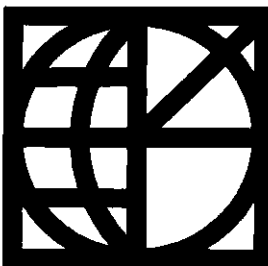


**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY  
OF ATHENS**  
**ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ SCHOOL OF RURAL AND SURVEYING  
ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ENGINEERING**  
**ΚΕΝΤΡΟ ΔΟΡΥΦΟΡΩΝ ΔΙΟΝΥΣΟΥ DIONYSOS SATELLITE OBSERVATORY**

**ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΔΙΑΔΟΧΙΚΩΝ ΘΕΣΕΩΝ ΚΙΝΟΥΜΕΝΟΥ  
ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΟΥ ΡΑΝΤΑΡ ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥ  
ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ (INVERSE SAR)**

**ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ ΠΑΠΑΧΡΙΣΤΟΣ**



**ΖΩΓΡΑΦΟΥ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2011**

## Περίληψη

Η όραση είναι ίσως η πιο σημαντική από τις αισθήσεις του ανθρώπου. Ο φακός στο ανθρώπινο μάτι συγκεντρώνει τα οπτικά κύματα τα οποία ανακλώνται από τα αντικείμενα στον ενδιάμεσο περιβάλλοντα χώρο και αργότερα «μεταφράζονται» σε οπτική πληροφορία στον εγκέφαλο.

Τα τεχνητά συστήματα οράσεως/εντοπισμού μιμούνται ακριβώς αυτή τη λειτουργία του οφθαλμού-αισθητήρα και του εγκεφάλου-επεξεργαστή. Τα τεχνητά συστήματα αρχικά κατασκευάστηκαν για να βελτιώνουν την ικανότητά μας να αναλύουμε και να αναγνωρίζουμε στόχους (κυάλια, ραντάρ, σόναρ) ή για να απεικονίσουμε π.χ. με φωτογραφικές μηχανές τα αντικείμενα. Όποια και αν είναι η περίπτωση, ο επιδιωκόμενος σκοπός επιτυγχάνεται καλύτερα με ένα φακό μεγαλύτερου ανοίγματος. Γενικώς, το «κλειδί» για την καλύτερη όραση είναι σαφώς το μεγαλύτερο άνοιγμα.

Το SAR (Synthetic Aperture Radar – Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος) παράγει ένα χάρτη υψηλής ανάλυσης στάσιμων στόχων καθώς και το ανάγλυφο του εδάφους. Το ISAR (Inverse SAR – Αντίστροφο SAR) χρησιμοποιεί ένα γεωμετρικά αντίστροφο τρόπο, όπου το ραντάρ είναι σταθερό και οι στόχοι κινούνται για να δημιουργήσουν εικόνες των στόχων. Με μια επαρκή ανάλυση υψηλού Doppler μετατοπίζουμε συναφείς σκεδαστές σε ένα στόχο που παρατηρείται και υπολογίζουμε την κατανομή της ανακλασιμότητας του στόχου που αποκτάται διαμέσου του φάσματος συχνοτήτων κατά Doppler. Η ανάλυση υψηλής εμβέλειας ανακτάται χρησιμοποιώντας μεγαλύτερο εύρος ζώνης της εκπεμφθείσας κυματομορφής, η δε υψηλή ανάλυση (*cross – range*) επιτυγχάνεται από τη συνεκτική επεξεργασία του επιστρεφόμενου σήματος από μια σειρά μικρών ανοιγμάτων διαφορετικών οπτικών ραντάρ ώστε να εξομοιώσει ένα μεγάλο άνοιγμα ραντάρ.

Οι συμβατικές μέθοδοι για την ανάκτηση πληροφοριών Doppler βασίζονται στην χρήση του μετασχηματισμού Fourier. Με τη λήψη μετασχηματισμού Fourier από ακολουθίες σειρών μπορεί να δημιουργηθεί μια εικόνα ISAR. Ως εκ τούτου η διαμόρφωση εικόνας σ' ένα συμβατικό ραντάρ είναι μια εικόνα που βασίζεται στον μετασχηματισμό Fourier.

## **Abstract**

Vision is perhaps the most critical component of the human sensory system. The lens in the human eye collect the optical waves that are being reflected from the objects in its surrounding space, which are then interpreted as visual information in the brain.

Human made vision systems imitate the function of the eye-sensor and that of the brain-processor. Human-made vision systems are primarily built to improve our ability to resolve targets, for example, binoculars, radars, and sonars, or to capture the image of a scene, for example, cameras. In either case the ability to view or capture a scene improves with a larger lens aperture (in a binocular or camera), a larger radar antenna aperture, or larger acoustic transducer aperture. The key to better vision is a larger aperture.

SAR generates a high-resolution map of stationary surface targets and terrain. ISAR uses a geometrically inverse way where the radar is stationary and targets are moving to generate image of targets. With a sufficient high-Doppler resolution, differential Time-Frequency Transforms for Radar Imaging and Signal Analysis Doppler shifts of adjacent scatterers on a target can be observed, and the distribution of the target's reflectivity can be obtained through the Doppler frequency spectrum. High-range resolution is obtained by using wide bandwidth of the transmitted waveform, and high cross-range resolution is achieved by coherently processing returned signals from a sequence of small apertures at different aspect angles to the radar to emulate a large aperture.

Conventional methods to retrieve Doppler information are based on the Fourier transform. By taking the Fourier transform of a sequence of time history series, an ISAR image can be formed. Therefore, the conventional radar image formation is a Fourier based image transform.

## Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους εκείνους που συνέβαλλαν και βοήθησαν στην πραγματοποίηση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή ΕΜΠ κ. Δημήτριο Παραδείση γιατί μου εμπιστεύτηκε τη διπλωματική εργασία καθώς και για την πολύτιμη βοήθειά του.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Επιστημονικό Συνεργάτη ΕΜΠ κ. Βασίλειο Μασσίνα για τη συνεχή και αποτελεσματική βοήθειά του, καθώς και για την αμέριστη συμπαράστασή του και υπομονή καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ ανήκει στη σύζυγό μου Μαρία και στα παιδιά μου Λάμπρο και Ειρήνη για την ηθική συμπαράσταση και αμέριστη κατανόηση που έδειξαν ολόκληρο το χρονικό διάστημα της φοίτησής μου στη Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών του ΕΜΠ η οποία συνδυαζόταν με την ταυτόχρονη εργασία μου στο Πολεμικό Ναυτικό.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	1
<b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</b> .....	3
<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	7
1.1 Πρόλογος .....	7
1.2 Γενικά-Σκοπός της Εργασίας .....	11
1.3 Δομή της Εργασίας .....	15
<b>2. ΑΡΧΕΣ ΡΑΝΤΑΡ</b> .....	16
2.1 Εισαγωγή .....	16
2.2 Ηλεκτρομαγνητική οπίσθια σκέδαση στόχων .....	22
2.3 Απεικόνιση Συνθετικού Ανοίγματος Ραντάρ .....	24
2.3.1 Προφίλ Εμβέλειας (Range Profile) .....	26
2.3.2 Ανάλυση Εμβέλειας (Range Resolution) .....	26
2.3.3 Ανάλυση Πλευρικής Εμβέλειας (Cross-Range Resolution) .....	27
<b>3. ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΚΑΙ ΕΞΑΓΩΓΗ ΣΗΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ</b> .....	28
<b>4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΧΡΟΝΟΥ-ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΕΜΒΕΛΕΙΑΣ ΡΑΝΤΑΡ</b> ...	30
4.1 Ηλεκτρομαγνητική φαινομενολογία ενσωματωμένη σε δεδομένα .....	30
4.2 Εξαγωγή των διανεμημένων χαρακτηριστικών σκέδασης από εικόνες ραντάρ χρησιμοποιώντας επεξεργασία χρόνου-συχνότητας .....	34
<b>5. ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΕΙΚΟΝΑΣ ΡΑΝΤΑΡ ΒΑΣΙΣΜΕΝΗ ΣΤΟ ΧΡΟΝΟ ΚΑΙ ΣΤΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ</b> .....	40
5.1 Απεικόνιση ραντάρ κινούμενων στόχων .....	41
5.2 Τυπική κίνηση επανόρθωσης και σχηματισμός εικόνας που βασίζεται στον μετασχηματισμό Fourier .....	48
5.3 Μετασχηματισμός εικόνας που βασίζεται στο χρόνο-συχνότητα .....	50
5.4 Απεικόνιση ραντάρ ελισσόμενων στόχων .....	53
5.4.1 Δυναμική ελισσόμενων στόχων .....	53
5.4.2 Απεικόνιση ελισσόμενων στόχων χρησιμοποιώντας δημιουργία εικόνας που βασίζεται στον μετασχηματισμό χρόνου-συχνότητας .....	55
5.5 Απεικόνιση ραντάρ πολλαπλών στόχων .....	60
5.5.1 Επίλυση ανάλυσης πολλαπλών στόχων .....	60

5.5.2 Φάση επανόρθωσης που βασίζεται στο χρόνο συχνότητας πολλαπλών στόχων ... ..	64
5.5.3 Σχηματισμός εικόνας που βασίζεται στον μετασχηματισμό χρόνου συχνότητας για απεικόνιση πολλαπλών στόχων από το ραντάρ .....	67
<b>6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....</b>	<b>68</b>
6.1 Μοντελοποίηση Συμβατικού ISAR και Απεικόνιση .....	68
6.2 Μοντέλο Αντίστροφου Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος (ISAR) .....	70
6.3 Συμπύση παλμού κατά τον αργό-χρόνο ή κίνηση επανόρθωσης .....	71
6.4 Επεξεργασία πολικού τύπου .....	71
6.5 Εφαρμογή σε εμπορικό αεροσκάφος τύπου Boeing 737 – 400 & 727 .....	74
6.6 Πολυστατικό Μονοπαλμικό ISAR.....	78
6.7 Πολυστατικό Μοντέλο ISAR.....	79
<b>7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....</b>	<b>80</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>82</b>
<b>Ευρετήριο Εικόνων</b>	
Εικόνα 2.1: Επιχειρησιακό σενάριο ραντάρ .....	17
Εικόνα 2.2: Τεχνητοί στόχοι-σκεδαστές:επιφάνειες, ακμές,γωνίες, τρίεδρα και κοιλότητες.....	18
Εικόνα 2.3: Προφίλ του αεροσκάφους κατά την εμβέλεια του Radar.....	20
Εικόνα 2.4: Προφίλ Doppler ενός αεροσκάφους .....	20
Εικόνα 2.5: α)Ένα LMF σήμα (β) η ανταπόκριση του matched φίλτρου και (γ) ο μετασχηματισμός Fourier της ισχύς φάσματος του LFM σήματος .....	25
Εικόνα 3.1: Φιλτράρισμα μεταβαλλόμενου-χρόνου συχνότητας και ανακατασκευή σήματος.....	29
Εικόνα 4.1: Σημειακός σκεδαστής .....	31
Εικόνα 4.2: Φυσική οπτική ακτίνα.....	32
Εικόνα 4.3: Επεξεργασία ISAR με σύνδεση χρόνο-συχνότητα .....	36
Εικόνα 4.4: Η τυπική απεικόνιση ISAR .....	37
Εικόνα 4.5: Το μοντέλο VFY-218.....	38
Εικόνα 5.1: Γεωμετρία απεικόνισης στόχου του ραντάρ .....	41
Εικόνα 5.2: Αναπαράσταση της διαδικασίας του συστήματος εικόνων SAR .....	46
Εικόνα 5.3: Ιστορικό χρονικών σειρών.....	47
Εικόνα 5.4: Τυπικό διάγραμμα κίνησης επανόρθωσης .....	49

Εικόνα 5.5: Επεξήγηση της απεικόνισης του ραντάρ που βασίζεται στο σχηματισμό εικόνας πάνω στο χρόνο-συχνότητα.....	51
Εικόνα 5.6: (α) Εικόνα προσομείωσης MIG-25 που ανακατασκευάστηκε με σχηματισμό εικόνας που στηρίζεται στο Fourier (β) Ανακατασκευασμένη απεικόνιση 7 πλαισίων με σχηματισμό εικόνας που βασίζεται στο Fourier .....	56
Εικόνα 5.7: Απεικόνιση αεροσκάφους (α) ανακατασκευή με χρήση Fourier (β) ανακατασκευή με χρήση χρόνου-συχνότητα.....	59
Εικόνα 5.8: Γεωμετρία δύο αεροσκαφών που πετούν (α)κατά μήκος ενός μονοπατιού (β) σε γραμμική κίνηση με ίδια διεύθυνση (γ) με όμοια εμβέλεια αλλά διαφορετική κατεύθυνση. Παρατηρούμε τη διαφορά Doppler σε σχέση με τη γωνία.....	63
Εικόνα 5.9: Τυπική διαδικασία χρόνου-συχνότητα πολλαπλών στόχων.....	65
Εικόνα 5.10: (α)Τροχιές δυο προσομοιωμένων στόχων με κυκλική κίνηση (β) απεικόνιση ραντάρ πολλαπλών στόχων χρησιμοποιώντας φάση επανόρθωσης και μετασχηματισμό Fourier που βασίζονται στο χρόνο-συχνότητα και (γ) απεικόνιση ραντάρ πολλαπλών στόχων χρησιμοποιώντας μετασχηματισμό χρόνου-συχνότητας.....	66
Εικόνα 6.1: Γεωμετρία Συστήματος Απεικόνισης ISAR.....	68
Εικόνα 6.2: Αναπαράσταση ISAR χρησιμοποιώντας αλγόριθμο μετώπου κύματος SAR.....	74
Εικόνα 6.3: (α) Αναπαράσταση ISAR σε αποκλίνων χωρικό πεδίο χρησιμοποιώντας αλγόριθμο μετώπου κύματος SAR (β) Κοντινό πλάνο των δύο ανακλαστήρων .....	75
Εικόνα 6.4:(α) Αναπαράσταση συμβατικού ISAR χρησιμοποιώντας προσεγγίσεις περιορισμένου εύρους ζώνης και εύρους δέσμης σε επεξεργασία πολικής μορφής (β) Κοντινό πλάνο των δύο ανακλαστήρων.....	76
Εικόνα 6.5: Διαδικασία ανασυγκρότησης 2D απεικόνισης ISAR .....	77
Εικόνα 6.6: Παράδειγμα απεικόνισης ISAR Boeing 727 .....	77
Εικόνα 6.7: Γεωμετρική προσομοίωση ενός Boeing 737-400 (α) Προσομοίωση μεταβλητών τιμών έντασης σκεδαστών και (β) Ανακατασκευή απεικόνισης ISAR.....	78
Εικόνα 6.8: Γεωμετρία Συστήματος Απεικόνισης σε Πολυστατικό ISAR .....	79
Εικόνα 7.1: Οπτική εικόνα πλοίου και απεικόνιση ISAR (Η εικόνα παραχωρήθηκε από το US Navy) .....	80

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Πρόλογος

Το ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (SAR) αποτελεί μία από τις πιο προχωρημένες εφευρέσεις του 20<sup>ου</sup> αιώνα. Το SAR είναι ένα σύστημα ραντάρ που σχετίζεται με την τεχνολογία της αεροναυπηγικής και αυτής των δορυφόρων. Αυτό μπορεί να παρέχει χάρτες υψηλής ανάλυσης απομακρυσμένων σημείων στο έδαφος, σε κάποιο πλανήτη κ.ο.κ. Τα διαστημόπλοια της NASA είναι επίσης εξοπλισμένα με αυτό το σύστημα ραντάρ. Τα συστήματα SAR αποτελούν ένα εξεζητημένο συνδυασμό λογισμικού ακριβείας και ηλεκτρονικού σχεδιασμού για την απόκτηση δεδομένων και εξελιγμένων θεωρητικών αρχών της μαθηματικής και φυσικής επιστήμης προκειμένου να αποκτηθούν δεδομένα που να μετασχηματίζονται σε εικόνες υψηλής ανάλυσης. Οι απαρχές των θεωρητικών αρχών του SAR μπορούν να εντοπιστούν στη θεωρία του Gabor για την ανακατασκευή του μετώπου κύματος (*wave – front reconstruction*). Η θεωρία αυτή αποτελεί τη βάση και για πολλά άλλα συναφή συστήματα απεικόνισης σε διαφορετικά πεδία έρευνας, όπως είναι η γεωφυσική έρευνα και η διαγνωστική ιατρική.

Η χρησιμότητα της θεωρίας αυτής του Gabor στο SAR αναγνωρίστηκε κατά τη διάρκεια των πρώτων βημάτων στα συστήματα απεικόνισης στις δεκαετίες του '50 και του '60. Ωστόσο, η έλλειψη ηλεκτρονικών υπολογιστών, όπως και η έλλειψη προηγμένων αλγορίθμων για την επεξεργασία της ψηφιακής πληροφορίας, εκείνη την εποχή, εμπόδισαν την ανάπτυξη μεθόδων απεικόνισης SAR που θα στηρίζονταν στη θεωρία της ανακατασκευής μετώπου κύματος. Τα πρώτα συστήματα SAR βασίζονταν στην οπτική (αναλογική) επεξεργασία του σήματος επιστροφής χρησιμοποιώντας τη διαδικασία προσέγγισης του Fresnel για το σχηματισμό εικόνας. Αυτού του τύπου ο επεξεργαστής SAR, στην αναλογική ή ψηφιακή εκδοχή του, που πρωτοχρησιμοποιήθηκε στα τέλη του 1970 είναι, επίσης, γνωστός και ως *range – Doppler imaging*.

Στα 1970 μια άλλη μέθοδος απεικόνισης SAR, γνωστή ως επεξεργασία πολικής διάταξης, εισήχθη στα κορυφαία τότε συστήματα σημειακής προβολής SAR. Αυτή η μέθοδος στηριζόταν στη λεγόμενη διαδικασία προσέγγισης κύματος αεροπλάνου. Έκτοτε, μία βάση γνώσεων θεωρητικής ή πρακτικής εφαρμογής έχει αναπτυχθεί που στηρίζεται σε αυτές τις συναφείς διαδικασίες προσέγγισης. Βέβαια, κάποιες από αυτές τις θεωρίες αποδείχθηκαν μη εφαρμοζόμενες στα σύγχρονα συστήματα υψηλής ανάλυσης SAR, ή και λανθασμένες.



Οι πρώτες μέθοδοι επεξεργασίας ψηφιακού σήματος για το σχηματισμό εικόνας SAR δια μέσου της θεωρίας του εισήχθησαν στα τέλη του 1980. Η ανακατασκευή μετώπου κύματος (*wave – front reconstruction*) μας παρέχει όχι μόνο ένα χρήσιμο εργαλείο για το σχηματισμό εικόνας SAR, αλλά και λειτουργικά εργαλεία του σήματος SAR που είτε προσκρούουν, είτε δεν προβλέπονταν από τον πυρήνα της θεωρίας που στηρίζεται στη διαδικασία προσέγγισης, στην απεικόνιση ακτίνας Doppler (*range Doppler imaging*) και στην επεξεργασία πολικής διάταξης.

Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα του αργού χρόνου στο εύρος φάσματος Doppler (*slow time Doppler bandwidth*) ενός συστήματος σημειακής προβολής SAR. Ο τύπος της θεωρίας πολικής επεξεργασίας ορίζει ότι το εύρος φάσματος είναι ανάλογο της γωνίας του εύρους της ακτίνας (*beamwidth*) ενός ραντάρ φυσικού ανοίγματος. Αυτός ο τύπος επίσης στηρίζει τις κλασικές αρχές της SAR θεωρίας για το σήμα SAR *stripmap*, λουριδωτής χαρτογράφησης. Το εύρος φάσματος Doppler αργού χρόνου ορίζει εδώ την ελάχιστη απαιτούμενη συχνότητα επανάληψης παλμού (*pulse repetition frequency – PRF*) του ραντάρ.

Ωστόσο, η θεωρία ανακατασκευής μετώπου κύματος SAR υποδεικνύει ότι το εύρος του φάσματος Doppler αργού χρόνου του σήματος σημειακής προβολής SAR είναι ανάλογο του εύρους ακτίνας ενός ραντάρ φυσικού ανοίγματος συν την οπτική γωνία του εύρους ακτίνας του συνθετικού ανοίγματος. Δυστυχώς οι περισσότεροι που χρησιμοποίησαν τη διαδικασία πολικής επεξεργασίας και προσπάθησαν να κατανοήσουν και να συμπληρώσουν τη θεωρία ανακατασκευής μετώπου κύματος SAR δεν πρόσεξαν αυτό το ιδιαίτερο σημαντικό ζήτημα.

Η επεξεργασία των φερόντων ψεύδη (*aliasing*) δεδομένων Doppler αργού χρόνου στην *X - band* των συστημάτων προβολής SAR (*spotlight SAR systems*) αποτελούσε σημείο κλειδί για την εκμετάλλευση σύνθετων υπογραφών του στόχου προκειμένου να επιτευχθεί η αυτόματη αναγνώριση στόχου. Το να φιλτράρουμε τα δεδομένα Doppler του υψηλότερου αργού χρόνου είναι ένας συνήθης τρόπος να χειριστούμε το πρόβλημα των δεδομένων *aliasing* Doppler.

Η θεωρία ανακατασκευής μετώπου κύματος παρέχει μοναδικές λειτουργικές ιδιότητες και πλεονεκτήματα στο SAR σήμα που δεν μπορούν να ευρεθούν σε οποιοδήποτε άλλο τρόπο επεξεργασίας. Αυτά τα πλεονεκτήματα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να επαναφέρουμε μη αλλοιωμένα δεδομένα από δεδομένα φέροντα ψεύδη.

Ένα άλλο κλασικό παράδειγμα του πώς η θεωρία ανακατασκευής μετώπου κύματος έχει αλλάξει τον τρόπο θεώρησης των σημάτων SAR αποτελεί το φιλτράρισμα των αποκτηθέντων δεδομένων SAR.

Το συμβατικό φιλτράρισμα του πεδίου συχνότητας (*frequency domain*), η εφαρμογή ενός παραθύρου του Hamming, είναι γνωστό ότι βελτιώνει την ποιότητα των δεδομένων στην επεξεργασία λόγου. Τέτοιου είδους φίλτρα έχουν, επίσης, χρησιμοποιηθεί στην απεικόνιση του *range-Doppler* ή στην πολική διαδικασία επεξεργασίας για να μειώσει το χιόνι στην οθόνη του ραντάρ και /ή να βελτιώσει το σχήμα του σημείου εξάπλωσης (*point spread function*).

Τα φίλτρα αυτά, όμως, κυρίως μειώνουν τα σφάλματα λόγω των προσεγγίσεων στην απεικόνιση του *range-Doppler* ή στην πολική διαδικασία επεξεργασίας. Αυτά τα σφάλματα αποδεδειγμένα είναι περισσότερο εμφανή στις υψηλότερες συχνότητες αργού χρόνου Doppler όπου το φίλτρο αποδυναμώνει τα δεδομένα SAR. Με το να στηριζόμαστε στη θεωρία ανακατασκευής μετώπου κύματος SAR και να εφαρμόζουμε αυτά τα φίλτρα στα δεδομένα SAR, λοιπόν, καταλήγουμε σε μια απώλεια μιας εξαιρετικά χρήσιμης πληροφορίας (υψηλή συχνότητα Doppler) και επομένως σε κακή ανάλυση.

Το κυρίως νόημα των παραπάνω παραδειγμάτων είναι ότι κάποιος δεν μπορεί να αξιοποιήσει τις ιδιότητες του σήματος SAR χρησιμοποιώντας την ακτίνα, *range Doppler* ή την πολική διαδικασία επεξεργασίας και μετά να χρησιμοποιήσει την θεωρία ανακατασκευής μετώπου κύματος SAR για τον σχηματισμό εικόνας. Τα περισσότερα, δυστυχώς, συστήματα λογισμικού SAR που αναπτύχθηκαν από το 1970 και έπειτα καταλήγουν σε δεδομένα SAR φέροντα ως ψευδή, εάν τα θεωρήσουμε αυτά τα ίδια αποκτηθέντα δεδομένα μέσα από την θεωρία ανακατασκευής. Αυτό, όμως, δε σημαίνει πως το πλήθος των δεδομένων που συγκεντρώνονται από αυτά τα συστήματα είναι υποχρεωτικά «επιμολυσμένα» (περιέχουν σφάλματα) και ότι θα έπρεπε αυτά τα συστήματα SAR να ανακατασκευαστούν.

Θα φανεί παρακάτω ότι, υπό ορισμένες συνθήκες :

1. Η αντισυμβατική θεωρία ανακατασκευής μετώπου κύματος SAR μπορεί να εξάγει, από μία βάση δεδομένων SAR που περιέχουν ψεύδη, δεδομένα χωρίς ψεύδη. Η διαδικασία που απαιτείται στηρίζεται πάνω στην θεωρία επεξεργασίας πολικής διαδικασίας.
2. Η θεωρία ανακατασκευής μετώπου κύματος έχει εισάγει νέους τρόπους επίλυσης προβλημάτων της κλασικής επεξεργασίας SAR, όπως είναι η κίνηση επανόρθωσης και η ισοστάθμιση ραντάρ (*radar calibration*).

Τα εν λόγω σφάλματα μπορούν να υποδειχθούν για την τροποποίηση του εύρους σήματος SAR το οποίο από μόνο του είναι σήμα τροποποιημένης φάσης.

Συνδυαζόμενα τα AM και PM σήματα ορίζουν την λειτουργία του *point spread* του SAR συστήματος. Η ιδέα αυτή χρησιμοποιήθηκε από τον Papoulis για την ανάλυση των Fourier ιδιοτήτων των οπτικών σημάτων AM-PM. Το 1960 ο O 'Neal επίσης προέβλεψε τέτοια χρησιμότητα των σημάτων SAR.

Θέμα υψίστης σημασίας που σχετίζεται με την αυτόματη αναγνώριση στόχου SAR (*ATR*) είναι οι ποικιλομορφίες του μοντέλου ακτινοβολίας ραντάρ over time ή το πρόβλημα της βαθμονόμησης. Λόγω των σφαλμάτων καλιμπραρίσματος η λειτουργία *point spread* ενός στόχου σε μια εικόνα SAR διαφοροποιείται από πείραμα σε πείραμα.

Η AM-PM μοντελοποίηση των μη καλιμπραρισμένων SAR σημάτων δίνει την δυνατότητα στο χρήστη να προσεγγίσει το πρόβλημα στο καλιμπράρισμα με την βοήθεια των μεθόδων των ελαχίστων τετραγώνων του υποδιαστήματος σήματος που χρησιμοποιούνται για την εξέλιξη της «τυφλής» αναγνώρισης στόχου.

Ένα αντίστοιχο πρόβλημα καλιμπραρίσματος συναντάται στον εντοπισμό κινουμένου στόχου χρησιμοποιώντας κατά μήκος SAR μονού/μοναδικού παλμού. Τα τελευταία χρόνια οι προσπάθειες για την χρήση περιοχών κέντρου φάσεως εκτός τόπου (DPCAS) προκειμένου να εξομοιωθεί κατά μήκος *MTP-SAR* μοναδικού παλμού κατά τη διάρκεια ενός σχετικά μεγάλου αργού χρόνου υπήρξαν ανεπιτυχείς εξαιτίας των σφαλμάτων στο καλιμπράρισμα. Η επεξεργασία σήματος υποδιαστήματος μη καλιμπραρισμένων μονού κατά μήκους παλμού *MTP-SAR* αποτελεί επίσης μία προσέγγιση για την επεξεργασία ψηφιακού σήματος που χρησιμοποιείται για την αντιμετώπιση σφαλμάτων καλιμπραρίσματος.

Στα παραδοσιακά γραμμικά συστήματα SAR απεικόνισης της κίνησης με λωρίδες και στα συστήματα σημειακής προβολής SAR έχουν πλέον προστεθεί ή ερευνώνται νέες εφαρμογές στα SAR. Ένα από αυτά τα νέα συστήματα SAR εξετάζει την κίνηση κυκλικής πορείας πτήσεως πάνω από την έρευνα περιοχή. Ο αντικειμενικός στόχος στα κυκλικά SAR συστήματα είναι να αποκτήσουμε την υπογραφή των στόχων στην προσδιορισμένη περιοχή από όλες τις οπτικές γωνίες. Τέτοιου είδους βάση δεδομένων, βεβαίως, είναι χρήσιμη για την αντιμετώπιση των *ATR-SAR* προβλημάτων στον εντοπισμό και την αναγνώριση στόχου.

Το *C-SAR*, επίσης, παρέχει δυνατότητες μιας κάποιας τρισδιάστατης απεικόνισης τις οποίες τα γραμμικά συστήματα δεν παρέχουν. Ωστόσο, το σήμα *C-SAR*, έχοντας ορισμένες λειτουργικές ιδιότητες, παρουσιάζει προβλήματα στην ψηφιακή επεξεργασία σήματος που είναι διαφορετικά από αυτά του γραμμικού SAR σήματος.

Η επιτυχία ενός συστήματος SAR υψηλής ανάλυσης εξαρτάται κατά 90% από ένα καλό λογισμικό ραντάρ και 10% από την προηγμένη επεξεργασία ψηφιακού συστήματος. Βέβαια, κάποιοι αλλάζουν την αναλογία σε 99 προς 1. Είναι, όμως, η ανάπτυξη και των δύο αναγκαία για την πρόοδο των συστημάτων SAR.

## 1.2 Γενικά-Σκοπός της Εργασίας

Η όραση είναι ίσως η πιο σημαντική από τις αισθήσεις του ανθρώπου. Ο φακός στο ανθρώπινο μάτι συγκεντρώνει τα οπτικά κύματα τα οποία ανακλώνται από τα αντικείμενα στον ενδιάμεσο περιβάλλοντα χώρο και αργότερα «μεταφράζονται» σε οπτική πληροφορία στον εγκέφαλο.

Τα τεχνητά συστήματα οράσεως/εντοπισμού μιμούνται ακριβώς αυτή τη λειτουργία του οφθαλμού-αισθητήρα και του εγκεφάλου-επεξεργαστή. Τα τεχνητά συστήματα αρχικά κατασκευάστηκαν για να βελτιώνουν την ικανότητά μας να αναλύουμε και να αναγνωρίζουμε στόχους (κιάλια, ραντάρ, σόναρ) ή για να απεικονίσουμε π.χ. με φωτογραφικές μηχανές τα αντικείμενα, όποια και αν είναι η περίπτωση, ο επιδιωκόμενος σκοπός επιτυγχάνεται καλύτερα με ένα φακό μεγαλύτερου ανοίγματος (κυάλια / φωτ. μηχανή), ή με ένα μεγαλύτερο ανοίγματος ακουστικό μετατροπέα. Γενικώς, το «κλειδί» για την καλύτερη όραση είναι σαφώς το μεγαλύτερο άνοιγμα. Δυστυχώς, είναι είτε ανέφικτο, είτε αντιοικονομικό (π.χ. τηλεσκόπιο του Hubble) να χτίσουμε και να διατηρήσουμε ένα σύστημα οράσεως φυσικού μεγάλου ανοίγματος.

Στα 1950 μια εφεύρεση στα ραντάρ του Wiley έφερε μια νέα επανάσταση στο πώς κατασκευάζονται τα τεχνητά οπτικά συστήματα. Αυτή η νέα εφεύρεση ονομάστηκε ραντάρ συνθετικού ανοίγματος ή SAR (synthetic aperture radar). Η σύλληψη του SAR αποσκοπεί στην επίτευξη του αποτελέσματος ενός φυσικού μεγάλου ραντάρ που, όπως είπαμε, είναι ανέφικτο.

Η σημασία ενός μεγάλου συνθετικού ανοίγματος γίνεται εμφανής και στο παρακάτω παράδειγμα.

Η πλευρική ή *cross-range* ανάλυση μιας κεραίας ραντάρ διαμέτρου  $D=1\text{m}$ , με μήκος κύματος  $\lambda=1\text{m}$  σε *range*  $R=1000\text{m}$  είναι :

$$\text{Πλευρική ανάλυση} = R \cdot \lambda / D = 1000 \text{ meters,}$$

η οποία είναι πολύ μικρή.

Ωστόσο, στηριζόμενοι στη θεωρία SAR και στην επεξεργασία σήματος, αν μετακινήσουμε αυτό το μικρό ενός μέτρου άνοιγμα ραντάρ κατά μήκος ενός θεωρητικού ανοίγματος με μήκος  $D_{\text{eff}}=1000\text{m}$ , όπου  $D_{\text{eff}}$  (eff:effective) είναι η ενεργή (αποτελεσματική) διάμετρος του ραντάρ ή το άνοιγμα, τότε η πλευρική ανάλυση με μήκος κύματος  $\lambda=1\text{m}$  για εμβέλεια  $R =1000\text{m}$  γίνεται:

Πλευρική ανάλυση =  $R*\lambda /D_{\text{eff}} =1 \text{ meter}$ , η οποία είναι πολύ μεγάλη.

Αυτό το θεωρητικό άνοιγμα του  $D_{\text{eff}}=1000 \text{ meters}$  είναι το λεγόμενο συνθετικό άνοιγμα του ραντάρ. Πρόσφατα μάλιστα η αρχή του συνθετικού ανοίγματος έχει χρησιμοποιηθεί και σε άλλες τεχνολογίες όπως αυτή του σόναρ.

Η απεικόνιση λοιπόν μέσω συνθετικού ανοίγματος αποτελεί μία καινοτομία. Από ότι έχει αποδειχθεί υπάρχουν σύνθετες βιολογικά δομές, όπως αυτές των δελφινιών και η νυχτερίδα, που εφαρμόζουν μία κάποιου είδους επεξεργασία συνθετικού ανοίγματος. Το δελφίνι και η νυχτερίδα χρησιμοποιούν την πλευρική κίνηση για να δημιουργήσουν ένα συνθετικό άνοιγμα. Ο σχηματισμός συνθετικού ανοίγματος που στηρίζεται στην πλευρική κίνηση και επεξεργασία ονομάζεται επεξεργασία Doppler στην βιβλιογραφία SAR.

Η απεικόνιση συνθετικού ανοίγματος ραντάρ έχει πολλές στρατιωτικές και εμπορικές εφαρμογές σε:

- Αναγνώριση αεροσκαφών
- Έλεγχο εναέριας κυκλοφορίας
- Προσγείωση με αυτόματο πιλότο
- Εντοπισμό ναρκών
- Εντοπισμό κεκαλυμμένων στόχων
- Εντοπισμό πυραύλων ή στόχων στη γη και παρακολούθηση
- Διερεύνηση εδάφους για πετρέλαιο και φυσικά διαθέσιμα
- Εκτίμηση της κατάστασης στην οποία βρίσκονται οι καλλιέργειες
- Εντοπισμό θαμμένων αρχαιολογικών ευρημάτων
- Εντοπισμό ανθρώπων σε κατεστραμμένα κτίρια
- Απεικόνιση βιολογικών δομών για ιατρικούς λόγους με τη χρήση υπερηχητικού σήματος

Ο σχηματισμός ψηφιακής εικόνας SAR εξαρτάται κατά πολύ από τη διακριτή ανάλυση Fourier του σήματος SAR και από τη λειτουργία του στόχου.

Αυτή η διάκριση χώρου και χρόνου επιβάλλει περιορισμούς περισσότερους που χρησιμοποιούνται για την απόκτηση των δεδομένων SAR, όπως είναι συχνότητα επανάληψης παλμού (Pulse Repetition Frequency - PRF), ο ρυθμός μετατροπής A/D γρήγορου-χρόνου και το μέγεθος της περιοχής προς απεικόνιση προκειμένου να γίνουν οι απαραίτητες χωρίς λάθη συμπληρώσεις.

Αυτή η συμπλήρωση των αλγόριθμων επεξεργασίας ψηφιακού σήματος απαιτεί την υψηλή γνώση της θεωρίας σήματος SAR και των περιορισμών δειγματοσμού της. Τα νέα μάλιστα υψηλής ανάλυσης SAR συστήματα έφεραν το δικό τους σύνολο σύνθετων διαδικασιών και παρεξηγήσεων.

Ειδική έμφαση δίνεται στους περιορισμούς παραμέτρων του συστήματος, στην επεξεργασία ψηφιακού σήματος και στα προβλήματα ανακατασκευής ψηφιακής εικόνας SAR.

#### ΟΡΓΑΝΩΣΗ - SAR

Το SAR παρέχει μία πολυδιάστατη βάση δεδομένων (τα αποκτηθέντα δεδομένα) τα οποία γίνονται εκμεταλλεύσιμα μέσω επεξεργασίας σήματος προκειμένου να αποκτήσουμε μία πολυδιάστατη εικόνα φέρουσα πληροφορίες σχετικά με την περιοχή που εξετάζουμε. Το σήμα - πληροφορία υποενοότητας διαστήματος των αποκτηθέντων δεδομένων σχηματίζεται εδώ με τροποποιήσεις της συχνότητας του ραντάρ και του αποτυπώματος του τρόπου ακτινοβολίας στην περιοχή του στόχου.

Ο πιο απλός τρόπος για να δει κανείς μία 2διάστατη απεικόνιση SAR είναι να στηριχθεί στην αρχή της απεικόνισης ραντάρ: ο  $x$  σημαίνων χώρος πληροφορίας κατασκευάζεται μέσω των ποικιλομορφιών στην συχνότητα του σήματος ραντάρ (εύρος φάσματος) και της απεικόνισης *cross range*, ο  $y$  σημαίνων χώρος πληροφορίας σχηματίζεται μέσω των ποικιλομορφιών του τρόπου ακτινοβολίας ραντάρ (συνθετικό άνοιγμα ή οπτική γωνία ραντάρ). Η 2διδιάστατη ωστόσο χαρτογράφηση είναι πιο δύσκολη από κατασκευή δύο ξεχωριστών μονοδιάστατων γραμμικών στοιχείων. Η θεωρία μάλιστα του σχηματισμού εικόνας SAR υψηλής ανάλυσης στηρίζεται στο αντίστροφο πρόβλημα των δύο διαστάσεων.

Στα πλαίσια της διπλωματικής με στόχο να αναπτύξουμε καλύτερους αλγόριθμους υψηλής ανάλυσης SAR θα μας βοηθήσουν:

- οι βασικές αρχές της μονοδιάστατης απεικόνισης *range* που σχετίζονται με την αξιοποίηση του εύρους φάσματος ραντάρ
- η απεικόνιση *cross-range* που σχετίζεται με το συνθετικό άνοιγμα
- η ιδιαιτερότητα απόκτησης δεδομένων και επεξεργασίας ψηφιακού σήματος

Συγκεκριμένα η φασματική (Fourier) αποδόμηση των εκπεμπόμενων κυμάτων και η θεωρία ανακατασκευής μετώπης κύματος αποτελούν την θεωρητική βάση για το σχηματισμό της θεωρίας σήματος SAR και απεικόνισης. Επίσης μας ενδιαφέρει η προσέγγιση όσον αφορά στο σχεδιασμό και την επεξεργασία σημάτων ραντάρ για την άσκηση ηλεκτρονικού πολέμου με π.χ σήματα τροποποιημένης φάσης *chirp phase-modulated chirp signals*.

Η σημασία του προτύπου ακτινοβολίας ραντάρ και οι ιδιότητες Fourier για την αξιοποίηση της θεωρίας ανακατασκευής μετώπης κύματος είναι σημαντικά για την κατανόηση της προέλευσης του σήματος SAR και του υποδιαστήματος πολυδιάστατου σήματος που αυτό καταλαμβάνει.

Θα αναφερθούμε διεξοδικά :

- στις δύο άλλες μεθόδους ψηφιακής ανακατασκευής σήματος SAR
  - συσχετισμός χώρου χρόνου TDC και
  - απεικόνισης οπίσθιας προβολής
- στις αρχές του αντίστροφου SAR για την μοντελοποίηση και απεικόνιση εναέριων στόχων
- στην εξέταση της χρήσης GPS δεδομένων για τη λεγόμενη ανταπόκριση κίνησης και για στόχους εντός πεδίου
- στην 3διάστατη απεικόνιση με τη χρήση 2διάστατων *planar* συνθετικού ανοίγματος στα αζιμούθια και *elevation domains*
- στην μοντελοποίηση συστήματος και την απεικόνιση για *broadside* και *squint* σημειακό προβολέα SAR και SAR λωριδωτή χαρτογράφηση. (καταγραφή εντός του πλαισίου των φασματικών ιδιοτήτων του προτύπου ακτινοβολίας SAR)
- στη γεωμετρία SAR

Η σύνθεση ενός κυκλικού ανοίγματος που σχηματίζεται με την κίνηση του αεροπλάνου που φέρει το ραντάρ. Πρόκειται για συστήματα SAR σημειακού προβολέα που δίνει την δυνατότητα απεικόνισης από όλες τις οπτικές γωνίες. Δυνατότητα 3διάστατης απεικόνισης παρέχεται επίσης με τον συνδυασμό ενός κυκλικού ανοίγματος και ενός συνθετικού ανοίγματος ανύψωσης.
- σε εξειδικευμένο σύστημα SAR που χρησιμοποιεί δύο και πλέον δέκτες ραντάρ με διαφοροποιημένες χωρικές συντεταγμένες για την καταγραφή επιστρεφόμενων δεδομένων *echoed* εκπομπής ενός μονού παλμού ραντάρ, το λεγόμενο μονοπαλικό SAR. Αυτό εντοπίζει κινούμενους στόχους στο

χώρο απεικόνισης, χαρτογραφεί περιοχές τοπογραφικού ενδιαφέροντος (*slant plane monopulse SAR* ή *interferometric SAR, InSAR* ή *IFSAR*). Επίσης εξετάζονται οι μέθοδοι επεξεργασίας υποδιαστήματος για την καταχώρηση μη ισοσταθμισμένων συστημάτων.

### 1.3 Δομή της Εργασίας

Η εργασία περιλαμβάνει επτά κεφάλαια, συμπεριλαμβανομένου του κεφαλαίου της εισαγωγής με το ακόλουθα περιεχόμενα:

Το κεφάλαιο 2 παρέχει μια σύντομη εισαγωγή στην έννοια του βασικού ραντάρ, συμπεριλαμβάνοντας τις αρχές του radar-back scattering, ραντάρ κυματομορφής, θόρυβο και διασκορπισμό, αμφίβολες συναρτήσεις, ταίριασμα φίλτρων και συμπίεσεις παλμών. Εμείς επίσης εισάγουμε την ιδέα απεικόνισης ραντάρ, συμπεριλαμβανομένου και των δύο: συνθετικού ανοίγματος ραντάρ (SAR) και αντίστροφο ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (ISAR).

Στο κεφάλαιο 3 συζητούμε τη χρήση του μετασχηματισμού time-frequency στην ανίχνευση και εξαγωγή θορύβου στο σήμα του ραντάρ. Η σκέψη του φίλτρου διαφορετικής συχνότητας εισάγεται για denoising του σήματος ραντάρ στο θόρυβο.

Στα κεφάλαια 4 και 5 συζητούμε τις κύριες εξελίξεις του μετασχηματισμού time-frequency για ανάλυση σήματος ραντάρ και επεξεργασία εικόνων. Στο κεφ. 4 περιγράφουμε με τη χρήση μετασχηματισμού time-frequency για μονοδιάστατο προφίλ εμβέλειας του ραντάρ. Ιδίως θα επικεντρωθούμε στο πώς η πολυπλοκότητα των ηλεκτρομαγνητικών μηχανισμών σκεδάσεων μπορούν να αναλυθούν καλύτερα και να ερμηνευτούν στο joint διάστημα time-frequency. Επίσης, εξηγούμε τη χρήση μετασχηματισμού υψηλής ανάλυσης time-frequency για εντοπισμό και εξαγωγή χαρακτηριστικών σκεδάσεων του time-frequency.

Στο κεφάλαιο 5 με τη χρήση του μετασχηματισμού time-frequency καταγράφεται για δυο διαστάσεις ο σχηματισμός εικόνας ραντάρ. Αναφερόμαστε για απεικόνιση ραντάρ κινούμενων στόχων και για διαφορετική συμπεριφορά χρόνου από τις μετατοπίσεις DOPPLER, καθώς και πώς η ανάλυση time-frequency χρησιμοποιείται για απεικόνιση ραντάρ πολλαπλών στόχων.

Στο κεφάλαιο 6 περιγράφουμε συγκεκριμένες εφαρμογές του μετασχηματισμού time-frequency για ραντάρ.

Στο κεφάλαιο 7 αναλύουμε τα συμπεράσματα των εφαρμογών και προτείνουμε μελλοντικές χρήσεις του ISAR.



## 2.ΑΡΧΕΣ ΡΑΝΤΑΡ

### 2.1 Εισαγωγή

Ραντάρ είναι ένα ηλεκτρομαγνητικό όργανο που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση και τη θέση των στόχων, όπως αεροσκαφών, πλοίων και οχημάτων εδάφους. Αυτό εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ενέργεια προς ένα στόχο και λαμβάνει το αντικατροπτίζον σήμα από το στόχο και clutter όπως φαίνεται στην εικόνα 2.1. Οποιαδήποτε ανεπιθύμητη επιστροφή σήματος στο ραντάρ που μπορεί να παρεμποδίζει τον εντοπισμό των επιθυμητών στόχων ονομάζεται clutter. Η πληροφορία που αφορά, τον στόχο όπως είναι η θέση και η ταχύτητα μπορούν κατ' αυτό τον τρόπο να γίνει αντικείμενο επεξεργασίας από το σώμα του ραντάρ που λαμβάνεται. Το ραντάρ είναι ένας αισθητήρας ραδιοσυχνοτήτων RF ο οποίος εν συγκρίσει με τους οπτικούς ή υπέρυθρους αισθητήρες αποδίδει και από μεγάλη απόσταση με μεγάλη ακρίβεια, και με τις οποιοσδήποτε καιρικές συνθήκες. Για αυτό άλλωστε χρησιμοποιείται ευρύτατα τόσο για πολιτικούς όσο και για στρατιωτικούς σκοπούς.

Εάν το ραντάρ εκπέμπει σήμα  $s_T(t)$  σε RF  $f_0$ , τότε το ανακλώμενο σήμα  $s_R(t)$  που λαμβάνεται από ένα στόχο, είναι ανάλογο του εκπεμπόμενου μηνύματος με μια καθυστέρηση μετάβασης και επιστροφής (round-trip delay),  $s_T(t-\tau)$  που κλιμακώνεται σύμφωνα με την ανακλαστικότητα  $\rho$  του στόχου, με τη σχέση:

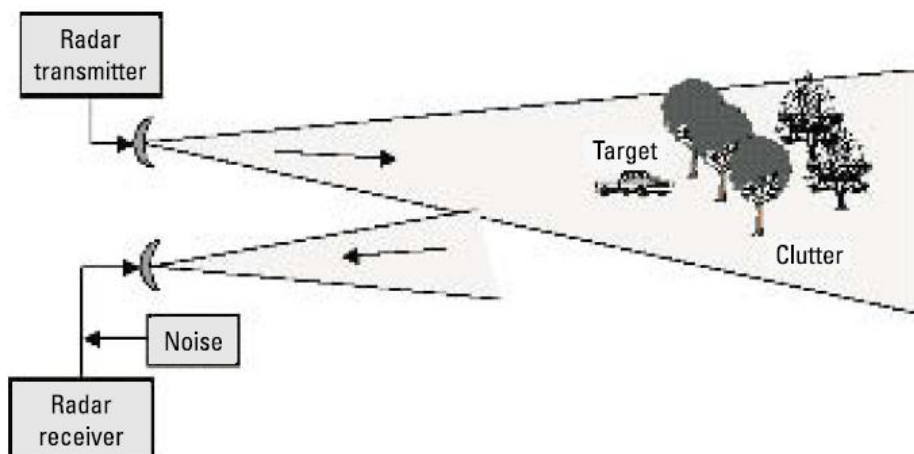
$$\begin{aligned} s_R(t) &\propto \rho s_T(t-\tau) = \rho \exp\{j\omega_0(t-\tau)\} & 0 \leq t \leq T \\ &= \rho \exp\{j2\pi f_0(t-\tau)\} & \end{aligned} \quad (2.1)$$

όπου  $T$  είναι η διάρκεια χρόνου του σήματος και  $\omega_0 = 2\pi f_0$  είναι η γωνιακή συχνότητα του σήματος.

Ο χρόνος μετάβασης και επιστροφής  $\tau$  (ταχύς χρόνος-fast time) του σήματος, καθορίζεται από:

$$\tau = 2R/c \quad (2.2)$$

όπου  $R$  είναι η απόσταση (εμβέλεια-range) στόχου-ραντάρ και  $c$  είναι η ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος.



**Εικόνα 2.1 Επιχειρησιακό Σενάριο Ραντάρ**

Εφόσον ο στόχος κινείται με ταχύτητα  $V_R$  σχετική με το radar που ονομάζεται γωνιακή ταχύτητα το σήμα radar πρέπει να διανύσει μια απόσταση, άλλοτε μικρότερη και άλλοτε μεγαλύτερη προκειμένου να φτάσει το στόχο. Το σήμα που λαμβάνεται σε χρόνο  $t$  ανακλάται από το στόχο σε χρόνο  $(t - \tau(t)/2)$  και ο χρόνος επιστροφής σήματος είναι μια καθυστέρηση  $\tau(t)$  σε διαφορετικούς χρόνους.

Επίσης στο σήμα που ανακλάται από το στόχο, προστίθεται θόρυβος. Η αναλογία σήματος θορύβου (SNR) στο δείκτη radar καθορίζεται από την ένταση του λαμβανόμενου σήματος, το θόρυβο της εικόνας και του εύρος φάσματος του δέκτη. Βεβαίως, η οποιαδήποτε βελτίωση στην SNR αυξάνει την πιθανότητα εντοπισμού του στόχου και την ακρίβεια στην εκτίμηση των παραμέτρων.

Το ραντάρ συνήθως εκπέμπει μια αλληλουχία παλμών ή σήματα άλλων ειδών κύματος στην απαιτούμενη συχνότητα επανάληψης παλμού (PRF) για την εξασφάλιση της μέγιστης ακτίνας εντοπισμού. Στο δέκτη του ραντάρ, το RF σήμα που λαμβάνεται πρώτα μετατρέπεται σε ένα σήμα IF ενδιάμεσης συχνότητας. Μετά το IF σήμα μετατρέπεται σε δύο σήματα βίντεο συχνότητας δηλαδή την εσωτερική φάση και τη φάση τετραγωνισμού (I και Q). Τα στοιχεία αυτά λαμβάνονται με τη χρήση δύο σύγχρονων αισθητήρων που έχουν πανομοιότυπο σήμα αναφοράς αλλά και μία διαφορά φάσης  $90^\circ$  μεταξύ τους. Τα I και Q σήματα διατηρούν την πληροφορία φάσης που εμπεριέχεται στο IF σήμα και έτσι δίνουν την δυνατότητα διάκρισης της θετικής και αρνητικής συχνότητας μετατόπισης Doppler.

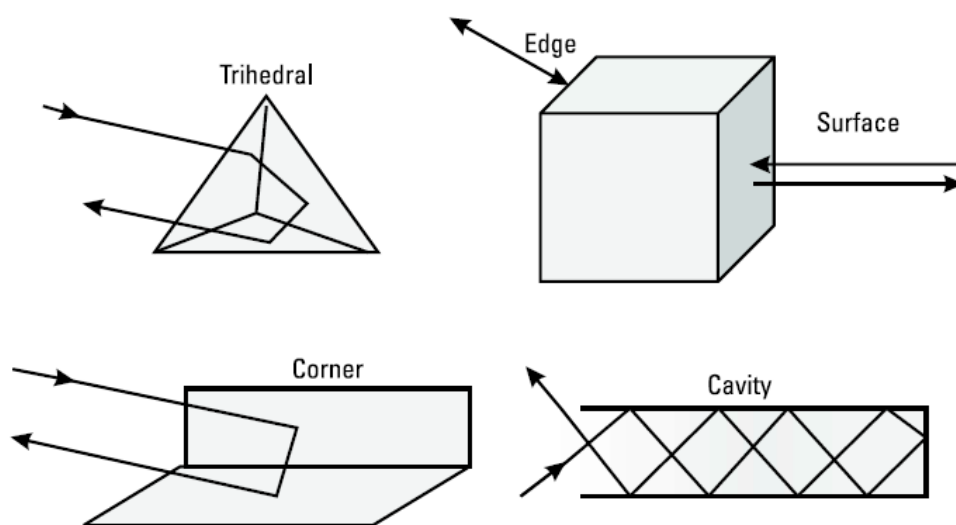
Οι πληροφορίες όσον αφορά στο στόχο που περιλαμβάνονται στα επιστρεφόμενα σήματα μπορούν να εξεταστούν άμεσα βάσει σχεδιασμού της εμβέλειας ραντάρ [η κατανομή της αντανάκλαστικότητας του στόχου σύμφωνα με τη γραμμή ραντάρ του πεδίου (LOS-Line Of Sight) προς το στόχο] ή από το φάσμα της συχνότητάς του εφαρμόζοντας τον μετασχηματισμό Fourier.

Η ακτίνα του στόχου που προσμετράται σύμφωνα με το LOS του ραντάρ προσδιορίζεται από τη χρονική καθυστέρηση που εντοπίζεται ανάμεσα στο εκπεμπόμενο σήμα και το λαμβανόμενο σήμα. Στην περίπτωση του κινούμενου στόχου, η ταχύτητά του προσμετράται βάσει ενός ευρέως γνωστού φαινομένου DOPPLER. Αν το ραντάρ εκπέμπει σήμα σε  $f_0$  συχνότητα, το ανακλώμενο σήμα από τον κινούμενο στόχο υφίσταται μια μεταβολή της συχνότητας Doppler  $f_D$  από την συχνότητα  $f_0$  εκπομπής καθώς επηρεάζεται από τη σχετική κίνηση μεταξύ ραντάρ και στόχου. Στην περίπτωση που ο στόχος έχει γωνιακή ταχύτητα  $V_R$  η μεταβολή συχνότητας Doppler  $f_D$  καθορίζεται από τη γωνιακή ταχύτητα του στόχου και τη συχνότητα εκπομπής του ραντάρ  $f_0$ :

$$f_D = -2f_0 \frac{V_R}{c} \quad (2.3)$$

όπου  $V_R$  ορίζεται με θετικό πρόσημο όταν ο στόχος απομακρύνεται από το ραντάρ. Ως εκ τούτου αν ο στόχος κινείται προς το ραντάρ με ταχύτητα  $VR = -1000 \text{ (ft/s)} = -304.8 \text{ (m/s)}$ , η μεταβολή συχνότητας Doppler για ραντάρ που λειτουργεί στα 9.842 GHz (X-μπάντα) είναι +20 kHz.

Οι στόχοι ραντάρ, ειδικά οι ανθρώπινες κατασκευές, μπορούν να θεωρηθούν ως μία συλλογή σκεδαστών σημείων. Αυτοί οι σκεδαστές μπορεί να έχουν μία μεγάλη ποικιλία συμπεριφορών αντανακλαστικής ή επανακπεμπόμενης προς το ραντάρ σκέδασης. Οι σκεδαστές μπορεί να είναι επιφάνειες, ακμές, γωνίες, δίεδρες επιφάνειες, τρίεδρες ή και κοιλότητες (εικόνα 2.2). Κάθε τύπος σκεδαστή έχει μία διαφορετική συμπεριφορά επανεκπομπής του σήματος.



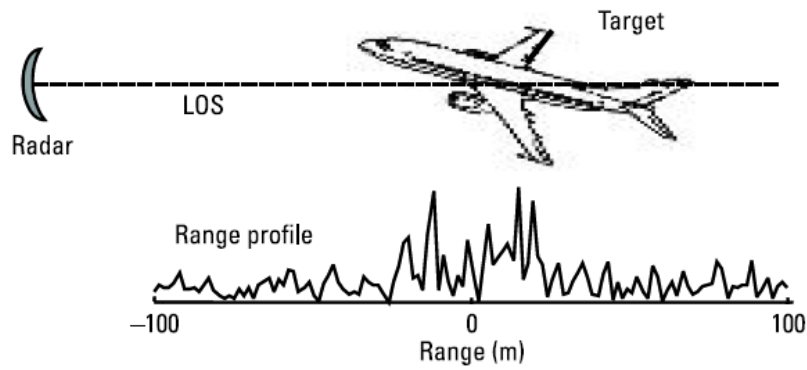
**Εικόνα 2.2 Τεχνητοί στόχοι-σκεδαστές: επιφάνειες, ακμές, γωνίες, τριέδρα και κοιλότητες**

Τα επιμέρους χαρακτηριστικά της εμβέλειας ραντάρ παρέχουν σχετική πληροφορία με την απόσταση του στόχου και τις θέσεις ισχυρών σκεδαστών, όπως είναι το πιάτο του ραντάρ, οι τουρμπίνες των μηχανών και άλλα πιθανά κέντρα σκέδασης (εικόνα 2.3). Η κάθετη διάσταση στη γραμμή LOS του ραντάρ ονομάζεται *cross range*. Επειδή η μετατόπιση Doppler ενός σκεδαστή πάνω σε ένα στόχο είναι ανάλογη της *cross range* του σκεδαστή με κλιμακωτή συνιστώσα, η προβολή της κατανομής ανακλαστικότητας του στόχου στην *cross range* διάσταση ανακτάται από την κατανομή των μετατοπίσεων Doppler, το επονομαζόμενο Doppler προφίλ. Με τη βοήθεια προφίλ Doppler υψηλής ανάλυσης, προσδιορίζονται οι θέσεις των ισχυρών σκεδαστών και η έκταση του στόχου στη διάσταση Doppler (εικόνα 2.4).

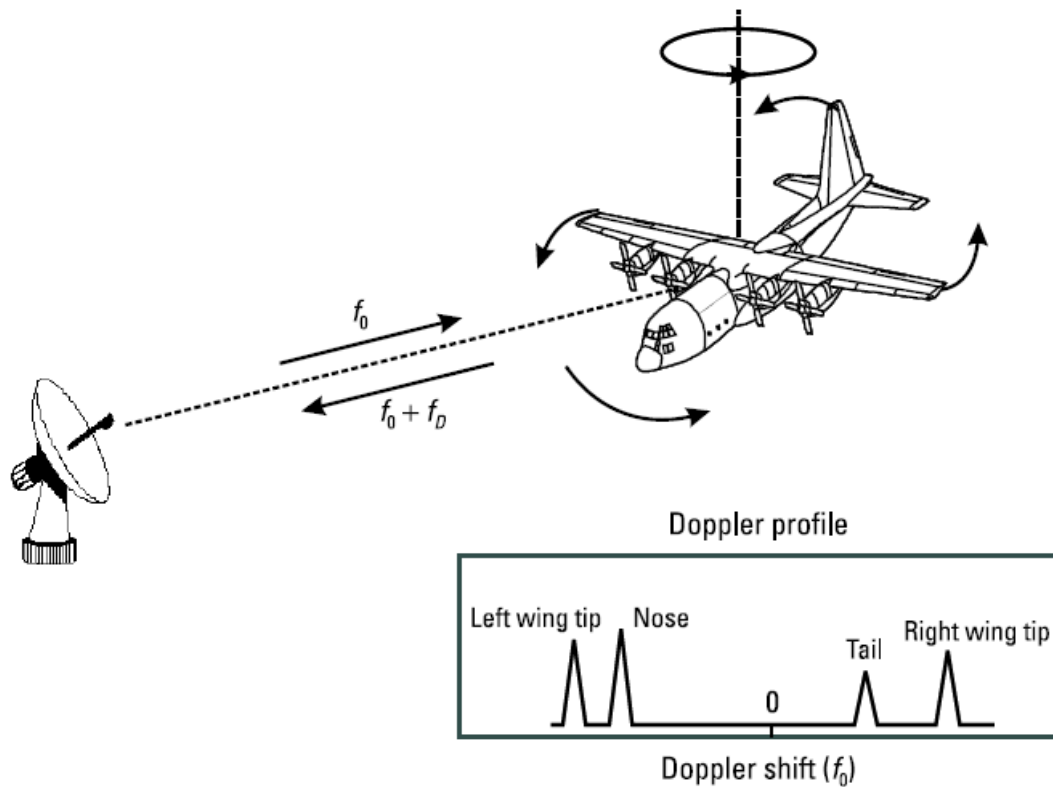
Με το συνδυασμό συγκεκριμένα των *range* και των Doppler προφίλ μπορεί να παραχθεί μία δισδιάστατη εικόνα ραντάρ. Μία εικόνα ραντάρ είναι τελικά μία χωρική κατανομή της ανακλαστικότητας του στόχου που καταγράφεται στην επίπεδη επιφάνεια *range* και Doppler. Η εικόνα *range-Doppler* μπορεί βέβαια να μετασχηματισθεί σε *range* και σε *cross range* εικόνα, αν γνωρίζουμε επακριβώς την κλιμακωτή συνιστώσα, η οποία με τη σειρά της καθορίζεται από το ρυθμό περιστροφής και το μήκος κύματος του μεταδιδόμενου κύματος.

Ένας σημαντικός παράγοντας που καθορίζει την ποιότητα της εικόνας είναι η ανάλυσή της (δηλαδή η δυνατότητα διάκρισης κοντινών μεταξύ τους σκεδαστών στη *range* και στη *cross range*). Η ανάλυση κατά μήκος της γραμμής LOS του ραντάρ προς το στόχο ονομάζεται *range* (ή *down-range*) ανάλυση. Η ελάχιστη δε απόσταση στην *range*  $\Delta r_r$  και στην *cross-range*  $\Delta r_{cr}$  σύμφωνα με την οποία διακρίνονται δύο σημεία σκεδαστές είναι ακριβώς η ανάλυση της εικόνας. Ένα τετράγωνο με πλευρές  $\Delta r_r$  και  $\Delta r_{cr}$  ονομάζεται κελί ανάλυσης.

Η ανάλυση κατά *range* καθορίζεται από τη συχνότητα του εύρους φάσματος πομπού και δέκτη. Για X-μπάντα ραντάρ που λειτουργεί σε συχνότητα 10GHz, ένα εύρος φάσματος σε ποσοστό 5% της συχνότητας λειτουργίας του ραντάρ (δηλ 500 MHz) μπορεί να αποδώσει 1ft της ανάλυσης κατά *range*.



**Εικόνα 2.3** Προφίλ του αεροσκάφους κατά την εμβέλεια του Radar



**Εικόνα 2.4** Προφίλ Doppler ενός αεροσκάφους

Προκειμένου να αποκτήσουμε υψηλή *cross range* ανάλυση απαιτείται και κεραία με μεγάλο άνοιγμα. Συνήθως, ένα συνθετικό άνοιγμα χρησιμοποιείται για να συντεθεί ένα μεγαλύτερο άνοιγμα κεραίας.

Το συνθετικό άνοιγμα επεξεργαζόμενο συμφασικά συνδυάζει σήματα που αποκτώνται από τις συχνότητες των μικρών ανοιγμάτων από διαφορετικές οπτικές γωνίες του στόχου προκειμένου να εξομοιώσει το αποτέλεσμα που θα προέκυπτε από μία κεραία μεγάλου ανοίγματος.

Η συμφασική επεξεργασία διατηρεί τις σχετικές φάσεις των «επιτυχημένων» παλμών. Κατά αυτόν τον τρόπο η φάση από παλμό σε παλμό διατηρείται και μπορεί ακόμα να εφαρμοστεί μία φάση διόρθωσης στα επιστρεφόμενα σήματα για να τα κάνει συμφασικά προς τις «επιτυχημένες» περιόδους των ενδιάμεσων παλμών. Εφόσον στις επιστροφές ραντάρ γίνεται συμφασική επεξεργασία, το επεξεργασμένο δεδομένο διατηρεί την πληροφορία τόσο του πλάτους όσο και της φάσης του στόχου. Το πλάτος σχετίζεται με τη διατομή ραντάρ (μέτρηση της ικανότητας να ανακλά ο στόχος ηλεκτρομαγνητικά κύματα) και η φάση εξαρτάται από τη γωνιακή ταχύτητα του στόχου.

Γενικά η απεικόνιση κινούμενων στόχων έχει αποδειχθεί αρκετά δύσκολη και αποτελεί μεγάλη πρόκληση σήμερα. Οι τεχνικές για την απεικόνιση ραντάρ υψηλής ανάλυσης βασίζονται στην επεξεργασία συνθετικών ανοιγμάτων όπως περιγράφηκε παραπάνω. Όσο υπάρχει μία σχετική κίνηση ανάμεσα του ραντάρ και του στόχου μπορεί να σχηματιστεί ένα συνθετικό άνοιγμα. Ένας στόχος, λοιπόν, μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα σύνολο διακριτών σημείων σκέδασης το καθένα με γωνιακή ταχύτητα ή μετατόπιση συχνότητας Doppler προς το ραντάρ. Επομένως η κατανομή ραντάρ της ανακλαστικότητας του στόχου μπορεί να μετρηθεί από το φάσμα της συχνότητας Doppler σε κάθε *range gate* που ονομάζεται *range-bin* και *range cell*, με το να πάρουμε το μετασχηματισμό Fourier πάνω στο συμφασικό μεσοδιάστημα επεξεργασίας (CPT) ή το χρόνο ολοκλήρωσης της απεικόνισης.

Για να χρησιμοποιήσουμε σωστά το μετασχηματισμό Fourier θεωρούμε ότι τα συστατικά της συχνότητας του αναλυμένου σήματος πρέπει να είναι χρονικά σταθερά. Έχοντας αυτό ως προϋπόθεση ένας μεγάλος χρόνος παρατήρησης αποδίδει υψηλή ανάλυση Doppler. Ωστόσο, όταν πρόκειται για κινούμενο στόχο οι μετατοπίσεις συχνότητας Doppler ποικίλουν και διαφοροποιούνται χρονικά έτσι ώστε η υπόθεση των σταθερών χρονικά μετατοπίσεων συχνότητας Doppler να μην ισχύει. Κατά αυτόν τον τρόπο το φάσμα Doppler τρεμουλιάζει υποβαθμίζοντας την ανάλυση *cross range* και η εικόνα του ραντάρ θολώνει.

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι ορισμένοι ονομάζονται αυτόματης εστίασης και άλλες που ονομάζονται αντιστάθμισης κίνησης για την επίλυση του τρεμουλιάσματος και της θολούρας.

Οι περισσότερες μέθοδοι στηρίζονται σε βασιζόμενες στον Fourier προσεγγίσεις που επιχειρούν να κάνουν επίπεδα τα φάσματα Doppler των διακριτών σκεδαστών με το να χρησιμοποιούν πολύπλοκες προσεγγίσεις πριν την επεξεργασία. Άλλες χρησιμοποιούν σύγχρονη φασματική ανάλυση για να πετύχουν καλύτερες εικόνες με μικρότερα δείγματα δεδομένων.

## 2.2 Ηλεκτρομαγνητική οπίσθια σκέδαση στόχων

Ο φυσικός μηχανισμός διαμέσου του οποίου μεταδίδεται το σήμα ραντάρ μετασχηματίζεται σε ένα ανακλώμενο σήμα εξαιτίας της ηλεκτρομαγνητικής σκέδασης από το στόχο. Αυτό είναι θεμελιώδης σημασία για την κατανόηση της λειτουργίας του ραντάρ. Το θέμα επηρεάζει το σχεδιασμό της μορφής κύματος του ραντάρ και τους σχετικούς αλγόριθμους επεξεργασίας σήματος και εικόνας. Επίσης καθορίζει πώς από τα χαρακτηριστικά του στόχου μπορούν να εξαχθούν από το σύστημα του ραντάρ. Τα περισσότερα επιχειρησιακά ραντάρ λειτουργούν με τρόπο μονοστατικό (π.χ ο πομπός και ο δέκτης βρίσκονται στον ίδιο φυσικό χώρο). Συνεπώς αν και ο στόχος σκεδάζει την προσπίπτουσα ενέργεια του ραντάρ σε όλες τις κατευθύνσεις μόνο η ενέργεια που σκεδάζεται όπισθεν προς τον πομποδέκτη του ραντάρ ενδιαφέρει (εικόνα 2.1). Σε αυτό αναφερόμαστε συνήθως με τον όρο ενέργεια οπίσθιας σκέδασης.

Όπως είναι αναμενόμενο οι μηχανισμοί οπίσθιας σκέδασης ορίζονται από τις εξισώσεις του Maxwell. Αυτές μπορεί να γίνουν αρκετά πολύπλοκες όταν πρόκειται για σύνθετους στόχους. Ένα απλοποιημένο μοντέλο, το επονομαζόμενο μοντέλο σημείου -σκεδαστή χρησιμοποιείται επιτυχώς για την κατά προσέγγιση περιγραφή του σήματος ραντάρ οπίσθιας σκέδασης. Σε αυτό το μοντέλο θεωρείται ότι η σκέδαση η προερχόμενη από ένα σύνθετο στόχο μπορεί να μοντελοποιηθεί ως απόρροια μίας συλλογής εντοπισμένων κέντρων σκέδασης πάνω στο στόχο. Ως εκ τούτου, η σχέση που προκύπτει μεταξύ του μεταδιδόμενου σήματος  $s_T(t)$  και του λαμβανόμενου σήματος  $s_R(t)$  μπορεί να καταγραφεί απλώς ως

$$s_R(t) = \sum_n A_n s_T \left( t - \frac{2R_n}{c} \right) \quad (2.4)$$

όπου το  $A_n$  αναπαριστά την ισχύ του  $n$  κέντρου σκέδασης και  $R_n$  αναπαριστά την θέση του κατά μήκος του LOS ραντάρ ή την επονομαζόμενη *down-range* κατεύθυνση.

Όσον αφορά έναν στόχο που είναι σταθερός ως προς ραντάρ και δεν εμπλέκεται η μεταβολή συχνότητας Doppler, είναι φανερό ότι αν το μεταδιδόμενο σήμα είναι ένας ελάχιστος παλμός τότε βάσει του μοντέλου σημείου σκέδασης το ανακλώμενο συντίθεται από μία συλλογή παλμών όπου οι θέσεις παλμού υποδεικνύουν τις χωρικές θέσεις των κέντρων σκέδασης πάνω στο στόχο κατά μήκος της *down-range* κατεύθυνσης. Οι δυνάμεις των παλμών είναι ανάλογες των δυνάμεων των κέντρων σκέδασης. Κατά αυτόν τον τρόπο, το λαμβανόμενο σήμα μετατρέπεται σε μία μονοδιάστατη χαρτογράφηση των σημαντικότερων κέντρων σκέδασης πάνω στο στόχο στην *down-range* κατεύθυνση.

Αυτό είναι γνωστό ως το *range profile* και αποτελεί σημαντικό χώρο χαρακτηριστικών στην διαγνωστική της **υπογραφής σήματος ραντάρ** και εφαρμογές της **αναγνώρισης στόχου**. Για παράδειγμα ολόκληρο το *range profile* παρέχει πληροφορίες που αφορούν το μήκος του στόχου κατά μήκος του LOS ραντάρ. Οι υψηλές κορυφές στο *range profile* δίνουν τις συγκεντρωμένες *range locations* των ισχυρών κέντρων σκέδασης.

Ενώ το μοντέλο σημείων σκέδασης είναι σύμφωνο με τις φαινομενολογικές παρατηρήσεις μπορεί να επαληθευτεί χωρίς λάθος και με τη θεμελιώδη θεωρία ηλεκτρομαγνητισμού. Αυτό επιτυγχάνεται μέσα από μία διαδικασία προσέγγισης της υψηλής συχνότητας στις εξισώσεις Maxwell ή με τα *ray optics*. Από τα πρώιμα κιάλας έργα των Luneburg και Kline φάνηκε ότι η ηλεκτρομαγνητική σκέδαση από ένα σύνθετο στόχο θα μπορούσε να περιγραφεί από ένα σύνολο highly localized ray φαινομένων. Κάθε μηχανισμός *ray* λειτουργεί επεξηγηματικά σε μία αντανάκλαση ή σε ένα σημείο διάθλασης πάνω στο στόχο.

Για παράδειγμα, ένα κατοπτρικό σημείο ανάκλασης χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη σκέδαση από μία λεία καμπυλωτή επιφάνεια. Ένα σημείο διάθλασης χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη σκέδαση από μία οξεία ακμή ή γωνία. Επιπλέον τα συσχετιζόμενα πλάτη σκέδασης, για έναν αριθμό κανονικών σχηματισμών έχουν εξαχθεί σε τυποποιημένη μορφή από ερευνητές του ηλεκτρομαγνητισμού. Σήμερα αυτή η γνώση ονομάζεται γενικά η γεωμετρική θεωρία της διάθλασης (GTD), όρος που εδραιώθηκε από τον Keller.

Στις εφαρμογές ραντάρ η γεωμετρική θεωρία διάθλασης GTD παρέχει το θεωρητικό πλαίσιο για το μοντέλο σημείου σκεδαστή. Τα σημεία ανάκλασης και διάθλασης πάνω σε ένα στόχο και τα συσχετιζόμενα πλάτη σκέδασης προξενούν τα σημεία σκεδαστές που παρατηρούνται στα ίδια τα *range profile* και στην απεικόνιση ραντάρ.



Ακόμα η GTD είναι μία σημαντική θεωρία όπου μας επιτρέπει να εξετάσουμε τα όρια του μοντέλου σημείου σκεδαστή. Αφού η GTD αρχικά παρήχθει για ηλεκτρομαγνητικά πεδία στο πεδίο ορισμού συχνότητας, επαναδιατυπώνουμε το μοντέλο σημείου σκεδαστή (2.4) στο πεδίο ορισμού της γωνιακής συχνότητας  $\omega=2\pi f$  ως

$$S_R(\omega) = S_T(\omega) \sum_n A_n \exp \left\{ -j\omega \frac{2R_n}{c} \right\} \quad (2.5)$$

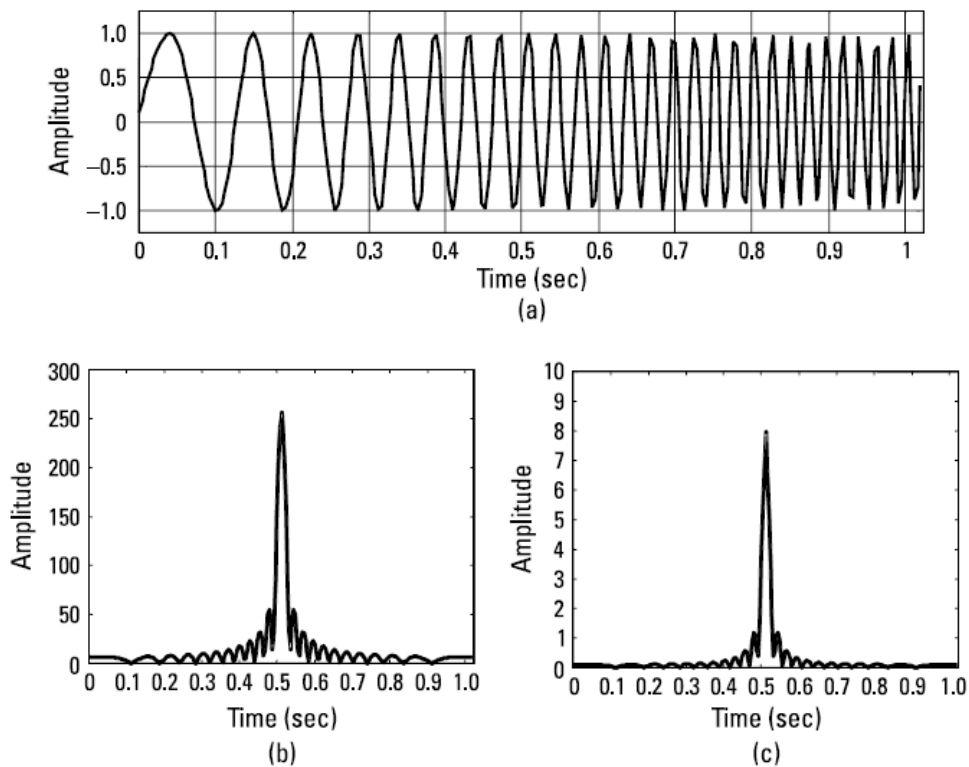
όπου  $S_T(\omega)$  και  $S_R(\omega)$  είναι μετασχηματισμοί Fourier του  $s_T(t)$  και  $s_R(t)$  αντίστοιχα. Σημειώσατε ότι στον παραπάνω τύπο κάθε μηχανισμός σκέδασης έχει ένα σταθερό πλάτος και ότι η παραπάνω συνθήκη γραμμικής φάσης κατονομάζεται συνήθως ως «μη διασκορπιστικός» μηχανισμός. Οι πραγματικοί μηχανισμοί σκέδασης ωστόσο πράγματι αποκλίνουν από το εξιδανικευμένο μοντέλο σημείου - σκεδαστή.

Για παράδειγμα το πλάτος σκέδασης  $A_n$  που προέκυψε τη GTD για κανονικώς συμπεριφερόμενες συνθέσεις είναι, γενικά ομιλώντας, ελάχιστα εξαρτώμενο από τη συχνότητα. Έχει αποδειχθεί ότι η εξάρτηση συχνότητας του  $A_n$  είναι στη μορφή του  $\omega^{\gamma_n}$  όπου  $\gamma_n$  προσλαμβάνει κλασματικές τιμές ανάλογες του σχήματος του σκεδαστή. Παρομοίως η φάση από τους εκθετικούς όρους στη σχέση (2.5) μπορεί να επιδείξει μη γραμμική συμπεριφορά, ως συνάρτηση της συχνότητας. Αυτό μπορεί να εμφανιστεί σε σκεδαστές που περιέχουν υλικά που δεν «συμπεριφέρονται» τέλεια ή συγκεκριμένες δομές, όπως είναι οι σωλήνες λήψεως καυσίμου όπου η διασπορά της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας διαφέρει από αυτήν σε ανοιχτό χώρο.

Ως αποτέλεσμα τέτοιου είδους εξαρτήσεων συχνότητας που αποκλίνουν από το εξιδανικευμένο μοντέλο σημείου - σκεδαστή, οι επιστρεφόμενοι παλμοί στην *range* δεν είναι πλέον πανομοιότυποι σε σχήμα με τον προσπίπτοντα παλμό. Γενικά, (οι παλμοί) απλώνουν περισσότερο στο *range* μετά την διαδικασία σκέδασης. Όταν αυτό συμβαίνει κατανομάζουμε την διαδικασία σκεδάσεως ως διαθλαστική. Η ερμηνεία των διαθλαστικών μηχανισμών σκέδασης στη *range* είναι πιο δύσκολη.

### 2.3 Απεικόνιση Συνθετικού Ανοίγματος Ραντάρ

Το ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (SAR) σαν ένα ραντάρ ατμόσφαιρας ή διαστήματος αναπτύχθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1950. Υπάρχει δυνατότητα για τη δημιουργία εικόνας του ραντάρ με καλή γνώση της θέσης και ταχύτητας.



**Εικόνα 2.5 (α) Ένα LMF σήμα (β) η ανταπόκριση του matched φίλτρου & (γ) ο μετ/σμός Fourier της ισχύς φάσματος του LFM σήματος**

Οι εικόνες SAR ανασυντάσσονται από λαμβανόμενα σήματα υψηλής ανάλυσης χαρτών της χωρικής κατανομής της συνάρτησης ανακλαστικότητα των σταθερών στόχων επιφάνειας και του ανάγλυφου του εδάφους. Ανάλυση υψηλής εμβέλειας ανακτάται χρησιμοποιώντας μεγαλύτερο εύρος ζώνης εκπεμφθείσας κυματομορφής και υψηλής πλευρικής ανάλυσης (*cross-range resolution*) επιτυγχάνεται δε από συνεκτική επεξεργασία επιστρεφόμενου σήματος από μια σειρά μικρών ανοιγμάτων διαφορετικών οπτικών ραντάρ ώστε να εξομοιώσει ένα μεγάλο άνοιγμα.

Αν το ραντάρ είναι σταθερό και ο στόχος κινείται, η γωνιακή κίνηση σε σχέση με το ραντάρ μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή μιας εικόνας του στόχου. Στην περίπτωση αυτή, το ραντάρ αποκαλείται **Αντίστροφο Ραντάρ Συνθετικού Ανοιγματος (ISAR- Inverse SAR)** επειδή αυτό χρησιμοποιεί γεωμετρικά ανάστροφο τρόπο (δηλαδή το ραντάρ είναι σταθερό και ο στόχος κινείται) στην εικόνα του στόχου. Στο ISAR η ανάλυση *cross-range* καθορίζεται από την ανάλυση DOPPLER με ένα συντελεστή προσαύξησης.

Μαζί με την υψηλή ανάλυση DOPPLER, οι διαφορετικές μετατοπίσεις DOPPLER γειτονικών σκεδαστών στο στόχο μπορούν να παρατηρηθούν και η κατανομή της ανακλαστικότητας του στόχου μπορεί να ανακτηθεί διαμέσου της συχνότητας φάσματος DOPPLER. Συμβατικές μέθοδοι απόκτησης πληροφορίας DOPPLER βασίζονται στο μετασχηματισμό Fourier.

### 2.3.1 Προφίλ Εμβέλειας (Range Profile)

Έχοντας επάρκεια εύρους στο φάσμα συχνότητας είναι δυνατόν να παραχθεί ένας γραμμικός (1D) χάρτης κατά μήκος της απεικόνισης στο ραντάρ LOS, ο οποίος ονομάζεται *range profile* ή *down-range profile*. Κατά τον ίδιο τρόπο με την παρατήρηση ενός στόχου με σχετική κίνηση σε σχέση με το ραντάρ πάνω από ένα επαρκές χρονικό διάστημα είναι δυνατόν να παραχθεί ένας γραμμικός (1D) *cross-range map* του στόχου.

Το χαρακτηριστικό της εμβέλειας ραντάρ είναι ένα επανεκπεμπόμενο σήμα σκέδασης συμπιεσμένου εύρους. Από τη στιγμή που ο χρόνος καθυστέρησης σχετίζεται με τη απόσταση του στόχου από το ραντάρ, το τελικό σήμα ραντάρ ως συνάρτηση του χρόνου μπορεί να αναγνωσθεί σαν γραμμική (1D) χαρτογράφηση των σημαντικότερων κέντρων σκέδασης του κατά μήκος στόχου του ραντάρ LOS. Σε απλούς στόχους, τα τυπικά χαρακτηριστικά εμβέλειας του ραντάρ περιέχουν περισσότερες της μιας αυτοτελείς κορυφές, που μπορούν να συνδέονται χωρικά με μεμονωμένα κέντρα σκέδασης του στόχου.

### 2.3.2 Ανάλυση Εμβέλειας (Range Resolution)

Με την ανάλυση τα εμβέλειας ραντάρ δίνεται η δυνατότητα ανάλυσης δυο σημειακών στόχων στο πλαίσιο τα τα δέσμης κεραίας, κοντά στην περιοχή τα εμβέλειας. Επειδή ο χρόνος καθυστέρησης του επιστρεφόμενου σήματος στο ραντάρ από το στόχο σχετίζεται με την απόσταση (*range*) R με  $z=2R/c$ , η ανάλυση απόσταση (*range*) σχετίζεται άμεσα με την ανάλυση του χρόνου καθυστέρησης. Η ανάλυση *range or down-range*  $\Delta r_r$  καθορίζεται από το εύρος της ζώνης του εκπεμπόμενου BW (Bandwidth).

$$\Delta r_r = c/2BW \quad (2.6)$$

### 2.3.3 Ανάλυση Πλευρικής Εμβέλειας (Cross – Range Resolution)

Η Ανάλυση Doppler είναι η ικανότητα επίλυσης δυο στόχων σε γωνιακές ταχύτητες. Η ανάλυση Doppler  $\Delta f_D$  σχετίζεται με το χρόνο επεξεργασίας για τη συνάφεια των εικόνων (*coherent integration time*)  $T$  από

$$\Delta f_D = 1/T \quad (2.7)$$

Η ανάλυση cross-range  $\Delta r_{cr}$  καθορίζεται από τη γωνία έκτασης (*angle extent*) των συνθετικών ανοιγμάτων κατά τη διάρκεια του *coherent integration time*  $\Delta r_{cr} = c/2\Omega f_0 T$ , όπου  $f_0$  είναι η συχνότητα του εκπεμπόμενου σήματος και  $\Omega$  είναι ο ρυθμός περιστροφής του στόχου. Ένας μεγαλύτερος χρόνος ολοκλήρωσης πιθανόν περιέχει υψηλότερη ανάλυση *cross-range*, αλλά επιφέρει *phase-tracking errors*, τα οποία μπορούν να μειώσουν την ανάλυση Doppler με αποτέλεσμα το θόλωμα της εικόνας.

Επειδή η ανάλυση Doppler  $\Delta f_D$  είναι αντίστροφα ανάλογη του χρόνου της εικόνας  $T$ , η ανάλυση *cross-range* είναι ανάλογη της ανάλυσης Doppler με συντελεστή κλίμακας

$$\Delta r_{cr} = (c/2\Omega f_0) \Delta f_D \quad (2.8)$$

όπου  $2\Omega f_0 / c$  καλείται συντελεστής κλίμακας.

### 3. ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΚΑΙ ΕΞΑΓΩΓΗ ΣΗΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ

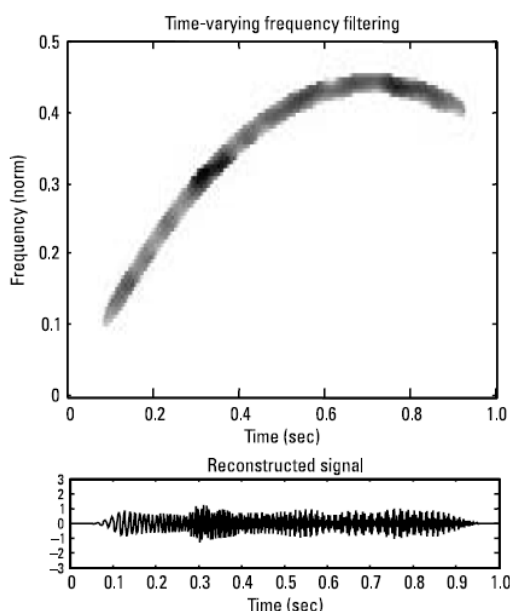
Η ανίχνευση και εξαγωγή ενός αγνώστου σήματος θορύβου είναι σημαντικό πρόβλημα της επεξεργασίας σήματος ραντάρ. Όταν ένα σήμα είναι σοβαρά αλλοιωμένο από θόρυβο και δεν μπορεί να παρατηρηθεί είτε με το χωρίο του χρόνου (*time domain*) είτε με το χωρίο των συχνοτήτων στο μιγαδικό επίπεδο των μετασχηματισμών Fourier, ο μετασχηματισμός ο οποίος βάσει συναρτήσεων εντοπίζεται και στα δύο χωρία (χρόνο και συχνότητα), όπως ο μετασχηματισμός Gabor, είναι πολύ συνηθισμένος για τα παρατηρούμενα σήματα. Μιλώντας για τον μετασχηματισμό χρονικής συχνότητας (*time frequency*), τυχαίος θόρυβος τείνει να σκορπίσει την ενέργειά του πάνω σε ολόκληρο το πεδίο ορισμού του *time frequency* ενώ σήματα συχνά συγκεντρώνουν την ενέργεια τους όχι πέρα από τα όρια (*time intervals*) και μπάντες συχνοτήτων. Κατ' αυτό τον τρόπο σήματα που ενσωματώνονται στο θόρυβο είναι πολύ ευκολότερα να αναγνωριστούν στο συνδυασμένο επίπεδο χρόνων και συχνοτήτων (*joint time-frequency domain*).

Για την ανίχνευση ή εντοπισμό και εξαγωγή αδύνατων σημάτων θορύβου, χρειάζεται πρώτα να ανιχνεύσουμε εκείνους τους συντελεστές στο *joint frequency domain* οι οποίοι ανταποκρίνονται στο επιθυμητό σήμα. Στη συνέχεια εμείς χρησιμοποιούμε μόνο εκείνους τους συντελεστές που ανακτούν την κυματομορφή του σήματος στο *time domain*.

Για την ανίχνευση των συντελεστών των σημάτων, θα πρέπει να συσταθεί ένα κατάλληλο κατώφλι (όριο). Αν ένας συντελεστής είναι μεγαλύτερος από το κατώφλι, επιφορτίζει το σήμα. Αλλιώς ο συντελεστής επιφορτίζει το θόρυβο. Ο καλύτερος δυνατός τρόπος να συσταθεί (ορισθεί) το κατώφλι βασίζεται στην ανίχνευση του CFAR (constant false-alarm). Επεκτείνουμε την ανίχνευση του CFAR στο *joint time frequency domain*. Ρυθμίζοντας έναν συντελεστή με CFAR στο πεδίο ορισμού χρόνου συχνότητας, μπορούμε εξετάζοντας ένα συντελεστή να καθορίσουμε κατά πόσον ανήκει σ' ένα σήμα ή όχι παίρνοντας τον αντίστροφο μετασχηματισμό του χρόνου συχνότητας (χρησιμοποιώντας μόνο ανιχνευμένους συντελεστές χρόνου συχνότητας). Έτσι, από το απομονωμένο σήμα θορύβου μπορεί να ανιχνευθούν οι παράμετροί του και το σήμα μπορεί να εμπλουτιστεί (αύξηση του SNR).

Για αλλοιωμένα σήματα από δυνατό στο βάθος θόρυβο είναι συνήθως πολύ δύσκολη η ανίχνευση σήματος και η εκτίμηση παραμέτρων είτε στο πεδίο ορισμού του χρόνου είτε στο πεδίο ορισμού της συχνότητας. Ωστόσο αυτά πιθανόν να αναγνωρισθούν στο *joint time frequency domain* παίρνοντας τον μετασχηματισμό χρόνου-συχνότητας όπου η κατανομή σειρών χρόνου-συχνότητας που χρησιμοποιήθηκε περιγράφεται στο κεφάλαιο 2.

Το σήμα συχνά συγκεντρώνει την ενέργειά του εκτός ενός περιορισμένου χρονικού διαστήματος (*limited time interval*) και μιας περιορισμένης μπάντας συχνοτήτων (*limited frequency band*), ενώ τυπικά ένας τυχαίος θόρυβος έχει την ενέργεια απλωμένη πάνω σε ένα μιγαδικό επίπεδο χρονικής συχνότητας (*time frequency plane*). Συμπερασματικά, αναπαριστώντας το σήμα και το θόρυβο στο *joint time frequency domain* η ανίχνευση σήματος γίνεται ευκολότερη. Εφαρμόζοντας *time varying frequency filtering* το SNR μπορεί επίσης να εμπλουτιστεί. Αν εμείς μπορούμε να ξεχωρίσουμε εκείνους τους συντελεστές οι οποίοι ανήκουν στο σήμα από εκείνους στους οποίους ανήκει ο θόρυβος, αυτοί οι συντελεστές μπορεί να χρησιμοποιηθούν για να αναγνωρίσουν το σήμα απλά παίρνοντας αντίστροφο μετασχηματισμό χρόνου-συχνότητας όπως φαίνεται στην *εικόνα 3.1*.



**Εικόνα 3.1 Φιλτράρισμα μεταβαλλόμενου-χρόνου συχνότητας και ανακατασκευή σήματος**

Για να διαχωρίσουμε τους συντελεστές του σήματος από τους συντελεστές του θορύβου απαιτείται ένα κατάλληλο κατώφλι (όριο). Ωστόσο ένα σταθερό κατώφλι δεν είναι κατάλληλο για ανιχνεύσεις σημάτων διαφορετικών θορύβων περιβάλλοντος επειδή ο ρυθμός *false-alarm* πιθανόν μεταβληθεί. Έτσι ένα προσαρμόσιμο κατώφλι το οποίο διατηρεί το CFAR κάτω από ένα ποικίλο επίπεδο θορύβων, είναι πιο πολύ επιθυμητό. Οι ανθρώπινες ψυχικές διαδικασίες κανονικά εφαρμόζουν την CFAR συνάρτηση πολύ καλά και ξεχωρίζουν χρήσιμα σήματα από έναν εσωτερικό θόρυβο (*background noise*) και εμπόδιο (*clutter*). Θα πρέπει να επεκτείνουμε τη CFAR ανίχνευση στο *joint frequency domain* ώστε να εξάγουμε μη αναγνωρίσιμα σήματα στο *background noise*.

#### 4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΧΡΟΝΟΥ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΕΜΒΕΛΕΙΑΣ ΡΑΝΤΑΡ

Το ραντάρ είναι ένα όργανο που παραδοσιακά χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει τη θέση και ταχύτητα ενός στόχου από τις οπίσθιες σκεδάσεις ενεργών μικροκυμάτων. Επιπρόσθετα με την ανάπτυξη των τεχνικών ραντάρ υψηλής ανάλυσης τις τελευταίες τρεις δεκαετίες, έχουμε οδηγηθεί στην ανάπτυξη των δυνατοτήτων ραντάρ ως προς τη συγκέντρωση αναλυτικότερης πληροφορίας για τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του στόχου.

Για παράδειγμα, χρησιμοποιώντας επαρκές εύρος ζώνης συχνοτήτων (frequency band width), είναι δυνατόν να παράγουμε μονοδιάστατο *down range* χάρτη του στόχου το οποίο ονομάζεται *range profile*. Όμως παρατηρώντας τη σχετική κίνηση του στόχου αναφορικά με το ραντάρ σε ένα επαρκές χρονικό διάστημα είναι δυνατόν να παράγουμε ένα μονοδιάστατο *cross range* χάρτη του στόχου.

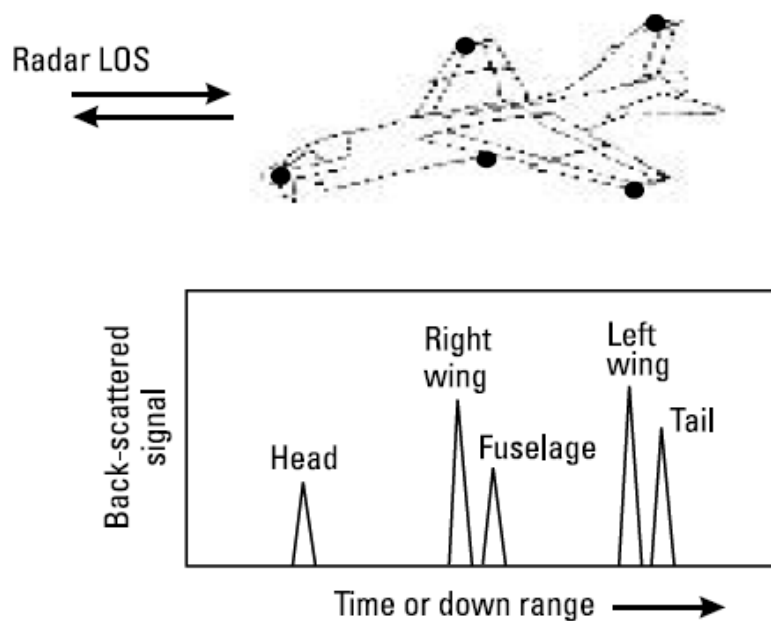
Α *range profile* είναι βασικά η καταγραφή του χρόνου *time history* του σήματος *back scattered* του ραντάρ εξαιτίας ενός κοντινού παλμού. Από τότε που ο χρόνος καθυστέρησης σχετίζεται με την απόσταση  $R$  κατά μήκος του LOS του ραντάρ δια μέσου της σχέσης  $t=2R/c$ , όπου  $c$  είναι η ταχύτητα της διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, το τελικό σήμα ραντάρ είναι μια συνάρτηση του χρόνου και μπορεί να εξηγηθεί σαν μια χαρτογραφική ανακλαστικότητα του στόχου κατά μήκος του LOS του ραντάρ ή στη *down range* κατεύθυνση.

Σε απλούς στόχους τα *range profiles* τυπικά αποτελούνται από σειρές ευδιάκριτων κορυφών τα οποία μπορεί να συσχετισθούν χωροταξικά και να απομονώσουν τα κέντρα σκέδασης του στόχου. Αυτά τα χαρακτηριστικά χρησιμοποιούνται συχνά για διάγνωση υπογραφής και εφαρμογές αναγνώρισης στόχου. Σε πραγματικούς στόχους ωστόσο, η φυσική της σκέδασης είναι συνήθως περισσότερο πολύπλοκη. Για παράδειγμα, οι σκεδάσεις από μερικά χαρακτηριστικά του στόχου δεν είναι πάντα σωστά χρονικά τοποθετημένες και μπορεί να έχουμε επιπλέον αντηχήσεις από την επιστροφή του σήματος του ραντάρ. Η ερμηνεία των διαδομένων φαινομένων σκέδασης δεν είναι εύκολο να πραγματοποιηθεί έχοντας υπόψη το *time domain range profile*.

##### 4.1 Ηλεκτρομαγνητική φαινομενολογία ενσωματωμένη σε δεδομένα

Είναι γνωστό ότι οι στόχοι ραντάρ, ειδικά οι τεχνητοί στόχοι, μπορούν συχνά να θεωρηθούν σαν μια συλλογή από διακριτούς σημειακούς σκεδαστές. Αυτό το

μοντέλο καλείται μοντέλο σημειακού σκεδαστή ή μοντέλο κεντρικής σκέδασης και χρησιμοποιείται ευρύτατα σε πολλές εφαρμογές ραντάρ. Η εικόνα 4.1 εξηγεί την θεμελιώδη ιδέα αυτού του μοντέλου όπου τα ηλεκτρομαγνητικά *back scattered* σήματα από ένα σύνθετο στόχο μπορεί να θεωρηθούν ότι είναι άθροισμα των επιμέρους κεντρικών σημείων σκέδασης του στόχου. Με αποτέλεσμα τα *range profiles* υψηλής ανάλυσης γίνεται μια μονοδιάστατη χαρτογράφηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών κορυφών του στόχου.



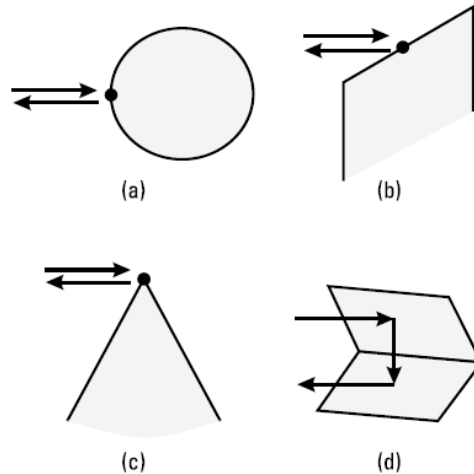
**Εικόνα 4.1 Σημειακός σκεδαστής (Point-scatterer)**

Το μοντέλο σημειακής σκέδασης μπορεί αυστηρά να εξηγηθεί με την πρώτη αρχή θεωρίας ηλεκτρομαγνητικής σκέδασης διαμέσου της οπτικής ακτίνας υψηλής συχνότητας ή της αποκαλούμενης GTD (Geometrical Theory of Diffraction). Η GTD είναι ο διασκορπισμός ενός ηλεκτρομαγνητικού στόχου από ένα σύνθετο στόχο υψηλής συχνότητας και περιγράφεται ενεργειακά από ακτινικά φαινόμενα επικεντρωμένα σε ένα σημείο, καθένα από τα οποία είναι μία αποδόσιμη αντανάκλαση ή διάθλαση κορυφών του στόχου. Όπως φαίνεται στη εικόνα 4.2 αυτά τα σημεία (κορυφές) μπορούν να περιλαμβάνουν κατοπτρικές αντανάκλασεις από λείες επιφάνειες, διαθλάσεις λόγω ακμών όπως πολλαπλές σκεδάσεις διέδρες και τριέδρες γωνίες ανάκλησης. Αυτά τα σημεία ανταποκρίνονται ακριβώς στα κέντρα της σκέδασης του μοντέλου σημειακής σκέδασης. Το GTD βασίζεται σε ολόκληρο το πεδίο οπίσθιας σκέδασης λόγω του ότι το μονοχρωματικό κύμα (με γωνιακή συχνότητα  $\omega=2\pi f$ ) και εξαρτώμενο χρόνο μπορεί έπειτα να γραφτεί ως:



$$E^s(\omega) = \sum_n A_n \exp\left(-j\omega \frac{2R_n}{c}\right) \quad (4.1)$$

όπου  $R_n$  είναι η *down range* θέση του κέντρου σκέδασης κατά μήκος του LOS του ραντάρ και  $A_n$  είναι το πλάτος σκέδασης του σκεδαστικού κέντρου.



**Εικόνα 4.2 Φυσική οπτική ακτίνα**

Στο σημείο αυτό, πρέπει να επισημάνουμε τα εξής: Πρώτον, η GTD είναι μια υψηλή συχνότητα που προσεγγίζει με ακρίβεια τις εξισώσεις Maxwell. Αυτή είναι μια κατάλληλη προσέγγιση υπό τον όρο ότι το νούμερο του στόχου είναι μεγαλύτερο συγκρινόμενο με το μήκος κύματος του ραντάρ. Για παράδειγμα, αν μια X-μπάντα ραντάρ λειτουργεί σε 3cm μήκος κύματος χρησιμοποιείται για εναέριο στόχο μεγέθους 20m, το μέγεθος του στόχου είναι 667 μήκη κύματος και «πέφτει» καλά χωρίς το σύστημα της οπτικής ακτίνας, τότε το GTD είναι αποτελεσματικό. Δεύτερον, το πλάτος διασκορπιστή από ένα νούμερο κανονικής διαμόρφωσης έχει εξαχθεί από ηλεκτρομαγνητικές μελέτες πολλών χρόνων.

Για παράδειγμα, το πλάτος περίθλασης από μία αγωγίμη σφήνα είναι γνωστό σε κλειστή μορφή (τέλεια μαθηματική λύση χωρίς προσεγγίσεις). Όμως για περισσότερες γενικές δομές, οι δυνάμεις διασκορπιστή δεν είναι πάντα διαθέσιμες αναλυτικά. Παρόλο αυτά, η βασική ιδέα του συνολικού διασκορπιστή μπορεί να γραφτεί σαν ένα άθροισμα το οποίο συνεισφέρεται από ξεχωριστά κέντρα διασκορπιστή και είναι αποδεχτό ακόμη και για περισσότερους σύνθετους - στόχους ραντάρ.

Κατόπιν, θεωρούμε την περίπτωση όταν τα δεδομένα ραντάρ συλλέγονται πάνω από μια μπάντα συχνοτήτων με εύρος κέντρου ζώνης  $\Delta\omega$  με  $\omega_0=2\pi f_0$ . Αν υποθέσουμε ότι το πλάτος σκέδασης για όλα τα κέντρα σκέδασης είναι ανεξάρτητο από τη συχνότητα, το πεδίο σκέδασης *time-domain* (ή *to range profile*) μπορεί να γραφεί σαν

$$E^s(R) = \sum_n A_n h\left(\frac{\Delta\omega}{c}(R - R_n)\right) \quad (4.2\alpha)$$

όπου

$$h(\cdot) = \exp\{j(2\omega_0 / \Delta\omega)(\cdot)\} \text{sinc}(\cdot) \quad (4.2\beta)$$

Η  $h(\cdot)$  συνήθως καλείται συνάρτηση “*point spread response*” (συνάρτηση απόκρισης σημειακής διάχυσης) του κέντρου σκέδασης. Από το όρισμα της συνάρτησης δειγματοληψίας sinc μπορούμε να δούμε ότι **όσο μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων ραντάρ έχουμε τόσο καλύτερη εστίαση έχουμε κατά range**. Επομένως, δεδομένου της επάρκειας του εύρους ζώνης, το *radar range profile* μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθορίσει διαφορετικά κέντρα στόχου όπως φαίνεται στην εικόνα 4.1

Εμείς τώρα στρέφουμε την προσοχή μας στο να μελετήσουμε πώς η πραγματική φαινομενολογία σκέδασης μπορεί να αποκλίνει από το εξιδανικευμένο μοντέλο σημειακού σκεδαστή. Η πρώτη απόκλιση από το μοντέλο στη σχέση 4.1 είναι ότι το πλάτος σκέδασης  $A_n$  είναι μια γενικά εξαρτημένη συχνότητα.

Βασιζόμενοι στο GTD τα πλάτη σκέδασης των κανονικών σχημάτων έχουν μια  $\omega^n$  εξάρτηση όπου η  $\gamma_n$  μπορεί να πάρει μισή ακέραιη τιμή τέτοια όπως -1(γωνία), -1/2 (άκρη), 0 (διπλή καμπύλη επιφάνεια), + 1/2 (μεμονωμένη καμπύλη επιφάνειας) και +1 (δίεδρη ή κατοπτρικό επίπεδο πιάτο). Σαν αποτέλεσμα της εξαρτημένης συχνότητας απόκρισης σημειακής διάχυσης είναι γενικά περισσότερο απλωμένα σε εμβέλεια περισσότερο από την περίπτωση της ανεξάρτητης περίπτωσης. Για παράδειγμα, για  $\gamma_n = 1$  η αντίστοιχη απόκριση σημειακής διάχυσης περιλαμβάνει τις παραγώγους της συνάρτησης ημιτόνου, η οποία έχει μεγάλο εύρος όταν η απόκριση είναι  $\gamma_n = 0$ . Ωστόσο αυτός ο τύπος απόκλισης από εξιδανικευμένο μοντέλο σημειακής σκέδασης είναι αρκετά μικρός, ειδικά αν τα δεδομένα του εύρος ζώνης δεν είναι πολύ μεγάλα.

Ο δεύτερος τύπος απόκλισης προκύπτει αν ο μηχανισμός σκέδασης περιλαμβάνει ακτίνα διάδοσης ανάμεσα στη διανέμουσα περιοχή συχνότητας. Σε

αυτή την περίπτωση η φάση του μοντέλου στην 4.1 πιθανόν να εξηγεί όχι μόνο το μονοπάτι της ακτίνας διάδοσης σε ελεύθερη απόσταση αλλά επίσης και αυτού στην περιοχή διασποράς. Ορίζοντας το μήκος του μονοπατιού για κάθε περιοχή  $R_{n1}$  και  $R_{n2}$ , πρέπει να τροποποιήσουμε την φάση ως εξής:

$$\Phi_n(\omega) = -2\left[\frac{\omega}{c}R_{n1} + \beta(\omega)R_{n2}\right] \quad (4.3)$$

Η συμπεριφορά του  $\beta(\omega)$  σαν συνάρτηση συχνότητας υπαγορεύεται από τις λεπτομέρειες σποραδικών χαρακτηριστικών της ενδιάμεσης διάδοσης. Αν  $\beta(\omega)$  δεν είναι μια γραμμική συνάρτηση της συχνότητας τα αποτελέσματα συμπεριφοράς της εμβέλειας του μηχανισμού σκέδασης μπορεί να γίνουν περισσότερο πολύπλοκα. Γενικά αυτό σημαίνει ότι καλά προσπίπτον παλμός θα απλωθεί πολύ περισσότερο έξω από την εμβέλεια μετά τη διαδικασία σκέδασης.

Τελικά υπάρχουν περιπτώσεις όταν η ανταπόκριση σκέδασης αποκλίνει τελείως από το μοντέλο σημειακού σκεδαστή. Τυπικά, αυτό λαμβάνει χώρα όταν το προσπίπτον μήκος κύματος είναι της τάξης της διάστασης των δομών σκέδασης. Σ' αυτή την περίπτωση ο μηχανισμός σκέδασης παρεκκλίνει από τη περιγραφική οπτική ακτίνα της διαδικασίας σκέδασης. Στο φερόμενο αντηχών πεδίο, η ανταπόκριση από τα χαρακτηριστικά του στόχου μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερη από κάποιες συχνότητες. Φυσικά μπορεί να σκεφτούμε αυτό το φαινόμενο σαν μια δυνατή κατασκευαστική παρεμβολή από τις πολλαπλές που υπάρχουν μέσα στη σύνθεση του μηχανισμού σκέδασης. Αυτός ο τύπος της υψηλής - Q, ηχηρής απόκρισης της συχνότητας συνήθως καταλήγει σε εκτεταμένο κωδώνισμα της εμβέλειας (range) διάστασης. Η ερμηνεία αυτών των επιστροφών που εκτείνεται στην εμβέλεια είναι δύσκολη καθώς πλέον δεν μεταβιβάζεται η γεωμετρική πληροφορία που φέρουν τα κέντρα σκέδασης.

## 4.2 Εξαγωγή των διανεμημένων χαρακτηριστικών σκέδασης από εικόνες ραντάρ χρησιμοποιώντας την επεξεργασία χρόνου-συχνότητας

Η επεξεργασία σε συνδυασμό χρόνου-συχνότητας των μονοδιάστατων *range profile* μπορεί να επεκταθεί σε διδιάστατη εικόνα ραντάρ. Η απεικόνιση Inverse SAR είναι μια απλή και πολύ δυνατή επεξεργασία για χαρτογράφηση της θέσης και της ποσότητας των σημείων σκέδασης του στόχου από πολλαπλές συχνότητες. Ωστόσο, όσον αφορά σύνθετους στόχους που περιέχουν άλλα φαινόμενα όπως είναι

οι αντηχήσεις και οι μηχανισμοί διασποράς συχνά εμφανίζονται εικονικά αντικείμενα στην τελική εικόνα ISAR.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η σκέδαση από τον αγωγό εξάτμισης ενός αεροσκάφους. Είναι ο κυριότερος παράγοντας που συμβάλλει στην συνολική σκέδαση του στόχου, ωστόσο η κυματοειδής δομή και οι σχετικοί μηχανισμοί σκέδασής του εξαρτώνται από τη συχνότητα το καθιστούν ένα μη σημειακό χαρακτηριστικό σκέδασης.

Όταν γίνουν αντικείμενο επεξεργασίας και παρουσιαστούν από το συμβατικό ISAR αλγόριθμο τα εισερχόμενα αποτελέσματα επιστροφής ενός χαρακτηριστικού εικόνας στο οποίο δεν γίνεται καλή εστίαση, δηλαδή δε σχετίζεται με την χωρική τοποθεσία του σκεδαστή τότε μπορεί συχνά να αποκρύψει άλλα σημαντικά χαρακτηριστικά σημεία πάνω στο στόχο.

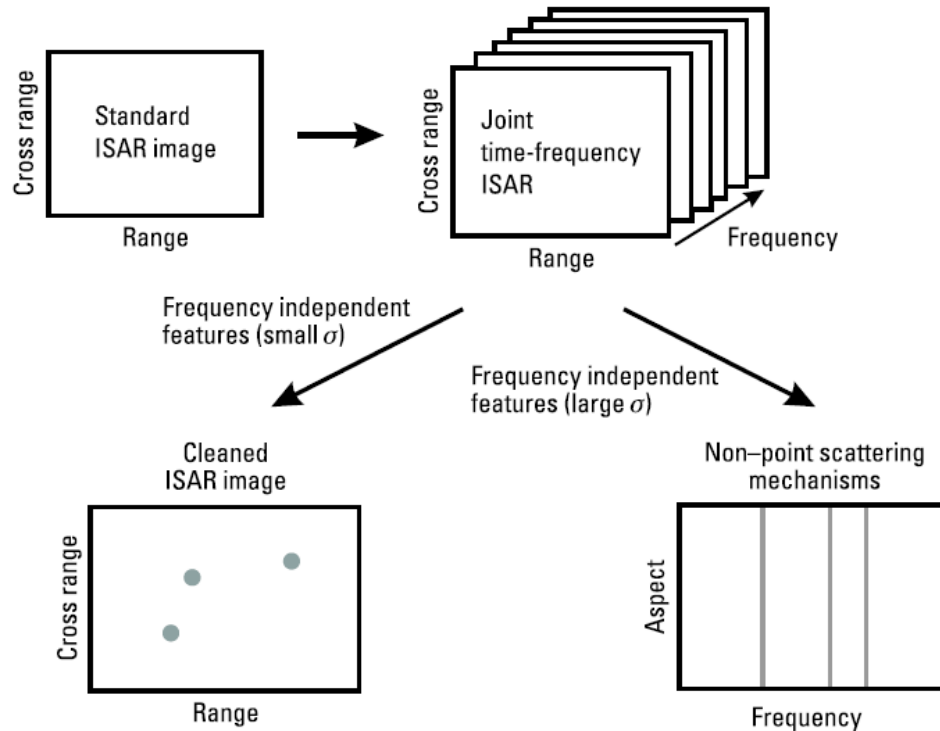
Ως εκ τούτου είναι αναγκαίο να απομακρύνουμε αυτά τα αντικείμενα από την ISAR εικόνα για να οδηγηθούμε σε μια καθαρή εικόνα ISAR που να περιέχει σημαντικά σημεία σκέδασης με φυσική υπόσταση. Περαιτέρω τα εξαγόμενα χαρακτηριστικά εισόδου μπορούν καλύτερα να παρουσιαστούν σ' ένα ουσιώδη χώρο χαρακτηριστικών προκειμένου ν' αναγνωρίσουμε τον στόχο και τα μεμονωμένα φαινόμενα.

Η ταυτόχρονη επεξεργασία χρόνου-συχνότητας μπορεί να εφαρμοστεί στην επεξεργασία εικόνας ISAR για να επιτύχουμε περιγραφή του στόχου που αναφέρθηκε προηγουμένως. Η βασική σύλληψη πίσω από τον αλγόριθμο χρόνου-συχνότητας ISAR είναι το να εφαρμόζουμε τον μετασχηματισμό στον άξονα της εμβέλειας (ή του χρόνου) της συμβατικής *range* και *cross-range* (πλευρικής) εικόνας ISAR για να αποκτήσουμε μια πρόσθετη διάσταση συχνότητας.

Το αποτέλεσμα είναι μια τρισδιάστατη *range*, *cross range* και *frequency matrix* όπου κάθε *range* και *cross range* κομμάτι αυτού του πίνακα αναπαριστά μια ISAR εικόνα σε μια συγκεκριμένη συχνότητα. Αυτή η ιδέα απεικονίζεται στην εικόνα 4.3. Εξετάζουμε πώς η εικόνα ISAR διαφοροποιείται σύμφωνα με τη συχνότητα μπορούμε να διακρίνουμε τους μηχανισμούς σκέδασης που δεν εξαρτώνται από τη συχνότητα σε σχέση με αυτούς που εξαρτώνται.

**Στη συγκεκριμένη εφαρμογή του *joint time frequency* ISAR η επιλογή του μηχανισμού επεξεργασίας *joint time frequency* είναι κριτικής σημασίας προκειμένου να διατηρήσουμε το *range resolution*.** Αυτό αναπαριστάται με τη χρήση της προσαρμοστικής αναπαράστασης Gaussian.

Αυτή η αναπαράσταση υπερέρχει του STFT (Short Time Fourier Transform) σε δυο σημεία. Πρώτον είναι μια παραμετρική διαδικασία η οποία καταλήγει σε μια υψηλή ανάλυση χρόνου συχνότητας.



**Εικόνα 4.3 Επεξεργασία ISAR με σύνδεση χρόνο-συχνότητα**

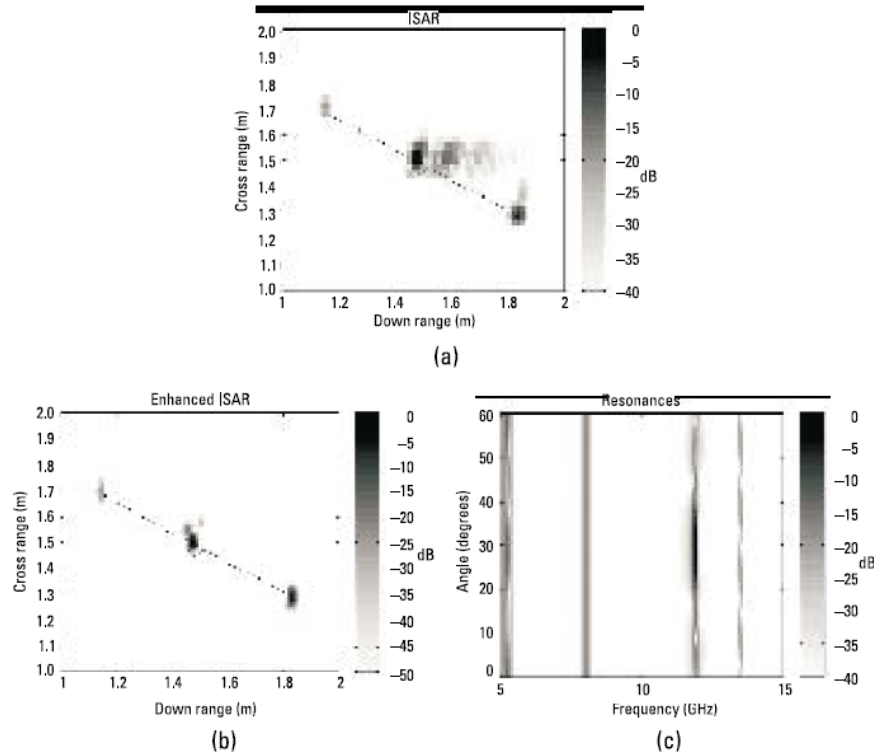
Το δεύτερο και πιο σημαντικό όμως είναι ότι η εφαρμογή που εξετάζουμε, μία προσαρμοστική αναπαράσταση, μας επιτρέπει να διακρίνουμε τα εξαρτώμενα από τη συχνότητα γεγονότα από τα μη εξαρτώμενα σε όλη τη διάρκεια των βασικών λειτουργιών. Η παρακάτω εξίσωση

$$h_p(t) = (\pi\sigma_p^2)^{-1} \exp\left\{-\frac{(t-t_p)^2}{2\sigma_p^2}\right\} \exp\{j\omega_p t\} \quad (4.4)$$

δείχνει ότι τα κέντρα σκέδασης (δηλαδή σήματα με στενό μήκος κύματος στο χρόνο) αναπαριστώνται καλώς με λειτουργίες βάσεως πολύ μικρού  $\sigma_p$ . Αντηχήσεις συχνότητας απεικονίζονται καλύτερα με μεγάλο  $\sigma_p$ . Κατ' αυτό τον τρόπο ανακατασκευάσουμε την εικόνα ISAR χρησιμοποιώντας μόνο αυτές τις βάσεις Gaussian με μικρές διαφοροποιήσεις και μπορούμε να αποκτήσουμε μια πιο καθαρή εικόνα που να δείχνει μόνο τα κέντρα σκέδασης. Οι υπόλοιποι μηχανισμοί (δηλ. εκείνοι που σχετίζονται με μεγάλες μεταβλητότητες) αποκτούν μεγαλύτερη σημασία αν εξεταστούν σε μια δυαδική παρουσίαση από την άποψη της συχνότητας, όπου οι

αντηχήσεις και άλλοι μηχανισμοί εξαρτώμενοι από τη συχνότητα μπορούν να γίνουν αναγνωρίσιμοι καλύτερα.

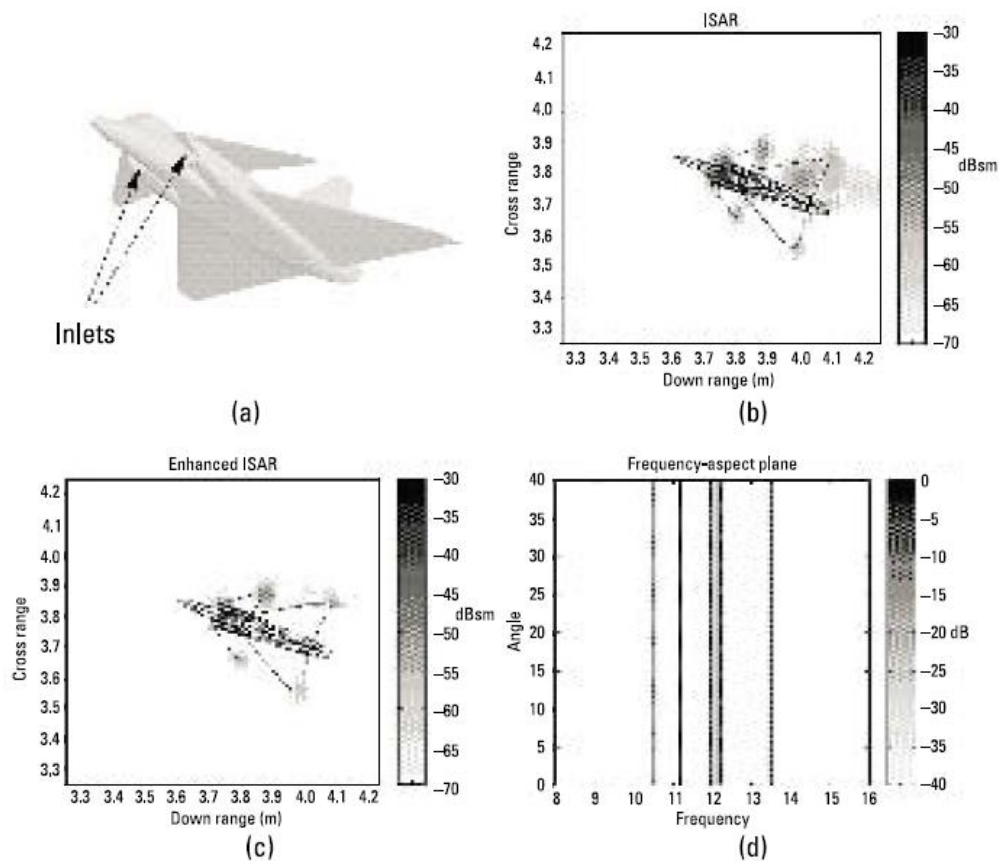
Ένα παράδειγμα της joint time frequency επεξεργασίας στηρίζεται σε δεδομένα αριθμητικής προσομοίωσης που αφορούν την τέλεια συμπεριφερόμενη λωρίδα που περιέχει την μικρή ανοιχτή κοιλότητα. Η εικόνα 4.4(α) δείχνει μία εικόνα ISAR στους 30 βαθμούς από την πάνω άκρη. Ο στόχος εκτός γραμμής επιστρώνεται πάνω στην απεικόνιση για πληροφορία. Τα δεδομένα συνηθίζουν να σχηματίζουν την εικόνα συλλεγόμενα από 5 σε 15 GHz και σε ένα περιθώριο ανοίγματος από 0 μέχρι 60 βαθμούς. Εμείς παρατηρούμε στην εικόνα επιπρόσθετα των τριών κέντρων σκεδάσεως αντίστοιχα την αριστερή και δεξιά άκρη της λωρίδας και της εξωτερικής εσοχής υπάρχει ένα μεγάλο νέφος κοντά στην εσοχή διασκόρπισης ανάμεσα στην *down range*. Αυτή η επιστροφή αντιστοιχεί σε ένα σταθερό ταίριασμα στην εσοχή και επανακπεμπόμενη ακτινοβολία ανάμεσα στον μηχανισμό αντήχησης. Η εικόνα 4.4(b) δείχνει την ενδυνάμωση απεικόνισης ISAR της εικόνας 4.4(α) εφαρμόζοντας τον προσαρμόσιμο αλγόριθμο και κρατώντας μόνο την μικρή-διακύμανση κατά Gauss. Εμείς βλέπουμε ότι το μεγάλο νέφος που ταιριάζει στην εσοχή αντήχησης έχει απομακρυνθεί και μόνο μέρος του κέντρου σκέδασης του αυθεντικού σήματος παραμένει στην απεικόνιση όπως προσδοκούμε.



**Εικόνα 4.4 Η τυπική απεικόνιση ISAR**

Η εικόνα 4.4 (c) δείχνει να εμφανίζει το θέμα της συχνότητας κατά Gauss υψηλής ποικιλομορφίας. Μερικές πολύ ευδιάκριτες ισομήκης κατακόρυφες γραμμές παρατηρούνται. Αυτές ανταποκρίνονται σε μια συντονισμένη συχνότητα της εσοχής, οι οποίες έπρεπε να συμβαίνουν στα 5.30, 8.39, 11.86, και 13.52 GHz βάση των διαστάσεων της εσοχής (κοιλότητας). Πράγματι βλέπουμε ότι εμφανίζονται σε αυτές τις συχνότητες και το ότι είναι σχεδόν ανεξάρτητες φάσεις.

Ο αλγόριθμος που παρουσιάζεται παρακάτω όπου χρησιμοποιούνται δεδομένα μέτρησης θαλάμου σε κλίμακα 1 προς 30 του μοντέλου Lockheed VFY-218 όπως παρέχονται από το Electromagnetic Code Consortium. Το αεροπλάνο στην εικόνα 4.5(α) έχει δύο επιμήκης οχετούς καυσαερίων που είναι τριγωνοειδής στις εξόδους αλλά συνενώνονται σε ένα κυκλικό σχήμα προτού καταλήξουν στον συμπιεστή.



**Εικόνα 4.5 Το μοντέλο VFY-218**

Όπως μπορούμε να δούμε στην συμβατική εικόνα SAR της εικόνας 4.5 (b) για την οριζόντια πολικότητα στους 20 βαθμούς κοντά στη μύτη το μεγάλο νέφος έξω από τη δομή του αεροπλάνου είναι η επιστροφή εισόδου. Η εικόνα 4.5 (c) δείχνει την βελτιωμένη εικόνα SAR της εικόνας 4.5(b) όπως αποκτήθηκε με την εφαρμογή του αλγόριθμου joint frequency-time ISAR και κρατώντας μόνο τα Gaussians χαμηλής ποικιλομορφίας. Παρατηρούμε ότι μόνο το κεντρικό κομμάτι σκέδασης του αρχικού σήματος παραμένει στην εικόνα, όπως ήταν αναμενόμενο. Σημειώνουμε ότι η ισχυρή επιστροφή εξαιτίας της εισαγωγής του αέρα έχει απομακρυνθεί αλλά η σκέδαση από την αριστερή άκρη του φτερού παραμένει. Η εικόνα 4.5(d) παρουσιάζει την εμφάνιση συχνότητας-φάσης των Gaussians υψηλής ποικιλομορφίας. Ένας αριθμός ισομηκών κάθετων γραμμών εντοπίζεται μεταξύ 10.5 και 13.5 MHz.

Γνωρίζοντας τις διαστάσεις του τριγωνοειδούς οχητού εισαγωγής εκτιμάται ότι αυτές οι συχνότητες ανταποκρίνονται κατά προσέγγιση στη δεύτερη επεξεργασμένη συχνότητα του κυματαγωγού οχητού. Αυτή η πληροφορία είναι μοναδική για τη συγκεκριμένη δομή οχητού και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα πρόσθετο χαρακτηριστικό διανύσματος στην κατηγοριοποίηση του στόχου.



## 5.ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΕΙΚΟΝΑΣ ΡΑΝΤΑΡ ΒΑΣΙΣΜΕΝΗ ΣΤΟ ΧΡΟΝΟ ΚΑΙ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ

Η διαμόρφωση της εικόνας ραντάρ είναι μια διαδικασία ανοικοδόμησης (αναπαράστασης) εικόνας των στόχων ραντάρ από καταγραφές σύνθετων δεδομένων. Όλες οι τεχνικές απεικόνισης κατά κύριο λόγο αφορούν την προβολή ενός 3διάστατου αντικειμένου πάνω σε ένα 2διάστατο επίπεδο εικόνας. Συγκεκριμένα η εικόνα ραντάρ είναι μια χαρτογράφηση 3D στόχου πάνω σ' ένα 2διάστατο πεδίο οριζόντιου και κάθετου (σταυρωτού) εύρους ακτίνας.

Για να πάρουμε μια εικόνα με τα συστήματα ραντάρ απαιτούνται τρεις κύριες συνιστώσες (πομπός, στόχος και δέκτες). Ο πομπός εκπέμπει μια ακολουθία παλμών και στόχου για να γίνει απεικόνιση. Ο δέκτης στη συνέχεια καταγράφει τους ανακλώμενους παλμούς από το στόχο και επεξεργάζεται τα καταγεγραμμένα δεδομένα για να ανασκευάσει την απεικόνιση του στόχου. Για να δημιουργήσουμε μία 2διάστατη εικόνα ραντάρ κατά *range* και *cross-range*, τα πρωτογενή δεδομένα που καταγράφονται χρειάζονται να διαμορφωθούν σε 2διάστατη μορφή.

Η ακτίνα ανάλυσης μιας εικόνας ραντάρ σχετίζεται με το εύρος ζώνης του μεταδιδόμενου σήματος ραντάρ ενώ η κάθετη σταυρωτή ανάλυση καθορίζεται από το εύρος (πλάτος) ακτίνας της ενεργής κεραίας το οποίο είναι αντιστρόφως ανάλογο του μήκους ακτίνας του ανοίγματος της κεραίας.

Για την επίτευξη υψηλής ανάλυσης *cross-range* χωρίς τη χρήση μεγάλου φυσικού ανοίγματος της κεραίας χρησιμοποιείται συνθετικός επεξεργαστής (ευρέως καλείται «συνθετικός» πίνακας) ο οποίος συνδυάζει συνεκτικά σήματα που αποκτώνται από ακολουθίες μικρών γωνιακών ανοιγμάτων σε διάφορες οπτικές γωνίες με ένα στόχο για να μιμηθεί το αποτέλεσμα από ένα μεγάλο άνοιγμα.

**Το SAR παράγει ένα χάρτη υψηλής ανάλυσης στάσιμων στόχων και το ανάγλυφο του εδάφους. Το ISAR χρησιμοποιεί ένα γεωμετρικά αντίστροφο τρόπο όπου το ραντάρ είναι σταθερό και οι στόχοι κινούνται για να δημιουργήσουν εικόνες των στόχων.** Με μια επαρκή ανάλυση υψηλού Doppler (υπερήχων) μετατοπίζουμε συναφείς σκεδαστές σ' ένα στόχο που παρατηρείται και υπολογίζουμε την κατανομή της ανακλασιμότητας του στόχου που αποκτάται διαμέσου του φάσματος συχνοτήτων κατά Doppler. Οι συμβατικές μέθοδοι για την ανάκτηση πληροφοριών Doppler βασίζονται στην χρήση του μετασχηματισμού Fourier. Με τη λήψη μετασχηματισμού Fourier από ακολουθίες σειρών μπορεί να δημιουργηθεί μια εικόνα ISAR. Ως εκ τούτου η διαμόρφωση εικόνας σ' ένα συμβατικό ραντάρ είναι μια εικόνα που βασίζεται στον μετασχηματισμό Fourier.

## 5.1 Απεικόνιση ραντάρ κινούμενων στόχων

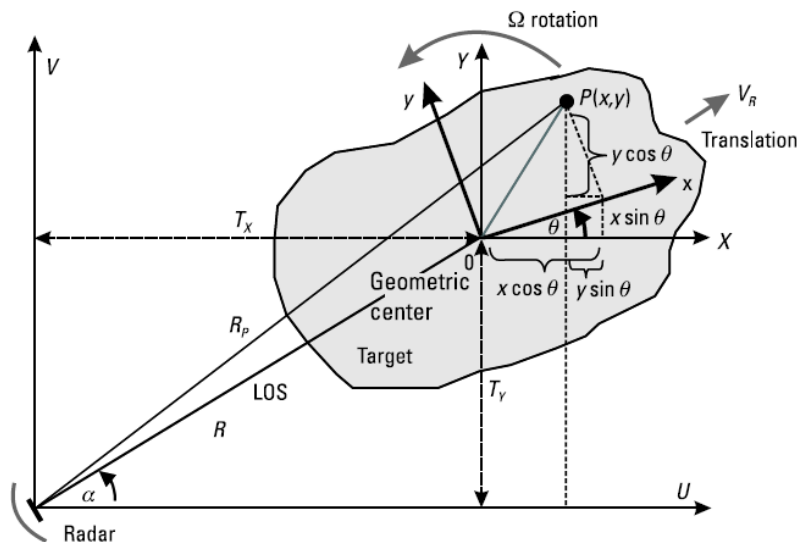
Η γεωμετρία μιας απεικόνισης ραντάρ ορισμένου στόχου παρουσιάζεται στην εικόνα 5.1. Το radar στηρίζεται στις αρχές των καρτεσιανών συντεταγμένων (U,V,W) που ονομάζονται συντεταγμένες radar. Ο στόχος περιγράφεται σε καρτεσιανές συντ/νες (x,y,z) των οποίων η προέλευση τοποθετείται/εντοπίζεται στο γεωμετρικό κέντρο του στόχου και καλούνται συν/νες στόχου. Για να περιγράψουμε περιστροφές (εναλλαγές) του στόχου, νέες αναφορές συν/νων (X, Y, Z) εισάγουμε μεταφρασμένες από το ραντάρ τις συν/νες (U, V, W) μαζί με την προέλευση του γεωμετρικού κέντρου του στόχου. Για λόγους απλότητας θα δείξουμε μόνο ένα στόχο αεροπλάνου σε 2διάστατες συν/νες. Η τρίτη διάσταση μπορεί να προστεθεί εύκολα με τις αναγκαίες τροποποιημένες εξισώσεις δια μέσου της ανυψωμένης γωνίας.

Ας υποθέσουμε ότι το ραντάρ εκπέμπει μια ημιτονοειδή κυματομορφή που μεταφέρει συχνότητα  $f_0$ . Σε χρόνο  $t=0$  η απόσταση στόχου (δηλαδή η απόσταση της κεραίας του ραντάρ από το γεωμετρικό κέντρο του στόχου) είναι  $R$  και η απόσταση του ραντάρ από το σημείο σκεδαστή  $P$  στο στόχο που βρίσκεται στο  $(x,y,z=0)$  είναι

$$R_p = \left[ (T_x + x \cos \theta_0 - y \sin \theta_0)^2 + (T_y + y \cos \theta_0 + x \sin \theta_0)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.1)$$

$$\cong R + x \cos(\theta_0 - \alpha) - y \sin(\theta_0 - \alpha)$$

όπου  $(T_x, T_y, T_z = 0)$  είναι η μετατροπή της προέλευσης από τις αυθεντικές  $(x, y, z)$  των συν/νων σε σχέση με τις συν/νες ραντάρ  $(U, V, W)$ ,  $\alpha$  είναι η γωνία αζιμουθίου του στόχου σε σχέση με τις  $(U, V, W)$  συν/νες και  $\theta_0$  είναι η αρχική γωνία περιστροφής των  $(x, y, z)$  συν/νων γύρω από τον  $z$  άξονα των  $(X, Y, Z)$  συν/νων όπως φαίνεται στην εικόνα 5.1.



Εικόνα 5.1 Γεωμετρία απεικόνισης στόχου του ραντάρ

Εάν ο στόχος έχει μια περιστροφική κίνηση με αρχική γωνιακή ταχύτητα  $\Omega$  γύρω από τον Z άξονα και μία μεταφορική κίνηση με ακτινική ταχύτητα κίνησης  $V_R$  τότε η απόσταση (range) και η γωνία περιστροφής του στόχου είναι μια συνάρτηση του χρόνου.

Το range μπορεί να εκφράζεται από το αρχικό range του στόχου  $R_0$ , την αρχική ταχύτητα  $V_R$ , και την αρχική γωνιακή επιτάχυνση  $a_R(=dV_R/dt)$  και άλλους σημαντικότερους όρους και η γωνιακή ταχύτητα μπορεί να εκφραστεί με την αρχική γωνία προσανατολισμού σε σχέση με τις (X,Y,Z) συν/νες δηλαδή την αρχική τιμή γωνιακής ταχύτητας  $\Omega$ , την αρχική τιμή γωνιακής επιτάχυνσης  $\gamma(=d\Omega/dt)$  και άλλους ανώτερης τάξης όρους:

$$R(t) = R_0 + V_R t + \frac{1}{2} a_R t^2 + \dots \quad (5.2)$$

και

$$\theta(t) = \theta_0 + \Omega t + \frac{1}{2} \gamma t^2 + \dots \quad (5.3)$$

Έτσι η ακτίνα δράσης του ραντάρ από το σημείο σκέδασης P γίνεται

$$R_p(t) = R(t) + x \cos[\theta(t) - a] - y \sin[\theta(t) - a] \quad (5.4)$$

και η βασική συχνότητα του επιστρεφόμενου σήματος από το σημείο σκέδασης P είναι συνάρτηση του  $R_i=R(t)$  και  $\theta_i = \theta(t)$ :

$$s_p(t) = \rho(x, y, z) \exp \left\{ j 2\pi f_0 \frac{2R_p(t)}{c} \right\} = \rho(x, y, z) \exp \{ j\Phi(R_{pt}) \} \quad (5.5)$$

όπου  $R_{pt}$  είναι συνάρτηση  $R_p(t)$ ,  $\rho(x,y,z)$  είναι η κατοπτρική συνάρτηση του σημείου σκέδασης P σε (x,y,z) και c είναι η ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος.

Η φάση της βασικής μπάντας του σήματος είναι

$$\Phi(R_{pt}) = 2\pi f_0 \frac{2R_p(t)}{c} \quad (5.6)$$

Μιλώντας για την χρονική παράγωγο της φάσης, η συχνότητα μετατόπισης Doppler προκαλείται από την κίνηση του στόχου και είναι περίπου:

$$\begin{aligned}
 f_D &= \frac{2f_0}{c} \frac{d}{dt} R_p(t) \\
 &= \frac{2f_0}{c} V_R + \frac{2f_0}{c} [-x\Omega \sin(\theta_0 + \Omega t - a) - y\Omega \cos(\theta_0 + \Omega t - a)] \\
 &= \frac{2f_0}{c} V_R + \frac{2f_0}{c} \{-x\Omega [\sin(\theta_0 - a) \cos \Omega t + \cos(\theta_0 - a) \sin \Omega t] \\
 &\quad - y\Omega [\cos(\theta_0 - a) \cos \Omega t - \sin(\theta_0 - a) \sin \Omega t]\}
 \end{aligned} \tag{5.7}$$

όπου χρησιμοποιούμε το μηδέν και τους πρώτους όρους των σχέσεων (5.2) και (5.3). Για δοσμένη τιμή περιστροφής και συμφασική επεξεργασία χρόνου  $t$ , αν  $\Omega^2 t^2 \ll 1$  και  $\Omega^3 t^3 \ll \Omega t$ ,

όπου  $\cos \Omega t = 1 - \Omega^2 t^2 / 2 + \dots = 1$  και  $\sin \Omega t = \Omega t - \Omega^3 t^3 / 6 + \dots = \Omega t$ , έχουμε:

$$\begin{aligned}
 f_D &\cong \frac{2f_0}{c} V_R + \frac{2f_0}{c} [-x\Omega [\sin(\theta_0 - a) + \cos(\theta_0 - a)\Omega t] \\
 &\quad - y\Omega [\cos(\theta_0 - a) - \sin(\theta_0 - a)\Omega t]] \\
 &= \frac{2f_0}{c} V_R + \frac{2f_0}{c} \{-[x \sin(\theta_0 - a) + y \cos(\theta_0 - a)]\Omega \\
 &\quad - [x \cos(\theta_0 - a) - y \sin(\theta_0 - a)\Omega^2 t]\} = f_{D_{TRANS}} + f_{D_{ROT}}
 \end{aligned} \tag{5.8}$$

Όπου η συχνότητα μετατόπισης Doppler που προκαλείται από τη μετασχηματισμένη κίνηση είναι:

$$f_{D_{Trans}} = \frac{2f_0}{c} V_R \tag{5.9}$$

και εκείνη που προκαλείται από τη περιστροφική κίνηση είναι

$$\begin{aligned}
 f_{D_{Rot}} &= \frac{2f_0}{c} \{-[x \sin(\theta_0 - a) + y \cos(\theta_0 - a)]\Omega \\
 &\quad - [x \cos(\theta_0 - a) - y \sin(\theta_0 - a)]\Omega^2 t\}
 \end{aligned} \tag{5.10}$$

Ο πρώτος και ο δεύτερος όρος της (5.10) προέρχεται από το γραμμικό και δευτεροβάθμιο όρο της φάσης αντίστοιχα. Ο δευτεροβάθμιος όρος της περιστροφικής συχνότητας μετατόπισης Doppler είναι μία συνάρτηση του χρόνου.

Άρα, δίνοντας γωνιακή περιστροφική τιμή, μεταφορική συχνότητα, και τοποθεσία των σκεδαστών  $(x,y,z)$ , εάν η ποσότητα  $2f_0/c[x \cos(\theta_0-\alpha)-y \sin(\theta_0-\alpha)]\Omega^2$  δεν μπορεί να αγνοηθεί, τότε η περιστροφική μετατόπιση της συχνότητας Doppler είναι χρονικά μεταβαλλόμενη, ακόμη και αν η γωνιακή ταχύτητα  $\Omega$  είναι σταθερή.

Βασιζόμενοι στο επιστρεφόμενο σήμα από ένα απλό σημειακό σκεδαστή, το επιστρεφόμενο σήμα από το στόχο μπορεί να απεικονιστεί σαν το γενικευμένο τριπλό ολοκλήρωμα των επιστρεφόμενων σημάτων από όλους τους σκεδαστές των στόχων:

$$s_R(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \rho(x, y, z) \exp \left\{ -j2\pi f_0 \frac{2R_p(t)}{c} \right\} dx dy dz \quad (5.11)$$

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

όπου  $T_{PRI}$  είναι το PRI του εκπεμπόμενου σήματος.

Για ένα στόχο ο οποίος έχει μεταφορική και περιστροφική κίνηση και χάριν απλότητας θεωρούμε ότι η γωνία αζιμουθίου του στόχου  $\alpha$  είναι μηδέν, τότε η απόσταση του σημείου σκέδασης σε  $(x,y,z=0)$  συν/νες συστήματος του στόχου μπορεί να ξαναγραφεί σαν  $R_{P(t)}=R(t) + x \cos\theta(t)-y \sin\theta(t)$  και το επιστρεφόμενο σήμα της σχέσης (5.11) σαν

$$s_R(t) = \exp \left\{ -j4\pi f_0 R(t)/c \right\} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \rho(x, y, z) \quad (5.12)$$

$$\exp \left\{ -j2\pi [x f'_x(t) - y f'_y(t)] \right\} dx dy dz$$

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

όπου τα στοιχεία της χωρικής συχνότητας καθορίζονται από

$$f'_x(t) = \frac{2f_0}{c} \cos \theta(t) \quad (5.13)$$

και

$$f'_y(t) = \frac{2f_0}{c} \sin \theta(t) \quad (5.14)$$

Από την (5.12) εμείς γνωρίζουμε ότι αν η αρχική απόσταση  $R_0$  (range) του στόχου είναι γνωστή και η ταχύτητα  $V_R$  και επιτάχυνση  $a_R$  της κίνησης του στόχου υπολογίζονται επακριβώς μέσα στο διάστημα της ταυτόχρονης επεξεργασίας της συνάφειας, τότε ο εξωτερικός όρος της φάσης της κίνησης  $\exp\{-j4\pi f_0 R(t)/c\}$  μπορεί να απλοποιηθεί πολλαπλασιάζοντας με  $\exp\{j4\pi f_0 R(t)/c\}$  και τα δύο μέλη της 5.12.

Επομένως η συνάρτηση πυκνότητας ανακλαστικότητας  $\rho(x,y,z)$  του στόχου μπορεί να προκύψει απλά παίρνοντας τον αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier της φάσης επανόρθωσης του σήματος βασικής μπάντας  $s_R(t)\exp\{j4\pi f_0 R(t)/c\}$ .

Η διαδικασία εκτίμησης της κίνησης του στόχου και η απομάκρυνση ξένων όρων φάσης καλείται εντοπισμός του range (range tracking). Αυτό είναι ένα θεμελιώδες βήμα για την τυπική διαδικασία επανόρθωσης κίνησης που ονομάζεται επίσης χονδροειδής κίνηση αποκατάστασης. Στη συνέχεια ο αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αντανάκλαστική συνάρτηση πυκνότητας του στόχου.

Για να χρησιμοποιήσουμε τον μετασχηματισμό Fourier σωστά πρέπει να πληρούνται ορισμένοι όροι. Καθ' όλο το χρόνο της συνεκτικής διαδικασίας απεικόνισης οι σκεδαστές πρέπει να παραμείνουν στο εύρος κελιών τους και η μετατόπιση συχνότητας Doppler πρέπει να είναι σταθερή. Εάν οι σκεδαστές παρουσιάσουν *drift*, δηλαδή βρέθουν έξω από το εύρος κελιών ή οι μετατοπίσεις κατά Doppler της συχνότητας είναι χρονικά μεταβαλλόμενες, τότε η εικόνα που ανακατασκευάζεται από το μετασχηματισμό Fourier θολώνει.

Μόνο με την επεξεργασία για τον εντοπισμό του εύρους και χωρίς την εφαρμογή οποιασδήποτε φάσης επανόρθωσης μπορεί οι μετατοπίσεις συχνότητας Doppler να είναι χρονικά μεταβαλλόμενες. Έτσι μία ωραία κίνηση επανόρθωσης καλείται εντοπισμός Doppler, θα πρέπει να εφαρμοστεί για να επανορθώσει τη φάση και έτσι οι μετατοπίσεις συχνότητας να είναι σταθερές. Ο εντοπισμός του εύρους και ο εντοπισμός Doppler είναι οι βάσεις του προτύπου επανόρθωσης κίνησης.

Η εικόνα 5.2 παρουσιάζει τη διαδικασία του συστήματος ISAR χρησιμοποιώντας ευρείας ζώνης κυματομορφή. Το ραντάρ εκπέμπει μία ακολουθία  $N$  παλμών. Το εύρος ανάλυσης προσδιορίζεται από το εύρος ζώνης του παλμού. Για κάθε εκπεμπόμενο παλμό ο συνολικός αριθμός του εύρους των κελιών  $M$  προσδιορίζεται από το μέγιστο εύρος και το εύρος ανάλυσης που καλύπτει. Ο συνολικός αριθμός των  $N$  παλμών ολοκλήρωσης της απεικόνισης για δεδομένη χρονική στιγμή καθορίζει το Doppler ή *cross-range* ανάλυση.

Αφού συμπιεστούν οι παλμοί ετερογενώς και τετραγωνιστούν αυτοί που εντοπίστηκαν στον δέκτη ραντάρ, οι βασικές μπάντες  $I$  και  $Q$  σημάτων οργανώνονται σε μία  $M \times N$  2D σύνθετη σειρά  $s_R(r_{m,n})$  όπου  $m=0,1,\dots,M-1$ ;  $n=0,1,\dots,N-1$ .

Επομένως N range profile το καθένα περιέχει M range cells όπου μπορεί να ληφθούν. Καθένα από τα range cells και τα across των N range profile δεδομένα συνιστούν **a new time history series**. Μετά την εφαρμογή του εντοπισμού του εύρους και του εντοπισμού Doppler το ευθυγραμμισμένης εμβέλειας προφίλ γίνεται  $G(r_{m,n})$ , ( $m=0,1,\dots,M-1$ ;  $n=0,1,\dots,N-1$ ).

Ο Fourier που βασίζεται στο σχηματισμό εικόνας λαμβάνει το μετασχηματισμό Fourier ή FFT για *new time history series* και παράγει N σημεία φάσματος Doppler τα οποία καλούνται προφίλ Doppler.

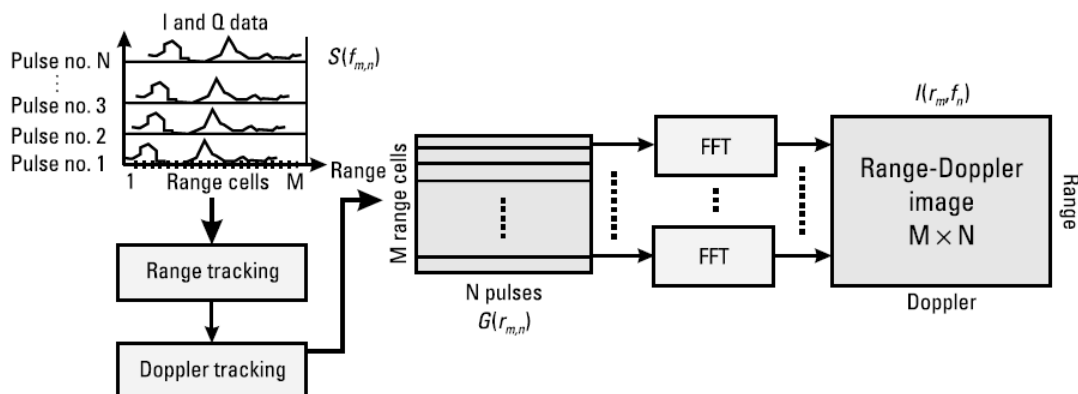
Από τον συνδυασμό M φασμάτων Doppler και M range cells τελικά η M x N εικόνα σχηματίζεται

$$I(r_m, f_n) = \text{FFT}\{G(r_{m,n})\} \quad (5.15)$$

όπου FFT δηλώνει την FFT λειτουργία σε σχέση με τη μεταβλητή n. Επομένως η εικόνα ραντάρ  $I(r_m, f_n)$  είναι χαρτογραφημένες ανακλάσεις του στόχου πάνω στο range-Doppler plane (επίπεδο).

Όπως περιγράφεται παραπάνω στην 5.10, όταν η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του στόχου είναι υψηλή ή το διάστημα της συνεκτικής επεξεργασίας της εικόνας είναι μεγάλο η περιστροφική μετατόπιση συχνότητας Doppler μπορεί να είναι χρονικά μεταβαλλόμενη.

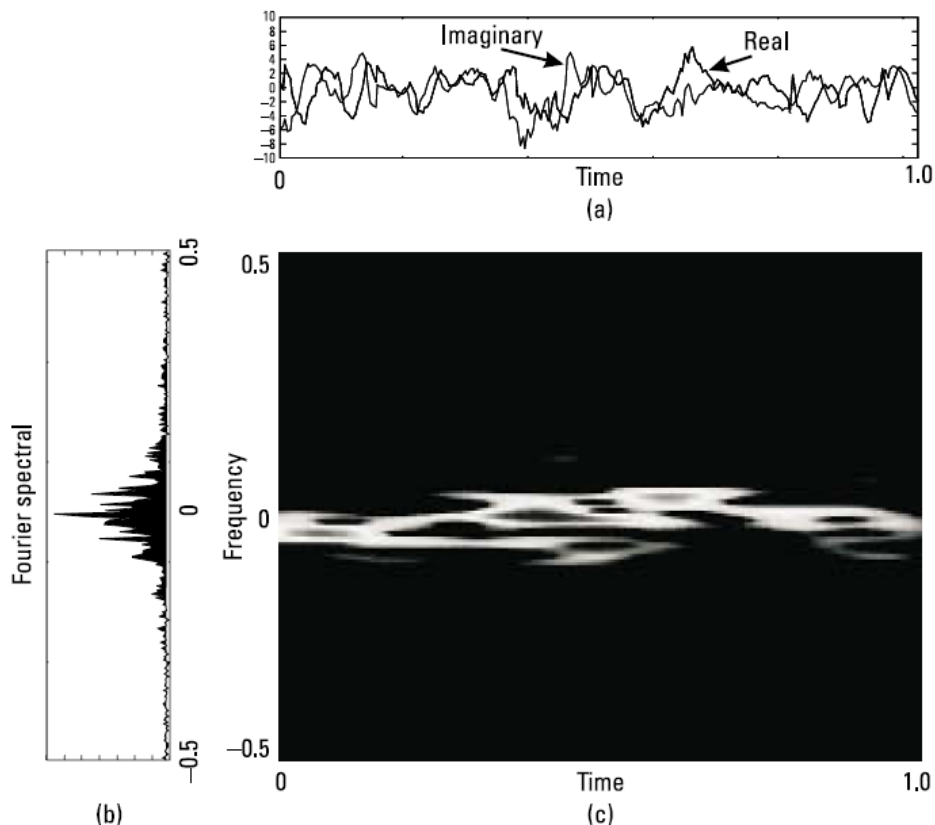
Άλλες πηγές του χρόνου μεταβολής της μετατόπισης συχνότητας Doppler μπορούν να προκύψουν από σφάλματα φάσης χωρίς επανόρθωση λόγω της ανωμαλίας στην κίνηση του στόχου, τη διακύμανση του ρυθμού περιστροφής του στόχου, τη διακύμανση στην εντόπιση του κέντρου περιστροφής και ανακρίβεια στην παρακολούθηση της ιστορίας φάσης και άλλες του συστήματος και του περιβάλλοντος.



**Εικόνα 5.2 Αναπαράσταση της διαδικασίας του συστήματος εικόνων SAR**

Από τη σχέση μεταξύ του εύρους και της φάσης που αναφέρονται στην (5.6) η φάση είναι πολύ ευαίσθητη στη διακύμανση του εύρους (range). Για παράδειγμα για ένα ραντάρ στη Χ-μπάντα στα 10 GHz,  $\Delta_r=1.5$  cm μετατόπιση εύρους μπορεί να επιφέρει  $\Delta\Phi=4\pi f_0 \Delta_{r/c}=360$  βαθμούς απόκλιση φάσης: Δεδομένου ότι τα εναπομείναντα σφάλματα φάσης μπορεί να μεταβάλλονται με το χρόνο συχνότητας Doppler μπορεί επίσης να μεταβάλλονται με το χρόνο.

Όπως είναι γνωστό ο μετασχηματισμός Fourier δείχνει μόνο ποιες συνιστώσεις συχνότητας περιέχονται στο σήμα. Αυτό δεν λέει πως οι συχνότητες μεταβάλλονται με το χρόνο. Εκπροσωπώντας τη χρονικά μεταβαλλόμενη συχνότητα φασμάτος Doppler με το μετασχηματισμό Fourier, το φάσμα Doppler απλώνεται. Για να αποδειχθεί αυτό εφαρμόζουμε το μετασχηματισμό Fourier και το STFT σε μία *time history series* των μετρούμενων δεδομένων ραντάρ όπως φαίνεται στην εικόνα 5.3. Μπορούμε να δούμε ότι η μετατροπή Fourier των *time history series* είναι στην πραγματικότητα το ολοκλήρωμα μετατροπής μετασχηματισμού χρόνου συχνότητας της ίδιας σειράς κατά τη διάρκεια του χρόνου της.



**Εικόνα 5.3 Ιστορικό χρονικών σειρών**



Αυτό είναι λόγω της οριακής κατάστασης της συχνότητας. Για ένα σήμα  $s(t)$  εάν είναι κοινή η κατανομή ενέργειας χρόνου συχνότητας πληροί την ακόλουθη προϋπόθεση:

$$\int P(t, f) dt = |S(f)|^2 \quad (5.16)$$

και

$$\int P(t, f) df = |s(t)|^2 \quad (5.17)$$

όπου  $S(f)$  είναι ο μετασχηματισμός Fourier του σήματος του μετασχηματισμού χρόνου συχνότητας και πληροί την οριακή κατάσταση του χρόνου και της συχνότητας.

## 5.2 Τυπική κίνηση επανόρθωσης και σχηματισμός εικόνας που βασίζεται στο Fourier

Για να δημιουργηθεί μια καθαρή εικόνα ραντάρ θα πρέπει να εφαρμόζονται αλγόριθμοι επανόρθωσης κίνησης. Ο σκοπός της επανόρθωσης κίνησης είναι να προεργαστεί τα δεδομένα έτσι ώστε ο συμβατικός σχηματισμός εικόνας Fourier να μπορεί να εφαρμοστεί για μια καλά εστιασμένη εικόνα ραντάρ.

Όπως περιγράψαμε στο τμήμα 5.1 για να χρησιμοποιηθεί σωστά ο σχηματισμός της εικόνας με βάση το FFT, πρέπει να πληρούνται οι ακόλουθες προϋποθέσεις κατά τη διάρκεια της συνεκτικής επεξεργασίας χρόνου εικόνας:

α) οι σκεδαστές στο στόχο πρέπει να παραμένουν στα κελιά του εύρους και  
β) οι μετατοπίσεις συχνότητας πρέπει να είναι σταθερές. Αν οι σκεδαστές κινηθούν έξω από range cells ή οι μετατοπίσεις συχνότητας Doppler μεταβάλλονται χρονικά, το φάσμα Doppler που λαμβάνεται από το μετασχηματισμό Fourier απλώνεται και η εικόνα ραντάρ θολώνει.

Η στάνταρ κίνηση επανόρθωσης περιλαμβάνει εντοπισμό του εύρους (εφαρμόζοντας range-bin alignment) και εντοπισμό Doppler (εφαρμόζοντας διόρθωση φάσης ή επανόρθωση). Ο εντοπισμός του εύρους (range tracking) μπορεί να κρατήσει τους σκεδαστές στην περιοχή των range cells.

Ο εντοπισμός Doppler κάνει τη μετατόπιση συχνότητας Doppler να παραμένει σταθερή όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.4.

Συνεπώς, μετά την κίνηση επανόρθωσης όλοι οι σκεδαστές στο στόχο εμφανίζονται να κινούνται με σταθερή ταχύτητα (που οφείλονται στη συνεχή - σταθερή- μετατόπιση συχνότητας Doppler) και δημιουργούν κατά μήκος ένα τέλειο κύκλο (που οφείλεται στο σταθερό εύρος). Ο εντοπισμός του εύρους ή η διαδικασία ευθυγράμμισης μπορεί να πραγματοποιηθεί με μια μέθοδο συσχέτισης των κακώς ευθυγραμμισμένων *range cells* σε σχέση με ένα προφίλ εύρους αναφοράς και στη συνέχεια να εκτελεστεί η ευθυγράμμιση του εύρους για όλο το προφίλ εύρους.

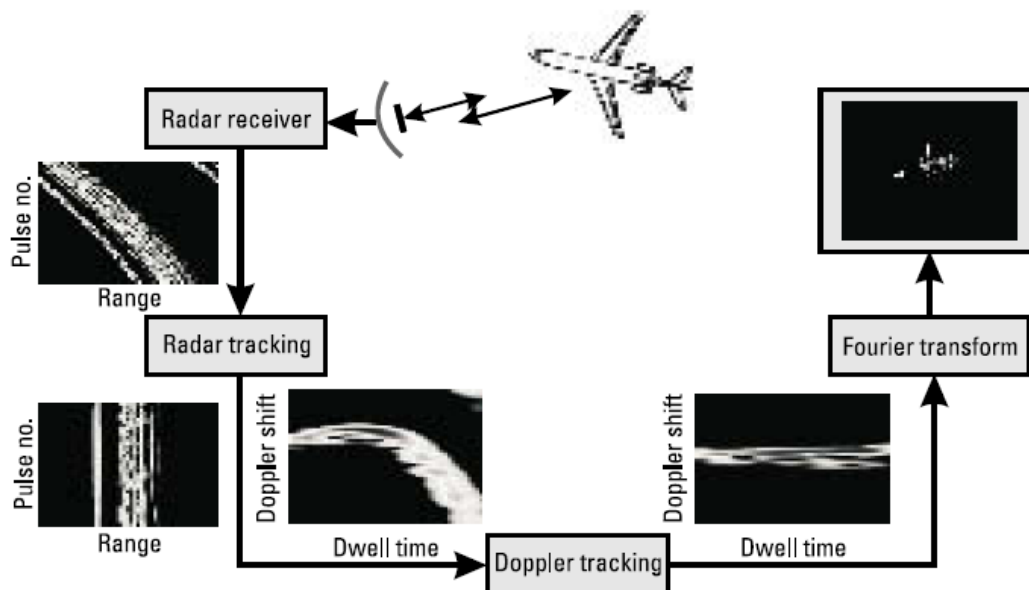
Ο εντοπισμός Doppler, γίνεται με τη μέθοδο επανόρθωσης φάσης. Η διαδικασία επανόρθωσης φάσης συνήθως περιλαμβάνει 3 βήματα:

(1) αναζήτηση για μια ή αρκετές αναφορές *range cells* με τη χρήση κριτηρίων όπως ελάχιστη διαφορά,

(2) παίρνοντας συζευγμένη φάση της αναφοράς *range cells* με τη χρήση κριτηρίων όπως ελάχιστη διαφορά,

(3) καθιστώντας διόρθωση φάσης για όλα τα *range cells* χρησιμοποιώντας συζευγμένη φάση.

Η εικόνα 5.4 απεικονίζει διάγραμμα στάνταρ κίνησης επανόρθωσης και δείχνει τα αποτελέσματα εύρους εντοπισμού και εντοπισμού Doppler.



**Εικόνα 5.4** Τυπικό διάγραμμα κίνησης επανόρθωσης

Εάν ο στόχος κινείται ομαλά, η τυποποιημένη κίνηση επανόρθωσης είναι αρκετά καλή για την παραγωγή μιας αρκετά καλής εικόνας του στόχου, χρησιμοποιώντας μετασχηματισμό Fourier.

Ωστόσο, όταν ένας στόχος επίδειξης κάνει σύνθετη κίνηση όπως περιστροφή, επιτάχυνση ή ελιγμό, η τυποποιημένη κίνηση επανόρθωσης δεν είναι επαρκής να παρέχει μια αποδεκτή εικόνα για προβολή και ανάλυση. Σ' αυτή την περίπτωση, χρειάζονται πιο εξελιγμένοι αλγόριθμοι για παραγωγή κίνησης των επιμέρους σκεδαστών όπως πολική επαναδιαμόρφωση και άλλοι πιο πολύπλοκοι αλγόριθμοι. Έτσι κάθε σκεδαστής, μπορεί να παραμείνει στο *range cell* και η μετατόπιση συχνότητας Doppler παραμένει σταθερή. Στη συνέχεια ο μετασχηματισμός Fourier μπορεί να εφαρμοστεί ορθά για την ανοικοδόμηση μιας καθαρής εικόνας του στόχου.

Η πολική επαναδιαμόρφωση, η οποία μπορεί να διορθώσει περιστροφική κίνηση για μεμονωμένους σκεδαστές, απαιτεί μια επαναδειγματοληψία των δεδομένων, έτσι ώστε τα σημεία δειγματοληψίας για το πολικό πλέγμα, να συμπίπτουν με τα επιθυμητά σημεία σε ένα ορθογώνιο πλέγμα δειγματοληψίας. Εκτός αυτού, για την εκτέλεση της πολικής επαναδιαμόρφωσης, είναι αναγκαίες ορισμένες αρχικές κινηματικές παράμετροι του στόχου.

Αν η εξελιγμένη επανόρθωση κίνησης δεν είναι ακόμα ικανοποιητική οφείλεται στο ότι οι μεμονωμένοι σκεδαστές μπορεί να παρασύρονται από τα *range cells* και η μετατόπιση συχνότητας Doppler να είναι χρονικά μεταβαλλόμενη. Έτσι η τελική εικόνα μπορεί να είναι ακόμα ασαφής αν εφαρμόζεται ο συμβατικός μετασχηματισμός Fourier.

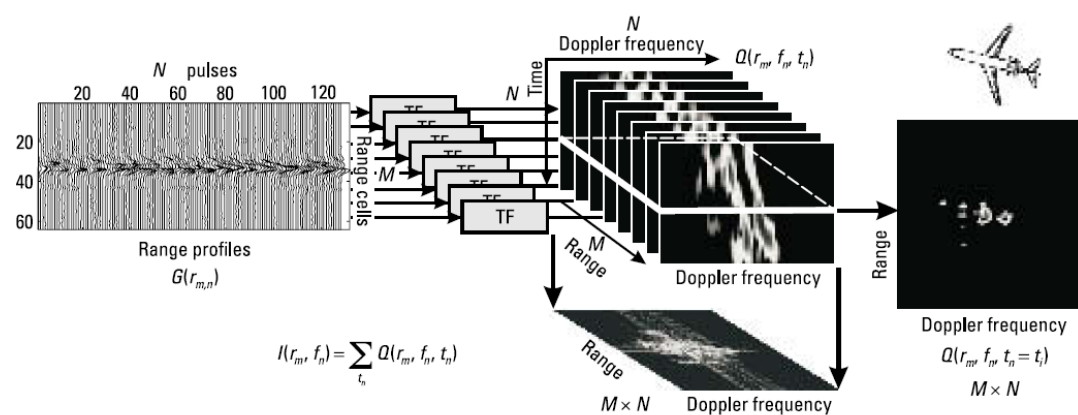
Ωστόσο, ο περιορισμός μετασχηματισμού Fourier, μπορεί να παρακαμφθεί εφόσον αντικαθίσταται με ένα μετασχηματισμό χρόνου. Εξαιτίας της χρονικά μεταβαλλόμενης συμπεριφοράς της μετατόπισης συχνότητας Doppler, αποτελεί αποτελεσματική μέθοδο για την επίλυση προβλήματος του απλώματος (κηλίδας) της συχνότητας φάσματος Fourier και ως εκ τούτου η θολή εικόνα είναι η εφαρμογή μιας υψηλής ανάλυσης μετασχηματισμού χρόνου – συχνότητας μιας επεξεργασίας Doppler. Με αυτό τον τρόπο η θολωμένη εικόνα που προκαλείται από την μετατόπιση συχνότητας χρονικά μεταβαλλόμενου Doppler, μπορεί να μετριάσει χωρίς την εφαρμογή εξελιγμένων αλγορίθμων κίνησης επανόρθωσης.

### **5.3 Μετασχηματισμός εικόνας που βασίζεται στο χρόνο - συχνότητα**

Περιγράψαμε την βασική έννοια απεικόνισης ISAR στο Κεφάλαιο.1 και στην αρχή του παρόντος κεφαλαίου, καθώς επίσης και το συμβατικό σύστημα απεικόνισης που βασίζεται στο Fourier στην Ενότητα 5.1. Για να δημιουργηθεί μια καθαρή απεικόνιση ISAR ελιγμών στόχων, είναι πάντα επιθυμητά ο μετασχηματισμός χρόνου-συχνότητας με την ανώτερη ανάλυση *low cross-term* παρεμβολών και αμερόληπτη εκτίμηση του στιγμιαίου φάσματος συχνότητων.

Για να εφαρμόσουμε το σχηματισμό εικόνας με βάση το χρόνο-συχνότητα, χρειαζόμαστε ένα μετασχηματισμό χρόνου-συχνότητας ο οποίος είναι ειδικά σχεδιασμένος για τον υπολογισμό χρονικά μεταβαλλόμενων φασμάτων και ανάκτησης πληροφοριών στιγμιαίας συχνότητας Doppler. Έχοντας μια υψηλής ανάλυσης φάσματος χρονικά μεταβαλλόμενου Doppler, δεν είναι πλέον απαραίτητο να καταργηθεί η κατανομή του φάσματος συχνοτήτων Doppler και να επανορθωθούν οι κινήσεις των μεμονωμένων σκεδαστών, για την απόκτηση καθαρής εικόνας των κινούμενων στόχων. Αντί της παραγωγής εύρους και Doppler (ή cross-range με γνωστό συντελεστή προσαύξησης) εικόνας, το χρονικά μεταβαλλόμενο φάσμα Doppler, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δημιουργήσει έναν αριθμό range και στιγμιαίων εικόνων Doppler.

Η εικόνα 5.5 δείχνει ένα σύστημα απεικόνισης ραντάρ, που βασίζεται στο μετασχηματισμό χρόνου-συχνότητας. Η μόνη διαφορά μεταξύ της απεικόνισης συστήματος που βασίζεται στο χρόνο-συχνότητα και αυτού που βασίζεται στο συμβατικό Fourier, είναι ότι ο μετασχηματισμός Fourier αντικαθίσταται από το μετασχηματισμό χρόνου-συχνότητας ακολουθούμενο από δειγματοληψία. Θεωρώντας ότι τα δεδομένα σχηματίζουν έναν πολύπλοκο 2D πίνακα  $G(r_m, n)$  με  $M$  χρονοσειρές, η καθεμία μήκους  $N$  (ή  $N$  παλμών), ο μετασχηματισμός απεικόνισης που βασίζεται στο Fourier δημιουργεί ένα μόνο πλαίσιο από  $M \times N$   $I$  και  $Q$  σειρά δεδομένων. Ωστόσο, ο σχηματισμός απεικόνισης που βασίζεται στο χρόνο και την συχνότητα δέχεται μετασχηματισμό χρόνου-συχνότητας για κάθε χρονοσειρά και δημιουργεί  $N \times N$  χρονικές κατανομές Doppler.



**Εικόνα 5.5** Επεξήγηση της απεικόνισης του ραντάρ που βασίζεται στο σχηματισμό εικόνας πάνω στο χρόνο-συχνότητα

Συνδυάζοντας τις M χρονικές κατανομές Doppler στα M range κελιά, ο 3D πίνακας  $N \times M \times N$  time-range-Doppler cube  $Q(r_m, f_n, t_n)$  μπορεί να γραφεί:

$$Q(r_m, f_n, t_n) = TFT_n \{G(r_{m,n})\}$$

όπου  $TFT_n$  (*Truncated Fourier Transform- Διακοπτόμενος Μετασχηματισμός Fourier*) υποδεικνύει το μετασχηματισμό χρόνου-συχνότητας σε σχέση με τη μεταβλητή  $n$ .

Επειδή ο μετασχηματισμός χρόνου-συχνότητας μπορεί να υπολογίσει τη στιγμιαία μετατόπιση συχνότητας Doppler, ανά πάσα στιγμή η μετατόπιση συχνότητας Doppler κάθε σκεδαστή στο στόχο παίρνει σταθερή τιμή σε σχέση με την ανάλυση Doppler που προσδιορίζεται από τον επιλεγμένο μετασχηματισμό χρόνου-συχνότητας.

Κατά τη δειγματοληψία σε χρόνο  $t_i$  μόνο ένα εύρος (φάσμα) και ένα στιγμιαίο πλαίσιο εικόνας Doppler  $Q(r_m, f_n, t_n = t_i)$  μπορεί να εξαχθεί από το  $N \times M \times N$  time-range-Doppler cube. Υπάρχει ένα σύνολο διαθέσιμο από  $N$  πλαίσια εικόνων και κάθε πλαίσιο αντιπροσωπεύει μια πλήρη εικόνα εύρους Doppler σε μια δεδομένη στιγμή. Με την αντικατάσταση του μετασχηματισμού Fourier με το μετασχηματισμό χρόνου-συχνότητας, η δυσδιάστατη εικόνα range-Doppler, γίνεται τρισδιάστατη time-range-Doppler. Λαμβάνοντας δειγματοληψία στο χρόνο, μπορεί να εξαχθεί μια χρονική ακολουθία από δυσδιάστατες εικόνες range-Doppler. Κάθε φορά στο δείγμα περιέχεται μια καθαρή εικόνα με μια ανώτερη ανάλυση που παρέχεται από το μετασχηματισμό χρόνου-συχνότητας. Σύμφωνα με την οριακή κατάσταση συχνότητας (τύπος 5.16), η ολοκλήρωση των  $N$  πλαισίων αποδεικνύεται ότι είναι μια εικόνα Fourier :

$$I(r_m, f_n) = \sum_{t_n=t_0}^{t_{N-1}} Q(r_m, f_n, t_n) \quad (5.18)$$

Δεν είναι συνήθως αναγκαίο να λάβουμε το μέγιστο αριθμό δειγμάτων στο χρόνο, επειδή η διακύμανση Doppler μεταξύ των δειγμάτων δεν είναι σημαντική. Σε πολλές περιπτώσεις, 16 ή 32 ισαπέχοντα δείγματα, μπορεί να είναι αρκετά για να απεικονιστεί λεπτομερώς η διακύμανση Doppler.

Στην ακόλουθη ενότητα, θα δώσουμε παραδείγματα του μετασχηματισμού χρόνου-συχνότητας για την απεικόνιση στο ρανταρ στόχων που ελίσσονται και πολλαπλών στόχων.

## 5.4 Απεικόνιση ραντάρ ελισσόμενων στόχων (Radar Imaging of Maneuvering Targets)

Ως ελισσόμενος στόχος, μπορεί να οριστεί ο στόχος ο οποίος κινείται μη ομοιόμορφα κατά το διάστημα της επεξεργασίας. Η πρόκληση για την απεικόνιση ρανταρ, είναι η απεικόνιση μιας καθαρής εικόνας κατά τη διάρκεια των ελιγμών του στόχου. Σε αυτήν την ενότητα, θα περιγράψουμε τη δυναμική ενός κινούμενου στόχου και θα εφαρμόσουμε μετασχηματισμό χρόνου-συχνότητας για παρουσίαση στο ραντάρ ελισσόμενων στόχων. Θα χρησιμοποιήσουμε και τα δύο στοιχεία (προσομοίωσης και μετρήσεις ρανταρ) για να εφαρμόσουμε τον μετασχηματισμό χρόνου-συχνότητας. Επίσης θα συγκρίνουμε τους μετασχηματισμούς χρόνου-συχνότητας που χρησιμοποιούνται στο σχηματισμό βασικής εικόνας ραντάρ.

### 5.4.1 Δυναμική των ελισσόμενων στόχων (Dynamics of Maneuvering Targets)

Για ένα σύστημα συντεταγμένων, όπως αυτό αναφέρεται νωρίτερα στην Εικόνα 5.1 όπου οι συντεταγμένες του στόχου  $(x, y, z)$  έχουν μια διαφορά  $(T_x, T_y, T_z)$  από τις συντεταγμένες ρανταρ  $(U, V, W)$  και έχει μια γωνία περιστροφής σε χρόνο  $t$ ,  $\theta(t)$  σε σχέση με τις συντεταγμένες αναφοράς  $(X, Y, Z)$ , τα οποία έχουν μετατραπεί μόνο από τις  $(U, V, W)$  συντεταγμένες αλλά όχι από τις  $(x, y, z)$ . Έτσι ο πίνακας μετατροπής ορίζεται ως:

$$Trans(T_x, T_y, T_z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & T_x \\ 0 & 1 & 0 & T_y \\ 0 & 0 & 1 & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.19)$$

όπου  $T_x = R \cos \alpha$ ,  $T_y = R \sin \alpha$  και  $T_z = 0$  όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.1.

Ένα συχνά χρησιμοποιούμενο σύνολο εναλλαγών κίνησης είναι τα roll, pitch και yaw. Για ένα αεροσκάφος που κινείται κατά τον άξονα  $x$ , ο όρος roll αντιστοιχεί στην περιστροφική κίνηση ως προς τον άξονα  $x$ , το pitch αντιστοιχεί στην περιστροφική κίνηση ως προς τον άξονα  $y$  και το yaw ως προς τον  $z$ .

Αν η σειρά εναλλαγής ακολουθεί την σειρά: roll με μια γωνία  $\theta_r$ , pitch με μια γωνία  $\theta_p$  και τέλος yaw με μια γωνία  $\theta_y$ , τότε η σύνθετη κίνηση roll, pitch και yaw στις συντεταγμένες του στόχου μπορούν να εκπροσωπούνται από ένα πίνακα περιστροφής:

$$Rot(\theta_r, \theta_p, \theta_y) = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

όπου:

$$a_{11} = \cos \theta_p \cos \theta_y$$

$$a_{12} = -\cos \theta_p \sin \theta_y$$

$$a_{13} = \sin \theta_p$$

$$a_{21} = \sin \theta_r \sin \theta_p \cos \theta_y + \cos \theta_r \sin \theta_y$$

$$a_{22} = -\sin \theta_r \sin \theta_p \sin \theta_y + \cos \theta_r \cos \theta_y$$

$$a_{23} = -\sin \theta_r \cos \theta_p$$

$$a_{31} = -\cos \theta_r \sin \theta_p \cos \theta_y + \sin \theta_r \sin \theta_y$$

$$a_{32} = \cos \theta_r \sin \theta_p \sin \theta_y + \sin \theta_r \cos \theta_y$$

$$a_{33} = \cos \theta_r \cos \theta_p$$

Λόγω της σύνθετης περιστροφής, ένας σκεδαστής  $S_1 = [X_1, Y_1, Z_1]$  ο οποίος παρατηρήθηκε στο σύστημα αξόνων  $(X, Y, Z)$ , θα περιστραφεί στον  $S_2 = [X_2, Y_2, Z_2]$  στο ίδιο σύστημα συντεταγμένων. Η σχέση μεταξύ των  $S_1$  και  $S_2$  περιγράφεται από τον τύπο

$$\vec{S}_2 = Rot(\theta_r, \theta_p, \theta_y) \vec{S}_1^T \quad (5.21)$$

όπου το  $T$  δηλώνει την μετατόπιση του διανύσματος. Σε γενικές γραμμές, ο πίνακας περιστροφής και μετατόπισης είναι:

$$Trans(T_x, T_y, T_z) Rot(\theta_r, \theta_p, \theta_y) = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & T_x \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & T_y \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.22)$$

Με την χρήση του παραπάνω πίνακα, οι συντεταγμένες οποιουδήποτε ελισσόμενου στόχου μπορούν να υπολογιστούν εάν δοθούν οι γωνίες περιστροφής ( $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ ) και οι μετατοπίσεις ( $T_x, T_y, T_z$ ).

#### **5.4.2 Απεικόνιση ελισσόμενων στόχων χρησιμοποιώντας δημιουργία εικόνας που βασίζεται στον μετασχηματισμό χρόνου-συχνότητας**

Για να απεικονίσουμε στο ρανταρ έναν κινούμενο στόχο, χρησιμοποιούμε κατ' αρχήν την προσομοίωση δεδομένων ρανταρ και στη συνέχεια εφαρμόζουμε μετασχηματισμό χρόνου-συχνότητας στα στοιχεία που μετρήθηκαν από το ραντάρ.

Στην προσομοίωση θεωρείται ότι το ρανταρ λειτουργεί στην X-band με κεντρική συχνότητα  $f_0 = 9000$  MHz και εκπέμπει μια κλιμακωτής-συχνότητας (stepped-frequency) κυματομορφή. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε άλλη κυματομορφή, όπως γραμμική διαμορφωμένης συχνότητας και chirp-pulse, για τον σχηματισμό εικόνας με την μέθοδο αυτή. Χρησιμοποιούνται ένα σύνολο από  $M=64$  βηματιστικές συχνότητες (με βήμα 8 MHz) για να καλύψουν ένα εύρος ζώνης 500 MHz ή την επίτευξη εύρους φάσματος 0.29m. Κάθε παλμός εκπέμπει μία φέρουσα συχνότητα. Μετά την εκπομπή μιας ομάδας 64 παλμών από τις 64 βηματικές συχνότητες (το οποίο καλείται burst) το ραντάρ εκπέμπει το επόμενο burst.

Στην προσομοίωσή μας το PRF είναι 20000 παλμοί/δευτερόλεπτο το οποίο είναι τουλάχιστον 64 φορές από τη συχνότητα επανάληψης του burst για τη δημιουργία εικόνας που καλύπτει το σύνολο του στόχου. Ο χρόνος παρατήρησης της εικόνας, θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος ούτως ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή cross-range ανάλυση. Κατά την προσομοίωση, ο χρόνος επεξεργασίας της συνεκτικής εικόνας  $T = MN/PRF = 1.64\text{sec}$ , χρησιμοποιώντας  $N=512$  δείγματα του ιστορικού σειράς χρόνου. Έτσι, η εικόνα ραντάρ είναι αποτέλεσμα 64 range-cells και 512 συχνοτήτων Doppler ή cross-range-cells.

Ένα αεροσκάφος (MIG-25), προσομοιώνεται στις 2 διαστάσεις συναρτήσει της πυκνότητας ανακλαστικότητας  $\rho(x,y)$  η οποία χαρακτηρίζεται από 120 σημεία διασκορπισμού με ίση ανακλαστικότητα. Τα 120 αυτά σημεία, κατανέμονται κατά μήκος του δυοδιάστατου σχήματος του αεροσκάφους. Το παραπάνω απλοποιημένο μοντέλο, είναι πολύ απλό συγκρινόμενο με την προσομοίωση ηλεκτρομαγνητικά προβλεπόμενου κώδικα (όπως X-patch). Παρότι τα διασκορπισμένα στοιχεία δεν αντιπροσωπεύουν την πραγματική κατανομή της ανακλαστικής επιφάνειας, είναι βολικά για την απεικόνιση της διαμορφωμένης εικόνας του στόχου.

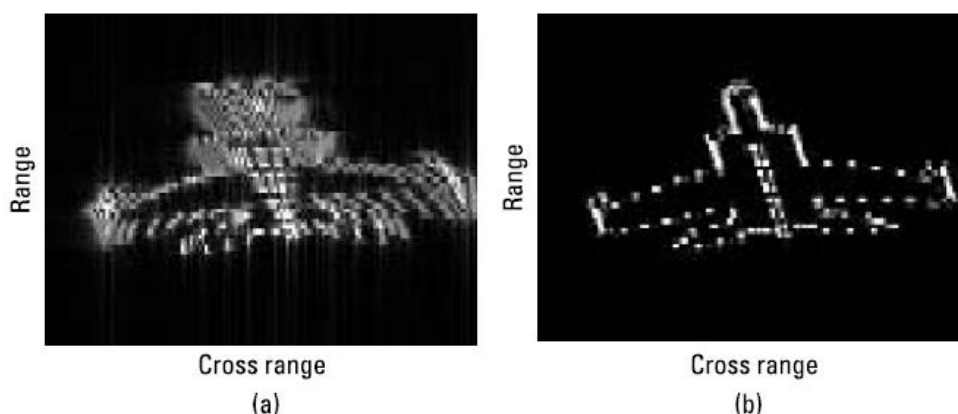


Είναι αρκετά καλό για τον έλεγχο και την σύγκριση διαφορετικών κινήσεων επανόρθωσης και αλγορίθμων σχηματισμού εικόνας.

Το αεροσκάφος αρχικά βρίσκεται σε απόσταση 3500m και έχει έναν γρήγορο ρυθμό περιστροφής 10 μοίρες/δευτερόλεπτο, ο οποίος είναι πολύ υψηλότερος από τον κανονικό για παραγωγή σαφούς εικόνας του στόχου. Υποθέτουμε ότι η παραπάνω κίνηση του στόχου μπορεί να επανορθωθεί απόλυτα. Παρά ταύτα, λόγω της μεγάλης ταχύτητας περιστροφής και του μεγάλου χρονικού διαστήματος της παρατήρησης, ακόμα και μετά τη standard επανόρθωση της κίνησης το σφάλμα uncompensated φάσης, παραμένει μεγάλο. Έτσι η σχηματιζόμενη εικόνα με τη χρήση μετασχηματισμού Fourier, παραμένει θολή όπως φαίνεται στην εικόνα 5.6(a).

Όταν ο στόχος έχει μια γρήγορη περιστροφική κίνηση, η πολική επαναδιαμόρφωση επιθυμείται. Αυτό μπορεί να εξαλείψει κάθε σκεδαστή από τη μετατόπιση από τα range cells και θα επιτρέψει στο σχηματισμό fourier να χρησιμοποιείται σωστά. Ωστόσο για να εκτελέσει πολική επαναδιαμόρφωση είναι απαραίτητη η γνώση των αρχικών κινηματικών παραμέτρων του στόχου. Επιπρόσθετα, η επανάληψη δειγματοληψίας και ο ορθογώνιος πολικός ανασχηματισμός αυξάνει την πολυπλοκότητα των υπολογισμών στη διαδικασία σχηματισμού εικόνας.

Με το σχηματισμό εικόνας που βασίζεται στο χρόνο-συχνότητα, μπορεί να προσδιορισθεί κάθε φορά το εύρος και η μετατόπιση συχνότητας Doppler κάθε σκεδαστή. Έτσι, χωρίς να γνωρίζουμε τις αρχικές κινηματικές παραμέτρους και την επανάληψη δειγματοληψίας των δεδομένων μια θολή εικόνα fourier, λόγω του απλώματος του φάσματος fourier θα γίνει μια σειρά καθαρού εύρους και στιγμιαίων εικόνων Doppler.



**Εικόνα 5.6 (α) Εικόνα προσομείωσης MIG-25 που ανακατασκευάστηκε με σχηματισμό εικόνας που στηρίζεται στο Fourier (β) Ανακατασκευασμένη απεικόνιση 7 πλασίων με σχηματισμό εικόνας που βασίζεται στο Fourier**

Κατ'αρχήν, οποιαδήποτε μετατροπή χρόνου συχνότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί με την αντικατάσταση μετασχηματισμού fourier για τον σχηματισμό εικόνας ραντάρ.Ωστόσο ένας επιθυμητός μετασχηματισμός χρόνου-συχνότητας θα πρέπει να πληροί τις ακόλουθες προϋποθέσεις:

- θα πρέπει να έχουν υψηλή συχνότητα ανάλυσης τόσο ο χρόνος όσο και οι τομείς συχνότητας και
- θα πρέπει να αντικατοπτρίζει με ακρίβεια τη στιγμιαία συχνότητα της ανάλυσης σήματος.

Ο μετασχηματισμός χρόνου συχνότητας περιλαμβάνει γραμμικό μετασχηματισμό σαν το STFT και διγραμμικού μετασχηματισμού σαν τη WVD (Wigner-Ville distribution).Η κοινή ανάλυση χρόνου συχνότητας του STFT περιορίζεται από την αρχή της αβεβαιότητας.Με ένα χρονικά περιορισμένο παράθυρο λειτουργίας η ανάλυση του STFT καθορίζεται από το μέγεθος του παραθύρου.Υπάρχει ένας συμβιβασμός μεταξύ της ανάλυσης χρόνου και της ανάλυσης συχνότητας.Ένα μεγαλύτερο παράθυρο έχει υψηλότερη ανάλυση συχνότητας αλλά χαμηλότερη χρονική ανάλυση. Ένα μικρότερο παράθυρο έχει χαμηλότερη ανάλυση συχνότητας αλλά υψηλότερη ανάλυση χρόνου.

Σε αντίθεση με το STFT στην οποία η ανάλυση χρόνου και συχνότητας καθορίζεται από την επιλογή ενός παραθύρου μικρού χρόνου λειτουργίας,δεν υπάρχουν παράθυρα σύντομου χρονικού διαστήματος που να εμπλέκεται στην WVD. Η WVD όχι μόνο έχει μεγαλύτερη ανάλυση συχνότητας κοντά στο πλήρες μέγεθος παραθύρου του μετασχηματισμού fourier αλλά παρέχει και μία υψηλή ανάλυση χρόνου. Λόγω της υψηλής ανάλυσης και της ακρίβειας αναπαράστασης χρόνου-συχνότητας η WVD μπορεί να είναι υποψήφια για τον σχηματισμό εικόνας που βασίζεται στο χρόνο–συχνότητα. Ωστόσο υπάρχουν cross-term παρεμβολές σχετικά με την WVD.

Όταν το σήμα περιέχει περισσότερες από μία συνιστώσες η WVD θα δημιουργήσει cross-term παρεμβολές μεταξύ συστατικών που εμφανίζεται στις ψευδείς θέσεις του χρόνου–συχνότητας του αεροπλάνου. Το cross-term διαθέτει μια περιορισμένη ενέργεια που αντικατοπτρίζει συσχέτιση μεταξύ των δύο σχετικών όρων και παρουσιάζει υψηλή ταλάντωση. Αν και το cross-term έχει μεταβαλλόμενο φάσμα. Για να μειωθούν οι cross-term παρεμβολές, το φιλτραρισμένο WVD μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την διατήρηση χρήσιμων ιδιοτήτων του μετασχηματισμού χρόνου-συχνότητας με ελαφρώς μειωμένη ανάλυση χρόνου-συχνότητας και σε μεγάλο βαθμό μειωμένες cross-term παρεμβολές.

Το WVD με ένα γραμμικό βαθυπερατό φίλτρο, χαρακτηρίζεται ως κλάση του Cohen και η διανομή με μη γραμμικό βαθυπερατό φίλτρο χαρακτηρίζεται ως TFDS (time-frequency distribution series).

Οι TFDS μπορεί να έχουν υψηλότερη ανάλυση και χαμηλότερες cross-term παρεμβολές ανάλογα με την διάταξή τους. Όταν είναι επιλεγμένη η μηδενικής τάξης, η TFDS συγκλίνει στο WVD. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η σειρά που μπορεί να έχει επιλεγεί μπορεί να είναι 3<sup>ης</sup> ή 4<sup>ης</sup> τάξης.

Για σύγκριση της συγκέντρωσης της ενέργειας χρόνου-συχνότητας, η στιγμιαία συχνότητα και το στιγμιαίο εύρος ζώνης μεταξύ των STFT, TFDS και WVD, το WVD έχει υψηλότερη συγκεντρωμένη ενέργεια χρόνου-συχνότητας ή χαμηλότερο στιγμιαίο εύρος ζώνης και η στιγμιαία συχνότητα αντικατοπτρίζει με ακρίβεια την πραγματική συχνότητα του σήματος. Ανάλογα με την σειρά διανομής, η TFDS έχει ελαφρώς χαμηλότερη συγκεντρωμένη ενέργεια χρόνου-συχνότητας σε σχέση με την WVD και μπορεί επίσης να αντανakλά με ακρίβεια την στιγμιαία συχνότητα του σήματος.

Αλλά η STFT έχει χαμηλότερη συγκεντρωμένη ενέργεια χρόνου-συχνότητας και απόκλιση από την πραγματική στιγμιαία συχνότητα. Σαν παράδειγμα, το στιγμιαίο εύρος ζώνης σε κανονικοποιημένη συχνότητα είναι 0.007 για το WVD, 0.012 για το TFDS και 0.03 για το STFT. Έτσι, η συγκέντρωση ενέργειας χρόνου-συχνότητας του STFT είναι περίπου 4.3 φορές χαμηλότερη από αυτή του WVD και περίπου 2.4 φορές χαμηλότερη από εκείνη της 4<sup>ης</sup> Τάξης TFDS.

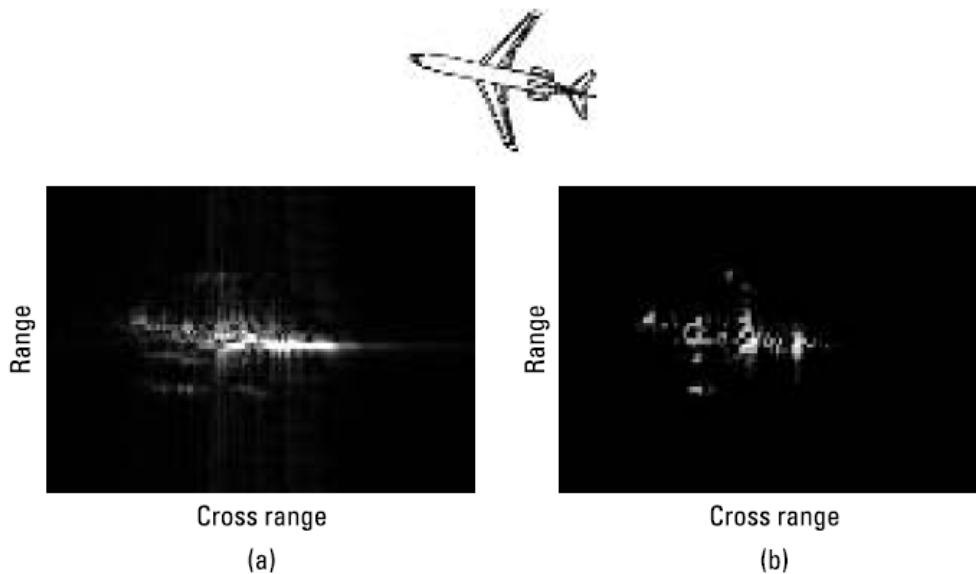
Δεδομένης της υψηλής συγκέντρωσης ενέργειας χρόνου-συχνότητας και των χαμηλών cross-term παρεμβολών τα οποία είναι επιθυμητά για το σχηματισμό εικόνας που βασίζεται στο χρόνο-συχνότητα, στην προσομοίωσή μας επιλέξαμε TFDS για την υψηλότερη ενέργειας χρόνου-συχνότητας, χαμηλότερες cross-term παρεμβολές και ευκολότερη εφαρμογή.

Η εικόνα 5.6(b) δείχνει το πλαίσιο της εικόνας 7 από την ακολουθία των 16 πλαισίων χρησιμοποιώντας το σχηματισμό εικόνας που βασίζεται στο χρόνο-συχνότητας. Η θολή εικόνα που προκαλείται από την γρήγορη περιστροφή του στόχου είναι επαναπροσδιορίσιμη χωρίς την εφαρμογή της πολικής επαναμορφοποίησης.

Επειδή το χρονικά μεταβαλλόμενο φάσμα επροσωπείται επαρκώς το άπλωμα της εικόνας Fourier έχει επιλυθεί σε μια ακολουθία χρονικού μεταβαλλόμενου φάσματος και στιγμιαίας εικόνας Doppler. Αυτές οι εικόνες όχι έχουν ανώτερη ανάλυση αλλά δείχνουν επίσης την αλλαγή Doppler από μια εικόνα πλαίσιο σε μια άλλη.

Για να αποδειχθεί η αποτελεσματικότητα σχηματισμού συχνότητας που βασίζεται στο χρόνο συχνότητας για μετρημένα δεδομένα ρανταρ εφαρμόζουμε το σχηματισμό εικόνας που βασίζεται τόσο στο fourier όσο και στο χρόνο-συχνότητα σε ένα σύνολο δεδομένων μέτρησης ραντάρ που επιστρέφονται από ένα εμπορικό αεροπλάνο. Οι παράμετροι ραντάρ είναι περίπου οι ίδιοι. Τα δεδομένα διαμορφώνονται ως ένα σύνθετο  $64 \times 512$  I και Q σε ένα πίνακα. Μετά την εφαρμογή του αλγόριθμου της πρότυπης κίνησης επανόρθωσης η εικόνα που σχηματίζεται με βάση το fourier εξακολουθεί να είναι θολή όπως φαίνεται στην εικόνα 5.7(α). Αυτό συμβαίνει λόγω των γρήγορων ελιγμών στόχου καθόλο το διάστημα της συνεκτικής επεξεργασίας. Χωρίς να γνωρίζουμε την αρχική κινηματική παράμετρο και χωρίς την επανάληψη δειγματοληψίας των δεδομένων, ένας απλός τρόπος να σχηματίσουμε μία εικόνα ενός ελισσόμενου στόχου είναι η χρήση ενός σύντομου παραθύρου ή υποανοίγματος δεδομένων. Εξαιτίας του σύντομου χρονικά παραθύρου ο μετασχηματισμός fourier μπορεί να εφαρμοστεί κατάλληλα.

Ωστόσο η Doppler ή η cross-range ανάλυση της ανασχηματισμένης εικόνας είναι η χαμηλότερη εξαιτίας του σύντομου παραθύρου όπως περιγράφηκε. Η εικόνα που σχηματίζεται από τον σχηματισμό εικόνας που βασίζεται στο χρόνο-συχνότητας δείχνει υψηλότερο Doppler ή cross-range ανάλυση όπως φαίνεται στην εικόνα 5.7(b). Η μύτη, τα φτερά, το ακροπτερύγιο της ατράκτου της μηχανής και η ουρά του αεροσκάφους μπορεί να προσδιοριστούν με σαφήνεια. Στο πάνω μέρος του κέντρου της εικόνας 5.7 δίνεται η πραγματική κάτοψη του αεροπλάνου στο έδαφος για σύγκριση.



**Εικόνα 5.7 Απεικόνιση αεροσκάφους (α) ανακατασκευή με χρήση Fourier (β) ανακατασκευή με χρήση χρόνου-συχνότητα**

Το ίδιο, δηλαδή ο σχηματισμός εικόνας με βάση το χρόνο-συχνότητας μπορεί επίσης να εφαρμοστεί σε δεδομένα SAR.

## 5.5 Απεικόνιση ραντάρ πολλαπλών στόχων

Η απεικόνιση ραντάρ πολλαπλών κινούμενων στόχων είναι ένα σημαντικό θέμα ιδίως όταν οι στόχοι περιστρέφονται ή ελίσσονται όπως πολλά αεροσκάφη πετούν σε σχηματισμό στο πλαίσιο της ίδιας δέσμης κεραίας κοντά η μία στην άλλη και κινούνται με διαφορετικές ταχύτητες ή διαφορετικές κατευθύνσεις. Οι αλγόριθμοι απεικόνισης του συμβατικού ραντάρ το οποίο λειτουργεί καλά για χωριστούς κινούμενους στόχους, δεν μπορούν να εφαρμοστούν άμεσα με το περιβάλλον πολλαπλών στόχων. Επιστρεφόμενα σήματα από το στόχο αυτό επικαλύπτονται χρονικά. Με την απλή εφαρμογή του αλγορίθμου επανόρθωσης της τυπικής κίνησης, η λειτουργία συνάρτησης διόρθωσης φάσης η οποία υπολογίζεται από στοιχεία Doppler που προέρχονται από μία ομάδα στόχων, δεν μπορεί να επανορθώσει το σφάλμα φάσης για κάθε επιμέρους στόχο. Συνήθως επανορθώνει το σφάλμα φάσης για ένα στόχο αλλά προκαλεί σφάλμα φάσης για τους άλλους. Έτσι οι πολλαπλοί κινούμενοι στόχοι δεν μπορούν να επιλυθούν και κανένας επιμέρους στόχος δεν μπορεί να απεικονιστεί σταθερά.

### 5.5.1 Επίλυση ανάλυσης πολλαπλών στόχων

Όταν ένας αριθμός στόχων βρίσκονται εντός της ίδιας δέσμης της κεραίας του ραντάρ το επιστρεφόμενο σήμα από δυο στόχους μπορεί να εκφραστεί ως το άθροισμα των επιστρεφόμενων σημάτων από επιμέρους στόχους

$$s_{\Sigma}(t) = \sum_{k=1}^L \iiint \rho_k(x, y, z) \exp \left\{ -j2\pi \left[ \frac{2f_0}{c} R_k(t) + xf_{kx}(t) - yf_{ky}(t) \right] \right\} dx dy dz \quad (5.23)$$

Όπου  $\rho_k(x,y,z)$  είναι η συνάρτηση ανακλαστικότητας των  $(x,y,z)$  στον  $k$  στόχο,  $f_{kx}=(2f_0/c) \cos\theta_k(t)$  και  $f_{ky}=(2f_0/c) \sin\theta_k(t)$  είναι τα συναφή συστατικά στοιχεία της χωρικής συχνότητας και  $R_k(t)$  και  $\theta_k(t)$  είναι το εύρος και η γωνία περιστροφής των  $k$  στόχων αντίστοιχα.

Το επιστρεφόμενο σήμα της φάσης των  $k$  στόχων είναι

$$\Phi_{rk}(r_t) = \frac{4\pi f_0}{c} [R_k(t) + x \cos \theta_k(t) - y \sin \theta_k(t)] \quad (5.24)$$

Έτσι η μετατόπιση συχνότητας Doppler λόγω της μεταφορικής κίνησης είναι

$$f_{D_{TRANS},k} = \frac{2f_0}{c} V_{R,k} = \frac{2}{\lambda} V_{R,k} \quad (5.25)$$

και η μετατόπιση συχνότητας Doppler λόγω της περιστροφικής κίνησης είναι

$$f_{D_{ROT},k} = \frac{2f_0}{c} [-(x \sin \theta_{0k} + y \cos \theta_{0k}) \Omega_k - (x \cos \theta_{0k} - y \sin \theta_{0k}) \Omega_k^2 t] \quad (5.26)$$

όπου  $V_{R,k}$  είναι οι αρχικές ακτινικές ταχύτητες,  $\theta_{0k}$  είναι οι αρχικές γωνίες περιστροφής και  $\Omega_k$  είναι η γωνιακή ταχύτητα των  $k$  στόχων.

Όταν οι πολλαπλοί στόχοι είναι κοντά ο ένας στον άλλο και επομένως δεν μπορούν να διαχωριστούν σε απόσταση η μόνη προσέγγιση για το διαχωρισμό αυτών των στόχων είναι η αξιοποίηση διαφορετικής συχνότητας Doppler.

Η εικόνα 5.8(α) απεικονίζει δυο στόχους που πετούν κατά μήκος μιας ευθείας γραμμής με την ίδια ταχύτητα  $V$ .

Υποθέτουμε ότι η απόσταση μεταξύ δυο αεροπλάνων είναι  $d$  και η απόσταση του ραντάρ από το μέσο μεταξύ των δυο αεροπλάνων είναι  $R$ . Η γωνία μεταξύ της κατεύθυνσης της πορείας πτήσης και LOS από το ραντάρ των στόχων 1 και 2 είναι  $\Phi_1$  και  $\Phi_2$  αντίστοιχα. Το σημείο του οποίου αντιστοιχεί η γωνία είναι  $\Phi = (\Phi_1 + \Phi_2)/2$ , θα πρέπει να βρίσκεται κοντά στο μέσο επίπεδο μεταξύ των δυο στόχων.

Επομένως η διαφορά Doppler ανάμεσα σε δυο στόχους γίνεται.

$$\begin{aligned} \Delta f_{D12} &= f_{D_{TRANS},1} - f_{D_{TRANS},2} = \frac{2V}{\lambda} (\cos \phi_1 - \cos \phi_2) \\ &= -\frac{2V}{\lambda} (2 \sin \phi \sin \frac{\phi_1 - \phi_2}{2}) = -\frac{2V}{\lambda} \frac{d}{R} \sin \phi \sin \phi_2 \end{aligned} \quad (5.27)$$

Όπου χρησιμοποιούμε την εξίσωση

$$\sin \frac{\phi_1 - \phi_2}{2} = \frac{d}{R} \frac{\sin \phi_2}{2}$$

Αν  $\phi \approx \phi_2$  έχουμε

$$\Delta f_{D12} \approx -\frac{2V}{\lambda} \frac{d}{R} \sin^2 \phi \quad (5.28)$$

Ας εξετάσουμε μερικές περιπτώσεις στις οποίες πολλαπλοί στόχοι μπορούν να διαχωριστούν. Υποθέτουμε ότι το ραντάρ λειτουργεί στην Χ-μπάντα ( $\lambda=0.033\text{m}$ ) και  $V=60\text{m/sec}$   $d=20\text{m}$   $R=20,000\text{m}$  η διαφορά Doppler ως συνάρτηση της γωνίας  $\Phi$  σε  $\Phi=90$  και  $270$  βαθμούς φθάνει την μέγιστη τιμή των  $3.5$  Hz όπως φαίνεται στην εικόνα 5.8(α). Η ξεκαθάριση των δυο στόχων, η συνεκτική επεξεργασία χρόνου των  $0.28$  sec είναι απαραίτητη. Αν η γωνία απέχει από  $90$  ή  $270$  μοίρες, η διαφορά Doppler γίνεται μικρότερη. Έτσι μια μεγαλύτερη συνεκτική επεξεργασία χρόνου η οποία μπορεί να προκαλέσει θόλωμα στην εικόνα καλείται να επιλύσει δυο στόχους. Όταν η γωνία προσεγγίζει  $0$  ή  $180$  μοίρες είναι αδύνατο να ξεκαθαρίσουν αυτοί οι δύο στόχοι.

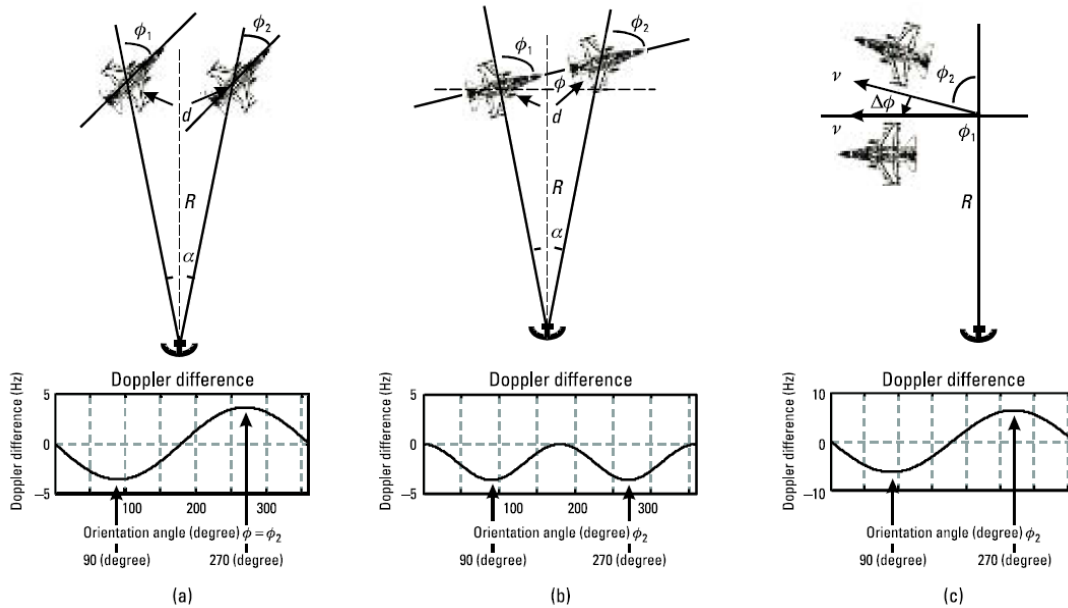
Η εικόνα 5.8( b) δείχνει άλλο ένα παράδειγμα δυο στόχων που παρατάσσονται και πετούν στην ίδια κατεύθυνση. Σ' αυτή την περίπτωση η διαφορά Doppler μεταξύ των δυο στόχων γίνεται

$$\begin{aligned} \Delta f_{D_{Trans},1} &= f_{D_{Trans},1} - f_{D_{Trans},2} = \frac{2V}{\lambda} (\cos \phi_1 - \cos \phi_2) \\ &= -\frac{2V}{\lambda} \left( 2 \sin \frac{\phi_1 + \phi_2}{2} \sin \frac{\phi_1 - \phi_2}{2} \right) \\ &= -\frac{2V}{\lambda} \left[ 2 \sin \left( \frac{d}{2R} + \phi_2 \right) \sin \left( \frac{d}{2R} \right) \right] \end{aligned} \quad (5.29)$$

Αν  $d/R$  είναι πολύ μικρότερο, τότε

$$\Delta f_{D12} \approx -\frac{2V}{\lambda} \frac{d}{R} \sin \left( \frac{d}{2R} + \phi_2 \right) \quad (5.30)$$

Για τις ίδιες παραμέτρους  $V, d$  και  $R$  που δίνονται παραπάνω, η συνάρτηση της γωνίας  $\Phi_2$  της διαφοράς Doppler σε  $\Phi_2=90$  και  $270$  μοίρες καταλήγει στην ίδια μέγιστη τιμή των  $3.5$  Hz όπως φαίνεται στην εικόνα 5.8(b).



**Εικόνα 5.8 Γεωμετρία δύο αεροσκαφών που πετούν (α) κατά μήκος ενός μονοπατιού (β) σε γραμμική κίνηση με ίδια διεύθυνση (γ) με όμοια εμβέλεια αλλά διαφορετική κατεύθυνση. Παρατηρούμε τη διαφορά Doppler σε σχέση με τη γωνία.**

Όταν η γωνία  $\Phi_2$  προσεγγίζει τις 0 ή 180 μοίρες η διαφορά Doppler προσεγγίζει το μηδέν. Έτσι είναι αδύνατο να ξεκαθαρίσει αυτούς τους δυο στόχους.

Σ'αυτή την περίπτωση οι πολλαπλοί στόχοι έχουν την ίδια απόσταση αλλά κινούνται σε διαφορετικές κατευθύνσεις όπως φαίνεται στην εικόνα 5.8(c) η διαφορά Doppler μεταξύ των δυο στόχων με γωνίες  $\Phi_1$  και  $\Phi_2$  γίνεται

$$\begin{aligned} \Delta f_{D_{12}} &= f_{D_1} - f_{D_2} = \frac{2V}{\lambda} (\cos \phi_1 - \cos \phi_2) \\ &= -\frac{2V}{\lambda} \left( 2 \sin \left( \frac{\Delta \phi}{2} + \phi_2 \right) \sin \frac{\Delta \phi}{2} \right) \end{aligned} \quad (5.31)$$

αν  $\Phi_2=180$  μοίρες τότε

$$\Delta f_{D_{12}} = \frac{2V}{\lambda} \left( 2 \sin^2 \frac{\Delta \phi}{2} \right) \quad (5.32)$$

όπου  $\Delta\phi$  είναι η διαφορά μεταξύ της γωνίας κατεύθυνσης των δυο στόχων.



Από την σχέση (5.31), αν  $V=60$  m/sec,  $R=20,000$ m και  $\Delta\phi=0.1$  μοίρες ως συνάρτηση της γωνίας  $\Phi_2$  σε  $\Phi_2=90$  και  $270$  μοίρες, η διαφορά Doppler φτάνει την μέγιστη τιμή των  $6.35$  Hz όπως φαίνεται στην εικόνα 5.8(c). Η διάκριση των δυο στόχων, η συνεκτική επεξεργασία χρόνου των  $0.16$  sec είναι αρκετή. Όταν η γωνία  $\Phi_2$  προσεγγίζει το μηδέν ή  $180$  μοίρες, η διαφορά Doppler προσεγγίζει το μηδέν και είναι επίσης αδύνατο να διακρίνει αυτούς τους δυο στόχους.

Από τα πρώτα δυο παραδείγματα μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι όταν οι στόχοι πετούν στην ίδια κατεύθυνση η διαφορά Doppler μεταξύ των στόχων είναι σχετικά μικρή. Με την μεγαλύτερη συνεκτική επεξεργασία χρόνου πολλαπλοί στόχοι μπορούν να επιλυθούν. Όταν όμως οι στόχοι πετούν σε διαφορετικές κατευθύνσεις όπως φαίνεται στο τρίτο παράδειγμα η διαφορά Doppler είναι σχετικά μεγάλη ανάλογα με τη διαφορά μεταξύ της γωνίας κατεύθυνσης που πετάνε.

Αν οι στόχοι έχουν περιστροφική κίνηση ή διαφορετικές ταχύτητες, θα έχουν διαφορετική Doppler histories. Με την χρήση αλγορίθμων συμβατικής κίνησης επανόρθωσης, μια εικόνα πολλαπλών στόχων «απλώνεται». Σ' αυτή την περίπτωση οι αλγόριθμοι χρόνου συχνότητας μπορούν να βοηθήσουν για την απεικόνιση πολλαπλών στόχων.

### **5.5.2 Φάση επανόρθωσης που βασίζεται στο χρόνο συχνότητας πολλαπλών στόχων**

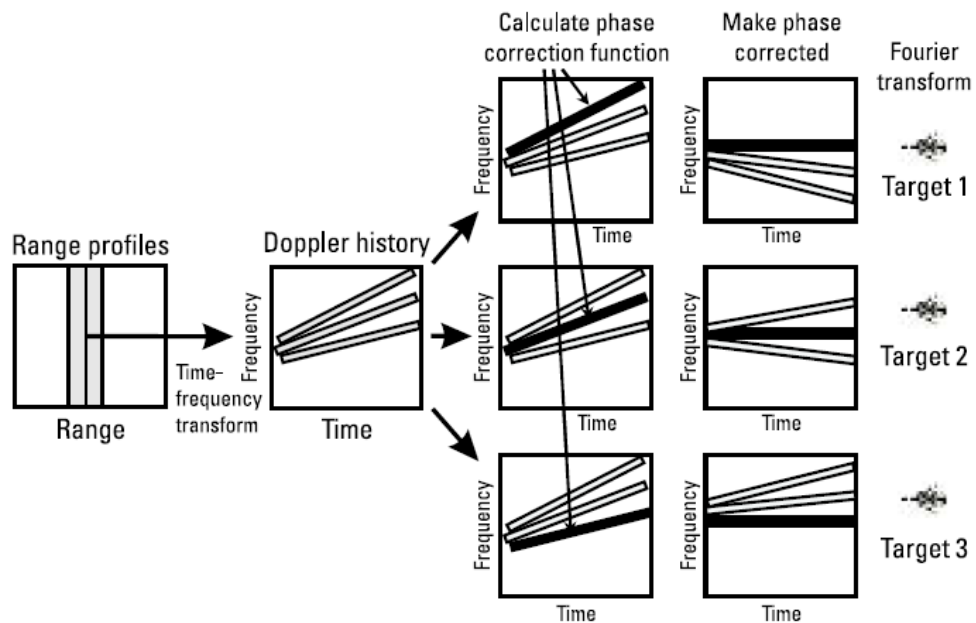
Όταν ένας αριθμός στόχων είναι εντός της ίδιας δέσμης κεραίας σε περιοχή κοντά και κινούνται μεταξύ τους με διαφορετικές ταχύτητες ή διαφορετικές κατευθύνσεις κάθε επιμέρος στόχος έχει το δικό του Doppler history. Μονολότι και οι δυο στόχοι είναι δύσκολο να διαχωριστούν στην περιοχή η διαφορά στο Doppler history μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επιλύσει πολλαπλούς στόχους. Μια προσέγγιση για το διαχωρισμό διαφοράς Doppler history είναι να εφαρμόσει το μετασχηματισμό χρόνου - συχνότητας τα δεδομένα χρονοσειρών history στα range cells όπου βρίσκονται οι στόχοι. Για καθένα μεμονωμένο στόχο η διανομή χρόνου συχνότητας με την οποία συνδέονται με κάθε ειδικό στόχο, το Doppler history αυτού του στόχου αποκτάται. Με την λήψη ολοκληρώματος του χρόνου της Doppler history η συνάρτηση της φάσης που συνδέεται με αυτόν τον στόχο μπορεί να βρεθεί.

Στη συνέχεια, πολλαπλασιάζοντας με τον συζυγή της συναρτησης history φάσης για τα πρώτα δεδομένα του ραντάρ η συνάρτηση φάσης που σχετίζόταν με τον συγκεκριμένο στόχο θα αναπληρωθεί και η μετατόπιση συχνότητας Doppler γίνεται χρονικά αμετάβλητη. Έτσι ο μετασχηματισμός Fourier μπορεί να επαρκεί για την ανοικοδόμηση της εικόνας για τον συγκεκριμένο στόχο.

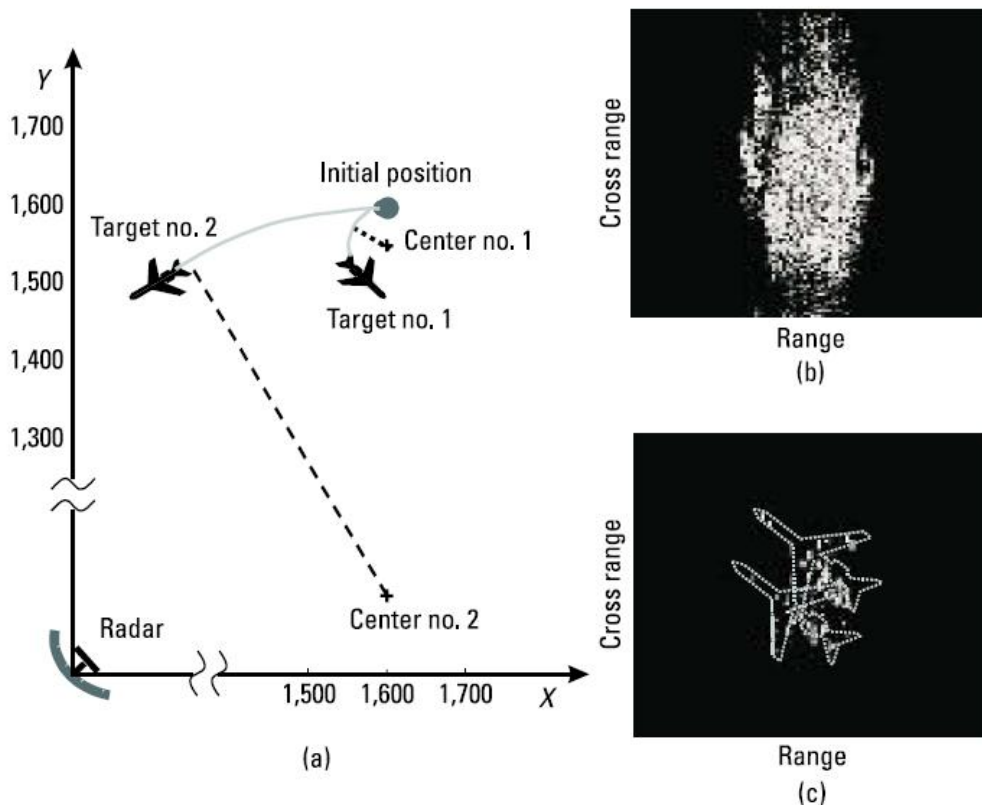
Στην εικόνα πολλαπλών στόχων η παραπάνω διαδικασία της φάσης επανόρθωσης πρέπει να εφαρμόζεται σε καθένα από τους στόχους χωριστά όπως φαίνεται στην εικόνα 5.9 όπου τρεις στόχοι απεικονίζονται με τρεις διαφορετικές συναρτήσεις φάσης.

Εάν ωστόσο ένας στόχος έχει περιστροφική κίνηση η διαδικασία της φάσης επανόρθωσης που περιγράφεται παραπάνω μπορεί να μην λειτουργήσει καλά και έτσι οι εικόνες πολλαπλών κινούμενων στόχων μπορεί να μην είναι καλά εστιασμένες.

Ένα παράδειγμα δύο στόχων καθένας από τους οποίους έχει μια κυκλική κίνηση γύρω από το κεντρικό σημείο της φαίνεται στην εικόνα 5.10(α). Το ραντάρ βρίσκεται στο  $(X=0, Y=0)$  και οι δύο στόχοι αρχίζουν την κυκλική κίνηση από το ίδιο αρχικό σημείο με  $(X=1,600m, Y=1,600m)$ .



**Εικόνα 5.9** Τυπική διαδικασία χρόνου-συχνότητας πολλαπλών στόχων



**Εικόνα 5.10 (α) Τροχιές δυο προσομοιωμένων στόχων με κυκλική κίνηση (β) απεικόνιση ραντάρ πολλαπλών στόχων χρησιμοποιώντας φάση επανόρθωσης και μετασχηματισμό Fourier που βασίζονται στο χρόνο-συχνότητα και (γ) απεικόνιση ραντάρ πολλαπλών στόχων χρησιμοποιώντας μετασχηματισμό χρόνου-συχνότητας.**

Ο στόχος 1 έχει μια κυκλική κίνηση γύρω από το κέντρο με  $(X=1,600\text{m}, Y=1,550\text{m})$  και με αναλογία περιστροφής  $0.04 \text{ rad/sec}$  ή  $2.29 \text{ degrees/sec}$ . Ο στόχος 2 έχει μια αναλογία περιστροφής των  $0.02 \text{ rad/sec}$  ή  $1.15 \text{ degrees/sec}$  γύρω από το κέντρο με  $(X=1,600\text{m}, Y=1,100\text{m})$ .

Λόγω της περιστροφής καθένας σκεδαστής του στόχου έχει δικό του συνδυασμό καταγραφής και περιστροφικής κίνησης και επιπλέον έχει το δικό του Doppler history. Σ' αυτή την περίπτωση ο αλγόριθμος επανόρθωσης της απλής φάσης δεν μπορεί να απομακρύνει την μετατόπιση Doppler όλων των επιμέρους σκεδαστών.

Έτσι η απεικόνιση καθενός επιμέρους στόχου μπορεί να απλωθεί και κανένας πολλαπλός στόχος δεν μπορεί να ξεχωρίσει όπως φαίνεται στην εικόνα 5.10(b).

### **5.5.3 Σχηματισμός εικόνας που βασίζεται στον μετασχηματισμό χρόνου συχνότητας για απεικόνιση πολλαπλών στόχων από το ραντάρ**

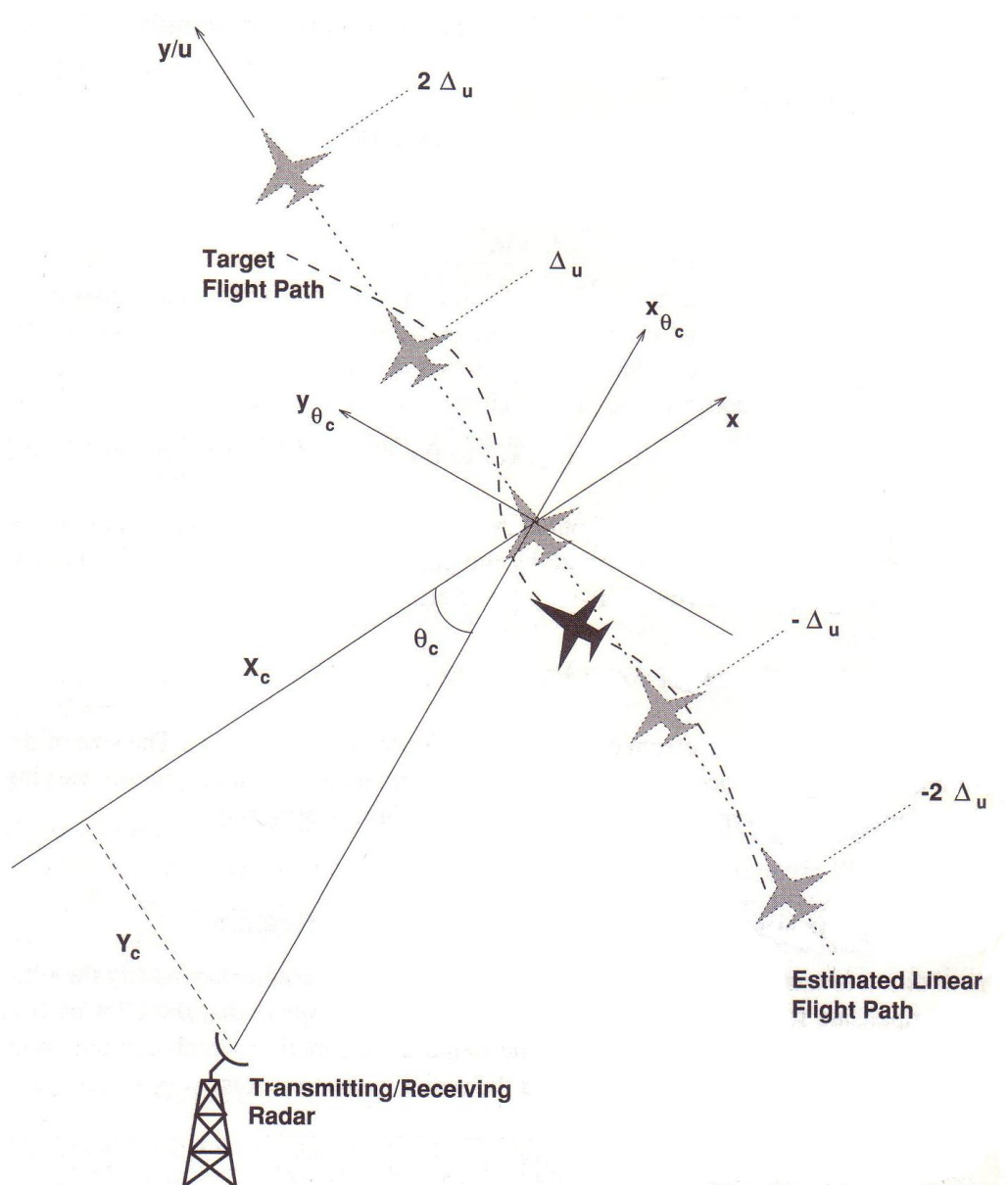
Σε περιπτώσεις που ο αλγόριθμος επανόρθωσης φάσης δεν λειτουργεί καλά για στόχους πολλαπλών περιστροφών και ελιγμών μπορούμε να εφαρμόσουμε σχηματισμό εικόνας που βασίζεται στον αλγόριθμο χρόνου- συχνότητας. Όταν εφαρμόζουμε σχηματισμό εικόνας που βασίζεται στον αλγόριθμο χρόνου- συχνότητας μπορούν να ταυτοποιηθούν πολλαπλοί στόχοι από μια ακολουθία σειράς και στιγμιαίου καρέ εικόνας Doppler. Ο στόχος μπορεί να είναι είτε ένα σημείο στόχος ή ένας εκτεταμένος στόχος και η κίνηση στόχων μπορεί να είναι μεταφορική ή ελισσόμενη.

Η εικόνα 5.10 (c) δείχνει δυο διαχωρίζοντα αεροσκάφη που ανασχηματίζονται από τον σχηματισμό εικόνας που βασίζεται στον αλγόριθμο χρόνου-συχνότητας σε σύγκριση με το άπλωμα της εικόνας 5.10(b) όπου εφαρμόζεται ο αλγόριθμος της φάσης επανόρθωσης.

## 6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

### 6.1 Μοντελοποίηση Συμβατικού ISAR και Απεικόνιση

Το ISAR (Αντίστροφο Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος) είναι μια απεικόνιση μορφοποίησης, η οποία αξιοποιεί τη σχετική κίνηση ενός στόχου (π.χ. αεροσκάφους) ως προς ένα ακίνητο ραντάρ μετάδοσης και λήψης, προκειμένου να δημιουργήσει την εικόνα του στόχου αυτού. Το σύστημα απεικόνισης γεωμετρικά για ένα ISAR σύστημα φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 6.1. Γεωμετρία Συστήματος Απεικόνισης ISAR

Το ραντάρ εκπομπής/λήψης είναι ακίνητο. Ο στόχος κινείται κατά μήκος τροχιάς, όπως φαίνεται με διακεκομμένη γραμμή στην εικόνα 6.1 και πρέπει θεωρητικά να έχει μία σταθερή γραμμική κίνηση. Αυτό δεν ισχύει στην πράξη. Στην πραγματικότητα ο χρήστης έρχεται αντιμέτωπος με τις μη γραμμικές συνιστώσες στην κίνηση του στόχου. Αυτές είναι ανάλογες με τα σφάλματα λόγω κίνησης  $[x_e(u), y_e(u)]$  στο SAR.

Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθούν οι μέθοδοι κίνησης-επανόρθωσης μέσα στο ISAR ώστε να απομακρυνθούν οι όροι της μη γραμμικής κίνησης. Τα αποτελέσματα θα είναι η εικόνα ISAR του στόχου εφόσον αυτή η κίνηση γίνεται κατά μήκος μιας γραμμής με σταθερή ταχύτητα  $u_t$ . Αυτή η γραμμή φαίνεται με κουκίδες στην εικόνα 6.1. Σε αυτό το εξιδανικευμένο μοντέλο το ISAR λαμβάνει την υπογραφή του κινούμενου στόχου κατά την οποία βρίσκεται στα σημεία  $\dots -2\Delta_u, -\Delta_u, 0, \Delta_u, 2\Delta_u, \dots$  κατά μήκος του ίχνους πτήσης (βλέπε εικόνα 6.1). Παρατηρούμε ότι η συνεχόμενη slow-time  $\tau$  περιοχή ( $\tau$ : αργός χρόνος του SAR) και η συνεχόμενη περιοχή  $u$  του συνθετικού ανοίγματος συνδέονται με τη σχέση:

$$u = u_t \tau \quad (6.1)$$

Η παράμετρος  $\Delta_u$ , το χωρικό δείγμα (sample spacing) μέσα στην περιοχή συνθετικού ανοίγματος, σχετίζεται με τη σταθερή ταχύτητα του στόχου και το χωρικό δείγμα μέσα στην περιοχή slow-time μέσω της σχέσης:

$$\Delta_u = u_t \Delta_\tau \quad (6.2)$$

Το χωρικό δείγμα μέσα στην περιοχή συνθετικού ανοίγματος είναι το slow-time διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών μεταδόσεων (εκπομπών) του ραντάρ. Αυτή η παράμετρος ονομάζεται επίσης, διάστημα επανάληψης παλμού (PRI - Pulse Repetition Interval):

$$\text{PRI} = \Delta_\tau \quad (6.3)$$

Ο αριθμός των μεταδόσεων ραντάρ ανά δευτερόλεπτο είναι το αντίστροφο του PRI και ονομάζεται συχνότητα επανάληψης παλμού (PRF – Pulse Repetition Frequency):

$$\text{PRF} = \frac{1}{\text{PRI}} \quad (6.4)$$

Η συμβατική μέθοδος για να μοντελοποίηση ενός σήματος ISAR βασίζεται στις προσεγγίσεις που αναπαριστούν οι ποικίλες αποστάσεις αργού-χρόνου (slow-time) του κινούμενου στόχου από το ραντάρ δια μέσω μιας πολυωνυμικής συνάρτησης του slow-time  $\tau$ .

Για παράδειγμα, η απόσταση των κέντρων μάζας των στόχων από το ραντάρ σαν μία συνάρτηση του slow-time  $\tau$  μοντελοποιείται μέσω της:

$$R_0(\tau) = R_c + u_t \tau + \frac{1}{2} a_t \tau^2 + \frac{1}{6} j_t \tau^3 \quad (6.5)$$

όπου οι παράμετροι  $(u_t, a_t, j_t)$  είναι ταχύτητα, επιτάχυνση και ορμή αντίστοιχα.

## 6.2 Μοντέλο Αντίστροφου Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος (ISAR)

Έστω ένας κινούμενος στόχος με γραμμική και μη γραμμική κίνηση κατά τη λειτουργία του slow-time  $\tau$  (του ραντάρ). Επιλέγουμε την αρχική χωρική περιοχή να είναι το κέντρο του στόχου. Η απόσταση του κέντρου του στόχου από το ραντάρ σαν μια συνάρτηση του αργού-χρόνου (slow-time) του ραντάρ  $\tau$ , δίνεται από τη σχέση:

$$R_0(\tau) = \sqrt{[X_c - x_e(\tau)]^2 + [Y_c - y_e(\tau) - u_t \tau]^2} \quad (6.6)$$

όπου  $(0, u_t)$  και  $[x_e(\tau), y_e(\tau)]$  αντιπροσωπεύουν αντίστοιχα τις γραμμικές και μη γραμμικές συνιστώσες της κίνησης του στόχου και  $(X_c, Y_c)$  είναι οι αποκλίνουσες παράμετροι του στόχου.

Ο αργός-χρόνος (slow-time  $\tau$ ) εξαρτάται από την ακτινική απόσταση του κέντρου της περιοχής του στόχου από το ραντάρ και είναι γενικά μία πολυωνυμική συνάρτηση υψηλής τάξης του slow-time  $\tau$ .

Έστω  $p(t)$  το εκπεμπόμενο σήμα ραντάρ. Το σήμα αντήχησης από ένα ανακλαστήρα σε  $(x_n, y_n)$  πάνω στο κινούμενο στόχο του slow-time  $\tau$  είναι

$$s_n(t, \tau) = p \left[ t - \frac{2\sqrt{[X_c + x_n - x_e(\tau)]^2 + [Y_c + y_n(\tau) - u_t \tau]^2}}{c} \right] \quad (6.7)$$

Ο μετασχηματισμός Fourier του αντηχούντος σήματος σε σχέση με το γρήγορο χρόνο  $t$  (fast-time) του ραντάρ είναι:

$$\text{FFT} \propto S_n(\omega, \tau) \quad (6.8)$$

όπου  $k = \omega/c$  είναι κυματαριθμός.

### 6.3 Συμπύεση παλμού κατά τον αργό-χρόνο ή κίνηση επανόρθωσης

Η αναφορά υπογραφής ISAR από το κέντρο του στόχου μέσα στο  $(\omega, \tau)$  πεδίο είναι:

$$s_0(\omega, \tau) = \exp[-j2k \sqrt{[X_c + x_n - x_e(\tau)]^2 + [Y_c + y_n(\tau) - u_t \tau]^2}] \quad (6.9)$$

$$= \exp[-j2kR_0(\tau)]$$

Πολλαπλασιάζοντας την υπογραφή ISAR του στόχου σε  $(x_n, y_n)$  με το συζυγή μιγαδικό της παραπάνω συνάρτησης φάσης αναφοράς, προκύπτει:

$$S_{nc}(\omega, \tau) = s_n(\omega, \tau) s_0^*(\omega, \tau)$$

$$= \exp[-j2k \sqrt{[X_c + x_n - x_e(\tau)]^2 + [Y_c + y_n(\tau) - u_t \tau]^2} + 2jkR_0(\tau)] \quad (6.10)$$

Το παραπάνω σήμα ονομάζεται συμπιεσμένο σήμα SAR (ISAR) κατά τον αργό-χρόνο (slow-time). Στη βιβλιογραφία του ISAR το σήμα αυτό αναφέρεται και σαν σήμα κίνησης επανόρθωσης Inverse SAR.

### 6.4 Επεξεργασία πολικού τύπου

Η βασική ιδέα σε μία συμβατική απεικόνιση ISAR είναι η ακόλουθη: Υπό την προϋπόθεση ότι το ιστορικό της ακτινικής κίνησης του slow-time ενός στόχου που είναι μέσα στο πεδίο (σε αυτή την περίπτωση η ακτινική κίνηση του ανακλαστήρα στην περιοχή του κέντρου του στόχου,  $R_0(\tau)$ ), και οι συνιστώσες της μη γραμμικής κίνησης  $x_e(t)$  και  $y_e(t)$  είναι πολύ μικρότερες από  $R_c = \sqrt{X_c^2 + Y_c^2}$ , τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί η διαδικασία προσέγγισης της επεξεργασίας πολικής μορφής και να προκύψει

$$S_{nc}(\omega, \tau) = \exp[-j2k \cos\theta_0(\tau) x_n - j2k \sin\theta_0(\tau) y_n] \quad (6.11)$$

όπου

$$\theta_0(\tau) = \arctan\left(\frac{Y_c - u_t \tau}{X_c}\right)$$

είναι οι μεταβολές των πλευρικών γωνιών του ραντάρ κατά τον αργό-χρόνο (slow-time) ως προς το κέντρο του στόχου με  $x_e(\tau) = y_e(\tau) = 0$ .



Λαμβάνοντας υπόψη την συνεισφορά από όλους τους ανακλαστήρες πάνω στους στόχους μπορεί κανείς να δει ότι η κίνηση επανόρθωσης (slow-time συμπίεση) σήματος ISAR μέσα στο πεδίο (domain)  $(\omega, \tau)$  παρέχει τα δείγματα του δυσδιάστατου μετασχηματισμού Fourier της συνάρτησης ανακλαστικότητας του στόχου σε

$$\begin{aligned} k_x &= 2k \cos\theta_0(\tau) \\ k_y &= 2k \sin\theta_0(\tau) \end{aligned} \quad (6.12)$$

Μεταβολές των  $(\omega, \tau)$  παρέχουν μια κάλυψη κωνικής-μορφής (περίπου πολική) για την ανακατασκευή της συνάρτησης του στόχου μέσα στο χωρικό πεδίο συχνότητας.

Πιο συμβατικοί επεξεργαστές ISAR βασίζονται πάνω στο διαχωρισμό της δυσδιάστατης πολικής μορφής επεξεργασίας σήματος οι οποίες με τη σειρά τους βασίζονται πάνω σε ελάχιστες προσεγγίσεις κατά bandwidth (εύρος ζώνης) και beamwidth (εύρος δέσμης). Με την ελάχιστη προσέγγιση κατά το εύρος δέσμης προκύπτει:

$$s_{nc}(\omega, \tau) \approx \exp\left(-j2k \frac{X_c}{R_c} x_n - j2k \frac{Y_c - u_t(\tau)}{R_c} y_n\right) \quad (6.13)$$

Λαμβάνοντας υπόψη την συνεισφορά από όλους τους ανακλαστήρες πάνω στους στόχους μπορεί κανείς να δει ότι η κίνηση επανόρθωσης σήματος ISAR μέσα στο πεδίο (domain)  $(\omega, \tau)$  παρέχει τα δείγματα του δυσδιάστατου μετασχηματισμού Fourier της συνάρτησης ανακλαστικότητας του στόχου σε:

$$\begin{aligned} k_x &= 2k \frac{X_c}{R_c} \\ k_y &= 2k \left( \frac{Y_c - u_t \tau}{R_c} \right) \end{aligned} \quad (6.14)$$

Αυτός ο μετασχηματισμός από το μετρημένο πεδίο  $(\omega, \tau)$  μέσα στο πεδίο της χωρικής συχνότητας του στόχου  $(k_x, k_y)$  παρέχει επίσης μια κάλυψη κωνικής μορφής.

Η παραπάνω ανακατασκευή είναι όμοια με τη διαδικασία ελάχιστου εύρους δέσμης (beamwidth) πολικής μορφής SAR.

Τώρα με την προσέγγιση ελάχιστου εύρους ζώνης (bandwidth) προκύπτει:

$$k_x = 2k \frac{X_c}{R_c} \quad (6.15)$$

$$k_y = 2k_c \left( \frac{Y_c - u_t \tau}{R_c} \right)$$

όπου παρέχει το διαχωρισμό των δύο διαστάσεων επεξεργασίας για τον σχηματισμό εικόνας.

Το αποτέλεσμα του χωρικού πεδίου ανακατασκευής πιθανόν περιέχει ένα σεβαστό ποσό πληροφορίας ορισμένου μεγέθους για την θέση των διαφόρων ανακλαστήρων πάνω στο στόχο. Ωστόσο, η πληροφορία της φάσης στην ανασυντιθέμενη εικόνα είναι υποβαθμισμένη εξαιτίας της προσέγγισης που χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση της κίνησης του στόχου. Το μέγεθος των υποβαθμισμένων φάσεων εξαρτάται από τις τιμές των  $(x_n, y_n)$ : σε  $(x_n, y_n) = (0, 0)$ . Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν υπάρχει φάση μετάπτωσης, το σφάλμα της φάσης αυξάνει όσο αυξάνει και η  $(x_n, y_n)$ .

Αυτός ο τύπος της επεξεργασίας ISAR έχει προταθεί για απεικόνιση αεροσκάφους και ταυτοποίηση από συναφείς εικόνες ISAR. Δυστυχώς η παραπάνω προσέγγιση μεταβάλλει τη φάση υπογραφής της εικόνας ISAR ενός στόχου. Έχει επίσης προταθεί ότι τα σφάλματα φάσης μπορεί να μειωθούν με την επανάκτηση της ελάχιστης κίνησης. Ωστόσο ο καλύτερος αλγόριθμος κίνησης επανόρθωσης ISAR μπορεί να εξασφαλίσει ότι το σφάλμα φάσεως (εξαιτίας της μη γραμμικής κίνησης) είναι μηδενικό στα  $(x_n, y_n) = (0, 0)$  όπου είναι το κέντρο του στόχου.

Μια από τις χειρότερες παρανοήσεις είναι ότι πολλές φορές δε δίνεται ιδιαίτερη σημασία στη γωνία  $\theta_c$  του στόχου. Στην πραγματικότητα η πολική μορφή επεξεργασίας του περιορισμένου εύρους ζώνης και του στενού εύρους δέσμης σε πλευρές ( $Y_c = \theta_c = 0$  και  $X_c = R_c$ ) χρησιμοποιούνται για να αποδώσουν την κάλυψη ISAR της χωρικής συχνότητας, η οποία είναι:

$$k_x = 2k$$

$$k_y = \left( \frac{-2k_c u_t \tau}{X_c} \right) \quad (6.16)$$

Αυτή η προσέγγιση καταλήγει σε χωρικό θόλωμα και παραμόρφωση της εικόνας του στόχου καθώς χάνεται η συνάφεια της πληροφορίας μέσα στην ανακατασκευασμένη εικόνα ISAR.

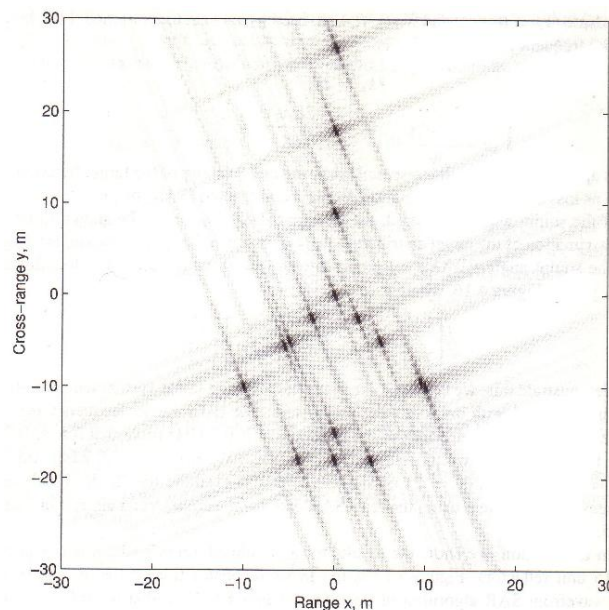
Εάν η γωνία απόκλισης (squint angle) αγνοηθεί, η προκύπτουσα εικόνα ISAR μπορεί να αποδειχθεί ότι είναι μία προσέγγιση της κατανομής του στόχου με μία συνάρτηση δύο μεταβλητών  $f(x,y)$ , όταν το χωρικό πεδίο περιστρέφεται γύρω από τη γωνία απόκλισης  $\theta_c$ . Αυτή η περιστροφή ή οι συν/νες της χωρικής γωνίας απόκλισης προσδιορίζονται από τις  $(\chi_{\theta_c}, y_{\theta_c})$  στην εικόνα 6.1 όπου:

$$\begin{bmatrix} \chi_{\theta_c} \\ y_{\theta_c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_c & \sin \theta_c \\ -\sin \theta_c & \cos \theta_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (6.17)$$

### 6.5 Εφαρμογή σε εμπορικό αεροσκάφος τύπου Boeing 737 – 400 & 727

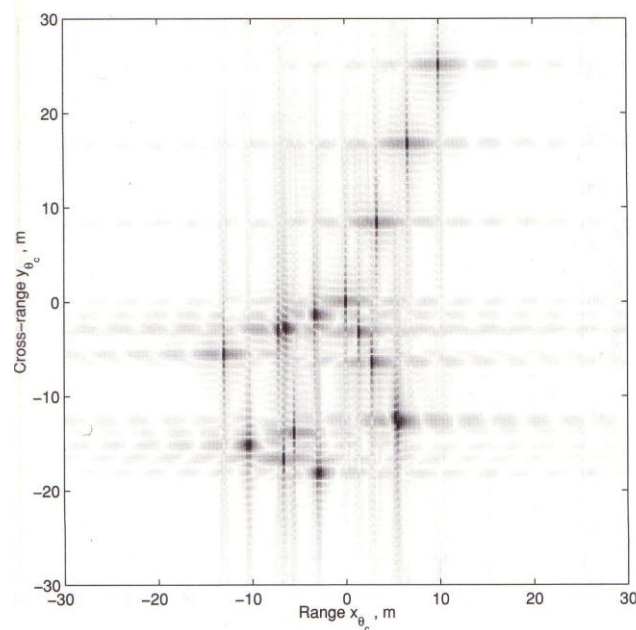
Προκειμένου να αποδειχθούν τα παραπάνω, θεωρούμε ένα ρεαλιστικό σύστημα ISAR περιορισμένου εύρους με τις ακόλουθες παραμέτρους. Η φέρουσα συχνότητα του ραντάρ είναι 9.25GHz, η βασική μπάντα εύρους ζώνης του σήματος ραντάρ είναι 0.5 GHz,  $(X_c, Y_c)=(5.23, 2.08)$ km, ή  $R_c=5.63$  km και  $\theta_c=21.65^\circ$ . Θα εξετάσουμε σήματα ISAR και εικόνες για αυτό το σύστημα χρησιμοποιώντας πραγματικά δεδομένα ISAR από ένα εμπορικό αεροσκάφος τύπου Boeing 737 - 400.

Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για μια προσομοίωση αεροσκάφους που αποτελείται από 15 μονάδες ανακλαστήρων. Η εικόνα 6.2 είναι μία αναπαράσταση ISAR αεροσκαφών που χρησιμοποιούν αλγόριθμο μετώπου κύματος SAR.

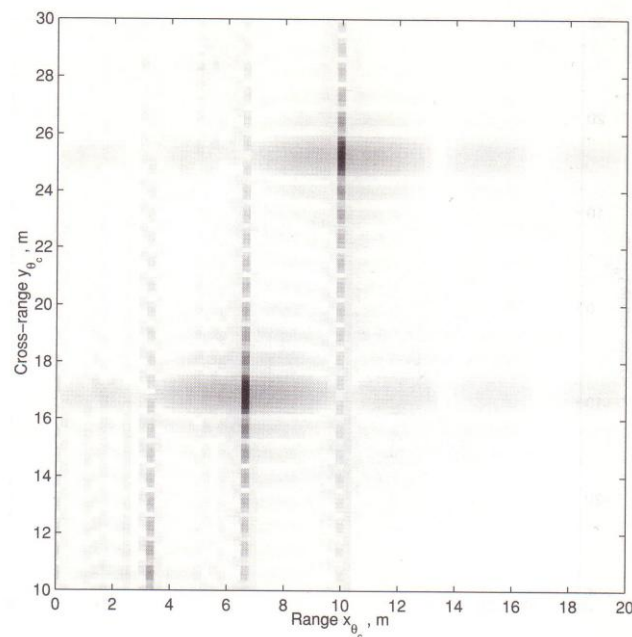


**Εικόνα 6.2. Αναπαράσταση ISAR χρησιμοποιώντας αλγόριθμο μετώπου κύματος SAR**

Η εικόνα 6.3 (α) είναι μία αναπαράσταση κύματος μετώπου ISAR όταν το χωρικό πεδίο περιστρέφεται με γωνία απόκλισης  $\theta_c=21.65^\circ$ . Η εικόνα 6.3 (β) είναι ένα κοντινό πλάνο δυο εκ των ανακλαστήρων μέσα στην εικόνα ISAR. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι συναρτήσεις διάχυσης των σημείων σε σχήμα σταυρού εμφανίζονται απευθείας στις εικόνες 6.3 (α) και 6.3 (β).

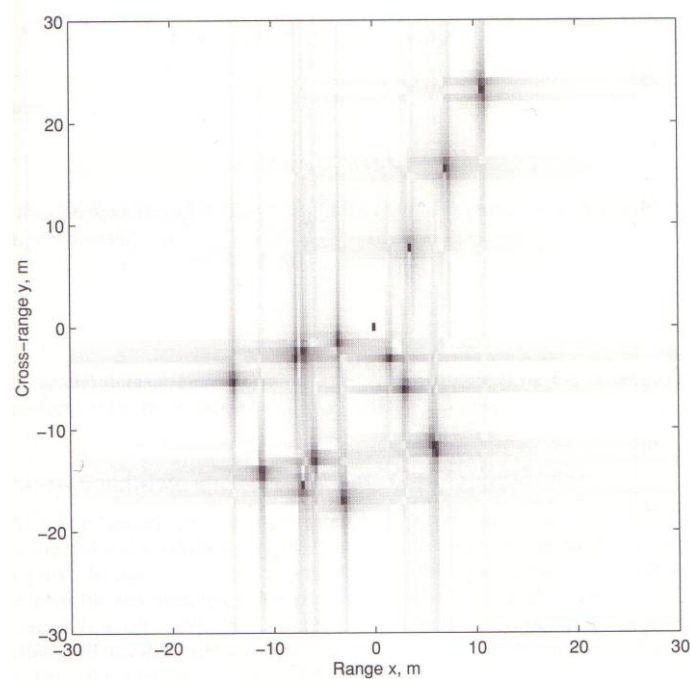


**Εικόνα 6.3 (α) Αναπαράσταση ISAR σε αποκλίνων χωρικό πεδίο χρησιμοποιώντας αλγόριθμο μετώπου κύματος SAR**

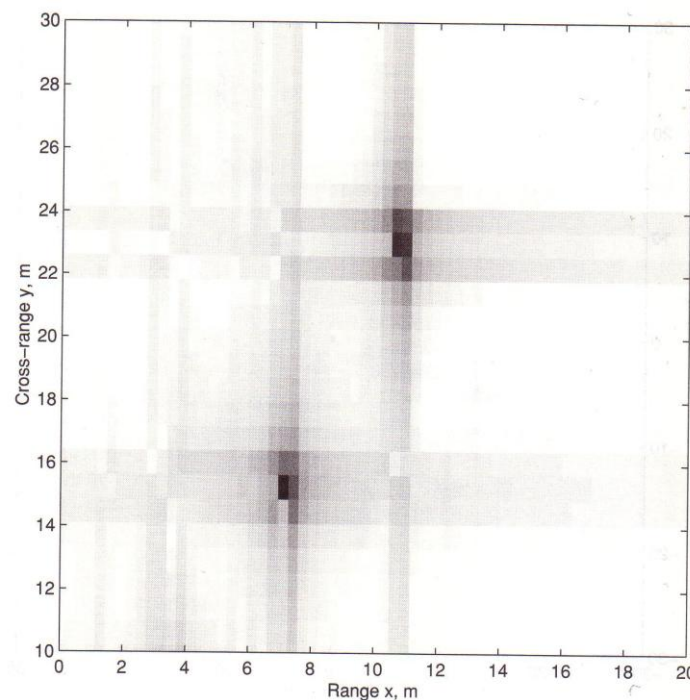


**Εικόνα 6.3 (β) Κοντινό πλάνο των δύο ανακλαστήρων**

Η εικόνα 6.4 (α) είναι μια αναπαράσταση συμβατικού ISAR που χρησιμοποιεί προσεγγίσεις περιορισμένου (στενού) εύρους ζώνης και εύρους δέσμης σε επεξεργασία πολικής μορφής. Η εικόνα 6.4 (β) είναι ένα κοντινό πλάνο των δύο στόχων που εμφανίζονται στην εικόνα 6.3 (β). Αξίζει να σημειωθεί η μετατόπιση και οι κηλίδες που παρουσιάζουν οι δύο στόχοι στην εικόνα 6.4 (β).

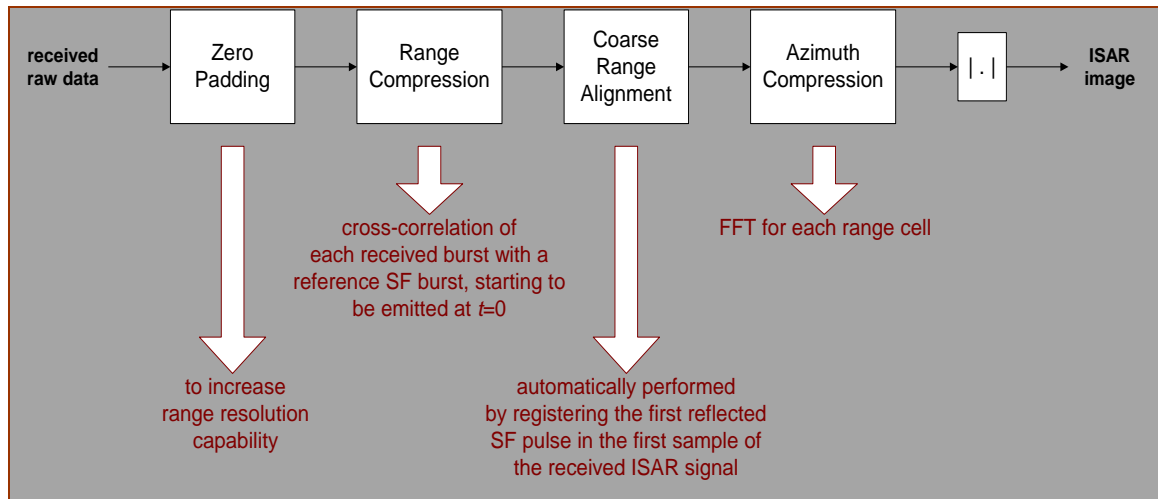


**Εικόνα 6.4 (α) Αναπαράσταση συμβατικού ISAR χρησιμοποιώντας προσεγγίσεις περιορισμένου εύρους ζώνης και εύρους δέσμης σε επεξεργασία πολικής μορφής**



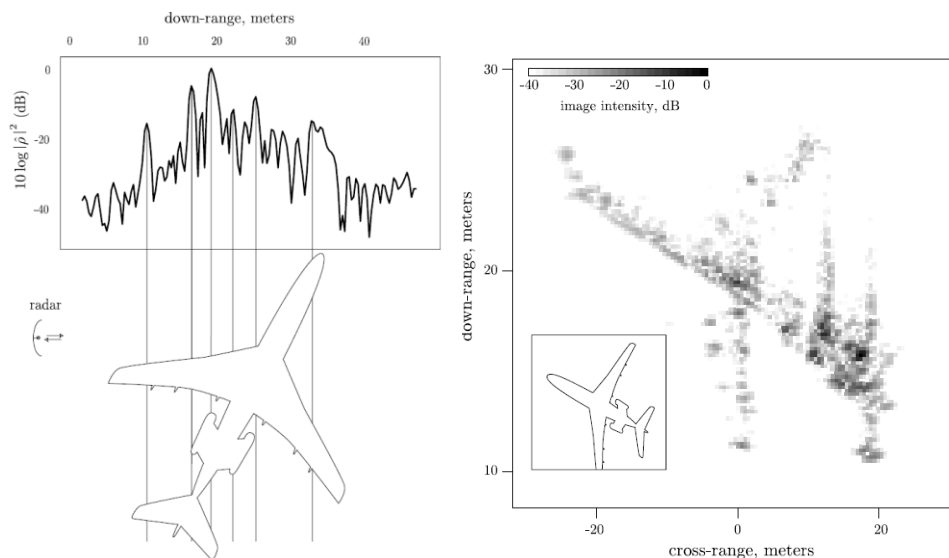
**Εικόνα 6.4 (β) Κοντινό πλάνο των δύο ανακλαστήρων**

Ειδικότερα, παραθέτουμε τον αλγόριθμο δημιουργίας 2D εικόνας ISAR.

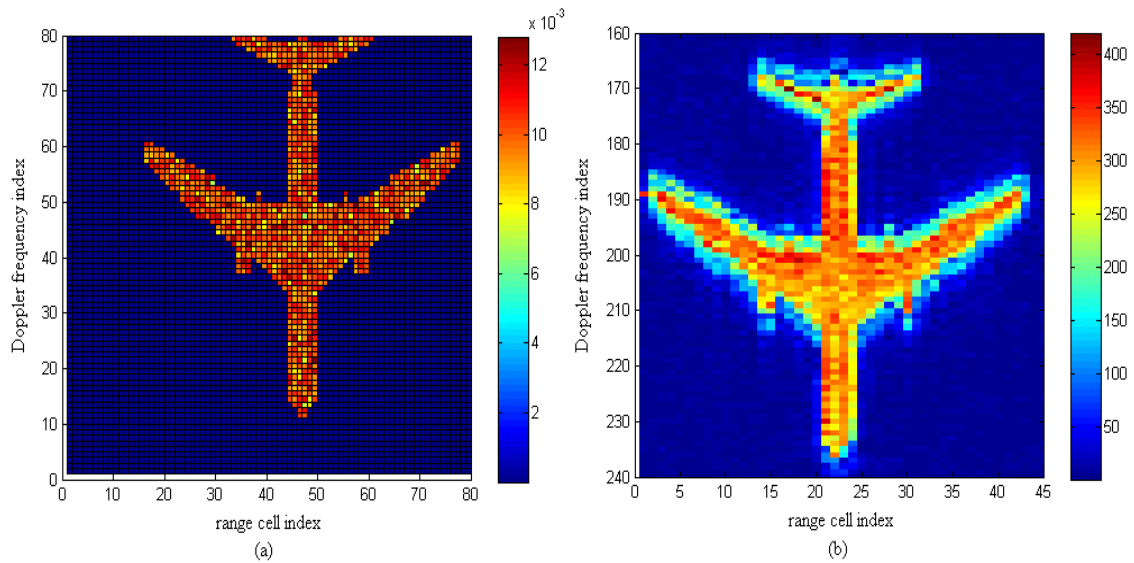


**Εικόνα 6.5 Διαδικασία ανασυγκρότησης 2D απεικόνισης ISAR**

Ακολουθώντας τον παραπάνω αλγόριθμο, χρησιμοποιώντας τα αρχικά δεδομένα των αεροσκαφών τύπου Boeing 737 – 400 και 727, προκειμένου να υλοποιηθούν όλες οι διαδικασίες μέχρι και τη συμπίεση κατά αζιμούθιο, εκτελέστηκαν λογισμικά των εταιρειών User Systems Enterprises, Inc. και Texas Instruments Incorporated. Αναπτύχθηκε επιπλέον λογισμικό σε περιβάλλον MATLAB, προκειμένου να υλοποιηθούν όλοι οι αλγόριθμοι Autofocus for SAR RADAR στηριζόμενοι σε αντίστοιχο λογισμικό που αναπτύχθηκε σε γλώσσα Fortran, από την Texas Instruments για την TIMPR System με προτυποποίηση κατά NATO/AGARD. Το αποτέλεσμα των εικόνων ISAR είναι η ταυτοποίηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του αεροσκάφους με ιδιαίτερα μεγάλη ακρίβεια (εικόνες 6.6 & 6.7).



**Εικόνα 6.6 Παράδειγμα απεικόνισης ISAR Boeing 727**



**Εικόνα 6.7 Γεωμετρική προσομοίωση ενός Boeing 737-400**  
**(α) Προσομοίωση μεταβλητών τιμών έντασης σκεδαστών και**  
**(β) Ανακατασκευή απεικόνισης ISAR**

## 6.6 Πολυστατικό Μονοπαλμικό ISAR

Το μονοπαλμικό SAR κεκλιμένου επιπέδου χρησιμεύει στην εξαγωγή 3διάστατων πληροφοριών που αφορούν κινούμενο στόχο στα προβλήματα ISAR. Ένα παράδειγμα αφορά το μονοπαλμικό SAR κεκλιμένου επιπέδου στην αυτόματη προσγείωση του αεροσκάφους (AAL-Automatic Aircraft Landing). Ένα σύστημα αυτόματης προσγείωσης αεροσκάφους παρέχει δεδομένα που αφορούν τον προσανατολισμό του αεροσκάφους σε ένα διάδρομο προσγείωσης. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τον πιλότο ή κάποιον χειριστή (ελεγκτή εναέριας κυκλοφορίας) προκειμένου να αποφασίσει αν το αεροσκάφος μπορεί να προσγειωθεί ασφαλώς.

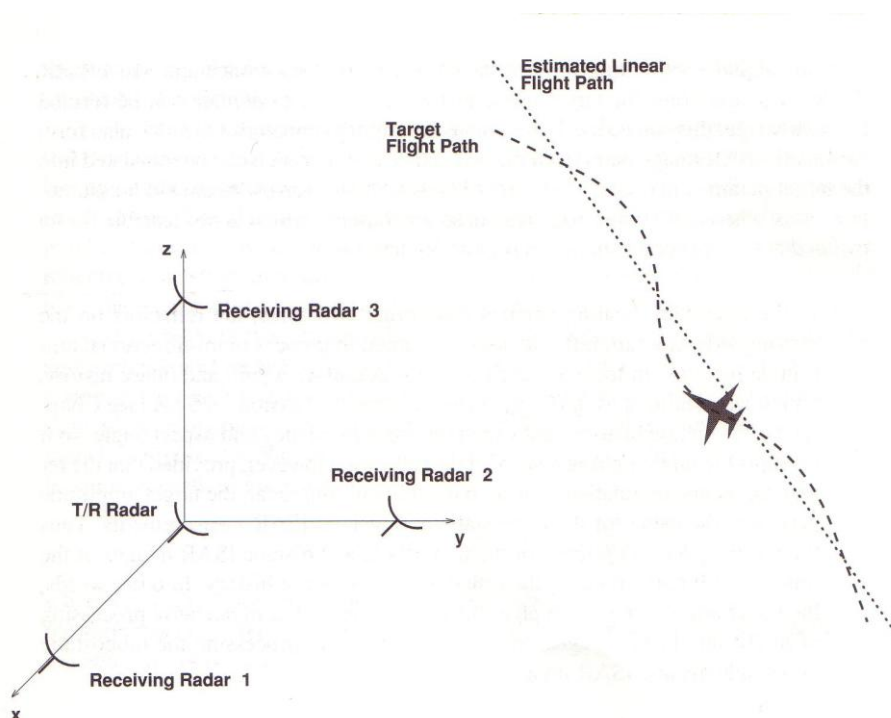
Το InSAR (Interferometric SAR - Συμβολομετρικό SAR) με ένα πομπό και 2 δέκτες σε κεκλιμένο επίπεδο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό της παραμικρής γωνιακής κλίσεως ενός αεροσκάφους (roll, pitch) κατά την προσγείωση. Η εικόνα ISAR ενός αεροσκάφους, σε αντίθεση με την εικόνα SAR μιας περιοχής, δεν εμφανίζει συμπαγή δομή. Η εικόνα ISAR μάλιστα ενός αεροσκάφους συντίθεται από ισχυρούς ανακλαστήρες (πάνω από το όριο του ήχου) καθώς και από μερικούς γωνιακούς ανακλαστήρες στην ουρά, στην άτρακτο και στα φτερά του αεροσκάφους.

Έτσι, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθούν οι μέθοδοι ξεδίπλωσης της φάσης (phase unwrapping) που χρησιμοποιούνται στην απεικόνιση του εδάφους με χρήση Συμβολομετρίας SAR (InSAR). Παρόλα αυτά, το InSAR περιέχει αρκετή πληροφορία φάσεως προκειμένου να προειδοποιήσει το χειριστή ενός AAL συστήματος στην περίπτωση μιας μη επιθυμητής κλίσης του αεροσκάφους κατά την προσγείωση.

## 6.7 Πολυστατικό Μοντέλο ISAR

Η προαναφερθείσα προσέγγιση του AAL μπορεί επίσης να επεκταθεί στο γενικότερο πρόβλημα των 3διαστάσεων απεικονίσεων ISAR και εντοπισμού με μονό πομπό και πολλαπλούς δέκτες. Το παραπάνω σύστημα ονομάζεται πολυστατικό ISAR (εικόνα 6.8). Ένα τέτοιο σύστημα ISAR μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επανάκτηση 3διαστάσεων πληροφοριών που αφορούν χωρικές παραμέτρους και παραμέτρους κίνησης ενός αεροσκάφους. Μερικές από τις εφαρμογές αυτού του συστήματος είναι:

- Αυτόματος πιλότος προσγείωσης αεροσκάφους σε πολιτικά και στρατιωτικά αεροδρόμια
- Υψηλής ανάλυση 3διάστατος έλεγχος εναέριας κυκλοφορίας
- Μελέτη των δονήσεων ποικίλων δομών ενός αεροσκάφους για τον εντοπισμό σχεδιαστικών ή δομικών σφαλμάτων σε νέα και παλαιά αεροσκάφη και τον σχεδιασμό ασφαλέστερων.



Εικόνα 6.8 Γεωμετρία Συστήματος Απεικόνισης σε Πολυστατικό ISAR

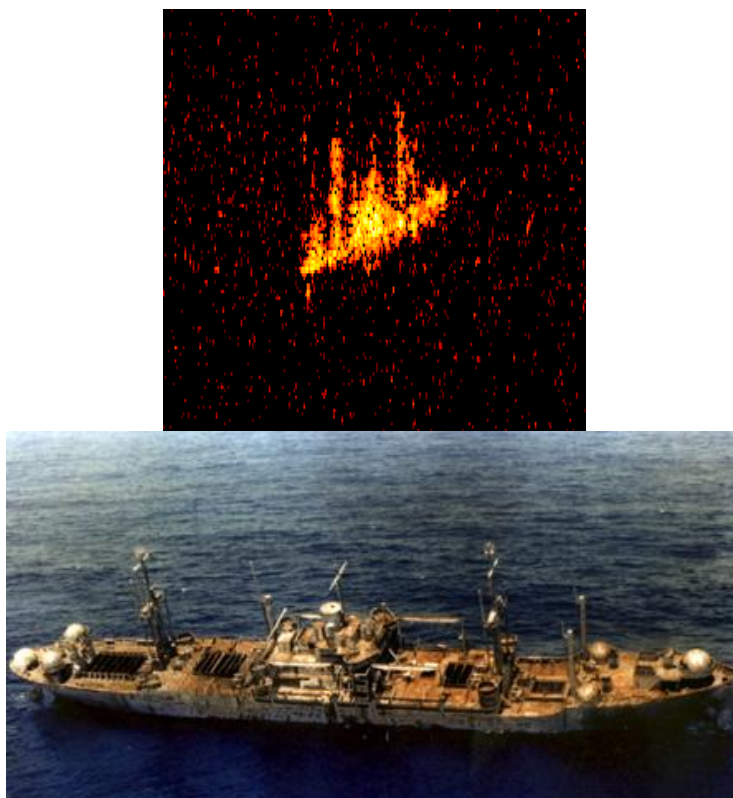


## 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Με την αναπαράσταση 2D εικόνων ISAR και τη χρήση του λογισμικού που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον MATLAB (προκειμένου να γίνει βελτιστοποίηση της δυναμικής αυτοεστίασης του SAR – ISAR Dynamic Autofocus processing), οι διαφορετικοί τύποι αεροσκαφών μπορούν να αναγνωριστούν εύκολα μέσα από τις αντιπαραβαλλόμενες ISAR εικόνες, καθώς οι 2D απεικονίσεις ISAR των στόχων – ανακλαστήρων πάνω στα αεροσκάφη, μπορούν να ανακατασκευαστούν επαρκώς μέσα από την προτεινόμενη μοντελοποίηση της επιστροφής σήματος ISAR.

Πρέπει να τονιστεί ότι με την τεχνική ISAR παρέχεται λεπτομερέστατη πληροφορία για τη γεωμετρία του στόχου καθώς επίσης οι 2D-εικόνες ISAR είναι κατάλληλες για λεπτομερή αναγνώριση και καταγραφή κινούμενων αντικειμένων με πολύ μεγάλες ταχύτητες, ανεξαρτήτως καιρικών συνθηκών. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα της μεθόδου απαιτεί μεγάλο χρόνο παρατήρησης του κινούμενου αντικειμένου και εξαρτάται από την κίνηση του στόχου. Το Αντίστροφο SAR (ISAR) χρησιμοποιεί την αρκετά σύνθετη διαδικασία της κίνησης επανόρθωσης.

Η τεχνολογία ISAR εφαρμόζεται ιδιαίτερα σε τεχνικές ταυτοποίησης και λεπτομερούς καταγραφής της «σιλουέτας» πλοίων (εικόνα 7.1) καθώς και κινούμενων οχημάτων και αεροσκαφών.



**Εικόνα 7.1 Οπτική εικόνα πλοίου και απεικόνιση ISAR (Η εικόνα παραχωρήθηκε από το US Navy)**

Η ιδιαίτερη τεχνική που χρησιμοποιεί το Αντίστροφο SAR δίνει τη δυνατότητα για περαιτέρω αξιοποίησή του σε πλήθος γεωδαιτικών εφαρμογών αλλά και συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης φυσικών καταστροφών.

Ειδικότερα, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την καταγραφή και παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο της δυναμικής συμπεριφοράς έργων υποδομής (ταλαντώσεις γεφυρών, έλεγχος σηράγγων κ.ά.), κατολισθήσεων καθώς επίσης και στον προσδιορισμό της μέσης στάθμης της θάλασσας με ιδιαίτερη έμφαση την έγκαιρη προειδοποίηση για τσουνάμι και άλλα ακραία φυσικά φαινόμενα.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

### **Ελληνική Βιβλιογραφία**

Ι. Κώτσης, Β. Μασσίνας, Δ. Παραδείσης, “Σημειώσεις Συμβολομετρίας με RADAR Συνθετικού Ανοίγματος”, ΕΜΠ, 2008.

Α.Μ. Αγατζά – Μπαλοδήμου, “Θεωρία Σφαλμάτων και Συνορθώσεις I & II”, ΕΜΠ, 2005.

Δ. Παραδείσης, “Σημειώσεις Δορυφορικής Γεωδαισίας”, ΕΜΠ, 2000.

Β. Μασσίνας, “Συμβολομετρία RADAR Συνθετικού Ανοίγματος”, Διπλωματική Εργασία (ΕΜΠ-ΤΑΤΜ), 1999.

### **Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία**

R. Kedzierawski, W. Czarnecki, C. Lesnik, J.Le Caillec, “MATLAB/simulink applications for SAR system design with FPGA”, Mil. Univ. of Technol., Warsaw, Poland Radar Symposium (IRS), 2011 Proceedings International, Print ISBN: 978-1-4577-0138-2, 7-9 Sept. 2011

LeRoy A. Gorham and Linda J. Moore, “SAR image formation toolbox for MATLAB” Air Force Research Laboratory, Sensors Directorate, 2241 Avionics Circle, Bldg 620, WPAFB, OH 45433-7321, 2010

N. Agrawal, K. Venugopalan, “SAR polar format implementation with MATLAB”, Deptt. of ECE, MPUAT, Udaipur, Recent Advances in Microwave Theory and Applications, 2008, MICROWAVE 2008, International Conference, Print ISBN: 978-1-4244-2690-4, 21-24 Nov. 2008

A.Karakassiliotis, G. Boultadakis, G. Kalognomos, B. A. Massinas, P. Frangos “Advanced Signal Processing Techniques for Inverse Synthetic Aperture RADAR (ISAR) Imaging”, International Technical Laser Workshop on SLR Tracking of GNSS Constellations, Metsovo, Greece, 14 – 19 September 2009.

A. Doerry, "Autofocus correction of SAR images exhibiting excessive residual migration", SPIE 2005 Defense & Security Symposium, Radar Sensor Technology X, Vol. 5788, Orlando FL, 28 March - 1 April 2005.

James A. Given, William R. Schmidt, "Generalized ISAR – Part I: An Optimal Method for Imaging Large Naval Vessels", IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 14, No. 11, pp. 1783-1791, November 2005.

James A. Given, William R. Schmidt, "Generalized ISAR – Part II: Interferometric Techniques for Three-Dimensional Location of Scatterers", IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 14, No. 11, pp. 1792-1797, November 2005.

Tang Li-bo, Li Dao-jing, Hong Wen, Cao Fang, "High Resolution SAR Imaging of Moving Ships", Proceedings of the 2005 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '05, Vol. 5, pp. 3329- 3332, 25-29 July 2005.

Armin W. Doerry, "Autofocus Correction of Excessive Migration in Synthetic Aperture Radar Images", Sandia Report SAND2004-4770, September 2004.

D. Pastina, A. Montanari, A. Aprile, "Motion Estimation and Optimum Time Selection for Ship ISAR Imaging", Proceedings of the 2003 IEEE Radar Conference, pp. 7-14, 5-8 May 2003.

Tristrom Cooke, "Ship 3D Model Estimation from an ISAR Image Sequence", Proceedings of the International Radar Conference, 2003, pp. 36- 41, 3-5 Sept. 2003.

D. Gibbins, J. Symons, B. Haywood, "Ship Motion Estimation from ISAR Data", Fifth International Symposium on Signal Processing and its Applications, ISSPA '99, pp. 333-336, Brisbane, Australia, 22-25 August, 1999.

Kenneth A. Melendez, John R. Bennett, "ISAR Target Parameter Estimation with Application for Automatic Target Recognition", SPIE Conference on Radar Processing, Technology, and Applications III, Vol. 3462, pp. 2-13, San Diego, California, USA, July 1998.

Victor C. Chen, "Time-Frequency Based ISAR Image Formation Technique", Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery IV, Proceedings of the SPIE, Vol. 3070, pp. 43-54, July 1997.

S. Musman, D. Kerr, C. Bachmann, "Automatic Recognition of ISAR Ship Images", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 32, No. 4, pp. 1392-1404, October 1996.

Victor C. Chen, "Adaptive Time-Frequency ISAR Processing", Radar Processing, Technology, and Applications, Proceedings of the SPIE, Vol. 2845, pp. 133-140, November 1996.

Dietrich Rapsilber, "Air Borne ISAR Processor for Ship Target Imaging", European Conference on Synthetic Aperture Radar, EUSAR'96, pp. 435-438, Konigswinter, Germany, 26-28 March 1996.

Carl C. Aleksoff, Nicola S. Subotic, "Opto-electronic ISAR processing", Radar/Ladar Processing and Applications, Proceedings of SPIE, Vol. 2562, pp. 56-63, August 1995.

D. R. Wehner, *High-Resolution Radar*, second edition, ISBN-10: 0890067279, Artech House, 1994.

Atul Jain, Indu Patel, "SAR/ISAR Imaging of a Nonuniformly Rotating Target", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 28, No. 1, pp. 317-321, January 1992.

J. Curlander (California Institute of Technology, Jet Propulsion Laboratory), R. McDonough (John Hopkins University), "Synthetic Aperture RADAR, Systems and Signal Processing", John Wiley and Sons, inc., 1992

Keith D. Ward, "Radar Imaging of Ships at Sea", IEE Colloquium on Synthetic Aperture Radar, pp. 7/1-7/5, London, UK, 29 Nov 1989.

"Ship Motion and Attitude", US DOD Interface Standard, Interface Standard for Shipboard Systems, DOD-STD-1399 (NAVY), Section 301A, 21 July 1986.