



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

**Χαρακτηρισμός Κατάστασης Θαλάσσης από  
Δεδομένα Οπισθοσκέδασης Αερομεταφερόμενου  
Ραντάρ SAR**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΤΟΥ

Γεώργιου Κ. Πουραΐμη

Αθήνα, Οκτώβριος 2020





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

# Χαρακτηρισμός Κατάστασης Θαλάσσης από Δεδομένα Οπισθοσκέδασης Αερομεταφερόμενου Ραντάρ SAR

## ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

του

Γεώργιου Κ. Πουραΐμη

Συμβουλευτική Επιτροπή: Παναγιώτης Φράγκος

Γεώργιος Φικιώρης

Αθανάσιος Παναγόπουλος

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την: 23 Οκτωβρίου 2020

.....  
Παναγιώτης Φράγκος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Γεώργιος Φικιώρης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Αθανάσιος Παναγόπουλος  
Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Κωνσταντίνα Νικήτα  
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....  
Συμεών Παπαβασιλείου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Ιωάννης Κούκος  
Καθηγητής Σ.Ν.Δ

.....  
Δημήτριος Φραντζεσκάκης  
Καθηγητής Ε.Κ.Π.Α

Αθήνα, Οκτώβριος 2020

.....

Γεώργιος Πουραΐμης

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

Copyright © Γεώργιος Πουραΐμης

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

# Περίληψη

Η υφιστάμενη διδακτορική διατριβή είναι μία επισκόπηση και κριτική ανάλυση της υφιστάμενης γνώσης που υπάρχει αναφορικά με τον χαρακτηρισμό της κατάστασης θαλάσσης από δεδομένα οπισθοσκέδασης ραντάρ. Συγκεκριμένα, για την διερεύνηση του χαρακτηρισμού της κατάστασης θαλάσσης δημιουργήθηκαν τρισδιάστατες fractal θαλάσσιες επιφάνειες με την χρήση των μαθηματικών μοντέλων ενώ στη συνέχεια εξετάστηκαν η σκέδαση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από τραχιές fractal επιφάνειες, χρησιμοποιώντας την προσέγγιση του Kirchhoff. Οι επιφάνειες που εξετάστηκαν είναι τραχιές fractal θαλάσσιες επιφάνειες τριών διαστάσεων. Οι τρισδιάστατες επιφάνειες μοντελοποιήθηκαν με μαθηματικές δισδιάστατες συναρτήσεις.

Η έρευνα στην συνέχεια επεκτάθηκε στον προσδιορισμό της κατάστασης θαλάσσης με πραγματικά δεδομένα οπισθοσκέδασης από ένα ραντάρ PicoSAR X ενός ελικοπτέρου από την ομάδα εργασίας SET-185. Αρχικά η μελέτη εστίασε στην σκέδαση ήρεμης και ταραχώδης θαλάσσιας επιφάνειας στο πεδίο του χρόνου. Στην συνέχεια βελτιστοποιήθηκε με απαλοιφή του θορύβου και μελετήθηκε στο πεδίο της συχνότητας.

Στο πλαίσιο εκπόνησης της διατριβής έγινε μία ανασκόπηση της βιβλιογραφίας χρονολογικά έτσι ώστε να μπορεί να αντιληφθεί ο αναγνώστης την πορεία της εξέλιξης της έρευνας της σκέδασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε τραχιά επιφάνεια.

Για την κατασκευή του μοντέλου μίας τραχιάς επιφάνειας χρησιμοποιούνται ντετερμινιστικές συναρτήσεις. Η θεωρία των fractals αποτελεί μια εναλλακτική επιλογή για την μοντελοποίηση των επιφανειών με διαφορετική τραχύτητα. Οι fractal συναρτήσεις δίνουν επιφάνειες όμοιες με τις πραγματικές επιφάνειες που συναντώνται στην φύση. Επίσης, μέσω μίας τέτοιας συνάρτησης και των παραμέτρων της, φερειπείν της διάστασης fractal (fractal dimension) ή και του μήκους fractal (fractal length), μπορεί να καθοριστεί με σχετική ακρίβεια η τραχύτητα της επιφάνειας.

Η έρευνα συνεχίστηκε με την μοντελοποίηση των τρισδιάστατων τραχιών fractal επιφανειών που δίνεται από την δισδιάστατη ευρυζωνική συνάρτηση Weierstrass Η εν λόγω συνάρτηση είναι ένας συνδυασμός διακριτών περιοδικών και τυχαίων παραμέτρων.

Στην συνέχεια, η μοντελοποίηση της σκεδάζουσας θαλάσσιας επιφάνειας έγινε με την χρήση πραγματικών δεδομένων που προήλθαν από ανάλυση της οπισθοσκέδασης ενός ραντάρ συνθετικού παραθύρου. Τα δεδομένα συλλέχθηκαν από την ομάδα εργασίας SET-185 στην δοκιμή NEMO 2014 που πραγματοποιήθηκε στο Taranto της Ιταλίας το

Σεπτέμβριο του 2014. Το ραντάρ που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένα PicoSAR X το οποίο ήταν τοποθετημένο σε ένα ελικόπτερο.

Στην συνέχεια για τον υπολογισμό του σκεδαζόμενου πεδίου από μία τραχιά επιφάνεια χρησιμοποιήθηκε η προσέγγιση του Kirchhoff στην οποία λαμβάνεται υπόψη η ακριβής τραχύτητα της επιφάνειας που παράχθηκε με την προσομοίωση και παρατέθηκαν αντιπροσωπευτικές παραχθείσες προσομοιώσεις του συντελεστή σκέδασης από τρισδιάστατες fractal επιφάνειες για διάφορες τιμές της fractal διάστασης  $D$ . Εξετάστηκε η σχέση μεταξύ της διάστασης fractal  $D$  και της υπολογιζόμενης μέσης κλίσης μεταξύ του κύριου λοβού και των πρώτων πλευρικών λοβών εκατέρωθεν αυτού του οπισθοσκεδαζόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Στην συνέχεια, για να γίνει φανερή η σχέση μεταξύ της διάστασης fractal  $D$  της τραχιάς επιφάνειας και του συντελεστή οπισθοσκέδασης  $|\gamma(k)|$ , πραγματοποιείται ένας υπολογισμός του συντελεστή  $|\gamma(k)|$  για διαφορετικές τιμές διάστασης fractal  $D$ .

Υπολογίστηκαν τα “διαστήματα προβλέψεων” για την υπολογιζόμενη απόκλιση  $D_{calc}$  από τις “φασματικές κλίσεις” του συντελεστή σκέδασης. Οι τιμές των “διαστημάτων προβλέψεων” αντιστοιχούν σε 90% “πιθανότητα εμφάνισης”. Επομένως, τα ανωτέρω αποτελέσματα δείχνουν ότι η προτεινόμενη μέθοδος είναι αρκετά αξιόπιστη σε ότι αφορά το χαρακτηρισμό μιας τρισδιάστατης τραχιάς fractal επιφάνειας από τα σκεδαζόμενα ηλεκτρομαγνητικά κύματα του ραντάρ.

Στο τελευταίο μέρος της διατριβής η έρευνα επικεντρώθηκε στον χαρακτηρισμό της κατάστασης θαλάσσης. Χρησιμοποιήθηκαν συνολικά τέσσερα κριτήρια, τα δύο κριτήρια βασίζονται στις fractal ιδιότητες που παρουσιάζει η θαλάσσια επιφάνεια και τα άλλα δύο κριτήρια επαληθεύουν τα δύο καινοτόμα κριτήρια fractal. Τα τέσσερα κριτήρια εφαρμόστηκαν σε πειραματικές μονοδιάστατες υπογραφές ραντάρ συνθετικού παραθύρου (SAR) στο φάσμα της συχνότητας (πραγματικά δεδομένα ραντάρ θαλάσσιου κυματισμού), σε δύο διαφορετικές θαλάσσιες καταστάσεις (ταραγμένη και ήρεμη θάλασσα). Τα τέσσερα κριτήρια εφαρμόστηκαν σε κανονικοποιημένα δεδομένα του μέσου σήματος οπισθοσκέδασης από την επιφάνεια της θάλασσας, από τα οποία τα κριτήρια που αφορούν την θεωρία των fractals είναι το κριτήριο της διάστασης fractal και το κριτήριο του μήκους fractal, ενώ για την επαλήθευση των προαναφερθέντων κριτηρίων χρησιμοποιήθηκαν το κριτήριο της διακύμανσης  $\sigma^2$  και το κριτήριο ελαχίστων τετραγώνων ισχύος. Στα κριτήρια διάστασης fractal και μήκους fractal χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος κουβέρτας (blanket method) έτσι όπως αναπτύχθηκε από τον Peleg.

## Λέξεις κλειδιά

Χαρακτηρισμός κατάστασης θαλάσσης, τραχιά επιφάνεια, θαλάσσια επιφάνεια, fractal, σκέδαση, οπισθοσκέδαση, ραντάρ συνθετικού παραθύρου, διάσταση fractal, μήκος fractal.

# Abstract

This dissertation is an overview and critical analysis of the existing knowledge regarding the characterization of the sea state from backscattering radar data. Specifically, it is a further research of the characterization of the sea state using virtual data simulations, mathematical models and application of techniques to real backscattered data from airborne synthetic aperture radar.

In particular, in order to investigate the characterization of the sea state, three-dimensional fractal sea surfaces were created using mathematical models, while scattering of electromagnetic waves from rough fractal surfaces was examined, using the Kirchhoff approach. The surfaces examined are rough fractal sea surfaces of three dimensions. Three-dimensional surfaces were modeled with mathematical two-dimensional functions.

The research was then extended to determine the state of the sea with real backscattering data from a PicoSAR X radar of a helicopter from the SET-185 working group. The study originally focused on the calm and turbulent sea surface scattering in the field of time. It was then optimized by noise cancelling and studied in the frequency domain.

Within elaborating this dissertation an annotated bibliography was made chronologically so that the reader can understand the evolution of the backscattering research of electromagnetic scattering on a rough surface.

Deterministic functions are used to construct the model of a fractal surface. The fractals theory is an alternative option for modeling surfaces with different roughness. Fractal functions give surfaces similar to real surfaces found in nature. Also, through such a function and its parameters, such as the fractal dimension or the fractal length, the roughness of the surface can be determined with relative accuracy.

Then, the scattering sea surface modeling was developed using real data derived from a backscatter analysis of a synthetic window radar. The data were collected by the SET-185 working group in the NEMO 2014 test conducted in Taranto, Italy in September 2014. The radar used was a PicoSAR X mounted on a helicopter.

Modeling the surfaces, the dissertation continued with the modeling of scattering of a two-dimensional rough surface with the Kirchhoff approach. Nonlinear differential equations were used to calculate the scattering of fractal surfaces.

Completing the modeling of both rough surfaces and scattering, the dissertation continued with the study of the characterization of the roughness of a three-dimensional surface. Initially, the geometry of the 3D problem was briefly described.

Then, to calculate the scattering field from a rough surface, Kirchhoff's approach was used, which takes into account the exact roughness of the surface produced by the simulation and presented representative generated scattering simulations from three-dimensional fractal surfaces for different values of  $D$ .

The "prediction intervals" for the calculated  $D_{\text{calc}}$  deviation from the "spectral slopes" of the scattering coefficient were calculated. The values of the "prediction intervals" correspond to 90% "probability of occurrence". Therefore, the above results show that the proposed method is quite reliable in terms of characterizing a three-dimensional rough fractal surface by scattered radar electromagnetic waves.

In the last part of the dissertation the research focused on the characterization of the sea situation. A sum of four criteria were used, the two criteria are based on the fractal properties of the sea surface and the other two criteria verify the two innovative fractal criteria. The four criteria were applied to experimental one-dimensional synthetic aperture radar (SAR) signatures in the frequency domain (actual sea wave radar data), in two different sea states (turbulent and calm sea).

The four criteria were applied to normalized data of the mean backscattering entertainment signal from the sea surface, of which the criteria for the theory of fractals are the criterion of the fractal dimension and the criterion of fractal length, while for the verification of the above criteria the criterion of variance  $\sigma^2$  and the criterion of power least squares approximation were used. The blanket method was used in the fractal dimension and fractal length criteria as developed by Peleg [13].

## **Keywords**

Sea state characterization, three dimensional rough surface, fractal, backscattering electromagnetic waves, raw data, synthetic aperture radar, fractal dimension, fractal length.



# Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Παναγιώτη Φράγκο για την πολύχρονη συνεργασία μας, για την εμπιστοσύνη του και την καθοδήγησή του στην διάρκεια της διδακτορικής μου έρευνας.

Επιπροσθετα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Υποψήφιο Διδάκτορα Ε.Μ.Π κ. Αποστόλη Κοτοπούλη, για την πολύτιμη συνεργασία μας στην διάρκεια της έρευνας μας στο χαρακτηρισμό τρισδιάστατης τραχιάς fractal επιφάνειας.



# Περιεχόμενα

Περίληψη.....	i
Λέξεις κλειδιά .....	ii
Abstract .....	iii
Keywords .....	iii
Ευχαριστίες.....	v
Περιεχόμενα.....	vii
Κατάλογος Εικόνων .....	xi
Κατάλογος Σχημάτων .....	xiii
Κατάλογος Πινάκων.....	xv
Γλωσσάριο Τεχνικών Όρων.....	xvii
Κεφάλαιο 1.....	1
Εισαγωγή .....	1
1.1 Σκοπός της διατριβής.....	1
1.2 Μεθοδολογία παρούσας έρευνας .....	2
1.3 Ανασκόπηση βιβλιογραφίας.....	4
Κεφάλαιο 2 .....	15
Μοντελοποίηση Επιφάνειας Σκέδασης .....	15
2.1 Μοντελοποίηση σκεδάζουσας τρισδιάστατης επιφάνειας.....	15
2.2 Μοντελοποίηση σκεδάζουσας θαλάσσιας επιφάνειας.....	19
Κεφάλαιο 3 .....	24
Μοντελοποίηση Σκέδασης Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων από Τραχιές Επιφάνειες.....	24
3.1 Μοντελοποίηση σκέδασης δισδιάστατης τραχιάς επιφάνειας με προσέγγιση Kirchhoff.....	24
3.2 Υπολογισμός εξίσωσης γενικής λύσης Kirchhoff για σκέδαση.....	25
3.3 Μοντελοποίηση σκέδασης τρισδιάστατης τραχιάς επιφάνειας με προσέγγιση Kirchhoff.....	33
Κεφάλαιο 4.....	36
Χαρακτηρισμός Τραχύτητας Τρισδιάστατης Επιφάνειας Δεδομένων Οπισθοσκέδασης Ραντάρ .....	36
4.1 Εισαγωγή .....	36
4.2 Μαθηματική διατύπωση .....	37
4.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης .....	42

4.4	Συμπεράσματα .....	48
	Κεφάλαιο 5 .....	51
	Χαρακτηρισμός Κατάστασης Θαλάσσης Πειραματικών Δεδομένων Ραντάρ SAR.....	51
5.1	Εισαγωγή .....	51
5.2	Περιγραφή προβλήματος .....	52
5.3	Χαρακτηρισμός τραχύτητας επιφάνειας με την μέθοδο Blanket .....	55
5.4	Κριτήρια χαρακτηρισμού θαλάσσιας επιφάνειας .....	59
5.5	Συμπεράσματα .....	69
	Κεφάλαιο 6 .....	71
	Συμπεράσματα- Μελλοντικές Επεκτάσεις.....	71
6.1	Ανακεφαλαίωση.....	71
6.2	Μελλοντικές επεκτάσεις.....	79
6.3	Summary .....	80
	Παράρτημα Α .....	87
	Θεωρία Συστημάτων Ραντάρ .....	87
A.1	Εισαγωγή στα συστήματα Ραντάρ.....	87
A.2	Αρχές Λειτουργίας .....	89
A.3	Πομπός .....	103
A.4	Ταλαντωτής .....	104
A.5	Ενισχυτής.....	105
A.6	Δέκτης .....	106
A.7	Ολοκλήρωση παλμών.....	108
A.8	Ραδιοδιατομή στόχου.....	109
A.9	Ανίχνευση στόχων.....	111
	Παράρτημα Β.....	115
	Ραντάρ Συνθετικού Παραθύρου (Synthetic Aperture Radar, SAR).....	115
B.1	Βασικές αρχές .....	115
B.2	Γεωμετρία ραντάρ SAR .....	117
B.3	Επιχειρησιακή λειτουργία.....	120
B.4	Εστιασμένες και μη-εστιασμένες κεραιές.....	123
B.5	Κυματομορφές εκπομπής .....	124
B.6	Επεξεργαστής σήματος .....	128
B.7	Διακριβωτική ικανότητα .....	129
B.8	Σηματοθορυβικός λόγος .....	130

Παράρτημα Γ.....	133
Εισαγωγή στις "Fractal Επιφάνειες".....	133
Γ.1 Αυτοομοιότητα - Δομή fractal .....	133
Γ.2 Διάσταση fractal .....	135
Γ.3 Fractals και ηλεκτρομαγνητικά κύματα.....	137
Βιβλιογραφία.....	139



# Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Απεικονίσεις διδιάστατης συνάρτησης fractal $f(x, y)$ για διάφορες τιμές διάστασης fractal και $b=1.80$ .....	16
Εικόνα 2: Απεικόνιση fractal συνάρτησης $W(x,y)$ για $b=1.1$ .....	17
Εικόνα 3: Απεικόνιση fractal συνάρτησης $W(x,y)$ για $b=3$ .....	18
Εικόνα 4: Απεικόνιση fractal συνάρτησης $W(x,y)$ για $D=2.6$ , $b=1.8$ και $N=[1,5,10]$ .....	18
Εικόνα 5: Πλάτος σήματος ραντάρ σε ταραγμένη (άνω σχήμα) και ήρεμη (κάτω σχήμα) θαλάσσια επιφάνεια .....	21
Εικόνα 6: Φασματική ισχύς σήματος ραντάρ σε ταραγμένη και λεία θαλάσσια επιφάνεια .....	21
Εικόνα 7: Γεωμετρία προβλήματος τραχιάς επιφάνειας.....	24
Εικόνα 8: Απεικονίσεις fractal συνάρτησης $f(x,y)$ για διαφορετικές τιμές της fractal διάστασης.....	39
Εικόνα 9: Απεικόνιση σκέδασης με συντελεστή σκέδασης $\gamma$ συνάρτηση γωνιών σκέδασης $\theta_2$ , $\theta_3$ και $\theta_1 = 30^\circ$ από τραχιές επιφάνειες με fractal διάσταση, $D = [2.10, 2.50, 2.90]$ .....	41
Εικόνα 10: Μέγεθος του συντελεστή οπισθοσκέδασης $ \gamma(k) $ ως συνάρτηση του κυματαριθμού $k$ , για τιμές διάσταση fractal $D = [2.05, 2.55, 2.85]$ .....	44
Εικόνα 11: Μέση κλίση του συντελεστή σκέδασης $ \gamma(k) $ έναντι της τιμής της fractal διάστασης $D$ .....	46
Εικόνα 12: Τιμές της διάσταση fractal $D$ σε σχέση με τον υπολογισμό της κλίσης του συντελεστή σκέδασης $ \gamma(k) $ .....	47
Εικόνα 13: Προφίλ απόστασης PicoSAR για γωνία πρόσπτωσης $\theta_g=20$ για ταραγμένη και λεία θαλάσσια επιφάνεια στο πεδίο του χρόνου .....	53
Εικόνα 14: Προφίλ απόστασης PicoSAR για γωνία πρόσπτωσης $\theta_g=20$ για ταραγμένη και λεία θαλάσσια επιφάνεια στο πεδίο της συχνότητας .....	54
Εικόνα 15: Μονοδιάστατη (1D) συνάρτηση και “άνω” και “κάτω” καμπύλες για κλίμακα $\delta=2$ .....	56
Εικόνα 16: Fractal μήκος $L(\delta)$ ως συνάρτηση της ανάλυσης $\delta$ σε λογαριθμική για μονοδιάστατη (1D) καμπύλη .....	57
Εικόνα 17: Τρισδιάστατη (3D) επιφάνεια και άνω και κάτω επιφάνειες με κουβέρτα πάχους $2\delta$ .....	58
Εικόνα 18: Μονοδιάστατο “προφίλ απόστασης” (range profile), για ταραγμένη (άνω σχήμα) και ήρεμη (κάτω σχήμα) θαλάσσια επιφάνεια, καθώς και άνω - κάτω καμπύλες “blanket”, για $\delta=4$ .....	59
Εικόνα 19: Διάσταση Fractal συναρτήσει του $\delta$ για γωνίες πρόσπτωσης $10^\circ$ και $25^\circ$ .....	60
Εικόνα 20: Διάσταση Fractal για γωνίες πρόσπτωσης $5^\circ$ , $15^\circ$ , $20^\circ$ , $30^\circ$ και $35^\circ$ .....	61
Εικόνα 21: Διάσταση Fractal συναρτήσει του $\delta$ για γωνία πρόσπτωσης $37.4^\circ$ .....	62
Εικόνα 22: Μήκος Fractal συναρτήσει του $\delta$ για γωνίες πρόσπτωσης $10^\circ$ και $25^\circ$ .....	63
Εικόνα 23: Μονοδιάστατο “προφίλ απόστασης” (range profile) και άνω - κάτω καμπύλες “blanket”, για $\delta=2$ .....	64
Εικόνα 24: Μήκος Fractal για γωνίες πρόσπτωσης $5^\circ$ , $15^\circ$ , $20^\circ$ , $30^\circ$ και $35^\circ$ .....	65
Εικόνα 25: Μήκος Fractal συναρτήσει του $\delta$ για γωνία πρόσπτωσης $39.5^\circ$ .....	66
Εικόνα 26: Φάσμα ισχύος σήματος και κλίση ευθείας ελαχίστων τετραγώνων.....	68
Εικόνα 27: Στατιστική αυτο-ομοιότητα fractal δομής σε διαφορετική κλίμακα.....	134
Εικόνα 28: Ακριβής αυτο-ομοιότητα fractal δομής.....	134





# Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: Μεθοδολογία της έρευνας .....	3
Σχήμα 2: Γεωμετρία διεξαγωγής του πειράματος.....	20
Σχήμα 3: Γεωμετρία προβλήματος σκέδασης επί μονοδιάστατης επιφάνειας.....	25
Σχήμα 4: Το σκεδαζόμενο πεδίο στο σημείο P .....	27
Σχήμα 5: Μεγάλη καμπυλότητα συγκρινόμενη με το μήκος κύματος, $\theta$ ) αιχμηρά σημεία .....	28
Σχήμα 6: Γεωμετρία σκέδασης, τοπική γωνία $\theta$ .....	29
Σχήμα 7: Γεωμετρία προβλήματος σκέδασης επί τρισδιάστατης επιφάνειας.....	34
Σχήμα 8: Κατηγορίες Ραντάρ ανάλογα την κυματομορφή .....	88
Σχήμα 9: Διάταξη Παλμικού Συστήματος Ραντάρ .....	89
Σχήμα 10: Τύποι απεικόνισης εικόνας.....	89
Σχήμα 11: Αρχή Λειτουργίας Παλμικού Ραντάρ.....	90
Σχήμα 12: Κυματομορφή Εκπομπής.....	92
Σχήμα 13: Σήμα Διαμόρφωσης Συχνότητας .....	95
Σχήμα 14: Χρόνος εκπομπής και λήψης ενός παλμού.....	96
Σχήμα 15: Πολικό διάγραμμα.....	97
Σχήμα 16: Βασικοί τύποι κεραιών .....	98
Σχήμα 17: Κατακόρυφο διάγραμμα ακτινοβολίας.....	98
Σχήμα 18: Εξίσωση Ραντάρ και Μικροκυματικές Απώλειες.....	102
Σχήμα 19: Θόρυβος Περιβάλλοντος .....	102
Σχήμα 20: Σχηματικό Διάγραμμα Πομπού.....	104
Σχήμα 21: Κύκλωμα ενισχυτή και κυματομορφής .....	105
Σχήμα 22: Είδη παραμόρφωσης κύματος .....	106
Σχήμα 23: Σχηματικό Διάγραμμα Δέκτη .....	107
Σχήμα 24: Τυπικό Διάγραμμα Δέκτη .....	108
Σχήμα 25: Ραδιοδιατομή διαφόρων στόχων .....	109
Σχήμα 26: Ράδιοδιατομή σφαίρας .....	111
Σχήμα 27: Ραδιοδιατομή Αεροσκάφους (S-band, $\lambda=10\text{cm}$ ).....	111
Σχήμα 28: Ανίχνευση στόχου με κατώφλι εντοπισμού .....	113
Σχήμα 29: Κατανομή Περιβάλλοντος σήματος και θορύβου .....	113
Σχήμα 30: Συνθετική απεικόνιση.....	116
Σχήμα 31: Θεμελιώδης Γεωμετρία Συνθετικού Παραθύρου .....	117
Σχήμα 32: Βασική Γεωμετρία SAR .....	118
Σχήμα 33: Γεωμετρία Ραντάρ Πλευρικής Απεικόνισης.....	119
Σχήμα 34: Έρευνα Λωρίδας (Strip) .....	121
Σχήμα 35: Έρευνα Σάρωσης Δέσμης Doppler (Doppler Beam Sharpening).....	121
Σχήμα 36: Έρευνα Φωτοδέσμης (Spotlight) .....	122
Σχήμα 37: Έρευνα Πολλαπλής Σάρωσης (Scansar).....	123
Σχήμα 38: μη-Εστιασμένη και Εστιασμένη Κεραία.....	123
Σχήμα 39: Γραμμική διαμόρφωση συχνότητας - LFM .....	124
Σχήμα 40: Μονοδιάστατος Συγκριτής .....	125
Σχήμα 41: Τρισδιάστατος Συγκριτής.....	126
Σχήμα 42: Διακριθωτικές ικανότητες .....	126
Σχήμα 43: Κυματομορφή βηματικής συχνότητας - SF .....	127
Σχήμα 44: Επεξεργαστής Ραντάρ Συνθετικού Παραθύρου.....	128



# Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Κατάσταση Θαλάσσης και Σύστημα Μέτρησης .....	19
Πίνακας 2: Παράμετροι προσομοίωσης .....	43
Πίνακας 3: Σχέση μεταξύ της διάστασης fractal $D$ και της υπολογιζόμενης κλίσης μεταξύ του κύριου και του πρώτου πλευρικού λοβού .....	44
Πίνακας 4: Εκτίμηση της $D_{CALC} = \alpha \text{ slope}^b + c$ .....	47
Πίνακας 5: $D_{CALC}$ Διάστημα Πρόβλεψης που Χρησιμοποιεί τα Όρια Πρόβλεψης.....	48
Πίνακας 6: Δείκτης κατάστασης θαλάσσης SSI διάστασης fractal.....	62
Πίνακας 7: Δείκτης κατάστασης θαλάσσης SSI μήκους fractal.....	66
Πίνακας 8: Τιμές διακύμανσης για διαφορετικές καταστάσεις θαλάσσης και γωνίες πρόσπτωσης .....	67
Πίνακας 9: Κλίση ευθείας ελαχίστων τετραγώνων φάσματος ισχύος για διαφορετικές καταστάσεις θαλάσσης και γωνίες πρόσπτωσης .....	69
Πίνακας 10: Κατηγορίες Ραντάρ ανά χρήση λειτουργίας .....	88
Πίνακας 11: Εμβέλεια συναρτήσει των χαρακτηριστικών του ραντάρ.....	93
Πίνακας 12: Χρήση λειτουργίας ανά ζώνη συχνότητων.....	103
Πίνακας 13: Συχνότητες Λειτουργίας Ραντάρ .....	103
Πίνακας 14: Ραδιοδιατομή απλών ηλεκτρικά αγώγιμων αντικειμένων .....	110
Πίνακας 15: Σύγκριση Διακριθωτικής Ικανότητας κατά Απόσταση και κατά Διόπτυση.....	130



# Γλωσσάριο Τεχνικών Όρων

<i>Blanket Method</i>	Μέθοδος Κουβέρτας
<i>Edge Effect</i>	Φαινόμενου Άκρου
<i>Fractal Brown Motion - fBm</i>	Μορφοκλασματική Κίνηση Brown
<i>Fractal Dimension</i>	Μορφοκλασματική Διάσταση
<i>Fractal Geometry</i>	Μορφοκλασματική Γεωμετρία
<i>Fractal Length</i>	Μορφοκλασματικό Μήκος
<i>Fractal Self-Similarity</i>	Μορφοκλασματική Αυτό-Ομοιότητα
<i>Grazing Angle</i>	Γωνία Πρόσπτωσης (ως προς την επιφάνεια)
<i>Incident Angle</i>	Γωνία Πρόσπτωσης
<i>Least Square Approximation – LSA</i>	Προσέγγιση Ελαχίστων Τετραγώνων
<i>Looking Angle</i>	Γωνία Παρατήρησης
<i>Physical Optics</i>	Φυσική Οπτική
<i>Power Spectral Density – PSD</i>	Πυκνότητα Φάσματος Ισχύος
<i>Probability Density Function – PDF</i>	Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας
<i>RADio Detection And Ranging - RADAR</i>	Συσκευή Ραδιοεντοπισμού
<i>Range Profile</i>	Προφίλ Απόστασης
<i>Resolution</i>	Διακριβωτική Ικανότητα
<i>Sea State</i>	Κατάσταση Θαλάσσης
<i>Specular Component</i>	Συνιστώσα Κατοπτρισμού
<i>Swell</i>	Αποθαλασσία
<i>Synthetic Aperture Radar – SAR</i>	Ραντάρ Συνθετικού Παραθύρου



# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

### 1.1 Σκοπός της διατριβής

Ο σκοπός της υφιστάμενης διδακτορικής διατριβής είναι αφενός η επισκόπηση και κριτική ανάλυση της υφιστάμενης γνώσης που υπάρχει αναφορικά με τον χαρακτηρισμό της κατάστασης θαλάσσης από δεδομένα οπισθοσκέδασης ραντάρ, αφετέρου η περαιτέρω διερεύνηση του χαρακτηρισμού της κατάστασης θαλάσσης με την βοήθεια προσομοιώσεων αρχικά εικονικών δεδομένων και στην συνέχεια με την χρήση πραγματικών δεδομένων.

Η περιγραφή και ερμηνεία της μελέτης αφορούν δεδομένα οπισθοσκέδασης από αερομεταφερόμενο ραντάρ συνθετικής απεικόνισης. Έτσι, καταβλήθηκε μία προσπάθεια για την δημιουργία νέων θεωρητικών και μεθοδολογικών προσεγγίσεων, τεχνικών, και άλλων καινοτομιών στη διερευνώμενη επιστημονική περιοχή.

Αρχικά, με την βοήθεια των μαθηματικών δημιουργήθηκαν τρισδιάστατες fractal θαλάσσιες επιφάνειες για την διερεύνηση του χαρακτηρισμού της κατάστασης θαλάσσης. Στην συνέχεια, εξετάστηκε η σκέδαση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ενός μονοστατικού ραντάρ από τραχιές fractal επιφάνειες, χρησιμοποιώντας την προσέγγιση του Kirchhoff.

Οι επιφάνειες που εξετάζονται είναι τριών διαστάσεων τραχιές fractal θαλάσσιες επιφάνειες. Οι τρισδιάστατες επιφάνειες μοντελοποιήθηκαν με μαθηματικές δισδιάστατες συναρτήσεις. Η μοντελοποίηση και ανάλυση της μελέτης της σκέδασης από τραχιές fractal επιφάνειες έγινε με την βοήθεια λογισμικού προσομοίωσης και μοντελοποίησης Matlab. Η εν λόγω μελέτη όπως φαίνεται και από την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας είναι συνέχεια μία έρευνας που μελετάται από τα μέσα της δεκαετίας του 1960, αλλά μελετήθηκε πιο εντατικά από την δεκαετία του 1980 και ύστερα.

Έπειτα, χρησιμοποιήθηκαν πραγματικά δεδομένα οπισθοσκέδασης της επιφάνειας της θάλασσας από ραντάρ συνθετικής απεικόνισης για την επαλήθευση των θεωρητικών δεδομένων και για την δημιουργία περεταίρω συμπερασμάτων.

Στο τελευταίο μέρος της διατριβής η έρευνα επικεντρώθηκε στον χαρακτηρισμό της κατάστασης θαλάσσης. Χρησιμοποιήθηκαν συνολικά τέσσερα κριτήρια, τα δύο κριτήρια βασίζονται στις fractal ιδιότητες που παρουσιάζει η θαλάσσια επιφάνεια και τα άλλα δύο κριτήρια επαληθεύουν τα δύο καινοτόμα κριτήρια fractal. Τα τέσσερα κριτήρια εφαρμόστηκαν σε πειραματικές μονοδιάστατες υπογραφές ραντάρ συνθετικού παραθύρου (SAR) στο φάσμα της συχνότητας (πραγματικά δεδομένα ραντάρ θαλάσσιου κυματισμού), σε δύο διαφορετικές θαλάσσιες καταστάσεις (ταραγμένη και ήρεμη θάλασσα).

Τα τέσσερα κριτήρια εφαρμόστηκαν σε κανονικοποιημένα δεδομένα του μέσου σήματος οπισθοσκέδασης από την επιφάνεια της θάλασσας, από τα οποία τα κριτήρια που αφορούν την θεωρία των fractals είναι το κριτήριο της διάστασης fractal και το κριτήριο του μήκους fractal, ενώ για την επαλήθευση των προαναφερθέντων κριτηρίων χρησιμοποιήθηκαν το κριτήριο της διακύμανσης  $\sigma^2$  και το κριτήριο ελαχίστων τετραγώνων ισχύος. Στα κριτήρια διάστασης fractal και μήκους fractal χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος κουβέρτας (blanket method) έτσι όπως αναπτύχθηκε από τον S. Peleg.

Η βασική ιδέα σχετικά με τις προτεινόμενες τεχνικές της διακύμανσης, των ελαχίστων τετραγώνων ισχύος, της διάστασης fractal και του μήκους fractal είναι ότι, τα προφίλ απόστασης του ραντάρ που αντιστοιχούν σε διαφορετικές καταστάσεις θαλάσσης, παρουσιάζουν διαφορετικές τιμές της διακύμανσης, του φάσματος ισχύος, της διάστασης fractal και του μήκους fractal. Παρατηρήθηκε ότι όσο πιο κυματώδεις είναι η θάλασσα τόσο μεγαλύτερη είναι η διακύμανση, το φάσμα ισχύος, η διάσταση fractal και το μήκος fractal του σήματος οπισθοσκέδασης στο πεδίο της συχνότητας και αυτό από φυσικής άποψης οφείλεται στην “ανώμαλη συμπεριφορά” των προφίλ απόστασης.

Επειδή, προκύπτουν πρακτικά ερωτήματα για τον χαρακτηρισμό ενός σήματος που ενσωματώνει θόρυβο, για να αντιμετωπιστεί η ύπαρξη του θορύβου στο σήμα, αρχικά εφαρμόστηκε η μέθοδος υπολογισμού του μέσου όρου των προφίλ απόστασης (averaging) για την απαλοιφή του θορύβου και στη συνέχεια, τα δεδομένα κανονικοποιήθηκαν στην κλίμακα από 0 έως 1 (normalizing) και το παραγόμενο σήμα οπισθοσκέδασης μετασχηματίστηκε στην περιοχή της συχνότητας.

## **1.2 Μεθοδολογία παρούσας έρευνας**

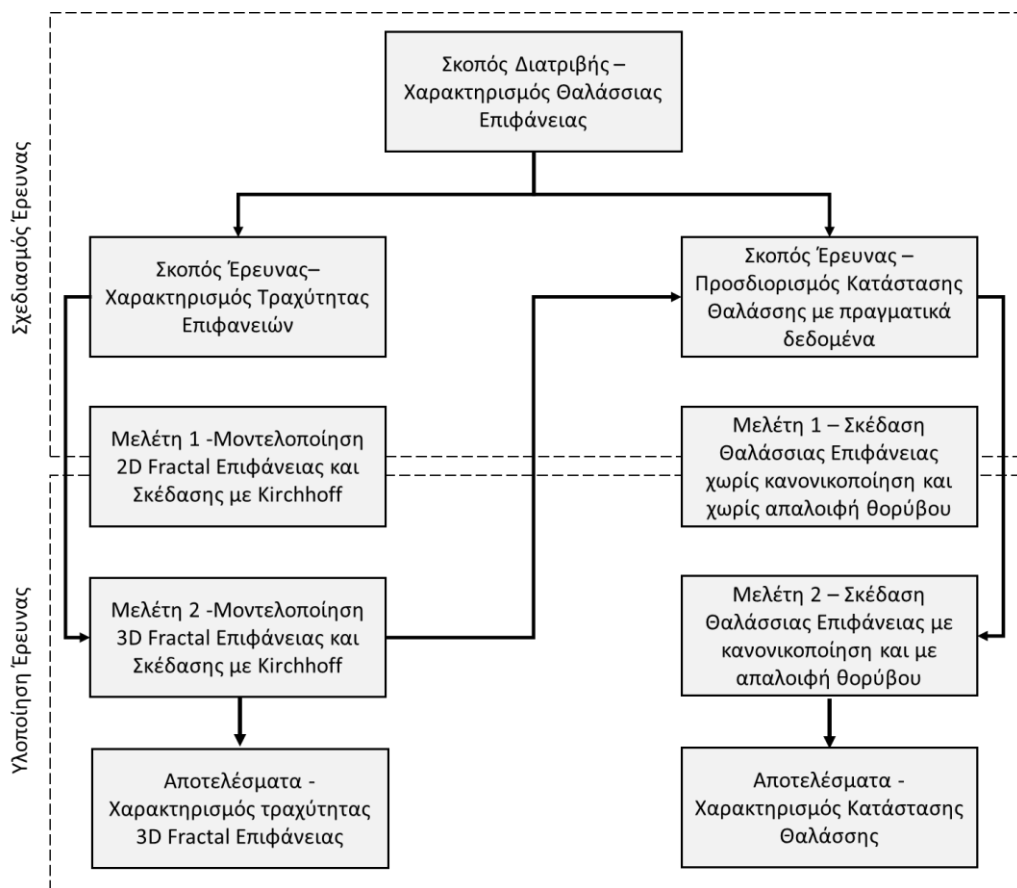
Η παρούσα διατριβή έχει σκοπό την μελέτη καινοτόμων τρόπων χαρακτηρισμού επιφανειών και πιο συγκεκριμένα της επιφάνειας της θάλασσας για διάφορες



καταστάσεις θαλάσσης (ήτοι της τραχύτητας της θαλάσσιας επιφάνειας). Ανωτέρω διατριβή σχεδιάστηκε να διερευνήσει δύο προβλήματα, τον χαρακτηρισμό της τραχύτητας επιφανειών και τον προσδιορισμό της κατάστασης θαλάσσης.

Ο χαρακτηρισμός της τραχύτητας επιφανειών αρχικά προσεγγίστηκε από τους Kotroulis και Rougaimis et al. [1], [2] στην μοντελοποίηση και σκέδαση μίας δισδιάστατης fractal επιφάνειας με την βοήθεια της προσέγγισης του Kirchhoff. Η επιφάνεια επιλέχθηκε να είναι fractal καθώς η θεωρία των fractals παρατηρήθηκε ότι προσομοίωνε ικανοποιητικά την θαλάσσια επιφάνεια [3]. Στην συνέχεια, μοντελοποιήθηκε μίας τρισδιάστατη fractal επιφάνεια και μελετήθηκε η οπισθοσκέδαση από αυτήν με την βοήθεια και πάλι της προσέγγισης του Kirchhoff.

Η μεθοδολογία της έρευνας φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 1: Μεθοδολογία της έρευνας

Η εξαγωγή αποτελεσμάτων από την μοντελοποίηση τόσο της τραχιάς επιφάνειας όσο και της σκέδασης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από αυτήν οδήγησε στην ανάγκη διερεύνησης της επιφάνειας που προέρχεται από πραγματικά δεδομένα ραντάρ. Για το λόγο αυτό η έρευνα επεκτάθηκε στον προσδιορισμό της κατάστασης θαλάσσης με πραγματικά δεδομένα που προέρχονται από τη δοκιμή "NEMO 2014" που πραγματοποιήθηκε στο Taranto της Ιταλίας, χρησιμοποιώντας

ένα ραντάρ PicoSAR X το οποίο το οποίο το έφερε ένα ελικόπτερο από την ομάδα εργασίας SET-185. Αρχικά η μελέτη εστίασε στην σκέδαση ήρεμης και ταραχώδης θαλάσσιας επιφάνειας στο πεδίο του χρόνου [4]. Στην συνέχεια βελτιστοποιήθηκε με απαλοιφή του θορύβου και μελετήθηκε στο πεδίο της συχνότητας [5].

Στην παρούσα διατριβή εξετάζονται ο χαρακτηρισμός τρισδιάστατων θαλάσσιων επιφανειών αφού πρώτα μοντελοποιήθηκαν ως fractal επιφάνειες και διερευνήθηκε η οπισθοσκέδαση του προσπίπτοντος κύματος με την βοήθεια της προσέγγισης του Kirchhoff. Στην συνέχεια εξετάζεται η σκέδαση από πραγματική θαλάσσια επιφάνεια με κανονικοποιημένα τα δεδομένα οπισθοσκέδασης με περεταίρω διερεύνηση στην απαλοιφή του θορύβου από το οπισθοσκεδαζόμενο κύμα.

### 1.3 Ανασκόπηση βιβλιογραφίας

Το πρόβλημα σκέδασης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από τυχαία τραχιά επιφάνεια μελετήθηκε ευρέως λόγω της άμεσης σχέσης που είχε τόσο στην τηλεπισκόπηση όσο και στις επικοινωνίες. Τα τελευταία χρόνια βασιζόμενοι στην γεωμετρία των fractals έχει αποδειχθεί ότι η μελέτη της τραχύτητας επιφανειών στην φύση μπορεί να γίνει με την βοήθεια των fractals. Με αποτέλεσμα να έχουν διατυπωθεί μοντέλα fractal επιφανειών που περιγράφουν ικανοποιητικά το πρόβλημα σκέδασης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στις επιφάνειες αυτές.

Στο πλαίσιο εκπόνησης της διατριβής κρίνεται σκόπιμο να γίνει μία ανασκόπηση της βιβλιογραφίας χρονολογικά έτσι ώστε να μπορεί να αντιληφθεί ο αναγνώστης την πορεία της εξέλιξης της έρευνας της σκέδασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε τραχιά επιφάνεια.

Αρχικά, ο J.D. DeLorenzo et al. [6] το 1966 μελέτησε το τρόπο με τον οποίο τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα σκεδάζονται από την επιφάνεια της θάλασσας. Βασισμένος στην περιοδικότητα που εμφανίζει η θαλάσσια επιφάνεια, έτσι όπως διατυπώθηκε από τον Floquet καθώς και στις αναλυτικές τεχνικές του προβλήματος σκέδασης σε τραχιές επιφάνειες που αναφέρουν στο βιβλίο τους οι Beckmann και Spizzichino [7], διαμόρφωσε ένα μοντέλο για τον υπολογισμό της φασματικής ισχύος των σκεδασμένων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Το μοντέλο, θεωρεί ότι η διακύμανση της επιφάνειας του νερού ακολουθεί την κατανομή Gauss. Στην συνέχεια, διαπίστωσε ότι το φάσμα του σκεδαζόμενου κύματος αυξάνεται όσο αυξάνεται το εύρος ζώνης του χωρικού φάσματος της επιφάνειας. Οι υπολογισμοί για την παρούσα μελέτη γίνονται σε ιδανική ανακλαστική επιφάνεια και επομένως δεν εμφανίζουν πόλωση που είναι αναμενόμενη σε ένα εντελώς ρεαλιστικό μοντέλο.

Την επόμενη χρονιά το 1967 ο Mandelbrot et al. [8] διατύπωσε ότι οι γεωγραφικές καμπύλες είναι τόσο πολύπλοκες ώστε το μήκος τους είναι συχνά άπειρο ή

καλύτερα μη-καθοριζόμενο (αόριστο). Ωστόσο, πολλές καμπύλες παρουσιάζουν στατιστικά την ιδιότητα της *αυτό-ομοιότητας* (self-similarity), που σημαίνει ότι κάθε τμήμα τους μπορεί να θεωρηθεί μία μικρότερης κλίμακας καμπύλη της συνολικής καμπύλης. Στην περίπτωση αυτή, ο βαθμός πολυπλοκότητας μπορεί να περιγραφεί από μια ποσότητα  $D$  που έχει ιδιότητες διάστασης, αν και είναι *μορφοκλασματική* (fractal). Ο Mandelbrot για πρώτη φορά μελετάει τις αυτό-ομοιες καμπύλες που έχουν τη διάσταση Hausdorff που είναι παραδείγματα fractals, αν και ο ίδιος δεν χρησιμοποιεί τον όρο αυτό, καθώς καθιερώθηκε αργότερα το 1975. Το 1977 ο Mandelbrot έγραψε το βιβλίο “The Fractal Geometry of Nature” [9] που αντικαθιστά σε μεγάλο βαθμό το δοκίμιο του, “Fractals: Form, Chance and Dimension” [10].

Στην συνέχεια, ο R.M. Axline et al. [11] το 1978 κατασκεύασε μια μονοδιάστατη τραχιά τυχαία επιφάνεια με γνωστές στατιστικές ιδιότητες σε ψηφιακό υπολογιστή της εποχής εκείνης. Η επιφάνεια χωρίστηκε σε ένα πλήθος από τμήματα ίσου μήκους. Για τον υπολογισμό του επαγόμενου επιφανειακού ρεύματος και ακολούθως του οπισθοσκεδαζόμενου πεδίου, υπέθεσε ότι η επιφάνεια είχε τέλεια αγωγιμότητα. Στην συνέχεια, υπολογίστηκε ο μέσος όρος της ισχύος οπισθοσκέδασης σε διάφορα τμήματα της επιφάνειας και διαπίστωσε ότι η μέση ισχύς οπισθοσκέδασης εξαρτάται από το συνολικό αριθμό των διαχωρισμένων επιφανειακών τμημάτων.

Ο Mandelbrot et al. [9] το 1982 κάνει την υπόθεση ότι το μήκος ενός ποταμού είναι *fractal* καμπύλη, κάτι που τεκμηριώθηκε αργότερα από τον Hjelmfelt et al. [12] χρησιμοποιώντας οκτώ ποτάμια στο Missouri. Στην συνέχεια, ο Mandelbrot διατύπωσε ότι τα πράγματα που συνήθως θεωρούνται αφηρημένα ή χαοτικά, όπως τα σύννεφα ή οι ακτές, παρουσιάζουν ένα βαθμό τάξης. Επίσης, τόνισε τη χρήση των fractal ως ρεαλιστικά και χρήσιμα μοντέλα για την περιγραφή πολλών τραχιών επιφανειών στον πραγματικό κόσμο. Έτσι, ενώ ορισμένα από τα μαθηματικά ζητήματα που παρουσίασε στην έρευνα του είχαν περιγραφεί προηγουμένως και από άλλους μαθηματικούς με μεμονωμένες περιγραφές, ο Mandelbrot ήταν αυτός που εφάρμοσε τον όρο fractal.

Ο Shmuel Peleg et al. [13] το 1984, μελέτησε την ανάλυση τραχύτητας μίας επιφάνειας, καθώς βασίστηκε ότι οι μορφές των επιφανειών ταξινομούνται με βάση την αλλαγή των ιδιοτήτων τους και την αλλαγή της ανάλυσης τους ως εικόνες. Αρχικά, μέτρησε την περιοχή της επιφάνειας μίας εικόνας με γκρι απόχρωση σε διάφορες ψηφιακές αναλύσεις. Παρατηρήθηκε ότι, όσο μειώνεται η ανάλυση της εικόνας μειώνονται και οι λεπτομέρειες της εικόνας. Οι fractal ιδιότητες της εικόνας μπορούν να υπολογιστούν από το ρυθμό αυτής της μείωσης στην γκρι περιοχή και χρησιμοποιούνται για τη σύγκριση και την ταξινόμηση της επιφάνειας. Ουσιαστικά όμως ο Peleg, εισήγαγε με αυτή τη μελέτη του την μέθοδο

*blanket* για μία δισδιάστατη επιφάνεια, μία μέθοδος που εφαρμόστηκε στην παρούσα μελέτη και θα αναλυθεί περαιτέρω σε επόμενο κεφάλαιο.

Δύο χρόνια αργότερα, το 1986 ο R.J. Para et al. [14] εξέτασε την γενική συμπεριφορά της ραδιοδιατομής μίας τραχιάς τρισδιάστατης επιφάνειας ως συνάρτηση των γωνιών πρόσπτωσης και σκέδασης ενός κύματος, της τραχύτητας της επιφάνειας, της διηλεκτρικής σταθεράς και της πόλωσης για τις συνθήκες φυσικής οπτικής (Physical Optics - PO). Παρατηρήθηκαν δε, μηδενικές τιμές στην κανονικοποιημένη *ράδιοδιατομή*  $\sigma^2$  σε συνάρτηση με την γωνία σκέδασης, ενώ άλλες παράμετροι δεν επέδειξαν τέτοια συμπεριφορά. Για δεδομένη πόλωση ενός προσπίπτοντος κύματος, αναπτύχθηκε μια τεχνική για τη βελτιστοποίηση παρατήρησης της σκέδασης μίας τρισδιάστατης επιφάνειας, χρησιμοποιώντας συνδυασμούς πόλωσης του δέκτη σε διάφορες γωνίες σκέδασης.

Ο D.L. Jaggard et al. [15] το 1990 μελέτησε το πρόβλημα της σκέδασης οπτικών και ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων για μια οικογένεια ακανόνιστων τραχιών επιφανειών που παρουσίαζαν χαρακτηριστικά *fractal γεωμετρίας*. Αναπτύχθηκε μία μέθοδος για την εξέταση τραχιών επιφανειών χωρίς τη χρήση τυχαίων ή περιοδικών συναρτήσεων. Επίσης, συσχετίστηκε η γωνιακή κατανομή της ενέργειας στη κατοπτρική επιφάνεια σκέδασης με τα *fractal* χαρακτηριστικά της επιφάνειας, και υπολογίστηκαν οι αναλυτικές τους εκφράσεις υπό τις συνθήκες του Kirchhoff.

Την ίδια χρονιά ο D.L. Jaggard et al. [16] μοντελοποίησε την σκέδαση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από τέλεια αγωγιμες *fractal* επιφάνειες σύμφωνα με την προσέγγιση του *Rayleigh*. Στην συνέχεια υπολογίστηκαν οι παράμετροι *coupling strength* και συσχετίστηκε η κατανομή της γωνιακής σκεδαζόμενης ενέργειας με τα *fractal* χαρακτηριστικά της επιφάνειας. Διαπιστώθηκε ότι η κλίση των παραμέτρων *coupling strength* εξαρτάται μονοτονικά από τη *διάσταση fractal* (*fractal dimension*) της επιφάνειας σκέδασης.

Ο Renzo Rosso et al. [17] το 1991 βασιζόμενος στην υπόθεση του Mandelbrot [9], ότι το μήκος του ποταμού περιγράφεται από την *fractal* γεωμετρία, υπολόγισε την *fractal* διάσταση του μήκους του ποταμού, σύμφωνα με τους νόμους του Horton. Το επαλήθευσε με τρεις μελέτες που δείχνουν ότι αυτή η εκτίμηση του είναι ορθή. Επίσης, ερεύνησε τη *fractal* διάσταση του δικτύου των ποταμών, και διαπίστωσε ότι εξαρτάται από τις αναλογίες διακλάδωσης και καμπύλης του ποταμού.

Το 1993, ο Titus Lo et al. [3] μελέτησε την *fractal* θεωρία και την εφαρμογή της στην ανάλυση πραγματικών σημάτων ραντάρ τα οποία είναι σκεδαζόμενα από τραχιές επιφάνειες της θάλασσας. Η λήψη των σημάτων ραντάρ που χρησιμοποιήθηκαν αφορούσε αφενός τα σκεδαζόμενα κύματα και αφετέρου τα κύματα οπισθοσκέδασης. Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος *box counting* για την εκτίμηση της *fractal* διάστασης των σκεδαζόμενων σημάτων. Παρατηρήθηκε

λοιπόν ότι τα εμπρόσθια σκεδασμένα και οπισθοσκεδαζόμενα σήματα ραντάρ έχουν πολύ παρόμοιες fractal διαστάσεις. Τέλος, παρατήρησε ότι υπάρχει μια ανιχνεύσιμη διακύμανση της fractal διάστασης όταν υπάρχει ένας στόχος επιφάνειας. Βάσει αυτής της διακύμανσης, είναι δυνατό να ανιχνευθεί η παρουσία ενός στόχου με την παρατήρηση της διάστασης των παραμορφώσεων των ραντάρ

Την επόμενη χρονιά ο Guo Lixin et al. [18] μοντελοποίησε μια δισδιάστατη τραχιά επιφάνεια με την βοήθεια μίας ζωνοπερατής συνεχούς fractal συνάρτησης σε διάφορες κλίμακες και της fractal συνάρτησης κίνησης Brown. Επίσης, αναλύθηκε η σχέση εξάρτησης της σκέδασης και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της fractal επιφάνειας με την προσέγγιση του Kirchhoff.

Ο Lin et al. [19] το 1995 παρουσίασε μια κανονικοποιημένη ζωνοπερατή συνάρτηση Weierstrass για τη μοντελοποίηση μίας τρισδιάστατης fractal τραχιάς επιφάνειας. Στην συνέχεια, συσχέτισε τις συμβατικές στατιστικές παραμέτρους, όπως τη μέση τετραγωνική ρίζα και το μήκος των τραχιών επιφανειών, με τη τραχύτητα των επιφανειών. Ενώ χρησιμοποίησε τη προσέγγιση του Kirchhoff για να αναλύσει το σκεδαζόμενο πεδίο από τις fractal επιφάνειες. Τρεις στατιστικές παράμετροι, ο μέσος συντελεστής σκέδασης, η μέση ένταση του σκεδαζόμενου πεδίου και η μέση τετραγωνική ρίζα του σκεδαζόμενου πεδίου μελετήθηκαν όσον αφορά την επίδραση τους στο σκεδαζόμενο πεδίο με ποιοτικούς και ποσοτικούς υπολογισμούς.

Την ίδια χρονιά οι Savaidis και Frangos et al. [20] μελέτησαν την σκέδαση οπτικών και ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από τέλεια αγωγίμες επιφάνειες μοντελοποιημένες με την χρήση μίας fractal συνάρτησης σε συγκεκριμένες οριακές συνθήκες. Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε με την βοήθεια των Floquet modes, που είναι η διάδοση κυμάτων με ολίσθηση της φάσης σε συνδυασμό με μία περιοδική συνάρτηση. Τα αποτελέσματα της προσέγγισης επαληθεύθηκαν συγκριτικά με τη προσέγγιση Kirchhoff και υπολογίστηκε η παράμετρος του ενεργειακού ισοζυγίου.

Την επόμενη χρονιά το 1996, ο Ji Chen et al. [21] μελέτησε την σκέδαση σε ένα μοντέλο τραχιάς επιφάνειας βασισμένο στη fractal γεωμετρία. Συγκεκριμένα, ενσωμάτωσε το φάσμα Pierson-Moskowitz στο ανωτέρω μοντέλο για να προσομοιώσει μια πλήρως ταραγμένη θαλάσσια επιφάνεια. Η προσέγγιση του Kirchhoff χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση της σκέδασης του πεδίου από αυτή την τραχιά επιφάνεια. Στην συνέχεια, διαπιστώθηκε μία συσχέτιση μεταξύ του προτεινόμενου μοντέλου επιφάνειας και των στατιστικών χαρακτηριστικών του σκεδαζόμενου πεδίου. Τα συμπεράσματα μεταξύ άλλων ήταν και η σχέση του μήκους της επιφάνειας και της fractal διάστασης, η σχέση μεταξύ της παραμέτρου του σχήματος της επιφάνειας, της K-κατανομής και της fractal διάστασης, η μέση

τιμή του σκεδαζόμενου πλάτους ως συνάρτηση της fractal διάστασης και η επίδραση της προσπίπτουσας γωνίας του κύματος στο σκεδαζόμενο πεδίο.

Οι Savaidis και Frangos et al. [22] το 1997 μελέτησαν μια νέα μέθοδος για τη σκέδαση από αγώγιμες επιφάνειες με αυλακώσεις / πτυχές με τη χρήση της προσέγγισης *Extended Boundary Condition*. Στην μελέτη αυτή συνέχισαν την έρευνα τους με τα Floquet modes της προγενέστερης έρευνας τους δύο χρόνια νωρίτερα και κατέληξαν σε αναλυτικές εκφράσεις για τα πλάτη σκέδασης τόσο για οριζόντια όσο και για κατακόρυφη πόλωση των προσπιπτόντων οπτικών και ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Τέλος, υπολόγισαν τα αριθμητικά αποτελέσματα σκέδασης από fractal επιφάνειες.

Ο Jihuan Yao et al. [23] το 1998 βασίστηκε στο φάσμα ισχύος της θάλασσας και δημιουργεί ένα μοντέλο εξισορρόπησης fractal των βαρυτικών κυμάτων (gravity waves). Υπολογίστηκε ο συντελεστής σκέδασης καθώς και η fractal διάσταση του οπισθοσκεδαζόμενου κύματος με την τεχνική box-counting και η σχέση της με τις παραμέτρους της επιφάνειας της θάλασσας και των συστημάτων ραντάρ. Τα αποτελέσματα αυτά είναι χρήσιμα για τον εντοπισμό στόχου επιφανείας στην τραχιά επιφάνεια της θάλασσας.

Το 1999, ο Fabrizio Berizzi et al. [24] πρότεινε μία μονοδιάστατη συνάρτηση fractal της επιφάνειας της θάλασσας που βασίζεται στην ζωνοπερατή fractal συνάρτηση *Weierstrass-Mandelbrot*. Το μοντέλο υπολογίζει τη γεωμετρία και την εξάρτηση του χρόνου από την ταραγμένη επιφάνεια της θάλασσας και συμφωνεί με τις γραμμικές υδροδυναμικές διαφορικές εξισώσεις της θάλασσας. Μια στατιστική ανάλυση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου σκέδασης από την fractal επιφάνεια χρησιμοποιείται για την επαλήθευση του μοντέλου.

Την ίδια χρονιά, με δεύτερη μελέτη του ο Berizzi et al. [25] ασχολείται με το πρόβλημα της ηλεκτρομαγνητικής σκέδασης από την θαλάσσια επιφάνεια. Διαπίστωσε ότι το κύμα που σκεδάζεται στη θάλασσα διατηρεί κάποια fractal χαρακτηριστικά της επιφάνειας. Ανέλυσε το σκεδασμένο κύμα από μια θαλάσσια επιφάνεια μοντελοποιημένη από μονοδιάστατο (1D) θαλάσσιο επιφανειακό fractal προφίλ που είχε αναπτυχθεί στην προηγούμενη έρευνα του την ίδια χρονιά. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το σκεδαζόμενο σήμα είναι μία fractal καμπύλη με την fractal διάσταση να είναι ίση με την αντίστοιχη fractal διάσταση από το προφίλ της θάλασσας.

Την ίδια χρονιά το 1999 η Esteller et al. [26] ανέλυσε και σύγκρινε τις προσεγγίσεις υπολογισμού της fractal διάστασης των βιοϊατρικών σημάτων. Η ανάλυση έγινε με δεδομένα από εγκεφαλογραφήματα αλλά και ηλεκτροκαρδιογραφήματα που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της προ χειρουργικής αξιολόγησης ατόμων με

επιληπτικές κρίσεις. Αυτή η μελέτη καταδεικνύει ότι απαιτείται προσεκτική επιλογή του αλγόριθμου της fractal διάστασης για τις συγκεκριμένες εφαρμογές.

Ο Guo Lixin et al. [27], [28] το 1999 και 2000 μοντελοποίησε μία τραχιά επιφάνεια με την χρήση μίας κανονικοποιημένης τρισδιάστατης ζωνοπερατής Weierstrass fractal συνάρτησης και στην συνέχεια παρουσίασε μια αναλυτική λύση του σκεδαζόμενου πεδίου με την βοήθεια της θεωρίας του Kirchhoff. Το πεδίο σκέδασης, ο μέσος συντελεστής σκέδασης και η διακύμανση της έντασης σκέδασης βοηθούν στο να μελετηθεί η επίδραση της fractal διάστασης στο πεδίο σκέδασης ποιοτικά και ποσοτικά.

Οι D. Jaggard, A. Jaggard, P. Frangos et. al. [29] το 2000 μελέτησαν την ηλεκτροδυναμική των fractals, διερευνώντας τη φύση των ηλεκτρομαγνητικών αλληλεπιδράσεων με fractal επιφάνειες και υπερκατασκευές. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι τρόποι με τους οποίους αυτά τα fractal αντικείμενα αποτυπώνουν τη χαρακτηριστική τους γεωμετρία σε σκεδαζόμενα κύματα και τη φυσική ερμηνεία αυτών των αλληλεπιδράσεων. Εξετάστηκε η fractal γεωμετρία, με έμφαση την fractal διάσταση και το μέτρο που τα fractal μοτίβα γεμίζουν το χώρο. Καθώς τραχιές επιφάνειες σε διάφορες κλίμακες συχνά διαμορφώνονται από fractals γεωμετρικά σχήματα, εξετάστηκε η σκέδαση από απλές fractal επιφάνειες ως συνάρτηση της τραχύτητας και της γωνίας σκέδασης χρησιμοποιώντας τόσο την προσέγγιση του Kirchhoff όσο και την προσέγγιση T-matrix, όπου διαπιστώθηκε μια σχέση μεταξύ fractal διάστασης και των μεταβολών της ράδιοδιατομής για μικρή ή μέτρια τραχύτητα.

Ο Piinchuk et al. [30] το 2000 εξέτασε τις ιδιαιτερότητες της σκέδασης του φωτός από διάφορους τύπους fractal επιφανειών. Χρησιμοποίησε τη δισδιάστατη συνάρτηση Weierstrass για τη μοντελοποίηση των τρισδιάστατων επιφανειών και υπολόγισε τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα σκέδασης με την βοήθεια της θεωρίας του Kirchhoff.

Ο Weng Haixiao et al. [31] την ίδια χρονιά εξέτασε την προσέγγιση του Kirchhoff και του μοντέλου *Integral Equation Method* για σκέδαση κύματος σε τραχιά τέλεια αγωγίμη επιφάνεια σε σύγκριση με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Στην έρευνα αυτή εξετάστηκαν το επιφανειακό ρεύμα και το σκεδαζόμενο πεδίο για επιφάνειες με διαφορετικό μήκος επιφάνειας, η διαφορετική μέση τετραγωνική ρίζα ύψους επιφάνειας και το μήκος κύματος. Ενώ στη συνέχεια, συγκρίνονται οι συντελεστές σκέδασης που υπολογίστηκαν από την προσέγγιση προσομοίωσης της θεωρίας του Monte Carlo.

Η Rosana Esteller et al. [32] το 2001 μελέτησε την ανάλυση των ηλεκτροεγκεφαλογραφημάτων και των ηλεκτροκαρδιογραφημάτων και χρησιμοποίησε την fractal διάσταση των κυματομορφών για τον εντοπισμό και τη

διάκριση συγκεκριμένων καταστάσεων φυσιολογικής λειτουργίας. Στη μελέτη αυτή, αναλύονται και συγκρίνονται οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι εντοπισμού των fractal βιοϊατρικών σημάτων. Η ανάλυση διεξάγεται σε δεδομένα ενδοκρανιακού ηλεκτροεγκεφαλογραφήματος που καταγράφηκαν κατά την προ-χειρουργική αξιολόγηση ατόμων με επιληπτικές κρίσεις, ενώ επισημάνθηκαν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε τεχνικής. Η μελέτη ήταν η συνέχεια της έρευνας που είχε ξεκινήσει δύο χρόνια πριν από την ίδια την Esteller.

Το ίδιο έτος ο Guo Li-Xin et al. [33] παρουσιάζει το *fractal Brown motion* (fBm), το οποίο κρίθηκε κατάλληλο για την περιγραφή μίας φυσικής τραχιάς επιφάνειας. Χρησιμοποιώντας την προσέγγιση του Kirchhoff, υπολογίζονται οι εκφράσεις σκέδασης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και η κανονικοποιημένη ράδιοδιατομή ραντάρ της fractal επιφάνειας. Καταγράφονται τα αριθμητικά αποτελέσματα της κανονικοποιημένης ράδιοδιατομής του ραντάρ ως συνάρτηση της fractal διάστασης, του χαρακτηριστικού μήκους fBm και της συχνότητας του κύματος. Τέλος, το μοντέλο fBm συγκρίνεται με τα κλασσικά μοντέλα Gauss και εκθετικής συσχέτισης.

Ο Zhong-Xin Li et al. [34] το 2001 χρησιμοποιεί μια γενικευμένη μέθοδος σκέδασης και οπισθοσκέδασης (GFBM) με ένα φασματικό επιταχυνόμενο αλγόριθμο για την επίλυση της εξίσωσης μαγνητικού πεδίου. Η έρευνα εφαρμόστηκε στην προσομοίωση της διστατικής σκέδασης από μια δισδιάστατη fractal επιφάνεια στην θάλασσα με την παρουσία ενός πλοίου με χρήση κύματος πόλωσης TE (κατώφλι αποκοπής σήματος) σε χαμηλή γωνία πρόσπτωσης (*Low Grazing Angle*). Οι προσομοιώσεις της διστατικής σκέδασης δείχνουν την εξάρτηση της fractal διάστασης από την αγωγιμότητα επιφάνειας, τη θέση του πλοίου και άλλων παραμέτρων.

Το 2002 ο Fabrizio Berizzi et al. [35] βασίστηκε στο ότι το ηλεκτρομαγνητικό σκεδαζόμενο κύμα της επιφάνειας της θάλασσας διατηρεί ορισμένες fractal ιδιότητες της επιφάνειας αυτής. Ξεκινώντας από την έκφραση του συντελεστή σκέδασης, έδειξε ποιοτικά ότι η fractal διάσταση του κύματος που σκεδάζεται από μια θαλάσσια fractal επιφάνεια σχετίζεται γραμμικά με τη fractal διάσταση της επιφάνειας της θάλασσας με την προϋπόθεση της προσέγγισης του Kirchhoff και έκανε μια εκτίμηση της τραχύτητας της θαλάσσιας επιφάνειας. Αυτό κατέληξε ότι θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε εφαρμογές τηλεπισκόπησης για ταξινόμηση, ανίχνευση στόχων, παρακολούθηση της θαλάσσιας κυκλοφορίας, ανάλυση θαλάσσιων ρευμάτων, αναγνώριση πετρελαιοκηλίδας, ανάλυση ρύπανσης κλπ.

Ο Chunhua Yang et al. [36] το 2003 πρότεινε την μέθοδο σύνθεσης διανύσματος για την ανάλυση της σκέδασης από μία τραχιά επιφάνεια. Πιο συγκεκριμένα, διερευνήθηκε η σκέδαση πολλαπλών διαδρομών. Τα αποτελέσματα από την άμεση



σκέδαση στόχων συγκρίθηκαν με τη σύνθετη σκέδαση του συστήματος για την εξεύρεση των χαρακτηριστικών της σκέδασης πολλαπλών διαδρομών.

Το 2004 ο Marco Martorella et al. [37] βασιζόμενος αφενός στο ότι όταν η υπόθεση του Kirchhoff ικανοποιείται, η διάσταση fractal του κύματος σχετίζεται γραμμικά με τη διάσταση fractal της θαλάσσιας επιφάνειας και αφετέρου στο ότι η σχέση αυτή είναι ανεξάρτητη της συχνότητας εκπομπής, της πόλωσης, του χρόνου, του χώρου, της κατεύθυνσης του θαλάσσιου κύματος, της γωνίας πρόσπτωσης (εντός του περιορισμού της παραδοχής του Kirchhoff) και του ύψους κύματος, διαπίστωσε ότι για μικρή γωνία πρόσπτωσης ( $\theta < 1^\circ$ ), η προσέγγιση του Kirchhoff δεν ικανοποιείται και η συμπεριφορά της fractal διάστασης της ταραγμένης θάλασσας δεν μπορεί θεωρητικά να προβλεφθεί. Μελέτησε λοιπόν τη διάσταση fractal της θαλάσσιας σκέδασης υπό μικρή γωνία πρόσπτωσης, προκειμένου να διερευνηθούν τα θεωρητικά αποτελέσματα. Επιπλέον, αναλύθηκε η παρουσία ενός στόχου επιφάνειας στην διάσταση fractal με τη χρήση πραγματικών δεδομένων.

Ο Ahmed Salem et al. [38] το 2004 διαπίστωσε ότι η εφαρμογή της προσέγγισης του Kirchhoff για σκέδαση από τραχιές επιφάνειες προϋποθέτει ότι η ακτίνα της καμπυλότητας της επιφάνειας θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το ηλεκτρομαγνητικό μήκος κύματος  $\lambda$ . Έτσι, τα μοντέλα των fractal επιφανειών, παρουσιάζουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά σε μικρές κλίμακες και δημιουργούν προβλήματα στην εφαρμογή των ηλεκτρομαγνητικών οριακών συνθηκών καθώς και στην εκτίμηση της ακτίνας της καμπυλότητας της επιφάνειας που σχετίζεται με την προσέγγιση Kirchhoff. Τα πειράματα και οι αριθμητικές προσομοιώσεις της μελέτης δείχνουν διαφορετική συμπεριφορά της σκέδασης σε λείες επιφάνειες με αυξανόμενο μήκος κύματος εκπομπής. Η διερεύνηση της εγκυρότητας της προσέγγισης του Kirchhoff για τον υπολογισμό της σκέδασης από τέλεια αγωγικές επιφάνειες σύμφωνα με τους Weierstrass-Mandelbrot και τα μοντέλα fractal επιφάνειας του Brown δείχνουν ότι και για τα δύο μοντέλα η εφαρμογή της προσέγγισης του Kirchhoff αυξάνεται με την αύξηση του μήκους κύματος  $\lambda$  και του εκθέτη *Hurst* που ελέγχει την τραχύτητα.

Η Jing Hu et al. [39] το 2006 εισήγαγε μία συνάρτηση βασισμένη στην θεωρία των *multifractals* για την ανάλυση δεδομένων από επιστροφές σήματος από τραχιά θαλάσσια επιφάνεια. Ένα multifractal σύστημα είναι μια γενίκευση ενός fractal συστήματος στο οποίο ένας μόνο εκθέτης (η fractal διάσταση) δεν είναι αρκετός για να περιγράψει τη δυναμική του και απαιτείται ένα συνεχές φάσμα εκθετών (το λεγόμενο *φάσμα ιδιομορφίας*). Βρέθηκε λοιπόν ότι, οι σκεδάσεις της τραχιάς θαλάσσιας επιφάνειας εμφανίζουν συμπεριφορές multifractals συστημάτων σε χρονική κλίμακα από περίπου 0,01 έως μερικά δευτερόλεπτα, ειδικά για στόχους επιφάνειας. Τα fractal και multifractal χαρακτηριστικά της θαλάσσιας τραχύτητας επέτρεψαν να αναπτυχθεί μια μέθοδος για την ανίχνευση στόχων στην θαλάσσια

επιφάνεια. Παρατηρήθηκε ότι η μέθοδος επιτυγχάνει μία υψηλής ακρίβειας ανίχνευσης. Η μοντελοποίηση της θαλάσσιας επιφάνειας χρησιμοποιώντας κατανομές όπως τις *Weibull*, *log-normal*, *K*, και *compound Gaussian* προσφέρουν περιορισμένη κατανόηση της φυσικής υπόστασης της θαλάσσιας τραχύτητας και δεν είναι πολύ αποτελεσματικές στην ανίχνευση στόχων σε θαλάσσια επιφάνεια.

Το 2008 το Ren Xin-Cheng et al. [40] μοντελοποίησε μία τρισδιάστατη τραχιά διηλεκτρική επιφάνεια χρησιμοποιώντας μια κανονικοποιημένη ζωνοπερατή fractal συνάρτηση Weierstrass και ανέλυσε το σκεδαζόμενο πεδίο με την βοήθεια της προσέγγισης του Kirchhoff. Στην συνέχεια μελέτησε την διακύμανση της έντασης της σκέδασης και το συμπέρασμα ήταν ότι οι κλίσεις των γραμμών που ενώνουν τις κορυφές των διαγραμμάτων μπορούν να υπολογιστούν ως μία κλίση γραμμικής εξίσωσης.

Ο Bin Li et al. [41] το 2010 με στόχο την επίλυση του προβλήματος υπολογισμού της fractal διάστασης, χρησιμοποίησε τις καμπύλες του εδάφους Xian, του ποταμού Weihe και του σφάλματος Changan-Lintong ως παραδείγματα για τον υπολογισμό των fractal διαστάσεων και πρότεινε το μοντέλο διόρθωσης χρησιμότητας για μοντέλο υπολογισμού της καμπύλης της fractal διάστασης.

Ο Oleksandr Semchuk et al. [42] το 2011 μελέτησε μία τρισδιάστατη τραχιά επιφάνεια με την βοήθεια μιας τροποποιημένης δισδιάστατης fractal συνάρτησης Weierstrass και στην συνέχεια υπολόγισε τον μέσο συντελεστή σκέδασης με την πρόσεγγιση Kirchhoff. Με βάση τον προσδιορισμό του μέσου συντελεστή σκέδασης, υπολόγισε τα διαγράμματα σκέδασης για διάφορες επιφάνειες και γωνίες πρόσπτωσης, καταλήγοντας στα ακόλουθα συμπεράσματα: η σκέδαση είναι συμμετρική σε σχέση με το επίπεδο πρόσπτωσης. η εικόνα γίνεται περίπλοκη όταν αυξάνεται η τραχύτητα της επιφάνειας. παρατηρείται μεγαλύτερη ένταση ενός σκεδαζόμενου κύματος στην κατεύθυνση κατοπτρισμού καθώς επίσης παρατήρησε και άλλες κατευθύνσεις στις οποίες παρατηρούνται μεγάλες εντάσεις του ανακλώμενου σήματος.

Το 2012, ο A. Zaleski et al. [43] χρησιμοποίησε την συνεχή συνάρτηση Weierstrass-Mandelbrot ως μοντέλο και προσομοίωσε μία fractal καμπύλη. Στην συνέχεια εξέτασε κάποιες βασικές ιδέες από τη θεωρία των μετρήσεων και τη fractal γεωμετρία, εστιάζοντας στη fractal διάσταση Hausdorff, της προσέγγισης box counting και τη διάσταση ομοιότητας.

Ο Antonio Iodice et al. [44] την επόμενη χρονιά μελέτησε την σκέδαση τόσο για την fractal κίνηση Brown όσο και για τις κλασικές τραχιές επιφάνειες σύμφωνα με την πρόσεγγιση του Kirchhoff. Αρχικά, διαπίστωσε ότι, για μια επιφάνεια fBm, η σκέδαση σύμφωνα με τον Kirchhoff είναι ανάλογη με μια συμμετρική κατανομή *alpha-stable* (SaS). Η ερμηνεία του αποτελέσματος αυτού, τον οδήγησε στην

επανεξέταση της σημασίας της λύσης του Kirchhoff και της Γεωμετρικής Οπτικής ακόμη και για μια κανονική (κλασική, μη-fractal) τραχιά επιφάνεια. Έπειτα, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι για αμφότερες τις fractal και τις κλασικές επιφάνειες, το ολοκλήρωμα της συνάρτησης του Kirchhoff μπορεί να ερμηνευτεί ως ένα είδος μοντέλου δύο διαστάσεων και ότι, στη fractal περίπτωση, η κατανομή SaS μπορεί να ερμηνευτεί ως *συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας* (probability density function - PDF) των καμπύλων μίας τραχιάς επιφάνειας της οποίας η συνάρτηση πυκνότητας ισχύος είναι ίση με την πυκνότητα ισχύος της επιφάνειας fBm.

Ο Luo et al. [45], την ίδια χρονιά το 2013, δημιούργησε ένα μονοδιάστατο μοντέλο μη γραμμικής fractal θαλάσσιας επιφάνειας με βάση το μοντέλο *Lagrange* στενής ζώνης, το οποίο λαμβάνει υπόψη τις κάθετες και οριζόντιες παραμορφώσεις της θαλάσσιας επιφάνειας. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο προσέγγισης *μικρής κλίσης δεύτερης τάξης* (SSA-II), υπολογίζονται η *κανονικοποιημένη ράδιοδιατομή ραντάρ* (NRCS) και το φάσμα Doppler γραμμικής και μη-γραμμικής fractal θαλάσσιας επιφάνειας. Τα αποτελέσματα κανονικοποιημένης ράδιοδιατομής της μη-γραμμικής fractal θαλάσσιας επιφάνειας είναι μεγαλύτερα από την οπισθοσκέδαση της γραμμικής fractal επιφάνειας, ειδικά για μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης, γεγονός που υποδεικνύει ότι η μη γραμμική επιφάνεια έχει ισχυρότερη ηχώ σκέδασης. Το αποτέλεσμα της μη γραμμικής fractal θαλάσσιας επιφάνειας είναι επίσης μεγαλύτερο από την γραμμική fractal επιφάνεια της θάλασσας για την διστατική περίπτωση. Για το φάσμα Doppler της επιφάνειας της θάλασσας, η μη γραμμικότητα της επιφάνειας της θάλασσας ενισχύει σημαντικά την μετατόπιση Doppler και το εύρος ζώνης φάσματος Doppler σε μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης, οι οποίες οφείλονται στο γεγονός ότι τα μη γραμμικά κύματα διαδίδονται ταχύτερα από τα γραμμικά και η μη γραμμική fractal επιφάνεια της θάλασσας διορθώνει τις ταχύτητες φάσης προσθέτοντας την οριζόντια και κατακόρυφη παραμόρφωση.

Τέλος, η Malamou et al. [46] το 2014 χρησιμοποίησε τη μέθοδο *Modified Fractal Signature* και εφαρμόστηκε σε πραγματικές εικόνες από ραντάρ συνθετικής απεικόνισης. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί την τεχνική *blanket method* του Peleg [13] για να παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για την ταξινόμηση εικόνων από το ραντάρ συνθετικής απεικόνισης. Η κύρια ιδέα σχετικά με αυτήν την προτεινόμενη τεχνική είναι το γεγονός ότι διαφορετικοί τύποι εδάφους που συναντώνται σε εικόνες SAR παρέχουν διαφορετικές τιμές καμπυλών fractal της περιοχής και fractal διάστασης, βάσει των οποίων είναι δυνατή η ταξινόμηση διαφορετικών τύπων εδάφους.



## Κεφάλαιο 2

### Μοντελοποίηση Επιφάνειας Σκέδασης

#### 2.1 Μοντελοποίηση σκεδάζουσας τρισδιάστατης επιφάνειας

Η διερεύνηση του προβλήματος της σκέδασης των οπτικών και ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων των fractal τραχιών επιφανειών παρουσιάζει τα τελευταία χρόνια μεγάλο ενδιαφέρον. Για την δημιουργία των επιφανειών αυτών χρησιμοποιήθηκαν μοντέλα fractal τραχιάς επιφάνειας με ντετερμινιστικές συναρτήσεις. Η θεωρία των fractals αποτελεί μια εναλλακτική επιλογή (ως σύγχρονο εργαλείο) για την μοντελοποίηση των επιφανειών με διαφορετική τραχύτητα. Οι συναρτήσεις fractal δίνουν επιφάνειες όμοιες με τις πραγματικές επιφάνειες που συναντώνται στην φύση. Επίσης, μέσω μίας τέτοιας συνάρτησης και των παραμέτρων της, π.χ. της διάστασης *fractal* (fractal dimension) ή και του μήκους *fractal* (fractal length), μπορεί να καθοριστεί με σχετική ακρίβεια η τραχύτητα της επιφάνειας.

Η μοντελοποίηση των τρισδιάστατων τραχιών fractal επιφανειών δίνεται από την δισδιάστατη ευρυζωνική συνάρτηση Weierstrass από την ακόλουθη σχέση:

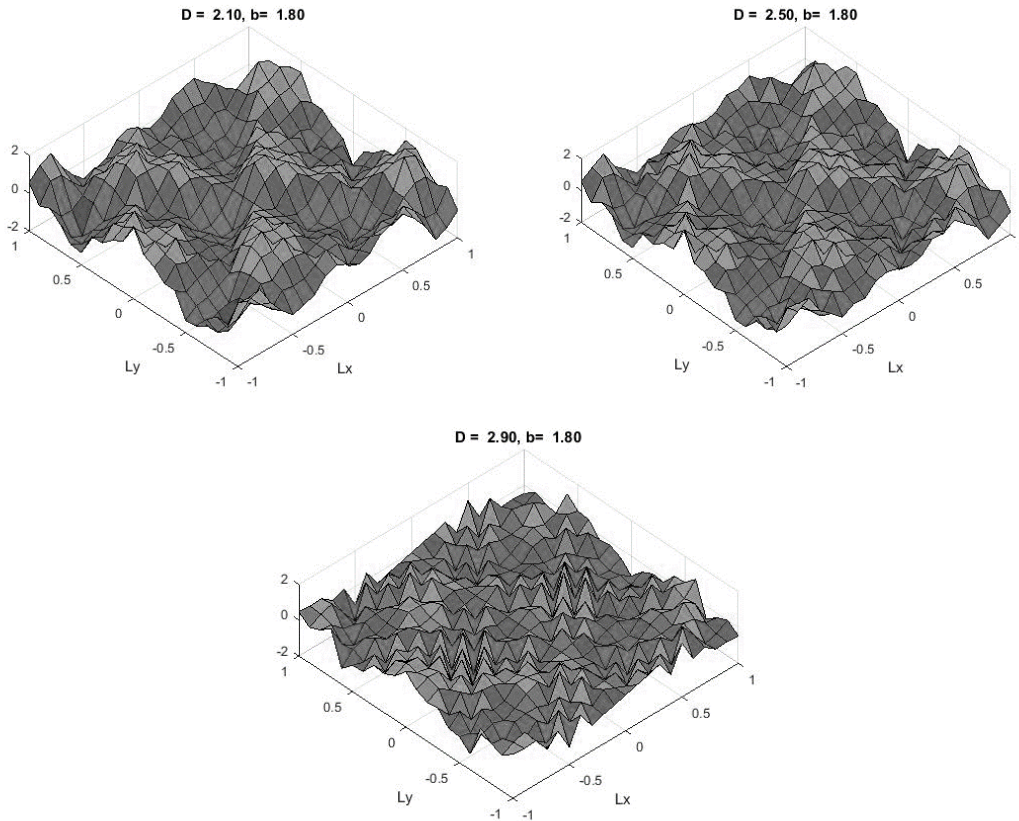
$$\zeta(x, y) = \sigma C \sum_{n=N_1}^{N_2} b^{(D-3)n} \sum_{m=1}^M \left\{ \sin \left\{ K b^n \left[ x \cos \left( \frac{2\pi m}{M} \right) + y \sin \left( \frac{2\pi m}{M} \right) \right] \right\} + \varphi_{nm} \right\} \quad (2.1)$$

Η παραπάνω συνάρτηση είναι ένας συνδυασμός διακριτών περιοδικών και τυχαίων παραμέτρων, όπου  $\sigma$  είναι η τυπική απόκλιση,  $C$  είναι ο συντελεστής εξομάλυνσης του πλάτους,  $N_1$  και  $N_2$  είναι το πλήθος των τόνων (κυμάτων) με  $N_1 \gg 1$  και  $N_2 \gg 1$ ,  $b$  είναι χωρική σταθερά και παίρνει τιμές  $[1.8122, 2.7183]$ ,  $D$  ( $2 < D < 3$ ) είναι η διάσταση fractal ως παράμετρος της τραχύτητας,  $K$  είναι ο θεμελιώδης χωρικός κυματαριθμός στην κατεύθυνση των  $x$  και  $y$  αντίστοιχα και  $\varphi_{n1}, \varphi_{n2}$  είναι αυθαίρετες φάσεις με ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα  $[-\pi, \pi]$ . Για να παραμένει το πλάτος της ανωτέρω συνάρτησης σταθερό ανεξάρτητα της τιμής που παίρνει η παράμετρος  $D$ , ο συντελεστής κανονικοποίησης του πλάτους  $C$  υπολογίζεται έτσι ώστε έχει την ακόλουθη έκφραση (βλέπε [40]):

$$C = \left( \frac{2[1 - b^{(2D-6)}]}{M[b^{(2D-6)N1} - b^{(2D-6)(N2+1)}]} \right)^{1/2} \quad (2.2)$$

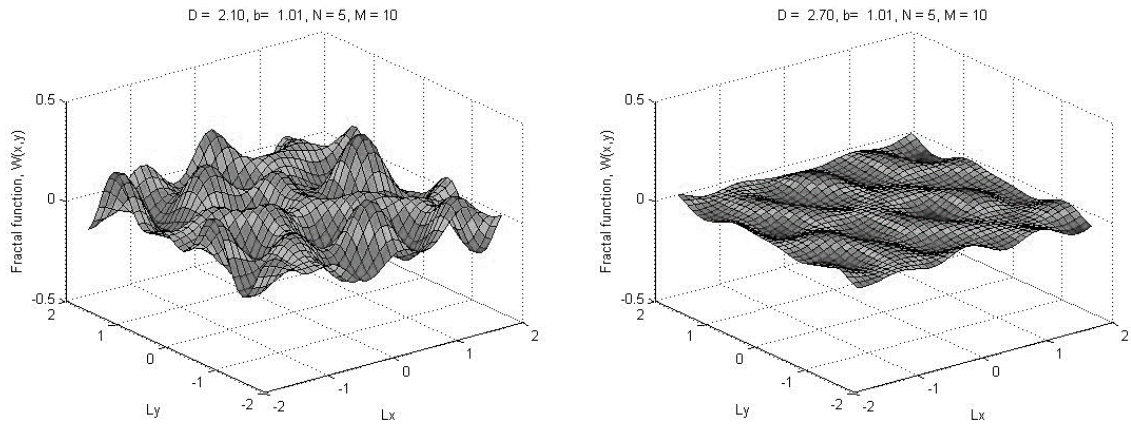
Στην

Εικόνα 1 απεικονίζονται μερικές αντιπροσωπευτικές προσομοιώσεις της συνάρτησης (2.1) για διαφορετικές τιμές της fractal διάστασης  $D$ , για  $b=1.80$ ,  $N=5$  και  $M=5$ . Καθώς η διάσταση fractal παίρνει τιμές  $D=[2.10, 2.50, 2.90]$ , η τραχύτητα των τρισδιάστατων fractal επιφανειών αυξάνεται.



Εικόνα 1: Απεικονίσεις δισδιάστατης συνάρτησης fractal  $f(x, y)$  για διάφορες τιμές διάστασης fractal και  $b=1.80$

Όπως αναφέρθηκε το  $b$  είναι η χωρική συχνότητα και είναι σταθερά που παίρνει τιμές  $[1.80, 2.71]$ . Στο πλαίσιο της έρευνας μελετήσαμε την επίδραση του  $b$  στην κλασική συνάρτηση Weierstrass  $W(x)$  για διαφορετικές τιμές της διάστασης fractal. Στα ακόλουθα σχήματα φαίνεται το πως επηρεάζει η τιμή της σταθεράς  $b$  την συνάρτηση Weierstrass  $W(x,y)$ :

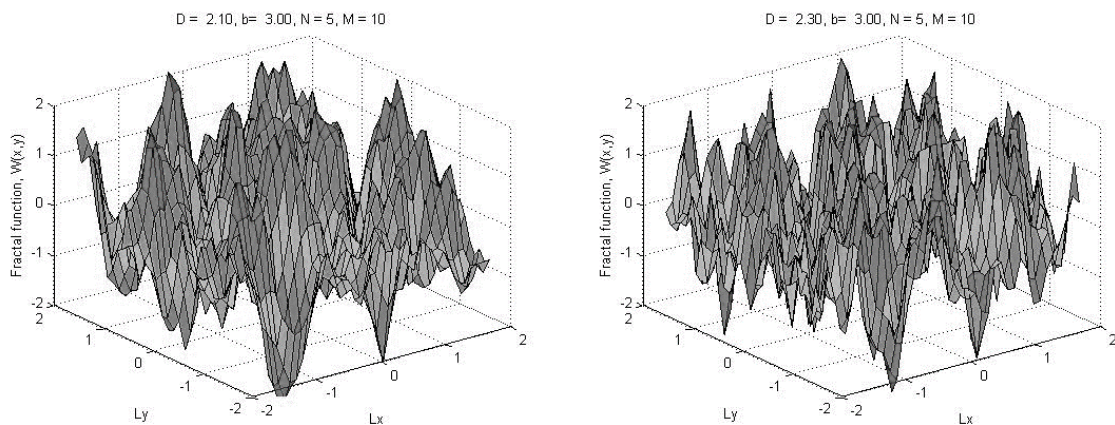


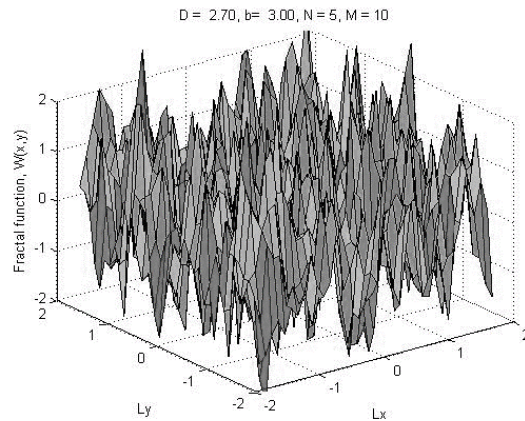
Εικόνα 2: Απεικόνιση fractal συνάρτησης  $W(x,y)$  για  $b=1.1$

Στην ανωτέρω εικόνα η εξεταζόμενη σταθερά  $b=1.01$  παίρνει τιμή μικρότερη της αναμενόμενης που είναι 1.80 ενώ η διάσταση fractal αυξάνει παίρνοντας τιμές  $D=[2.10, 2.90]$ .

Όπως είναι φανερό η συνάρτηση Weierstrass  $W(x,y)$  δεν μας δίνει τα αναμενόμενα αποτελέσματα καθώς ενώ η διάσταση fractal αυξάνει η παραγόμενη από την προσομοίωση τρισδιάστατη επιφάνεια γίνεται πιο ομαλή.

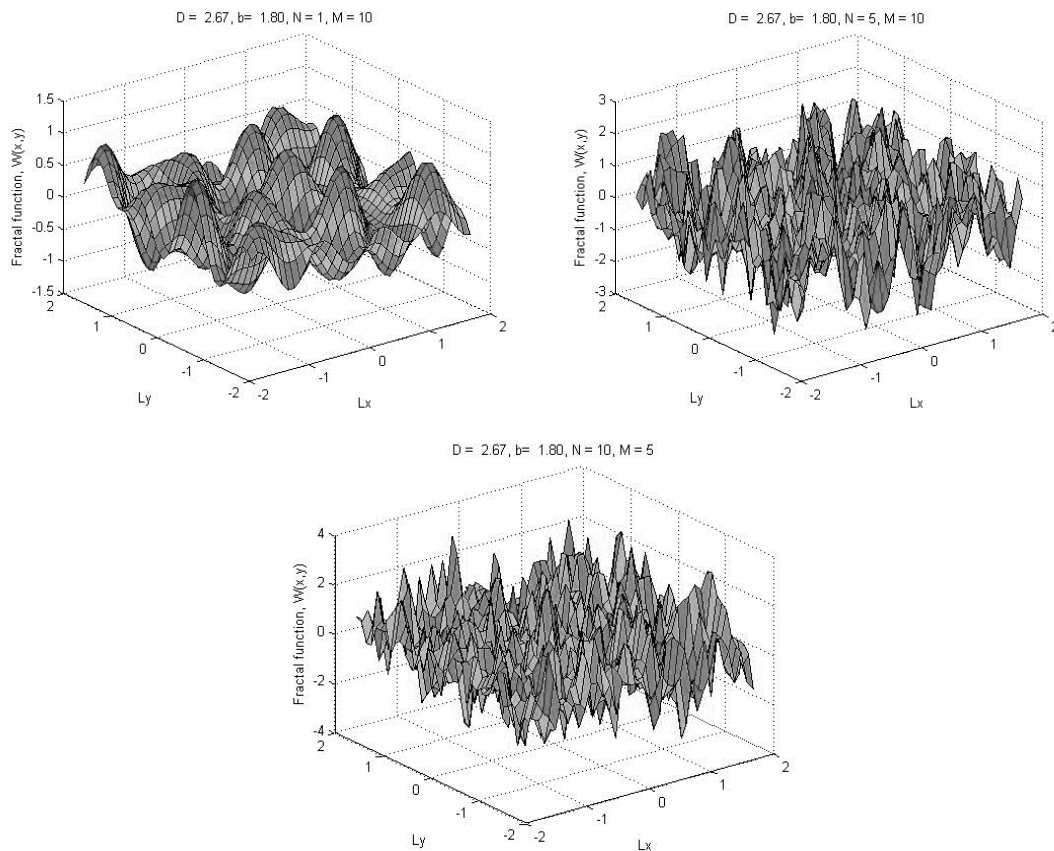
Στην συνέχεια επιλέγουμε τιμή του  $b$  μεγαλύτερη της αναμενόμενης μέγιστης τιμής 2.71 για να παρατηρήσουμε τα αποτελέσματα. Έτσι, για  $b=3$  διαπιστώνουμε ότι η τραχύτητα της επιφάνειας αυξάνει αναλογικά με την αύξηση της τιμής της διάστασης fractal που και πάλι παίρνει τιμές  $D=[2.10, 2.50, 2.90]$ .





Εικόνα 3: Απεικόνιση fractal συνάρτησης  $W(x,y)$  για  $b=3$

Στην συνέχεια της παραπάνω διερεύνησης εξετάστηκε και η μεταβλητή  $N$  στην εξίσωση του Weierstrass  $W(x,y)$  όπου  $N$  είναι το πλήθος των "τόνων" (κυμάτων) με  $N \gg 1$ . Για  $N=1$  ήταν αναμενόμενο η παραγόμενη από τις προσομοιώσεις επιφάνεια να είναι ομαλή (για  $D=1$  είναι σχεδόν λεία) σε σχέση με τις επιφάνειες που παράγονται για  $N$  αυξανόμενο. Ακολούθως φαίνεται η εξεταζόμενη επιφάνεια για  $D=2.6$  το  $N=[1,5,10]$  ενώ το  $b$  έχει σταθερή τιμή για  $b=1.80$ .



Εικόνα 4: Απεικόνιση fractal συνάρτησης  $W(x,y)$  για  $D=2.6$ ,  $b=1.8$  και  $N=[1,5,10]$

Αυτό επαληθεύει ότι το  $N$  θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο της μονάδας,  $N \gg 1$ .



## 2.2 Μοντελοποίηση σκεδάζουσας θαλάσσιας επιφάνειας

Η διατριβή αυτή, πέραν της δημιουργίας δεδομένων σκέδασης που δημιουργήθηκαν με τις μαθηματικές εξισώσεις που προαναφέρθηκαν, βασίστηκε και σε πραγματικά δεδομένα που προήλθαν από ανάλυση δεδομένων οπισθοσκέδασης ραντάρ συνθετικού παραθύρου, τα οποία συλλέχθηκαν από την ομάδα εργασίας "SET-185" στην δοκιμή "NEMO 2014" που πραγματοποιήθηκε στο Taranto της Ιταλίας το Σεπτέμβριο του 2014. Το ραντάρ που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένα PicoSAR-X το οποίο ήταν τοποθετημένο σε ελικόπτερο.

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής το πείραμα αποφασίστηκε να πραγματοποιηθεί με διόπτευση της υπό έρευνας επιφάνεια της θάλασσας προσήνεμα (δηλαδή με την δέσμη του ραντάρ να στοχεύει την θάλασσα προς τον άνεμο). Το ελικόπτερο που χρησιμοποιήθηκε ήταν ιδανικό ως αεροπορικό μέσο για τη διεξαγωγή τέτοιων μετρήσεων, καθώς διέθετε την ικανότητά να ανεβαίνει κατακόρυφα διατηρώντας σταθερή τη γεωγραφική του θέση (γεωγραφικό πλάτος και μήκος).

Τα χαρακτηριστικά του ραντάρ PicoSAR που χρησιμοποιήθηκαν κατά την διεξαγωγή του πειράματος είναι: μήκος παλμού 12μs, εύρος ζώνης 150MHz, PRF 1kHz, απόσταση ραντάρ στόχου 1850m για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης και συχνότητα λειτουργίας  $f_s=9.4\text{GHz}$ .

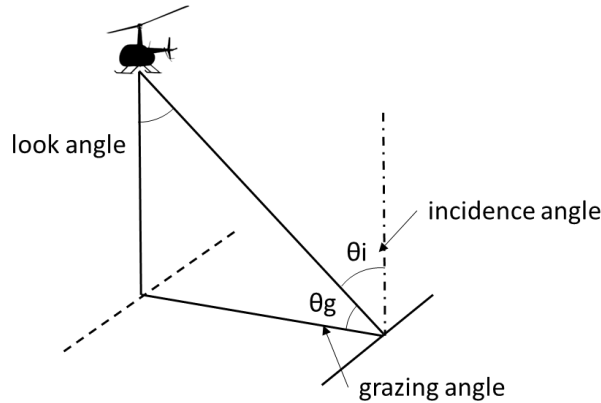
Για τις δύο ημέρες διεξαγωγής του πειράματος η κατεύθυνση του ανέμου ήταν από την στεριά προς την θάλασσα, με αποτέλεσμα να μην έχει αναπτυχθεί πλήρως ο κυματισμός καθώς η απόσταση από την ακτή ήταν μόλις 18 χιλιόμετρα (περί τα 9.72 ναυτικά μίλια). Στον ακόλουθο πίνακα φαίνονται ο χαρακτηρισμός της κατάστασης θαλάσσης και το διεθνές σύστημα μέτρησης τους:

Κατάσταση Θαλάσσης	Χαρακτηρισμός Κατάστασης Θαλάσσης	Ύψος Κύματος (m)	Ταχύτητα ανέμου (m/sec)
1	Γαλήνια - Ρυτιδούμενη	0.0-0.3	0.3-<1.6
2	Ήρεμη	0.3-0.9	1.6-<5.5
3	Λίγο ταραγμένη ως ταραγμένη	0.9-1.5	5.5-<8.0
4	Ταραγμένη	1.5-2.4	8.0-<10.8
5	Κυματώδης	2.4-3.7	10.8-<13.9
6	Πολύ κυματώδης έως τρικυμιώδης	3.7-6.1	13.9-<17.2
7	Πολύ τρικυμιώδης	6.1-12.2	17.2-<24.5
8	Μαινόμενη	>12.2	24.5-<28.5

Πίνακας 1: Κατάσταση Θαλάσσης και Σύστημα Μέτρησης

Κατά την διάρκεια της πρώτης ημέρας δοκιμής την 23/9/2014, η ταχύτητα του ανέμου στην περιοχή ήταν 10-12m/s και η τραχύτητα της θάλασσας ήταν σχετικά μεγάλη (ταραγμένη θάλασσα). Το ελικόπτερο διατήρησε την κατεύθυνση της δέσμης της κεραίας του ραντάρ με διόπτευση προς τον άνεμο μέσα σε ένα εύρος

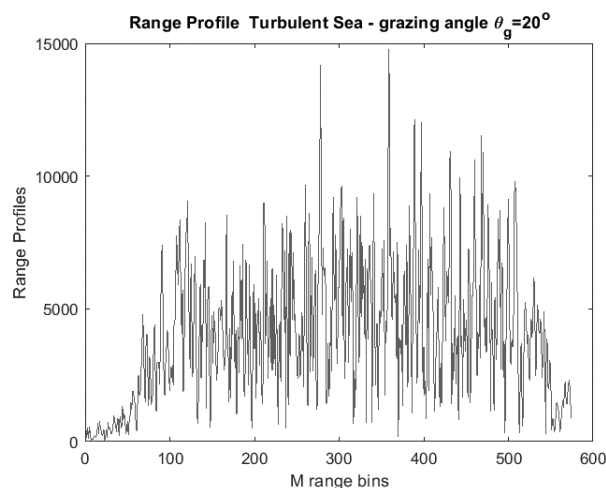
διόπτουσης 20 μοίρες εκατέρωθεν της διόπτουσης, καθώς η γωνία πρόσπτωσης (grazing angle) κυμαινόταν από 3 έως 55 μοίρες όπως φαίνεται στο Σχήμα 2. Ο χρόνος εκπομπής και λήψης στις ανωτέρω γωνίες ήταν περίπου 5 λεπτά. Αυτός ο χρόνος θεωρείται ότι είναι αρκετά μικρός ώστε οι συνθήκες ανέμου και θάλασσας να είναι σχεδόν σταθερές για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης κατά την κατακόρυφη πτήση του ελικοπτερου.

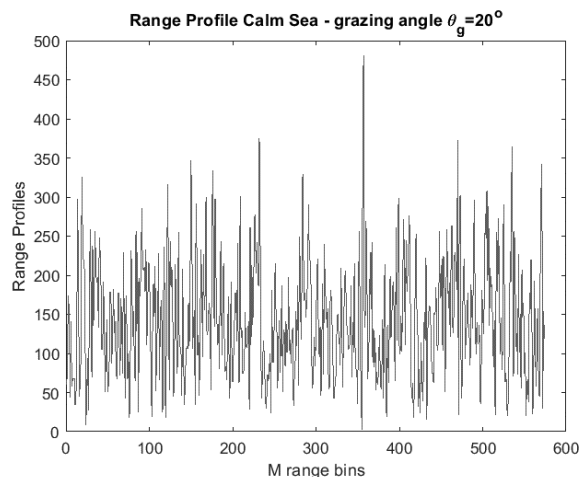


Σχήμα 2: Γεωμετρία διεξαγωγής του πειράματος

Η ταχύτητα του ελικοπτερου κατά την άνοδο του ήταν μικρή, ενώ η οριζόντια ταχύτητα ήταν σχεδόν μηδενική, με αποτέλεσμα να έχει πολύ μικρή συμβολή στο φάσμα Doppler στην θαλάσσια επιφάνεια. Καθώς το ελικόπτερο ανέρχεται, αυξάνεται η γωνία πρόσπτωσης  $\theta_g$  και παρατηρείται αύξηση της ισχύος του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος.

Τη δεύτερη ημέρα της δοκιμής, την 24/9/2014, η ταχύτητα του ανέμου ήταν μικρή (λίγων m/s) που μερικές φορές εξασθενούσα πλήρως τοπικά, σχηματίζοντας μία σχεδόν λεία επιφάνεια (ρυτιδούμενη θάλασσα). Η παρουσία βουβών κυμάτων οφειλόταν σε αποθαλασσία (swell waves), δηλαδή σε κύμα που δεν οφείλεται σε καιρικά φαινόμενα στο χρόνο παρατήρησης, αλλά σε άνεμο που έπνεε την προηγούμενη μέρα σε γειτονική περιοχή.



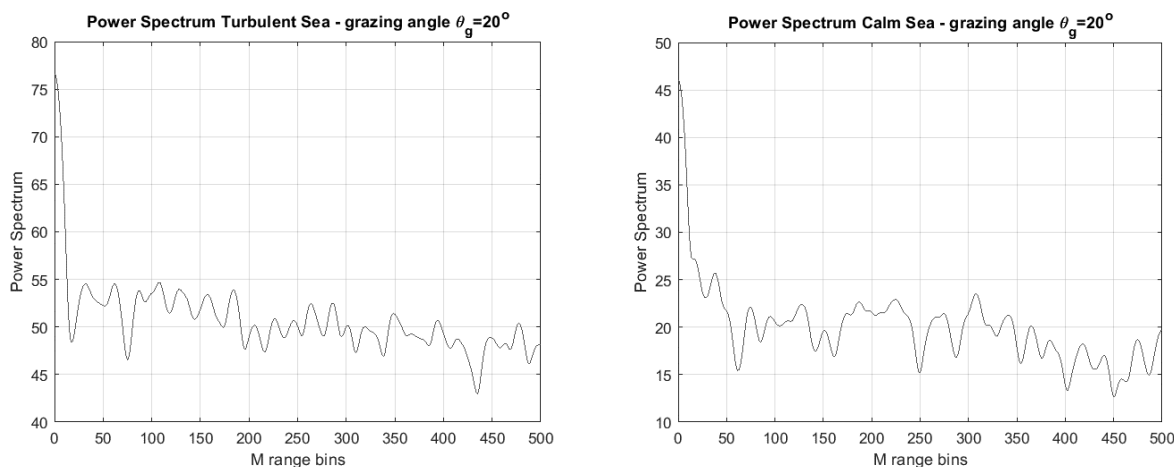


*Εικόνα 5: Πλάτος σήματος ραντάρ σε ταραγμένη (άνω σχήμα) και ήρεμη (κάτω σχήμα) θαλάσσια επιφάνεια*

Στις ανωτέρω εικόνες φαίνονται οι εντάσεις των σημάτων του ραντάρ για τις δύο μέρες 23/9 (ταραγμένη θάλασσα) και 24/9 (ήρεμη θάλασσα) για γωνία πρόσπτωσης του κύματος στην επιφάνεια της θάλασσας στις 20 μοίρες.

Αυτό που παρατηρήθηκε στα πειραματικά δεδομένα ήταν ότι για ταραγμένη θάλασσα η οπισθοσκέδαση είναι ισχυρότερη απ' ό,τι για ήρεμη θάλασσα, που ήταν αναμενόμενο ενώ η γαλήνια θάλασσα συμπεριφέρεται ως "λεία" επιφάνεια. Επίσης για μικρή γωνία πρόσπτωσης  $\theta_g$  η οπισθοσκέδαση είναι μικρότερη, διότι για τις εν λόγω γωνίες η θάλασσα εμφανίζεται περισσότερο "επίπεδη" στο ραντάρ.

Η γωνία πρόσπτωσης του κύματος του ραντάρ τη δεύτερη ημέρα της δοκιμής κατά τη διάρκεια της ανόδου του ελικοπτέρου κυμάνθηκε από 4 έως 54 μοίρες και η γωνία απόκλισης εκατέρωθεν της διόπτρευσης της επιφάνειας παρατήρησης δεν ξεπέρασε τις 20 μοίρες.



*Εικόνα 6: Φασματική ισχύς σήματος ραντάρ σε ταραγμένη και λεία θαλάσσια επιφάνεια*

Είναι φανερή η διαφορά στο πλάτος τιμών (κάθετος άξονας) όπου την πρώτη μέρα, όπου η θάλασσα είναι ταραγμένη, το μέσο πλάτος του σήματος είναι σχεδόν δέκα φορές περισσότερο από το μέσο πλάτος την δεύτερη μέρα, όπου η θάλασσα ήταν ήρεμη. Αντίστοιχα, στην Εικόνα 6 φαίνονται οι φασματικές ισχύς του ραντάρ για ταραγμένη και ήρεμη θαλάσσια επιφάνεια για γωνία πρόσπτωσης του κύματος στις 20 μοίρες όπου φαίνεται η διαφορά στις τιμές της φασματικής ισχύος μετρημένη σε dB, όπου στην ταραχώδη θάλασσα η φασματική ισχύς είναι σχεδόν διπλάσια από την ήρεμη επιφάνεια.

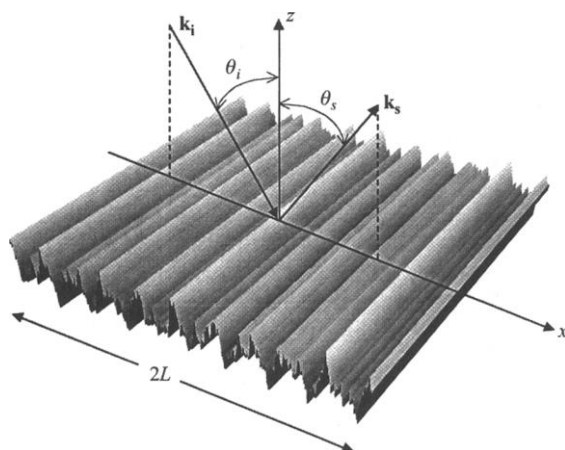


## Κεφάλαιο 3

### Μοντελοποίηση Σκέδασης Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων από Τραχιές Επιφάνειες

#### 3.1 Μοντελοποίηση σκέδασης δισδιάστατης τραχιάς επιφάνειας με προσέγγιση Kirchhoff

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (2.1) που είναι της μορφής  $\zeta=f_r(x,y)$ , έτσι όπως αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 2, λαμβάνουμε μία επιφάνεια  $\zeta=\zeta(x,y)$  ως στην Εικόνα 7. Θεωρούμε η επιφάνεια εκτείνεται από  $x=-L$  έως  $x=L$  και επειδή στην κατεύθυνση  $y$  επαναλαμβάνετε η ίδια τιμή, δύναται να γίνει η απλοποίηση,  $f_r(x,y)=f_r(x)$ .



Εικόνα 7: Γεωμετρία προβλήματος τραχιάς επιφάνειας

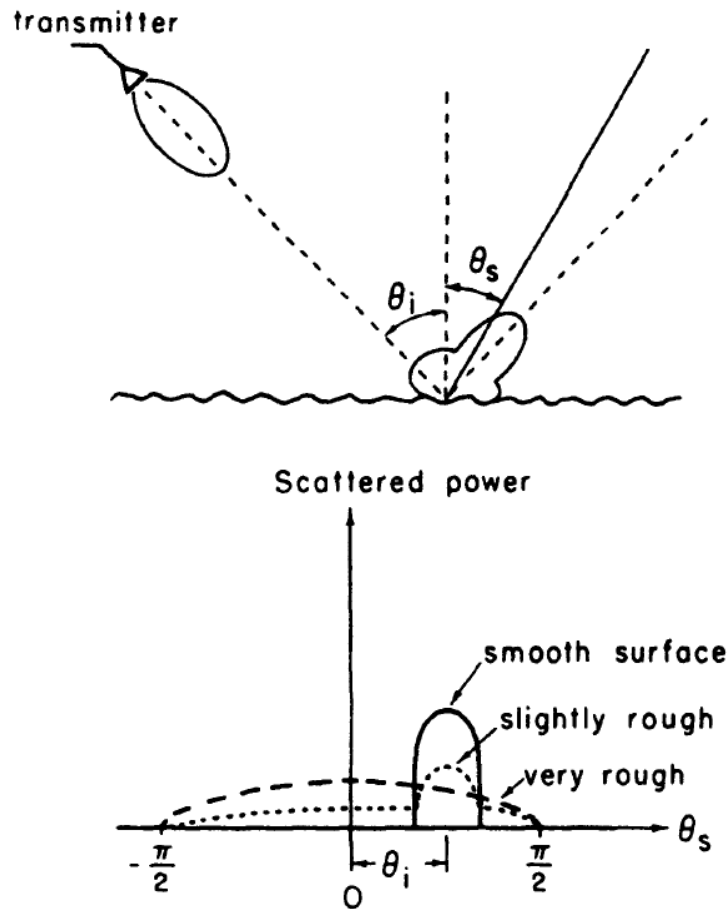
Για να υπολογιστεί η σκέδαση των επιφανειών fractal, χρησιμοποιήθηκαν μη γραμμικές διαφορικές εξισώσεις [7]. Κρίνεται αναγκαίο να βρεθούν προσεγγιστικές λύσεις με ορισμένα όρια, δεδομένης της μη ύπαρξης αναλυτικής γενικής λύσης των μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων. Μια προτεινόμενη λύση που έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως είναι η προσέγγιση του Kirchhoff που έχει όμως τον περιορισμό ότι ισχύει όταν το μήκος του προσπίπτοντος κύματος είναι μικρό σε σχέση με την τοπική ακτίνα καμπυλότητας της τραχύτητας της εξεταζόμενης επιφάνειας [15], [38], [47]. Η προσέγγιση του Kirchhoff λαμβάνει υπόψιν την ακριβή τραχύτητα της επιφάνειας για να υπολογίσει τη σκέδαση από αυτήν, ενώ οι λοιπές προσεγγιστικές μέθοδοι υπολογίζουν στατιστικά το μέσο όρο του σκεδαζόμενου πεδίου από την τραχιά επιφάνεια [7], [47].

### 3.2 Υπολογισμός εξίσωσης γενικής λύσης Kirchhoff για σκέδαση

Βάσει της σχετικής βιβλιογραφίας [7], [47] θεωρήθηκε ότι η τραχιά επιφάνεια δίνεται από την συνάρτηση:

$$\zeta = \zeta(x, y) \quad (3.1)$$

με το επίπεδο  $z=0$  να είναι η μέση στάθμη της επιφάνειας όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3: Γεωμετρία προβλήματος σκέδασης επί μονοδιάστατης επιφάνειας

Πριν τη λεπτομερή μαθηματική ανάλυση, κρίνεται διδακτικό να εξετασθούν τα γενικά χαρακτηριστικά της σκέδασης μίας τραχιάς επιφάνειας [48]. Αν υποτεθεί ότι ένα κύμα εκπέμπεται από έναν πομπό και προσπίπτει σε μια επιφάνεια όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3. Εάν η επιφάνεια είναι λεία, το ανακλώμενο κύμα είναι όμοιο με το ανακλώμενο κύμα που προέρχεται από το σημείο σκέδασης. Αν η επιφάνεια είναι ελαφρώς τραχιά, το ανακλώμενο κύμα εξασθενεί ελαφρώς λόγω της σκέδασης και η ισχύς του σήματος που αντιστοιχεί σε αυτή την εξασθένιση διασπείρεται προς κάθε κατεύθυνση. Αυτή η ανακλώμενη ισχύς ονομάζεται *συνιστώσα κατοπτρισμού* (specular component) του σήματος και η ισχύς που

διασπείρεται ονομάζεται *συνιστώσα διάχυσης* (diffuse component). Η κατοπτρική ανάκλαση από μια τραχιά επιφάνεια αντιστοιχεί στη συνεκτική ισχύ σε ένα τυχαίο μέσο και είναι ίση με το τετράγωνο του συνεκτικού (μέσου) πεδίου. Η συνιστώσα διάχυσης αντιστοιχεί στο μη-συνεκτικό πεδίο στο τυχαίο μέσο. Εάν η επιφάνεια γίνει πολύ τραχιά, η συνιστώσα κατοπτρισμού (συνεκτική ισχύς) σχεδόν μηδενίζεται και το πεδίο διάχυσης (μη συνεκτικό πεδίο) επικρατεί.

Στην συνέχεια, για την μαθηματική ανάλυση θεωρήθηκε ότι το μέσο στο χώρο  $z > \zeta$  είναι ο ελεύθερος χώρος. Για διευκόλυνση θεωρήθηκε επίσης ότι το ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι πολωμένο (οριζόντια ή κάθετα) έτσι ώστε να χρειάζεται να υπολογιστεί μόνο η βαθμωτή τιμή του διανύσματος  $E_z$  (δηλαδή το μέτρο του διανύσματος). Τέλος, θεωρήθηκε ότι το  $E_i$  είναι ένα αρμονικό επίπεδο κύμα με μοναδιαίο πλάτος ως κάτωθι:

$$E_1 = e^{iK_1 r} e^{-i\omega t} \quad (3.2)$$

όπου

$$K_1 = \frac{2\pi K_1}{\lambda k_1} \quad (3.3)$$

$K_1$  είναι το διάνυσμα διάδοσης, το οποίο αναφέρεται στο επίπεδο  $(x, z)$  ενώ  $r$  είναι η ακτίνα του διανύσματος

$$r = xx_0 + yy_0 + zz_0 \quad (3.4)$$

Ενώ για το πλήθος των σημείων που βρίσκονται πάνω στην επιφάνεια η εξίσωση (2.11) γίνεται:

$$r = xx_0 + yy_0 + \zeta(x, y)z_0 \quad (3.5)$$

Στο Σχήμα 3,  $\theta_1$  ορίζεται η συμπληρωματική γωνία πρόσπτωσης μεταξύ της διεύθυνσης της διάδοσης του  $E_i$  και του άξονα  $z$  ενώ  $\theta_2$  είναι η γωνία σκέδασης μεταξύ του άξονα  $z$  και του διανύσματος  $K_2$ , με:

$$K_1 = |K_2| = |K_1| = K = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.6)$$

με την  $\theta_1$  και  $\theta_2$  να μετρούνται με φορά αντίθετη από τον θετικό άξονα  $z$ .

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο χρονικός συντελεστής  $\exp(-i\omega t)$  από το αρμονικό επίπεδο κύμα της εξίσωσης (3.2) εις το εξής παραλείπεται. Η πόλωση του  $E_i$  ονομάζεται *κάθετη πόλωση* αν το  $E_i$  βρίσκεται στο επίπεδο πρόσπτωσης, όπου είναι το επίπεδο που σχηματίζουν τα διανύσματα  $K_i$  και  $z$  και ομοίως το  $E_2$  ονομάζεται *κάθετα πολωμένο* αν βρίσκεται στο επίπεδο σκέδασης  $K_2$  και  $z$ . Ομοίως, στην οριζόντια πόλωση τα  $E_i$  και  $E_2$  είναι κάθετα στο επίπεδο πρόσπτωσης και σκέδασης αντίστοιχα. Οι ποσότητες που συνδέονται με κάθετη πόλωση θα



δηλώνονται με τον ενδείκτη + (π.χ.  $E_1^+$  και  $E_2^+$ ), και εκείνες που συνδέονται με οριζόντια πόλωση από το ενδείκτη - (π.χ.  $E_1^-$  και  $E_2^-$ ). Το  $E$  είναι βαθμωτό μέγεθος και κατά συνέπεια ισχύει  $E = \mathbf{e} \cdot \mathbf{E}$  όπου  $\mathbf{e}$  είναι το μοναδιαίο διάνυσμα στην κατεύθυνση του  $\mathbf{E}$ . Ενώ επίσης ισχύει  $E_1^- = E_1 \gamma_0$

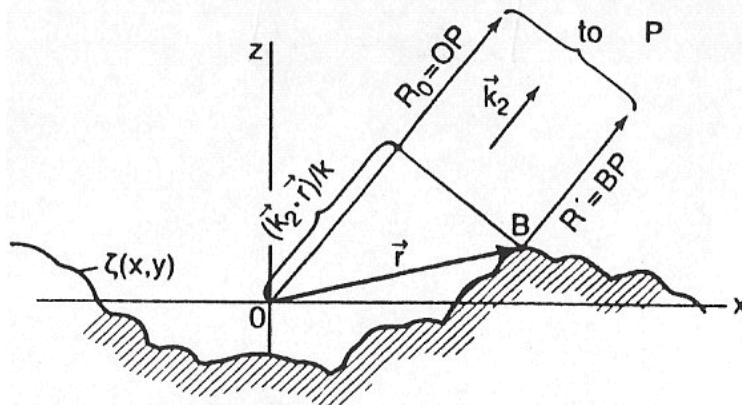
Ορίζεται ως  $P$  το σημείο παρατήρησης και το  $R'$  η απόσταση από το σημείο σκέδασης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος προς το σημείο  $P$  που βρίσκεται σε συντεταγμένες  $x, y, z(x,y)$  πάνω στην επιφάνεια  $S$ . Το ολοκλήρωμα *Helmholtz* δίνει το σκεδαζόμενο πεδίο  $E_2$  στο σημείο παρατήρησης  $P$

$$E_2(P) = \frac{1}{4\pi} \iint \left( E \frac{\theta\psi}{\theta n} - \psi \frac{\theta E}{\theta n} \right) dS \quad (3.7)$$

Όπου  $\psi = \frac{e^{ik_2 R''}}{R''}$

Για να αντιμετωπισθούν τα σκεδαζόμενα επίπεδα κύματα από τα σφαιρικά (π.χ με διευθύνσεις  $\theta_2$  από ότι τα σημεία  $\psi$ ), επιτρέπουμε  $R \rightarrow \infty$  και απαλείφεται το  $P$  προς την ζώνη διάθλασης *Fraunhofer* όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.

$$k_2 R' = k_2 R_0 - k_2 r \quad (3.8)$$



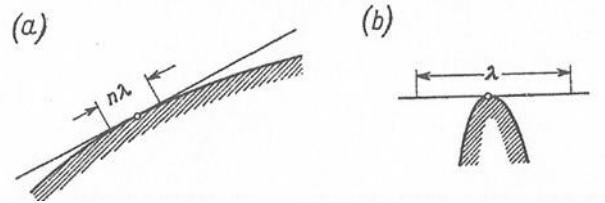
Σχήμα 4: Το σκεδαζόμενο πεδίο στο σημείο  $P$

όπου  $R_0$  είναι η απόσταση του  $P$  από την αρχή των συντεταγμένων,  $E$  και  $\theta E/\theta n$  είναι το πεδίο και η κάθετη παράγωγος πάνω στην επιφάνεια  $S$ . Το  $\psi$  γίνεται:

$$\psi = \frac{e^{ik_2 R_0 - ik_2 r}}{R_0} \quad (3.9)$$

Για να προσεγγιστούν οι τιμές αυτών των δυο ποσοτήτων, λόγω του ότι είναι γενικά άγνωστες, χρησιμοποιούμε τη προσέγγιση *Kirchhoff* (αναφέρεται και ως μέθοδος φυσικής οπτικής) που έγκειται στον υπολογισμό των τιμών του  $E$  και  $\theta E/\theta n$  πάνω στην επιφάνεια  $S$  για να υπολογίσουμε το ολοκλήρωμα της εξίσωσης (3.7). Στην παρούσα έρευνα εξετάζεται το πεδίο σε οποιοδήποτε σημείο της επιφάνειας ως το εφαπτόμενο επίπεδο όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.

Η ακτίνα καμπυλότητας των επιφανειών πρέπει να είναι μεγάλη [38], [47], [49], συγκρινόμενη με το μήκος κύματος του προσπίπτοντος κύματος όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5(α), καθώς η προσέγγιση του Kirchhoff δεν ευσταθεί ως θεωρία αν η τραχύτητα περιλαμβάνει αιχμηρά άκρα ή αιχμηρά σημεία όπως αυτό στο Σχήμα 5(β).



Σχήμα 5: Μεγάλη καμπυλότητα συγκρινόμενη με το μήκος κύματος, β) αιχμηρά σημεία

Στην παραπάνω περίπτωση το πεδίο πάνω στην επιφάνεια  $S$  είναι:

$$(E)_S = (1 + R)E_1 \quad (3.10)$$

Παραγωγίζοντας την εξίσωση που ουσιαστικά είναι το προσπίπτον και το ανακλώμενο κύμα ή παίρνοντας αντίστοιχα το μαγνητικό πεδίο ως κάτωθι:

$$(H)_S = (1 - R)H_1 \quad (3.11)$$

και χρησιμοποιώντας την εξίσωση Maxwell:

$$\nabla \times E = -\varepsilon \frac{\partial H}{\partial t} \quad (3.12)$$

Προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση:

$$\left(\frac{\partial E}{\partial n}\right) = (1 - R)E_1 k_1 n \quad (3.13)$$

όπου  $n$  είναι το κάθετο διάνυσμα στην επιφάνεια στο σημείο παρατήρησης και  $R$  είναι ο συντελεστής ανάκλασης του λείου επιπέδου.

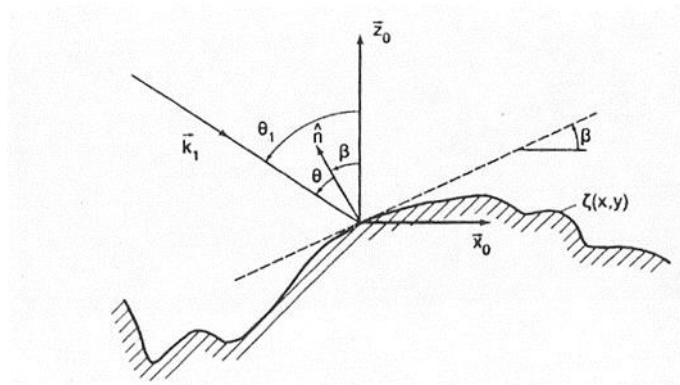
Η πόλωση του προσπίπτοντος κύματος, οι ηλεκτρικές ιδιότητες του ανακλώμενου υλικού αλλά και η γωνία πρόσπτωσης του κύματος είναι παράγοντες απ' τους οποίους εξαρτάται ο συντελεστής ανάκλασης,  $R=f(\text{incident angle, electrical properties, polarization})$ .

Οι συντελεστές ανάκλασης Fresnel για κάθετη και οριζόντια πόλωση για λείο επίπεδο είναι:

$$R^v = \frac{Y^2 \cos \theta - \sqrt{Y^2 - \sin^2 \theta}}{Y^2 \cos \theta + \sqrt{Y^2 - \sin^2 \theta}} \quad (3.14)$$

$$R^h = \frac{\cos\theta - \sqrt{Y^2 - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{Y^2 - \sin^2\theta}} \quad (3.15)$$

όπου  $\theta$  είναι η τοπική γωνία πρόσπτωσης όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6 δηλ. η γωνία που αποτελείται από τα διανύσματα  $k_i$  και  $n$  στο σημείο πρόσπτωσης της επιφάνειας (ενώ η ολική γωνία πρόσπτωσης  $\theta_1$  σε σχέση με το επίπεδο  $z(x,y)$ . είναι σταθερή για όλη την επιφάνεια).



Σχήμα 6: Γεωμετρία σκέδασης, τοπική γωνία  $\theta$

Η ακόλουθη σχέση μας δίνει την ποσότητα  $Y$  που είναι η κανονικοποιημένη αγωγιμότητα του μέσου στον χώρο  $Z < \zeta$ .

$$Y = \sqrt{\frac{\epsilon_{rc}}{\mu_{rc}}} \quad (3.16)$$

Όπου  $\epsilon_{rc}$  είναι η σχετική μιγαδική επιτρεπτότητα:

$$\epsilon_{rc} = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} + i60\lambda\sigma \quad (3.17)$$

όπου  $\epsilon$  είναι η διηλεκτρική σταθερά,  $\sigma$  η αγωγιμότητα και  $\mu_{rc} = \mu/\mu_0$  είναι η σχετική επιτρεπτότητα (η οποία μπορεί να έχει ένα μιγαδικό μέρος αν το μέσο έχει μαγνητικές απώλειες).

Στο Σχήμα 6 είναι φανερό ότι όταν το  $n$  εκτείνεται στο επίπεδο πρόσπτωσης  $x,z$  και η παράγωγος αναφέρεται μόνο σε δισδιάστατες τραχιές επιφάνειες που είναι σταθερές κατά μήκος των  $y$  συντεταγμένων και προκύπτει απλοποίηση της  $\zeta(x,y)$ :

$$\zeta(x,y) = \zeta(x) \quad (3.18)$$

Στην συνέχεια για:

$$\theta = \theta_1 - \beta = \theta_1 - \arctan\zeta'(x) \quad (3.19)$$

Αν αντικατασταθούν οι (3.9), (3.10) και (3.11) στην (3.7) βρίσκουμε ότι :

$$E_2 = \frac{ie^{ikR}}{4\pi R} \int (Rv - p)ne^{ivr} dS \quad (3.20)$$

Εισάγοντας τα διανύσματα:

$$v = k_1 - k_2 \quad (3.21)$$

$$p = k_1 + k_2 \quad (3.22)$$

Ενώ αναλύοντας τα διανύσματα στην εξίσωση (3.21) σε καρτεσιανές συντεταγμένες, έχουμε:

$$v = k[(\sin\theta_1 - \sin\theta_2)x_o - (\cos\theta_1 + \cos\theta_2)z_o] \quad (3.23)$$

Η παρατήρηση που μπορούμε να κάνουμε είναι ότι για  $\theta_1=\theta_2$ ,  $u_y=0$  δηλ. όταν η συμπληρωματική γωνία πρόσπτωσης είναι ίση με την γωνία σκέδασης, ενώ το  $u_x$  είναι αμελητέο μόνο όταν η συμπληρωματική γωνία πρόσπτωσης ως προς το έδαφος είναι ίση με την γωνία σκέδασης και ισχύει  $\theta_1=\theta_2=\pi/2$ .

$$p = k[(\sin\theta_1 + \sin\theta_2)x_o + (\cos\theta_2 - \cos\theta_1)z_o] \quad (3.24)$$

$$n = -x_o \sin\beta + z_o \cos\beta \quad (3.25)$$

$$r = xx_o + \zeta(x)z_o \quad (3.26)$$

$$dS = \sec\beta dx = \frac{dx}{\cos\beta}, \tan\beta = \zeta'(x) \quad (3.27)$$

Γράφοντας την (3.20) σε βαθμωτή μορφή για επιφάνεια που εκτείνεται από  $x=-L$  έως  $x=L$  έχουμε :

$$E_2 = \frac{ike^{ikR}}{4\pi R} \int_{-L}^L (\alpha\zeta' - b)e^{iu_x + iu_y\zeta} dx \quad (3.28)$$

Όπου

$$a = (1 - R)\sin\theta_1 + (1 + R)\sin\theta_2 \quad (3.29)$$

$$b = (1 + R)\cos\theta_2 - (1 - R)\cos\theta_1 \quad (3.30)$$

Για την απαλοιφή του συντελεστή μπροστά από το ολοκλήρωμα στην εξίσωση (3.28) καθώς και από τις δυσκολίες που προκύπτουν με αυτό, γίνεται κανονικοποίηση της προαναφερθείσας εξίσωσης εισάγοντας τον συντελεστή σκέδασης:

$$\rho = \frac{E_2}{E_{20}} \quad (3.31)$$

Όπου  $E_{20}$  είναι το ανακλώμενο πεδίο στην κατεύθυνση της κατοπτρικής σκέδασης  $\theta_1=\theta_2$  από μία λεία τέλεια επιφάνεια ίδιων διαστάσεων, κάτω από την ίδια γωνία

πρόσπτωσης στην ίδια απόσταση, όταν το προσπίπτον κύμα είναι οριζόντια πολωμένο. Για  $L=\lambda$  που θεωρείται για τις εξισώσεις (3.10) και (3.11) έγκυρο, η λεία τέλεια και αγωγίμη επιφάνεια θα συγκεντρώσει πρακτικά όλη την ανακλώμενη ενέργεια στην κατεύθυνση  $\theta_1=\theta_2$ , έτσι ώστε ο νόμος διατήρησης της ενέργειας να απαιτεί:

$$|\rho| \leq 1 \quad (3.32)$$

Αν

$$u_x = k(\sin\theta_1 - \sin\theta_2) \quad (3.33)$$

προκύπτει ότι για την κατεύθυνση της κατοπτρικής σκέδασης  $u_x=0$  και για λεία επιφάνεια  $\zeta=\zeta'=0$  από την εξίσωση (3.28) έχουμε:

$$E_{20} = \frac{ike^{ikR_0}L\cos\theta_1}{\pi R_0} \quad (3.34)$$

Από την εξίσωση (3.28), (3.31) και (3.34) βρίσκεται ότι

$$\rho = \frac{1}{4L\cos\theta_1} \int_{-L}^L (a\zeta' - b)e^{iu_x x + iu_z \zeta} dx \quad (3.35)$$

Η παραπάνω εξίσωση αποτελεί την γενική λύση μιας μονοδιάστατης τραχιάς επιφάνειας πεπερασμένης αγωγιμότητας. Επειδή τα  $a$  και  $b$  μέσω των εξισώσεων (3.14), (3.15), (3.19), (3.29) και (3.30) είναι γενικά πολύπλοκες συναρτήσεις του  $x$  η μορφή στην οποία παρουσιάζεται το ολοκλήρωμα (3.35) δεν είναι χρήσιμη εκτός της περίπτωσης λείας επιφάνειας, όπου  $\zeta=0$  και η εξίσωση (3.35) γίνεται:

$$\rho = -\frac{(1+R)\cos\theta_2 - (1-R)\cos\theta_1}{2\cos\theta_1} \text{sinc}u_x L \quad (3.36)$$

Κάνοντας χρήση του τύπου για το  $\text{sinc}x$ :

$$\text{sinc}x = \frac{\sin x}{x} \quad (3.37)$$

για οριζόντιά πόλωση, δηλαδή για τον τέλει αγωγό όπου  $R^h=-1$ , η εξίσωση (3.36) θα απλοποιηθεί σε:

$$\rho_0 = \text{sinc}u_x L \quad (3.38)$$

Η εξίσωση (3.38) είναι το γνωστό διάγραμμα σκέδασης αγωγίμου άπειρου φύλλου. Οι πλευρικοί λοβοί  $\lambda/L \rightarrow 0$  με την αντικατάσταση στον τύπο (3.33) του  $u_x$  με το  $k(\sin\theta_1 - \sin\theta_2)$  συγκεντρώνονται στην κατεύθυνση  $\theta_1=\theta_2$  κάνοντας το  $\rho_0=1$  για  $\theta_1 \approx \theta_2$  και το  $\rho_0=0$  για όλες τις άλλες κατευθύνσεις. Εύκολα επιλύεται το ολοκλήρωμα (3.34) όταν τα  $a$  και  $b$  είναι σταθερά. Ένας τρόπος ολοκλήρωσης είναι να πάρουμε

το μέσο όρο του  $R$  πάνω από την επιφάνεια και κάνοντας τα  $a$  και  $b$  ανεξάρτητα του  $x$ . Ένας άλλος ενδιαφέρων τρόπος είναι να πάρουμε το  $Y \rightarrow \infty$  ή μια τέλεια αγώγιμη επιφάνεια.

Από την (3.14) και (3.15) έχουμε:

$$R^v = 1 \text{ και } R^h = -1 \quad (3.39)$$

έτσι ώστε τα  $a$  και  $b$  στην (3.29) και (3.30) να είναι ανεξάρτητα του  $x$ .

Έτσι αν γίνει απαλοιφή των παρενθέσεων στο ολοκλήρωμα (3.35) ο πρώτος όρος φαίνεται να είναι το γινόμενο των  $\alpha z \exp(iu_z z)$  και  $\exp(iu_x z)$  και αν ολοκληρωθεί κατά μέρη η εξίσωση (3.35) θα μας δώσει:

$$\rho = \frac{1}{4L \cos \theta_1} \left[ \left( b + \frac{au_x}{u_z} \right) \int_{-L}^L e^{iv \cdot r} dx - \frac{ia}{u_z} e^{iv \cdot r(x)} \Big|_{-L}^L \right] \quad (3.40)$$

Αν αντικαταστήσουμε την (3.39) στην (3.29) και (3.30) θα έχουμε:

$$\begin{aligned} a^v &= 2 \sin \theta_2, b^v = 2 \cos \theta_2 \\ a^h &= 2 \sin \theta_1, b^h = -2 \cos \theta_1 \end{aligned} \quad (3.41)$$

Και αν αντικατασταθεί η (3.41) στην εξίσωση (3.28) και χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3.23) και θεμελιώδεις μετασχηματισμούς θα λάβουμε τελικά ότι:

$$\rho^\pm(\theta_1, \theta_2) = \pm \sec \theta_1 \frac{1 + \cos(\theta_1 + \theta_2)}{\cos \theta_1 + \cos \theta_2} \frac{1}{2L} \int_{-L}^L e^{iv \cdot r} dx + \frac{e^\pm(L)}{2L} \quad (3.42)$$

Όπου

$$e^\pm(L) = \frac{i \sec \theta_1 \sin \theta^\pm}{\kappa(\cos \theta_1 + \cos \theta_2)} e^{iv \cdot r(x)} \Big|_{-L}^L \quad (3.43)$$

Με

$$\theta^+ = \theta_2, \theta^- = \theta_1$$

Η ποσότητα  $vr$  δίνεται ως

$$v \cdot r = \frac{2\pi}{\lambda} [(\sin \theta_1 - \sin \theta_2)x - (\cos \theta_1 + \cos \theta_2)z(x)] \quad (3.44)$$

Η εξίσωση (3.42) είναι η γενική λύση για τέλεια αγώγιμη διδιάστατη τραχιά επιφάνεια, ακριβώς εντός της εγκυρότητας της (3.10). Η προέλευση της βασίζεται πάνω στην προσέγγιση *Isakovich* [50] όπου το 1952 υπέθεσε μία τέλεια αγωγιμότητα και έκανε χρήση μιας προσεγγιστικής διαδικασίας για την ολοκλήρωση. Σε μεταγενέστερες εφαρμογές θα υποθέσουμε μερικές φορές ότι η επιφάνεια είναι σταθερή στα άκρα με

$$\zeta(L) = \zeta(-L) = 0 \quad (3.45)$$

Για  $L=\lambda$  ο δεύτερος όρος της εξίσωσης (3.42) εύκολα φαίνεται αμελητέος συγκρινόμενος με τον πρώτο περιορίζοντας την εξίσωση αυτή σε μία απλή μορφή:

$$\rho = \frac{F_2}{2L} \int_{-L}^L e^{iv^r} dx \quad (3.46)$$

Με

$$F_2(\theta_1, \theta_2) = \sec\theta_1 \frac{1 + \cos(\theta_1 + \theta_2)}{\cos\theta_1 + \cos\theta_2} \quad (3.47)$$

### 3.3 Μοντελοποίηση σκέδασης τρισδιάστατης τραχιάς επιφάνειας με προσέγγιση Kirchhoff

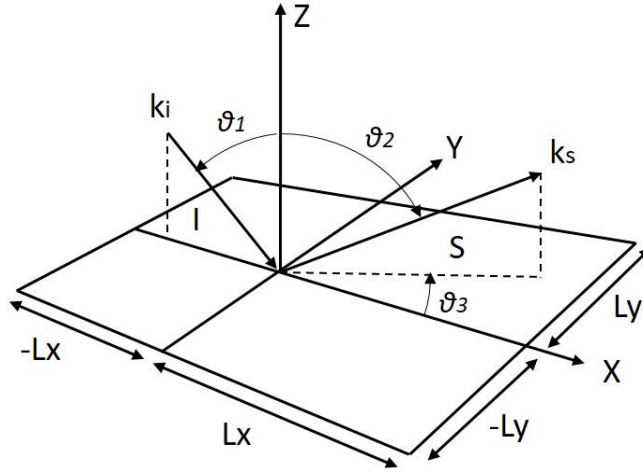
Τα αποτελέσματα του προηγούμενου τμήματος εύκολα μπορεί να επεκταθούν σε μια τρισδιάστατη επιφάνεια  $\zeta(x,y)$ . Η ακτίνα του διανύσματος  $r$  είναι όπως και στην δισδιάστατη περίπτωση,  $r = xx_0 + yy_0 + \zeta(x,y)z_0$

Η κύρια δυσκολία είναι ότι το  $R_v$  και  $R_h$  καθώς δίνονται από τις σχέσεις (3.14) και (3.15) εφαρμόζονται μόνο στην τοπική πόλωση η οποία δεν είναι αναγκαία πανομοιότυπη με την πόλωση σε σχέση με το επίπεδο  $x,y$  αφού το  $n$  γενικά δεν θα εκτείνεται στο επίπεδο πρόσπτωσης  $x,z$ .

Μπορεί να σημειωθεί ότι αν το τοπικό επίπεδο πρόσπτωσης  $k_i, n$  δεν είναι πανομοιότυπο με το κύριο επίπεδο πρόσπτωσης  $k_i, z_0$ , το  $E_i$  θα πρέπει να αναλυθεί σε μια τοπικά οριζόντια συνιστώσα (με διεύθυνση του σκεδαζόμενου κύματος και εφαπτόμενη στην επιφάνεια) και σε μια τοπικά κάθετη συνιστώσα (με διεύθυνση του σκεδαζόμενου κύματος και εφαπτόμενη στο επίπεδο  $k_i, n$ ).

Οι δύο συνιστώσες θα ανακλώνται με συντελεστές ανάκλασης  $R_v$  και  $R_h$ , και αφού γενικά αυτοί οι δύο μιγαδικοί συντελεστές είναι άνισοι, ένα γραμμικά πολωμένο κύμα θα είναι εκ-πολωμένο σε ένα ελλειπτικά πολωμένο κύμα. Προκειμένου να αποφευχθεί μια κουραστική ανάλυση της τρισδιάστατης γεωμετρίας, παρατηρούμε ότι το κύμα σκεδάζεται στην κατεύθυνση  $\theta_2, \theta_3$ , όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7.

Κατά συνέπεια εισάγουμε στο Σχήμα 7 ακόμη μια γωνία, την  $\theta_3$  για την πλευρική σκέδαση έξω από το επίπεδο πρόσπτωσης ( $k_i, z_0$ ). Όπου  $I$  είναι το επίπεδο πρόσπτωσης και  $S$  είναι το επίπεδο σκέδασης. Επίσης  $\theta_i$  είναι η γωνία πρόσπτωσης και  $\theta_2, \theta_3$  είναι οι γωνίες σκέδασης όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 7: Γεωμετρία προβλήματος σκέδασης επί τρισδιάστατης επιφάνειας

Ο συντελεστής ανάκλασης  $R$  των συνοριακών συνθηκών (3.14) και (3.15) για μία πεπερασμένη αγωγιμότητα θα είναι πλέον μια πολύπλοκη συνάρτηση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων, της κλίσης, της γωνίας πρόσπτωσης και της πόλωσης του προσπίπτοντος κύματος. Αν η αγωγιμότητα σε μία επιφάνεια είναι τέλεια τότε τα ανακλώμενα επίπεδα αφήνουν το πλάτος του προσπίπτοντος πεδίου αναλλοίωτο, αν και μπορούν να αλλάξουν την κατεύθυνση του διανύσματος  $E$ . Αυτό σημαίνει ότι αν τεθεί ο συντελεστής ανάκλασης ίσος με την μονάδα θα προκύψει μία βαθμωτή τιμή του  $E_2$  χωρίς την πληροφόρηση για το πως πολώνεται το μέγεθος αυτό. Επαναλαμβάνοντας την διαδικασία του προγενέστερου τμήματος που αφορούσε την σκέδαση σε δισδιάστατη επιφάνεια βρίσκουμε ότι ο συντελεστής σκέδασης είναι:

$$\rho = \frac{1}{4XY \cos \theta_1} \int_{-X}^X \int_{-Y}^Y (a\zeta'_x + c\zeta'_y - b) e^{iv \cdot r} dx dy \quad (3.48)$$

όπου

$$v = k[(\sin \theta_1 - \sin \theta_2 \cos \theta_3)x_0 - \sin \theta_2 \sin \theta_3 y_0 - (\cos \theta_1 - \cos \theta_2)z_0] \quad (3.49)$$

και

$$a = (1 - R)\sin \theta_1 + (1 + R)\sin \theta_2 \cos \theta_3 \quad (3.50)$$

$$b = (1 + R)\cos \theta_2 - (1 - R)\cos \theta_1 \quad (3.51)$$

$$c = (1 + R)\sin \theta_2 \sin \theta_3 \quad (3.52)$$

ο συντελεστής ανάκλασης  $R$  δεν είναι απαραίτητα ίσος με τον συντελεστή Fresnel. Για τέλεια αγωγή επιφάνεια, θέτουμε  $R=1$  με την διατήρηση της πόλωσης ως ανωτέρω και βρίσκουμε:



$$a = 2\sin\theta_2\cos\theta_3 \quad (3.53)$$

$$b = 2\cos\theta_2 \quad (3.54)$$

$$c = 2\sin\theta_2\sin\theta_3 \quad (3.55)$$

Αν τα  $a, b, c$  οφείλονται σε άπειρη αγωγιμότητα ή για άλλους λόγους είναι σταθερά, η σχέση (3.48) μπορεί να ολοκληρωθεί κατά μέρη όπως στην περίπτωση δισδιάστατης επιφάνειας ως κάτωθι:

$$\rho = \frac{1}{4XY\cos\theta_1} \left[ \left( b + \frac{av_x + cv_y}{v_z} \right) \int_{-X}^X \int_{-Y}^Y e^{iv \cdot r} dx dy - \frac{ic}{v_x} \int_{-Y}^Y e^{iv \cdot r} dx - \frac{ia}{v_z} \int_{-X}^X e^{iv \cdot r} dy \right] \quad (3.56)$$

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (3.53), (3.54), (3.55) στην σχέση (3.56) βρίσκουμε:

$$\rho(\theta_1, \theta_2, \theta_3) = \frac{1 + \cos\theta_1\cos\theta_2 - \sin\theta_1\sin\theta_2\cos\theta_3}{\cos\theta_1(\cos\theta_1 + \cos\theta_2)} \frac{1}{A} \int_{-X}^X \int_{-Y}^Y e^{iv \cdot r} dx dy + \frac{e(X, Y)}{A} \quad (3.57)$$

όπου  $A=4XY$  είναι η περιοχή της επιφάνειας  $S$  που προβάλλεται στο επίπεδο  $x, y$  και  $e(X, Y)$  δίνεται από τον τελευταίο όρο της (3.57). Ο δεύτερος όρος της (3.57) είναι ένα φαινόμενο άκρου (edge effect) που είναι αμελητέο συγκρινόμενο με τον πρώτο όρο για  $A=\lambda^2$  όπως προαναφέρθηκε. Σε αυτή την περίπτωση η (3.57) περιορίζεται στον απλό τύπο:

$$\rho = \frac{F_3}{A} \iint_A e^{iv \cdot r} dx dy \quad (3.58)$$

Με

$$F_3(\theta_1, \theta_2, \theta_3) = \frac{1 + \cos\theta_1\cos\theta_2 - \sin\theta_1\sin\theta_2\cos\theta_3}{\cos\theta_1(\cos\theta_1 + \cos\theta_2)} \quad (3.59)$$

Για την διαμήκη σκέδαση  $\theta_3=0$  έχουμε  $F_3=F_2$ , έτσι η (3.58) περιορίζεται στη σχέση (3.46). Επιπλέον τα κατά μήκος σκεδαζόμενα κύματα (δηλαδή τα κύματα που σκεδαζονται στο επίπεδο πρόσπτωσης  $x, z$ ) δεν αποπολώνονται αν το προσπίπτων κύμα είναι πολωμένο κάθετα ή οριζόντια. Αυτό φαίνεται καλύτερα με αντικατάσταση του  $\theta_3=0$  στην (3.55) και από το  $c=0$  στην (3.48). Για τα κατά μήκος σκεδαζόμενα κύματα η τιμή του  $\zeta'_y$  είναι άσχετη και ως εκ τούτου δεν αναγνωρίζεται καμία αποπόλωση έτσι ώστε ο συντελεστής ανάκλασης  $R$  να είναι όπως στην περίπτωση της μονοδιάστατης τραχιάς επιφάνειας πανομοιότυπος με τον συντελεστή Fresnel  $R_v$  ή  $R_h$  εξαρτώμενο από την πόλωση του  $E_i$ . Φυσικά, αυτό είναι ξεκάθαρο επειδή τα κατά μήκος σκεδαζόμενα κύματα προέρχονται μόνο από τα εφαιπτόμενα επίπεδα με το  $n$  στο επίπεδο  $x, z$ . Ο πρώτος όρος στην σχέση (3.57) βρέθηκε από τον Isakovich [50] με μια προσεγγιστική ολοκλήρωση.

## Κεφάλαιο 4

### Χαρακτηρισμός Τραχύτητας Τρισδιάστατης Επιφάνειας Δεδομένων Οπισθοσκέδασης Ραντάρ

#### 4.1 Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον για τη σκέδαση οπτικών, ηλεκτρομαγνητικών και ακουστικών κυμάτων από τραχιές επιφάνειες. Μια πολύ ενδιαφέρουσα και πολύ δημοφιλής προσέγγιση για την παρουσίαση τραχιών επιφανειών που συναντώνται στην πραγματική ζωή έχει προταθεί όπως έχει ήδη αναφερθεί από τον Mandelbrot και άλλους επιστήμονες που παρουσίασαν την έννοια των fractal, [9], [51]. Η σκέδαση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από τραχιές fractal επιφάνειες έχει εξεταστεί στο παρελθόν όπου έχουν ληφθεί υπόψη τρισδιάστατες fractal επιφάνειες που δημιουργήθηκαν από προσομοίωση, και στην συνέχεια αναλύθηκαν με τη προσέγγιση του Kirchhoff. Σε αντίθεση με την πρόσφατη δημοσίευσή του Kotropoulis [1] όπου εξετάζεται η μονοστατική σκέδαση, η κύρια ιδέα του παρόντος κεφαλαίου είναι η απλή περίπτωση σκέδασης από τρισδιάστατες επιφάνειες όπου χρησιμοποιήθηκε μια παραλλαγή της μονοδιάστατης συνάρτησης Weierstrass [52] (που μελετάει διδιάστατη fractal επιφάνεια), για την μελέτη τρισδιάστατων fractal επιφανειών.

Το 1994, όπως αναφέρθηκε στο πρώτο κεφάλαιο, προτάθηκε μια ευρυζωνική συνάρτηση Weierstrass (για τρισδιάστατη επιφάνεια) από τον Lin [19], προκειμένου να μελετηθεί η διστατική σκέδαση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από τρισδιάστατες fractal επιφάνειες. Ωστόσο, στην παρούσα μελέτη υιοθετούμε μια απλούστερη αναπαράσταση τρισδιάστατης fractal επιφάνειας, που εισήχθη το 2012 από τον Zaleski [43]. Η μαθηματική διατύπωση για την ηλεκτρομαγνητική σκέδαση από τρισδιάστατες τραχιές επιφάνειες παρουσιάστηκε αρχικά από τους Beckmann και Spizzichino [7], όπου έγινε χρήση της προσέγγισης Kirchhoff περί σκέδασης από τραχιές επιφάνειες, και χρησιμοποιήθηκε στην πλειοψηφία της διεθνούς βιβλιογραφίας. Βασικό όμως είναι ότι η προσέγγιση Kirchhoff που αναφέρθηκε παραπάνω, ισχύει με την παραδοχή ότι το μήκος κύματος του προσπίπτοντος ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι πολύ μικρότερο από την ακτίνα

καμπυλότητας της τραχιάς επιφάνειας τοπικά στο σημείο παρατήρησης ( $L \gg \lambda$ ), δηλαδή η τραχύτητα της επιφάνειας είναι μικρή σε σύγκριση με το μήκος κύματος του προσπίπτοντος ηλεκτρομαγνητικού κύματος [7].

#### 4.2 Μαθηματική διατύπωση

Η γεωμετρία του τρισδιάστατου προβλήματος περιγράφεται αναλυτικά ανωτέρω στην παράγραφο περί γενικής λύσης της σκέδασης σε τρισδιάστατη τραχιά επιφάνεια και φαίνεται στο Σχήμα 7 του προηγούμενου κεφαλαίου. Να θυμίσουμε ότι, ένα προσπίπτον επίπεδο ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει σε μια τρισδιάστατη τραχιά fractal επιφάνεια  $f(x,y)$ , όπου το εμβαδόν της επιφάνειας (λόγω του περιορισμένου εύρους δέσμης της κεραίας του ραντάρ) είναι  $A=4LxLy$ , με  $-Lx < x < Lx$  και  $-Ly < y < Ly$ . Η γωνία πρόσπτωσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος σε σχέση με το κάθετο άξονα  $z$  είναι  $\theta_1$ , ενώ οι γωνίες σκέδασης και διόπτρευσης της σκέδασης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι  $\theta_2$  και  $\theta_3$ , ως προς τον κάθετο άξονα  $z$  και τον οριζόντιο άξονα  $x$ , αντίστοιχα. Τα διανύσματα του προσπίπτοντος και σκεδαζόμενου κύματος αναφέρονται ως  $k_i$  και  $k_s$ , αντίστοιχα.

Όσον αφορά τη μοντελοποίηση της τρισδιάστατης τραχιάς fractal επιφάνειας, εισάγουμε την δισδιάστατη συνάρτηση Weierstrass δύο μεταβλητών, ως απλή τροποποίηση των αντίστοιχων συναρτήσεων Weierstrass που προτάθηκαν στο παρελθόν από τους Jaggard [52] (συνάρτηση μιας μεταβλητής) και του Zaleski [43] (συνάρτηση δύο μεταβλητών). Επομένως, η συνάρτηση που προτείνεται και περιγράφει την τροποποιημένη δισδιάστατη ευρυζωνική συνάρτηση Weierstrass για τη μοντελοποίηση των τρισδιάστατων τραχιών fractal επιφανειών δίνεται από τον τύπο :

$$f(x,y) = \sigma C \sum_{n=0}^{N-1} b^{(D-3)n} \sin(K_1 b_1^n x + \varphi_{n1}) \cos(K_2 b_2^n y + \varphi_{n2}) \quad (4.1)$$

όπου  $\sigma$  είναι η τυπική απόκλιση (δηλαδή το μέσο ύψος της τραχιάς επιφάνειας),  $C$  είναι ο συντελεστής εξομάλυνσης του πλάτους,  $N$  είναι το πλήθος των τόνων που περιγράφουν την επιφάνεια,  $b$ ,  $b_1$  και  $b_2$  ( $b_1 > 1$ ,  $b_2 > 1$ ) είναι οι παράμετροι κλίμακας χωρικής συχνότητας με  $b_1$  και  $b_2$  να είναι οι χωρικές συχνότητες στους άξονες  $x$  και  $y$  αντίστοιχα, το  $b$  είναι σταθερά με παίρνει τιμές [1.8177, 2.7183],  $D$  ( $2 < D < 3$ ) είναι διάσταση fractal και ουσιαστικά είναι η παράμετρος της τραχύτητας της επιφάνειας,  $K_1$  και  $K_2$  είναι οι θεμελιώδεις χωρικοί κυματαριθμοί στην κατεύθυνση των  $x$  και  $y$  αντίστοιχα,  $\Lambda_0$  είναι το θεμελιώδες χωρικό μήκος κύματος και  $\varphi_{n1}$ ,  $\varphi_{n2}$  είναι αυθαίρετες φάσεις με συνεχή ομοιόμορφη κατανομή (ή ορθογώνια κατανομή) στο διάστημα  $[-\pi, \pi]$ .

Ο συντελεστής εξομάλυνσης  $C$  (δηλαδή ελέγχου του πλάτους) υπολογίζεται έτσι ώστε η συνάρτηση (4.1) να παρουσιάζει μέσο ύψος της επιφάνειας πάντα ίσο με

την τυπική απόκλιση  $\sigma$ . Επομένως, θεωρώντας ότι η τροποποιημένη δισδιάστατη ευρυζωνική συνάρτηση Weierstrass  $f(x,y)$  περιγράφει την τρισδιάστατη τραχιά επιφάνεια θέλουμε να ισχύει:

$$f_{rms}^2 = [\text{rms height of } f(x,y)]^2 = \frac{1}{4L^2} \int_{-L}^L \int_{-L}^L f^2(x,y) dx dy \cong \sigma^2 \quad (4.2)$$

Όμως

$$f^2(x,y) = \sigma^2 C^2 \left( \sum_{n=0}^{N-1} b^{(D-3)n} \sin(K_1 b_1^2 x + \varphi_{n1}) \cos(K_2 b_2^2 y + \varphi_{2n}) \right)^2 \quad (4.3)$$

Και

$$f_{rms}^2(x,y) = \sigma^2 C^2 \sum_{n=0}^{N-1} \frac{1}{4} b^{(D-3)2n} = \frac{\sigma^2 C^2}{4} \sum_{n=0}^{N-1} b^{(D-3)2n} \quad (4.4)$$

$$\langle \sin^2 x \rangle \rightarrow \frac{1}{2} \quad \text{και} \quad \langle \cos^2 x \rangle \rightarrow \frac{1}{2}$$

Αλλά ισχύει ότι:

$$\sum_{n=0}^{N-1} b^{2(D-3)n} = \frac{1 - b^{2(D-3)N}}{1 - b^{2(D-3)}} \quad (4.5)$$

Επομένως προκύπτει

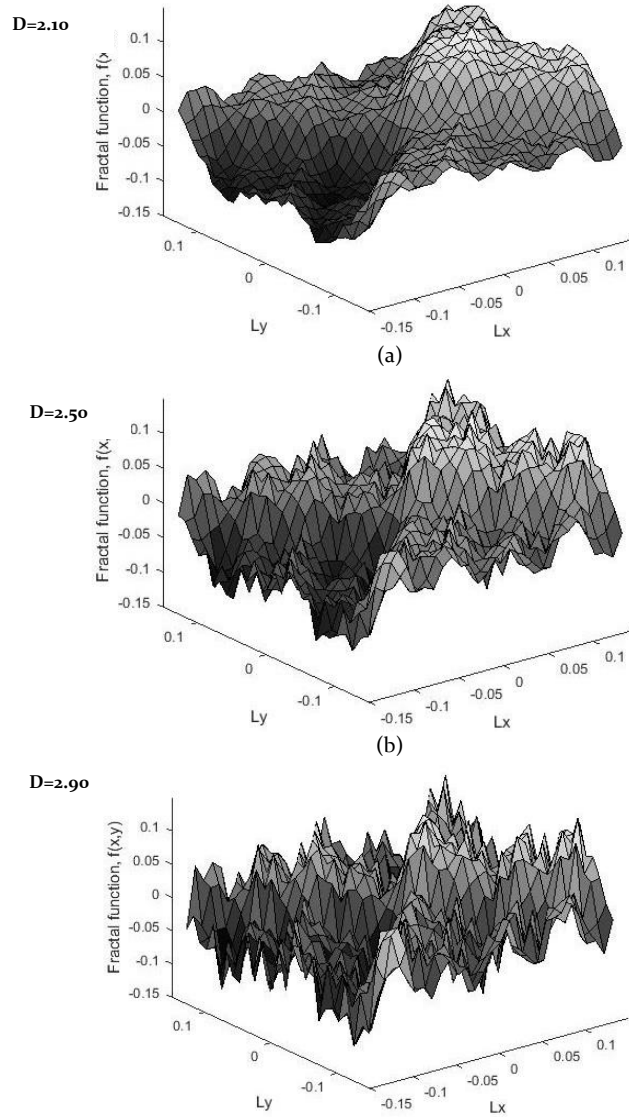
$$f_{rms}^2 = \frac{\sigma^2 C^2}{4} \frac{1 - b^{2(D-3)N}}{1 - b^{2(D-3)}} = \sigma^2 \quad (4.6)$$

$$C^2 = 4 \frac{1 - b^{2(D-3)}}{1 - b^{2(D-3)N}} \quad (4.7)$$

Μετά από υπολογισμούς το  $C$  δίνεται από την ακόλουθη σχέση (βλέπε [15]):

$$C = 2 \left( \frac{1 - b^{2(D-3)N}}{1 - b^{2(D-3)}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.8)$$

Στην Εικόνα 8 απεικονίζονται μερικές αντιπροσωπευτικές προσομοιώσεις της συνάρτησης (4.3) για διάφορες τιμές της fractal διάστασης  $D$ . Καθώς, η διάσταση fractal επηρεάζει την τραχύτητα της επιφάνειας και παίρνει τιμές  $D=[2.10, 2.50, 2.90]$ , η τραχύτητα των τρισδιάστατων fractal επιφανειών αυξάνεται όπως φαίνεται και στην Εικόνα 8.



*Εικόνα 8: Απεικονίσεις fractal συνάρτησης  $f(x,y)$  για διαφορετικές τιμές της fractal διάστασης*

Στην συνέχεια για τον υπολογισμό του σκεδαζόμενου πεδίου από μία τραχιά επιφάνεια χρησιμοποιήθηκε η προσέγγιση του Kirchhoff στην οποία λαμβάνεται υπόψη η ακριβής τραχύτητα της επιφάνειας που παράχθηκε με την προσομοίωση. Στην προσέγγιση του Kirchhoff θεωρείται ότι το μήκος κύματος του προσπίπτοντος πεδίου είναι μικρό σε σχέση με την ακτίνα καμπυλότητας της επιφάνειας στο σημείο παρατήρησης. Το βαθμωτό σκεδαζόμενο πεδίο  $E_{sc}$  για μία επιφάνεια εμβαδού  $2L_x \times 2L_y$  σε μία απόσταση  $R_0$  από το σημείο σκέδασης δίνεται από την προσέγγιση του Kirchhoff:

$$E_{sc} = \frac{ikL \exp(ikR_0)}{4\pi R_0 L_x L_y} \int_{-L_x}^{L_x} \int_{-L_y}^{L_y} (af'_{rx} - cf'_{ry} - b) \exp(iku_x x + iku_y y + iku_z f_r(x, y)) dx dy \quad (4.9)$$

όπου:

$$a = (1 - R)\sin\theta_1 + (1 + R)\sin\theta_2\cos\theta_3 \quad (4.10)$$

$$b = (1 + R)\cos\theta_2 - (1 - R)\cos\theta_1 \quad (4.11)$$

$$c = (1 + R)\sin\theta_2\sin\theta_3 \quad (4.12)$$

$$u_x = \sin\theta_1 - \sin\theta_2\cos\theta_3 \quad (4.13)$$

$$u_y = -\sin\theta_2\sin\theta_3 \quad (4.14)$$

$$u_z = -(\cos\theta_1 + \cos\theta_2) \quad (4.15)$$

Στην συνέχεια, για τη μελέτη χαρακτηρισμού της τραχύτητας μίας τρισδιάστατης επιφάνειας, ο συντελεστής σκέδασης  $\gamma$  του προσπίπτοντος ηλεκτρομαγνητικού κύματος σε μια αυθαίρετη κατεύθυνση σκέδασης ( $\theta_2$  και  $\theta_3$ ), αντιπροσωπεύει το σκεδαζόμενο ηλεκτρικό πεδίο, και ομαλοποιείται κατά περίπτωση από τη fractal διάσταση  $D$ .

Στην περίπτωση μία λείας και τέλεια αγωγίμης επιφάνειας σκέδασης, το σκεδαζόμενο πεδίο για οριζόντια πόλωση μπορεί να θεωρηθεί η αντανάκλαση κατοπτρισμού για  $\theta_3=0$ ,  $\theta_2=-\theta_1$ . Το σκεδαζόμενο πεδίο  $E_{sc0}$  σε αυτή την περίπτωση παίρνει την μορφή:

$$E_{sc0} = -\frac{2L_xL_y ik \exp(ikR_0)\cos\theta_1}{\pi R_0} \quad (4.16)$$

Έτσι ο συντελεστής σκέδασης  $\gamma$  γίνεται:

$$\gamma = \frac{E_{sc}}{E_{sc0}} = \frac{F_3}{A} \int_{-L_x}^{L_x} \int_{-L_y}^{L_y} \exp(iku_x x + ik u_y y + ik u_z f_r(x, y)) dx dy + \frac{e(X, Y)}{A} \quad (4.17)$$

όπου:

$$F_3(\theta_1, \theta_2, \theta_3) = \frac{1 + \cos\theta_1\cos\theta_2 - \sin\theta_1\sin\theta_2\cos\theta_3}{\cos\theta_1(\cos\theta_1 + \cos\theta_2)} \quad (4.18)$$

$$A = 4L_xL_y, \quad (4.19)$$

$$k = 2\pi f / c \quad (4.20)$$

$$u_x = \sin\theta_1 - \sin\theta_2\cos\theta_3 \quad (4.21)$$

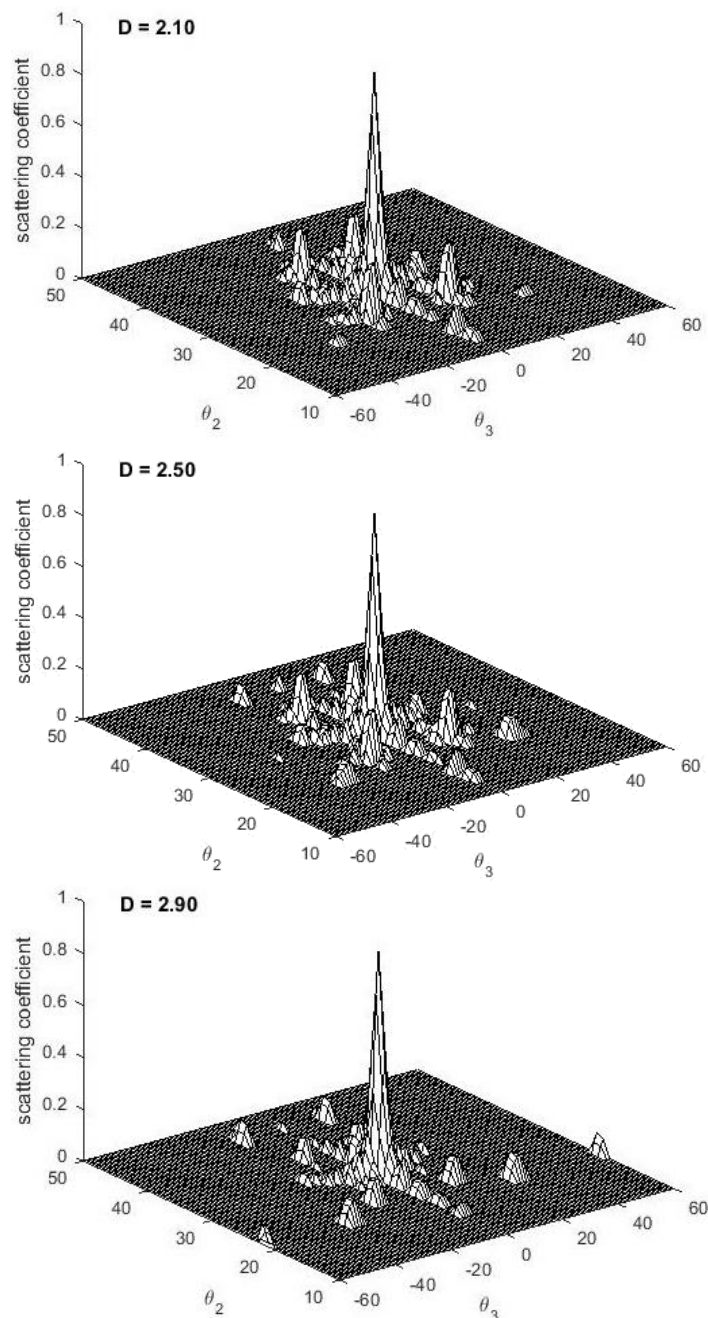
$$u_y = -\sin\theta_2\sin\theta_3 \quad (4.22)$$

$$u_z = -(\cos\theta_1 + \cos\theta_2) \quad (4.23)$$

και  $e(X, Y)$  αντιπροσωπεύει το λεγόμενο φαινόμενου άκρου (edge effect).

Στην εξίσωση (4.17),  $k$  είναι ο κυματαριθμός του σκεδαζόμενου ηλεκτρομαγνητικού κύματος ( $k=2\pi f/c$ , όπου  $f$  είναι η συχνότητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος). Επιπλέον, στην εξίσωση (4.17), ο πρώτος όρος αποτελεί το σημαντικότερο παράγοντα στο φαινόμενο της σκέδασης, ενώ ο δεύτερος όρος  $e(X,Y)$  είναι το φαινόμενου άκρου που προαναφέρθηκε, και παραλείπεται όταν  $A \gg \lambda^2$  [7].

Στην Εικόνα 9 απεικονίζονται αντιπροσωπευτικές παραχθείσες προσομοιώσεις του συντελεστή σκέδασης από τρισδιάστατες επιφάνειες fractal για διάφορες τιμές της διάστασης fractal  $D$ , όπως προέκυψαν χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (4.17) έως (4.23).



Εικόνα 9: Απεικόνιση σκέδασης με συντελεστή σκέδασης  $\gamma$  συνάρτηση γωνιών σκέδασης  $\theta_2, \theta_3$  και  $\theta_1 = 30^\circ$  από τραχιές επιφάνειες με fractal διάσταση,  $D = [2.10, 2.50, 2.90]$

Όπως είναι φανερό στην Εικόνα 9, ο συντελεστής σκέδασης παρουσιάζει μικρή διασπορά εκατέρωθεν της γωνίας σκέδασης για μικρή διάσταση fractal  $D$  (όπως προέκυψε από ένα μεγάλο αριθμό προσομοιώσεων). Ο συντελεστής σκέδασης κατοπτρικής ανάκλασης (όπου η γωνία πρόσπτωσης είναι ίση με την γωνία σκέδασης), δηλαδή στην κατεύθυνση ( $\theta_3=0, \theta_2=-\theta_1$ ) δίνεται από την εξίσωση (4.24). Τέλος, σημειώνεται ότι στην ειδική περίπτωση της οπισθοσκέδασης όπου  $\theta_3=0, \theta_2=-\theta_1$  που εξετάζεται στην συνέχεια, εξάγονται οι ακόλουθες εξισώσεις για τον συντελεστή οπισθοσκέδασης  $\gamma_{bsc}$ :

$$\gamma_{bsc} = \frac{1}{4L_x L_y \cos^2(\theta_1)} \int_{-L_x}^{L_x} \int_{-L_y}^{L_y} e^{i2k\varphi(x,y)} dx dy \quad (4.24)$$

Όπου:

$$\varphi(x,y) = x \sin \theta_1 - f(x,y) \cos \theta_1 \quad (4.25)$$

### 4.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Το σύνολο των προσομοιώσεων εστιάστηκαν για ηλεκτρομαγνητικά κύματα που σκεδάζονται από τραχιά επιφάνεια όταν ισχύει η συνθήκη  $\theta_3=0$  και  $\theta_2=-\theta_1$  (οπισθοσκεδαζόμενο ηλεκτρομαγνητικό κύμα) και συγκεκριμένα τέθηκαν οι τιμές  $\theta_1=30$  και  $\theta_2=-30$ . Η επιφάνεια προσομοιώθηκε ως μηδενικού μέσου (*zero-mean*) ζωνοπερατή fractal συνάρτηση όπου η τραχύτητα της καθορίζεται από την διάσταση fractal  $D$  ( $2 < D < 3$ ). Το μέσο ύψος της τραχιάς επιφάνειας καθορίστηκε σε  $\sigma=0.05\lambda$ . Το μήκος φωτιζόμενης επιφάνειας στην διεύθυνση του άξονα  $x$  (patch size) επιλέχθηκε ίσο με  $2L=80\lambda$  ενώ το θεμελιώδες μήκος κύματος  $\Lambda_0=10\lambda$  έτσι ώστε να ισχύει η συνθήκη  $2L \gg \Lambda_0$  και να έχει υπόσταση η προσέγγιση του Kirchhoff.

Έτσι, για ένα εύρος συχνοτήτων ενός ραντάρ συνθετικού παραθύρου βηματικής συχνότητας (Stepped Frequency - SF), υπολογίστηκε ο συντελεστής οπισθοσκέδασης  $\gamma_{bsc}$ , της εξίσωσης (4.24), σε συνάρτηση με τη διάσταση fractal  $D$  της τραχιάς επιφάνειας. Η λειτουργία των ραντάρ συνθετικού παραθύρου βηματικής συχνότητας περιγράφονται αναλυτικά στο Παράρτημα "B" της παρούσας μελέτης.

Όπως αναφέρθηκε η απόλυτη τιμή του συντελεστή σκέδασης  $|\gamma(k)|$  υπολογίστηκε από την εξίσωση (4.17) για ένα εύρος συχνοτήτων  $f_m=f_0+(m-1)\Delta f$ , όπου  $m=1,2,\dots,M$ ,  $M$  είναι ο αριθμός των συχνοτήτων του ραντάρ συνθετικού παραθύρου βηματικής συχνότητας,  $f_0$  είναι η φέρουσα συχνότητα,  $\Delta f=B/M$  είναι το βήμα αύξησης της συχνότητας και  $B$  είναι το εύρος ζώνης του ραντάρ, όπως αναφέρεται και στην βιβλιογραφία [1], [46]. Σε αυτές τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκαν, για λόγους απλότητας οι κυματαριθμοί  $K_1=K_2=K$  ( $K=2\pi/\Lambda_0$ , όπου  $\Lambda_0$  είναι το θεμελιώδες μήκος

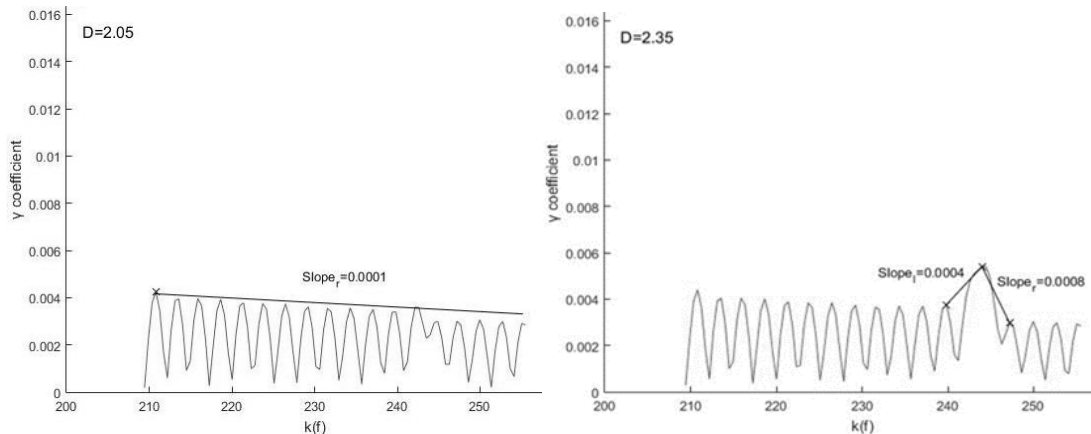


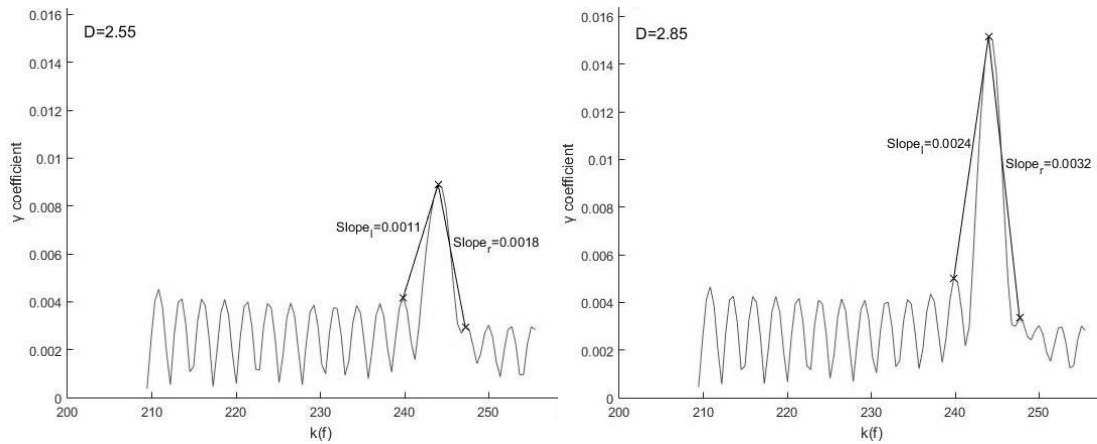
κύματος επιφάνειας). Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση των προσομοιώσεων συνοψίζονται στον Πίνακα 2, όπου χρησιμοποιήθηκαν  $L_x=L_y=L$ ,  $2L \gg \Lambda_0$  και  $k \cos \theta_1 < 1$ , με  $k=2\pi/\lambda$  να είναι ο κυματαριθμός του ραντάρ [1], [15].

No	Description	Symbol	Value
1	spatial frequency scaling parameters	$b=b_1$	1.8122
		$b_2$	2.7183
2	number of tones	N	6
3	number of frequency steps	M	100
4	radar bandwidth	B	2.2 GHz
5	frequency step	$\Delta f$	$B/M=22$ MHz
6	carrier radar frequency	$f_0$	10 GHz
7	radar wavelength	$\lambda$	$c/f_0=3$ cm
8	surface rms height	$\sigma$	$0.05\lambda$
9	fundamental surface wavelength	$\Lambda_0$	$10\lambda$
10	fundamental surface wavenumbers	$K_1=K_2$	$2\pi/\Lambda_0$
11	rough surface illuminated length (patch size)	$4L_xL_y$	$80\lambda \times 80\lambda$
12	incident angle	$\theta_1$	$30^\circ$

Πίνακας 2: Παράμετροι προσομοίωσης

Σε όλες τις προσομοιώσεις η γωνία πρόσπτωσης επιλέχθηκε  $\theta_1=30^\circ$  και οι γωνίες σκέδασης είναι  $\theta_3=0$  και  $\theta_2=-\theta_1$ . Στην Εικόνα 10 απεικονίζεται ο συντελεστής σκέδασης  $|\gamma(k)|$  για διαφορετικές τιμές της διάστασης fractal  $D$  (που καθορίζει την τραχύτητα επιφάνειας), όπου  $D=[2.05, 2.35, 2.55, 2.85]$ . Από αυτή την εικόνα, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι καθώς αυξάνεται η τιμή της διάστασης fractal  $D$ , δηλαδή όσο αυξάνεται η τραχύτητα της επιφάνειας fractal, η κλίση μεταξύ του κύριου λοβού της συνάρτησης  $|\gamma(k)|$  και των πλευρικών λοβών στο φασματικό πεδίο επίσης αυξάνονται.





Εικόνα 10: Μέγεθος του συντελεστή οπισθοσκέδασης  $|\gamma(k)|$  ως συνάρτηση του κυματαριθμού  $k$ , για τιμές διάστασης fractal  $D = [2.05, 2.55, 2.85]$

Ο Πίνακας 3 συνοψίζει τη σχέση μεταξύ της διάστασης fractal  $D$  και της υπολογιζόμενης μέσης κλίσης μεταξύ του κύριου λοβού και των πρώτων πλευρικών λοβών εκατέρωθεν αυτού.

D	Left slope calculations	Right slope calculations
2.10	$0.1 \times 10^{-3}$	$0.1 \times 10^{-3}$
2.20	$0.1 \times 10^{-3}$	$0.1 \times 10^{-3}$
2.30	$0.1 \times 10^{-3}$	$0.7 \times 10^{-3}$
2.40	$0.6 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-3}$
2.50	$0.9 \times 10^{-3}$	$1.5 \times 10^{-3}$
2.60	$1.4 \times 10^{-3}$	$2.2 \times 10^{-3}$
2.70	$1.8 \times 10^{-3}$	$2.4 \times 10^{-3}$
2.80	$2.2 \times 10^{-3}$	$3.0 \times 10^{-3}$
2.90	$2.6 \times 10^{-3}$	$3.4 \times 10^{-3}$

Πίνακας 3: Σχέση μεταξύ της διάστασης fractal  $D$  και της υπολογιζόμενης κλίσης μεταξύ του κύριου και του πρώτου πλευρικού λοβού

Κάθε κλίση είναι ίση με  $|\Delta\gamma|/|\Delta k|$ , όπου  $\Delta\gamma$  αντιπροσωπεύει τη μεταβολή του συντελεστή οπισθοσκέδασης μεταξύ της κορυφής του κύριου λοβού και της κορυφής του πρώτου πλευρικού λοβού, και  $\Delta k$  ορίζει την μεταβολή των κορυφών κυματισμού.

Μια σημαντική παρατήρηση σχετικά με τα αποτελέσματα προσομοίωσης της Εικόνα 10 είναι ότι, το εύρος ζώνης  $B$  του ραντάρ πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο ( $B \approx 2\text{GHz}$ ), έτσι ώστε να παρατηρείται το φαινόμενο που προαναφέρθηκε και η κλίση μεταξύ του κύριου λοβού της συνάρτησης  $|\gamma(k)|$  και των πλευρικών λοβών στο φασματικό πεδίο της συχνότητας να αυξάνεται συναρτήσει της αυξανόμενης fractal διάστασης  $D$ .

Επίσης βρέθηκε ότι το εύρος ζώνης  $B$  πρέπει να είναι τουλάχιστον σε ποσοστό 15% της φέρουσας συχνότητας του ραντάρ, έτσι ώστε να παρατηρείται το παραπάνω φαινόμενο με τις κλίσεις  $|\Delta\gamma|/|\Delta k|$ .

Παρόλα ταύτα, ο περιορισμός του μικρού διαθέσιμου εύρους ζώνης  $B$  του ραντάρ σε πραγματικές μετρήσεις μπορεί να αντισταθμιστεί από το μεγάλο εύρος της επιφάνειας παρατήρησης  $2L$  (βλ. [1], [15], [22]). Αυτό σημαίνει ότι με κατάλληλη επιλογή του εμβαδού της επιφάνειας παρατήρησης από το ραντάρ δύναται να αντισταθμιστεί η επιλογή ενός μικρότερου εύρους ζώνης. Ουσιαστικά όσο μεγαλύτερο είναι το εύρος ζώνης ενός ραντάρ τόσο μικρότερη είναι η διακριβωτική ικανότητα του και τόσο μεγαλύτερη ισχύς λειτουργίας του ραντάρ απαιτείται.

Η *διακριβωτική ικανότητα* (*resolution*) ενός ραντάρ ορίζεται ως η ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο σκεδαστών, που μπορεί το ραντάρ να διακρίνει στην επιφάνεια παρατήρησης. Η διακριβωτική ικανότητα ενός μονοστατικού ραντάρ καθορίζεται από το εύρος ζώνης  $B$  του ραντάρ και είναι μια παράμετρος του συστήματος που δεν σχετίζεται καθόλου με τον στόχο και τη γεωμετρική θέση μεταξύ του στόχου και του ραντάρ. Περισσότερες πληροφορίες για την διακριβωτική ικανότητα και το εύρος ζώνης ενός ραντάρ παρατίθενται στο Παράρτημα "Α" της παρούσας μελέτης.

Για να γίνει φανερή η σχέση μεταξύ της διάστασης fractal  $D$  της τραχιάς επιφάνειας και του συντελεστή οπισθοσκέδασης  $|\gamma(k)|$ , πραγματοποιείται ένας υπολογισμός του συντελεστή  $|\gamma(k)|$  για διαφορετικές τιμές διάστασης fractal  $D$  με τιμές από 2.05 έως 2.95, με βήμα 0.05.

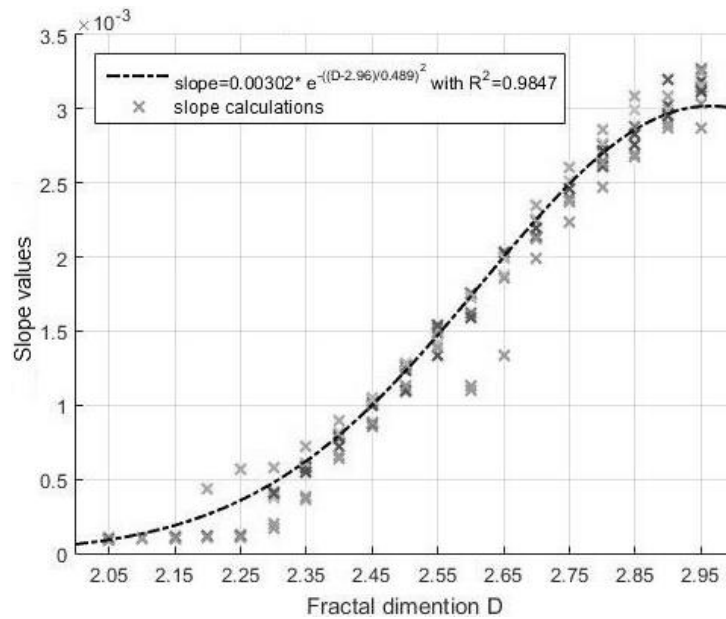
Όλες οι άλλες παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτές τις προσομοιώσεις παρέμειναν οι ίδιες, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 2. Για να επαληθευτεί η προτεινόμενη μέθοδος χρησιμοποιήθηκαν ομοιόμορφα κατανομημένες μεταβλητές τυχαίας φάσης  $\varphi_{n1}$ ,  $\varphi_{n2}$  στην εξίσωση (4.13) στο διάστημα  $[-\pi, \pi]$  προκειμένου να δημιουργηθούν fractal επιφάνειες. Συγκεκριμένα, υποθέτουμε ότι οι μεταβολές του σκεδαστή είναι αμελητέες κατά τη διάρκεια μιας ριπής ραντάρ, όπου κάθε μια από τις ριπές ραντάρ αποτελείται από  $M$  παλμούς ραντάρ με αυξανόμενη βηματική συχνότητα. Ο υπολογισμός προκύπτει μετά από 10 προσομοιώσεις, για κάθε τιμή  $D$  και παρουσιάζεται στην Εικόνα 11.

Επιπλέον, αντιστρέφοντας τα δεδομένα (τιμές κλίσης του συντελεστή σκέδασης και της διάστασης fractal) που παρέχονται στην Εικόνα 11, προκύπτουν τα διαγράμματα της Εικόνα 12, όπου σε αυτή την περίπτωση η διάσταση fractal  $D$  σχεδιάζεται συναρτήσει της κλίσης του συντελεστή σκέδασης  $|\gamma(k)|$ , παρόμοια με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται από τον Κοτορουλίσ [1]. Οι παραπάνω προσομοιώσεις δείχνουν ότι η τραχύτητα της τρισδιάστατης fractal επιφάνειας μπορεί να χαρακτηριστεί από τη μέση κλίση μεταξύ του κύριου λοβού της

συνάρτησης  $|\gamma(k)|$  και των δυο πρώτων πλευρικών λοβών, εκατέρωθεν του κύριου λοβού (βλέπε Εικόνα 10 έως Εικόνα 12). Συγκεκριμένα, στην Εικόνα 12 φαίνεται ότι υπάρχει μια καμπύλη προσαρμοσμένη στα προσομοιωμένα δεδομένα, όταν η διάσταση fractal  $D$  παρέχεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$D_{calc} = a * slope^b + c \quad (4.26)$$

όπου οι σταθερές στην ανωτέρω εξίσωση είναι  $a = 49,9$ ,  $b = 0,71$  και  $c = 2,08$



Εικόνα 11: Μέση κλίση του συντελεστή σκέδασης  $|\gamma(k)|$  έναντι της τιμής της fractal διάστασης  $D$

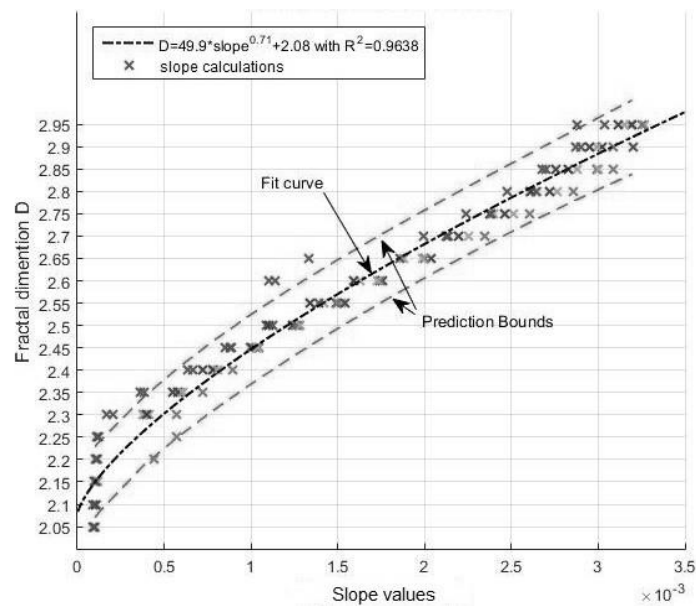
Επιπλέον, για τη προσαρμογή των δεδομένων της Εικόνα 12 στην εξίσωση (4.17) χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο με το συντελεστής προσδιορισμού  $R$ -square, με σκοπό να μετρηθεί η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων. Το κριτήριο αυτό παρέχει ένα μέτρο για το πόσο καλά παρατηρήσιμα είναι τα αποτελέσματα από το μοντέλο, με βάση το ποσοστό της συνολικής διακύμανσης των αποτελεσμάτων που προκύπτει από αυτό. Στην προκειμένη περίπτωση, υπολογίστηκε ότι  $R^2=0,9638$  (όπου  $R^2= 1$  αντιστοιχεί στην απόλυτη προσαρμογή στην καμπύλη). Επιπρόσθετα, τα όρια πρόβλεψης για την προσαρμοσμένη καμπύλη απεικονίστηκαν γραφικά, όπου η πιθανότητα εμφάνισης είναι 90%.

Η απεικόνιση της διάστασης fractal  $D$  που χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις, της κλίσης  $|\Delta\gamma|/|\Delta k|$  και τέλος της τιμής  $D_{calc}$ , φαίνεται στον Πίνακα 4 και στον Πίνακα 5. Συγκεκριμένα, ο Πίνακας 4 δείχνει την διάσταση fractal  $D$  που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις έναντι της κλίσης που υπολογίστηκε από αυτές και την εκτιμώμενη διάσταση της διάστασης fractal  $D_{calc}$ .

<i>D</i>	<i>Slope</i>	<i>D<sub>calc</sub></i>
2.05	$0.1 \times 10^{-3}$	2.15
2.15	$0.1 \times 10^{-3}$	2.15
2.25	$0.1 \times 10^{-3}$	2.16
2.35	$0.6 \times 10^{-3}$	2.33
2.45	$1.0 \times 10^{-3}$	2.45
2.55	$1.5 \times 10^{-3}$	2.57
2.65	$1.9 \times 10^{-3}$	2.66
2.75	$2.4 \times 10^{-3}$	2.76
2.85	$2.8 \times 10^{-3}$	2.85
2.95	$3.2 \times 10^{-3}$	2.95

Πίνακας 4: Εκτίμηση της  $D_{CALC} = \alpha slope^b + c$

Αυτά τα αποτελέσματα δείχνουν μια καλή εκτίμηση της τραχύτητας της διάστασης fractal  $D$  (δηλ. της τραχύτητας της επιφάνειας), με εξαίρεση τις τιμές  $D$  που είναι μικρότερες από 2,25, οπότε η διάσταση fractal  $D$  υπολογίζεται με χαμηλότερη ακρίβεια.



Εικόνα 12: Τιμές της διάστασης fractal  $D$  σε σχέση με τον υπολογισμό της κλίσης του συντελεστή σκέδασης  $|\gamma(k)|$

Τέλος, ο Πίνακας 5 παρουσιάζει τα διαστήματα προβλέψεων για την υπολογιζόμενη απόκλιση  $D_{calc}$  από τις φασματικές κλίσεις του συντελεστή σκέδασης. Όπως αναφέρθηκε επίσης παραπάνω, οι τιμές των διαστημάτων προβλέψεων που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5 αντιστοιχούν σε πιθανότητα εμφάνισης 90%.

<i>D<sub>calc</sub></i> <i>lower</i>	<i>D</i>	<i>D<sub>calc</sub></i> <i>upper</i>
2.05	2.05	2.23
2.08	2.15	2.23
2.08	2.25	2.24
2.25	2.35	2.40
2.37	2.45	2.52
2.49	2.55	2.65
2.58	2.65	2.73
2.68	2.75	2.84
2.77	2.85	2.93
2.78	2.95	2.99

Πίνακας 5:  $D_{CALC}$  Διάστημα Πρόβλεψης που Χρησιμοποιεί τα Όρια Πρόβλεψης

Όλα τα ανωτέρω αποτελέσματα δείχνουν ότι η προτεινόμενη μέθοδος είναι αρκετά αξιόπιστη σε ότι αφορά το χαρακτηρισμό μιας τρισδιάστατης τραχιάς fractal επιφάνειας από τα σκεδαζόμενα ηλεκτρομαγνητικά κύματα του ραντάρ.

#### 4.4 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται μια μέθοδος για τον χαρακτηρισμό των τρισδιάστατων τραχιών fractal επιφανειών από ηλεκτρομαγνητικά κύματα ραντάρ. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήσαμε την προσέγγιση Kirchhoff [7] προκειμένου να λάβουμε αποτελέσματα προσομοίωσης για το πλάτος του σήματος ραντάρ, ως συνάρτηση της συχνότητας και ως εκ τούτου αυτό αποτελεί μία φασματική μέθοδο [1]. Όσον αφορά τη μοντελοποίηση της τραχιάς fractal επιφάνειας, χρησιμοποιήθηκε μια πρόσφατη διατύπωση της τρισδιάστατης Weierstrass Mandelbrot συνάρτησης [43], τροποποιημένη κατάλληλα προκειμένου να προσαρμόζεται στην παρούσα έρευνα. Με βάση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο παρόν κεφάλαιο, παρατηρείται ότι η μέση κλίση μεταξύ του κύριου λοβού και των γειτονικών εκατέρωθεν πλευρικών λοβών αυξάνεται όσο αυξάνεται η διάσταση fractal της τραχιάς fractal επιφάνειας, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 11. Επομένως, είναι δυνατός ο χαρακτηρισμός της τραχιάς επιφάνειας (εκτίμηση της διάστασης fractal) από τα φασματικά δεδομένα του ραντάρ που έχουν υποστεί ανάλυση. Με αυτόν τον τρόπο, ελήφθησαν εδώ παρόμοια αποτελέσματα με την δημοσίευση που αφορούσε μια δισδιάστατη μοντελοποίηση της τραχιάς fractal επιφάνειας [1], [2] με μία πιο ρεαλιστική τρισδιάστατη απεικόνιση των τραχιών fractal επιφανειών.

Επιπρόσθετα, καθώς ανωτέρω μελέτη πραγματοποιήθηκε απουσία θορύβου, προστέθηκε θόρυβος για να παρατηρήσουμε την συμπεριφορά των λοβών της οπισθοσκέδασης. Έτσι, όταν ένα σήμα οπισθοσκέδασης  $\gamma(\kappa)$  εμφανίζει υψηλό σηματοθορυβικό λόγο  $SNR=20\text{dB}$  η μορφή του σήματος δεν επηρεάζεται. Η βέλτιστη επιλογή του σηματοθορυβικού λόγου εκτιμήθηκε ότι ανέρχεται περί το

$SNR=12\text{dB}$  ενώ για ένα σήμα οπισθοσκέδασης  $\gamma(k)$  με πολύ χαμηλό  $SNR \approx 0\text{dB}$  παρατηρείται ότι επηρεάζει πλήρως τους πλευρικούς λοβούς και ακυρώνει την προτεινόμενη μέθοδο χαρακτηρισμού της τραχιάς επιφάνειας.

Τέλος αυτό που είναι πολύ σημαντικό να αναφερθεί είναι ότι για να είναι δυνατός ο ανωτέρω χαρακτηρισμός τραχιάς επιφάνειας, απαιτείται μεγάλο εύρος ζώνης ραντάρ, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 2. Το τελευταίο φαινόμενο μπορεί να αντισταθμιστεί, ως ένα βαθμό, από την αύξηση του μεγέθους της επιφάνειας  $2L$  (δηλαδή από το αυξημένο εύρος δέσμης ραντάρ ή με το υψόμετρο του ραντάρ επιφανειακής παρατήρησης).





# Κεφάλαιο 5

## Χαρακτηρισμός Κατάστασης Θαλάσσης Πειραματικών Δεδομένων Ραντάρ SAR

### 5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζεται ο χαρακτηρισμός της κατάστασης θαλάσσης με τη χρήση δύο κριτηρίων που χρησιμοποιούν τις fractal ιδιότητες που παρουσιάζει η θαλάσσια επιφάνεια και δύο κριτηρίων που επαληθεύουν τα δύο καινοτόμα κριτήρια fractal. Τα τέσσερα κριτήρια εφαρμόζονται σε πειραματικές μονοδιάστατες υπογραφές ραντάρ συνθετικού παραθύρου (SAR) στο φάσμα της συχνότητας, σε δύο διαφορετικές θαλάσσιες καταστάσεις (ταραγμένη και ήρεμη θάλασσα). Οι συγκεκριμένες μέθοδοι εφαρμόστηκαν σε κανονικοποιημένα δεδομένα του μέσου σήματος οπισθοσκέδασης από την επιφάνεια της θάλασσας. Η προσομοίωση των μεθόδων εφαρμόστηκε σε πραγματικά δεδομένα ραντάρ θαλάσσιου κυματισμού (clutter), τα οποία παραχωρήθηκαν για ερευνητικούς σκοπούς από την ομάδα εργασίας “SET 215” που αφορά τις τεχνικές ραντάρ SAR. Τα κριτήρια που αφορούν την θεωρία των fractals είναι το *κριτήριο της διάστασης fractal* και το *κριτήριο του μήκους fractal*. Ενώ, στην συνέχεια για την επαλήθευση των προαναφερθέντων κριτηρίων χρησιμοποιούνται το *κριτήριο της διακύμανσης  $\sigma^2$*  και το *κριτήριο ελαχίστων τετραγώνων ισχύος*.

Στα κριτήρια διάστασης fractal και μήκους fractal χρησιμοποιείται η μέθοδος *κουβέρτας* (blanket method) έτσι όπως αναπτύχθηκε από τον Peleg [13] και διερευνήθηκε εκτενέστερα από τους Tang [53] και Malamou [46]. Ανωτέρω κριτήρια παρέχουν στοιχεία για τον χαρακτηρισμό της κατάστασης θαλάσσης από τα *προφίλ απόστασης* (range profiles) ενός ραντάρ SAR. Η μέθοδος του Peleg χρησιμοποιήθηκε στον υπολογισμό της περιοχής μιας *περιοχής κουβέρτας*, του κανονικοποιημένου μέσου του προφίλ απόστασης στο φάσμα της συχνότητας.

Η βασική ιδέα σχετικά με τις προτεινόμενες τεχνικές της διακύμανσης, των ελαχίστων τετραγώνων ισχύος, της διάστασης fractal και του μήκους fractal είναι

ότι, τα προφίλ απόστασης του ραντάρ που αντιστοιχούν σε διαφορετικές καταστάσεις θαλάσσης, παρουσιάζουν διαφορετικές τιμές της διακύμανσης, του φάσματος ισχύος, της διάστασης fractal και του μήκους fractal. Παρατηρήθηκε ότι όσο πιο κυματώδεις είναι η θάλασσα τόσο μεγαλύτερη είναι η διακύμανση, το φάσμα ισχύος, η διάσταση fractal και το μήκος fractal του σήματος οπισθοσκέδασης στο πεδίο της συχνότητας και αυτό από φυσικής άποψης οφείλεται στην "ανώμαλη συμπεριφορά" των προφίλ απόστασης.

Σε προηγούμενη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες πειραματικές μονοδιάστατες υπογραφές ραντάρ για την παροχή χρήσιμων αποτελεσμάτων σχετικά με τον χαρακτηρισμό της κατάστασης θαλάσσης αλλά η έρευνα περιορίστηκε στο πεδίο του χρόνου και χωρίς να έχει γίνει απαλοιφή του θορύβου [4]. Σε συνέχεια της έρευνας, στόχος είναι να χρησιμοποιηθούν η διάσταση fractal και το μήκος fractal των πειραματικών σημάτων ραντάρ ως πρόσθετο εργαλείο για τον χαρακτηρισμό της επιφάνειας της θάλασσας.

## 5.2 Περιγραφή προβλήματος

Η διάταξη του πειράματος, όπου παρήχθησαν τα πραγματικά δεδομένα ραντάρ θαλάσσιου κυματισμού (clutter) και τα οποία παραχωρήθηκαν όπως προαναφέρθηκε από την ομάδα εργασίας SET 215, περιγράφεται αναλυτικά στο δεύτερο κεφάλαιο της παρούσας μελέτης. Εν συντομία αναφέρεται ότι, ένα ελικόπτερο το οποίο κινούταν κατακόρυφα με ανοδική πορεία έφερε ένα ραντάρ PicoSAR το οποίο σάρωνε συγκεκριμένη περιοχή προς την θάλασσα σε απόσταση 1850 μέτρα. Την πρώτη μέρα του πειράματος οι καιρικές συνθήκες ήταν κακές με αποτέλεσμα να πνέουν άνεμοι ταχύτητας 10-12 m/sec (6 Beaufort) ενώ την δεύτερα μέρα οι συνθήκες βελτιώθηκαν με την ταχύτητα των ανέμων να ανέρχεται σε 1-2 m/sec (2 Beaufort). Τα χαρακτηριστικά του ραντάρ ήταν μήκος παλμού 12μs, εύρος ζώνης 150 MHz, PRF 1 kHz και συχνότητα λειτουργίας του ραντάρ  $f_s = 9.4\text{GHz}$  (X Band).

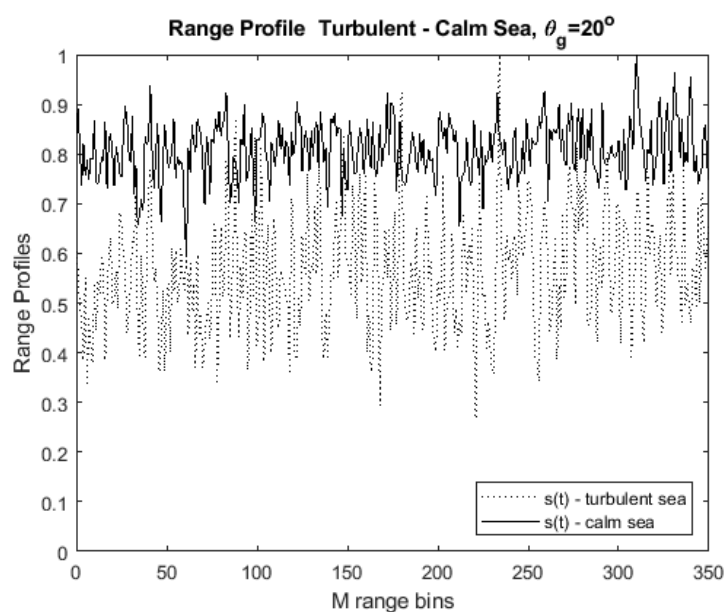
Στην μελέτη για τον χαρακτηρισμό της κατάστασης θαλάσσης [4] αναλύθηκε μια καινοτόμος μέθοδος χαρακτηρισμού της επιφάνειας της θάλασσας χρησιμοποιώντας το κριτήριο μέσου μήκους fractal (Mean Fractal Length - MFL) το οποίο εφαρμόστηκε στα ίδια πειραματικά προφίλ απόστασης του ραντάρ συνθετικού παραθύρου (SAR) που χρησιμοποιούνται σε αυτό το κεφάλαιο.

Ωστόσο, προκύπτουν αρκετά πρακτικά ερωτήματα για τον χαρακτηρισμό ενός σήματος που ενσωματώνει θόρυβο. Για να αντιμετωπίσουμε την ύπαρξη του θορύβου στο σήμα, παρουσιάζεται μια μέθοδος η οποία αρχικά υπολογίζει τον μέσο όρο των προφίλ απόστασης (averaging) για την απαλοιφή του θορύβου. Για τον υπολογισμό ενός σήματος απουσίας θορύβου καθορίστηκε το πλήθος των δειγμάτων  $N$  των προφίλ απόστασης να είναι ίσο με 65 έτσι ώστε να διασφαλιστεί ότι αυτό ήταν ικανοποιητικό για να δώσει ένα ακριβές αποτέλεσμα. Στη συνέχεια,

ο μέσος όρος των προφίλ απόστασης κανονικοποιήθηκε στην κλίμακα από 0 έως 1 (normalizing) και το παραγόμενο σήμα οπισθοσκέδασης μετασχηματίστηκε στην περιοχή της συχνότητας.

Προκειμένου να επαληθευθεί η εγκυρότητα της μεθόδου χαρακτηρισμού της θαλάσσιας κατάστασης, πραγματοποιήθηκαν πληθώρα πειραμάτων σε ένα μεγάλο εύρος γωνιών σκέδασης του σήματος από  $5^\circ$  έως  $35^\circ$ , καθώς για γωνία μεγαλύτερη από  $37^\circ$  παρατηρήθηκε μια ανώμαλη συμπεριφορά του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος, το οποίο μπορεί να θεωρηθεί φυσιολογικό καθώς σε γωνίες θέασης άνω των  $35^\circ$  αναμένουμε να προκαλούνται σύνθετα φυσικά φαινόμενα λόγω θορύβου.

Τα κανονικοποιημένα οπισθοσκεδαζόμενα κύματα στο πεδίο του χρόνου από το ραντάρ που αντιστοιχούν στα προφίλ εμβέλειας για  $N=65$  μονοδιάστατες υπογραφές ραντάρ, για την πρώτη μέρα όπου η θάλασσα ήταν ταραγμένη και για την δεύτερη μέρα που ήταν ήρεμη και για γωνία πρόσπτωσης  $\theta_g=20^\circ$ ; φαίνονται στην Εικόνα 13.

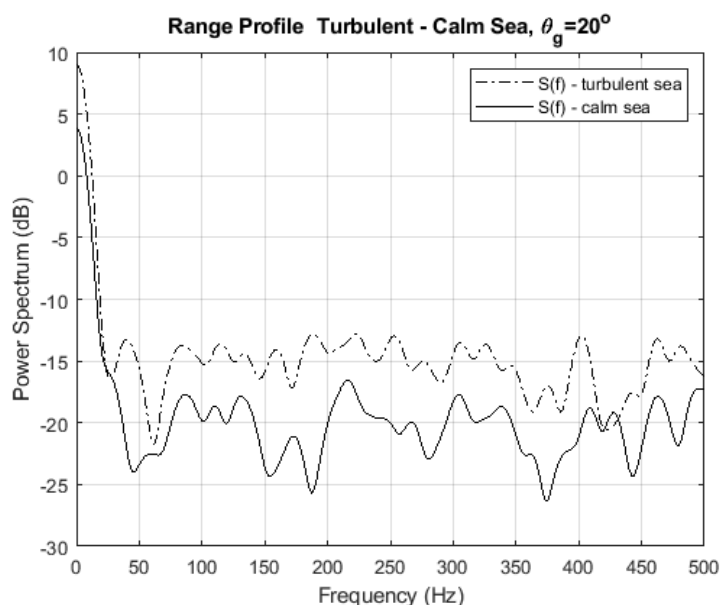


Εικόνα 13: Προφίλ απόστασης PicoSAR για γωνία πρόσπτωσης  $\theta_g=20^\circ$  για ταραγμένη και λεία θαλάσσια επιφάνεια στο πεδίο του χρόνου

Παρατηρώντας την Εικόνα 13 την πρώτη μέρα όπου η θαλάσσια επιφάνεια ήταν ταραγμένη το εύρος των τιμών κυμαίνεται περίπου από 0,3 έως 1 ενώ για την δεύτερη μέρα που η θάλασσα ήταν ήρεμη το εύρος τιμών των προφίλ απόστασης κυμαίνεται από 0,6 έως 1. Συμπεραίνεται ότι όταν το εύρος τιμών του κανονικοποιημένου μέσου όρου των  $N$  προφίλ απόστασης για μία τραχιά θαλάσσια επιφάνεια είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο εύρος τιμών του προφίλ απόστασης για σχεδόν γαλήνια θάλασσα, κάτι που είναι αναμενόμενο αφού το προφίλ απόστασης για μία ταραγμένη επιφάνεια πρέπει να παρουσιάζει μεγαλύτερο εύρος

από το εύρος μίας λείας επιφάνειας. Όσον αφορά το φάσμα ισχύος αυτών των σημάτων παρατηρείται ότι η ταραγμένη θάλασσα εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με την ήρεμη θάλασσα.

Τα ίδια οπισθοσκεδαζόμενα κύματα στο πεδίο της συχνότητας (φασματική ισχύος) φαίνονται στην Εικόνα 14.



Εικόνα 14: Προφίλ απόστασης PicoSAR για γωνία πρόσπτωσης  $\theta_g = 20$  για ταραγμένη και λεία θαλάσσια επιφάνεια στο πεδίο της συχνότητας

Τα κριτήρια χαρακτηρισμού της κατάστασης θαλάσσης που χρησιμοποιήθηκαν όπως προαναφέρθηκε είναι το κριτήριο της διάστασης fractal και το κριτήριο του μήκους fractal, το κριτήριο της διακύμανσης  $\sigma^2$  και το κριτήριο ελαχίστων τετραγώνων ισχύος.

Το κριτήριο της διάστασης fractal είναι η πρώτη μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό της κατάστασης της θάλασσας, η οποία υπολογίζει τη διάσταση fractal του κανονικοποιημένου μέσου όρου του προφίλ απόστασης στην περιοχή συχνοτήτων, για ταραγμένη και ήρεμη θάλασσα και για γωνία πρόσπτωσης από  $5^\circ$  έως και  $35^\circ$ . Η διάσταση fractal υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την μέθοδο blanket που περιγράφεται συνοπτικά στην επόμενη παράγραφο.

Στην συνέχεια, το κριτήριο του μήκους fractal χρησιμοποιείται και αυτό για τον χαρακτηρισμό της κατάστασης της θάλασσας, όπου υπολογίζεται το μήκος fractal του κανονικοποιημένου μέσου όρου του προφίλ απόστασης στην περιοχή συχνοτήτων, για ταραγμένη και ήρεμη θάλασσα και για γωνία πρόσπτωσης από  $5^\circ$  έως και  $35^\circ$ . Τα δύο αυτά κριτήρια κάνουν χρήση της θεωρίας των fractals ενώ τα επόμενα δύο κριτήρια το κριτήριο της διακύμανσης  $\sigma^2$  και το κριτήριο ελαχίστων

τετραγώνων ισχύος εφαρμόζονται απευθείας στο σήμα του κανονικοποιημένου μέσου όρου του προφίλ απόστασης στην περιοχή της συχνότητας.

Το κριτήριο της διακύμανσης  $\sigma^2$  χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της κατάστασης της θάλασσας, ο οποίος υπολογίζει τη διακύμανση του κανονικοποιημένου μέσου όρου του σήματος στην περιοχή της συχνότητας, για ταραγμένη και ήρεμη θάλασσα και σε γωνίες πρόσπτωσης από  $5^\circ$  έως  $30^\circ$  (αυξανόμενης ανά  $5^\circ$ ). Η διακύμανσης  $\sigma^2$  δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\sigma^2 = \frac{1}{f_{max}} \int_{f=0}^{f_{max}} (S(f) - S_m)^2 df \quad (5.1)$$

Τέλος, το κριτήριο ελαχίστων τετραγώνων ισχύος εφαρμόζεται στο φάσμα ισχύος του κανονικοποιημένου μέσου όρου του σήματος στην περιοχή της συχνότητας και υπολογίζει την κλίση της ευθείας που προκύπτει από την προσέγγιση των ελαχίστων τετραγώνων στο φάσμα ισχύος του σήματος.

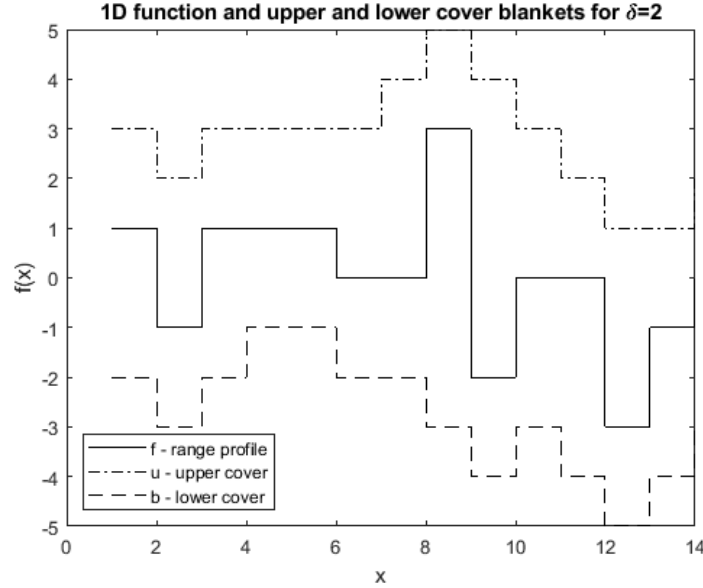
### 5.3 Χαρακτηρισμός τραχύτητας επιφάνειας με την μέθοδο **Blanket**

Η μέθοδος *blanket* αναφέρθηκε για πρώτη φορά από τον Peleg [13] το 1984 και χρησιμοποιήθηκε για τον χαρακτηρισμό επιφανειών και πιο συγκεκριμένα της υφής τους. Στην έρευνα του Peleg οι επιφάνειες ταξινομούνται με βάση την αλλαγή των ιδιοτήτων τους συναρτήσει της αλλαγής της ανάλυσης της εικόνας. Η επιφάνεια της γκριζας περιοχής υπολογίζεται σε διάφορες αναλύσεις της εικόνας και παρατηρείται ότι μειώνεται όσο μεγαλύτερη είναι η ανάλυση της εικόνας, αφού μειώνονται οι λεπτομέρειες που συμβάλλουν στο γκρι χρώμα στην περιοχή.

Στην συνέχεια ο Tang [53] και η Malamou [46] χρησιμοποίησαν την μέθοδο *blanket* για το χαρακτηρισμό εικόνων εγγράφων και εικόνων SAR αντίστοιχα. Η μελέτη βασίστηκε στον υπολογισμό του όγκου μιας κουβέρτας, που αντιστοιχεί στην εικόνα που πρόκειται να χαρακτηρισθεί, και στη συνέχεια στον υπολογισμό της αντίστοιχης καμπύλης περιοχής fractal και της καμπύλης διάστασης fractal της εικόνας. Η κύρια ιδέα σχετικά με αυτήν την προτεινόμενη τεχνική στην μελέτη της Malamou είναι το γεγονός ότι πέντε διαφορετικοί τύποι επιφάνειας εδάφους (αστικό, προαστιακό, αγροτικό, ορεινό και θαλάσσιο) που απεικονίζονται σε εικόνες SAR παράγουν διαφορετικές τιμές καμπυλών περιοχής fractal και καμπυλών διάστασης fractal, βάσει των οποίων είναι δυνατός ο χαρακτηρισμός διαφορετικών τύπων εδάφους.

Η ανωτέρω έρευνα προέρχεται από τη μέθοδο του Peleg, για τη μέτρηση του μήκους ακανόνιστων καμπυλών, όπου χρησιμοποίησε την μέθοδο Mandelbrot [9],

[10]. Πιο συγκεκριμένα, ο Peleg χρησιμοποίησε μία μονοδιάστατη συνάρτηση που φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα (εσωτερική καμπύλη, από τις 3 καμπύλες):



Εικόνα 15: Μονοδιάστατη (1D) συνάρτηση και “άνω” και “κάτω” καμπύλες για κλίμακα  $\delta=2$

Όταν όλα τα σημεία έχουν απόσταση από την καμπύλη όχι περισσότερο από μία σταθερά  $\delta$  (όπου  $\delta$  είναι η κλίμακα της κουβέτας), τότε σχηματίζεται μια περιοχή πλάτους  $2\delta$ . Αυτή η περιοχή δημιουργεί μια “λωρίδα” που περιβάλλεται από μία άνω και μία κάτω κουβέρτα. Οι καμπύλες των “άνω” και “κάτω” συναρτήσεων της Εικόνα 15 παρέχονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$u_{\delta}(i, j) = \max\{u_{\delta-1}(i, j) + 1, \max_{|(m,n)-(i,j)| \leq 1} u_{\delta-1}(m, n)\} \quad (5.2)$$

$$b_{\delta}(i, j) = \max\{b_{\delta-1}(i, j) - 1, \max_{|(m,n)-(i,j)| \leq 1} b_{\delta-1}(m, n)\} \quad (5.3)$$

Η εξίσωση (3.1) εξασφαλίζει ότι η άνω καμπύλη  $u_{\delta}$  είναι υψηλότερη τουλάχιστον κατά  $u_{\delta-1}$  και επίσης σε απόσταση τουλάχιστον κατά  $u_{\delta-1}$  από τις οριζόντιες και κάθετες διευθύνσεις [13].

Το εμβαδόν μεταξύ των άνω και κάτω καμπυλών υπολογίζεται από τα  $u_{\delta}$  και  $b_{\delta}$  από την εξίσωση:

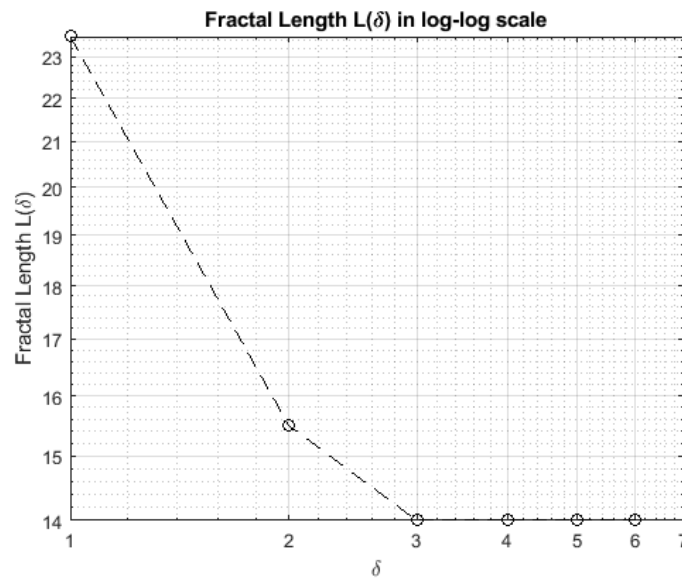
$$A_{\delta} = \sum_{i,j} (u_{\delta}(i, j) - b_{\delta}(i, j)) \quad (5.4)$$

Το μήκος fractal  $L_{\delta}$  της καμπύλης υπολογίζεται κατά προσέγγιση με την αφαίρεση των περιοχών λωρίδων με κλίμακες  $\delta$  και  $\delta-1$  διαιρούμενες με τον αριθμό 2 ή από την περιοχή της λωρίδας (κουβέτας) που διαιρείται με το  $2\delta$ , όπως φαίνεται παρακάτω:

$$L_{\delta} = \frac{(A_{\delta} - A_{\delta-1})}{2} \quad (5.5)$$

$$L_{\delta} = \frac{A_{\delta}}{2\delta} \quad (5.6)$$

Το μήκος fractal  $L_{\delta}$  ως συνάρτηση της κλίμακας  $\delta$  (όπου  $\delta=1$  αντιστοιχεί σε "πλήρη κλίμακα" του αρχικού σήματος) φαίνεται σε λογαριθμική κλίμακα, στην καμπύλη στην Εικόνα 15, όπου όταν η εξεταζόμενη καμπύλη σκέδασης είναι fractal, η γραφική παράσταση του fractal μήκους αποτυπώνεται ιδανικά με ευθύγραμμα τμήματα. Αντίθετα, στην περίπτωση που η καμπύλη δεν είναι fractal η γραφική παράσταση του μήκους fractal είναι καμπύλη [13].

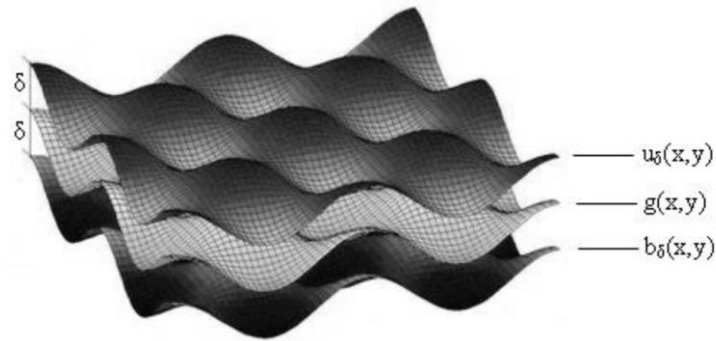


Εικόνα 16: Fractal μήκος  $L(\delta)$  ως συνάρτηση της ανάλυσης  $\delta$  σε λογαριθμική για μονοδιάστατη (1D) καμπύλη

Η διάσταση fractal  $FD_{\delta}$  της καμπύλης υπολογίζεται εφόσον υπολογίσουμε το εμβαδόν μεταξύ των άνω και κάτω καμπυλών, όπως φαίνεται παρακάτω:

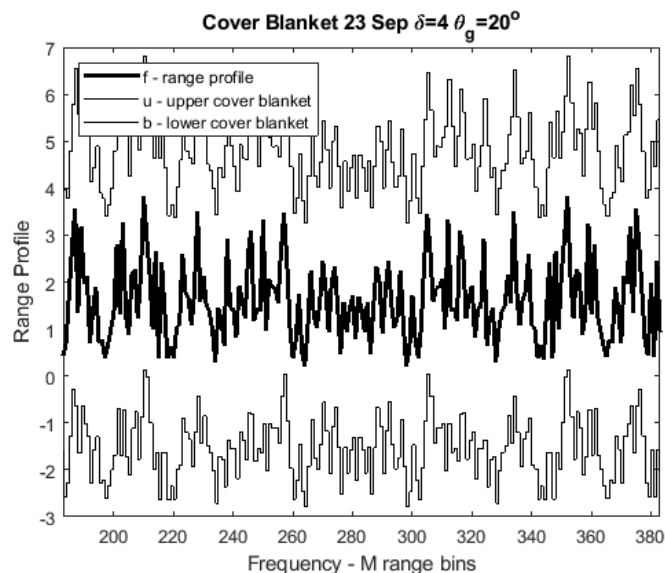
$$FD_{\delta} = 1 - \frac{(\log A_{\delta} - \log A_{\delta-1})}{(\log \delta - \log(\delta - 1))} \quad (5.6)$$

Ενώ στην τρισδιάστατη περίπτωση επιφάνειας που μελετήθηκε από την Malamou [46] η κουβέρτα που δημιουργείται είναι μεταξύ των άνω και κάτω επιφανειών που πλαισιώνουν την εξεταζόμενη επιφάνεια όπως φαίνεται και στην ακόλουθη εικόνα.

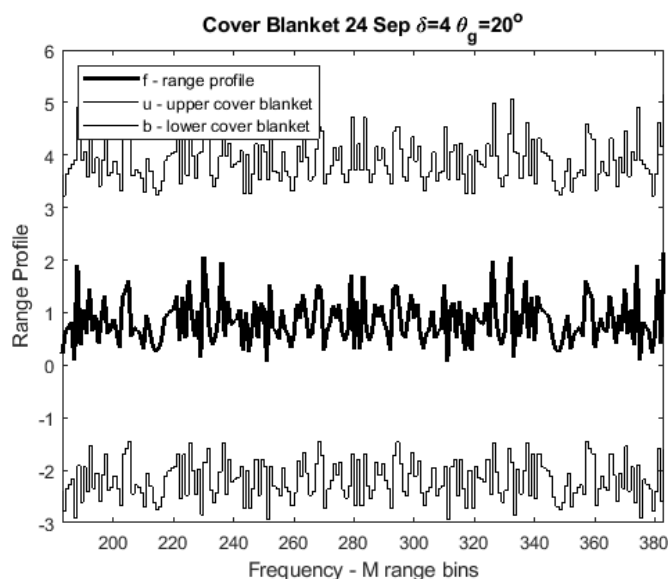


Εικόνα 17: Τρισδιάστατη (3D) επιφάνεια και άνω και κάτω επιφάνειες με κουβέρτα πάχους  $2\delta$

Αναφορικά με την εξέταση των πραγματικών δεδομένων που εξετάζονται, η διάσταση fractal υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την μέθοδο blanket που περιγράφεται συνοπτικά ανωτέρω και συγκεκριμένα οι άνω και κάτω καμπύλες των προφίλ απόστασης του ραντάρ μετά την εφαρμογή της μεθόδου φαίνονται ενδεικτικά στην Εικόνα 18, για  $\delta=4$  επαναλήψεις του κανονικοποιημένου μέσου οπισθοσκεδαζόμενου σήματος στην περιοχή της συχνότητας (για γωνία πρόσπτωσης  $\theta_g = 20^\circ$ ). Να σημειωθεί ότι, το  $\delta$  αντιπροσωπεύει τον αριθμό επανάληψης, ή, αλλιώς, την "ανάλυση" του προφίλ απόστασης, όπως αναφέρεται αναλυτικά και στο Παράρτημα Γ.







Εικόνα 18: Μονοδιάστατο “προφίλ απόστασης” (range profile”), για ταραγμένη (άνω σχήμα) και ήρεμη (κάτω σχήμα) θαλάσσια επιφάνεια, καθώς και άνω - κάτω καμπύλες “blanket”, για  $\delta=4$

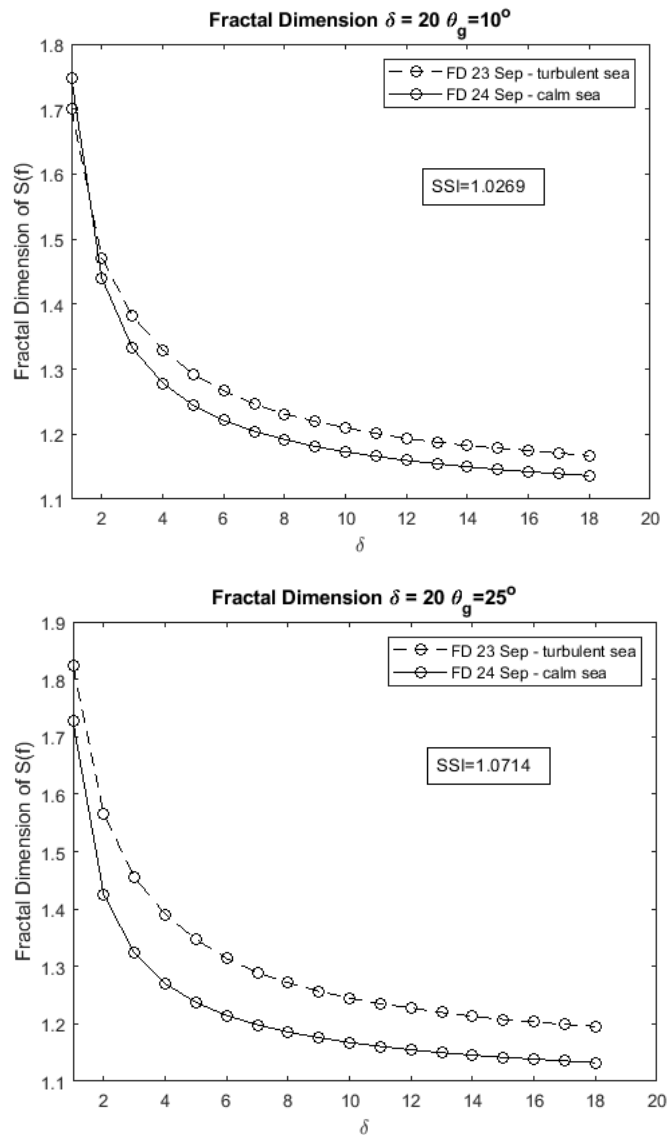
Παρατηρώντας τις ανωτέρω εικόνες είναι φανερό ότι το εύρος τιμών του σήματος την ημέρα της ταραχώδους θάλασσας είναι μεγαλύτερο από την ημέρα της ήρεμης επιφάνεια θαλάσσης.

#### 5.4 Κριτήρια χαρακτηρισμού θαλάσσιας επιφάνειας

Όπως προαναφέρθηκε τα τέσσερα κριτήρια που χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό της κατάστασης θαλάσσης είναι το κριτήριο της διάστασης fractal, το κριτήριο του μήκους fractal το κριτήριο της διακύμανσης  $\sigma^2$  και το κριτήριο ελαχίστων τετραγώνων ισχύος.

Το κριτήριο διάστασης fractal υπολογίζει τη διάσταση fractal του κανονικοποιημένου μέσου σήματος για τα προφίλ απόστασης για  $N=65$  στο φάσμα συχνοτήτων, χρησιμοποιώντας την μέθοδο blanket όπως περιγράφηκε συνοπτικά ανωτέρω.

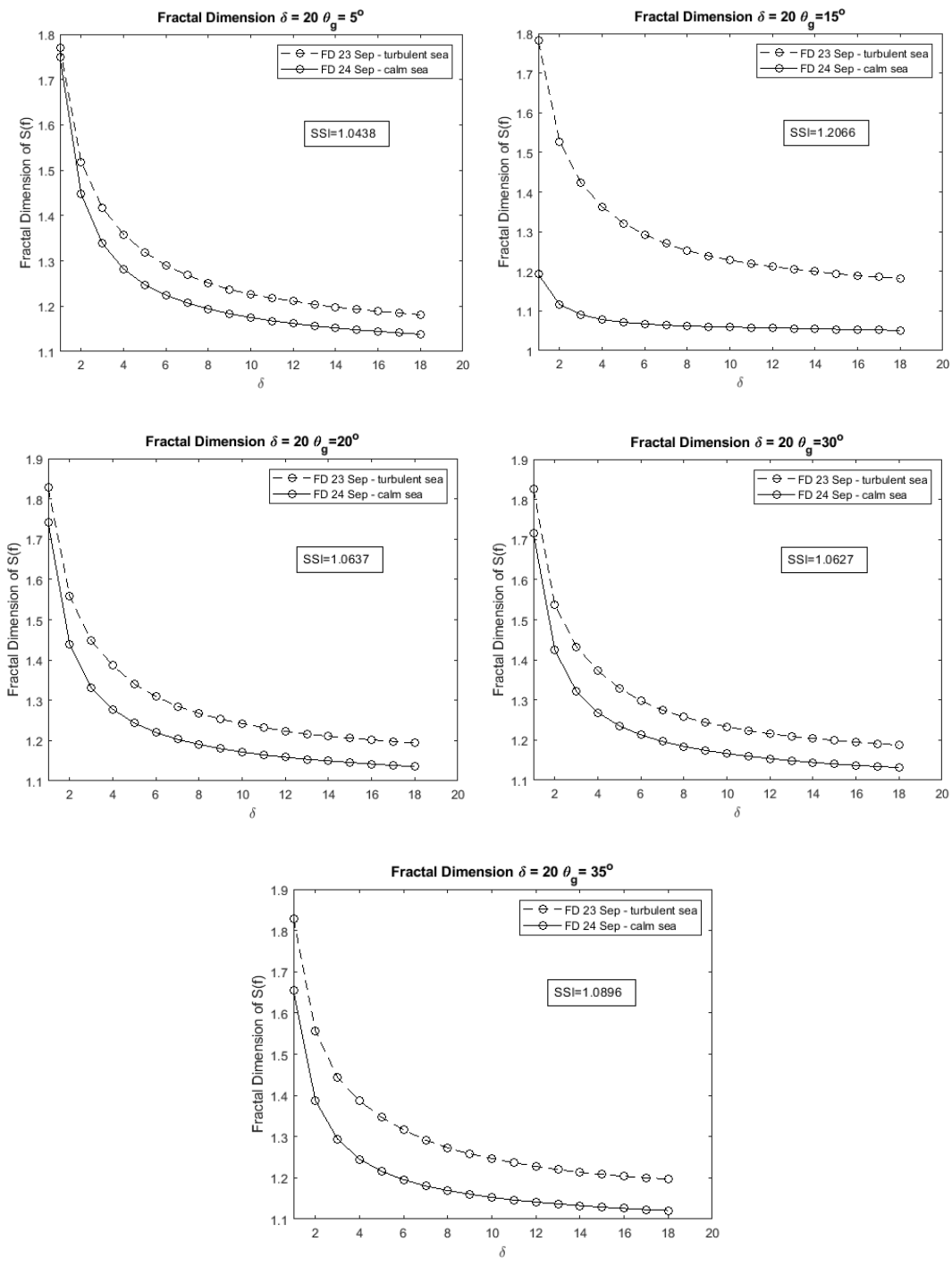
Οι προσομοιώσεις του κριτηρίου που αφορά τον υπολογισμό και σύγκριση της διάστασης fractal για ταραγμένη και ήρεμη θάλασσα για γωνίες πρόσπτωσης ενδεικτικά  $10^\circ$  και  $25^\circ$  φαίνονται στην Εικόνα 19.



Εικόνα 19: Διάσταση Fractal συναρτήσεως του  $\delta$  για γωνίες πρόσπτωσης  $10^\circ$  και  $25^\circ$

Τα αποτελέσματα της ανωτέρω εικόνας δείχνουν ότι οι τιμές των διαστάσεων fractal του κανονικοποιημένου μέσου σήματος ραντάρ των προφίλ απόστασης για  $N=65$  κατά τη διάρκεια της ταραγμένης θάλασσας είναι σημαντικά μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές σε ήρεμη θάλασσα.

Θέλοντας να μελετηθεί το κριτήριο αντιπροσωπευτικά σε όλο το εύρος των γωνιών πρόσπτωσης, η προσομοίωση επαναλήφθηκε σε όλες τις γωνίες πρόσπτωσης με ακρίβεια δέκατου της μοίρας, ενώ για λόγους συντομίας παρατίθενται τα αποτελέσματα για τις γωνίες πρόσπτωσης  $5^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$  και  $30^\circ$  όπως φαίνονται στις ακόλουθες εικόνες.

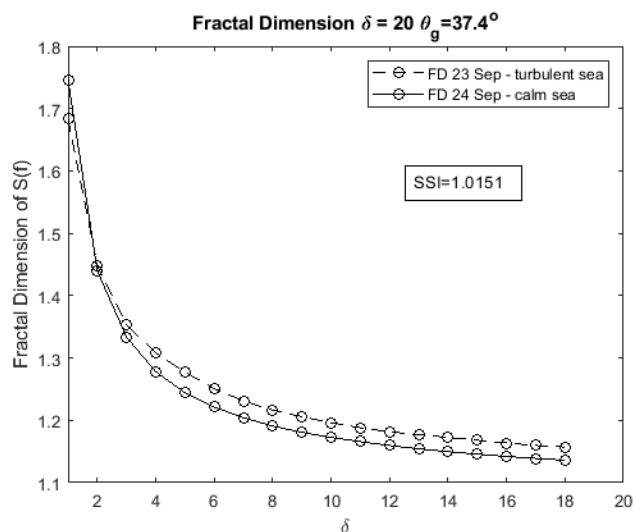


Εικόνα 20: Διάσταση Fractal για γωνίες πρόσπτωσης  $5^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 30^\circ$  και  $35^\circ$

Από την μελέτη των αποτελεσμάτων της διάστασης fractal για γωνίες πρόσπτωσης  $\theta_g = [5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ]$  συμπεραίνεται ότι το κριτήριο διάστασης fractal δύναται να χρησιμοποιηθεί σε όλο το εύρος των γωνιών πρόσπτωσης του κύματος στην επιφάνεια της θάλασσας.

Θέλοντας να διερευνηθεί το κριτήριο και τα όρια μέσα στα οποία μας δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα διαπιστώνεται ότι το ανωτέρω κριτήριο είναι λειτουργικό σε μικρές σχετικά γωνίες. Στην οριακή γωνία  $\theta_g = 37.4^\circ$  και άνω, το

κριτήριο δεν δύναται να παρέχει ασφαλή χαρακτηρισμό της κατάστασης θαλάσσης με ικανοποιητικά αποτελέσματα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 21.



Εικόνα 21: Διάσταση Fractal συναρτήσεσι του  $\delta$  για γωνία πρόσπτωσης  $37.4^\circ$

Ανωτέρω αδυναμία λειτουργίας του κριτηρίου διάστασης fractal είναι αναμενόμενη για γωνίες μεγαλύτερες των  $35^\circ$  καθώς η ύπαρξη θορύβου στο σήμα γίνεται μεγάλη, κάτι λογικό από φυσικής απόψεως.

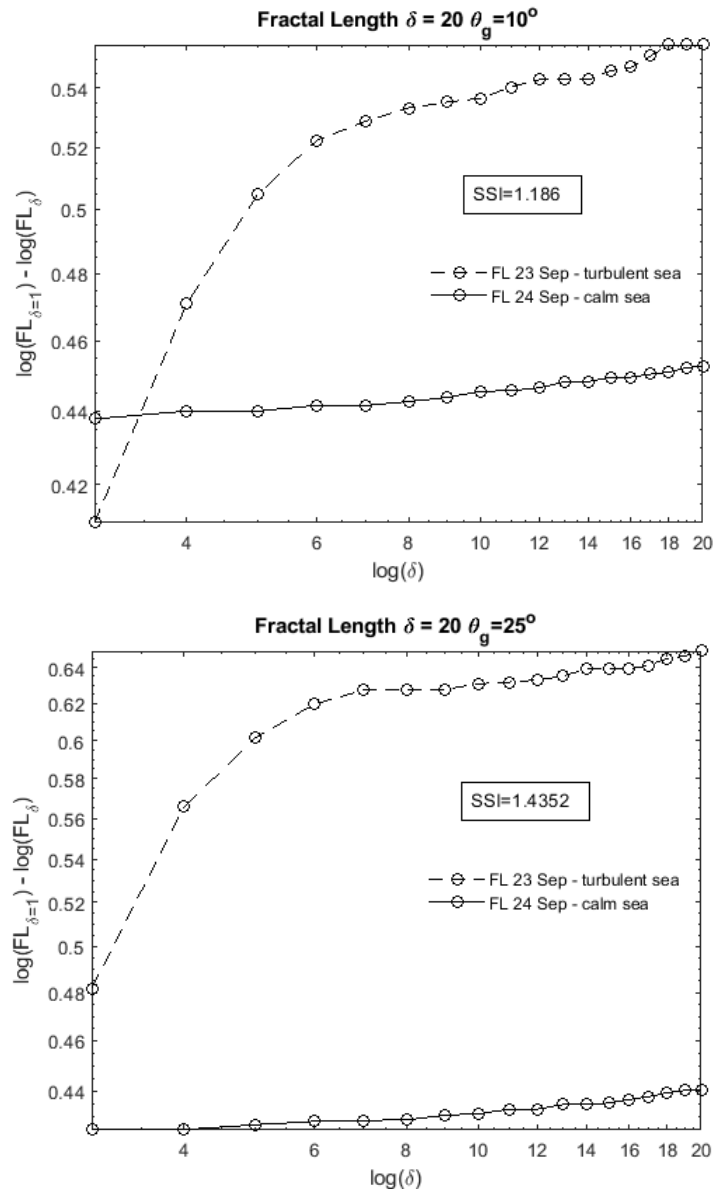
Επίσης το πλήθος  $N$  των προφίλ απόστασης που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του μέσου σήματος (averaging) για την απαλοιφή του θορύβου δύναται να μεταβάλλεται αλλά δεν μπορεί να παίρνει τιμές μικρότερες των  $N=10$  προφίλ απόστασης και μεγαλύτερες των  $N=150$  καθώς η απαλοιφή του θορύβου δεν λειτουργεί ικανοποιητικά.

Τέλος, ο δείκτης κατάστασης θαλάσσης (sea state index - SSI) υπολογίζεται για το κριτήριο διάστασης fractal. Ο δείκτης κατάστασης θαλάσσης (SSI) του κριτηρίου διάστασης fractal είναι ο λόγος της μέσης διάστασης fractal στην ταραγμένη θάλασσα προς την μέση διάσταση fractal για ήρεμη θάλασσα στο φάσμα της συχνότητας.

Γωνία \ SSI	Διάσταση Fractal
$5^\circ$	1.043
$10^\circ$	1.026
$15^\circ$	1.206
$20^\circ$	1.063
$25^\circ$	1.071
$30^\circ$	1.062
$35^\circ$	1.089

Πίνακας 6: Δείκτης κατάστασης θαλάσσης SSI διάστασης fractal

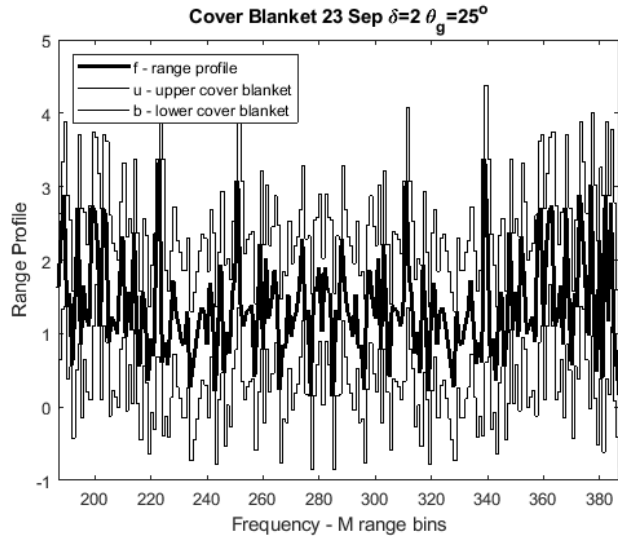
Το δεύτερο κριτήριο χαρακτηρισμού της επιφάνειας της θάλασσας πραγματοποιήθηκε με την εξέταση του μήκους fractal. Το κριτήριο λογαρίθμου μήκους fractal υπολογίζει το μήκος fractal του κανονικοποιημένου μέσου σήματος για τα προφίλ απόστασης για πλήθος προφίλ  $N=65$  στο φάσμα συχνοτήτων, χρησιμοποιώντας την μέθοδο blanket όπως περιγράφηκε συνοπτικά ανωτέρω. Το κριτήριο προσομοιώθηκε για τις γωνίες  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $25^\circ$ ,  $30^\circ$  και  $35^\circ$  με τα αποτελέσματα ενδεικτικά για τις γωνίες πρόσπτωσης  $10^\circ$  και  $25^\circ$  να φαίνονται στην Εικόνα 22.



Εικόνα 22: Μήκος Fractal συναρτήσει του  $\delta$  για γωνίες πρόσπτωσης  $10^\circ$  και  $25^\circ$

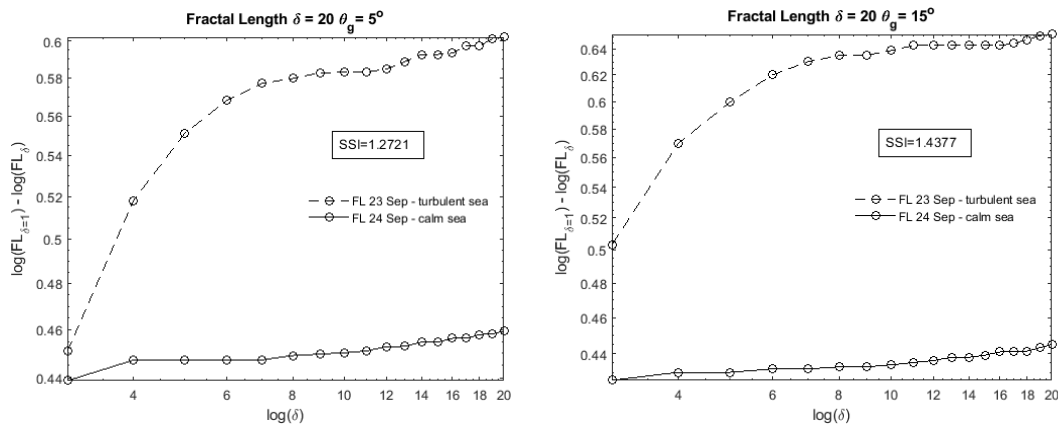
Το κριτήριο λογαρίθμου μήκους fractal εξετάζει την διαφορά του λογάριθμου του μήκους fractal για κλίμακα  $\delta=1$  μείον το λογάριθμο του μήκους fractal για  $\delta$  ως προς τον λογάριθμο του  $\delta$ . Το σήμα για κλίμακα  $\delta=1$  ουσιαστικά ταυτίζεται με το οπισθοσκεδαζόμενο σήμα. Στην Εικόνα 23 φαίνεται η άνω και κάτω κουβέρτα σε

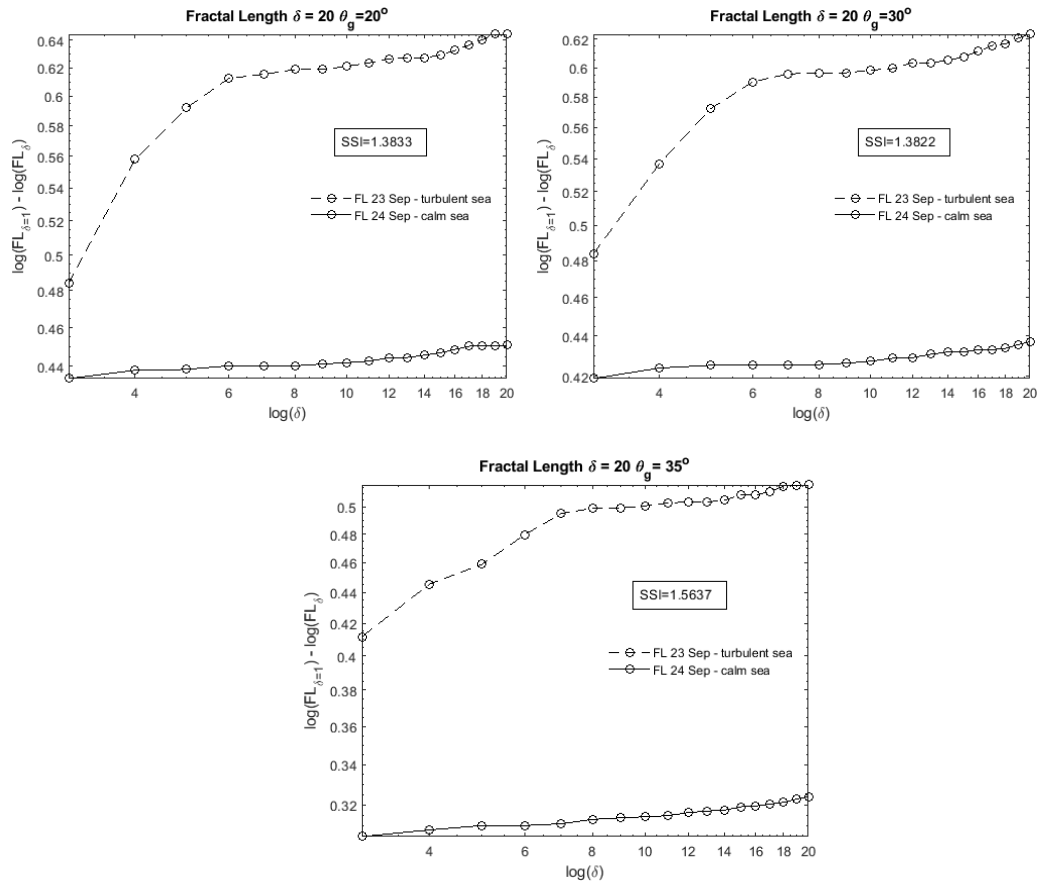
σχέση με το οπισθοσκεδαζόμενο σήμα για  $\delta=2$  έτσι ώστε να είναι φανερή η μέθοδος blanket. Κατά συνέπεια το μήκος fractal για  $\delta=1$  δεν προσφέρει κάποια προστιθέμενη αξία στο κριτήριο χαρακτηρισμού της θάλασσας καθώς αποτελεί το ίδιο το οπισθοσκεδαζόμενο σήμα και για αυτό αφαιρείται.



Εικόνα 23: Μονοδιάστατο "προφίλ απόστασης" (range profile) και άνω - κάτω καμπύλες "blanket", για  $\delta=2$

Η μελέτη των προσομοιώσεων του μήκους fractal ερευνήθηκε σε όλες τις γωνίες ενώ ενδεικτικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για γωνίες πρόσπτωσης  $\theta_g=[5^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 35^\circ]$  όπως φαίνεται και στην Εικόνα 24.



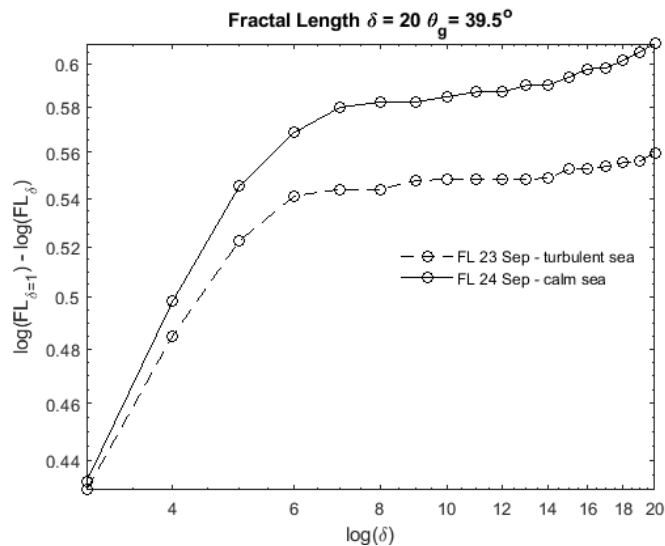


Εικόνα 24: Μήκος Fractal για γωνίες πρόσπτωσης  $5^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$  και  $35^\circ$

Συνεπώς, συμπεραίνεται ότι το κριτήριο λογαρίθμου μήκους *fractal* δύναται να χρησιμοποιηθεί για γωνίες πρόσπτωσης του κύματος στην επιφάνεια της θάλασσας  $\theta_g = [5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ]$ .

Για να διερευνηθεί το κριτήριο και τα όρια γωνιών πρόσπτωσης στα οποία δίνονται ικανοποιητικά αποτελέσματα αυξάνεται η γωνία πρόσπτωσης όπου διαπιστώνεται ότι το ανωτέρω κριτήριο είναι πλήρως λειτουργικό σε σχετικά μικρές γωνίες από  $5^\circ$  έως  $35^\circ$ .

Στην οριακή γωνία  $\theta_g = 39.5^\circ$  και άνω, το κριτήριο δεν δύναται να παρέχει ασφαλή χαρακτηρισμό της κατάστασης της θάλασσας με ικανοποιητικά αποτελέσματα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 25.



Εικόνα 25: Μήκος Fractal συναρτήσεϊ του  $\delta$  για γωνία πρόσπτωσης  $39.5^\circ$

Στην ανωτέρω εικόνα είναι φανερό ότι το μήκος fractal είναι μεγαλύτερο στην ήρεμη θάλασσα σε σχέση με την ταραγμένη θάλασσα.

Τέλος, ο δείκτης κατάστασης θαλάσσης (sea state index - SSI) υπολογίζεται για το κριτήριο λογαρίθμου μήκους fractal. Ο δείκτης κατάστασης θαλάσσης του κριτηρίου μήκους fractal είναι ο λόγος του μέσου μήκους fractal στην ταραγμένη θάλασσα προς το μέσο μήκος fractal για ήρεμη θάλασσα στο φάσμα της συχνότητας.

SSI Γωνία	Μήκος Fractal
5°	1.272
10°	1.186
15°	1.437
20°	1.383
25°	1.435
30°	1.382
35°	1.563

Πίνακας 7: Δείκτης κατάστασης θαλάσσης SSI μήκους fractal

Το κριτήριο διακύμανσης  $\sigma^2$  υπολογίζει τη διακύμανση του κανονικοποιημένου μέσου σήματος στην περιοχή του χρόνου και της συχνότητας των  $N$  προφίλ απόστασης (με  $N=65$ ), σύμφωνα με το εξίσωση (5.1). Για την εφαρμογή του κριτηρίου αυτού πραγματοποιήθηκαν αριθμητικοί υπολογισμοί για την διακύμανση σε ένα εύρος γωνιών από  $5^\circ$  έως  $30^\circ$  και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα.



Μέρα Γωνία	Πεδίο Συχνοτήτων		Πεδίο Χρόνου	
	Ταραγμένη Θάλασσα	Ήρεμη Θάλασσα	Ταραγμένη Θάλασσα	Ήρεμη Θάλασσα
5°	0.856	0.279	0.010	0.003
10°	0.606	0.328	0.010	0.003
15°	1.121	0.085	0.014	0.003
20°	1.070	0.300	0.014	0.003
25°	0.915	0.229	0.013	0.003
30°	0.720	0.243	0.012	0.002

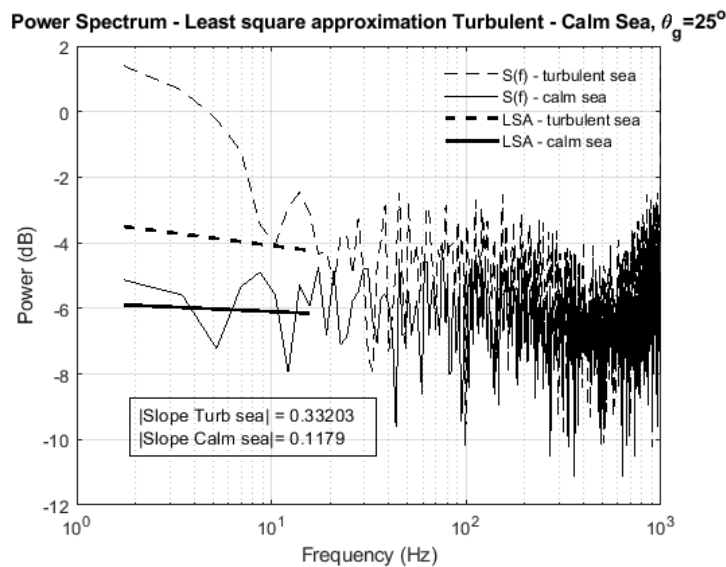
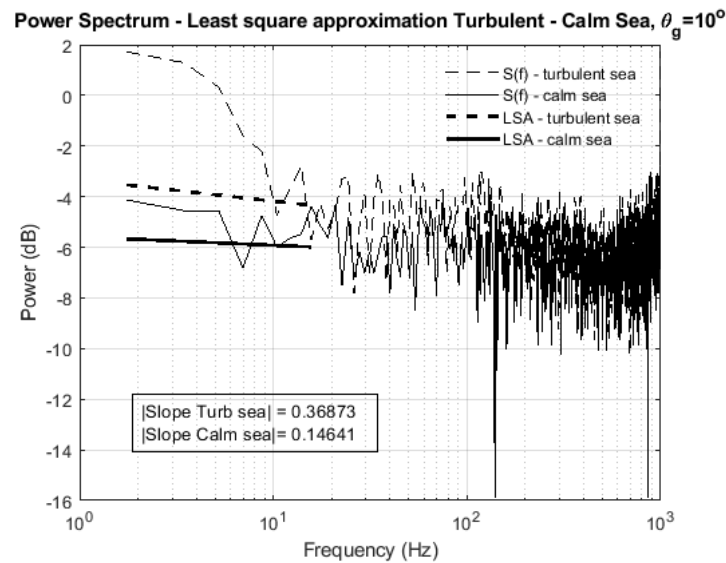
Πίνακας 8: Τιμές διακύμανσης για διαφορετικές καταστάσεις θαλάσσης και γωνίες πρόσπτωσης

Τα αποτελέσματα του Πίνακας 8 δείχνουν ότι οι τιμές της διακύμανσης του κανονικοποιημένου μέσου προφίλ απόστασης για  $N=65$  (όπου  $N$  είναι το πλήθος των προφίλ απόστασης που συνυπολογίστηκαν για το μέσο σήμα) ενός ραντάρ στο φάσμα της συχνότητας και του χρόνου κατά τη διάρκεια της ταραγμένης θάλασσας είναι σημαντικά μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές σε ήρεμη θάλασσα.

Τέλος, το κριτήριο ελαχίστων τετραγώνων ισχύος υπολογίζει την κλίση της ευθείας που προκύπτει από την προσέγγιση των ελαχίστων τετραγώνων στο φάσμα ισχύος του σήματος. Το συγκεκριμένο κριτήριο χρησιμοποιείται για να επαληθεύσει την ορθότητα των δύο κριτηρίων που βασίζονται στην θεωρία των fractals και προαναφέρθηκαν. Αντίστοιχη μελέτη έχει πραγματοποιηθεί από τους Lo [3] και Hu [54], χωρίς όμως ανάλογο κριτήριο να έχει χρησιμοποιηθεί για σύγκριση και χαρακτηρισμό διαφορετικών τραχιών επιφανειών.

Από την πυκνότητα φάσματος ισχύος υπολογίστηκε η καμπύλη ελαχίστων τετραγώνων πρώτου βαθμού, που σημαίνει ότι προκύπτει μία ευθεία της μορφής  $\alpha x + \beta$ . Η ευθεία υπολογίστηκε από όλες τις τιμές της πυκνότητας ισχύος του σήματος για την κάθε ημέρα, όμως για λόγους απλότητας αποτυπώθηκε η ευθεία στις 10 πρώτες συχνότητες, αφενός διότι η ισχύς στις μικρές συχνότητες παρουσιάζει μεγάλες τιμές αφετέρου γιατί μας ενδιαφέρει η κλίση της ευθείας και όχι η ευθεία καθαυτή.

Το φάσμα ισχύος του κανονικοποιημένου μέσου σήματος στην περιοχή της συχνότητας των  $N$  προφίλ απόστασης (με  $N=65$ ) για την ταραγμένη και την ήρεμη θάλασσα ενδεικτικά φαίνονται στην Εικόνα 26.



Εικόνα 26: Φάσμα ισχύος σήματος και κλίση ευθείας ελαχίστων τετραγώνων

Στις ανωτέρω εικόνες φαίνεται η *πυκνότητα του φάσματος ισχύος* (power spectral density - PSD) σε σχέση με την συχνότητα σε λογαριθμική κλίμακα για ταραγμένη και ήρεμη θάλασσα για γωνίες πρόσπτωσης του κύματος  $10^\circ$  και  $25^\circ$ , όπου είναι φανερό ότι η ισχύς του σήματος για την ταραγμένη θάλασσα παρουσιάζει μεγαλύτερη τιμή σε σχέση με την ήρεμη θάλασσα, κάτι που ήταν αναμενόμενο από φυσικής απόψεως. Επίσης παρατηρείται ότι το σήμα οπισθοσκέδασης παρουσιάζει μεγαλύτερη ισχύς σε μικρότερες συχνότητες, κάτι που είχε παρατηρηθεί και από τον Hu [54] σε αντίστοιχη έρευνα που είχε κάνει με πραγματικά δεδομένα.

Στην ίδια εικόνα φαίνονται οι κλίσεις των ευθειών που προκύπτουν από την προσέγγιση των ελαχίστων τετραγώνων (least square approximation – LSA) στο φάσμα ισχύος για την ταραγμένη και την ήρεμη θάλασσα. Από τις ευθείες των ελαχίστων τετραγώνων φαίνεται ότι η απόλυτη τιμή της κλίσης για την ταραγμένη θάλασσα είναι μεγαλύτερη από την απόλυτη τιμή της κλίσης για την ήρεμη

θάλασσα, κάτι που χρησιμοποιείται ως κριτήριο χαρακτηρισμού της επιφάνειας της θάλασσας.

Για την εφαρμογή του κριτηρίου αυτού πραγματοποιήθηκαν οι προσομοιώσεις και οι αριθμητικοί υπολογισμοί για την κλίση της ευθείας που προκύπτει από την προσέγγιση των ελαχίστων τετραγώνων στην πυκνότητα φάσματος ισχύος στο οπισθοσκεδαζόμενο κύμα σε ένα εύρος γωνιών από 5° έως 35° και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα.

Επιφ. Γωνία	κλίση ευθείας - LSA	
	Ταραγμένη Θάλασσα	Ήρεμη Θάλασσα
5°	0.290	0.119
10°	0.368	0.146
15°	0.316	0.166
20°	0.300	0.148
25°	0.332	0.117
30°	0.346	0.115
35°	0.314	0.174

Πίνακας 9: Κλίση ευθείας ελαχίστων τετραγώνων φάσματος ισχύος για διαφορετικές καταστάσεις θαλάσσης και γωνίες πρόσπτωσης

Το κριτήριο ελαχίστων τετραγώνων ισχύος δύναται να χρησιμοποιηθεί για τον χαρακτηρισμό την κατάσταση θαλάσσης και την επαλήθευση των κριτηρίων της διάστασης fractal και του μήκους fractal. Όπως φαίνεται και στο ανωτέρω πίνακα το κριτήριο ικανοποιείται για όλες τις γωνίες μέχρι και τις 35° ενώ παρατηρήθηκε ότι δεν ικανοποιείται ως κριτήριο στις 36.5° και μεμονωμένα για τιμές μεγαλύτερες αυτής.

## 5.5 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό η έρευνα επικεντρώθηκε στον χαρακτηρισμό της κατάστασης θαλάσσης με την βοήθεια τεσσάρων κριτηρίων, όπου τα δύο κριτήρια βασίζονται στις fractal ιδιότητες που παρουσιάζει η θαλάσσια επιφάνεια και τα άλλα δύο κριτήρια επαληθεύουν τα δύο προαναφερθέντα κριτήρια fractal. Τα τέσσερα κριτήρια εφαρμόστηκαν στις πειραματικές μονοδιάστατες υπογραφές ενός ραντάρ συνθετικού παραθύρου (SAR) στο φάσμα της συχνότητας (πραγματικά δεδομένα ραντάρ θαλάσσιου κυματισμού), σε δύο διαφορετικές θαλάσσιες καταστάσεις (ταραγμένη και ήρεμη θάλασσα).

Τα τέσσερα κριτήρια εφαρμόστηκαν σε κανονικοποιημένα δεδομένα του μέσου σήματος οπισθοσκέδασης από την επιφάνεια της θάλασσας, από τα οποία τα κριτήρια που αφορούν την θεωρία των fractals είναι το κριτήριο της διάστασης fractal και το κριτήριο του μήκους fractal, ενώ για την επαλήθευση των προαναφερθέντων κριτηρίων χρησιμοποιήθηκαν το κριτήριο της διακύμανσης  $\sigma^2$  και το κριτήριο ελαχίστων τετραγώνων ισχύος.

Για να αντιμετωπιστεί η ύπαρξη του θορύβου στο σήμα, αρχικά εφαρμόστηκε η μέθοδος υπολογισμού του μέσου όρου των προφίλ απόστασης (averaging) για την απαλοιφή του θορύβου και στη συνέχεια, τα δεδομένα κανονικοποιήθηκαν στην κλίμακα από 0 έως 1 (normalizing), ενώ το παραγόμενο σήμα οπισθοσκέδασης μετασχηματίστηκε στην περιοχή της συχνότητας.

Τέλος, υπολογίστηκε ο δείκτης κατάστασης θαλάσσης (sea state index - SSI) τόσο για το κριτήριο διάστασης fractal όσο και για το κριτήριο μήκους fractal.

Από τα αποτελέσματα του κεφαλαίου αυτού είναι φανερό ότι με βάση τα τέσσερα κριτήρια που ετέθησαν είναι κατ' αρχήν δυνατός ο χαρακτηρισμός κατάστασης θαλάσσης, με βάση τον δείκτη κατάστασης θαλάσσης (sea state index - SSI), όπως προαναφέρθηκε.

# Κεφάλαιο 6

## Συμπεράσματα– Μελλοντικές Επεκτάσεις

### 6.1 Ανακεφαλαίωση

Η υφιστάμενη διδακτορική διατριβή είναι μία επισκόπηση και κριτική ανάλυση της υφιστάμενης γνώσης που υπάρχει αναφορικά με τον χαρακτηρισμό της κατάστασης θαλάσσης από δεδομένα οπισθοσκέδασης ραντάρ. Ιδιαίτερα δε, είναι η περεταίρω διερεύνηση του χαρακτηρισμού της κατάστασης θαλάσσης με την βοήθεια προσομοιώσεων αρχικά εικονικών δεδομένων, με την χρήση μαθηματικών μοντέλων και στην συνέχεια με την εφαρμογή τεχνικών σε πραγματικά δεδομένα οπισθοσκέδασης από αερομεταφερόμενο ραντάρ συνθετικής απεικόνισης.

Συγκεκριμένα, για την διερεύνηση του χαρακτηρισμού της κατάστασης θαλάσσης δημιουργήθηκαν τρισδιάστατες fractal θαλάσσιες επιφάνειες με την χρήση των μαθηματικών μοντέλων ενώ στη συνέχεια εξετάστηκαν η σκέδαση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από τραχιές fractal επιφάνειες, χρησιμοποιώντας την προσέγγιση του Kirchhoff. Οι επιφάνειες που εξετάστηκαν είναι τραχιές fractal θαλάσσιες επιφάνειες τριών διαστάσεων. Οι τρισδιάστατες επιφάνειες μοντελοποιήθηκαν με μαθηματικές δισδιάστατες συναρτήσεις.

Σκοπός της παρούσας διατριβής ήταν η μελέτη καινοτόμου χαρακτηρισμού επιφανειών και πιο συγκεκριμένα την θαλάσσιας επιφάνειας για διάφορες καταστάσεις θαλάσσης (ήτοι τραχύτητα της θαλάσσιας επιφάνειας). Ο χαρακτηρισμός της τραχύτητας επιφανειών προσεγγίστηκε με την μοντελοποίηση μίας τρισδιάστατης fractal επιφάνειας και μελετήθηκε η οπισθοσκέδαση από αυτήν με την βοήθεια της προσέγγισης του Kirchhoff.

Η έρευνα στην συνέχεια επεκτάθηκε στον προσδιορισμό της κατάστασης θαλάσσης με πραγματικά δεδομένα οπισθοσκέδασης από ένα ραντάρ PicoSAR X ενός ελικοπτέρου από την ομάδα εργασίας SET-185. Αρχικά η μελέτη εστίασε στην σκέδαση ήρεμης και ταραχώδης θαλάσσιας επιφάνειας στο πεδίο του χρόνου [4]. Στην συνέχεια βελτιστοποιήθηκε με απαλοιφή του θορύβου και μελετήθηκε στο πεδίο της συχνότητας [5].

Στο πλαίσιο εκπόνησης της διατριβής έγινε μία ανασκόπηση της βιβλιογραφίας χρονολογικά έτσι ώστε να μπορεί να αντιληφθεί ο αναγνώστης την πορεία της εξέλιξης της έρευνας της σκέδασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε τραχιά επιφάνεια.

Οι πιο σημαντικές βιβλιογραφικές αναφορές είναι του Mandelbrot [8] όπου το 1967 μελετάει τις αυτο-όμοιες καμπύλες που έχουν τη διάσταση Hausdorff που είναι παραδείγματα fractals, καθώς και μια ποσότητα  $D$  που έχει ιδιότητες "διάστασης". Το 1982 ενώ ορισμένα από τα μαθηματικά ζητήματα που παρουσίασε στην έρευνα του είχαν περιγραφεί προηγουμένως και από άλλους μαθηματικούς με μεμονωμένες περιγραφές, ο Mandelbrot ήταν αυτός που εφάρμοσε τον όρο "fractal". Ο Peleg [13] το 1984 μελέτησε την ανάλυση τραχύτητας μίας επιφάνειας καθώς βασίστηκε ότι οι μορφές των επιφανειών ταξινομούνται με βάση την αλλαγή των ιδιοτήτων τους και την αλλαγή της ανάλυσης τους ως εικόνων. Έτσι, εισήγαγε μέθοδο "blanket" για μία δισδιάστατη επιφάνεια, μία μέθοδος που εφαρμόστηκε στην παρούσα διατριβή.

Ο D.L. Jaggard [15] το 1990 μελέτησε το πρόβλημα της σκέδασης οπτικών και ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων για μια οικογένεια ακανόνιστων τραχιών επιφανειών που παρουσίαζαν χαρακτηριστικά fractal γεωμετρίας. Και την ίδια χρονιά μοντελοποίησε [16] την σκέδαση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από τέλεια αγωγίμες fractal επιφάνειες σύμφωνα με την τεχνική του Rayleigh.

Το 1993 ο Lo [3] μελέτησε την fractal θεωρία και την εφαρμογή της στην ανάλυση πραγματικών σημάτων ραντάρ τα οποία είναι σκεδαζόμενα από τραχιές επιφάνειες της θάλασσας. Παρατηρήθηκε λοιπόν ότι τα εμπρόσθια σκεδασμένα και οπισθοσκεδαζόμενα σήματα ραντάρ έχουν πολύ παρόμοιες fractal διαστάσεις.

Το 1994 προτάθηκε μια ευρυζωνική συνάρτηση Weierstrass (για τρισδιάστατη επιφάνεια) από τον Lin [19], προκειμένου να μελετηθεί η διστατική σκέδαση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από τρισδιάστατες fractal επιφάνειες. Ωστόσο, μια απλούστερη αναπαράσταση τρισδιάστατης fractal επιφάνειας, εισήχθη το 2012 από τον Zaleski [43].

Οι Savaidis και Frangos [20] το 1994 μελέτησαν την σκέδαση οπτικών και ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από τέλεια αγωγίμες επιφάνειες μοντελοποιημένες με την χρήση μίας fractal συνάρτησης σε συγκεκριμένες οριακές συνθήκες. Ενώ το 1997 μελέτησαν μια νέα μέθοδος για τη σκέδαση από αγωγίμες επιφάνειες με αυλακώσεις / πτυχές με τη χρήση της προσέγγισης "Extended Boundary Condition".

Το 1999 ο Fabrizio Berizzi [24] πρότεινε μία μονοδιάστατη συνάρτηση fractal επιφάνειας της θάλασσας που βασίζεται στην fractal ζωνοπερατή συνάρτηση των

Weierstrass-Mandelbrot και την ίδια χρονιά με δεύτερη μελέτη του ο Berizzi [25] ασχολείται με το πρόβλημα της ηλεκτρομαγνητικής σκέδασης από επιφάνεια της θάλασσας.

Το 2008 το Ren Xin-Cheng [40] μοντελοποίησε μία τρισδιάστατη τραχιά διηλεκτρική επιφάνεια χρησιμοποιώντας μια κανονικοποιημένη ζωνοπερατή fractal συνάρτηση Weierstrass και ανέλυσε το σκεδαζόμενο πεδίο με την βοήθεια της θεωρίας του Kirchhoff. Στην συνέχεια μελέτησε την διακύμανση της έντασης της σκέδασης και το συμπέρασμα ήταν ότι οι κλίσεις των γραμμών που ενώνουν τις κορυφές των διαγραμμάτων μπορούν να υπολογιστούν ως μία κλίση γραμμικής εξίσωσης.

Μετά την βιβλιογραφική ανασκόπηση ακολούθησε η θεωρητική μελέτη της σκέδασης με την μοντελοποίηση της σκεδάζουσας δισδιάστατης επιφάνειας. Για την κατασκευή του μοντέλου μίας τραχιάς επιφάνειας χρησιμοποιούνται ντετερμινιστικές συναρτήσεις. Η θεωρία των fractals αποτελεί μια εναλλακτική επιλογή για την μοντελοποίηση των επιφανειών με διαφορετική τραχύτητα. Οι fractal συναρτήσεις δίνουν επιφάνειες όμοιες με τις πραγματικές επιφάνειες που συναντώνται στην φύση. Επίσης, μέσω μίας τέτοιας συνάρτησης και των παραμέτρων της, φερειπείν της διάστασης fractal (fractal dimension) ή και του μήκους fractal (fractal length), μπορεί να καθοριστεί με σχετική ακρίβεια η τραχύτητα της επιφάνειας.

Για την μοντελοποίηση των επιφανειών χρησιμοποιήθηκαν οι συναρτήσεις: *Weierstrass-Mandelbrot* συνάρτηση -  $W(x)$  [9], [29] και η τροποποιημένη *Weierstrass-Mandelbrot* συνάρτηση -  $f_r(x)$  [15], [29] με διάσταση fractal  $1 < D < 2$ . Η εν λόγω συνάρτηση ουσιαστικά αποτελείται από το άθροισμα ημιτονικών συναρτήσεων, με βάρη που φθίνουν όσο η περίοδος αυξάνει και παρουσιάζει το κλασσικό χαρακτηριστικό της αυτό-ομοιότητας (self-similarity) των fractals. Η τροποποιημένη *Weierstrass-Mandelbrot* συνάρτηση θεωρείται η ιδανική συνάρτηση για την μοντελοποίηση μίας επιφάνειας. Συνεπώς ένα σπουδαίο μαθηματικό μοντέλο σκεδασμού ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε επιφάνειες

Η έρευνα συνεχίστηκε με την μοντελοποίηση των τρισδιάστατων τραχιών fractal επιφανειών που δίνεται από την δισδιάστατη ευρυζωνική συνάρτηση Weierstrass Η εν λόγω συνάρτηση είναι ένας συνδυασμός διακριτών περιοδικών και τυχαίων παραμέτρων.

Στην συνέχεια, η μοντελοποίηση της σκεδάζουσας θαλάσσιας επιφάνειας έγινε με την χρήση πραγματικών δεδομένων που προήλθαν από ανάλυση της οπισθοσκέδασης ενός ραντάρ συνθετικού παραθύρου. Τα δεδομένα συλλέχθηκαν από την ομάδα εργασίας SET-185 στην δοκιμή NEMO 2014 που πραγματοποιήθηκε

στο Taranto της Ιταλίας το Σεπτέμβριο του 2014. Το ραντάρ που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένα PicoSAR X το οποίο ήταν τοποθετημένο σε ένα ελικόπτερο.

Κατά την διάρκεια της πρώτης ημέρας δοκιμής, η ταχύτητα του ανέμου στην περιοχή ήταν 10-12m/s και η τραχύτητα της θάλασσας ήταν σχετικά μεγάλη (ταραγμένη θάλασσα).

Τη δεύτερη ημέρα της δοκιμής την 24/9/2014, η ταχύτητα του ανέμου ήταν μικρή (λίγων m/s) που μερικές φορές εξασθενούσα πλήρως τοπικά, σχηματίζοντας μία σχεδόν λεία επιφάνεια (ρυτιδούμενη θάλασσα). Η παρουσία βουβών κυμάτων οφειλόταν σε αποθαλασσία (swell waves), δηλαδή σε κύμα που δεν οφείλεται σε καιρικά φαινόμενα στο χρόνο παρατήρησης, αλλά σε άνεμο που έπνεε την προηγούμενη μέρα σε γειτονική περιοχή.

Με την μοντελοποίηση των επιφανειών η διατριβή συνεχίστηκε με την μοντελοποίηση της σκέδασης από μία δισδιάστατη τραχιά επιφάνεια με την προσέγγιση Kirchhoff. Για να υπολογιστεί η σκέδαση των fractal επιφανειών, χρησιμοποιήθηκαν μη γραμμικές διαφορικές εξισώσεις [7]. Καθώς κρίνεται αναγκαίο να βρεθούν προσεγγιστικές λύσεις με ορισμένα όρια, δεδομένης της μη ύπαρξης αναλυτικής γενικής λύσης των μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων, μια προτεινόμενη λύση που έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στην βιβλιογραφία είναι η προσέγγιση του Kirchhoff που έχει όμως τον περιορισμό ότι ισχύει όταν το μήκος του προσπίπτοντος κύματος είναι μικρό σε σχέση με την τοπική ακτίνα καμπυλότητας της τραχύτητας της εξεταζόμενης επιφάνειας [15], [38], [47]. Η προσέγγιση του Kirchhoff που χρησιμοποιήθηκε στην μελέτη λαμβάνει υπόψιν την ακριβή τραχύτητα της επιφάνειας έτσι ώστε να υπολογιστεί η σκέδαση από αυτήν. Αντίθετα, οι λοιπές προσεγγιστικές μέθοδοι υπολογίζουν στατιστικά το μέσο όρο του σκεδαζόμενου πεδίου από την τραχιά επιφάνεια [7], [47]. Τέλος, οι μοντελοποιήσεις ολοκληρώθηκαν με την μοντελοποίηση σκέδασης από τρισδιάστατη τραχιά επιφάνεια με την προσέγγιση Kirchhoff.

Με την ολοκλήρωση της μοντελοποίησης τόσο των τραχιών επιφανειών όσο και της σκέδασης συνεχίστηκε η διατριβή με την μελέτη χαρακτηρισμού της τραχύτητας μίας τρισδιάστατης επιφάνειας. Αρχικά, περιγράφηκε σύντομα η γεωμετρία του τρισδιάστατου προβλήματος. Η μοντελοποίηση της τρισδιάστατης τραχιάς fractal επιφάνειας, πραγματοποιήθηκε με την δισδιάστατη συνάρτηση Weierstrass δύο μεταβλητών, ως απλή τροποποίηση των αντίστοιχων συναρτήσεων Weierstrass που προτάθηκαν στο παρελθόν από τους Jaggard [52] (συνάρτηση μιας μεταβλητής) και του Zaleski [43] (συνάρτηση δύο μεταβλητών), όπου παράχθηκαν αντιπροσωπευτικές προσομοιώσεις της επιφάνειας για διάφορες τιμές της fractal διάστασης  $D$ .



Στην συνέχεια για τον υπολογισμό του σκεδαζόμενου πεδίου από μία τραχιά επιφάνεια χρησιμοποιήθηκε η προσέγγιση του Kirchhoff στην οποία λαμβάνεται υπόψη η ακριβής τραχύτητα της επιφάνειας που παράχθηκε με την προσομοίωση και παρατέθηκαν αντιπροσωπευτικές παραχθείσες προσομοιώσεις του συντελεστή σκέδασης από τρισδιάστατες fractal επιφάνειες για διάφορες τιμές της fractal διάστασης  $D$ .

Οι προσομοιώσεις εστιάστηκαν για ηλεκτρομαγνητικό κύμα που σκεδάζεται από τραχιά επιφάνεια όπου ισχύει συνθήκη  $\theta_3=0$ ,  $\theta_2=-\theta_1$  (που σημαίνει ότι θα εξετασθεί το οπισθοσκεδαζόμενο ηλεκτρομαγνητικό κύμα) και συγκεκριμένα τέθηκαν οι τιμές  $\theta_1=30$  και  $\theta_2=-30$ . Έτσι, για ένα εύρος συχνοτήτων ενός ραντάρ συνθετικού παραθύρου βηματικής συχνότητας (Stepped Frequency - SF), υπολογίστηκε ο συντελεστής οπισθοσκέδασης  $\gamma_{bsc}$ , σε συνάρτηση με τη διάσταση fractal  $D$  της τραχιάς επιφάνειας.

Σε όλες τις προσομοιώσεις η γωνία πρόσπτωσης επιλέχθηκε  $\theta_1=30^\circ$  και οι γωνίες σκέδασης είναι  $\theta_3=0$  και  $\theta_2=-\theta_1$ . Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων συμπεραίνεται ότι καθώς αυξάνεται η τιμή της fractal διάστασης  $D$ , δηλαδή όσο αυξάνεται η τραχύτητα της fractal επιφάνειας, η κλίση μεταξύ του κύριου λοβού της συνάρτησης  $|\gamma(k)|$  και των πλευρικών λοβών στο φασματικό πεδίο επίσης αυξάνεται.

Επίσης εξετάστηκε και η σχέση μεταξύ της διάστασης fractal  $D$  και της υπολογιζόμενης μέσης κλίσης μεταξύ του κύριου λοβού και των πρώτων πλευρικών λοβών εκατέρωθεν αυτού. Η κλίση είναι ίση με  $|\Delta\gamma|/|\Delta k|$ , όπου  $\Delta\gamma$  αντιπροσωπεύει τη διαφορά τιμής του συντελεστή οπισθοσκέδασης μεταξύ της κορυφής του κύριου λοβού και της κορυφής του πρώτου πλευρικού λοβού, και  $\Delta k$  ορίζει την μεταβολή των κορυφών κυματισμού.

Μια σημαντική παρατήρηση σχετικά με τα αποτελέσματα προσομοίωσης είναι ότι το εύρος ζώνης  $B$  του ραντάρ πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο, έτσι ώστε να παρατηρείται το φαινόμενο που προαναφέρθηκε όπου η κλίση μεταξύ του κύριου λοβού της συνάρτησης  $|\gamma(k)|$  και των πλευρικών λοβών στο φασματικό πεδίο της συχνότητας αυξάνεται συναρτήσει της αυξανόμενης τιμής της fractal διάστασης  $D$ . Επίσης βρέθηκε ότι το εύρος ζώνης  $B$  πρέπει να είναι τουλάχιστον σε ποσοστό 15% της φέρουσας συχνότητας του ραντάρ, έτσι ώστε να παρατηρείται το παραπάνω φαινόμενο με τις κλίσεις  $|\Delta\gamma|/|\Delta k|$ .

Παρόλα αυτά, ο περιορισμός του μικρού διαθέσιμου εύρους ζώνης  $B$  του ραντάρ σε πραγματικές μετρήσεις μπορεί να αντισταθμιστεί από το μεγάλο εύρος της επιφάνειας παρατήρησης  $zL$  (βλ. [1], [15], [22]). Αυτό σημαίνει ότι με κατάλληλη επιλογή του εμβαδού της επιφάνειας παρατήρησης από το ραντάρ δύναται να αντισταθμιστεί η επιλογή ενός μικρότερου εύρους ζώνης. Ουσιαστικά όσο

μεγαλύτερο είναι το εύρος ζώνης ενός ραντάρ τόσο μικρότερη είναι η διακριβωτική ικανότητα και απαιτείται μεγαλύτερη ισχύς λειτουργίας του ραντάρ.

Στην συνέχεια, για να γίνει φανερή η σχέση μεταξύ της διάστασης fractal  $D$  της τραχιάς επιφάνειας και του συντελεστή οπισθοσκέδασης  $|\gamma(k)|$ , πραγματοποιείται ένας υπολογισμός του συντελεστή  $|\gamma(k)|$  για διαφορετικές τιμές διάστασης fractal  $D$ .

Επιπλέον, αντιστρέφοντας τα δεδομένα (τιμές κλίσης του συντελεστή σκέδασης και της fractal διάστασης), η διάσταση fractal  $D$  σχεδιάζεται συναρτήσει της κλίσης του συντελεστή σκέδασης  $|\gamma(k)|$ . Οι προσομοιώσεις δείχνουν ότι η τραχύτητα της τρισδιάστατης fractal επιφάνειας μπορεί να χαρακτηριστεί από τη μέση κλίση μεταξύ του κύριου λοβού της συνάρτησης  $|\gamma(k)|$  και των δυο πρώτων πλευρικών λοβών, εκατέρωθεν του κύριου λοβού. Επιπλέον, για τη προσαρμογή των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο με το συντελεστή προσδιορισμού  $R$ -square, με σκοπό να μετρηθεί η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων. Το κριτήριο αυτό παρέχει ένα μέτρο για το πόσο καλά παρατηρήσιμα είναι τα αποτελέσματα από το μοντέλο, με βάση το ποσοστό της συνολικής διακύμανσης των αποτελεσμάτων που προκύπτει από το μοντέλο. Ουσιαστικά είναι η αναλογία της διακύμανσης της εξαρτημένης μεταβλητής που προκύπτει από μία ανεξάρτητη μεταβλητή. Επιπρόσθετα, τα όρια πρόβλεψης για την προσαρμοσμένη καμπύλη απεικονίστηκαν γραφικά, όπου η πιθανότητα εμφάνισης είναι 90%.

Υπολογίστηκαν τα “διαστήματα προβλέψεων” για την υπολογιζόμενη απόκλιση  $D_{calc}$  από τις “φασματικές κλίσεις” του συντελεστή σκέδασης. Οι τιμές των “διαστημάτων προβλέψεων” αντιστοιχούν σε 90% “πιθανότητα εμφάνισης”. Επομένως, τα ανωτέρω αποτελέσματα δείχνουν ότι η προτεινόμενη μέθοδος είναι αρκετά αξιόπιστη σε ότι αφορά το χαρακτηρισμό μιας τρισδιάστατης τραχιάς fractal επιφάνειας από τα σκεδαζόμενα ηλεκτρομαγνητικά κύματα του ραντάρ.

Προκειμένου να εξεταστεί η δυνατότητα εφαρμογής της ανωτέρου μεθόδου σε πραγματικό θορυβώδες περιβάλλον ραντάρ, προστέθηκε, στα παραγόμενα δεδομένα του συντελεστή οπισθοσκέδασης  $\gamma(k)$ , λευκός θόρυβος (Additive white Gaussian noise – AWGN). Στην συνέχεια υπολογίστηκε η στάθμη θορύβου  $N(\gamma)$  για μια δεδομένη τιμή του σηματοθορυβικού λόγου (SNR). Έτσι, όταν ένα σήμα οπισθοσκέδασης  $\gamma(k)$  εμφανίζει υψηλό σηματοθορυβικό λόγο  $SNR=20\text{dB}$  η μορφή του σήματος δεν επηρεάζεται. Η βέλτιστη επιλογή του σηματοθορυβικού λόγου εκτιμήθηκε ότι ανέρχεται περί το  $SNR=12\text{dB}$  ενώ για ένα σήμα οπισθοσκέδασης  $\gamma(k)$  με πολύ χαμηλό  $SNR=0\text{dB}$  παρατηρείται ότι επηρεάζει τους πλευρικούς λοβούς και ακυρώνει την προτεινόμενη μέθοδο.

Στο τελευταίο μέρος της διατριβής η έρευνα επικεντρώθηκε στον χαρακτηρισμό της κατάστασης θαλάσσης. Χρησιμοποιήθηκαν συνολικά τέσσερα κριτήρια, τα

δύο κριτήρια βασίζονται στις fractal ιδιότητες που παρουσιάζει η θαλάσσια επιφάνεια και τα άλλα δύο κριτήρια επαληθεύουν τα δύο καινοτόμα κριτήρια fractal. Τα τέσσερα κριτήρια εφαρμόστηκαν σε πειραματικές μονοδιάστατες υπογραφές ραντάρ συνθετικού παραθύρου (SAR) στο φάσμα της συχνότητας (πραγματικά δεδομένα ραντάρ θαλάσσιου κυματισμού), σε δύο διαφορετικές θαλάσσιες καταστάσεις (ταραγμένη και ήρεμη θάλασσα).

Τα τέσσερα κριτήρια εφαρμόστηκαν σε κανονικοποιημένα δεδομένα του μέσου σήματος οπισθοσκέδασης από την επιφάνεια της θάλασσας, από τα οποία τα κριτήρια που αφορούν την θεωρία των fractals είναι το κριτήριο της διάστασης fractal και το κριτήριο του μήκους fractal, ενώ για την επαλήθευση των προαναφερθέντων κριτηρίων χρησιμοποιήθηκαν το κριτήριο της διακύμανσης  $\sigma^2$  και το κριτήριο ελαχίστων τετραγώνων ισχύος. Στα κριτήρια διάστασης fractal και μήκους fractal χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος κουβέρας (blanket method) έτσι όπως αναπτύχθηκε από τον Peleg [13].

Η βασική ιδέα σχετικά με τις προτεινόμενες τεχνικές της διακύμανσης, των ελαχίστων τετραγώνων ισχύος, της διάστασης fractal και του μήκους fractal είναι ότι, τα προφίλ απόστασης του ραντάρ που αντιστοιχούν σε διαφορετικές καταστάσεις θαλάσσης, παρουσιάζουν διαφορετικές τιμές της διακύμανσης, του φάσματος ισχύος, της διάστασης fractal και του μήκους fractal. Παρατηρήθηκε ότι όσο πιο κυματώδεις είναι η θάλασσα τόσο μεγαλύτερη είναι η διακύμανση, το φάσμα ισχύος, η διάσταση fractal και το μήκος fractal του σήματος οπισθοσκέδασης στο πεδίο της συχνότητας και αυτό από φυσικής άποψης οφείλεται στην “ανώμαλη συμπεριφορά” των προφίλ απόστασης.

Επειδή, προκύπτουν πρακτικά ερωτήματα για τον χαρακτηρισμό ενός σήματος που ενσωματώνει θόρυβο, για να αντιμετωπιστεί η ύπαρξη του θορύβου στο σήμα, αρχικά εφαρμόστηκε η μέθοδος υπολογισμού του μέσου όρου των προφίλ απόστασης (averaging) για την απαλοιφή του θορύβου και στη συνέχεια, τα δεδομένα κανονικοποιήθηκαν στην κλίμακα από 0 έως 1 (normalizing) και το παραγόμενο σήμα οπισθοσκέδασης μετασχηματίστηκε στην περιοχή της συχνότητας.

Το κριτήριο διάστασης fractal υπολογίζει τη διάσταση fractal του κανονικοποιημένου μέσου σήματος στο φάσμα συχνοτήτων, χρησιμοποιώντας την μέθοδο blanket. Οι προσομοιώσεις του κριτηρίου που αφορά τον υπολογισμό και σύγκριση της διάστασης fractal για ταραγμένη και ήρεμη θάλασσα με ικανοποιητικά αποτελέσματα πραγματοποιήθηκαν για γωνίες πρόσπτωσης από  $5^\circ$  έως και  $35^\circ$ . Η αδυναμία λειτουργίας του “κριτηρίου διάστασης fractal” είναι αναμενόμενη για γωνίες μεγαλύτερες των  $35^\circ$ , κάτι αναμενόμενο από φυσικής απόψεως.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων υπέδειξαν ότι οι τιμές των διαστάσεων fractal του κανονικοποιημένου μέσου σήματος ραντάρ των προφίλ απόστασης κατά τη διάρκεια της ταραγμένης θάλασσας είναι σημαντικά μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές σε ήρεμη θάλασσα.

Επίσης παρατηρήθηκε ότι, το πλήθος  $N$  των προφίλ απόστασης που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του μέσου σήματος (averaging) για την απαλοιφή του θορύβου δύναται να μεταβάλλεται αλλά δεν μπορεί να παίρνει τιμές μικρότερες των  $N=10$  προφίλ απόστασης και μεγαλύτερες των  $N=150$  καθώς η απαλοιφή του θορύβου δεν λειτουργεί ικανοποιητικά.

Τέλος, υπολογίστηκε ο δείκτης κατάστασης θαλάσσης (sea state index - SSI) για το κριτήριο διάστασης fractal. Ο δείκτης κατάστασης θαλάσσης (SSI) του κριτηρίου διάστασης fractal είναι ο λόγος της μέσης διάστασης fractal στην ταραγμένη θάλασσα προς την μέση διάσταση fractal για ήρεμη θάλασσα στο φάσμα της συχνότητας.

Το δεύτερο κριτήριο χαρακτηρισμού της επιφάνειας της θάλασσας εξέτασε το μήκος fractal. Το κριτήριο λογαρίθμου μήκους fractal υπολογίζει το μήκος fractal του κανονικοποιημένου μέσου σήματος για τα προφίλ απόστασης στο φάσμα συχνοτήτων, χρησιμοποιώντας την μέθοδο blanket. Το κριτήριο προσομοιώθηκε για τις γωνίες από  $5^\circ$  έως και  $35^\circ$ .

Το κριτήριο λογαρίθμου μήκους fractal εξετάζει την διαφορά του λογάριθμου του μήκους fractal για κλίμακα  $\delta=1$  (όπου το σήμα για  $\delta=1$  ουσιαστικά ταυτίζεται με το οπισθοσκεδαζόμενο σήμα) μείον το λογάριθμο του μήκους fractal για ένα  $\delta$  ως προς τον λογάριθμο του  $\delta$ . Η προσομοίωση του μήκους fractal μελετήθηκε σε όλες τις γωνίες από  $5^\circ$  έως  $35^\circ$ .

Ο δείκτης κατάστασης θαλάσσης (sea state index - SSI) υπολογίστηκε για το κριτήριο λογαρίθμου μήκους fractal. Ο δείκτης κατάστασης θαλάσσης του κριτηρίου μήκους fractal είναι ο λόγος του μέσου μήκους fractal στην ταραγμένη θάλασσα προς το μέσο μήκος fractal για ήρεμη θάλασσα στο φάσμα της συχνότητας.

Στην συνέχεια, το κριτήριο διακύμανσης  $\sigma^2$  υπολογίζει τη διακύμανση του κανονικοποιημένου μέσου σήματος στην περιοχή του χρόνου και της συχνότητας των  $N$  προφίλ απόστασης. Αντίστοιχα, για την εφαρμογή του κριτηρίου αυτού πραγματοποιήθηκαν αριθμητικοί υπολογισμοί για την διακύμανση σε ένα εύρος γωνιών από  $5^\circ$  έως  $30^\circ$ .

Ενώ τέλος, το κριτήριο ελαχίστων τετραγώνων ισχύος υπολογίζει την κλίση της ευθείας που προκύπτει από την προσέγγιση των ελαχίστων τετραγώνων στο φάσμα ισχύος του σήματος. Το συγκεκριμένο κριτήριο χρησιμοποιείται για να

επαληθεύσει την ορθότητα των δύο κριτηρίων που βασίζονται στην θεωρία των fractals. Από την πυκνότητα φάσματος ισχύος υπολογίστηκε η καμπύλη ελαχίστων τετραγώνων πρώτου βαθμού, που σημαίνει ότι προκύπτει μία ευθεία της μορφής  $\alpha x + \beta$ . Από τις ευθείες των ελαχίστων τετραγώνων φαίνεται ότι η απόλυτη τιμή της κλίσης για την ταραγμένη θάλασσα είναι μεγαλύτερη από την απόλυτη τιμή της κλίσης για την ήρεμη θάλασσα, κάτι που χρησιμοποιείται ως κριτήριο χαρακτηρισμού της επιφάνειας της θάλασσας.

## 6.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Η μελλοντική έρευνα της διατριβής δύναται να επικεντρωθεί αρχικά στην περεταίρω μελέτη της επίδρασης του σηματοθορυβικού λόγου SNR στην προτεινόμενη μέθοδο χαρακτηρισμού τραχιάς επιφάνειας. Η επίδραση του σηματοθορυβικού λόγου SNR έχει ήδη εξετασθεί και διερευνηθεί πλήρως στην περίπτωση του θεωρητικού μοντέλου της σκέδασης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε δισδιάστατη τραχιά επιφάνεια [2], επομένως κρίνεται σκόπιμο να διερευνηθεί και στην περίπτωση της τρισδιάστατης επιφάνειας, όπου μπορεί να διατηρηθεί σταθερό το SNR και να μεταβάλλεται η διάσταση fractal έτσι ώστε να μελετηθεί η επίδραση στην εξεταζόμενη τραχιά επιφάνεια.

Στην διερεύνηση του χαρακτηρισμού της κατάστασης θαλάσσης με την χρήση πραγματικών δεδομένων από ραντάρ SAR παρατηρήθηκε ότι το εύρος ζώνης λειτουργίας του ραντάρ ήταν μικρό. Κατά συνέπεια εκτιμάται ότι δύναται να διερευνηθεί περεταίρω το θεωρητικό μοντέλο που αναπτύχθηκε στην παρούσα μελέτη. Να σημειωθεί ότι ο περιορισμός του μικρού διαθέσιμου εύρους ζώνης B του ραντάρ αντισταθμίζεται αυξάνοντας το εύρος της επιφάνειας παρατήρησης  $2L$ .

Επιπρόσθετα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος "Extended Boundary Condition Method - EBCM" που αφορά τη μελέτη της σκέδασης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων προκειμένου να γίνει επαλήθευση των αποτελεσμάτων της θεωρητικής μεθόδου που μελετήθηκε και εν συνεχεία διερεύνηση της παράμετρου  $k_\sigma$  πέρα από το περιορισμό του Kirchhoff όπου το μήκος της επιφάνειας πρέπει να είναι πολύ μεγαλύτερο του μήκους κύματος ( $L \ll \lambda$ ), έτσι ώστε να έχουμε αποτελέσματα της προσομοίωσης και για  $k_\sigma \gg 1$ , ήτοι και για επιφάνειες με μέσο ύψος της τάξης των cm. Το EBCM ή T-matrix ή μεταβατικό πλέγμα είναι πολύ γνωστό στην κβαντική θεωρία της σκέδασης.

Στην θεωρητική μελέτη χαρακτηρισμού μίας τραχιάς επιφάνειας έτσι όπως αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 2 και 3 αφενός για τη δημιουργία fractal επιφανειών και αφετέρου για την μοντελοποίηση της σκέδασης χρησιμοποιήθηκε στην πρώτη περίπτωση η δισδιάστατη ευρυζωνική συνάρτηση Weierstrass και στην δεύτερη η προσέγγιση του Kirchhoff. Κρίνεται σκόπιμο να διερευνηθεί περεταίρω τόσο η δημιουργία fractal τραχιών επιφανειών όσο και η σκέδαση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από τρισδιάστατη τραχιά επιφάνεια με έτερες προσεγγίσεις. Αναφορικά

με τη μοντελοποίηση της σκέδασης από τρισδιάστατη τραχιά επιφάνεια δύναται να χρησιμοποιηθεί η προσέγγιση του Rayleigh προκειμένου να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα σε σχέση με αυτά της υφιστάμενης διατριβής.

Τέλος, δύναται να υπολογισθεί η "διάσταση" με χρήση άλλων μεθόδων πέραν της θεωρίας που χρησιμοποιήσαμε σε αυτή την διατριβή. Μία τέτοια μέθοδος είναι η "Box Counting Dimension - BCM" όπου είναι ανάλογη της διάστασης fractal και έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στην διεθνή βιβλιογραφία.

### **6.3 Summary**

This dissertation is an overview and critical analysis of the existing knowledge regarding the characterization of the sea state from backscattering radar data. Specifically, it is a further research of the characterization of the sea state using virtual data simulations, mathematical models and application of techniques to real backscattered data from airborne synthetic aperture radar.

In particular, in order to investigate the characterization of the sea state, three-dimensional fractal sea surfaces were created using mathematical models, while scattering of electromagnetic waves from rough fractal surfaces was examined, using the Kirchhoff approach. The surfaces examined are rough fractal sea surfaces of three dimensions. Three-dimensional surfaces were modeled with mathematical two-dimensional functions.

The purpose of this dissertation was to study the innovative characterization of surfaces and more specifically the sea surface for various sea conditions (such as roughness of the sea surface). The characterization of surface roughness was approached by modeling a three-dimensional fractal surface and the backscattering of it was studied with the help of Kirchhoff's approach.

The research was then extended to determine the state of the sea with real backscattering data from a PicoSAR X radar of a helicopter from the SET-185 working group. The study originally focused on the calm and turbulent sea surface scattering in the field of time [4]. It was then optimized by noise cancelling and studied in the frequency domain [5].

Within elaborating this dissertation an annotated bibliography was made chronologically so that the reader can understand the evolution of the backscattering research of electromagnetic scattering on a rough surface. The most important bibliographic references are the ones of Mandelbrot [8] where in 1967 he studied the self-similar curves having the Hausdorff dimension which are examples of fractals, as well as a  $D$  quantity having "dimensional" properties. In 1982, while some of the mathematical issues he presented in his research had previously been described by other mathematicians with individual descriptions,

it was Mandelbrot who used the term "fractal". In 1984, Peleg [13] studied the fractal analysis of a surface based on the fact that the shapes of surfaces are classified based on the change of their properties and the change of their resolution as images. Thus, he introduced the "blanket" method for a two-dimensional surface, a method which applied in the present dissertation.

In 1990, D.L. Jaggard [15] studied the problem of optical and electromagnetic waves backscattering for a family of irregular rough surfaces with fractal geometry. The same year he modeled [16] the scattering of electromagnetic waves from perfectly conductive fractal surfaces according to the Rayleigh technique. In 1993, Lo [3] studied fractal theory and its application to the analysis of real radar signals that are scattered by rough sea surfaces. It has therefore been observed that the scattered and backscatter radar signals have very similar fractal dimensions.

In 1994, a Weierstrass (3D surface) function was proposed by Lin [19] to study the scattering of electromagnetic waves from 3D fractal surfaces. However, a simpler representation of a three-dimensional fractal surface was introduced in 2012 by Zaleski [43]. Savaidis and Frangos [20] in 1994 studied the scattering of optical and electromagnetic waves from perfectly conductive surfaces modeled using a fractal function under specific boundary conditions. While in 1997 they studied a new method for scattering from conductive surfaces with grooves / folds using the "Extended Boundary Condition" approach.

In 1999 Fabrizio Berizzi [24] proposed a one-dimensional fractal sea surface function based on the Weierstrass-Mandelbrot fractal band limited function and in the same year with his second study Berizzi [25] dealt with the problem of electromagnetic scattering from the sea surface. In 2008 Ren Xin-Cheng [40] modeled a three-dimensional rough dielectric surface using a normalized band-limited fractal Weierstrass function and analyzed the scattering field using Kirchhoff approximation. Then, he studied the variation of the scattering intensity and concluded that the slopes of the lines joining the vertices of the diagrams can be calculated as a slope of a linear equation.

The literature review was followed by a theoretical study of scattering with modeling of the scattering two-dimensional surface. Deterministic functions are used to construct the model of a fractal surface. The fractals theory is an alternative option for modeling surfaces with different roughness. Fractal functions give surfaces similar to real surfaces found in nature. Also, through such a function and its parameters, such as the fractal dimension or the fractal length, the roughness of the surface can be determined with relative accuracy.

The following functions were used to model the surfaces: Weierstrass-Mandelbrot function -  $W(x)$  [9], [29] and the modified Weierstrass-Mandelbrot function -  $fr(x)$  [15], [29] with fractal dimension  $1 < D < 2$ . This function essentially consists of the sum of sine functions, with weights decreasing as the period increases and presents the classic characteristic of the fractals' self-similarity. The modified Weierstrass-Mandelbrot function is considered the ideal function for modeling a surface and therefore, a great mathematical model of electromagnetic wave scattering on surfaces. The research continued with modeling three-dimensional rough fractal surfaces given by two-dimensional Weierstrass broadband function. This function is a combination of discrete periodic and random parameters.

Then, the scattering sea surface modeling was developed using real data derived from a backscatter analysis of a synthetic window radar. The data were collected by the SET-185 working group in the NEMO 2014 test conducted in Taranto, Italy in September 2014. The radar used was a PicoSAR X mounted on a helicopter.

During the first day of testing, the wind speed in the area was 10-12 m/s and the sea state was relatively high (turbulent sea). On the second day of testing on 24/9/2014, the wind speed was low (few m/s) which sometimes weakened completely locally, forming an almost smooth surface (wrinkled sea). The presence of mute waves was due to swell waves, ie a wave that is not due to weather effect at the time of observation, but to a wind that blew the previous days in an area nearby.

Modeling the surfaces, the dissertation continued with the modeling of scattering of a two-dimensional rough surface with the Kirchhoff approach. Nonlinear differential equations were used to calculate the scattering of fractal surfaces [7]. As it is necessary to find approximate solutions with some limits, given the lack of a detailed general solution of nonlinear differential equations, a proposed solution that has been widely used in the annotated bibliography is the Kirchhoff approach which has the limitation that applies when the length of the incident wavelength is small relative to the local radius of curvature of the surface roughness [15], [38], [47]. The Kirchhoff approach used in the study takes into account the exact surface roughness in order to calculate the scatter from it. In contrast, the other approximate methods statistically calculate the average of the scattered field from the rough surface [7], [47]. Finally, modeling was completed by scattering modeling from a three-dimensional rough surface with the Kirchhoff approach.

Completing the modeling of both rough surfaces and scattering, the dissertation continued with the study of the characterization of the roughness of a three-dimensional surface. Initially, the geometry of the 3D problem was briefly described. The modeling of the three-dimensional rough fractal surface was



performed with the two-dimensional Weierstrass function of two variables, as a simple modification of the corresponding Weierstrass functions previously proposed by Jaggard [52] (a variable function) and the Zaleski function [43] (two-function function), where representative surface simulations were produced for various values of the fractal dimension  $D$ .

Then, to calculate the scattering field from a rough surface, Kirchhoff's approach was used, which takes into account the exact roughness of the surface produced by the simulation and presented representative generated scattering simulations from three-dimensional fractal surfaces for different values of  $D$ . The simulations focused on an electromagnetic wave scattered from a rough surface where the condition  $\theta_3 = 0$ ,  $\theta_2 = -\theta_1$  (which means that the backscatter electromagnetic wave will be examined) and specifically the values  $\theta_1 = 30$  and  $\theta_2 = -30$  were set. Thus, for a frequency range of a Stepped Frequency (SF) synthetic aperture radar, the ybsc scattering coefficient was calculated as a function of the fractal  $D$  dimension of the rough surface.

In all simulations the angle of incidence was chosen  $\theta_1 = 30^\circ$  and the scattering angles are  $\theta_3 = 0$  and  $\theta_2 = -\theta_1$ . From the results of the simulations it is concluded that as the value of the fractal dimension  $D$  increases, ie as the roughness of the fractal surface increases, the slope between the main lobe of the function  $|\gamma(k)|$  and lateral lobes in the spectral field also increases. The relationship between the fractal  $D$  dimension and the calculated mean slope between the main lobe and the first lateral lobes on either side of it was also examined. The slope is equal to  $|\Delta\gamma|/|\Delta k|$ , where  $\Delta\gamma$  represents the value difference of the backscatter coefficient between the peak of the main lobe and the peak of the first lateral lobe, and  $\Delta k$  defines the change in the wave peaks.

An important observation about the simulation results is that the bandwidth of the radar must be large enough to observe the above phenomenon where the slope between the main lobe of the function  $|\gamma(k)|$  and lateral lobes in the spectral frequency range increases with increasing value of the fractal dimension  $D$ . It was also found that the bandwidth  $B$  must be at least 15% of the radar carrier frequency, so that the above phenomenon is observed with slopes  $|\Delta\gamma|/|\Delta k|$ .

However, the limitation of the small available radar bandwidth  $B$  in real measurements can be offset by the large bandwidth of the  $2L$  observation area (see [1], [15], [22]). This means that selecting properly the area of the observation surface from the radar, the selection of a smaller bandwidth can be offset. In fact, the greater the bandwidth of a radar, the lower the resolution and the higher the radar power use required. Then, in order to reveal the relationship between the fractal dimension  $D$  of the rough surface and the rear diffraction coefficient  $|\gamma(k)|$ , a calculation of the coefficient  $|\gamma(k)|$  for different dimension values of fractal  $D$ .

In addition, by inverting the data (scattering values of the scattering coefficient and the fractal dimension), the fractal dimension  $D$  is designed as a function of the scattering of the scattering coefficient  $|\gamma(k)|$ . The simulations show that the roughness of the three-dimensional fractal surface can be characterized by the mean slope between the main lobe of the function  $|\gamma(k)|$  of the first two lateral lobes, on either side of the main lobe. In addition, the criterion with the coefficient of determination R-square was used to adjust the data, in order to measure the validity of the results. This criteria provides a measure of how well the results from the model are observable, based on the percentage of the overall variance of the results obtained from the model. Basically it is the ratio of the variability of the dependent variable resulting from an independent variable. In addition, the forecast limits for the custom curve were plotted, where the probability of occurrence is 90%.

The "prediction intervals" for the calculated  $D_{\text{calc}}$  deviation from the "spectral slopes" of the scattering coefficient were calculated. The values of the "prediction intervals" correspond to 90% "probability of occurrence". Therefore, the above results show that the proposed method is quite reliable in terms of characterizing a three-dimensional rough fractal surface by scattered radar electromagnetic waves. In order to test the possibility of applying the above method in a real noisy radar environment, white noise (Additive white Gaussian noise - AWGN) was added to the generated data of the rear scattering coefficient  $\gamma(k)$ . The noise level  $N(\gamma)$  was then calculated for a given value of the signal-to-noise ratio (SNR). Thus, when a backscatter signal  $\gamma(k)$  exhibits a high signal-to-noise ratio  $\text{SNR}=20\text{dB}$  the signal format is not affected. The best choice of the signal-to-noise ratio was estimated to be around  $\text{SNR}=12\text{dB}$  while for a backscattering signal  $\gamma(k)$  with very low  $\text{SNR}=0\text{dB}$  it is observed that it affects the lateral lobes and cancels the proposed method.

In the last part of the dissertation the research focused on the characterization of the sea situation. A sum of four criteria were used, the two criteria are based on the fractal properties of the sea surface and the other two criteria verify the two innovative fractal criteria. The four criteria were applied to experimental one-dimensional synthetic aperture radar (SAR) signatures in the frequency domain (actual sea wave radar data), in two different sea states (turbulent and calm sea).

The four criteria were applied to normalized data of the mean backscattering entertainment signal from the sea surface, of which the criteria for the theory of fractals are the criterion of the fractal dimension and the criterion of fractal length, while for the verification of the above criteria the criterion of variance  $\sigma^2$  and the criterion of power least squares approximation were used. The blanket

method was used in the fractal dimension and fractal length criteria as developed by Peleg [13].

The basic idea behind the proposed techniques of variation, power least squares approximation, fractal dimension and fractal length is that radar range profiles corresponding to different sea conditions have different values of variation, power spectrum, fractal dimension and fractal length. It was observed that the more turbulent the sea is, the greater the variation, power spectrum, fractal dimension and fractal length of the backscatter signal in the frequency domain are, and this is naturally due to the "abnormal behavior" of the range profiles.

Practical questions arise for the characterization of a signal that contains noise. In order to address the presence of noise in the signal, the method of calculating the average range profiles (averaging) for the noise cancelling was first applied and then the data were normalized on a scale from 0 to 1 (normalizing) and the generated feedback signal was transformed in the frequency domain.

The fractal dimension criterion calculates the fractal dimension of the normalized average signal in the frequency spectrum, using the blanket method. The simulations of the criterion concerning the calculation and comparison of the fractal dimension for turbulent and calm seas with satisfactory results were performed for angles of inclination from  $5^\circ$  to  $35^\circ$ , something expected from a physical point of view. The simulation results indicated that the fractal dimension values of the normalized average radar signal of the range profiles during turbulent sea are significantly higher than the corresponding values in calm sea. It was also observed that the number  $N$  of the range profiles used to calculate the average signal (averaging) for noise cancelling can be varied but cannot take values less than  $N=10$  distance profiles and greater than  $N=150$  as the noise cancelling does not work adequately. Finally, the sea state index (SSI) was calculated for the fractal dimension criterion. The Sea State Index (SSI) of the fractal dimension criterion is the ratio of the mean fractal dimension in turbulent sea to the mean fractal dimension for calm sea in the frequency spectrum.

The second sea surface characterization criterion examined the fractal length. The fractal length logarithm criterion calculates the fractal length of the normalized average signal for range profiles in the frequency domain, using the blanket method. The criterion was simulated for angles from  $5^\circ$  to  $35^\circ$ . The fractal length logarithm criterion examines the difference between the fractal length logarithm for scale  $\delta=1$  (where the signal for  $\delta=1$  is essentially the same as the backscatter signal) minus the fractal length logarithm for a  $\delta$  with respect to the logarithm of  $\delta$ . Fractal length simulation was studied at all angles from  $5^\circ$  to  $35^\circ$ . The sea state index (SSI) was calculated for the fractal length logarithm criterion. The sea state

index of the fractal length criterion is the ratio of the mean fractal length in the turbulent sea to the mean fractal length for calm seas in the frequency domain.

Following, the variance criterion  $\sigma^2$  calculates the variance of the normalized average signal in the time and frequency domains for  $N$  range profiles. Correspondingly, for the application of this criterion, simulations were performed for the variation in a range of angles from  $5^\circ$  to  $30^\circ$ .

Finally, the power least squares approximation (LSA) criterion calculates the slope of the line resulting from the approximation of the least squares in the signal power range. This criterion is used to verify the correctness of the two criteria based on the theory of fractals. From the power spectrum density, the first degree curve of least squares approximation was calculated, which means that a line of the form  $\alpha x + \beta$  is obtained. From the lines of the least squares approximation it seems that the absolute value of the slope for the turbulent sea is greater than the absolute value of the slope for the calm sea, something that is used as a criterion for characterizing the sea surface.

# Παράρτημα Α

## Θεωρία Συστημάτων Ραντάρ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μία εισαγωγική αναφορά στα συστήματα ραντάρ, ξεκινώντας με τον βασικό σκοπό για τον οποίο δημιουργήθηκε το ραντάρ καθώς γίνεται και μία σύντομη αναφορά στα είδη των ραντάρ. Ακολουθούν οι αρχές και οι βασικές εξισώσεις των ραντάρ προκειμένου να γίνει κατανοητός ο τρόπος λειτουργίας τους. Στην συνέχεια αναφέρονται οι συχνότητες λειτουργίας των ραντάρ ανάλογα με την χρήση τους (πολιτικό και στρατιωτικό φάσμα συχνοτήτων). Τα βασικά μέρη ενός ραντάρ θεωρήθηκε σκόπιμο να αναφερθούν, όπως ο πομπός και τα είδη αυτού, οι κεραιές που χρησιμοποιούνται και τι εξυπηρετούν, ο δέκτης και η τοπολογία αυτού. Τέλος γίνεται μία σύντομη αναφορά στην ραδιοδιατομή του στόχου και στην διαδικασία εντοπισμού των στόχων μέσω της επεξεργασίας και ανίχνευσης του σήματος, το προσαρμοσμένο φίλτρο και την συνάρτηση αβεβαιότητας.

### Α.1 Εισαγωγή στα συστήματα Ραντάρ

Το ραντάρ είναι ένα ηλεκτρονικό σύστημα που χρησιμοποιείται για εντοπισμό στόχων και αντικειμένων. Η λέξη ραντάρ προέρχεται από την αγγλική λέξη *radar* (RAdio Detection And Ranging) και αρχικά συσχετίστηκε με τα ραδιοκύματα ενώ στην συνέχεια κατασκευάστηκαν και ραντάρ που χρησιμοποιούσαν οπτικά κύματα και λέιζερ (laser) [55]. Το ραντάρ είναι λοιπόν ένα σύστημα που χρησιμεύει στον εντοπισμό αντικειμένων τα οποία δεν δύναται να παρατηρηθούν οπτικά και μας δίνει την δυνατότητα προσδιορισμού της διόπτεισης, της απόστασης και της γωνίας ύψωσης του στόχου.

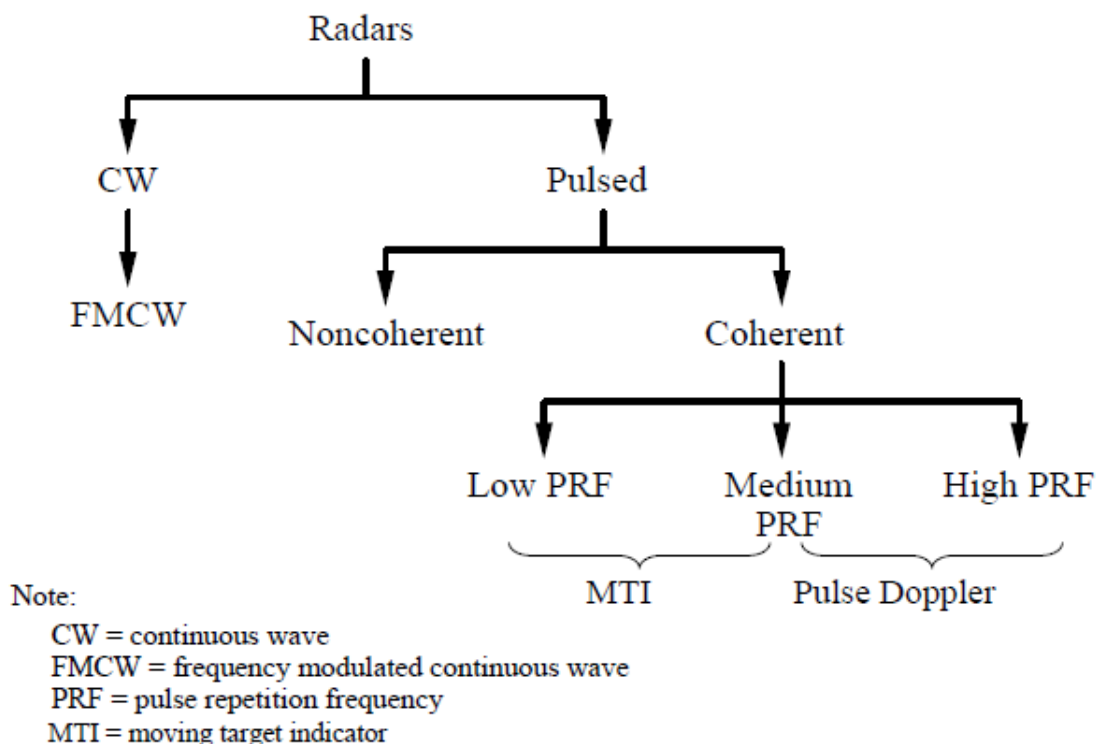
Τα ραντάρ μπορούν να διαχωριστούν σε πολιτικά και στρατιωτικά ανάλογα της χρήσης λειτουργίας τους όπως φαίνεται και στο ακόλουθο πίνακα.

Χρήση	Πολιτικά	Στρατιωτικά
Μετεωρολογία	•	•
Ναυσιπλοΐα	•	•
Έρευνα και Διάσωση	•	•
Υψηλή Ανάλυση Εικόνων, Χαρτογράφηση	•	•
Ήχος	•	

Διάστημα	•	
Αντιμέτρα εντοπισμού		•
Πυροσωλήνα προσέγγισης		•

Πίνακας 10: Κατηγορίες Ραντάρ ανά χρήση λειτουργίας

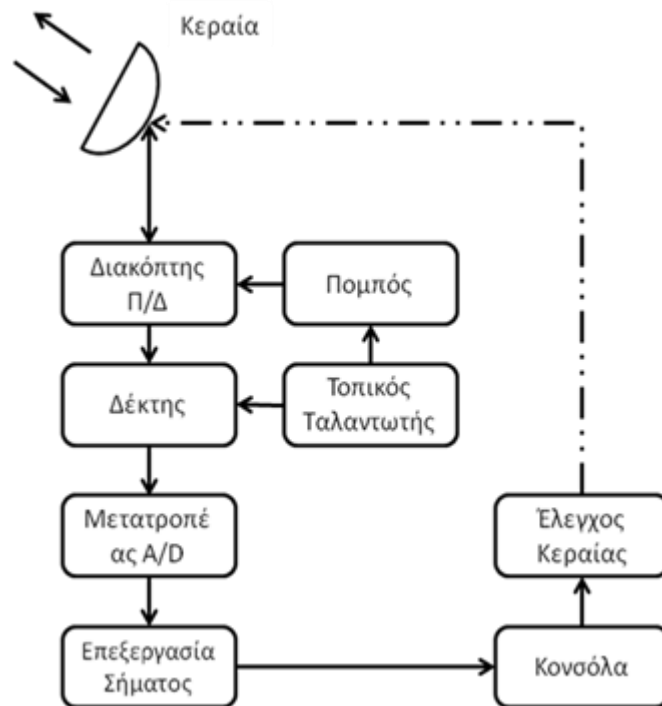
Επίσης, διαχωρίζονται ανάλογα με την κυματομορφή εκπομπής σε ραντάρ σταθερού πλάτους και σε παλμικά ραντάρ. Τα συνεχούς κύματος ραντάρ (continuous-wave radar) εκπέμπουν συνεχώς, συνήθως σταθερού πλάτους ραδιοκύματα, τα οποία έχουν υποστεί διαμόρφωση ή ολίσθηση στην συχνότητα. Εκτός των ραντάρ σταθερού πλάτους υπάρχουν και τα παλμικά ραντάρ που η κυματομορφή τους έχει υποστεί παλμική διαμόρφωση. Γενικότερα, τα συνηθέστερα ραντάρ είναι τα μονοστατικά παλμικά ραντάρ.



Σχήμα 8: Κατηγορίες Ραντάρ ανάλογα την κυματομορφή

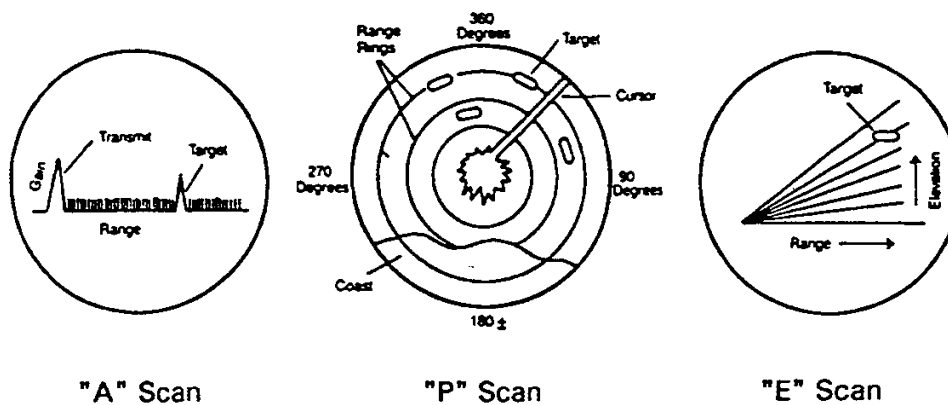
### Διάταξη μονοπαλμικού ραντάρ

Μία τυπική διάταξη ενός μονοπαλμικού ραντάρ φαίνεται στο Σχήμα 9. Το συγκεκριμένο ραντάρ αποτελείται από μία κεραία εκπομπής και λήψης, ένα διακόπτη που επιτρέπει να εκπέμπονται σήματα από τον πομπό και να λαμβάνονται οι επιστροφές από τους στόχους στον δέκτη, ένα τοπικό ταλαντωτή που διεγείρει τον πομπό και δίνει αντίστοιχο σήμα αναφοράς στον δέκτη, τον μετατροπέα του σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό και τέλος τον επεξεργαστή όπου γίνεται η επεξεργασία του σήματος προκειμένου να σταλεί στην κονσόλα του χειριστή.



Σχήμα 9: Διάταξη Παλμικού Συστήματος Ραντάρ

Στο επόμενο σχήμα φαίνονται οι τρεις πιο συνηθέστεροι τύποι απεικόνισης εικόνας του στόχου. Η πιο συνηθισμένη απεικονίση στόχων είναι η *P Scan* που είναι γνωστή και ως PPI (Plan Position Indicator).



Σχήμα 10: Τύποι απεικόνισης εικόνας

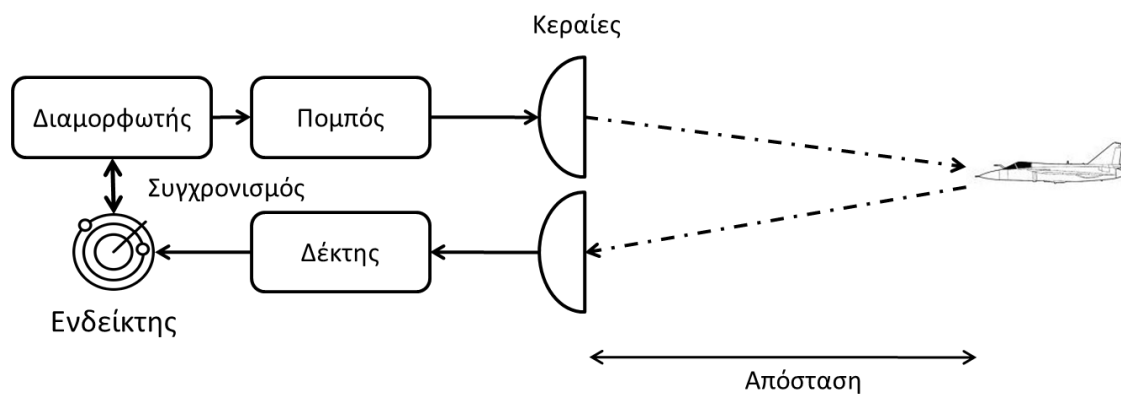
## A.2 Αρχές Λειτουργίας

Η αρχή λειτουργίας του ραντάρ βασίζεται στην εκπομπή μικρών, μεγάλης ισχύος παλμών ράδιο ενέργειας. Το ραντάρ βασίζεται και εξαρτάται από την εκπομπή και λήψη μίας ηχούς - που ονομάζεται *ραντάρ ηχώ* (radar echo). Η ανακλώμενη από τον στόχο ενέργεια είναι η ραντάρ ηχώ ή απλά ηχώ.

Σε ένα σύστημα ραντάρ παράγεται ένας παλμός στον πομπό, μετατρέπεται από την κεραία σε ηλεκτρομαγνητικό κύμα και εκπέμπεται στο χώρο, όπου ταξιδεύει με την ταχύτητα του φωτός μέχρι τον στόχο. Το σήμα ανακλάται και επιστρέφει στην κεραία λήψης, όπου μετατρέπεται σε ένα παλμό λήψης και με κατάλληλη επεξεργασία στον δέκτη και στον επεξεργαστή σημάτων παρέχει τα στοιχεία (διόπτευση και απόσταση) του στόχου. Γενικά, ο χώρος μεταξύ των κεραιών και του εκάστοτε στόχου ονομάζεται μέσο ή κανάλι διάδοσης.

Τα ραντάρ διαχωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες ανάλογα με το πλήθος των κεραιών εκπομπής και λήψης, σε μονοστατικά, διστατικά και πολυστατικά ραντάρ. Στα μονοστατικά ραντάρ, η κεραία εκπομπής και λήψης ταυτίζεται λειτουργώντας για εκπομπή και λήψη κατά περίπτωση όπου το ραντάρ ουσιαστικά διαθέτει μία κεραία. Τα διστατικά ραντάρ διαθέτουν ξεχωριστές θέσεις για εκπομπή και λήψη αντίστοιχα. Σε περίπτωση που υφίστανται πολλές κεραιές εκπομπής και λήψης τότε τα ραντάρ ονομάζονται πολυστατικά.

Το ραντάρ αποτελείται κατά βάση από ένα πομπό που εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικά κύματα με την βοήθεια μίας κεραίας εκπομπής, από ένα δέκτη που συνδέεται επίσης με μία κεραία λήψης των ανακλώμενων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από τους στόχους και από ένα δείκτη που δείχνει οπτικά την ηχώ που επιστρέφει από τον στόχο. Το βασικό διάγραμμα λειτουργίας ενός συστήματος ραντάρ φαίνεται στο Σχήμα 11



Σχήμα 11: Αρχή Λειτουργίας Παλμικού Ραντάρ

Όταν ένα σήμα με σταθερή συχνότητα εκπέμπεται από τον πομπό ταξιδεύει προς όλες τις κατευθύνσεις και ανακλάται από κάθε αντικείμενο το οποίο συναντά. Η ανάκλαση του σήματος ταξιδεύει και αυτή προς κάθε κατεύθυνση και ένα μέρος του ανακλώμενου σήματος επιστρέφει στην κεραία του δέκτη. Αυτή είναι μια απλουστευμένη εξήγηση λειτουργίας εκπομπής και λήψης του σήματος, όμως υπάρχουν δύο βασικά προβλήματα που πρέπει να επιλυθούν.



Αρχικά, υπάρχει πρόβλημα αν ο πομπός λειτουργεί εκπέμποντας μεγάλη ισχύ κοντά στο δέκτη στην ίδια συχνότητα. Για να μπορεί ο δέκτης να ανιχνεύει το ανακλώμενο σήμα θα πρέπει το εκπεμπόμενο σήμα να μην επηρεάζει το δέκτη. Το δεύτερο πρόβλημα είναι ο υπολογισμός της απόστασης. Όταν ένα συνεχές σταθερής συχνότητας σήμα εκπέμπεται είναι αδύνατο για τον δέκτη να διαχωρίσει τους στόχους που βρίσκονται στην ίδια απόσταση. Τα ανωτέρω προβλήματα επιλύονται με διάφορους τρόπους, για το λόγο αυτό αναπτύχθηκαν τα συστήματα *διαμόρφωσης της συχνότητας* (frequency modulation), *ολίσθησης της συχνότητας* (frequency shift) και *παλμικής διαμόρφωσης* (pulse modulation).

### **Βασικά μεγέθη λειτουργίας**

Εφαρμόζοντας τις διάφορες προσέγγισης επεξεργασίας του σήματος ραντάρ, αντλούμε κάποια βασικά αποτελέσματα όπου για την κατανόηση τους θα χρειαστεί να εξηγήσουμε παρακάτω κάποιες βασικές έννοιες.

Θεωρούμε ότι, ο *εκπεμπόμενος παλμός* ενός ραντάρ στην έξοδο του πομπού είναι  $s(t)$ . Η γενική μορφή της  $s(t)$  δίνεται από την ακόλουθη σχέση .

$$s(t) = \alpha(t) \cos[\omega(t) + \theta(t) + \varphi_0] \quad (A.1)$$

Όπου:

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

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

$\varphi_0$  = αυθαίρετη γωνία φάσης.

Η συχνότητα στην οποία παράγεται η ενέργεια του συστήματος ραντάρ ονομάζεται *φέρουσα συχνότητα*. Βάση της επιθυμητής κατευθυντικότητας επιλέγουμε την φέρουσα συχνότητα. Επιλέγοντας μια πλήρως κατευθυντική κεραία μπορούμε να προσδιορίσουμε την κατεύθυνση και την πυκνότητα του σήματος που εκπέμπεται. Μικρότερη κεραία [56], μας δίνει μικρότερο μήκος κύματος άρα και υψηλότερη φέρουσα συχνότητα.

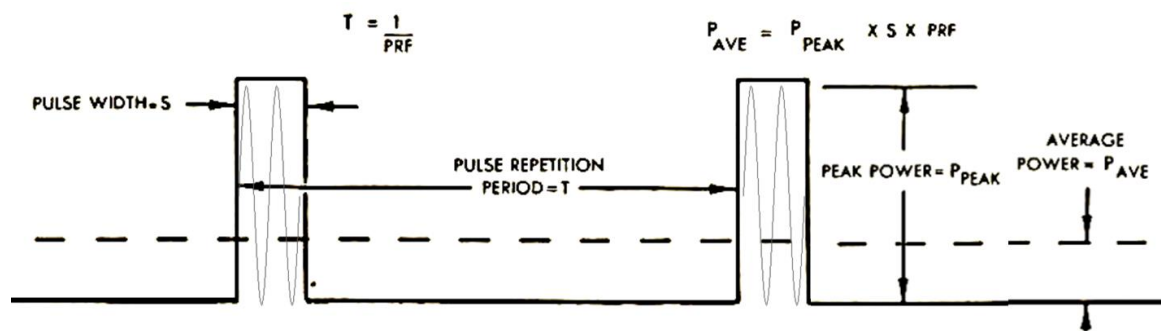
Ο παλμός  $s(t)$  σε ένα παλμικό ραντάρ φαίνεται στο Σχήμα 12. Όπου  $S$  είναι η *διάρκεια παλμού*,  $T$  είναι η *περίοδος επανάληψης παλμού* (Pulse Repetition Period - PRP) και  $\alpha$  το πλάτος. Χαρακτηριστικό μέγεθος για ένα ραντάρ είναι η *γωνιακή ή κυκλική συχνότητα επανάληψης του παλμού* (Pulse Repetition Frequency - PRF) όπου είναι ο αριθμός των παλμών που εκπέμπονται ανά δευτερόλεπτο και δίνεται από την σχέση (A.2).

Πριν την έναρξη της εκπομπής του επόμενου παλμού πρέπει να έχει τελειώσει η εκπομπή του προηγούμενου έτσι ώστε η απόσταση του στόχου να προσδιοριστεί

με ακρίβεια. Συνεπώς, ανάμεσα στην εκπομπή του κάθε παλμού απαιτείται η μεσολάβηση αρκετού χρόνου.

$$PRF = \frac{1}{PRP} = \frac{1}{T} \quad (A.2)$$

Συνδυάζοντας τη συχνότητα που επαναλαμβάνονται οι παλμοί και τη μέγιστη ισχύ, μπορεί το ραντάρ να μετρήσει τη μέγιστη απόσταση. Αν ελαττώσουμε τη συχνότητα που επαναλαμβάνονται οι παλμοί και διατηρήσουμε σταθερή την ισχύ τότε θα αυξηθεί η δυνατή απόσταση για ανίχνευση στόχου.



Σχήμα 12: Κυματομορφή Εκπομπής

Η διάρκεια του παλμού που εκπέμπεται από το ραντάρ ονομάζεται *μήκος παλμού* και μετράται σε ms. Το μήκος παλμού ορίζει την ελάχιστη ανιχνεύσιμη απόσταση ενός στόχου. Αν το σήμα που ανακλάται επιστρέφει στο δέκτη πριν την ολοκλήρωση της μετάδοσης του σήματος που εκπέμπεται λόγω κοντινής απόστασης πομπού και στόχου, τότε δε θα είναι σαφής η ανίχνευση του στόχου.

Διαφορετικά είδη ραντάρ μπορούν να λειτουργήσουν με μικρής και μεγάλης διάρκειας παλμούς. Η απόσταση μεταξύ των στόχων μας βοηθάει στην επιλογή του ιδανικού μήκους παλμού. Τα ραντάρ μεγάλης διάρκειας παλμών, λόγω της εκπομπής μεγάλου ποσοστού ενέργειας, μπορούν να μετρήσουν καλύτερα την απόσταση του στόχου. Ενώ τα ραντάρ μικρής διάρκειας παλμών έχουν μεγάλη ακρίβεια στη μέτρηση / ανίχνευση της απόστασης αλλά δεν μπορούν να ανιχνεύσουν σωστά τη μέγιστη απόσταση.

Σε περίπτωση δύο ξεχωριστών στόχων σε μικρή απόσταση, για την αποφυγή να θεωρηθούν ως ένας μεγάλος στόχος [56], χρησιμοποιείται η *ανάλυση απόστασης* (range resolution), που αποτελεί και μέτρο δυνατότητας ανίχνευσης ενός ραντάρ.

Η *μέγιστη ισχύς* (peak power) που εκπέμπει το σύστημα ραντάρ ορίζεται ως ισχύς του πομπού των παλμών που εκπέμπονται. Την υπολογίζουμε ως μέση τιμή σε μία περίοδο χρόνου. Ενώ το ραντάρ λειτουργεί για κάποιο διάστημα, ο πομπός του λειτουργεί για μικρότερο συγκριτικά χρόνο με αποτέλεσμα η διάθεση της μέγιστης

ισχύς ενώ εκπέμπεται ο παλμός να είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τη μέση ισχύ (average power) σε μια περίοδο λειτουργίας.

### Ισχύς σε παλμικά ραντάρ

Η εμβέλεια ενός ραντάρ εξαρτάται κατά κύριο λόγο από ισχύ εκπομπής του πομπού. Θα πρέπει ο παλμός που εκπέμπεται να έχει την απαιτούμενη ενέργεια έτσι ώστε το επίπεδο ισχύος του παλμού οπισθοσκέδασης να είναι τουλάχιστον ίσο με το επίπεδο του ηλεκτρονικού θορύβου στον δέκτη. Κατά συνέπεια ο πομπός συνήθως εκπέμπει μέγιστη ισχύ περί τα 5 MW και όχι λιγότερο των 20 kW.

Για να αντιληφθούμε τις απαιτήσεις ισχύος ενός ραντάρ θα πρέπει να κατανοήσουμε την διαφορά της μέγιστης ισχύος που είναι η ισχύς κατά την διάρκεια εκπομπής ενός παλμού και την μέση ισχύ που είναι η μέση ισχύς κατά την περίοδο επανάληψης παλμού (PRP) ή διάστημα επανάληψης παλμού (PRI) όπως φαίνεται και στο Σχήμα 12.

Η ισχύς εκπομπής ενός ραντάρ εξαρτάται αφενός από το ελάχιστο ποσό ισχύος που ο δέκτης λειτουργεί ικανοποιητικά και αφετέρου από τους παράγοντες εξασθένησης του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος από τον στόχο. Τέτοιοι παράγοντες είναι η υγρασία της ατμόσφαιρας, τα σύννεφα και η αδιάβροχη βαφή της κεραίας. Στον ακόλουθο πίνακα φαίνονται το αποτέλεσμα στην εμβέλεια του ραντάρ ανάλογα με την μεταβολή των χαρακτηριστικών του ραντάρ [57].

	PRF	PULSE WIDTH	PEAK POWER	AVERAGE POWER	MAXIMUM RANGE
↑ Increase	⊕	→	→	↑	↓
→ No Change	→	→	⊕	↑	↑
	→	⊕	→	↑	↑
↓ Decrease	→	⊖	⊕	→	→

Circle denotes the elements (characteristics) which are varied. For example, if the PRF is increased, then the average power must be increased to maintain the same peak power. This results in less maximum range (less listening time).

Πίνακας 11: Εμβέλεια συναρτήσει των χαρακτηριστικών του ραντάρ

Η μέγιστη ισχύς και η μέση ισχύς σε μία περίοδο λειτουργίας δίνονται από της σχέση (Α.3). Το διάστημα επανάληψης παλμού (pulse repetition interval) είναι ανάλογος με το ρυθμό επανάληψης παλμού. Όσο περισσότερο διαρκεί ο παλμός

τόσο μεγαλώνει και η ισχύς. Και η μέση ισχύς μειώνεται όσο μεγαλώνει ο χρόνος που επαναλαμβάνεται ο παλμός.

$$\frac{P_{AVE}}{P_{PEAK}} = \frac{PulseWidth}{T} \quad (A.3)$$

### **Ολίσθηση συχνότητας**

Μία από τις βασικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται στην επιστήμη των ραντάρ για να υπολογιστεί η ταχύτητα ενός στόχου είναι η χρήση του φαινομένου της ολίσθησης συχνότητας ή φαινόμενο Doppler. Η μεταβολή της συχνότητας των ανακλώμενων κυμάτων του στόχου στον δέκτη, δίνει την πληροφορία για το αν ο στόχος προσεγγίζει ή απομακρύνεται από το ραντάρ. Στην περίπτωση που ο στόχος είναι ακίνητος το φαινόμενο Doppler δεν δύναται να χρησιμοποιηθεί.

Το φαινόμενο Doppler χρησιμοποιείται επίσης προκειμένου να διαχωριστούν οι στόχοι από τις ανεπιθύμητες επιστροφές (clutter) στο μέσο διάδοσης [58]. Το φαινόμενο αυτό βασίζεται στο γεγονός ότι οι περισσότεροι στόχοι ενδιαφέροντος κινούνται ταχέως σε σχέση με το ραντάρ, ενώ οι περισσότερες ανεπιθύμητες επιστροφές που προέρχονται από το περιβάλλον παρουσιάζουν μηδενικό ρυθμό μετατόπισης. Στην περίπτωση που ο στόχος και οι ανεπιθύμητες επιστροφές δεν διατηρούν έστω ελάχιστη διαφορά στις ταχύτητες τους το φαινόμενο επίσης δεν δύναται να χρησιμοποιηθεί.

Η ολίσθηση Doppler για ένα συνεχούς κύματος σήμα δίνεται από την σχέση

$$f_d = \frac{2R'}{c} f = \frac{2u_r}{\lambda} \quad (A.4)$$

Όπου:

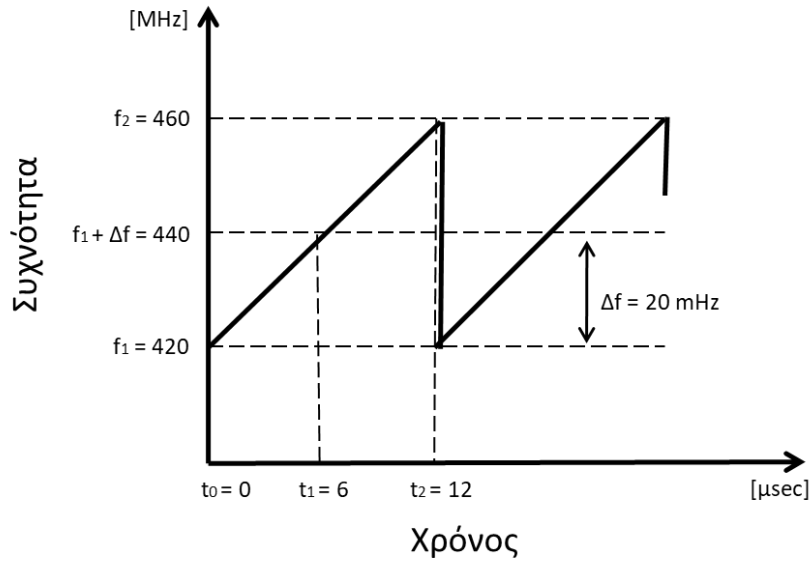
$c$  = ταχύτητα του φωτός ( $3 \cdot 10^8$  m/sec)

$f$  = συχνότητα εκπομπής

$R'$  ή  $u_r$  = ρυθμός μετατόπισης ή ταχύτητα

### **Διαμόρφωση συχνότητας**

Κάθε κύκλος του διαμορφωμένου κατά συχνότητα ράδιο κύματος διαφέρει κατά μία μικρή προκαθορισμένη αύξηση της συχνότητας. Έτσι ένα τέτοιο σύστημα δύναται να εντοπίσει τον κύκλο ενός κύματος και να το αναγνωρίσει από όλα τα άλλα εκπεμπόμενα σήματα όταν επιστρέφει στον δέκτη. Ένα διαμορφωμένο κατά συχνότητα σήμα φαίνεται στο Σχήμα 13 [57].

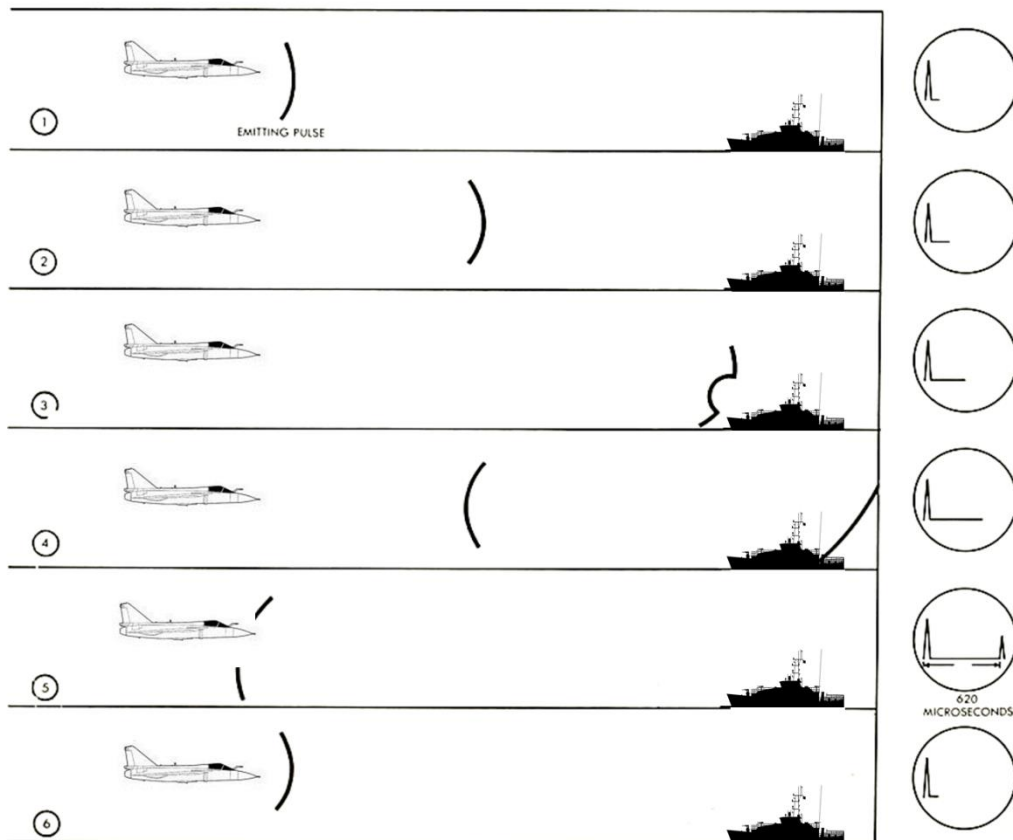


Σχήμα 13: Σήμα Διαμόρφωσης Συχνότητας

### Διαμόρφωση παλμού

Η διαμόρφωση του παλμού χρησιμοποιείται σχεδόν σε όλα τα ραντάρ. Σε αυτά τα συστήματα ο πομπός εκπέμπει περιοδικά για ένα μικρό χρονικό διάστημα ενώ παραμένει σε σίγαση για μεγάλο χρονικό διάστημα. Κατά την διάρκεια της εκπομπής εκπέμπει μια μικρή ριπή ενέργειας που ονομάζεται παλμός. Επειδή ο πομπός δεν εκπέμπει για μεγάλα χρονικά διαστήματα δεν παρεμβαίνει στον δέκτη κατά την λήψη του ανακλώμενου παλμού.

Ο παλμός ταξιδεύει στο μέσο διάδοσης με την ταχύτητα του φωτός  $3 \times 10^8$  m/sec που σημαίνει ότι ένα ράδιο κύμα διανύει ένα ναυτικό μίλι σε 6.2 μsec δηλαδή χρειάζεται 12.4 μsec για να διανύσει ένα ναυτικό μίλι και να επιστρέψει στον πομπό. Αυτή η σταθερή ταχύτητα χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της απόστασης του στόχου. Ο ρυθμιστής χρόνου (time-measuring device ή timer) χρησιμοποιείται για τον καθορισμό του χρόνου επόμενης εκπομπής παλμού από τον πομπό. Στο Σχήμα 14 φαίνεται ο χρόνος που απαιτείται για να ταξιδέψει ένας παλμός από τον πομπό μέχρι τον στόχο και πίσω στον δέκτη σε 620 μsec. Αυτό σημαίνει ότι αφού το ένα ναυτικό μίλι το διανύει σε 12.4 μsec ο στόχος βρίσκεται σε απόσταση  $620 / 12.4 = 50$  ναυτικά μίλια.



Σχήμα 14: Χρόνος εκπομπής και λήψης ενός παλμού

### Κεραίες ραντάρ

Η κεραία ραντάρ είναι η ηλεκτρονική συσκευή που χρησιμεύει για την εκπομπή και λήψη της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας στο χώρο. Στον πομπό του ραντάρ παράγεται ένα υψίσυχο σήμα και η κεραία μετατρέπει το σήμα αυτό σε ηλεκτρομαγνητικό πεδίο το οποίο εκπέμπεται στο χώρο. Αντίστοιχα, η κεραία είναι υπεύθυνη να συλλέξει το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που βρίσκεται στο χώρο και να το μετατρέψει σε τάση (volt), ενώ ο δέκτης ενισχύει το σήμα που λαμβάνει. Μια κεραία μπορεί να χρησιμοποιηθεί το ίδιο ικανοποιητικά, για εκπομπή και λήψη σημάτων στην ίδια συχνότητα, ακολουθώντας όμως την έννοια της αμοιβαιότητας (reciprocity) [57].

Βασική λειτουργία της κεραίας είναι να συγκεντρώνει την εκπεμπόμενη ενέργεια, εντός της δέσμης ακτινοβολίας που είναι γνωστή ως λοβός ακτινοβολίας, να την εκπέμπει στην επιθυμητή κατευθυντικότητα και να λαμβάνει την ανάκλαση του σήματος από τους εκάστοτε στόχους. Οι κεραίες ραντάρ είναι κατευθυντικές και παρέχουν διακριβωτική ικανότητα κατά γωνία και κατά απόσταση. Οι βασικές παράμετροι μίας κεραίας ραντάρ είναι το εύρος συχνοτήτων λειτουργίας, ο λοβός εκπομπής, το κατευθυντικό κέρδος, το κέρδος κεραίας, το εύρος λοβού, οι πλευρικοί λοβοί, το είδος πόλωσης, ο σηματοθορυβικός λόγος και η δυνατότητα ισχύος εκπομπής [59].

Μια αποδοτική κεραία καταναλώνει πολύ λίγη ενέργεια. Όσο μεγαλύτερη απόδοση έχει μία κεραία (που μπορεί να φτάσει και στο 90%) τόσο λιγότερη απώλεια ενέργειας παρουσιάζει. Η μεγαλύτερη απώλεια στην κεραία οφείλεται στην *θερμότητα*. Το κέρδος της κεραίας είναι βασικό χαρακτηριστικό αυτής και περιγράφει την ικανότητα της κεραίας να συγκεντρώνει την εκπεμπόμενη ενέργεια σε μία συγκεκριμένη κατεύθυνση [60]. Το κέρδος δίνεται από την σχέση:

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (A.5)$$

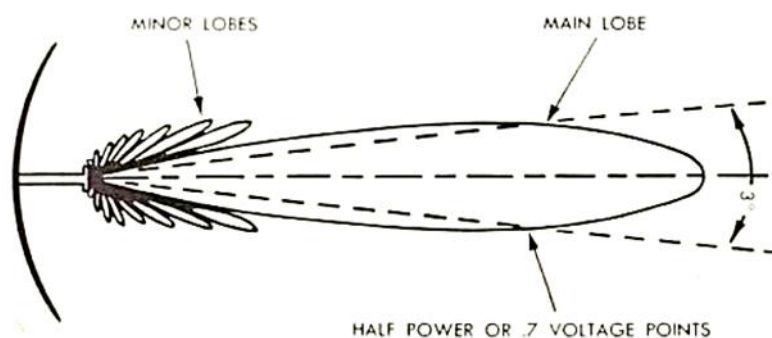
Όπου:

$G$  = κέρδος κεραίας

$A_e$  = ενεργός επιφάνεια κεραίας

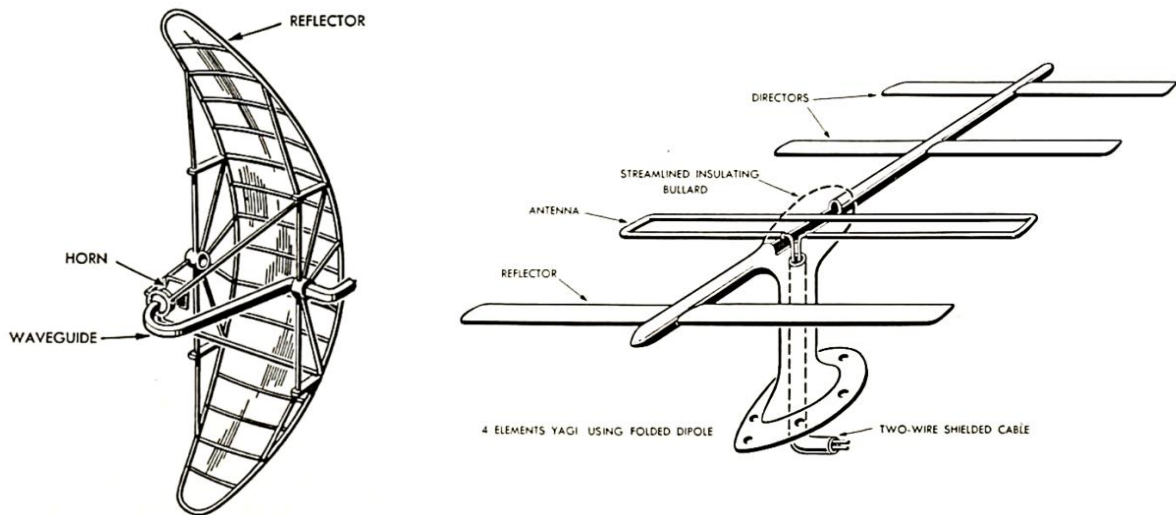
$\lambda$  = μήκος κύματος κεραίας

Κάθε κεραία παρουσιάζει ένα μοναδικό διάγραμμα ακτινοβολίας το οποίο και την χαρακτηρίζει [59].



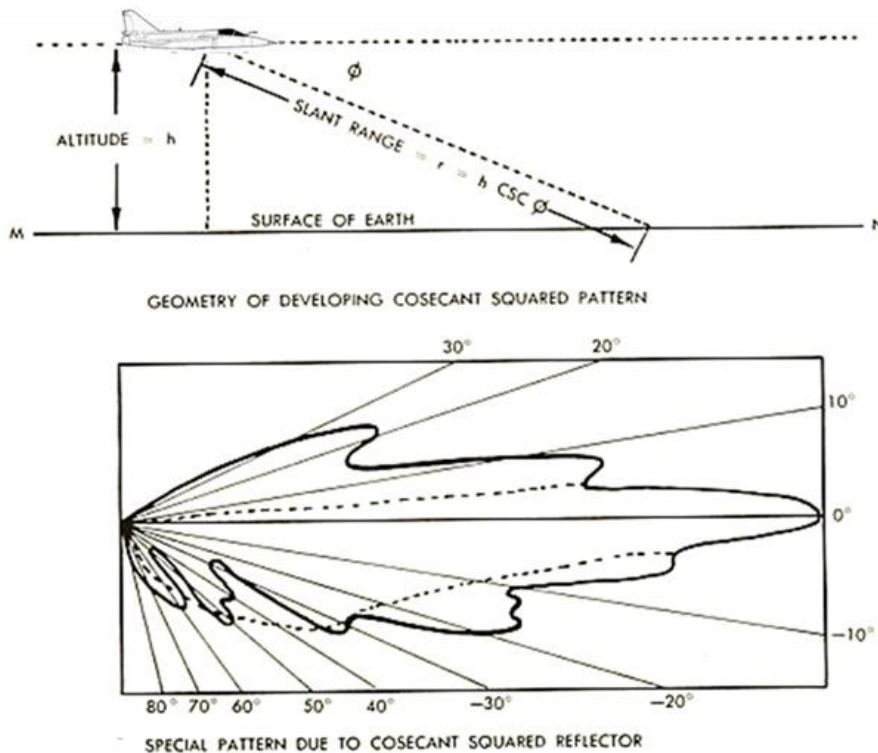
Σχήμα 15: Πολικό διάγραμμα

Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι κεραίας ραντάρ, ο κυκλικός ανακλαστήρας / δίσκος (circular dish antenna), ο παραβολικός ανακλαστήρας ημικυκλίου (parabolic antenna) και η στοιχειοκεραία (array antenna). Στο ακόλουθο σχήμα φαίνονται δύο βασικοί τύποι κεραίων, ο παραβολικός ανακλαστήρας και η στοιχειοκεραία.



Σχήμα 16: Βασικοί τύποι κεραιών

Ένα ραντάρ διαθέτει μεγάλη εμβέλεια όταν εκπέμπει ένα σήμα που είναι η σύνθεση ενός πολύ υψηλής συχνότητας φέρον κύματος και ενός πολύ μικρού χρονικά παλμού. Όταν ένα αεροσκάφος ίπταται σε ένα ύψος από το έδαφος όπως φαίνεται στο Σχήμα 17 το πολικό διάγραμμα του ραντάρ θα ξεκινάει με μία ευθεία γραμμή παράλληλη προς την επιφάνεια της γης όπου παρουσιάζει την μέγιστη ακτινοβολία ενώ εκατέρωθεν θα αναπτυχθεί το ηλεκτρικό πεδίο της κεραιάς συναρτήσει των γωνιών ύψωσης και βύθισης [57].



Σχήμα 17: Κατακόρυφο διάγραμμα ακτινοβολίας



### **Εξίσωση ραντάρ**

Εάν θεωρηθεί ότι ένα ραντάρ εκπέμπει στο χώρο που έχει σχήμα σφαίρας ακτίνας  $R$ , τότε το εμβαδόν της σφαιρικής επιφάνειας του χώρου είναι  $4\pi R^2$ . Επίσης, θεωρώντας ότι ο στόχος βρίσκεται επί της ακτίνας της σφαίρας τότε η *πυκνότητα ισχύος* στον στόχο δίνεται από την ακόλουθη σχέση (A.6) [61].

$$P_{\Delta} = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \quad (A.6)$$

Όπου:

$P_t$  = εκπεμπόμενη ισχύς στην κατεύθυνση του στόχου σε Watt

$G_t$  = κέρδος κεραίας εκπομπής

Η *ισχύς οπισθοσκέδασης* από τον στόχο είναι  $P_c = P_{\Delta}\sigma$  όπου  $\sigma$  είναι η *ενεργός επιφάνεια* του στόχου [62]. Ο στόχος διαχέει την ισχύ αυτή *ισοτροπικά* στον χώρο ανάλογα με το μοντέλο του στόχου. Η ισχύς που επιστρέφει στο ραντάρ από τον στόχο δίνεται από την σχέση:

$$P_r = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \frac{\sigma}{4\pi R^2} \quad (A.7)$$

Το κέρδος της κεραίας  $G_r$  είναι ανάλογο της *ενεργού επιφάνειας*  $S_{ef}$  και το αντίστροφο όπως φαίνεται στην σχέση:

$$S_{ef} = \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \quad (A.8)$$

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

$$P_r = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \frac{\sigma}{4\pi R^2} \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \quad (A.9)$$

Στην περίπτωση όπου αναφερόμαστε σε *μονοστατικό ραντάρ* τότε έχουμε  $G_t = G_r = G$  καθώς και  $P_t$  είναι η μέση ισχύς εκπομπής του ραντάρ.

### **Θόρυβος - Μέγιστη απόσταση εντοπισμού**

Οποιαδήποτε ηλεκτρομαγνητική ενέργεια-παρεμβολή που είναι ανεπιθύμητη, θεωρείται *θόρυβος* και μειώνει την απόδοση ενός ηλεκτρονικού συστήματος. Το εξωτερικό περιβάλλον ή το ίδιο το σύστημα λήψης μπορούν να ληφθούν απ' το ραντάρ ως θόρυβος. Στις δυο αυτές περιπτώσεις έχουμε ως αποτέλεσμα τη μείωση της ικανότητας της συσκευής να ανιχνεύσει ασθενή σήματα (μείωση ευαισθησίας λήψης). Όταν τα ηλεκτρόνια κινούνται στα ωμικά τμήματα εισόδου ενός δέκτη σε ιδανικές συνθήκες δημιουργείται ο λεγόμενος *θερμικός θόρυβος* (thermal ή Johnson noise). Η τιμή του θορύβου αυτού, είναι ευθέως ανάλογη της θερμοκρασίας των ωμικών τμημάτων, καθώς επίσης και του εύρους συχνοτήτων

(bandwidth) της μπάντας λειτουργίας του δέκτη (συγκεκριμένα, το εύρος διέλευσης του ενισχυτή IF).

$$N = kTB \quad (A.10)$$

Όπου:

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

$T$  = θερμοκρασία θορύβου σε K

$B$  = εύρος ζώνης του δέκτη σε Hz.

Το εύρος ζώνης  $B$  σε Hz δίνεται από τον αντίστροφο του μήκους παλμού  $1/PW$ .

Ο εσωτερικός θερμικός θόρυβος στο δέκτη παράγει μικρότερη συνολική ισχύ θορύβου από αυτή που παράγει ένα πραγματικό σύστημα λήψης. Αυτό συμβαίνει λόγω της εισαγωγής θορύβου από την κεραία λήψης (θερμικός θόρυβος κεραίας, θόρυβος ατμόσφαιρας, κοσμική ακτινοβολία, κτλ.), από τη γραμμή μετάδοσης σήματος μέχρι την είσοδο του δέκτη (waveguide & duplexer noise), κτλ.

Το γινόμενο της ισχύος θορύβου στην έξοδο ενός ιδανικού δέκτη ιδίου κέρδους, ο οποίος θεωρητικά δεν εισάγει καθόλου θόρυβο (πρακτικά εισάγει μόνο το θερμικό θόρυβο του κυκλώματος εισόδου του) επί ένα συντελεστή  $F_n$  ο οποίος ονομάζεται *συντελεστής θορύβου* του συστήματος, εκφράζει τη συνολική τιμή ισχύος θορύβου στην έξοδο ενός πραγματικού δέκτη. Επομένως η εικόνα θορύβου ενός δέκτη ορίζεται ως εξής:

$$F_N = \frac{S_i / N_i}{S_o / N_o} = \frac{N_o}{N_i G} = \frac{N_o}{KT_o B G} \quad (A.11)$$

Όπου  $S_i/N_i$  και  $S_o/N_o$  είναι οι λόγοι σήματος προς θόρυβο στην είσοδο και στην έξοδο του πραγματικού δέκτη.

Ο λόγος σήματος προς το θόρυβο ή σηματοθορυβικός λόγος ορίζεται ως το μέτρο εξασθένησης του συντελεστή θορύβου καθώς το σήμα διέρχεται μέσα από τον δέκτη. Από την τελευταία σχέση προκύπτει το λαμβανόμενο σήμα εισόδου:

$$S_i = \frac{kT_o B F_n S_o}{N_o} \quad (A.12)$$

Εάν το ελάχιστο ανιχνεύσιμο σήμα  $S_{\min}$  αντιστοιχεί στην τιμή  $S_i$  που είναι η ελάχιστη ανιχνεύσιμη τιμή σήματος προς θόρυβο στην έξοδο, τότε:

$$S_{\min} = kT_0 B F_n \left( \frac{S_0}{N_0} \right)_{\min} \quad (A.13)$$

Η τελευταία σχέση εκφράζει την εξίσωση της μέγιστης απόστασης εντοπισμού του ραντάρ, και μετασχηματίζεται ακολούθως:

$$R_{MAX} = \left[ \frac{P_t G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 K T_0 F_n B L (S_0 / N_0)_{\min}} \right]^{1/4} \quad (A.14)$$

όπου,  $L$  είναι ο συντελεστής απωλειών σήματος ( $L > 1$ ), ο οποίος εκφράζει συνολικά τις εξωτερικές και εσωτερικές απώλειες του σήματος μέχρι το δέκτη, π.χ. ατμοσφαιρικές, κεραιάς, γραμμής μεταφοράς, επεξεργασίας σήματος.

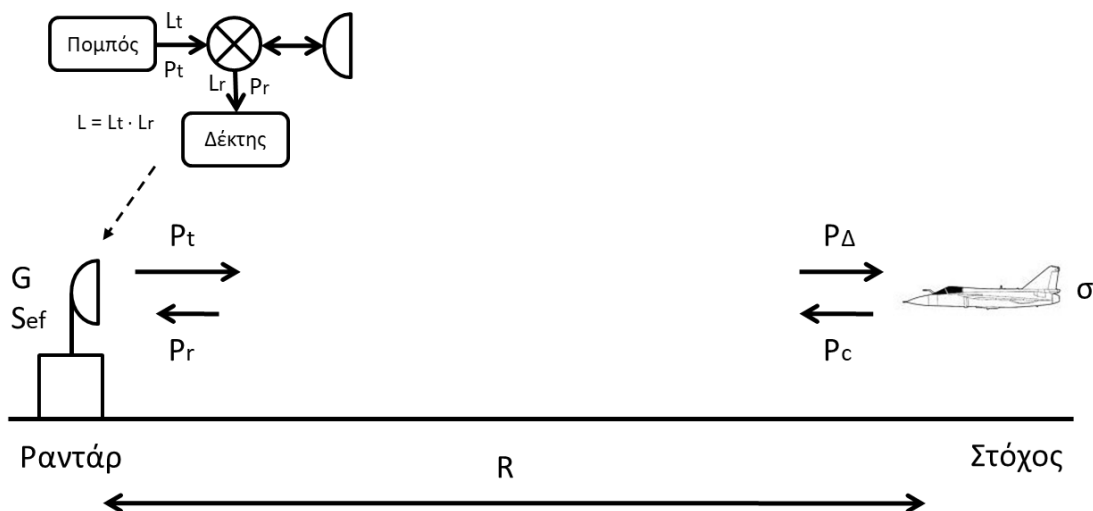
### Σηματοθορυβικός λόγος

Ο σημαντικότερος λόγος ισχύων στο ραντάρ είναι ο λόγος ισχύος σήματος προς την ισχύ θορύβου σήματος, γνωστός και ως σηματοθορυβικός λόγος. Το μεγαλύτερο μέρος του θορύβου  $N$  υπεισέρχεται στο πρώτο στάδιο επεξεργασίας του σήματος στον δέκτη και εξαρτάται από την ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου σε αυτόν [63].

Επομένως, ο σηματοθορυβικός λόγος στον δέκτη του ραντάρ (χωρίς απώλειες) είναι:

$$SNR = \frac{S}{N} = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \frac{\sigma}{4\pi R^2} \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \frac{\tau}{kT} = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma \tau}{(4\pi)^3 R^4 kT} \quad (A.15)$$

Οι απώλειες στον σηματοθορυβικό λόγο οφείλονται επί το πλείστον στις ωμικές απώλειες του συστήματος και στον σχεδιασμό του δέκτη. Στην περίπτωση που οι απώλειες ισχύος στους κυματοδηγούς του ραντάρ είναι  $L$  ως φαίνεται στο Σχήμα 18



Σχήμα 18: Εξίσωση Ραντάρ και Μικροκυματικές Απώλειες

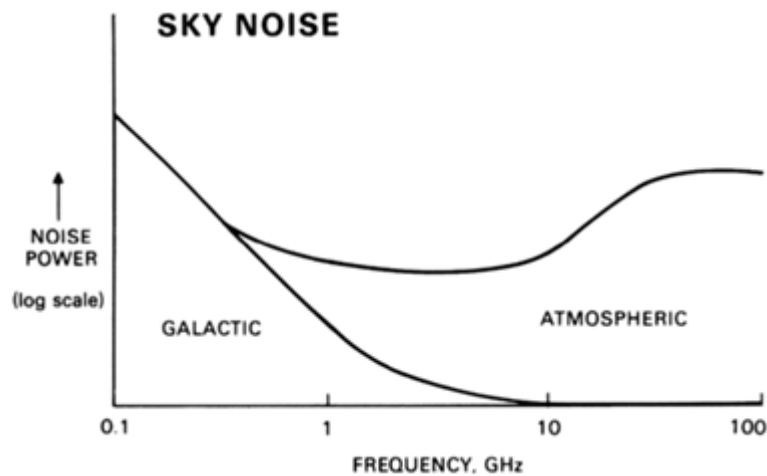
τότε ο σηματοθορυβικός λόγος του ραντάρ γίνεται:

$$SNR = \frac{S}{N} = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \frac{\sigma}{4\pi R^2} \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \frac{\tau}{kT} \frac{1}{L} = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma \tau}{(4\pi)^3 R^4 kTL} \quad (A.16)$$

### Συχνότητες εκπομπής

Τα ραντάρ λειτουργούν σε ένα ευρύ πεδίο συχνοτήτων από 40 MHz έως 100 GHz. Θεωρητικά, δεν υφίστανται παράγοντες που περιορίζουν την επιλογή συχνότητας λειτουργίας, πρακτικά όμως, υπάρχουν παράγοντες που επηρεάζουν δραστικά την επιλογή της *συχνότητας εκπομπής* ενός ραντάρ. Τέτοιοι παράγοντες είναι οι ιδιότητες της ατμόσφαιρας, οι φυσικοί περιορισμοί καθώς και οι δυνατότητες των συσκευών ραντάρ [59].

Για παράδειγμα, συνήθως το φυσικό μέγεθος των υποσυστημάτων (κεραία, κυματοδηγοί) ενός ραντάρ είναι αντιστρόφως ανάλογο με την συχνότητα λειτουργίας του. Άλλο παράδειγμα είναι ο θόρυβος του μέσου διάδοσης, όπου παρουσιάζει υψηλές τιμές σε υψηλές συχνότητες ενώ ελαχιστοποιείται μεταξύ των 0.3 και 10 GHz [64] όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 19: Θόρυβος Περιβάλλοντος

Μία πρακτική που ακολουθείται στις συχνότητες λειτουργίας των ραντάρ είναι η χρήση κεφαλαίων γραμμάτων του λατινικού αλφάβητου σε αντιστοιχία των πεδίων λειτουργίας αυτών. Αυτό συμβαίνει διότι πολλές φορές η ακριβής συχνότητα λειτουργίας ενός ραντάρ δεν αναφέρεται για πρακτικούς λόγους. Παράδειγμα είναι οι στρατιωτικές εφαρμογές όπου τέτοιες πληροφορίες είναι καθοριστικές στην υποκλοπή της συχνότητας ενός ραντάρ και στην αναγνώριση του στόχου ή ακόμα και σε εφαρμογές παρεμβολής θορύβου [65].

Η συνήθης κεντρική συχνότητα λειτουργίας των ραντάρ για πολιτικές εφαρμογές είναι στις μπάντες UHF: 425 MHz; L band: 1.3 GHz; S band: 3.3 GHz; C band: 5.5 GHz; και X band: 9.5 GHz. Στο ακόλουθο σχήμα φαίνονται οι χρήσεις των ραντάρ ανάλογα με την συχνότητα εκπομπής τους.

Band Designation	Frequency Range	Usage
HF	3–30 MHz	OTH surveillance
VHF	30–300 MHz	Very-long-range surveillance
UHF	300–1,000 MHz	Very-long-range surveillance
L	1–2 GHz	Long-range surveillance
S	2–4 GHz	En route traffic control
		Moderate-range surveillance
C	4–8 GHz	Terminal traffic control
		Long-range weather
		Long-range tracking
X	–12 GHz	Airborne weather detection
		Short-range tracking
		Missile guidance
		Mapping, marine radar
K <sub>u</sub>	12–18 GHz	Airborne intercept
		High-resolution mapping
K	18–27 GHz	Satellite altimetry
K <sub>a</sub>	27–40 GHz	Little use (water vapor)
millimeter	40–100+ GHz	Very-high-resolution mapping
		Airport surveillance
		Experimental

Πίνακας 12: Χρήση λειτουργίας ανά ζώνη συχνοτήτων

Το φάσμα συχνότητας λειτουργίας ενός ραντάρ δεν ξεπερνά το 5% έως 15% της κεντρικής συχνότητας [66]. Οι βασικές περιοχές συχνοτήτων λειτουργίας των ραντάρ φαίνονται στον Πίνακας 11 [67].

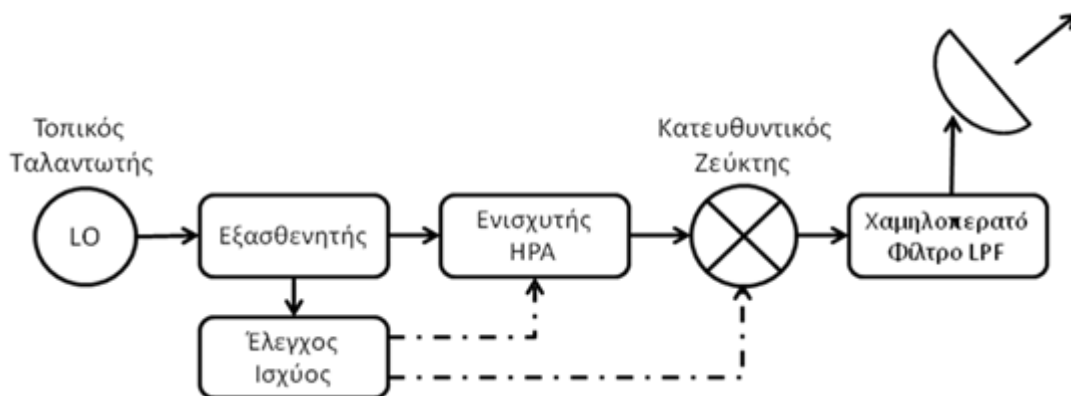
Περιοχές συχνοτήτων Πολιτικό Πρότυπο IEEE (1984)	Εύρος συχνοτήτων (GHZ)	Περιοχές συχνοτήτων Στρατιωτικό Πρότυπο USN & NATO (1969)	Εύρος συχνοτήτων (GHZ)
S	2 - 4	E	2 - 3
C	4 - 8	F	3 - 4
X	8 - 12	G	4 - 6
K <sub>u</sub>	12 - 18	H	6 - 8
K	18 - 27	I	8 - 10
K <sub>a</sub>	27 - 40	J	10 - 20

Πίνακας 13: Συχνότητες Λειτουργίας Ραντάρ

### A.3 Πομπός

Ο πομπός είναι ένα υποσύστημα του ραντάρ που παράγει κατάλληλα σήματα ραδιοσυχνοτήτων τα οποία εκπέμπονται προς την κατεύθυνση του στόχου [59]. Δηλαδή, μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε ενέργεια ραδιοσυχνοτήτων (ηλεκτρομαγνητική ενέργεια), η οποία εκπέμπεται στο περιβάλλοντα χώρο μέσω

της κατευθυντικής κεραίας [63]. Ένα τυπικό σχηματικό διάγραμμα πομπού φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 20: Σχηματικό Διάγραμμα Πομπού

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι πομπών ραντάρ οι οποίοι είναι οι *πομποί με λυχνία κενού* (vacuum-tube transmitters) και οι *πομποί στερεάς κατάστασης* (solid-state transmitters) [62]. Η επιλογή του τύπου ραντάρ καθορίζει την απεικόνιση του ραντάρ και συνδέεται άμεσα με το σχεδιασμό και τις επιδόσεις του συστήματος.

Επιπρόσθετα, υπάρχουν δύο μέθοδοι παραγωγής ραδιοσυχνοτήτων στους πομπούς, *πομποί αυτοδιεγερόμενης γεννήτριας ραδιοσυχνοτήτων* (power-oscillator transmitters) και *πομποί ενίσχυσης ραδιοσυχνοτήτων* (power-amplifier transmitters) [67]. Οι *ταλαντωτές* (oscillators) και οι *ενισχυτές* (amplifiers) είναι τα πιο σημαντικά κυκλώματα στα συστήματα τηλεπικοινωνιών και ραντάρ και μοιάζουν μεταξύ τους [57].

#### A.4 Ταλαντωτής

Ο *ταλαντωτής* είναι μία συσκευή που μπορεί να μετατρέπει ένα συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο, σε μία συγκεκριμένη συχνότητα που καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά του ταλαντωτή. Οι τοπικοί ταλαντωτές χρησιμοποιούνται για την κατασκευή χαμηλού κόστους πομπών που δεν απαιτείται κατ' ανάγκη η λειτουργία παρακολούθησης κινούμενων στόχων (MTI) με μεγάλη ευκρίνεια. Σύνηθες είναι η χρήση ταλαντωτών με λυχνίες magnetron σε ραντάρ ναυτιλιακού τύπου.

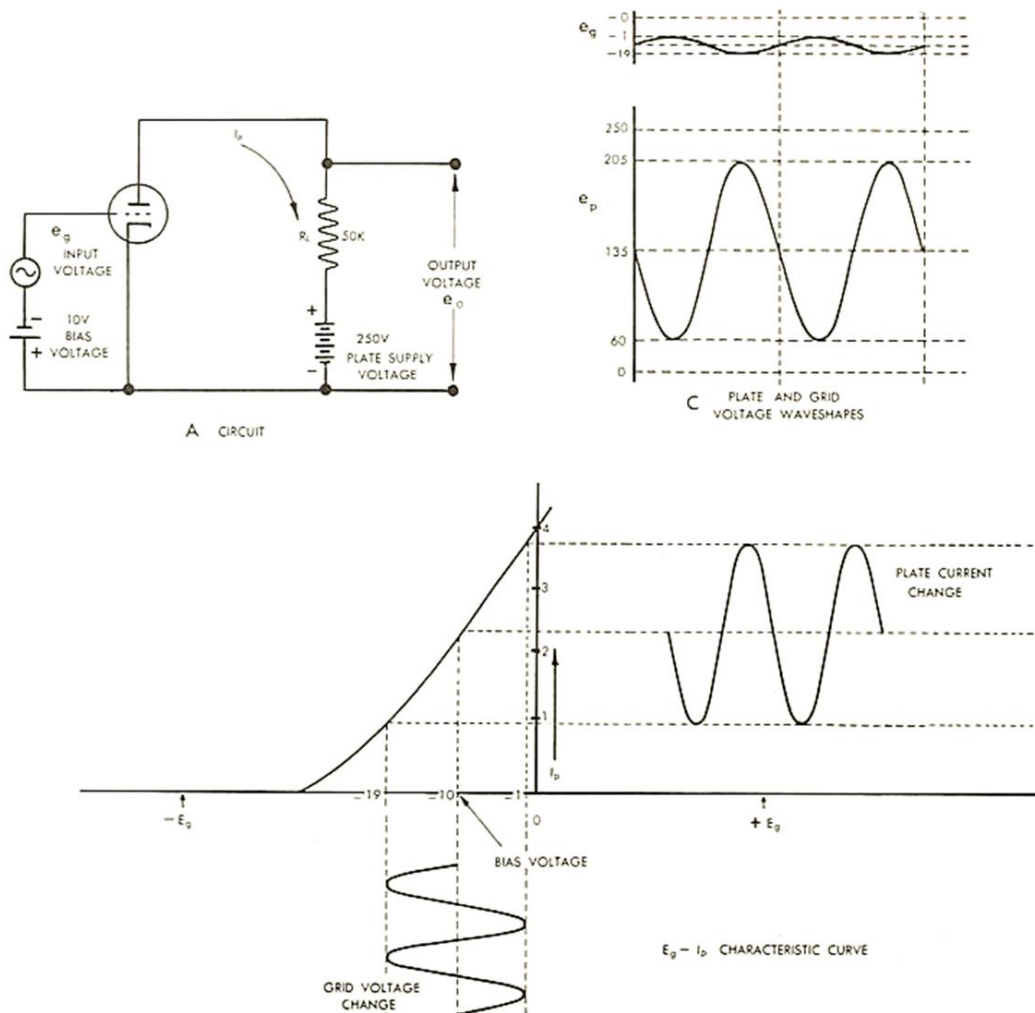
Ένα βασικό χαρακτηριστικό των πομπών είναι η ισχύς που παράγουν [66]. Αυτή συνήθως χαρακτηρίζεται από την *μέγιστη στιγμιαία ισχύ* (transmitter peak RF power,  $P_p$ ) και την *μέση ισχύ* (transmitter average RF power,  $P_a$ ). Η διάρκεια του παλμού που παράγεται είναι εξίσου σημαντικός παράγοντας. Η μέγιστη στιγμιαία ισχύς μπορεί να παραχθεί για ένα χρονικό διάστημα το οποίο ονομάζεται *μέγιστη διάρκεια παλμού* και συμβολίζεται ως  $t_M$ .

Τα περισσότερα σύγχρονα ραντάρ χρησιμοποιούν *συνεκτικούς πομπούς* [66]. Αυτό σημαίνει ότι η φάση της εκπεμπόμενης κυματομορφής προκύπτει από ένα σταθερό σήμα αναφοράς που χρησιμοποιείται επίσης από τον δέκτη. Τα ανωτέρω ραντάρ επεξεργάζονται τα σήματα λήψης συνεκτικά έτσι ώστε να μετρήσουν την ολίσθηση της συχνότητας Doppler, να εκτελείται συνεκτική ολοκλήρωση των παλμών και τέλος να μηδενίζουν τις επιστροφές από ακίνητους στόχους.

### A.5 Ενισχυτής

Ο ενισχυτής ραδιοσυχνοτήτων συνήθως προτιμάται έναντι των πομπών με τοπικούς ταλαντωτές [65]. Σε έναν ενισχυτή το σήμα που παράγεται έχει χαμηλή ισχύ και στην συνέχεια ενισχύεται προκειμένου να αποκτήσει την επιθυμητή ισχύ και να εκπεμφθεί από την κεραία.

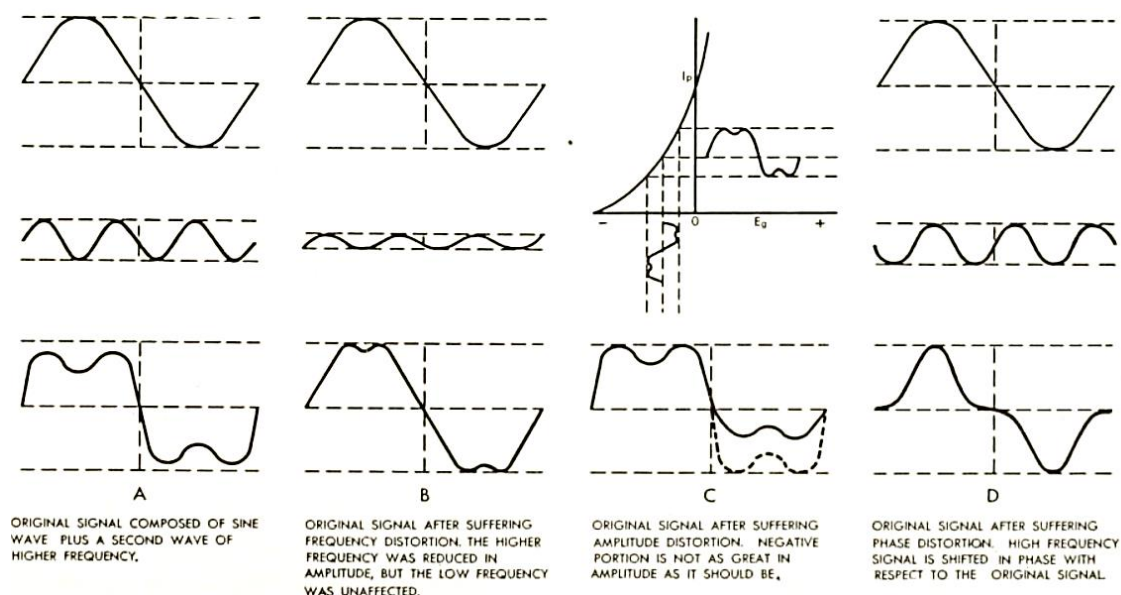
Στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται η ενίσχυση του παραγόμενου κύματος [57].



Σχήμα 21: Κύκλωμα ενισχυτή και κυματομορφής

Οι ενισχυτές έχουν το πλεονέκτημα να παρέχουν σταθερές κυματομορφές σημάτων, διαμορφωμένους κατάλληλα συμπιεσμένους παλμούς, εύκολη αλλαγή

συχνότητας κ.α. Κάθε φορά που το παραγόμενο κύμα (plate current change) δεν έχει την ίδια μορφή με το αρχικό κύμα (grid voltage change) λέμε ότι έχουμε παραμόρφωση. Υπάρχουν τρία είδη παραμόρφωσης - η παραμόρφωση συχνότητας, η παραμόρφωση πλάτους (μη-γραμμική) και η παραμόρφωση φάσης. Στο ακόλουθο σχήμα φαίνονται τα είδη παραμόρφωσης μίας κυματομορφής που έχει παραχθεί από ενισχυτή.



Σχήμα 22: Είδη παραμόρφωσης κύματος

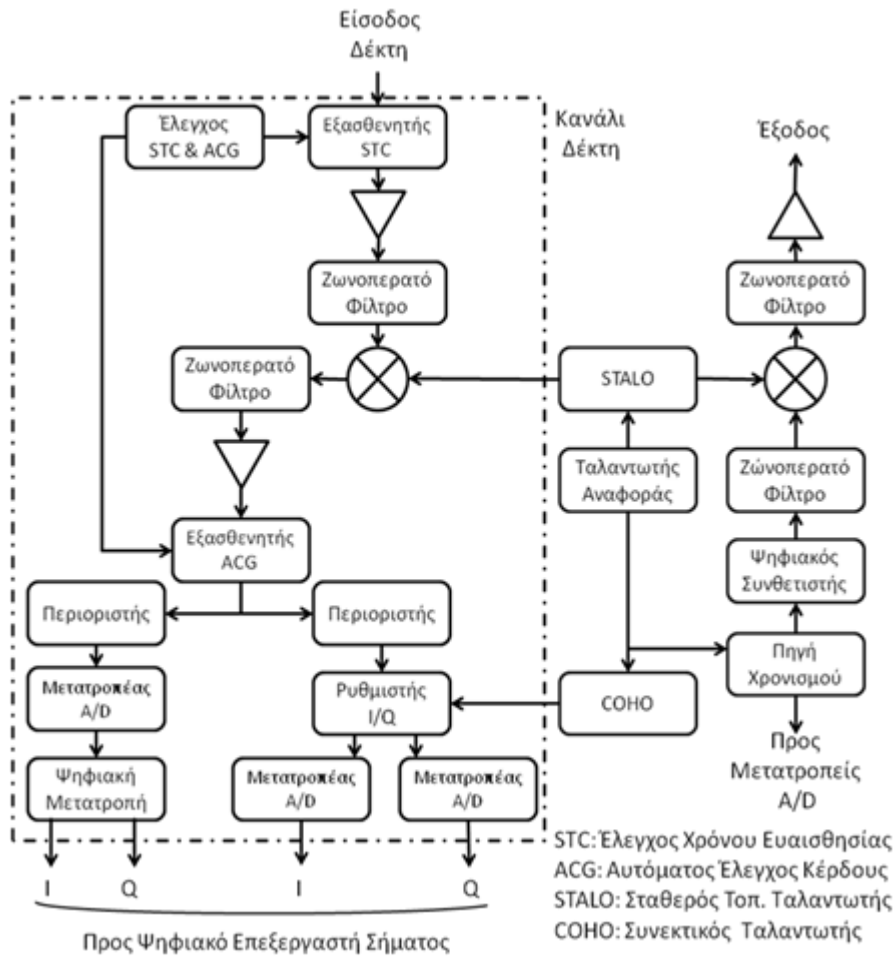
## A.6 Δέκτης

Ο δέκτης είναι ένα υποσύστημα του ραντάρ το οποίο λαμβάνει την επιστροφή του σήματος, την ενισχύει, την μετασχηματίζει στο πεδίο της συχνότητας και τέλος την φιλτράρει αποκόβοντας τις ανεπιθύμητες επιστροφές [59].

Πρακτικά, όλοι οι δέκτες ραντάρ λειτουργούν ως *υπερετερόδυνα*. Σύμφωνα με την αρχιτεκτονική του σχήματος ο δέκτης φιλτράρει το σήμα προκειμένου να διαχωρίσει το επιθυμητό σήμα του στόχου από τις ανεπιθύμητες επιστροφές και θορύβους. Στην συνέχεια, το σήμα ενισχύεται και με την βοήθεια ενός τοπικού ταλαντωτή μετατοπίζεται σε μία ενδιάμεση συχνότητα. Αυτή η *ενδιάμεση συχνότητα* (intermediate frequency) συνήθως είναι καθορισμένη ώστε να υπάρχει μία τυποποίηση στους δέκτες και επεξεργαστές σήματος και να μην εξαρτώνται από την εκάστοτε συχνότητα λειτουργίας της συσκευής.

Οι υπερτερόδυνα δέκτες μεταβάλλουν την συχνότητα των τοπικών ταλαντωτών με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να ακολουθούν τον αντίστοιχο συντονισμό του πομπού δίχως να επηρεάζουν το φιλτράρισμα της ενδιάμεσης συχνότητας. Το πλεονέκτημα αυτό έχει καταστήσει τους υπερτερόδυνα δέκτες κυρίαρχους έναντι άλλων τύπων δεκτών [65]. Στο Σχήμα 23 φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα του δέκτη.



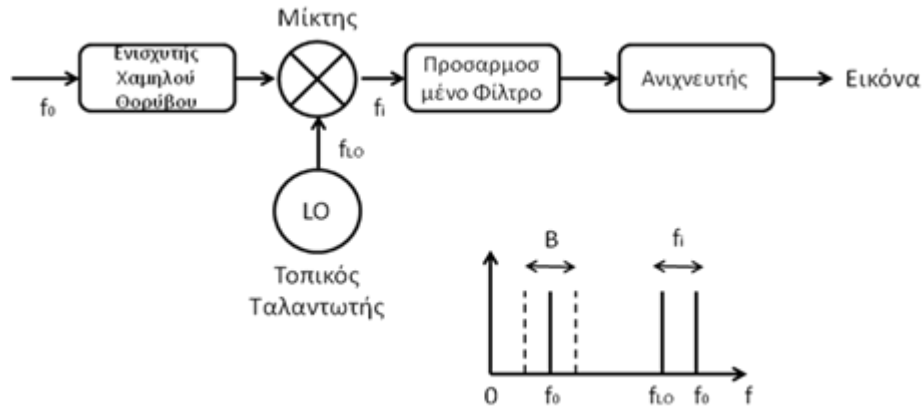


Σχήμα 23: Σχηματικό Διάγραμμα Δέκτη

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

Στο διάγραμμα δέκτη ραντάρ, ο παλμός που επιστρέφει στο ραντάρ από τους στόχους έχει συχνότητα  $f_0$ . Στην συνέχεια ένας μίκτης (κρυσταλλική δίοδος), με μη γραμμικά χαρακτηριστικά, λαμβάνει το σήμα λήψης καθώς και ένα παλμό

συχνότητας  $f_{LO}$  από ένα τοπικό ταλαντωτή. Όποτε υφίσταται σήμα επιστροφής συχνότητας  $f_o$ , ένα έτερο σήμα  $f_i$  εξέρχεται από τον μίκτη. Η συχνότητα  $f_i$  ουσιαστικά είναι η διαφορά των συχνοτήτων  $f_o$  και  $f_{LO}$ . Στην συνέχεια, το προσαρμοσμένο φίλτρο (ενισχυτής ενδιάμεσης συχνότητας) φιλτράρει τις αρμονικές του σήματος συχνότητας  $f_i$  προσαρμόζοντας το εύρος ζώνης  $B$  στο εύρος ζώνης του εκπεμπόμενου σήματος [62].



Σχήμα 24: Τυπικό Διάγραμμα Δέκτη

## A.7 Ολοκλήρωση παλμών

Γενικά, η ολοκλήρωση των παλμών είναι μια τεχνική βελτίωσης που χρησιμεύει στην αύξηση της πιθανότητας ανίχνευσης ενός στόχου με τη χρήση  $N$  παλμών μετάδοσης. Η βελτίωση αυτή επιτυγχάνεται με την εισαγωγή σημάτων ραντάρ λήψης στον επεξεργαστή από διάφορες διαδοχικές περιόδους παλμών. Ανάλογα με τη θέση του ολοκληρωτή παλμών στην αλυσίδα επεξεργασίας σήματος στον επεξεργαστή σημάτων, η διαδικασία αυτή είναι γνωστή ως *συνεκτική* ή *μη-συνεκτική ολοκλήρωση*.

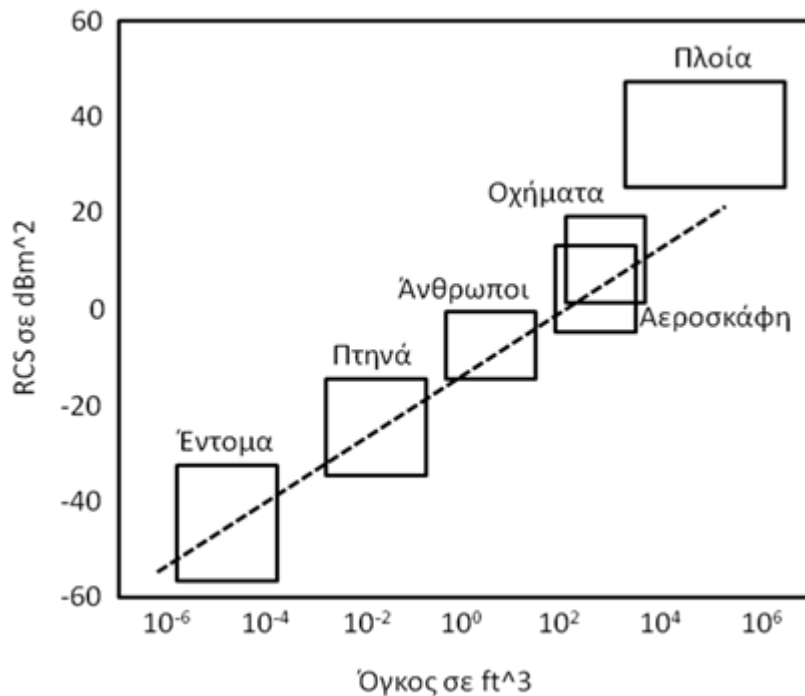
*Συνεκτική ολοκλήρωση* (coherent integration) ή *συνεκτικός υπολογισμός μέσης τιμής* (coherent averaging) ή *υπολογισμός μέσης τιμής στο πεδίου του χρόνου* (time domain averaging) ή *προ-ανίχνευση* εκτελείται πριν τον εντοπισμό του στόχου (η φάση πρέπει να είναι γνωστή) για μία ακολουθία  $N$  παλμών. Η συνεκτική ολοκλήρωση απαιτεί τη διατήρηση της φάσης του σήματος. Όταν επιτευχθεί η διαδικασία ολοκλήρωσης και επειδή οι πληροφορίες φάσης καταστρέφονται από τον ανιχνευτή του σήματος, για αυτό το λόγο αν και η προ-ανίχνευση είναι πιο εύκολο να επιτευχθεί, δεν είναι τόσο αποτελεσματική παρόλο που το SNR αυξάνεται κατά  $N$  φορές.

*Μη-συνεκτική ολοκλήρωση* (non coherent integration) ή *μη-συνεκτικός υπολογισμός μέσης τιμής* (incoherent averaging) ή *μετα-ανίχνευση* εκτελείται μετά την ανίχνευση του στόχου, όπου δεν χρησιμοποιούνται δείγματα στο πεδίο του χρόνου καθώς μετά την ανίχνευση του στόχου η πληροφορία της φάσης έχει χαθεί.

Στην μη-συνεκτική ολοκλήρωση προστίθενται τα πλάτη όλων των παλμών, ωστόσο, αν και η διαδικασία ολοκλήρωσης είναι εξίσου αποτελεσματική, υπάρχουν οι απώλειες του ανιχνευτή, οι οποίες μειώνουν το SNR στην έξοδο του ανιχνευτή σήματος με το SNR να αυξάνεται σε αυτή την περίπτωση περίπου κατά  $\sqrt{N}$  φορές.

### A.8 Ραδιοδιατομή στόχου

Η ραδιοδιατομή  $\sigma$  (RCS: Radio Cross Section) είναι η ενεργός επιφάνεια ενός στόχου. Γενικά, η ραδιοδιατομή ενός στόχου είναι δύσκολο να υπολογισθεί καθώς πρέπει να ληφθούν υπόψη πληθώρα παραγόντων όπως το σχήμα του στόχου, η συχνότητα εκπομπής του ραντάρ, η πόλωση του κύματος, τα υλικά που είναι κατασκευασμένος ο στόχος κ.α. Τυπικές τιμές ραδιοδιατομής για τεχνητούς και φυσικούς στόχους φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 25: Ραδιοδιατομή διαφόρων στόχων

Η δυσκολία υπολογισμού της ραδιοδιατομής  $\sigma$  οδήγησε τους μηχανικούς, πέρα από τους θεωρητικούς υπολογισμούς, να την υπολογίζουν κατόπιν πειραματικών μετρήσεων προκειμένου να εξασφαλίζουν ακριβή στοιχεία.

Αντικείμενο	Γωνία πρόσπτωσης	$\sigma_{\max}$	$\sigma_{\min}$	Αριθμός λοβών	Εύρος κυρίου λοβού
Σφαίρα $a$ : ακτίνα	οποιαδήποτε	$\pi a^2$	$\pi a^2$	1	$2\pi$
Ελλειψοειδές $a$ : μεγάλος ημιάξονας $b$ : μικρός ημιάξονας	πλάγια $\sigma_{\max}$ αξονική $\sigma_{\min}$	$\pi a^2$	$\pi b^4/a^2$	2	$\sim b/a$
Κύλινδρος $a$ : ακτίνα βάσης $b$ : μήκος/ύψος	πλάγια $\sigma_{\max}$ αξονική $\sigma_{\min}$	$2\pi aL^2/\lambda$	0	$8L/\lambda$	$\lambda/L$
Επίπεδη επιφάνεια $A$ : εμβαδόν	κάθετη $\sigma_{\max}$ οριζόντια $\sigma_{\min}$	$4\pi A^2/\lambda^2$	0	$8L/\lambda$	$\lambda/L$
Δίπολο $\lambda/2$	πλάγια $\sigma_{\max}$ αξονική $\sigma_{\min}$	$0.86 \lambda^2$	0	2	$\pi/2$
Κώνος απείρου μήκους $\theta$ : μισή γωνία κορυφής	πλάγια $\sigma_{\max}$ αξονική $\sigma_{\min}$	$\lambda^4 \tan^4 \theta / 16\pi$	0		
Τετράγωνος γωνιακός ανακλαστήρας $a$ : πλευρά βάσης		$12\pi a^4/\lambda^2$		4	$\pi/4$
Τριγωνικός γωνιακός ανακλαστήρας $a$ : πλευρά βάσης		$4\pi a^4/3\lambda^2$		4	$\pi/4$
Ανακλαστήρας ορθής διεδρης γωνίας $a$ : πλευρά βάσης		$8\pi a^4/\lambda^2$			
Κυρτή επιφάνεια		$\pi a_1 a_2$			

Πίνακας 14: Ραδιοδιατομή απλών ηλεκτρικά αγώγιμων αντικειμένων

Η ραδιοδιατομή για μία επίπεδη επιφάνεια δίνεται από την σχέση :

$$\sigma \approx \frac{4\pi A^2}{\lambda^2} \quad (A.17)$$

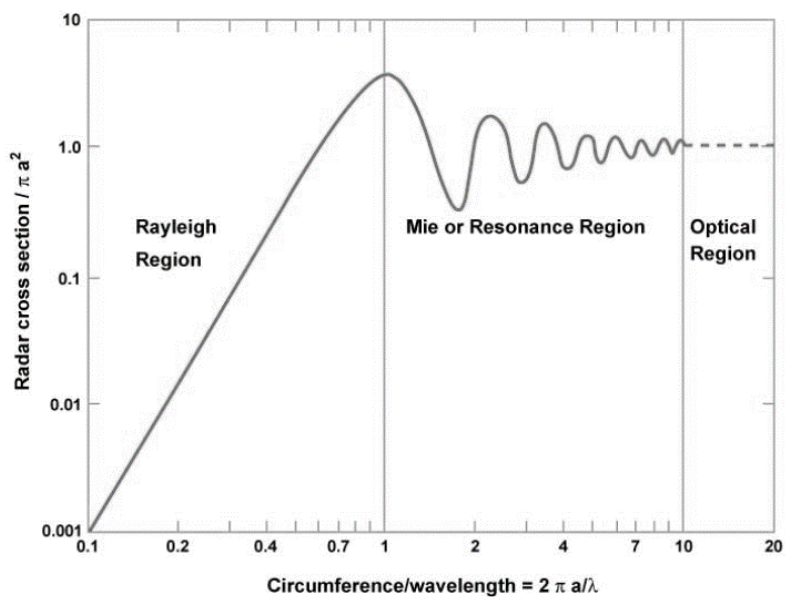
Όπου:

$\sigma$  = ραδιοδιατομή στόχου

$A$  = εμβαδόν ανακλαστικής επιφάνειας

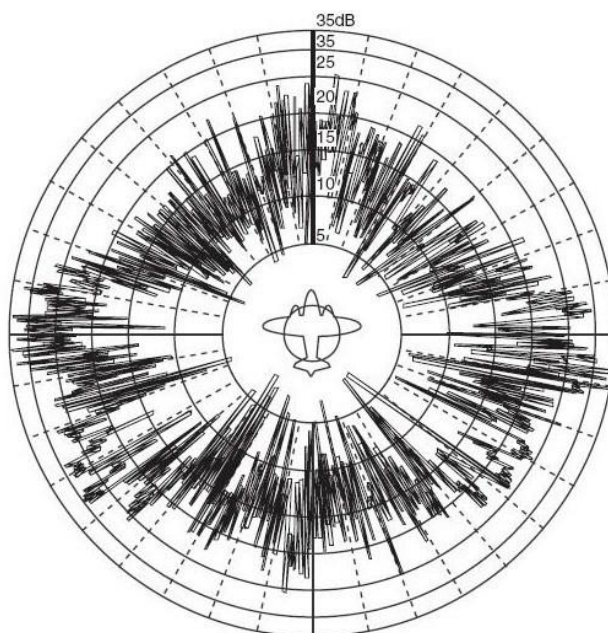
$\lambda$  = μήκος κύματος κεραίας

Η ραδιοδιατομή ενός αντικειμένου εξαρτάται τόσο από το μέγεθος του όσο και από το μήκος κύματος του προσπίπτοντος σήματος. Πιο συγκεκριμένα η ραδιοδιατομή μίας σφαίρας όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα μεγιστοποιείται όσο μεγαλύτερη είναι η περιφέρεια της και όσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος του προσπίπτοντος κύματος.



Σχήμα 26: Ράδιοδιατομή σφαίρας

Τέλος, η τυπική ραδιοδιατομή ενός αεροσκάφους δεν είναι ομοιόμορφη και παρουσιάζει πληθώρα αιχμών όπως φαίνεται και στο Σχήμα 27 [62].



Σχήμα 27:Ραδιοδιατομή Αεροσκάφους (S-band, λ=10cm)

### A.9 Ανίχνευση στόχων

Το βασικό πρόβλημα εντοπισμού ενός στόχου είναι ο θόρυβος. Ένα τέτοιο πρόβλημα μπορεί να μελετηθεί σε δύο φάσεις. Η πρώτη φάση μελέτης είναι η κατάλληλη διαμόρφωση του σήματος με ενίσχυση και φιλτράρισμα αυτού, που έχει στόχο να εξαλειφθεί ο θόρυβος που περιβάλλει το χρήσιμο σήμα. Επόμενη φάση είναι η ανίχνευση του στόχου, όπου χρησιμοποιώντας το ενισχυμένο /

φιλτραρισμένο σήμα και με κατάλληλη επεξεργασία, το ραντάρ να είναι σε θέση να διακρίνει την ύπαρξη του στόχου [62].

### **Επεξεργασία σήματος**

Η βασική λειτουργία ενός επεξεργαστή ραντάρ, στο πλαίσιο τόσο της ανίχνευσης του σήματος όσο και της μέγιστης απόστασης εντοπισμού, είναι η μεγιστοποίηση του σηματοθορυβικού λόγου. Σύμφωνα με τους Nathanson, Reilly και Cohen [58], ο σχεδιασμός ενός επεξεργαστή ραντάρ μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους, προκειμένου να επιτευχθεί ο βέλτιστος σηματοθορυβικός λόγος. Το κόστος, η πολυπλοκότητα και η αξιοπιστία είναι παράγοντες που καθορίζουν τον σχεδιασμό.

Η μέθοδος της επεξεργασίας σήματος εξαρτάται από τις υφιστάμενες περιβαντολλογικές συνθήκες κάτω από τις οποίες το σήμα είναι διαθέσιμο στον δέκτη. Η πλέον διαδεδομένη διαδικασία επεξεργασίας περιλαμβάνει την προεπεξεργασία (preprocessing), την διατήρηση της πληροφορίας στον λευκό θόρυβο (prewhitening) και τέλος την παρεμβολή πληροφορίας στην εξομάλυνση του σήματος [61].

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

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

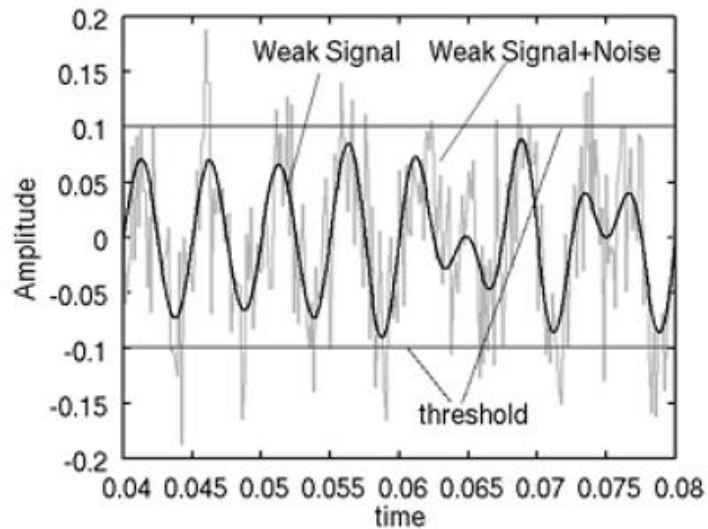
$$v(t) = r(t)\cos(\omega_0 t - \varphi(t)) \quad (A.18)$$

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

$$u(t) + n(t) > V_T: \text{Εντοπισμός}$$

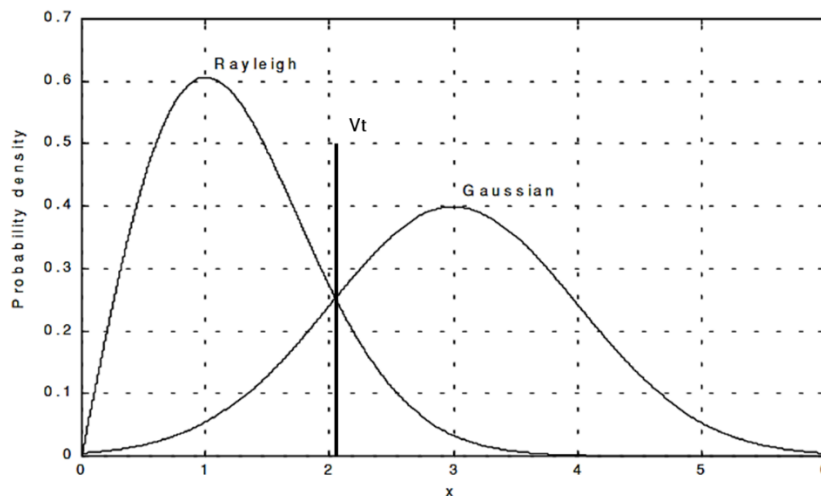
$$n(t) > V_T: \text{Ψευδός συναγερμός}$$

Η κατανομή της περιβάλλουσας του σήματος εξόδου από το ζωνοπερατό φίλτρο (σήμα εισόδου στο κύκλωμα απόφασης) συγκρίνεται με μία καθορισμένη τιμή κατωφλίου  $V_T$  προκειμένου να ληφθεί απόφαση για την ανίχνευση του στόχου.



Σχήμα 28: Ανίχνευση στόχου με κατώφλι εντοπισμού

Δεδομένου ότι το σήμα και ο θόρυβος ακολουθούν την κατανομή Rice (Gaussian) και ότι ο θόρυβος ακολουθεί την κατανομή Rayleigh [68] μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα για τις πιθανότητες εντοπισμού και ψευδού συναγερμού του ραντάρ.



Σχήμα 29: Κατανομή Περιβάλλουσας σήματος και θορύβου

Η κατανομή κατωφλίου του σήματος και του θορύβου για  $P(R)=75\%$  θεωρείται σωστή ανίχνευση (όπου λέγοντας 75% της περιοχής του σήματος εννοούμε να είναι πάνω από το επίπεδο κατωφλίου  $V_T$ ).

Στο παράρτημα αυτό αναφέρονται βασικές έννοιες περί ραντάρ που χρειάζονται για να κατανοήσει ο αναγνώστης την μελέτη στην παρούσα διατριβή. Έτσι, έγινε μία σύντομη αναφορά στις αρχές λειτουργίας των ραντάρ, καθώς αναπτύχθηκαν και έννοιες όπως ο πομπός, ο ταλαντωτής, ο ενισχυτής, ο δέκτης, η ολοκλήρωση των παλμών, η ραδιοδιατομή του στόχου και η διαδικασία ανίχνευσης στόχων.





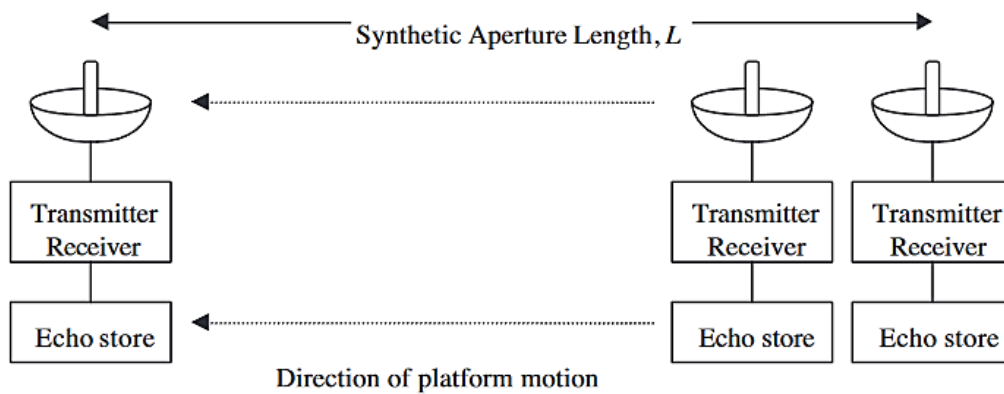
# Παράρτημα Β

## Ραντάρ Συνθετικού Παραθύρου (Synthetic Aperture Radar, SAR)

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μία αρχική αναφορά στην αρχή λειτουργίας του ραντάρ συνθετικού παραθύρου (synthetic aperture radar – SAR) καθώς και στη γεωμετρία τόσο του φορέα όσο και του στόχου. Αναπτύσσονται τα δύο είδη κεραίας συνθετικού παραθύρου όπου φαίνονται οι διαφορές τους καθώς και η επιχειρησιακή χρησιμοποίηση του ραντάρ ανάλογα με το είδος έρευνας που εκτελεί. Ακόμα, γίνεται αναφορά στην επεξεργασία σήματος του SAR, στην δομή και τρόπο λειτουργίας του επεξεργαστή, στην συχνότητα Doppler και στην διαμόρφωση κατά συχνότητα (FM) καθώς επίσης και στην διακριβωτική ικανότητα του ραντάρ κατά απόσταση και διόπτευση. Αναφέρεται ο σηματοθορυβικός λόγος, η αντιστάθμιση της κίνησης του στόχου και το σφάλμα φάσης που υπεισέρχεται στο σήμα καθώς και η αυτό-εστίαση και το φαινόμενο της κηλίδας (speckle).

### **B.1 Βασικές αρχές**

Όπως φανερώνει και το όνομα του, το ραντάρ συνθετικού παραθύρου παρακολουθεί μεγάλα πλαίσια (παράθυρα) στο έδαφος, εκπέμποντας στενούς παλμούς που μπορούν να δώσουν διακριβωτική ικανότητα κατά διόπτευση ανάλογη της διακριβωτικής ικανότητας κατά απόσταση. Τα ραντάρ συνθετικού παραθύρου πιθανόν να μπορούν να χαρακτηρισθούν ως τα πιο πολύπλοκα ραντάρ. Στα ραντάρ αυτά χρησιμοποιείται η τεχνική του συνθετικού παραθύρου, που δύναται να εφαρμοσθεί από ένα αεροσκάφος ή δορυφόρο, όπου δημιουργείται μία ενεργού παραθύρου κεραία που είναι πολύ μεγαλύτερη από μία πραγματική επιχειρησιακή κεραία. Η κίνηση της κεραίας του ραντάρ είναι προαπαιτούμενο στοιχείο προκειμένου να είναι λειτουργική η τεχνική αυτή [69]. Στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται η έννοια της συνθετικής απεικόνισης.



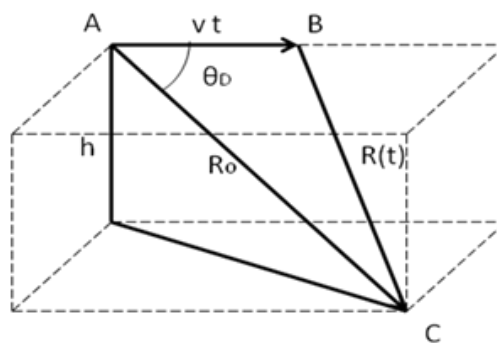
Σχήμα 30: Συνθετική απεικόνιση

Το βασικό πλεονέκτημα των ραντάρ αυτών είναι ότι δύναται να παρέχουν εικόνες υψηλής ανάλυσης και μεγάλης έκτασης στην επιφάνεια της γης από μεγάλες αποστάσεις χωρίς οι παρεχόμενες εικόνες να επηρεάζονται από τις συνθήκες καιρού ή το σκοτάδι [70]. Τα ραντάρ συνθετικού παραθύρου μπορούν να αντικαταστήσουν την οπτική και υπέρυθρη (infrared) απεικόνιση σε εφαρμογές που απαιτούν επιχειρήσεις παντός καιρού [69].

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

Θέλοντας να εξετάσουμε σχηματικά την λειτουργία του ραντάρ, θεωρούμε ότι ένα αεροσκάφος κινείται επί του διανύσματος AB με ταχύτητα  $v$  όπως φαίνεται στο Σχήμα 31

Η απόσταση που διανύει κατά την διάρκεια συλλογής πληροφοριών είναι  $vt$ . Το αρχικό διάνυσμα οπτικής επαφής (LOS: Line of Sight) του αεροσκάφους με το στόχο στο σημείο C, είναι AC.



### Σχήμα 31: Θεμελιώδης Γεωμετρία Συνθετικού Παραθύρου

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

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

Όπου  $\theta_D$  είναι η γωνία Doppler και  $h$  είναι το ύψος πτήσης του αεροσκάφους από το έδαφος.

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

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

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

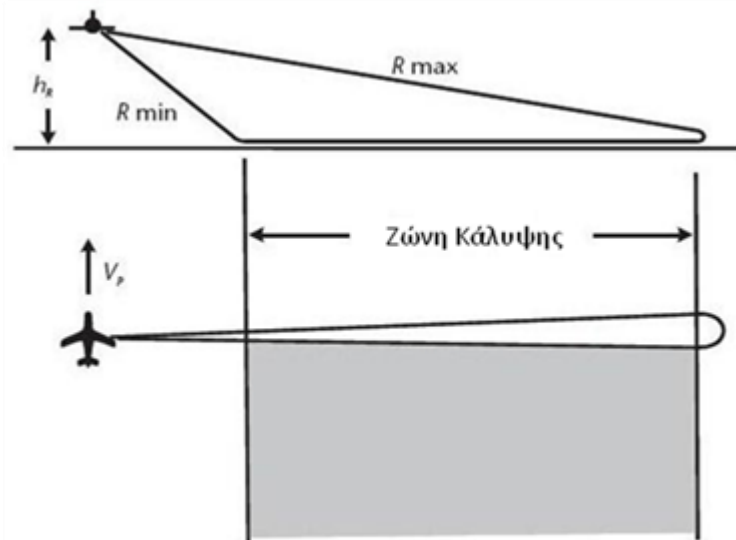
$$f_D = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi}{dt} = \frac{2v}{\lambda} \cos \theta_D - \frac{2v^2 t}{\lambda R_0} \sin^2 \theta_D \quad (B.3)$$

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

## B.2 Γεωμετρία ραντάρ SAR

Τα ραντάρ όπως αναφέρθηκε στο Παράρτημα A, μπορούν να διαχωριστούν σε κατηγορίες μεταξύ των οποίων και σε ραντάρ έρευνας και απεικόνισης [71]. Τα ραντάρ έρευνας βασίζουν την λειτουργία τους στον εντοπισμό αντικειμένων (στόχων) με εκπομπή και λήψη ηλεκτρομαγνητικών παλμών χρησιμοποιώντας κεραίες που περιστρέφονται. Αντίθετα, τα ραντάρ απεικόνισης (imaging radars) σχετίζονται με την κίνηση της πλατφόρμας που φέρει την κεραία. Η κεραία στην περίπτωση αυτή βρίσκεται στην πλευρά της πλατφόρμας και εκπέμπει μια στενή δέσμη προς το έδαφος [72].

Για να απεικονίσουμε λοιπόν την επιφάνεια της γης, είτε από αερομεταφερόμενο φορέα (airborne) πχ αεροσκάφος, ελικόπτερο κλπ, είτε από δορυφόρο τηλεπισκόπησης χαμηλής τροχιάς, σε περιστροφή γύρω από την γη (spaceborne SAR) χρησιμοποιούμε το ραντάρ συνθετικής απεικόνισης ή ραντάρ συνθετικού παραθύρου.



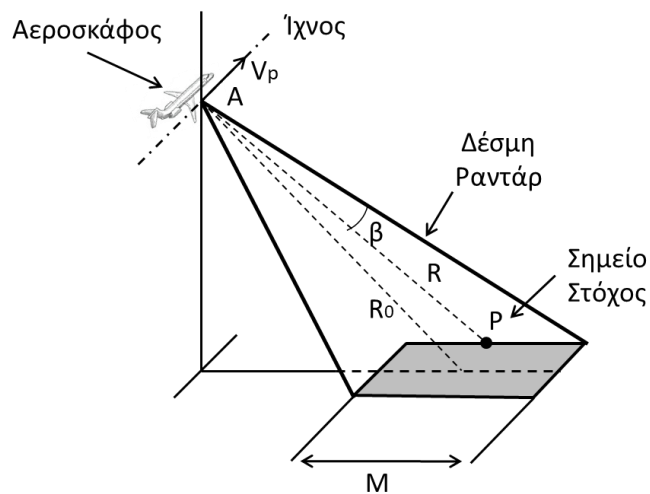
Σχήμα 32: Βασική Γεωμετρία SAR

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

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

Το Σχήμα 33 καθορίζει την γεωμετρία ενός ραντάρ πλευρικής απεικόνισης, όπου έχουμε θεωρήσει ότι το αεροσκάφος φέρει ένα συνεκτικό (συνεκτικής ολοκλήρωσης) ραντάρ. Η επεξεργασία σήματος ενός ραντάρ SAR κάνει βασικά μία συνεκτική αντιστάθμιση φάσης που διορθώνει την συγκεκριμένη μετατόπιση φάσης του ανακλώμενου σήματος, από ένα συγκεκριμένο σημείο του εδάφους, κατά την διάρκεια κίνησης του αεροσκάφους [69]. Το ραντάρ συνθετικής απεικόνισης βρίσκεται επί πλατφόρμας που βρίσκεται σε υψόμετρο  $h$  πάνω από τη γη, ενώ κινείται με σταθερή ταχύτητα  $V_p$ , με κατεύθυνση κατά μήκος της τροχιάς ίχνους (along track) και εκπέμπει παλμούς προς την κατεύθυνση του στατικού σημείου  $P$ , δηλαδή προς τα πλάγια. Ως κατεύθυνση απόστασης (range direction) ονομάζουμε την κατεύθυνση της διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων του ραντάρ από το αεροσκάφος  $A$  προς το σημείο  $P$ . Ως κάθετη απόσταση (cross - range) ονομάζεται η κάθετη στην κατεύθυνση απόστασης διεύθυνση επί της γης.

Το ραντάρ εκπέμπει έναν παλμό RF (Radio Frequency), όπου το εύρος της δέσμης είναι  $\beta$ . Το γραμμοσκιασμένο παράθυρο στο Σχήμα 33 φωτίζεται με ενέργεια RF καθώς το αεροσκάφος κινείται με σταθερή ταχύτητα επί της χαραχθείσας πορείας (ίχνος). Ένα σημείο  $P$ , το οποίο βρίσκεται στο έδαφος και εισέρχεται στον λοβό του παλμού απέχει από το ραντάρ απόσταση  $R$ . Καθώς το αεροσκάφος κινείται επί του ίχνους το σημείο  $P$  μετακινείται μέσα στον χώρο που φωτίζει το ραντάρ. Το σημείο  $P$  φθάνει στην πλησιέστερη απόσταση  $R_0$  από το ραντάρ όταν το  $P$  βρίσκεται σε παράλλαξη με το αεροσκάφος. Το σημείο  $P$  συνεχίζει να μένει πίσω μέσα στο λοβό και απέχει από το ραντάρ απόσταση  $R$  όταν εξέρχεται του φωτιζόμενου παραθύρου.



Σχήμα 33: Γεωμετρία Ραντάρ Πλευρικής Απεικόνισης

Συλλέγοντας  $N$  παλμούς από την γήινη επιφάνεια με τη χρήση LFM (Linear Frequency Modulation) παλμών εκπομπής ή  $N$  ριπές (bursts) παλμών με τη χρήση SF (Stepped Frequency) δημιουργείται μια απεικόνιση (SAR image) με το αερομεταφερόμενο ραντάρ.

Το σημείο  $P$  είναι το μέσον της τροχιάς της πλατφόρμας. Για κάθετη παρακολούθηση του στόχου ακολουθούμε την συγκεκριμένη τροχιά. Ορίζουμε μία αυθαίρετη θέση του στόχου κατά το μήκος του  $[-N/2, N/2]$  στην οποία λαμβάνεται ο  $n$ -στος παλμός λήψης ( $n=1...N$ ). Για την λήψη μιας απεικόνισης (SAR image) απαιτούνται  $N$  παλμοί στους οποίους αντιστοιχεί το μήκος της τροχιάς της πλατφόρμας το οποίο και ονομάζουμε συνθετικό μήκος (synthetic length,) του ραντάρ συνθετικής απεικόνισης. Για το συνθετικό μήκος  $L_e$  ισχύει η σχέση:

$$L_e = vNT_E \quad (B.4)$$

Στην περίπτωση παλμικού ραντάρ με χρήση παλμών SF, η εξίσωση (B.4) τροποποιείται στην εξίσωση:

$$L_e = vNMT_E \quad (B.5)$$

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

$$T_b = MT_E \quad (B.6)$$

και  $M$  είναι ο αριθμός των συχνοτήτων σε μία ριπή για την SF κυματομορφή.

Τέλος, ως  $R$  και  $R_0$  ορίζουμε τις αποστάσεις πλατφόρμας – στόχου για τις θέσεις στο μέσο και στην άκρη του παραθύρου έρευνας,  $\beta$  είναι η γωνία πρόσπτωσης (grazing angle) των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ως προς τη γη.

Με τη λήψη  $N$  παλμών (ή  $N$  ριπών) σκέδασης από την γήινη επιφάνεια και με την κατάλληλη επεξεργασία φάσης (coherent radar system) το σύστημα ραντάρ δημιουργεί μια εικόνα. Αυτή τη διαδικασία ονομάζουμε ραντάρ συνθετικής απεικόνισης (Synthetic Aperture Radar, SAR) και προσομοιάζεται με μία *συνθετική φασική στοιχειοκεραία* (synthetic array ή synthetic aperture)

### B.3 Επιχειρησιακή λειτουργία

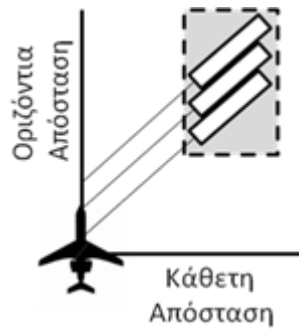
Όσον αφορά τα είδη της έρευνας, που μπορεί να εφαρμόσει ένα ιπτάμενο μέσο που φέρει ραντάρ συνθετικού παραθύρου, ποικίλουν. Τα πρώτα έτη που χρησιμοποιήθηκαν τα ανωτέρω ραντάρ η έρευνα γινόταν στην παράλλαξη της πορείας του μέσου (δηλαδή σε διόπτρευση  $90^\circ$  από την πορεία του αεροσκάφους) όπου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

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

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

#### **Έρευνα "Λωρίδας" ("Strip search")**

Ένα σχετικά παλιό είδος έρευνας SAR είναι η έρευνα "λωρίδας" (strip search) όπου η έρευνα γίνεται διαγώνια σε σχέση με την κίνηση του μέσου και η γωνία της διαγωνίου είναι χαρακτηριστική όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 34: Έρευνα Λωρίδας (Strip)

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

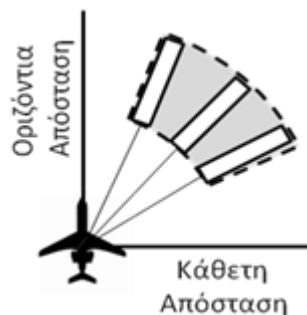
$$\delta A_Z = \frac{\lambda R_0}{2V_p T \sin \theta_S} \quad (B.7)$$

Με  $T$  και  $\theta_S$  να παίρνουν σταθερές τιμές.

**Έρευνα "Σάρωσης δέσμης Doppler" ("Doppler beam sharpening search")**

Ένας δεύτερος τύπος έρευνας είναι η "σάρωση δέσμης Doppler" (Doppler beam sharpening search) όπου το ραντάρ ερευνά κυκλικό τομέα υπό γωνία σε σχέση με την πορεία του αεροσκάφους.

Ο κυκλικός τομέας δεν δύναται να βρίσκεται επί της πορείας του αεροσκάφους καθώς ο χρόνος ολοκλήρωσης των παλμών απειρίζεται.



Σχήμα 35: Έρευνα Σάρωσης Δέσμης Doppler (Doppler Beam Sharpening)

Η διακριβωτική ικανότητα αυτής της έρευνας δίνεται από την σχέση:

$$\delta A_Z = \frac{\lambda R_0}{2V_p T \sin \theta_S} \quad (B.8)$$

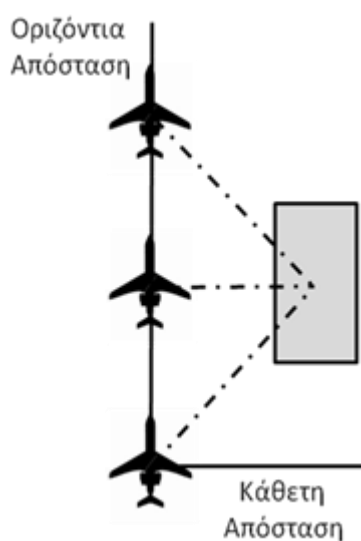
Με το  $T$  να αυξάνεται κατάλληλα έτσι ώστε το  $\delta A_Z$  να παραμένει σταθερό.

**Έρευνα "Φωτοδέσμης" ("Spotlight search")**

Ένα άλλο είδος έρευνας είναι η έρευνα φωτοδέσμης (spotlight search). Για να βελτιώσουμε την διακριβωτική ικανότητα κατά διόπτευση είναι αναγκαίο να μειώσουμε το μήκος της κεραίας (καθώς προκύπτει από την ανάγκη να αυξήσουμε

το εύρος ζώνης Doppler) και να αυξήσουμε αναλογικά την συχνότητα δειγματοληψίας κατά διόπτρευση (προκειμένου να ικανοποιείται ο κανόνας του Shannon περί ελαχίστου χρόνου δειγματοληψίας) [72].

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

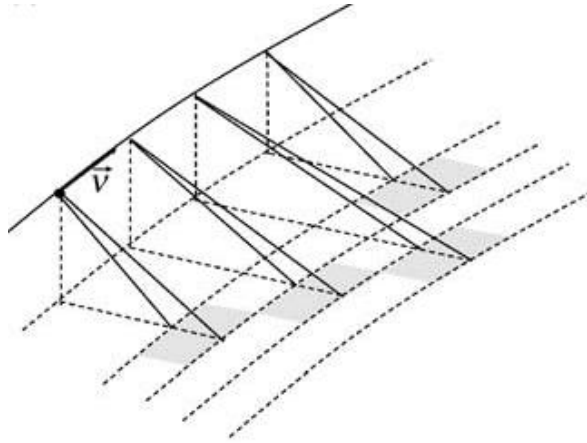


Σχήμα 36: Έρευνα Φωτοδέσμης (Spotlight)

### **Έρευνα "Πολλαπλής Σάρωσης" ("Scansar ή Multilook")**

Στην περίπτωση που επιθυμούμε να αυξήσουμε το πλάτος του τομέα έρευνας, θα ήταν απαραίτητο να αυξήσουμε το μήκος της κεραίας και να μειώσουμε την συχνότητα δειγματοληψίας κατά διόπτρευση. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει μία εξάρτηση μεταξύ της διακριβωτικής ικανότητας κατά διόπτρευση και του πλάτους τομέα έρευνας. Ένα τέτοιο είδος έρευνας ραντάρ συνθετικού παραθύρου φαίνεται στο Σχήμα 37 και ονομάζεται έρευνα πολλαπλής σάρωσης (Scansar ή Multilook).



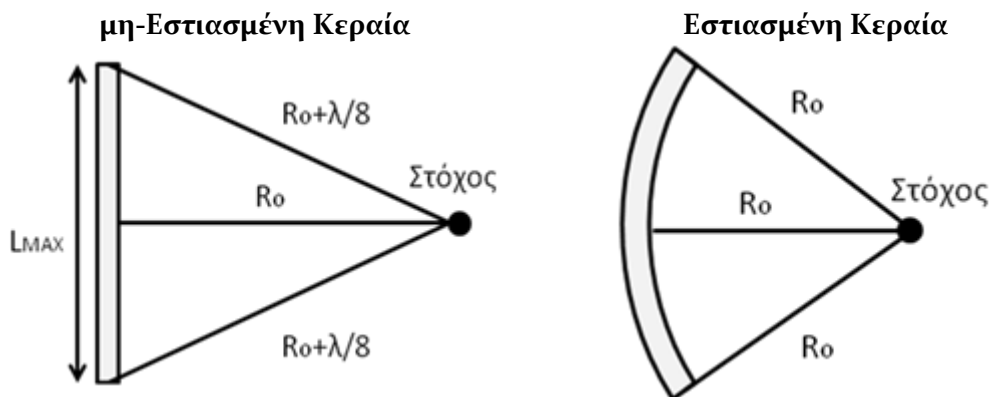


Σχήμα 37: Έρευνα Πολλαπλής Σάρωσης (Scansar)

Στην έρευνα αυτή το ραντάρ επεξεργάζεται πολλές περιοχές του τομέα ταυτόχρονα, στέλνοντας διαδοχικές ριπές παλμών σε κάθε μία περιοχή του τομέα. Στην περίπτωση αυτή πρέπει να δοθεί προσοχή ώστε ο χρόνος των διαδοχικών ριπών να μην υπερβαίνει τον χρόνο επεξεργασίας του παραθύρου κατά διόπτρευση. Η έρευνα αυτή χρησιμοποιήθηκε επιχειρησιακά στον καναδικό δορυφόρο RADARSAT το 1995 [72].

#### Β.4 Εστιασμένες και μη-εστιασμένες κεραίες

Προτού συνεχίσουμε στην θεωρία των ραντάρ συνθετικού παραθύρου θα αναφερθούμε στις εστιασμένες και μη-εστιασμένες κεραίες όπως φαίνονται στο Σχήμα 38 και να αναφερθούμε στις διαφορές αυτών.



Σχήμα 38: μη-Εστιασμένη και Εστιασμένη Κεραία

Παρατηρούμε ότι στην μη-εστιασμένη κεραία το σήμα λήψης καθυστερεί να φθάσει στα άκρα της κεραίας από τον στόχο κατά  $1/8$  του μήκους κύματος  $\lambda$  σε σχέση με το κέντρο αυτής. Σε περίπτωση που το μήκος της κεραίας αυξανόταν περταίρω, η φάση του σήματος στα άκρα σε σχέση με το κέντρο αυτής θα αυξανόταν μέχρι να υπερβεί τις  $90^\circ$ . Καθώς το μήκος κεραίας θα μεγάλωνε κι άλλο, το σήμα θα άρχιζε να εξασθενεί αντί να ενισχύεται. Το σημείο αυτό είναι το όριο

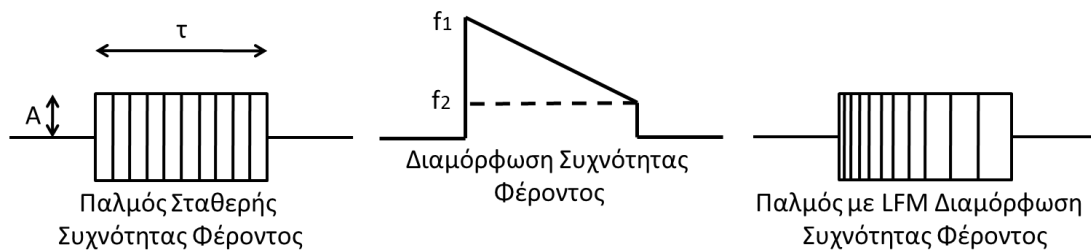
του μέγιστου μήκους μίας γραμμικής κεραίας και δύναται να ξεπερασθεί με την κατασκευή μίας εστιασμένης κεραίας σε μία συγκεκριμένη απόσταση [73].

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

## B.5 Κυματομορφές εκπομπής

### *Ραντάρ γραμμικής διαμόρφωσης συχνότητας - LFM (Linear Frequency Modulation)*

Στην εκπομπή κυματομορφής γραμμικής διαμόρφωσης συχνότητας LFM (Linear Frequency Modulation) από ραντάρ συνθετικής απεικόνισης, η φέρουσα συχνότητα που εκπέμπεται από τον παλμό ραντάρ, μπορεί να παρουσιάζει αύξηση ή ελάττωση γραμμικά με τον χρόνο όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 39: Γραμμική διαμόρφωση συχνότητας - LFM

Η παρακάτω σχέση μας δίνει το εύρος ζώνης  $B$  για αυτόν τον τύπο παλμού εκπομπής:

$$B = f_{\max} - f_{\min} \quad (B.9)$$

όπου  $f_{\max}$  είναι η μέγιστη εκπεμπόμενη συχνότητα στο φέρον και  $f_{\min}$  είναι η αντίστοιχη ελάχιστη εκπεμπόμενη συχνότητα στο φέρον σήμα του παλμού LFM. Η διακριβωτική ικανότητα του ραντάρ στην κατεύθυνση της απόστασης βελτιώνεται λόγω του αυξημένου εύρους ζώνης.

Το ραντάρ παράγει ένα παλμό  $\tau$  εύρους μερικών  $\mu\text{sec}$  πλάτους  $A$ . Για να επιτευχθεί μία αξιόλογη διακριβωτική ικανότητα κατά απόσταση, το φέρον υφίσταται μία γραμμική διαμόρφωση κατά συχνότητα (LFM διαμόρφωση) από μία συχνότητα  $f_1$  σε μία συχνότητα  $f_2$  στο εύρος  $\tau$ . Ο διαμορφωμένος παλμός κατά συχνότητα (FM) δίνεται από την σχέση:

$$f(t) = A \cos\left(2\pi f_c t - \frac{2\pi\alpha t^2}{2}\right), \quad -\frac{\tau}{2} \leq t \leq \frac{\tau}{2} \quad (B.10)$$

όπου:

$f_c$  = Συχνότητα φέροντος

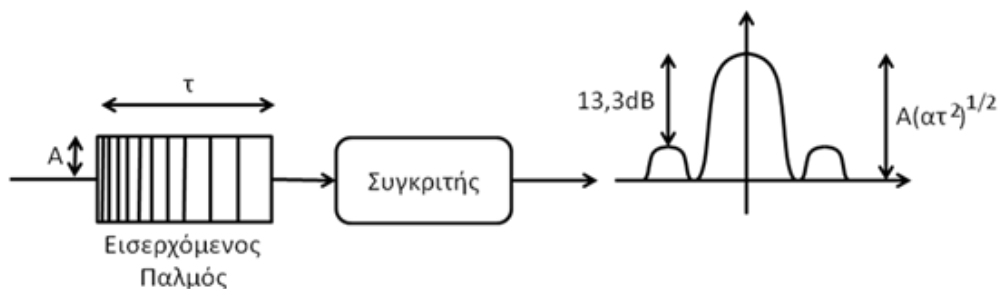
$\alpha$  = Ρυθμός σάρωσης της συχνότητας

$\tau$  = Μη-συμπιεσμένο εύρος παλμού

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

$$f_{DET}(t) = f_0 - \alpha t \quad (B.11)$$

Η παραπάνω συχνότητα έχει την ίδια μορφή με την συχνότητα Doppler. Καθώς το σήμα εισέρχεται και επεξεργάζεται στον συγκριτή (συμπιεστής παλμών) το εξερχόμενο σήμα έχει την μορφή της συνάρτησης  $\sin x/x$  όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 40: Μονοδιάστατος Συγκριτής

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

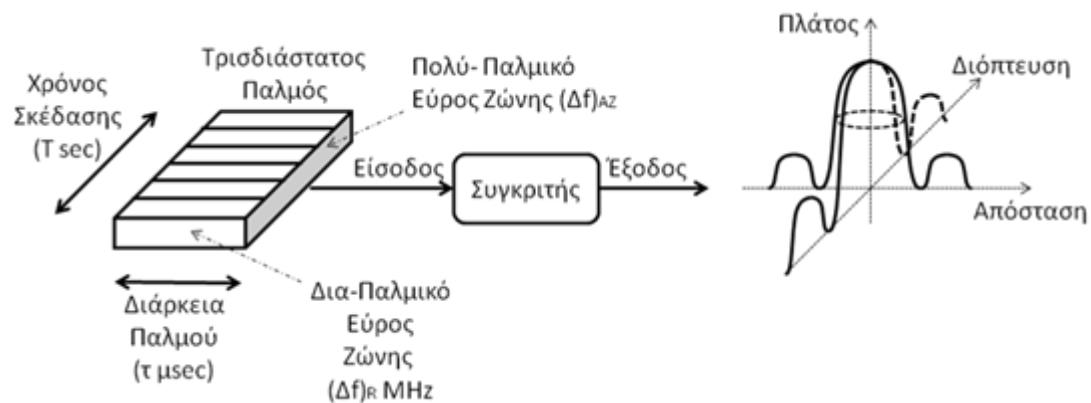
Όταν χρησιμοποιούμε παλμούς γραμμικής διαμόρφωσης συχνότητας LFM για απεικονίσεις ραντάρ συνθετικής απεικόνισης απαιτείται η λήψη  $N$  παλμών σκέδασης από το δέκτη του ραντάρ.

Παράλληλα, κατά τη διάρκεια λήψης και επεξεργασίας των παλμών επιστροφής γίνεται λήψη απαραίτητως  $M$  δειγμάτων ανά παλμό οπισθοσκέδασης (στην βασική

ζώνη συχνοτήτων μετά την αποδιαμόρφωση στον δέκτη) όπου τα δείγματα αντιστοιχούν σε  $M$  συχνότητες μέσα στο εύρος ζώνης ανά παλμό.

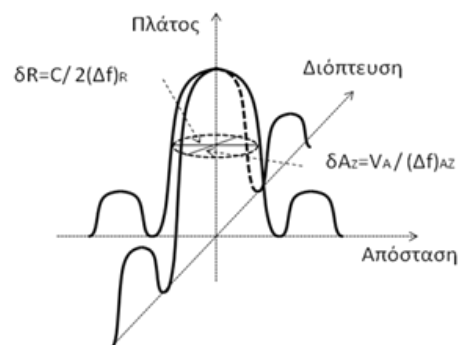
Έτσι εφαρμόζοντας τη μέθοδο απεικόνισης *Range Doppler Imaging* (RDI) λαμβάνουμε μιγαδικά δεδομένα σκέδασης προς επεξεργασία στο δέκτη του ραντάρ,  $M \times N$  [74].

Η δημιουργία συνθετικής απεικόνισης (δεδομένα συχνότητας Doppler) και η συμπίεση παλμών (εκπεμπόμενος παλμός FM) είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους και μπορούν να συνδυαστούν.



Σχήμα 41: Τρισδιάστατος Συγκριτής

Οι τρεις άξονες του σχήματος είναι το πλάτος, η απόσταση (παλμός) και η διόπτευση (Doppler). Η έξοδος από τον συνεκτικό ανιχνευτή είναι μία σειρά από παλμούς. Ο κάθε παλμός έχει μία διάρκεια της τάξης msec και ένα εύρος ζώνης της τάξης MHz. Οι παλμοί αυτοί είναι οι επιστροφές από τα σκεδαζόμενα σήματα και εισέρχονται στον συγκριτή για χρονικό διάστημα  $T$  που είναι τάξης sec. Κατά το χρονικό διάστημα  $T$ , ένα εύρος ζώνης Doppler παράγεται. Εισάγοντας την ανωτέρω σειρά παλμών στον τρισδιάστατο συγκριτή λαμβάνουμε ως έξοδο μία τρισδιάστατη κατανομή  $\sin x/x$ . Στον άξονα της απόστασης η διακριβωτική ικανότητα είναι  $\delta R$  ενώ στον άξονα της διόπτευσης είναι  $\delta A_z$ .



Σχήμα 42: Διακριβωτικές ικανότητες

### Ραντάρ βηματικής συχνότητας, SF ("Step Frequency")

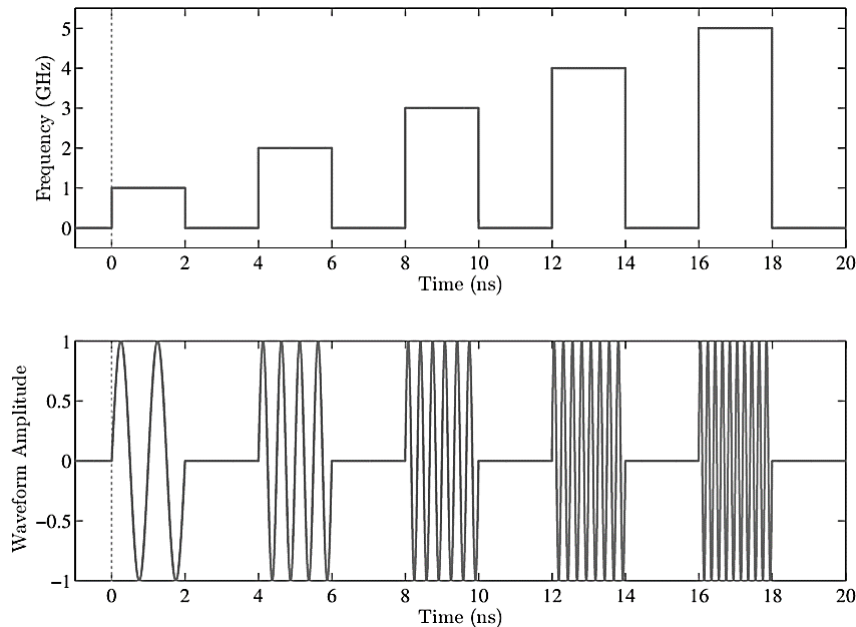
Στο Σχήμα 43 παρατηρούμε την κυματομορφή ενός ραντάρ συνθετικής απεικόνισης με εκπεμπόμενη κυματομορφή βηματικής συχνότητας - SF (Stepped Frequency) κατά την οποία εκπέμπονται  $M$  παλμοί στην αρχή, όπου η φέρουσα συχνότητα είναι σταθερή με τον χρόνο, αλλά αυξάνει από παλμό σε παλμό (για τους  $M$  αυτούς παλμούς) με βήμα  $\Delta f$ , σύμφωνα με την σχέση:

$$f_m = f_o + (m - 1)\Delta f \quad (B.12)$$

όπου  $m=1\dots M$ .

Το εύρος ζώνης στην περίπτωση αυτή κατά προσέγγιση είναι:

$$B = M \cdot \Delta f \quad (B.13)$$



Σχήμα 43: Κυματομορφή βηματικής συχνότητας - SF

Μία ριπή εκπομπής (burst) αποτελείται από το σύνολο των  $M$  εκπεμπόμενων παλμών. Εκπέμποντας και λαμβάνοντας  $N$  τέτοιες ριπές, επιτυγχάνουμε μια απεικόνιση για ραντάρ συνθετικής απεικόνισης με το σχηματισμό της απαιτούμενης ρήτρας  $M \times N$  μιγαδικών δεδομένων σκέδασης. Στον τύπο βηματικής συχνότητας κυματομορφής, συνήθως παίρνουμε ένα δείγμα ανά παλμό (στη βασική ζώνη συχνοτήτων μετά την αποδιαμόρφωση στον δέκτη).

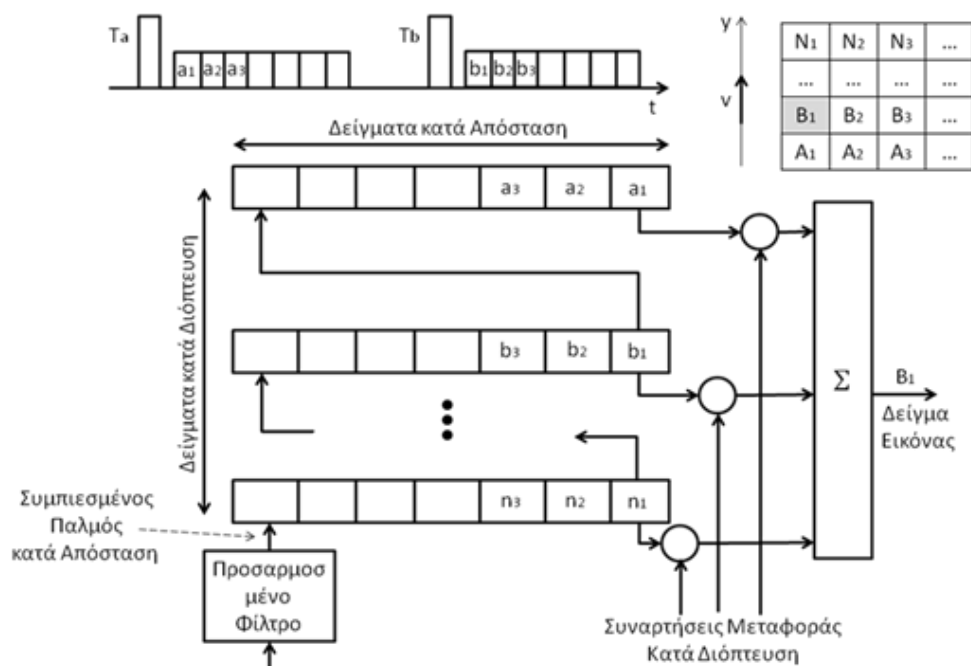
Οι δυο τύποι εκπομπής ραντάρ που προαναφέρθηκαν είναι θεωρητικά δύο μαθηματικά ισοδύναμες μέθοδοι για ραντάρ συνθετικής απεικόνισης αφού οι σκεδαζόμενοι παλμοί από το στόχο περιέχουν πληροφορία για  $M$  διαφορετικές συχνότητες και για  $N$  διαφορετικές γωνίες θέασης του στόχου. Έτσι τα προφίλ απόστασης (range profiles) του στόχου συναρτήσει του χρόνου, αποτελούν μια

μονοδιάστατη υπογραφή του επιστρεφόμενου σήματος από τον στόχο, και παρέχονται από τον αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier (IFFT) των  $M$  μιγαδικών δεδομένων. Αφού ευθυγραμμίσουμε τα  $N$  λαμβανόμενα προφίλ απόστασης μέσω του υπολογισμού του φάσματος Doppler (FFT σε  $N$  μιγαδικά δεδομένα) στην κατεύθυνση της διόπτεισης, καταλήγουμε στην τρισδιάστατη απεικόνιση SAR στις κατευθύνσεις απόστασης και διόπτεισης, γνωστή και ως τεχνική *Range Doppler Imaging* [75].

## B.6 Επεξεργαστής σήματος

Η επεξεργασία σήματος παράγει μία εικόνα της οποίας κάθε *εικονοκύτταρο* (pixel) είναι το αποτέλεσμα των υπολογισμών των προσαρμοσμένων φίλτρων και της επεξεργασίας Doppler. Σύμφωνα με τον Mahafza [69], οι εκπεμπόμενοι παλμοί  $T_a$ ,  $T_b \dots$ , δύναται να κωδικοποιηθούν εσωτερικά προκειμένου να διευκολύνουν την συμπίεση παλμών κατά απόσταση.

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



Σχήμα 44: Επεξεργαστής Ραντάρ Συνθετικού Παραθύρου

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

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

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

## B.7 Διακριβωτική ικανότητα

Οι διακριβωτικές ικανότητες τόσο κατά απόσταση όσο και κατά διόπτρευση έχουν στον αριθμητή των σχέσεων που τις περιγράφουν τον όρο της ταχύτητας. Η  $\delta R$  είναι ανάλογη της ταχύτητας του φωτός ενώ η  $\delta AZ$  είναι ανάλογη της ταχύτητας του αεροσκάφους. Αντίθετα, οι διακριβωτικές ικανότητες είναι αντιστρόφως ανάλογες ενός εύρους ζώνης. Η  $\delta R$  είναι αντιστρόφως ανάλογη του εύρους ζώνης των ραδιοκυμάτων, ενώ η  $\delta AZ$  είναι αντιστρόφως ανάλογη του εύρους ζώνης Doppler. Δηλαδή, η διακριβωτική ικανότητα επιτυγχάνεται και στις δύο διευθύνσεις από την δημιουργία ενός εύρους ζώνης. Κατά συνέπεια, όταν υλοποιείται η συνάρτηση των ανωτέρω διακριβωτικών ικανοτήτων δημιουργείται ένα συνθετικό παράθυρο. Η σύγκριση των δύο διακριβωτικών ικανοτήτων φαίνεται στον Πίνακα 13.

Διακριβωτική Ικανότητα κατά Απόσταση	Διακριβωτική Ικανότητα κατά Διόπτρευση
Εύρος παλμού $\tau_R$ της εικόνας στο επίπεδο -4dB	Εύρος παλμού $\tau_{AZ}$ της εικόνας στο επίπεδο -4dB
$\tau_R = \frac{1}{(\Delta f)_R}$	$\tau_{AZ} = \frac{1}{(\Delta f)_{AZ}}$
Όπου $(\Delta f)_R$ είναι το εκπεμπόμενο εύρος ζώνης διαμορφωμένο κατά FM.	Όπου $(\Delta f)_{AZ}$ είναι το εύρος ζώνης Doppler.

<p>Πολλαπλασιάζοντας και τα δύο μέλη της παραπάνω σχέσης με <math>C/2</math> όπου <math>C</math> είναι η ταχύτητα του φωτός (ο όρος <math>\frac{1}{2}</math> απαιτείται για την εκπομπή και την επιστροφή του σήματος) έχουμε:</p> $\frac{C\tau_R}{2} = \frac{C}{2(\Delta f)_R}$	<p>Πολλαπλασιάζοντας και τα δύο μέλη της παραπάνω σχέσης με την ταχύτητα του αεροσκάφους <math>V_P</math> έχουμε:</p> $V_P\tau_{AZ} = \frac{V_P}{(\Delta f)_{AZ}}$
<p>Ο όρος <math>C\tau_R/2</math> ορίζεται ως η διακριβωτική ικανότητα κατά απόσταση <math>\delta R</math>:</p> $\delta R = \frac{C}{2(\Delta f)_R}$	<p>Ο όρος <math>V_P\tau_{AZ}</math> ορίζεται ως η διακριβωτική ικανότητα κατά διόπτειση <math>\delta A_Z</math>:</p> $\delta A_Z = \frac{V_P}{(\Delta f)_{AZ}}$

Πίνακας 15: Σύγκριση Διακριβωτικής Ικανότητας κατά Απόσταση και κατά Διόπτειση

## B.8 Σηματοθορυβικός λόγος

Ο σηματοθορυβικός λόγος (signal to noise ratio - SNR) ενός ραντάρ συνθετικού παραθύρου δίνεται από την σχέση:

$$\frac{S}{N} = \frac{P_p G^2 \lambda^2 \sigma n_i}{(4\pi)^3 R_0^4 k T_0 B F} \quad (B.14)$$

Όπου

$P_p$ : μέγιστη εκπεμπόμενη ισχύς

$G$ : κέρδος κεραίας

$n_i$ : αριθμός παλμών συνεκτικής ολοκλήρωσης

$\sigma$ : ραδιοδιατομή στόχου

$k$ : σταθερά Boltzmann

$B$ : εύρος φάσματος δέκτη

$T_0$ : θερμοκρασία δέκτη

$F$ : συντελεστής θορύβου δέκτη

Θέτουμε  $P_p = P_{av}/\tau_u PRF$ , όπου  $P_{av}$  η μέση ισχύς και  $\tau_u$  η διάρκεια του ασυμπίεστου παλμού. Θεωρούμε  $B = Q/\tau_u$ , όπου  $Q$  είναι το γινόμενο του εύρους ζώνης με την διάρκεια της κυματομορφής. Καθώς αναφερόμαστε σε συνεκτικό ραντάρ έχουμε  $n_i = T_a PRF$ . Το κέρδος της κεραίας μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει της οριζόντιας και κάθετης γωνίας του εύρους δέσμης  $\theta_h$  και  $\theta_u$  ως  $G = 4\pi\eta/\theta_h\theta_u$  όπου  $\eta$  είναι ο συντελεστής απόδοσης της κεραίας,  $\theta_h = \lambda/D_h$  και  $\theta_u = \lambda/D_u$ . Η



ραδιοδιατομή RCS είναι  $\sigma = \sigma^o \delta R \delta A_z$  όπου  $\sigma^o$  είναι ο συντελεστής σκέδασης,  $\delta R$  είναι η διακριβωτική ικανότητα κατά απόσταση και  $\delta A_z$  είναι η διακριβωτική ικανότητα κατά διόπτρευση. Συνεπώς, ο σηματοθορυβικός λόγος γίνεται:

$$\frac{S}{N} = \frac{P_{av} n^2 D_h^2 D_u^2 \delta R \sigma^o}{8\pi R_0^3 Q \lambda u k T_0 F \cos \xi \sin \psi} \quad (B.15)$$

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



# Παράρτημα Γ

## Εισαγωγή στις "Fractal Επιφάνειες"

Τα fractals μας επιτρέπουν να περιγράψουμε τον φυσικό κόσμο σύμφωνα με τη γεωμετρία του και παρόλο που εμφανίζουν μία ακανόνιστη μορφή, παρουσιάζουν ευταξία και δομή σε όλες τις κλίμακες. Γίνεται λοιπόν φανερό ότι η *γεωμετρία των fractals* μας επιτρέπει να περιγράψουμε δύσκολα φυσικά φαινόμενα, όπως η ροή του ρευστού σε πορώδη υλικά και τους κεραυνούς, με μεγαλύτερη ευκολία από την *Ευκλείδεια γεωμετρία*.

Ο συνηθέστερος ορισμός για ένα αντικείμενο fractal είναι όταν αυτό παρουσιάζει το χαρακτηριστικό της *αυτοομοιότητας* (self similarity), που με την σειρά της ορίζεται ως η ομοιότητα ενός τμήματος του αντικειμένου σε σχέση με το συνολικό αντικείμενο ανεξάρτητα από την κλίμακα μεγέθους, και με την ιδιότητα όπου η *μορφοκλασματική διάσταση* είναι μεγαλύτερη από την τοπολογική διάστασή του αντικειμένου.

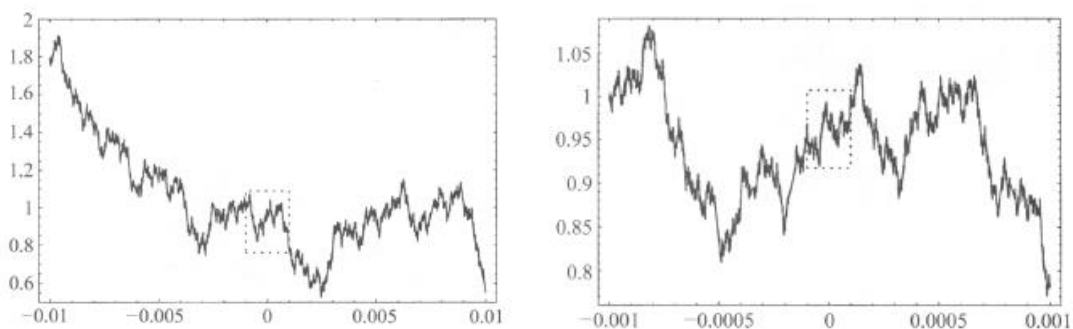
Σε αυτό το παράρτημα αναφέρονται μερικά από τα βασικά χαρακτηριστικά των fractals, και ιδιαίτερα η αυτοομοιότητα της δομής τους σε όλες τις κλίμακες. Αυτά τα χαρακτηριστικά κάνουν τα fractals, χρήσιμα για τη μοντελοποίηση φυσικών δομών, όπως είναι τα βουνά. Μελετάται επίσης πώς μπορεί να περιγραφεί ένα fractal για την ποσοτικοποίηση της υψής μιας φράκταλ ομάδας χρησιμοποιώντας τη διάσταση fractal, η οποία δεν απαιτείται να είναι ένας ακέραιος αριθμός.

### Γ.1 Αυτοομοιότητα - Δομή fractal

Παρόλο που δεν υπάρχουν αυστηρά κριτήρια σχετικά με το τι κάνει μία δομή fractal, υπάρχουν ορισμένες ιδιότητες που συχνά χαρακτηρίζουν τα fractals. Η πρώτη ιδιότητα είναι η *αυτο-ομοιότητα* της δομής του fractal σε όλες τις κλίμακες. Μια ακτογραμμή με τους διάφορους κόλπους και χερσονήσους, όταν εξετάζεται από ένα παρατηρητή από εκατοντάδες χιλιόμετρα πάνω από τη γη, μοιάζει με μια τραχιά καμπύλη. Όταν ο ίδιος παρατηρητής περπατά κατά μήκος των κοιλίσκων και των σημείων της ακτογραμμής, αυτή εμφανίζεται και πάλι ως μια τραχιά καμπύλη. Τέλος, όταν εξετάζεται από την οπτική γωνία ενός μυρμηγκιού που περπατά κατά μήκος των κόκκων άμμου στην ίδια ακτογραμμή τότε παρατηρείται

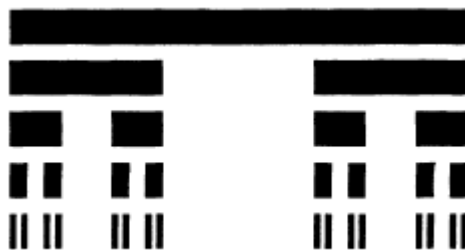
ότι διατηρεί αυτή την εμφάνιση της τραχιάς καμπύλης. Αυτή η παρόμοια δομή σε πολλές διαφορετικές κλίμακες είναι χαρακτηριστική των fractals. Αντίθετα, μια σφαίρα που βρίσκεται στην εξεταζόμενη παραλία στην ίδια ακτογραμμή όταν την παρατηρούμε από πολύ ψηλά μοιάζει με σημείο, όταν την παρατηρεί κάποιος που περπατά κατά μήκος της ακτής μοιάζει με σφαίρα και όταν παρατηρείται από ένα μυρμήγκι που περπατάει πάνω σε αυτήν μοιάζει με ένα πολύ μεγάλο σφαιρικό αντικείμενο. Αυτή η τελευταία διαφορετική εμφάνιση όταν παρατηρείται σε διαφορετικές κλίμακες είναι χαρακτηριστική για δομές που δεν είναι fractal και περιγράφονται καλύτερα από την Ευκλείδεια γεωμετρία [29].

Η αυτό-ομοιότητα χαρακτηρίζει μία fractal δομή στατιστικά ή με ακρίβεια. Στην πρώτη περίπτωση, που φαίνεται στην Εικόνα 27, η μεγέθυνση σε ένα τμήμα της καμπύλης μας δίνει ένα υποσύνολο αυτής που έχει την ίδια γενική εμφάνιση με το γενικό σύνολο, χωρίς να είναι ακριβές αντίγραφο του γενικού συνόλου.



*Εικόνα 27: Στατιστική αυτο-ομοιότητα fractal δομής σε διαφορετική κλίμακα*

Η ακριβής αυτο-ομοιότητα που απεικονίζεται στην Εικόνα 28 έχει την ιδιότητα η μεγέθυνση σε ένα υποσύνολο του γενικού συνόλου να εμφανίζει ένα κλιμακωτό αντίγραφο ολόκληρου του αρχικού fractal. Η αυτοομοιότητα μπορεί να παρατηρείται είτε σε χωρική κλίμακα είτε σε χρονική κλίμακα (π.χ. καρδιογράφημα).



*Εικόνα 28: Ακριβής αυτο-ομοιότητα fractal δομής*

Όταν μία δομή fractal διαθέτει στατιστική ή ακριβή αυτο-ομοιότητα, η ομοιότητα της σε κάθε κλίμακα υποδηλώνει ότι κάθε δομή μπορεί να κατασκευαστεί με επανάληψη ενός αρχικού μοτίβου. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με την ευκλείδεια

γεωμετρία, όπου οι δομές μπορούν να προσδιοριστούν πιο εύκολα χρησιμοποιώντας μαθηματικές σχέσεις. Θα δούμε επίσης ότι τα fractals μπορούν συχνά να περιγραφούν με μια ρητή διάσταση, σε αντίθεση με τον Ευκλείδειο χώρο που περιγράφεται από την ακέραια διάσταση  $n$ , πχ  $R_n$ .

## Γ.2 Διάσταση fractal

Παρατηρώντας τα ανωτέρω δύο παραδείγματα των δομών fractal, διαπιστώνεται ότι τα fractals συχνά φαίνεται να καταλαμβάνουν διαφορετικό χώρο από ό, τι τα αντικείμενα που περιγράφονται από την Ευκλείδεια γεωμετρία. Στην Ευκλείδεια Γεωμετρία, η διάσταση είναι ένας από τους ακέραιους φυσικούς αριθμούς  $[1,2,3]$  όπου παίρνει την τιμή 1 για την ευθεία γραμμή, την τιμή 2 όταν αναφερόμαστε σε μία επιφάνεια και την τιμή 3 για τα στερεά.

Η διάσταση ενός αντικειμένου στην Ευκλείδεια Γεωμετρία είναι μικρότερη ή ίση με την ευκλείδεια διάσταση του χώρου, παίρνει ακέραιες τιμές και είναι ίση με τη διάσταση του πιο απλού μαθηματικού αντικειμένου που χωρίζει σε δύο κομμάτια το υπό εξέταση αντικείμενο, αυξημένη κατά 1, με το σημείο (αδιαίρετο) να έχει τοπολογική διάσταση 0 [76]. Κατά συνέπεια, ένα σημείο έχει τοπολογική διάσταση 0, μια ευθεία που χωρίζεται στα δύο από ένα σημείο έχει τοπολογική διάσταση 1, ένα επίπεδο που χωρίζεται στα δύο από μία ευθεία έχει τοπολογική διάσταση 2, και ένα στερεό που χωρίζεται στα δύο από ένα επίπεδο, έχει διάσταση 3.

Μια fractal καμπύλη στο επίπεδο, όπως αυτή στην Εικόνα 27, είναι ικανή να καλύψει περισσότερο το επίπεδο από μια ομαλή καμπύλη, αλλά ακόμα και έτσι δεν γεμίζει ολόκληρο το επίπεδο. Τέλος, λόγω του απεριόριστου εύρους κλίμακας σε ένα φράκταλ (απεριόριστη μεγέθυνση), δεν μπορούμε ποτέ να θεωρήσουμε ότι μια οσοδήποτε μικρή περιοχή το φράκταλ μοιάζει με ένα  $n$ -διαστάσεων ευκλείδειο αντικείμενο. Οι ανωτέρω εκτιμήσεις υποδηλώνουν ότι τα fractals μπορεί να θεωρηθούν ότι έχουν διαστάσεις διαφορετικές από εκείνες των παραδοσιακών γεωμετρικών αντικειμένων και μας αναγκάζουν να επανεξετάσουμε την έννοια της διάστασης. Η διάσταση fractal είναι ένα αδιάστατο μέγεθος που ποσοτικοποιεί την πολυπλοκότητα μίας δομής και μπορεί να υπολογιστεί τόσο σε fractal όσο και σε μη fractal αντικείμενα

Η ακόλουθη ανάλυση γίνεται για να επεκταθεί η έννοια της διάστασης από τα ευκλείδεια αντικείμενα σε δομές που θα θέλαμε να είναι ρητής (όχι ακέραιας) διάστασης. Αν θέλουμε να μετρήσουμε το μήκος του μοναδιαίου διαστήματος  $[0,1]$ , μπορούμε να υπολογίσουμε τον αριθμό των διαστημάτων μήκους  $\delta$  που χρειάζονται για να καλύψουν το διάστημα αυτό. Χρησιμοποιώντας βασικές γνώσεις μέτρησης για το μήκος, χρειαζόμαστε  $N_{o,1}(\delta)$  διαστήματα για την κάλυψη του  $[0,1]$ :

$$N_{[0,1]}(\delta) = \left(\frac{1}{\delta}\right)^1 \quad (Γ.1)$$

Για την μέτρηση μεγαλύτερων ή μικρότερων διαστημάτων, πολλαπλασιάζεται το διάστημα  $N_{[0,1]}$  με μια κατάλληλη σταθερά (το μήκος του διαστήματος), αλλά η εξάρτηση  $\delta^{-1}$  θα παραμείνει. Ομοίως, αν θέλουμε να μετρήσουμε την περιοχή της μοναδιαίας επιφάνειας  $[0,1] \times [0,1]$  μπορούμε να μετρήσουμε τον αριθμό των τετραγώνων της πλευράς  $\delta$  που χρειάζεται για να την καλύψουμε.

$$N_{[0,1] \times [0,1]}(\delta) = \left(\frac{1}{\delta}\right)^2 \quad (Γ.2)$$

Αν μετρήσουμε μεγαλύτερες ή μικρότερες τετράγωνες επιφάνειες, το αποτέλεσμα θα είναι το ίδιο μέχρι ένα σταθερό παράγοντα, διατηρώντας ειδικότερα την εξάρτηση  $\delta^{-2}$  του  $N_{[0,1] \times [0,1]}$ . Γενικότερα, αν θέλουμε να μετρήσουμε ένα  $n$ -διαστάσεων μοναδιαίο κύβο  $[0,1]^n$ , τότε χρειαζόμαστε  $n$ -κύβους με πλευρά  $\delta$ :

$$N_{[0,1]^n}(\delta) = \left(\frac{1}{\delta}\right)^n \quad (Γ.3)$$

Αυτό σημαίνει ότι μπορούμε να δούμε την εξάρτηση του  $\delta$  στον εκθέτη του  $N_{[0,1]^n}(\delta)$  ως τη διάσταση του συνόλου  $[0,1]^n$  και αυτή η διάσταση μπορεί να επεκταθεί σε δομές fractal σε όλες τις κλίμακες. Ο αριθμός  $N_E(\delta)$  είναι το πλήθος ενός συνόλου που χρειάζονται για να καλύψουμε μία δομή fractal, με  $E$  υποσύνολο του  $R^n$  με  $n$  κύβους ενός άλλου  $n$ -διαστάσεων συνόλου. Αν:

$$N_E(\delta) = C\delta^{-D} \quad (Γ.4)$$

Τότε έχουμε:

$$D = \frac{\ln C - \ln N_E(\delta)}{\ln \delta} \quad (Γ.5)$$

Για οριακές δομές fractal και αρκετά μεγάλο  $\delta$ , το  $N_E$  δεν εξαρτάται από το  $\delta$ . Ενώ γενικότερα ως διάσταση fractal ενός συσχετισμένα αυτοόμοιου συνόλου  $S$  ονομάζομαι ο λόγος

$$D = \frac{\log k}{\log M} \quad (Γ.6)$$

Με  $k$  το πλήθος των ισοδύναμων μερών στα οποία υποδιαιρείται το σύνολο  $S$  και  $M$  ο συντελεστής μεγέθυνσης (σταθερός παράγοντας) όπου κάθε ένα υποσύνολο μεγεθυνόμενο κατά  $M$  δίνει το σύνολο  $S$ .

### **Γ.3 Fractals και ηλεκτρομαγνητικά κύματα**

Ανωτέρω είδαμε ότι το βασικό χαρακτηριστικό των fractals είναι η αυτο-ομοιότητα και η δομή τους σε πολλές διαφορετικές κλίμακες. Αυτό το χαρακτηριστικό υποδηλώνει ότι τα fractals μπορεί να έχουν ρητή (μη ακέραια) διάσταση. Χρησιμοποιώντας τη δομή των fractals σε πολλές κλίμακες, είμαστε σε θέση να καθορίσουμε την διάσταση συναρτήσει της υφής για τις δομές fractals.

Η ανάλυση για τα fractals κάνει χρήση διαφόρων μέτρων μήκους (yardsticks) μεταβλητού μήκους, τόσο για την περιγραφή της κλίμακας μιας δομής fractal όσο και στη μέτρηση της διάστασης ενός fractal. Εξετάζοντας προβλήματα fractal ηλεκτροδυναμικής, μπορούμε να αναζητήσουμε ένα ηλεκτρομαγνητικό μέτρο σύγκρισης (yardstick) μεταβλητού μεγέθους. Το μήκος κύματος και το πλάτος των παλμών εξεταζόμενων κυμάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εργαλεία μεταβλητής κλίμακας με τα οποία μπορούμε να διερευνήσουμε δομές fractal στο φάσμα της συχνότητας και του χρόνου, αντίστοιχα. Επίσης μπορούν τέτοιου είδους εργαλεία στα προβλήματα της σκέδασης των κυμάτων από fractal επιφάνειες και υπερκατασκευές.





# Βιβλιογραφία

- [1] A. Kotopoulis, A. Malamou, G. Pouraimis, E. Kallitsis και P. Frangos, «Characterization of Rough Fractal Surfaces from Backscattered Radar Data,» *ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA*, τόμ. 22, αρ. 6, pp. 61-66, 2016.
- [2] A. Kotopoulis, G. Pouraimis, A. Malamou, E. Kallitsis και P. Frangos, «Characterization of rough fractal surfaces from backscattered radar data,» σε *CEMA 2016*, Athens, Greece, 2016.
- [3] T. Lo, H. Leung, J. Litva και S. Haykin, «Fractal characterisation of sea-scattered signals and detection of sea-surface targets,» *IEE Proceedings F (Radar and Signal Processing)*, τόμ. 140, αρ. 4, DOI:10.1049/ip-f-2.1993.0034, p. 243 - 250, 1993.
- [4] G. Pouraimis, A. Kotopoulis, N. Ampilova, I. Soloviev και P. Frangos, «Sea State Characterization Using Experimental One - Dimensional (1D) Radar Signatures at X - Band and Fractal Techniques,» σε *13th INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS, ELECTROMAGNETICS AND MEDICAL APPLICATIONS (CEMA'18)*, Sofia, 2018.
- [5] G. Pouraimis, A. Kotopoulis, E. Kallitsis και P. Frangos, «Sea State Determination Using Normalized Experimental One - Dimensional Radar Signatures At X - Band And Fractal Techniques,» σε *14th International Conference CEMA'19*, Sofia, 2019.
- [6] J. DeLorenzo. και E. Cassedy, «A Study of the Mechanism of Sea Surface Scattering,» *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, τόμ. 14, αρ. 5, pp. 611 - 620, 1966.
- [7] Beckmann, Petr και Spizzichino, *The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces*, Norwood, MA: Artech House, 1987.
- [8] B. Mandelbrot, «How Long Is the Coast of Britain? Statistical Self-Similarity and Fractional Dimension,» *Science*, τόμ. 156, αρ. 3775, pp. 636-8, 1967.
- [9] B. Mandelbrot, *The Fractal Geometry of Nature*, New York: W. H. Freeman and Company, 1977.
- [10] B. Mandelbrot, *Fractals: Form, Chance and Dimension*, W. H. Freeman and Company, 1977.
- [11] R. Axline και A. Fung, «Numerical Computation of Scattering from a Perfectly Conducting Random Surface,» *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, τόμ. 26, αρ. 3, pp. 482 - 488, 1978.

- [12] H. Allen, «Fractals And The River-Length Catchment-Area Ratio,» *Water Resources Bulletin*, τόμ. 24, αρ. 2, pp. 455-459, 1988.
- [13] S. Peleg, J. Naor, R. Hartley και D. Avnir, «Multiple resolution texture analysis and classification,» *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, τόμ. 6, αρ. 4, p. 518-523, 1984.
- [14] R. J. Papa και J. L. R. L. Taylor, «The Variation of Bistatic Rough Surface Scattering Cross Section for a Physical Optics Model,» *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, τόμ. 34, αρ. 10, pp. 1229 - 1237, 1986.
- [15] D. Jaggard και X. Sun, «Scattering from fractally corrugated surfaces,» *Journal of the Optical Society of America A*, τόμ. 7, pp. 1131-1139, 1990.
- [16] D. Jaggard και S. Xiaoguang, «Fractal surface scattering: A generalized Rayleigh solution,» *Journal of Applied Physics*, τόμ. 68, αρ. 11, pp. 5456 - 5462, 1991.
- [17] R. Renzo, B. Baldassare και L. B. Paolo, «Fractal relation of mainstream length to catchment area in river networks,» *Water Resources Research*, τόμ. 27, αρ. 3, pp. 381-387, 1991.
- [18] L. Guo και W. Zhen-Sen, «Electromagnetic Scattering from One-Dimension Fractal Surface,» *Chinese Physics Letters*, τόμ. 11, αρ. 5, p. 257, 1994.
- [19] N. Lin, H. Lee, S. Lim και K. Lee, «Wave Scattering from Fractal Surfaces,» *Journal of Modern Optics*, τόμ. 42, pp. 225-241, 1994.
- [20] S. Savaidis, P. Frangos, D. Jaggard και K. Hizanidis, «Scattering from fractally corrugated surfaces: An exact approach,» *Optics Letters*, τόμ. 20, αρ. 23, p. 2357, 1995.
- [21] J. Chen, T. Lo, H. Leung και J. Litva, «The use of fractals for modeling EM waves scattering from rough sea surface,» *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, τόμ. 34, αρ. 4, p. 966-972, 1996.
- [22] S. Savaidis, P. Frangos, D. Jaggard και K. Hizanidis, «Scattering from fractally corrugated surfaces with use of the extended boundary condition method,» *Journal of the Optical Society of America A*, τόμ. 14, pp. 475-485, 1997.
- [23] Y. Jihuan, F. Yidong, X. Jingming και G. Debiao, «Fractal characterization of electromagnetic scattering waves from rough sea surfaces,» 1998.
- [24] F. Berizzi, E. Dalle και M. G. Pinelli, «One-dimensional fractal model of the sea surface,» *IEE Proceedings - Radar Sonar and Navigation*, τόμ. 146, αρ. 1, p. 55-64, 1999.

- [25] B. Fabrizio και D. Enzo, «Fractal analysis of the signal scattered from the sea surface,» *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, τόμ. 47, αρ. 2, p. 324–338, 1999.
- [26] R. Esteller, G. Vachtsevanos, J. Echauz και B. Lilt, «Comparison of fractal dimension algorithms using synthetic and experimental data,» σε *Circuits and Systems, 1999. ISCAS '99. IEEE International Symposium on Proceedings of the 1999*, 1999.
- [27] L.-X. Guo και W. Zhen-Sen, «Electromagnetic Scattering from the Two-Dimensional Fractal Rough Surface,» *Chinese Physics Letters*, τόμ. 18, αρ. 1, p. 42, 2001.
- [28] L. Guo και W. Zhen-Sen, «Fractal model and electromagnetic scattering from time-varying sea surface,» *Electronics Letters*, τόμ. 36, αρ. 21, pp. 1810 - 1812, 2000.
- [29] D. Jaggard, A. Jaggard και P. Frangos , «Fractal electrodynamics: surfaces and superlattices,» *IEEE Press - Frontiers in Electromagnetics*, 2000.
- [30] A. O. Piinchuk και V. Gozhenko, «Electromagnetic Wave Scattering by Fractal Surface,» σε *International Conference on Electromagnetics of Complex Media*, Lisboa, 2000.
- [31] H. Weng, L. Zongqian και N. Liu, «Comparison of the Kirchoff model and the IEM model for rough surface scattering using numerical simulation,» σε *5th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory*, 2000.
- [32] E. Rosana, V. George, E. Javier και L. Brian, «A Comparison of waveform fractal dimension algorithms,» *IEEE Transactions on Circuits and Systems I Fundamental Theory and Applications*, τόμ. 48, αρ. 2, pp. 177 - 183, 2001.
- [33] L.-X. Guo, L.-c. Jiao και W. Zhen-Sen, «Electromagnetic Scattering from Two-Dimensional Rough Surface Using the Kirchhoff Approximation,» *Chinese Physics Letters*, τόμ. 18, αρ. 2, p. 214, 1999.
- [34] L. Zhong-Xin και J. Ya-Qiu, «Bistatic scattering from a fractal dynamic rough sea surface with a ship presence at low grazing-angle incidence using the GFBM/SAA,» *Microwave and Optical Technology Letters*, τόμ. 31, αρ. 2, pp. 146 - 151, 2001.
- [35] B. Fabrizio και D.-M. E., «Scattering from a 2-D sea fractal surface: Fractal analysis of the scattered signal,» *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, τόμ. 50, αρ. 7, p. 912–925, 2002.
- [36] Y. Chunhua και Z. Huaibei, «The study of electromagnetic scattering by a target with fractal rough surface,» σε *6th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory*, 2003.

- [37] M. Marco, B. Fabrizio και E. D. Mese, «On the Fractal Dimension of Sea Surface Backscattered Signal at Low Grazing Angle,» *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, τόμ. 52, αρ. 5, pp. 1193 - 1204, 2004.
- [38] S. Ahmed και T. G. Leonard, «Validity of the Kirchhoff approximation for electromagnetic wave scattering from fractal surfaces,» *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, τόμ. 42, αρ. 9, pp. 1860 - 1870, 2004.
- [39] H. Jing, T. Wen-Wen και G. Jianbo, «Detection of Low Observable Targets Within Sea Clutter by Structure Function Based Multifractal Analysis,» *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, τόμ. 54, αρ. 1, pp. 136 - 143, 2006.
- [40] X.-C. Ren και L.-X. Guo, «Fractal characteristics investigation on electromagnetic scattering from 2-D Weierstrass fractal dielectric rough surface,» *Chinese Physics B*, τόμ. 17, αρ. 8, p. 2956, 2008.
- [41] L. Bin, X. Yonglong, Z. Jinhui και C. Long, «Study on calculation models of curve fractal dimension,» σε *Sixth International Conference on Natural Computation*, Shandong, 2010.
- [42] O. Semchuk και M. Willander, «Features of electromagnetic waves scattering by surface fractal structures,» σε *Behavior of Electromagnetic Waves in Different Media and Structures*, Croatia, InTech, ISBN: 978-953-307-302-6, 2011, p. Ch. 2.
- [43] A. Zaleski, «Fractals and the Weierstrass Mandelbrot Function,» *Rose-Hulman Undergraduate Mathematics Journal*, τόμ. 13, αρ. 2, pp. 80 - 113, 2012.
- [44] I. Antonio, N. Antonio και R. Daniele, «Kirchhoff Scattering From Fractal and Classical Rough Surfaces: Physical Interpretation,» *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, τόμ. 61, αρ. 4, pp. 2156-2163, 2013.
- [45] L. Gen και M. Zhang, «Investigation on the scattering from onedimensional nonlinear fractal sea surface by second-order small-slope approximation,» *Progress In Electromagnetics Research*, τόμ. 133, pp. 425-441, 2013.
- [46] A. Malamou, C. Pandis, P. Stefaneas, A. Karakasiliotis, D. Kodokostas και P. Frangos, «Application of the modified fractal signature method for terrain classification from synthetic aperture radar images,» *Electronics and Electrical Engineering Journal*, τόμ. 20, αρ. 6, pp. 118-121, 2014.
- [47] Π. Φράγκος, Ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι τηλεπισκόπησης, Αθήνα: Παπασωτηρίου, 1999.
- [48] A. Ishimaru, «Rough Surface Scattering,» σε *Wave propagation and scattering in random media. Volume 1 - Single scattering and transport theory*, New York (NY, USA), Academic Press, 1978, pp. 455-485.

- [49] M. F. Chen και F. Adrian, «A numerical study of the regions of validity of the Kirchhoff and small-perturbation rough surface scattering models,» *Radio Science*, τόμ. 23, αρ. 2, pp. 163-170, 1988.
- [50] M. A. Isakovich, «The scattering of waves from a statistically rough surface,» *Zh. Eksp. Teor. Fiz.*, τόμ. 23, p. 305-314, 1952.
- [51] N. Ampilova και I. Soloviev, «On digital image segmentation based on fractal and multifractal methods,» Τόμ. 1 από 2 Conference Proceedings,, αρ. pp. 14-17, 2015.
- [52] D. Jaggard και Y. Kim, «Diffraction by band-limited fractal screens,» *J. Opt. Soc. Am. A*, τόμ. 4, pp. 1055-1062, 1987.
- [53] Y. Tang, H. Ma, D. Xi, X. Mao και C. Suen, «Modified fractal signature (MFS): a new approach to document analysis for automatic knowledge acquisition,» *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, τόμ. 9, αρ. 5, DOI:10.1109/69.634753, p. 747-762, 1997.
- [54] J. Hu, W.-W. Tung και J. Gao, «Detection of Low Observable Targets Within Sea Clutter by Structure Function Based Multifractal Analysis,» *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, τόμ. 54(1), pp. 136 - 143, 2006.
- [55] P. Z. Peebles, *Radar Principles*, New York, NY: John Wiley & Sons, Inc., 1998.
- [56] C. E. Shannon, «A Mathematical Theory of Communications,» *Bell System Technology Journal*, τόμ. 27, pp. 379-423, 1948.
- [57] N. 5.-8. A. F. Manual, *Radar Circuit Analysis*, Washington D.C.: Department of the Air Force, 1951.
- [58] F. E. Nathanson, P. J. Reilly και M. N. Cohen, *Radar Design Principles*, 2nd επιμ., Mendham, NJ: McGraw-Hill, Inc, 1999.
- [59] D. K. Barton και S. A. Leonov, *Radar Technology Encyclopedia*, Norwood, MA: Artech House, Inc, 1998.
- [60] B. R. Mahafza, *Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB*, Boca Raton, FL: CRC Press, Llc, 2000.
- [61] M. O. Kolawole, *Radar Systems, Peak Detection and Tracking*, Burlington, MA: Elsevier Science, 2002.
- [62] P. Lacomme, J. P. Hardange, J. C. Marchais και E. Normant, *Air and Spaceborne Radar Systems: An Introduction*, Norwich, NY: William Andrew Publishing, Llc, 2001.

- [63] H. Meikle, *Modern Radar Systems*, 2nd επιμ., Norwood, MA: Artech House, Inc, 2008.
- [64] G. W. Stimson, *Introduction to Airborne Radar*, 2nd επιμ., Mendham, NJ: SciTech Publishing, Inc, 1998.
- [65] M. I. Skolnik, *Radar Handbook*, 3rd Edition επιμ., New York: Mc-Graw Hill Companies, 2008.
- [66] R. G. Curry, *Radar System Performance Modelling*, Norwood, MA: Artech House, 2005.
- [67] Γ. Α. Σάγος και Ν. Γ. Μαλαχίας, *Αρχές Ραντάρ και Ηλεκτρονικού Πολέμου στην εποχή της Πληροφορικής*, Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2004.
- [68] B. R. Mahafza και Α. Ζ. Elsherbeni, *MATLAB Simulations for Radar Systems Design*, Boca Raton, FL: CRC Press, Llc, 2004.
- [69] N. Levanon, *Radar Principles*, New York, NY: John Wiley & Sons, Inc, 1988.
- [70] S. Kingsley και S. Quegan, *Understanding Radar Systems*, Berkshire, UK: McGraw-Hill International, 1992.
- [71] H. Maitre, *Processing of Synthetic Aperture Radar Images*, 2nd επιμ., Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc, 2008.
- [72] D. Massonnet και J. C. Souyris, *Imaging with Synthetic Aperture Radar*, Boca Raton, FL: CRC Press, 2008.
- [73] E. Brookner, *Radar Technology*, Dedham, MA: Artech House Inc, 1979.
- [74] D. Wehner, *High Resolution Radar*, Norwood, MA: Artech House Inc, 1995.
- [75] V. C. Chen και Η. Ling, *Time-Frequency Transforms for Radar Imaging and Signal Analysis*, Norwood, MA: Artech House Inc, 2002.
- [76] Σ. Μάιπας, Α. Νόννη, Α. Πολίτη, Η. Sarlanis και Ν. Καβαντζάς, «Γεωμετρία Fractal: Εκπαιδευτική και τεχνολογική καινοτομία από τη σχολική αίθουσα έως την έρευνα για τον καρκίνο – Παράδειγμα εφαρμογής στον καρκίνο του μαστού,» σε *Πανελλήνιο Συνέδριο Scientix για την εκπαίδευση STEM Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*, Αθήνα, 2018.
- [77] Α. Kostenko, Α. Ι. Nosich και Ι. Tishchenko, «Radar Prehistory, Soviet Side,» *Proc. of IEEE APS International Symposium 2001*, τόμ. vol.IV, p. p.44, 2003.

- [78] A. W. Rihaczek, *Principles of High-resolution Radar*, Norwood, MA: Artech House, Inc, 1996.
- [79] G. Morris και L. Harkness, *Airborne Pulsed Doppler Radar*, 2nd επιμ., Norwood, MA: Artech House, Inc, 1996.
- [80] T. G. Kostis, «Interferometric Inverse Synthetic Aperture Radar,» University College London, London, 2001.
- [81] J. S. Son, G. Thomas και B. C. Flores, *Range-Doppler Radar Imaging and Motion Compensation*, Norwood, MA: Artech House, Inc, 2001.
- [82] Hardange, J P, «Inverse Synthetic Aperture Radars,» σε *Fundamentals and Special Problems of Synthetic Aperture Radar*, Neuilly Sur Siene, France, 1992.
- [83] A. Karakasiliotis, A. Lazarov, P. Frangos, G. Boultadakis και G. Kalognomos, «Two-dimensional ISAR model and image reconstruction with stepped frequency-modulated signal,» *IET Signal Processing*, 2008.
- [84] E. D. Kallitsis, A. V. Karakasiliotis, G. E. Boultadakis και P. V. Frangos, «A Fully Automatic Autofocusing Algorithm for Post-processing ISAR Imaging based on Image Entropy Minimization,» Athens, Greece, 2011.
- [85] E. Kallitsis, G. Boultadakis, A. Karakasiliotis, I. Tseremoglou, E. Stergiannis, H. Hristakis, E. Grigoratou, A. Vagianou, P. Frangos, T. Kostis, E. Parkelis και S. Pintzos, «An Autofocusing Algorithm for Post-processing ISAR Imaging based on Image Entropy Minimization,» Athens, Greece.
- [86] O. Y. Semchuk, I. G. Grechko, D. L. Vodopianov και I. Y. Kunitska, «Features of Light Scattering by Surface Fractal Structures,» σε *Behaviour of Electromagnetic Waves in Different Media and*, τόμ. 13, Rijeka,, InTech, 2011, pp. 199-206.
- [87] A. Malamou, A. Karakasiliotis, E. Kallitsis, G. Boultadakis και P. Frangos, «An autofocusing algorithm for post-processing of synthetic,» σε *Proc. of International Conference CEMA 12*, Athens, 2012.
- [88] L. Rosenberg και S. Watts, «A review of high grazing angle sea-clutter,» σε *International Conference on Radar*, 2013.