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

Φασματική Ανάλυση και Μοντελοποίηση Σήματος για Εφαρμογές Απεικόνισης και Εκτίμησης Παραμέτρων Ραντάρ Αντίστροφου Συνθετικού Ανοίγματος

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΥ Β. ΚΑΡΑΚΑΣΙΛΙΩΤΗ

Αθήνα, Νοέμβριος 2010

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

Φασματική Ανάλυση και Μοντελοποίηση Σήματος για Εφαρμογές Απεικόνισης και Εκτίμησης Παραμέτρων Ραντάρ Αντίστροφου Συνθετικού Ανοίγματος

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΥ Β. ΚΑΡΑΚΑΣΙΛΙΩΤΗ

Συμβουλευτική Επιτροπή: Π. Φράγκος (επιβλέπων)
Ν. Ουζούνογλου
Φ. Κωνσταντίνου

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 16η Δεκεμβρίου 2010.

Π. Φράγκος Καθηγητής ΕΜΠ	Ν. Ουζούνογλου Καθηγητής ΕΜΠ	Φ. Κωνσταντίνου Καθηγητής ΕΜΠ
Σ. Κόλλιας Καθηγητής ΕΜΠ	Κ. Νικήτα Καθηγήτρια ΕΜΠ	Κ. Παπαοδυσσεύς Αν. Καθηγητής ΕΜΠ
	Π. Μαθιόπουλος Καθηγητής ΕΚΠΑ	

Αθήνα, Νοέμβριος 2010

.....

Αναστάσιος Β. Καρακασιλιώτης

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

Copyright © Αναστάσιος Β. Καρακασιλιώτης, 2010.
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 στους Έλληνες επιστήμονες
Που υπερβάλλουν εαυτούς.

Περίληψη

Αντικείμενο της διατριβής αποτελεί η μελέτη των συστημάτων ραντάρ αντίστροφου συνθετικού ανοίγματος (ISAR, inverse synthetic aperture radar), η μονοδιάστατη και διδιάστατη μοντελοποίηση του επιστρέφοντος σήματος ISAR και η σύγκριση διαφόρων αλγορίθμων απεικόνισης στόχων ραντάρ. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στις παραμετρικές τεχνικές φασματικής ανάλυσης, τόσο για προβλήματα απεικόνισης στόχου όσο και για προβλήματα εκτίμησης παραμέτρων του σήματος ραντάρ (δεύτερο και τρίτο κεφάλαιο). Η σπουδαιότερη καινοτομία της διατριβής αυτής είναι το προτεινόμενο αναλυτικό μοντέλο επιστρέφοντος σήματος ISAR και η μεθοδολογία προσομοίωσής του για την παραγωγή διδιάστατων συνθετικών δεδομένων ραντάρ (τέταρτο κεφάλαιο). Συγκριτικά με αντίστοιχες δημοσιευμένες εργασίες, το μοντέλο της παρούσας διατριβής περιλαμβάνει την ακριβή μαθηματική ανάλυση του διδιάστατου προβλήματος ISAR και μπορεί να θεωρηθεί η ιδανική εκδοχή πιο σύνθετων μοντέλων, όπως το διδιάστατο μοντέλο που βασίζεται στη γεωμετρική θεωρία της περίθλασης (GTD, geometrical theory of diffraction), το οποίο αναλύεται στο πέμπτο κεφάλαιο.

Λέξεις – κλειδιά: ραντάρ αντίστροφου συνθετικού ανοίγματος, απεικόνιση στόχου ραντάρ, παραμετρικές τεχνικές φασματικής ανάλυσης, εκτίμηση παραμέτρων μοντέλου σήματος ραντάρ, μοντέλο επιστρέφοντος σήματος, γεωμετρική θεωρία της περίθλασης

Abstract

This dissertation focuses on the study of inverse synthetic aperture radar systems (ISAR), the one-dimensional and two-dimensional modeling of the backscattered ISAR signal and the comparison of various radar target imaging algorithms. Special attention is paid to parametric spectral analysis techniques, for both target imaging and parameter estimation of radar signal model (second and third chapter). The most significant novelty of this thesis is the proposed analytical ISAR return signal model and its simulation methodology for two-dimensional synthetic radar data generation (fourth chapter). In comparison to relevant bibliography, the present thesis's model includes the precise mathematical analysis of the two-dimensional ISAR problem and can be considered as the ideal variant of more complex models, such as the two-dimensional model that is based on the geometrical theory of diffraction (GTD), which is analyzed in the fifth chapter.

Index terms: inverse synthetic aperture radar, radar target imaging, parametric spectral analysis techniques, radar signal model parameter estimation, backscattered signal model, geometrical theory of diffraction

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 2003 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.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή του Burgas Free University της Βουλγαρίας κ. Andon Lazarov για τις πολύτιμες γνώσεις του σε θέματα ραντάρ που μοιράστηκε με τους Έλληνες φίλους του. Η συνεισφορά του στη συγγραφή της βασικής δημοσίευσης υπήρξε πολύτιμη και το πείσμα του οδηγός για τις μελλοντικές μου προσπάθειες.

Για την επιστημονική μας συνεργασία και τις κοινές μας δημοσιεύσεις θα ήθελα να ευχαριστήσω τον διδάκτορα Ε.Μ.Π. κ. Γεώργιο Μπουλταδάκη.

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

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

Πρόλογος 1

Βιβλιογραφικές αναφορές 2
Περιοδικά 2
Συνέδρια 2

Κεφάλαιο 1
Εισαγωγικά στοιχεία για το ραντάρ αντίστροφου συνθετικού ανοίγματος 5

1.1 Σύντομη ιστορική αναδρομή 6
1.2 Τι είναι το ραντάρ 7
1.3 Το παλμικό ραντάρ 8
1.4 Κυματομορφές ραντάρ 10
1.5 Βασικές έννοιες επεξεργασίας σήματος ραντάρ 14
1.5.1 Ανάλυση 14
1.5.2 Χωρική συχνότητα 16
1.5.3 Μετασχηματισμοί Fourier 17
1.6 Ραντάρ συνθετικής απεικόνισης 18
1.7 Μονοδιάστατη απεικόνιση ραντάρ αντίστροφου συνθετικού ανοίγματος 21
1.8 Διδιάστατη απεικόνιση ραντάρ αντίστροφου συνθετικού ανοίγματος 25
1.9 Δομή διδακτορικής διατριβής 27
1.10 Βιβλιογραφικές αναφορές 31

Κεφάλαιο 2
Παραμετρικές μέθοδοι φασματικής ανάλυσης: Μαθηματική θεωρία και εφαρμογή στη μονοδιάστατη και διδιάστατη απεικόνιση στόχου με ραντάρ αντίστροφου συνθετικού ανοίγματος 33

2.1 Εισαγωγή 34
2.2 Μονοδιάστατες παραμετρικές μέθοδοι φασματικής ανάλυσης 37
2.2.1 Βασική μαθηματική θεωρία 37
2.2.2 Μαθηματική περιγραφή αυτο-αναδρομικών μεθόδων 40
2.2.2.1 Μέθοδος Yule-Walker 40

2.2.2.2 Μέθοδοι ελαχίστων τετραγώνων 41
2.2.2.3 Μέθοδος Burg 45
2.2.3 Μαθηματική περιγραφή αλγορίθμων υψηλής ανάλυσης 48
2.2.3.1 Αλγόριθμος MUSIC 48
2.2.3.2 Μέθοδος ESPRIT 50
2.2.4 Αριθμητικές προσομοιώσεις 53
2.2.4.1 Δημιουργία μονοδιάστατων συνθετικών δεδομένων ραντάρ 53
2.2.4.2 Αριθμητικά αποτελέσματα 54
2.3 Διδιάστατες παραμετρικές μέθοδοι φασματικής ανάλυσης 67
2.3.1 Μαθηματική περιγραφή 67
2.3.1.1 Διδιάστατη απευθείας αυτο-αναδρομική μέθοδος 67
2.3.1.2 Διδιάστατος Αλγόριθμος MUSIC 70
2.3.2 Αριθμητικές προσομοιώσεις 71
2.3.2.1 Δημιουργία διδιάστατων συνθετικών δεδομένων ραντάρ 71
2.3.2.2 Αριθμητικά αποτελέσματα 75
2.4 Συμπεράσματα με βάση τα αριθμητικά αποτελέσματα και κατευθύνσεις μελλοντικής έρευνας 81
2.5 Παράρτημα 1: Μαθηματική σχέση μεταξύ FFT και IFFT 84
2.6 Βιβλιογραφικές αναφορές 86

Κεφάλαιο 3
Μονοδιάστατη εκτίμηση παραμέτρων ραντάρ με χρήση μεθόδων υψηλής φασματικής ανάλυσης 89

3.1 Εισαγωγή 90
3.2 Μονοδιάστατο μοντέλο σκέδασης βασιζόμενο στη γεωμετρική θεωρία της περίθλασης 93
3.3 Εκδοχές του αλγορίθμου MUSIC για εφαρμογές υψηλής φασματικής εκτίμησης 95
3.4 Προτεινόμενη μέθοδος υψηλής φασματικής εκτίμησης βασιζόμενη στην υποδειγματοληψία σήματος 98
3.5 Αριθμητικές προσομοιώσεις 102
3.6 Συμπεράσματα και κατευθύνσεις μελλοντικής έρευνας 106
3.7 Βιβλιογραφικές αναφορές 107

Κεφάλαιο 4
Διδιάστατη μοντελοποίηση ραντάρ αντίστροφου συνθετικού ανοίγματος και απεικόνιση στόχου με χρήση σήματος διαμορφωμένου κατά βηματική συχνότητα 109

4.1 Εισαγωγή 110
4.2 Γεωμετρία προβλήματος 116
4.3 Μοντέλο επιστρέφοντος σήματος για ραντάρ τύπου ISAR με διαμόρφωση βηματικής συχνότητας 119

4.3.1 Εκπεμπόμενη κυματομορφή βηματικής συχνότητας 119
4.3.2 Διερεύνηση ως προς το χρόνο άφιξης των επιστρέφοντων παλμών από τους διάφορους σημειακούς σκεδαστές 120
4.3.3 Προτεινόμενο μοντέλο επιστρέφοντος σήματος ISAR 124
4.3.4 Συνυπολογισμός του θορύβου στο μοντέλο επιστρέφοντος σήματος ISAR 126
4.4 Ανακατασκευή εινόνας ISAR 128
4.4.1 Συμπίεση απόστασης 129
4.4.1.1 Μεθοδολογία βασιζόμενη στον αντίστροφο γρήγορο μετασχηματισμό Fourier 130
4.4.1.2 Μεθοδολογία βασιζόμενη στην ετερο-συσχέτιση 131
4.4.2 Ευθυγράμμιση απόστασης 132
4.4.3 Συμπίεση γωνίας αζιμουθίου 132
4.4.4 Επιλογή παραμέτρων για τετραγωνική ανάλυση εικόνας ISAR 133
4.5 Αριθμητικές προσομοιώσεις 134
4.5.1 Αριθμητικά αποτελέσματα 134
4.5.2 Σχόλια για τα αριθμητικά αποτελέσματα 144
4.6 Συμπεράσματα και κατευθύνσεις μελλοντικής έρευνας 146
4.7 Παράρτημα 1: Μαθηματική περιγραφή του προγράμματος προσομοίωσης της προτεινόμενης μεθοδολογίας μοντελοποίησης σήματος και απεικόνισης ISAR 148
4.8 Βιβλιογραφικές αναφορές 160

Κεφάλαιο 5
Διδιάστατη απεικόνιση ραντάρ αντίστροφου συνθετικού ανοίγματος μέσω βασιζόμενου στη γεωμετρική θεωρία της περίθλασης μοντέλου σκέδασης 164

5.1 Εισαγωγή 165
5.2 Διδιάστατα μοντέλα σκέδασης 168
5.2.1 Διδιάστατο μοντέλο σημειακών σκεδαστών 168
5.2.2 Διδιάστατο μοντέλο GTD 170
5.2.3 Ομοιότητες και διαφορές των δύο μοντέλων σκέδασης 172
5.3 Διαδικασία ανακατασκευής εικόνας ISAR 173
5.4 Αριθμητικές προσομοιώσεις 175
5.4.1 Στόχος με ιδανικούς σημειακούς σκεδαστές 176
5.4.2 Στόχος με συγκεντρωμένους μηχανισμούς σκέδασης 177
5.5 Συμπεράσματα και κατευθύνσεις μελλοντικής έρευνας 179
5.6 Βιβλιογραφικές αναφορές 180

Γλωσσάριο
Αγγλο-ελληνικοί τεχνικοί όροι ραντάρ 182

Λίστα Σχημάτων

Σχήμα 1-1. Βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη παλμικού ραντάρ 8
Σχήμα 1-2. Διάγραμμα λειτουργίας μονοστατικού παλμικού ραντάρ 9
Σχήμα 1-3. Γραμμική διαμόρφωση συχνότητας με ανοδική κλίση 11
Σχήμα 1-4. Φάσμα της κυματομορφής γραμμικής διαμόρφωσης συχνότητας.. 12
Σχήμα 1-5. Διαμόρφωση βηματικής συχνότητας 13
Σχήμα 1-6. Γεωμετρία περιγραφής ανάλυσης απόστασης παλμού 14
Σχήμα 1-7. Γεωμετρία περιγραφής γωνιακής ανάλυσης..... 15
Σχήμα 1-8. Περιγραφή χωρικής συχνότητας 16
Σχήμα 1-9. Ισοδυναμία ραντάρ τύπου SAR και ISAR..... 19
Σχήμα 1-10. Παράδειγμα προφίλ απόστασης 23
Σχήμα 1-11. Επικάλυψη σκεδαστών στόχου ανάλογα με το διάστημα αναμφιβόλου αποστάσεως..... 24
Σχήμα 1-12. Διάγραμμα περιγραφής της διδιάστατης απεικόνισης ISAR..... 26

Σχήμα 2-1. Απλό μοντέλο αεροσκάφους ως προσομοιωμένος στόχος ραντάρ 54
Σχήμα 2-2. Προφίλ απόστασης, για την περίπτωση καλά διαχωρισμένων θέσεων, για *SNR* = 25dB και 4η τάξη: (α) FFT, (β) μέθοδος συνδιακύμανσης, (γ) τροποποιημένη μέθοδος συνδιακύμανσης, (δ) μέθοδος Burg, (ε) αλγόριθμος MUSIC..... 57
Σχήμα 2-3. Προφίλ απόστασης, για την περίπτωση καλά διαχωρισμένων θέσεων, για *SNR* = 10dB και 4η τάξη: (α) FFT, (β) μέθοδος συνδιακύμανσης, (γ) τροποποιημένη μέθοδος συνδιακύμανσης, (δ) μέθοδος Burg, (ε) αλγόριθμος MUSIC..... 57
Σχήμα 2-4. Προφίλ απόστασης, για την περίπτωση καλά διαχωρισμένων θέσεων, για *SNR* = 25dB και 6η τάξη: (α) FFT, (β) μέθοδος συνδιακύμανσης, (γ) τροποποιημένη μέθοδος συνδιακύμανσης, (δ) μέθοδος Burg, (ε) αλγόριθμος MUSIC..... 58
Σχήμα 2-5. Προφίλ απόστασης, για την περίπτωση καλά διαχωρισμένων θέσεων, για *SNR* = 10dB και 6η τάξη: (α) FFT, (β) μέθοδος συνδιακύμανσης, (γ) τροποποιημένη μέθοδος συνδιακύμανσης, (δ) μέθοδος Burg, (ε) αλγόριθμος MUSIC..... 58
Σχήμα 2-6. Προφίλ απόστασης, για την περίπτωση καλά διαχωρισμένων θέσεων, για *SNR* = 25dB και 8η τάξη: (α) FFT, (β) μέθοδος συνδιακύμανσης, (γ) τροποποιημένη μέθοδος συνδιακύμανσης, (δ) μέθοδος Burg, (ε) αλγόριθμος MUSIC..... 59
Σχήμα 2-7. Προφίλ απόστασης, για την περίπτωση καλά διαχωρισμένων θέσεων, για *SNR* = 10dB και 8η τάξη: (α) FFT, (β) μέθοδος συνδιακύμανσης, (γ) τροποποιημένη μέθοδος συνδιακύμανσης, (δ) μέθοδος Burg, (ε) αλγόριθμος MUSIC..... 59

Σχήμα 2-8. Προφίλ απόστασης, για την περίπτωση δύο πολύ κοντινών θέσεων, για *m* = 8, *SNR* = 30dB και 4η τάξη: (α) FFT, (β) μέθοδος συνδιακύμανσης, (γ) τροπο-ποιημένη μέθοδος συνδιακύμανσης, (δ) μέθοδος Burg, (ε) αλγόριθμος MUSIC. 61
Σχήμα 2-9. Προφίλ απόστασης, για την περίπτωση δύο πολύ κοντινών θέσεων, για *m* = 12, *SNR* = 30dB και 4η τάξη: (α) FFT, (β) μέθοδος συνδιακύμανσης, (γ) τροπο-ποιημένη μέθοδος συνδιακύμανσης, (δ) μέθοδος Burg, (ε) αλγόριθμος MUSIC..... 61
Σχήμα 2-10. Προφίλ απόστασης, για την περίπτωση δύο πολύ κοντινών θέσεων, για *m* = 16, *SNR* = 30dB και 4η τάξη: (α) FFT, (β) μέθοδος συνδιακύμανσης, (γ) τροπο-ποιημένη μέθοδος συνδιακύμανσης, (δ) μέθοδος Burg, (ε) αλγόριθμος MUSIC..... 62
Σχήμα 2-11. Προφίλ απόστασης, για την περίπτωση δύο πολύ κοντινών θέσεων, για *m* = 8, *SNR* = 40dB και 4η τάξη: (α) FFT, (β) μέθοδος συνδιακύμανσης, (γ) τροπο-ποιημένη μέθοδος συνδιακύμανσης, (δ) μέθοδος Burg, (ε) αλγόριθμος MUSIC..... 62
Σχήμα 2-12. Προφίλ απόστασης, για την περίπτωση δύο πολύ κοντινών θέσεων, για *m* = 16, *SNR* = 20dB και 4η τάξη: (α) FFT, (β) μέθοδος συνδιακύμανσης, (γ) τροπο-ποιημένη μέθοδος συνδιακύμανσης, (δ) μέθοδος Burg, (ε) αλγόριθμος MUSIC..... 63
Σχήμα 2-13. Μέση τιμή του RMS σφάλματος εκτίμησης απόστασης σε συνάρτηση με το σηματοθορυβικό λόγο, για την περίπτωση καλά διαχωρισμένων θέσεων..... 66
Σχήμα 2-14. Μέση τιμή του RMS σφάλματος εκτίμησης απόστασης σε συνάρτηση με το σηματοθορυβικό λόγο, για την περίπτωση δύο πολύ κοντινών θέσεων. 66
Σχήμα 2-15. Το πεδίο συχνότητας-γωνίας των διδιάστατων δεδομένων ραντάρ και το ορθογώνιο πλέγμα για τη διαδικασία παρεμβολής (αναπαραγωγή από την αναφορά [1])..... 73
Σχήμα 2-16. Εικόνα ISAR μέσω διδιάστατου FFT σε σετ δεδομένων 128 x 121 75
Σχήμα 2-17. Εικόνα ISAR μέσω διδιάστατου FFT σε σετ δεδομένων 128 x 241 76
Σχήμα 2-18. Εικόνα ISAR μέσω διδιάστατου FFT σε σετ δεδομένων 256 x 241 76
Σχήμα 2-19. Εικόνα ISAR μέσω διδιάστατης αυτο-αναδρομικής μεθόδου σε σετ δεδομένων 64 x 61..... 77
Σχήμα 2-20. Εικόνα ISAR μέσω διδιάστατης αυτο-αναδρομικής μεθόδου σε σετ δεδομένων 128 x 121..... 77
Σχήμα 2-21. Εικόνα ISAR μέσω διδιάστατης αυτο-αναδρομικής μεθόδου τάξεως (4, 7) σε σετ δεδομένων 128 x 121 78
Σχήμα 2-22. Εικόνα ISAR μέσω διδιάστατου MUSIC σε σετ δεδομένων 32 x 31 79
Σχήμα 2-23. Εικόνα ISAR μέσω διδιάστατου MUSIC σε σετ δεδομένων 16 x 31 79
Σχήμα 2-24. Εικόνα ISAR μέσω διδιάστατου MUSIC και της τεχνικής MSSP σε σετ δεδομένων 32 x 31 με διαστάσεις υποπίνακα δεδομένων 12 x 12 80

Σχήμα 2-25. Εικόνα ISAR μέσω διδιάστατου MUSIC και της τεχνικής MSSP σε σετ δεδομένων 16 x 31 με διαστάσεις υποπίνακα δεδομένων 7 x 10 80
Σχήμα 2-26. Προφίλ απόστασης για *SNR* = 25dB και *N* = 64: (α) FFT, (β) IFFT. 85

Σχήμα 3-1. Μέση τιμή του RMS σφάλματος εκτίμησης απόστασης σε συνάρτηση με το σηματοθορυβικό λόγο, για την περίπτωση καλά διαχωρισμένων θέσεων..... 103
Σχήμα 3-2. Μέση τιμή του RMS σφάλματος εκτίμησης έντασης σκέδασης σε συνάρτηση με το σηματοθορυβικό λόγο, για την περίπτωση καλά διαχωρισμένων θέσεων..... 104
Σχήμα 3-3. Μέση τιμή του RMS σφάλματος εκτίμησης απόστασης σε συνάρτηση με το σηματοθορυβικό λόγο, για την περίπτωση δύο πολύ κοντινών θέσεων 104

Σχήμα 4-1. Διδιάστατη γεωμετρία ISAR: αντικείμενο και ραντάρ σε διαφορετικά συστήματα συντεταγμένων 116
Σχήμα 4-2. Σχηματισμός επιστρέφοντος σήματος ISAR: άθροιση των ανακλώμενων σημάτων από τους πέντε σημειακούς σκεδαστές του αντικειμένου. 121
Σχήμα 4-3. Προσομοιωμένα μοντέλα σταθερής έντασης σκέδασης των τριών τύπων αεροσκάφους: (α) B-2 stealth, (β) Mirage 2000C, (γ) Boeing 737-400. 135
Σχήμα 4-4. Ανακατασκευασμένες εικόνες ISAR για *SNR* = 20dB και $\varphi = 0^o$: (α) B-2 stealth, (β) Mirage 2000C, (γ) Boeing 737-400..... 138
Σχήμα 4-5. Ανακατασκευασμένες εικόνες ISAR για *SNR* = 0dB και $\varphi = 0^o$: (α) B-2 stealth, (β) Mirage 2000C, (γ) Boeing 737-400. 139
Σχήμα 4-6. Ανακατασκευασμένες εικόνες ISAR για το αεροσκάφος B-2 stealth για *SNR* = 20dB: (α) $\varphi = 20^o$, (β) $\varphi = 40^o$. 140
Σχήμα 4-7. Ανακατασκευασμένες εικόνες ISAR για το αεροσκάφος Boeing 737-400 για *SNR* = 20dB: (α) $\varphi = 20^o$, (β) $\varphi = 40^o$. 140
Σχήμα 4-8. Προσομοιωμένο μοντέλο έντασης σκέδασης, (α), και ανακατασκευασμένη εικόνα ISAR, (β), για το αεροσκάφος Boeing 737-400, για *SNR* = 20dB και $\varphi = 0^o$. 141
Σχήμα 4-9. Ανακατασκευασμένες εικόνες ISAR για το αεροσκάφος Mirage 2000C για *SNR* = 20dB και $\varphi = 0^o$: (α) κυματομορφή βηματικής συχνότητας, (β) κυματομορφή γραμμικής διαμόρφωσης συχνότητας. 142

Σχήμα 5-1. Προσομοιούμενη γεωμετρία του αεροσκάφους Mirage 2000C 176
Σχήμα 5-2. Εικόνα ISAR που προκύπτει από το μοντέλο σημειακών σκεδαστών 177
Σχήμα 5-3. Εικόνα ISAR που προκύπτει από το «ιδανικό» μοντέλο GTD..... 177
Σχήμα 5-4. Εικόνα ISAR που προκύπτει από το μοντέλο GTD με συγκεντρωμένους μηχανισμούς σκέδασης..... 178

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1-1. Χαρακτηριστικά μεγέθη παλμικού ραντάρ 8

Πίνακας 2-1. Μέση τιμή του RMS σφάλματος εκτίμησης απόστασης σε συνάρτηση με το σηματοθορυβικό λόγο, για την περίπτωση καλά διαχωρισμένων θέσεων, με *N* = 64. 64
Πίνακας 2-2. Μέση τιμή του RMS σφάλματος εκτίμησης απόστασης σε συνάρτηση με το σηματοθορυβικό λόγο, για την περίπτωση καλά διαχωρισμένων θέσεων, με *N* = 128. 64
Πίνακας 2-3. Μέση τιμή του RMS σφάλματος εκτίμησης απόστασης σε συνάρτηση με το σηματοθορυβικό λόγο, για την περίπτωση δύο πολύ κοντινών θέσεων, με *N* = 64. 65
Πίνακας 2-4. Μέση τιμή του RMS σφάλματος εκτίμησης απόστασης σε συνάρτηση με το σηματοθορυβικό λόγο, για την περίπτωση δύο πολύ κοντινών θέσεων, με *N* = 128. 65

Πίνακας 3-1. Παράμετροι γεωμετρίας για κανονικές γεωμετρίες σκέδασης 94
Πίνακας 3-2. Μέσο σφάλμα εκτίμησης απόστασης ως προς το σηματοθορυβικό λόγο, για τους δύο πολύ κοντινούς σκεδαστές του δεύτερου σεναρίου προσομοίωσης 105

Πίνακας 4-1. Προσομοιωμένες διαστάσεις των τριών τύπων αεροσκάφους. . 136
Πίνακας 4-2. Παράμετροι της διδιάστατης γεωμετρίας ISAR. 136
Πίνακας 4-3. Παράμετροι του ραντάρ τύπου ISAR με παλμούς βηματικής συχνότητας. 136
Πίνακας 4-4. Υπολογιζόμενες τιμές εντροπίας των κανονικοποιημένων κατά ισχύ εικόνων ISAR και των αντίστοιχων μοντέλων έντασης σκέδασης. .. 143
Πίνακας 4-5. Ορισμός και περιγραφή διανυσμάτων για το πρόγραμμα προσομοίωσης 151

Πίνακας 5-1. Παράμετροι γεωμετρίας για διάφορες γεωμετρίες σκέδασης 171

Πρόλογος

Η παρούσα διδακτορική διατριβή βασίζεται στην έρευνα που διεξήχθη στο ευρύτατο πεδίο της ψηφιακής επεξεργασίας σήματος ραντάρ και στις δημοσιεύσεις σε διεθνή περιοδικά και συνέδρια (με κριτές). Τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας (Νοέμβριος 2003 – Απρίλιος 2009) παρουσιάζονται στα κεφάλαια 2-5, έπειτα από ένα εισαγωγικό κεφάλαιο για τα συστήματα ραντάρ και τη συνθετική απεικόνιση στόχου ραντάρ.

Οι βιβλιογραφικές αναφορές που ακολουθούν διαχωρίζονται σε περιοδικά και συνέδρια, κατά χρονολογική σειρά. Στο δεύτερο κεφάλαιο της διατριβής αναλύονται τα αποτελέσματα της αναφοράς [6], τα οποία εμπλουτίζονται σε σχέση με τη διερεύνηση των μεθόδων φασματικής ανάλυσης και την εφαρμογή σε πιο σύνθετα σενάρια απεικόνισης και εκτίμησης παραμέτρων. Στις αναφορές [1, 8, 9] εξετάζεται το πρόβλημα εκτίμησης απόστασης και έντασης σκέδασης για κάθε σημειακό σκεδαστή ενός στόχου ραντάρ, το οποίο αναπτύσσεται στο τρίτο κεφάλαιο της διατριβής. Η βασική δημοσίευση της παρούσας διατριβής [3] παρουσιάζει λεπτομερώς το προτεινόμενο μοντέλο επιστρέφοντος σήματος ραντάρ αντίστροφου συνθετικού ανοίγματος, καθώς και τους αλγορίθμους αντίστροφης συνθετικής απεικόνισης στόχου με τη χρήση διαμόρφωσης βηματικής συχνότητας. Τα αποτελέσματα της δημοσίευσης αυτής και η δομή του προγράμματος προσομοίωσης αναλύονται στο τέταρτο κεφάλαιο. Η αναφορά [11] περιγράφει το διδιάστατο μοντέλο σήματος ραντάρ που βασίζεται στη γεωμετρική θεωρία της περίθλασης, το οποίο συγκρίνεται με το προτεινόμενο μοντέλο σημειακών σκεδαστών [3] στο πέμπτο κεφάλαιο. Τέλος, οι αναφορές [2, 4, 5, 7, 10] παρατίθενται σε αυτή την ενότητα για λόγους πληρότητας, καθώς η συμμετοχή μου σε ορισμένες από αυτές υπήρξε σημαντική.

Βιβλιογραφικές αναφορές

Περιοδικά

[1] A. Karakasiliotis and P. Frangos, “Decimative Spectrum Estimation Method for High-Resolution Radar Parameter Estimates,” *Journal of Applied Electromagnetism*, Vol. 9, No. 2, pp. 88-97, Dec. 2007.

[2] A. V. Karakasiliotis, G. Boultadakis , A. D. Lazarov, and P. V. Frangos, “High-Resolution Stepped Frequency Inverse Synthetic Aperture Imaging Using Time-Frequency Transforms,” *Journal of Applied Electromagnetism*, June 2008.

[3] A. V. Karakasiliotis, A. D. Lazarov, P. V. Frangos, G. Boultadakis, and G. Kalognomos, “Two-dimensional ISAR Model and Image Reconstruction with Stepped Frequency Modulated Signal,” *IET Signal Processing*, Special Issue on ISAR Signal Processing Techniques and Feature Extraction, Vol. 2, Issue 3, pp. 277-290, Sept. 2008.

[4] G. E. Boultadakis, G. K. Kalognomos, L. K. Stergioulas, A. V. Karakasiliotis, and P. V. 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.

[5] G. K. Kalognomos, G. E. Boultadakis, A. V. Karakasiliotis, and P. V. Frangos, “Performance Analysis of a Parameterized APES (PAPES) Spectrum Estimation Method for ISAR Applications,” *Electronics and Electrical Engineering Journal*, T191 High Frequency Technology, Microwaves, No. 3 (99), March 2010.

Συνέδρια

[6] A. Karakasiliotis and P. Frangos, “Comparison of Several Spectral Estimation Methods for Application to ISAR Imaging,” *Proceedings of RTO/SET 080 International Symposium on Target Identification and Recognition Using RF Systems*, Oslo, Norway, Oct. 2004.

[7] K. Skrapas, G. Boultadakis, A. Karakasiliotis, and P. Frangos, “Time-Frequency Analysis of Radar Signals for ISAR Applications,” *Proceedings of International Conference RAST 2005*, Istanbul, Turkey, June 2005.

[8] A. Karakasiliotis and P. Frangos, “Decimative Spectrum Estimation Method for High-Resolution Radar Parameter Estimates,” *Proceedings of 5th International Symposium on Communications and Signal Processing (CSNDSP 2006)*, Patras, Greece, July 2006.

[9] A. Karakasiliotis and P. Frangos, “Decimative Spectrum Estimation Method for High-Resolution Radar Parameter Estimates,” *Proceedings of Communications, Electromagnetics and Medical Applications Conference (CEMA 2006)*, Sofia, Bulgaria, Oct. 2006.

[10] A. Karakasiliotis, G. Boultadakis, A. Lazarov, and P. Frangos, “High-Resolution Stepped Frequency Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging Using Time-Frequency Transforms,” *Proceedings of Communications, Electromagnetics and Medical Applications Conference (CEMA 2007)*, Sofia, Bulgaria, Oct. 2007.

[11] A. Karakasiliotis, A. Lazarov, and P. Frangos, “ISAR Imaging Based on Two-Dimensional GTD Scattering Model,” *Proceedings of European Radar Conference 2008 (EuRAD 2008)*, Amsterdam, Netherlands, Oct. 2008.

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 Pearl Harbor αγνόησε την προειδοποίηση ταυτοποιώντας λανθασμένα το εχθρικό αεροσκάφος με αμερικανικό 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 Τι είναι το ραντάρ

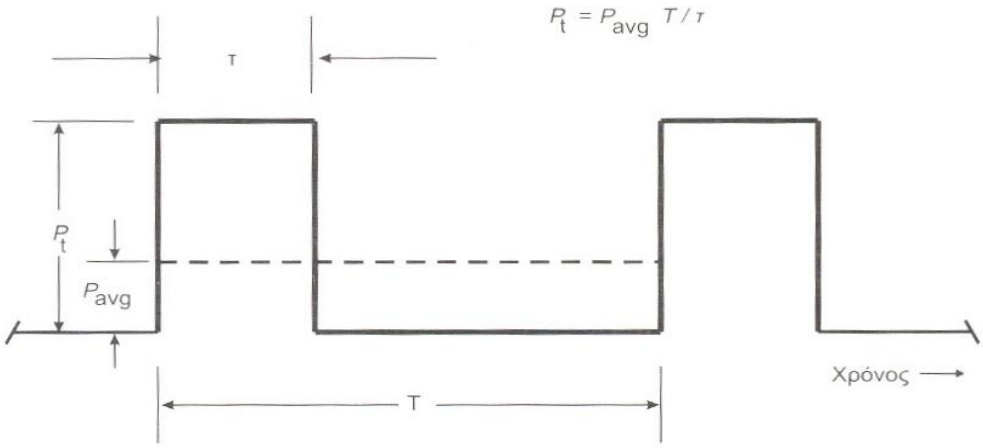
Ο όρος «ραντάρ» καθιερώθηκε στη δεκαετία του ’40 από τους ερευνητές του NRL, προέρχεται από το ακρωνύμιο RADAR (RAdio Detection And Ranging), και περιγράφει μία συσκευή εκπομπής ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας προς ένα συγκεκριμμένο τμήμα του περιβάλλοντος χώρου, με στόχο την ανίχνευση στόχων και τη μέτρηση 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 εποπτείας 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 επιστρέφοντος 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 μέγεθη του παλμικού ραντάρ συγκεντρώνονται στον ακόλουθο πίνακα, και οι συσχετισμοί τους απεικονίζονται στο Σχήμα 1-1.

Πίνακας 1-1. Χαρακτηριστικά μεγέθη παλμικού ραντάρ

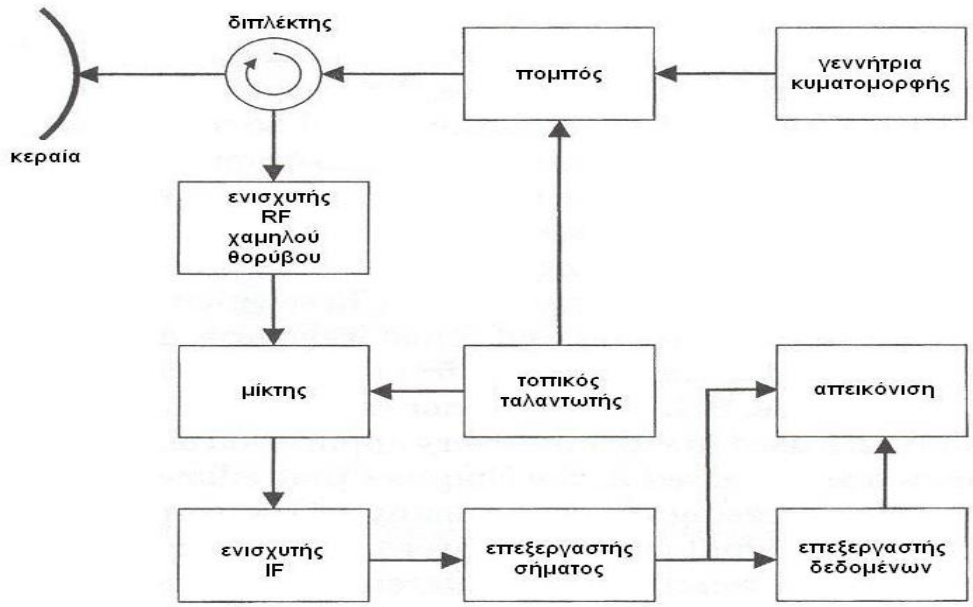
Μέγεθος	Συμβολισμός	Μονάδα Μέτρησης
φέρουσα συχνότητα	f_c	Hz
περίοδος επανάληψης παλμών	T	sec
συχνότητα επανάληψης παλμών	$f_r = 1/T$	Hz
εύρος ή διάρκεια παλμού	τ	sec
μέση εκπεμπόμενη ισχύς	P_{avg}	W
μέγιστη εκπεμπόμενη ισχύς	P_t	W
ενέργεια εκπεμπόμενου παλμού	$E = P_t \cdot \tau$	J



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 επιστρέφον 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 (συμπίεση 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 διδιάστατη (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 συγκεκριμμένη αποστολή που επιτελεί. Το κόστος και η πολυπλοκότητα για ένα συγκεκριμμένο 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

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

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

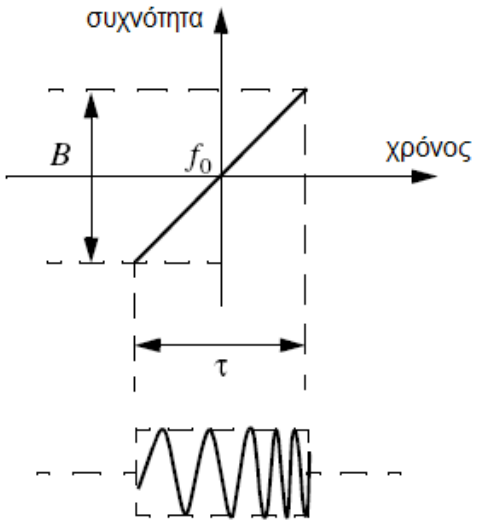
$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \psi(t) = f_0 \pm \mu t \tag{1.2}$$

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

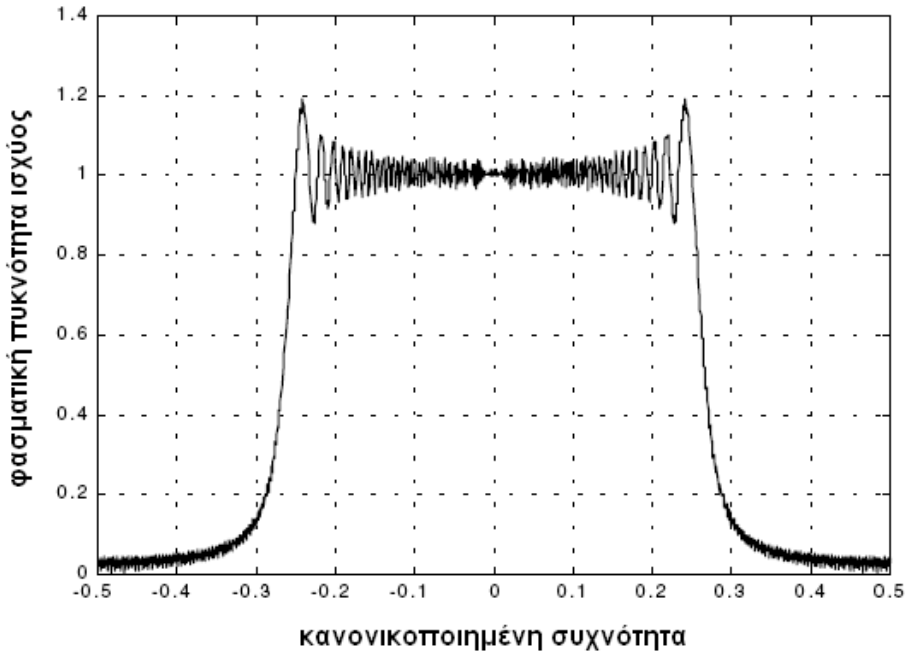
$$s(t) = rect\left(\frac{t}{\tau}\right) \cdot \exp\left(j\,2\pi\left(f_0\,t \pm \frac{\mu}{2}t^2\right)\right) \tag{1.3}$$

όπου ως $rect\left(\frac{t}{\tau}\right)$ 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

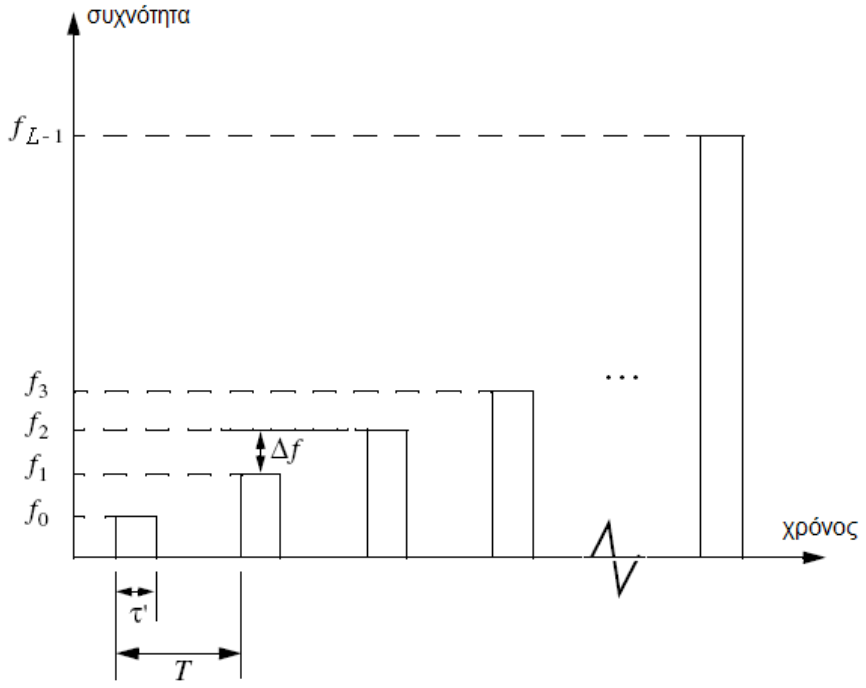


Σχήμα 1-4. Φάσμα της κυματομορφής γραμμικής διαμόρφωσης συχνότητας

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 επιστρέφοντος 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.



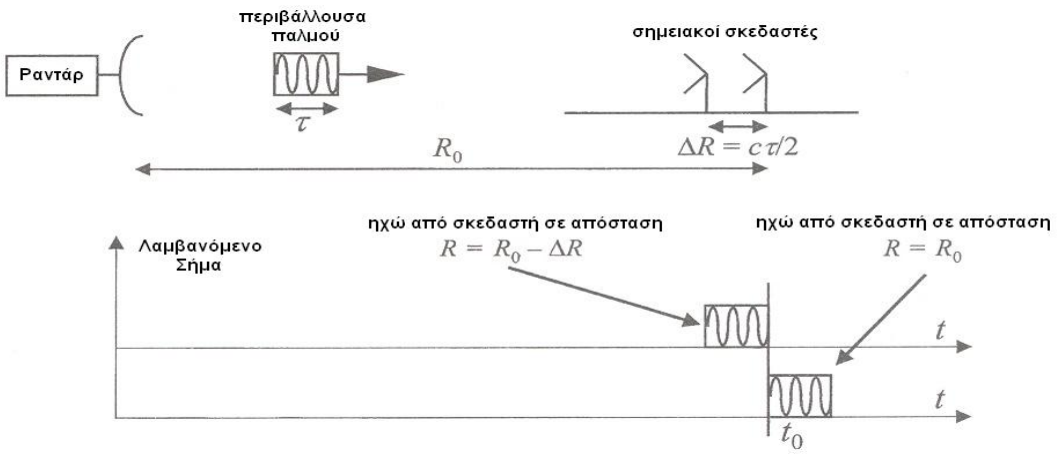
Σχήμα 1-5. Διαμόρφωση βηματικής συχνότητας

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 Ανάλυση

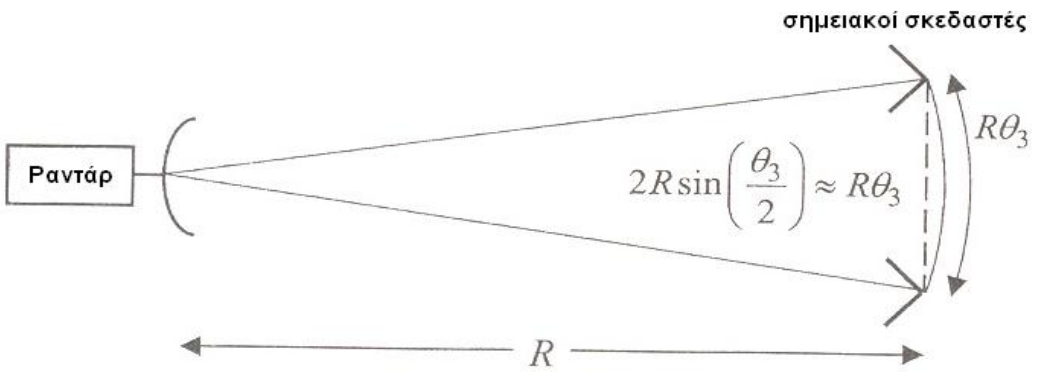
Η έννοια του κελιού ανάλυσης εμφανίζεται συχνά στη θεωρία ραντάρ. Ως κελί ανάλυσης ορίζεται ο όγκος στον τρισδιάστατο χώρο που συνεισφέρει στην ηχώ που λαμβάνεται από το ραντάρ σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η ανάλυση στην κατεύθυνση της απόστασης για έναν παλμό σταθερής 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, 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 $R\theta_3$.

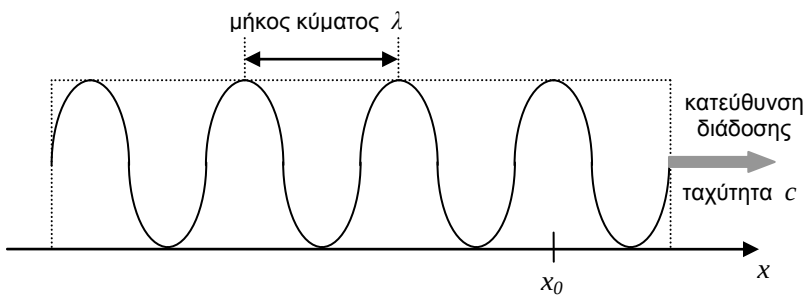


Σχήμα 1-7. Γεωμετρία περιγραφής γωνιακής ανάλυσης

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 συγκεκριμμένο 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.

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

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

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.

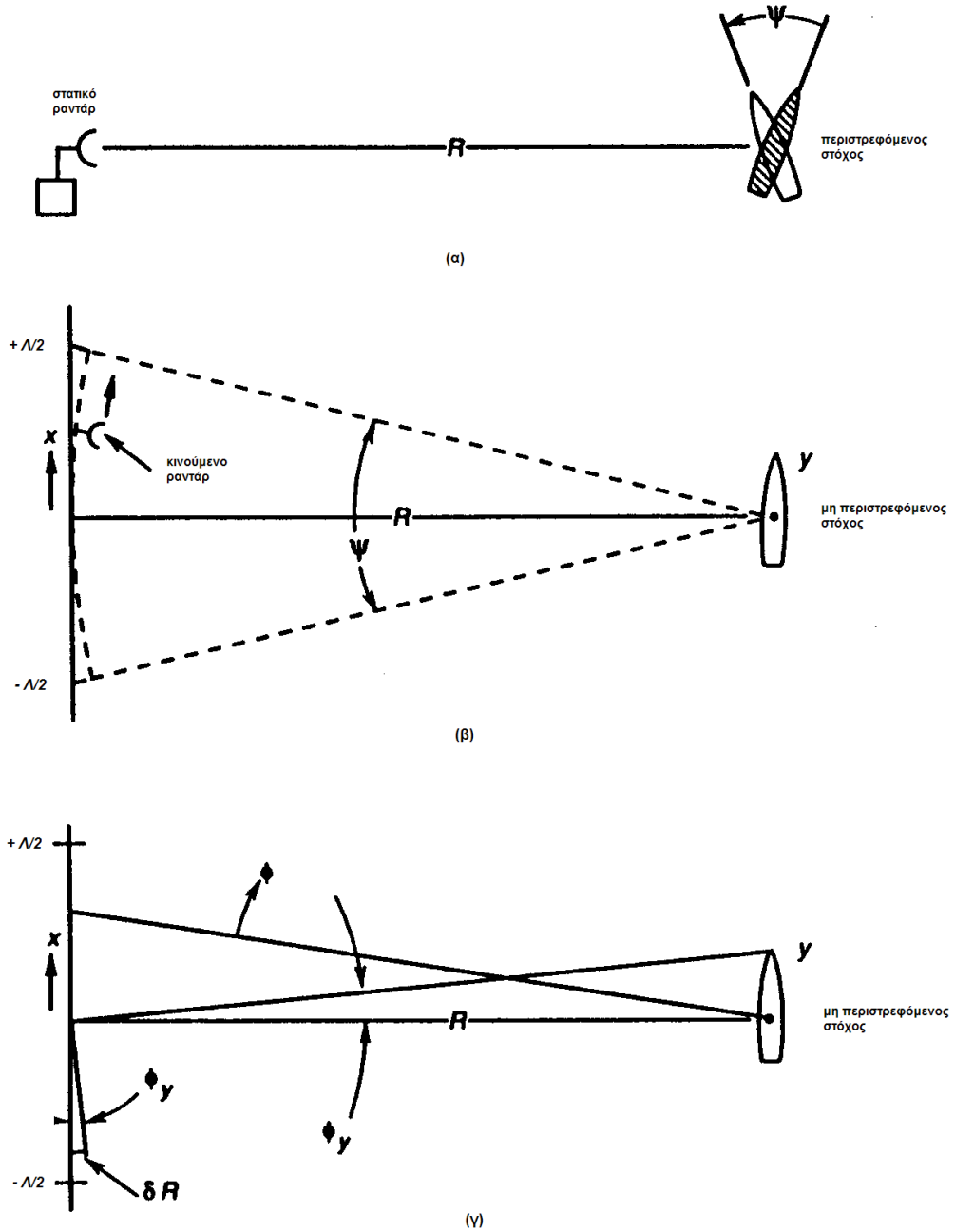
1.6 Ραντάρ συνθετικής απεικόνισης

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 διδιάστατη 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 επιστρέφοντων 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 διδιάστατη 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. Η μαθηματική ανάλυση της γενικής αυτής περίπτωσης ξεφεύγει από το γενικό

πλαίσιο του κεφαλαίου αυτού και ο αναγνώστης παραπέμπεται στο πέμπτο κεφάλαιο της αναφοράς [5] για μία πλήρη μαθηματική περιγραφή.

Η ισοδυναμία του ραντάρ αντίστροφου συνθετικού ανοίγματος με το ραντάρ συνθετικού ανοίγματος προβολικού τύπου (spotlight SAR) μπορεί εύκολα να εξηγηθεί μέσω του ακόλουθου σχήματος [1].



Σχήμα 1-9. Ισοδυναμία ραντάρ τύπου SAR και ISAR

Το Σχήμα 1-9(α) απεικονίζει την περίπτωση ενός ραντάρ ISAR που συλλέγει δεδομένα από έναν περιστρεφόμενο στόχο, του οποίου η γωνία αζιμουθίου ως προς το ραντάρ καλύπτει γωνιακό τομέα ψ. Στο Σχήμα 1-9(β) απεικονίζεται η ισοδύναμη γεωμετρία SAR όπου το ραντάρ περιστρέφεται κατά μήκος της διακεκομμένης γραμμής. Το μήκος Λ του ανοίγματος του ραντάρ SAR αντιστοιχεί στη γωνία ολοκλήρωσης ψ του ραντάρ ISAR. Προσεγγίζοντας τη διακεκομμένη με την ευθεία γραμμή (θεωρώντας ότι το μέγεθος του στόχου είναι πολύ μικρότερο από το μήκος Λ, το οποίο με τη σειρά του είναι πολύ μικρότερο από την απόσταση του στόχου από το ραντάρ), προκύπτει το Σχήμα 1-9(γ) που περιγράφει τη γεωμετρία SAR προβολικού τύπου. Η ισοδυναμία των συστημάτων SAR και ISAR μας βοηθάει να κατανοήσουμε τις βασικές έννοιες της απεικόνισης ISAR μέσω των απλούστερων αρχών του ραντάρ SAR. Στις επόμενες παραγράφους του εισαγωγικού αυτού κεφαλαίου περιγράφουμε τα μονοδιάστατα (προφίλ απόστασης) και διδιάστατα (εικόνες ISAR) προϊόντα της απεικόνισης ISAR.

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

$$f_l = f_0 + l\,\Delta f \tag{1.6}$$

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

$$z_l^e = A\cdot\exp\left[\, j\,2\pi\left(f_l\left(t+t_l\right)+\theta_{0,l}\right)\right] \tag{1.7}$$

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

$$z_l^r = \rho\cdot A\cdot\exp\left[\, j\,2\pi\left(f_l\left(t+t_l-{2R}/{c}\right)+\theta_{0,l}\right)\right] \tag{1.8}$$

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

$$G_l = \frac{z_l^r}{z_l^e} = \rho\cdot\exp\left[-j\,4\pi\,{R}/{c}\cdot f_l\right] = \rho'\cdot\exp\left[-j\,4\pi\,{R}/{c}\cdot l\,\Delta f\right] \tag{1.9}$$

όπου η σταθερά $\exp\left[-j\,4\pi\,{R}/{c}\cdot f_0\right]$ ενσωματώνεται στο πλάτος ρ'.

Όπως φαίνεται από τον τύπο (1.9), 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

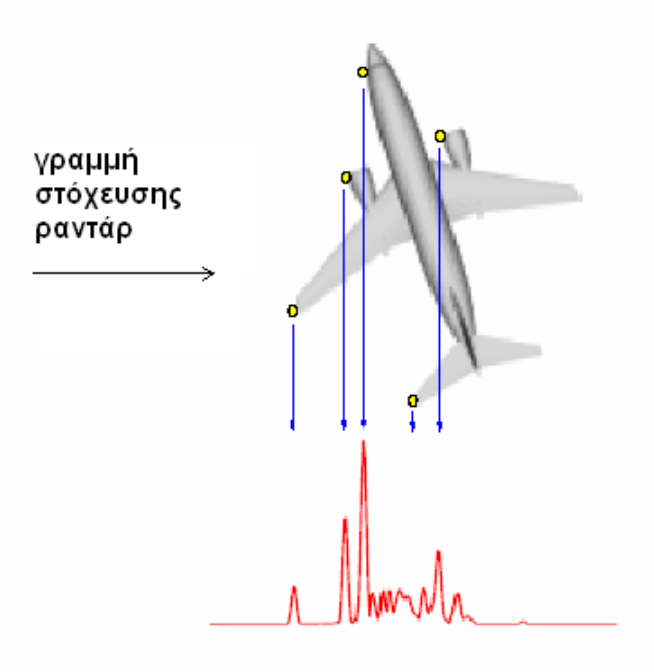
$$\begin{aligned} g_m &= \sum_{l=0}^{L-1} G_l \exp\left[j\,2\pi \frac{l\,m}{L} \right] \\ &= \rho \cdot \exp\left[-j\,4\pi \, {}^{R}\!/_{c} \cdot f_0 \right] \cdot \sum_{l=0}^{L-1} \exp\left[j\,2\pi\, l \left(\frac{m}{L} - 2\,\Delta f \cdot {}^{R}\!/_{c} \right) \right] \end{aligned} \tag{1.10}$$

Μετά από μία σειρά πράξεων καταλήγουμε στην εξίσωση

$$\left| g_m \right|^2 = \rho^2 \cdot \left| \frac{\sin\left(\pi\, y_m \right)}{\sin\left(\dfrac{\pi\, y_m}{L} \right)} \right|^2 \tag{1.11}$$

όπου $B = L\,\Delta f$ και $y_m = m - \dfrac{2\,B\,R}{c}$.

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



Σχήμα 1-10. Παράδειγμα προφίλ απόστασης

Μέσω της εξίσωσης (1.11) 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 $c/2B$. Αυτή η ποσότητα καλείται ελάχιστη διακριβωτική ικανότητα του προφίλ απόστασης και αποτελεί την επιτυγχανόμενη ανάλυση απόστασης με τη χρήση διαμορφωμένων παλμών

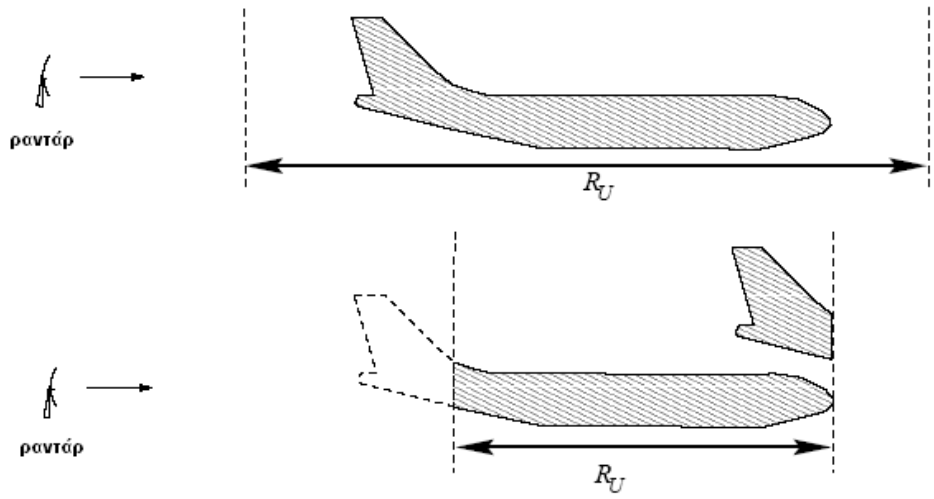
$$\Delta R_s = \frac{c}{2B} \tag{1.12}$$

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

$$R_U = \frac{c}{2\Delta f} \tag{1.13}$$

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 1-11. Επικάλυψη σκεδαστών στόχου ανάλογα με το διάστημα αναμφιβόλου αποστάσεως

1.8 Διδιάστατη απεικόνιση ραντάρ αντίστροφου συνθετικού ανοίγματος

Για να παράγει ένα ραντάρ απεικόνισης τύπου ISAR μία διδιάστατη εικόνα ενός στόχου είναι απαραίτητη η ύπαρξη περιστροφικής κίνησης του στόχου γύρω από έναν άξονα κάθετο στο επίπεδο απεικόνισης, που ορίζεται από την κατεύθυνση στόχευσης και την κάθετη σε αυτή [1]. Τονίζουμε ότι το ραντάρ βρίσκεται σε μία σταθερή θέση στο χώρο των τριών διαστάσεων, σε αντίθεση με τα ραντάρ SAR, όπου το ραντάρ κινείται σαρώνοντας μία περιοχή που περιλαμβάνει τον υπό εξέταση ακίνητο στόχο.

Θεωρώντας ότι κατά τη λήψη δεδομένων από το δέκτη του ραντάρ ο στόχος περιστρέφεται κατά μία γωνία $\Delta\phi$ (συνθετικό άνοιγμα), ο μαθηματικός τύπος που εκφράζει τη διακριβωτική ικανότητα του ραντάρ τύπου ISAR στην κάθετη απόσταση (ή ανάλυση κάθετης απόστασης) είναι ο εξής [6]

$$\Delta R_c = \frac{\lambda}{2\Delta\phi} \tag{1.14}$$

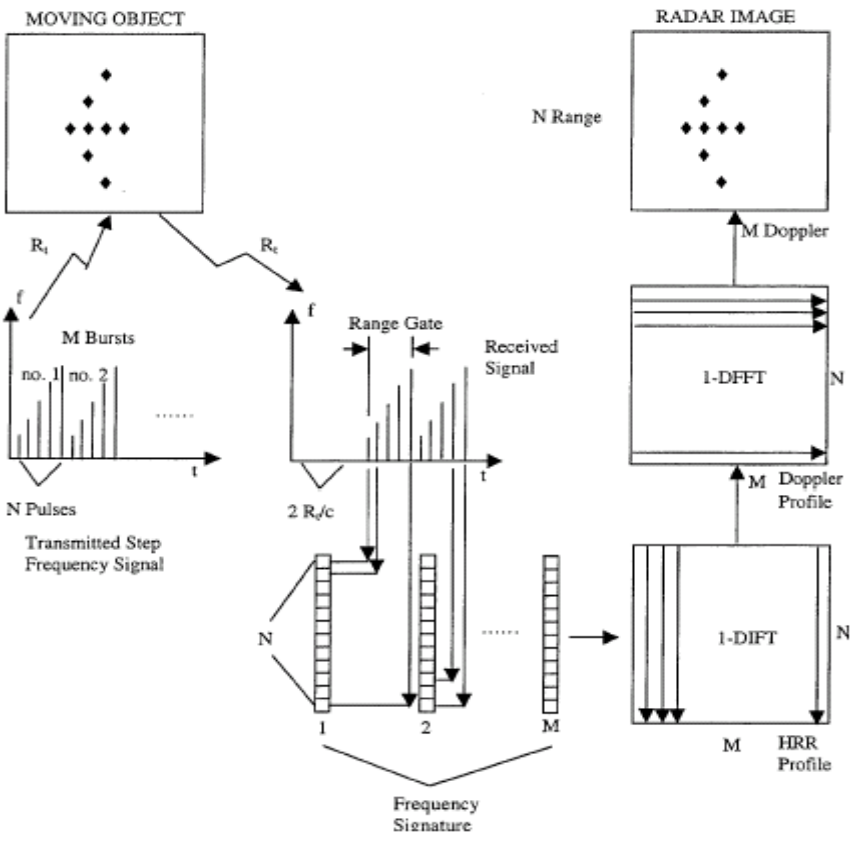
όπου λ είναι το μήκος κύματος της κεντρικής συχνότητας ραντάρ.

Η εξάρτηση της ακρίβειας απεικόνισης στην κάθετη απόσταση από το εύρος του συνθετικού ανοίγματος είναι προφανής από την παραπάνω σχέση. Μία πολύ συχνή υπόθεση της απεικόνισης ISAR είναι ότι η γωνία $\Delta\phi$ είναι σχετικά μικρή ($\Delta\phi << \pi$), η οποία αν παραβιαστεί οδηγεί σε θολές εικόνες ISAR. Τεχνικές εστίασης της εικόνας απαιτούνται σε αυτή την περίπτωση.

Ένα ραντάρ τύπου ISAR εκπέμπει την ίδια κυματομορφή βηματικής συχνότητας για καθεμία από τις M στοχευτικές γραμμές που συνθέτουν το άνοιγμα $\Delta\phi$. Για τη δημιουργία της εικόνας ISAR ενός στόχου από τα δεδομένα λήψης του ραντάρ (διδιάστατο σετ δεδομένων ως προς τη συχνότητα του παλμού και τη γωνία στόχευσης), εφαρμόζεται ο διδιάστατος ταχύς μετασχηματισμός Fourier (2D-FFT, fast Fourier transform) στο πεδίο των χωρικών συχνοτήτων που αντιστοιχούν στην ευθεία και στην κάθετη απόσταση [7].

Το βασικό διάγραμμα περιγραφής της απεικόνισης ISAR φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Οι τεχνικές εστίασης της παραγόμενης εικόνας ISAR παραλείπονται από το απλό αυτό διάγραμμα και περισσότερες λεπτομέρειες δίνονται στο τέταρτο κεφάλαιο της διατριβής.

Ισοδύναμα με την εφαρμογή του 2D-FFT, μπορούμε να εφαρμόσουμε αρχικά τον αντίστροφο ταχύ μετασχηματισμό Fourier (IFFT, inverse fast Fourier transform) για κάθε εκπεμπόμενη κυματομορφή βηματικής συχνότητας για να παράγουμε τα M προφίλ απόστασης, και στη συνέχεια το μετασχηματισμό FFT για κάθε κελί απόστασης στα παραχθέντα προφίλ για να προκύψει η εικόνα ISAR.



Σχήμα 1-12. Διάγραμμα περιγραφής της διδιάστατης απεικόνισης ISAR

(αναπαραγωγή από την αναφορά [7])

1.9 Δομή διδακτορικής διατριβής

Αντικείμενο της διατριβής αποτελεί η μελέτη των συστημάτων ραντάρ αντίστροφου συνθετικού ανοίγματος, η μονοδιάστατη και διδιάστατη μοντελοποίηση του επιστρέφοντος σήματος ISAR και η σύγκριση διαφόρων αλγορίθμων απεικόνισης στόχων ραντάρ. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στις παραμετρικές τεχνικές φασματικής ανάλυσης, τόσο για προβλήματα απεικόνισης στόχου όσο και για προβλήματα εκτίμησης παραμέτρων του σήματος ραντάρ (δεύτερο και τρίτο κεφάλαιο). Η σπουδαιότερη καινοτομία της διατριβής αυτής είναι το προτεινόμενο αναλυτικό μοντέλο επιστρέφοντος σήματος ISAR και η μεθοδολογία προσομοίωσής του για την παραγωγή διδιάστατων συνθετικών δεδομένων ραντάρ (τέταρτο κεφάλαιο). Συγκριτικά με αντίστοιχες δημοσιευμένες εργασίες, το μοντέλο της παρούσας διατριβής περιλαμβάνει την ακριβή μαθηματική ανάλυση του διδιάστατου προβλήματος ISAR και μπορεί να θεωρηθεί η ιδανική εκδοχή πιο σύνθετων μοντέλων, όπως το διδιάστατο μοντέλο GTD (Geometrical Theory of Diffraction) που αναλύεται στο πέμπτο κεφάλαιο. Τα παραπάνω στάδια της έρευνας αναπτύσσονται εκτενώς στα κεφάλαια της διατριβής, το περιεχόμενο των οποίων παρουσιάζεται συνοπτικά στις επόμενες παραγράφους.

Στο *πρώτο 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 διδιάστατα, 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 αναλυτικά διάφορες μονοδιάστατες και διδιάστατες παραμετρικές μέθοδοι φασματικής ανάλυσης, οι οποίες εφαρμόζονται

αντί του μονοδιάστατου και διδιάστατου μετασχηματισμού Fourier για την παραγωγή των επιθυμητών εικόνων ραντάρ (προφίλ απόστασης και εικόνες ISAR αντίστοιχα). Οι παραμετρικές μέθοδοι φασματικής εκτίμησης αποτελούν ένα αξιόλογο μαθηματικό εργαλείο για προβλήματα απεικόνισης που απαιτούν υψηλή ανάλυση, και η υπεροχή τους σε σχέση με το μετασχηματισμό Fourier εξετάζεται σε βάθος στο κεφάλαιο αυτό [8]. Τα αριθμητικά αποτελέσματα από την προσομοίωση των μονοδιάστατων (συνδιακύμανσης, τροποποιημένης συνδιακύμανσης, Burg, MUSIC και ESPRIT) και διδιάστατων (απευθείας αυτο-αναδρομική και MUSIC) παραμετρικών μεθόδων για ραντάρ τύπου ISAR τονίζουν τα πλεονεκτήματα των μεθόδων αυτών σε σχέση με το μετασχηματισμό Fourier. Στην περίπτωση των μονοδιάστατων μεθόδων, οι προσομοιώσεις περιλαμβάνουν δύο διαφορετικά πεδία σύγκρισης, τη μονοδιάστατη απεικόνιση μέσω των προφίλ απόστασης και την εκτίμηση των θέσεων των σημειακών σκεδαστών του εξεταζόμενου στόχου. Η εξειδικευμένη αυτή σύγκριση για ραντάρ τύπου ISAR δεν απαντάται στη βιβλιογραφία συστημάτων ραντάρ, και η σπουδαιότητά της έγκειται στην ανάδειξη τόσο των πλεονεκτημάτων όσο και των μειονεκτημάτων των παραμετρικών μεθόδων φασματικής ανάλυσης και των διαφόρων κατηγοριών εξ αυτών.

Στο *τρίτο κεφάλαιο* προτείνεται η χρήση μίας συγκεκριμμένης 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. 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. Το επιστρέφον σήμα για ραντάρ τύπου ISAR μοντελοποιείται σύμφωνα με το μονοδιάστατο μοντέλο GTD, το οποίο έχει προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία ως μία αξιόπιστη μαθηματική αναπαράσταση του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος ραντάρ για διαφόρων ειδών γεωμετρίες σκέδασης (επίπεδη πλάκα, γωνία, ακμή, ιδανικός σημειακός σκεδαστής, κ.ά.). Η βάση του μοντέλου αυτού είναι η γεωμετρική θεωρία της περίθλασης. 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 τις παραμέτρους των δύο προαναφερθέντων μοντέλων σήματος (DE και GTD). Στις αριθμητικές προσομοιώσεις του κεφαλαίου αυτού διερευνάται η ικανότητα εκτίμησης/ανάλυσης απόστασης της προτεινόμενης μεθόδου σε σχέση με δύο εκδοχές του αλγορίθμου MUSIC (με τροποποιημένη προεπεξεργασία χωρικής εξομάλυνσης και με υποδειγματοληψία σήματος). 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.

Το *τέταρτο κεφάλαιο* πραγματεύεται τη διδιάστατη μοντελοποίηση του επιστρέφοντος σήματος για ραντάρ τύπου ISAR. Ο υπό εξέταση στόχος μοντελοποιείται ως ένα ορθογώνιο πλέγμα σημειακών σκεδαστών, με τις αντίστοιχες εντάσεις σκέδασης να περιγράφουν τη γεωμετρική μορφή του στόχου, πράγμα που σημαίνει ότι το προσομοιούμενο μοντέλο σημειακών σκεδαστών παραμετροποιείται από τη θέση στη διδιάστατη γεωμετρία του προβλήματος και την ένταση σκέδασης. Σε αντίθεση με τη συνήθη υπόθεση κατά την απεικόνιση ISAR, αυτή της ομοιόμορφης περιστροφικής κίνησης του στόχου γύρω από το κέντρο μάζας του, για το μοντέλο που παρουσιάζουμε υποθέτουμε ότι ο στόχος κινείται κατά μήκος μίας ευθύγραμμης τροχιάς με σταθερή ταχύτητα, χωρίς κανενός είδους περιστροφική κίνηση. Το σενάριο αυτό χαρακτηρίζει την πτήση ενός αεροσκάφους σε ένα καθορισμένο ύψος για μία μικρή χρονική περίοδο. Επιπλέον, εξετάζουμε την ενδιαφέρουσα περίπτωση της εκπομπής παλμών διαμορφωμένων κατά βηματική συχνότητα. Στη σχετική βιβλιογραφία για ραντάρ τύπου ISAR, αναλυτικά μοντέλα του επιστρέφοντος σήματος και τεχνικές ανακατασκευής εικόνας έχουν προταθεί για την περίπτωση της γραμμικής διαμόρφωσης συχνότητας και της διαμόρφωσης με κωδικοποίηση φάσης. Στην παρούσα διατριβή, με βάση το προτεινόμενο μοντέλο του επιστρέφοντος σήματος, περιγράφουμε με λεπτομερείς μαθηματικούς τύπους τη διαδικασία ανακατασκευής της εικόνας ενός στόχου με ραντάρ τύπου ISAR [11]. Η διαδικασία αυτή είναι ανεξάρτητη από τις παραμέτρους που καθορίζουν την τροχιά του στόχου, και

αποτελείται από έναν αλγόριθμο συμπίεσης απόστασης, που βασίζεται στην ετερο-συσχέτιση, και έναν αλγόριθμο συμπίεσης γωνίας αζιμουθίου, που βασίζεται στο γρήγορο μετασχηματισμό Fourier. Εφαρμόζοντας αυτούς τους αλγόριθμους στο μοντελοποιημένο επιστρέφον σήμα, μπορούμε να ανακατασκευάσουμε την εικόνα ISAR του στόχου. Προσεγγιστική ευθυγράμμιση απόστασης επιτυγχάνεται αυτόματα μέσω της καταγραφής του πρώτου παλμού βηματικής συχνότητας, που ανακλάται από τον κοντινότερο σημειακό σκεδαστή, στο πρώτο δείγμα του λαμβανόμενου σήματος ISAR. Στο κεφάλαιο αυτό, κάνουμε την υπόθεση ότι ο κοντινότερος σημειακός σκεδαστής παραμένει ο ίδιος κατά τη διάρκεια του διαστήματος συμφασικής επεξεργασίας. Συνεπώς, η ακριβής απόσβεση φάσης δεν είναι αναγκαία και δεν περιλαμβάνεται στην προτεινόμενη διαδικασία απεικόνισης στόχου.

Στο *πέμπτο κεφάλαιο* μελετάται το διδιάστατο μοντέλο GTD για την περιγραφή του επιστρέφοντος σήματος ISAR. Το μοντέλο αυτό προσομοιώνεται για την παραγωγή αντιπροσωπευτικών διδιάστατων δεδομένων σκέδασης, τα οποία επεξεργάζομαστε για τη δημιουργία της εικόνας ISAR του υπό απεικόνιση στόχου. Το μοντέλο GTD συγκρίνεται με το διδιάστατο μοντέλο που προτείνεται στο προηγούμενο κεφάλαιο [12]. Οι παραγόμενες εικόνες ISAR από τα δύο αυτά μοντέλα συγκρίνονται για την περίπτωση ιδανικών σημειακών σκεδαστών, και οδηγούν στο συμπέρασμα ότι το μοντέλο GTD μπορεί να θεωρηθεί ότι ενσωματώνει ως ειδική περίπτωση το μοντέλο του τέταρτου κεφαλαίου. Στα αριθμητικά αποτελέσματα που παραθέτουμε περιλαμβάνεται και η εικόνα ISAR που προκύπτει θεωρώντας ότι ο εξεταζόμενος στόχος αποτελείται από διάφορους μηχανισμούς σκέδασης (περιθλάσεις από γωνίες και ακμές). Οι μηχανισμοί αυτοί περιγράφονται από το μοντέλο GTD και διαφοροποιούν σημαντικά την παραγόμενη εικόνα ISAR. Αντικείμενο της συγκεκριμμένης μελέτης είναι να αναδείξει τις ιδιαιτερότητες του μοντέλου αυτού (που βασίζεται στη γεωμετρική θεωρία της περίθλασης) σε σχέση με τα μοντέλα σημειακών σκεδαστών της βιβλιογραφίας ραντάρ.

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] R. Sullivan, *Microwave Radar Imaging and Advanced Concepts*, Artech House, 1st Edition, 2000.

[7] M. Leong, *Stepped Frequency Imaging Radar Simulation*, Naval Postgraduate School, Monterey, California, MSc. Thesis, 2000.

[8] A. Karakasiliotis and P. Frangos, "Comparison of Several Spectral Estimation Methods for Application to ISAR Imaging," *Proceedings of RTO SET Panel Symposium*, Oslo, Norway, Oct. 2004.

[9] A. Karakasiliotis and P. Frangos, "Decimative Spectrum Estimation Method for High-Resolution Radar Parameter Estimates," *Proceedings of CSNDSP 2006*, 5th International Symposium on Communications and Signal Processing, Patras, Greece, July 2006.

[10] A. Karakasiliotis and P. Frangos, "Decimative Spectrum Estimation Method for High-Resolution Radar Parameter Estimates," *Journal of Applied Electromagnetism*, Vol. 9, No. 2, pp. 88-97, Dec. 2007.

[11] A. Karakasiliotis, A. Lazarov, P. Frangos, G. Boultadakis and G. Kalognomos, "Two-dimensional ISAR Model and Image Reconstruction with Stepped Frequency Modulated Signal," *IET Signal Processing*, Vol. 2, No. 3, pp. 277-290, Sept. 2008.

[12] A. Karakasiliotis, A. Lazarov and P. Frangos, "ISAR Imaging Based on Two-Dimensional GTD Scattering Model," *Proceedings of EuRAD 2008*, European Microwave Week - European Radar Conference, Amsterdam, Netherlands, Oct. 2008.

Κεφάλαιο 2

Παραμετρικές μέθοδοι φασματικής ανάλυσης: Μαθηματική θεωρία και εφαρμογή στη μονοδιάστατη και διδιάστατη απεικόνιση στόχου με ραντάρ αντίστροφου συνθετικού ανοίγματος

2.1 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 πολλές 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 διδιάστατης 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 διδιάστατη εικόνα [1]. Όλες αυτές οι αναφορές βιβλιογραφικής φύσεως είναι, λίγο εώς πολύ, η ιστορία της διδιάστατης 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 συγκεκριμμένο γνωστικό πεδίο και αρκετές μεθοδολογίες απεικόνισης ISAR έχουν προταθεί [2, 3].

Η διάρθρωση του υπόλοιπου του κεφαλαίου αυτού έχει ως εξής: Στη δεύτερη ενότητα, παρουσιάζουμε τη μαθηματική θεωρία διαφόρων μονοδιάστατων παραμετρικών μεθόδων φασματικής εκτίμησης [4], και επίσης, συγκρίνουμε και εκτιμούμε την απόδοσή τους σε σχέση με την ικανότητα δημιουργίας προφίλ απόστασης υψηλής ανάλυσης και την ακρίβεια εκτίμησης των θέσεων των κέντρων σκέδασης ενός στόχου. Αρχικά, αναλύουμε εν συντομία το βασικό μαθηματικό υπόβαθρο των αυτο-αναδρομικών μεθόδων, που αποτελούν ένα σημαντικό τμήμα της βιβλιογραφίας φασματικής ανάλυσης [4]. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στη μέθοδο συνδιακύμανσης και στην τροποποιημένη μέθοδο συνδιακύμανσης, καθώς και στην κλασσική μέθοδο Burg. Μολονότι αυτές οι μέθοδοι (που βασίζονται σε αυτο-αναδρομικά μοντέλα σήματος) είναι καταλληλότερες για τη φασματική εκτίμηση σημάτων με «ρητό» φάσμα [2], η υπολογιστική τους απλότητα [3] τις καθιστά ελκυστικές για εφαρμογές ραντάρ. Στη συνέχεια, αναπτύσσουμε δύο μεθόδους που βασίζονται στην ιδιοανάλυση, συγκεκριμμένα τη μέθοδο MUSIC και τη μέθοδο ESPRIT [4], οι οποίες ανήκουν στην πολύ ενδιαφέρουσα κλάση των μεθόδων υποχώρου υψηλής ανάλυσης. Όλες οι παραπάνω μέθοδοι συγκρίνονται στο πλαίσιο των μονοδιάστατων συνθετικών (προσομοιούμενων) δεδομένων ραντάρ που παράγονται με βάση την αντίστοιχη ανάλυση της αναφοράς [5].

---

[1] Τεχνική γνωστή ως τεχνική οπισθοπροβολής.

[2] Μαθηματικές λεπτομέρειες για τον όρο «ρητό» φάσμα ακολουθούν στην επόμενη ενότητα.

[3] Σε σχέση με άλλες παραμετρικές μεθόδους φασματικής εκτίμησης, και όχι σε σχέση με το γρήγορο μετασχηματισμό Fourier.

[4] Το ακρωνύμιο MUSIC είναι συντομογραφία της αγγλικής φράσης “Multiple Signal Classification”, και το ακρωνύμιο ESPRIT είναι συντομογραφία της αγγλικής φράσης “Estimation of Signal Parameters by Rotational Invariance Techniques”.

Τα προκύπτοντα προφίλ απόστασης (ή οι εκτιμήσεις των θέσεων των κέντρων σκέδασης του στόχου) χρησιμεύουν ως πολύτιμο κριτήριο της ανάλυσης απόστασης που επιτυγχάνει η κάθε μέθοδος. Στην τρίτη ενότητα του κεφαλαίου αυτού, εξετάζονται δύο μέθοδοι διδιάστατης φασματικής εκτίμησης, συγκεκριμμένα η διδιάστατη απευθείας αυτο-αναδρομική μέθοδος [6] και η διδιάστατη μέθοδος MUSIC [1], οι οποίες βρίσκουν εφαρμογή στο πρόβλημα της διδιάστατης απεικόνισης ISAR. Αρχικά, αναπτύσσουμε τη μαθηματική θεωρία των δύο αυτών μεθόδων, υπό το πρίσμα ενός διδιάστατου μοντέλου του επιστρέφοντος σήματος ISAR. Ακολουθώντας τα βήματα προσομοίωσης που περιγράφονται στην αναφορά [1], παράγουμε διδιάστατα συνθετικά δεδομένα ραντάρ στο πεδίο συχνότητας-γωνίας, και κατόπιν, τα μετασχηματίζουμε στο διδιάστατο πεδίο της χωρικής συχνότητας. Οι διδιάστατες επεκτάσεις της κλασσικής αυτο-αναδρομικής μεθόδου και του αλγορίθμου MUSIC προσομοιώνονται, ώστε να λάβει χώρα η διδιάστατη φασματική εκτίμηση και να ξεπεραστούν τα όρια ανάλυσης εικόνας του διδιάστατου μετασχηματισμού Fourier. Οι προκύπτουσες εικόνες ISAR αναπαριστώνται μέσω υψομετρικών γραφημάτων, που αναδεικνύουν τα πλεονεκτήματα της κάθε διδιάστατης τεχνικής. Στην τελευταία ενότητα, εξάγουμε χρήσιμα συμπεράσματα με βάση τα αποτελέσματα των αριθμητικών προσομοιώσεων. Επιπρόσθετα, επισημαίνουμε διάφορες κατευθύνσεις μελλοντικής έρευνας αναφορικά με τις μονοδιάστατες και διδιάστατες παραμετρικές μεθόδους φασματικής ανάλυσης και την αξιοποίησή τους σε συστήματα ραντάρ τύπου ISAR.

2.2 Μονοδιάστατες παραμετρικές μέθοδοι φασματικής ανάλυσης

Στην ενότητα αυτή, αρχικά αναφερόμαστε σε βασικές μαθηματικές έννοιες που σχετίζονται με παραμετρικά μοντέλα περιγραφής σημάτος. Τα μοντέλα αυτά αποτελούν το μαθηματικό πυρήνα γύρω από τον οποίο αναπτύσσονται οι διάφορες παραμετρικές μέθοδοι φασματικής εκτίμησης. Περιγράφονται συνοπτικά οι συγκεκριμμένες μονοδιάστατες αυτο-αναδρομικές μέθοδοι που έχουν εξεταστεί στα πλαίσια της διδακτορικής μου έρευνας, καθώς επίσης και δύο παραμετρικές μέθοδοι υψηλής φασματικής ανάλυσης. Τέλος, παρατίθενται ενδεικτικά αριθμητικά αποτελέσματα από την εφαρμογή αυτών των μεθόδων στα μονοδιάστατα πρόβλημματα της δημιουργίας προφίλ απόστασης και της εκτίμησης των θέσεων των κέντρων σκέδασης για ραντάρ τύπου ISAR.

2.2.1 Βασική μαθηματική θεωρία

Οι παραμετρικές ή βασιζόμενες σε μοντέλο μέθοδοι φασματικής εκτίμησης υποθέτουν ότι το υπό εξέταση σήμα προκύπτει από ένα μοντέλο με γνωστή συναρτησιακή μορφή, και στη συνέχεια προχωρούν εκτιμώντας τις παραμέτρους του μοντέλου. Κατόπιν, τα φασματικά χαρακτηριστικά του σήματος προκύπτουν μέσω του εκτιμώμενου μοντέλου. Στις περιπτώσεις όπου το υποτιθέμενο μοντέλο είναι μία καλή προσέγγιση της πραγματικότητας είναι αναμενόμενο οι παραμετρικές μέθοδοι να παρέχουν πιο ακριβείς φασματικές εκτιμήσεις από τις μη παραμετρικές. Παρόλα αυτά, η μη παραμετρική προσέγγιση στο πρόβλημα της εκτίμησης της φασματικής πυκνότητας ισχύος παραμένει χρήσιμη σε εφαρμογές όπου λίγη ή καθόλου πληροφορία για το υπό εξέταση σήμα είναι διαθέσιμη.

Τα κλασματικά ή «ρητά» φάσματα αποτελούν ένα μεγάλο μέρος της κλάσης των συνεχών φασμάτων. Σύμφωνα με το θεώρημα του Weierstrass από το λογισμό, κάθε συνεχές φάσμα μπορεί να προσεγγιστεί αυθαιρέτως ικανοποιητικά από ένα κλασματικό φάσμα (κλασματική φασματική πυκνότητα

ισχύος) της ακόλουθης μορφής, δεδομένου ότι οι βαθμοί m και n επιλέγονται επαρκώς μεγάλοι

$$\Phi(\omega) = \frac{\sum_{k=-m}^{m} \gamma_k \, e^{-i\,\omega\,k}}{\sum_{k=-n}^{n} \rho_k \, e^{-i\,\omega\,k}} \tag{2.1}$$

όπου $\gamma_{-k} = \gamma_k^*$ και $\rho_{-k} = \rho_k^*$.

Με τη βοήθεια του θεωρήματος της φασματικής παραγοντοποίησης, η εξίσωση (2.1) μπορεί να γραφτεί ως εξής, εφόσον $\Phi(\omega) \geq 0$

$$\Phi(\omega) = \left| \frac{B(\omega)}{A(\omega)} \right|^2 \sigma^2 \tag{2.2}$$

όπου σ^2 είναι μία θετική σταθερά, και $A(\omega)$ και $B(\omega)$ είναι πολυώνυμα της μορφής

$$A(\omega) = 1 + a_1 \, e^{-i\,\omega} + \ldots + a_n \, e^{-i\,n\,\omega}$$
$$B(\omega) = 1 + b_1 \, e^{-i\,\omega} + \ldots + b_m \, e^{-i\,m\,\omega}$$

Το κλασματικό φάσμα της εξίσωσης (2.2) μπορεί να συσχετιστεί με ένα σήμα που προέρχεται από το φιλτράρισμα λευκού θορύβου με σταθερή φασματική πυκνότητα ισχύος σ^2 μέσω του φίλτρου με συνάρτηση μεταφοράς $H(\omega) = B(\omega)/A(\omega)$. Με αυτό το τρόπο, το παραμετροποιημένο μοντέλο του $\Phi(\omega)$ μετατρέπεται σε ένα μοντέλο του υπό εξέταση σήματος $y(t)$, όπως βλέπουμε καθαρά αν γράψουμε την εξίσωση (2.2) στο πεδίο του χρόνου

$$y(t) = \frac{B(q)}{A(q)} e(t) \quad \text{ή} \quad A(q)\,y(t) = B(q)\,e(t) \tag{2.3}$$

όπου $e(t)$ είναι το σήμα του λευκού θορύβου εισόδου στο συγκεκριμμένο φίλτρο.

Το σημείο-κλειδί των παραμετρικών μεθόδων είναι ότι το πρόβλημα της φασματικής εκτίμησης μπορεί να εκφυλιστεί σε ένα πρόβλημα μοντελοποίησης σήματος, όπως φαίνεται από τις προηγούμενες μαθηματικές σχέσεις.

Οι αυτο-αναδρομικές μέθοδοι φασματικής εκτίμησης υποθέτουν ότι το υπό εξέταση σήμα $y(t)$ περιγράφεται από ένα αυτο-αναδρομικό (AR, auto-regressive) μοντέλο AR(n)

$$A(q)y(t)=e(t) \tag{2.4}$$

Στη γενική περίπτωση ενός αυτο-αναδρομικού μοντέλου κινητού μέσου (ARMA, auto-regressive moving average), η εξίσωση (2.3) γράφεται αναλυτικά ως εξής

$$y(t)+\sum_{i=1}^{n} a_i\, y(t-i)=\sum_{j=0}^{m} b_j\, e(t-j) \quad (b_0=1) \tag{2.5}$$

και ακολουθώντας απλά μαθηματικά οδηγούμαστε σε μία πολύ σημαντική εξίσωση για την ακολουθία αυτοσυσχέτισης $r(k)$ του σήματος $y(t)$

$$r(k)+\sum_{i=1}^{n} a_i\, r(k-i)=0\,, \text{ για } k>m \tag{2.6}$$

Στην περίπτωση του αυτο-αναδρομικού μοντέλου, η εξίσωση (2.6) ισχύει για $k>0$, και για $k=0$ η ανάλυση που προκύπτει από την εξίσωση (2.5) έχει ως αποτέλεσμα

$$r(0)+\sum_{i=1}^{n} a_i\, r(-i)=\sigma^2 \tag{2.7}$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (2.6), για $k=1,\ldots,n$, και (2.7) καταλήγουμε σε ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων, που είναι ευρέως γνωστές στη βιβλιογραφία ως εξισώσεις Yule-Walker (ή κανονικές εξισώσεις)

$$\begin{bmatrix} r(0) & r(-1) \cdots & r(-n) \\ r(1) & r(0) & \vdots \\ \vdots & \ddots & r(-1) \\ r(n) & \cdots & r(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma^2 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \tag{2.8}$$

Οι εξισώσεις Yule-Walker αποτελούν τη βάση πολλών αυτο-αναδρομικών μεθόδων φασματικής εκτίμησης.

2.2.2 Μαθηματική περιγραφή αυτο-αναδρομικών μεθόδων

2.2.2.1 Μέθοδος Yule-Walker

Δεδομένων των δειγμάτων του υπό εξέταση σήματος $\{y(t)\}_{t=1}^{N}$, ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

(i) Υπολογισμός των δειγματικών συμεταβλητοτήτων $\{\hat{r}(k)\}_{k=0}^{n}$ (ισοδύναμες με τις αυτοσυσχετίσεις στην περίπτωση στασίμων με την ευρεία έννοια σημάτων) χρησιμοποιώντας τον πολωμένο εκτιμητή αυτοσυσχέτισης

$$\hat{r}(k) = \frac{1}{N} \sum_{t=k+1}^{N} y(t) y^*(t-k) \quad \text{για} \quad 0 \le k \le N-1 \tag{2.9}$$

(ii) Εξαιρώντας την πρώτη γραμμή από το σύστημα γραμμικών εξισώσεων (2.8) και χρησιμοποιώντας τις δειγματικές συμεταβλητότητες που υπολογίστηκαν στο βήμα (i), έχουμε την εκτίμηση του διανύσματος των AR παραμέτρων $\hat{\theta} = [\hat{a}_1, \cdots, \hat{a}_n]^T$.

(iii) Έχοντας υπολογισμένες τις AR παραμέτρους, η εξίσωση της πρώτης γραμμής μας δίνει την εκτίμηση της φασματικής πυκνότητας ισχύος του λευκού θορύβου $\hat{\sigma}^2$.

(iv) Το τελικό βήμα, κοινό σε όλες τις αυτο-αναδρομικές μεθόδους φασματικής εκτίμησης, περιλαμβάνει την αντικατάσταση των $\hat{\theta}$ και $\hat{\sigma}^2$ στην εξίσωση (2.2) με $B(\omega)=1$ ώστε να προκύψει η επιθυμητή φασματική εκτίμηση

$$\Phi(\omega)=\left|\frac{1}{A(\omega)}\right|^2 \sigma^2 \tag{2.10}$$

2.2.2.2 Μέθοδοι ελαχίστων τετραγώνων

Ο αυτο-αναδρομικός εκτιμητής ελαχίστων τετραγώνων (LS, least squares) βασίζεται σε ένα κριτήριο ελαχιστοποίησης τύπου LS (μέσω της εξίσωσης (2.4)), και όχι απευθείας στις κανονικές εξισώσεις, όπως ο αυτο-αναδρομικός εκτιμητής Yule-Walker.

Η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων σχετίζεται στενά με το πρόβλημα της γραμμικής πρόβλεψης (LP, linear prediction). Για ένα μοντέλο AR(n) ορίζεται το σφάλμα εμπρόσθιας γραμμικής πρόβλεψης $e(t)$ ως

$$e(t)=y(t)+\sum_{i=1}^{n} a_i\, y(t-i)=y(t)+\varphi^T(t)\theta \tag{2.11}$$

όπου $\varphi(t)=[y(t-1),\cdots,y(t-n)]^T$.

Το διάνυσμα των AR παραμέτρων που ελαχιστοποιεί τη διακύμανση του σφάλματος γραμμικής πρόβλεψης $\sigma_n^2=E\left\{|e(t)|^2\right\}$ αποδεικνύεται ότι δίνεται από

$$\theta=-R_n^{-1}\, r_n \tag{2.12}$$

και η αντίστοιχη μεταβλητότητα υπολογίζεται ως εξής

$$\sigma_n^2 = r(0) - r_n^* R_n^{-1} r_n \tag{2.13}$$

όπου $r_n = \left[r(1), \cdots, r(n) \right]^T$ και $R_n = \begin{bmatrix} r(0) & \cdots & r(-n+1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r(n-1) & \cdots & r(0) \end{bmatrix}$.

Παρατηρούμε ότι οι εξισώσεις (2.12) και (2.13) ταυτίζονται με τις εξισώσεις Yule-Walker (2.8). Επομένως, το πρόβλημα εύρεσης της καλύτερης γραμμικής πρόβλεψης του σήματος $y(t)$ από τα n τελευταία (χρονικά) δείγματά του μπορεί να επιλυθεί μέσω των κανονικών εξισώσεων.

Η μέθοδος φασματικής εκτίμησης ελαχίστων τετραγώνων στηρίζεται σε μία προσεγγιστική λύση πεπερασμένου πλήθους δειγμάτων στο προαναφερθέν πρόβλημα ελαχιστοποίησης. Δεδομένων των δειγμάτων του υπό εξέταση σήματος $\{y(t)\}_{t=1}^{N}$, τα ακόλουθα βήματα συνιστούν τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων:

(i) Υπολογίζουμε προσεγγιστικά τη μεταβλητότητα του σφάλματος γραμμικής πρόβλεψης σ_n^2 ώστε να ελαχιστοποιείται η συνάρτηση κόστους

$$f(\theta) = \sum_{t=N_1}^{N_2} |e(t)|^2 = \sum_{t=N_1}^{N_2} \left| y(t) + \sum_{i=1}^{n} a_i \, y(t-i) \right|^2 = \| y + Y\theta \|^2$$

όπου υποθέτουμε ότι $y(t) = 0$ για $t \notin [1, N]$, και ορίζουμε

$$y = \left[y(N_1), y(N_1+1), \cdots, y(N_2) \right]^T \text{ και } Y = \begin{bmatrix} y(N_1-1) & \cdots & y(N_1-n) \\ y(N_1) & \cdots & y(N_1+1-n) \\ \vdots & & \vdots \\ y(N_2-1) & \cdots & y(N_2-n) \end{bmatrix} \tag{2.14}$$

(ii) Το διάνυσμα θ που ελαχιστοποιεί την $f(\theta)$ εκτιμάται μέσω της παρακάτω μαθηματικής σχέσης

$$\hat{\theta} = -\left(Y^* Y\right)^{-1}\left(Y^* y\right) \tag{2.15}$$

Είναι προφανές ότι οι τιμές των εκτιμώμενων AR παραμέτρων εξαρτώνται από την επιλογή των N_1 και N_2.

(iii) Υπολογίζουμε την ελάχιστη μεταβλητότητα του σφάλματος γραμμικής πρόβλεψης μέσω της εξίσωσης (2.13), με αντικατάσταση των R_n και r_n με $\left(Y^* Y\right)/N$ (ή $\left(Y^* Y\right)/(N-n)$) και $\left(Y^* y\right)/N$ (ή $\left(Y^* y\right)/(N-n)$) αντιστοίχως [5]. Η εκτίμηση αυτοσυσχέτισης για μηδενική χρονική διαφορά $\hat{r}(0)$ δίνεται μέσω του βεβιασμένου εκτιμητή αυτοσυσχέτισης.

(iv) Η φασματική εκτίμηση ελαχίστων τετραγώνων προκύπτει άμεσα από την εξίσωση (2.10).

Μία από τις πιο συνηθισμένες επιλογές για τις τιμές των N_1 και N_2 είναι $\{N_1 = 1, N_2 = N + n\}$. Η προκύπτουσα μέθοδος φασματικής εκτίμησης ελαχίστων τετραγώνων ονομάζεται *μέθοδος αυτοσυσχέτισης* και είναι ισοδύναμη με τη μέθοδο Yule-Walker. Ξαναγράφοντας την εξίσωση (2.15) ως προς τους όρους $\left(Y^* Y\right)/N$ και $\left(Y^* y\right)/N$, το συμπέρασμα αυτό γίνεται εύκολα αντιληπτό. Σε αυτό το σημείο, πρέπει να τονίσουμε ότι ο εκτιμώμενος πίνακας

[5] Αυτές οι δύο περιπτώσεις αφορούν τη μέθοδο αυτοσυσχέτισης και τη μέθοδο συνδιακύμανσης αντίστοιχα, αναφορικά με τις συγκεκριμμένες επιλογές των N_1 και N_2. Στην πρώτη περίπτωση, οι δύο εκφράσεις περιέχουν στοιχεία που ταυτίζονται με τις βεβιασμένες εκτιμήσεις αυτοσυσχέτισης, τις οποίες χρησιμοποιεί και η μέθοδος Yule-Walker, ενώ στη δεύτερη περίπτωση, οι δύο εκφράσεις αποτελούν τις μη βεβιασμένες εκτιμήσεις των R_n και r_n.

αυτοσυσχέτισης $\hat{R}^{corr} = \left(Y^* Y\right)/N$ έχει δομή Toeplitz, η οποία επιτρέπει τις λύσεις επαναληπτικής τάξης, όπως ο αλγόριθμος Levinson-Durbin [7].

Επιλέγοντας $\{N_1 = n+1, N_2 = N\}$, οδηγούμαστε σε μία διαφορετική μέθοδο φασματικής εκτίμησης ελαχίστων τετραγώνων, που λέγεται *μέθοδος συνδιακύμανσης* ή απλά μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων. Με βάση τους ορισμούς (2.14), εύκολα αποδεικνύεται ότι ο εκτιμώμενος πίνακας αυτοσυσχέτισης $\hat{R}^{\mathrm{cov}} = \left(Y^* Y\right)/(N-n)$ δεν έχει δομή Toeplitz. Κατά συνέπεια, διάφοροι αποδοτικοί αλγόριθμοι επαναληπτικής τάξης για αυτο-αναδρομική φασματική εκτίμηση δεν μπορούν να εφαρμοστούν στην περίπτωση της μεθόδου αυτής. Αυτή είναι μία σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο προαναφερθέντων μεθόδων.

Στην περίπτωση πολλών δειγμάτων σήματος ($N >> 1$), η διαφορά μεταξύ των δύο αυτών αυτο-αναδρομικών εκτιμητών εξαφανίζεται, ενώ για σχετικά λίγα δείγματα, οι δύο μέθοδοι συμπεριφέρονται διαφορετικά:

- Το εκτιμώμενο AR μοντέλο μέσω της μεθόδου αυτοσυσχέτισης είναι πάντοτε ευσταθές, πράγμα που δεν ισχύει στην περίπτωση της μεθόδου συνδιακύμανσης. Αυτή η αστάθεια αποτελεί ένα σοβαρό μειονέκτημα, ειδικά όταν ενδιαφερόμαστε για το προκύπτον AR μοντέλο.

- Η μέθοδος συνδιακύμανσης είναι πιο ακριβής από τη μέθοδο αυτοσυσχέτισης, αφού δε στηρίζεται στην αβάσιμη παραδοχή ότι $y(t) = 0$ για $t \notin [1, N]$. Αυτή η υπόθεση οδηγεί σε βεβιασμένες εκτιμήσεις των AR παραμέτρων, με τη δημιουργούμενη πόλωση να αυξάνεται όσο $N \to n$.

Η *τροποποιημένη μέθοδος συνδιακύμανσης* επεκτείνει την σχέση μεταξύ της μεθόδου συνδιακύμανσης (ίδια N_1 και N_2) και της θεωρίας γραμμικής πρόβλεψης, καθώς περιλαμβάνει και το σφάλμα οπίσθιας γραμμικής πρόβλεψης στο κριτήριο ελαχιστοποίησης τύπου LS. Για αυτό το λόγο, η μέθοδος αυτή είναι επίσης γνωστή ως εμπρόσθιος-οπίσθιος αλγόριθμος.

Ο εκτιμώμενος πίνακας αυτοσυσχέτισης δίνεται από τον τύπο $\hat{R}^{m\,\mathrm{cov}} = \left(Y^{*}Y\right)/2\left(N-n\right)$, όπου ο πίνακας Y εμπεριέχει όρους που σχετίζονται με την οπίσθια γραμμική πρόβλεψη

$$Y = \begin{bmatrix} y(n) & \cdots & y(1) \\ y(n+1) & \cdots & y(2) \\ \vdots & & \vdots \\ y(N-1) & \cdots & y(N-n) \\ y^{*}(1) & \cdots & y^{*}(n) \\ y^{*}(2) & \cdots & y^{*}(n+1) \\ \vdots & & \\ y^{*}(N-n) & \cdots & y^{*}(N-1) \end{bmatrix} \tag{2.16}$$

Καμία παραδοχή δε γίνεται για τα δείγματα του σήματος $y(t)$ για $t \notin [1, N]$, οπότε έχουμε μικρότερη πόλωση στην περίπτωση λίγων δειγμάτων. Επιπρόσθετα, η αστάθεια του εκτιμώμενου AR μοντέλου παραμένει. Οι φασματικές εκτιμήσεις της απλής και της τροποποιημένης μεθόδου συνδιακύμανσης είναι παρόμοιες, ακόμη και για μικρό αριθμό δειγμάτων. Στην περίπτωση της εκτίμησης της συχνότητας ημιτόνου, η τροποποιημένη μέθοδος δεν εμφανίζει το φαινόμενο-μειονέκτημα του διαχωρισμού φασματικών γραμμών, όπως η μέθοδος Burg που περιγράφεται στη συνέχεια, και, παρουσία θορύβου, παρέχει μικρότερη πόλωση συχνότητας από την απλή μέθοδο συνδιακύμανσης.

2.2.2.3 Μέθοδος Burg

Παρομοίως με την τροποποιημένη μέθοδο συνδιακύμανσης, η μέθοδος Burg [8] είναι μία αυτο-αναδρομική μέθοδος φασματικής εκτίμησης που βασίζεται στα σφάλματα εμπρόσθιας και οπίσθιας γραμμικής πρόβλεψης.

Δεδομένων των δειγμάτων του υπό εξέταση σήματος $\{y(t)\}_{t=1}^{N}$, ορίζουμε τα σφάλματα εμπρόσθιας και οπίσθιας γραμμικής πρόβλεψης για το AR μοντέλο p-οστής τάξης ως εξής

$$\begin{aligned} \hat{e}_{f,p}(t) &= y(t) + \sum_{i=1}^{p} \hat{a}_{p,i}\, y(t-i) \\ \hat{e}_{b,p}(t) &= y(t-p) + \sum_{i=1}^{p} \hat{a}^{*}_{p,i}\, y(t-p+i) \end{aligned} \quad , \; t \in [p+1, N] \tag{2.17}$$

Οι AR παράμετροι συνδέονται με τους συντελεστές ανάκλασης μέσω της ακόλουθης σχέσης

$$\hat{a}_{p,i} = \begin{cases} \hat{a}_{p-1,i} + \hat{k}_p\, \hat{a}^{*}_{p-1,\,p-i}, & i = 1, \ldots, p-1 \\ \hat{k}_p & , \quad i = p \end{cases} \tag{2.18}$$

Η μέθοδος Burg βρίσκει την τιμή του $\hat{k}_p$ που ελαχιστοποιεί τον αριθμητικό μέσο όρο των εκτιμώμενων διακυμάνσεων των σφαλμάτων εμπρόσθιας και οπίσθιας γραμμικής πρόβλεψης

$$\min_{\hat{k}_p} \left\{ \frac{1}{2} \left[\hat{\rho}_f(p) + \hat{\rho}_b(p) \right] \right\} \tag{2.19}$$

όπου $\hat{\rho}_f(p) = \dfrac{1}{N-p} \displaystyle\sum_{t=p+1}^{N} \left| \hat{e}_{f,p}(t) \right|^2$ και $\hat{\rho}_b(p) = \dfrac{1}{N-p} \displaystyle\sum_{t=p+1}^{N} \left| \hat{e}_{b,p}(t) \right|^2$.

Αποδεικνύεται ότι τα σφάλματα εμπρόσθιας και οπίσθιας γραμμικής πρόβλεψης ικανοποιούν τις εξής μαθηματικές εκφράσεις επαναληπτικής τάξης

$$\begin{aligned} \hat{e}_{f,p}(t) &= \hat{e}_{f,p-1}(t) + \hat{k}_p\, \hat{e}_{b,p-1}(t-1) \\ \hat{e}_{b,p}(t) &= \hat{e}_{b,p-1}(t-1) + \hat{k}^{*}_p\, \hat{e}_{f,p-1}(t) \end{aligned} \tag{2.20}$$

Επιπλέον, ο συντελεστής ανάκλασης που ικανοποιεί το κριτήριο (2.19) δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$\hat{k}_p = \frac{-2\sum_{t=p+1}^{N} \hat{e}_{f,p-1}(t)\hat{e}^*_{b,p-1}(t-1)}{\sum_{t=p+1}^{N}\left[\left|\hat{e}_{f,p-1}(t)\right|^2 + \left|\hat{e}_{b,p-1}(t-1)\right|^2\right]} \tag{2.21}$$

Δεδομένων των δειγμάτων του υπό εξέταση σήματος $\{y(t)\}_{t=1}^{N}$, τα ακόλουθα βήματα συνιστούν τον αλγόριθμο Burg επαναληπτικής τάξης για την εκτίμηση των AR παραμέτρων:

(i) Αρχικοποιούμε τα σφάλματα πρόβλεψης για μηδενική τάξη: $\hat{e}_{f,0}(t) = \hat{e}_{b,0}(t) = y(t)$, και θέτουμε $p = 1$.

(ii) Υπολογίζουμε το συντελεστή ανάκλασης $\hat{k}_p$ μέσω της εξίσωσης (2.21).

(iii) Για $t \in [p+1, N]$ υπολογίζουμε $\hat{e}_{f,p}(t)$ και $\hat{e}_{b,p}(t)$ από τους τύπους (2.20).

(iv) Εκτιμούμε τις AR παραμέτρους $\hat{a}_{p,i}$ $\{i \in [1, p]\}$ χρησιμοποιώντας τον αναδρομικό ορισμό (2.18).

(v) Αυξάνουμε την τάξη p του AR μοντέλου κατά 1 και επαναλαμβάνουμε τα βήματα (ii)-(iv). Όταν η τάξη του μοντέλου πάρει την τιμή n_0 ο αλγόριθμος σταματάει.

Ο αλγόριθμος Burg είναι υπολογιστικά απλός και επιδέχεται λύσεις τόσο επαναληπτικής τάξης όσο και επαναληπτικού χρόνου. Το εκτιμώμενο AR μοντέλο μέσω του αλγορίθμου Burg είναι εγγυημένα ευσταθές. Παρόλα αυτά, η μέθοδος Burg είναι ημι-ιδεατή, επειδή εκτιμάει τους n_0 σε πλήθος συντελεστές ανάκλασης αποσυσχετίζοντας το n_0-οστής διάστασης πρόβλημα ελαχιστοποίησης σε n_0 μονοδιάστατα προβλήματα ελαχιστοποίησης.

Για σχετικά μικρό αριθμό δειγμάτων σήματος, ο αλγόριθμος Burg συμπεριφέρεται αρκετά καλύτερα από τη μέθοδο Yule-Walker και χειρότερα από τη μέθοδο συνδιακύμανσης. Για μεγάλο αριθμό δειγμάτων, οι μέθοδοι Burg και συνδιακύμανσης είναι σχεδόν ισοδύναμοι σε επίδοση φασματικής εκτίμησης.

2.2.3 Μαθηματική περιγραφή αλγορίθμων υψηλής ανάλυσης

2.2.3.1 Αλγόριθμος MUSIC

Μία άλλη τεχνική φασματικής εκτίμησης, επίσης μέλος της ευρείας κλάσης των παραμετρικών μεθόδων, που οδηγεί στη δημιουργία μονοδιάστατων εικόνων ραντάρ είναι ο αλγόριθμος MUSIC [9, 4]. Αυτή η μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές αναγνώρισης στόχων ραντάρ, παρέχοντας προφίλ απόστασης υψηλής ανάλυσης σε σύγκριση με εκείνα που προκύπτουν μέσω του κλασσικού αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier για το ίδιο εύρος συχνοτήτων [5].

Στις επόμενες δύο παραγράφους, σύντομα περιγράφουμε το μαθηματικό υπόβαθρο του αλγορίθμου MUSIC. Η ανάλυση που παρουσιάζουμε βασίζεται στα μονοδιάστατα δεδομένα ραντάρ που προσομοιώνονται ώστε να συγκριθούν οι διάφορες μονοδιάστατες μέθοδοι φασματικής εκτίμησης. Σε διανυσματικό συμβολισμό η εξίσωση που περιγράφει τα προσομοιούμενα δεδομένα είναι η εξής

$$\boldsymbol{y} = \boldsymbol{E}\boldsymbol{a} + \boldsymbol{n} \tag{2.22}$$

όπου $\boldsymbol{y}=\left[y_1,...,y_N\right]^T$ είναι το διάνυσμα δεδομένων, $\boldsymbol{E}=\left[e(r_1),...,e(r_L)\right]$ είναι ένας πίνακας με στήλες τα N -διάστατα διανύσματα κατεύθυνσης της μορφής $e(r_k)=\left[\exp\left(-j\frac{4\pi}{c}f_1 r_k\right),...,\exp\left(-j\frac{4\pi}{c}f_N r_k\right)\right]^T$, $\boldsymbol{a}=\left[a_1,...,a_L\right]^T$ είναι το διάνυσμα εντάσεων σκέδασης των L σημειακών σκεδαστών του στόχου, οι

οποίοι βρίσκονται σε αποστάσεις $r_1, r_2, \ldots, r_L$ από το ραντάρ, και $\boldsymbol{n} = [n_1, \ldots, n_N]^T$ είναι το διάνυσμα θορύβου.

Το πρώτο βήμα του αλγορίθμου MUSIC περιλαμβάνει τον υπολογισμό του πίνακα συσχέτισης του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος ραντάρ $\boldsymbol{y}$. Ο πίνακας συσχέτισης δεδομένων ορίζεται ως

$$R_{yy} = E[\boldsymbol{y}\,\boldsymbol{y}^H] \tag{2.23}$$

Αξίζει να σημειώσουμε ότι συνήθως ένα στιγμιότυπο δεδομένων είναι διαθέσιμο στις εφαρμογές ραντάρ, και επομένως ο συνολικός μέσος όρος μπορεί να απαλοιφεί από την εξίσωση (2.23). Η ιδιοανάλυση του πίνακα συσχέτισης είναι το δεύτερο βήμα του αλγορίθμου, οδηγώντας σε N ιδιοδιανύσματα, L εκ των οποίων αντιστοιχούν στις L μέγιστες ιδιοτιμές και απαρτίζουν το υποχώρο σήματος. Τα $N-L$ ιδιοδιανύσματα, που αντιστοιχούν στις $N-L$ ελάχιστες ιδιοτιμές του πίνακα συσχέτισης, απαρτίζουν τον υποχώρο θορύβου. Ο αλγόριθμος MUSIC εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι το διάνυσμα κατεύθυνσης $e(r)$ είναι ορθογώνιο ως προς τα ιδιοδιανύσματα θορύβου u_i ($i = L+1, \ldots, N$), για κάθε θέση κέντρου σκέδασης $r = r_k$. Η παραγωγή του ψευδο-φάσματος MUSIC είναι το τελικό βήμα του αλγορίθμου, μέσω του οποίου προκύπτει το εκτιμώμενο προφίλ απόστασης, και περιγράφεται από τον τύπο

$$P_{MUSIC}(r) = \frac{1}{\sum_{i=L+1}^{N} \left| u_i^H e(r) \right|^2} \tag{2.24}$$

Η παραπάνω μαθηματική περιγραφή αντιστοιχεί στη φασματική εκδοχή του αλγορίθμου MUSIC, η οποία απεικονίζει την ανακλαστικότητα του υπό εξέταση στόχου σε συνάρτηση με την απόσταση του κάθε σημειακού σκεδαστή από το ραντάρ. Μία δεύτερη εκδοχή του αλγορίθμου MUSIC είναι εκείνη της εκτίμησης των θέσεων των σημειακών σκεδαστών του υπό εξέταση στόχου ραντάρ. Το τελικό βήμα του αλγορίθμου διαφοροποιείται για την

εκτίμηση των θέσεων των σκεδαστών. Ορίζοντας ως U τον πίνακα των ιδιοδιανυσμάτων θορύβου, διαστάσεων $N \times (N-L)$, καταλήγουμε στην ακόλουθη εξίσωση, οι ρίζες της οποίας αντιστοιχούν στις εκτιμώμενες θέσεις των σημειακών σκεδαστών του στόχου

$$e^H(r) \cdot U U^H \cdot e(r) = 0 \tag{2.25}$$

Στις αριθμητικές μας προσομοιώσεις, η δεύτερη εκδοχή του αλγορίθμου MUSIC (εκδοχή «ριζών») συγκρίνεται με τη μέθοδο ESPRIT, που παρουσιάζουμε στη συνέχεια, για το πρόβλημα της εκτίμησης των θέσεων των κέντρων σκέδασης.

Επισημαίνουμε σε αυτό το σημείο ότι ο αλγόριθμος MUSIC εκφυλίζεται στη *μέθοδο Pisarenko* [10] αν θέσουμε στην προηγειθείσα ανάλυση $N = L+1$. Αυτή η μέθοδος φασματικής εκτίμησης αντιστοιχεί σε ένα ιδιοδιάνυσμα θορύβου u και, όπως είναι αναμενόμενο, επιτυγχάνει μικρότερη ακρίβεια από τον αλγόριθμο MUSIC, ιδίως για θορυβώδη σήματα ραντάρ. Η μέθοδος Pisarenko προτιμάται σε εφαρμογές εκτίμησης συχνότητας και διαχωρισμού αρμονικών, κυρίως λόγω του μικρού υπολογιστικού της κόστους.

2.2.3.2 Μέθοδος ESPRIT

Μολονότι, όπως τονίζεται στις αναφορές [4, 11, 12], οι διάφορες μέθοδοι φασματικής εκτίμησης υψηλής ανάλυσης παρουσιάζουν παρόμοια ακριβείς και συνεπείς εκτιμήσεις στην περίπτωση φασματικών γραμμών [6], υπάρχει μία μέθοδος με συγκεκριμμένα πλεονεκτήματα έναντι των υπολοίπων. Αυτή είναι η μέθοδος ESPRIT [13] και υπερέχει από τις υπόλοιπες μέθοδους υποχώρου, αφού δεν παρουσιάζει το πρόβλημα της διάκρισης μεταξύ των ριζών $r = r_k$ των διανυσμάτων κατεύθυνσης σε εκείνες που αντιστοιχούν στον υποχώρο σήματος και σε εκείνες που αντιστοιχούν στον υποχώρο θορύβου. Για

[6] Με τον όρο φασματικές γραμμές χαρακτηρίζουμε το φάσμα ενός σήματος που συνίσταται από ένα πεπερασμένο πλήθος διακριτών συχνοτήτων (γραμμές στο πεδίο της συχνότητας).

παράδειγμα, ο αλγόριθμος MUSIC εκτιμάει τις συχνότητες των φασματικών γραμμών του υπό εξέταση σήματος μέσω ενός πολυωνύμου με τάξη μεγαλύτερη από το πλήθος L των κέντρων σκέδασης του στόχου ραντάρ. Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα έχει μάλιστα προταθεί ο *τροποποιημένος αλγόριθμος MUSIC* [14], του οποίου η απόδοση για εφαρμογές απεικόνισης ISAR αποτελεί αντικείμενο μελλοντικής έρευνας.

Η μαθηματική περιγραφή της μεθόδου ESPRIT, για την εύρεση των θέσεων των κέντρων σκέδασης ενός στόχου ραντάρ, δίνεται συνοπτικά στις επόμενες παραγράφους με βάση την αναφορά [4]. Αρχικά, ορίζονται δύο πίνακες E_1 και E_2 οι οποίοι σχετίζονται με έναν μετασχηματισμό περιστροφής, όπως φαίνεται στην εξίσωση (2.26)

$$\begin{aligned} E_1 &= \left[I_{N-1} \; 0 \right] E \\ E_2 &= \left[0 \; I_{N-1} \right] E \end{aligned} \tag{2.26}$$

$$\begin{aligned} E_2 &= E_1 D \\ D &= \begin{bmatrix} \exp\left(j \dfrac{4\pi}{c} \Delta f \, r_1 \right) & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \exp\left(j \dfrac{4\pi}{c} \Delta f \, r_L \right) \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{2.27}$$

όπου E είναι ο πίνακας των διανυσμάτων κατεύθυνσης, D είναι ο μαναδιαίος πίνακας περιστροφής, και Δf είναι το επιλεγμένο συχνοτικό βήμα της κυματομορφής βηματικής συχνότητας.

Επιπλέον, με παρόμοιο τρόπο με την εξίσωση (2.26) ορίζονται δύο άλλοι πίνακες, με βάση τον πίνακα των ιδιοδιανυσμάτων του υποχώρου σήματος S

$$\begin{aligned} S_1 &= \left[I_{N-1} \; 0 \right] S \\ S_2 &= \left[0 \; I_{N-1} \right] S \end{aligned} \tag{2.28}$$

Για τους δύο αυτούς πίνακες ισχύει η εξίσωση-κλειδί της μεθόδου

$$S_2 = S_1 \phi$$
$$\phi = C^{-1} D C \tag{2.29}$$

με άμεση συνεπαγωγή οι πίνακες ϕ και D να έχουν τις ίδιες ιδιοτιμές. Ο πίνακας C περιγράφεται μέσω μίας πολύπλοκης μαθηματικής έκφρασης (με τους πίνακες E και S), της οποίας οι λεπτομέρειες παραλείπονται από την παρούσα ανάλυση. Ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης παραπέμπεται στο τέταρτο κεφάλαιο της αναφοράς [4] για μία πιο λεπτομερή μαθηματική ανάλυση.

Επομένως, αρκεί να εκτιμηθεί ο πίνακας $\varphi = \left(S_1^H S_1\right)^{-1} S_1^H S_2$, και κατόπιν, από την ιδιοανάλυσή του προκύπτουν οι θέσεις των κέντρων σκέδασης του υπό εξέταση στόχου, οι οποίες αντιστοιχούν στις γωνίες των L μιγαδικών ιδιοτιμών του πίνακα φ.

Όσον αφορά τη στατιστική επίδοση, η μέθοδος ESPRIT είναι λίγο πιο ακριβής από τον κλασσικό και τον τροποποιημένο αλγόριθμο MUSIC [4]. Το υπολογιστικό της κόστος είναι παρόμοιο με εκείνο του αλγορίθμου MUSIC, και η καλύτερη της επίδοση σε προβλήματα εκτίμησης συχνότητας (όπως άλλωστε είναι και το πρόβλημα της εκτίμησης των θέσεων των σημειακών σκεδαστών ενός στόχου) καθιστά τη μέθοδο ESPRIT την πρώτη επιλογή μεταξύ των μονοδιάστατων παραμετρικών μεθόδων φασματικής εκτίμησης που παρουσιάσαμε στο κεφάλαιο αυτό.

2.2.4 Αριθμητικές προσομοιώσεις

2.2.4.1 Δημιουργία μονοδιάστατων συνθετικών δεδομένων ραντάρ

Είναι ευρέως αποδεκτό ότι, στο όριο των υψηλών συχνοτήτων, ένας στόχος ραντάρ μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σύνολο από πεπερασμένα σε πλήθος κέντρα σκέδασης και από πεπερασμένες αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους. Το συμφασικό σκεδαζόμενο σήμα από έναν τέτοιο στόχο ραντάρ αναπαρίσταται ως το μιγαδικό άθροισμα των σκεδαζόμενων σημάτων από κάθε κέντρο σκέδασης. Όπως επισημαίνεται στην αναφορά [1], η υπόθεση της μη διασπαρμένης φύσης των διακριτών κέντρων σκέδασης ισχύει για τους περισσότερους στόχους ραντάρ στο όριο των υψηλών συχνοτήτων, εάν το μετρούμενο εύρος συχνοτήτων είναι περιορισμένο και ο υπό εξέταση γωνιακός τομέας είναι σχετικά μικρός.

Ακολουθώντας την ανάλυση της αναφοράς [5], προσομοιώνουμε μονοδιάστατα δεδομένα ραντάρ (δηλαδή υπάρχει εξάρτηση από μία μόνο μεταβλητή), ώστε να συγκρίνουμε τις προαναφερθείσες μονοδιάστατες μεθόδους φασματικής εκτίμησης ως προς την επιτυγχανόμενη ανάλυση απόστασης. Σύμφωνα με την αναφορά αυτή, η μετρούμενη κάθετη διατομή ραντάρ για υψηλές τιμές της συχνότητας f_i μπορεί να θεωρηθεί ως ένα άθροισμα αποσβεννόμενων εκθετικών όρων της μορφής

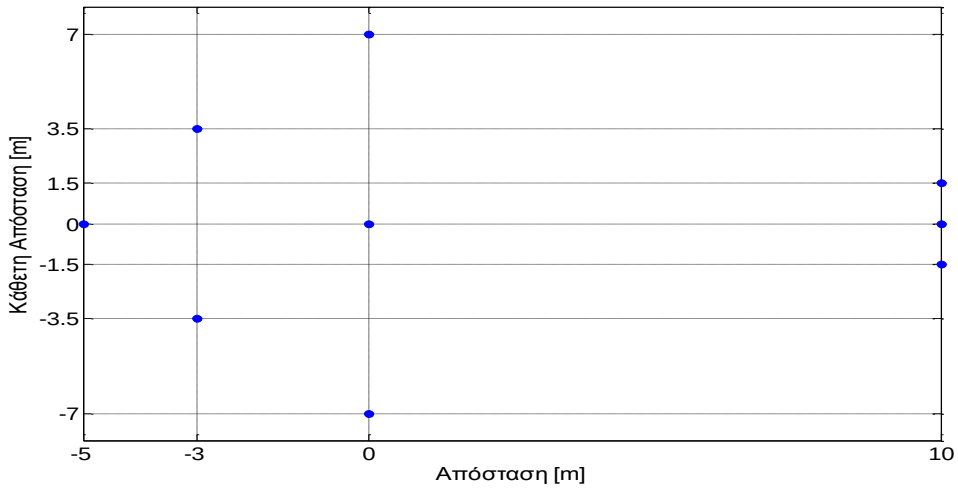
$$y_i = \sum_{k=1}^{L} a_k \exp\left(-j\frac{4\pi}{c} f_i r_k\right) + n_i \,, \quad i = 1, 2, ..., N \tag{2.30}$$

όπου r_k είναι η θέση του k-οστού κέντρου σκέδασης, a_k είναι η αντίστοιχη ένταση σκέδασης, L είναι ο αριθμός των κέντρων σκέδασης του στόχου, N είναι ο αριθμός των συχνοτήτων μέτρησης (f_i), και n_i είναι ο λευκός θόρυβος μέτρησης, ενώ ως c συμβολίζουμε την ταχύτητα του φωτός.

2.2.4.2 Αριθμητικά αποτελέσματα

Τα αριθμητικά αποτελέσματα από την προσομοίωση των μονοδιάστατων παραμετρικών μεθόδων φασματικής ανάλυσης που παρουσιάζουμε παρακάτω διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία αφορά τη δημιουργία των προφίλ απόστασης (πρόβλημα απεικόνισης), ενώ η δεύτερη κατηγορία σχετίζεται με την εκτίμηση των θέσεων των κέντρων σκέδασης (πρόβλημα εκτίμησης παραμέτρου). Για κάθε κατηγορία αποτελεσμάτων, εξετάζουμε δύο σενάρια προσομοίωσης. Για το πρώτο σενάριο οι θέσεις των σημειακών σκεδαστών του στόχου είναι καλά διαχωρισμένες, ενώ το δεύτερο σενάριο περιλαμβάνει δύο πολύ κοντινές θέσεις σκεδαστών.

Ο προσομοιωμένος στόχος ραντάρ είναι ένα απλό μοντέλο ενός αεροσκάφους με εννέα κέντρα σκέδασης, που απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα. Η μέγιστη διάσταση στόχου είναι 15m και ο στόχος είναι αρχικά με τη μύτη του προς το ραντάρ. Η θέση του ραντάρ στο xy-επίπεδο είναι (0m, 0m) και το κέντρο περιστροφής του στόχου βρίσκεται στη θέση (4530m, 0m). Για το πρώτο σενάριο προσομοίωσης, οι θέσεις των εννέα κέντρων σκέδασης είναι (4525m, 0m), (4527m, 3.5m), (4527m, -3.5m), (4530m, 0m), (4530m, 7m), (4530m, -7m), (4540m, 0m), (4540m, 1.5m), και (4540m, -1.5m). Οι xy-συντεταγμένες αναφέρονται ως προς το κέντρο περιστροφής του στόχου.



Σχήμα 2-1. Απλό μοντέλο αεροσκάφους ως προσομοιωμένος στόχος ραντάρ

Λαμβάνοντας υπόψη τις επιλεγμένες παραμέτρους για την κυματομορφή βηματικής συχνότητας (συχνοτικό βήμα Δf ίσο με 5MHz, και συχνότητα επανάληψης παλμών PRF ίση με 10KHz), το υπολογιζόμενο παράθυρο αναμφιβόλου αποστάσεως είναι 30m και η αναμφίβολη μέγιστη απόσταση ανίχνευσης υπολογίζεται σε 15Km. Κατά συνέπεια, όταν απεικονίζουμε τα προφίλ απόστασης του παραπάνω στόχου, αναμένουμε να αναγνωρίσουμε κέντρα σκέδασης στις θέσεις απόστασης των 0m (σκεδαστές με τετμημένη 4530m), 10m (τετμημένη 4540m), 25m (τετμημένη 4525m) και 27m (τετμημένη 4527m). Στα αποτελέσματα που παρουσιάζουμε στη συνέχεια αναδιπλώνουμε τα προκύπτοντα προφίλ απόστασης για λόγους ευκολίας στη σύγκρισή τους με το προσομοιωμένο μοντέλο του Σχήματος 2-1. Στις αριθμητικές μας προσομοιώσεις, επιλέγουμε αρχική συχνότητα φέροντος σήματος ίση με 16.7GHz, ώστε να μιμηθούμε το εύρος συχνοτήτων του ραντάρ απεικόνισης του συστήματος TIRA [7] [15].

Όσον αφορά την επεξεργασία του επιστρέφοντος σήματος μέσω του μετασχηματισμού Fourier για απεικόνιση ISAR, είναι ευρέως γνωστό ότι οι αναλύσεις απόστασης και κάθετης απόστασης εξαρτώνται από το εύρος συχνοτήτων και τη γωνία ολοκλήρωσης (αντίστροφο συνθετικό άνοιγμα) του ραντάρ αντιστοίχως. Η κυματομορφή βηματικής συχνότητας επιλέγεται ώστε να αυξηθεί το εύρος συχνοτήτων και να βελτιωθεί η ανάλυση απόστασης των παραγόμενων εικόνων ραντάρ που βασίζονται στο μετασχηματισμό FFT. Στις αριθμητικές μας προσομοιώσεις, δεν εφαρμόζουμε φιλτράρισμα του σήματος ραντάρ μέσω κάποιας συνάρτησης «παραθύρου» [8] πριν από την εφαρμογή του μετασχηματισμού FFT, καθώς υπάρχει πάντα μία σχέση ανταλλαγής μεταξύ της επιτυγχανόμενης ανάλυσης και του ύψους των πλευρικών λοβών.

---

[7] Το ακρωνύμιο TIRA είναι συντογραφία της αγγλικής φράσης “Tracking and Imaging Radar”. Το σύστημα TIRA είναι ένα σύνθετο σύστημα ραντάρ που εντοπίζει και απεικονίζει εναέριους στόχους στο διάστημα και στην ατμόσφαιρα.

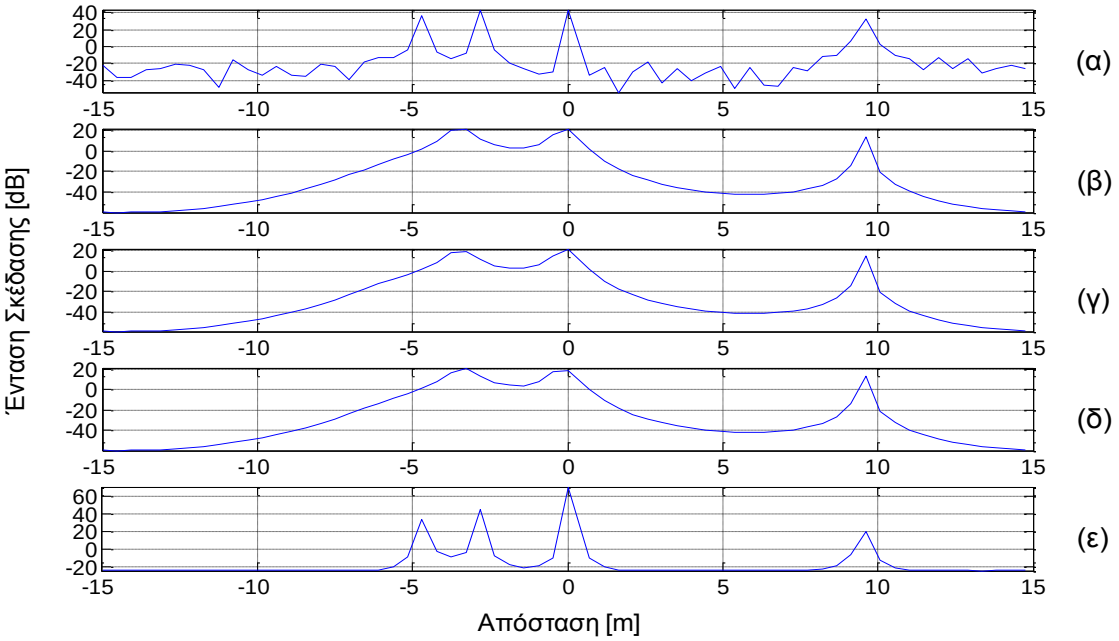
[8] Οι συναρτήσεις «παραθύρου» Hanning και Hamming μπορούν να χαμηλώσουν ικανοποιητικά τους πλευρικούς λοβούς [16].

Τα επόμενα έξι σχήματα (2-2 εώς 2-7) απεικονίζουν τα προφίλ απόστασης που προκύπτουν από την εφαρμογή του μετασχηματισμού FFT [9] και των παραμετρικών μεθόδων συνδιακύμανσης, τροποποιημένης συνδιακύμανσης, Burg, και MUSIC, για σηματοθορυβικούς λόγους (*SNR*) ίσους με 25dB και 10dB αντίστοιχα. Επιπλέον, για κάθε σηματοθορυβικό λόγο, εξετάζουμε διάφορες τιμές για την τάξη της κάθε τεχνικής φασματικής εκτίμησης [10]. Η κυματομορφή βηματικής συχνότητας αποτελείται από 64 παλμούς, με συνολικό εύρος συχνοτήτων 320MHz.

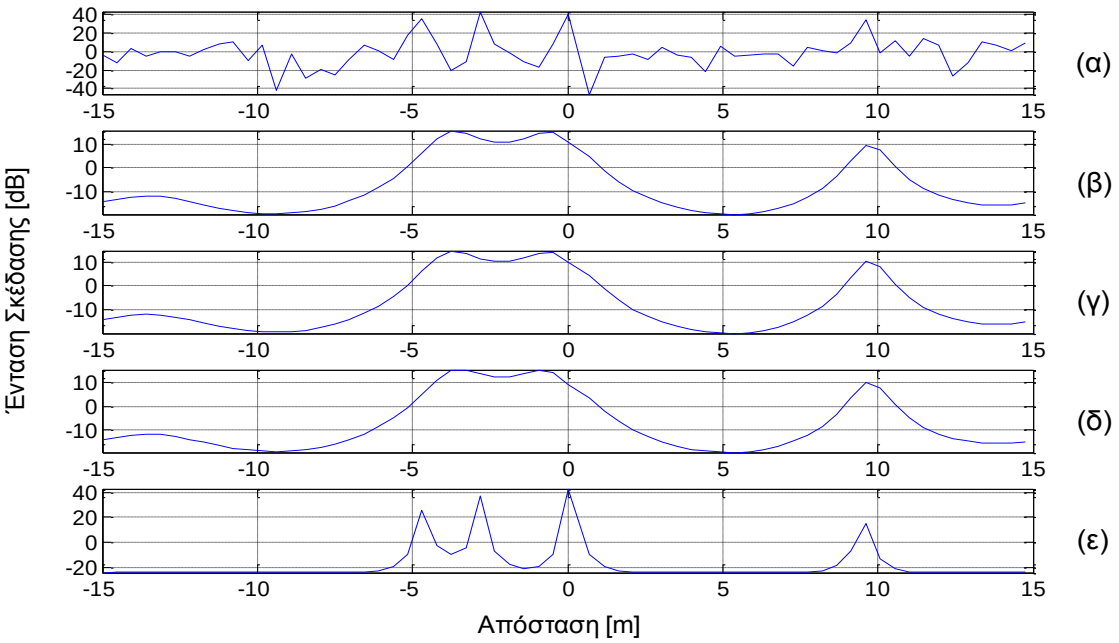
Σημειώνουμε ότι οι εκτιμήσεις έντασης σκέδασης των προφίλ απόστασης που προκύπτουν από την εφαρμογή του αλγορίθμου MUSIC δεν πρέπει να συγκρίνονται αυστηρά με αυτές των υπολοίπων φασματικών εκτιμητών, αφού προέρχονται από το ψευδο-φάσμα MUSIC.

[9] Χρησιμοποιούμε εδώ το μετασχηματισμό FFT αντί του IFFT επειδή μας παρέχει τη δυνατότητα άμεσης σύγκρισης με τις παραμετρικές τεχνικές φασματικής ανάλυσης. Η μαθηματική σχέση που συνδέει τους δύο μετασχηματισμούς δίνεται στο Παράρτημα 1.

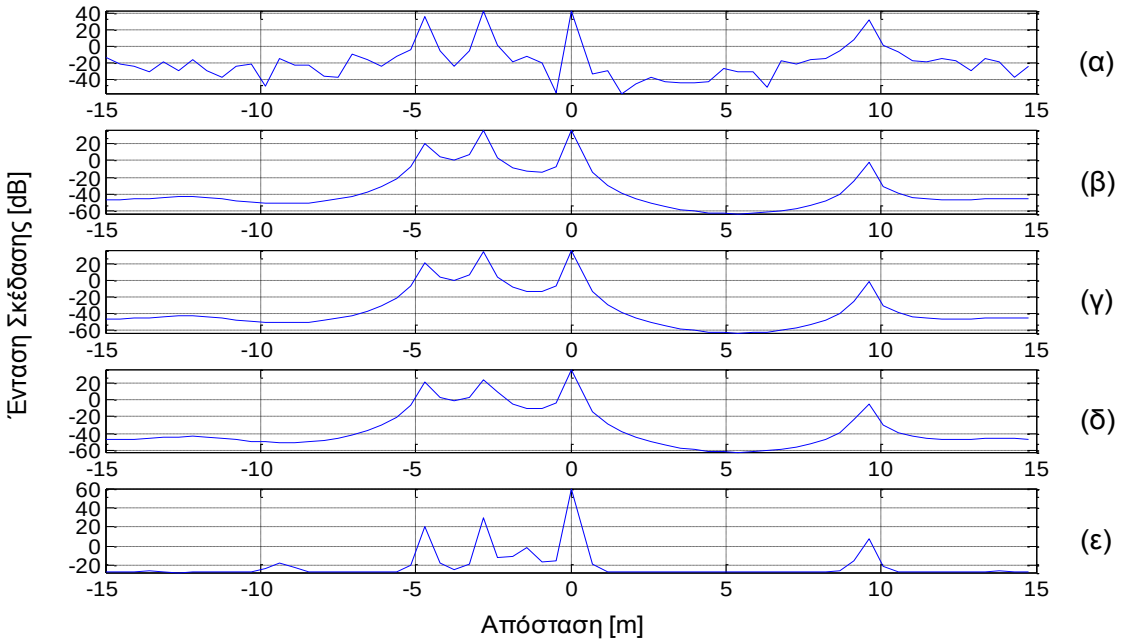
[10] Για τις αυτο-αναδρομικές μεθόδους, ως τάξη ορίζουμε την τάξη του αυτο-αναδρομικού μοντέλου n. Για τη μέθοδο Burg, η τάξη συμβολίζεται ως p, ενώ για τον αλγόριθμο MUSIC η τάξη αντιστοιχεί στον αριθμό των σημειακών σκεδαστών L.



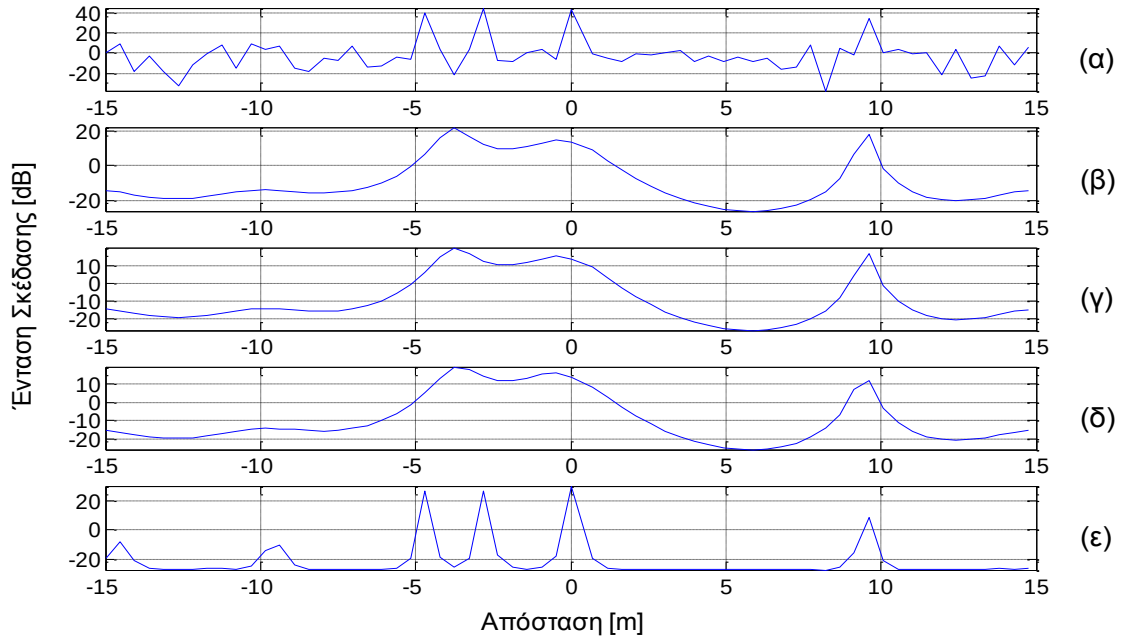
Σχήμα 2-2. Προφίλ απόστασης, για την περίπτωση καλά διαχωρισμένων θέσεων, για *SNR* = 25dB και 4η τάξη: (α) FFT, (β) μέθοδος συνδιακύμανσης, (γ) τροποποιημένη μέθοδος συνδιακύμανσης, (δ) μέθοδος Burg, (ε) αλγόριθμος MUSIC.



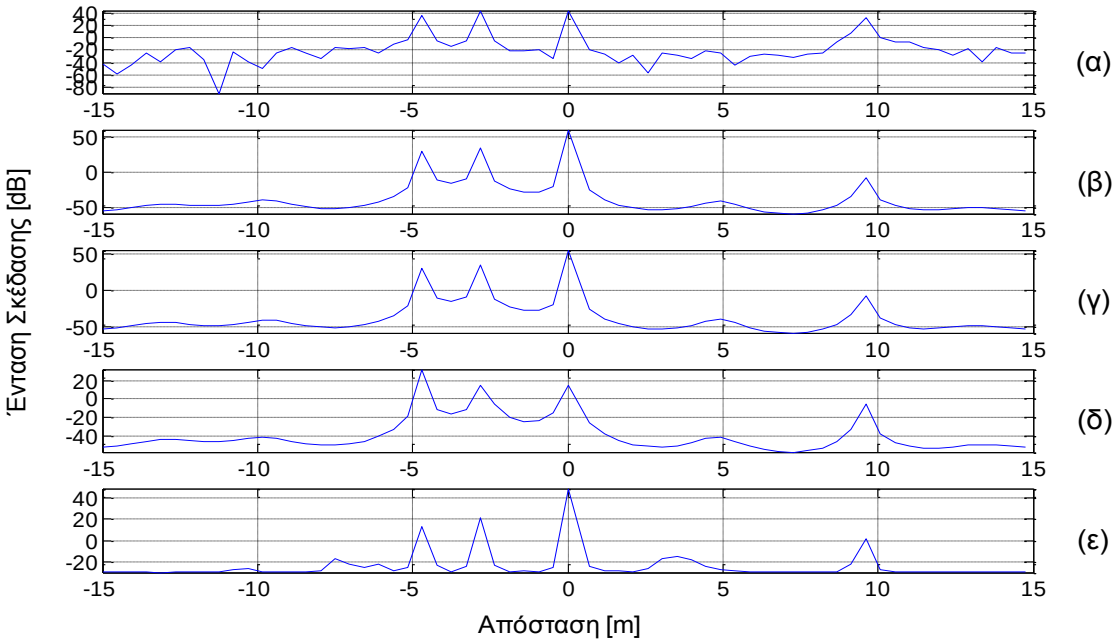
Σχήμα 2-3. Προφίλ απόστασης, για την περίπτωση καλά διαχωρισμένων θέσεων, για *SNR* = 10dB και 4η τάξη: (α) FFT, (β) μέθοδος συνδιακύμανσης, (γ) τροποποιημένη μέθοδος συνδιακύμανσης, (δ) μέθοδος Burg, (ε) αλγόριθμος MUSIC.



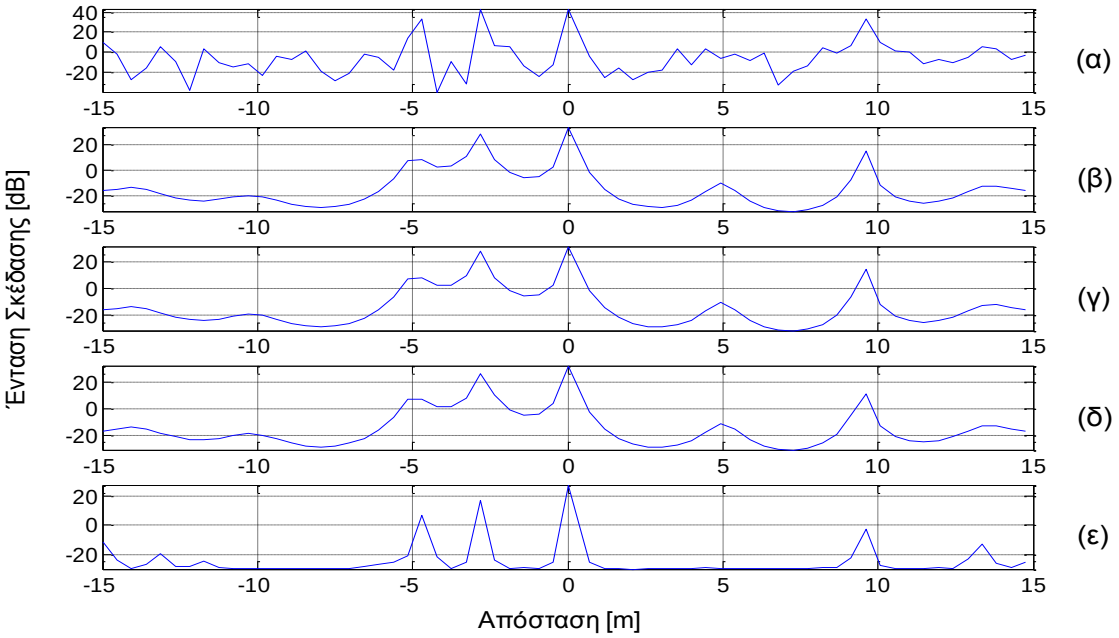
Σχήμα 2-4. Προφίλ απόστασης, για την περίπτωση καλά διαχωρισμένων θέσεων, για *SNR* = 25dB και 6η τάξη: (α) FFT, (β) μέθοδος συνδιακύμανσης, (γ) τροποποιημένη μέθοδος συνδιακύμανσης, (δ) μέθοδος Burg, (ε) αλγόριθμος MUSIC.



Σχήμα 2-5. Προφίλ απόστασης, για την περίπτωση καλά διαχωρισμένων θέσεων, για *SNR* = 10dB και 6η τάξη: (α) FFT, (β) μέθοδος συνδιακύμανσης, (γ) τροποποιημένη μέθοδος συνδιακύμανσης, (δ) μέθοδος Burg, (ε) αλγόριθμος MUSIC.



Σχήμα 2-6. Προφίλ απόστασης, για την περίπτωση καλά διαχωρισμένων θέσεων, για *SNR* = 25dB και 8η τάξη: (α) FFT, (β) μέθοδος συνδιακύμανσης, (γ) τροποποιημένη μέθοδος συνδιακύμανσης, (δ) μέθοδος Burg, (ε) αλγόριθμος MUSIC.

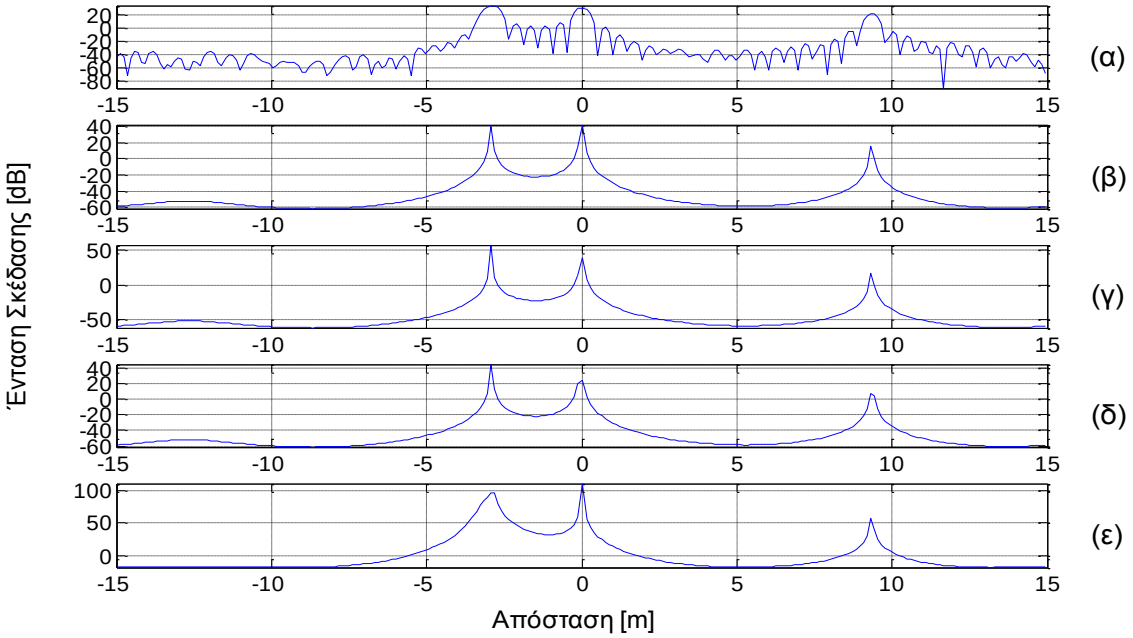


Σχήμα 2-7. Προφίλ απόστασης, για την περίπτωση καλά διαχωρισμένων θέσεων, για *SNR* = 10dB και 8η τάξη: (α) FFT, (β) μέθοδος συνδιακύμανσης, (γ) τροποποιημένη μέθοδος συνδιακύμανσης, (δ) μέθοδος Burg, (ε) αλγόριθμος MUSIC.

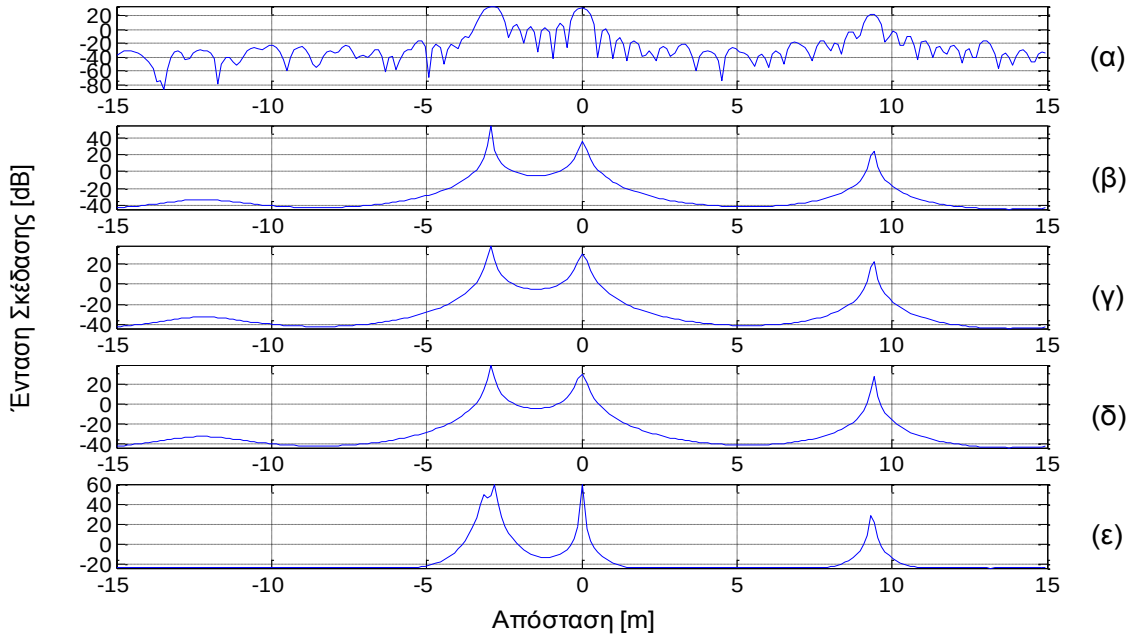
Όσον αφορά την πρώτη κατηγορία αποτελεσμάτων, εξετάζουμε επιπλέον και την περίπτωση ύπαρξης δύο πολύ κοντινών θέσεων σημειακών σκεδαστών. Συγκεκριμμένα, η απόσταση μεταξύ της μύτης του προσομοιωμένου στόχου του Σχήματος 2-1 και των δύο πιο κοντινών σε αυτή σημειακών σκεδαστών (σε απόσταση –3m από το κέντρο περιστροφής του στόχου) τίθεται μικρότερη από την ανάλυση απόστασης. Για N = 64 και Δf = 5MHz, η θεωρητική τιμή της ανάλυσης απόστασης είναι ΔR_s = 0.46875m, ενώ για N = 128, έχουμε ΔR_s = 0.234375m. Έτσι, για το νέο σενάριο προσομοίωσης, η μύτη του στόχου τοποθετείται σε απόσταση –(3 + 0.9 $\cdot \Delta R_s$)m.

Στο σημείο αυτό, πρέπει να επισημάνουμε ότι οι μέθοδοι υποχώρου συνήθως λαμβάνουν υπόψη τους μία παράμετρο m, η οποία καθορίζει και τη διάσταση του τετραγωνικού πίνακα συσχέτισης δεδομένων. Από την ιδιοανάλυση αυτού του πίνακα προκύπτουν τα ιδιοδιανύσματα του υποχώρου θορύβου (που χρησιμοποιούνται στον αλγόριθμο MUSIC) και του υποχώρου σήματος (που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο ESPRIT). Στις μαθηματικές εξισώσεις που περιγράφουν τις μεθόδους MUSIC και ESPRIT, η παράμετρος m αντικαθιστά τον αριθμό δειγμάτων N του μονοδιάστατου σήματος ραντάρ. Για παράδειγμα, οι υπολογισμοί του αλγορίθμου MUSIC βασίζονται στα $m-L$ ιδιοδιανύσματα θορύβου. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της παραμέτρου m, τόσο καλύτερη επίδοση αναμένουμε για τις δύο προαναφερθείσες μεθόδους υποχώρου. Η κατάλληλη τιμή δεν πρέπει να είναι ούτε πολύ μικρή (συνήθως η διάσταση m επιλέγεται ίση ή μεγαλύτερη από το διπλάσιο της τάξης της μεθόδου), ούτε συγκρίσιμη με τον αριθμό των δειγμάτων του υπό εξέταση σήματος. Η επιλεγόμενη τιμή για το πρώτο σενάριο (Σχήματα 2-2 εώς 2-7) είναι m = 16, τετραπλάσια της τάξεως του αλγορίθμου MUSIC.

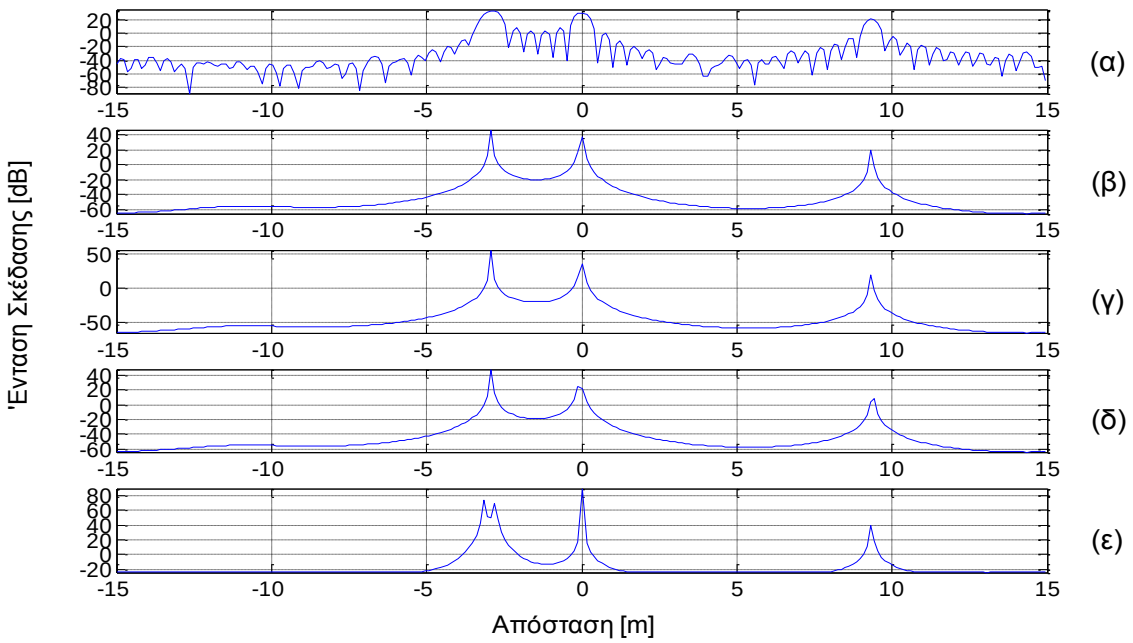
Στα επόμενα πέντε σχήματα (2-8 εώς 2-12) παρουσιάζουμε τα παραγόμενα μέσω FFT και παραμετρικών μεθόδων προφίλ απόστασης, για το δεύτερο σενάριο προσομοίωσης. Εξετάζουμε διάφορες τιμές της παραμέτρου m και του σηματοθορυβικού λόγου *SNR*, για N = 64. Παρατηρούμε ότι οι δύο πολύ κοντινές κορυφές του προφίλ απόστασης διακρίνονται καλύτερα αυξάνοντας την τιμή της παραμέτρου m, για τον ίδιο σηματοθορυβικό λόγο, ενώ για επαρκώς μεγάλες τιμές της παραμέτρου m ο απαιτούμενος σηματοθορυβικός λόγος μειώνεται.



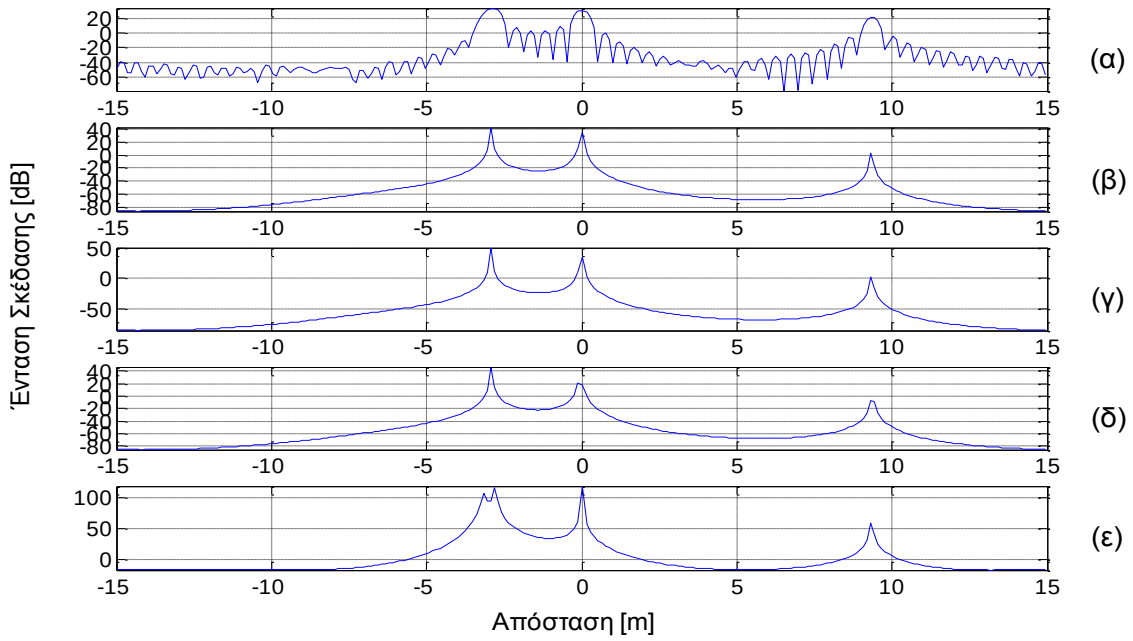
Σχήμα 2-8. Προφίλ απόστασης, για την περίπτωση δύο πολύ κοντινών θέσεων, για *m* = 8, *SNR* = 30dB και 4η τάξη: (α) FFT, (β) μέθοδος συνδιακύμανσης, (γ) τροποποιημένη μέθοδος συνδιακύμανσης, (δ) μέθοδος Burg, (ε) αλγόριθμος MUSIC.



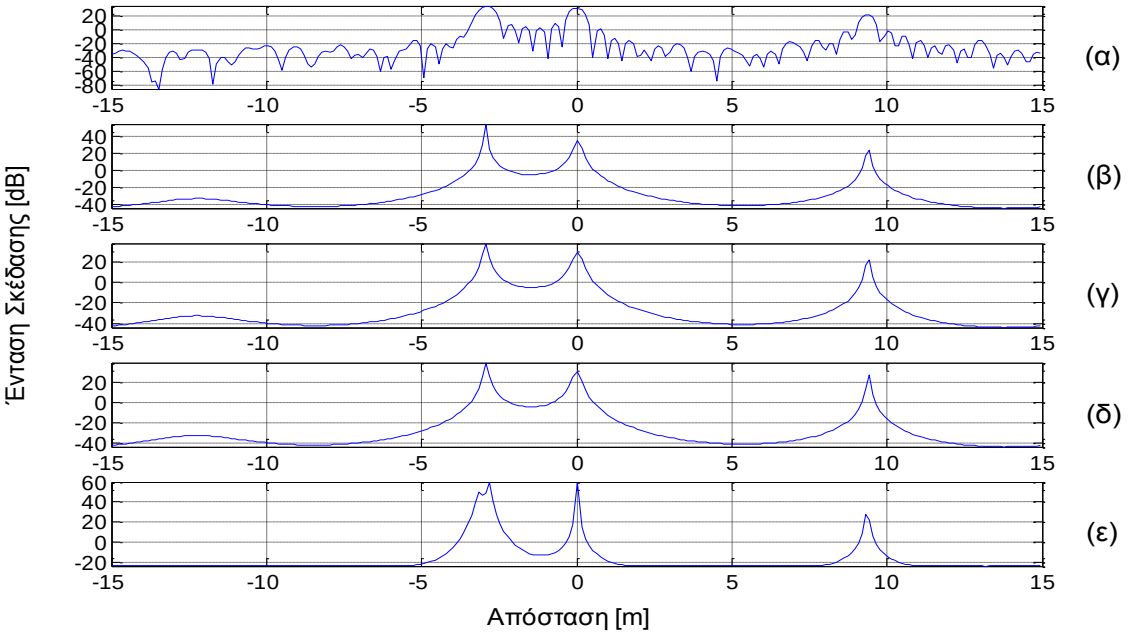
Σχήμα 2-9. Προφίλ απόστασης, για την περίπτωση δύο πολύ κοντινών θέσεων, για *m* = 12, *SNR* = 30dB και 4η τάξη: (α) FFT, (β) μέθοδος συνδιακύμανσης, (γ) τροποποιημένη μέθοδος συνδιακύμανσης, (δ) μέθοδος Burg, (ε) αλγόριθμος MUSIC.



Σχήμα 2-10. Προφίλ απόστασης, για την περίπτωση δύο πολύ κοντινών θέσεων, για *m* = 16, *SNR* = 30dB και 4η τάξη: (α) FFT, (β) μέθοδος συνδιακύμανσης, (γ) τροποποιημένη μέθοδος συνδιακύμανσης, (δ) μέθοδος Burg, (ε) αλγόριθμος MUSIC.



Σχήμα 2-11. Προφίλ απόστασης, για την περίπτωση δύο πολύ κοντινών θέσεων, για *m* = 8, *SNR* = 40dB και 4η τάξη: (α) FFT, (β) μέθοδος συνδιακύμανσης, (γ) τροποποιημένη μέθοδος συνδιακύμανσης, (δ) μέθοδος Burg, (ε) αλγόριθμος MUSIC.



Σχήμα 2-12. Προφίλ απόστασης, για την περίπτωση δύο πολύ κοντινών θέσεων, για *m* = 16, *SNR* = 20dB και 4η τάξη: (α) FFT, (β) μέθοδος συνδιακύμανσης, (γ) τροποποιημένη μέθοδος συνδιακύμανσης, (δ) μέθοδος Burg, (ε) αλγόριθμος MUSIC.

Αξίζει να τονίσουμε ότι τα προφίλ απόστασης που προκύπτουν μέσω του μετασχηματισμού FFT και των τριών αυτο-αναδρομικών μεθόδων βασίζονται στην εκτίμηση της πυκνότητας φασματικής ισχύος (αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο δεν πρέπει να συγκρίνουμε τις εκτιμήσεις έντασης σκέδασης μέσω των μεθόδων αυτών με εκείνες του ψευδο-φάσματος MUSIC). Για την περίπτωση καλά διαχωρισμένων θέσεων σκεδαστών, ο αριθμός των σημείων N_{FFT} του μετασχηματισμού FFT, που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της πυκνότητας φασματικής ισχύος, επιλέγεται ίσος με τον αριθμό των δειγμάτων N του υπό φασματική ανάλυση σήματος. Όμως, για την περίπτωση δύο πολύ κοντινών θέσεων σκεδαστών (απόσταση μικρότερη από ένα κελί απόστασης), παρατηρούμε μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων ότι ο ελάχιστος αναγκαίος αριθμός σημείων είναι $N_{FFT} = 4N$. Για αυτόν τον αριθμό σημείων, παρατηρούμε στα παραπάνω σχήματα ότι ο αλγόριθμος MUSIC μπορεί να διακρίνει με αρκετή ακρίβεια τις δύο πολύ κοντινές κορυφές του προφίλ απόστασης.

Όσον αφορά τη δεύτερη κατηγορία αποτελεσμάτων, προσομοιώνουμε τις μεθόδους MUSIC (εκδοχή «ριζών») και ESPRIT για την εκτίμηση των θέσεων των κέντρων σκέδασης του υπό εξέταση στόχου. Στους παρακάτω πίνακες παραθέτουμε τη μέση τιμή του RMS σφάλματος εκτίμησης απόστασης (ή θέσης σκεδαστών) από 200 Monte-Carlo επαναλήψεις, για τις δύο αυτές μεθόδους, σε συνάρτηση με το σηματοθορυβικό λόγο και την τιμή της διάστασης m. Εξετάζονται και τα δύο προαναφερθέντα σενάρια προσομοίωσης, ώστε να εξάγουμε χρήσιμα συγκριτικά συμπεράσματα. Τα επόμενα δύο γραφήματα απεικονίζουν τα αποτελέσματα των πινάκων για κάθε σενάριο προσομοίωσης, για m = {8, 20} και N = {64, 128}.

Πίνακας 2-1. Μέση τιμή του RMS σφάλματος εκτίμησης απόστασης σε συνάρτηση με το σηματοθορυβικό λόγο, για την περίπτωση καλά διαχωρισμένων θέσεων, με N = 64.

SNR **[dB]**	**Μέση τιμή του RMS σφάλματος εκτίμησης απόστασης [m]**					
	MUSIC m **= 5**	**ESPRIT** m **= 5**	**MUSIC** m **= 8**	**ESPRIT** m **= 8**	**MUSIC** m **= 20**	**ESPRIT** m **= 20**
30	0.03867318	0.03867318	0.00537807	0.00496282	0.00216685	0.00206996
25	0.11548807	0.11548807	0.01054157	0.00992013	0.00379266	0.00362419
20	0.37998667	0.37998667	0.02410731	0.02308344	0.00672077	0.00663017
15	1.20151127	1.20151127	0.06871639	0.06932769	0.01365013	0.01303572
10	2.51859124	2.51859124	0.36037389	0.29834691	0.02533227	0.02496370

Πίνακας 2-2. Μέση τιμή του RMS σφάλματος εκτίμησης απόστασης σε συνάρτηση με το σηματοθορυβικό λόγο, για την περίπτωση καλά διαχωρισμένων θέσεων, με N = 128.

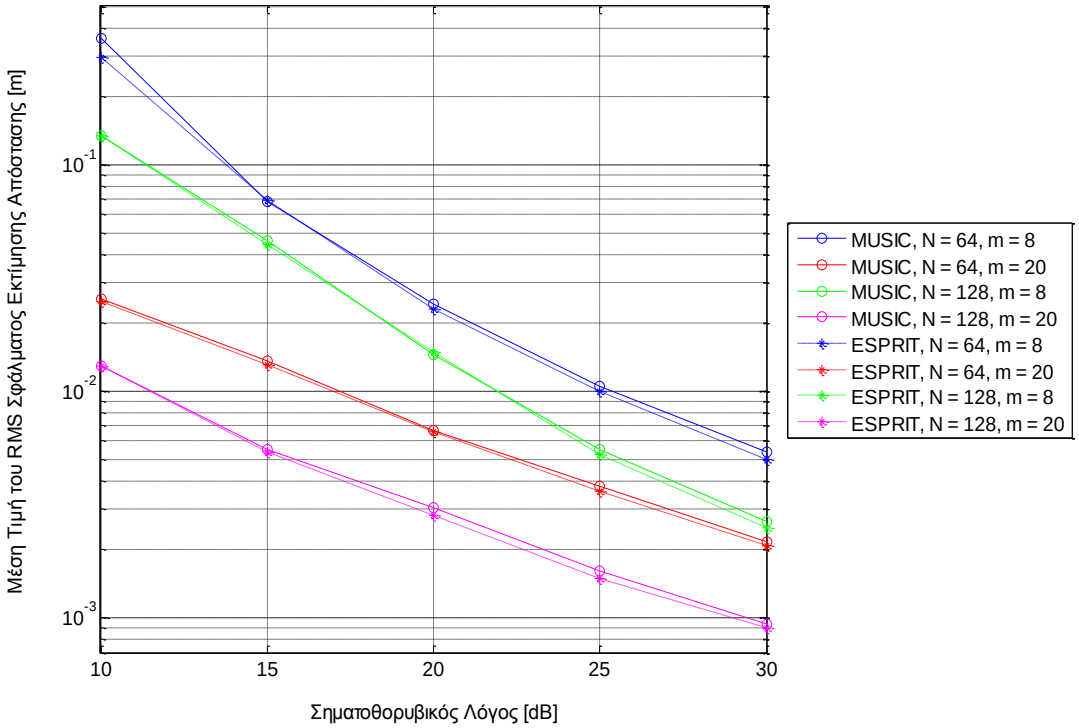
SNR **[dB]**	**Μέση τιμή του RMS σφάλματος εκτίμησης απόστασης [m]**					
	MUSIC m **= 5**	**ESPRIT** m **= 5**	**MUSIC** m **= 8**	**ESPRIT** m **= 8**	**MUSIC** m **= 20**	**ESPRIT** m **= 20**
30	0.02454429	0.02454429	0.00263446	0.00247391	0.00093437	0.00090016
25	0.07700025	0.07700025	0.00552559	0.00521413	0.00160376	0.00149148
20	0.23547334	0.23547334	0.01449969	0.01480196	0.00304606	0.00282628
15	0.78734604	0.78734604	0.04589356	0.04443575	0.00550105	0.00534378
10	2.27380898	2.27380898	0.13431084	0.13334625	0.01285263	0.01282974

Πίνακας 2-3. Μέση τιμή του RMS σφάλματος εκτίμησης απόστασης σε συνάρτηση με το σηματοθορυβικό λόγο, για την περίπτωση δύο πολύ κοντινών θέσεων, με N = 64.

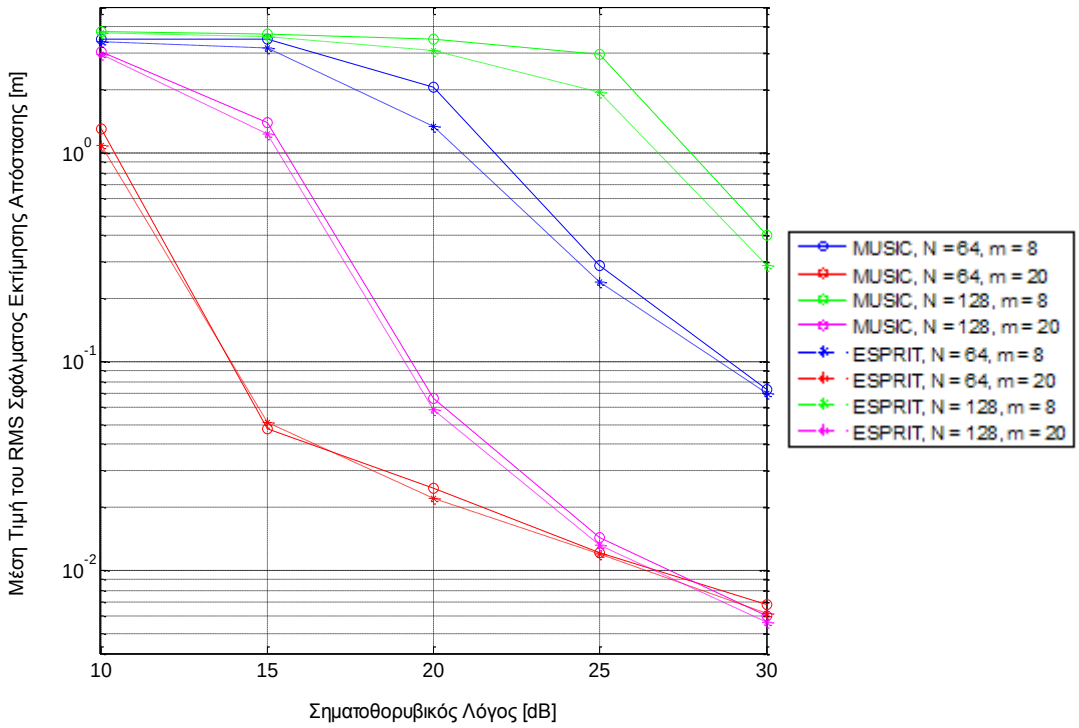
SNR **[dB]**	**Μέση τιμή του RMS σφάλματος εκτίμησης απόστασης [m]**					
	MUSIC m **= 5**	**ESPRIT** m **= 5**	**MUSIC** m **= 8**	**ESPRIT** m **= 8**	**MUSIC** m **= 20**	**ESPRIT** m **= 20**
30	1.38658351	1.38658351	0.07390774	0.07029835	0.00685388	0.00622602
25	2.87034365	2.87034365	0.28898291	0.23944858	0.01214181	0.01203963
20	3.42625260	3.42625260	2.04845969	1.34650895	0.02478619	0.02216451
15	3.57380455	3.57380455	3.50764621	3.19669559	0.04749477	0.05124007
10	3.84884226	3.84884226	3.51908268	3.41369341	1.30853119	1.08442752

Πίνακας 2-4. Μέση τιμή του RMS σφάλματος εκτίμησης απόστασης σε συνάρτηση με το σηματοθορυβικό λόγο, για την περίπτωση δύο πολύ κοντινών θέσεων, με N = 128.

SNR **[dB]**	**Μέση τιμή του RMS σφάλματος εκτίμησης απόστασης [m]**					
	MUSIC m **= 5**	**ESPRIT** m **= 5**	**MUSIC** m **= 8**	**ESPRIT** m **= 8**	**MUSIC** m **= 20**	**ESPRIT** m **= 20**
30	3.02079508	3.02079508	0.40050031	0.28970294	0.00600636	0.00561529
25	3.60114305	3.60114305	2.98333460	1.95134496	0.01425576	0.01318943
20	3.76798346	3.76798346	3.49290398	3.09713268	0.06648190	0.05832801
15	3.77346396	3.77346396	3.69215032	3.62150556	1.39710574	1.23095780
10	3.94811162	3.94811162	3.79270808	3.77372968	3.05144210	2.96336195



Σχήμα 2-13. Μέση τιμή του RMS σφάλματος εκτίμησης απόστασης σε συνάρτηση με το σηματοθορυβικό λόγο, για την περίπτωση καλά διαχωρισμένων θέσεων.



Σχήμα 2-14. Μέση τιμή του RMS σφάλματος εκτίμησης απόστασης σε συνάρτηση με το σηματοθορυβικό λόγο, για την περίπτωση δύο πολύ κοντινών θέσεων.

2.3 Διδιάστατες παραμετρικές μέθοδοι φασματικής ανάλυσης

Στα πλαίσια ενός διδιάστατου μοντέλου του επιστρέφοντος σήματος ISAR [1], το οποίο περιγράφεται μαθηματικά παρακάτω, αναπτύσσουμε στην ακόλουθη υποενότητα δύο συγκεκριμμένες διδιάστατες μεθόδους φασματικής εκτίμησης που έχουμε εφαρμόσει στο πρόβλημα της διδιάστατης απεικόνισης ISAR. Τα αριθμητικά αποτελέσματα από την εφαρμογή των δύο αυτών μεθόδων για τη δημιουργία εικόνων ISAR υψηλής ανάλυσης, μαζί με τη μαθηματική περιγραφή των διδιάστατων συνθετικών δεδομένων ραντάρ, παρατίθενται στη δεύτερη υποενότητα.

2.3.1 Μαθηματική περιγραφή

2.3.1.1 Διδιάστατη απευθείας αυτο-αναδρομική μέθοδος

Η διδιάστατη αυτο-αναδρομική φασματική εκτίμηση μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορους τρόπους, ξεκινώντας από την απλή αντιστροφή του πίνακα συσχέτισης δεδομένων (απευθείας μέθοδος) και καταλήγοντας σε επαναληπτικές τεχνικές, οι οποίες έχουν προταθεί προκειμένου να μειωθεί το υπολογιστικό κόστος [11]. Στις επόμενες παραγράφους, περιγράφουμε εν συντομία την απευθείας μέθοδο [6] που είναι η απλούστερη από τις υπάρχουσες λύσεις [17-19].

Αρχικά, το υπό εξέταση σήμα ραντάρ $x(n_1, n_2)$ μοντελοποιείται ως η έξοδος ενός διδιάστατου αυτο-αναδρομικού φίλτρου τάξεως (N_1, N_2), οδηγούμενο από λευκό γκαουσιανό θόρυβο $e(n_1, n_2)$ με διακύμανση ίση με σ^2 και μηδενική μέση τιμή. Το μαθηματικό αυτό μοντέλο γράφεται ως εξής

[11] Υπάρχει πάντα μία αντιστρόφως ανάλογη σχέση μεταξύ υπολογιστικού κόστους και αλγοριθμικής πολυπλοκότητας.

$$x(n_1,n_2) = -\sum_{k=0}^{N_1-1} \sum_{\substack{l=0 \\ \notin\{k=l=0\}}}^{N_2-1} a(k,l)\, x(n_1-k-1, n_2-l-1) + e(n_1,n_2) \qquad (2.30)$$

Για να καθοριστούν οι συντελεστές του διδιάστατου αυτο-αναδρομικού φίλτρου $a(k,l)$ από τα διαθέσιμα δεδομένα, ορίζουμε το φίλτρο πρόβλεψης σφάλματος, το οποίο προκύπτει από τη συνένωση των στηλών του πίνακα των συντελεστών του αυτο-αναδρομικού φίλτρου, ως εξής

$$\alpha = \left[1, a(0,1), ..., a(0,N_2-1), a(1,0), ..., a(1,N_2-1), a(2,0), ..., a(N_1-1,N_2-1)\right]^T \qquad (2.31)$$

Οι συντελεστές επιλέγονται ώστε να ελαχιστοποιείται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα πρόβλεψης, που ορίζεται ως

$$MSE = E\left[e^*(n_1,n_2)\, e(n_1,n_2)\right] = \alpha^H R_{xx}\, \alpha \qquad (2.32)$$

όπου ο πίνακας αυτο-συσχέτισης δεδομένων είναι $R_{xx} = E[\boldsymbol{x}^*\boldsymbol{x}^T]$ και $\boldsymbol{x} = \left[x(n_1,n_2), ..., x(n_1,n_2-N_2+1), x(n_1-1,n_2), ..., x(n_1-N_1+1,n_2-N_2+1)\right]^T$ είναι το διατεταγμένο κατά στήλες διάνυσμα δεδομένων.

Συνήθως τίθεται ο περιορισμός ότι οι συντελεστές του αυτο-αναδρομικού φίλτρου $a(k,l)$ ορίζονται για ένα τεταρτημόριο πεπερασμένων διαστάσεων, το οποίο μαθηματικά περιγράφεται ως $\{(k,l): 0 \le k \le N_1-1, 0 \le l \le N_2-1\}$, εξαιρώντας το σημείο $k = l = 0$. Ο περιορισμός αυτός σχετίζεται με την αιτιατότητα (causality) του υπό εξέταση σήματος. Πιο σύνθετες μαθηματικές θεωρίες επίλυσης του γενικού προβλήματος γραμμικής πρόβλεψης εκμεταλλεύονται και τα τέσσερα πιθανά τεταρτημόρια για την παραγωγή ακριβέστερων φασματικών περιεχομένων. Στις προσομοιώσεις που ακολουθούν, εξετάζουμε μόνο την απλή περίπτωση του πρώτου τεταρτημορίου, καθώς η υπόθεση αιτιατού σήματος είναι πιο συνεπής με το υπό φασματική ανάλυση σήμα ραντάρ.

Επιπρόσθετα, ορίζουμε ως $\varepsilon_N(i)$ ένα διάνυσμα με μήκος N, του οποίου το i-οστό στοιχείο είναι μονάδα και τα υπόλοιπα μηδενικά, και συμβολίζουμε ως $\omega = [\omega_1, \omega_2]^T$ το διάνυσμα των γωνιακών συχνοτήτων (μία συχνότητα για κάθε διάσταση της προκύπτουσας φασματικής εκτίμησης). Επίσης, ορίζεται ο πίνακας E ως

$$E = \left[\exp\left(-j\omega^T \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}\right), ..., \exp\left(-j\omega^T \begin{bmatrix} 0 \\ N_2 - 1 \end{bmatrix}\right), \exp\left(-j\omega^T \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}\right), ..., \exp\left(-j\omega^T \begin{bmatrix} N_1 - 1 \\ N_2 - 1 \end{bmatrix}\right) \right]^T \quad (2.33)$$

Με βάση τους παραπάνω ορισμούς, η διδιάστατη αυτο-αναδρομική εκτίμηση της πυκνότητας φασματικής ισχύος του σήματος ραντάρ δίνεται από τον τύπο

$$P_{AR}(\omega_1, \omega_2) = \frac{\sigma^2}{\left|E^T \alpha\right|^2} = \frac{\varepsilon_{N_1 N_2}(0)^T R_{xx}^{-1} \varepsilon_{N_1 N_2}(0)}{\left|E^T R_{xx}^{-1} \varepsilon_{N_1 N_2}(0)\right|^2} \quad (2.34)$$

Για να υπολογίσουμε το διδιάστατο αυτό φάσμα, εκτιμούμε τον πίνακα αυτο-συσχέτισης R_{xx} από τα συνθετικά δεδομένα ραντάρ, τον αντιστρέφουμε και υπολογίζουμε το μετασχηματισμό z της πρώτης στήλης του. Αυτή η μέθοδος αναφέρεται ως απευθείας μέθοδος [6]. Στην πράξη, για να μειώσουμε το υπολογιστικό κόστος της αντιστροφής ενός πολύ μεγάλου διδιάστατου πίνακα, προτιμούμε να υπολογίσουμε τις τιμές της διδιάστατης αυτο-συσχέτισης του υπό ανάλυση σήματος, σχηματίζοντας με αυτές έναν αρκετά μικρότερο πίνακα διαστάσεων $N_1 N_2 \times N_1 N_2$. Ο πίνακας αυτός πολλαπλασιαζόμενος με το διάνυσμα των αυτο-αναδρομικών συντελεστών α ισούται με ένα διάνυσμα του οποίου μόνο το πρώτο στοιχείο είναι μη μηδενικό και ίσο με σ^2. Πρόκειται για τη μαθηματική περιγραφή των διδιάστατων κανονικών εξισώσεων ή εξισώσεων Yule-Walker. Η λύση του προβλήματος αυτού είναι παρόμοια με αυτή του αντίστοιχου μονοδιάστατου προβλήματος (αντιστροφή πίνακα διαστάσεων $(N_1 N_2 - 1) \times (N_1 N_2 - 1)$). Έτσι, οδηγούμαστε στην εκτίμηση της διακύμανσης του θορύβου και των συντελεστών του διδιάστατου αυτο-αναδρομικού φίλτρου, και μέσω της εξίσωσης (2.34)

υπολογίζουμε το διδιάστατο φάσμα του σήματος ραντάρ, το οποίο αποτελεί μία μορφή απεικόνισης ISAR. Παρατηρούμε επίσης ότι η εξίσωση (2.34) είναι ουσιαστικά μία παραλλαγή του διδιάστατου μετασχηματισμού Fourier.

2.3.1.2 Διδιάστατος Αλγόριθμος MUSIC

Σε διανυσματικό συμβολισμό η εξίσωση που περιγράφει τα διδιάστατα συνθετικά δεδομένα ραντάρ είναι η εξής

$$\boldsymbol{x} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{s} + \boldsymbol{u} \tag{2.35}$$

όπου $\boldsymbol{x}=\left[x(0,0), x(1,0), ..., x(M-1,0), x(0,1), ..., x(M-1,N-1)\right]^T$ είναι το διατεταγμένο κατά στήλες διάνυσμα δεδομένων, $\boldsymbol{u}=\left[u(0,0), u(1,0), ..., u(M-1,0), u(0,1), ..., u(M-1,N-1)\right]^T$ είναι το διατεταγμένο κατά στήλες διάνυσμα θορύβου, και $\boldsymbol{s}=\left[s_1, ..., s_d\right]^T$ είναι το διάνυσμα εντάσεων σκέδασης για τα d κέντρα σκέδασης του υπό εξέταση στόχου.

Ο πίνακας $\boldsymbol{A}=\left[a(x_1, y_1), ..., a(x_d, y_d)\right]$ έχει ως στήλες τα d διανύσματα κατεύθυνσης. Το k-οστό διάνυσμα κατεύθυνσης περιλαμβάνει τους όρους φάσης του διδιάστατου μοντέλου του επιστρέφοντος σήματος ISAR για το k-οστό κέντρο σκέδασης με συντεταγμένες (x_k, y_k), και περιγράφεται μαθηματικά ως

$$\begin{aligned} a(x_k, y_k) = \Bigg[& \exp\left(j\frac{4\pi}{c}\left[f_0^x x_k - f_0^y y_k \right]\right), ..., \exp\left(j\frac{4\pi}{c}\left[f_{M-1}^x x_k - f_0^y y_k \right]\right), ... \\ & ...\exp\left(j\frac{4\pi}{c}\left[f_0^x x_k - f_1^y y_k \right]\right), ..., \exp\left(j\frac{4\pi}{c}\left[f_{M-1}^x x_k - f_{N-1}^y y_k \right]\right)\Bigg]^T \end{aligned} \tag{2.36}$$

Παρόμοια με τη μονοδιάστατη περίπτωση, το πρώτο βήμα του διδιάστατου αλγορίθμου MUSIC είναι ο υπολογισμός του πίνακα συσχέτισης δεδομένων, ο οποίος ορίζεται ως

$$R_{xx} = E[\boldsymbol{x}\,\boldsymbol{x}^H] \tag{2.37}$$

Ακολουθώντας τη μονοδιάστατη ανάλυση, το επόμενο βήμα του διδιάστατου αλγόριθμου MUSIC περιλαμβάνει την ιδιοανάλυση του πίνακα συσχέτισης. Σε αυτό το σημείο, οφείλουμε να τονίσουμε ότι το διάνυσμα δεδομένων $\boldsymbol{x}$ έχει μήκος $M \cdot N$. Συνεπώς, ο πίνακας συσχέτισης είναι τετραγωνικός με διάσταση $M \cdot N$ και η ιδιοανάλυσή του παράγει $M \cdot N - d$ ιδιοδιανύσματα θορύβου και d ιδιοδιανύσματα σήματος. Όλα τα ιδιοδιανύσματα έχουν το ίδιο μήκος με το διάνυσμα δεδομένων. Τα ιδιοδιανύσματα του υποχώρου θορύβου, που αντιστοιχούν στις $M \cdot N - d$ ελάχιστες ιδιοτιμές, συνιστούν ένα πίνακα E_n. Το τελικό βήμα του αλγορίθμου είναι η δημιουργία του διδιάστατου ψευδο-φάσματος MUSIC

$$P_{MUSIC}(x,y) = \frac{a(x,y)^H\, a(x,y)}{a(x,y)^H\, E_n\, E_n^H\, a(x,y)} \tag{2.38}$$

Το διδιάστατο ψευδο-φάσμα υποδεικνύει τις θέσεις των κέντρων σκέδασης, που αναγνωρίζονται ως οι κορυφές του ψευδο-φάσματος. Σημειώνουμε ότι η πληροφορία της έντασης σκέδασης που ενσωματώνεται στο διδιάστατο ψευδο-φάσμα MUSIC (εκτιμώμενη εικόνα ISAR) δεν είναι αρκετά ακριβής. Για το λόγο αυτό, διάφορες μέθοδοι εκτίμησης πλάτους, όπως η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων (με βάρη ή χωρίς), εφαρμόζονται ξεχωριστά από το διδιάστατο αλγόριθμο MUSIC, εάν επιθυμείται περισσότερη ακρίβεια στην εκτίμηση της εντάσεως σκέδασης [9].

2.3.2 Αριθμητικές προσομοιώσεις

2.3.2.1 Δημιουργία διδιάστατων συνθετικών δεδομένων ραντάρ

Για να δημιουργήσουμε διδιάστατα συνθετικά δεδομένα ραντάρ, ακολουθούμε τη μέθοδο που παρουσιάζεται στην αναφορά [1], σύμφωνα με την οποία το μετρούμενο οπισθοσκεδαζόμενο σήμα από d κέντρα σκέδασης,

για M διακριτές συχνότητες f_m ($m = 0,1,...,M-1$) και N γωνίες παρατήρησης (ή σκόπευσης) θ_n ($n = 0,1,...,N-1$), δίνεται από τον τύπο

$$x'(m,n) = \sum_{k=1}^{d} s_k \exp\left(j\frac{4\pi}{c} f_m \left[x_k \cos\theta_n - y_k \sin\theta_n \right] \right) + u(m,n) \qquad (2.39)$$

όπου s_k είναι η μιγαδική ένταση σκέδασης του k-οστού κέντρου σκέδασης, x_k και y_k είναι οι συντεταγμένες του k-οστού κέντρου σκέδασης [12] στο επίπεδο περιστροφής του στόχου (xy-επίπεδο), $u(m,n)$ συμβολίζει τον προσθετικό θόρυβο, που συνήθως θεωρείται ότι είναι λευκός γκαουσιανός με μηδενική μέση τιμή και διακύμανση σ^2.

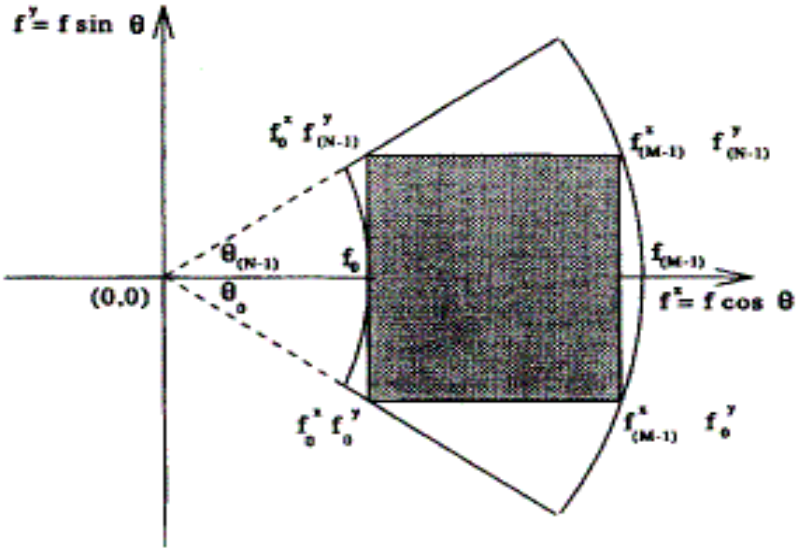
Στη διδιάστατη απεικόνιση ISAR, το πεδίο της συχνότητας μετασχηματίζεται σε απόσταση και το πεδίο της γωνίας σε κάθετη απόσταση. Από την εξίσωση (2.39), μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι τα δύο ζευγάρια μετασχηματισμού Fourier ($f\cos\theta \Leftrightarrow x$ και $f\sin\theta \Leftrightarrow y$) είναι μη διαχωρίσιμα ως προς τους όρους f και θ. Υιοθετώντας την προσέγγιση μικρής γωνίας (δηλαδή ότι $\cos\theta \approx 1$ και $\sin\theta \approx \theta$), μπορούμε να έχουμε δεδομένα που αποτελούνται από διαχωρίσιμα ζευγάρια μετασχηματισμού Fourier, αλλά η παραγόμενη εικόνα ραντάρ είναι μη εστιασμένη [20]. Η παρεμβολή των δεδομένων στο πεδίο συχνότητας-γωνίας σε καρτεσιανές συντεταγμένες (ορθογώνιο πλέγμα από $M \times N$ σημεία), με διαχωρίσιμες μεταβλητές $f^x = f\cos\theta$ και $f^y = f\sin\theta$, οδηγεί στη δημιουργία εστιασμένης εικόνας ραντάρ. Ξαναγράφοντας την εξίσωση (2.39) για τα δεδομένα ραντάρ έχουμε

$$x(m,n) = \sum_{k=1}^{d} s_k \exp\left(j\frac{4\pi}{c} \left[f_m^x x_k - f_n^y y_k \right] \right) + u(m,n) \qquad (2.40)$$

Στις αριθμητικές μας προσομοιώσεις, προσομοιώνουμε τη συγκεκριμμένη διαδικασία παρεμβολής, η οποία βασίζεται στο ακόλουθο επεξηγηματικό

[12] Οι xy-συντεταγμένες είναι σε σχέση με το κέντρο περιστροφής του στόχου.

σχήμα. Παρατηρούμε ότι τα δεδομένα παρεμβολής είναι πάνω σε ένα ορθογώνιο πλέγμα με ισαπέχοντα σημεία και στις δύο κατευθύνσεις (f^x και f^y), έτσι ώστε ο γρήγορος μετασχηματισμός Fourier να μπορεί να εφαρμοστεί για τη δημιουργία της κλασσικής εικόνας ραντάρ.



Σχήμα 2-15. Το πεδίο συχνότητας-γωνίας των διδιάστατων δεδομένων ραντάρ και το ορθογώνιο πλέγμα για τη διαδικασία παρεμβολής (αναπαραγωγή από την αναφορά [1])

Αξίζει να σημειωθεί ότι η πλειοψηφία των μεθόδων φασματικής εκτίμησης υψηλής ανάλυσης απαιτεί τον υπολογισμό ενός πίνακα συσχέτισης, που βασίζεται στην εκτίμηση ενός μέσου όρου για έναν αριθμό από στιγμιότυπα μονοδιάστατων και διδιάστατων δεδομένων ραντάρ. Εφόσον μόνο ένα στιγμιότυπο είναι τις περισσότερες φορές διαθέσιμο σε εφαρμογές ραντάρ (αναφερόμαστε σε επεξεργασία δεδομένων πραγματικού χρόνου), και επίσης, τα σήματα που προέρχονται από τους διάφορους σημειακούς σκεδαστές του στόχου είναι συμφασικά, είναι αναγκαίο να αποσυσχετίσουμε τα σήματα αυτά. Ακόμη και αν ο αριθμός των διαθέσιμων στιγμιοτύπων αυξηθεί, η συσχέτιση των δεδομένων ραντάρ θα είναι υπαρκτή, με αποτέλεσμα ο πίνακας συσχέτισης να μην είναι πλήρους τάξεως. Η απαίτηση πλήρους τάξεως είναι

πιο σημαντική για τις μεθόδους υποχώρου (MUSIC) λόγω της αναγκαίας ιδιοανάλυσης.

Μία ειδική τεχνική, γνωστή ως προεπεξεργασία χωρικής εξομάλυνσης [21], και η τροποποιημένη εκδοχή της [22] έχουν αποδειχθεί ικανές να επιτύχουν την απαιτούμενη αποσυσχέτιση των δεδομένων ραντάρ. Παρόλα αυτά, τέτοιου είδους προεπεξεργασία μειώνει το ενεργό εύρος συχνοτήτων και οδηγεί σε μείωση της επιτυγχανόμενης ανάλυσης απόστασης. Στην προσομοίωση του διδιάστατου αλγορίθμου MUSIC, εφαρμόζουμε την τροποποιημένη προεπεξεργασία χωρικής εξομάλυνσης (MSSP, modified spatial smoothing pre-processing) εξαιτίας της εμφάνισης ισχυρών «εικονικών» κέντρων σκέδασης. Τα διδιάστατα συνθετικά δεδομένα (διαστάσεων $M \times N$), που παράγονται μέσω της εξίσωσης (2.40), χωρίζονται σε επιμέρους αλληλοκαλυπτόμενους υποπίνακες διαστάσεων $p_1 \times p_2$. Συνολικά σχηματίζονται $L = (M - p_1 + 1) \cdot (N - p_2 + 1)$ διδιάστατοι υποπίνακες, οι οποίοι διατάσσονται κατά στήλες σε διανύσματα $\boldsymbol{x_l}$ και για καθέναν υπολογίζεται ο αντίστοιχος πίνακας συσχέτισης $R_l = \boldsymbol{x_l}\, \boldsymbol{x_l^H}$. Η τροποποιημένη μορφή του πίνακα συσχέτισης δεδομένων, διαστάσεων $p_1 p_2 \times p_1 p_2$, υπολογίζεται μέσω του τύπου

$$R_{xx} = \frac{1}{2L} \sum_{l=1}^{L} \left(R_l + J\, R_l^{*}\, J \right) \tag{2.41}$$

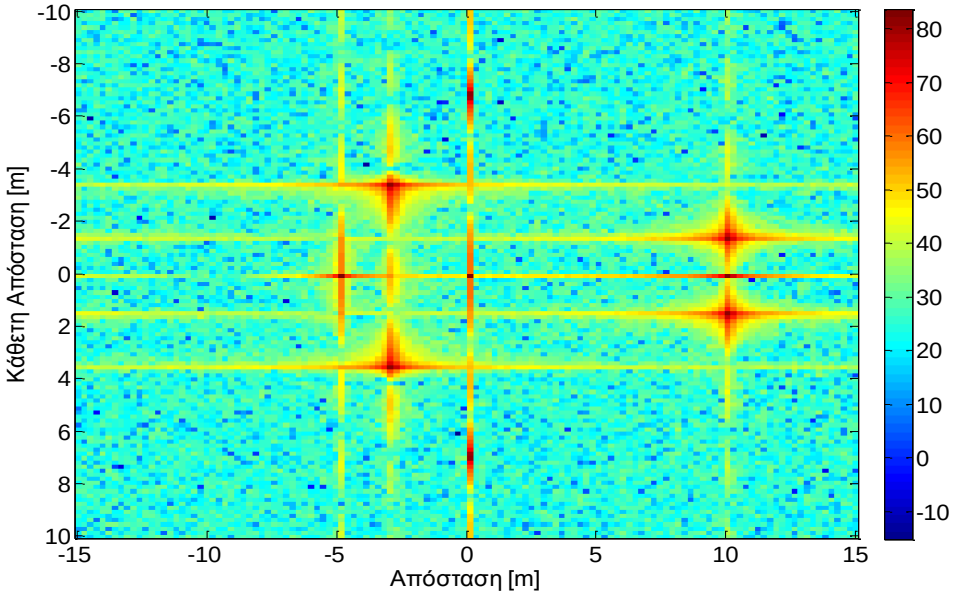
όπου J είναι ένας πίνακας ανταλλαγής, διαστάσεων $p_1 p_2 \times p_1 p_2$, με μη μηδενικές, μοναδιαίες τιμές μόνο στην αντιδιαγώνιό του.

Το πλήθος L των υποπινάκων καθορίζει το βαθμό αποσυσχέτισης των δεδομένων ραντάρ. Από την άλλη πλευρά, όσο μεγαλύτερες τιμές παίρνουν οι διαστάσεις p_1 και p_2, τόσο καλύτερη ανάλυση απόστασης και κάθετης απόστασης αντιστοίχως επιτυγχάνεται. Η επιλογή των τιμών αυτών αποτελεί θέμα διερεύνησης μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων.

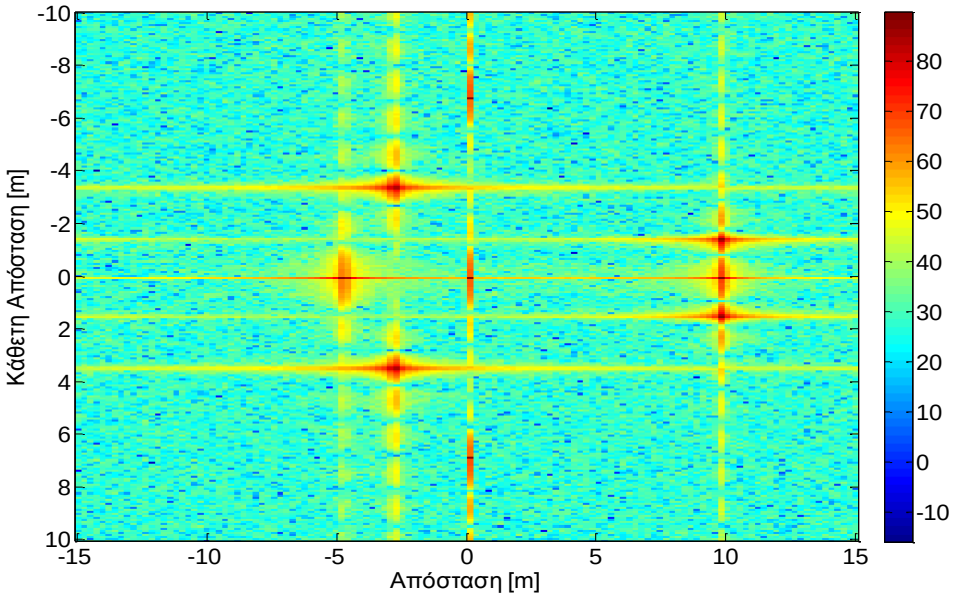
2.3.2.2 Αριθμητικά αποτελέσματα

Για τις αριθμητικές προσομοιώσεις των διδιάστατων τεχνικών φασματικής ανάλυσης επιλέγουμε τις βασικές παραμέτρους του ραντάρ ίδιες με εκείνες της παραγράφου 2.2.4.2 και τη γεωμετρία του απλού μοντέλου σημειακών σκεδαστών του Σχήματος 2-1 (d = 9). Ο προσομοιούμενος σηματοθορυβικός λόγος είναι 25dB.

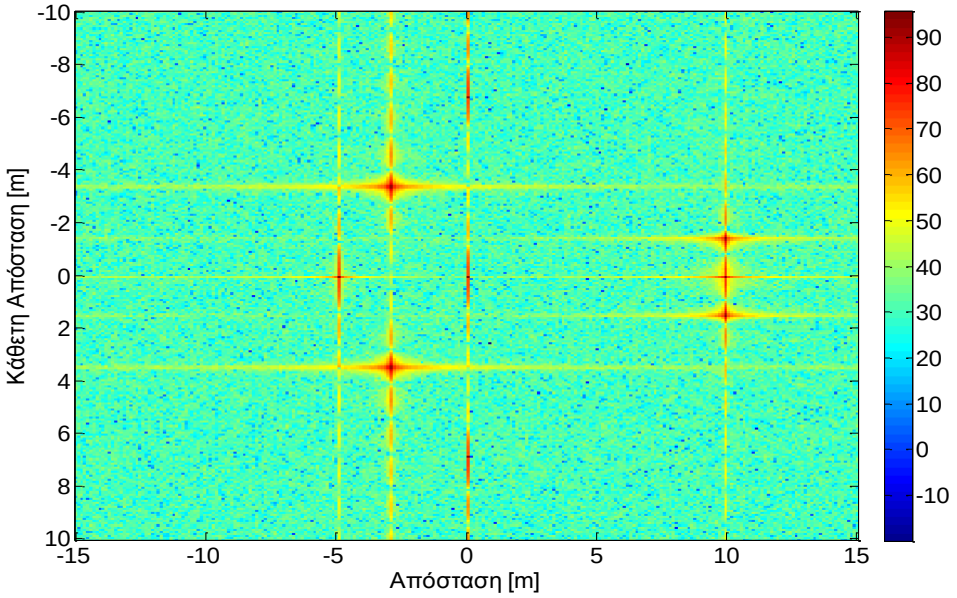
Τα επόμενα τρία σχήματα (2-16 εώς 2-18) απεικονίζουν εικόνες ISAR που παράγονται μέσω του διδιάστατου μετασχηματισμού FFT, ο οποίος εφαρμόζεται σε ένα σετ συνθετικών δεδομένων με αριθμό συχνοτήτων-γωνιών (M, N) ίσο με (128, 121), (128, 241) και (256, 241) αντίστοιχα. Για καθεμία από τις δύο διαστάσεις ο αντίστοιχος αριθμός σημείων υπολογισμού του μετασχηματισμού επιλέγεται ίσος με την αμέσως επόμενη δύναμη του δύο. Οι τιμές αυτές για τον αριθμό συχνοτήτων και γωνιών στόχευσης μπορούν να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικές επιλογές ενός πραγματικού συστήματος ISAR. Παρόλα αυτά, ο διδιάστατος μετασχηματισμός FFT αρχίζει να επιτυγχάνει καλή ανάλυση κελιού για εύρος συχνοτήτων μεγαλύτερο από 640MHz και συνθετικό άνοιγμα 6°.



Σχήμα 2-16. Εικόνα ISAR μέσω διδιάστατου FFT σε σετ δεδομένων 128 x 121



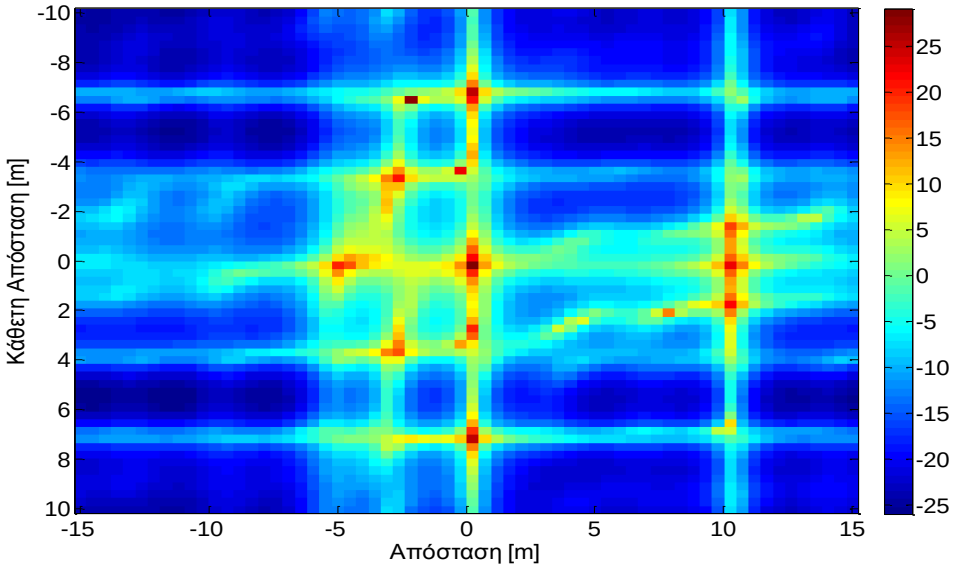
Σχήμα 2-17. Εικόνα ISAR μέσω διδιάστατου FFT σε σετ δεδομένων 128 x 241



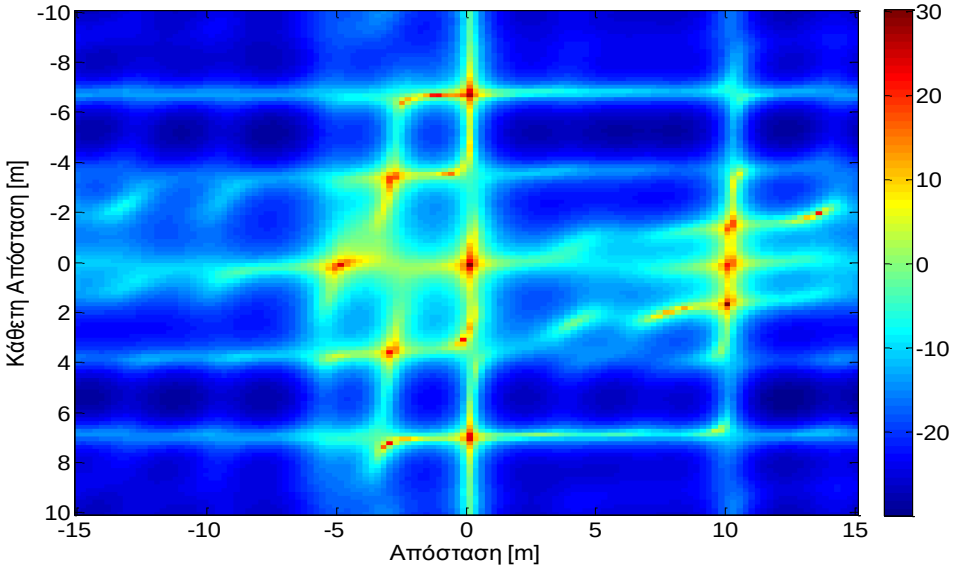
Σχήμα 2-18. Εικόνα ISAR μέσω διδιάστατου FFT σε σετ δεδομένων 256 x 241

Από την εφαρμογή της διδιάστατης απευθείας αυτο-αναδρομικής μεθόδου σε δύο διαφορετικά σετ δεδομένων προκύπτουν οι ακόλουθες δύο εικόνες ISAR (Σχήματα 2-19 και 2-20). Παρατηρούμε ότι η διδιάστατη αυτο-αναδρομική μέθοδος επιτυγχάνει καλύτερη ανάλυση από το διδιάστατο FFT

για μικρότερα σετ δεδομένων. Επίσης, εύκολα εντοπίζουμε στις παραγόμενες εικόνες ορισμένες πλεονάζουσες κορυφές με ποιοτικά χαρακτηριστικά διαφορετικά από τα πραγματικά κέντρα σκέδασης. Πιθανός συνδυασμός της τεχνικής αυτής με κάποια διαδικασία απο-συσχέτισης δεδομένων (όπως η τεχνική MSSP) μπορεί να επιφέρει βελτίωση της παραγόμενης εικόνας.

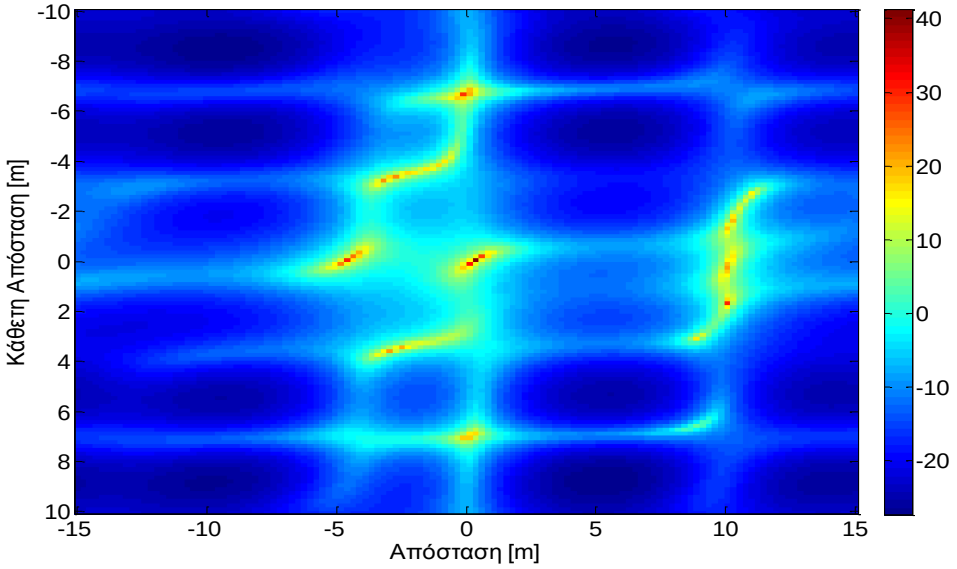


Σχήμα 2-19. Εικόνα ISAR μέσω διδιάστατης αυτο-αναδρομικής μεθόδου σε σετ δεδομένων 64 x 61



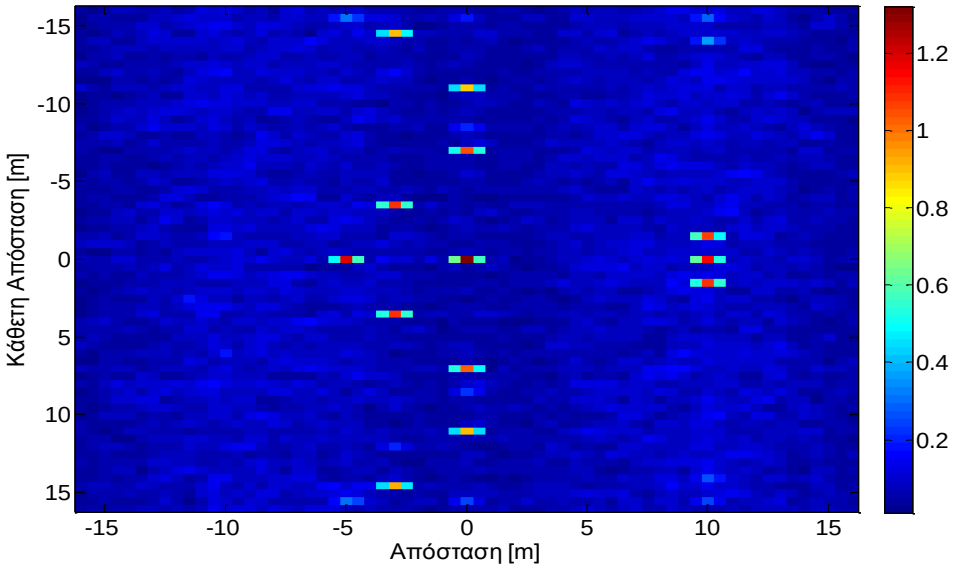
Σχήμα 2-20. Εικόνα ISAR μέσω διδιάστατης αυτο-αναδρομικής μεθόδου σε σετ δεδομένων 128 x 121

Οι δύο προηγούμενες εικόνες προκύπτουν από ένα διδιάστατο αυτο-αναδρομικό μοντέλο τάξεως (9, 9). Μειώνοντας την τάξη του μοντέλου σε (4, 7), όσα και τα διακριτά κέντρα σκέδασης στην κατεύθυνση της απόστασης και της κάθετης απόστασης αντίστοιχα, βλέπουμε ότι η ένταση σκέδασης των περιττών κορυφών στην εικόνα ISAR ελλαττώνεται σημαντικά, ενώ παράλληλα η διασπορά των πραγματικών κέντρων σκέδασης αυξάνεται (Σχήμα 2-21). Το συμπέρασμα αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την περίπτωση ενός πιο σύνθετου στόχου με περισσότερους σημειακούς σκεδαστές.

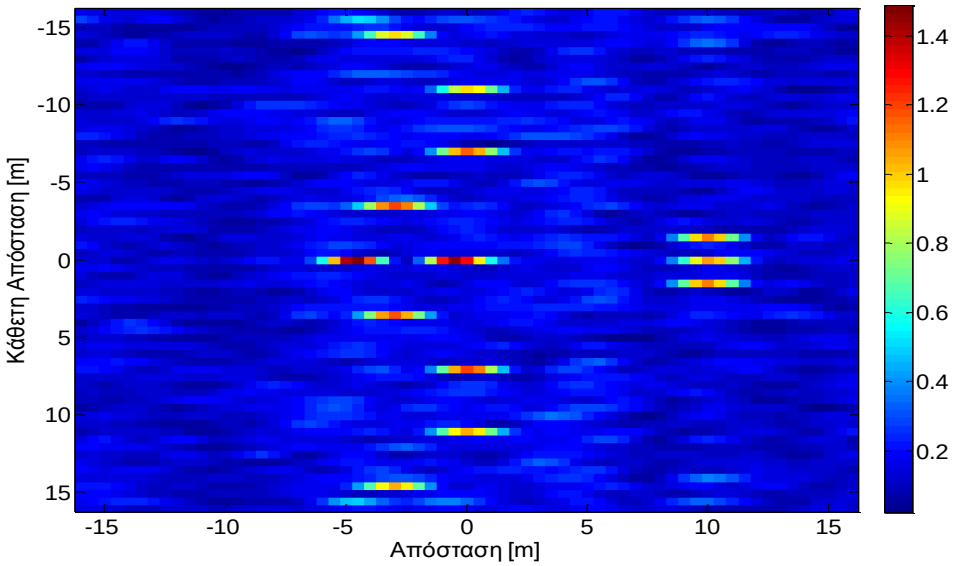


Σχήμα 2-21. Εικόνα ISAR μέσω διδιάστατης αυτο-αναδρομικής μεθόδου τάξεως (4, 7) σε σετ δεδομένων 128 x 121

Εφαρμόζοντας το διδιάστατο αλγόριθμο MUSIC σε δύο μικρά σετ δεδομένων για 31 γωνίες στόχευσης και 32 και 16 συχνότητες αντίστοιχα, παράγουμε τις παρακάτω εικόνες ISAR (Σχήματα 2-22 και 2-23). Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του αλγορίθμου MUSIC είναι ότι το προκύπτον ψευδο-φάσμα μπορεί να υπολογιστεί σε ένα πλέγμα σημείων που καθορίζεται από το χρήστη του προγράμματος προσομοίωσης, ανεξάρτητα από το μέγεθος του εξεταζόμενου σετ δεδομένων. ‘Ετσι, τα ακόλουθα σχήματα προκύπτουν από ένα πλέγμα 65 x 65 σημείων. Η επιλεγόμενη τάξη του αλγορίθμου είναι ίση με το πλήθος των κέντρων σκέδασης d .



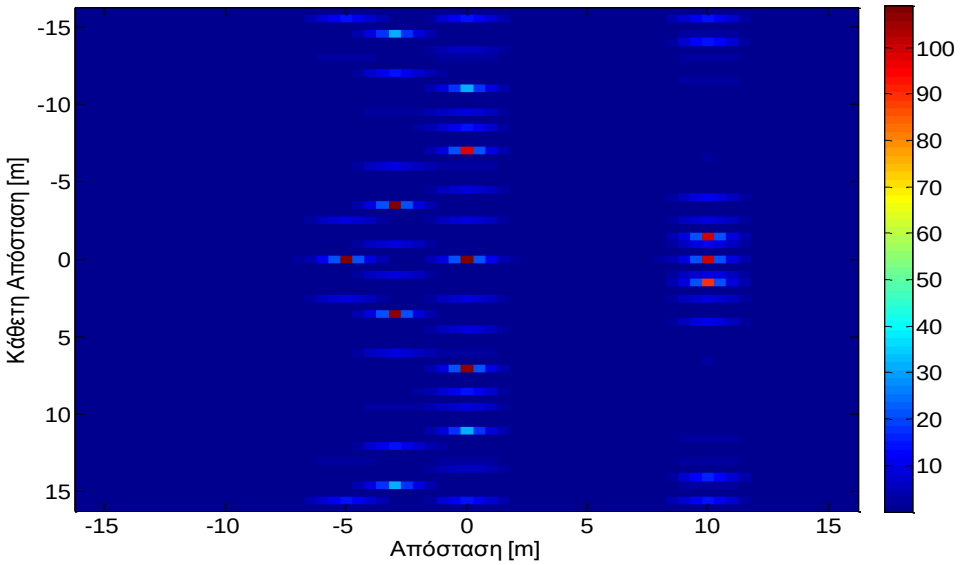
Σχήμα 2-22. Εικόνα ISAR μέσω διδιάστατου MUSIC σε σετ δεδομένων 32 x 31



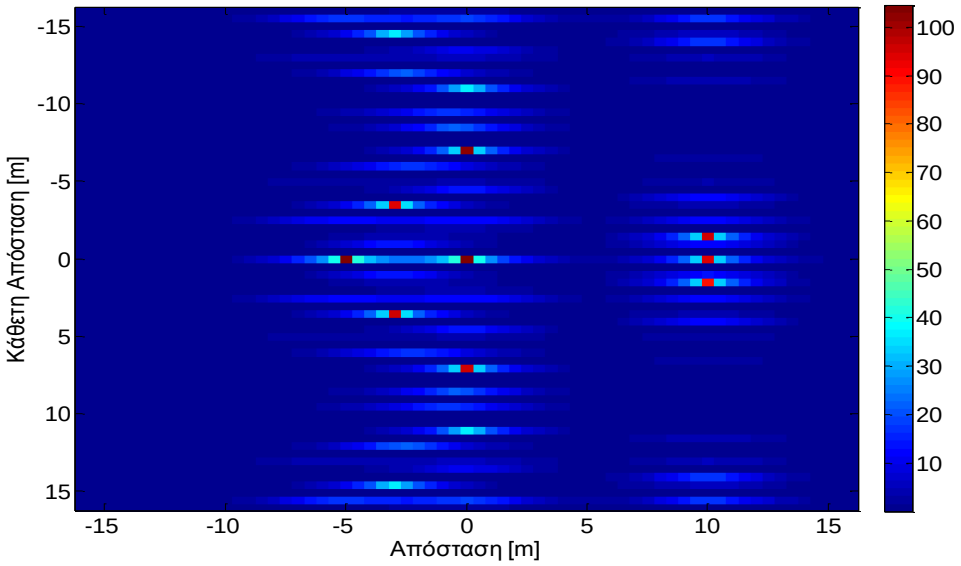
Σχήμα 2-23. Εικόνα ISAR μέσω διδιάστατου MUSIC σε σετ δεδομένων 16 x 31

Οι περιττές κορυφές που παρατηρούνται στις παραπάνω εικόνες ISAR είναι λόγω της συσχέτισης μεταξύ των δεδομένων από τα διαφορετικά κέντρα σκέδασης. Εφαρμόζοντας την τεχνική απόσυσχέτισης MSSP μπορούμε να παράγουμε τις ακόλουθες εικόνες ISAR με αρκετά εξασθενημένες εντάσεις σκέδασης των περιττών κορυφών (Σχήματα 2-24 και 2-25). Επιλέγουμε

προσεκτικά τις διαστάσεις του υποπίνακα δεδομένων p_1 και p_2 (βλέπε εξίσωση (2.41)) σε σχέση με το μέγεθος του κάθε σετ δεδομένων.



Σχήμα 2-24. Εικόνα ISAR μέσω διδιάστατου MUSIC και της τεχνικής MSSP σε σετ δεδομένων 32 x 31 με διαστάσεις υποπίνακα δεδομένων 12 x 12



Σχήμα 2-25. Εικόνα ISAR μέσω διδιάστατου MUSIC και της τεχνικής MSSP σε σετ δεδομένων 16 x 31 με διαστάσεις υποπίνακα δεδομένων 7 x 10

2.4 Συμπεράσματα με βάση τα αριθμητικά αποτελέσματα και κατευθύνσεις μελλοντικής έρευνας

Με βάση τα αριθμητικά αποτελέσματα των μονοδιάστατων τεχνικών φασματικής ανάλυσης οδηγούμαστε στα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Οι παραμετρικές μέθοδοι παράγουν εξομαλυμένα προφίλ απόστασης, ακόμη και για χαμηλό σηματοθορυβικό λόγο. Αντιθέτως, τα προφίλ απόστασης που προέρχονται από το μετασχηματισμό FFT χειροτερεύουν σημαντικά με τη μείωση του σηματοθορυβικού λόγου, με την εμφάνιση κορυφών συγκρίσιμων σε ένταση με εκείνες των σημειακών σκεδαστών του υπό εξέταση στόχου (Σχήμα 2-3).
- Για την περίπτωση καλά διαχωρισμένων σκεδαστών, οι αυτο-αναδρομικές τεχνικές χρειάζονται τάξη μοντέλου μεγαλύτερη από το πλήθος των διακριτών αποστάσεων για να δώσουν ικανοποιητικά προφίλ απόστασης. Αυξάνοντας την τάξη από 6 σε 8 (Σχήματα 2-4 και 2-6), παρατηρούμε την ελλάττωση των πλευρικών λοβών του παραγόμενου φάσματος σε αντίστοιχο επίπεδο με τα φάσματα από τις άλλες δύο τεχνικές. Επιπλέον, η αύξηση της τάξης οδηγεί και σε μεγαλύτερη ανοχή στο θόρυβο σε σχέση με το μετασχηματισμό FFT (Σχήμα 2-7).
- Για τάξη μεγαλύτερη από το πλήθος των διακριτών αποστάσεων, ο αλγόριθμος MUSIC έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση πλεονάζουσων κορυφών στο ψευδο-φάσμα, οι οποίες έχουν μικρότερη ένταση όσο αυξάνεται η τάξη και αλλάζουν θέση λόγω του ψευδο-τυχαίου θορύβου (Σχήματα 2-4 – 2-7). Η εφαρμογή τεχνικών εξομάλυνσης των περιττών κορυφών κρίνεται μη αναγκαία για τη μονοδιάστατη απεικόνιση μέσω των προφίλ απόστασης.
- Για την περίπτωση δύο πολύ κοντινών σκεδαστών, οι αυτο-αναδρομικές μέθοδοι και ο μετασχηματισμός FFT αποτυγχάνουν να ξεχωρίσουν τις δύο πολύ κοντινές φασματικές κορυφές, σε αντίθεση με τον αλόγριθμο MUSIC ο οποίος διαχωρίζει ικανοποιητικά τις δύο κορυφές για μεγάλες τιμές της τάξης του πίνακα συσχέτισης δεδομένων και χαμηλό

σηματοθορυβικό λόγο (Σχήμα 2-12) ή για μικρές τιμές της τάξης και υψηλό σηματοθορυβικό λόγο (Σχήμα 2-11).

- Για τη δεύτερη κατηγορία προσομοιώσεων, παρατηρούμε ότι η μέθοδος ESPRIT υπερέχει ελαφρώς του αλγορίθμου MUSIC για την περίπτωση καλά διαχωρισμένων σκεδαστών (Σχήμα 2-13). Για την περίπτωση δύο πολύ κοντινών σκεδαστών, η εκτίμηση των θέσεων των σκεδαστών από τη μέθοδο ESPRIT είναι αρκετά καλύτερη από εκείνη του αλγορίθμου MUSIC, για ένα εύρος τιμών της τάξης του πίνακα συσχέτισης δεδομένων (Σχήμα 2-14).

Με βάση τα αριθμητικά αποτελέσματα των διδιάστατων τεχνικών φασματικής ανάλυσης οδηγούμαστε στα ακόλουθα συμπεράσματα

- Παρατηρώντας τις εικόνες ISAR που προκύπτουν από το μετα-σχηματισμό FFT (Σχήματα 2-16 – 2-18), βλέπουμε ότι η ανάλυση απόστασης και κάθετης απόστασης αυξάνονται με την αντίστοιχη αύξηση τους μεγέθους του σετ δεδομένων. Αυτό είναι αναμενόμενο και αποτελεί και το βασικό μειονέκτημα των τεχνικών φασματικής εκτίμησης που στηρίζονται στο μετασχηματισμό Fourier.
- Συγκρίνοντας τις εικόνες ISAR των Σχημάτων 2-16 και 2-20, συμπεραίνουμε ότι η απευθείας αυτο-αναδρομική μέθοδος παρουσιάζει καλύτερη ανάλυση από το μετασχηματισμό FFT.
- Μία ενδιαφέρουσα ιδιότητα του διδιάστατου αυτο-αναδρομικού φάσματος προκύπτει από τη σύγκριση των Σχημάτων 2-20 και 2-21: Η εκτίμηση των συντεταγμένων των κέντρων σκέδασης του στόχου εξαρτάται από την εκτιμώμενη τάξη του αυτο-αναδρομικού μοντέλου σε κάθε διάσταση του υπό εξέταση σήματος.
- Ο διδιάστατος αλγόριθμος MUSIC επιτυγχάνει υψηλής ανάλυσης εικόνες ISAR για σχετικά πολύ μικρά σετ δεδομένων, για τα οποία η επίδοση των άλλων δύο τεχνικών είναι πτωχή. Επιπρόσθετα, η εφαρμογή της τεχνικής αποσυσχέτισης δεδομένων MSSP βελτιώνει την παραγόμενη εικόνα με την ελλάττωση της έντασης σκέδασης των περιττών κορυφών.

Αναφερόμενοι στις μελλοντικές ερευνητικές επεκτάσεις της παρούσας εργασίας σε σχέση με τις παραμετρικές μεθόδους φασματικής εκτίμησης, θα μπορούσαμε να τονίσουμε την ανάγκη μελέτης διαφόρων – στατιστικών κυρίως – κριτηρίων επιλογής της τάξης της κάθε τεχνικής. Όπως είδαμε και από τα αριθμητικά αποτελέσματα, η επιλογή της παραμέτρου αυτής είναι μείζονος σημασίας. Παράλληλα, η χρήση ορισμένων μονοδιάστατων τεχνικών φασματικής ανάλυσης για την επίλυση προβλημάτων εκτίμησης απόστασης ή θέσης μπορεί να οδηγήσει μελλοντικά στη βελτίωση υπάρχοντων αλγορίθμων ευθυγράμμισης των προφίλ απόστασης για την παραγωγή εστιασμένων εικόνων ISAR. Τέλος, διάφορες σύνθετες μέθοδοι διδιάστατης φασματικής ανάλυσης, με σημαντικό υπολογιστικό κόστος, έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία [23-25], και αποτελούν αντικείμενο μελλοντικής λεπτομερούς διερεύνησης όσον αφορά την εφαρμογή σε συνθετικά ή πραγματικά δεδομένα ραντάρ.

2.5 Παράρτημα 1: Μαθηματική σχέση μεταξύ FFT και IFFT

Η μαθηματική σχέση ορισμού του διακριτού μετασχηματισμού Fourier (και επομένως και του FFT) είναι η ακόλουθη

$$X_{FFT}(m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot \exp\left[-j\,2\pi \frac{n \cdot m}{N}\right]$$

όπου το υπό φασματική ανάλυση σήμα $x(n)$ αποτελείται από N δείγματα.

Θέτοντας στον παραπάνω τύπο $N-m$ αντί m, προκύπτει η εξίσωση

$$\begin{aligned} X_{FFT}(N-m) &= \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot \exp\left[-j\,2\pi \frac{n \cdot (N-m)}{N}\right] = \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot \exp\left[-j\,2\pi\, n\right] \cdot \exp\left[j\,2\pi \frac{n \cdot m}{N}\right] \end{aligned}$$

Εφόσον $\exp\left[-j\,2\pi\, n\right] = \cos(2\pi\, n) - j\sin(2\pi\, n) = 1$, η προηγούμενη εξίσωση απλοποιείται σε

$$X_{FFT}(N-m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot \exp\left[j\,2\pi \frac{n \cdot m}{N}\right]$$

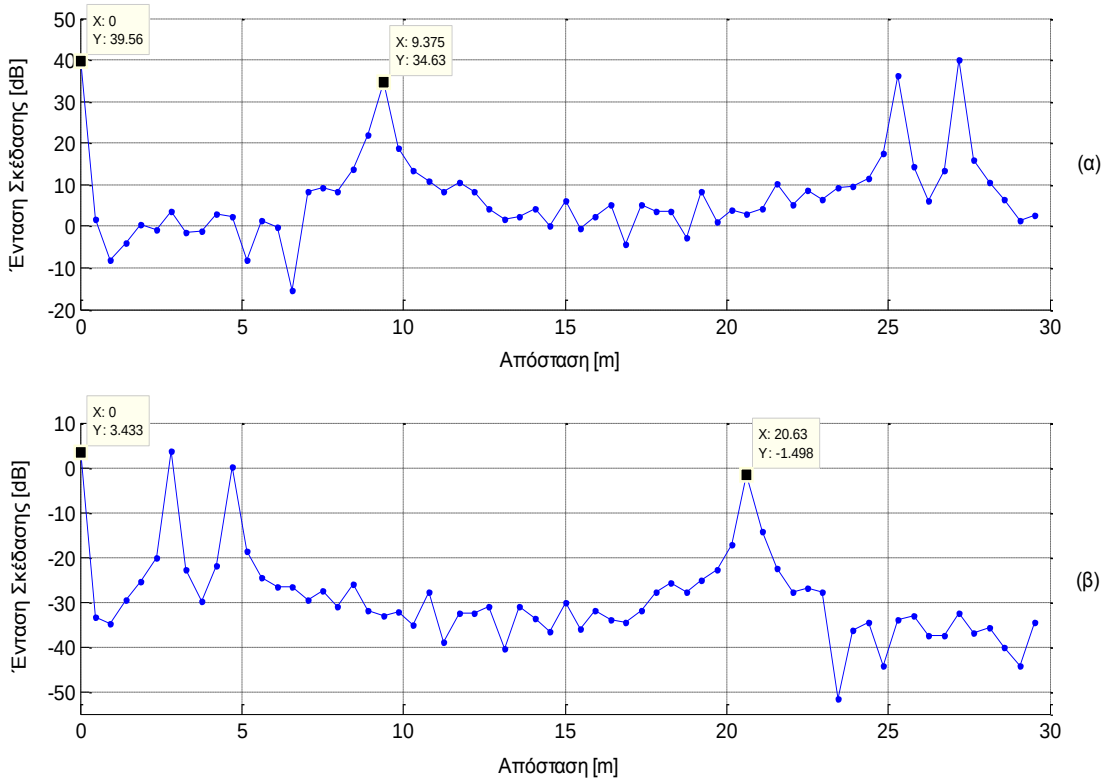
Συγκρίνοντας τον παραπάνω τύπο με τη μαθηματική σχέση ορισμού του διακριτού μετασχηματισμού IFFT για σήμα $x(n)$ $(n = 0, ..., N-1)$

$$X_{IFFT}(m) = \left(\frac{1}{N}\right) \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot \exp\left[j\,2\pi \frac{n \cdot m}{N}\right]$$

παρατηρούμε ότι ισχύει η ακόλουθη ταυτότητα

$$X_{IFFT}(m) = \left(\frac{1}{N}\right) \cdot X_{FFT}(N-m)$$

Η παραπάνω μαθηματική σχέση επαληθεύεται μέσω αριθμητικής προσομοίωσης ειδικά για το πρόβλημα της δημιουργίας προφίλ απόστασης. Υπενθυμίζουμε ότι στη μονοδιάστατη απεικόνιση ISAR χρησιμοποιείται ο μετασχηματισμός IFFT (και όχι ο FFT), ο οποίος εφαρμόζεται σε δεδομένα ραντάρ στο πεδίο της συχνότητας και παράγει προφίλ απόστασης (δεδομένα στο πεδίο του χρόνου). Για μονοδιάστατα συνθετικά δεδομένα ραντάρ, με σηματοθορυβικό λόγο ίσο με 25dB και $N = 64$, παραθέτουμε στο ακόλουθο σχήμα τα προφίλ απόστασης που παράγονται μέσω των μετασχηματισμών FFT και IFFT. Παρατηρούμε ότι η ιδιότητα της κυκλικής ολίσθησης κατά N δείγματα μεταξύ των δύο μετασχηματισμών επιβεβαιώνεται μέσω της συγκεκριμμένης αριθμητικής προσομοίωσης. Επιπρόσθετα, ο λόγος πλατών $1/N$ μεταξύ του IFFT και του FFT είναι περίπου ίσος με 36.12dB, γεγονός που επαληθεύεται και οπτικά μέσω του παρακάτω σχήματος, για τις αντίστοιχες θέσεις σημειακών σκεδαστών (σημειώνονται οι τιμές της έντασης σκέδασης για δύο εκ των τεσσάρων θέσεων).



Σχήμα 2-26. Προφίλ απόστασης για *SNR* = 25dB και *N* = 64: (α) FFT, (β) IFFT.

2.6 Βιβλιογραφικές αναφορές

[1] J. Odendaal, E. Barnard, and C. Pistorius, “Two-Dimensional Superresolution Radar Imaging Using the MUSIC Algorithm,” *IEEE Trans. Ant. & Propag.*, Vol. 42, No. 10, Oct. 1994.

[2] A. Quinquis, E. Radoi, and F. Totir, “Some Radar Imagery Results Using Superresolution Techniques,” *IEEE Trans. Ant. & Propag.*, Vol. 52, No. 5, May 2004.

[3] K. Kim, S. Kim, and H. Kim, “Two-Dimensional ISAR Imaging Using Full Polarisation and Super-Resolution Processing Techniques,” *IEE Proc. Radar, Sonar & Navig.*, Vol. 145, No. 4, Aug. 1998.

[4] P. Stoica, and R. Moses, *Introduction to Spectral Analysis*, Prentice Hall, NJ, 1st Edition, 1997.

[5] K. Kim, D. Seo, and H. Kim, “Efficient Radar Target Recognition Using the MUSIC Algorithm and Invariant Features,” *IEEE Trans. Ant. & Propag.*, Vol. 50, No. 3, March 2002.

[6] B. McGuffin, and B. Liu, “An Efficient Algorithm for Two-Dimensional Autoregressive Spectrum Estimation,” *IEEE Trans. ASSP*, Vol. 37, No. 1, Jan. 1989.

[7] N. Levinson, “The Wiener Root Mean Square Criterion in Filter Design and Prediction,” *Journal of Math. and Physics*, Vol. 25, 1947, pp. 261-278.

[8] J. Burg, *Maximum Entropy Spectral Analysis*, Ph. D. Thesis, Stanford University, 1975.

[9] R. Schimdt, “Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation,” *IEEE Trans. Ant. & Propag.*, Vol. 34, No. 3, March 1986, pp. 276-280.

[10] V. Pisarenko, “The Retrieval of Harmonics from a Covariance Function,” *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, Vol. 33, 1994.

[11] P. Stoica, and T. Söderström, “Statistical Analysis of MUSIC and Subspace Rotation Estimates of Sinusoidal Frequencies,” *IEEE Trans. SP*, Vol. 39, No. 8, Aug. 1991.

[12] P. Stoica, R. Moses, B. Friedlander, and T. Söderström, “Maximum Likelihood Estimation of the Parameters of Multiple Sinusoids from Noisy Measurements,” *IEEE Trans. ASSP*, Vol. 37, No. 3, March 1989.

[13] R. Roy, and T. Kailath, “Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Technique,” *IEEE Trans. ASSP*, Vol. 37, No. 7, July 1989.

[14] P. Stoica, and K. Sharman, “Maximum Likelihood Methods for Direction-of-Arrival Estimation,” *IEEE Trans. ASSP*, Vol. 38, No. 7, July 1990.

[15] D. Mehrholz, L. Leushacke, W. Flury, R. Jehn, H. Klinkrad, and M. Landgraf, “Detecting, Tracking and Imaging Space Debris,” *ESA Bulletin*, Vol. 109, Feb. 2002, pp. 128-134.

[16] F. Harris, “On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform,” *Proc. IEEE*, Vol. 66, No. 1, Jan. 1978, pp. 51-83.

[17] S. L. Marple, “A Fast Algorithm for the Two-Dimensional Covariance Method of Linear Prediction,” *Proc. ICASSP ’95*, Detroit, USA, May 1995, pp. 1693-1696.

[18] S. L. Marple, “Fast Algorithm for the Two-Dimensional Modified Covariance Method of Linear Prediction,” *Proc. 32nd Asilomar Conf. on Signals, Systems and Computers*, Pacific Grove, USA, Nov. 1998, pp. 1452-1455.

[19] S. D’Ercole, “Super-Resolution Techniques Applied to MSTAR Data,” *Proc. RTO SET Symposium on Target Identification and Recognition Using RF Systems*, Oslo, Norway, Oct. 2004.

[20] D. Mensa, *High Resolution Radar Cross-Section Imaging*, Artech House, Norwood, MA, 1991.

[21] T. Shan, M. Wax, and T. Kailath, “On Spatial Smoothing for Direction-of-Arrival Estimation of Coherent Signals,” *IEEE Trans. ASSP*, Vol. 33, No. 4, Aug. 1985.

[22] R. Williams, S. Prasad, A. Mahalanabis, and L. Sibul, “An Improved Spatial Smoothing Technique for Bearing Estimation in a Multipath Environment,” *IEEE Trans. ASSP*, Vol. 36, No. 4, Apr. 1988.

[23] M. Cátedra, J. Pérez, F. Fernández and I. Montiel, “A Comparison Between Super-Resolution Methods for ISAR,” *RTO Meeting Proceedings 40: High Resolution Radar Techniques*, Nov. 1999.

[24] Y. Hua, et al., “Performance Comparison of Two Methods for 2-D Frequency Estimation in Both Medium and High SNR Cases,” *Signal Processing*, Vol. 58, 1997.

[25] J. Li and R. Compton, “Two-Dimensional Angle and Polarization Estimation Using the ESPRIT Algorithm,” *IEEE Trans. Ant. & Propag.*, Vol. 40, No. 5, May 1992.

Κεφάλαιο 3

Μονοδιάστατη εκτίμηση παραμέτρων ραντάρ με χρήση μεθόδων υψηλής φασματικής ανάλυσης

3.1 Εισαγωγή

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 (SVD, singular value decomposition) 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 διάνυσμα 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, συγκεκριμμένα 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, προτείνουμε τη χρήση μίας μεθόδου φασματικής εκτίμησης με υποδειγματοληψία σήματος, συγκεκριμμένα τη μέθοδο DESED (DEcimative Spectrum Estimation by factor D) [4], για την εκτίμηση των παραμέτρων ενός μοντέλου του σήματος ραντάρ, το οποίο βασίζεται στη γεωμετρική θεωρία της περίθλασης (GTD, geometrical theory of diffraction). Το υιοθετούμενο μοντέλο έχει αποδειχθεί ότι περιγράφει με μεγάλη ακρίβεια το οπισθοσκεδαζόμενο σήμα ραντάρ για διάφορα είδη σκεδαστών [7]. Επομένως, η χρησιμοποίηση του μοντέλου αυτού για την περιγραφή των λαμβανόμενων δεδομένων (στο πεδίο της συχνότητας) μίας κυματομορφής βηματικής συχνότητας είναι εύλογη.

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 προ-αναφερθέντα μοντέλα σήματος (DE και GTD).

Το υπόλοιπο του κεφαλαίου αυτού είναι οργανωμένο ως ακολούθως. Η δεύτερη ενότητα σκιαγραφεί το μονοδιάστατο παραμετρικό μοντέλο σκέδασης που βασίζεται στη γεωμετρική θεωρία της περίθλασης, ενώ στην τρίτη ενότητα περιγράφονται συνοπτικά δύο εκδοχές του αλγορίθμου MUSIC για

εφαρμογές υψηλής φασματικής εκτίμησης. Στην τέταρτη ενότητα, αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο της μεθόδου DESED. Τα αποτελέσματα από τις αριθμητικές προσομοιώσεις της μεθόδου DESED και των διαφόρων εκδοχών του αλγορίθμου MUSIC παρουσιάζονται στην πέμπτη ενότητα. Οι διάφορες μέθοδοι συγκρίνονται σε σχέση με την ακρίβεια εκτίμησης των παραμέτρων του επιστρέφοντος σήματος ραντάρ (μοντέλο GTD). Στην τελευταία ενότητα, παραθέτουμε χρήσιμα συμπεράσματα που εξάγονται από τα αριθμητικά αποτελέσματα, καθώς ακόμη και διάφορες προτάσεις για μελλοντική έρευνα σε σχέση με την εκτίμηση παραμέτρων σήματος ραντάρ.

3.2 Μονοδιάστατο μοντέλο σκέδασης βασιζόμενο στη γεωμετρική θεωρία της περίθλασης

Οι στόχοι ραντάρ μπορούν να χαρακτηριστούν επαρκώς από ένα μικρό αριθμό κέντρων σκέδασης, στο όριο των υψηλών συχνοτήτων. Το μοντέλο GTD [7], το οποίο χρησιμοποιούμε στην παρούσα μελέτη, παρέχει μία παραμετρική περιγραφή της μετρούμενης συμπεριφοράς σκέδασης ενός στόχου ραντάρ. Το κύριο πλεονέκτημά του είναι ότι περιλαμβάνει μία παράμετρο που χαρακτηρίζει τη γεωμετρία του κάθε κέντρου σκέδασης. Η ακρίβεια του μοντέλου GTD οφείλεται στη στενή του σχέση με τη φυσική της ηλεκτρομαγνητικής σκέδασης. Όπως αναφέρεται στην αναφορά [7], το μοντέλο GTD περιγράφει την εξάρτηση των δεδομένων σκέδασης από τη συχνότητα με μεγαλύτερη ακρίβεια από το μοντέλο αποσβεννόμενων εκθετικών όρων (μοντέλο DE). Ειδικά για μεγάλες τιμές του σχετικού εύρους συχνοτήτων του ραντάρ, το μοντέλο DE αποτυγχάνει να αναπαραστήσει ικανοποιητικά διάφορους κανονικούς μηχανισμούς σκέδασης, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνει χειρότερη ανάλυση των θέσεων των κέντρων σκέδασης σε σύκριση με το μοντέλο GTD.

Για το μοντέλο GTD, η εξίσωση περιγραφής του οπισθοσκεδαζόμενου πεδίου ενός τέλεια αγώγιμου στόχου έχει ως εξής

$$E(f) = \sum_{i=1}^{L} A_i \left(\frac{f}{f_c} \right)^{\alpha_i} e^{-j4\pi f r_i / c} \tag{3.1}$$

όπου ως f συμβολίζουμε τη συχνότητα ραντάρ, L είναι ο αριθμός των κέντρων σκέδασης, ως A_i, α_i και r_i συμβολίζουμε την ένταση σκέδασης, την παράμετρο γεωμετρίας και την απόσταση του i-οστού κέντρου σκέδασης, f_c είναι η κεντρική συχνότητα, και c είναι η ταχύτητα του φωτός. Ο Πίνακας 3-1 συνοψίζει τις παραμέτρους γεωμετρίας για διάφορους κανονικούς μηχανισμούς σκέδασης.

Στην περίπτωση της κυματομορφής βηματικής συχνότητας, οι N συχνότητες που σαρώνουν το αξιοποιούμενο εύρος συχνοτήτων του ραντάρ δίνονται από τον τύπο

$$f_n = f_c + n \cdot \Delta f \ , \quad n = -\frac{(N-1)}{2}, \ldots, \frac{(N-1)}{2} \tag{3.2}$$

όπου ο αριθμός N υποτίθεται περιττός, ώστε να υπάρχει συμμετρία γύρω από την κεντρική συχνότητα, και Δf είναι το επιλεγμένο συχνοτικό βήμα της κυματομορφής.

Το μοντέλο GTD μπορεί να περιγράψει με ακρίβεια διάφορους μηχανισμούς σκέδασης. Στην αναφορά [7], αποδεικνύεται ότι οι μηχανισμοί περίθλασης από ακμή και γωνία, όπως επίσης και οι μηχανισμοί ανάκλασης από τρεις κανονικές επιφάνειες (σφαίρα, κύλινδρος από το πλάι και επίπεδη πλάκα), είναι σε συμφωνία με το μοντέλο GTD. Επομένως, είναι λογικό να θεωρούμε ένα στόχο ραντάρ ως συνάθροιση αρκετών διαφορετικών γεωμετριών σκέδασης, όπως αυτές που παρατίθενται στον Πίνακα 3-1.

Πίνακας 3-1. Παράμετροι γεωμετρίας για κανονικές γεωμετρίες σκέδασης

Κανονική Γεωμετρία Σκέδασης	**Τιμή Παραμέτρου Γεωμετρίας**
περίθλαση από γωνία	– 1
περίθλαση από ακμή	– ½
ιδανικός σημειακός σκεδαστής, ανάκλαση από διπλά κυρτή επιφάνεια, κατοπτρική ανάκλαση από ομαλή ακμή	0
ανάκλαση από κυρτή επιφάνεια	½
επίπεδη πλάκα από το πλάι, δίεδρο	1

3.3 Εκδοχές του αλγορίθμου MUSIC για εφαρμογές υψηλής φασματικής εκτίμησης

Προτού παρουσιάσουμε την προτεινόμενη μέθοδο υψηλής φασματικής ανάλυσης, είναι χρήσιμο να δούμε τις μαθηματικές λεπτομέρειες των δύο εκδοχών του αλγορίθμου MUSIC με τις οποίες συγκρίνουμε στη συνέχεια του κεφαλαίου την προτεινόμενη μέθοδο. Οι δύο αυτές τεχνικές επιτυγχάνουν πολύ καλά αποτελέσματα στο πρόβλημα της εύρεσης των θέσεων των σημειακών σκεδαστών ενός στόχου (εκδοχή «ριζών» του αλγορίθμου MUSIC).

Η πρώτη τεχνική είναι ο αλγόριθμος MUSIC «ριζών» (όπως παρουσιάζεται στο δεύτερο κεφάλαιο) με την εφαρμογή της τροποποιημένης προ-επεξεργασίας χωρικής εξομάλυνσης (MSSP, modified spatial smoothing pre-processing) για τον υπολογισμό του πίνακα συσχέτισης δεδομένων [8]. Ακολουθώντας τη μαθηματική περιγραφή της παραγράφου 2.2.3.1, ο πίνακας συσχέτισης δεδομένων υπολογίζεται ως εξής

$$R_{yy} = \frac{1}{2M} \sum_{k=1}^{M} \left(R_k + J\, R_k^H\, J \right) \tag{3.3}$$

όπου M είναι ο αριθμός των υποπινάκων (μονοδιάστατοι πίνακες με m δείγματα του υπό ανάλυση σήματος), J είναι ένας πίνακας ανταλλαγής διαστάσεων $m \times m$ που ορίζεται ως

$$J = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & 1 \\ 0 & \dots & 1 & 0 \\ \vdots & \iddots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}^T \tag{3.4}$$

και ο πίνακας συσχέτισης για τον k -οστό υποπίνακα ορίζεται ως

$$R_k = \boldsymbol{y}_k \boldsymbol{y}_k^H$$

$$\boldsymbol{y}_k = [\, y_k \,,\, y_{k+1} \,,\, ...,\, y_{k+m-1} \,]^T \tag{3.5}$$

Παρά το γεγονός ότι ο υπολογισμός του πίνακα συσχέτισης γίνεται μέσω αυτής της μεθόδου με λιγότερα δείγματα ($m < N$) από ότι με τον κλασσικό αλγόριθμο MUSIC, τα δείγματα του υπό εξέταση σήματος ραντάρ αποσυσχετίζονται μέσω της χρήσης υποπινάκων. Μία ανεκτή μείωση της επιτυγχανόμενης ανάλυσης είναι το τίμημα για την εξάλειψη του φαινομένου εμφάνισης «πλασματικών» κέντρων σκέδασης στα παραγόμενα προφίλ απόστασης, το οποίο προκαλείται από το συσχετισμό των δεδομένων.

Η δεύτερη τεχνική υψηλής φασματικής εκτίμησης είναι ο αλγόριθμος MUSIC «ριζών» που βασίζεται στην υποδειγματοληψία του υπό ανάλυση σήματος [5]. Από το αρχικό διάνυσμα δεδομένων $\boldsymbol{y} = [y_1, ..., y_N]^T$ προκύπτουν D ακολουθίες δεδομένων ύστερα από υποδειγματοληψία κατά παράγοντα D, οι οποίες σε διανυσματική μορφή εκφράζονται ως

$$\boldsymbol{z}_k = [y_{D-k+1},\, y_{2D-k+1},\, \ldots,\, y_{N-k+1}]^T, \quad k = 1, 2, \ldots, D \tag{3.6}$$

όπου υποθέτουμε ότι ο λόγος N/D είναι ακέραιος αριθμός.

Παίρνοντας ένα στιγμιότυπο μεγέθους m ($L < m < N/D$) από κάθε υποδειγματοληπτημένη ακολουθία $z_k(t) = y_{D \cdot t-k+1}$, $t = 1, 2, \ldots, \left(N/D\right) - m + 1$, σχηματίζουμε έναν πίνακα της μορφής

$$\boldsymbol{x}_k(t) = \left[z_k(t),\, z_k(t+1),\, \ldots,\, z_k(t+m-1) \right]^T \tag{3.7}$$

και ο πίνακας συνδιακύμανσης δεδομένων για την k-οστή ακολουθία υπολογίζεται μέσω της παρακάτω μαθηματικής εξίσωσης [5]

$$R_k = \frac{1}{\left(N/D\right) - m + 1} \sum_{t=1}^{\left(N/D\right)-m+1} \boldsymbol{x}_k(t)\ \boldsymbol{x}_k^H(t) \tag{3.8}$$

Ο μέσος όρος των επιμέρους πινάκων συνδιακύμανσης υπολογίζεται στοιχείο προς στοιχείο για να παραχθεί ένας πιο ακριβής συνολικός πίνακας προς ιδιοανάλυση για την εύρεση των θέσεων (αποστάσεων από το ραντάρ) των σημειακών σκεδαστών του στόχου. Από θεωρητική άποψη, η τεχνική αυτή επιτυγχάνει D φορές καλύτερη ανάλυση από τον κλασσικό αλγόριθμο MUSIC «ριζών», καθώς η υποδειγματοληψία αυξάνει το διαχωρισμό στο πεδίο συχνότητας (ή απόστασης για το πρόβλημα ραντάρ) κατά παράγοντα D. Η τιμή της παραμέτρου m πρέπει να επιλέγεται αρκετά μεγαλύτερη από τον αριθμό των κέντρων σκέδασης του στόχου L, αλλά όχι πολύ μεγαλύτερη καθώς επιβαρύνει υπολογιστικά τον αλγόριθμο. Επιπλέον, για να έχουμε ακριβείς εκτιμήσεις για τους επιμέρους πίνακες συνδιακύμανσης, θα πρέπει η τιμή της παραμέτρου αυτής να μην είναι ιδιαίτερα συγκρίσιμη με το λόγο N/D.

3.4 Προτεινόμενη μέθοδος υψηλής φασματικής εκτίμησης βασιζόμενη στην υποδειγματοληψία σήματος

Η φασματική εκτίμηση με υποδειγματοληψία σήματος κατά έναν παράγοντα D (DEcimative 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

$$\begin{aligned} s(n) &= \sum_{i=1}^{p} \left(a_i \, e^{j\phi_i} \right) \cdot e^{(-d_i + j\,2\pi f_i)\,n} \\ &= \sum_{i=1}^{p} g_i \cdot z_i^n \;, \quad n = 0, 1, \ldots, N-1 \end{aligned} \tag{3.9}$$

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 (3.9) 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 (3.9). Ο πίνακας Hankel σχηματίζεται ως εξής

$$S = \begin{pmatrix} s(0) & s(1) & \dots & s(M_h - 1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s(L_h - 1) & s(L_h) & \cdots & s(N-1) \end{pmatrix} \tag{3.10}$$

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

$$S_{\uparrow D}^{trunc} = U_{\uparrow D}^{trunc} \Sigma_{\uparrow D}^{trunc} \left(V_{\uparrow D}^{trunc} \right)^H \tag{3.11}$$

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 $(L_h - D)$ που υπολογίζεται ως εξής

$$X = S_{\downarrow D} \cdot \left(S_{\uparrow D}^{trunc} \right)^{\dagger} \tag{3.12}$$

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

Βήμα 5: Εκτίμηση των συχνοτήτων f_i και των παραγόντων απόσβεσης d_i ($i = 1, \ldots, p$) 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 (3.9) 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 ($i = 1, \ldots, p$) μέσω της εύρεσης της λύσης ελαχίστων τετραγώνων της εξίσωσης (3.9), αντικαθιστώντας σε αυτήν τις εκτιμήσεις των συχνοτήτων και των παραγόντων απόσβεσης από το προηγούμενο βήμα.

Συγκρίνοντας τις εξισώσεις (3.1) και (3.9), με την υπόθεση ότι το σχετικό εύρος συχνοτήτων ραντάρ είναι αρκετά μικρότερο από την κεντρική συχνότητα, μπορούμε να εξάγουμε τη μαθηματική σχέση που συνδέει τις εκτιμήσεις συχνότητων του μοντέλου DE (από το πέμπτο βήμα της μεθόδου DESED) και τις εκτιμήσεις αποστάσεων του μοντέλου GTD

$$r_i = -\left(\frac{c}{2\Delta f}\right) \cdot f_i \tag{3.13}$$

Οι εκτιμήσεις πλατών του μοντέλου DE συνδέονται με τις εκτιμήσεις εντάσεων σκέδασης του μοντέλου GTD. Η σύνδεση αυτή είναι άμεση στην περίπτωση ιδανικών σημειακών σκεδαστών, η οποία είναι η συνήθης υπόθεση στην απεικόνιση ραντάρ. Στην περίπτωση που ο υπό εξέταση στόχος απαρτίζεται από διάφορους μηχανισμούς σκέδασης (εκτός των ιδανικών σημειακών σκεδαστών), η μαθηματική σχέση μεταξύ πλατών και εντάσεων σκέδασης γίνεται πιο σύνθετη, καθώς στο μοντέλο GTD

ενσωματώνεται η εξάρτηση από τη συχνότητα. Αυτή η εξάρτηση μπορεί να αγνοηθεί για αρκετά μικρές τιμές του σχετικού εύρους συχνοτήτων.

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

$$p \leq L_h - D \leq M_h \tag{3.14}$$

$$L_h + M_h - 1 \equiv N \tag{3.15}$$

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

3.5 Αριθμητικές προσομοιώσεις

Στις αριθμητικές προσομοιώσεις που παρουσιάζουμε στην ενότητα αυτή, υποθέτουμε ότι ο στόχος ραντάρ συνίσταται από ιδανικούς σημειακούς σκεδαστές, και για το λόγο αυτό προσομοιώνουμε το μοντέλο GTD με μηδενικές τιμές για τις παραμέτρους γεωμετρίας.

Η μεθόδος DESED ελαχίστων τετραγώνων και οι δύο εκδοχές του αλγορίθμου MUSIC «ριζών» (με προεπεξεργασία MSSP και με υπο-δειγματοληψία σήματος) συγκρίνονται για δύο διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης. Το πρώτο σενάριο προσομοίωσης περιλαμβάνει καλά διαχωρισμένους ως προς την απόσταση σημειακούς σκεδαστές (πέντε διακριτές ακτινικές θέσεις), ενώ στο δεύτερο σενάριο προσομοιώνουμε δύο σκεδαστές σε πολύ κοντινές θέσεις, με τη μεταξύ τους απόσταση να είναι ίση με $\frac{1}{3}\cdot\delta r$, όπου δr είναι η θεωρητική ανάλυση απόστασης. Όλες οι εντάσεις σκέδασης τίθενται ίσες με τη μονάδα, καθώς δεν εξετάζουμε την επίδραση της φάσης της έντασης σκέδασης στις αριθμητικές μας προσομοιώσεις.

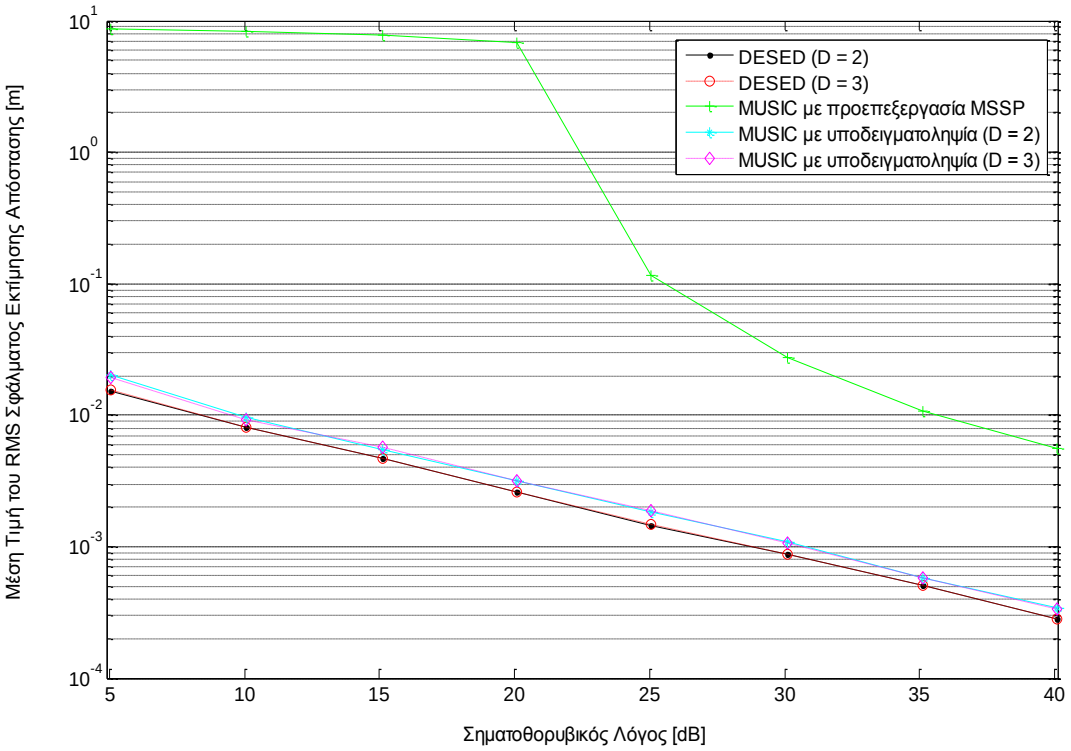
Επιλέγοντας το εύρος συχνοτήτων ραντάρ ίσο με $B = 400\,MHz$ και την κεντρική συχνότητα ίση με $f_c = 9\,GHz$, η απόσταση μεταξύ των δύο πολύ κοντινών σκεδαστών (δεύτερο σενάριο προσομοίωσης) υπολογίζεται ίση με $\Delta r = \left(c/2B \right) / 3 = 0.125\,m$. Το σχετικό εύρος συχνοτήτων ραντάρ παίρνει την τιμή $\gamma = B/f_C \approx 0.044$, η οποία είναι αρκετά μικρή ώστε να δικαιολογεί την υπόθεση ότι το μοντέλο DE προσεγγίζει το μοντέλο GTD. Το συχνοτικό βήμα της κυματομορφής βηματικής συχνότητας επιλέγεται ίσο με $\Delta f = 2\,MHz$, και κατά συνέπεια, το υπό εξέταση σήμα ραντάρ (μία ριπή παλμών βηματικής συχνότητας) αποτελείται από $N = 201$ δείγματα στο πεδίο της συχνότητας.

Οι μέσες τιμές των RMS σφαλμάτων εκτίμησης απόστασης και έντασης σκέδασης υπολογίζονται για τις τρεις μεθόδους υψηλής φασματικής ανάλυσης που προσομοιώνουμε, για ένα σύνολο από 100 δοκιμές Monte-Carlo. Για τις δύο εκδοχές του αλγορίθμου MUSIC, επιλέγουμε τη διάσταση υποπίνακα για την τεχνική MSSP ίση με $m = 40$, ώστε να επιτύχουμε μία καλή αναλογία μεταξύ ανάλυσης απόστασης και ακρίβειας στην εκτίμηση του πίνακα

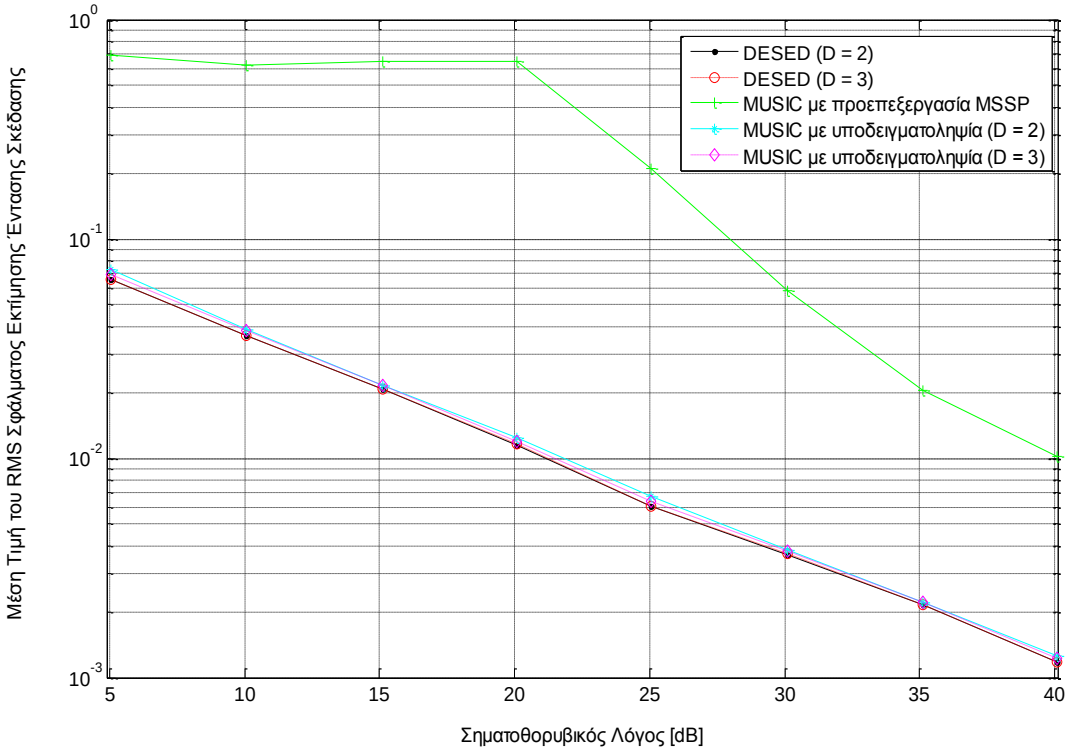
συσχέτισης δεδομένων. Ο παράγοντας υποδειγματοληψίας D παίρνει δύο τιμές, 2 και 3, για τις δύο μεθόδους που στηρίζονται στην υποδειγματοληψία σήματος.

Τα Σχήματα 3-1 και 3-2 απεικονίζουν τα αριθμητικά αποτελέσματα για την περίπτωση καλά διαχωρισμένων σημειακών σκεδαστών. Οι μέσες τιμές των RMS σφαλμάτων εκτίμησης απόστασης και έντασης σκέδασης παρουσιάζονται στα δύο αυτά γραφήματα για τιμές του σηματοθορυβικού λόγου (*SNR*) από 5 εώς 40 dB.

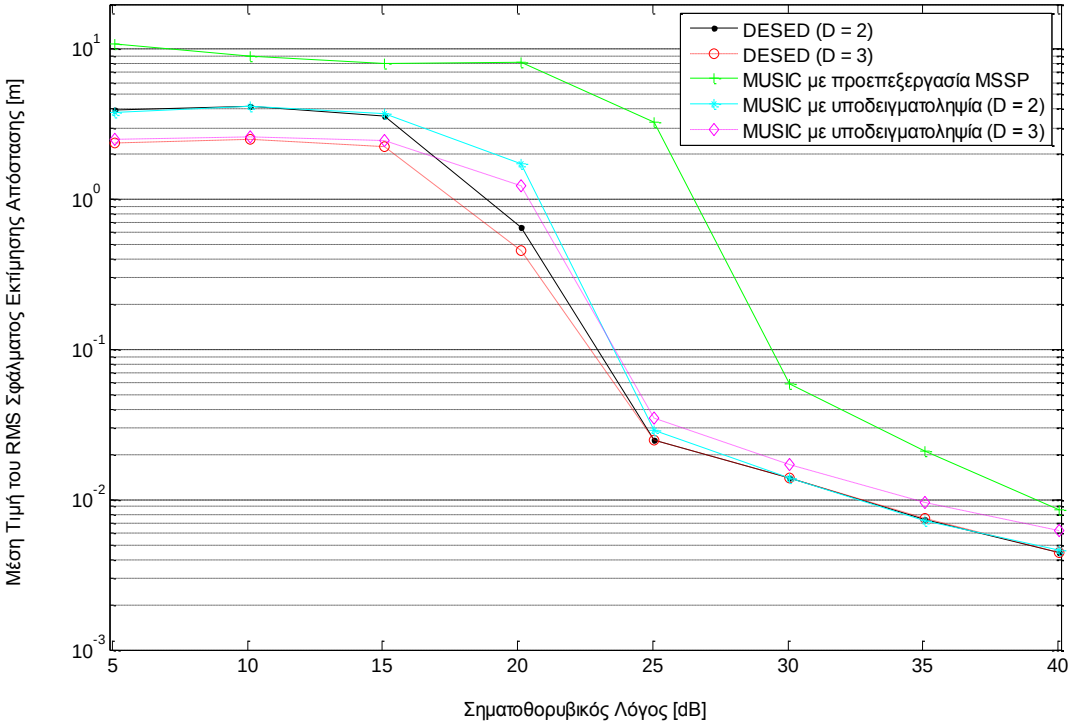
Για το δεύτερο σενάριο προσομοίωσης, παρουσιάζουμε το αντίστοιχο γράφημα για το σφάλμα εκτίμησης απόστασης στο Σχήμα 3-3. Επιπρόσθετα, στον Πίνακα 3-2 παραθέτουμε το μέσο σφάλμα εκτίμησης απόστασης για τον τέταρτο και τον πέμπτο σημειακό σκεδαστή (με την μεταξύ τους απόσταση ίση με $\frac{1}{3}\cdot\delta r$), σε συνάρτηση με το σηματοθορυβικό λόγο. Για το συγκεκριμμένο αριθμητικό αποτέλεσμα, εξετάζουμε μόνο τις δύο μεθόδους που βασίζονται στην υποδειγματοληψία σήματος για παράγοντα υποδειγματοληψίας ίσο με 3.



Σχήμα 3-1. Μέση τιμή του RMS σφάλματος εκτίμησης απόστασης σε συνάρτηση με το σηματοθορυβικό λόγο, για την περίπτωση καλά διαχωρισμένων θέσεων



Σχήμα 3-2. Μέση τιμή του RMS σφάλματος εκτίμησης έντασης σκέδασης σε συνάρτηση με το σηματοθορυβικό λόγο, για την περίπτωση καλά διαχωρισμένων θέσεων



Σχήμα 3-3. Μέση τιμή του RMS σφάλματος εκτίμησης απόστασης σε συνάρτηση με το σηματοθορυβικό λόγο, για την περίπτωση δύο πολύ κοντινών θέσεων

Πίνακας 3-2. Μέσο σφάλμα εκτίμησης απόστασης ως προς το σηματοθορυβικό λόγο, για τους δύο πολύ κοντινούς σκεδαστές του δεύτερου σεναρίου προσομοίωσης

Σηματοθορυβικός Λόγος [dB]	Μέσο Σφάλμα Εκτίμησης Απόστασης [m]			
	Τέταρτος Σκεδαστής		Πέμπτος Σκεδαστής	
	DESED (D = 3)	MUSIC (D = 3)	DESED (D = 3)	MUSIC (D = 3)
5	1.0930	1.0468	1.6454	1.7395
10	1.1503	1.0103	1.5067	1.9683
15	0.9613	0.9118	1.6680	1.8995
20	0.2492	0.7518	0.3966	0.8590
25	0.0331	0.0601	0.0388	0.0393
30	0.0187	0.0232	0.0210	0.0260
35	0.0107	0.0114	0.0105	0.0137
40	0.0065	0.0088	0.0063	0.0087

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε από τα Σχήματα 3-1 και 3-3, η μέθοδος DESED υπερέχει του αλγορίθμου MUSIC «ριζών» με προεπεξεργασία MSSP, όσον αφορά τις εκτιμήσεις απόστασης. Στην περίπτωση δύο πολύ κοντινών σημειακών σκεδαστών, η απόδοση της μεθόδου DESED αρχίζει να χειροτερεύει για τιμές του σηματοθορυβικού λόγου γύρω στα 15 dB, ενώ η απόδοση του αλγορίθμου MUSIC «ριζών» με προεπεξεργασία MSSP έχει ήδη χειροτερεύσει στα 25 dB. Και τα τρία σχήματα φανερώνουν ότι οι δύο τεχνικές που βασίζονται στην υποδειγματοληψία εμφανίζουν παρόμοια απόδοση όσον αφορά τις εκτιμήσεις απόστασης και έντασης σκέδασης. Η μέθοδος DESED είναι ελαφρά καλύτερη από τον αλγόριθμο MUSIC με υποδειγματοληψία, ενώ και οι δύο αυτές τεχνικές επιτυγχάνουν υψηλότερη ανάλυση από τον αλγόριθμο MUSIC με προεπεξεργασία MSSP. Επιπρόσθετα, είναι εμφανές μέσω των αριθμητικών αποτελεσμάτων ότι η αύξηση της ακρίβειας εκτίμησης απόστασης μέσω της αύξησης του παράγοντα υποδειγματοληψίας από 2 σε 3 είναι αμελητέα. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στο σχετικά μικρό αριθμό δειγμάτων του υπό εξέταση σήματος ραντάρ.

3.6 Συμπεράσματα και κατευθύνσεις μελλοντικής έρευνας

Στο κεφάλαιο αυτό, προτείνουμε την εφαρμογή μίας μεθόδου φασματικής εκτίμησης με υποδειγματοληψία σήματος - μέθοδος DESED - για την εκτίμηση των παραμέτρων ενός συνθετικού σήματος ραντάρ. Η προτεινόμενη μέθοδος είναι πολύ πιο ακριβής από τον κλασσικό αλγόριθμο MUSIC «ριζών», όσον αφορά τις εκτιμήσεις απόστασης και έντασης σκέδασης. Τα αποτελέσματα προσομοιώσεων, τόσο για την περίπτωση καλά διαχωρισμένων σημειακών σκεδαστών όσο και για την περίπτωση δύο πολύ κοντινών σημειακών σκεδαστών, δείχνουν ότι η μέθοδος DESED έχει ελαφρά καλύτερη απόδοση από τον αλγόριθμο MUSIC «ριζών» που βασίζεται στην υποδειγματοληψία σήματος.

Η επέκταση της χρήσης της μεθόδου DESED στο πρόβλημα της εκτίμησης παραμέτρων ενός διδιάστατου συνθετικού σήματος ραντάρ, όπως οι συντεταγμένες των κέντρων σκέδασης, είναι ένα πολύ ενδιαφέρον θέμα μελλοντικής έρευνας. Επίσης, η μονοδιάστατη εφαρμογή της μεθόδου για τον ακριβή υπολογισμό των αποστάσεων των σκεδαστών αποτελεί σημαντικό μέρος ενός συνδυαστικού αλγορίθμου αντιστάθμισης της μετατοπιστικής κίνησης του υπό εξέταση στόχου. Ο αλγόριθμος αυτός είναι υπό θεωρητική κατασκευή και η μελλοντική του εφαρμογή σε πειραματικά δεδομένα ISAR αποτελεί μία πρόκληση για την ερευνητική μας ομάδα.

3.7 Βιβλιογραφικές αναφορές

[1] A-J. van der Veen, E. F. Deprettere, and A. L. Swindlehurst, “Subspace-Based Signal Analysis Using Singular Value Decomposition,” *Proc. IEEE*, Vol. 81 (9), pp. 1277–1308, Sept. 1993.

[2] M. Cátedra, J. Pérez, F. Fernández, and I. Montiel, “A Comparison Between Super-Resolution Methods for ISAR,” *RTO Meeting Proceedings 40: High Resolution Radar Techniques*, Nov. 1999.

[3] A. V. Karakasiliotis, and P. V. Frangos, “Comparison of Several Spectral Estimation Methods for Application to ISAR Imaging,” *Proceedings of RTO SET Panel Symposium*, Oslo, Norway, pp. 1058–1067, Oct. 2004.

[4] S-E. Fotinea, I. Dologlou, and G. Carayannis, “A New Decimative Spectral Estimation Method with Unconstrained Model Order and Decimation Factor,” in *Total Least Squares and Errors-in-Variables Modeling: Analysis, Algorithms and Applications*, 1st ed., Kluwer editions, 2002, pp. 317–326.

[5] P. Stoica, and A. Nordsjo, “Subspace-Based Frequency Estimation in the Presence of Moving-Average Noise Using Decimation,” *Signal Processing*, Vol. 63 (3), pp. 211–220, 1997.

[6] B. Halder, and T. Kailath, “Efficient Estimation of Closely Spaced Sinusoidal Frequencies Using Subspace-Based Methods,” *IEEE Signal Proc. Letters*, Vol. 4 (2), pp. 49–51, Feb. 1997.

[7] L. C. Potter, D-M. Chiang, R. Carriére, and M. J. Gerry, “A GTD-based parametric model for radar scattering,” *IEEE Trans. Ant. & Propag.*, vol. 43 (10), pp. 1058–1067, Oct. 1995.

[8] K-T. Kim, D-K. Seo, and H-T. Kim, “Efficient radar target recognition using the MUSIC algorithm and invariant features,” *IEEE Trans. Ant. & Propag*, vol. 50 (3), pp. 325–337, Mar. 2002.

[9] S. van Huffel, and J. Vanderwalle, *The Total Least Squares Problem. Computational Aspects and Analysis.* Philadelphia: SIAM, Frontiers in Applied Mathematics, Vol. 9, 1991.

Κεφάλαιο 4

Διδιάστατη μοντελοποίηση ραντάρ αντίστροφου συνθετικού ανοίγματος και απεικόνιση στόχου με χρήση σήματος διαμορφωμένου κατά βηματική συχνότητα

4.1 Εισαγωγή

Οι αισθητήρες απεικόνισης υψηλής ανάλυσης, όπως το ραντάρ αντίστροφου συνθετικού ανοίγματος, έχουν την ικανότητα να εντοπίζουν, αναγνωρίζουν και να ανιχνεύουν ένα στόχο με πολύ αποδοτικό τρόπο, και είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι στην περίπτωση στόχων με χαμηλή κάθετη διατομή ραντάρ. Το ραντάρ αντίστροφου συνθετικού ανοίγματος μπορεί να παρέχει ακριβείς εκτιμήσεις της απόστασης, της κατεύθυνσης και της θέσης ενός στόχου, καθώς και υψηλής ανάλυσης εικόνες για επίδειξη και καταγραφή [1].

Τα συμβατικά συστήματα ραντάρ αντίστροφου συνθετικού ανοίγματος είναι συμφασικά ραντάρ, τα οποία καταγράφουν τα λαμβανόμενα σήματα και τα επεξεργάζονται ώστε να παράγουν μία υψηλής ποιότητας εικόνα του ακτινοβολούμενου στόχου, με βάση την αρχή απόστασης-συχνότητας Doppler. Η ανάλυση απόστασης της παραγόμενης εικόνας είναι ευθέως ανάλογη του εύρους συχνοτήτων του εκπεμπόμενου σήματος, και η τεχνική διαμόρφωσης βηματικής συχνότητας έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως από μηχανικούς συστημάτων ραντάρ για την αύξηση του εύρους συχνοτήτων και την παραγωγή προφίλ υψηλής ανάλυσης απόστασης [2-4]. Στην αναφορά [2], οι συγγραφείς προτείνουν τη χρήση μίας τεχνικής συχνοτικού βηματισμού με στόχο τη βελτίωση ήδη υπάρχοντων συστημάτων ραντάρ με μικρό εύρος συχνοτήτων. Στις αναφορές [3, 4] περιγράφεται μαθηματικά ένα μοντέλο σήματος γραμμικά διαμορφωμένου κατά συχνότητα, με συχνοτικό βηματισμό μεταξύ των διαμορφωμένων παλμών, όχι όμως από την σκοπιά των σημειακών σκεδαστών του στόχου. Μολονότι ένα τέτοιο σήμα εξασφαλίζει σημαντικά πλεονεκτήματα (αυξημένη απόσταση ανίχνευσης, χαμηλότεροι πλευρικοί λοβοί στην απόκριση απόστασης), η πολυπλοκότητα του αντίστοιχου δέκτη ραντάρ είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτή ενός συμβατικού δέκτη σήματος διαμορφωμένου κατά βηματική συχνότητα. Για αυτό το λόγο, στη συγκεκριμμένη διατριβή επιλέγουμε να ασχοληθούμε λεπτομερώς με τη συμβατική διαμόρφωση βηματικής συχνότητας.

Η ακριβής μοντελοποίηση του επιστρέφοντος σήματος, για ένα ραντάρ αντίστροφου συνθετικού ανοίγματος που χρησιμοποιεί διαμόρφωση βηματικής συχνότητας, είναι ένα θέμα μεγάλης σημασίας για την ανάπτυξη

μίας αποτελεσματικής μεθόδου ανακατασκευής της εικόνας του υπό εξέταση στόχου.

Στα πρώτα χρόνια της εξέλιξης των ραντάρ, συζητήθηκε μέσω της βιβλιογραφίας το κατά πόσο μπορεί να μοντελοποιηθεί το επιστρέφον σήμα ενός ραντάρ ως μία στοχαστική ανέλιξη, με το γκαουσιανό κυρίως μοντέλο να προσελκύει την προσοχή των ερευνητών [5]. Τα σύγχρονα συστήματα ραντάρ συνήθως επεξεργάζονται τα λαμβανόμενα δεδομένα κατά συμφασικό τρόπο, και η συχνότητα Doppler του κάθε σκεδαστή του στόχου είναι άγνωστη. Όπως επισημαίνεται στην αναφορά [6], ένα γκαουσιανό μοντέλο δεν μπορεί να περιγράψει ικανοποιητικά το επιστρέφον σήμα ενός συμφασικού ραντάρ με άγνωστη συχνότητα Doppler. Συνέπως, είναι απαραίτητη μία πιο ακριβής περιγραφή της σκεδαστικής συμπεριφοράς του στόχου.

Στις υψηλές συχνότητες, η απόκριση σκέδασης ενός στόχου μπορεί να προσεγγιστεί καλά από το άθροισμα των επιμέρους αποκρίσεων από τα διαφορετικά κέντρα σκέδασης [7]. Είναι συνηθισμένο να κατασκευάζεται ένα μοντέλο σημειακών σκεδαστών για την αναπαράσταση του υπό εξέταση στόχου. Εκτός από την εξαγωγή απλών μαθηματικών τύπων [8], ηλεκτρομαγνητικοί κώδικες πρόβλεψης της κάθετης διατομής ραντάρ έχουν εφαρμοστεί για την παραγωγή μοντέλων σημειακών σκεδαστών [9, 10]. Οι κώδικες αυτοί είναι ιδιαίτερα πολύπλοκοι υπολογιστικά, καθώς εξάγουν τις βασικές γεωμετρίες σκέδασης από ένα λεπτομερές μοντέλο CAD του υπό εξέταση στόχου, και εν συνεχεία προσθέτουν τα οπισθοσκεδαζόμενα σήματα από κάθε βασική γεωμετρία. Σύνθετα μοντέλα στόχων, τα οποία ενσωματώνουν τη γεωμετρική σκίαση και τις δευτερεύουσες ανακλάσεις, έχουν επίσης προταθεί στη βιβλιογραφία ραντάρ [11, 12]. Η «μέθοδος του απλούστερου στοιχείου», η οποία είναι επαρκώς ακριβής για σχετικά μικρά μήκη κύματος (της τάξης των 10-50 εκατοστών του μέτρου), έχει αξιοποιηθεί για τη ρεαλιστική προσομοίωση της σκέδασης τόσο από θαλάσσιους [11] όσο και από εναέριους στόχους [12]. Στο κεφάλαιο αυτό, κατασκευάζουμε με μαθηματικούς τύπους ένα μοντέλο σημειακών σκεδαστών για την περιγραφή του επιστρέφοντος σήματος για ένα ραντάρ αντίστροφου συνθετικού ανοίγματος που χρησιμοποιεί διαμόρφωση βηματικής συχνότητας. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της συμφασικής άθροισης των διαμορφωμένων κατά βηματική συχνότητα σημάτων που ανακλώνται από τους διαφορετικούς

σημειακούς σκεδαστές του στόχου. Αυτή η αναλυτική προσέγγιση έχει ως αποτέλεσμα την απαιτούμενη ακρίβεια μοντελοποίησης για την ανάπτυξη μίας αποδοτικής τεχνικής ανακατασκευής της εικόνας του στόχου.

Η απεικόνιση στόχου μέσω ενός ραντάρ αντίστροφου συνθετικού ανοίγματος στηρίζεται συνήθως σε ένα πλήθος υποθέσεων, όπως η ύπαρξη ενός ομοιογενούς στόχου στο μακρινό πεδίο του ραντάρ, η σύσταση του στόχου από σημειακούς σκεδαστές, το περιορισμένο σχετικό εύρος συχνοτήτων του ραντάρ και η μικρή γωνία ολοκλήρωσης (ή το μικρό αντίστροφο συνθετικό άνοιγμα) [8]. Οι υποθέσεις αυτές οδηγούν σε μία μαθηματική περιγραφή του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος. Στις αναφορές [8, 13], το προτεινόμενο μοντέλο σήματος είναι απλά το άθροισμα ενός αριθμού διδιάστατων μιγαδικών ημιτόνων, με τη δεύτερη εξ αυτών να λαμβάνει υπόψη και τη μετανάστευση απόστασης, καθώς και τα φασικά λάθη κατά την κάθετη απόσταση. Αυτά τα μοντέλα επιστρέφοντος σήματος, που βασίζονται στη διδιάστατη χωρική συχνότητα, είναι κατάλληλα για την εφαρμογή διδιάστατων τεχνικών φασματικής ανάλυσης, υψηλής ανάλυσης [8, 13-16]. Παρόλα αυτά, δεν προκύπτουν από την αναλυτική άθροιση όλων των οπισθοσκεδαζόμενων σημάτων από τους σημειακούς σκεδαστές του στόχου, δηλαδή δεν είναι αναλυτικά μοντέλα.

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζουμε τη μοντελοποίηση του υπό εξέταση στόχου ως ένα ορθογώνιο πλέγμα σημειακών σκεδαστών, με τις αντίστοιχες εντάσεις σκέδασης να περιγράφουν τη γεωμετρική μορφή του στόχου, πράγμα που σημαίνει ότι το προσομοιούμενο μοντέλο σημειακών σκεδαστών παραμετροποιείται από τη θέση στη διδιάστατη γεωμετρία του προβλήματος και την ένταση σκέδασης. Υποθέτουμε ότι το μοντέλο αυτό δε μεταβάλλεται σε σχέση με τη γωνία σκόπευσης, για σχετικά μικρή γωνία ολοκλήρωσης. Σε αντίθεση με τη συνήθη υπόθεση κατά την απεικόνιση ISAR, αυτή της ομοιόμορφης περιστροφικής κίνησης του στόχου γύρω από το κέντρο μάζας του, για το μοντέλο που παρουσιάζουμε υποθέτουμε ότι ο στόχος κινείται κατά μήκος μίας ευθύγραμμης τροχιάς με σταθερή ταχύτητα, χωρίς κανενός είδους περιστροφική κίνηση. Το σενάριο αυτό χαρακτηρίζει την πτήση ενός αεροσκάφους σε ένα καθορισμένο ύψος για μία μικρή χρονική περίοδο. Επιπλέον, εξετάζουμε την ενδιαφέρουσα περίπτωση της εκπομπής παλμών διαμορφωμένων κατά βηματική συχνότητα. Στη σχετική βιβλιογραφία για

ραντάρ τύπου ISAR, αναλυτικά μοντέλα του επιστρέφοντος σήματος και τεχνικές ανακατασκευής εικόνας έχουν προταθεί για την περίπτωση της γραμμικής διαμόρφωσης συχνότητας [17] και της διαμόρφωσης με κωδικοποίηση φάσης [18]. Τεχνικές αυτο-εστίασης εικόνας για την απόσβεση της μετατοπιστικής κίνησης έχουν επίσης περιγραφεί στις αναφορές [18-20], με την τελευταία εξ αυτών να συνοψίζει την τρισδιάστατη μοντελοποίηση του επιστρέφοντος σήματος για ραντάρ τύπου ISAR και διαμόρφωση βηματικής συχνότητας. Στην παρούσα διατριβή, εξετάζουμε αναλυτικά τη διδιάστατη γεωμετρία του ISAR προβλήματος. Κατά κύριο λόγο, επικεντρώνουμε την έρευνά μας στη διαμόρφωση βηματικής συχνότητας, όμως παρουσιάζουμε συνοπτικά και την αντίστοιχη διαδικασία μοντελοποίησης για την περίπτωση της γραμμικής διαμόρφωσης συχνότητας. Βασιζόμενοι στο προτεινόμενο μοντέλο του επιστρέφοντος σήματος, περιγράφουμε με λεπτομερείς μαθηματικούς τύπους τη διαδικασία ανακατασκευής της εικόνας ενός στόχου με ραντάρ τύπου ISAR. Η διαδικασία αυτή είναι ανεξάρτητη από τις παραμέτρους που καθορίζουν την τροχία του στόχου, και αποτελείται από έναν αλγόριθμο συμπίεσης απόστασης, που βασίζεται στην ετερο-συσχέτιση, και έναν αλγόριθμο συμπίεσης γωνίας αζιμουθίου, που βασίζεται στο γρήγορο μετασχηματισμό Fourier (FFT). Εφαρμόζοντας αυτούς τους αλγόριθμους στο μοντελοποιημένο επιστρέφον σήμα, μπορούμε να ανακατασκευάσουμε την εικόνα ISAR του στόχου. Προσεγγιστική ευθυγράμμιση απόστασης επιτυγχάνεται αυτόματα μέσω της καταγραφής του πρώτου παλμού βηματικής συχνότητας, που ανακλάται από τον κοντινότερο σημειακό σκεδαστή, στο πρώτο δείγμα του λαμβανόμενου σήματος ISAR. Στο κεφάλαιο αυτό, κάνουμε την υπόθεση ότι ο κοντινότερος σημειακός σκεδαστής παραμένει ο ίδιος κατά τη διάρκεια του διαστήματος συμφασικής επεξεργασίας (CPI, coherent processing interval). Συνεπώς, η ακριβής απόσβεση φάσης δεν είναι αναγκαία και δεν περιλαμβάνεται στην προτεινόμενη διαδικασία απεικόνισης στόχου.

Οι κυματομορφές που προκύπτουν μέσω της διαμόρφωσης βηματικής συχνότητας και της γραμμικής διαμόρφωσης συχνότητας είναι δύο από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες κυματομορφές σε ραντάρ υψηλής ανάλυσης απόστασης [21]. Η διαμόρφωση βηματικής συχνότητας παρουσιάζει μεγαλύτερη τεχνολογική ευελιξία, καθώς η εκπεμπόμενη κυματομορφή συνίσταται από παλμούς μίας συχνότητας, οι οποίοι εύκολα μπορούν να

παραχθούν από ένα γρήγορο και συμφασικό κύκλωμα σύνθεσης, με συχνοτικό βηματισμό [22]. Επιπλέον, για τους μονοσυχνοτικούς αυτούς παλμούς δεν απαιτείται επεξεργασία ευρέως φάσματος κατά τη λήψη τους, σε αντιδιαστολή με τους πολυσυχνοτικούς παλμούς που προκύπτουν από τη γραμμική διαμόρφωση συχνότητας. Από την άλλη πλευρά, οι κυματομορφές γραμμικής διαμόρφωσης συχνότητας, για τις οποίες το προϊόν χρόνου-εύρους ζώνης συχνοτήτων παίρνει μεγάλες τιμές, εμφανίζουν μέγαλη ανοχή στις μεταβολές της συχνότητας Doppler, μολονότι παρουσιάζουν το πρόβλημα της σύζευξης απόστασης-συχνότητας Doppler [23]. Επιπρόσθετα, το τετράγωνο του πλάτους της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης (δηλαδή η συνάρτηση αμφιβολίας με μηδενική μετατόπιση Doppler) παρουσιάζει σχεδόν το ίδιο μέγιστο ύψος πλευρικών λοβών και για τις δύο κυματομορφές [21, 22]. Αξίζει να σημειωθεί ότι οποιαδήποτε διαφορά μεταξύ των δύο κυματομορφών, σε σχέση με την ανάλυση απόστασης ή συχνότητας Doppler, δεν αναμένεται να είναι εμφανής στις παραγόμενες εικόνες ISAR, εάν καταγράφεται ένα δείγμα για κάθε συχνοτικό βήμα. Όσον αφορά την κυματομορφή γραμμικής διαμόρφωσης συχνότητας, τα συχνοτικά βήματα προκύπτουν από την διακριτότητα στο πεδίο του χρόνου.

Στο υπόλοιπο του κεφαλαίου αυτού, παρουσιάζουμε μία πλήρη ανάλυση της προσέγγισής μας στο πρόβλημα της διδιάστατης μοντελοποίησης του επιστρέφοντος σήματος για ένα ραντάρ τύπου ISAR που χρησιμοποιεί τη διαμόρφωση βηματικής συχνότητας. Για να εκτιμήσουμε την εγκυρότητα του προτεινόμενου μοντέλου, πραγματοποιούμε μία σειρά από αριθμητικές προσομοιώσεις για διάφορα σενάρια ραντάρ τύπου ISAR, και παράγουμε υψηλής ανάλυσης εικόνες ISAR για τρεις διαφορετικές γεωμετρίες αεροσκαφών. Βασιζόμενοι στην οπτική εξέταση των παραγόμενων εικόνων ISAR και στις αντίστοιχες τιμές της εντροπίας των εικόνων αυτών, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η προτεινόμενη διαδικασία απεικόνισης στόχου είναι πολύ αποτελεσματική για ρεαλιστικά σενάρια ραντάρ τύπου ISAR. Επιπλέον, παρουσιάζουμε συγκριτικά αριθμητικά αποτελέσματα (εικόνες ISAR και τιμές εντροπίας) για τις κυματομορφές διαμόρφωσης βηματικής συχνότητας και γραμμικής διαμόρφωσης συχνότητας, για ένα κοινό σενάριο προσομοίωσης. Στόχος μας είναι να εξετάσουμε τα πιθανά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των δύο κυματομορφών σε σχέση με την

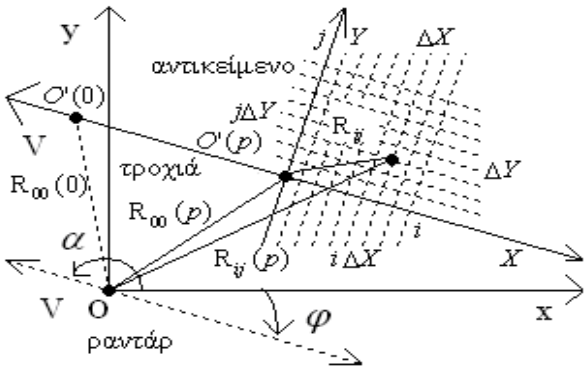
ανάλυση των παραγόμενων εικόνων ISAR. Οι μαθηματικοί τύποι περιγραφής του επιστρέφοντος σήματος για ραντάρ τύπου ISAR και γραμμική διαμόρφωση συχνότητας, καθώς και οι αντίστοιχοι αλγόριθμοι απεικόνισης, αναλύονται στις αναφορές [17, 19] και χρησιμοποιούνται για τη συγκριτική αυτή προσομοίωση.

Το υπόλοιπο του κεφαλαίου αυτού είναι οργανωμένο ως εξής: Στη δεύτερη ενότητα, καθορίζουμε τη γεωμετρία του προβλήματος ραντάρ τύπου ISAR στις δύο διαστάσεις. Στην τρίτη ενότητα, αναπτύσσουμε το προτεινόμενο μοντέλο του επιστρέφοντος σήματος, βασιζόμενοι στη διαμόρφωση βηματικής συχνότητας. Παραθέτουμε εξισώσεις στο πεδίο του χρόνου, οι οποίες περιγράφουν τα λαμβανόμενα δεδομένα για κάθε ριπή από παλμούς βηματικής συχνότητας. Επιπλέον, παρουσιάζεται λεπτομερώς ο μηχανισμός εξαγωγής του προτεινόμενου μοντέλου. Στην τέταρτη ενότητα, περιγράφονται οι διαδικασίες που πρέπει να πραγματοποιηθούν ώστε να εξαχθεί μία εικόνα ISAR από τα μη επεξεργασμένα λαμβανόμενα δεδομένα. Τα δεδομένα αυτά συντίθενται μέσω του προτεινόμενου μοντέλου του επιστρέφοντος σήματος. Στην πέμπτη ενότητα, παρουσιάζουμε διάφορα αποτελέσματα προσομοιώσεων για τρεις διαφορετικές γεωμετρίες αεροσκαφών, τα οποία αποδεικνύουν την εφαρμοσιμότητα του προτεινόμενου μοντέλου και της διαδικασίας απεικόνισης για ρεαλιστικά σενάρια ραντάρ τύπου ISAR. Στην ενότητα αυτή περιλαμβάνονται επίσης τα αποτελέσματα προσομοιώσεων από τη σύγκριση των κυματομορφών διαμόρφωσης βηματικής συχνότητας και γραμμικής διαμόρφωσης συχνότητας. Στην έκτη ενότητα, εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα σε σχέση με την παρούσα μελέτη, και επισημαίνονται μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις. Στην τελευταία ενότητα του κεφαλαίου, περιγράφουμε με αναλυτικές μαθηματικές εκφράσεις το πρόγραμμα προσομοίωσης της προτεινόμενης μεθοδολογίας μοντελοποίησης σήματος και απεικόνισης ISAR.

4.2 Γεωμετρία προβλήματος

Είναι συνηθισμένη η υπόθεση ότι ο στόχος προς απεικόνιση αποτελείται από σημειακούς σκεδαστές ή διανεμημένα κέντρα σκέδασης [24]. Η υπόθεση αυτή υιοθετείται πολύ συχνά για τις υψηλές συχνότητες των ραντάρ. Στην παρούσα μελέτη, υιοθετούμε χάριν απλότητος ένα μοντέλο σημειακών σκεδαστών και ονομάζουμε τον στόχο προς απεικόνιση με το γενικό όρο "αντικείμενο". Επιπλέον, μοντελοποιούμε τη διδιάστατη γεωμετρία του προβλήματος ISAR με το αντικείμενο και το ραντάρ να βρίσκονται σε διαφορετικά συστήματα συντεταγμένων (Σχήμα 4-1).

Το αντικείμενο ανιχνεύεται στο διδιάστατο χώρο, έχοντας τη μορφή ενός πλέγματος σημειακών σκεδαστών, το οποίο βρίσκεται στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων $XO'Y$. Το αντικείμενο, ως ενιαίο σώμα, κινείται ευθύγραμμα με σταθερή διανυσματική ταχύτητα $\mathbf{V}$ στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων xOy, στην αρχή του οποίου είναι τοποθετημένο το ραντάρ. Το σημείο $O'(0)$ καθορίζει τη θέση της αρχής του συστήματος συντεταγμένων $XO'Y$ τη χρονική στιγμή $p = \frac{N}{2}$ [13], ενώ το σημείο $O'(p)$ καθορίζει την ίδια θέση την p-οστή χρονική στιγμή (p-οστή εκπεμπόμενη ριπή).



Σχήμα 4-1. Διδιάστατη γεωμετρία ISAR: αντικείμενο και ραντάρ σε διαφορετικά συστήματα συντεταγμένων

[13] Εδώ, N είναι ο αριθμός των εκπεμπόμενων ριπών από παλμούς βηματικής συχνότητας, ο οποίος υποτίθεται χάριν απλότητος ότι είναι άρτιος. Στην περίπτωση περιττού αριθμού ριπών, το σημείο αναφοράς $O'(0)$ αντιστοιχεί στη χρονική στιγμή $p = \frac{N+1}{2}$.

Το διάνυσμα της απόστασης $\mathbf{R}_{ij}(p)=\left[x_{ij}(p),\ y_{ij}(p)\right]^T$ από το ραντάρ προς το ij-οστό σημειακό σκεδαστή την p-οστή χρονική στιγμή ορίζεται από τη διανυσματική εξίσωση

$$\mathbf{R}_{ij}(p)=\mathbf{R}_{00}(0)+\mathbf{V}\left(p-\frac{N}{2}\right)T_b+\mathbf{A}\mathbf{R}_{ij} \tag{4.1}$$

όπου

$\mathbf{R}_{00}(0)=\left[x_{00}(0),\ y_{00}(0)\right]^T$ είναι το διάνυσμα απόστασης του σημείου $O'(0)$ στο σύστημα συντεταγμένων xOy;

$\mathbf{V}=\left[V\cdot\cos a,\ V\cdot\sin a\right]^T$ είναι η διανυσματική ταχύτητα του αντικειμένου, όπου V το πλάτος της και a η γωνία της ως προς τον άξονα συντεταγμένων Ox;

N είναι ο αριθμός των εκπεμπόμενων ριπών;

T_b είναι η περίοδος επανάληψης ριπής, η οποία στην παρούσα ενότητα υποτίθεται ότι ισούται με τη διάρκεια ριπής ($T_b=M\cdot T$) [14];

M είναι ο αριθμός των παλμών σε κάθε ριπή;

T είναι η περίοδος επανάληψης παλμού;

$\mathbf{A}=\begin{bmatrix}\cos\varphi & \sin\varphi\\ -\sin\varphi & \cos\varphi\end{bmatrix}$ είναι ο πίνακας μετασχηματισμού συντεταγμένων;

φ είναι η γωνία μεταξύ των αξόνων Ox και $O'X$;

$\mathbf{R}_{ij}=\left[X_{ij},\ Y_{ij}\right]^T$ είναι το διάνυσμα απόστασης του ij-οστού σημειακού σκεδαστή, στο σύστημα συντεταγμένων $XO'Y$;

[14] Η υπόθεση αυτή ισχύει στην περίπτωση που υπάρχουν δύο ανεξάρτητες κεραίες στο ραντάρ, μία για εκπομπή και μία για λήψη. Στην περίπτωση ραντάρ με μία κοινή κεραία, η περίοδος επανάληψης ριπής πρέπει να είναι αρκετά μεγαλύτερη από τη διάρκεια ριπής, ώστε να μπορεί ο δέκτης του ραντάρ να καταγράφει τους επιστρέφοντες παλμούς.

$X_{ij} = i \cdot \Delta X$ και $Y_{ij} = j \cdot \Delta Y$ είναι οι διακριτές τιμές των συντεταγμένων του ij -οστού σημειακού σκεδαστή, στο σύστημα συντεταγμένων $XO'Y$;

ΔX και ΔY είναι οι διαστάσεις του διδιάστατου κελιού του πλέγματος σκεδαστών;

$i = \overline{0, I-1}$ είναι ο δείκτης του ij -οστού σημειακού σκεδαστή στον άξονα $O'X$;

$j = \overline{0, J-1}$ είναι ο δείκτης του ij -οστού σημειακού σκεδαστή στον άξονα $O'Y$;

I είναι ο αριθμός των σημειακών σκεδαστών κατά τον άξονα $O'X$ στο χώρο του αντικειμένου;

J είναι ο αριθμός των σημειακών σκεδαστών κατά τον άξονα $O'Y$ στο χώρο του αντικειμένου.

4.3 Μοντέλο επιστρέφοντος σήματος για ραντάρ τύπου ISAR με διαμόρφωση βηματικής συχνότητας

Η βιβλιογραφία ραντάρ τύπου ISAR δεν περιλαμβάνει ένα αναλυτικό μαθηματικό μοντέλο του επιστρέφοντος σήματος για την περίπτωση της διαμόρφωσης βηματικής συχνότητας και για τη διδιάστατη γεωμετρία του προβλήματος ISAR. Αντίστοιχα αναλυτικά μοντέλα για τη γραμμική διαμόρφωση συχνότητας και τη διαμόρφωση με κωδικοποίηση φάσης έχουν προταθεί στο παρελθόν από τους Λαζάροφ και Μίντσεφ [17, 18]. Μία περίληψη της τρισδιάστατης διαδικασίας μοντελοποίησης για διαμόρφωση βηματικής συχνότητας παρουσιάζεται στην αναφορά [20]. Σε αυτή την ενότητα, εξάγουμε λεπτομερώς τις αναλυτικές μαθηματικές εκφράσεις που περιγράφουν το προτεινόμενο διδιάστατο μοντέλο του επιστρέφοντος σήματος.

4.3.1 Εκπεμπόμενη κυματομορφή βηματικής συχνότητας

Για τη λειτουργία του ραντάρ ISAR με διαμόρφωση βηματικής συχνότητας, μία σειρά από ριπές παλμών βηματικής συχνότητας εκπέμπεται. Στην παρούσα μελέτη, υποθέτουμε ότι κάθε ριπή συνίσταται από M παλμούς, στους οποίους εφαρμόζεται διαμόρφωση βηματικής συχνότητας. Επιπλέον, N ριπές εκπέμπονται κατά τη διάρκεια του χρόνου ολοκλήρωσης εικόνας ISAR [15], ο οποίος υπολογίζεται ως $T_{\text{int}} = N \cdot T_b = N \cdot M \cdot T$.

Επιπρόσθετα, η εκπεμπόμενη ακολουθία παλμών βηματικής συχνότητας κατά τη σύνθεση του αντίστροφου ανοίγματος περιγράφεται από τον τύπο

$$s(t) = \sum_{p=1}^{N} \sum_{m=1}^{M} rect\left(\frac{t - t_{mp}}{T_p} \right) \cdot \exp\left[j\, 2\pi \cdot f_m \cdot t \right] \tag{4.2}$$

[15] Στην βιβλιογραφία ραντάρ, ονομάζεται και διάστημα συμφασικής επεξεργασίας.

όπου

$rect\left(\frac{t-t_{mp}}{T_p}\right)=\left\{\begin{array}{ll} 1, & 0\le\frac{t-t_{mp}}{T_p}<1 \\ 0, & \alpha\lambda\lambda\iota\acute{\omega}\varsigma \end{array}\right\}$, που δεικνύει ότι το πλάτος των παλμών κανονικοποιείται ως προς τη μονάδα κατά τη διάρκεια παλμού T_p;

$t_{mp}=\left[(m-1)+(p-1)\cdot M\right]\cdot T$, είναι η χρονική στιγμή στην οποία η εκπομπή του m-οστού παλμού της p-οστής ριπής αρχίζει;

$m=\overline{1,M}$ είναι ο δείκτης του εκπεμπόμενου παλμού, αλλιώς και δείκτης «ταχέος χρόνου» [25];

$p=\overline{1,N}$ είναι ο δείκτης της εκπεμπόμενης ριπής, αλλιώς και δείκτης «βραδέος χρόνου» [25];

$f_m=f_0+(m-1)\cdot\Delta f$ είναι η συχνότητα φέροντος του m-οστού παλμού, που εκπέμπεται την χρονική στιγμή t_{mp};

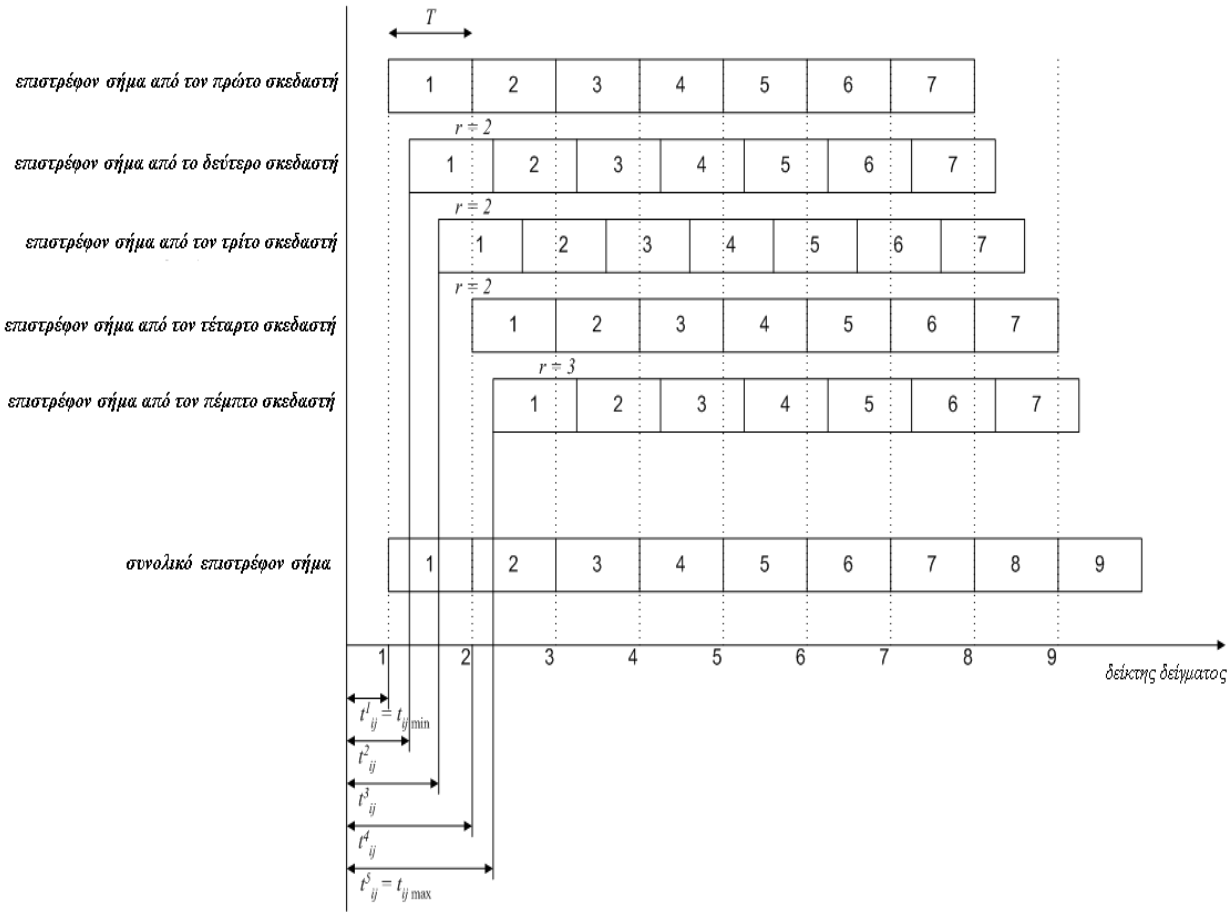
f_0 είναι η αρχική συχνότητα φέροντος, για το συγκεκριμμένο εύρος συχνοτήτων ραντάρ $B=M\cdot\Delta f$;

Δf είναι το συχνοτικό βήμα της διαμόρφωσης βηματικής συχνότητας.

4.3.2 Διερεύνηση ως προς το χρόνο άφιξης των επιστρέφοντων παλμών από τους διάφορους σημειακούς σκεδαστές

Πριν να παρουσιάσουμε τις εξισώσεις του προτεινόμενου μοντέλου επιστρέφοντος σήματος, αξίζει να εξετάσουμε λεπτομερώς τη λήψη των ακολουθιών παλμών βηματικής συχνότητας που οπισθοσκεδάζονται από τους διάφορους σημειακούς σκεδαστές του αντικειμένου (στόχου).

Το Σχήμα 4-2 απεικονίζει ένα ενδεικτικό παράδειγμα της διαδικασίας σχηματισμού του επιστρέφοντος σήματος ISAR, για ένα αντικείμενο που αποτελείται από πέντε σημειακούς σκεδαστές. Για το παράδειγμα αυτό, κάθε ριπή συνίσταται από επτά παλμούς ($M=7$), αριθμημένους από το 1 εώς το 7.



Σχήμα 4-2. Σχηματισμός επιστρέφοντος σήματος ISAR: άθροιση των ανακλώμενων σημάτων από τους πέντε σημειακούς σκεδαστές του αντικειμένου.

Η συνολική καθυστέρηση του σήματος ISAR που οπισθοσκεδάζεται από τον ij-οστό σημειακό σκεδαστή, για την p-οστή εκπεμπόμενη ριπή, δίνεται από τον τύπο $t_{ij}(p) = \dfrac{2 \cdot R_{ij}(p)}{c}$, όπου $R_{ij}(p)$ συμβολίζει το πλάτος του διανύσματος απόστασης από το ραντάρ εώς τον ij-οστό σημειακό σκεδαστή του αντικειμένου, ορίζεται από τον τύπο

$$R_{ij}(p) = \sqrt{x_{ij}^{\,2}(p) + y_{ij}^{\,2}(p)} \tag{4.3}$$

Οι συντεταγμένες του ij-οστού σημειακού σκεδαστή την p-οστή χρονική στιγμή υπολογίζονται μέσω της εξίσωσης (4.1), την οποία ξαναγράφουμε παρακάτω υπό μορφή πινάκων

$$\begin{bmatrix} x_{ij}(p) \\ y_{ij}(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{00}(0) + V_x \cdot T_b \cdot \left(p - \frac{N}{2} \right) \\ y_{00}(0) + V_y \cdot T_b \cdot \left(p - \frac{N}{2} \right) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi \\ -\sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_{ij} \\ Y_{ij} \end{bmatrix} \tag{4.4}$$

όπου $V_x = V \cdot \cos a$ και $V_y = V \cdot \sin a$ είναι οι καρτεσιανές συνιστώσες της διανυσματικής ταχύτητας του αντικειμένου.

Τη χρονική στιγμή $t_{ij}^1 = t_{ij\min}$, ο πρώτος παλμός, που ανακλάται από τον κοντινότερο σημειακό σκεδαστή, ανιχνεύεται από το ραντάρ. Συμβολίζουμε ως $t_{ij\min}(p) = \frac{2 \cdot R_{ij\min}(p)}{c}$ την ελάχιστη χρονική καθυστέρηση του λαμβανόμενου σήματος ISAR κατά την p-οστή ριπή, όπου $R_{ij\min}(p)$ συμβολίζει το πλάτος του διανύσματος απόστασης από το ραντάρ εώς τον κοντινότερο σημειακό σκεδαστή του αντικειμένου. Ξεκινώντας από τη χρονική στιγμή $t_{ij\min}$, ένας δείκτης τρέχοντος δείγματος m, για το σήμα ISAR που καταγράφεται από το δέκτη του ραντάρ, αυξάνεται για κάθε περίοδο επανάληψης παλμού.

Τη χρονική στιγμή t_{ij}^2, ο πρώτος παλμός που ανακλάται από το δεύτερο κοντινότερο σημειακό σκεδαστή ανιχνεύεται, και ο επόμενος δείκτης δείγματος είναι $r = 2$. Ο δείκτης r είναι θεμελιώδης για τη μαθηματική περιγραφή του προτεινόμενου μοντέλου επιστρέφοντος σήματος ISAR, επειδή καθορίζει τη συχνότητα του κάθε παλμού, που οπισθοσκεδάζεται από τους διάφορους σημειακούς σκεδαστές και δημιουργεί παρεμβολές στο σήμα ISAR που οπισθοσκεδάζεται από τον κοντινότερο σημειακό σκεδαστή. Υπολογίζουμε την τιμή του δείκτη r, για τον ij-οστό σημειακό σκεδαστή και την p-οστή ριπή, μέσω της εξίσωσης

$$r = 1 + \left\lceil \frac{t_{ij}(p) - t_{ij\min}(p)}{T} \right\rceil \tag{4.5}$$

όπου $\lceil x \rceil$ συμβολίζει τη συνάρτηση «οροφής» (δηλαδή το μικρότερο ακέραιο αριθμό που είναι μεγαλύτερος από ή ίσος με το x).

Ομοίως, τη χρονική στιγμή t_{ij}^{3}, ο πρώτος παλμός που ανακλάται από τον τρίτο κοντινότερο σημειακό σκεδαστή ανιχνεύεται, και ο επόμενος δείκτης δείγματος παίρνει την τιμή $r = 2$. Για το παράδειγμα που απεικονίζεται στο Σχήμα 4-2, η πλειοψηφία των οπισθοσκεδαζόμενων σημάτων από τους διαφόρους σημειακούς σκεδαστές του αντικειμένου εμφανίζουν μικρές τιμές για το μέγεθος $\{t_{ij}(p) - t_{ij\min}(p)\}$, σε σύγκριση με την επιλεγμένη τιμή της περιόδου επανάληψης παλμού. Για το λόγο αυτό, ο δείκτης r παίρνει στην πλειοψηφία των περιπτώσεων την τιμή $r = 2$, η οποία αποτελεί επίσης και τη συνηθέστερη περίπτωση για τα ρεαλιστικά σενάρια ISAR των αριθμητικών μας προσομοιώσεων.

Τη χρονική στιγμή t_{ij}^{4}, το επιστρέφον σήμα από τον τέταρτο σημειακό σκεδαστή λαμβάνεται και ο επόμενος δείκτης δείγματος είναι οριακά $r = 2$. Έτσι, οι παλμοί με συχνότητα φέροντος f_1 από το δεύτερο, τον τρίτο και τον τέταρτο σημειακό σκεδαστή αθροίζονται με τον παλμό με συχνότητα φέροντος f_2, από τον κοντινότερο σημειακό σκεδαστή.

Τη χρονική στιγμή $t_{ij}^{5} = t_{ij\max}$, το επιστρέφον σήμα από το μακρινότερο σημειακό σκεδαστή λαμβάνεται και ο επόμενος δείκτης δείγματος μεταβάλλεται σε $r = 3$. Συμβολίζουμε ως $t_{ij\max}(p) = \frac{2 \cdot R_{ij\max}(p)}{c}$ τη μέγιστη χρονική καθυστέρηση του λαμβανόμενου σήματος ISAR κατά την p-οστή ριπή, όπου $R_{ij\max}(p)$ συμβολίζει το πλάτος του διανύσματος απόστασης από το ραντάρ εώς το μακρινότερο σημειακό σκεδαστή του αντικειμένου.

Το συνολικό σήμα ISAR που καταγράφεται από το δέκτη αποτελείται από εννέα δείγματα (Σχήμα 4-2). Συμβολίζοντας ως $L(p) = \left\lceil \frac{t_{ij\max}(p) - t_{ij\min}(p)}{T} \right\rceil$ την

κανονικοποιημένη χρονική διάσταση του αντικειμένου για την p-οστή ριπή, εύκολα συνάγουμε ότι ο δείκτης τρέχοντος δείγματος m παίρνει τιμές από 1 εώς $M + L(p)$. Για να αποθηκεύσουμε τα λαμβανόμενα σήματα ISAR για όλες τις εκπεμπόμενες ριπές – για λόγους ψηφιακής επεξεργασίας – πρέπει να προκαθορίσουμε τη μέγιστη αναμενόμενη κανονικοποιημένη χρονική διάσταση $L_{\max} = \max\{L(p)\}$, με βάση το αναμενόμενο μέγεθος του αντικειμένου.

Επιπρόσθετα, όσον αφορά τη μοντελοποίηση του λαμβανόμενου σήματος ISAR, ο χρόνος καθυστέρησης t για την p-οστή ριπή παίρνει τιμές που ανήκουν στο διάστημα $t_{ij\min}(p) \le t \le t_{ij\max}(p) + M \cdot T$. Έτσι, ο διακριτός χρόνος καθυστέρησης μπορεί να περιγραφεί από τη σχέση $t = t_m = t_{ij\min}(p) + (m-1)\cdot T$, όπου $m = \overline{1, M + L(p)}$. Το πρώτο κελί απόστασης, όπου ένα οπισθο-σκεδαζόμενο σήμα ISAR ανιχνεύεται, αντιστοιχεί στο δείκτη $m = 1$ και σε χρόνο καθυστέρησης $t = t_{ij\min}(p)$. Το κελί απόστασης με δείκτη $m = 1 + L(p)$ αντιστοιχεί σε χρόνο καθυστέρησης $t = t_{ij\min}(p) + L(p)\cdot T = \left\lceil \frac{t_{ij\max}(p)}{T} \right\rceil \cdot T$. Αυτές είναι οι χρονικές στιγμές στις οποίες οι πρώτοι παλμοί που ανακλώνται από τον κοντινότερο και το μακρινότερο σημειακό σκεδαστή του αντικειμένου καταγράφονται, αντιστοίχως.

4.3.3 Προτεινόμενο μοντέλο επιστρέφοντος σήματος ISAR

Με βάση την εξίσωση (4.2) και την πλήρη ανάλυση της διαδικασίας σχηματισμού του επιστρέφοντος σήματος ISAR, όπως περιγράφεται παραπάνω, εξάγουμε εν συνεχεία τις αναλυτικές μαθηματικές εκφράσεις του προτεινόμενου μοντέλου επιστρέφοντος σήματος ISAR.

Στην ενότητα αυτή, κάνουμε χάριν απλότητας την υπόθεση ότι οι συντελεστές ανάκλασης, που αντιστοιχούν στους σημειακούς σκεδαστές του αντικειμένου, παίρνουν θετικές, πραγματικές τιμές. Χρησιμοποιούμε το

σύμβολο a_{ij} στις εξισώσεις του προτεινόμενου μοντέλου για το πλάτος του συντελεστή ανάκλασης του ij -οστού σημειακού σκεδαστή του αντικειμένου.

Το σήμα ISAR που οπισθοσκεδάζεται από τον ij -οστό σημειακό σκεδαστή, και αντιστοιχεί στην p -οστή ριπή και στο m -οστό παλμό με συχνότητα φέροντος f_m, δίνεται από τον τύπο

$$s_{ij}(p,m) = a_{ij} \cdot rect\left(\frac{t - t_{ij}(p)}{T_b}\right) \cdot \exp\left[j\,2\pi \cdot f_{m-r+1} \cdot \left(t - t_{ij}(p)\right)\right] \qquad (4.6)$$

όπου

$rect\left(\frac{t - t_{ij}(p)}{T_b}\right) = \left\{ \begin{array}{ll} 1, & 0 \le \frac{t_{ij\min}(p) + (m-1)\cdot T - t_{ij}(p)}{T_b} < 1 \\ 0, & \alpha\lambda\lambda\iota\acute{\omega}\varsigma \end{array} \right\}$, που καθορίζει τη διάρκεια της ριπής παλμών βηματικής συχνότητας που ανακλάται από τον ij -οστό σημειακό σκεδαστή;

$t = t_m = t_{ij\min}(p) + (m-1)\cdot T$ είναι ο διακριτός χρόνος καθυστέρησης, που αντιστοιχεί στον ij -οστό σημειακό σκεδαστή και στην p -οστή εκπεμπόμενη ριπή;

$p = \overline{1, N}$, και, $m = \overline{1, M + L(p)}$ είναι οι δείκτες ριπής και δείγματος, αντιστοίχως;

$f_{m-r+1} = f_0 + (m-r)\cdot \Delta f$ είναι η συχνότητα φέροντος του λαμβανόμενου παλμού, κατάλληλα δεικτοδοτημένη λαμβάνοντας υπόψη την ολίσθηση του χρόνου λήψης του ανακλώμενου σήματος από τον ij -οστό σημειακό σκεδαστή, αναφορικά με τη χρονική στιγμή $t_{ij\min}(p)$.

Το σήμα ISAR που οπισθοσκεδάζεται από ολόκληρο το αντικείμενο είναι το γεωμετρικό άθροισμα των επιμέρους σημάτων ISAR που οπισθοσκεδάζονται από όλους τους σημειακούς σκεδαστές, και γράφεται ως

$$S(p,m) = \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} a_{ij} \cdot rect\left(\frac{t - t_{ij}(p)}{T_b}\right) \cdot \exp\left[j\,2\pi \cdot f_{m-r+1} \cdot \left(t - t_{ij}(p)\right)\right] \qquad (4.7)$$

η οποία αποτελεί την εξίσωση που συνοψίζει τη διαδικασία σχηματισμού του επιστρέφοντος σήματος ISAR.

4.3.4 Συνυπολογισμός του θορύβου στο μοντέλο επιστρέφοντος σήματος ISAR

Εκτός από το σήμα ISAR που οπισθοσκεδάζεται από ολόκληρο το αντικείμενο, θερμικός ή εξωτερικός θόρυβος λαμβάνεται από την κεραία του ραντάρ. Περιγράφουμε τον προσθετικό αυτό θόρυβο ως μία μιγαδική γκαουσιανή τυχαία μεταβλητή $n(p,m)$, με μηδεμική μέση τιμή και σταθερή διακύμανση που εξαρτάται από την επιλεγμένη τιμή του σηματοθορυβικού λόγου. Η μεταβλητή θορύβου αναφέρεται σε ένα σύνολο από N ριπές, που αποτελούνται κατά το μέγιστο από $M + L_{\max}$ δείγματα. Για λόγους ψηφιακής επεξεργασίας, είναι πιο βολικό να προσθέσουμε μηδενικά στο μοντέλο σήματος $S(p,m)$, στο τέλος εκείνων των ριπών που περιέχουν λιγότερα δείγματα από $M + L_{\max}$ (δηλαδή για τις ριπές που ισχύει $L(p) < L_{\max}$). Στην πράξη, ο δέκτης του ραντάρ προκαθορίζει μία αναμενόμενη τιμή για το μέγεθος $L_{\max}$ και δειγματοληπτεί το λαμβανόμενο θορυβώδες σήμα ISAR στις συγκεκριμμένες χρονικές στιγμές $t = (p-1)\cdot T_b + t_{ij\min}(p) + (m-1)\cdot T$ ($p = \overline{1,N}$ και $m = \overline{1, M + L_{\max}}$). Έτσι, λευκός γκαουσιανός θόρυβος προστίθεται επίσης και στα δεδομένα $S(p,m)$ με μηδενική τιμή, για ρεαλιστικές προσομοιώσεις.

Το συνολικό επιστρέφον σήμα ISAR είναι το άθροισμα του ντετερμινιστικού όρου δεδομένων $S(p,m)$ και του τυχαίου όρου θορύβου $n(p,m)$

$$S_n(p,m) = S(p,m) + n(p,m) \tag{4.8}$$

η οποία αποτελεί την εξίσωση που περιγράφει το διδιάστατο πίνακα λαμβανόμενων, μιγαδικών, μη επεξεργασμένων δεδομένων.

Οι μαθηματικές εκφράσεις (4.3)-(4.8) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση του συνολικού επιστρέφοντος σήματος ISAR από τους σημειακούς σκεδαστές που συνιστούν το στόχο προς απεικόνιση, ο οποίος κινείται κατά μήκος μίας ευθύγραμμης τροχιάς με σταθερή ταχύτητα. Η εγκυρότητα του προτεινόμενου μοντέλου επιστρέφοντος σήματος ISAR εξετάζεται για διάφορα σενάρια προσομοίωσης στην ενότητα 4.5, όπου παρουσιάζονται αποτελέσματα προσομοιώσεων για διαφορετικούς στόχους, διαφορετικές γεωμετρίες ISAR και συνθήκες σηματοθορυβικού λόγου.

4.4 Ανακατασκευή εικόνας ISAR

Το κύριο αντικείμενο ενός ραντάρ απεικόνισης τύπου ISAR είναι η ανακατασκευή της εικόνας του στόχου. Για να σχηματιστεί μία καλά εστιασμένη διδιάστατη εικόνα ISAR, ένας συμβατικός δέκτης ραντάρ πρέπει να εκτελέσει μία σειρά από βασικές διαδικασίες:

(i) Συμπίεση απόστασης, που ουσιαστικά αποτελεί μία διαδικασία «πανομοιότυπου» φιλτραρίσματος που διαχωρίζει τους σημειακούς σκεδαστές του στόχου στην κατεύθυνση της απόστασης,

(ii) Αντιστάθμιση μετατοπιστικής κίνησης, η οποία τυπικά περιλαμβάνει προσεγγιστική ευθυγράμμιση απόστασης για τη διατήρηση όλων των σημειακών σκεδαστών σε συγκεκριμμένα κελιά απόστασης (δηλαδή «ιχνηλασία απόστασης» [25]), και ακριβή διόρθωση φάσης για τη διατήρηση σταθερών συχνοτήτων Doppler για όλους τους σκεδαστές κατά τη διάρκεια του διαστήματος συμφασικής επεξεργασίας (δηλαδή «ιχνηλασία συχνότητας Doppler» [25]),

(iii) Αντιστάθμιση περιστροφικής κίνησης, που συχνά επιτυγχάνεται μέσω του ανασχηματισμού πολικών συντεταγμένων [21, 25], και,

(iv) Συμπίεση γωνίας αζιμουθίου, η οποία κυρίως πραγματοποιείται μέσω ενός διακριτού ή ενός γρήγορου μετασχηματισμού Fourier, και διαχωρίζει τους σημειακούς σκεδαστές του στόχου κατά συχνότητα Doppler, και, επομένως, στην κατεύθυνση της κάθετης απόστασης.

Στο κεφάλαιο αυτό, εφόσον μοντελοποιούμε το διδιάστατο πρόβλημα ISAR με το αντικείμενο να κινείται κατά μήκος μίας ευθύγραμμης τροχιάς με σταθερή ταχύτητα, αφήνουμε την αντιστάθμιση περιστροφικής κίνησης εκτός των απαραίτητων βημάτων που πρέπει να γίνουν για να ολοκληρωθεί η διαδικασία ανακατασκευής της εικόνας ISAR του αντικειμένου. Επιπλέον, η

«ιχνηλασία συχνότητας Doppler» διορθώνει τα εναπομείναντα σφάλματα φάσης (μετά τη προσεγγιστική ευθυγράμμιση απόστασης), που προκύπτουν όταν ο κοντινότερος σημειακός σκεδαστής του στόχου αλλάζει διεύθυνση (δηλαδή αλλάζουν οι αντίστοιχοι δείκτες i και j) από ριπή σε ριπή. Στην παρούσα εργασία, κάνουμε την υπόθεση ότι ο κοντινότερος σημειακός σκεδαστής παραμένει ο ίδιος κατά τη διάρκεια του διαστήματος συμφασικής επεξεργασίας. Για αυτό το λόγο, η «ιχνηλασία συχνότητας Doppler» δεν περιλαμβάνεται στην προτεινόμενη διαδικασία απεικόνισης. Αν κρίνεται απαραίτητο, γνωστές τεχνικές αυτο-εστίασης εικόνας μπορούν να εφαρμοστούν για να αποσβέσουν την κηλίδωση της εικόνας ISAR [18-20].

Στις επόμενες παραγράφους, περιγράφουμε μαθηματικά τους επιμέρους αλγόριθμους που απαρτίζουν την προτεινόμενη διαδικασία απεικόνισης ISAR, συγκεκριμμένα τη συμπίεση απόστασης, την ευθυγράμμιση απόστασης, και, τη συμπίεση γωνίας αζιμουθίου. Εφαρμόζοντας αυτούς τους αλγόριθμους στο προτεινόμενο μοντέλο επιστρέφοντος σήματος, ανακατασκευάζουμε την εικόνα ISAR του υπό εξέταση στόχου.

4.4.1 Συμπίεση απόστασης

Υπάρχουν δύο μεθοδολογίες για να πραγματοποιηθεί η συμπίεση απόστασης [20]: (i) να αποδιαμορφωθεί το λαμβανόμενο σήμα ISAR και να εφαρμοστεί αντίστροφος γρήγορος μετασχηματισμός Fourier στο σήμα βασικής ζώνης που προκύπτει, και (ii) να ετερο-συσχετιστεί κάθε ριπή του λαμβανόμενου σήματος ISAR με μία εκπεμπόμενη ριπή αναφοράς. Αυτές οι δύο μεθοδολογίες αναπτύσσονται στις επόμενες παραγράφους και εύκολα αποδεικνύονται ισοδύναμες, χρησιμοποιώντας τη μαθηματική σχέση μεταξύ ετερο-συσχέτισης και συνέλιξης, και, εφαρμόζοντας το πολύ γνωστό θεώρημα της συνέλιξης. Λόγω της υπολογιστικής του ευθύτητας, στις αριθμητικές μας δοκιμές, προσομοιώνεται ο αλγόριθμος συμπίεσης απόστασης που βασίζεται στην ετερο-συσχέτιση.

4.4.1.1 Μεθοδολογία βασιζόμενη στον αντίστροφο γρήγορο μετασχηματισμό Fourier

Η πρώτη μεθοδολογία συμπίεσης απόστασης συνίσταται από δύο βήματα επεξεργασίας.

Το πρώτο βήμα είναι η αποδιαμόρφωση του λαμβανόμενου σήματος ISAR, το οποίο μοντελοποιείται μέσω των μαθηματικών εκφράσεων της ενότητας 4.3. Η διαδικασία αποδιαμόρφωσης επιτυγχάνεται πολλαπλασιάζοντας κάθε ριπή των λαμβανόμενων, μη επεξεργασμένων δεδομένων $S_n(p,m)$ με το μιγαδικό συζυγές μίας εκπεμπόμενης ριπής παλμών βηματικής συχνότητας, που δίνεται από τον τύπο $\exp\left[-j\,2\pi\cdot f_m\cdot(m-1)\cdot T\right]$, για τιμές του δείκτη παλμού στο διάστημα $m=\overline{1,M}$. Το αποδιαμορφωμένο σήμα ISAR αποτελείται από μόνο M δείγματα, όσα ακριβώς και ο αριθμός των παλμών ανά ριπή. Τα τελευταία δείγματα κάθε ριπής του λαμβανόμενου σήματος ISAR, για τα οποία ο δείκτης δείγματος m είναι μεγαλύτερος από M, αγνοούνται. Έτσι, η μαθηματική έκφραση της διαδικασίας αποδιαμόρφωσης για κάθε λαμβανόμενη ριπή είναι

$$\hat{S}(p,m)=S_n(p,m)\cdot\exp\left[-j\,2\pi\cdot f_m\cdot(m-1)\cdot T\right] \tag{4.9}$$

Το δεύτερο βήμα περιλαμβάνει την εφαρμογή του αντίστροφου γρήγορου μετασχηματισμού Fourier στο αποδιαμορφωμένο σήμα ISAR κατά τη διάσταση του δείγματος, δημιουργώντας ένα προφίλ απόστασης για κάθε λαμβανόμενη ριπή. Η αντίστοιχη μαθηματική έκφραση είναι

$$\hat{S}(p,n)=\sum_{m=1}^{M}\hat{S}(p,m)\cdot\exp\left[j\,2\pi\frac{n\cdot m}{M}\right] \tag{4.10}$$

όπου $p=\overline{1,N}$ είναι ο δείκτης ριπής και $n=\overline{1,M}$ είναι ο δείκτης κελιού απόστασης.

4.4.1.2 Μεθοδολογία βασιζόμενη στην ετερο-συσχέτιση

Η δεύτερη μεθοδολογία συμπίεσης απόστασης πραγματοποιείται μέσω της ετερο-συσχέτισης κάθε ριπής των λαμβανόμενων δεδομένων $S_n(p,m)$ με ένα σήμα αναφοράς της μορφής $s_{ref}(m) = \exp\left[j\,2\pi \cdot f_m \cdot (m-1) \cdot T \right]$, $m = \overline{1, M}$, δηλαδή μία ριπή παλμών βηματικής συχνότητας που αρχίζει να εκπέμπεται τη χρονική στιγμή $t = 0$. Κάθε λαμβανόμενη ριπή περιλαμβάνει $M + L_{\max}$ δείγματα, με την προσθήκη μηδενικών στο τέλος της αν χρειάζεται, και όλα τα δείγματα χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό της ετερο-συσχέτισης.

Το αποτέλεσμα αυτής της μεθοδολογίας είναι ένα προφίλ απόστασης, για κάθε λαμβανόμενη ριπή, που εμφανίζει μεγάλες τιμές του πλάτους ετερο-συσχέτισης σε συγκεκριμμένα κελιά απόστασης που αντιστοιχούν στις θέσεις απόστασης των σημειακών σκεδαστών του στόχου.

Η βασιζόμενη στην ετερο-συσχέτιση συμπίεση απόστασης περιγράφεται μαθηματικά ως εξής

$$\hat{S}(p, n_{ccl}) = \sum_{l=1}^{M} S_n(p, l-1+n_{ccl}) \cdot s_{ref}^{*}(l) = \sum_{l=1}^{M} S_n(p, l-1+n_{ccl}) \cdot \exp\left[-j\,2\pi \cdot f_l \cdot (l-1) \cdot T \right] \Leftrightarrow$$

$$\overset{(m = l-1+n_{ccl})}{\Leftrightarrow} \quad \hat{S}(p, n_{ccl}) = \sum_{m=n_{ccl}}^{n_{ccl}+M-1} S_n(p,m) \cdot \exp\left[-j\,2\pi \cdot f_{m-n_{ccl}+1} \cdot (m - n_{ccl}) \cdot T \right] \tag{4.11}$$

όπου $f_{m-n_{ccl}+1} = f_0 + (m - n_{ccl}) \cdot \Delta f$ και $n_{ccl} = \overline{1, L_{\max}+1}$ είναι ο δείκτης υστέρησης φάσης ετερο-συσχέτισης.

Επιπρόσθετα, για να επιτύχουμε αύξηση της ικανότητας ανάλυσης απόστασης, κάθε ριπή των λαμβανόμενων, μη επεξεργασμένων δεδομένων $S_n(p,m)$ συμπληρώνεται με μηδενικά για τις τιμές του δείκτη δείγματος $m = \overline{M + L_{\max} + 1,\ 2M - 1}$. Μετά την προσθήκη $M - (L_{\max} + 1)$ μηδενικών, κάθε προφίλ απόστασης αποτελείται από M δείγματα (δηλαδή $n_{ccl} = \overline{1, M}$).

4.4.2 Ευθυγράμμιση απόστασης

Καταγράφωντας τον πρώτο παλμό που ανακλάται από τον κοντινότερο σημειακό σκεδαστή, ο οποίος λαμβάνεται μετά από χρονική καθυστέρηση $t_{ij\min}(p)$, στο πρώτο δείγμα του λαμβανόμενου σήματος ISAR και ισοδύναμα στο πρώτο κελί απόστασης του κάθε προφίλ απόστασης, πραγματοποιείται αυτομάτως η διαδικασία της προσεγγιστικής ευθυγράμμισης απόστασης. Βέβαια, απαιτείται ο κοντινότερος σημειακός σκεδαστής να είναι ο ίδιος κατά τη σύνθεση του αντίστροφου ανοίγματος, ειδάλλως πρέπει να εφαρμοστούν τεχνικές αυτο-εστίασης εικόνας [18-20].

4.4.3 Συμπίεση γωνίας αζιμουθίου

Ο συμβατικός γρήγορος μετασχηματισμός Fourier χρησιμοποιείται για να συμπιεστούν τα δημιουργούμενα προφίλ απόστασης ως προς το συνθετικό άνοιγμα της γωνίας αζιμουθίου. Τα δεδομένα των προφίλ απόστασης στο πεδίο του χρόνου $\hat{S}(p,n)$ [16] μετατρέπονται σε δεδομένα του φάσματος Doppler στο πεδίο της συχνότητας $\hat{S}(k,n)$, για κάθε κελί απόστασης. Πριν την εφαρμογή του γρήγορου μετασχηματισμού Fourier στα δεδομένα των προφίλ απόστασης, μπορούμε επίσης να προσθέσουμε μηδενικά για να αυξήσουμε την προκύπτουσα φασματική ανάλυση.

Η βασιζόμενη στο γρήγορο μετασχηματισμό Fourier συμπίεση γωνίας αζιμουθίου περιγράφεται μαθηματικά ως εξής

$$\hat{S}(k,n) = \sum_{p=1}^{N} \hat{S}(p,n) \cdot \exp\left[-j\,2\pi \frac{k \cdot p}{N} \right] \tag{4.12}$$

[16] Χάριν απλότητας, ο υπογεγραμμένος δείκτης παραλείπεται από τα δεδομένα των προφίλ απόστασης $\hat{S}(p,n_{ccl})$, στην περίπτωση της βασιζόμενης στην ετερο-συσχέτιση συμπίεσης απόστασης.

όπου $k=\overline{1,N}$ είναι ο δείκτης συχνότητας Doppler και $n=\overline{1,M}$ είναι ο δείκτης κελιού απόστασης.

Το πλάτος των δεδομένων που προκύπτουν από τη συμπίεση γωνίας αζιμουθίου $\left|\hat{S}(k,n)\right|$ αποτελεί την ανακατασκευασμένη εικόνα ISAR του στόχου (αλλιώς και εικόνα απόστασης-Doppler).

4.4.4 Επιλογή παραμέτρων για τετραγωνική ανάλυση εικόνας ISAR

Συνήθως στην πράξη, η ανάλυση απόστασης Δr_s επιλέγεται ίση με την ανάλυση κάθετης απόστασης Δr_c. Έτσι, η προκύπτουσα εικόνα ISAR αποτελείται από κελιά απόστασης με τετραγωνική ανάλυση.

Η μαθηματική εξίσωση που μας δίνει την αναγκαία διάρκεια ριπής T_b σε συνάρτηση με την επιθυμητή ανάλυση κάθετης απόστασης Δr_c [20] είναι παρόμοια με τον κλασσικό τύπο που συνδέει την ανάλυση κάθετης απόστασης με το αντίστροφο συνθετικό άνοιγμα [21]. Έτσι έχουμε

$$T_b = \frac{\lambda \cdot R_{00}(0)}{2 \cdot NV \cdot \Delta r_c \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right)} \tag{4.13}$$

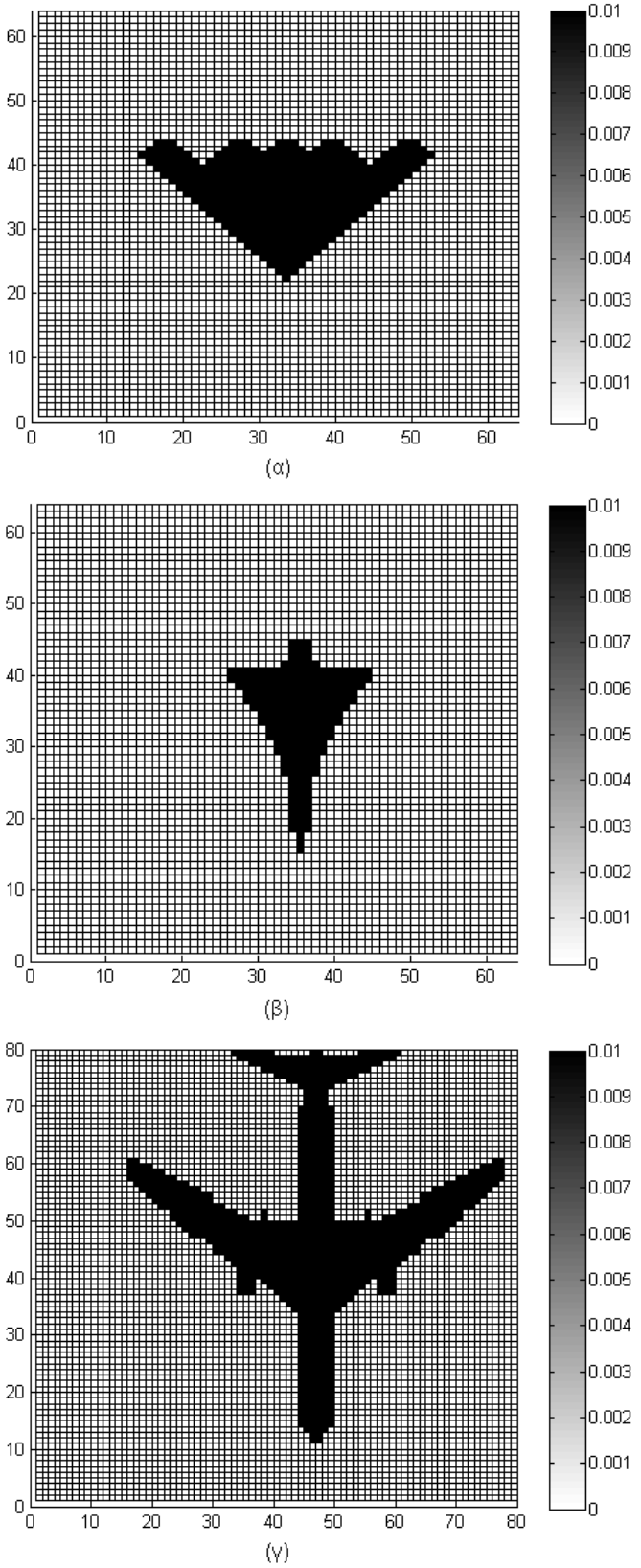
Για να επιτύχουμε τετραγωνική ανάλυση, πρέπει να θέσουμε, στην εξίσωση (4.13), $\Delta r_c = \Delta r_s = \frac{c}{2B}$, όπου $B = M \cdot \Delta f$ είναι το εύρος συχνοτήτων της εκπεμπόμενης κυματομορφής βηματικής συχνότητας.

4.5 Αριθμητικές προσομοιώσεις

4.5.1 Αριθμητικά αποτελέσματα

Το βασικό πλεονέκτημα της περιγραφής ενός στόχου μέσω σημειακών σκεδαστών είναι ότι διευκολύνει την προσομοίωση διαφόρων γεωμετριών στόχων. Επιπλέον, επιλέγοντας αυθαίρετες τιμές a_{ij} για ένα πλέγμα από $I \cdot J$ σημειακούς σκεδαστές, μπορούμε να μοντελοποιήσουμε τη μεταβολή της έντασης σκέδασης στην επιφάνεια του στόχου. Σε αυτήν την ενότητα, παρουσιάζουμε αποτελέσματα απεικόνισης ISAR για τρεις διαφορετικές γεωμετρίες αεροσκάφους, με είτε σταθερή είτε μεταβλητή ένταση σκέδασης για τους σημειακούς σκεδαστές του στόχου.

Οι τρεις γεωμετρίες αεροσκάφους που επιλέχτηκαν για τις προσομοιώσεις μας απεικονίζονται στο Σχήμα 4-3. Το πλέγμα του στόχου έχει διαστάσεις 64x64 για τα δύο μαχητικά αεροσκάφη, και 80x80 για το πολιτικό αεροσκάφος. Ο Πίνακας 4-1 περιλαμβάνει τις προσομοιωμένες διαστάσεις των τριών αεροσκαφών.



Σχήμα 4-3. Προσομοιωμένα μοντέλα σταθερής έντασης σκέδασης των τριών τύπων αεροσκάφους: (α) B-2 stealth, (β) Mirage 2000C, (γ) Boeing 737-400.

Πίνακας 4-1. Προσομοιωμένες διαστάσεις των τριών τύπων αεροσκάφους.

Τύπος Αεροσκάφους	Μήκος [m]	Άνοιγμα Πτερυγίων [m]
B-2 stealth	11.0	19.5
Mirage 2000C	15.5	8.5
Boeing 737-400	35.0	31.0

Οι τιμές των παραμέτρων της διδιάστατης γεωμετρίας ISAR που επιλέχτηκαν για τις προσομοιώσεις μας περιλαμβάνονται στον Πίνακα 4-2. Επιπλέον, οι παράμετροι του ραντάρ τύπου ISAR με παλμούς βηματικής συχνότητας καταγράφονται στον Πίνακα 4-3. Παρατηρούμε ότι η συνθήκη μέγιστης απόστασης ανίχνευσης, $R_{\max} = {c \cdot T}/{2}$, που ισχύει για ένα συμβατικό ραντάρ ανίχνευσης στόχου, παραβιάζεται εδώ, για το υπό εξέταση ραντάρ απεικόνισης τύπου ISAR.

Πίνακας 4-2. Παράμετροι της διδιάστατης γεωμετρίας ISAR.

Παράμετρος	Τιμή [μονάδα]
διαστάσεις κελιού του πλέγματος στόχου, $\Delta X = \Delta Y$	0.5 [m]
συντεταγμένες σημείου αναφοράς, $\{x_{00}(0),\ y_{00}(0)\}$	{0, 10} [Km]
πλάτος διανυσματικής ταχύτητας, V	300 [m/sec]
γωνία διανυσματικής ταχύτητας, a	180 [^{o}]

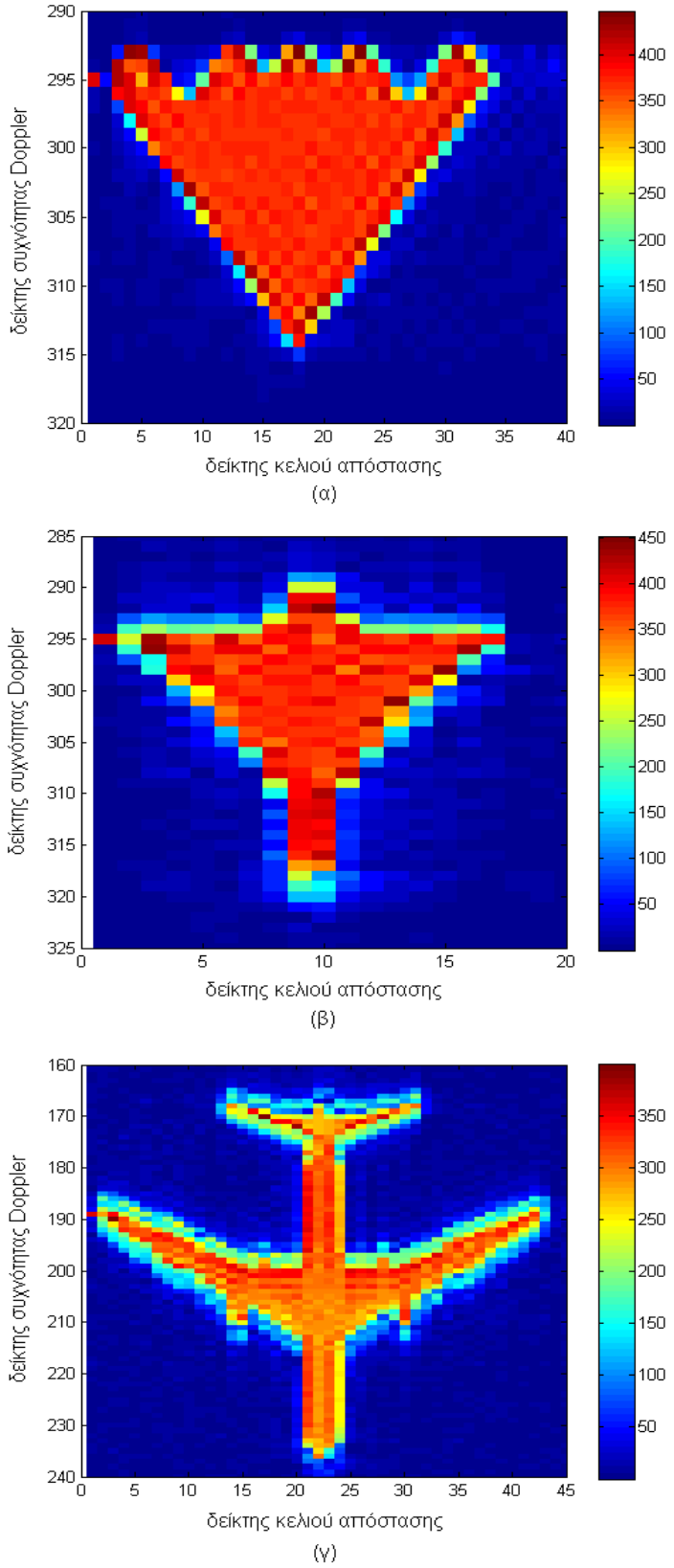
Πίνακας 4-3. Παράμετροι του ραντάρ τύπου ISAR με παλμούς βηματικής συχνότητας.

Παράμετρος	Τιμή [μονάδα]
αρχική συχνότητα φέροντος, f_0	10 [GHz]
τετραγωνική ανάλυση, $\Delta r_s = \Delta r_c$	0.5 [m]
εύρος συχνοτήτων ραντάρ, B	300 [MHz]
αριθμός παλμών, M (1)	64, 80
συχνοτικό βήμα, Δf (1)	4.6875, 3.75 [MHz]
περίοδος επανάληψης παλμού, T (1)	26.562, 33.203 [μsec]
διάρκεια ριπής, T_b (1)	1.699, 2.656 [msec]
αριθμός ριπών, N (1), (2)	589, 377

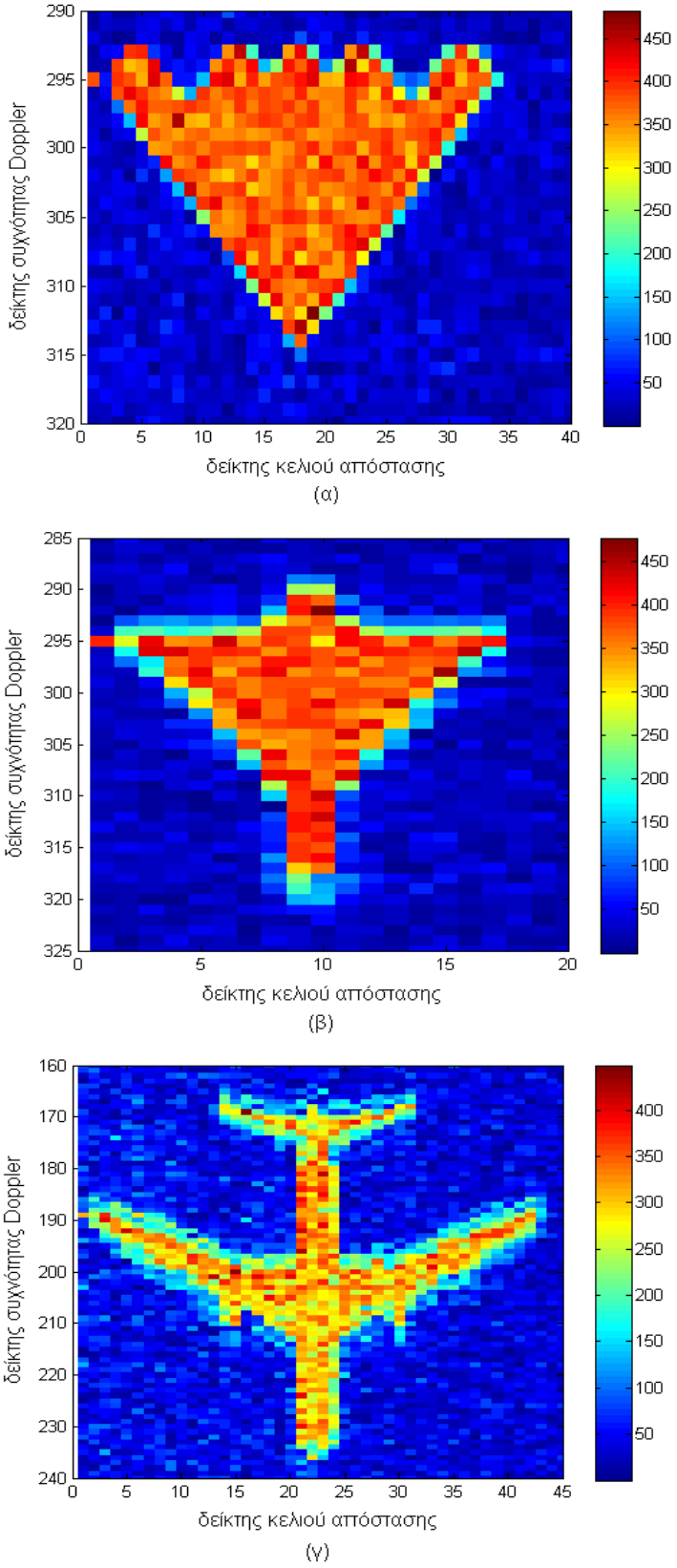
(1) Οι δεύτερες τιμές αφορούν τις προσομοιώσεις για το αεροσκάφος B737-400.
(2) Υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης (4.13) για $\varphi = 0^o$.

Οι παράμετροι του ραντάρ πρέπει να επιλεχθούν κατάλληλα για κάθε σενάριο προσομοίωσης. Το πρώτο βήμα είναι να καθοριστεί η επιθυμητή τετραγωνική ανάλυση, $\Delta r_s = \Delta r_c$, από τις διαστάσεις κελιού του πλέγματος στόχου. Έπειτα, υπολογίζουμε το απαιτούμενο εύρος συχνοτήτων ραντάρ ως $B = c / 2 \cdot \Delta r_s$, και τον ικανό αριθμό παλμών, M, διαιρώντας το αναμενόμενο μέγεθος στόχου, R_{ext}, με την επιλεγμένη ανάλυση απόστασης. Συνήθως, οι σχεδιαστές συστημάτων ραντάρ επιλέγουν μία τιμή για το αναμενόμενο μέγεθος στόχου η οποία είναι αρκετά μεγαλύτερη από τη μέγιστη διάσταση του στόχου (δηλαδή το μήκος ή το άνοιγμα πτερυγίων για αεροσκάφη). Το συχνοτικό βήμα της εκπεμπόμενης κυματομορφής βηματικής συχνότητας μπορεί να υπολογιστεί ως $\Delta f = B / M$. Μία σημαντική επιλογή για τη μοντελοποίηση σήματος και την απεικόνιση ISAR είναι αυτή της περιόδου επανάληψης παλμού, T. Είναι κοινή πρακτική να επιλέγεται μία τιμή για την περίοδο επανάληψης παλμού αρκετά μεγαλύτερη από $2 \cdot R_{ext} / c$, και, ταυτόχρονα, μία σχετικά μικρή τιμή, ώστε να αποφεύγεται σοβαρή έλλειψη ευθυγράμμισης των προφίλ απόστασης (δηλαδή «ολίσθηση απόστασης» [21]). Μία τυπική τιμή είναι $T = 30\,\mu\text{sec}$. Ο υπολογισμός της διάρκειας ριπής είναι ευθύς, δηλαδή $T_b = M \cdot T$. Τέλος, η εξίσωση (4.13) υπολογίζει τον αριθμό ριπών, N, που απαιτείται για την επίτευξη ικανού διαστήματος συμφασικής επεξεργασίας ($T_{\text{int}} = N \cdot T_b$).

Αρχικά, εξετάζουμε τη μεταβολή της εικόνας ISAR σε σχέση με το προσομοιούμενο σηματοθορυβικό λόγο. Τα Σχήματα 4-4 και 4-5 απεικονίζουν τις εικόνες ISAR που παράγονται για τα τρία υπό εξέταση αεροσκάφη, για μία περίπτωση σχετικά υψηλού σηματοθορυβικού λόγου (*SNR* = 20dB) και για μία περίπτωση χαμηλού σηματοθορυβικού λόγου (*SNR* = 0dB), αντιστοίχως. Εύκολα μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι, όπως αναμένουμε, η ποιότητα εικόνας χειροτερεύει όσο ο σηματοθορυβικός λόγος μειώνεται.

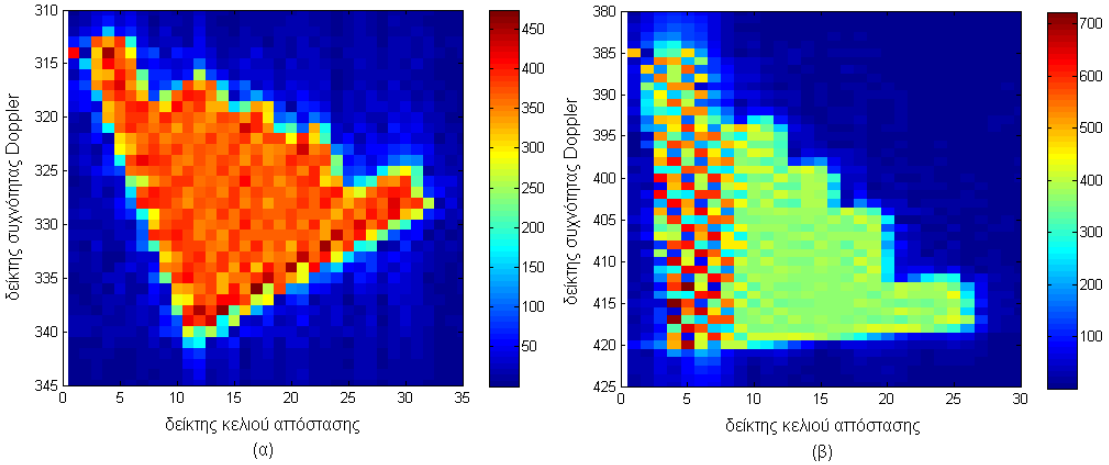


Σχήμα 4-4. Ανακατασκευασμένες εικόνες ISAR για *SNR* = 20dB και *φ* = 0°: (α) B-2 stealth, (β) Mirage 2000C, (γ) Boeing 737-400.

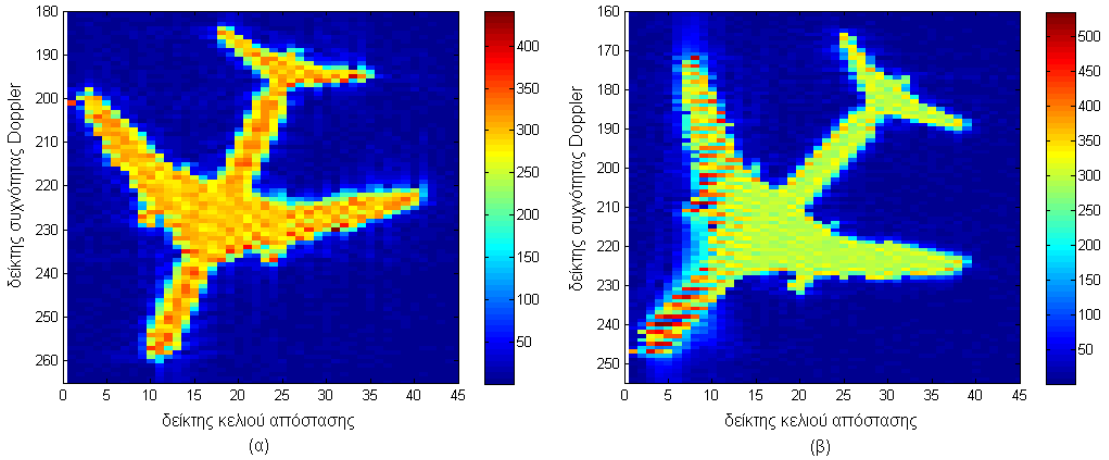


Σχήμα 4-5. Ανακατασκευασμένες εικόνες ISAR για *SNR* = 0dB και $\varphi = 0^{o}$: (α) B-2 stealth, (β) Mirage 2000C, (γ) Boeing 737-400.

Η επίδραση της γωνίας φ (μεταξύ των δύο συστημάτων συντεταγμένων του στόχου και του ραντάρ) στις παραγόμενες εικόνες ISAR διερευνάται επίσης μέσω προσομοιώσεων. Στα Σχήματα 4-6 και 4-7, παρουσιάζουμε τις ανακατασκευασμένες εικόνες ISAR για τα αεροσκάφη B-2 stealth και B737-400, για $\varphi = 20°$ και $\varphi = 40°$ (*SNR* = 20dB). Είναι ορατή η αλλοίωση της ποιότητας εικόνας για μεγάλες τιμές της γωνίας φ, όπως είναι αναμενόμενο μέσω φυσικής διαίσθησης, για τις γεωμετρίες των υπό εξέταση στόχων.

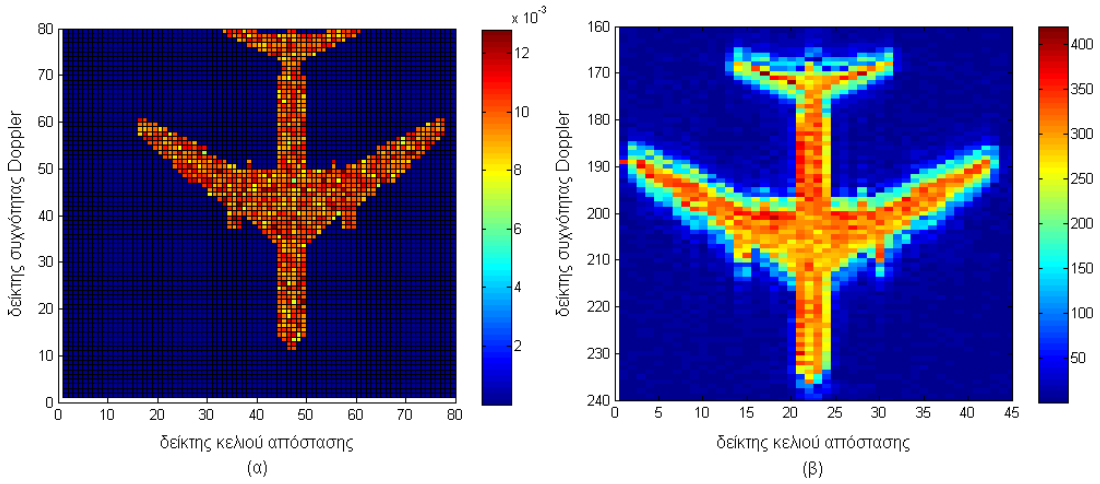


Σχήμα 4-6. Ανακατασκευασμένες εικόνες ISAR για το αεροσκάφος B-2 stealth για *SNR* = 20dB: (α) *φ* = 20°, (β) *φ* = 40°.



Σχήμα 4-7. Ανακατασκευασμένες εικόνες ISAR για το αεροσκάφος Boeing 737-400 για *SNR* = 20dB: (α) φ = 20°, (β) φ = 40°.

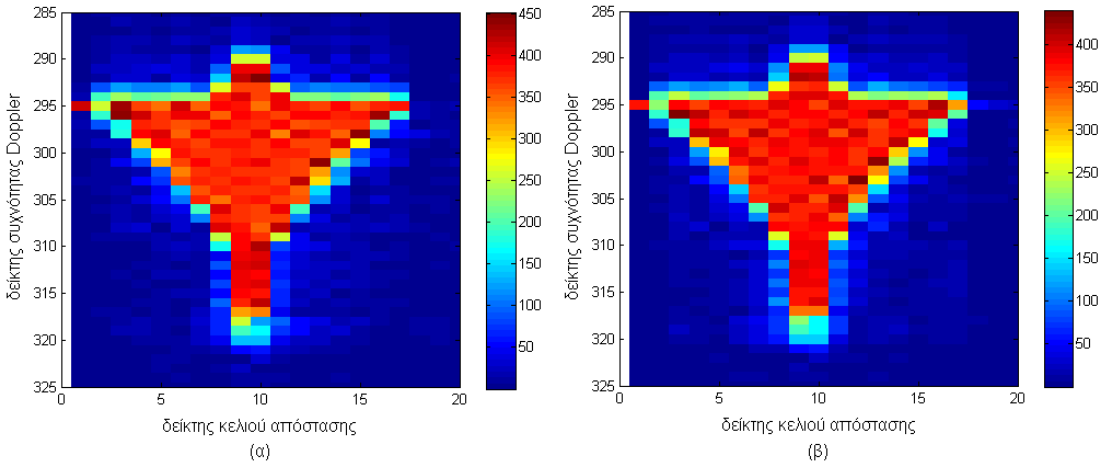
Επιπρόσθετα, εξετάζουμε την ικανότητα της προτεινόμενης μεθοδολογίας μοντελοποίησης σήματος και απεικόνισης ISAR να ανακατασκευάσει την εικόνα ISAR ενός στόχου με μεταβλητή ένταση σκέδασης για τους σημειακούς σκεδαστές του. Το Σχήμα 4-8 παρουσιάζει το προσομοιωμένο μοντέλο έντασης σκέδασης για το αεροσκάφος B737-400 και την αντίστοιχη ανακατασκευασμένη εικόνα ISAR για *SNR* = 20dB και $\varphi = 0°$. Οι προσομοιούμενες τιμές έντασης σκέδασης προκύπτουν από μία τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί μία κανονική κατανομή με μέση τιμή 0.01 και τυπική απόκλιση 0.001.



Σχήμα 4-8. Προσομοιωμένο μοντέλο έντασης σκέδασης, (α), και ανακατασκευασμένη εικόνα ISAR, (β), για το αεροσκάφος Boeing 737-400, για *SNR* = 20dB και *φ* = 0°.

Ως μέσο εκτίμησης της ικανότητας απεικόνισης ISAR για την κυματομορφή γραμμικής διαμόρφωσης συχνότητας σε σύγκριση με την κυματομορφή βηματικής συχνότητας, πραγματοποιούμε επίσης μία συγκριτική προσομοίωση για το αεροσκάφος Mirage 2000C. Διατηρούμε τις παραμέτρους της διδιάστατης γεωμετρίας ISAR του Πίνακα 4-2, και επιλέγουμε *SNR* = 20dB, $\varphi = 0°$. Για μία δίκαιη σύγκριση μεταξύ των δύο κυματομορφών, οι παράμετροι του ραντάρ ISAR με γραμμική διαμόρφωση συχνότητας επιλέγονται κατάλληλα σε σχέση με τις αντίστοιχες παραμέτρους του Πίνακα 4-3. Έτσι, το εύρος συχνοτήτων τίθεται ίσο με 300MHz, και ο αριθμός συχνοτήτων ανά παλμό επιλέγεται ίσος με 64. Επιπλέον, η περίοδος

επανάληψης παλμού παίρνει την τιμή 1.699msec (δηλαδή ίση με την αντίστοιχη περίοδο επανάληψης ριπής για την κυματομορφή βηματικής συχνότητας). Ο απαιτούμενος αριθμός παλμών υπολογίζεται μέσω μίας μαθηματικής έκφρασης που δίνεται στην αναφορά [17], η οποία είναι παρόμοια με την εξίσωση (4.13), και είναι ίδιος με τον αντίστοιχο αριθμό ριπών για την κυματομορφή βηματικής συχνότητας, δηλαδή ίσος με 589. Το Σχήμα 4-9 απεικονίζει τις ανακατασκευασμένες εικόνες ISAR για τις δύο κυματομορφές, οι οποίες δείχνουν μόνο ανεπαίσθητες διαφορές ως προς την ανάλυση απόστασης και την ανάλυση συχνότητας Doppler.



Σχήμα 4-9. Ανακατασκευασμένες εικόνες ISAR για το αεροσκάφος Mirage 2000C για *SNR* = 20dB και *φ* = 0°: (α) κυματομορφή βηματικής συχνότητας, (β) κυματομορφή γραμμικής διαμόρφωσης συχνότητας.

Επιπρόσθετα, για κάθε σενάριο προσομοίωσης που παρουσιάζεται σε αυτή την ενότητα, υπολογίζουμε την εντροπία της κανονικοποιημένης κατά ισχύ εικόνας ISAR, που αποτελεί ένα κλασσικό δείκτη ποιότητας εστίασης [20, 26]. Στον Πίνακα 4-4, συγκρίνουμε την εντροπία της κανονικοποιημένης κατά ισχύ εικόνας ISAR με την εντροπία του κανονικοποιημένου κατά ισχύ μοντέλου έντασης σκέδασης του υπό εξέταση στόχου. Όσο πλησιέστερες είναι οι δύο αυτές τιμές εντροπίας, τόσο καλύτερα εστιασμένη είναι η εικόνα ISAR που παράγεται.

Ο Πίνακας 4-4 περιέχει τις υπολογιζόμενες τιμές εντροπίας. Οι μαθηματικές σχέσεις που περιγράφουν την κανονικοποιημένη κατά ισχύ εικόνα ISAR, $\bar{P}_S(k,n)$, και την εντροπία αυτής, H, είναι οι ακόλουθες

$$\bar{P}_S(k,n) = \left|\hat{S}(k,n)\right|^2 \Big/ \sum_{k=1}^{N}\sum_{n=1}^{M}\left|\hat{S}(k,n)\right|^2$$
$$H = -\sum_{k=1}^{N}\sum_{n=1}^{M}\bar{P}_S(k,n)\cdot\ln\left(\bar{P}_S(k,n)\right) \tag{4.14}$$

Πίνακας 4-4. Υπολογιζόμενες τιμές εντροπίας των κανονικοποιημένων κατά ισχύ εικόνων ISAR και των αντίστοιχων μοντέλων έντασης σκέδασης.

Τύπος Αεροσκάφους \ Σενάριο Προσομοίωσης		*SNR* = 20dB			*SNR* = 0dB	Εντροπία αναφοράς του μοντέλου έντασης σκέδασης
		$\varphi = 0^o$	$\varphi = 20^o$	$\varphi = 40^o$	$\varphi = 0^o$	
B-2 stealth		6.0312	6.2817	6.3705	8.0983	6.0684
Mirage 2000C		5.4278 5.4376 (1)	-	-	7.7216	5.3375
Boeing 737-400	ΣΕΣ (2)	6.9392	7.2061	7.2480	8.6333	6.9236
	ΜΕΣ (3)	6.8709	-	-	-	6.9060

(1) Η πρώτη τιμή αναφέρεται στην κυματομορφή βηματικής συχνότητας και η δεύτερη στην κυματομορφή γραμμικής διαμόρφωσης συχνότητας.

(2) ΣΕΣ: Σταθερή Ένταση Σκέδασης

(3) ΜΕΣ: Μεταβλητή Ένταση Σκέδασης

4.5.2 Σχόλια για τα αριθμητικά αποτελέσματα

Βασιζόμενοι στις υπολογιζόμενες τιμές εντροπίας και στην οπτική παρατήρηση των ανακατασκευασμένων εικόνων ISAR, μπορούμε να κάνουμε τα εξής σχόλια για τα αριθμητικά αποτελέσματα:

- Οι διδιάστατες εικόνες ISAR των προσομοιούμενων στόχων ανακατασκευάζονται επιτυχώς μέσω της προτεινόμενης μεθοδολογίας μοντελοποίησης σήματος και απεικόνισης ISAR.
- Η μείωση του σηματοθορυβικού λόγου δεν έχει σημαντική επίδραση στην ικανότητα των αλγορίθμων απεικόνισης να αναπαραγάγουν τις εικόνες ISAR των τριών προσομοιούμενων αεροσκαφών. Επιπλέον, οι τιμές εντροπίας, που περιλαμβάνονται στον Πίνακα 4-4, για *SNR* = 0dB, αποκλίνουν αρκετά από τις αντίστοιχες τιμές αναφοράς, όπως είναι αναμενόμενο. Ακόμη και για τόσο χαμηλό σηματοθορυβικό λόγο, οι διαφορετικοί τύποι αεροσκάφους μπορούν εύκολα να αναγνωρισθούν από τις αντίστοιχες εικόνες ISAR.
- Καθώς η γωνία φ γίνεται μεγαλύτερη, η εντροπία της εικόνας ISAR αυξάνεται και η ποιότητα της εικόνας χειροτερεύει σημαντικά. Αυτό το αποτέλεσμα υποδεικνύει ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία απεικόνισης ISAR θα μπορούσε να συμπληρωθεί με μία τεχνική αυτο-εστίασης [18-20], η οποία θα ελαχιστοποιούσε την εντροπία εικόνας (κατά το δυνατόν πλησιέστερα στην αντίστοιχη τιμή αναφοράς). Αυτό αποτελεί ένα θέμα μελλοντικής έρευνας, σε σχέση με την παρούσα εργασία.
- Για $\varphi = 20°$ οι εικόνες ISAR των αεροσκαφών B-2 stealth και B737-400 εμφανίζονται σχετικά καλά εστιασμένες, ενώ για $\varphi = 40°$ η έλλειψη εστίασης γίνεται εμφανής, καθώς ο προσανατολισμός και των δύο στόχων ως προς την κατεύθυνση στόχευσης του ραντάρ αλλάζει σημαντικά σε αυτή την περίπτωση. Οι αντίστοιχες τιμές εντροπίας ποσοτικοποιούν την σχετική απόκλιση από τα μοντέλα σταθερής έντασης σκέδασης. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο στόχος B737-400, ο οποίος έχει το μεγαλύτερο άνοιγμα πτερυγίων μεταξύ των τριών υπό εξέταση στόχων, παρουσιάζει τη μεγαλύτερη πιθανότητα έλλειψης εστίασης στην παραγόμενη εικόνα ISAR, λόγω πιθανής αλλαγής του κοντινότερου

σημειακού σκεδαστή κατά τη διάρκεια του διαστήματος συμφασικής επεξεργασίας (π.χ. υπό κάθετη στην άτρακτο κατεύθυνση στόχευσης, ο κοντινότερος σημειακός σκεδαστής μπορεί να είναι είτε η μύτη του αεροσκάφους είτε το άκρο ενός από τα πτερύγιά του).

- Εξετάζοντας το Σχήμα 4-8, παρατηρούμε ότι το μοντέλο μεταβλητής έντασης σκέδασης του B737-400 ανακατασκευάζεται ικανοποιητικά. Μειώνοντας την επιλεγμένη τετραγωνική ανάλυση (π.χ. σε 0.33m) μπορούμε να επιτύχουμε πιο ακριβή ανακατασκευή του προσομοιούμενου μοντέλου.
- Τα συγκριτικά αριθμητικά αποτελέσματα για το αεροσκάφος Mirage 2000C - εικόνες ISAR (Σχήμα 4-9) και τιμές εντροπίας (Πίνακας 4-4) - καταδεικνύουν ότι οι δύο υπό εξέταση κυματομορφές επιτυγχάνουν σχεδόν την ίδια ανάλυση εικόνας ISAR. Αυτό οφείλεται στο σχετικά μεγάλο αριθμό συχνοτικών βημάτων και στις δύο κυματομορφές, και στο γεγονός ότι καταγράφεται ένα μόνο δείγμα ανά συχνοτικό βήμα, όπως εξηγείται στην πρώτη ενότητα. Μία πιο λεπτομερής σύγκριση των δύο κυματομορφών, με περισσότερα του ενός δείγματα ανά συχνοτικό βήμα, αποτελεί επίσης θέμα μελλοντικής έρευνας.

4.6 Συμπεράσματα και κατευθύνσεις μελλοντικής έρευνας

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζουμε την ενδιαφέρουσα περίπτωση ενός στόχου που κινείται κατά μήκος ευθύγραμμης τροχιάς με σταθερή ταχύτητα, εντός της ακτίνας ανίχνευσης ενός ραντάρ τύπου ISAR που εκπέμπει παλμούς διαμορφωμένους κατά βηματική συχνότητα. Εξάγουμε αναλυτικά το μαθηματικό μοντέλο του επιστρέφοντος σήματος ISAR στο πεδίο του χρόνου, για διαμόρφωση βηματικής συχνότητας και διδιάστατη γεωμετρία. Η καινοτομία της προτεινόμενης μεθοδολογίας μοντελοποίησης του σήματος ISAR έγκειται στη διαδικασία της συμφασικής άθροισης των διαμορφωμένων παλμών που ανακλώνται από τους σημειακούς σκεδαστές του υπό σκέδαση στόχου. Επιπρόσθετα, περιγράφουμε μαθηματικά μία αποδοτική διαδικασία ανακατασκευής της εικόνας ISAR, η οποία είναι ανεξάρτητη από τις παραμέτρους της τροχιάς του στόχου και συνίσταται σε έναν αλγόριθμο συμπίεσης απόστασης που βασίζεται στην ετερο-συσχέτιση και σε έναν αλγόριθμο συμπίεσης γωνίας αζιμουθίου που βασίζεται στο μετασχηματισμό FFT. Η προσεγγιστική ευθυγράμμιση απόστασης αποτελεί επίσης μέρος της προτεινόμενης διαδικασίας ανακατασκευής εικόνας ISAR, και πραγματοποιείται αυτόματα καταγράφωντας τον πρώτο παλμό που ανακλάται από τον κοντινότερο σημειακό σκεδαστή στο πρώτο δείγμα του λαμβανόμενου σήματος ISAR.

Τα αριθμητικά αποτελέσματα προσομοιώσεων (οι υψηλής ανάλυσης εικόνες ISAR και οι αντίστοιχες τιμές εντροπίας), τα οποία εξάγονται για τρεις διαφορετικές γεωμετρίες αεροσκάφους και διάφορα σενάρια προσομοίωσης, δεικνύουν την εγκυρότητα του προτεινόμενου διδιάστατου μοντέλου επιστρέφοντος σήματος ISAR και των προτεινόμενων αλγορίθμων απεικόνισης. Ακόμη και για πολύ χαμηλό σηματοθορυβικό λόγο (0dB), οι διαφορετικοί τύποι αεροσκαφών μπορούν εύκολα να αναγνωρισθούν από τις αντίστοιχες παραγόμενες εικόνες ISAR. Επιπλέον, χρήσιμα συμπεράσματα εξάγονται μέσω πειραμάτων σε σχέση με τον προσανατολισμό του στόχου, και η περαιτέρω έρευνα σε τεχνικές αυτο-εστίασης προάγεται από την παρούσα μελέτη.

Οι μελλοντικές ερευνητικές προσπάθειες, οι οποίες θα εκμεταλλεύοναι τη μεθοδολογία μοντελοποίησης σήματος και απεικόνισης ISAR που προτείνεται στην παρούσα εργασία, θα πρέπει να ενσωματώνουν μία πιο ακριβή αναπαράσταση των προσομοιούμενων στόχων μέσω σημειακών σκεδαστών, με βάση τη γεωμετρική θεωρία της περίθλασης [24]. Ορισμένα πρωτόλεια αριθμητικά αποτελέσματα πάνω στο θέμα αυτό παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο της διατριβής. Μία άλλη σημαντική ερευνητική κατεύθυνση είναι προς τη διερεύνηση ενός σύνθετου αλγορίθμου αυτο-εστίασης [20], ο οποίος μπορεί να βελτιώσει την ποιότητα εστίασης των παραγόμενων εικόνων ISAR στην περίπτωση πολύπλοκης κίνησης στόχου (επιταχυνόμενη ή με μανούβρες). Τέλος, η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου απεικόνισης ISAR σε μετρούμενα δεδομένα ραντάρ αποτελεί ένα ακόμη σημαντικό θέμα μελλοντικής έρευνας, με ορισμένες πρώτες προσπάθειες να έχουν ήδη γίνει σε πραγματικά δεδομένα για αεροσκάφη πολιτικής αεροπορίας (δεδομένα ORFEO, TNO, Ολλανδία) και διαστημικά αντικείμενα (δεδομένα TIRA, FGAN, Γερμανία).

4.7 Παράρτημα 1: Μαθηματική περιγραφή του προγράμματος προσομοίωσης της προτεινόμενης μεθοδολογίας μοντελοποίησης σήματος και απεικόνισης ISAR

Στην ενότητα αυτή περιγράφουμε με αναλυτικές μαθηματικές εκφράσεις το πρόγραμμα προσομοίωσης της προτεινόμενης μεθοδολογίας μοντελοποίησης σήματος και απεικόνισης ISAR. Έτσι, ο αναγνώστης μπορεί να κατανοήσει καλύτερα τις λεπτομέρειες του διδιάστατου προβλήματος ISAR. Επιπλέον, η σύνθετη δομή του προγράμματος αυτού μπορεί να αποτελέσει τον πυρήνα των αριθμητικών προσομοιώσεων μίας μελλοντικής εργασίας σε αυτό το ερευνητικό πεδίο.

Αρχικά, παραθέτουμε τους μαθηματικούς συμβολισμούς για τα δομικά στοιχεία του προγράμματος προσομοίωσης, δηλαδή τους ορισμούς των διαφόρων πινάκων και διανυσμάτων.

Ο πίνακας με τις πραγματικές τιμές των εντάσεων σκέδασης για όλους τους σημειακούς σκεδαστές του διδιάστατου πλέγματος του στόχου είναι ο εξής

$$a_ij = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1J} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{I1} & \cdots & a_{IJ} \end{pmatrix}$$

Οι πίνακες με τις καρτεσιανές συντεταγμένες των σημείων του πλέγματος, στο σύστημα συντεταγμένων του στόχου $XO'Y$, είναι οι ακόλουθοι

$$X_ij = \begin{pmatrix} 1\cdot\Delta x & \dots & 1\cdot\Delta x \\ i\cdot\Delta x & \ddots & i\cdot\Delta x \\ \mathrm{I}\cdot\Delta x & \cdots & \mathrm{I}\cdot\Delta x \end{pmatrix} \quad \text{και} \quad Y_ij = \begin{pmatrix} 1\cdot\Delta y & j\cdot\Delta y & J\cdot\Delta y \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1\cdot\Delta y & j\cdot\Delta y & J\cdot\Delta y \end{pmatrix}$$

Οι τρισδιάστατοι πίνακες με τις καρτεσιανές συντεταγμένες των σημείων του πλέγματος, στο σύστημα συντεταγμένων του ραντάρ xOy, συμβολίζονται ως $x_ij(I,J,N)$ και $y_ij(I,J,N)$. Η τρίτη διάστασή τους αναφέρεται στην

τρέχουσα ριπή παλμών, καθώς οι συντεταγμένες αυτές μεταβάλλονται λόγω της κίνησης του στόχου. Θεωρούμε ότι η μεταβολή αυτή είναι μικρή από παλμό σε παλμό και λαμβάνουμε υπόψη μας μόνο τη μεταβολή από ριπή σε ριπή.

Οι μαθηματικές εκφράσεις για τις συντεταγμένες αυτές δίνονται από την εξίσωση (4.4), την οποία ξαναγράφουμε παρακατω σε αναλυτική μορφή πινάκων, ξεχωριστά για την τεταγμένη x_ij και την τετμημένη y_ij. Για κάθε ριπή υπολογίζονται οι δύο αντίστοιχοι διδιάστατοι πίνακες με τις συντεταγμένες όλων των σημειακών σκεδαστών του στόχου. Ως phi συμβολίζουμε τη γωνία προσανατολισμού φ, ενώ τα υπόλοιπα σύμβολα είναι αντίστοιχα με εκείνα της δεύτερης και τρίτης ενότητας.

$$
\begin{aligned}
x_ij(:,:,p) &= \left[x_{00} + V_x \cdot T_{burst} \cdot \left(p - N/2\right)\right] + \begin{pmatrix} 1\cdot\Delta x & \dots & 1\cdot\Delta x \\ i\cdot\Delta x & \ddots & i\cdot\Delta x \\ \mathrm{I}\cdot\Delta x & \cdots & \mathrm{I}\cdot\Delta x \end{pmatrix} \cdot \cos(phi) \\
&- \begin{pmatrix} 1\cdot\Delta y & j\cdot\Delta y & J\cdot\Delta y \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1\cdot\Delta y & j\cdot\Delta y & J\cdot\Delta y \end{pmatrix} \cdot \sin(phi)
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
y_ij(:,:,p) &= \left[y_{00} + V_y \cdot T_{burst} \cdot \left(p - N/2\right)\right] + \begin{pmatrix} 1\cdot\Delta x & \dots & 1\cdot\Delta x \\ i\cdot\Delta x & \ddots & i\cdot\Delta x \\ \mathrm{I}\cdot\Delta x & \cdots & \mathrm{I}\cdot\Delta x \end{pmatrix} \cdot \sin(phi) \\
&+ \begin{pmatrix} 1\cdot\Delta y & j\cdot\Delta y & J\cdot\Delta y \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1\cdot\Delta y & j\cdot\Delta y & J\cdot\Delta y \end{pmatrix} \cdot \cos(phi)
\end{aligned}
$$

Το πλάτος του διανύσματος απόστασης από το ραντάρ προς τον ij-οστό σημειακό σκεδαστή του συμβολίζεται ως $R_ij(I,J,N)$ και αποτελεί επίσης τρισδιάστατο πίνακα. Το γνωστό Πυθαγόρειο θεώρημα δίνει τη σχετική μαθηματική περιγραφή

$$
R_ij(:,:,p) = \sqrt{\left(x_ij(:,:,p)\right)^2 + \left(y_ij(:,:,p)\right)^2}
$$

Η συνολική καθυστέρηση του σήματος ISAR που οπισθοσκεδάζεται από τον ij-οστό σημειακό σκεδαστή αποτελεί έναν ακόμη τρισδιάστατο πίνακα $t_ij(I,J,N)$, ιδιαίτερα σημαντικό για την καταγραφή των λαμβανόμενων δειγμάτων του επιστρέφοντος σήματος ISAR στο συγκεκριμμένο πρόγραμμα προσομοίωσης. Για την p-οστή ριπή παλμών, ο υπολογισμός των αντίστοιχων χρόνων καθυστέρησης για όλους τους σημειακούς σκεδαστές του στόχου γίνεται μέσω του εξής μαθηματικού τύπου

$$t_ij(:,:,p) \quad = \quad \frac{2 \cdot R_ij(:,:,p)}{c}$$

Στον τρισδιάστατο πίνακα $t_ij(I,J,N)$ αναζητούμε για κάθε ριπή παλμών την ελάχιστη και τη μέγιστη χρονική καθυστέρηση του λαμβανόμενου σήματος ISAR, που αντιστοιχούν στον κοντινότερο και στο μακρινότερο σημειακό σκεδαστή του στόχου. Έτσι, προκύπτουν δύο διανύσματα μήκους N, που συμβολίζονται ως $t_ij_\min$ και $t_ij_\max$ αντίστοιχα.

Στη συνέχεια, παρουσιάζουμε τον πυρήνα του προγράμματος προσομοίωσης, που σχετίζεται με τη μοντελοποίηση του επιστρέφοντος σήματος ISAR. Η βάση του τμήματος αυτού του προγράμματος είναι οι εξισώσεις (4.5)-(4.8) , καθώς επίσης και η σχετική διερεύνηση της διαδικασίας άθροισης των ανακλώμενων σημάτων από τους διάφορους σημειακούς σκεδαστές του στόχου.

Η μοντελοποίηση του επιστρέφοντος σήματος ISAR προσομοιώνεται σε δύο στάδια. Πρώτα, υπολογίζουμε τη συμβολή κάθε σημειακού σκεδαστή στο οπισθοσκεδαζόμενο σήμα ISAR, μέσω της εξίσωσης (4.6), και στη συνέχεια, αθροίζουμε κατάλληλα τις συμβολές όλων των σκεδαστών για το σχηματισμό του συνολικού επιστρέφοντος σήματος ISAR, όπως στο Σχήμα 4-2.

Αξίζει να επισημάνουμε ότι στο αριστερό μέρος της εξίσωσης (4.6) έχουμε ουσιαστικά έναν πίνακα τεσσάρων διαστάσεων, για τον υπολογισμό του οποίου απαιτούνται ειδικοί μαθηματικοί προϋπολογισμοί σε επίπεδο διανυσμάτων και κυρίως πινάκων, ώστε να καθίσταται δυνατός και σχετικά

γρήγορος ο υπολογισμός του πίνακα αυτού σε έναν απλό προσωπικό υπολογιστή, μέσω του λογισμικού MATLAB της εταιρείας Mathworks.

Για τους μαθηματικούς προϋπολογισμούς που περιλαμβάνονται στο πρώτο μέρος της προσομοίωσης, ορίζουμε αρχικά τα ακόλουθα διανύσματα

Πίνακας 4-5. Ορισμός και περιγραφή διανυσμάτων για το πρόγραμμα προσομοίωσης

Ορισμός διανύσματος	Περιγραφή διανύσματος
$m = [1 \ldots M]$	οι τιμές του δείκτη εκπεμπόμενου παλμού
$T_sample_m = [0T_{sa} \ \ldots \ (M-1)T_{sa}]$	οι διακριτές χρονικές στιγμές, με περίοδο δειγματοληψίας T_{sa} ίση με την περίοδο επανάληψης παλμού
$F_m = [F_1 \ \ldots \ F_M]$	οι τιμές της βηματικής συχνότητας
$ang_F_m = j2\pi \cdot [F_1 \ \ldots \ F_M]$	οι αντίστοιχες τιμές της γωνιακής συχνότητας

Ο πρώτος προϋπολογισμός προκύπτει απλά από τον πολλαπλασιασμό των διανυσμάτων ang_F_m και T_sample_m, στοιχείο με στοιχείο. Επαναλαμβάνοντας N φορές το προκύπτον διάνυσμα, έχουμε ως αποτέλεσμα έναν πίνακα διαστάσεων $N \times M$, που αποτελεί το δεύτερο προϋπολογισμό. Η μαθηματική τους περιγραφή είναι η εξής

$$precomp_1 \quad = \quad j2\pi \cdot [F_1 \cdot 0T_{sa} \ \ldots \ F_M \cdot (M-1)T_{sa}]$$

$$precomp_2 \quad = \quad j2\pi \cdot \begin{pmatrix} F_1 \cdot 0T_{sa} & \ldots & F_M \cdot (M-1)T_{sa} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ F_1 \cdot 0T_{sa} & \cdots & F_M \cdot (M-1)T_{sa} \end{pmatrix}$$

Πολλαπλασιάζοντας τα διανύσματα $(t_ij_\min)^T$ και ang_F_m, προκύπτει ένας ακόμη πίνακας διαστάσεων $N \times M$, που είναι ο τρίτος απαραίτητος προϋπολογισμός

$$precomp_3 \quad = \quad j2\pi \cdot \begin{pmatrix} F_1 \cdot t_ij_\min(1) & \dots & F_M \cdot t_ij_\min(1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ F_1 \cdot t_ij_\min(N) & \cdots & F_M \cdot t_ij_\min(N) \end{pmatrix}$$

Περαιτέρω επιτάχυνση του τμήματος της προσομοίωσης που αφορά τη μοντελοποίηση του επιστρέφοντος σήματος επιτυγχάνεται μέσω του διαμερισμού του υπό υπολογισμό πίνακα δεδομένων σε επιμέρους πίνακες. Η βασική ιδέα είναι ότι, όταν πρέπει να υπολογιστεί ένας πίνακας με τη μία του διάσταση αρκετά μεγάλη, είναι προτιμότερο να διαμεριστεί σε αρκετούς επιμέρους πίνακες με μικρότερη τη διάσταση αυτή. Έτσι, για παράδειγμα, για $M = 64$ και $N = 589$ μπορούμε να πάρουμε επιμέρους πίνακες διαστάσεων 50×64, ορίζοντας το μήκος (πρώτη διάσταση) του κάθε επιμέρους πίνακα ως $length_PM$. Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται για τον τελευταίο επιμέρους πίνακα, ο οποίος μπορεί να έχει μήκος μικρότερο από $length_PM$. Ο συνολικός αριθμός των επιμέρους πινάκων δίνεται από τον εξής τύπο

$$number_PM = \left\lceil \frac{N}{length_PM} \right\rceil$$

Για κάθε επιμέρους πίνακα, υπολογίζουμε το εύρος ριπών που του αντιστοιχούν ως

$$range_PM \rightarrow \begin{cases} [1 \quad \dots \quad length_PM] \\ [1 + length_PM \quad \dots \quad 2 \cdot length_PM] \\ \dots \end{cases}$$

και ορίζουμε έναν πίνακα προσωρινής αποθήκευσης των δεδομένων που αφορούν το συγκεκριμμένο εύρος ριπών. Ο πίνακας αυτός, τεσσάρων διαστάσεων, συμβολίζεται ως $s_ij_temp(I, J, \ length_PM, M)$. Όλοι οι επιμέρους πίνακες αποθηκεύονται στο σκληρό δίσκο του υπολογιστή στον οποίο εκτελείται το πρόγραμμα, από όπου ανακαλούνται κατά το δεύτερο μέρος της προσομοίωσης για να πραγματοποιηθεί η διαδικασία της άθροισής τους. Κατά αυτόν τον τρόπο, ελαχιστοποιείται η χρήση της μνήμης του υπολογιστή κατά την εκτέλεση του προγράμματος.

Για κάθε σημειακό σκεδαστή, σχηματίζουμε το διάνυσμα t_ij_p που περιλαμβάνει τις χρονικές καθυστερήσεις που αντιστοιχούν στον ij-οστό σημειακό σκεδαστή και στο συγκεκριμμένο εύρος ριπών. Πολλαπλασιάζοντας το διάνυσμα $(t_ij_p)^T$ με το διάνυσμα ang_F_m, προκύπτει ο τέταρτος προϋπολογισμός (που μεταβάλλεται για κάθε σκεδαστή), ο οποίος μαθηματικά περιγράφεται ως εξής

$$precomp_4 = j2\pi \cdot \begin{pmatrix} F_1 \cdot t_ij_p(1) & \cdots & F_M \cdot t_ij_p(1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ F_1 \cdot t_ij_p(length_PM) & \cdots & F_M \cdot t_ij_p(length_PM) \end{pmatrix}$$

Κατόπιν, χρησιμοποιώντας τους προϋπολογισμένους πίνακες $precomp_2$, $precomp_3$ και $precomp_4$, και επιλέγοντας από τους δύο πρώτους το τμήμα τους που αντιστοιχεί στο προκαθορισμένο εύρος ριπών για τον κάθε επιμέρους πίνακα, είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε τον όρο φάσης της εξίσωσης (4.6). Καθένας από τους πίνακες της ακόλουθης εξίσωσης έχει διαστάσεις $length_PM \times M$. Χάριν ευκολίας, γράφουμε την εξίσωση μόνο για τον πρώτο επιμέρους πίνακα

$$\begin{aligned} \exp_time &= j2\pi \cdot \begin{pmatrix} F_1 \cdot 0T_{sa} & \cdots & F_M \cdot (M-1)T_{sa} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ F_1 \cdot 0T_{sa} & \cdots & F_M \cdot (M-1)T_{sa} \end{pmatrix} \\ &+ j2\pi \cdot \begin{pmatrix} F_1 \cdot t_ij_\min(1) & \cdots & F_M \cdot t_ij_\min(1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ F_1 \cdot t_ij_\min(length_PM) & \cdots & F_M \cdot t_ij_\min(length_PM) \end{pmatrix} \\ &- j2\pi \cdot \begin{pmatrix} F_1 \cdot t_ij_p(1) & \cdots & F_M \cdot t_ij_p(1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ F_1 \cdot t_ij_p(length_PM) & \cdots & F_M \cdot t_ij_p(length_PM) \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Εν συνεχεία, εύκολα υπολογίζουμε το σήμα ISAR που οπισθοσκεδάζεται από τον ij-οστό σημειακό σκεδαστή, για το συγκεκριμμένο εύρος ριπών

(δηλαδή για συγκεκριμμένες τιμές του δείκτη ριπής p και για όλες τις τιμές του δείκτη παλμού m). Μαθηματικά γράφουμε

$$s_ij_temp(i, j, :, :) \quad = \quad a_ij(i, j) \cdot e^{\exp_time(:,:)}$$

Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε σημειακό σκεδαστή και με αυτόν τον τρόπο καταλήγουμε στον τρέχοντα πίνακα προσωρινής αποθήκευσης δεδομένων, διαστάσεων $I \times J \times length_PM \times M$. Επιπλέον, όλοι οι υπολογισμοί επαναλαμβάνονται για κάθε επιμέρους πίνακα (δηλαδή για κάθε πίνακα προσωρινής αποθήκευσης δεδομένων).

Στο δεύτερο μέρος της μοντελοποίησης του συνολικού επιστρέφοντος σήματος ISAR, πραγματοποιείται η διαδικασία της άθροισης των ήδη υπολογισμένων επιστρέφοντων σημάτων από όλους τους σημειακούς σκεδαστές του στόχου. Πρώτα όμως, ας δώσουμε μερικούς ορισμούς διανυσμάτων και μεγεθών που σχετίζονται με το δεύτερο μέρος της προσομοίωσης.

Ορίζουμε αρχικά έναν πίνακα $t_ij_ord\left(1, I \cdot J\right)$ για την προσωρινή αποθήκευση των χρόνων t_ij κατά αύξουσα σειρά, για κάθε ριπή παλμών, αφού πρώτα έχουμε ανασχηματίσει το διδιάστατο πίνακα $t_ij\left(:,:, p\right)$ σε μονοδιάστατο με μήκος $I \cdot J$. Ο ανασχηματισμός αυτός γίνεται στήλη-στήλη και παράλληλα οι αντίστοιχοι δείκτες i και j υπολογίζονται και αποθηκεύονται σε ξεχωριστά διανύσματα για μετέπειτα πρόσβαση στα κατάλληλα δεδομένα (το επιστρέφον σήμα ISAR από τον ij-οστό σημειακό σκεδαστή). Τα δύο αυτά διανύσματα δεικτών έχουν ως εξής

$$i_LUT = \left[\left(1\,2 \ldots I\right)\left(1\,2 \ldots I\right) \ldots \left(1\,2 \ldots I\right)\right]$$

$$j_LUT = \left[\left(11 \ldots 1\right)\left(2\,2 \ldots 2\right) \ldots \left(J\;J \ldots J\right)\right]$$

Επίσης, ο πίνακας $ind_ij_ord(1, I \cdot J)$ περιέχει τιμές δείκτη από 1 εώς $I \cdot J$, που προκύπτουν από την ταξινόμηση κατά αύξουσα σειρά του ανασχηματισμένου πίνακα t_ij.

Επιπρόσθετα, υπολογίζουμε ένα διάνυσμα μήκους N που περιλαμβάνει την κανονικοποιημένη χρονική διάσταση του στόχου για τις ριπές. Η διάσταση αυτή δίνεται σε δείγματα (όπου T_{sa} η περίοδος δειγματοληψίας) και ο σχετικός μαθηματικός τύπος είναι

$$L = \left\lceil \frac{t_ij_\max - t_ij_\min}{T_{sa}} \right\rceil$$

Η μέγιστη τιμή της κανονικοποιημένης χρονικής διάστασης του στόχου υπολογίζεται ως $L_\max = \max\{L\}$, και είναι απαραίτητη για τον ορισμό της διάστασης κάθε ριπής του συνολικού επιστρέφοντος σήματος ISAR. Όπως αναφέρουμε και στην τελευταία υποενότητα της τρίτης ενότητας, κάθε ριπή αποτελείται από $L_\max + M$ δείγματα (δηλαδή όσα η μέγιστη χρονική διάσταση του στόχου και M επιπλέον δείγματα για το επιστρέφον σήμα ISAR από το μακρινότερο σημειακό σκεδαστή).

Ορίζουμε ακόμη ένα μεγάλο πίνακα s_ij_large, διαστάσεων $(L_\max + M) \times (I \cdot J)$, στον οποίο τοποθετούνται κατάλληλα τα ήδη υπολογισμένα δεδομένα λήψης, από τους επιμέρους πίνακες που φορτώνονται από το σκληρό δίσκο. Ο πίνακας αυτός αρχικοποιείται με μηδενικές τιμές για κάθε ριπή του κάθε επιμέρους πίνακα δεδομένων, ώστε να χρησιμοποιηθεί ξανά για την εγγραφή σε αυτόν δεδομένων.

Τέλος, ορίζουμε έναν πίνακα s_pm, διαστάσεων $N \times (L_\max + M)$, για την αποθήκευση του συνολικού επιστρέφοντος σήματος ISAR (διδιάστατος πίνακας μη επεξεργασμένων δεδομένων).

Η διαδικασία της άθροισης των επιστρέφοντων σημάτων από τους διάφορους σημειακούς σκεδαστές του στόχου περιγράφεται παρακάτω.

Για κάθε επιμέρους πίνακα δεδομένων λήψης, που φορτώνεται από το σκληρό δίσκο (όπου αποθηκεύεται κατά το πρώτο μέρος της προσομοίωσης),

δημιουργούμε εκ νέου έναν πίνακα προσωρινής φόρτωσης δεδομένων s_ij_temp, διαστάσεων $(L_\max + M) \times (I \cdot J)$.

Κατόπιν, για το εύρος ριπών του κάθε επιμέρους πίνακα, κάνουμε τους ακόλουθους υπολογισμούς. Πρώτα, ορίζουμε έναν επαναληπτικό βρόχο μέσω ενός μετρητή ριπών k, ο οποίος παίρνει τιμές από 1 εώς $length_PM$. Μέσω αυτού του μετρητή, υπολογίζουμε το δείκτη τρέχουσας ριπής p ως εξής

$$p = \left(index_PM - 1\right) \cdot length_PM + k$$

Με βάση τα διανύσματα δεικτών i_LUT και j_LUT, καθώς και τον πίνακα ind_ij_ord, ο οποίος υπολογίζεται σε κάθε επανάληψη (για την p-οστή ριπή), μπορούμε να εξάγουμε τις τιμές των δεικτών i και j που προσδιορίζουν κατά σειρά λήψης τους σημειακούς σκεδαστές του στόχου. Έτσι, έχουμε

$$i_ord = i_LUT(ind_ij_ord)$$

$$j_ord = j_LUT(ind_ij_ord)$$

Με βάση τον ταξινομημένο πίνακα t_ij_ord και την ελάχιστη χρονική καθυστέρηση της p-οστής ριπής $t_ij_\min(p)$, υπολογίζουμε την κανονικο-ποιημένη χρονική διαφορά μεταξύ της κάθε λαμβανόμενης ριπής και της ριπής που επιστρέφεται από τον κοντινότερο σημειακό σκεδαστή. Το παραγόμενο διάνυσμα t_ij_norm έχει μηδενικά στοιχεία στην αρχή του, που αντιστοιχούν σε σημεία του πλέγματος του στόχου στα οποία δεν υπάρχει σημειακός σκεδαστής. Το στοιχείο που αντιστοιχεί στον κοντινότερο σκεδαστή είναι και αυτό μηδενικό, ενώ το πρώτο μη μηδενικό στοιχείο αντιστοιχεί στο δεύτερο κοντινότερο σκεδαστή.

Για τον ij-οστό σημειακό σκεδαστή του στόχου, ανακτούμε το τμήμα εκείνο του πίνακα προσωρινής φόρτωσης δεδομένων s_ij_temp που αφορά τον υπό εξέταση σκεδαστή, με τη βοήθεια των διανυσμάτων i_ord και j_ord, καθώς και του μετρητή ριπών k. Ανασχηματίζουμε το τμήμα αυτό, που στον

κώδικα MATLAB ορίζεται ως $s_ij_temp\left(i_ord(ij), j_ord(ij), k, :\right)$, σε διάνυσμα μήκους M, και το τοποθετούμε στη σωστή θέση στην ij-οστή στήλη του πίνακα s_ij_large. Η σωστή θέση για την k-οστή ριπή του υπό εξέταση επιμέρους πίνακα, η οποία επιστρέφεται από τον ij-οστό σκεδαστή, καθορίζεται με βάση την αντίστοιχη κανονικοποιημένη χρονική διαφορά $t_ij_norm(ij)$. Η εντολή MATLAB που αποτελεί τον πυρήνα της διαδικασίας της άθροισης είναι η εξής

$$\begin{aligned} & s_ij_large\left(t_ij_norm(ij) + (1:M),\ ij\right) \\ & = reshape(s_ij_temp\left(i_ord(ij), j_ord(ij),\ k, :\right),\ M, 1) \end{aligned}$$

Έχοντας υπολογίσει τον πίνακα s_ij_large, συνεχίζουμε με την άθροιση των επιστρέφοντων ριπών από όλους τους σκεδαστές. Από την άθροιση αυτή προκύπτει η p-οστή ριπή του συνολικού επιστρέφοντος σήματος ISAR. Αρκεί να αθροίσουμε τα στοιχεία του πίνακα s_ij_large κατά τη δεύτερη διάσταση, δηλαδή για όλους τους σημειακούς σκεδαστές. Με μία απλή μετάθεση, προκύπτει ένα διάνυσμα διαστάσεων $1 \times (L_\max + M)$, το οποίο αποτελεί την p-οστή γραμμή του πίνακα μη επεξεργασμένων δεδομένων, που συμβολίζεται ως $s_pm\left(p, :\right)$.

Επαναλαμβάνοντας όλη την παραπάνω διαδικασία για κάθε ριπή του κάθε επιμέρους πίνακα, καταλήγουμε στον υπολογισμό του διδιάστατου πίνακα μη επεξεργασμένων δεδομένων για το πρόβλημα ISAR που επιλύει το παρόν πρόγραμμα προσομοίωσης. Έχουμε δηλαδή προσομοιώσει το μοντέλο του συνολικού επιστρέφοντος σήματος ISAR.

Στη συνέχεια, παρουσιάζουμε και το τμήμα του προγράμματος που προσομοιώνει τους αλγόριθμους απεικόνισης ISAR, των οποίων η μαθηματική περιγραφή γίνεται στην τέταρτη ενότητα αυτού του κεφαλαίου.

Η βασιζόμενη στην ετερο-συσχέτιση συμπίεση απόστασης αποτελεί τον πρώτο υπό προσομοίωση αλγόριθμο απεικόνισης. Για να αυξήσουμε την ικανότητα ανάλυσης απόστασης του ραντάρ, προσθέτουμε $M - (L_{\max} + 1)$

μηδενικά σε κάθε ριπή μη επεξεργασμένων δεδομένων $s_pm(p,:)$. Με αυτόν τον τρόπο, προκύπτει ένας νέος πίνακας δεδομένων s_pm_zpd, διαστάσεων $N \times (M + L_\max + zpd_size)$, όπου $zpd_size = M - (L_{\max} + 1)$.

Για την προσομοίωση του αλγορίθμου που περιγράφεται από την εξίσωση (4.11), ορίζουμε έναν πίνακα αποθήκευσης των παραγόμενων προφίλ απόστασης S_pn, διαστάσεων $N \times (L_\max + 1 + zpd_size)$. Επίσης, ορίζουμε έναν πίνακα s_pm_buffer για την αποθήκευση τμημάτων από M δείγματα της p-οστής τρέχουσας ριπής, με διαστάσεις $(L_\max + 1 + zpd_size) \times M$. Καθένα από τα τμήματα αυτά αποτελεί ένα «παράθυρο» M δειγμάτων, που «ολισθαίνει» εντός της τρέχουσας ριπής μη επεξεργασμένων δεδομένων, αναλόγως με την τιμή του δείκτη υστέρησης φάσης n_{ccl}.

Ο πέμπτος κατά σειρά μαθηματικός προϋπολογισμός του προγράμματος, απαραίτητος για τη συμπίεση απόστασης, προκύπτει από την επανάληψη του προϋπολογισμένου διανύσματος $precomp_1$ κατά $(L_\max + 1 + zpd_size)$ φορές. Ο παραγόμενος πίνακας $precomp_5$ περιλαμβάνει τους όρους φάσης της εξίσωσης (4.11) για το εύρος επιτρεπτών τιμών του δείκτη δείγματος m και έχει διαστάσεις $(L_\max + 1 + zpd_size) \times M$.

Για την p-οστή τρέχουσα ριπή, εκτελείται μία επαναληπτική διαδικασία για όλες τις τιμές του δείκτη n_{ccl}, από 1 εώς $(L_\max + 1 + zpd_size)$, κατά την οποία συμπληρώνουμε κάθε γραμμή του πίνακα s_pm_buffer με τα κατάλληλα M δείγματα της p-οστής ριπής από τον πίνακα s_pm_zpd. Η σχετική εντολή στο πρόγραμμα MATLAB είναι η ακόλουθη

$$s_pm_buffer(n_{ccl}, :) = s_pm_zpd(p, n_{ccl} : n_{ccl} + M - 1)$$

Πολλαπλασιάζοντας στοιχείο με στοιχείο τους πίνακες s_pm_buffer και $\exp(-precomp_5)$, και εν συνεχεία, αθροίζοντας τα στοιχεία του παραγόμενου

πίνακα κατά τη δεύτερη διάσταση, προκύπτει το p-οστό προφίλ απόστασης που συμβολίζεται ως $S_pn(p,:)$.

Η βασιζόμενη στο γρήγορο μετασχηματισμό Fourier συμπίεση γωνίας αζιμουθίου είναι ο δεύτερος αλγόριθμος απεικόνισης που προσομοιώνουμε. Ορίζουμε έναν πίνακα S_qn, διαστάσεων $N \times (L_\max+1+zpd_size)$, στον οποίο αποθηκεύεται το αποτέλεσμα του γρήγορου μετασχηματισμού Fourier που πραγματοποιείται κατά την πρώτη διάσταση του πίνακα S_pn. Ο μαθηματικός τύπος (4.12) προσομοιώνεται στο πρόγραμμα μέσω της εντολής fft του MATLAB, η οποία εκτελείται ταυτόχρονα για κάθε στήλη του πίνακα S_pn. Το αποτέλεσμα του αλγόριθμου συμπίεσης γωνίας αζιμουθίου είναι η μιγαδική εικόνα του στόχου S_qn. Παίρνοντας το πλάτος αυτού του πίνακα μιγαδικών τιμών μέσω της εντολής $abs(S_qn)$, καταλήγουμε στη ζητούμενη εικόνα ISAR.

4.8 Βιβλιογραφικές αναφορές

[1] Pace, P., Fouts, D., and Zulaica, D., “Digital Image Synthesizers: Are Enemy Sensors Really Seeing What’s There?,” *IEEE Aerospace Electron. Syst. Mag.*, Feb. 2006, Vol. 21 (2), pp. 3-7.

[2] Freedman, A., Bose, R., and Steinberg, B., “Thinned Stepped Frequency Waveforms to Furnish Existing Radars with Imaging Capability,” *IEEE Aerospace Electron. Syst. Mag.*, Nov. 1996, Vol. 11 (11), pp. 39-43.

[3] Levanon, N., and Mozeson, E., “Nullifying ACF Grating Lobes in Stepped-Frequency Train of LFM Pulses,” *IEEE Trans. Aerospace Electron. Syst.*, April 2003, Vol. 39 (2), pp. 694-703.

[4] Zhang, Q., and Jin, Y.-Q., “Aspects of Radar Imaging Using Frequency-Stepped Chirp Signals,” *EURASIP J. Appl. Signal Processing*, 2006, Vol. 2006, pp. 1-8.

[5] Scholtz, R., Kappl, J., and Nahi, N., “The Detection of Moderately-Fluctuating Rayleigh Targets,” *IEEE Trans. Aerospace Electron. Syst.*, March 1976, Vol. 12 (2), pp. 117-125.

[6] Nayebi, M., and Aref, M., “Limitations of the Gaussian Model for Radar Signals,” *Proc. Int. Symp. on Information Theory*, Ulm, Germany, June 1997, p. 76.

[7] Keller, J., “Geometrical Theory of Diffraction,” *J. Opt. Soc. Amer.*, 1962, Vol. 52, pp. 116-130.

[8] Hua, Y., Baqai, F., Zhu, Y., and Heilbronn, D., “Imaging of Point Scatterers from Step-Frequency ISAR Data,” *IEEE Trans. Aerospace Electron. Syst.*, Jan. 1993, Vol. 29 (1), pp. 195-205.

[9] Haywood, B., Anderson, W., Morris, J., and Kyprianou, R., “Generation of Point Scatterer Models for Simulating ISAR Images of Ships,” *Proc. RADAR 1997*, Edinburgh, UK, Oct. 1997, pp. 700-704.

[10] Haywood, B., Zyweck, A., and Kyprianou, R., “ISARLAB: A Radar Signal Processing Tool.” *Proc. ICASSP 1994*, Adelaide, Australia, April 1994, pp. 177-180.

[11] Totir, F., Radoi, E., and Quinquis, A., “Validation of Complex Naval Target Models Using Superresolution Imagery Methods,” *Proc. OCEANS 2005*, June 2005, pp. 50-55.

[12] Shirman, Y., *Computer Simulation of Aerial Target Radar Scattering, Recognition, Detection and Tracking*, Norwood, MA: Artech House, 2002.

[13] Li, J., Wu, R., and Chen, V., “Robust Autofocus Algorithm for ISAR Imaging of Moving Targets,” *IEEE Trans. Aerospace Electron. Syst.*, July 2001, Vol. 37 (3), pp. 1056-1069.

[14] Odendaal, J., Barnard, E., and Pistorius, C., “Two-Dimensional Superresolution Radar Imaging Using MUSIC Algorithm”, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Oct. 1994, Vol. 42 (10), pp. 1386-1391.

[15] Pastina, D., Farina, A., Gunning, J., and Lombardo, P., “Two-Dimensional Super-Resolution Spectral Analysis Applied to SAR Images,” *IEE Proc.-Radar Sonar Navig.*, Oct. 1998, Vol. 145 (5), pp. 281-290.

[16] Karakasiliotis, A., and Frangos, P., “Comparison of Several Spectral Estimation Methods for Application to ISAR Imaging,” *Proc. Int. Symp. on Target Identification and Recognition Using RF Systems*, Oslo, Norway, Oct. 2004, pp. 11-1 - 11-14.

[17] Lazarov, A., and Minchev, C., “Spectral 2-D Image Reconstruction in ISAR with Linear Frequency Modulated Signals,” *Proc. DASC 2001*, Daytona, Oct. 2001, pp. 4.E.2-1 - 4.E.2-10.

[18] Lazarov, A., and Minchev, C., “ISAR Image Reconstruction and Autofocusing Procedure over Phase Modulated Signals,” *Proc. RADAR 2002*, Edinburgh, UK, Oct. 2002, pp. 536-541.

[19] Lazarov, A., and Minchev, C., “Correlation-Autofocusing-Spectral 2-D ISAR Image Reconstruction from Linear Frequency Modulated Signals,” *Proc. DASC 2002*, California, US, Oct. 2002, pp. 11.D.2-1 - 11.D.2-13.

[20] Lazarov, A., and Minchev, C., “ISAR Signal Modeling and Image Reconstruction with Entropy Minimization Autofocusing,” *Proc. DASC 2006*, Portland, US, Oct. 2006, pp. 1-11.

[21] Wehner, D., *High-Resolution Radar*, Norwood, MA: Artech House, 2nd Edn., 1995.

[22] Scheer, J., and Kurtz, J., *Coherent Radar Performance Estimation*, Norwood, MA: Artech House, 1993.

[23] Richards, M., *Fundamentals of Radar Signal Processing*, New York, NY: McGraw-Hill Professional, 2005.

[24] Gerry, M., Potter, L., Gupta, I., and van der Merwe, A., "A Parametric Model for Synthetic Aperture Radar Measurements," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, July 1999, Vol. 47 (7), pp. 1179-1188.

[25] Chen, V., and Ling, H., *Time-Frequency Transforms for Radar Imaging and Signal Analysis*, Norwood, MA: Artech House, 2002.

[26] Son, J., Thomas, G., and Flores, B., *Range-Doppler Radar Imaging and Motion Compensation*, Norwood, MA: Artech House, 2001.

Κεφάλαιο 5

Διδιάστατη απεικόνιση ραντάρ αντίστροφου συνθετικού ανοίγματος μέσω βασιζόμενου στη γεωμετρική θεωρία της περίθλασης μοντέλου σκέδασης

5.1 Εισαγωγή

Η απεικόνιση ραντάρ αντίστροφου συνθετικού ανοίγματος (απεικόνιση ISAR) αποτελεί ένα εξελισσόμενο ερευνητικό πεδίο της τεχνολογίας ραντάρ. Σημαντικό ερευνητικό έργο έχει αφιερωθεί στην ανάπτυξη αποδοτικών τεχνικών απεικόνισης, καθώς επίσης και στην επίλυση του προβλήματος της αντιστάθμισης της κίνησης του στόχου, ενώ αντιθέτως λίγες προσπάθειες έχουν γίνει για τη μοντελοποίηση του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος. Όσο πιο πλήρης και ακριβής είναι η περιγραφή του επιστρέφοντος σήματος ISAR μέσω ενός μαθηματικού μοντέλου, τόσο πιο αποδοτικοί είναι οι αλγόριθμοι απεικόνισης που αναπτύσσονται με βάση αυτό το μοντέλο. Επιπλέον, η ηλεκτρομαγνητική μοντελοποίηση της ανακλαστικότητας ενός στόχου ραντάρ αποτελεί σημαντικό μέρος του σχεδιασμού ενός συστήματος ραντάρ, καθώς η επιλογή ενός συγκεκριμμένου μοντέλου καθορίζει κατά μεγάλο βαθμό τις παραμέτρους του συστήματος [1].

Για μεγάλες τιμές της συχνότητας ραντάρ, το οπισθοσκεδαζόμενο πεδίο από ένα στόχο μπορεί να θεωρηθεί προσεγγιστικά ίσο με το αθροισμα των επιμέρους πεδίων που οπισθοσκεδάζονται από τα διάφορα κέντρα σκέδασης του στόχου αυτού [2]. Έτσι, μπορούμε να κατασκευάσουμε ένα μοντέλο σημειακών σκεδαστών για να προσομοιώσουμε τη συμπεριφορά σκέδασης του υπό εξέταση στόχου. Πέρα από τις απλές μαθηματικές εξισώσεις ενός τέτοιου μοντέλου [3], έχουν προταθεί στη σχετική βιβλιογραφία και κώδικες πρόβλεψης της κάθετης διατομής ραντάρ, οι οποίοι εφαρμόζονται για την παραγωγή πληρέστερων μοντέλων σημειακών σκεδαστών [4]. Σύνθετα μοντέλα στόχων, που ενσωματώνουν τα φαινόμενα της γεωμετρικής σκίασης και των δευτερευόντων ανακλάσεων, έχουν επίσης προταθεί στη βιβλιογραφία ραντάρ και έχουν χρησιμοποιηθεί για τη ρεαλιστική περιγραφή της συμπεριφοράς σκέδασης τόσο θαλάσσιων [5] όσο και εναέριων [6] στόχων. Πρόσφατα, ένα μοντέλο σημειακών σκεδαστών για την περιγραφή του επιστρέφοντος σήματος ISAR προτάθηκε από την ερευνητική μας ομάδα, και αφορά την περίπτωση διδιάστατης γεωμετρίας ISAR και σήματος διαμορφωμένου κατά βηματική συχνότητα [7]. Αυτό το αναλυτικό μοντέλο κατασκευάζεται μαθηματικά μέσω της σύμφωνης άθροισης των επιμέρους

ανακλώμενων σημάτων από τους διάφορους σημειακούς σκεδαστές του στόχου.

Στην αναφορά [7], ο υπό απεικόνιση στόχος μοντελοποιείται ως ένα ορθογώνιο πλέγμα από σημειακούς σκεδαστές, με τις τιμές της έντασης σκέδασης για τα σημεία του πλέγματος να περιγράφουν το γεωμετρικό σχήμα του στόχου. Μπορούμε λοιπόν να πούμε ότι αυτό το μοντέλο σημειακών σκεδαστών παραμετροποιείται μέσω της θέσης στη διδιάστατη γεωμετρία και της έντασης σκέδασης. Επιπλέον, γίνεται η υπόθεση ότι η ένταση σκέδασης του κάθε σημειακού σκεδαστή παραμένει σταθερή σε σχέση με τη γωνία σκόπευσης, για σχετικά μικρή γωνία ολοκλήρωσης. Σε αντίθεση με τη συνήθη παραδοχή κατά την απεικόνιση ISAR (ομοιόμορφη περιστροφική κίνηση του στόχου γύρω από το κέντρο μάζας του [8]), στην αναφορά [7] ο στόχος υποτίθεται ότι κινείται κατά μήκος μίας ευθύγραμμης τροχιάς με σταθερή ταχύτητα, χωρίς καθόλου περιστροφική κίνηση.

Στην αναφορά [9], ένα διδιάστατο παραμετρικό μοντέλο σκέδασης προτείνεται για την ανάλυση των μετρούμενων δεδομένων από ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (SAR). Το μοντέλο αυτό βασίζεται στη γεωμετρική θεωρία της περίθλασης (GTD), και περιγράφει τη σκέδαση από ραντάρ ως συνάρτηση της συχνότητας και της γωνίας σκόπευσης. Το διδιάστατο μοντέλο GTD παρέχει μία περιεκτική, σχετιζόμενη με τη φυσική σκέδασης περιγραφή των κέντρων σκέδασης του στόχου και παραμετροποιείται μέσω της θέσης, του γεωμετρικού σχήματος, της γωνίας προσανατολισμού και της σχετικής έντασης σκέδασης. Παρόλο που αρχικά έχει προταθεί στα πλαίσια του ραντάρ τύπου SAR, στην παρούσα εργασία εκμεταλλευόμαστε την ισοδυναμία SAR/ISAR [8] ώστε να χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο GTD για την περιγραφή του επιστρέφοντος σήματος ISAR όταν έχουμε εκπομπή κυματομορφής βηματικής συχνότητας.

Το κύριο αντικείμενο της παρούσας μελέτης είναι να αναδείξει τις ομοιότητες και τις διαφορές των δύο μοντέλων σκέδασης που προτείνονται στις αναφορές [7] και [9], και να εφαρμόσει γνωστούς αλγόριθμους απεικόνισης ISAR [7] σε συνθετικά δεδομένα ραντάρ ISAR που παράγονται μέσω αυτών των μοντέλων. Επιπρόσθετα, παρατίθενται και ορισμένες κατευθύνσεις μελλοντικής έρευνας σε σχέση με τη μοντελοποίηση της σκέδασης από ραντάρ με βάση τη γεωμετρική θεωρία της περίθλασης.

Το υπόλοιπο του κεφαλαίου αυτού είναι οργανωμένο ως εξής. Στη δεύτερη ενότητα, συνοψίζονται τα δύο υπό εξέταση μοντέλα σκέδασης, και επισημαίνονται οι ομοιότητες και οι διαφορές τους. Η τρίτη ενότητα περιλαμβάνει μία σύντομη ανακεφαλαίωση της μεθοδολογίας απεικόνισης ISAR που προτείνεται στην αναφορά [7] (και παρουσιάζεται στο προηγούμενο κεφάλαιο), και αποσαφηνίζει την εφαρμοσιμότητα της μεθοδολογίας αυτής σε συνθετικά δεδομένα ραντάρ που παράγονται μέσω του διδιάστατου μοντέλου GTD. Οι εικόνες ISAR, οι οποίες δημιουργούνται μέσω των αριθμητικών προσομοιώσεων των δύο μοντέλων σκέδασης και των αλγορίθμων απεικόνισης ISAR, παρουσιάζονται στην τέταρτη ενότητα. Με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, ενδιαφέροντα συμπεράσματα εξάγονται σε σχέση με τις μελλοντικές ερευνητικές μας προσπάθειες στην πέμπτη και τελευταία ενότητα.

5.2 Διδιάστατα μοντέλα σκέδασης

Στην ενότητα αυτή, δίνουμε συνοπτικά τη μαθηματική περιγραφή των δύο υπό εξέταση μοντέλων σκέδασης, και συγκεκριμμένα παρουσιάζουμε το διδιάστατο μοντέλο σημειακών σκεδαστών που προτείνεται στην αναφορά [7] και το διδιάστατο μοντέλο σκέδασης που βασίζεται στη γεωμετρική θεωρία της περίθλασης (σύντομα αναφέρεται ως μοντέλο GTD) [9]. Επιπλέον, αναφερόμαστε στις ομοιότητες και στις διαφορές τους, οι οποίες φαίνονται και μέσω των αποτελεσμάτων απεικόνισης ISAR που παραθέτουμε στην τέταρτη ενότητα.

5.2.1 Διδιάστατο μοντέλο σημειακών σκεδαστών

Η διδιάστατη γεωμετρία του προβλήματος ISAR που εξετάζεται στην αναφορά [7] φαίνεται στο Σχήμα 4-1 του τετάρτου κεφαλαίου. Ο στόχος και το ραντάρ τύπου ISAR βρίσκονται σε ξεχωριστά συστήματα συντεταγμένων. Ο στόχος διαγράφει ευθύγραμμη τροχιά με σταθερή διανυσματική ταχύτητα $\mathbf{V}$. Οι λεπτομέρειες της γεωμετρικής μοντελοποίησης του συγκεκριμμένου σεναρίου ISAR περιλαμβάνονται τόσο στην αναφορά [7] όσο και στη δεύτερη ενότητα του τετάρτου κεφαλαίου.

Για τη λειτουργία του ραντάρ ISAR με διαμόρφωση βηματικής συχνότητας, μία σειρά από ριπές παλμών βηματικής συχνότητας εκπέμπεται. Για το μαθηματικό μοντέλο σκέδασης που κατασκευάζουμε, υποθέτουμε ότι κάθε ριπή αποτελείται από M παλμούς, στους οποίους εφαρμόζεται διαμόρφωση βηματικής συχνότητας. Επιπρόσθετα, N ριπές εκπέμπονται κατά τη διάρκεια του διαστήματος συμφασικής επεξεργασίας.

Το συνολικό επιστρέφον σήμα ISAR είναι το άθροισμα του ντετερμινιστικού όρου δεδομένων $S(p,m)$ και του τυχαίου όρου θορύβου $n(p,m)$, ο οποίος θεωρείται λευκός γκαουσιανός. Οι ακόλουθες εξισώσεις συνοψίζουν το διδιάστατο μοντέλο σημειακών σκεδαστών για την περίπτωση της διαμόρφωσης βηματικής συχνότητας

$$S_n(p,m) = S(p,m) + n(p,m) \tag{5.1}$$

$$S(p,m) = \sum_{i=0}^{I-1}\sum_{j=0}^{J-1}\left\{\begin{array}{l} a_{ij}\cdot rect\left(\dfrac{t-t_{ij}(p)}{T_b}\right)\cdot \\ \cdot\exp\left[\, j\,2\pi\cdot f_{m-r+1}\cdot\left(t-t_{ij}(p)\right)\right]\end{array}\right\} \tag{5.2}$$

όπου

ως a_{ij} συμβολίζεται η σχετική ένταση σκέδασης για τον ij-οστό σημειακό σκεδαστή;

$t_{ij}(p) = \dfrac{2\cdot R_{ij}(p)}{c}$ είναι η συνολική καθυστέρηση του σήματος ISAR που οπισθοσκεδάζεται από τον ij-οστό σημειακό σκεδαστή και αντιστοιχεί στην p-οστή εκπεμπόμενη ριπή;

$t_{ij\min}(p)$ και $t_{ij\max}(p)$ είναι αντιστοίχως η ελάχιστη και η μέγιστη καθυστέρηση του λαμβανόμενου σήματος ISAR για την p-οστή ριπή;

ως $R_{ij}(p)$ σημειώνεται το πλάτος του διανύσματος απόστασης από το ραντάρ εώς τον ij-οστό σημειακό σκεδαστή του στόχου;

$t = t_{ij\min}(p) + (m-1)\cdot T$ είναι ο διακριτός χρόνος καθυστέρησης αναφορικά με το δείκτη τρέχοντος δείγματος m;

ως T και T_b συμβολίζουμε την περίοδο επανάληψης παλμού και ριπής αντίστοιχα;

$f_{m-r+1} = f_0 + (m-r)\cdot\Delta f$ είναι η συχνότητα λαμβανόμενου παλμού, κατάλληλα δεικτοδοτημένη [17] λαμβάνοντας υπόψη την ολίσθηση της χρονικής στιγμής λήψης του σήματος ISAR που ανακλάται από τον ij-οστό σημειακό σκεδαστή σε σχέση με την ελάχιστη καθυστέρηση $t_{ij\min}(p)$;

Δf είναι το συχνοτικό βήμα της διαμόρφωσης βηματικής συχνότητας.

[17] Βλέπε εξίσωση (4.5) του τετάρτου κεφαλαίου.

Στις παραπάνω εξισώσεις, p και m είναι οι δείκτες ριπής και δείγματος αντίστοιχα ($p=\overline{1,N}$, $m=\overline{1,M+L(p)}$, $L(p)=\left\lceil \left(t_{ij\max}(p)-t_{ij\min}(p)\right)/T \right\rceil$), ενώ οι δείκτες i, j καθορίζουν τη θέση ενός συγκεκριμμένου σημειακού σκεδαστή στο ορθογώνιο πλέγμα του στόχου, του οποίου το μέγεθος είναι $I \times J$.

5.2.2 Διδιάστατο μοντέλο GTD

Το διδιάστατο μοντέλο GTD συνυπολογίζει την εξάρτηση της έντασης σκέδασης των διαφόρων κέντρων σκέδασης του στόχου τόσο από τη συχνότητα όσο και από τη γωνία σκόπευσης. Ένα χαρακτηριστικό στοιχείο του μοντέλου αυτού είναι ο διαχωρισμός μεταξύ συγκεντρωμένων και διανεμημένων μηχανισμών σκέδασης. Η εξάρτηση από τη γωνία σκόπευσης μοντελοποιείται ως μία αργά μεταβαλλόμενη εκθετική συνάρτηση για τους συγκεντρωμένους μηχανισμούς σκέδασης και ως μία συνάρτηση *sinc* για τους διανεμημένους μηχανισμούς σκέδασης. Οι ακόλουθες εξισώσεις περιγράφουν το συνολικό οπισθοσκεδαζόμενο σήμα $E_N(f,\phi)$ σύμφωνα με το διδιάστατο μοντέλο GTD. Λευκός γκαουσιανός θόρυβος $N(f,\phi)$ προστίθεται στο οπισθοσκεδαζόμενο σήμα $E(f,\phi)$ στο πεδίο συχνότητας-γωνίας.

$$E_N(f,\phi)=E(f,\phi)+N(f,\phi) \tag{5.3}$$

$$E(f,\phi)=\sum_{n=1}^{p}\left\{\begin{array}{l} A_n\left(j\frac{f}{f_c}\right)^{\alpha_n}\cdot\exp\left(-2\pi\, f\,\gamma_n\sin\phi\right)\cdot \\ \cdot\sin c\left(\frac{2\pi f}{c}L_n\sin\left(\phi-\overline{\phi_n}\right)\right)\cdot \\ \cdot\exp\left(j\frac{4\pi f}{c}\left(x_n\cos\phi+y_n\sin\phi\right)\right)\end{array}\right\} \tag{5.4}$$

όπου

$f=f_m=f_0+(m-1)\Delta f$, $m=\overline{1,M}$, είναι η εξίσωση που περιγράφει τη συχνότητα του m-οστού παλμού της κυματομορφής βηματικής συχνότητας;

f_0 και f_c είναι η αρχική και η κεντρική συχνότητα ραντάρ αντιστοίχως;

$\phi = \phi_k$, $k = \overline{1, K}$, είναι η γωνία σκόπευσης για την k-οστή ριπή, η οποία μεταβάλλεται ομοιόμορφα από $-\frac{\Delta\phi}{2}$ εώς $\frac{\Delta\phi}{2}$, για γωνία ολοκλήρωσης $\Delta\phi$;

ως p σημειώνουμε το πλήθος των κέντρων σκέδασης του στόχου;

ως A_n και α_n συμβολίζουμε τη σχετική ένταση σκέδασης και την παράμετρο γεωμετρίας του n-οστού κέντρου σκέδασης αντίστοιχα;

γ_n είναι μία παράμετρος χωρίς άμεση φυσική σημασία, η οποία χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει την εκθετική μεταβολή της έντασης σκέδασης ενός συγκεντρωμένου μηχανισμού σκέδασης σε σχέση με τη γωνία σκόπευσης;

L_n και $\overline{\phi_n}$ είναι το μήκος και η γωνία προσανατολισμού ενός διανεμημένου μηχανισμού σκέδασης αντίστοιχα;

x_n και y_n είναι οι συντεταγμένες της θέσης του n-οστού κέντρου σκέδασης.

Στον Πίνακα 5-1 παραθέτουμε τις τιμές της παραμέτρου γεωμετρίας του διδιάστατου μοντέλου GTD για διάφορες γεωμετρίες σκέδασης.

Πίνακας 5-1. Παράμετροι γεωμετρίας για διάφορες γεωμετρίες σκέδασης

Γεωμετρία Σκέδασης	**Παράμετρος Γεωμετρίας**
δίεδρο, ανάκλαση από γωνία	1
κύλινδρος	½
σφαίρα, ακμή από το πλάι	0
περίθλαση από ακμή	–½
περίθλαση από γωνία	–1
διπλή περίθλαση από γωνία	–2

Η διαδικασία του ανασχηματισμού πολικών συντεταγμένων, που περιγράφεται στις αναφορές [9], [10], δεν είναι απαραίτητη για ένα σενάριο ISAR με σχετικά μικρή γωνία ολοκλήρωσης (π.χ. 1°-2°). Ανεπαίσθητες διαφορές αναμένονται στις εικόνες ISAR που προκύπτουν με ή χωρίς την εφαρμογή αυτού του ανασχηματισμού από πολικές σε καρτεσιανές συντεταγμένες.

5.2.3 Ομοιότητες και διαφορές των δύο μοντέλων σκέδασης

Και τα δύο μοντέλα που παρουσιάζονται παραπάνω αποτελούν προσεγγιστικές λύσεις του προβλήματος της διδιάστατης μοντελοποίησης της σκέδασης από ραντάρ. Μολονότι στην παρούσα εργασία εξετάζουμε την περίπτωση της διαμόρφωσης βηματικής συχνότητας, και τα δύο μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για κάθε είδος κυματομορφής ραντάρ με κωδικοποίηση συχνότητας.

Στην περίπτωση του μοντέλου σημειακών σκεδαστών, η ένταση σκέδασης είναι αμετάβλητη σε σχέση με τη γωνία σκόπευσης του ραντάρ, ενώ το μοντέλο GTD περιλαμβάνει αυτή τη μεταβολή, η οποία μπορεί να είναι ιδιαίτερα σημαντική. Επιπλέον, η μεταβολή της έντασης σκέδασης σε συνάρτηση με τη συχνότητα του λαμβανόμενου παλμού είναι ένα ακόμη σημαντικό χαρακτηριστικό του μοντέλου GTD, το οποίο δεν περιλαμβάνεται στο μοντέλο σημειακών σκεδαστών (για μικρό σχετικό εύρος συχνοτήτων ραντάρ μπορούμε να θεωρήσουμε τη μεταβολή αυτή ανεπαίσθητη). Επιπρόσθετα, το μοντέλο GTD βασίζεται στη φυσική σκέδασης και μπορεί να περιγράψει μία μεγάλη κλάση μηχανισμών σκέδασης, οι οποίοι δεν μπορούν να χαρακτηριστούν με ακρίβεια από το μοντέλο σημειακών σκεδαστών.

5.3 Διαδικασία ανακατασκευής εικόνας ISAR

Στην αναφορά [7], μία διαδικασία ανακατασκευής εικόνας ISAR, η οποία είναι ανεξάρτητη των παραμέτρων τροχιάς του στόχου και συνίσταται από έναν αλγόριθμο συμπίεσης απόστασης (που βασίζεται στην ετερο-συσχέτιση) και έναν αλγόριθμο συμπίεσης γωνίας αζιμουθίου (που βασίζεται στο μετασχηματισμό FFT), παρουσιάζεται σε πλήρη μαθηματική λεπτομέρεια.

Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτή η μεθοδολογία απεικόνισης ISAR προτείνεται για στόχους που κινούνται κατά μήκος ευθύγραμμης τροχιάς με σταθερή ταχύτητα, χωρίς καθόλου περιστροφική κίνηση. Για μικρή γωνία ολοκλήρωσης, αυτή η ευθύγραμμη ομαλή κίνηση είναι παρόμοια με τη συμβατική ομοιόμορφη περιστροφική κίνηση που είναι η συνήθης υπόθεση στη θεωρία ραντάρ τύπου ISAR [8]. Εφόσον το διδιάστατο μοντέλο GTD στηρίζεται σε αυτή την υπόθεση, μπορούμε να εφαρμόσουμε τη μεθοδολογία απεικόνισης που προτείνεται στην αναφορά [7] στα συνθετικά δεδομένα που παράγονται μέσω αυτού του μοντέλου.

Επιπλέον, ο βασιζόμενος στην ετερο-συσχέτιση αλγόριθμος συμπίεσης απόστασης είναι ισοδύναμος με μία διαδικασία δύο βημάτων για τη συμπίεση απόστασης [7]. Αντί της ετερο-συσχέτισης της κάθε ριπής του λαμβανόμενου σήματος ISAR με μία εκπεμπόμενη ριπή αναφοράς, μπορούμε πρώτα να αποδιαμορφώσουμε το λαμβανόμενο σήμα ISAR (δηλαδή να πολλαπλασιάσουμε με $e^{-j2\pi f t}$), και έπειτα να εφαρμόσουμε τον αντίστροφο μετασχηματισμό FFT (IFFT) στο παραγόμενο σήμα βασικής ζώνης. Από την άλλη, όπως επισημαίνεται στην αναφορά [9], ο χρονικός όρος $e^{j2\pi f t}$ δεν περιέχεται στο διδιάστατο μοντέλο GTD. Επομένως, δεν απαιτείται η αποδιαμόρφωση του λαμβανόμενου σήματος ISAR για την περίπτωση του μοντέλου GTD.

Επιπρόσθετα, το μοντέλο GTD υποθέτει ότι τα παραγόμενα συνθετικά δεδομένα ραντάρ στο πεδίο συχνότητας-γωνίας έχουν υποστεί αντιστάθμιση κίνησης, ενώ στην περίπτωση του μοντέλου σημειακών σκεδαστών η αντιστάθμιση κίνησης (ευθυγράμμιση απόστασης) πραγματοποιείται πριν από τη συμπίεση απόστασης.

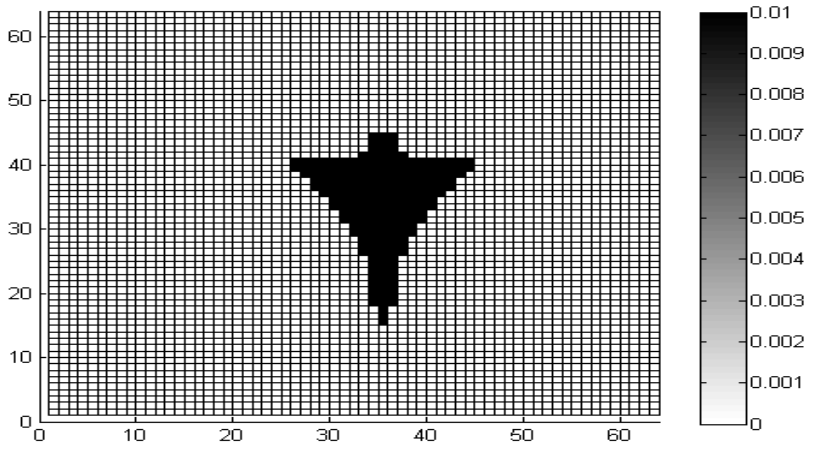
Η παραπάνω ανάλυση αποσαφηνίζει την εφαρμοσιμότητα των αλγορίθμων απεικόνισης ISAR που προτείνονται στην αναφορά [7] σε συνθετικά δεδομένα ραντάρ που παράγονται από το διδιάστατο μοντέλο GTD.

5.4 Αριθμητικές προσομοιώσεις

Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζουμε δύο είδη αποτελεσμάτων αριθμητικής προσομοίωσης για τη γεωμετρία του αεροσκάφους Mirage 2000C που απεικονίζεται στο Σχήμα 5-1. Το πλέγμα του στόχου έχει διαστάσεις 64x64.

Αρχικά, υποθέτουμε ότι ο στόχος αποτελείται από ιδανικούς σημειακούς σκεδαστές (δηλαδή οι παράμετροι α_n, γ_n, L_n και $\overline{\varphi_n}$ παίρνουν μηδενικές τιμές), και συγκρίνουμε την εικόνα ISAR που προκύπτει από το μοντέλο GTD με εκείνη που προκύπτει από το μοντέλο σημειακών σκεδαστών [7]. Για το δεύτερο σενάριο προσομοίωσης, προσθέτουμε στη γεωμετρία του στόχου ένα πλήθος από συγκεντρωμένους μηχανισμούς σκέδασης, συγκεκριμμένα 2 σημεία διπλής περίθλασης από γωνία (στο πίσω τμήμα της ατράκτου), 8 σημεία περίθλασης από γωνία, και 22 σημεία περίθλασης από ακμή (κατά μήκος των πτερυγίων). Οι παράμετροι L_n και $\overline{\varphi_n}$ παίρνουν μηδενικές τιμές για αυτό το σενάριο.

Χάριν απλότητος, οι σχετικές εντάσεις σκέδασης των κέντρων σκέδασης του στόχου τίθενται όλες ίσες με τη μονάδα, και για τα δύο εξεταζόμενα μοντέλα. Οι επιλεγόμενες παράμετροι ISAR για την περίπτωση της κυματομορφής βηματικής συχνότητας, κοινές και στα δύο μοντέλα, είναι $f_0 = 10\,GHz$, $B = 300\,MHz$ (εύρος συχνοτήτων ραντάρ), $M = 64$, $\Delta f = 4.6875\,MHz$, και $N = K = 589$. Για το μοντέλο σημειακών σκεδαστών, επιλέγουμε επίσης $T = 26.56\,\mu\sec$, $T_b = 1.7\ m\sec$, $V = 300\ {}^{m}\!/_{\sec}$ (πλάτος διανυσματικής ταχύτητας), $a = 180^0$ (γωνία διανυσματικής ταχύτητας), και $\varphi = 0^0$ (γωνία προσανατολισμού/θέσης στόχου ως προς το ραντάρ). Για το μοντέλο GTD, επιλέγουμε επιπλέον $\Delta\phi = 1.72^0$ ώστε να επιτύχουμε το ίδιο αντίστροφο συνθετικό άνοιγμα.

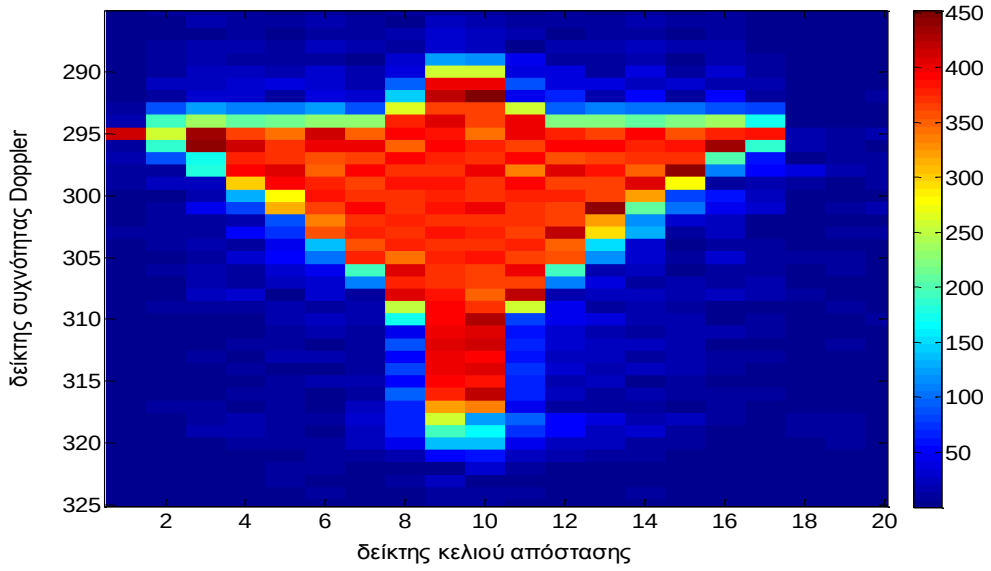


Σχήμα 5-1. Προσομοιούμενη γεωμετρία του αεροσκάφους Mirage 2000C

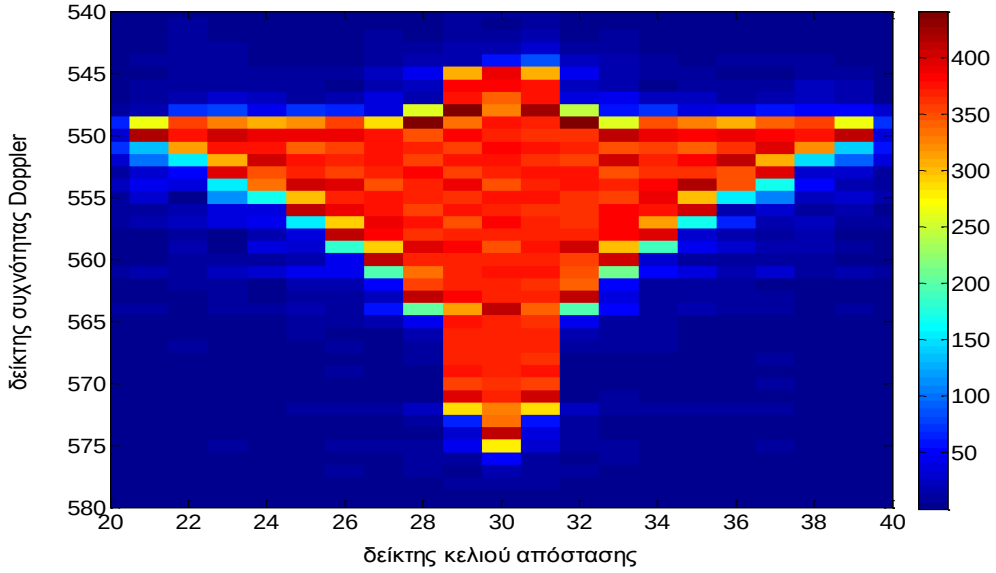
5.4.1 Στόχος με ιδανικούς σημειακούς σκεδαστές

Τα Σχήματα 5-2 και 5-3 απεικονίζουν τις εικόνες ISAR που προκύπτουν από τα συνθετικά δεδομένα ραντάρ που παράγονται μέσω του μοντέλου σημειακών σκεδαστών και του μοντέλου GTD, αντιστοίχως, για το πρώτο σενάριο προσομοίωσης. Ο προσομοιούμενος σηματοθορυβικός λόγος είναι 20 dB.

Παρατηρούμε την ομοιότητα των δύο εικόνων ISAR σε σχέση με τις εντάσεις σκέδασης των διαφόρων σημείων του πλέγματος, καθώς και σε σχέση με την εστίαση της εικόνας.



Σχήμα 5-2. Εικόνα ISAR που προκύπτει από το μοντέλο σημειακών σκεδαστών



Σχήμα 5-3. Εικόνα ISAR που προκύπτει από το «ιδανικό» μοντέλο GTD

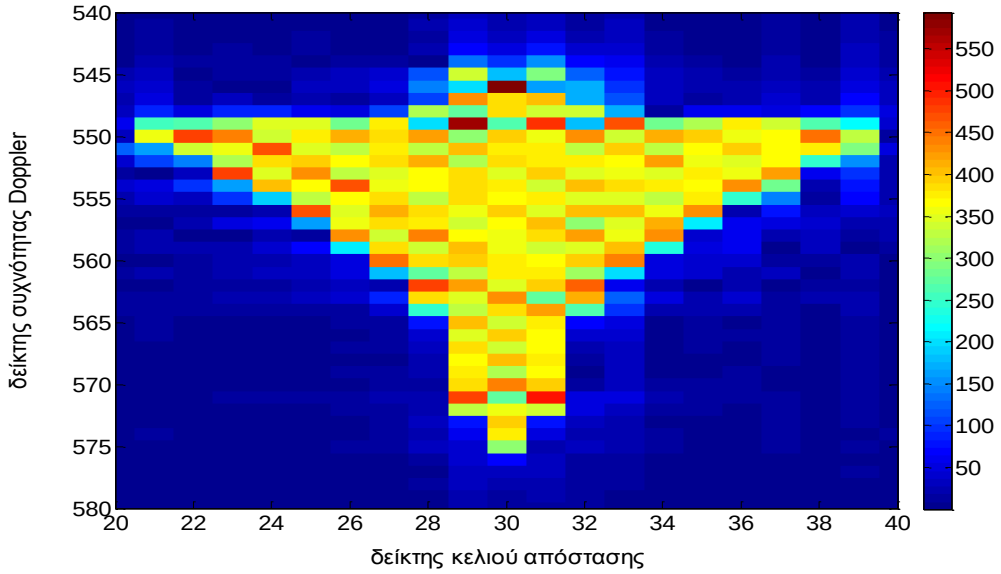
5.4.2 Στόχος με συγκεντρωμένους μηχανισμούς σκέδασης

Το αποτέλεσμα της προσθήκης διαφόρων μηχανισμών περίθλασης στη γεωμετρία του εξεταζόμενου στόχου απεικονίζεται στην αντίστοιχη εικόνα ISAR που προκύπτει από το μοντέλο GTD, η οποία φαίνεται στο Σχήμα 5-4.

Παρά το γεγονός ότι ο προσομοιούμενος σηματοθορυβικός λόγος είναι και για αυτό το σενάριο προσομοίωσης ίσος με 20 dB, η εστίαση της εικόνας έχει χειροτερεύσει σημαντικά. Σε σχέση με την εικόνα ISAR του Σχήματος 5-3, παρατηρούμε σημαντικές διακυμάνσεις στις τιμές της έντασης σκέδασης των διαφόρων σκεδαστών του στόχου.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα σημεία περίθλασης από ακμή, κατά μήκος των πτερυγίων του αεροσκάφους, εμφανίζουν υψηλότερες τιμές έντασης σκέδασης από τους ιδανικούς σημειακούς σκεδαστές. Επιπλέον, τα σημεία περίθλασης από γωνία (απλή και διπλή), στο πίσω τμήμα του αεροσκάφους, εμφανίζουν αρκετά μικρές τιμές έντασης σκέδασης.

Αυτά τα πρωτόλεια αριθμητικά αποτελέσματα απεικόνισης ISAR επισημαίνουν τη σημασία ενός ορθού μοντέλου σκέδασης, όπως είναι το διδιάστατο μοντέλο GTD, για την ανάπτυξη αποτελεσματικών τεχνικών απεικόνισης ISAR.



Σχήμα 5-4. Εικόνα ISAR που προκύπτει από το μοντέλο GTD με συγκεντρωμένους μηχανισμούς σκέδασης

5.5 Συμπεράσματα και κατευθύνσεις μελλοντικής έρευνας

Στο κεφάλαιο αυτό, εφαρμόζουμε μία αποδεδειγμένη μεθοδολογία απεικόνισης ISAR σε συνθετικά δεδομένα για ραντάρ τύπου ISAR που εκπέμπει κυματομορφή βηματικής συχνότητας. Τα δεδομένα αυτά παράγονται είτε από ένα διδιάστατο μοντέλο σημειακών σκεδαστών (το οποίο περιγράφεται αναλυτικά στο τέταρτο κεφάλαιο της διατριβής), είτε από ένα διδιάστατο μοντέλο GTD (που βασίζεται στη γεωμετρική θεωρία της περίθλασης). Επιπρόσθετα, αποσαφηνίζουμε την εφαρμοσιμότητα της μεθοδολογίας απεικόνισης για την περίπτωση του μοντέλου GTD.

Με βάση τις παραγόμενες εικόνες ISAR, αποκτούμε πολύτιμη διαίσθηση σε σχέση με την επίδραση της συμπεριφοράς σκέδασης του εξεταζόμενου στόχου στην επιτυγχανόμενη ποιότητα εικόνας ISAR.

Μελλοντικές ερευνητικές προσπάθειες στο συγκεκριμμένο αντικείμενο θα πρέπει να συμπεριλαμβάνουν και διάφορους διανεμημένους μηχανισμούς σκέδασης για την πληρέστερη προσομοίωση του διδιάστατου μοντέλου GTD. Η προσεκτική επιλογή των παραμέτρων του μοντέλου GTD που αφορούν τα διανεμημένα κέντρα σκέδασης του στόχου είναι επιβεβλημένη. Η χρήση πραγματικών πειραματικών δεδομένων ISAR είναι το επόμενο βήμα της έρευνας, με κύριο στόχο τη σωστή επιλογή τιμών για τις παραμέτρους του μοντέλου GTD.

5.6 Βιβλιογραφικές αναφορές

[1] U. D'Elia, M. Del Gaudio, and D. Pistoia, "Electromagnetic Modeling of Complex Targets in the Near Zone and Comparison with Experimental Results," in *Proc. Radar'97*, 1997, paper 449, p. 463-467.

[2] J. Keller, "Geometrical Theory of Diffraction," *J. Opt. Soc. Amer.*, Vol. 52, pp. 116-130, 1962.

[3] Y. Hua, F. Baqai, Y. Zhu, and D. Heilbronn, "Imaging of Point Scatterers from Stepped-Frequency ISAR Data," *IEEE Trans. Aerospace Electron. Syst.*, Vol. 29, pp. 195–205, Jan. 1993.

[4] B. Haywood, W. Anderson, J. Morris, and R. Kyprianou, "Generation of Point Scatterer Models for Simulating ISAR Images of Ships," in *Proc. Radar'97*, 1997, paper 148, p. 700.

[5] F. Totir, E. Radoi, and A. Quinquis, "Validation of Complex Naval Target Models Using Superresolution Imagery Methods," in *Proc. Oceans'05*, 2005, paper 10, p. 50.

[6] Y. Shirman, *Computer Simulation of Aerial Target Radar Scattering, Recognition, Detection and Tracking*, 1st ed., Norwood, MA: Artech House, 2002.

[7] A. Karakasiliotis, A. Lazarov, and P. Frangos, "Two-dimensional ISAR Model and Image Reconstruction with Stepped Frequency Modulated Signal," *IET Signal Processing*, Special Issue on Signal Processing Techniques for ISAR and Feature Extraction, Vol. 2, No. 3, pp. 277-290, Sep. 2008.

[8] D. Wehner, *High-Resolution Radar*, 2nd ed., Norwood, MA: Artech House, 1995.

[9] M. Gerry, L. Potter, I. Gupta, and A. van der Merwe, "A Parametric Model for Synthetic Aperture Radar Measurements," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 47, pp. 1179–1188, July 1999.

[10] Y. Akyildiz, and R. Moses, "A Scattering Center Model for SAR Imagery," *Proc. SPIE [C]*, Vol. 3869, pp. 76–85, Dec. 1999.

Γλωσσάριο

Αγγλο-ελληνικοί τεχνικοί όροι ραντάρ

Αγγλικά	Ελληνικά
ambiguity function	συνάρτηση αμφιβολίας
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