



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ

ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Προσδιορισμός Τραχύτητας Επιφάνειας  
από Δεδομένα Οπισθοσκέδασης ΗΜ Κυμάτων  
με Εφαρμογή σε RADAR τύπου SAR**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΑΠΟΣΤΟΛΟΥ Δ. ΚΟΤΟΠΟΥΛΗ

Αθήνα, Ιούνιος 2024





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

**Προσδιορισμός Τραχύτητας Επιφάνειας  
από Δεδομένα Οπισθοσκέδασης ΗΜ Κυμάτων  
με Εφαρμογή σε RADAR τύπου SAR**

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

Απόστολου Δ. Κοτοπούλη

**Συμβουλευτική Επιτροπή:** Παναγιώτης Φράγκος

Ευστάθιος Συκάς

Αθανάσιος Παναγόπουλος

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 20<sup>η</sup> Ιουνίου 2024

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

.....  
Ευστάθιος Συκάς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

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

.....  
Γεώργιος Ματσόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

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

Αθήνα, Ιούνιος 2024

.....  
Απόστολος Δ. Κοτοπούλης

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

Copyright © Απόστολος Δ. Κοτοπούλης 2024

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

Υπάρχει εκτεταμένη βιβλιογραφία για ταξινόμηση γήινων επιφανειών, από εικόνες προερχόμενες από δορυφορικά ή αερομεταφερόμενα RADAR τύπου SAR, η οποία όμως βασίζεται στην χρήση τεχνικών επεξεργασίας εικόνας. Η ιδέα που οδήγησε στην πρωτοτυπία της παρούσας διατριβής είναι η ταξινόμηση και ειδικότερα ο προσδιορισμός της τραχύτητας μιας επιφάνειας αναλύοντας απευθείας τα οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρομαγνητικά (HM) κύματα ενός RADAR τύπου SAR χωρίς χρήση τεχνικών δημιουργίας και επεξεργασίας εικόνας. Με την παρούσα διατριβή εξετάζω αυτή την δυνατότητα σε δύο φάσης.

Στην πρώτη φάση (θεωρητικό επίπεδο) προσομοιώνω το πρόβλημα με χρήση μαθηματικών μοντέλων. Για την προσομοίωση των επιφανειών χρησιμοποιώ μορφοκλασματικά μοντέλα 'fractals' τύπου 'Weierstrass – Mandelbrot', ενώ για την προσομοίωση των φαινομένων σκέδασης των HM κυμάτων χρησιμοποιώ την μαθηματική προσέγγιση 'Kirchhoff approximation' (KA). Προσομοιώνοντας τις ριπές 'burst' των εκπομπών ενός RADAR προς μια επιφάνεια, ως  $M$  διαδοχικούς παλμούς HM κυμάτων μιας βηματικά αυξανόμενης συχνότητας, προτείνω μια καινοτόμο μέθοδο προσδιορισμού της τραχύτητας της επιφάνειας η οποία βασίζεται στην απευθείας ανάλυση των  $M$  διαδοχικών τιμών έντασης των οπισθοσκεδαζόμενων HM κυμάτων που προκύπτουν μετά από κάθε μία ριπή RADAR.

Στη δεύτερη φάση (πειραματικό επίπεδο) ο προσδιορισμός της τραχύτητας εξειδικεύεται σε προσδιορισμό της κυμάτωσης που επικρατεί σε μια θαλάσσια επιφάνεια αναλύοντας πραγματικές μετρήσεις έντασης HM κυμάτων προερχόμενες από ένα αερομεταφερόμενο PicoSAR RADAR. Για την βελτίωση του σηματοθορυβικού λόγου, την εξάλειψη θορύβων στο οπισθοσκεδαζόμενο HM σήμα, χρησιμοποίησα τεχνικές στατιστικής ανάλυσης, όπως φίλτρα ενδοτεταρτημοριακού εύρους 'IQR' και τεχνικές συμψηφισμού 'averaging'. Για τον προσδιορισμό της τραχύτητας χρησιμοποιώ δύο διαφορετικούς αλγόριθμους. Ο πρώτος αλγόριθμος, 'ανάλυση μονοδιάστατων υπογραφών Radar', επεξεργάζεται τα οπισθοσκεδαζόμενα HM κύματα ανά ριπή RADAR, ως μονοδιάστατα διανύσματα μήκους  $M$  διαδοχικών παλμών έντασης  $E$ , όπου με τεχνικές μορφοκλασματικής ανάλυσης υπολογίζει την μέση τιμή του μορφοκλασματικού μήκους, MFL 'Mean Fractal Length'  $N$  διαδοχικών ριπών. Η τιμή MFL αποδεικνύεται αξιόπιστο μέτρο της θαλάσσιας κυμάτωσης, 'sea state'. Ο δεύτερος αλγόριθμος, 'ανάλυση διοδιάστατων υπογραφών Radar', επεξεργάζεται τα οπισθοσκεδαζόμενα HM κύματα,  $M$  παλμών ανά ριπή ανά  $N$  διαδοχικές ριπές, ως διοδιάστατα διανύσματα ενός πίνακα  $M \times N$  όπου οι τιμές έντασης  $E$  του HM κύματος δημιουργούν την διάσταση του ύψους στην επιφάνεια των  $M \times N$  διαστάσεων. Εφαρμόζοντας 'multi-resolution fractal analysis' επί της τριοδιάστατης αυτής επιφάνειας των μετρήσεων έντασης, υπολογίζω την μορφοκλασματική της υπογραφή 'fractal signature'. Η μέση τιμή  $D_\mu$  της μορφοκλασματικής υπογραφής, ήτοι MFS 'Mean Fractal Signature', αποδεικνύεται ως ένα εξαιρετικά αντιπροσωπευτικό μέτρο για την τραχύτητα μιας επιφάνειας και ακριβής δείκτης για τον προσδιορισμό της θαλάσσιας κυμάτωσης.

Την παρούσα διατριβή ολοκληρώνω με μια πρακτική εφαρμογή - επαλήθευση. Ανασύρω με χρονολογική σειρά το σύνολο των διαθέσιμων καταγραφών, 'raw data', του αερομεταφερόμενου RADAR και υπολογίζω την μέση τιμή MFS/ $D_\mu$  που αντιστοιχεί σε κάθε 3,5 δευτερόλεπτα πτήσης. Λαμβάνοντας την τιμή  $D_\mu(t)$  ως μέτρο της θαλάσσιας κυμάτωσης και αντιπαραβάλλοντας τις τιμές  $D_\mu$  με τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες προκύπτει ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος εντοπίζει με εξαιρετική επιτυχία και συνέπεια την θαλάσσια κυμάτωση 'sea state' που επικρατούσε στην περιοχή καθ' όλη την διάρκεια της πτήσεως.

## Λέξεις κλειδιά

Σκέδαση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, Οπισθοσκέδαση, Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος, Ακατέργαστα Δεδομένα Ραντάρ, Επεξεργασία σήματος Ραντάρ, Μορφοκλασματική επιφάνεια, Μορφοκλασματική ανάλυση, Μορφοκλασματική διάσταση, Μορφοκλασματικό μήκος, Μορφοκλασματική υπογραφή, Τραχύτητα επιφάνειας, Θαλάσσια κατάσταση.



# Abstract

There is an extensive literature on classification of Earth's surface using images derived from satellite or airborne SAR RADARs based on image processing techniques. The idea that led to the unique concept of this dissertation is the classification and in particular the characterization of the roughness of a surface by directly analyzing the backscattered electromagnetic (EM) waves of a RADAR without image formation and image processing techniques. In this PhD dissertation I defend this proposal on theoretical as well as on practical results.

As part of the first phase, theoretical approach, I developed an EM wave scattering simulation software. For rough surfaces simulation, I use a modified '*Weierstrass-Mandelbrot*' fractal function. To simulate EM wave scattering on these '*fractal*' surfaces, I use the '*Kirchhoff approximation*' (KA) model. By simulating RADAR emissions as '*burst*' of  $M$  successive pulses of EM waves of a stepped frequency, an innovative method of determining the surface roughness is proposed and verified based on the direct analysis of the  $M$  successive intensity values of the backscattered EM waves resulting after each burst.

As part of the second phase, experimental approach, I extend the research to determine the roughness of a real surface and in particular to determine the '*sea state*' of a marine area by directly analyzing the backscattered EM waves originating from bursts of an airborne PicoSAR RADAR. For the signal preprocessing stage, namely SNR improvement, noise elimination, I use statistical analysis techniques, '*averaging*' techniques, as well as intra-quartile range '*IQR*' statistical filters. For the signal processing, namely roughness determination, I use two different algorithms. The first algorithm, '*analysis of one-dimensional Radar signatures*,' processes the backscattered amplitudes of EM waves per burst of  $M$  successive pulses, i.e. as one-dimensional  $M$ -sized vectors and calculates the '*fractal length*' of each vector separately. The mean value of '*fractal length*' from  $N$  successive vectors equals to the *MFL* value, namely '*Mean Fractal Length*'. As demonstrated in this dissertation, the *MFL* value can successfully function as measure of '*sea state*' index. The second algorithm, '*analysis of two-dimensional Radar signatures*' processes the intensity measurements of the backscattered EM waves as a two-dimensional  $M \times N$  array, where  $M$  is the number of pulses per burst and  $N$  the number of successive bursts. The intensity measurements of  $E$  thus create the dimension of height on this  $M \times N$  surface. By applying '*multi-resolution fractal analysis*' on this three-dimensional surface of the intensity measurements, I calculate the '*fractal signature*'. The average value  $D\mu$  of the '*fractal signature*', namely *MFS* '*Mean Fractal Signature*' proves to be a highly representative measure of the surface roughness and an accurate index of the '*sea state*'.

I conclude this dissertation with a practical application of the above so as to verify the proposed method. I retrieve in chronological order the set of all '*raw data*' recordings of the airborne RADAR and by using the *MFS* algorithm, a  $D\mu$  value is calculated for every 3.5 seconds of flight time. By comparing the  $D\mu(t)$  value as a measure of the '*sea state*' with the prevailing weather conditions according to meteorological data, it follows that the proposed algorithm determines '*sea state*' with an excellent success and consistency throughout the flight.

## Keywords

Scattering of electromagnetic waves, Backscattering, Kirchhoff Approximation, Synthetic Aperture Radar, SAR raw data, Radar signal processing, Weierstrass-Mandelbrot functions, AWGN, Fractal surfaces, Fractal analysis, Multi-resolution Fractal analysis, Fractal area, Fractal dimension, Fractal length, Fractal Signature, Rough surface, Sea State.





# Ευχαριστίες

Η παρούσα διδακτορική διατριβή αποτελεί το επιστέγασμα μιας πολυετούς και εξαιρετικά επίπονης ερευνητικής εργασίας. Στο μεγαλύτερο μέρος της ήταν ένα μοναχικό ταξίδι αναζήτησης καινούργιας γνώσης το οποίο όμως δύσκολα θα μπορούσα να είχα ολοκληρώσει χωρίς την εξαιρετική καθοδήγηση του Καθηγητού μου, του κ. Παναγιώτη Φράγκου, τον οποίο και ευχαριστώ εκ βάθους καρδίας για την αμέριστη βοήθεια που μου προσέφερε καθόλη την διάρκεια της διδακτορικής μου διατριβής.

Δεν υπάρχει αμφιβολία ότι τα συστήματα RADAR ανήκουν σε ένα από τα πιο απαιτητικά διεπιστημονικά πεδία και αισθάνομαι πολύ τυχερός που είχα την ευκαιρία να γίνω μέλος της ερευνητικής ομάδας του Εργαστηρίου Συστημάτων RADAR και Τηλεπικοινωνιών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και ευχαριστώ τον Καθηγητή μου κ. Φράγκο για την τιμή και την δυνατότητα που μου έδωσε να συνεργαστώ απ' ευθείας με καθηγητές ξένων πανεπιστημίων και να αντλήσω έτσι ανεκτίμητες εμπειρίες και γνώσεις από τόσο διαφορετικά θεματικά πεδία.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω και όλους τους συνυποψηφίους διδάκτορες του εργαστηρίου παλαιότερους και νεότερους, ιδιαιτέρως την Άννα Μαλάμου, τον Γιώργο Πουραϊμη, τον Βασίλη Μασσίνα με τους οποίους είχα μια καθόλα άψογη και εξαιρετικά παραγωγική συνεργασία. Να ευχαριστήσω και τον συνάδελφο και προϊστάμενο μου στην Υπηρεσία Πολιτικής Αεροπορίας, τον Δρ. Ευάγγελο Καλλίτση, που με προέτρεψε να ασχοληθώ με την έρευνα στα συστήματα RADAR και με σύστησε στον Καθηγητή μας τον κ. Φράγκο. Τον ευχαριστώ και για τις επισημάνσεις του στο τελικό κείμενο της παρούσας διατριβής χάρη στις οποίες βελτίωσα αρκετά σημεία.

Ευχαριστώ πολύ και τα μέλη της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής για την τιμή που μου έκαναν να αποδεχθούν την πρόσκληση καθώς και για τον χρόνο που αφιέρωσαν για την αξιολόγηση της εργασίας μου. Ιδιαιτέρως δε να ευχαριστήσω και τον καθηγητή μου τον κ. Συκά ο οποίος είχε κάνει αρχικά δεκτή την αίτησή μου για εκπόνηση διδακτορικής διατριβής με αντικείμενο τα δίκτυα επικοινωνιών με επίγνωση περιβάλλοντος - IoT και που ακόμα και όταν στην πορεία το θέμα της έρευνάς μου άλλαξε, προς την κατεύθυνση των συστημάτων RADAR, συνέχισε να με στηρίζει παραμένοντας μέλος και της νέας συμβουλευτικής επιτροπής.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου Δημήτριο και Μαρίνα γιατί με το παράδειγμά τους, μέσα από τον καθημερινό αγώνα της ζωής, με δίδαξαν να σέβομαι τον Θεό, να αγαπώ τον συνάνθρωπο και να αγωνίζομαι, χωρίς να υπολογίζω χρόνο και κόπο, για το αϊέν άριστεύειν.



Αφιερώνω την παρούσα  
στα δύο μου παιδιά  
Δημήτριο και Αθανάσιο

παραινῶ δε ὑμᾶς

«αἰὲν ἀριστεύειν...  
μηδὲ γένος πατέρων  
αἰσχυνέμεν» (Ιλιάδα, Ζ-208)



# Κατάλογος Περιεχομένων

Περίληψη.....	5
Abstract .....	7
Ευχαριστίες.....	9
Κατάλογος Περιεχομένων .....	13
Κατάλογος Εικόνων .....	17
Γλωσσάριο τεχνικών όρων .....	27
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>29</b>
Σκοπός Διατριβής .....	29
Δομή παρούσας εργασίας.....	29
<b>1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> ΘΕΩΡΙΑ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΣΚΕΔΑΣΗΣ ΑΠΟ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ FRACTAL.33</b>	
1.1 Προσομοίωση επιφάνειας με χρήση ‘ <i>fractals</i> ’ .....	35
1.1.1 Η έννοια της μορφοκλασματικής διάστασης ‘ <i>fractal dimension</i> ’ .....	35
1.1.2 Η συνάρτηση <i>Weierstrass</i> ως βάση δημιουργίας ‘ <i>fractal</i> ’ επιφάνειας .....	39
1.1.3 Παράμετροι και ρυθμίσεις της τροποποιημένης <i>Weierstrass</i> συνάρτησης .....	41
1.1.4 Προσομοίωση τραχύτητας για διαφορετικές τιμές ‘ <i>fractal dimension</i> ’ <i>D</i> .....	45
1.2 Προσομοίωση Σκέδασης Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων. ....	46
1.2.1 Γεωμετρία του προβλήματος σκέδασης ΗΜ από τραχεία επιφάνεια.....	46
1.2.2 Υπολογισμός εξίσωσης γενικής περίπτωσης σκέδασης με Kirchhoff .....	47
1.3 Εισαγωγή στην έννοια του συντελεστή σκέδασης $\gamma$ .....	53
1.3.1 Συντελεστής σκέδασης $\gamma$ επί ‘ <i>fractal</i> ’ επιφάνειας $S(x,y)=f_r(x)$ .....	56
1.4 Βιβλιογραφία.....	57
<b>2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΠΟ ΟΠΙΣΘΟΣΚΕΔΑΖΟΜΕΝΑ ΗΜ ΚΥΜΑΤΑ .....</b>	<b>59</b>
2.1 Εισαγωγή στα διαγράμματα του συντελεστή σκέδασης $\gamma$ .....	61
2.1.1 Διάγραμμα συντελεστή σκέδασης $\gamma=\gamma(\theta_2)$ .....	62
2.1.2 Διάγραμμα συντελεστή σκέδασης $\gamma=\gamma(k)$ .....	63
2.2 Σχέση διαγραμμάτων σκέδασης $\gamma(k)$ με το ‘ <i>fractal dimension</i> ’ <i>D</i> .....	64
2.3 Υπολογισμός κλίσεων ‘ <i>slopes</i> ’ στα διαγράμματα σκέδασης $\gamma(k)$ .....	67
2.4 Μέθοδος Προσδιορισμού Τραχύτητας Επιφάνειας $D=f(\text{slope})$ .....	68
2.4.1 Υπολογισμός συναρτησιακής σχέσης μεταξύ μεταβλητών ‘ <i>D</i> ’ & ‘ <i>slope</i> ’ .....	70
2.5 Παράμετροι που επηρεάζουν την μέθοδο $D=f(\text{slope})$ .....	71
2.5.1 Επίδραση εύρους ζώνης ‘ <i>bandwidth</i> ’ – <i>BW</i> .....	71
2.5.2 Επίδραση αριθμού βημάτων <i>M</i> και μεγέθους βημάτων συχνότητας $\Delta f$ .....	74
2.5.3 Επίδραση μεγέθους επιφάνειας σκέδασης ‘ <i>patch-size</i> ’. .....	75
2.5.4 Συνδυαστική επίδραση εύρους ζώνης ‘ <i>bandwidth</i> ’ και ‘ <i>patch-size</i> ’ .....	77

2.5.5	Επίδραση της γωνίας πρόσπτωσης $\theta_1$ .....	79
2.6	Αξιολόγηση της μεθόδου παρουσία ηλεκτρονικού θορύβου.....	83
2.6.1	Προσθήκη ‘Additive White and Gaussian Noise’ στο σήμα $\gamma(k)$ .....	84
2.6.2	Υπολογισμός σήματος $\gamma_{noisy}$ για δημιουργία συγκεκριμένης στάθμης SNR.....	85
2.6.3	Επίδραση της στάθμης θορύβου στην μέθοδο των κλίσεων ‘slope’.....	85
2.6.4	Προτεινόμενη βελτίωση της μεθόδου για αντιστάθμιση στον θόρυβο.....	87
2.7	Ανακεφαλαίωση και Συμπεράσματα.....	90
2.8	Βιβλιογραφία.....	92
<b>3</b>	<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΚΥΜΑΤΩΣΗΣ ΜΕ 1D-FRACTAL ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ RADAR.....</b>	<b>95</b>
3.1	Εισαγωγή στο πείραμα NEMO2014 και παρουσίαση 1D υπογραφών RADAR.....	97
3.2	Αλγόριθμος προσδιορισμού κυμάτωσης με 1D fractal ανάλυση (MFL).....	100
3.3	Εφαρμογή ‘blanket’ σε 1D καταγραφές και υπολογισμός του ‘Fractal Length’ ....	101
3.4	Υπολογισμός του ‘Mean Fractal Length’ (MFL).....	107
3.4.1	Calculation-Processing tool για υπολογισμό MFL.....	108
3.4.2	Αποτελέσματα 1D μορφοκλασματικής ανάλυσης (μέθοδος MFL). .....	109
3.5	Αξιολόγηση αποτελεσμάτων.....	114
3.5.1	Ο δείκτης Sea State Index ως βελτίωση του κριτηρίου MFL.....	115
3.6	Ανακεφαλαίωση και Συμπεράσματα.....	117
3.7	Βιβλιογραφία.....	118
<b>4</b>	<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΚΥΜΑΤΩΣΗΣ ΜΕ 2D FRACTAL ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ RADAR.....</b>	<b>121</b>
4.1	Εισαγωγή στην έννοια της δισδιάστατης υπογραφής RADAR.....	123
4.2	Αλγόριθμος προσδιορισμού κυμάτωσης με 2D ανάλυση υπογραφών (MFS/D $\mu$ )	126
4.3	Στάδια Προεπεξεργασίας των 3D - SAR Raw Data.....	127
4.3.1	Απόρριψη μεταβατικών & ελλαττωματικών καταγραφών. ....	127
4.3.2	Data & Noise reduction με χρήση τεχνικής ‘signal averaging’.....	130
4.3.3	Φιλτράρισμα θορύβου εξάρσεων ‘spikes’.....	133
4.3.4	Κανονικοποίηση με βάση το ‘Dynamic Range’ της εξόδου του RADAR.....	136
4.3.5	Παρουσίαση των σταδίων προ-επεξεργασίας σε δείγμα καταγραφών.....	137
4.4	Στάδια Επεξεργασίας των 3D SAR Raw Data.....	139
4.4.1	Θεωρία ‘blanket’, ‘fractal Dimension’ D, ‘fractal Signature’ D( $\delta$ ).....	140
4.4.2	Εφαρμογή ‘blanket’ σε 2D υπογραφές RADAR & υπολογισμός του fractal signature – D( $\delta$ ). 143	
4.5	Υπολογισμός ‘fractal signature’ σε καταγραφές του πειράματος NEMO2014.....	147
4.5.1	Calculation-Processing tool για MFS (Mean Fractal Signature).....	148
4.5.2	Αποτελέσματα μορφοκλασματικής ανάλυσης με την μέθοδος MFS. ....	149
4.6	Αξιολόγηση αποτελεσμάτων.....	151

4.7 Ανακεφαλαίωση και Συμπεράσματα .....	155
4.8 Βιβλιογραφία.....	157
<b>5 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup> ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ: «ΧΡΗΣΗ RADAR SAR ΓΙΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΚΥΜΑΤΩΣΗΣ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΧΡΟΝΟ» .....</b>	<b>161</b>
5.1 Πρακτική εφαρμογή - ‘real time’ προσδιορισμός θαλάσσιας κυμάτωσης .....	162
5.1.1 Διάγραμμα ροής αλγόριθμου υπολογισμού $Dm(t)$ .....	163
5.2 Διάγραμμα ‘fractal dimension’ $Dm$ ως προς τον χρόνο .....	164
5.3 Διάγραμμα ‘fractal dimension’ $Dm$ ως προς ‘grazing angle’ $\theta g$ .....	166
5.3.1 Υπολογισμός συναρτησιακής σχέσης μεταξύ $Dm$ και γωνίας θέασης $\theta g$ .....	167
5.4 Βελτίωση στο υπολογισμό του $Dm$ με αντιστάθμιση της γωνίας πρόσπτωσης ....	168
5.5 Ανακεφαλαίωση .....	170
<b>6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ .....</b>	<b>171</b>
6.1 Συνεισφορά της παρούσας διδακτορικής εργασίας.....	171
6.2 Γενική Σύνοψη .....	171
6.3 Σύνοψη ανά κεφάλαιο και προτάσεις για μελλοντική έρευνα .....	172
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΩΝ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ .....</b>	<b>275</b>

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

<b>A. ‘SCATTERINGLAB’ - ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΗΜ ΣΚΕΔΑΣΕΩΝ .....</b>	<b>179</b>
A1. Εισαγωγική παρουσίαση λογισμικού ‘ScatteringLab’ .....	181
A2. Ρυθμίσεις στην δομή της επιφάνειας ‘fractal’ .....	184
A3. Ρυθμίσεις των παραμέτρων του ΗΜ κύματος.....	186
A4. Ρυθμίσεις σε διαγράμματα σκέδασης $\gamma(\theta_2)$ .....	187
A5. Ρυθμίσεις σε διαγράμματα οπισθοσκέδασης $\gamma(k)$ ή $\gamma(f)$ .....	191
A6. Μετρήσεις κλίσεων και Ανάλυση συσχέτισης $slope=f(D)$ .....	195
A7. Εκτίμηση τραχύτητας - ‘fractal dimension’ από την σχέση $D=f(slope)$ .....	203
A8. Εκτίμηση τραχύτητας ‘fractal dimension’ από την σχέση $D=f(\delta\gamma)$ .....	209
<b>B. ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΚΕΔΑΣΗΣ ΤΟΥ ‘SCATTERINGLAB’ .</b>	<b>211</b>
B1. Συγκρίσεις διαγραμμάτων σκέδασης $\gamma(\theta_2)$ για διαφορετικής τραχύτητας επιφάνειες..	212
B2. Συγκρίσεις διαγραμμάτων σκέδασης $\gamma(\theta_2)$ για διαφορετικού μεγέθους επιφάνειες..	214
B.2.1. Ελάχιστο χωρικό μήκος ‘ $\Lambda_0$ ’ και μήκος ‘patch-size’ .....	216

<b>Γ. 'SAR RAW DATA ANALYZER' – ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΩΝ RADAR.....</b>	<b>217</b>
Γ.1. Δομή και βασικές λειτουργίες του λογισμικού .....	219
Γ.2. Φόρτωση καταγραφών και ομαδοποίηση σε δέσμες 'batch' .....	222
Γ.3. Παρουσίαση των SAR raw data.....	224
Γ.3.1. Δισδιάστατη παρουσίαση (2D) σε μορφή εικόνας (png) .....	224
Γ.3.2. Αποθήκευση καταγραφών SAR raw data σε μορφή εικόνας τύπου png.....	228
Γ.3.3. Τρισδιάστατη παρουσίαση (3D) .....	228
Γ.3.4. Στατιστική παρουσίαση των SAR raw data.....	231
Γ.3.5. Ρυθμίσεις σε άξονες διαγραμμάτων .....	240
Γ.3.6. Εντοπισμός θέσης προβληματικών μετρήσεων και διαλείψεων.....	241
Γ.4. Αλγόριθμοι προ-επεξεργασίας ( <i>data reduction &amp; noise filtering</i> ) .....	243
Γ.4.1. Κανονικοποίηση δεδομένων (SAR raw data rescaling) .....	245
Γ.4.2. Φιλτράρισμα ακραίων τιμών (SAR raw data outliers filtering) .....	247
Γ.5. Μείωση του όγκου των δεδομένων προς επεξεργασία ( <i>data reduction</i> ).....	258
Γ.5.1. Μείωση διαστάσεων δεδομένων .....	258
Γ.5.2. Μείωση όγκου δεδομένων δια αντιπροσώπευσης ' <i>averaging</i> ' .....	260
<b>Δ. ΠΕΙΡΑΜΑ NEMO2014 – ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΛΗΨΗΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΑΠΟ RADAR ΤΥΠΟΥ SAR</b>	<b>263</b>
Δ.1. Πείραμα NEMO 2014 .....	264
Δ.1.1. Εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για το πείραμα .....	264
Δ.1.2. Τοποθεσία NEMO 2014 και περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας .....	265
Δ.1.3. Χαρακτηρισμός ' <i>sea state</i> ' με βάση την ταχύτητα του ανέμου.....	268
Δ.2. Λήψεις μετρήσεων - αρχεία καταγραφής πειράματος NEMO.....	270



# Κατάλογος Εικόνων

## Κεφάλαιο 1ο

### Θεωρία ηλεκτρομαγνητικής σκέδασης από επιφάνειες fractal

Εικόνα 1-1. Η φτέρη του Barnsley .....	35
Εικόνα 1-2. Η ακτογραμμή της Μ. Βρετανίας μετρημένη με διαφορετικού μήκους 'δ' κανόνες μέτρησης.....	36
Εικόνα 1-3. Log-Log διάγραμμα αριθμού τμημάτων ως προς μήκος τμήματος 'δ' .....	37
Εικόνα 1-4. Modified Weierstrass-Mandelbrot 'fractal' function .....	40
Εικόνα 1-5. Weierstrass-Mandelbrot 'fractal' function .....	40
Εικόνα 1-6. Μονοδιάστατη 'fractal' συνάρτηση $f_r(x)$ για διαφορετικές τιμές $D$ 'fractal dimension' .....	45
Εικόνα 1-7. Γεωμετρία προβλήματος σκέδασης επί επιφάνεια 'fractal' επιφάνειας[20] .....	46
Εικόνα 1-8. Γεωμετρία προβλήματος σκέδασης ΗΜ κύματος επί μονοδιάστατης επιφάνειας .....	48
Εικόνα 1-9. Υπολογισμός του σκεδαζόμενου ΗΜ πεδίου στο σημείο P .....	49
Εικόνα 1-10. Εφαπτόμενο επίπεδο σε τυχαίο σημείο της τραχείας επιφάνειας. Η ακτίνα καμπυλότητας είναι (α) μεγάλη, (β) μικρή συγκρινόμενη με το μήκος κύματος .....	50
Εικόνα 1-11. Η συνεχώς μεταβαλλόμενη τοπική γωνία $\theta$ και η σταθερή γωνία πρόσπτωσης $\theta_1$ .....	51
Εικόνα 1-12. Γεωμετρία προβλήματος σκέδασης ΗΜ κύματος επί μονοδιάστατης 'fractal' επιφάνειας .....	56

## Κεφάλαιο 2ο

### Προσδιορισμός τραχύτητας επιφάνειας από οπισθοσκεδαζόμενα ΗΜ κύματα

Εικόνα 2-1. Γεωμετρία προβλήματος σκέδασης ΗΜ κύματος επί μονοδιάστατης 'fractal' επιφάνειας .....	61
Εικόνα 2-2. Διάγραμμα συντελεστή σκέδασης $\gamma(\theta_2)$ για $-90^\circ < \theta_2 < 90^\circ$ και γωνία πρόσπτωσης $\theta_1=30^\circ$ σε επιφάνεια με τραχύτητα 'fractal dimension' $D=1.75$ σε πολικές συντεταγμένες και κλίμακα db. ....	62
Εικόνα 2-3. Διάγραμμα συντελεστή σκέδασης $\gamma(\theta_2)$ για $-90^\circ < \theta_2 < 90^\circ$ και γωνία πρόσπτωσης $\theta_1=30^\circ$ σε επιφάνεια με τραχύτητα 'fractal dimension' $D=1.55$ .....	62
Εικόνα 2-4. Διάγραμμα συντελεστή σκέδασης $\gamma(\theta_2)$ για $-90^\circ < \theta_2 < 90^\circ$ και γωνία πρόσπτωσης $\theta_1=30^\circ$ σε μια σχεδόν λεία επιφάνεια. ....	62
Εικόνα 2-5. Διάγραμμα συντελεστή σκέδασης $\gamma(k)$ , σε καρτεσιανέ συντεταγμένες και κλίμακα db για γωνία πρόσπτωσης $\theta_1=25^\circ$ , γωνία οπισθοσκέδασης $\theta_2=-25^\circ$ επί επιφάνειας με τραχύτητα 'fractal dimension' $D=1.75$ .....	63
Εικόνα 2-6. Διάγραμμα συντελεστή σκέδασης $\gamma(k)$ , ως συνεχόμενη γραμμή σε γραμμική κλίμακα για γωνία πρόσπτωσης $\theta_1=25^\circ$ , γωνία οπισθοσκέδασης $\theta_2=-25^\circ$ επί επιφάνειας με τραχύτητα 'fractal dimension' $D=1.75$ .....	64
Εικόνα 2-7. Διαγράμματα σκέδασης $\gamma(k)$ για γωνία πρόσπτωσης $\theta_1=25^\circ$ επί επιφανειών με τραχύτητες - 'fractal dimension' $D=1.05, 1.30, 1.55$ και $1.85$ .....	65
Εικόνα 2-8. Δείγματα τομών 'fractal' επιφανειών παραγόμενα από την σχέση (1.25) για μεταβαλλόμενες τιμές τραχύτητας - 'fractal dimension' από $1.05 < D < 1.95$ .....	65

Εικόνα 2-9. Διαγράμματα σκέδαση $\gamma(k)$ για γωνία πρόσπτωσης $\theta_1=25^\circ$ επί επιφανειών με τραχύτητες - 'fractal dimension' $D=1.05, 1,30, 1.55$ και $1.85$ .....	66
Εικόνα 2-10. Διαγράμματα σκέδαση $\gamma(k)$ για γωνία πρόσπτωσης $\theta_1=30^\circ$ επί επιφανειών με τραχύτητες - 'fractal dimension' $D=1.05, 1,30, 1.55$ και $1.85$ .....	67
Εικόνα 2-11. Καταγραφές των κλίσεων 'slope' συναρτήσει της τιμής του 'fractal dimension' $D$ για γωνία πρόσπτωσης $\theta_1=30^\circ$ .....	68
Εικόνα 2-12. Διάγραμμα εκτίμησης του 'Fractal dimension' $D$ με την μέθοδο των κλίσεων 'slope' συχνότητα $f_0=10\text{GHz}$ , βήμα μεταβολής $\Delta f=20\text{MHz}$ και με γωνία πρόσπτωσης $\theta_1=30^\circ$ .....	69
Εικόνα 2-13. Επίδραση του εύρους ζώνης στο διάγραμμα του συντελεστή σκέδασης $\gamma(k)$ αποτελέσματα προσομοιώσεων για 'fractal dimension' $D$ 1.15, 1.35, 1.55, 1.75, 'patch size' 80λ, γωνία πρόσπτωσης $\theta_1=25^\circ$ , αρχική συχνότητα $f_0=10\text{GHz}$ και βήμα μεταβολής $\Delta f=20\text{MHz}$ .....	72
Εικόνα 2-14. Επίδραση του εύρους ζώνης στην εκτίμηση του 'Fractal dimension' $D$ αποτελέσματα σειράς προσομοιώσεων με κανονικοποιημένες $[0,1]$ τις τιμές 'slope' για $BW=[250, 500, 1000]\text{MHz}$ , αρχική συχνότητα $f_0=10\text{GHz}$ και γωνία πρόσπτωσης $\theta_1=30^\circ$ .....	73
Εικόνα 2-15. Επίδραση παραμέτρων $\Delta f, M$ στην εκτίμηση του 'Fractal dimension' $D$ , μέσος όρος αποτελεσμάτων από μια σειρά 180 προσομοιώσεων για ζευγάρια τιμών $M*\Delta f=[20*50\text{MHz}, 25*40\text{MHz}, 50*20\text{MHz}, 100*10\text{MHz}]$ , 'patch size' 80λ αρχική συχνότητα $f_0=10\text{GHz}$ και γωνία πρόσπτωσης $\theta_1=30^\circ$ .....	74
Εικόνα 2-16. Επίδραση patch-size στο διάγραμμα $\gamma(k)$ , αποτελέσματα σειράς προσομοιώσεων για $D=1.55$ , συχνότητα $f_0=10\text{GHz}$ , $BW=1000\text{MHz}$ , γωνία πρόσπτωσης $\theta_1=30^\circ$ .....	75
Εικόνα 2-17. Επίδραση του 'patch-size' στην κλίση 'slope', σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ 'patch size' 40λ και 120λ για $D=1.75$ , συχνότητα $f_0=10\text{GHz}$ , $BW=1000\text{MHz}$ και $\theta_1=25^\circ$ .....	76
Εικόνα 2-18. Επίδραση 'patch size' στην εκτίμηση του 'Fractal dimension' $D$ κανονικοποιημένη σύγκριση μεταξύ 'patch size', 40λ, 80λ, 160λ και 320λ συχνότητα $f_0=10\text{GHz}$ , $BW=1000\text{MHz}$ και γωνία πρόσπτωσης $\theta_1=25^\circ$ .....	76
Εικόνα 2-19. Εκτίμηση του 'fractal dimension' $D$ , υπό γωνία πρόσπτωσης $\theta_1=25^\circ$ , $f_0=10\text{GHz}$ για συνδυασμό 'patch size' 40λ και $BW=2500\text{MHz}$ .....	78
Εικόνα 2-20. Εκτίμηση του 'fractal dimension' $D$ , υπό γωνία πρόσπτωσης $\theta_1=25^\circ$ , $f_0=10\text{GHz}$ για συνδυασμό 'patch size' 40λ και $BW=1000\text{MHz}$ .....	78
Εικόνα 2-21. Η γωνία πρόσπτωσης $\theta_1$ , 'incident angle', του ΗΜ κύματος ως προς την κάθετο στην επιφάνεια 'fractal' .....	79
Εικόνα 2-22. Εκτίμηση του 'fractal dimension' $D$ , υπό γωνία πρόσπτωσης $\theta_1=40^\circ$ .....	81
Εικόνα 2-23. Εκτίμηση του 'fractal dimension' $D$ , υπό γωνία πρόσπτωσης $\theta_1=30^\circ$ .....	81
Εικόνα 2-24. Εκτίμηση του 'fractal dimension' $D$ , υπό γωνία πρόσπτωσης $\theta_1=20^\circ$ .....	81
Εικόνα 2-25. Εκτίμηση του 'fractal dimension' $D$ , υπό γωνία πρόσπτωσης $\theta_1=10^\circ$ .....	81
Εικόνα 2-26. Εκτίμηση του 'fractal dimension' $D$ , υπό γωνία πρόσπτωσης $\theta_1=50^\circ$ .....	82
Εικόνα 2-27. Εκτίμηση του 'fractal dimension' $D$ , υπό γωνία πρόσπτωσης $\theta_1=60^\circ$ .....	82
Εικόνα 2-28. Εκτίμηση του 'fractal dimension' $D$ , υπό γωνία πρόσπτωσης $\theta_1=80^\circ$ .....	82
Εικόνα 2-29. Εκτίμηση του 'fractal dimension' $D$ , υπό γωνία πρόσπτωσης $\theta_1=70^\circ$ .....	82
Εικόνα 2-30. Συντελεστής σκέδασης $\gamma(k)_{noisy}$ παρουσία θορύβου με $\text{SNR}=23\text{db}$ .....	86
Εικόνα 2-31. Συντελεστής σκέδασης $\gamma(k)_{noisy}$ παρουσία θορύβου με $\text{SNR}=12\text{db}$ .....	86

Εικόνα 2-32. Συντελεστής σκέδασης $\gamma(k)_{noisy}$ παρουσία θορύβου με $SNR=0db$ .....	87
Εικόνα 2-33. Συντελεστής σκέδασης με $SNR=12db$ πριν & μετά το <i>signal averaging</i> .....	88
Εικόνα 2-34. Συντελεστής σκέδασης με $SNR=0db$ πριν & μετά το <i>signal averaging</i> .....	89

### Κεφάλαιο 3ο

#### Προσδιορισμός θαλάσσιας κυμάτωσης με 1D ανάλυση δεδομένων radar

Εικόνα 3-1. Κατακόρυφη κίνηση ελικοπτέρου εκπέμποντας HM ριπές με μεταβαλλόμενη γωνία, 'grazing angle' $\theta_g$ , ως προς τη θάλασσα.....	97
Εικόνα 3-2. Από αέρος φωτογραφία θάλασσας για την 1 <sup>η</sup> ημέρα μετρήσεων (23/9).....	97
Εικόνα 3-3. Από αέρος φωτογραφία θάλασσας για την 2 <sup>η</sup> ημέρα μετρήσεων (24/9).....	97
Εικόνα 3-4. Δείγμα λήψης από τον δέκτη του PicoSAR RADAR από την 1 <sup>η</sup> ημέρα μετρήσεων 23/09, για παραγμένη θάλασσα υπό γωνία 'grazing angle' $\theta_g=39^\circ$ .....	99
Εικόνα 3-5. Δείγμα λήψης από τον δέκτη του PicoSAR RADAR από την 2 <sup>η</sup> ημέρα μετρήσεων 24/09, για ήρεμη θάλασσα υπό γωνία 'grazing angle' $\theta_g=39^\circ$ .....	99
Εικόνα 3-6. Διάγραμμα αλγόριθμου προσδιορισμού θαλάσσιας κυμάτωσης με βάση τον υπολογισμό του 'Mean Fractal Length' - MFL.....	100
Εικόνα 3-7. Log-Log διάγραμμα αριθμού τμημάτων ( $N$ ) ως προς το μήκος τμήματος ' $\delta$ ' .....	102
Εικόνα 3-8. Η ακτογραμμή της Μ. Βρετανίας μετρημένη με διαφορετικού μήκους 'κανόνες' ..	102
Εικόνα 3-9. Τεχνική 'Blanket' με zoom σε 100 'range bins' για $\delta=2$ .....	104
Εικόνα 3-10 Επιλογές Blankets .....	105
Εικόνα 3-11. Τεχνική 'blanket' σε 'range profile' με για $\delta=5$ ( $\alpha$ ) και $\delta=2$ ( $\beta$ ).....	105
Εικόνα 3-12. Υπολογισμός FL( $\delta$ ) συναρτήσεως του $\delta$ σε διάγραμμα log-log από 'range profile' παραγμένης θάλασσας υπό γωνία $\theta_g=39^\circ$ .....	106
Εικόνα 3-13. Υπολογισμός FL( $\delta$ ) συναρτήσεως του $\delta$ σε διάγραμμα log-log από 'range profile' ήρεμης θάλασσας υπό γωνία $\theta_g=39^\circ$ .....	106
Εικόνα 3-14. Επιλογές επεξεργασίας.....	108
Εικόνα 3-15. Δείγμα καταγραφών δέσμης γωνιών $10^\circ < \theta_g < 12^\circ$ αριστερά από παραγμένη θάλασσα 5.000ms, δεξιά από ήρεμη θάλασσα 10.000ms.....	110
Εικόνα 3-16. Υπολογισμός MFL διαδοχικών 'range profiles' για γωνίες $10^\circ < \theta_g < 12^\circ$ με πράσινο το MFL κοματώδους, με μπλε το MFL ήρεμης θάλασσας.....	110
Εικόνα 3-17. Δείγμα καταγραφών δέσμης γωνιών $20^\circ < \theta_g < 22^\circ$ αριστερά από παραγμένη θάλασσα 1.000ms, δεξιά από ήρεμη θάλασσα 5.500ms .....	111
Εικόνα 3-18. Υπολογισμός MFL διαδοχικών 'range profiles' για γωνίες $20^\circ < \theta_g < 22^\circ$ με πράσινο το MFL κοματώδους, με μπλε το MFL ήρεμης θάλασσας.....	111
Εικόνα 3-19. Δείγμα καταγραφών δέσμης γωνιών $30^\circ < \theta_g < 32^\circ$ αριστερά από παραγμένη θάλασσα 3.000ms, δεξιά από ήρεμη θάλασσα 9.000ms .....	111
Εικόνα 3-20. Υπολογισμός MFL διαδοχικών 'range profiles' για γωνίες $30^\circ < \theta_g < 32^\circ$ με πράσινο το MFL κοματώδους, με μπλε το MFL ήρεμης θάλασσας.....	112
Εικόνα 3-21. Δείγμα καταγραφών δέσμης γωνιών $40^\circ < \theta_g < 42^\circ$ αριστερά από παραγμένη θάλασσα 1.650ms, δεξιά από ήρεμη θάλασσα 22.000ms .....	112

Εικόνα 3-22. Υπολογισμός MFL διαδοχικών ‘range profiles’ για γωνίες $40^\circ < \theta_g < 42^\circ$ με πράσινο το MFL κυματώδους, με μπλε το MFL ήρεμης θάλασσας .....	112
Εικόνα 3-24. Υπολογισμός MFL διαδοχικών ‘range profiles’ για γωνίες $50^\circ < \theta_g < 52^\circ$ με πράσινο το MFL κυματώδους, με μπλε το MFL ήρεμης θάλασσας .....	113
Εικόνα 3-23. Δείγμα καταγραφών δέσμης γωνιών $50^\circ < \theta_g < 52^\circ$ αριστερά από παραγμένη θάλασσα 3.100ms, δεξιά από ήρεμη θάλασσα 19.000ms.....	113
Εικόνα 3-25. Σύγκριση αποτελεσμάτων για όλες τις γωνίες από παραγμένη (πράσινο) και ήρεμη (μπλε) θάλασσα.....	115
Εικόνα 3-26. Σχέση γωνίας θέασης ‘grazing angle’ με γωνία πρόσπτωσης ‘incidence angle’ .....	116

## Κεφάλαιο 4ο

### Προσδιορισμός θαλάσσιας κυμάτωσης με 2D ανάλυση δεδομένων radar

Εικόνα 4-2. Φωτογραφία της θάλασσας από την 2 <sup>η</sup> ημέρα μετρήσεων, 24/9.....	123
Εικόνα 4-3. Φωτογραφία της θάλασσας από την 1 <sup>η</sup> ημέρα μετρήσεων, 23/9.....	123
Εικόνα 4-4. Μονοδιάστατο δείγμα υπογραφής, $M=574$ , από τον δέκτη του RADAR για παραγμένη θάλασσα υπό γωνία $\theta_g=10^\circ$ (1 <sup>η</sup> ημέρα μετρήσεων 23/09) (1 <sup>η</sup> ημέρα μετρήσεων 23/09) .....	124
Εικόνα 4-5. Διοδιάστατο δείγμα υπογραφής $M \times N=350 \times 574$ από τον δέκτη του RADAR για παραγμένη θάλασσα υπό γωνίες $9.8^\circ < \theta_g < 10.4^\circ$ (1 <sup>η</sup> ημέρα μετρήσεων 23/09) .....	124
Εικόνα 4-6. Σχηματισμός μιας μονοδιάστατης υπογραφής ‘range profile’ .....	125
Εικόνα 4-7. Σχηματισμός μιας διοδιάστατης υπογραφής ‘two dimensional range profile’ .....	125
Εικόνα 4-8. Διάγραμμα ροής των αλγόριθμων προ-επεξεργασίας και επεξεργασίας για τον προσδιορισμό της θαλάσσιας κυμάτωσης μέσω 2D ανάλυσης των SAR raw data .....	126
Εικόνα 4-9. Boxplot παρουσίαση SAR raw data, του συνόλου των καταγραφών της 2 <sup>ης</sup> ημέρας 24/09 .....	128
Εικόνα 4-10. Boxplot παρουσίαση SAR raw data, εντοπισμός και εστίαση στις έγκυρες καταγραφές της 2 <sup>ης</sup> ημέρας 24/09 .....	128
Εικόνα 4-11. Τριοδιάστατη παρουσίαση δέσμης ριπών με σημείωση των μεταβατικών ‘range bin’ .....	129
Εικόνα 4-12 Τριοδιάστατη παρουσίαση δέσμης ριπών μετά την αφαίρεση μεταβατικών περιοχών που δεν επηρεάζουν τους υπολογισμούς της μορφοκλασματικής ανάλυσης .....	130
Εικόνα 4-13, Δείγμα τριοδιάστατης παρουσίασης δέσμης 3500 ριπών πριν το averaging .....	131
Εικόνα 4-14 Δείγμα τριοδιάστατης παρουσίασης δέσμης 3500 ριπών μετά από averaging ανά 10 ριπές.....	131
Εικόνα 4-15, Στατιστική παρουσίαση Μέσου όρου και MaxMin του συνόλου των καταγραφών .....	132
Εικόνα 4-16 Τριοδιάστατης παρουσίασης δέσμης 3500 ριπών μετά από averaging & φίλτρο IQR .....	133
Εικόνα 4-17. Παρουσίαση ‘boxplot’ πριν (α) και μετά (β) την εφαρμογή φίλτρου IQR.....	134
Εικόνα 4-18. Σύγκριση μεταξύ καταγραφών μετά από προ-επεξεργασία μόνο averaged (α), averaged & IQR filtered (β) και μόνο IQR filtered (γ) .....	135
Εικόνα 4-19. Δείγμα ‘range profile’ - SAR raw data πριν (α) και μετά (β) την κανονικοποίηση... 136	

Εικόνα 4-20. Δείγμα δισδιάστατης υπογραφής από παραγμένη θάλασσα πριν τα στάδια προεπεξεργασίας (η 3 <sup>η</sup> διάσταση είναι ο χρόνος καταγραφής-‘ <i>slow time</i> ’) .....	137
Εικόνα 4-21. Δείγμα δισδιάστατης υπογραφής από παραγμένη θάλασσα μετά το 1 <sup>ο</sup> στάδιο προεπεξεργασίας - <i>averaged 1:10</i> .....	138
Εικόνα 4-22. Δείγμα δισδιάστατης υπογραφής από παραγμένη θάλασσα μετά το 2 <sup>ο</sup> στάδιο προεπεξεργασίας - <i>filtrated with IRQ</i> .....	138
Εικόνα 4-23. Δείγμα δισδιάστατης υπογραφής από παραγμένη θάλασσα μετά το 3 <sup>ο</sup> στάδιο προεπεξεργασίας - <i>Normalized</i> .....	138
Εικόνα 4-24. Τεχνική ‘κουβέρτας’, σκεπάζοντας με δύο επιφάνειες $u_{\delta}(i,j)$ & $b_{\delta}(i,j)$ την επιφάνεια $g(i,j)$ σε απόσταση ‘ $\delta$ ’ εκατέρωθεν.....	143
Εικόνα 4-25. Βελτιωμένος υπολογισμός εμβαδού $A(\delta)$ για μη fractal επιφάνειες με την εφαρμογή της σχέσης (4.21).....	144
Εικόνα 4-26. Διάγραμμα Ροής αλγόριθμων επεξεργασίας.....	147
Εικόνα 4-27. Επιλογές επεξεργασίας.....	148
Εικόνα 4-28. 3D παρουσίαση των SAR raw data μετά την προ επεξεργασίας τους από παραγμένη ( $\beta$ ) και ήρεμη ( $\gamma$ ) θάλασσα για ‘ <i>grazing angles</i> ’ από 7 <sup>ο</sup> έως 10 <sup>ο</sup> .....	149
Εικόνα 4-29. Σε κοινό γράφημα οι μορφοκλασματικές υπογραφές από δείγματα ήρεμης(μπλε) και κυματώδους θάλασσας (πράσινο) υπό διαφορετικές γωνίες $\theta g$ ‘ <i>grazing angle</i> ’, $\theta g \geq 38^{\circ}$ .....	150
Εικόνα 4-30. Σε κοινό γράφημα οι μορφοκλασματικές υπογραφές από δείγματα ήρεμης(μπλε) και κυματώδους θάλασσας (πράσινο) υπό διαφορετικές γωνίες $\theta g$ ‘ <i>grazing angle</i> ’, $\theta g \leq 38^{\circ}$ .....	150
Εικόνα 4-31. Μεγέθυνση του φαινομένου της εξάρτησης της μορφοκλασματικής υπογραφής από την γωνία πρόσπτωσης των HM κυμάτων .....	152
Εικόνα 4-32. Ήρεμη θάλασσα. Λόγω δημιουργίας ‘κατοπτρικού’ σκεδαστή μόνο κατά διαστήματα εμφανίζεται σημαντική οπισθοσκέδαση .....	153
Εικόνα 4-33. Κυματώδης θάλασσα. Δημιουργία μιας, σχεδόν μόνιμης, οπισθοσκέδασης λόγω σημαντικής τραχύτητας.....	153

## Κεφάλαιο 5ο

### Πρακτική Εφαρμογή: «Χρήση RADAR SAR για Προσδιορισμό θαλάσσιας κυμάτωσης σε πραγματικό χρόνο»

Εικόνα 5-1. Διάγραμμα ροής των αλγόριθμων προ-επεξεργασίας και επεξεργασίας για τον υπολογισμό και την καταγραφή της τιμής $D_{\mu}$ ως προς τον χρόνο .....	163
Εικόνα 5-2. Συνεχής προσδιορισμός της θαλάσσιας κυμάτωσης με μετρήσεις κάθε 3,5 sec. Διάγραμμα $D_{\mu}$ ως προς το χρόνο καταγραφής των μετρήσεων κατά την κατακόρυφη κίνηση του ελικοπτερου και το ‘σκανάρισμα’ της θάλασσας από 15 <sup>ο</sup> έως 50 <sup>ο</sup> .....	165
Εικόνα 5-3. Συνεχής προσδιορισμός της θαλάσσιας κυμάτωσης με μετρήσεις κάθε 3,5 sec. Διάγραμμα $D_{\mu}$ ως προς την γωνία λήψης των μετρήσεων κατά την κατακόρυφη κίνηση του ελικοπτερου και το ‘σκανάρισμα’ της θάλασσας από 15 <sup>ο</sup> έως 50 <sup>ο</sup> .....	166
Εικόνα 5-4. Εξισώσεις ευθείας ελαχίστων τετραγώνων (μαύρες γραμμές) για τις μετρήσεις της 1 <sup>ης</sup> ( <i>sea state 1</i> ) και της 2 <sup>ης</sup> ημέρας ( <i>sea state 4</i> ).....	167
Εικόνα 5-5. Προσδιορισμός της θαλάσσιας κυμάτωσης με τις τιμές $D_{\mu}$ να είναι διορθωμένες ως προς την εξάρτηση της ανακλαστικότητας της θαλάσσιας επιφάνειας συναρτήσει της γωνίας $\theta g$ .....	168

Εικόνα 5-6. Προσομοίωση προσδιορισμού της θαλάσσιας κυμάτωσης σε πραγματικό χρόνο με μετρήσεις της τιμής  $D$  διορθωμένης κατά ένα παράγοντα  $-\beta \cdot \theta g$  ..... 169

## Παράρτημα Α.

### 'ScatteringLab' - Λογισμικό Προσομοίωσης ΗΜ Σκεδάσεων

Εικόνα A-1. Διάγραμμα σκέδασης $\gamma(\theta)$ σε $db$ με $x=35db$ fractal.....	181
Εικόνα A-2. Υφή επιφάνειας σκέδασης & παράμετροι επιφάνειας fractal.....	185
Εικόνα A-3. Διάγραμμα σκέδασης $\gamma(\theta)$ σε καρτεσιανές συντεταγμένες και γραμμική κλίμακα.....	188
Εικόνα A-4. Διάγραμμα σκέδασης $\gamma(\theta)$ σε καρτεσιανές συντεταγμένες και κλίμακα σε $db$ .....	188
Εικόνα A-5. Διάγραμμα σκέδασης $\gamma(\theta)$ σε καρτεσιανές συντεταγμένες και κλίμακα σε $db$ με μετατόπιση $x=35db$ .....	189
Εικόνα A-6. Διάγραμμα σκέδασης $\gamma(\theta)$ σε πολικές συντεταγμένες και κλίμακα $db$ .....	189
Εικόνα A-7. Διάγραμμα πολικό σε καρτεσιανές συντεταγμένες.....	190
Εικόνα A-8. Ρυθμίσεις Οπισθοσκέδασης.....	191
Εικόνα A-9. Διάγραμμα $\gamma(f)$ για $\theta_2=-\theta_1=-25^\circ$ , $D=1.75$ .....	191
Εικόνα A-10. Διάγραμμα $\gamma(k)$ για $\theta_2=-\theta_1=-25^\circ$ , $D=1.75$ και για συχνότητες από 10GHz έως 11GHz, επιλογή 'SlopeR&L'.....	192
Εικόνα A-11. Διάγραμμα $\gamma(k)$ για $\theta_2=-\theta_1=-25^\circ$ , $D=1.75$ και για συχνότητες από 10GHz έως 11GHz, επιλογή 'Envelope'.....	192
Εικόνα A-12. Διάγραμμα $\gamma(k)$ για $\theta_2=-\theta_1=-25^\circ$ , $D=1.75$ και συχνότητες από 10GHz έως 11GHz, επιλογή 'Allslopes'.....	193
Εικόνα A-13. Διάγραμμα $\gamma(k)$ για $\theta_2=-\theta_1=-25^\circ$ , $D=1.75$ και συχνότητες από 10GHz έως 11GHz, επιλογή 'Normalize'.....	193
Εικόνα A-14. Διάγραμμα $\gamma(k)$ για $\theta_2=-\theta_1=-25^\circ$ , $D=1.75$ και συχνότητες από 10GHz έως 11GHz με επιλογή 'burst'.....	194
Εικόνα A-15. Διάγραμμα $\gamma(k)$ για $\theta_2=-\theta_1=-25^\circ$ , $D=1.75$ και συχνότητες από 10GHz έως 11GHz, επιλογή 'SNR=10db'.....	194
Εικόνα A-16. Διάγραμμα $\gamma(k)$ για $\theta_2=-\theta_1=-25^\circ$ , $D=1.75$ και συχνότητες από 10GHz έως 11GHz με επιλογή 'Avg=30'.....	195
Εικόνα A-17. Μετρήσεις κλίσεων 'slopes' και ανάλυση συσχέτισης $slopes$ vs. $fractal$ dimension $D$ .....	195
Εικόνα A-18. Διάγραμμα $\gamma(k)$ για $\theta_2=-\theta_1=-25^\circ$ , με ριπές από συχνότητα 10GHz έως 11GHz και μεταβαλλόμενη τραχύτητα - 'fractal dimension' $D$ .....	197
Εικόνα A-19. Διάγραμμα 'Slope vs D' με καμπύλες Γκαουσιανής προσαρμογής στα σημεία μετρήσεων. Μπλε δεξιές και κόκκινες αριστερές μετρήσεις κλίσεων αντίστοιχα.....	198
Εικόνα A-20. Διάγραμμα 'Slope vs D' με τις μετρήσεις δεξιάς (μπλε χρώμα) και αριστερής (κόκκινο χρώμα) κλίσης.....	198
Εικόνα A-21. Διάγραμμα 'Slope vs D' με μετρήσεις δεξιάς (μπλε), αριστερής (κόκκινο) και μέση τιμή κλίσης (μαύρο) $Slope(R+L)/2$ .....	199
Εικόνα A-22. Διάγραμμα 'Slope vs D' με Γκαουσιανή προσαρμογή στις κανονικοποιημένες μέσες τιμές κλίσεων.....	200

Εικόνα A-23. Διάγραμμα 'Slope vs D' με πολυωνυμική προσαρμογή στις κανονικοποιημένες μέσες τιμές κλίσεων .....	200
Εικόνα A-24. Διάγραμμα $\gamma(k)$ για $\theta_2=-\theta_1=-25^\circ$ , $D=1.45$ συχνότητες από 10GHz έως 11GHz με επιλογή 'Allslopes' .....	201
Εικόνα A-25. Διάγραμμα $\gamma(k)$ για $\theta_2=-\theta_1=-25^\circ$ , $D=1.75$ συχνότητες από 10GHz έως 11GHz με επιλογή 'Allslopes' .....	201
Εικόνα A-26. Διάγραμμα 'D vs slope' με χρήση του μέσου όρου των τιμών των κλίσεων, επιλογή <S> .....	201
Εικόνα A-27. Διάγραμμα 'Slope vs D' σχεδιασμένο με βάση την μέση τιμή κλίσης $Slope(R+L)/2$ και με επιλογή <p> .....	202
Εικόνα A-28. Διάγραμμα 'Slope vs D' σχεδιασμένο με βάση την μέση τιμή κλίσης $Slope(R+L)/2$ .....	202
Εικόνα A-29. Εκτίμηση του 'fractal dimension' $D$ μιας επιφάνειας μετρώντας την κλίση 'slope' στο διάγραμμα $\gamma(k)$ .....	203
Εικόνα A-30. Διάγραμμα διασποράς μεταβλητών $D$ vs slope για γωνία πρόπτωσης $\theta_1=25^\circ$ .....	204
Εικόνα A-34. $D=f(slope)$ με επιλογή 'quadratic fit' .....	206
Εικόνα A-33. $D=f(slope)$ με επιλογή 'Gaussian fit' .....	206
Εικόνα A-32. $D=f(slope)$ με επιλογή 'power fit' .....	207
Εικόνα A-31. $D=f(slope)$ με επιλογή 'log fit' .....	207
Εικόνα A-35. $D=f(slope)$ με επιλογή 'power fit', 'bounds' & 'table', για γωνία πρόπτωσης $\theta_1=25^\circ$ .....	207
Εικόνα A-36. $D=f(\delta\gamma)$ με επιλογή 'power fit', 'bounds' & 'table', για γωνία πρόπτωσης $\theta_1=25^\circ$ ...	209

## **Παράρτημα Β.**

### **Επαλήθευση αλγόριθμου προσομοίωσης σκέδασης του λογισμικού 'ScatteringLab'**

Εικόνα B-1. Διαγράμματα σκέδασης $\gamma(\theta_2)$ σε db. για διαφορετικές τιμές 'fractal dimension' $D$ (τραχύτητες επιφάνειας) με προσομοιώσεις με τον 'ScattringLab' .....	212
Εικόνα B-2. Διαγράμματα σκέδασης $\gamma(\theta)$ σε db. για διαφορετικές τιμές 'fractal dimension' $D$ από την δημοσίευση των Jaggard & Sun .....	213
Εικόνα B-3. Διαγράμματα σκέδασης $\gamma(\theta_2)$ σε db. για διαφορετικά 'patch size' (μήκος) επιφάνειας σκέδασης από την δημοσίευση των Jaggard & Sun .....	214
Εικόνα B-4. Διαγράμματα σκέδασης $\gamma(\theta_2)$ σε db. για διαφορετικά 'patch size' επιφάνειας σκέδασης μετά από προσομοιώσεις με την βοήθεια του 'ScatterinLab' .....	215

## **Παράρτημα Γ.**

### **'SAR raw data Analyzer' - Λογισμικό Ανάλυσης καταγραφών Radar**

Εικόνα Γ-1, Λογισμικό SARrawdataAnalyzer, παρουσίαση σε αντιπαραβολή των καταγραφών SAR raw data 3-D analysis .....	218
Εικόνα Γ-2. Λογισμικό SARrawdataAnalyzer, παρουσίαση σε αντιπαραβολή καταγραφών SAR raw data 2-D analysis .....	218
Εικόνα Γ-3. Γράφημα μεμονωμένου 'range profile' ως ένταση HM κόματος ως προς 'range bin' σε συγκεκριμένη γωνία (χρόνο) .....	220

Εικόνα Γ- 4. Επιλογές αλγόριθμων προ-επεξεργασίας και τρόποι παρουσίασης SAR raw-data.	221
Εικόνα Γ- 5. Επιλογές αλγόριθμων επεξεργασίας των SAR raw data και τρόποι παρουσίασης αποτελεσμάτων.....	222
Εικόνα Γ- 6. Επιλογή αρχείου καταγραφών .....	222
Εικόνα Γ- 7. Δείγμα λίστας με τα αρχεία καταγραφής του πειράματος NEMO2014 .....	223
Εικόνα Γ- 8. επιλογές εικονικής παρουσίασης .....	224
Εικόνα Γ- 9. gray-scaled image of SAR raw data .....	225
Εικόνα Γ- 10. Color-scaled image of SAR raw data.....	225
Εικόνα Γ- 11. Color-scaled image of SAR raw data with values in db.....	226
Εικόνα Γ- 12. Gray-scaled image of SAR raw data with values in db.....	226
Εικόνα Γ- 13. Gray-scaled SAR raw data image after Chebyshev filtration.....	227
Εικόνα Γ- 14. Color-scaled SAR raw data image after Chebyshev filtration.....	227
Εικόνα Γ- 15. Τρισδιάστατη παρουσίαση τη ίδιας δέσμης SAR raw data ως προς το ‘fast time’ (ns) .....	229
Εικόνα Γ- 16. Τρισδιάστατη παρουσίαση SAR raw data ως προς το ‘slow time’ (ms).....	229
Εικόνα Γ- 17. Τομή τρισδιάστατου γραφήματος ως προς τον άξονα του χρόνου καταγραφής ‘slow time’ .....	230
Εικόνα Γ- 18. Επιλογές συνοπτικής παρουσίασης με την μορφή στατιστικών .....	231
Εικόνα Γ- 19. Διάγραμμα μέσης τιμής διαδοχικών range profiles ως προς το fast time .....	233
Εικόνα Γ- 20. Διάγραμμα μέσης τιμής διαδοχικών range profiles ως προς το slow time.....	233
Εικόνα Γ- 21. Διάγραμμα τοπικής απόκλισης διαδοχικών range profiles ως προς slow time.....	234
Εικόνα Γ- 22. Διάγραμμα τοπικής απόκλισης διαδοχικών range profiles ως προς fast time .....	234
Εικόνα Γ- 23. Διάγραμμα MaxMin ως προς fast time.....	235
Εικόνα Γ- 24. Διάγραμμα MaxMin ως προς slow time .....	235
Εικόνα Γ- 25. Διάγραμμα μέσης τιμής & τοπικής απόκλισης των range profiles ανά μονάδα χρόνου (slow time) .....	235
Εικόνα Γ- 26. Διάγραμμα ‘πλασιού-απολήξεων’ ‘box & whisker plot’ ή ‘five-number summary’ ...	236
Εικόνα Γ- 27. Μεγέθυνση των Boxplot των ‘range profiles’ 160-175.....	238
Εικόνα Γ- 28. Διάγραμμα Boxplot μια δέσμης από 350 διαδοχικά ‘range profiles’ .....	238
Εικόνα Γ- 29. Πληροφορίες boxplot ‘five-number summary’ από ένα συγκεκριμένο ‘range profile’	239
Εικόνα Γ- 30. Γραφήματα γωνίας ανά μονάδα χρόνου 1 <sup>ης</sup> ημέρας αριστερά και 2 <sup>ης</sup> δεξιά .....	240
Εικόνα Γ- 31. Γραφήματα γωνίας ανά μονάδα χρόνου με την τροχιά της 2 <sup>ης</sup> ημέρας ανοδική....	240
Εικόνα Γ- 32. Γράφημα γωνίας ανά μονάδα χρόνου (pulse index as a serial number).....	241
Εικόνα Γ- 33. Γράφημα γωνίας ανά μονάδα χρόνου (pulse index as original sample number) .	241
Εικόνα Γ- 34. Συνολικό γράφημα γωνιών ανά μονάδα χρόνου μετά από την παράληψη των διαλείψεων.....	242
Εικόνα Γ- 35. Επιλογές προ-επεξεργασίας .....	243



Εικόνα Γ- 36. Δέσμη 350 range profiles ως 3D - raw data.....	245
Εικόνα Γ- 37. Δέσμη 350 'range profiles' rescaled στο εύρος 0 έως 255 - (normalized batch) .....	245
Εικόνα Γ- 38. Κανονικοποίηση με βάση το <i>dynamic range</i> του δέκτη (normalized full).....	246
Εικόνα Γ- 39. 2D color scaled Unfiltered Normalized vs Filtered & Normalized raw data.....	248
Εικόνα Γ- 40. 3D Unfiltered Normalized data vs Filtered & Normalized raw data.....	248
Εικόνα Γ- 41. 2D gray scaled Unfiltered Normalized vs Filtered & Normalized raw data.....	248
Εικόνα Γ- 42. Εντοπισμός ακραίων και 'ύποπτα' ακραίων τιμών.....	251
Εικόνα Γ- 43. Τριοδιάστατη παρουσίαση δέσμης 350 range profiles αφιλτράριστη από ακραίες τιμές.....	252
Εικόνα Γ- 44. Τομή τριοδιάστατης δέσμης 350 range profiles αφιλτράριστη από ακραίες τιμές.....	252
Εικόνα Γ- 45. Τριοδιάστατη παρουσίαση δέσμης N=350 'range profiles' φιλτραρισμένη με επιλογή [batch] .....	253
Εικόνα Γ- 46. Τομή της τριοδιάστατης δέσμης της εικόνας Γ-45. ....	253
Εικόνα Γ- 47. Τριοδιάστατη παρουσίαση δέσμης N=350 'range profiles' φιλτραρισμένη, επιλογή [range].....	254
Εικόνα Γ- 48. Τομή της τριοδιάστατης δέσμης της εικόνας Γ-47 .....	254
Εικόνα Γ- 49. Παρουσίαση δέσμης N=3500 με αφιλτράριστα SAR raw data.....	256
Εικόνα Γ- 50. Παρουσίαση δέσμης N=3500 φιλτραρισμένη με επιλογή range.....	256
Εικόνα Γ- 51. Τριοδιάστατη παρουσίαση δέσμης N=3500 φιλτραρισμένη με επιλογή batch.....	257
Εικόνα Γ- 52. Τομή δέσμης N=3500 φιλτράρισμα με επιλογή [batch].....	257
Εικόνα Γ- 53. Τομή δέσμης N=3500 φιλτράρισμα με επιλογή [range].....	257
Εικόνα Γ- 54. Μείωση διαστάσεων range profile με επιλογή [Cut bins] [400] .....	259
Εικόνα Γ- 55. Μείωση διαστάσεων range profile με επιλογή [Cut bins] [350] .....	259
Εικόνα Γ- 56. Γράφημα μέσης τιμής N=3500 'range profiles', επιλογή [Plot-μ].....	260
Εικόνα Γ- 57. Δείγμα λίστας χρόνων/γωνιών από το αρχείο καταγραφών .....	261
Εικόνα Γ- 58. Ιστόγραμμα κατανομής βηματισμού 'step' γωνιών καταγραφής.....	262

## **Παράρτημα Δ.**

### **Πείραμα NEMO2014 - Διαδικασίες και λήψη μετρήσεων από Radar τύπου SAR**

Εικόνα Δ-1. Το PicoSAR τοποθετημένο για τις ανάγκες του πειράματος στην πίσω θέση του ελικοπτέρου AS350B-3 .....	264
Εικόνα Δ-2. Κεραία PicoSAR RADAR.....	264
Εικόνα Δ-3. PicoSAR RADAR με προσαρμοσμένη την κεντρική μονάδα επεξεργασίας πίσω από την κεραία .....	264
Εικόνα Δ-4. Απόσταση σκόπευσης, <i>slant range</i> , του Radar του ελικοπτέρου. ....	265
Εικόνα Δ-5. Τοποθεσία του πειράματος στον κόλπο Τάραντα στη νότια Ιταλία.....	265
Εικόνα Δ-6. Κατακόρυφη κίνηση του ελικοπτέρου για σάρωση γωνιών από 3° έως 55°.....	266
Εικόνα Δ-7. Φωτογραφία της θάλασσας στις 23/9 με ταχύτητα ανέμου 10-12m/s.....	266

Εικόνα Δ-8. Κατακόρυφη κίνηση του ελικοπτέρου για σάρωση γωνιών από 40 έως 54o.....	267
Εικόνα Δ-9. Φωτογραφίες της θαλάσσιας επιφάνειας στις 24/9. Αριστερά γαλήνια, δεξιά ελαφρώς ρυτιδωμένη .....	267
Εικόνα Δ-10. Εικόνες θαλάσσιας κατάστασης ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου.....	269
Εικόνα Δ- 11. Πεδία ενδιαφέροντος από τα αρχεία καταγραφής .bin .....	270
Εικόνα Δ- 12. Σχέση μεταξύ ‘ <i>depression angle</i> ’ και ‘ <i>elevation angle</i> ’ .....	270
Εικόνα Δ- 13. γωνίες - κίνηση ελικοπτέρου την 1 <sup>η</sup> ς ημέρα.....	272
Εικόνα Δ- 14. γωνίες -κίνηση ελικοπτέρου- την 2 <sup>η</sup> ς ημέρα .....	272
Εικόνα Δ- 15. Μορφή πίνακα Matlab με ‘ <i>raw data</i> ’ της καταγραφής του PicoSAR.....	273
Εικόνα Δ- 16. PicoSar Radar – brochure της κατασκευάστριας εταιρείας Leonardo.....	274

## Γλωσσάριο τεχνικών όρων

Αγγλικοί Όροι	Ελληνικοί Όροι
RADAR	Ράδιοεντοπιστής με μέτρηση αποστάσεως
Synthetic Aperture Radar - SAR	Ραντάρ Συνθετικού Ανοιγματος
Grazing Angle	Γωνία θέασης ως προς την επιφάνεια σκέδασης
Incident Angle	Γωνία πρόσπτωσης. Γωνία θέασης ως προς την κάθετο στην επιφάνεια σκέδασης
Incident EM Wave	Προσπίπτον Ηλεκτρομαγνητικό Κύμα
Pulse Repetition Frequency - PRF	Συχνότητα Επανάληψης Παλμού
Pulse Repetition Interval - PRI	Περίοδος Επανάληψης Παλμού
Patch Size	Μήκος Επιφάνειας Πρόσπτωσης
Beamwidth	Εύρος Δέσμης
Range Profile	Προφίλ Απόστασης
Range Cell / Range Bin	Κελί Απόστασης
Range Gate	Κελί Χρόνου (αντίστοιχο της απόστασης)
Wave Number	Κυματαριθμός
Scattering Coefficient	Συντελεστής Σκέδασης
Fractal Length	Μορφοκλασματικό μήκος
Fractal Dimension	Κλασματική Διάσταση
Fractal Signature	Μορφοκλασματική Υπογραφή
Self - similarity	Αυτο-ομοιότητα
Blanket Technique	Τεχνική «Κουβέρτας»
Coastline Problem	Πρόβλημα Ακτογραμμής
Yardstick	Κανόνας Μέτρησης / Χάρακας Μέτρησης
Frequency Scaling Parameter	Συχνότητα Χωρικής Κλιμάκωσης
FFT	Ταχύς Μετασχηματισμός Fourier
IFFT	Αντίστροφος Μετασχηματισμός Fourier
AWGN	Λευκός Προσθετικός Γκαουσιανός Θόρυβος
IQR	Ενδοτεταρτημοριακό εύρος
Sea State	Κατάσταση Θαλάσσιου κυματισμού
Sea Clutter	Ανακλάσεις από Θαλάσσια επιφάνεια



# Εισαγωγή

## Σκοπός Διατριβής

Ο σκοπός της παρούσας διατριβής είναι ο προσδιορισμός της τραχύτητας μιας επιφάνειας αναλύοντας απευθείας τα οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρομαγνητικά (HM) κύματα ενός RADAR κάνοντας χρήση μορφοκλασματικών μεθόδων (τεχνικές 'fractal'). Με την παρούσα διατριβή εξετάζω αυτή την δυνατότητα προσδιορισμού της τραχύτητας μιας επιφάνειας σε δύο φάσης.

Στο πρώτο μέρος (θεωρητικό) κάνω χρήση μαθηματικών μοντέλων για την προσομοίωση σκέδασης HM κυμάτων με σκοπό τον απευθείας προσδιορισμό της τραχύτητας μιας επιφάνειας.

Στο δεύτερο μέρος (πειραματικό) εφαρμόζω τεχνικές μορφοκλασματικής ανάλυσης σε πραγματικές καταγραφές οπισθοσκεδαζόμενων HM κυμάτων, προερχόμενες από ένα αερομεταφερόμενο RADAR τύπου SAR, με σκοπό τον προσδιορισμό της τραχύτητας της επιφάνειας παρατήρησης και εν προκειμένω τον προσδιορισμό της θαλάσσιας κατάστασης, 'sea state', που επικρατεί σε μια θαλάσσια περιοχή. Ειδικά για τα RADAR τύπου SAR, η διερεύνηση της ιδέας μιας απευθείας εφαρμογής μορφοκλασματικής ανάλυσης επί των ακατέργαστων δεδομένων, 'Radar raw data', θα μπορούσε να οδηγήσει σε πολλαπλά οφέλη όπως το να εξαγάγει με άμεσο τρόπο χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με την υφή και την τραχύτητα της επιφάνειας παρατήρησης, παρακάμπτοντας τους χρονοβόρους και ενεργοβόρους μετασχηματισμούς από και προς το πεδίο συχνότητας (*IFFT, FFT*) που απαιτούνται για την μετατροπή των SAR raw data σε SAR image και τους εν συνεχεία εξίσου απαιτητικούς αλγόριθμους επεξεργασίας εικόνας προκειμένου να εξαχθούν τα σχετικά με την τραχύτητα της επιφάνειας συμπεράσματα.

## Δομή παρούσας εργασίας

Η δομή της παρούσας εργασίας, όπως διαμορφώνεται διαδοχικά στα αντίστοιχα κεφάλαια, είναι συνυφασμένη με την πορεία που ακολούθησα κατά την έρευνα στα πλαίσια της διδακτορικής μου διατριβής. Η διατριβή, όπως και η αντίστοιχη έρευνά μου ακολουθεί δύο φάσεις. Στο 1<sup>ο</sup> και 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο το πρόβλημα του προσδιορισμού της τραχύτητας μιας επιφάνειας από δεδομένα οπισθοσκέδασης HM κυμάτων προσεγγίζεται σε θεωρητικό επίπεδο μέσω προσομοιώσεων HM σκέδασης. Στα επόμενα κεφάλαια, 3<sup>ο</sup> έως 5<sup>ο</sup>, το πρόβλημα διερευνάτε σε πειραματικό επίπεδο αναλύοντας καταγραφές από δεδομένα οπισθοσκέδασης HM κυμάτων που διετέθησαν για το σκοπό αυτό από το πείραμα NEMO2014.

## Θεωρητική Προσέγγιση

Στο **1ο Κεφάλαιο** ξεκινώ με την θεωρία των μορφοκλασματικών μοντέλων 'fractals' ως μαθηματικά μοντέλα ιδιαίτερα ικανά να προσομοιώνουν φυσικές επιφάνειες και παρουσιάζω αναλυτικά την 'fractal' συνάρτηση 'Weierstrass Mandelbrot' (W-M). Στη συνέχεια παρουσιάζω την γενική θεωρία του προβλήματος

σκέδασης ΗΜ κυμάτων από τραχείες επιφάνειες και χρησιμοποιώντας την μαθηματική προσέγγιση ‘*Kirchhoff approximation*’ (ΚΑ) υπολογίζω την εξίσωση της γενικής προσεγγιστικής λύσης για την περίπτωση σκέδασης από τραχεία επιφάνεια. Το 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο ολοκληρώνεται ενσωματώνοντας την συνάρτηση της ‘*fractal*’ επιφάνειας στην γενική προσεγγιστική λύση (ΚΑ) διαμορφώνοντας έτσι την τελική συνάρτηση του συντελεστή σκέδασης που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος του λογισμικού προσομοίωσης ΗΜ σκεδάσεων ‘*ScatteringLab*’.

Στο **Παράρτημα Α** παρουσιάζω αναλυτικά το λογισμικό ‘*ScatteringLab*’ το οποίο δημιούργησα ειδικά για τις ανάγκες των προσομοιώσεων της παρούσας διατριβής.

Στο **Παράρτημα Β** προσομοιώνω με την βοήθεια του ‘*ScatteringLab*’ πειράματα σκέδασης ΗΜ κυμάτων δημοσιευμένα σε διεθνή περιοδικά. Προκειμένου να επαληθεύσω την ορθή λειτουργία του λογισμικού πριν χρησιμοποιηθεί στην συνέχεια για την παραγωγή αποτελεσμάτων που αφορούν την καινοτόμο έρευνά μου, αντιπαραβάλω τα δημοσιευμένα αποτελέσματα με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του ‘*ScatteringLab*’.

Στο **2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο** αξιοποιώντας την θεωρία ηλεκτρομαγνητικής σκέδασης και ειδικότερα την εξίσωση του συντελεστή σκέδασης ‘ $\gamma$ ’ του 1<sup>ου</sup> κεφαλαίου, διερευνώ μέσω προσομοιώσεων με το λογισμικό ‘*ScatteringLab*’, την δυνατότητα προσδιορισμού της τραχύτητας μιας επιφάνειας αναλύοντας απευθείας τα οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρομαγνητικά ΗΜ κύματα. Το πλεονέκτημα των ‘*fractal*’ επιφανειών είναι ότι η τραχύτητά τους μπορεί να προκαθορίζεται με ακρίβεια μέσω της τιμής  $D$ , ‘*fractal dimension*’, της μορφοκλασματικής δηλαδή διάστασης της επιφάνειας. Μέσα από τις προσομοιώσεις αναδεικνύω το πώς η μεταβολή στην τραχύτητα μιας επιφάνειας σε συνδυασμό με μια κατάλληλα διαμορφωμένη ΗΜ εκπομπή μεταβαλλόμενης συχνότητας μπορεί να δημιουργήσει μετρήσιμες μεταβολές στο συντελεστή σκέδασης. Με την βοήθεια της στατιστικής ανάλυσης προτείνω μια μέθοδο προσδιορισμού της τραχύτητας της επιφάνειας που βασίζεται στη μέτρηση των κλίσεων ‘*slope*’ που εμφανίζονται στο διάγραμμα του συντελεστή σκέδασης. Έχοντας βρει μια μέθοδο προσδιορισμού της τραχύτητας επιφάνειας από το διάγραμμα σκέδασης των οπισθοσκεδαζόμενων ΗΜ κυμάτων εξετάζω τις προϋποθέσεις και τις παραμέτρους που επηρεάζουν την επιτυχή εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου. Η έρευνα του 2<sup>ου</sup> κεφαλαίου ολοκληρώνεται εξετάζοντας και το κατά πόσο η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί να λειτουργήσει παρουσία θορύβου στο δέκτη ενός RADAR. Το κεφάλαιο κλείνει με τα τελικά συμπεράσματα και την παράθεση της σχετικής βιβλιογραφίας.

### **Πειραματική Προσέγγιση**

Τα αισιόδοξα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο οδηγούν στην συνέχιση της μελέτης με πειραματισμό σε πραγματικές καταγραφές RADAR. Στο εργαστήριο «RADAR και Τηλεπισκόπησης» της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ, όπου εκπονήθηκε η παρούσα διδακτορική διατριβή, διετέθησαν καταγραφές (SAR *raw data*) ενός RADAR τύπου PicoSAR X-

band του Νορβηγικού Ινστιτούτου Άμυνας (FFI) οι οποίες συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος NEMO2014 που διεξήχθη σε μια θαλάσσια περιοχή του κόλπου του Τάραντα στην νότια Ιταλία.

Για την ανάλυση των ακατέργαστων καταγραφών (SAR *raw data*) χρειάστηκε να δημιουργήσω ένα εξειδικευμένο λογισμικό, το '*SARrawDataAnalyzer*', όπου ο χρήστης σε γραφικό περιβάλλον, μπορεί να «φυλλομετρήσει» μεταξύ μεγάλου όγκου καταγραφών '*big data*' αλλά και να πειραματιστεί ταυτόχρονα με αλγόριθμους προ-επεξεργασίας και επεξεργασίας και να παρακολουθεί διαδραστικά τα αποτελέσματα εφαρμογής τους.

Στο **Παράρτημα Γ** παρουσιάζω αναλυτικά το λογισμικό '*SARrawDataAnalyzer*' και τις δυνατότητες χρήσης του, οι οποίες αναπτύχθηκαν σταδιακά ακολουθώντας τις ανάγκες της έρευνας.

Στο **Παράρτημα Δ** παρουσιάζω τις λεπτομέρειες σχετικά με το πείραμα NEMO2014.

Στο **3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο** με βοήθεια του λογισμικού '*SARrawDataAnalyzer*' διερευνώ το πρόβλημα του προσδιορισμού της τραχύτητας μιας επιφάνειας από τα δεδομένα οπισθοσκέδασης των ΗΜ κυμάτων εφαρμόζοντας τεχνικές μορφοκλασματικής ανάλυσης στις καταγραφές (SAR *raw data*) του πειράματος NEMO2014. Ως βάση προσδιορισμού της θαλάσσιας κυμάτωσης προτείνω τον υπολογισμό του μορφοκλασματικού μήκους '*fractal length*' των μονοδιάστατων υπογραφών RADAR, '*1D fractal analysis*', και ως κριτήριο διαχωρισμού προτείνω την μέση τιμή του μορφοκλασματικού μήκους  $N$  διαδοχικών μονοδιάστατων υπογραφών. Την προτεινόμενη μέθοδο την ονομάζω MFL από τα αρχικά του αντίστοιχου κριτηρίου '*Mean Fractal Length*' και την εφαρμόζω σε δείγματα SAR '*raw data*' από όλες τις διαθέσιμες γωνίες καταγραφής '*grazing angles*',  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $40^\circ$  καθώς και  $50^\circ$ . Παρουσιάσω τα αποτελέσματα και προχωρώ σε μια συνολική αξιολόγηση της μεθόδου ως προς την ικανότητά της να προσδιορίζει την επικρατούσα θαλάσσια κατάσταση. Το κεφάλαιο κλείνει με την παράθεση της σχετικής βιβλιογραφίας.

Στο **4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο** χρησιμοποιώ τις ίδιες καταγραφές SAR '*raw data*' του πειράματος NEMO2014 και επεκτείνω την έρευνα προσθέτοντας αλγόριθμους προ-επεξεργασίας επί των ακατέργαστων καταγραφών (SAR *raw data*) έτσι ώστε ο αλγόριθμος μορφοκλασματικής ανάλυσης να εφαρμοστεί σε κατά το δυνατό βελτιστοποιημένα δεδομένα. Επίσης αναβαθμίζω τον αλγόριθμο επεξεργασίας εφαρμόζοντας διδιάστατη μορφοκλασματική ανάλυση επί των οπισθοσκεδαζόμενων ΗΜ κυμάτων, '*2D fractal analysis*', με σκοπό την βελτιστοποίηση της ακρίβειας στον προσδιορισμό της τραχύτητας μιας επιφάνειας και εν προκειμένω στον προσδιορισμό της θαλάσσιας κατάστασης, '*sea state*'.

Εφαρμόζω τον συνδυασμό αλγόριθμων προ-επεξεργασίας και αλγόριθμων επεξεργασίας για να υπολογίσω τις μορφοκλασματικές υπογραφές '*fractal signatures*' σε δείγματα SAR '*raw data*' από όλες τις διαθέσιμες γωνίες καταγραφής '*grazing angles*' υπό γωνία  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $40^\circ$  καθώς και  $50^\circ$ . Εν συνεχεία παρουσιάζω σε

γραφήματα τα τελικά αποτελέσματα των μορφοκλασματικών υπογραφών των δειγμάτων και προχωρώ σε μια αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της 2D ανάλυσης.

Το κεφάλαιο κλείνει με την παράθεση της σχετικής βιβλιογραφίας.

Στο **5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο** προτείνω μια πρακτική εφαρμογή που είναι ταυτόχρονα και μια επαλήθευση συνέπειας των αποτελεσμάτων της προτεινόμενης μεθόδου. Η πρακτική εφαρμογή που θα μπορούσε να έχει η συγκεκριμένη μέθοδος είναι ο προσδιορισμός της θαλάσσιας κατάστασης που επικρατεί σε μια θαλάσσια περιοχή σε πραγματικό χρόνο αναλύοντας απευθείας τα SAR *'raw data'*. Ως ένα παράδειγμα εφαρμογής θα μπορούσε να είναι ένα εναέριο μέσο κατά την διάρκεια μιας νυκτερινής επιχείρησης διάσωσης το οποίο υλοποιώντας την συγκεκριμένη μέθοδο στο αερομεταφερόμενο Radar του, θα μπορούσε να προσδιορίζει με ακρίβεια την θαλάσσια κυμάτωση *'sea state'* που επικρατεί στην περιοχή, ενημερώνοντας έτσι τον πιλότο και το κέντρο επιχειρήσεων για το ύψος των κυμάτων.

Χρησιμοποιώντας το σύνολο των καταγραφών του RADAR που μου διατέθησαν από το Νορβηγικό Ίδρυμα Αμυντικών Ερευνών (FFI), δημιουργώ ένα πρόγραμμα το οποίο ανασύρει με ημερολογιακή - χρονική σειρά τις εγγραφές *'raw data'* του αερομεταφερόμενου RADAR όπως αυτές κατεγράφησαν κατά την διάρκεια της πτήσης του ελικοπτερου πάνω από την θάλασσα. Λαμβάνοντας την μέση τιμή της μορφοκλασματικής υπογραφής  $D\mu(t)$  ως το μέτρο για την θαλάσσια κυμάτωση που επικρατεί σε κάθε χρονική στιγμή της καταγραφής αντιπαραβάλλω το διάγραμμα  $D\mu(t)$  με τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες όπως αυτές δόθηκαν από Νορβηγικό Ίδρυμα για τον συγκεκριμένο χρόνο. Αξιολογώ τα αποτελέσματα, εντοπίζω σημεία βελτίωσης και προτείνω έναν αναβαθμισμένο αλγόριθμο υπολογισμού που αντισταθμίζει την εξάρτηση που παρατηρείται μεταξύ των παραμέτρων, γωνία θέασης RADAR, ανακλαστικότητα θαλάσσιας επιφάνειας και τιμής  $D\mu(t)$  βελτιστοποιώντας το τελικό αποτέλεσμα προσδιορισμού της θαλάσσιας κυμάτωσης.

Το κεφάλαιο κλείνει με τα τελικά συμπεράσματα και με παράθεση της σχετικής βιβλιογραφίας.



# Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>

## Θεωρία ηλεκτρομαγνητικής σκέδασης από επιφάνειες fractal.

### Περιεχόμενα

1.1 Προσομοίωση επιφάνειας με χρήση 'fractals' .....	35
1.1.1 Η έννοια της μορφοκλασματικής διάστασης 'fractal dimension' .....	35
1.1.2 Η συνάρτηση Weierstrass ως βάση δημιουργίας 'fractal' επιφάνειας.....	39
1.1.3 Παράμετροι και ρυθμίσεις της τροποποιημένης Weierstrass συνάρτησης.....	41
1.1.4 Προσομοίωση τραχύτητας για διαφορετικές τιμές 'fractal dimension' $D$ .....	45
1.2 Προσομοίωση Σκέδασης Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων.....	46
1.2.1 Γεωμετρία του προβλήματος σκέδασης ΗΜ από τραχεία επιφάνεια. ....	46
1.2.2 Υπολογισμός εξίσωσης γενικής περίπτωσης σκέδασης με Kirchhoff.....	47
1.3 Εισαγωγή στην έννοια του συντελεστή σκέδασης $\gamma$ .....	53
1.3.1 Συντελεστής σκέδασης $\gamma$ επί 'fractal' επιφάνειας $S(x,y)=f_r(x)$ .....	56
1.4 Βιβλιογραφία.....	57

### Περίληψη Κεφαλαίου

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζω το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο της παρούσας διατριβής το οποίο έγκειται στο θεμελιώδες πρόβλημα της σκέδασης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ΗΜ από τραχείες επιφάνειες. Η σκέδαση ΗΜ κυμάτων από τραχείες επιφάνειες αποτελεί ένα πολύ ενδιαφέρον αντικείμενο επιστημονικής έρευνας εδώ και δεκαετίες [4],[5],[7]-[17],[21],[22]. Σε πολλές περιπτώσεις ο κύριος σκοπός της έρευνας είναι ο χαρακτηρισμός της τραχύτητας μιας επιφάνειας αναλύοντας τα δεδομένα των σκεδαζόμενων ΗΜ κυμάτων [12]-[17], [19], [24]. Η επιφάνεια σκέδασης μπορεί να προσομοιωθεί μαθηματικά είτε με ντετερμινιστικές 'deterministic' είτε με τυχαίες 'random' συναρτήσεις [4],[5],[10]. Η εισαγωγή όμως των μορφοκλασματικών συνόλων 'fractals' [2],[3],[6] στην προσομοίωση επιφανειών σκέδασης ΗΜ κυμάτων [11]-[19], [23] έδωσε πολλά πλεονεκτήματα μεταξύ των οποίων είναι το ότι παρέχουν συναρτήσεις που προσομοιάζουν καλύτερα στα φυσικά χαρακτηριστικά μιας επιφάνειας ενώ ταυτόχρονα μπορούν να ελέγχουν με ακρίβεια τον βαθμό της τραχύτητάς της.

Στην ενότητα 1.1 παρουσιάζω λεπτομερώς την συνάρτηση που επέλεξα για την μορφοκλασματική 'fractal' προσομοίωση της επιφάνειας σκέδασης.

Στην ενότητα 1.2 αναπτύσσω την απαραίτητη θεωρία του προβλήματος της ΗΜ σκέδασης από τραχεία επιφάνεια. Ξεκινώ με την γεωμετρία του προβλήματος και εν συνεχεία χρησιμοποιώντας την προσέγγιση Kirchhoff approximation (KA) παρουσιάζω τη μέθοδο επίλυσης του προβλήματος της ΗΜ σκέδασης από τραχεία επιφάνεια[20]. Υπολογίζω την ένταση του σκεδαζόμενου πεδίου, εισάγω την έννοια

του συντελεστή σκέδασης [12], [24] και καταλήγω σε μια συνάρτηση η οποία αντιπροσωπεύει την γενική προσεγγιστική λύση (KA) για μια τέλεια αγωγίμη μονοδιάστατη τραχεία επιφάνεια.

Στην παράγραφο 1.3 εισάγω την έννοια του συντελεστή σκέδασης και συνδυάζοντας την συνάρτηση της γενικής προσεγγιστικής λύση (KA) με την συνάρτηση μιας *'fractal'* επιφάνειας καταλήγω στην τελική συνάρτηση που χρησιμοποιεί το λογισμικό προσομοίωσης HM σκεδάσεων *'ScatteringLab'* που δημιούργησα για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής και το οποίο παρουσιάζω αναλυτικά στο παράρτημα Α.

Το κεφάλαιο κλείνει με την παράθεση της σχετικής βιβλιογραφίας

## 1.1 Προσομοίωση επιφάνειας με χρήση ‘*fractals*’

Το πρόβλημα της σκέδασης οπτικών και ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από τραχείες επιφάνειες παρουσιάζει μεγάλο θεωρητικό και πρακτικό ενδιαφέρον. Συνήθως για τη μελέτη της σκέδασης χρησιμοποιούνται ντετερμινιστικές, περιοδικές ή τυχαίες συναρτήσεις ως μαθηματικά μοντέλα που περιγράφουν τραχείες επιφάνειες. Μια άλλη επιλογή η οποία αποτελεί ένα σύγχρονο εργαλείο για τη μοντελοποίηση επιφανειών με μεταβλητή τραχύτητα είναι τα ‘*fractals*’.

Μία μορφοκλασματική ‘*fractal*’ συνάρτηση λειτουργεί ως μια γέφυρα μεταξύ των ντετερμινιστικών, περιοδικών συναρτήσεων και των τυχαίων συναρτήσεων. Ο όρος μορφοκλάσμα ‘*fractal*’ επινοήθηκε από τον Mandelbrot το 1975 [3] και προέρχεται από την λατινική λέξη ‘*fractus*’ που κυριολεκτικά σημαίνει το θραυσμένο και χρησιμοποιήθηκε για να αποδώσει την έννοια του κατακερματισμού μια δομής σε πολύ μικρότερα παρόμοια κομμάτια. Η θεωρία του ξεκίνησε από την παρατήρηση



Εικόνα 1-1. Η φτέρη του Barnsley

ότι τα περισσότερα σχήματα στην φύση να μεν έχουν μια περίπλοκη μορφή τόσο ακανόνιστη που η ευκλείδεια γεωμετρία δεν είναι ικανή να τα περιγράψει, πλην όμως ενυπάρχει σε αυτά μια μορφή τάξης που βασίζεται στην γεωμετρική επανάληψη. Τα σχήματα στην φύση εμφανίζονται με ένα αρχικό μοτίβο στο οποίο όλο και μικρότερα αντίγραφα του ίδιου μοτίβου εμφωλεύονται διαδοχικά το ένα μέσα στο άλλο και τα οποία όλα μαζί δημιουργούν το αρχικό μοτίβο - σχήμα. Τα φύλλα φτέρης (βλ. εικόνα 1-1) είναι ένα τέτοιο χαρακτηριστικό παράδειγμα από τη φύση. Στο βιβλίο του Mandelbrot ‘*The fractal geometry of nature*’ [6] χρησιμοποιώντας μια σειρά από παραδείγματα και εικόνες παρουσιάζει αυτό το βασικό χαρακτηριστικό των μορφοκλασμάτων που το ονομάζει αυτοομοιότητα ‘*self-similarity*’ και από την οποία προκύπτει και ο σύγχρονος ορισμός σύμφωνα με τον οποίο ‘*fractal*’ (ελλ. μορφοκλάσμα) ονομάζεται μια καμπύλη ή γεωμετρικό σχήμα πολύπλοκης δομής κάθε τμήμα του οποίου παρουσιάζει τον ίδιο στατιστικό χαρακτήρα με το σύνολο.

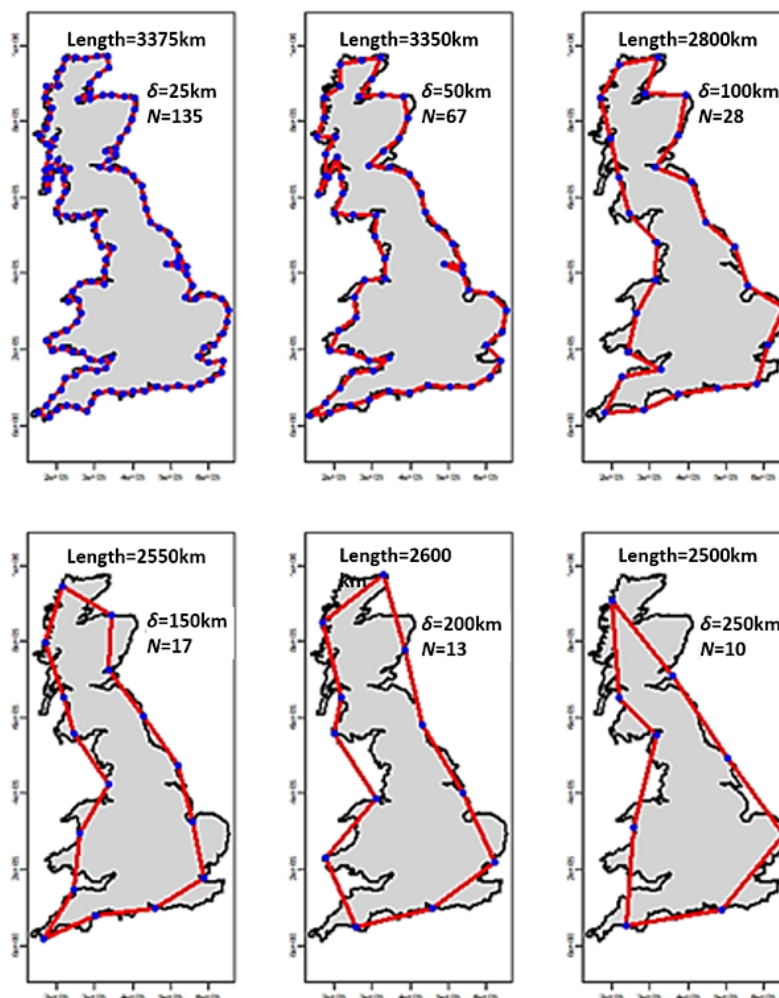
Οι ‘*fractal*’ συναρτήσεις έχουν έτσι δυνατότητα να παράγουν επιφάνειες που όχι μόνο προσομοιάζουν καλύτερα στις φυσικές αλλά όπως θα δούμε παρακάτω, έχουν και το πλεονέκτημα ότι μας επιτρέπουν, μέσω της μορφοκλασματικής διάστασης ‘*fractal dimension*’, να ρυθμίζουμε με ακρίβεια την τραχύτητα της επιφάνειας.

### 1.1.1 Η έννοια της μορφοκλασματικής διάστασης ‘*fractal dimension*’

Ο Mandelbrot, στο βιβλίο του ‘*How Long Is the Coast of Britain? Statistical Self Similarity and Fractional Dimension*’ [2] ασχολήθηκε με το πρόβλημα μέτρησης του μήκους μιας καμπύλης γραμμής και συγκεκριμένα έφερε ως παράδειγμα τον

υπολογισμό της ακτογραμμής της Μ. Βρετανίας. Εκεί σημείωσε ότι το μήκος μιας ακτογραμμής όχι μόνο δεν είναι σταθερό αλλά αυτό γίνεται όλο και μεγαλύτερο όσο μικραίνει το μέτρο 'yardstick', δηλαδή ο βαθμονομημένος χάρακας, με το οποίο την μετράμε. Αυτό είναι ένα πραγματικό φαινόμενο το οποίο βασίζεται στο γεγονός ότι όσο ο χάρακας γίνεται μικρότερος ολοένα και πιο λεπτές δομές της ακτογραμμής μπορούν να μετρηθούν αυξάνοντας έτσι το συνολικό μετρούμενο μήκος. Αυτό το φαινόμενο αναδεικνύει τόσο την μαγεία των 'fractal' όσο και την πρακτική χρησιμότητά τους στο να προσεγγίζουν και να περιγράφουν σύνθετες και μη ευκλείδειες δομές.

Στην εικόνα 1-2, ο αριθμός στην παρένθεση αντιπροσωπεύει τον αριθμό των τμημάτων (N) που χρειάζονται για να κυκλωθεί η ακτογραμμή ενώ ο αριθμός 'δ' αντιπροσωπεύει το 'yardstick' δηλαδή τον μήκος του μέτρου που χρησιμοποιήθηκε για να μετρηθεί η ακτή. Η εικόνα 1-2, έχει ληφθεί από το διαδικτυακό τόπο '<https://rspatial.org/cases/2-coastline.html>'



Εικόνα 1-2. Η ακτογραμμή της Μ. Βρετανίας μετρημένη με διαφορετικού μήκους 'δ' κανόνες μέτρησης

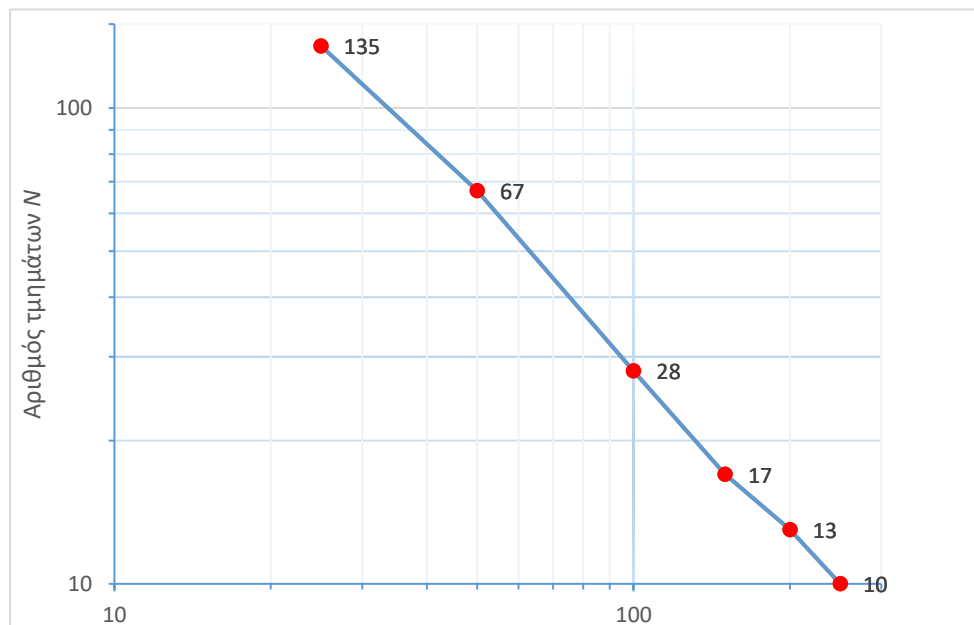
Ο Mandelbrot αναφερόμενος στον τρόπο μέτρησης του μήκους μιας ακανόνιστης γραμμής, όπως η ακτογραμμή, περιέγραψε μεταξύ των άλλων την παρακάτω μέθοδο. Η μέθοδος βασίζεται στην αρχή της προσέγγισης της καμπύλης που

θέλουμε να μετρήσουμε με ένα πολύγωνο φτιαγμένο από  $N$  διαδοχικά κομμάτια μήκους  $\delta'$ . Ο αριθμός των τμημάτων  $N$  που θα χρειαστούν για να καλύψουν την ακτογραμμή επί το μήκους τους  $\delta'$  δίνει μια προσέγγιση του συνολικού μήκους της ακτογραμμής  $L(\delta)$ . Όσο το μήκος του χρησιμοποιούμενου τμήματος  $\delta'$  γίνεται μικρότερο τόσο το παρατηρούμενο συνολικό μήκος της ακτογραμμής  $L(\delta)$  αυξάνει όπως φαίνεται στην εικόνα 1.2 όπου σημειώνεται το συνολικό μήκος της ακτογραμμής για διαφορετικές τιμές των  $N$  και  $\delta'$ .

Στο διάγραμμα της εικόνας 1.3 αποτυπώνω σε μορφή log-log την σχέση που υπάρχει μεταξύ του αριθμού των τμημάτων  $N$  που απαιτούνται ως προς το μήκος  $\delta'$  που έχει το κάθε τμήμα. Για μια μαθηματικά κατασκευασμένη *'fractal'* δομή η σχέση που υπάρχει μεταξύ των  $N$  και  $\delta'$ , όταν αυτή αποτυπωθεί σε ένα διάγραμμα της μορφής log-log, προκύπτει ως μια τέλεια ευθεία γραμμή με σταθερή κλίση. Για μια φυσικά κατασκευασμένη *'fractal'* δομή, όπως οι ακτογραμμές της Μ. Βρετανίας, προκύπτει μια γραμμή (βλ. εικόνα 1-3) με σχεδόν σταθερή κλίση που δίνεται από την σχέση (1.1)

$$D = -\frac{\log(N_1) - \log(N_2)}{\log(\delta_1) - \log(\delta_2)} \quad (1.1)$$

Η κλίση αυτή ισοδυναμεί με την τιμή της μορφοκλασματικής διάστασης *'fractal dimension'* και ο Mandelbrot έδειξε ότι για μια μαθηματικά κατασκευασμένη *'fractal'* δομή, αυτή η τιμή  $D$  της κλίσης παραμένει σταθερή και ανεξάρτητη από την τιμή  $\delta'$  της κλίμακας μέτρησης όπως επίσης έδειξε ότι η τιμή αυτή εξαρτάται απόλυτα και αποκαλύπτει την τραχύτητα της υπό μέτρηση γραμμής.



Εικόνα 1-3. Log-Log διάγραμμα αριθμού τμημάτων ως προς μήκος τμήματος  $\delta'$

Η τιμή  $D$  της μορφοκλασματικής διάστασης, είναι το μέτρο για το πόσο *'ακανόνιστη'*, σε σχέση με μια ευθεία, είναι η υπό μέτρηση γραμμή.

Το συνολικό μήκος της γραμμής προσεγγίζεται από την σχέση (1.2).

$$L(\delta) \cong b \delta^{1-D} \quad (1.2)$$

όπου  $b > 0$  και  $D \geq 1$ . Εάν στην θέση του  $N$  τοποθετήσουμε στο γράφημα την τιμή του μήκους  $L(\delta)$  και σχεδιάσουμε πάλι το γράφημα ως προς το μήκος κλίμακας  $\delta$  σε διάγραμμα log-log (λογαριθμοποιήσουμε δηλαδή τη σχέση (1.2) προκύπτει επίσης μια ευθεία αλλά με κλίση  $1-D$ .

Όταν η τιμή  $D$  παραμένει σταθερή ανεξάρτητα από την κλίμακα μέτρησης  $\delta$ , αυτό είναι μια απόδειξη ότι η δομή παρουσιάζει μια άπειρη αυτοομοιότητα *'self-similarity'* [6] ανεξαρτήτως κλίμακας το οποίο είναι αποκλειστικό χαρακτηριστικό των μαθηματικών *'fractal'* δομών. Ακριβώς όμως όπως δεν υπάρχει τέλειος κύκλος ή τέλεια ευθεία στην φύση έτσι δεν υπάρχουν στην φύση και οι τέλειες *'fractal'* δομές. Στην πράξη οι φυσικές δομές εμφανίζουν το χαρακτηριστικό της αυτοομοιότητας, είναι δηλαδή *'fractals'* για κάποιο εύρος κλίμακας. Γενικότερα όμως θα μπορούσαμε να σημειώσουμε εδώ ότι στον βαθμό που από τις μετρήσεις μας διαπιστώνουμε ότι η μορφοκλασματική διάσταση (η τιμή  $D$  της κλίσης) μιας υπό εξέταση δομής παραμένει σταθερή σε αυτό τον βαθμό η δομή προσομοιάζει ή όχι μια *'fractal'* δομή. Αυτό έχει ένα ενδιαφέρον γιατί στην πράξη δεν είναι μόνο η τιμή της μορφοκλασματικής διάστασης αλλά και ο τρόπος της μεταβολής της, ανάλογα με την μεταβολή της κλίμακας  $\delta$ , που μπορεί να μας αποκαλύψει συγκεκριμένες πληροφορίες για το είδος, την υφή και την τραχύτητα της επιφάνειας και να μας δώσει έτσι την δυνατότητα του μιας δομής ή και του διαχωρισμού της έναντι άλλων.

Σύμφωνα με τον Mandelbrot η μορφοκλασματική διάσταση ταυτίζεται με την διάσταση *'Hausdorff Besicovitch'* [6] και μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ της τοπολογικής και της ευκλείδειας διάστασης ήτοι:

$$D_T \leq D < D_E \quad (1.3)$$

όταν πρόκειται για μια γραμμή ανάλογα με την τραχύτητά της η μορφοκλασματική της διάσταση κυμαίνεται μεταξύ

$$1 \leq D < 2 \quad (1.4)$$

ενώ εάν πρόκειται για μια επιφάνεια η μορφοκλασματική της διάσταση κυμαίνεται μεταξύ

$$2 \leq D < 3 \quad (1.5)$$

Η τιμή της μορφοκλασματικής διάστασης  $D$  είναι θα λέγαμε το μέτρο της απόκλισης από την τοπολογική διάσταση. Σύμφωνα με το ορισμό που έδωσε ο ίδιος ο Mandelbrot στο βιβλίο του *'The fractal geometry of nature'* ένα *'fractal'* είναι εξ ορισμού ένα σύνολο όπου η *Hausdorff Besicovitch* διάστασή του ξεπερνά αυστηρά την τοπολογική του διάσταση [6].

Και κάθε σύνολο με μη ακέραια τιμή  $D$  είναι ένα *'fractal'* [6]. Η έννοια αυτής της

«διάστασης» που εισάγει η μορφοκλασματική θεωρία μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτή εάν σκεφτεί κάποιος την εικόνα μιας ευθείας λείας γραμμής της οποίας το σύνολο των σημείων της βρίσκονται όλα πάνω σε ένα μονοδιάστατο χώρο ( $D=1$ ). Όσο η τραχύτητα της γραμμής αυξάνει τόσο αρχίζει να αποκλίνει από την τοπολογική της διάσταση διότι το σύνολο των σημείων της δεν μπορούν πλέον να βρίσκονται όλα στον μονοδιάστατο χώρο αλλά επεκτείνονται σε ένα δισδιάστατο χώρο  $D>1$  και αυτό συνεχίζεται όσο αυξάνει η τραχύτητάς προσεγγίζοντας σιγά σιγά την τοπολογική διάσταση ενός επιπέδου  $D\leq 2$ . Η μορφοκλασματική διάσταση  $D$  εκφράζει θα λέγαμε το βαθμό με τον οποίο η τραχύτητα μιας γραμμής «γεμίζει» ένα επίπεδο και αντίστοιχα εάν πρόκειται για επιφάνεια εκφράζει το βαθμό με τον οποίο η επιφάνεια «γεμίζει» τον χώρο.

### 1.1.2 Η συνάρτηση Weierstrass ως βάση δημιουργίας 'fractal' επιφάνειας

Οι μαθηματικές εκφράσεις που σήμερα χρησιμοποιούνται για την κατασκευή δομών 'fractal' ανακαλύφθηκαν πολύ πριν δημιουργηθεί η έννοια των 'fractal' [3]. Ο μαθηματικός Karl Weierstrass παρουσίασε για πρώτη φορά το 1872 μια συνάρτηση που είναι παντού συνεχής και πουθενά διαφορίσιμη. Στην αρχική εργασία του Weierstrass [1] αυτή η συνάρτηση ορίστηκε ως μια σειρά Fourier, εξίσωση (1.6):

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a^n \cos(b^n \pi x) \quad (1.6)$$

Η συνάρτηση αυτή αποτελεί την πιο γνωστή μαθηματική βάση για δημιουργία 'fractal' δομών [11]-[19] και αποκαλύπτει ακόμα και διαισθητικά την στενή σχέση που υπάρχει μεταξύ της θεωρίας των 'fractals' και της αρμονικής (φασματικής & Fourier) ανάλυσης. Χαρακτηριστικό σε όλες τις παραλλαγές της σχέσης 1.6 που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή δομών 'fractal' είναι ότι δημιουργούνται από έναν πεπερασμένο  $N$  αριθμό τόνων, είναι δηλαδή 'bandlimited'-περιορισμένου φασματικού εύρους. Μια κλασσική μονοδιάστατη 'bandlimited' Weierstrass συνάρτηση  $W(x)$  για δημιουργία μονοδιάστατων 'fractals' είναι η εξίσωση (1.7) που είναι γνωστή ως Weierstrass Mandelbrot (W-M):

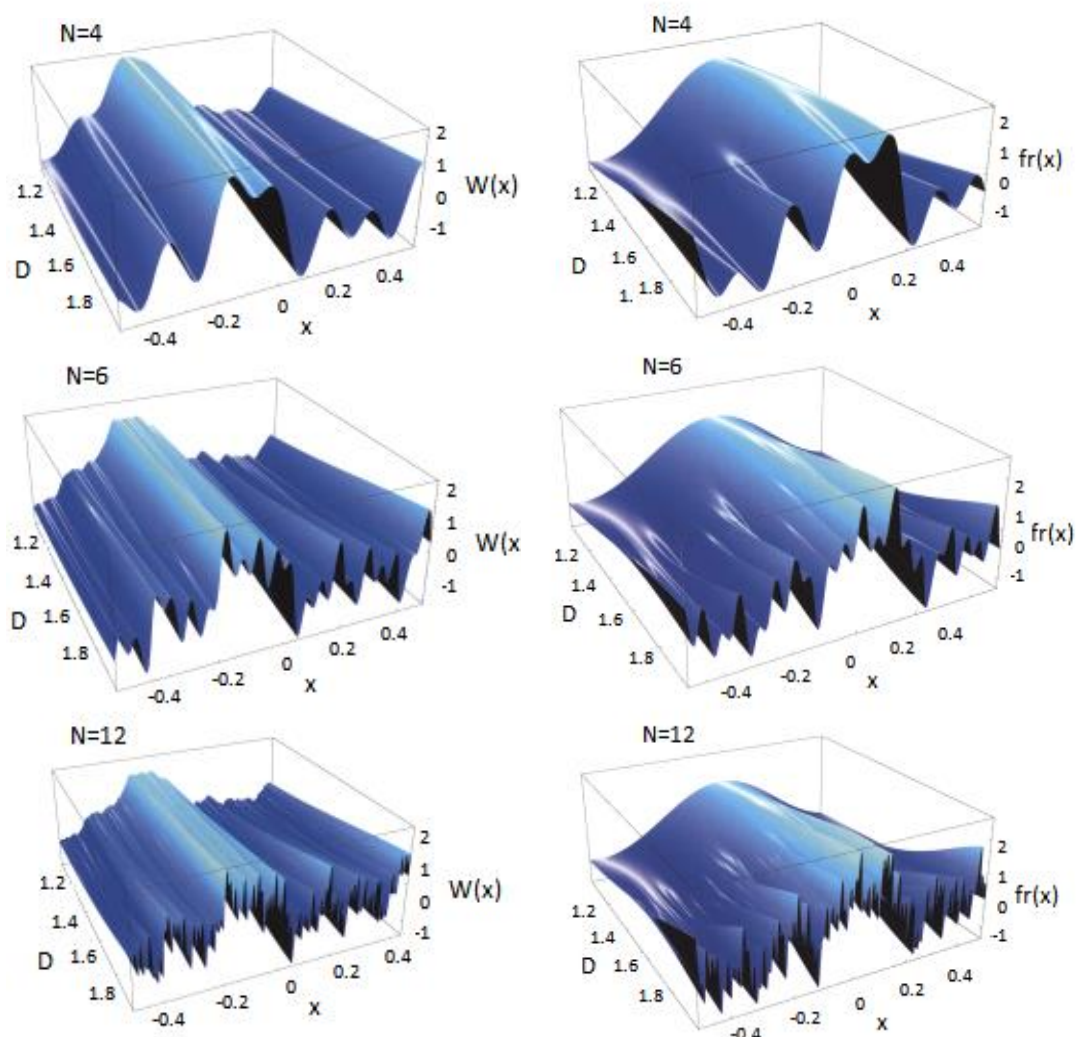
$$W(x) = C \sum_{n=N_1}^{N_2} b^{n(D-2)} \cos(2\pi K_0 b^n x + \phi_n) \quad (1.7)$$

Η παραπάνω εξίσωση (1.7) έχει χρησιμοποιηθεί από αρκετούς συγγραφείς [13],[17]-[19]. Στην παρούσα διδακτορική διατριβή επέλεξα την σχέση (1.8) η οποία έχει χρησιμοποιηθεί από εξίσου πολλούς συγγραφείς [11],[12],[14]-[16], ειδικά σε πειράματα σκέδασης ΗΜ κυμάτων γιατί παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι η τραχύτητα της επιφάνειας που δημιουργεί αυξάνεται στην αρχή πιο ομαλά με την αύξηση της κλασματικής διάστασης (εικόνα 1-5). Η εξίσωση (1.8) είναι γνωστή ως modified Weierstrass Mandelbrot, (modified W-M):

$$f_r(x) = C \sum_{n=0}^{N-1} (D-1)^n \sin(K_0 b^n x + \phi_n) \quad (1.8)$$

Στην εικόνα 1-4 παρουσιάζω την κλασική Weierstrass Mandelbrot συνάρτηση (σχέση 1.7) και στην εικόνα 1-5 παρουσιάζω σε αντιπαραβολή την τροποποιημένη (modified W-M) συνάρτηση (σχέση 1.8). Οι εικόνες 1-4 και 1-5 έχουν σχεδιαστεί [20] με ίδιες όλες τις επιμέρους παραμέτρους και για ίδιο αριθμό τόνων,  $N=4, N=6$  &  $N=12$ .

Από τις εικόνες γίνεται εμφανές το πως η μεταβολή της τιμής  $D$  της κλασματικής διάστασης για τιμές  $1 < D < 2$  επηρεάζει ανάλογα και την τραχύτητα της επιφάνειας. Η προτεινόμενη τροποποιημένη συνάρτηση  $f_r(x)$  που παρουσιάζεται στην εικόνα 1-5 διαφέρει όπως μπορεί και εποπτικά να φανεί από το ότι η τραχύτητα της επιφάνειας που δημιουργεί μεταβάλλεται πιο ομαλά στην αρχή σε αντίθεση με την κλασική  $W(x)$  όπου η τραχύτητα της αυξάνει απότομα ακόμα και από μικρές τιμές  $D$ , βλ. εικόνα 1-4



Εικόνα 1-4. Weierstrass-Mandelbrot 'fractal' function

Εικόνα 1-5. Modified Weierstrass-Mandelbrot 'fractal' function

$$W(x) = C \sum_{n=N_1}^{N_2} b^{n(D-2)} \cos(2\pi K b^n x + \phi_n) \quad f_r(x) = C \sum_{n=N_1}^{N_2} (D-1)^n \cos(K_0 b^n x + \phi_n)$$



### 1.1.3 Παράμετροι και ρυθμίσεις της τροποποιημένης *Weierstrass* συνάρτησης

Η συνάρτηση  $f_r(x)$  που επέλεξα για την συνέχεια, εξίσωση (1.8), αποτελείται από ένα άθροισμα  $N$  ημιτονικών συναρτήσεων με βάρη ‘*amplitudes*’ που φθίνουν όσο η περίοδος αυξάνει. Η παράμετρος  $N$  καθορίζει τον αριθμό των τόνων ήτοι των αριθμό των χωρικών συχνοτήτων που περιγράφουν την τελική σύνθεση της επιφάνειας. Το  $K_0 = 2\pi/\Lambda_0$  είναι ο θεμελιώδης χωρικός κυματαριθμός της επιφάνειας ‘*fundamental spatial wavenumber*’, το  $\Lambda_0$  αντιπροσωπεύει την αντίστοιχη θεμελιώδη χωρική συχνότητα ‘*fundamental spatial frequency*’, το  $b > 1$  είναι η παράμετρος κλιμάκωσης της χωρικής συχνότητας ‘*spatial frequency scaling parameter*’ και  $\phi_n$  είναι τυχαίες φάσεις ‘*arbitrary phases*’ και χρησιμοποιούνται στην περίπτωση που θέλουμε να εισάγουμε ένα βαθμό τυχαιότητα δημιουργώντας έτσι σε κάθε καινούρια προσομοίωση μια επιφάνεια που είναι τελείως διαφορετική από κάθε προηγούμενη. Σε όλες τις προσομοιώσεις της παρούσας διατριβής η παράμετρος κλιμάκωσης της χωρικής συχνότητας  $b$  έχει επιλεγθεί σταθερά με τιμή  $b = 2e/3$ , καθότι είναι μια τιμή που κάνει την συνάρτηση να είναι σχεδόν περιοδική ‘*almost periodic*’ [12]. Η παράμετρος  $D$  ‘*fractal dimension*’ είναι η πιο σημαντική παράμετρος διότι αυτή καθορίζει το μέτρο της τραχύτητας της επιφάνειας. Μπορεί να πάρει τιμές  $1 \leq D < 2$ . Για  $D=1$  έχουμε μια ομαλή καμπύλη ενώ όσο πλησιάζουμε στο  $D \approx 2$  δημιουργείται μια καμπύλη με την μέγιστη δυνατή τραχύτητα ανάλογα βέβαια και με τον αριθμό των τόνων που την συνθέτουν. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των τόνων (βλ. εικόνα 1-4 & εικόνα 1-5) τόσο πιο σύνθετη γίνεται η επιφάνεια και τόσο μεγαλύτερος είναι και ο αριθμός των μεταβολών ανά μονάδα μήκους. Η εξίσωση (1.8) ως άθροισμα ημιτονικών συναρτήσεων έχει φυσικά μια μηδενική μέση τιμή. Για να μπορούμε να ορίζουμε την επιθυμητή τιμή πλάτους διακύμανσης  $\sigma^2$  ‘*rms height*’ της επιφάνειας πολλαπλασιάζουμε την εξίσωση (1.8) με ένα παράγοντα  $\sigma$  δημιουργώντας την τελική εξίσωση (1.9)

$$f_r(x) = \sigma C \sum_{n=0}^{N-1} (D-1)^n \sin(K_0 b^n x + \phi_n) \quad (1.9)$$

Αυτό όμως που έχει μεγάλη σημασία και χρειάζεται να δώσουμε ιδιαίτερη προσοχή στις προσομοιώσεις με μεταβλητή τραχύτητα (μεταβαλλόμενη τιμή της παραμέτρου  $D$ ) είναι ότι αυξάνοντας την τιμή  $D$  αυξάνεται εκτός από την τραχύτητα και η διακύμανση του πλάτους της επιφάνειας, βλ. εξίσωση 1.9. Αυτό γίνεται άμεσα αντιληπτό εάν παρατηρήσουμε ότι η παράμετρος  $D$  καθορίζει ταυτόχρονα και το πλάτος του κάθε τόνου που συνθέτει την τελική επιφάνεια. Έτσι όσο αυξάνει η τιμή της παραμέτρου  $D$  τόσο αυξάνεται και η τιμή του πλάτους της διακύμανσης της επιφάνειας κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε αλλοίωση των αποτελεσμάτων καθότι η σκέδαση των ΗΜ κυμάτων θα γίνεται μεταξύ επιφανειών όχι μόνο διαφορετικής τραχύτητας αλλά και διαφορετικού πλάτους διακύμανσης.

Για να κρατηθεί η τιμή της διακύμανση σταθερή και ίση πάντα με  $\sigma^2$  ανεξάρτητα της τιμής της εκάστοτε παραμέτρου  $D$ , χρησιμοποιείται ένα παράγοντας  $C$ , παράγοντας αυτόματης ρύθμισης του πλάτους '*amplitude control factor*'. Αυτός ο παράγοντας πρέπει να υπολογιστεί προσεκτικά και έχει πολύ μεγάλη σημασία για την αξιοπιστία των προσομοιώσεων γιατί αυτός μας δίνει την δυνατότητα να συγκρίνουμε μεταξύ επιφανειών που έχουν το ίδιο  $\sigma^2$  '*rms height*' και διαφέρουν μεταξύ τους μόνο ως προς την τραχύτητα.

Ο παράγοντας  $C$  '*amplitude control factor*' υπολογίζεται προσεκτικά ως εξής:

Από την εξίσωση (1.9) και για  $\varphi_n=0$  παίρνω την εξίσωση (1.10):

$$f_r(x) = \sigma C \times \sum_{n=0}^{N-1} (D-1)^n \sin(K b^n x) \quad (1.10)$$

Η τιμή  $\sigma^2$  '*rms*' της  $f_r(x)$  υπολογίζεται από την εξίσωση (1.11)

$$\sigma^2 = \frac{1}{2L} \times \int_0^{2L} f_r^2(x) dx \quad (1.11)$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (1.11) στην εξίσωση (1.10) έχουμε ότι

$$\sigma^2 = \frac{1}{2L} \times \int_0^{2L} \sigma^2 C^2 \sum_{n=0}^{N-1} (D-1)^{2n} \sin^2(K b^n x) dx \quad (1.12)$$

για  $f_r(x) > 0 \quad \forall x, n$  ισχύει η σχέση (1.13)

$$\int \Sigma f(x) dx = \Sigma \int f(x) dx \quad (1.13)$$

και άρα η (1.12) με βάση την (1.13) μπορεί να ξαναγραφεί ως εξής:

$$\sigma^2 = \frac{1}{2L} \times \sigma^2 C^2 \times \sum_{n=0}^{N-1} \int_0^{2L} (D-1)^{2n} \sin^2(K b^n x) dx \quad (1.14)$$

χρησιμοποιώντας τις αλλαγές μεταβλητών:

$$u = K b^n x \Rightarrow du = K b^n dx \Rightarrow dx = \frac{du}{K b^n}$$

τα νέα όρια είναι για  $x_1 = 0 \Rightarrow u_1 = 0$  και για  $x_2 = 2L \Rightarrow u_2 = 2K b^n L$

έτσι η (1.14) γράφεται ως εξής:

$$\sigma^2 = \frac{1}{2L} \times \frac{\sigma^2 C^2}{K} \times \sum_{n=0}^{N-1} \frac{(D-1)^{2n}}{b^n} \int_0^{2K b^n L} \sin^2 u \cdot du \quad (1.15)$$

θέτοντας  $\sin^2 u = \frac{1}{2}(1 - \cos(2u))$  η σχέση (1.15) γίνεται ως εξής:

$$\sigma^2 = \frac{1}{2L} \times \frac{\sigma^2 C^2}{K} \times \sum_{n=0}^{N-1} \frac{(D-1)^{2n}}{b^n} \frac{1}{2} \int_0^{2Kb^n L} (1 - \cos(2u)) du \quad (1.16)$$

χρησιμοποιώντας τις αλλαγές μεταβλητών:  $w = 2u \Rightarrow dw = 2du \Rightarrow du = \frac{dw}{2}$

τα νέα όρια είναι για  $u_1 = 0 \Rightarrow w_1 = 0$  και  $u_2 = 2Kb^n L \Rightarrow W_2 = 4Kb^n L$  έτσι

η σχέση (1.16) γράφεται τώρα ως εξής:

$$\sigma^2 = \frac{1}{4L} \times \frac{\sigma^2 C^2}{K} \times \sum_{n=0}^{N-1} \frac{(D-1)^{2n}}{b^n} \cdot \frac{1}{2} \left\{ \int_0^{4Kb^n L} dw - \int_0^{4Kb^n L} \cos w \cdot dw \right\} \Rightarrow \quad (1.17)$$

και μετά από πράξεις έχουμε ότι:

$$\sigma^2 = \frac{1}{8L} \times \frac{\sigma^2 C^2}{K} \times \sum_{n=0}^{N-1} \frac{(D-1)^{2n}}{b^n} (4Kb^n L - \sin(4Kb^n L)) \quad (1.18)$$

Έτσι ο υπολογισμός του  $\sigma^2$  περιέχει τώρα δύο όρους:

$$\text{όρος } \alpha': \frac{1}{8L} \times \frac{\sigma^2 C^2}{K} \times \sum_{n=0}^{N-1} \frac{(D-1)^{2n}}{b^n} \times 4Kb^n L = \frac{1}{2} \sigma^2 C^2 \times \sum_{n=0}^{N-1} (D-1)^{2n}$$

$$\text{όρος } \beta': -\frac{1}{8L} \times \frac{\sigma^2 C^2}{K} \times \sum_{n=0}^{N-1} \sin(4Kb^n L) = 0$$

Κρατώντας έτσι μόνο τον  $\alpha'$  όρο έχουμε ότι

$$\sigma^2 = \frac{1}{2} \sigma^2 C^2 \times \sum_{n=0}^{N-1} (D-1)^{2n} \quad (1.19)$$

έχοντας υπόψη ότι  $\sum_{n=0}^{N-1} 1 \cdot \alpha^n = 1 \cdot \frac{1 - \alpha^N}{1 - \alpha}$  και θέτοντας  $\alpha^2 = a$  μπορούμε να γράψουμε ότι:

$$\sum_{n=0}^{N-1} \alpha^{2n} = \frac{1 - \alpha^{2N}}{1 - \alpha^2} \quad (1.20)$$

με την βοήθεια της εξίσωσης (1.20) η εξίσωση (1.19) μπορεί να γραφεί ως

$$\sigma^2 = \frac{\sigma^2 C^2}{2} \times \frac{1 - (D-1)^{2N}}{1 - (D-1)^2} \quad (1.21)$$

όπου λύνοντας την (1.21) ως προς την παράμετρο  $C$  βρίσκουμε ότι

$$C^2 = \frac{2(1-(D-1))}{1-(D-1)^{2N}} \Rightarrow C = \left[ \frac{2(1-(D-1)^2)}{1-(D-1)^{2N}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.22)$$

η εξίσωση (1.22) μπορεί να γραφεί στην τελική σχέση (1.23) που μας δίνει την τιμή του παράγοντα  $C$  συναρτήσει της τιμής  $D$ .

$$C = \left\{ \frac{2D(2-D)}{1-(D-1)^{2N}} \right\}^{1/2} \quad (1.23)$$

Με την προσθήκη της παραμέτρου  $C$  υπολογισμένη σύμφωνα με την εξίσωση (1.23) καταφέρνουμε να κρατήσουμε την rms τιμή της επιφάνειας  $\sigma^2$  της συνάρτησης (1.9), σταθερή και ανεξάρτητη από τις μεταβολές της τιμής που παίρνει η παράμετρος  $D$ . Έτσι η τιμή  $D$  καθορίζει πλέον μόνο την τραχύτητα της επιφάνειας αφήνοντας σταθερή και ανεπηρέαστη την rms τιμή της επιφάνειας επιτρέποντας έτσι την σύγκριση μεταξύ επιφανειών με διαφορετική τιμή τραχύτητας  $D$ .

Ένα ακόμα εγγενές χαρακτηριστικό της  $f_r(x)$ , εξίσωση (1.9), είναι ότι παρουσιάζει το κλασσικό χαρακτηριστικό της αυτοομοιότητας '*self-similarity*' των '*fractal*' και συγκεκριμένα ισχύει η παρακάτω σχέση:

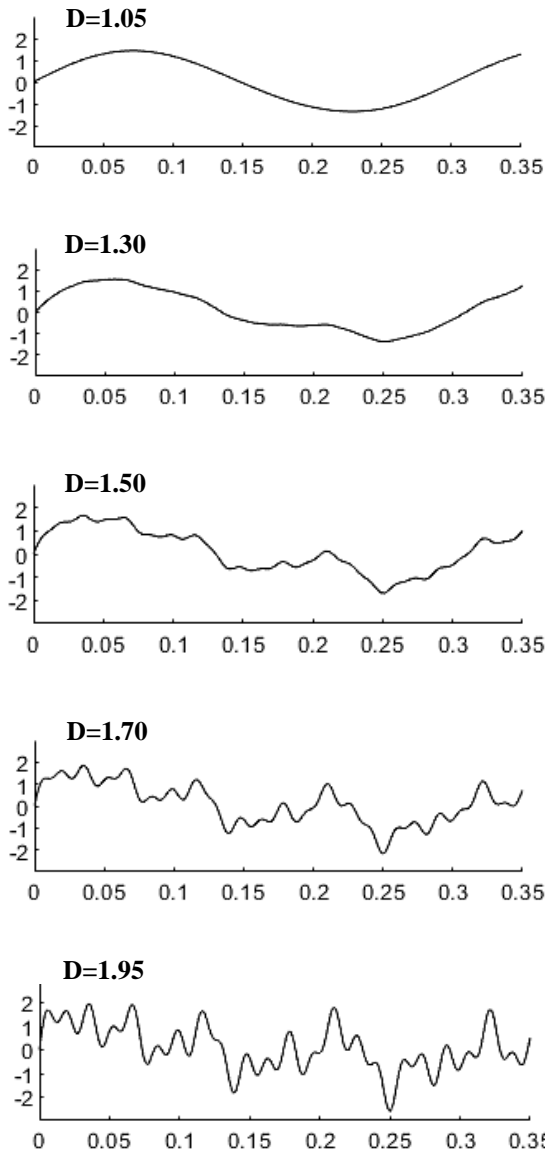
$$f_r(x) \approx \frac{1}{D-1} f_r(bx) \quad (1.24)$$

η οποία ουσιαστικά σημαίνει ότι η  $f_r(bx)$  καμπύλη είναι όμοια με την αρχική  $f_r(x)$  καμπύλη όταν ο άξονας των  $x$  αλλάζει κατά ένα παράγοντα  $b$  και ο άξονας των  $y$  αλλάζει κατά ένα παράγοντα  $1/(D-1)$ . Στην επόμενη παράγραφο παρουσιάζω κάποιες προσομοιώσεις της μορφής της επιφάνειας για διαφορετικές τιμές  $D$  της μορφοκλασματικής διάστασης '*fractal dimension*'. Με κατάλληλα υπολογισμένο τον παράγοντα αυτόματης ρύθμισης του πλάτους '*amplitude control factor*'  $C$ , σχέση (1.23), όλες οι προσομοιώσεις ανεξαρτήτως τραχύτητας εμφανίζουν μια όμοια σε μέγιστο πλάτος, '*RMS height*,' κοματομορφή όπως φαίνεται και στην επόμενη εικόνα 1.6 όπου το μόνο που αλλάζει είναι η τραχύτητα της επιφάνειας.

#### 1.1.4 Προσομοίωση τραχύτητας για διαφορετικές τιμές ‘fractal dimension’ $D$

Στο λογισμικό προσομοίωσης ‘ScatteringLab,’ το οποίο ανέπτυξα για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας χρησιμοποιώ την ‘Modified W-M’ συνάρτηση (1.25)

$$f_r(x) = \sigma \cdot \left\{ \frac{2D(2-D)}{1-(D-1)^{2N}} \right\}^{1/2} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} (D-1)^n \cdot \sin(K_0 \cdot b^n \cdot x + \phi_n) \quad (1.25)$$



Εικόνα 1-6. Μονοδιάστατη ‘fractal’ συνάρτηση  $f_r(x)$  για διαφορετικές τιμές  $D$  ‘fractal dimension’

Η συνάρτηση  $f_r(x)$  έχει χρησιμοποιηθεί κατ’ επανάληψη σε παρόμοιες έρευνες φαινομένων σκέδασης ΗΜ κυμάτων από πολλούς συγγραφείς [11]-[14],[16]-[20],[23] δεδομένου δε ότι και πολλές φυσικές ανώμαλες επιφάνειες, όπως η κυμάτωση μιας θάλασσας ή ένα ορεινό έδαφος, παρουσιάζουν εγγενώς ‘fractal’ χαρακτηριστικά. Η ικανότητα ελέγχου των επιφανειών του μοντέλου σε συνδυασμό με τον ρεαλισμό του το καθιστούν ένα εξαιρετικό μοντέλο για τραχιές επιφάνειες σκέδασης.

με παραμέτρους προσομοίωσης  $b = 2e/3$ ,  $K_0=24$  και  $N=6$ , ήτοι με 6 τόνους να συνθέτουν την τελική επιφάνεια ακολουθώντας έτσι την σχετική βιβλιογραφία [11]-[14],[16]-[19]. Η παράμετρος τραχύτητας ‘fractal dimension’ μπορεί να παίρνει τιμές μεταξύ:  $1.05 \leq D \leq 1.95$  [6],[12],[20].

Στην εικόνα 1-6 παρουσιάζω κάποια δείγματα, από τομές επιφάνειας κατασκευασμένες από την σχέση (1.25) για διαφορετικές τιμές τραχύτητας  $D=1.06, 1.30, 1.50, 1.70$  και  $1.95$

Συνοψίζοντας τις προηγούμενες ενότητες θα μπορούσα να πω ότι η  $f_r(x)$  αποτελεί ένα μαθηματικό μοντέλο επιφάνειας πεπερασμένου εύρους χωρικών συχνοτήτων ( $N=6$ ) όπου η φασματική κατανομή τους καθορίζεται από τις παραμέτρους  $K_0, b, N$ . Η τραχύτητα της επιφάνειας αυτού του μοντέλου δίνεται από την μορφοκλασματική διάσταση ‘ $D$ ’ ενώ το ‘rms height’ της επιφάνειας μπορεί να παραμένει σταθερό και ίσο με  $\sigma$ , ανεξάρτητα από το βαθμό της τραχύτητας ‘ $D$ ’, χάρη στον παράγοντα αυτόματης ρύθμισης του πλάτους ‘amplitude control factor’  $C$ .

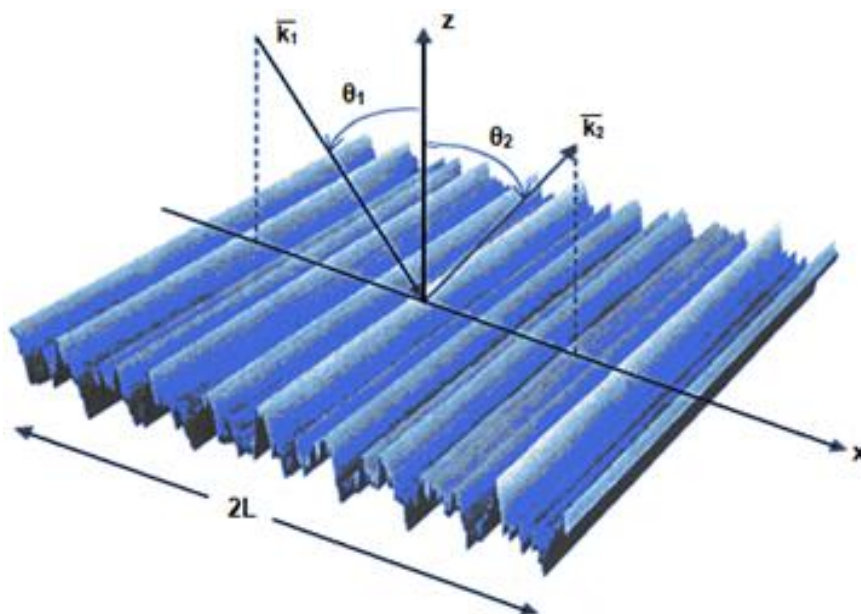
Για όλους τους παραπάνω λόγους, η συνάρτηση  $f_r(x)$  έχει χρησιμοποιηθεί σε παρόμοιες έρευνες φαινομένων σκέδασης ΗΜ κυμάτων από πολλούς συγγραφείς [11]-[14],[16]-[20],[23] δεδομένου δε ότι και πολλές φυσικές ανώμαλες επιφάνειες, όπως η κυμάτωση μιας θάλασσας ή ένα ορεινό έδαφος, παρουσιάζουν εγγενώς ‘fractal’ χαρακτηριστικά. Η ικανότητα ελέγχου των επιφανειών του μοντέλου σε συνδυασμό με τον ρεαλισμό του το καθιστούν ένα εξαιρετικό μοντέλο για τραχιές επιφάνειες σκέδασης.

## 1.2 Προσομοίωση Σκέδασης Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων.

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζω την θεωρία του προβλήματος της ΗΜ σκέδασης από τραχεία επιφάνεια. Ξεκινώ με την γεωμετρία του προβλήματος και χρησιμοποιώντας την μέθοδο κατά Kirchhoff, 'Kirchhoff Approximation' (KA) παρουσιάζω όλες τις απαραίτητες ενδιάμεσες αποδείξεις της μεθόδου [24]. Υπολογίζω την ένταση του σκεδαζόμενου πεδίου και εισάγω την έννοια του συντελεστή σκέδασης [12], [24]. Καταλήγω σε μια έκφραση κλειστού τύπου για τον συντελεστή σκέδασης η οποία αντιπροσωπεύει την προσεγγιστική λύση (KA) για την γενική περίπτωση σκέδασης από τραχεία επιφάνεια τόσο πεπερασμένης όσο και τέλει αγωγιμότητας. Στο τέλος αυτή της ενότητας εφαρμόζω την γενική λύση σε μια μονοδιάστατη 'fractal' επιφάνεια  $fr(x)$  εφαρμόζοντας την εξίσωση (1.9) και παράγω την τελική εξίσωση που χρησιμοποίησα στο λογισμικό 'ScatteringLab' για την υλοποίηση των προσομοιώσεων σκέδασης στην παρούσας διατριβή.

### 1.2.1 Γεωμετρία του προβλήματος σκέδασης ΗΜ από τραχεία επιφάνεια.

Στην παρακάτω εικόνα 1.7 βλέπουμε μια επιφάνεια  $S = S(x, y)$ . Η επιφάνεια αυτή δημιουργείται χρησιμοποιώντας την εξίσωση (1.9) για  $S = f_r(x, y)$  θεωρώντας ότι και στην κατεύθυνση  $y$  επαναλαμβάνετε η ίδια τιμή, ήτοι  $f_r(x, y) = f_r(x)$ . Ένα επίπεδο ΗΜ κύμα φωτίζει αυτή την 'fractal' επιφάνεια σε ένα τμήμα της, συνολικού μήκους  $2L$  (για  $x = -L$  έως  $x = L$ ) υπό μια γωνία πρόσπτωσης  $\theta_1$  ως προς την κάθετο στο επίπεδο αναφοράς ( $z=0$ ). Το κυματοδιάνυσμα του προσπίπτοντος κύματος συμβολίζεται με  $\vec{k}_1$  και το κυματοδιάνυσμα του σκεδαζόμενου κύματος συμβολίζεται με  $\vec{k}_2$  και έχουν μέτρο ίσο με  $2\pi/\lambda$ .



Εικόνα 1-7. Γεωμετρία προβλήματος σκέδασης επί επιφάνεια 'fractal'

Το πρόβλημα του υπολογισμού της σκέδασης από fractal επιφάνειες, περιλαμβάνει λύσεις από μη γραμμικές διαφορικές εξισώσεις [7],[25]. Εφόσον μία αναλυτική

γενική λύση κλειστής μορφής των μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων δεν είναι δυνατό να βρεθεί, είναι απαραίτητο να βρεθούν προσεγγιστικές λύσεις σύμφωνα με ορισμένα όρια. Η προσέγγιση Kirchhoff 'Kirchhoff Approximation' (KA) είναι έγκυρη όταν η τοπική ακτίνα καμπυλότητας της τραχύτητας της επιφάνειας είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με το μήκος του προσπίπτοντος κύματος [9],[10],[11],[24]. Για την εγκυρότητα της προσεγγιστικής αυτής μεθόδου (KA) ειδικά επί επιφάνειας τύπου 'fractal' υπάρχει και με πιο πρόσφατα δημοσιευμένη εργασία [21] η οποία επιπλέον μας εφιστά την προσοχή στο ότι η σχέση της ενεργού μέσης ακτίνας καμπυλότητας που εμφανίζει μια επιφάνεια ως προς το μήκος του προσπίπτοντος σε αυτή HM κύματος δεν εξαρτάται μόνο από τα μαθηματικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας αλλά, ειδικά στις οριακές περιπτώσεις, εξαρτάται και από την γωνία πρόσπτωσης, την πόλωση και το μήκος του ίδιου του προσπίπτοντος HM κύματος. Σε κάθε περίπτωση στην παρούσα διατριβή και στις σχετικές προσομοιώσεις έχω φροντίσει έτσι ώστε το μήκος κύματος να είναι πάντα πολύ μικρότερο από την ακτίνας καμπυλότητας ώστε να ισχύει ξεκάθαρα η βασική προϋπόθεση της (KA) μεθόδου. Ένα πλεονέκτημα της προσέγγισης Kirchhoff, το οποίο την κάνει ιδανική για την συγκεκριμένη έρευνα, είναι ότι για την εξαγωγή του αποτελέσματος λαμβάνει υπόψη της επακριβώς την τραχύτητα της επιφάνειας προκειμένου να υπολογίσει τη σκέδαση, ενώ άλλες προσεγγιστικές μέθοδοι υπολογίζουν στατιστικά το μέσο όρο του σκεδαζόμενου πεδίου από την τραχεία επιφάνεια [7],[24].

### 1.2.2 Υπολογισμός εξίσωσης γενικής περίπτωσης σκέδασης με Kirchhoff

Ακολουθώντας την σχετική βιβλιογραφία [24] και με βάση την εικόνα 1-7 χρησιμοποιώ τις καρτεσιανές συντεταγμένες  $x, y, z$  με αρχή συντεταγμένων το  $0$  και μοναδιαία διανύσματα τα  $x_0, y_0, z_0$  και με την τραχεία επιφάνεια να δίνεται από την συνάρτηση (1.26)

$$S = S(x, y) \quad (1.26)$$

όπου  $\overline{S(x, y)} = 0$ , ήτοι οι μεταβολές λόγω τραχύτητας της επιφάνειας παρουσιάζουν μηδενική μέση τιμή και η μέση στάθμη της επιφάνειας  $S(x, y)$  βρίσκεται στο επίπεδο  $z=0$ . Για τα σημεία που βρίσκονται επί της επιφάνειας  $S(x, y)$  το διάνυσμα της θέσης τους δίνεται από την σχέση (1.27)

$$\vec{r} = xx_0 + yy_0 + S(x, y)z_0 \quad (1.27)$$

Με δείκτη **1** συμβολίζω το προσπίπτον πεδίο ενώ με δείκτη **2** το σκεδαζόμενο.

Θεωρώ επίσης ότι το  $E_1$  είναι ένα αρμονικό επίπεδο κύμα με μοναδιαίο πλάτος που δίνεται από την σχέση (1.28)

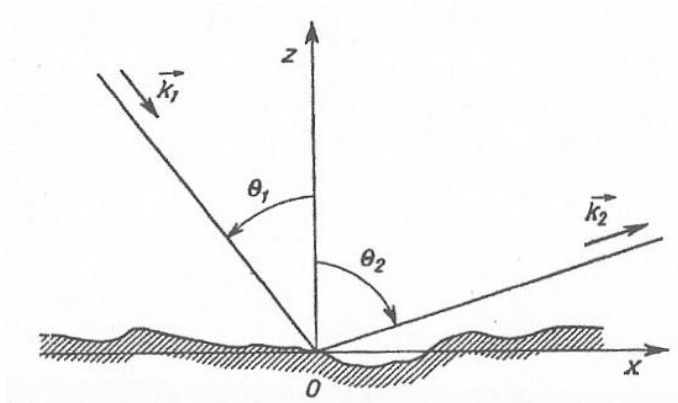
$$\vec{E}_1 = e^{i\vec{k}_1\vec{r} - i\omega t} \quad (1.28)$$

όπου  $k_1$  είναι το κυματοδιάνυσμα του προσπίπτοντος κύματος,  $r$  η ακτίνα του

διανύσματος θέσης που δίνεται από την σχέση (1.29) και  $e^{-i\omega t}$  η χρονική εξάρτηση η οποία στο εξής θα αποσιωπάται.

$$\vec{r} = xx_0 + yy_0 + yz_0 \quad (1.29)$$

Η γωνία πρόσπτωσης  $\theta_1$  είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του άξονα  $z$  και της διεύθυνσης διάδοσης του  $\vec{E}_1$ , ενώ  $\theta_2$  είναι η γωνία σκέδασης που σχηματίζεται μεταξύ του  $z$  και  $\vec{E}_2$  με τις  $\theta_1$  και  $\theta_2$  να μετρούνται αντίθετα από τον θετικό άξονα  $z$  (εικόνα 1-8)



Εικόνα 1-8. Γεωμετρία προβλήματος σκέδασης ΗΜ κύματος επί μονοδιάστατης επιφάνειας

Προς απλοποίηση θεωρώ ότι το ΗΜ κύμα είναι είτε οριζόντια είτε κάθετα πολωμένο έτσι ώστε να χρειάζεται να υπολογίζω μόνο την βαθμωτή τιμή του διανύσματος  $E_2$ . Η πόλωση του προσπίπτοντος κύματος είναι λοιπόν είτε οριζόντια, το  $\vec{E}_1$  κείται κάθετα στο επίπεδο πρόσπτωσης δηλαδή  $\vec{E}_1^h = E_1^h y_0$  είτε κατακόρυφη, το  $\vec{E}_1$  κείται επί του επιπέδου πρόσπτωσης  $x_0, z_0$ . Ομοίως το  $E_2$  θεωρείται κατακόρυφα πολωμένο αν κείται στο επίπεδο σκέδασης  $x_0, z_0$ . Ομοίως στην οριζόντια πόλωση τα  $\vec{E}_1$  και  $\vec{E}_2$  είναι κάθετα στο επίπεδο πρόσπτωσης και σκέδασης αντίστοιχα. Οι ποσότητες που συνδέονται με κάθετη πόλωση θα δηλώνονται με τον δείκτη 'ν' (π.χ.  $E_1^v, E_2^v$ ), και εκείνες που συνδέονται με οριζόντια πόλωση από το δείκτη 'h' (π.χ.  $E_1^h, E_2^h$ ). Το  $E$  είναι βαθμωτό έτσι ώστε  $\vec{E} = \vec{e} \cdot E$  όπου  $\vec{e}$  είναι το μοναδιαίο διάνυσμα στην κατεύθυνση του  $\vec{E}$  π.χ.  $\vec{E}_1^h = E_1^h y_0$ .

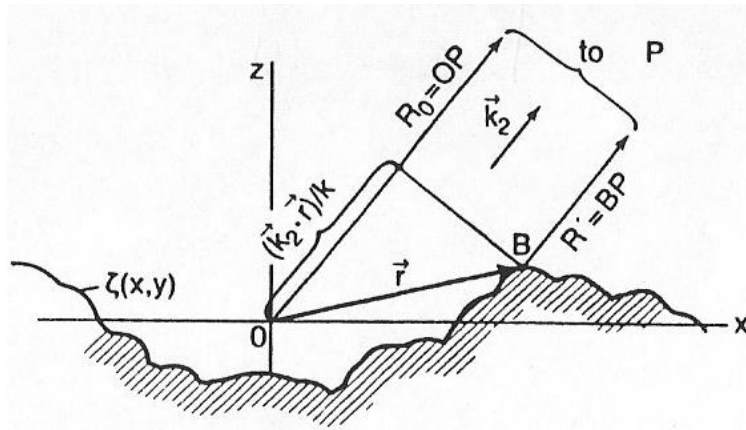


Αναφερόμενος στο σχήμα 1-9, το σκεδαζόμενο ηλεκτρικό πεδίο  $E_2$  στο σημείο παρατήρησης  $P$  που απέχει απόσταση  $R' = BP$  από το τυχόν σημείο  $B$  της επιφάνειας  $S(x, y)$ , δίνεται από το ολοκλήρωμα Helmholtz (1.30)

$$E_2(P) = \frac{1}{4\pi} \iint_S \left( E \frac{\partial \psi}{\partial n} - \psi \frac{\partial E}{\partial n} \right) dS \quad (1.30)$$

όπου

$$\psi = \frac{e^{ik_2 R'}}{R'} \quad (1.31)$$



Εικόνα 1-9. Υπολογισμός του σκεδαζόμενου HM πεδίου στο σημείο P

Έστω ότι η απόσταση του σημείου παρατήρησης  $P$  από την αρχή των αξόνων (0) είναι  $R_0$ . Στο μακράν πεδίο οι ακτίνες  $BP$  και  $OP$  γίνονται παράλληλες οπότε προκύπτει ότι:

$$k_2 R' = k_2 R_0 - \vec{k}_2 \cdot \vec{r} \quad (1.32)$$

και έτσι η εξίσωση (1.31) γράφεται :

$$\psi = \frac{e^{ik_2 R_0 - i\vec{k}_2 \cdot \vec{r}}}{R_0} \quad (1.33)$$

Το επόμενο βήμα για τον υπολογισμό του σκεδαζόμενου πεδίου  $E_2(P)$  της σχέσης (1.30) είναι να γραφεί η προσέγγιση κατά Kirchhoff για τα  $E$  και  $\frac{\partial E}{\partial n}$  όπου  $E$  είναι το πεδίο και  $\frac{\partial E}{\partial n}$  είναι η κάθετη παράγωγος στην επιφάνεια  $S$ .

Η ακριβής τιμή αυτών των δυο ποσοτήτων είναι γενικά άγνωστη και η προσέγγιση της μεθόδου Kirchhoff ονομάζεται έτσι ακριβώς γιατί βασίζεται στην προσέγγιση των τιμών του  $E$  και  $\frac{\partial E}{\partial n}$  πάνω στην επιφάνεια  $S$  από ότι στο να υπολογίσουμε το ολοκλήρωμα της σχέσης (1.30).

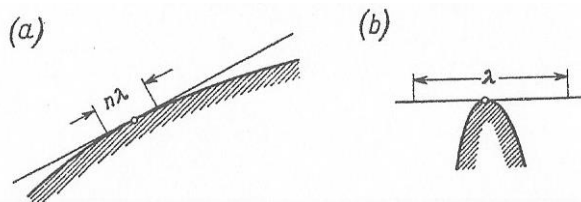
Η προσέγγιση αυτή συνίσταται στις ακόλουθες εκφράσεις για το ηλεκτρικό πεδίο επί της επιφάνειας  $S$

$$(E)_s = (1 + R) E_1 \quad (1.34)$$

και

$$\left( \frac{\partial E}{\partial n} \right)_s = (1 - R) E_1 \vec{k}_1 \cdot \vec{n} \quad (1.35)$$

όπου  $\vec{n}$  είναι το μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα επί της επιφάνειας. Η εξίσωση (1.34) χρησιμοποιεί τον συντελεστή ανάκλασης κατά Fresnel για την προσέγγιση του άγνωστου ηλεκτρικού πεδίου. Η προσέγγιση αυτή ισχύει υπό την προϋπόθεση ότι η ακτίνα καμπυλότητας των ανωμαλιών που εμφανίζονται στην επιφάνεια είναι πολύ μεγαλύτερη [9],[10],[21],[24] συγκρινόμενη με το μήκος κύματος (βλ. εικόνα 1-10α). Η προσέγγιση αυτή καταρρέει εντελώς όταν η τραχύτητα περιλαμβάνει αιχμηρά άκρα, οξείες αιχμές ή ακμές (βλ. εικόνα 1.10b).



Εικόνα 1-10. Εφαιπτόμενο επίπεδο σε τυχαίο σημείο της τραχείας επιφάνειας. Η ακτίνα καμπυλότητας είναι (α) μεγάλη, (β) μικρή συγκρινόμενη με το μήκος κύματος

Οι συντελεστές ανάκλασης Fresnel για λείο επίπεδο δίνονται από τη σχέση (1.36) για την κάθετη πόλωση

$$R^v = \frac{Y^2 \cos \theta - \sqrt{(Y^2 - \sin^2 \theta)}}{Y^2 \cos \theta + \sqrt{(Y^2 - \sin^2 \theta)}} \quad (1.36)$$

και από την σχέση (1.37) για την οριζόντια πόλωση

$$R^h = \frac{\cos \theta - \sqrt{(Y^2 - \sin^2 \theta)}}{\cos \theta + \sqrt{(Y^2 - \sin^2 \theta)}} \quad (1.37)$$

Όπου  $Y$  είναι η κανονικοποιημένη σύνθετη αγωγιμότητα του μέσου στον χώρο κάτω από την τραχεία επιφάνεια ήτοι  $z < S(x, y)$  και δίνεται από την σχέση

$$Y = \sqrt{\frac{\epsilon_{rc}}{\mu_{rc}}} \quad (1.38)$$

όπου  $\epsilon_{rc}$  είναι η σχετική διηλεκτρική σταθερά που δίνεται από την σχέση

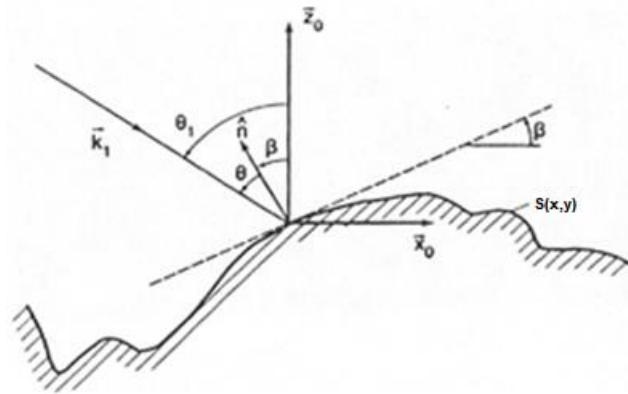
$$\epsilon_{rc} = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} + i60\lambda\sigma \quad (1.39)$$

Η διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_{rc}$  είναι μιγαδική όταν το μέσο εμφανίζει απώλειες λόγω αγωγιμότητας  $\sigma$ . Η σχετική μαγνητική διαπερατότητα δίνεται από την σχέση

$$\mu_{rc} = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (1.40)$$

η οποία μπορεί να έχει και αυτή ένα μιγαδικό μέρος αν το μέσο παρουσιάζει μαγνητικές απώλειες.

Στις σχέσεις (1.36) & (1.37) ορίζουμε ως γωνία  $\theta = \sphericalangle(\vec{k}_1, \vec{n})$  την τοπική γωνία πρόσπτωσης (βλ. εικόνα 1-11) ήτοι η γωνία που περιλαμβάνεται μεταξύ  $\vec{k}_1$  και  $\vec{n}$ , όπου  $\vec{n}$  είναι το μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα. Συνεπώς η γωνία  $\theta$  μεταβάλλεται συνεχώς καθώς μεταβάλλεται το κάθετο μοναδιαίο διάνυσμα στα διάφορα σημεία της επιφάνειας, ενώ η γωνία πρόσπτωσης  $\theta_1 = \sphericalangle(\vec{k}_1, \vec{z}_0)$  παραμένει σταθερή για όλη την επιφάνεια.



Εικόνα 1-11. Η συνεχώς μεταβαλλόμενη τοπική γωνία  $\theta$  και η σταθερή γωνία

Από τις σχέσεις (1.36) και (1.37) παρατηρούμε ότι η τιμή του συντελεστή ανάκλασης  $R$  ακόμα και για την ίδια επιφάνεια και υπό την ίδια γωνία πρόσπτωσης των ΗΜ κυμάτων είναι διαφορετική ανάλογα με την πόλωση του ΗΜ κύματος. Παρατηρούμε επίσης ότι η τιμή του συντελεστή πρόσπτωσης εξαρτάται τόσο από τις ιδιότητες του υλικού της σκεδαζόμενης επιφάνειας ( $\epsilon_{rc}, \mu_{rc}$ ) όσο και από την γωνία πρόσπτωσης των ΗΜ κυμάτων.

Για την περίπτωση που εξετάζω ισχύει (βλ. εικόνα 1-7) ισχύει ότι  $S(x,y) = S(x)$ , ήτοι σταθερό ύψος κατά μήκος της κατεύθυνσης  $y$  οπότε από το σχήμα 1.11 προκύπτει

$$\theta = \theta_1 - \beta = \theta_1 - \arctan S'(x) \quad (1.41)$$

Στην εξίσωση (1.30), ολοκλήρωμα Helmholtz, αντικαθιστώ τα  $\psi, E$  με τις αντίστοιχες εξισώσεις (1.33) και (1.34) και μετά από τις σχετικές πράξεις καταλήγω στην παρακάτω προσεγγιστική πλέον σχέση για το σκεδαζόμενο πεδίο:

$$E_2 = \frac{ie^{ikR_0}}{4\pi R_0} \int_s (Rv - p) \cdot \vec{n} e^{i\vec{v}\cdot\vec{r}} dS \quad (1.42)$$

Όπου  $R$  είναι ο τοπικός συντελεστής ανάκλασης Fresnel,  $R_0$  είναι η απόσταση του σημείου παρατήρησης  $P$  από την αρχή των αξόνων και  $\vec{v}, \vec{p}$  είναι βοηθητικά για τους υπολογισμούς διανύσματα που δίνονται από τις σχέσεις (1.43), (1.44)

$$\vec{v} = \vec{k}_1 - \vec{k}_2 \quad (1.43)$$

$$\vec{p} = \vec{k}_1 + \vec{k}_2 \quad (1.44)$$

Το σημείο παρατήρησης  $P$  θεωρείται σταθερό και ως εκ τούτου σταθερά παραμένουν και τα κυματοδιανύσματα  $\vec{k}_1, \vec{k}_2$  και κατ' επέκταση σταθερά και τα διανύσματα  $\vec{v}, \vec{p}$ , ενώ όσο αφορά την ολοκλήρωση τα μεγέθη  $\vec{n}, \vec{r}$  και  $R$  είναι μεταβλητά.

Εργαζόμενοι σε καρτεσιανές συντεταγμένες οι σχέσεις (1.43) και (1.44) μπορούν να αναλυθούν ως εξής (βλ. σχήμα 1.8):

$$\vec{v} = k(\sin \theta_1 - \sin \theta_2) \bar{x}_0 - k(\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \bar{z}_0 \quad (1.45)$$

$$\vec{p} = k(\sin \theta_1 + \sin \theta_2) \bar{x}_0 + k(\cos \theta_2 - \cos \theta_1) \bar{z}_0 \quad (1.46)$$

και επίσης με βάση το σχήμα 1-11 έχουμε ότι:

$$\vec{r} = x \bar{x}_0 + S(x) \bar{z}_0 \quad (1.47)$$

$$\vec{n} = -\bar{x}_0 \sin \beta + \bar{z}_0 \cos \beta \quad (1.48)$$

$$\tan \beta = S'(x) \quad (1.49)$$

$$dS = \frac{dx}{\cos \beta} = \sec \beta \cdot dx \quad (1.50)$$

Η εξίσωση (1.42) μετά από αντικαταστάσεις με τις αντίστοιχες εξισώσεις από (1.43) έως και (1.50) και τις σχετικές πράξεις απλοποιείται έτι περαιτέρω και για μια επιφάνεια που εκτείνεται από  $x = -L$  έως  $x = +L$  μπορεί να γραφεί ως εξής

$$E_2 = \frac{ike^{ikR_0}}{4\pi R_0} \int_{-L}^L (aS' - b) e^{iv_x + iv_z S(x)} dx \quad (1.51)$$

όπου:

$$a = (1 - R) \sin \theta_1 + (1 + R) \sin \theta_2 \quad (1.52)$$

$$b = (1 + R) \cos \theta_2 - (1 - R) \cos \theta_1 \quad (1.53)$$

$$v_x = k(\sin \theta_1 - \sin \theta_2) \quad (1.54)$$

$$v_z = -k(\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \quad (1.55)$$

### 1.3 Εισαγωγή στην έννοια του συντελεστή σκέδασης $\gamma$

Προκειμένου να επιτευχθεί η χρήση ενός μεγέθους που θα ευνοεί συγκρίσεις μεταξύ αποτελεσμάτων εισάγεται η έννοια του συντελεστή σκέδασης η οποία επιπροσθέτως καταφέρνει να απλοποιήσει μαθηματικά ακόμα περισσότερο την εξίσωση (1.51). Έτσι ο συντελεστής σκέδασης ορίζεται ως:

$$\gamma = \frac{E_2}{E_{20}} \quad (1.56)$$

Όπου  $E_2$  είναι η ένταση του σκεδαζόμενου πεδίου υπό γωνία πρόσπτωσης  $\theta_1$  από τραχεία επιφάνεια πεπερασμένης αγωγιμότητας και  $E_{20}$  είναι η ένταση του σκεδαζόμενου από τέλεια αγωγήμη και επίπεδη επιφάνεια ίδιων διαστάσεων με την τραχεία επιφάνεια, υπό την ίδια γωνία πρόσπτωσης  $\theta_1$  και στην ίδια απόσταση παρατήρησης.

Για τον υπολογισμό του  $E_{20}$  στην εξίσωση (1.54) θέτω  $\theta_2 = \theta_1$ , αφού για τιμές  $L \gg \lambda$  η σκέδαση από μια τέλεια αγωγήμη και τέλεια λεία επιφάνεια θα συγκεντρώσει πρακτικά όλη την ανακλώμενη ενέργεια στην κατοπτρική κατεύθυνση  $\theta_2 = \theta_1$  όπως άλλωστε προκύπτει και από την σχέση (1.54) όπου  $v_x = k(\sin \theta_1 - \sin \theta_2)$ . Επίσης αφού η επιφάνεια είναι εντελώς λεία και επίπεδη παντού θέτω  $S(x,y)=0$  και άρα και  $S'(x,y)=0$  και θεωρώντας την περίπτωση κύματος οριζόντιας πόλωσης από την σχέση 1.37 για  $\theta_2 = \theta_1$  θα πάρω ότι  $R = R^h = -1$ . Με βάση αυτά η σχέση (1.51) μας δίνει την ένταση του κατοπτρικά σκεδαζόμενου πεδίου :

$$E_{20} = \frac{ik \cdot e^{ikR_0}}{\pi R_0} \cdot L \cos \theta_1 \quad (1.57)$$

Διαιρώντας το  $E_2$  με το  $E_{20}$  δημιουργείται ένας κανονικοποιημένος, ως προς το μέγιστο  $E_{20}$ , συντελεστής σκέδασης για τον οποίο σύμφωνα με το νόμο της διατήρησης της ενέργειας θα ισχύει πάντα ότι:

$$|\gamma| \leq 1 \quad (1.58)$$

Η χρήση του συντελεστή σκέδασης καταφέρνει να κανονικοποιεί τα αποτελέσματα στην κλίμακα από 0 έως 1 και ταυτόχρονα να απλοποιεί έτι περαιτέρω την σχέση (1.51) απαλείφοντας τον όρο  $ike^{ikR_0}$

Μετά τις αντικαταστάσεις η εξίσωση (1.51) διαμορφώνει τον κάτωθι συντελεστή σκέδασης ο οποίος ισχύει ως:

*η γενική λύση για μονοδιάστατη τραχεία επιφάνεια πεπερασμένης αγωγιμότητας*

$$\gamma = \frac{1}{4L \cos \theta_1} \int_{-L}^L (a \cdot S'(x) - b) e^{i v_x \cdot x + i v_z \cdot S(x)} dx \quad (1.59)$$

Η παραπάνω σχέση (1.59) παρά την απλοποίηση δεν είναι ιδιαίτερα χρήσιμη καθώς τα  $a$  και  $b$  (εξισώσεις 1.52 & 1.53) που υπάρχουν στο ολοκλήρωμα είναι πολύπλοκες συναρτήσεις που εξαρτώνται από την μεταβλητή ολοκλήρωσης  $x$  του

ολοκληρώματος. Αυτό συμβαίνει διότι ο τοπικός συντελεστής ανάκλασης  $R$  (εξισώσεις 1.36 & 1.37) είναι εξαρτημένος από την γωνία  $\theta$  η οποία γωνία  $\theta$  εξαρτάται άμεσα από την μεταβλητή ολοκλήρωσης μέσω της σχέσης (1.41) ήτοι  $\theta = \theta_1 - \arctan S'(x)$ .

Το ολοκλήρωμα (1.59) μπορεί όμως εύκολα να ολοκληρωθεί όταν τα  $a$  και  $b$  είναι σταθερά. Ένας τρόπος για να το πετύχουμε αυτό είναι να θεωρήσουμε την τιμή του συντελεστή ανάκλασης  $R$  ως μια σταθερά κατά προσέγγιση ίση με την μέση τιμή της. Σε αυτή την περίπτωση με σταθερή τιμή  $R$ , οι συντελεστές  $a$  και  $b$  γίνονται σταθερές ανεξάρτητες της μεταβλητής ολοκλήρωσης  $x$ .

Άλλος τρόπος είναι εάν θεωρήσουμε ότι η υπό εξέταση επιφάνεια είναι μια τέλεια αγωγίμη επιφάνεια, ήτοι  $Y \rightarrow \infty$ . Και σε αυτή την περίπτωση η τιμή του συντελεστή  $R$  γίνεται σταθερά. Από την (1.36) και (1.37) θέτοντας  $Y \rightarrow \infty$  βρίσκουμε ότι

$$R^v = 1 \text{ και } R^h = -1 \quad (1.60)$$

Έτσι τώρα με τα  $a$  και  $b$  σταθερά και ανεξάρτητα της μεταβλητής  $x$  όπως επίσης σταθερά και τα  $v_x$  και  $v_z$  η εξίσωση (1.59) της γενικής λύσης μπορεί να χωριστεί σε άθροισμα δύο ολοκληρωμάτων:

$$\gamma = \frac{1}{4L \cos \theta_1} \left[ a \cdot \int_{-L}^L S'(x) \cdot e^{i v_z \cdot S(x)} \cdot e^{i v_x \cdot x} dx - b \cdot \int_{-L}^L e^{i v_z \cdot S(x)} \cdot e^{i v_x \cdot x} dx \right] \quad (1.61)$$

ολοκληρώνοντας κατά παράγοντες το κάθε ολοκλήρωμα της (1.61) ξεχωριστά και χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (1.45),(1.47),(1.54),(1.55) επαναφέρω τα  $e^{i v_x \cdot x} \cdot e^{i v_z \cdot S(x)}$  σε  $e^{i \vec{v} \cdot \vec{r}}$  και καταλήγω στην παρακάτω εξίσωση:

$$\gamma = \frac{1}{4L \cos \theta_1} \left[ \left( \frac{a \cdot v_x}{v_z} + b \right) \int_{-L}^L e^{i \vec{v} \cdot \vec{r}} dx - \frac{ia}{v_z} e^{i \vec{v} \cdot \vec{r}(x)} \Big|_{-L}^L \right] \quad (1.62)$$

Χρησιμοποιώντας την (1.52) και (1.53) με  $R^v = 1$  βρίσκω τις τιμές των  $a$  και  $b$  για κάθετη πόλωση:

$$a^v = 2 \sin \theta_2 \quad b^v = 2 \cos \theta_2 \quad (1.63)$$

και αντίστοιχα την (1.52) και (1.53) με  $R^h = -1$  βρίσκω τις τιμές των  $a$  και  $b$  για οριζόντια πόλωση:

$$a^h = 2 \sin \theta_1 \quad b^h = -2 \cos \theta_1 \quad (1.64)$$

Αντικαθιστώντας τώρα τα  $a$  και  $b$  στην (1.61) και αντικαθιστώντας τα  $v_x$  και  $v_z$  με τις εξισώσεις (1.54) και (1.55) λαμβάνουμε τη ακόμα πιο απλοποιημένη μορφή:

$$\gamma_h^v(\theta_1, \theta_2) = \pm \sec \theta_1 \cdot \frac{1 + \cos(\theta_1 + \theta_2)}{\cos \theta_1 + \cos \theta_2} \cdot \frac{1}{2L} \int_{-L}^L e^{i \vec{v} \cdot \vec{r}} dx + \frac{e_h^v(L)}{2L} \quad (1.65)$$

όπου:

$$e_h^v(L) = \frac{i \sec \theta_1 \cdot \sin \theta_h^v}{k(\cos \theta_1 + \cos \theta_2)} e^{i\vec{v}\cdot\vec{r}(x)} \Big|_{-L}^L \quad (1.66)$$

όπου ανάλογα με την πόλωση έχουμε  $\theta^v = \theta_2$ ,  $\theta^h = \theta_1$  αντίστοιχα.

Το  $\vec{v}\cdot\vec{r}$  σύμφωνα με τις (1.45) και (1.47) υπολογίζεται ως εξής:

$$\vec{v}\cdot\vec{r} = \left[ k \cdot (\sin \theta_1 - \sin \theta_2) \cdot \bar{x}_0 - k \cdot (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \cdot \bar{z}_0 \right] \cdot \left[ x \cdot \bar{x}_0 + S(x) \cdot \bar{z}_0 \right] \quad (1.67)$$

ήτοι:

$$\vec{v}\cdot\vec{r} = \frac{2\pi}{\lambda} \left[ (\sin \theta_1 - \sin \theta_2) \cdot \bar{x}_0 - (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \cdot S(x) \cdot \bar{z}_0 \right] \quad (1.68)$$

Για τιμές  $L \gg \lambda$  η ποσότητα  $\frac{e_h^v(L)}{2L}$  αποδεικνύεται εύκολα ότι είναι αμελητέα συγκρινόμενη με τον πρώτο όρο της εξίσωσης (1.65) περιορίζοντας έτσι την (1.65) στην παρακάτω συνάρτηση (1.69)

$$\gamma = \frac{1}{2L} \cdot \sec \theta_1 \cdot \frac{1 + \cos(\theta_1 + \theta_2)}{\cos \theta_1 + \cos \theta_2} \cdot \int_{-L}^L e^{i\vec{v}\cdot\vec{r}} dx \quad (1.69)$$

Η εξίσωση (1.69) είναι η γενική προσεγγιστική λύση 'Kirchhoff approximation' για μια τέλεια αγωγίμη μονοδιάστατη τραχεία επιφάνεια με την προϋπόθεση ότι ισχύει  $L \gg \lambda$  καθώς και η προσεγγιστική σχέση  $(E)_s = (1 + R)E_1$  που προϋποθέτει ότι το μήκος του προσπίπτοντος ΗΜ κύματος είναι πολύ μικρότερο από την ενεργή ακτίνα καμπλότητας της τραχείας επιφάνειας[9],[10],[21],[24].

### 1.3.1 Συντελεστής σκέδασης $\gamma$ επί 'fractal' επιφάνειας $S(x,y)=f_r(x)$

Συμπληρώνοντας στην θέση του  $S(x)$  της εξίσωση (1.68) την εξίσωση (1.26) που αντιπροσωπεύει την 'fractal' επιφάνεια διαμορφώνω από την εξίσωση (1.69) την τελική εξίσωση (1.70) που αποδίδει τον συντελεστή σκέδασης HM κυμάτων επί 'fractal' επιφάνειας.

Για μήκος επιφάνειας 'patch size' ίσο με  $2L$ , ήτοι όρια ολοκλήρωσης από  $-L$  έως  $L$  η τελική εξίσωση του συντελεστή σκεδαστής δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\gamma = \frac{1}{2L} \cdot \sec \theta_1 \cdot \frac{1 + \cos(\theta_1 + \theta_2)}{\cos \theta_1 + \cos \theta_2} \times \int_{-L}^L \exp[iv_x x + iv_z f_r(x)] dx \quad (1.70)$$

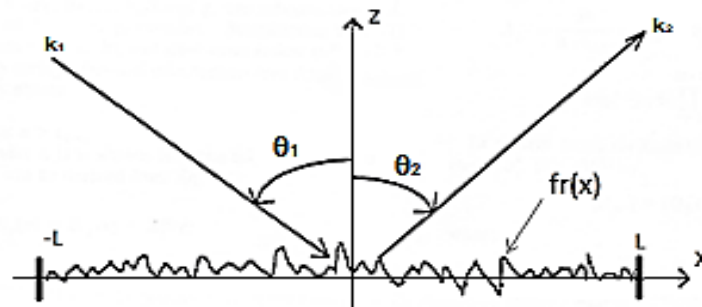
Οι παράμετροι  $v_x$  και  $v_z$  προκύπτουν από την σχέση (1.67) όπου

$$v_x = k(\sin \theta_1 - \sin \theta_2) \quad (1.71)$$

$$v_z = -k(\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \quad (1.72)$$

και όπου  $k$  είναι ο κυματαριθμός  $k = 2\pi/\lambda$ .

Η εξίσωση (1.70) αποτελεί την γενική λύση του προβλήματος σκέδασης HM κύματος επί επιφάνειας 'fractal', βλ. εικόνα 1.12 και μπορεί να υπολογίσει την τιμή του συντελεστή σκέδασης  $\gamma$  για οποιαδήποτε μήκος επιφάνειας, γωνία πρόσπτωσης και συχνότητα προσπίπτοντος κύματος.



Εικόνα 1-12. Γεωμετρία προβλήματος σκέδασης HM κύματος επί μονοδιάστατης 'fractal' επιφάνειας



## 1.4 Βιβλιογραφία

- [1] Karl Weierstrass, "*Abhandlungen aus der Functionenlehre*", Julius Springer, Berlin 1886
- [2] B. Mandelbrot, "*How Long Is the Coast of Britain? Statistical Self-Similarity and Fractional Dimension*", Science, Vol. 156, pp. 636-638, 1967. [Online]. Available: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.156.3775.636>
- [3] B. Mandelbrot, "*Les objets fractals: forme, hasard et dimension*", Flammarion, Paris, 1975.
- [4] R. Axline και A. Fung, "*Numerical Computation of Scattering from a Perfectly Conducting Random Surface*", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 26, No. 3, pp. 482 - 488, 1978.
- [5] A. Ishimaru, "*Wave propagation and scattering in random media*", Elsevier, 1978. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374701-3.X5001-7>
- [6] B. Mandelbrot, "*The fractal geometry of nature*", Freeman, San Francisco, 1982
- [7] P. Beckmann, A. Spizzichino, "*The Scattering of electromagnetic waves from rough surfaces*", Artech House Inc., 1987.
- [8] J. DeLorenzo. και E. Cassedy, "*A Study of the Mechanism of Sea Surface Scattering*", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 14, No. 5, pp. 611-620, 1966
- [9] M. F. Chen, A. K. Fung, "*A numerical study of the regions of validity of the Kirchhoff and small perturbation rough surface scattering models*", Radio Science, Vol. 23, pp. 163 - 170, 1988. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1029/RS023i002p00163>
- [10] E. I. Thorsos, "*The validity of the Kirchhoff approximation for rough surface scattering using a Gaussian roughness spectrum*", Journal of Acoustical Society of America, Vol. 83, No 11, pp. 78-92, 1988. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1121/1.396188>
- [11] D. L. Jaggard, X. Sun, "*Fractal surface scattering: a generalized Rayleigh solution*", Journal of Applied Physics, Vol. 68, No 11, pp. 5456-5462, 1990. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1063/1.347002>
- [12] D. L. Jaggard, X. Sun, "*Scattering from fractally corrugated surfaces*", Journal of the Optical society of America A, Vol. 7, No 6, pp. 1131-1139, 1990. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1364/JOSAA.7.001131>
- [13] L. Guo και W. Zhen-Sen, "*Electromagnetic Scattering from One-Dimension Fractal Surface*", Chinese Physics Letters, Vol. 11, No. 5, pp. 257-260, 1994.

- [14] S. Savaidis, P. Frangos, D. L. Jaggard and K. Hizanidis., “*Scattering from fractally corrugated surfaces: an exact approach*”, *Optics Letters*, Vol. 20, No. 23, pp. 2357-2359, 1995.
- [15] J. Chen, T. Lo, H. Leung and J. Litva, “*The use of fractals for modeling EM waves scattering from rough sea surface*”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 34, No. 4, pp. 966-972, 1996.
- [16] S. Savaidis, P. Frangos, D. L. Jaggard and K. Hizanidis., “*Scattering from fractally corrugated surfaces using the extended boundary condition method*”, *Journal of the Optical Society of America A*, Vol. 14, No. 2, pp. 475 - 485, 1997.
- [17] Y.Jihuan, F. Yidong, X. Jingming και G. Debiao, “*Fractal characterization of electromagnetic scattering waves from rough sea surfaces*”, 1998.
- [18] F. Berizzi, E. Dalle Mese, G. Pinelli, “*One dimensional fractal model of the sea surface*”, *IEE Proc. Radar Sonar Navig.*, Vol. 46, No 1, pp. 55-64, 1999.
- [19] B. Fabrizio και D. Enzo, “*Fractal analysis of the signal scattered from the sea surface*”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 47, No. 2, pp. 324-338, 1999.
- [20] D.L.Jaggard, A.D. Jaggard, P. Frangos, “*Fractal Electrodynamics: Surfaces and Superlattices*”, *IEEE Press, Frontiers in Electromagnetics*, pp. 1-47, 2000.
- [21] A.K. Sultan - Salem, G.L. Tyler, “*Validity of the Kirchhoff approximation for electromagnetic wave scattering from fractal surfaces*”, *IEEE Trans. Geosc. Rem. Sensing*, Vol. 42, No. 9, pp. 1860-1870, 2004.
- [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2004.832655>
- [22] N. Antonio and 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.
- [23] A. Kotopoulis, A. Malamou, G. Pouraimis, E. Kallitsis και P. Frangos, “*Characterization of Rough Fractal Surfaces from Backscattered Radar Data*”, *Elektronika ir Elektrotechnika*, Vol. 22, No. 6, pp. 61-66, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5755/j01.eie.22.6.17226>
- [24] Π.Φράγκος, “*Ηλεκτρομαγνητικές Μέθοδοι Τηλεπισκόπησης*”, Ε.Π.Ι.Σ.Ε.Υ. Ε.Μ.Π Παπασωτηρίου, 1999.
- [25] E. Jakeman., “*Scattering by Fractals, Fractals in Physics*”, pp. 55-60, 1986.

## Κεφάλαιο 2°

# Προσδιορισμός τραχύτητας επιφάνειας από οπισθοσκεδαζόμενα ΗΜ κύματα

### Περιεχόμενα

---

2.1 Εισαγωγή στα διαγράμματα του συντελεστή σκέδασης $\gamma$ .....	61
2.1.1 Διάγραμμα συντελεστή σκέδασης $\gamma=\gamma(\theta_2)$ .....	62
2.1.2 Διάγραμμα συντελεστή σκέδασης $\gamma=\gamma(k)$ .....	63
2.2 Σχέση διαγραμμάτων σκέδασης $\gamma(k)$ με το ‘fractal dimension’ - $D$ .....	64
2.3 Υπολογισμός κλίσεων ‘slopes’ στα διαγράμματα σκέδασης $\gamma(k)$ .....	67
2.4 Μέθοδος Προσδιορισμού Τραχύτητας Επιφάνειας $D=f(\text{slope})$ .....	68
2.4.1 Υπολογισμός συναρτησιακής σχέσης μεταξύ μεταβλητών ‘ $D$ ’ & ‘slope’ .....	70
2.5 Παράμετροι που επηρεάζουν την μέθοδο $D=f(\text{slope})$ .....	71
2.5.1 Επίδραση εύρους ζώνης ‘bandwidth’ ( $BW$ ) .....	71
2.5.2 Επίδραση αριθμού $M$ και μεγέθους $\Delta f$ των βημάτων συχνότητας .....	74
2.5.3 Επίδραση μεγέθους επιφάνειας σκέδασης ‘patch-size’ .....	75
2.5.4 Συνδυαστική επίδραση εύρους ζώνης ‘bandwidth’ και ‘patch-size’ .....	77
2.5.5 Επίδραση της γωνίας πρόσπτωσης $\theta_1$ .....	79
2.6 Αξιολόγηση της μεθόδου παρουσία ηλεκτρονικού θορύβου .....	83
2.6.1 Προσθήκη ‘Additive White and Gaussian Noise’ στο σήμα $\gamma(k)$ .....	84
2.6.2 Υπολογισμός σήματος $\gamma_{noisy}$ για δημιουργία συγκεκριμένης στάθμης $SNR$ .....	85
2.6.3 Επίδραση της στάθμης θορύβου στην μέθοδο των κλίσεων ‘slope’ .....	85
2.6.4 Προτεινόμενη βελτίωση της μεθόδου για αντιστάθμιση στον θόρυβο .....	87
2.7 Ανακεφαλαίωση και Συμπεράσματα .....	90
2.8 Βιβλιογραφία .....	92

---

### Περίληψη Κεφαλαίου

Στο παρόν κεφάλαιο, αξιοποιώντας την θεωρία ηλεκτρομαγνητικής σκέδασης και ειδικότερα την εξίσωση του συντελεστή σκέδασης  $\gamma$  του 1<sup>ου</sup> κεφαλαίου, διερευνώ μέσω προσομοιώσεων την δυνατότητα προσδιορισμού της τραχύτητας μιας επιφάνειας αναλύοντας απευθείας, στο πεδίο του χρόνου, τα οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρομαγνητικά ΗΜ κύματα τα οποία επιστρέφουν στον δέκτη ενός RADAR.

Στην ενότητα 2.1 παρουσιάζω πρακτικά παραδείγματα για την χρήση των διαγραμμάτων σκέδασης  $\gamma(\theta_2)$  όπως αυτά έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί στην σχετική βιβλιογραφία[10] και στην συνέχεια εισάγω την έννοια των διαγραμμάτων σκέδασης  $\gamma(k)$  τα οποία επικεντρώνονται αυστηρά στην κατεύθυνση των οπισθοσκεδαζόμενων ΗΜ κυμάτων.

Στις ενότητες 2.2 & 2.3 αναδεικνύω το πώς η μεταβολή στην τραχύτητα μιας επιφάνειας δημιουργεί μετρήσιμες μεταβολές στο συντελεστή σκέδασης  $\gamma(k)$  και προτείνω ως μέτρο των μεταβολών αυτών την μέτρηση των κλίσεων *'slope'*.

Στην ενότητα 2.4 με την βοήθεια στατιστικής ανάλυσης αναζητώ μια συναρτησιακή σχέση  $\hat{D} = f(\text{slope})$  η οποία να συνδέει την μέτρηση των κλίσεων *'slopes'* που εμφανίζονται στο διάγραμμα σκέδασης με την μορφοκλασματική διάσταση  $D$  *'fractal dimension'* που χαρακτηρίζει την τραχύτητα που επικρατεί στην επιφάνεια σκέδασης και προτείνω ως μέθοδο εκτίμησης της τραχύτητας μιας επιφάνειας την εξίσωση  $\hat{D} = \hat{a} * \text{slope}^{\hat{b}} + \hat{c}$ . όπου *'slope'* η τιμή του *'average slope'* που υπολογίζεται από το διάγραμμα της σκέδασης  $\gamma(k)$  και  $a, b, c$  παράμετροι βέλτιστης προσαρμογής της εξίσωσης του στατιστικού αυτού μοντέλου.

Στην ενότητα 2.5 εξετάζω τις παραμέτρους που επηρεάζουν την μέθοδο εκτίμησης της τιμής  $\hat{D}$  καθώς και τις προϋποθέσεις που πρέπει να ισχύουν ώστε η προτεινόμενη μέθοδος να μπορεί να λειτουργεί.

Στην ενότητα 2.6 εισάγεται θόρυβος με συγκεκριμένα επίπεδα SNR κατά την κατασκευή του διαγράμματος του συντελεστή σκέδασης  $\gamma(k)$  προκειμένου να εξεταστεί κατά πόσο η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί να λειτουργήσει παρουσία θορύβου και προτείνεται τρόπος βελτίωσης της μεθόδου.

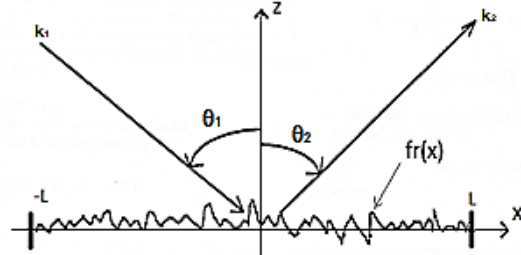
Το κεφάλαιο κλείνει με τα συμπεράσματα και την παράθεση της σχετικής βιβλιογραφίας.

Να σημειώσω εδώ ότι οι προσομοιώσεις ΗΜ σκέδασης, οι αλγόριθμοι επεξεργασίας καθώς και όλα τα διαγράμματα του παρόντος κεφαλαίου έχουν υλοποιηθεί με το λογισμικό *'ScatteringLab'* το οποίο ανέπτυξα στα πλαίσια της διδακτορικής μου διατριβής και το οποίο παρουσιάζω αναλυτικά στο παράρτημα Α.

## 2.1 Εισαγωγή στα διαγράμματα του συντελεστή σκέδασης $\gamma$

Χρησιμοποιώντας τα μοντέλα προσομοίωσης σκέδασης επί τραχείας επιφάνειας που ανέπτυξα στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναζητώ στο παρόν κεφάλαιο μια σχέση που να συνδέει την τραχύτητα της επιφάνειας με τα χαρακτηριστικά του οπισθοσκεδαζόμενου ΗΜ κύματος.

Με την βοήθεια του Matlab δημιούργησα ένα πρωτότυπο λογισμικό το οποίο ονόμασα 'ScatteringLab' και το οποίο παρουσιάζω αναλυτικά στο παράρτημα Α της παρούσας εργασίας. Το λογισμικό προσομοιώνει το πρόβλημα της σκέδασης ΗΜ κύματος σύμφωνα με την γεωμετρία του σχήματος της εικόνας 2-1.



Εικόνα 2-1. Γεωμετρία προβλήματος σκέδασης ΗΜ κύματος επί μονοδιάστατης 'fractal'

Ο συντελεστής σκέδασης δίνεται από την σχέση  $\gamma = \frac{E_2}{E_{20}}$  [10] όπου  $E_2$  είναι η

μετρούμενη ένταση του σκεδαζόμενου πεδίου από την υπό εξέταση τραχεία επιφάνεια στην κατεύθυνση  $\theta_2$  ενώ  $E_{20}$  είναι η ένταση του κατοπτρικά σκεδαζόμενου πεδίου από μια τέλεια αγωγίμη και επίπεδη επιφάνεια ίδιων διαστάσεων με την τραχεία επιφάνεια, υπό την ίδια γωνία πρόσπτωσης  $\theta_1$  και στην ίδια απόσταση παρατήρησης.

Η χρήση του συντελεστή σκέδασης κανονικοποιεί τα αποτελέσματα σε μια κλίμακα από 0 έως 1, αφού σύμφωνα με το νόμο της διατήρησης της ενέργειας θα ισχύει πάντα εξ 'ορισμού ότι  $|\gamma| \leq 1$  και λόγω της κανονικοποίησης αυτής παρέχει και το πλεονέκτημα της άμεσης σύγκρισης μεταξύ αποτελεσμάτων διαφορετικών προσομοιώσεων [10],[20]. Ο κανονικοποιημένος αυτός συντελεστής σκέδασης δίνεται αναλυτικά από την σχέση (1.70) που απέδειξα στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο:

$$\gamma = \frac{1}{2L} \cdot \sec \theta_1 \cdot \frac{1 + \cos(\theta_1 + \theta_2)}{\cos \theta_1 + \cos \theta_2} \times \int_{-L}^L \exp[iv_x x + iv_z f_r(x)] dx \quad (1.70)$$

όπου  $v_x = k(\sin \theta_1 - \sin \theta_2)$ ,  $v_z = -k(\cos \theta_1 + \cos \theta_2)$  βλ. σχέσεις (1.71), (1.72) και  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  ο κυματριθμός μέσω του οποίου, βλ. ενότητα §1.3 του 1<sup>ο</sup> κεφαλαίου, ο συντελεστής σκέδασης συνδέεται με την συχνότητα του σκεδαζόμενου ΗΜ κύματος, ήτοι  $k = 2\pi f/c$ .

Το λογισμικό 'ScatteringLab' που ανέπτυξα είναι σε θέση να επιλύει το ορισμένο ολοκλήρωμα της σχέσης (1.70) και να υπολογίζει την τιμή του συντελεστή σκέδασης  $\gamma$  συναρτήσει οποιασδήποτε παραμέτρου επιλέξει ο χρήστης θεωρώντας τις υπόλοιπες ως σταθερές. Ο χρήστης μπορεί να καθορίσει διαδραστικά, όλες τις τιμές των παραμέτρων που αφορούν τα δεδομένα της ΗΜ σκέδασης, όπως γωνία πρόσπτωσης  $\theta_1$ , ανάκλασης  $\theta_2$ , συχνότητα ΗΜ κύματος καθώς και όλες τις τιμές των παραμέτρων που αφορούν την τραχύτητα της επιφάνειας όπως αυτές καθορίζονται μέσα από την συνάρτηση βλ. σχέση (1.26) ενότητα §1.1.3.

### 2.1.1 Διάγραμμα συντελεστή σκέδασης $\gamma=\gamma(\theta_2)$

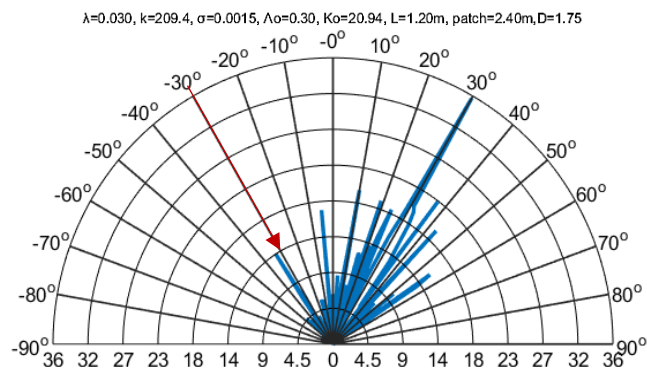
Επι παραδείγματι η επίλυση του ορισμένου ολοκληρώματος της σχέσης (1.70) συναρτήσει της γωνίας ανάκλασης  $\theta_2$ , με τις υπόλοιπες παραμέτρους ως σταθερές, μας δίνει ένα κλασσικό διάγραμμα σκέδασης  $\gamma(\theta_2)$ , του πώς δηλαδή μεταβάλετε η τιμή του συντελεστή σκέδασης ως προς κάθε πιθανή γωνία ανάκλασης, τιμές  $-90^\circ < \theta_2 < 90^\circ$ , βλ. εικόνες 2-2, 2-3, 2-4.

Από τα διπλανά διαγράμματα γίνεται άμεσα αντιληπτό ότι όσο αυξάνει η τραχύτητα της επιφάνειας τόσο μεγαλύτερη γίνεται και η διάχυση της ενέργειας προς διαφορετικές κατευθύνσεις [10]. Η τραχύτητα μιας επιφάνειας είναι εύκολα προσδιορίσιμη στην περίπτωση που είναι εφικτό να μετρήσουμε τον συντελεστή σκέδασης ταυτόχρονα από διαφορετικές κατευθύνσεις.

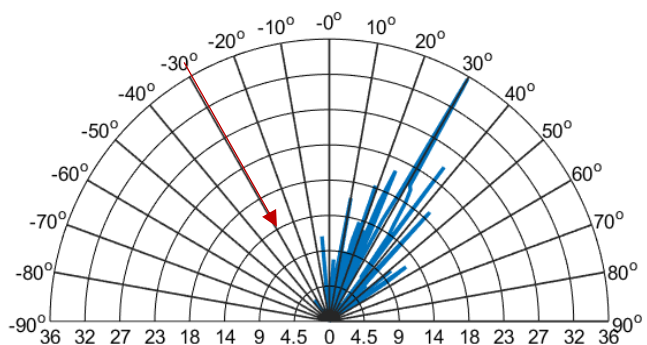
Περισσότερα σχετικά με τα διαγράμματα σκέδασης  $\gamma(\theta_2)$ , ο αναγνώστης μπορεί να πληροφορηθεί στα παραρτήματα Β1, Β2 και Α4.

Μια μέτρηση όμως της μεταβολής της τιμής του συντελεστή σκέδασης  $\gamma$  ως προς την γωνία  $\theta_2$  είναι αδύνατο να γίνει στην περίπτωση των μονοστατικών RADAR [1] όπου η λειτουργία τους βασίζεται στην λήψη των οπισθοσκεδαζόμενων ΗΜ κυμάτων από σταθερής κλίσης κεραίας. Από την κεραία ενός RADAR εκπέμπονται ΗΜ παλμοί υπό μια σταθερή, ως προς την φωτιζόμενη επιφάνεια, γωνία πρόσπτωσης  $\theta_1$  βλ. κόκκινο βέλος, και εν συνεχεία ο δέκτης του RADAR λαμβάνει οποιαδήποτε ανάκλαση προκύψει προς την κατεύθυνση της κεραίας του RADAR ήτοι λαμβάνει μόνο από την κατεύθυνση γωνίας  $\theta_2 = -\theta_1$ .

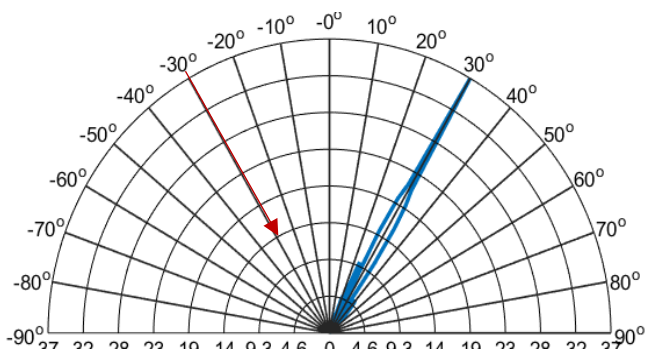
Εκ των ανωτέρω γίνεται σαφές ότι ένα RADAR δεν μπορεί να προσδιορίσει την τραχύτητα μιας επιφάνειας μέσω ενός διαγράμματος σκέδασης του τύπου  $\gamma=\gamma(\theta_2)$  αφού η γωνία οπισθοσκέδασης  $\theta_2$  παραμένει πάντα εξ' ορισμού σταθερά ίση και αντίθετη από την γωνία πρόσπτωσης  $\theta_1$ .



Εικόνα 2-2. Διάγραμμα συντελεστή σκέδασης  $\gamma(\theta_2)$  για  $-90^\circ < \theta_2 < 90^\circ$  και γωνία πρόσπτωσης  $\theta_1=30^\circ$  σε επιφάνεια με τραχύτητα, 'fractal dimension'  $D=1.75$  σε πολικές συντεταγμένες και κλίμακα db.



Εικόνα 2-3. Διάγραμμα συντελεστή σκέδασης  $\gamma(\theta_2)$  για  $-90^\circ < \theta_2 < 90^\circ$  και γωνία πρόσπτωσης  $\theta_1=30^\circ$  σε επιφάνεια με τραχύτητα, 'fractal dimension'  $D=1.55$



Εικόνα 2-4. Διάγραμμα συντελεστή σκέδασης  $\gamma(\theta_2)$  για  $-90^\circ < \theta_2 < 90^\circ$  και γωνία πρόσπτωσης  $\theta_1=30^\circ$  σε μια σχεδόν λεία επιφάνεια.

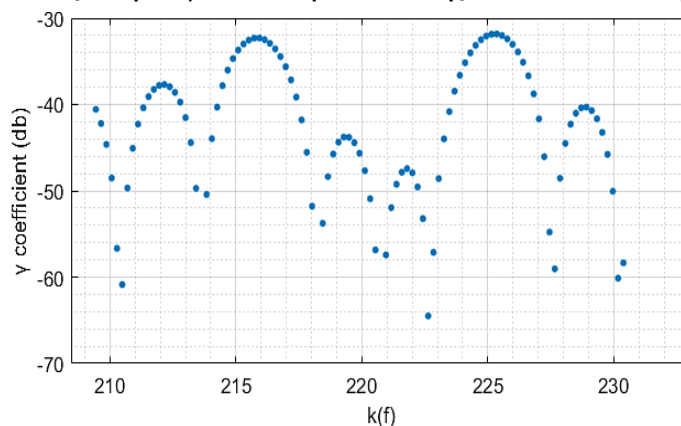
### 2.1.2 Διάγραμμα συντελεστή σκέδασης $\gamma=\gamma(k)$

Μια από της καινοτομίες που εισάγει η παρούσα διατριβή, προκειμένου να κάνει εφικτό τον προσδιορισμό της τραχύτητας μιας επιφάνειας μέσω των οπισθοσκεδαζόμενων ΗΜ ενός RADAR είναι το διάγραμμα του συντελεστή σκέδασης  $\gamma(k)$ . Το διάγραμμα σκέδασης  $\gamma(k)$  σχεδιάζεται όχι ως προς μια μεταβαλλόμενη γωνία λήψης όπως το  $\gamma(\theta_2)$  αλλά ως προς μια σταθερή γωνία λήψης  $\theta_2=-\theta_1$ , δηλαδή στην κατεύθυνση της οπισθοσκέδασης και ως προς μια μεταβαλλόμενη συχνότητα εκπομπής όπως θα δείξω στην συνέχεια. Ως ένα πρακτικό παράδειγμα εκπομπής ΗΜ κυμάτων μεταβαλλόμενης συχνότητας λαμβάνω το RADAR τύπου SAR [2]-[6] το οποίο εκπέμπει ΗΜ παλμούς ριπής, 'burst', ήτοι μια βηματικού τύπου, 'stepped frequency', κυματομορφή [7]-[9]. Προκειμένου να προσομοιώσω αυτή την λειτουργία του RADAR εκπέμπω προς την υπό εξέταση επιφάνεια και υπό σταθερή γωνία πρόσπτωσης  $\theta_1$  μια σειρά από  $M$  διαδοχικούς ΗΜ παλμούς συχνότητας  $f_m = f_0 + (m-1)\Delta f$  όπου  $f_0$  είναι η αρχική συχνότητα εκπομπής,  $m=1,2,\dots,M$  ο αύξων αριθμός του ΗΜ παλμού,  $\Delta f = BW/M$  το βήμα μεταβολής της συχνότητας και  $BW$  το συνολικό διαθέσιμο εύρος ζώνης του RADAR [8],[9]. Υπολογίζω εν συνεχεία την τιμή του συντελεστή σκέδασης από το ολοκλήρωμα της σχέσης (1.70) για κάθε μία διακριτή τιμή συχνότητας  $f_m$ , δημιουργώντας έτσι το διάγραμμα σκέδασης  $\gamma(k)$ , όπου  $k$  είναι ο χαρακτηριστικός κυματαριθμός που δίνεται από την σχέση  $k = 2\pi f_m/c$ .

Στις προσομοιώσεις που ακολουθούν στο παρόν κεφάλαιο, αναφορικά με τα δεδομένα της εκπεμπόμενης κυματομορφής, θέτω  $f_0=10\text{GHz}$ ,  $\Delta f=10\text{MHz}$ ,  $BW=1\text{GHz}$ ,  $M=100$  βήματα.

Ένα παράδειγμα διαγράμματος συντελεστή σκέδασης  $\gamma(k)$  όπως αυτό προκύπτει μετά από μια προσομοίωση σκέδασης επί επιφάνειας με τραχύτητα 'fractal dimension'  $D=1.75$  δίνω στην εικόνα 2-5.

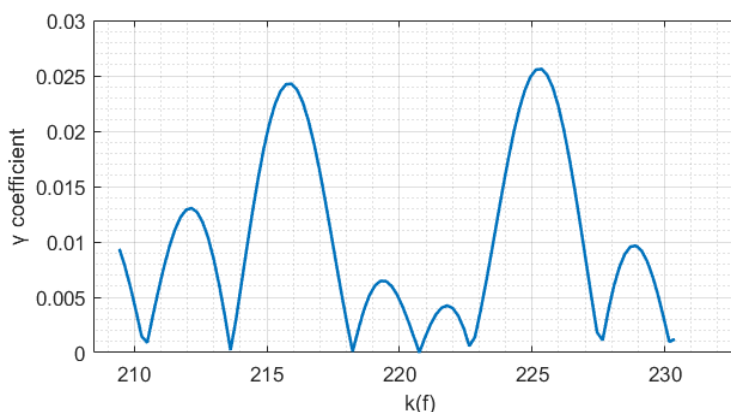
Στο παράδειγμα αυτό, κρατώντας την γωνία πρόσπτωσης  $\theta_1=25^\circ$  σταθερή, υπολογίζω τον συντελεστή σκέδασης στην κατεύθυνση της οπισθοσκέδασης  $\theta_2=-25^\circ$  επιλύοντας το ορισμένο ολοκλήρωμα της σχέσης (1.70) συναρτήσει μιας διακριτά μεταβαλλόμενης συχνότητας  $f_m$  και τοποθετώ τις τιμές του συντελεστή σκέδασης ως προς  $k = 2\pi f_m/c$  σε ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων σε κλίμακα  $db$  όπου  $\gamma(db) = 20\log(\gamma)$ .



Εικόνα 2-5. Διάγραμμα συντελεστή σκέδασης  $\gamma(k)$ , σε καρτεσιανές συντεταγμένες και κλίμακα  $db$  για γωνία πρόσπτωσης  $\theta_1=25^\circ$ , γωνία οπισθοσκέδασης  $\theta_2=-25^\circ$  επί επιφάνειας με τραχύτητα 'fractal dimension'  $D=1.75$

Περισσότερα σχετικά με ρυθμίσεις στα διαγράμματα  $\gamma(k)$  στο παράρτημα A5.

Μετά από αρκετές δοκιμές διαπίστωσα ότι το καλύτερο, για την μετέπειτα επεξεργασία, είναι όταν οι τιμές του συντελεστή σκέδασης αποτυπώνονται στο διάγραμμα σε γραμμική κλίμακα και οι διακριτές τιμές παρουσιάζονται ως μια συνεχόμενη γραμμή. Στην εικόνα 2-6 παρουσιάζω τα δεδομένα της εικόνας 2-5 σε γραμμική κλίμακα και με συνεχόμενη γραμμή όπως θα παρουσιάζω τα αποτελέσματα εφεξής.



Εικόνα 2-6. Διάγραμμα συντελεστή σκέδασης  $\gamma(k)$ , ως συνεχόμενη γραμμή σε γραμμική κλίμακα για γωνία πρόσπτωσης  $\theta_1=25^\circ$ , γωνία οπισθοσκέδασης  $\theta_2=-25^\circ$  επί επιφάνειας με τραχύτητα, 'fractal dimension'  $D=1.75$

## 2.2 Σχέση διαγραμμάτων σκέδασης $\gamma(k)$ με το 'fractal dimension' $D$

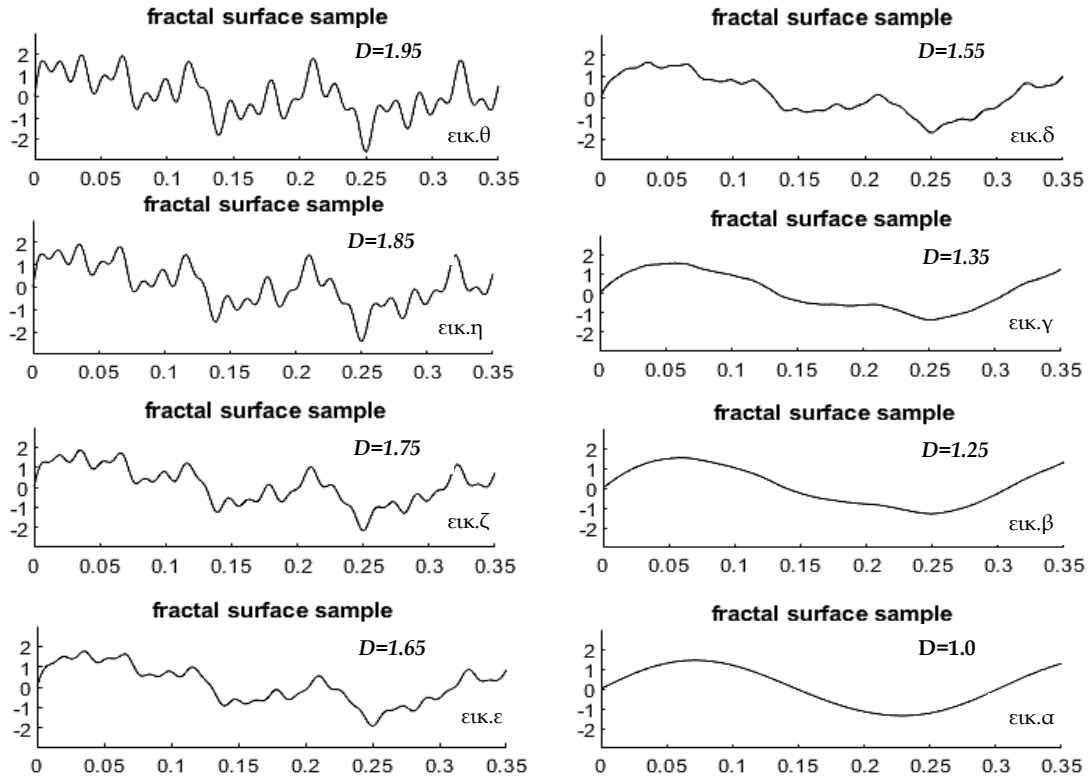
Στη παρούσα ενότητα θα εξετάσω, με την βοήθεια προσομοιώσεων, την συσχέτιση του διαγράμματος  $\gamma(k)$  των οπισθοσκεδαζόμενων ΗΜ κυμάτων ως προς την τραχύτητα της σκεδαζόμενης επιφάνειας.

Προκειμένου να προσομοιώσω την επιφάνεια σκέδασης χρησιμοποιώ την εξίσωση (1.25) με σταθερές τις παραμέτρους κατασκευής  $b=2e/3$ ,  $K_0=24$  και  $N=6$ , σύμφωνα με την σχετική βιβλιογραφία[10] και §1.1.3 & §1.1.4 του 1<sup>ου</sup> κεφαλαίου.

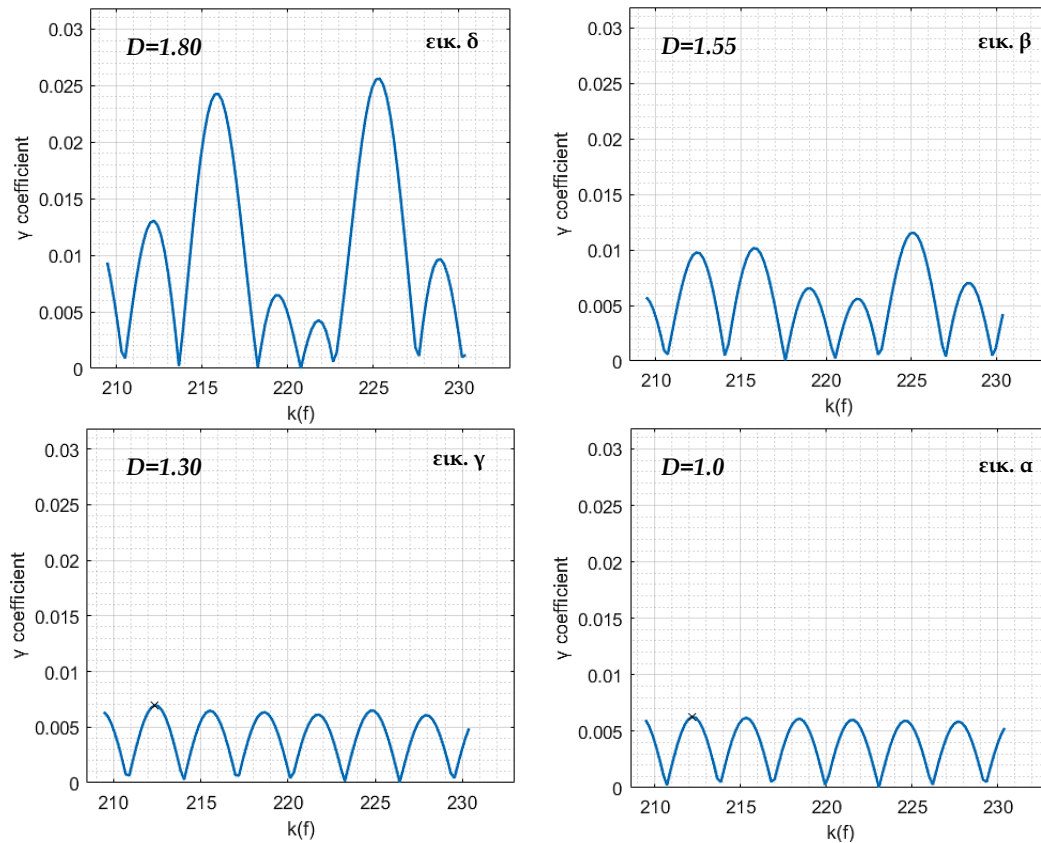
$$f_r(x) = \sigma \cdot \left\{ \frac{2D(2-D)}{1-(D-1)^{2N}} \right\}^{1/2} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} (D-1)^n \cdot \sin(K_0 \cdot b^n \cdot x + \phi_n) \quad (1.25)$$

Η τραχύτητα της επιφάνειας καθορίζεται από την παράμετρος  $D$ , 'fractal dimension' [20] και μπορεί να παίρνει τιμές μεταξύ μιας ελάχιστης και μέγιστης τιμής ήτοι από  $1.05 \leq D \leq 1.95$ , [10],[15] με το 1.05 να αντιστοιχεί στην ελάχιστη τραχύτητα -σχεδόν λεία υφή- και το 1.95 στην μέγιστη τραχύτητα της επιφάνειας. Στην επόμενη εικόνα 2-7 παρουσιάζω μερικά δείγματα της σχέσης (1.25) με 'fractal dimension'  $D=1.05, 1.25, 1.55, 1.75$  και 1.95 τα οποία θα χρησιμοποιήσω στην συνέχεια ως επιφάνειες για προσομοιώσεις ΗΜ σκέδασης. Αυτό που έχει αξία να παρατηρήσουμε στα διαγράμματα της εικόνα 2.7 είναι ότι η τραχύτητα που εμφανίζει το συγκεκριμένο μοντέλο γίνεται γρήγορα αμελητέα για τιμές  $D < 1.50$  ενώ αντίθετα για τιμές  $D \geq 1.50$  και πάνω η τραχύτητα αρχίζει να γίνεται έντονα ευδιάκριτη. Στην εικόνα 2-8 καταγράφονται, σε μορφή διαγράμματος σκέδασης  $\gamma(k)$ , τα αποτελέσματα προσομοιώσεων ΗΜ σκέδασης επί επιφανειών με 'fractal dimension'  $D=1.05, 1.30, 1.55$  και 1.80 από όπου προκύπτει ότι υπάρχει σχέση μεταξύ της μορφής του εκάστοτε διαγράμματος σκέδασης  $\gamma(k)$  (βλ. εικόνες 2-7) και της τραχύτητας της επιφάνειας σκέδασης (βλ. εικόνες 2-8).



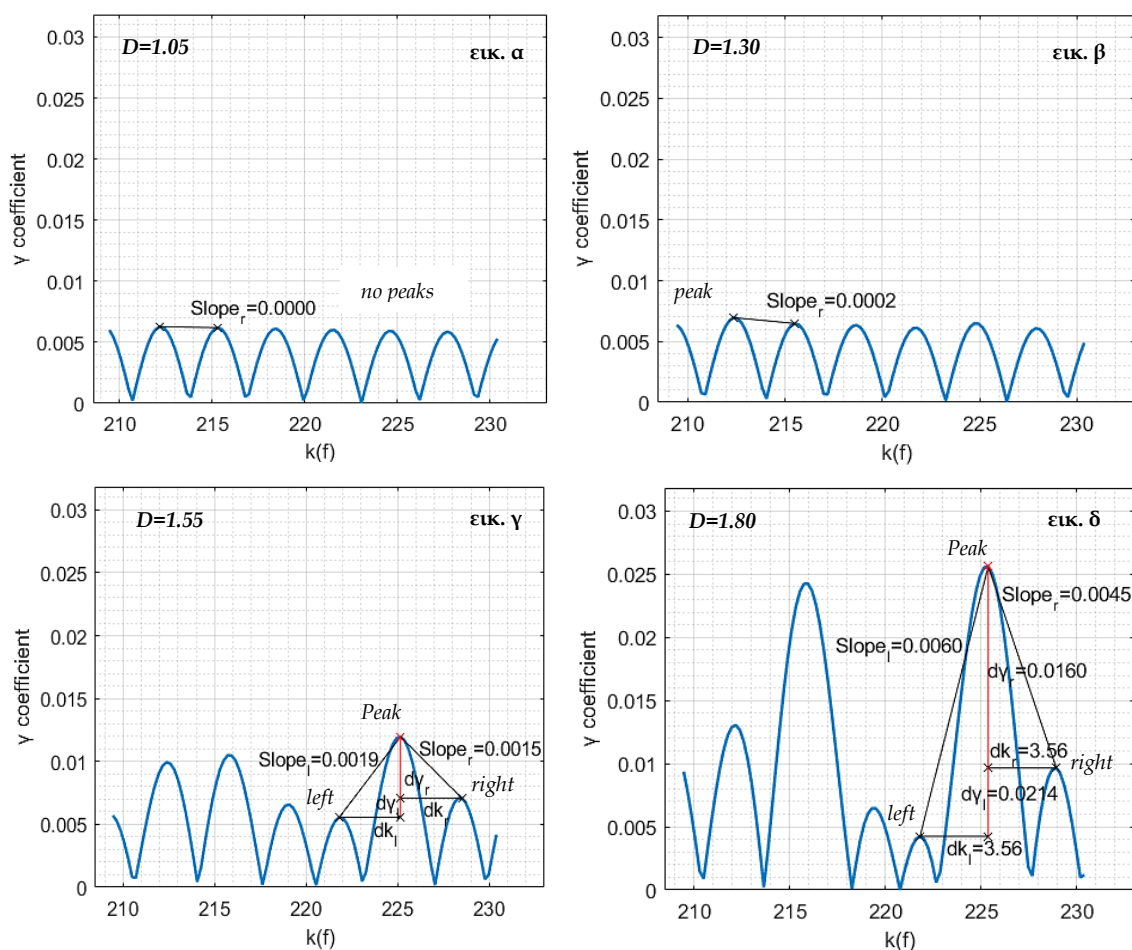


Εικόνα 2-8. Δείγματα τομών 'fractal' επιφανειών παραγόμενα από την σχέση (1.25) για μεταβαλλόμενες τιμές τραχύτητας - 'fractal dimension' από  $1.05 < D < 1.95$



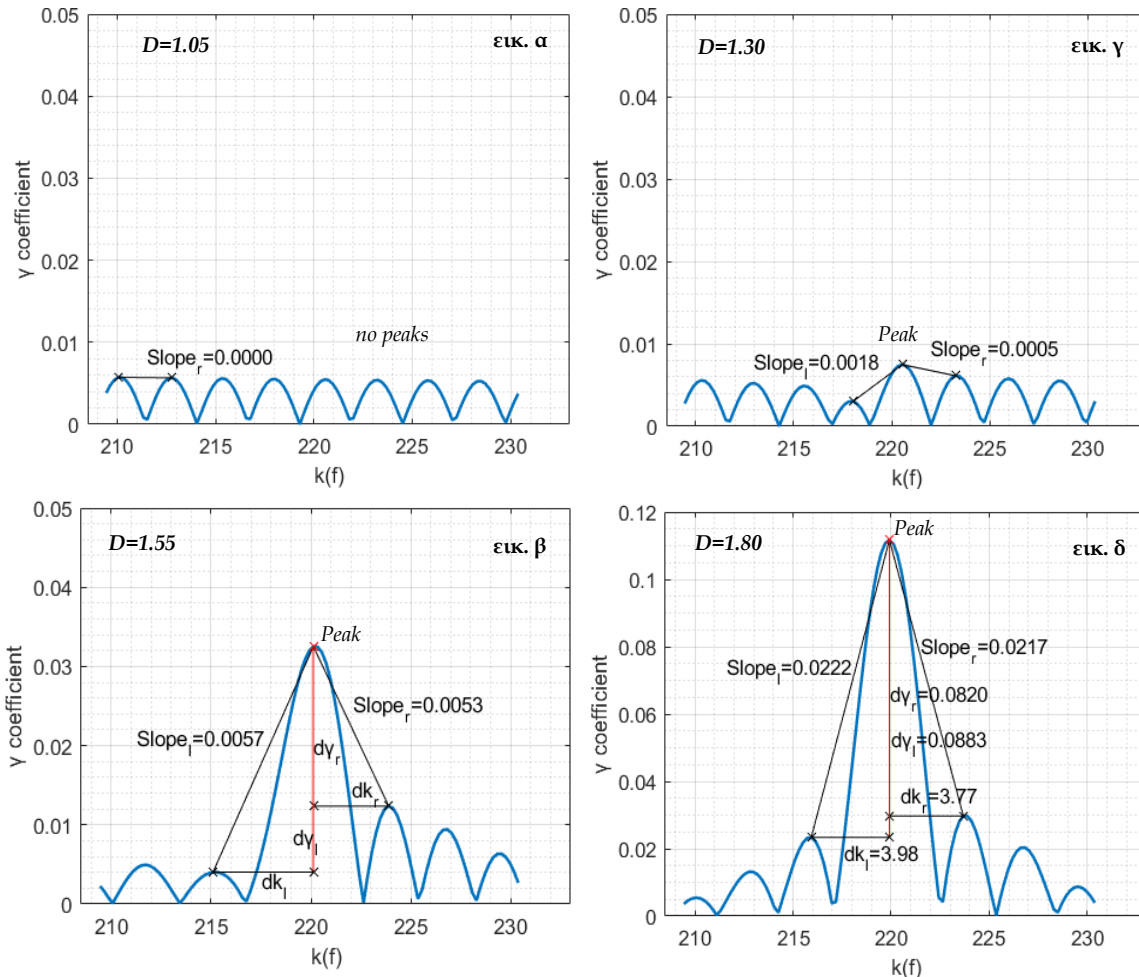
Εικόνα 2-7. Διαγράμματα σκέδαση  $\gamma(k)$  για γωνία πρόπτωσης  $\theta_1=25^\circ$  επί επιφανειών με τραχύτητες - 'fractal dimension'  $D=1.05, 1.30, 1.55$

Στην εικόνα 2-7 παρατηρήσουμε ότι εμφανίζονται κάποιες περιοδικές μεταβολές στο πλάτος του συντελεστή οπισθοσκέδασης  $\gamma(k)$ . Για σχεδόν λείες επιφάνειες, περίπτωση  $D=1.05$ ,  $D=1.30$  παρατηρούμε ότι τα μέγιστα πλάτη των εμφανιζόμενων λοβών είναι σχεδόν ίδια. Καθώς όμως η τραχύτητα της επιφάνειας αυξάνεται, για τιμές  $D>1.50$ , τα διαγράμματα  $\gamma(k)$  αρχίζουν να εμφανίζουν ένα μέγιστο για κάποια συχνότητα/κυματαριθμό. Όσο δε η τραχύτητα της επιφάνειας αυξάνει τόσο περισσότερο μεγαλώνει και αυτή η ανομοιομορφία στο διάγραμμα του συντελεστή  $\gamma(k)$  και αρχίζει να σχηματίζεται μια ολοένα και μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ ενός μέγιστου και των υπόλοιπων τοπικών μέγιστων τιμών. Ένα εμφανές κριτήριο που θα μπορούσε να συσχετίσει την τραχύτητα της επιφάνειας ήτοι το 'fractal dimension  $D$ ' με την μορφή του συντελεστή  $\gamma(k)$  είναι η κλίση 'slope' που σχηματίζεται μεταξύ της μέγιστης τιμής του μεγαλύτερου λοβού και των εκατέρωθεν αυτού τοπικών μέγιστων τιμών του  $\gamma(k)$ . Σύμφωνα με το προτεινόμενο κριτήριο των κλίσεων 'slopes' μπορούν να σχηματιστούν δύο κλίσεις, η μία από την δεξιά μεριά, 'slope<sub>r</sub>' και η άλλη από την αριστερή μεριά, 'slope<sub>l</sub>', του μέγιστου λοβού. Όταν η επιφάνεια είναι σχεδόν λεία οι κλίσεις που σχηματίζονται είναι ελάχιστες ή και μηδενικές. Παραδείγματα εφαρμογής του κριτηρίου των κλίσεων και των σχετικών μετρήσεων δίνω στις εικόνες 2-9, 2-10.



Εικόνα 2-9. Διαγράμματα σκέδαση  $\gamma(k)$  για γωνία πρόπτωσης  $\theta_1=25^\circ$   
 επί επιφανειών με τραχύτητες - 'fractal dimension'  $D=1.05, 1.30, 1.55$  και  $1.85$

Τα διαγράμματα του συντελεστή σκέδασης  $\gamma(k)$  της εικόνας 2-9 έχουν κατασκευαστεί από προσομοιώσεις ΗΜ σκεδάσεων για γωνία πρόσπτωσης  $\theta_1=25^\circ$  ενώ τα διαγράμματα της εικόνας 2-10 έχουν κατασκευαστεί με πανομοιότυπες όλες τις παραμέτρους και με μόνη διαφορά την γωνία πρόσπτωσης  $\theta_1=30^\circ$ .



Εικόνα 2-10. Διαγράμματα σκέδαση  $\gamma(k)$  για γωνία πρόσπτωσης  $\theta_1=30^\circ$  επί επιφανειών με τραχύτητες - 'fractal dimension'  $D=1.05, 1.30, 1.55$  και  $1.85$

Ανεξάρτητα από την γωνία πρόσπτωσης παρατηρούμε ότι η μορφή των διαγραμμάτων είναι πάντα σχεδόν παραπλήσια των διαγραμμάτων στις εικόνες 2-9, 2-10 και η προτεινόμενη μέθοδος των κλίσεων μπορεί να εφαρμοστεί εντός κάποιων βέβαια ορίων και απαραίτητων προϋποθέσεων που εξετάζω αναλυτικότερα στην ενότητα 2.5

### 2.3 Υπολογισμός κλίσεων 'slopes' στα διαγράμματα σκέδασης $\gamma(k)$

Η κάθε κλίση υπολογίζεται από την σχέση  $slope = \Delta\gamma/\Delta k$ . Η τιμή  $\Delta\gamma$  αντιπροσωπεύει την διαφορά πλάτους μεταξύ της μέγιστης τιμής 'peak' του μεγαλύτερου λοβού που εμφανίζεται στο διάγραμμα του συντελεστή  $\gamma(k)$  και της αμέσως δεξιάς ή αριστερής από αυτήν τοπικής μέγιστης τιμής. Η τιμή  $\Delta k$  αντιπροσωπεύει την διαφορά μεταξύ των κυματαριθμών για τους οποίους συμβαίνουν αυτά τα μέγιστα. Στις εικόνες 2-9, 2-10 σημειώνω ως παραδείγματα τα αντίστοιχα  $\Delta\gamma$ ,  $\Delta k$  όπως αυτά προκύπτουν για την αριστερή 'slope' και δεξιά 'slope'

κλίση αντίστοιχα. Ως τελική τιμή κλίσης σε κάθε γράφημα λαμβάνω την μέση τιμή  $slope = (slope_l + slope_r)/2$ . Από τις παραπάνω προσομοιώσεις με  $\theta_i = 30^\circ$ , υπολογίζουμε ενδεικτικά τις κλίσεις και συμπληρώνουμε τον πίνακα:

Πίνακας 2-1. Fractal dimension  $D$  επιφάνειας και μετρηθείσα κλίση 'slope'

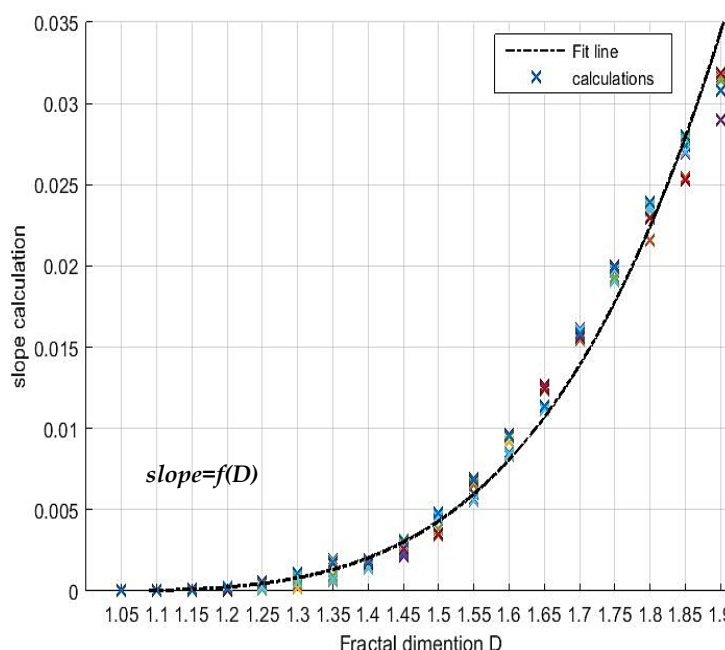
$D$	Left slope calculations			Right slope calculations			Average Slope
	$\Delta\gamma$	$\Delta k$	$slope_l$	$\Delta\gamma$	$\Delta k$	$slope_r$	$slope$
<b>1.05</b>	0.0000	0.00	0.0000	0.0000	0.00	0.0000	<b>0.0000</b>
<b>1.30</b>	0.0044	2.51	0.0018	0.0014	2.93	0.0005	<b>0.0012</b>
<b>1.55</b>	0.0285	5.03	0.0057	0.0202	3.77	0.0053	<b>0.0055</b>
<b>1.80</b>	0.0883	3.98	0.0222	0.0820	3.77	0.0217	<b>0.0220</b>

Περισσότερες λεπτομέρειες για τον υπολογισμό των κλίσεων δίνω και στο παράρτημα Α6.

## 2.4 Μέθοδος Προσδιορισμού Τραχύτητας Επιφάνειας $D=f(slope)$

Για να βρω μια μαθηματική σχέση που να συνδέει το 'fractal dimension'  $D$  μιας επιφάνειας με την κλίση 'slope' που προκύπτει από το διάγραμμα σκέδασης  $\gamma(k)$ , εκτελώ μια σειρά προσομοιώσεων ΗΜ σκέδασης σε επιφάνειες μεταβλητής τραχύτητας όπου η τιμή του 'fractal dimension'  $D$  ξεκινά από μια σχεδόν εντελώς λεία επιφάνεια  $D=1.05$  έως μια σχεδόν εντελώς τραχεία επιφάνεια  $D=1.90$  με βήμα μεταβολής  $+0.05$ , ήτοι για 18 διαδοχικές τιμές  $D=1.10, 1.15, \dots, 1.85, 1.90$ .

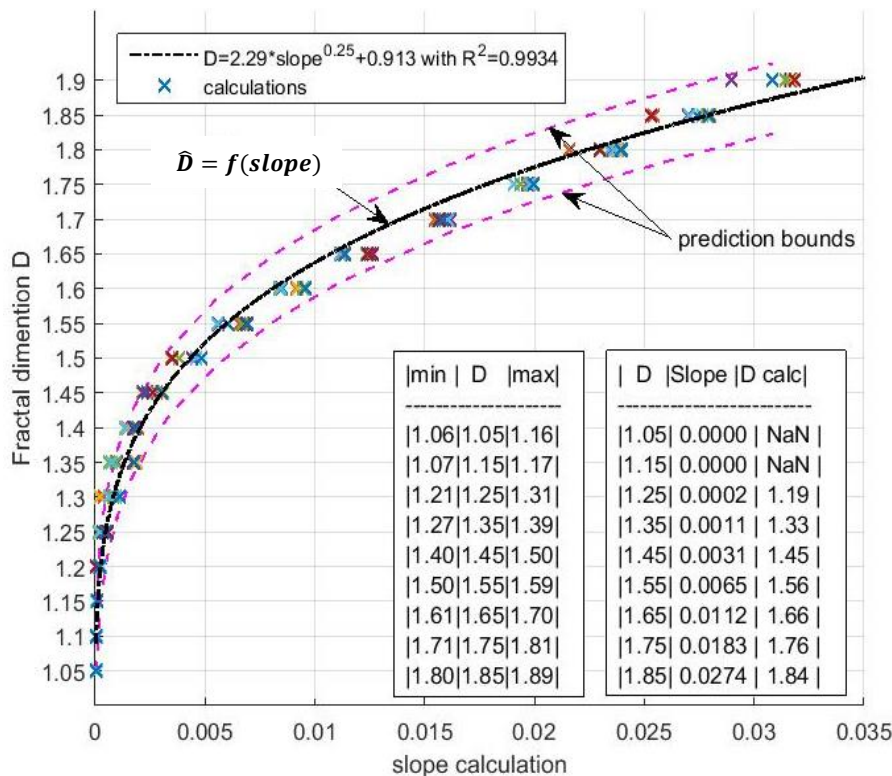
Εκτελώ 10 προσομοιώσεις ΗΜ σκέδασης σε κάθε μία από τις 18 διαφορετικές τραχύτητας επιφάνειες, συνολικά δηλαδή 180 προσομοιώσεις ΗΜ σκέδασης κρατώντας κάθε φορά όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους σκέδασης σταθερές και αλλάζοντας μόνο την τιμή της φάσης  $\varphi_n$ , βλ. σχέση (1.25), εισάγοντας και μια τυχαίοτητα στην κατασκευή της επιφάνειας δοκιμάζοντας έτσι και την ευρωστία της προτεινόμενης μεθόδου. Ακολουθώντας την μεθοδολογία υπολογισμών συμπλήρωσης του ανωτέρω



Εικόνα 2-11. Καταγραφές των κλίσεων 'slope' συναρτήσει της τιμής του 'fractal dimension'  $D$  για γωνία πρόσπτωσης  $\theta_i=30^\circ$ .

πίνακα 2-1 αντιστοιχίζω σε κάθε μία τιμή του 'fractal dimension'  $D$  την τιμή της κλίσης 'average slope' όπως αυτή προκύπτει από το διάγραμμα σκέδασης  $\gamma(k)$  της εκάστοτε προσομοίωσης και παρουσιάζω τα αποτελέσματα σε μορφή διαγράμματος 'slope calculation' vs. 'fractal dimension', βλ. εικόνα 2-11.

Χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις του διαγράμματος της εικόνας 2-11, λαμβάνω το διάγραμμα  $D=f(\text{slope})$  της εικόνας 2-12 το οποίο παρουσιάζει ένα γράφημα της μεταβλητής ‘fractal dimension’  $D$  σαν συνάρτηση των μετρήσεων ‘slope calculation’.



Εικόνα 2-12. Διάγραμμα εκτίμησης του ‘Fractal dimension’  $D$  με την μέθοδο των κλίσεων ‘slope’ συχνότητα  $f_0=10\text{GHz}$ , βήμα μεταβολής  $\Delta f=20\text{MHz}$  και με γωνία πρόσπτωσης  $\theta_1=30^\circ$ .

Εξετάζοντας το διάγραμμα της εικόνας 2-12 ως ένα διάγραμμα διασποράς μεταξύ των δύο μεταβλητών ‘ $D$ ’ & ‘slope’ κατανοούμε αμέσως ότι υπάρχει μια σαφής θετική σχέση εξάρτησης μεταξύ της τιμής του ‘slope’ που καταγράφεται στο διάγραμμα του συντελεστή σκέδασης  $\gamma(k)$  και της τιμής του ‘fractal dimension’  $D$  που χαρακτηρίζει την επιφάνεια σκέδασης. Με την βοήθεια ανάλυσης παλινδρόμησης - ‘regression analysis’ [28]-[30], μπορεί να εξαχθεί η συναρτησιακή σχέση  $D=f(\text{slope})$  η οποία συνδέει τις δύο αυτές μεταβλητές, ‘ $D$ ’ & ‘slope’, όπως θα δείξω στην επόμενη ενότητα §2.4.1. Έτσι όταν από τα δεδομένα ΗΜ οπισθοσκέδασης ενός RADAR κατασκευάσουμε το διάγραμμα σκέδασης  $\gamma(k)$  και υπολογίσουμε την μέση τιμή κλίσης ‘slope’ που εμφανίζεται σε αυτό, έχοντας στην διάθεσή μας την μαθηματική σχέση  $\hat{D} = f(\text{slope})$ , μπορούμε να προχωρήσουμε σε μια ασφαλή εκτίμηση για την τιμή του ‘fractal dimension’  $D$  που χαρακτηρίζει την επιφάνεια σκέδασης και ως εκ τούτου μπορούμε να προσδιορίσουμε την τραχύτητα της επιφάνειας. Η μέθοδος αυτή αποτελεί ένα πρωτότυπο τρόπο προσδιορισμού της τραχύτητας της επιφάνειας σκέδασης μέσω των οπισθοσκεδαζόμενων ΗΜ κυμάτων που μπορεί να βρει εφαρμογή σε RADAR μεταβλητής συχνότητας εκπομπής ικανού εύρους ζώνης. Τις προϋποθέσεις εφαρμογής της μεθόδου και τους περιορισμούς εξετάζω αναλυτικότερα στην ενότητα §2.4

### 2.4.1 Υπολογισμός συναρτησιακής σχέσης μεταξύ μεταβλητών 'D' & 'slope'

Για να εξάγω την συναρτησιακή σχέση που συνδέει τις δύο αυτές μεταβλητές, 'D' & 'slope' χρησιμοποιώ το λογισμικό 'ScatteringLab' που ανέπτυξα για τις ανάγκες της παρούσας έρευνας. Μέσω των επιλογών 'Slope measurements & Regression analysis' του λογισμικού πραγματοποίησα αρκετά πειράματα ΗΜ σκέδασης προκειμένου να εξάγω ένα μαθηματικό μοντέλο που να προσαρμόζεται στα αριθμητικά αποτελέσματα. Μετά από σχετική έρευνα κατέληξα ότι μια εξαιρετική προσαρμογή μεταξύ των μετρήσεων των μεταβλητών 'D' & 'slope' επιτυγχάνεται όταν η τιμή 'D' δίνεται από μια εξίσωση του τύπου  $\hat{D} = \hat{a} * slope^{\hat{b}} + \hat{c}$ . Στο διάγραμμα της εικόνας 2-12 η καμπύλη προσαρμογής 'Fit curve' [28]-[30] έχει σχεδιαστεί με εκτιμήτριες ελαχίστων τετραγώνων τιμές  $\hat{a} = 2.29$ ,  $\hat{b} = 1/4$ ,  $\hat{c} = 0.913$  και σαν κριτήριο βέλτιστης προσαρμογής χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης  $R^2$  ο οποίος είναι της τάξης του  $R^2=0.993$  οπότε η προσαρμογή κρίνεται εξαιρετική όπως άλλωστε φαίνεται και οπτικά. Αναλυτικότερο παράδειγμα για τον τρόπο πραγματοποίησης των προσομοιώσεων των ΗΜ σκεδάσεων, λήψης των μετρήσεων, κατασκευής των διαγραμμάτων σκέδασης  $\gamma(k)$ , υπολογισμού των κλίσεων επί αυτών και τελικά του προσδιορισμού της συναρτησιακής σχέσης μεταξύ των δύο μεταβλητών 'D' & 'slope', παρουσιάζω στο Παράρτημα Α7.

Στον πίνακα 2.2 αντιπαραβάλω την τιμή  $D$  με την τιμή εκτίμησης  $\hat{D}$ . Η τιμή  $D$  αντιπροσωπεύει το 'fractal dimension' με το οποίο δημιουργήθηκε η τραχύτητα της επιφάνειας σκέδασης ενώ η τιμή  $\hat{D}$  είναι μια εκτίμηση για την τραχύτητα της επιφάνειας σκέδασης που δίνεται από την εξίσωση  $\hat{D} = 2.29 * slope^{0.25} + 0.913$  με το 'slope' να υπολογίζεται από την ανάλυση των οπισθοσκεδαζόμενων ΗΜ κυμάτων μέσω του διαγράμματος του συντελεστή σκέδασης  $\gamma(k)$ . Όπως γίνεται άμεσα εμφανές από τον πίνακα 2.2 η προτεινόμενη μέθοδος εκτίμησης της τραχύτητας της επιφάνειας είναι πολύ επιτυχημένη αφού καταφέρνει όχι μόνο να κάνει έναν γενικό χαρακτηρισμό-ταξινόμηση της τραχύτητας της επιφάνειας αλλά μπορεί να δώσει και μια τιμή εκτίμησης του 'fractal dimension' που είναι εξαιρετικά κοντά στην πραγματική τιμή.

Εκτίμηση του  $\hat{D}$   
 $\hat{D} = 2.29 * slope^{0.25} + 0.913$ .

$D$	$Slope$	$\hat{D}$
1.05	0.0000	N/A
1.15	0.0000	N/A
1.25	0.0002	1.19
1.35	0.0011	1.33
1.45	0.0031	1.45
1.55	0.0065	1.56
1.65	0.0112	1.66
1.75	0.0183	1.76
1.85	0.0274	1.84

Πίνακας 2.2

Μέγιστη & ελάχιστη τιμή εκτίμησης  $\hat{D}$   
 με βάση τα prediction bounds

$\hat{D}_{Lower}$	$D$	$\hat{D}_{Upper}$
1.06	1.05	1.16
1.07	1.15	1.17
1.21	1.25	1.31
1.27	1.35	1.39
1.40	1.45	1.50
1.50	1.55	1.59
1.61	1.65	1.70
1.71	1.75	1.81
1.80	1.85	1.89

Πίνακας 2.3

Να παρατηρήσουμε εδώ ότι για χαμηλές τιμές τραχύτητας της επιφάνειας,  $D < 1.25$ , η μέθοδος αδυνατεί κάποιες φορές να δώσει κάποια εκτίμηση. Το γεγονός αυτό δεν συνιστά μια αδυναμία της μεθόδου γιατί οφείλεται στο γεγονός ότι η επιφάνεια που δημιουργείται για τιμές κλασματικής διάστασης μικρότερες από  $D < 1.25$ , είναι χωρίς σημαντική τραχύτητα, βλ. εικόνες 2-8α, 2-8β. Ουσιαστικά πρόκειται για το γεγονός ότι σε μια λεία επιφάνεια η οπισθοσκεδαζόμενη ενέργεια είναι μηδενική ή ελάχιστη αφού το σύνολο της ενέργειας βρίσκεται στην κατοπτρική διεύθυνση. Ο πίνακας 2.1 έχει δημιουργηθεί με την βοήθεια του λογισμικού ‘*ScatteringLab*’ και τις επιλογές [Bound] και [table] βλ. Παράρτημα Α7. Με την επιλογή [Bound] το λογισμικό δημιουργεί τα όρια πρόβλεψης ‘*prediction bounds*’ [22]. Στην εικόνα 2-12 τα όρια πρόβλεψης εμφανίζονται ως διακεκομμένες ροζ γραμμές και αντιπροσωπεύουν το διάστημα μέσα στο οποίο αναμένεται με μια πιθανότητα 90% να βρίσκεται η πραγματική τιμή σε σχέση με την τιμή εκτίμησης. Στον πίνακα 2.3 καταγράφω στην μεσαία στήλη την πραγματική τιμή του ‘*fractal dimension*’  $D$  το οποίο έχει εκ κατασκευής η επιφάνεια σκέδασης, ενώ στις στήλες  $\hat{D}_{Lower}$  και  $\hat{D}_{Upper}$  καταγράφω τις ελάχιστες και μέγιστες τιμές εντός των οποίων η προτεινόμενη μέθοδος αναμένεται με πιθανότητα 90% να χαρακτηρίσει την επιφάνεια με βάση την μέθοδο υπολογισμού των κλίσεων ‘*slope*’ από το διάγραμμα σκέδασης  $\gamma(k)$ . Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι  $\hat{D}_{Lower} \leq D \leq \hat{D}_{Upper}$  στις 90 από τις 100 μετρήσεις προσδιορισμού της τραχύτητας της επιφάνειας με την προτεινόμενη μέθοδο..

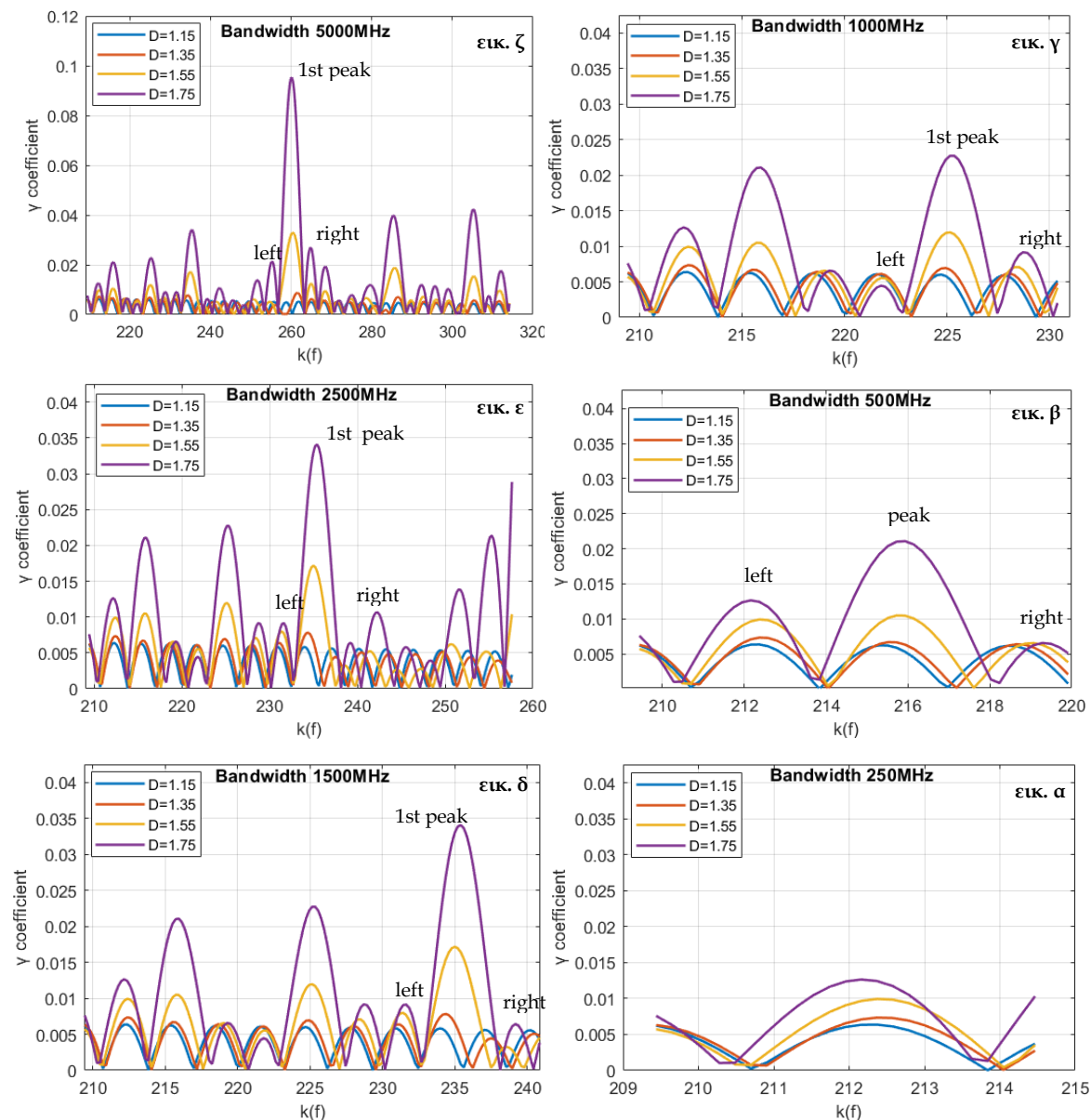
## 2.5 Παράμετροι που επηρεάζουν την μέθοδο $D=f(\text{slope})$

Έχοντας βρει μια μέθοδο προσδιορισμού της τραχύτητας επιφάνειας από το διάγραμμα σκέδασης  $\gamma(k)$  των οπισθοσκεδαζόμενων ΗΜ κύματα θα εξετάσω στην συνέχεια τις προϋποθέσεις και τις παραμέτρους που επηρεάζουν την επιτυχή εφαρμογή της. Η βασική προϋπόθεση για να μπορεί η μέθοδος αυτή να εφαρμοστεί σε ένα σύστημα RADAR είναι η δυνατότητα εκπομπής και λήψης ΗΜ κυμάτων μεταβλητής συχνότητας σε ένα ικανό εύρος ζώνης ‘*bandwidth*’ έτσι ώστε να είναι δυνατό να κατασκευαστεί ένα διάγραμμα σκέδασης  $\gamma(k)$ . Έτσι η κυριότερη παράμετρος για την λειτουργία της μεθόδου είναι το εύρος μεταβολής της συχνότητας και ακολουθούν όπως θα δείξω στην συνέχεια και κάποιες επιμέρους παράμετροι όπως το μέγεθος της επιφάνειας σκέδασης ‘*patch-size*’ και η γωνία πρόσπτωσης  $\theta_1$  των ΗΜ κυμάτων ως προς την επιφάνεια.

### 2.5.1 Επίδραση εύρους ζώνης ‘*bandwidth*’ – *BW*

Ο συντελεστής σκέδασης  $\gamma(k)$  σχεδιάζεται στο διάγραμμα ως προς τον κυματαριθμό  $k$  του προσπίπτοντος κύματος, συνδέεται δηλαδή άμεσα με την εκπεμπόμενη συχνότητα του ΗΜ κύματος  $k(f_m) = 2\pi f_m/c$ . Εάν λοιπόν δεν υπάρχει μεταβολή συχνότητας των προσπίπτοντων ΗΜ κυμάτων δεν μπορεί να σχηματιστεί καν ένα διάγραμμα συντελεστής σκέδασης  $\gamma(k)$ . Ακόμα όμως και να υπάρχει μεταβολή συχνότητας αυτή πρέπει να είχε ικανό εύρος μεταβολής έτσι ώστε η αλληλεπίδραση της συχνότητας των προσπίπτοντων ΗΜ κυμάτων με την επιφάνεια να μπορεί να αποκαλύπτει, μέσω των οπισθοσκεδαζόμενων ΗΜ

κυμάτων, αρκετή πληροφορία σχετικά με την τραχύτητα της επιφάνεια σκέδασης. Η προτεινόμενη μέθοδος των κλίσεων  $\hat{D} = f(\text{slope})$  προϋποθέτει την ύπαρξη τουλάχιστον ενός λοβού με ένα μέγιστο 'peak' και εκατέρωθεν αυτού τουλάχιστον από ένα πλαϊνό λοβό με τοπικό μέγιστο για να σχηματιστεί μια κλίση 'slope' βλ. §2.3. Στην εικόνα 2-13 παρουσιάζω ενδεικτικά μερικές προσομοιώσεις σκεδάσεων σε επιφάνειες με  $D=[1.15, 1.35, 1.55, 1.75]$  για διαφορετικού εύρους μεταβολής συχνότητας  $BW=[250, 500, 1000, 1500, 2500, 5000]$  MHz



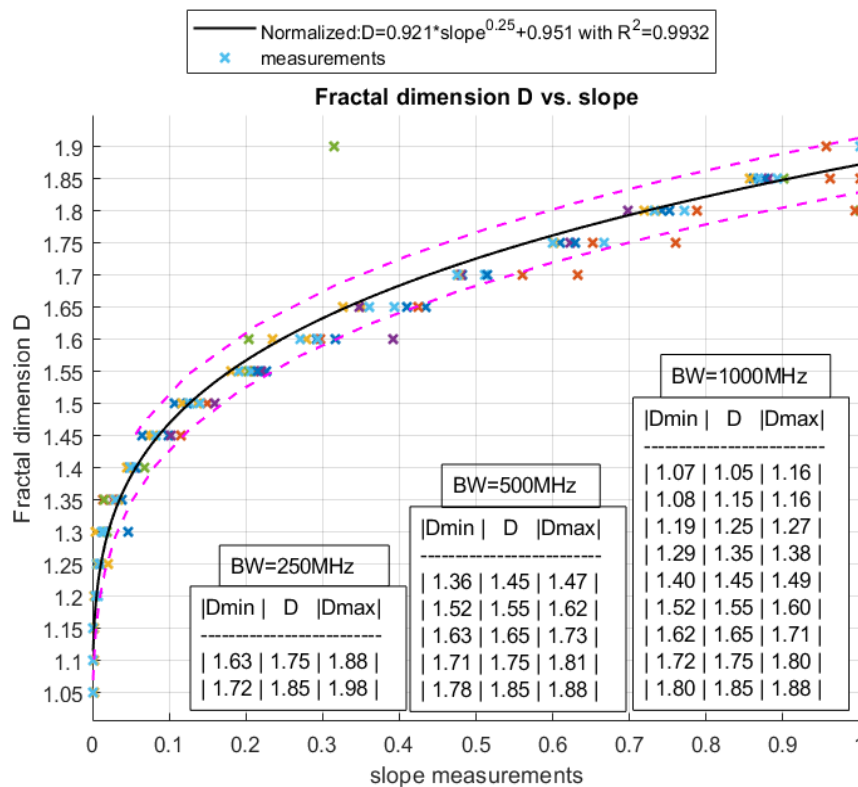
Εικόνα 2-13. Επίδραση του εύρους ζώνης στο διάγραμμα του συντελεστή σκέδασης  $\gamma(k)$  αποτελέσματα προσομοιώσεων για 'fractal dimension'  $D$  1.15, 1.35, 1.55, 1.75, 'patch size' 80λ, γωνία πρόπτωσης  $\theta_1=25^\circ$ , αρχική συχνότητα  $f_0=10\text{GHz}$  και βήμα μεταβολής  $\Delta f=20\text{MHz}$

Από τα διαγράμματα σκέδασης  $\gamma(k)$  της εικόνας 2-13 γίνεται άμεσα αντιληπτό ότι όσο αυξάνει το  $BW$  τόσο αυξάνεται και η διαθέσιμη πληροφορία που αφορά την επιφάνεια σκέδασης και μάλιστα από  $BW>1000\text{MHz}$  η πληροφορία αρχίζει να γίνεται πλεονάζουσα ως προς την απαίτηση της προτεινόμενης μεθόδου για ύπαρξη



ενός κεντρικού λοβού, αφού εμφανίζονται αρκετοί περισσότεροι. Αντιθέτως για  $BW < 500\text{MHz}$ , βλ. εικ.α, η μέθοδος των κλίσεων δεν μπορεί να λειτουργήσει αφού δεν εντοπίζεται στο διάγραμμα σκέδασης κάποιος κεντρικός λοβός με τους εκατέρωθεν αυτού και γενικά παρατηρούμε ότι οι μεταβολές του συντελεστή σκέδασης  $\gamma(k)$  ακόμα και από διαφορετικής τραχύτητας επιφάνειας είναι σχεδόν αμελητέες. Από  $BW = 500\text{MHz}$ , βλ. εικ.β, αρχίζει η εμφάνιση ενός κεντρικού λοβού με τα εκατέρωθεν αυτού δεξιά και αριστερά τοπικά μέγιστα. Για  $BW \geq 1000\text{MHz}$  βλ. εικ.γ, δ, ε, ζ εμφανίζεται πάντα ένας μέγιστος λοβός και οι εκατέρωθεν αυτού πλευρικοί λοβοί οι οποίοι είναι πάντοτε ευδιάκριτοι με σημαντική τιμή κλίσεων έτσι ώστε η μέθοδος να μπορεί με μεγάλη ευκολία να εφαρμοστεί. Στην εικόνα 2-14 παρουσιάζω αποτελέσματα εφαρμογής της μεθόδου μετά από επαναλαμβανόμενες προσομοιώσεις σκέδασης για  $BW = [250, 500, 1000]\text{MHz}$ . Για λόγους σύγκρισης χρησιμοποιώ κανονικοποιημένες τιμές κλίσεων 'slopes'.

Όπως προκύπτει και από τους πίνακες του διαγράμματος της εικόνας 2-14 όσο μεγαλύτερο το εύρος ζώνης τόσο καλύτερη γίνεται η διακριτική ικανότητα της μεθόδου.



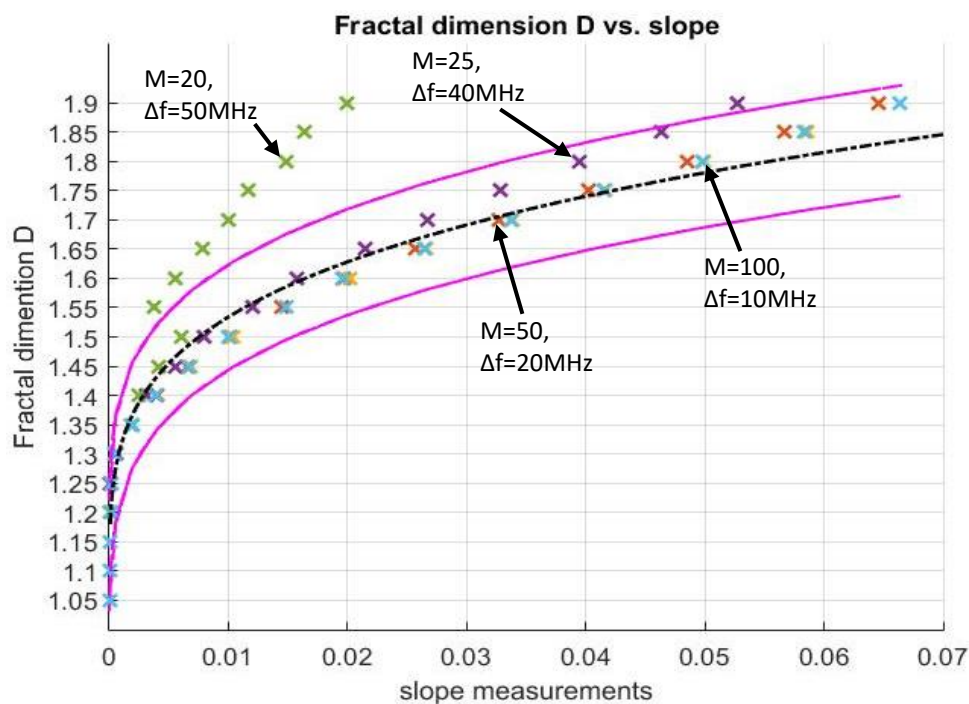
Εικόνα 2-14. Επίδραση του εύρους ζώνης στην εκτίμηση του 'Fractal dimension'  $D$  αποτελέσματα σειράς προσομοιώσεων με κανονικοποιημένες  $[0,1]$  τις τιμές 'slope' για  $BW = [250, 500, 1000]\text{MHz}$ , αρχική συχνότητα  $f_0 = 10\text{GHz}$  και γωνία πρόσπτωσης  $\theta_1 = 30^\circ$

Για  $BW = 250\text{MHz}$  η μέθοδος οριακά μπορεί να διακρίνει υψηλής τραχύτητας επιφάνειες για τιμές  $D > 1.75$ . Για όλες τις υπόλοιπες τιμές  $D < 1.75$  η μέθοδος βλέπει μια επιφάνεια χωρίς τραχύτητα. Για  $BW = 500\text{MHz}$  η μέθοδος μπορεί να διακρίνει επιφάνειες με τραχύτητες από  $D > 1.45$ . Για  $BW = 1000\text{MHz}$  η μέθοδος μπορεί να διακρίνει επιφάνειες με τραχύτητες από  $D > 1.15$  και με αρκετά μεγάλη ανάλυση, βλ. εικόνα 2-14 σχετικούς πίνακες μετρήσεων. Μετά από μεγάλο αριθμό

επανάληψης πειραμάτων προσομοίωσης σκεδάσεων με διαφορετικές αρχικές συχνότητες  $f_0$ , διαφορετικά  $BW$ , διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης και μεταξύ τους συνδυασμούς κατέληξα στο συμπέρασμα ότι για να είναι λειτουργική η μέθοδος πρέπει να ισχύει η σχέση  $BW \gg 0.05f_0$ , δηλαδή το εύρος ζώνης μεταβολής της συχνότητας πρέπει να είναι μεγαλύτερο του 5% της φέρουσας συχνότητας. Ήτοι για μια αρχική φέρουσα συχνότητα  $f_0 = 10GHz$  το εύρος ζώνης πρέπει να είναι οπωσδήποτε μεγαλύτερο από  $500MHz$  και ανάλογα των υπόλοιπων συνθηκών και παραμέτρων μπορεί να χρειάζεται να είναι ακόμα μεγαλύτερο. Σε κάθε περίπτωση το εύρος ζώνης μεταβολής της συχνότητας είναι μια πολύ κρίσιμη παράμετρος για την λειτουργία της συγκεκριμένη μεθόδου.

### 2.5.2 Επίδραση αριθμού βημάτων $M$ και μεγέθους βημάτων συχνότητας $\Delta f$

Το συνολικό εύρος ζώνης  $BW$  δίνεται όπως είδαμε από σχέση  $BW = M * \Delta f$ , βλ. παράγραφο §2.1.2. Κρατώντας το συνολικό εύρος μεταβολής σταθερό θα εξετάσω στην συνέχεια το πώς επηρεάζουν οι παραμέτρων  $M, \Delta f$  το τελικό αποτέλεσμα της μεθόδου και ποιος είναι ο βέλτιστος συνδυασμός τιμών μεταξύ τους. Κρατώντας σταθερό το εύρος ζώνης  $M * \Delta f = 1000MHz$  υλοποιώ για 4 ζευγάρια συνδυασμών  $M * \Delta f = [20 \times 50MHz, 25 \times 40MHz, 50 \times 20MHz, 100 \times 10MHz]$  μια σειρά προσομοιώσεων. Για κάθε ένα από αυτά τα 4 παραπάνω ζευγάρια τιμών  $M * \Delta f$  υλοποιώ 18 προσομοιώσεις σκέδασης ήτοι μία προσομοίωση για κάθε μία ξεχωριστή τιμή τραχύτητας  $D = [1.05, 1.10, 1.15, \dots, 1.85, 1.90]$ . Επαναλαμβάνω το ανωτέρω σύνολο προσομοιώσεων 10 φορές και κρατώ τον μέσο όρο των μετρήσεων στο διάγραμμα της εικόνας 2-15.

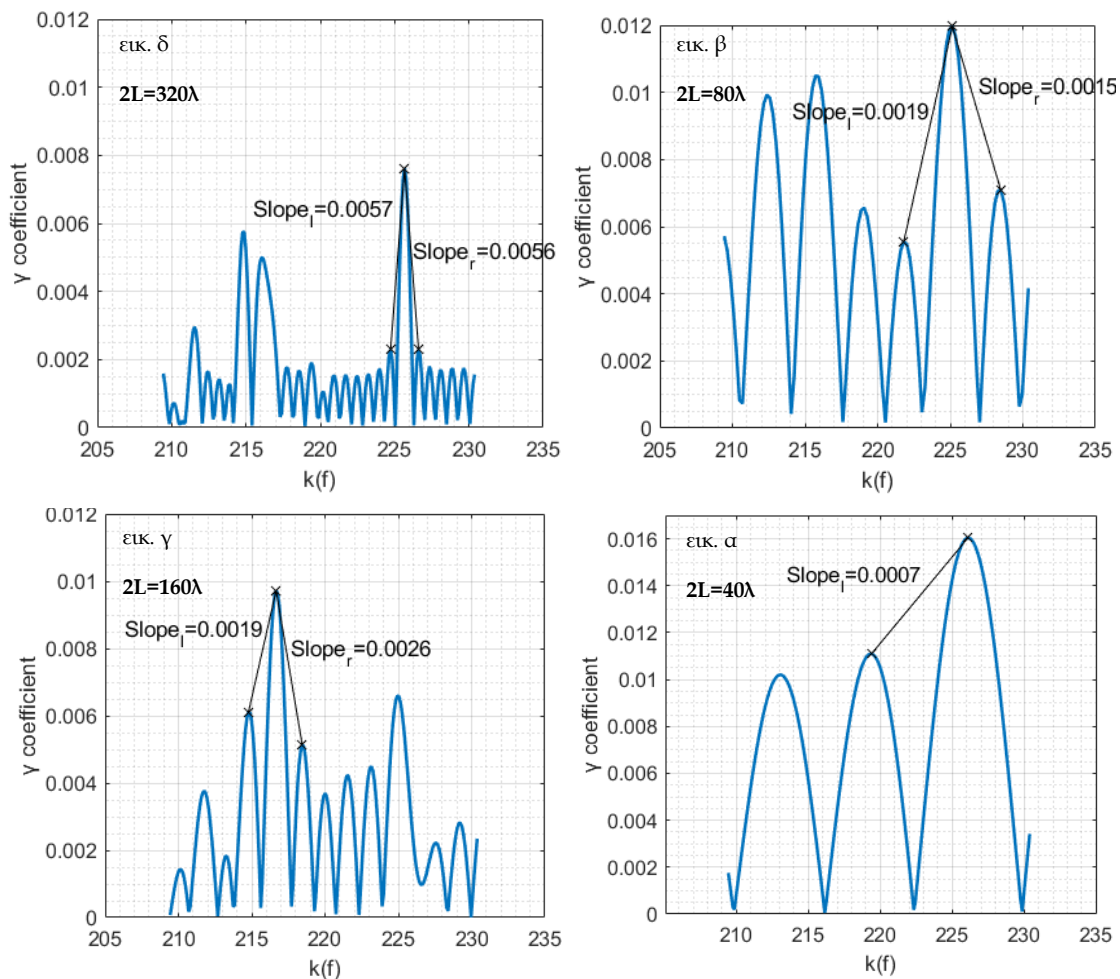


Εικόνα 2-15. Επίδραση παραμέτρων  $\Delta f, M$  στην εκτίμηση του 'Fractal dimension'  $D$ , μέσος όρος αποτελεσμάτων από μια σειρά 180 προσομοιώσεων για ζευγάρια τιμών  $M * \Delta f = [20 \times 50MHz, 25 \times 40MHz, 50 \times 20MHz, 100 \times 10MHz]$ , 'patch size' 80λ αρχική συχνότητα  $f_0 = 10GHz$  και γωνία πρόσπτωσης  $\theta_i = 30^\circ$

Με αναφορά την μαύρη διακεκομμένη καμπύλη προσαρμογής, 'curve fit', η οποία έχει κατασκευαστεί για βέλτιστη προσαρμογή στο ζευγάρι τιμών  $M = 100, \Delta f = 10\text{MHz}$  παρατηρώ ότι για  $M = 20, \Delta f = 50\text{MHz}$  οι μετρήσεις κλίσεις 'slope' έχουν ξεφύγει εντελώς εκτός των ορίων πρόβλεψης 'prediction bounds'. Το ίδιο οριακά συμβαίνει και για  $M = 25, \Delta f = 40\text{MHz}$ . Δηλαδή όσο μεγαλώνει το μέγεθος του βήματος της μεταβολής  $\Delta f$  τόσο μικραίνει και η ακρίβεια που επιτυγχάνεται στην μέτρηση των slope. Ένας βέλτιστος αριθμός βημάτων  $M$  διαπιστώθηκε πειραματικά ότι δίνεται από την σύνδεση του εύρους  $BW$  με το ελάχιστο βήμα μεταβολής  $\Delta f$  μέσα από την προσεγγιστική σχέση  $0,02 \cdot BW \geq \Delta f$  από όπου προκύπτει και ο αριθμός  $M \geq BW/\Delta f$ . Τέλος διαπιστώθηκε ότι από ένα σημείο και μετά η αύξηση των βημάτων και η αντίστοιχη μείωση του βήματος μεταβολής  $\Delta f$  αυξάνει την κατανάλωση υπολογιστικών πόρων χωρίς να συνεισφέρει σε περισσότερη ακρίβεια στις μετρήσεις και τα αποτελέσματα της μεθόδου.

### 2.5.3 Επίδραση μεγέθους επιφάνειας σκέδασης 'patch-size'.

Στην εικόνα 2-16 έχω σχεδιάσει αποτελέσματα προσομοιώσεων σκέδασης σε μια επιφάνεια με ένα σταθερό 'fractal dimension'  $D = 1.55$  και όλες τις λοιπές παραμέτρους, συχνότητα  $f_0 = 10\text{GHz}$ ,  $BW = 1\text{GHz}$ , γωνία πρόσπτωσης  $\theta_1 = 25^\circ$



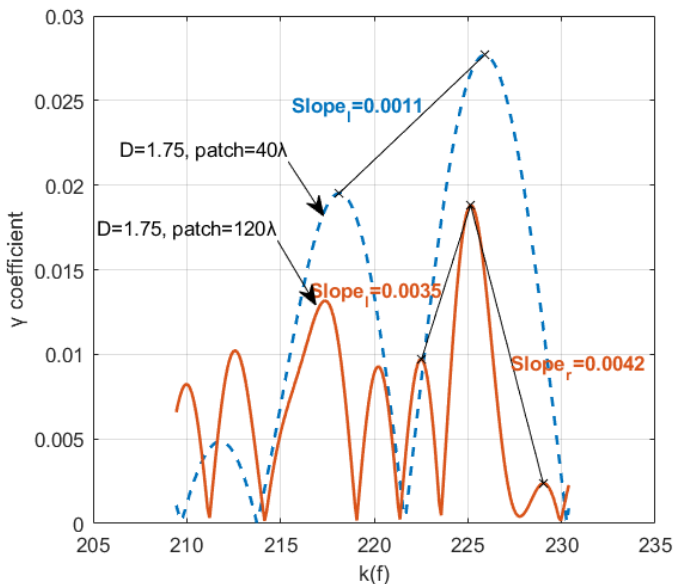
Εικόνα 2-16. Επίδραση patch-size στο διάγραμμα  $\gamma(k)$ , αποτελέσματα σειράς προσομοιώσεων για  $D=1.55$ , συχνότητα  $f_0=10\text{GHz}$ ,  $BW=1000\text{MHz}$ , γωνία πρόσπτωσης  $\theta_1=30^\circ$

σταθερές εκτός από το μήκος της επιφάνειας σκέδασης ‘*patch-size*’ το οποίο μεταβάλλω μεταξύ των τιμών 40λ, 80λ, 160λ και 320λ.

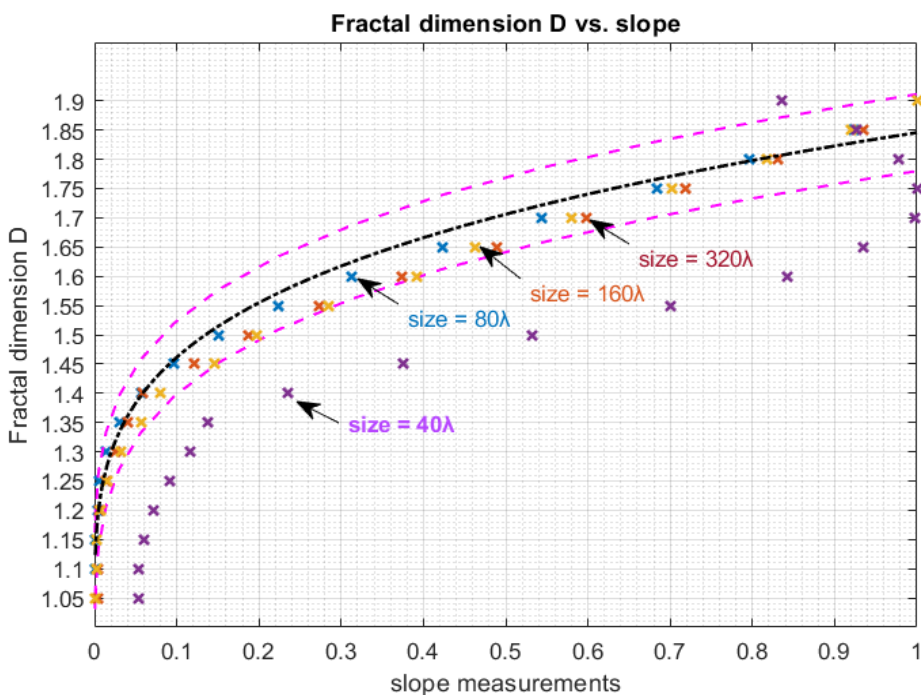
Από τις προσομοιώσεις, βλ. εικόνες 2-16 α, β, γ, δ προκύπτει ότι με σταθερό  $D = 1.55$  για ‘*patch-size*’ [40λ, 80λ, 160λ, 320λ] τα αντίστοιχα ‘*average slope*’ είναι [0.0007, 0.0017, 0.0023, 0.0057]. Δηλαδή παρατηρούμε ένα σχεδόν διπλασιασμό της μέσης τιμής κλίσης ‘*slope*’ για κάθε διπλασιασμό του ‘*patch-size*’. Σε κάθε περίπτωση όσο μεγαλώνει το ‘*patch-size*’ τόσο η κλίση ‘*slope*’ γίνεται πιο οξεία και οι λοβοί περισσότεροι στον αριθμό.

Ταυτόχρονα όμως παρατηρείται και μια μείωση στα κατ’ απόλυτο τιμή πλάτη του διαγράμματος σκέδασης  $\gamma(k)$ .

Στην εικόνα 2-17 έχω τοποθετήσει για σύγκριση τα αποτελέσματα δύο προσομοιώσεων στο ίδιο διάγραμμα. Για ‘*patch-size*’ 40λ σχηματίζεται μόνο μια αριστερή κλίση, ενώ για ακριβώς την ίδια τραχύτητα  $D=1.75$  με ‘*patch-size*’ 120λ οι λοβοί που σχηματίζονται είναι αρκετοί και



Εικόνα 2-17. Επίδραση του ‘*patch-size*’ στην κλίση ‘*slope*’, σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ ‘*patch size*’ 40λ και 120λ για  $D=1.75$ , συχνότητα  $f_0=10\text{GHz}$ ,  $BW=1000\text{MHz}$  και  $\theta_1=25^\circ$



Εικόνα 2-18. Επίδραση ‘*patch size*’ στην εκτίμηση του ‘*Fractal dimension*’  $D$  κανονικοποιημένη σύγκριση μεταξύ ‘*patch size*’, 40λ, 80λ, 160λ και 320λ συχνότητα  $f_0=10\text{GHz}$ ,  $BW=1000\text{MHz}$  και γωνία πρόσπτωσης  $\theta_1=25^\circ$

σχηματίζονται δύο κλίσεις (αριστερά και δεξιά).

Στην εικόνα 2-18 καταγράφω τις μετρήσεις *'slope'* σε κανονικοποιημένες τιμές [0,1] έτσι ώστε τα αποτελέσματα από προσομοιώσεις με διαφορετικά *'patch size'* να είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους. Για *'patch size'* 40λ παρατηρούμε ήδη από τις εικόνες 2-16, 2-17 ότι οριακά σχηματίζεται μια κλίση μόνο ως προς τον αριστερό λοβό και όπως επιβεβαιώνεται και από τις προσομοιώσεις προσδιορισμού της τραχύτητας της επιφάνειας σκέδασης, βλ. διάγραμμα εικόνας 2-18, όπου οι εκτιμήσεις του *'fractal dimension'*  $D$  για *'patch size'* 40λ είναι εκτός *'prediction bounds'* και για  $D > 1.70$  γίνονται και εσφαλμένες θέτοντας έτσι πρακτικά και ένα κατώτατο όριο 40λ ως προς το μέγεθος *'patch-size'* της επιφάνειας για την συγκεκριμένη προσομοίωση με  $BW = 1000MHz$ . Συνοψίζοντας θα λέγαμε ότι η αύξηση του *'patch-size'* δημιουργεί μια μείωση στα κατ' απόλυτο τιμή πλάτη των λοβών του διαγράμματος σκέδασης  $\gamma(k)$  αλλά αυξάνει τον αριθμό τους και ταυτόχρονα οι κλίσεις *'slope'* γίνονται εντονότερες παρατηρώντας ένα σχεδόν διπλασιασμό της μέσης τιμής κλίσης *'slope'* για κάθε διπλασιασμό του *'patch-size'*. Σε κάθε περίπτωση όμως όσο το *'patch-size'* μικραίνει αρχίζουν να εμφανίζονται προβλήματα στην λειτουργία της μεθόδου και από κάποιο όριο και μετά η μέθοδος δεν μπορεί να λειτουργήσει. Το ακριβές μέγεθος του *'patch-size'* κάτω από το οποίο η μέθοδος αποτυγχάνει συνδέεται με το διαθέσιμο εύρος ζώνης μεταβολής  $BW$  το οποίο διερευνώ στην επόμενη παράγραφο.

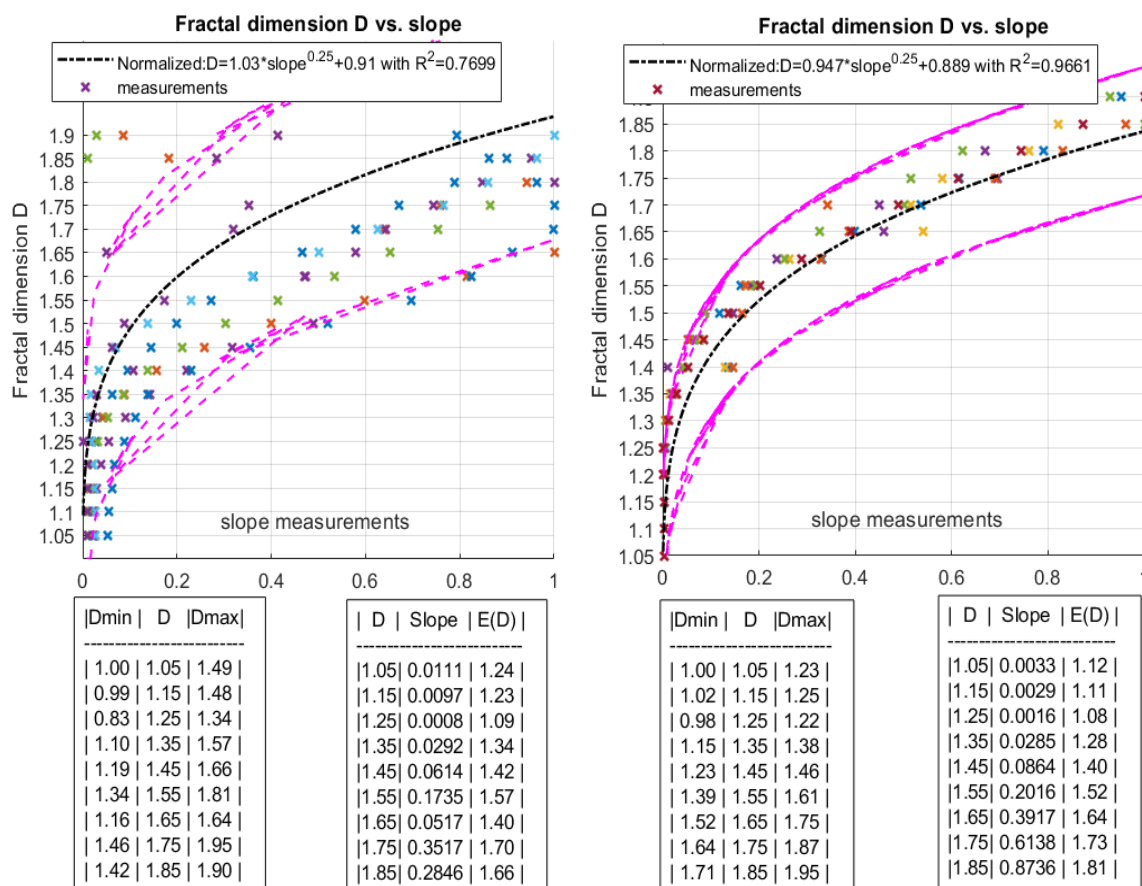
#### 2.5.4 Συνδυαστική επίδραση εύρους ζώνης *'bandwidth'* και *'patch-size'*.

Στα επόμενα διαγράμματα παρουσιάζω αποτελέσματα προσομοιώσεων από συνδυασμό ίδιου *'patch-size'* 40λ με δύο διαφορετικές τιμές εύρους  $BW = [1000MHz, 2500MHz]$ : Το διάγραμμα της εικόνας 2-19 έχει δημιουργηθεί με επαναλαμβανόμενες προσομοιώσεις σκέδασης επί επιφάνειας με *'patch-size'* 40λ και  $BW = 1000MHz$  ενώ το διάγραμμα της εικόνας 2-20 έχει δημιουργηθεί με κρατώντας το ίδιο *'patch-size'* 40λ αλλά με διαφορετικό  $BW = 2500MHz$ .

Σε κάθε μία προσομοίωση σκέδασης αλλάζω επιπλέον και την τιμή της τυχαίας φάσης  $\varphi_n$ , βλ. σχέση 1.25, εισάγοντας έτσι και μια τυχαίοτητα στην κατασκευή της επιφάνειας η οποία επιτρέπει τον ακόμα πιο δυναμικό έλεγχο της μεθόδου. Σε κάθε διάγραμμα, εικόνες 2-19 έως 2-20, εκτός από την καταγραφή των μετρήσεων, έχω σχεδιάσει ως μαύρη διακεκομμένη την καμπύλη προσαρμογής, *'curve fit'*, της οποίας την συνάρτηση  $f$  παρουσιάζω στο πλαίσιο κάτω από τον τίτλο του κάθε διαγράμματος. Με βάση αυτή την συνάρτηση έχω συμπληρώσει σε κάθε διάγραμμα ενδεικτικά τον πίνακα εκτίμησης της τραχύτητας " $|D| Slope | E(D) |$ " όπου στην στήλη  $D$  σημειώνεται η τιμή του *'fractal dimension'*  $D$  με την οποία κατασκευάστηκε η επιφάνεια της προσομοίωσης, στην στήλη  $Slope$  καταγράφεται η τιμή της μέτρησης *'slope'* που αντιστοιχεί στο *'average slope'* όπως αυτό μετρήθηκε στο διάγραμμα σκέδασης  $\gamma(k)$  της συγκεκριμένης προσομοίωσης και στην τελευταία στήλη σημειώνω την τιμή εκτίμησης  $E(D) = \hat{D} = f(slope)$  που είναι η τιμή που προσδιορίζει η μέθοδος ότι πρέπει να είναι το *'fractal dimension'*  $D$  της επιφάνειας σκέδασης με βάση την προτεινόμενη μέθοδο/τιμή *'slope'*. Με την βοήθεια αυτού του

πίνακα ο αναγνώστης μπορεί με μια ματιά να αντιπαραβάλει την αρχική τιμή  $D$  κατασκευής της επιφάνειας με την τιμή εκτίμησης  $E(D)$  που δίνει η προτεινόμενη μέθοδος προσδιορισμού της τραχύτητας μια επιφάνειας. Άμεσα γίνεται εμφανές από το διάγραμμα της εικόνας 2-19 ότι για 'patch-size' 40λ με  $BW = 1000MHz$  η μέθοδος δεν μπορεί να λειτουργήσει καθώς η διασπορά των μετρήσεων είναι πολύ μεγάλη και οι εκτιμήσεις εσφαλμένες στην πλειοψηφία τους. Κρατώντας το ίδιο 'patch-size' 40λ και υπερδιπλασιάζοντας το εύρος σε  $BW = 2500MHz$  καταφέρνουμε, όπως παρατηρούμε στην εικόνα 2-20 να μειώσουμε την διασπορά των μετρήσεων, να αυξήσουμε σημαντικά την ακρίβεια των εκτιμήσεων  $E(D)$  και να ξανακάνουμε την μέθοδο λειτουργική.

Από τις προσομοιώσεις διαπιστώθηκε επίσης ότι οι παραπάνω παρατηρήσεις μπορεί να λειτουργήσουν και αντίστροφα, βλ. διάγραμμα εικόνας 2-18. Όπου για σταθερό  $BW = 1000MHz$  αυξάνοντας το 'patch-size' μειώνεται η διασπορά και βελτιώνεται η ακρίβεια των μετρήσεων. Έτσι κατά την εφαρμογή της μεθόδου όταν διαπιστώνεται ότι η απαίτηση  $BW \gg 0.05f_0$  δεν μπορεί να ικανοποιηθεί μπορεί να εξετάζεται εναλλακτικά και η περίπτωση της αντιστάθμισης της έλλειψης ικανού εύρους ζώνης μέσω αύξηση του μεγέθους 'patch-size'.

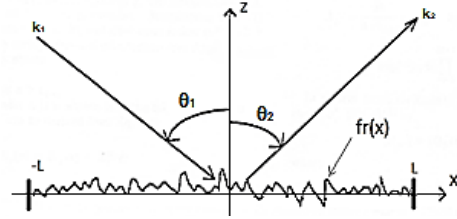


Εικόνα 2-20. Εκτίμηση του 'fractal dimension'  $D$ , υπό γωνία πρόσπτωσης  $\theta_1=25^\circ$ ,  $f_0=10GHz$  για συνδυασμό 'patch size' 40λ και  $BW=1000MHz$

Εικόνα 2-19. Εκτίμηση του 'fractal dimension'  $D$ , υπό γωνία πρόσπτωσης  $\theta_1=25^\circ$ ,  $f_0=10GHz$  για συνδυασμό 'patch size' 40λ και  $BW=2500MHz$

### 2.5.5 Επίδραση της γωνίας πρόσπτωσης $\theta_1$

Θα εξετάσω στην συνέχεια το πώς επηρεάζει η γωνία πρόσπτωσης  $\theta_1$ , βλ. εικόνα 2-21, την προτεινόμενη μέθοδο εκτίμησης της τραχύτητας μιας επιφάνειας. Συγκεκριμένα κρατώντας σταθερές τις παραμέτρους προσομοίωσης της ΗΜ εκπομπής, ήτοι  $f_0=10\text{GHz}$ ,  $BW=1000\text{MHz}$ ,  $\Delta f=10\text{MHz}$ ,  $M=100$  και με σταθερό μέγεθος επιφάνειας, 'patch-size'=80λ, μεταβάλλω την γωνία πρόσπτωσης  $\theta_1$  του ΗΜ κύματος ανά  $10^\circ$  ξεκινώντας από τις  $10^\circ$ , σχεδόν κάθετη πρόσπτωση του ΗΜ κύματος στην επιφάνεια, έως τις  $80^\circ$  σχεδόν παράλληλα στην επιφάνεια, ήτοι  $\theta_1 = [10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ]$ . Για κάθε μία διαφορετική τιμή γωνίας πρόσπτωσης  $\theta_1$ , μεταβάλλω την τραχύτητα της επιφάνειας με ένα βήμα 0.05 ήτοι για 18 τιμές  $D=[1.05, 1.10, 1.15, \dots, 1.80, 1.85, 1.90]$  και καταγράφω τα αποτελέσματα των μετρήσεων των προσομοιώσεων στα διαγράμματα των εικόνων 2-20 έως 2-27. Για κάθε μία διαφορετική τιμή γωνίας πρόσπτωσης επαναλαμβάνω 10 φορές το κάθε πείραμα προσομοίωσης αλλάζοντας επιπλέον και σε κάθε προσομοίωση την τιμή της τυχαίας φάσης  $\varphi_n$ , βλ. σχέση 1.25, εισάγοντας έτσι και μια τυχαίοτητα στην κατασκευή της επιφάνειας η οποία επιτρέπει τον ακόμα πιο δυναμικό έλεγχο της ευρωστίας της προτεινόμενης μεθόδου. Σε κάθε διάγραμμα, βλ. εικόνες 2-22 έως 2-29, εκτός από την καταγραφή των μετρήσεων, έχω σχεδιάσει ως μαύρη διακεκομμένη την καμπύλη προσαρμογής, 'curve fit', της οποίας την συνάρτηση  $f$  παρουσιάζω στο πλαίσιο κάτω από τον τίτλο του κάθε διαγράμματος. Με βάση αυτή την συνάρτηση έχω συμπληρώσει σε κάθε διάγραμμα ενδεικτικά τον πίνακα εκτίμησης της τραχύτητας " $|D|Slope|E(D)|$ " όπου στην στήλη  $D$  σημειώνεται η τιμή του 'fractal dimension'  $D$  με την οποία κατασκευάστηκε η επιφάνεια της προσομοίωσης, στην στήλη  $Slope$  καταγράφεται η τιμή της μέτρησης 'slope' που αντιστοιχεί στο 'average slope' όπως αυτό μετρήθηκε στο διάγραμμα σκέδασης  $\gamma(k)$  της συγκεκριμένης προσομοίωσης και στην τελευταία στήλη σημειώνω την τιμή εκτίμησης  $E(D) = \hat{D} = f(slope)$  που είναι η τιμή που προσδιορίζει η μέθοδος ότι πρέπει να είναι το 'fractal dimension'  $D$  της επιφάνειας σκέδασης με βάση την προτεινόμενη μέθοδο/τιμή 'slope'. Με την βοήθεια αυτού του πίνακα ο αναγνώστης μπορεί με μια ματιά να αντιπαραβάλει την αρχική τιμή  $D$  κατασκευής της επιφάνειας με την τιμή εκτίμησης  $E(D)$  που δίνει η προτεινόμενη μέθοδος προσδιορισμού της τραχύτητας μιας επιφάνειας. Άμεσα γίνεται εμφανές από τα διαγράμματα, εικόνες 2-22 έως 2-29, ότι για πολύ μικρές γωνίες  $\theta_1 \leq 10^\circ$ , δηλαδή όταν το ΗΜ κύμα προσπίπτει σχεδόν κάθετα στην επιφάνεια η μέθοδος δεν μπορεί να λειτουργήσει και αυτό αποτυπώνεται και από την διασπορά στις τιμές εκτίμησης της τραχύτητας. Ακριβώς το ίδιο παρατηρείται και για πολύ μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης  $\theta_1 \geq 80^\circ$  όπου επίσης φαίνεται ότι δεν μπορεί να λειτουργήσει η μέθοδος όπως άλλωστε αυτή η αδυναμία επιβεβαιώνεται και από την σχέση (1.55)



Εικόνα 2-21. Η γωνία πρόσπτωσης  $\theta_1$ , 'incident angle', του ΗΜ κύματος ως προς την κάθετο στην επιφάνεια

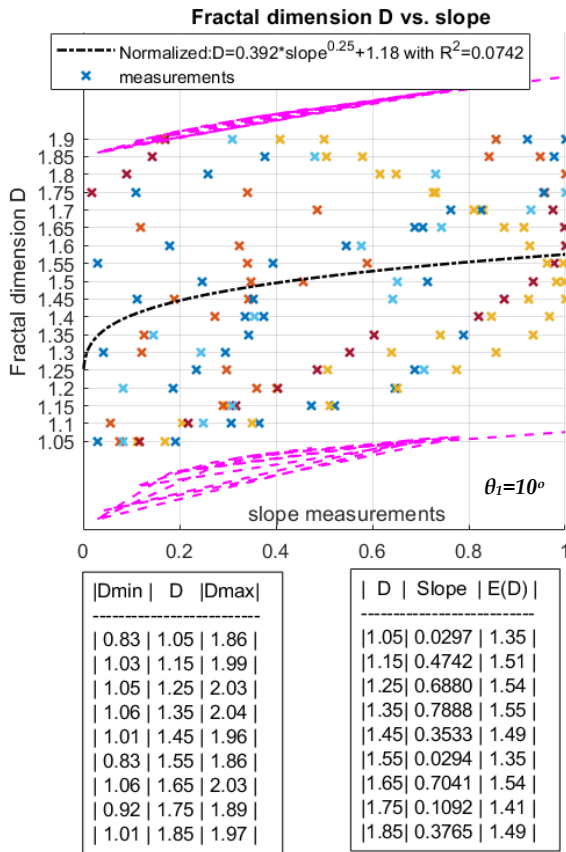
1<sup>ο</sup> κεφαλαίου §1.2.2 όπου  $v_z = -k(\cos \theta_1 + \cos \theta_2)$  και η οποία για  $\theta_1 \rightarrow \pi/2$  και  $v_z \rightarrow 0$  με αποτέλεσμα το γινόμενο  $v_z \cdot S(x) \rightarrow 0$  όπου  $S(x)$  αποτελεί την συνάρτηση που μεταφέρει την πληροφορία για την επιφάνεια στο ολοκλήρωμα της σχέσης

$$(1.51) \quad E_2 = \frac{ike^{ikR_0}}{4\pi R_0} \int_{-L}^L (aS' - b)e^{iv_x + iv_z S(x)} dx \quad \text{μέσω του οποίου υπολογίζεται η ένταση του}$$

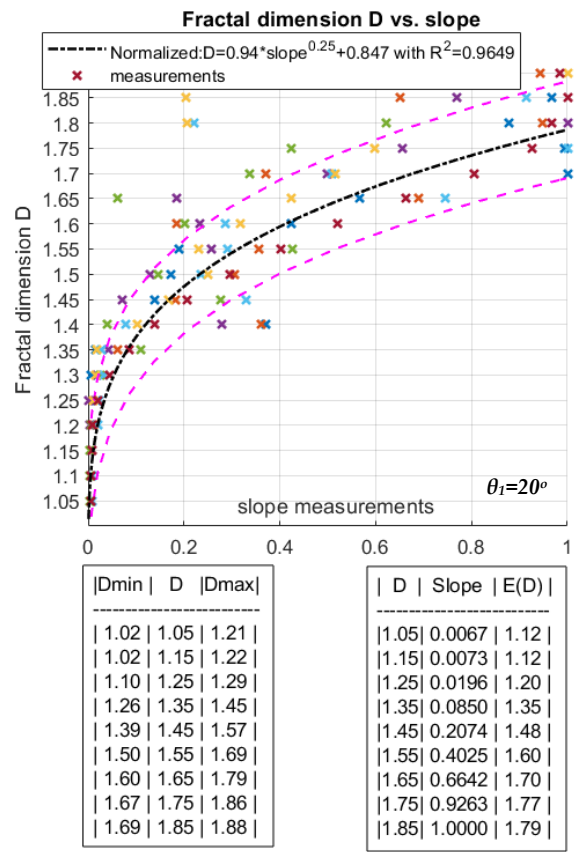
οπισθοσκεδαζόμενου ΗΜ κύματος.

Από τις προσομοιώσεις προκύπτει επίσης ότι η μέθοδος μπορεί να λειτουργήσει ικανοποιητικά εντός εύρους γωνιών πρόσπτωσης  $20^\circ \leq \theta_1 \leq 70^\circ$  και αυτό επαληθεύεται και από τον δείκτη ένδειξης βέλτιστης προσαρμογής  $R^2$  [28]-[29]. Ο δείκτης αυτός που ονομάζεται '*R-squared*', αλλά είναι και γνωστός ως συντελεστής προσδιορισμού '*coefficient of determination*', όσο πιο κοντά είναι στη μονάδα τόσο πιο κοντά στις πραγματικές τιμές είναι και οι εκτιμήσεις του μοντέλου καθώς η διακύμανση των σφαλμάτων απόκλισης των τιμών πρόβλεψης του μοντέλου ως προς τις πραγματικές μετρήσεις ελαχιστοποιούνται [30]. Επίσης σε κάθε διάγραμμα έχω σημειώσει με ροζ διακεκομμένες γραμμές τα όρια πρόβλεψης - '*prediction bounds*' [22] τα οποία παρουσιάζω και σε μορφή πίνακα ορίων πρόβλεψης " $|Dmin|D|Dmax|$ " όπου στην στήλη  $D$  σημειώνεται η τιμή του '*fractal dimension*'  $D$  με την οποία κατασκευάστηκε η επιφάνεια της προσομοίωσης κατά το πείραμα και εκατέρωθεν αυτής το άνω και κάτω όριο εκτίμησης  $Dmin, Dmax$  όπως αυτό υπολογίζεται από το μοντέλο εκτίμησης με ένα συντελεστή εμπιστοσύνης στο 90%. Το εύρος των ορίων πρόβλεψης όπως και οι διασπορά των μετρήσεων παρατηρούμε ότι μικραίνει για γωνίες πρόσπτωσης  $20^\circ \leq \theta_1 \leq 70^\circ$  που σημαίνει ότι για αυτές τις γωνίες πρόσπτωσης οι εκτιμήσεις της μεθόδου για τον προσδιορισμό της τραχύτητας μιας επιφάνειας γίνονται πιο ακριβείς. Περισσότερα σχετικά με την μεθοδολογία εκτίμησης του '*fractal dimension*'  $D$  παρουσιάζω στο παράρτημα Α7.

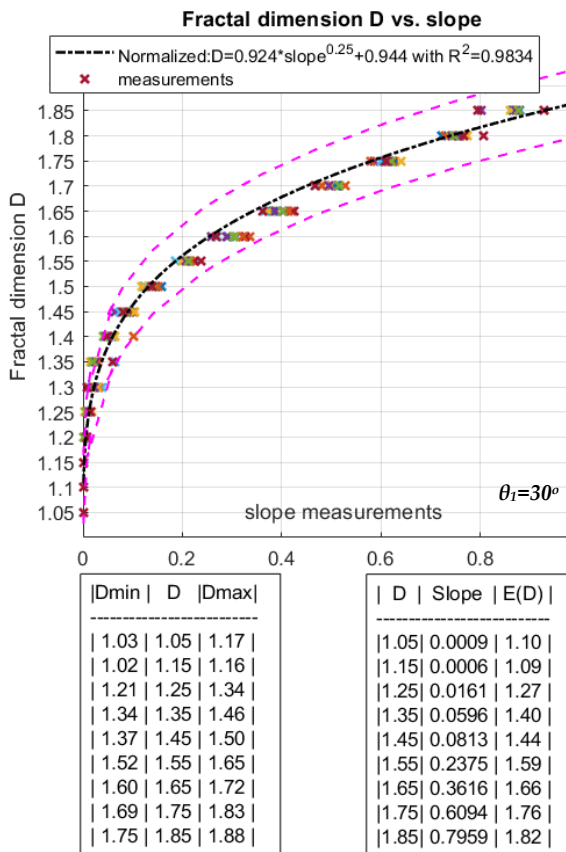




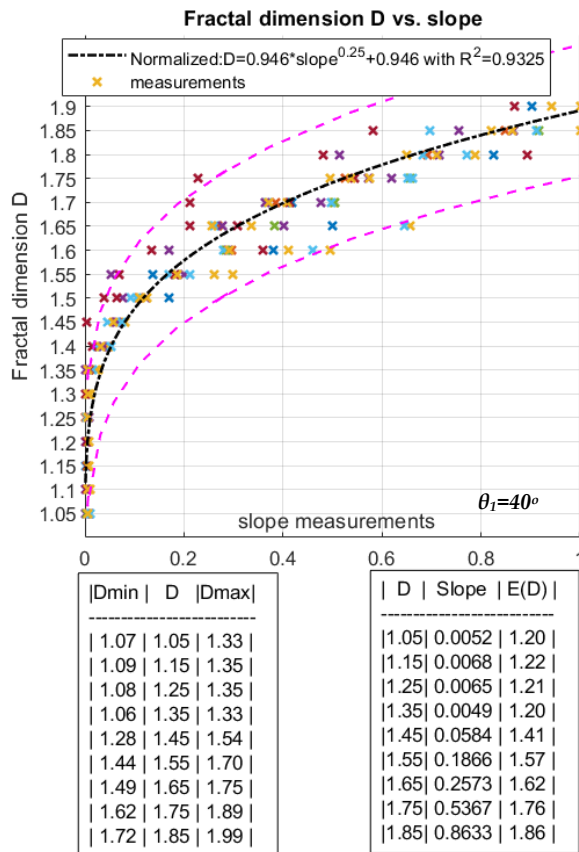
Εικόνα 2-25. Εκτίμηση του 'fractal dimension' D, υπό γωνία πρόσπτωσης  $\theta_i=10^\circ$



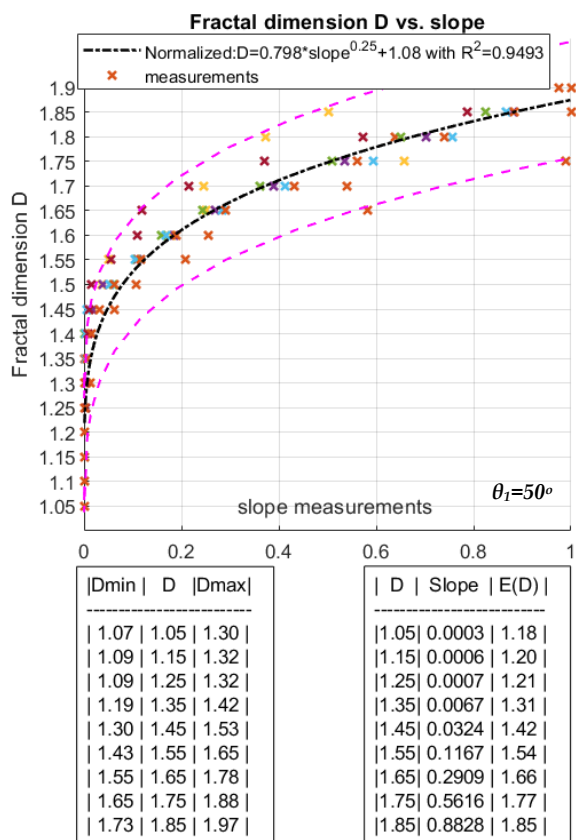
Εικόνα 2-24. Εκτίμηση του 'fractal dimension' D, υπό γωνία πρόσπτωσης  $\theta_i=20^\circ$



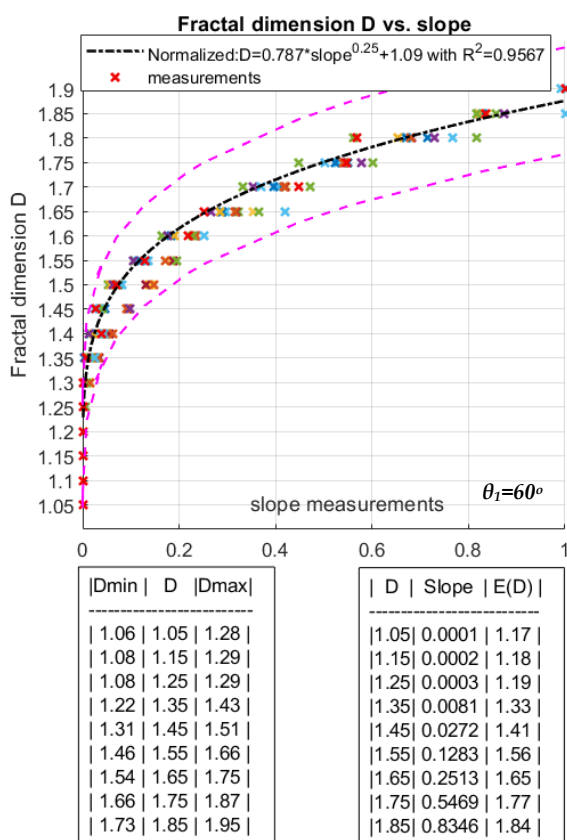
Εικόνα 2-23. Εκτίμηση του 'fractal dimension' D, υπό γωνία πρόσπτωσης  $\theta_i=30^\circ$



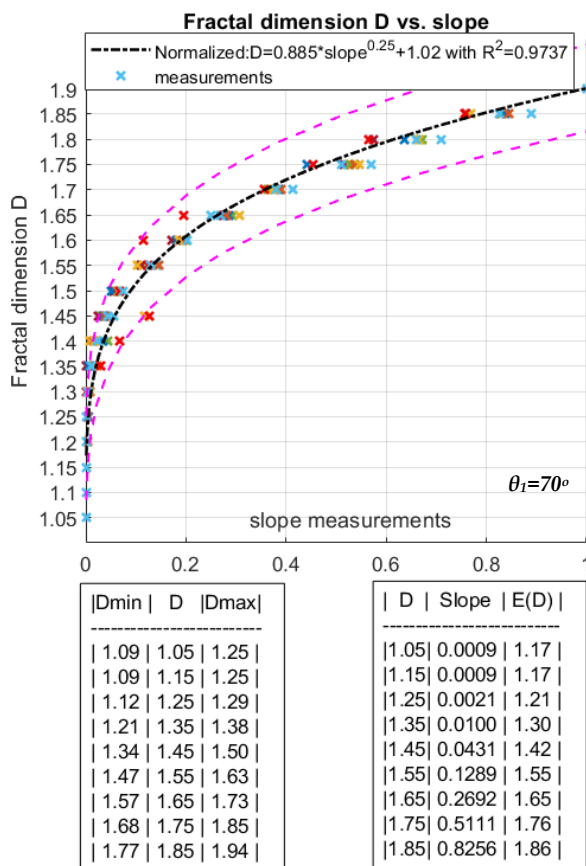
Εικόνα 2-22. Εκτίμηση του 'fractal dimension' D, υπό γωνία πρόσπτωσης  $\theta_i=40^\circ$



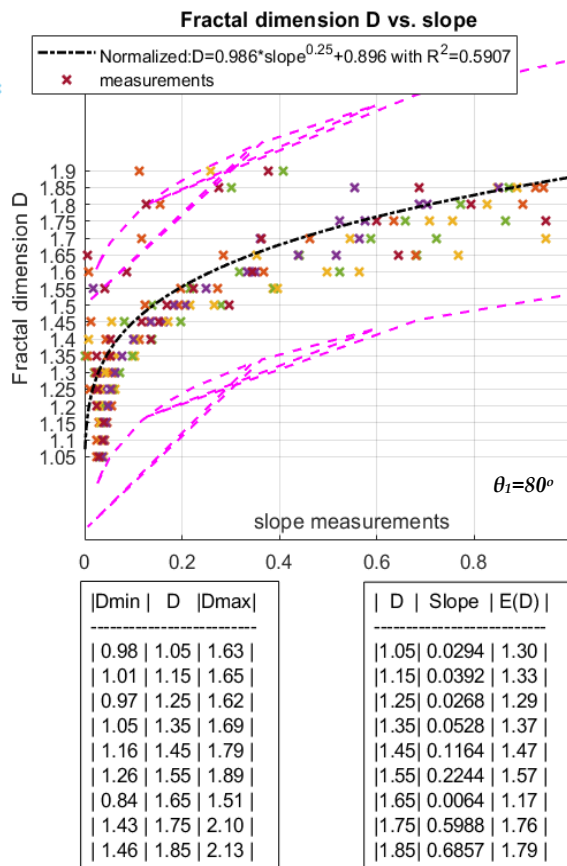
Εικόνα 2-26. Εκτίμηση του 'fractal dimension'  $D$ , υπό γωνία πρόσπτωσης  $\theta_1=50^\circ$



Εικόνα 2-27. Εκτίμηση του 'fractal dimension'  $D$ , υπό γωνία πρόσπτωσης  $\theta_1=60^\circ$



Εικόνα 2-29. Εκτίμηση του 'fractal dimension'  $D$ , υπό γωνία πρόσπτωσης  $\theta_1=70^\circ$



Εικόνα 2-28. Εκτίμηση του 'fractal dimension'  $D$ , υπό γωνία πρόσπτωσης  $\theta_1=80^\circ$

Τα διαγράμματα των εικόνων 2-22 έως και 2-29 αποτυπώνουν κανονικοποιημένες τις τιμές των κλίσεων από 0 έως 1 έτσι ώστε να μπορεί να είναι εφικτή και μια γενικότερη σύγκριση μεταξύ τους και κυρίως μεταξύ των εξισώσεων εκτίμησης  $\hat{D} = \hat{a} \cdot slope^{\hat{b}} + \hat{c}$ . Μια τελευταία λοιπόν πολύ σημαντική παρατήρηση που αφορά την γωνία πρόσπτωσης σε σχέση με την προτεινόμενη μέθοδο προσδιορισμού της τραχύτητας μιας επιφάνειας από τα οπισθοσκεδαζόμενα ΗΜ κύματα είναι ότι υπάρχει μια σημαντική εξάρτηση της μεθόδου από την γωνία πρόσπτωσης. Εάν παρατηρήσουμε παραδείγματος χάριν την εξίσωση εκτίμησης για γωνία  $\theta_1 = 30^\circ$  αυτή δίνεται από την σχέση  $\hat{D} = 0.924 slope^{0.25} + 0.944$  με παραμέτρους ( $\hat{a} = 0.924, \hat{c}=0.944$ ) η οποία μας δίνει μια σχεδόν τέλεια προσαρμοσμένη με  $R^2=0.9834$ . Για γωνία  $40^\circ$  έχουμε ( $\hat{a} = 0.946, \hat{c}=0.946$ ) τα οποία είναι πλησίον στα ( $\hat{a} = 0.924, \hat{c}=0.944$ ) των  $30^\circ$  όπως και για γωνία  $20^\circ$  όπου ( $\hat{a} = 0.94, \hat{c}=0.847$ ) επίσης οριακά πλησίον των προηγούμενων.

Αντίθετα διαπιστώνεται εύκολα ότι το μοντέλο εκτίμησης για γωνίες  $\theta_1 = 30^\circ$  δεν είναι καθόλου συμβατό για γωνίες  $\theta_1 = 50^\circ, \theta_1 = 60^\circ$  ή  $\theta_1 = 70^\circ$  γιατί εκεί βλέπουμε ότι οι παράμετροι των μοντέλων  $\hat{a}, \hat{c}$  είναι της τάξης του ( $\hat{a} = 0.798, \hat{c}=1.08$ ) για τις  $50^\circ$ , ( $\hat{a} = 0.787, \hat{c}=1.09$ ) για τις  $60^\circ$  και ( $\hat{a} = 0.885, \hat{c}=1.02$ ) για τις  $70^\circ$ . Δηλαδή το μοντέλο πρόβλεψης των  $30^\circ$  είναι οριακά κατάλληλο για  $20^\circ$  και  $40^\circ$  και δεν ταιριάζει για προβλέψεις στις  $50^\circ, 60^\circ$  και  $70^\circ$  όπως αντίστοιχα το μοντέλο των  $60^\circ$  ταιριάζει για προβλέψεις στις  $50^\circ$  και  $70^\circ$  αλλά δεν ταιριάζει για τις  $20^\circ, 30^\circ$  και  $40^\circ$ .

Πρέπει λοιπόν να λαμβάνεται πάντα υπόψη ότι το προτεινόμενο μοντέλο προσδιορισμού της τραχύτητας μιας επιφάνειας μέσω υπολογισμού κλίσεων στο διάγραμμα  $\gamma(k)$  των οπισθοσκεδαζόμενων ΗΜ κυμάτων μπορεί να λειτουργήσει ικανοποιητικά εντός εύρους γωνιών πρόσπτωσης  $20^\circ \leq \theta_1 \leq 70^\circ$  υπό την επιπλέον προϋπόθεση ότι η γωνία πρόσπτωσης παραμένει σταθερή ή έστω μεταβάλλεται για κάποιες μοίρες πλησίον όμως της αρχικής γωνίας για την οποία κατασκευάστηκε το μοντέλο πρόβλεψης.

## 2.6 Αξιολόγηση της μεθόδου παρουσία ηλεκτρονικού θορύβου

Ο προσδιορισμός της τραχύτητας μιας 'fractal' επιφάνειας μέσω υπολογισμού κλίσεων στο διάγραμμα  $\gamma(k)$  των οπισθοσκεδαζόμενων ΗΜ κυμάτων λειτουργεί ικανοποιητικά υπό τις κατάλληλες προϋποθέσεις όπως αυτές παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα §2.5. Η προτεινόμενη αυτή μέθοδος δημοσιεύτηκε στο έγκριτο διεθνές επιστημονικό περιοδικό Electronics and Electrical Engineering Journal, Signal Technology υπό τον τίτλο "Characterization of Fractal Surfaces From Backscattered Radar Data" [21] και παρουσιάστηκε σε αρκετά συνέδρια [26]-[27]. Στο συνέδριο Science & Technology Organization 'STO' που έλαβε χώρα στην Κωνσταντινούπολη στις 16 Δεκεμβρίου 2015 [26] ετέθη το θέμα κατά πόσο η μέθοδος αυτή θα μπορούσε να έχει πρακτική εφαρμογή σε ένα θορυβώδες περιβάλλον RADAR. Από το επόμενο συνέδριο του 'STO' παρουσιάστηκε η μελέτη που ακολουθεί όπου στις προσομοιώσεις προστέθηκε και θόρυβος ρυθμιζόμενης στάθμης στο διάγραμμα του συντελεστή σκέδασης  $\gamma(k)$  προκειμένου να εξεταστεί κατά πόσο η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί να λειτουργήσει παρουσία θορύβου.

### 2.6.1 Προσθήκη ‘Additive White and Gaussian Noise’ στο σήμα $\gamma(k)$

Ένα ανεπιθύμητο σήμα που δυσκολεύει την ανάκτηση της πληροφορίας στον δέκτη ενός ραντάρ ονομάζεται θόρυβος. Παρόμοιο ρόλο με τον θόρυβο παίζει και η παρεμβολή ‘*interference*’, όμως υπάρχει μια πολύ βασική διαφορά μεταξύ θορύβου και παρεμβολής. Η παρεμβολή προέρχεται από ένα άλλο σήμα το οποίο ενέχει κάποιου είδους περιοδικότητα ή άλλη στατιστική συσχέτιση ενώ ο θόρυβος είναι ένα σύνολο τυχαίων σημάτων με ανεξάρτητα πλάτη, φάσεις και συχνότητες μεταξύ τους. Στην συνέχεια θα ασχοληθούμε μόνο με τον θόρυβο διότι οι παρεμβολές δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν παρά μόνο περιπτώσιολογικά και εξειδικευμένα, δηλαδή για να ληφθούν μέτρα πρέπει να είναι γνωστό το είδος της παρεμβολής. Οι πηγές θορύβου ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες στις φυσικές και στις τεχνητές πηγές. Τεχνητές πηγές θορύβου θεωρούμε τις συσκευές που η λειτουργία τους παράγει θόρυβο όμως π.χ. είναι οι ηλεκτρικοί κινητήρες, οι ηλεκτρομαγνητικές επαφές, ηλεκτρονόμοι κλπ. Οι φυσικές πηγές θορύβου διακρίνονται σε εξωγενείς που ο θόρυβος προέρχεται από την κοσμική ακτινοβολία ή/και την ατμόσφαιρα και στις ενδογενείς που ο θόρυβος προέρχεται από τα ηλεκτρονικά στοιχεία που εμπεριέχονται στο ίδιο το ηλεκτρονικό κύκλωμα. Σε αντίθεση με τις τεχνητές πηγές που μπορούν να εντοπιστούν και με την χρήση κατάλληλων κυκλωμάτων να απαλειφθούν ή να περιοριστούν σημαντικά, οι φυσικές πηγές θορύβου είναι αδύνατο να απαλειφθούν. Σε ένα πραγματικό σύστημα RADAR το διάγραμμα  $\gamma(k)$  προκύπτει μετά την επεξεργασία των οπισθοσκεδαζόμενων ΗΜ κυμάτων που φθάνουν στον δέκτη του. Ο φυσικός θόρυβος εισέρχεται στον δέκτη από την κεραία του ραντάρ ‘*εξωγενής*’ και απευθείας από τα ίδια τα ηλεκτρονικά κυκλώματα που απαρτίζουν τον δέκτη ‘*ενδογενής*’. Οι πιο σημαντικοί ενδογενείς θόρυβοι είναι ο θερμικός θόρυβος ‘*thermal noise*’ και ο θόρυβος βολής ‘*shot noise*’. Το σύνολο των φυσικών αυτών θορύβων μπορούν να μοντελοποιηθούν με την χρήση Προσθετικού Λευκού Γκαουσιανού Θορύβου ‘*Additive White Gaussian Noise*’ - *AWGN*. Το *AWGN* είναι ένα βασικό μοντέλο εισαγωγής θορύβου που χρησιμοποιείται στην θεωρία της πληροφορίας και προσομοιάζει την επίδραση φυσικών θορύβων και γενικά τυχαίων διαδικασιών που μπορούν να εισάγουν θόρυβο στην πληροφορία. Το μοντέλο *AWGN* που χρησιμοποιώ στην συνέχεια υλοποιεί μια τυπική κανονική κατανομή ‘*standard normal distribution*’ *Norm(0,1)* με μέση τιμή  $\mu=0$  και τυπική απόκλιση  $\sigma=1$ .

Ένα μέτρο που δίνει άμεσα μια εικόνα για τα επίπεδα του θορύβου σε σχέση με το ωφέλιμο σήμα στον δέκτη αλλά και σε οποιοδήποτε σημείο του RADAR είναι ο λεγόμενος σηματοθορυβικός λόγος ή εν συντομία *SNR* ‘*Signal to Noise ratio*’. Το *SNR* είναι καθαρός αριθμός και για ευκολία εκφράζεται σε *db* με  $SNR(db) = 10\log_{10}(SNR)$ .  $SNR=0db$  σημαίνει ότι το σήμα έχει το ίδιο μέγεθος με τον θόρυβο.

Το *SNR* δίνεται από την σχέση:

$$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{noise}} = \frac{A_{signal}^2}{A_{noise}^2} \quad (2.1)$$

Όπου  $P$  είναι η ισχύς πάνω σε μια μοναδιαία αντίσταση και το  $A$  συμβολίζει την *RMS* τιμή της τάσης πάνω στην ίδια μοναδιαία αντίσταση.

Έτσι  $A_{signal}$  είναι η *RMS* τιμή του πλάτους του σήματος ήτοι  $A_{signal}=RMS(\gamma(k))$  και αντίστοιχα  $A_{noise}$  είναι η *RMS* τιμή του πλάτους θορύβου.

### 2.6.2 Υπολογισμός σήματος $\gamma_{noisy}$ για δημιουργία συγκεκριμένης στάθμης $SNR$

Με βάση τα παραπάνω και προκειμένου να εξετάσω την επίδραση του θορύβου στον υπολογισμό των κλίσεων 'slopes' θα χρησιμοποιήσω το  $SNR$  ως μέτρο σύγκρισης μεταξύ σημάτων  $\gamma(k)$  στα οποία θα εισάγω κάθε φορά μια διαφορετική στάθμη θορύβου. Θεωρώντας μια μοναδιαία αντίσταση, η  $RMS$  τιμή του διακριτού ως προς την μεταβλητή  $k$ , σήματος  $\gamma(k)$  υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$A_{signal} = RMS(\gamma) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{m=1}^n |\gamma(m)|^2} \quad (2.2)$$

και αντίστοιχα η ισχύς του σήματος  $P_{signal}$  δίνεται ως:

$$P_{signal} = P_{\gamma} = RMS^2(\gamma) = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n |\gamma(m)|^2 \quad (2.3)$$

Από τις σχέσεις (2.1), (2.2) και (2.3) προκύπτει ότι το πλάτος του θορύβου  $A_{noise}$  που πρέπει να προσθέσω στο πλάτος του σήματος έτσι ώστε το τελικό σήμα να εμφανίζει συγκεκριμένη τιμή  $SNR$  υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$A_{noise} = \sqrt{\frac{P_{\gamma}}{SNR}} \Leftrightarrow A_{noise} = \sqrt{\frac{\frac{1}{n} \sum_{m=1}^n |\gamma(m)|^2}{SNR}} \quad (2.4)$$

Έτσι το τελικό θορυβώδες σήμα  $\gamma_{noisy}$  δίνεται από την παρακάτω σχέση (2.5):

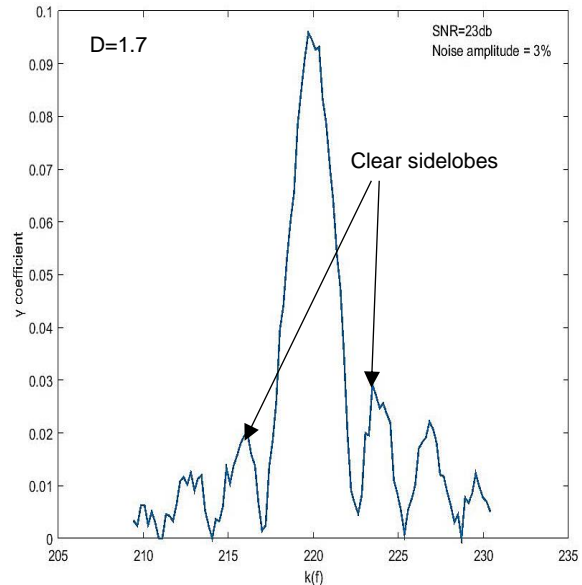
$$\gamma_{noisy} = \gamma + A_{noise} \cdot Norm(0,1) \quad (2.5)$$

και αποτελείται από το αρχικό σήμα στο οποίο έχει προστεθεί και ένα επίπεδο θορύβου συγκεκριμένου πλάτους  $A_{noise}$  από την σχέση (2.4) έτσι ώστε το θορυβώδες αυτό σήμα  $\gamma_{noisy}$  να επιτυγχάνει μια συγκεκριμένη τιμή σηματοθορυβικού λόγου  $SNR$  ως προς το αρχικό σήμα  $\gamma(k)$

### 2.6.3 Επίδραση της στάθμης θορύβου στην μέθοδο των κλίσεων 'slope'

Μετά από αρκετές προσομοιώσεις σκεδάσεων για διαφορετικά επίπεδα σηματοθορυβικού λόγου παρουσιάζω ενδεικτικά στις παρακάτω εικόνες τα ποιο ενδιαφέρονται σημεία. Όλες οι παρακάτω σκεδάσεις έχουν γίνει σε επιφάνεια με 'fractal dimension'  $D = 1.75$ , υπό γωνία πρόσπτωσης  $\theta_1 = 30^\circ$  και με λουπές παραμέτρους  $f_0 = 10GHz$ ,  $BW = 1000MHz$ ,  $\Delta f = 10MHz$  και  $M = 100$ .

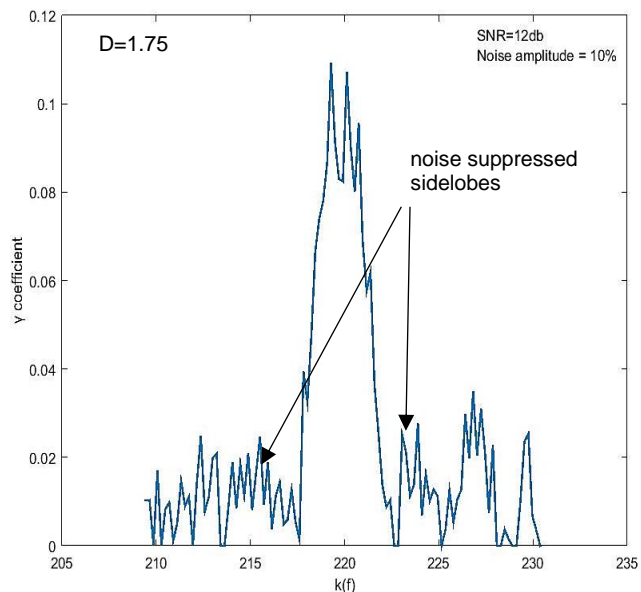
Στην εικόνα 2-30 παρουσιάζω ένα σήμα  $\gamma(k)$  μετά από προσθήκη θορύβου με στάθμη  $SNR=23db$ , με βάσει τους υπολογισμούς από την σχέση (2.5). Το πλάτος του θορύβου που έχει προστεθεί αντιστοιχεί με βάση τη σχέση (2.4) στο 3% περίπου του μέγιστου πλάτους της απόλυτης τιμής του σήματος  $|\gamma(k)|$ . Παρατηρούμε ότι με  $SNR 23 db$  το συνολικό διάγραμμα δεν έχει υποστεί κάποια σημαντική αλλοίωση από τον θόρυβο που να δυσκολεύει την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου των κλίσεων.



Εικόνα 2-30. Συντελεστής σκέδασης  $\gamma(k)_{noisy}$  παρουσία θορύβου με  $SNR=23db$

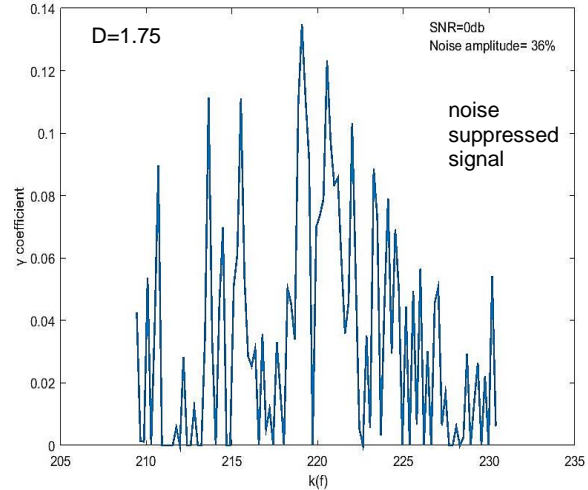
Στην εικόνα 2-31 βλέπουμε το ίδιο σήμα  $\gamma(k)$  μετά από προσθήκη μεγαλύτερης στάθμης θορύβου έτσι ώστε το  $SNR$  να έχει σχεδόν υποδιπλασιαστεί,  $SNR = 12db$ .

Σε αυτή την περίπτωση το πλάτος του επιπρόσθετου θορύβου είναι ίσο με περίπου το 10% του μέγιστου πλάτους του σήματος  $|\gamma(k)|$ . Οι λεπτομέρειες του σήματος έχουν αρχίσει να αλλοιώνονται και οι πλαϊνοί λοβοί έχουν αρχίσει να συγκαλύπτονται από τον θόρυβο. Παρατηρούμε δηλαδή ότι με  $SNR < 23db$  η μέθοδος αρχίζει να εμφανίζει κάποια πρόβλημα στην υλοποίηση της αφού οι θέσεις των λοβών και συνεπώς οι μετρήσεις κλίσεων 'slopes' γίνονται ασαφείς λόγω του πλάτους του θορύβου.



Εικόνα 2-31. Συντελεστής σκέδασης  $\gamma(k)_{noisy}$  παρουσία θορύβου με  $SNR=12db$

Στην εικόνα 2-32 βλέπουμε ότι για  $SNR = 0db$ , δηλαδή με προσθήκη θορύβου που το πλάτος του ανέρχεται στο 36% του μέγιστου πλάτους του αρχικού σήματος  $|\gamma(k)|$ , οι πλευρικοί λοβοί έχουν πλήρως καλυφθεί από τον θόρυβο και η προτεινόμενη μέθοδος δεν μπορεί να λειτουργήσει καθόλου εάν δεν ενσωματωθεί κάποια τεχνική βελτίωσης του SNR πριν την εφαρμογή της μεθόδου.



Εικόνα 2-32. Συντελεστής σκέδασης  $\gamma(k)_{noisy}$  παρουσία θορύβου με  $SNR=0db$

#### 2.6.4 Προτεινόμενη βελτίωση της μεθόδου για αντιστάθμιση στον θόρυβο

Υπάρχουν πολλές τεχνικές που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να βελτιώσουν τον σηματοθορυβικό λόγο  $SNR$  και να κάνουν την μέθοδο των κλίσεων λειτουργική με παρουσία ακόμα και σημαντικής στάθμης θορύβου. Η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής εξαρτάται από το είδος του θορύβου που παρεμβάλλεται στο ωφέλιμο σήμα. Στην περίπτωση που εξετάζω εδώ και είναι αυτή του φυσικού θορύβου, προσθετικού λευκού θορύβου Γκαουσιανής κατανομής, μια τεχνική για την βελτίωση του  $SNR$  είναι η άθροιση  $N$  διαδοχικών δειγμάτων σήματος και εν συνεχεία η αφαίρεση σημαντικού μέρους του θορύβου μέσω της εξαγωγής ενός σήματος που είναι ο μέσος όρος των διαδοχικών αυτών αθροίσεων. Η τεχνική αυτή είναι γνωστή ως *'signal averaging'* [23]-[25] και μπορεί να οδηγήσει στην βελτίωση του σηματοθορυβικού λόγου  $SNR$  μέσω άθροισης *'averaging'*  $N$  διαδοχικών μετρήσεων  $\gamma(k)$ .

Η τεχνική αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι ο Γκαουσιανός θόρυβος είναι ένας στατιστικός θόρυβος με πυκνότητα πιθανότητας που δίνεται από την κανονική κατανομή  $Norm(\mu, \sigma)$  με μηδενική μέση τιμή  $\mu = 0$  και είναι ασυσχέτιστος *'uncorrelated'* με τα δεδομένα και την πληροφορία του σήματος.

Το σήμα που λαμβάνουμε στο δέκτη κάθε χρονική στιγμή είναι το άθροισμα της συνιστώσας του ωφέλιμου σήματος  $\gamma(k)$  και της συνιστώσας του θορύβου  $AWGN$ . Έστω ότι λαμβάνουμε μετρήσεις από την επιφάνεια σκέδασης κάθε  $T$  χρονικά διαστήματα και ότι οι τιμές του αθροίσματος σήματος & θορύβου σε κάθε χρονική στιγμή  $i=1,2,\dots,N$  είναι  $\gamma_{noise}(iT) = \gamma(iT) + AWGN(iT)$ .

Εάν πάρουμε τον μέσο όρο των μετρήσεων μετά από  $N$  επαναλήψεις θα έχουμε:

$$\overline{\gamma}_{noisy} = \sum_{i=1}^N \gamma^i(kT) + \sum_{i=1}^N A_{noise}^i(kT), \quad \forall k = 1, 2, \dots, M \quad (2.6)$$

Εάν το ωφέλιμο σήμα είναι σταθερό κατά την διάρκεια των  $N$  επαναλήψεων τότε η τιμή του αθροιστικά θα είναι:

$$\sum_{i=1}^N \gamma^i(kT) = N \cdot \gamma(kT) \quad (2.7)$$

Για τον λευκό θόρυβο με  $\mu = 0$  και τυπική απόκλιση  $\sigma = \sigma_n$  (η οποία επίσης ισούται με την  $RMS$  τιμή του) ισχύει ότι:

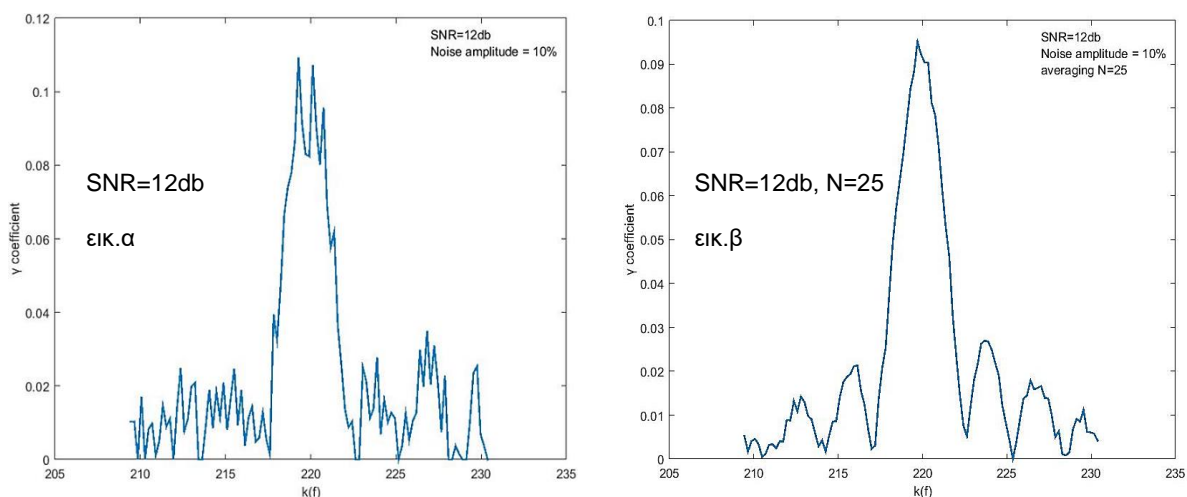
$$\sum_{i=1}^N A_{noise}^i(kT) = \sqrt{N \cdot \sigma_n^2} = \sqrt{N} \cdot \sigma_n \quad (2.8)$$

Ο σηματοθρομβικός λόγος μετά από  $N$  επαναλήψεις δίνεται από την σχέση:

$$SNR_N = \frac{N \cdot \gamma(kT)}{\sqrt{N} \cdot \sigma_n} = \sqrt{N} \cdot SNR_1 \quad (2.9)$$

Από την σχέση (2.9) προκύπτει ότι με την τεχνική του 'signal averaging' [23], γνωστός και ως 'oversampling' το αρχικό  $SNR$  μπορεί να βελτιωθεί κατά ένα παράγοντα  $\sqrt{N}$ . Βασική προϋπόθεση για να λειτουργήσει η τεχνική του 'signal averaging' είναι τα διαδοχικά ωφέλιμα σήματα που αθροίζονται να είναι σταθερά ή τουλάχιστον δυνατά συσχετισμένα μεταξύ τους 'strong correlated'.

Ο αριθμός  $N$  επανάληψης των μετρήσεων σκέδασης  $\gamma(k)$  που απαιτείται κάθε φορά προκειμένου να είναι μέθοδος των κλίσεων εφαρμόσιμη και ανεπηρέαστη σε περιπτώσεις ύπαρξης θορύβου έχει να κάνει με την στάθμη του θορύβου. Πρακτικά δηλαδή έχει να κάνει με το πόσο θέλουμε να βελτιώσουμε τον σηματοθρομβικό λόγο.

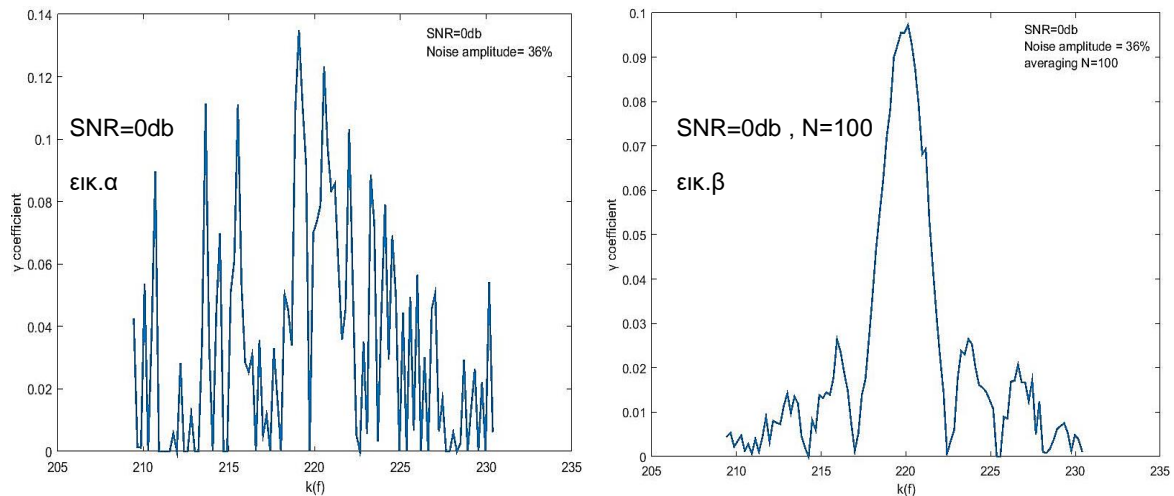


Εικόνα 2-33. Συντελεστής σκέδασης με  $SNR=12db$  πριν (α) & μετά(β) το *signal averaging*

Στην εικόνα 2-33α βλέπουμε το διάγραμμα του συντελεστή σκέδασης  $\gamma(k)$  το οποίο έχει εμπλακεί με θόρυβο και παρουσιάζει ένα σηματοθρομβικό λόγο  $SNR = 12db$ . Για να καθαρίσει το διάγραμμα ικανοποιητικά από τον θόρυβο και να επιτύχουμε το αποτέλεσμα της εικόνας 2-33β χρειάστηκαν  $N=25$  διαδοχικές μετρήσεις.



Ενώ για το διάγραμμα της εικόνας 2-34α όπου έχει πάρα πολύ θόρυβο  $SNR=0db$  χρειάστηκαν  $N=100$  διαδοχικές μετρήσεις για να έχουμε το τελικό ικανοποιητικό αποτέλεσμα της εικόνας 2-34β.



Εικόνα 2-34. Συντελεστής σκέδασης με  $SNR=0db$  πριν(α) & μετά(β) το *signal averaging*

Ανάλογα λοιπόν με την στάθμη του θορύβου που υπάρχει στο σήμα, ανάλογος είναι και ο αριθμός  $N$  της επανάληψης των μετρήσεων που θα χρειαστούν για να επιτευχθεί η επιθυμητή βελτίωση του σηματοθορυβικού λόγου. Άρα το πλεονέκτημα του '*signal averaging*' είναι ότι ο σηματοθορυβικός λόγος μπορεί να βελτιωθεί κατά βούληση κατά ένα παράγοντα  $\sqrt{N}$ . Το βασικό μειονέκτημα όμως είναι ότι αυξάνοντας τον αριθμό των διαδοχικών μετρήσεων που απαιτούνται αυξάνεται και ο χρόνος που απαιτείται για να ολοκληρωθεί διαδικασία των μετρήσεων. Πιο συγκεκριμένα για να επιτευχθεί μια βελτίωση του σηματοθορυβικού λόγου κατά ένα παράγοντα  $\sqrt{N}$  ο απαιτούμενος χρόνος μέτρησης αυξάνεται κατά μια διάρκεια  $N$  επαναλήψεων. Ταυτόχρονα υπάρχει η απαίτηση η επιφάνεια καθώς και η γωνία παρατήρησης κατά τον χρόνο των  $N$  διαδοχικών αυτών μετρήσεων να παραμένει κατά το δυνατό σταθερή ούτως ώστε τα δεδομένα των οπισθοσκεδαζόμενων ΗΜ κυμάτων να είναι '*strong correlated*' μεταξύ τους έτσι ώστε να ισχύει η εφαρμογή της τεχνικής αυτής. Συνεπώς σε περίπτωση μετρήσεων επί μιας μεταβαλλόμενης επιφάνειας, τα μέγιστα περιθώρια βελτίωσης του σηματοθορυβικού λόγου καθορίζονται από τον μέγιστο αριθμό μετρήσεων '*radar hits*' που μπορούν να επιτευχθούν επί της επιφάνειας πριν αυτή μεταβληθεί σημαντικά και αυτό αποτελεί έναν περιορισμό στην εφαρμογή αυτής της μεθόδου.

## 2.7 Ανακεφαλαίωση και Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο διερεύνθησα μέσω προσομοιώσεων σκέδασης την δυνατότητα του προσδιορισμού της τραχύτητας μιας επιφάνειας αναλύοντας απευθείας τα οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρομαγνητικά ΗΜ κύματα που επιστρέφουν στην κεραία ενός RADAR μετά από την πρόσπτωσή τους σε αυτή την τραχεία επιφάνεια.

Προσομοίωσα την επιφάνεια σκέδασης με την χρήση μαθηματικών μοντέλων 'fractal' ελέγχοντας έτσι με ακρίβεια την τραχύτητα της επιφάνειας μέσω του συντελεστή της μορφοκλασματικής διάστασης  $D$  'fractal dimension'. Στην συνέχεια προσομοίωσα την κυματομορφή εκπομπής ενός RADAR τύπου SAR ως μια εκπομπή ριπής, 'burst', ήτοι μια βηματικού τύπου, 'stepped frequency', κυματομορφή αποτελούμενη από  $M$  ηλεκτρομαγνητικά κύματα συχνότητας  $f_m = f_0 + (m-1)\Delta f$  όπου  $m=1,2,\dots,M$ ,  $\Delta f = B/M$  το βήμα της συχνότητας,  $B$  το εύρος ζώνης μεταβολής της συχνότητας και  $f_0$  η αρχική συχνότητα.

Υπό σταθερή γωνία πρόσπτωσης  $\theta_1$  και με χρήση της ανωτέρω κυματομορφής προσομοίωσα ΗΜ σκεδάσεις σε επιφάνειες μεταβλητής τραχύτητας και μελέτησα την μεταβολή των τιμών της έντασης των οπισθοσκεδαζόμενων ( $\theta_2=-\theta_1$ ) ΗΜ κυμάτων. Ορίζοντας ως συντελεστή σκέδασης την τιμή  $|\gamma| = |E/E_0|$ , όπου  $E_0$  είναι η τιμή έντασης του κατοπτρικά ανακλώμενου ΗΜ κύματος από μια λεία τέλεια αγωγίμη επίπεδη επιφάνεια και  $E$  η τιμή μέτρησης του εκάστοτε σκεδαζόμενου ΗΜ κύματος και τοποθετώντας τις μετρήσεις ως προς την συχνότητα και ειδικότερα ως προς τον κυματαριθμό  $k = 2\pi c/f_m$ , προκύπτει για κάθε ριπή ένα διάγραμμα τιμών  $\gamma = |\gamma(k)|$  ως προς  $k$ . Η προτεινόμενη μέθοδος χρησιμοποιεί ως μέτρο προσδιορισμού της τραχύτητας μιας επιφάνειας την τιμή της κλίση 'slope'  $\Delta\gamma/\Delta k$  της ευθείας που συνδέει την μέγιστη τιμή που εμφανίζει ο συντελεστής σκέδασης με την αμέσως επόμενη ή προηγούμενη μεγαλύτερη τιμή. Όσο μεγαλύτερη είναι η κλίση αυτή τόσο μεγαλύτερη είναι η τραχύτητα της επιφάνειας.

Με την χρήση αυτής της μεθόδου των κλίσεων και μετά από μεγάλο αριθμό προσομοιώσεων δοκιμών και στατιστικής ανάλυσης προέκυψε το συμπέρασμα ότι η τραχύτητα της επιφάνειας όπως αυτή εκφράζεται μέσω του συντελεστή  $D$  της μορφοκλασματικής διάστασης, μπορεί να συνδεθεί με την τιμή της κλίσης 'slope' με μια σχέση της μορφής  $\hat{D} = a * slope^b + c$  όπου  $slope = \Delta\gamma/\Delta k$  και  $a, b, c$  σταθερές που προκύπτουν μετά από εφαρμογή μεθόδων βέλτιστης προσαρμογής προς τα σημεία των μετρήσεων.

Εξετάστηκαν στην συνέχεια οι περιορισμοί και οι προϋποθέσεις που πρέπει να ισχύουν προκειμένου να μπορεί η συγκεκριμένη μέθοδος να λειτουργεί. Το εύρος ζώνης μεταβολής της συχνότητας είναι μια πολύ κρίσιμη παράμετρος για την λειτουργία της συγκεκριμένη μεθόδου και για να είναι η μέθοδος λειτουργική πρέπει να ισχύει η σχέση  $BW \gg 0.05f_0$ , δηλαδή το εύρος ζώνης μεταβολής της συχνότητας πρέπει να είναι μεγαλύτερο του 5% της αρχικής συχνότητας. Ήτοι για μια αρχική συχνότητα  $f_0 = 10GHz$  το εύρος ζώνης πρέπει να είναι οπωσδήποτε μεγαλύτερο από  $500MHz$  και ανάλογα των υπόλοιπων συνθηκών και παραμέτρων μπορεί να χρειάζεται να είναι ακόμα μεγαλύτερο.

Σημαντικός είναι και ο τρόπος που ‘χτιζεται’ το εύρος ζώνης. Από τις προσομοιώσεις διαπιστώθηκε ότι όσο μεγαλώνει το μέγεθος του βήματος  $\Delta f$  τόσο μικραίνει και η ακρίβεια που επιτυγχάνεται στην μέτρηση των ‘*slope*’. Μια βέλτιστη επιλογή για το μέγεθος του βήματος  $\Delta f$  δίνεται από την σχέση  $0,02 \cdot BW \geq \Delta f > 0,01 \cdot BW$  όπου με δεδομένη την τιμή  $\Delta f$  προκύπτει ο αριθμός των βημάτων από την σχέση  $M \geq BW/\Delta f$ .

Επίσης το μέγεθος του ‘*patch size*’, της φωτιζόμενης επιφάνειας, διαπιστώθηκε ότι μπορεί να λειτουργήσει συνεργατικά με το  $BW$  έτσι ώστε όταν η απαίτηση για  $BW \gg 0,05f_0$  δεν μπορεί να ικανοποιηθεί μπορεί να εξετάζεται η αντιστάθμιση μέσω αύξησης του μεγέθους ‘*patch-size*’ και αντίστροφα όταν το ‘*patch-size*’ είναι μικρό και δεν μπορεί να μεγαλώσει, μπορεί να εξετάζεται η αύξηση του διαθέσιμου εύρους μεταβολής  $BW$  έτσι ώστε να παραμένει η μέθοδος λειτουργική.

Τέλος πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη ότι το προτεινόμενο μοντέλο προσδιορισμού της τραχύτητας μιας επιφάνειας μέσω υπολογισμού κλίσεων στο διάγραμμα  $\gamma(k)$  των οπισθοσκεδαζόμενων ΗΜ κυμάτων μπορεί να λειτουργήσει ικανοποιητικά μόνο εντός ενός συγκεκριμένου εύρους γωνιών πρόσπτωσης  $20^\circ \leq \theta_1 \leq 70^\circ$  και υπό την επιπλέον προϋπόθεση ότι η γωνία πρόσπτωσης  $\theta_1$  παραμένει σταθερή, ή έστω να μεταβάλλεται κατά το μάλλον ή ήττον πλησίον της αρχικής γωνίας για την οποία προσαρμόστηκαν οι σταθερές  $a, b, c$  του μοντέλου εκτίμησης  $\hat{D} = a * slope^b + c$

Η ευρωστία της προτεινόμενης μεθόδου δοκιμάστηκε έναντι θορύβου σε περιβάλλον προσομοίωσης ηλεκτρονικού θορύβου AWGN όπου διαπιστώθηκε ότι η μέθοδος μπορεί να λειτουργήσει με ασφάλεια για μια τάξη σηματοθορυβικού λόγου  $SNR \geq 23db$ . Για να παραμείνει η μέθοδος λειτουργική σε μεγαλύτερη στάθμη θορύβου προτάθηκε η τεχνική του ‘*signal averaging*’. Το πλεονέκτημα της τεχνικής του ‘*signal averaging*’ είναι ότι ο σηματοθορυβικός λόγος μπορεί να βελτιωθεί κατά ένα οποιοδήποτε παράγοντα  $\sqrt{N}$ , όπου  $N$  είναι ο αριθμός των διαδοχικών επαναλαμβανόμενων μετρήσεων ‘*slopes*’ που απαιτούνται για να επιτευχθεί η βελτίωση του σηματοθορυβικού λόγου κατά  $\sqrt{N}$ . Το μειονέκτημα είναι ότι υπάρχει η απαίτηση η επιφάνεια καθώς και η γωνία παρατήρησης να παραμένει κατά το δυνατό σταθερή καθ’ όλο το χρόνο διάρκειας λήψης των  $N$  διαδοχικών αυτών μετρήσεων ούτως ώστε οι μετρήσεις των οπισθοσκεδαζόμενων ΗΜ κύματα να είναι ‘*strong correlated*’ μεταξύ τους για να έχει ισχύει η εφαρμογή της τεχνικής αυτής. Συνεπώς σε περίπτωση μετρήσεων χρονικά μεταβαλλόμενης επιφάνειας, τα περιθώρια βελτίωσης του σηματοθορυβικού λόγου καθορίζονται από τον μέγιστο αριθμό μετρήσεων ‘*radar hits*’ που μπορεί να επιτευχθεί επί της επιφάνειας πριν αυτή μεταβληθεί σημαντικά και αυτό αποτελεί και τον περιορισμό στην εφαρμογή αυτής της μεθόδου.

Η μέθοδος των κλίσεων που περιέγραψα στο παρόν κεφάλαιο έχει δημοσιευθεί στο διεθνές επιστημονικό περιοδικό *Electronics and Electrical Engineering Journal, Signal Technology* υπό τον τίτλο “*Characterization of Fractal Surfaces From Backscattered Radar Data*”. DOI :<https://doi.org/10.5755/j01.eie.22.6.17226>

## 2.8 Βιβλιογραφία

- [1] M. I. Skolnik, *“Introduction to Radar Systems”*, McGraw-Hill, 1980.
- [2] Curlander, J., & McDonough, R, *“Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing”*, John Wiley & Sons, 1991.
- [3] D. Wehner, *“High-Resolution Radar”*, Artech House, 2nd Edition, 1995.
- [4] Π.Φράγκος., *“Ηλεκτρομαγνητικές Μέθοδοι Τηλεπισκόπησης”*, Ε.Π.Ι.Σ.Ε.Υ./Ε.Μ.Π., Παπασωτηρίου, 1999.
- [5] Chan, Y. K., & Koo, V. C., *“An Introduction to Synthetic Aperture Radar (SAR)”*. Progress In Electromagnetics Research B, 2, 27–60, 2008. [Online]. Available: <https://www.jpier.org/issues/volume.html?paper=07110101>
- [6] Bamler, R., *“Principles of synthetic aperture radar”*, Surveys in Geophysics, Vol.21, pp 147–157, 2010. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1006790026612>
- [7] M. Richards, *“Fundamentals of Radar Signal Processing”*, McGraw-Hill, 1st Edition, 2005.
- [8] Π. Φράγκος & Σ. Πίντζος, *“Συστήματα PANTAP”*, Ε.Μ.Π., 2022
- [9] Chen, C. H., *“Principles of Synthetic Aperture Radar Imaging: A System Simulation Approach”*, CRC Press, 2016.
- [10] D. L. Jaggard, X. Sun, *“Scattering from fractally corrugated surfaces”*, Journal of the Optical society of America A, Vol. 7, No 6, pp. 1131-1139, 1990. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1364/JOSAA.7.001131>
- [11] D. L. Jaggard, X. Sun, *“Fractal surface scattering: a generalized Rayleigh solution”*, Journal of Applied Physics, Vol. 68, No 11, pp. 5456-5462, 1990. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1063/1.347002>
- [12] L. Guo και W. Zhen-Sen, *“Electromagnetic Scattering from One-Dimension Fractal Surface”*, Chinese Physics Letters, Vol. 11, No. 5, pp. 257-260, 1994.
- [13] S. Savaidis, P. Frangos, D. L. Jaggard and K. Hizanidis., *“Scattering from fractally corrugated surfaces: an exact approach”*, Optics Letters, Vol. 20, No. 23, pp. 2357-2359, 1995.
- [14] S. Savaidis, P. Frangos, D. L. Jaggard and K. Hizanidis., *“Scattering from fractally corrugated surfaces using the extended boundary condition method”*, Journal of the Optical Society of America A, Vol. 14, No. 2, pp. 475 - 485, 1997.
- [15] D.L.Jaggard, A.D. Jaggard, P. Frangos, *“Fractal Electrodynamics: Surfaces and Superlattices”*, Chapter 1 (pages 1-47) in Frontiers in Electromagnetics, Douglas H. Werner and Raj Mittra, eds., IEEE Press, 2000

- [16] 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, Vol. 34, No 4, p. 966–972, 1996.
- [17] A.K. Sultan – Salem, G.L. Tyler, “*Validity of the Kirchhoff approximation for electromagnetic wave scattering from fractal surfaces*”, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 42, No. 9, pp. 1860-1870, 2004. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2004.832655>
- [18] M. F. Chen, A. K. Fung, “*A numerical study of the regions of validity of the Kirchhoff and small perturbation rough surface scattering models*”, Radio Science, Vol. 23, pp. 163 – 170, 1988. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1029/RS023i002p00163>
- [19] L.-X. Guo και W. Zhen-Sen, “*Electromagnetic Scattering from the Two-Dimensional Fractal Rough Surface*”, Chinese Physics Letters, Vol. 18, No. 1, p. 49, 2001.
- [20] B. Mandelbrot, “*The fractal geometry of nature*”, Freeman, San Francisco, 1982
- [21] A. Kotopoulis, A. Malamou, G. Pouraimis, E. Kallitsis και P. Frangos, “*Characterization of Rough Fractal Surfaces from Backscattered Radar Data*”, Elektronika ir Elektrotechnika, Vol. 22, No. 6, pp. 61-66, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5755/j01.eie.22.6.17226>
- [22] MathWorks documentation, “*Confidence & Prediction Bounds*”, R2018b. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/curvefit/confidence-and-prediction-bounds.html>
- [23] H.Umer, M. Sabieh, “*Reducing noise by repetition: introduction to signal averaging*”, Article in European Journal of Physics, March 2010 doi 10.1088/0143-0807/31/3/003
- [24] Hudgings D., Gragt A., “*Signal averaging at modest cost*” Am. J. Phys. Vol. 40, pp. 1206–12, 1972.
- [25] Kraftmaker Y., “*Noise reduction by signal accumulation*”, Phys. Teach. Vol.44, pp 528–30, 2006.
- [26] A. Kotopoulis, A. Malamou, G. Pouraimis, E. Kallitsis and P. Frangos, “*Characterization of Fractal Surfaces From Backscattered Radar Data*” SET 215 Working Group on Model – based SAR Automatic Target Recognition, Istanbul, Turkey, 15-16/12/2015.
- [27] A. Kotopoulis, A. Malamou, G. Pouraimis, E. Kallitsis and P. Frangos, “*Characterization Of Fractal Surfaces From Backscattered Radar Data*” “Electronics 2016” 20<sup>th</sup> International Conference, Palanga, Lithuania, 13-15/6/2016
- [28] Han, J., Kamber, M. and Pei, J. (2011), “*Data Mining: Concepts and Techniques*”, 3rd Edition - 2011, Morgan Kaufmann Publishers, Burlington.
- [29] Tukey John W., “*Exploratory Data Analysis*”, Addison-Wesley Publishing Company, 1977.

[30] A. Papoulis, "*Probability, Random Variables, Stochastic Processes*", 3rd ed., New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1991.

## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup> Προσδιορισμός θαλάσσιας κυμάτωσης με *1D-fractal* ανάλυση δεδομένων Radar

### Περιεχόμενα

---

3.1 Εισαγωγή στο πείραμα NEMO2014 και παρουσίαση 1D υπογραφών RADAR .....	97
3.2 Αλγόριθμος προσδιορισμού κυμάτωσης με 1D <i>fractal</i> ανάλυση (MFL) .....	100
3.3 Εφαρμογή ‘ <i>blanket</i> ’ σε 1D καταγραφές και υπολογισμός του ‘ <i>Fractal Length</i> ’ ....	101
3.4 Υπολογισμός του ‘ <i>Mean Fractal Length</i> ’ (MFL).....	107
3.4.1 Calculation-Processing tool για υπολογισμό MFL .....	108
3.4.2 Αποτελέσματα 1D μορφοκλασματικής ανάλυσης (μέθοδος MFL). .....	109
3.5 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων .....	114
3.5.1 Ο δείκτης Sea State Index ως βελτίωση του κριτηρίου MFL .....	115
3.6 Ανακεφαλαίωση και Συμπεράσματα .....	117
3.7 Βιβλιογραφία .....	118

---

### Περίληψη

Τα αισιόδοξα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο οδήγησαν στην συνέχιση της έρευνας με πειραματισμό σε πραγματικές καταγραφές RADAR. Ειδικότερα διετέθησαν στο «εργαστήριο RADAR και Τηλεπισκόπησης της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ», όπου εκπονήθηκε η παρούσα διδακτορική διατριβή, καταγραφές ενός RADAR τύπου PicoSAR X-band του Νορβηγικό Ινστιτούτου Άμυνας ‘FFI’ οι οποίες συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια πειράματος που διεξήχθη σε μια θαλάσσια περιοχή του κόλπου του Τάραντα στην νότια Ιταλία. Λεπτομέρειες για το πείραμα NEMO2014 δίνονται στο παράρτημα Δ.

Στο παρόν 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο αξιοποιώντας αυτές τις πειραματικές καταγραφές θα εξετάσω το πρόβλημα του προσδιορισμού της τραχύτητας μιας επιφάνειας μέσω μορφοκλασματικής ανάλυσης των οπισθοσκεδαζόμενων ΗΜ κυμάτων εξειδικεύοντας στον προσδιορισμό της θαλάσσιας κυμάτωσης ‘*sea state*’ [29][30].

Στην ενότητα 3.1 περιγράφω εν συντομία το πείραμα NEMO2104 και την διαδικασία συλλογής καταγραφών RADAR από ήρεμη και ταραγμένη θάλασσα. Εν συνεχεία παρουσιάζω σε μορφή διαγράμματος ροής τον αλγόριθμο προσδιορισμού της θαλάσσιας κυμάτωση χρησιμοποιώντας ως κριτήριο την τιμή του μέσου μορφοκλασματικού μήκους ‘*Mean Fractal Length*’, εν συντομία MFL, που εμφανίζουν οι μονοδιάστατες υπογραφές, ‘*range profiles*’, του RADAR στο πεδίο του χρόνου.

Στην ενότητα 3.2 αναπτύσσω την θεωρία της τεχνικής ‘*blanket*’ [1],[2] ως το μέσο υπολογισμού του ‘*fractal length*’ [4],[5] των ‘*range profile*’ [18]-[22] του RADAR.

Στην ενότητα 3.3 εφαρμόζω τον αλγόριθμο υπολογισμού MFL επί του συνόλου των διαθέσιμων καταγραφών RADAR και παρουσιάζω αναλυτικά τα αποτελέσματα της μεθόδου.

Στην ενότητα 3.4 προχωρώ σε μια αξιολόγηση της μεθόδου και της ικανότητας της τιμής MFL να προσδιορίζει την επικρατούσα θαλάσσια κυμάτωση. Τέλος προτείνω τον δείκτη *'Sea State Index' - SSI* ως μια βελτιωμένη έκδοση του κριτηρίου MFL χάρη στην κανονικοποίηση που εισάγει ως προς μια την τιμή αναφοράς.

Το κεφάλαιο κλείνει με τα συμπεράσματα και την παράθεση της σχετικής βιβλιογραφίας.

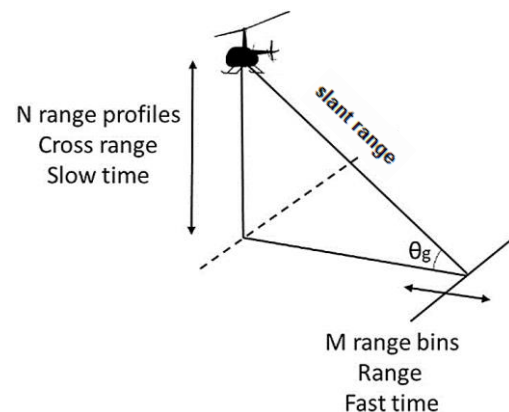
Να σημειώσω εδώ ότι οι επεξεργασίες των SAR *'raw data'* και όλα τα διαγράμματα του παρόντος κεφαλαίου έχουν υλοποιηθεί με την βοήθεια του λογισμικού *'SARrawdataAnalyzer'* το οποίο ανέπτυξα στα πλαίσια της διδακτορικής μου διατριβής και παρουσιάζω αναλυτικά στο παράρτημα Γ.



### 3.1 Εισαγωγή στο πείραμα NEMO2014 και παρουσίαση 1D υπογραφών RADAR.

Το ερώτημα που διερευνάτε στο παρόν κεφάλαιο είναι ο προσδιορισμός της τραχύτητας μιας επιφάνειας και ειδικότερη ο προσδιορισμός της θαλάσσιας κυμάτωσης 'sea state' [29] απευθείας από τα παραγόμενα δεδομένα, SAR 'raw data', του RADAR παρακάμπτοντας την κλασική διαδικασία σχηματισμού εικόνας, 'SAR image' [18]-[23] από τα δεδομένα και την μετέπειτα επεξεργασία τους ως εικόνα 'image processing' [11], [32]-[34]. Προς την διερεύνηση του ερωτήματος αυτού, διετέθησαν στο εργαστήριο RADAR και Τηλεπισκόπησης της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, πραγματικές καταγραφές ενός RADAR τύπου PicoSAR X-band από το Νορβηγικό Ινστιτούτο Άμυνας 'FFI' οι οποίες συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος «NEMO 2014». Πρόκειται για ένα πείραμα που διεξήχθη στα πλαίσια ομάδας εργασίας Working Group του Science & Technology Organization. Το πείραμα έλαβε χώρα στον θαλάσσιο κόλπο του Τάραντα στην νότια Ιταλία στις 23 και 24 Σεπτεμβρίου 2014. Αναλυτικά για το πείραμα NEMO 2014 ο αναγνώστης μπορεί να πληροφορηθεί στο παράρτημα Δ της παρούσας διατριβής.

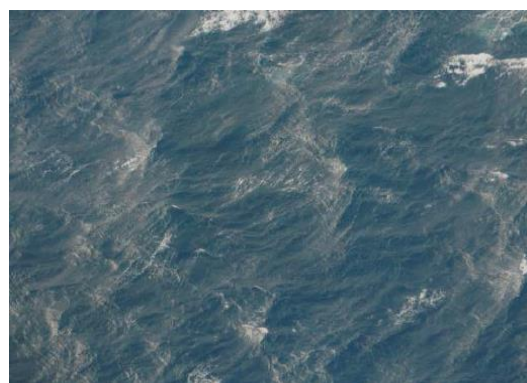
Εδώ εν συντομία θα αναφέρω ότι κατά την διάρκεια του πειράματος ένα ελικόπτερο τύπου AS350B-3 έφερε ένα RADAR τύπου PicoSAR X-band το οποίο κατέγραφε με διαδοχικές ριπές ΗΜ κυμάτων την θαλάσσια επιφάνεια ενόσω ανέβαινε κατακόρυφα διατηρώντας σταθερή την θέση του, γεωγραφικό πλάτος και γεωγραφικό μήκος, όπως φαίνεται και στην διπλανή εικόνα 3-1. Η γωνία θέασης  $\theta_g$  'grazing angle' καταγραφόταν με υψηλή πυκνότητα δειγματοληψίας. Το RADAR είχε ρυθμιστεί σε εύρος παλμού  $12\mu s$ , εύρος ζώνης  $150MHz$ ,  $PRF 1KHz$  και στόχευε την θάλασσα



Εικόνα 3-1. Κατακόρυφη κίνηση ελικοπτέρου εκπέμποντας ΗΜ ριπές με μεταβαλλόμενη γωνία, 'grazing angle'  $\theta_g$ , ως προς τη θάλασσα



Εικόνα 3-3. Από αέρος φωτογραφία θάλασσας για την 2<sup>η</sup> ημέρα μετρήσεων (24/9)



Εικόνα 3-2. Από αέρος φωτογραφία θάλασσας για την 1<sup>η</sup> ημέρα μετρήσεων (23/9)

κρατώντας σταθερή την απόσταση ‘*slant range*’ από την θαλάσσια επιφάνεια στα 1850m. Κατά τη διάρκεια του πειράματος το ελικόπτερο διατήρησε χαμηλή κατακόρυφη και αμελητέα οριζόντια ταχύτητα. Οι καταγραφές έγιναν σε δύο ημέρες υπό διαφορετικές καταστάσεις θαλάσσιας κυμάτωσης.

Την πρώτη ημέρα, βλ. εικόνα 3-2, η επιφάνεια της θάλασσας ήταν ταραγμένη. Η ταχύτητα του ανέμου που έπνεε στην περιοχή ήταν από 10 έως 12m/s, μια σχετικά υψηλή ταχύτητα ανέμου και ο πλότος του ελικοπτερου κράτησε την κατεύθυνση της δέσμης της κεραίας σταθερή, κατά το δυνατό ως προς τον οριζοντα, ενώ την ίδια στιγμή οι γωνίες  $\theta_g$  ‘*grazing angle*’ μεταβάλλονταν με αργό ρυθμό από 3° έως 55° μοίρες. Το σύνολο της πτήσης δεν διήρκεσε πάνω από 5 λεπτά. Την δεύτερη ημέρα, βλ. εικόνα 3-3, η ταχύτητα του ανέμου ήταν πολύ χαμηλή 1-2 m/s και τοπικά αρκετές φορές έσβηνε εντελώς. Το εύρος των γωνιών θέασης  $\theta_g$  την δεύτερη ημέρα μεταβαλλόταν επίσης με πολύ αργό ρυθμό από τις 4° έως τις 54° μοίρες με επίσης πολύ μικρή μετατόπιση του ελικοπτερου ως προς τον οριζοντα.

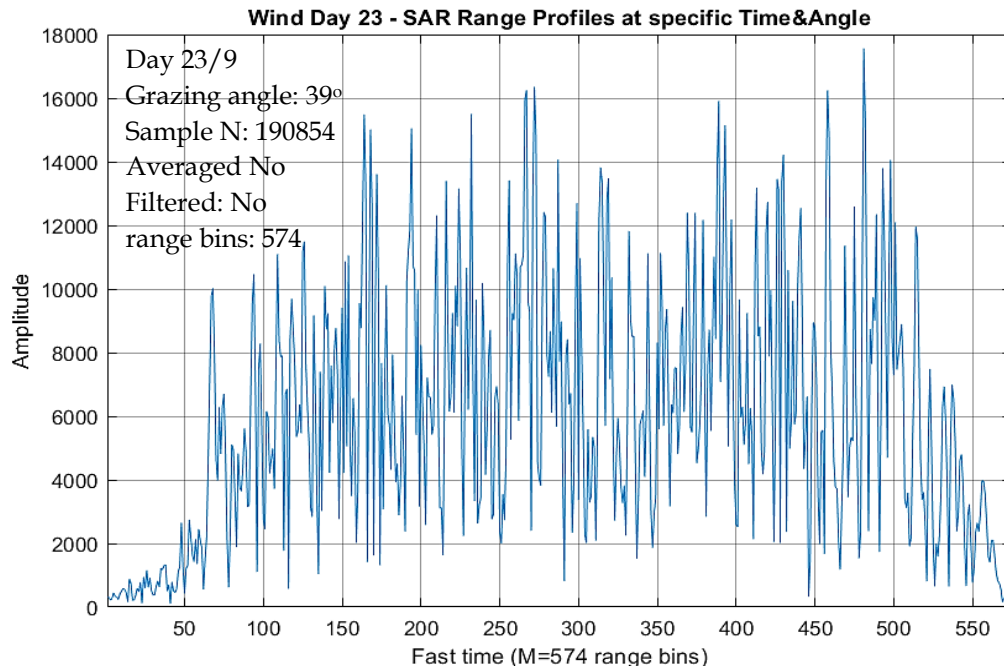
Στον πίνακα 3-1 παρουσιάζω την δομή του πίνακα καταγραφών του RADAR. Μετά από κάθε ριπή ΗΜ κύματος από τον πομπό του RADAR δημιουργείται κατά την λήψης της στον δέκτη μια στήλη με τιμές όπου καταγράφονται σε αυτήν οι εντάσεις ( $I, Q$ ) των οπισθοσκεδαζόμενων ΗΜ κυμάτων ανά συχνότητα λήψης. Να σημειώσω εδώ ότι οι τελικές τιμές έντασης που χρησιμοποιώ προκύπτουν από την σχέση  $Amplitude = \sqrt{I^2 + Q^2}$ , όπου τα  $I, Q$  είναι οι τιμές ‘*In phase signal*’ και ‘*Quadrature signal*’ [20] που παράγει ο δέκτης του RADAR μετά από κάθε του μέτρηση. Για το συγκεκριμένο RADAR βλ. παράρτημα Δ.1, γνωρίζουμε ότι ο αριθμός των ‘*range bin*’ [20] φθάνει τα  $M=574$ . Έτσι το σύνολο των μετρήσεων μιας στήλης (574 κελιά) μπορεί να παράγει ένα ‘*range profile*’ [21] στο πεδίο του χρόνου, μια μονοδιάστατη υπογραφή ή με ακόμα πιο απλά λόγια ένα RADAR ‘*strip*’. Γνωρίζουμε επίσης ότι το ‘*Pulse Repetition Frequency*’ [6],[21] του RADAR είναι  $PRF=1KHz$ , δηλαδή έχουμε ένα ‘*radar hit*’ και ως εκ τούτου την δημιουργία μιας καινούρια καταγραφής (στήλη μετρήσεων) κάθε 1ms.

Πίνακας 3-1. Παρουσίαση της δομής του πίνακα καταγραφών  $M \times N$  των SAR Raw Data

		N διαδοχικές Ριπές RADAR					
		1 <sup>η</sup> Ριπή	2 <sup>η</sup> Ριπή	3 <sup>η</sup> Ριπή	j <sup>η</sup> Ριπή	N <sup>η</sup> -1 Ριπή	N <sup>η</sup> Ριπή
M Διαδοχικές συχνότητες εκπομπής εντός ριπής	Συχνότητα 1	C(1,1)	C(1,2)	C(1,3)	C(1,j)	C(1,N-1)	C(1,N)
	Συχνότητα 2	C(2,1)	C(2,2)	C(2,3)	C(2,j)	C(2,N-1)	C(2,N)
	Συχνότητα 3	C(3,1)	C(3,2)	C(3,3)	C(3,j)	C(3,N-1)	C(3,N)
	Συχνότητα i	C(i,1)	C(i,2)	C(i,3)	C(i,j)	C(i,N-1)	C(i,N)
	Συχνότητα M-1	C(M-1,1)	C(M-1,2)	C(M-1,3)	C(M-1,j)	C(M-1,N-1)	C(M-1,N)
	Συχνότητα M	C(M,1)	C(M,2)	C(M,3)	C(M,j)	C(M,N-1)	C(M,N)

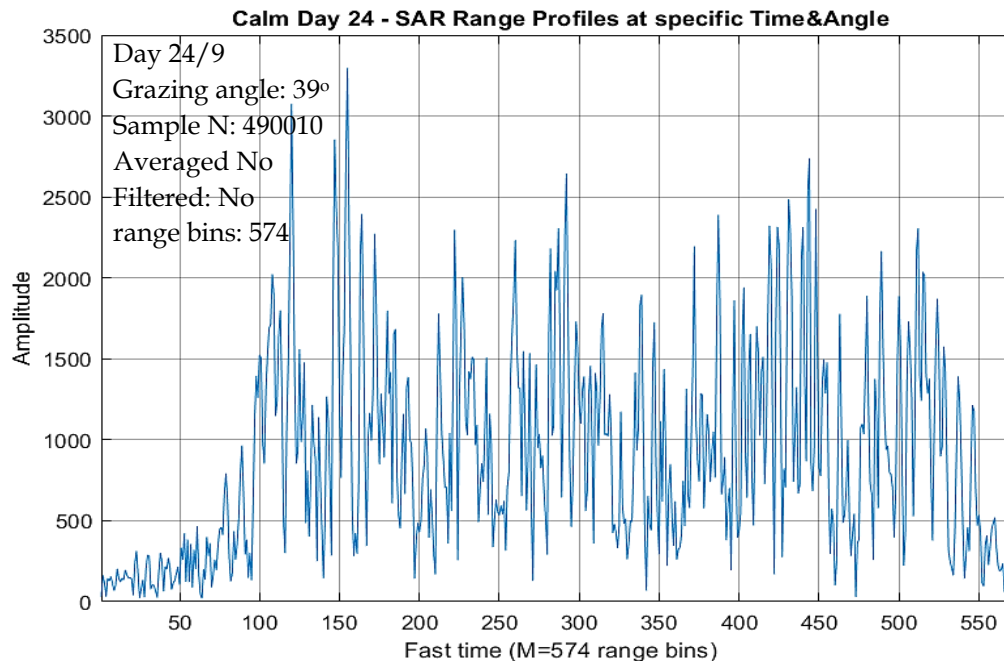
Δείγμα μετρήσεων με τιμές από την καταγραφή του πειράματος παρουσιάζω στην εικόνα Δ-15 της ενότητας Δ.2.1 του σχετικού παραρτήματος Δ μαζί με λεπτομέρειες σχετικές με τα αρχεία καταγραφής.

Ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα από τις καταγραφές της 1<sup>ης</sup> ημέρας 23/9, παραγμένη θάλασσα, παρουσιάζω στην εικόνα 3-4. Αποτελείται από 574 διαδοχικές μετρήσεις έντασης.



Εικόνα 3-4. Δείγμα λήψης από τον δέκτη του PicoSAR RADAR από την 1<sup>η</sup> ημέρα μετρήσεων 23/09, για παραγμένη θάλασσα υπό γωνία 'grazing angle'  $\theta_g=39^\circ$

Ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα από τις καταγραφές της 2<sup>ης</sup> ημέρας 24/9, ήρεμη θάλασσα, παρουσιάζω στην εικόνα 3.5.



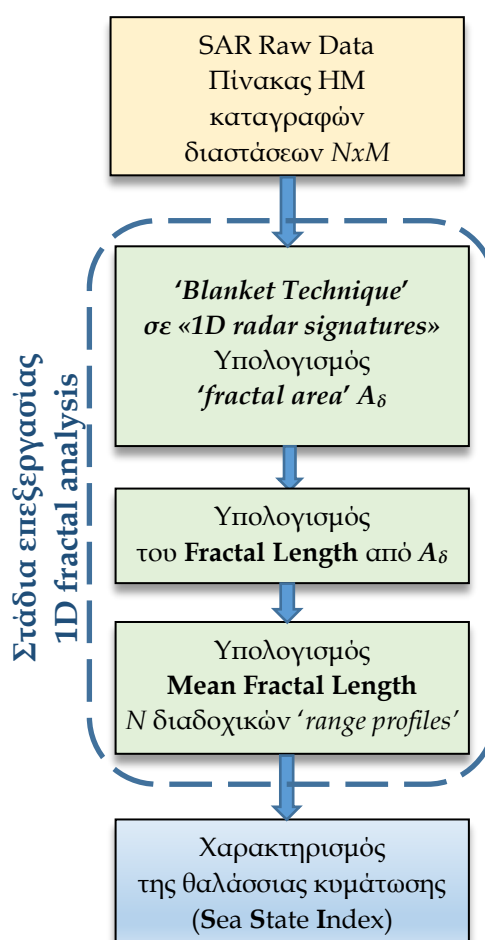
Εικόνα 3-5. Δείγμα λήψης από τον δέκτη του PicoSAR RADAR από την 2<sup>η</sup> ημέρα μετρήσεων 24/09, για ήρεμη θάλασσα υπό γωνία 'grazing angle'  $\theta_g=39^\circ$

## 3.2 Αλγόριθμος προσδιορισμού κυμάτωσης με 1D fractal ανάλυση (MFL)

Η συχνότητα λειτουργίας  $f = 9.4GHz$  του RADAR του πειράματος NEMO2014 σε συνδυασμό με το μικρό εύρος ζώνης λειτουργίας  $BW = 150MHz$  με το οποίο είχε ρυθμιστεί από τους διοργανωτές του πειράματος δεν κάλυπτε τις προϋποθέσεις εφαρμογής της μεθόδου  $\hat{D} = f(\text{slope})$  που ανέπτυξα στον 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο βλ. §2.5.1 από όπου προκύπτει ότι για να είναι λειτουργική η μέθοδος αυτή πρέπει να ισχύει  $BW \gg 0.05 f_0$ , δηλαδή εν προκειμένω για συχνότητα εκπομπής  $f = 9.4GHz$  το εύρος ζώνης μεταβολής θα έπρεπε να ήταν οπωσδήποτε μεγαλύτερο από  $480MHz$ .

Για το λόγο αυτό ανατρέχοντας στην σχετική με μορφοκλασματική ανάλυση βιβλιογραφία [1]-[5],[11]-[16],[24],[28] αναζητήσα μια εναλλακτική μέθοδο προσδιορισμού της τραχύτητας μιας επιφάνειας. Το κριτήριο MFL είναι ένα «προϊόν» καινοτομίας της παρούσας διδακτορικής έρευνας[17] και το οποίο έρχεται να προστεθεί στην σχετική βιβλιογραφία[1]-[3],[13],[18],[24],[34] και έχει την βάση του στην τεχνική 'blanket' και ειδικότερα στην δημοσίευση 'Multiple Resolution Texture Analysis and Classification' των Peleg et al. [1] στην οποία η κεντρική ιδέα είναι ότι «πληροφορίες συχνότητας σχετικά με την υφή μιας επιφάνειας μπορούν να ληφθούν απευθείας από το χωρικό πεδίο 'spatial domain' χωρίς να χρειαστεί να καταφύγουμε στο πεδίο συχνότητας 'frequency domain'» το οποίο είναι και το σκεπτικό της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Ακολουθώντας την αλγόριθμο της εικόνας 3-6, εφαρμόζω την τεχνική 'blanket' [1] σε κάθε 'range profile' ξεχωριστά και υπολογίζω το 'fractal Area'  $A_\delta$  που καταλαμβάνει ως μονοδιάστατη 1D υπογραφή στο επίπεδο, βλ. εικόνα 3.9. Εν συνεχεία από το εμβαδό  $A_\delta$  υπολογίζω το μορφοκλασματικό μήκος 'fractal length' ενός εκάστου 'range profile'. Τέλος υπολογίζω την μέση τιμή 'Mean fractal length'  $N$  διαδοχικών 'range profiles' και προκύπτει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τραχύτητα της θαλάσσιας επιφάνειας τόσο μεγαλύτερη βρίσκεται να είναι και η τιμή του MFL. Στις επόμενες ενότητες εξηγώ αναλυτικά την θεωρία και τον τρόπο εφαρμογής των αλγόριθμων που συνθέτουν την συγκεκριμένη μέθοδο.



Εικόνα 3-6. Διάγραμμα αλγόριθμου προσδιορισμού θαλάσσιας κυμάτωσης με βάση τον υπολογισμό του 'Mean Fractal Length' - MFL

### 3.3 Εφαρμογή ‘blanket’ σε 1D καταγραφές και υπολογισμός του ‘Fractal Length’

Η μέτρηση του μήκους μιας γραμμής όπως της εικόνας 3-7 είναι από τα πρώτα προβλήματα με τα οποία ασχολήθηκε και από τα οποία προέκυψε η θεωρία των ‘fractal’. Ένας από τους θεμελιωτές της θεωρίας των *Fractal*, ο Mandelbrot, στο βιβλίο του ‘*The Fractal Geometry of Nature*’ [5] ασχολήθηκε με το πρόβλημα μέτρησης του μήκους μιας καμπύλης γραμμής και συγκεκριμένα έφερε ως παράδειγμα τον υπολογισμό της ακτογραμμής της Μ. Βρετανίας[16]. Εκεί σημείωσε ότι το μήκος της ακτογραμμής όχι μόνο δεν είναι σταθερό αλλά γίνεται όλο και μεγαλύτερο όσο μικραίνει το μέτρο ‘yardstick’ με το οποίο την μετράμε. Αυτό είναι ένα πραγματικό φαινόμενο το οποίο αναδεικνύει τόσο την ‘μαγεία’ των *fractal* όσο και την αναγκαιότητα των μαθηματικών και την χρησιμότητα των τεχνικών *fractals* όταν αυτές χρησιμοποιούνται σε σύνθετες και μη ευκλείδειες δομές. Το μέτρο ‘yardstick’ που χρησιμοποιούμε για την μέτρηση είναι ένα μέτρο της κλίμακας που χαρακτηρίζει την ανάλυση ‘resolution’ της μέτρησης. Ο Mandelbrot αναφερόμενος στον τρόπο μέτρησης του μήκους μιας ακανόνιστης γραμμής, όπως η ακτογραμμή, περιέγραψε μεταξύ των άλλων την παρακάτω βασική μέθοδο.

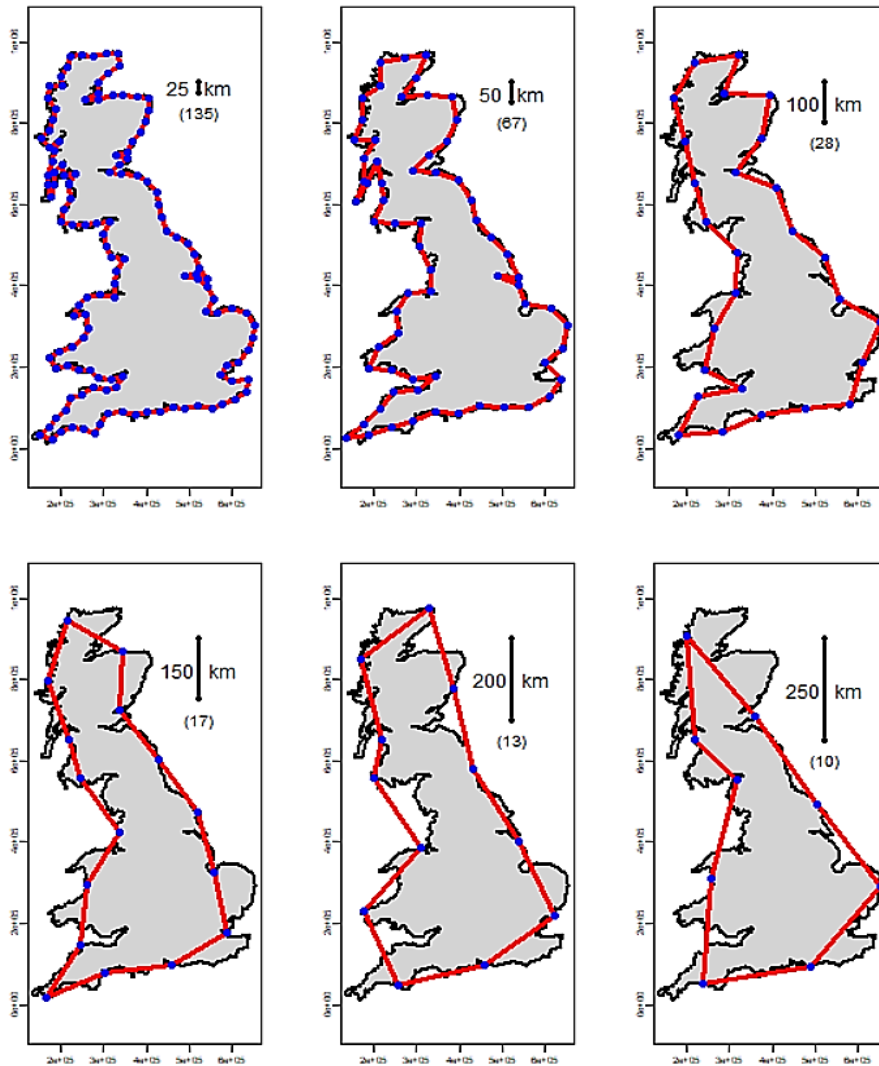
Η μέθοδος βασίζεται στην αρχή της προσέγγισης της καμπύλης που θέλουμε να μετρήσουμε με ένα πολύγωνο φτιαγμένο από  $N$  διαδοχικά κομμάτια μήκους ‘ $\delta$ ’. Ο αριθμός των τμημάτων  $N$  που θα χρειαστούν για να καλύψουν την ακτογραμμή επί το μήκους τους ‘ $\delta$ ’ δίνει μια προσέγγιση του μήκους της ακτογραμμής  $L(\delta)$ . Όσο το μήκος του χρησιμοποιούμενου τμήματος ‘ $\delta$ ’ γίνεται μικρότερο τόσο το παρατηρούμενο μήκος της ακτογραμμής  $L(\delta)$  αυξάνει απεριόριστα. Στην εικόνα 3-8 η τιμή μέσα στην παρένθεση αντιπροσωπεύει τον αριθμό των χρησιμοποιούμενων τμημάτων και πάνω από αυτή σημειώνεται το μήκος σε  $km$  που αντιπροσωπεύει το κάθε τμήμα. Στο διάγραμμα της εικόνας 3-7 αποτυπώνω σε μορφή  $\log\text{-}\log$  την σχέση μεταξύ του αριθμού των τμημάτων  $N$  που απαιτούνται ως προς το μήκος ‘ $\delta$ ’ που έχει το κάθε τμήμα.

Εφόσον πρόκειται για *Fractal* δομή η σχέση μεταξύ ‘ $N$ ’ και ‘ $\delta$ ’ όταν αποτυπωθεί σε ένα διάγραμμα της μορφής  $\log\text{-}\log$  αποδεικνύεται [4],[5],[15],[16] ότι είναι μια ευθεία γραμμή με μια κλίση που δίνεται από την σχέση:

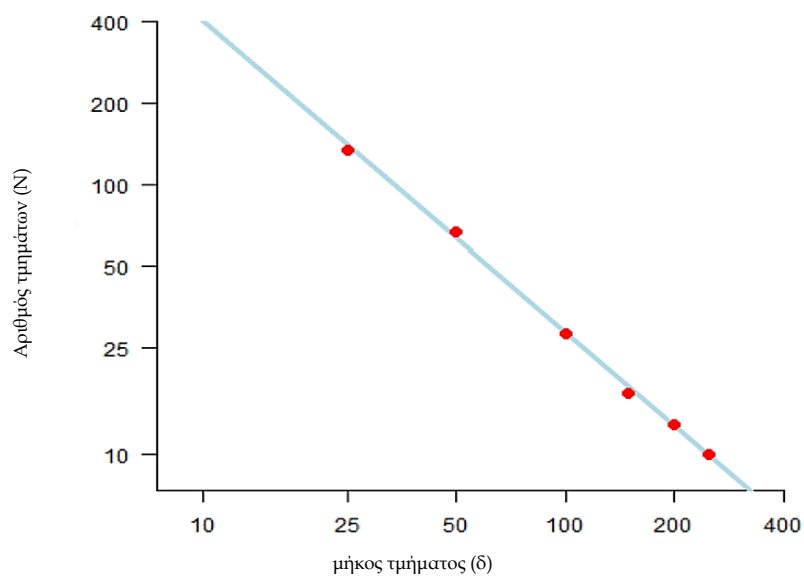
$$D = -\frac{\log(N)}{\log(\delta)} \quad (3.1)$$

Αυτή η κλίση ονομάζεται ‘*Fractal Dimension*’  $D$  [5],[15] και ο Mandelbrot έδειξε ότι η τιμή του  $D$  είναι χαρακτηριστική και ανεξάρτητη της κλίμακας ‘ $\delta$ ’ παρέχοντάς μας μια πολύ σημαντική και χαρακτηριστική πληροφορία. Η τιμή του ‘*Fractal Dimension*’ μας αποκαλύπτει την τραχύτητα της γραμμής είναι δηλαδή ένα μέτρο για το πόσο ‘ακανόνιστη’ σε σχέση με μια ευθεία είναι η υπό μέτρηση γραμμή. Το μήκος της γραμμής δίνεται από την σχέση:

$$L(\delta) \cong \beta \delta^{1-D} \quad (3.2)$$



Εικόνα 3-8. Η ακτογραμμή της Μ. Βρετανίας μετρημένη με διαφορετικού μήκους ‘κανόνες’.



Εικόνα 3-7. Log-Log διάγραμμα αριθμού τμημάτων (N) ως προς το μήκος τμήματος ‘δ’

Εάν σχεδιαστεί η τιμή του μήκους  $L(\delta)$  ως προς το μήκος της κλίμακας  $\delta$  σε διάγραμμα *log-log*, λογαριθμοποίηση της σχέσης 3.2, προκύπτει επίσης μια ευθεία γραμμή με κλίση  $1-D$  βλ. εικόνα 3-7. Στην περίπτωση που η τιμή  $D$  μεταβάλλεται όταν μεταβάλλεται το μήκος της κλίμακας μέτρησης  $\delta$  αυτό είναι μια απόδειξη ότι η υφή της υπό εξέταση γραμμής δεν παρουσιάζει σταθερά *fractal* χαρακτηριστικά. Αντιθέτως εάν η τιμή  $D$  παραμένει σταθερή ανεξάρτητα από την κλίμακα  $\delta$  παρατήρησής της, αυτό είναι μια απόδειξη ότι η δομή παρουσιάζει μια αυτοομοιότητα[4],[16], χαρακτηριστικό *fractal* δομής. Οι τιμές  $\beta$  και  $D$  είναι χαρακτηριστικές για την υφή της γραμμής και ειδικά η τιμή  $D$  είναι ευθέως εξαρτώμενη από την τραχύτητά της. Όταν η γραμμή είναι απολύτως ευθεία τότε  $D=1$  ενώ όταν εμφανίζει την μέγιστη τραχύτητα τότε το '*fractal dimension*' προσεγγίζει την τιμή  $D \leq 2$ .

Η παραπάνω μέθοδο μέτρησης του μήκους μιας ακανόνιστης γραμμής με την χρήση ενός κανόνα μήκους  $\delta$  είναι πολύ αποδοτική στο να περιγράψει και να εξηγήσει τις βασικές αρχές και παραμέτρους αλλά καθόλου πρακτική για την εφαρμογή της σε ένα υπολογιστικό περιβάλλον όπως εν προκειμένω για την μέτρηση του μήκους ενός '*range profile*', βλ. εικόνα 3-5, με σκοπό τον υπολογισμό του '*fractal dimension*'  $D$  για να χαρακτηρίσουμε την τραχύτητά του.

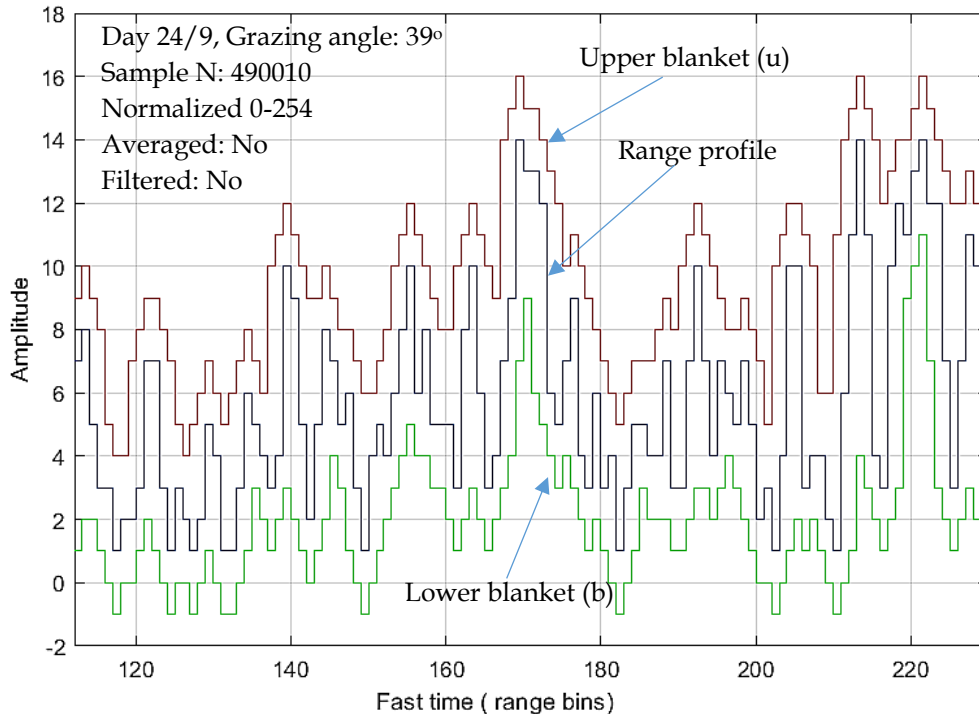
Μια πολύ πιο αποδοτική τόσο από πρακτικής όσο και από υπολογιστικής-αλγοριθμικής πλευράς τεχνική για την μέτρηση της παραμέτρου  $D$  προτάθηκε από τον Peleg[1] και βασίζεται στην εφαρμογή μιας πρότασης του Mandelbrot[15]. Η τεχνική αυτή είναι γνωστή ως τεχνική 'κουβέρτας', '*blanket technique*'. Πιο συγκεκριμένα για τον υπολογισμό του μήκους της ακτογραμμής ο Mandelbrot[5],[15] πρότεινε εναλλακτικά και την εξής μέθοδο. Εάν θεωρήσουμε ότι όλα τα σημεία με απόσταση μικρότερη ή ίση με μια τιμή  $\delta$  σχηματίζουν εκατέρωθεν της ακτογραμμής μια λωρίδα '*strip*' εύρους  $2\delta$ , τότε το μήκος  $L(\delta)$  της ακτογραμμής ισούται με το συνολικό εμβαδό της λωρίδας διαιρεμένο δια του  $2\delta$ . Ο Peleg[1] προκειμένου να εφαρμόσει υπολογιστικά την πρόταση του Mandelbrot σε μια επιφάνεια χρησιμοποίησε δύο επιφάνειες σε απόσταση  $\delta$  που σκεπάζουν σαν κουβέρτες '*blankets*' την υπό μέτρηση επιφάνεια[1]-[3].

Στην περίπτωση της δικής μου εφαρμογής η υπό μέτρηση 'ακτή' είναι ένα μονοδιάστατο  $1-D$  '*range profile*' όπως αυτό της εικόνας 3-5. Έτσι η μέθοδος του Peleg[1] εφαρμόζεται εδώ μονοδιάστατα[17],[18] και συνίσταται σε δύο συναρτήσεις την  $u_\delta$  σχέση (3.3) &  $b_\delta$  σχέση (3.4) οι οποίες σκεπάζουν σαν κουβέρτες '*blankets*' βλ. στην εικόνα 3-9 κόκκινη  $u_\delta$  και πράσινη  $b_\delta$  γραμμή και το '*range profile*' μπλε γραμμή, δημιουργώντας έτσι μια λωρίδα '*strip*' μεταξύ της κόκκινης και πράσινης γραμμής

Οι συναρτήσεις  $u_\delta$  σχέση (3.3) &  $b_\delta$  σχέση (3.4) οι οποίες σκεπάζουν σαν κουβέρτες 'blankets' το 'range profile' δίνονται από τις κάτωθι σχέσεις[1]:

$$u_\delta(i) = \max\{u_{\delta-1}(i) + 1, \max_{|m-i|\leq 1} u_{\delta-1}(m)\} \quad (3.3)$$

$$b_\delta(i) = \min\{b_{\delta-1}(i) - 1, \min_{|m-i|\leq 1} b_{\delta-1}(m)\} \quad (3.4)$$



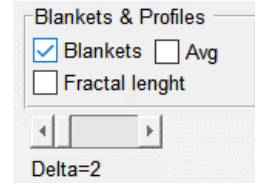
Εικόνα 3-9. Τεχνική 'Blanket' με zoom σε 100 'range bins' για  $\delta=2$

Το εμβαδό 'fractal Area'  $A_\delta$  της λωρίδας που σχηματίζεται μεταξύ της συνάρτησης  $u_\delta$  και  $b_\delta$  υπολογίζεται[1],[17],[18] από την σχέση 3.5:

$$A_\delta = \sum_i (u_\delta(i) - b_\delta(i)) \quad (3.5)$$



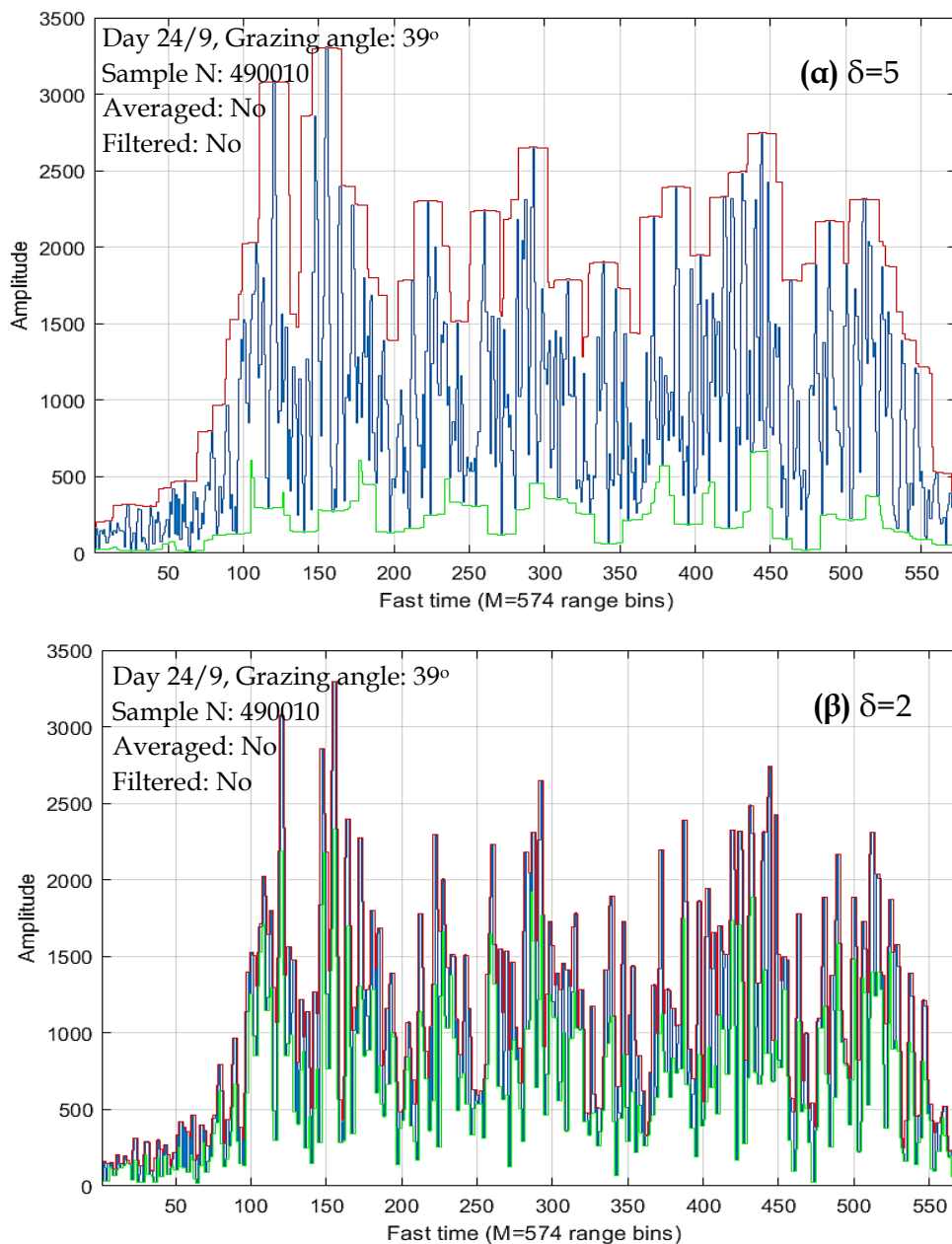
Με την χρήση του λογισμικού *'SARrawdataAnalyzer'* που περιγράφω αναλυτικότερα στο παράρτημα Γ μπορώ να επεξεργαστώ τα *'range profiles'* είτε μεμονωμένα είτε σε ομάδες. Με την επιλογή [Blankets] μπορώ να υπολογίσω και να σχεδιάσω τις upper & lower blankets πάνω σε ένα *'range profile'* για οποιοδήποτε *'resolution'* τιμή  $\delta$ . Η τιμή του  $\delta$  καθορίζεται από το αντίστοιχο slide bar [Delta] βλ. εικόνα 3-10.



Εικόνα 3-10  
Επιλογές Blankets

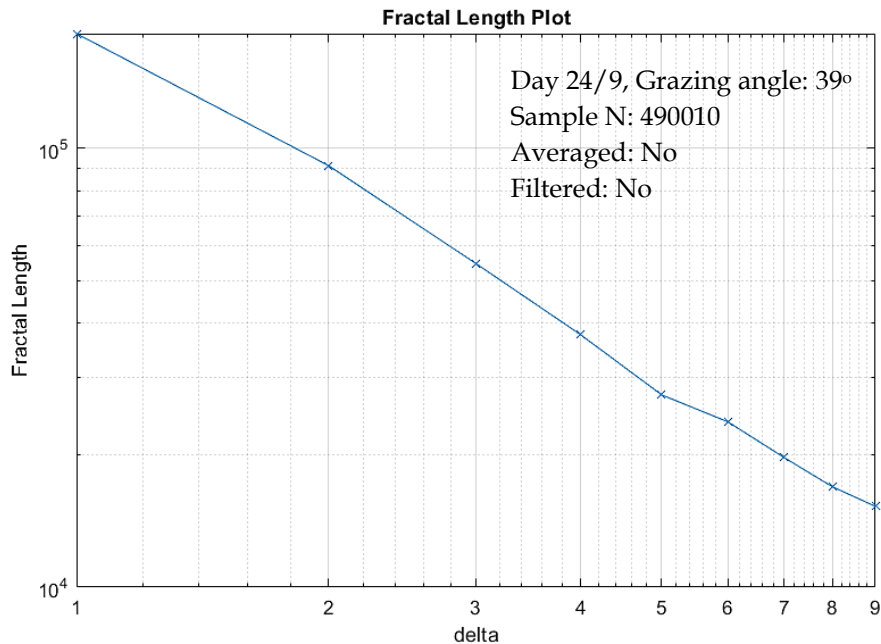
Στην εικόνα 3-11 παρουσιάζω ένα *'range profile'* με αριθμός καταγραφής  $N=490010$ , όπου εκατέρωθεν αυτού έχω τοποθετήσει τις upper & lower blankets για δύο διαφορετικές τιμές *'resolution'*  $\delta=2$  και  $\delta=5$ .

Παρατηρούμε ότι όσο μικραίνει η τιμή του  $\delta$  *'yardstick'* τόσο αυξάνει η ανάλυση *'resolution'* της μέτρησης.

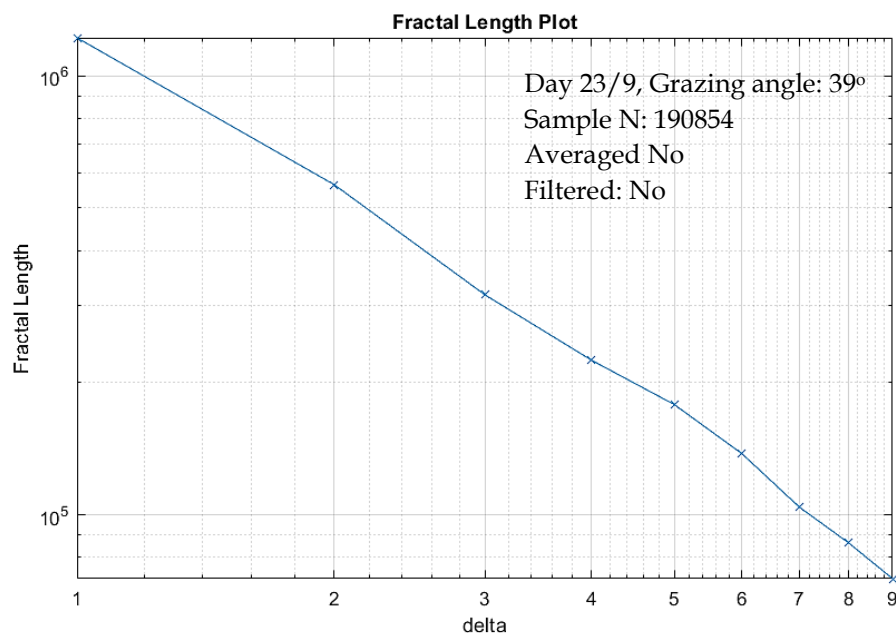


Εικόνα 3-11. Τεχνική *'blanket'* σε *'range profile'* με για  $\delta=5$  (α) και  $\delta=2$  (β)

Με την επιλογή [Fractal length] το λογισμικό 'SARrawdataAnalyzer' υπολογίζει το μορφοκλασματικό μήκος 'Fractal Length'  $FL(\delta)$  των 'range profiles' και το σχεδιάζει σε κλίμακα  $\log\text{-}\log$  συναρτήσει ενός εύρους  $\delta$  τιμών που καθορίζεται από την αντίστοιχη τιμή του [Delta] *slidebar*, βλ. εικόνες 3-12 & 3-13.



Εικόνα 3-13. Υπολογισμός  $FL(\delta)$  συναρτήσει του  $\delta$  σε διάγραμμα  $\log\text{-}\log$  από 'range profile' ήρεμης θάλασσας υπό γωνία  $\theta_g=39^\circ$



Εικόνα 3-12. Υπολογισμός  $FL(\delta)$  συναρτήσει του  $\delta$  σε διάγραμμα  $\log\text{-}\log$  από 'range profile' ταραγμένης θάλασσας υπό γωνία  $\theta_g=39^\circ$

Αυτό που έχει μεγάλη αξία να παρατηρήσουμε στα παραπάνω διαγράμματα είναι ότι το 'Fractal Length'  $FL(\delta)$  που παρουσιάζουν τα 'range profiles' των καταγραφών ως προς το μέτρο 'δ' σχεδιασμένο σε κλίμακα  $\log\text{-}\log$  εμφανίζει μια σχεδόν

γραμμική σχέση. Σύμφωνα με τις παρατηρήσεις των Mandelbrot[5] και Peleg [1], όπως σχολιάσαμε και στην σχέση (3.2), όταν η τιμή  $FL(\delta)$  ως προς το  $\delta$  σε μια κλίμακα  $\log\text{-}\log$  παράγει μια ευθεία γραμμή αυτό είναι μια απόδειξη ότι η υπό μέτρηση καμπύλη, εν προκειμένο τα *'range profiles'* έχουν χαρακτηριστικά *fractal*. Και μάλιστα λογαριθμίζοντας την σχέση (3.2). κατά μέλη είδαμε ότι η κλίση της ευθείας  $FL(\delta)$  ισούται με  $1-D$  όπου  $D$  είναι το *fractal dimension*, δηλαδή η τιμή που καθορίζει την τραχύτητα της γραμμής. Η τιμή του  $FL(\delta)$  υπολογίζεται από την σχέση (3.6) :

$$FL_{\delta} = \frac{A_{\delta} - A_{\delta-1}}{2} \quad (3.6)$$

όπου τα  $A_{\delta}$  και  $A_{\delta-1}$  να είναι τα εμβαδά των λωρίδων που σχηματίζονται για *'resolution'*  $\delta$  και  $\delta-1$  αντίστοιχα. Το  $A_{\delta}$  υπολογίζεται όπως είδαμε παραπάνω από την σχέση 3.5.

Η σχεδόν γραμμική σχέση μεταξύ *'fractal length'* και παραμέτρου  $\delta$  που επιβεβαιώνεται από τα διαγράμματα είτε πρόκειται για καταγραφές εντάσεων οπισθοσκεδαζόμενων ΗΜ κυμάτων από ήρεμη θάλασσα (βλ. εικόνα 3.5) είτε από καταγραφές ταραγμένης θάλασσας (βλ. εικόνα 3-4) μας επιτρέπει να συμπεράνουμε ότι τα *'range profiles'* που σχηματίζονται από τις ΗΜ σκεδάσεις στην θαλάσσια επιφάνεια έχουν μορφή *fractal*. Παρόμοια διαπίστωση ότι το ΗΜ κύμα που σκεδάζεται από μια θαλάσσια επιφάνεια παρουσιάζει χαρακτηριστικά *fractals* έχει διατυπωθεί και σε παλαιότερες δημοσιεύσεις Lo et al. [28] και Berizzi et al. [8],[13],[28]. Άρα μας δίνεται η δυνατότητα να αξιοποιήσουμε την θεωρία των *fractals* και τα σχετικά μαθηματικά εργαλεία που μας προσφέρει προκειμένου για να εξετάσουμε εάν το κριτήριο του μορφοκλασματικού μήκους *'fractal length'* θα μπορούσε χρησιμοποιηθεί για τον χαρακτηρισμό της θαλάσσιας κατάστασης.

### 3.4 Υπολογισμός του *'Mean Fractal Length'* (MFL)

Χρησιμοποιώντας την παραπάνω θεωρία των *fractals* σε κάθε μεμονωμένο range profile των *SAR raw data* εφαρμόζω την τεχνική *'blanket'* και υπολογίζω το εμβαδό της λωρίδας για  $A_{\delta}$  και για  $A_{\delta-1}$ . Από την σχέση (3.6) μπορώ να υπολογίσω το *fractal length* που παρουσιάζει το κάθε range profiles.

Η μέση τιμή *'Mean Fractal Length'* για  $N$  διαδοχικά *range profiles* υπολογίζεται από την σχέση (3.7)

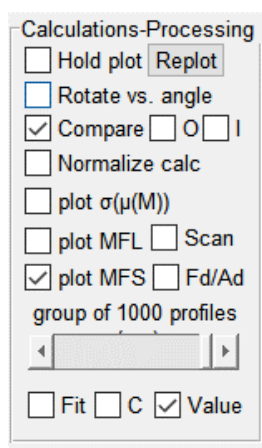
$$MFL = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (FL)_n \quad (3.7)$$

Για τους υπολογισμούς και τα γραφήματα που θα ακολουθήσουν έχω χρησιμοποιήσει  $N=100$ . Για το συγκεκριμένο RADAR βλ. παράρτημα Δ, έχουμε PRF *'Pulse Repetition Frequency'* 1KHz, δηλαδή έχουμε ένα *radar hit* κάθε 1ms,  $N=100$  σημαίνει ότι υπολογίζουμε το *fractal length* σε 100 διαδοχικά *'range profiles'* και

παίρνουμε ως τελική τιμή του  $MFL$  τον μέσο όρο τους. Η χρήση της τιμής του  $MFL$ , δηλαδή της χρήσης 100 διαδοχικών μετρήσεων  $FL$  'oversampling' γίνεται για λόγους βελτίωσης του σηματοθορυβικού λόγου μέσω της τεχνικής 'averaging' [25]-[27] βλ. §2.6.4 Μετά και την εφαρμογή της τεχνικής 'averaging' λαμβάνουμε μια τιμή  $MFL$  κάθε 100ms πτήσης πάνω από την θαλάσσια επιφάνεια. Όπως απέδειξα σχετικά στην παράγραφο §2.6.4 του 2<sup>ου</sup> κεφαλαίου μια επιλογή αριθμού  $N$  'range profiles' μπορεί να βελτιώσει τον σηματοθορυβικό λόγο κατά ένα παράγοντα  $\sqrt{N}$ . Έτσι ο αριθμός  $N$  μπορεί να προσαρμόζεται δυναμικά με βάση την στάθμη θορύβου και τις λοιπές συνθήκες λειτουργίας προς βελτιστοποίηση του αποτελέσματος έχοντας βέβαια υπόψη και τους σχετικούς περιορισμούς και προϋποθέσεις εφαρμογής που αναφέρω στην σχετική παράγραφο.

### 3.4.1 Calculation-Processing tool για υπολογισμό MFL

Η επεξεργασία και τα διαγράμματα MFL που θα ακολουθήσουν στην συνέχεια δημιουργήθηκαν με το 'Calculation-Processing' tool του λογισμικού 'SARrawdataAnalyzer' βλ. παράρτημα Γ. στο οποίο ενσωμάτωσα τους αλγόριθμους που περιέγραψα στις ανωτέρω παραγράφους. Στην εικόνα 3-14 παρουσιάζω τις βασικές διαθέσιμες επιλογές του λογισμικού επεξεργασίας 'SARrawdataAnalyzer':



Εικόνα 3-14.  
Επιλογές  
επεξεργασίας

**[plot MFL]:** Με την επιλογή αυτή σχεδιάζεται το διάγραμμα του *Fractal length* -  $FL(\delta)$  ως προς 'δ' όπως προκύπτει από την σχέση (3.6) με βάση το δείγμα μετρήσεων που έχει επιλεγεί.

**[Compare]:** Τα διαγράμματα MFL σχεδιάζονται σε ένα κοινό γράφημα, για λόγους ευκολίας σύγκρισης. Τα διαγράμματα MFL από την ταραγμένη θάλασσα σχεδιάζονται σε πράσινο χρώμα και τα MFL διαγράμματα από την ήρεμη θάλασσα σχεδιάζονται με μπλε χρώμα.

**[group of 100 profiles]:** Το slider αυτό καθορίζει την παράμετρο  $N$  της σχέσης 3.7 και μπορεί να λάβει τιμές από 1 έως 1000.

**[Value]:** Με την επιλογή αυτή σημειώνεται πάνω στο κάθε διάγραμμα η υπολογισθείσα τιμή  $\langle MFL \rangle$  η οποία αποτελεί την μέση τιμή των τιμών MFL που καταγράφονται στο διάγραμμα 'Mean fractal Length Plot'.

Υπάρχουν διαθέσιμες και κάποιες επιπλέον επιλογές που έχω χρησιμοποιήσει κατά την διάρκεια της έρευνας σε συνδυασμό με την MFS §4.4.1 αλλά επειδή δεν τις χρησιμοποιώ στην συνέχεια θα αναφερθώ εδώ για αυτές εν συντομία και μόνο για λόγους πληρότητας. Οι επιλογές αυτές είναι η [hold plot] με τις οποίες μπορεί να κρατηθεί ένα διάγραμμα για να συγκριθεί με κάποιο επόμενο. Η επιλογή [Rotate vs angle] όπου αλλάζει τους άξονες ενός διαγράμματος από  $y=f(x)$  σε  $x=f(y)$ . Η επιλογή [Normalize calc] η οποία κανονικοποιεί τα αποτελέσματα στην περιοχή 0 έως 1. Η επιλογή [O] σε συνδυασμό με την επιλογή [Compare] δημιουργεί ένα ξεχωριστό παράθυρο αποτελεσμάτων μόνο με τα αποτελέσματα των υπολογισμών χωρίς να εμφανίζει και τα δείγματα των μετρήσεων. Και τέλος η επιλογή [I] όπου

όταν έχει επιλεγεί [Hold plot] δίνει την δυνατότητα να αλλάζουν αυτόματα τα χρώματα των καμπυλών σε κάθε νέα καμπύλη που προστίθεται στο διάγραμμα των αποτελεσμάτων. Τέλος η επιλογή [Fit] μπορεί να μας εμφανίσει, χρησιμοποιώντας την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, μια πρωτοβάθμια προσαρμογή και όπου υπάρχει και ικανοποιητικός αριθμός μετρήσεων σημειώνει πάνω στο διάγραμμα με διακεκομμένες ροζ γραμμές τα 95% όρια πρόβλεψης '*prediction bounds*'. Περισσότερα σχετικά με το λογισμικό '*SARrawdataAnalyzer*' παρουσιάζω στο παράρτημα Γ.

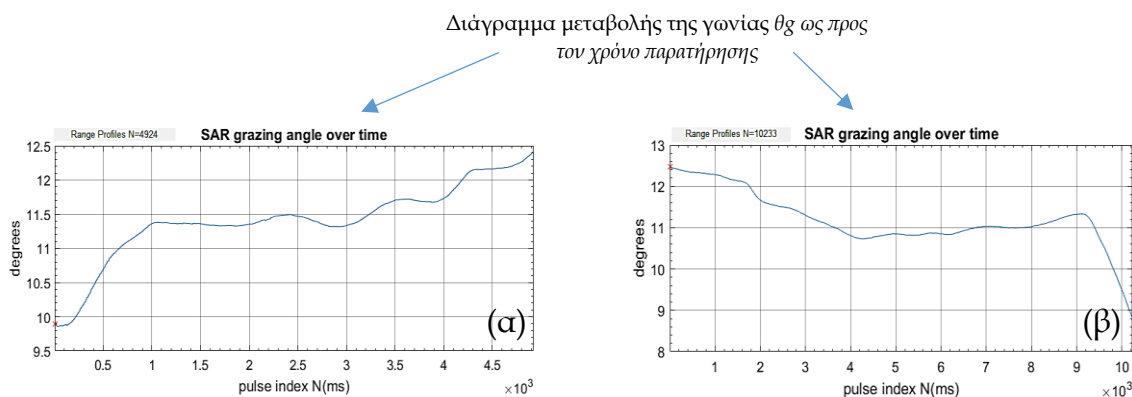
### 3.4.2 Αποτελέσματα 1D μορφοκλασματικής ανάλυσης (μέθοδος MFL).

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της μορφοκλασματικής ανάλυσης των ΗΜ καταγραφών με την μέθοδο MFL για διαφορετικές γωνίες θέασης της θαλάσσιας επιφάνειας και υπό διαφορετικές θαλάσσιες καταστάσεις (ήρεμη και κυματώδη). Ιδανικά θα θέλαμε η γωνία πρόπτωσης κατά την στιγμή των μετρήσεων να παραμένει κάθε φορά σταθερή ή/και να μεταβάλλεται πάντα με τον ίδιο σταθερό ρυθμό. Έτσι θα μπορούμε εύκολα να αντιπαραβάλουμε τα αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθόδου MFL μεταξύ ήρεμης και ταραγμένης θάλασσας υπό όλες τις δυνατές γωνίες θέασης και να συγκρίνουμε τις δυνατότητες διαχωρισμού της μεθόδου. Όμως η καταγραφή της θαλάσσιας επιφάνειας γίνεται σε πραγματικές συνθήκες από RADAR που βρίσκεται πάνω στο ελικόπτερο με την γωνία θέασης του RADAR να είναι διαρκώς μεταβαλλόμενη ως προς την θάλασσα και τον χρόνο καταγραφής, βλ. σχετικά στο παράρτημα Δ. Έτσι λόγω της διαρκώς μεταβαλλόμενης θέσης του ελικοπτερού, ο αριθμός των καταγραφών '*range profile*' του Radar, τα που απαιτούνται προκειμένου να δημιουργηθεί κάθε φορά ένα δείγμα καταγραφών που να περιλαμβάνει συγκεκριμένες γωνίες θέασης δεν είναι ποτέ σταθερός. Ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες ανέμου και με την στιγμιαία ταχύτητα ανόδου ή καθόδου του ελικοπτερού για να καταγραφεί μεταβολή μιας μοίρας στην γωνία θέασης του Radar ως προς την θάλασσα μπορεί χρειαστεί χρόνος από εκατοντάδες ή και χιλιάδες *ms* και ως εκ τούτου απαιτείται ένας διαφορετικός αριθμός δειγμάτων προκειμένου να καλυφθεί ο ίδιος αριθμός γωνιών θέασης. Επί παραδείγματι, στην εικόνα 3-15(α) βλέπουμε για την 1<sup>η</sup> ημέρα πτήσης (ταραγμένη θάλασσα) και προκειμένου να ληφθούν δείγματα από γωνίες 10° έως 12° το δείγμα μετρήσεων πρέπει αποτελείται από τουλάχιστον 5.000 διαδοχικές καταγραφές - '*range profiles*' (αντίστοιχος χρόνος πτήσης 5sec, λαμβάνοντας υπόψη το PRF 1KHz του RADAR δηλαδή ένα *radar hit* κάθε 1ms,) ενώ την επόμενη ημέρα 2<sup>η</sup> ημέρα πτήσης (ήρεμη θάλασσα) προκειμένου να ληφθούν δείγματα που να καλύπτουν τις ίδιες γωνίες θέασης το δείγμα μετρήσεων πρέπει να αποτελείται από τουλάχιστον 10.000 διαδοχικές καταγραφές - '*range profiles*' ήτοι 10sec πτήσεις. Αντιθέτως για να καλυφθούν οι γωνίες από 20° έως 22°, κατά την 1<sup>η</sup> ημέρα πτήσης, βλ. εικόνα 3-17(α), αρκούν μόνο 1000 δείγματα από διαδοχικές καταγραφές ήτοι μόνο ένα 1sec πτήσης. Σε κάθε περίπτωση ο αριθμός των καταγραφών που πρέπει να ληφθούν κάθε φορά υπόψη για την κάλυψη ενός συγκεκριμένου εύρους γωνιών είναι δυναμικός και διαφορετικός και σημειώνεται στο αντίστοιχο διάγραμμα μεταβολής της γωνίας

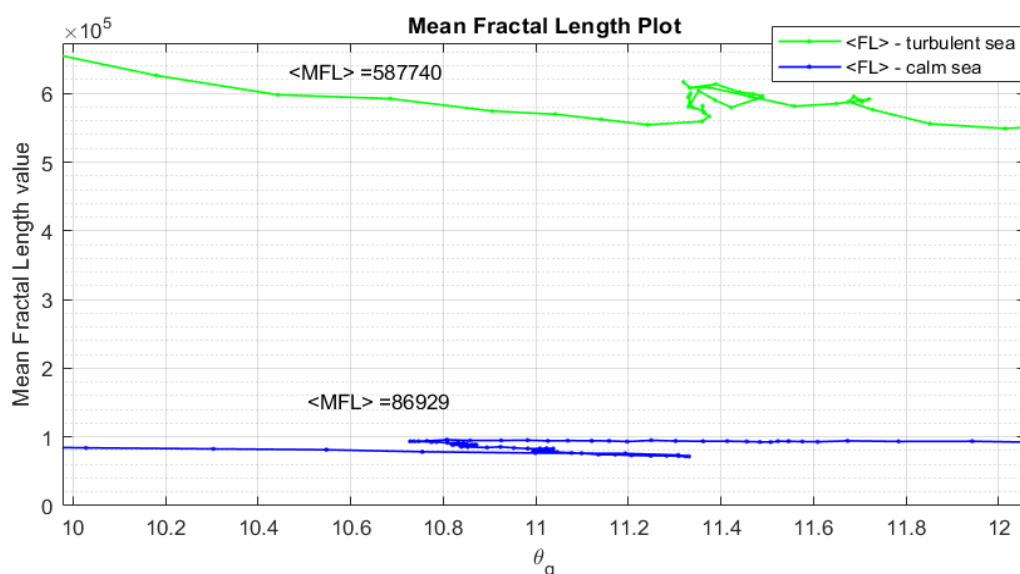
ανά *ms* που συνοδεύει τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Ανάλογα λοιπόν με τον αριθμό των καταγραφών που θα χρησιμοποιηθούν και τον αριθμό *N* που θα επιλέξουμε για τον σχηματισμό της μέσης τιμής, υπολογίζεται η τιμή *MFL* από την σχέση (3.7) και σχεδιάζεται το διάγραμμα ‘*Mean Fractal Length Plot*’. Επιλέγοντας π.χ. *N=100* η καμπύλη γραμμή στο διάγραμμα ‘*Mean Fractal Length Plot*’ θα αποτελείται από 50 σημεία μετρήσεων *MFL*, βλ. εικόνα 3-16, αφού το δείγμα αποτελείται από 5000 ‘*range profiles*’. Δηλαδή το κάθε σημείο μέτρησης από τα 50 σημεία που δημιουργούν το διάγραμμα προέρχεται από την μέση τιμή *N=100* διαδοχικών *range profiles*. Η τιμή που σημειώνω στα διαγράμματα ως  $\langle MFL \rangle$  είναι η μέση τιμή αυτών των 50 διαφορετικών, για την συγκεκριμένη περίπτωση, μετρήσεων *MFL*.

Ακολουθεί σειτ γωνιών καταγραφής (επάνω εικόνα) και αποτελεσμάτων (κάτω εικόνα) μετά από επεξεργασία των *HM* εντάσεων με την μέθοδο *MFL* για ταραγμένη και ήρεμη θάλασσα υπό γωνίες  $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$  και  $50^\circ$  μοίρες.

**Καταγραφές και αποτελέσματα για γωνίες ‘*grazing angle*’  $10^\circ < \theta_g < 12^\circ$**

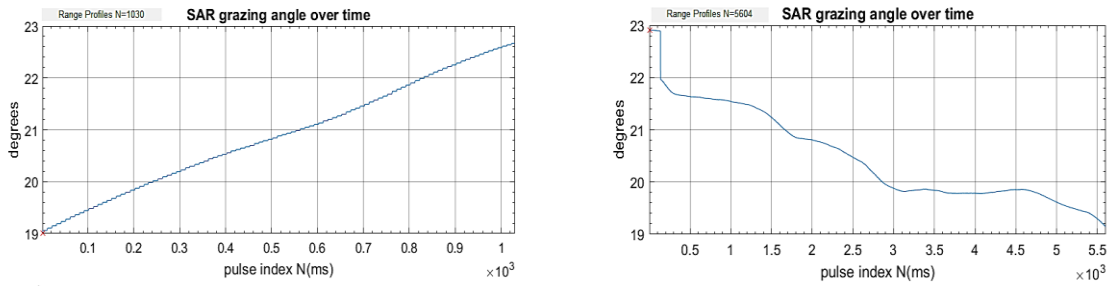


Εικόνα 3-16. Δείγμα καταγραφών δέσμης γωνιών  $10^\circ < \theta_g < 12^\circ$  αριστερά από ταραγμένη θάλασσα 5.000ms, δεξιά από ήρεμη θάλασσα 10.000ms

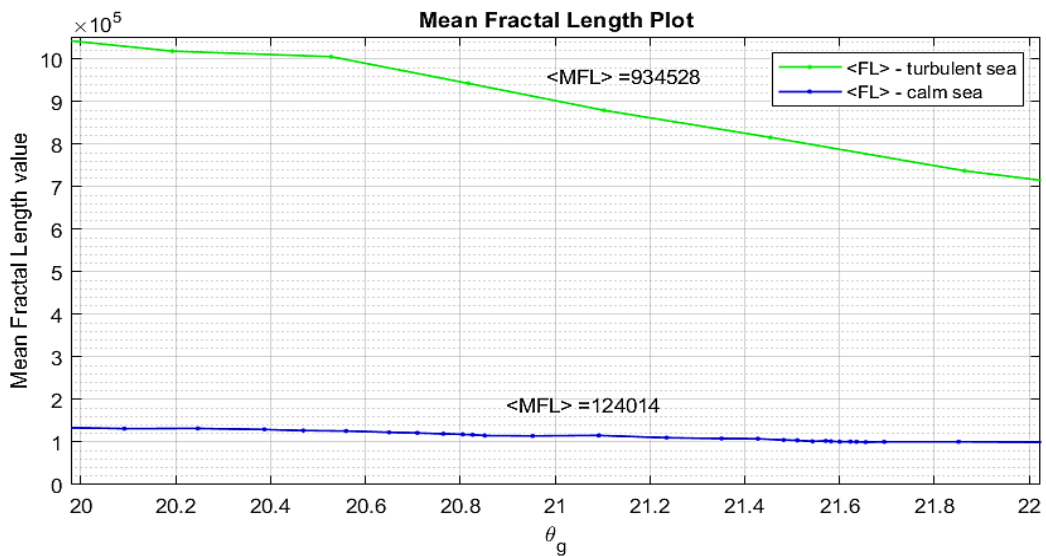


Εικόνα 3-15. Υπολογισμός *MFL* διαδοχικών ‘*range profiles*’ για γωνίες  $10^\circ < \theta_g < 12^\circ$  με πράσινο το *MFL* κοματώδους, με μπλε το *MFL* ήρεμης θάλασσας

**Καταγραφές και αποτελέσματα για γωνίες 'grazing angle'  $20^\circ < \theta_g < 22^\circ$**

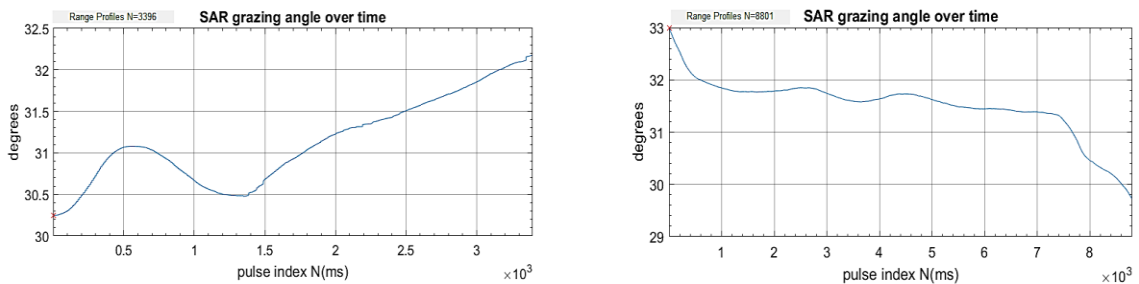


Εικόνα 3-17. Δείγμα καταγραφών δέσμης γωνιών  $20^\circ < \theta_g < 22^\circ$  αριστερά από ταραγμένη θάλασσα 1.000ms, δεξιά από ήρεμη θάλασσα 5.500ms

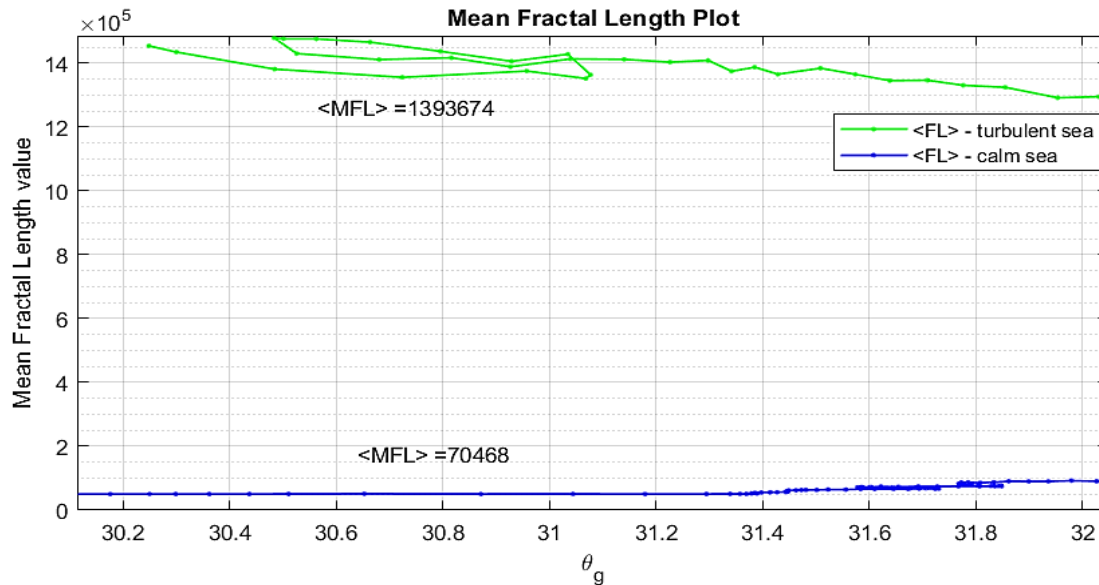


Εικόνα 3-18. Υπολογισμός MFL διαδοχικών 'range profiles' για γωνίες  $20^\circ < \theta_g < 22^\circ$  με πράσινο το MFL κυματώδους, με μπλε το MFL ήρεμης θάλασσας

**Καταγραφές και αποτελέσματα για γωνίες 'grazing angle'  $30^\circ < \theta_g < 32^\circ$**

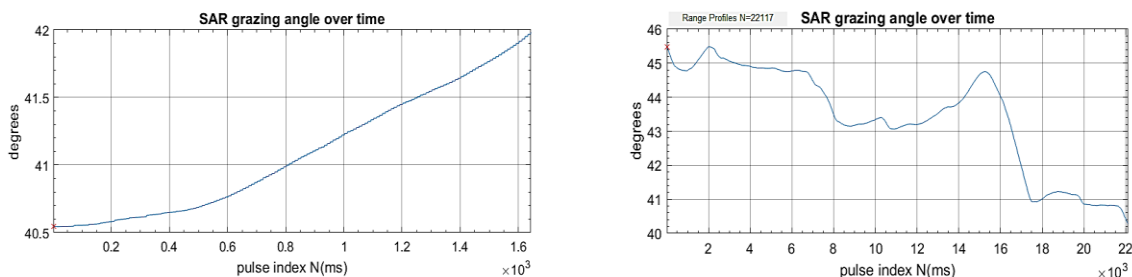


Εικόνα 3-19. Δείγμα καταγραφών δέσμης γωνιών  $30^\circ < \theta_g < 32^\circ$  αριστερά από ταραγμένη θάλασσα 3.000ms, δεξιά από ήρεμη θάλασσα 9.000ms

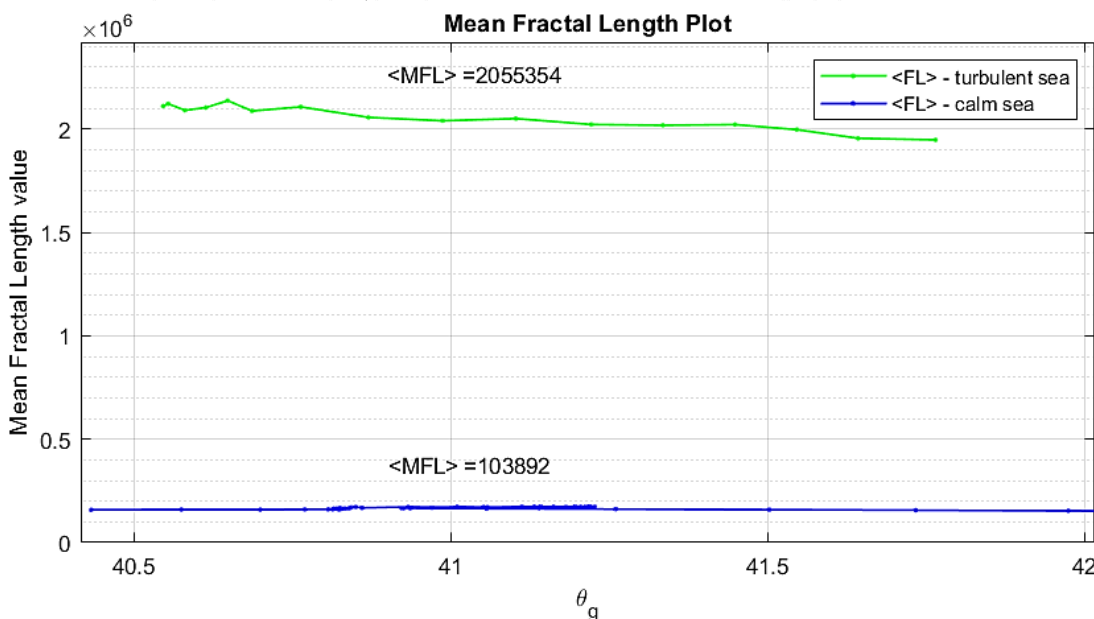


Εικόνα 3-20. Υπολογισμός MFL διαδοχικών 'range profiles' για γωνίες  $30^\circ < \theta_g < 32^\circ$  με πράσινο το MFL κυματώδους, με μπλε το MFL ήρεμης θάλασσας

**Καταγραφές και αποτελέσματα για γωνίες 'grazing angle'  $40^\circ < \theta_g < 42^\circ$**



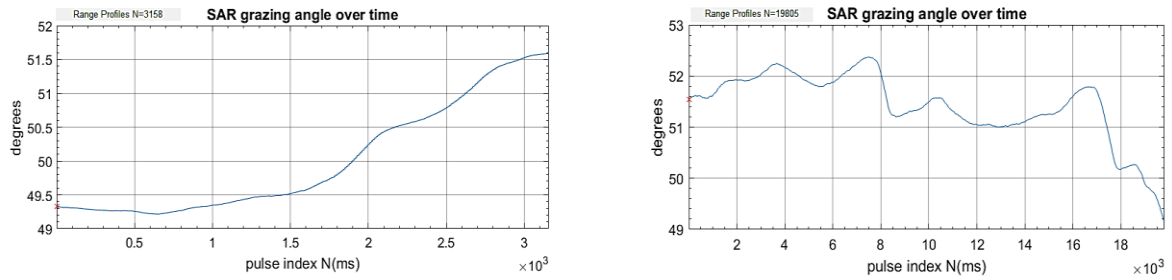
Εικόνα 3-21. Δείγμα καταγραφών δέσμης γωνιών  $40^\circ < \theta_g < 42^\circ$  αριστερά από ταραγμένη θάλασσα 1.650ms, δεξιά από ήρεμη θάλασσα 22.000ms



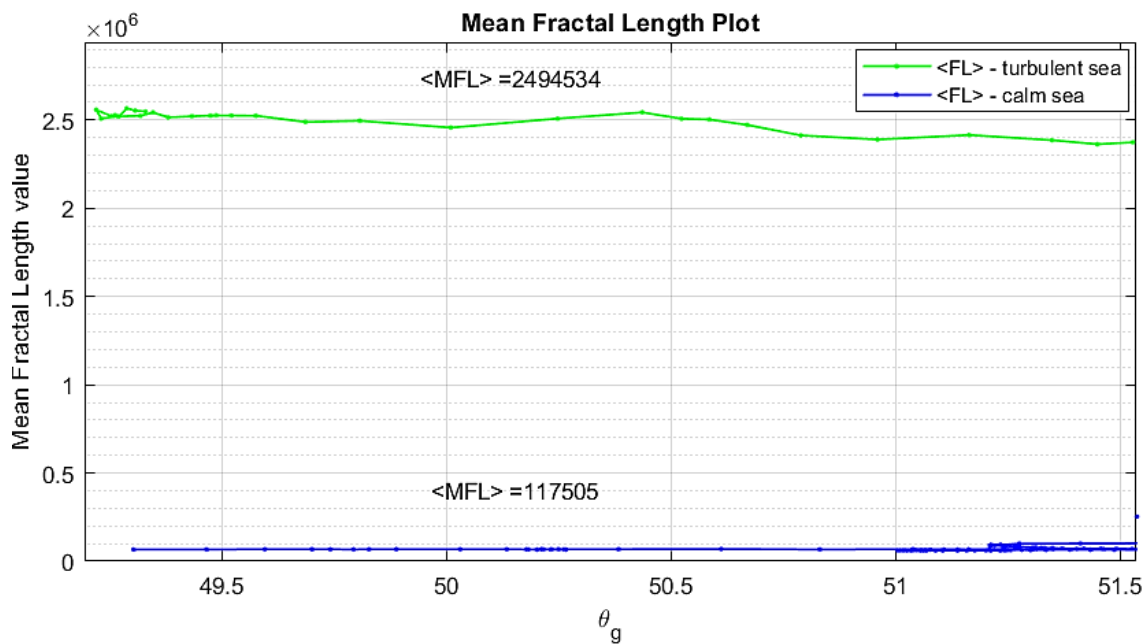
Εικόνα 3-22. Υπολογισμός MFL διαδοχικών 'range profiles' για γωνίες  $40^\circ < \theta_g < 42^\circ$  με πράσινο το MFL κυματώδους, με μπλε το MFL ήρεμης θάλασσας



Καταγραφές και αποτελέσματα για γωνίες 'grazing angle'  $50^\circ < \theta_g < 52^\circ$



Εικόνα 3-23. Δείγμα καταγραφών δέσμης γωνιών  $50^\circ < \theta_g < 52^\circ$   
 αριστερά από ταραγμένη θάλασσα 3.100ms, δεξιά από ήρεμη θάλασσα 19.000ms



Εικόνα 3-24. Υπολογισμός MFL διαδοχικών 'range profiles' για γωνίες  $50^\circ < \theta_g < 52^\circ$   
 με πράσινο το MFL κυματώδους, με μπλε το MFL ήρεμης θάλασσας

### 3.5 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Στον παρακάτω πίνακα 3-2 μεταφέρω τα αριθμητικά αποτελέσματα <MFL> από τα ανωτέρω γραφήματα ‘Mean Fractal Length Plots’:

Πίνακας 3-2. Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων <MFL> vs. Δείκτη SSI

<i>Grazing angle</i>	23/09/2014 Κυματώδης Sea state: 4-5	24/09/2014 Γαλήνια Sea state: 1	<i>Sea State Index</i>	
$\theta_g$	<MFL>	<MFL>	SSI	
$10^\circ < \theta_g < 12^\circ$	587,740	86,929	6.76	<i>low grazing angles</i> SSI≈7
$20^\circ < \theta_g < 22^\circ$	934,528	124,014	7.54	
$30^\circ < \theta_g < 32^\circ$	1,393,674	70,468	19.77	<i>medium grazing angles</i> SSI≈20
$40^\circ < \theta_g < 42^\circ$	2,055,354	103,892	19.78	
$50^\circ < \theta_g < 52^\circ$	2,494,534	117,505	21.23	

Στον ανωτέρω πίνακα σημειώνω ανάλογα με την ημέρα διεξαγωγής του πειράματος την τιμή του ‘Sea state’ που ίσχυε για την θαλάσσια περιοχή. Την τιμή αυτή του ‘Sea state’ [29]-[30] την έχω υπολογίσει στο παράρτημα Δ.1.3 με βάση τις τιμές του ανέμου που δόθηκαν από τους διοργανωτές του πειράματος κατά την στιγμή της καταγραφής. Έτσι οι καταγραφές της 1<sup>ης</sup> ημέρας έγιναν με ‘Sea state’ έντασης 4-5 που λεκτικά αντιστοιχεί σε χαρακτηρισμό ταραγμένη έως κυματώδη θάλασσα, ενώ οι καταγραφές της 2<sup>ης</sup> ημέρας έλαβαν χώρα με ‘Sea state’ έντασης 1 που λεκτικά αντιστοιχεί σε χαρακτηρισμό γαλήνια έως ρυτιδωμένη θάλασσα. Γνωρίζοντας λοιπόν την διαφορά στις συνθήκες της θαλάσσιας κυμάτωσης που επικρατούσαν κατά την διεξαγωγή του πειράματος NEMO2014 μπορούμε να συγκρίνουμε τις τιμές <MFL> που υπολογίζει ο προτεινόμενος αλγόριθμος για την ταραγμένη και την ήρεμη θάλασσα. Παρατηρούμε ότι οι τιμές <MFL> της ταραγμένης θάλασσας είναι πάντα υπέρ πολλαπλάσιες των αντιστοιχών τιμών <MFL> της ήρεμης θάλασσας και μάλιστα ανεξαρτήτως γωνίας θέασης  $\theta_g$  με την οποία το RADAR στοχεύει την θαλάσσια επιφάνεια.

Αποδεικνύεται λοιπόν ότι η 1D ανάλυση υπογραφών των οπισθοσκεδαζόμενων HM κυμάτων με βάση τις ανωτέρω αναπτυχθείσες τεχνικές *fractal* παρέχει σαφώς, μέσω του κριτηρίου MFL, την δυνατότητα επιτυχούς διαχωρισμού της ήρεμης από την ταραγμένη θάλασσα. Ένα πρακτικό μειονεκτήματα στην χρήση της τιμής MFL ως κριτήριο προσδιορισμού της θαλάσσιας κατάστασης είναι ότι η τιμή της, ως απόλυτο μέγεθος, παρουσιάζει μια μεγάλη εξάρτηση από την τιμή της γωνίας πρόσπτωσης, βλ. τιμές πίνακα 3.2, όπου η τιμή του δείκτη <MFL> εμφανίζεται ευθέως ανάλογη με την τιμή της γωνίας θέασης ‘grazing angle’. Για την βελτίωση του κριτηρίου MFL προτείνω την εισαγωγή του δείκτη ‘Sea State Index’ τον οποίο παρουσιάζω στην αμέσως επόμενη παράγραφο.

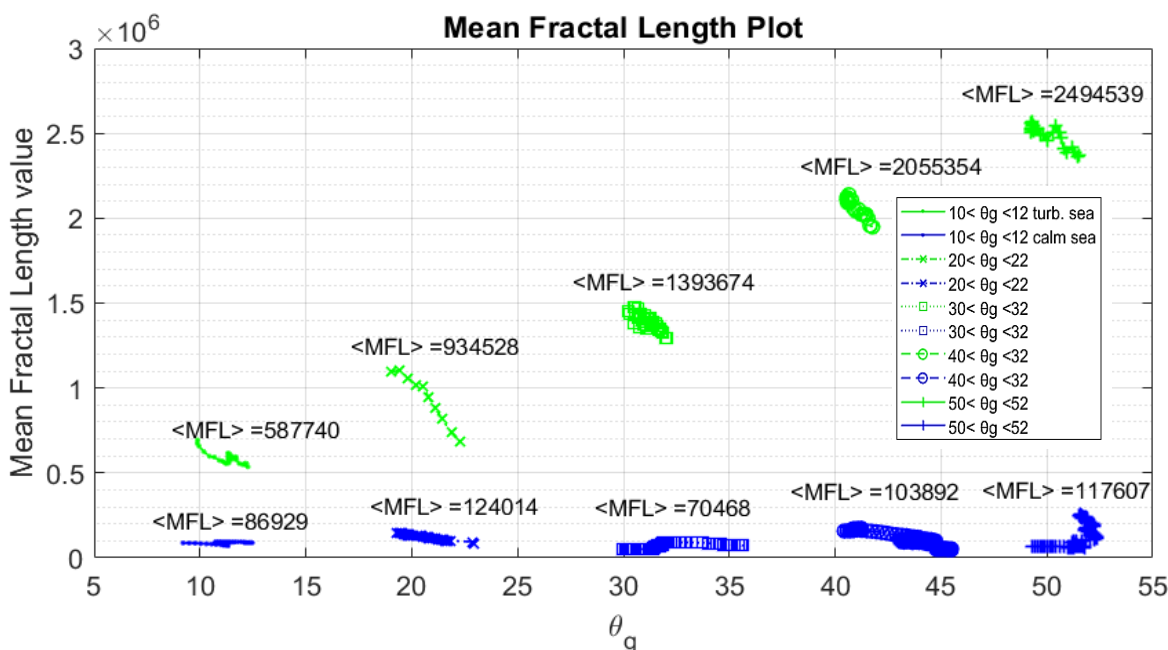
### 3.5.1 Ο δείκτης Sea State Index ως βελτίωση του κριτηρίου MFL

Θεωρώντας την τιμή <MFL> της ήρεμης θάλασσα ως τιμή αναφοράς δημιουργώ ένα δείκτη που τον ονομάζω Δείκτη Θαλάσσιας Κυμάτωσης ‘Sea State Index’ ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της τιμής <MFL> της υπό εξέταση επιφάνειας ως προς την τιμή <MFL> της ήρεμης θάλασσα.

$$SSI = \frac{\text{μέτρηση MFL}}{\text{τιμή MFL ήρεμης θάλασσας}}$$

Ο δείκτης SSI αποδεικνύεται ότι μπορεί να λειτουργήσει πολύ πιο αποτελεσματικά από την απόλυτη τιμή <MFL> χάρη στην κανονικοποίηση του αποτελέσματος ως προς την τιμή αναφοράς. Αυτό φαίνεται αμέσως και από την σταθεροποίηση των τιμών SSI σε τιμές περίπου στο δείκτη 7 για ήρεμη θάλασσα ανεξαρτήτως γωνίας παρατήρησης καθώς και για σταθερές τιμές περίπου στο 20 για κυματώδη θάλασσα επίσης ανεξαρτήτως γωνίας παρατήρησης.

Αναλυτικότερα, επαναλαμβάνω την επεξεργασία για καταγραφές από γωνίες 10°, 20°, 30°, 40° και 50° αποτυπώνοντας συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των υπολογισμών στο ίδιο διάγραμμα, βλ. εικόνα 3-25, έτσι ώστε να δοθεί μια εποπτική εικόνα των αποτελεσμάτων από διαφορετικές γωνίες καταγραφής.



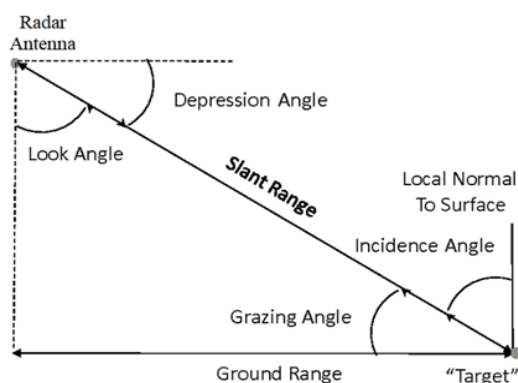
Εικόνα 3-25. Σύγκριση αποτελεσμάτων με δείγματα από όλες τις γωνίες από ταραγμένη (πράσινο) και από ήρεμη (μπλε) θάλασσα

Στο διάγραμμα της εικόνας 3-25 παρατηρούμε ότι για χαμηλές γωνίες ‘grazing angles’ θ<sub>g</sub> ο διαχωρισμός αν και συνεχίζει να είναι ξεκάθαρος εμφανίζει ένα μειωμένο εύρος. Αυτό δεν έχει να κάνει τόσο με την μέθοδο όσο με την ίδια την φύση του φαινομένου της HM σκέδασης. Όσο αυξάνει η γωνία πρόσπτωσης ‘incidence angle’ του HM κύματος ως προς την επιφάνεια σκέδασης (δηλαδή όσο μειώνεται αντίστοιχα η γωνία ‘grazing angle’ βλ. εικόνα 3-26), τόσο μικραίνει σε απόλυτες τιμές το ποσοστό της συνολικής HM ενέργειας που οπισθοσκοδεύεται.

Πλην όμως, ο δείκτης SSI έχοντας ως αναφορά την τιμή <MFL> της ήρεμης θάλασσας για την αντίστοιχη γωνία πρόσπτωσης, λαμβάνει υπόψη του το ποσοστό στην διαφορά της ανακλαστικότητα της επιφάνειας σκέδασης που οφείλεται καθαρά λόγω της διαφοράς στην γωνία πρόσπτωσης. Έτσι για τις χαμηλότερες γωνίες '*grazing angle*' από  $10^\circ$  έως  $20^\circ$  η τιμή του SSI παραμένει σταθερή γύρω στις 7 μονάδες ανεξαρτήτως της ακριβούς τιμής της γωνίας παρατήρησης και αντίστοιχα για γωνίες από  $30^\circ$  έως  $50^\circ$  η τιμή του δείκτη SSI παραμένει σταθερή στις 20 περίπου μονάδες επίσης ανεξαρτήτως της τιμής της γωνίας παρατήρησης, βλ. πίνακα 3-2.

Σε κάθε περίπτωση όμως θα πρέπει να είναι γνωστό το ποια είναι η γωνία παρατήρησης κατά την στιγμή της μέτρησης, δηλαδή κατά την εφαρμογή της μεθόδου σε επιχειρησιακό περιβάλλον και προκειμένου η μέθοδος να προσδιορίζει σωστά την θαλάσσια κυμάτωση, αρκεί το να δίνεται ως δεδομένο συνυπολογισμού στην μέθοδο και η γωνία θέασης '*grazing angle*' έτσι ώστε να γίνεται η κατάλληλη αντιστάθμιση.

Παρόμοια παρατήρηση για την επίδραση της γωνίας πρόσπτωσης στην εκτίμηση της τραχύτητας μιας επιφάνειας έχω διατυπώσει και στο τέλος της παραγράφου 2.5.5 του 2<sup>ου</sup> κεφαλαίου. Και εκεί χρησιμοποιώντας μοντέλα προσομοίωσης σκέδασης σε επιφάνειες μεταβλητής τραχύτητας είχα επίσης διαπιστώσει ότι πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η τιμή της γωνίας πρόσπτωσης για την οποία κατασκευάστηκε το μοντέλο εκτίμησης έτσι ώστε να γίνεται σωστά η εκτίμηση της τραχύτητας μιας επιφάνειας.



Εικόνα 3-26. Σχέση γωνίας θέασης '*grazing angle*' με γωνία πρόσπτωσης '*incidence angle*'

### 3.6 Ανακεφαλαίωση και Συμπεράσματα

Το Νορβηγικό Ινστιτούτου Άμυνας 'FFI' διεξήγαγε το πείραμα «NEMO 2014» στα πλαίσια ομάδα εργασίας του Science & Technology Organization. Ο σκοπός του πειράματος ήταν η καταγραφή της θαλάσσιας επιφάνειας από ένα X-band RADAR συνθετικού ανοίγματος (SAR) για δύο διαφορετικές θαλάσσιες καταστάσεις παραγμένη και ήρεμη θάλασσα υπό όλες τις γωνίες θέασης 'grazing angles' από 5° έως 55°.

Λαμβάνοντας τις παραπάνω καταγραφές διερευνήσα το πρόβλημα του προσδιορισμού της τραχύτητας μιας επιφάνειας μέσω μορφοκλασματικής ανάλυσης των οπισθοσκεδαζόμενων HM κυμάτων εξειδικεύοντας στον προσδιορισμό της θαλάσσιας κυμάτωσης 'sea state'. Εφαρμόζοντας την τεχνική 'blanket' σε μονοδιάστατες υπογραφές, 'range profiles' και στην συνέχεια υπολογίζοντας το μέσο μορφοκλασματικό μήκος 'Mean Fractal Length' N διαδοχικών 'range profiles' απέδειξα ότι ανεξαρτήτως της γωνίας θέασης η τιμή MFL των SAR raw data μιας παραγμένης θάλασσας είναι πάντοτε υπέρ πολλαπλάσια σε απόλυτες τιμές από αυτή μιας ήρεμης θάλασσας και μπορεί να υπάρξει ξεκάθαρος διαχωρισμός της επικρατούσας θαλάσσιας κατάστασης χρησιμοποιώντας ως κριτήριο την τιμή του MFL.

Το κριτήριο MFL είναι ένα «προϊόν» καινοτομίας της παρούσας έρευνας και το οποίο έρχεται να προστεθεί στην σχετική βιβλιογραφία[1]-[3],[13]-[14],[18],[24],[28] και έχει την βάση του στην εργασία 'Multiple Resolution Texture Analysis and Classification' των Peleg et al. [1]. Η κεντρική ιδέα είναι ότι πληροφορίες «συχνότητας» σχετικά με την υφή μιας επιφάνειας μπορούν να ληφθούν απευθείας από το χωρικό πεδίο 'spatial domain' χωρίς να χρειαστεί να καταφύγουμε στο πεδίο συχνότητας 'frequency domain' αποφεύγοντας έτσι χρονοβόρους ή ενεργοβόρους επαναλαμβανόμενους μετασχηματισμούς συχνότητας[7] βλ. π.χ. μετατροπής SAR raw data σε SAR imaging[21]-[23] και εν συνεχεία επεξεργασία της εικόνας προς εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την τραχύτητα της επιφάνειας[24],[33],[34].

Τέλος λαμβάνοντας την τιμή MFL της ήρεμης θάλασσα ως τιμή αναφοράς δημιουργώ ένα δείκτη που τον ονομάζω Δείκτη Θαλάσσιας Κυμάτωσης 'Sea State Index', ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος μεταξύ της τιμής <MFL> της υπό εξέταση θαλάσσιας επιφάνειας ως προς την τιμή <MFL> της ήρεμης θάλασσας. Ο δείκτης SSI αποδεικνύεται ότι μπορεί να λειτουργήσει πολύ πιο αποτελεσματικά από την απόλυτη τιμή <MFL> χάρη στην κανονικοποίηση του αποτελέσματος ως προς την τιμή αναφοράς.

Ο χαρακτηρισμός της θαλάσσιας κυμάτωσης απευθείας από τα SAR raw data με την χρήση της τεχνικής Mean Fractal Length αποδεικνύεται επιτυχής και η προτεινόμενη μέθοδος καθώς και αποτελέσματα της μεθόδου, έχω δημοσιεύσει στο περιοδικό Physical Sciences and Technology, Vol 7 (No 1-2), 2020, p31-37 υπό τον τίτλο 'Sea state characterization using fractal techniques on experimental one - dimensional radar signatures'. DOI: <https://doi.org/10.26577/phst.2020.v7.i1.05>

### 3.7 Βιβλιογραφία

- [1] S. Peleg, J. Naor, R. Hartley, and D. Avnir. “Multiple Resolution Texture Analysis and Classification” - IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-6 - No.4, 1984. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TPAMI.1984.4767557>
- [2] Y. Tang, H. Ma, D. Xi, X. Mao, C. Suen. “Modified Fractal Signature (MFS): A New Approach to Document Analysis for Automatic Knowledge Acquisition” - IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, Vol. 9 - No. 5 - pp. 747-762, 1997. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/69.634753>.
- [3] A. Malamou, C. Pandis, P. Frangos, P. Stefanias, A. Karakasiliotis, D. Kodokostas. “Application of the modified fractal signature method for terrain classification from synthetic aperture radar images” - Electronics and Electrical Engineering Journal, Vol.20 - No.6 - pp.118–121, 2014 [Online]. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1401.2899>
- [4] K. J. Falconer, “Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications” - J. Wiley and Sons - 1990
- [5] B. Mandelbrot, “The Fractal Geometry of Nature” - New York: W. H. Freeman and Company - 1977
- [6] M. Richards, “Fundamentals of Radar Signal Processing”, McGraw-Hill, 1st Edition, 2005.
- [7] Brigham, E. Oran “The fast Fourier transform and its applications”, Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, 1988
- [8] F. Berizzi, E. Dalle Mese, G. Pinelli, “One dimensional fractal model of the sea surface”, IEE Proc. Radar Sonar Navig., Vol. 46, No 1, pp. 55-64, 1999.
- [9] A. Kotopoulos, A. Malamou, G. Pouraimis, E. Kallitsis και P. Frangos, “Characterization of Rough Fractal Surfaces from Backscattered Radar Data”, Elektronika ir Elektrotechnika, Vol. 22, No. 6, pp. 61-66, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5755/j01.eie.22.6.17226>
- [10] G. Pouraimis, A. Kotopoulos, E. Kallitsis and P. Frangos, “Characterization of Three-Dimensional Rough Fractal Surfaces From Backscattered Radar Data”, Electronics and Electrical Engineering Journal, vol.23, no. 4, pp.45 - 50, Jul. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5755/j01.eie.23.4.18721>
- [11] N. Ampilova, I. Soloviev, A. Kotopoulos, G. Pouraimis, P. Frangos , “On the Analysis of Sea Surface Images related to Sea State Determination by Multifractal Methods’, Applied Electromagnetism Journal, vol. 21, no. 1, pp. 23 – 30, Dec. 2019. [Online]. Available: [http://rcvt.tu-sofia.bg/CEMA2019\\_8.pdf](http://rcvt.tu-sofia.bg/CEMA2019_8.pdf)

- [12] A. Zaleski, “*Fractals and the Weierstrass Mandelbrot Function*” - Rose-Hulman Undergraduate Mathematics Journal – 2012 – Vol.13 - No2 - pp.80 – 113
- [13] B. Fabrizio και D. Enzo, “*Fractal analysis of the signal scattered from the sea surface*”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 47, No. 2, pp. 324–338, 1999.
- [14] R. Xin and G. Li-Xin, “*Fractal characteristics investigation on electromagnetic scattering from 2-D Weierstrass fractal dielectric rough surface*” - Chinese Physics B - 2008 – Vol.17 – No.8
- [15] B. Mandelbrot, “*Fractals: Form, Chance and Dimension*” - San, Francisco: CA: W. H. Freeman and Company - 1977
- [16] B. Mandelbrot, “*How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension*”, Science, vol. 156, no. 3775, pp. 636–638, 1967. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1126/science.156.3775.636>
- [17] A. Kotopoulis, B. Massinas, G. Pouraimis and P. Frangos, ‘*Sea State Characterization Using Fractal Techniques on Experimental One – Dimensional Radar Signatures*’, ‘Physical Sciences and Technology’ Journal, Faculty of Physics and Engineering, Al – Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakshtan, Vol. 7, no. 1-2, 2020. DOI: <https://doi.org/10.26577/phst.2020.v7.i1.05>
- [18] G. Pouraimis, A. Kotopoulis, B. Massinas and P. Frangos, “*Sea state characterization using experimental one – dimensional radar signatures and fractal techniques*”, Elektronika ir Elektrotechnika, Vol. 27, No. 3, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5755/j02.eie.28906>.
- [19] D. Wehner, “*High-Resolution Radar*’, Artech House, 2nd Edition, 1995.
- [20] Chan, Y. K., & Koo, V. C., “*An Introduction to Synthetic Aperture Radar (SAR)*”. Progress In Electromagnetics Research B, 2, 27–60, 2008.
- [21] Π. Φράγκος & Σ. Πιντζος, “*Συστήματα Ραντάρ*”, Τομέας Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας & Τεχνολογίας Υλικών, Σ.Η.Μ.Μ.Υ / Ε.Μ.Π., Ιούνιος 2022.
- [22] Chen, C. H., “*Principles of Synthetic Aperture Radar Imaging: A System Simulation Approach*”, CRC Press, 2016.
- [23] V. Chen and H. Ling, “*Time-Frequency Transforms for Radar Imaging and Signal Analysis*”, Artech House, 1st Edition, 2002.
- [24] Α.Μαλάμου, “*Μαθηματικές και Ηλεκτρομαγνητικές Μέθοδοι για Συστήματα Ραντάρ Συνθετικής Απεικόνισης (SAR)*”, Ε.Μ.Π/Σ.ΗΜΜ.Υ. Τομέας Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας & Τεχνολογίας Υλικών, 2017.
- [25] H.Umer, M. Sabieh, “*Reducing noise by repetition: introduction to signal averaging*”, Article in European Journal of Physics, March 2010. DOI 10.1088/0143-0807/31/3/003

- [26] Hudgings D., Gragt A., "Signal averaging at modest cost" Am. J. Phys. Vol. 40, pp. 1206-12, 1972.
- [27] Kraftmaker Y., "Noise reduction by signal accumulation", Phys. Teach. Vol.44, pp 528-30, 2006.
- [28] T. Lo, H. Leung, J. Litva, and S. Haykin, "Fractal characterization of sea scattered signals and detection of sea-surface targets", Proc. Inst. Elect. Eng., vol. 140, pt. F, no. 4, pp. 243-250, 1993.
- [29] Schule, J. J. "Sea state." The Encyclopedia of Oceanography, New York: Reinhold, pp.786-792, 1966
- [30] Owens E.H. "Sea conditions. In: Beaches and Coastal Geology". Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, New York, NY. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1007/0-387-30843-1\\_397](https://doi.org/10.1007/0-387-30843-1_397)
- [31] Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία, 'Κλίμακα Douglas για το κύμα' Available: [http://www.emy.gr/emy/el/navigation/naftilia\\_douglas?](http://www.emy.gr/emy/el/navigation/naftilia_douglas?)
- [32] N. Ampilova and I. Soloviev, "On digital image segmentation based on fractal and multifractal methods" - CEMA'15 Conference Proceedings pp. 14-17, 2015.
- [33] A.Pleskachevsky, S.Jacobsen, B.Tings and E.Schwarz 'Estimation of sea state from Sentinel-1 Synthetic aperture radar imagery for maritime situation awareness', International Journal of Remote Sensing, Vol. 40, No. 11, pp. 4104-4142, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1558377>
- [34] H. Pan, W. Zhang, W. Jiang, P. Wang, J. Yang and X. Zhang, 'Roughness Change Analysis of Sea Surface from Visible Images by Fractals,' in IEEE Access, vol. 8, pp. 78519-78529, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2990161>



## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> Προσδιορισμός θαλάσσιας κυμάτωσης με 2D *fractal* ανάλυση δεδομένων Radar

### Περιεχόμενα

---

4.1	Εισαγωγή στην έννοια της διδιάστατης υπογραφής RADAR.....	123
4.2	Αλγόριθμος προσδιορισμού κυμάτωσης με 2D ανάλυση υπογραφών (MFS/Dμ) ....	126
4.3	Στάδια Προεπεξεργασίας των 3D - SAR Raw Data .....	127
4.3.1	Απόρριψη μεταβατικών & ελαττωματικών καταγραφών. ....	127
4.3.2	Data & Noise reduction με χρήση τεχνικής ‘ <i>signal averaging</i> ’ .....	130
4.3.3	Φιλτράρισμα θορύβου εξάρσεων ‘ <i>spikes</i> ’ .....	133
4.3.4	Κανονικοποίηση με βάση το ‘ <i>Dynamic Range</i> ’ της εξόδου του RADAR.....	136
4.3.5	Παρουσίαση των σταδίων προ-επεξεργασίας σε δείγμα καταγραφών.....	137
4.4	Στάδια Επεξεργασίας των 3D SAR Raw Data.....	139
4.4.1	Θεωρία ‘ <i>blanket</i> ’, ‘ <i>fractal Dimension</i> ’ $D$ , ‘ <i>fractal Signature</i> ’ $D(\delta)$ .....	140
4.4.2	Εφαρμογή ‘ <i>blanket</i> ’ σε 2D υπογραφές RADAR & υπολογισμός του <i>fractal signature</i> – $D(\delta)$ . 143	
4.5	Υπολογισμός ‘ <i>fractal signature</i> ’ σε καταγραφές του πειράματος NEMO2014 ...	147
4.5.1	Calculation-Processing tool για MFS ( <i>Mean Fractal Signature</i> ).....	148
4.5.2	Αποτελέσματα μορφοκλασματικής ανάλυσης με την μέθοδο MFS.....	149
4.6	Αξιολόγηση αποτελεσμάτων .....	151
4.7	Ανακεφαλαίωση και Συμπεράσματα .....	155
4.8	Βιβλιογραφία.....	157

---

### Περίληψη

Στο παρόν κεφάλαιο συνεχίζω την έρευνα στο πρόβλημα του προσδιορισμού της τραχύτητας μιας επιφάνειας μέσω μορφοκλασματικής ανάλυσης των οπισθοσκεδαζόμενων ΗΜ κυμάτων, χρησιμοποιώντας τις ίδιες καταγραφές SAR ‘*raw data*’, με αυτές που χρησιμοποίησα και στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο της παρούσας διατριβής. Οι καταγραφές αυτές συλλέχθηκαν από ένα RADAR τύπου PicoSAR X-band του Νορβηγικού Ινστιτούτου Άμυνας (FFI) κατά τη διάρκεια του πειράματος NEMO2014 το οποίο διεξήχθη σε μια θαλάσσια περιοχή του κόλπου του Τάραντα στην νότια Ιταλία. Λεπτομέρειες για το πείραμα NEMO2014 δίνονται στο παράρτημα Δ.

Στο παρόν 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο βελτιώνω την μέθοδο της τεχνικής ‘*blanket*’ [2],[9],[10] που ανέπτυξα στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο επεκτείνοντας την μορφοκλασματική ανάλυση επί των οπισθοσκεδαζόμενων ΗΜ κυμάτων (SAR *raw data*) στις δύο διαστάσεις [1],[4],[11] με σκοπό την βελτιστοποίηση της ακρίβειας στον προσδιορισμό της τραχύτητας της θαλάσσιας επιφάνειας, ‘*sea state*’ [26]-[27].

Στην ενότητα 4.1 παρουσιάζω την έννοια της διοδιάστατης υπογραφής RADAR και προτείνω ένα τρόπο εφαρμογής της τεχνικής *'blanket'* [1] σε δύο διαστάσεις [4],[11].

Στην ενότητα 4.2 δίνω εποπτικά, σε μορφή διαγράμματος ροής τα στάδια προ-επεξεργασίας και επεξεργασίας που θα χρησιμοποιήσω προκειμένου να προσδιορίσω την θαλάσσια κυμάτωση *'sea state'* μέσω διοδιάστατης μορφοκλασματικής ανάλυσης των SAR *'raw data'*.

Στην ενότητα 4.3 περιγράφω εν συντομία τα στάδια προ-επεξεργασίας που εφαρμόζω επι των 3D SAR *raw data* καταγραφών έτσι ώστε ο αλγόριθμος μορφοκλασματικής ανάλυσης να εφαρμοστεί σε κατά το δυνατό βελτιστοποιημένα δεδομένα. Τα στάδια προ-επεξεργασίας που εφαρμόζω συνοψίζονται στον εντοπισμό και απόρριψη ελλιπών και προβληματικών καταγραφών, στην αποθορυβοποίηση των καταγραφών με την εφαρμογή τεχνικών *'signal averaging'* [23]-[25] και *'Inter Quartile Range'* [30]-[32],[34],[36] και τέλος στην κανονικοποίηση των τιμών με βάση το *'dynamic range'* της εξόδου του δέκτη του RADAR.

Στην ενότητα 4.4 παρουσιάζω αναλυτικά την τεχνική *'blanket'* μέσα από την θεωρία του δ-παράλληλου σώματος και το πώς αυτή εφαρμόζεται επί των 3D SAR *raw data* προκειμένου να υπολογιστεί το *'fractal area'*  $A(\delta)$  [1],[2] που δημιουργεί η μεταβολή των εντάσεων των καταγραφών των οπισθοσκεδαζόμενων HM κυμάτων ανάλογα με την τραχύτητα του σκεδαστή. Εν συνεχεία συνδέω το εμβαδό του *'fractal area'*  $A(\delta)$  με την τιμή της μορφοκλασματικής διάστασης - *'fractal dimension'*  $D(\delta)$  [12]-[15] και τέλος δίνω την σχέση που παράγει την μορφοκλασματική υπογραφή *'fractal signature'* ως γράφημα της τιμής του συντελεστή *'fractal dimension'*  $D(\delta)$  συναρτήσει της τιμής  $\delta$  - *'resolution'* της μέτρησης.

Στην ενότητα 4.5 εφαρμόζω συνδυασμό αλγόριθμων προ-επεξεργασίας και αλγόριθμων επεξεργασίας για να υπολογίσω τις μορφοκλασματικές υπογραφές σε δείγματα SAR *'raw data'* από όλες τις διαθέσιμες γωνίες καταγραφής *'grazing angles'* [16]-[19], ήτοι υπό γωνία  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $40^\circ$  καθώς και  $50^\circ$  και παρουσιάζω τα γραφήματα με τα τελικά αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου.

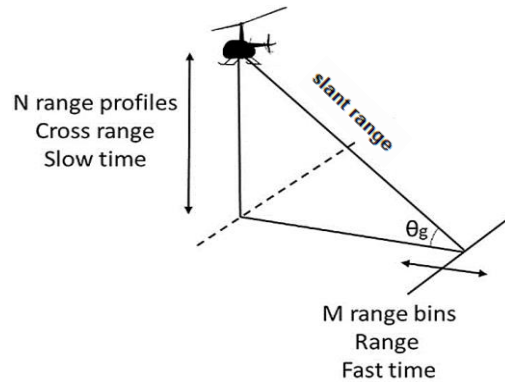
Στην ενότητα 4.6 προχωρώ σε μια αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και σχολιασμό της 2D ανάλυσης.

Το κεφάλαιο κλείνει με τα συμπεράσματα και την παράθεση της σχετικής βιβλιογραφίας.

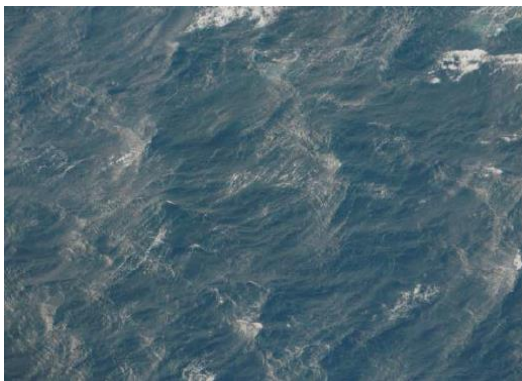
## 4.1 Εισαγωγή στην έννοια της δισδιάστατης υπογραφής RADAR.

Στο παρόν κεφάλαιο συνεχίζω την έρευνα στο πρόβλημα του προσδιορισμού της τραχύτητας μιας επιφάνειας μέσω της μορφοκλασματικής ανάλυσης των οπισθοσκεδαζόμενων ΗΜ κυμάτων, χρησιμοποιώντας τις ίδιες καταγραφές RADAR με αυτές που χρησιμοποίησα και στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο της παρούσας διατριβής, ήτοι τις καταγραφές που συλλέχθηκαν από ένα RADAR τύπου PicoSAR X-band του Νορβηγικού Ινστιτούτου Άμυνας 'FFI' κατά τη διάρκεια του πειράματος NEMO2014 το οποίο διεξήχθη σε μια θαλάσσια περιοχή του κόλπου του Τάραντα στην νότια Ιταλία. Λεπτομέρειες για το πείραμα NEMO2014 δίνονται στο παράρτημα Δ.

Εδώ εν συντομία θα αναφέρω ότι κατά την διάρκεια του πειράματος ένα ελικόπτερο έφερε ένα RADAR τύπου PicoSAR X-band το οποίο κατέγραφε με διαδοχικές ριπές ΗΜ κυμάτων την θαλάσσια επιφάνεια ενόσω ανέβαινε κατακόρυφα όπως φαίνεται και στην εικόνα 4-1, με το εύρος των γωνιών θέασης  $\theta_g$  να μεταβάλετε με πολύ αργό ρυθμό από τις 3<sup>ο</sup> έως τις 55<sup>ο</sup> μοίρες. Το RADAR είχε ρυθμιστεί σε εύρος παλμού 12 $\mu$ s, εύρος ζώνης 150MHz, PRF 1KHz [18] και στόχευε την θάλασσα κρατώντας σταθερή, στα 1850m, την απόσταση 'slant range' [19] από την θαλάσσια επιφάνεια. Την πρώτη ημέρα, βλ. εικόνα 4-3, η επιφάνεια της θάλασσας ήταν ταραγμένη θάλασσα, 'sea state' 4-5 ενώ την δεύτερη ημέρα η επιφάνεια της θάλασσας ήταν ήρεμη έως ρυτιδωμένη 'sea state' 1, βλ. εικόνα 4-2.



Εικόνα 4-3. Κατακόρυφη κίνηση ελικοπτέρου εκπέμποντας ΗΜ ριπές προς τη θάλασσα με μεταβαλλόμενη γωνία 'grazing angle'  $\theta_g$



Εικόνα 4-1. Φωτογραφία της θάλασσας από την 1<sup>η</sup> ημέρα μετρήσεων, 23/9

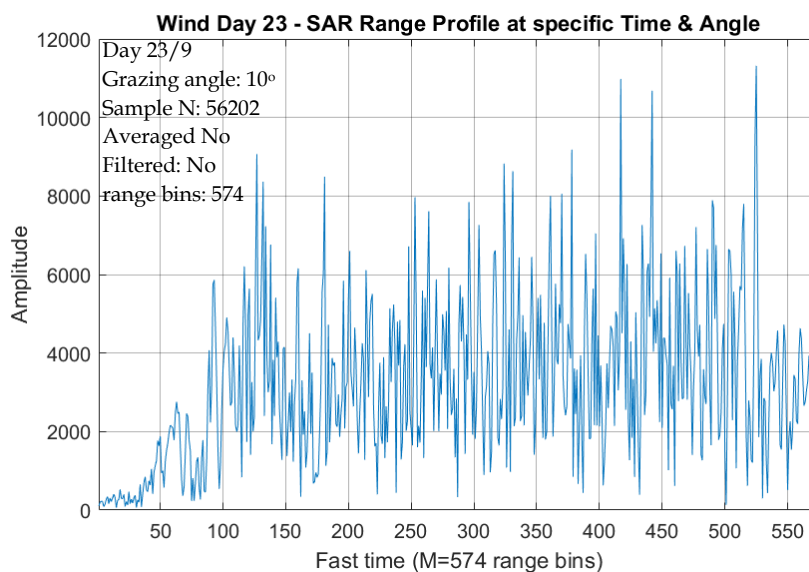


Εικόνα 4-2. Φωτογραφία της θάλασσας από την 2<sup>η</sup> ημέρα μετρήσεων, 24/9

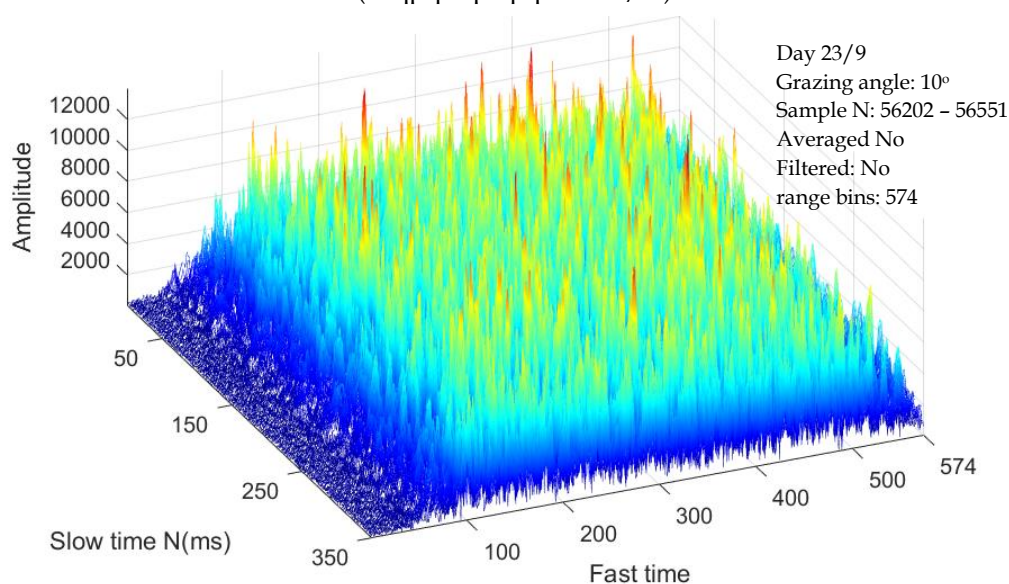
Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο είχα χρησιμοποιήσει μορφοκλασματική ανάλυση εφαρμόζοντας την τεχνική 'blanket' [2] σε μονοδιάστατες υπογραφές RADAR, δηλαδή σε μονοδιάστατα διανύσματα καταγραφών των οποίων οι τιμές έντασης των οπισθοσκεδαζόμενων ΗΜ είναι καταγεγραμμένες ως προς την διάσταση του γρήγορου χρόνου 'fast time'[20]-[22], μήκους  $M$ , βλ. εικόνα 4-4. Στο παρόν 4<sup>ο</sup>

κεφάλαιο βελτιώνω την προτεινόμενη μέθοδο εφαρμόζοντας την τεχνική ‘blanket’ σε διδιάστατες υπογραφές[11] δηλαδή σε ένα διδιάστατο διάνυσμα όπου οι τιμές της έντασης των ΗΜ κυμάτων είναι καταγεγραμμένες ως προς δύο διαστάσεις. Η μία διάσταση παραμένει όπως πριν η διάσταση του γρήγορου χρόνου ‘fast time’, μήκους  $M$  (βλ. εικόνα 4.5) και προσθέτω ακόμα μία διάσταση, την διάσταση του αργού χρόνου ‘slow time’ μήκους  $N$ , δημιουργώντας έτσι μια επιφάνεια μετρήσεων  $M \times N$  όπου η τιμή της έντασης των ΗΜ κυμάτων καταγράφεται στον άξονα  $z$  δημιουργώντας έτσι το τρισδιάστατο γράφημα μετρήσεων, βλ. εικόνα 4.5.

Το δείγμα μετρήσεων της εικόνας 4-5 έχει δημιουργηθεί από  $N=350$  διαδοχικά μονοδιάστατα διανύσματα όπως αυτό της εικόνας 4-4 τα οποία έχουν ληφθεί εντός συνολικού χρονικού διαστήματος  $350ms$ .

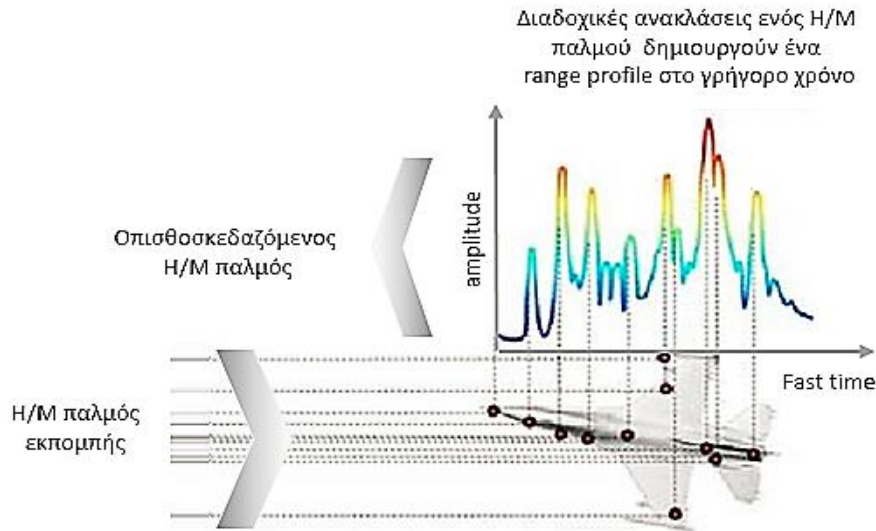


Εικόνα 4-4. Μονοδιάστατο δείγμα υπογραφής,  $M=574$ , από τον δέκτη του RADAR για παραγμένη θάλασσα υπό γωνία  $\theta_g=10^\circ$  (1<sup>η</sup> ημέρα μετρήσεων 23/09) (1<sup>η</sup> ημέρα μετρήσεων 23/09)



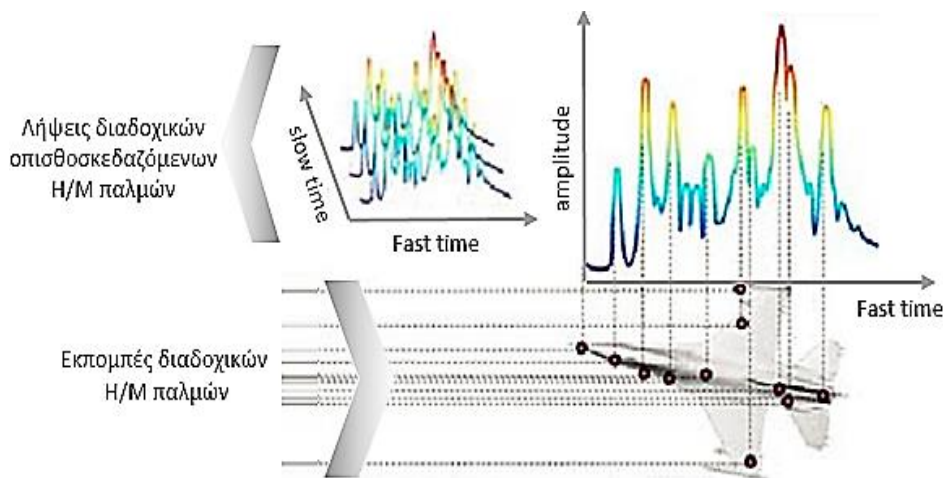
Εικόνα 4-5. Διδιάστατο δείγμα υπογραφής  $M \times N=350 \times 574$  από τον δέκτη του RADAR για παραγμένη θάλασσα υπό γωνίες  $9.8^\circ < \theta_g = 10.4^\circ$  (1<sup>η</sup> ημέρα μετρήσεων 23/09)

Για να γίνει πρακτικά αντιληπτό στον αναγνώστη που δεν έχει μεγάλη εμπειρία ως προς την λειτουργία των RADAR, στην εικόνα 4-6 παρουσιάζω σχηματικά το πώς δημιουργείται μια μονοδιάστατη υπογραφή RADAR όπως αυτή του διαγράμματος της εικόνας 4-4. Οι διαδοχικές ανακλάσεις του Η/Μ παλμού πάνω σε ένα σκεδαστή βλ. παράδειγμα αεροσκάφους εικόνας 4-6, καταγράφονται από τον δέκτη του RADAR ως προς τον γρήγορο χρόνο *'nano seconds'*, διάσταση  $M$  όπου για το RADAR του πειράματος είναι  $M=574$ .



Εικόνα 4-6. Σχηματισμός μιας μονοδιάστατης υπογραφής *'range profile'*

Μια δισδιάστατη υπογραφή RADAR ή ένα *'two-dimensional range profile'* απαρτίζεται από διαδοχικές λήψεις μονοδιάστατων υπογραφών, όπως φαίνεται παραστατικά στην εικόνα 4-7. Η χρονική απόσταση μεταξύ διαδοχικών λήψεων καθορίζεται από το *PRF 'pulse repetition frequency'* [16]-[22] του RADAR που στο συγκεκριμένο πείραμα ήταν ρυθμισμένο στο 1KHz. Έτσι με τις διαδοχικές λήψεις, που λαμβάνουν χώρα ανά *ms*, δημιουργώ την 2<sup>η</sup> διάσταση του αργού χρόνου *'slow time'* στην δέσμη των μετρήσεων. Π.χ. η δέσμη μετρήσεων στην εικόνα 4-5 αποτελείται από 350 διαδοχικά *'range profiles'* [18]-[21].

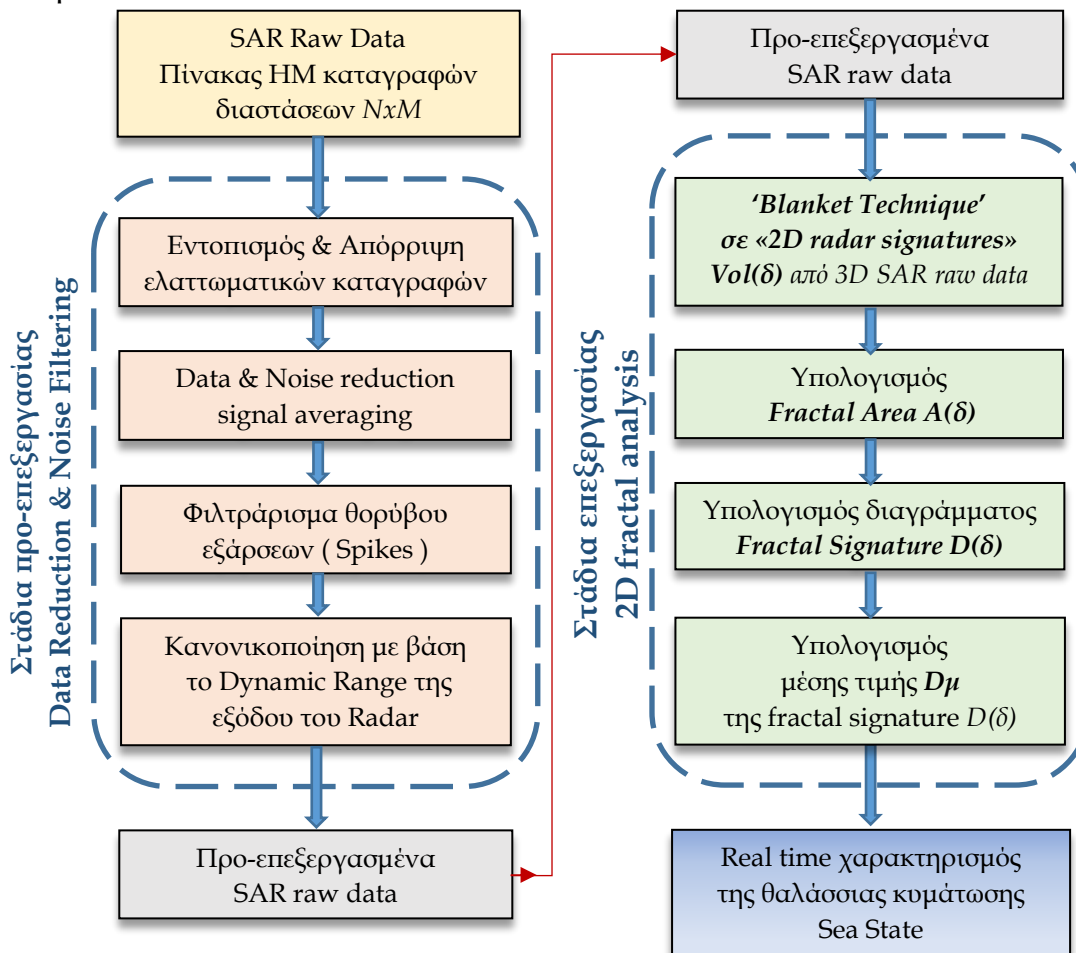


Εικόνα 4-7. Σχηματισμός μιας δισδιάστατης υπογραφής *'two dimensional range profile'*

## 4.2 Αλγόριθμος προσδιορισμού κυμάτωσης με 2D ανάλυση υπογραφών (MFS/Dμ)

Προκειμένου να βελτιστοποιήσω το τελικό αποτέλεσμα θα χρησιμοποιήσω δύο επίπεδα επεξεργασίας επί των καταγραφών του RADAR, βλ. εικόνα 4-8.

Το πρώτο επίπεδο το ονομάζω προ-επεξεργασία των μετρήσεων. Δεδομένου ότι η διεξαγωγή του πειράματος έλαβε χώρα σε πραγματικές συνθήκες τα δεδομένα καταγραφής δεν είναι 'ιδανικά'. Αντίστοιχο επίπεδο προ-επεξεργασίας λαμβάνει χώρα και στις περιπτώσεις μετασχηματισμού των SAR 'raw data' σε SAR 'image' όπου εκεί η προ-επεξεργασία έχει σκοπό την βελτίωση της τελικής εικόνας πριν αυτή οδηγηθεί στα στάδια επεξεργασίας εικόνας 'image processing' [7],[8],[34],[36]. Προβλήματα όπως μικρό διαλείψεις στις καταγραφές του RADAR, θόρυβος διαφόρων πηγών προέλευσης που δημιουργεί τυχαίες διακυμάνσεις και στιγμιαίες εξάρσεις όπως 'spikes', 'speckle noise[34]' κ.ά. στο σήμα λήψης του δέκτη του RADAR αντιμετωπίζονται σε αυτό το πρώτο στάδιο της προ-επεξεργασίας των δεδομένων.



Εικόνα 4-8. Διάγραμμα ροής των αλγορίθμων προ-επεξεργασίας και επεξεργασίας για τον προσδιορισμό της θαλάσσιας κυμάτωσης μέσω 2D ανάλυσης των SAR raw data

Το δεύτερο επίπεδο, στάδιο επεξεργασίας, αφορά τους διαδοχικούς αλγόριθμους μορφοκλασματικής ανάλυσης που χρησιμοποιώ προκειμένου να υπολογίσω το

'fractal dimension'  $D$  [15],[18], την τιμή δηλαδή της μορφοκλασματικής διάστασης της επιφάνειας σκέδασης μέσω της οποίας προσδιορίζεται ευθέως η τραχύτητα της επιφάνειας σκέδασης, εν προκειμένω ο βαθμός κυμάτωσης της θαλάσσιας κυμάτωσης 'sea state'. Στο διάγραμμα ροής της εικόνα 4-8 παρουσιάζω εποπτικά όλα τα επιμέρους στάδια που χρησιμοποιώ και με την διαδοχική σειρά που τα εφαρμόζω. Το κάθε στάδιο το αναλύω στις ξεχωριστές ενότητες που ακολουθούν.

### 4.3 Στάδια Προεπεξεργασίας των 3D - SAR Raw Data

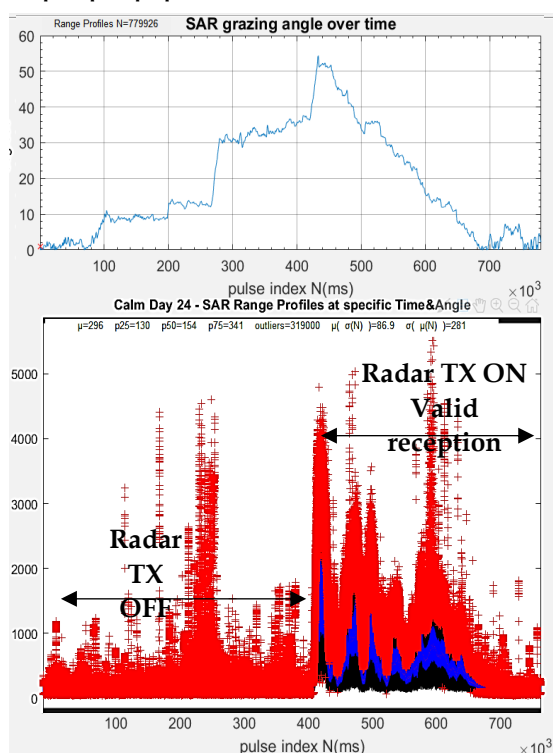
Τα στάδια προ-επεξεργασίας που χρησιμοποιώ είναι τέσσερα. Το πρώτο στάδιο είναι το πιο γενικό και αφορά τον εντοπισμό και απόρριψη των ελλαττωματικών καταγραφών. Το δεύτερο στάδιο αφορά την αύξηση του σηματοθορυβικού λόγου μέσω προσεκτικής εφαρμογής της τεχνικής 'averaging'[23]-[25]. Το τρίτο στάδιο αφορά τον εντοπισμό θορύβου τύπου εξάρσεων [29]-[32] μεταξύ των μετρήσεων, χρησιμοποιώντας στατιστικά φίλτρα[31]. Στο τρίτο στάδιο, οι τελικές τιμές των μετρήσεων μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας αποθορυβοποίησης, κανονικοποιούνται με μέτρο την μέγιστη τιμή που μπορεί να δώσει ο αναλογοποιητικός μετατροπέας της εξόδου του δέκτη RADAR έτσι ώστε να είναι εφικτή η μετέπειτα σύγκριση δειγμάτων μετρήσεων από διαφορετικούς χρόνους και θέσης λήψης. Μετά και την ολοκλήρωση της κανονικοποίησης οι μετρήσεις είναι έτοιμες να δοθούν στους αλγόριθμους επεξεργασίας έτσι ώστε να γίνει με επιτυχία ο προσδιορισμός της τραχύτητας της επιφάνειας, εν προκειμένω να προσδιοριστεί ο βαθμός της θαλάσσιας κυμάτωσης 'sea state'. Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζω συνοπτικά τα στάδια προ-επεξεργασίας των SAR raw data. Περισσότερες λεπτομέρειες για το κάθε στάδιο προ-εργασίας καθώς και για τους σχετικούς αλγόριθμους που εφαρμόζω με την βοήθεια του λογισμικού 'SARrawdataAnalyzer' παρουσιάζω στο παράρτημα Γ.4.

#### 4.3.1 Απόρριψη μεταβατικών & ελλαττωματικών καταγραφών.

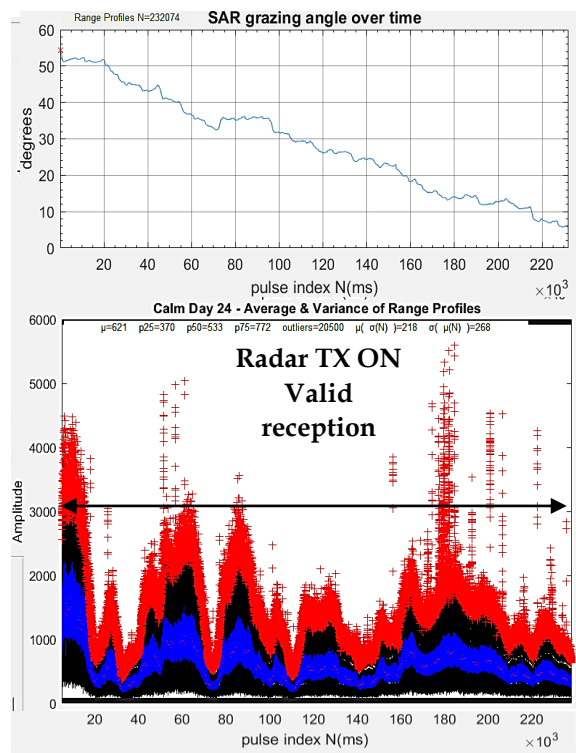
Κατά την διάρκεια των μετρήσεων ο χειριστής του ελικοπτέρου κρατούσε σταθερό το αζιμούθιο του ελικοπτέρου μεταβάλλοντας κατακόρυφα την θέση του ελικοπτέρου στοχεύοντας έτσι με μεταβαλλόμενες γωνίες θέασης την θαλάσσια επιφάνεια. Στα επάνω αριστερά και δεξιά διαγράμματα της εικόνας 4-9 'SAR grazing angle over time' βλέπουμε την καταγραφή των γωνιών παρατήρησης της θαλάσσιας επιφάνειας ως προς τον χρόνο για την 1<sup>η</sup> ημέρα και 2<sup>η</sup> ημέρα του πειράματος NEMO2014. Στο κάτω μέρος της εικόνας της εικόνας 4-9 βλέπουμε με μορφή θηκογράμματος 'boxplot'[30] τις αντίστοιχες καταγραφές (ένταση ΗΜ κύματος ως προς τον αντίστοιχο χρόνο). Αναλυτικές πληροφορίες σχετικά με τα θηκογράμματα 'boxplot' και τα χαρακτηριστικά σημεία τους  $Q1$ ,  $Q2$ ,  $Q3$  και  $IQR$  παραθέτω στο παράρτημα Γ.3.3.4

Με την βοήθεια της στατιστικής ανάλυσης 'boxplot' των μετρήσεων[30],[31] μπορεί να εντοπιστούν και να ξεχωρίσουν οι λήψεις οπισθοσκεδαζόμενων ΗΜ που οφείλονται σε εκπομπές του RADAR από τις λήψεις ΗΜ κυμάτων που οφείλονται σε τυχαίο θόρυβο. Ως παράδειγμα εφαρμογής παρουσιάζω τις μετρήσεις της 2<sup>ης</sup>

ημέρας 24/9. Από την στατιστική ανάλυση προκύπτει ότι η εκπομπή του RADAR ήταν ανοικτή κατά τον χρόνο καθόδου (μείωση γωνίας θέασης) του ελικοπτέρου, βλ. εικόνα 4-9 'Radar TX ON'. Με μπλε χρώμα στο διάγραμμα 'boxplot' σημειώνεται η μέση τιμή  $Q2$  των μετρήσεων καθώς και το σώμα  $IQR$  [31] των μετρήσεων έντασης των ΗΜ κυμάτων που λαμβάνει ο δέκτης μετά την εκπομπή ενός 'radar hit' τύπου 'burst' [18]. Οι μετρήσεις που καταγράφονται με κόκκινο χρώμα θεωρούνται 'outliers' δηλαδή μετρήσεις που δεν μπορούν να συσχετιστούν στατιστικά με το σώμα των μετρήσεων. Στις περιοχές που έχουμε μόνο κόκκινο χρώμα σημαίνει ότι η λήψη οφείλεται αποκλειστικά σε τυχαία θόρυβο και όχι σε οπισθοσκεδαζόμενο ΗΜ κύμα μετά από εκπομπή αφού δεν μπορεί να συγκροτηθεί στατιστικά κάποιο σώμα μετρήσεων.



Εικόνα 4-9. Boxplot παρουσίαση SAR raw data, του συνόλου των καταγραφών, έγκυρες και μη της 2ης ημέρας 24/09



Εικόνα 4-10. Boxplot παρουσίαση SAR raw data, εντοπισμός και εστίαση 'zoom' στις έγκυρες καταγραφές της 2ης ημέρας 24/09

Μετά τον εντοπισμό και την αφαίρεση των τμημάτων των καταγραφών κατά τις οποίες η εκπομπή είναι κλειστή, βλ. εικόνα 4-9 γωνίες από  $0$  έως  $55^\circ$  κατά το χρόνο ανόδου του ελικοπτέρου, κρατάμε προς επεξεργασία τις καταγραφές που ανήκουν στην έγκυρη περιοχή μετρήσεων, βλ. εικόνα 4-10 γωνίες από  $55^\circ$  έως  $5^\circ$  (χρόνος καθόδου του ελικοπτέρου)

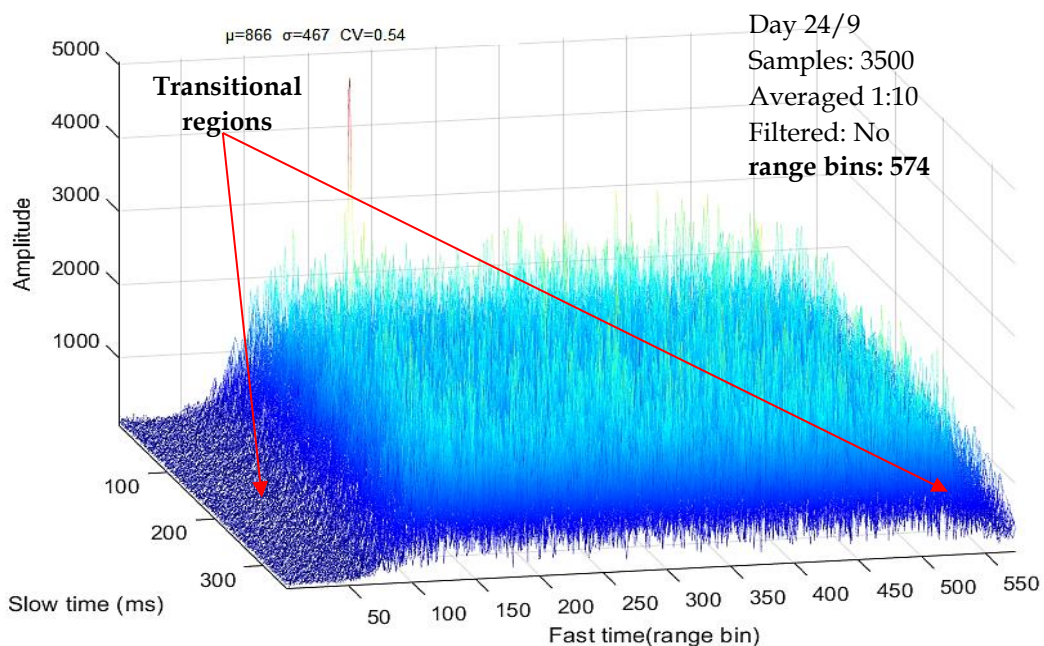
Στην εικόνα 4-10 έχω κρατήσει και εστίασει τις έγκυρες περιοχές των καταγραφών που θα επεξεργαστώ στην συνέχεια. Από την περιοχή των έγκυρων καταγραφών του RADAR αναζητώ προς αφαίρεση και όλες τις μεμονωμένες καταγραφές που είναι ελαττωματικές. Ελαττωματικές θεωρούνται οι καταγραφές του υπολογιστή του δέκτη του RADAR οι οποίες λόγω αστοχιών λείπουν από αυτές



σημαντικές πληροφορίες όπως η τιμή της γωνίας κατά την στιγμή της καταγραφής, η τιμή έντασης του λαμβανόμενου ΗΜ κύματος κ.ο.κ.

Για περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τον τρόπο εντοπισμού της θέσης προβληματικών μετρήσεων, διαλείψεων κλπ. βλ. παράρτημα Γ.3.5. Εν συνεχεία, στα πλαίσια της προ-επεξεργασίας του σήματος, προχωρώ σε μια επιλεκτική απόρριψη ενός αριθμού καταγραφών από την αρχή και το τέλος των *'bursts'* οι οποίες εμφανίζουν μια μεταβατική συμπεριφορά ως προς την ένταση τους σε σχέση με το σώμα των υπόλοιπων μετρήσεων.

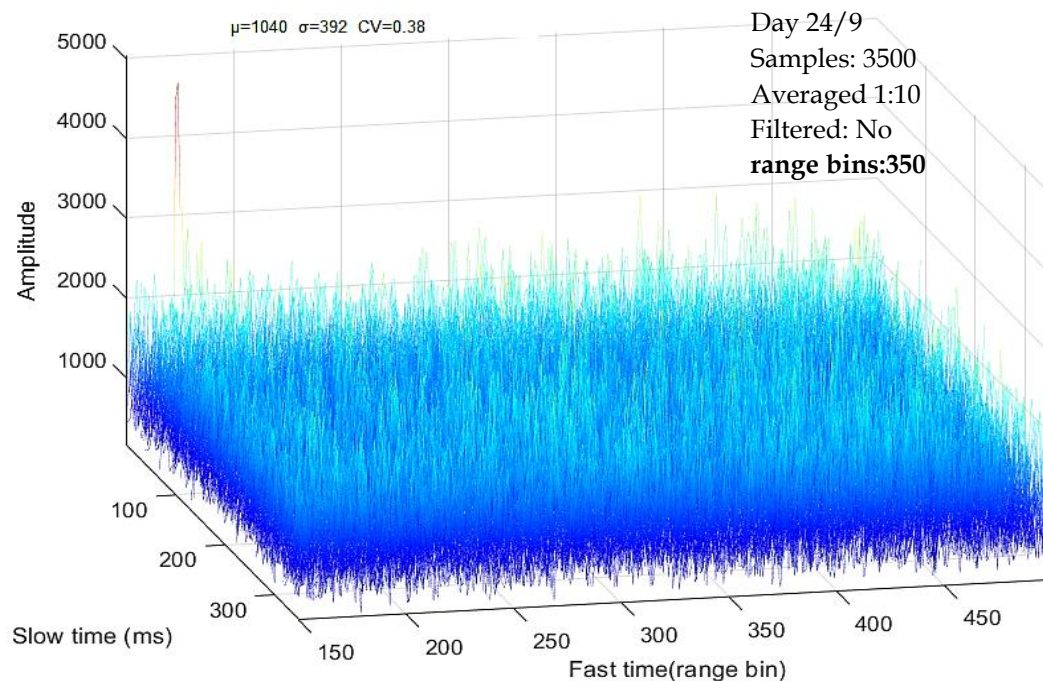
Όπως ενδεικτικά φαίνεται και σε ένα δείγμα μετρήσεων στην εικόνα 4-11, οι μετρήσεις έντασης για τα πρώτα 100-150 *'range gate'* [21] εμφανίζουν μια μεταβατική συμπεριφορά και παρόμοιο φαινόμενο συμβαίνει και στα τελευταία 74 *'range gate'*, περισσότερες λεπτομέρειες στο παράρτημα Γ.5.



Εικόνα 4-11. Τρισδιάστατη παρουσίαση δέσμης ριπών με σημείωση των μεταβατικών *'range bin'*

Μετά από σχετική έρευνα διαπίστωνα ότι το μεταβατικό φαινόμενο εμφανίζεται με συνέπεια κατά την μέτρηση των οπισθοσκεδαζόμενων ΗΜ κατά την αρχή και λήξη κάθε ριπής δεδομένου ότι η μορφή του οφείλεται και σχετίζεται άμεσα με την κυματομορφή εκπομπής, η δε παραμονή των μετρήσεων αυτών ή η απόρριψή τους δεν επηρεάζει την διαχωριστική ικανότητα των τεχνικών *'fractal'* για τον υπολογισμό της θαλάσσιας κυμάτωσης. Η απόρριψη όμως των σχετικών μετρήσεων, βλ. εικόνα 4-12 όπου  $M=350$  έναντι εικόνας 4-11 'όπου  $M=574$ , δίνει το πλεονέκτημα της μειώσεως του όγκου των δεδομένων *'data reduction'* που απαιτείται να οδηγηθεί προς επεξεργασία μειώνοντας έτσι τις απαιτήσεις σε μνήμη, σε υπολογιστική ισχύ και σε ενέργεια που χρειάζεται να καταναλωθεί. Με την αφαίρεση των σχετικών μετρήσεων βελτιώνεται έτι περαιτέρω η απόδοση και η ταχύτητα υπολογισμού της θαλάσσιας κυμάτωσης με την προτεινόμενη μέθοδο. Από τον συνολικό αριθμό των 574 *'range gate'*, βλ. παράρτημα Δ.2.2, η απόρριψη των 150 πρώτων και των 74 τελευταίων μετρήσεων μπορούν να αποδώσουν μια

συνολική μείωση του όγκου της τάξης του 350/574 δηλαδή μείωση μετρήσεων της τάξης του 40% ανά 'radar hit'.

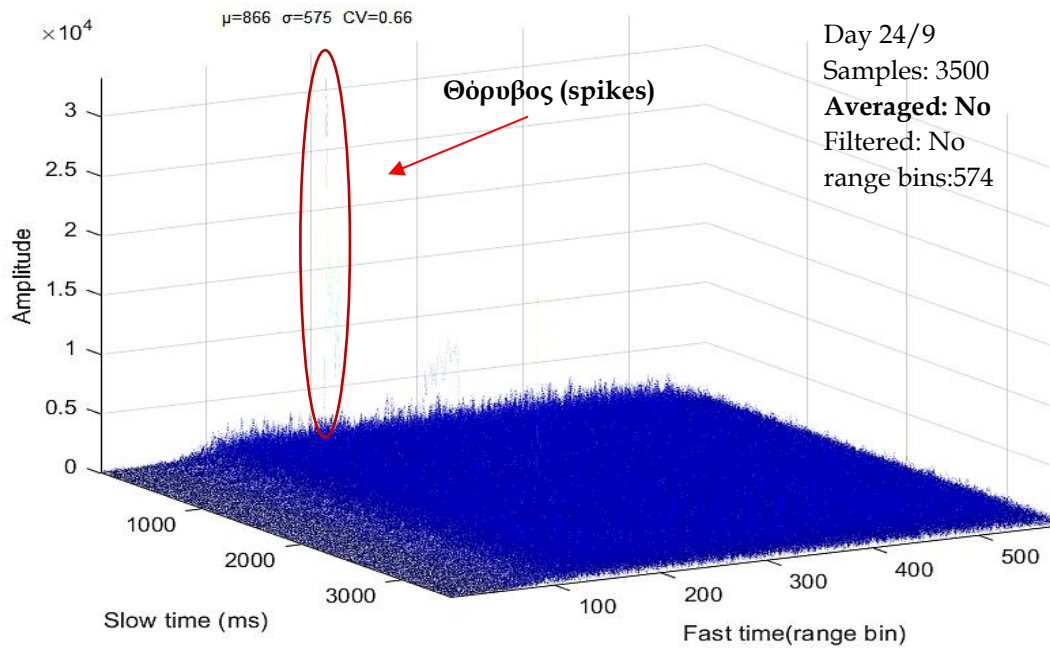


Εικόνα 4-12 Τρισδιάστατη παρουσίαση δέσμης ριπών μετά την αφαίρεση μεταβατικών περιοχών που δεν επηρεάζουν τους υπολογισμούς της μορφοκλασματικής ανάλυσης

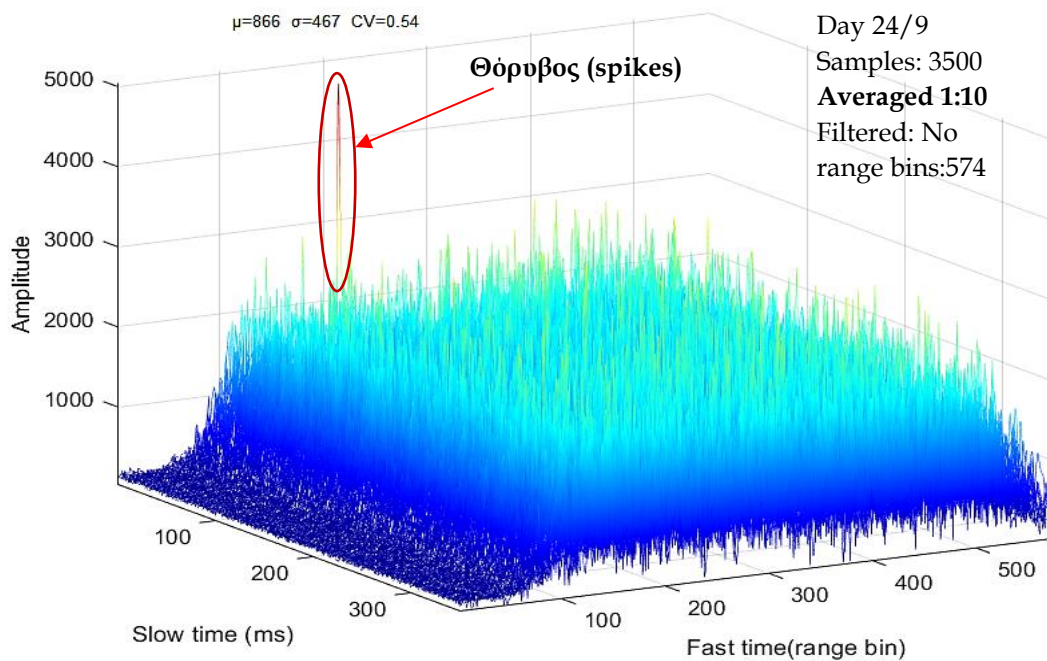
#### 4.3.2 Data & Noise reduction με χρήση τεχνικής 'signal averaging'

Η τεχνική συμψηφισμού, γνωστή ως 'signal averaging', είναι μια κλασσική τεχνική επεξεργασίας σήματος [23]-[25] που μπορεί να εφαρμοστεί στο πεδίο του χρόνου 'time domain' και η οποία βελτιώνει τον σηματοθορυβικό λόγο του σήματος λαμβάνοντας επαναλαμβανόμενες μετρήσεις και υπολογίζοντας τον μέσο όρο των μετρήσεων. Μετά από  $N$  επαναλαμβανόμενες μετρήσεις ο σηματοθορυβικός λόγος βελτιώνεται κατά ένα παράγοντα  $\sqrt{N}$  [23] όπως αποδεικνύω και στην περίπτωση της παραγράφου 2.6.4. Συγκεκριμένα στο PicoSAR RADAR που χρησιμοποιήθηκε για τις καταγραφές του πειράματος NEMO2014 διαπιστώθηκε ότι η συντριπτική πλειοψηφία των καταγραφών των 'range profile' ελήφθησαν με 10 'radar hits' ανά γωνία, δηλαδή 10 μετρήσεις με ακριβώς την ίδια γωνία θέασης, βλ. παράρτημα Γ.5.2. Με βάση το δεδομένο των 10 'radar hits' ανά γωνία θέασης ο βέλτιστος αριθμός  $N$  συμψηφισμού 'averaging' είναι ο μέσος όρος μεταξύ αυτών των 10 διαδοχικών λήψεων οι οποίες έχουν καταγραφεί με ακριβώς την ίδια γωνία θέασης 'exact same angle'. Με την τεχνική βελτιώνεται ο σηματοθορυβικός λόγος κατά περίπου 3 φορές και ταυτόχρονα μειώνεται και ο προς επεξεργασία όγκος των δεδομένων στο 1 προς 10 δια αυτής της μεθόδου αντιπροσώπευσης.

Συγκρίνοντας τις δύο εικόνες 4-13 και 4-14, οποίες προέρχονται από το ίδιο ακριβώς δείγμα πριν και μετά το 'averaging', παρατηρούμε ότι οι μέγιστες τιμές που ήταν στα  $3 \times 10^4$  έχουν μειωθεί στο  $5 \times 10^3$  λόγω σημαντικής καταστολής των τυχαίων θορύβων επιτρέποντας περισσότερες λεπτομέρειες (αύξηση SNR) να αναδειχθούν στην εικόνα. Ειδικά αυτό ισχύει περισσότερο για μετρήσεις που εμφανίζουν μια χαμηλή οπισθοσκεδαζόμενη ένταση ΗΜ κύματος και στις οποίες η κάλυψη «θάψιμο» του ωφέλιμου σήματος μέσα στον θόρυβο είναι εντονότερη. Με την τεχνική 'averaging' οι θόρυβοι μειώνονται παρόλα αυτά τα 'spikes', όπως σημειώνω στις παρακάτω εικόνες παρά το 'averaging' παραμένουν.

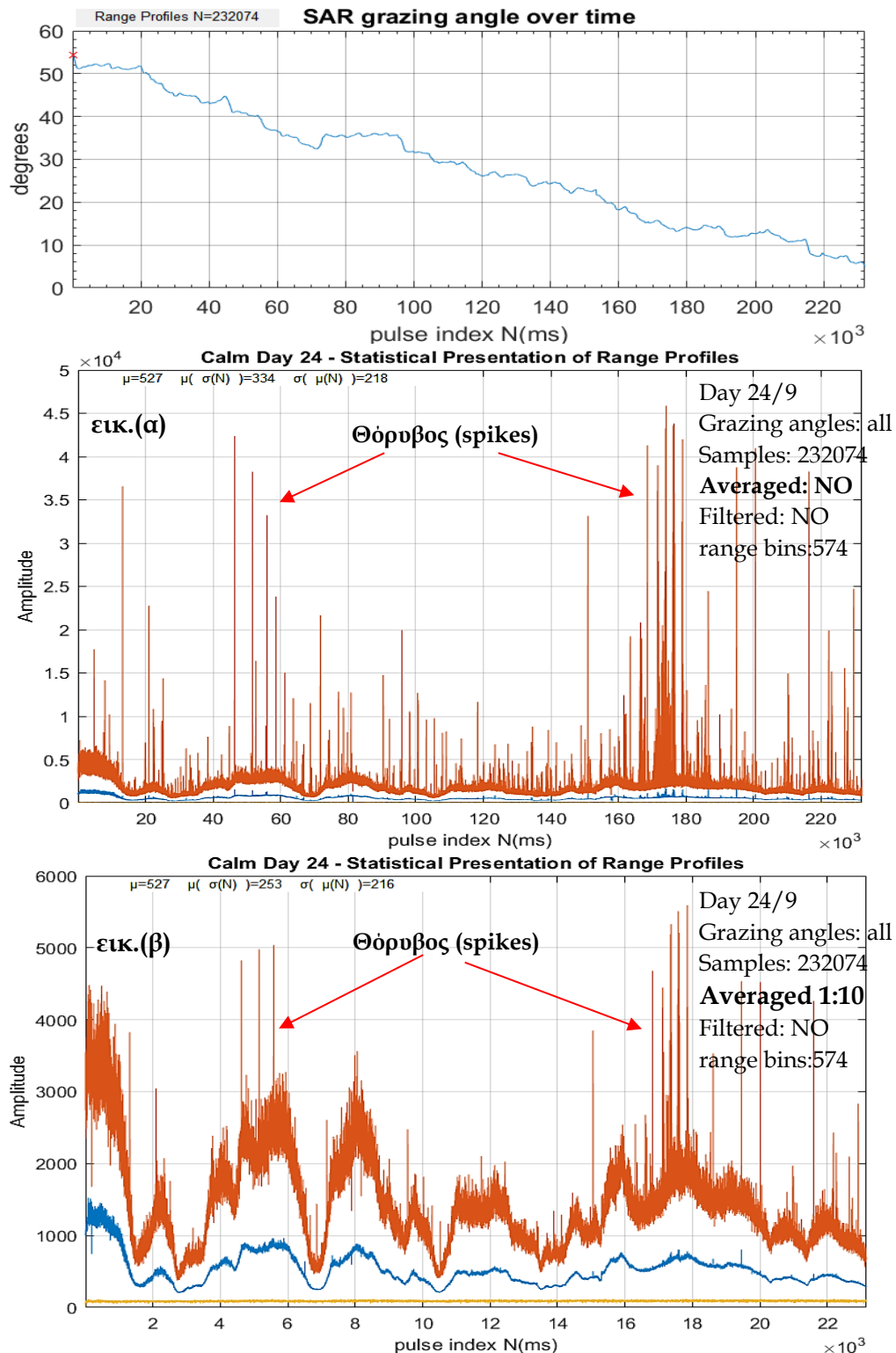


Εικόνα 4-14, Δείγμα τρισδιάστατης παρουσίασης δέσμης 3500 ριπών πριν το averaging



Εικόνα 4-13 Δείγμα τρισδιάστατης παρουσίασης δέσμης 3500 ριπών μετά από averaging ανά 10 ριπές

Στο διάγραμμα της εικόνας 4-15 (α) αποτυπώνω μια στατιστική παρουσίαση για το σύνολο μετρήσεων της 2<sup>η</sup> ημέρας, όπου με χρώμα μπλε σημειώνεται η μέση τιμή των μετρήσεων των οπισθοσκεδαζόμενων ΗΜ εντάσεων εντός ενός εκάστου 'range profile' και με πορτοκαλί η μέγιστη τιμή ΗΜ εντάσεως που παρατηρήθηκε επίσης εντός ενός εκάστου 'range profile' για κάθε χρονική στιγμή της πτήσης του ελικοπτέρου.

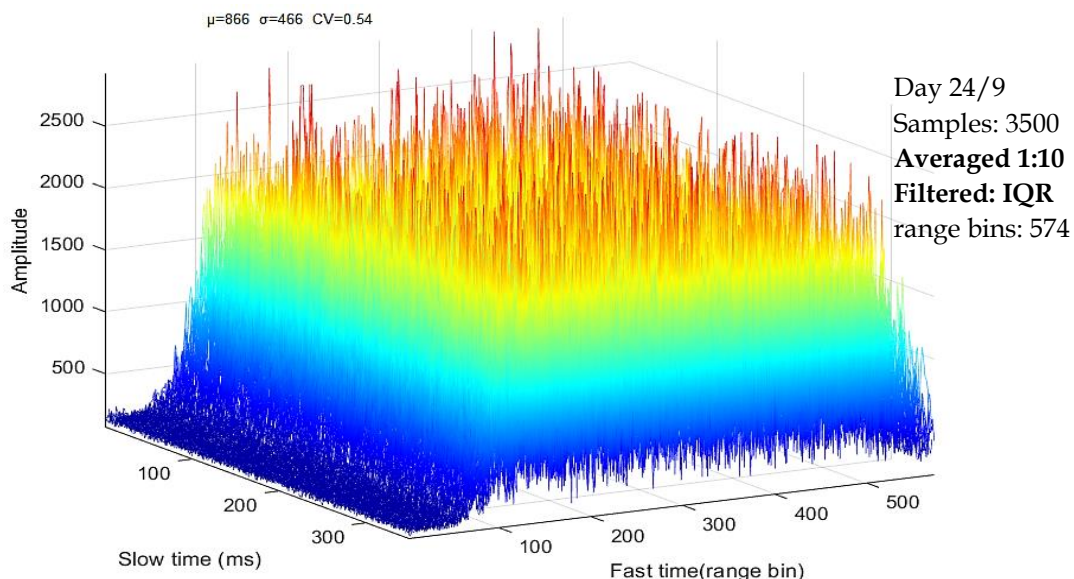


Εικόνα 4-15, Στατιστική παρουσίαση Μέσου όρου και MaxMin του συνόλου των καταγραφών

Μετά την εφαρμογή του αλγόριθμου *'averaging'* παρατηρούμε, βλ. εικόνα 4-15(β), ότι το σώμα του σήματος (μπλε χρώμα) αναδεικνύεται καλύτερα σε σχέση με τον θόρυβο (πορτοκαλί) πλην όμως ένας εξαιρετικά μεγάλος αριθμός εξάρσεων *'spikes'* παραμένουν.

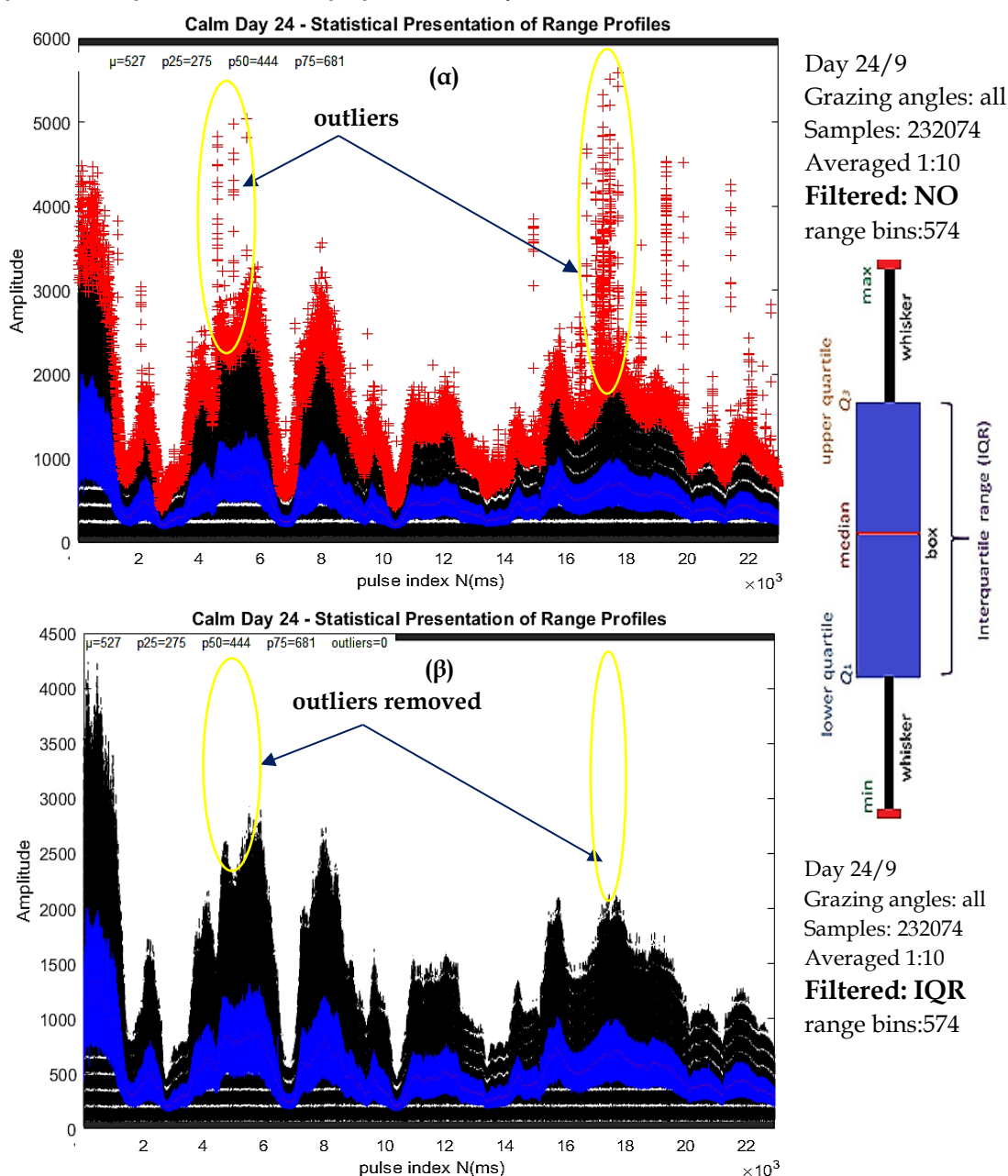
### 4.3.3 Φιλτράρισμα θορύβου εξάρσεων *'spikes'*

Μετά την εφαρμογή της τεχνικής του *'averaging'*, όπως φαίνεται και από το μεμονωμένο δείγμα της εικόνας 4-14, όσο και από το διάγραμμα της στατιστικής παρουσίασης του συνόλου των μετρήσεων της 2<sup>η</sup> ημέρας, εικόνα 4-15β, οι θόρυβοι που οφείλονται σε στιγμιαίες εξάρσεις δεν εξαλείφονται πλήρως αλλά μόνο καταστέλλονται μερικώς. Υπάρχει λοιπόν η ανάγκη για έναν αλγόριθμο ο οποίος θα εντοπίζει και θα αφαιρεί τις ακραίες αυτές μετρήσεις (που δεν ανήκουν στο σώμα του σήματος, όπως προκύπτει στατιστικά) πριν αυτές δημιουργήσουν πρόβλημα στα επόμενα στάδια επεξεργασίας. Κατά την διάρκεια της διδακτορικής διατριβής πειραματίστηκα με πάρα πολλά διαφορετικά μαθηματικά φίλτρα [31]-[32] για την αντιμετώπιση του θορύβου λόγω τυχαίων εξάρσεων και ακραίων τιμών ΗΜ έντασης που εμφανίζονται στο δέκτη. Διαπίστωση στην πράξη ότι τα φίλτρα που χρησιμοποιούσαν περιγραφική στατιστική είχαν την καλύτερη απόδοση στο να εντοπίζουν και να αφαιρούν τον θόρυβο από εξάρσεις χωρίς να επηρεάζουν ή να αλλοιώνουν το σώμα του σήματος. Φίλτρα τύπου ανισότητας *'Chebyshev'* [32], βλ. παράρτημα Γ.4.2.1 είναι εξαιρετικά γρήγορα και παρουσιάζουν ένα ικανοποιητικό βαθμό απόρριψης εξάρσεων. Όμως τα φίλτρα *IQR 'InterQuartileRange'* [30],[31] εμφανίζουν πολύ μεγαλύτερη επιλεκτικότητα και εξαιρετική ακρίβεια. Γι' αυτό, στην εν λόγω εργασία, χρησιμοποίησα φίλτρο που βασίζεται στο ενδοτεταρτημοριακό εύρος *IQR* δεδομένου δε ότι παρόμοιοι αλγόριθμοι έχουν προταθεί και από την σχετική βιβλιογραφία για RADAR τύπου SAR [34],[36]. Ένα φίλτρο *IQR* μπορεί να εφαρμοστεί με διαφορετικούς τρόπους και παραμέτρους πάνω στα δεδομένα των μετρήσεων. Η δέσμη μετρήσεων της εικόνας 4-16 προέρχεται από την εφαρμογή φίλτρου *IRQ* στην δέσμη της εικόνα 4-14.



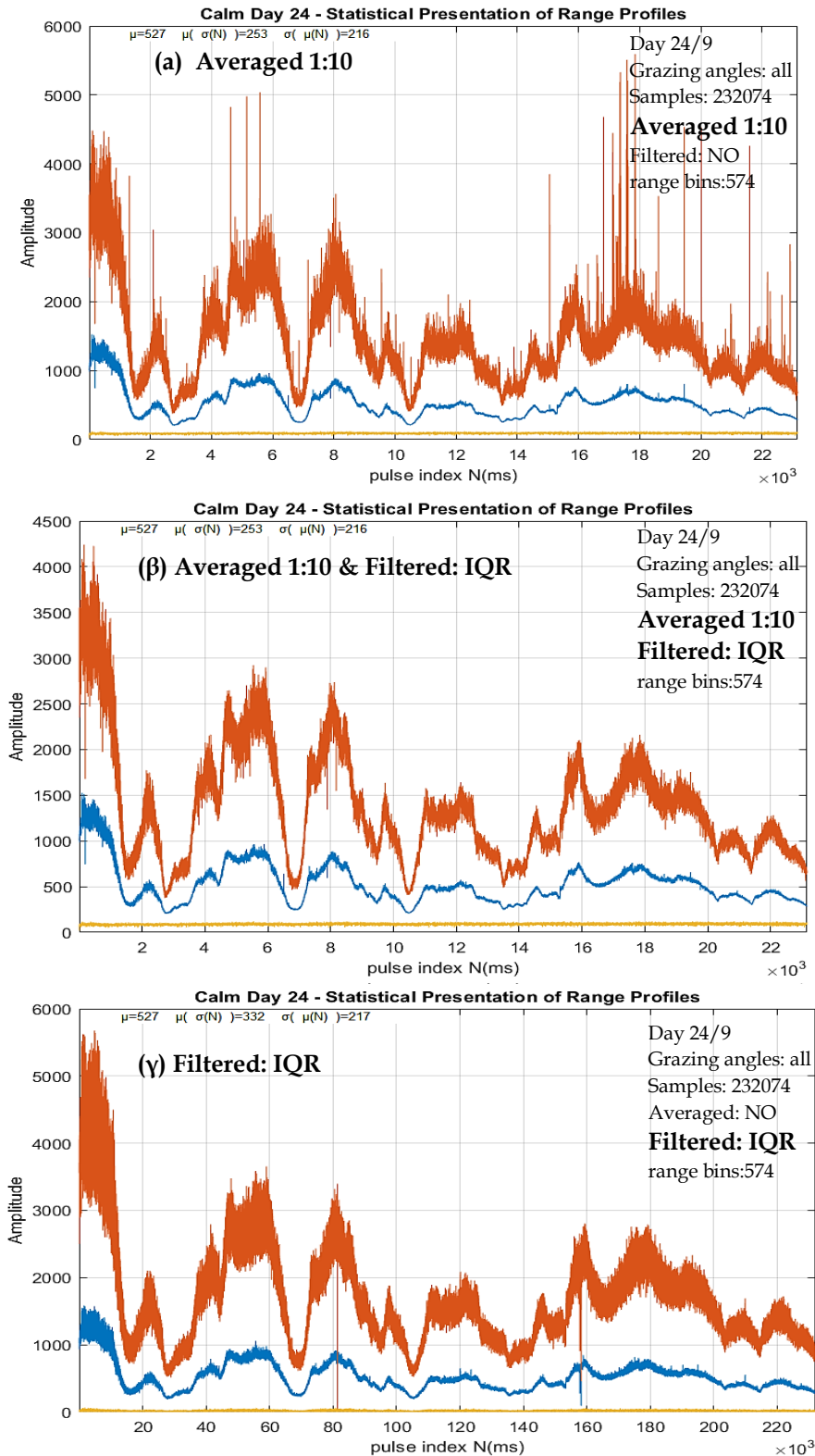
Εικόνα 4-16 Τριδιάστατης παρουσίασης δέσμης 3500 ριψών μετά από *averaging* & φίλτρο *IQR*

Στην δέσμη του σήματος της εικόνας 4-16, βλέπουμε ότι έχουν αναδειχθεί ακόμα περισσότερες λεπτομέρειες ως προς την 'ύψη' της επιφάνειάς της και ο θόρυβος τύπου 'spike' έχει επιτυχώς εξαλειφθεί. Το φίλτρο *IQR* που χρησιμοποιώ έχει τιμή 'whisker'  $W=2.25$  και για την κατασκευή του 'upper outer fence' χρησιμοποιώ την σχέση  $Q3+W*IQR$  και το εφαρμόζω ανά 'range profile'. Περισσότερες λεπτομέρειες για τον τρόπο εφαρμογής, λειτουργίας και την παραμετροποίηση του φίλτρου *IQR* αναφέρω αναλυτικά στο παράρτημα Γ.4.2.2. Στην εικόνα 4-17 παρουσιάζω σε μορφή θηκογράμματος 'boxplot' το σύνολο των καταγραφών της δεύτερης ημέρας, 24/9 πριν (α) και μετά (β) την εφαρμογή του *IQR* φίλτρου. Με μπλε σημειώνεται το σώμα *IQR* των μετρήσεων της έντασης της κάθε ριπής, με μαύρο το στατιστικά επιτρεπτό διάστημα ύπαρξης τιμών έντασης και με κόκκινο οι τιμές έντασης που θεωρούνται 'outliers', δηλαδή που ξεπερνούν το 'upper outer fence' και θεωρούνται τιμές που οφείλονται σε θόρυβο τύπου 'spike'.



Εικόνα 4-17. Παρουσίαση 'boxplot' πριν (α) και μετά (β) την εφαρμογή φίλτρου IQR

Στα διαγράμματα της εικόνας 4-18, έχει σημασία να παρατηρήσουμε ότι η χρήση ενός φίλτρου τύπου *IQR* (εικ.4-18γ) μπορεί να έχει σχεδόν το ίδιο ικανοποιητικά αποτελέσματα όσο και ο συνδυασμός *IQR* και 'averaging' μαζί (εικ. 4-18β). Αυτή η παρατήρηση επιτρέπει το 'averaging' να παραλείπεται όταν δεν υπάρχει η απαίτηση για μείωση του όγκου των δεδομένων προς επεξεργασία.



Εικόνα 4-18. Σύγκριση μεταξύ καταγραφών μετά από προ-επεξεργασία μόνο *averaged* (α), *averaged & IQR filtered* (β) και μόνο *IQR filtered* (γ)

#### 4.3.4 Κανονικοποίηση με βάση το 'Dynamic Range' της εξόδου του RADAR.

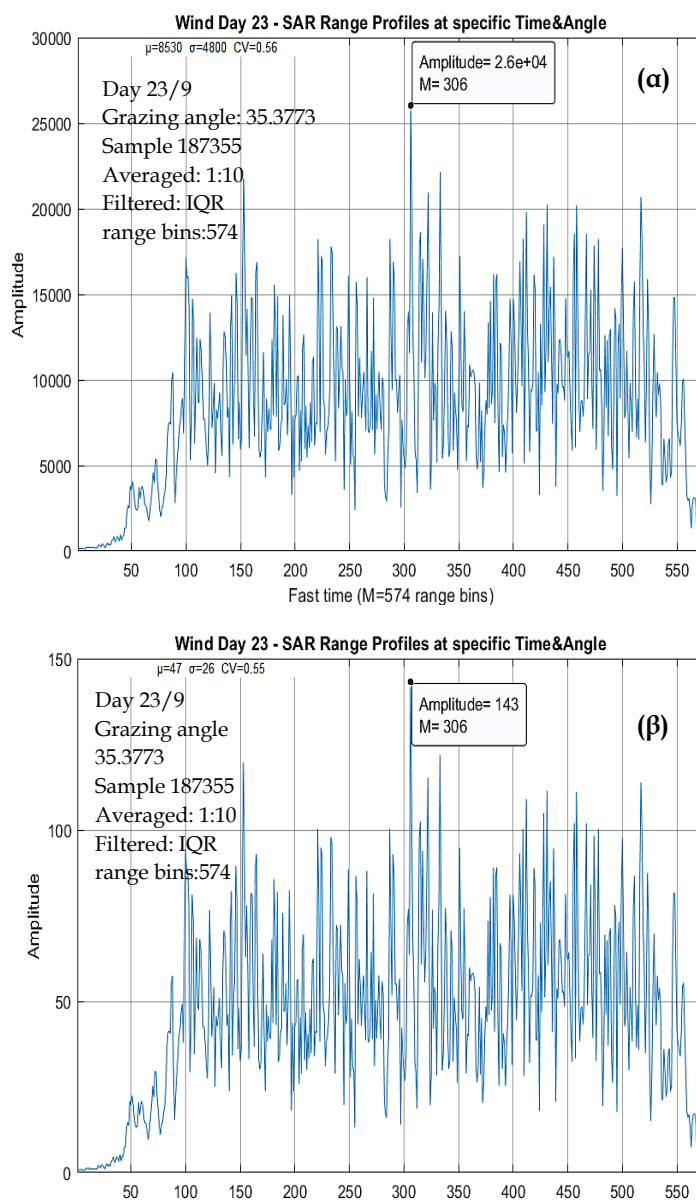
Στο τελικό στάδιο της προ επεξεργασίας γίνεται κανονικοποίηση όλων των δειγμάτων λήψης, με βάση ένα σταθερό και κοινό μέτρο έτσι ώστε να μπορούν αυτά να είναι ανά πάσα στιγμή συγκρίσιμα με δείγματα που έχουν ληφθεί σε διαφορετικούς χρόνους. Ως μέτρο της κανονικοποίησης επιλέχθηκε το μέγιστο της τιμής που μπορεί να δώσει η έξοδος του δέκτη του RADAR. Όλες οι μετρήσεις μεταφέρθηκαν, έγιναν 'rescaled' στο διάστημα τιμών από 0 έως  $2^8$  μέσω της παρακάτω σχέσης, γνωστής και ως 'min-max normalization' [32]:

$$X_{scaled} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} * 255$$

Η διαφορά  $x_{max} - x_{min}$  ετέθη ίση με  $\sqrt{(2)^{31}}$ . Η τιμή αυτή υπολογίζεται από την απόλυτη τιμή του 'dynamic range' της εξόδου του δέκτη όπως προκύπτει από τα τεχνικά χαρακτηριστικά και τις μετρήσεις του Radar του πειράματος NEMO2014. Περισσότερες λεπτομέρειες στο παράρτημα Γ.4.1.

Το εύρος επιλέχθηκε να είναι παρόμοιο με αυτό που χρησιμοποιούν οι κλασικές εικόνες SAR 'image', δηλαδή από 0 έως  $2^8$  έτσι ώστε να μπορούν να γίνουν εύκολα συγκρίσεις με αυτές.

Στην εικόνα 4-19 παρουσιάζω ένα 'range profile' πριν (α) και μετά (β) την κανονικοποίηση. Το μόνο που αλλάζει στα δύο διαγράμματα είναι οι απόλυτες τιμές ενώ όλα τα άλλα χαρακτηριστικά έχουν παραμείνει αμετάβλητα.



Εικόνα 4-19. Δείγμα 'range profile' - SAR raw data πριν (α) και μετά (β) την κανονικοποίηση

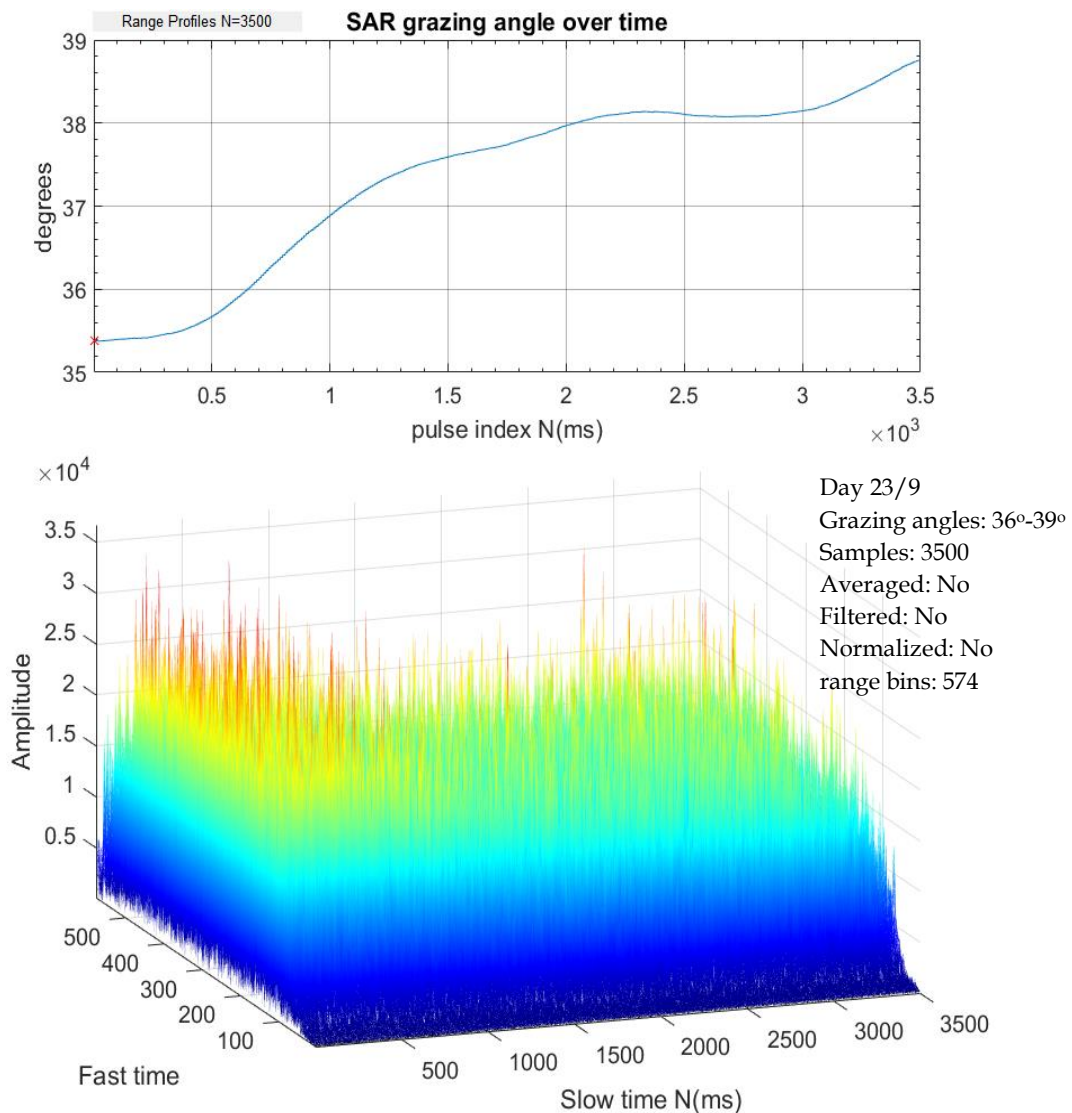


#### 4.3.5 Παρουσίαση των σταδίων προ-επεξεργασίας σε δείγμα καταγραφών

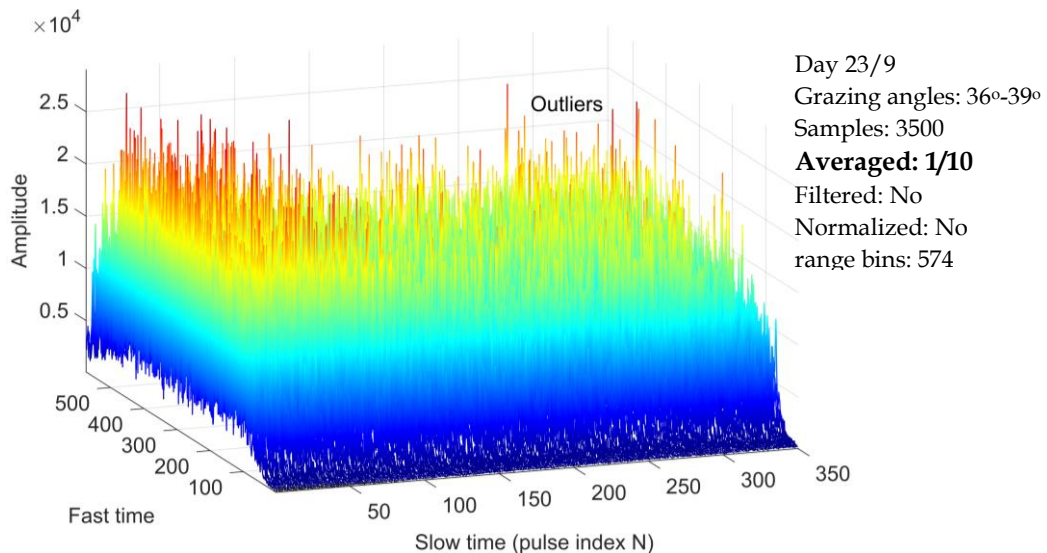
Στην εικόνα 4-20 παρουσιάζω ένα δείγμα SAR 'raw data' αποτελούμενο από 3500ms καταγραφής **ταραγμένης θάλασσας** (23/9) με γωνίες θέασης από 36° έως και 39° μοίρες και στις επόμενες εικόνες 4-21, 4-22, 4-23, παρουσιάζω τα αποτελέσματα μετά από τα διαδοχικά στάδια επεξεργασίας, 1<sup>ον</sup> 'averaging', 2<sup>ον</sup> 'IQR filtering', 3<sup>ον</sup> 'normalization'

**Δείγμα SAR 'raw data' από 3500ms καταγραφής ταραγμένης θάλασσας για 36°-39°**

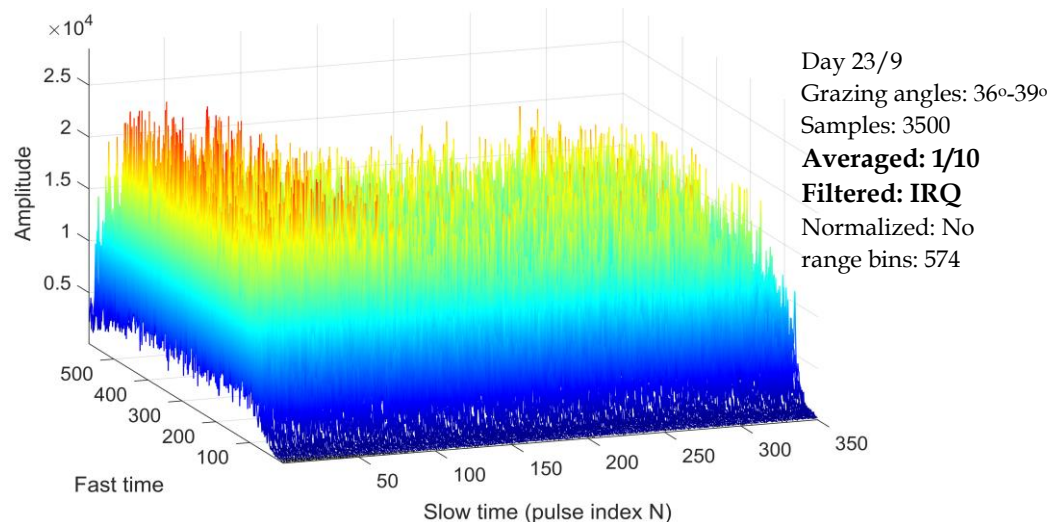
- Είσοδος προς στάδια επεξεργασία: Raw data 574x3500



Εικόνα 4-20. Δείγμα διδιάστατης υπογραφής από ταραγμένη θάλασσα πριν τα στάδια προεπεξεργασίας (η 3<sup>η</sup> διάσταση είναι ο χρόνος καταγραφής-'slow time')

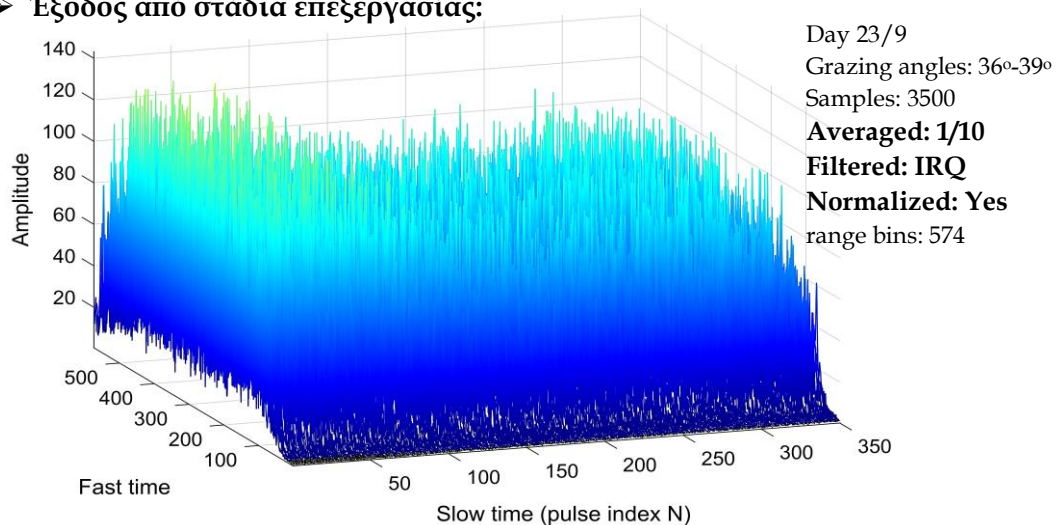


Εικόνα 4-23, Δείγμα διδιάστατης υπογραφής από ταραγμένη θάλασσα μετά το 1<sup>ο</sup> στάδιο προεπεξεργασίας - *averaged 1:10*



Εικόνα 4-22, Δείγμα διδιάστατης υπογραφής από ταραγμένη θάλασσα μετά το 2<sup>ο</sup> στάδιο προεπεξεργασίας - *filtrated with IRQ*

➤ Έξοδος από στάδια επεξεργασίας:



Εικόνα 4-21, Δείγμα διδιάστατης υπογραφής από ταραγμένη θάλασσα μετά το 3<sup>ο</sup> στάδιο προεπεξεργασίας - *Normalized*

Μετά την ολοκλήρωση των σταδίων επεξεργασίας, τα σήματα είναι έτοιμα για να περάσουν για ανάλυση από τους αλγόριθμους επεξεργασίας που θα εξετάσουμε στην παρακάτω ενότητα.

#### 4.4 Στάδια Επεξεργασίας των 3D SAR Raw Data

Η μέθοδος της μορφοκλασματικής υπογραφής '*fractal signature*' [1]-[4],[37] είναι μια μέθοδος που έχει χρησιμοποιηθεί κατά το παρελθόν για την αυτόματη ανάλυση υψής κειμένου[1], ταξινόμηση βιοϊατρικών εικόνων [3], ταξινόμηση γαλαξιών[37] καθώς και ταξινόμηση εικόνων RADAR [4].

Η μέθοδος της μορφοκλασματικής υπογραφής, προκειμένου να προσδιορίσει το '*fractal dimension*'  $D$  μιας επιφάνειας χρησιμοποιεί έναν ισοδύναμο ορισμό του '*box-counting*' [1],[12],[35] τον ορισμό του δ-παράλληλου σώματος[1]. Στους κλασσικούς ορισμούς του '*fractal dimension*'  $D$  [12]-[15] μπορούμε να παρατηρήσουμε (βλ. §3.3) ότι προκειμένου να μετρηθεί ένα φυσικό μήκος, χρησιμοποιείται ένα μέτρο ' $\delta$ ' το οποίο λειτουργεί ως κανόνας στην μέτρηση '*yardstick*'. Ανάλογη μεθοδολογία αναπτύσσεται όταν πρόκειται να μετρηθεί το '*fractal dimension*'  $D$  μιας επιφάνειας. Στην μέθοδο του '*box-counting*' αντί για '*yardsticks*' μήκους ' $\delta$ ', χρησιμοποιείται ένας αριθμός από ' $N$  boxes' προκειμένου να καλυφθεί κατά το δυνατό το σύνολο της υπό μέτρηση επιφάνειας. Με την μέθοδο '*box counting*' όπως και με την κλασσική μέθοδο (βλ. §3.3), το '*fractal dimension*' δίνεται από την ίδια σχέση (4.1) που αντιπροσωπεύει την κλίση της συνάρτησης  $N(\delta)$  όταν αυτή σχεδιάζεται σε μια λογαριθμική κλίμακα  $\log\text{-}\log$ , βλ. εικόνα 3-7, §3.3. Η κλίση αυτή είναι σταθερή και ανεξάρτητη της τιμής του  $\delta$  και αυτό οφείλεται στο χαρακτηριστικό της αυτοομοιότητας των *fractals* [12], [14].

$$D = \lim_{\delta \rightarrow 0} - \frac{\log(N)}{\log(\delta)} \quad (4.1)$$

Κατ' αναλογία του μήκους μιας ακτογραμμής, όπου όσο μικρότερο κανόνα μέτρησης  $\delta$  χρησιμοποιεί κάποιος τόσο μεγαλύτερο μετράει το τελικό μήκος της ακτογραμμής[15], το ίδιο ακριβώς συμβαίνει και σε μια τραχεία επιφάνεια όταν κάποιος προσπαθήσει να υπολογίσει το εμβαδό της. Ωστόσο, σε μη *fractal* επιφάνειες, λόγω της έλλειψης του χαρακτηριστικού της αυτοομοιότητας η κλίση και συνεπώς η τιμή του '*fractal dimension*' εμφανίζει εξάρτηση από το μέτρο μέτρησης ' $\delta$ '. Συνεπώς σε μη αμιγώς '*fractal*' επιφάνεια, δηλαδή επιφάνεια χωρίς ή με περιορισμένο το χαρακτηριστικό της αυτοομοιότητας, η ανάλυση με *fractal* μεθόδους εμφανίζει δύο προβλήματα. Το πρώτο πρόβλημα είναι η δυσκολία της μέτρησής της χρησιμοποιώντας έναν κλασσικό ορισμό π.χ. '*box counting*' και το δεύτερο είναι η εξάρτηση του '*fractal dimension*' από την κλίμακα μέτρησης  $\delta$ .

Μια λύση στα παραπάνω προβλήματα δόθηκε από τον Tang et al.[1] και είναι η διδιάστατη εφαρμογή της τεχνικής '*blanket*' ως απάντηση στο πρόβλημα της μέτρησης των χαρακτηριστικών μιας επιφάνειας ('*fractal area*'  $A$ , '*fractal dimension*'  $D$ ) και το διάγραμμα '*fractal signature*' ως απάντηση στην εξάρτηση του '*fractal dimension*' από την κλίμακα μέτρησης ' $\delta$ ' αναδεικνύοντας έτσι την εξάρτηση

του *'fractal dimension'* από την κλίμακα μέτρησης  $\delta$  όχι ως ένα πρόβλημα ή μειονέκτημα της μεθόδου στις περιπτώσεις των μη αμιγώς *'fractal'* επιφανειών αλλά αντιθέτως ως μια υπογραφή *'fractal signature'* η οποία χαρακτηρίζει μια επιφάνεια ανάλογα με την υφή και την τραχύτητά της.

Η τεχνική *'blanket'* [1],[2] είναι λοιπόν μια μέθοδος ισοδύναμη του κλασσικού ορισμού *'box-counting'*[1],[12],[35] η οποία όμως ανάγει τον υπολογισμό του εμβαδού που εμφανίζει μια επιφάνεια λόγω της τραχύτητάς της σε υπολογισμό του όγκου που καταλαμβάνει αυτή η επιφάνεια στο χώρο λόγω αυτής της τραχύτητας.

Αυτό ακριβώς το πολύ πρακτικό υπολογιστικό πλεονέκτημα της μεθόδου *'blanket'* χρησιμοποιώ στην διατριβή μου, στο συγκεκριμένο κεφάλαιο.

Συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας την ανωτέρω μεθοδολογία, ανάγω τον προσδιορισμό του *'fractal dimension'*  $D$  μιας θαλάσσιας επιφάνειας σε μια διαδικασία υπολογισμού του όγκου και εν συνεχεία του εμβαδού που εμφανίζουν οι διοδιάστατες υπογραφές των οπισθοσκεδαζόμενων ΗΜ κυμάτων όταν λαμβάνονται από τον δέκτη του RADAR μετά από την ανάκλασή τους από αυτή την θαλάσσια επιφάνεια.

Εν συνεχεία επαναλαμβάνω την ανωτέρω μεθοδολογία υπολογίζοντας το *'fractal dimension'*  $D$  για μια σειρά από διαδοχικές τιμές  $\delta$  *'multiresolution analysis'* εξάγοντας τις χαρακτηριστικές καμπύλες *'fractal signatures'* οι οποίες καταφέρνουν λεπτομερώς, όπως θα δείξω με τα αποτελέσματα επί πραγματικών δεδομένων SAR *'raw data'*, να διαχωρίσουν την κατάσταση της θαλάσσιας επιφάνειας ανάλογα με την κυμάτωση που επικρατεί στην επιφάνειά της.

#### 4.4.1 Θεωρία *'blanket'*, *'fractal Dimension'* $D$ , *'fractal Signature'* $D(\delta)$

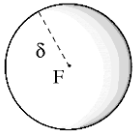
Η τεχνική *'blanket'* προκειμένου να υπολογίσει το εμβαδό μιας επιφάνειας μέσα από τον όγκο που καταλαμβάνει αυτή στο χώρο λόγω της τραχύτητάς της, *'σκεπάζει'* την υπό εξέταση επιφάνεια με δύο επιφάνειες σε απόσταση  $\delta$  εκατέρωθεν αυτής (βλ. εικόνα 4-23) και λόγω αυτής της μεθοδολογίας η τεχνική αυτή είναι γνωστή και ως *τεχνική 'blanket'/τεχνική 'κουβέρτας'*[1],[2],[4],[37].

Η τεχνική *'blanket'* στις δύο διαστάσεις βασίζεται στην θεωρία του  $\delta$ -παράλληλου σώματος[1] το οποίο λειτουργεί ως η κουβέρτα που θα σκεπάζει την υπό εξέταση επιφάνεια. Ο γενικός ορισμός του  $\delta$ -παράλληλου σώματος δίνεται από την σχέση:

$$F_\delta = \{x \in \mathbb{R}^n : |x - y| \leq \delta, \text{ για } y \in F\} \quad (4.2)$$

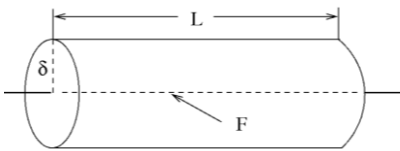
Από αυτή την σχέση 4.2 προκύπτει ότι ως  $\delta$ -παράλληλο σώμα ορίζεται το σύνολο των σημείων όπου η απόσταση μεταξύ  $F$  και  $F_\delta$  δεν είναι μεγαλύτερη από μια απόσταση  $\delta$ . Παρακάτω παραθέτω με εικόνες μερικές χαρακτηριστικές υλοποιήσεις με βάση τον ορισμό σχέση (4.2) έτσι ώστε να γίνει άμεσα αντιληπτό. Για ένα τριδιάστατο χώρο η σχέση 4.2 δίνεται ως:

$$F_\delta = \{x \in \mathbb{R}^3 : |x - y| \leq \delta, \text{ για } y \in F\} \quad (4.3)$$



Η πιο απλή περίπτωση μιας επιφάνειας  $F_\delta$  ενός  $\delta$ -παράλληλου σώματος είναι αυτή όπου το  $F$  είναι μόνο ένα σημείο στον χώρο. Στην περίπτωση αυτή η επιφάνεια του  $\delta$ -παράλληλου σώματος  $F_\delta$  ανάγεται σε μια επιφάνεια σφαίρας σε απόσταση  $\delta$  από το σημείο. Ο όγκος που δημιουργεί το  $\delta$ -παράλληλο σώμα δίνεται από την σχέση:

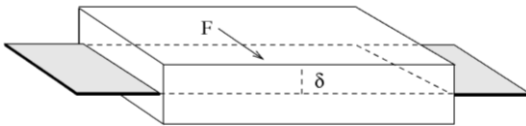
$$Vol(F_\delta) = \frac{4}{3} \pi * \delta^3 \quad (4.4)$$



Εάν το  $F$  είναι ένα σύνολο που περιέχει τα σημεία μιας ευθείας γραμμής μήκους  $L$ , το παράλληλο σώμα  $F_\delta$  ανάγεται σε μια επιφάνεια κυλίνδρου σε απόσταση  $\delta$  από την ευθεία. Ο όγκος που δημιουργεί το  $\delta$ -παράλληλο σώμα σε σχέση με την ευθεία

δίνεται από την σχέση:

$$Vol(F_\delta) = L\pi * \delta^2 \quad (4.5)$$



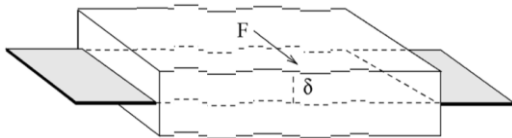
απόσταση  $\delta$  από την ευθεία. Ο όγκος του ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου που δημιουργεί το  $\delta$ -παράλληλο σώμα σε σχέση με την επιφάνεια  $A$  δίνεται από την σχέση:

$$Vol(F_\delta) = A * 2\delta \quad (4.6)$$

Από τις παραπάνω τρεις σχέσεις μπορούμε να παρατηρήσουμε την γενικότερη σχέση μεταξύ του όγκου, της τιμής  $\delta$  και της διάστασης του συνόλου  $F$ :

$$Vol(F_\delta) = \beta * \delta^{3-D} \quad (4.7)$$

όπου το  $\beta$  είναι μια σταθερά ανάλογα με το είδος του συνόλου  $F$  και το  $D$  λαμβάνει στις παραπάνω περιπτώσεις μια τιμή  $D=0$  για σημείο,  $D=1$  για ευθεία γραμμή,  $D=2$  για επίπεδη επιφάνεια, μια τιμή δηλαδή ανάλογη με τις διαστάσεις.



Σε μια γενικότερη περίπτωση όπου μιλάμε για μια επίπεδη επιφάνεια που εμφανίζει ένα κυματισμό, μια τραχύτητα, ο αντίστοιχος όγκος του  $\delta$ -παράλληλου σώματος μπορεί να προσεγγιστεί από την σχέση 4.8 για τιμές ' $\delta$ ' που είναι ικανοποιητικά μικρές.

$$Vol(F_\delta) \approx \beta * \delta^{3-D} \quad (4.8)$$

Η σχέση (4.8) είναι η πιο γενικευμένη περίπτωση όπου η παράμετρος  $D$  είναι η τιμή του '*fractal dimension*' και αντιπροσωπεύει την τραχύτητα της υπό εξέταση είτε γραμμής είτε επιφάνειας. Η τιμή του '*fractal dimension*' παίρνει τιμή  $D=1$  για μια ευθεία γραμμή οπότε προκύπτει η σχέση (4.5) και ανάλογα με την τραχύτητα της γραμμής από  $1 \leq D < 2$ . Πραγματικά εάν σκεφτούμε μια γραμμή μη ευθύγραμμη θα διαπιστώσουμε ότι αυτή 'χρειάζεται' διαστάσεις πάνω σε μια επιφάνεια για να εκδηλώσει την τραχύτητά της που αυτό εκφράζεται σαν μια τιμή  $D > 1$  και που

προσεγγίζει την τιμή 2, δηλαδή την τιμή διάστασης μιας επίπεδης επιφάνειας όσο η τραχύτητά της αυξάνεται. Το αντίστοιχο ισχύει και για την τιμή  $D$  μιας επίπεδης επιφάνειας όπου για μια λεία επιφάνεια όπως αυτή της σχέσης (4.6) το  $D=2$ . Εν συνεχεία η τιμή του  $D$  όπως θα δούμε και πειραματικά αυξάνει με τιμές  $D>2$  ανάλογα με την τραχύτητα που εμφανίζει η υπό μέτρηση επίπεδη επιφάνεια και αποκτά πλέον διαστάσεις όγκου στον χώρο. Συνδυάζοντας την σχέση  $Vol(F_\delta) = A * 2\delta$  με την σχέση  $Vol(F_\delta) \approx \beta * \delta^{3-D}$  και θεωρώντας όπου  $A$  την τιμή  $A(\delta)$  όπου είναι το εμβαδό της επιφάνειας 'κουβέρτας' για μέτρηση υπό κλίμακα μέτρησης ' $\delta$ ' έχουμε ότι:

$$A(\delta) = \frac{Vol(F_\delta)}{2\delta} \Leftrightarrow A(\delta) \approx \frac{\beta * \delta^{2-D}}{2} \quad (4.9)$$

Θεωρώντας ότι η τιμή του  $\beta$  είναι μια σταθερά θέτουμε για λόγους απλοποίησης της σχέσης (4.9) την τιμή  $\beta/2$  ως  $\beta$  και έτσι η ανωτέρω σχέση γράφεται ως:

$$A(\delta) \approx \beta * \delta^{2-D} \quad (4.10)$$

Στην παραπάνω σχέση το  $D$  είναι το '*fractal dimension*' της επιφάνειας. Για μικρές τιμές του ' $\delta$ ' η μορφή της επιφάνειας  $A(\delta)$  (βλ. και επιφάνεια κουβέρτας, εικόνα 4-24) είναι σχεδόν ίδια με την μορφή της υπό εξέταση επιφάνειας και έτσι λύνοντας την σχέση 4.10 ως προς  $D$  μπορούμε να έχουμε την τιμή του '*fractal dimension*'. Ειδικότερα λογαριθμίζοντας κατά μέλη την σχέση 4.10 προκύπτει ότι:

$$\log_2 A(\delta) \approx \log_2 \beta + \log_2(\delta^{2-D}) \quad (4.11)$$

$$\log_2 A(\delta) \approx \log_2 \beta + (2-D)\log_2 \delta \quad (4.12)$$

$$(2-D)\log_2 \delta \approx \log_2 A(\delta) - \log_2 \beta \quad (4.13)$$

$$2-D \approx \frac{\log_2 A(\delta)}{\log_2 \delta} - \frac{\log_2 \beta}{\log_2 \delta} \quad (4.14)$$

Ο όρος  $\frac{\log_2 \beta}{\log_2 \delta}$  προσεγγίζει στο μηδέν για αρκετά μικρές τιμές  $\delta$  οπότε μπορούμε να ξαναγράψουμε την προσεγγιστική σχέση 4.14 για λόγους απλοποίησης ως:

$$2-D \approx \frac{\log_2 A(\delta)}{\log_2 \delta} \quad (4.15)$$

Η παραπάνω σχέση είναι μια σχέση της μορφή της σχέσης 4.1 και ισχύει και με αυτήν ότι ισχύει για τα '*fractal*' [12]-[15], δηλαδή εάν σχεδιάσουμε το  $A(\delta)$  ως προς  $\delta$  σε μια λογαριθμική κλίμακα *log-log* θα σχηματιστεί μια ευθεία γραμμή με κλίση  $2-D$ . Η γραμμή φυσικά δεν θα είναι ευθεία για μια μη '*fractal*' επιφάνεια, λόγω της έλλειψης αυτοομοιότητας ανάλογα με την κλίμακα μέτρησης ' $\delta$ '. Όμως και σε αυτή την περίπτωση, αυτή η μετρούμενη κλίση, αν και μεταβαλλόμενη συναρτήσει του ' $\delta$ ', αποδεικνύεται ένα πολύ «αποκαλυπτικό» για την υφή της επιφάνειας στοιχείο[2]. Το διάγραμμα της κλίσης ως προς ' $\delta$ ' ονομάζεται '*fractal signature*'

και είναι το βασικό εργαλείο που χρησιμοποιώ στην συνέχεια για τον υπολογισμό της τραχύτητας μια επιφάνειας.

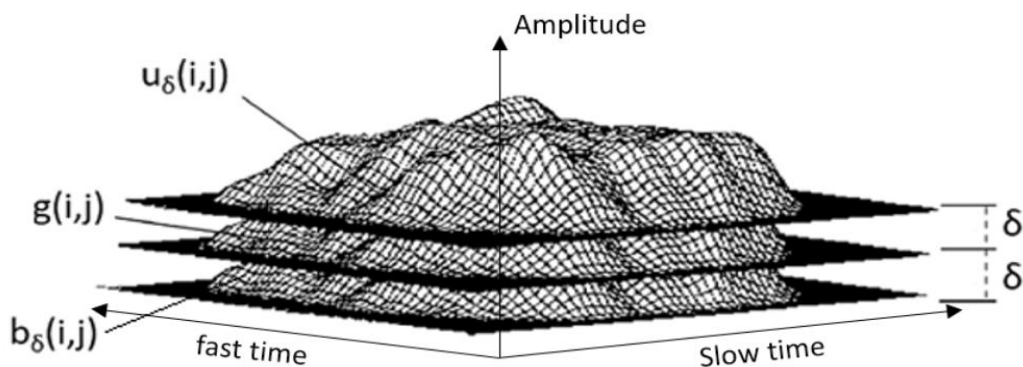
Η παρακάτω σχέση 4.16 είναι η βασική σχέση η οποία συνδέει το 'fractal dimension'  $D$  μιας επιφάνειας με το εμβαδό  $A(\delta)$  που αυτή εμφανίζει ανάλογα με τον κανόνα  $\delta$  'resolution' που χρησιμοποιείται για την μέτρηση

$$D \approx 2 - \frac{\log_2 A(\delta)}{\log_2 \delta} \quad (4.16)$$

#### 4.4.2 Εφαρμογή 'blanket' σε 2D υπογραφές RADAR & υπολογισμός του fractal signature – $D(\delta)$

Τα ανωτέρω στην εφαρμογή μου εξειδικεύονται ως ακολούθως. Το σύνολο των σημείων της επιφάνειας  $F = \{E_{ij}\}, i = 0, 1, 2, \dots, M, j = 0, 1, 2, \dots, N$  βλ. σχέση 4-3 αποτελεί την διδιάστατη υπογραφή των 'range profiles' ( $M$  range bins) που λαμβάνονται στον δέκτη του RADAR σε χρόνο  $N(ms)$ . Το  $E_{ij}$  αντιπροσωπεύει την τιμή της έντασης Amplitude του οπισθοσκεδαζόμενου ΗΜ κύματος την χρονική στιγμή  $(i,j)$ . Τα  $i$  και  $j$  αντιπροσωπεύουν την χρονική στιγμή της μέτρησης της έντασης στον αργό ( $N$ ) και γρήγορο ( $M$ ) χρόνο αντίστοιχα. Να υπενθυμίσω εδώ ότι  $M$  διαδοχικές μετρήσεις στον γρήγορο χρόνο ( $i = 0, 1, \dots, M$ ) αποτελούν τα 'range bin' ενός 'range profile' και  $N$  διαδοχικά 'range profiles' (ένα κάθε  $ms$ ) σχηματίζουν το δείγμα μια διδιάστατης υπογραφής, βλ. π.χ. διαγράμματα της εικόνας 4-23.

Η διδιάστατη αυτή υπογραφή των  $N$  διαδοχικών 'range profiles' δημιουργεί μια επιφάνεια  $g(i,j)$  η οποία προσεγγίζεται με την τεχνική του 'δ'-παράλληλου σώματος, βλ. επόμενη εικόνα 4-24 και συγκεκριμένα με τις άνω και κάτω επιφάνειες  $u_\delta(i,j)$  και  $b_\delta(i,j)$ . Όλα τα σημεία του τριδιάστατου χώρου που απέχουν σύμφωνα με την σχέση  $F_\delta = \{x \in \mathbb{R}^3 : |x - y| \leq \delta, \text{ για } y \in F\}$  απόσταση  $\delta$  από την διδιάστατη υπογραφή  $F$  των 'range profiles' δημιουργούν μια άνω και κάτω 'κουβέρτα' πάχους  $2\delta$  η οποία καλύπτει την επιφάνεια που δημιουργούν οι τιμές της έντασης  $E_{ij}$  των οπισθοσκεδαζόμενων ΗΜ κυμάτων, [1],[12],[35] εν προκειμένω των SAR raw data. Για  $\delta=0$  η άνω και κάτω κουβέρτα συμπίπτει με την υπό μέτρηση επιφάνεια δηλαδή ενώ για απόσταση  $\delta=1, 2, 3, \dots$  η άνω και κάτω κουβέρτα ορίζονται αντίστοιχα από



Εικόνα 4-24, Τεχνική 'κουβέρτας', σκεπάζοντας με δύο επιφάνειες  $u_\delta(i,j)$  &  $b_\delta(i,j)$  την επιφάνεια  $g(i,j)$  σε απόσταση ' $\delta$ ' εκατέρωθεν.

τις σχέσεις:

$$u_{\delta}(i, j) = \max \left\{ u_{\delta-1}(i, j) + 1, \max_{|(m,n)-(i,j)| \leq 1} u_{\delta-1}(m, n) \right\} \quad (4.17)$$

$$b_{\delta}(i, j) = \min \left\{ b_{\delta-1}(i, j) - 1, \max_{|(m,n)-(i,j)| \leq 1} b_{\delta-1}(m, n) \right\} \quad (4.18)$$

Οι εξισώσεις (4.17) και (4.18) είναι μια επέκταση στις δύο διαστάσεις των μονοδιάστατων συναρτήσεων (3.3) και (3.4) αντίστοιχα του 3<sup>ου</sup> κεφαλαίου §3.3. Η εξίσωση (4.17) εξασφαλίζει ότι κάθε νέα επιφάνεια  $u_{\delta}$  που σκεπάζει σε απόσταση  $\delta$  μια επιφάνεια  $g_s$ , απέχει τουλάχιστον μια μονάδα υψηλότερα από την επιφάνεια  $u_{\delta-1}$  τόσο σε κατακόρυφο όσο και σε οριζόντιο επίπεδο. Το αντίστοιχο ισχύει και για την εξίσωση (4.18) αλλά για μια μονάδα χαμηλότερα, αφού η εξίσωση αυτή αφορά την από κάτω επιφάνεια. Ο όγκος  $Vol_{\delta}$  που δημιουργεί η άνω ( $u_{\delta}$ ) και κάτω ( $u_{\delta-1}$ ) κουβέρτα σε απόσταση  $\delta$  από την υπό μέτρηση επιφάνεια υπολογίζεται ως:

$$Vol_{\delta} = \sum_{i,j} (u_{\delta}(i, j) - b_{\delta}(i, j)) \quad (4.19)$$

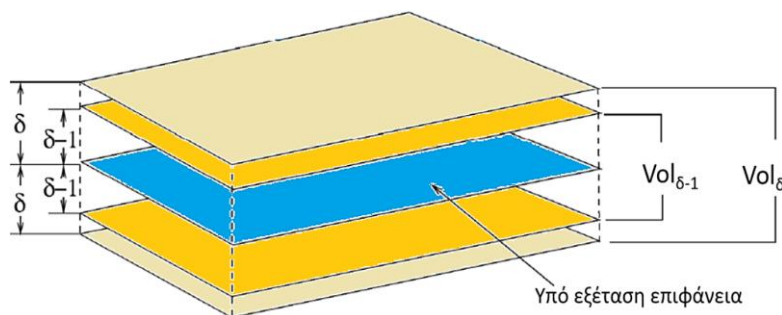
Έχοντας υπολογίσει το όγκο από την παραπάνω σχέση μπορούμε να λύσουμε την  $Vol(F_{\delta}) = A(\delta) * 2\delta$  ως προς  $A(\delta)$  και να βρούμε το ζητούμενο εμβαδό της επιφάνειας ως

$$A(\delta) = \frac{Vol_{\delta}}{2\delta} \quad (4.20)$$

Σε περιπτώσεις μετρήσεων όπου οι επιφάνειες δεν έχουν αμιγώς *fractal* χαρακτηριστικά, όπως η περίπτωση μιας θαλάσσιας επιφάνειας όπου τα όποια χαρακτηριστικά αυτοομοιότητας δεν είναι ανεξάρτητα από την κλίμακα μέτρησης χρησιμοποιώ για τον υπολογισμό του εμβαδού της υπό μέτρηση επιφάνειας την παρακάτω σχέση:

$$A(\delta) = \frac{Vol_{\delta} - Vol_{\delta-1}}{2} \quad (4.21)$$

Η σχέση (4.21) προέρχεται από την ίδια μεθοδολογία του  $\delta$ -παράλληλου σώματος, όπως και η σχέση (4.20) μόνο που αποδίδει καλύτερα στον υπολογισμό της επιφάνειας και των μη αμιγώς *fractal* επιφανειών.



Εικόνα 4-25, Βελτιωμένος υπολογισμός εμβαδού  $A(\delta)$  για μη *fractal* επιφάνειες με την εφαρμογή της σχέσης (4.21)



Πιο συγκεκριμένα όταν αναλύεται μια καθαρά *'fractal'* επιφάνεια και οι δύο ορισμοί, σχέσεις (4.20) και (4.21) είναι εξίσου αποτελεσματικοί αφού λόγω της αυτοομοιότητας που είναι χαρακτηριστικό των *fractals*, οι μεταβολές στην κλίμακα μέτρησης  $\delta$  θα επηρεάσουν[12]-[15] την τιμή του τελικού αποτελέσματος και του εξαγόμενου *'fractal dimension'*  $D$ . Ωστόσο, σε μη fractal επιφάνειες αυτός ο διαχωρισμός της επίδρασης της αλλαγής κλίμακας από το τελικό αποτέλεσμα είναι απαραίτητος ακριβώς λόγω της έλλειψης του χαρακτηριστικού της αυτοομοιότητας ανεξαρτήτως κλίμακας. Η αφαίρεση λοιπόν του  $Vol_{\delta-1}$  από  $Vol_{\delta}$  απομονώνει ακριβώς αυτές τις αλλαγές που εμφανίζονται λόγω της αλλαγής κλίμακας από  $\delta-1$  και έτσι με την σχέση (4.21), δίνεται μια καλύτερη προσέγγιση στην μέτρηση του εμβαδού και για μη *'fractal'* επιφάνειες.

Το ίδιο ισχύει και για τον τύπου που θα χρησιμοποιήσω για τον πρακτικό υπολογισμό του *'fractal dimension'*  $D$  σε μια επιφάνεια όπως η θάλασσα που παρουσιάζει μια περιορισμένη αυτοομοιότητα και για τον λόγο αυτό η τιμή του  $D$  δεν είναι σταθερή αλλά παρουσιάζει μια εξάρτηση από την κλίμακα  $\delta$  με την οποία γίνεται η μέτρηση. Γι' αυτές τις περιπτώσεις όπου το υπό εξέταση μέγεθος δεν περιέχει αμιγώς fractal χαρακτηριστικά, ο τρόπος της μεταβολής του  $D$  συναρτήσει του  $\delta$  μπορεί να αποτελέσει ένα πολύ ενδιαφέρον γράφημα, ένα ιδιαίτερο *'fractal signature'*, από το οποίο μπορούν να εξαχθούν σημαντικές πληροφορίες για την υφή και την τραχύτητα της επιφάνειας. Το *'fractal signature'*, περίπτωση που αναλύει ο Tang et al.[1], αφορά την μεταβολή του *'fractal area'*  $A(\delta)$  συναρτήσει του  $\delta$  για την οποία όμως διαπίστωσα ότι στην περίπτωση της θαλάσσιας επιφάνειας δεν μπορεί να μας παρέχει ιδιαίτερα χαρακτηριστικές πληροφορίες. Αντιθέτως στην περίπτωση της θαλάσσιας επιφάνειας ένα γράφημα του *'fractal dimension'*  $D$  ως προς το  $\delta$  μπορεί να δώσει χαρακτηριστικές *'fractal signatures'* που είναι εντελώς διαφοροποιημένες ανάλογα με την κατάσταση *'sea state'* που επικρατεί στην θαλάσσια επιφάνεια και στην περίπτωση αυτή η τιμή του  $D$  συναρτήσει του  $\delta$  παρουσιάζει μια ιδιαίτερη *'υπογραφή'* και εύκολα διακριτή ανάλογα με την κατάσταση της θαλάσσιας επιφάνειας.

Ο αλγόριθμος επεξεργασίας που θα χρησιμοποιήσω βασίζεται στον αλγόριθμο του Tang et al.[1] για να υπολογίσει τις τιμές των  $A(\delta)$  και εν συνεχεία με βάση αυτές τις τιμές, στην παρούσα διατριβή προχωρώ και υπολογίζω τις κλίσεις του διαγράμματος  $A(\delta)$  για διαδοχικές τιμές  $\delta$ . Οι κλίσεις αυτές ισοδυναμούν με το *'fractal dimension'* για τις αντίστοιχες τιμές  $\delta$ .

Για τον υπολογισμό των κλίσεων ξεκινάω από την σχέση (4-10) όπου  $A(\delta) \approx \beta * \delta^{2-D}$  και χρειάζεται να πάρω δύο σημεία. Λαμβάνοντας ενδεικτικά τα σημεία για  $\delta_1$  και  $\delta_2$  έχουμε:

$$A(\delta_1) \approx \beta * \delta_1^{2-D} \quad (4.22)$$

και

$$A(\delta_2) \approx \beta * \delta_2^{2-D} \quad (4.23)$$

διαιρώντας τις ανωτέρω κατά μέλη έχουμε:

$$\frac{A(\delta_1)}{A(\delta_2)} \approx \frac{\delta_1^{2-D}}{\delta_2^{2-D}} \quad (4.24)$$

λογαριθμίζοντας κατά μέλη έχουμε:

$$\log_2 A_{\delta_1} - \log_2 A_{\delta_2} = (2-D) * (\log_2 \delta_1 - \log_2 \delta_2) \quad (4.25)$$

και λύνοντας ως προς  $D$  έχουμε ότι:

$$D = 2 - \frac{\log_2 A_{\delta_1} - \log_2 A_{\delta_2}}{\log_2 \delta_1 - \log_2 \delta_2} \quad (4.26)$$

Η παραπάνω τιμή του  $D$  είναι η τιμή του 'fractal dimension'  $D$  για  $\delta=\delta_2$ . Ανάλογα η τιμή για  $\delta=\delta_3$  δίνεται από την σχέση:

$$D(\delta_3) = 2 - \frac{\log_2 A_{\delta_2} - \log_2 A_{\delta_3}}{\log_2 \delta_2 - \log_2 \delta_3} \quad (4.27)$$

και η γενική σχέση για την τιμή του  $D$  για  $\delta_n$  δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$D(\delta_i) = 2 - \frac{\log_2 A_{\delta_{i-1}} - \log_2 A_{\delta_i}}{\log_2 \delta_{i-1} - \log_2 \delta_i} \quad (4.28)$$

Από την σχέση (4.28) για διαδοχικές τιμές  $\delta=2,3,4\dots n$  προκύπτει η καμπύλη μιας μορφοκλασματικής υπογραφής 'fractal signature'. Η καμπύλη της μορφοκλασματικής υπογραφής παρουσιάζει κάποια μοναδικά χαρακτηριστικά ανάλογα με την τραχύτητα της επιφάνειας από την οποία έχει προκύψει. Η αρχική τιμή του  $D$  για  $\delta_2$ , ο τρόπος μεταβολής της τιμής  $D$  κατά την διάρκεια της μεταβολής του  $\delta$ , καθώς και η μέγιστη τιμή του  $\delta$  μετά από την οποία η τιμή του  $D$  σταθεροποιείται είναι μόνο μερικά από τα πιο εμφανή χαρακτηριστικά αυτής της καμπύλης από τα οποία μπορούν να προκύψουν πολύ αξιόλογες πληροφορίες για ταξινόμηση επιφανειών. Στην περίπτωση που εξετάζω ακόμα και ο μέσος όρος με τη μορφή ενός αριθμού  $D\mu$ , ως μια απλή περιγραφική σύνοψη του συνόλου της ομάδας των διαδοχικών αριθμών  $D(\delta_i)$  που δημιουργούν την μορφοκλασματική υπογραφή, είναι επαρκής για να χαρακτηριστεί η τραχύτητα της υπό εξέταση επιφάνειας όπως θα δείξω παρακάτω:

$$D\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D(\delta_i) \quad (4.29)$$

Το  $\delta$  λαμβάνει τιμές από 2 έως  $n$ . Η μέγιστη τιμή  $n$  που μπορεί να φτάσει το  $\delta$  κατά την εφαρμογή αυτού του αλγόριθμου της πολλαπλής ανάλυσης 'multiresolution analysis' καθορίζεται από την μορφή και τα ύψη 'rms height' των μεταβολών που εμφανίζονται στην επιφάνεια λόγω της τραχύτητας. Όταν η επιφάνεια είναι σχεδόν λεία, δηλαδή παρουσιάζει πολύ μικρή τραχύτητα, τότε

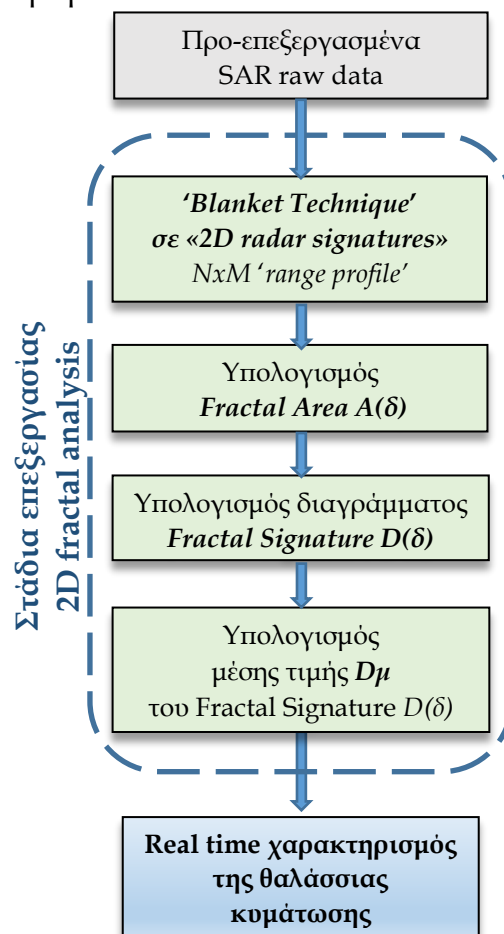
εμφανίζει πολύ μικρές μεταβολές στο κατ' απόλυτο ύψος στην επιφάνειά της και οι σχετικές μεταβολές στους μετρούμενους όγκους λόγω της μεταβολής του  $\delta$  είναι όλο και πιο μικρές αυξανόμενου του  $\delta$  όπως και η σχετική κλίση, βλ. σχέση (4.28) με αποτέλεσμα η τιμή του  $D$  να συγκλίνει πολύ γρήγορα σε μια τιμή πέραν της οποίας δεν υπάρχουν μεταβολές. Αντιθέτως σε μια τραχεία επιφάνεια όσο μεγαλύτερες είναι οι κατ' απόλυτο ύψος μεταβολές που υπάρχουν στην επιφάνεια, τόσο περισσότερη 'ανάλυση' μπορεί να δεχθεί η επιφάνεια, δηλαδή τόσο μεγαλύτερες τιμές μπορεί φτάσει το μέτρο της κλίμακας  $\delta$  μέχρι να συγκλίνει η τιμή του  $D$ . Αυτό είναι ακόμα ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά που δημιουργούν μια 'μοναδικότητα' στην μορφοκλασματική υπογραφή για κάθε ξεχωριστή επιφάνεια όπως θα δούμε στην συνέχεια.

#### 4.5 Υπολογισμός '*fractal signature*' σε καταγραφές του πειράματος NEMO2014

Έχοντας παρουσιάσει και αναλύσει στις προηγούμενες παραγράφους το θεωρητικό κομμάτι των μορφοκλασματικών τεχνικών που θα χρησιμοποιήσω καθώς και τον τρόπο εφαρμογής τους σε διδιάστατες υπογραφές RADAR, βλ. §4.3.2, θα συνεχίσω στην συνέχεια με την εφαρμογή των αλγόριθμων επεξεργασίας σε SAR '*raw data*' πραγματικών καταγραφών RADAR από το πείραμα NEMO 2014.

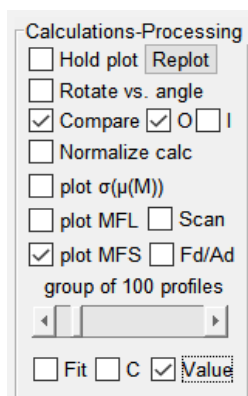
Σε πρώτη φάση, από το σύνολο των καταγραφών του πειράματος NEMO 2014 θα χρησιμοποιήσω δείγματα από όλες τις διαθέσιμες γωνίες θέασης της θαλάσσιας επιφάνειας '*grazing angles*', ήτοι υπό γωνία  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $40^\circ$  καθώς και  $50^\circ$  για να παρουσιάσω αναλυτικά τα αποτελέσματα της εφαρμογής του αλγόριθμου διδιάστατης μορφοκλασματικής ανάλυσης, διάγραμμα ροής του οποίου παρουσιάζω στην εικόνα 4-26.

Σε δεύτερη φάση, κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>, θα δημιουργήσω μια πρακτική εφαρμογή η οποία θα βασίζεται σε ένα αυτοματοποιημένο πρόγραμμα το οποίο θα μπορεί να διαβάζει σειριακά, δηλαδή με την χρονική αλληλουχία του χρόνου καταγραφής, το περιεχόμενο του αρχείου καταγραφής των SAR '*raw data*' και θα υπολογίζει, με βάση τον αλγόριθμο της εικόνας 4-26, την τραχύτητα της επιφάνειας που επικρατεί σε 'πραγματικό χρόνο' δηλαδή σε κάθε χρονικό σημείο καταγραφής της επιφάνειας της θάλασσας.



Εικόνα 4-26, Διάγραμμα Ροής αλγόριθμων επεξεργασίας

#### 4.5.1 Calculation-Processing tool για MFS (*Mean Fractal Signature*)



Εικόνα 4-27.

Επιλογές  
επεξεργασίας

Λεπτομέρειες για το λογισμικό που θα χρησιμοποιήσω και τις γενικότερες δυνατότητες του λογισμικού 'SARrawdataAnalyzer' παρέχω στο παράρτημα Γ.

Το λογισμικό 'SARrawdataAnalyzer' δίνει την δυνατότητα διαδραστικού πειραματισμού με όλους τους διαθέσιμους αλγόριθμους επεξεργασίας που ανέπτυξα κατά την διάρκεια της διδακτορικής μου διατριβής. Επίσης δίνει την δυνατότητα εφαρμογής τους σε οποιοδήποτε χρονικό σημείο των καταγραφών, ή/και γωνίας πρόσπτωσης των ΗΜ κυμάτων, που ελήφθησαν κατά το πείραμα NEMO2014.

Οι επιλογές επεξεργασίας, βλ. εικόνα 4-27, που δίνει το λογισμικό 'SARrawdataAnalyzer' σχετικά με τις τεχνικές ανάλυσης 'Mean Fractal Signature' (MFS) είναι οι ακόλουθες:

**[plot MFS]:** Με την επιλογή αυτή το λογισμικό υπολογίζει αυτόματα τις τιμές  $Vol(\delta)$ ,  $A(\delta)$  για το οποιοδήποτε δείγμα έχει επιλεγεί και σχεδιάζει το 'fractal signature', συναρτήσει της κλίμακας μέτρησης  $\delta$ .

**[Fd/Ad]:** Παρέχει την δυνατότητα επιλογής 'fractal signature'. Με Fd σχεδιάζεται το 'fractal dimension' ως προς  $\delta$ , δηλαδή το  $D(\delta)$  σχέση (4.28) Με Ad σχεδιάζεται το 'fractal area' ως προς  $\delta$ , δηλαδή το  $A(\delta)$  σχέση (4.20)

**[Compare]:** Με την επιλογή αυτή σχεδιάζονται σε κοινό γράφημα, για λόγους ευκολίας σύγκρισης, τα διαγράμματα MFS από ήρεμη και ταραγμένη θάλασσα. Τα διαγράμματα MFS από την ταραγμένη θάλασσα σχεδιάζονται σε πράσινο χρώμα και τα MFS διαγράμματα από την ήρεμη θάλασσα σχεδιάζονται με μπλε χρώμα.

**[Value]:** Με την επιλογή σημειώνεται πάνω στο διάγραμμα  $D(\delta)$  η μέση τιμή του 'fractal dimension'  $D_{\mu}$  σχέση (4.29)

Υπάρχουν διαθέσιμες και κάποιες επιπλέον βοηθητικές επιλογές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με την MFS. Οι επιλογές αυτές είναι η **[hold plot]** με τις οποίες μπορεί να κρατηθεί ένα διάγραμμα για να συγκριθεί με κάποιο επόμενο. Η επιλογή **[Rotate vs angle]** όπου αλλάζει την παρουσίαση του οποιοδήποτε διαγράμματος από σε  $y = f(x)$  σε  $x = f(y)$  Η επιλογή **[Normalize calc]** κάνει μια κανονικοποίηση των αποτελεσμάτων στην περιοχή 0 έως 1. Η επιλογή **[O]** σε συνδυασμό με την επιλογή [Compare] δημιουργεί ένα μοναδικό παράθυρο μόνο με τα αποτελέσματα των υπολογισμών χωρίς να εμφανίζει και τα δείγματα των μετρήσεων. Και τέλος η επιλογή **[I]** όταν συνδυαστεί με την επιλογή [Hold plot] δίνει την δυνατότητα να αλλάζουν αυτόματα τα χρώματα των καμπυλών σε κάθε νέα καμπύλη που προστίθεται στο διάγραμμα των αποτελεσμάτων. Τέλος η επιλογή **[Fit]** μπορεί να μας εμφανίσει μια  $\alpha'$  βάρη προσρμογή στο διάγραμμα του οποιοδήποτε αποτελέματος και επιπλέον, όπου

είναι δυνατό και υπάρχει και ικανοποιητικός αριθμός μετρήσεων, σημειώνει πάνω στο διάγραμμα με διακεκομμένες ροζ γραμμές τα 95% όρια πρόβλεψης 'upper & lower prediction bounds'[33].

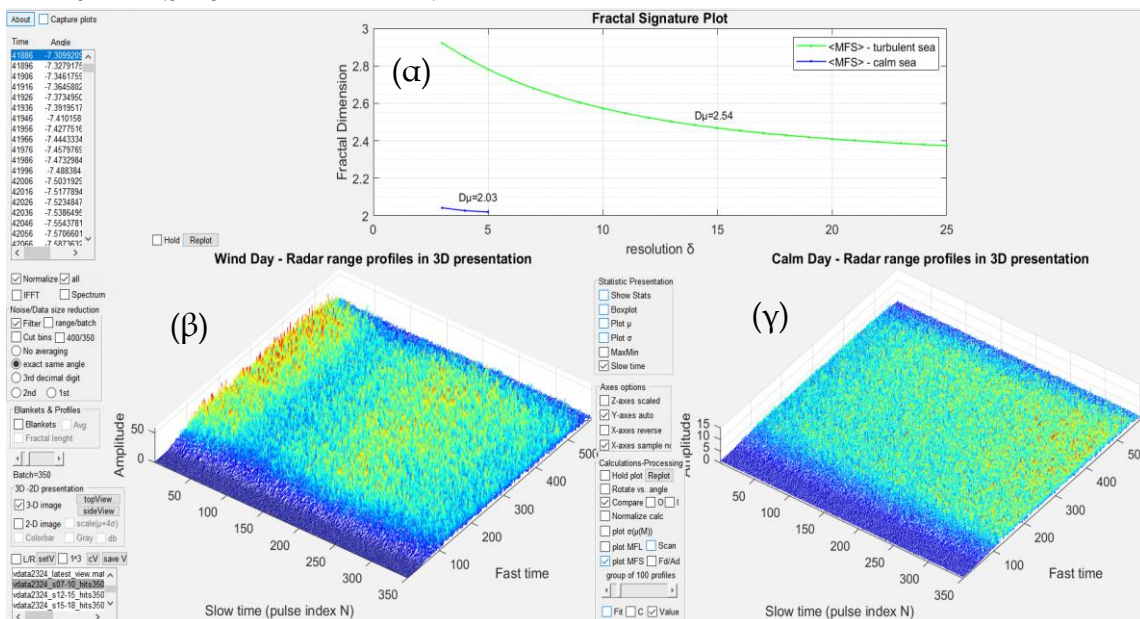
Η επιλογή [C] μπορεί να μας δημιουργήσει ένα αντιστάθμισμα 'offset' με βάση μια πρωτοβάθμια προσαρμογή επί των μετρήσεων και θα δείξω πως ακριβώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί μαζί με την [Fit] στο επόμενο κεφάλαιο που θα αφορά το 'real time fractal signature calculation'.

#### 4.5.2 Αποτελέσματα μορφοκλασματικής ανάλυσης με την μέθοδος MFS.

Από το σύνολο των καταγραφών του πειράματος NEMO 2014 θα χρησιμοποιήσω δείγματα οπισθοσκεδαζόμενων ΗΜ κυμάτων από τη θάλασσα επιφάνεια, από όλες τις διαθέσιμες γωνίες θέασης 'grazing angles', ήτοι υπό γωνία  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $40^\circ$  καθώς και  $50^\circ$  για να παρουσιάσω τα τελικά αποτελέσματα του συνδυασμού αλγόριθμων προ-επεξεργασίας και αλγόριθμων επεξεργασίας.

Με την βοήθεια του λογισμικού 'SARrawdataAnalyzer' που ανέπτυξα κατά την διάρκεια της διδακτορικής μου έρευνας, βλ. 'screenshot' σε εικόνα 4-28, εφαρμόζω στα SAR 'raw data' τους αλγόριθμους προ-επεξεργασίας (§4.2) για να δημιουργήσω τις κατάλληλα φιλτραρισμένες και κανονικοποιημένες διοδιάστατες υπογραφές που παρουσιάζω σε μορφή 3D βλ. εικόνα 4-28(β) για ταραγμένη και 4-28(α) για ήρεμη θάλασσα.

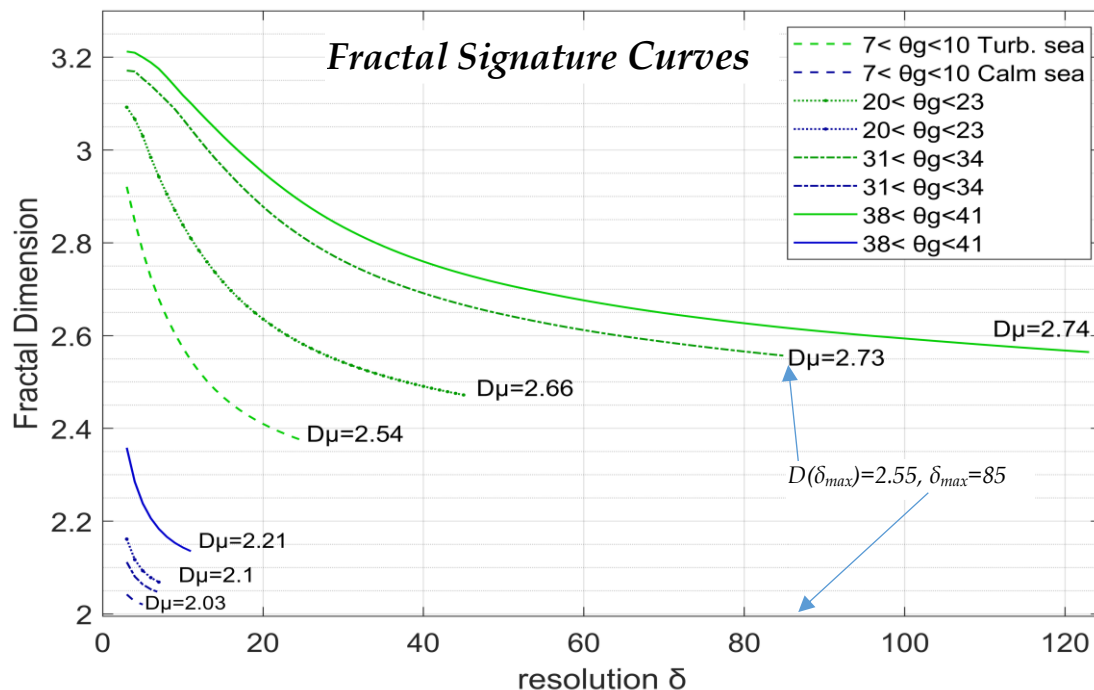
Εν συνεχεία σε αυτές τις κατάλληλα προ-επεξεργασμένες διοδιάστατες υπογραφές εφαρμόζω τους αλγόριθμους επεξεργασίας (§4.4) και λαμβάνω σε ένα κοινό διάγραμμα, βλ. εικόνα 4-28(α), τις μορφοκλασματικές υπογραφές 'fractal signatures' που αντιστοιχούν σε ταραγμένη και ήρεμη θάλασσα, γραμμή πράσινου χρώματος και μπλε χρώματος αντίστοιχα:



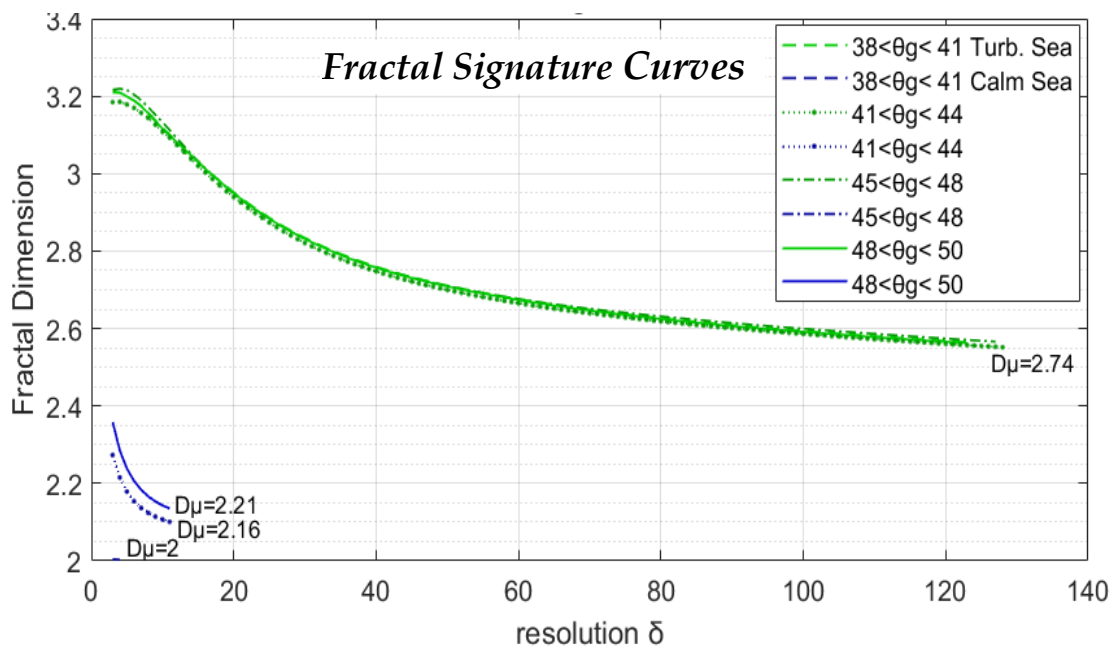
Εικόνα 4-28, 3D παρουσίαση των SAR raw data μετά την προ επεξεργασίας τους από ταραγμένη (β) και ήρεμη (γ) θάλασσα για 'grazing angles' από  $7^\circ$  έως  $10^\circ$

Στο γράφημα (α) βλέπουμε την μορφοκλασματική υπογραφή με πράσινο για την ταραγμένη θάλασσα και με μπλε για την ήρεμη θάλασσα

Επαναλαμβάνω την παραπάνω διαδικασία σε δείγματα από όλες τις διαθέσιμες γωνίες θέασης 'grazing angle' του πειράματος NEMO2014 και παρουσιάζω τα τελικά αποτελέσματα στις παρακάτω εικόνες:



Εικόνα 4-29. Σε κοινό γράφημα οι μορφοκλασματικές υπογραφές από δείγματα ήρεμης (μπλε) και κυματώδους θάλασσας (πράσινο) υπό διαφορετικές γωνίες  $\theta_g$  'grazing angle',  $\theta_g \leq 38^\circ$



Εικόνα 4-30. Σε κοινό γράφημα οι μορφοκλασματικές υπογραφές από δείγματα ήρεμης (μπλε) και κυματώδους θάλασσας (πράσινο) υπό διαφορετικές γωνίες  $\theta_g$  'grazing angle',  $\theta_g \geq 38^\circ$

Η τιμή  $D_\mu$ , που υπολογίζεται από την σχέση (4.29), είναι ο μέσος όρος των τιμών της καμπύλης  $D(\delta)$ , η μέση τιμή δηλαδή της μορφοκλασματικής υπογραφής.

Από τα αποτελέσματα, εικόνες 4-29 έως 4-30, προκύπτει ότι η μέθοδος *'fractal signature'* εφαρμοζόμενη στα SAR *'raw data'* μπορεί να διαχωρίσει με μεγάλη ευκολία την παραγμένη από την ήρεμη θάλασσα για οποιαδήποτε γωνία πρόσπτωσης  $\theta_g$  των ΗΜ κυμάτων ως προς την θαλάσσια επιφάνεια.

#### 4.6 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Από τις συνθήκες του πειράματος NEMO2014 καθώς και από τους σχετικούς υπολογισμούς (βλ. παράρτημα Δ.4.1) γνωρίζουμε ότι οι καταγραφές που έγιναν την 1<sup>η</sup> ημέρα, ταχύτητες ανέμου  $10m/s$  έως  $12m/s$ , αντιστοιχούν σε παραγμένη έως κυματώδη θάλασσα[28] με *'sea state'* 4-5 ενώ οι καταγραφές που έγιναν την 2<sup>η</sup> ημέρα, ταχύτητες ανέμου  $1m/s$  έως το πολύ  $2m/s$ , αντιστοιχούν σε ήρεμη έως ρυτιδωμένη θάλασσα[28] *'sea state'* 1.

Γνωρίζοντας λοιπόν εκ των προτέρων την θαλάσσια κατάσταση που επικρατούσε στην περιοχή την συγκρίνουμε με τα αποτελέσματα της μεθόδου MFS, από όπου προκύπτουν τα κάτωθι συμπεράσματα:

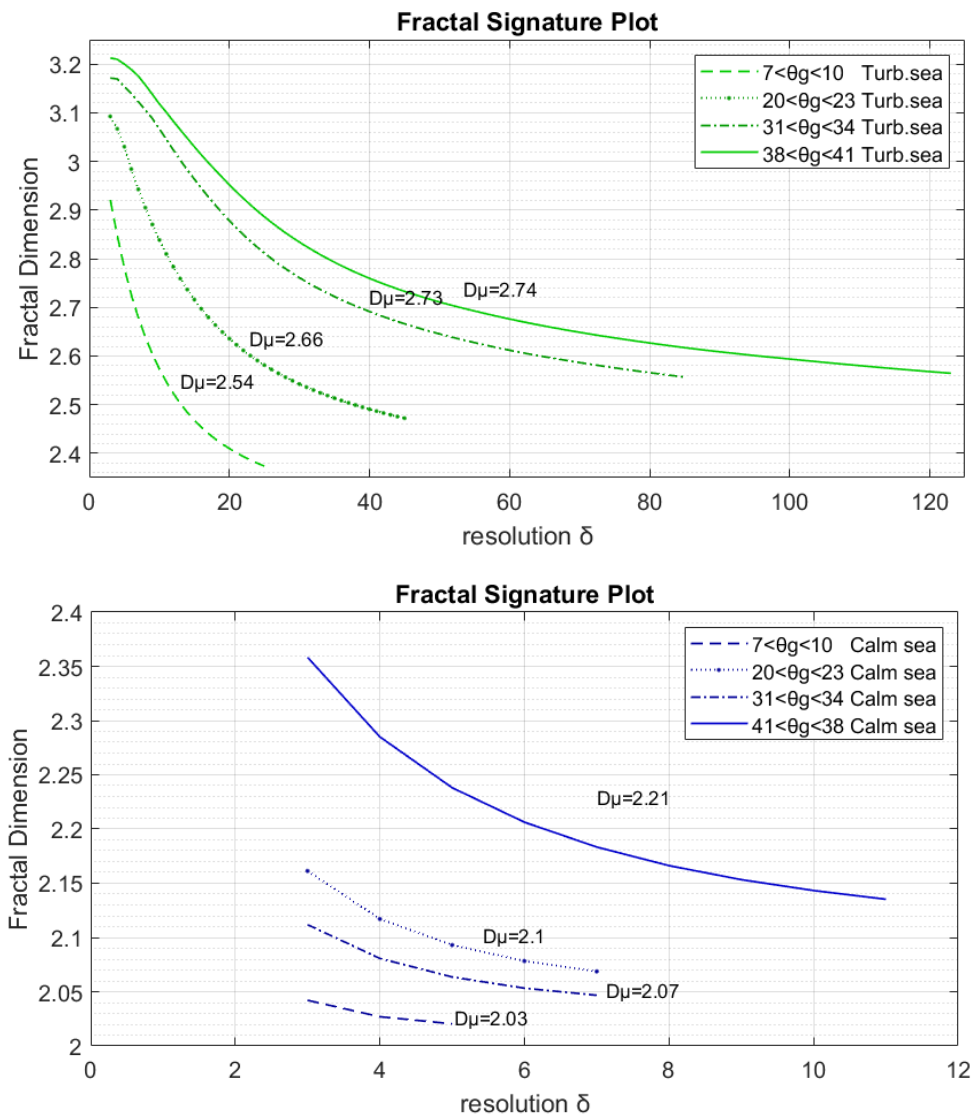
➤ Με την χρήση της μεθόδου *'fractal signature'* ο διαχωρισμός της κυματώδους από την ήρεμη θάλασσα είναι ξεκάθαρος υπό οποιαδήποτε γωνία θέασης της υπό εξέταση επιφάνειας από το RADAR.

➤ Ακόμα και ο απλούστερος τρόπος αξιολόγησης μιας μορφοκλασματικής καμπύλης *'fractal signature'*, που είναι ο υπολογισμός του μέσου όρου των τιμών της  $D\mu$ , είναι αρκετός για να έχουμε έναν συνεπή και ικανοποιητικότατο διαχωρισμό μεταξύ των διαφορετικών *'sea state'*. Χρησιμοποιώντας πιο εξειδικευμένους αλγόριθμους όπου θα μπορούσαν να λαμβάνουν υπόψη τους το συνολικό σχήμα, θέση καθώς και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της κάθε καμπύλης (π.χ. ρυθμό μεταβολής της κλίσης, τιμή  $\delta$  για την οποία η καμπύλη σταματά - συγκλίνει δηλαδή ο αλγόριθμος υπολογισμού κ.α.) η θαλάσσια κατάσταση και γενικότερα η τραχύτητα της επιφάνειας, θα μπορούσε να προσδιοριστεί με ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια και να εξαχθούν επιπλέον ποιοτικά χαρακτηριστικά της υφής της επιφάνειας.

➤ Όλες οι μορφοκλασματικές υπογραφές, ανεξαρτήτως της γωνίας πρόσπτωσης των ΗΜ κυμάτων, παρουσιάζουν μια μέση τιμή *'fractal dimension'* που κυμαίνεται στο εύρος τιμών  $2 < D\mu < 2.21$  όταν προέρχονται από θάλασσα με *'sea state'* 1 (ήρεμη επιφάνεια) ενώ κυμαίνεται στο  $2.54 < D\mu < 2.74$  όταν προέρχονται από θάλασσα με *'sea state'* 4-5 (παραγμένη επιφάνεια) και άρα ο διαχωρισμός είναι εξαιρετικά εύκολος ακόμα και αν η γωνία πρόσπτωσης των ΗΜ κυμάτων δεν είναι γνωστή. Αυτό είναι μια πολύ σημαντική βελτίωση έναντι της μεθόδου MFL που ανέπτυξα στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο.

Αξιολογώντας δηλαδή μόνο την τιμή του κριτηρίου  $D\mu$  που εμφανίζει μια μορφοκλασματική υπογραφή, η ήρεμη θάλασσα λαμβάνει πάντα τιμές πολύ κοντά στο 2 ανεξαρτήτως της γωνίας πρόσπτωσης των ΗΜ κυμάτων. Δηλαδή τιμές που υποδεικνύουν μια σχεδόν λεία ( $D\mu < 2.21$ ) ή/και εντελώς επίπεδη ( $D\mu = 2$ ) επιφάνεια, βλ. θεωρία *fractal* §4.4.1. Ενώ η παραγμένη θάλασσα σε επίπεδο *'sea state'* 4-5 λαμβάνει πάντα τιμές εντός συγκεκριμένου εύρους  $2.54 < D\mu < 2.74$  ανεξαρτήτως της γωνίας πρόσπτωσης των ΗΜ κυμάτων. Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν, βλ. θεωρία *fractal* §4.4.1. σε μια σαφώς τραχεία επιφάνεια.

➤ Εστιάζοντας και μεγεθύνοντας τα αποτελέσματα της εικόνας 4-29 μπορούμε να παρατηρούμε ότι για την ίδια κατάσταση θάλασσας, π.χ. ταραγμένη θάλασσα (πράσινες καμπύλες) σημειώνεται μια εξάρτηση των τιμών των 'fractal dimension'  $D(\delta)$  από την γωνία  $\theta g$ . Συγκεκριμένα όσο αυξάνει η γωνία  $\theta g$  τόσο οι καμπύλες της μορφοκλασματικής υπογραφής μετατοπίζονται προς τα πάνω εμφανίζοντας λόγω αυτής της μετατόπισης το εύρος των παρατηρούμενων τιμών  $D\mu$  από 2.54 έως 2.74. Το ίδιο συμβαίνει και για τις καμπύλες της ήρεμης θάλασσας.



Εικόνα 4-31. Μεγέθυνση του φαινομένου της εξάρτησης της μορφοκλασματικής υπογραφής από την γωνία πρόσπτωσης των ΗΜ κυμάτων

Η εξάρτηση αυτή της μορφοκλασματικής υπογραφής από την γωνία πρόσπτωσης των ΗΜ κυμάτων και η ύπαρξη ενός εύρους τιμών  $D\mu$  αντί μόνο μιας τιμής για κάθε 'sea state' μπορεί να αποδοθεί στην μεταβολή της ανακλαστικότητας της επιφάνειας λόγω της μεταβολής της γωνίας πρόσπτωσης. Αυτό το έχω ήδη παρατηρήσει και σχολιάσει στην παράγραφο §3.5.1 του 3<sup>ου</sup> κεφαλαίου.



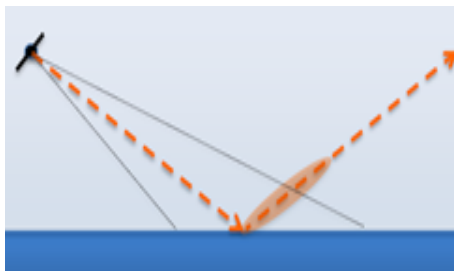
Η αύξηση του ποσοστού της ενέργειας που οπισθοσκεδάζεται από την επιφάνεια της θάλασσας λόγω της αύξησης της γωνίας  $\theta_g$  οδηγεί σε μια αντίστοιχη αύξηση, 'μεγέθυνση' του όγκου που δημιουργούν οι εντάσεις των HM κυμάτων στο 3D δείγμα των καταγραφών στο δέκτη του RADAR. Δευτερευόντως οφείλεται και στην μη εντελώς σταθερή και πανομοιότυπη θαλάσσια κατάσταση 'sea state' κατά την διάρκεια του πειράματος λόγω μεταβολής της στιγμιαίας έντασης των ανέμων επίσης εντός κάποιου διαστήματος τιμών (10m/s έως 12m/s).

Στην περίπτωση της 1D ανάλυσης των οπισθοσκεδαζόμενων HM κυμάτων (κριτήριο  $\langle MFL \rangle$  'Mean Fractal Length') που ανέπτυξα στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο, βλ. αποτελέσματα πίνακα 3.2, η μεταβολή στην τιμή του κριτηρίου λόγω μεταβολής της γωνίας πρόσπτωσης ήταν σαφώς εντονότερη. Με την ίδια κατάσταση θάλασσας (ταραγμένη) για γωνία  $\theta_g=10^\circ$  υπολογιζόταν  $\langle MFL \rangle \approx 600,000$  ενώ για  $\theta_g=40^\circ$  υπολογιζόταν  $\langle MFL \rangle \approx 2100,000$ . Ήτοι στο κριτήριο  $\langle MFL \rangle$  ένας τετραπλασιασμός της γωνίας πρόσπτωσης οδηγούσε σε μεταβολή κατά 250% της τιμής του κριτηρίου  $\langle MFL \rangle$ .

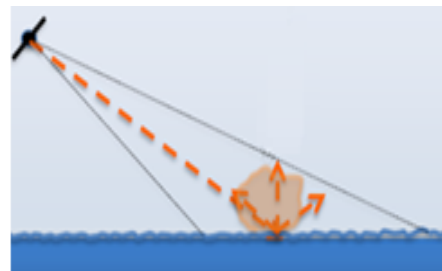
Στην περίπτωση της 2D ανάλυσης των οπισθοσκεδαζόμενων HM κυμάτων (κριτήριο  $D_m - MFS$  'Mean Fractal Signature') για την ίδια θαλάσσια κατάσταση και το ίδιο εύρος μεταβολής γωνίας έχουμε  $D_m=2.54$  για  $\theta_g=10^\circ$  και  $D_m=2.74$  για  $\theta_g=40^\circ$ . Ήτοι με το βελτιωμένο κριτήριο  $D_m$  της MFS ένας τετραπλασιασμός της γωνίας πρόσπτωσης επηρεάζεται το τελικό αποτέλεσμα μόλις κατά 7,8%.

➤ Για γωνίες  $\theta_g > 38^\circ$  οι μορφοκλασματικές υπογραφές της ταραγμένης θάλασσας είναι όλες σχεδόν σταθερές με σταθερή τιμή  $D_m=2.74$  όπως φαίνεται και στην εικόνα 4-30. Αντιθέτως οι μορφοκλασματικές υπογραφές για ήρεμη θάλασσα συνεχίζουν να εμφανίζουν μεταβολές μεταξύ  $2 < D_m < 2.21$  για  $\theta_g > 38^\circ$

Αυτή η ταύτιση μεταξύ των καμπυλών για γωνίες  $\theta_g > 38^\circ$  οφείλεται στην εμφάνιση ενός 'plateau region' όπου από μια γωνία και έπειτα η ταραγμένη θαλάσσια επιφάνεια παραμένει, βλ. εικόνα 4-32, ένας μόνιμα σημαντικός σκεδαστής όπου η αύξηση της γωνίας από  $38^\circ$  έως και  $50^\circ$  δεν επιφέρει κάποια σημαντική αλλαγή ως προς το πλάτος των οπισθοσκεδαζόμενων HM κυμάτων. Αντιθέτως, στην περίπτωση της ήρεμης θάλασσας έχουμε ένα στοχαστικό σκεδαστή όπου κατά διαστήματα άλλοτε εμφανίζει μια ελάχιστη οπισθοσκέδαση λόγω κατοπτρικής σκέδασης και άλλοτε μια αυξανόμενη οπισθοσκεδαζόμενη ένταση λόγω της ρυτιδωσης της επιφάνειας με αποτέλεσμα ανεξαρτήτως γωνίας πρόσπτωσης να παρατηρείται αυτό ως μια μεταβολή στο κριτήριο  $D_m$  από  $D_m \approx 2$  (σχεδόν λεία επιφάνεια) έως  $D_m \approx 2.20$  (ρυτιδωμένη επιφάνεια) βλ. εικόνα 4-33.



Εικόνα 4-32. Ήρεμη θάλασσα.  
Λόγω δημιουργίας 'κατοπτρικού' σκεδαστή μόνο κατά διαστήματα εμφανίζεται σημαντική οπισθοσκέδαση.



Εικόνα 4-33. Κυματώδης θάλασσα.  
Δημιουργία μιας σχεδόν μόνιμης οπισθοσκέδασης λόγω σημαντικής τραχύτητας.

➤ Αναφορικά με την τελική τιμή που λαμβάνει η παράμετρος  $\delta$ , ήτοι το συνολικό μήκος της μορφοκλασματικής υπογραφής (βλ. καμπύλη εικόνας 4-29 σημείο  $(D(\delta_{max})=2.55, \delta_{max}=85)$ ) θα ήθελα να παρατηρήσω το εξής:

Όσο πιο μεγάλες κατ' απόλυτες τιμές ύψους '*rms height*' εμφανίζονται οι διαφορές μεταξύ «κοιλιάδων» και «κορυφών» στην τραχύτητα της υπό εξέταση επιφάνειας τόσο μεγαλύτερες τιμές λαμβάνει η παράμετρος  $\delta$  μέχρι να συγκλίνει σε μια τελική τιμή  $D(\delta_{max})$ . Όπως εξήγησα και κατά την περιγραφή της σχέσης (4.29), το  $\delta$  λαμβάνει τιμές από 2 έως  $n$ . Κατά την εφαρμογή του αλγόριθμου της πολλαπλής ανάλυσης '*multiresolution*' από τον οποίο προκύπτει η μορφοκλασματική υπογραφή, η μέγιστη τιμή  $n$  που μπορεί να φτάσει το  $\delta$  καθορίζεται από την μορφή και από την κατ' απόλυτο τιμή '*rms height*' του ύψους των μεταβολών που εμφανίζονται στην επιφάνεια λόγω της τραχύτητάς της. Όταν η επιφάνεια είναι σχεδόν λεία, εμφανίζονται πολύ μικρές μεταβολές στην επιφάνειά της και οι μεταβολές στους μετρούμενους όγκους σε κάθε αύξηση του  $\delta$  ελαχιστοποιούνται πολύ γρήγορα και συγκλίνουν σε μια τιμή  $D(\delta_n)$  πέραν της οποίας δεν υπάρχουν μεταβολές της τιμής της μορφοκλασματικής διάστασης και ισχύει ότι  $D(\delta_n)=D(\delta_{max})$ =σταθερό. Αυτή είναι και η τιμή σύγκλισης και ταυτόχρονα και η ελάχιστη τιμή της μορφοκλασματικής διάστασης  $D(\delta_{max})=D_{min}$  που χαρακτηρίζει την υπο εξέταση επιφάνεια. Ενδεικτικά  $D(\delta_{max})=2.55$  στο  $\delta_{max}=85$  στην εικόνα 4-29. Στην εικόνα 4-30 και στην μεγέθυνσή της εικόνα 4-31 βλέπουμε ότι η τιμή  $D(\delta)$  για ήρεμη θάλασσα συγκλίνει και σταθεροποιείται για τιμές μεταξύ  $\delta_{max}=6$  έως το πολύ  $\delta_{max}=12$ , ενώ για την κυματώδη θάλασσα ανάλογα με την γωνία πρόσπτωσης παίρνει τιμές από  $\delta_{max}=20$  έως και  $\delta_{max}$  120. Όσο περισσότερο ανώμαλη είναι η επιφάνεια και όσο μεγαλύτερη η διαφορά στα ύψη μεταξύ «κοιλιάδων» και «κορυφών» που καταγράφονται στην επιφάνειά της, τόσο μεγαλύτερες είναι οι μεταβολές στους μετρούμενους όγκους που συνεχίζουν να παρατηρούνται σε κάθε αύξηση του  $\delta$  ακόμα και για αρκετά μεγάλες τιμές  $\delta$  πριν τελικά συγκλίνουν σε μια τιμή πέραν της οποίας δεν παρατηρούνται μεταβολές. Αυτό είναι ένα από τα χαρακτηριστικά που προσθέτουν μια επιπλέον πληροφορία για την υπό εξέταση επιφάνεια η οποία καταγράφεται ως μια ακόμα χαρακτηριστική 'μοναδικότητα' της μορφοκλασματικής υπογραφής ανάλογα με την υφή της επιφάνειας.

## 4.7 Ανακεφαλαίωση και Συμπεράσματα

Το Νορβηγικό Ινστιτούτου Άμυνας 'FFI' διεξήγαγε το πείραμα «NEMO 2014» στα πλαίσια ομάδας εργασίας του Science & Technology Organization. Ο σκοπός του πειράματος ήταν η καταγραφή της θαλάσσιας επιφάνειας από ένα X-band RADAR συνθετικού ανοίγματος, 'Synthetic Aperture Radar' - SAR [18] για δύο διαφορετικές θαλάσσιες καταστάσεις[26]-[28] ταραγμένη και ήρεμη θάλασσα υπό όλες τις γωνίες θέασης 'grazing angles' από 5° έως 55°.

Λαμβάνοντας τις παραπάνω καταγραφές διερεύνησα το πρόβλημα του προσδιορισμού της τραχύτητας μιας επιφάνειας μέσω μορφοκλασματικής ανάλυσης των οπισθοσκεδαζόμενων HM κυμάτων εξειδικεύοντας στον προσδιορισμό της θαλάσσιας κυμάτωσης 'sea state' [26]. Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο είχα εφαρμόσει την τεχνική 'blanket' σε μονοδιάστατες υπογραφές[2],[10], RADAR δηλαδή σε μονοδιάστατα διανύσματα των οποίων οι τιμές της έντασης των HM είναι καταγεγραμμένες ως προς την διάσταση του γρήγορου χρόνου 'fast time'[20]-[22], μήκους  $M$ . Στο παρόν 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο βελτιώνω την προτεινόμενη μέθοδο εφαρμόζοντας την τεχνική 'blanket' σε διοδιάστατες υπογραφές[1],[11] δηλαδή σε διοδιάστατο διάνυσμα όπου οι τιμές της έντασης των HM κυμάτων είναι καταγεγραμμένες ως προς δύο διαστάσεις. Η μία διάσταση παραμένει όπως πριν η διάσταση του γρήγορου χρόνου 'fast time', μήκους  $M$  και προστίθεται ακόμα μία διάσταση, η διάσταση του αργού χρόνου 'slow time', μήκους  $N$ , δημιουργώντας έτσι μια επιφάνεια  $M \times N$  όπου η τιμή της έντασης των HM κυμάτων δημιουργεί το τρισδιάστατο γράφημα μετρήσεων, βλ. δείγμα εικόνας 4-5.

Δεδομένου ότι η διεξαγωγή του πειράματος έλαβε χώρα σε πραγματικές συνθήκες τα δεδομένα καταγραφής δεν είναι 'ιδανικά'. Προβλήματα όπως μικρό διαλείψεις στις καταγραφές του RADAR, θόρυβος διαφόρων πηγών προέλευσης που δημιουργεί τυχαίες διακυμάνσεις και στιγμιαίες εξάρσεις όπως 'spikes', 'speckle noise' κ.ά. στο σήμα λήψης του δέκτη του RADAR χρειάζεται να αντιμετωπιστούν επιτυχώς προκειμένου να βελτιστοποιηθεί το τελικό αποτέλεσμα. Για το λόγο αυτό πριν εφαρμόσω στο σήμα τους αλγόριθμους μορφοκλασματικής ανάλυσης, 'fractal processing' εφαρμόζω διαδοχικά μια σειρά αλγόριθμων προ-επεξεργασίας 'pre-processing'.

Τα στάδια προ-επεξεργασίας συνοψίζονται στον εντοπισμό και απόρριψη ελλειπών και προβληματικών καταγραφών, στην αποθρομβοποίηση με την εφαρμογή τεχνικών 'signal averaging' και με φίλτρα ενδοτεταρτημοριακού εύρους, 'Inter Quartile Range' και τέλος στην κανονικοποίηση των τιμών των καταγραφών με βάση το 'dynamic range' της εξόδου του δέκτη του RADAR.

Τα στάδια επεξεργασίας χρησιμοποιούν αλγόριθμους μορφοκλασματικής ανάλυσης προκειμένου να υπολογιστεί το 'fractal dimension'  $D$ , η τιμή δηλαδή της μορφοκλασματικής διάστασης της επιφάνειας σκέδασης η οποία προσδιορίζει ευθέως την τραχύτητα της επιφάνειας σκέδασης, εν προκειμένω το βαθμό της θαλάσσιας κυμάτωσης 'sea state'. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας την τεχνική 'blanket', ανάγω τον προσδιορισμό του fractal dimension  $D$  μιας θαλάσσιας

επιφάνειας σε μια διαδικασία υπολογισμού του όγκου και εν συνεχεία του εμβαδού 'fractal Area' που εμφανίζουν οι διοδιάστατες υπογραφές των οπισθοσκεδαζόμενων ΗΜ κυμάτων όταν λαμβάνονται από τον δέκτη του RADAR μετά από την ανάκλασή τους από αυτή την θαλάσσια επιφάνεια.

Εν συνεχεία επαναλαμβάνω την ανωτέρω μεθοδολογία υπολογίζοντας το 'fractal dimension'  $D(\delta)$  για μια σειρά από διαδοχικές τιμές του κανόνα μέτρησης  $\delta=1,2,3\dots n$ , 'multiresolution analysis' εξάγοντας τις χαρακτηριστικές καμπύλες 'fractal signatures' οι οποίες καταφέρνουν λεπτομερώς να διαχωρίσουν την κατάσταση της θαλάσσιας επιφάνειας ανάλογα με την κυμάτωση που επικρατεί στην επιφάνειά της.

Ως τελικό κριτήριο προσδιορισμού της τραχύτητας της επιφάνειας προτείνω την τιμή  $D_m$  'Mean Fractal Signature value' που υπολογίζεται ως ο μέσος όρος των τιμών της μορφοκλασματικής υπογραφής.

Η εφαρμογή μορφοκλασματικής ανάλυσης απευθείας στα SAR raw data για τον προσδιορισμό της θαλάσσιας κατάστασης 'sea state' καθώς και το κριτήριο  $D_m$  είναι ένα «προϊόν» καινοτομίας της παρούσας έρευνας το οποίο έρχεται να προστεθεί στην σχετική βιβλιογραφία μορφοκλασματικής ανάλυσης [1]-[6],[9]-[11],[35],[37],[38] και έχει την βάση του στις εργασίες 'Modified Fractal Signature (MFS): A New Approach to Document Analysis for Automatic Knowledge Acquisition' των Tang et al. και 'Application of the Modified Fractal Signature Method for Terrain Classification from Synthetic Aperture Radar Images' των Malamou et al. Η κεντρική ιδέα είναι ότι η μορφοκλασματική υπογραφή καθορίζεται πλήρως από το εμβαδό της επιφάνειας που σχηματίζουν οι μετρήσεις έντασης των ΗΜ κυμάτων, SAR raw data. Το μέγεθος και η μορφή της επιφάνειας των μετρήσεων των 3D SAR raw data είναι συνάρτηση του βαθμού της τραχύτητας που επικρατεί στην επιφάνεια του σκεδαστή. Κατά συνέπεια η μορφοκλασματική υπογραφή αντανακλά τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας του σκεδαστή και αποκαλύπτει έτσι με μοναδικό τρόπο την τραχύτητα της επιφάνειας.

Ο χαρακτηρισμός της θαλάσσιας κυμάτωσης απευθείας από τα SAR raw data με την χρήση της τεχνικής 'blanket' σε δύο διαστάσεις αποδεικνύεται εξαιρετικά επιτυχής και η προτεινόμενη μέθοδος έχει δημοσιευτεί στο περιοδικό Electronics and Electrical Engineering Journal με τίτλο "Sea State Characterization using Experimental Synthetic Aperture Radar Raw Data in Two-Dimensions and the Modified Fractal Signature Method"

DOI: <https://doi.org/10.5755/j02.eie.31502>

## 4.8 Βιβλιογραφία

- [1] Y. Tang, H. Ma, D. Xi, X. Mao, C. Suen. “*Modified Fractal Signature (MFS): A New Approach to Document Analysis for Automatic Knowledge Acquisition*” - IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, Vol. 9 - No. 5 - pp. 747-762, 1997. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/69.634753>.
- [2] S. Peleg, J. Naor, R. Hartley, and D. Avnir. “*Multiple Resolution Texture Analysis and Classification*” - IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-6 - No.4, 1984. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TPAMI.1984.4767557>
- [3] N.B. Ampilova, E.Y. Gurevich, I.P. Soloviev, “*Application of modified fractal signature and Regny spectrum methods to the analysis of biomedical preparation images*”, in CEMA’11 International Conference, Sofia, Bulgaria, October 2011, pp. 96 - 100.
- [4] A. Malamou, C. Pandis, P. Frangos, P. Stefaneas, A. Karakasiliotis, D. Kodokostas. “*Application of the modified fractal signature method for terrain classification from synthetic aperture radar images*” - Electronics and Electrical Engineering Journal, Vol.20 - No.6 - pp.118-121, 2014 [Online]. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1401.2899>
- [5] H. Pan, W. Zhang, W. Jiang, P. Wang, J. Yang and X. Zhang, ‘*Roughness Change Analysis of Sea Surface from Visible Images by Fractals*,’ in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 78519-78529, 2020. [Online]. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2990161>
- [6] B. Fabrizio, D. Enzo, “*Fractal analysis of the signal scattered from the sea surface*”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 47, No. 2, pp. 324-338, 1999.
- [7] A.Pleskachevsky, S.Jacobsen, B.Tings and E.Schwarz ‘*Estimation of sea state from Sentinel-1 Synthetic aperture radar imagery for maritime situation awareness*’, International Journal of Remote Sensing, Vol. 40, No. 11, pp. 4104-4142, 2018. [Online]. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1558377>
- [8] K.Topouzelis, D.Kitsiou, ‘*Sea State Primitive Object Creation from SAR Data*’, Vol.5, No.13, pp.1561-1570, [Online]. <https://doi.org/10.4236/ijg.2014.513127>
- [9] A. Kotopoulis, B. Massinas, G. Pouraimis and P. Frangos, ‘*Sea State Characterization Using Fractal Techniques on Experimental One – Dimensional Radar Signatures*’, ‘Physical Sciences and Technology’ Journal, Faculty of Physics and Engineering, Al – Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakshtan, Vol. 7, no. 1-2, 2020. [Online]. DOI: <https://doi.org/10.26577/phst.2020.v7.i1.05>
- [10] G. Pouraimis, A. Kotopoulis, B. Massinas and P. Frangos, “*Sea state characterization using experimental one – dimensional radar signatures and fractal techniques*”, Electronics and Electrical Engineering Journal, Vol. 27, No. 3, 2021. [Online]. Available: DOI: <https://doi.org/10.5755/j02.eie.28906>.
- [11] A.Kotopoulis, B.Massinas, G. Pouraimis and P. Frangos, “*Sea State Characterization using Experimental Synthetic Aperture Radar Raw Data in Two-Dimensions and the Modified Fractal Signature Method*”, Electronics and Electrical

Engineering Journal, vol. 28, no. 6, pp. 35 - 41, Dec. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5755/j02.eie.31502>

[12] K. J. Falconer, "*Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications*" - J. Wiley and Sons - 1990

[13] B. Mandelbrot, "*The Fractal Geometry of Nature*" - New York: W. H. Freeman and Company - 1977

[14] B. Mandelbrot, "*Fractals: Form, Chance and Dimension*" - San, Francisco: CA: W. H. Freeman and Company - 1977

[15] B. Mandelbrot, "*How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension*", Science, vol. 156, no. 3775, pp. 636-638, 1967. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1126/science.156.3775.636>

[16] M. I. Skolnik, "*Introduction to Radar Systems*", McGraw-Hill, 1980.

[17] D. Wehner, "*High-Resolution Radar*", Artech House, 2nd Edition, 1995.

[18] Π. Φράγκος & Σ. Πίντζος, "*Συστήματα Ραντάρ*", Τομέας Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας & Τεχνολογίας Υλικών, Σ.Η.Μ.Μ.Υ / Ε.Μ.Π., Ιούνιος 2022.

[19] Π. Φράγκος, "*Ηλεκτρομαγνητικές Μέθοδοι Τηλεπισκόπησης*", Ε.Π.Ι.Σ.Ε.Υ. Ε.Μ.Π. Παπασωτηρίου, 1999.

[20] Chen, C. H., "*Principles of Synthetic Aperture Radar Imaging: A System Simulation Approach*", CRC Press, 2016.

[21] V. Chen and H. Ling, "*Time-Frequency Transforms for Radar Imaging and Signal Analysis*", Artech House, 1st Edition, 2002.

[22] M. Richards, "*Fundamentals of Radar Signal Processing*", McGraw-Hill, 1st Edition, 2005.

[23] H.Umer, M. Sabieh, "*Reducing noise by repetition: introduction to signal averaging*", Article in European Journal of Physics, March 2010. DOI 10.1088/0143-0807/31/3/003

[24] Hudgings D., Gragt A., "*Signal averaging at modest cost*" Am. J. Phys. Vol. 40, pp. 1206-12, 1972.

[25] Kraftmaker Y., "*Noise reduction by signal accumulation*", Phys. Teach. Vol.44, pp 528-30, 2006.

[26] Schule, J. J. "*Sea state.*" The Encyclopedia of Oceanography, New York: Reinhold, pp.786-792, 1966

[27] Owens E.H. "*Sea conditions. In: Beaches and Coastal Geology*". Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, New York, NY. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1007/0-387-30843-1\\_397](https://doi.org/10.1007/0-387-30843-1_397)

[28] Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία, '*Κλίμακα Douglas για το κόμα*' Available: [http://www.emy.gr/emyl/navigation/naftilia\\_douglas?](http://www.emy.gr/emyl/navigation/naftilia_douglas?)

- [29] Han, J., Kamber, M. and Pei, J., “Data Mining: Concepts and Techniques”, 3rd Edition 2011, Morgan Kaufmann Publishers, Burlington.
- [30] Tukey John W., “*Exploratory Data Analysis*”, Addison-Wesley Publishing Company, 1977.
- [31] S.Saleem, M.Asalam, M.R.Shaukat, ‘*A Review and Empirical Comparison of Univariate Outlier Detection Methods.*’, Pakistan Journal of Statistics, Vol. 37, No.4, pp. 448-462, 2021. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper>
- [32] A. Papoulis, “*Probability, Random Variables, Stochastic Processes*”, 3rd ed., New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1991.
- [33] MathWorks documentation, Confidence & Prediction Bounds, R2018b <https://www.mathworks.com/help/curvefit/confidence-and-prediction-bounds.html>
- [34] F. Argenti, A. Lapini, T. Bianchi, L. Alparone, “*A Tutorial on Speckle Reduction in Synthetic Aperture Radar Images*”, IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, Vol. 1, No. 3, pp. 6-35, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/MGRS.2013.2277512>
- [35] Jian Li, Qian Du, Caixin Sun, “*An improved box-counting method for image fractal dimension estimation*”, Pattern Recognition, vol 42, no. 11, pp. 2460-2469, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2009.03.001>.
- [36] C. Wang, J. Caja, E. Gómez, “*Comparison of methods for outlier identification in surface characterization*”, Measurement, Vol.117, pp. 312-325, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.12.015>
- [37] S. Lekshmi, K. Revathy, and S. R. Prabhakaran Nayar, “*Galaxy classification using fractal signatures*”, Astronomy Astrophysics, vol 405, no 3, pp.1163-1167, 2003. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20030541>
- [38] N. Ampilova, I. Soloviev, A. Kotopoulis, G. Pouraimis, P. Frangos , “*On the Analysis of Sea Surface Images related to Sea State Determination by Multifractal Methods*’, Applied Electromagnetism Journal, vol. 21, no. 1, pp. 23 – 30, Dec. 2019. [Online]. Available: <http://jae.ece.ntua.gr/archive/2019/JAE>





## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup> Πρακτική Εφαρμογή: «Χρήση RADAR SAR για Προσδιορισμό θαλάσσιας κυμάτωσης σε πραγματικό χρόνο»

### Περιεχόμενα

5.1 Πρακτική εφαρμογή - 'real time' προσδιορισμός θαλάσσιας κυμάτωσης .....	162
5.1.1 Διάγραμμα ροής αλγόριθμου υπολογισμού $Dm(t)$ .....	163
5.2 Διάγραμμα 'fractal dimension' $Dm$ ως προς τον χρόνο .....	164
5.3 Διάγραμμα 'fractal dimension' $Dm$ ως προς 'grazing angle' $\theta g$ .....	166
5.3.1 Υπολογισμός συναρτησιακής σχέσης μεταξύ $Dm$ και γωνίας θέασης $\theta g$ .....	167
5.4 Βελτίωση στο υπολογισμό του $Dm$ με αντιστάθμιση της γωνίας πρόσπτωσης ..	168
5.5 Ανακεφαλαίωση .....	170

### Περίληψη

Δημιούργησα ένα πρόγραμμα για υπολογισμό και ανάλυση της μορφοκλασματικής υπογραφής των καταγραφών σε 'πραγματικό χρόνο'. Συγκεκριμένα το πρόγραμμα ανασύρει με ημερολογιακή - χρονική σειρά τις εγγραφές 'raw data' του αερομεταφερόμενου RADAR όπως αυτές κατεγράφησαν κατά την διάρκεια της πτήσης του ελικοπτέρου πάνω από την θάλασσα. Κάθε 3.5sec υπολογίζει την μορφοκλασματική υπογραφή που εμφανίζουν τα οπισθοσκεδαζόμενα HM κύματα στον δέκτη του RADAR (3D SAR raw data  $N=3500$ ) και αποτυπώνει την μέση τιμή της σχηματισθείσας μορφοκλασματικής υπογραφής  $Dm$  ως προς τον πραγματικό χρόνο. Η τιμή  $Dm$ , όπως απέδειξα στο προηγούμενο κεφάλαιο, είναι μια τιμή που χαρακτηρίζει τον βαθμό κυμάτωσης της θαλάσσιας επιφάνειας και κατ' επέκταση το διάγραμμα της τιμής  $Dm$  ως προς τον χρόνο είναι ένα διάγραμμα προσδιορισμού της θαλάσσιας κυμάτωσης σε πραγματικό χρόνο.

Στην ενότητα 5.1 δίνω τον αλγόριθμο υπολογισμού σε μορφή διαγράμματος ροής και μια βασική περιγραφή της διαδικασίας υπολογισμού της παραμέτρου 'fractal dimension'  $Dm$ .

Στην ενότητα 5.2 παρουσιάζω τα αποτελέσματα υπολογισμών από την 1<sup>η</sup> και την 2<sup>η</sup> ημέρα σε μορφή διαγράμματος της τιμής  $Dm$  ως προς το χρόνο καταγραφής των μετρήσεων κατά την κατακόρυφη κίνηση του ελικοπτέρου και το 'οκανάρισμα' της θάλασσας από 15° έως 50°

Στην ενότητα 5.3 παρουσιάζω τα παραπάνω αποτελέσματα υπολογισμών από την 1<sup>η</sup> και την 2<sup>η</sup> ημέρα σε μορφή διαγράμματος της τιμής  $Dm$  ως προς την γωνία θέασης  $\theta g$  κατά τον χρόνο καταγραφής των μετρήσεων και αναζητώ το πώς η μεταβολή της γωνίας θέασης της θαλάσσιας επιφάνειας από το RADAR επηρεάζει την τιμή εκτίμησης  $Dm$  για την τραχύτητα της επιφάνειας.

Στην ενότητα 5.4 επαναλαμβάνω τον αλγόριθμο υπολογισμού και ανάλυσης της μορφοκλασματικής υπογραφής των καταγραφών σε 'πραγματικό χρόνο' συμπεριλαμβάνοντας ένα παράγοντα αντιστάθμισης της μεταβολής της γωνίας πρόσπτωσης και παρουσιάζω τα τελικά αποτελέσματα.

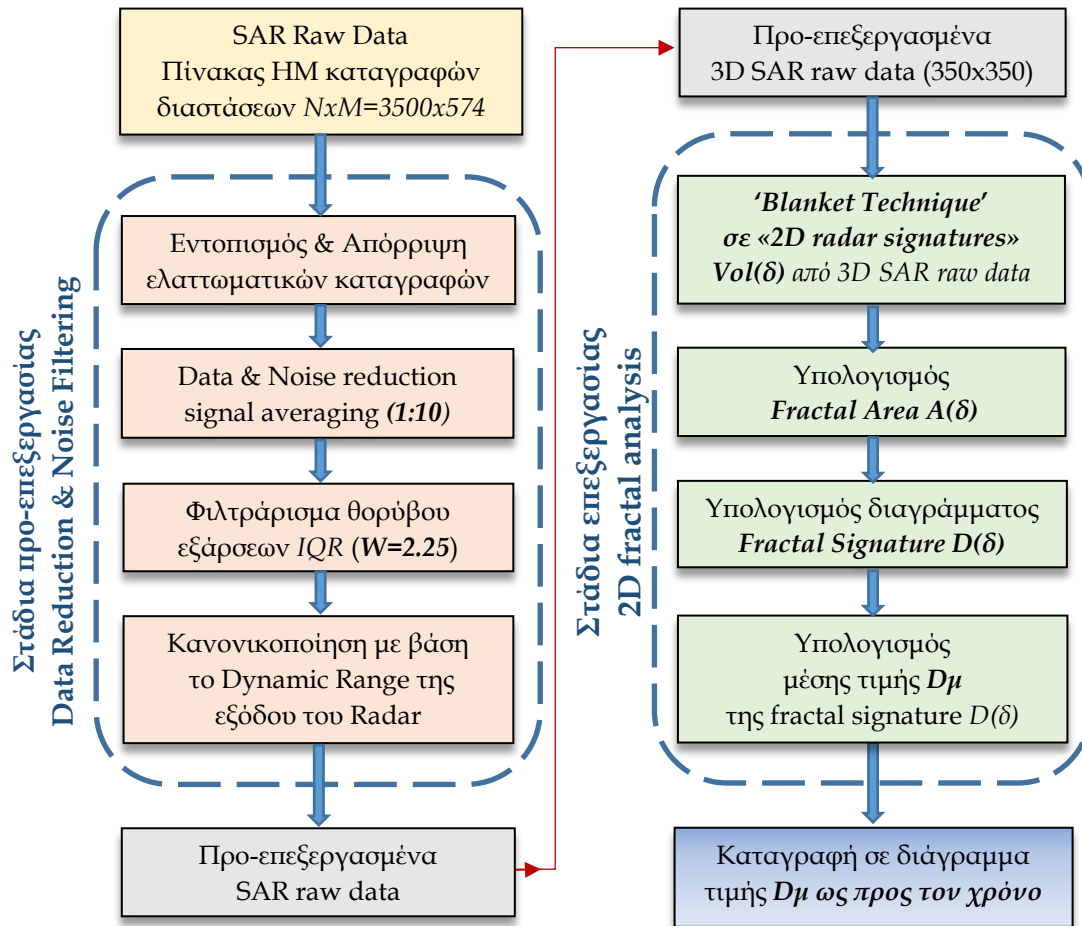
Το κεφάλαιο κλείνει με μια ανακεφαλαίωση και τα τελικά συμπεράσματα.

## **5.1 Πρακτική εφαρμογή - '*real time*' προσδιορισμός θαλάσσιας κυμάτωσης**

Μια πρακτική εφαρμογή που θα μπορούσε να έχει η συγκεκριμένη μέθοδο ανάλυσης των οπισθοσκεδαζόμενων ΗΜ κυμάτων είναι η αξιοποίησή της για το προσδιορισμό της θαλάσσιας κατάστασης που επικρατεί σε μια θαλάσσια περιοχή σε πραγματικό χρόνο απευθείας από τα SAR '*raw data*'. Ως ένα παράδειγμα εφαρμογής θα μπορούσε να είναι ένα ελικόπτερο κατά την διάρκεια μιας νυκτερινής επιχείρησης διάσωσης, ή ένα αεροπλάνο που πετά πάνω από μια θαλάσσια περιοχή κατά την διάρκεια νυκτερινής πτήσης και το οποίο θα μπορούσε, υλοποιώντας την συγκεκριμένη μέθοδο, να προσδιορίζει με ακρίβεια και να εμφανίζει σε κάποια οθόνη στο πιλοτήριο την θαλάσσια κυμάτωση '*sea state*' που επικρατεί στην περιοχή καθώς και το ύψος των κυμάτων, ενημερώνοντας έτσι τον πιλότο ή και το κέντρο επιχειρήσεων.

### 5.1.1 Διάγραμμα ροής αλγόριθμου υπολογισμού $D_{\mu}(t)$

Προκειμένου να δοκιμάσω την παραπάνω ιδέα στην πράξη θα εφαρμόσω τον προτεινόμενο αλγόριθμο (διάγραμμα ροής εικόνας 5-1) στο σύνολο των καταγραφών του αρχείου της 1<sup>ης</sup> και 2<sup>ης</sup> ημέρας του πειράματος NEMO2014.



Εικόνα 5-1. Διάγραμμα ροής των αλγορίθμων προ-επεξεργασίας και επεξεργασίας για τον υπολογισμό και την καταγραφή της τιμής  $D_{\mu}$  ως προς τον χρόνο

Το λογισμικό διαβάζει από το αρχείο καταγραφών των SAR 'raw data' σειριακά τις καταχωρήσεις των οπισθοσκεδαζόμενων HM εντάσεων ξεκινώντας από την αρχή του αρχείου, το οποίο λαμβάνω προς απλοποίηση της διαδικασίας ως την αρχή του χρόνου, ήτοι χρόνο 'μηδέν'. Οι καταγραφές των εντάσεων των οπισθοσκεδαζόμενων HM κυμάτων (3D SAR raw data) ανασύρονται κάθε 3,5 δευτερόλεπτα ήτοι για  $N=3500ms$  και για  $M=574$  και εφαρμόζω σύμφωνα με το διάγραμμα ροής, τα στάδια προ-επεξεργασία ('Data reduction 350/574', 'Signal averaging 1:10', 'IQR/filtering W=2.25', 'Normalization'. Εν συνέχεια τα προ επεξεργασμένα δεδομένα καταγραφής (3D SAR raw data 350x350) οδηγούνται στα στάδια επεξεργασίας 2D fractal analysis.

Στο στάδιο επεξεργασίας υπολογίζεται με την μέθοδο της τεχνικής 'blanket' σε δύο διαστάσεις 350x350 ο όγκος  $Vol(\delta)$  και εν συνέχεια το 'fractal area'-  $A(\delta)$  των προ-επεξεργασμένων 3D SAR raw data εφαρμόζοντας την μέθοδο του  $\delta$ -παράλληλου σώματος για  $\delta=1,2,3...n$  και δημιουργώντας έτσι μια σειρά υπολογισμών 'fractal

*dimension'  $D(\delta)$*  που σχηματίζουν την μορφοκλασματική υπογραφή η οποία χαρακτηρίζει αυτά τα 3,5sec καταγραφών.

Τελικό αποτέλεσμα είναι μια τιμή μορφοκλασματικής διάστασης  $D\mu$  η οποία αντιπροσωπεύει την μέση τιμή της μορφοκλασματικής υπογραφής για τα συγκεκριμένα 3,5sec καταγραφών. Επαναλαμβάνω την ίδια διαδικασία για τα επόμενα 3,5sec πτήσης του ελικοπτέρου και μέχρι το τέλος του χρόνου των καταγραφών.

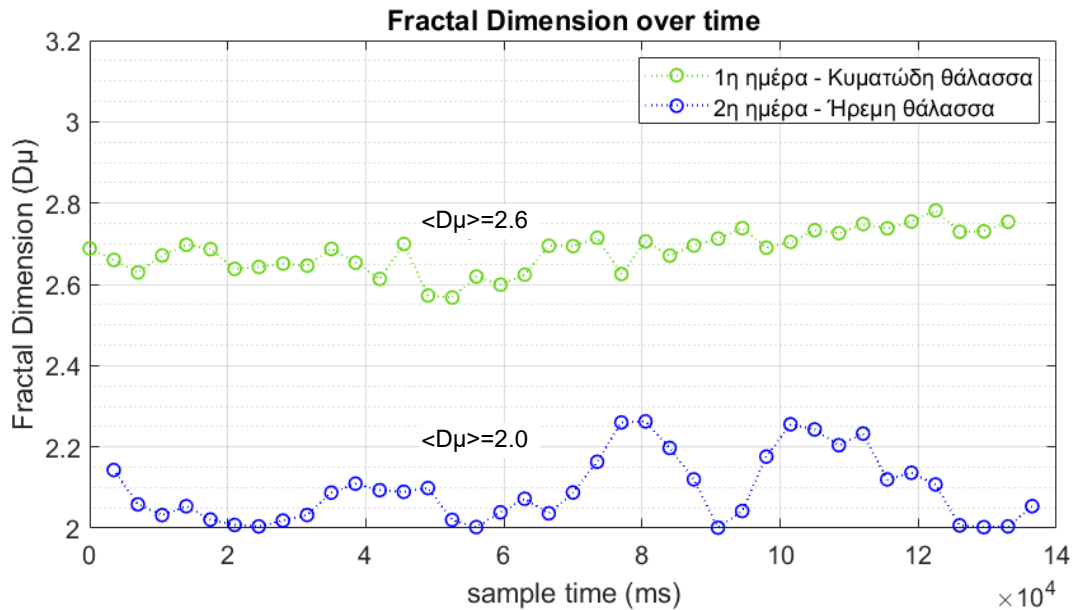
## 5.2 Διάγραμμα '*fractal dimension*' $D\mu$ ως προς τον χρόνο

Στην εικόνα 5-2 παρουσιάζω σε κοινό διάγραμμα (αντιπαραβολή) τα αποτελέσματα των τιμών  $D\mu$  από την 1<sup>η</sup> και την 2<sup>η</sup> ημέρα. Οι πράσινοι κύκλοι αντιστοιχούν σε μετρήσεις  $D\mu$  της θαλάσσιας επιφάνειας κάθε 3500ms για την 1<sup>η</sup> ημέρα (κυματώδη θάλασσα - '*sea state*' 4) και οι μπλε κύκλοι αντίστοιχα σε μετρήσεις κάθε 3500ms για την 2<sup>η</sup> ημέρα (ήρεμη θάλασσα - '*sea state*' 1).

Το διάγραμμα έχει υπολογιστεί για περίπου 2,5 λεπτά πτήσης του ελικοπτέρου, για την ακρίβεια για 138700ms κατά τα οποία το RADAR μετέβαλε την γωνία θέασης του  $\theta g$  ως προς την θάλασσα από 15° έως 50°.

Παρατηρώντας τις μετρήσεις μπλε χρώματος διαπιστώνουμε ότι καθ' όλη την διάρκεια πτήσης του ελικοπτέρου πάνω από την ήρεμη θάλασσα και παρά την συνεχή αλλαγή της γωνίας θέασης της θαλάσσιας επιφάνειας από 15° έως και 50° η τιμή  $D\mu$  κυμαίνεται σταθερά μεταξύ 2.00 με 2.20. Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν σε '*sea state*' 1.

Παρατηρώντας τις μετρήσεις πράσινου χρώματος διαπιστώνουμε ότι επίσης καθ' όλη την διάρκεια πτήσης του ελικοπτέρου πάνω από την κυματώδη θάλασσα και παρά την συνεχή αλλαγή της γωνίας σκόπευσης της θάλασσας από 15° έως και 50° η τιμή  $D\mu$  κυμαίνεται σταθερά μεταξύ 2.55 και 2.75. Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν σε '*sea state*' 4-5.



Εικόνα 5-2. Συνεχής προσδιορισμός της θαλάσσιας κυμάτωσης με μετρήσεις κάθε 3,5 sec. Διάγραμμα  $D\mu$  ως προς το χρόνο καταγραφής των μετρήσεων κατά την κατακόρυφη κίνηση του ελικοπτερόου και το 'σκανάρισμα' της θάλασσας από 15° έως 50°

Επιβεβαιώνονται έτσι και από το διάγραμμα της εικόνας 5-2 ότι ακόμα και ανεξαρτήτως γνώσεως της γωνίας πρόσπτωσης των HM κυμάτων η μέθοδος της μορφοκλασματικής ανάλυσης με το κριτήριο  $D\mu$  προσδιορίζει σε κάθε δευτερόλεπτο την θαλάσσια κυμάτωση με εξαιρετική επιτυχία, επαναληψιμότητα και επαρκή διαχωρισμό.

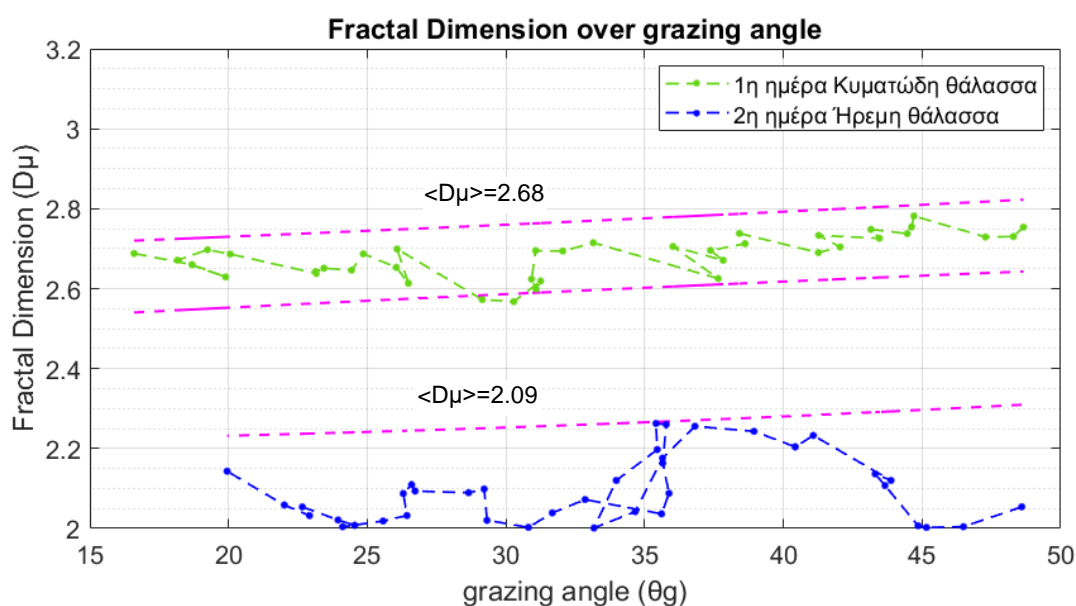
Ισχύουν επίσης οι ίδιες παρατηρήσεις που είχαν γίνει στην ανάλυση των αποτελεσμάτων παράγραφος §4.6 του 4<sup>ου</sup> κεφαλαίου με βάση δείγματα από το αρχείο καταγραφών με σημαντικότερη την παρατήρηση ότι:

➤ αυξανόμενης της γωνίας  $\theta g$  (από τις 15° στις 50°) δημιουργείται μια σταδιακή 'υπερεκτίμηση' για την πραγματική τιμή  $D\mu$  που στην εν λόγω εικόνα καταγράφεται σαν μια, με τον χρόνο, ανοδική κλίση στο διάγραμμα της τιμής. Η υπερεκτίμηση αυτή οφείλεται, όπως εξήγησα και στην προηγούμενη παράγραφο §4.6, στην αυξανόμενη ανακλαστικότητα της θαλάσσιας επιφάνειας αυξανόμενης της γωνίας θέασης  $\theta g$ .

Στην επόμενη παράγραφο θα προτείνω μια διόρθωση για την αντιμετώπιση του φαινομένου της υπερεκτίμησης της τραχύτητας της επιφάνειας (αύξηση της υπολογισθείσας μορφοκλασματικής διάστασης  $D\mu$  της επιφάνειας) λόγω μείωσης της γωνίας πρόσπτωσης και συνεπώς αύξησης της έντασης των οπισθοσκεδαζόμενων HM κυμάτων.

### 5.3 Διάγραμμα ‘fractal dimension’ $D_m$ ως προς ‘grazing angle’ $\theta_g$

Επαναλαμβάνω την παραπάνω ανάλυση του συνόλου των καταγραφών και σημειώνω στο διάγραμμα της εικόνας 5-3 τα αποτελέσματα των μετρήσεων ως προς την τιμή θέασης του RADAR προς την θάλασσα. Οι διακεκομμένες ροζ γραμμές οριοθετούν το 95% άνω και κάτω διάστημα πρόβλεψης ‘95% prediction bounds’. Το διάστημα αυτό καθορίζει, με βάση την παρατηρούμενη μεταβλητότητα των μετρήσεων ανά γωνία, τα όρια μέσα στα οποία αναμένεται να βρίσκεται με συχνότητα 95% κάθε νέα εκτίμηση της θαλάσσιας κατάστασης μέσω της τιμής  $D_m$  όταν η θαλάσσια όντως βρίσκεται στην αντίστοιχη κατάσταση.



Εικόνα 5-3. Συνεχής προσδιορισμός της θαλάσσιας κυμάτωσης με μετρήσεις κάθε 3,5 sec.

Διάγραμμα  $D_m$  ως προς την γωνία λήψης των μετρήσεων κατά την κατακόρυφη κίνηση του ελικοπτερου και το ‘σκανάρισμα’ της θάλασσας από 15° έως 50°

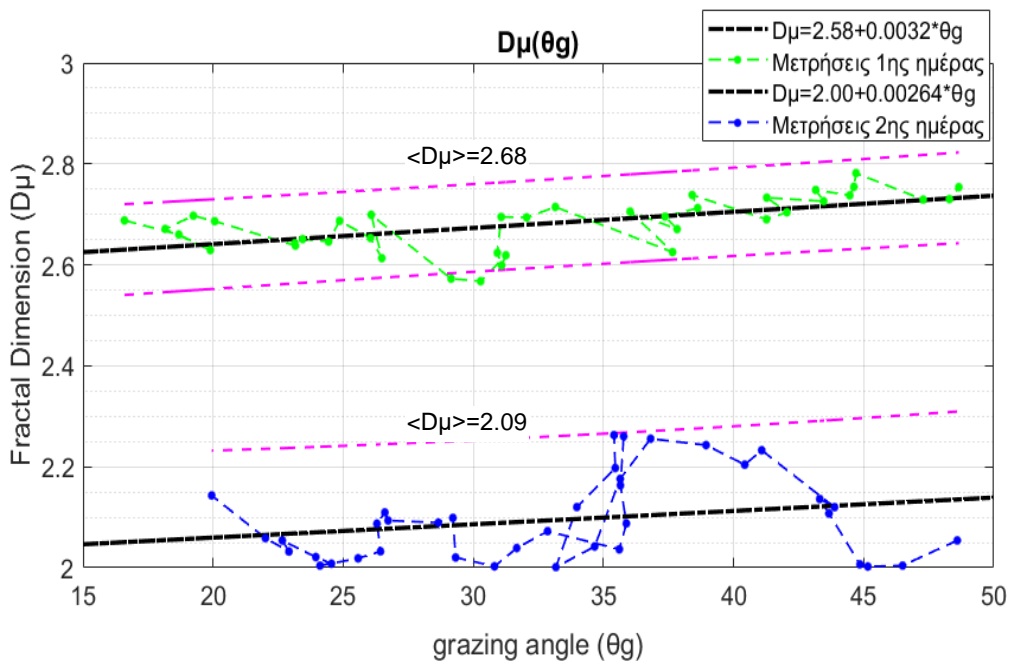
Από το διάγραμμα της εικόνα 5-3 επιβεβαιώνεται το συμπέρασμα ότι ο προσδιορισμός της τιμής  $D_m$  που αφορά την τραχύτητα της θαλάσσιας επιφάνειας ‘sea state’ γίνεται με επαρκέστατο διαχωρισμό παρά το γεγονός ότι η γωνία πρόσπτωσης των ΗΜ κυμάτων είναι χρονικά μεταβαλλόμενη. Από το διάγραμμα παρατηρούμε επίσης ότι το ελικόπτερο λόγω του ανέμου αλλά και της κίνησής του δεν είχε μια σταθερά και γραμμικά αυξανόμενη γωνίας θέασης του RADAR από τις 15° έως της 50° αλλά υπήρχαν κάποιες στιγμές όπου η γωνία θέασης γύριζε σε μικρότερες τιμές και αυτό καταγράφεται εμφανέστερα για την 2<sup>η</sup> ημέρα μετρήσεων (μπλε γραμμή). Π.χ. στην περιοχή των 35° βλέπουμε ότι η γωνίας θέασης έφτασε μέχρι περίπου τις 36° και μετά άρχισε να μειώνεται και να γυρίζει πίσω μέχρι περίπου τις 33° και μετά να αυξάνει πάλι για να ξεπεράσει τις 35°. Παρόλες όμως τις μη γραμμικές είτε αυξανόμενες είτε μειούμενες μεταβολές της γωνίας πρόσπτωσης των ΗΜ κυμάτων η μέθοδος δεν φαίνεται να επηρεάζεται πέρα από την θετική σύνδεση της αύξησης της γωνίας  $\theta_g$  με υπερεκτίμηση της τιμής  $D_m$ .

Η γενική τάση λοιπόν ότι το πλάτος του οπισθοσκεδαζόμενου HM κύματος αυξάνεται με την αύξηση της γωνίας  $\theta g$  αντικατοπτρίζεται και σε αυτό το διάγραμμα με τη θετική κλίση των ορίων πρόβλεψης (ροζ διακεκομμένες γραμμές). Δηλαδή μεγαλύτερες γωνίες  $\theta g$  συνδέονται με μια πιθανότητα προσδιορισμού αυξημένης τιμής  $D\mu$  (δεδομένου ότι η θαλάσσια κατάσταση παραμένει σταθερή) ειδικά στην περίπτωση που ο σκεδαστής παρουσιάζει μια σταθερά σημαντική τραχύτητα (περίπτωση κυματώδους θάλασσας - πράσινη γραμμή). Σε αυτή την περίπτωση μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι αναδεικνύεται και μια σχέση που τείνει να είναι γραμμική μεταξύ της τιμής  $D\mu$  και της γωνίας πρόσπτωσης των HM κυμάτων. Όσο αυξάνει η γωνία  $\theta g$ , δηλαδή όσο η πρόπτωση των H/M κυμάτων γίνεται λιγότερο πλάγια και περισσότερο κάθετη προς την επιφάνεια, τόσο η εκτίμηση για την τραχύτητα της επιφάνειας (τιμή  $D\mu$ ) αυξάνει, εξ' ου και η ανοδική κλίση που αποτυπώνεται τόσο στις μετρήσεις όσο φυσικά και στα αντίστοιχα διαστήματα πρόβλεψης.

### 5.3.1 Υπολογισμός συναρτησιακής σχέσης μεταξύ $D\mu$ και γωνίας θέασης $\theta g$

Χρησιμοποιώντας την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων προσεγγίζω με μια εξίσωση  $\alpha'$  βαθμού την προφανή θετική συσχέτιση που εμφανίζεται μεταξύ των δύο μεταβλητών, γωνίας  $\theta g$  και διασποράς τιμών εκτίμησης τραχύτητας  $\bar{D}\mu$ , και σχεδιάζω το επόμενο γράφημα, βλ. εικόνα 5-4. Η πληθυσμιακή ευθεία παλινδρόμησης δίνεται γενικά από την σχέση:

$$E(D\mu / \theta g) = \alpha + \beta * \theta g \quad (5.1)$$



Εικόνα 5-4. Εξισώσεις ευθείας ελαχίστων τετραγώνων (μαύρες γραμμές) για τις μετρήσεις της 1<sup>ης</sup> (sea state 1) και της 2<sup>ης</sup> ημέρας (sea state 4)

Εφαρμόζοντας με την βοήθεια του λογισμικού που ανέπτυξα (§4.5.1 επιλογή [Fit]) την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, προσδιορίζω με βάση την διασπορά των μετρήσεων τα  $a$  και τα  $\beta$  για τις μετρήσεις της 1<sup>ης</sup> και της 2<sup>ης</sup> ημέρας αντίστοιχα.

Για την 1<sup>η</sup> ημέρα ‘κυματώδη θαλάσσια επιφάνεια’ - ‘sea state 4’

$$\hat{D}\mu = 2.58 + 0.0032 * \theta g \quad (5.2)$$

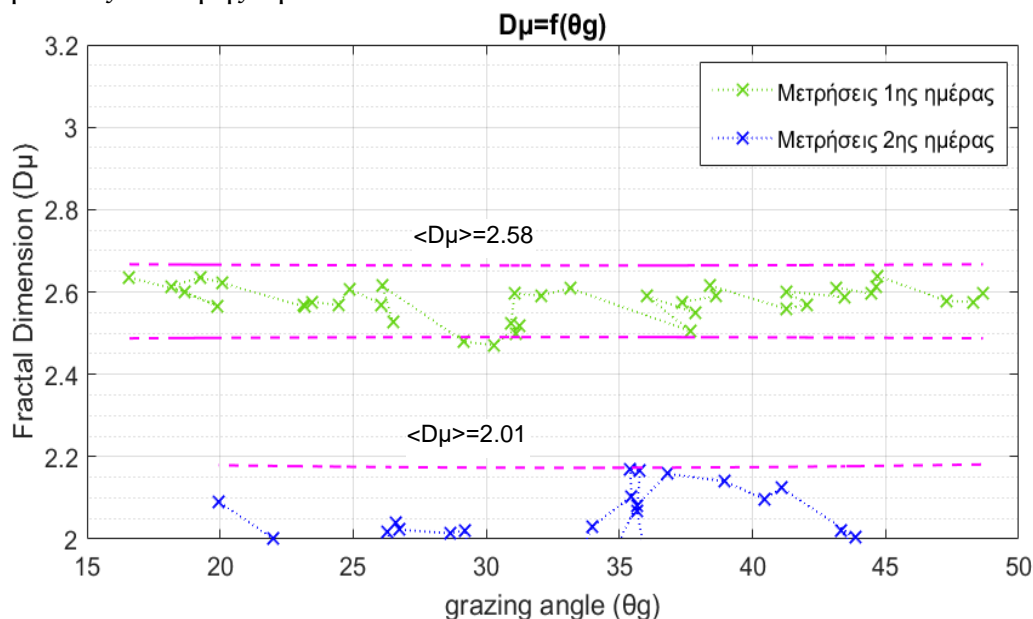
Για την 2<sup>η</sup> ημέρα ‘ήρεμη θαλάσσια επιφάνεια’ - ‘sea state 1’

$$\hat{D}\mu = 2.01 + 0.00264 * \theta g \quad (5.3)$$

Τα αποτελέσματα αυτά προσεγγίζουν απόλυτα την σχετική θεωρία, βλ. §4.4.1 με την τιμή του συντελεστή ‘ $a$ ’ να αποδίδει την μέση τιμή ‘fractal dimension’ που χαρακτηρίζει την θαλάσσια επιφάνεια καθόλα τα περίπου 2.5 λεπτά πτήσεις. Στην σχέση (5.3)  $a=2.01$  αντιστοιχεί όντως σε μια εντελώς λεία επιφάνεια ‘sea state 1’ και στην σχέση (5.2)  $a=2.58$  αντιστοιχεί όντως σε αυξημένης τραχύτητας επιφάνεια ‘sea state 4’. Ο συντελεστής  $\beta$  μπορεί να αξιοποιηθεί ως ένας συντελεστής αντιστάθμισης της μεταβολής της ανακλαστικότητα της επιφάνειας λόγω μεταβολής της γωνίας πρόσπτωσης του RADAR.

## 5.4 Βελτίωση στο υπολογισμό του $D\mu$ με αντιστάθμιση της γωνίας πρόσπτωσης

Στο παρακάτω διάγραμμα, βλ. εικόνα 5-5, με την βοήθεια του λογισμικού που ανέπτυξα, (§4.5.1 επιλογή [C]), διορθώνω κατά ένα παράγοντα  $-\beta * \theta g$  τις υπολογιζόμενες τιμές του  $D\mu$  που προκύπτουν κατά την ανάλυση της μορφοκλασματικής υπογραφής, αφαιρώντας έτσι την εξάρτηση που παρατηρείται μεταξύ των παραμέτρων, γωνία θέασης RADAR, ανακλαστικότητα θαλάσσιας επιφάνειας και τιμής  $D\mu$ .

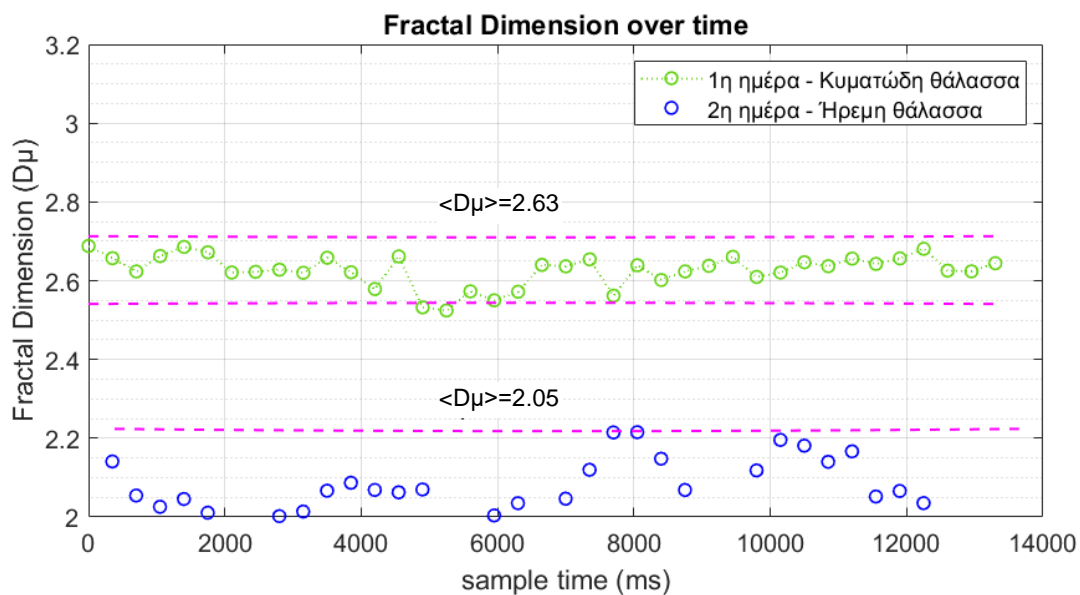


Εικόνα 5-5. Προσδιορισμός της θαλάσσιας κυμάτωσης με τις τιμές  $D\mu$  να είναι διορθωμένες ως προς την εξάρτηση της ανακλαστικότητας της θαλάσσιας επιφάνειας συναρτήσει της γωνίας  $\theta g$



Στο διάγραμμα της εικόνας 5-5 βλέπουμε ότι έχει φύγει η σχετική κλίση και εξάρτηση τις τιμές της μορφοκλασματικής διάστασης  $D_m$  από την γωνία θέασης της θάλασσας  $\theta_g$ . Λαμβάνοντας υπόψη την ανωτέρω διόρθωση κατά ένα παράγοντα  $-\beta \cdot \theta_g$  της τιμής  $D_m$  επαναλαμβάνω μια προσομοίωση του πώς θα ήταν ο προσδιορισμός της θαλάσσιας κυμάτωσης εάν το λογισμικό του συγκεκριμένου RADAR χρησιμοποιούσε τον προτεινόμενο αλγόριθμο και εμφάνιζε στο πιλοτήριο του ελικοπτερου μια τιμή  $D_m$  προς χαρακτηρισμό σε πραγματικό χρόνο της θαλάσσιας κατάστασης.

Από το διάγραμμα της εικόνας 5-6 προκύπτει ότι ο διαχωρισμός μεταξύ ήρεμης και κυματώδους θάλασσας συνεχίζει να είναι εξαιρετικός και επιπλέον μετά την ανωτέρω διόρθωση η τιμές  $D_m$  δεν εμφανίζουν την εξάρτηση από την τιμή της γωνίας θέασης  $\theta_g$  όπως συνέβαινε πριν, βλ. εικόνα 5.2



Εικόνα 5-6. Προσομοίωση προσδιορισμού της θαλάσσιας κυμάτωσης σε πραγματικό χρόνο με μετρήσεις της τιμής  $D_m$  διορθωμένης κατά ένα παράγοντα  $-\beta \cdot \theta_g$ .

Μετά και την ανωτέρω βελτίωση γίνεται σαφές ότι οι συγκεκριμένες θαλάσσιες καταστάσεις (*sea state 1* και *sea state 4*) μπορούν να αποδοθούν σταθερά σε συγκεκριμένες τιμές  $D_m$  μορφοκλασματικής διάστασης.

Αναφορικά με την μικρή διασπορά που παρατηρείται στο εύρος των τιμών  $D_m$ , αυτή μπορεί να ελαχιστοποιηθεί εάν η γωνία σκόπευσης του RADAR ως προς την επιφάνεια της θάλασσας παραμένει σταθερή ή έχει ένα μικρότερο εύρος μεταβολής (π.χ.  $\pm 5^\circ$  έναντι του τρέχοντος  $15^\circ - 50^\circ$ ).

Με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα των μετρήσεων του πειράματος NEMO 2014 και την ανάλυση με την μέση τιμή της μορφοκλασματικής υπογραφής έχουμε διαθέσιμες τις αντιστοιχίσεις μεταξύ τιμών  $D_m$  και *sea state 1* και *4*. Εκτελώντας ένα πείραμα παρόμοιο του NEMO 2014 όπου για συγκεκριμένες τιμές γωνίας σκόπευσης του RADAR θα λαμβάνονται εκτεταμένες μετρήσεις από όλες τις δυνατές θαλάσσιες καταστάσεις, ήτοι για *sea state* από 1 έως 8 θα μπορούσαμε να αντιστοιχίσουμε μονοσήμαντα τις τιμές  $D_m$  με όλες τις θαλάσσιες (από 1 έως 8) καταστάσεις.

## 5.5 Ανακεφαλαίωση

Η πρακτική εφαρμογή αυτή είναι ταυτόχρονα και μια επαλήθευση της προτεινόμενης μεθόδου. Χρησιμοποιώντας το σύνολο των καταγραφών του RADAR που μου διετέθησαν από το Νορβηγικό Ίδρυμα Αμυντικών Ερευνών (FFI), δημιουργώ ένα πρόγραμμα για υπολογισμό και ανάλυση της μορφοκλασματικής υπογραφής των καταγραφών σε 'πραγματικό χρόνο'. Συγκεκριμένα το πρόγραμμα ανασύρει με ημερολογιακή - χρονική σειρά τις εγγραφές 'raw data' του αερομεταφερόμενου RADAR όπως αυτές κατεγράφησαν κατά την διάρκεια της πτήσης του ελικοπτέρου πάνω από την θάλασσα. Κάθε 3.5sec υπολογίζει την μορφοκλασματική υπογραφή που εμφανίζουν μέχρι εκείνη την στιγμή τα οπισθοσκεδαζόμενα ΗΜ κύματα στον δέκτη του RADAR (3D SAR raw data  $N=3500$ ) και αποτυπώνει σε ένα διάγραμμα την μέση τιμή της σχηματισθείσας μορφοκλασματικής υπογραφής  $D\mu$  ως προς τον πραγματικό χρόνο.

Λαμβάνοντας την μέση τιμή της μορφοκλασματικής υπογραφής  $D\mu(t)$  ως το μέτρο για την θαλάσσια κυμάτωση που επικρατεί σε κάθε χρονική στιγμή της καταγραφής για την 1<sup>η</sup> και την 2<sup>η</sup> ημέρα και αντιπαραβάλλοντας το διάγραμμα  $D\mu(t)$  με τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες κατά τον χρόνο των μετρήσεων όπως αυτές δόθηκαν από το Νορβηγικό Ίδρυμα προκύπτει ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος εντοπίζει με εξαιρετική επιτυχία και με απόλυτη συνέπεια καθ' όλη την διάρκεια της πτήσεως την θαλάσσια κατάσταση που επικρατούσε στην περιοχή κατά την 1<sup>η</sup> και 2<sup>η</sup> αντίστοιχα ημέρα διεξαγωγής του πειράματος NEMO2014.

Κατά την μελέτη των αποτελεσμάτων διαπιστώνεται μια υπερεκτίμηση της τραχύτητας της θαλάσσιας επιφάνειας, τιμή  $D\mu$  ανάλογη με την τιμή γωνίας θέασης  $\theta g$  της θάλασσας από το RADAR. Χρησιμοποιώντας την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων προσεγγίζω με μια εξίσωση  $\alpha'$  βαθμού την προφανή θετική συσχέτιση που εμφανίζεται μεταξύ των δύο μεταβλητών, γωνίας  $\theta g$  και διασποράς τιμών εκτίμησης τραχύτητας  $\hat{D}\mu$ . Διορθώνοντας κατά ένα παράγοντα  $-\beta*\theta g$  τις υπολογιζόμενες τιμές του  $D\mu$  που προκύπτουν κατά την ανάλυση της μορφοκλασματικής υπογραφής, αντισταθμίζω την εξάρτηση που παρατηρείται μεταξύ των παραμέτρων, γωνία θέασης RADAR, ανακλαστικότητα θαλάσσιας επιφάνειας και τιμής  $D\mu$  βελτιστοποιώντας το τελικό αποτέλεσμα προσδιορισμού της θαλάσσιας κυμάτωσης.

Μετά και την ανωτέρω βελτίωση γίνεται σαφές ότι οι συγκεκριμένες θαλάσσιες καταστάσεις που μελετήθηκαν στο πείραμα NEMO2014 'sea state' 1 και 'sea state' 4 μπορούν να αποδοθούν με την χρήση της προτεινόμενης μεθόδου σε σταθερές και πολύ συγκεκριμένες τιμές μορφοκλασματικής διάστασης  $D\mu$ .

## Συμπεράσματα διατριβής και μελλοντική έρευνα

### 6.1 Συνεισφορά της παρούσας διδακτορικής εργασίας

Η συνεισφορά της παρούσας διδακτορικής εργασίας έγκειται στην ανάδειξη των μορφοκλασματικών αλγόριθμων, ως ιδιαίτερα κατάλληλων και αξιόπιστων εργαλείων επεξεργασίας σημάτων RADAR, για τον προσδιορισμό της τραχύτητας της επιφάνειας ενός σκεδαστή.

Εξίσου σημαντική είναι και η συνεισφορά της παρούσας διατριβής στην εφαρμοσμένη έρευνα όπου τόσο με πειραματικά όσο και με δεδομένα προσομοίωσης τεκμηριώνει ότι πολύ σημαντικά στοιχεία για την υφή της επιφάνειας ενός σκεδαστή μπορούν να εξαχθούν και από την απευθείας ανάλυση των οπισθοσκεδαζόμενων HM κυμάτων ενός RADAR τύπου SAR ακόμα και πριν προηγηθεί η κλασική μετατροπή των ακατέργαστων δεδομένων (SAR *raw data*) σε δεδομένα εικόνας SAR (SAR *image*).

### 6.2 Γενική Σύνοψη

Στην ενότητα αυτή δίνω μια γενική σύνοψη και συμπυκνώνω τα κύρια συμπεράσματα της παρούσας διατριβής

Σε πρώτη φάση προσέγγισα το αντικείμενο της έρευνας με την χρήση μαθηματικών μοντέλων και υπολογιστικών προσομοιώσεων από όπου ανέδειξα μια μέθοδο με την οποία ο βαθμός τραχύτητας μια επιφάνειας μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια αναλύοντας απευθείας τα δεδομένα των οπισθοσκεδαζόμενων HM κυμάτων. Η προτεινόμενη μέθοδος καθώς και αποτελέσματα των σχετικών προσομοιώσεων δημοσιεύθηκαν και παρουσιάστηκαν σε σχετικά συνέδρια με θετικά σχόλια εγείροντας όμως ως ζήτημα το κατά πόσο θα μπορούσε η προτεινόμενη μέθοδος να εφαρμοστεί και να λειτουργήσει σε ένα περιβάλλον με έντονη παρουσία θορύβου, όπως είναι το περιβάλλον λειτουργίας των RADAR σε πραγματικές συνθήκες. Για το σκοπό αυτό δοκίμασα επιτυχώς μέσω προσομοιώσεων, μια πρόταση για την αντιμετώπιση της παρουσίας θορύβου στην προτεινόμενη μέθοδο, την οποία συμπεριέλαβα στην παρούσα εργασία και παρουσίασα επιτυχώς σε επόμενα συνέδρια.

Στην συνέχεια αναζητήσα πραγματικές καταγραφές RADAR, προκειμένου να επαληθεύσω και στην πράξη τα θεωρητικά αποτελέσματα. Για το σκοπό αυτό μου διετέθησαν καταγραφές, '*raw data*', από RADAR τύπου PicoSAR X-band του Νορβηγικού Ινστιτούτου Άμυνας (FFI), οι οποίες συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος NEMO2014. Το πείραμα διεξήχθη σε μια θαλάσσια περιοχή στην νότια Ιταλία και οι καταγραφές RADAR αφορούσαν λήψεις θαλάσσιας επιφάνειας σε διαφορετικές ημέρες και υπό διαφορετικές συνθήκες ανέμου. Το ζητούμενο από αυτές τις καταγραφές ήταν να προσδιοριστεί ο βαθμός της θαλάσσιας κυμάτωσης '*sea state*' που επικρατούσε στην θαλάσσια περιοχή κατά την διεξαγωγή του πειράματος. Εφαρμόζοντας αλγόριθμους μορφοκλασματικής ανάλυσης επι των ακατέργαστων HM καταγραφών του δέκτη ενός RADAR τύπου SAR, επιβεβαίωσα

πειραματικά την δυνατότητα προσδιορισμού της τραχύτητας της επιφάνειας απευθείας από τα δεδομένα των οπισθοσκεδαζόμενων ΗΜ κυμάτων.

Το γενικότερο και ιδιαίτερα σημαντικό συμπέρασμα που προκύπτει από την παρούσα έρευνα είναι ότι τα μορφοκλασματικά χαρακτηριστικά που εμφανίζουν οι μετρήσεις έντασης των οπισθοσκεδαζόμενων ΗΜ κυμάτων ενός RADAR αντανακλούν ευθέως τα ιδιαίτερα μορφοκλασματικά χαρακτηριστικά της τραχύτητα της επιφάνειας του σκεδαστή. Έτσι μορφοκλασματικά μέτρα όπως το *'fractal length'*, το *'fractal dimension'* και ακόμα περισσότερο η μορφοκλασματική υπογραφή, *'fractal signature'* των μετρήσεων έντασης των οπισθοσκεδαζόμενων ΗΜ αποκαλύπτουν με μοναδικό τρόπο πληροφορίες για τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και την τραχύτητα της επιφάνειας του σκεδαστή.

### 6.3 Σύνοψη ανά κεφάλαιο και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στην επόμενη παραγράφους παραθέτω μια πολύ σύντομη ανακεφαλαίωση και προτάσεις για την συνέχιση της έρευνας ανά ερευνητικό κεφάλαιο.

#### Σύνοψη και συμπεράσματα 2<sup>ο</sup> Κεφαλαίου

Στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο διερεύνησα μέσω προσομοιώσεων σκέδασης την δυνατότητα του προσδιορισμού της τραχύτητας μιας επιφάνειας αναλύοντας απευθείας τα οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρομαγνητικά ΗΜ κύματα που επιστρέφουν στην κεραία ενός RADAR μετά από την πρόσπτωσή τους σε αυτή την τραχεία επιφάνεια. Προσομοίωσα την επιφάνεια σκέδασης με χρήση μαθηματικών μοντέλων *'fractal'* ελέγχοντας έτσι με ακρίβεια την τραχύτητα της επιφάνειας μέσω του συντελεστή της μορφοκλασματικής διάστασης  $D$  *'fractal dimension'*. Στην συνέχεια προσομοίωσα την κυματομορφή εκπομπής ενός RADAR τύπου SAR ως μια εκπομπή ριπής, *'burst'*, ήτοι μια βηματικού τύπου, *'stepped frequency'* κυματομορφή. Μετά την σχετική ανάλυση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων διαπίστωνα ότι η τραχύτητα της επιφάνειας και συγκεκριμένα το *'fractal dimension'*  $D$  της επιφάνειας σκέδασης μπορεί να εκτιμηθεί μέσα από τις μεταβολές στις εντάσεις των οπισθοσκεδαζόμενων ΗΜ κυμάτων και συγκεκριμένα διαπίστωνα ότι η τιμή του *'fractal dimension'* της επιφάνειας του σκεδαστή μπορεί να προσεγγιστεί από την σχέση  $\hat{D} = a * slope^b + c$  όπου *'a'*, *'b'*, *'c'* είναι σταθερές που προκύπτουν μετά από εφαρμογή μεθόδων βέλτιστης προσαρμογής στα σημεία των μετρήσεων και *'slope'* η μέση τιμή κλίσης των ευθειών που συνδέουν την μέγιστη τιμή που εμφανίζει ο συντελεστής σκέδασης με την αμέσως επόμενη και προηγούμενη τοπική μέγιστη τιμή. Εξετάστηκαν στην συνέχεια περιορισμοί και οι προϋποθέσεις που πρέπει να ισχύουν προκειμένου να μπορεί η συγκεκριμένη μέθοδο υπολογισμού να λειτουργεί. Οι κυριότερες προϋποθέσεις είναι το επαρκές εύρος ζώνης  $BW \gg 0.05 f_0$ , δηλαδή το εύρος ζώνης μεταβολής της βηματικής συχνότητας εκπομπής πρέπει να είναι μεγαλύτερο του 5% της αρχικής τιμής της συχνότητας εκπομπής, όπως επίσης πρέπει να υπάρχει ένα επαρκώς μικρό βήμα μεταβολής της συχνότητας ήτοι,  $0,02 \cdot BW \geq \Delta f$  από όπου προκύπτει και η απαίτηση για ένα ελάχιστο αριθμό βημάτων μεταβολής  $M$  έτσι ώστε να ισχύει  $M \geq BW/\Delta f$ . Τέλος διαπιστώθηκε ότι η

προτεινόμενη μέθοδος μπορεί να λειτουργήσει ικανοποιητικά μόνο εντός ενός συγκεκριμένου εύρους γωνιών πρόσπτωσης  $20^\circ \leq \theta_1 \leq 70^\circ$  και υπό την επιπλέον προϋπόθεση ότι η γωνία  $\theta_1$  παραμένει σταθερή, ή μεταβάλλεται πλησίον της αρχικής γωνίας πρόσπτωσης για την οποία προσαρμόστηκαν οι σταθερές  $a, b, c$  του μοντέλου εκτίμησης  $\hat{D} = a * slope^b + c$ .

Η ευρωστία της προτεινόμενης μεθόδου δοκιμάστηκε έναντι θορύβου, σε περιβάλλον προσομοίωσης ηλεκτρονικού θορύβου AWGN, απ' όπου διαπιστώθηκε ότι η μέθοδος μπορεί να λειτουργήσει με ασφάλεια για μια τάξη σηματοθορυβικού λόγου  $SNR \geq 23db$ . Για να παραμείνει η μέθοδος λειτουργική σε μεγαλύτερες στάθμες θορύβου χρειάζεται να γίνει χρήση μεθόδων βελτίωσης SNR. Δοκιμάστηκε με επιτυχία η τεχνική του *'signal averaging'*. Το μειονέκτημα της τεχνικής του *'signal averaging'*, στην περίπτωση της προτεινόμενης μεθόδου είναι ότι η επιφάνεια καθώς και η γωνία πρόσπτωσης των HM κυμάτων πρέπει να παραμένουν κατά το δυνατό σταθερά καθ' όλη τη διάρκεια λήψης των μετρήσεων ούτως ώστε τα δεδομένων των οπισθοσκεδαζόμενων HM κυμάτων να μπορούν να θεωρηθούν ως *'strong correlated'* μεταξύ τους και να μπορεί έτσι να ισχύει η εφαρμογή της τεχνικής αυτής. Αναλυτικότερα συμπεράσματα είναι διαθέσιμα στο τέλος του 2<sup>ου</sup> κεφαλαίου §2.7.

### Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η συνέχιση της έρευνα που αφορά το ανωτέρω ερευνητικό κεφάλαιο θα μπορούσε να έχει τους εξής στόχους:

- την αναβάθμιση του λογισμικού *'ScatteringLab'*, που ανέπτυξα στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής, έτσι ώστε αυτό να προσομοιώνει σκεδάσεις και σε τρισδιάστατες επιφάνειες.
- την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου των κλίσεων *'slopes'* σε τρισδιάστατη *'3D fractal'* επιφάνεια προς επαλήθευση των αποτελεσμάτων της μεθόδου και εξαγωγή περαιτέρω συμπερασμάτων.

Να σημειώσω εδώ ότι αυτό το βήμα έχει αποτελέσει αντικείμενο επόμενης έρευνας με σχετική δημοσίευση των G. Pouraimis, A. Kotopoulos, E. Kallitsis and P. Frangos, *"Characterization of Three Dimensional Rough Fractal Surfaces From Backscattered Radar Data"*, Electronics and Electrical Engineering Journal, vol.23, no. 4, pp.45 - 50, Jul. 2017. <https://doi.org/10.5755/j01.eie.23.4.18721>

- την ενσωμάτωση στο λογισμικό προσομοιώσεων σκέδασης *'ScatteringLab'* και άλλων μαθηματικών μοντέλων προσομοίωσης HM σκεδάσεων πέραν της προσέγγισης Kirchhoff (KA). Ενδεικτικά αναφέρω την ενσωμάτωση της μεθόδου των ροπών (MOM), της μεθόδου των μικρών μεταβολών (SPM) καθώς και της εκτεταμένης μεθόδου συννοριακών συνθηκών (EBCM). Η ενσωμάτωση περισσότερων αλγόριθμων προσομοίωσης στο ίδιο λογισμικό θα δώσει μεγάλα πλεονεκτήματα στην σχετική με τις σκεδάσεις έρευνα καθώς κάθε μέθοδος έχει διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και μπορεί έτσι να επιλέγεται η καταλληλότερη, σύμφωνα με τις ανάγκες και ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της κάθε εφαρμογής.

- την χρήση της μεθόδου των κλίσεων '*slope*' για τον προσδιορισμό της τραχύτητας μιας φυσικής επιφάνειας κάνοντας χρήση πραγματικών οπισθοσκεδαζόμενων ΗΜ δεδομένων που θα μπορούσαν να προέρχονται από μια βηματικού τύπου κυματομορφή εκπομπής RADAR. Τέτοια δεδομένα θα μπορούσαν να βρεθούν από RADAR τύπου SAR κατόπιν συνεργασίας με σχετικούς με το θέμα φορείς.

Να σημειώσω εδώ ότι η μέθοδος των κλίσεων '*slope*' δεν εφαρμόστηκε στις καταγραφές του πειράματος NEMO2014, διότι το RADAR του πειράματος είχε συχνότητα λειτουργίας και εύρος ζώνης που δεν κάλυπταν την βασική προϋπόθεση εφαρμογής της μεθόδου, ήτοι το εύρος ζώνης της κυματομορφής εκπομπής δεν ήταν μεγαλύτερο από το 5% της φέρουσας συχνότητας εκπομπής του RADAR, βλ. περιορισμούς εφαρμογής μεθόδου §2.5.1 καθώς και τεχνικά χαρακτηριστικά του RADAR του πειράματος §Δ.1.1. παραρτήματος.

### **Σύνοψη και συμπεράσματα 3<sup>ο</sup> Κεφαλαίου**

Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο διερεύνησα το πρόβλημα του προσδιορισμού της τραχύτητας μιας επιφάνειας, μέσω μορφοκλασματικής ανάλυσης των οπισθοσκεδαζόμενων ΗΜ κυμάτων, εξειδικεύοντας στον προσδιορισμό της θαλάσσιας κυμάτωσης '*sea state*'. Με την βοήθεια του λογισμικού '*SARrawDataAnalyzer*', που ανέπτυξα στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής, εφάρμοσα τεχνικές μορφοκλασματικής ανάλυσης στις καταγραφές (*SAR raw data*) του RADAR του πειράματος NEMO2014. Ως βάση προσδιορισμού της θαλάσσιας κυμάτωσης πρότεινα τον υπολογισμό του μορφοκλασματικού μήκους '*fractal length*' των μονοδιάστατων υπογραφών RADAR, '*1D fractal analysis*', και ως κριτήριο διαχωρισμού πρότεινα την μέση τιμή του μορφοκλασματικού μήκους  $N$  διαδοχικών μονοδιάστατων υπογραφών RADAR. Την προτεινόμενη μέθοδο την ονόμασα MFL από τα αρχικά του αντίστοιχου κριτηρίου '*Mean Fractal Length*'. Μετά από επαναλαμβανόμενες εφαρμογές της μεθόδου MFL στις καταγραφές του πειράματος NEMO2014 διαπιστώθηκε ότι οι τιμές MFL της ταραγμένης θάλασσας είναι πάντα υπέρ πολλαπλάσιες των αντίστοιχων τιμών MFL της ήρεμης θάλασσας και έτσι η τιμή MFL μπορεί να λειτουργήσει ως ένα ξεκάθαρο κριτήριο διαχωρισμού της θαλάσσιας κατάστασης Ένα πρακτικό μειονεκτήματα στην χρήση της τιμής MFL ως κριτήριο προσδιορισμού της θαλάσσιας κατάστασης είναι ότι η τιμή MFL, ως απόλυτος αριθμός, παρουσιάζει μια μεγάλη εξάρτηση από την τιμή της γωνίας πρόσπτωσης. Για την βελτίωση του κριτηρίου MFL προτείνω την εισαγωγή του δείκτη '*Sea State Index*' ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της τιμής MFL της υπό εξέτασης επιφάνειας ως προς την τιμή MFL της ήρεμης θάλασσας. Ο δείκτης SSI αποδεικνύεται ότι μπορεί να λειτουργήσει πολύ πιο αποτελεσματικά από ότι η απόλυτη τιμή MFL χάρη στην κανονικοποίηση του αποτελέσματος ως προς την τιμή αναφοράς.

Το κριτήριο MFL είναι ένα «προϊόν» καινοτομίας της παρούσας έρευνας και έρχεται να προστεθεί στην σχετική βιβλιογραφία με βάση την εργασία '*Multiple Resolution Texture Analysis and Classification*' των Peleg et al.

Η κεντρική ιδέα είναι ότι πληροφορίες «συχνότητας» σχετικά με την υφή μιας επιφάνειας μπορούν να ληφθούν απευθείας από το χωρικό πεδίο '*spatial domain*' χωρίς να χρειαστεί να καταφύγουμε στο πεδίο συχνότητας '*frequency domain*' αποφεύγοντας έτσι χρονοβόρους ή ενεργοβόρους επαναλαμβανόμενους μετασχηματισμούς συχνότητας (IFFT, FFT) που απαιτούνται για την μετατροπή SAR *raw data* σε SAR *imaging* και εν συνεχεία τη επεξεργασία της εικόνας προς εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την τραχύτητα της επιφάνειας μιας επιφάνειας.

Αναλυτικότερα συμπεράσματα και λεπτομερέστερη αξιολόγηση του κριτηρίου MFL είναι διαθέσιμα στις παραγράφους §3.5 και §3.6 του 3<sup>ου</sup> κεφαλαίου.

### Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η μελλοντική έρευνα, σχετική με το ανωτέρω 3<sup>ο</sup> ερευνητικό κεφάλαιο, θα μπορούσε να έχει στόχους:

- την εφαρμογή της μεθόδου MFL/SSI σε SAR '*raw data*' που θα διατεθούν από παρόμοια με το NEMO2014 πειράματα και τα οποία θα έχουν σκοπό την καταγραφή της θαλάσσιας επιφάνειας υπό όλων των δυνατών θαλάσσιων καταστάσεων, '*sea state*' 1 έως 8, προκειμένου να αντιστοιχισθεί ο δείκτης '*Sea State Index*', SSI, με ένα μονοσήμαντο τρόπο με τις αντίστοιχες θαλάσσιες καταστάσεις. Σε αυτή την περίπτωση, δηλαδή έχοντας διαθέσιμες καταγραφές από όλες τις πιθανές θαλάσσιες καταστάσεις, θα μπορούσε να προσεγγιστεί περαιτέρω η μαθηματική συσχέτιση, πιθανών με μια κλειστού τύπου μαθηματική συνάρτηση, που υπάρχει μεταξύ της τιμής του δείκτη SSI και του πραγματικού '*sea state*' που επικρατεί στην θαλάσσια επιφάνεια.
- την εφαρμογή της μεθόδου MFL/SSI και σε καταγραφές, '*raw data*', από άλλους τύπους RADAR ή/και υπό άλλες ρυθμίσεις του ίδιου RADAR, τύπου SAR, έτσι ώστε να προταθεί μια μέθοδος κανονικοποίησης των αποτελεσμάτων και ανεξαρτητοποίηση της μεθόδου, κατά το δυνατό, από τα τεχνικά χαρακτηριστικά ή/και τις ρυθμίσεις του εκάστοτε RADAR.
- την βελτιστοποίηση της μορφοκλασματικής ανάλυσης δοκιμάζοντας και άλλα κριτήρια όπως ο υπολογισμός του '*fractal dimension*'  $D$  επί των μονοδιάστατων υπογραφών RADAR
- την εφαρμογή '*multiresolution fractal analysis*' δηλαδή υπολογισμό του '*fractal dimension*',  $D(\delta)$ , των μονοδιάστατων υπογραφών με μεταβλητό κανόνα μέτρησης  $\delta$ , δημιουργώντας έτσι '*fractal signatures*' επί μονοδιάστατων υπογραφών RADAR
- τέλος η αναβάθμιση της μορφοκλασματικής ανάλυσης από *1D fractal analysis* σε *2D fractal analysis* υλοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής και παρουσιάζεται στο επόμενο ερευνητικό κεφάλαιο (4<sup>ο</sup>).

## Σύνοψη και συμπεράσματα 4<sup>ο</sup> Κεφαλαίου

Στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο της παρούσας διατριβής χρησιμοποιώ τις ίδιες καταγραφές SAR *'raw data'* του πειράματος NEMO2014 που χρησιμοποίησα στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναβαθμίζοντας όμως τον αλγόριθμο επεξεργασίας σε διδιάστατη μορφοκλασματική ανάλυση επί των οπισθοσκεδαζόμενων HM κυμάτων, *'2D fractal analysis'*.

Σκοπός είναι η βελτιστοποίηση της ακρίβειας στον προσδιορισμό της τραχύτητας μιας επιφάνειας, εν προκειμένω της θαλάσσιας επιφάνειας, όπως επίσης και η μείωση, κατά το δυνατό, της εξάρτησης των αποτελεσμάτων της μεθόδου από την γωνία πρόσπτωσης των HM κυμάτων

Στα πλαίσια της βελτιστοποίησης του αλγόριθμου προσδιορισμού της τραχύτητας της θαλάσσιας επιφάνειας από τα οπισθοσκεδαζόμενα HM κύματα, προσθέτω και ορισμένα στάδια προ-επεξεργασίας επί των ακατέργαστων καταγραφών *'raw data'* του RADAR. Έτσι χρησιμοποιώντας τεχνικές *'averaging'*, στατιστικά φίλτρα ενδοτεταρτημοριακού εύρους *'IQR'* σε συνδυασμό με κανονικοποίηση των τιμών έντασης των HM καταγραφών, ο αλγόριθμος μορφοκλασματικής ανάλυσης εφαρμόζεται σε κατά το δυνατό βελτιστοποιημένα δεδομένα. Εφαρμόζοντας εν συνεχεία την τεχνική *'blanket'* επί των προ-επεξεργασμένων καταγραφών του RADAR ανάγω τον προσδιορισμό του *'fractal dimension'*  $D$  μιας θαλάσσιας επιφάνειας σε μια διαδικασία υπολογισμού του όγκου και εξ' αυτού του μορφοκλασματικού εμβαδού που εμφανίζουν οι διδιάστατες υπογραφές των εντάσεων των οπισθοσκεδαζόμενων HM κυμάτων. Υπολογίζοντας το *'fractal dimension'*  $D(\delta)$  για μια σειρά από διαδοχικές τιμές του κανόνα μέτρησης  $\delta=1,2,3\dots n$ , εφαρμόζοντας δηλαδή *'multiresolution analysis'* επί των οπισθοσκεδαζόμενων HM κυμάτων, εξάγω τις μορφοκλασματικές υπογραφές *'fractal signatures'*. Ως τελικό κριτήριο προσδιορισμού της τραχύτητας της θαλάσσιας επιφάνειας προτείνω την τιμή  $D\mu$  *'Mean Fractal Signature'* που υπολογίζεται ως ο μέσος όρος των τιμών της καμπύλης της μορφοκλασματικής υπογραφής. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι όλες οι μορφοκλασματικές υπογραφές, ανεξαρτήτως γωνίας πρόσπτωσης των HM κυμάτων, παρουσιάζουν μια μέση τιμή που κυμαίνεται στο εύρος τιμών  $2 < D\mu < 2.21$  όταν προέρχονται από θάλασσα με *'sea state'* 1, ήτοι γαλήνια έως ρυτιδωμένη επιφάνεια, ενώ κυμαίνεται στο εύρος τιμών  $2.54 < D\mu < 2.74$  όταν προέρχονται από θάλασσα με *'sea state'* 4-5, παραγμένη έως κυματώδη επιφάνεια και άρα ο διαχωρισμός είναι εξαιρετικά εύκολος ακόμα και όταν η γωνία πρόσπτωσης των HM κυμάτων δεν είναι γνωστή. Η σαφή μείωση της εξάρτησης του κριτηρίου διαχωρισμού από την γωνία πρόσπτωσης των HM κυμάτων καθώς και η δυνατότητα αντιστοίχισης συγκεκριμένου εύρους τιμών του κριτηρίου με συγκεκριμένες τιμές *'sea state'* είναι δύο εξαιρετικά σημαντικές βελτιώσεις της μεθόδου MFS/ $D\mu$  έναντι της μεθόδου MFL που ανέπτυξα στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο της παρούσας εργασίας.

Η εφαρμογή διδιάστατης μορφοκλασματικής ανάλυσης, μέθοδος MFS, απευθείας σε SAR *raw data* για τον προσδιορισμό της θαλάσσιας κατάστασης, *'sea state'*, καθώς και το κριτήριο  $D\mu$  είναι ένα «προϊόν» καινοτομίας της παρούσας έρευνας το οποίο έρχεται να προστεθεί στην σχετική με μορφοκλασματική ανάλυση βιβλιογραφία και ειδικότερα στις εργασίες *'Modified Fractal Signature (MFS): A New*



*Approach to Document Analysis for Automatic Knowledge Acquisition* των Tang et al. και *Application of the Modified Fractal Signature Method for Terrain Classification from Synthetic Aperture Radar Images* των Malamou et al.

Η κεντρική ιδέα της καινοτομίας πάνω στην οποία βασίζεται η παρούσα έρευνα είναι ότι η μορφοκλασματική υπογραφή καθορίζεται πλήρως από το εμβαδό της επιφάνειας που σχηματίζουν οι μετρήσεις έντασης των HM κυμάτων ήτοι τα *3D SAR raw data*. Το μέγεθος και η μορφή της επιφάνειας των μετρήσεων, των *3D SAR raw data*, είναι συνάρτηση του βαθμού της τραχύτητας που επικρατεί στην επιφάνεια του σκεδαστή. Κατά συνέπεια η μορφοκλασματική υπογραφή αντανακλά τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας του σκεδαστή και αποκαλύπτει έτσι με μοναδικό τρόπο την τραχύτητα της επιφάνειας.

### **Προτάσεις για μελλοντική έρευνα**

Η μελλοντική έρευνα, σχετική με το ανωτέρω 4<sup>ο</sup> ερευνητικό κεφάλαιο, θα μπορούσε να έχει στόχους:

- την εφαρμογή της μεθόδου MFS/ $D_m$  σε SAR *'raw data'* που θα διατεθούν από παρόμοια με το NEMO2014 πειράματα τα οποία θα έχουν σκοπό την καταγραφή της θαλάσσιας επιφάνειας υπό όλων των δυνατών θαλάσσιων καταστάσεων προκειμένου να αντιστοιχισθεί ο δείκτης  $D_m$ , ως εύρος τιμών τιμή, με συγκεκριμένες τιμές *'sea state'* από 1 έως 8.
- την εφαρμογή της μεθόδου MFS/ $D_m$  και σε *'raw data'* από άλλα είδη RADAR ή/και υπό άλλες ρυθμίσεις του ίδιου RADAR έτσι ώστε να διαπιστωθεί το μέτρο κατά το οποίο η μέθοδος MFS/ $D_m$  είναι ανεξάρτητη από την γωνία πρόσπτωσης των HM κυμάτων καθώς επίσης να διαπιστωθεί το μέτρο κατά το οποίο η μέθοδος MFS/ $D_m$  είναι ανεξάρτητη από τα τεχνικά χαρακτηριστικά, τις ρυθμίσεις του λογισμικού και γενικότερα της πλατφόρμας του RADAR, ή σε κάθε περίπτωση να διερευνηθούν επαρκώς οι τυχόν βελτιώσεις που πρέπει να γίνουν προκειμένου η μέθοδος να καταστεί εύκολα προσαρμόσιμη σε οποιαδήποτε πλατφόρμα RADAR.
- την βελτιστοποίηση της μορφοκλασματικής ανάλυσης των διαδιάστατων υπογραφών RADAR δοκιμάζοντας και άλλα κριτήρια όπως είναι :
  - α) η μέθοδος του φάσματος *Regny*, *'Regny spectrum'* ή
  - β) ο υπολογισμός του *'fractal dimension'* βασιζόμενος στην εντροπία *Rényi*

Σημαντικό ενδιαφέρον επίσης θα είχε να διερευνηθεί η σχέση που μπορεί να υπάρχει μεταξύ της μορφοκλασματικής υπογραφής που προέρχεται από την εφαρμογή της μεθόδου MFS/ $D_m$  απευθείας στα SAR *raw data* και της μορφοκλασματικής υπογραφής που προέρχεται από την εφαρμογή της μεθόδου MFS/ $D_m$  στην SAR *image* που έχει παραχθεί από τα συγκεκριμένα SAR *raw data*.

Αν σκεφτούμε ότι από τα ακατέργαστα δεδομένα *'SAR raw data'* μετά από κατάλληλους μετασχηματισμούς (IFFT, FFT) δημιουργούνται οι εικόνες SAR και ταυτόχρονα, από τα ίδια ακατέργαστα δεδομένα πριν αυτά σχηματίσουν την εικόνα, εξάγεται η μορφοκλασματική υπογραφή μέσω της προτεινόμενης μέθοδο MFS/ $D_m$ , τότε η χρήση της προτεινόμενης μέθοδο MFS/ $D_m$  θα μπορούσε να εξεταστεί σαν μια επιπρόσθετη πληροφορία που μπορεί να συνοδεύει την εκάστοτε εικόνα SAR. Θα είχε λοιπόν μεγάλο ενδιαφέρον τόσο θεωρητικό όσο και πρακτικό

να διερευνηθεί η συσχέτιση της μορφοκλασματικής υπογραφής, επί των ακατέργαστων δεδομένων, με το τελικό περιεχόμενο μιας εικόνας SAR και το πώς θα μπορούσε αυτή η επιπλέον πληροφορία της προτεινόμενης μεθόδου MFS/ $D\mu$  να συνδυαστεί και να αξιοποιηθεί από αλγόριθμους χαρακτηρισμού και ταξινόμησης εικόνων SAR

### **Σύνοψη και συμπεράσματα 5<sup>ο</sup> κεφαλαίου**

Στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο της παρούσας διατριβής χρησιμοποιώ τις ίδιες καταγραφές SAR ‘raw data’ του πειράματος NEMO2014 και προτείνω τον έλεγχο συνέπειας ‘consistency check’ της μεθόδου MFS/ $D\mu$  χρησιμοποιώντας το σύνολο των καταγραφών του RADAR που μου διετέθησαν από το Νορβηγικό Ίδρυμα Αμυντικών Ερευνών (FFI). Για το σκοπό αυτό δημιουργώ έναν αλγόριθμο ο οποίος ανασύρει με ημερολογιακή - χρονική σειρά όλες τις εγγραφές ‘raw data’ του αερομεταφερόμενου RADAR όπως αυτές κατεγράφησαν κατά την διάρκεια της πτήσης του ελικοπτερου πάνω από την θάλασσα. Λαμβάνοντας την μέση τιμή της μορφοκλασματικής υπογραφής  $D\mu(t)$  ως το μέτρο για την θαλάσσια κυμάτωση που επικρατεί σε κάθε χρονική στιγμή της καταγραφής, αντιπαραβάλλω το διάγραμμα  $D\mu(t)$  με τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες όπως δόθηκαν από το Νορβηγικό Ίδρυμα για τον συγκεκριμένο χρόνο και ημέρα.

Αξιολογώ τα αποτελέσματα, εντοπίζω σημεία βελτίωσης και προτείνω έναν αναβαθμισμένο αλγόριθμο υπολογισμού που αντισταθμίζει την μικρή εξάρτηση που παρατηρείται μεταξύ των παραμέτρων, γωνία θέασης RADAR, ανακλαστικότητα θαλάσσιας επιφάνειας και τιμής  $D\mu(t)$  βελτιστοποιώντας το τελικό αποτέλεσμα προσδιορισμού της θαλάσσιας κυμάτωσης.

Ο τελικός αλγόριθμος που προκύπτει εντοπίζει με εξαιρετική επιτυχία και με απόλυτη συνέπεια καθ’ όλη την διάρκεια της πτήσεως την θαλάσσια κατάσταση που επικρατούσε στην περιοχή κατά την 1<sup>η</sup> και 2<sup>η</sup> ημερομηνία διεξαγωγής του πειράματος NEMO2014, ‘sea state’ 4-5 και ‘sea state’ 1 αντίστοιχα και επιβεβαιώνεται ότι με την χρήση της προτεινόμενης μεθόδου MFS/ $D\mu$  συγκεκριμένα ‘sea state’ μπορούν να αποδοθούν σε σταθερές και πολύ συγκεκριμένες τιμές μορφοκλασματικής διάστασης  $D\mu$ .

### **Προτάσεις για συνέχιση της έρευνας στο πεδίο εφαρμογής**

Η μελλοντική έρευνα, σχετική με το ανωτέρω 5<sup>ο</sup> ερευνητικό κεφάλαιο, συμπίπτει με τα σημεία που αναφέρω για το 4<sup>ο</sup> ερευνητικό κεφάλαιο και ως ένα επιπλέον σημείο θα πρότεινα την επιχειρησιακή εφαρμογή της μεθόδου MFS/ $D\mu$ , συγκεκριμένα

- ως παράδειγμα επιχειρησιακής εφαρμογής θα μπορούσε να είναι ένα οποιοδήποτε εναέριο μέσο, ελικόπτερο, αεροπλάνο ή drone το οποίο διαθέτει ένα RADAR τύπου SAR για την καταγραφή εικόνας. Υλοποιώντας την συγκεκριμένη μέθοδο MFS/ $D\mu$ , επί των ακατέργαστων δεδομένων του RADAR, το εναέριο αυτό μέσο θα είναι σε θέση να προσδιορίζει σε πραγματικό χρόνο την θαλάσσια κυμάτωση ‘sea state’ που επικρατεί στην περιοχή που επιχειρεί και να εμφανίζει αυτή την πληροφορία σε κάποια οθόνη του πιλοτηρίου ή/και ταυτόχρονα να την μεταδίδει άμεσα σε κάποιο επιχειρησιακό κέντρο ενημερώνοντας έτσι τον πλότο και το κέντρο επιχειρήσεων αντίστοιχα.

## Παράρτημα Α. 'ScatteringLab'-Λογισμικό Προσομοίωσης ΗΜ Σκεδάσεων

### Περιεχόμενα

---

A1. Εισαγωγική παρουσίαση λογισμικού 'ScatteringLab' .....	181
A2. Ρυθμίσεις στην δομή της επιφάνειας 'fractal' .....	184
A3. Ρυθμίσεις των παραμέτρων του ΗΜ κύματος .....	186
A4. Ρυθμίσεις σε διαγράμματα σκέδασης $\gamma(\vartheta_2)$ .....	187
A5. Ρυθμίσεις σε διαγράμματα οπισθοσκέδασης $\gamma(k)$ ή $\gamma(f)$ .....	191
A6. Μετρήσεις κλίσεων & Ανάλυση συσχέτισης $slope=f(D)$ .....	195
A7. Εκτίμηση τραχύτητας - 'fractal dimension' από την σχέση $D=f(slope)$ .....	203
A8. Εκτίμηση τραχύτητας 'fractal dimension' από την σχέση $D=f(\delta\gamma)$ .....	209

---

### Περίληψη.

Στο παράρτημα 'ScatteringLab' παρουσιάζω τις βασικές λειτουργίες του λογισμικού προσομοίωσης ΗΜ σκεδάσεων που ανέπτυξα για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας.

Στην ενότητα A1 κάνω μια σύντομη εισαγωγή στις γενικές επιλογές όπως ενεργοποίηση 'multi-core processing' και στους βασικούς χειρισμούς γραφημάτων.

Στην ενότητα A2 παρουσιάζω τα χειριστήρια για την δημιουργία και παραμετροποίηση μιας 'fractal' επιφάνειας.

Στην ενότητα A3 παρουσιάζω τα χειριστήρια που καθορίζουν τις παραμέτρους προσομοίωσης του προσπίπτοντος ΗΜ κύματος.

Στην ενότητα A4 παρουσιάζω τα διαγράμματα που μπορεί να υποστηρίξει το λογισμικό ήτοι πολικά  $(\rho, \varphi)$ , καρτεσιανά  $(x, y)$  καθώς και διαγράμματα πολικής μορφής σε καρτεσιανές συντεταγμένες  $(\rho \cos \varphi, \rho \sin \varphi)$ .

Στην ενότητα A5 παρουσιάζω τις επιλογές δημιουργίας διαγραμμάτων οπισθοσκέδασης συναρτήσει συχνότητας  $\gamma(f)$  ή συναρτήσει κυματαριθμού  $\gamma(k)$  καθώς και τις επιλογές και ρυθμίσεις για τις μετρήσεις κλίσεων 'slope' ή μετρήσεις μεταβολής πλάτους 'δγ' επ' αυτών. Στην ίδια ενότητα αναλύω τον τρόπο εισαγωγής λευκού θορύβου στα διαγράμματα μετρήσεων με συγκεκριμένη στάθμη SNR καθώς και τους χειρισμούς και τις σχετικές ρυθμίσεις για την απομείωση του.

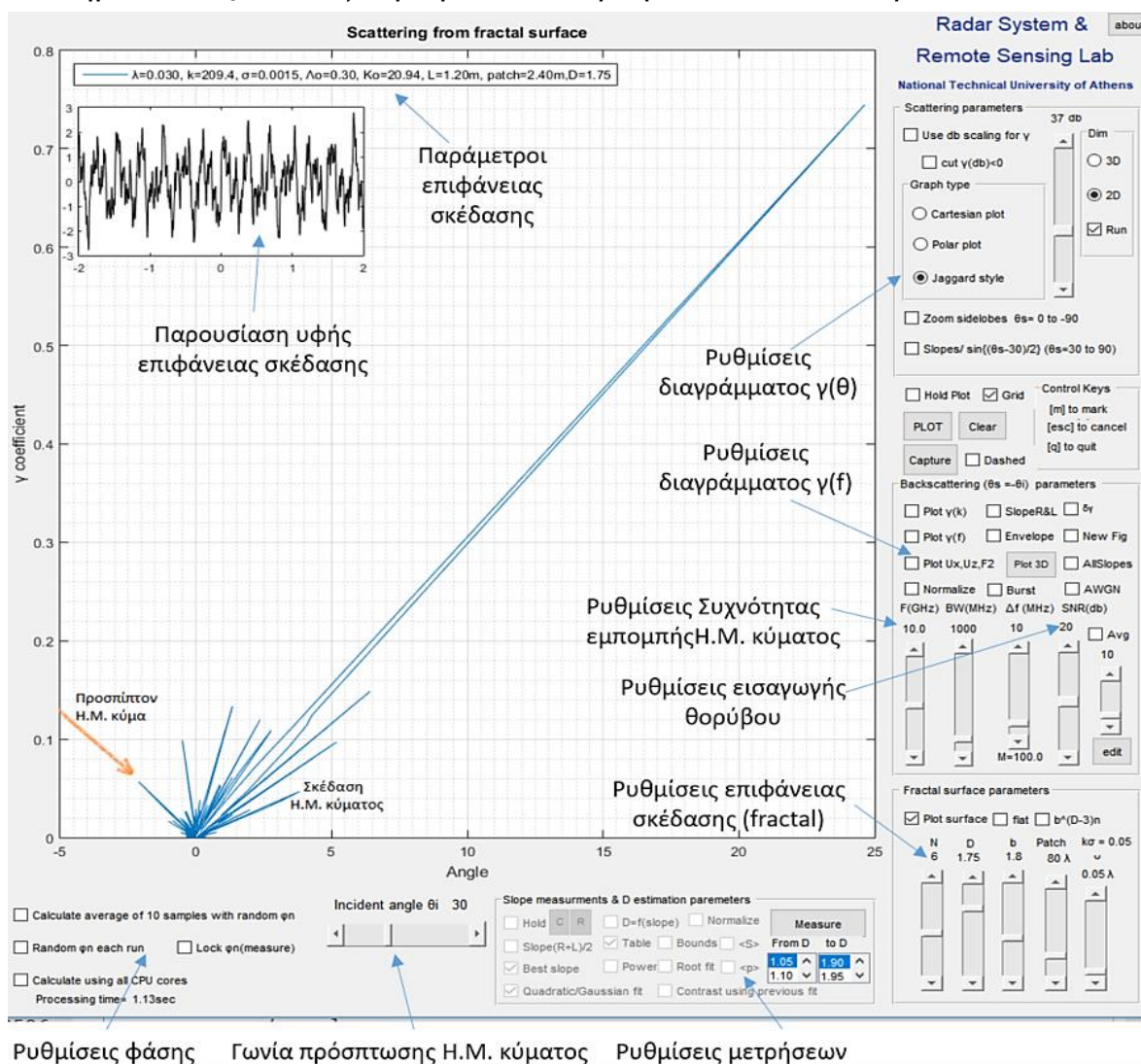
Στην ενότητα A6 κάνω μια σύντομη εισαγωγή στην έννοια της παλινδρόμησης για τον προσδιορισμό της συναρτησιακής σχέσης μεταξύ δύο μεταβλητών και εξηγώ την επιλογή 'Measure' ήτοι την διαδικασία αυτόματης προσομοίωσης διαδοχικών σκεδάσεων ΗΜ κυμάτων και καταγραφής των σχετικών μετρήσεων σε διαγράμματα και πίνακες.

Τέλος στις ενότητες Α7 και Α8 παρουσιάζω τα βήματα για τον προσδιορισμό της μορφοκλασματικής διάστασης ‘*fractal dimension*’  $D$  μιας επιφάνειας μέσα από τις μετρήσεις των οπισθοσκεδαζόμενων ΗΜ κυμάτων, ήτοι το πως δημιουργώ το διάγραμμα διασποράς μεταξύ των δύο μεταβλητών  $(D, slope)$  ή  $(D, \delta\gamma)$ , το πως δοκιμάζω εξισώσεις παλινδρόμησης για το εντοπισμό της μεταξύ τους συναρτησιακής σχέσης και τελικά το πως οριοθετώ την εκτίμηση  $\hat{D}$  μέσα σε ένα διάστημα τιμών (ζώνη πρόβλεψης) με συγκεκριμένη βεβαιότητα 90% με την δημιουργία διαστήματος εμπιστοσύνης.

## A1. Εισαγωγική παρουσίαση λογισμικού 'ScatteringLab'

Στην εικόνα A-1 βλέπουμε την κεντρική οθόνη του προγράμματος προσομοίωσης 'ScatteringLab' μαζί με σύντομη επεξήγηση των βασικών πλαισίων ρυθμίσεων τα οποία θα αναλυθούν στην συνέχεια. Το διάγραμμα στην εικόνα A-1 αποτυπώνει το διάγραμμα  $\gamma(\theta)$  του συντελεστή σκέδασης ως προς την γωνία σκέδασης όπως αυτό προκύπτει όταν ένα ΗΜ κύμα προσπίπτει υπό γωνία πρόσπτωσης  $30^\circ$  πάνω σε μια τραχεία επιφάνεια 'fractal' η υφή της οποίας παρουσιάζεται στο πάνω αριστερά διάγραμμα. Το λογισμικό αυτό αναπτύχθηκε κατά τα έτη 2015-2018 στα πλαίσια της έρευνάς μου στο εργαστήριο RADAR και Τηλεπισκόπησης της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών και είναι προϊόν πολυετούς και επίπονης διατριβής στο συγκεκριμένο αντικείμενο.

Με την βοήθεια του εν λόγω λογισμικού κατέστη δυνατόν να μελετηθεί αναλυτικά το φαινόμενο της σκέδασης επί τραχείας επιφάνειας και με βάση τις προσομοιώσεις του εν λόγω λογισμικού κατέστη δυνατόν να προκύψουν έως τώρα τουλάχιστον δύο δημοσιεύσεις σε αναγνωρισμένα διεθνή περιοδικά και συνέδρια.



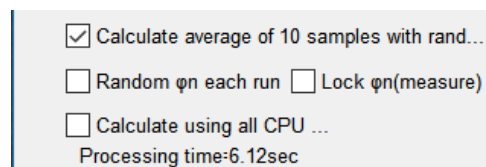
Εικόνα A-1. Διάγραμμα σκέδασης  $\gamma(\theta)$  σε  $db$  με  $x=35db$  fractal

Το λογισμικό αναπτύχθηκε αρχικά στο περιβάλλον Matlab R2015a και ολοκληρώθηκε σταδιακά μέχρι και το περιβάλλον Matlab R2018b ακολουθώντας ‘object-oriented’ προγραμματισμό και παράγοντας ένα τελικό εκτελέσιμο πρόγραμμα για λειτουργικό Windows, το ‘ScatteringLab.exe’. Όπως φαίνεται και στην εικόνα A-1 υπάρχει μια πληθώρα χειριστηρίων ‘checkbox’, ‘sliders’ κοκ. με τα οποία ο χρήστης μπορεί να παραμετροποιήσει τόσο τα χαρακτηριστικά του εκπεμπόμενου ηλεκτρομαγνητικού κύματος όσο και τα χαρακτηριστικά της σκεδαζόμενης επιφάνειας.

Ο Η/Υ στον οποίο έγιναν οι προσομοιώσεις είναι ένας σταθμός εργασίας της Hewlett Packard, ο HP Z620, ο οποίος αγοράστηκε ειδικά για τον σκοπό αυτών των προσομοιώσεων. Ο HP Z620 διαθέτει διπλούς επεξεργαστές (twin processor technology). Συγκεκριμένα διαθέτει δύο Intel® Xeon® Processor E5-2680 με 8 πυρήνες ανά επεξεργαστή και με μέγιστη συχνότητα λειτουργίας κάθε επεξεργαστή τα 3,5GHz και Bus speed 8.00 GT/s. Πρόκειται για ένα σταθμό εργασίας με συνολικά 16 πυρήνες (core processor) και 96GB μνήμης ικανό για να ανταπεξέλθει στις αυξημένες σε υπολογιστική ισχύ απαιτήσεις των προσομοιώσεων ηλεκτρομαγνητικής σκέδασης επί επιφανειών μεταβαλλόμενης τραχύτητας.

Ακολουθεί μια περιγραφή των παραμέτρων που μπορούν να ρυθμιστούν με τη βοήθεια του εν λόγω προγράμματος καθώς και σύντομη περιγραφή των σχετικών δυνατοτήτων προσομοίωσης που μας προσφέρει το εν λόγω λογισμικό.

### Ενεργοποίηση παράλληλης επεξεργασίας ‘multi-core processing’



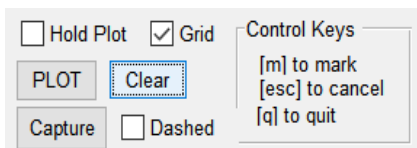
Στην κάτω αριστερή γωνία της βασικής οθόνης υπάρχει η επιλογή ‘calculate using all CPUs cores’. Η επιλογή αυτή δίνει την δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν όλοι οι διαθέσιμοι πυρήνες /

CPU που υπάρχουν στον Η/Υ που τρέχει την προσομοίωση. Δεδομένου ότι οι προσομοιώσεις ηλεκτρομαγνητικής σκέδασης χρειάζονται σημαντική επεξεργαστική ισχύ, ο κώδικας του προγράμματος έχει συνταχθεί έτσι ώστε να επιτρέπει τον διαχωρισμό του μαθηματικού προβλήματος και την παράλληλη μαθηματική επεξεργασία του σε πολλαπλούς υπολογιστικούς πυρήνες μειώνοντας έτσι σημαντικά τους χρόνους υπολογισμού. Παραδείγματος χάριν στο workstation HP Z620 που χρησιμοποιήθηκε για την έρευνα υπήρχαν διαθέσιμοι συνολικά 16 υπολογιστικοί πυρήνες. Ενεργοποιώντας την δυνατότητα παράλληλης μαθηματικής επεξεργασίας επιτεύχθηκε σημαντική επιτάχυνση σε χρόνους προσομοίωσης.

Παρά ταύτα η επιλογή αυτή δεν είναι μόνιμα ενεργοποιημένη διότι η ενεργοποίηση πολλαπλών πυρήνων και ο διαμοιρασμός των απαραίτητων μαθηματικών υπολογισμών σε πολλαπλούς πυρήνες εισάγει μια αρχική καθυστέρηση ‘overhead’ στην έναρξη της επίλυσης του μαθηματικού προβλήματος. Έτσι όταν το πείραμα που προσομοιώνεται δεν έχει ανάγκη μεγάλης υπολογιστικής ισχύος, τότε ο επιπλέον χρόνος ‘overhead’ που εισάγεται κάνει την διαδικασία

σχετικά ασύμφορη από άποψης χρόνου αφού και ένας μόνο πυρήνας μπορεί να παράγει παραπλήσιους χρόνους. Για το λόγο αυτό παραμένει στην διακριτική ευχέρεια του χρήστη να επιλέξει ανάλογα με το είδους της προσομοίωσης εάν υπάρχει συμφέρον ενεργοποίησης πολλαπλών πυρήνων και διαμοιρασμού των υπολογισμών ή όχι.

### Γενικές επιλογές γραφημάτων του λογισμικού 'ScatteringLab'



**Hold Plot**, ο χρήστης μπορεί να ενεργοποιήσει την επιλογή αυτή εάν θέλει να κρατηθεί το οποιοδήποτε γράφημα με τις υπάρχουσες σε αυτό μετρήσεις έτσι ώστε να γίνει αντιπαραβολή του με το επόμενο που

θα υπολογιστεί και θα σχεδιαστεί.

**Capture**, πατώντας το 'capture' το εκάστοτε διάγραμμα που είναι σχεδιασμένο στην οθόνη επανασχεδιάζεται σε καινούριο ξεχωριστό παράθυρο όπου εκεί ο χρήστης μπορεί να το επεξεργαστεί ως διάγραμμα ή/και να το σώσει σε μορφή αρχείου εικόνας είτε άλλης μορφής.

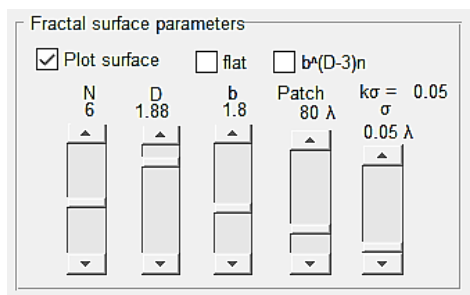
**Clear**, πατώντας διαγράφονται οποιαδήποτε γραφήματα βρίσκονται στην οθόνη.

**Grid**, με αυτή την επιλογή το εκάστοτε διάγραμμα σχεδιάζεται πάνω σε πλέγμα.

**Dashed**, το εκάστοτε διάγραμμα σχεδιάζεται με διακεκομμένες γραμμές. Μια χρήσιμη μερικές φορές επιλογή όταν θέλουμε ένα διάγραμμα να ξεχωρίζει από το επόμενο ή το προηγούμενο διάγραμμα κλπ.

Πατώντας το πλήκτρο **m** ή **M** οποιαδήποτε στιγμή στο πληκτρολόγιο του Η/Υ δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να επιλέξει με το ποντίκι του σημεία πάνω στο οποιοδήποτε διάγραμμα για να σημειωθούν επ' αυτών οι τιμές ή/και να υπολογιστεί η κλίση '*slope*' μιας οποιασδήποτε ευθείας συνδέει δύο σημεία. Πατώντας το πλήκτρο του Η/Υ **ESC** ακυρώνεται το πιο πρόσφατο σημείο επιλογής. Πατώντας το πλήκτρο **q** ή **Q** ακυρώνεται η παραπάνω δυνατότητα και το ποντίκι επανέρχεται στην κανονική του λειτουργία.

## A2. Ρυθμίσεις στην δομή της επιφάνειας ‘fractal’



Η επιφάνεια της σκέδασης προσομοιώνεται, όπως δείξαμε αναλυτικά στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο με την βοήθεια μιας ‘fractal’ συνάρτησης και δίνεται από την σχέση (1.26)

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

Μπορούμε δυναμικά μέσω των ρυθμίσεων του λογισμικού να καθορίσουμε όλες τις δυνατές

παραμέτρους της επιφάνειας καθορίζοντας έτσι αναλυτικά την υφή της επιφάνειας όπου:

$N$  είναι ο αριθμός των τόνων (αρμονικών) που θα συνθέσουν την τελική δομή της επιφάνεια ‘fractal’ και μπορεί να πάρει τιμές από 1 έως 12.

$D$  είναι το ‘fractal dimension’ και καθορίζει εν πολλοίς την τραχύτητα της επιφάνειας. Ο συντελεστή του ‘fractal dimension’ μπορεί να πάρει τιμές από 1 έως 1.99.

$b$  είναι η παράμετρος κλιμάκωσης χωρικής συχνότητας της επιφάνειας ‘fractal’ και μπορεί να πάρει τιμές από 1 έως 3.

*Patch* είναι μια παράμετρος που αναφέρεται στο ‘patch size’ δηλαδή στο μέγεθος της φωτιζόμενης από το ΗΜ κύμα επιφάνειας σκέδασης και με το αντίστοιχο ‘slider’ μπορούμε να ορίσουμε το μέγεθος ως συνάρτηση του προσπίπτοντος ΗΜ μήκους κύματος  $\lambda$  με τιμές από 1 $\lambda$  έως 400 $\lambda$ .

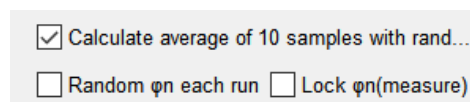
$k\sigma$  είναι μια παράμετρος που αναφέρεται στην τιμή *rms* των μεταβολών του πλάτους της επιφάνειας σκέδασης ως προς την τιμή  $\lambda$  του προσπίπτοντος ΗΜ κύματος

Με την επιλογή ‘Plot surface’ μπορούμε να ορίσουμε εάν θα εμφανίζεται μαζί με το διάγραμμα σκέδασης και το διάγραμμα της επιφάνειας σκέδασης.

Με την επιλογή ‘flat’ μπορούμε να ορίσουμε η σκέδαση να γίνεται σε μια εντελώς λεία επιφάνεια και αυτό είναι χρήσιμο μερικές φορές όπως π.χ. για λόγους ελέγχου μιας σκέδασης επί μιας τέλεια λείας επιφάνειας.

Η επιλογή ‘ $b^{(D-3)n}$ ’ έχει να κάνει με την μετέπειτα έρευνα 3-D Scattering και δεν χρησιμοποιείται στην παρούσα διατριβή.

### Ρυθμίσεις τυχαίας φάσης $\phi_n$ της επιφάνειας σκέδασης



Στην κάτω αριστερή γωνία της κεντρικής οθόνης υπάρχουν επιλογές που αφορούν την τυχαία φάση  $\phi_n$  που συμμετέχει στην **συνάρτηση ‘fractal’**:

Με την επιλογή ‘Random  $\phi_n$  each run’ ενεργοποιημένη οι τυχαίες φάση  $\phi_n$  παίρνουν μια καινούρια τυχαία τιμή για κάθε  $n$  κατά την έναρξη κάθε προσομοίωσης σκέδασης. Εάν η επιλογή αυτή είναι απενεργοποιημένη τότε στις προσομοιώσεις θέτουμε  $\phi_n=0$ . Συνήθως αυτό χρειάζεται σε περιπτώσεις που θέλουμε να πειραματιστούμε με μια ‘fractal’ επιφάνεια και ερευνάμε το πώς επηρεάζεται η σκέδαση λόγω μεταβολής των υπόλοιπων χαρακτηριστικών της επιφάνειας,

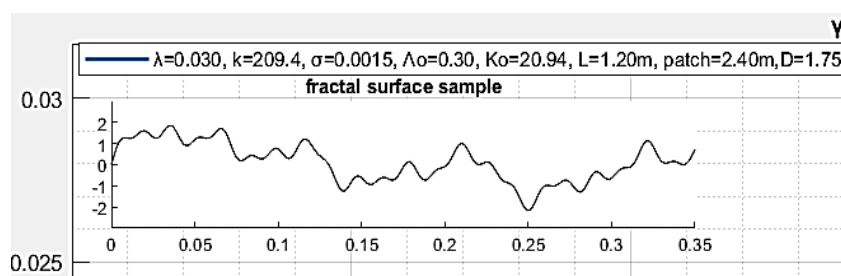


παράμετροι π.χ.  $N, D, patch\ size, b$  κλπ. ή λόγω μεταβολής παραμέτρων του ΗΜ κύματος π.χ.  $f, BW, \Delta f$ , κ.ο.κ.

Η επιλογή '**Lock  $\varphi_n$ (measure)**' συνδυάζεται με την επιλογή '**Measure**' βλ. ενότητα A7 & A8, όπου το λογισμικό ξεκινά μια σειρά διαδοχικών μετρήσεων κλίσης σε επιφάνειες μεταβαλλόμενης τραχύτητας (διαδοχικά μεταβαλλόμενη τιμή  $D$ ). Εάν θέλουμε όλες οι παράμετροι της επιφάνειας να παραμένουν σταθερές εκτός από την τιμή που καθορίζει την τραχύτητα της επιφάνειας (τιμή  $D$ ) τότε η επιλογή '**Random  $\varphi_n$  each run**' πρέπει να είναι απενεργοποιημένη. Εάν ενεργοποιήσουμε την επιλογή '**Random  $\varphi_n$  each run**' και ταυτόχρονα την επιλογή '**Lock  $\varphi_n$ (measure)**' η επιφάνεια σκέδασης λαμβάνει τυχαίες τιμές για την κάθε φάση  $\varphi_n$  μόνο κάθε φορά που πατάμε το κουμπι '**Measure**' δηλαδή κατά την έναρξη μιας σειράς προσομοιώσεων σκέδασης μεταβλητής τραχύτητας και όχι σε κάθε μεταβολή της τιμής  $D$ .

Με την επιλογή '**Calculate average of 10 samples with random  $\varphi_n$** ' ενεργοποιημένη ο χρήστης έχει την δυνατότητα να πειραματίζεται με διαγράμματα σκέδασης τα οποία προκύπτουν από τον μέσο όρο των αποτελεσμάτων σκέδασης 10 συνεχόμενων προσομοιώσεων κατά τις οποίες η επιφάνεια σκέδασης παραμένει ως προς όλα τα χαρακτηριστικά της πανομοιότυπη εκτός από την τυχαία φάση  $\varphi_n$  η οποία αλλάζει σε κάθε μία από τις 10 διαδοχικές προσομοιώσεις.

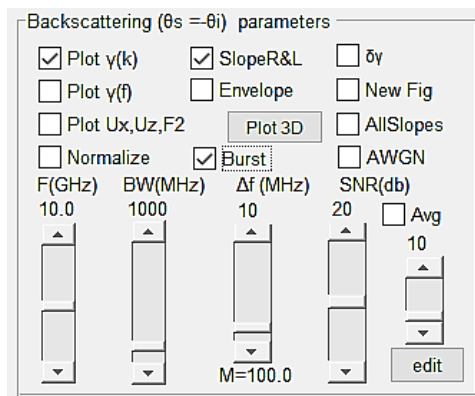
### Εμφάνιση δειγματος της επιφάνειας σκέδασης



Εικόνα Α-2. Υφή επιφάνειας σκέδασης & παράμετροι επιφάνειας

Τσεκάροντας την επιλογή '**Plot surface**' εμφανίζεται, στην πάνω αριστερή γωνία της οθόνης του λογισμικού, το γράφημα της επιφάνειας σκέδασης μαζί με πλαίσιο που περιλαμβάνει τις βασικές παραμέτρους κατασκευής της επιφάνειας καθώς και το μήκος κύματος του προσπίπτοντος ΗΜ κύματος μαζί με τον αντίστοιχο κυματαριθμό. Έτσι μαζί με οποιοδήποτε γράφημα ηλεκτρομαγνητικής σκέδασης μπορούμε να έχουμε ταυτόχρονα στην πάνω αριστερή γωνία του διαγράμματος και ένα στιγμιότυπο από την επιφάνεια της σκέδασης. Στη εικόνα Α-2 βλέπουμε δείγμα από μια επιφάνεια σκέδασης με  $L=1.20m$ ,  $patch=2L=2.4m$ ,  $\Lambda_o=10\lambda$ ,  $K_o=2\pi/\Lambda_o=20.94$ ,  $\sigma=0.0015$  και με τραχύτητα που αντιστοιχεί σε μορφοκλασματική διάσταση '*fractal*'  $D=1.75$  δηλαδή μια σημαντική τραχύτητα. Η δε συχνότητα του ΗΜ κύματος είναι στα 10GHz ήτοι  $\lambda=30cm$ . Με την επιλογή Capute

### Α3. Ρυθμίσεις των παραμέτρων του ΗΜ κύματος



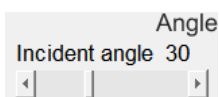
Μέσα στο πλαίσιο των ρυθμίσεων σκέδασης ο χρήστης μπορεί, με την βοήθεια ‘sliders’ και ‘checkboxes’, να καθορίσει τις διάφορες παραμέτρους του ηλεκτρομαγνητικού κύματος το οποίο θα εκπεμφθεί προς την επιφάνεια. Παρακάτω θα εξηγήσουμε όλες τις ρυθμίσεις στο πλαίσιο ‘Backscattering’ όπου αφορούν τις παραμέτρους του ΗΜ κύματος

Το ΗΜ κύμα μπορεί να εκπεμφθεί σε μορφή ‘burst’ (π.χ. RADAR τύπου SAR), δηλαδή ως μια σειρά από διαδοχικές εκπομπές ΗΜ κυμάτων όπου η κάθε εκπομπή έχει συχνότητα  $f_m = f_0 + (m-1)\Delta f$  όπου  $m=1,2,\dots,M$  είναι ο αριθμός των βημάτων και  $\Delta f = BW/M$  είναι η διαφορά συχνότητας μεταξύ διαδοχικών εκπομπών. Η συχνότητα της εκπομπής ‘F(GHz)’ καθορίζει το  $f_0$  και μπορεί να πάρει τιμές από 1 έως 20 GHz. Το συνολικό ‘BW’ σε MHz σε συνδυασμό με το βήμα ‘Δf’ εμμέσως καθορίζει και τον αριθμό  $M$  των βημάτων μεταξύ διαδοχικών εκπομπών. Επί παραδείγματι, στην παραπάνω εικόνα έχει επιλεγθεί συχνότητα  $F=10\text{GHz}$  με  $BW=1\text{GHz}$  και  $\Delta f=10\text{MHz}$  που σημαίνει ότι θα υπάρξει ένα burst από  $M=100$  ΗΜ παλμούς με το πρώτο ΗΜ παλμό να ξεκινά με συχνότητα εκπομπής  $F=10\text{GHz}$ , κάθε επόμενο να εκπέμπεται με συχνότητα  $+10\text{MHz}$  και με το τελευταίο ΗΜ κύμα να εκπεμφθεί με συχνότητα  $F=11\text{GHz}$ .

Αυτή η δυνατότητα είναι πολύ χρήσιμη, όπως θα δούμε παρακάτω όταν ο χρήστης θέλει να σχεδιάσει τον συντελεστή σκέδασης  $\gamma$  συναρτήσει της συχνότητας  $f$  δηλαδή να υπολογίσει ένα διάγραμμα  $\gamma(f)$  ή  $\gamma(k)$ . Πρακτικά με αυτό τον τρόπο μας δίνεται η δυνατότητα να μελετήσουμε την επίδραση της μεταβολής της συχνότητας στο φαινόμενο της σκέδασης ενός ΗΜ κύματος.

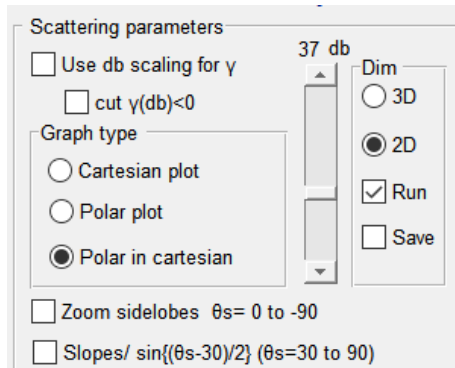
#### Γωνία πρόσπτωσης ΗΜ κύματος

‘Incident angle’, με αυτό το ‘slider’ ο χρήστης μπορεί δυναμικά να καθορίζει την γωνία υπό την οποία το ΗΜ κύμα πέφτει πάνω στην υπό εξέταση επιφάνεια σκέδασης. Η γωνία πρόσπτωσης μπορεί να πάρει τιμές από  $0^\circ$  έως  $90^\circ$  με ελάχιστο βήμα την μία μοίρα. Κάθε φορά που ο χρήστης μεταβάλει την γωνία πρόσπτωσης αυτόματα γίνεται επανυπολογισμός της σκέδασης και αυτόματα επίσης η σχεδίαση ενός καινούριου γραφήματος σκέδασης.



#### A4. Ρυθμίσεις σε διαγράμματα σκέδασης $\gamma(\theta_2)$

Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει μεταξύ τριών διαφορετικών τύπων του διαγράμματος  $\gamma(\theta)$ , όπου  $\gamma$  είναι ο συντελεστής σκέδασης και  $\theta$  είναι η γωνία πρόσπτωσης του ΗΜ κύματος. Το διάγραμμα σκέδασης  $\gamma(\theta)$  μπορεί να σχεδιαστεί σε καρτεσιανές συντεταγμένες '*Cartesian plot*' ήτοι ο συντελεστής σκέδασης  $\gamma$  να τοποθετηθεί στον άξονα των  $y$  και η γωνία  $\theta$  στον άξονα των  $x$ , βλ. εικόνα A-3 στην επόμενη σελίδα



Το διάγραμμα σκέδασης  $\gamma(\theta)$  μπορεί να σχεδιαστεί σε πολικές συντεταγμένες '*Polar plot*' όπου η τιμή συντελεστή σκέδασης  $\gamma$  αντιστοιχεί στην τιμή  $\rho$  και η γωνία  $\theta$  αντιστοιχεί στην γωνία  $\varphi$  αντίστοιχα των πολικών συντεταγμένων. βλ. εικόνα A-6.

Τέλος επιλέγοντας '*Polar in cartesian*', το διάγραμμα σκέδασης σχεδιάζεται σε καρτεσιανές συντεταγμένες ακολουθώντας το μετασχηματισμό από πολικές σε καρτεσιανές συντεταγμένες έτσι ώστε τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας να είναι συγκρίσιμα ως προς αυτά της σχετικής δημοσίευσης του Jaggard[1] όπως αναλυτικά εξηγώ στο Παράρτημα Β. Έτσι σε αυτή την ειδική περίπτωση στον κάθετο βάζω τις τιμές  $y = \rho * \cos(\theta)$  και στον οριζόντιο άξονα βάζω τις τιμές  $x = \rho * \eta\mu(\theta)$  και αυτό για να μπορούν στον άξονα τον  $x$  να αποτυπωθούν τόσο οι θετικές όσοι και οι αρνητικές τιμές του  $\theta$  και έτσι το διάγραμμα σκέδασης αν και σε καρτεσιανές συντεταγμένες να ομοιάζει απόλυτα με το διάγραμμα σε πολικές συντεταγμένες.

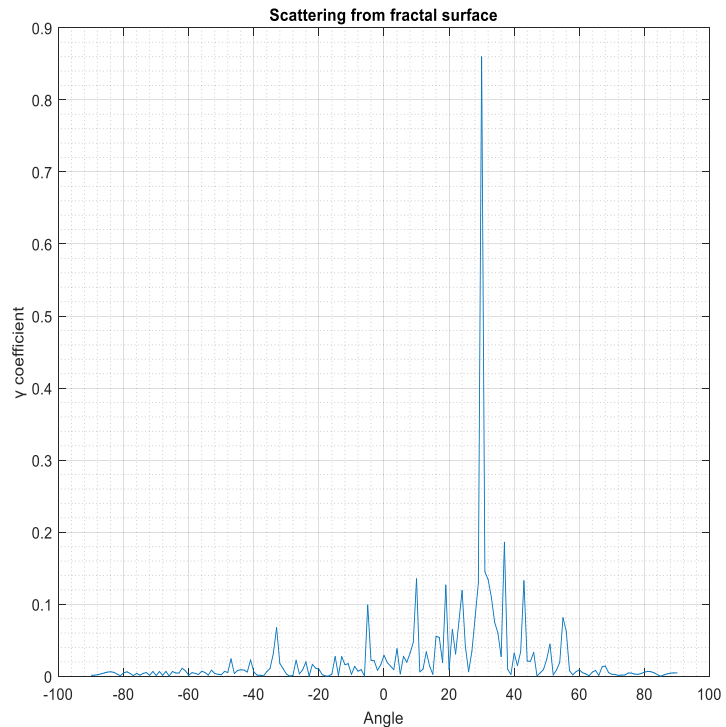
[1] D. L. Jaggard, X. Sun., "Scattering from fractally corrugated surfaces", Journal of the optical society of America, Vol. 7, No 6, pp. 1131-1139, 1990.

### Διαγράμματα σκέδασης $\gamma=\gamma(\theta_2)$ σε Καρτεσιανές & σε Πολικές Συντεταγμένες.

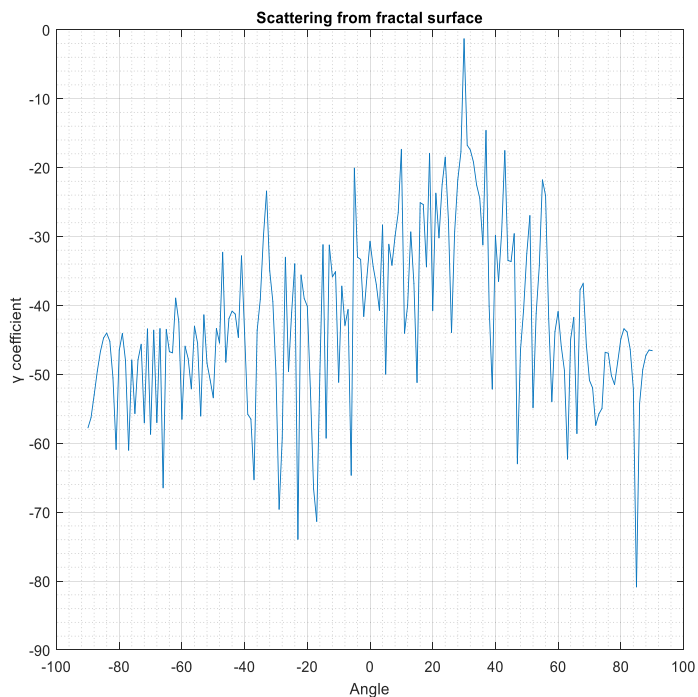
Στον κάθετο άξονα του διαγράμματος τοποθετούμε τις τιμές του συντελεστή σκέδασης  $\gamma$ . Ο συντελεστής σκέδασης  $\gamma$  εξορισμού, βλ. ενότητα 1.3 του 1<sup>ου</sup> κεφαλαίου, αντιπροσωπεύει την κανονικοποιημένη τιμή έντασης του ΗΜ πεδίου και γι' αυτό και βλέπουμε να λαμβάνει τιμές από 0 έως 1 όπως φαίνεται και στο διάγραμμα της εικόνας Α-3.

Με την βοήθεια του checkbox '*use db scaling for  $\gamma$* ' η τιμή του συντελεστή σκέδασης  $\gamma$  αποτυπώνεται στο διάγραμμα, βλ. εικόνα Α-4. σε τιμές *db* εφαρμόζοντας τη σχέση  $\gamma(db) = 20\log(\gamma) + x(db)$ , όπου το  $x$  μπορεί να παίρνει τιμές από 0 έως 100 με την βοήθεια του '*db slider*'. Ο σχεδιασμός του συντελεστή  $\gamma$  σε κλίμακα *db* δίνει την δυνατότητα της μεγέθυνσης λεπτομερειών.

Δηλαδή ακόμα και μικρές τιμές του συντελεστή  $\gamma$  μπορούν να εμφανίζονται με ένα σημαντικό αποτόπωμα στο συνολικό διάγραμμα της σκέδασης όπως αυτό χαρακτηριστικά φαίνεται στην εικόνα Α-4 όπου απεικονίζεται το ίδιο διάγραμμα σκέδασης  $\gamma(\theta)$  σε κλίμακα *db* με  $x = 0db$ .



Εικόνα Α-3. Διάγραμμα σκέδασης  $\gamma(\theta)$  σε καρτεσιανές συντεταγμένες και γραμμική κλίμακα.



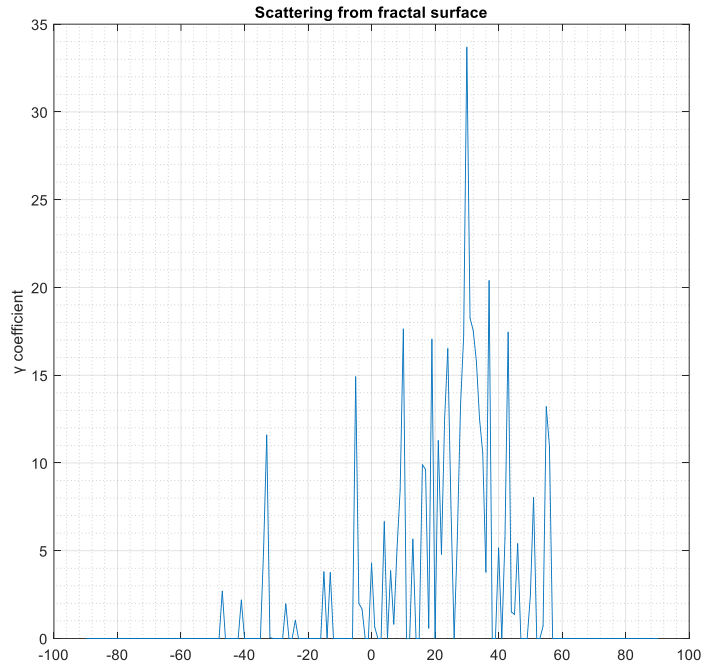
Εικόνα Α-4. Διάγραμμα σκέδασης  $\gamma(\theta)$  σε καρτεσιανές συντεταγμένες και κλίμακα σε *db*.

Με την μεταβλητή  $x$  δίνεται η δυνατότητα να μετατοπίζουμε το διάγραμμα του  $\gamma$  προς τις θετικές τιμές και σε συνδυασμό με την επιλογή ' $cut \gamma(db) < 0'$ ' μπορούμε να κόβουμε τις όποιες τιμές του  $\gamma(db)$  παραμένουν αρνητικές, πρακτικά δηλαδή όσες τιμές είναι μικρότερες από ένα όριο των  $x db$ .

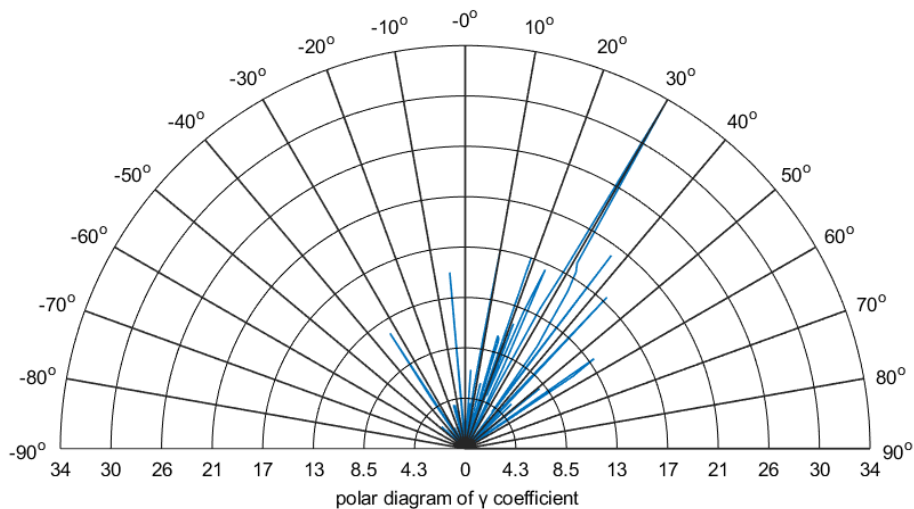
Με αυτό τον τρόπο μπορούμε να αφαιρέσουμε από το διάγραμμα τιμές που θεωρούμε αμελητέες ανάλογα με την επιλογή  $x$  σε  $db$  και να αναδείξουμε στο διάγραμμα τις σημαντικότερες συνιστώσες, βλ. διπλανή εικόνα A-5.

Το διάγραμμα της εικόνας A-5 προκύπτει από αυτό της εικόνα A-4 επιλέγοντας  $x=35db$  και ενεργοποιώντας την επιλογή ' $cut \gamma(db) < 0'$ '. Με τον συνδυασμό αυτό πρακτικά αποκλείουμε από το διάγραμμα του συντελεστή  $\gamma$  συνιστώσες μικρότερες από μια τιμή και κάτω, πχ. εδώ αποκλείσαμε συνιστώσες μικρότερες των  $-35db$ .

Το διάγραμμα της εικόνας A-6 απεικονίζει ακριβώς το ίδιο διάγραμμα με αυτό της εικόνας A-5 αλλά σε πολική μορφή χρησιμοποιώντας την επιλογή '*Polar Plot*'.



Εικόνα A-5. Διάγραμμα σκέδασης  $\gamma(\theta)$  σε καρτεσιανές συντεταγμένες και κλίμακα σε  $db$  με μετατόπιση  $x=35db$

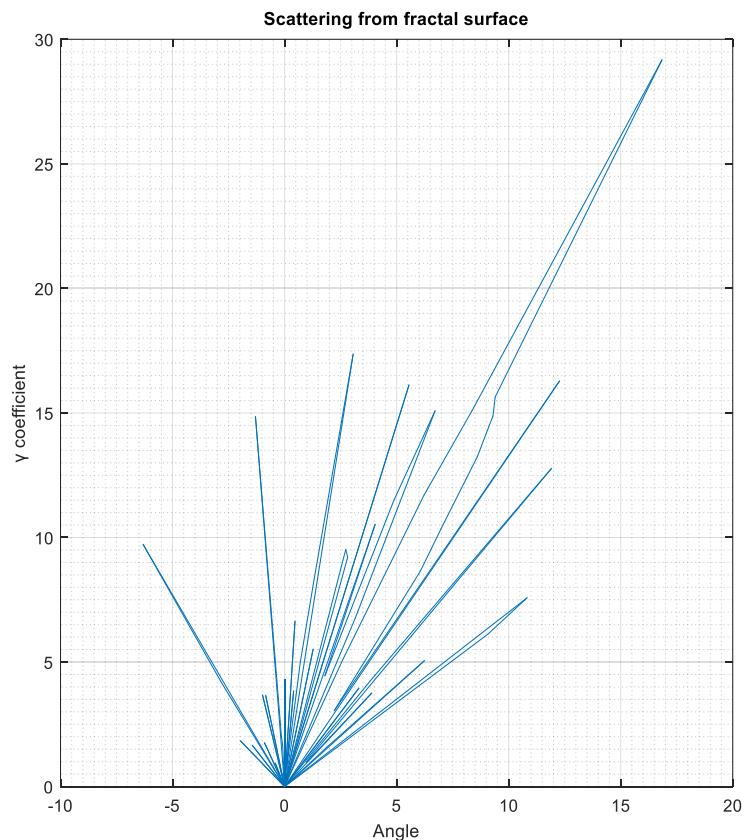


Εικόνα A-6. Διάγραμμα σκέδασης  $\gamma(\theta)$  σε πολικές συντεταγμένες και κλίμακα  $db$

### Διάγραμμα σκέδασης $\gamma=\gamma(\theta_2)$ πολικής μορφής με αποτύπωση σε καρτεσιανές συντεταγμένες

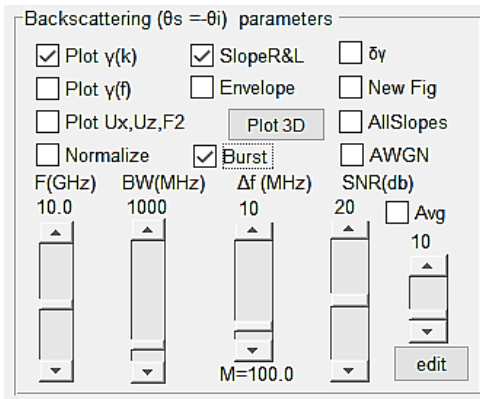
Το “*Polar in Cartesian*” συνδυάζει την αποτύπωση του αποτελέσματος σε μορφή πολικού διαγράμματος σε ένα καρτεσιανό σύστημα. Το διάγραμμα της εικόνας Α-7 είναι πανομοιότυπο ως προς την μορφή με το πολικό διάγραμμα της εικόνας Α-6. Εάν θα μπορούσαμε να μιλήσουμε για μια βασική διαφορά θα λέγαμε ότι στο μεν πολικό γίνεται πιο ξεκάθαρη η ανάδειξη του διαγράμματος όσο αναφορά τις κατευθύνσεις, γωνίες  $\theta$  του διαγράμματος σκέδασης ενώ στο διάγραμμα “*Polar in Cartesian*” δίνεται μεγαλύτερη λεπτομέρεια ως προς την ανάδειξη του πλάτους  $\gamma$  του διαγράμματος σκέδασης ως προς τις διάφορες γωνίες σκέδασης.

Τα διαγράμματα αυτά είναι τα πρώτα που αναπτύχθηκαν κατά την έναρξη της διδακτορικής μου διατριβής και χρησιμοποιήθηκαν ως διαγράμματα αναφοράς και ελέγχου της ορθής λειτουργίας του βασικού αλγόριθμου σκέδασης που χρησιμοποιεί το λογισμικό που ανέπτυξα. Ειδική μνεία και χρήση αυτών των διαγραμμάτων κάνω στο Παράρτημα Β.



Εικόνα Α-7. Διάγραμμα πολικό σε καρτεσιανές συντεταγμένες

## A5. Ρυθμίσεις σε διαγράμματα οπισθοσκέδασης $\gamma(k)$ ή $\gamma(f)$



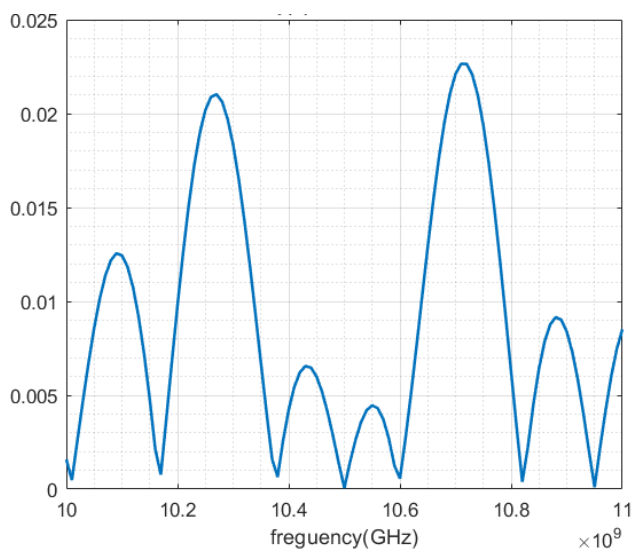
Εικόνα A-8. Ρυθμίσεις Οπισθοσκέδασης.

Στο πλαίσιο αυτό ο χρήστης μπορεί να επιλέξει να σχεδιάσει αντί του κλασσικού διαγράμματος σκέδασης συναρτήσεως της γωνίας  $\gamma(\theta)$  (βλ. εικόνες A-3 έως και A-7) να επιλέξει να σχεδιάσει για την συγκεκριμένη γωνία οπισθοσκέδασης ( $\theta_2 = -\theta_1$ ) το συντελεστή σκέδασης συναρτήσεως της συχνότητας  $\gamma(f)$  ή συναρτήσεως του κυματारιθμού  $k$  ήτοι  $\gamma(k)$  όπου εκεί έγκειται και η καινοτομία της έρευνάς μου όπως αναλυτικά παρουσιάζω στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο.

Με τις επιλογές 'Plot  $\gamma(k)$ ', 'Plot  $\gamma(f)$ ' το λογισμικό σχεδιάζει τον συντελεστή σκέδασης για μια σταθερή γωνία σκέδασης ίση και αντίθετη με την γωνία πρόσπτωσης ( $\theta_2 = -\theta_1$ ) και για μια σειρά συχνοτήτων ή αντίστοιχα για μια σειρά κυματारιθμών σύμφωνα με τις επιλογές του χρήστη.

Υπενθυμίζω εδώ ότι σε ένα RADAR τύπου SAR οι εκπομπές είναι τύπου ριπής, 'burst' με μια κυματομορφή βηματικού τύπου, 'stepped frequency'. Προκειμένου να προσομοιώσω αυτή την κυματομορφή εκπέμπω προς την 'fractal' επιφάνεια και υπό μια σταθερή γωνία πρόσπτωσης έστω  $\theta_1$  μια σειρά από  $M$  ηλεκτρομαγνητικά κύματα μεταβαλλόμενης συχνότητας  $f_m = f_0 + (m-1)\Delta f$  όπου  $m = 1, 2, \dots, M$ ,  $\Delta f = B/M$  είναι το βήμα της συχνότητας,  $BW$  είναι το εύρος ζώνης του RADAR και με  $f_0$ , να είναι η αρχική συχνότητα εκπομπής.

Με τις ρυθμίσεις τις εικόνες A-8 μπορώ να ορίζω όλες τις παραπάνω παραμέτρους και να σχεδιάζω το διάγραμμα του συντελεστή σκέδασης ως προς την μεταβλητή συχνότητα  $f_m$  ή αντίστοιχα ως προς τον μεταβλητό κυματारιθμό  $k = 2\pi c/f_m$ . Έτσι για κάθε ριπή προκύπτει ένα διάγραμμα τιμών  $|\gamma|$  ως προς  $k$  ή ως προς  $f_m$ .



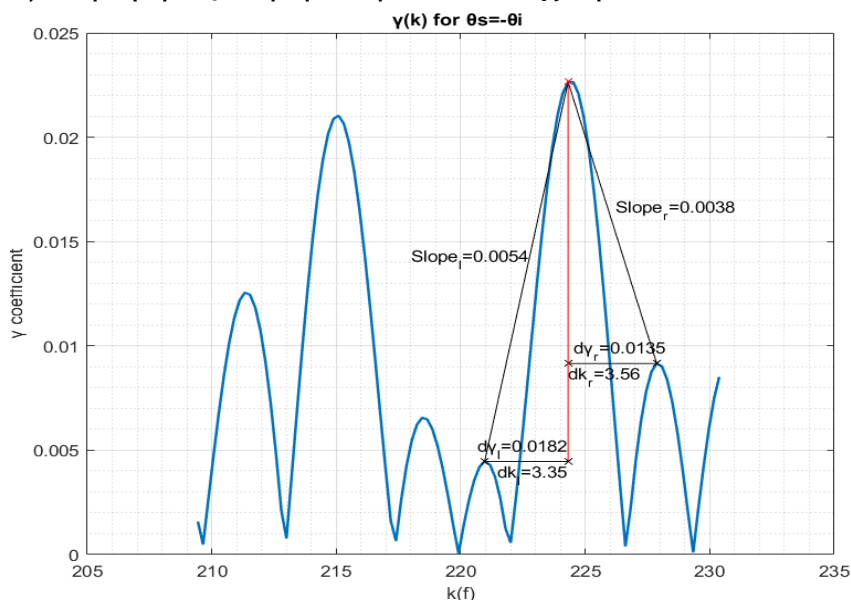
Εικόνα A-9. Διάγραμμα  $\gamma(f)$  για  $\theta_2 = -\theta_1 = -25^\circ$ ,  $D = 1.75$

Κρατώντας τις ρυθμίσεις τις εικόνες A-8, ήτοι  $f_0 = 10\text{GHz}$ ,  $M = 100$ ,  $\Delta f = 10\text{MHz}$ ,  $BW = 1\text{GHz}$  και για μια γωνία πρόσπτωσης  $\theta_2 = -\theta_1 = -25^\circ$  λαμβάνουμε το διάγραμμα της εικόνας A-9.

Σχεδιάζοντας το ίδιο διάγραμμα αλλά ως προς την παράμετρο  $k = 2\pi f_m/c$  λαμβάνουμε το διάγραμμα της επόμενης εικόνας A-10.

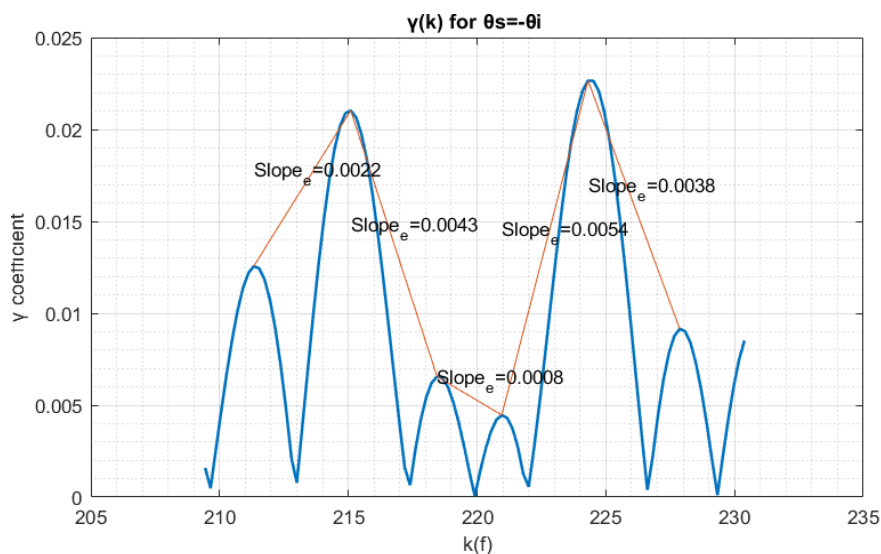
### Διαθέσιμοι τρόποι μέτρησης κλίσεων (SlopeR&L, Envelope, Allslopes)

Επιλέγοντας την ρύθμιση 'SlopeR&L' το λογισμικό εντοπίζει αυτόματα τον λοβό στο οποίο εμφανίζεται η μέγιστη τιμή στο διάγραμμα σκέδασης και υπολογίζει με βάση αυτόν τις κλίσεις  $Slope_r=0,0038$  και  $Slope_l=0,0054$  που σχηματίζονται από τις ευθείες που συνδέουν την μέγιστη τιμή του συντελεστή σκέδασης  $\gamma$  με την αμέσως επόμενη μέγιστη τιμή δεξιά ή αριστερά αντίστοιχα, βλ. εικόνα Α-10.



Εικόνα Α-10. Διάγραμμα  $\gamma(k)$  για  $\theta_2=-\theta_1=-25^\circ$ ,  $D=1.75$   
 και για συχνότητες από 10GHz έως 11GHz, επιλογή 'SlopeR&L'

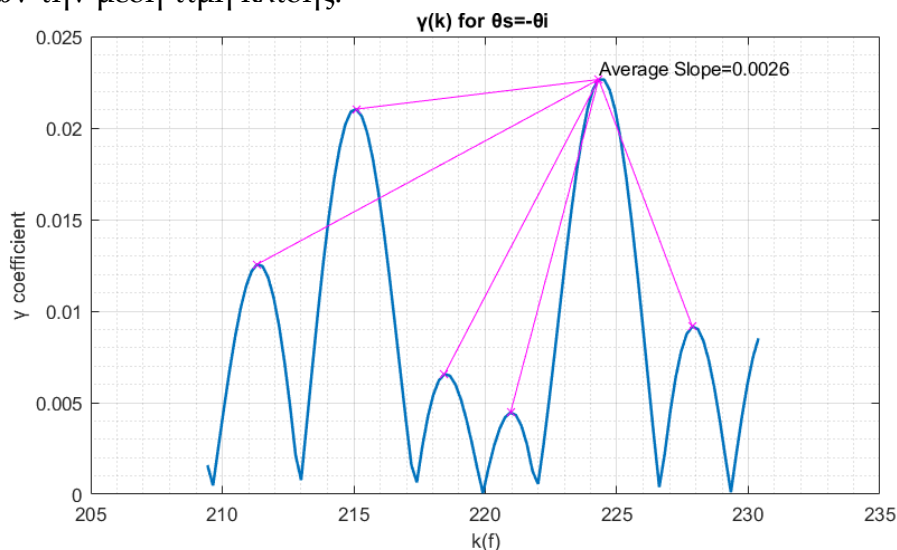
Επιλέγοντας την ρύθμιση 'δγ' σημειώνονται αυτόματα τα αντίστοιχα ζευγάρια τιμών  $\delta\gamma_r$  και  $\delta k_r$  και  $\delta\gamma_l$  και  $\delta k_l$  για την δεξιά και αριστερή κλίση. Οι κλίσεις υπολογίζονται ως  $\delta\gamma/\delta k$ . Με την επιλογή 'Envelope' το λογισμικό υπολογίζει όλες τις δυνατές κλίσεις που σχηματίζονται από τις ευθείες που ενώνουν την μέγιστη τιμή του κάθε λοβού με την αμέσως διπλανή του, βλ. εικόνα Α-11 και υπολογίζει την μέση τιμή μεταξύ όλων των κλίσεων.



Εικόνα Α-11. Διάγραμμα  $\gamma(k)$  για  $\theta_2=-\theta_1=-25^\circ$ ,  $D=1.75$   
 και για συχνότητες από 10GHz έως 11GHz, επιλογή 'Envelope'

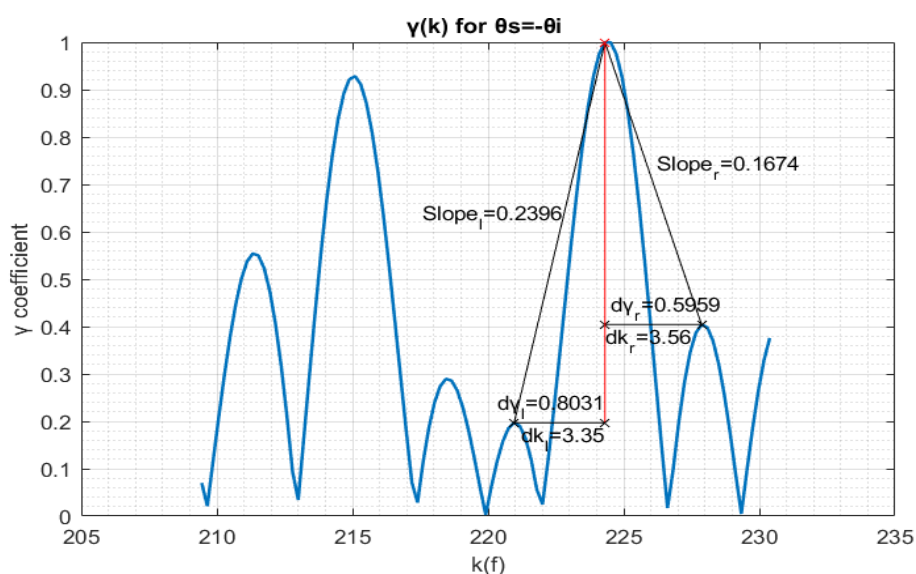


Με την επιλογή '**Allslopes**' το λογισμικό υπολογίζει όλες τις δυνατές κλίσεις που σχηματίζονται από τις ευθείες που ενώνουν την μέγιστη τιμή του που εμφανίζει ο συντελεστής σκέδασης του διαγράμματος με τις υπόλοιπες τοπικές μέγιστες τιμές που εμφανίζουν οι υπόλοιποι λοβοί, βλ. επόμενη εικόνα A-12 και υπολογίζει μεταξύ όλων την μέση τιμή κλίσης.



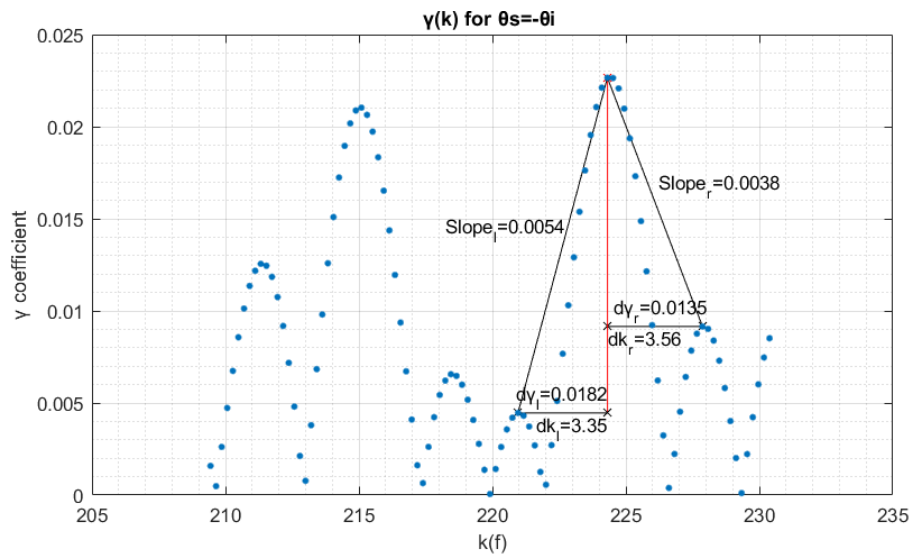
Εικόνα A-12. Διάγραμμα  $\gamma(k)$  για  $\theta_2 = -\theta_1 = -25^\circ$ ,  $D=1.75$  και συχνότητες από 10GHz έως 11GHz, επιλογή '**Allslopes**'

Με την επιλογή '**Normalize**' οι μετρήσεις κανονικοποιούνται όλες ως προς την μέγιστη τιμή του συντελεστή σκέδασης του εκάστοτε διαγράμματος και αντίστοιχα και όλες οι υπολογιζόμενες τιμές επί του διαγράμματος προκύπτουν κατά αυτό τον τρόπο κανονικοποιημένες, κλπ.



Εικόνα A-13. Διάγραμμα  $\gamma(k)$  για  $\theta_2 = -\theta_1 = -25^\circ$ ,  $D=1.75$  και συχνότητες από 10GHz έως 11GHz, επιλογή '**Normalize**'

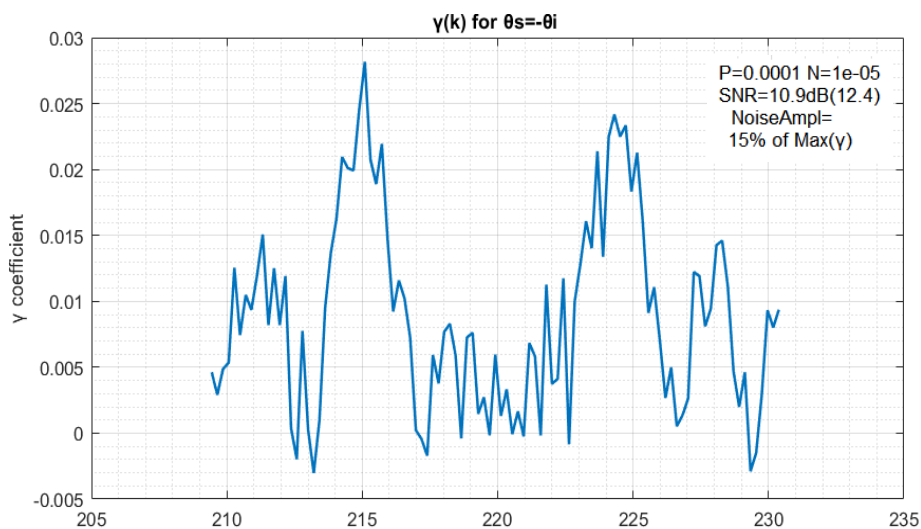
Στην εικόνα A-14 με την επιλογή 'Burst' μπορούμε να βλέπουμε τα διακριτά σημεία, στο παράδειγμα της εικόνας,  $M=100$  από τα οποία αποτελείται η ριπή εκπομπής και με βάση τα οποία σχεδιάζεται ο συντελεστής σκέδασης  $\gamma$ . Οι μετρήσεις, βλ. εικόνα A-14 λαμβάνουν χώρα ανά βήμα μεταβολής της συχνότητας  $\Delta f=10\text{MHz}$



Εικόνα A-14. Διάγραμμα  $\gamma(k)$  για  $\theta_2=-\theta_1=-25^\circ$ ,  $D=1.75$  και συχνότητες από 10GHz έως 11GHz με επιλογή 'burst'

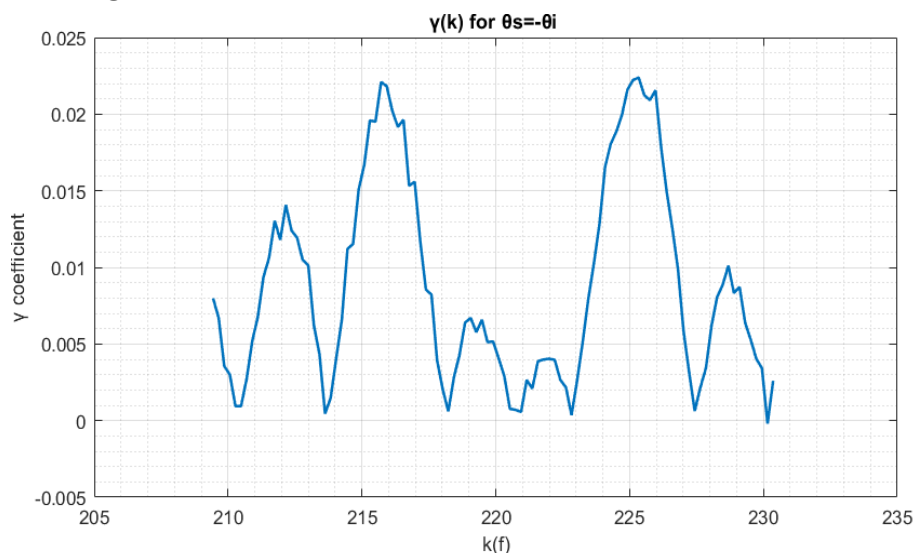
### Ρυθμίσεις εισαγωγής θορύβου στις μετρήσεις

Με την επιλογή 'AWGN' εισάγουμε θόρυβο στις μετρήσεις με στάθμη που καθορίζεται από το αντίστοιχο 'slider' SNR (βλ. χειριστήρια εικόνας A-8). Το λογισμικό υπολογίζει αυτόματα το ύψος του θορύβου  $N$  που πρέπει να εισάγει με βάση την τιμή SNR που έχουμε επιλέξει. Περισσότερες λεπτομέρειες στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο στην ενότητα αξιολόγηση της μεθόδου παρουσία θορύβου. Το διάγραμμα σκέδασης στην εικόνα A-15 προέρχεται από το διάγραμμα σκέδασης της εικόνας A-13 εισάγοντας με το αντίστοιχο 'slider' ένα θόρυβο που αντιστοιχεί σε  $\text{SNR}=10\text{db}$ .



Εικόνα A-15. Διάγραμμα  $\gamma(k)$  για  $\theta_2=-\theta_1=-25^\circ$ ,  $D=1.75$  και συχνότητες από 10GHz έως 11GHz, επιλογή 'SNR=10db'

Με την επιλογή 'Avg' το λογισμικό δημιουργεί επαναλαμβανόμενες μετρήσεις του συντελεστή σκέδασης εφαρμόζοντας τεχνική 'averaging' για την μείωση του θορύβου και την βελτίωση του σηματοθορυβικού λόγου SNR. Τον αριθμό των μετρήσεων που θα ληφθούν το καθορίζουμε από το αντίστοιχο 'slidebar' κάτω από το 'checkbox Avg'.



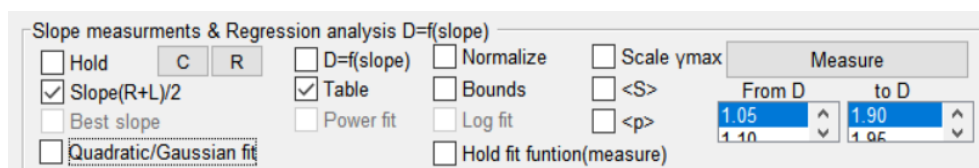
Εικόνα A-16. Διάγραμμα  $\gamma(k)$  για  $\theta_2=-\theta_1=-25^\circ$ ,  $D=1.75$  και συχνότητες από 10GHz έως 11GHz με επιλογή 'Avg=30'

Η εικόνα A-15 αποτυπώνει το διάγραμμα σκέδασης  $\gamma(k)$  με σηματοθορυβικό λόγο 10db και στην εικόνα A-16 βλέπουμε την βελτίωση του σήματος, εν προκειμένω του διαγράμματος σκέδασης  $\gamma(k)$  εάν εφαρμόσουμε 'averaging' επί 30 διαδοχικών μετρήσεων.

## A6. Μετρήσεις κλίσεων και Ανάλυση συσχέτισης $slope=f(D)$

Γενικά περί παλινδρόμησης και συναρτησιακής σχέσης μεταξύ μεταβλητών.

Σε αυτή την περιοχή 'Slope measurements & Regression analysis' υπάρχουν διαθέσιμες μια σειρά επιλογών και ρυθμίσεις που αφορούν την στατιστική ανάλυση των μετρήσεων. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιώντας ανάλυση παλινδρόμησης 'regression analysis' εξετάζω την σχέση που υπάρχει μεταξύ της τραχύτητας της επιφάνειας όπως αυτή διαμορφώνεται από την τιμή  $D$  της μορφοκλασματικής διάστασης 'fractal dimension' και της τιμής των κλίσεων 'slopes' όπως αυτές καταγράφονται κάθε φορά στα διαγράμματα του συντελεστή σκέδασης  $\gamma(k)$ . Σε κάθε πρόβλημα ανάλυσης παλινδρόμησης διακρίνουμε δύο είδη μεταβλητών, τις ανεξάρτητες ή ελεγχόμενες και τις εξαρτημένες ή απόκρισης.



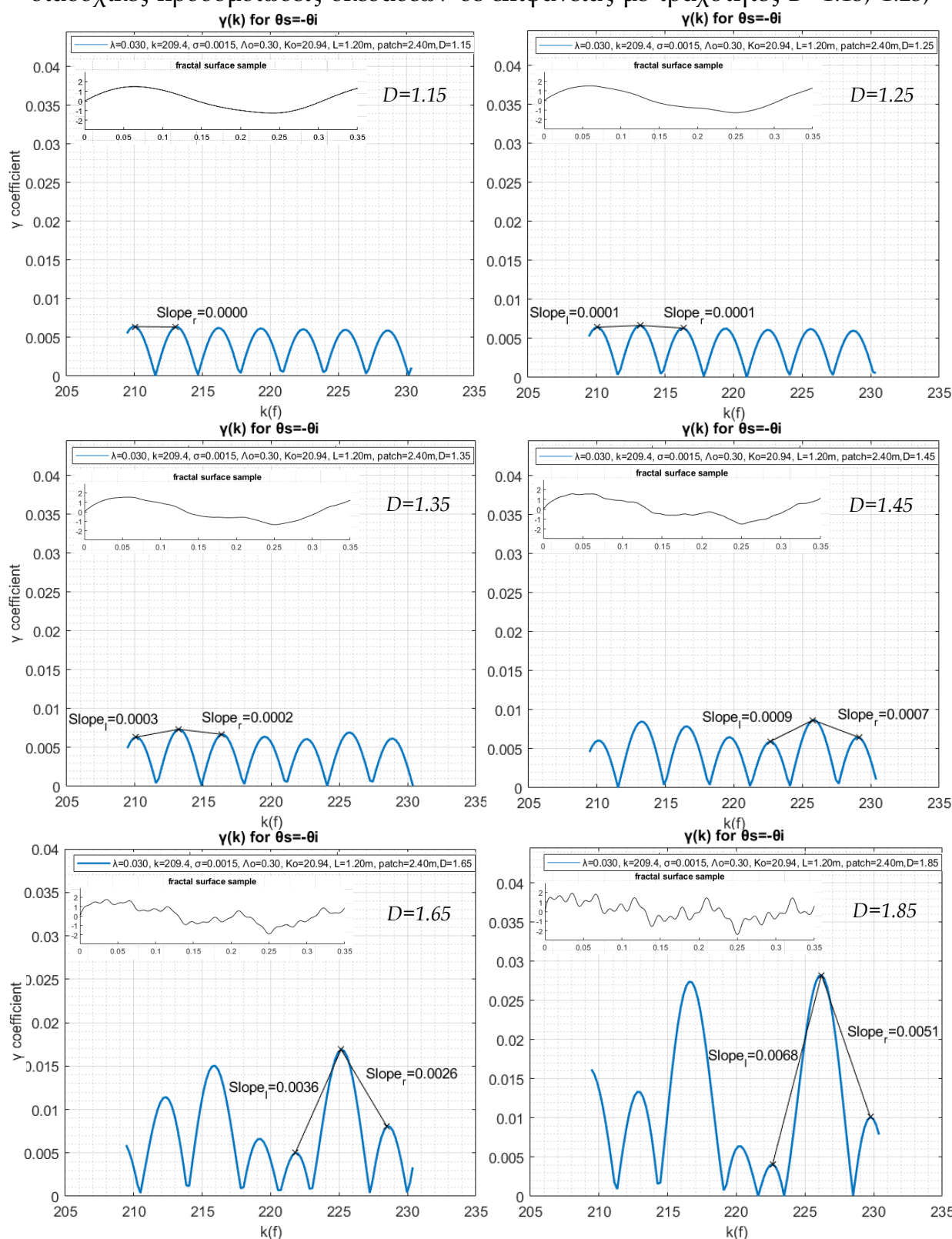
Εικόνα A-17. Μετρήσεις κλίσεων 'slopes' και ανάλυση συσχέτισης  $slopes vs. fractal dimension$

Γενικά ανεξάρτητη θεωρείται η μεταβλητή της οποίας ελέγχουμε την τιμή και εξαρτημένη θεωρείται η μεταβλητή εκείνη στην οποία αντανakλάται το αποτέλεσμα της μεταβολής της ανεξάρτητης μεταβλητής. Σε ένα πείραμα όπως το συγκεκριμένο όπου διαπιστώνουμε ότι η τραχύτητα της επιφάνειας καθορίζει το μέγεθος των κλίσεων στο διάγραμμα σκέδασης αλλά που ταυτόχρονα το μέγεθος των κλίσεων αποφαιίνεται για το ποια είναι η τραχύτητα της επιφάνειας σκέδασης, η διάκριση μεταξύ ανεξάρτητης και εξαρτημένης μεταβλητής δεν είναι εκ των προτέρων ορισμένη αλλά καθορίζεται από το ποια θεωρούμε κάθε φορά ως γνωστή και ελεγχόμενη τιμή μεταβλητής στο πείραμα και ποια ως την ζητούμενη μεταβλητή. Εάν θεωρήσουμε γενικά δύο μεταβλητές  $X$ ,  $Y$  και για κάθε τιμή της  $X$  μπορούμε να προβλέψουμε την τιμή της μεταβλητής  $Y$  τότε λέμε ότι οι δύο αυτές μεταβλητές συνδέονται με μια συναρτησιακή - προσδιοριστική ‘*deterministic*’ σχέση του τύπου  $Y=f(X)$ . Εάν η πρόβλεψη που μας δίνει ένα συναρτησιακό μοντέλο για την τιμή της μεταβλητής  $Y$  περιέχει κάθε φορά και ένα ποσοστό σφάλματος ή μια απόκλιση ως προς το ποια πραγματικά είναι η τιμή της μεταβλητής  $Y$  τότε λέμε ότι υπάρχει μια μη συναρτησιακή - προσδιοριστική σχέση που ονομάζεται στατιστική ή στοχαστική ‘*stochastic*’ σχέση εξάρτησης. Όσο πιο μικρή είναι η διασπορά που προκύπτει από την απόκλιση της τιμής της πρόβλεψης με την πραγματική τιμή τόσο πιο ισχυρή είναι η στοχαστική σχέση εξάρτησης μεταξύ των δύο μεταβλητών και τότε μπορούμε να μιλάμε για εξαρτημένες μεταξύ τους μεταβλητές. Στην περίπτωση της στοχαστικής εξάρτησης προσπαθούμε να βρούμε μια συναρτησιακή σχέση η οποία να προσεγγίζει την εικόνα της εξάρτησης μεταξύ των δύο μεταβλητών  $X$ ,  $Y$ . Για να προσδιοριστεί η σχέση μεταξύ δύο μεταβλητών στα πλαίσια της ανάλυσης παλινδρόμησης, αυτό που αρχικά χρειάζεται είναι ένα σύνολο μετρήσεων αποτελούμενο από πραγματικές τιμές παρατήρησης των υπό εξέταση μεταβλητών. Το σύνολο αυτό των δεδομένων αποτελεί το ‘σύνολο εκπαίδευσης’ της ανάλυσης παλινδρόμησης από το οποίο θα προσδιοριστεί η σχέση των μεταβλητών αυτών και κατά συνέπεια το ακριβές μοντέλο παλινδρόμησης που θα χρησιμοποιηθεί.

#### **Διαδοχικές μετρήσεις κλίσεων με αυτοματοποιημένο τρόπο, επιλογή ‘Measure’.**

Εν προκειμένω οι μεταβλητές τις οποίες θέλουμε να προσδιορίσουμε την μεταξύ τους σχέση είναι η μεταβλητή  $D$  του ‘*fractal dimension*’ και η μεταβλητή ‘*slope*’ και η συλλογή των δεδομένων των υπό εξέταση μεταβλητών γίνεται πατώντας το πλήκτρο ‘**Measure**’ με το οποίο ξεκινά μια σειρά από προσομοιώσεις σκεδάσεων σε επιφάνειες με μεταβλητή τραχύτητα που ξεκινά από την τιμή που καθορίζεται στο πεδίο ‘**From D**’ π.χ 1.05 έως και την τιμή που καθορίζεται στο πεδίο ‘**to D**’ π.χ. 1.90 με την μεταβολή του  $D$  να έχει βήμα 0.05. Με βάση αυτές τις προσομοιώσεις κατασκευάζονται αυτόματα διαδοχικά γραφήματα σκέδασης  $\gamma(k)$  για κάθε διαφορετική  $D$  και αποθηκεύονται σε ένα πίνακα οι τιμές των κλίσεων που μετρούνται επί αυτών. Οι μετρήσεις αυτές παραμένουν διαθέσιμες στον χρήστη για περαιτέρω επεξεργασία μέχρις ότου πατηθεί ξανά το πλήκτρο ‘**Measure**’ όπου τότε αντικαθίστανται από καινούριες και ξεκινά μια επόμενη συλλογή δεδομένων, ζευγάρια δηλαδή τιμών των μεταβλητών  $D$ , *slope*.

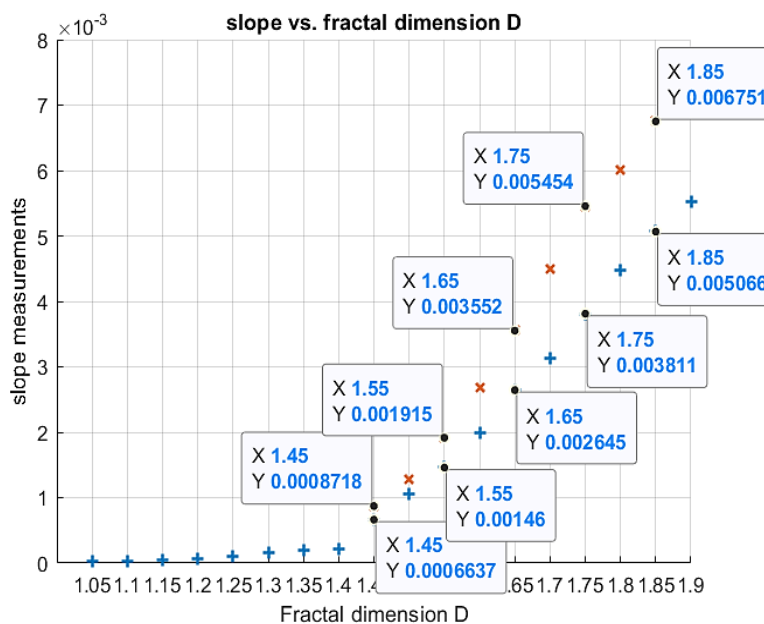
Προκειμένου να γίνει πολύ εύκολα αντιληπτή η διαδικασία συλλογής των δεδομένων προς ανάλυση παραθέτω ενδεικτικά μια σειρά από διαγράμματα του συντελεστή σκέδασης  $\gamma(k)$ , βλ. εικόνες Α-18, όπως αυτά έχουν καταγραφεί κατά τις διαδοχικές προσομοιώσεις σκεδιάσεων σε επιφάνειες με τραχύτητες  $D=1.15, 1.25,$



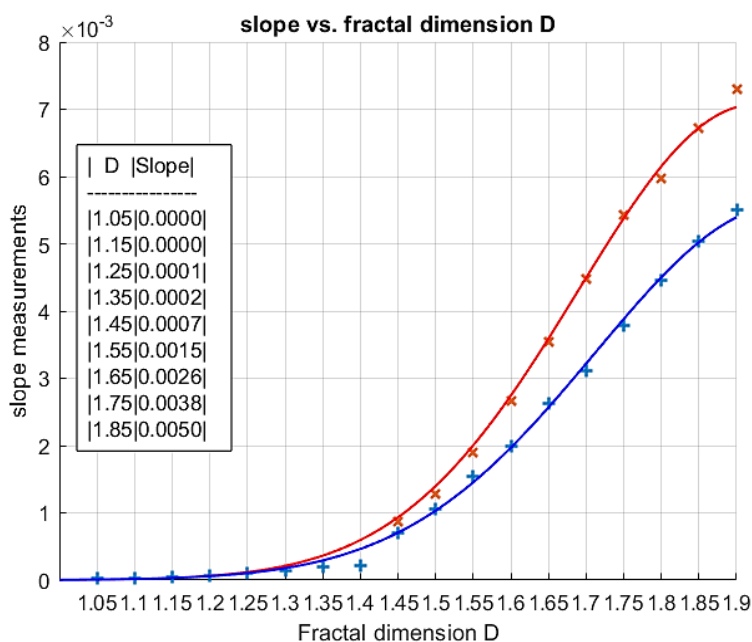
Εικόνα Α-18. Διάγραμμα  $\gamma(k)$  για  $\theta_2 = -\theta_1 = -25^\circ$ , με ριπές από συχνότητα 10GHz έως 11GHz και μεταβαλλόμενη τραχύτητα - 'fractal dimension'  $D$

1.35, 1.45, 1.65, 1.85 στα οποία σημειώνονται οι κλίσεις  $Slope_r$  και  $Slope_l$  (ενεργοποιημένη η επιλογή ‘**SlopeR&L**’).

Όπως παρατηρούμε στην εικόνα A-18 όσο αυξάνεται η μορφοκλασματική διάσταση  $D$  της *fractal* επιφάνειας τόσο αυξάνεται και η τραχύτητα της επιφάνειας δείγμα της οποίας φαίνεται στο πάνω αριστερά ένθετο διάγραμμα και ταυτόχρονα αυξάνονται και οι κλίσεις που δημιουργούνται μεταξύ των λοβών και ειδικά μεταξύ του μέγιστου λοβού και των εκατέρωθεν αυτού. Ως πρώτο βήμα της μελέτης της σχέσης μεταξύ των εξεταζόμενων μεταβλητών ( $D$ ,  $slope$ ) και της αποτύπωσης της τάσης που τις διέπει, γίνεται αρχικά μία οπτική αναπαράσταση των υπαρχόντων



Εικόνα A-19. Διάγραμμα ‘Slope vs D’ με τις μετρήσεις δεξιάς (μπλε



Εικόνα A-20. Διάγραμμα ‘Slope vs D’ με καμπύλες Γκαουσιανής προσαρμογής στα σημεία μετρήσεων. Μπλε δεξιές και κόκκινες αριστερές μετρήσεις κλίσεων αντιστοίχα

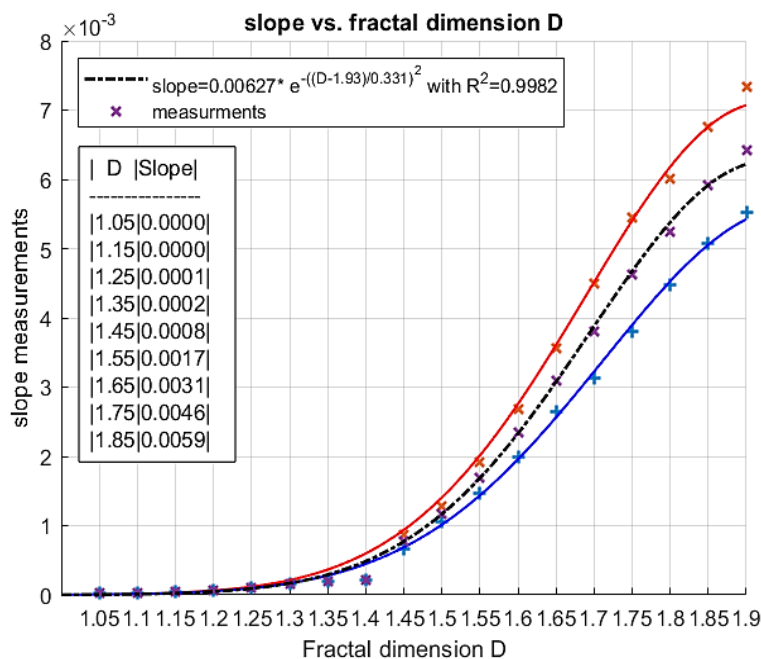
δεδομένων με τη χρήση ενός διαγράμματος διασποράς ‘scatter plot’ βλ. εικόνα A-19. Ένα τέτοιο διάγραμμα δίνει μία πρώτη ένδειξη της τάσης ή της συσχέτισης που υπάρχει μεταξύ των μεταβλητών που μελετώνται. Με τον όρο «τάση» ή «συσχέτιση» μεταξύ μεταβλητών εννοείται ο τρόπος με τον οποίο αλλάζει η τιμή της μιας μεταβλητής,  $slope$ , όταν αυξηθεί ή μειωθεί η τιμή της άλλης μεταβλητής  $D$ . Το διάγραμμα διασποράς δίνει μία πρώτη ένδειξη του πως οι υπό εξέταση μεταβλητές συσχετίζονται. Όπως διαφαίνεται από το διάγραμμα διασποράς στην εικόνα A-19, όσο μεγαλύτερη η τιμή της τραχύτητας της επιφάνειας, τόσο μεγαλύτερη η τιμή της κλίσης που καταγράφεται. Αυτό σημαίνει ότι στη σχέση μεταξύ των εν λόγω μεταβλητών φαίνεται να υπάρχει θετική συσχέτιση. Ο χαρακτηρισμός θετική

για τη συσχέτιση σημαίνει ότι αύξηση της τιμής της μιας μεταβλητής φαίνεται να οδηγεί και σε αύξηση της τιμής και της άλλης μεταβλητής. Οι καμπύλες γραμμές που διαπερνούν τα δεδομένα στην εικόνα A-20, είναι ένα τρόπος συναρτησιακής αναπαράστασης της τάσης/σχέσης που υπάρχει μεταξύ των μεταβλητών  $D$  &  $slope$ . Οι συγκεκριμένες καμπύλες φαίνεται να εντοπίζουν σχετικά ικανοποιητικά τη σχέση που υπάρχει μεταξύ των μεταβλητών αυτών. Από το διάγραμμα διασποράς της εικόνας A-19 φαίνεται λοιπόν καθαρά ότι υπάρχει μια θετική συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών  $D$  και  $slope$  και με την βοήθεια της ανάλυσης παλινδρόμησης μένει να καθοριστεί και ποσοτικά η μεταξύ τους σχέση μέσω της εξίσωσης παλινδρόμησης. Αυτός ο ποσοτικός - συναρτησιακός καθορισμός της σχέσης των δύο μεταβλητών στα πλαίσια της παλινδρόμησης, χρησιμοποιείται τόσο για την ερμηνεία όσο και για την πρόβλεψη των τιμών της μιας μεταβλητής όταν είναι γνωστές οι τιμές της άλλης μεταβλητής. Οι εξισώσεις παλινδρόμησης που ενσωματώνει το λογισμικό ως καταλληλότερες για την απόδοση της συναρτησιακής σχέσης  $slope$  vs  $D$  είναι οι ακόλουθες:

επιλογή **Gaussian fit** που χρησιμοποιεί την εξίσωση  $Y = a \cdot e^{-\left(\frac{x-b}{c}\right)^2}$

επιλογή **Quadratic fit** που χρησιμοποιεί την εξίσωση  $Y = a \cdot X^2 + b \cdot X + c$

Με το πλήκτρο '**Measure**' και επιλέγοντας μια από τις παραπάνω διαθέσιμες επιλογές ξεκινούν διαδοχικές προσομοιώσεις (βλ. δείγματα προσομοιώσεων στην εικόνα A-18) μετά το πέρας των οποίων όλες οι τιμές της μορφοκλασματικής διάστασης  $D$  μαζί με τις τιμές κλίσεων  $slopes$  όπως αυτές μετρήθηκαν στα αντίστοιχα διάγραμμα σκεδάσεων, βλ. εικόνα A-18, απεικονίζονται σε ένα συγκεντρωτικό γράφημα μετρήσεων ' $slope$  vs  $D$ ', βλ. εικόνα A-21 όπου οι σημειωμένες με κόκκινο χρώμα μετρήσεις αντιστοιχούν στις μετρήσεις κλίσεων αριστερά του κύριου λοβού,  $Slope_l$ , και οι μπλε χρώματος στις μετρήσεις δεξιά του κύριου λοβού,  $Slope_r$ .



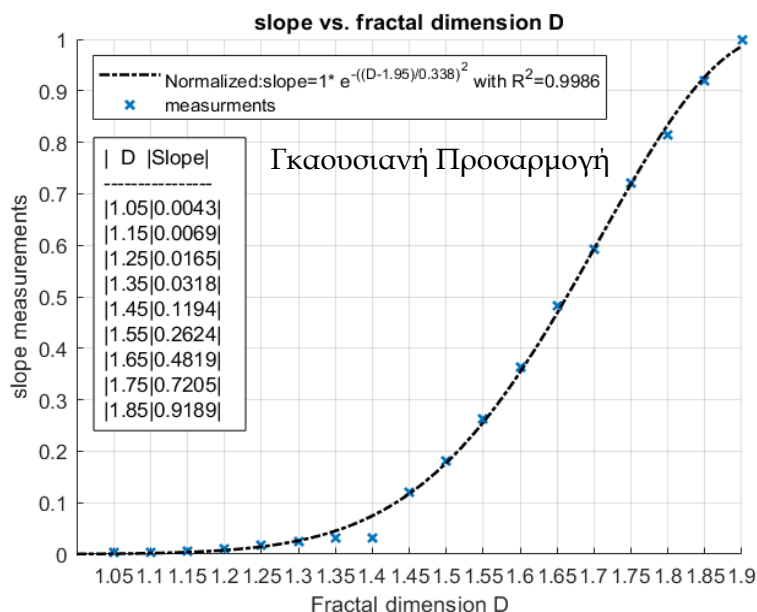
Εικόνα A-21. Διάγραμμα 'Slope vs D' με μετρήσεις δεξιάς (μπλε), αριστερής(κόκκινο) και μέση τιμή κλίσης (μαύρο)

Στο επάνω μέρος του διαγράμματος εμφανίζεται ένα πλαίσιο που περιέχει την εξίσωση παλινδρόμησης που έχει επιλεγεί. Το διάγραμμα της εικόνα A-21 προέκυψε με την επιλογή '**Gaussian fit**'. Σε αυτή την περίπτωση η εξίσωση παλινδρόμησης δίνεται από την σχέση  $slope = a \cdot e^{-\left(\frac{D-b}{c}\right)^2}$  όπου οι παράμετροι  $a$ ,  $b$ ,  $c$  υπολογίζονται με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων για την καλύτερη δυνατή προσαρμογή με βάση τα σημεία των μετρήσεων.

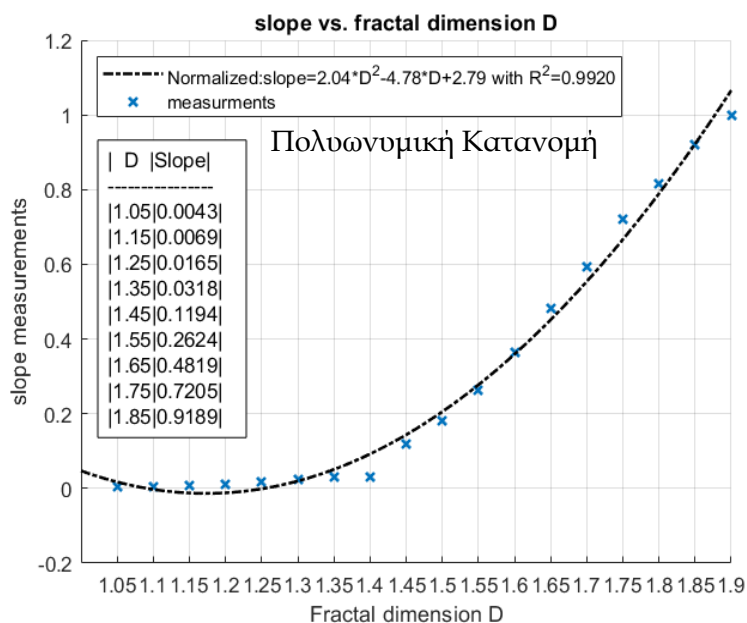
Με την επιλογή ‘**Table**’ εμφανίζεται ένας πίνακας εντός διαγράμματος, βλ. εικόνα A-21, που περιέχει τα ζευγάρια τιμών  $D$  και τιμής κλίσης. Στην εικόνα ο πίνακας περιέχει τα ζευγάρια τιμών  $D$  και μέση τιμή κλίσης, ήτοι  $(Slope_r+Slope_l)/2$ .

Με την επιλογή ‘**Slope(R+L)/2**’ το λογισμικό λαμβάνει ως μέτρηση κλίσης τον μέσο όρο μεταξύ των τιμών της αριστερής και της δεξιάς κλίσης και σχεδιάζει με μαύρο χρώμα τις μετρήσεις μαζί με την αντίστοιχη μαύρου χρώματος καμπύλη προσαρμογής, βλ. εικόνα A-21.

Με την επιλογή ‘**Best slope**’ το λογισμικό επιλέγει μία από τις δύο σειρές μετρήσεων (αριστερές -κόκκινες ή δεξιές μπλε) ανάλογα με το ποια παρουσιάζει την καλύτερη  $R^2$  (r-squared) τιμή με βάση το επιλεχθέν μοντέλο προσαρμογής.



Εικόνα A-22. Διάγραμμα ‘Slope vs D’ με Γκαουσιανή προσαρμογή στις κανονικοποιημένες μέσες τιμές κλίσεων



Εικόνα A-23. Διάγραμμα ‘Slope vs D’ με πολυωνμική προσαρμογή στις κανονικοποιημένες μέσες τιμές κλίσεων

Με την επιλογή ‘**Normalize**’ (βλ. εικόνα A-22) γίνεται κανονικοποίηση των τιμών των μετρήσεων κλίσης διαιρώντας όλες τις κλίσεις ως προς την μέγιστη τιμή κλίσης που μετρήθηκε κατά τις προσομοιώσεις. Έτσι το διάγραμμα της εικόνας A-22 προκύπτει από αυτό της εικόνας A-21 μετά την κανονικοποίηση των μετρήσεων και παραμένει ακριβώς το ίδιο πλην όμως οι τιμές των κλίσεων βρίσκονται πλέον στην κλίμακα από 0 έως 1 όπως φαίνεται και στον σχετικό πίνακα του διαγράμματος. Αυτή η λειτουργία διευκολύνει την σύγκριση μεταξύ μετρήσεων που έχουν παρθεί υπό άλλες αρχικές συνθήκες.

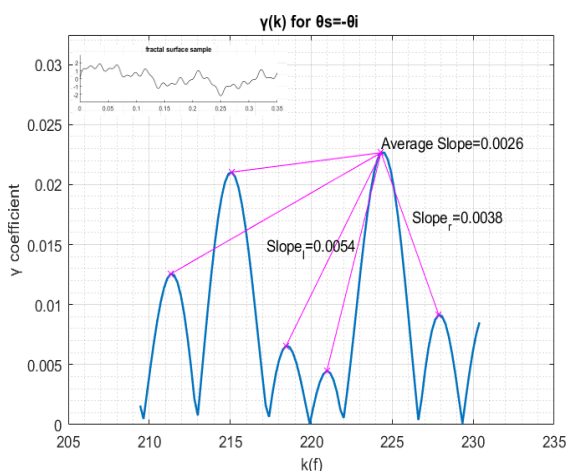
Η καμπύλη του διαγράμματος στην εικόνα A-23 προκύπτει με επιλογή πολυωνμικής προσαρμογής ‘**Quadratic fit**’ Η εξίσωση σημειακής προσαρμογής σε



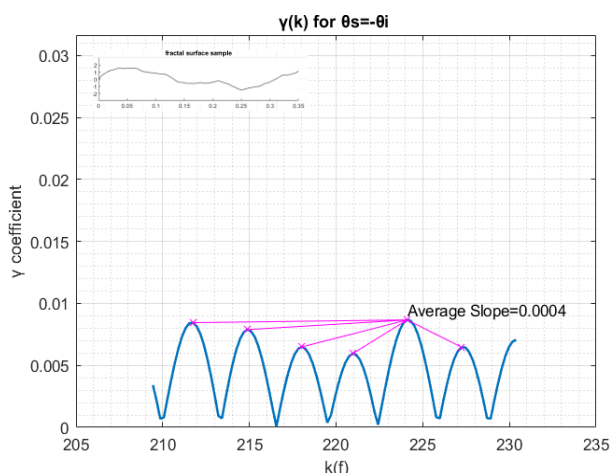
αυτή την επιλογή δίνεται από την σχέση  $slope = ax^2 + bx + c$  όπου οι παράμετροι  $a, b, c$  υπολογίζονται επίσης μέσω πολυωνυμικής παλινδρόμησης με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων προς επίτευξη της καλύτερης δυνατής προσαρμογή της εξίσωσης με τα σημεία μέτρησης.

Με την επιλογή '<S>' λαμβάνουμε από κάθε διάγραμμα του συντελεστή σκέδασης  $\gamma(k)$  τον μέσο όρο των τιμών των κλίσεων που εμφανίζονται μεταξύ του μέγιστου λοβού και όλων των πλευρικών λοβών, βλ. παραδείγματα εικόνας A-24 & A25.

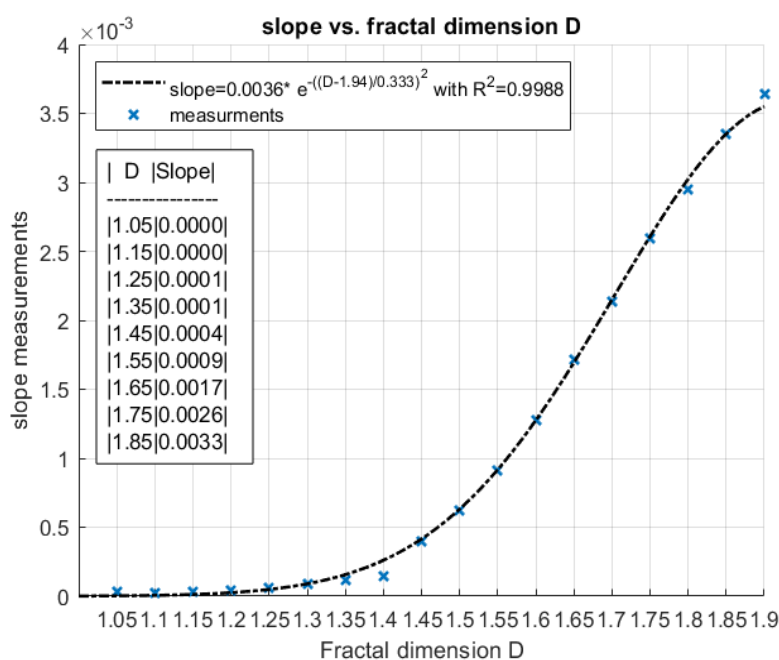
Με βάση αυτές τις μετρήσεις μετά από διαδοχικές προσομοιώσεις τραχύτητας (για από  $D=1.05$  έως  $D=1.90$ ) λαμβάνουμε αυτόματα το διάγραμμα μετρήσεων  $slope$  vs  $D$  της εικόνας εικόνα A.24



Εικόνα A-25. Διάγραμμα  $\gamma(k)$  για  $\theta_2 = -\theta_1 = -25^\circ$ ,  $D=1.75$  συχνότητες από 10GHz έως 11GHz με επιλογή 'Allslopes'

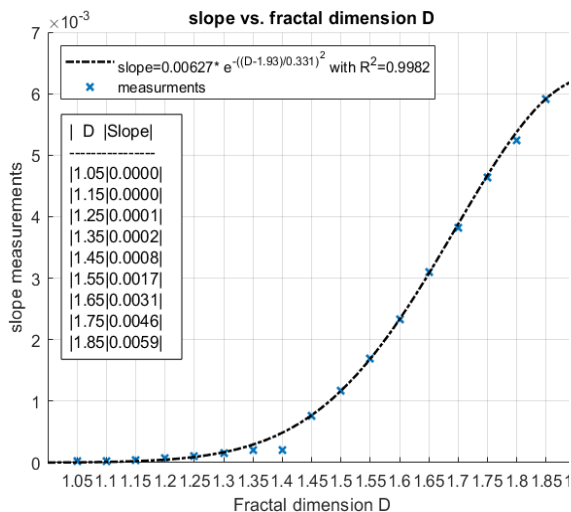


Εικόνα A-26. Διάγραμμα  $\gamma(k)$  για  $\theta_2 = -\theta_1 = -25^\circ$ ,  $D=1.45$  συχνότητες από 10GHz έως 11GHz με επιλογή 'Allslopes'

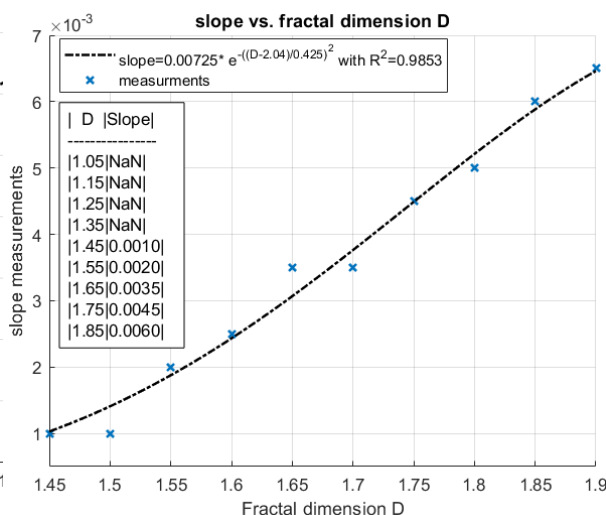


Εικόνα A-24. Διάγραμμα 'D vs slope' με χρήση του μέσου όρου των τιμών των κλίσεων, επιλογή '<S>'

Με την επιλογή '<p>' λαμβάνουμε τις μετρήσεις με ακρίβεια τριών δεκαδικών ψηφίων. Έτσι μετρήσεις κλίσεων με τιμές κάτω από 0,0005 θεωρούνται ως μηδενικές. Αυτή η επιλογή έχει δημιουργηθεί για να προσομοιώσει τυχόν μετρητικές δυσκολίες που μπορεί να παρουσιάσουν οι φυσικές μετρήσεις και να ελεγχθεί έτσι το κατά πόσο η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί να λειτουργήσει σε περιπτώσεις μετρήσεων με ακρίβεια μικρότερη από 3 δεκαδικά ψηφία



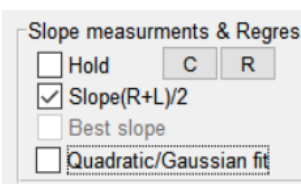
Εικόνα A-28. Διάγραμμα 'Slope vs D' σχεδιασμένο με βάση την μέση τιμή κλίσης  $Slope(R+L)/2$



Εικόνα A-27. Διάγραμμα 'Slope vs D' σχεδιασμένο με βάση την μέση τιμή κλίσης  $Slope(R+L)/2$  και με επιλογή '<p>'

Συγκρίνοντας τα δύο διαγράμματα παρατηρούμε ότι μετρήσεις κλίσεων για τραχύτητες που αντιστοιχούν σε τιμές  $D < 1.45$  δεν λαμβάνονται υπόψη στο διάγραμμα της εικόνας A-27 και στον πίνακα σημειώνονται με την ένδειξη NaN. Παρατηρώντας τις τιμές των μετρήσεων στους δύο πίνακες διαπιστώνεται άμεσα ότι με την επιλογή '<p>' οι μετρήσεις με τιμές που αντιστοιχούν σε κλίσεις μικρότερες από 0.002 εκλαμβάνονται λόγω της επιλογής '<p>' ως μηδενικές.

### Γενικές επιλογές διαγραμμάτων μέτρησης κλίσης 'slope'



Η επιλογή 'Hold' με την οποία το διάγραμμα που έχει ήδη σχεδιαστεί παραμένει και πάνω σε αυτό σχεδιάζονται οι επόμενες μετρήσεις. Αυτό βοηθά στο να γίνεται εύκολη η σύγκριση μεταξύ διαγραμμάτων που προκύπτουν από διαδοχικές μετρήσεις.

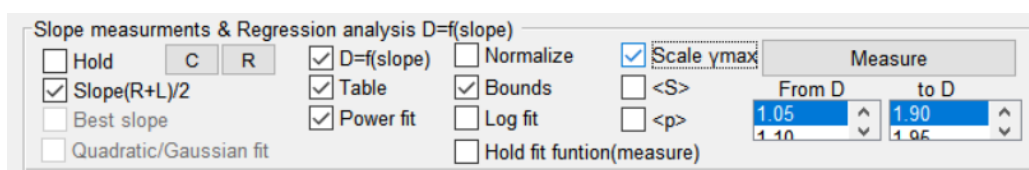
Η επιλογή 'C' διαγράφει το εκάστοτε διάγραμμα από μετρήσεις, καμπύλες και πίνακες.

Η επιλογή 'R' επανασχεδιάζει το διάγραμμα με βάση τις μετρήσεις κλίσεων που έχουν ήδη αποθηκευτεί στον πίνακα μετρήσεων χωρίς να χρειαστεί να επαναληφθεί η διαδικασία 'Measure'.

Η επιλογή 'Hold fit function' μόλις ενεργοποιηθεί κρατά σταθερή την εξίσωση παλινδρόμησης και αμετάβλητες τις παραμέτρους a, b, c, της εξίσωσης παλινδρόμησης όπως αυτές έχουν υπολογιστεί για την βέλτιστη προσαρμογή με

βάση της έως τώρα μετρήσεις. Έκτοτε οποτεδήποτε καινούρια σειρά προσομοιώσεων ξεκινήσει με την επιλογή 'Measure' το λογισμικό δεν θα υπολογίζει εκ νέου τις τιμές των παραμέτρων  $\alpha, \beta, \gamma$  έτσι ώστε αυτές να βελτιστοποιηθούν με βάση την βέλτιστη προσαρμογή της εξίσωσης στα καινούρια σημεία-μετρήσεις, αλλά θα τοποθετήσει τις νέες μετρήσεις πάνω στο υπάρχον διάγραμμα. Αυτή είναι μια πολύ σημαντική λειτουργία που επιτρέπει να εξετάσουμε κατά πόσο η υφιστάμενη εξίσωση παλινδρόμησης με τις υπολογισθείσες παραμέτρους  $\alpha, \beta, \gamma$  ταιριάζει με τις νέες μετρήσεις και ελέγχεται πρακτικά η προβλεπτική της ικανότητα.

### A7. Εκτίμηση τραχύτητας - 'fractal dimension' από την σχέση $D=f(\text{slope})$

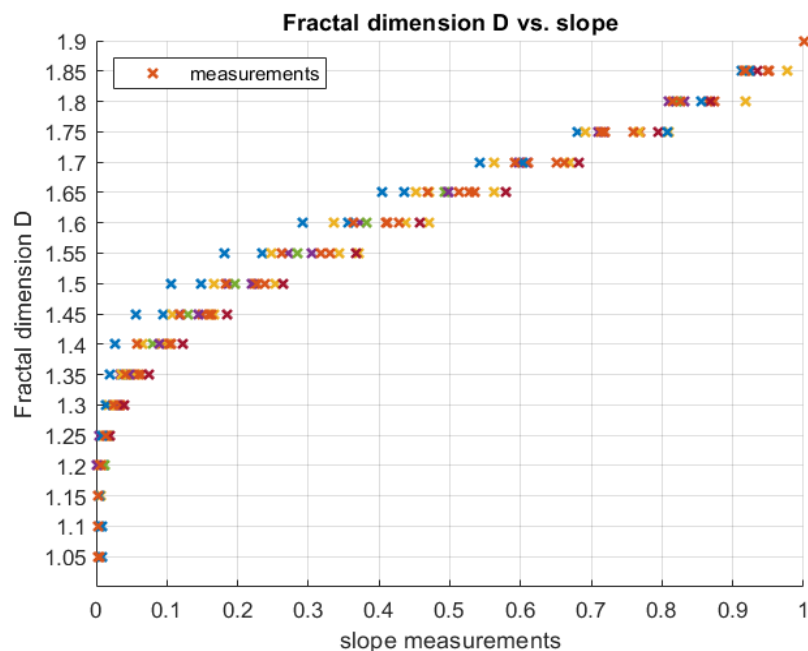


Εικόνα A-29. Εκτίμηση του 'fractal dimension'  $D$  μιας επιφάνειας μετρώντας την κλίση 'slope' στο διάγραμμα  $\gamma(k)$

Γενικά στην ανάλυση παλινδρόμησης ανεξάρτητη θεωρείται η μεταβλητή της οποίας ελέγχουμε την τιμή και εξαρτημένη θεωρείται η μεταβλητή εκείνη στην οποία αντανακλάται το αποτέλεσμα της μεταβολής της ανεξάρτητης μεταβλητής. Σε ένα πείραμα όμως όπως το συγκεκριμένο όπου διαπιστώνουμε ότι η τραχύτητα της επιφάνειας καθορίζει το μέγεθος των κλίσεων που εμφανίζονται στο διάγραμμα σκέδασης  $\gamma(k)$  αλλά που ταυτόχρονα και από το μέγεθος των κλίσεων που εμφανίζονται στο διάγραμμα μπορούμε να συμπεράνουμε για το μέγεθος της τραχύτητας της επιφάνειας σκέδασης, η διάκριση μεταξύ ανεξάρτητης και εξαρτημένης μεταβλητής δεν είναι εκ των προτέρων ορισμένη αλλά καθορίζεται από το ποια θεωρούμε κάθε φορά ως την ελεγχόμενη τιμή μεταβλητής στο πείραμα. Στην παρούσα ενότητα θεωρώ ως ανεξάρτητη μεταβλητή την τιμή της κλίσης που καταγράφεται στα διαγράμματα σκέδασης  $\gamma(k)$  και αναζητώ υπό αυτό το πρίσμα και στα πλαίσια της ανάλυσης παλινδρόμησης, την συναρτησιακή σχέση που συνδέει τις δύο μεταβλητές. Αυτό που χρειάζεται η ανάλυση παλινδρόμησης είναι ένα σύνολο μετρήσεων αποτελούμενο από ζευγάρια τιμών παρατήρησης των υπό εξέταση μεταβλητών. Το σύνολο αυτών των δεδομένων αποτελεί κάθε φορά το σύνολο εκπαίδευσης από το οποίο ακολουθώντας τα κάτωθι βήματα προκύπτει ένα μοντέλο για την εκτίμηση της τιμής της τραχύτητας μιας επιφάνειας σκέδασης όταν ως το μοναδικό γνωστό στοιχείο που έχουμε για αυτή την επιφάνεια είναι το διάγραμμα του συντελεστή σκέδασης  $\gamma(k)$ . Τα βήματα είναι τα εξής:

**1<sup>ον</sup> βήμα: Δημιουργία του διαγράμματος διασποράς 'scatter plot' (βλ.εικόνα Α-30).**

Από τις ρυθμίσεις επιλέγω '**D=f(slope)**' και πατώ '**Measure**' έτσι ώστε να ξεκινήσει μια σειρά προσομοιώσεων σκέδασης σε επιφάνειες με μεταβλητή τραχύτητα  $1.05 < D < 1.90$ . Στην εικόνα Α-18 μπορούμε να δούμε κάποια παραδείγματα από στιγμιότυπα προσομοίωσης. Οι τιμές των κλίσεων 'slope' και οι αντίστοιχες τιμές του 'fractal dimension D' τοποθετούνται στο διάγραμμα της εικόνας Α-30 δημιουργώντας έτσι το διάγραμμα διασποράς. Επαναλαμβάνουμε με την ανωτέρω διαδικασία για αρκετές φορές μια σειρά προσομοίωσης σκεδάσεων σε επιφάνειες με μεταβλητή τραχύτητα από  $1.05 < D < 1.90$  και έχοντας επιλέξει σε κάθε πείραμα σκέδασης να ξεκινάμε με μια τυχαία φάση  $\varphi_n$ , κατά την κατασκευή της 'fractal' επιφάνειας (βλ. ενότητα Α.2) εισάγοντας έτσι και μια τυχαίοτητα αναφορικά με την δομή της επιφάνειας σκέδασης. Προκειμένου τα αποτελέσματα να είναι εύκολα συγκρίσιμα μεταξύ τους, επιλέγω Normalize από το menu (βλ. εικόνα Α-29) πριν την έναρξη των προσομοιώσεων. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων καταγράφονται στο διάγραμμα διασποράς στην εικόνα Α-30 με διαφορετικά χρώματα για κάθε σειρά προσομοίωσης.



Εικόνα Α-30. Διάγραμμα διασποράς μεταβλητών  $D$  vs  $slope$  για γωνία πρόσπτωσης  $\theta_i=25^\circ$ .

Για το παράδειγμα της ανωτέρω προσομοίωσης σκέδασης (εικόνα Α-30) έχουν επιλεγεί οι εξής παράμετροι: Τραχύτητα επιφάνειας μεταβλητή από  $1.05 < D < 1.90$  και κατασκευής της 'fractal' δομής με παραμέτρους  $N=6$ ,  $b=1.8$ ,  $k\sigma=0.31$  και τυχαία αρχική φάση  $\varphi_n$  σε κάθε νέα σειρά προσομοίωσης (ενεργοποιημένες οι επιλογές Random  $\varphi_n$  each run & Lock  $\varphi_n$ , βλ. παρ Α.2). Γωνία πρόσπτωσης του ΗΜ κύματος στις  $25^\circ$  ως προς την κάθετο στην επιφάνεια, συχνότητα ΗΜ κύματος  $f_0=10GHz$ ,  $\Delta f=10MHz$ ,  $M=100$ ,  $BW=1GHz$  και τύπος διαγράμματος μετρήσεων σκέδασης  $\gamma=f(k)$ , συνολικό μήκος επιφάνειας 'patch size' 80λ. Το διάγραμμα διασποράς υποδεικνύει την γενική τάση - συσχέτισης που υπάρχει μεταξύ των δύο μεταβλητών

'slope' και 'D'. Με τον όρο «τάση» ή «συσχέτιση» μεταξύ μεταβλητών εννοείται ο τρόπος με τον οποίο αλλάζει η τιμή της μιας μεταβλητής, *slope*, όταν αυξηθεί ή μειωθεί η τιμή της άλλης. Στην εικόνα A-30 βλέπουμε κατ' αρχάς μια ξεκάθαρα θετική συσχέτιση μεταξύ των δύο μεταβλητών καθότι αύξηση της τιμής της μετρούμενης κλίσης συνδέεται στατιστικά σχεδόν πάντα με αυξημένη τιμή τραχύτητας της επιφάνειας ήτοι με αυξημένοι τιμή 'fractal dimension' *D* και αντίστροφα. Η συσχέτιση ακολουθεί κατά τόπους μια γραμμική σχέση αλλά στο σύνολό της, μετρήσεις κλίσεων από 0 έως 1, είναι μια μη γραμμική σχέση.

**2<sup>ον</sup> βήμα: Προσδιορισμός του μοντέλου/εξίσωση παλινδρόμησης που ερμηνεύει στο μεγαλύτερο δυνατό ποσοστό την δυναμική της διασποράς μεταξύ των δύο μεταβλητών.**

Για την αναζήτηση της συναρτησιακής σχέσης που υπάρχει μεταξύ των δύο μεταβλητών *D*, *slope* το λογισμικό διαθέτει τους ακόλουθους τύπους συναρτήσεων παλινδρόμησης - σημειακής προσαρμογής στις μετρήσεις:

Από τις ρυθμίσεις επιλέγω μια από τις κάτωθι επιλογές:

επιλογή 'Gaussian fit' που χρησιμοποιεί την εξίσωση  $Y = a \cdot e^{-\left(\frac{X-b}{c}\right)^2}$

επιλογή 'Power fit' που χρησιμοποιεί την εξίσωση  $Y = a \cdot X^b + c$

επιλογή 'Quadratic fit' που χρησιμοποιεί την εξίσωση  $Y = a \cdot X^2 + b \cdot X + c$

επιλογή 'Log fit' που χρησιμοποιεί την εξίσωση  $Y = a \cdot \log(x) + c$

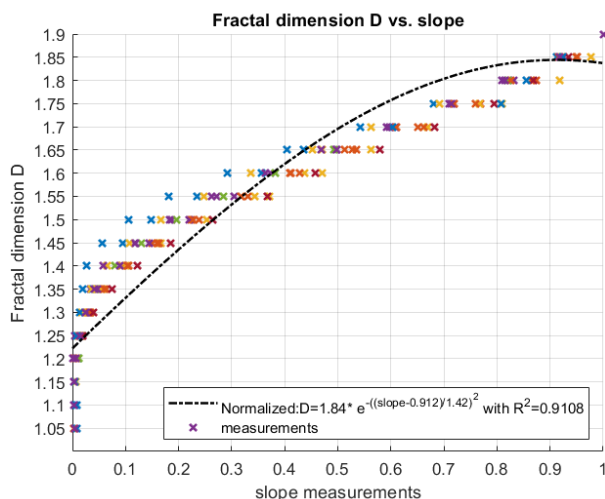
Οι παράμετροι *a*, *b*, *c* υπολογίζονται με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων σφαλμάτων έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή προσαρμογή της καμπύλης της εξίσωσης παλινδρόμησης στα σημεία των μετρήσεων. Το πόσο καλή είναι η προσαρμογή του κάθε μοντέλου παλινδρόμησης υπολογίζεται από την διακύμανση του σφάλματος της πρόβλεψης ως προς την πραγματική τιμή. Στην περίπτωση της μελέτης μου επέλεξα ως δείκτη ένδειξης της βέλτιστης προσαρμογής την τιμή  $R^2$  (R-squared). Ο δείκτης αυτός που ονομάζεται συντελεστής παλινδρόμησης ή/και συντελεστής προσδιορισμού (coefficient of determination ή percentage of variance explained) προτιμήθηκε έναντι άλλων δεικτών, όπως ο *RMSE* (root mean square error) για το λόγο του ότι είναι ένας δείκτης που εκ της φύσεως του υπολογισμού του εμφανίζεται με μια κανονικοποιημένη τιμή μεταξύ 0 και 1 όπως εξηγώ εν συντομία και παρακάτω. Έτσι δίνει το πλεονέκτημα με την πρώτη ματιά να μπορεί κάποιος να συγκρίνει μεταξύ διαφορετικών μοντέλων και γενικά να αποφαινεται άμεσα για το ποσοστό της προσαρμογής. Όσο πιο κοντά στη μονάδα είναι το  $R^2$  τόσο καλύτερο είναι το μοντέλο της συνάρτησης που έχουμε επιλέξει, με την διακύμανση των σφαλμάτων απόκλισης των προβλέψεων του μοντέλου ως προς τις πραγματικές μετρήσεις να ελαχιστοποιούνται. Συγκεκριμένα λαμβάνοντας υπόψη την δειγματική διασπορά των παρατηρήσεων/μετρήσεων  $Y_i$  ως προς την μέση τιμή τους αποδεικνύεται ότι ισχύει  $\sum_i^n (Y_i - \bar{Y})^2 = \sum_i^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 + \sum_i^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 +$ . Όπου το  $\sum_i^n (Y_i - \bar{Y})^2$  συμβολίζεται ως *SST* (Sum of Squares Total), το  $\sum_i^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$  ως *SSR* (Sum of Squares Regression) και το  $\sum_i^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2$  ως *SSE* (Sum of

Squares Error). Το  $SST$  εκφράζει την συνολική μεταβλητότητα των παρατηρήσεων εκ της οποίας ένα μέρος ερμηνεύεται επιτυχώς από το μοντέλο παλινδρόμησης ( $SSR$ ) και το υπόλοιπο μέρος τους παραμένει ανερμηνεύτο από το μοντέλο παλινδρόμησης και αυτό αποτελεί το άθροισμα των τετραγώνων των εκτιμώμενων σφαλμάτων ( $SSE$ ). Έτσι ισχύει ότι  $SST = SSR + SSE$ . Ο συντελεστής προσδιορισμού της παλινδρόμησης δίνεται από την σχέση  $R^2 = \frac{SSR}{SST} = \frac{SST - SSE}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST}$  ως εκ τούτου ισχύει ότι  $0 \leq R^2 \leq 1$ . Όταν  $R^2 = 0$  σημαίνει  $SSR=0$  και άρα το μοντέλο δεν μπορεί να ερμηνεύσει καθόλου την μεταβλητότητα των παρατηρήσεων ενώ όταν  $R^2 = 1$  σημαίνει  $SSE=0$  δηλαδή καθόλου σφάλματα στις εκτιμήσεις του μοντέλου και άρα τέλεια εφαρμογή.

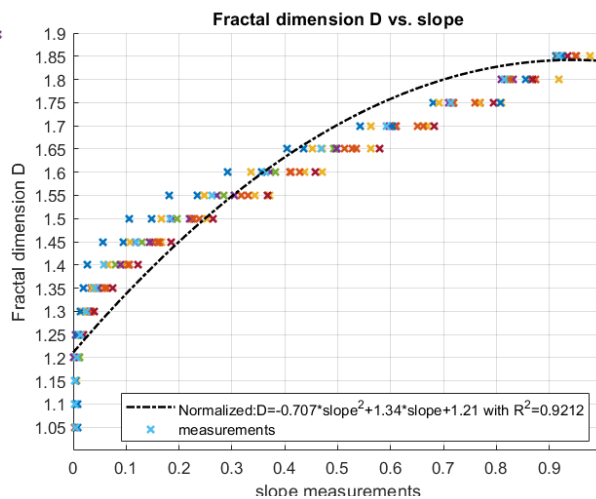
Στις επόμενες εικόνες A-31 έως A-34 δοκιμάζω διαφορετικές εξισώσεις παλινδρόμησης πάνω στα διάγραμμα διασποράς των δύο μεταβλητών και με την βοήθεια του λογισμικού που ανέπτυξα υπολογίζω τις παραμέτρους  $a, b, c$  καθώς και τον δείκτη  $R^2$  και τις εμφανίζω σε πλαίσιο πάνω στο κάθε διάγραμμα.

Η καμπύλη της εικόνας A-32 έχει δημιουργηθεί με εξίσωση παλινδρόμησης  $D = a \cdot e^{-\left(\frac{slope-b}{c}\right)^2}$  και η μέγιστη δυνατή προσαρμογή που επιτυγχάνει η καμπύλη της εξίσωσης ως προς τα σημεία των μετρήσεων υπολογίζεται από τον δείκτη προσαρμογής  $R^2$  να είναι στο 91.08%.

Η καμπύλη της εικόνας A-31 έχει δημιουργηθεί με εξίσωση παλινδρόμησης  $D = a \cdot slope^2 + b \cdot slope + c$  και ο δείκτης  $R^2$  φθάνει στο 92.12%.



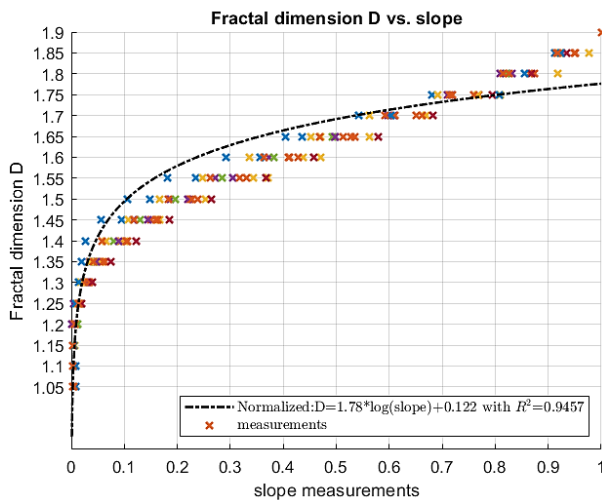
Εικόνα A-31.  $D=f(slope)$  με επιλογή ‘Gaussian fit’



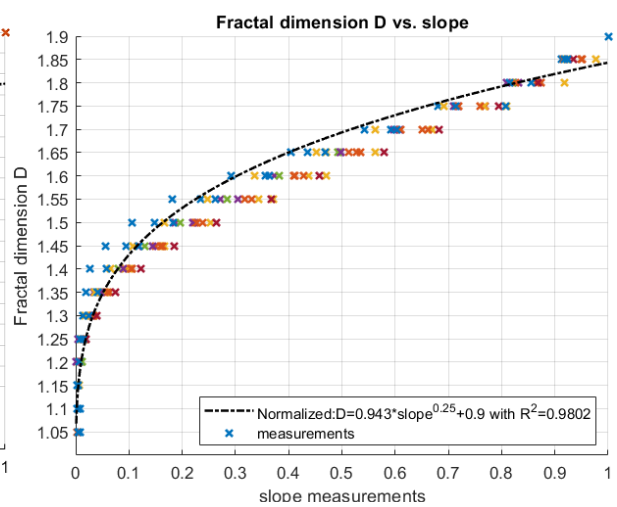
Εικόνα A-32.  $D=f(slope)$  με επιλογή ‘quadratic fit’

Η καμπύλη της εικόνας A-34 έχει δημιουργηθεί με εξίσωση παλινδρόμησης  $D = a \cdot \log(slope) + c$  και ο δείκτης  $R^2$  φθάνει στο 94.57%.

Τέλος η καμπύλη της εικόνας A-33 έχει δημιουργηθεί με εξίσωση παλινδρόμησης τη  $D = a \cdot slope^b + c$  από την οποία προκύπτει ο καλύτερος δείκτης προσαρμογής με  $R^2$  στο 98.02% και ως εκ τούτου επιλέγεται εφ’ εξής ως το αντιπροσωπευτικότερο μοντέλο.



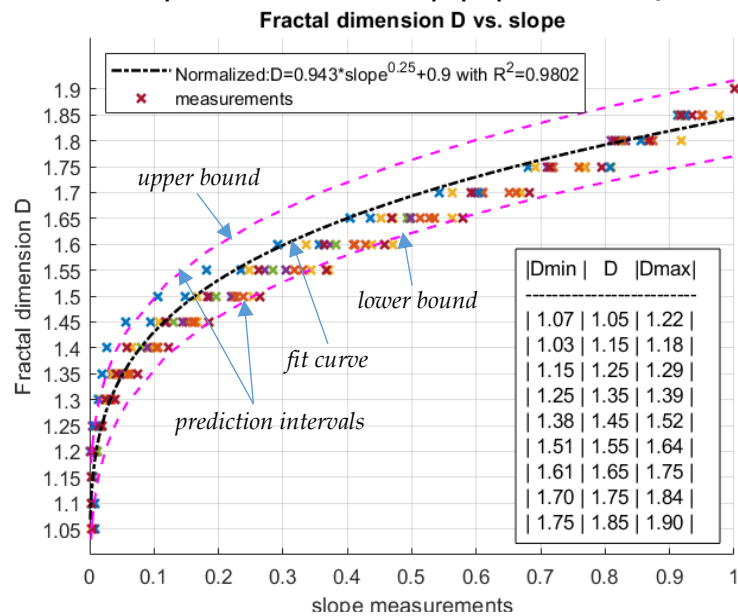
Εικόνα A-34.  $D=f(\text{slope})$  με επιλογή 'log fit'



Εικόνα A-33.  $D=f(\text{slope})$  με επιλογή 'power fit'

### 3<sup>ο</sup> βήμα: Προσδιορισμός της τιμής εκτίμησης $\hat{D}$ και όρια ζώνης πρόβλεψης

Με την επιλογή 'Power fit' χρησιμοποιούμε την εξίσωση  $\hat{D} = \hat{a} \cdot \text{slope}^{\hat{b}} + \hat{c}$  και το λογισμικό υπολογίζει τις κατ' εκτίμηση παραμέτρους του μοντέλου  $\hat{a} = 0.943$ ,  $\hat{b} = 0.25$ ,  $\hat{c} = 0.9$  εφαρμόζοντας επί των μετρήσεων την μέθοδο της ελαχιστοποίησης των τιμών των τετραγώνων σφάλματος, εν προκειμένω ελαχιστοποίηση του  $\sum_i^n (D_i - \hat{D}_i)^2$ . Με την επιλογή 'Power fit' σχεδιάζεται εν συνεχεία και η καμπύλη 'fit curve' της εξίσωσης  $\hat{D} = 0.943 \text{slope}^{0.25} + 0.9$  βλ. εικόνα A-35. Χρησιμοποιώντας αυτή την εξίσωση μπορούμε να κάνουμε μια εκτίμηση-πρόβλεψη 'prediction' για την τιμή  $\hat{D}$  της μορφοκλασματικής διάστασης, δηλαδή μια εκτίμηση της τραχύτητας της επιφάνειας σκέδασης έχοντας διαθέσιμη μια μέτρηση της τιμής της κλίσης 'slope' αξιοποιώντας τα δεδομένα του διαγράμματος οπισθοσκέδασης  $\gamma(k)$ .



Εικόνα A-35.  $D=f(\text{slope})$  με επιλογή 'power fit', 'bounds' & 'table', για γωνία πρόπτωσης  $\theta_i = 25^\circ$

Λόγω όμως της στοχαστικής συσχέτισης μεταξύ της τιμής εκτίμησης  $\hat{D}$  και της τιμής μέτρησης  $\text{slope}$ , η βεβαιότητα ότι η εκτίμηση αυτή θα μας δίνει κάθε φορά μια τιμή που θα συμπίπτει ακριβώς με την πραγματική είναι πολύ μικρή όσο τέλει και να

είναι το μοντέλο πρόβλεψης. Το πιο πιθανό είναι η τιμή εκτίμησης να βρίσκεται πλησίον της πραγματικής τιμής εντός κάποιου διαστήματος τιμών.

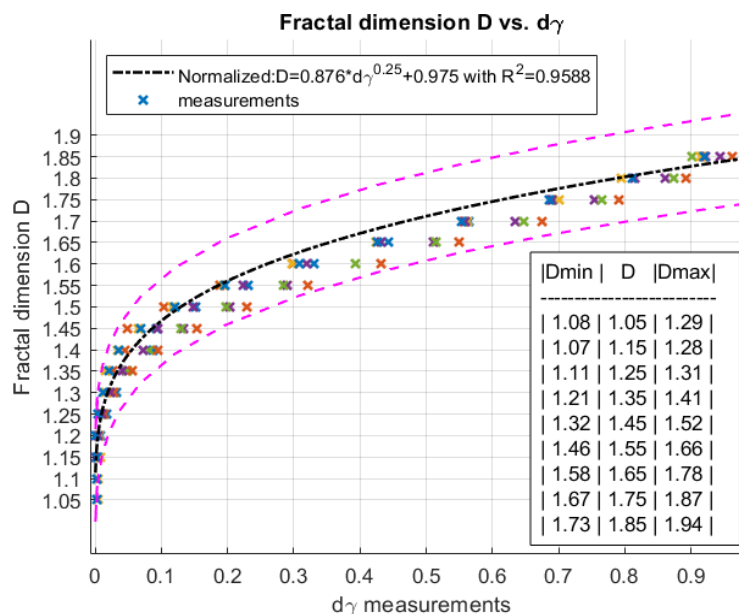
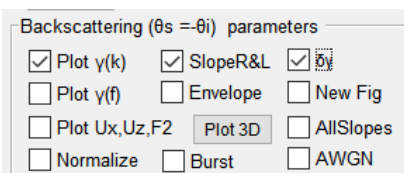
Στην προγνωστική συμπερασματική αυτό το διάστημα ονομάζεται διάστημα πρόβλεψης ‘*prediction interval*’ και είναι το διάστημα τιμών μέσα στο οποίο δίνουμε μια ορισμένη πιθανότητα να βρίσκεται η τιμή μιας μελλοντικής παρατήρησης, δεδομένων των όσων έχουν ήδη παρατηρηθεί. Η πιθανότητα αυτή ονομάζεται και συντελεστής εμπιστοσύνης. Με βάση τον συντελεστή εμπιστοσύνης και λαμβάνοντας υπόψη το ιστορικό κάθε φορά των διαθέσιμων μετρήσεων που έχουν προηγηθεί και υπολογίζοντας την διακύμανσή τους και σε συνάρτηση με την εξίσωση παλινδρόμησης το λογισμικό υπολογίζει ένα διάστημα πρόβλεψης ‘*prediction interval*’ εκατέρωθεν της εξίσωσης παλινδρόμησης. Από τις ρυθμίσεις επιλέγω ‘**bounds**’ για την εμφάνιση του ‘*prediction intervals*’. Η μία ζώνη ‘*upper bound*’ οριοθετεί την μέγιστη τιμή εκτίμησης  $\hat{D}_{max}$  και η δεύτερη ζώνη ‘*lower bound*’ οριοθετεί την ελάχιστη τιμή εκτίμησης  $\hat{D}_{min}$  δημιουργώντας έτσι το διάστημα πρόβλεψης (περιοχή εντός των ροζ διακεκομμένων γραμμών). Στην παρούσα έρευνα τα διαστήματα πρόβλεψης υπολογίζονται με συντελεστή εμπιστοσύνης 90%. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η τιμή  $D$  που παρουσιάζει στην πραγματικότητα η επιφάνεια σκέδασης έχει πιθανότητα 90% να βρίσκεται εντός των ορίων των τιμών εκτίμησης που έγιναν για αυτή με βάση την μέθοδο της μέτρησης των κλίσεων ή πιο απλά ότι ισχύει ότι  $\hat{D}_{min} \leq D \leq \hat{D}_{max}$  στις 90 από τις 100 μετρήσεις κλίσεων. Επιλέγοντας από τις ρυθμίσεις ‘**bounds**’ & ‘**Table**’ ταυτόχρονα με τα όρια πρόβλεψης εμφανίζεται και ο σχετικός πίνακα, βλ. εικόνα Α-35 ο οποίος παρουσιάζει την τιμή  $D$  που είχε η επιφάνεια σκέδασης κατά το πείραμα και εκατέρωθεν αυτής το άνω και κάτω όριο εκτίμησης  $\hat{D}_{min}$ ,  $\hat{D}_{max}$  όπως αυτό υπολογίζεται από την μέθοδο των κλίσεων με συντελεστή εμπιστοσύνης όπως είπαμε στο 90%. Να σημειώσω εδώ ότι στον πίνακα η τιμή εκτίμησης  $\hat{D}_{min}$  εμφανίζεται για λόγους απλότητας ως  $D_{min}$  όπως και η τιμή εκτίμησης  $\hat{D}_{max}$  εμφανίζεται ως  $D_{max}$ .



## A8. Εκτίμηση τραχύτητας 'fractal dimension' από την σχέση $D=f(\delta\gamma)$

Μεταξύ των διαθέσιμων ρυθμίσεων στο πλαίσιο των διαγραμμάτων οπισθοσκέδασης βρίσκεται και η επιλογή 'δγ'. Επιλέγοντας 'δγ' αντί μέτρηση της κλίσης  $\delta\gamma/\delta k$  λαμβάνεται από το διάγραμμα οπισθοσκέδασης η μέτρηση  $\delta\gamma$ . Επιλέγοντας 'Measure' επαναλαμβάνονται τα βήματα της προηγούμενης ενότητας A7 αλλά αυτή την φορά η εκτίμηση της μορφοκλασματικής διάστασης  $D$  υπολογίζεται με βάση την μέτρηση  $\delta\gamma$ . Το λογισμικό υπολογίζει με βάση τις διαθέσιμες μετρήσεις τις κατ' εκτίμηση παραμέτρους του μοντέλου  $\hat{D} = \hat{\alpha} \cdot (\delta\gamma)^{\hat{\beta}} + \hat{\epsilon}$  έτσι ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή προσαρμογή της καμπύλης της εξίσωσης με τα σημεία των μετρήσεων και για το παράδειγμα της εικόνα A-36 είναι τα  $\hat{\alpha} = 0.876$ ,  $\hat{\beta} = 0.25$ ,  $\hat{\epsilon} = 0.975$ . Επιλέγοντας 'bounds' με βάση την εξίσωση  $\hat{D} = 0.876 (\delta\gamma)^{0.25} + 0.975$  και συνοπολογίζοντας την διακύμανση των μετρήσεων του διαγράμματος, υπολογίζετε το διάστημα πρόβλεψης για συντελεστή εμπιστοσύνης 90% και τοποθετούνται οι ροζ διακεκομμένες γραμμές που οριοθετούν το άνω και κάτω όριο της ζώνης εκτίμησης.

Επιλέγοντας 'Table' συμπληρώνεται ο πίνακας που περιέχει την τιμή  $D$  με την οποία κατασκευάστηκε η επιφάνεια κατά την προσομοίωση της σκέδασης και εκατέρωθεν αυτής την μέγιστη τιμή  $\hat{D}_{max}$  και την ελάχιστη  $\hat{D}_{min}$  που το μοντέλο εκτιμά ότι έχει η επιφάνεια σκέδασης με βάση την μέτρηση  $\delta\gamma$  από το διάγραμμα σκέδασης.



Εικόνα A-36.  $D=f(\delta\gamma)$  με επιλογή 'power fit', 'bounds' & 'table', για γωνία πρόπτωσης  $\theta_i=25^\circ$ .



## Παράρτημα Β.

### Επαλήθευση αλγόριθμου προσομοίωσης σκέδασης του λογισμικού 'ScatteringLab'.

#### Περιεχόμενα

B1. Συγκρίσεις διαγραμμάτων σκέδασης $\gamma(\theta_2)$ για διαφορετικής τραχύτητας επιφάνειες.....	212
B2. Συγκρίσεις διαγραμμάτων σκέδασης $\gamma(\theta_2)$ για διαφορετικού μεγέθους επιφάνειες ....	214
B.2.1. Ελάχιστο χωρικό μήκος 'Λ <sub>0</sub> ' και μήκος 'patch-size' .....	216

#### Περίληψη

Το λογισμικό 'ScatteringLab' υλοποιήθηκε για πρώτη φορά στα πλαίσια της παρούσας διατριβής και χρησιμοποιήθηκε για να παράγει πρωτότυπη έρευνα και αποτελέσματα που δημοσιεύονται για πρώτη φορά. Προκειμένου να αξιολογηθεί η ορθή λειτουργία του λογισμικού πριν αυτό χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή αποτελεσμάτων που αφορούν καινοτόμο έρευνα κρίθηκε σκόπιμο να δοκιμαστεί πρώτα προσομοιώνοντας γνωστά πειράματα σκέδασης ΗΜ κυμάτων με δημοσιευμένα αποτελέσματα.

Συγκεκριμένα επιλέχθηκαν να προσομοιωθούν οι σκεδάσεις που παρουσιάζονται στην δημοσίευση των D. L. Jaggard, X. Sun, "Scattering from fractally corrugated surfaces", Journal of the optical society of America, Vol. 7, No 6, pp. 1131-1139, 1990. Η επιλογή αυτή βασίστηκε στο γεγονός ότι οι Jaggard & Sun στην συγκεκριμένη δημοσίευσή τους έχουν χρησιμοποιήσει ίδια μέθοδο, Kirchhoff Approximation, ως μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού της σκέδασης καθώς και 'fractal' επιφάνεια σκέδασης. Άρα η δυνατότητα του λογισμικού 'ScatteringLab' να προσομοιώσει σκεδάσεις με τα δεδομένα της συγκεκριμένης δημοσίευσης και να αναπαράγει με ακρίβεια τα διαγράμματα σκέδασης της συγκεκριμένης δημοσίευσης έχει κομβικό χαρακτήρα για την αξιοπιστία και την επαλήθευση της ορθής λειτουργίας του λογισμικού που κατασκεύασα.

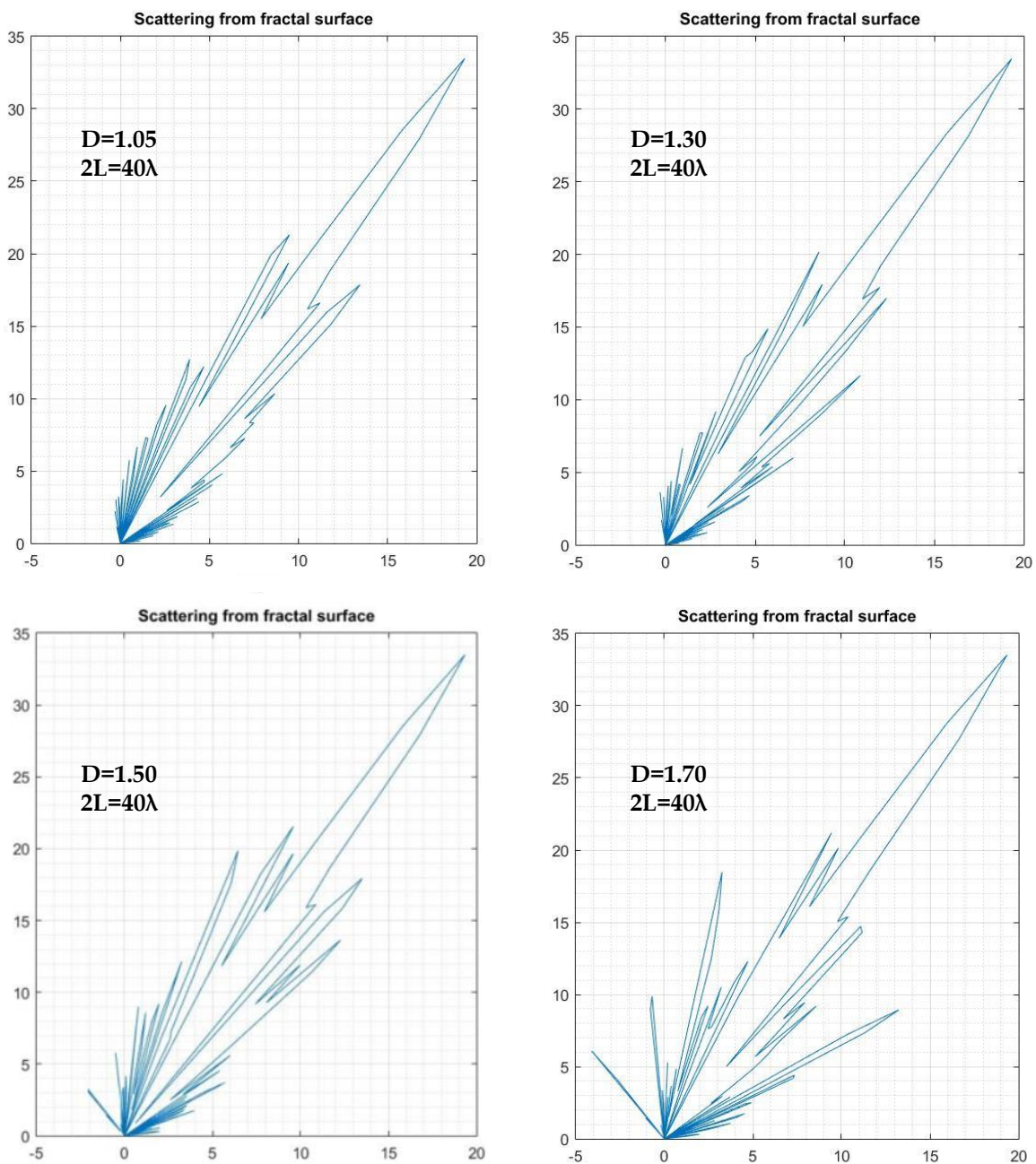
Στην ενότητα B1 αντιπαραβάλλω τα διαγράμματα του συντελεστή σκέδασης  $\gamma(\theta_2)$  επί διαφορετικής τραχύτητας επιφάνειες, όπως αυτά δημοσιεύτηκαν από τους Jaggard & Sun, με τα διαγράμματα σκέδασης  $\gamma(\theta_2)$  τα οποία παρήγαγε το 'ScatteringLab' χρησιμοποιώντας ακριβώς τις ίδιες παραμέτρους προσομοίωσης

Ομοίως στην ενότητα B2 για τα διαγράμματα του συντελεστή σκέδασης  $\gamma(\theta_2)$  επί ίδιας τραχύτητας αλλά διαφορετικού μήκους επιφάνειες σκέδασης.

Από τις προσομοιώσεις που παρουσιάζω στις ενότητες B1 και B2 προκύπτει ότι τα αποτελέσματα των σκεδάσεων είναι σύμφωνα τόσο με τα διαγράμματα της σχετικής δημοσίευσης όσο και με την θεωρία σκέδασης ΗΜ κυμάτων από τραχείες επιφάνειες επιβεβαιώνοντας έτσι την σωστή λειτουργία του αλγόριθμου σκέδασης του εν λόγω λογισμικού.

## B1. Συγκρίσεις διαγραμμάτων σκέδασης $\gamma(\theta_2)$ για διαφορετικής τραχύτητας επιφάνειες.

Με την βοήθεια του λογισμικού 'ScatteringLab' σχεδιάστηκαν τα παρακάτω διαγράμματα του συντελεστή σκέδασης  $\gamma(\theta_2)$  με βάση τα δεδομένα της δημοσίευσης των D. L. Jaggard, X. Sun, "Scattering from fractally corrugated surfaces", Journal of the optical society of America, Vol. 7, No 6, pp. 1131-1139, 1990. Συγκεκριμένα προσομοιώθηκε σκέδαση ΗΜ κύματος συχνότητας  $f=10\text{GHz}$  ( $\lambda=3\text{cm}$ ) υπό γωνία πρόσπτωσης  $\theta=30^\circ$  επί επιφάνειας συνολικού μήκους  $2L=40\lambda=1.2\text{m}$  και τραχύτητας που προσομοιώθηκε από δομή 'fractal' με  $\sigma=0.005\lambda$ ,  $N=6$ ,  $K_0=2\pi/\Lambda_0$ ,  $\Lambda_0=10\lambda$ ,  $b=2e/3$  με τιμές 'fractal dimension'  $D$  από 1.05 έως 1.75.



Εικόνα Β-1. Διαγράμματα σκέδαση  $\gamma(\theta_2)$  σε db. για διαφορετικές τιμές 'fractal dimension'  $D$  (τραχύτητες επιφάνειας) με προσομοιώσεις με τον 'ScattringLab'

Στο λογισμικό ενεργοποιήθηκε η επιλογή 'Calculate average of 10 sample with random  $\varphi_n$ ', έτσι ώστε τα διαγράμματα σκέδασης  $\gamma(\theta)$  που παρουσιάζω στην εικόνα Β-1 να προκύπτουν από τον μέσο όρο 10 σκεδάσεων επί επιφανειών που δημιουργήθηκαν να μεν με την ίδια τραχύτητα επιφάνειας, ίδια δηλαδή τιμή 'fractal dimension'  $D$ , πλην όμως με εισαγωγή τυχαίων γωνιών  $\varphi_n$  κατά την δημιουργία της κάθε μία επιφάνειας από τις 10 συνολικά επιφάνειες σκεδάσεις ακριβώς όπως έκαναν και οι Jaggard & Sun στην σχετική δημοσίευσή τους. Όπως εύκολα μπορεί να διαπιστωθεί, τα διαγράμματα σκέδασης της εικόνας Β-1 είναι σχεδόν πανομοιότητα με αυτά της δημοσίευσης, εικόνα Β-2, παρά το γεγονός ότι αμφότερα έχουν προέλθει μετά από εισαγωγή τυχαιότητας κατά την κατασκευή των επιφανειών σκέδασης επιβεβαιώνοντας έτσι την εξαιρετικά ορθή λειτουργία του λογισμικού 'ScatteringLab'.

D. L. Jaggard and X. Sun

Vol. 7, No. 6/June 1990/J. Opt. Soc. Am. A 1135

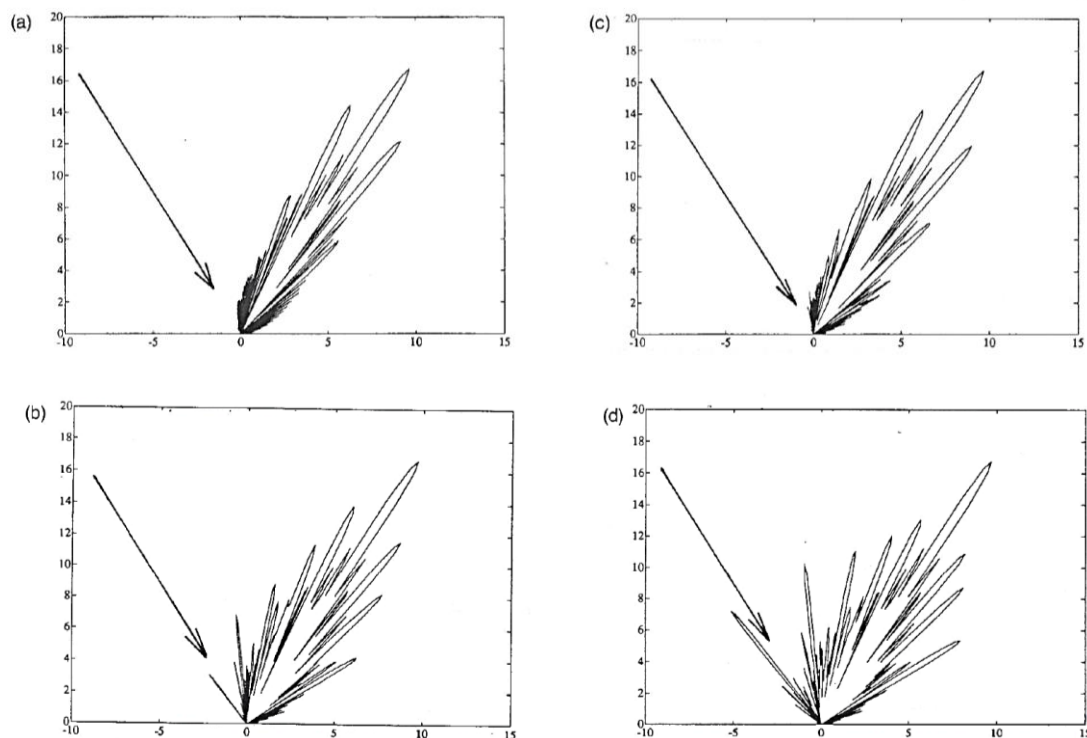


Fig. 4. Patterns of the scattering coefficient from fractally corrugated surfaces with fractal dimensions (a)  $D = 1.05$ , (b)  $D = 1.30$ , (c)  $D = 1.50$  (d)  $D = 1.70$ . Note that these are polar plots, and the labels provide a decibel scale for reference.

Εικόνα Β-2. Διαγράμματα σκέδασης  $\gamma(\theta)$  σε db. για διαφορετικές τιμές 'fractal dimension'  $D$  από την δημοσίευση των Jaggard & Sun

Παρατηρούμε επίσης ότι για 'fractal dimension'  $D = 1.05$ , δηλαδή για σχεδόν λεία επιφάνεια, όλοι οι λοβοί σκέδασης είναι πολύ κοντά μεταξύ τους με όλη την ενέργεια να είναι μαζεμένη στην κατεύθυνση της κατοπτρικής σκέδασης 'specular direction'. Για  $D = 1.3$  όπου η επιφάνεια αποκτά μικρή τραχύτητα η ενέργεια βρίσκεται πάλι συγκεντρωμένη στην κατεύθυνση της κατοπτρικής σκέδασης αλλά οι πλευρικοί λοβοί αρχίζουν να γίνονται λίγο μεγαλύτεροι. Για  $D = 1.5$  η τραχύτητα της επιφάνειας έχει αυξηθεί και η ενέργεια έχει αρχίσει να μοιράζεται στους πλαϊνούς λοβούς οι οποίοι έχουν αυξηθεί σε μέγεθος και αριθμό. Για  $D = 1.7$  έχουμε μια πολύ τραχεία επιφάνεια όπου πλέον εμφανίζονται έντονα φαινόμενα σκέδασης προς περισσότερες κατευθύνσεις καθώς και σημαντικό ποσοστό οπισθοσκέδασης.

Από τις παραπάνω παρατηρήσεις προκύπτει ότι τα αποτελέσματα των σκεδάσεων είναι σύμφωνα τόσο με τα διαγράμματα της σχετικής δημοσίευσης όσο και με την θεωρία σκέδασης ΗΜ κυμάτων από τραχείες επιφάνειες επιβεβαιώνοντας έτσι την σωστή λειτουργία του αλγόριθμου σκέδασης του εν λόγω λογισμικού.

## B2. Συγκρίσεις διαγραμμάτων σκέδασης $\gamma(\theta_2)$ για διαφορετικού μεγέθους επιφάνειες

Ένας επιπλέον έλεγχος του προγράμματος 'ScatteringLab' θα γίνει προσομοιώνοντας σκεδάσεις επί τραχείας επιφάνειας μεταβλητού μήκους. Συγκεκριμένα λαμβάνοντας ως δεδομένα τις παραμέτρους της προηγούμενης προσομοίωσης, βλ. ενότητα Β1, κρατάω σταθερό τον συντελεστή της τραχύτητας της επιφάνεια  $D = 1.5$  και μεταβάλλω μόνο το μήκος της επιφάνειας σκέδασης 'patch-size' ακολουθώντας επί ακριβώς το πείραμα της σχετικής δημοσίευσης των D. L. Jaggard, X. Sun, "Scattering from fractally corrugated surfaces", Journal of the optical society of America, Vol. 7, No 6, pp. 1131-1139, 1990.

Τα διαγράμματα της εικόνας Β-4 έγιναν με την βοήθεια του 'ScatteringLab' και είναι σύμφωνα τόσο με αυτά της δημοσίευσης των Jaggard and Sun, βλ. εικόνα Β-3, όσο και με τα θεωρητικά αναμενόμενα αποτελέσματα όπως αυτά προβλέπονται από την θεωρία σκέδασης ΗΜ κυμάτων από τραχείες επιφάνειες, βλ. A. Spizzichino., "The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces", Artech House Radar Library, 1987, επιβεβαιώνοντας έτσι και πάλι την σωστή λειτουργία του λογισμικού ως προς όλες τις παραμέτρους υπολογισμών και ρυθμίσεων.

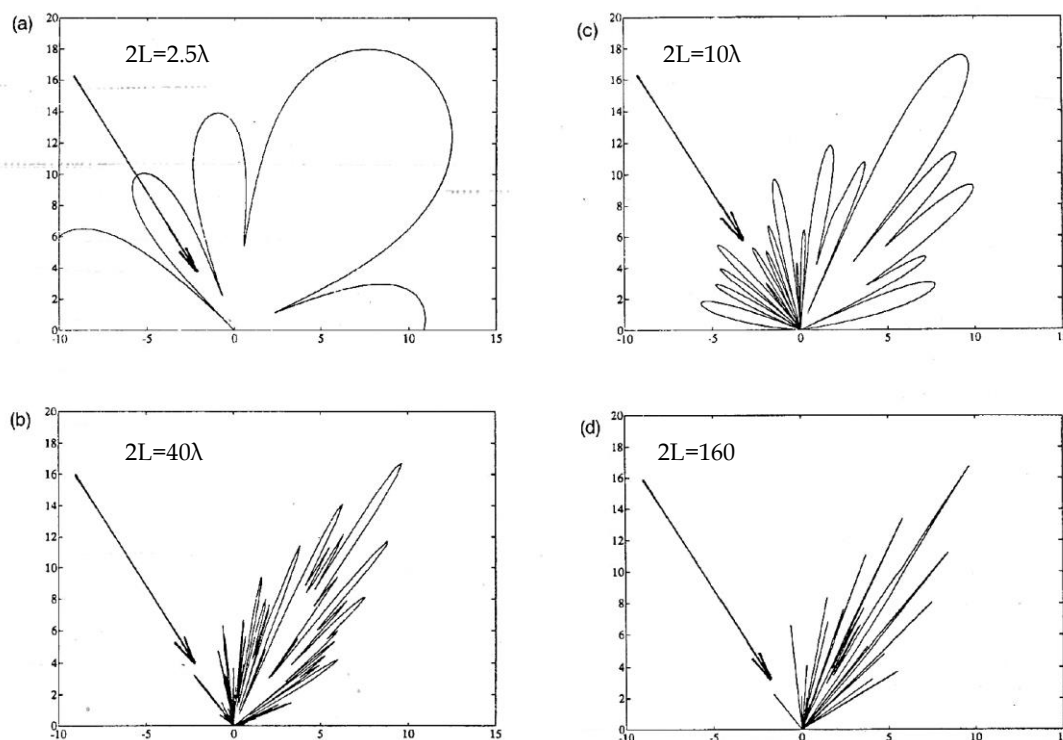
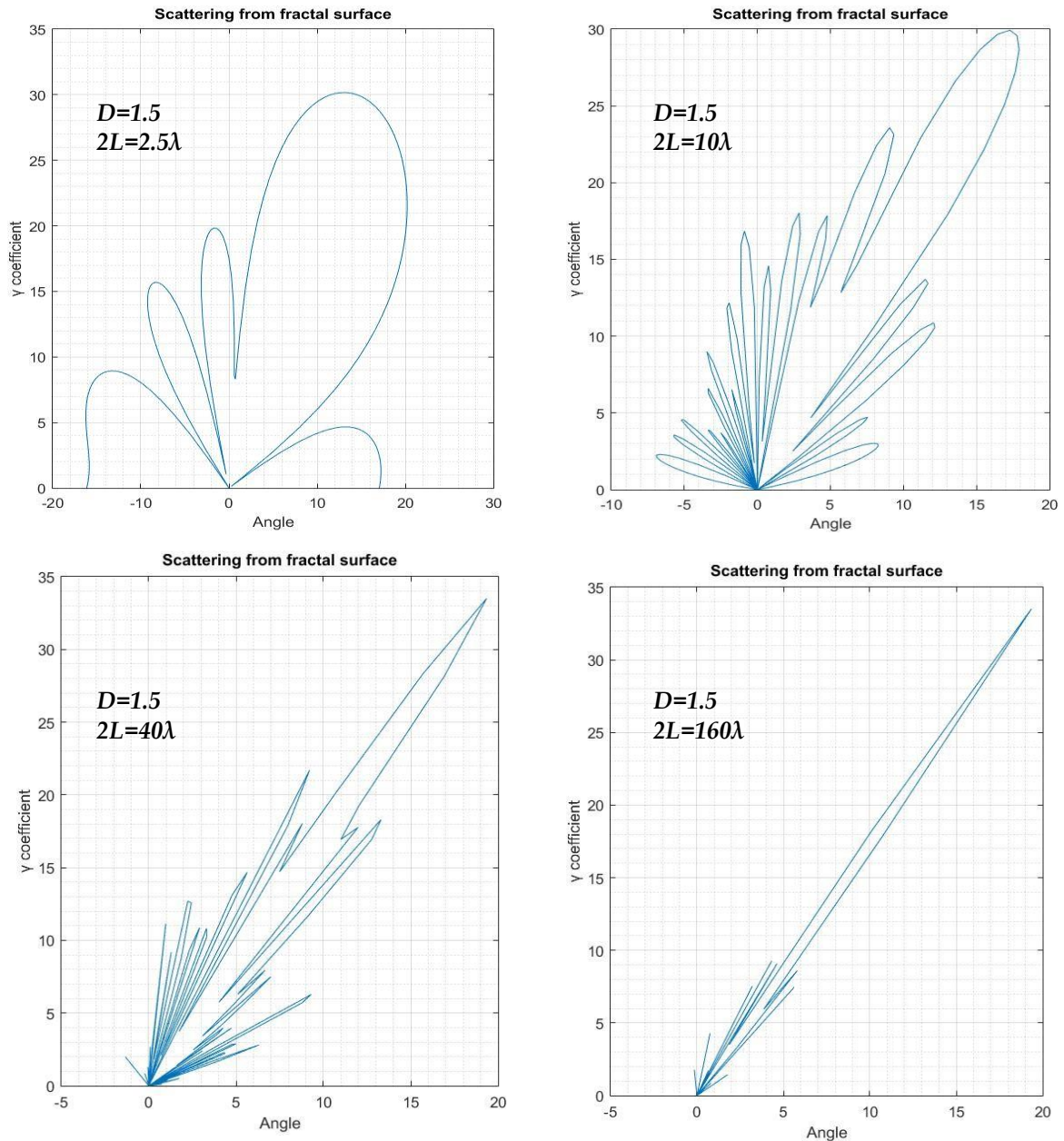


Fig. 6. Patterns of the scattering from rough surfaces of fractal dimension  $D = 1.50$  with patch sizes (a)  $2.5\lambda$ , (b)  $10\lambda$ , (c)  $40\lambda$ , (d)  $160\lambda$ . Note that these are polar plots, and the labels provide a decibel scale for reference.

Εικόνα Β- 3. Διαγράμματα σκέδασης  $\gamma(\theta_2)$  σε db. για διαφορετικά 'patch size' (μήκος) επιφάνειας σκέδασης από την δημοσίευση των Jaggard & Sun



Εικόνα Β- 4. Διαγράμματα σκέδασης  $\gamma(\theta_2)$  σε  $db$ , για διαφορετικά 'patch size' επιφάνειας σκέδασης μετά από προσομοιώσεις με την βοήθεια του 'ScatterinLab'

Παρατηρώντας τα αντίστοιχα διαγράμματα για 'patch-size'  $2.5\lambda$ ,  $10\lambda$ ,  $40\lambda$ ,  $160\lambda$  βλέπουμε ότι το μέγεθος της επιφάνειας σκέδασης παίζει χαρακτηριστικό ρόλο για την μορφή της δέσμης 'beamwidth' του σκεδαζόμενου ΗΜ κύματος από την επιφάνεια. Συγκεκριμένα όσο πιο μεγάλη είναι η επιφάνεια τόσο πιο στενό γίνεται το εύρος της δέσμης σκέδασης όπως προβλέπεται άλλωστε και από την θεωρία αλλά επιβεβαιώνεται και από τις προσομοιώσεις της δημοσίευσης των Jaggard & Sun καθώς και από αυτές του λογισμικού 'ScatteringLab'.

**B.2.1. Ελάχιστο χωρικό μήκος  $\Lambda_o$  και μήκος 'patch-size'.**

Όπως προκύπτει και από την σχετική θεωρία, βλ. 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο σχέση 1.65, όσο το μήκος  $L$  της επιφάνειας γίνεται μικρότερο τόσο το λεγόμενο 'edge effect' αρχίζει να παίζει σημαντικότερο ρόλο αφού στην εξίσωση του συντελεστή σκέδασης

$$\gamma_h^v(\theta_1, \theta_2) = \pm \sec \theta_1 \cdot \frac{1 + \cos(\theta_1 + \theta_2)}{\cos \theta_1 + \cos \theta_2} \cdot \frac{1}{2L} \int_{-L}^L e^{i\vec{v}\cdot\vec{r}} dx + \frac{e_h^v(L)}{2L}, \text{ ο όρος } \frac{e_h^v(L)}{2L} \text{ έχει το μήκος}$$

$L$  στον παρονομαστή και παύει πλέον αυτός ο όρος  $e_h^v(L) = \frac{i \sec \theta_1 \cdot \sin \theta_h^v}{k(\cos \theta_1 + \cos \theta_2)} e^{i\vec{v}\cdot\vec{r}(x)} \Big|_{-L}^L$  να

θεωρείται αμελητέος και δεν μπορεί πλέον να παραλείπεται.

Άρα είναι σημαντικό το μήκος της επιφάνειας σκέδασης να είναι  $2L > \Lambda_o$  έτσι ώστε ο όρος  $e_h^v(L)$  να μπορεί να παραλείπεται χωρίς να δημιουργείται κάποιο σφάλμα.

Δηλαδή στην πράξη χρειάζεται το 'patch-size' να έχει ένα μήκος τουλάχιστον  $2L > 10\lambda$ , βλ. και σχετική βιβλιογραφία [9], [21], [24] του 1<sup>ου</sup> κεφαλαίου.

Για όλους τους παραπάνω λόγους επιλέγω, σε όλες τις προσομοιώσεις σκέδασης της παρούσας διατριβής, ένα μήκος επιφάνειας σκέδασης της τάξης του  $2L=80\lambda$  έτσι ώστε να τηρούνται οι προαναφερθείσες προϋποθέσεις και περιορισμοί αναφορικά με το  $\Lambda_o$ , το  $\lambda$  και το μήκος  $L$  του 'patch-size'. Σχετικά με το  $\Lambda_o$  να σημειωθεί επίσης ότι όταν το μήκος  $L$  της επιφάνειας σκέδασης 'patch-size' γίνεται σημαντικά μεγαλύτερο από το χωρικό μήκος κύματος της 'fractal' επιφάνειας παύει να παρατηρείται οποιαδήποτε ποιοτική διαφορά στο διάγραμμα σκέδασης. Το χωρικό μήκος της 'fractal' επιφάνειας δίνεται από την παράμετρο  $\Lambda_o=2\pi/K_o$ . Αυτή την παρατήρηση την τηρώ επίσης σε όλες τις προσομοιώσεις της παρούσας διατριβής και θέτω πάντα  $\Lambda_o=10\lambda$ .



## Παράρτημα Γ. 'SAR raw data Analyzer' – Λογισμικό Ανάλυσης καταγραφών Radar

### Περιεχόμενα

---

Γ.1. Δομή και βασικές λειτουργίες του λογισμικού .....	219
Γ.2. Φόρτωση καταγραφών & ομαδοποίηση σε δέσμες 'batch' .....	222
Γ.3. Παρουσίαση των SAR raw data .....	224
Γ.3.1. Δισδιάστατη παρουσίαση (2D) σε μορφή εικόνας (png) .....	224
Γ.3.2. Αποθήκευση καταγραφών SAR raw data σε μορφή εικόνας τύπου png. ....	228
Γ.3.3. Τρισδιάστατη παρουσίαση (3D) .....	228
Γ.3.4. Στατιστική παρουσίαση των SAR raw data .....	231
Γ.3.4.1. Διαγράμματα μέσης τιμής (Plot $\mu$ ) .....	232
Γ.3.4.2. Διαγράμματα τυπικής απόκλισης (Plot $\sigma$ ) .....	234
Γ.3.4.3. Διαγράμματα Μέγιστου-Ελάχιστου (MaxMin) .....	235
Γ.3.4.4. Διαγράμματα Boxplot 'five number summary' .....	236
Γ.3.5. Ρυθμίσεις σε άξονες διαγραμμάτων .....	240
Γ.3.6. Εντοπισμός θέσης προβληματικών μετρήσεων και διαλείψεων. ....	241
Γ.4. Αλγόριθμοι προ-επεξεργασίας (data reduction & noise filtering).....	243
Γ.4.1. Κανονικοποίηση δεδομένων (SAR raw data rescaling) .....	245
Γ.4.2. Φιλτράρισμα ακραίων τιμών (SAR raw data outliers filtering) .....	247
Γ.4.2.1. Φίλτρο απόρριψης εξάρσεων 'spikes' τύπου ανισότητας <i>Chebyshev</i> .....	249
Γ.4.2.2. Φίλτρο απόρριψης εξάρσεων – spikes τύπου IQR.....	250
Γ.5. Μείωση του όγκου των δεδομένων προς επεξεργασία (data reduction) .....	258
Γ.5.1. Μείωση διαστάσεων δεδομένων .....	258
Γ.5.2. Μείωση όγκου δεδομένων δια αντιπροσώπευσης 'averaging' .....	260

---

### Περίληψη.

Το λογισμικό που διαβάζει, επεξεργάζεται και παρουσιάζει τα SAR raw data έχει φτιαχτεί σε περιβάλλον Matlab R2018b ακολουθώντας 'object-oriented' προγραμματισμό, παράγοντας ένα τελικό εκτελέσιμο πρόγραμμα για Windows, το 'SARrawdataAnalyzer.exe'. Το λογισμικό αναπτύχθηκε σταδιακά ακολουθώντας τις ανάγκες της έρευνας και χρειάστηκε ένα διάστημα περίπου 3 ετών (2019-2021) ώστε να πάρει την σημερινή του μορφή (βλ. εικόνες Γ-1, Γ-2)

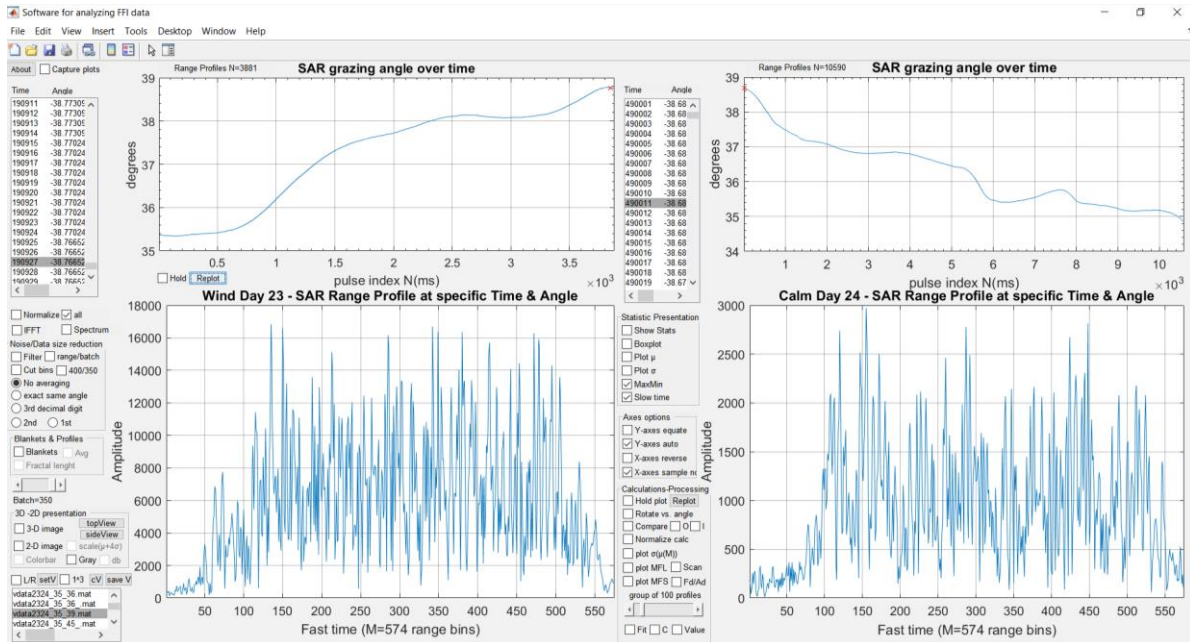
Το λογισμικό αυτό διαθέτει μια πληθώρα επιλογών μέσω χειριστηρίων 'checkbox', 'sliders' κ.ο.κ. τα οποία προστέθηκαν με βάση τις ανάγκες κατά την πορεία της έρευνας και με τα οποία ο χρήστης μπορεί να παραμετροποιήσει τόσο τον τρόπο επεξεργασίας και μαθηματικής ανάλυσης των SAR raw data όσο και τον τρόπο

## Παράρτημα Γ.

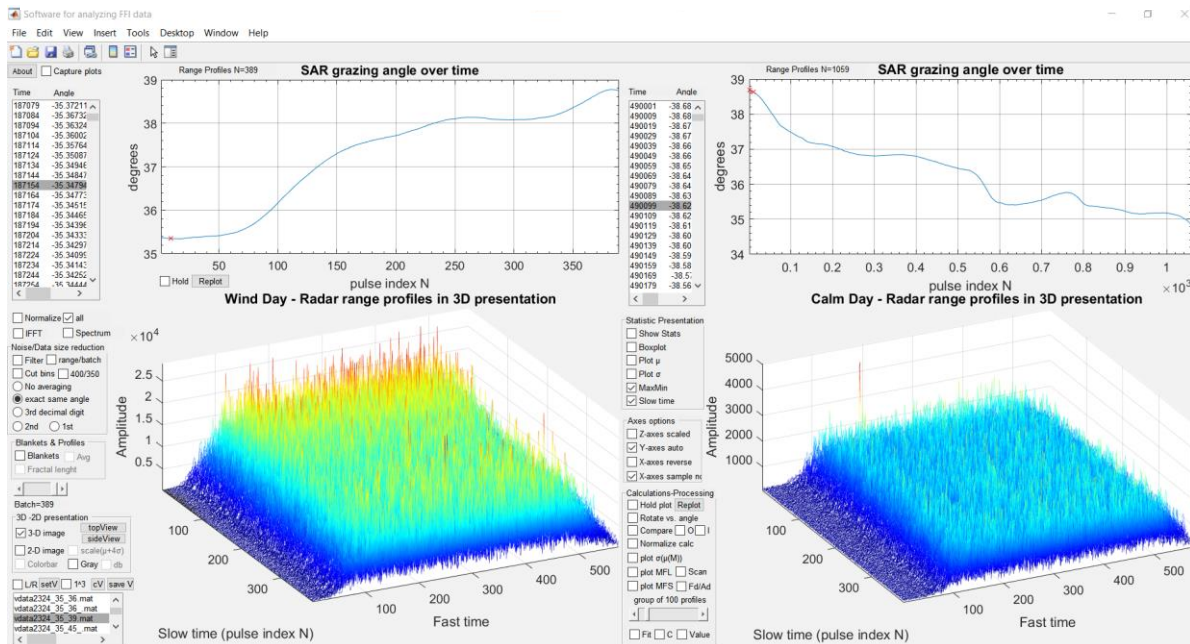
### ‘SAR raw data Analyzer’ – Λογισμικό Ανάλυσης καταγραφών Radar

παρουσίασης τους και την μετατροπή και την αποθήκευσή τους με διάφορες μορφές όπως π.χ. σε μορφή διδιάστατης εικόνας ή και τριδιάστατου γραφήματος.

Με την βοήθεια του εν λόγω λογισμικού κατέστη δυνατόν να μελετηθούν αναλυτικά τα δεδομένα SAR *raw data* από το πείραμα NEMO 2014 και με εφαρμογή μαθηματικών αλγορίθμων και τεχνικών *fractal* επί των καταγραφών να δημοσιευθούν αποτελέσματα σε αρκετά συνέδρια με ήδη δύο δημοσιεύσεις σε αναγνωρισμένα διεθνή περιοδικά.



Εικόνα Γ- 2, Λογισμικό SARrawdataAnalyzer, παρουσίαση σε αντιπαραβολή καταγραφών SAR *raw data* 2-D analysis



Εικόνα Γ- 1, Λογισμικό SARrawdataAnalyzer, παρουσίαση σε αντιπαραβολή των καταγραφών SAR *raw data* 3-D analysis

## Γ.1. Δομή και βασικές λειτουργίες του λογισμικού

Το κεφάλαιο αυτό εξηγεί τους αλγόριθμους που χρησιμοποιήθηκαν για την προ-επεξεργασία των SAR *raw data* και ταυτόχρονα το κεφάλαιο αυτό μπορεί να λειτουργήσει και ως ένα σύντομο εγχειρίδιο λειτουργίας για τον επόμενο ερευνητή που θα ενδιαφερθεί να εργαστεί και να αξιολογήσει το εν λόγω λογισμικό. Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή και επεξήγηση της δομής και της φιλοσοφίας του προγράμματος, των διαγραμμάτων καθώς και των βασικών λειτουργιών του έτσι ώστε να εξοικειωθεί ο αναγνώστης με αυτά και να γίνουν πιο εύκολα κατανοητά τα πειράματα και τα αποτελέσματα τους που θα παρουσιαστούν στα επόμενα κεφάλαια.

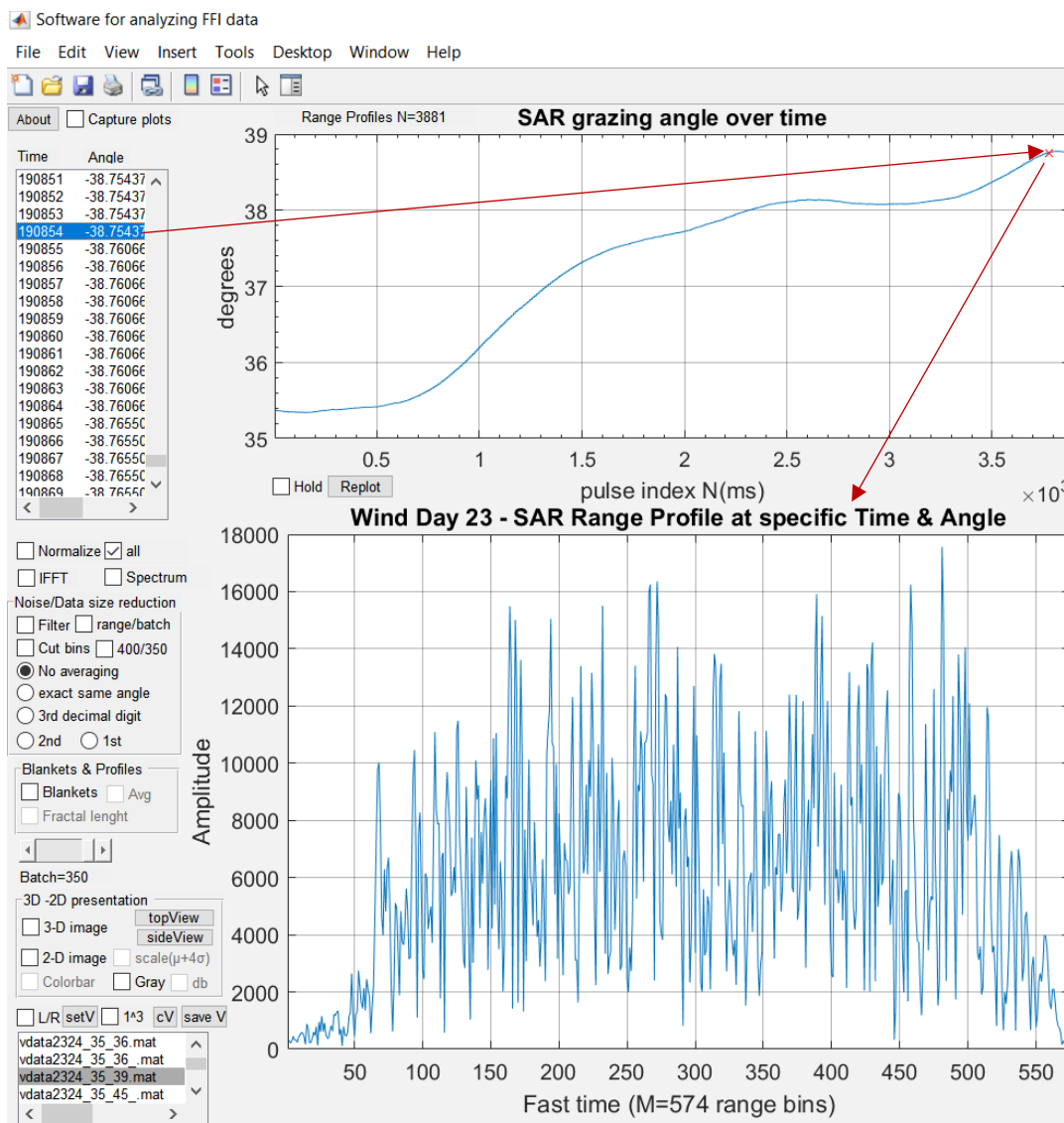
Στις εικόνες Γ-1, Γ-2 παρατηρούμε ότι το πρόγραμμα ξεκινά εμφανίζοντας πάντοτε 4 διαγράμματα, 2 διαγράμματα το ένα πάνω και το άλλο κάτω στα αριστερά και 2 επίσης πάνω κάτω στα δεξιά.

Τα αριστερά διαγράμματα αφορούν την πρώτη ημέρα των πειραμάτων NEMO14 και τα αντίστοιχα δεξιά διαγράμματα αφορούν την δεύτερη ημέρα των καταγραφών. Αυτό ο διαχωρισμός είναι μια βασική επιλογή και φιλοσοφία του προγράμματος, το να αντιπαραβάλλονται δηλαδή, σε μια οθόνη, τα δεδομένα και των δύο ημερών έτσι ώστε ο ερευνητής και χρήστης του προγράμματος να μπορεί εύκολα να σχηματίζει μια συνολική εικόνα για δύο διαφορετικές ημέρες εν προκειμένω για δύο διαφορετικές καταστάσεις θάλασσας. Να σημειώσω εδώ ότι την πρώτη ημέρα (23/9) του πειράματος NEMO τα δεδομένα προέρχονται από μια παραγμένη θάλασσα με μεγάλη κυμάτωση ενώ την δεύτερη ημέρα (24/9) από μια ήσυχη θάλασσα με ελάχιστη έως μηδενική κυμάτωση.

Ο επόμενος διαχωρισμός αφορά το πάνω και κάτω διάγραμμα, βλπ εικόνα Γ-3. Το επάνω διάγραμμα παρουσιάζει τις γωνίες '*grazing angle*' ως προς τον χρόνο καταγραφής (ms) των μετρήσεων. Το κάτω διάγραμμα παρουσιάζει το '*range profile*' που καταγράφηκε για την συγκεκριμένη γωνία και χρόνο και σημειώνεται με ένα κόκκινου χρώματος X πάνω διάγραμμα.

Η καταγραφή των '*range profile*' παρουσιάζεται ως '*Amplitude vs Fast time*'. Το '*fast time*' στο συγκεκριμένο RADAR έχει ένα εύρος  $M=574$  διακριτών τιμών '*range bins*'. Για κάθε ένα από αυτά τα '*range bin*' έχουμε από τον δέκτη του RADAR μια ψηφιακή καταγραφή των I,Q της οπισθοσκέδασης με την μορφή ενός μιγαδικού αριθμού  $I+jQ$ . Παιρνοντας την απόλυτη τιμή από την σχέση  $Amplitude = \sqrt{I^2 + Q^2}$  δημιουργείται το διάγραμμα που βλέπουμε στο κάτω διάγραμμα της εικόνα Γ-3.

Ο χρήστης με την βοήθεια της λίστας *Time/Angle* που βρίσκεται δίπλα σε κάθε διάγραμμα με τίτλο '*SAR grazing angle over seconds*' μπορεί να επιλέγει τον χρόνο ή την γωνία που τον ενδιαφέρει με το mouse ή με το πληκτρολόγιο. Στο πάνω διάγραμμα σημειώνεται με κόκκινο x το σημείο της τροχιάς (γωνία, χρόνος) ενώ στο κάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η καταγραφή (ένταση οπισθοσκεδαζόμενου ΗΜ κύματος ως προς '*fast time*') για το συγκεκριμένο χρονικό σημείο.



Εικόνα Γ- 3, Γράφημα μεμονωμένου ‘range profile’ ως ένταση HM κόματος ως προς ‘range bin’ σε συγκεκριμένη γωνία (χρόνο)

Μεταξύ των τεσσάρων διαγραμμάτων βλ. εικόνες Γ-1, Γ-2 υπάρχουν σταθερά δύο μενού με επιλογές. Οι επόμενες εικόνες Γ-4 και Γ-5 παρουσιάζουν λεπτομερώς τα περιεχόμενα αυτών των μενού τα οποία περιλαμβάνουν επιλογές ως προς τον τρόπο παρουσίασης των SAR raw data καθώς και επιλογές ως προς τους αλγόριθμους προ-επεξεργασίας και επεξεργασίας επί των SAR raw data.

Οι επιλογές που αφορούν τα στάδια της προ-επεξεργασίας των SAR raw data αναλύονται στην παράγραφο Γ4. του παρόντος παραρτήματος

Οι επιλογές που αφορούν τα στάδια επεξεργασίας μονοδιάστατων υπογραφών RADAR (1D fractal analysis) με εφαρμογή των αλγορίθμων ‘blankets’, ‘fractal length’ και της μεθόδου Mean Fractal Length (MFL) αναλύονται στο 3ο κεφάλαιο.

Οι επιλογές που αφορούν τα στάδια επεξεργασίας διδιάστατων υπογραφών RADAR (2D fractal analysis) Mean Fractal Signature (MFS) αναλύονται στο 4ο κεφάλαιο.

Στις παρακάτω εικόνες Γ-4 & Γ-5 συνδέω τις διάφορες περιοχές επιλογών με τις παραγράφους του παραρτήματος και τα αντίστοιχα κεφάλαια στα οποία μπορεί να ανατρέξει κάποιος για περισσότερες πληροφορίες

Παράρτημα Γ.4.1	Επιλογές προεπεξεργασίας, μετασχηματισμός δεδομένων	
Παράρτημα Γ.4.2 & Γ.4.3	Επιλογές προεπεξεργασίας για μείωση όγκου δεδομένων & αφαίρεση θορύβου	
3 <sup>ο</sup> κεφάλαιο	Παρουσίαση SAR raw data με γραφήματα Blankets & fractal length	
Παράρτημα Γ.3	Επιλογές παρουσίασης των SAR raw data σε μορφή εικόνας (2D) ή στο χώρο (3D)	
Παράρτημα Γ.2	Επιλογή αρχείου καταγραφών πειράματος NEMO2014 και δημιουργία αρχείων από τμήματα καταγραφών	

Εικόνα Γ- 4, Επιλογές αλγόριθμων προ-επεξεργασίας και τρόποι παρουσίασης SAR raw-data

Παράρτημα  
Γ.3.4

Υπολογισμοί στατιστικών  
παραμέτρων επί των SAR raw data  
και παρουσίαση  
σχετικών γραφημάτων

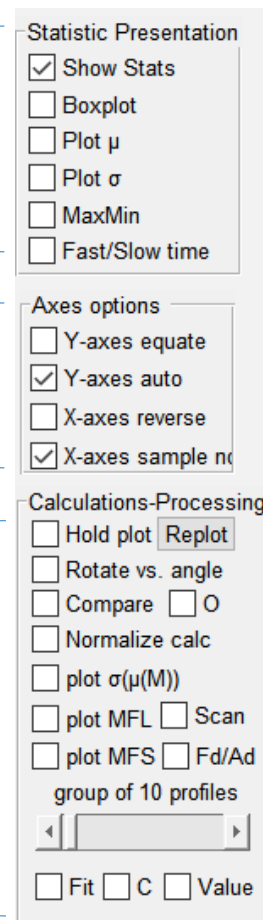
Παράρτημα  
Γ.3.5 & Γ.3.6

Ρυθμίσεις επί αξόνων γραφημάτων  
για συγκρίσεις μεταξύ γραφημάτων  
εντοπισμών διαλείψεων κ.ο.κ

3<sup>ο</sup> κεφάλαιο  
ενότητα 3.4.1

4<sup>ο</sup> κεφάλαιο  
ενότητα 4.5.1

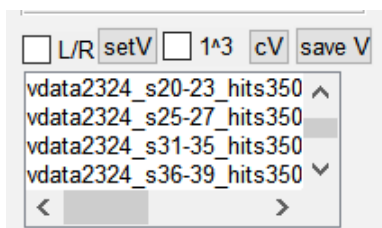
Επιλογή αλγόριθμων επεξεργασίας  
όπως Mean Fractal Length (MFL),  
Mean Fractal Signature (MFS) κ.α.



Εικόνα Γ- 5, Επιλογές αλγόριθμων επεξεργασίας των SAR raw data και τρόποι παρουσίασης αποτελεσμάτων

## Γ.2. Φόρτωση καταγραφών και ομαδοποίηση σε δέσμες ‘batch’

Η επιλογή του αρχείου καταγραφών γίνεται από μια λίστα αρχείων τύπου ‘mat’ (βλ. εικόνα Γ-6).



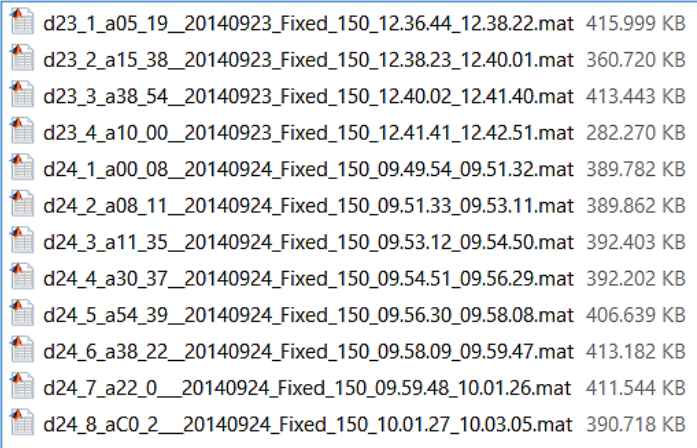
Εικόνα Γ- 6,  
Επιλογή αρχείου καταγράφων

Το όνομα των αρχείων είναι της μορφής vdata2324\_sXX-XX\_hitsYYYY.mat, όπου το 2324 αναφέρεται στις ημερομηνίες του πειράματος ημέρες 23/9 και 24/9, το XX-XX αναφέρεται στις γωνίες σάρωσης που περιέχει το εν λόγω αρχείο και το YYYY αναφέρεται στον αριθμό των radar hits (αριθμό *range bins*) από τα οποία αποτελείται. Έτσι για το πείραμα NEMO ο χρήστης μπορεί σκρολάροντας την λίστα να

επιλέξει για επεξεργασία κάποιο αρχείο π.χ. το vdata2324\_s20\_23\_hits350.mat που περιέχει 350 range profiles με καταγραφές με γωνίες ‘grazing angle’ από 20° έως 23°. Υπάρχουν και αρχεία που περιέχουν είτε το σύνολο των range profiles όπως το αρχείο vdata2324\_all\_hits\_326290\_779926.mat ή μόνο ένα συγκεκριμένο σύνολο διαθέσιμο γωνιών πρόπτωσης π.χ. από 5° έως 54° μοίρες όπως στο αρχείο

vdata2324\_all\_angles\_5\_54.mat κ.ο.κ. Σκρολάροντας την λίστα αρχείων καταγραφής ο χρήστης μπορεί να βρει και άλλες επιλογές πακέτου καταγραφών όπου για λόγους συντομίας δεν μπορούν να παρουσιαστούν όλες εδώ.

Να σημειώσω όμως ότι η επιλογή κατάτμησης των αρχικών δεδομένων καταγραφής σε επιμέρους γωνίες (δέσμες ‘batch’) έχει να κάνει και με τον όγκο των δεδομένων που θα κληθεί ο Η/Υ να επεξεργαστεί. Έτσι ο χρήστης ανάλογα με την υπολογιστική ισχύ που διαθέτει μπορεί να επιλέξει να επεξεργαστεί είτε ένα μικρό εύρος γωνιών με όγκο δεδομένων της τάξης των 60MB είτε και το σύνολο των δεδομένων με μέγεθος 4,2GB.



d23_1_a05_19_20140923_Fixed_150_12.36.44_12.38.22.mat	415.999 KB
d23_2_a15_38_20140923_Fixed_150_12.38.23_12.40.01.mat	360.720 KB
d23_3_a38_54_20140923_Fixed_150_12.40.02_12.41.40.mat	413.443 KB
d23_4_a10_00_20140923_Fixed_150_12.41.41_12.42.51.mat	282.270 KB
d24_1_a00_08_20140924_Fixed_150_09.49.54_09.51.32.mat	389.782 KB
d24_2_a08_11_20140924_Fixed_150_09.51.33_09.53.11.mat	389.862 KB
d24_3_a11_35_20140924_Fixed_150_09.53.12_09.54.50.mat	392.403 KB
d24_4_a30_37_20140924_Fixed_150_09.54.51_09.56.29.mat	392.202 KB
d24_5_a54_39_20140924_Fixed_150_09.56.30_09.58.08.mat	406.639 KB
d24_6_a38_22_20140924_Fixed_150_09.58.09_09.59.47.mat	413.182 KB
d24_7_a22_0_20140924_Fixed_150_09.59.48_10.01.26.mat	411.544 KB
d24_8_aC0_2_20140924_Fixed_150_10.01.27_10.03.05.mat	390.718 KB

Η κατάτμηση σε δέσμες εξυπηρετεί τόσο λόγους ομαδοποίησης και πειραματισμού σε συγκεκριμένες γωνίες, όσο και λειτουργικούς λόγους (μείωση υπολογιστικού φορτίου). Τσεκάροντας την επιλογή L/R στην εικόνα Γ-6 εμφανίζονται τα διαθέσιμα στην λίστα αρχεία της εικόνας Γ-7.

Εικόνα Γ- 7, Δείγμα λίστας με τα αρχεία καταγραφής του πειράματος NEMO2014

Τα αρχεία της εικόνας Γ-7 περιέχουν τα δεδομένα καταγραφής όπως αυτά μας δόθηκαν από τους νορβηγούς και τα αρχεία έχουν όνομα που ξεκινά με d23 ή d24 ανάλογα την ημέρα της καταγραφής και το υπόλοιπο όνομα είναι πανομοιότυπο με αυτό του αρχικού αρχείου τύπου bin της καταγραφής έτσι ώστε να μπορεί να γίνεται, για λόγους τεκμηρίωσης, εύκολα και αντιπαραβολή ως προς τα αρχικά αρχεία καταγραφής του πειράματος NEMO2014. Οι καταγραφές που περιέχουν είναι αυτές που παρήχθησαν αυτοματοποιημένα από το λογισμικό του PicoSAR κατά την στιγμή του πειράματος, όπου κάθε 98 δευτερόλεπτα είχαμε την παραγωγή ενός νέου αρχείου, βλ. παράρτημα Δ.2.1.

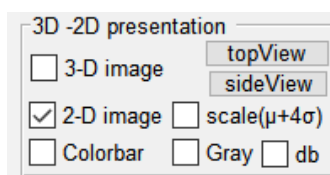
Ο χρήστης μπορεί ανά πάσα στιγμή να φορτώσει κάποιο από αυτά τα αρχεία και με την βοήθεια των παραθύρων “Time/Angle” που βρίσκονται δίπλα στα διαγράμματα “SAR grazing angle over second” να επιλέξει δεδομένα από γωνίες που τον ενδιαφέρουν και μετά να δημιουργήσει ένα καινούριο αρχείο vdata2324\_sXX-XX\_hitsYYYY.mat που θα περιέχει μια δέσμη με τις επιθυμητές γωνίες και μαζί τις αντίστοιχες καταγραφές τους.

Πιο συγκεκριμένα μπορεί με ‘zoom in’ να επιλέξει την περιοχή ενδιαφέροντος στα διαγράμματα “SAR grazing angle over second”. Εν συνέχεια μπορεί με ‘datacursor’ να εμφανίσει τις συντεταγμένες αρχής και τέλους της περιοχής ‘batch’ των

καταγραφών που θέλει να αποθηκεύσει ως ξεχωριστό αρχείο. Πατώντας cV, βλ. επιλογή στην πάνω αριστερή γωνία της εικόνας Γ-6, εισάγει χειροκίνητα τα χρονικά σημεία ‘Radar hit index number’ έναρξης και λήξης της δέσμης μετρήσεων και δύο κύκλοι σημειώνονται αυτόματα πάνω στο διάγραμμα οι οποίοι οριοθετούν για επιβεβαίωση την αρχή και το τέλος της καταγραφής. Πατώντας την επιλογή saveV ανοίγει ένα νέο παράθυρο που δίνει στον χρήστη την δυνατότητα να σημειώσει το όνομα του αρχείου vdata2324\_sxx-xxx\_hitsyyyy.mat με το οποίο θέλει να σωθεί η συγκεκριμένη δέσμη καταγραφών RADAR.

### Γ.3. Παρουσίαση των SAR raw data

Εκτός από την επιλογή και την παρουσίαση ενός εκάστου range profile με την μορφή του κλασσικού διαγράμματος της έντασης του οπισθοσκεδαζόμενου HM κύματος ανά range bin, βλ. εικόνα Γ.3, το λογισμικό δίνει την δυνατότητα να παρουσιάζονται τα SAR raw data είτε σε μορφή εικόνας 2D ή σε μορφή εικόνας 3D. Με τις μορφές 3D και 2D το διάγραμμα περιλαμβάνει μια δέσμη από καταγραφές.



Εικόνα Γ- 8,, επιλογές  
εικονικής παρουσίασης

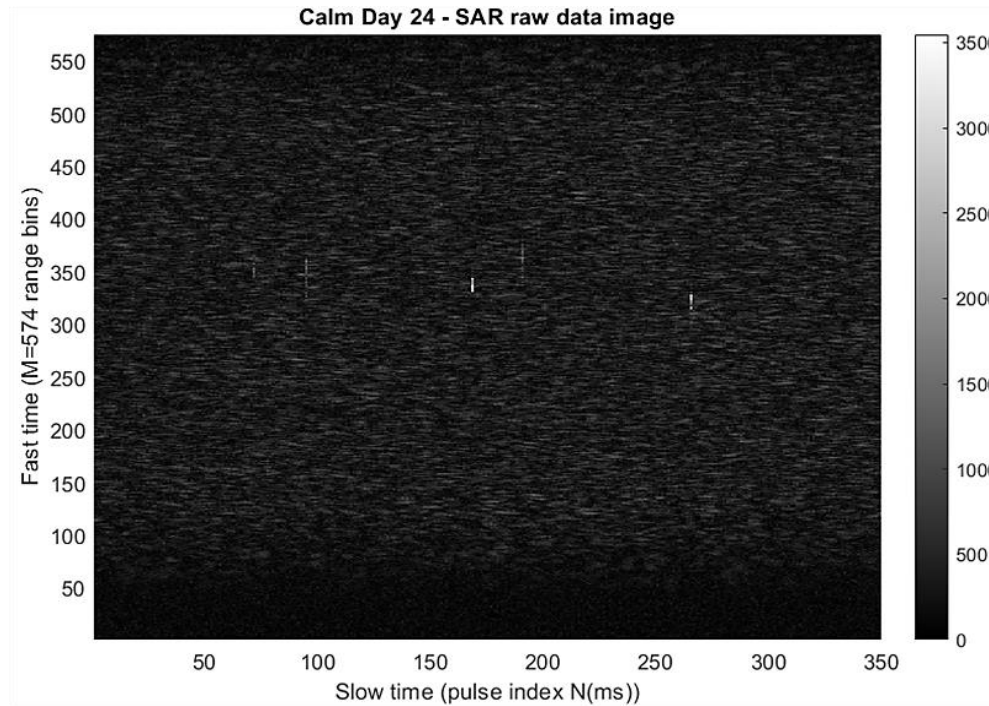
#### Γ.3.1. Δισδιάστατη παρουσίαση (2D) σε μορφή εικόνας (png)

**[2D-image]:** Επιλέγοντας 2-D image, οι καταγραφές παρουσιάζονται με την μορφή εικόνας, βλ εικόνες Γ-9 έως Γ-14. Η μία διάσταση της εικόνας (άξονας x) αντιπροσωπεύει τον αργό χρόνο ‘slow time’, δηλαδή απαρτίζεται από τους χρόνους καταγραφής ‘sample time’ του κάθε RADAR hit. Η άλλη διάσταση (άξονας y) αντιπροσωπεύει τον γρήγορο χρόνο ‘fast time’, δηλαδή τα 574 ‘range bin’ από τα οποία απαρτίζεται το κάθε ένα ‘range profile’. Οι διαφορετικές τιμές εντάσεων των οπισθοσκεδαζόμενων HM κυμάτων που καταγράφονται από τον δέκτη του PicoSAR για το κάθε ‘range bin’ του ‘range profile’ αποτυπώνεται ως μια διαφορετική τιμή φωτεινής έντασης στο αντίστοιχο ‘pixel’.

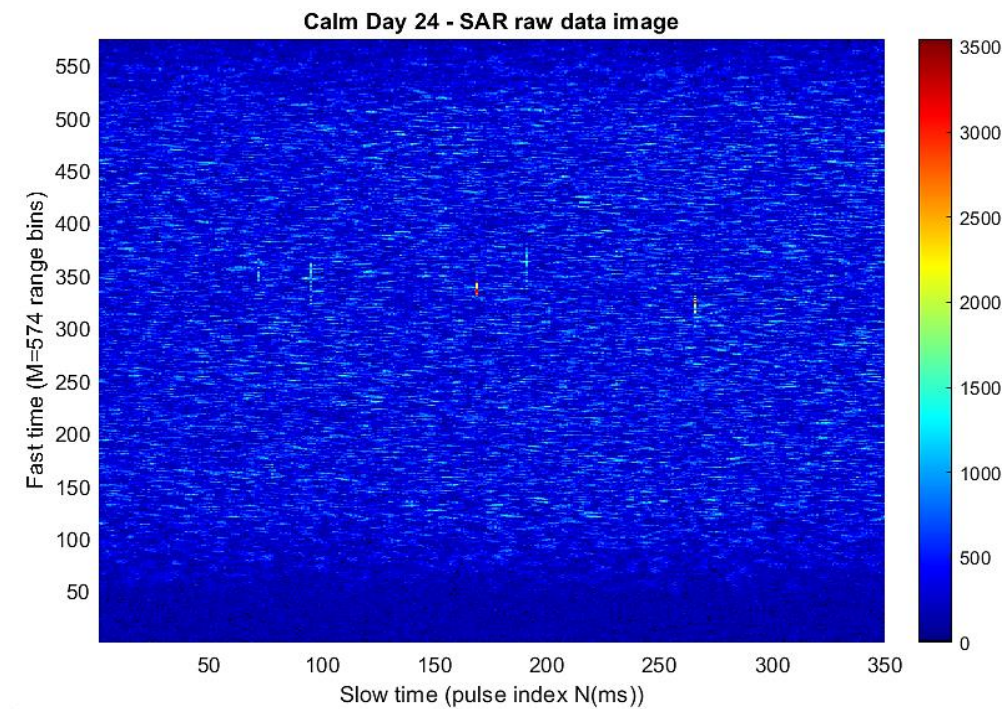
**[Gray]:** Οι τιμές της φωτεινής έντασης στην εικόνα αποτυπώνεται στην κλίμακα του γκρι ‘gray-scale’. Από μηδέν (0) που αντιστοιχεί στο απόλυτο μαύρο έως την μέγιστη τιμή έντασης που αντιστοιχεί στο απόλυτο άσπρο. Εάν αυτή η επιλογή δεν έχει τσεκαριστεί τότε οι διαφορετικές τιμές εντάσεων των οπισθοσκεδαζόμενων HM κυμάτων αποτυπώνονται στην εικόνα με την μορφή χρωμάτων (color-scale) από το μαύρο για το απόλυτο μηδέν μέχρι το κόκκινο για το απόλυτο μέγιστο.



**[Colorbar]:** Η κλίμακα των χρωμάτων ή αντίστοιχη κλίμακα του γκρι αποτυπώνονται δίπλα από την εικόνα για να είναι εύκολη η άμεση αντιστοίχιση του πλάτους της έντασης με τα χρώματα ή τις εντάσεις στην εικόνα.

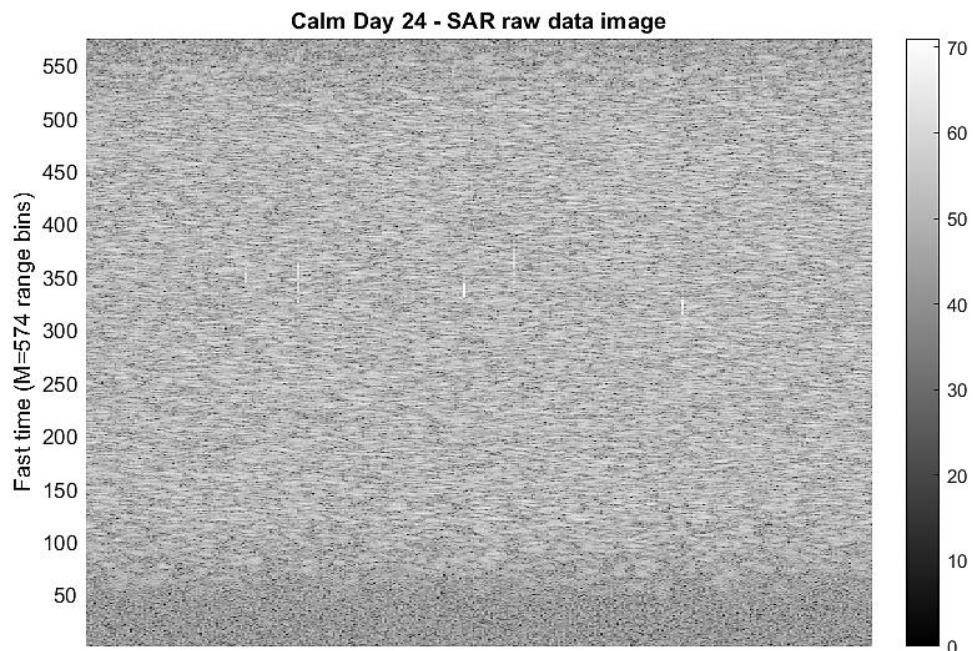


Εικόνα Γ- 9, gray-scaled image of SAR raw data

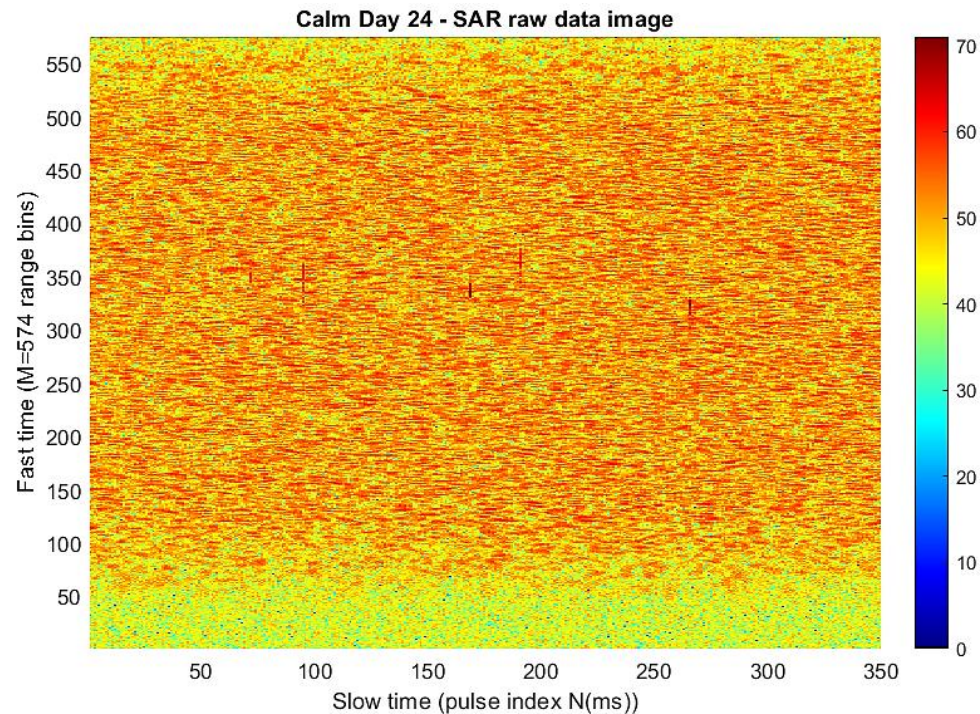


Εικόνα Γ- 10, Color-scaled image of SAR raw data

[db]: Οι τιμές των εντάσεων των οπισθοσκεδαζόμενων ΗΜ κυμάτων μετατρέπονται πρώτα σε db με χρήση της σχέσης  $E_{db}=20\log_{10}(E)$  και μετά απεικονίζονται στην εικόνα.

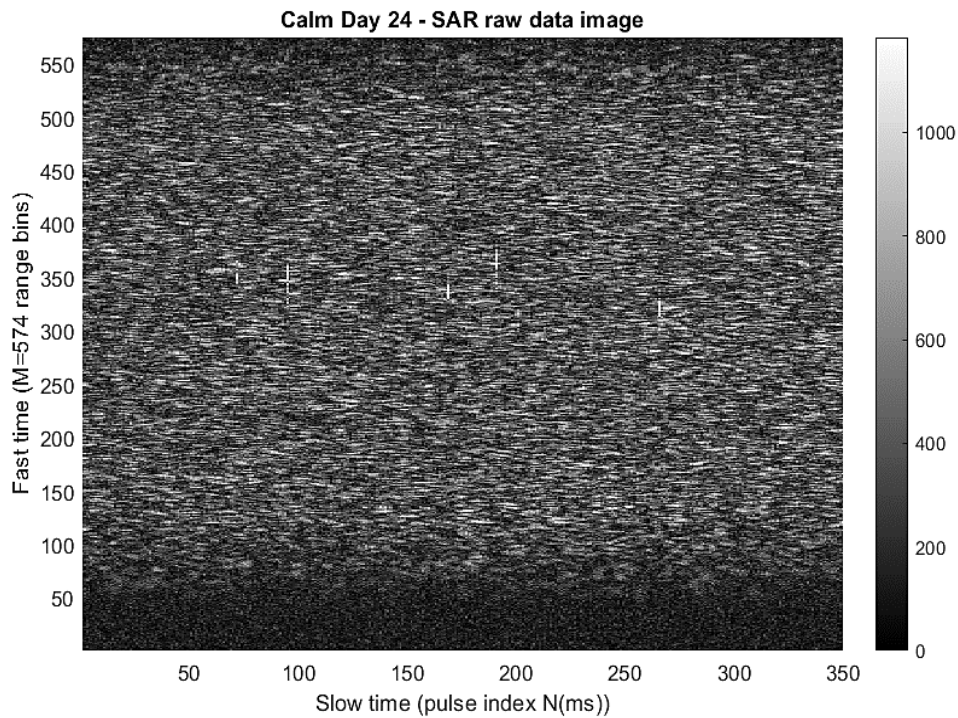


Εικόνα Γ- 12, Gray-scaled image of SAR raw data with values in db

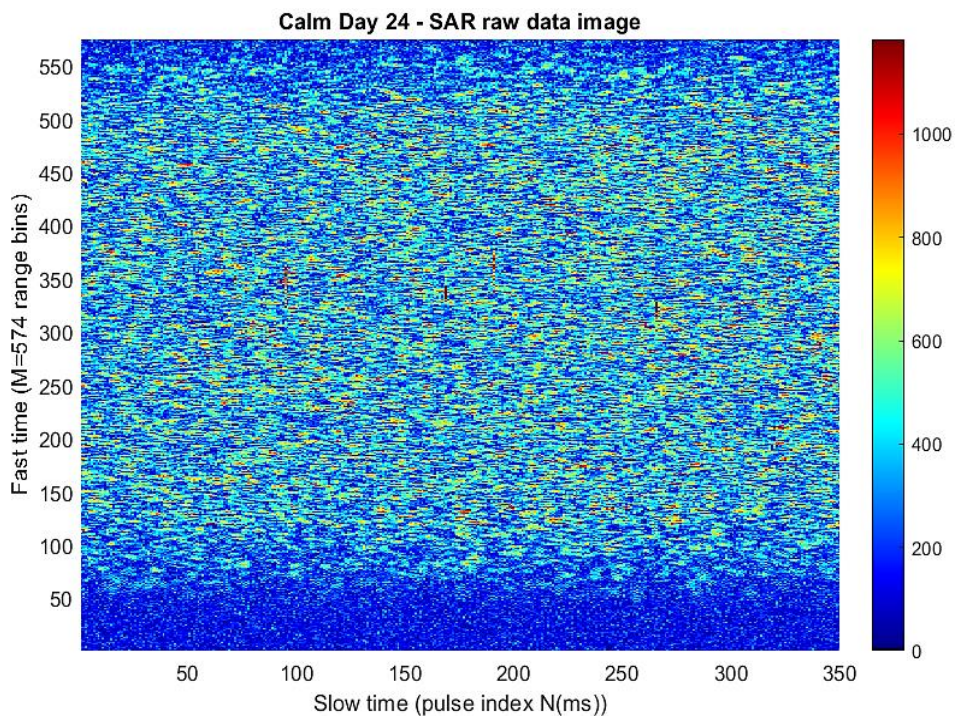


Εικόνα Γ- 11, Color-scaled image of SAR raw data with values in db

**[scale( $\mu+4\sigma$ )]:** Με την επιλογή αυτή εφαρμόζεται ένα φίλτρο απόρριψης εξάρσεων θορύβου 'spikes' τύπου Chebyshev, βλ. παράρτημα Γ.4.2. Οι εικόνες Γ-13 και Γ-14 απεικονίζουν τις εικόνες Γ-10 και Γ-9 μετά την εφαρμογή του φίλτρου. Οπως φαίνεται και στις εικόνες μετά την απόρριψη των 'spikes' αυξάνει η φωτεινότητα της εικόνας γιατί αναδεικνύονται οι λεπτομέρειες και περισσότερη πληροφορία.



Εικόνα Γ- 14, Gray-scaled SAR raw data image after Chebyshev filtration



Εικόνα Γ- 13, Color-scaled SAR raw data image after Chebyshev filtration

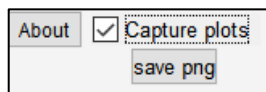
Συγκεκριμένα μια οποιαδήποτε εικόνα απαρτίζεται από ένα σύνολο  $N * M$  pixels όπου κάθε pixel έχει μια τιμή έντασης  $X_i$ . Με την επιλογή **[scale( $\mu+4\sigma$ )]** ο αλγόριθμος υπολογίζει την μέση τιμή  $\mu$  καθώς και την τυπική απόκλιση  $\sigma$  που παρουσιάζει το σύνολο των pixels της εικόνας με την βοήθεια των παρακάτω σχέσεων:

$$\mu = \frac{1}{N * M} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N X_{mn} \quad \text{και} \quad \sigma^2 = \frac{1}{N * M} \sum_{m=0}^M \sum_{n=1}^N (X_{mn} - \mu)^2$$

Εν συνεχεία δημιουργώ μια κλίμακα χρωμάτων ή μια κλίμακα του γκρι όπου οποιαδήποτε τιμή εντάσεως είναι μεγαλύτερη από την τιμή  $\mu+4\sigma$ , δηλαδή όποια τιμή εντάσεως είναι μεγαλύτερη από τον μέσο όρο των εντάσεων επαυξημένο κατά τέσσερεις (4) τυπικές αποκλίσεις, ‘ψαλιδίζεται’ στο μέγιστο της κλίμακας. Όλες οι υπόλοιπες τιμές εντάσεων που βρίσκονται μεταξύ 0 και  $\mu+4\sigma$  κατανέμονται αναλογικά στην κλίμακα από 0 έως  $\mu+4\sigma$ . Με τον τρόπο αυτό καταφέρνω να αναδείξω περισσότερη πληροφορία από το σώμα του σήματος καταστέλλοντας τις ανεπιθύμητες εξάρσεις που για διάφορους λόγους έχουν παρεισφρήσει σε αυτό και δεν προσφέρουν καμία ουσιαστική πληροφορία. Περισσότερα για την θεωρία και τον τρόπο λειτουργίας αυτού του φίλτρο απόρριψης εξάρσεων τύπου Chebyshev περιγράφω παράρτημα Γ.4.2.

### Γ.3.2. Αποθήκευση καταγραφών SAR raw data σε μορφή εικόνας τύπου png.

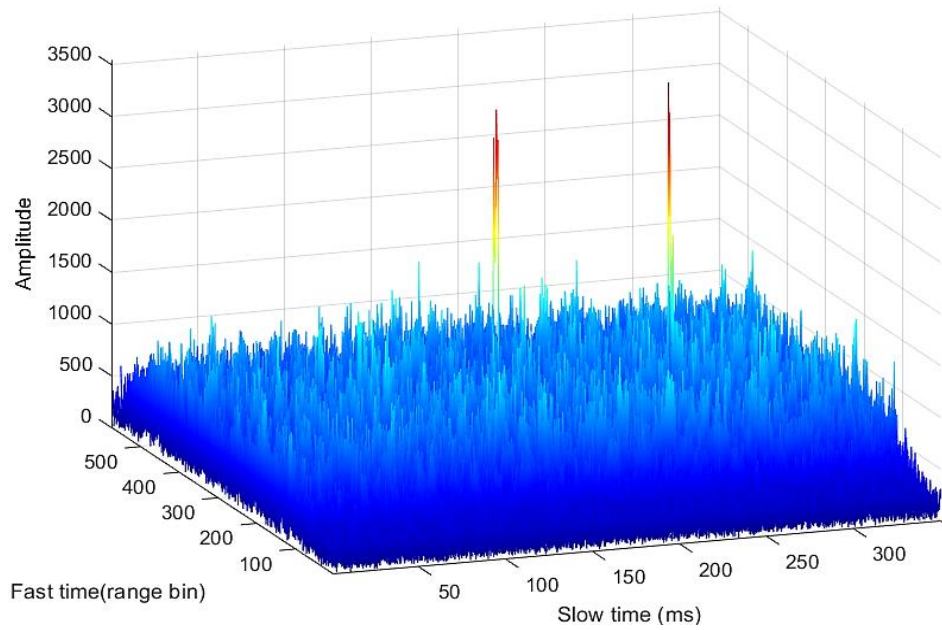
Στην πάνω αριστερή γωνία του λογισμικού, βλ. εικόνα Γ-3, υπάρχει πάντοτε διαθέσιμη η επιλογή **[Capture plots]**. Επιλέγοντας **[Capture plots]** εμφανίζεται από



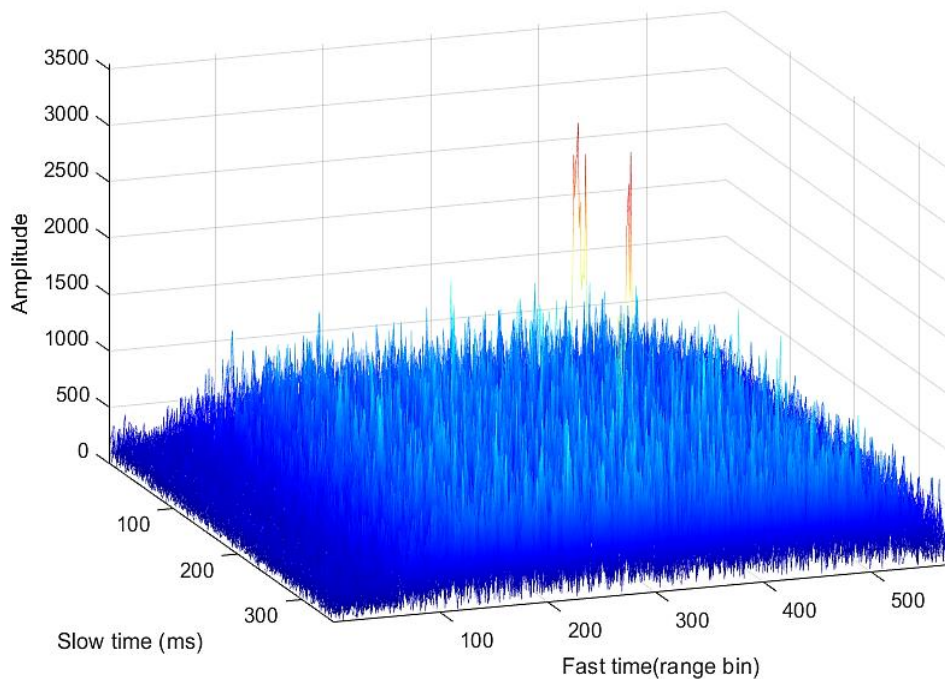
κάτω η επιλογή **[save png]** με την οποία ο χρήστης μπορεί να αποθηκεύσει και τις δύο τρέχουσες εικόνες σε μορφή png με όνομα αρχείου ίδιο με το όνομα του αρχείου καταγραφών από το οποίο δημιουργήθηκε. Η εικόνα π.χ. που δημιουργήθηκε από ένα αρχείο καταγραφών με όνομα vdata2324\_s20\_23\_hits350.mat θα έχει ως όνομα αρχείου το παρακάτω image\_s20\_23\_hits350\_day24\_uint8.png. Η κατάληξη uint8.png. ή uint16.png εξαρτάται από το εάν έχει επιλεγεί ή όχι κανονικοποίηση των καταγραφών αντίστοιχα (βλ. παρ. Γ.4.1).

### Γ.3.3. Τριοδιάστατη παρουσίαση (3D)

**[3D-image]:** Επιλέγοντας **[3D image]**, τα SAR raw data παρουσιάζονται με την μορφή τριοδιάστατης εικόνας, βλ. εικόνα Γ-15. Ο άξονας των x αντιπροσωπεύει τον αργό χρόνο ‘slow time’ δηλαδή σημειώνει τους χρόνους καταγραφής του κάθε RADAR hit. Ο άξονας των y αντιπροσωπεύει τον γρήγορο χρόνο ‘fast time’ δηλαδή τα 574 ‘range bin’. Ο άξονας των z αντιπροσωπεύει τις τιμές των εντάσεων των οπισθοσκεδαζόμενων ΗΜ κομμάτων που καταγράφονται από τον δέκτη του PicoSAR για το κάθε range bin.



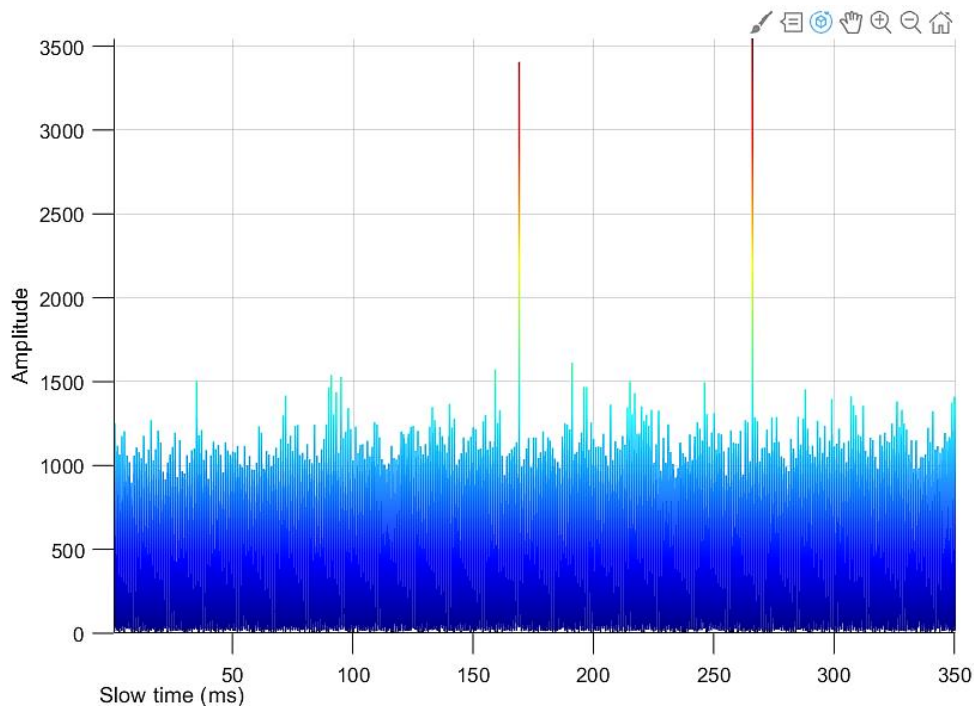
Εικόνα Γ- 16, Τρισδιάστατη παρουσίαση SAR raw data ως προς το 'slow time' (ms)



Εικόνα Γ- 15, Τρισδιάστατη παρουσίαση τη ίδιας δέσμης SAR raw data ως προς το

**[sideView]** Πατώντας **[sideView]** η τρισδιάστατη παρουσίαση αλλάζει μεταξύ τριών διαφορετικών προκαθορισμένων προβολών (γωνιών θέασης του διαγράμματος). Η πρώτη προβολή είναι αυτή της εικόνα Γ-15 (ως προς 'slow time'). Η δεύτερη προβολή είναι αυτή της εικόνα Γ-16 (ως προς 'fast time'). Η τρίτη προβολή, εικόνα Γ-17, παρουσιάζει μια κάθετη τομή του τρισδιάστατου γραφήματος της εικόνας Γ-16 ως προς τον άξονα 'slow time'. Κάθε μία από αυτές τις διαφορετικές προβολές, δίνει στον ερευνητή την δυνατότητα να μελετήσει με το

πάτημα ενός πλήκτρου, την δέσμη καταγραφών από διαφορετικές προοπτικές γωνίες αποκαλύπτοντας τα διαφορετικά χαρακτηριστικά της.

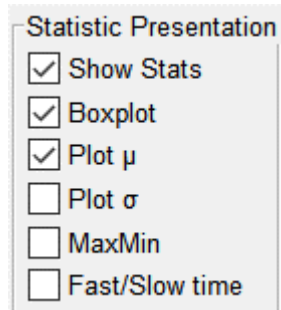


Εικόνα Γ- 17. Τομή τρισδιάστατου γραφήματος ως προς τον άξονα του χρόνου

Πατώντας αριστερό κλικ με το ποντίκι πάνω στο γράφημα, το λογισμικό δίνει επιπλέον μια σειρά από δυνατότητες, βλ. πάνω δεξιά γωνία εικόνας Γ-17, όπως **‘Zoom in’**, **‘Zoom out’** μεταξύ των οποίων είναι και η δυνατότητα του **‘Rotate 3D’** όπου ο χρήστης μπορεί ελεύθερα να καθορίσει την γωνία θέασης του τρισδιάστατου γραφήματος μετακινώντας το *mouse* πάνω στην τρισδιάστατη εικόνα κρατώντας πατημένο το αριστερό πλήκτρο του *mouse*.

### Γ.3.4. Στατιστική παρουσίαση των SAR raw data

Με τις επιλογές στατιστικής παρουσίασης των SAR raw data δίνεται ένας πολύ διαφορετικός τρόπος παρουσίασης των εικόνων SAR σε σχέση με τους συνηθισμένους τρόπους διδιάστατης παρουσίασης των SAR data.



Εικόνα Γ- 18,  
Επιλογές συνοπτικής  
παρουσίασης με την  
μορφή στατιστικών

Στην εικόνα Γ-18 βλέπουμε τις διαθέσιμες επιλογές στατιστικής παρουσίασης που θα αναπτύξουμε παρακάτω.

**[Show Stats]:** Με αυτή την επιλογή πάνω από κάθε διάγραμμα εμφανίζεται μια γραμμή που περιέχει στατιστικές μετρήσεις που αφορούν το σύνολο της δέσμης των range profile που έχουν επιλεγεί. Το είδος των μετρήσεων που θα εμφανιστούν σε αυτή την γραμμή προσαρμόζεται ανάλογα με τις υπόλοιπες επιλογές.

**[Fast/Slow]:** Η επιλογή αυτή καθορίζει το ως προς ποιο άξονα τιμών θα πραγματοποιηθούν οι παρουσιάσεις των στατιστικών διαγραμμάτων και οι επιλογές είναι είτε ως προς τον αργό χρόνο ‘slow time’ δηλαδή ως προς τον χρόνο καταγραφής είτε ως προς τον γρήγορο χρόνο ‘fast time’ δηλαδή ως προς τα ‘range bin’.

Ένας πίνακας τιμών HM εντάσεων προερχόμενος από ένα RADAR τύπου SAR κατά κανόνα μετατρέπεται μετά από εφαρμογή IFFT και FFT σε μια τυπική εικόνα τύπου SAR. Συνήθως, επί τις τελικής εικόνας, εφαρμόζονται κάποια στατιστικά μέτρα όπως μέση τιμή και τυπική απόκλιση της φωτεινότητας της εικόνας ή και οποιαδήποτε άλλοι αλγόριθμοι επεξεργασίας για τον στατιστικό χαρακτηρισμό του περιεχομένου της. Σε αυτές τις περιπτώσεις η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση κ.ο.κ. υπολογίζονται από το σύνολο των στοιχείων του πίνακα χρησιμοποιώντας τις σχέσεις:

$$\mu = \frac{1}{N * M} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N X_{mn}$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N * M} \sum_{m=0}^M \sum_{n=1}^N (X_{mn} - \mu)^2$$

Στην παρούσα διατριβή όμως τα στοιχεία των τιμών των HM εντάσεων δεν μετατρέπονται πρώτα σε μια κλασσική εικόνα SAR για να αναλυθούν εν συνεχεία αλλά γίνεται μια ερευνητική προσπάθεια έτσι ώστε αυτά να αξιολογηθούν απευθείας ως ‘raw data’ πριν καν τύχουν της κλασσικής μετατροπής τους σε εικόνα SAR και εν συνεχεία αναλυθούν με μεθόδους ‘image processing’.

Η επεξεργασία των SAR raw data, ως προς κάποια συγκεκριμένη διάσταση του πίνακα, μπορεί να έχει ιδιαίτερη είτε φυσική είτε πρακτική αξία ικανή για αξιολόγηση, επεξεργασία, διαχωρισμό ή και ταξινόμηση των καταγραφών SAR. Με την προσθήκη της επιλογής του **[Fast/Slow time]** στο εν λόγω λογισμικό δίνω

την δυνατότητα της έρευνας και προς αυτή την πρωτότυπη κατεύθυνση η οποία είναι αντικείμενο μελλοντικής έρευνας.

Προς διευκόλυνση της κατανόησης της έννοιας της στατιστικής ανάλυσης, ως προ κάποια συγκεκριμένη διάσταση του πίνακα καταγραφών, υπενθυμίζω σε αυτό το σημείο εδώ ότι οι καταγραφές των μετρήσεων του PicoSAR είναι σε μορφή δισδιάστατου πίνακα  $M \times N$  όπου  $N$  είναι η διάσταση του αργού χρόνου (χρόνος καταγραφής της μέτρησης σε  $ms$ ) και  $M$  είναι η διάσταση του γρήγορου χρόνου (καταγραφής τιμής μέτρησης HM έντασης για συγκεκριμένη συχνότητα εκπομπής ήτοι για κατανόηση μπορούμε να πούμε για συγκεκριμένο ‘range bin’ (εάν εφαρμόσουμε IFFT). Κάθε ‘range profile’ που έχει καταγραφεί σε κάποιο συγκεκριμένο χρόνο  $N_i$  αποτελείται από 574 ‘range bin’. Για κάθε ‘range bin’ έχει αποθηκευτεί η τιμή του μέτρου της έντασης του HM κόματος που μέτρησε ο δέκτης την συγκεκριμένη στιγμή λήψης. Ως ένα παράδειγμα μετρήσεων από μια δέσμη 350 ‘range profiles’ μπορεί ο αναγνώστης να παρατηρήσει τον παρακάτω πίνακας μετρήσεων.

Πίνακας Γ-1. Δείγμα τιμών μέτρησης δέσμης SAR raw data

		N (slow time)						
		n=1	n=2	n=3	n=...	n=349	n=350	
M (Fast time)	m=1	15	42	15	23	4	25	<X <sub>M=1</sub> >
	m=2	36	9	16	12	7	37	<X <sub>M=2</sub> >
	m=3	27	24	27	41	35	85	<X <sub>M=3</sub> >
	m=...	505	1335	1418	435	480	873	<X <sub>M=i</sub> >
	m=573	15	60	35	18	29	10	<X <sub>M=349</sub> >
	m=574	55	10	45	52	07	14	<X <sub>M=350</sub> >
		<X <sub>N=1</sub> >	<X <sub>N=2</sub> >	<X <sub>N=3</sub> >	<X <sub>N=i</sub> >	X <sub>N=349</sub>	<X <sub>N=574</sub> >	

Όπως γίνεται εμφανές για τον συγκεκριμένο πίνακα, τα στατιστικά μέτρα όπως μέση τιμή, τοπική απόκλιση κ.ο.κ. μπορούν να υπολογιστούν είτε ως προς τις γραμμές του είτε ως προς τις στήλες του και αυτό καθορίζεται από την επιλογή [Fast/Slow] όπως θα δείξουμε λεπτομερέστερα παρακάτω.

### Γ.3.4.1. Διαγράμματα μέσης τιμής (Plot $\mu$ )

[Plot  $\mu$ ]: Με την επιλογή αυτή δημιουργείται ένα ‘διάγραμμα μέσης τιμής’. Δεν υπολογίζεται μια μέση τιμή για το σύνολο των στοιχείων, όπως συνηθίζεται με βάση την σχέση (1), αλλά υπολογίζονται μια σειρά από μέσες τιμές  $\mu$  με βάση τις οποίες σχεδιάζεται ένα ‘διάγραμμα μέσης τιμής’. Οι μέσες αυτές τιμές υπολογίζονται, ανάλογα με την επιλογή του χρόνου [Fast/Slow], είτε ως προς τις στήλες του πίνακα ‘slow time’ από την σχέση:

$$\mu_n = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M X_{mn}$$

είτε ως προς τις γραμμές του πίνακα ‘fast time’ από την σχέση:

$$\mu_m = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N X_{mn}$$

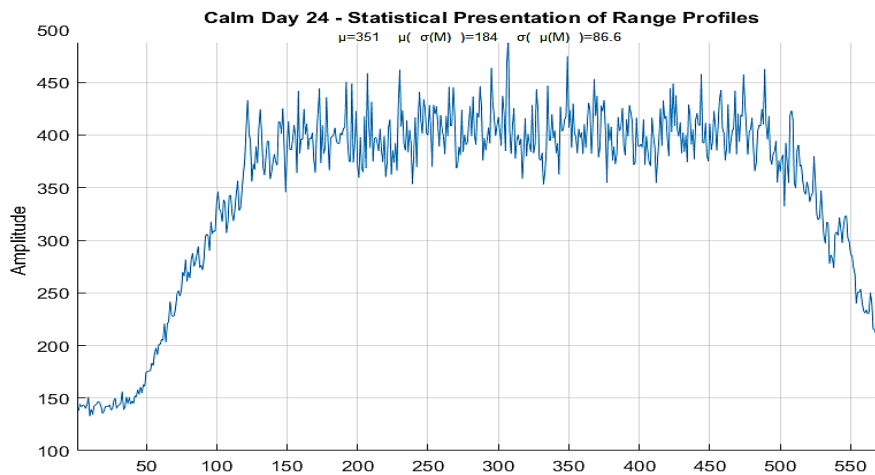


Επιλέγοντας [Plot  $\mu$ ] & [Slow time] υπολογίζονται  $N$  μέσες τιμές, όσες και ο αριθμός των 'range profiles', δηλαδή μία μέση τιμή για κάθε 'range profile' και οι τιμές αυτές δημιουργούν ένα 'διάγραμμα μέσης τιμής' ως προς τον αργό χρόνο, βλ. εικόνα Γ-20.

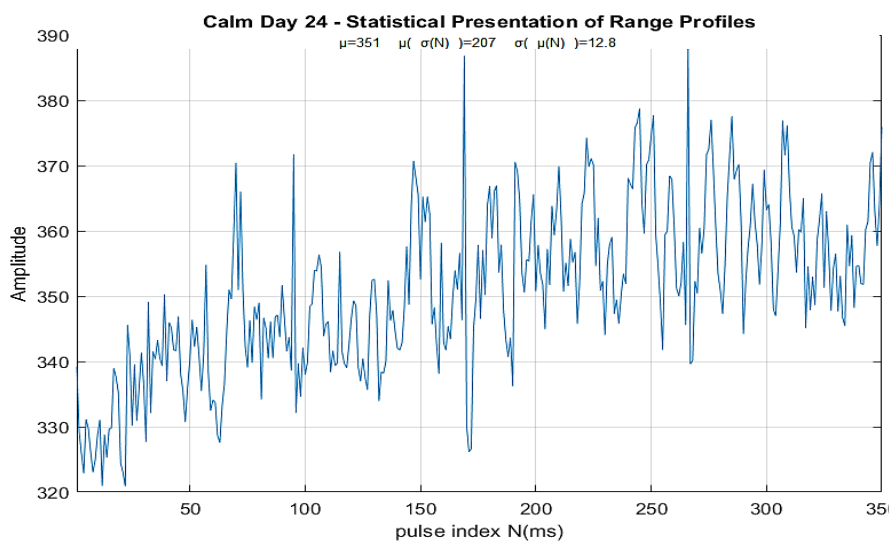
Επιλέγοντας [Plot  $\mu$ ] & [Fast time] υπολογίζονται  $M$  μέσες τιμές, όσες και ο αριθμός των 'range bins', δηλαδή μία μέση τιμή για κάθε 'range bin', δημιουργώντας ένα 'διάγραμμα μέσης τιμής' ως προς τον γρήγορο χρόνο, βλ. εικόνα Γ-19.

Οι μέσες αυτές τιμές, είτε ως προς τον γρήγορο, είτε ως προς τον αργό χρόνο αποτυπώνονται στα αντίστοιχα διαγράμματα- $\mu$  τα οποία με αυτό τον τρόπο συνοψίζουν ή και 'σμπιέζουν' θα μπορούσαμε να πούμε το αντίστοιχο τρισδιάστατο γράφημα σε ένα καρτεσιανό γράφημα.

Επί παραδείγματι το τρισδιάστατο γράφημα της εικόνας Γ-15 συνοψίζεται στατιστικά, ως προς την μέση τιμή ανά range profile στο διάγραμμα- $\mu$  της εικόνας Γ-19. Ομοίως το τρισδιάστατο γράφημα της εικόνας Γ-16 μπορεί να συνοψιστεί ως προς την μέση τιμή ανά 'range bin' στο διάγραμμα- $\mu$  της εικόνας Γ-20.



Εικόνα Γ- 19, Διάγραμμα μέσης τιμής διαδοχικών range profiles ως προς το fast time

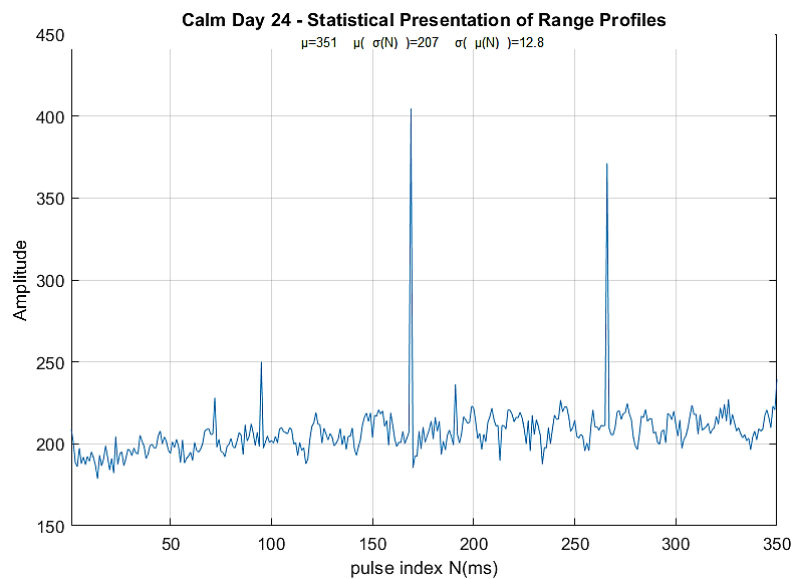


Εικόνα Γ- 20, Διάγραμμα μέσης τιμής διαδοχικών range profiles ως προς το slow time

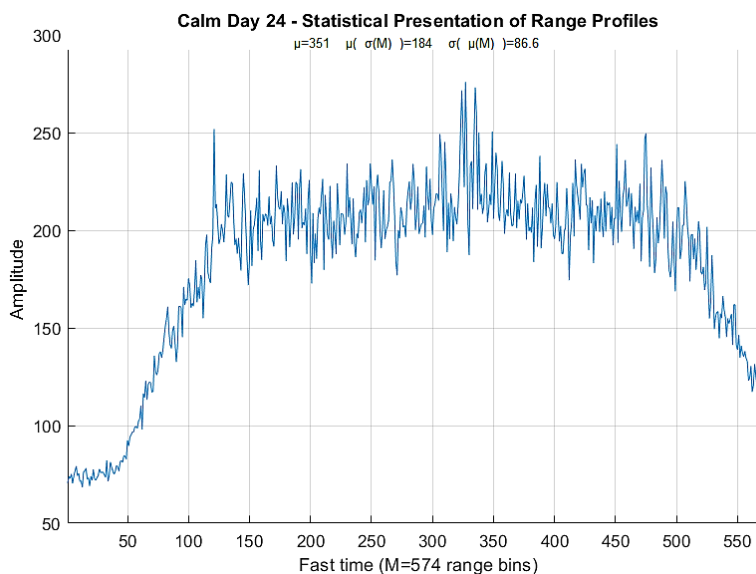
### Γ.3.4.2. Διαγράμματα τυπικής απόκλισης (Plot σ)

[Plot σ]: Ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία όπως στο [Plot-μ] ο ερευνητής μπορεί να κατασκευάσει τα αντίστοιχα διαγράμματα-σ συνοψίζοντας τρισδιάστατα γραφήματα σε καρτεσιανά αναδεικνύοντας και διερευνώντας έτσι μια σειρά επιπρόσθετων χαρακτηριστικών, όπως η μεταβολή της τυπικής απόκλισης ανά μονάδα χρόνου ή ανά 'range bin'.

Το τρισδιάστατο γράφημα της εικόνας Γ-15 συνοψίζεται στατιστικά, ως προς την τιμή της τυπικής απόκλισης ανά 'range profile' στο επόμενο καρτεσιανό γράφημα.



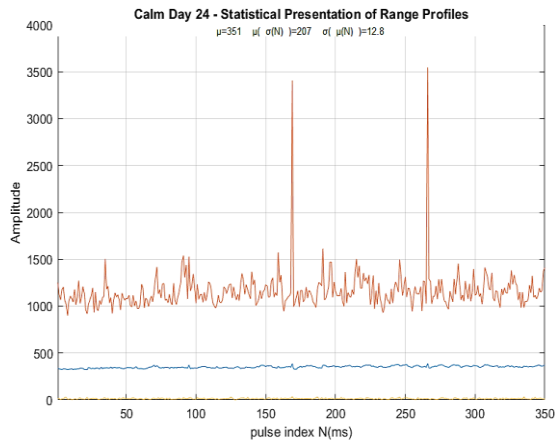
Εικόνα Γ- 21, Διάγραμμα τυπικής απόκλισης διαδοχικών range profiles ως προς slow time  
Το τρισδιάστατο γράφημα της εικόνας Γ-16 μπορεί να συνοψιστεί στατιστικά, ως προς την τυπική απόκλιση ανά 'range bin', στο επόμενο καρτεσιανό γράφημα.



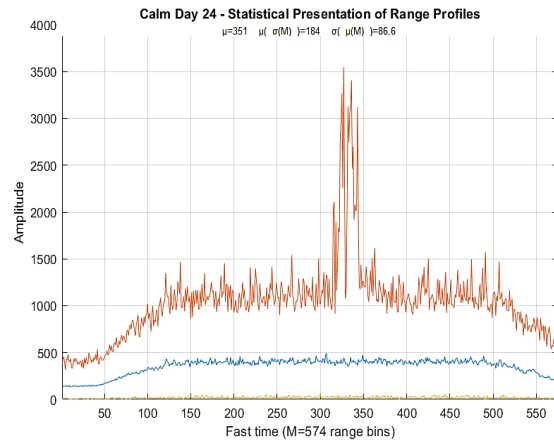
Εικόνα Γ- 22, Διάγραμμα τυπικής απόκλισης διαδοχικών range profiles ως προς fast time

### Γ.3.4.3. Διαγράμματα Μέγιστου-Ελάχιστου (MaxMin)

[MaxMin]: Με την επιλογή αυτή και ανάλογα με την επιλογή του χρόνου Fast/Slow μπορεί ο ερευνητής να δημιουργήσει και να μελετήσει τα αντίστοιχα διαγράμματα-MaxMin στα οποία παρουσιάζονται οι μέγιστες (κόκκινο) και ελάχιστες (κίτρινο) τιμές που εμφάνισαν οι καταγραφές ή ένα ‘range profile’, μαζί με την μέση τιμή (μπλε).

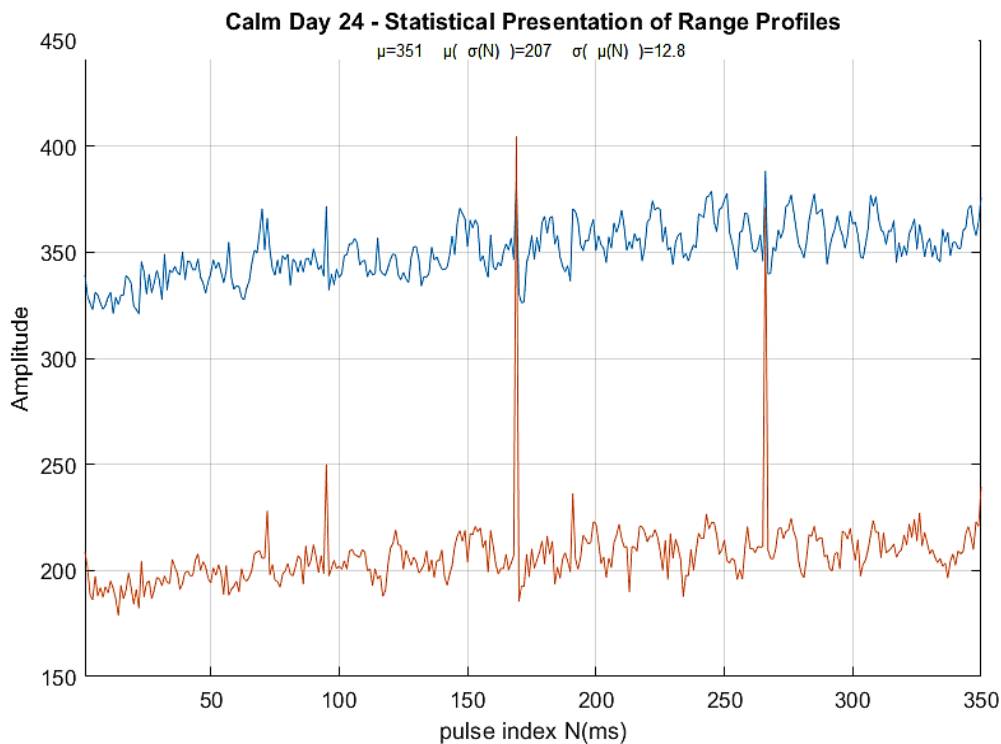


Εικόνα Γ- 24, Διάγραμμα MaxMin ως προς slow time



Εικόνα Γ- 23, Διάγραμμα MaxMin ως προς fast time

Φυσικά όλα τα ανωτέρω διαγράμματα μπορεί ο ερευνητής να τα επιλέξει και συνδυαστικά όπως παραδειγματος χάριν το επόμενο διάγραμμα έχει κατασκευαστεί με τις επιλογές [Plot μ] & [Plot σ] & [slow time] ταυτόχρονα ενεργοποιημένες.



Εικόνα Γ- 25, Διάγραμμα μέσης τιμής & τυπικής απόκλισης των range profiles ανά μονάδα χρόνου (slow time)

#### Γ.3.4.4. Διαγράμματα **Boxplot** ‘*five number summary*’

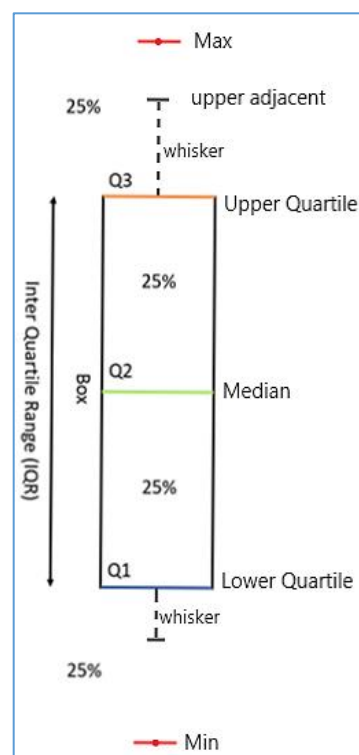
Ένας εντελώς πρωτότυπος και συνάμα εξαιρετικά χρήσιμος τρόπος παρουσίασης των δεδομένων SAR raw data, αποτελεί η χρήση διαγράμματος ‘πλαισίου-απολήξεων’, γνωστό και ως ‘*Boxplot*’. Το διάγραμμα της εικόνας Γ-26, το οποίο για πρώτη φορά εισήγαγε ο John Tukey το 1977 αποτελεί σήμερα ένα κύριο στοιχείο μιας απλής αλλά ισχυρής μεθοδολογίας παρουσίασης δεδομένων που είναι γνωστή με την ονομασία ανιχνευτική ανάλυση δεδομένων, ‘*exploration data analysis – EDA*’.

Τα στοιχεία που παρουσιάζει ένα ‘*boxplot*’ είναι οι τιμές  $X_{min}$ ,  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$ ,  $X_{max}$ , όπου  $X_{min}$  &  $X_{max}$  είναι η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή μεταξύ των δεδομένων,  $Q_2$  είναι η τιμή του διάμεσου ‘*median*’ του συνόλου των δεδομένων και  $Q_1$ ,  $Q_3$  είναι το πρώτο και το τρίτο τεταρτημόριο αντίστοιχα.

Επειδή αυτή η μέθοδος παρουσίασης των δεδομένων χρησιμοποιεί αυτές τις 5 τιμές, ονομάζεται και σύνοψη των πέντε αριθμών ‘*five-number summary*’.

Υπενθυμίζω εδώ ότι τα τεταρτημόρια είναι οι τιμές των μετρήσεων που χωρίζουν τα διατεταγμένα με αύξουσα σειρά συνολικά δεδομένα των μετρήσεων σε τέσσερα ίσα μέρη, το καθένα εκ των οποίων περιέχει το 25% των μετρήσεων. Το  $Q_1$  είναι το κάτω τεταρτημόριο και ορίζεται ως η τιμή εκείνη μεταξύ των μετρήσεων όπου το 25% των τιμών εκ του συνόλου των μετρήσεων βρίσκονται κάτω από αυτή την τιμή ενώ το  $Q_3$  είναι το άνω τεταρτημόριο και ισούται με μια τιμή όπου μόνο το 25% των τιμών εκ του συνόλου των μετρήσεων βρίσκεται πάνω από αυτή. Το 50% των μετρήσεων βρίσκονται στο εσωτερικό του πλαισίου  $Q_2$ - $Q_3$  και η διαφορά μεταξύ των δύο τιμών  $Q_3$ - $Q_2$  ονομάζεται *ενδοτεταρτημοριακό εύρος* ή εν συντομία *IQR* ‘*Inter Quartile Range*’ και είναι μια πολύ σημαντική τιμή που χρησιμοποιείται συχνά και στα RADAR τύπου SAR ειδικά για το φιλτράρισμα των εικόνων από θορύβους τύπου ‘*speckle*’.

Η εικόνα Γ-26 παρουσιάζει το βασικό διάγραμμα ενός πλαισίου-απολήξεων ‘*box and whisker plot*’. Στο διάγραμμα βλέπουμε τα τεταρτημόρια ( $Q_1$  μπλε,  $Q_2$  πράσινη,  $Q_3$  πορτοκαλί) ως γραμμές καθώς και το IQR ενδοτεταρτημοριακό εύρος ως ένα πλαίσιο εκ του οποίου έχει γίνει και γνωστό στην διεθνή βιβλιογραφία με τον αγγλικό όρο ‘*boxplot*’. Επίσης παρατηρούμε και δύο διακεκομμένες κάθετες γραμμές, οι οποίες ονομάζονται απολήξεις ‘*whiskers*’. Οι γραμμές αυτές ορίζουν ένα άνω και κάτω όριο τιμών. Όσες μετρήσεις ξεπερνούν αυτό το όριο θεωρούνται ως ύποπτα ακραίες τιμές και όπως θα δείξω στο παράρτημα Γ.4.2 τέτοιες τιμές μπορούν να θεωρηθούν όσες μετρήσεις που έχουν προκληθεί από θόρυβο και είναι στατιστικά ασυσχέτιστες με το υπόλοιπο περιεχόμενο – τιμές του συνόλου των μετρήσεων. Ένα σύνολο μετρήσεων λοιπόν μπορεί να παρουσιαστεί περιγραφικά με την μορφή ενός και μόνο τέτοιου ‘*boxplot*’



Εικόνα Γ- 26, Διάγραμμα ‘πλαισίου-απολήξεων’ ‘*box & whisker plot*’ ή *five-number summary*’

κάνοντάς το ένα εξαιρετικό εργαλείο για μια συνοπτική παρουσίαση ενός συνόλου μετρήσεων.

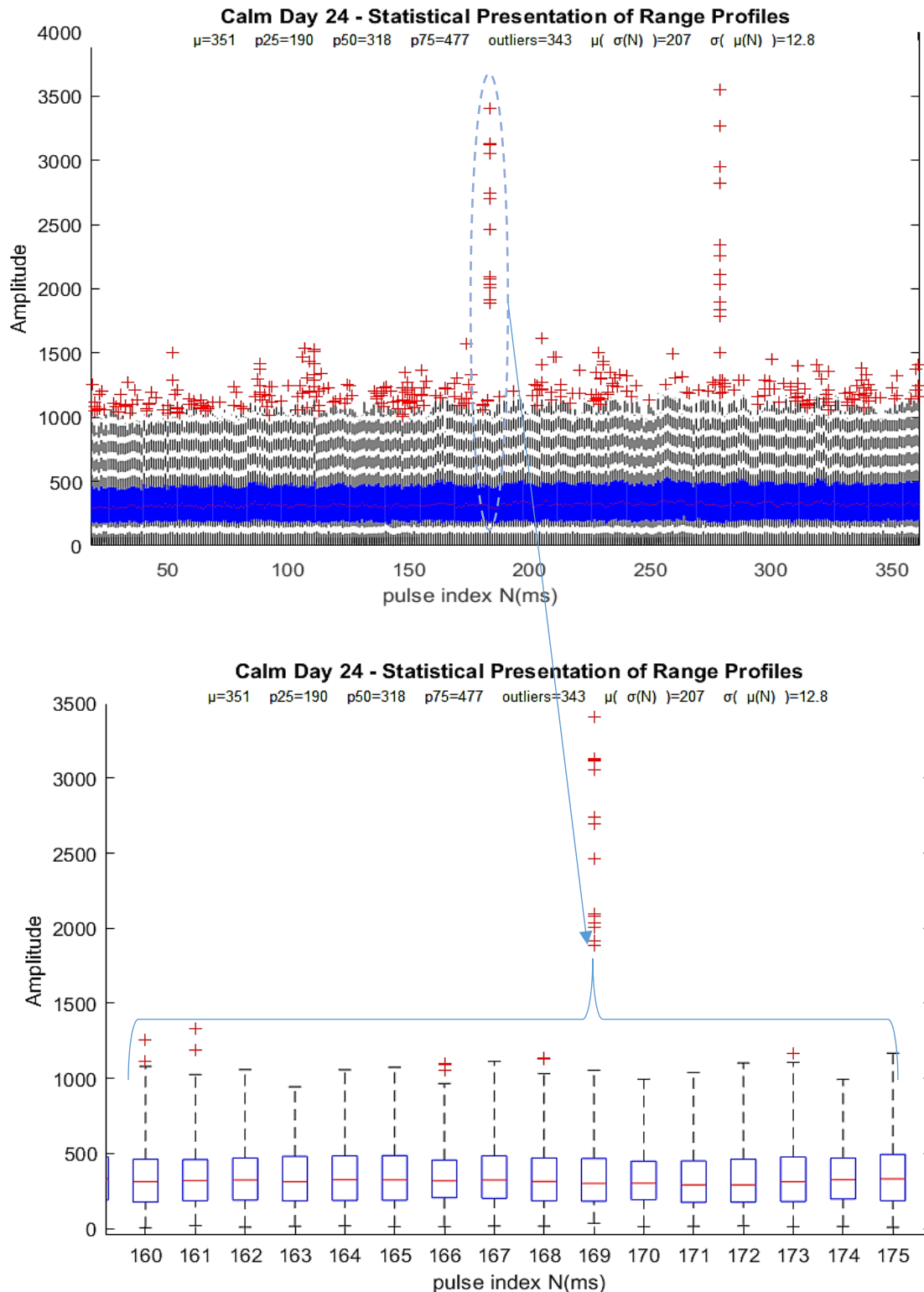
Τοποθετώντας 'boxplot' το ένα δίπλα στο άλλο μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα γράφημα που μπορεί να γίνει ένα ιδανικό εργαλείο για συνοπτική παρουσίαση μιας δέσμης ή/και ομάδων μετρήσεων. Στην περίπτωση των SAR raw data του πειράματος NEMO2014, όπου ένα 'range profile' αποτελείται από ένα σύνολο 574 μετρήσεις 'range gates' και μπορεί να παρουσιαστεί συνοπτικά από ένα και μόνο τέτοιο 'boxplot' όπως αυτό της εικόνα Γ-26. Με αυτό το σκεπτικό τα διαγράμματα τύπου 'boxplot' μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ένα πρωτότυπο, χρήσιμο και εξαιρετικά συνοπτικό εργαλείο παρουσίασης διαδοχικών 'range profiles', ιδανικό για ανάλυση και ιδιαίτερος για τον εντοπισμό και μείωση του θορύβου που οφείλεται στην ύπαρξη ακραίων τιμών 'spikes' όπως αναλυτικότερα παρουσιάζω στο παράρτημα Γ.4.2

**[Boxplot]:** Με την επιλογή αυτή, το λογισμικό παρουσιάζει τις καταγραφές με την μορφή 'boxplot'. Στην εικόνα Γ-27 βλέπουμε την παρουσίαση μιας δέσμης από 350 καταγραφές range profiles σε μορφή κατακόρυφων boxplot διαγραμμάτων. Πρόκειται για την ίδια δέσμη range profiles όπως αυτή παρουσιάζεται στις προηγούμενες εικόνες 10-15 έως 10-17 έτσι ώστε να είναι εύκολη η σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών τρόπων παρουσίασης και να γίνεται εύκολα αντιληπτό το τι προσφέρει ο κάθε διαφορετικός τρόπος παρουσίασης των range profiles.

Η μορφή boxplot, αν και παρουσιάζει ακριβώς το ίδιο σύνολο μετρήσεων όπως αυτό αποτυπώνεται είτε στην διοδιάστατη εικόνα 10-10 είτε στην τρισδιάστατη εικόνα 10-15, βλέπουμε ότι είναι εντελώς διαφοροποιημένη από τις προηγούμενες εικόνες και η πληροφορία που παρέχει αυτού του είδους το διάγραμμα είναι εξαιρετικά σημαντική όπως θα δούμε και σε επόμενη παράγραφο ειδικά όσο αφορά την απόρριψη από το ωφέλιμο σήμα του θορύβου που οφείλεται σε τυχαίες έξαρσης (spikes).

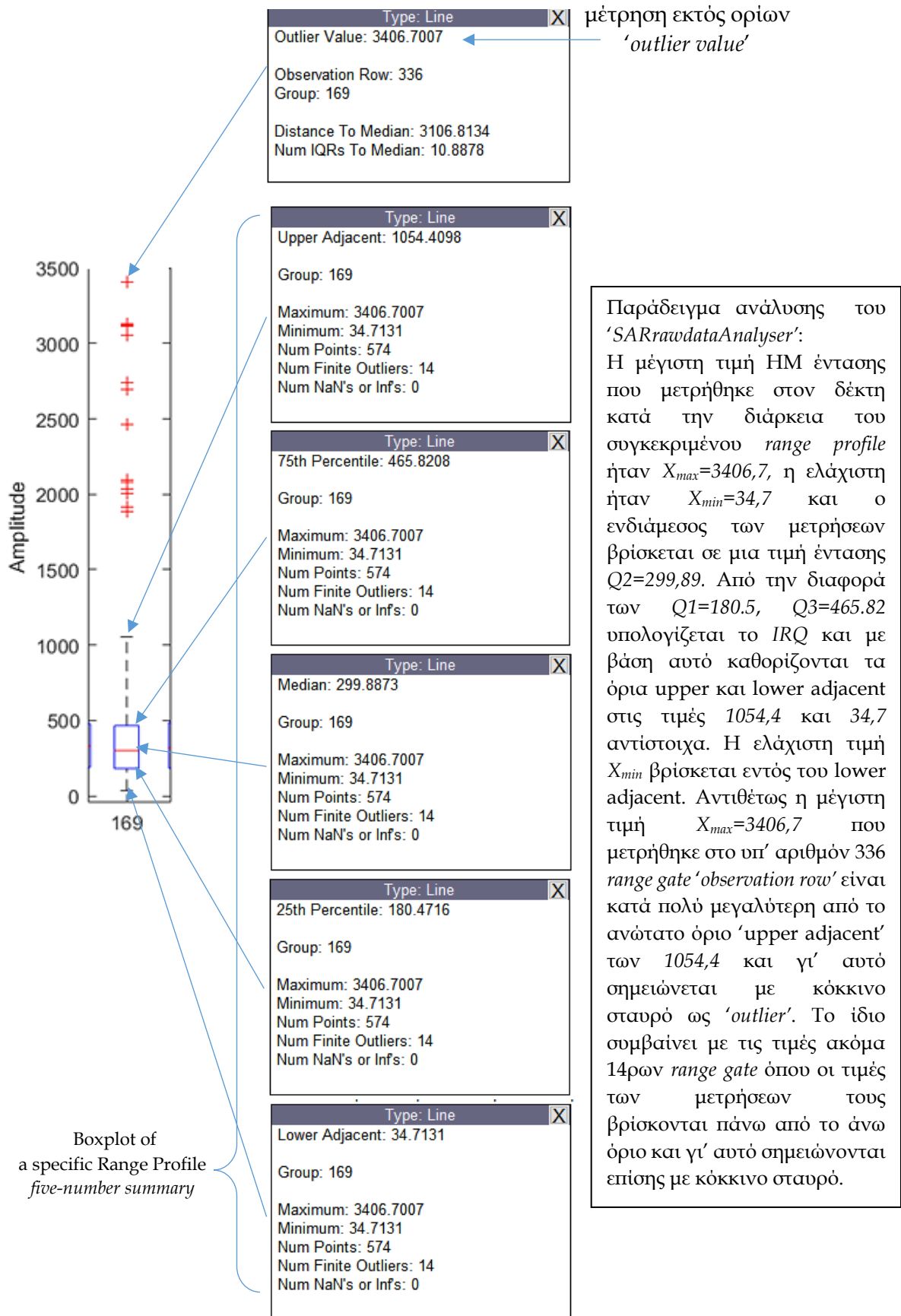
Στην εικόνα Γ-27 παρουσιάζω με την βοήθεια του λογισμικού 'SARrawdataAnalyzer' μια μεγέθυνση της εικόνας Γ-28. Μετά την μεγέθυνση είναι εύκολο να παρατηρήσουμε τα επιμέρους στοιχεία του όπου το μπλε χρώμα, αντιπροσωπεύει την περιοχή ενδοτεταρτημοριακού εύρους 'IQR', στην οποία βρίσκεται το 50% των τιμών έντασης που εμφανίζουν οι μετρήσεις των 'range gate' ενός εκάστου 'range profile'. Με μια κόκκινη γραμμή στο μέσο περίπου της περιοχής του μπλε χρώματος, σημειώνεται ο ενδιάμεσος 'median' των τιμών έντασης των ΗΜ κυμάτων για την συγκεκριμένη καταγραφή. Οι διακεκομμένες γραμμές, 'whiskers', καθορίζουν τα άνω και κάτω 'επιτρεπτά' όρια. Όποιες τιμές μετρήσεων ξεπερνούν αυτά τα όρια, θεωρούνται ύποπτα ακραίες τιμές 'outliers' και σημειώνονται στο διάγραμμα με κόκκινους σταυρούς.

Μετακινώντας το ποντίκι πάνω σε οποιοδήποτε μεμονωμένο 'range profile' το λογισμικό δίνει τις αναλυτικές πληροφορίες 'five-number summary' που αφορούν το σύνολο των μετρήσεων ενός συγκεκριμένου 'range profile'.



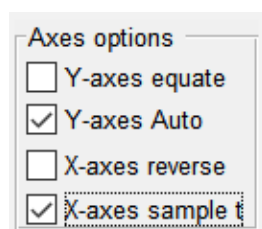
Εικόνα Γ- 27, Μεγέθυνση των Boxplot των ‘range profiles’ 160-175

Παράδειγμα αναλυτικών πληροφοριών που δίνονται για ένα μεμονωμένο ‘range profile’ παρουσιάζω στην εικόνα Γ-29, όπου έχω επιλέξει το ‘range profile’ με *pulse index*=169ms από τα συνολικά 350ms που περιέχει η συγκεκριμένη δέσμη. Το ‘range profile’ αυτό, που αναφέρεται ως ‘Group’ 169, περιέχει τις 574 μετρήσεις των ‘range gate’ του 169<sup>th</sup> range profile.



Εικόνα Γ- 29, Πληροφορίες boxplot 'five-number summary' από ένα συγκεκριμένο 'range profile'

### Γ.3.5. Ρυθμίσεις σε άξονες διαγραμμάτων



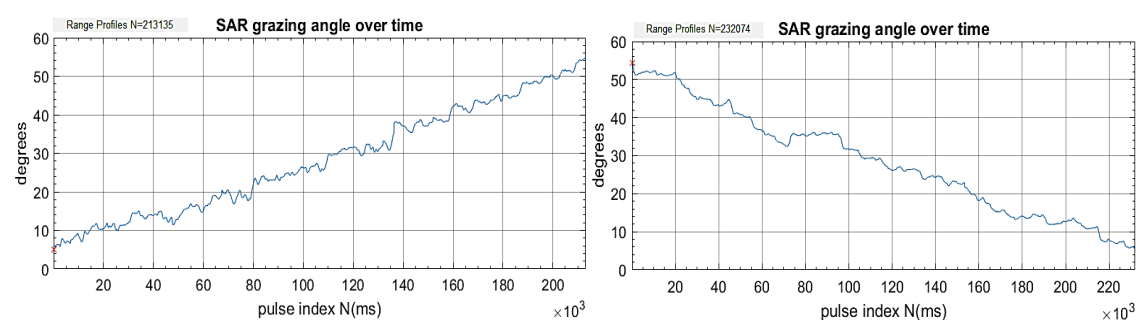
Οι επιλογές διαμόρφωσης των αξόνων δίνουν στο ερευνητή την δυνατότητα καλύτερης σύγκρισης μεταξύ αποτελεσμάτων από διαφορετικές ημέρες, εν προκειμένω, για το συγκεκριμένο πείραμα NEMO, μεταξύ της 1<sup>ης</sup> ημέρας (κυματώδους θάλασσας) και 2<sup>ης</sup> ημέρας (ήρεμης θάλασσας). Οι επιλογές αυτές έχουν να κάνουν μόνο με τις τιμές των αξόνων και τον τρόπο παρουσίασης

των δεδομένων χωρίς να παρεμβαίνουν στα δεδομένα.

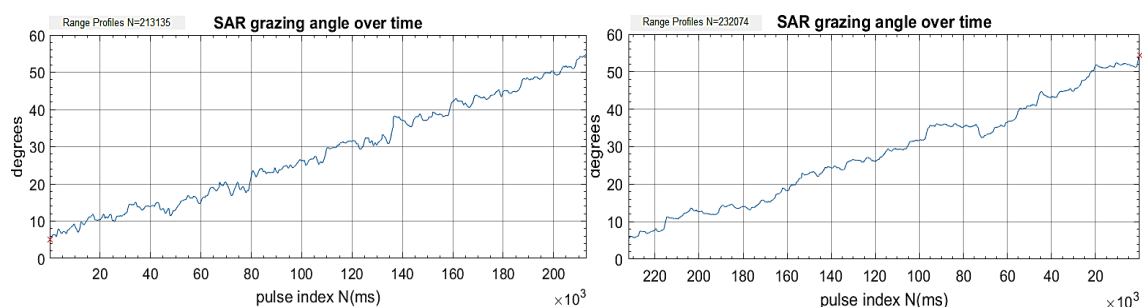
**[Y-axes equate]:** Με την επιλογή αυτή οι άξονες Y μεταξύ των αντιπαραβαλλόμενων διαγραμμάτων ευθυγραμμίζονται στην ίδια κλίμακα έτσι ώστε να γίνονται άμεσα και εποπτικά αντιληπτές τυχόν διαφορές στα πλάτη μεταξύ των αποτελεσμάτων.

**[Y-axes auto/Ymax=m+4s]:** Όταν το πεδίο είναι τσεκαρισμένο εμφανίζεται η επιλογή [Y-axes auto] διαφορετικά εμφανίζεται η επιλογή [Ymax=m+4s]. Στην [Y-axes auto] το μέγιστο του εκάστοτε άξονα Y καθορίζεται από την μέγιστη τιμή μεταξύ των τιμών που παρουσιάζει το κάθε διάγραμμα. Στην περίπτωση του [Ymax=m+4s] ως μέγιστο κάθε διαγράμματος καθορίζεται η τιμή  $Y_{max} = \mu + 4\sigma$  όπου  $\mu$  και  $\sigma$  είναι η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση όπως αυτά υπολογίζονται από το σύνολο των τιμών του διαγράμματος. Βλ. σχετικά και παράρτημα Γ.4.2.

**[X-axes reverse]:** Στην εικόνα Γ-30 βλέπουμε σε αντιπαραβολή την κίνηση του ελικοπτερου και την μεταβολή της γωνίας ‘grazing angle’ από 5° έως 55° της 1<sup>ης</sup> ημέρας (δεξιά) και της 2<sup>ης</sup> ημέρας (αριστερά). Επειδή διαπιστώθηκε από το αρχείο των μετρήσεων ότι οι καταγραφές την 2<sup>ης</sup> ημέρα του πειράματος NEMO ξεκίνησαν ενόσω το ελικοπτερο βρισκόταν σε κάθοδο ενώ την 1<sup>η</sup> ημέρα οι καταγραφές ξεκίνησαν ενόσω το ελικοπτερο βρισκόταν σε άνοδο, δίνεται στον χρήστη η δυνατότητα με την επιλογή [X-axes reverse] να αντιστρέφει την πορεία μεταβολής των γωνιών (από καθοδική σε ανοδική), εάν το επιθυμεί, αναδιατάσσοντας τις τιμές στον άξονα X από τις μεγαλύτερες προς τις μικρότερες τιμές κάνοντας ευκολότερη την μετέπειτα αντιπαραβολή και σύγκριση αποτελεσμάτων, βλ. εικόνα Γ-31.



Εικόνα Γ- 30, Γραφήματα γωνίας ανά μονάδα χρόνου 1<sup>ης</sup> ημέρας αριστερά και 2<sup>ης</sup> δεξιά

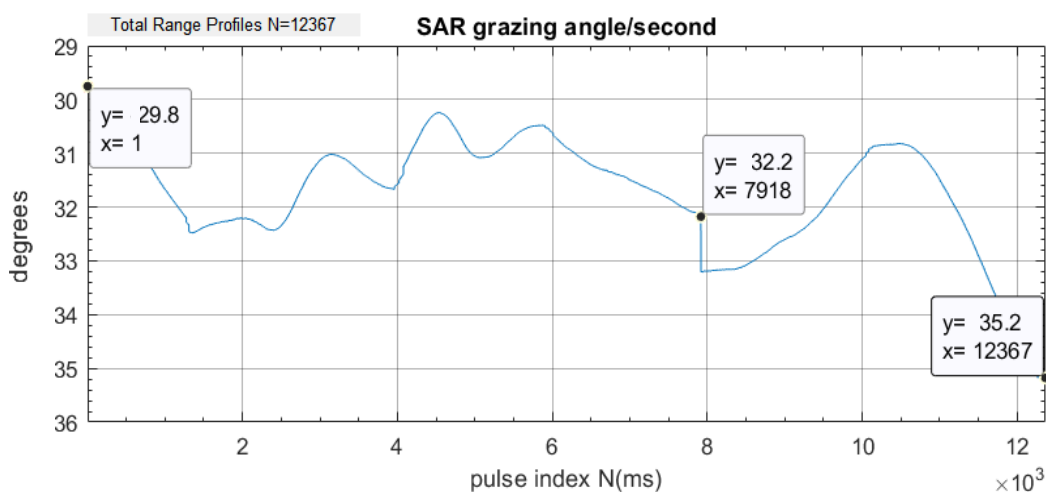


Εικόνα Γ- 31, Γραφήματα γωνίας ανά μονάδα χρόνου με την τροχιά της 2<sup>η</sup> ημέρας ανοδική.

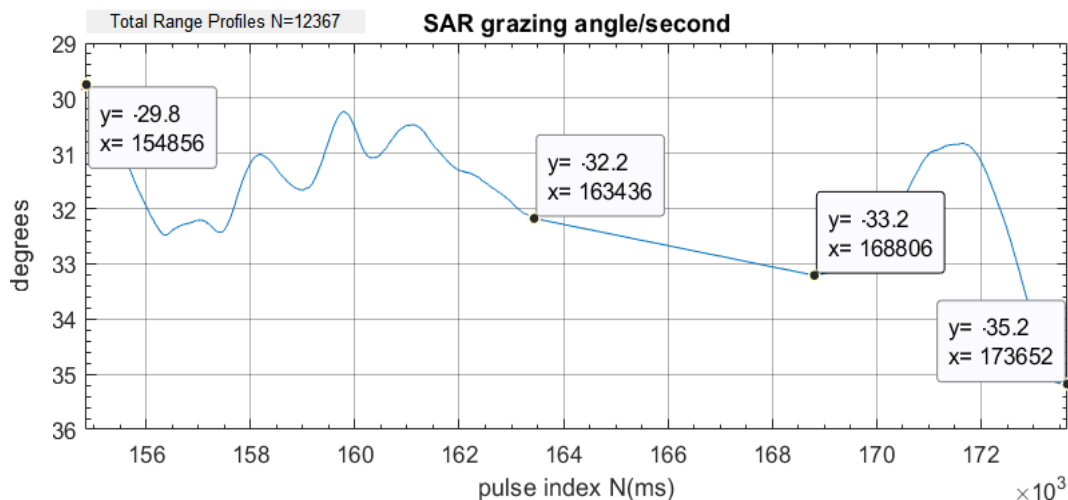


### Γ.3.6. Εντοπισμός θέσης προβληματικών μετρήσεων και διαλείψεων.

[X-axes sample no]: Στην εικόνα Γ-32 βλέπουμε ένα τμήμα καταγραφών αποτελούμενο από 12367 'range profiles' που περιλαμβάνει μια διαδρομή του ελικοπτερου όπου κατά την κίνησή του σαρώθηκαν γωνίες μεταξύ 30° -35°. Όταν η επιλογή [X-axes sample t] είναι ενεργοποιημένη, τότε οι χρόνοι στον άξονα Χ ξεκινούν πάντα από τον αριθμό 1 και αυξάνονται έως τον συνολικό αριθμό των 'range profiles' που περιέχει η δέσμη. Εάν δεν είναι ενεργοποιημένη αυτή η επιλογή, τότε στον άξονα των Χ εμφανίζονται οι σειριακοί αριθμοί του δείγματος, βλ. παράγραφος Δ.2 και 'sample no' και όπως βλέπουμε στο παράδειγμα της εικόνας Γ-33, η αρίθμηση ξεκινάει από το 154856 που είναι ο αριθμός δείγματος που πήρε το συγκεκριμένο προφίλ την στιγμή της λήψης του.



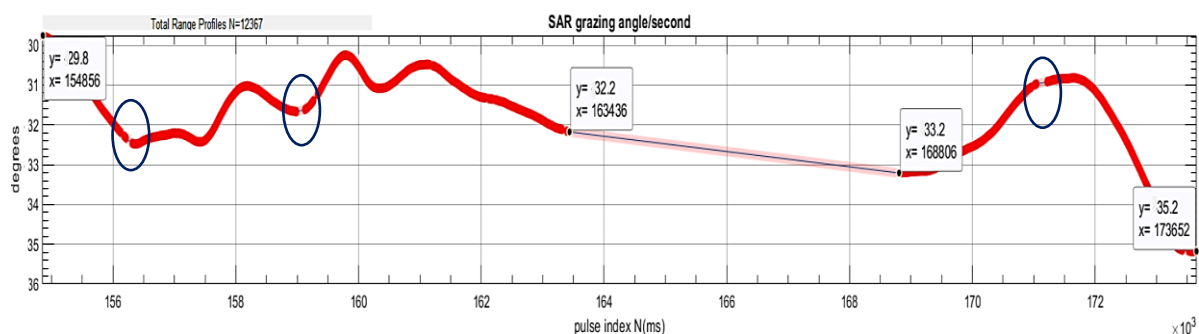
Εικόνα Γ- 32, Γράφημα γωνίας ανά μονάδα χρόνου (pulse index as a serial number)



Εικόνα Γ- 33, Γράφημα γωνίας ανά μονάδα χρόνου (pulse index as original sample number)

Στα πλαίσια της διερεύνησης του πειράματος ενδιαφέρει μόνο η πορεία κάποιας παραμέτρου (π.χ. γωνίας και ΗΜ έντασης) συναρτήσει του χρόνου. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις όπου μπορεί ο ερευνητής να χρειαστεί να ανατρέξει για να εντοπίσει κάποιο συγκεκριμένο δείγμα μέσα στο αρχικό αρχείο καταγραφής, οπότε η επιλογή αυτή είναι επιβεβλημένη να υπάρχει, για λόγους τεκμηρίωσης της έρευνας.

Το σημαντικότερο όμως που πρέπει να σημειωθεί εδώ είναι ότι με την συγκεκριμένη λειτουργία, επιλογής [X-axes sample no], μπορούμε να παρατηρήσουμε που υπήρξαν τυχόν κενά κατά την καταγραφή των οπισθοσκεδαζόμενων HM κυμάτων από τον δέκτη του RADAR. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα που παρουσιάζω στις συγκεκριμένες εικόνες Γ-32, Γ-33 όπου μεταξύ του  $sample=163436$  και  $sample=168806$  υπάρχει ένα από τα μεγαλύτερα κενά μετρήσεων περί των 5 δευτερολέπτων ( $5370ms$ ) που εντοπίστηκαν στα αρχεία των πειραματικών δεδομένων. Αυτές οι διακοπές ή/και οι προβληματικές μετρήσεις που παρουσιάζονται στην πορεία των καταγραφών μπορούν να αναδειχθούν με την χρήση αυτής της επιλογής. Η παρακάτω εικόνα Γ-34 είναι μεγέθυνση κατά μήκος της εικόνας Γ-33 εστιάζοντας στα προβληματικά σημεία. Οι μετρήσεις χωρίς πρόβλημα έχουν χρωματιστεί με την επιλογή ‘brush’ κόκκινες έτσι ώστε να γίνουν ακόμα πιο εμφανή τα κενά σημεία των διαλείψεων.

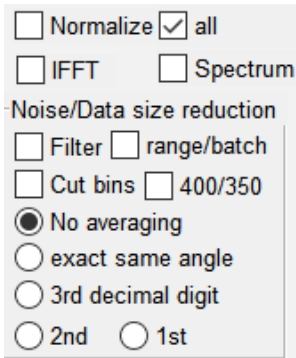


Εικόνα Γ- 34, Συνολικό γράφημα γωνιών ανά μονάδα χρόνου μετά από την παράληψη των διαλείψεων

Οι διαλείψεις αυτές που προκύπτουν είτε από διακοπές της διαδικασίας καταγραφών, βλ. ροζ χρωματισμένη γραμμή, είτε από προβληματικές εγγραφές βλ. σημεία με μπλε χρώματος κύκλους, εντοπίζονται και αφαιρούνται κατά την διαδικασία της προ-επεξεργασίας. Ο αριθμός  $sample$  όμως για τις εγγραφές αυτές που αφαιρούνται έχει κρατηθεί και έτσι είναι δυνατό να εντοπίζονται εύκολα με την βοήθεια του εξειδικευμένου λογισμικού ‘SARrawdataAnalyzer’, όπως φαίνεται και στην ανωτέρω εικόνα.

## Γ.4. Αλγόριθμοι προ-επεξεργασίας (*data reduction & noise filtering*)

Στην εικόνα Γ-35 εμφανίζονται οι διαθέσιμες επιλογές προ-επεξεργασίας που μπορούν να εφαρμοστούν επί των SAR raw data. Οι αλγόριθμοι προ-επεξεργασίας δίνουν την δυνατότητα στο χρήστη να κάνει μια προετοιμασία στα αριθμητικά δεδομένα των διαθέσιμων μετρήσεων 'raw data' πριν αυτά οδηγηθούν στους αλγόριθμους επεξεργασίας. Ο σκοπός της προ-επεξεργασίας είναι να γίνουν τα δεδομένα κατά το δυνατό καταλληλότερα ως προς την μαθηματική επεξεργασία που θα ακολουθήσει. Τα 'raw data' των RADAR γενικά παρουσιάζουν διαφόρων ειδών προβλήματα μεταξύ των οποίων το κυριότερο είναι η ύπαρξη συνεχούς θορύβου στην είσοδο του δέκτη.



Εικόνα Γ- 35. Επιλογές προ-επεξεργασίας

Η προεπεξεργασία των δεδομένων περιλαμβάνει τον κατά το δυνατό καθαρισμό των δεδομένων από τον θόρυβο αλλά δεν περιορίζεται σε αυτό. Η κανονικοποίηση, επιλογή [**Normalize**] είναι μια από τις συχνότερες μεθόδους που χρησιμοποιείται στο στάδιο της προ-επεξεργασίας δεδομένων. Ο σκοπός της κανονικοποίησης είναι η μετασχηματισμός των αριθμητικών τιμών των αρχικών δεδομένων και η μεταφορά τους σε μια καινούρια περιοχή τιμών είτε γιατί αυτή είναι καταλληλότερη για τα μετέπειτα βήματα επεξεργασίας είτε γιατί μεταφέροντας όλα τα δείγματα τιμών σε μια κοινή περιοχή τιμών αναφοράς μπορούμε να προβούμε ευκολότερα σε συγκρίσεις μεταξύ τους.

Εκτός από το μετασχηματισμό των αρχικών δεδομένων σε άλλη περιοχή τιμών μπορούμε, κατά το στάδιο της προ-επεξεργασίας, να επιλέξουμε τον μετασχηματισμό των δεδομένων από ένα πεδίο ορισμού σε ένα άλλο. Επί παραδείγματι, με την επιλογή IFFT (αντίστροφος ταχύς μετασχηματισμός *Fourier*) ή '*spectrum*' μπορούμε να κάνουμε μια μετατροπή του δείγματος από το αρχικό πεδίο ορισμού στο πεδίο του χρόνου ή της συχνότητας.

Ένα επιπλέον θέμα που εμπίπτει στην προ-επεξεργασία των δεδομένων είναι και η μείωση του όγκου τους '*data reduction*.' Η μείωση του όγκου των δεδομένων δεν μειώνει μόνο τις απαιτήσεις σε μνήμη ενός υπολογιστικού συστήματος αλλά μπορεί να μειώσει δραματικά το υπολογιστικό φορτίο που θα απαιτήσουν τα επόμενα στάδια επεξεργασίας καθώς και την κατανάλωση σε ενέργεια. Κύριο μέλημα ενός αλγόριθμου μείωσης όγκου δεδομένων είναι να παραχθεί ένα αντιπροσωπευτικό υποσύνολο των αρχικών δεδομένων το οποίο θα είναι μεν μικρότερο σε αριθμό, πλην όμως όταν θα τροφοδοτεί τον αλγόριθμο επεξεργασίας, θα παράγει τα ίδια αποτελέσματα με αυτά που παράγουν τα αρχικά δεδομένα.

Το λογισμικό που ανέπτυξα περιλαμβάνει δύο ειδών στρατηγικές μείωσης όγκου δεδομένων. Η πρώτη βασίζεται στην μείωση των διαστάσεων του πίνακα των μετρήσεων επιλογή [**Cut bins**] και η δεύτερη στρατηγική βασίζεται στην μείωση του

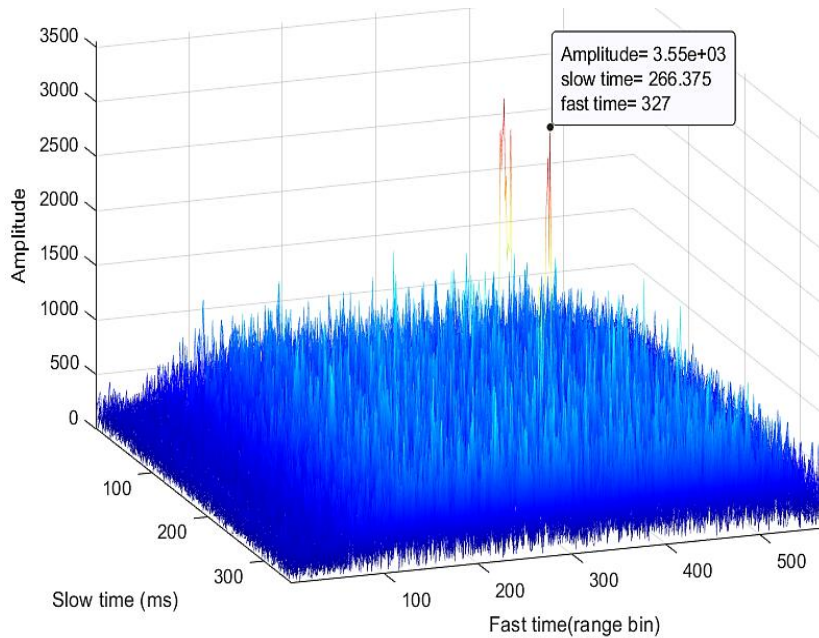
αριθμού των μετρήσεων, επιλογές **averaging**. Στην μείωση των διαστάσεων εφαρμόζονται σχήματα κωδικοποίησης δεδομένων έτσι ώστε να ληφθεί μια μειωμένη ή "συμπιεσμένη" αναπαράσταση των αρχικών δεδομένων. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε με τεχνικές συμπίεσης είτε με απευθείας επιλογή υποσυνόλου χαρακτηριστικών (π.χ. κατάργηση άσχετων χαρακτηριστικών) και διατήρηση χρήσιμων χαρακτηριστικών που προέρχεται από το αρχικό σύνολο. Στη μείωση του αριθμού των δεδομένων, τα δεδομένα αντικαθίστανται από εναλλακτικές, μικρότερες αναπαραστάσεις χρησιμοποιώντας είτε παραμετρικά μοντέλα είτε μη παραμετρικά μοντέλα. Στα παραμετρικά μοντέλα η συμπίεση επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας επί παραδείγματι κάποιες στατιστικές παραμέτρους όπως μέσο όρο, τυπική απόκλιση κ.ο.κ. στην θέση συνόλων αρχικών τιμών ενώ στα μη παραμετρικά μοντέλα ακολουθούνται άλλες μέθοδοι όπως η δειγματοληψία, τα ιστογράμματα κ.ο.κ. Περισσότερες τεχνικές και λεπτομέρειες μπορούν να αναζητηθούν στο πολύ ενδιαφέρον βιβλίο των Han, J., Kamber, M. and Pei, J. '*Data Mining: Concepts and Techniques*'. 3rd Edition 2011, Morgan Kaufmann Publishers, Burlington.

Τέλος μια βασική αποστολή της προ επεξεργασίας των δεδομένων, είναι ο καθαρισμός, επιλογή **[Filter]** των αρχικών δεδομένων (raw data) από θορύβους, τυχαίες διακυμάνσεις και εξάρσεις. Και είναι βασική αυτή η αποστολή του φιλτραρίσματος γιατί αυτή θα καθορίσει σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα του τελικού αποτελέσματος της ανάλυσης των δεδομένων. Η αδυναμία αποτελεσματικού εντοπισμού και αφαίρεσης των ακραίων τιμών '*outliers*' μέσα από ένα σύνολο μετρήσεων, μπορεί να αποπροσανατολίσει τους αλγόριθμους επεξεργασίας οδηγώντας την έρευνα είτε σε αδιέξοδα είτε και σε εντελώς εσφαλμένα αποτελέσματα.

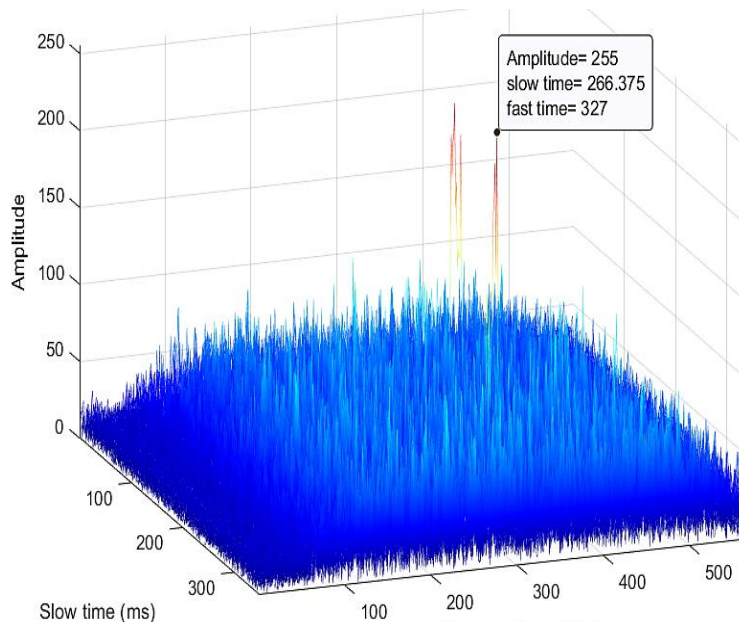
Ο χρήστης έχει την δυνατότητα να πειραματιστεί εφαρμόζοντας οποιονδήποτε συνδυασμό επιλογών προ-επεξεργασίας επί των '*raw data*'. Στις επόμενες παραγράφους θα δούμε τις επιλογές προ-επεξεργασίας καθώς και αναλυτικά τους αλγόριθμους που αντιπροσωπεύουν οι συγκεκριμένες επιλογές.

### Γ.4.1. Κανονικοποίηση δεδομένων (SAR raw data rescaling)

[**Normalize**]: Με την επιλογή αυτή εφαρμόζεται μια κανονικοποίηση επί των δεδομένων του αρχείου καταγραφής τέτοια ώστε οι αρχικές τιμές να τοποθετούνται σε μια κλίμακα μεταξύ 0 και 255. Η κανονικοποίηση μπορεί να γίνει είτε σε συνδυασμό με την επιλογή [**batch**] είτε σε συνδυασμό με την επιλογή [**full**]



Εικόνα Γ- 36, Δέσμη 350 range profiles ως 3D - raw data

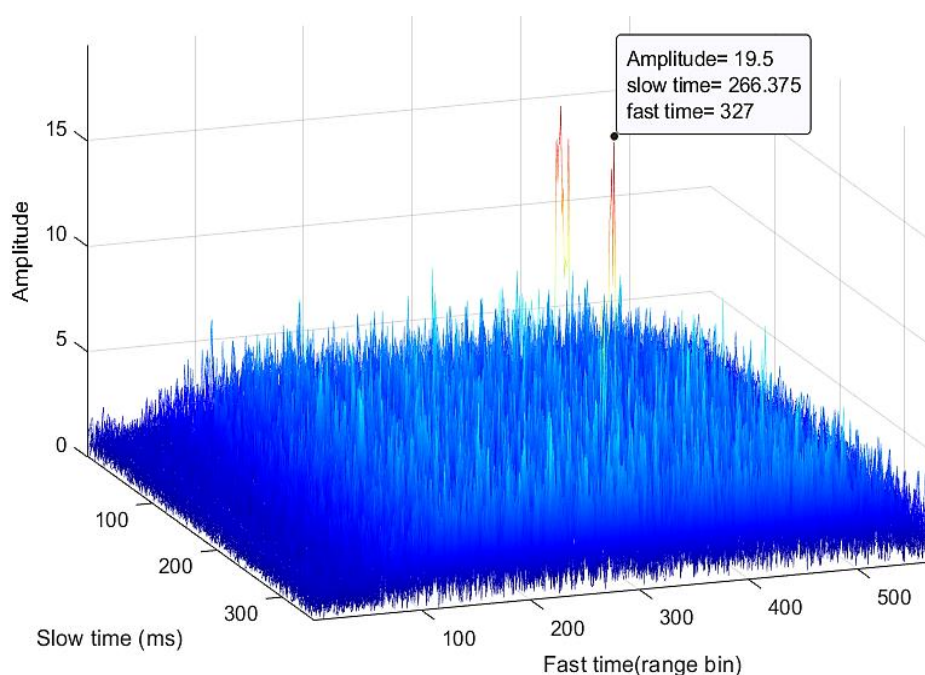


Εικόνα Γ- 37, Δέσμη 350 'range profiles' rescaled στο εύρος 0 έως 255 – (normalized batch)

Όπως παρατηρούμε και στις εικόνες Γ-36 και Γ-37 από την κανονικοποίηση αυτή δεν επηρεάζεται κανέναν ποιοτικό χαρακτηριστικό των μετρήσεων καθώς η μορφή της καταγραφής όπως γίνεται εμφανές και από τις εικόνες, παραμένει αναλλοίωτη.

**[Normalize] [batch]** εντός της επιλεγμένης δέσμης μετρήσεων ‘batch’ μιας καταγραφής, εντοπίζεται δυναμικά η μέγιστη τιμή που εμφανίζεται μεταξύ των ‘range profile’ της και η κανονικοποίηση αυτής της δέσμης ‘batch’ γίνεται με βάση την μέγιστη αυτή ευρεθείσα τιμή. Στο παράδειγμα της εικόνα Γ-36 βλέπουμε ότι έχει επιλεγεί μια δέσμη 350 ‘range profile’. Η μέγιστη τιμή που καταγράφηκε μεταξύ των ‘range profile’ της συγκεκριμένης δέσμης ήταν η τιμή 3550 και με βάση αυτή έγινε η κανονικοποίηση του συγκεκριμένου τμήματος και προκύπτει η τελική εικόνα Γ-37.

**[Normalize] [full]** με την επιλογή αυτή η κανονικοποίηση γίνεται χρησιμοποιώντας την τιμή  $maxAmplitude = 46341$ . Οπότε, όπως παρατηρούμε στην εικόνα Γ-38 η νέα κανονικοποιημένη μέγιστη τιμή στην συγκεκριμένη δέσμη δεν είναι το 255 αλλά το 19.5 που αντιστοιχεί σε κανονικοποίηση με μέγιστο το 46341.



Εικόνα Γ- 38, Κανονικοποίηση με βάση το *dynamic range* του δέκτη (*normalized*)

Η τιμή  $maxAmplitude = 46341$  προκύπτει από το ‘dynamic range’ του συγκεκριμένου δέκτη με βάση τις μετρήσεις και τις προδιαγραφές του PicoSAR. Συγκεκριμένα γνωρίζουμε ότι κάθε ‘range profile’ αποτελείται από 574 ‘range gate’ και για κάθε ένα από αυτά ψηφιοποιούνται και καταγράφονται στο αρχείο του PicoSAR οι  $I$  και  $Q$  συνιστώσες λήψης με την βοήθεια του αναλογοψηφιακός μετατροπέα του δέκτη ως ένα μιγαδικός αριθμός  $I+jQ$ .

Οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές που κατεγράφησαν είτε στις 23/9 είτε στις 24/9 παρουσιάζονται στον κατωτέρω πίνακα:

Πίνακας Γ-2. Μέγιστες και Ελάχιστες τιμές I & Q

Ημ/νία	Μέγιστο		Ελάχιστο	
	I	Q	I	Q
23/09	32767	32767	-32768	32768
24/09	32740	32635	-32735	-32708

Από τον πίνακα εύκολα προκύπτει ότι τόσο για τις I όσο και για τις Q συνιστώσες ο δέκτης παρουσιάζει ένα εύρος τιμών 16bit εκ των οποίων ένα bit χρησιμοποιείται ως πρόσημο και έτσι έχουμε ένα εύρος τιμών  $\pm 2^{15}$  ήτοι  $\pm 32768$ . Δεδομένου ότι οι τιμές I, Q των οπισθοσκεδαζόμενων HM σχηματίζουν ένα μιγαδικό αριθμό  $I+jQ$  λαμβάνοντας το μέτρο αυτού του μιγαδικού αριθμού υπολογίζω την μέγιστη τιμή που μπορεί να εμφανίσει ως εξής:

$$\max Amplitude = |I_{max} + jQ_{max}| = \sqrt{(I_{max})^2 + (Q_{max})^2} = \sqrt{(2^{15})^2 + (2^{15})^2} = \sqrt{(32768)^2 + (32768)^2} = 46341 \quad \eta$$

$$\max Amplitude = \sqrt{(2^{15})^2 + (2^{15})^2} = \sqrt{(2)^{30} + (2)^{30}} = \sqrt{(2)^{31}} = 2^{15.5} = 46341$$

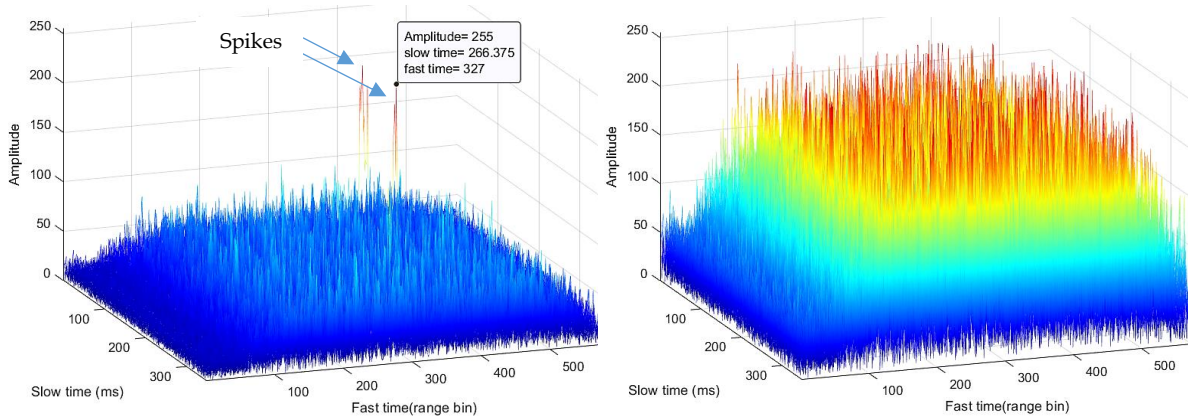
Από τα ανωτέρω προκύπτει ότι η τιμή maxAmplitude είναι 46341 και επιλέγω αυτή την τιμή ως βάση για την κανονικοποίηση των καταγραφών όταν ο χρήστης επιλέγει [Normalize] [full]

#### Γ.4.2. Φιλτράρισμα ακραίων τιμών (SAR raw data outliers filtering)

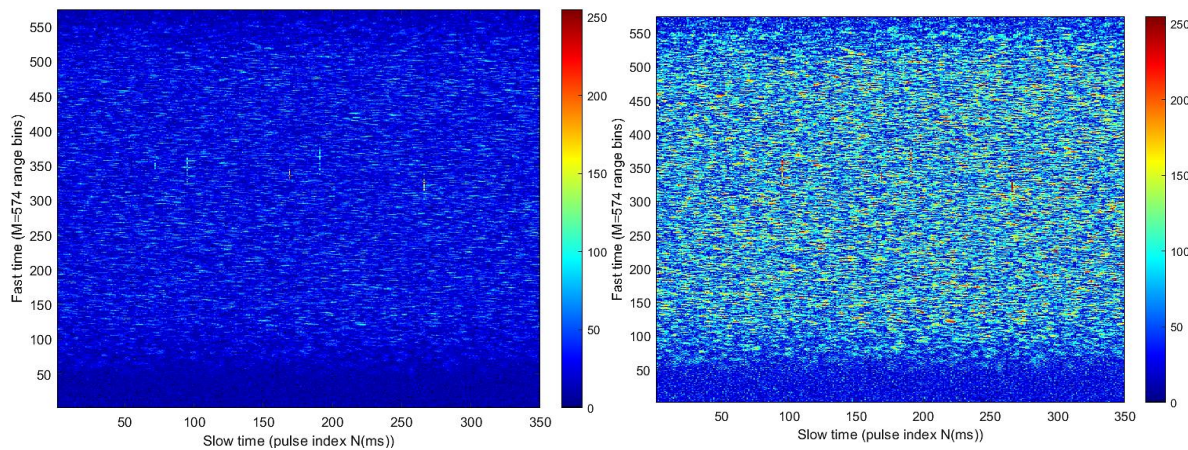
**[Filter]:** Με αυτή την επιλογή γίνεται μια προ επεξεργασία επί των δεδομένων καταγραφής χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο που αφαιρεί τον θόρυβο που οφείλεται στην ύπαρξη ακραίων τιμών. Ακραίες τιμές 'outliers' θεωρούνται οι τιμές που δεν εκφράζουν κάποια κανονικότητα ούτε και κάποια συσχέτιση με το υπόλοιπο σύνολο των μετρήσεων αλλά και δεν προσφέρουν κάποια χρήσιμη πληροφορία. Εάν αυτές οι στιγμιαίες εξάρσεις 'spikes' δεν εντοπιστούν και δεν αφαιρεθούν επαρκώς μπορούν να αποπροσανατολίσουν τους αλγόριθμους επεξεργασίας που ακολουθούν και να οδηγήσουν σε προβληματικά ή και εντελώς εσφαλμένα αποτελέσματα.

Στην εικόνα Γ-39 βλέπουμε αριστερά, σε τρισδιάστατη παρουσίαση μια δέσμη  $N=350$  'range profiles' χωρίς φιλτράρισμα και διαπιστώνουμε ότι λόγω της ύπαρξης των 'spikes', ο αλγόριθμος κανονικοποίησης χρησιμοποιεί λανθασμένα ως μέγιστο μέτρο την τιμή των 'spikes' «θάβοντας» έτσι την παρουσίαση της πραγματικής πληροφορίας. Στην ίδια εικόνα δεξιά βλέπουμε την δέσμη των  $N=350$  'range profiles' μετά το φιλτράρισμα, όπου μετά από μια επιτυχημένη αφαίρεση των 'spikes', έχει αναδειχθεί η πολύ χρήσιμη πληροφορία της υψής που παρουσιάζουν τα 'range profiles' στον τρισδιάστατο χώρο.

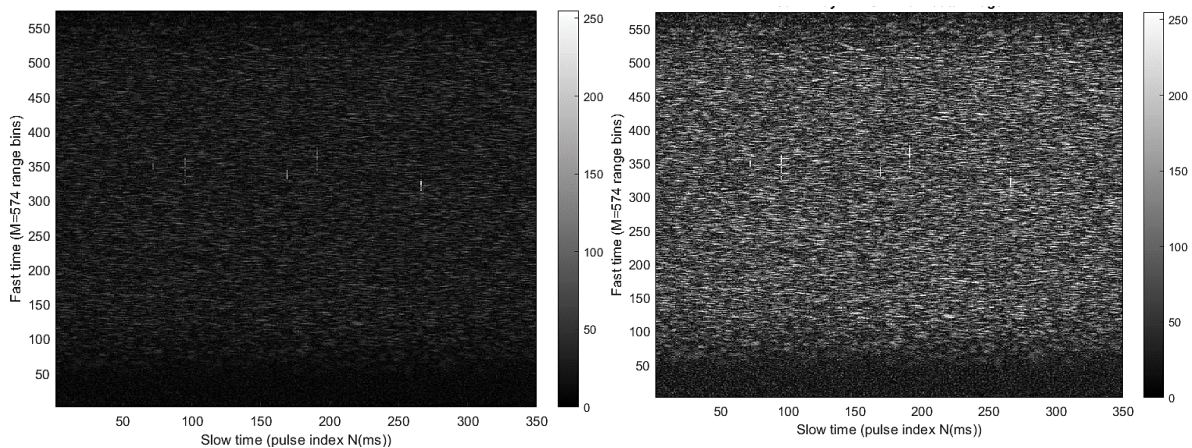
Στην εικόνα Γ-40 παρουσιάζω τα ίδια δεδομένα σε μορφή διδιάστατης εικόνας, πριν και μετά το φιλτράρισμα. Το μέγεθος της τιμής της έντασης αποτυπώνεται ως χρωματική απόκλιση. Στην εικόνα Γ-41 τα ίδια τρισδιάστατα δεδομένα παρουσιάζονται σε μορφή διδιάστατης εικόνας όπου η τιμή της έντασης των οπισθοσκεδαζόμενων ΗΜ κυμάτων αποτυπώνεται ως φωτεινότητα από μαύρο έως εντελώς άσπρο ‘gray scaled’.



Εικόνα Γ- 40, 3D *Unfiltered Normalized data* vs *Filtered & Normalized raw data*



Εικόνα Γ- 39, 2D color scaled *Unfiltered Normalized* vs *Filtered & Normalized raw data*



Εικόνα Γ- 41, 2D gray scaled *Unfiltered Normalized* vs *Filtered & Normalized raw data*



Και στις τρεις μορφές παρουσίασης γίνεται άμεσα αντιληπτός ο καθοριστικός ρόλος του φιλτραρίσματος των ακραίων τιμών ως προς την ανάδειξη του χρήσιμου σήματος. Σημειώνω εδώ ότι όταν ο χρήστης επιλέγει φιλτράρισμα μαζί με κανονικοποίηση των δεδομένων, εφαρμόζεται πρώτα ο αλγόριθμος του φιλτραρίσματος των δεδομένων και μετά ακολουθεί η κανονικοποίηση τους. Ο αλγόριθμος φιλτραρίσματος πρέπει να είναι αρκετά εκλεπτυσμένος έτσι ώστε να εντοπίζει και να εξαλείφει μόνο μετρήσεις που οφείλονται σε τυχαίες εξάρσεις και όχι μετρήσεις που μπορεί να μην να εμφανίζουν μεγάλες τιμές εντάσεως πλην όμως ανήκουν όντως στα οπισθοσκεδαζόμενα ΗΜ κύματα του σήματος τα οποία οφείλονται στον σκεδαστή και μεταφέρουν χρήσιμη πληροφορία σχετική με αυτόν.

Κατά την διάρκεια της διδακτορικής διατριβής πειραματίστηκα με πάρα πολλά διαφορετικά μαθηματικά φίλτρα για την αντιμετώπιση του θορύβου λόγω ακραίων τιμών και τυχαίων εξάρσεων που εμφανίζονται στις καταγραφές του RADAR του πειράματος εκ των οποίων διαπιστώθηκε στην πράξη ότι τα φίλτρα που χρησιμοποιούσαν περιγραφική στατιστική και συγκεκριμένα μέτρα μεταβλητότητας είχαν την καλύτερη απόδοση στο να εντοπίζουν και να αφαιρούν τον θόρυβο από στιγμιαίες εξάρσεις στο σήμα λήψης του δέκτη. Σημειώνω στις επόμενες παραγράφους τα δύο αποδοτικότερα φίλτρα που ενσωμάτωσα στο λογισμικό που ανέπτυξα.

#### Γ.4.2.1. Φίλτρο απόρριψης εξάρσεων ‘spikes’ τύπου ανισότητας *Chebyshev*

Το πρώτο φίλτρο κάνει χρήση ενός θεωρήματος της ανισότητας *Chebyshev*. Η ανισότητα *Chebyshev* θεωρεί ότι αν  $X$  μια τυχαία μεταβλητή, με τοπική απόκλιση  $\sigma$  και μέση τιμή  $\mu$ , τότε για οποιαδήποτε τιμή  $\delta > 0$  ισχύει ότι  $P(\mu - \delta\sigma \leq X \leq \mu + \delta\sigma) \geq 1 - \frac{1}{\delta^2}$ . Το ενδιαφέρον χαρακτηριστικό αυτού του θεωρήματος είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε σύνολο παρατηρήσεων ανεξαρτήτως του είδους της κατανομής από το οποίο προκύπτει η τυχαία μεταβλητή  $X$ . Οπότε ακόμα και αν θεωρήσουμε την χειρότερη περίπτωση, ότι οι μετρήσεις των οπισθοσκεδαζόμενων ΗΜ κυμάτων αποτελούν μια τυχαία μεταβλητή με μια εντελώς άγνωστη κατανομή, ακόμα και τότε κάνοντας χρήση του θεωρήματος *Chebyshev* μπορούμε να εκτιμήσουμε άμεσα ένα ανώτερο όριο κατώφλι πάνω από το οποίο μπορούμε με ασφάλεια να εντοπίζουμε και να αφαιρούμε ακραίες παρατηρήσεις ‘outliers’, δηλαδή τιμές μετρήσεων που βρίσκονται μακριά από το σώμα των δεδομένων και οφείλονται σε τυχαίες εξάρσεις ‘spikes’, σε θόρυβο τύπου ‘speckle’ αρκετά διαδεδομένο στα RADAR τύπου SAR καθώς και σε οποιοδήποτε παρόμοιο είδος θορύβου που μπορεί να είναι υπεύθυνο για την ύπαρξη τέτοιων στιγμιαίων εξάρσεων.

Η σχέση του θεωρήματος  $P(\mu - \delta\sigma \leq X \leq \mu + \delta\sigma) \geq 1 - \frac{1}{\delta^2}$  πρακτικά λέει ότι δοθέντος ενός συνόλου μετρήσεων, το ποσοστό των μετρήσεων που περιλαμβάνονται σε μια απόσταση  $\delta$  τυπικών αποκλίσεων  $\sigma$  από τον αντίστοιχο μέσο τους  $\mu$ , δεν μπορεί να είναι μικρότερο από  $1 - (1/\delta^2)$ . Θέτοντας  $\delta=4$  έχουμε

παραδείγματος χάριν μια πιθανότητα της τάξης  $P=1-(1/4^2)=0.94$  αυτό να ισχύει. Αυτό συνοψίζεται ακόμα πιο απλά στο ότι το 94% των μετρήσεων θα πρέπει να βρίσκεται στατιστικά εντός της περιοχής τιμών  $\pm\mu+4\sigma$ . Έτσι η πιθανότητα μια τιμή μέτρησης με μέγεθος μεγαλύτερο από  $\mu+4\sigma$  να ανήκει όντως στο συγκεκριμένο σύνολο των μετρήσεων και να μην είναι θόρυβος είναι της τάξης του 6%. Αλλάζοντας την τιμή του  $\delta$  μπορούμε να επιτύχουμε μεγαλύτερη ή μικρότερη αυστηρότητα στο φίλτρο απόρριψης θορύβου αιχμών. Μετά από πολύμηνο πειραματισμό επί πραγματικών μετρήσεων διαπίστωση ότι μια τιμή  $\delta=4$  ήταν μια βέλτιστη και επαρκής επιλογή για τον καθαρισμό και ρύθμιση της φωτεινότητας μιας εικόνας όπως θα δείξω και σε επόμενες παραγράφους. Μεγαλύτερες τιμές  $\delta>4$  οδηγούσαν σε ψαλιδισμό χρήσιμου σήματος ενώ μικρότερες τιμές επέτρεπαν ακραίες τιμές να παραμένουν, δημιουργώντας προβλήματα στους αλγόριθμους στα επόμενα στάδια της επεξεργασίας. Το πλεονεκτήματα του συγκεκριμένου φίλτρου ανισότητας Chebyshev είναι η απλότητά του αλγόριθμου, το χαμηλό υπολογιστικό φορτίο και συνεπώς η ταχύτητα στην εφαρμογή του ως φίλτρο επεξεργασίας. Το μειονέκτημά του ήταν η έλλειψη μεγαλύτερης εξειδίκευσης στην απόρριψη θορύβου που μπορεί να επιτευχθεί με άλλα είδη φίλτρων όπως αυτό του IQR που θα παρουσιάσω στην συνέχεια.

#### Γ.4.2.2. Φίλτρο απόρριψης εξάρσεων – spikes τύπου IQR

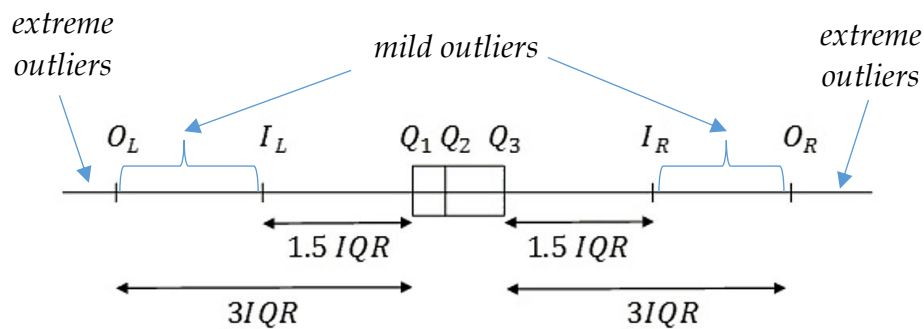
Για να επιτύχω ένα ποιο εκλεπτυσμένο φιλτράρισμα του θορύβου που οφείλεται σε αιχμές ‘spikes’ και ακραίες τιμές μετρήσεων ‘outliers’ στην έξοδο του δέκτη του RADAR χρησιμοποίησα ένα πιο εξειδικευμένο μαθηματικό αλγόριθμο που βασίζεται στο ενδοτεταρτημοριακό εύρος γνωστό με την σύντμηση **IQR** που προέρχεται από τα αρχικά των λέξεων *Interquartile Range*. Αλγόριθμοι που βασίζονται στο IQR έχουν ήδη προταθεί και χρησιμοποιούνται για την μείωση του θορύβου σε εικόνες από RADAR τύπου SAR.

Το ενδοτεταρτημοριακό εύρος είναι ένα μέτρο απόκλισης που στηρίζεται στα εκατοστιαία σημεία ‘percentiles’ και ορίζεται από την σχέση  $IQR=Q_3-Q_2$  όπου  $Q_3$  είναι το τρίτο τεταρτημόριο και  $Q_1$  είναι το πρώτο τεταρτημόριο. Η ιδιότητα του ενδοτεταρτημοριακού εύρους ως μέτρο απόκλισης, ειδικά σε σχέση με το συνολικό εύρος τιμών ‘dynamic range= $X_{max}-X_{min}$ ’ που μπορεί να εμφανίζουν οι μετρήσεις, είναι ότι αυτό το IQR δεν επηρεάζεται από αυτές τις ακραίες τιμές  $X_{max}$ ,  $X_{min}$ . Και αυτό συμβαίνει γιατί το IQR εξ’ ορισμού δεν εξαρτάται από τις τιμές των ακραίων παρατηρήσεων αλλά διαμορφώνεται, όπως είπαμε από το σώμα των μετρήσεων που οριοθετείτε μεταξύ  $Q_1$  και  $Q_3$ .

Αυτό είναι ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα που κάνει αλγόριθμους που βασίζονται στο IQR να είναι πολύ αποτελεσματικοί ως προς τον εντοπισμό ακραίων τιμών ‘outliers’ και απομάκρυνση ‘spikes’ και συναφών θορύβων από το σώμα, κύριο όγκο των δεδομένων, του ωφέλιμου σήματος. Ο εντοπισμός ακραίων τιμών που πιθανότατα δεν ανήκουν στο σώμα των μετρήσεων γίνεται με βάση τις ακόλουθες σχέσεις που καθορίζουν κάποια κατώφλια ‘thresholds’ φράχτες όπως σχηματικά παρουσιάζονται και στην εικόνα Γ-42.

Lower inner fence:  $I_L = Q_1 - 1.5 \times IQR$ , Lower outer fence:  $O_L = Q_1 - 3 \times IQR$

Upper inner fence:  $I_R = Q_3 + 1.5 \times IQR$ , Upper outer fence:  $O_R = Q_3 + 3 \times IQR$



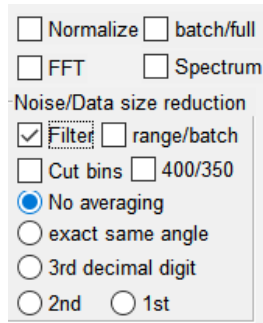
Εικόνα Γ- 42, Εντοπισμός ακραίων και 'ύποπτα' ακραίων τιμών

Τιμές μετρήσεων που βρίσκονται πέρα από τα *lower fence*  $Q_1 \pm 1.5 \times IQR$ , χαρακτηρίζονται ως ύποπτα ακραίες τιμές ή *'mild outliers'* ενώ τιμές μετρήσεων που βρίσκονται πέρα από το *outer fence*  $Q_3 \pm 3 \times IQR$  χαρακτηρίζονται ως ακραίες τιμές ή *extreme outliers*.

Στην περίπτωση των πειραματικών δεδομένων του PicoSAR RADAR όπου οι μετρήσεις προέρχονται από οπισθοσκεδαζόμενα HM κυμάτων διαπιστώθηκε ότι δεν υφίσταται πρόβλημα ακραίων τιμών στην περιοχή κάτω του  $Q_1$  και αυτό γιατί οι μηδενικές τιμές αποτελούν το απόλυτο κατώτατο όριο μετρήσεων και είναι καθόλα αποδεκτές στο σώμα της πληροφορίας. Αντιθέτως στην περιοχή πάνω από το  $Q_3$ , ο ακριβής προσδιορισμός της παραμέτρου  $W$  - *'whisker'* στην σχέση  $Q_3 + W \times IQR$  είναι αυτός που θα καθορίσει ποιο είναι το *'threshold'* τιμών πάνω από το οποίο οι μετρήσεις με μεγαλύτερες από αυτό τιμές θα απορρίπτονται ως μετρήσεις που αντιστοιχούν σε ακραίες τιμές και μπορούν να απορρίπτονται ως ασυσχέτιστες με το υπόλοιπο σώμα των μετρήσεων.

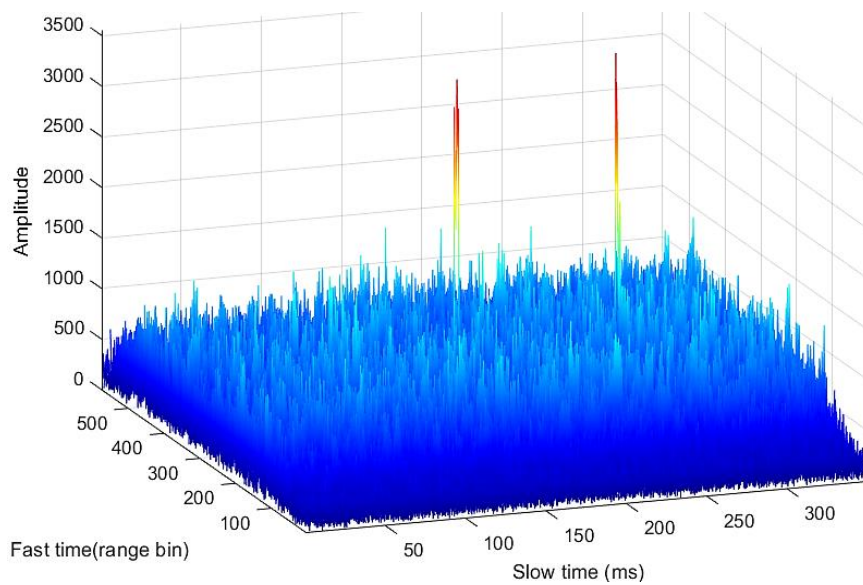
Η τιμή του  $W$  προσδιορίστηκε πειραματικά. Συγκεκριμένα για τιμές  $W \approx 3$  όταν δηλαδή το όριο του θορύβου τίθετο κοντά σε αυτό που ορίζεται ως *outer fence* ( $Q_3 + 3 \times IQR$ ) τότε υπερβολικά πολλές ακραίες τιμές μετρήσεων παρέμεναν στο σώμα του σήματος μετά την εφαρμογή του φίλτρου. Αντίθετα πάλι για τιμές  $W \approx 1.5$  ήτοι ( $Q_3 + 1.5 \times IQR$ ) πάρα πολλές τιμές από το σύνολο των διαθέσιμων μετρήσεων απορρίπτονταν δημιουργώντας ταυτόχρονα και ένα εμφανές ψαλίδισμα στο σώμα των μετρήσεων επηρεάζοντας αρνητικά τα αποτελέσματα των αλγορίθμων των επόμενων σταδίων επεξεργασίας. Μετά από αρκετούς πειραματισμούς, διαπιστώθηκε ότι μια τιμή  $W = 2.25$  αντιστοιχεί σε μια βέλτιστη λύση με βάση τα πειραματικά δεδομένα για το συγκεκριμένο RADAR. Γραφήματα σχετικά με *'boxplot'* και λοιπές στατιστικές μετρήσεις επί των σημάτων καταγραφής παρουσιάζονται στο παράρτημα Γ.3.4.

Το φίλτρο τύπου IQR μπορεί να εφαρμοστεί με διαφορετικούς τρόπους πάνω στα δεδομένα των πειραματικών μετρήσεων.

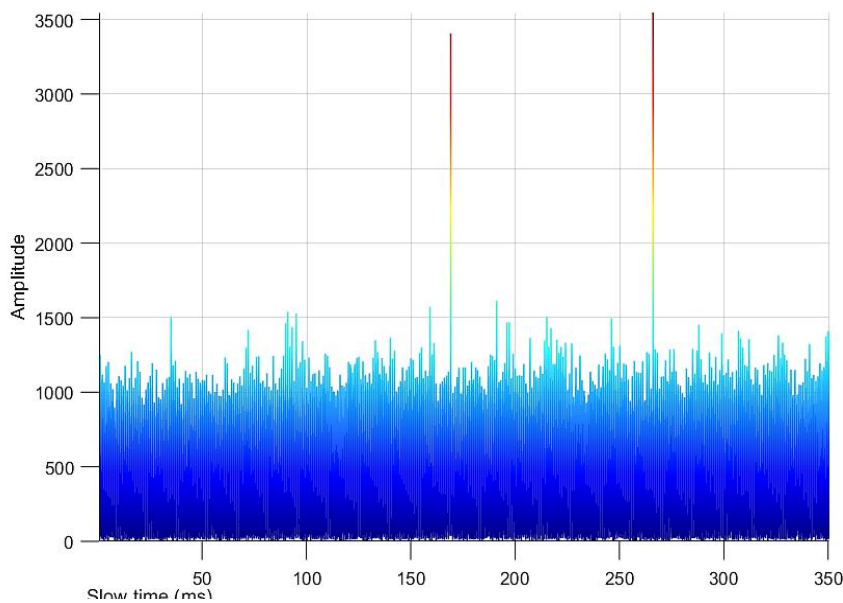


Μετά από αρκετούς πειραματισμούς κατέληξα σε δύο βασικές επιλογές εφαρμογής του IQR επί των μετρήσεων, τις επιλογές **[range]** και **[batch]**. Οι επιλογές αυτές βρίσκονται δίπλα στο checkbox **[Filter]**. Προεπιλεγμένη είναι η επιλογή **[range]**, και τσεκάροντας στο checkbox ενεργοποιείται η επιλογή **[batch]**. Στις επόμενες εικόνες θα δείξω τις διαφορές στην υφή της τρισδιάστατης επιφάνειας και στην τομή της ανάλογα με τον τρόπο εφαρμογής του φίλτρου IQR.

Στις εικόνες Γ-43 και Γ-44 βλέπουμε μια δέσμη N=350 αφιλτράριστων ‘range profiles’

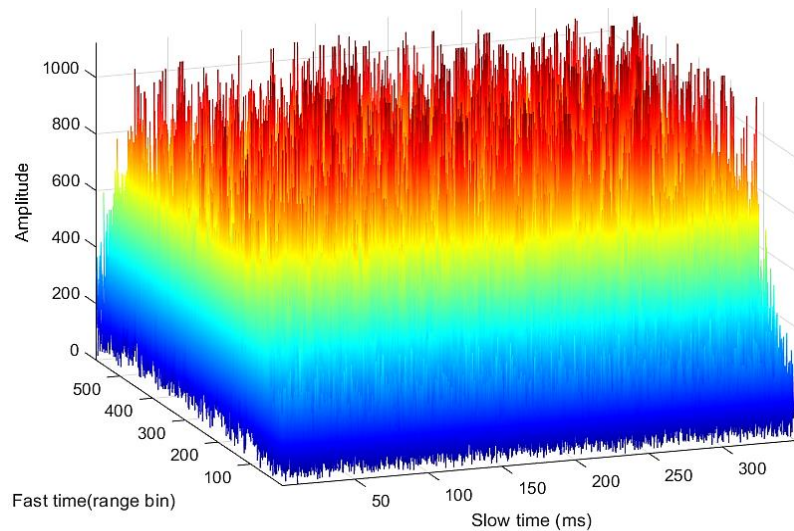


Εικόνα Γ- 43, Τρισδιάστατη παρουσίαση δέσμης 350 range profiles αφιλτράριστη από ακραίες τιμές

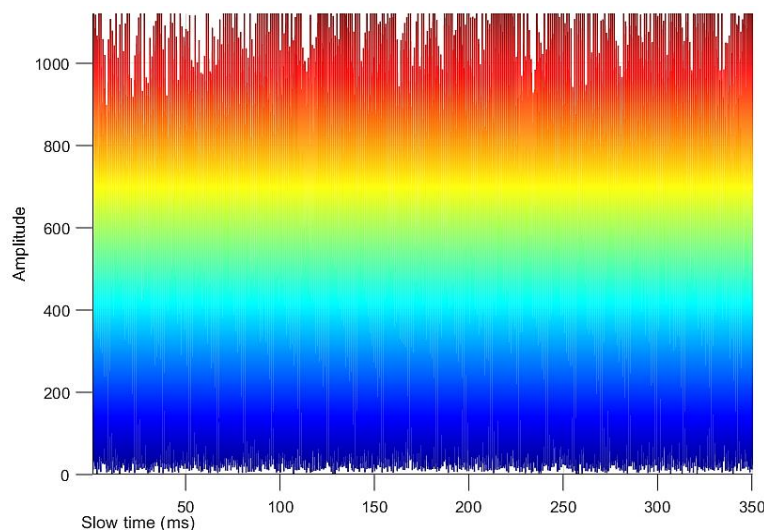


Εικόνα Γ- 44, Τομή τρισδιάστατης δέσμης 350 range profiles αφιλτράριστη από ακραίες τιμές

**[batch]:** επιλέγοντας φιλτράρισμα με ενεργοποιημένη την επιλογή [batch], ο αλγόριθμος φιλτραρίσματος βλέπει όλες τις τιμές των μετρήσεων που περιέχονται μέσα σε αυτή την δέσμη των 350 'range profiles' ως ένα ενιαίο σύνολο τιμών και εφαρμόζει πάνω στο συγκεκριμένο σύνολο τις στατιστικές μετρήσεις τύπου 'boxplot'. Συγκεκριμένα για μια δέσμη  $N=350$  'range profiles' όπου αποτελείται από  $M=574$  'range gates' μας δίνει ένα συνολικό πίνακα  $N \times M=200900$  μετρήσεων. Υπολογίζοντας τις χαρακτηριστικές στατιστικές τιμές  $Q_1$ ,  $Q_3$ ,  $IQR$  που αντιπροσωπεύουν το σύνολο των μετρήσεων του πίνακα, καθορίζεται ένα κατώφλι από την σχέση  $Q_3+2,25 \cdot IQR$ . Οποιαδήποτε τιμή μέτρησης ξεπερνά αυτό το κατώφλι φιλτράρεται ως ακραία τιμή 'outlier'. Οι εικόνες Γ-45 και Γ-46 προέρχονται από την εικόνα Γ-43 μετά το φιλτράρισμα των αρχικών μετρήσεων SAR raw data με την επιλογή [batch].

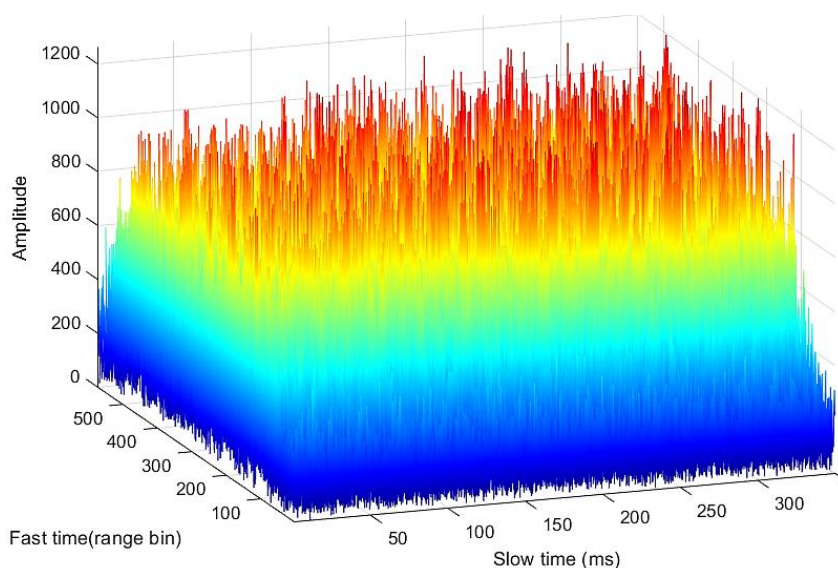


Εικόνα Γ- 45. Τρισδιάστατη παρουσίαση δέσμης  $N=350$  'range profiles' φιλτραρισμένη με επιλογή

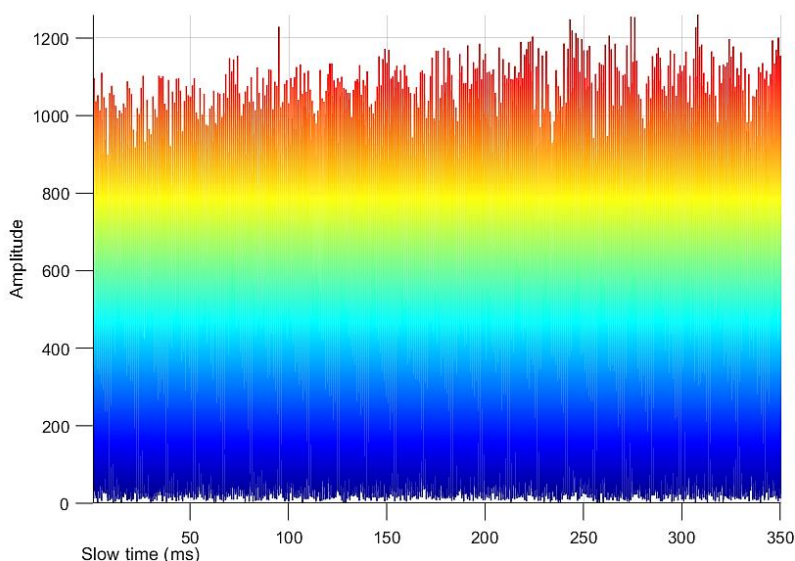


Εικόνα Γ- 46. Τομή της τρισδιάστατης δέσμης της εικόνας Γ-45.

**[range]:** επιλέγοντας φιλτράρισμα με ενεργοποιημένη την επιλογή [range], ο αλγόριθμος φιλτραρίσματος εντοπίζει δυναμικά τις ακραίες τιμές 'outliers' κάνοντας χρήση των ίδιων στατιστικών τύπου 'boxplot' αναλύοντας όμως τα 'range profile' το καθένα ξεχωριστά. Ποιο συγκεκριμένα για το κάθε 'range profile' δημιουργείται ένας μονοδιάστατος πίνακας που περιέχει τις μετρήσεις από τα 574 'range gates'. Για τον κάθε μονοδιάστατο πίνακα τιμών, υπολογίζονται ξεχωριστά τα  $Q_1$ ,  $Q_3$ ,  $IQR$  και από αυτά ορίζεται ένα κατώφλι από την σχέση  $Q_3 + 2,25 * IQR$  πάνω από το οποίο οποιαδήποτε τιμή μέτρησης θεωρείται ακραία τιμή μεταξύ πάντα αυτών των 574 'range gates'. Οι εικόνες Γ-47 και Γ-48 προέρχονται από την εικόνα Γ-43 μετά το φιλτράρισμα των αρχικών μετρήσεων SAR raw data με την επιλογή [batch].



Εικόνα Γ- 47. Τρισδιάστατη παρουσίαση δέσμης  $N=350$  'range profiles' φιλτραρισμένη, επιλογή [range]



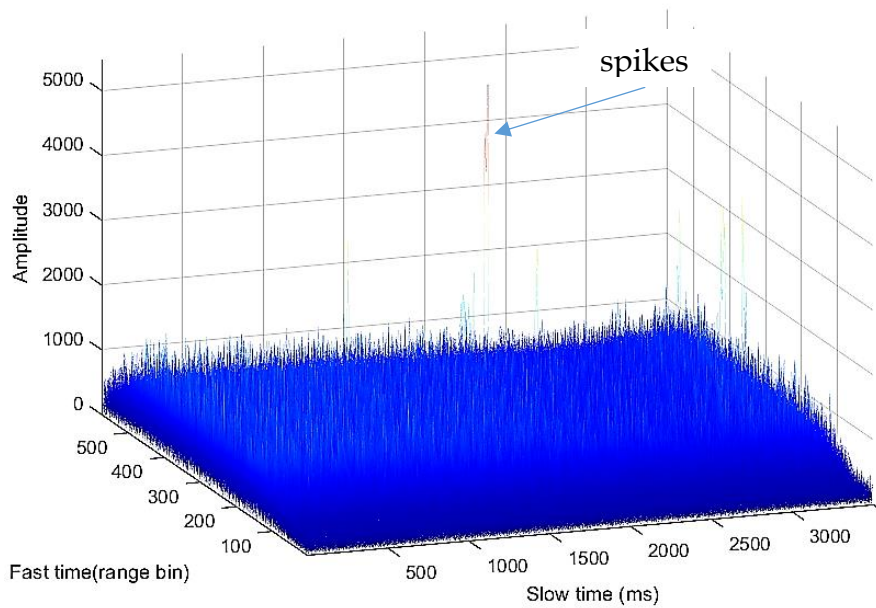
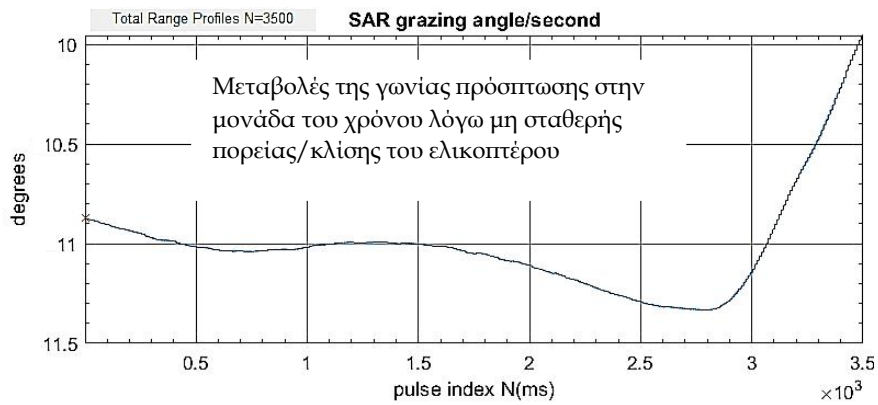
Εικόνα Γ- 48. Τομή της τρισδιάστατης δέσμης της εικόνας Γ-47

Συγκρίνοντας τις εικόνες από τις επιλογές [batch] και [range] παρατηρούμε ότι η εφαρμογή του φίλτρου IRQ με την επιλογή [batch] δίνει ένα ποιο αυστηρό κριτήριο φιλτραρίσματος το οποίο επηρεάζεται και από τις μεταβολές της έντασης του σήματος που συμβαίνουν κατά την διάρκεια του αργού χρόνου 'slow time'. Αυτό οδηγεί τελικά σε μεγαλύτερο ποσοστό απόρριψης τιμών που εμφανίζεται ως ένα είδος εντονότερου ψαλιδισμού στην υφή της τελικής τρισδιάστατης επιφάνειας, βλ. εικόνα Γ-46 έναντι Γ-48.

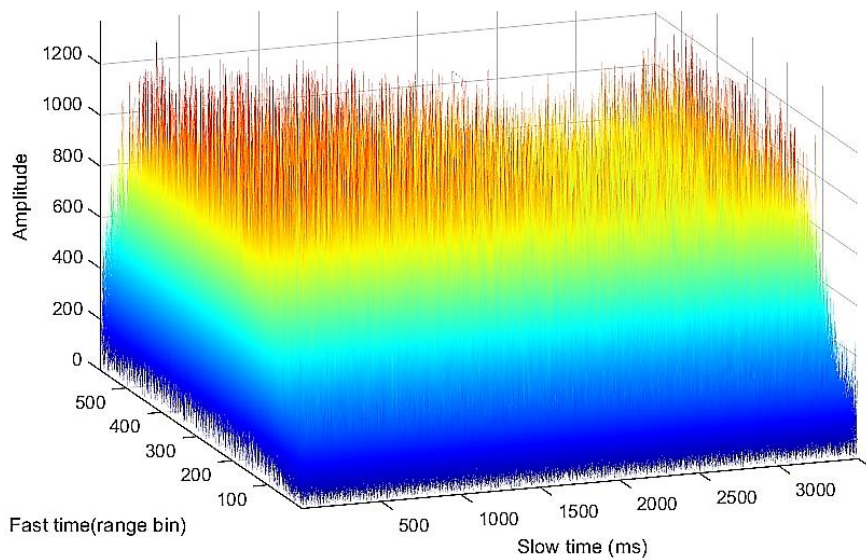
Από την άλλη, η εφαρμογή του φίλτρου ανά 'range profile' δεν επηρεάζεται από τυχόν μεταβολές μετρήσεων που συμβαίνουν κατά την διάρκεια του αργού χρόνου μιας και το φίλτρο IRQ εφαρμόζεται επί των μετρήσεων εντός του μονοδιάστατου πίνακα μετρήσεων του γρήγορου χρόνου.

Το φαινόμενο της εντονότερης επίδρασης (ψαλιδισμα) στο τελικό αποτέλεσμα των μεταβολών της έντασης που συμβαίνουν κατά την διάρκεια του αργού χρόνου όταν έχει επιλεγεί φιλτράρισμα τύπου [batch] μπορεί να γίνει ακόμα πιο εμφανές όταν το προς φιλτράρισμα δείγμα έχει μεγαλύτερη διάρκεια στον χρόνο, αποτελείται δηλαδή από πολλά περισσότερα 'range profiles'.

Αυτό μπορεί να εξηγηθεί για το συγκεκριμένο πείραμα και ως εξής. Το RADAR PicoSAR έχει  $PRF=1\text{KHz}$ , δηλαδή έχουμε την καταγραφή ενός καινούριου 'range profile' μετά από κάθε καινούριο 'radar hit' ήτοι μετά από ένα *millisecond*. Έτσι οι παραπάνω εικόνες αποτελούνται από μια δέσμη  $N=350$  δηλαδή από καταγραφές που διήρκεσαν 350ms. Εάν αυξήσουμε τον χρόνο καταγραφής στα 3,5 δευτερόλεπτα θα σχηματίσουμε μια εικόνα με μετρήσεις από  $N=3500$  'range profile'. Στα 3,5 δευτερόλεπτα το ελικόπτερο μπορεί να κρατήσει μια πορεία σχετικά σταθερής κατεύθυνσης πλην όμως λόγω της φύσης του μέσου δεν μπορεί να μην λείπουν και κάποιες σχετικά απότομες μεταβολές στην πορεία ή την κλίση του όπως φαίνεται και στο σχετικό διάγραμμα (*SAR grazing angle/second*) της εικόνα Γ-49 που καταγράφει την πορεία της γωνίας θέασης του RADAR ως προς την θαλάσσια επιφάνεια. Επίσης στο αντίστοιχο τρισδιάστατο γράφημα της εικόνα Γ-49 βλέπουμε ότι λόγω της ύπαρξης κάποιων 'spikes' δεν είναι εμφανείς οι επιπτώσεις των μεταβολών της κίνησης του ελικοπτερού στο αποτύπωμα της έντασης των 'range profiles'. Αντιθέτως στην εικόνα Γ-50, εφαρμόζοντας ένα φίλτρο IQR με την επιλογή [range] μπορούμε να αφαιρέσουμε αποτελεσματικά τον θόρυβο χωρίς να επηρεαστεί η ευαισθησία στην ανίχνευση και την αποτύπωση των μεταβολών κατά την διάρκεια του χρόνου καταγραφής 'slow time'. Αντιθέτως, εφαρμόζοντας το φίλτρο IQR με την επιλογή [batch], βλέπουμε ότι αυτό το πλεονέκτημα χάνεται όπως προκύπτει και από την σύγκριση μεταξύ της εικόνας Γ-50 και Γ-51.

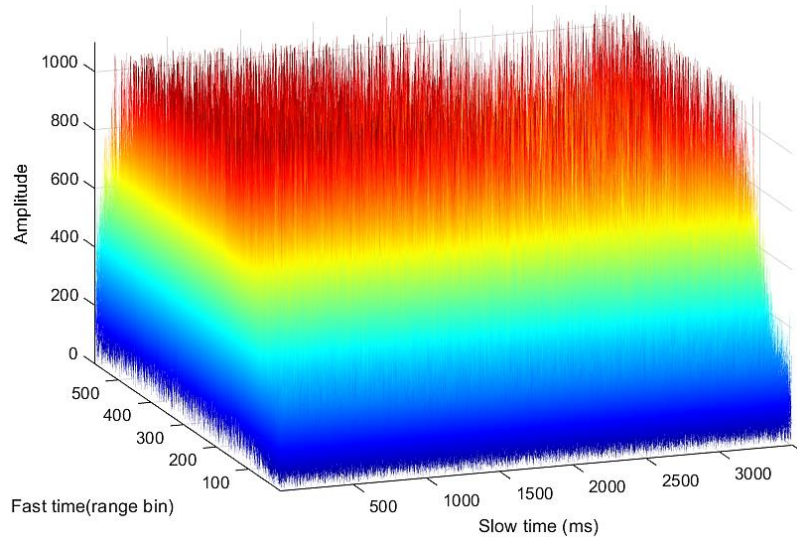


Εικόνα Γ- 49, Παρουσίαση δέσμης  $N=3500$  με αφιτράριστα SAR raw data



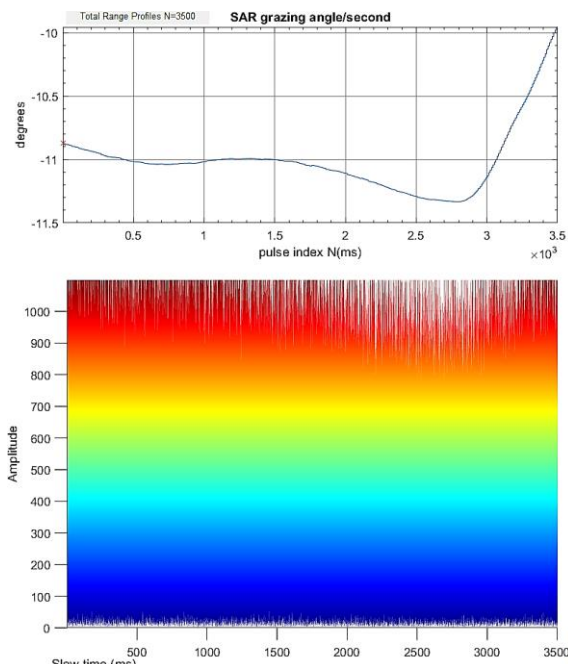
Εικόνα Γ- 50, Παρουσίαση δέσμης  $N=3500$  φιλτραρισμένη με επιλογή range



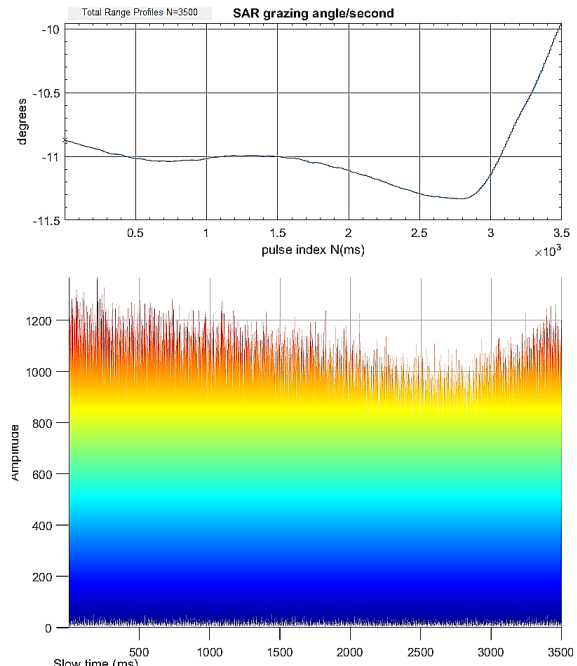


Εικόνα Γ- 51, Τρισδιάστατη παρουσίαση δέσμης N=3500 φιλτραρισμένη με επιλογή batch

Στις παρακάτω εικόνες Γ-52, Γ-53 βλέπουμε τις τομές των αντίστοιχων τρισδιάστατων εικόνων Γ-50,Γ-51 από όπου παρατηρούμε ποιο καθαρά την διαφορά στο τελικό αποτέλεσμα μεταξύ των δύο διαφορετικών εφαρμογών του φίλτρου IRQ επί του συνόλου της δέσμης [batch] και επί του [range]. Το φιλτράρισμα ανά [range] δίνει ένα λεπτομερέστερο αποτέλεσμα χωρίς έντονους ψαλιδισμούς ακόμα και σε απότομες μεταβολές της γωνίας πρόσπτωσης των ΗΜ κυμάτων του RADAR επί της θαλάσσιας επιφάνειας.



Εικόνα Γ- 52, Τομή δέσμης N=3500  
 φιλτράρισμα με επιλογή [batch]



Εικόνα Γ- 53, Τομή δέσμης N=3500  
 φιλτράρισμα με επιλογή [range]

Είναι στην διακριτική ευχέρεια του χρήστη να επιλέξει τον τρόπο που θα εφαρμόσει το φίλτρο ανάλογα και με τις απαιτήσεις του αλγόριθμου που θα χρησιμοποιήσει στο επόμενο στάδιο επεξεργασίας και ανάλογα με τα περιεχόμενα της εικόνας των μετρήσεων που θέλει να επεξεργαστεί όπως θα δούμε σε επόμενο κεφάλαιο.

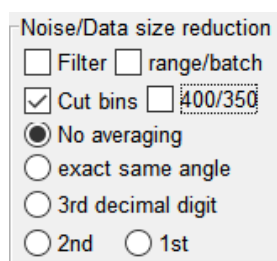
## Γ.5. Μείωση του όγκου των δεδομένων προς επεξεργασία (*data reduction*)

Όπως ανέφερα και στην εισαγωγή η μείωση του όγκου των δεδομένων ‘*data reduction*’ είναι ένα βασικό κομμάτι που απασχολεί πάντα την διαδικασία της προ-επεξεργασίας καθότι ταυτόχρονα με την μείωση του όγκου των δεδομένων, άρα και τις απαιτήσεις του συστήματος σε μνήμη, μπορεί να μειώσει δραματικά και το υπολογιστικό φορτίο που θα απαιτήσουν τα επόμενα στάδια επεξεργασίας και αυτό είναι εξίσου εάν όχι ακόμα πιο σημαντικό σε εφαρμογές όπως αυτή που ανέπτυξα. Η μείωση του χρόνου επεξεργασίας και ανάλυσης δίνει στον ερευνητή την δυνατότητα να πειραματίζεται με τις μετρήσεις και να παράγει αποτελέσματα με τρόπο διαδραστικό αυξάνοντας έτσι την αποδοτικότητα της έρευνάς του.

Κατά την διάρκεια της διδακτορικής μου διατριβής δοκίμασα διάφορες τεχνικές για την μείωση του όγκου των SAR raw data. Στις επόμενες δύο παραγράφους θα αναφέρω τις δύο κυριότερες τεχνικές που ενσωμάτωσα στο λογισμικό. Οι στρατηγικές μείωσης όγκου δεδομένων περιλαμβάνουν μείωση διαστάσεων δεδομένων, επιλογές [Cut bins] ή/και ταυτόχρονη μείωση αριθμού δεδομένων δια αντιπροσώπευσης, επιλογές [averaging].

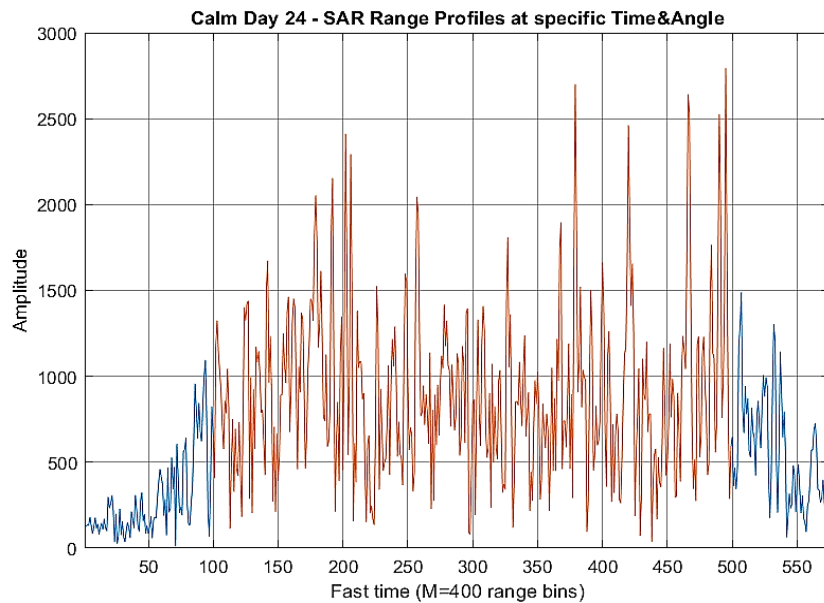
### Γ.5.1. Μείωση διαστάσεων δεδομένων

Στην μείωση των διαστάσεων εφαρμόζονται σχήματα κωδικοποίησης δεδομένων έτσι ώστε να ληφθεί μια μειωμένη ή «συμπιεσμένη» αναπαράσταση των αρχικών δεδομένων. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί και με μια απευθείας επιλογή ενός υποσυνόλου χαρακτηριστικών, π.χ. με εντοπισμό και κατάργηση άσχετων ή και επιβλαβών χαρακτηριστικών και διατήρηση των χρήσιμων χαρακτηριστικών εκ του αρχικού συνόλου. Περισσότερες τεχνικές και λεπτομέρειες μπορούν να αναζητηθούν στο πολύ ενδιαφέρον βιβλίο των Han, J., Kamber, M. and Pei, J. ‘*Data Mining: Concepts and Techniques*’ 3rd Edition, 2011, Morgan Kaufmann Publishers, Burlington.



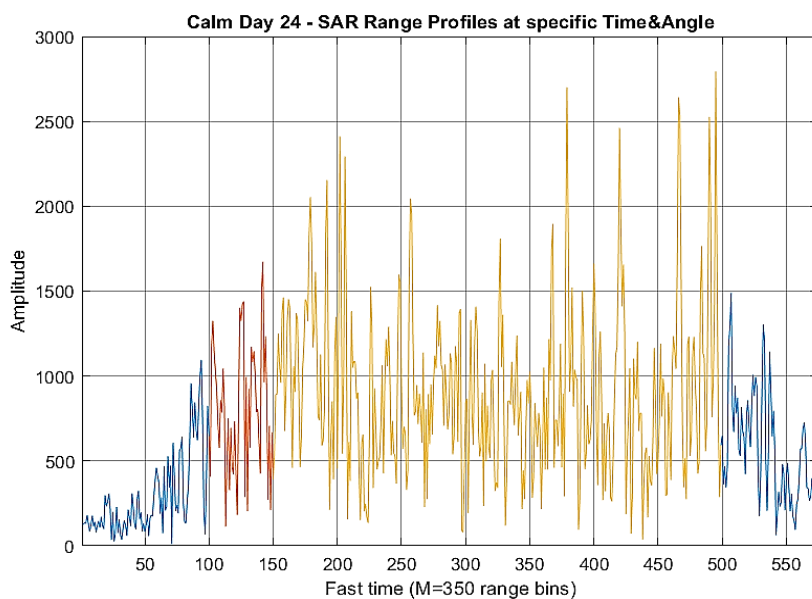
**[Cut bins]:** Με την επιλογή αυτή απορρίπτουμε έναν συγκεκριμένο αριθμό από ‘*range bin*’ στην αρχή και στο τέλος ενός ‘*range profile*’. Συγκεκριμένα, και μετά από αρκετό πειραματισμό διαπίστωσα ότι η απόρριψη των 100 πρώτων ‘*range gate*’ [0-100] όπως επίσης και των τελευταίων [500-574] όχι μόνο δεν επηρέαζε τα τελικά αποτελέσματα αλλά σε πολλές περιπτώσεις βελτιώνει όλα τα στάδια της μετέπειτα μαθηματικής επεξεργασίας του σήματος. Η εικόνα Γ-54 δείχνει ένα ‘*range profile*’ το οποίο αποτελείται από τα 574 ‘*range bin*’. Επιλέγοντας [Cut bins] ενεργοποιείται ο αλγόριθμος μείωσης διαστάσεων και από το σύνολο των ‘*range bin*’ που κρατάω σημειώνεται με κόκκινο χρώμα, δηλαδή παραμένουν συνολικά 400 ‘*range bin*’ εκ συνόλου 574 ήτοι συμπίεση 400/574 στο 70%.

Αν και το φαινόμενο είναι πιο σύνθετο θα μπορούσε κάποιος επιγραμματικά να πει ότι οι μπλε περιοχές αποτελούν μια μεταβατική περιοχή που δεν είναι αντιπροσωπευτική των βασικών χαρακτηριστικών του συνόλου. Αντιθέτως η κόκκινη περιοχή διατηρεί τα χρήσιμα χαρακτηριστικά του σήματος και αποδεικνύεται ότι είναι αντιπροσωπευτική και ιδανική για μείωση διαστάσεων και συμπίεση του αρχικού όγκου των δεδομένων.



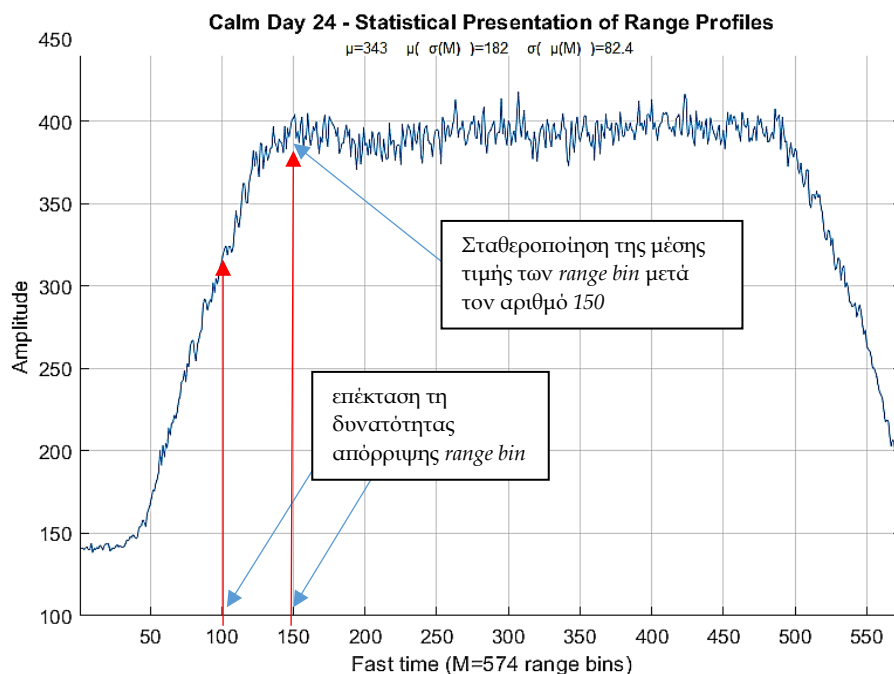
Εικόνα Γ- 54, Μείωση διαστάσεων range profile με επιλογή [Cut bins] [400]

**[400/350]:** επιλέγοντας [Cut bins] και [350] μειώνουμε στα 350 τα σημεία μετρήσεων που κρατάμε (βλ. κίτρινο χρώμα σε εικόνα Γ-55). Αυτό οδηγεί σε μια περαιτέρω μείωση των διαστάσεων των δεδομένων με αύξηση της ολικής συμπίεσης στο 60%. Αυτή είναι και η μέγιστη μείωση διαστάσεων που μπόρεσα να επιτύχω χωρίς να υπάρξει απώλεια ως προς την βασική πληροφορία που μεταφέρει το σώμα του σήματος.



Εικόνα Γ- 55, Μείωση διαστάσεων range profile με επιλογή [Cut bins]

Με την βοήθεια της στατιστικής ανάλυσης, βλ. εικόνα Γ-56 (παράρτημα Γ.3.4) μπορεί να γίνει πολύ εμφανές ότι το μεταβατικό φαινόμενο διαρκεί όντως και μετά τα 100 πρώτα ‘range bin’ έως και τον αριθμό 150 το πολύ κάτι το οποίο δεν γίνεται άμεσα εμφανές δια της απλής παρατήρησης της εικόνας Γ-55.



Εικόνα Γ- 56. Γράφημα μέσης τιμής  $N=3500$  ‘range profiles’, επιλογή [Plot-μ]

### Γ.5.2. Μείωση όγκου δεδομένων δια αντιπροσώπευσης ‘averaging’

Μια άλλη τεχνική συμπίεσης είναι η μείωση του αριθμού των δεδομένων δια αντιπροσώπευσης. Κατά την διαδικασία αυτή της μεθόδου μείωσης του αριθμού των δεδομένων, τα δεδομένα αντικαθίστανται από εναλλακτικές, μικρότερου αριθμού αναπαραστάσεις, χρησιμοποιώντας είτε παραμετρικά μοντέλα είτε μη παραμετρικά μοντέλα. Στα παραμετρικά μοντέλα η συμπίεση επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας επί παραδειγματι στην θέση ενός συνόλου αρχικών τιμών κάποιες στατιστικές παραμέτρους όπως μέσο όρο, τυπική απόκλιση κ.α. ενώ στα μη παραμετρικά μοντέλα χρησιμοποιούνται μέθοδοι όπως είναι η δειγματοληψία κρατώντας αντιπροσωπευτικά τμήματα από το αρχικό σήμα. Στην περίπτωση του λογισμικού που ανέπτυξα η μείωση επιλέχθηκε να γίνει μέσω παραμετρικού μοντέλου και συγκεκριμένα επιλέχθηκε η διαδικασία ‘averaging’ μεταξύ γειτονικών ‘range profiles’, υπό προϋποθέσεις που θα αναλυθούν παρακάτω.

Η διαδικασία ‘averaging’ επιλέχθηκε μεταξύ άλλων γιατί μπορεί να επιτύχει ταυτόχρονα τόσο την μείωση του αριθμού (όγκου) των δεδομένων όσο και βελτίωση του σηματοθορυβικού λόγου στο τελικό σήμα. Σχετικά με την διαδικασία ‘averaging’ και την βελτίωση που μπορεί αυτή να επιφέρει στο σηματοθορυβικό λόγο αναφέρω και στην παράγραφο 2.6.4 του 2<sup>ου</sup> κεφαλαίου. Παρακάτω θα εξετάσω την διαδικασία ‘averaging’ ως προς την δυνατότητα μείωσης/συμπίεσης του αρχικού όγκου των δεδομένων.

Noise/Data size reduction

Filter  range/batch

Cut bins  400/350

No averaging

exact same angle

3rd decimal digit

2nd  1st

**[No averaging]:** Με αυτή την επιλογή ο χρήστης επιλέγει να κρατήσει όλα τα αρχικά δεδομένα καταγραφής χωρίς να εφαρμόσει κάποια τεχνική ‘*averaging*’.

Μείωση αριθμού δεδομένων μπορεί να επιτευχθεί με μια από τις ακόλουθες επιλογές **[exact same angle]**, **[3d decimal digit]**, **[2nd]** **[1st]**. Οι διαφορές μεταξύ των επιλογών θα αναλυθούν στην συνέχεια.

**[exact same angle]:** Αυτή η επιλογή αφορά ‘*averaging*’ μεταξύ διαδοχικών καταγραφών που προέρχονται από μετρήσεις με ακριβώς την ίδια γωνία πρόσπτωσης, ακριβώς δηλαδή με ίδια γωνία ‘*grazing angle*’.

Από την λίστα Time/Angle που βρίσκεται δίπλα σε κάθε διάγραμμα SAR (βλ. εικόνα Γ-57) μπορούμε άμεσα να παρατηρήσουμε ότι η ίδια ακριβώς γωνία εμφανίζεται για παραπάνω από μία διαδοχικές φορές.

Μετά από ανάλυση όλων των αρχείων καταγραφής διαπιστώνεται ότι η συντριπτική πλειοψηφία των καταγραφών του PicoSAR RADAR στο πείραμα NEMO πραγματοποιήθηκε με 10 ‘*radar hits*’ ανά γωνία, βλ. Πίνακα Γ.3.

Πίνακας Γ3

NEMO2014 day 23/09			NEMO2014 day 24/09		
Radar hits	Counts	%	Radar hits	Counts	%
1	5	0,00%	1	13	0,00%
2	24	0,01%	2	18	0,00%
3	33	0,01%	3	30	0,00%
4	32	0,01%	4	36	0,00%
5	55	0,02%	5	35	0,00%
6	54	0,02%	6	24	0,00%
7	28	0,01%	7	56	0,01%
8	128	0,04%	8	80	0,01%
9	2241	0,64%	9	5049	0,65%
10	344880	98,36%	10	769570	98,41%
11	3168	0,90%	11	7128	0,91%

Time	Angle	
200056	-38.11565018	1
200057	-38.11565018	2
200058	-38.11565018	3
200059	-38.11565018	4
200060	-38.11565018	5
200061	-38.11565018	6
200062	-38.11565018	7
200063	-38.11565018	8
200064	-38.11565018	9
200065	-38.11565018	10
200066	-38.11168671	11
200067	-38.11168671	12
200068	-38.11168671	13
200069	-38.11168671	14
200070	-38.11168671	15
200071	-38.11168671	16
200072	-38.11168671	17
200073	-38.11168671	18
200074	-38.11168671	19
200075	-38.11168671	20
200076	-38.10382462	21
200077	-38.10382462	22
200078	-38.10382462	23
200079	-38.10382462	24
200080	-38.10382462	25
200081	-38.10382462	26
200082	-38.10382462	27
200083	-38.10382462	28
200084	-38.10382462	29
200085	-38.10382462	30

Εικόνα Γ- 57,

Δείγμα λίστας χρόνων/γωνιών από το αρχείο καταγραφών

Η επιλογή **[exact same angle]** εκμεταλλεύεται την ανωτέρω παρατήρηση, που εδράζεται σε τεχνικό χαρακτηριστικό/ρύθμιση του συγκεκριμένου RADAR PicoSAR-X, όπου για κάθε γωνία πρόσπτωσης έχουμε μια καταγραφή περισσότερων του ενός και συγκεκριμένα δέκα διαδοχικών μετρήσεων. Με βάση αυτή την παρατήρηση μπορούμε να διερευνήσουμε την εφαρμογή ‘*averaging*’ επί διαδοχικών ‘*range profiles*’ που προέρχονται από μετρήσεις που έχουν γίνει ακριβώς από την ίδια γωνία πρόσπτωσης των ΗΜ κυμάτων επιτυγχάνοντας έτσι μια σημαντική συμπίεση στο όγκο των δεδομένων της τάξης του 90% (1 προς 10).

Δηλαδή ο αλγόριθμος κρατά ένα ‘range profile’ που κατασκευάζεται από ‘averaging’ μεταξύ 10 διαδοχικών καταγραφών.

Επιπλέον της μείωσης του αριθμού των δεδομένων, με την εφαρμογή ‘averaging’ μπορεί να επιτευχθεί και βελτίωση του σηματοθορυβικού λόγου στο τελικό αποτέλεσμα με τους όποιους βέβαια περιορισμούς πρέπει να ληφθούν υπόψη και ανέπτυξα στην παράγραφο §2.6.4.

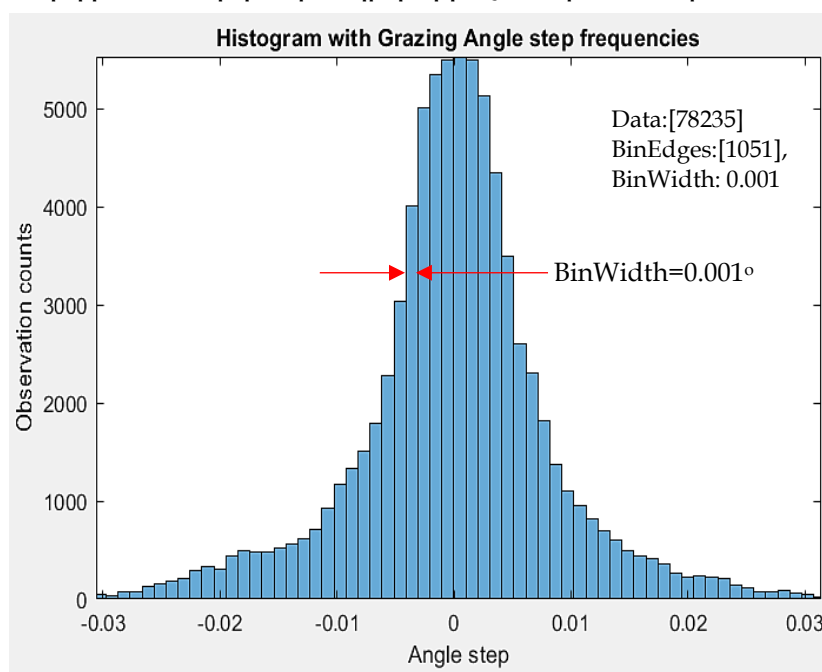
**[3<sup>rd</sup> decimal digit]:** Αυτή η επιλογή αφορά ‘averaging’ μεταξύ διαδοχικών μετρήσεων που προέρχονται από γωνίες πρόσπτωσης που την στιγμή της καταγραφής είχαν την ίδια γωνία με ακρίβεια 3<sup>ο</sup> δεκαδικού ψηφίου. Η εικόνα Γ-57 παρουσιάζει ένα δείγμα από την λίστα των χρόνων/γωνιών καταγραφής. Η μεταβολή (βήμα) της γωνίας θέασης του HM κύματος παρατηρούμε ότι δεν είναι σταθερή. Η πρώτη μεταβολή είναι από  $38,11565018^\circ$  σε  $38,11168671^\circ$  δηλαδή  $0,00397^\circ$ , η επόμενη μεταβολή είναι από  $38,11168671^\circ$  σε  $38,10382462^\circ$  δηλαδή  $0,00786^\circ$ . Αναλύοντας το μέγεθος της μεταβολής ‘step’ από γωνία σε γωνία στο σύνολο των καταγραφών ( $N=782039$ ) της πρώτης ημέρας του πειράματος NEMO2014 και παρουσιάζοντας τα αποτελέσματα σε μορφή ιστογράμματος λαμβάνουμε το ακόλουθο ιστόγραμμα, εικόνα Γ-58, που αναδεικνύει την μορφή της κατανομής του βήματος μεταβολής της γωνίας πρόσπτωσης.

Παρατηρούμε ότι το βήμα μεταβολής ακολουθεί μια κανονική κατανομή. Στο σύνολο των μεταβολών το βήμα μεταξύ διαδοχικών γωνιών δεν ξεπερνά σχεδόν ποτέ τις  $\pm 0.03^\circ$  μοίρες. Η πλειοψηφία των καταγραφών εμφανίζει ένα βήμα μεταβολής που δεν ξεπερνά τις  $\pm 0.01^\circ$  μοίρες ενώ με την μεγαλύτερη συχνότητα εμφανίζονται μεταβολές της τάξης του  $\pm 0.001^\circ$  ‘BinWidth’.

Δηλαδή η πλειοψηφία των διαδοχικών γωνιών πρόσπτωσης διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους στο 3<sup>ο</sup> δεκαδικό ψηφίο. Αυτή η παρατήρηση μας επιτρέπει, πέραν του ‘averaging’ μεταξύ μιας

δεκάδας διαδοχικών μετρήσεων με ακριβώς την ίδια γωνία πρόσπτωσης να επεκτείνουμε τον πειραματισμό με ‘averaging’ μεταξύ καταγραφών με ίδια γωνία πρόσπτωσης σε επίπεδο 3<sup>ο</sup> δεκαδικού ψηφίου.

Οι επιλογές **[1st]** και **[2nd]** βασίζονται στο ‘averaging’ μεταξύ καταγραφών διαδοχικών γωνιών με ίδια γωνία πρόσπτωσης σε επίπεδο 1<sup>ο</sup> και 2<sup>ο</sup> δεκαδικού ψηφίου αντίστοιχα.



Εικόνα Γ- 58. Ιστόγραμμα κατανομής βηματισμού ‘step’ γωνιών καταγραφής

## Παράρτημα Δ. Πείραμα NEMO2014 – Διαδικασίες και λήψη μετρήσεων από Radar τύπου SAR

### Περιεχόμενα

---

Δ.1. Πείραμα NEMO 2014.....	264
Δ.1.1. Εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για το πείραμα.....	264
Δ.1.2. Τοποθεσία NEMO 2014 και περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας.....	265
Δ.1.2.1 1 <sup>η</sup> ημέρα μετρήσεων (23/9), κατάσταση θάλασσας κυματώδης. ....	266
Δ.1.2.2 2 <sup>η</sup> ημέρα μετρήσεων (24/9), θάλασσα ήρεμη.....	267
Δ.1.3. Χαρακτηρισμός ‘sea state’ με βάση την ταχύτητα του ανέμου. ....	268
Δ.2. Λήψεις μετρήσεων - αρχεία καταγραφής πειράματος NEMO .....	270
Δ.2.1 Περιεχόμενα και μορφή δεδομένων καταγραφής .....	270
Δ.2.1 Ρυθμός καταγραφής και όγκος παραγόμενων δεδομένων. ....	271

---

### Περίληψη.

Στα πλαίσια της συνεργασίας του εργαστηρίου συστημάτων RADAR & Τηλεπισκόπησης του Ε.Μ.Π με τον οργανισμό Science & Technology (STO) μας δόθηκαν καταγραφές δεδομένων ενός αερομεταφερόμενου RADAR τύπου SAR από το πείραμα NEMO 2014 στο Τάραντα της Ιταλίας. Το πείραμα αυτό διεξήχθη σε συνεργασία με το Νορβηγικό Ίδρυμα Αμυντικών Ερευνών - *Forsvarets forskningsinstitutt* (FFI) (<https://www.ffi.no/en>).

Στόχος του επόμενου τμήματος της διατριβής είναι να διαπιστωθεί εάν μπορούμε και πειραματικά να επαληθεύσουμε την παραπάνω διατυπωθείσα θεωρία της διατριβής όπου προβλέπει την δυνατότητα χαρακτηρισμού της τραχύτητας μιας επιφάνειας, εν προκειμένω μιας θαλάσσιας επιφάνειας, αναλύοντας οπισθοσκεδαζόμενα ΗΜ κύματα που προέρχονται από την λήψη ριπών εκπομπής RADAR, εν προκειμένω ενός RADAR SAR. Ο χαρακτηρισμός της κατάστασης της θάλασσας ειδικά την νύχτα που δεν είναι δυνατό να υπάρχει οπτική επαφή με την εικόνα της θάλασσας είναι ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα ειδικά σε στρατιωτικές αλλά και πολλές άλλες εφαρμογές.

## Δ.1. Πείραμα NEMO 2014

Σκοπός του πειράματος ήταν η καταγραφή των θαλάσσιων επιστροφών ‘*sea clutter*’ από ένα αερομεταφερόμενο RADAR τύπου SAR για ένα ευρύ φάσμα γωνιών θέασης ‘*grazing angle*’. Το ιδανικό μέσο για ένα τέτοιο πείραμα είναι το ελικόπτερο διότι είναι ένα ιπτάμενο μέσο το οποίο μπορεί να κρατήσει σταθερή την θέση του στον χώρο ‘*latitude, longitude*’ ενώ την ίδια στιγμή μπορεί να ανεβαίνει κατακόρυφα με αργό ρυθμό μεταβάλλοντας έτσι την γωνία πρόσπτωσης των ΗΜ κυμάτων ως προς την θαλάσσια επιφάνεια.

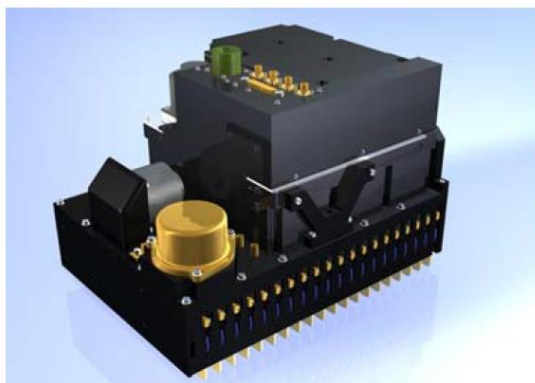
### Δ.1.1. Εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για το πείραμα

Για το πείραμα χρησιμοποιήθηκε ένα ελικόπτερο EUROCOPTER AS 350B-3 όπου στο πίσω κάθισμα τοποθετήθηκε όπως φαίνεται και στην εικόνα Δ-1 ένα PicoSAR RADAR. Η πίσω πόρτα του ελικοπτερου αφαιρέθηκε, βλ. εικόνα Δ-1, για να αποφευχθούν ενδεχόμενες ανακλάσεις και αποσβέσεις. Στην πίσω θέση βρισκόταν ο χειριστής του RADAR, και στις μπροστινές θέσεις βρισκόταν δεξιά ο χειριστής του ελικοπτερου και αριστερά ο πλοηγός και χειριστής της γωνίας πρόσπτωσης της δέσμης του RADAR. Ο χειριστής της γωνίας πρόσπτωσης ρύθμιζε μέσω ενός Η/Υ της γωνίες πρόσπτωσης με βήματα μικρότερα του εκατοστού της μοίρας.

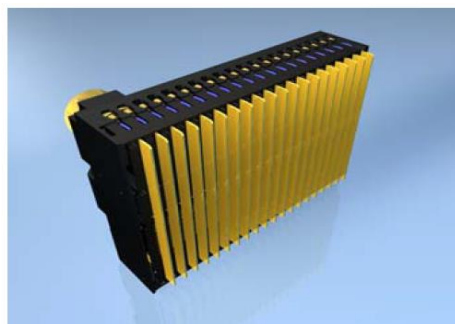


Εικόνα Δ-1. Το PicoSAR τοποθετημένο για τις ανάγκες του πειράματος στην πίσω θέση του ελικοπτερου AS350B-3

Το RADAR PicoSAR που χρησιμοποιήθηκε για το πείραμα, βλ. εικόνα Δ-2, είναι ένα RADAR X-band τύπου AESA ‘*Active Electronically Scanned Array*’ κατασκευής της Leonardo. Η κεραία του φαίνεται στην εικόνα Δ-3.



Εικόνα Δ-2. PicoSAR RADAR με προσαρμοσμένη την κεντρική μονάδα επεξεργασίας πίσω από την κεραία



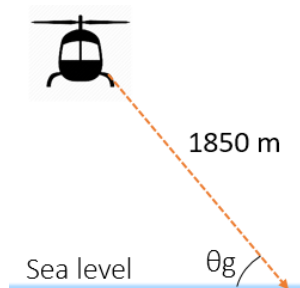
Εικόνα Δ-3. Κεραία PicoSAR RADAR



Το RADAR είχε ρυθμιστεί από τους διοργανωτές του πειράματος για συχνότητα λειτουργίας  $f_s=9.4\text{GHz}$ , εύρος ζώνης  $BW=150\text{MHz}$ ,  $\text{pulse width}=12\mu\text{s}$ ,  $\text{PRF}=1\text{KHz}$ , επίσης η απόσταση ‘slant range’ του RADAR του ελικοπτέρου ως προς το σημείο στόχευσης της επιφάνειας της θαλάσσιας επιφάνειας ‘range to scene center’ ήταν σταθερά ρυθμισμένη στα  $1850\text{m}$  ανεξαρτήτως γωνίας  $\theta_g$  ‘grazing angle’, βλ. εικόνα Δ-4

### Δ.1.2. Τοποθεσία NEMO 2014 και περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας

Το πείραμα NEMO 2014 πραγματοποιήθηκε στο κόλπο Τάραντα στη νότια Ιταλία στις 23 και 24 Σεπτεμβρίου του 2014. Και τις δύο μέρες όπου διεξήχθησαν οι πειραματικές μετρήσεις η διεύθυνση του ανέμου ήταν από τον βορρά, από την πλευρά της ακτής και η απόσταση του πειράματος από την ακτή ήταν μόνο περί τα  $18\text{Km}$ .



Εικόνα Δ-4. Απόσταση σκόπευσης, *slant range*, του Radar του ελικοπτέρου.



Εικόνα Δ-5. Τοποθεσία του πειράματος στον κόλπο Τάραντα στη νότια Ιταλία

Στον πίνακα σημειώνω τις κυριότερες παραμέτρους ‘specs’ του PicoSAR RADAR.

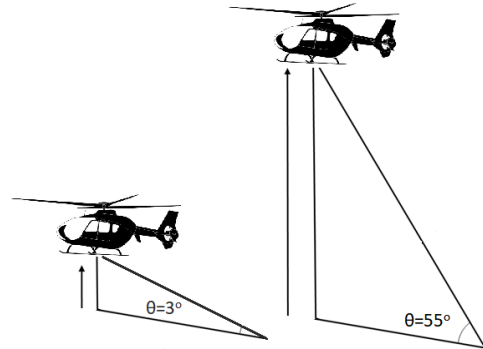
Frequency	X band (~10 GHz)
Bandwidth	Up to 1.5 GHz
Resolution in spot mode	0.15 - 3 m
Polarization	VV
Beam width	6° in azimuth, 9° in elevation
Beam steering	Electronic in azimuth, mechanical in elevation
Peak transmitted power	100 W
Mean transmitted power	13 W
Size	33 x 23 x 23 cm
Weight	10 kg
Min/max range	5-20 km at 3 m resolution 5-10 km at 0.3 m resolution

Ιστοσελίδα κατασκευαστή:

<https://www.leonardocompany.com/en/products/picosar-1>

**Δ.1.2.1 1<sup>η</sup> ημέρα μετρήσεων (23/9), κατάσταση θάλασσας κυματώδης.**

Κατά την διάρκεια των μετρήσεων ο χειριστής του ελικοπτερου κρατούσε σταθερό το αζιμούθιο του ελικοπτερου (εντός  $20^\circ$ ) με κατεύθυνση προς τον άνεμο και ξεκίνησε να ανυψώνει με αργή ταχύτητα το ελικόπτερο για γωνίες θέασης 'grazing angle' από  $3^\circ$  έως και τις  $55^\circ$  όπως φαίνεται στην εικόνα Δ-6. Η διάρκεια της ανύψωσης του ελικοπτερου και η καταγραφή των δεδομένων οπισθοσκέδασης από το RADAR διήρκεσε περίπου 5 λεπτά. Ο χρόνος αυτός θεωρείται αρκετά μικρός έτσι ώστε να μπορούμε με ασφάλεια να θεωρήσουμε ότι κατά την διάρκεια της καταγραφής η ταχύτητα του ανέμου και η κατάσταση της θάλασσας 'sea state' ήταν σχεδόν ίδια για όλες τις γωνίες σάρωσης.



Εικόνα Δ-6, Κατακόρυφη κίνηση του ελικοπτερου για σάρωση γωνιών από  $3^\circ$  έως  $55^\circ$

Την πρώτη μέρα 23/9/2014 ο άνεμος έπνεε από  $10m/s$  έως το πολύ  $12m/s$ . Στην εικόνα Δ-7 παρουσιάζεται η εικόνα της θάλασσας όπως φωτογραφήθηκε μέσα από το ελικόπτερο κατά την πρώτη ημέρα του πειράματος.

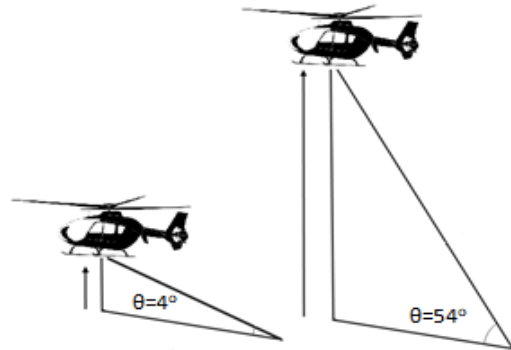


Εικόνα Δ-7. Φωτογραφία της θάλασσας στις 23/9 με ταχύτητα ανέμου  $10-12m/s$

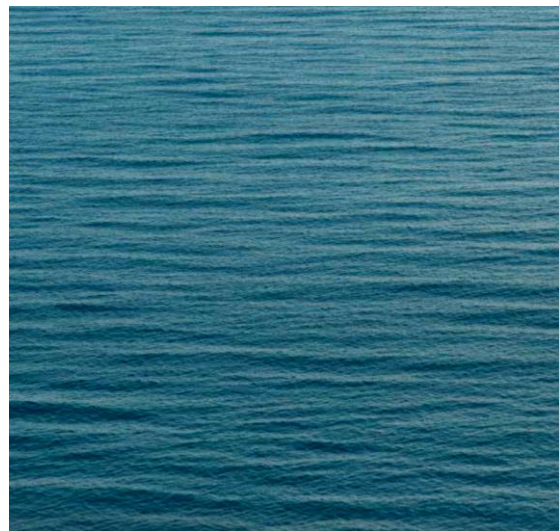
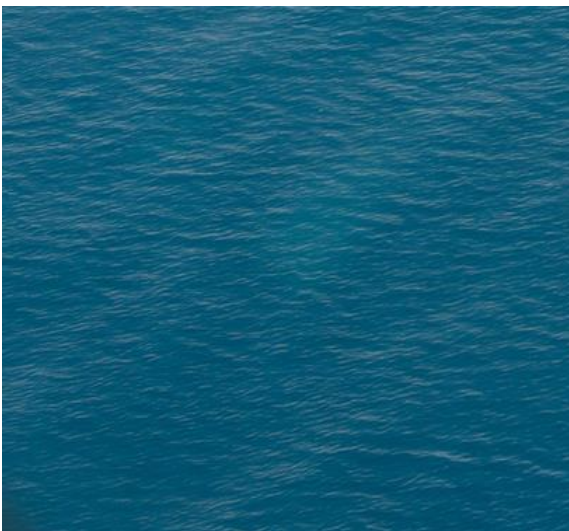
#### Δ.1.2.2 2<sup>η</sup> ημέρα μετρήσεων (24/9), θάλασσα ήρεμη.

Κατά την διάρκεια των μετρήσεων της δεύτερης ημέρας ο χειριστής του ελικοπτερου έκανε ακριβώς τους ίδιους χειρισμούς με την πρώτη ημέρα κρατώντας σταθερό το αζιμούθιο του ελικοπτερου (εντός  $20^\circ$ ) με κατεύθυνση προς τον άνεμο με το RADAR να στοχεύει την θαλάσσια επιφάνεια από  $4^\circ$  έως  $54^\circ$ , βλ. εικόνα Δ-8.

Την δεύτερη ημέρα 24/9/2014 ο άνεμος έπνεε από  $1m/s$  έως το πολύ  $2m/s$ . Η ταχύτητα του ανέμου και αντιστοίχα και η κατάσταση της θάλασσας 'sea state' ήταν σχεδόν ίδια για όλες τις γωνίες σάρωσης. Σύμφωνα με τις πληροφορίες που συλλέχθηκαν κατά την διάρκεια των καταγραφών του πειράματος την 2<sup>η</sup> ημέρα υπήρχαν στιγμές που ο άνεμος έσβηνε εντελώς προς στιγμήν δημιουργώντας σχεδόν κατοπτρικές συνθήκες και μια θαλάσσια επιφάνεια απόλυτης ηρεμίας και στιγμές που η θαλάσσια επιφάνεια εμφάνιζε μια ελαφρά ρυτίδωση και ως εκ τούτου η ανακλαστικότητα της θαλάσσιας επιφάνειας την δεύτερη ημέρα του πειράματος εμφάνιζε υψηλή ευαισθησία στις αλλαγές του ανέμου, βλ εικόνα Δ-9.



Εικόνα Δ-8. Κατακόρυφη κίνηση του ελικοπτερου για σάρωση γωνιών από  $4^\circ$  έως  $54^\circ$



Εικόνα Δ-9, Φωτογραφίες της θαλάσσιας επιφάνειας στις 24/9.  
Αριστερά γαλήνια, δεξιά ελαφρώς ρυτιδωμένη

### Δ.1.3. Χαρακτηρισμός ‘sea state’ με βάση την ταχύτητα του ανέμου.

Στον πίνακα Δ-1 παραθέτω τον συσχετισμό μεταξύ της ταχύτητας του ανέμου (κλίμακα μποφόρ) που επικρατεί σε μια θαλάσσια περιοχή και την κατάσταση της θάλασσας ‘sea state’ με βάση την κωδικοποίηση που χρησιμοποιεί ο Παγκόσμιος Μετεωρολογικός Οργανισμός (WMO), Manual on Codes Volume I.1, Annex II, πίνακας 3700.

Sea State:

Beaufort Number	Wind Speed Range (knots)	Sea State	Wave Heights Range (m)
1	0-3	1	0-0.1
2	4-6		
3	7-10	2	0.1-0.5
4	11-16	3	0.5-1.25
5	16-21	4	1.25-2.5
6	22-27	5	2.5-4.0
7	28-33	6	4.0-6.0
8	34-40		
9	41-47		
10	48-55	7	6.0-9.0
11	56-63	8	9.0-14.0
12	>63	>8	>14

Πίνακας Δ-1. Συσχέτιση κλίμακας ανέμων ‘Beaufort’, με ταχύτητα ανέμου σε κόμβους, ύψος κύματος και ‘Sea State’

Για τις συγκεκριμένες ημέρες διεξαγωγής του πειράματος NEMO2014, με βάση τα στοιχεία που μας γνωστοποιήθηκαν από το Νορβηγικό Ίδρυμα Αμυντικών Ερευνών (FFI), την 1<sup>η</sup> μέρα (23/9) οι άνεμοι έπνεαν με ταχύτητα από 10m/s έως το πολύ 12m/s ενώ την 2<sup>η</sup> ημέρα (24/9) οι άνεμοι έπνεαν με ταχύτητα 1m/s έως το πολύ 2m/s. Δεδομένου ότι ο κόμβος ‘knot’ αντιστοιχεί σε 1852m/3600sec, ήτοι 1m/s αντιστοιχεί σε 1,94Knots βρίσκω ότι την 1<sup>η</sup> ημέρα είχαμε ταχύτητες ανέμου από 19,4Kn έως 23,3Kn ενώ την 2<sup>η</sup> ημέρα μεταξύ 1.94Kn με 3.88Kn. Στον πίνακα σημειώνω σε κύκλο τις ταχύτητες ανέμου και τα ‘Sea State’ στο οποίο αντιστοιχούν.

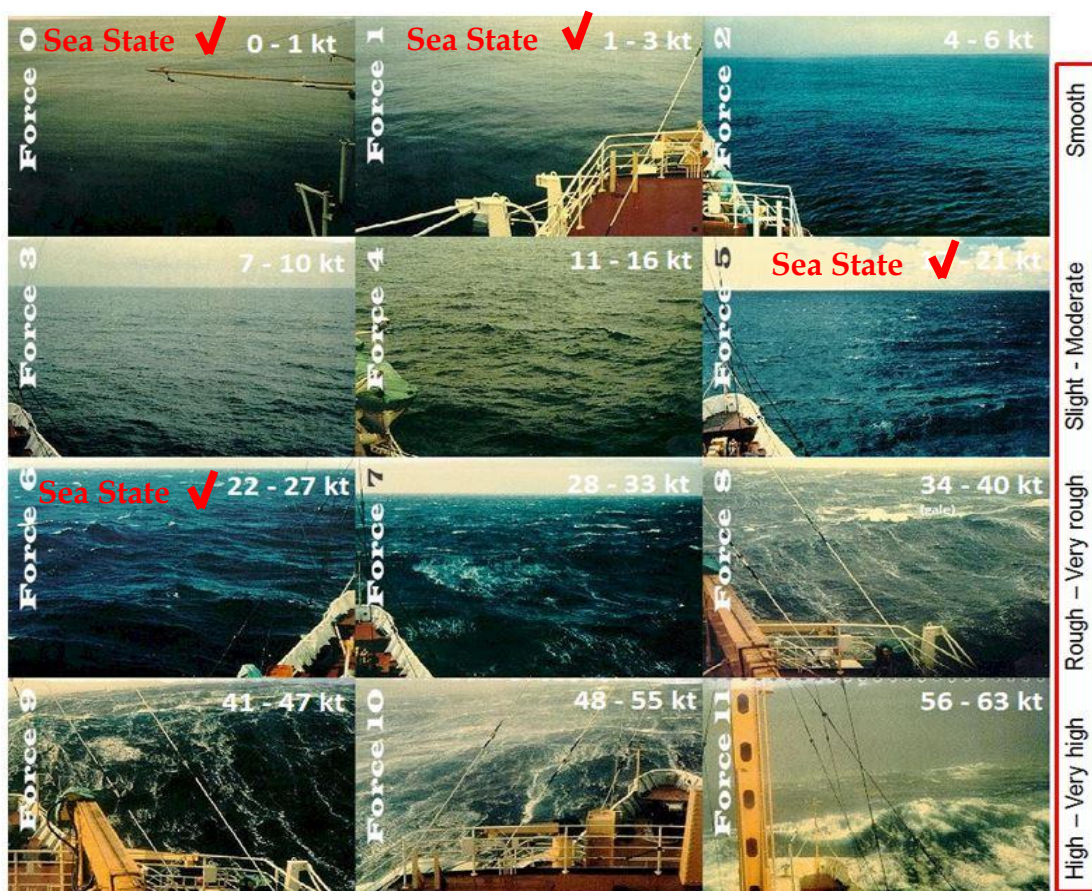
Να σημειώσω εδώ ότι τα ύψη κύματος που αναφέρονται στον πίνακα αφορούν καθαρά ανεμογενή κύματα, σε ανοικτό πέλαγος και σε πλήρως ανεπτυγμένη θάλασσα. Γνωρίζουμε όμως, από παρατηρήσεις που συνόδευαν το πείραμα NEMO2014 η θάλασσα δεν ήταν πλήρως ανεπτυγμένη λόγω της σχετικής γειτνίασης του σημείου του πειράματος με τον κόλπο του Τάραντα σε συνδυασμό με την κατεύθυνση του ανέμου που έπνεε από την ξηρά προς τη θάλασσα, βλ. εικόνα Δ-5. Έτσι τα ύψη των κυμάτων ήταν μικρότερα και οξύτερα και το ‘sea state’ παρά το ότι οι άνεμοι ξεπερνούσαν τους 21Kn και έφταναν έως και τους 23,2Kn, έφτασε μόνο οριακά την κατάσταση ‘sea state’ 5, βλ. και εικόνα Δ-7.

Με βάση λοιπόν τις ταχύτητες του ανέμου και έχοντας υπόψη τις παραπάνω παρατηρήσεις σε συνδυασμό με τον πίνακα Δ-1 καταλήγω για την 1η ημέρα διεξαγωγής του πειράματος η θαλάσσια επιφάνεια βρισκόταν σε 'sea state' 4 έως 5 ενώ την 2η ημέρα διεξαγωγής του πειράματος η θαλάσσια επιφάνεια βρισκόταν σε 'sea state' 1. Στο παρακάτω πίνακα με κόκκινο χρώμα συνοψίζω τα δεδομένα για την 1<sup>η</sup> ημέρα και με μπλε χρώμα τα δεδομένα για την 2<sup>η</sup> ημέρα.

Πίνακας Δ-2.

Συσχέτιση ημέρας διεξαγωγής του πειράματος με κατάσταση θαλάσσιας κυμάτωσης 'sea state'

Ημέρα διεξαγωγής πειράματος	Sea State WMO	Χαρακτηρισμός WMO
<i>1<sup>η</sup> ημέρα 23/9</i>	<i>4</i>	<i>Ταραγμένη</i>
	<i>5</i>	<i>Κυματώδης</i>
<i>2<sup>η</sup> ημέρα 24/9</i>	<i>1</i>	<i>Γαλήνια</i>
		<i>Ρυτιδωμένη</i>



Εικόνα Δ-10. Εικόνες θαλάσσιας κατάστασης ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου

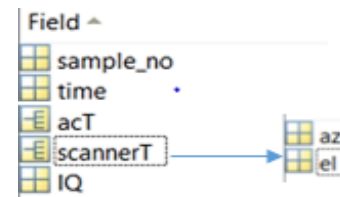
## Δ.2. Λήψεις μετρήσεων - αρχεία καταγραφής πειράματος NEMO

### Δ.2.1 Περιεχόμενα και μορφή των δεδομένων καταγραφής

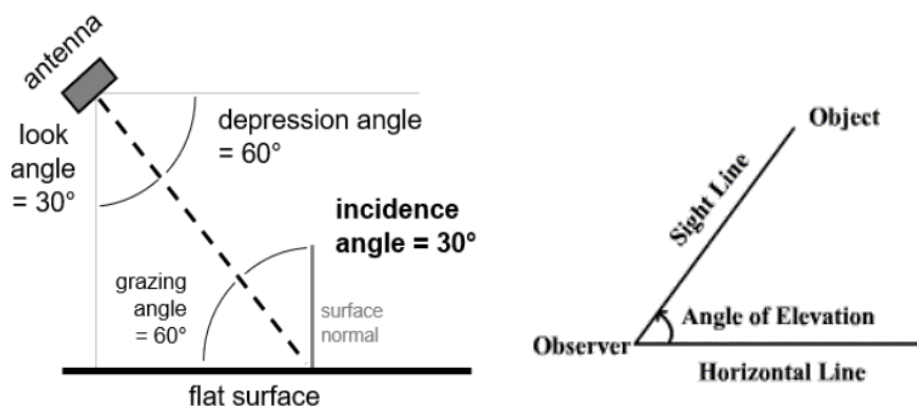
Οι καταγραφές δόθηκαν σε μορφή .bin αρχείων τα οποία περιείχαν SAR raw data ακολουθώντας το πολύ συγκεκριμένο 'format' του PicoSAR.

Με την βοήθεια προγράμματος που φτιάχτηκε στο Matlab, τα αρχεία .bin των καταγραφών του πειράματος μετατράπηκαν σε 'm-files' κρατώντας προς περαιτέρω ανάλυση μόνο τα πεδία που σημειώνω στην εικόνα Δ-11

Για κάθε οπισθοσκεδαζόμενο ΗΜ κύμα αποθηκεύτηκε στη βάση δεδομένων το μιγαδικό σήμα (I, Q) *baseband in-phase* και *quadrature-phase* του δέκτη και ταυτόχρονα καταχωρήθηκε ο αριθμός του δείγματος (sample\_no), ο χρόνος καταχώρησης, οι συντεταγμένες του αεροσκάφους (acT) καθώς και η διόπτευση του RADAR (az, el). Ειδικά όσο αναφορά την γωνία αζιμουθίου (az) και την γωνία ανύψωσης (el), αυτές κατεγράφησαν με μεγάλη ακρίβεια αφού το RADAR με το οποίο διεξήχθη το πείραμα ήταν RADAR «ενεργητικής» ηλεκτρονικής σάρωσης 'Active Electronically Scanned Array' (AESA). Να σημειώσω εδώ ότι το πεδίο που στο αρχείο καταγραφών δίνεται ως 'elevation angle' περιέχει αρνητικές τιμές και αυτό γιατί το συγκεκριμένο RADAR τεχνολογίας AESA μπορεί να 'κοιτάξει' είτε με θετική είτε με αρνητική τιμή 'elevation angle'. Στο πείραμα κοιτάει προς τα κάτω (αρνητικές τιμές) και όπως δείχνω στην εικόνα Δ-12 στην περίπτωση του πειράματος όπου το RADAR είναι ένα αερομεταφερόμενο (επί ελικοπτέρου) SAR το συγκεκριμένο πεδίο 'el' αντιστοιχεί κατά απόλυτο τιμή στην γωνία 'depression angle' και κατ' επέκταση μας πληροφορεί για την γωνία grazing angle εφόσον η επιφάνεια που κοιτά το RADAR είναι μια επίπεδη επιφάνεια.



Εικόνα Δ-11. Πεδία ενδιαφέροντος από τα αρχεία καταγραφής .bin



Εικόνα Δ-12. Σχέση μεταξύ 'depression angle' και 'elevation angle'

### Δ.2.1 Ρυθμός καταγραφής και όγκος παραγόμενων δεδομένων.

Οι μετρήσεις έντασης των ΗΜ, σήμα (I, Q) στο αρχείο καταγραφής σημειώνονται με την ένδειξη 'shortreal', σύμφωνα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά που δόθηκαν από το Νορβηγικό Ινστιτούτο Αμυντικών Ερευνών, η οποία αντιστοιχεί στην μορφή C float δηλαδή *single precision (32 bit) floating point data type* ενώ αντίστοιχα η μορφή real αντιστοιχεί με C double δηλαδή *double precision (64 bit) floating point data type*. Με PRF=1kHz το RADAR παράγει καταγραφές με ρυθμό ένα 'range profile' ανά ms. Το κάθε 'range profile' αποτελείται από 574 'range bin' με συνολικό *pulse width=12μs*.

Το RADAR PicoSAR, από τις καταγραφές που διατέθησαν, φαίνεται ότι παράγει ένα αρχείο τύπου bin κάθε 98 δευτερόλεπτα. Με το *format* που ανέλυσα παραπάνω ο όγκος των δεδομένων που παράγονται κάθε 98 δευτερόλεπτα είναι περί τα 452,870kB. Συνολικά για τα περίπου 19 λεπτά πτήσης παρήχθησαν 4,5GB SAR raw data.

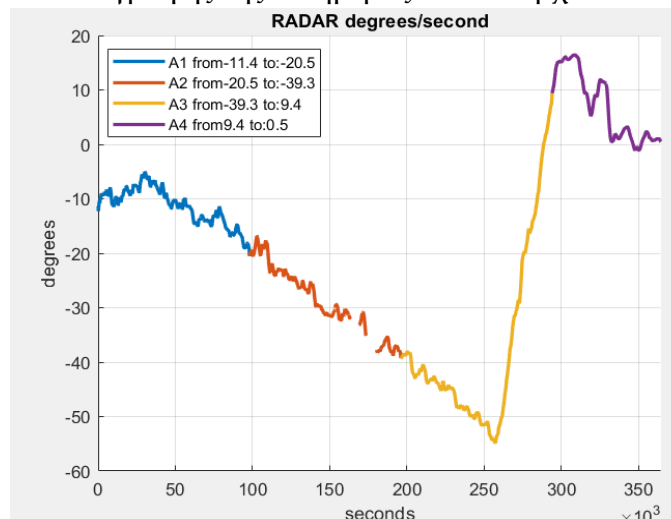
Στο παρακάτω πίνακα είναι τα αρχεία καταγραφής όπως αυτά μας δόθηκαν σε μορφή .bin και τα μετατρέψαμε σε μορφή .mat και δίπλα σε κάθε αρχείο σημειώνω τον ακριβή αριθμό των ms που περιέχουν καθώς και αθροιστικά το σύνολο των λεπτών πτήσης για κάθε ημέρα.

Πίνακας Δ-3.

Το σύνολο των αρχείων καταγραφής από την 1<sup>η</sup> και 2<sup>η</sup> ημέρα του πειράματος

1η ημέρα 23/9	A1	20140923_Fixed_150_12.36.44_12.38.22.mat	1	98000 ms	1,63 min
	A2	20140923_Fixed_150_12.38.23_12.40.01.mat	98001	196000 ms	3,27 min
	A3	20140923_Fixed_150_12.40.02_12.41.40.mat	196001	294000 ms	4,90 min
	A4	20140923_Fixed_150_12.41.41_12.42.51.mat	294001	364486 ms	6,07 min
2η ημέρα 24/9	B1	20140924_Fixed_150_09.49.54_09.51.32.mat	1	98000 ms	1,63 min
	B2	20140924_Fixed_150_09.51.33_09.53.11.mat	98001	196000 ms	3,27 min
	B3	20140924_Fixed_150_09.53.12_09.54.50.mat	196001	294000 ms	4,90 min
	B4	20140924_Fixed_150_09.54.51_09.56.29.mat	294001	392000 ms	6,53 min
	B5	20140924_Fixed_150_09.56.30_09.58.08.mat	392001	490000 ms	8,17 min
	B6	20140924_Fixed_150_09.58.09_09.59.47.mat	490001	588000 ms	9,80 min
	B7	20140924_Fixed_150_09.59.48_10.01.26.mat	588001	686000 ms	11,43 min
	B8	20140924_Fixed_150_10.01.27_10.03.05.mat	686001	784000 ms	13,07 min

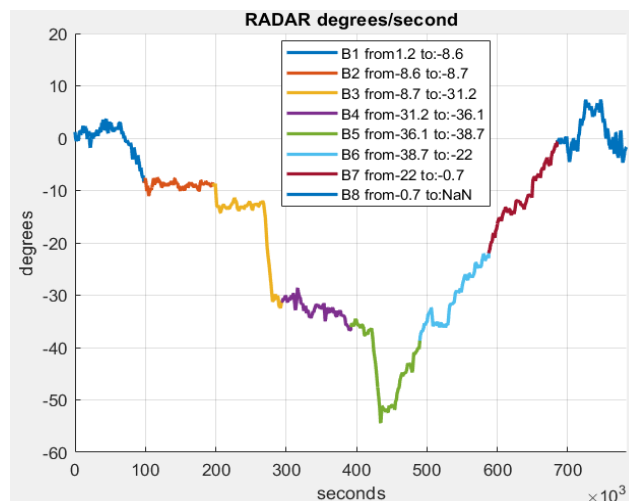
Τα αρχεία A1 έως A4 αφορούν τα αρχεία καταγραφής της 1<sup>ης</sup> ημέρας ενώ τα αρχεία B1 έως B8 της 2<sup>ης</sup> ημέρας. Τα όποια κενά εμφανίζονται στην γραμμή του διαγράμματος αντιστοιχούν σε διαλείψεις (μηδενικό περιεχόμενο) που λόγω κάποιου τεχνικού προβλήματος δημιουργήθηκαν κατά την καταγραφή του PicoSAR και αφού εντοπίστηκαν αφαιρέθηκαν από τα τελικά προς επεξεργασία διαθέσιμα στοιχεία.



Εικόνα Δ- 13. γωνίες - κίνηση ελικοπτερού την 1<sup>ης</sup> ημέρα

Στις εικόνες Δ-13 και Δ-14 απεικονίζω με διαφορετικό χρώματα τις γωνίες λήψης που περιέχουν τα αντίστοιχα αρχεία, βλ. πίνακα Δ-3 του πειράματος ως προς τον χρόνο καταγραφής.

Παρατηρούμε ότι την πρώτη ημέρα όπου έπνεαν ισχυροί άνεμοι, το ελικόπτερο έδωσε μια καταγραφή με 6,07 λεπτά πτήσης (364,486ms) ενώ την δεύτερη ημέρα που δεν υπήρχε σχεδόν καθόλου άνεμος το ελικόπτερο παρέμεινε στον αέρα περισσότερο χρόνο δίνοντάς μας μια καταγραφή της τάξης των 13 λεπτών πτήσης (784,000ms).



Εικόνα Δ-14. γωνίες -κίνηση ελικοπτερού- την 2<sup>ης</sup> ημέρα

Συνολικά κατά την διάρκεια του πειράματος NEMO 2014 παρήχθησαν για επεξεργασία 364,486 'range profiles' για την 1η ημέρα με την κυματώδη θάλασσα και 784,000 range profiles για την 2η ημέρα με την ήρεμη θάλασσα. Κάθε 'range profile' αποτελείται από 574 'range bin' και για κάθε ένα από αυτά τα 'range bin' έχει καταγραφεί με ακρίβεια *shortreal data type* οι τιμές I, Q των οπισθοσκεδαζόμενων ΗΜ κυμάτων σε μορφή μιγαδικού αριθμού  $I+jQ$ . Για κάθε range profile έχει καταγραφεί ένας αύξων αριθμός 'sample no', η γωνία 'grazing angle' καθώς και ο χρόνος την στιγμή της μέτρησης.

Με τα δεδομένα ενδιαφέροντος, βλ. πεδία εικόνας Δ-11) σχηματίζεται ένας πίνακας για κάθε ημέρα του πειράματος NEMO, βλ. εικόνα Δ-15) όπου στην διάσταση των στηλών έχουμε τον χρόνο καταγραφής, SAR 'slow time' και στην διάσταση των γραμμών έχουμε



αποθηκευμένες τις εξής πληροφορίες: στην 1η γραμμή είναι ο αύξων αριθμός της καταγραφής *'sample no'*, στην 2η γραμμή είναι ο αριθμός των *'radar hits'* από την συγκεκριμένη γωνία, στην 3η γραμμή είναι τιμή της γωνίας ανύψωσης του ελικοπτερου (γωνία *'grazing angle'* του PicoSAR) και από την 4η γραμμή έως την 577η ξεκινούν οι τιμές των μετρήσεων της ΗΜ έντασης για κάθε *'range bin'* του εκάστοτε *'range profile'*. Η τιμή της έντασης στο κάθε *'range bin'* προκύπτει από την σχέση  $Amplitude = \sqrt{I^2 + Q^2}$ , όπου τα I, Q είναι τιμές του σήματος λήψης στο δέκτη για κάθε ένα από αυτά τα 574 *'range bin'*.

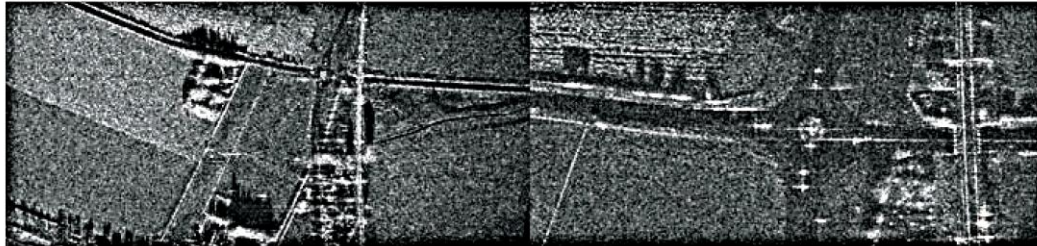
	297467	297468	297469	297470	297471	297472	297473
1	298819	298820	298821	298822	298823	298824	298825
2	10	10	10	10	10	10	10
3	-30.1305	-30.1305	-30.1305	-30.1305	-30.1305	-30.1305	-30.1254
4	93	150.9868	22.0227	147.1224	73.0616	118.1059	141.4108
5	80.4114	87.4757	72.6705	72.1249	30.4138	284.4820	61.4003
6	80.3990	69.5270	104.3504	177.3697	161.1490	235.2807	94.0479
7	113.0044	151.9210	28.3019	135.7940	293.0188	79.7559	132.0038
8	210.2023	149.2515	85.7963	38.8330	178.8771	140.2890	125.3994
9	295.9544	122.5887	157.1560	67.8970	58.6003	103.5809	105.3423
10	58.5235	156.2050	166.1084	67.1193	91.2634	182.4774	52.6973
11	50.3289	40.8044	81.4002	147.3533	79.6116	38.8330	131.7460
12	40.8044	184.3909	65.3070	190.5177	103.9663	118.2582	115.8016
13	31.1448	140.6165	170.8567	230.5558	261.6295	126.9055	263.0589
14	78.6448	171.5925	191.9427	204	269	166.3731	67.2681
15	125.1000	62.6817	162.9356	137.8840	102.4890	183.4475	182.2224
16	314.0860	150.2065	99.7447	179.6274	33.5410	203.6664	154.6383
17	97.9439	212.1320	41.7732	87.6185	129.6341	189.0026	195.3586
18	209.0215	246.1747	58.0517	75.2861	240.5203	25.9615	240.8423
19	151.3275	320.9751	29.6816	68.4763	190.2630	44.2832	237.6068
20	130.5450	250.4915	63.3246	113.6002	105.0762	93.8616	178.6001
21	148.5194	229.2706	57.9741	161.2979	213.1901	102.3963	177.4289
22	318.2468	290.1724	123.1666	229.0546	227.0198	111.8302	201.1219
23	185.8844	121.1033	229.7325	268.8289	97.6371	68.2495	84.4038
24	276.4435	126.6057	227.5610	308.5207	80.7527	40.3113	130.1768
25	174.7713	99.4887	102.3426	136.5650	24	120.0667	154.8709
26	133.8096	118.8024	214.8697	45.6508	190.7905	64.0078	192.6266
27	72.1110	152.8398	151.5586	151.5586	258.8165	28.6007	171.0117

Εικόνα Δ-15. Μορφή πίνακα Matlab με *'raw data'* της καταγραφής του PicoSAR.

Άμεσα γίνεται αντιληπτό ότι για την 1η ημέρα μιλάμε για πίνακες της τάξης του  $364,486 \times 577$  (210εκ. στοιχεία μετρήσεων) και για την 2η ημέρα  $784,000 \times 577$  (450εκ στοιχεία μετρήσεων). Για να είναι εφικτή μια διαδραστική επεξεργασία, παρουσίαση και σύγκριση μεταξύ των πειραμάτων της 1η και 2η ημέρας απαιτήθηκε η δημιουργία ενός εξειδικευμένου λογισμικού το *'SARrawdataAnalyzer'* το οποίο δημιούργησα κατά την διάρκεια της παρούσας διδακτορικής διατριβής και παρουσιάζω αναλυτικά στο Παράρτημα Γ.

Παρακάτω παραθέτω μια μπροσούρα της κατασκευάστρια εταιρείας Leonardo του RADAR PICOSAR που δίνει πληροφορίες για τα γενικότερα τεχνικά χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου τύπου RADAR

## PICOSAR



PicoSAR delivers a high resolution Synthetic Aperture Radar (SAR) imaging and Ground Moving Target Indication (GMTI) capability that permits new and existing platforms to easily acquire a true, all-weather ground mapping and surveillance capability. Its compact size, low weight and low power consumption permit installation in parallel with electro-optical/infrared sensors even on platforms with limited payloads.

### TECHNICAL SPECIFICATION

Frequency	X band
Scan Coverage	±45°
Maximum Range	20km (resolution dependant)
Map Resolution	<1m
Cooling	Unconditioned Air (existing internal fans)
Weight	10kgs
Input Power	<300W 28V DC

### DIMENSIONS

	Antenna	Processor
Height	220 mm	200 mm
Width	310 mm	200 mm
Depth	85 mm	125 mm
	(140 mm max)	
Electrical Interface Connectors	Global Positioning System (GPS) antenna feed	
	28V DC power and Ethernet	

### CAPABILITIES

Ground Mapping	Strip SAR
	Spotlight SAR
Moving Target Detection	GMTI

### BACKGROUND

Our company has been at the forefront of airborne radar capability since the 1950s when the AI23 radar became the world's first high power monopulse radar to enter squadron service.

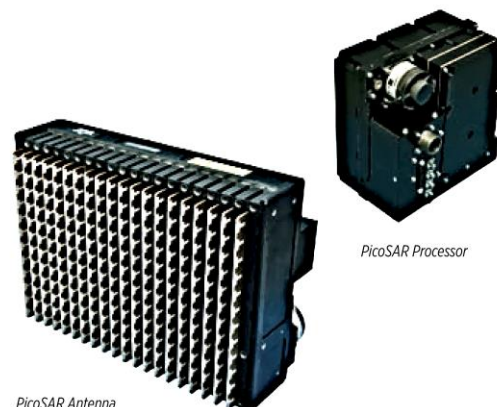
To maintain our leading position, we have been developing AESA technology since the early 1990s, and we now have a range of AESA products available to meet the airborne radar market requirements.

PicoSAR is one of a family of AESA radars that includes the Vixen family of fire control radars and the Seaspray family of surveillance radars which are in operation in the United States, on the USCG HC-130H aircraft and under contract for the UK Royal Navy Surface Combatant Maritime Rotorcraft (Future Lynx).

PicoSAR utilises common technology and techniques used on our other radar programmes.

### RELIABILITY

The PicoSAR radar minimises the impact of transmitter and receiver failure by using many solid state Transmit/Receive Modules within a fixed array. As a result component failures within the array demonstrate graceful performance degradation rather than complete system failure, thereby delivering the highest levels of operational availability.



PicoSAR Antenna

PicoSAR Processor



2017 © Leonardo MW Ltd

For more information please email [informarketing@leonardocompany.com](mailto:informarketing@leonardocompany.com)  
 Leonardo MW Ltd  
 Crewe Toll - 2 Crewe Road North - Edinburgh - EH5 2XS - United Kingdom - Tel: +44 (0) 131 3322411  
 This publication is issued to provide outline information only and is supplied without liability for errors or omissions. No part of it may be reproduced or used unless authorised in writing. We reserve the right to modify or revise all or part of this document without notice.

[leonardocompany.com](http://leonardocompany.com)

ASS: MM07724 1-17

Εικόνα Δ-16. PicoSar Radar – brochure της κατασκευάστριας εταιρείας Leonardo.

## Κατάλογος Δημοσιεύσεων Συγγραφέα

### Δημοσιεύσεις σε Διεθνή Επιστημονικά Περιοδικά.

- [1] **A. Kotopoulos**, A. Malamou, G. Pouraimis, E. Kallitsis, and P. V. Frangos, “Characterization of Rough Fractal Surfaces from Backscattered Radar Data”, *Electronics and Electrical Engineering Journal*, vol. 22, no. 6, pp. 61 - 66, Dec. 2016. doi:<https://doi.org/10.5755/j01.eie.22.6.17226>
- [2] G. Pouraimis, **A. Kotopoulos**, E. Kallitsis and P. Frangos, “Characterization of Three Dimensional Rough Fractal Surfaces From Backscattered Radar Data”, *Electronics and Electrical Engineering Journal*, vol.23, no. 4, pp.45 - 50, Jul. 2017. doi:<https://doi.org/10.5755/j01.eie.23.4.18721>
- [3] N. Ampilova, I. Soloviev, **A. Kotopoulos**, G. Pouraimis, P. Frangos , “On the Analysis of Sea Surface Images related to Sea State Determination by Multifractal Methods’, *Applied Electromagnetism Journal*, vol. 21, no. 1, pp. 23 – 30, Dec. 2019. link: <http://jae.ece.ntua.gr/archive/2019/JAE>
- [4] **A. Kotopoulos**, B. Massinas, G. Pouraimis and P. Frangos, “Sea state characterization using fractal techniques on experimental one – dimensional radar signatures”, *Physical Sciences and Technology*, vol. 7, no. 1 – 2, pp. 31 - 37. May 2020. doi: <https://doi.org/10.26577/phst.2020.v7.i1.05>
- [5] G. Pouraimis, **A. Kotopoulos**, B. Massinas and P. Frangos, “Sea State Characterization using Experimental One – Dimensional Radar Signatures and Fractal Techniques”, *Electronics and Electrical Engineering Journal*, vol. 27, no. 3, pp. 71-77, Jun. 2021. doi:<https://doi.org/10.5755/j02.eie.28906>
- [6] **A. Kotopoulos**, B. Massinas, G. Pouraimis and P. Frangos, “Sea State Characterization using Experimental Synthetic Aperture Radar Raw Data in Two-Dimensions and the Modified Fractal Signature Method”, *Electronics and Electrical Engineering Journal*, vol. 28, no. 6, pp. 35 - 41, Dec. 2022. doi: <https://doi.org/10.5755/j02.eie.31502>

### Παρουσιάσεις σε Διεθνή Επιστημονικά Συνέδρια

- [1] E. Kallitsis, A. Karakasiliotis, **A. Kotopoulos** and P. Frangos, “A DESED enhanced Slant Range Rotational Compensation algorithm for Novel Fine Range Profile Alignment in Air – Target ISAR Imaging”, *9th International Conference on Communications, Electromagnetics and Medical Applications (CEMA14)*, Sofia, Bulgaria, 16-18/10/2014.

- [2] **A. Kotopoulos**, A. Malamou, G. Pouraimis, E. Kallitsis and P. Frangos, "Characterization of Fractal Surfaces From Backscattered Radar Data" *SET 215 Working Group on Model – based SAR Automatic Target Recognition, Istanbul, Turkey, 15-16/12/2015*.
- [3] A. Malamou, **A. Kotopoulos**, G. Pouraimis, E. Kallitsis, and P. Frangos, 'An Autofocusing Post-Processing Algorithm for SAR Image Optimization based on Image Entropy Minimization - Modified Fractal Signature (MFS) Method for SAR Terrain Classification', *SET 215 Working Group on 'SAR radar techniques', Rennes, France, June 28 – July 1, 2015*.
- [4] **A. Kotopoulos**, A. Malamou, G. Pouraimis, E. Kallitsis and P. Frangos, "Characterization Of Fractal Surfaces From Backscattered Radar Data" "*Electronics 2016*" *20<sup>th</sup> International Conference, Palanga, Lithuania, 13-15/6/2016*
- [5] **A. Kotopoulos**, A. Malamou, G. Pouraimis, E. Kallitsis and P. Frangos "Characterization Of Fractal Surfaces From Backscattered Radar Data" *11<sup>th</sup> International Conference on Communications, Electromagnetics and Medical Applications (CEMA16), Athens, Greece, 13-15/10/2016*.
- [6] **A. Kotopoulos**, G. Pouraimis, A. Malamou, E. Kallitsis, and P. Frangos, 'Characterization of rough surfaces from backscattered SAR radar data in noisy conditions', *SET 215 meeting, Athens, Greece, 9-10/11/2016*.
- [7] **A. Kotopoulos**, G. Pouraimis, A. Malamou, E. Kallitsis, and P. Frangos, 'Characterization of rough surfaces from backscattered SAR radar data in noisy conditions', *SET 215 meeting, Copenhagen, Denmark, May 2018*.
- [8] **A. Kotopoulos**, G. Pouraimis, A. Malamou, E. Kallitsis, and P. Frangos, 'Characterization of rough surfaces from backscattered SAR radar data in noisy conditions', *Erasmus visit and presentation by Prof. P. Frangos to the 'Military University of V. Turnovo', Sofia, Bulgaria, May 2018*.
- [9] G. Pouraimis, **A. Kotopoulos**, Th. Lymperopoulos, N. Ampilova, I. Soloviev, E. Kallitsis and P. Frangos, 'Sea state characterization using experimental one – dimensional radar signatures at X-band and fractal techniques', *CEMA'18 Conference, Sofia, Bulgaria, 18-20/10/2018*.
- [10] G. Pouraimis, **A. Kotopoulos**, N. Ampilova, I. Soloviev, E. Kallitsis and P. Frangos, 'Sea state determination using normalized experimental one – dimensional radar signatures at X-band and fractal techniques', *CEMA'19 Conference, Sofia, Bulgaria, 17 - 18/10/2019*.

- [11] N. Ampilova, I. Soloviev, **A. Kotopoulos**, G. Pouraimis and P. Frangos, 'On the application of multifractal methods for the analysis of sea surface images related to sea state determination', *CEMA'19 Conference, Sofia, Bulgaria, 17 - 18/10/2019*
- [12] G. Pouraimis, **A. Kotopoulos** and P. Frangos, 'Sea State Characterization using Normalized Experimental One – Dimensional Radar Signatures and Fractal Techniques', *CEMA'21 Conference by 'webex', Athens, Greece, 21/10/2021*.
- [13] G. Pouraimis, **A. Kotopoulos**, B. Massinas and P. Frangos, 'Sea State Characterization using Experimental One – Dimensional Radar Signatures and Fractal Techniques', *Electronics' 2021 International Conference, 14-16/6/2021 (Best Presentation Award for P. Frangos)*.