



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Μαθηματικές και Ηλεκτρομαγνητικές Μέθοδοι για Συστήματα
Ραντάρ Συνθετικής Απεικόνισης (SAR)

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ANNAΣ ΜΑΛΑΜΟΥ

Επιβλέπων: Φράγκος Παναγιώτης
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούνιος 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Μαθηματικές και Ηλεκτρομαγνητικές Μέθοδοι για Συστήματα
Ραντάρ Συνθετικής Απεικόνισης (SAR)

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ
ΑΝΝΑΣ ΜΑΛΑΜΟΥ

Συμβουλευτική Επιτροπή: Π. Φράγκος (επιβλέπων)
Γ. Φικιώρης
Α. Παναγόπουλος

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 30^η Ιουνίου 2017.

Π. Φράγκος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Γ. Φικιώρης
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π

Α. Παναγόπουλος
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Π. Στεφανέας
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Δ. Φραντζεσκάκης
Καθηγητής Ε.Κ.Π.Α.

Κ. Νικήτα
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Α.Γ. Σταφυλοπάτης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2017

.....
Άννα Μαλάμου

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

Διπλωματούχος Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Μικροσυστήματα και Νανοδιατάξεις» Ε.Μ.Π.

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

Copyright © Άννα Μαλάμου, 2017.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Αφιερώνεται
Στην οικογένειά μου

Περίληψη

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή, αναπτύχθηκε αρχικά η μαθηματική θεωρία και η μεθοδολογία για τη δημιουργία δεδομένων οπισθοσκέδασης ραντάρ συνθετικής απεικόνισης (SAR). Προσομοιώθηκε σύμφωνα με τη SAR γεωμετρία ένα μοντέλο πλοίου που αποτελείται από σημειακούς σκεδαστές. Κατόπιν, εφαρμόστηκε ο προτεινόμενος αλγόριθμος αυτοεστίασης του διαχωριζόμενου συμφασικού διαστήματος επεξεργασίας (CPI-split autofocusing) σε δύο διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης καθώς επίσης και σε πραγματικά δεδομένα από ραντάρ SAR. Τα σενάρια προσομοίωσης και η εφαρμογή στα πραγματικά δεδομένα αποδεικνύουν την προσαρμοστικότητα της διαδικασίας αυτοεστίασης σε διαφορετικές περιπτώσεις και σενάρια απεικόνισης SAR εικόνων. Επιπρόσθετα παρουσιάστηκε μία νέα προσέγγιση για την κατηγοριοποίηση διαφόρων κατηγοριών εδαφών που συναντώνται στις εικόνες ραντάρ συνθετικής απεικόνισης (SAR). Η προτεινόμενη μέθοδος κατηγοριοποίησης εφαρμόζει τον αλγόριθμο της τροποποιημένης fractal υπογραφής (Modified Fractal Signature, MFS), ο οποίος βασίζεται στον υπολογισμό των καμπύλων της fractal διάστασης (fractal dimension) και κατόπιν στη σύγκρισή τους για διάφορες υπο-εικόνες που προέρχονται από πραγματικές εικόνες SAR. Τα αποτελέσματα του πίνακα κατηγοριοποίησης που προέκυψε καταδεικνύουν σωστά αποτελέσματα κατηγοριοποίησης βασισμένα σε πραγματικές εικόνες SAR. Τέλος εξετάστηκε μία νέα μέθοδος για τον χαρακτηρισμό της τραχύτητας fractal επιφανειών από οπισθοσκεδαζόμενα δεδομένα SAR. Από τα διαγράμματα του συντελεστή οπισθοσκέδασης ως προς τον κυματαριθμό (συχνότητα) του προσπίπτοντος ηλεκτρομαγνητικού κύματος, προκύπτει ότι καθώς αυξάνει η τραχύτητα της fractal επιφάνειας, τότε η παρατηρούμενη κλίση μεταξύ του κεντρικού λοβού και του πρώτου πλευρικού λοβού επίσης αυξάνεται.

Λέξεις-κλειδιά: Ραντάρ Συνθετικής Απεικόνισης (SAR), Αλγόριθμος Αυτοεστίασης, Μέθοδος Τροποποιημένης Fractal Υπογραφής (MFS), Κατηγοριοποίηση Εικόνων SAR, Αναγνώριση Προτύπων, Fractal Επιφάνεια, Προσέγγιση Kirchoff, Σκέδαση Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων

Abstract

In the dissertation a new mathematical theory and methodology for generating SAR synthetic backscattered data is developed. A two-dimensional and a three-dimensional target (ship) implementations are included in the simulations for both cases of airborne and spaceborne SAR. Furthermore, the application of an autofocusing algorithm is presented in two simulation scenarios as well as for the case of real field radar data. The results prove the adaptability of the autofocusing algorithm to different SAR imaging scenarios. Moreover, the Modified Fractal Signature (MFS) method is applied to real Synthetic Aperture Radar (SAR) images for classification purposes of different terrain types. It is based on the calculation of the corresponding Fractal Area curve and Fractal Dimension curve of each image. The classification matrix results depict that the proposed classification technique for five different terrain types (urban, suburban, rural, mountain and sea) is correct. In addition, the scattering of electromagnetic (EM) waves, emitted by a monostatic radar, from rough fractal surfaces is examined by using the Kirchhoff approximation. More specifically, the scattering coefficient of the backscattered signal is calculated for a number of radar frequencies and for different values of the surface fractal dimension. In the diagrams of the backscattering coefficient as a function of the wavenumber (frequency) of the incident EM waves, it is found that the slope between the main lobe and the first sidelobe increases as the roughness of the surface also increases (characterization of rough fractal surfaces).

Keywords: Synthetic Aperture Radar (SAR) Imaging, Autofocusing, Post Processing Algorithm, SAR Image Classification, Modified Fractal Signature (MFS) Method, Pattern Recognition, Fractal Surface, Kirchhoff Approximation, Scattering of Electromagnetic Waves.

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Παναγιώτη Φράγκο κατ' αρχήν για την ευκαιρία που μου έδωσε αναθέτοντας μου το θέμα της Διδακτορικής Διατριβής και ειδικότερα για την ανεκτίμητη και ουσιαστική καθοδήγηση καθώς επίσης και για τη συνεχή υποστήριξη που μου προσέφερε σε όλη τη διάρκεια της διατριβής μέχρι την ολοκλήρωσή της. Αισθάνομαι βαθύτατα την ανάγκη να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε όλα αυτά τα χρόνια, τη βοήθεια καθώς και για τον πολύτιμο χρόνο που μου διέθεσε παρά τις ιδιαίτερα απαιτητικές επαγγελματικές του υποχρεώσεις. Πραγματικά δεν θα μπορούσα να έχω καλύτερο καθοδηγητή σε όλα τα χρόνια της συνεργασίας μας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ και Διευθυντή του Τομέα Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών κ. Γιώργο Φικιώρη που ως μέλος της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής συνέβαλε καθοριστικά στην ερευνητική μου πορεία με τις πάντα εύστοχες παρατηρήσεις του.

Οφείλω θερμές ευχαριστίες στον Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ κ. Αθανάσιο Παναγόπουλο, μέλος της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, ο οποίος υποστήριξε το ερευνητικό μου έργο και συνέβαλε καθοριστικά στη διαμόρφωση του τρόπου σκέψης μου, ενθαρρύνοντάς με να συνεχίσω και σε νέες ερευνητικές κατευθύνσεις.

Οφείλω επίσης ειλικρινές ευχαριστίες στον λέκτορα της σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών κ. Πέτρο Στεφανέα για την πολύτιμη γνώση που μου μετέδωσε στο πεδίο των αλγορίθμων με χρήση fractals και τις ουσιαστικές συμβουλές του. Πολλές ευχαριστίες επίσης στον Καθηγητή του τμήματος Φυσικής του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών κ. Δημήτριο Φραντζεσκάκη του οποίου οι συμβουλές αποτέλεσαν σημαντικό παράγοντα για την ολοκλήρωση της Διδακτορικής Διατριβής. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου κ. Κωνσταντίνα Νικήτα και κ. Ανδρέα-Γεώργιο Σταφυλοπάτη οι οποίοι δέχθηκαν να είναι μέλη της επταμελούς επιτροπής αξιολόγησης και συνέβαλαν στην ολοκλήρωση του διδακτορικού.

Θα πρέπει επίσης να ευχαριστήσω όλα τα μέλη (παλαιότερα ή νεότερα) της ερευνητικής μας ομάδας για την ηθική τους συμπαράσταση, την ουσιαστική επικοινωνία και τις χρήσιμες συμβουλές τους όλα αυτά τα χρόνια της διατριβής μου. Από τα παλαιότερα μέλη, θερμές ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στον Δρ. Γεώργιο Μπουλαδάκη για την καθοδήγηση, τη συνεχή βοήθεια και στήριξη καθ' όλη τη διάρκεια της διδακτορικής μου διατριβής και τους Δρ. Αναστάσιο Καρακασιλιώτη και Δρ. Ευάγγελο Καλλίτση για τις συμβουλές και την επίλυση αποριών στα θέματα του κοινού ερευνητικού μας πεδίου. Από τα νεότερα μέλη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συνεργάτες Χρήστο Πανδή, Γιώργο Πουραΐμη και Απόστολο Κοτοπούλη για την άψογη συνεργασία που είχαμε όλα αυτά τα χρόνια.

Τέλος, θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ και να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου σε όλα τα μέλη της οικογένειας μου, τους γονείς μου Απόστολο και Αγγελική Μαλάμου, την αδερφή μου Βασιλική και την δασκάλα γιαγιά μου Άννα Γκλαβά, οι οποίοι με ενθάρρυναν και στήριξαν την απόφασή μου να ξεκινήσω και να ολοκληρώσω τη Διδακτορική μου Διατριβή και μου συμπαραστέκονται καθημερινά σε κάθε απόφασή μου. Επιπλέον ευχαριστώ τον αρραβωνιαστικό μου Δρ. Στυλιανό Κοντομάρη για την αγάπη του, την υποστήριξη και το γεγονός ότι είναι πάντα δίπλα μου σε όλες τις ευχάριστες αλλά και δύσκολες στιγμές της κοινής μας ζωής.

Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΡΑΝΤΑΡ ΣΥΝΘΕΤΙΚΗΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ ...	1
1.1 Εισαγωγή	1
1.2 Αρχή λειτουργίας συστημάτων ραντάρ	2
1.3 Βασικά μεγέθη λειτουργίας	5
1.3.1 Φέρουσα συχνότητα	5
1.3.2 Συχνότητα επανάληψης παλμών.....	5
1.3.3 Μήκος παλμού	5
1.3.4 Σχέση ισχύος.....	6
1.3.5 Ανάλυση απόστασης (Range Resolution).....	7
1.4 Ραντάρ συνθετικής απεικόνισης.....	7
1.5 Βιβλιογραφικές αναφορές.....	9
2. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΡΑΝΤΑΡ ΣΥΝΘΕΤΙΚΗΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ – ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΡΑΝΤΑΡ ΚΑΙ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΣΤΟΧΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΗΜΑΤΟΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΜΕΝΟΥ ΚΑΤΑ ΒΗΜΑΤΙΚΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ	11
2.1 Γεωμετρία προσομοίωσης	11
2.2 Κυματομορφές εκπομπής ραντάρ (κυματομορφές LFM, SF)	13
2.2.1 Γραμμική διαμόρφωση συχνότητας - LFM (Linear Frequency Modulation)	13
2.2.2 Κυματομορφή τύπου βηματικής συχνότητας (Stepped Frequency, SF)	14
2.3 Επεξεργασία σημάτων επιστροφής κατά την κατεύθυνση απόστασης (range) – διαχωριστική ικανότητα στόχων.....	15
2.4 Μαθηματική ανάλυση για μοντελοποίηση σημειακού στόχου	15
2.4.1 Ολίσθηση φάσης στο δέκτη του ραντάρ	15
2.4.2 Ολίσθηση (συχνότητα) Doppler στο δέκτη του ραντάρ	18
2.5 Διαχωριστική ικανότητα στόχων στην κατεύθυνση της κάθετης απόστασης (cross range)	20
2.6 Βέλτιστη δυνατή διαχωριστική ικανότητα στόχων στην κατεύθυνση της κάθετης απόστασης (cross range)	23
2.7 Εναλλακτική υπολογισμού της βέλτιστης δυνατής διαχωριστικής ικανότητας στόχων στην κατεύθυνση της κάθετης απόστασης (cross range).....	25
2.8 Μαθηματική ανάλυση ραντάρ συνθετικής απεικόνισης (SAR) για στόχο που μοντελοποιείται με σημειακούς σκεδαστές	28
2.8.1 Μορφή του σήματος επιστροφής στο δέκτη του ραντάρ	28
2.8.2 Σχηματισμός της εικόνας του ραντάρ συνθετικής απεικόνισης (SAR) από τα ακατέργαστα δεδομένα λήψης με χρήση της μεθόδου Range – Doppler imaging.....	32
2.9 Αριθμητικές προσομοιώσεις.....	34

2.9.1 Προσομοίωση ανακατασκευής εικόνας SAR για ένα δισδιάστατο στόχο όπου ο φορέας του ραντάρ είναι ένα αεροσκάφος (airborne scenario)	34
2.9.2 Προσομοίωση ανακατασκευής εικόνας SAR για ένα δισδιάστατο στόχο όπου ο φορέας του ραντάρ είναι ένας δορυφόρος (spaceborne scenario).....	36
2.9.3 Προσομοίωση ανακατασκευής εικόνας SAR για ένα δισδιάστατο στόχο με μεταβαλλόμενη ένταση σκέδασης.....	37
2.9.4 Προσομοίωση ανακατασκευής εικόνας SAR για ένα τρισδιάστατο στόχο	38
2.9.5 Προσομοίωση ανακατασκευής εικόνας SAR για δισδιάστατο στόχο και διαφορετικές γωνίες στροφής στόχου	39
2.9.6 Προσομοίωση ανακατασκευής εικόνας SAR για δισδιάστατο στόχο και διάρκεια παρατήρησης στόχου ίση με 13 <i>CPI</i> (<i>CPI</i> = διάστημα συμφασικής επεξεργασίας)	40
2.10 Βιβλιογραφικές αναφορές.....	41
3. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΑΥΤΟΕΣΤΙΑΣΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ ΡΑΝΤΑΡ ΣΥΝΘΕΤΙΚΗΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ (SAR) ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΝΤΡΟΠΙΑΣ.....	43
3.1 Εισαγωγή	43
3.2 Εντροπία εικόνας.....	44
3.3 Μεθοδολογία αλγορίθμου αυτοεστίασης εικόνας ραντάρ συνθετικής απεικόνισης (SAR)	46
3.4 Εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης εικόνας ραντάρ συνθετικής απεικόνισης (SAR) σε σενάριο προσομοίωσης στόχου που εκτελεί απότομη αλλαγή κίνησης.....	49
3.4.1 Γεωμετρία προσομοίωσης.....	49
3.4.2 Αριθμητικές προσομοιώσεις	53
3.5 Εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης εικόνας ραντάρ συνθετικής απεικόνισης (SAR) σε σενάριο μερικής απώλειας δεδομένων	57
3.6 Εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης εικόνας ραντάρ συνθετικής απεικόνισης (SAR) σε πραγματικά δεδομένα ραντάρ SAR	60
3.6.1 Πρώτο σετ δεδομένων.....	60
3.6.2 Δεύτερο σετ δεδομένων.....	62
3.7 Συμπεράσματα	64
3.8 Ευχαριστίες.....	64
3.9 Βιβλιογραφικές αναφορές.....	65
4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ MODIFIED FRACTAL SIGNATURE ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΕΔΑΦΩΝ ΑΠΟ ΕΙΚΟΝΕΣ ΡΑΝΤΑΡ ΣΥΝΘΕΤΙΚΗΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ (SAR).....	67
4.1 Εισαγωγή	67
4.2 Βασικές έννοιες της fractal διάστασης (fractal dimension)	77
4.2.1 Τοπολογικός χώρος – Τοπολογική διάσταση	77
4.2.2 Μαθηματικός ορισμός fractal	77
4.3 Διάσταση Hausdorff (Hausdorff dimension).....	78

4.4 Διάσταση Box-computing (Box-computing dimension)	79
4.5 Διάσταση Minkowski (Minkowski dimension)	82
4.6 δ - παράλληλο σώμα (δ - parallel body).....	82
4.7 Τεχνική «κουβέρτας» (blanket technique) και μέθοδος “τροποποιημένη fractal υπογραφή” (Modified Fractal Signature, MFS).....	85
4.8 Αλγόριθμος για τη μέθοδο “τροποποιημένη fractal υπογραφή” (Modified Fractal Signature, MFS)	88
4.9 Εφαρμογή της μεθόδου “τροποποιημένης fractal υπογραφής” (Modified Fractal Signature, MFS) σε πραγματικές SAR εικόνες με σκοπό την κατηγοριοποίηση διαφόρων τύπων εδαφών.....	89
4.10 Έλεγχος της προτεινόμενης μεθόδου κατηγοριοποίησης εδαφών σε πραγματικές SAR εικόνες	100
4.11 Συμπεράσματα	102
4.12 Βιβλιογραφικές αναφορές.....	102
5. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ FRACTAL ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΜΕΣΩ ΟΠΙΣΘΟΣΚΕΛΑΖΟΜΕΝΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΡΑΝΤΑΡ ΣΥΝΘΕΤΙΚΗΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ	105
5.1 Εισαγωγή	105
5.2 Μοντέλο Fractal Επιφάνειας.....	107
5.3 Μοντελοποίηση με βάση τη λύση Kirchhoff	110
5.4 Αριθμητικά αποτελέσματα	113
5.5 Συμπεράσματα	118
5.6 Βιβλιογραφικές αναφορές.....	119
ΓΛΩΣΣΑΡΙΟ – ΑΓΓΛΟΕΛΛΗΝΙΚΟΙ ΤΕΧΝΙΚΟΙ ΟΡΟΙ ΡΑΝΤΑΡ.....	121

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Αρχή λειτουργίας ραντάρ	3
Σχήμα 1.2: Παλμοί ραντάρ	6
Σχήμα 1.3: Ανάλυση απόστασης	7
Σχήμα 1.4: Ραντάρ συνθετικής απεικόνισης.....	8
Σχήμα 2.1: Γεωμετρία για το ραντάρ συνθετικής απεικόνισης (SAR).....	11
Σχήμα 2.2: Γραμμική διαμόρφωση συχνότητας - LFM	13
Σχήμα 2.3: Κυματομορφή βηματικής συχνότητας - SF	14
Σχήμα 2.4: Ολίσθηση φάσης στο δέκτη του ραντάρ	16
Σχήμα 2.5: Φάση $\phi(t)$ στο δέκτη του ραντάρ για κάθετη θέαση του στόχου O' ($\theta_o = 90^\circ$), για μικρούς χρόνους t ($t \ll 1$), μέσα στο CPI ($-\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2}$).....	18
Σχήμα 2.6: Ολίσθηση Doppler $f_d(t)$ στο δέκτη του ραντάρ, (εξ. 21) [$\theta_o = 90^\circ$, ($-\frac{T}{2} < t < \frac{T}{2}$)] δηλαδή χρόνος t μέσα στο CPI].....	19
Σχήμα 2.7: Διαχωριστική ικανότητα μεταξύ δύο στόχων P και P'	20
Σχήμα 2.8: Υπολογισμός διαχωριστικής ικανότητας Δy στην κατεύθυνση της κάθετης απόστασης (cross range) για ένα ραντάρ SAR.....	20
Σχήμα 2.9: Διαχωριστική ικανότητα Δy στην κατεύθυνση της κάθετης απόστασης (cross range) για ένα ραντάρ SAR.....	22
Σχήμα 2.10: Μέγιστο δυνατό συνθετικό μήκος $L_{e,max}$	23
Σχήμα 2.11: Διαχωρισμός δύο σημειακών στόχων P και P' στην κατεύθυνση κάθετης απόστασης (cross range).....	25
Σχήμα 2.12: Διόρθωση φάσης σε ραντάρ SAR (coherent SAR).....	27
Σχήμα 2.13: Γεωμετρία ραντάρ συνθετικής απεικόνισης.....	28
Σχήμα 2.14: Συντεταγμένες $(X_{(i,j)}, Y_{(i,j)})$ ενός σημειακού σκεδαστή του δισδιάστατου στόχου ραντάρ	30
Σχήμα 2.15: Ανάκτηση εικόνας SAR [$I(m,n)$] από ακατέργαστα δεδομένα ραντάρ $x(m,n) = h(m,n)$ με χρήση του αλγορίθμου Range- Doppler imaging	32
Σχήμα 2.16: Μοντέλο πλοίου που αποτελείται από σημειακούς σκεδαστές.....	34
Σχήμα 2.17: Ανακατασκευασμένη εικόνα SAR για δισδιάστατο στόχο όπου ο φορέας του ραντάρ είναι ένα αεροσκάφος (airborne scenario).....	36
Σχήμα 2.18: Ανακατασκευασμένη εικόνα SAR για δισδιάστατο στόχο όπου ο φορέας του ραντάρ είναι ένας δορυφόρος (spaceborne scenario).....	37
Σχήμα 2.19: Ανακατασκευασμένη εικόνα SAR για δισδιάστατο στόχο με μεταβαλλόμενη ένταση σκέδασης για πέντε σκεδαστές.....	38
Σχήμα 2.20: Ανακατασκευασμένη εικόνα SAR για τρισδιάστατο στόχο	39
Σχήμα 2.21: Ανακατασκευασμένη εικόνα SAR για δισδιάστατο στόχο και γωνία στροφής στόχου $\phi = 180^\circ$	39
Σχήμα 2.22: Ανακατασκευασμένη εικόνα SAR για δισδιάστατο στόχο και γωνία στροφής στόχου $\phi = 90^\circ$	40
Σχήμα 2.23: Ανακατασκευασμένη εικόνα SAR για δισδιάστατο στόχο και γωνία στροφής στόχου $\phi = 120^\circ$	40

Σχήμα 2.24: Ανακατασκευασμένες εικόνες SAR για δισδιάστατο στόχο και διάρκεια παρατήρησης στόχου ίση με 13 <i>CPI</i> , στο σχήμα φαίνονται ενδεικτικά τα $CPI = 1,5,7,9,13$	41
Σχήμα 3.1: Σχηματική αναπαράσταση μεθοδολογίας αλγορίθμου <i>CPI-split</i> autofocusing	47
Σχήμα 3.2: SAR γεωμετρία στόχου που εκτελεί απότομη αλλαγή κίνησης.....	50
Σχήμα 3.3: Συντεταγμένες $(X_{(i,j)}, Y_{(i,j)})$ ενός σημειακού σκεδαστή του δισδιάστατου στόχου ραντάρ	51
Σχήμα 3.4: Μοντέλο πλοίου που αποτελείται από σημειακούς σκεδαστές.....	54
Σχήμα 3.5: Ανακατασκευασμένες SAR εικόνες α) τρίτο <i>CPI</i> , b) τέταρτο <i>CPI</i> , c) πέμπτο <i>CPI</i> , d) τέταρτο <i>CPI</i> εστιασμένο μετά από την εφαρμογή του αλγορίθμου..	55
Σχήμα 3.6: Ανακατασκευασμένες SAR εικόνες α) έβδομο <i>CPI</i> , b) όγδοο <i>CPI</i> , c) ένατο <i>CPI</i> , d) όγδοο <i>CPI</i> εστιασμένο μετά από την εφαρμογή του αλγορίθμου.....	56
Σχήμα 3.7: Ανακατασκευασμένες SAR εικόνες α) τρίτο <i>CPI</i> , b) τέταρτο <i>CPI</i> , c) πέμπτο <i>CPI</i> , d) τέταρτο <i>CPI</i> εστιασμένο μετά από την εφαρμογή του αλγορίθμου..	58
Σχήμα 3.8: Ανακατασκευασμένες SAR εικόνες α) έβδομο <i>CPI</i> , b) όγδοο <i>CPI</i> , c) ένατο <i>CPI</i> , d) όγδοο <i>CPI</i> εστιασμένο μετά από την εφαρμογή του αλγορίθμου.....	59
Σχήμα 3.9: Ανακατασκευασμένες SAR εικόνες για πέντε διαδοχικά <i>CPI</i> (πραγματικά δεδομένα).....	61
Σχήμα 3.10: Ανακατασκευασμένες SAR εικόνες για το τέταρτο <i>CPI</i> a) πριν και b) μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου	62
Σχήμα 3.11: Ανακατασκευασμένες SAR εικόνες για τέσσερα διαδοχικά <i>CPI</i> (πραγματικά δεδομένα).....	62
Σχήμα 3.12: Ανακατασκευασμένες SAR εικόνες για το τρίτο <i>CPI</i> a) πριν και b) μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου	63
Σχήμα 4.1: Σύνολο Cantor	68
Σχήμα 4.2: Σύνολο Cantor	69
Σχήμα 4.3: α) Κατασκευή καμπύλης von Koch, b) Καμπύλες von Koch οι οποίες συνδυάζόμενες μεταξύ τους κατασκευάζουν το σχήμα μιας χιονονιφάδας	70
Σχήμα 4.4: Κατασκευή τριγώνου Sierpinski ($\dim_H F = \dim_B F = \frac{\log 3}{\log 2}$)	71
Σχήμα 4.5: Κατασκευή σκόνης Cantor (“Cantor dust”) ($\dim_H F = \dim_B F = 1$)	72
Σχήμα 4.6: Κατασκευή fractal με αυτοομοιότητα χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικές αναλογίες αφαίρεσης κομματιών	72
Σχήμα 4.7: Σύνολο Julia	73
Σχήμα 4.8: Γραφική παράσταση της συνάρτησης $f(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{3}{2}\right)^{-\frac{k}{2}} \sin\left[\left(\frac{3}{2}\right)^k t\right]$	74
Σχήμα 4.9: Τυχαία καμπύλη von Koch – κατασκευή με τη βοήθεια ρίψης ενός νομίσματος.....	74
Σχήμα 4.10: Διαίρεση κάποιων συνόλων σε τέσσερα μέρη. Τα μέρη είναι παρόμοια με το όλο σύμφωνα με κάποιες αναλογίες: α) $\frac{1}{4}$ για τη γραμμή, (b) $\frac{1}{2}$ για το τετράγωνο, (c) $\frac{1}{9}$ για το σύνολο Cantor και d) $\frac{1}{3}$ για την καμπύλη von Koch	76
Σχήμα 4.11: Καλύψεις του συνόλου <i>F</i>	80
Σχήμα 4.12: Πάνω και κάτω όρια μιας συνάρτησης	81

Σχήμα 4.13: Γραφικές αναπαραστάσεις των ισοδύναμων ορισμών της διάστασης Box-computing	82
Σχήμα 4.14: Παραδείγματα δ- παράλληλων σωμάτων.....	83
Σχήμα 4.15: Αναπαράσταση επιφάνειας g και των άνω και κάτω επιφανειών που σχηματίζουν την «κουβέρτα» (blanket).....	85
Σχήμα 4.16: Υπολογισμός του εμβαδού της επιφάνειας με τη βοήθεια της κουβέρτας ακτίνας δ και της κουβέρτας ακτίνας $\delta - 1$	86
Σχήμα 4.17: SAR εικόνα από την πόλη της Νέας Υόρκης (New York, USA)	90
Σχήμα 4.18: SAR εικόνα από την πόλη της Ουάσινγκτον (Washington D.C., USA).90	
Σχήμα 4.19: SAR εικόνα από την πόλη του Λας Βέγκας (Las Vegas, USA)	91
Σχήμα 4.20: SAR εικόνα από την πόλη του Κολοράντο (Colorado, USA)	91
Σχήμα 4.21: Καμπύλες fractal area ως προς την επανάληψη δ για το αστικό περιβάλλον (urban site).....	92
Σχήμα 4.22: Καμπύλες fractal area ως προς την επανάληψη δ για το ημιαστικό περιβάλλον (suburban site)	93
Σχήμα 4.23: Καμπύλες fractal area ως προς την επανάληψη δ για το αγροτικό περιβάλλον (rural site)	93
Σχήμα 4.24: Καμπύλες fractal area ως προς την επανάληψη δ για το βουνό (mountain site).....	94
Σχήμα 4.25: Καμπύλες fractal area ως προς την επανάληψη δ για τη θάλασσα (sea site).....	94
Σχήμα 4.26: Καμπύλες fractal area ως προς την επανάληψη δ ανά κατηγορία εδάφους σε λογαριθμική κλίμακα. Κάθε καμπύλη είναι ο μέσος όρος τεσσάρων καμπύλων...95	
Σχήμα 4.27: Καμπύλες fractal dimension ως προς την επανάληψη δ για το αστικό περιβάλλον (urban site).....	96
Σχήμα 4.28: Καμπύλες fractal dimension ως προς την επανάληψη δ για το ημιαστικό περιβάλλον (suburban site)	96
Σχήμα 4.29: Καμπύλες fractal dimension ως προς την επανάληψη δ για το αγροτικό περιβάλλον (rural site)	97
Σχήμα 4.30: Καμπύλες fractal dimension ως προς την επανάληψη δ για το βουνό (mountain site)	97
Σχήμα 4.31: Καμπύλες fractal dimension ως προς την επανάληψη δ για τη θάλασσα (sea site)	98
Σχήμα 4.32: Καμπύλες fractal dimension ως προς την επανάληψη δ ανά κατηγορία εδάφους. Κάθε καμπύλη είναι ο μέσος όρος τεσσάρων καμπύλων	99
Σχήμα 5.1: Λεία fractal επιφάνεια	106
Σχήμα 5.2: Τραχεία fractal επιφάνεια.....	106
Σχήμα 5.3: Fractal επιφάνεια με $D = 1.05$	108
Σχήμα 5.4: Fractal επιφάνεια με $D = 1.50$	109
Σχήμα 5.5: Fractal επιφάνεια με $D = 1.70$	109
Σχήμα 5.6: Fractal επιφάνεια με $D = 1.80$	110
Σχήμα 5.7: Γεωμετρία του προβλήματος σκέδασης.....	111
Σχήμα 5.8: Τιμή του συντελεστή οπισθοσκέδασης $ \gamma(k) $ ως προς τον κυματαριθμό k για fractal διάσταση $D=1.05$	114
Σχήμα 5.9: Τιμή του συντελεστή οπισθοσκέδασης $ \gamma(k) $ ως προς τον κυματαριθμό k για fractal διάσταση $D=1.30$	114
Σχήμα 5.10: Τιμή του συντελεστή οπισθοσκέδασης $ \gamma(k) $ ως προς τον κυματαριθμό k για fractal διάσταση $D=1.50$	115
Σχήμα 5.11: Τιμή του συντελεστή οπισθοσκέδασης $ \gamma(k) $ ως προς τον κυματαριθμό k για fractal διάσταση $D=1.70$	115

Σχήμα 5.12: Τιμή του συντελεστή οπισθοσκέδασης $ \gamma(k) $ ως προς τον κυματαριθμό k για fractal διάσταση $D=1.70$ και μήκος επιφάνειας $2L = 40\lambda$	117
Σχήμα 5.13: Τιμή του συντελεστή οπισθοσκέδασης $ \gamma(k) $ ως προς τον κυματαριθμό k για fractal διάσταση $D=1.70$ και μήκος επιφάνειας $2L = 120\lambda$	117

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2-1: Παράμετροι προσομοίωσης της γεωμετρίας του ραντάρ τύπου SAR...	35
Πίνακας 2-2: Συγκριτικός πίνακας παραμέτρων προσομοίωσης για φορέα SAR αεροσκάφος και δορυφόρος.....	37
Πίνακας 3-1: Παράμετροι προσομοίωσης της γεωμετρίας του ραντάρ τύπου SAR...	54
Πίνακας 3-2: Τιμές εντροπίας των ανακατασκευασμένων εικόνων SAR.....	57
Πίνακας 3-3: Τιμές εντροπίας των ανακατασκευασμένων εικόνων SAR.....	59
Πίνακας 3-4: Τιμές εντροπίας.....	61
Πίνακας 3-5: Τιμές εντροπίας.....	63
Πίνακας 4-1: Μέση τιμή και τυπική απόκλιση ανά κατηγορία εδάφους	99
Πίνακας 4-2: Πίνακας Κατηγοριοποίησης	101
Πίνακας 5-1: Σχέση μεταξύ της fractal διάστασης D και της κλίσης που προκύπτει μεταξύ του κύριου λοβού και του πρώτου πλευρικού λοβού	116

1. Εισαγωγικά στοιχεία για το ραντάρ συνθετικής απεικόνισης

1.1 Εισαγωγή

Τα ραντάρ είναι ηλεκτρομαγνητικά συστήματα που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση και εντοπισμό διάφορων στόχων. Η αρχή λειτουργίας τους στηρίζεται στην εκπομπή ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος (για παράδειγμα ένα ημιτονοειδές κύμα διαμορφωμένο σε παλμό) και στη συνέχεια στη λήψη των ανακλάσεων από τα διάφορα αντικείμενα στα οποία προσπίπτει το σήμα εκπομπής. Το κύριο πλεονέκτημα των συστημάτων ραντάρ, σε σύγκριση με άλλα συστήματα, είναι ότι έχουν τη δυνατότητα να υπολογίζουν απ' ευθείας την απόσταση των στόχων και το γεγονός ότι η λειτουργία τους παραμένει ανεπηρέαστη από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Σε κάθε στοιχειώδες σύστημα ραντάρ διακρίνονται τρία κύρια υποσυστήματα: ο πομπός, ο οποίος εκπέμπει το ηλεκτρομαγνητικό σήμα που παράγεται από έναν ταλαντωτή, ο δέκτης, ο οποίος ανιχνεύει το ανακλώμενο σήμα και ένα σύστημα κατάλληλο για την ανάλυση των σημάτων. Τα συστήματα ραντάρ έχουν εξελιχθεί πολύ τα τελευταία χρόνια, τόσο στο επίπεδο σχεδίασης του πομπού και του δέκτη όσο και στην αυτοματοποίηση του τρόπου ανάλυσης των σημάτων. Ωστόσο, ως προς την αρχή λειτουργίας τα υποσυστήματα αυτά παραμένουν ίδια από την εποχή που αναπτύχθηκαν τα πρώτα συστήματα ραντάρ στη δεκαετία 1940-1950.

Η απόσταση από το στόχο προσδιορίζεται από το χρόνο που χρειάζεται το σήμα για να διανύσει την απόσταση από τον πομπό μέχρι το στόχο και πίσω στο δέκτη. Η κατεύθυνση του στόχου προσδιορίζεται από την κατεύθυνση άφιξης του ανακλώμενου από το στόχο σήματος. Επίσης αν ο στόχος κινείται, τότε υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ ραντάρ και στόχου και επομένως η μετατόπιση της φέρουσας συχνότητας στο ανακλώμενο σήμα (σύμφωνα με το φαινόμενο Doppler) είναι ένα μέτρο της σχετικής ταχύτητας του στόχου. Αυτή η παρατήρηση είναι χρήσιμη για τη διάκριση των κινούμενων από τους ακίνητους στόχους.

Ο όρος ραντάρ καθιερώθηκε τη δεκαετία του 1940 και προέρχεται από το ακρωνύμιο R.A.D.A.R. (RADIO Detection And Ranging). Ανεξάρτητα από την αρχή σχεδίασης, ο όρος ραντάρ περιγράφει μία συσκευή εκπομπής ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας προς ένα συγκεκριμένο στόχο ή τμήμα του περιβάλλοντος χώρου, με στόχο την ανίχνευση και μέτρηση χαρακτηριστικών στοιχείων των στόχων (όπως απόσταση, ταχύτητα, γωνιακή θέση, κτλ.) [1]. Τα συστήματα ραντάρ χρησιμοποιούν κατά κύριο λόγο διαμορφωμένες κυματομορφές και κατευθυντικές κεραιές. Οποιοσδήποτε στόχος στην περιοχή εσοπτείας ενός ραντάρ ανακλά μέρος της εκπεμπόμενης ενέργειας που επιστρέφει στο δέκτη του ραντάρ (ηχώ). Ο δέκτης του ραντάρ εκτελεί μία σειρά από διαδικασίες αναλογικής και ψηφιακής επεξεργασίας του επιστρεφόμενου σήματος, για να εξάγει χρήσιμες πληροφορίες για το στόχο.

Η σημερινή τεχνολογία των συστημάτων ραντάρ χρησιμοποιεί το φάσμα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που αρχίζει από τις συχνότητες VHF (100 MHz) και επεκτείνεται μέχρι τις συχνότητες EHF (100 GHz). Οι χαμηλές συχνότητες του φάσματος αυτού επηρεάζονται ελάχιστα από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες και έτσι η ορατότητα που παρέχουν τα ραντάρ από πλευράς εμβέλειας ανίχνευσης είναι μεγάλη.

Πιο συγκεκριμένα παρέχουν τη δυνατότητα ανίχνευσης αντικειμένων σε μεγάλες αποστάσεις και υπολογισμού της απόστασης ενός στόχου με μεγάλη ακρίβεια.

Ανάλογα με την αρχή σχεδίασης του εκάστοτε ραντάρ διακρίνονται οι παρακάτω τύποι ραντάρ:

1. Παλμικά ραντάρ
2. Ραντάρ συνεχούς κύματος
3. Ανιχνευτές κινούμενων στόχων
4. Ραντάρ παρακολούθησης
5. Ραντάρ συνθετικής απεικόνισης

Τα παλμικά ραντάρ αποτελούν τα πιο απλά και ευρέως χρησιμοποιούμενα ραντάρ, όπως π.χ. για ναυσιπλοΐα και αεροναυσιπλοΐα. Τα ραντάρ συνεχούς κύματος και οι ανιχνευτές κινούμενων στόχων χρησιμοποιούν το φαινόμενο Doppler για την ανίχνευση κινούμενων αντικειμένων. Τα ραντάρ παρακολούθησης στόχων είναι παλμικά ραντάρ που όμως έχουν την ικανότητα να μετρούν, με μεγάλη ακρίβεια, την κατεύθυνση ενός αντικειμένου και έχουν σκοπό να παρακολουθούν αποκλειστικά ένα στόχο μόνο. Τέλος τα ραντάρ συνθετικής απεικόνισης, που είναι και το θέμα της παρούσας διδακτορικής διατριβής, απεικονίζουν από αεροσκάφη την επιφάνεια της γης με μεγάλη διακριτικότητα, και η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στο φαινόμενο Doppler [1] – [4].

1.2 Αρχή λειτουργίας συστημάτων ραντάρ

Η αρχή λειτουργίας ενός συστήματος ραντάρ συνοψίζεται στα εξής: Ένα σήμα παράγεται από τον πομπό, μετατρέπεται στη συνέχεια από την κεραία σε ηλεκτρομαγνητικό κύμα, ταξιδεύει με την ταχύτητα του φωτός μέχρι τον στόχο, ανακλάται από αυτόν, επιστρέφει στην κεραία λήψης, όπου μετατρέπεται σε σήμα λήψης και με κατάλληλη επεξεργασία στον δέκτη και στον επεξεργαστή σημάτων παρέχει σημαντικές πληροφορίες για το στόχο. Η μεγάλη αξία του ραντάρ οφείλεται στη δυνατότητα ανίχνευσης και παρακολούθησης στόχων σε μεγάλες αποστάσεις και με μεγάλη ακρίβεια. Με βάση την ακτινοβολία που λαμβάνει ο δέκτης, προσδιορίζεται η απόσταση και η θέση του στόχου. Αν ο στόχος είναι κινούμενος προσδιορίζεται επιπλέον η ταχύτητα και η πορεία του [3].

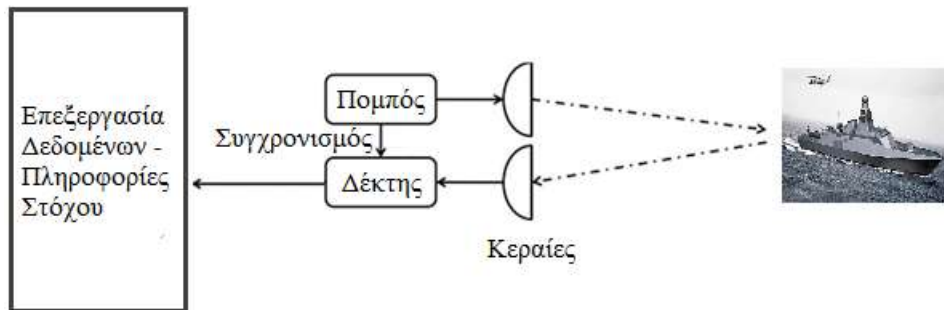
Ένα απλοποιημένο διάγραμμα ενός παλμικού ραντάρ φαίνεται στο σχήμα 1.1. Το σήμα εκπομπής είναι ένας ημιτονοειδής παλμός διάρκειας $T_p \text{ sec}$. Οι παλμοί επαναλαμβάνονται κάθε $T_e \text{ sec}$. Επομένως σε 1sec προκύπτουν $\frac{1}{T_e}$ παλμοί εκπομπής

από το ραντάρ. Τα σήματα που εκπέμπονται από την κεραία διαδίδονται με την ταχύτητα του φωτός $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/sec}$ μέχρι να συναντήσουν το στόχο, όπου ένα ποσοστό της προσπίπτουσας ισχύος ανακλάται και επιστρέφει στην κεραία του δέκτη. Ο χρόνος που χρειάζεται για να ταξιδέψει το σήμα εκπομπής από την κεραία του πομπού στον στόχο και να επιστρέψει ξανά στην κεραία του δέκτη είναι:

$$T = \frac{2R}{c} \quad (1.1)$$

όπου R είναι η απόσταση ραντάρ – στόχου.

Επομένως η μέτρηση του χρόνου T που απαιτείται για την επιστροφή του σήματος μετά την ανάκλαση από το στόχο, συμβάλλει στον άμεσο προσδιορισμό της απόστασης R του στόχου.



Σχήμα 1.1: Αρχή λειτουργίας ραντάρ

Όταν εκπέμπεται ένας παλμός προς το στόχο, τότε πρέπει να περάσει κάποιος χρόνος προτού εκπεμφθεί ο επόμενος παλμός, έτσι ώστε να ανιχνευτούν πρώτα οι ανακλώμενοι παλμοί. Επομένως ο ρυθμός με τον οποίο εκπέμπονται οι παλμοί καθορίζεται από τη μέγιστη εκτιμώμενη απόσταση από τους στόχους. Αν η συχνότητα επανάληψης παλμών (Pulse Repetition Frequency, PRF) είναι πολύ υψηλή, τότε κάποιοι, ανακλώμενοι από τους στόχους, παλμοί είναι δυνατό να φτάνουν στον δέκτη μετά την εκπομπή του επόμενου παλμού. Ως αποτέλεσμα μπορεί να προκύψει αμφιβολία ως προς την πραγματική απόσταση του στόχου.

Οι ανακλάσεις που φτάνουν μετά την εκπομπή του επόμενου παλμού, εμφανίζουν το στόχο ότι βρίσκεται σε μικρότερη απόσταση από την πραγματική και μπορεί να είναι παραπλανητικές. Η απόσταση πέρα από την οποία εμφανίζονται αυτές οι καθυστερημένες ανακλάσεις ονομάζεται αναμφίβολη μέγιστη απόσταση (maximum unambiguous range) και δίνεται από τη σχέση:

$$R_{\text{αναμφ}} = \frac{c}{2f_{\text{PRF}}} \quad (1.2)$$

όπου f_{PRF} (Hz) είναι η συχνότητα επανάληψης παλμών.

Για να ανιχνευθεί ένα αντικείμενο από τα ραντάρ είναι απαραίτητο η ισχύς P_t που επιστρέφει σαν ηχώ στον δέκτη, να υπερβαίνει ένα ελάχιστο κατώφλι ισχύος P_m . Το κατώφλι P_m καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά του δέκτη του ραντάρ και μερικές φορές από ανεπιθύμητες ανακλάσεις που προέρχονται από αντικείμενα γύρω από τον στόχο (για παράδειγμα σε περίπτωση ανίχνευσης πλοίου κάποιες ανεπιθύμητες ανακλάσεις είναι δυνατό να προέρχονται από κάποιες τυχαίες διακυμάνσεις της θάλασσας).

Η πυκνότητα ισχύος W (W/m^2) που προκαλεί η κεραία εκπομπής του ραντάρ σε απόσταση R από την κεραία δίνεται από τη σχέση:

$$W = \frac{P_t G}{4\pi R^2} \quad (1.3)$$

όπου P_π είναι η ισχύς εκπομπής του πομπού σε *Watt* και G είναι το κέρδος της κεραίας (περίπτωση κατευθυντικής κεραίας) που είναι καθαρός αριθμός. Το γινόμενο $P_\pi G$ είναι γνωστό και ως ενεργή εκπεμπόμενη ισχύς (effective radiated power - ERP).

Κάθε αντικείμενο που φωτίζεται από την πυκνότητα ισχύος W επιστρέφει προς την κεραία του δέκτη ποσότητα ισχύος $P_\sigma(W)$. Ορίζεται ως ενεργός διατομή ενός ραντάρ $\sigma(m^2)$ ο λόγος:

$$\sigma = \frac{P_\sigma}{W} \quad (1.4)$$

Αφού η ισχύς $P_\sigma(W)$ εκπέμπεται προς την κεραία, το ανακλώμενο σήμα από τον στόχο σε απόσταση R παρουσιάζει πυκνότητα ισχύος $W_\lambda (W/m^2)$ και δίδεται από την σχέση :

$$W_\lambda = \frac{P_\sigma}{4\pi R^2} = \frac{P_\pi G \sigma}{(4\pi R^2)^2} \quad (1.5)$$

Αν υποθεθεί ότι η ενεργός επιφάνεια A_ε της κεραίας του ραντάρ είναι γνωστή, τότε ισχύει η σχέση:

$$A_\varepsilon = \frac{\lambda^2 G}{4\pi} \quad (1.6)$$

όπου λ είναι το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Η ισχύς λήψης $P_\lambda(W)$ για τους παλμούς που επιστρέφουν από τους στόχους είναι:

$$P_\lambda = W_\lambda A_\varepsilon = \frac{P_\pi G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \quad (1.7)$$

Η παραπάνω σχέση καταδεικνύει ότι η ισχύς λήψης είναι αντιστρόφως ανάλογη με την τέταρτη δύναμη της απόστασης R . Γνωρίζοντας ότι η μικρότερη ισχύς που είναι δυνατό να ανιχνευθεί είναι $P_\lambda = P_m$, η μέγιστη εμβέλεια R_M του ραντάρ, για ένα στόχο που έχει ενεργό διατομή $\sigma(m^2)$ προκύπτει:

$$R_M = \left(\frac{P_\pi G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 P_m} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (1.8)$$

Η παραπάνω εξίσωση αποτελεί μια πρώτη προσέγγιση της εμβέλειας του ραντάρ η οποία όμως μεταβάλλεται αν λάβουμε υπόψη και άλλους παράγοντες [1] – [5].

1.3 Βασικά μεγέθη λειτουργίας

Στη συνέχεια αναλύονται ορισμένες βασικές έννοιες, οι οποίες αποτελούν τη βάση για την κατανόηση των αποτελεσμάτων από την εφαρμογή των διαφόρων μεθόδων επεξεργασίας σήματος ραντάρ.

1.3.1 Φέρουσα συχνότητα

Η φέρουσα συχνότητα είναι η συχνότητα στην οποία παράγεται η ενέργεια του συστήματος ραντάρ. Ο κύριος παράγοντας που επηρεάζει την επιλογή της φέρουσας συχνότητας είναι η επιθυμητή κατευθυντικότητα. Για τον προσδιορισμό της κατεύθυνσης και της συγκέντρωσης του εκπεμπόμενου σήματος, η κεραία πρέπει να είναι πλήρως κατευθυντική. Όσο υψηλότερη είναι η φέρουσα συχνότητα τόσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος και ως εκ τούτου απαιτείται μικρότερη κεραία [3], [5].

1.3.2 Συχνότητα επανάληψης παλμών

Η συχνότητα επανάληψης παλμών (Pulse Repetition Frequency, PRF) είναι ο αριθμός των παλμών που εκπέμπονται ανά δευτερόλεπτο. Για να προσδιοριστεί η απόσταση του στόχου με ακρίβεια πρέπει να έχει ολοκληρωθεί η εκπομπή ενός παλμού πριν αρχίσει η εκπομπή του επόμενου παλμού. Αυτός είναι και ο λόγος που ανάμεσα στους εκπεμπόμενους παλμούς παρεμβάλλονται σχετικά μεγάλες περίοδοι μη μετάδοσης.

Η μέγιστη απόσταση που είναι δυνατό να μετρήσει το ραντάρ εξαρτάται από τη μέγιστη ισχύ σε συνδυασμό με τη συχνότητα επανάληψης παλμών. Για παράδειγμα αν η ισχύς παραμένει σταθερή και μειωθεί η συχνότητα επανάληψης παλμών τότε αυξάνεται η δυνατή απόσταση για ανίχνευση στόχου [3], [5].

1.3.3 Μήκος παλμού

Το μήκος του παλμού ορίζεται ως η διάρκεια του εκπεμπόμενου από το ραντάρ παλμού και μετράται συνήθως σε ms . Η ελάχιστη απόσταση στην οποία είναι δυνατό να ανιχνευτεί ένας στόχος καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από το μήκος παλμού. Αν ο στόχος βρίσκεται πολύ κοντά στον πομπό, έτσι ώστε το ανακλώμενο σήμα να επιστρέφει στο δέκτη πριν ολοκληρωθεί η μετάδοση του εκπεμπόμενου σήματος, τότε θα υπάρξει αμφιβολία για την ανίχνευση ή όχι του στόχου.

Πολλά είδη ραντάρ είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να λειτουργούν και με μικρής και με μεγάλης διάρκειας παλμούς. Η επιλογή του κατάλληλου μήκους παλμού γίνεται ανάλογα με την απόσταση των στόχων. Συνήθως τα ραντάρ που χρησιμοποιούν μεγάλης διάρκειας παλμούς έχουν μεγαλύτερες δυνατότητες στη

μέτρηση της απόστασης από το στόχο, γιατί εκπέμπεται μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας με κάθε παλμό.

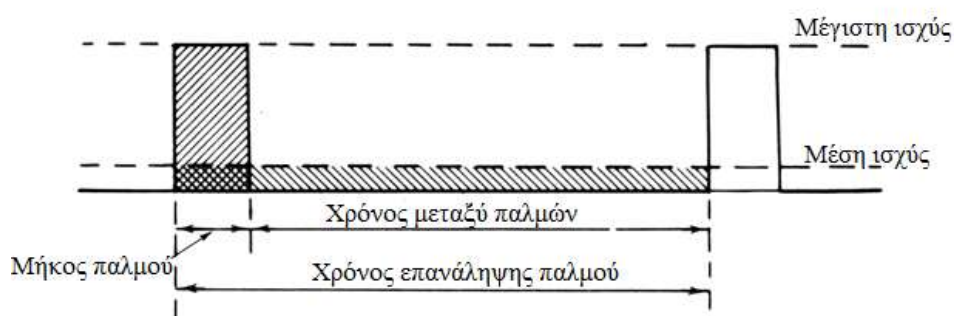
Αντίθετα χρησιμοποιώντας μικρής διάρκειας παλμούς, μπορεί να μην είναι δυνατή η ανίχνευση μέγιστης απόστασης, αλλά υπάρχει μεγαλύτερη ακρίβεια στη μέτρηση και την ανάλυση της απόστασης του στόχου. Γενικά προκύπτει καλύτερος προσδιορισμός των χαρακτηριστικών του στόχου με τους παλμούς μικρής διάρκειας.

Η ανάλυση απόστασης (range resolution) είναι ένα μέτρο της δυνατότητας του ραντάρ να ανιχνεύει ότι δύο στόχοι οι οποίοι βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους είναι ξεχωριστοί, να μην τους αντιλαμβάνεται δηλαδή ως ένα μεγάλο στόχο [3], [5].

1.3.4 Σχέση ισχύος

Η ισχύς του πομπού (των εκπεμπόμενων παλμών) ονομάζεται μέγιστη ισχύς του συστήματος ραντάρ. Η ισχύς συνήθως υπολογίζεται ως μέση τιμή σε μία περίοδο χρόνου. Επειδή ο πομπός του ραντάρ δε λειτουργεί για ένα χρονικό διάστημα που είναι μεγάλο σε σχέση με το χρόνο λειτουργίας του ραντάρ, η μέση ισχύς για μία περίοδο λειτουργίας είναι σχετικά μικρή σε σύγκριση με τη μέγιστη ισχύ που είναι διαθέσιμη κατά τη διάρκεια εκπομπής του παλμού.

Υπάρχει μία σχέση η οποία συνδέει τη μέση ισχύ για μία περίοδο λειτουργίας και τη μέγιστη ισχύ κατά τη διάρκεια εκπομπής ενός παλμού. Ο χρόνος επανάληψης παλμού (pulse repetition interval) είναι αντιστρόφως ανάλογος με το ρυθμό επανάληψης παλμού. Όσο μεγαλύτερος σε διάρκεια είναι ο παλμός τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η μέση ισχύς. Επίσης όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος επανάληψης παλμού τόσο χαμηλότερη θα είναι η μέση ισχύς (μέση ισχύς/μέγιστη ισχύς = μήκος παλμού/χρόνος επανάληψης παλμού). Η σχέση αυτή παριστάνεται γραφικά και στο σχήμα 1.2. Η μέγιστη ισχύς είναι επιθυμητή έτσι ώστε οι ανακλάσεις να φτάνουν στο δέκτη από τη μέγιστη απόσταση στόχου ενώ η χαμηλή μέση ισχύς επιτρέπει στον εξοπλισμό να έχει μικρότερες διαστάσεις και να είναι πιο συμπαγής [1].



Σχήμα 1.2: Παλμοί ραντάρ

1.3.5 Ανάλυση απόστασης (Range Resolution)

Η ανάλυση απόστασης ενός ραντάρ (Range Resolution) είναι η δυνατότητα του ραντάρ να διακρίνει δύο ή περισσότερους σκεδαστές οι οποίοι βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους. Η ικανότητα αυτή εξαρτάται κυρίως από το μήκος του εκπεμπόμενου παλμού καθώς επίσης και από τον τύπο και το μέγεθος των στόχων. Αποδεικνύεται ότι δύο σκεδαστές πρέπει να βρίσκονται σε απόσταση μεγαλύτερη ή ίση με $\Delta R = \frac{c\tau}{2}$ μεταξύ τους, όπου τ είναι η διάρκεια του εκπεμπόμενου παλμού και

c η ταχύτητα του φωτός, έτσι ώστε να είναι δυνατή η διάκρισή τους ως ξεχωριστών στόχων. Όπως προκύπτει και από την παραπάνω σχέση, για μεγαλύτερη ανάλυση απόστασης, δηλαδή καλύτερη διάκριση μεταξύ δύο στόχων απαιτείται μικρότερη διάρκεια παλμού.

Επίσης, η απόσταση δύο σκεδαστών σε κατεύθυνση κάθετη προς τη γραμμική στόχευση του ραντάρ ονομάζεται ανάλυση κάθετης απόστασης (cross-range resolution) και συμβολίζεται με ΔR_c . Στην περίπτωση αυτή δύο σκεδαστές που βρίσκονται σε ίδια απόσταση από το ραντάρ, αλλά σε διαφορετική γωνία ανύψωσης θα συνεισφέρουν ταυτόχρονα στο λαμβανόμενο σήμα εάν βρίσκονται εντός του κεντρικού λοβού της κεραίας [1].



Σχήμα 1.3: Ανάλυση απόστασης

1.4 Ραντάρ συνθετικής απεικόνισης

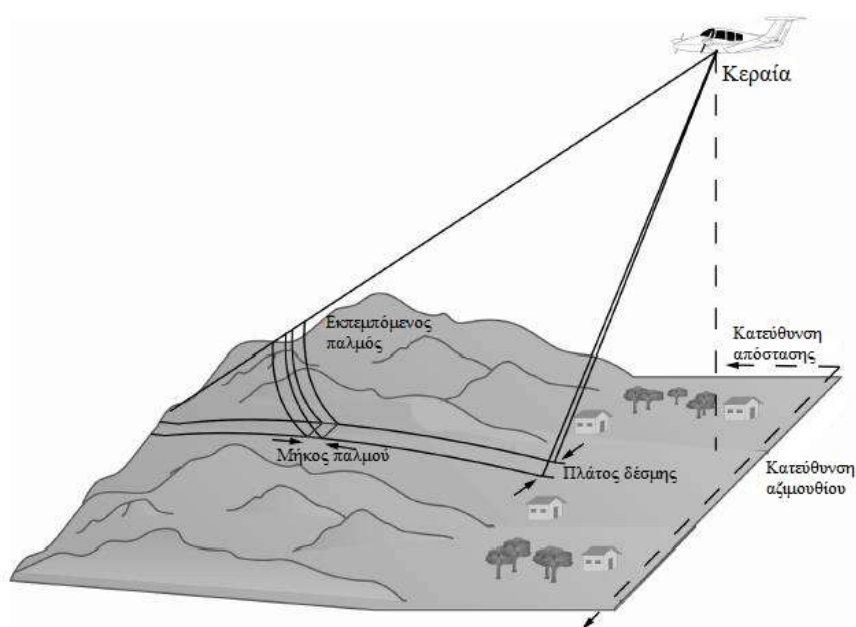
Το ραντάρ συνθετικής απεικόνισης (Synthetic Aperture Radar, SAR) είναι ένα σύστημα ραντάρ, το οποίο παράγει υψηλής ανάλυσης εικόνες από στόχους που βρίσκονται στο έδαφος ή στην επιφάνεια της θάλασσας καθώς επίσης και υψηλής ανάλυσης εικόνες από την επιφάνεια της γης. Το ραντάρ συνθετικής απεικόνισης αποτελείται από μία πλατφόρμα ή φορέα η οποία μπορεί να είναι είτε ένα αεροσκάφος (airborne) είτε ένας δορυφόρος (spaceborne) και έχει την ίδια κεραία για πομπό και δέκτη (μονοστατικό ραντάρ). Καθώς η πλατφόρμα διασχίζει μία περιοχή, η κεραία εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς. Μόλις ένας παλμός φτάσει σε ένα στόχο, τότε μέρος του παλμού ανακλάται από την επιφάνεια του στόχου, επιστρέφει στην κεραία του ραντάρ όπου και συλλέγεται. Στην περίπτωση ενός διστατικού ραντάρ, χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικές κεραίες, μία για τον πομπό και μία για το δέκτη, και η καθεμία τοποθετείται σε ξεχωριστή πλατφόρμα.

Ο φορέας του ραντάρ κινείται κατά μήκος της αζιμουθιακής κατεύθυνσης ενώ η κεραία γενικά εστιάζει σε μία κατεύθυνση ορθογώνια προς την αζιμουθιακή, η

οποία ονομάζεται κατεύθυνση απόστασης (range). Αν η κατεύθυνση της παρατήρησης είναι κατά μήκος του ναδίου του φορέα (δηλαδή κατ' ευθείαν κάτω από την πλατφόρμα) το σύστημα ορίζεται με βάση το οπτικό πεδίο. Αντίθετα, αν η κατεύθυνση παρατήρησης πραγματοποιείται υπό γωνία το σύστημα ορίζεται με βάση τη γωνία αυτή, η οποία ονομάζεται γωνία θέασης.

Το ραντάρ συνθετικής απεικόνισης επιτυγχάνει τη μονοδιάστατη και δισδιάστατη απεικόνιση ενός στόχου με υψηλή ανάλυση απόστασης και κάθετης απόστασης. Για να επιτευχθεί υψηλή ανάλυση απόστασης απαιτείται συνήθως μεγάλο εύρος συχνοτήτων ραντάρ, παρά το γεγονός ότι η ανάλυση αυτή μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά με τη χρήση παραμετρικών ή μη μεθόδων υψηλής φασματικής ανάλυσης. Η συμφασική επεξεργασία («ολοκλήρωση» μέσω του εφαρμοζόμενου μετασχηματισμού Fourier) των επιστρεφόμενων σημάτων από μία σειρά επιμέρους μικρών ανοιγμάτων (δηλαδή μικρό ακτινικό εύρος κεραίας ραντάρ) υπό διαφορετικές γωνίες στόχευσης του ραντάρ, είναι απαραίτητη για την επίτευξη υψηλής γωνιακής ανάλυσης και κατά συνέπεια υψηλής ανάλυσης κάθετης απόστασης. Τα επιμέρους μικρά ανοίγματα συνθέτουν ένα μεγαλύτερο συνθετικό άνοιγμα, το οποίο διασφαλίζει υψηλή ανάλυση κάθετης απόστασης. Δημιουργείται δηλαδή μία κεραία ενεργού παραθύρου, η οποία είναι πολύ μεγαλύτερη από μία πραγματική επιχειρησιακή κεραία.

Στα συστήματα ραντάρ συνθετικής απεικόνισης ο στόχος είναι ακίνητος και το ραντάρ κινείται ώστε να εξασφαλίζεται η παρακολούθηση του στόχου υπό γωνία και να δημιουργείται ικανό συνθετικό άνοιγμα για τη δισδιάστατη απεικόνιση του στόχου. Η κίνηση του ραντάρ είναι προαπαιτούμενο στοιχείο προκειμένου να είναι λειτουργική η τεχνική αυτή. Το βασικό πλεονέκτημα των ραντάρ αυτών είναι ότι δύναται να παρέχουν υψηλής ανάλυσης εικόνες μεγάλων εκτάσεων της επιφάνειας της γης ή στόχων από έναν φορέα που καλύπτει μεγάλες αποστάσεις [1] – [5].



Σχήμα 1.4: Ραντάρ συνθετικής απεικόνισης

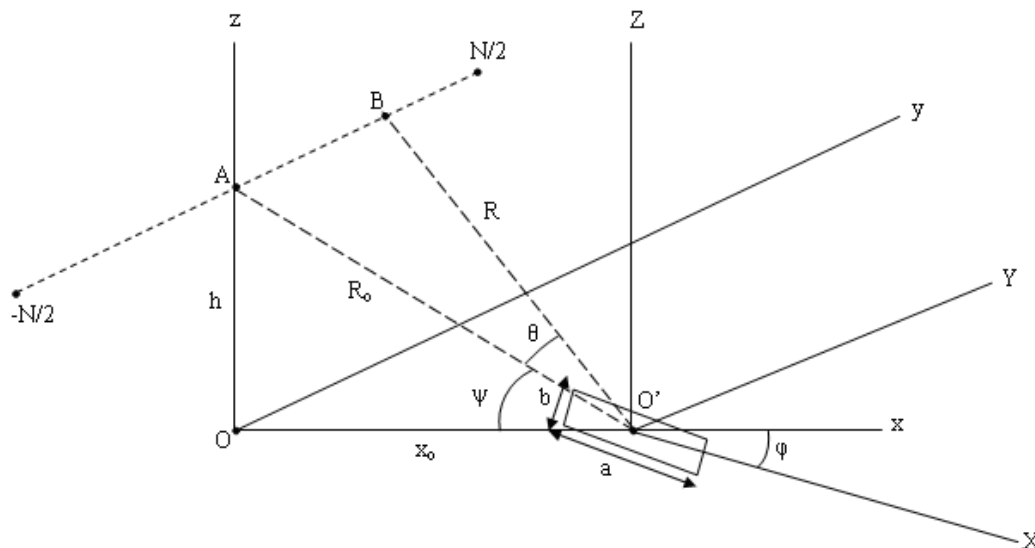
1.5 Βιβλιογραφικές αναφορές

- [1] D. Wehner, High-Resolution Radar, Artech House, 2nd Edition, 1995.
- [2] V. Chen and H. Ling, Time-Frequency Transforms for Radar Imaging and Signal Analysis, Artech House, 1st Edition, 2002.
- [3] M. I. Skolnik, Introduction to Radar Systems, McGraw-Hill, 1980.
- [4] M. Richards, Fundamentals of Radar Signal Processing, McGraw-Hill, 1st Edition, 2005.
- [5] J. S Son, G. Thomas and B. C Flores, Range-Doppler Radar Imaging and Motion Compensation, Artech House, 2001.

2. Μαθηματική θεωρία και ανάλυση γεωμετρίας για το ραντάρ συνθετικής απεικόνισης – Δισδιάστατη μοντελοποίηση ραντάρ και απεικόνιση στόχων με χρήση σήματος διαμορφωμένου κατά βηματική συχνότητα

2.1 Γεωμετρία προσομοίωσης

Το Ραντάρ Συνθετικής Απεικόνισης ή Ραντάρ Συνθετικού Παραθύρου (SAR) χρησιμοποιείται ευρέως κατά τις τελευταίες δεκαετίες για την απεικόνιση της επιφάνειας της γης, είτε από αερομεταφερόμενο φορέα (airborne SAR / αεροσκάφος, ελικόπτερο κλπ), είτε από δορυφόρο τηλεπισκόπησης χαμηλής τροχιάς, σε περιστροφή γύρω από την γη (spaceborne SAR). Παραδείγματα τέτοιων σύγχρονων δορυφόρων είναι ο RadarSat (Καναδικός) και ο TerraSat (Γερμανικός).



Σχήμα 2.1: Γεωμετρία για το ραντάρ συνθετικής απεικόνισης (SAR)

Το σχήμα 2.1 παρουσιάζει την τυπική γεωμετρία SAR. Η πλατφόρμα που φέρει το ραντάρ συνθετικής απεικόνισης ίπταται σε υψόμετρο h πάνω από την γη, με σταθερή ταχύτητα v , κατά την κατεύθυνση Oy (κατεύθυνση κατά μήκος της τροχιάς (along track)), και εκπέμπει παλμούς προς τα πλάγια, δηλαδή προς την κατεύθυνση Ox , πρόκειται δηλαδή για ένα ραντάρ πλευρικά εποπτεύον (Side Looking Radar). Η κατεύθυνση διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων του ραντάρ AO' (ή η αντίστοιχη προβολή της πάνω στην επιφάνεια της γης Ox) ονομάζεται κατεύθυνση απόστασης (range direction), ενώ η κάθετη σ' αυτήν διεύθυνση επί της γης, δηλαδή η κατεύθυνση Oy του σχήματος 2.1, ονομάζεται κάθετη απόσταση (cross-range) ή απόσταση κατά μήκος της τροχιάς (along track).

Ο στόχος στο σχήμα 2.1 θεωρείται ως στόχος γεωμετρίας ορθογωνίου παραλληλογράμμου διαστάσεων $a \times b$, σε γωνία ϕ ως προς τον άξονα Ox . Για

την περιγραφή του στόχου γίνεται χρήση των τοπικών συντεταγμένων στόχου $O'XYZ$, σε αντίθεση με τις συντεταγμένες της γήινης επιφάνειας $Oxyz$ (xy είναι η επιφάνεια της γης και z το υψόμετρο).

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.1, προκειμένου το αερομεταφερόμενο ραντάρ να δημιουργήσει μία απεικόνιση (SAR image) της γήινης επιφάνειας, χρειάζεται να συλλέξει N παλμούς σκέδασης από την γήινη επιφάνεια στην περίπτωση χρησιμοποίησης LFM (Linear Frequency Modulation) παλμών εκπομπής (ανάλυση αυτού του είδους παλμών στην επόμενη παράγραφο), ή N ριπών (bursts) παλμών, στην περίπτωση χρησιμοποίησης SF (Stepped Frequency) παλμών εκπομπής (ομοίως ανάλυση αυτού του είδους παλμών στην επόμενη παράγραφο). Επίσης στο σχήμα 2.1 το μέσον της τροχιάς της πλατφόρμας σημειώνεται με A . Ακολουθώντας τη συγκεκριμένη τροχιά, η πλατφόρμα παρακολουθεί κάθετα τον στόχο. Ως B ορίζεται μία αυθαίρετη θέση του στόχου κατά το μήκος $\left(-\frac{N}{2}, \frac{N}{2}\right)$ στην οποία λαμβάνεται ο n -στος παλμός λήψης ($n = 1, \dots, N$). Το μήκος τροχιάς της πλατφόρμας που αντιστοιχεί σε αυτούς τους N παλμούς, που απαιτούνται για την λήψη μιας απεικόνισης (SAR image), ονομάζεται συνθετικό μήκος (Synthetic Length, L_e) του ραντάρ συνθετικής απεικόνισης. Προφανώς για το συνθετικό μήκος L_e ισχύει η σχέση:

$$L_e = vNT_E \quad (2.1)$$

όπου T_E είναι ο χρόνος επανάληψης παλμών (Pulse Repetition Interval, PRI) του παλμικού ραντάρ LFM παλμών. Στην περίπτωση παλμικού ραντάρ με χρήση παλμών SF, η εξίσωση (2.1) τροποποιείται στην εξίσωση:

$$L_e = vNMT_E \quad (2.2)$$

δεδομένου ότι στην περίπτωση αυτή για μία απεικόνιση απαιτούνται N ριπές (N bursts) παλμών SF, όπου η διάρκεια μιας ριπής είναι

$$T_b = MT_E \quad (2.3)$$

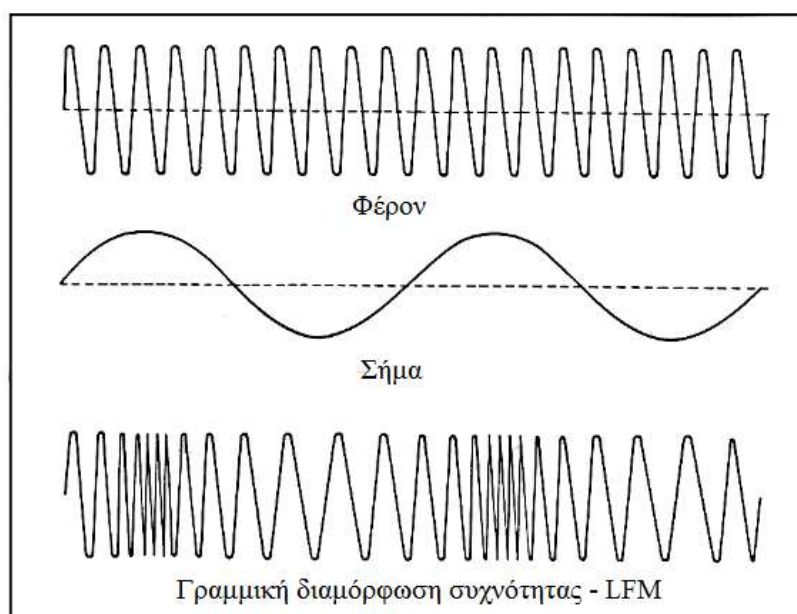
και M είναι ο αριθμός των συχνοτήτων σε μία ριπή για την SF κυματομορφή. Τέλος, στο Σχήμα 2.1, R και R_o είναι οι αποστάσεις πλατφόρμας – στόχου για τις θέσεις A και B , αντίστοιχα, ψ είναι η γωνία πρόσπτωσης (grazing angle) των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ως προς τη γη, θ είναι η γωνία θέασης (γωνία αζιμουθίου) του στόχου του ραντάρ, και x_o είναι η προβολή της απόστασης R_o πάνω στη γη.

Η ονομασία ραντάρ συνθετικής απεικόνισης (Synthetic Aperture Radar, SAR) προέρχεται από την εξής διαδικασία: προκειμένου το σύστημα ραντάρ να δημιουργήσει μία απεικόνιση (image) απαιτείται η λήψη N παλμών (ή N ριπών) σκέδασης από την γήινη επιφάνεια, καθώς και η κατάλληλη επεξεργασία φάσης (coherent radar system). Συνεπώς το εν λόγω σύστημα προσομοιάζεται με μία «συνθετική φασική στοιχειοκεραία» (synthetic array ή synthetic aperture) [1] – [6].

2.2 Κυματομορφές εκπομπής ραντάρ (κυματομορφές LFM, SF)

2.2.1 Γραμμική διαμόρφωση συχνότητας - LFM (Linear Frequency Modulation)

Στην περίπτωση που το ραντάρ συνθετικής απεικόνισης εκπέμπει κυματομορφή τύπου γραμμικής διαμόρφωσης συχνότητας, LFM (Linear Frequency Modulation), η φέρουσα συχνότητα στον εκπεμπόμενο παλμό ραντάρ αυξάνεται ή ελαττώνεται γραμμικά με τον χρόνο, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2: Γραμμική διαμόρφωση συχνότητας - LFM

Το εύρος ζώνης B (Bandwidth) για αυτόν τον τύπο παλμού εκπομπής δίνεται κατά προσέγγιση από την σχέση:

$$B = f_{\max} - f_{\min} \quad (2.4)$$

όπου f_{\max} είναι η μέγιστη εκπεμπόμενη συχνότητα στο φέρον και f_{\min} είναι η αντίστοιχη ελάχιστη εκπεμπόμενη συχνότητα στο φέρον του παλμού LFM. Το αυξημένο αυτό εύρος ζώνης παρέχει τη δυνατότητα ικανοποιητικής διαχωριστικής ικανότητας στόχων ραντάρ στην κατεύθυνση απόστασης (range).

Στην περίπτωση χρήσης παλμών τύπου γραμμικής διαμόρφωσης συχνότητας - LFM για απεικονίσεις ραντάρ συνθετικής απεικόνισης απαιτείται η λήψη N παλμών σκέδασης από το δέκτη του ραντάρ, έτσι ώστε να επιτευχθεί η απεικόνιση (Σχήμα 2.1). Επίσης, κατά την λήψη και επεξεργασία των παλμών επιστροφής, απαιτείται η λήψη M δειγμάτων ανά παλμό επιστροφής (στην βασική ζώνη συχνοτήτων μετά την αποδιαμόρφωση στον δέκτη), που αντιστοιχούν σε M λαμβανόμενες συχνότητες μέσα στο εύρος ζώνης ανά παλμό. Με τον τρόπο αυτό λαμβάνονται, προς επεξεργασία στο δέκτη του ραντάρ, $M \times N$ μιγαδικά δεδομένα σκέδασης, στα οποία εφαρμόζεται η

μέθοδος απεικόνισης Range – Doppler Imaging (RDI) που θα περιγραφεί στη συνέχεια [1].

2.2.2 Κυματομορφή τύπου βηματικής συχνότητας (Stepped Frequency, SF)

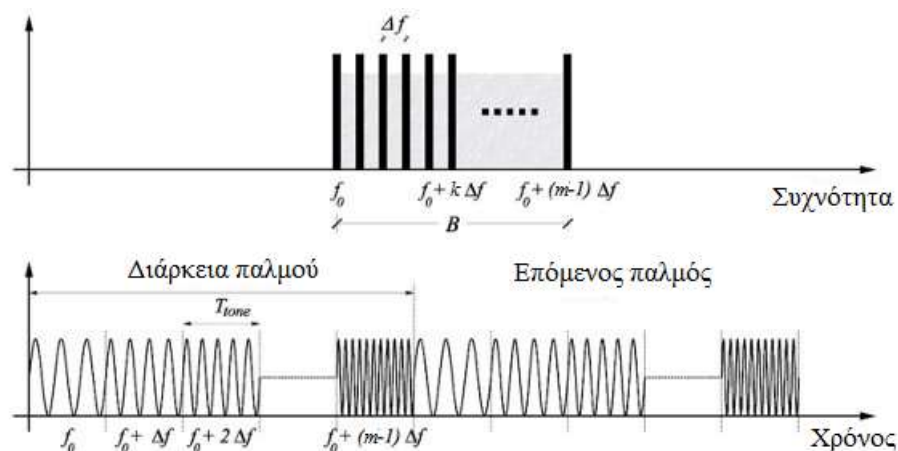
Στην περίπτωση που το ραντάρ συνθετικής απεικόνισης εκπέμπει κυματομορφή τύπου βηματικής συχνότητας (stepped frequency), όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3, εκπέμπονται αρχικά M παλμοί, στον καθένα από τους οποίους η φέρουσα συχνότητα είναι σταθερή με τον χρόνο, αλλά αυξάνει από παλμό σε παλμό (για τους M αυτούς παλμούς) με βήμα Δf , σύμφωνα με την σχέση:

$$f_m = f_o + (m-1)\Delta f \quad (2.5)$$

όπου $m = 1, 2, \dots, M$.

Το εύρος ζώνης στην περίπτωση αυτή είναι κατά προσέγγιση:

$$B = M \cdot \Delta f \quad (2.6)$$



Σχήμα 2.3: Κυματομορφή βηματικής συχνότητας - SF

Το σύνολο των M εκπεμπόμενων παλμών αποτελεί μία ριπή εκπομπής (burst). Περαιτέρω, προκειμένου να επιτευχθεί μία απεικόνιση για ραντάρ συνθετικής απεικόνισης, απαιτείται η εκπομπή (και λήψη) N τέτοιων ριπών, οπότε σχηματίζεται η απαιτούμενη μήτρα $M \times N$ μιγαδικών δεδομένων σκέδασης. Στην περίπτωση της κυματομορφής τύπου βηματικής συχνότητας, λαμβάνεται συνήθως ένα δείγμα ανά παλμό (στη βασική ζώνη συχνοτήτων μετά την αποδιαμόρφωση στον δέκτη).

Οι δύο τύποι εκπομπής ραντάρ, θεωρούνται, για την απεικόνιση ραντάρ συνθετικής απεικόνισης, ως μαθηματικά ισοδύναμες μέθοδοι, με την έννοια ότι λαμβάνονται τα δεδομένα σκέδασης από τον στόχο ραντάρ για M διαφορετικές συχνότητες, και για N διαφορετικές γωνίες θέασης (ή γωνίες αζιμούθιου) του στόχου.

Όπως θα αναφερθεί στη συνέχεια, ο αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier (IFFT) των M μιγαδικών δεδομένων μας παρέχει τα προφίλ απόστασης (range profiles) του στόχου τα οποία αποτελούν μία μονοδιάστατη υπογραφή του στόχου/επιστρεφόμενο σήμα από τον στόχο σαν συνάρτηση του χρόνου. Στη συνέχεια, μετά την ευθυγράμμιση (alignment) των N λαμβανόμενων προφίλ απόστασης, ο υπολογισμός του φάσματος Doppler (FFT σε N μιγαδικά δεδομένα) στην κατεύθυνση του cross – range μας παρέχει τελικά την δισδιάστατη απεικόνιση SAR στις κατευθύνσεις range – cross range (Range – Doppler Imaging technique) [2].

2.3 Επεξεργασία σημάτων επιστροφής κατά την κατεύθυνση απόστασης (range) – διαχωριστική ικανότητα στόχων

Κατά την κατεύθυνση απόστασης (range), σχετικά με τον διαχωρισμό των στόχων ραντάρ (ανάλυση απόστασης - range resolution) ισχύουν οι γενικές αρχές διαχωρισμού στόχων, που ισχύουν και σε ένα συμβατικό ραντάρ. Συνεπώς, η διαχωριστική ικανότητα ΔR του ραντάρ συνθετικής απεικόνισης μεταξύ στόχων, εξαρτάται από την διάρκεια των παλμών εκπομπής τ του ραντάρ, και γενικότερα από το εύρος ζώνης της κυματομορφής εκπομπής B όπως φαίνεται από τις παρακάτω εξισώσεις. Συνεπώς από το Σχήμα 2.1 προκύπτει:

$$\Delta R = \frac{c\tau}{2} = \frac{c}{2B} \quad (2.7)$$

Το σήμα επιστροφής στον δέκτη πρέπει να υποστεί επεξεργασία, δηλαδή εφαρμόζεται αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier (Inverse Fast Fourier Transform, IFFT) στα δεδομένα συχνότητας στην βασική ζώνη συχνοτήτων και έτσι λαμβάνεται η μονοδιάστατη υπογραφή του στόχου ή αλλιώς προφίλ απόστασης του στόχου (1D radar signature ή range profile) [3], [7] – [8].

Αντίστοιχα η διαχωριστική ικανότητα απόστασης επί της επιφάνειας της γης δίδεται από την εξίσωση:

$$\Delta x = \frac{c\tau}{2 \cos \psi} = \frac{c}{2B \cos \psi} \quad (2.8)$$

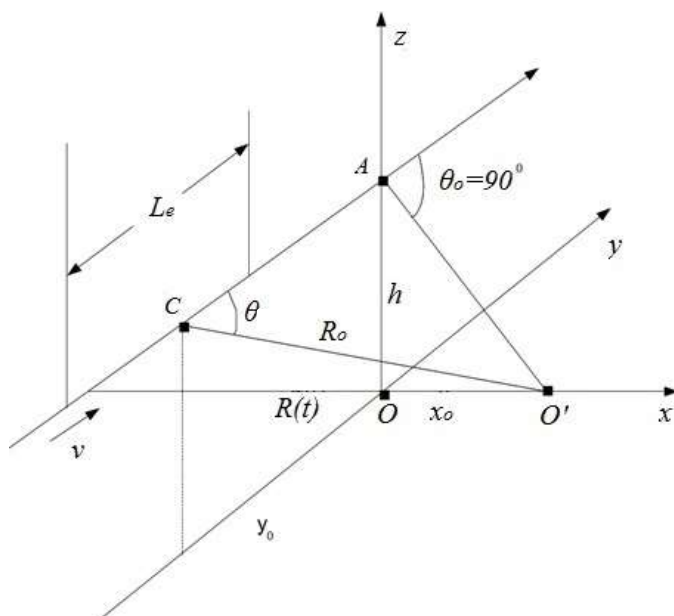
2.4 Μαθηματική ανάλυση για μοντελοποίηση σημειακού στόχου

2.4.1 Ολίσθηση φάσης στο δέκτη του ραντάρ

Από την γεωμετρία του σχήματος 2.4 εξάγονται οι μαθηματικές εκφράσεις που προσδιορίζουν την απόσταση $R(t)$ της πλατφόρμας του ραντάρ από τον σημειακό σκεδαστή O' στο εδάφος. Στη συνέχεια, θα προσδιοριστεί η μαθηματική έκφραση για την αντίστοιχη συνάρτηση φάσης: $\phi(t) = 2\kappa R(t)$ του

ηλεκτρομαγνητικού κύματος ραντάρ στην πλατφόρμα, καθώς και της αντίστοιχης συχνότητας Doppler στο δέκτη του ραντάρ:

$$f_d = \frac{2v}{c} f_o = \frac{2v}{\lambda} = -\frac{2}{\lambda} \frac{dR}{dt} \quad (2.9)$$



Σχήμα 2.4: Ολίσηση φάσης στο δέκτη του ραντάρ

Οι παραπάνω μαθηματικές εκφράσεις θα προσδιοριστούν τόσο για αυθαίρετη γωνία θέασης (γωνία αζιμούθιου) θ του στόχου, που αντιστοιχεί στο σημείο C της τροχιάς του φορέα, όσο και για το σημείο A μέγιστης προσέγγισης (ελάχιστης απόστασης) του φορέα από τον σημειακό στόχο O' [7].

Έστω ότι ο φορέας του ραντάρ τη χρονική στιγμή $t = 0$ βρίσκεται στο σημείο C της ευθύγραμμης τροχιάς του (προς την κατεύθυνση του θετικού ημιάξονα Oy) και ίπταται με σταθερή ταχύτητα v . Εκείνη την χρονική στιγμή η απόσταση R ραντάρ - στόχου είναι:

$$R(t=0) = R_o = (x_o^2 + y_o^2 + h^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2.10)$$

Η γωνία θέασης (squint angle) θ_o του στόχου O' είναι:

$$\cos \theta_o = \frac{y_o}{R_o} \quad (2.11)$$

Το ραντάρ απεικονίζει την περιοχή γύρω από τον σκεδαστή O' χρησιμοποιώντας συνθετικό μήκος L_e , για το οποίο ισχύει η σχέση :

$$L_e = v \cdot (CPI) = v \cdot T \quad (2.12)$$

όπου T είναι ο χρόνος επεξεργασίας (παρατήρησης) του ανακλώμενου σήματος που απαιτείται για την δημιουργία μιας απεικόνισης SAR (SAR image). Ο χρόνος T ονομάζεται διάστημα συμφασικής επεξεργασίας (CPI) του ραντάρ συνθετικής απεικόνισης ($CPI = \text{Coherent Processing Interval}$).

Κατά τη διάρκεια του χρόνου παρατήρησης T , η απόσταση R ραντάρ – στόχου δίνεται από την σχέση:

$$R(t) = [x_o^2 + (y_o - v \cdot t)^2 + h^2]^{\frac{1}{2}}, \quad -\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2} \quad (2.13)$$

Αναπτύσσοντας τον τετραγωνικό όρο της εξίσωσης (2.13) και χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (2.10) και (2.11), λαμβάνεται η σχέση:

$$R(t) = (R_o^2 - 2R_o v t \cos \theta_o + v^2 t^2)^{\frac{1}{2}} = R_o \left(1 - \frac{2vt \cos \theta_o}{R_o} + \frac{v^2 t^2}{R_o^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.14)$$

Ακολουθώντας χρησιμοποιώντας το ανάπτυγμα Taylor της εξίσωσης (2.14) γύρω από το σημείο $t = 0$ (σειρά Mac-Laurin), η εξίσωση (2.14) γράφεται:

$$\begin{aligned} R(t) &= R_o \left(1 - \frac{vt \cos \theta_o}{R_o} + \frac{v^2 t^2}{2R_o^2} \sin^2 \theta_o + \frac{v^3 t^3}{2R_o^3} \cos \theta_o \sin^2 \theta_o + \dots \right) = \\ &= R_o - vt \cos \theta_o + \frac{v^2 t^2}{2R_o} \sin^2 \theta_o + \frac{v^3 t^3}{2R_o^2} \cos \theta_o \sin^2 \theta_o + \dots \end{aligned} \quad (2.15)$$

Στην ειδική περίπτωση που η γωνία θέασης θ είναι $\theta_o = 90^\circ$ (σημείο A , δηλαδή η πλησιέστερη θέση του φορέα από τον στόχο O'), από την εξίσωση (2.15) προκύπτει:

$$R(t) = R_o + \frac{v^2 t^2}{2R_o} - \frac{v^4 t^4}{8R_o^3} + \dots \quad (\theta_o = 90^\circ) \quad (2.16)$$

Η αντίστοιχη φάση $\phi(t)$ στο δέκτη του ραντάρ δίνεται από την εξίσωση:

$$\phi(t) = 2 \cdot k \cdot R(t) = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot R(t) \quad (2.17)$$

Συνεπώς, από τις εξισώσεις (2.16) και (2.17), προκύπτει :

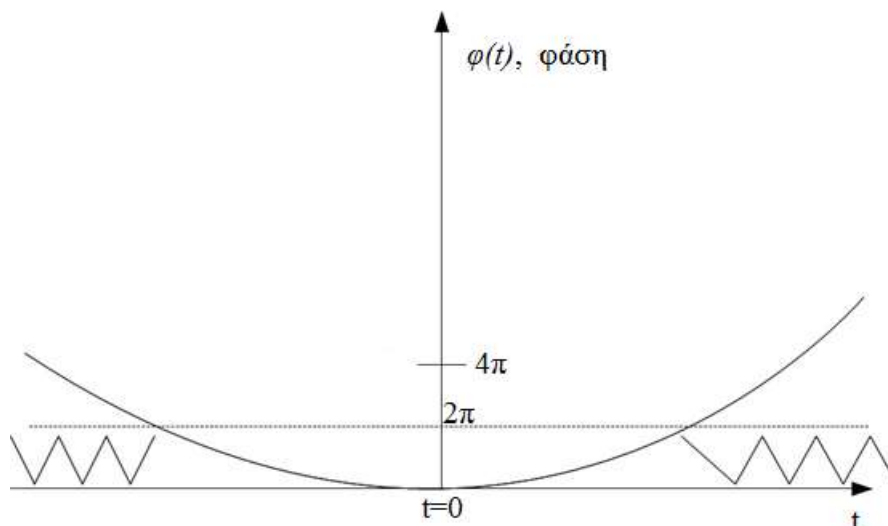
$$\phi(t) = \phi_o + \frac{2\pi v^2 t^2}{\lambda R_o} - \frac{\pi v^2 t^4}{2\lambda R_o^3} + \dots \quad (\theta_o = 90^\circ) \quad (2.18)$$

όπου $\phi_o = \frac{4\pi R_o}{\lambda}$.

Αν υποθεθεί ότι ο χρόνος t (γύρω από το σημείο $t = 0$) είναι αρκετά μικρός ($t \ll 1$), τότε στην εξίσωση (2.18) μένει μόνο ο όρος με την τετραγωνική εξάρτηση από τον χρόνο. Οπότε η σχέση αυτή δίνει προσεγγιστικά:

$$\phi(t) \approx \phi_o + \frac{2\pi v^2 t^2}{\lambda R_o} \quad (\theta_o = 90^\circ) \quad (2.19)$$

Δεδομένου ότι η φάση ϕ_o είναι η σταθερή διαφορά φάσης μεταξύ του μέσου της τροχιάς και του στόχου O' , είναι δυνατό να επιλεγεί αυθαίρετα $\phi_o = 0$, οπότε η φάση $\phi(t)$ μέσα στο *CPI* ($-\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2}$), και για $\theta_o = 90^\circ$, έχει παραβολική εξάρτηση από τον χρόνο. Το γεγονός αυτό θα έπρεπε να αναμένεται διότι, από την εξίσωση (2.16) η απόσταση $R(t)$ έχει, κατά προσέγγιση, παραβολική εξάρτηση από τον χρόνο. Για την περίπτωση αυτή, η φάση $\phi(t)$ γύρω από το σημείο $t = 0$, δίνεται στο σχήμα 2.5. Η φάση $\phi(t)$ είναι κατά προσέγγιση παραβολικής μορφής [7].



Σχήμα 2.5: Φάση $\phi(t)$ στο δέκτη του ραντάρ για κάθετη θέαση του στόχου O' ($\theta_o = 90^\circ$),

για μικρούς χρόνους t ($t \ll 1$), μέσα στο *CPI* ($-\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2}$)

2.4.2 Ολίσθηση (συχνότητα) Doppler στο δέκτη του ραντάρ

Η συχνότητα Doppler στο δέκτη προκύπτει από την παραγωγή ως προς το χρόνο της εξίσωσης (2.15) [7]. Επομένως η συχνότητα δίνεται από την παρακάτω εξίσωση για την απόσταση $R(t)$:

$$f_d(t) = -\frac{2}{\lambda} \cdot \frac{dR(t)}{dt} = \frac{2v}{\lambda} \cdot \cos \theta_o - \frac{2v^2 t}{\lambda R_o} \cdot \sin^2 \theta_o - \frac{3v^3 t^2}{\lambda R_o^2} \cdot \cos \theta_o \cdot \sin^2 \theta_o + \dots \quad (2.20)$$

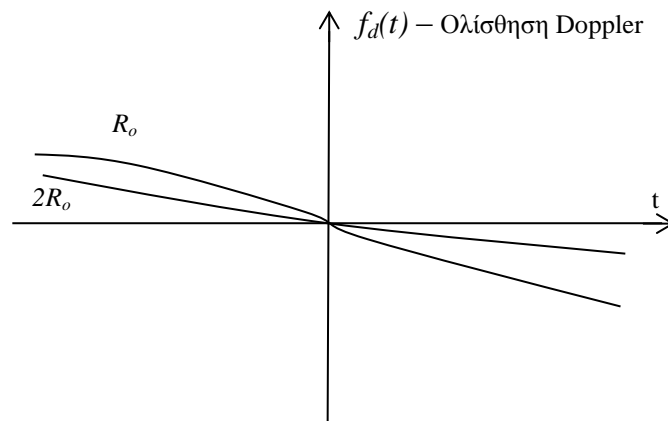
Για την ειδική περίπτωση γωνίας θέασης ίσης με $\theta_o = 90^\circ$, η εξίσωση (2.20) γράφεται:

$$f_d(t) = -\frac{2v^2 t}{\lambda R_o} - \frac{v^4 t^3}{\lambda R_o^3} + \dots \quad (2.21)$$

Ειδικότερα, αν υποθεθεί ότι $t \ll 1$, τότε παραμένει μόνο ο γραμμικός όρος μπορούμε ως προς τον χρόνο στην εξίσωση (2.21), και έτσι προκύπτει:

$$f_d(t) \approx -\frac{2v^2 t}{\lambda R_o} \quad (2.22)$$

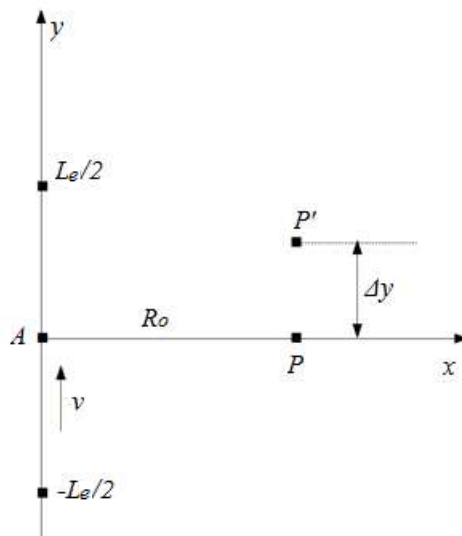
Φαίνεται ότι για $t < 0$ ($-\frac{T}{2} < t < 0$) η ολίσθηση Doppler f_d είναι θετική, όπως αναμένεται (ο στόχος πλησιάζει στο O'), ενώ για $t > 0$ ($0 < t < \frac{T}{2}$) η f_d είναι αρνητική (ο στόχος απομακρύνεται από το O'). Το γράφημα της συνάρτησης $f_d(t)$ της εξίσωσης (2.21) δίνεται στο σχήμα 2.6:



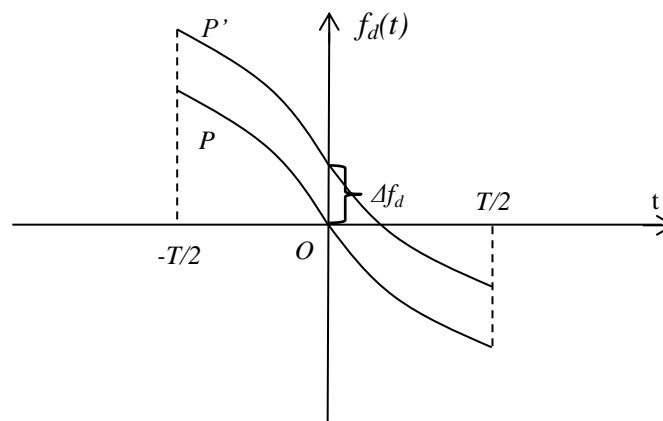
Σχήμα 2.6: Ολίσθηση Doppler $f_d(t)$ στο δέκτη του ραντάρ, (εξ. 21) [$\theta_o = 90^\circ$, $(-\frac{T}{2} < t < \frac{T}{2})$] δηλαδή χρόνος t μέσα στο CPI]

2.5 Διαχωριστική ικανότητα στόχων στην κατεύθυνση της κάθετης απόστασης (cross range)

Στην παράγραφο αυτή υπολογίζεται η διαχωριστική ικανότητα Δy του ραντάρ να διαχωρίζει στόχους στην κατεύθυνση της κάθετης απόστασης (cross range ή along track) Oy . Σε αντίθεση με την κατεύθυνση απόστασης (range), όπου η διαχωριστική ικανότητα σχετίζεται με την διάρκεια των παλμών εκπομπής ραντάρ [ή, γενικότερα με το εύρος ζώνης του ραντάρ], στην περίπτωση κάθετης απόστασης (cross range) η διαχωριστική ικανότητα στόχων σχετίζεται με την ικανότητα του δέκτη να διαχωρίζει συχνότητες Doppler (frequency resolution) [7].



Σχήμα 2.7: Διαχωριστική ικανότητα μεταξύ δύο στόχων P και P'



Σχήμα 2.8: Υπολογισμός διαχωριστικής ικανότητας Δy στην κατεύθυνση της κάθετης απόστασης (cross range) για ένα ραντάρ SAR

Στο σχήμα 2.7 απεικονίζονται δύο στόχοι (σκεδαστές) P και P' που απέχουν απόσταση Δy μεταξύ τους στην κατεύθυνση κάθετης απόστασης (cross range). Στη συνέχεια θα εξεταστεί η ικανότητα του δέκτη του ραντάρ στο διαχωρισμό των στόχων P και P' . Αντίστοιχα στο σχήμα 2.8 σχεδιάζεται, με βάση το σχήμα 2.7, η ολίσθηση Doppler $f_d(t)$ για απόσταση στόχου R_o (στόχος P), γωνία θέασης $\theta_o = 90^\circ$ και για $(-\frac{T}{2} < t < \frac{T}{2})$, δηλαδή για χρόνους μέσα στο CPI . Η αντίστοιχη καμπύλη $f_d(t)$ για το σημειακό στόχο (σκεδαστή) P' έπεται χρονικά προφανώς της προηγούμενης καμπύλης κατά χρόνο:

$$t_o = \frac{\Delta y}{v} \quad (2.23)$$

Συνεπώς, προσεγγιστικά από την εξίσωση (2.22), για $t' = t + t_o = t + \frac{\Delta y}{v}$, προκύπτει:

$$f_d(t) = -\frac{2v^2 t}{\lambda R_o} - \frac{2v^2}{\lambda R_o} \cdot \frac{\Delta y}{v} \quad (2.24)$$

Οπότε η αντίστοιχη μετατόπιση συχνότητας Doppler Δf_d , που αντιστοιχεί στον σημειακό στόχο P' , σε σχέση με τον στόχο P , δίνεται από την σχέση:

$$\Delta f_d = \frac{2v}{\lambda R_o} \cdot \Delta y \quad (2.25)$$

Όπως είναι γνωστό από την θεωρία σημάτων, η διαχωριστική ικανότητα στη συχνότητα ενός δέκτη είναι αντιστρόφως ανάλογη με τη χρονική διάρκεια παρατήρησης του σήματος, που στη περίπτωση αυτή ισούται με T . Άρα:

$$\Delta f_d \approx \frac{1}{T} \quad (2.26)$$

Δεδομένου, όμως, ότι από την εξίσωση (2.12) είναι $T = \frac{L_e}{v}$, από την εξίσωση (2.26) προκύπτει:

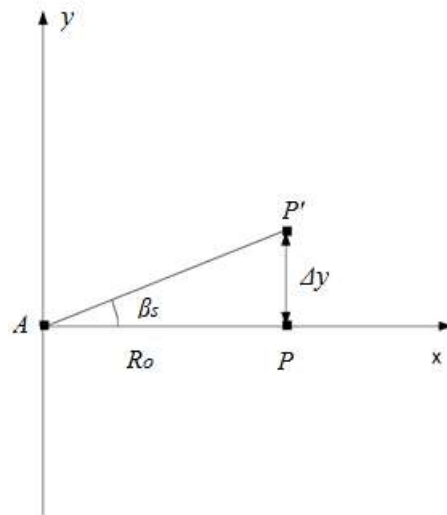
$$\Delta f_d \approx \frac{v}{L_e} \quad (2.27)$$

Εξισώνοντας τις (2.23), (2.25) και (2.27) προκύπτει :

$$\Delta y = \frac{\lambda R_o}{2L_e} \quad (2.28)$$

όπου R_o είναι η απόσταση ραντάρ – στόχου , L_e το συνθετικό μήκος (synthetic length) του ραντάρ SAR και $\lambda = \frac{c}{f}$ το μήκος κύματος λειτουργίας του ραντάρ (f =συχνότητα λειτουργίας του ραντάρ).

Οι εξισώσεις (2.8) και (2.28) αποτελούν τις θεμελιώδεις σχέσεις για το ραντάρ SAR και αφορούν τη διαχωριστική ικανότητα στην κατεύθυνση απόστασης (range) και κάθετης απόστασης (cross-range) αντίστοιχα. Οι διαστάσεις των μεγεθών Δx και Δy μετριούνται σε μέτρα (m) [7].



Σχήμα 2.9: Διαχωριστική ικανότητα Δy στην κατεύθυνση της κάθετης απόστασης (cross range) για ένα ραντάρ SAR

Στη βιβλιογραφία του SAR , πολλές φορές η διαχωριστική ικανότητα Δy στην κατεύθυνση της κάθετης απόστασης (cross-range) δίνεται και ως η αντίστοιχη με το τόξο (απόσταση) Δy γωνία θέασης β_s (μετρούμενη σε ακτίνια (rad)) από το ραντάρ:

$$\beta_s \approx \frac{\Delta y}{R_o} \quad (2.29)$$

Συνεπώς η διαχωριστική ικανότητα β_s σύμφωνα με τις εξισώσεις (2.28) και (2.29) είναι:

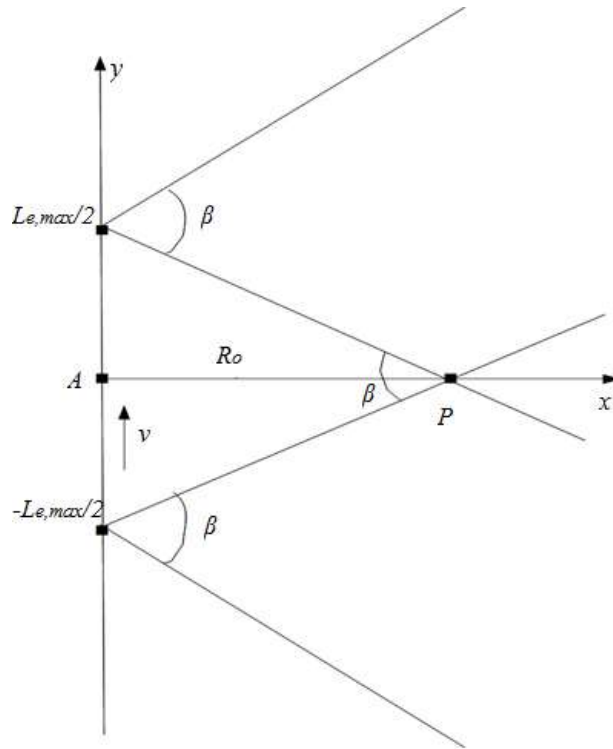
$$\beta_s = \frac{\lambda}{2L_e} \quad (2.30)$$

Η παραπάνω σχέση ορίζεται ως διαχωριστική ικανότητα στην κατεύθυνση κάθετης απόστασης (cross range), μετρούμενη ως γωνία θέασης από το ραντάρ, σε ακτίνια (rad) [7].

2.6 Βέλτιστη δυνατή διαχωριστική ικανότητα στόχων στην κατεύθυνση της κάθετης απόστασης (cross range)

Από την εξίσωση (2.8) για την ανάλυση απόστασης (range resolution) προκύπτει ότι το εύρος ζώνης B του ραντάρ πρέπει να είναι το μέγιστο δυνατό, ώστε να επιτευχθεί ικανοποιητική (μικρής τιμής) διαχωριστική ικανότητα Δx στην κατεύθυνση απόστασης (range).

Αντίστοιχα, από την εξίσωση (2.28) ή την εξίσωση (2.30) προκύπτει ότι το συνθετικό μήκος L_e πρέπει να είναι μέγιστο, κατά το δυνατόν, για επίτευξη ικανοποιητικής διαχωριστικής ικανότητας στην κατεύθυνση κάθετης απόστασης (cross range). Λόγω της εξίσωσης (2.1) και του απαιτούμενου αριθμού παλμών λήψης N , υπάρχει μία σχέση εξάρτησης (trade – off) ανάμεσα στην πραγματοποίηση ικανοποιητικής διαχωριστικής ικανότητας στην κατεύθυνση κάθετης απόστασης (cross range) και ποσότητας δεδομένων (amount of received data) ή απαιτούμενου αριθμού παλμών επιστροφής [7].



Σχήμα 2.10: Μέγιστο δυνατό συνθετικό μήκος $L_{e,max}$

Σύμφωνα με το σχήμα 2.10, το μέγιστο δυνατό συνθετικό μήκος $L_{e,max}$ είναι εκείνο για το οποίο, με δεδομένο εύρος δέσμης (beamwidth) β της κεραίας εκπομπής ραντάρ ισχύει:

$$\beta \approx \frac{\lambda}{D} \quad (2.31)$$

όπου D η διάμετρος της κεραίας του (μονοστατικού) ραντάρ. Ο στόχος P θεωρείται θεατός (visible) από το ραντάρ. Από το σχήμα 2.10 προκύπτει, λόγω γεωμετρίας:

$$\beta \approx \frac{L_{e,\max}}{R_o} \quad (2.32)$$

όπου R_o είναι η απόσταση ραντάρ – στόχου. Εξισώνοντας τις εξισώσεις (2.31) και (2.32) προκύπτει:

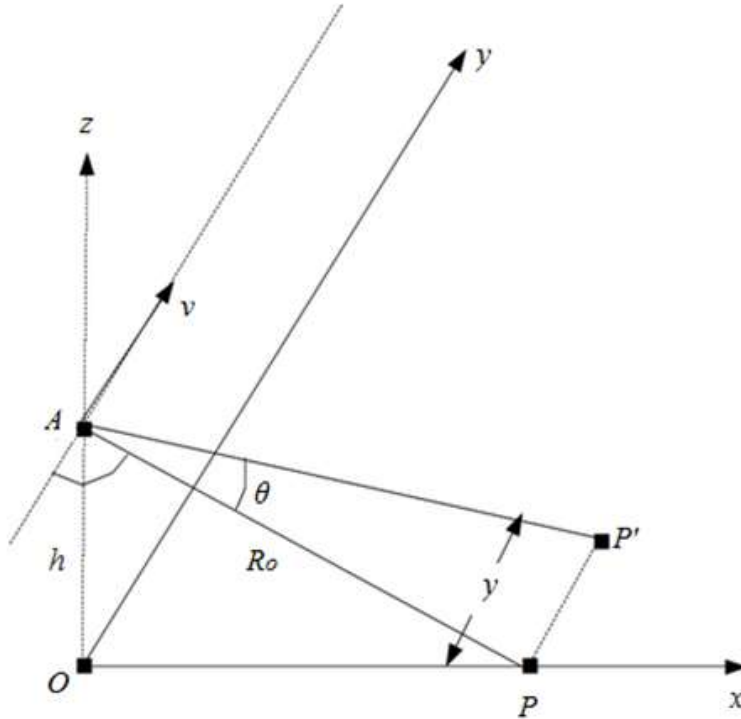
$$L_{e,\max} = \frac{\lambda R_o}{D} \quad (2.33)$$

και με αντικατάσταση στη εξίσωση (2.28) προκύπτει η βέλτιστη δυνατή διαχωριστική ικανότητα Δy στο cross- range (cross- range resolution limit):

$$\Delta y = \frac{D}{2} \quad (2.34)$$

Η παραπάνω βέλτιστη διαχωριστική ικανότητα Δy είναι δυνατό να επιτευχθεί μόνο με αντάλλαγμα (trade – off) τη συλλογή μεγάλου αριθμού δεδομένων σκέδασης στο δέκτη του ραντάρ. Επίσης στην εξίσωση (2.34) δημιουργείται η εντύπωση ότι η διαχωριστική ικανότητα Δy είναι ανεξάρτητη της απόστασης ραντάρ – στόχου R_o . Όμως η παράμετρος αυτή επηρεάζει δραστικά την ισχύ λήψης στον δέκτη [1], [9].

2.7 Εναλλακτική υπολογισμού της βέλτιστης δυνατής διαχωριστικής ικανότητας στόχων στην κατεύθυνση της κάθετης απόστασης (cross range)



Σχήμα 2.11: Διαχωρισμός δύο σημειακών στόχων P και P' στην κατεύθυνση κάθετης απόστασης (cross range)

Έστω δύο σημειακοί στόχοι (σκεδαστές) P και P' όπως φαίνονται στο σχήμα 2.11. Επιπλέον γίνεται η υπόθεση ότι κατά την παρούσα χρονική στιγμή ο στόχος P είναι σε καθετότητα με την τροχιά του φορέα του ραντάρ, δηλαδή η ευθεία ραντάρ – στόχου AP είναι κάθετη ως προς την ταχύτητα v του φορέα του ραντάρ. Επιπλέον ένας παρακείμενος σημειακός στόχος P' βρίσκεται σε απόσταση y από το στόχο P . Τότε, η συχνότητα λήψης f_λ για τον στόχο P' , για την μετατόπιση Doppler, προκύπτει από την εξίσωση (2.9) ίση με:

$$f_\lambda = f_o + f_d = f_o + \frac{2v}{c} f_o \cdot \sin \theta \quad (2.35)$$

όπου θ είναι η γωνία θέασης του στόχου. Είναι προφανές ότι για $\theta > 0$ προκύπτει $f_d > 0$ (πλησιάζει το ραντάρ στο στόχο), για $\theta = 0$ προκύπτει $f_d = 0$ (στόχος P στο Σχήμα 2.11), ενώ για $\theta < 0$ προκύπτει $f_d < 0$ (απομακρύνεται το ραντάρ από το στόχο).

Επιπρόσθετα από το σχήμα 2.11, για μικρές γωνίες θέασης στόχου θ , ισχύει κατά προσέγγιση η σχέση:

$$y \approx R_o \cdot \sin \theta \quad (2.36)$$

όπου R_o είναι η απόσταση ραντάρ – στόχου.

Η εξίσωση (2.36) , με την βοήθεια της εξίσωσης (2.35) για το f_d , δίνει:

$$y \approx \frac{R_o c f_d}{2\nu f_o} = \frac{R_o \lambda f_d}{2\nu} \quad (2.37)$$

Συνεπώς η διαχωριστική ικανότητα στην κατεύθυνση κάθετης απόστασης (cross range) Δy προκύπτει , από την εξίσωση (2.37) , ίση με:

$$\Delta y \approx \frac{R_o \lambda (\Delta f_d)}{2\nu} \quad (2.38)$$

όπου ν η ταχύτητα του φορέα του ραντάρ και Δf_d η διαχωριστική ικανότητα στην συχνότητα του δέκτη του ραντάρ . Η σχέση που δίνει το συνθετικό μήκος L_e είναι η εξής:

$$L_e = \nu \cdot N \cdot T_E \quad (2.39)$$

όπου $N \cdot T_E$ είναι ο χρόνος επεξεργασίας ραντάρ ή αλλιώς διάστημα συμφασικής επεξεργασίας (Coherent Processing Interval, CPI) . Με αντικατάσταση στην εξίσωση (2.38) της εξίσωσης (2.39) για την ταχύτητα ν , προκύπτει η σχέση:

$$\Delta y \approx \frac{R_o \lambda}{2L_e} \cdot [N \cdot T_E \cdot (\Delta f_d)] \quad (2.40)$$

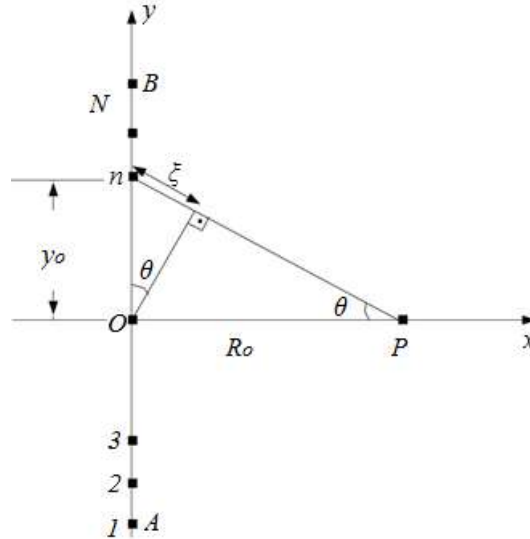
Όμως η διαχωριστική ικανότητα του δέκτη στη συχνότητα Doppler (Δf_d) είναι αντιστρόφως ανάλογη του χρόνου επεξεργασίας του δέκτη (CPI) , δηλαδή:

$$\Delta f_d \approx \frac{1}{CPI} = \frac{1}{N \cdot T_E} \quad (2.41)$$

Οπότε , με αντικατάσταση στην εξίσωση (2.40) , προκύπτει, με διαφορετική μέθοδο αυτή την φορά, η διαχωριστική ικανότητα στην κατεύθυνση κάθετης απόστασης (cross range):

$$\Delta y \approx \frac{\lambda R_o}{2L_e} \quad (2.42)$$

που ταυτίζεται με την εξίσωση (2.28).



Σχήμα 2.12: Διόρθωση φάσης σε ραντάρ SAR (coherent SAR)

Όπως προκύπτει από το σχήμα 2.12, η απαιτούμενη διόρθωση φάσης στο δέκτη του ραντάρ, για τον n -οστό παλμό λήψης (από τους N απαιτούμενους LFM παλμούς μέσα στο CPI) δίνεται κατά προσέγγιση από την σχέση:

$$\Delta\phi = k \cdot 2\xi \quad (2.43)$$

όπου k ο κυματάριθμος $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c}$, f η συχνότητα λειτουργίας του ραντάρ, λ το αντίστοιχο μήκος κύματος και ξ η κατά προσέγγιση διαφορά απόστασης από το σημειακό στόχο P του φορέα του ραντάρ, που αφορά τον παλμό εκπομπής n (σε σχέση με το μέσο O του συνθετικού μήκους AB όπως φαίνεται στο σχήμα 2.12).

Επιπλέον, από την γεωμετρία του σχήματος 2.12 προκύπτει, για μικρές γωνίες θ :

$$\xi \approx y_o \cdot \sin\theta \quad (2.44)$$

και:

$$\sin\theta \approx \frac{y_o}{R_o} \quad (2.45)$$

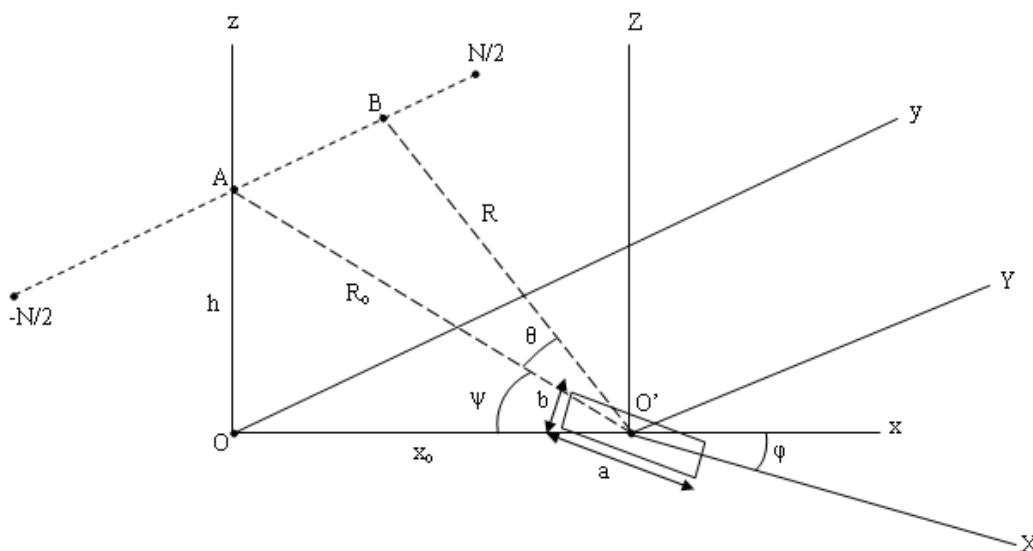
όπου y_o η συντεταγμένη y (σε m) του n -οστού παλμού και R_o η απόσταση ραντάρ – στόχου. Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (2.43) και (2.45), προκύπτει η κατά προσέγγιση διόρθωση φάσης $\Delta\phi$ (rad) για το n -οστό παλμό μέσα στο CPI ($n = 1, 2, 3, \dots, N$):

$$\Delta\phi = \frac{4\pi y_o^2}{\lambda R_o} \quad (2.46)$$

Το ραντάρ συνθετικής απεικόνισης (SAR) είναι σύστημα ραντάρ με συνάφεια φάσης (coherent radar system) και επομένως η αντιστάθμιση/διόρθωση φάσης $\Delta\phi$ της εξίσωσης (2.46) (phase compensation) είναι απαραίτητη για την επίτευξη εστίασης της απεικόνισης (SAR imaging). Το αντίθετο συμβαίνει στο Ραντάρ Αντίστροφης Συνθετικής Απεικόνισης (ISAR), όπου το επίγειο ραντάρ δεν κινείται, και ο στόχος (αεροσκάφος, πλοίο κ.λπ.) είναι σε κίνηση, η οποία είναι εν γένει άγνωστη στο ραντάρ. Συνεπώς στην περίπτωση αυτή, και προκειμένου να γίνει η απαιτούμενη διόρθωση φάσης (phase tracking), πρέπει να γίνει προηγουμένως μία εκτίμηση στην κίνηση (περιστροφική, ή ευθύγραμμη κ.λπ.) του στόχου του ραντάρ. Ως αποτέλεσμα, απαιτείται να εξετασθούν οι διαδικασίες radar tracking (ή ευθυγράμμιση των προφίλ απόστασης/ range profile alignment) και phase tracking [1], [7], [9].

2.8 Μαθηματική ανάλυση ραντάρ συνθετικής απεικόνισης (SAR) για στόχο που μοντελοποιείται με σημειακούς σκεδαστές

2.8.1 Μορφή του σήματος επιστροφής στο δέκτη του ραντάρ



Σχήμα 2.13: Γεωμετρία ραντάρ συνθετικής απεικόνισης

Στο σχήμα 2.13 παρουσιάζεται η τυπική γεωμετρία SAR. Η πλατφόρμα που φέρει το ραντάρ συνθετικής απεικόνισης ίπταται σε υψόμετρο h πάνω από την γη, με σταθερή ταχύτητα v , κατά την κατεύθυνση Oy (κατεύθυνση κατά μήκος της τροχιάς (along track)), και εκπέμπει παλμούς τύπου βηματικής συχνότητας (stepped

frequency, SF) προς τα πλάγια, δηλαδή προς την κατεύθυνση Ox . Ανάλογη ανάλυση γίνεται αντίστοιχα και στην περίπτωση εκπομπής παλμών τύπου LFM. Η κατεύθυνση διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων του ραντάρ AO' (ή η αντίστοιχη προβολή της πάνω στην επιφάνεια της γης Ox) ονομάζεται κατεύθυνση απόστασης (range direction), ενώ η κάθετη σ' αυτήν διεύθυνση επί της γης, δηλαδή η κατεύθυνση Oy του σχήματος 2.13, ονομάζεται κάθετη απόσταση (cross range) ή απόσταση κατά μήκος της τροχιάς (along track).

Επιπλέον γίνεται η υπόθεση (για λόγους απλότητας και χωρίς βλάβη της γενικότητας) ότι ο στόχος είναι επίπεδος, σχήματος ορθογωνίου παραλληλογράμμου, και διαστάσεων $a \times b$ δεδομένου ότι η γενίκευση για τρισδιάστατο (3D) στόχο ραντάρ, αυθαιρέτου σχήματος, μπορεί να προκύψει με άμεσο τρόπο. Θεωρείται επίσης ότι ο στόχος ραντάρ αποτελείται από d σημειακούς σκεδαστές (point scatterers). Στη συνέχεια με βάση τις παραπάνω υποθέσεις, θα εξαχθεί η μορφή του σήματος επιστροφής στο ραντάρ (backscatter signal), $x(m, n)$ ως συνάρτηση της m -οστής συχνότητας εκπομπής ($m = 1, 2, \dots, M$) και της n -οστής ριπής (burst, $n = -\frac{N}{2}, \dots, -1, 0, 1, 2, \dots, \frac{N}{2}$). [εξισώσεις (2.2), (2.3), (2.5) και (2.6)].

Ειδικότερα υπολογίζεται η φάση $\phi_{i,j}^{m,n}$ στο σήμα επιστροφής ραντάρ (για την m -οστή συχνότητα και την n -οστή ριπή). Ως παρατήρηση αναφέρεται ότι ο αριθμός της ριπής n αντιστοιχεί σε μια ορισμένη γωνία θέασης (aspect angle ή azimuth angle) του στόχου μέσα στον χρόνο επεξεργασίας – διάστημα συμφασικής επεξεργασίας (coherent processing interval, CPI), για το οποίο ισχύει:

$$CPI = N \cdot M \cdot T_E \quad (2.47)$$

όπου $T_E = PRI$ είναι η περίοδος επανάληψης παλμού (Pulse Repetition Interval), για την οποία ισχύει η σχέση: $PRI = \frac{1}{PRF} = \frac{1}{f_e}$, όπου PRF είναι η συχνότητα επανάληψης παλμού (Pulse Repetition Frequency). Το αντίστοιχο συνθετικό μήκος L_e δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$L_e = v \cdot CPI = v \cdot N \cdot M \cdot T_E \quad (2.48)$$

Το συνθετικό μήκος L_e αντιπροσωπεύει το μήκος επί της τροχιάς του φορέα, όπου συλλέγονται $N \cdot M$ μιγαδικά δεδομένα, η επεξεργασία των οποίων μας δίνει μία εικόνα ραντάρ συνθετικής απεικόνισης (SAR).

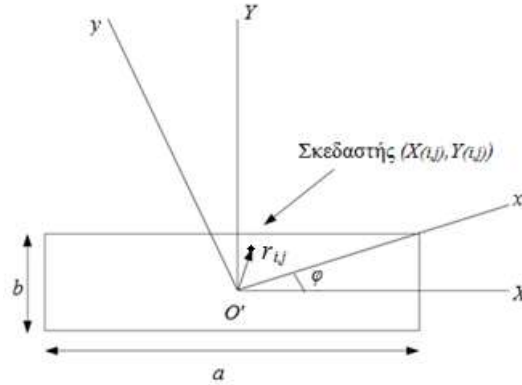
Προκειμένου να υπολογισθεί η φάση $\phi_{i,j}^{m,n}$ στο σήμα επιστροφής ραντάρ και με βάση το σχήμα 2.13, υπολογίζεται κατ' αρχήν το διάνυσμα της απόστασης R μεταξύ φορέα – ραντάρ (θέση B), και του κέντρου του στόχου O , από τη σχέση:

$$\vec{R} = x_o \hat{x} - vnT_b \hat{y} - h \hat{z} \quad (2.49)$$

όπου $T_b = M \cdot PRI$ είναι η διάρκεια μιας ριπής.

Στο σχήμα 2.13, $Oxyz$ είναι οι συντεταγμένες της γήινης επιφάνειας, ενώ $O'xyz$ είναι οι τοπικές συντεταγμένες του στόχου ραντάρ. Οι συντεταγμένες ενός

τυχαίου σκεδαστή (i, j) του στόχου είναι $(X_{(i,j)}, Y_{(i,j)})$ όπως απεικονίζονται στο σχήμα 2.14:



Σχήμα 2.14: Συντεταγμένες $(X_{(i,j)}, Y_{(i,j)})$ ενός σημειακού σκεδαστή του διδιάστατου στόχου ραντάρ

Από το σχήμα 2.13 προκύπτει κατά τη διάρκεια ενός *CPI*, η γωνία θέασης του στόχου θ δίνεται από την σχέση:

$$\cos \theta = \left(\frac{x_o^2 + h^2}{x_o^2 + h^2 + v^2 n^2 T_b^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.50)$$

Η γωνία θέσης του στόχου είναι σε συνάρτηση με τον αριθμό της ριπής n ($n = -\frac{N}{2}, \dots, -1, 0, 1, 2, \dots, \frac{N}{2}$), δηλαδή ισχύει η ισότητα $\theta = \theta(n)$. Δεδομένου οι τοπικές συντεταγμένες του στόχου $XO'Y$ είναι σε στροφή κατά γωνία ϕ ως προς τις συντεταγμένες της γήινης επιφάνειας $xO'y$ (με άλλα λόγια ο στόχος ραντάρ έχει στραφεί κατά γωνία ϕ ως προς το σύστημα συντεταγμένων $xO'y$). Ο αντίστοιχος πίνακας μετασχηματισμού συντεταγμένων \vec{A} δίδεται από την σχέση:

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \quad (2.51)$$

Κατ' αυτό τον τρόπο, αν η θέση του σκεδαστή (i, j) στις τοπικές συντεταγμένες είναι:

$$\vec{r}_{i,j} = (X_{i,j}, Y_{i,j}) = X_{i,j} \hat{X} + Y_{i,j} \hat{Y} \quad (2.52)$$

το διάνυσμα θέσης του εν λόγω (i, j) σκεδαστή από τον φορέα του ραντάρ στην τυχαία θέση B μέσα στο *CPI* είναι:

$$\vec{R}_{i,j} = \vec{R} + \vec{A} \cdot \vec{r}_{i,j} \quad (2.53)$$

Η παραπάνω σχέση αφού εκτελεστούν οι πράξεις γίνεται:

$$\vec{R}_{i,j} = \vec{R} + [(X_{i,j} \cdot \cos \phi + Y_{i,j} \cdot \sin \phi)\hat{x} + (-X_{i,j} \cdot \sin \phi + Y_{i,j} \cdot \cos \phi)\hat{y}] \quad (2.54)$$

όπου το διάνυσμα \vec{R} δίνεται από την εξίσωση (2.49).

Το αντίστοιχο κυματοδιάνυσμα πρόσπτωσης \vec{k} δίνεται από την σχέση:

$$\vec{k} = k \cos \theta \cdot \cos \psi \cdot \hat{x} - k \sin \theta \cdot \hat{y} - k \cos \theta \cdot \sin \psi \cdot \hat{z} \quad (2.55)$$

όπου η γωνία θέασης θ δίνεται από την εξίσωση (2.50), ψ είναι η γωνία πρόσπτωσης ως προς την γη (grazing angle) και ο κυματάρριθμος k δίνεται από την εξίσωση:

$$k = \frac{\omega_m}{c} = \frac{2\pi f_m}{c} \quad (2.56)$$

Η φάση που αντιστοιχεί στο σήμα επιστροφής του ραντάρ υπολογίζεται από την σχέση:

$$\phi_{i,j} = 2\vec{k} \cdot \vec{R}_{i,j} \quad (2.57)$$

Από τις εξισώσεις (2.54), (2.55) και (2.57) προκύπτει άμεσα η παρακάτω έκφραση για την φάση $\phi_{i,j}^{m,n}$:

$$\phi_{i,j}^{m,n} = \frac{4\pi f_m}{c} \cdot [\cos \theta \cdot \cos \psi \cdot (X_{i,j} \cdot \cos \phi + Y_{i,j} \cdot \sin \phi) + \sin \theta \cdot (X_{i,j} \cdot \sin \phi - Y_{i,j} \cdot \cos \phi)] \quad (2.58)$$

Η παραπάνω έκφραση αφορά την τοπική φάση σκέδασης δηλαδή αφορά μόνο τους σκεδαστές ως προς το τοπικό σύστημα συντεταγμένων. Η φάση που αφορά την απόσταση από τον φορέα μέχρι το κέντρο του σκεδαστή O' ισούται με:

$$\phi_{comp}^{m,n} = \frac{4\pi f_m}{c} \cdot (x_o \cos \theta \cdot \cos \psi + h \cos \theta \cdot \sin \psi + vnT_b \cdot \sin \theta) \quad (2.59)$$

Η φάση που αφορά την απόσταση από τον φορέα μέχρι το κέντρο του σκεδαστή O' , αποτελεί τη διόρθωση ή αντιστάθμιση φάσης (phase compensation). Απλούστερη έκφραση για τη διόρθωση φάσης $\Delta\phi$ προκύπτει από την εξίσωση (2.46).

Τέλος, το σήμα επιστροφής ραντάρ $x(m, n)$ δίδεται από την σχέση:

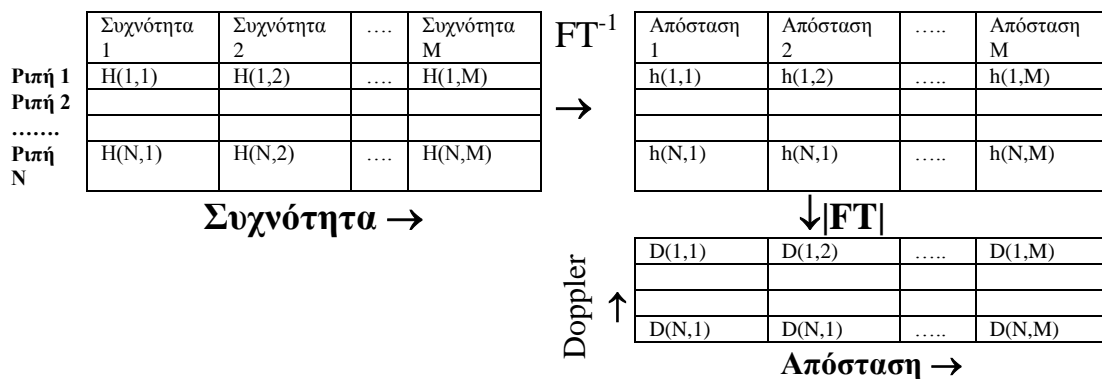
$$x(m, n) = \sum_d s_{i,j} \exp(j\phi_{i,j}^{m,n}) \quad (2.60)$$

όπου $s_{i,j}$ είναι το πλάτος σκέδασης που αντιστοιχεί στον (i, j) σκεδαστή, d είναι ο αριθμός των σκεδαστών του στόχου ραντάρ και η φάση $\phi_{i,j}^{m,n}$ δίνεται από την εξίσωση (2.58).

Το μέτρο και η φάση της εξίσωσης (2.60) καταγράφονται σε ένα δισδιάστατο πίνακα (μήτρα/matrix) διάστασης $M \times N$ και αποτελούν τα ακατέργαστα δεδομένα (raw data). Δεδομένου ότι αυτά προέκυψαν από M συχνότητες εκπομπής του SF ραντάρ, είναι δυνατό να θεωρηθούν ως δεδομένα στο πεδίο της συχνότητας (frequency domain data) [5], [6], [10].

2.8.2 Σχηματισμός της εικόνας του ραντάρ συνθετικής απεικόνισης (SAR) από τα ακατέργαστα δεδομένα λήψης με χρήση της μεθόδου Range – Doppler imaging

Ο πιο απλός τρόπος λήψης της εικόνας SAR $[I(m, n)]$ με αριθμό pixel $M \times N$, είναι με τη βοήθεια του αλγορίθμου Range – Doppler Imaging, δηλαδή με την χρήση αντίστροφων και ευθέων μετασχηματισμών Fourier (IFFT και FFT), όπου FFT είναι ο γρήγορος μετασχηματισμός Fourier (Fast Fourier Transform). Ο τρόπος ανάκτησης της εικόνας SAR από τα ακατέργαστα δεδομένα παριστάνεται στο σχήμα 2.15. Δηλαδή, για κάθε ριπή λήψης n ($n = 1, 2, \dots, N$), λαμβάνεται ο αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier (Inverse Fourier Transform, IFFT/FT⁻¹) επί των M μιγαδικών δεδομένων συχνότητας και έτσι λαμβάνονται N προφίλ απόστασης (range profiles) τα οποία αντιπροσωπεύουν μονοδιάστατες υπογραφές (ID signatures) του στόχου ραντάρ στο πεδίο του χρόνου $[h(m, n)]$.



Σχήμα 2.15: Ανάκτηση εικόνας SAR $[I(m, n)]$ από ακατέργαστα δεδομένα ραντάρ $x(m, n) = h(m, n)$ με χρήση του αλγορίθμου Range- Doppler imaging

Ο αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier (IFFT) πραγματοποιείται μέσω της σχέσης:

$$h(\kappa, m) = \frac{1}{M} \sum_{l=0}^{M-1} H(\kappa, l) e^{j2\pi ml/M} \quad (2.61)$$

Στην συνέχεια τα προφίλ απόστασης ευθυγραμμίζονται (range profile alignment). Για παράδειγμα η σκέδαση από τον ισχυρότερο σκεδαστή του στόχου

πρέπει να αντιστοιχεί στο ίδιο κελί απόστασης (range cell ή range bin) για όλα τα προφίλ απόστασης. Τα N προφίλ απόστασης αντιστοιχούν σε N διαφορετικές γωνίες θέασης του στόχου. Η διόρθωση στα προφίλ απόστασης (range profile alignment) αφορά επεξεργασία στο μέτρο (magnitude) των προφίλ απόστασης.

Μερικές φορές χρησιμοποιείται και δεύτερη μέθοδος διόρθωσης των προφίλ απόστασης, που αφορά όμως τη φάση των δεδομένων (phase tracking). Σε αυτή τη μέθοδο διόρθωσης, τίθεται η φάση του ισχυρότερου σκεδαστή ενός προφίλ απόστασης ίση με 0 για όλα τα προφίλ απόστασης, με την απαραίτητη διόρθωση φάσης ανά range bin και εν τέλει για την σχετική διόρθωση σε κάθε range profile [1,2,3]. Η διόρθωση φάσης καθιστά το ραντάρ συνθετικής απεικόνισης ως ένα σύστημα ραντάρ με συνάφεια φάσης (coherent radar system).

Μετά τις παραπάνω διορθώσεις στα προφίλ απόστασης, σύμφωνα και με το σχήμα 2.15, εφαρμόζεται κατόπιν ο ευθύς μετασχηματισμός Fourier (FT/FFT) για κάθε κελί απόστασης, που αντιστοιχεί στο φάσμα Doppler και για κάθε σκεδαστή επί των προφίλ απόστασης. Με αυτόν τον τρόπο λαμβάνεται τελικά η εικόνα SAR (SAR image) $I(m, n)$:

$$I(n, m) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} h(k, m) e^{j2\pi kn / N} \quad (2.62)$$

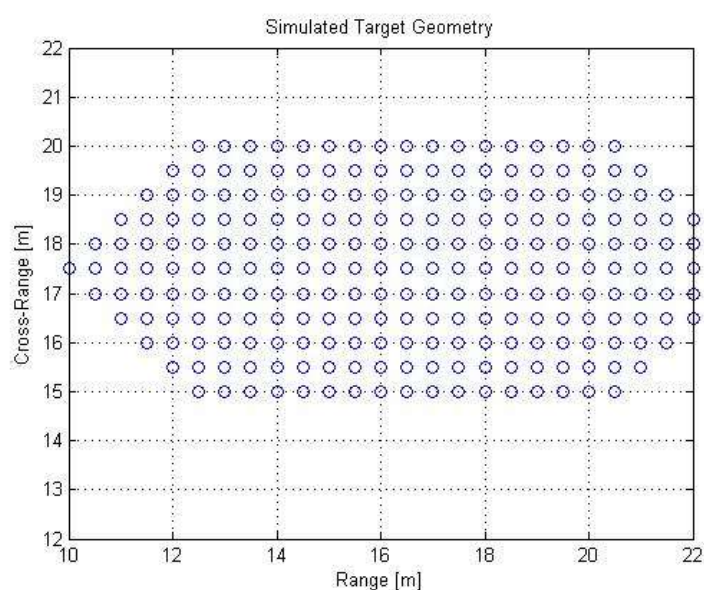
Σύμφωνα με τον αλγόριθμο Range-Doppler, η εικόνα SAR δεν είναι τίποτε άλλο από την απεικόνιση των σκεδαστών του στόχου ραντάρ στους άξονες της απόστασης (range/οριζόντιος άξονας) και της συχνότητας Doppler (κατακόρυφος άξονας) όπως φαίνονται στο σχήμα 2.13.

Συγκεντρωτικά αναφέρεται η μέθοδος απεικόνισης εικόνας SAR με προσομοίωση του σήματος εκπομπής και λήψης. Αρχικά λαμβάνονται στο δέκτη του ραντάρ τα ακατέργαστα δεδομένα λήψης $x(m, n) = H(m, n)$ στο πεδίο της συχνότητας (raw radar data in frequency domain), τα οποία είναι $M \times N$ μιγαδικά δεδομένα, όπου M είναι ο αριθμός των εκπεμπόμενων συχνοτήτων στη βηματικής συχνότητας (stepped frequency, SF) χρησιμοποιούμενη κυματομορφή ραντάρ και N είναι ο απαιτούμενος αριθμός ριπών (bursts) για την κυματομορφή εκπομπής. Στην περίπτωση χρησιμοποίησης LFM παλμών εκπομπής, M είναι ο αριθμός των δειγμάτων ανά παλμό λήψης (ο αριθμός των χρησιμοποιούμενων συχνοτήτων μέσα στο εύρος ζώνης B του παλμού LFM), και N ο απαιτούμενος αριθμός LFM παλμών. Στη συνέχεια τα ακατέργαστα δεδομένα λήψης μετά από δύο διαδοχικούς μετασχηματισμούς Fourier (FFT/ Fast Fourier Transform) λαμβάνεται η εικόνα SAR. Πρώτα με έναν αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier (IFFT) λαμβάνονται τα προφίλ απόστασης (range profiles) στην κατεύθυνση απόστασης (range). Κατόπιν με ένα ευθύ μετασχηματισμό Fourier (FFT) για κάθε κελί απόστασης (range bin), λαμβάνεται το φάσμα Doppler (Doppler spectrum) κάθε σκεδαστή στην κατεύθυνση απόστασης (range), με τελικό αποτέλεσμα την ανακατασκευασμένη εικόνα SAR [9] ,[11], [12].

2.9 Αριθμητικές προσομοιώσεις

2.9.1 Προσομοίωση ανακατασκευής εικόνας SAR για ένα δισδιάστατο στόχο όπου ο φορέας του ραντάρ είναι ένα αεροσκάφος (airborne scenario)

Ο στόχος που προσομοιώθηκε σύμφωνα με τη γεωμετρία του ραντάρ συνθετικής απεικόνισης είναι ένα μοντέλο πλοίου που αποτελείται από σημειακούς σκεδαστές. Πιο συγκεκριμένα αποτελείται από 233 σκεδαστές όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.16. Το βασικό πλεονέκτημα της περιγραφής ενός στόχου μέσω σημειακών σκεδαστών είναι ότι διευκολύνει την προσομοίωση διαφόρων γεωμετριών στόχων.



Σχήμα 2.16: Μοντέλο πλοίου που αποτελείται από σημειακούς σκεδαστές

Οι τιμές των παραμέτρων της δισδιάστατης γεωμετρίας SAR που επιλέχθηκαν για τις προσομοιώσεις φαίνονται στον πίνακα 2.1.

Οι παράμετροι του ραντάρ πρέπει να επιλεγούν κατάλληλα για κάθε σενάριο προσομοίωσης. Αρχικά πρέπει να καθοριστεί η επιθυμητή τετραγωνική ανάλυση (square resolution). Στην τετραγωνική ανάλυση, η ανάλυση απόστασης Δx (range resolution) επιλέγεται ίση με την ανάλυση κάθετης απόστασης Δy (cross range resolution). Επομένως για να επιτευχθεί τετραγωνική ανάλυση θα πρέπει να ισχύει:

$$\Delta x = \Delta y = \frac{c}{2B} \quad (2.63)$$

Πίνακας 2-1: Παράμετροι προσομοίωσης της γεωμετρίας του ραντάρ τύπου SAR

Παράμετρος	Τιμή [μονάδα]
Αρχική συχνότητα φέροντος, f_0	10 [GHz]
Εύρος συχνοτήτων ραντάρ, B	300 [MHz]
Αριθμός εκπεμπόμενων συχνοτήτων, M	64
Συχνότητα επανάληψης παλμού, PRF	2.74 [KHz]
Διάρκεια ριπής, T_b	0.0234 [s]
Διάστημα συμφασικής επεξεργασίας, CPI	3 [s]
Αριθμός ριπών, N	128
Αριθμός CPI s, N_{CPI}	1
Απόσταση από τη κέντρο του στόχου, R_o	10 [km]
Ύψος φορέα SAR, h	2 [km]
Γωνία στροφής στόχου, ϕ	0°
Ταχύτητα φορέα SAR, v	100 [m/s]

Κατ' αυτό τον τρόπο η προκύπτουσα εικόνα SAR αποτελείται από κελιά απόστασης με τετραγωνική ανάλυση. Στην περίπτωση της παρούσας προσομοίωσης επιλέγεται $\Delta x = \Delta y = 0.5$ σύμφωνα και με τις διαστάσεις κελιού του πλέγματος στόχου.

Η μαθηματική εξίσωση από την οποία προκύπτει η διάρκεια ριπής T_b σε συνάρτηση με την ανάλυση κάθετης απόστασης Δy είναι:

$$T_b = \frac{\lambda R_o}{2 \cdot N \cdot v \cdot \Delta y \cdot \cos \phi} \quad (2.64)$$

όπου λ είναι το μήκος κύματος, R_o είναι η απόσταση του φορέα του ραντάρ από το κέντρο του στόχου, N είναι ο αριθμός των ριπών, v η ταχύτητα του φορέα του ραντάρ, Δy είναι η ανάλυση κάθετης απόστασης η οποία επιλέχτηκε ίση με $\Delta y = 0.5$. Η γωνία ϕ για λόγους απλότητας και χωρίς βλάβη της γενικότητας λαμβάνεται ίση με $\phi = 90^\circ$ και επομένως προκύπτει $\cos \phi = 1$.

Στη συνέχεια υπολογίζεται το απαιτούμενο εύρος συχνοτήτων ραντάρ σύμφωνα με τη σχέση $B = \frac{c}{2\Delta x}$. Ο αριθμός των εκπεμπόμενων συχνοτήτων M

προκύπτει διαιρώντας το αναμενόμενο μέγεθος στόχου με την επιλεγμένη ανάλυση απόστασης. Συνήθως το αναμενόμενο μέγεθος στόχου επιλέγεται αρκετά μεγαλύτερο από τη μεγαλύτερη διάσταση του στόχου. Το βήμα της εκπεμπόμενης βηματικής συχνότητας υπολογίζεται ως το ακόλουθο πηλίκο: $\Delta f = \frac{B}{M-1}$. Μία σημαντική

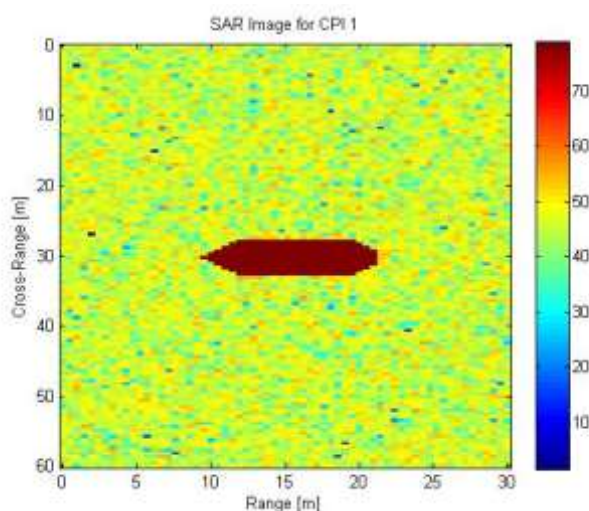
επιλογή για τη μοντελοποίηση του σήματος και την απεικόνιση SAR είναι η επιλογή τιμής για την περίοδο επανάληψης παλμού (pulse repetition interval, PRI), έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ικανοποιητική απεικόνιση του στόχου και ταυτόχρονα να αποφεύγεται η έλλειψη ευθυγράμμισης των προφίλ απόστασης. Η διάρκεια της ριπής T_b προκύπτει από τη σχέση: $T_b = M \cdot PRI$, όπου PRI είναι η περίοδος επανάληψης παλμού. Τέλος από την εξίσωση (2.64) υπολογίζεται ο αριθμός των ριπών N που

απαιτούνται για την επίτευξη ικανού διαστήματος συμφασικής επεξεργασίας (coherent processing interval, CPI):

$$CPI = N \cdot M \cdot PRI = N \cdot T_p \quad (2.65)$$

Στην παρούσα προσομοίωση έχει επιλεγεί σχετικά υψηλός σηματοθορυβικός λόγος $SNR = 15dB$ καθώς η ποιότητα της εικόνας χειροτερεύει όσο ο σηματοθορυβικός λόγος μειώνεται. Επιπλέον στη συγκεκριμένη προσομοίωση το ραντάρ θεωρείται ότι βρίσκεται σε ένα αεροσκάφος (airborne scenario) γι' αυτό και οι παράμετροι της απόστασης ραντάρ – στόχου R_0 και της ταχύτητας του φορέα του ραντάρ v έχουν επιλεγεί κατάλληλα [6].

Στο σχήμα 2.17 φαίνεται η παραγόμενη SAR εικόνα που προκύπτει από τη SAR γεωμετρία που παρουσιάστηκε στο σχήμα 2.13 και τις παραμέτρους προσομοίωσης που περιγράφηκαν στον πίνακα 2.1 στη διάρκεια ενός διαστήματος συμφασικής επεξεργασίας CPI .



Σχήμα 2.17: Ανακατασκευασμένη εικόνα SAR για δισδιάστατο στόχο όπου ο φορέας του ραντάρ είναι ένα αεροσκάφος (airborne scenario)

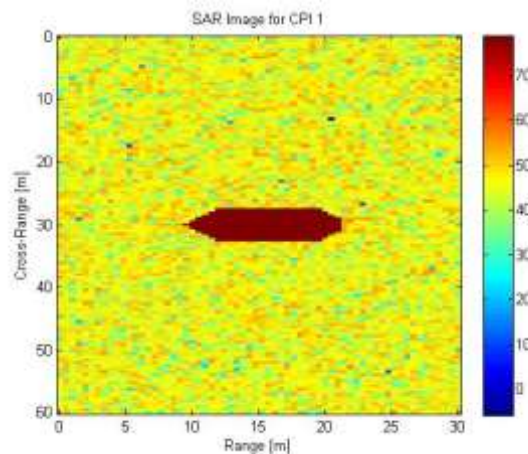
2.9.2 Προσομοίωση ανακατασκευής εικόνας SAR για ένα δισδιάστατο στόχο όπου ο φορέας του ραντάρ είναι ένας δορυφόρος (spaceborne scenario)

Στην περίπτωση όπου ο φορέας του ραντάρ είναι ένας δορυφόρος, η βασική SAR γεωμετρία παραμένει ίδια (σχήμα 2.13) αλλά οι παράμετροι προσομοίωσης, όπως για παράδειγμα η απόσταση ραντάρ – στόχου και η ταχύτητα του φορέα του ραντάρ αλλάζουν. Στον πίνακα 2.2 παρουσιάζεται ένας συγκριτικός πίνακας μεταξύ των παραμέτρων για την προσομοίωση με φορέα ένα αεροσκάφος και για την προσομοίωση με φορέα ένα δορυφόρο [6].

Πίνακας 2-2: Συγκριτικός πίνακας παραμέτρων προσομοίωσης για φορέα SAR αεροσκάφος και δορυφόρος

Παράμετρος	Αεροσκάφος [μονάδες]	Δορυφόρος [μονάδες]
Αρχική συχνότητα φέροντος, f_0	10 [GHz]	10 [GHz]
Εύρος συχνοτήτων ραντάρ, B	300 [MHz]	300 [MHz]
Αριθμός εκπεμπόμενων συχνοτήτων, M	64	64
Διάρκεια ριπής, T_b	23.4 [msec]	0.085 [msec]
Αριθμός ριπών, N	128	128
Απόσταση από τη κέντρο του στόχου, R_0	10 [km]	1000 [km]
Ύψος φορέα SAR, h	2 [km]	$2 \cdot 10^5$ [m]
Ταχύτητα φορέα SAR, v	100 [m/sec]	2900 [m/sec]

Στο σχήμα 2.18 φαίνεται η παραγόμενη SAR εικόνα που προκύπτει από τη SAR γεωμετρία που παρουσιάστηκε στο σχήμα 2.13 και τις παραμέτρους προσομοίωσης που περιγράφηκαν στον πίνακα 2.2 ενώ ο φορέας του SAR βρίσκεται σε ένα δορυφόρο.

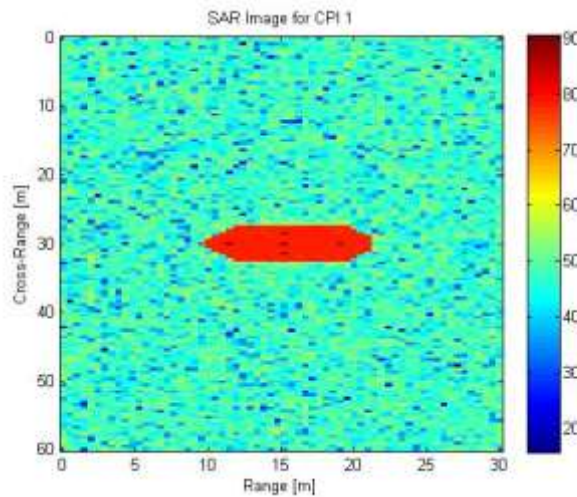


Σχήμα 2.18: Ανακατασκευασμένη εικόνα SAR για δισδιάστατο στόχο όπου ο φορέας του ραντάρ είναι ένας δορυφόρος (spaceborne scenario)

2.9.3 Προσομοίωση ανακατασκευής εικόνας SAR για ένα δισδιάστατο στόχο με μεταβαλλόμενη ένταση σκέδασης

Στο συγκεκριμένο σενάριο προσομοίωσης γίνεται μοντελοποίηση της μεταβολής της έντασης σκέδασης στην επιφάνεια του στόχου. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν πέντε σκεδαστές στους οποίους αποδόθηκε μεγαλύτερη ένταση ακτινοβολίας και ως εκ τούτου έχουν μεγαλύτερη συνεισφορά στο ανακλώμενο σήμα. Αυτό είναι εμφανές στην SAR εικόνα (σχήμα 2.19) καθώς οι πέντε σκεδαστές εμφανίζονται με πιο έντονο χρώμα.

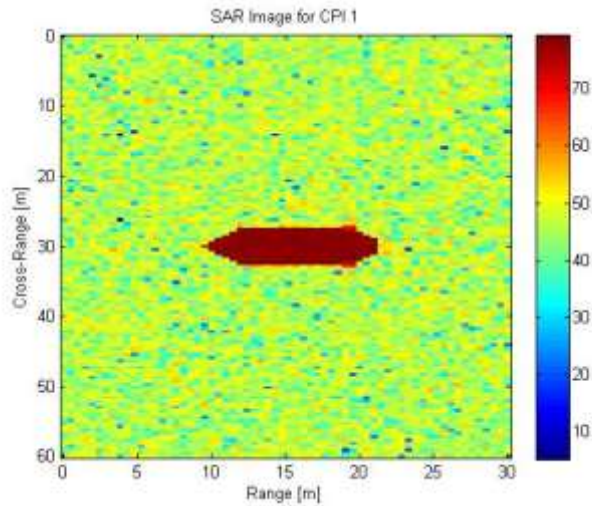
Στο σχήμα 2.19 φαίνεται η παραγόμενη SAR εικόνα που προκύπτει από τη SAR γεωμετρία που παρουσιάστηκε στο σχήμα 2.13 και τις παραμέτρους προσομοίωσης που περιγράφηκαν στον πίνακα 2.1 με μεταβαλλόμενο πλάτος σκέδασης $s_{i,j}$ (εξίσωση 2.60) για πέντε σκεδαστές [6].



Σχήμα 2.19: Ανακατασκευασμένη εικόνα SAR για δισδιάστατο στόχο με μεταβαλλόμενη ένταση σκέδασης για πέντε σκεδαστές

2.9.4 Προσομοίωση ανακατασκευής εικόνας SAR για ένα τρισδιάστατο στόχο

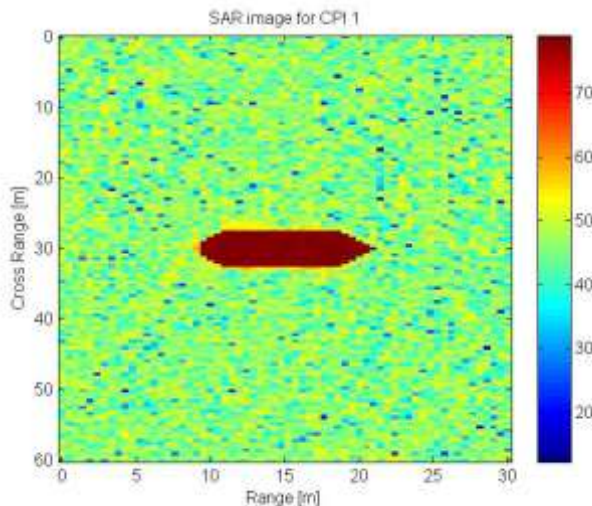
Στο συγκεκριμένο σενάριο προσομοίωσης γίνεται απεικόνιση ενός τρισδιάστατου στόχου. Ο στόχος που προσομοιώθηκε σύμφωνα με τη γεωμετρία του ραντάρ συνθετικής απεικόνισης είναι ένα μοντέλο πλοίου που αποτελείται από σημειακούς σκεδαστές, όχι μόνο στους άξονες x και y αλλά και στον άξονα z . Οι σκεδαστές του άξονα z αντιπροσωπεύουν ένα κατάρτι στο κέντρο του πλοίου. Η ανακατασκευασμένη SAR εικόνα που θα προκύψει, θα είναι δισδιάστατη όπως συμβαίνει και στην περίπτωση των πραγματικών εικόνων SAR. Στο σχήμα 2.20 φαίνεται η παραγόμενη SAR εικόνα που προκύπτει από τη SAR γεωμετρία που παρουσιάστηκε στο σχήμα 2.13 και τις παραμέτρους προσομοίωσης που περιγράφηκαν στον πίνακα 2.1 για τρισδιάστατο στόχο [6].



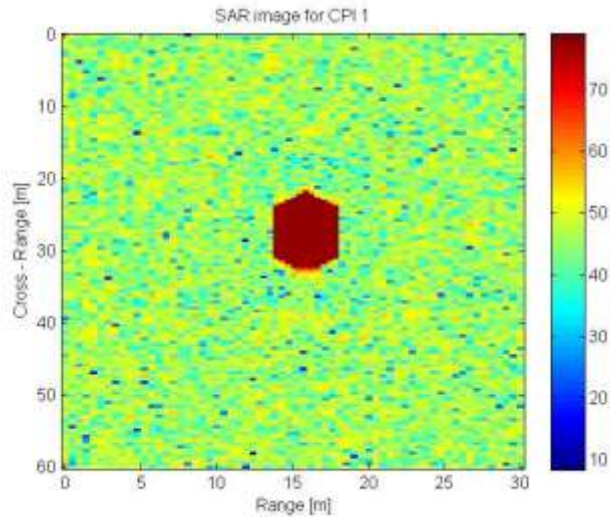
Σχήμα 2.20: Ανακατασκευασμένη εικόνα SAR για τρισδιάστατο στόχο

2.9.5 Προσομοίωση ανακατασκευής εικόνας SAR για δισδιάστατο στόχο και διαφορετικές γωνίες στροφής στόχου

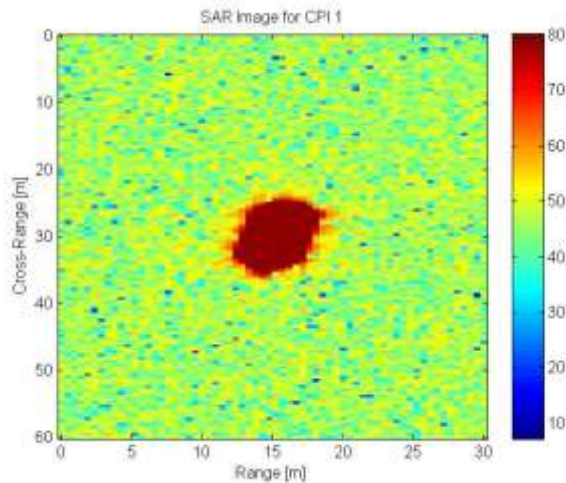
Στο συγκεκριμένο σενάριο προσομοίωσης γίνεται απεικόνιση ενός δισδιάστατου στόχου υπό διαφορετικές γωνίες στροφής του στόχου. Στα σχήματα 2.21-2.23 φαίνεται η παραγόμενη SAR εικόνα που προκύπτει από τη SAR γεωμετρία που παρουσιάστηκε στο σχήμα 2.13 και τις παραμέτρους προσομοίωσης που περιγράφηκαν στον πίνακα 2.1 για δισδιάστατο στόχο και αντίστοιχες γωνίες στροφής στόχου $\phi = 180^\circ$, $\phi = 90^\circ$ και $\phi = 120^\circ$.



Σχήμα 2.21: Ανακατασκευασμένη εικόνα SAR για δισδιάστατο στόχο και γωνία στροφής στόχου $\phi = 180^\circ$



Σχήμα 2.22: Ανακατασκευασμένη εικόνα SAR για δισδιάστατο στόχο και γωνία στροφής στόχου $\phi = 90^\circ$

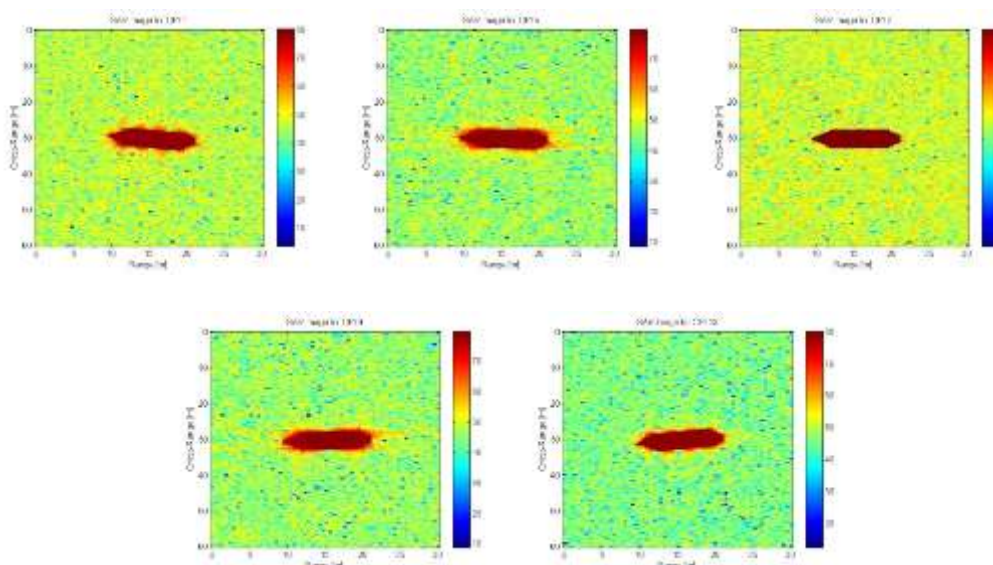


Σχήμα 2.23: Ανακατασκευασμένη εικόνα SAR για δισδιάστατο στόχο και γωνία στροφής στόχου $\phi = 120^\circ$

2.9.6 Προσομοίωση ανακατασκευής εικόνας SAR για δισδιάστατο στόχο και διάρκεια παρατήρησης στόχου ίση με 13 *CPI* (*CPI* = διάστημα συμφασικής επεξεργασίας)

Στο συγκεκριμένο σενάριο προσομοίωσης γίνεται απεικόνιση ενός δισδιάστατου στόχου για διάρκεια παρατήρησης στόχου ίση με 13 *CPI* (*CPI* = διάστημα συμφασικής επεξεργασίας). Στο σχήματα 2.24 φαίνονται ενδεικτικά κάποιες παραγόμενες SAR εικόνες (*CPI* = 1,5,7,9,13) που προκύπτουν από τη SAR γεωμετρία που παρουσιάστηκε στο σχήμα 2.13 και τις παραμέτρους προσομοίωσης που περιγράφηκαν στον πίνακα 2.1 για δισδιάστατο στόχο και αριθμό *CPI* = 13.

Καθώς ο φορέας του ραντάρ κινείται στη διάρκεια των 13 CPI , ο στόχος που είναι ακίνητος φαίνεται υπό διαφορετικές γωνίες, γεγονός που επιβεβαιώνει ότι η προσομοιωμένη γεωμετρία SAR είναι σωστή [5].



Σχήμα 2.24: Ανακατασκευασμένες εικόνες SAR για διδιάστατο στόχο και διάρκεια παρατήρησης στόχου ίση με 13 CPI , στο σχήμα φαίνονται ενδεικτικά τα $CPI = 1,5,7,9,13$

2.10 Βιβλιογραφικές αναφορές

- [1] D. Wehner, High-Resolution Radar, Artech House, 2nd Edition, 1995.
- [2] V. Chen and H. Ling, Time-Frequency Transforms for Radar Imaging and Signal Analysis, Artech House, 1st Edition, 2002.
- [3] J. S Son, G. Thomas and B. C Flores, Range-Doppler Radar Imaging and Motion Compensation, Artech House, 2001.
- [4] D. Pastina, A. Farina, J. Gunning, P. Lombardo, “Two-dimensional super resolution spectral analysis applied to SAR images”, IEE Proc., Radar Sonar Navig., Vol. 145, No 5, pp. 281–290, 1998.
- [5] A. Malamou, A. Karakasiliotis, E. Kallitsis, G. Bouladakis, P. Frangos, ‘Application of a Fully Automatic Autofocusing Algorithm for Post Processing of Synthetic Aperture Radar Images based on Image Entropy Minimization’, ‘Electronics and Electrical Engineering’ Journal, Vol. 19, No.6, June 2013, pp. 95–98.
- [6] A. Malamou, C. Pandis, A. Karakasiliotis, P. Stefaneas, E. Kallitsis and P. Frangos, ‘SAR imaging : an autofocusing method for improving image Quality and MFS image classification technique’, ‘Applications of Mathematics and Informatics in Science and Engineering’, Springer Optimization and Its Applications (SOIA), Vol. 91, 2013.
- [7] Π. Φράγκος, Χειρόγραφες σημειώσεις συστημάτων Ραντάρ, Αθήνα, Οκτώβριος 2014.
- [8] G. Bouladakis, L. Stergioulas, G. Kalognomos, A. Karakasiliotis and P. Frangos, “A Comparative Study of Bilinear Time–Frequency Transforms of ISAR Signals for

Air Target Imaging”, *Electronics and Electrical Engineering Journal*, T121 Signal Technology, No. 4 (92), April 2009.

[9] A. Karakasiliotis, A. Lazarov, P. Frangos, G. Boultadakis and G. Kalognomos, “Two-dimensional ISAR model and image reconstruction with stepped frequency-modulated signal”, *IET Signal Processing*, Vol. 2, No. 3, Sept. 2008.

[10] A. Malamou, A. Karakasiliotis, E. Kallitsis, G. Boultadakis and P. Frangos, “An autofocusing algorithm for post-processing of synthetic aperture radar (SAR) images based on image entropy minimization”, *CEMA’12 International Conference*, National Technical University of Athens (NTUA), Athens, Greece, 8-10/11/2012, pp. 53–56.

[11] A.D. Lazarov, T.P. Kostadinov, and A. Malamou, ‘SAR Signal modeling and SLC image reconstruction’, *Journal of Applied Electromagnetism (JAE)*, Vol. 15, No.1, June 2013, pp. 20 –29.

[12] S. DeGraaf, “SAR imaging via modern 2-D spectral estimation methods”, *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 7 (5), pp.729-761, May 1998.

3. Προτεινόμενος αλγόριθμος αυτοεστίασης εικόνας ραντάρ συνθετικής απεικόνισης (SAR) με τη μέθοδο της ελαχιστοποίησης της εντροπίας

3.1 Εισαγωγή

Το ραντάρ συνθετικής απεικόνισης (SAR) χρησιμεύει για την ανακατασκευή εικόνας υψηλής ανάλυσης ενός στόχου. Εκπέμπονται παλμοί υψηλού εύρους ζώνης προς το στόχο, ενώ οι ανακλάσεις από το στόχο λαμβάνονται υπό διαφορετικές γωνίες θέασης. Στη συνέχεια ύστερα από κατάλληλη επεξεργασία σχηματίζεται η εικόνα SAR του στόχου. Ένα από τα θεμελιώδη ζητήματα της απεικόνισης SAR είναι η εστίαση της εικόνας ή η αντιστάθμιση κίνησης.

Ο στόχος ενός ραντάρ συνθετικής απεικόνισης συνήθως είναι κινούμενος και η κίνησή του, η διαδρομή δηλαδή που ακολουθεί, δεν είναι δυνατό να προβλεφθεί. Ο στόχος που πρόκειται να απεικονισθεί συχνά εμπλέκεται σε πολύπλοκους ελιγμούς και η κίνηση του στόχου διακρίνεται σε μετατοπιστική και περιστροφική. Στην περίπτωση που ο στόχος εκτελέσει απότομη κίνηση ή μανούβρα τότε η εικόνα SAR που προκύπτει είναι θολή και οι λεπτομέρειες του στόχου (διαστάσεις κ.τ.λ.) δεν είναι ξεκάθαρες. Ως εκ τούτου απαιτείται αντιστάθμιση της κίνησης η οποία πρέπει να πραγματοποιείται χωρίς οποιαδήποτε εξωτερική βοήθεια. Μία τέτοια λειτουργία είναι γνωστή ως αυτοεστίαση (autofocusing) της εικόνας. Στην πραγματικότητα όσο καλύτερα πραγματοποιείται η λειτουργία της αυτοεστίασης τόσο υψηλότερης ποιότητας είναι η εστίαση της εικόνας.

Οι τεχνικές αυτοεστίασης που έχουν προταθεί διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: στις παραμετρικές και μη παραμετρικές τεχνικές. Οι παραμετρικές τεχνικές κάνουν χρήση του μοντέλου σήματος. Οι παράμετροι του μοντέλου σήματος πρέπει να εκτιμηθούν με σκοπό την πραγματοποίηση της αντιστάθμισης κίνησης. Οι μη παραμετρικές τεχνικές αντίθετα δε χρησιμοποιούν το μοντέλο σήματος. Η χρήση των παραμετρικών ή μη παραμετρικών τεχνικών εξαρτάται από την ακρίβεια που απαιτείται και το διαθέσιμο υπολογιστικό κόστος για την εκάστοτε εφαρμογή. Στις παραμετρικές τεχνικές η αυτοεστίαση βασίζεται στην αντίθεση της εικόνας (Image Contrast Based Autofocus) [1] και την εντροπία της εικόνας (Image Entropy Based Autofocus) [1]. Οι μη παραμετρικές τεχνικές περιλαμβάνουν την τεχνική της σημειακής επεξεργασίας (Prominent Point Processing) [1] (θερμή κηλίδα) και την αυτοεστίαση της κλίσης φάσης (Phase Gradient Autofocus) [1].

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος αυτοεστίασης βασίζεται στην κλασική τεχνική Range – Doppler Imaging. Η αυτοεστίαση σχετίζεται με τις τεχνικές απεικόνισης SAR, οι οποίες βελτιώνουν την ποιότητα της εικόνας SAR προτού εφαρμοστούν οι διαδικασίες αναγνώρισης και ταξινόμησης στόχου. Συνήθως, η αυτοεστίαση βασίζεται στο κριτήριο της ελαχιστοποίησης ή μεγιστοποίησης της τιμής της εντροπίας.

Στόχος είναι η βελτίωση της ποιότητας της δισδιάστατης εικόνας SAR μέσω της προτεινόμενης μεθοδολογίας που αντισταθμίζει τη μη ομοιόμορφη κίνηση του στόχου. Στην περίπτωση μη ομοιόμορφης κίνησης του στόχου, ο προτεινόμενος αλγόριθμος αυτοεστίασης βελτιώνει την ποιότητα της εικόνας SAR. Το βασικό κριτήριο που χρησιμοποιείται για να κριθεί η ποιότητα της εικόνας SAR είναι η τιμή της εντροπίας της εικόνας. Ως εκ τούτου υπάρχει μια αποδεκτή περιοχή τιμών

εντροπίας εικόνας που οδηγεί σε εικόνα SAR υψηλής ποιότητας. Με αυτόν τον τρόπο, χρησιμοποιώντας δηλαδή την τιμή της εντροπίας εικόνας ως κριτήριο, αμελούνται τα δεδομένα που οδηγούν σε εικόνες SAR χαμηλής ποιότητας και χρησιμοποιούνται μόνο τα δεδομένα που οδηγούν σε εικόνες SAR ανώτερης ποιότητας. Τα αριθμητικά αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου αλγορίθμου στην παραγωγή εστιασμένων εικόνων SAR υψηλής ποιότητας, με σχεδόν βέλτιστες τιμές εντροπίας [1] – [3].

3.2 Εντροπία εικόνας

Έστω ότι x είναι μια πραγματική τυχαία μεταβλητή με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (probability distribution function, PDF) $p(x)$. Η εντροπία κατά τον Shannon [3] ορίζεται ως εξής:

$$S = - \int_{-\infty}^{+\infty} p(x) \ln p(x) dx \quad (3.1)$$

Ακολουθώντας τον ορισμό της εντροπίας κατά Shannon, ο Pun [4] όρισε την εντροπία μιας εικόνας ως εξής:

$$S = - \sum_0^{MN-1} P_k \ln P_k : P_k = z_k = \frac{z_k}{z} \quad (3.2)$$

όπου z_k είναι η συχνότητα της γκριζας στάθμης k (grey scale) σε μία εικόνα. Το z ορίζεται ως εξής:

$$z = \sum_0^{MN-1} P_k \quad (3.3)$$

Ουσιαστικά το P_k είναι μια συνάρτηση της έντασης του κάθε pixel σε μια εικόνα. Η κατανομή της έντασης του pixel είναι ανάλογη με το βαθμό εστίασης της εικόνας. Σε αυτό το πλαίσιο η εντροπία είναι μια μέτρηση της πιθανοκρατικής αβεβαιότητας της πληροφορίας. Η αβεβαιότητα αυξάνει καθώς η εικόνα γίνεται περισσότερο θολή και μειώνεται καθώς η εικόνα γίνεται περισσότερο εστιασμένη. Έστω ότι η τυχαία μεταβλητή είναι κανονικά κατανομημένη, τότε αν το x αναπαριστά τη θέση του τυχαίως κινούμενου σωματιδίου τότε το p_x είναι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας αυτής της θέσης. Τότε η εντροπία δίνεται από την σχέση:

$$S = \ln(\sigma\sqrt{2\pi\varepsilon}) \quad (3.4)$$

Η εντροπία του x είναι ανάλογη προς την τυπική απόκλιση σ . Μια μικρή τιμή της τυπικής απόκλισης σ σημαίνει ότι η πιθανότητα εύρεσης του σωματιδίου είναι μεγάλη σε ένα σχετικά στενό διάστημα και η εντροπία θα είναι μικρή. Μια αύξηση στην τυπική απόκλιση καταδεικνύει μεγαλύτερη τιμή εντροπίας που υποδηλώνει ότι

το σωματίδιο είναι δυνατό να βρεθεί σε μία θέση με μικρότερη ακρίβεια. Η έννοια της εντροπίας εφαρμόζεται στην αντιστάθμιση κίνησης της εικόνας του στόχου που λαμβάνεται μέσω του ραντάρ συνθετικής απεικόνισης (SAR). Στην ουσία η εντροπία της εικόνας θεωρείται ως μια μέτρηση της ποιότητας της εικόνας του στόχου. Ο στόχος υποτίθεται ότι είναι μια συλλογή από κινούμενους σημειακούς σκεδαστές οι οποίοι ανακλούν το ηλεκτρομαγνητικό επίπεδο κύμα που προέρχεται από τη δέσμη εκπομπής του ραντάρ. Χρησιμοποιώντας δείγματα της συνάρτησης μεταφοράς ανάκλασης, οι θέσεις αυτών των σκεδαστών απεικονίζονται με τη βοήθεια των μετασχηματισμών Fourier ώστε να κατασκευασθεί μια καθαρή εικόνα στόχου.

Στην περίπτωση κίνησης του στόχου, το ηλεκτρομαγνητικό κύμα σκεδάζεται σε κάποιο σημειακό σκεδαστή και επομένως δεν εντοπίζεται επακριβώς αλλά διαχέεται μέσω των κελιών ανάλυσης (resolution cells). Η κατανομή της ισχύος θεωρείται ως μια συνάρτηση πυκνότητας της εικόνας. Η ανακατασκευασμένη εικόνα SAR που προκύπτει όταν ο στόχος εκτελεί μία μη ομοιόμορφη κίνηση, αντιστοιχεί σε υψηλή τυπική απόκλιση στην ακρίβεια απόστασης και επομένως η τιμή της εντροπίας είναι υψηλή. Συνεπώς η εικόνα βρίσκεται σε ανεστίαστη κατάσταση. Μεγαλύτερη εντροπία σημαίνει μικρότερη ακρίβεια της εικόνας, ενώ μικρότερη εντροπία υποδηλώνει μεγαλύτερη ακρίβεια. Καθώς η κίνηση του στόχου αντισταθμίζεται με τον προτεινόμενο αλγόριθμο αυτοεστίασης, η εντροπία μειώνεται στο ελάχιστο. Η εξίσωση (3.2) γράφεται εκ νέου ως:

$$S = -\sum \sum I_{n,m} \ln I_{n,m} \quad (3.5)$$

όπου:

$$I_{n,m} = \frac{D_{n,m}}{\sum \sum D_{n,m}} \quad (3.6)$$

και $D_{n,m}$ είναι η διατομή ενός ξεχωριστού στοιχείου εικόνας του ραντάρ υψηλής ευκρίνειας που δίνεται από τις σχέσεις:

$$D(n,m) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} h(k,m) e^{-\frac{j2\pi kn}{N}} \quad (3.7)$$

με:

$$h(k,m) = \frac{1}{M} \sum_{l=0}^{M-1} H(k,l) e^{-\frac{j2\pi ml}{M}} \quad (3.8)$$

όπου N ο αριθμός των ριπών (bursts). Συγκεντρωτικά η σχέση 3.7 γράφεται:

$$D(n,m) = \frac{1}{NM} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{M-1} H(k,l) e^{-\frac{j2\pi ml}{M}} e^{-\frac{j2\pi kn}{N}} \quad (3.9)$$

με $n = 0,1,\dots,N-1$, $m = 0,1,\dots,M-1$. Η συνάρτηση $D(n,m)$ είναι ο μετασχηματισμός Fourier της αντισταθμισμένης συνάρτησης πυκνότητας

ανακλαστικότητας $H_{n,m}$. Επίσης η σχέση 3.9 εκφράζει σε συμπαγή μορφή το μετασχηματισμό Fourier που προκύπτει από τις σχέσεις 3.7 και 3.8. Μια μεταβολή της σχέσης (3.5) δίνεται από ένα εκθετικό κέρδος πληροφορίας:

$$S = \sum \sum I_{n,m} \exp(1 - I_{n,m}) \quad (3.10)$$

Η παραπάνω έκφραση είναι λιγότερο ευαίσθητη στο θόρυβο. Η αιχμηρότητα της εικόνας εξαρτάται από τις εκτιμήσεις των κινηματικών παραμέτρων του στόχου. Η διαδικασία της αντιστάθμισης επαναλαμβάνεται για διαφορετικά σετ εκτιμήσεων ταχύτητας και επιτάχυνσης μέχρις ότου αποδοθεί μια γενική ελάχιστη τιμή εντροπίας. Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι υπολογιστικά δαπανηρή επειδή απαιτεί δισδιάστατο διακριτό μετασχηματισμό Fourier για κάθε εικόνα που παράγεται, και η διαδικασία παραγωγής εικόνας συνεχίζεται μέχρις ότου επιτευχθεί μία γενική ελάχιστη τιμή εντροπίας.

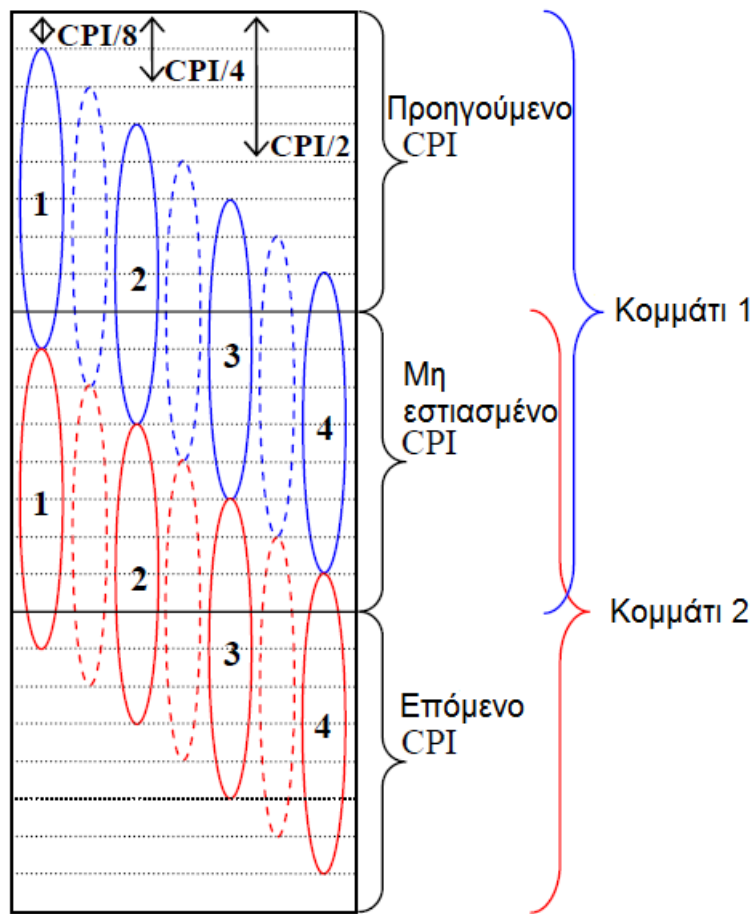
Η εντροπία της εικόνας είναι μια μέτρηση του βαθμού αξιοπιστίας της, σε σχέση με την εστίαση της εικόνας και τη συνολική ανάλυση. Επομένως υπολογίζεται η εντροπία H της κανονικοποιημένης ισχύος της εικόνας SAR, και στην περίπτωση που υπερβαίνει ένα κατώφλι (threshold) εντροπίας H_{thr} , εφαρμόζεται η μεθοδολογία που ακολουθείται ώστε να αντικατασταθεί το μέρος του ληφθέντος σήματος που έχει επηρεαστεί από τη μη ομοιόμορφη κίνηση του στόχου. Στόχοι οι οποίοι παρουσιάζουν μη ομοιόμορφη κίνηση εντός της χρονικής περιόδου του ενός συμφασικού διαστήματος επεξεργασίας (CPI), συνθέτουν το τυπικό σενάριο απεικόνισης SAR που θα εξεταστεί στη συνέχεια [1] – [2].

3.3 Μεθοδολογία αλγόριθμου αυτοεστίασης εικόνας ραντάρ συνθετικής απεικόνισης (SAR)

Στο σχήμα 3.1 απεικονίζεται η μεθοδολογία του προτεινόμενου αλγόριθμου αυτοεστίασης του διαχωριζόμενου συμφασικού διαστήματος επεξεργασίας (CPI-split autofocus). Ο αλγόριθμος βασίζεται στη διαίρεση και συνένωση των δισδιάστατων πινάκων με ακατέργαστα δεδομένα διάστασης $M \times N$ (raw data) δύο συνεχόμενων συμφασικών διαστημάτων επεξεργασίας.

Ο στόχος θεωρείται ακίνητος σε κάποια διαστήματα συμφασικής επεξεργασίας (CPI) ενώ σε κάποια άλλα προσομοιώνεται κίνηση. Στα διαστήματα συμφασικής επεξεργασίας (CPI), στα οποία ο στόχος κινείται η ανακατασκευασμένη εικόνα SAR που προκύπτει είναι παραμορφωμένη. Το χρονικό διάστημα στο οποίο ο στόχος εκτελεί κίνηση ονομάζεται μη-εστιασμένο συμφασικό διάστημα επεξεργασίας (unfocused Coherent Processing Interval) και ουσιαστικά είναι το CPI στο οποίο παρατηρείται παραμόρφωση της εικόνας SAR.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.1 σχηματίζονται δύο κομμάτια (segments). Το πρώτο κομμάτι περιέχει τμήματα του προηγούμενου συμφασικού διαστήματος επεξεργασίας (προηγούμενο CPI) και του μη-εστιασμένου συμφασικού διαστήματος επεξεργασίας, ενώ το δεύτερο τμήμα περιέχει τμήματα του μη-εστιασμένου συμφασικού διαστήματος επεξεργασίας και του επόμενου συμφασικού διαστήματος επεξεργασίας (επόμενο CPI).



Σχήμα 3.1: Σχηματική αναπαράσταση μεθοδολογίας αλγορίθμου CPI-split autofocusing

Κάθε συμφασικό διάστημα επεξεργασίας (CPI), είναι δυνατό να διαιρεθεί σε υπό-διαστήματα. Γι' αυτό το λόγο ο προτεινόμενος αλγόριθμος αυτοεστίασης του διαχωριζόμενου συμφασικού διαστήματος επεξεργασίας (CPI -split autofocusing), αποτελείται από ένα μεταβλητό αριθμό βαθμίδων (N stages) που σχετίζονται με το βάθος διαχωρισμού (δηλαδή με τον αριθμό των υπό-διαστημάτων που δύναται να διαιρεθεί το CPI). Ο αριθμός των βαθμίδων πρέπει να είναι κλάσμα του CPI . Με σκοπό να μειωθεί η υπολογιστική πολυπλοκότητα, το CPI επιλέγεται έτσι ώστε να διαιρείται σε διαστήματα δύναμης του δύο, αυξάνοντας το διαιρέτη του CPI με ένα συντελεστή του δύο από βαθμίδα σε βαθμίδα. Αν συνυπολογιστεί και το γεγονός ότι ο αριθμός των ριπών (bursts) συνήθως επιλέγεται να είναι δύναμη του δύο, η απομόνωση των ακατέργαστων δεδομένων (raw data) και ο διαχωρισμός τους μπορεί να απλοποιηθεί.

Επιπλέον ο προτεινόμενος αλγόριθμος είναι δυνατό να εφαρμοστεί και στα δεδομένα της ιστορίας του προφίλ απόστασης (range profiles) αντί των ακατέργαστων δεδομένων. Παραλείποντας τον πρώτο μετασχηματισμό Fourier στην κλασική απεικόνιση Range-Doppler, μειώνεται σημαντικά η υπολογιστική πολυπλοκότητα του αλγορίθμου.

Στο σχήμα 3.1 απεικονίζεται γραφικά η μεθοδολογία του αλγορίθμου και συγκεκριμένα το στιγμιότυπο του διαχωρισμού και της συνένωσης της τρίτης

βαθμίδας $\frac{CPI}{8}$ του αλγόριθμου διαχωρισμού του συμφασικού διαστήματος επεξεργασίας. Η κύρια ιδέα είναι η ίδια για όλες τις βαθμίδες του αλγόριθμου $\frac{CPI}{2}, \frac{CPI}{4}$ κ.τ.λ.

Ο κάθετος άξονας του σχήματος 3.1 περιλαμβάνει το δείκτη για τις ριπές N (άξονας αργού χρόνου) ενώ ο οριζόντιος άξονας περιλαμβάνει το δείκτη για τις συχνότητες (άξονας γρήγορου χρόνου). Τα μπλέ και κόκκινα ελλειψοειδή καταδεικνύουν τους πιθανούς συνδυασμούς των δεδομένων που περιλαμβάνονται στα κομμάτια 1 και 2 αντίστοιχα. Ο όρος συνδυασμός αναφέρεται στην συννέωση των μερών των δεδομένων από δύο συνεχόμενα CPI .

Γενικά τα δύο μέρη των δεδομένων που πρόκειται να συνδυαστούν έχουν διαφορετικά μεγέθη σε σχέση με τον αριθμό των ριπών με εξαίρεση τη βαθμίδα $\frac{CPI}{2}$. Τα διακεκομμένα ελλειψοειδή δηλώνουν εκείνους τους συνδυασμούς δεδομένων οι οποίοι έχουν ήδη εξεταστεί στις προηγούμενες βαθμίδες διαχωρισμού του συμφασικού χρόνου ολοκλήρωσης και αποκλείονται για να έχει ο αλγόριθμος ικανοποιητική απόδοση. Ο αριθμός, των δυνατών συνδυασμών ανά κομμάτι για το i -οστό στάδιο διαχωρισμού της βαθμίδας του CPI είναι:

$$N_{i,comp} = 2^{i-1} \quad (3.11)$$

όπου $i = 1, \dots, N_{stages}$.

Στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, ο αριθμός των βαθμίδων τέθηκε ίσος με $N_{stages} = 4$. Επομένως, σε κάθε τρέξιμο του αλγορίθμου, προκύπτουν 30 συνδυασμοί δεδομένων. Για κάθε συνδυασμό δεδομένων (με διάρκεια ίση με ένα CPI) σχηματίζεται μία SAR εικόνα μέσω δισδιάστατου μετασχηματισμού Fourier και υπολογίζεται η τιμή της εντροπίας κάθε εικόνας. Επομένως, οι συνδυασμοί αυτοί εξετάζονται ως προς το ποιος δίνει τη βέλτιστη ποιότητα εικόνας (χαμηλότερη τιμή εντροπίας).

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος περιλαμβάνει τα εξής βήματα: Αρχικά, υπολογίζεται η εντροπία κάθε CPI . Στη συνέχεια όταν εντοπιστεί κάποιο CPI με εντροπία υψηλότερη από την τιμή κατωφλίου τότε εφαρμόζεται η μεθοδολογία της αυτοεστίασης (autofocusing). Το CPI στο οποίο η εντροπία υπερβαίνει την τιμή κατωφλίου, διαιρείται σε δύο μέρη ($\frac{CPI}{2}$), υπολογίζεται η εντροπία του κάθε μέρους και έστω ότι η παραμόρφωση υφίσταται στο κάτω μέρος του χρονικού διαστήματος σύμφωνα με τις τιμές της εντροπίας. Τότε, αντικαθίσταται το παραμορφωμένο κάτω μέρος (διακεκομμένο κόκκινο ελλειψοειδές στο σχήμα 3.1 που αντιστοιχεί σε $\frac{CPI}{2}$) με το άνω μέρος (διακεκομμένο κυανό ελλειψοειδές που αντιστοιχεί σε $\frac{CPI}{2}$ στο σχήμα 3.1).

Στη συνέχεια εξετάζεται η εντροπία ανά δυάδες γραμμών, για παράδειγμα τη δυάδα πρώτης και δεύτερης γραμμής του μη εστιασμένου CPI , τη δυάδα τρίτης και τέταρτης γραμμής του μη εστιασμένου CPI κ.ο.κ. Στην περίπτωση αυτή το χρονικό διάστημα διαχωρίζεται σε $\frac{CPI}{4}$ και αν εντοπιστεί τιμή εντροπίας που υπερβαίνει την

τιμή κατωφλίου στη δυνάδα των δύο τελευταίων γραμμών του μη εστιασμένου CPI τότε αντικαθιστούμε το κόκκινο ελλειψοειδές που βρίσκεται μεταξύ των ελλειψοειδών 3 και 4 με το αντίστοιχο κυανό ελλειψοειδές που βρίσκεται από πάνω του. Αντίστοιχα ακολουθείται η ίδια διαδικασία για οποιαδήποτε δυνάδα γραμμών όπου εντοπίζεται εντροπία πέραν του κατωφλίου.

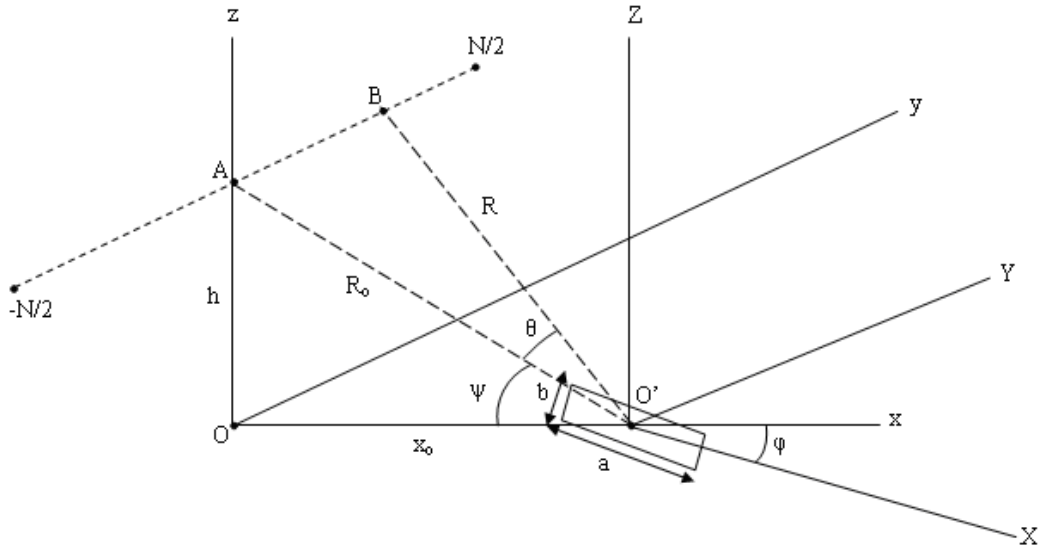
Τέλος, το μη εστιασμένο CPI δύναται να διαιρεθεί σε $\frac{CPI}{8}$, όπου στην περίπτωση αυτή εξετάζονται όλες οι γραμμές του CPI ξεχωριστά. Αν εντοπιστεί εντροπία που υπερβαίνει την τιμή κατωφλίου στην πρώτη γραμμή του μη εστιασμένου CPI τότε αντικαθίσταται το κυανό ελλειψοειδές με τον αριθμό 1 με το κόκκινο ελλειψοειδές αριθμού 1.

Για κάθε συνδυασμό δεδομένων (με διάρκεια ίση με ένα CPI), σχηματίζεται μια SAR εικόνα μέσω του διδιάστατου μετασχηματισμού Fourier και υπολογίζεται η αντίστοιχη τιμή εντροπίας. Σε κάθε βαθμίδα διαχωρισμού του CPI ο προτεινόμενος αλγόριθμος είναι δυνατό είτε να επιλέξει τη SAR εικόνα με την ελάχιστη τιμή εντροπίας η την πρώτη εικόνα που έχει τιμή εντροπίας εντός μιας αποδεκτής περιοχής. Φυσικά θέτοντας μια κατάλληλη περιοχή αποδεκτών τιμών εντροπίας για την εικόνα SAR, ο αλγόριθμος μπορεί να σταματήσει σε μια αρχική βαθμίδα διαχωρισμού του CPI εξοικονομώντας υπολογιστικό χρόνο αφού ικανοποιούνται τα κριτήρια για την εστίαση της εικόνας SAR. Για τη λειτουργία του αλγορίθμου ορίζεται μία τιμή εντροπίας ως κατώφλι H_{thr} καθώς επίσης και ένα χαμηλότερο H_{low} και ένα υψηλότερο H_{upp} όριο για τον καθορισμό της περιοχής με αποδεκτές τιμές εντροπίας [1].

3.4 Εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης εικόνας ραντάρ συνθετικής απεικόνισης (SAR) σε σενάριο προσομοίωσης στόχου που εκτελεί απότομη αλλαγή κίνησης

3.4.1 Γεωμετρία προσομοίωσης

Στο σχήμα 3.2 παρουσιάζεται η γεωμετρία SAR που εφαρμόζεται στο συγκεκριμένο σενάριο προσομοίωσης Η πλατφόρμα που φέρει το ραντάρ συνθετικής απεικόνισης ίπταται σε υψόμετρο h πάνω από την γη, με σταθερή ταχύτητα v , κατά την κατεύθυνση Oy (κατεύθυνση κατά μήκος της τροχιάς (along track)), και εκπέμπει παλμούς τύπου βηματικής συχνότητας (stepped frequency, SF) προς τα πλάγια, δηλαδή προς την κατεύθυνση Ox . Το αεροσκάφος, σύμφωνα με την προσομοίωση, κινείται κατά μήκος του άξονα Oy από $-\frac{N}{2}$ έως $\frac{N}{2}$, όπου N είναι ο αριθμός των ριπών κατά τη διάρκεια ενός συμφασικού διαστήματος επεξεργασίας (CPI). Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.2 το κέντρο της τροχιάς του αεροσκάφους θεωρείται το σημείο A . Επιπλέον το ραντάρ συνθετικής απεικόνισης θεωρείται ότι εκπέμπει M παλμούς τύπου βηματικής συχνότητας (stepped frequency, SF) ανά ριπή ($m = 1, \dots, M$) και N ριπές ανά συμφασικό διάστημα επεξεργασίας (CPI).

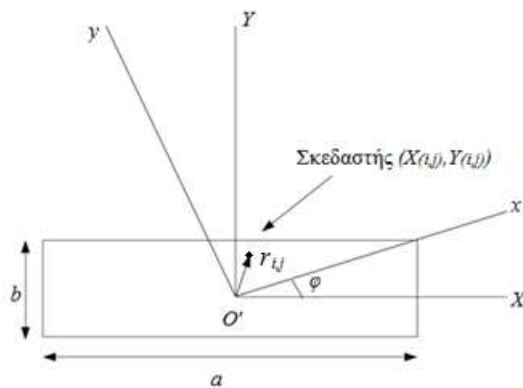


Σχήμα 3.2: SAR γεωμετρία στόχου που εκτελεί απότομη αλλαγή κίνησης

Ο στόχος παρατήρησης που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση, είναι ένα πλοίο που βρίσκεται στην επιφάνεια της θάλασσας. Επιπλέον γίνεται η υπόθεση (για λόγους απλότητας και χωρίς βλάβη της γενικότητας) ότι ο στόχος είναι επίπεδος, σχήματος ορθογωνίου παραλληλογράμμου, και διαστάσεων $a \times b$ δεδομένου ότι η γενίκευση για τρισδιάστατο στόχο ραντάρ, αυθαίρετου σχήματος, μπορεί να προκύψει με άμεσο τρόπο. Στο σχήμα 3.2 παρουσιάζονται δύο συστήματα συντεταγμένων: Το σύστημα συντεταγμένων του στόχου (πλοίο) το οποίο ονομάζεται τοπικό σύστημα συντεταγμένων $O'XYZ$, και το σύστημα συντεταγμένων της γήινης επιφάνειας $Oxyz$. Η αρχή O' στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων τοποθετείται στο κέντρο μάζας του πλοίου. Η απόσταση R_0 είναι η απόσταση από το κέντρο της τροχιάς του αεροσκάφους μέχρι την αρχή O' στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων. Σύμφωνα με την παραπάνω SAR γεωμετρία, το διάνυσμα της απόστασης \vec{R} δίνεται από τη σχέση:

$$\vec{R} = x_0 \hat{x} - vnT_b \hat{y} - h\hat{z} \quad (3.12)$$

όπου h είναι το ύψος της πλατφόρμας του ραντάρ, $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ είναι τα μοναδιαία διανύσματα κατά μήκος των αξόνων x, y, z αντίστοιχα, $T_b = M \cdot PRI$ είναι η διάρκεια μιας ριπής, PRI είναι η περίοδος επανάληψης παλμού και $n = -N/2, \dots, -1, 0, 1, 2, \dots, N/2$. Ο στόχος (πλοίο) θεωρείται ότι αποτελείται από έναν αριθμό σημειακών σκεδαστών $(X_{(i,j)}, Y_{(i,j)})$ όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3. Η γωνία ψ είναι η γωνία πρόσπτωσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος του ραντάρ ενώ η γωνία θ είναι η γωνία αζιμουθίου ή θέασης του στόχου στη διάρκεια ενός διαστήματος συμφασικής επεξεργασίας, CPI .



Σχήμα 3.3: Συντεταγμένες $(X_{(i,j)}, Y_{(i,j)})$ ενός σημειακού σκεδαστή του δισδιάστατου στόχου ραντάρ

Από το σχήμα 2.14 προκύπτει ότι μέσα στο *CPI*, η γωνία θέασης του στόχου θ προκύπτει από την εξίσωση:

$$\cos \theta = \left(\frac{x_o^2 + h^2}{x_o^2 + h^2 + v^2 n^2 T_b^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.13)$$

Η ολική απόσταση από την πλατφόρμα του ραντάρ SAR έως ένα τυχαίο σκεδαστή του πλοίου δίνεται από τη σχέση:

$$\vec{R}_{i,j} = \vec{R} + \vec{A} \cdot \vec{r}_{i,j} \quad (3.14)$$

όπου \vec{A} είναι ο πίνακας μετασχηματισμού από το τοπικό σύστημα συντεταγμένων στο σύστημα συντεταγμένων της γήινης επιφάνειας:

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \quad (3.15)$$

Στην παραπάνω σχέση η γωνία ϕ είναι η γωνία μεταξύ των δύο συστημάτων συντεταγμένων. Η γωνία αυτή καθορίζει επιπλέον και τον προσανατολισμό του πλοίου (στροφή στόχου) ως προς το σύστημα συντεταγμένων της γήινης επιφάνειας $Oxyz$ (πιο συγκεκριμένα τον άξονα Ox).

Η απόσταση $\vec{r}_{i,j}$ είναι η απόσταση μεταξύ της αρχής O' του τοπικού συστήματος συντεταγμένων και ενός τυχαίου σκεδαστή του στόχου και δίνεται από τη σχέση:

$$\vec{r}_{i,j} = (X_{i,j}, Y_{i,j}) = X_{i,j} \hat{X} + Y_{i,j} \hat{Y} \quad (3.16)$$

Αν συνδυαστούν οι σχέσεις (3.14) - (3.16), τότε προκύπτει η ολική απόσταση από την πλατφόρμα του ραντάρ SAR έως ένα τυχαίο σκεδαστή του πλοίου:

$$\vec{R}_{i,j} = \vec{R} + [(X_{i,j} \cdot \cos \phi + Y_{i,j} \cdot \sin \phi)\hat{x} + (-X_{i,j} \cdot \sin \phi + Y_{i,j} \cdot \cos \phi)\hat{y}] \quad (3.17)$$

όπου το διάνυσμα \vec{R} δίνεται από την εξίσωση (2.49).

Το αντίστοιχο κυματοδιάνυσμα πρόσπτωσης \vec{k} δίνεται από την σχέση:

$$\vec{k} = k \cos \theta \cdot \cos \psi \cdot \hat{x} - k \sin \theta \cdot \hat{y} - k \cos \theta \cdot \sin \psi \cdot \hat{z} \quad (3.18)$$

όπου η γωνία θέασης θ δίνεται από την εξίσωση (3.13), ψ είναι η γωνία πρόσπτωσης ως προς την γη (grazing angle) και ο κυματάρριθμος k δίνεται από την εξίσωση:

$$k = \frac{\omega_m}{c} = \frac{2\pi f_m}{c} \quad (3.19)$$

όπου $f_m = f_o + (m-1)\Delta f$, ($m=1,2,\dots,M$) είναι η εκπεμπόμενη βηματική συχνότητα (SF) και ω_m είναι η αντίστοιχη γωνιακή συχνότητα.

Επομένως η φάση $\phi_{i,j}$ για τον (i,j) σκεδαστή που αντιστοιχεί στο σήμα επιστροφής του ραντάρ υπολογίζεται από την σχέση:

$$\phi_{i,j} = 2\vec{k} \cdot \vec{R}_{i,j} \quad (3.20)$$

Από τις εξισώσεις (3.14), (3.18) και (3.20) προκύπτει άμεσα η παρακάτω έκφραση για την φάση $\phi_{i,j}^{m,n}$, αν θεωρηθεί ότι ο στόχος είναι ακίνητος:

$$\phi_{i,j}^{m,n} = \frac{4\pi f_m}{c} \cdot [\cos \theta \cdot \cos \psi \cdot (X_{i,j} \cdot \cos \phi + Y_{i,j} \cdot \sin \phi) + \sin \theta \cdot (X_{i,j} \cdot \sin \phi - Y_{i,j} \cdot \cos \phi)] \quad (3.21)$$

Η παραπάνω έκφραση αφορά την τοπική φάση σκέδασης δηλαδή αφορά μόνο τους σκεδαστές ως προς το τοπικό σύστημα συντεταγμένων. Η φάση που αφορά την απόσταση από τον φορέα (θέση B της πλατφόρμας) μέχρι το κέντρο του σκεδαστή O' ισούται με:

$$\phi_{comp}^{m,n} = \frac{4\pi f_m}{c} \cdot (x_o \cos \theta \cdot \cos \psi + h \cos \theta \cdot \sin \psi + vnT_b \cdot \sin \theta) \quad (3.22)$$

Στην παραπάνω σχέση $m=1,\dots,M$ είναι ο δείκτης της βηματικής συχνότητας, $n=1,\dots,N \cdot N_{CPI}$ είναι ο δείκτης για τις ριπές. Στην προσομοίωση δημιουργούνται N ριπές κατά τη διάρκεια ενός συμφασικού διαστήματος επεξεργασίας (CPI) και ο αριθμός των CPI ισούται με N_{CPI} . Επιπλέον $(X_{(i,j)}, Y_{(i,j)})$ είναι οι τοπικές συντεταγμένες των σκεδαστών του πλοίου. Η φάση που αφορά την απόσταση από τον φορέα μέχρι το κέντρο του σκεδαστή O' , αποτελεί τη διόρθωση ή αντιστάθμιση φάσης (phase compensation).

Στην περίπτωση ενός κινούμενου στόχου, η σχέση για τη φάση αλλάζει ανάλογα με το είδος της κίνησης. Στο συγκεκριμένο σενάριο προσομοίωσης, το πλοίο

θεωρείται ότι έχει μία κάθετη κίνηση λόγω των κυμάτων στην επιφάνεια της θάλασσας. Στο μοντέλο αυτό κίνησης του πλοίου, εισάγεται στη σχέση της φάσης ένας επιπλέον όρος λόγω της κίνησης του πλοίου κατά μήκος του z άξονα. Ο όρος αυτός εξαρτάται από την περίοδο T_{osc} της κίνησης της επιφάνειας της θάλασσας. Επομένως η φάση για το οπισθοσκεδαζόμενο σήμα που λαμβάνει υπόψη και τον όρο λόγω της κίνησης που εκτελεί το πλοίο στην επιφάνεια της θάλασσας θα είναι:

$$\phi_{i,j,osc}^{m,n} = \phi_{i,j}^{m,n} - \frac{4\pi f_m}{c} \cdot z_o \cdot \cos \theta \cdot \sin \psi \cdot \sin(\omega_{osc} t) \quad (3.23)$$

όπου z_o είναι το πλάτος της ταλάντωσης και ω_{osc} είναι η γωνιακή συχνότητα της ταλάντωσης $\left(\omega_{osc} = \frac{2\pi}{T_{osc}} \right)$.

Τέλος, το σήμα επιστροφής ραντάρ $x(m, n)$ δίδεται από την σχέση :

$$x(m, n) = \sum_d s_{i,j} \exp(j\phi_{i,j}^{m,n}) + u(m, n) \quad (3.24)$$

όπου $s_{i,j}$ είναι το πλάτος σκέδασης που αντιστοιχεί στον (i, j) σκεδαστή, d είναι ο αριθμός των σκεδαστών του στόχου ραντάρ και $u(m, n)$ είναι ο δισδιάστατος προσθετικός λευκός θόρυβος Gauss (Gaussian noise). Στις παρακάτω προσομοιώσεις έχει υποτεθεί χωρίς βλάβη της γενικότητας ότι όλοι οι σκεδαστές έχουν το ίδιο πλάτος (ίδια ένταση ακτινοβολίας) δηλαδή ισχύει $s_{i,j} = 1$ για όλους τους σκεδαστές (i, j) . Η φάση $\phi_{i,j}^{m,n}$ του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος δίνεται από τη σχέση (3.21) αν ο στόχος δεν κινείται και από τη σχέση (3.23) αν ο στόχος κινείται.

Το μέτρο και η φάση της εξίσωσης (3.24) καταγράφονται σε ένα δισδιάστατο πίνακα διάστασης $M \times N$ και αποτελούν τα ακατέργαστα δεδομένα (raw data). Δεδομένου ότι αυτά προέκυψαν από M συχνότητες εκπομπής του SF ραντάρ, είναι δυνατό να θεωρηθούν ως δεδομένα στο πεδίο της συχνότητας (frequency domain data).

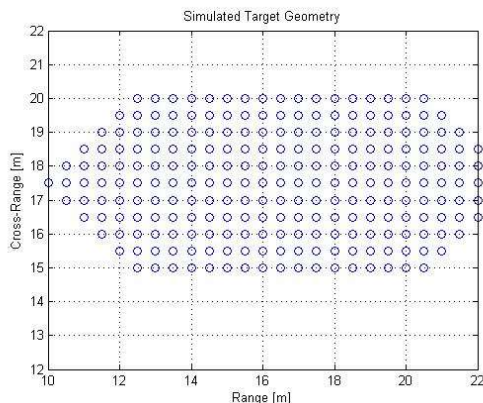
Οι SAR εικόνες ανακατασκευάζονται από τα ακατέργαστα δεδομένα με την τεχνική απεικόνισης Range – Doppler αφού γίνουν δύο μετασχηματισμοί Fourier στην κατεύθυνση της απόστασης (range) και στην κατεύθυνση της κάθετης απόστασης (cross range). Για να συγκριθεί η ποιότητα των εικόνων SAR, υπολογίζεται η τιμή της εντροπίας για κάθε εικόνα. Επομένως η τιμή της εντροπίας αποτελεί ένα κριτήριο σύγκρισης μεταξύ των SAR εικόνων [5] – [7].

3.4.2 Αριθμητικές προσομοιώσεις

Στο συγκεκριμένο σενάριο προσομοίωσης ο στόχος θεωρείται ακίνητος στα περισσότερα CPI παρατήρησης. Αντίθετα σε ορισμένα CPI εισάγεται μία κίνηση ταλάντωσης κατά μήκος του κάθετου άξονα z λόγω της κίνησης της επιφάνειας της θάλασσας. Οι SAR εικόνες που προκύπτουν για τα CPI στα οποία έχει προσομοιωθεί

κίνηση του στόχου, είναι θολές λόγω της κίνησης. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος αυτοεστίασης έχει ως αποτέλεσμα να διορθωθεί η εικόνα στα συγκεκριμένα CPI .

Ο στόχος που προσομοιώθηκε σύμφωνα με τη γεωμετρία του ραντάρ συνθετικής απεικόνισης είναι ένα μοντέλο πλοίου που αποτελείται από σημειακούς σκεδαστές. Πιο συγκεκριμένα αποτελείται από 233 σκεδαστές όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4: Μοντέλο πλοίου που αποτελείται από σημειακούς σκεδαστές

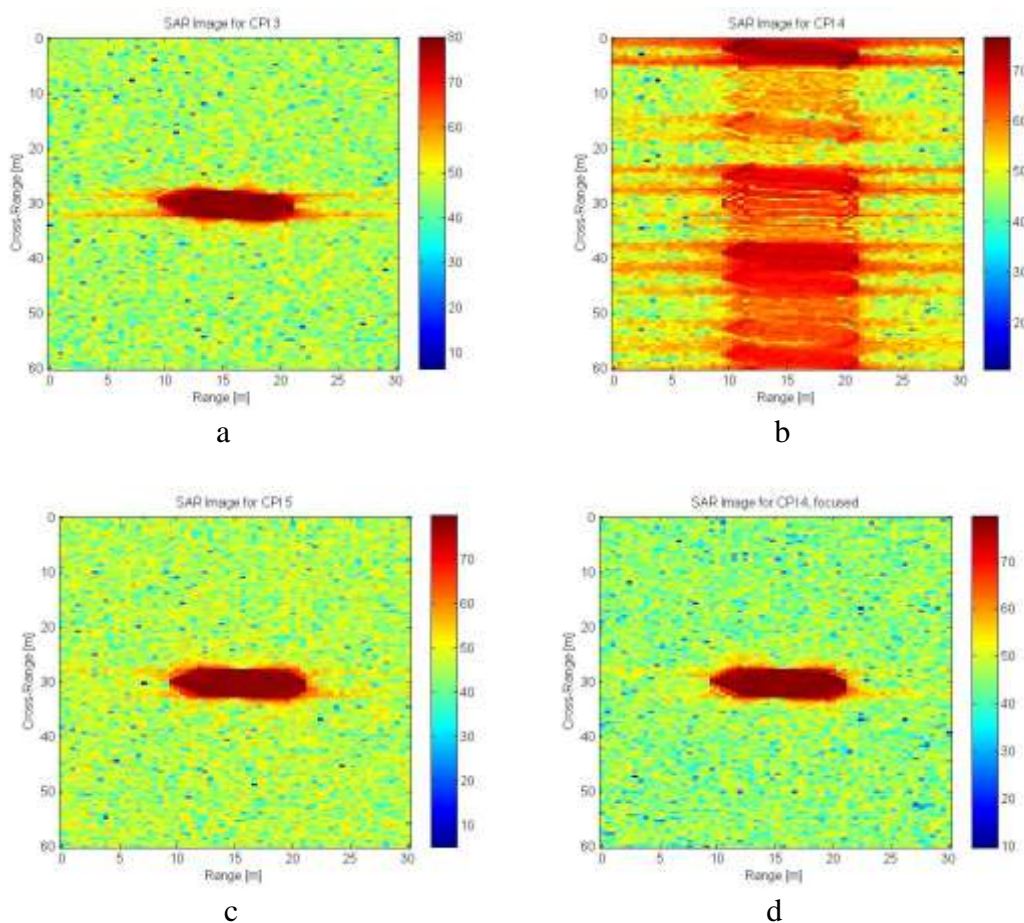
Οι τιμές των παραμέτρων της δισδιάστατης γεωμετρίας SAR που επιλέχθηκαν για τις προσομοιώσεις φαίνονται στον πίνακα 3.1. Οι παράμετροι του ραντάρ πρέπει να επιλεγούν κατάλληλα για κάθε σενάριο προσομοίωσης. Αρχικά πρέπει να καθοριστεί η επιθυμητή τετραγωνική ανάλυση (square resolution).

Πίνακας 3-1: Παράμετροι προσομοίωσης της γεωμετρίας του ραντάρ τύπου SAR

Παράμετρος	Τιμή [μονάδα]
Αρχική συχνότητα φέροντος, f_0	10 [GHz]
Εύρος συχνοτήτων ραντάρ, B	300 [MHz]
Αριθμός εκπεμπόμενων συχνοτήτων, M	64
Συχνότητα επανάληψης παλμού, PRF	2.74 [KHz]
Διάρκεια ριπής, T_b	0.0234 [s]
Διάστημα συμφασικής επεξεργασίας, CPI	3 [s]
Αριθμός ριπών, N	128
Αριθμός CPI , N_{CPI}	13
Απόσταση από τη κέντρο του στόχου, R_o	10 [km]
Ύψος φορέα SAR, h	2 [km]
Γωνία στροφής στόχου, φ	0°
Ταχύτητα φορέα SAR, v	100 [m/s]
Πλάτος ταλάντωσης, z_o	0.2 [m]
Περίοδος ταλάντωσης, T_{osc}	1.3 [s]

Στο παρόν σενάριο προσομοίωσης, η διάρκεια πτήσης του φορέα του ραντάρ θεωρείται ίση με 13 CPI . Η κίνηση του στόχου εισάγεται μόνο στο τέταρτο και όγδοο CPI . Σε όλες τις εικόνες SAR που θα παρατεθούν, ο οριζόντιος άξονας αναπαριστά την κατεύθυνση απόστασης (range direction) ενώ ο κάθετος άξονας αναπαριστά την κατεύθυνση κάθετης απόστασης (cross range direction).

Ο αλγόριθμος αυτοεστίασης του διαχωριζόμενου συμφασικού διαστήματος επεξεργασίας (*CPI-split autofocusing*) εφαρμόζεται αυτόματα σε εκείνα τα *CPI* στα οποία η τιμή εντροπίας των αντίστοιχων εικόνων SAR υπερβαίνει το κατώφλι εντροπίας, το οποίο για τη συγκεκριμένη προσομοίωση ορίστηκε ίσο με 6.0. Οι εικόνες των οποίων οι τιμές εντροπίας είναι μικρότερες από την τιμή κατώφλιου εντροπίας ονομάζονται εστιασμένες εικόνες (focused). Αντίθετα οι εικόνες των οποίων οι τιμές εντροπίας είναι μεγαλύτερες από την τιμή κατώφλιου εντροπίας ονομάζονται μη εστιασμένες εικόνες (unfocused). Όπως είναι αναμενόμενο, οι SAR εικόνες που αντιστοιχούν σε εκείνα τα συγκεκριμένα *CPI* στα οποία εισάγεται η κίνηση του στόχου (τέταρτο και όγδοο *CPI*), θα έχουν μεγαλύτερες τιμές εντροπίας από τις SAR εικόνες που αντιστοιχούν στα *CPI* στα οποία δεν παρατηρείται κίνηση στόχου.

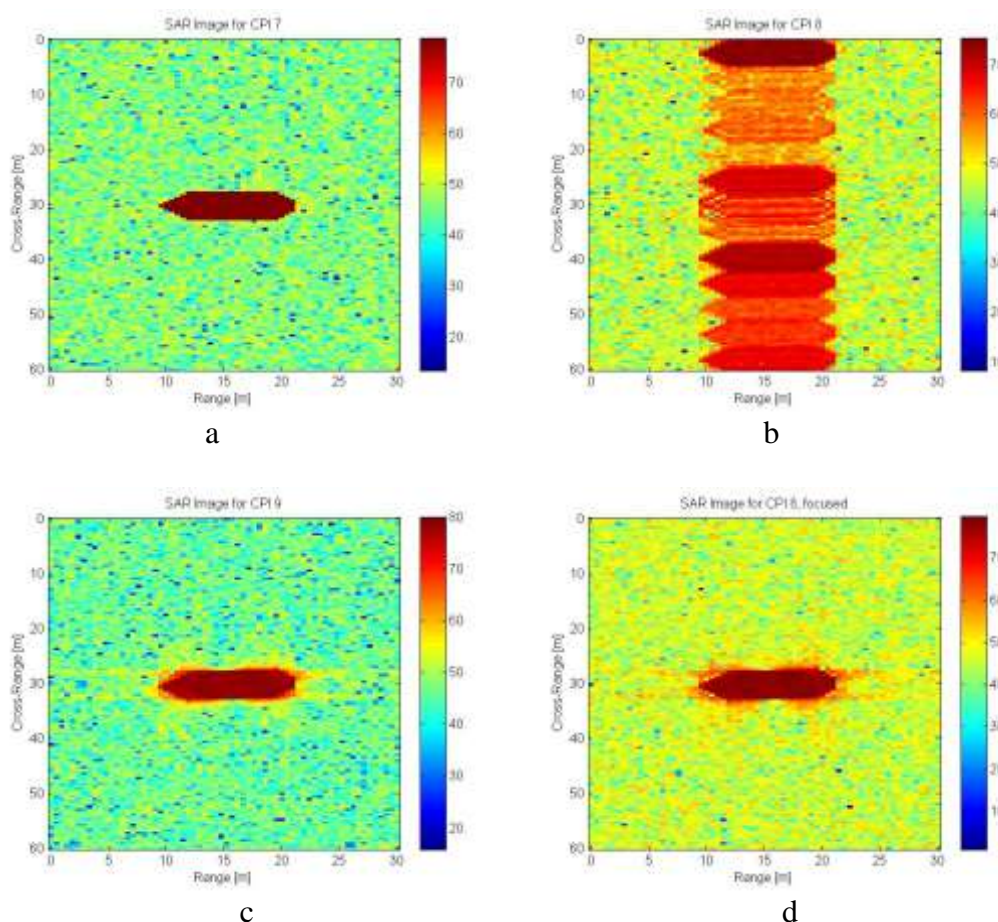


Σχήμα 3.5: Ανακατασκευασμένες SAR εικόνες α) τρίτο *CPI* , β) τέταρτο *CPI* , γ) πέμπτο *CPI* , δ) τέταρτο *CPI* εστιασμένο μετά από την εφαρμογή του αλγορίθμου

Στο σχήμα 3.5 φαίνονται τέσσερις ανακατασκευασμένες εικόνες SAR. Οι εικόνες a,b,c αντιστοιχούν στις ανακατασκευασμένες εικόνες SAR για το τρίτο, το τέταρτο, το πέμπτο *CPI* αντίστοιχα. Η εικόνα που αντιστοιχεί στο τέταρτο *CPI* (εικόνα b) είναι φανερό ότι είναι μη εστιασμένη λόγω της κίνησης της επιφάνειας της θάλασσας, όπως μοντελοποιήθηκε στις προσομοιώσεις. Στην εικόνα d η εικόνα SAR για το τέταρτο *CPI* φαίνεται μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης του διαχωριζόμενου συμφασικού διαστήματος επεξεργασίας (*CPI-split autofocusing*).

Όπως είναι εμφανές, η SAR εικόνα είναι πλέον εστιασμένη και έχει αποδεκτή τιμή εντροπίας.

Στο σχήμα 3.6 φαίνονται τέσσερις ανακατασκευασμένες εικόνες SAR. Οι εικόνες a,b,c αντιστοιχούν στις ανακατασκευασμένες εικόνες SAR για το έβδομο, το όγδοο, το ένατο *CPI* αντίστοιχα. Η εικόνα που αντιστοιχεί στο όγδοο *CPI* (εικόνα b) είναι φανερό ότι είναι μη εστιασμένη λόγω της κίνησης της επιφάνειας της θάλασσας, όπως μοντελοποιήθηκε στις προσομοιώσεις. Στην εικόνα d η εικόνα SAR για το όγδοο *CPI* φαίνεται μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης του διαχωριζόμενου συμφασικού διαστήματος επεξεργασίας (*CPI-split autofocusing*). Όπως είναι εμφανές, η SAR εικόνα είναι πλέον εστιασμένη και έχει αποδεκτή τιμή εντροπίας.



Σχήμα 3.6: Ανακατασκευασμένες SAR εικόνες α) έβδομο *CPI* , b) όγδοο *CPI* , c) ένατο *CPI* , d) όγδοο *CPI* εστιασμένο μετά από την εφαρμογή του αλγορίθμου

Στον πίνακα 3.2 φαίνονται οι τιμές της εντροπίας για τις SAR εικόνες που παρατέθηκαν στα σχήματα 3.5 και 3.6. Παρατηρείται ότι η τιμή της εντροπίας για την εικόνα που αντιστοιχεί στο τέταρτο *CPI* ξεπερνά το κατώφλι εντροπίας (6.0) ενώ μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης διαχωριζόμενου συμφασικού διαστήματος επεξεργασίας (*CPI-split autofocusing*), η τιμή της εντροπίας για την εικόνα SAR που αντιστοιχεί στο τέταρτο *CPI* είναι κάτω από το κατώφλι εντροπίας και μέσα στα επιτρεπτά όρια (<6.0). Το ίδιο ισχύει και για το όγδοο *CPI* . Αρχικά πριν την εφαρμογή του αλγορίθμου η εικόνα SAR που αντιστοιχεί στο όγδοο *CPI* έχει τιμή εντροπίας που ξεπερνά το κατώφλι εντροπίας (6.0) ενώ μετά την εφαρμογή

του αλγορίθμου αυτοεστίασης διαχωριζόμενου συμφασικού διαστήματος επεξεργασίας (*CPI-split autofocusing*), η τιμή της εντροπίας για την εικόνα SAR που αντιστοιχεί στο όγδοο *CPI* είναι κάτω από το κατώφλι εντροπίας και μέσα στα επιτρεπτά όρια (<6.0) [6]–[7].

Πίνακας 3-2: Τιμές εντροπίας των ανακατασκευασμένων εικόνων SAR

Εικόνα SAR	Εντροπία	Συνδυασμός ελάχιστης εντροπίας
CPI 3	5.7617	
CPI 4, μη εστιασμένη	7.7743	
CPI 5	5.7573	
CPI 4, εστιασμένη	5.7582	βαθμίδα 4, κομμάτι 2, συνδυασμός 7
Εικόνα SAR	Εντροπία	Συνδυασμός ελάχιστης εντροπίας
CPI 7	5.6826	
CPI 8, μη εστιασμένη	7.4295	
CPI 9	5.7586	
CPI 8, εστιασμένη	5.7653	βαθμίδα 4, κομμάτι 2, συνδυασμός 7

3.5 Εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης εικόνας ραντάρ συνθετικής απεικόνισης (SAR) σε σενάριο μερικής απώλειας δεδομένων

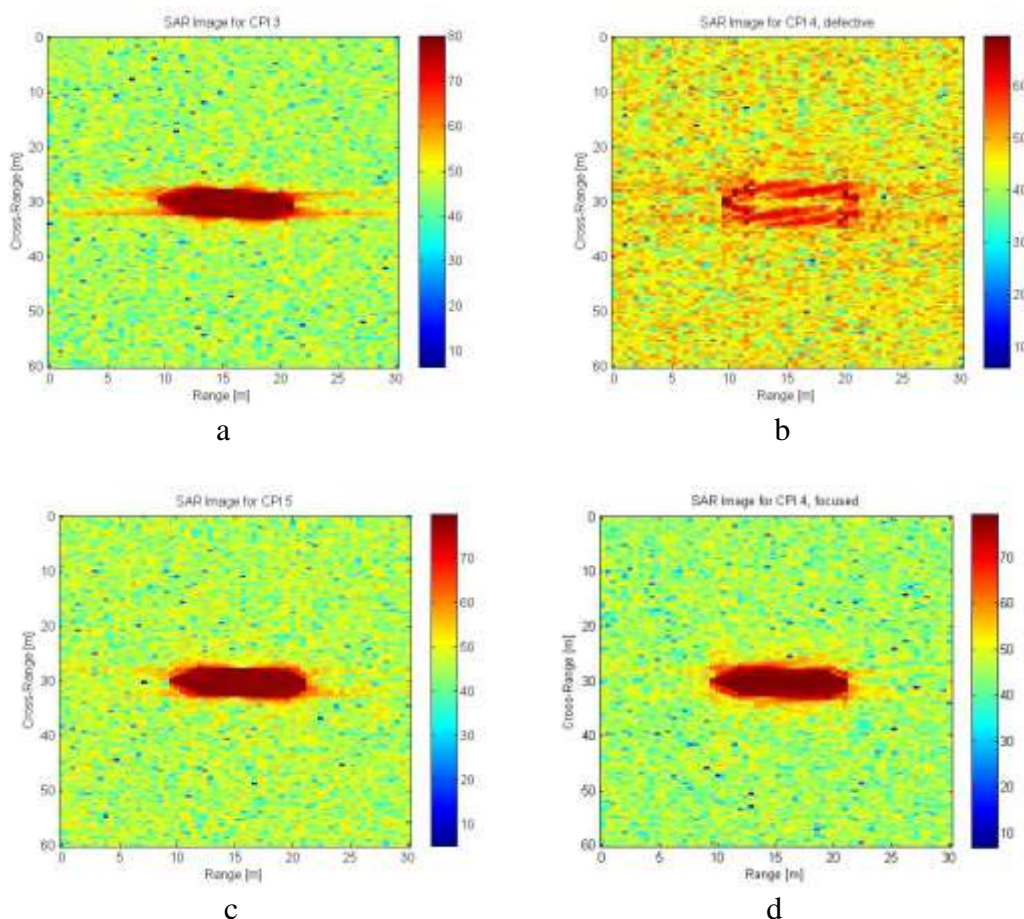
Στο συγκεκριμένο σενάριο, προσομοιώνεται η μερική απώλεια δεδομένων σε ορισμένα *CPI*, που μπορεί ενδεχομένως να οφείλεται σε δυσλειτουργία του πομπού ή του δέκτη του ραντάρ κατά τη διάρκεια ορισμένων *CPI*. Για την προσομοίωση χρησιμοποιείται το μοντέλο του σχήματος 3.4. Ο αλγόριθμος αυτοεστίασης του διαχωριζόμενου συμφασικού διαστήματος επεξεργασίας (*CPI-split autofocusing*) εφαρμόζεται στα *CPI* στα οποία υπάρχει απώλεια δεδομένων με σκοπό να παραχθούν εικόνες SAR καλής ποιότητας παρά την προσωρινή δυσλειτουργία του ραντάρ.

Για εκείνα τα *CPI* στα οποία θα προσομοιωθεί μερική απώλεια δεδομένων, το οπισθοσκεδαζόμενο σήμα θεωρείται μηδενικό και μόνο ο παράγοντας του δισδιάστατου λευκού θορύβου Gauss (Gaussian noise) $u(m, n)$ λαμβάνεται υπόψη.

Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται σε αυτό το σενάριο προσομοίωσης είναι ίδιοι με τις παραμέτρους του πίνακα 3.1. Η διάρκεια πτήσης του φορέα του ραντάρ ορίζεται ίση με 13 *CPI*. Η απώλεια δεδομένων προκύπτει σύμφωνα με την προσομοίωση κατά τη διάρκεια του τέταρτου και του όγδοου *CPI*. Ο αλγόριθμος αυτοεστίασης του διαχωριζόμενου συμφασικού διαστήματος επεξεργασίας (*CPI-split autofocusing*) εφαρμόζεται αυτόματα σε εκείνα τα *CPI* στα οποία η τιμή εντροπίας των αντίστοιχων εικόνων SAR υπερβαίνει το κατώφλι εντροπίας το οποίο για τη συγκεκριμένη προσομοίωση ορίστηκε ίσο με 6.0.

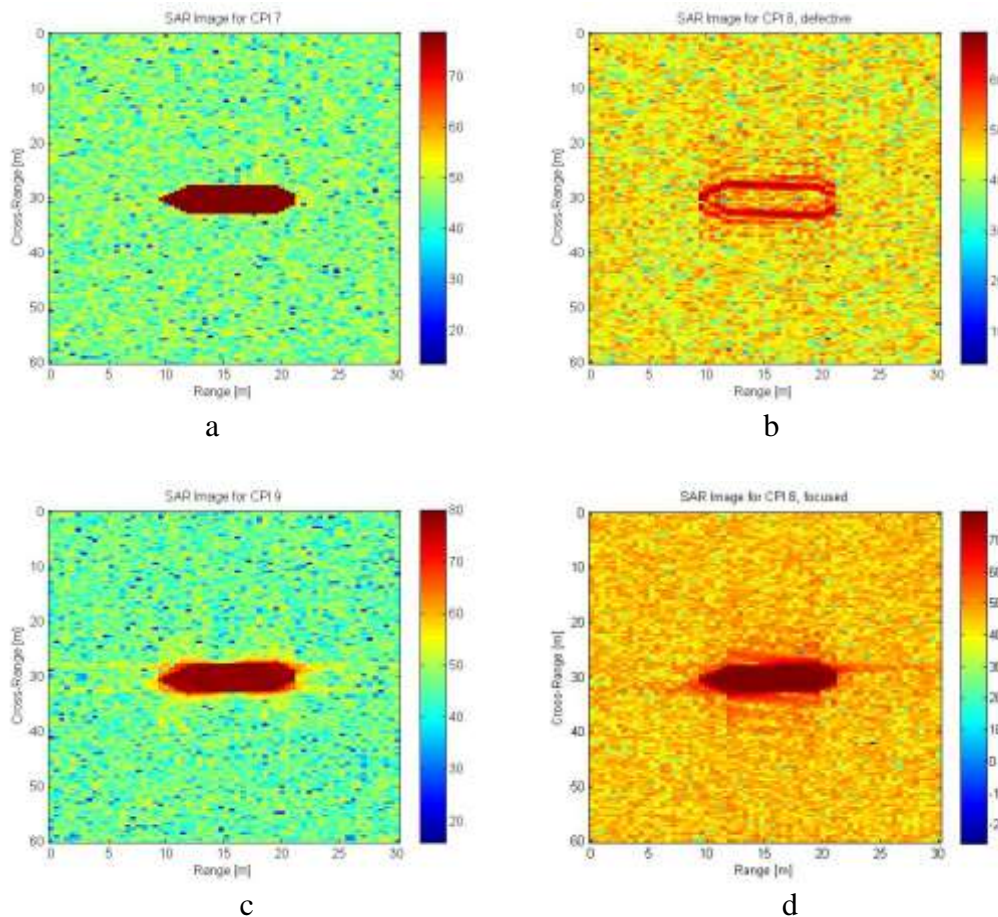
Στο σχήμα 3.7 φαίνονται τέσσερις ανακατασκευασμένες εικόνες SAR. Οι εικόνες a,b,c αντιστοιχούν στις ανακατασκευασμένες εικόνες SAR για το τρίτο, το τέταρτο, το πέμπτο *CPI* αντίστοιχα. Η εικόνα που αντιστοιχεί στο τέταρτο *CPI* (εικόνα b) είναι φανερό ότι είναι ελλιπής και ελαττωματική λόγω της δυσλειτουργίας του πομπού ή του δέκτη του ραντάρ που είχε ως αποτέλεσμα μερική απώλεια

δεδομένων, όπως μοντελοποιήθηκε στις προσομοιώσεις. Στην εικόνα d η εικόνα SAR για το τέταρτο *CPI* φαίνεται μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης του διαχωριζόμενου συμφασικού διαστήματος επεξεργασίας (*CPI-split autofocusing*). Όπως είναι εμφανές, η SAR εικόνα είναι πλέον εστιασμένη και έχει αποδεκτή τιμή εντροπίας. Επομένως ο προτενόμενος αλγόριθμος είναι αποτελεσματικός και σε αυτό το σενάριο προσομοίωσης.



Σχήμα 3.7: Ανακατασκευασμένες SAR εικόνες α) τρίτο *CPI* , β) τέταρτο *CPI* , γ) πέμπτο *CPI* , δ) τέταρτο *CPI* εστιασμένο μετά από την εφαρμογή του αλγορίθμου

Στο σχήμα 3.8 φαίνονται τέσσερις ανακατασκευασμένες εικόνες SAR. Οι εικόνες a,b,c αντιστοιχούν στις ανακατασκευασμένες εικόνες SAR για το έβδομο, το όγδοο, το ένατο *CPI* αντίστοιχα. Η εικόνα που αντιστοιχεί στο όγδοο *CPI* (εικόνα b) είναι φανερό ότι είναι μη εστιασμένη λόγω της δυσλειτουργίας του πομπού ή του δέκτη του ραντάρ που είχε ως αποτέλεσμα μερική απώλεια δεδομένων, όπως μοντελοποιήθηκε στις προσομοιώσεις. Στην εικόνα d η εικόνα SAR για το όγδοο *CPI* φαίνεται μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης του διαχωριζόμενου συμφασικού διαστήματος επεξεργασίας (*CPI-split autofocusing*). Όπως είναι εμφανές, η SAR εικόνα είναι πλέον εστιασμένη και έχει αποδεκτή τιμή εντροπίας.



Σχήμα 3.8: Ανακατασκευασμένες SAR εικόνες α) έβδομο *CPI* , β) όγδοο *CPI* , γ) ένατο *CPI* , δ) όγδοο *CPI* εστιασμένο μετά από την εφαρμογή του αλγορίθμου

Πίνακας 3-3: Τιμές εντροπίας των ανακατασκευασμένων εικόνων SAR

Εικόνα SAR	Εντροπία	Συνδυασμός ελάχιστης εντροπίας
CPI 3	5.7314	
CPI 4, μη εστιασμένη	7.8365	
CPI 5	5.7251	
CPI 4, εστιασμένη	5.7603	βαθμίδα 2, κομμάτι 1, συνδυασμός 1
Εικόνα SAR	Εντροπία	Συνδυασμός ελάχιστης εντροπίας
CPI 7	5.6521	
CPI 8, μη εστιασμένη	7.7165	
CPI 9	5.7292	
CPI 8, εστιασμένη	5.7745	βαθμίδα 3, κομμάτι 2, συνδυασμός 3

Στον πίνακα 3.3 φαίνονται οι τιμές της εντροπίας για τις SAR εικόνες που παρατέθηκαν στα σχήματα 3.7 και 3.8. Παρατηρείται ότι η τιμή της εντροπίας για την εικόνα που αντιστοιχεί στο τέταρτο *CPI* ξεπερνά το κατώφλι εντροπίας (6.0) ενώ μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης διαχωριζόμενου συμφασικού διαστήματος επεξεργασίας (*CPI-split autofocus*), η τιμή της εντροπίας για την εικόνα SAR που αντιστοιχεί στο τέταρτο *CPI* είναι κάτω από το κατώφλι εντροπίας και μέσα στα επιτρεπτά όρια (<6.0). Το ίδιο ισχύει και για το όγδοο *CPI*. Αρχικά

πριν την εφαρμογή του αλγορίθμου η εικόνα SAR που αντιστοιχεί στο όγδοο *CPI* έχει τιμή εντροπίας που ξεπερνά το κατώφλι εντροπίας (6.0) ενώ μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης διαχωριζόμενου συμφασικού διαστήματος επεξεργασίας (*CPI-split autofocusing*), η τιμή της εντροπίας για την εικόνα SAR που αντιστοιχεί στο όγδοο *CPI* είναι κάτω από το κατώφλι εντροπίας και μέσα στα επιτρεπτά όρια (<6.0).

Είναι χαρακτηριστικό ότι ο συνδυασμός ελάχιστης εντροπίας, πραγματοποιείται για διαφορετική βαθμίδα, κομμάτι και συνδυασμό κάθε φορά, γεγονός που καταδεικνύει την ευελιξία του αλγορίθμου [6].

3.6 Εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης εικόνας ραντάρ συνθετικής απεικόνισης (SAR) σε πραγματικά δεδομένα ραντάρ SAR

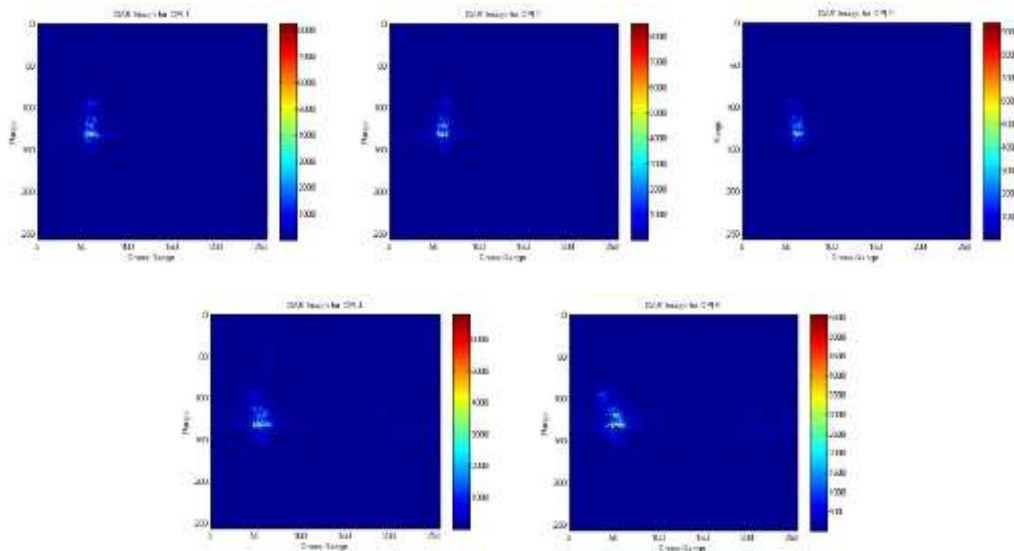
Στη συγκεκριμένη ενότητα εφαρμόζεται ο αλγόριθμος αυτοεστίασης του διαχωριζόμενου συμφασικού διαστήματος επεξεργασίας (*CPI-split autofocusing*) σε πραγματικά δεδομένα από ραντάρ SAR. Τα πραγματικά δεδομένα παραχωρήθηκαν στην επιστημονική μας ομάδα από τις επιστημονικές ομάδες SET 163 και SET 111 Working Groups. Οι παράμετροι λειτουργίας του ραντάρ συνθετικής απεικόνισης (SAR) είναι διαθέσιμα από τις παραπάνω επιστημονικές ομάδες.

Το ραντάρ SAR εκπέμπει κυματομορφή τύπου γραμμικής διαμόρφωσης συχνότητας, LFM (Linear Frequency Modulation), ενώ στα σενάρια προσομοίωσης που παρουσιάστηκαν στις παραγράφους 3.4 και 3.5 προσομοιώθηκε ραντάρ που εκπέμπει παλμούς βηματικής συχνότητας (Stepped Frequency, SF). Από τα ακατέργαστα δεδομένα (raw data) που μας παραχωρήθηκαν και ύστερα από την κατάλληλη ανάλυση σήματος προέκυψαν εικόνες SAR που απεικονίζουν κινούμενους στόχους (πλοία) στην επιφάνεια της θάλασσας [8].

3.6.1 Πρώτο σετ δεδομένων

Στο σχήμα 3.9 φαίνονται πέντε εικόνες SAR από πέντε διαδοχικά διαστήματα συμφασικής επεξεργασίας (*CPI*) που προέκυψαν από το πρώτο σετ ακατέργαστων δεδομένων.

Προκειμένου να συγκριθεί η ποιότητα των SAR εικόνων του σχήματος 3.9, υπολογίζεται η τιμή της εντροπίας για κάθε εικόνα. Στον πίνακα 3.4 παρουσιάζονται οι τιμές της εντροπίας των πέντε SAR εικόνων του σχήματος 3.9. Ο αλγόριθμος αυτοεστίασης του διαχωριζόμενου συμφασικού διαστήματος επεξεργασίας (*CPI-split autofocusing*) εφαρμόζεται αυτόματα σε εκείνα τα *CPI* στα οποία η τιμή εντροπίας των αντίστοιχων εικόνων SAR υπερβαίνει το κατώφλι εντροπίας το οποίο αντιπροσωπεύει την αποδεκτή ποιότητα εικόνων SAR. Οι εικόνες με τιμές εντροπίας κάτω από την τιμή κατωφλίου ονομάζονται εστιασμένες εικόνες (focused), ενώ οι εικόνες με τιμές εντροπίας πάνω από την τιμή κατωφλίου ονομάζονται μη εστιασμένες εικόνες (unfocused).



Σχήμα 3.9: Ανακατασκευασμένες SAR εικόνες για πέντε διαδοχικά *CPI* (πραγματικά δεδομένα)

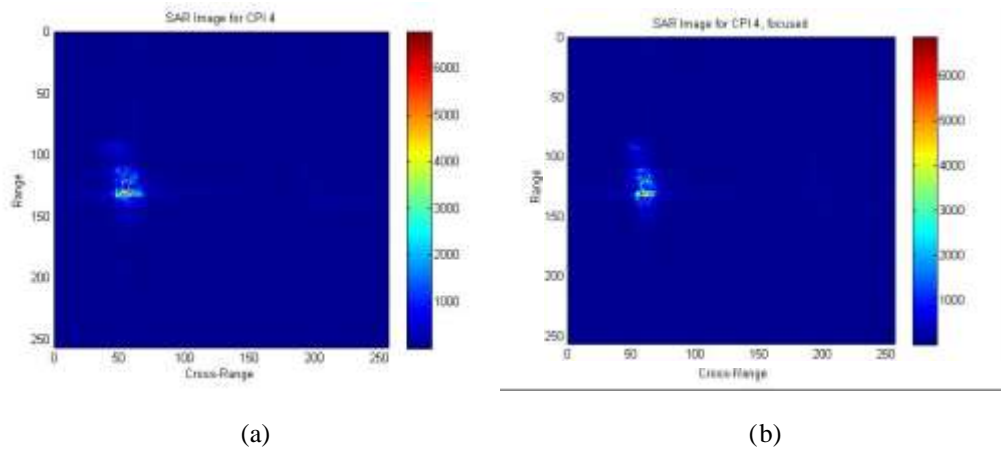
Όπως φαίνεται και στον πίνακα 3.4 το τέταρτο έχει τη μεγαλύτερη τιμή εντροπίας και ως εκ τούτου θεωρείται ότι είναι το μη εστιασμένο. Το κατώφλι εντροπίας τέθηκε ίσο με 6.7 [8].

Πίνακας 3-4: Τιμές εντροπίας

Εικόνα SAR	Εντροπία	Συνδυασμός ελάχιστης εντροπίας
CPI 1	6.4684	
CPI 2	6.2411	
CPI 3	6.1885	
CPI 4, μη εστιασμένο	6.7877	
CPI 5	6.7082	
CPI 4, εστιασμένο	6.5991	βαθμίδα 4, κομμάτι 2, συνδυασμός 7

Στο σχήμα 3.10 φαίνονται οι εικόνες για το τέταρτο *CPI* πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης του διαχωριζόμενου συμφασικού διαστήματος επεξεργασίας (*CPI-split autofocusing*).

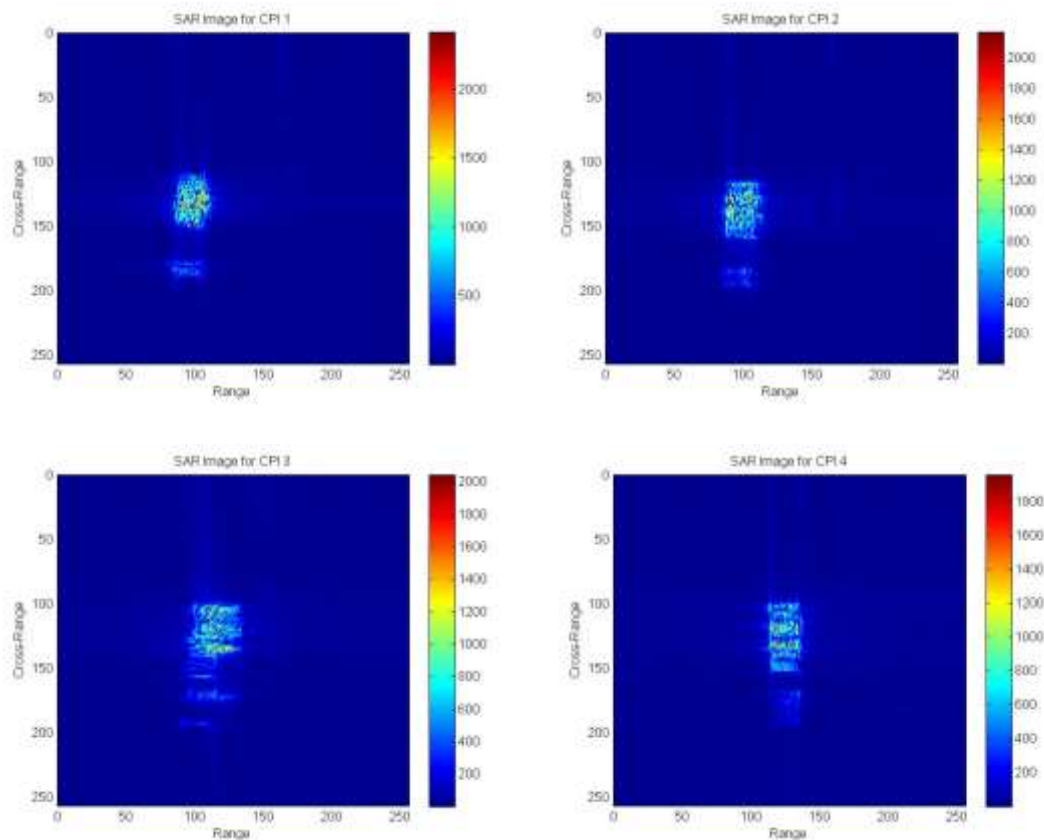
Η SAR εικόνα για το τέταρτο *CPI* μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου είναι εμφανώς πιο εστιασμένη από τη SAR εικόνα πριν την εφαρμογή του αλγορίθμου. Το αποτέλεσμα αυτό επιβεβαιώνεται και από τις τιμές της εντροπίας του πίνακα 3.4. Η τιμή της εντροπίας για τη SAR εικόνα του τέταρτου *CPI* πριν την εφαρμογή του αλγορίθμου είναι μεγαλύτερη από την τιμή της εντροπίας που προκύπτει για τη SAR εικόνα του τέταρτου *CPI* μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Επιπλέον η τιμή της εντροπίας για την εστιασμένη εικόνα είναι μέσα στα αποδεκτά όρια τιμών εντροπίας (κάτω από την τιμή κατωφλίου) [8].



Σχήμα 3.10: Ανακατασκευασμένες SAR εικόνες για το τέταρτο *CPI* α) πριν και β) μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου

3.6.2 Δεύτερο σετ δεδομένων

Στο σχήμα 3.11 φαίνονται τέσσερις εικόνες SAR από τέσσερα διαδοχικά διαστήματα συμφασικής επεξεργασίας (*CPI*) που προέκυψαν από το δεύτερο σετ ακατέργαστων δεδομένων.



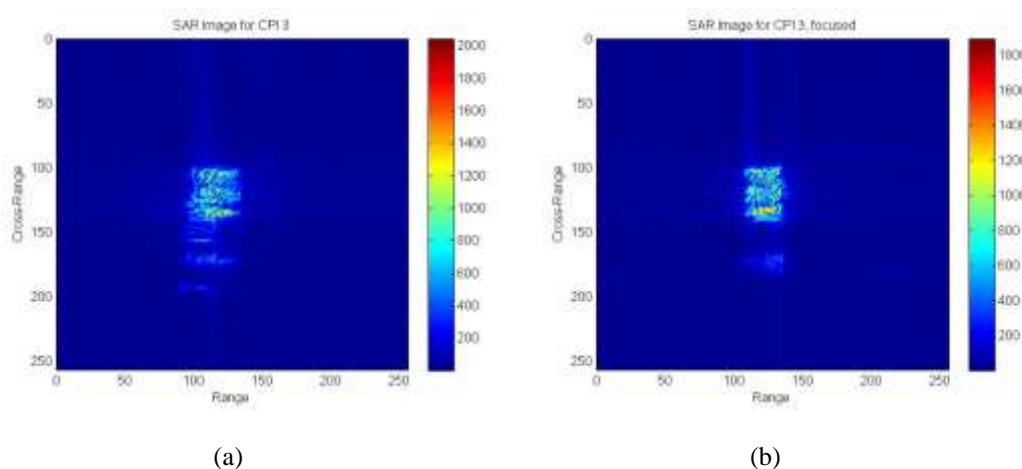
Σχήμα 3.11: Ανακατασκευασμένες SAR εικόνες για τέσσερα διαδοχικά *CPI* (πραγματικά δεδομένα)

Προκειμένου να συγκριθεί η ποιότητα των SAR εικόνων του σχήματος 3.11, υπολογίζεται η τιμή της εντροπίας για κάθε εικόνα. Στον πίνακα 3.5 παρουσιάζονται οι τιμές της εντροπίας των τεσσάρων SAR εικόνων του σχήματος 3.11. Ο αλγόριθμος αυτοεστίασης του διαχωριζόμενου συμφασικού διαστήματος επεξεργασίας (*CPI-split autofocusing*) εφαρμόζεται αυτόματα σε εκείνα τα *CPI* στα οποία η τιμή εντροπίας των αντίστοιχων εικόνων SAR υπερβαίνει το κατώφλι εντροπίας το οποίο αντιπροσωπεύει την αποδεκτή ποιότητα εικόνων SAR. Όπως φαίνεται και στον πίνακα 3.5 το τρίτο *CPI* έχει τη μεγαλύτερη τιμή εντροπίας και ως εκ τούτου θεωρείται ότι είναι το μη εστιασμένο *CPI*. Το κατώφλι εντροπίας τέθηκε ίσο με 7.5.

Πίνακας 3-5: Τιμές εντροπίας

Εικόνα SAR	Εντροπία	Συνδυασμός ελάχιστης εντροπίας
CPI 1	7.1409	
CPI 2	7.3497	
CPI 3, μη εστιασμένο	7.6694	
CPI 4	7.4978	
CPI 3, εστιασμένο	7.3948	βαθμίδα 3, κομμάτι 2, συνδυασμός 3

Στο σχήμα 3.12 φαίνονται οι εικόνες για το τρίτο *CPI* πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης του διαχωριζόμενου συμφασικού διαστήματος επεξεργασίας (*CPI-split autofocusing*).



Σχήμα 3.12: Ανακατασκευασμένες SAR εικόνες για το τρίτο *CPI* a) πριν και b) μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου

Η SAR εικόνα για το τρίτο *CPI* μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου είναι εμφανώς πιο εστιασμένη από τη SAR εικόνα πριν την εφαρμογή του αλγορίθμου. Το αποτέλεσμα αυτό επιβεβαιώνεται και από τις τιμές της εντροπίας του πίνακα 3.5. Η τιμή της εντροπίας για τη SAR εικόνα του τρίτου *CPI* πριν την εφαρμογή του αλγορίθμου είναι μεγαλύτερη από την τιμή της εντροπίας που προκύπτει για τη SAR εικόνα του τρίτου *CPI* μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης. Επιπλέον η τιμή της εντροπίας για την εστιασμένη εικόνα είναι εντός των αποδεκτών ορίων τιμών εντροπίας (κάτω από την τιμή κατωφλίου).

Τα παραπάνω αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος αυτοεστίασης είναι αποτελεσματικός στο να παράγει εστιασμένες εικόνες. Με βάση το κριτήριο ελαχιστοποίησης της εντροπίας, ο αλγόριθμος απορρίπτει δεδομένα που οδηγούν σε εικόνες SAR χαμηλής ποιότητας και χρησιμοποιεί μόνο δεδομένα που οδηγούν σε εικόνες SAR υψηλής ποιότητας. Με αυτό τον τρόπο επιβεβαιώνεται η προσαρμοστικότητα της διαδικασίας αυτοεστίασης σε διαφορετικές συνθήκες απεικόνισης SAR [8].

3.7 Συμπεράσματα

Στην αυτή την ενότητα, εφαρμόστηκε ο αλγόριθμος αυτοεστίασης του διαχωριζόμενου συμφασικού διαστήματος επεξεργασίας (CPI-split autofocusing) σε δύο διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης καθώς επίσης και σε πραγματικά δεδομένα από ραντάρ SAR. Στο πρώτο σενάριο προσομοίωσης σε ορισμένα συμφασικά διαστήματα επεξεργασίας (CPI) εισάγεται μία κίνηση ταλάντωσης του στόχου κατά μήκος του κάθετου άξονα z λόγω της κίνησης της επιφάνειας της θάλασσας, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή μη εστιασμένων εικόνων SAR που αντιστοιχούν στα συγκεκριμένα CPI. Στο δεύτερο σενάριο προσομοίωσης σε ορισμένα CPI θεωρείται ότι συμβαίνει απώλεια δεδομένων λόγω δυσλειτουργίας του δέκτη ή του πομπού του ραντάρ, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την παραμόρφωση των εικόνων SAR που αντιστοιχούν στα συγκεκριμένα CPI. Η εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης του διαχωριζόμενου συμφασικού διαστήματος επεξεργασίας (CPI-split autofocusing), είχε ως αποτέλεσμα την παραγωγή εστιασμένων εικόνων SAR που αντιστοιχούν στα CPI στα οποία υπήρχε πρόβλημα (είτε λόγω της κίνησης του στόχου είτε λόγω απώλειας δεδομένων) και στα δύο παραπάνω σενάρια προσομοίωσης.

Επιπλέον ο αλγόριθμος εφαρμόστηκε και στην περίπτωση πραγματικών δεδομένων ραντάρ, που απεικονίζουν κινούμενους στόχους (πλοία) στην επιφάνεια της θάλασσας. Και στην περίπτωση των πραγματικών δεδομένων αποδείχθηκε ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος είναι αποτελεσματικός στο να παράγει εστιασμένες εικόνες SAR. Τα σενάρια προσομοίωσης και η εφαρμογή στα πραγματικά δεδομένα αποδεικνύουν την προσαρμοστικότητα της διαδικασίας αυτοεστίασης σε διαφορετικές περιπτώσεις και σενάρια απεικόνισης SAR εικόνων [7] – [9].

3.8 Ευχαριστίες

Η επιστημονική μας ομάδα θα ήθελε να εκφράσει τις θερμές ευχαριστίες της, στις επιστημονικές ομάδες SET 163 και SET 111 Working Groups για την παραχώρηση των πραγματικών δεδομένων. Τα δεδομένα αυτά, τα οποία παριστάνουν κινούμενους στόχους (πλοία) στην επιφάνεια της θάλασσας, χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτοεστίασης διαχωριζόμενου συμφασικού διαστήματος επεξεργασίας (CPI-split autofocusing) και τον έλεγχο της αποτελεσματικότητάς του σε πραγματικούς στόχους και συνθήκες.

3.9 Βιβλιογραφικές αναφορές

- [1] E. Kallitsis, A. Karakasiliotis, G. Boultadakis, P. Frangos, “A Fully Automatic Autofocusing Algorithm for Post-processing ISAR Imaging based on Image Entropy Minimization”, *Electronics and Electrical Engineering Journal*, No. 4 (110), pp. 125–130, April 2011.
- [2] A. Lazarov, C. Minchev, “ISAR Signal Modeling and Image Reconstruction with Entropy Minimization Autofocusing”, *Proc. DASC*, Portland, USA, Oct 2006, pp. 3E5-1–3E5-11.
- [3] Shannon, C. E., “A Mathematical Theory of Communications”, *Bell Syst. Tech. J.*, Vol. 27, July 1948, pp. 379-423.
- [4] Pun, T., “A New Method for Gray-Level Picture Thresholding Using the Entropy of the Histogram”, *Signal Processing*, Vol. 2, 1980, pp. 223-237.
- [5] J. Li, R. Wu, V. Chen, “Robust autofocus algorithm for ISAR imaging of moving”, *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, Vol. 37, No 3, pp. 1056–1069, 2001.
- [6] A. Malamou, A. Karakasiliotis, E. Kallitsis, G. Boultadakis, P. Frangos, ‘Application of a Fully Automatic Autofocusing Algorithm for Post Processing of Synthetic Aperture Radar Images based on Image Entropy Minimization’, ‘*Electronics and Electrical Engineering*’ Journal, Vol. 19, No.6, June 2013, pp. 95–98.
- [7] A. Malamou, A. Karakasiliotis, E. Kallitsis, G. Boultadakis and P. Frangos, “An autofocus algorithm for post-processing of synthetic aperture radar (SAR) images based on image entropy minimization”, *CEMA’12 International Conference*, National Technical University of Athens (NTUA), Athens, Greece, 8-10/11/2012, pp. 53–56.
- [8] A. Malamou, C. Pandis, A. Karakasiliotis, P. Stefaneas, E. Kallitsis and P. Frangos, ‘SAR imaging : an autofocus method for improving image Quality and MFS image classification technique’, ‘*Applications of Mathematics and Informatics in Science and Engineering*’, Springer Optimization and Its Applications (SOIA), Vol. 91, 2013.

4. Εφαρμογή της μεθόδου Modified Fractal Signature για την κατηγοριοποίηση εδαφών από εικόνες ραντάρ συνθετικής απεικόνισης (SAR)

4.1 Εισαγωγή

Δεν υπάρχει επακριβής ορισμός για την έννοια των fractal. Γενικά ένα σύνολο E στον Ευκλείδειο χώρο θα θεωρείται fractal αν έχει όλα ή τα περισσότερα από τα παρακάτω χαρακτηριστικά [1]:

α) Το σύνολο E έχει μία δομή η οποία χαρακτηρίζεται από ακανόνιστη λεπτομέρεια σε αυθαίρετα μικρές κλίμακες.

β) Το σύνολο E είναι τόσο ακανόνιστο που δεν είναι δυνατό να περιγραφεί με διαφορικό λογισμό ή γεωμετρία είτε σε τοπικό ή σε ολικό επίπεδο.

γ) Συχνά το σύνολο E χαρακτηρίζεται από μία ομοιότητα ή συγγένεια, ίσως με μία στατιστική έννοια ή προσεγγιστική. Το ουσιώδες χαρακτηριστικό ενός τέτοιου συνόλου είναι επομένως η «αυτοομοιότητά» του, το οποίο εν ολίγοις σημαίνει ότι οποιαδήποτε 'περιοχή' του σχήματος κι αν επιλεγθεί, εξεταζόμενη στην ίδια κλίμακα με κάποια άλλη περιοχή είναι ακριβώς οι ίδιες. Δηλαδή, για κάθε περιοχή του σχήματος υπάρχει μέσα στο σχήμα μία άλλη περιοχή, η οποία είναι όμοια με την αρχική, και ως προς τη συνηθισμένη έννοια της ομοιότητας σχημάτων, γενικευμένη. Τελικά, κάθε παρόμοια κατασκευαστική διαδικασία ενός αντικειμένου δίνει πάντα αντικείμενα με αυτοομοιότητα.

δ) Συνήθως η fractal διάσταση του E (fractal dimension) είναι αυστηρά μεγαλύτερη από την τοπολογική του διάσταση.

ε) Σε πολλές περιπτώσεις το σύνολο E έχει ένα πολύ απλό ίσως και αναδρομικό ορισμό.

στ) Συνήθως το E έχει μία «φυσική» εμφάνιση.

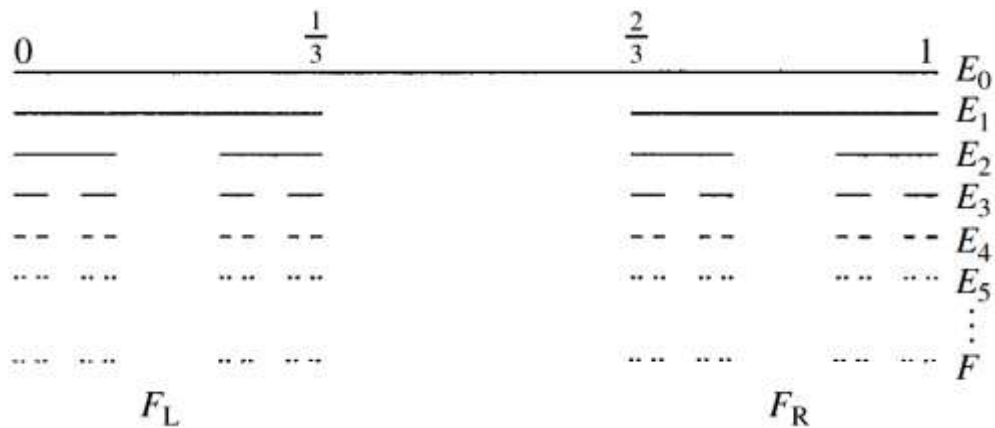
Ίσως ο πιο εύκολος ορισμός των fractal προκύπτει μέσα από παραδείγματα τέτοιων συνόλων και περιγραφή του τρόπου κατασκευής τους. Το σύνολο Cantor για παράδειγμα είναι ένα από τα πιο γνωστά και πιο εύκολα κατασκευάσιμα fractals και εμφανίζει πολλά χαρακτηριστικά των fractal. Κατασκευάζεται σύμφωνα με μια αλληλουχία εργασιών διαγραφής όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.1. Έστω E_0 είναι το διάστημα $[0, 1]$. Έστω E_1 ότι είναι το σύνολο που προκύπτει με τη διαγραφή του διαστήματος μεταξύ των αριθμών $\frac{1}{3}$ και $\frac{2}{3}$ του συνόλου E_0 , έτσι ώστε το E_1 να

αποτελείται από δύο διαστήματα $[0, \frac{1}{3}]$ και $[\frac{2}{3}, 1]$. Χωρίστηκε δηλαδή το αρχικό

διάστημα σε τρία ίσα μέρη και στη συνέχεια αφαιρέθηκε το μεσαίο από τα τρία αυτά μέρη για να παραμείνουν τα δύο ακραία διαστήματα. Συνεχίζοντας με τον ίδιο τρόπο τη διαδικασία, με τη διαγραφή των μεσαίων διαστημάτων σε κάθε υποδιάστημα του αρχικού συνόλου, προκύπτει το σύνολο E_2 το οποίο και περιλαμβάνει τέσσερα διαστήματα $[0, \frac{1}{9}]$, $[\frac{2}{9}, \frac{1}{3}]$, $[\frac{2}{3}, \frac{7}{9}]$, $[\frac{8}{9}, 1]$. Συνοψίζοντας, το σύνολο E_k προκύπτει

με διαγραφή του μεσαίου τρίτου από κάθε διάστημα E_{k-1} . Επομένως το E_k αποτελείται από 2^k διαστήματα με μήκος το κάθενα ίσο με 3^{-k} . Το σύνολο Cantor F

αποτελείται από τους αριθμούς που βρίσκονται στο E_k για κάθε k , και ορίζεται ως η τομή $\bigcap_{k=0}^{\infty} E_k$. Το σύνολο Cantor μπορεί να θεωρηθεί και ως το όριο της ακολουθίας των συνόλων E_k καθώς το k τείνει στο άπειρο. Είναι προφανές όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.1 ότι οι εικόνες του F τείνουν να είναι εικόνες ενός από τα σύνολα E_k , όταν το k είναι αρκετά μεγάλο.



Σχήμα 4.1: Σύνολο Cantor

Στην πραγματικότητα, το F είναι ένα άπειρο (και μάλιστα μη μετρήσιμο) διάστημα, το οποίο περιέχει άπειρους αριθμούς σε καθένα από τα σημεία του. Το σύνολο Cantor F περιέχει ακριβώς εκείνους τους αριθμούς στο διάστημα $[0, 1]$ για τους οποίους ισχύει $a_1 3^{-1} + a_2 3^{-2} + a_3 3^{-3} + \dots$ με $a_i = 0$ ή 2 για κάθε i . Το σύνολο Cantor παρουσιάζει παρόμοια χαρακτηριστικά γνωρίσματα που βρίσκονται σε πολλά fractals:

α) Το σύνολο F παρουσιάζει αυτοομοιότητα. Είναι σαφές ότι το τμήμα του F στο διάστημα $[0, \frac{1}{3}]$, και το τμήμα του F στο $[\frac{2}{3}, 1]$, είναι και τα δύο γεωμετρικά παρόμοια με το F , κλιμακούμενα κατά ένα συντελεστή $\frac{1}{3}$. Επίσης, τα τμήματα του F σε καθένα από τα τέσσερα διαστήματα του E_2 είναι παρόμοια με το F , αλλά κλιμακούμενα με ένα συντελεστή $\frac{1}{9}$, και ούτω καθεξής. Το σύνολο Cantor περιέχει αντίγραφο του εαυτού του σε πολλές διαφορετικές κλίμακες.

β) Το σύνολο F έχει μία λεπτή δομή, περιέχει δηλαδή λεπτομέρειες σε αυθαίρετα μικρές κλίμακες. Όσο πιο πολύ μεγενθύνεται η εικόνα του συνόλου Cantor, τόσο περισσότερα κενά γίνονται εμφανή δια γυμνού οφθαλμού.

γ) Το F έχει μία περίπλοκη αναλυτική δομή, ενώ ο πραγματικός ορισμός του F είναι πολύ απλός.

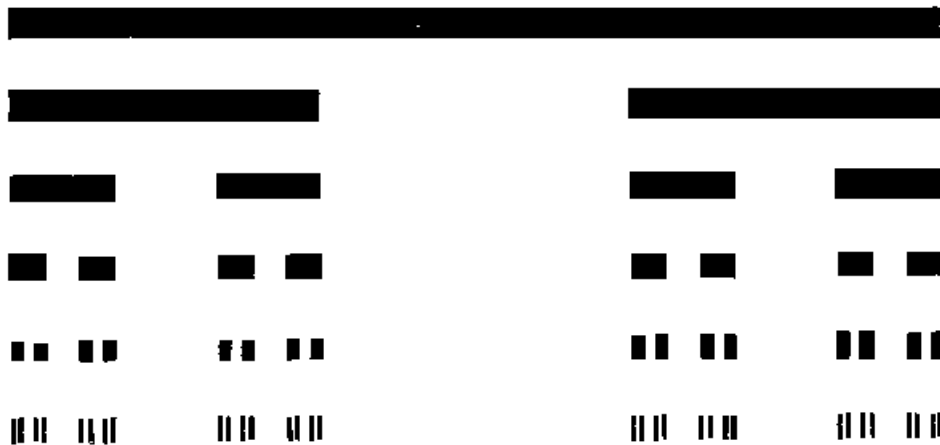
δ) Το F προκύπτει από μία αναδρομική διαδικασία. Η κατασκευή προκύπτει από την κατ' επανάληψη αφαίρεση των μεσαίων διαστημάτων μετά το χωρισμό του αρχικού διαστήματος σε τρία ίσα μέρη. Διαδοχικά βήματα δίνουν όλο και καλύτερες προσεγγίσεις E_k στο σύνολο F .

ε) Η γεωμετρία του F δεν περιγράφεται εύκολα με την κλασική έννοια: Το σύνολο Cantor δεν αποτελεί για παράδειγμα το γεωμετρικό τόπο των σημείων που ικανοποιούν κάποια απλή γεωμετρική συνθήκη, ούτε είναι το σύνολο των λύσεων μιας απλής εξίσωσης.

(στ) Είναι δύσκολο να περιγραφεί η τοπική γεωμετρία του F . Κοντά σε καθένα από τα σημεία του είναι ένας μεγάλος αριθμός από άλλα σημεία, που χωρίζονται από κενά διαφόρων μηκών.

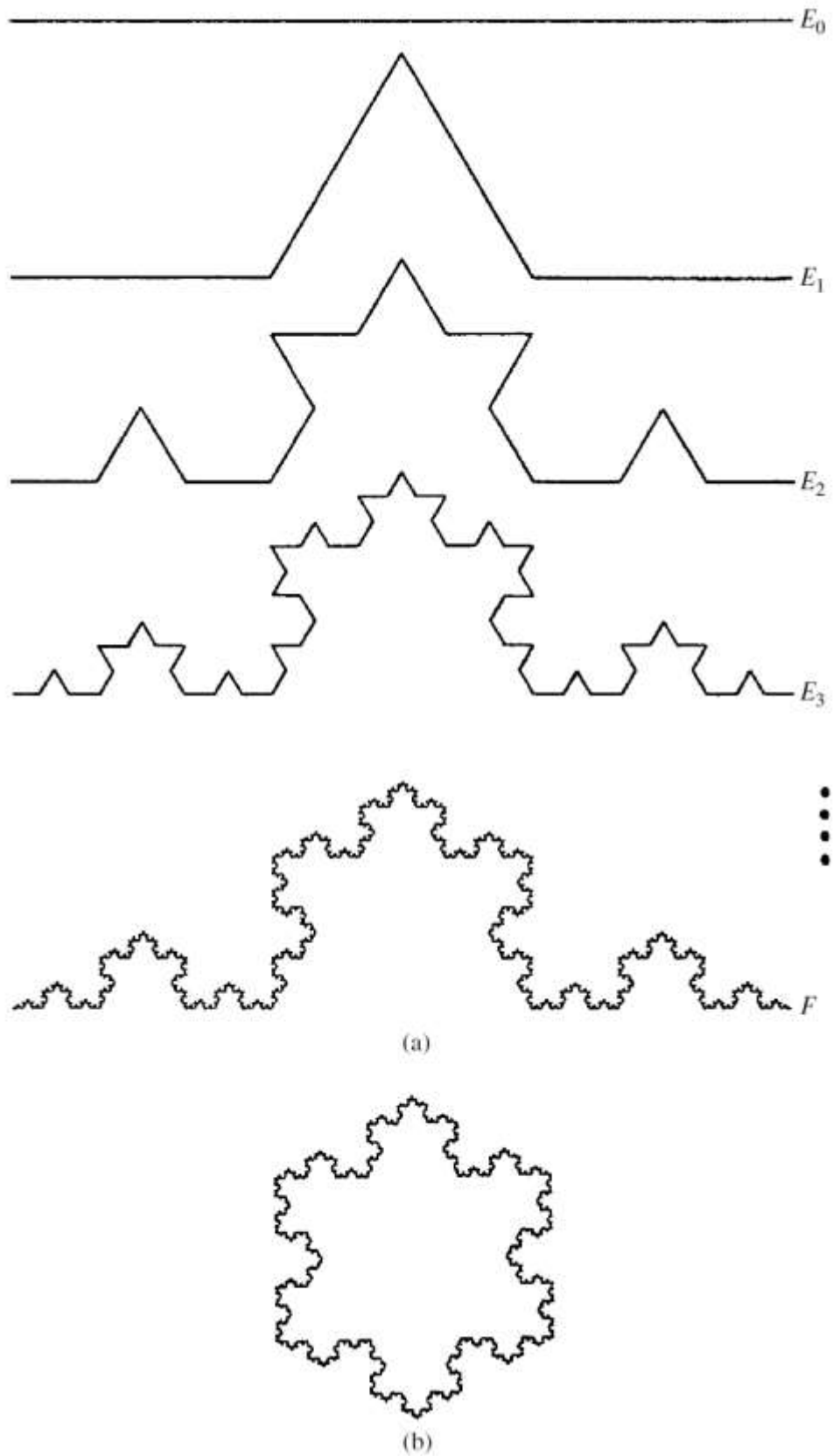
(ζ) Αν και το F είναι κατά κάποιο τρόπο ένα αρκετά μεγάλο σύνολο (είναι άπειρο και μη μετρήσιμο), το μέγεθός του δεν ποσοτικοποιείται από τα συνήθη μέτρα, όπως για παράδειγμα το μήκος.

Στο σχήμα 4.2 φαίνεται το σύνολο Cantor σε μία άλλη απεικόνιση.



Σχήμα 4.2: Σύνολο Cantor

Ένα ακόμα παράδειγμα fractal είναι η καμπύλη von Koch, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.3. Έστω E_0 ότι είναι ένα ευθύγραμμο τμήμα μοναδιαίου μήκους. Το σύνολο E_1 αποτελείται από τα τέσσερα τμήματα που προκύπτουν με την αφαίρεση του μεσαίου τρίτου του E_0 και αντικαθιστώντας το με τις άλλες δύο πλευρές του ισόπλευρου τριγώνου που έχει ως βάση το τμήμα που αφαιρέθηκε. Ομοίως, το E_2 κατασκευάζεται εφαρμόζοντας την ίδια διαδικασία σε καθένα από τα τμήματα του E_1 , και ούτω καθεξής. Έτσι το κάθε τμήμα E_k προκύπτει από την αντικατάσταση του μεσαίου τρίτου από κάθε τμήμα του E_{k-1} , και την αντικατάστασή του από τις άλλες δύο πλευρές ενός ισόπλευρου τριγώνου. Όταν το k είναι μεγάλο, οι καμπύλες E_{k-1} και E_k διαφέρουν μόνο σε μικρές λεπτομέρειες, ενώ καθώς το k τείνει στο άπειρο, η ακολουθία των πολυγωνικών καμπυλών E_k προσεγγίζει μία περιοριστική καμπύλη F , η οποία ονομάζεται καμπύλη von Koch.

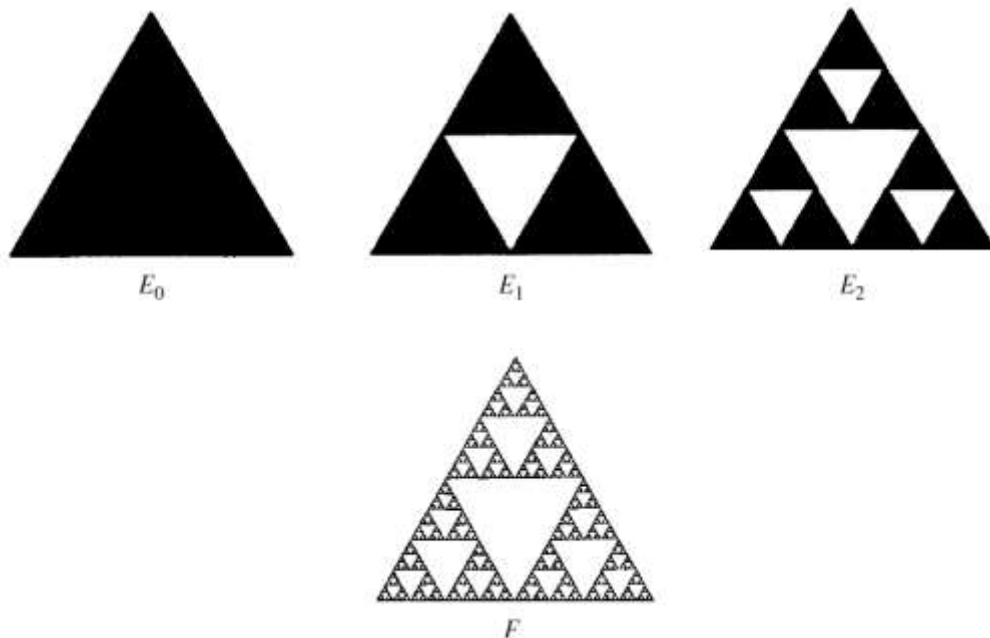


Σχήμα 4.3: α) Κατασκευή καμπύλης von Koch, β) Καμπύλες von Koch οι οποίες συνδυαζόμενες μεταξύ τους κατασκευάζουν το σχήμα μιας χιονονιφάδας

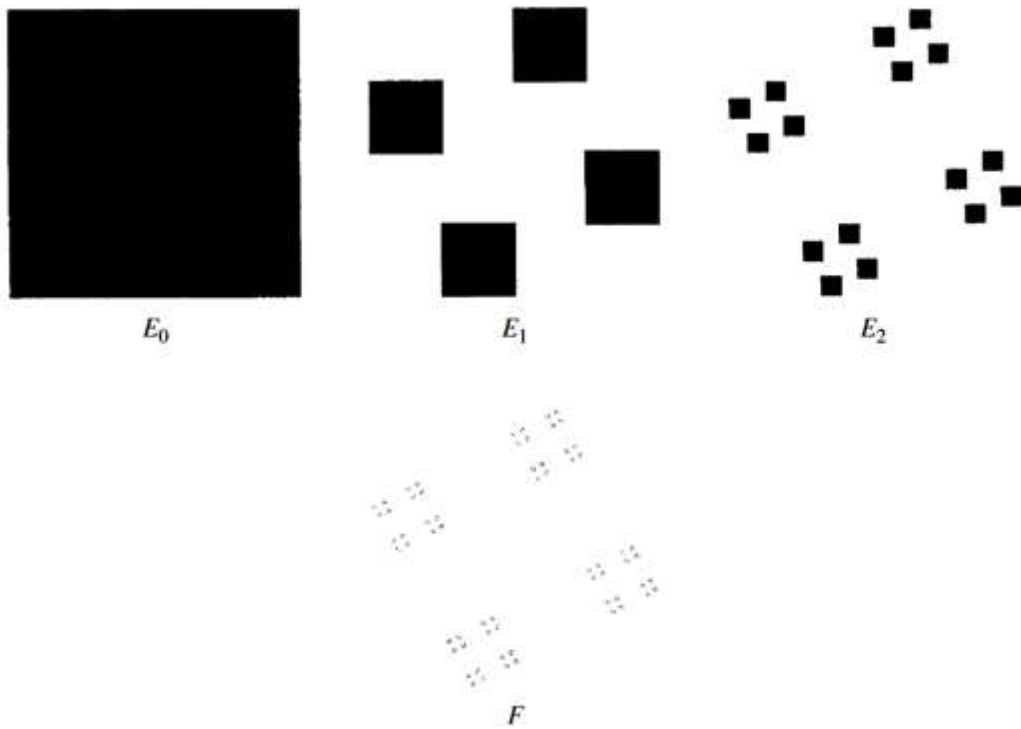
Η καμπύλη von Koch παρουσιάζει πολλά παρόμοια χαρακτηριστικά με το σύνολο Cantor. Αποτελείται από τέσσερα «τέταρτα» που το καθένα είναι παρόμοιο με το σύνολο, αλλά κλιμακώνεται κατά ένα συντελεστή $\frac{1}{3}$. Η δομή ακολουθεί το ίδιο μοτίβο σε όλες τις κλίμακες. Παρ' όλα αυτά, αυτή η περίπλοκη δομή πηγάζει από μια ουσιαστικά απλή κατασκευή. Σύμφωνα με έναν απλό υπολογισμό, προκύπτει ότι η E_k έχει μήκος $\left(\frac{4}{3}\right)^k$. Όταν το k τείνει στο άπειρο εξάγεται το συμπέρασμα ότι η F έχει άπειρο μήκος.

Χρησιμοποιώντας τέτοιες αναδρομικές διαδικασίες μπορούν να κατασκευαστούν πολλά άλλα παρόμοια σύνολα. Για παράδειγμα, το τρίγωνο Sierpinski προκύπτει με τη συνεχόμενη αφαίρεση ισόπλευρων τριγώνων (αντεστραμμένων) από ένα αρχικό ισόπλευρο τρίγωνο, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.4. Εναλλακτική περιγραφή της διαδικασίας κατασκευής του τριγώνου Sierpinski είναι η αντικατάσταση ενός ισόπλευρου τριγώνου με τρία τρίγωνα που έχουν το μισό του ύψος.

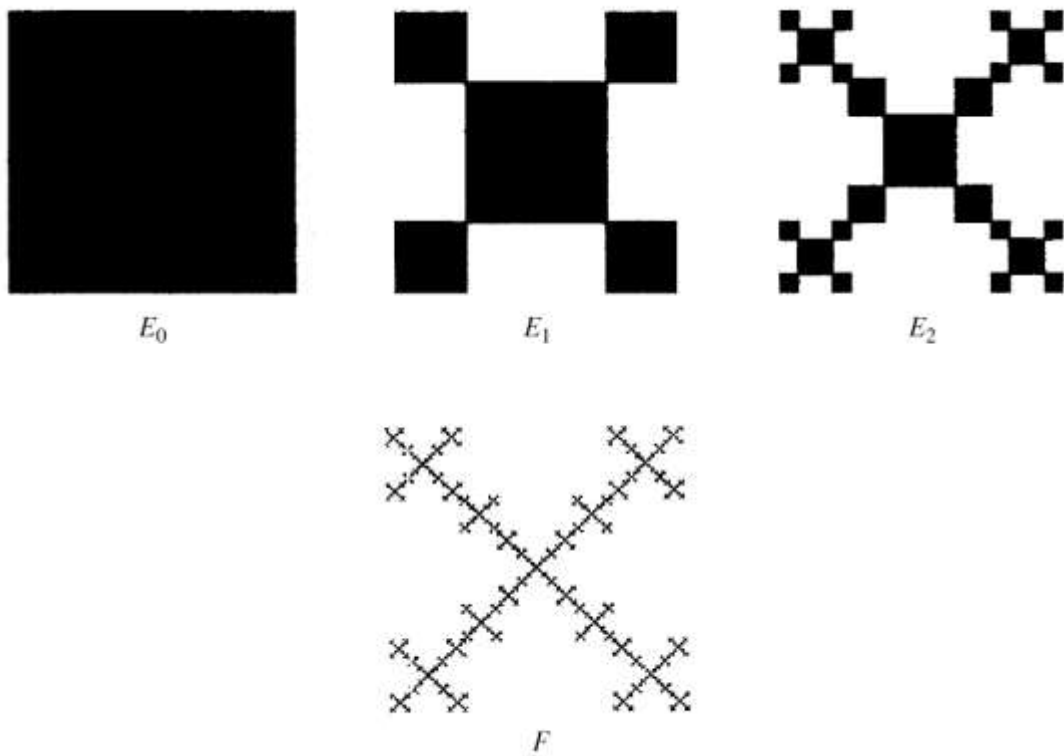
Ένα σύνολο ανάλογο του συνόλου Cantor, ονομάζεται σκόνη Cantor ("Cantor dust") και απεικονίζεται στο σχήμα 4.5. Σε κάθε στάδιο κάθε τετράγωνο χωρίζεται σε 16 μικρότερα τετράγωνα εκ των οποίων τα τέσσερα διατηρούνται και τα υπόλοιπα απορρίπτονται. Τα παραδείγματα αυτά έχουν ιδιότητες παρόμοιες με εκείνες που αναφέρθηκαν για το σύνολο Cantor και την καμπύλη von Koch. Το παράδειγμα που απεικονίζεται στο σχήμα 4.6 κατασκευάζεται χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικές αναλογίες αφείρεσης κομματιών.



Σχήμα 4.4: Κατασκευή τριγώνου Sierpinski ($\dim_H F = \dim_B F = \frac{\log 3}{\log 2}$)

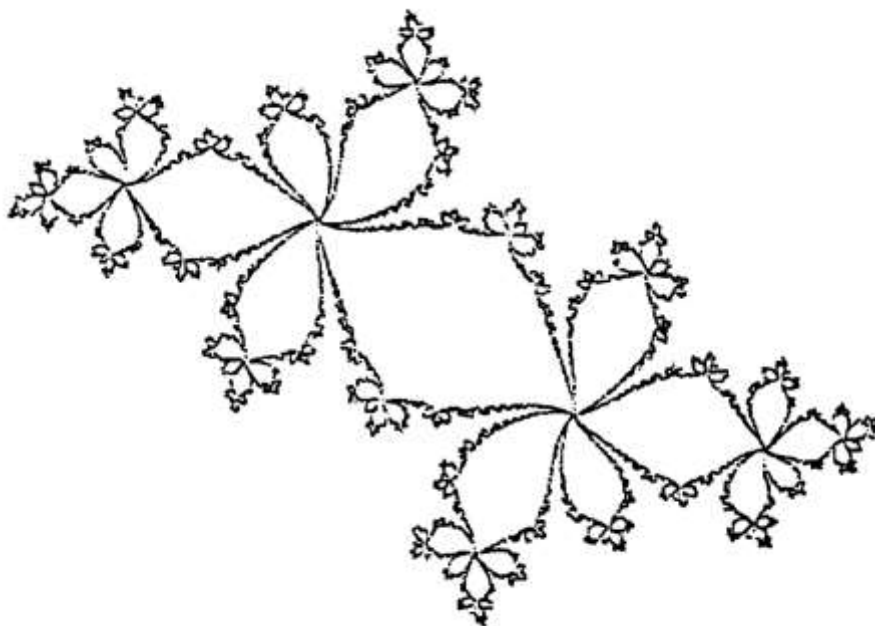


Σχήμα 4.5: Κατασκευή σκόνης Cantor (“Cantor dust”) ($\dim_H F = \dim_B F = 1$)



Σχήμα 4.6: Κατασκευή fractal με αυτοομοιότητα χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικές αναλογίες αφαίρεσης κομματιών

Η εξαιρετικά περίπλοκη δομή του συνόλου Julia που απεικονίζεται στο σχήμα 4.7 προκύπτει από την ενιαία τετραγωνική συνάρτηση $f(z) = z^2 + c$ όπου c είναι μία σταθερά. Αν και το σύνολο αυτό δεν είναι αυστηρά αυτο-παρόμοιο όπως συμβαίνει με το σύνολο Cantor και την καμπύλη von Koch, είναι «οιονεί αυτο-όμοιο» σε αυθαίρετα μικρά τμήματα του συνόλου, τα οποία είναι δυνατό να μεγεθυνθούν και στη συνέχεια να παραμορφωθούν ομαλά ώστε να συμπίπτουν εμφανισιακά με ένα μεγάλο μέρος του συνόλου.



Σχήμα 4.7: Σύνολο Julia

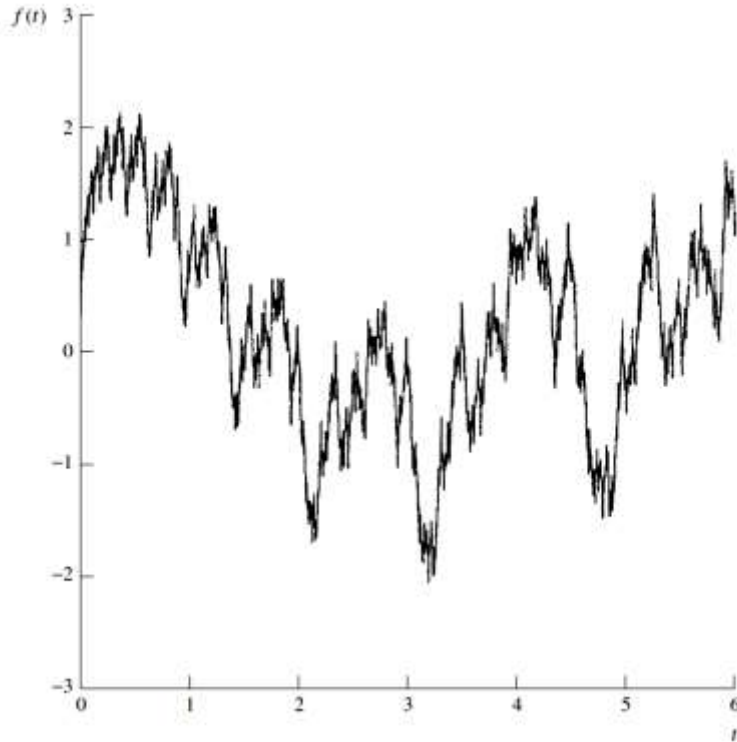
Το σχήμα 4.8 παριστάνει τη γραφική παράσταση της συνάρτησης $f(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{3}{2}\right)^{\frac{k}{2}} \sin\left[\left(\frac{3}{2}\right)^k t\right]$. Το άπειρο άθροισμα προσδίδει στη γραφική παράσταση

τη συγκεκριμένη δομή, η οποία δεν αντιστοιχεί σε μία ομαλή καμπύλη στην οποία μπορεί να εφαρμοστεί η λογική του κλασικού λογισμού.

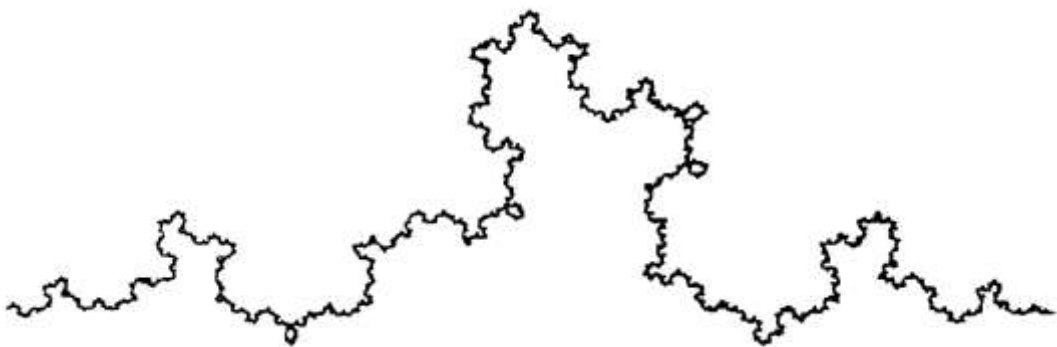
Ορισμένες από αυτές τις κατασκευές είναι δυνατόν να προκύψουν «τυχαία». Στο σχήμα 4.9 παρουσιάζεται μία «τυχαία καμπύλη von Koch». Η κατασκευή της καμπύλης έγινε με τη βοήθεια της ρίψης ενός νομίσματος σε κάθε στάδιο της κατασκευής για να καθοριστεί σε ποια πλευρά της καμπύλης θα τοποθετηθεί το νέο ζεύγος των γραμμών. Αυτή η τυχαία καμπύλη έχει σίγουρα μια λεπτή δομή, ωστόσο η αυστηρή αυτο-ομοιότητα της καμπύλης von Koch έχει αντικατασταθεί από μια «στατιστική αυτο-ομοιότητα».

Τα παραπάνω είναι όλα παραδείγματα των συνόλων που αναφέρονται συνήθως ως fractals και χαρακτηρίζονται από ορισμένες ιδιότητες. Όπως προαναφέρθηκε, κάθε fractal χαρακτηρίζεται από μια λεπτή δομή, με λεπτομέρειες ορατές σε όλες τις κλίμακες. Πολλά fractals τα οποία χαρακτηρίζονται από κάποιο βαθμό αυτο-ομοιότητας και όχι πλήρη αυτό-ομοιότητα είναι κατασκευασμένα από τμήματα που μοιάζουν με το σύνολο κατά κάποιο τρόπο. Μερικές φορές, η ομοιότητα

είναι δυνατό να είναι ασθενέστερη από ό,τι στην περίπτωση της αυστηρής γεωμετρικής ομοιότητας, καθώς μπορεί να είναι για παράδειγμα αποτέλεσμα μίας προσέγγισης ή στατιστικής διαδικασίας.



Σχήμα 4.8: Γραφική παράσταση της συνάρτησης $f(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{3}{2}\right)^{-\frac{k}{2}} \sin\left[\left(\frac{3}{2}\right)^k t\right]$



Σχήμα 4.9: Τυχαία καμπύλη von Koch – κατασκευή με τη βοήθεια ρίψης ενός νομίσματος

Οι μέθοδοι της κλασικής γεωμετρίας και του μαθηματικού λογισμού είναι ακατάλληλοι για τη μελέτη των fractals και απαιτούνται εναλλακτικές τεχνικές. Το κύριο εργαλείο της fractal γεωμετρίας είναι η διάσταση (dimension) στις διάφορες

μορφές της. Όπως είναι προφανές, μία λεία καμπύλη είναι ένα μονοδιάστατο αντικείμενο ενώ μια επιφάνεια ένα δισδιάστατο αντικείμενο. Είναι λιγότερο σαφές ότι, για πολλούς λόγους, το σύνολο Cantor, πρέπει να θεωρηθεί ότι έχει διάσταση

$$\frac{\log 2}{\log 3} = 0.631\dots$$

ενώ η καμπύλη von Koch πρέπει να θεωρηθεί ότι έχει διάσταση

$\frac{\log 4}{\log 3} = 1.262\dots$. Ο τελευταίος αριθμός που αφορά τη διάσταση της καμπύλης von Koch, είναι συνεπής με το γεγονός ότι η καμπύλη von Koch είναι «μεγαλύτερη από ένα μονοδιάστατο αντικείμενο (αφού έχει άπειρο μήκος) και «μικρότερη από ένα δισδιάστατο αντικείμενο (εφόσον έχει μηδενικό εμβαδό).

Μία ερμηνεία της έννοιας των «διαστάσεων» αναφέρεται στη συνέχεια, καταδεικνύοντας πως αυτές οι διαστάσεις αντικατοπτρίζουν τις ιδιότητες της κλιμάκωσης και της αυτό-ομοιότητας. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.10, κάθε κομμάτι γραμμής (a) προκύπτει από τέσσερα αντίγραφα του εαυτού του, κλιμακούμενα κατά ένα συντελεστή $\frac{1}{4}$. Το κομμάτι έχει διάσταση

$$-\frac{\log 4}{\log \frac{1}{4}} = 1. \text{ Ωστόσο, στην περίπτωση}$$

του τετραγώνου (b), κάθε τετράγωνο αποτελείται από τέσσερα αντίγραφα του εαυτού του κλιμακούμενα κατά ένα συντελεστή $\frac{1}{2}$ και έχει διάσταση

$$-\frac{\log 4}{\log \frac{1}{2}} = 2. \text{ Κατά τον}$$

ίδιο τρόπο, η καμπύλη von Koch (d) απαρτίζεται από τέσσερα αντίγραφα του εαυτού της κλιμακούμενα κατά ένα συντελεστή $\frac{1}{3}$, και έχει διάσταση

$$-\frac{\log 4}{\log \frac{1}{3}} = \frac{\log 4}{\log 3}.$$

Το σύνολο Cantor (c) μπορεί να θεωρηθεί ότι περιλαμβάνει τέσσερα αντίγραφα του εαυτού του κλιμακούμενα κατά ένα συντελεστή $\frac{1}{9}$ και έχει διάσταση

$$-\frac{\log 4}{\log \frac{1}{9}} = \frac{\log 2}{\log 3}.$$

Γενικά, ένα σύνολο που αποτελείται από m αντίγραφα του εαυτού του κλιμακούμενα κατά ένα συντελεστή r , θεωρείται ότι έχει διάσταση

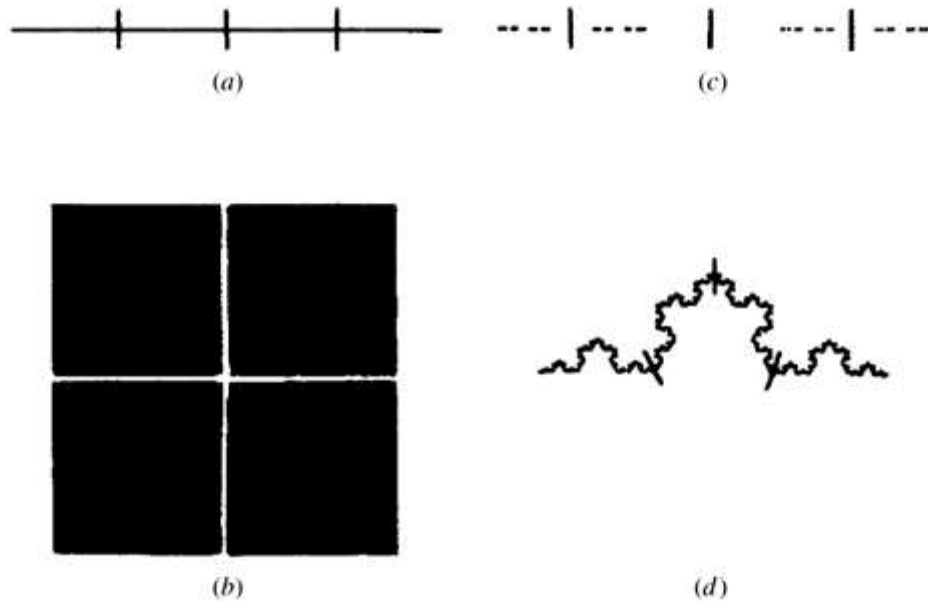
$$-\frac{\log m}{\log r}.$$

Ο αριθμός που προκύπτει με αυτόν τον τρόπο συνήθως αναφέρεται και ως διάσταση ομοιότητας (similarity dimension) του συνόλου.

Δυστυχώς, η διάσταση ομοιότητας έχει νόημα μόνο για σχετικά μικρή τάξη από αυστηρά αυτο-παρόμοια σύνολα. Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν και άλλοι ορισμοί της διάστασης που είναι πολύ πιο ευρέως εφαρμόσιμες. Για παράδειγμα, η διάσταση Hausdorff και η διαστάση box-counting ορίζονται για κάθε σύνολο και είναι ισοδύναμες με τη διάσταση ομοιότητας. Πολύ γενικά, η έννοια της διάστασης παρέχει μια περιγραφή του πόσο χώρο γεμίζει ένα σύνολο. Είναι ένα μέτρο για την ανάδειξη των ανωμαλιών ενός συνόλου όταν αυτό προβάλλεται σε πολύ μικρές κλίμακες. Μια διάσταση, περιέχει πολλές πληροφορίες σχετικά με τις γεωμετρικές ιδιότητες ενός συνόλου.

Είναι δυνατό να καθοριστεί η «διάσταση» ενός συνόλου με πολλούς τρόπους, ενώ είναι σημαντικό να διευκρινιστεί ότι διαφορετικοί ορισμοί είναι δυνατό να δώσουν διαφορετικές τιμές της διάστασης για το ίδιο σύνολο. Ασυνεπής χρήση

μπορεί να οδηγήσει πολλές φορές σε μεγάλη σύγχυση.



Σχήμα 4.10: Διαίρεση κάποιων συνόλων σε τέσσερα μέρη. Τα μέρη είναι παρόμοια με το όλο σύμφωνα με κάποιες αναλογίες: **a)** $\frac{1}{4}$ για τη γραμμή, **b)** $\frac{1}{4}$ για το τετράγωνο, **c)** $\frac{1}{9}$ για το σύνολο Cantor και **d)** $\frac{1}{3}$ για την καμπύλη von Koch

Υπάρχει μία πληθώρα φυσικών αντικειμένων που περιγράφονται ως fractals όπως: τοπογραφικές επιφάνειες, ακτογραμμές, αναταράξεις σε υγρά, κ.α. Κανένα από τα παραπάνω δεν είναι πραγματικό fractal, διότι χάνουν τα fractal χαρακτηριστικά τους σε αρκετά μικρές κλίμακες. Παρ'όλα αυτά, σε ορισμένες κλίμακες παρουσιάζουν πολλές ομοιότητες με τα fractals, και ως εκ τούτου σε αυτές τις κλίμακες είναι δυνατό να θεωρηθούν ως τέτοια [2].

Τα «θεωρητικά» fractal από την άλλη πλευρά, είναι μαθηματικά σύνολα τα οποία χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό γεωμετρικής πολυπλοκότητας και μέσω αυτών είναι δυνατό να μοντελοποιηθούν πολλές κατηγορίες δεδομένων στις οποίες ανήκουν και οι εικόνες. Η fractal διάσταση (fractal dimension), όπως προαναφέρθηκε, είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των fractal, διότι περιέχει πληροφορίες σχετικά με γεωμετρική δομή τους. Η έννοια της fractal διάστασης έχει εφαρμογές και στην περιοχή της επεξεργασίας εικόνας, όπου η fractal διάσταση χρησιμοποιείται για τη συμπίεση της εικόνας, την ανάλυση υφής, την κωδικοποίηση εικόνας κ.τ.λ. Επομένως η έννοια της fractal διάστασης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων σε σχέση με την κατηγοριοποίηση εικόνων από ραντάρ συνθετικής απεικόνισης (SAR).

4.2 Βασικές έννοιες της fractal διάστασης (fractal dimension)

Στη συνέχεια θα δοθεί ο μαθητικός ορισμός της έννοιας του fractal καθώς επίσης και οι ορισμοί για διάφορους τύπους fractal διαστάσεων. Ένας από τους πιο σημαντικούς ορισμούς για τη fractal διάσταση είναι η διάσταση Hausdorff, η οποία βασίζεται σε ένα μαθηματικό εργαλείο, το οποίο καθιστά την ανάλυση εύκολη, και κατάλληλη για κάθε σύνολο δεδομένων. Επιπλέον δύο ακόμα ορισμοί για τη fractal διάσταση είναι η διάσταση box-computing και η διάσταση Minkowski.

4.2.1 Τοπολογικός χώρος – Τοπολογική διάσταση

Αρχικά θα παρατεθεί ο ορισμός του τοπολογικού χώρου και της τοπολογικής διάστασης (topological dimension).

Μία οικογένεια υποσυνόλων \mathfrak{T} ενός συνόλου X καλείται τοπολογία του X αν έχει τις ακόλουθες ιδιότητες:

- α) $\emptyset, X \in \mathfrak{T}$.
- β) $U_1, U_2 \in \mathfrak{T} \Rightarrow U_1 \cap U_2 \in \mathfrak{T}$.
- γ) $\{U_i\}_{i \in I} \subseteq \mathfrak{T} \Rightarrow \bigcup_{i \in I} U_i \in \mathfrak{T}$.

Αν \mathfrak{T} είναι τοπολογία του X τότε το ζεύγος (X, \mathfrak{T}) καλείται τοπολογικός χώρος.

Τα στοιχεία της τοπολογίας \mathfrak{T} καλούνται ανοιχτά υποσύνολα (ως προς την \mathfrak{T}) του X .

Η τοπολογική διάσταση $\dim_T(X)$ ενός χώρου X είναι ένας ακέραιος αριθμός ≥ -1 ή ∞ και ορίζεται επαγωγικά ως εξής:

- α) $\dim_T(X) = -1$ αν και μόνο αν $X = \emptyset$.
- β) $\dim_T(X) \leq n$, όπου $n = 0, 1, 2, \dots$ αν για κάθε $x \in X$ και για κάθε ανοιχτή περιοχή U του x υπάρχει ανοιχτό σύνολο V τέτοιο ώστε: $x \in V \subseteq U$ και $\dim_T(Bd(V)) \leq n - 1$
- γ) $\dim_T(X) = n \geq 0$, αν $\dim_T(X) \leq n$ και η ανισότητα $\dim_T(X) \leq n - 1$ δεν ισχύει.
- δ) $\dim_T(X) = \infty$ αν η ανισότητα $\dim_T(X) \leq n$ δεν ισχύει για κάθε $n = 0, 1, \dots$

Θα γράφεται $\dim_T(X) > n$ αν και μόνο αν η ανισότητα $\dim_T(X) \leq n$ δεν ισχύει [3].

4.2.2 Μαθηματικός ορισμός fractal

Με βάση τους ορισμούς του τοπολογικού χώρου και της τοπολογικής διάστασης, παρατίθενται τρεις ορισμοί της έννοιας του fractal. Ο Mandelbrot το 1982 έδωσε τον εξής ορισμό για την έννοια του fractal:

Ένα σύνολο F ονομάζεται fractal αν η διάσταση Hausdorff ($\dim_H F$) είναι μεγαλύτερη από την τοπολογική διάσταση ($\dim_T F$), δηλαδή όταν ισχύει η σχέση: $\dim_H F > \dim_T F$.

Ο Mandelbrot το 1986 όρισε την έννοια του fractal ως εξής:

Ένα fractal είναι ένα συμπαγές αντικείμενο το οποίο περιέχει διάφορα υποαντικείμενα. Τα γενικά χαρακτηριστικά αυτού του ολικού αντικειμένου είναι

παρόμοια με τα χαρακτηριστικά κάθε υπο-αντικειμένου.

Ένας πιο ακριβής ορισμός ενός συνόλου fractal F δίνεται παρακάτω:

Ένα σύνολο F ονομάζεται fractal αν ικανοποιούνται οι παρακάτω συνθήκες:

- Τα χαρακτηριστικά του ολικού συνόλου F παρουσιάζουν αυτό-ομοιότητα ως προς τα χαρακτηριστικά κάθε υπο-συνόλου, δηλαδή: $\mathfrak{Z}(F) \sim \mathfrak{Z}(f_i)$, $f_i \supset F$.
- Με $\mathfrak{Z}(\cdot)$ συμβολίζεται το χαρακτηριστικό του (\cdot) .
- Το σύνολο F είναι διαχωριζόμενο επ' άπειρον, δηλαδή:

$$F = \{f_1^1, f_2^1, \dots, f_i^1, \dots, f_n^1\}$$

$$f_1^1 = \{f_1^2, f_2^2, \dots, f_k^2, \dots, f_n^2\}$$

$$\dots\dots\dots$$

$$f_k^m = \{f_1^{m+1}, f_2^{m+1}, \dots, f_k^{m+1}, \dots, f_n^{m+1}\}, \quad m+1 \rightarrow \infty$$
- Συνήθως η fractal διάσταση του συνόλου F είναι ένα κλάσμα και μεγαλύτερη από την τοπολογική διάσταση $\dim_T F$, δηλαδή ισχύει η σχέση: $\dim_H F > \dim_T F$.
- Σε πολλές περιπτώσεις ο ορισμός του F είναι αναδρομικός [2], [4].

4.3 Διάσταση Hausdorff (Hausdorff dimension)

Έστω U ένα μη κενό υποσύνολο του n -διάστατου Ευκλείδειου χώρου \mathfrak{R}^n , και η διάμετρος του U ορίζεται ως $|U| = \sup\{|x - y| : x, y \in U\}$, όπου $\sup\{\cdot\}$ αντιπροσωπεύει το άνω όριο του $\{\cdot\}$. Η διάμετρος του U ουσιαστικά είναι η διάμετρος της μικρότερης σφαίρας που καλύπτει όλες τις περιοχές του συνόλου ή αλλιώς η διάμετρος του U είναι η μεγαλύτερη απόσταση πέρα από κάθε ζεύγος σημείων του U . Έστω σύνολο F ($F \subset \bigcup_{i=1}^{\infty} U_i$), που περικλείεται στην ένωση των συνόλων $\{U_i\}$ και $0 < \text{diam}(U_i) \leq \delta$, τότε το $\{U_i\}$ είναι μία κάλυψη \mathcal{D} (\mathcal{D} -cover) του F . Αν F είναι υποσύνολο του \mathfrak{R}^n και s ένας μη αρνητικός αριθμός, τότε για κάθε $\delta > 0$ είναι:

$$H_\delta^s(F) = \inf \left\{ \sum_{i=1}^{\infty} [\text{diam}(U_i)]^s : U_i \text{ } \delta \text{ κάλυψη του } F \right\} \quad (4.1)$$

Καθώς μειώνεται το δ , η τάξη των επιτρεπόμενων καλύψεων του F μειώνεται. Έτσι μειώνεται και το $\inf H_\delta^s(F)$ και καθώς $\delta \rightarrow 0$ ισχύει:

$$H^s(F) = \lim_{\delta \rightarrow 0} H_\delta^s(F) \quad (4.2)$$

Το $H^s(F)$ καλείται s -διάστατο μέτρο Hausdorff του F .

Η διάσταση Hausdorff (ή Hausdorff-Besicovitch) δίνεται από τη σχέση:

$$\dim_H F = \inf \{s : H^s(F) = 0\} = \sup \{s : H^s(F) = \infty\} \quad (4.3)$$

έτσι ώστε να ισχύει:

$$H^s(F) = \begin{cases} \infty & , s < \dim_H F \\ 0 & , s > \dim_H F \end{cases} \quad (4.4)$$

Για $s = \dim_H F$, το $H^s(F)$ μπορεί να είναι 0 ή ∞ ή να ικανοποιεί την ανισότητα:

$$0 < H^s(F) < \infty \quad (4.5)$$

Η διάσταση Hausdorff παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι ορίζεται για κάθε σύνολο και ο μαθηματικός χειρισμός της είναι σχετικά εύκολος καθώς βασίζεται σε μέτρα. Ένα σημαντικό μειονέκτημα είναι ότι, σε πολλές περιπτώσεις, είναι δύσκολο να υπολογιστεί ή να εκτιμηθεί με υπολογιστικές μεθόδους [2].

4.4 Διάσταση Box-computing (Box-computing dimension)

Θεμελιώδους σημασίας για τους περισσότερους ορισμούς της διάστασης είναι η ιδέα της μέτρησης σε κλίμακα δ . Για κάθε δ , ένα σύνολο είναι δυνατό να μετρηθεί με τρόπο που αγνοεί τις παρατυπίες με μέγεθος μικρότερο από το δ , ενώ ο τρόπος με τον οποίο αυτές οι μετρήσεις συμπεριφέρονται φαίνεται καθώς $\delta \rightarrow 0$.

Έστω ότι η F είναι μία απλή καμπύλη και έστω ότι το μέγεθος $M_\delta(F)$ υποδηλώνει τον αριθμό των συνόλων (με μήκος δ) που χωρίζουν το σύνολο F . Η διάσταση του F προσδιορίζεται από το $M_\delta(F)$ καθώς $\delta \rightarrow 0$.

$$M_\delta(F) \sim K\delta^{-s} \quad (4.6)$$

όπου K και s είναι σταθερές. Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση το F έχει διάσταση s , ενώ το K αντιπροσωπεύει το s -διάστατο μέτρο του F .

Αν τα δύο άκρα της εξίσωσης 4.6 λογαριθμηθούν προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$\log_2 M_\delta(F) \approx \log_2 K - s \log_2 \delta \quad (4.7)$$

Με την έννοια ότι η διαφορά των δύο μελών τείνει στο 0 ανάλογα με το δ , προκύπτει:

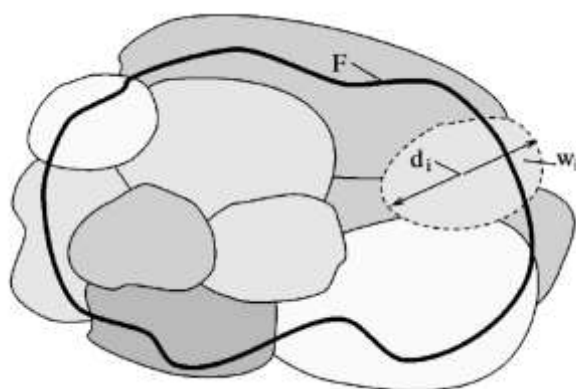
$$s = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log_2 M_\delta(F)}{-\log_2 \delta} \quad (4.8)$$

Από την παραπάνω εξίσωση, το s μπορεί να θεωρηθεί ως η κλίση σε μία

λογαριθμική – λογαριθμική (log-log) κλίμακα.

Η διάσταση Box-computing ή διάσταση Box, είναι μία από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες διαστάσεις, λόγω της ευκολίας μαθηματικού υπολογισμού και εμπειρικής εκτίμησης.

Έστω F είναι ένα μη κενό και φραγμένο σύνολο του \mathbb{R}^n και $\Omega = \{\omega_i : i = 1, 2, 3, \dots\}$ είναι καλύψεις του συνόλου F . Με $N_\delta(F)$ συμβολίζονται οι καλύψεις, για τις οποίες ισχύει $N_\delta(F) = |\Omega : d_i \leq \delta|$ όπου d_i είναι η διάμετρος της i -οστής κάλυψης. Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση το $N_\delta(F)$ αντιστοιχεί στον μικρότερο αριθμό υποσυνόλων που αποτελούν καλύψεις του συνόλου F και οι διάμετροί τους d_i δεν είναι μεγαλύτερες από το δ , όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.11.



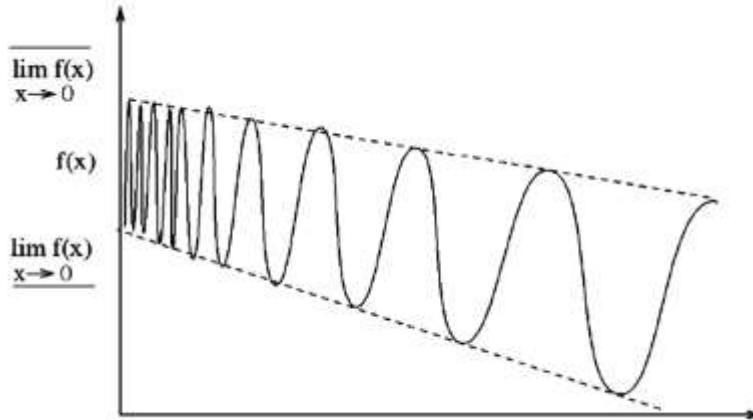
Σχήμα 4.11: Καλύψεις του συνόλου F

Τα άνω και κάτω όρια της διάστασης Box-computing του F ορίζεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\underline{\dim}_B F = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log_2 N_\delta(F)}{-\log_2 \delta} \quad (4.9)$$

$$\overline{\dim}_B F = \overline{\lim}_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log_2 N_\delta(F)}{-\log_2 \delta} \quad (4.10)$$

Ένα παράδειγμα για το άνω και κάτω όριο φαίνεται στο σχήμα 4.12.



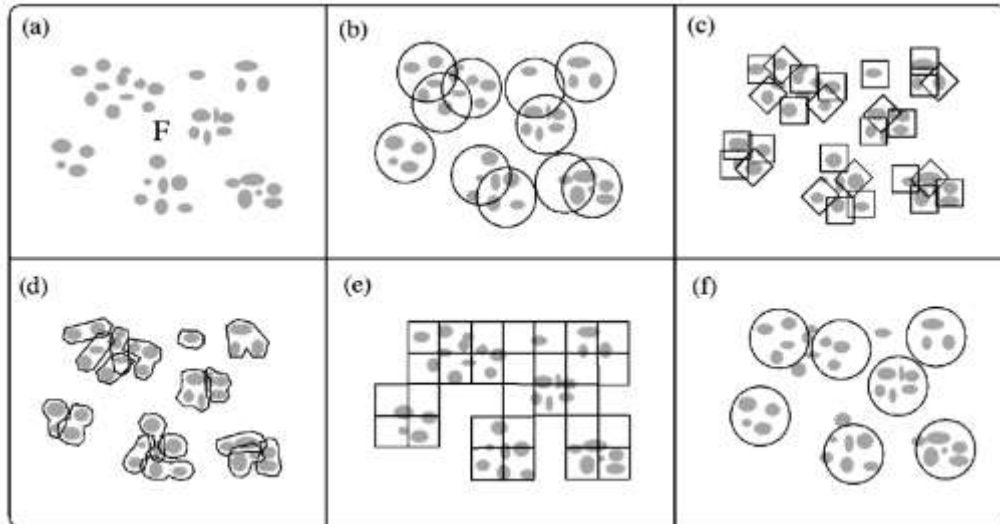
Σχήμα 4.12: Πάνω και κάτω όρια μιας συνάρτησης

Αν και το πάνω όριο $\overline{\dim}_B F$ και το κάτω όριο $\underline{\dim}_B F$ είναι ίσα δηλαδή αν ισχύει η σχέση: $\overline{\lim}_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log_2 N_\delta(F)}{-\log_2 \delta} = \underline{\lim}_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log_2 N_\delta(F)}{-\log_2 \delta}$ τότε η κοινή αυτή τιμή ονομάζεται διάσταση Box-computing ή διάσταση Box του F δηλαδή:

$$\dim_B F = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log_2 N_\delta(F)}{-\log_2 \delta} \quad (4.11)$$

Στον παραπάνω ορισμό, το $N_\delta(F)$ είναι δυνατό να εμπίπτει σε μία από τις παρακάτω κατηγορίες:

- i. Ο ελάχιστος αριθμός κύκλων με ακτίνα δ που καλύπτουν το F (σχήμα 4.13b).
- ii. Ο ελάχιστος αριθμός κύβων με πλευρά δ που καλύπτουν το F (σχήμα 4.13c).
- iii. Ο ελάχιστος αριθμός συνόλων με διάμετρο D που καλύπτουν το F με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να ισχύει $D \leq \delta$ (σχήμα 4.13d).
- iv. Ο αριθμός των τετραγώνων με πλευρά δ που τέμνονται με το F (σχήμα 4.13e).
- v. Ο μέγιστος αριθμός μη τεμνόμενων κύκλων με ακτίνα δ με κέντρα μέσα στο F (σχήμα 4.13f) [2], [3].



Σχήμα 4.13: Γραφικές αναπαραστάσεις των ισοδύναμων ορισμών της διάστασης Box-computing

4.5 Διάσταση Minkowski (Minkowski dimension)

Για την εφαρμογή της έννοιας της διάστασης Box σε εικόνες, θα χρησιμοποιηθεί η έννοια της διάστασης Minkowski, η οποία είναι κατάλληλη για την επεξεργασία εικόνων σύμφωνα με την έννοια των Fractal.

Έστω F είναι ένα μη κενό και φραγμένο σύνολο του \mathfrak{R}^n . Για μία σταθερά s , αν για $\delta \rightarrow 0$, το όριο του $\frac{Vol^n(F_\delta)}{\delta^{n-s}}$ είναι θετικό και φραγμένο, τότε το σύνολο F έχει διάσταση Minkowski ίση με s , η οποία και συμβολίζεται με $\dim_M F$. Το μέγεθος $Vol^n(F_\delta)$ ονομάζεται μέτρο Lebesgue [5].

Αποδεικνύεται ότι για ένα μη κενό και φραγμένο σύνολο F του \mathfrak{R}^n ισχύει η σχέση:

$$\dim_B F = \dim_M F \quad (4.12)$$

4.6 δ - παράλληλο σώμα (δ - parallel body)

Το δ παράλληλο σώμα (δ parallel body) αποτελεί ένα ισοδύναμο ορισμό της διάστασης Box-computing με μία διαφορετική μορφή.

Το δ παράλληλο σώμα (δ parallel body) συμβολίζεται με F_δ και ορίζεται ως:

$$F_\delta = \{x \in \mathfrak{R}^n : |x - y| \leq \delta, \text{ για } y \in F\} \quad (4.13)$$

Είναι φανερό ότι το F_δ είναι ένα σύνολο σημείων, όπου η απόσταση μεταξύ

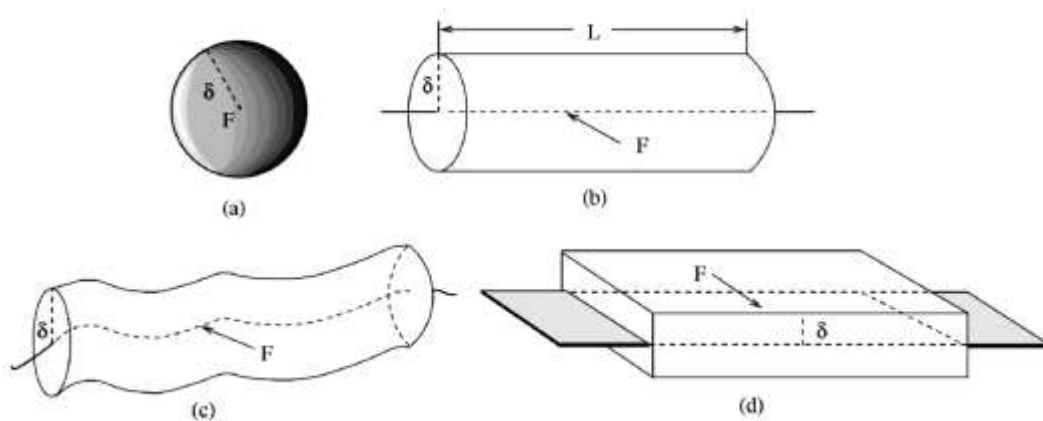
του F και κάθε στοιχείου του F_δ δεν είναι μεγαλύτερη από δ . Σημαντικός παράγοντας αποτελεί ο ρυθμός με τον οποίο ο n -διάστατος όγκος του F_δ μειώνεται καθώς $\delta \rightarrow 0$. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζονται τα παρακάτω παραδείγματα στο \mathbb{R}^3 .

- i. Αν το F είναι ένα σύνολο που περιέχει μόνο ένα σημείο (δηλαδή το F είναι ένα σημείο) τότε το F_δ θα είναι μία σφαίρα (σχήμα 4.14α) με όγκο: $Vol(F_\delta) = \frac{4}{3}\pi\delta^3$.
- ii. Αν το F είναι ένα σύνολο που περιέχει ένα τμήμα μιας ευθείας με μήκος L , τότε το F_δ θα είναι ένας κύλινδρος (σχήμα 4.14b) με όγκο: $Vol(F_\delta) = \pi L\delta^2$.
- iii. Αν το F είναι ένα σύνολο που περιέχει ένα τμήμα μιας καμπύλης με μήκος L , τότε το F_δ θα είναι ένας «κυματιστός» κύλινδρος (σχήμα 4.14c) με όγκο: $Vol(F_\delta) \sim \pi L\delta^2$.
- iv. Αν το F είναι ένα σύνολο που περιέχει ένα επίπεδο με εμβαδό ίσο με A , τότε το F_δ θα είναι ένα «τούβλο» (σχήμα 4.14d) με όγκο: $Vol(F_\delta) = 2A\delta$.

Σε κάθε παραπάνω περίπτωση ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$Vol(F_\delta) \sim \beta\delta^{3-D} \quad (4.14)$$

Όπου β είναι μία σταθερά και ο ακέραιος D είναι η fractal διάσταση (fractal dimension) του F .



Σχήμα 4.14: Παραδείγματα δ - παράλληλων σωμάτων

Έστω $F = \{X_{i,j}\}, i = 0,1,\dots,K, j = 0,1,\dots,L$ είναι μία εικόνα από ένα ραντάρ συνθετικής απεικόνισης (SAR) πολλαπλών επιπέδων του γκρι (multigray level), και $X_{i,j}$ είναι το επίπεδο του γκρι (gray level) για το (i, j) pixel. Σε ένα συγκεκριμένο εύρος, η διαφόρων επιπέδων του γκρι επιφάνεια F μπορεί να θεωρηθεί ως fractal. Το εμβαδόν της επιφάνειας αυτής είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της fractal διάστασης (fractal dimension) της επιφάνειας.

Η διαφόρων επιπέδων του γκρι συνάρτηση F είναι ένα μη κενό και φραγμένο

σύνολο του \mathbb{R}^3 . Η έννοια του \mathcal{D} παράλληλου σώματος (\mathcal{D} parallel body) μπορεί να εφαρμοστεί πρακτικά σε μία τεχνική η οποία ονομάζεται τεχνική «κουβέρτας» (Blanket Technique) με σκοπό να μεγαλώσει στο χώρο τη συνάρτηση F . Κατ' αυτό τον τρόπο προκύπτει το σύνολο F_δ , το οποίο εξακολουθεί να είναι μη κενό και φραγμένο σύνολο του \mathbb{R}^3 . Σύμφωνα με τον ορισμό της διάστασης Minkowski (Minkowski dimension) προκύπτει ότι αν ισχύει: $\lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{Vol^3(F_\delta)}{\delta^{3-D}} = \beta > 0$ τότε $D = \dim_M F = \dim_B F$, όπου β είναι μία σταθερά και $Vol^3(F_\delta)$ είναι ο όγκος της «κουβέρτας» F_δ . Επομένως όταν το \mathcal{D} είναι ικανοποιητικά μικρό προκύπτει $Vol^3(F_\delta) \approx \beta \delta^{3-D}$ [5].

Έστω $A(\delta)$ ότι είναι το εμβαδό της επιφάνειας της «κουβέρτας». Το εμβαδό αυτό δίνεται από τη σχέση:

$$A(\delta) = \frac{Vol^3(F_\delta)}{2\delta} = \frac{\beta \delta^{2-D}}{2} \quad (4.15)$$

Στην πραγματικότητα το $A(\delta)$ είναι το εμβαδό της διαφόρων επιπέδων του γκρι επιφάνειας της SAR εικόνας.

Για να διευκολυνθεί η απλότητα του τύπου αντικαθίσταται στην παραπάνω σχέση ο όρος $\frac{\beta}{2}$ με τον όρο β . Επομένως η σχέση 4.15 ξαναγράφεται ως εξής:

$$A(\delta) = \beta \delta^{2-D}, \text{ αν το } \delta \text{ είναι ικανοποιητικά μικρό} \quad (4.16)$$

Όπου β είναι μία σταθερά και D είναι η fractal διάσταση της SAR εικόνας.

Σύμφωνα με τη σχέση 4.16, η fractal διάσταση D είναι δυνατό να υπολογιστεί από το εμβαδό $A(\delta)$. Πιο συγκεκριμένα, λογαριθμώντας και τις δύο πλευρές της εξίσωσης 4.16 προκύπτει:

$$\begin{aligned} \log_2 A(\delta) &\approx \log_2 \beta + (2-D) \log_2 \delta \Rightarrow \\ 2-D &\approx \frac{\log_2 A(\delta)}{\log_2 \delta} - \frac{\log_2 \beta}{\log_2 \delta} \Rightarrow \\ D &\approx 2 - \frac{\log_2 A(\delta)}{\log_2 \delta} - \frac{\log_2 \beta}{\log_2 \delta} \end{aligned} \quad (4.17)$$

Όταν το δ είναι επαρκώς μικρό, τότε ο όρος $\frac{\log_2 \beta}{\log_2 \delta}$ στη σχέση 4.17 τείνει στο μηδέν ($\frac{\log_2 \beta}{\log_2 \delta} \approx 0$). Επομένως η σχέση 4.17 γράφεται:

$$D \approx 2 - \frac{\log_2 A(\delta)}{\log_2 \delta} \quad (4.18)$$

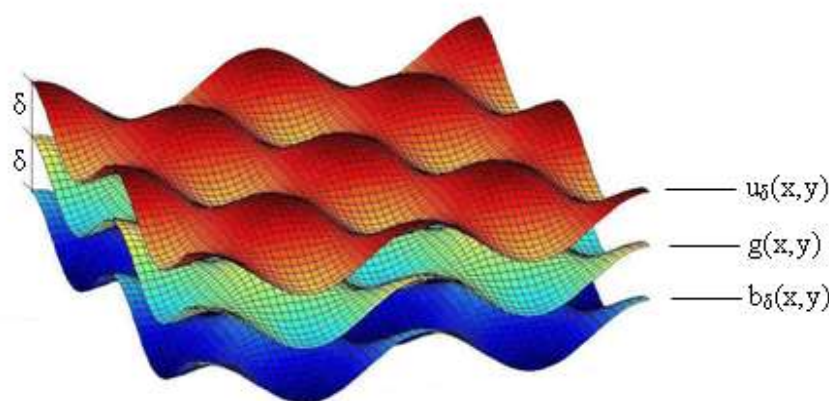
4.7 Τεχνική «κουβέρτας» (blanket technique) και μέθοδος “τροποποιημένη fractal υπογραφή” (Modified Fractal Signature, MFS)

Η βασική ιδέα αυτής της νέας προσέγγισης είναι ότι μια εικόνα μετατρέπεται αρχικά σε συνάρτηση διαφόρων επιπέδων του γκρι. Κατόπιν αυτή η συνάρτηση μετατρέπεται σε μία επιφάνεια επιπέδων του γκρι και μέσω του προσδιορισμού του εμβαδού αυτής της επιφάνειας, είναι δυνατό να προσδιοριστεί η fractal διάσταση (fractal dimension) της εικόνας. Χρησιμοποιώντας την τεχνική δ παράλληλο σώμα (δ parallel body) στη διαφόρων επιπέδων του γκρι επιφάνεια της εικόνας του ραντάρ συνθετικής απεικόνισης (SAR), μεγαλώνει ο όγκος της επιφάνειας έτσι ώστε να γίνει ένα τρισδιάστατο δ παράλληλο σώμα. Στη συνέχεια, υπολογίζεται ο όγκος του εν λόγω σώματος, δεδομένου ότι ο υπολογισμός του όγκου είναι πολύ πιο εύκολος από ότι ο υπολογισμός του εμβαδού της επιφάνειας. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται «τροποποιημένη fractal υπογραφή» (Modified Fractal Signature, MFS) καθώς η fractal διάσταση (fractal dimension) της εικόνας υπολογίζεται όχι απευθείας αλλά μέσω του υπολογισμού του όγκου του αντίστοιχου δ παράλληλου σώματος.

Για τον υπολογισμό της fractal διάστασης, είναι απαραίτητο να υπολογιστεί το εμβαδό της διαφόρων επιπέδων του γκρι επιφάνειας. Γι' αυτό το σκοπό χρησιμοποιείται η τεχνική της «κουβέρτας» (blanket technique). Η βασική ιδέα της τεχνικής αυτής είναι η εξής:

Στην τεχνική «κουβέρτας» (blanket technique), λαμβάνονται υπόψη όλα τα σημεία του τρισδιάστατου χώρου σε απόσταση δ από την διαφόρων επιπέδων του γκρι επιφάνεια. Τα σημεία αυτά κατασκευάζουν μία «κουβέρτα» πάχους 2δ που καλύπτουν την επιφάνεια αυτή. Μια γραφική απεικόνιση φαίνεται στο Σχήμα 4.15. Η εικόνα από το ραντάρ συνθετικής απεικόνισης (SAR) μετατρέπεται σε μία συνάρτηση διαφόρων επιπέδων του γκρι $g(i, j)$. Η «κουβέρτα» που σχηματίζεται ορίζεται από την άνω επιφάνεια $u_\delta(i, j)$ και την κάτω επιφάνεια $b_\delta(i, j)$. Αρχικά $\delta=0$ και η συνάρτηση διαφόρων επιπέδων του γκρι ισούται με την πάνω και την κάτω επιφάνεια, δηλαδή ισχύει η σχέση:

$$g(i, j) = u_0(i, j) = b_0(i, j) \quad (4.19)$$



Σχήμα 4.15: Αναπαράσταση επιφάνειας g και των άνω και κάτω επιφανειών που σχηματίζουν την «κουβέρτα» (blanket)

Για $\delta = 1, 2, \dots$ οι επιφάνειες της κουβέρτας ορίζονται επαναληπτικά ως εξής:

$$u_{\delta}(i, j) = \max \left\{ u_{\delta-1}(i, j) + 1, \max_{|(m,n)-(i,j)| \leq 1} u_{\delta-1}(m, n) \right\} \quad (4.20)$$

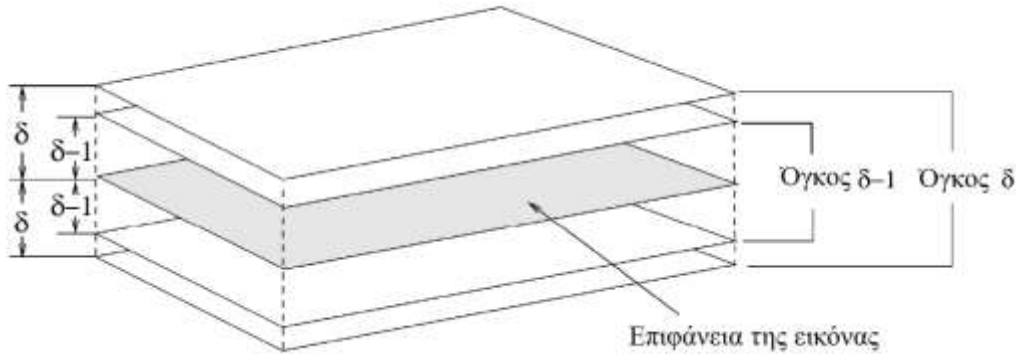
$$b_{\delta}(i, j) = \min \left\{ b_{\delta-1}(i, j) - 1, \min_{|(m,n)-(i,j)| \leq 1} b_{\delta-1}(m, n) \right\} \quad (4.21)$$

Τα pixel της εικόνας (m, n) με απόσταση μικρότερη της μονάδας από τα (i, j) προκύπτουν από τους τέσσερις άμεσους γείτονες των (i, j) . Είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν και οι οχτώ άμεσοι γείτονες των (i, j) όπου και προκύπτουν παρόμοιες εκφράσεις με αυτές των εξισώσεων 4.20 και 4.21 [5].

Ένα σημείο $f(x, y)$ θα ενσωματωθεί στην «κουβέρτα» για δ όταν ισχύει $b_{\delta}(x, y) < f(x, y) < u_{\delta}(x, y)$. Ο ορισμός της «κουβέρτας» στηρίζεται στο γεγονός ότι η «κουβέρτα» της επιφάνειας με ακτίνα δ περιλαμβάνει όλα τα σημεία της «κουβέρτας» με ακτίνα $\delta - 1$, συμπεριλαμβανομένων και των σημείων με ακτίνα 1 (σχήμα 4.16). Η εξίσωση 4.20 εξασφαλίζει ότι η νέα άνω επιφάνεια u_{δ} είναι μεγαλύτερη από την $u_{\delta-1}$ τουλάχιστον κατά 1 και επίσης σε απόσταση τουλάχιστον 1 από την $u_{\delta-1}$ στην οριζόντια και στην κάθετη κατεύθυνση.

Ο όγκος Vol_{δ} της «κουβέρτας» υπολογίζεται από τα u_{δ} και b_{δ} ως εξής:

$$Vol_{\delta} = \sum_{i,j} (u_{\delta}(i, j) - b_{\delta}(i, j)) \quad (4.22)$$



Σχήμα 4.16: Υπολογισμός του εμβαδού της επιφάνειας με τη βοήθεια της κουβέρτας ακτίνας δ και της κουβέρτας ακτίνας $\delta - 1$

Καθώς ο όγκος Vol_{δ} της «κουβέρτας» αυξάνεται με ακτίνα δ , είναι δυνατό να προσδιοριστεί το εμβαδό της fractal επιφάνειας ως εξής:

$$A_\delta = \frac{Vol_\delta}{2^\delta} \quad (4.23)$$

ή

$$A_\delta = \frac{Vol_\delta - Vol_{\delta-1}}{2} \quad (4.24)$$

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή θα χρησιμοποιηθεί η έκφραση της σχέσης 4.24. Επιπλέον η fractal διάσταση (fractal dimension) θα συμβολίζεται στη συνέχεια με F_D και όχι με D για λόγους πληρότητας και καλύτερης κατανόησης των τύπων.

Το εμβαδό της fractal επιφάνειας συμπεριφέρεται σύμφωνα με τη σχέση 4.16 ως εξής: $A(\delta) \approx \beta \delta^{2-F_D}$, $\delta = 1, 2, \dots$. Από την τελευταία σχέση υπολογίζεται η fractal διάσταση F_D . Εφόσον η διάσταση μπορεί να θεωρηθεί ως η κλίση σε μία λογαριθμική – λογαριθμική κλίμακα, απαιτούνται μόνο δύο σημεία για να τον υπολογισμό της. Χρησιμοποιούνται δύο τιμές του δ για τον υπολογισμό της fractal διάστασης, έστω δ_1 και δ_2 . Τότε θα ισχύουν οι σχέσεις:

$$A_{\delta_1} \approx \beta \delta_1^{2-F_D} \quad (4.25)$$

$$A_{\delta_2} \approx \beta \delta_2^{2-F_D} \quad (4.26)$$

Διαιρώντας κατά μέλη τις δύο παραπάνω εξισώσεις προκύπτει:

$$\frac{A_{\delta_1}}{A_{\delta_2}} \approx \frac{\delta_1^{2-F_D}}{\delta_2^{2-F_D}} \quad (4.27)$$

Λογαριθμώντας τα δύο μέλη της εξίσωσης 4.27 προκύπτει:

$$2 - F_D \approx \frac{\log_2 A_{\delta_1} - \log_2 A_{\delta_2}}{\log_2 \delta_1 - \log_2 \delta_2} \Rightarrow$$

$$F_D \approx 2 - \frac{\log_2 A_{\delta_1} - \log_2 A_{\delta_2}}{\log_2 \delta_1 - \log_2 \delta_2} \quad (4.28)$$

Επομένως με την παραπάνω μέθοδο υπολογίζεται η fractal διάσταση (fractal dimension) F_D .

Σύμφωνα με τις ιδιότητες των αναλογιών ισχύει η εξής ιδιότητα: αν $\frac{a_1}{b_1} = \frac{a_2}{b_2}$

τότε $\frac{a_1}{b_1} = \frac{a_1 - a_2}{b_1 - b_2}$. Επομένως εφαρμόζοντας την ιδιότητα αυτή στην προκειμένη

περίπτωση προκύπτει: αν $\frac{\log_2 A_{\delta_1}}{\log_2 \delta_1} = \frac{\log_2 A_{\delta_2}}{\log_2 \delta_2}$ τότε $\frac{\log_2 A_{\delta_1}}{\log_2 \delta_1} = \frac{\log_2 A_{\delta_1} - \log_2 A_{\delta_2}}{\log_2 \delta_1 - \log_2 \delta_2}$.

Συνεπώς οι εξισώσεις 4.18 και 4.28 είναι ισοδύναμες, δηλαδή ισχύει η σχέση:

$$\left(F_D \approx 2 - \frac{\log_2 A(\delta)}{\log_2 \delta} \right) \equiv \left(F_D \approx 2 - \frac{\log_2 A_{\delta_1} - \log_2 A_{\delta_2}}{\log_2 \delta_1 - \log_2 \delta_2} \right) \quad (4.29)$$

Το σημείο που πρέπει να αποσαφηνιστεί είναι για ποιο λόγο οι διάφορες εικόνες SAR έχουν διαφορετικές fractal διαστάσεις. Η ουσιαστική διαφορά μεταξύ των διάφορων εικόνων είναι οι τιμές της επιφάνειας $A(\delta)$. Η τιμή του $A(\delta)$ εξαρτάται μόνο από τον όγκο $Vol^3(F_D)$ της «κουβέρτας». Συνοψίζοντας ισχύουν οι ισοδυναμίες: $F_D \Leftrightarrow A(\delta) \Leftrightarrow Vol^3(F_D)$.

4.8 Αλγόριθμος για τη μέθοδο “τροποποιημένη fractal υπογραφή” (Modified Fractal Signature, MFS)

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε με σκοπό τον υπολογισμό της fractal διάστασης (fractal dimension) βασίζεται στον ισοδύναμο ορισμό της διάστασης Box computing. Πιο συγκεκριμένα οι εξισώσεις 4.20, 4.21, 4.22 και 4.24 αξιοποιούνται για την κατασκευή του παρακάτω αλγόριθμου:

Σαν είσοδο ο αλγόριθμος δέχεται μία SAR εικόνα.

Βήμα 1: Η SAR εικόνα χωρίζεται σε διάφορες μη επικαλυπτόμενες υπο-εικόνες $R_k(x, y)$ μεγέθους $N \times N$ η καθεμία.

Βήμα 2: Για $k = 1$ έως n κάθε υπο-εικόνα $R_k(x, y)$ μετατρέπεται σε μία συνάρτηση $g_k(x, y)$ διαφόρων επιπέδων του γκρι.

Βήμα 3: Για $k = 1$ έως n

Υπο-βήμα 1: Αρχικά για $\delta = 0$, η άνω επιφάνεια $u_0^k(x, y)$ και η κάτω επιφάνεια $b_0^k(x, y)$ της «κουβέρτας» επιλέγονται ίσες με την διαφόρων επιπέδων του γκρι συνάρτηση $g_k(x, y)$ δηλαδή ισχύει η σχέση: $u_0^k(x, y) = b_0^k(x, y) = g_k(x, y)$.

Υπο-βήμα 2: Τίθεται $\delta = \delta_1$.

α) Η άνω επιφάνεια $u_{\delta_1}(x, y)$ υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση 4.20:

$$u_{\delta_1}(x, y) = \max \left\{ u_0(x, y) + 1, \max_{|(i,j)-(x,y)| \leq 1} u_0(i, j) \right\}$$

β) Η κάτω επιφάνεια $b_{\delta_1}(x, y)$ υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση 4.21:

$$b_{\delta_1}(x, y) = \min \left\{ b_0(x, y) - 1, \min_{|(i,j)-(x,y)| \leq 1} b_0(i, j) \right\}$$

γ) Ο όγκος Vol_{δ_1} της «κουβέρτας» υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση

4.22:

$$Vol_{\delta_1} = \sum_{x,y} (u_{\delta_1}(x,y) - b_{\delta_1}(x,y))$$

Υπο-βήμα 3: Τίθεται $\delta = \delta_2 = \delta_1 + 1$.

α) Η άνω επιφάνεια $u_{\delta_2}(x,y)$ υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση 4.20:

$$u_{\delta_2}(x,y) = \max \left\{ u_{\delta_1}(x,y) + 1, \max_{|(i,j)-(x,y)| \leq 1} u_{\delta_1}(i,j) \right\}$$

β) Η κάτω επιφάνεια $b_{\delta_2}(x,y)$ υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση 4.21:

$$b_{\delta_2}(x,y) = \min \left\{ b_{\delta_1}(x,y) - 1, \min_{|(i,j)-(x,y)| \leq 1} b_{\delta_1}(i,j) \right\}$$

γ) Ο όγκος Vol_{δ_2} της «κουβέρτας» υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση 4.22:

$$Vol_{\delta_2} = \sum_{x,y} (u_{\delta_2}(x,y) - b_{\delta_2}(x,y))$$

Βήμα 4: Το εμβαδό της κάθε υπο - εικόνας A_{δ}^k υπολογίζεται από την εξίσωση 4.24:

$$A_{\delta} = \frac{Vol_{\delta} - Vol_{\delta-1}}{2}.$$

Βήμα 5: Συνδυάζοντας όλα τα εμβαδά από κάθε υπο - εικόνα A_{δ}^k , $k = 1, 2, \dots, n$ υπολογίζεται το συνολικό εμβαδό: $A_{\delta} = \bigcup_{k=1}^n A_{\delta}^k$.

4.9 Εφαρμογή της μεθόδου “τροποποιημένης fractal υπογραφής” (Modified Fractal Signature, MFS) σε πραγματικές SAR εικόνες με σκοπό την κατηγοριοποίηση διαφόρων τύπων εδαφών

Σε αυτή την ενότητα εφαρμόζεται η μέθοδος της τροποποιημένης fractal υπογραφής (Modified Fractal Signature, MFS) για διάφορους τύπους εδαφών που συναντώνται σε εικόνες ραντάρ συνθετικής απεικόνισης (SAR) και προέρχονται από πραγματικά δεδομένα. Οι SAR εικόνες παραχωρήθηκαν στην επιστημονική μας ομάδα από ένα διεθνές Working Group που έχει ως κύριο αντικείμενο τις τεχνικές για ραντάρ συνθετικής απεικόνισης (SAR) και ονομάζεται SET 163 Working Group.

Στις παρακάτω εικόνες 4.17 – 4.20 φαίνονται οι SAR εικόνες από πραγματικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή της μεθόδου της τροποποιημένης fractal υπογραφής (Modified Fractal Signature, MFS). Οι εικόνες αυτές είναι πραγματικές εικόνες από ένα spaceborne radar και απεικονίζουν τέσσερις διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής (ΗΠΑ) και πιο συγκεκριμένα την πόλη της Νέας Υόρκης, την πόλη της Ουάσινγκτον, το Λας Βέγκας και το Κολοράντο.



Σχήμα 4.17: SAR εικόνα από την πόλη της Νέας Υόρκης (New York, USA)



Σχήμα 4.18: SAR εικόνα από την πόλη της Ουάσινγκτον (Washington D.C., USA)



Σχήμα 4.19: SAR εικόνα από την πόλη του Λας Βέγκας (Las Vegas, USA)

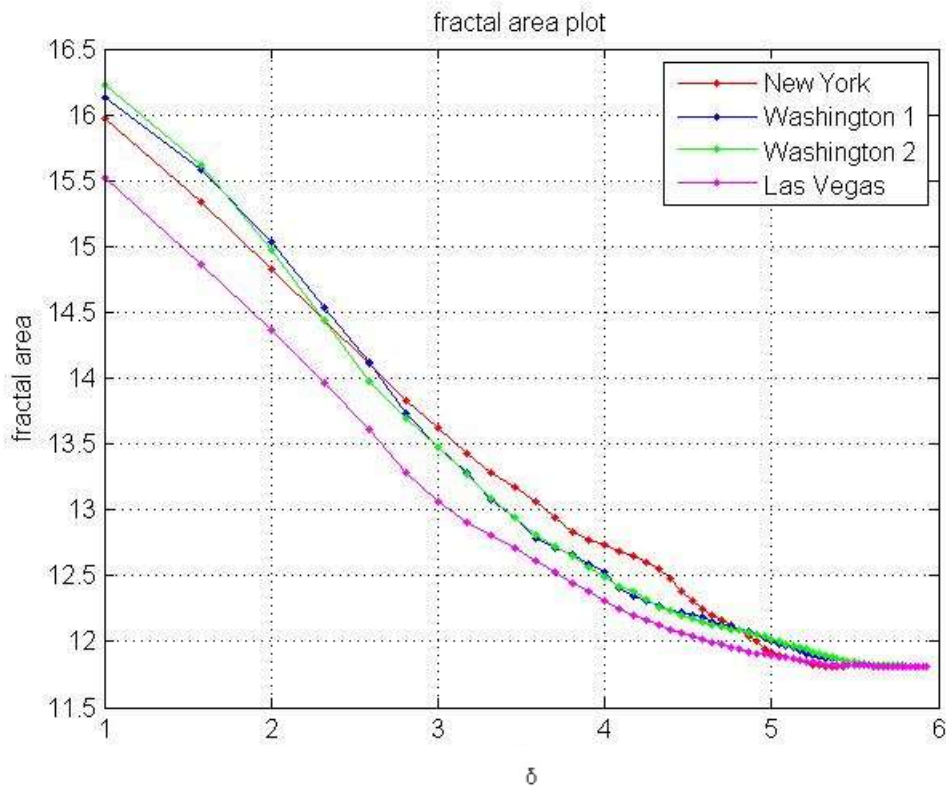


Σχήμα 4.20: SAR εικόνα από την πόλη του Κολοράντο (Colorado, USA)

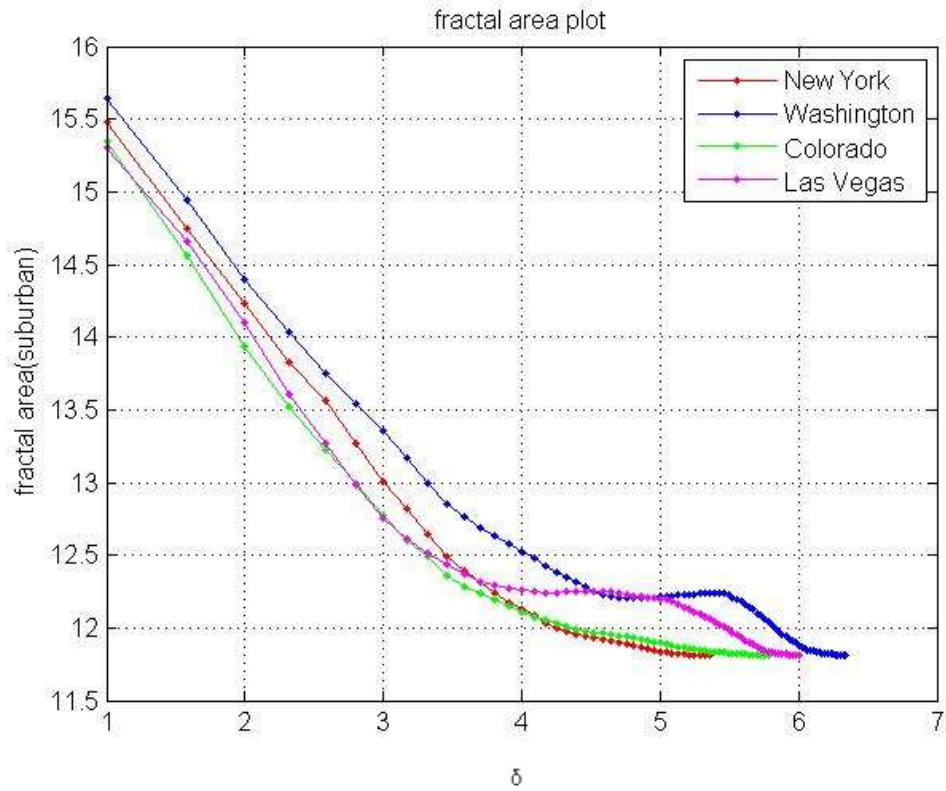
Με την βοήθεια των παραπάνω SAR εικόνων θα υλοποιηθεί μία προτεινόμενη διαδικασία για την κατηγοριοποίηση εικόνων SAR με τη βοήθεια της μεθόδου της

τροποποιημένης fractal υπογραφής (Modified Fractal Signature, MFS). Από τις τέσσερις παραπάνω εικόνες (4.17- 4.20) επιλέχθηκαν είκοσι υπο-εικόνες του ίδιου μεγέθους. Αυτές οι είκοσι υπο-εικόνες οργανώθηκαν σε πέντε ομάδες, κάθε μία από τις οποίες αντιστοιχεί σε πέντε διαφορετικού τύπου εδάφη, τα οποία και θα αναγνωρίζονται από την προτεινόμενη διαδικασία κατηγοριοποίησης. Τα πέντε είδη εδαφών που εξετάζονται είναι τα εξής: αστικό περιβάλλον (urban site), ημιαστικό περιβάλλον (suburban site), αγροτικό περιβάλλον (rural site), βουνό (mountain site) και θάλασσα (sea site). Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν τέσσερις υπο-εικόνες ανά τύπο εδάφους. Αυτές θα αποτελέσουν και τη βάση για την υλοποίηση της προτεινόμενης μεθόδου κατηγοριοποίησης SAR εικόνων, δηλαδή τα δεδομένα βάσης (training data) σύμφωνα με τα οποία θα γίνεται η κατηγοριοποίηση [6].

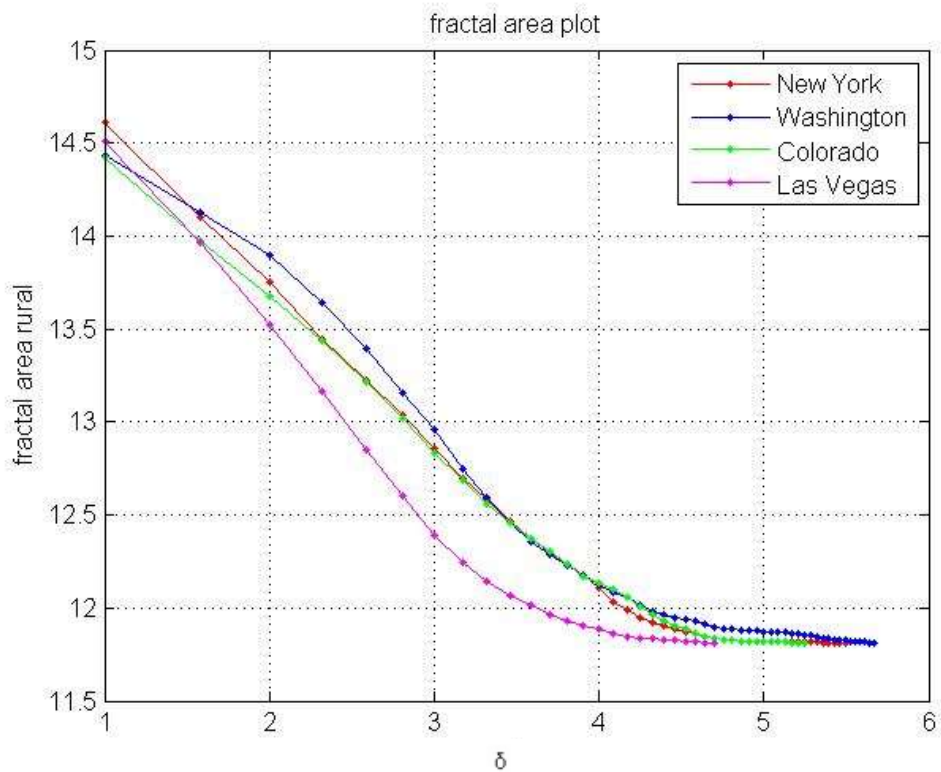
Για κάθε μία από τις είκοσι υπο-εικόνες, υπολογίστηκαν αρχικά οι τιμές του fractal εμβαδού (fractal area) A_δ ανά επανάληψη δ . Ως εκ τούτου προέκυψαν οι καμπύλες fractal area A_δ ως προς την επανάληψη δ και παρουσιάζονται στα σχήματα 4.21-4.25 ανά ομάδα εδαφών.



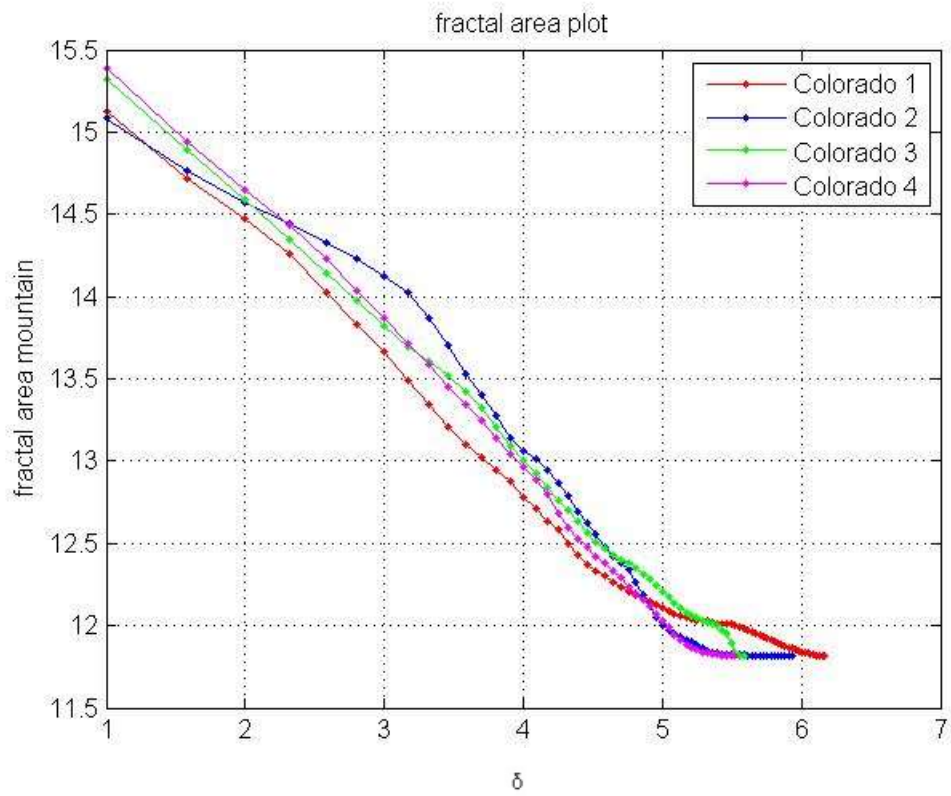
Σχήμα 4.21: Καμπύλες fractal area ως προς την επανάληψη δ για το αστικό περιβάλλον (urban site)



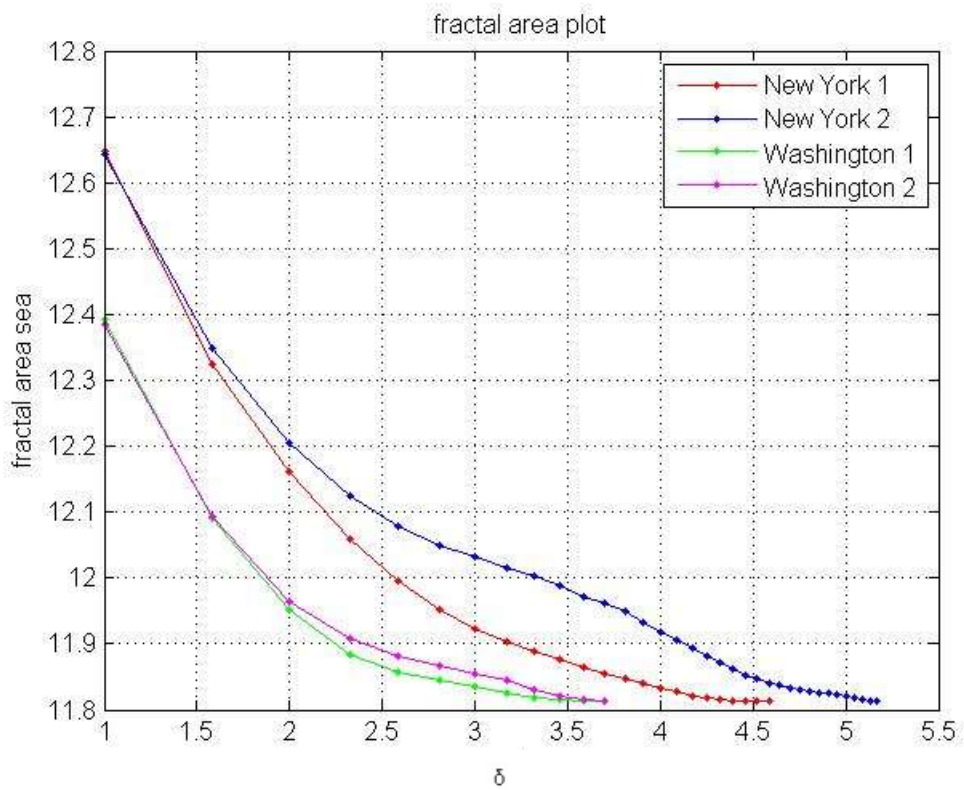
Σχήμα 4.22: Καμπύλες fractal area ως προς την επανάληψη δ για το ημιαστικό περιβάλλον (suburban site)



Σχήμα 4.23: Καμπύλες fractal area ως προς την επανάληψη δ για το αγροτικό περιβάλλον (rural site)

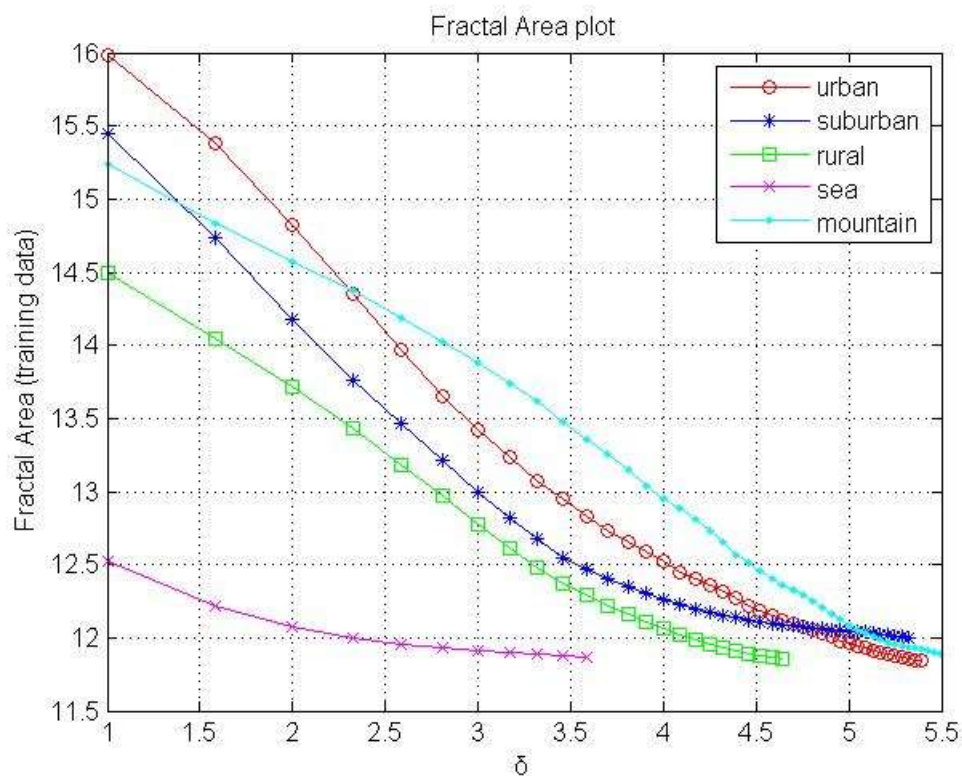


Σχήμα 4.24: Καμπύλες fractal area ως προς την επανάληψη δ για το βουνό (mountain site)



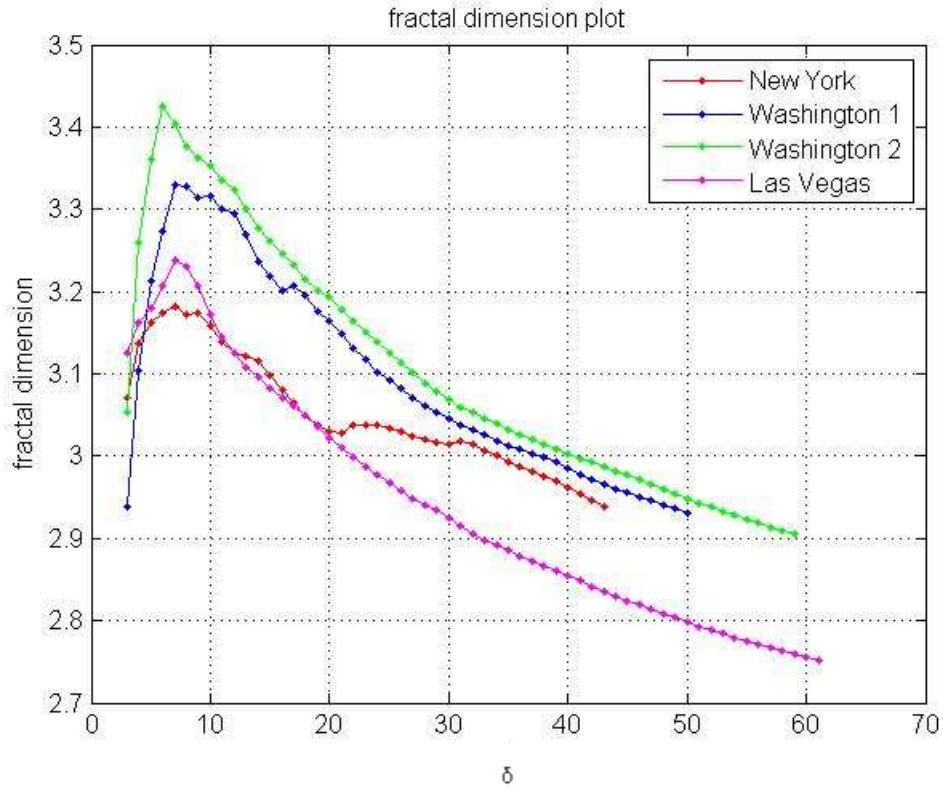
Σχήμα 4.25: Καμπύλες fractal area ως προς την επανάληψη δ για τη θάλασσα (sea site)

Στη συνέχεια υπολογίστηκε ο μέσος όρος για κάθε καμπύλη εμβαδού (fractal area) ανά κατηγορία εδάφους. Ως αποτέλεσμα οι αντίστοιχες καμπύλες εμβαδού για τις πέντε κατηγορίες εδάφους φαίνονται συγκεντρωτικά στο σχήμα 4.26 σε λογαριθμική κλίμακα (log-log scale).

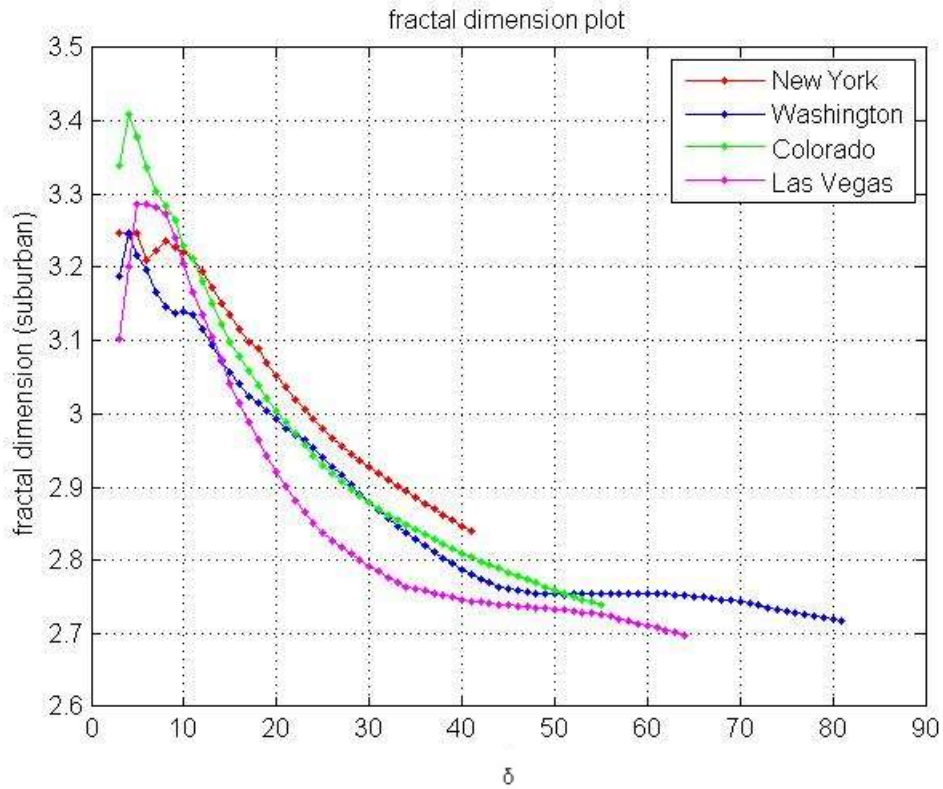


Σχήμα 4.26: Καμπύλες fractal area ως προς την επανάληψη δ ανά κατηγορία εδάφους σε λογαριθμική κλίμακα. Κάθε καμπύλη είναι ο μέσος όρος τεσσάρων καμπύλων

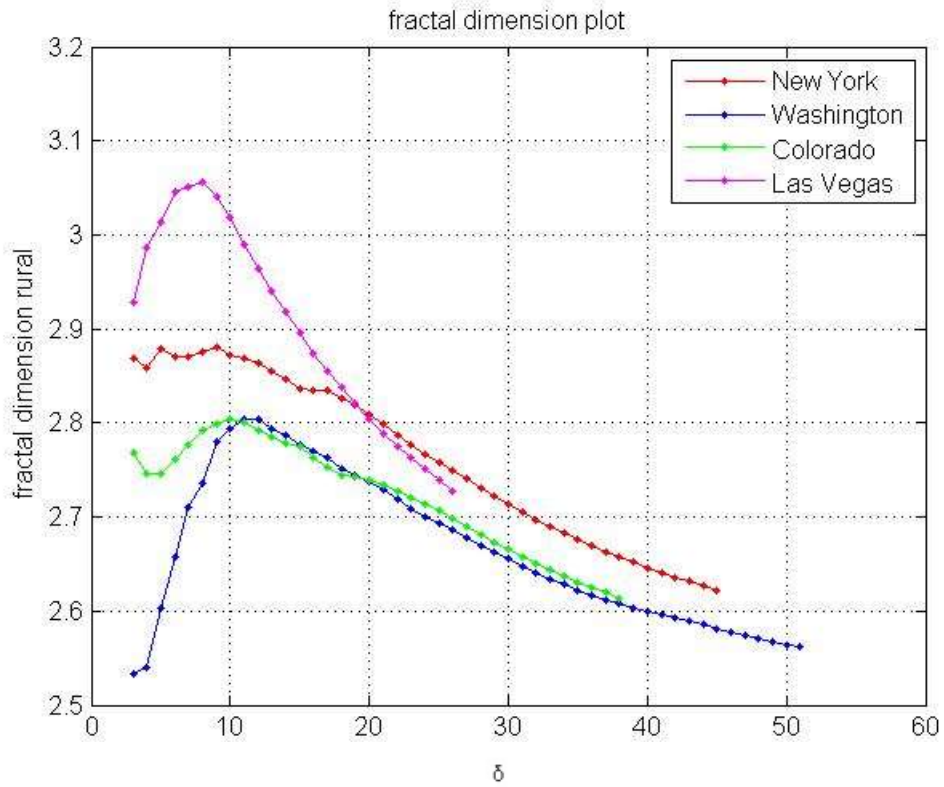
Κατόπιν για κάθε μία από τις είκοσι υπο-εικόνες, υπολογίστηκαν με τη βοήθεια της εξίσωσης 4.29 οι τιμές της fractal διάστασης (Fractal Dimension) F_δ ανά επανάληψη δ . Ως εκ τούτου προέκυψαν οι καμπύλες Fractal Dimension F_δ ως προς την επανάληψη δ και παρουσιάζονται στα σχήματα 4.27-4.31 ανά ομάδα εδαφών.



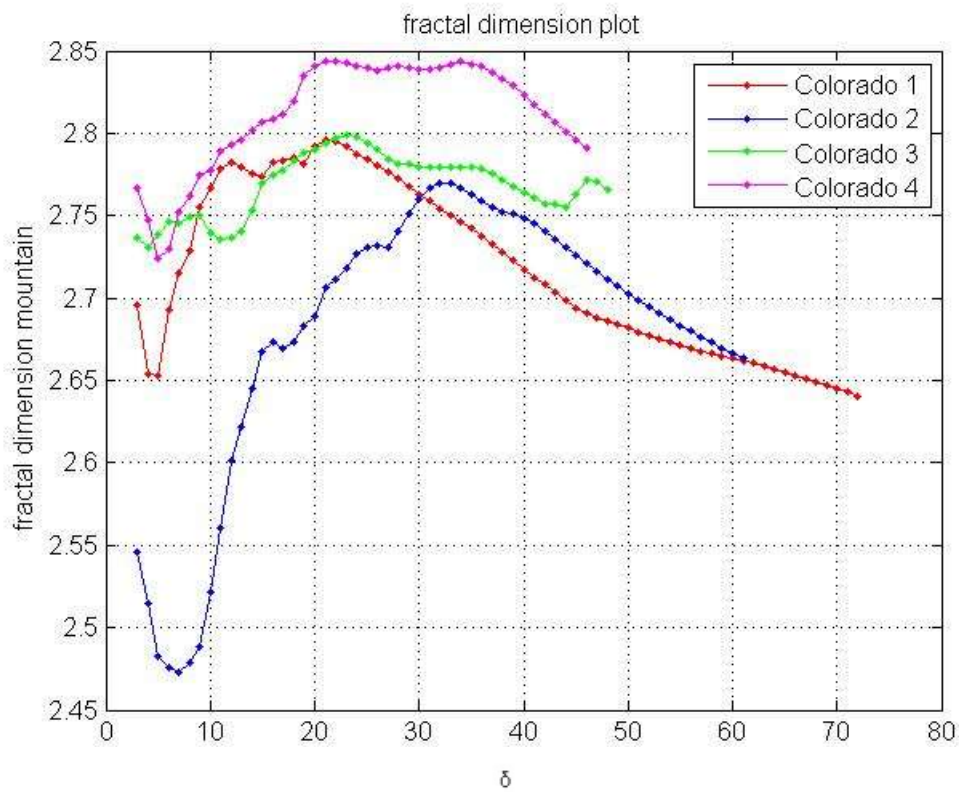
Σχήμα 4.27: Καμπύλες fractal dimension ως προς την επανάληψη δ για το αστικό περιβάλλον (urban site)



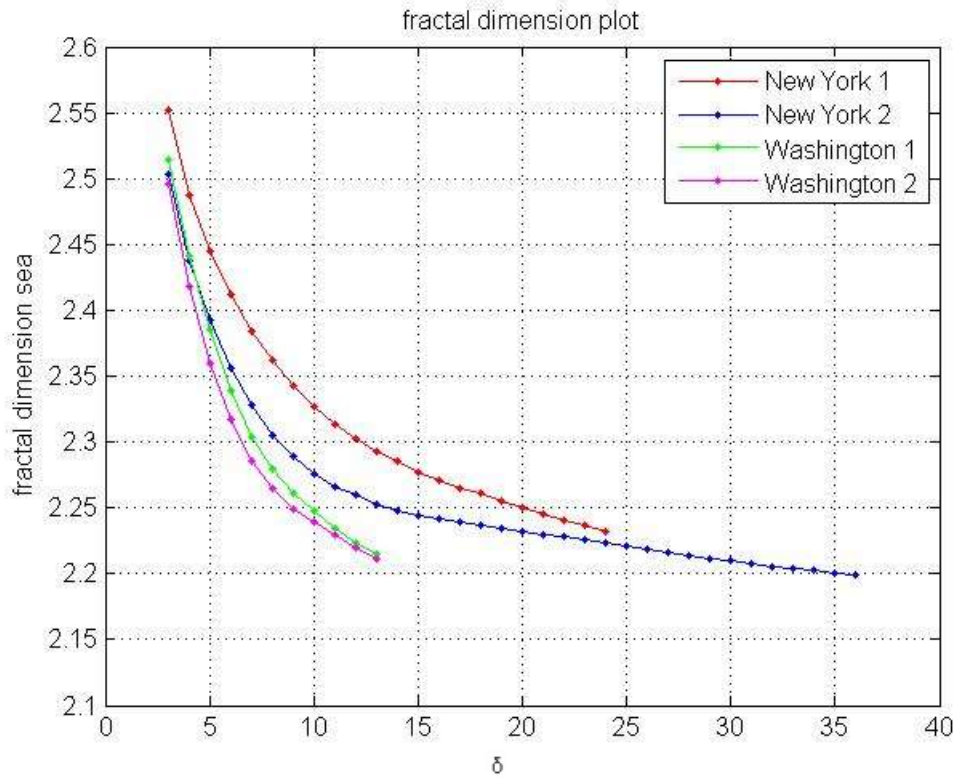
Σχήμα 4.28: Καμπύλες fractal dimension ως προς την επανάληψη δ για το ημιαστικό περιβάλλον (suburban site)



Σχήμα 4.29: Καμπύλες fractal dimension ως προς την επανάληψη δ για το αγροτικό περιβάλλον (rural site)

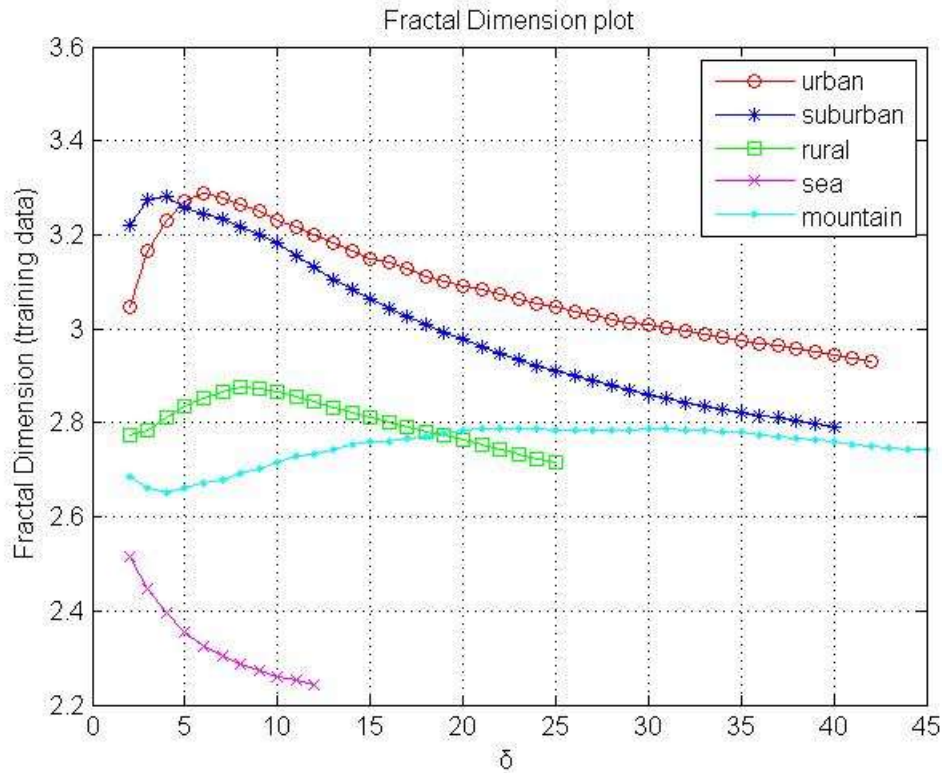


Σχήμα 4.30: Καμπύλες fractal dimension ως προς την επανάληψη δ για το βουνό (mountain site)



Σχήμα 4.31: Καμπύλες fractal dimension ως προς την επανάληψη δ για τη θάλασσα (sea site)

Στη συνέχεια υπολογίστηκε ο μέσος όρος για κάθε καμπύλη fractal διάστασης (fractal dimension) ανά κατηγορία εδάφους. Ως αποτέλεσμα οι αντίστοιχες καμπύλες fractal διάστασης (fractal dimension) για τις πέντε κατηγορίες εδάφους φαίνονται στο σχήμα 4.32.



Σχήμα 4.32: Καμπύλες fractal dimension ως προς την επανάληψη δ ανά κατηγορία εδάφους. Κάθε καμπύλη είναι ο μέσος όρος τεσσάρων καμπύλων

Οι καμπύλες fractal dimension στο σχήμα 4.32 καταδεικνύουν ένα ξεκάθαρο πρότυπο (pattern) για κάθε ένα από τους επιλεγμένους τύπους εδαφών. Αυτή η διαφορά στη fractal «υπογραφή» του κάθε εδάφους, θα αποτελέσει τη βάση για την κατηγοριοποίηση εδαφών, η οποία θα βασίζεται στην «απόσταση» μεταξύ των αντίστοιχων καμπύλων Fractal Dimension.

Στη συνέχεια υπολογίστηκε η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση για τις συναρτήσεις διαφόρων επιπέδων του γκρι που αντιστοιχούν σε καθεμία από τις είκοσι υπο-εικόνες. Κατόπιν, για κάθε είδος εδάφους υπολογίστηκε ο μέσος όρος της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης που αντιστοιχούν στον εκάστοτε τύπο εδάφους. Οι τιμές της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης ανά κατηγορία εδάφους φαίνονται στον πίνακα 4.1.

Πίνακας 4-1: Μέση τιμή και τυπική απόκλιση ανά κατηγορία εδάφους

SAR υπο-εικόνες	Τιμές	
	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση
Αστικό περιβάλλον	89.50	7.98
Ημι-αστικό περιβάλλον	73.43	4.31
Αγροτικό περιβάλλον	44.55	3.50
Βουνό	60.51	15.82
Θάλασσα	14.20	1.37

Οι παρατηρούμενες διαφορές στις τιμές της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης μεταξύ των πέντε διαφορετικών τύπων εδαφών, αντικατοπτρίζονται με πιο έντονο τρόπο στις καμπύλες fractal εμβαδού (fractal area) A_δ , και κυρίως στις καμπύλες fractal διάστασης (fractal dimension), όπως απεικονίζονται στα σχήματα 4.26 και 4.32 αντίστοιχα. Ως αποτέλεσμα, η ανάλυση fractal που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα με την εφαρμογή της μεθόδου της τροποποιημένης fractal υπογραφής (Modified Fractal Signature, MFS) στις 20 υπο-εικόνες των πραγματικών SAR εικόνων, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί για την κατηγοριοποίηση και το διαχωρισμό διαφόρων τύπων εδαφών που απεικονίζονται στις εικόνες ραντάρ συνθετικής απεικόνιση (SAR) [6], [7].

4.10 Έλεγχος της προτεινόμενης μεθόδου κατηγοριοποίησης εδαφών σε πραγματικές SAR εικόνες

Η υπολογιζόμενη τιμή της fractal διάστασης (fractal dimension) F_D συσχετίζεται με το επίπεδο της λεπτομέρειας που χάνεται όταν αυξάνεται το μέγεθος δ . Υψηλές τιμές της fractal διάστασης (fractal dimension) F_D σχετίζονται με υψηλές τιμές διακυμάνσεων στην επιφάνεια διαφόρων επιπέδων του γκρι για απόσταση δ . Επομένως, η τιμή της fractal διάστασης (fractal dimension) F_D , παρέχει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με το μέγεθος της διακύμανσης στην επιφάνεια διαφόρων επιπέδων του γκρι.

Για την υλοποίηση της προτεινόμενης μεθόδου κατηγοριοποίησης, επιλέχθηκαν από τις ίδιες πραγματικές εικόνες ραντάρ συνθετικής απεικόνισης (SAR) που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, τρεις εικόνες ανά κατηγορία εδάφους ίδιων διαστάσεων με τις υπο-εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν στην προηγούμενη ενότητα και αποτελούν τα δεδομένα βάσης (training data). Οι συγκεκριμένες δεκαπέντε συνολικά εικόνες, συγκροτούν τρεις ομάδες δεδομένων ελέγχου (testing data). Πιο συγκεκριμένα κάθε κατηγορία εδάφους (αστικό, ημιαστικό, αγροτικό περιβάλλον, βουνό, θάλασσα) εκπροσωπείται από τρεις εικόνες, μία στην ομάδα ελέγχου 1, μία στην ομάδα ελέγχου 2 και μία στην ομάδα ελέγχου 3.

Για κάθε υπο-εικόνα που ανήκει σε μία από τις τρεις ομάδες ελέγχου (testing data) πραγματοποιήθηκε σύγκριση με τις υπο-εικόνες της ομάδας βάσης (training data), σύμφωνα με την απόσταση D των αντίστοιχων καμπύλων fractal διάστασης (fractal dimension) F_D . Έστω ότι i είναι μία υπο-εικόνα της ομάδας βάσης (training data) με καμπύλη fractal διάστασης (fractal dimension) $F_{D_i}(\delta)$ και j είναι μία υπο-εικόνα της ομάδας ελέγχου (testing data) με καμπύλη fractal διάστασης (fractal dimension) $F_{D_j}(\delta)$. Η απόσταση D μεταξύ τους, υπολογίζεται με τη βοήθεια της παρακάτω σχέσης:

$$D(i, j) = \sum_{\delta} \left[\left(F_{D_i}(\delta) - F_{D_j}(\delta) \right)^2 \cdot \log \left(\frac{\delta + \frac{1}{2}}{\delta - \frac{1}{2}} \right) \right] \quad (4.30)$$

όπου \mathcal{D} αντιπροσωπεύει τον αριθμό των επαναλήψεων [8].

Η σχέση 4.30 εφαρμόστηκε σε όλα τα πιθανά ζευγάρια υπο-εικόνων της ομάδας βάσης (training data) και των υπο-εικόνων της ομάδας ελέγχου (testing data). Οι τιμές των αποστάσεων που υπολογίστηκαν για όλα τα πιθανά ζευγάρια παρατίθενται στον πίνακα 4.2. Μία υπο-εικόνα από τις τρεις ομάδες ελέγχου αναγνωρίζεται ότι παριστάνει μία συγκεκριμένη κατηγορία εδάφους, αν έχει τη μικρότερη απόσταση D από την αντίστοιχη υπο-εικόνα της ομάδας βάσης [6], [7].

Πίνακας 4-2: Πίνακας Κατηγοριοποίησης

Training data	Test data 1				
	Urban	Sub-urban	Rural	Mountain	Sea
Urban	0,0254	0,0623	0,3765	1,0909	2,2352
Sub-urban	0,0316	0,0075	0,4034	1,2081	2,2353
Rural	0,4674	0,6774	0,0334	0,1092	0,501
Mountain	0,8321	1,1013	0,1915	0,0221	0,4432
Sea	1,8113	2,2272	0,8342	0,2046	0,0291
Training data	Test data 2				
	Urban	Sub-urban	Rural	Mountain	Sea
Urban	0,0077	0,0273	0,6846	1,1483	2,8118
Sub-urban	0,1038	0,0449	0,718	1,2535	2,839
Rural	0,4227	0,3634	0,0378	0,1194	0,8183
Mountain	0,793	0,6953	0,0531	0,0263	0,6564
Sea	1,7218	1,6739	0,4451	0,1818	0,0004
Training data	Test data 3				
	Urban	Sub-urban	Rural	Mountain	Sea
Urban	0,0164	0,0666	0,318	0,7412	2,5293
Sub-urban	0,1122	0,0149	0,4681	0,8797	2,6879
Rural	0,6305	0,5277	0,0157	0,0297	0,8359
Mountain	1,0736	0,9252	0,1304	0,0076	0,4991
Sea	2,0747	2,0585	0,7091	0,3443	0,0016

Από τον πίνακα 4.2 προκύπτει ότι για την ίδια κατηγορία εδαφών μεταξύ της ομάδας βάσης και της ομάδας ελέγχου (για κάθε μία από τις τρεις ομάδες), παρατηρείται η μικρότερη απόσταση D μεταξύ των καμπύλων fractal διάστασης (fractal dimension) F_D . Επομένως η προτεινόμενη διαδικασία κατηγοριοποίησης με χρήση της μεθόδου της τροποποιημένης fractal υπογραφής (Modified Fractal Signature, MFS), δίνει σωστά αποτελέσματα κατηγοριοποίησης. Η ελάχιστη τιμή της

απόστασης D προκύπτει για ίδιες κατηγορίες εδαφών μεταξύ των υπο-εικόνων της ομάδας βάσης και της εκάστοτε ομάδας ελέγχου (διαγώνιος στον κάθε πίνακα κατηγοριοποίησης) [6].

4.11 Συμπεράσματα

Στην ενότητα αυτή παρουσιάστηκε μία νέα προσέγγιση για την κατηγοριοποίηση διαφόρων κατηγοριών εδαφών που συναντώνται στις εικόνες ραντάρ συνθετικής απεικόνισης (SAR). Η προτεινόμενη μέθοδος κατηγοριοποίησης βασίζεται στον υπολογισμό των καμπύλων της fractal διάστασης (fractal dimension) F_D για διάφορες υπο-εικόνες και κατόπιν στη σύγκριση των καμπύλων fractal διάστασης των υπο-εικόνων βάσης και των υπο-εικόνων ελέγχου μέσω του υπολογισμού της αντίστοιχης απόστασης D μεταξύ των καμπυλών. Τα αποτελέσματα στον πίνακα 4.2 καταδεικνύουν σωστά αποτελέσματα κατηγοριοποίησης βασισμένα σε πραγματικές εικόνες SAR.

Ως μελλοντική έρευνα σε αυτό το πεδίο, είναι δυνατό να ληφθούν περισσότερες εικόνες SAR, οι οποίες είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν και ως δεδομένα βάσης (training data) και ως δεδομένα ελέγχου (testing data), έτσι ώστε να κατασκευαστεί ένα πιο εύρωστο και αξιόπιστο σύστημα κατηγοριοποίησης. Επιπλέον θα μπορούσαν να εισαχθούν και περισσότερες κατηγορίες εδαφών (από τις πέντε κατηγορίες που ήδη εξετάστηκαν: αστικό, ημι-αστικό, αγροτικό περιβάλλον, βουνό, θάλασσα) χρησιμοποιώντας νέες εικόνες SAR. Τέλος και άλλες μέθοδοι fractal εκτός από τη μέθοδο της τροποποιημένης fractal υπογραφής (Modified Fractal Signature, MFS), όπως είναι η μέθοδος του φάσματος Regny (Regny spectrum) είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί για το σκοπό της κατηγοριοποίησης εδαφών με τη βοήθεια SAR εικόνων [6].

4.12 Βιβλιογραφικές αναφορές

- [1] K. Falconer, “Techniques in Fractal Geometry”, John Wiley & Sons, Chichester, 1997.
- [2] K. Falconer, “Fractal Geometry: “Mathematical Foundations and Applications”, John Wiley & Sons, Chichester, 2003.
- [3] J.R. Munkres, «Topology, A First Course», Englewood Cliffs: N.J.: Prentice Hall, Inc., 1975.
- [4] B.B. Mandelbrot, «The Fractal Geometry of Nature», New York: Freeman, 1982/1983.
- [5] Y. Tang, H. Ma, D. Xi, X. Mao, C. Suen, “Modified Fractal Signature (MFS): A New Approach to Document Analysis for Automatic Knowledge Acquisition”, IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, Vol. 9, No. 5, pp. 747-762, Sept. – Oct. 1997.
- [6] A. Malamou, C. Pandis, P. Frangos, P. Stefaneas, A. Karakasilotis and D. Kodokostas, “Application of the Modified Fractal Signature Method for Terrain Classification from Synthetic Aperture Radar Images”, Electronics and Electrical Engineering Journal, Vol. 20, No.6, June 2014.

- [7] A. Malamou, C. Pandis, A. Karakasiliotis, P. Stefaneas, D. Kodokostas and P. Frangos, ‘Application of an Autofocusing Algorithm for SAR Image Quality Improvement and Application of the Modified Fractal Signature (MFS) Method for SAR Image Classification for the case of Real Radar Data’, CEMA’13 Conference, Technical University of Sofia, Bulgaria, October 2013.
- [8] S. Peleg, J. Naor, R. Hartley, D. Avnir, “Multiple resolution texture analysis and classification”, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. PAMI-6, no. 4, pp. 518–523, 1984.

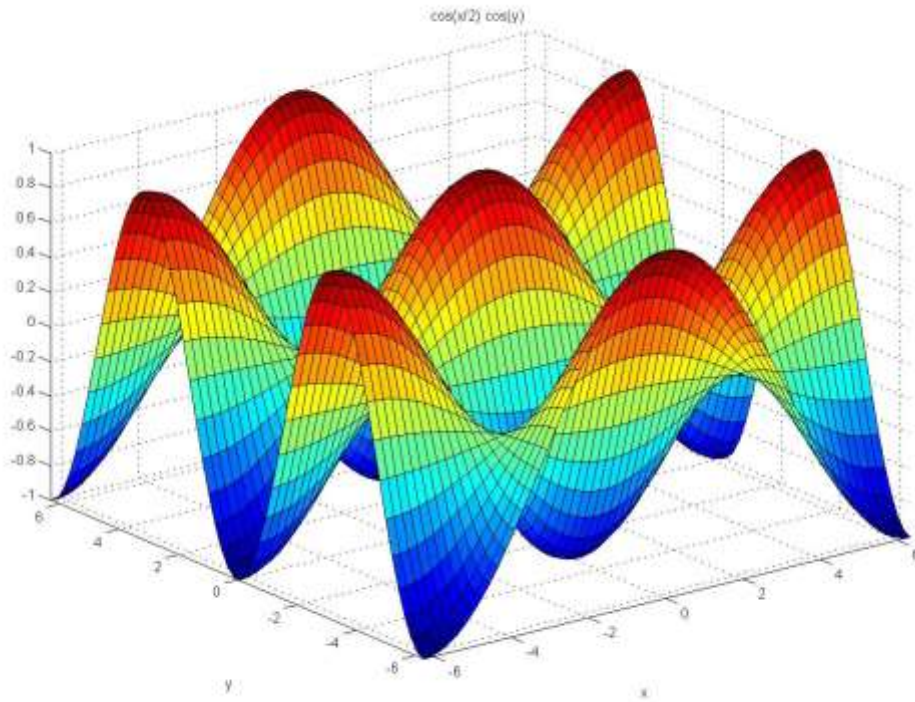
5. Χαρακτηρισμός τραχύτητας fractal επιφανειών μέσω οπισθοσκεδαζόμενων δεδομένων από ραντάρ συνθετικής απεικόνισης

5.1 Εισαγωγή

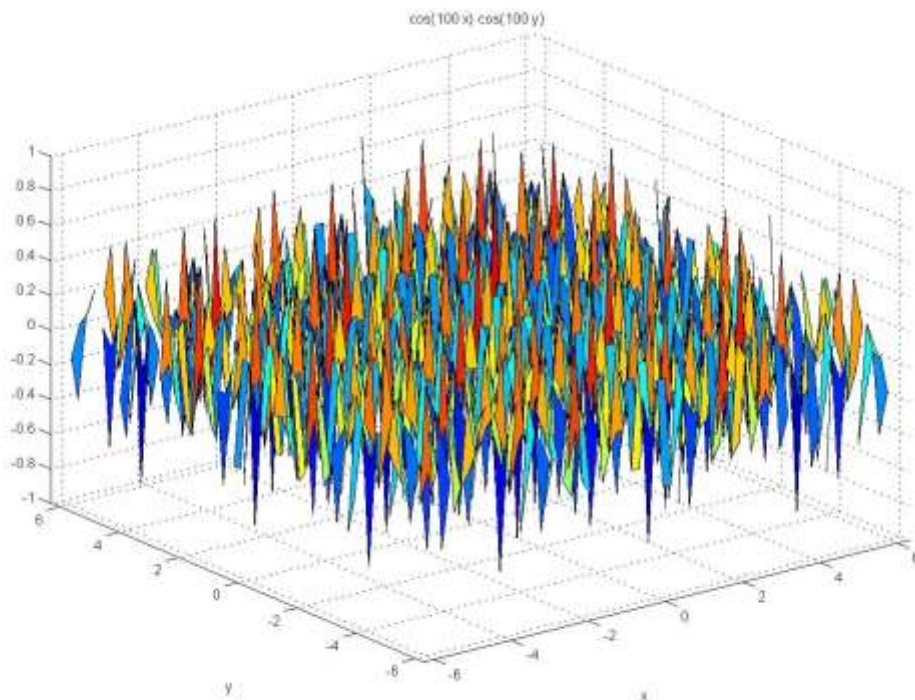
Το πρόβλημα της σκέδασης οπτικών, ηλεκτρομαγνητικών και ακουστικών κυμάτων από τραχείες επιφάνειες παρουσιάζει θεωρητικό και πρακτικό ενδιαφέρον για το χαρακτηρισμό των διαφόρων τύπων ανώμαλων επιφανειών όπως η επιφάνεια της θάλασσας ή του εδάφους. Συνήθως για τη μελέτη της σκέδασης χρησιμοποιούνται ντετερμινιστικές, περιοδικές συναρτήσεις ή ακόμα και τυχαίες συναρτήσεις ως μαθηματικά μοντέλα που περιγράφουν τις τραχείες επιφάνειες. Η fractal γεωμετρία αποτελεί ένα νέο εργαλείο για τη μοντελοποίηση επιφανειών με διαφορετική τραχύτητα. Μία fractal συνάρτηση λειτουργεί ως γέφυρα μεταξύ των ντετερμινιστικών, περιοδικών συναρτήσεων και των τυχαίων συναρτήσεων. Επιπλέον, οι παράγοντες που σχετίζονται με τη γεωμετρία του προβλήματος και με τα χαρακτηριστικά της σκέδασης, ελέγχονται από αντίστοιχους παράγοντες που σχετίζονται με τα fractal όπως για παράδειγμα είναι η fractal διάσταση (fractal dimension).

Η μαθηματική έννοια των fractals προέρχεται από το λεγόμενο πρόβλημα της ακτογραμμής (coastline problem), στο οποίο ζητείται να υπολογιστεί το μήκος μίας τραχείας ακτογραμμής. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα, το μήκος μιας ζητούμενης τραχείας ακτογραμμής υπολογίζεται μέσω μετρήσεων που γίνονται από ένα μέτρο σύγκρισης (yard-stick) μεταβαλλόμενου μήκους. Όπως είναι προφανές, όσο μειώνεται το μήκος του μέτρου σύγκρισης (yard-stick), τόσο περισσότερες λεπτομέρειες και λεπτές δομές της ακτογραμμής μπορούν να μετρηθούν και ως εκ τούτου η μετρούμενη περίμετρος ή μήκος της ακτογραμμής αυξάνεται. Προκειμένου για μία ιδανική καμπύλη Fractal το μετρούμενο μήκος της ακτογραμμής θα αυξανόταν χωρίς περιορισμό. Ο ρυθμός με τον οποίο η μετρούμενη περίμετρος αυξάνεται όσο μικραίνει το μήκος του μέτρου σύγκρισης (yard-stick), αποτελεί ποσοτική μέτρηση της τραχύτητας της ακτογραμμής και επομένως και της fractal διάστασης (fractal dimension) της ακτογραμμής. Για παράδειγμα, η fractal επιφάνεια που φαίνεται στο σχήμα 5.1 χαρακτηρίζεται από μικρότερη τιμή fractal διάστασης (fractal dimension) σε σχέση με την fractal επιφάνεια που φαίνεται στο σχήμα 5.2 καθώς είναι πιο λεία όπως είναι εμφανές.

Στο πρόβλημα της σκέδασης από fractal επιφάνειες, το μήκος κύματος του προσπίπτοντος κύματος (incident wave) λειτουργεί ως το μέτρο σύγκρισης (yard-stick) που ανιχνεύει την τραχύτητα των fractal επιφανειών καθώς η τιμή του μήκους κύματος ποικίλλει. Κατ' αυτό τον τρόπο, οι λεπτομέρειες της fractal επιφάνειας αποκαλύπτονται καθώς το μήκος κύματος μικραίνει.



Σχήμα 5.1: Λεία fractal επιφάνεια



Σχήμα 5.2: Τραχεία fractal επιφάνεια

Το πρόβλημα της σκέδασης από fractal επιφάνειες, περιλαμβάνει λύσεις από μη γραμμικές διαφορικές εξισώσεις. Εφόσον μία αναλυτική γενική λύση κλειστής μορφής των μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων δεν είναι δυνατό να βρεθεί με μαθηματικό τρόπο, είναι απαραίτητο να βρεθούν προσεγγιστικές λύσεις σύμφωνα με ορισμένα όρια. Η λύση Kirchhoff (Kirchhoff solution) χρησιμοποιείται όταν η τραχύτητα είναι ήπια στο επίπεδο του μήκους κύματος. Η λύση Kirchhoff (Kirchhoff solution) λαμβάνει υπόψη την ακριβή τραχύτητα της επιφάνειας με σκοπό να υπολογίσει τη σκέδαση, ενώ άλλες προσεγγιστικές μέθοδοι υπολογίζουν στατιστικά το μέσο όρο του σκεδαζόμενου πεδίου από την τραχεία επιφάνεια.

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή εξετάζεται η σκέδαση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από τραχείες επιφάνειες με τη χρήση της λύσης του Kirchhoff. Η προσεγγιστική λύση παρέχει τη φυσική εικόνα της σκέδασης και αποδίδει μια απλή σχέση μεταξύ των δεδομένων σκέδασης και της fractal διάστασης (fractal dimension). Αυτή η μέθοδος περιλαμβάνει μια απλουστευμένη βαθμωτή προσέγγιση που δεν λαμβάνει υπόψη την πόλωση [1-3].

5.2 Μοντέλο Fractal Επιφάνειας

Έστω μία fractal συνάρτηση $f_r(x)$ με μηδενική μέση τιμή. Αυτή η συνάρτηση θα χρησιμοποιηθεί για να μοντελοποιηθεί μία επιφάνεια με μονοδιάστατη τραχύτητα. Η συνάρτηση εμφανίζει το χαρακτηριστικό ενός fractal την αυτοομοιότητα. Η fractal διάσταση (fractal dimension) D της συνάρτησης $f_r(x)$, αποτελεί ένα μέτρο της τραχύτητας της επιφάνειας με εύρος από $D=1$ (λεία περιοδική συνάρτηση) έως $D=2$ (τραχεία καμπύλη). Η fractal συνάρτηση $f_r(x)$ εκφράζεται ως άθροισμα περιοδικών συναρτήσεων ως εξής [4]:

$$f_r(x) = \sigma C \sum_{n=0}^{N-1} (D-1)^n \sin(K_0 b^n x + \phi_n) \quad (5.1)$$

Όπου D ($1 < D < 2$) είναι η fractal διάσταση (fractal dimension) που εκφράζει την τραχύτητα της επιφάνειας [5], K_0 είναι ο θεμελιώδης κυματαριθμός (wave number), b ($b > 1$) είναι η παράμετρος κλιμάκωσης της χωρικής συχνότητας, ϕ_n είναι οι τυχαίες φάσεις και N είναι ο αριθμός των τόνων. Ο παράγοντας ελέγχου του πλάτους (amplitude control factor) θα είναι:

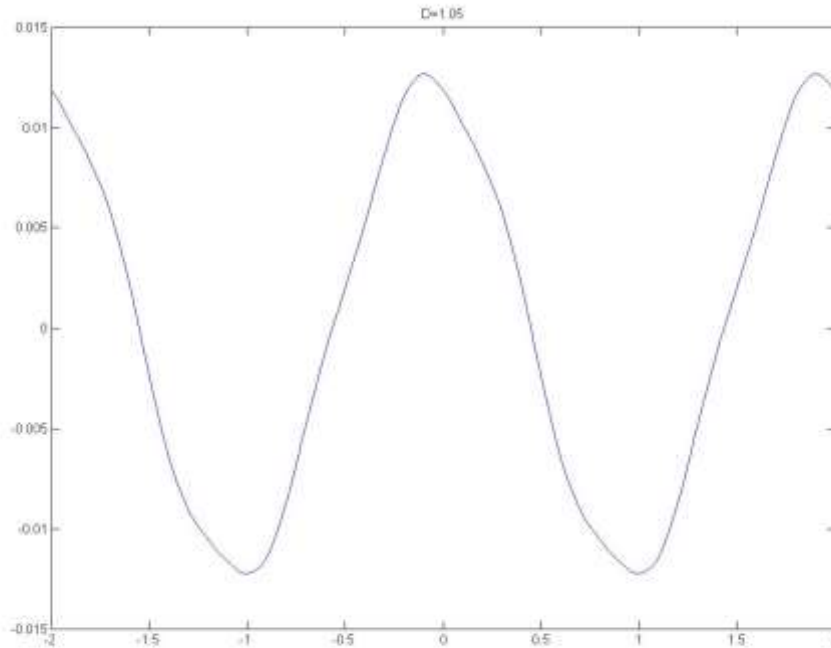
$$C = \left\{ \frac{2[1 - (D-1)^2]}{[1 - (D-1)^{2N}]} \right\}^{\frac{1}{2}} = \left\{ \frac{2D(2-D)}{[1 - (D-1)^{2N}]} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5.2)$$

Ο παράγοντας ελέγχου του πλάτους επιλέγεται έτσι ώστε να έχει τυπική απόκλιση (standard deviation, rms height) ίση με σ , ενώ η τιμή του b επιλέγεται έτσι ώστε η fractal συνάρτηση να είναι σχεδόν περιοδική. Σύμφωνα με την εξίσωση 5.1, οι περιοδικές συναρτήσεις αυξανόμενης συχνότητας μέσα στο άθροισμα παράγουν τα χαρακτηριστικά της fractal δομής [2]. Η αυτοομοιότητα της συνάρτησης που προκύπτει από την εξίσωση 5.1 αποδεικνύεται ότι ισχύει λόγω της παρακάτω σχέσης:

$$f_r(x) \approx \frac{1}{D-1} f_r(bx) \quad (5.3)$$

Η σχέση 5.3 καταδεικνύει ότι η παραγόμενη καμπύλη δείχνει όμοια με την αρχική όταν ο οριζόντιος άξονας κλιμακώνεται κατά b και ο κάθετος άξονας κατά $\frac{1}{D-1}$. Προφανώς είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν και άλλες περιοδικές συναρτήσεις όπως η συνάρτηση της εξίσωσης 5.1 για να αντικαταστήσουν την ημιτονοειδή συνάρτηση.

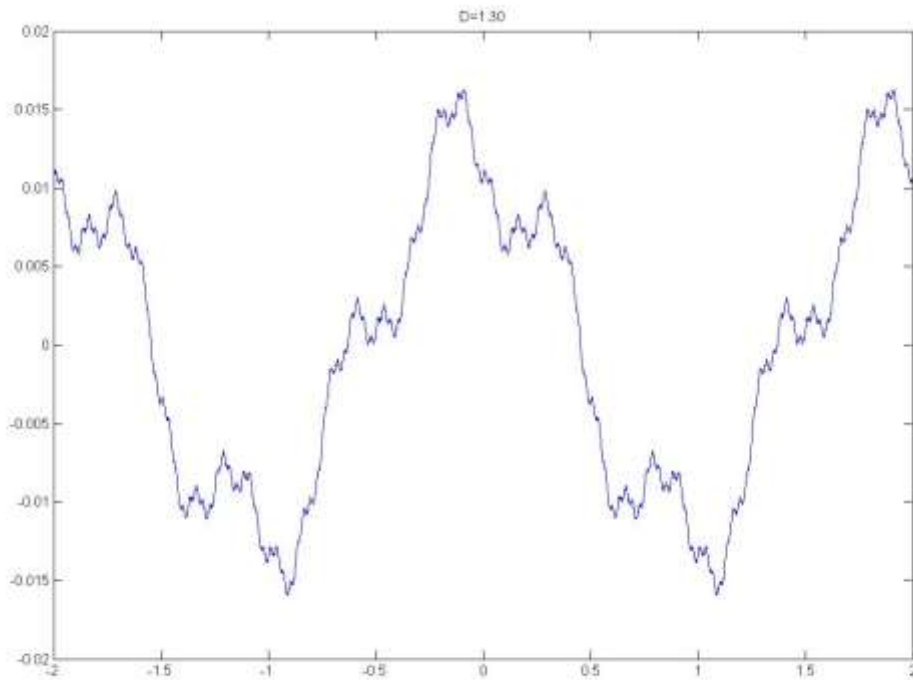
Ενδεικτικές γραφικές παραστάσεις fractal συναρτήσεων με διαφορετικές τιμές fractal διάστασης (fractal dimension) D ($D = 1.05, D = 1.50, D = 1.70, D = 1.80$), φαίνονται στα σχήματα 5.3-5.6 για σύνολο 6 τόνων ($N = 6$). Παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η τιμή της fractal διάστασης, αυξάνεται επίσης και η παρατηρούμενη τραχύτητα της επιφάνειας. Στις παραπάνω προσομοιώσεις τέθηκε $b = 1.8122$.



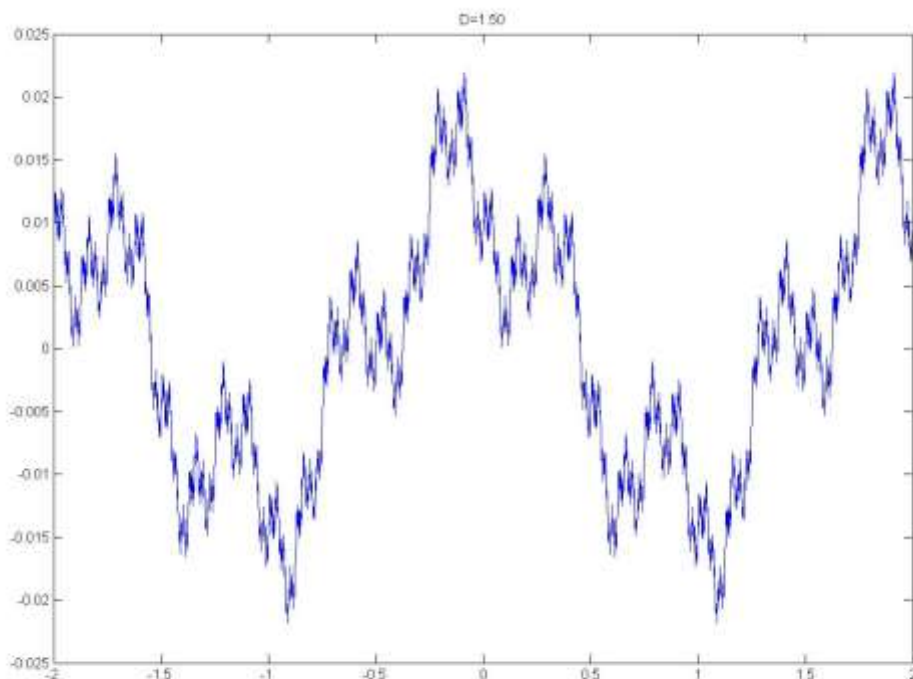
Σχήμα 5.3: Fractal επιφάνεια με $D = 1.05$

Το rms ύψος της fractal επιφάνειας ορίζεται ως σ . Η rms κλίση σ_s της fractal επιφάνειας είναι δυνατό να υπολογιστεί από την πρώτη παράγωγο της σχέσης 5.1. Το αποτέλεσμα είναι το ακόλουθο:

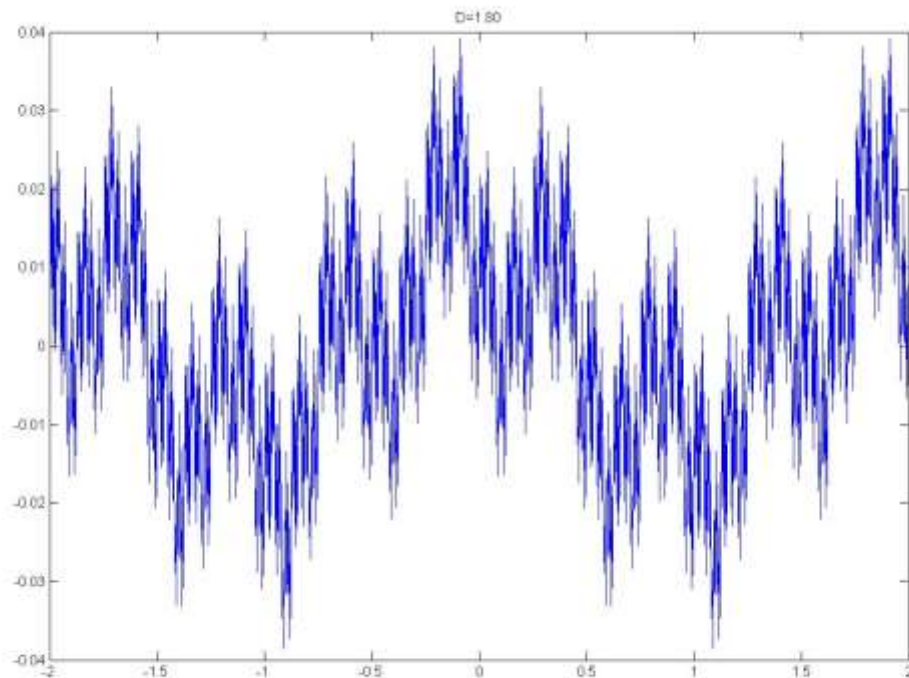
$$\sigma_s = K_0 \sigma \left\{ \frac{[1 - (D-1)^2]}{[1 - (D-1)^{2N}]}\right\}^{\frac{1}{2}} \left\{ \frac{[1 - b^{2N}(D-1)^2]}{[1 - b^2(D-1)^2]}\right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5.4)$$



Σχήμα 5.4: Fractal επιφάνεια με $D = 1.50$



Σχήμα 5.5: Fractal επιφάνεια με $D = 1.70$



Σχήμα 5.6: Fractal επιφάνεια με $D = 1.80$

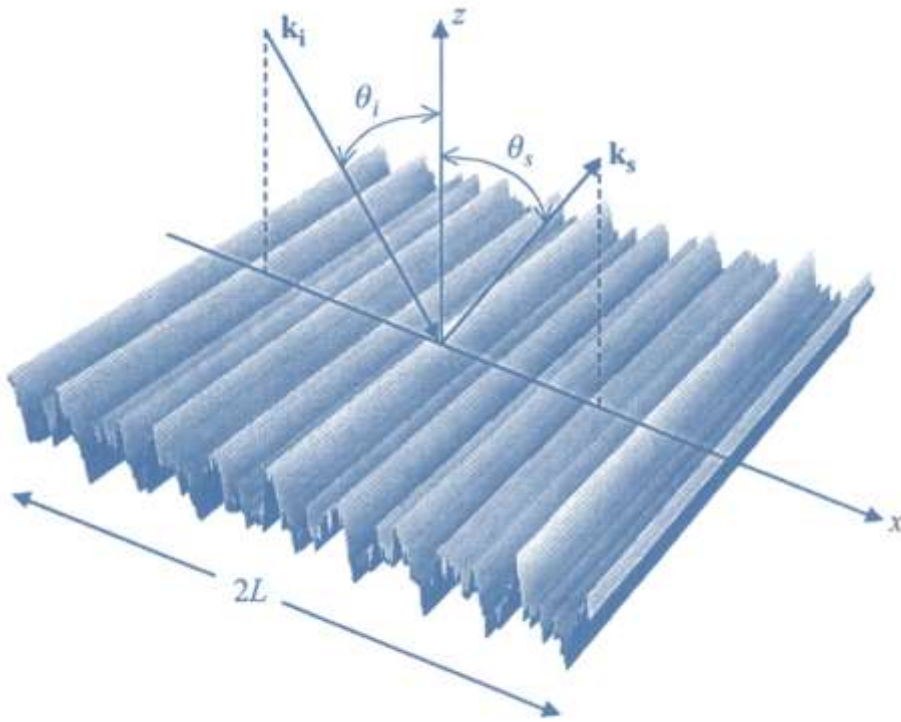
Συνοψίζοντας, η fractal συνάρτηση $f_r(x)$ περιλαμβάνει ένα πεπερασμένο αριθμό χωρικών συχνοτήτων. Η κατανομή φάσματος καθορίζεται από τις παραμέτρους K_0, b, N . Η τραχύτητα της fractal επιφάνειας ελέγχεται από τη fractal διάσταση D , ενώ το rms ύψος είναι σ . Επομένως η fractal επιφάνεια είναι δυνατό να καθοριστεί επακριβώς και να ελέγχεται από αυτές τις παραμέτρους. Πολλές φυσικές τραχείες επιφάνειες όπως η επιφάνεια της θάλασσας ή το έδαφος σε ένα βουνό, εμφανίζουν fractal χαρακτηριστικά. Η δυνατότητα ελέγχου που υπάρχει στο μοντέλο προσομοίωσης επιφανειών μέσω των παραπάνω παραμέτρων κάνει πολύ ρεαλιστική τη χρήση fractal για την προσομοίωση τραχέων επιφανειών [1], [2].

5.3 Μοντελοποίηση με βάση τη λύση Kirchhoff

Η λύση Kirchhoff χρησιμοποιείται για τη σκέδαση από τραχείες επιφάνειες και λαμβάνει υπόψη το ακριβές μέγεθος της τραχύτητας της εκάστοτε επιφάνειας για τον υπολογισμό του οπισθοσκεδαζόμενου (backscattered) σήματος. Οι τραχείες επιφάνειες στη λύση Kirchhoff θεωρούνται ως τοπικά επίπεδες με την υπόθεση ότι το μήκος κύματος του προσπίπτοντος κύματος είναι μικρό σε σχέση με την ακτίνα καμπυλότητας των επιφανειακών ανωμαλιών. Γι' αυτό το σκοπό, τα αποτελέσματα θα προκύψουν με προσομοίωση μικρών γωνιών έτσι ώστε να αποφευχθεί το πρόβλημα της σκίασης [6].

Έστω ένα επίπεδο ηλεκτρομαγνητικό κύμα, μοναδιαίου πλάτους το οποίο προσπίπτει σε μία μονοδιάστατη τραχεία επιφάνεια, η οποία χαρακτηρίζεται από τη

συνάρτηση fractal $f_r(x)$, η οποία εκτείνεται από $x = -L$ έως $x = L$ όπως φαίνεται στο σχήμα 5.7.



Σχήμα 5.7: Γεωμετρία του προβλήματος σκέδασης

Προκειμένου για μία τετράγωνη επιφάνεια, το σκεδαζόμενο πεδίο σε απόσταση R_0 από την προέλευση δίνεται σύμφωνα με τη λύση του Kirchhoff στο επίπεδο $x - z$ από την παρακάτω σχέση:

$$E_{sc} = \frac{ikL \exp(ikR_0)}{2\pi R_0} \int_{-L}^L (pf'_r - q) \exp[i\nu_x x + i\nu_z f_r(x)] dx \quad (5.5)$$

με:

$$p = (1 - R) \sin \theta_i + (1 + R) \sin \theta_s \quad (5.6)$$

$$q = (1 + R) \cos \theta_s - (1 - R) \cos \theta_i \quad (5.7)$$

$$\nu_x = k(\sin \theta_i - \sin \theta_s) \quad (5.8)$$

$$\nu_z = -k(\cos \theta_i + \cos \theta_s) \quad (5.9)$$

Όπου k είναι ο κυματαριθμός, R είναι ο συντελεστής ανάκλασης του εφαπτομενικού επιπέδου και θ_s είναι η διεύθυνση του παρατηρητή.

Για λόγους απλοποίησης των υπολογισμών, θεωρείται η περίπτωση της σκέδασης από μία τέλεια ανακλώμενη τραχεία επιφάνεια. Επομένως οι τιμές των σταθερών ανάκλασης Fresnel γίνονται:

$$R^+ = 1, R^- = -1 \quad (5.10)$$

Όπου οι εκθέτες + και - καταδεικνύουν την πόλωση των κυμάτων τα οποία είναι παράλληλα και κάθετα αντίστοιχα στο επίπεδο πρόσπτωσης [3].

Το σκεδαζόμενο πεδίο προκειμένου για οριζόντια πόλωση για μία λεία επιφάνεια στην κατοπτρική κατεύθυνση $\theta_i = \theta_s$ είναι:

$$E_{sc0} = \frac{i2kL^2 \exp(ikR_0) \cos \theta_i}{\pi R_0} \quad (5.11)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις 5.5 και 5.11 προκύπτει ο συντελεστής σκέδασης γ :

$$\gamma = \frac{E_{sc}}{E_{sc0}} = \frac{1}{4L \cos \theta_i} \times \left(\left(q + \frac{p v_x}{v_z} \right) \times \int_{-L}^L \exp[i v_x x + i v_z f_r(x)] dx - \left\{ \frac{ip}{v_z} \exp[i v_x x + i v_z f_r(x)] \right\}_{-L}^L \right) \quad (5.12)$$

Ο πρώτος όρος στην παρένθεση αποτελεί τον κύριο όρο που συμβάλλει στη διαδικασία της σκέδασης, ενώ ο δεύτερος όρος αντιπροσωπεύει την επίδραση λόγω των άκρων και μπορεί να θεωρηθεί αμελητέος όταν $L \gg \lambda$.

Ο συντελεστής σκέδασης (scattering coefficient) είναι δυνατό να εκφραστεί και με μία λύση κλειστής μορφής (closed – form solution), ως άθροισμα συναρτήσεων Bessel, όπως φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$\gamma^\pm = \pm \sec \theta_i \frac{1 + \cos(\theta_i + \theta_s)}{\cos \theta_i + \cos \theta_s} \times \sum_{m_1, m_2, \dots, m_{N-1} = -\infty}^{+\infty} \exp \left(i \sum_{n=0}^{N-1} m_n \phi_n \right) \times \prod_{n=0}^{N-1} J_{m_n} [C(D-1)^n v_z \sigma] \sin c \left[\left(v_x + K_0 \sum_{n=0}^{N-1} m_n b^n \right) L \right] \quad (5.13)$$

Τα πρόσημα + και - υποδηλώνουν την κάθετη και την παράλληλη πόλωση αντίστοιχα. Για τις προσομοιώσεις που παρουσιάζονται την παρούσα διδακτορική διατριβή, χρησιμοποιείται η εξίσωση 5.12. Ωστόσο, η εξίσωση 5.13 σε συνδυασμό με την εξίσωση 5.12 αποσαφηνίζουν το παρόν πρόβλημα σκέδασης και από φυσική άποψη.

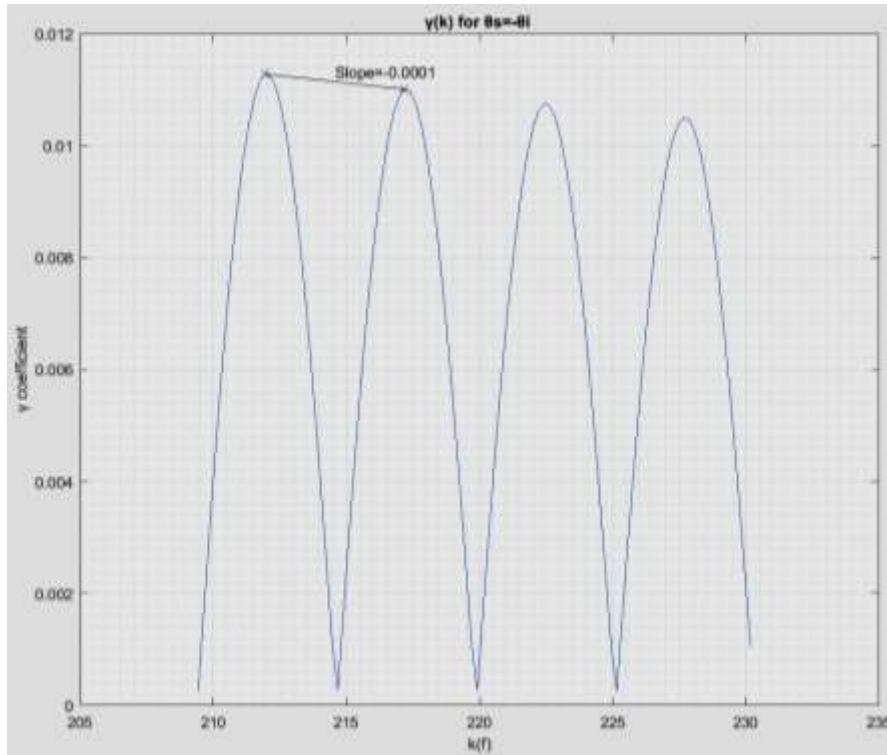
5.4 Αριθμητικά αποτελέσματα

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή, εξετάζεται η σκέδαση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (από ένα μονοστατικό ραντάρ) από επιφάνειες οι οποίες έχουν διαφορετικό επίπεδο τραχύτητας. Κάθε fractal επιφάνεια προσομοιώνεται από την εξίσωση 5.1 και η τραχύτητα ελέγχεται από τη fractal διάσταση D (fractal dimension). Για $D = 1.05$, η επιφάνεια είναι σχεδόν ημιτονοειδής και η τραχύτητα είναι αμελητέα. Προφανώς, όσο η παράμετρος της fractal διάστασης D αυξάνει, το ίδιο ισχύει και για την τραχύτητα της επιφάνειας.

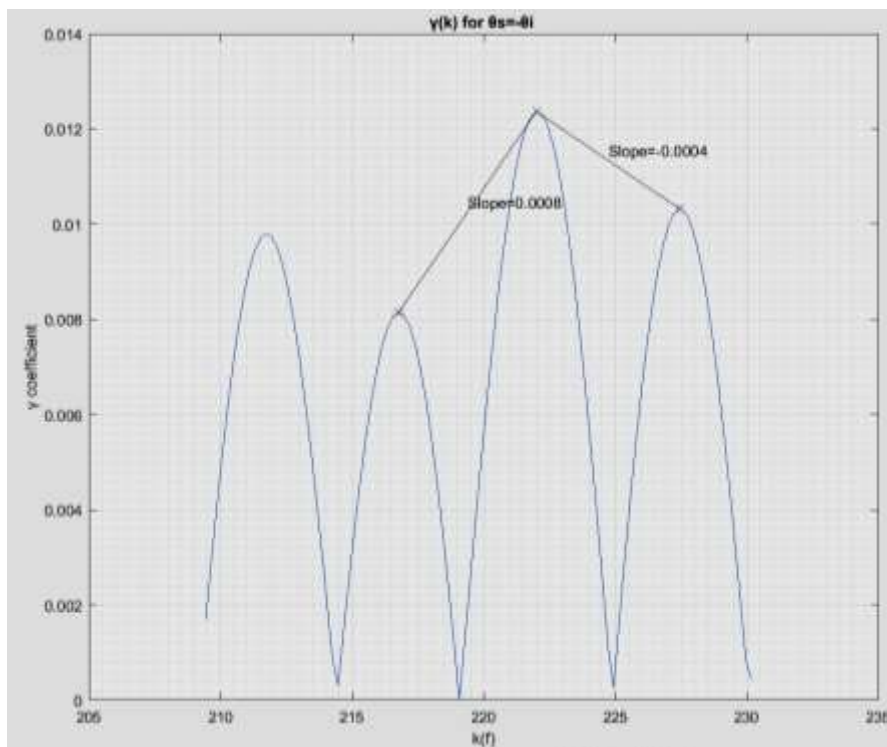
Στη διαδικασία της προσομοίωσης, ο συντελεστής σκέδασης γ υπολογίστηκε από την εξίσωση 5.12 για έναν αριθμό συχνοτήτων $f_m = f_o + (m - 1)\Delta f$, όπου $m = 1, 2, \dots, M$. Επιπλέον $f_o = 10 \text{ GHz}$ είναι η φέρουσα συχνότητα, $\Delta f = \frac{B}{m-1}$ είναι το βήμα της συχνότητας και B είναι το εύρος ζώνης του ραντάρ [7], [8]. Σε όλες τις προσομοιώσεις ισχύει $\theta_s = -\theta_i$ όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Στις γραφικές παραστάσεις που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια παριστάνεται η τιμή $|\gamma(k)|$ για γωνία πρόσπτωσης ίση με $\theta_i = 30^\circ$.

Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις είναι $B = 1 \text{ GHz}$ (εύρος ζώνης) και $M = 200$ (200 βήματα συχνοτήτων της εκπεμπόμενης κυματομορφής βηματικής συχνότητας). Όσον αφορά στην fractal επιφάνεια που προκύπτει από την προσομοίωση, η παράμετρος κλιμάκωσης της χωρικής συχνότητας τέθηκε ίση με $b = 1.8$, ενώ ο αριθμός των τόνων τέθηκε ίσος με $N = 6$ [1]. Επιπλέον, το ενεργό (rms) ύψος της επιφάνειας είναι ίσο με $\sigma = 0.005\lambda$, η παράμετρος $\Lambda_0 = 10\lambda = 0.3m$ και το «φωτιζόμενο» μήκος της τραχιάς επιφάνειας κατά μήκος της x-διεύθυνσης (μήκος μονοδιάστατης τραχιάς επιφάνειας (patch size)) επιλέχθηκε ίσο με $2L = 80\lambda$ (Σχήμα 5.7). Τέλος για όλες τις προσομοιώσεις ισχύουν: $2L \gg \Lambda_0$ και $k\sigma < 1$ [1]. Πρακτικά, το μήκος $2L$ είναι ανάλογο με το κάθετο εύρος δέσμης (beamwidth) του SAR ραντάρ, προκειμένου για μία πλατφόρμα SAR που κινείται στην κατεύθυνση y του σχήματος 5.7, όπως επίσης είναι ανάλογο και με την απόσταση R_0 μεταξύ του ραντάρ και του κέντρου της επιφάνειας.

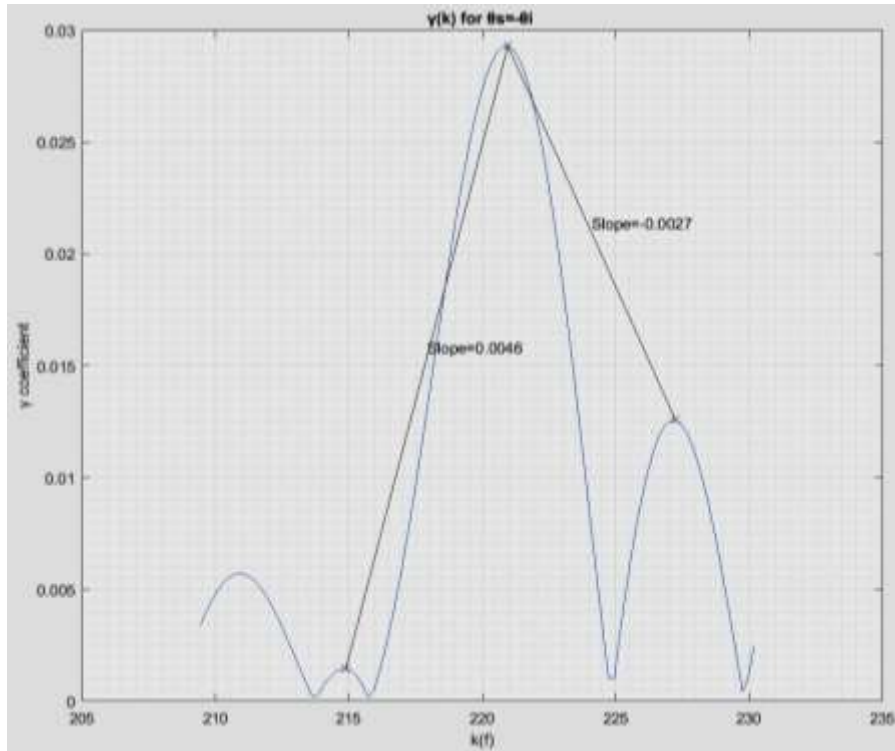
Στα σχήματα 5.8 έως 5.11 παρουσιάζεται η τιμή $|\gamma(k)|$ για γωνία πρόσπτωσης ίση με $\theta_i = 30^\circ$ ως προς τον κυματαριθμό $k = \frac{2\pi\Delta f}{c}$. Το εύρος ζώνης τέθηκε ίσο με $B = 1 \text{ GHz}$. Η τιμή της τραχύτητας της προσομοιούμενης fractal επιφάνειας (δηλαδή η fractal διάσταση, D) αυξάνεται ανά εικόνα, δηλαδή $D = 1.05$ (σχήμα 5.8), $D = 1.30$ (σχήμα 5.9), $D = 1.50$ (σχήμα 5.10) και $D = 1.70$ (σχήμα 5.11).



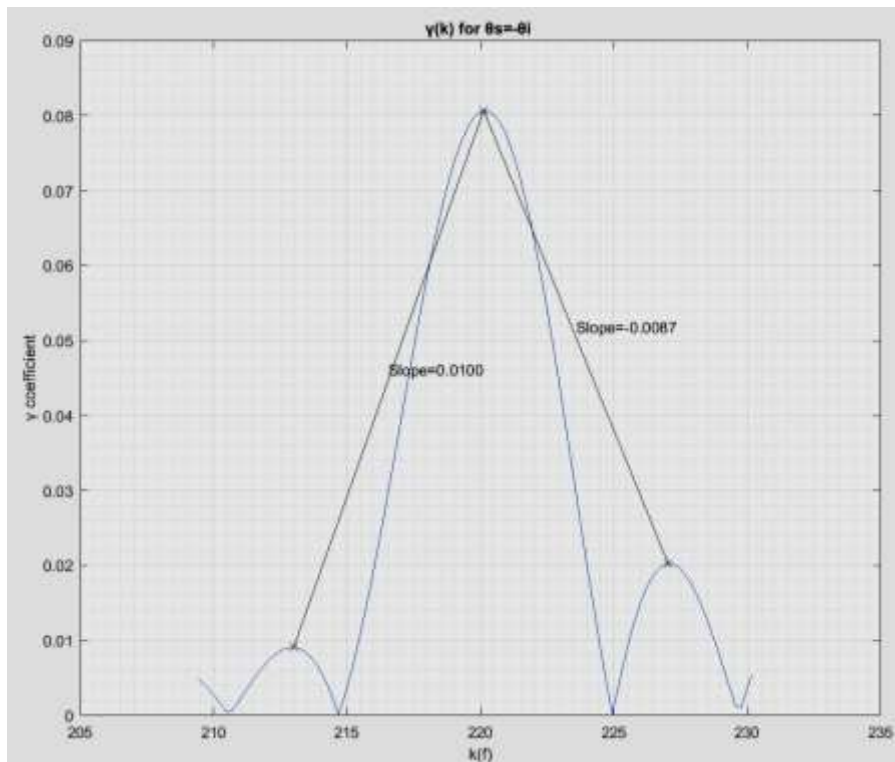
Σχήμα 5.8: Τιμή του συντελεστή οπισθοσκέδασης $|\gamma(k)|$ ως προς τον κυματαριθμό k για fractal διάσταση $D=1.05$



Σχήμα 5.9: Τιμή του συντελεστή οπισθοσκέδασης $|\gamma(k)|$ ως προς τον κυματαριθμό k για fractal διάσταση $D=1.30$



Σχήμα 5.10: Τιμή του συντελεστή οπισθοσκέδασης $|\gamma(k)|$ ως προς τον κυματαριθμό k για fractal διάσταση $D=1.50$



Σχήμα 5.11: Τιμή του συντελεστή οπισθοσκέδασης $|\gamma(k)|$ ως προς τον κυματαριθμό k για fractal διάσταση $D=1.70$

Παρατηρώντας τις γραφικές παραστάσεις στα σχήματα 5.8-5.11 προκύπτει το εξής συμπέρασμα. Καθώς αυξάνεται η τιμή της παραμέτρου της fractal διάστασης D , δηλαδή όσο αυξάνεται η τραχύτητα της fractal επιφάνειας, η κλίση που προκύπτει μεταξύ του κύριου λοβού και του πρώτου πλευρικού λοβού επίσης αυξάνεται. Όπως προκύπτει από το σχήμα 5.8 για μία προσεγγιστικά λεία επιφάνεια με fractal διάσταση $D=1.05$, η κλίση μεταξύ του κύριου λοβού και του πρώτου πλαϊνού λοβού είναι μικρή, ενώ αντίθετα καθώς η επιφάνεια γίνεται τραχύτερη στα σχήματα 5.9 – 5.11 καθώς αυξάνει δηλαδή η τιμή της fractal διάστασης D η κλίση μεταξύ του κύριου λοβού και του πρώτου πλαϊνού λοβού αυξάνεται.

Πράγματι, καθώς $D \rightarrow 1$ ($1 < D < 2$), αναμένεται η κλίση που παρατηρείται στα διαγράμματα να «ακολουθεί» την κλίση μιας συνάρτησης sinc ($\text{sinc}(x) = \frac{\sin(x)}{x}$)

όπως προκύπτει και από την εξίσωση 5.12. Αντιθέτως, καθώς η τιμή D αυξάνεται ($1 < D < 2$), αναμένονται μεγαλύτεροι λοβοί στη συνάρτηση $|\gamma(k)|$, λόγω της αυξημένης «τυχειότητας» της επιφάνειας (τουλάχιστον στην περίπτωση όπου το μήκος κύματος είναι συγκρίσιμο με την τραχύτητα της εξεταζόμενης επιφάνειας).

Επομένως η τραχύτητα της επιφάνειας είναι δυνατό να χαρακτηριστεί από το οπισθοσκεδαζόμενο σήμα που προέρχεται μόνο από μία ριπή συχνοτήτων του ραντάρ. Στον πίνακα 5.1 φαίνεται η σχέση μεταξύ της fractal διάστασης D και της κλίσης που προκύπτει μεταξύ του κύριου λοβού και του πρώτου πλευρικού λοβού.

Πίνακας 5-1: Σχέση μεταξύ της fractal διάστασης D και της κλίσης που προκύπτει μεταξύ του κύριου λοβού και του πρώτου πλευρικού λοβού

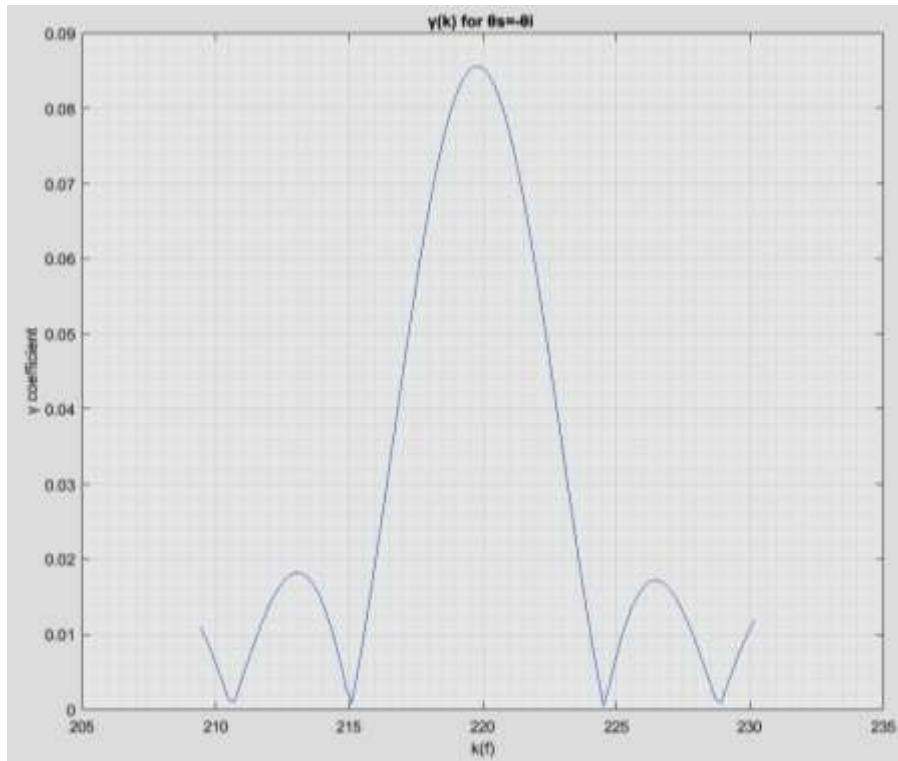
D	slope
1.05	0.0001
1.30	0.0008
1.50	0.0046
1.70	0.0100

Αν μειωθεί το εύρος ζώνης, τότε η πληροφορία που παρέχεται από το διάγραμμα του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος ως προς τον κυματαριθμό, δεν είναι πάντα αρκετή έτσι ώστε να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με την τραχύτητα της επιφάνειας. Ως αποτέλεσμα, το εύρος ζώνης στην προτεινόμενη μέθοδο χαρακτηρισμού της τραχύτητας μιας επιφάνειας με βάση τα οπισθοσκεδαζόμενα δεδομένα ραντάρ, πρέπει να είναι ικανοποιητικά μεγάλο (τουλάχιστον 5% της φέρουσας συχνότητας f_o) έτσι ώστε η πληροφορία που παρέχουν τα διαγράμματα των σχημάτων 5.8 έως 5.11 να είναι παρατηρήσιμη και μετρήσιμη.

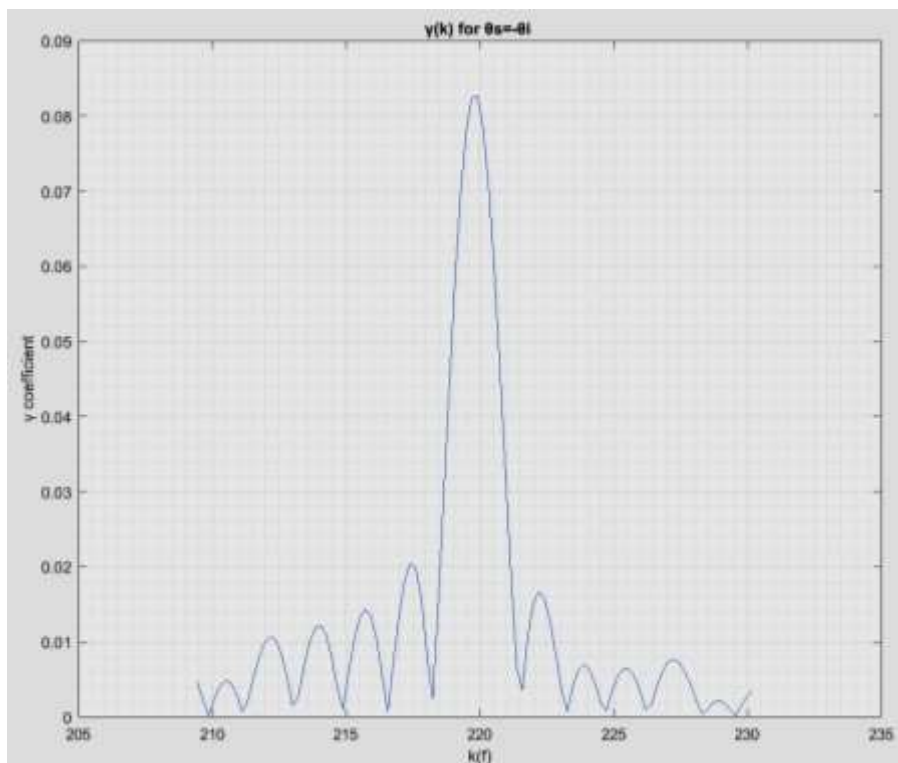
Ωστόσο, το πιθανό πρόβλημα του μικρού διαθέσιμου εύρους ζώνης σε πραγματικές μετρήσεις ραντάρ, μπορεί να αντισταθμιστεί και να επιλυθεί αν αυξηθεί αντίστοιχα το μήκος της επιφάνειας παρατήρησης (patch size) $2L$ [1], [9-10].

Στην επόμενη προσομοίωση, ο συντελεστής σκέδασης $|\gamma(k)|$ υπολογίστηκε για την ίδια τιμή της fractal διάστασης $D=1.70$ και για δύο διαφορετικές τιμές μήκους της μονοδιάστατης τραχείας επιφάνειας, δηλαδή $2L=40\lambda$ και $2L=120\lambda$. Οι υπόλοιποι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση παραμένουν

ίδιες με προηγούμενως. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα σχήματα 5.12 και 5.13.



Σχήμα 5.12: Τιμή του συντελεστή οπισθοσκέδασης $|\gamma(k)|$ ως προς τον κυματαριθμό k για fractal διάσταση $D=1.70$ και μήκος επιφάνειας $2L = 40\lambda$



Σχήμα 5.13: Τιμή του συντελεστή οπισθοσκέδασης $|\gamma(k)|$ ως προς τον κυματαριθμό k για fractal διάσταση $D=1.70$ και μήκος επιφάνειας $2L = 120\lambda$

Όπως προκύπτει από τα σχήματα 5.11 και 5.12, όσο μικρότερο είναι το μήκος της μονοδιάστατης τραχείας επιφάνειας τόσο λιγότερες πληροφορίες παρέχει σχετικά με την τραχύτητα της επιφάνειας. Σύμφωνα και με την εξίσωση 5.12 ο αριθμός των πλευρικών λοβών αυξάνεται καθώς αυξάνεται το μήκος της μονοδιάστατης τραχείας επιφάνειας $2L$. Όσο αυξάνεται το μήκος $2L$, τόσο πιο απότομοι γίνονται οι πλευρικοί λοβοί και ως αποτέλεσμα τα εξαγόμενα αποτελέσματα είναι πιο ξεκάθαρα και αξιόπιστα. Επιπλέον, το μήκος της μονοδιάστατης τραχείας επιφάνειας καθορίζει επίσης το εύρος της δέσμης του ραντάρ. Για μεγαλύτερο μήκος $2L$, παράγεται στενότερο εύρος δέσμης. Επομένως, το μήκος της μονοδιάστατης τραχείας επιφάνειας στην προτεινόμενη μέθοδο χαρακτηρισμού της τραχύτητας μιας επιφάνειας με βάση τα οπισθοσκεδαζόμενα δεδομένα ραντάρ, πρέπει να είναι ικανοποιητικά μεγάλο έτσι ώστε να είναι δυνατό να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά την τραχύτητα μιας επιφάνειας [11-12].

Τέλος, αν η γωνία πρόσπτωσης είναι ίση με $\theta_i \approx \frac{\pi}{2}$ (δηλαδή η πρόσπτωση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι σχεδόν παράλληλη στην τραχεία επιφάνεια), τότε από την εξίσωση 5.9 προκύπτει $U_z \approx 0$ και από την εξίσωση 5.11 φαίνεται ότι η προτεινόμενη μέθοδος δεν είναι εφαρμόσιμη σε αυτή την ειδική περίπτωση καθώς ο συντελεστής σκέδασης $|\gamma(k)|$ δεν είναι δυνατό να υπολογιστεί. Συμπερασματικά, ή προτεινόμενη μέθοδος χαρακτηρισμού της τραχύτητας επιφανειών, παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα για κατάλληλες τιμές εύρους ζώνης (bandwidth), μήκους της μονοδιάστατης τραχείας επιφάνειας (patch size) και γωνίας πρόσπτωσης (θ_i).

5.5 Συμπεράσματα

Στην ενότητα αυτή παρουσιάστηκε μία νέα προσέγγιση για τον χαρακτηρισμό της τραχύτητας fractal επιφανειών από οπισθοσκεδαζόμενα δεδομένα ραντάρ επαρκούς εύρους ζώνης. Όπως προέκυψε από τα διαγράμματα του συντελεστή οπισθοσκέδασης ως προς τον κυματαριθμό (συχνότητα) του προσπίπτοντος ηλεκτρομαγνητικού κύματος, καθώς αυξάνει η τραχύτητα της fractal επιφάνειας (καθώς αυξάνει η fractal διάσταση D), τότε η παρατηρούμενη κλίση μεταξύ του κεντρικού λοβού και του πρώτου πλευρικού λοβού επίσης αυξάνεται. Επιπλέον, η τιμή του διαθέσιμου εύρους ζώνης αποτελεί κρίσιμο παράγοντα και πρέπει να είναι ικανοποιητικά μεγάλη έτσι ώστε να μπορεί να γίνει σωστός χαρακτηρισμός της τραχύτητας της επιφάνειας. Επιπρόσθετα, μία πιθανή έλλειψη επαρκούς εύρους ζώνης για τον παραπάνω σκοπό, είναι δυνατό να αντισταθμιστεί με την αύξηση του μήκους της μονοδιάστατης τραχείας επιφάνειας $2L$ (patch size), η οποία προκύπτει με την αύξηση του εύρους δέσμης ή με την αύξηση του ύψους του φορέα του ραντάρ. Τέλος, με την προϋπόθεση ότι η γωνία πρόσπτωσης είναι σχετικά μικρή, η προτεινόμενη μέθοδος χαρακτηρισμού της τραχύτητας επιφανειών παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα.

Σχετικά με την μελλοντική έρευνα, τα θέματα που σχετίζονται είναι δυνατό να αφορούν: i) την προσομοίωση μίας τρισδιάστατης 3-D τραχείας fractal επιφάνειας και την εφαρμογή της μεθόδου σε αυτή, ii) τον χαρακτηρισμό της κατάστασης της επιφάνειας της θάλασσας (ήρεμη, ταραγμένη, κυματώδης κ.τ.λ.) με τη χρήση

πραγματικών δεδομένων SAR που προέρχονται από βηματικής συχνότητας χρησιμοποιούμενη SAR κυματομορφή.

5.6 Βιβλιογραφικές αναφορές

- [1] D. L. Jaggard, A.D. Jaggard, P. Frangos, *Fractal Electrodynamics: Surfaces and Superlattices*. IEEE Press, *Frontiers in Electromagnetics*, 2000, pp. 1-47.
- [2] P. Beckmann, A. Spizzichino, *The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces*, Artech House Radar Library, 1987.
- [3] D. L. Jaggard, X. Sun, “Scattering from fractally corrugated surfaces”, *Journal of the optical society of America*, Vol. 7, No 6, pp. 1131-1139, 1990.
- [4] E. Jakeman, *Scattering by Fractals*, “*Fractals in Physics*”, 1986, pp. 55-60.
- [5] A. Malamou, C. Pandis, P. Frangos, P. Stefaneas, A. Karakasiliotis, D. Kodokostas, “Application of the Modified Fractal Signature Method for Terrain Classification from Synthetic Aperture Radar Images”, *Electronics and Electrical Engineering Journal*, Vol. 20, No. 6, pp. 118 – 121, 2014.
- [6] M. F. Chen, A. K. Fung, “A numerical study of the regions of validity of the Kirchhoff and small perturbation rough surface scattering models”, *Radio Science*, Vol. 23, pp. 163 – 170, 1988.
- [7] A. Malamou, A. Karakasiliotis, E. Kallitsis, G. Bouladakis, P. Frangos, ‘Application of a Fully Automatic Autofocusing Algorithm for Post – Processing of Synthetic Aperture Radar Images based on Image Entropy Minimization’, *Electronics and Electrical Engineering Journal*, Vol. 19, No. 6, pp. 95 – 98, 2013.
- [8] F. Berizzi, E. Dalle Mese, G. Pinelli, “One dimensional fractal model of the sea surface”, *IEE Proc. Radar Sonar Navig.*, Vol. 46, No 1, pp. 55-64, 1999.
- [9] A.K. Sultan – Salem, G.L. Tyler, “Validity of the Kirchhoff approximation for electromagnetic wave scattering from fractal surfaces”, *IEEE Trans. Geosc. Rem. Sensing*, Vol. 42, No. 9, pp. 1860 – 1870, 2004.
- [10] N. Ampilova and I. Soloviev, “On digital image segmentation based on fractal and multifractal methods”, *CEMA’15 Conference Proceedings*, pp. 14-17, Sofia, Bulgaria, 2015.
- [11] S. Savaidis, P. Frangos, D. L. Jaggard and K. Hizanidis, “Scattering from fractally corrugated surfaces : an exact approach”, *Optics Letters*, Vol. 20, No. 23, pp. 2357-2359, 1995.
- [12] S. Savaidis, P. Frangos, D. L. Jaggard and K. Hizanidis, “Scattering from fractally corrugated surfaces using the extended boundary condition method”, *Journal of the Optical Society of America A*, Vol. 14, No. 2, pp. 475 - 485, 1997.

Γλωσσάριο – Αγγλοελληνικοί τεχνικοί όροι ραντάρ

Αγγλικοί Όροι	Ελληνικοί Όροι
Range	Απόσταση
Pulse Repetition Frequency	Συχνότητα Επανάληψης Παλμού
Maximum Unambiguous Range	Αναμφίβολη Μέγιστη Απόσταση
Range Detection	Ανίχνευση Απόστασης
Range Resolution	Ανάλυση Απόστασης
Cross Range Resolution	Ανάλυση Κάθετης Απόστασης
Coherent Processing Interval	Διάστημα Συμφασικής Επεξεργασίας
Phase Compensation	Αντιστάθμιση/Διόρθωση Φάσης
Aspect Angle / Azimuth Angle	Γωνία Θέασης
Pulse Repetition Interval	Περίοδος Επανάληψης Παλμού
Grazing Angle	Γωνία Πρόσπτωσης
Raw Data	Ακατέργαστα Δεδομένα
Range Profile	Προφίλ Απόστασης
Range Cell / Range Bin	Κελί Απόστασης
Square Resolution	Τετραγωνική Ανάλυση
Unfocused Coherent Processing Interval	Μη Εστιασμένο Συμφασικό Διάστημα Επεξεργασίας
Autofocusing	Αυτοεστίαση
Fractal Dimension	Fractal Διάσταση
Self - similarity	Αυτό-ομοιότητα
Topological Dimension	Τοπολογική Διάσταση
Blanket Technique	Τεχνική «Κουβέρτας»
Coastline Problem	Πρόβλημα Ακτογραμμής
Yard-stick	Μέτρο Σύγκρισης
Incident Wave	Προσπίπτον Κύμα
Wave Number	Κυματαριθμός
Scattering Coefficient	Συντελεστής Σκέδασης
Frequency Scaling Parameter	Παράμετρος Κλιμάκωσης Χωρικής Δυσχρότητας
Patch Size	Μήκος Μονοδιάστατης Τραχείας Επιφάνειας
Beamwidth	Εύρος Δέσμης