



ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΕΥΕΛΠΙΔΩΝ
Τμήμα Στρατιωτικών Επιστημών

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΔΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ
ΣΧΕΔΙΑΣΗ & ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
(SYSTEMS ENGINEERING)
(ΠΔ 96/2015/ΦΕΚ 163Α'/20.08.2014)



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής &
Διοίκησης

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Μοντελοποίηση Εναέριου Στόχου
και Εκτίμηση της Ραδιοδιατομής του (RCS):
Εφαρμογή στο Ελικόπτερο NH90

Υπό:
Ιωάννη Γρηγορίου Γιαβάσογλου
Α.Μ.: 2015018004

Ιανουάριος 2018

Η Μεταπτυχιακή Διατριβή του Ιωάννη Γρηγορίου Γιαβάσογλου,
εγκρίνεται:

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Κωνσταντίνος Ζηκίδης (Επιβλέπων)

Στυλιανός Τσαφάρáκης

Κωνσταντίνος Σταμούλης

ΣΕΛΙΔΑ ΣΚΟΠΙΜΑ ΚΕΝΗ

© Copyright υπό
Ιωάννη Γιαβάσογλου
Έτος 2018

Στην Κωνσταντίνη

ΣΕΛΙΔΑ ΣΚΟΠΙΜΑ ΚΕΝΗ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Εκφράζω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή, κύριο Κωνσταντίνο Ζηκίδη για τις γνώσεις του, το ενδιαφέρον του και τον πολύτιμο χρόνο που μου αφιέρωσε, προκειμένου να εκπονηθεί η διατριβή. Επιπλέον, στον κύριο Νικόλαο Δάρα, ο οποίος οποιαδήποτε στιγμή χρειάστηκα τη βοήθειά του, την τελευταία τριετία στάθηκε πραγματικά στο πλάι μου, προσφέροντας άμεσες λύσεις κατά τη θητεία μου στο ΠΜΣ. Για όλους τους σπουδαστές της Σχολής και του μεταπτυχιακού τμήματος ο κύριος Δάρας δίνει εκτός από τον χρόνο του, τον καλύτερο εαυτό του.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στην τριάδα αγαπητών συμφοιτητών μου, Φώτιο Πανταζόγλου, Γεώργιο Γαϊτανάκη και Εύα Αλεξοπούλου, οι οποίοι πορεύτηκαν μαζί μου στην προσπάθεια ολοκλήρωσης των σπουδών και μου χάρισαν τη φιλία και τη βοήθειά τους.

Τέλος, ευχαριστώ όλο το διδακτικό προσωπικό του ΠΜΣ "Σχεδίαση και Επεξαργασία Συστημάτων", για την αξιόπενη προσπάθεια που καταβάλουν για τη διατήρηση του επιπέδου του μεταπτυχιακού υψηλό.

ΣΕΛΙΔΑ ΣΚΟΠΙΜΑ ΚΕΝΗ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο	
Αρχές Λειτουργίας Ραντάρ και Ραδιοδιατομή Στόχων	
1.1 Λειτουργία Ραντάρ	4
1.1.1 Εισαγωγικά	4
1.1.2 Η Εξίσωση Ραντάρ	7
1.1.3 Τύποι Ραντάρ	10
1.1.4 Χρήση Ραντάρ για Αμυντικούς Σκοπούς - Παραδείγματα	10
1.1.4.1 Πολυστατικά Ραντάρ	11
1.1.4.2 Ραντάρ Παθητικού – Συμφασικού Εντοπισμού	14
1.1.4.3 Συστήματα Παθητικής Ανίχνευσης	18
1.1.4.4 Ραντάρ Χαμηλών Συχνοτήτων	19
1.2 Ραδιοδιατομή Στόχων	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο	
Μοντελοποίηση Εναέριου Στόχου	
2.1 Εισαγωγή στη Μοντελοποίηση Εναέριων Στόχων	35
2.1.1 Μαθηματική Εφαρμογή της Φυσικής Οπτικής σε Μοντέλα Επιφανειών	37
2.1.2 Υπολογισμός Σκεδαζόμενου Πεδίου	38
2.1.3 Το Πρόγραμμα ROFACETS	40
2.2 Διαδικασίες Μοντελοποίησης Αεροσκαφών - Ελικοπτέρων	42
2.2.1 Κατασκευή 3D Μοντέλου από 2D Εικόνες	44
2.2.2 Μοντελοποίηση του Μαχητικού Αεροσκάφους F-16 με το Λογισμικό AUTODESK 3Ds MAX	45
2.2.3 Μοντελοποίηση Μαχητικού Αεροσκάφους F-35 με το Λογισμικό Blender 3D	50

2.2.4 Μοντελοποίηση του Πυράυλου DONG–FENG 15 με το Λογισμικό CATIA	52
2.3 Κατασκευή 3D Μοντέλου Γνωστών Διαστάσεων - Μοντελοποίηση του Ελικοπτέρου NH90 με το Λογισμικό AUTODESK 3Ds MAX	55
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο	
Διαδικασία Προσομοίωσης Εναέριου Στόχου	
3.1 Γενικά περί Προσομοίωσης Εναέριων Στόχων (για την Εκτίμηση της Ραδιοδιατομής τους)	66
3.2 Εισαγωγή Ε/Π NH90 στο Matlab και Προσομοίωση με Κώδικα ROFACETS	71
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο	
Αποτελέσματα Προσομοίωσης	
Αποτελέσματα Προσομοίωσης - Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων	76
ΕΠΙΛΟΓΟΣ	80
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	82
ΙΣΤΟΤΟΠΟΙ	84
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	
Αποτελέσματα Προσομοίωσης – Πολικά Διαγράμματα RCS	86

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή έχει ως στόχο την εκτίμηση της ραδιοδιατομής (Radar Cross Section) του ελικοπτήρου NH90, προκειμένου να αξιοποιηθεί μελλοντικά σε επιχειρησιακή χρησιμοποίηση. Η έννοια επιχειρησιακή αξιοποίηση ενός μέσου είναι πολυσύνθετη και περιλαμβάνει πολυποίκιλες γνώσεις. Ένας πιλότος Ε/Π πρέπει να είναι γνώστης των δυνατοτήτων του μέσου το οποίο χειρίζεται όσον αφορά στις επιδόσεις του, για να είναι σε θέση να εκτελεί αποδοτικούς ελιγμούς αποφυγής εμπλοκής από την εχθρική αεράμυνα. Ο όρος επιδόσεις αναφέρεται, πέρα από την ταχύτητα και την ισχύ που παρέχει σε ένα πιλότο το Ε/Π, επιπρόσθετα και στο μέγεθος της ραδιοδιατομής του καθώς και στη θερμική "υπογραφή" του.

Στην πράξη το RCS ενός αντικειμένου υπολογίζεται σε ανηχοϊκό θάλαμο, όπου το αντικείμενο τοποθετείται σε διάφορες θέσεις και ακτινοβολείται με ηλεκτρομαγνητικό κύμα, ενώ στη συνέχεια υπολογίζεται η ανακλώμενη ακτινοβολία από κάθε διεύθυνση του αντικειμένου. Στην παρούσα διατριβή, θα εκτελεστεί μοντελοποίηση του ελικοπτήρου NH90 σε ηλεκτρονικό υπολογιστή και με τη βοήθεια μίας θεωρητικής μεθόδου υπολογισμού θα εκτιμηθεί η ραδιοδιατομή του. Η θεωρητική προσέγγιση της ραδιοδιατομής ενός στόχου θα αποδώσει παραπλήσια αποτελέσματα, μεγάλης ακρίβειας σε σχέση με τα αποτελέσματα που δίδονται πραγματοποιώντας μετρήσεις σε ανηχοϊκό θάλαμο. Μέσω της εφαρμογής μοντελοποίησης και προσομοίωσης σε διάφορους τομείς, όπως η αεροπλοΐα, οι ελληνικές Ένοπλες Δυνάμεις μπορούν να αποκτήσουν σημαντικές γνώσεις επί των δυνατοτήτων ενός εναέριου μέσου, εξοικονομώντας ταυτόχρονα σημαντικούς οικονομικούς πόρους.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Από τις αρχές του 20ου αιώνα, μετά τη διαπίστωση του Marconi ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται σε μεγάλες αποστάσεις, έγινε φανερό σε όλους τους ειδικούς, το ενδεχόμενο να κατασκευαστούν διατάξεις που θα εντοπίζουν με ηλεκτρομαγνητικά κύματα τα μακρινά πλοία στη θάλασσα και τα αεροπλάνα στον αέρα. Ο σημαντικότερος σταθμός στην πορεία της τεχνολογικής εξέλιξης του ραντάρ ήταν ίσως, η κατασκευή της λυχνίας Magnetron στην δεκαετία του '30, καθώς και η εφεύρεση της Cavity Magnetron από τους Randall και Boot, στο πανεπιστήμιο του Μπέρμιγχαμ. Τα πρώτα μικροκυματικά συστήματα ραντάρ κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο ραδιοτεχνίας του MIT στις ΗΠΑ και το όνομα ραντάρ προήλθε από τις λέξεις «Radio Detection and Ranging» κατά το Β' ΠΠ.

Σήμερα υφίσταται τεράστια ποικιλία συστημάτων ραντάρ, που μεταξύ τους διακρίνονται σε κατηγορίες ανάλογα με το ποσό και το ποιόν των πληροφοριών που δίνουν στον χειριστή τους. Τα σύγχρονα αντιαεροπορικά ραντάρ εκπέμπουν και λαμβάνουν με φασικές στοιχειοκεραίες που μένουν ακίνητες, ενώ έχουν τη δυνατότητα να παρακολουθούν πάνω από 50 στόχους συγχρόνως χωρίς να διακόψουν την σάρωση του χώρου.

Λαμβάνοντας υπόψη την ολοένα αυξανόμενη βελτίωση των δυνατοτήτων των ραντάρ, οι κατασκευαστές αεροσκαφών και ελικοπτέρων με το πέρασμα των χρόνων προσαρμόστηκαν και σκέφτηκαν λύσεις αντιμετώπισης της ανεπιθύμητης για αυτούς πιθανής αποκάλυψης. Η μορφοποίηση των σχημάτων των εναέριων μέσων, σε συνδυασμό με τα χρησιμοποιούμενα υλικά κατασκευής και τα ειδικά χρώματα που μπορούν να τοποθετηθούν σε κρίσιμες επιφάνειές τους, αποδείχθηκε ότι μειώνουν σημαντικά τις πιθανότητες αποκάλυψής τους σε μακρινές αποστάσεις.

Η σημασία της εύρεσης της ενεργούς ραδιοδιατομής ενός στόχου (Radar Cross Section) -είτε είναι φίλιος είτε εχθρικός-, είναι ιδιαίτερα υψηλή καθώς προσδίδει σπουδαίο τακτικό πλεονέκτημα ως προς την αντιμετώπιση μιας απειλής.

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή θα απαντήσει στα εξής ερευνητικά ερωτήματα:

α. οι υπολογιστικές μέθοδοι υπολογισμού της ραδιοδιατομής ενός στόχου καταλήγουν σε αληθή συμπεράσματα;

β. τα αποτελέσματα της διατριβής μπορούν να λαμβάνονται υπόψη στη σχεδίαση μελλοντικών επιχειρήσεων;

γ. αναδεικνύονται οι δυνατότητες και οι αδυναμίες ως προς την αποκάλυψη του Ε/Π NH90;

Α. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

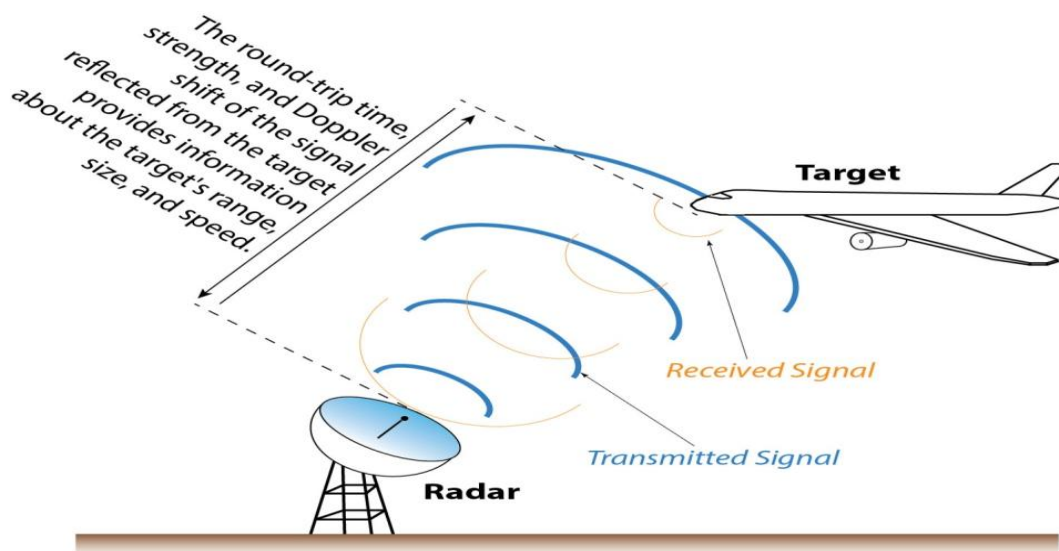
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο

Αρχές Λειτουργίας Ραντάρ και Ραδιοδιατομή Στόχων

1.1 Η λειτουργία των Ραντάρ

1.1.1 Εισαγωγικά

Ραδιοεντοπιστής ή όπως είναι ευρέως γνωστό με το διεθνές όνομα Ραντάρ, που προέρχεται από συντόμευση των αγγλικών λέξεων "RADio Detection And Ranging" και μεταφράζεται ως «ανίχνευση με ηλεκτρομαγνητικά κύματα και μέτρηση αποστάσεως», αποτελεί ένα βασικό ηλεκτρονικό σύστημα ηλεκτρομαγνητικού εντοπισμού, παρακολούθησης ακίνητων και κινητών στόχων, σε αποστάσεις και συνθήκες φωτισμού απαγορευτικές για τον απευθείας οπτικό εντοπισμό, δηλαδή με το ανθρώπινο μάτι ή και οπτικά όργανα [2].



Εικόνα 1.1 Βασική αρχή λειτουργίας συστήματος ραντάρ [3]

Η λειτουργία του ραντάρ απεικονίζεται σχηματικά στην παραπάνω Εικόνα 1.1 και μπορεί να περιγραφεί με το παρακάτω τρόπο: η κεραία του ραντάρ λειτουργώντας ως πομπός εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικό κύμα συνεχές ή με τη μορφή παλμού κάποια χρονική στιγμή t_0 . Το κύμα αυτό προσπίπτει στο στόχο (target) και μέρος της ενέργειάς που αντανακλάται πίσω είναι αυτή που ενδιαφέρει το ραντάρ. Η κεραία του δέκτη συλλέγει την ανακλώμενη ενέργεια και την αποστέλλει στον δέκτη, όπου γίνεται η επεξεργασία για να ανιχνευθεί η παρουσία του αντικειμένου και να υπολογισθούν η θέση και η σχετική ταχύτητά του. Η απόσταση από την κεραία δέκτη μέχρι το αντικείμενο-στόχο προσδιορίζεται μετρώντας τον χρόνο που χρειάζεται το σήμα να ταξιδέψει μέχρι τον στόχο και πίσω, δηλαδή $t = t_0 + \Delta t$. Η κατεύθυνση ή η γωνιακή θέση μπορεί να προσδιορισθεί από την διεύθυνση του μετώπου του κύματος που αντανακλάται από το ραντάρ [2].

Αν υπάρχει σχετική μετατόπιση μεταξύ του αντικειμένου και του ραντάρ, η ολίσθηση συχνότητας του φέροντος σήματος ανάκλασης (στην ουσία έχουμε εμφάνιση του φαινομένου Doppler) είναι ένα μέτρο της ακτινικής ταχύτητας η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να γίνει η διάκριση ανάμεσα στα κινητά από τα ακίνητα αντικείμενα [1], [2].

Οι τεχνολογίες των συστημάτων ραντάρ χρησιμοποιούν το φάσμα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων οι οποίες ξεκινούν από τις τιμές συχνοτήτων VHF στα 100MHz και επεκτείνονται μέχρι τις συχνότητες EHF στα 100GHz. Παρακάτω στον Πίνακα 1.1 παραθέτονται συνοπτικά οι συχνότητες λειτουργίας και χρήσης των ραντάρ. Να τονιστεί ότι οι χαμηλές συχνότητες του φάσματος των ραντάρ επηρεάζονται σε χαμηλό βαθμό από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, παρέχοντας πολύ καλύτερη από πλευράς εμβέλειας ανίχνευση.

Πίνακας 1.1 Ζώνες συχνοτήτων για εφαρμογές ραντάρ [4]

Συχνότητες και χρήσεις των Ραντάρ			
Σύμβολο Ζώνης	Ζώνη Συχνοτήτων f (GHz)	Μήκος Κύματος λ (cm)	Εφαρμογές
L	1,35-1,40	22,1-21,4	Διάφορα στρατιωτικά Radar
S	2,45-2,64	12,3-11,2	Radar για πολιτικές χρήσεις
S	2,7-2,9	11,1-10,4	Επιτήρηση στρατιωτικών αεροδρομίων
S	2,9-3,10	10,4-9,7	Radar για τη ναυσιπλοΐα
S	2,90-3,70	10,4-8,1	Radar για ποικίλες χρήσεις
C	4,2-4,4	7,1-6,8	Διάφορα υψομετρικά Radar
C	5,35-5,47	5,6-5,5	Radar καιρού (μετεωρολογικά)
C	5,25-5,925	5,7-5,1	Radar για ποικίλες χρήσεις
X	8,5-10,55	3,53-2,84	Radar για ποικίλες χρήσεις
X	9-9,2	3,33-3,26	Radar για προσέγγιση ακριβείας
X	9,3-9,5	3,23-3,16	Radar καιρού και ναυσιπλοΐας
X	10,525	2,85	Radar για την αστυνομία
X	8,5-10,55	3,53-2,84	Radar για ποικίλες χρήσεις

Ku	15,7-17,7	1,91-1,70	Radar για ποικίλες χρήσεις
K	24,15	1,24	Radar για την αστυνομία
K	24,25-25,25	1,24-1,19	Radar για την αεροπλοΐα
Ka	31,8-36	0,94-0,90	Radar για την αεροπλοΐα
Ka	33,4-36,0	0,9-0,83	Radar για ποικίλες χρήσεις
V	43-48	0,7-0,63	Radar για ποικίλες χρήσεις

1.1.2 Η Εξίσωση Ραντάρ

Η έκφραση μιας μαθηματικής σχέσης που να υπολογίζει την εμβέλεια R ενός ραντάρ μας αναγκάζει να θεωρήσουμε μια κεραία ως ιστροπικό ακτινοβολητή που εκπέμπει σε ιδανικές συνθήκες διάδοσης σφαιρικών κύματα. Με το τρόπο αυτό, περιοχές με την ίδια πυκνότητα ισχύος σχηματίζουν επιφάνειες σφαίρας A , οι οποίες εκφράζονται ως $A=4\pi R^2$ γύρω από την κεραία. Όσο αυξάνεται η απόσταση από την κεραία, η πυκνότητα ισχύος είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης κεραίας – στόχου [1], [2].

Από τη παρακάτω σχέση 1.1 δίνεται η πυκνότητα ισχύος κεραίας ραντάρ (μη κατευθυντικής):

$$S = \frac{P_{\Pi}}{4\pi R_1^2} \quad (1.1)$$

όπου :

P_{Π} : η εκπεμπόμενη ισχύς από τον πομπό (σε W).

R_1 : η απόσταση ραντάρ-στόχου (σε m).

Αντικαθιστούμε το όρο S με τον όρο S_{Π} και λαμβάνοντας υπόψη το κατευθυντικό κέρδος G της κεραίας, έχουμε την έκφραση της σχέσης 1.2:

$$S_{\Pi} = S \cdot G \quad (1.2)$$

Η ενέργεια P_{σ} που ανακλάται η αλλιώς ή «ηχώ» από το στόχο προς το ραντάρ είναι συνάρτηση της ραδιοδιατομής ή «ενεργού διατομής» ή «ηχώ» ραντάρ ή Radar Cross Section (RCS) του στόχου (το οποίο συμβολίζεται με σ και θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα) και εκφράζεται χρησιμοποιώντας τη σχέση 1.3 [1]:

$$P_{\sigma} = \frac{P_{\Pi}}{4\pi R_1^2} \cdot G \cdot \sigma \quad (1.3)$$

Η επιστροφή της «ηχούς» γίνεται υπό τις ίδιες συνθήκες διάδοσης στο μέσο, οπότε η πυκνότητα ισχύος S_{λ} που λαμβάνει ο δέκτης του ραντάρ θα είναι:

$$S_{\lambda} = \frac{P_{\sigma}}{4\pi R_2^2} \quad (1.4)$$

Ακόμη, λαμβάνοντας υπόψη την ενεργό επιφάνεια της κεραίας θα έχουμε:

$$A_e = \frac{\lambda^2 \cdot G}{4\pi} \quad (1.5)$$

όπου λ : το μήκος κύματος της ακτινοβολίας.

Με βάση τις σχέσεις 1.4 και 1.5 η ισχύς λήψης P_{λ} εκφράζεται ως:

$$P_{\lambda} = S_{\lambda} \cdot A_{\epsilon} = \frac{P_{\pi} \cdot G^2 \cdot \sigma \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 \cdot R^4} \quad (1.6)$$

Όπου:

$R=R_1=R_2$, δηλαδή θεωρούμε ότι η απόσταση πομπού και στόχου R_1 και στόχου με δέκτη R_2 είναι ίσες.

Με την υπόθεση ότι η μέγιστη απόσταση στην οποία ανιχνεύεται ο στόχος- R_M γίνεται όταν υπάρχει ελάχιστη ισχύ λήψης στο δέκτη, δηλαδή $P_{\lambda}=P_{\min}$ και έχοντας ως δεδομένη την ευαισθησία αυτού, εξισώνοντας τη σχέση 1.6 ως προς την απόσταση R , προκύπτει η μέγιστη εμβέλεια ή αλλιώς η εξίσωση ραντάρ [33], [34], [35], [36]:

$$R_M = \sqrt[4]{\frac{P_{\pi} \cdot G^2 \cdot \sigma \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 \cdot P_{\min}}} \quad (1.7)$$

Εάν λάβουμε υπόψη και τις απώλειες που οφείλονται σε ατμοσφαιρικούς παράγοντες, σε απώλειες γραμμών μεταφοράς, σε απώλειες προσαρμογής φίλτρων, επεξεργασίας σήματος κλπ, οι οποίες μπορούν να περιγραφούν με το παράγοντα L , που μειώνει την R_M και βρίσκεται στον παρονομαστή της σχέσης 1.7, δίνοντας έτσι την σχέση 1.8 στην παρακάτω μορφή:

$$R_M = \sqrt[4]{\frac{P_{\pi} \cdot G^2 \cdot \sigma \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 \cdot P_{\min} \cdot L}} \quad (1.8)$$

1.1.3 Τύποι Ραντάρ

Τα ραντάρ μπορούν να ταξινομηθούν σε αρκετές κατηγορίες με βάση το κάθε κριτήριο που τα επιλέγουμε και σύμφωνα με το σκοπό και τη χρήση τους, όπως πχ ανίχνευσης εδάφους, εναέριων μέσων, κλπ. Ο Πίνακας 1.2 παρουσιάζει το διαχωρισμό των ραντάρ σύμφωνα με το υπό εξέταση κριτήριο.

Πίνακας 1.2 Τύποι ραντάρ σε συνδυασμό με το κριτήριο επιλογής [2]

Είδος Ραντάρ	Κριτήριο
1) Παθητικά, 2) Ενεργητικά, 3) Υβριδικά.	Υπαρξη πομπού
1) Μονοστατικά, 2) Διστατικά, 3) Πολυστατικά.	Πλήθος δειτών των ραντάρ και η θέση τους στο χώρο
1) Παλμικά: α. ραντάρ ένδειξης κινούμενων στόχων β. παλμικά Doppler 2) Συνεχούς κύματος : α. Doppler συνεχούς κύματος β. Ραντάρ διαμορφωμένου σήματος	Εκπομπή σήματος

Αναλυτικότερα ενεργητικά ραντάρ (active) χαρακτηρίζονται τα συστήματα ραντάρ που διαθέτουν πομπό, ενώ παθητικά (passive) εκείνα που έχουν μόνο δέκτη. Τα παθητικά τύπου ραντάρ ανιχνεύουν πηγές ΗΜ ακτινοβολίας και αποτελούν ένα είδος «αισθητήρα». Τέλος τα

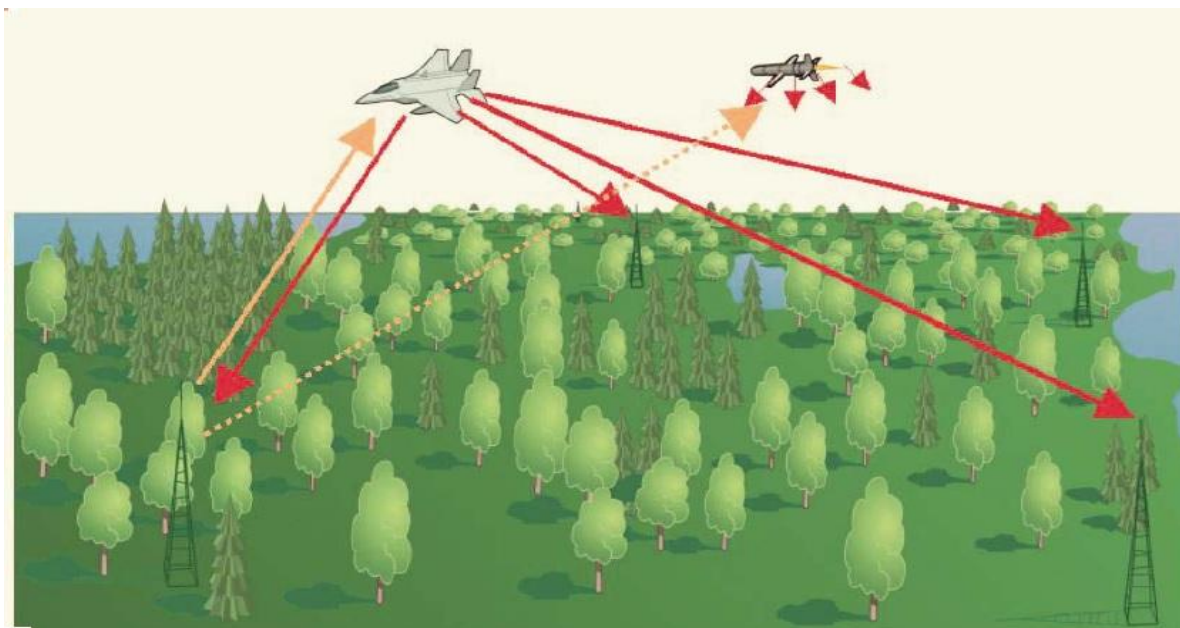
υβριδικά (hybrid) ραντάρ είναι τα συστήματα που ενώ έχουν τα χαρακτηριστικά των παθητικών, εντούτοις διαθέτουν και πομπό ώστε να μπορούν να «φωτίσουν» αυτοδύναμα κάποιο στόχο, χωρίς να στηρίζονται στην ύπαρξη ή όχι πηγής ΗΜ κυμάτων σ' αυτόν.

1.1.4 Χρήση Ραντάρ για Αμυντικούς Σκοπούς – Παραδείγματα

1.1.4.1 Πολυστατικά Ραντάρ

Ο συνήθης τύπος ραντάρ είναι το μονοστατικό, όπου η κεραία του δέκτη ταυτίζεται με την κεραία του πομπού. Τα αεροσκάφη (Α/Φ) stealth¹ είναι βελτιστοποιημένα για αυτόν τον τύπο ραντάρ και για το λόγο αυτό η τεχνολογία των πολυστατικών ραντάρ έχει προταθεί ως πιθανός τρόπος αντιμετώπισης αυτών. Η ύπαρξη πολλών δεκτών αυξάνει την πιθανότητα λήψης ανακλώμενης ακτινοβολίας από έναν τέτοιο τύπου στόχο, επιτρέποντας έτσι τον εύκολο εντοπισμό του. Το κύριο πλεονέκτημα των πολυστατικών ραντάρ είναι ότι παρουσιάζουν υψηλή επιβιωσιμότητα λόγω της διασποράς των δεκτών και της παθητικής λειτουργίας τους, γεγονός που τους καθιστά δύσκολους στόχους. Με τη διασπορά των δεκτών η εξουδετέρωση ενός εξ αυτών δεν αχρηστεύει όλο το σύστημα με τη λειτουργία του να συνεχίζεται, ενδεχομένως με μια μικρή υποβάθμιση [5].

Η κατασκευή του γίνεται με τον πομπό του να βρίσκεται σε υψηλό σημείο, ενώ οι δέκτες βρίσκονται διασκορπισμένοι εντός και εκτός της περιοχής επιτήρησης.



Εικόνα 1.2 Απεικόνιση πολυστατικού ραντάρ, με έναν πομπό και τέσσερις δέκτες [5].

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια παραδείγματα ανάπτυξης πολυστατικών τύπου ραντάρ για αμυντικούς σκοπούς:

- Πολυστατικό ραντάρ 52E6MU Struna- 1MU/Barrier E (NNIIRT, Ρωσία):

Η συγκεκριμένη εφαρμογή πολυστατικού ραντάρ παρέχει έγκαιρη προειδοποίηση έναντι στόχων με χαμηλό RCS, σε μικρά και μεσαία ύψη. Οι πομποί λειτουργούν σε επίπεδα ισχύος από 1 έως 10 Watt με τιμές συχνοτήτων από 390 έως 430 MHz. Μέχρι 10 σταθμοί μπορούν συνδεθούν μεταξύ τους, σε απόσταση 40 μέχρι 50 km, δημιουργώντας έτσι ένα ραντάρ εμβελείας 400 km, υπό τον έλεγχο ενός κεντρικού σταθμού [5],[6],[7].



Εικόνα 1.3 Άποψη από πολυστατικό ραντάρ 52E6MU Struna- 1MU/Barrier E (NNIIRT) [6]

- Πολυστατικό ραντάρ AASR –Associative Aperture Synthesis Radar (Saab Microwave Systems, Σουηδία):

Το συγκεκριμένο πολυστατικού τύπου ραντάρ δεν εφαρμόστηκε ποτέ στην πράξη. Το σύστημα του αποτελούνταν από πομπούς UHF και πλήθος 900 κόμβων–κεραίες. Σύμφωνα με τις μελέτες που έγιναν το σύστημα παρείχε μεγάλη ακρίβεια (της τάξης του 1,5 m) αλλά το υψηλό κόστος (γύρω στα 150 εκατ. Δολάρια) το έκανε μη προσιτό για ευρεία εφαρμογή. Επίσης, σημαντικό μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι πομπός και δέκτης θα πρέπει να βρίσκονται εκατέρωθεν του στόχου [5].

1.1.4.2 Ραντάρ Παθητικού Συμφασικού Εντοπισμού (Passive Coherent Location- PCL)

Τα συστήματα αυτά αποτελούνται από δέκτες που έχουν την ιδιότητα να εκμεταλλεύονται την υπάρχουσα Η/Μ ακτινοβολία από εκπομπές:

- ραδιοφώνου (FM, ψηφιακού, βραχέων κυμάτων),
- τηλεόρασης (αναλογικής, ψηφιακής, High Definition)
- και τηλεφωνίας (GSM, 3G, 4G).

Τα συστήματα ραντάρ παθητικού συμφασικού εντοπισμού χρησιμοποιούν εξελιγμένες τεχνικές όπως ψηφιακή χωρική διαμόρφωση ακτινοβολίας (Digital Beamforming), προσαρμοζόμενα φίλτρα και ετεροσυσχέτιση μεταξύ του σήματος που λαμβάνεται απευθείας από τον πομπό και εκείνου που έρχεται μέσω ανάκλασης στον στόχο.

Ένα βασικό πλεονέκτημα των PCL είναι η χρήση πολλών δεκτών (πολυστατικό παθητικό ραντάρ) και εκπομπών, ώστε να ληφθούν αρκετές ανεξάρτητες μετρήσεις. Τα παθητικά ραντάρ αναφέρεται ότι παρέχουν δυνατότητα εντοπισμού στόχων stealth, καθώς χρησιμοποιούν χαμηλές μπάντες συχνοτήτων. Παράλληλα, όμως, παρουσιάζουν ορισμένα μειονεκτήματα στην επιχειρησιακή τους εκμετάλλευση, καθότι οι εκπομπές που χρησιμοποιούνται δεν προορίζονται για χρήση ραντάρ. Τα συστήματα αυτά αναμένεται να χρησιμοποιηθούν ως εναλλακτικά ή βοηθητικά κύριων συστημάτων, για παρακολούθηση κενών στην κάλυψη του εναέριου χώρου, ιδίως σε χαμηλά/μεσαία ύψη, πχ για παρακολούθηση εναέριας κυκλοφορίας σε τερματικές περιοχές, καθώς δεν απαιτείται άδεια για εκπομπή. Παρακάτω ακολουθούν χαρακτηριστικά παραδείγματα PCL με τη χρήση τους να είναι για στρατιωτικούς- αμυντικούς σκοπούς [7].

- Παθητικό ραντάρ Silent Sentry (Lockheed Martin, ΗΠΑ):

Εμφανίστηκε για πρώτη φορά το έτος 1999 και παρέχει ανίχνευση με μεγάλη ακρίβεια, με δυνατότητα παρακολούθησης έως και 100 στόχων, σε αποστάσεις έως 150 ν.μ. Πλεονέκτημα του Silent Sentry είναι ότι εκμεταλλεύεται τις εκπομπές FM και TV (αναλογικό και ψηφιακό σήμα). Ακόμη, το χαμηλό κόστος απόκτησης και λειτουργίας είναι χαμηλότερο σε σχέση με τα συμβατικά ραντάρ. Μπορεί να παρακολουθεί Α/Φ, πυραύλους, πλοία και οχήματα επιφανείας, με ακρίβεια 250 m για την οριζόντια θέση, 1000 m για την κατακόρυφη θέση, καθώς και τη ταχύτητα του στόχου με σφάλμα ± 2 m/sec. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το ραντάρ Silent Sentry δεν εμφανίζεται πλέον στις ιστοσελίδες της κατασκευάστριας εταιρείας [5],[7].

- Homeland Alerter 100 (Thales Air Systems, Γαλλία):

Το σύστημα Homeland Alerter 100 (Εικόνα 1.4) παρουσιάστηκε το 2005 και χρησιμοποιεί σήματα κινητής τηλεφωνίας και FM. Καλύπτει χαμηλά και μεσαία ύψη, προστατεύοντας ευαίσθητους στόχους όπως εργοστάσια, αεροδρόμια και γενικότερα, στόχους υψηλής αξίας. Η εμβέλεια του φθάνει την απόσταση των 100 km ενώ το ύψος σάρωσής του μπορεί να αγγίξει τα 20.000 πόδια. Μπορεί να τοποθετηθεί σε σταθερές ή μεταφερόμενες πλατφόρμες και έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί αυτόνομα ή να συνδεθεί και να συνεργάζεται με άλλα ραντάρ ή Κέντρα Διοίκησης και Ελέγχου [7].



Εικόνα 1.4 Το παθητικό ραντάρ Homeland Alerter 100 της γαλλικής Thales [7]

- CELLDAR – CELL PHONE RADAR (BAE Systems – Roke, M. Βρετανία):

Σε στάδιο δοκιμών. Χρησιμοποιεί σήματα κινητής τηλεφωνίας για την ανίχνευση εναέριων στόχων και στόχων επιφανείας. Εντοπίζει και παρακολουθεί στόχους σε δύο διαστάσεις, σε απόσταση 60 χιλιομέτρων και ύψος έως 10.000 ποδών [5]. Το Silent Sentry και το CELLDAR, αν και αρχικά παρουσιάστηκαν επίσημα στον τύπο, από ένα σημείο και μετά έπαψε κάθε αναφορά σε αυτά χωρίς αυτό να σημαίνει ότι σταμάτησε και η σχετική ανάπτυξή τους. Αντίθετα, το γαλλικό, ιταλικό και (ίσως λιγότερο) το γερμανικό παθητικό ραντάρ παρουσιάζονται κανονικά και διαφημίζονται.

- AULOS Passive Covert Location Radar (Selex Sistemi Integrati, Ιταλία):

Παρουσιάστηκε στο Farnborough 2012, αν και το πρόγραμμα έχει ξεκινήσει από το 2005. Χρησιμοποιεί εκπομπές ψηφιακής τηλεόρασης και FM, με εμβέλεια αρκετών εκατοντάδων χιλιομέτρων. Είναι περιορισμένων διαστάσεων και μεταφέρεται μαζί με τον

ιστό του σε ένα τετράτροχο ρυμουλκούμενο όχημα. Πέραν της στρατιωτικής αξιοποίησης, προτείνεται για έλεγχο εναέριας κυκλοφορίας, συμπληρώνοντας την κάλυψη σε μικρά και μεσαία ύψη [7],[8].



Εικόνα 1.5 Ραντάρ παθητικού συμφασικού εντοπισμού AULOS [8]

- Παθητικό Ραντάρ Cassidian (Γερμανία):

Πρόσφατα η εταιρεία Cassidian του ομίλου EADS ανακοίνωσε ότι έχει αναπτύξει ένα σύστημα παθητικού ραντάρ που βασίζεται σε εκπομπές ραδιοφωνίας και τηλεόρασης, για πολιτική και στρατιωτική χρήση, με δυνατότητα ανίχνευσης Α/Φ stealth. Το υπόψη σύστημα περιλαμβάνει όλες τις τελευταίες τεχνολογικές εξελίξεις και μπορεί να τοποθετηθεί και να επιχειρεί σε όχημα τύπου βαν (Εικόνα 1.6).



Εικόνα 1.6 Το κινητό παθητικό ραντάρ της γερμανικής Cassidian [7]

- Hellenic Multi-target Passive System – HEMPAS («Ομάδα Θεσσαλονίκης»):

Γνωστό και ως CCIAS, αποτελεί πρόταση μιας ερευνητικής ομάδας από τη Θεσσαλονίκη, για ανάπτυξη ενός πολυστατικού παθητικού ραντάρ, με σκοπό την αποκάλυψη ιπταμένων στόχων και στόχων επιφανείας. Το 2006 παρουσιάζεται για πρώτη φορά στο ΓΕΕΘΑ, ενώ η πρώτη δημόσια αναφορά γίνεται το 2007. Σύμφωνα με δημοσιεύματα του τύπου, έχει τη δυνατότητα να αποκαλύπτει σε απόσταση 400km, Α/Φ stealth και ελικόπτερα, από τη στιγμή που απογειώνονται. Παρουσιάσθηκε στο ΓΕΑ εκ νέου τον Ιούλιο του 2012 και απορρίφθηκε κατόπιν πολιτικής απόφασης, το προαναφερθέν σύστημα τελεί υπό εξέταση από τους αρμόδιους φορείς [5].

1.1.4.3 Συστήματα Παθητικής Ανίχνευσης

Τα συστήματα παθητικής ανίχνευσης μπορούν να εντοπίσουν στόχους μέσω εκπομπών που προέρχονται από τους ίδιους τους στόχους, ενώ πολλοί τα θεωρούν ως μια κατηγορία παθητικών ραντάρ. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται σε τεχνικές ραδιογωνιομέτρησης ή μέτρησης διαφοράς χρόνου άφιξης (TDOA–Time Difference Of Arrival). Με τη χρήση τριγωνισμού εξασφαλίζεται η ανίχνευση και η τρισδιάστατη αποκάλυψη της θέσης των

στόχων. Τα εν λόγω συστήματα εκμεταλλεύονται κυρίως πανκατευθυντικές εκπομπές όπως: εκπομπές τηλεπικοινωνιών, datalink, SSR/IFF, TACAN/DME και, δευτερευόντως εκπομπές ραντάρ και παρεμβολέων, καθότι είναι σχετικά μειωμένη η πιθανότητα να βρίσκονται περισσότερες από μία κεραίες ταυτόχρονα εντός του λοβού εκπομπής, ώστε να μπορεί να γίνει ο απαραίτητος συσχετισμός. Από τα παραπάνω συνεπάγεται ότι, για να αποκαλυφθούν οι στόχοι, θα πρέπει πρώτα να εκπέμψουν [5],[7].

Ενδεικτικά έχουν αναπτυχτεί οι παρακάτω τύποι συστημάτων παθητικής ανίχνευσης:

- Kolchuga (Topaz, Ουκρανία),
- Tamara (Tesla, Τσεχοσλοβακία),
- και το διάδοχο σύστημα Vera-NG (Era, Τσεχία),
- VEGA 85V6-A (Rosoboronexport, Ρωσία),
- DWL002 (China Electronics Technology Corp. – CETC, Κίνα).

1.1.4.4 Ραντάρ Χαμηλών Συχνοτήτων

Τα Α/Φ stealth έχουν σχεδιαστεί με κύριο γνώμονα τη μείωση του RCS στην X-Band και την Ku-Band. Σε χαμηλότερες συχνότητες, το RCS ενός Α/Φ stealth κατά κανόνα αυξάνεται. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι καθώς μειώνεται η συχνότητα, το μήκος κύματος γίνεται συγκρίσιμο με τμήματα του στόχου (πτέρυγες, άτρακτος κλπ), οπότε η σκέδαση περνάει από την οπτική περιοχή στην περιοχή συντονισμού. Το RCS παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις ανάλογα με το μήκος κύματος και τη μορφή του στόχου και μπορεί να αυξηθεί ακόμα και κατά 10 φορές ή και περισσότερο, σε σχέση με την οπτική περιοχή. Επιπρόσθετα, τα υλικά RAM είναι λιγότερο αποτελεσματικά σε χαμηλές συχνότητες. Για

τους λόγους αυτούς, τα ραντάρ χαμηλών συχνοτήτων εκτιμάται ότι αποτελούν σημαντικά όπλα anti-stealth.

Για πρώτη φορά ραντάρ χαμηλών συχνοτήτων (VHF –UHF Band) χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου λόγω τεχνολογικών περιορισμών της εποχής. Οι Ρώσοι ήταν αυτοί που συνέχισαν να χρησιμοποιούν τέτοιου είδους ραντάρ και κατά τις δεκαετίες 1950 και 1960. Μετά τον Πόλεμο του Κόλπου το 1990, όπου διαπιστώθηκαν οι δυνατότητες της τεχνολογίας stealth, η ρωσική βιομηχανία επανέφερε το ενδιαφέρον της σε ραντάρ χαμηλών συχνοτήτων, ενσωματώνοντας σύγχρονες τεχνολογίες σε αυτά [5]. Ιστορικά η μοναδική κατάρριψη ενός Α/Φ stealth F-117, κατά τον πόλεμο του Κοσόβου οφείλεται στη χρήση ενός VHF ραντάρ τύπου P-18 «Spoon Rest», ρωσικής κατασκευής.

Ένα επιπρόσθετο πλεονέκτημα που προσφέρουν τα ραντάρ χαμηλών συχνοτήτων είναι ότι δεν «προειδοποιούν» τα Α/Φ που παρακολουθούν, καθώς οι συχνότητες λειτουργίας τους είναι πολύ χαμηλές για να γίνουν αντιληπτές από τα συνήθη συστήματα αυτοπροστασίας Α/Φ. Για τον ίδιο λόγο, δεν μπορούν να στοχοποιηθούν από την πλειονότητα συστημάτων αντιραντάρ όπως οι πύραυλοι AGM-88 HARM ή τα ισραηλινά UAV HARPY.

Ακολουθούν ορισμένα ενδεικτικά παραδείγματα ραντάρ χαμηλών συχνοτήτων.

- 3D VHF Ραντάρ AESA 1L119 NEBO SVU (Rosoboronexport, Ρωσία):

Το 3D ραντάρ επιτήρησης NEBO SVU διαθέτει πλήρως ψηφιακή επεξεργασία και βασίζεται σε τεχνολογία ημιαγωγών, με σκοπό την αποκάλυψη εναέριων και βαλλιστικών απειλών. Αποτελείται από μια συστοιχία 84 κεραιών τύπου Yagi (Εικόνα 1.7). Η χρήση του

έχει ξεκινήσει από το 2004. Το σύστημα αυτό χαμηλών συχνοτήτων διαθέτει ενσωματωμένη συστοιχία IFF και δυνατότητα ανίχνευσης θορύβου παρεμβολής.

Το ραντάρ αυτό είναι τοποθετημένο σε όχημα, επιτρέποντας την εύκολη και ταχεία μετακίνηση: μόλις σε 20 λεπτά είναι έτοιμο για μεταφορά σε άλλη θέση [7],[9].



Εικόνα 1.7 3D ραντάρ AESA χαμηλών συχνοτήτων (VHF) 1L119 NEBO SVU της Rosoboronexpoert (Ρωσία) [9]

Οι εμβέλειες που δίνονται για την πιο πρόσφατη έκδοση NEBO SVU έχουν ως εξής, για μαχητικό με RCS $2,5 \text{ m}^2$:

- 65 km για ύψος 500 m.
- 270 km για ύψος 10.000 m.
- 380 km για ύψος 20.000 m.

Η ακρίβειά του φτάνει τα 200 m ως προς την απόσταση, $1,5^\circ$ στον κατακόρυφο άξονα και $0,5^\circ$ στο αζιμούθιο. Μπορεί να παρακολουθεί μέχρι και 100 στόχους ταυτόχρονα, ενώ ανανεώνει τα στοιχεία κάθε 5 δευτερόλεπτα. Ακόμη, υπάρχει δυνατότητα σύνδεσής του με το σύστημα S-300, με σκοπό την υπόδειξη στόχων stealth [5].

- 3D Multiband Ραντάρ RLM-M NEBO-M (Rosoboronexport, Ρωσία):

Το 2008 παρουσιάσθηκε το πρωτοποριακό σύστημα RLM-M Nebo-M το οποίο αποτελείται από τρία ήδη υπάρχοντα 3D ραντάρ, τα οποία τροποποιήθηκαν, ώστε να παρέχουν εικόνα σε ένα κεντρικό όχημα διοίκησης και ελέγχου. Τα ραντάρ αυτά είναι το προαναφερθέν Nebo SVU (VHF-Band), το Protivnik G (L-Band) και το Gamma S1 (S/XBand). Όλα τα υποσυστήματα είναι τοποθετημένα σε ένα οχήματα 8×8 . Δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία για τις δυνατότητες και τις επιδόσεις του Nebo M, αλλά, σύμφωνα με διαρροές, η εμβέλεια του νέου αυτού ραντάρ εκτιμάται ως 40% μεγαλύτερη από το Nebo SVU και με αρκετά μεγαλύτερη ακρίβεια [7].

- 2D VHF ραντάρ VOSTOK E (Agat/KB Radar, Λευκορωσία):

Πρόκειται για ένα κινητό ραντάρ εφαρμοσμένο σε ένα όχημα 6×6 , με δυνατότητα ανάπτυξης σε χρόνο 6 λεπτών (Εικόνα 1.8). Σε περιβάλλον παρεμβολών, αποκαλύπτει το F-117 στα 57 km (σύμφωνα με άλλες πηγές, στα 72 km 43) και το F-16 σε 133 km, ενώ, σε περιβάλλον χωρίς παρεμβολές, από καλύπτει το F-117 στα 350 km [5],[10].



Εικόνα 1. 8 2D VHF ραντάρ VOSTOK E της Agat/KB Radar [10]

- 3D Ραντάρ AESA L-Band 67N6E Gamma-DE (VNIIRT, Ρωσία):

Αν και δεν εκπέμπει σε πολύ χαμηλές συχνότητες, το Gamma-DE συμπεριλαμβάνεται ως ένα παράδειγμα ραντάρ μεγάλου βεληνικού στην L Band. Χρησιμοποιείται αυτόνομα ή ως μέρος ολοκληρωμένου αντιαεροπορικού συστήματος. Στην ισχυρότερη διαμόρφωσή του, η εμβέλεια φθάνει τα 400 km για στόχο με RCS 1 m² σε 40 km ύψος. Διαθέτει μεγάλες δυνατότητες αντιμετώπισης παρεμβολής. Είναι ρυμουλκούμενο και απαιτείται 1,5 ώρα για την ανάπτυξή του [7],[9].



Εικόνα 1.9 3D L-Band ραντάρ 67N6E Gamma-DE της VNIIR [9]

- 3D Ραντάρ Δυνατότητας έγκαιρης προειδοποίησης AESA SMART-L EWC (Early Warning Capability) της Thales (Ολλανδία):

Το συγκεκριμένο μοντέλο ραντάρ της Thales αποτελεί ένα πλήρως ψηφιακά ελεγχόμενο ραντάρ Active Electronic Scanned Array (AESA). Οι τεχνικές υψηλών προδιαγραφών που έχουν εφαρμοστεί στο SMART-L, έχουν ως αποτέλεσμα ένα ραντάρ με μεγάλη απόδοση σε απόσταση ανίχνευσης που ξεπέρα τα 2.000 χιλιόμετρα στην D Band. Το σημερινό ραντάρ μεγάλης εμβέλειας SMART-L μπορεί να ανιχνεύσει αυτόματα, να καταγράψει και να παρακολουθήσει περισσότερους από 1.000 εναέριους στόχους ταυτόχρονα σε αποστάσεις έως 400 χιλιόμετρα [22],[24]. Η ελάχιστη εμβέλεια του φθάνει τα 5 χιλιόμετρα.

Μέσα σε αυτό το τεράστιο εύρος εντοπίζει ένα ευρύ φάσμα στόχων όπως στόχοι αεροσκαφών stealth μέχρι βαλλιστικούς τύπου πυραύλους. Το SMART-L EWC είναι σε θέση να εφοδιάσει συστήματα θαλάσσιων και χερσαίων οπλικών συστημάτων με δεδομένα στόχου υψηλής ακρίβειας ώστε οι ληφθούν έγκαιρες αποφάσεις διασφάλισης μιας αποτελεσματικής καταπολέμησης βαλλιστικών πυραύλων ή άλλων εναερίων στόχων. Το σύστημα ραντάρ μεγάλης εμβέλειας χρησιμοποιείται από το γερμανικό ναυτικό και από πολλούς άλλους ευρωπαϊκούς ναυτικούς στόλους [23].

Για τα μεγάλα επίγεια ραντάρ η τεραστία αυτή εμβέλεια είναι συνηθισμένη και συναντάται σε πολλά επίγεια ραντάρ. Για τα πολύ μικρότερα ραντάρ πλοίων όμως, είναι κάτι καινοτόμο. Η Thales είναι η πρώτη εταιρεία παγκοσμίως με τόσο ισχυρό προϊόν σε εφαρμογές ραντάρ πολεμικών πλοίων.

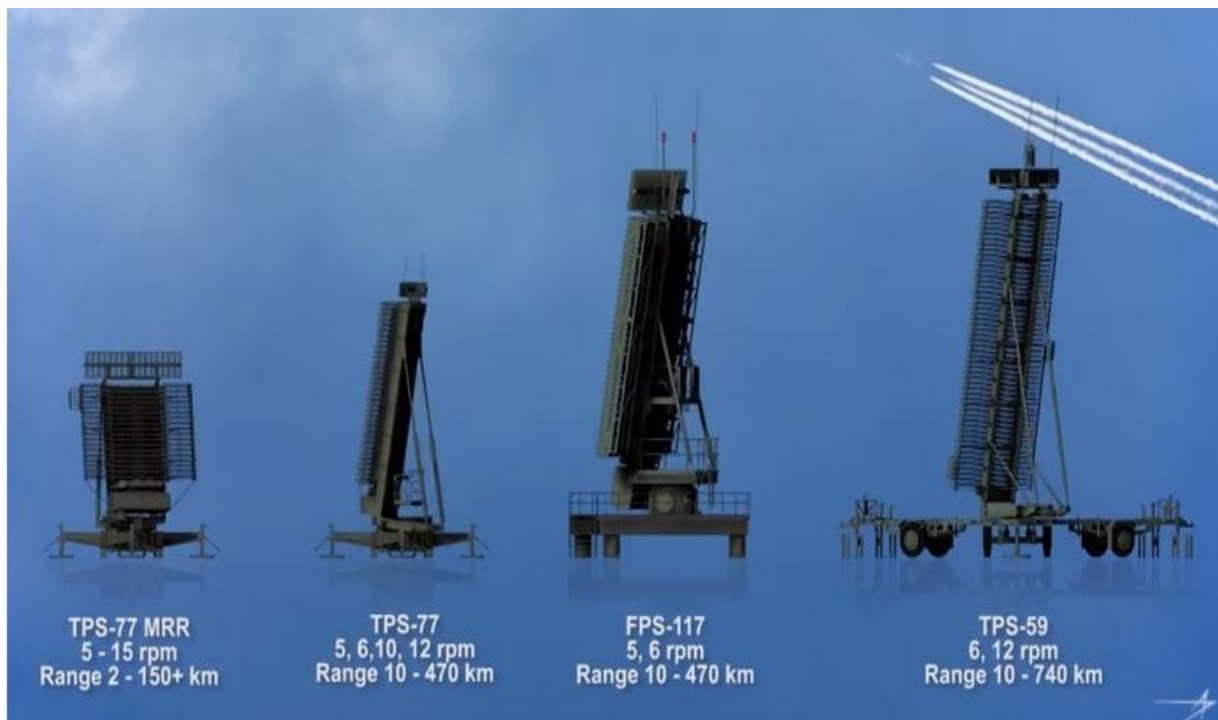


Εικόνα 1.10 Εφαρμογή του ραντάρ SMART-L EWC σε πολεμικό πλοίο [22]

- FPS-117/TPS-77 της Lockheed Martin, Η.Π.Α:

Το FPS-117/TPS-77 είναι ένα 3D ραντάρ εναέριας αναζήτησης που κατασκευάστηκε για πρώτη φορά από την GE Aerospace (τώρα πλέον Lockheed Martin) το 1980 [25]. Το FPS-117/TPS-77 είναι ένα σύστημα ραντάρ αναζήτησης χαμηλής ισχύος (L-band), μεγάλης εμβέλειας που φθάνει έως τα 250 ναυτικά μίλια (400km) και υψόμετρο μέχρι 100.000 πόδια. Η προηγμένη αρχιτεκτονική Pencil Beam του συγκεκριμένου μοντέλου δίνει το πλεονέκτημα εξαιρετικής ανίχνευσης και παρακολούθησης, καθώς και εξαιρετική προσαρμοστικότητα στις μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες. Το συγκεκριμένο σύστημα της Lockheed Martin είναι πιστοποιημένο από το NATO και έως σήμερα έχει αξιοποιηθεί σαν αμυντικό σύστημα αλλά και σύστημα εναέριας κυκλοφορίας σε περισσότερα από 120 σημεία ανά το κόσμο [26],[27].

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η Πολεμική Αεροπορία των ΗΠΑ και η Lockheed Martin, ανέπτυξαν ειδικά το ραντάρ AN/FPS-117 για να μειώσουν τις λειτουργικές δαπάνες και τις απαιτήσεις ανθρώπινου δυναμικού σε απομακρυσμένες περιοχές ύπαρξης ραντάρ. Για παράδειγμα όταν το ραντάρ FPS-117 εισήχθη στην Αλάσκα, η επάνδρωση για τις 13 θέσεις παρακολούθησης ραντάρ μειώθηκε σημαντικά. Τα επόμενα προγράμματα αναβάθμισης μείωσαν περαιτέρω τις ανάγκες για προσωπικό φτάνοντας σήμερα στο σημείο μεμονωμένες τοποθεσίες ραντάρ να λειτουργούν χωρίς προσωπικό [26],[28].



Εικόνα 1.11 Η οικογένεια ραντάρ FPS/TPS της Lockheed Martin [27]

- EZ-Guard ELM-2270 της IAI (Ισραήλ):

Το ELM-2270 EZ GUARD είναι ένα παράκτιο ραντάρ επιτήρησης μεγάλης εμβέλειας που λειτουργεί στη μπάντα συχνοτήτων HF, για την ανίχνευση στόχων υπερήχων επιφανειών και αεροσκαφών χαμηλής πτήσης πολύ πέρα από τον ορίζοντα [29]. Η κατασκευή του ELM-2270 EZ GUARD έγινε από την βιομηχανία αεροδιαστήματος του Ισραήλ (Israel Aerospace Industries-ISA) με κύριο σκοπό την παρακολούθηση δραστηριοτήτων στην αποκλειστική οικονομική ζώνη (ΑΟΖ) της χώρας σε απόσταση μέχρι 200 ναυτικά μίλια (370,4χλμ) από την ακτογραμμή.

Η αρχή του ραντάρ βασίζεται στα χαρακτηριστικά της διάδοσης των ραδιοκυμάτων HF πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Ο εξοπλισμός λήψης του ραντάρ περιλαμβάνει ένα ή περισσότερα πεδία κατακόρυφων κεραιών, παρέχοντας ταυτόχρονη κάλυψη ολόκληρου του τομέα παρατήρησης χρησιμοποιώντας αρκετές ακτίνες αζιμούθιου του προτύπου ακτινοβολίας που σχηματίζεται από τον επεξεργαστή σήματος. Η αρχιτεκτονική αυτού του είδους, δίνει το πλεονέκτημα στατιστικής λήψης πολλαπλών ακτινών, παρέχοντας την απαιτούμενη διάρκεια χρόνου δράσεων για την εξασφάλιση της μακροπρόθεσμης ανίχνευσης στόχων εντός της αποκλειστικής οικονομικής ζώνης (ΑΟΖ). Οι κύριες προδιαγραφές του ELM-2270 EZ GUARD της IAI αναφέρονται στις αναφορές [29],[30].

- ELM-2090U-ULTRA-C1 (Ισραήλ):

Το ELM-2090U ULTRA-C1 (Εικόνα 1.12) είναι ένα κινητό ραντάρ αεράμυνας έγκαιρης προειδοποίησης με εμβέλεια που φθάνει έως και τα 310 μίλια. Το σύστημα, λειτουργεί στη ζώνη UHF για καλύτερη ανίχνευση μικρών στόχων σε μεγάλη απόσταση πχ μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAV). Ακόμη, η σχεδίαση του είναι τέτοια ώστε να ανιχνεύει αυτόνομα και ταυτόχρονα να παρακολουθεί πολλαπλούς στόχους (αεροσκάφη, Ε/Π, UAV κλπ - Air Breathing Targets-ABT). Η σειρά των ELM ραντάρ είναι αρθρωτή, επιτρέποντας τη δημιουργία διαφορετικών συστημάτων για να ανταποκριθεί σε διαφορετικές απαιτήσεις ακόμη και υπό ακραίες καιρικές συνθήκες και παρουσία πυκνού ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος [31],[32].

Το ULTRA-C1 διαθέτει προηγμένη ψηφιοποίηση για καλύτερες επιχειρησιακές επιδόσεις με την εφαρμογή προηγμένης τεχνολογίας AESA, που υποστηρίζει κάλυψη αζιμούθιου 360° σε κατάσταση περιστροφής ή 120° σε σταθερή κατάσταση. Μια καινοτομία του ELM-2090U είναι η ψηφιοποίηση του σήματος σε επίπεδο TRM (transmit-receive

modules). Στα περισσότερα ηλεκτρονικά σαρωμένα ραντάρ, η ψηφιοποίηση των αναλογικών σημάτων του ραντάρ εκτελείται περαιτέρω στο ραντάρ. Η διεξαγωγή της διαδικασίας σε επίπεδο TRM επιτρέπει περισσότερη ευελιξία στη διαμόρφωση και τη διαμόρφωση δέσμης [31].



Εικόνα 1.12 Η κινητή μονάδα ραντάρ ELM-2090U ULTRA-C1[32]

1.2 Ραδιοδιατομή Στόχων

Ένα χαρακτηριστικό στοιχείο των ραντάρ είναι η ενεργός επιφάνεια ραντάρ σ , η ραδιοδιατομή (Radar Cross Section-RCS) ενός στόχου, η οποία μπορεί να οριστεί ως «η νοητή επιφάνεια που απαιτείται για να συλληφθεί τόση πυκνότητα ισχύος στο στόχο ώστε αν η συνολική ισχύς επανεικπέμπονταν ισοτροπικά, θα προκαλούσε την ίδια πυκνότητα ισχύος που παρατηρείται στο δέκτη» [1],[2], [33], [34], [35], [36].

Μαθηματικά ο ορισμός του RCS αναφέρεται ως:

$$\sigma = \frac{\text{Ισχύς που αντανακλάται στο δέκτη ανα μονάδα στερεάς γωνίας}}{\text{Πυκνότητα ισχύος} / 4\pi}$$

Με βάση τη σχέση 1.3 η ανακλώμενη ενέργεια που λαμβάνει το ραντάρ από το στόχο είναι:

$$P_{\sigma} = \frac{P_{\Pi}}{4\pi R_1^2} \cdot G \cdot \sigma \quad (1.3)$$

Εάν στην παραπάνω μαθηματική σχέση περιληφθεί η ενεργός επιφάνεια του δέκτη του ραντάρ A_{ev} και ο παράγοντας ιστροπικής εξάπλωσης της ανακλώμενης ισχύος $1/4\pi R^2$, μπορούμε να δούμε ότι η ανακλώμενη ενέργεια που λαμβάνει το ραντάρ από το στόχο θα είναι:

$$P_{\sigma} = \frac{P_{\Pi} \cdot G}{4\pi R^2} \cdot \frac{1}{4\pi R^2} \cdot A_{ev} \cdot \sigma \quad (1.9)$$

Στην πράξη κανένας ακτινοβολητής δεν έχει την δυνατότητα να ακτινοβολεί ιστροπικά πόσο μάλλον ο στόχος του ραντάρ που ανακλά την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Στην ουσία, μόνο εκτιμήσεις του σ μπορούν να γίνουν ώστε να προσεγγιστεί ο λόγος ανακλώμενη προς προσπίπτουσα ισχύ.

Ο υπολογισμός του RCS στις τρεις διαστάσεις, μπορεί να εκφραστεί ως :

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E_{\sigma}|^2}{|E_{\pi}|^2} \quad (1.10)$$

Όπου:

Εσ: το σκεδαζόμενο ηλεκτρικό πεδίο.

Επ: το προσπίπτον ηλεκτρικό πεδίο,

Το RCS έχει μονάδα μέτρησης τα τετραγωνικά μέτρα [m^2] ωστόσο, εκφράζεται και σε ντεσιμπέλ ως προς 1m^2 (dBsm):

$$\sigma[\text{dBsm}] = 10 \log(\sigma[\text{m}^2]) \quad (1.11)$$

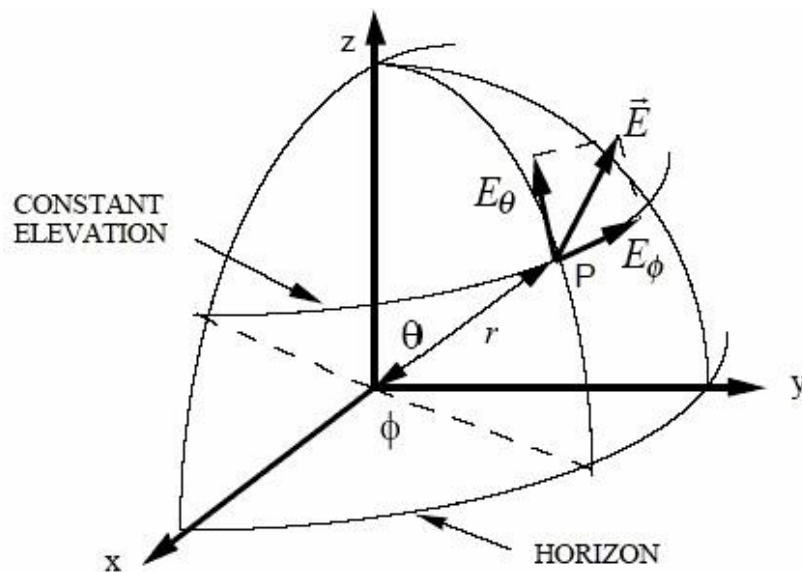
Το RCS ενός αντικειμένου εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες όπως:

- Γεωμετρικά χαρακτηριστικά στόχου,
- Υλικό στόχου,
- Μέγεθος στόχου,
- Σχετική θέση πομπού-στόχου,
- Σχετική θέση στόχου-δέκτη,
- Πόλωση προσπίπτοντος και σκεδαζόμενου κύματος,
- Γωνίες πρόσπτωσης και σκέδασης του κύματος,
- Συχνότητα κύματος.

Παρόλο που στην ανιχνευσιμότητα ενός στόχου παίζουν σημαντικό ρόλο η απόσταση πομπού – δέκτη - στόχου και η ισχύς της δέσμης του ραντάρ, κανένα από αυτά τα μεγέθη δεν εμπλέκονται στο υπολογισμό του RCS που χαρακτηρίζει αποκλειστικά το στόχο. Συνεπώς, γενικά, το RCS θα μπορούσε να οριστεί ως:

$$\sigma_{pq} = (\theta, \varphi) \quad (1.12)$$

όπου p και q αφορούν τις διάσπαρτες και προσπίπτοντες πολώσεις αντίστοιχα, ενώ θ και φ είναι οι σφαιρικές πολικές γωνίες, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.13 [11], [13].



Εικόνα 1.13 Σύστημα σφαιρικών συντεταγμένων [11]

Δεδομένου ότι τα στοιχεία του φορέα κύματος σε μεγάλες αποστάσεις είναι εφαπτόμενα σε μια σφαίρα, δύο ορθογώνιες συνιστώσες από την άποψη των μεταβλητών θ και φ αρκούν για να αντιπροσωπεύσουν το προσπίπτον πεδίο σε ένα σφαιρικό σύστημα επικεντρωμένο στο στόχο [12].

Έτσι, σύμφωνα με τα παραπάνω είναι δυνατό να ορίσουμε το προσπίπτον ηλεκτρικό πεδίο E_π ως προς τις συνιστώσες θ και φ ως εξής:

$$\vec{E}_\pi = E_{\pi\theta}\hat{\theta} + E_{\pi\varphi}\hat{\varphi} \quad (1.13)$$

Από την άλλη πλευρά η πόλωση του προσπίπτοντος πεδίου δεν είναι απαραίτητως η ίδια με αυτό του σκεδαζόμενου πεδίου, δεδομένου ότι οι πολύπλοκοι στόχοι δημιουργούν

ένα στοιχείο διασταυρούμενης πολωμένης σκέδασης λόγω πολλαπλών διαθλάσεων και ανακλάσεων. Αριθμητικώς κάτι τέτοιο μπορεί να εκφραστεί από την μήτρα σκέδασης (σχέση 1.14) η οποία αντικατοπτρίζει τη συσχέτιση μεταξύ της πόλωσης του σκεδαζόμενου πεδίου και του διάσπαρτου πεδίου.

$$\begin{bmatrix} E_{\sigma\theta} \\ E_{\sigma\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{\theta\theta} & S_{\theta\varphi} \\ S_{\varphi\theta} & S_{\varphi\varphi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{\pi\theta} \\ E_{\pi\varphi} \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

Τα στοιχεία της μήτρας σκέδασης S_{ij} αντιπροσωπεύουν τις παραμέτρους σκέδασης, όπου με τον δείκτη i προσδιορίζεται το σκεδαζόμενο πεδίο πόλωση και με το δείκτη j προσδιορίζεται η πόλωση προσπίπτοντος πεδίου. Ακόμη τα στοιχεία της μήτρας σκέδασης είναι σύνθετες ποσότητες και σχετίζονται με το RCS με την ακόλουθη σχέση 1.15:

$$S_{ij} = \sqrt{\frac{\sigma_{ij}}{4\pi R^2}} \quad (1.15)$$

Με βάση τους παραπάνω παράγοντες, μπορεί να λεχθεί σε γενικές γραμμές ότι ένα αντικείμενο - στόχος έχει μεγάλο RCS όταν:

- Είναι μεγάλο σε μέγεθος,
- Έχει μεγάλα εκτεθειμένα μεταλλικά τμήματα στην επιφάνειά του, τα οποία εξέχουν, όπως δεξαμενές καυσίμου, εξωτερικά αναρτημένες βόμβες, πυραυλοι κλπ.
- Έχει καμπύλη επιφάνεια, τμήματα της οποίας μπορεί να βρεθούν κάθετα στην αναμενόμενη ακτινοβολία του ραντάρ.

Ενδεικτικά RCS διάφορων αντικειμένων-στόχων φαίνονται στον Πίνακα 1.3

Πίνακας 1.3 RCS διάφορων αντικειμένων-στόχων [13]

Αντικείμενο	RCS (m ²)
Έντομο	10 ⁻⁵
Πουλί	10 ⁻²
Αεροσκάφος stealth τεχνολογίας	0,1
Άνθρωπος	1
Μαχητικό αεροσκάφος	4
Μεγάλο μεταφορικά αεροσκάφος	10 ²
Φρεγάτα	10 ⁵

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο

Μοντελοποίηση Εναέριου Στόχου

2.1 Εισαγωγή στη Μοντελοποίηση Εναέριων Στόχων

Οι μέθοδοι για την πρόβλεψη της ραδιοδιατομής [Radar Cross Section (RCS)] ενός φυσικού αντικειμένου – στόχου, από πλευράς υπολογιστικού ηλεκτρομαγνητισμού, διακρίνονται σε ακριβείς και προσεγγιστικές. Οι ακριβείς μέθοδοι τείνουν να είναι αρκετά πολύπλοκες, ενώ οι προσεγγιστικές μέθοδοι συνήθως χαρακτηρίζονται ως πιο αποδοτικές με σημαντικά μικρότερες υπολογιστικές απαιτήσεις.

Οι πιο κοινές μέθοδοι πρόβλεψης ραδιοδιατομής, για τυχαίους τρισδιάστατους στόχους είναι μεταξύ άλλων:

- η Μέθοδος Ροπών,
- η Μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών,
- η προσέγγιση Γεωμετρικής Οπτικής,
- η προσέγγιση Φυσικής Οπτικής.

Αναλυτικότερα, οι Μέθοδοι Ροπών (Method of Moments) και Πεπερασμένων Διαφορών (Finite Difference Methods) αντίστοιχα, μειώνουν τις ενσωματωμένες εξισώσεις σε ένα σύνολο ταυτόχρονων γραμμικών εξισώσεων που μπορούν να λυθούν χρησιμοποιώντας την τυπική άλγεβρα πινάκων, δίνοντας έτσι το πλεονέκτημα να είναι μαθηματικά ακριβείς και να αποδίδουν ακριβή αποτελέσματα. Το βασικό μειονέκτημα των παραπάνω δύο μεθόδων

είναι οι απαιτήσεις σε υπολογιστικούς πόρους, δηλαδή απαιτούν διακριτοποίηση (κατάτμηση) του σώματος του στόχου, πράγμα το οποίο οδηγεί στην παραγωγή μεγάλων πινάκων, με αποτέλεσμα υψηλές υπολογιστικές απαιτήσεις και αύξηση του χρόνου εκτέλεσης [13].

Η Γεωμετρική Οπτική και η Φυσική Οπτική είναι προσεγγιστικές μέθοδοι. Η Γεωμετρική Οπτική εάν και θεωρείται μια εύκολη μέθοδος, στην εφαρμογή έχει σοβαρότατους περιορισμούς, καθώς πχ στην περίπτωση επίπεδων ή κυλινδρικών επιφανειών, απλούστατα δεν δίνει κανένα αποτέλεσμα. Αντιθέτως, η προσεγγιστική μέθοδος της Φυσικής Οπτικής χρησιμοποιείται για τις υψηλές συχνότητες και αποδίδει αρκετά καλά αποτελέσματα για «μεγάλους» στόχους, καθώς και βέλτιστη κατοπτρική ανάκλαση (specular reflection), με προσέγγιση των επαγομένων επιφανειακών ρευμάτων.

Στην ουσία η μέθοδος της Φυσικής Οπτικής υπολογίζει το ρεύμα επιφανείας που προκαλείται σε ένα αυθαίρετο σώμα από την προσπίπτουσα ακτινοβολία προκειμένου να υπολογιστεί το σκεδαζόμενο μακρινό πεδίο, ενώ το επαγόμενο ρεύμα θεωρείται μηδενικό στις μη φωτιζόμενες επιφάνειες. Αφού το επαγόμενο ρεύμα θεωρείται μηδενικό στο όριο της σκιασμένης περιοχής, οι τιμές του υπολογιζόμενου πεδίου δεν είναι ακριβείς για μεγάλες γωνίες και στις σκιασμένες περιοχές. Επιπλέον, δεν λαμβάνονται υπ' όψη τα επιφανειακά κύματα, οι πολλαπλές αντανάκλασεις και οι περιθλάσεις στις ακμές. Παρ' όλα αυτά, η απλότητα της προσέγγισης εξασφαλίζει μικρή υπολογιστική επιβάρυνση καθώς και κατάλληλους χρόνους εκτέλεσης [13].

2.1.1 Μαθηματική Εφαρμογή της Φυσικής Οπτικής σε Μοντέλα Επιφανειών

Σε ένα σφαιρικό σύστημα συντεταγμένων (r, θ, φ) το προσπίπτον κύμα σε οποιοδήποτε σημείο $P(x_p, y_p, z_p)$ και το μαγνητικό πεδίο που προέρχεται από σημειακή πηγή είναι:

$$H(r) = H_0 \hat{h} \exp \{jk\hat{r} \cdot r\} \quad (2.1)$$

Όπου:

H_0 : είναι μια σταθερά,

\hat{h} : το διάνυσμα πόλωσης για το μαγνητικό πεδίο (ένα από τα μοναδιαία διανύσματα $\hat{\theta}$ ή $\hat{\varphi}$),

k : ο κυματαριθμός (wavenumber) k , ο οποίος υπολογίζεται ως $k = 2\pi/\lambda$,

r : το διάνυσμα θέσης (με \hat{r} το μοναδιαίο διάνυσμα προς την πηγή),

J_s : η πυκνότητα επιφανειακού ρεύματος στην επιφάνεια του σκεδαστή.

Η πυκνότητα επιφανειακού ρεύματος J_s ή αλλιώς ρεύμα οπτικής φυσικής μπορεί να αποτυπωθεί με την ακόλουθη σχέση:

$$\vec{J}_s = \begin{cases} 2\hat{n} \times \vec{H}_i, & \text{για τις φωτεινές όψεις} \\ 0, & \text{για τις σκιασμένες πλευρές} \end{cases} \quad (2.2)$$

Όπου: \hat{n} το μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα σε κάθε σημείο μια επιφανείας S του σκεδαστή.

Το πεδίο σκέδασης μπορεί να υπολογιστεί από την ολοκλήρωση του ρεύματος Φυσικής Οπτικής [13],[14]. Έτσι, θέτοντας την έκφραση για το μακρινό πεδίο στο σκεδαζόμενο πεδίο Οπτικής Φυσικής το (σκεδαζόμενο) μαγνητικό πεδίο $H_S(r_s)$, σε κάθε θέση r_s προσεγγίζεται από την έκφραση 2.3 ως:

$$H_S(r_s) \approx \frac{-jk}{4\pi} \cdot \frac{e^{-jkr}}{r_s} \iint_S \hat{r}_s \times J_s(r') \cdot \exp\{jk\hat{r}_s \cdot r\} d^2S' \quad (2.3)$$

Όπου:

S : η φωτιζόμενη επιφάνεια του σκεδαστή,

r' : η θέση του τυχαίου σημείου στην επιφάνεια S ,

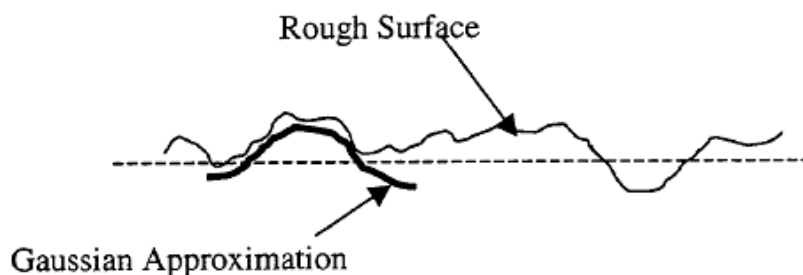
$\hat{n}(r')$: το μοναδιαίο διάνυσμα που είναι κάθετο στην επιφάνεια S στο σημείο r' ,

r_s : το μέτρο του διανύσματος r' .

2.1.2 Υπολογισμός Σκεδαζόμενου Πεδίου

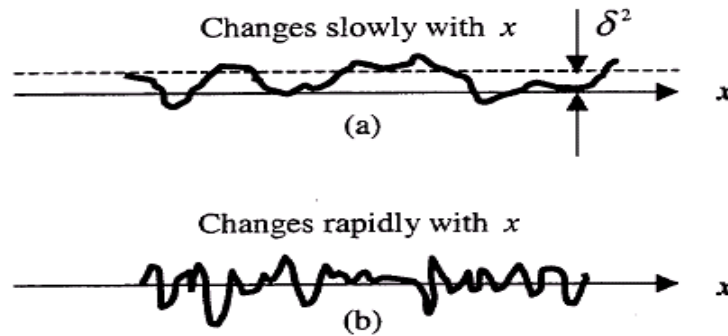
Μέχρι στιγμής, οι όψεις είναι τελείως ομαλές για τις αναφορές που έχουμε παρουσιάσει, στην πραγματικότητα όμως, οι στόχοι σπάνια έχουν τελείως ομαλές επιφάνειες, εξαιτίας υλικών και κατασκευαστικών ατελειών. Με αυτό το τρόπο, η τραχύτητα μιας επιφάνειας εισάγει διαφορές διαδρομής σε σχέση με μια ομαλή επιφάνεια με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η εξέταση της σκέδασης λόγω ύπαρξης αυτών των ατελειών στους υπολογισμούς της ραδιοδιατομής RCS [20].

Δεδομένου ότι οι διάφορες ατέλειες στις διαδικασίες κατασκευής και συναρμολόγησης ενός στόχου τείνουν να συμπεριφέρονται με τυχαίο τρόπο, οι ποσότητες που επιλέγονται να αντιπροσωπεύουν αυτές τις παραμέτρους μπορούν να μοντελοποιηθούν ως τυχαίες μεταβλητές. Έτσι το διάσπαρτο πεδίο που θα εμφανιστεί και η RCS, είναι λειτουργίες αυτών των τυχαίων μεταβλητών. Η επίδραση των τυχαίων σφαλμάτων στο προκύπτον πρότυπο RCS είναι να αφαιρεθεί η ενέργεια από την κατοπτρική ανάκλαση, μετατρέποντάς την σε τυχαία σκέδαση, που είναι σχεδόν εξίσου κατανεμημένη σε όλες τις κατευθύνσεις της και ονομάζεται διάχυτη σκέδαση. Έτσι, η μοντελοποίηση μιας τραχιάς επιφάνειας αρχίζει με την παραδοχή ότι οι αποκλίσεις της επιφάνειας μοιάζουν με Γκαουσιανά (Gaussian) βαθουλώματα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.1.



Εικόνα 2.1 Γκαουσιανή (Gaussian) προσέγγιση μια τραχιάς επιφάνειας [20]

Ακόμη, είναι απαραίτητο να ορισθούν δύο παράμετροι, το διάστημα συσχέτισης C [m] και η διακύμανση των ανωμαλιών, που ορίζεται ως δ^2 όπου δ είναι η τυπική απόκλιση των παρατυπιών. Το διάστημα συσχέτισης C , είναι η μέση απόσταση στην οποία οι αποκλίσεις γίνονται χωρίς συσχετισμό. Όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.2, μια μεγάλη απόσταση συσχέτισης υποδηλώνει ένα βραδέως μεταβαλλόμενο σφάλμα επιφάνειας, ενώ μια μικρή απόσταση συσχέτισης χαρακτηρίζει ένα ταχύτατα μεταβαλλόμενο σφάλμα.



Εικόνα 2.2 (α) Μεγάλη απόσταση συσχέτισης, (β) Μικρή απόσταση συσχέτισης [20]

Με βάση τα παραπάνω η μέση τιμή της RCS μιας επιφάνειας είναι:

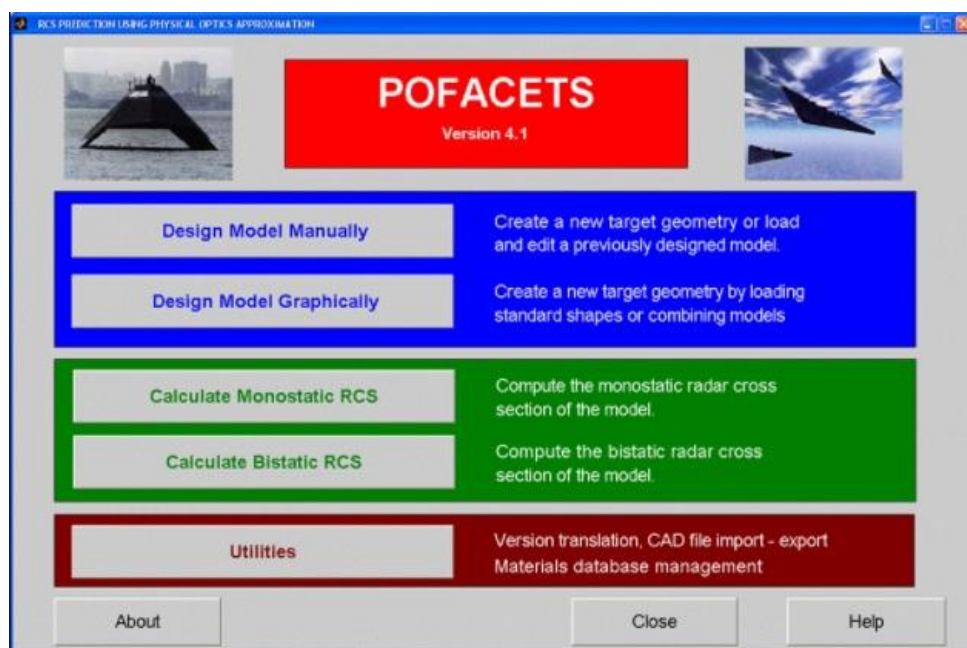
$$\sigma_{Aveg} \approx \frac{4\pi A^2}{\lambda^2} e^{-4k^2 \delta^2 \cos^2 \theta''} \cdot \left[\frac{4\pi k^2 \delta^2 C^2}{A} \exp\left(-\frac{\pi^2 C^2 \sin^2 \theta''}{\lambda^2}\right) \right] \quad (2.4)$$

με το A να είναι το εμβαδόν της επιφάνειας και το θ'' να είναι η πολική γωνία των τοπικών συντεταγμένων μιας επιφάνειας [20].

2.1.2 Το Πρόγραμμα POFACETS

Το πρόγραμμα με την ονομασία POFACETS, είναι μία εφαρμογή που αναπτύχθηκε το 2000 στο US Naval Postgraduate School η οποία μπορεί να εκτελείται σε περιβάλλον MATLAB. Το πρόγραμμα POFACETS σήμερα βρίσκεται στην έκδοση 4.1 (Εικόνα 2.3) και θεωρείται ως είναι μία υλοποίηση της μεθόδου Φυσικής Οπτικής για την πρόβλεψη της ραδιοδιατομής σύνθετων αντικειμένων, με σχετικά μέτριες υπολογιστικές απαιτήσεις. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η μέθοδος της Φυσικής Οπτικής, χρησιμοποιείται για να

υπολογιστούν τα επαγόμενα ρεύματα σε κάθε στοιχειώδη τριγωνική επιφάνεια. Το παραπάνω πρόγραμμα μοντελοποιεί έναν τυχαίο στόχο διαιρώντας την επιφάνειά του σε πολλές μικρές τριγωνικές επιφάνειες (facets). Το λογισμικό μπορεί να υπολογίζει το μονοστατικό ή διστακτικό (2D) RCS του αντικειμένου για τις παραμέτρους που καθορίζει ο ίδιος ο χρήστης και εμφανίζει γραφικά τη γεωμετρία του μοντέλου και το RCS του. Τέλος, το λογισμικό περιλαμβάνει ένα σύνολο χρήσιμων βοηθητικών προγραμμάτων για την εισαγωγή αρχείων CAD και την παρουσίαση δεδομένων [13],[15].



Εικόνα 2.3 Το πρόγραμμα POFACETS 4.1 [15]

Στην παρούσα πτυχιική εργασία το λογισμικό POFACETS χρησιμοποιείται, προκειμένου να εκτιμηθεί η ραδιοδιατομή ενός ελικοπτερου το οποίο αποτελεί τον εξεταζόμενο στόχο μας. Αρχικά, όπως θα αναλυθεί στις επόμενες ενότητες δημιουργείται ένα τρισδιάστατο 3D μοντέλο του στόχου - ελικοπτερου, το οποίο βελτιώνεται σταδιακά, με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα και στη συνέχεια γίνεται προσομοίωση στο περιβάλλον του Matlab με την βοήθεια του POFACETS.

2.2 Διαδικασίες Μοντελοποίησης Αεροσκαφών - Ελικοπτέρων

Προκειμένου να εκτιμηθεί η ραδιοδιατομή RCS ενός στόχου πρέπει να δημιουργηθεί ένα τρισδιάστατο 3D μοντέλο αυτού, το οποίο σταδιακά γίνεται ποιοτικότερο, με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα, είτε δυο διαστάσεων πχ φωτογραφίες, βίντεο εφόσον δεν διατίθενται πληροφορίες και μετρήσεις, ή και πρωτότυπα σχέδια, καθώς και κάποιες βασικές γνώσεις σχετικά με τον σχεδιασμό του και τα υλικά κατασκευής του. Στην συνέχεια, χρησιμοποιείται ο κώδικας ROFACETS 4.1 που όπως προαναφέρθηκε είναι μια υλοποίηση της μεθόδου Φυσικής Οπτικής για την πρόβλεψη της ραδιοδιατομής σύνθετων αντικειμένων και ο οποίος μπορεί να εκτελεστεί στο περιβάλλον MATLAB [13].

Έτσι, μια προτεινόμενη ιδέα κατασκευής ενός μοντέλου όταν δεν είναι γνωστές οι διαστάσεις του αντικειμένου και είναι αδύνατη η εκτέλεση πραγματικών μετρήσεων, με την χρήση της Φυσικής Οπτικής για τον υπολογισμό της διατομής στόχου, αποτελείται από τα ακόλουθα βήματα:

- Προεπεξεργασία δισδιάστατων 2D φωτογραφιών υψηλής ευκρίνειας (ή στιγμιοτύπων από βίντεο) του υπό εξέταση αντικειμένου, με τη μετατροπή τους σε σχέδια, χρησιμοποιώντας εφαρμογές όπως το GIMP. Ιδανικά, αυτές οι εικόνες θα πρέπει να καλύπτουν την πρόσοψη, την πλάγια και την κάτοψη του αντικειμένου, επιτρέποντας την ορθογραφική προβολή,
- Εκτίμηση των διαστάσεων του αντικειμένου,
- Κατασκευή ενός τρισδιάστατου μοντέλου, βασισμένου στα προαναφερόμενα σχέδια και διαστάσεις, π.χ με λογισμικό όπως το AUTODESK 3ds Max ή με το Blender 3D,

- Βελτίωση - τελειοποίηση του τρισδιάστατου 3D μοντέλου, βάσει φωτογραφιών/βίντεο κλπ,
- Εκτέλεση προσομοιώσεων με το πρόγραμμα POFACETS οι οποίες μπορούν να λάβουν υπόψη διάφορες πιθανές ρυθμίσεις, ζώνες συχνότητων και υλικά των επιφανειών του αντικειμένου [13],[16].

Όταν οι διαστάσεις του αντικειμένου είναι γνωστές ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

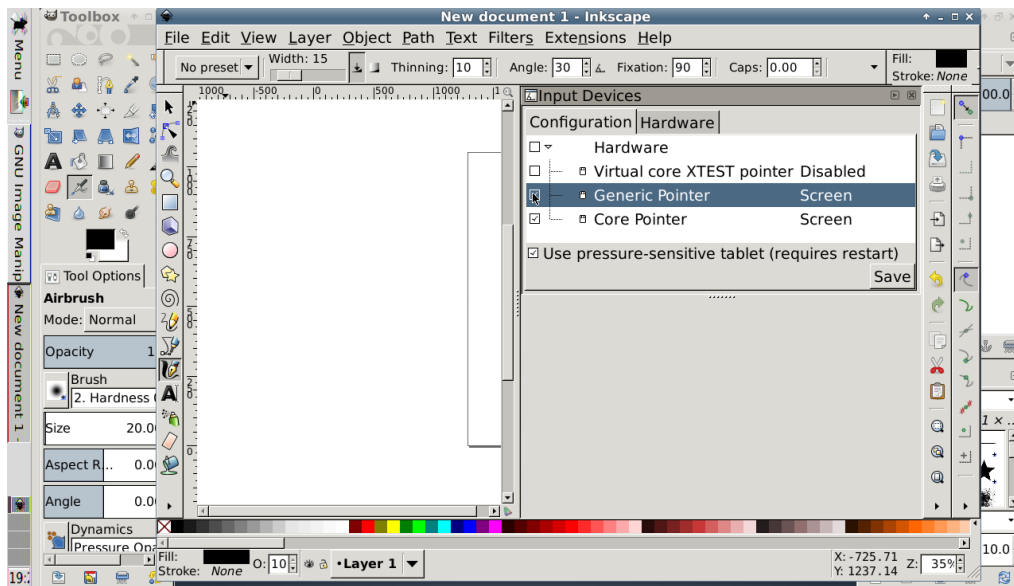
- Εισαγωγή των διαστάσεων του αντικειμένου από τη βιβλιογραφία, και στη συνέχεια κατασκευή του τρισδιάστατου μοντέλου, πχ με λογισμικό, όπως AUTODESK 3ds Max ή Blender 3D,
- Εκτέλεση πραγματικών μετρήσεων στο πεδίο, για την βελτίωση - τελειοποίηση του τρισδιάστατου 3D μοντέλου,
- Εκτέλεση προσομοιώσεων με το πρόγραμμα POFACETS οι οποίες μπορούν να λάβουν υπόψη διάφορες πιθανές ρυθμίσεις, ζώνες συχνότητων και υλικά των επιφανειών του αντικειμένου [13],[16].

2.2.1 Κατασκευή 3D Μοντέλου από 2D Εικόνες

Προκειμένου να δημιουργηθεί ένα μοντέλο τριών διαστάσεων (3D model) ενός σύγχρονου αεροσκάφους, πυραύλου ή οποιουδήποτε άλλου οπλικού συστήματος, είναι απαραίτητο να υπάρχει πρόσβαση σε τυχόν πλήρη σχέδια αυτών καθώς και πρόσβαση σε συλλογή εικόνων υψηλής ποιότητας, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δισδιάστατα μοντέλα αναφοράς (2D models). Εάν ένα οπλικό σύστημα είναι αρκετά «ώριμο», πιθανό είναι να υπάρχουν αρκετές εικόνες υψηλής ανάλυσης, προδιαγραφές καθώς και σχετικά αξιόπιστα σχέδια αυτού.

Αντίθετα, όσον αφορά στα νέα συστήματα όπλων, οι διαθέσιμες φωτογραφίες ή σχέδια ενδέχεται να έχουν αλλάξει, με κάποιο τρόπο. Έτσι, για παράδειγμα μια νέα αλλαγή - αναβάθμιση στη διάμετρο ή τα πτερύγια του πυραύλου στις ήδη υπάρχουσες προδιαγραφές ή ελαφρώς επεξεργασμένες φωτογραφίες από αεροσκάφη μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικές μεταβολές ως προς στην εκτιμώμενη ραδιοδιατομή RCS [16].

Το 1ο βήμα για την 3D μοντελοποίηση ενός οπλικού συστήματος είναι η επιλογή και η επεξεργασία διαθέσιμων φωτογραφιών υψηλής ανάλυσης ή ακίνητων εικόνων από βίντεο (με λήψη στιγμιότυπων οθόνης- screenshots), παρέχοντας εμπρόσθια, πλευρικές και κάτοψη των αντικειμένων. Σε δεύτερο χρόνο με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού επεξεργασίας φωτογραφιών, όπως το GIMP (GNU Image Manipulation Program), (Εικόνα 2.4) το οποίο είναι ένα δωρεάν εργαλείο ανοιχτού κώδικα, οι επιλεγμένες φωτογραφίες μπορούν να μετατραπούν σε σχέδια χρησιμοποιώντας τις επιλογές αποκορεσμού (desaturation) και της ανίχνευση άκμων (edge detection) [16],[17].



Εικόνα 2.4 Το λογισμικό GIMP 2.8 [17]

Με τον παραπάνω τρόπο υλοποιείται η ιδέα δημιουργίας ενός βασικού τρισδιάστατου μοντέλου του αντικείμενου, το οποίο στην συνέχεια θα εξευγενιστεί με τη βοήθεια ενός κατάλληλου λογισμικού CAD, με τελικό στόχο να «ταιριάζει» το μοντέλο που φτιάχτηκε με τις λεπτομέρειες που απεικονίζονται στις διαθέσιμες φωτογραφίες και βίντεο. Στις παρακάτω υποενότητες παρουσιάζονται παραδείγματα, τρεις διαφορετικές μέθοδοι για τη δημιουργία ενός 3D μοντέλου.

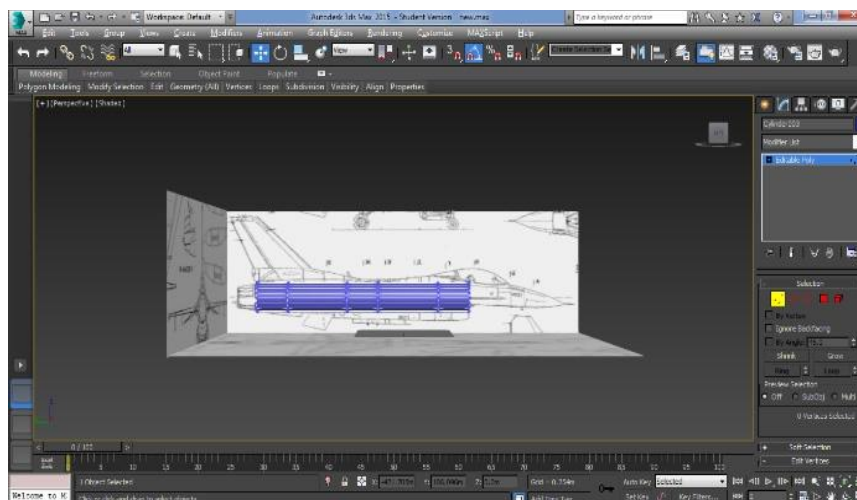
2.2.2 Το Παράδειγμα Μοντελοποίησης Μαχητικού Αεροσκάφους F-16 με την Εφαρμογή AUTODESK 3Ds MAX

Το μαχητικό αεροσκάφος F-16 θεωρείται ως ένας ώριμος τύπος αεροσκάφους, οπότε δεν υπάρχει δυσκολία εύρεσης τεχνικών χαρακτηριστικών, φωτογραφιών και σχεδιαγραμμάτων. Έτσι, χρησιμοποιώντας σχέδια από ανοικτές πηγές ως σημείο εκκίνησης δημιουργήθηκε ένα τρισδιάστατο μοντέλο του αεροσκάφους. Το συγκεκριμένο τρισδιάστατο

μοντέλο στην συνέχεια θα συγκριθεί με μεγάλο πλήθος φωτογραφιών, τραβηγμένες από διάφορες γωνίες ώστε να βελτιωθεί σταδιακά [16],[18].

Με την βοήθεια της εφαρμογής AUTODESK 3Ds MAX μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει απλά γεωμετρικά σχήματα (γεωμετρίες-geometries) όπως κύλινδροι και κύβοι, για να κατασκευάσει πιο σύνθετα σχέδια. Οποιαδήποτε απλή «γεωμετρία» μπορεί να αποτελέσει ένα «πολύεδρο» που μπορεί να τροποποιηθεί, αποτελούμενο από πλευρές, ακμές και πολύγωνα. Εκβάλλοντας και μετακινώντας τα στοιχεία, μπορούν να οριστούν πολύπλοκα σχήματα.

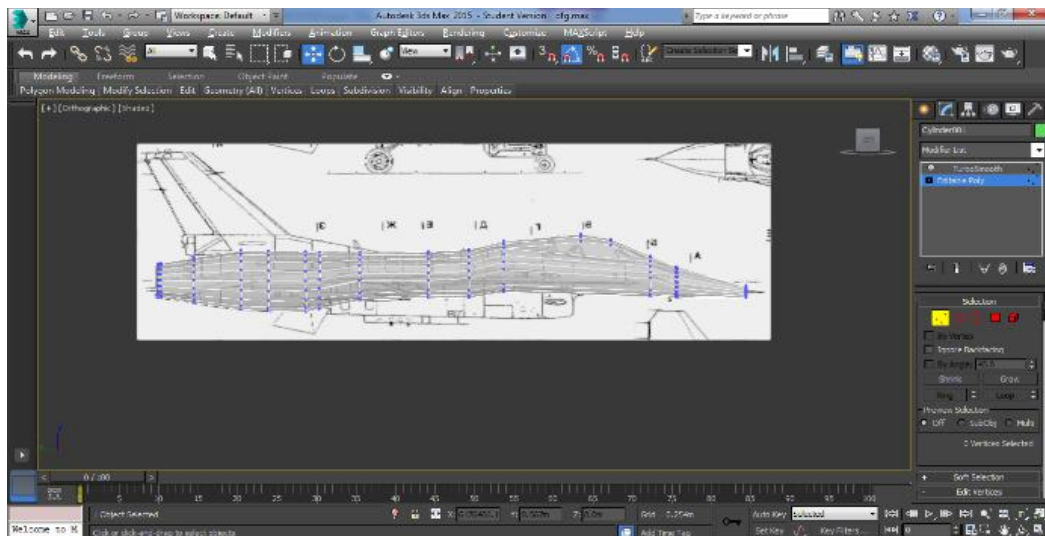
Για το F-16 όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.5 σχεδιάζεται αρχικά ένας κύλινδρος που αντιπροσωπεύει την άτρακτο, ενώ στη συνέχεια, η «γεωμετρία» αυτή μετατρέπεται σε ένα τροποποιήσιμο «πολύεδρο». Μετά την τροποποίηση των κορυφών, μοντελοποιείται η άτρακτος. Το επόμενο βήμα είναι η μοντελοποίηση της καλύπτρας. Τα πολύγωνα στο πρόσθιο μέρος της ατράκτου, τα οποία μπορούν να τροποποιηθούν για να μοντελοποιήσουν την καλύπτρα, αρχικά εξωθούνται και μετά τροποποιούνται με τη μετατόπιση πλευρών στο σχήμα της καλύπτρας. Η καλύπτρα δεν προβάλλεται με ακρίβεια στα σχέδια, οπότε αναγκαία είναι η χρήση φωτογραφιών αναφοράς [16].



Εικόνα 2.5 Προσαρμογή των τροποποιήσιμων πολυέδρων που απεικονίζουν την άτρακτο του F-16, σύμφωνα με τα δεδομένα των σχεδίων [16]

Σε ότι αφορά στο ακροφύσιο του κινητήρα:

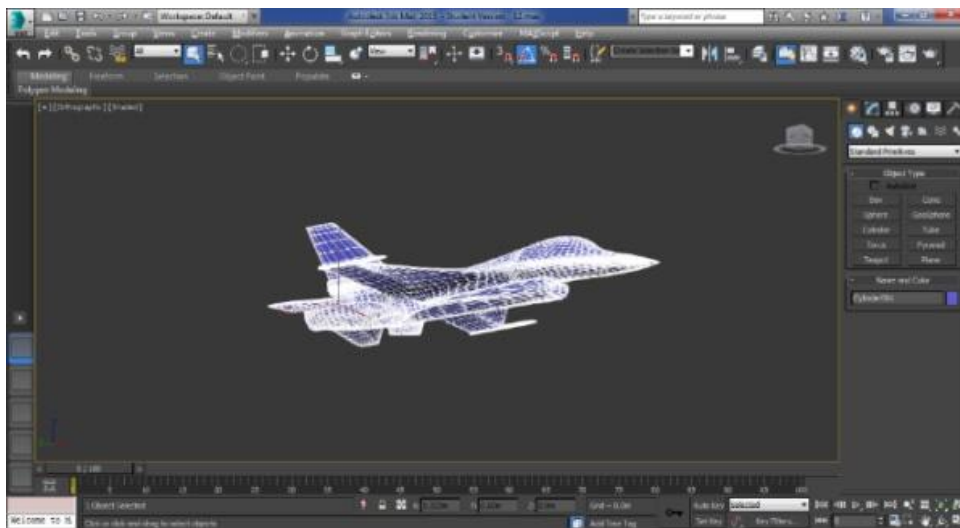
- Αρχικά η κυκλική ακμή στην άκρη της ατράκτου μετακινείται, και μετά ρυθμίζεται το μέγεθός της.
- Για τον κώνο του ραντάρ, δημιουργείται μια σφαίρα, ρυθμίζεται το μέγεθός της και μετά διαιρείται στη μέση. Στη συνέχεια τροποποιείται περαιτέρω για να προσεγγίσει το επιθυμητό σχήμα. Στην Εικόνα 2.6 αναπαριστάται το τροποποιήσιμο «πολύεδρο» της ατράκτου του F-16.



Εικόνα 2.6 Το τροποποιήσιμο «πολύεδρο» της ατράκτου του F-16 [16]

- Με την παραπάνω διαδικασία το κύριο μέρος του μοντέλου είναι έτοιμο και πλέον μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση για τον σχεδιασμό και την πρόσθεση των υπολοίπων μερών.
- Το μοντέλο θα πρέπει να είναι σχετικά συμμετρικό, για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται η εντολή symmetry, έτσι ώστε οι αλλαγές στη μία πλευρά της ατράκτου να εφαρμόζονται και στην άλλη.
- Καθώς το μοντέλο προβάλλεται στην πρόσθια όψη, είναι απαραίτητη η διαγραφή του μισού. Στη συνέχεια, με την εφαρμογή της εντολής symmetry, το μοντέλο κατοπτρίζεται.
- Τέλος, αρκετά χρήσιμη είναι η εντολή turbosmooth, καθώς με τη επιλογή αυτής ομαλοποιούνται οι επίπεδες επιφάνειες και οι καμπύλες γίνονται ακριβέστερες.

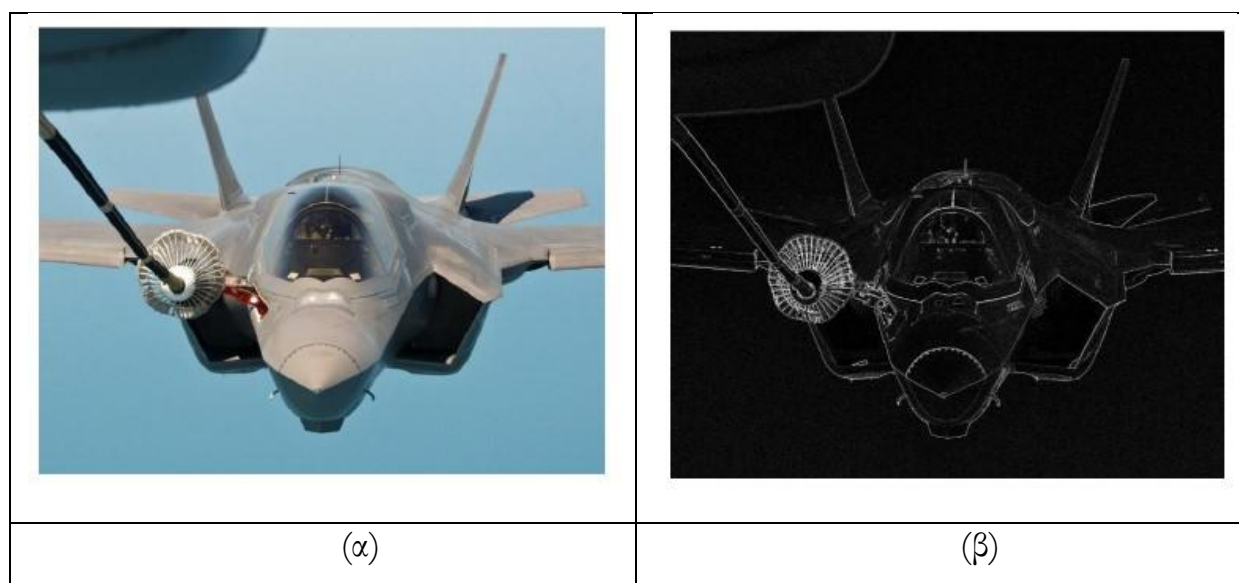
- Οι πτέρυγες μπορούν να μοντελοποιηθούν με την εξώθηση των πολυγώνων στην πλευρά της ατράκτου, εκεί που βρίσκεται η ρίζα της πτέρυγας. Στην συνέχεια, μοντελοποιείται η πτέρυγα προσαρμόζοντας την κλίμακα των πολυγώνων που μοντελοποιούν το ακροπτερυγό κατά μήκος του άξονα z, καθώς η αλλαγή της κλίμακας επηρεάζει όλα τα συνδεδεμένα πολύγωνα [16].
- Τα πίσω πτερύγια σταθεροποίησης μοντελοποιούνται χωριστά, με την εφαρμογή της προηγούμενης διαδικασίας.
- Ξεχωριστά μπορούν να μοντελοποιηθούν ο εξωτερικός οπλισμός, τα ατρακτίδια ή/και οι εξωτερικές δεξαμενές καυσίμου, μετά να επικολληθούν στο κυρίως μοντέλο, εφ' όσον απαιτείται. Στην Εικόνα 2.7, αποτυπώνεται το τελικό μοντέλο του F-16 με τον κώνο του ραντάρ.



Εικόνα 2.7 Το μοντέλο του F-16 με τον ριναίο κώνο του ραντάρ [16]

2.2.3 Μοντελοποίηση Μαχητικού Αεροσκάφους F-35 με το Λογισμικό Blender 3D

Το F-35 είναι ένα 5ης γενιάς μαχητικό αεροσκάφος σχεδιασμένο και κατασκευασμένο από την Lockheed Martin. Το βασικό πλεονέκτημα ενός F-35 είναι τα πολύ χαμηλά ποσοστά παρατηρησιμότητας. Για το μαχητικό F-35 δημιουργήθηκε ένα τρισδιάστατο μοντέλο (Εικόνα 2.10) με τη βοήθεια του λογισμικού ανοικτού κώδικα Blender 3D. Το μοντέλο αυτό τροποποιήθηκε περαιτέρω με τη σύγκρισή του με διαθέσιμες φωτογραφίες και βίντεο, όπως αυτά που φαίνονται στις Εικόνες 2.8 και 2.9 αντίστοιχα.

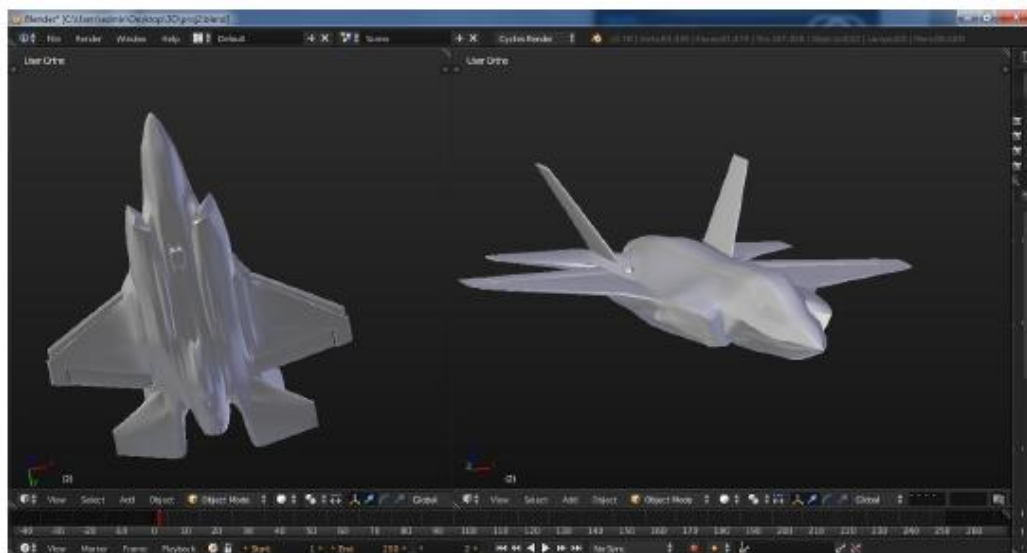


Εικόνα 2.8 (α) HD Φωτογραφία απο F-35, (β) Τροποποιημένη φωτογραφία του F-35 που χρησιμοποιήθηκε ως αναφορά [16]



Εικόνα 2.9 Στιγμιότυπο απο βίντεο (screenshot) του F-35

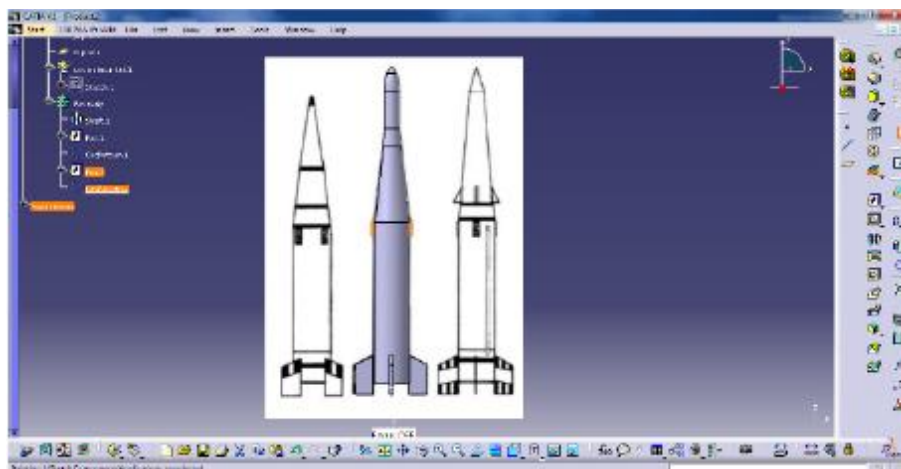
Τα μοντέλα που δημιουργήθηκαν ήταν δύο, ένα με και ένα χωρίς κώνο ραντάρ (ο οποίος είναι στην πραγματικότητα διαφανής, από πλευράς ραδιοδιατομής). Το μοντέλο με τον κώνο ραντάρ απεικονίζεται στην Εικόνα 2.10.



Εικόνα 2.10 Το τρισδιάστατο μοντέλο του F-35

2.2.4 Μοντελοποίηση του Πύραυλου Dong-Feng 15 (DF-15) με το Λογισμικό CATIA

Ο πύραυλος DF-15 είναι βαλλιστικός πύραυλος μικρού βεληνεκούς που αναπτύχθηκε από την Κίνα σε τρεις εκδόσεις (τις -A, -B και -C) [19]. Η δημιουργία ενός τρισδιάστατου μοντέλου πυραύλου με το πρόγραμμα CATIA v5 αποτελεί μια γρήγορη και ακριβή διαδικασία.



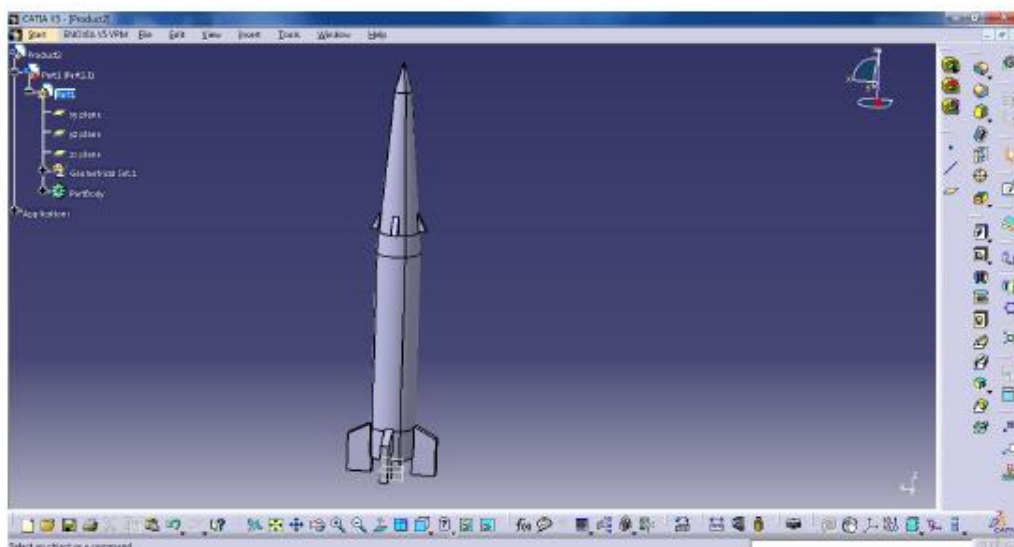
Εικόνα 2.11 Μοντέλα DF-15 στην CATIA v5

Η φωτογραφία που χρησιμοποιήθηκε ως βάση αναφοράς εισήχθη στο CATIA v5, με τη βοήθεια της λειτουργίας Sketch Tracer, έχοντας επιλέξει προηγουμένως το front view όπως φαίνεται στην παραπάνω Εικόνα 2.11. Η εικόνα δεν είναι απαραίτητο να εισαχθεί στο κέντρο του συστήματος αξόνων. Ο χρήστης μπορεί να μετακινήσει το σύστημα πριν αποδεχθεί την εισηγμένη εικόνα. Το σύστημα αξόνων πρέπει να τοποθετηθεί τρόπο τέτοιο ώστε ο z άξονας να διαιρεί τον πύραυλο σε δύο ίσα μέρη. Στη συνέχεια εισάγεται ένα νέο μέρος [16].

Ο σχεδιασμός του περιγράμματος του πυράβλου, πρέπει να γίνει με το CATIA v5 σε λειτουργία sketch mode. Ακόμη με την βοήθεια των εντολών profile και spline μπορεί να ολοκληρωθεί με επάρκεια το αρχικό, μισό περίγραμμα.

Το επόμενο βήμα είναι η εντολή shaft όπου σε λειτουργία workshop, επιλέγεται το περίγραμμα του πυράβλου. Με την εκτέλεση της εντολής shaft και επιλέγοντας τον άξονα z ως αναφορά, το περίγραμμα περιστρέφεται κατά 360° και δημιουργείται ένας τρισδιάστατος πυράβλος. Επίσης, το 3D μοντέλο που κατασκευάστηκε, μεγεθύνεται καταλλήλως, σύμφωνα με τις διαθέσιμες πληροφορίες για τις διαστάσεις του πυράβλου.

Τέλος, πρέπει να μοντελοποιηθούν τα πτερύγια. Έτσι σε ένα νέο σχεδιάγραμμα δημιουργείται με την ίδια διαδικασία, το περίγραμμα ενός πτερυγίου. Ακολούθως, εφαρμόζεται η εντολή rad και το περίγραμμα εξωθείται, δημιουργώντας ένα στερεό πτερύγιο. Πρέπει να δημιουργηθούν άλλα τρία πτερύγια, συμμετρικά, με τη χρήση κυκλικού pattern και τοποθετώντας κάθε πτερύγιο σε κλίση 90° ως προς το προηγούμενο, έχοντας επιλέξει ως αναφορά τον άξονα της ατράκτου. Το τελικό τρισδιάστατο μοντέλο του DF-15 παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.12.



Εικόνα 2.12 3D μοντέλο του πυραύλου DF-15-C στο CATIA v5 [16]

Β. ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.3 Κατασκευή 3D Μοντέλου Γνωστών Διαστάσεων - Μοντελοποίηση του Ελικοπτέρου NH90 με το Λογισμικό AUTODESK 3Ds MAX

Το ελικόπτερο που αποτελεί αντικείμενο εξέτασης της παρούσας εργασίας, είναι το Ε/Π NH90 της εταιρείας NHI, θυγατρικής εταιρείας της Airbus (Εικόνα 2.13). Είναι ελικόπτερο διινητήριο πολλαπλών ρόλων (αποστολών), μέσης μεταφορικής ικανότητας. Την πρώτη του πτήση εκτέλεσε το Δεκέμβριο του 1995, ενώ επιχειρησιακά ήταν έτοιμο αρκετά χρόνια αργότερα (2007). Μέχρι σήμερα έχουν παραδοθεί από την κατασκευάστρια εταιρεία, περισσότερα από 265 ελικόπτερα σε 13 χρήστες (Ελλάδα, Γαλλία, Γερμανία, Ιταλία, Ολλανδία, Φινλανδία, Νορβηγία, Ομάν, Αυστραλία, Νέα Ζηλανδία κ.α) και έχουν εκτελέσει συνολικά περίπου 127.000 ώρες πτήσης.

Το συγκεκριμένο ελικόπτερο ήταν το πρώτο που σχεδιάστηκε και στηρίχθηκε στις δυνατότητες ελέγχου του συστήματος πτήσης "fly by wire" με αυτόματο πιλότο τεσσάρων αξόνων. Επιπρόσθετα, η κατασκευάστρια εταιρεία έχει προβλέψει και άλλες καινοτομίες, όπως την κατασκευή του συνόλου του ελικοπτέρου από σύνθετα υλικά (ακόμη και των πτερύγων κυρίως και ουραίου στροφείου), την εισαγωγή συστήματος αυτοδιαγνωστικού ελέγχου για λόγους ελέγχου της κόπωσης όλων των κύριων συγκροτημάτων του ελικοπτέρου, αποπαγωποιητικό και αντιπαγωποιητικό σύστημα για τις πτέρυγες κυρίως και ουραίου στροφείου, περιβάλλον full glass cockpit κ.α.

Οι επιδόσεις του ελικοπτέρου είναι αξιομνημόνευτες, με τους τύπους κινητήρων που μπορεί να φέρει ($2 \times$ Rolls-Royce-Turbomeca RTM322-01/9 που αποδίδουν 2.230shp ή

2 × General Electric T700-T6E που αποδίδουν 2.115shp κ.α), μπορεί να μεταφέρει 20 άτομα με μέγιστη ταχύτητα 300km/h (162 knots, 186 mph) με εμβέλεια της τάξης των 800 km (497 mi).



Εικόνα 2.15 Το Ε/Π ΝΗ90 σε αποστολή [38]



Εικόνα 2.16 Το Cockpit του Ε/Π ΝΗ90

Γενικά, το ελικόπτερο NH90 έλαβε υπόψη για την κατασκευή του πολλές τεχνολογικές καινοτομίες των περασμένων δύο δεκαετιών με αποτέλεσμα να βρίσκεται σε περίοπτη θέση ανάμεσα στα υπόλοιπα ελικόπτερα της γενιάς του.

Οι πραγματικές διαστάσεις του αντικειμένου έχουν όπως στη βιβλιογραφία [37].

Ενδεικτικά έχουν όπως παρακάτω:

- Συνολικό μήκος 19,548μ, πλάτος 16,3μ, ύψος 5,309μ.
- Μήκος ατράκτου 16,125μ, διάμετρος κυρίως στροφείου 16,3μ, διάμετρος ουραίου στροφείου 3,2μ.
- Πλάτος οριζώντιου σταθερού αντισταθμιστικού πτερυγίου 4,61μ.

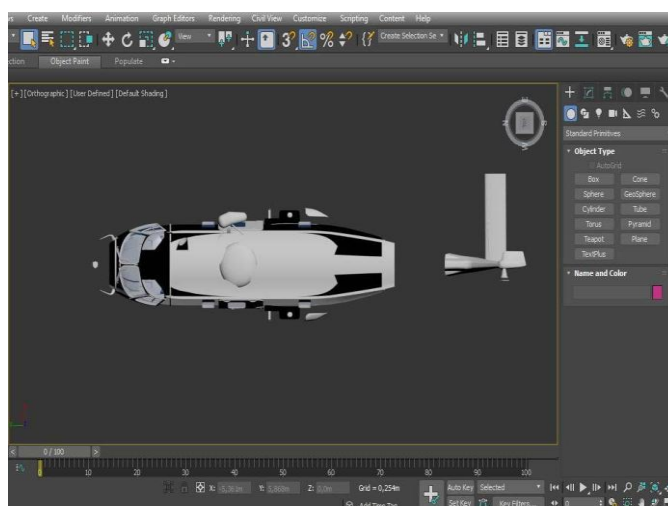
Για τις ανάγκες μοντελοποίησης του Ε/Π στο πρόγραμμα Autodesk, πραγματοποιήθηκαν και μετρήσεις επί πραγματικού ελικοπτέρου στο αεροδρόμιο Πάχης Μεγάρων.



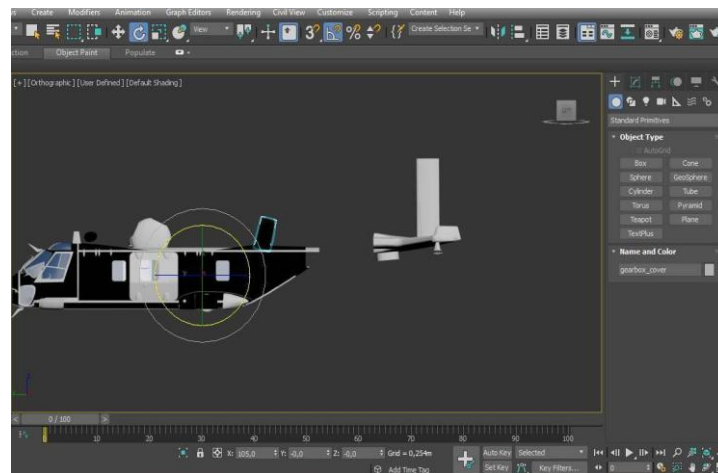
Εικόνα 2.17 Το Ε/Π NH90 της εταιρείας NHI [38]

Στο πρόγραμμα Autodesk χρησιμοποιήθηκε στην εκκίνηση της κατασκευής το γεωμετρικό σχήμα του κυλίνδρου για να δοθεί στο αντικείμενο η υπόσταση της ατράκτου. Ο κύλινδρος έλαβε τα παραμετρικά του αντικειμένου, δηλαδή τις πραγματικές διαστάσεις του. Με βάση τον κύλινδρο εξήχθησαν πολυέδρα (polygons), για να αποδοθεί η άτρακτος στο επιθυμητό σχέδιο του ελικοπτερού. Τροποποιήθηκαν οι κορυφές (vertices) των πολυέδρων και μοντελοποιήθηκε στη συνέχεια το αλεξήνεμο, οι πόρτες και τα παράθυρα των πιλότων όπως και η ράμπα και οι πόρτες και τα παράθυρα στην καμπίνα των επιβατών. Επιπρόσθετα, προκειμένου το πρόγραμμα να μπορεί να αναγνωρίζει το αντικείμενο της έρευνας με βάση την υλική του υπόσταση στον πραγματικό κόσμο, έγιναν ορισμένες τροποποιήσεις με εργαλεία που διαθέτει το πρόγραμμα στα παραμετρικά του [39], [40].

Η ίδια διαδικασία ακολούθηθηκε και για το ουραίο τμήμα του ελικοπτερού, παίρνοντας αυτή τη φορά ως αρχικό σχήμα ένα ορθογώνιο. Τέλος, τα δύο τμήματα ενώθηκαν και λειάνθηκαν (smoothed) [39], [40], προκειμένου να δώσουν μια ενιαία δομή, αυτή της ολοκληρωμένης ατράκτου. Στις εικόνες 2.18 και 2.19, παρουσιάζονται αποσπάσματα από τις διεργασίες κατασκευής της ατράκτου.

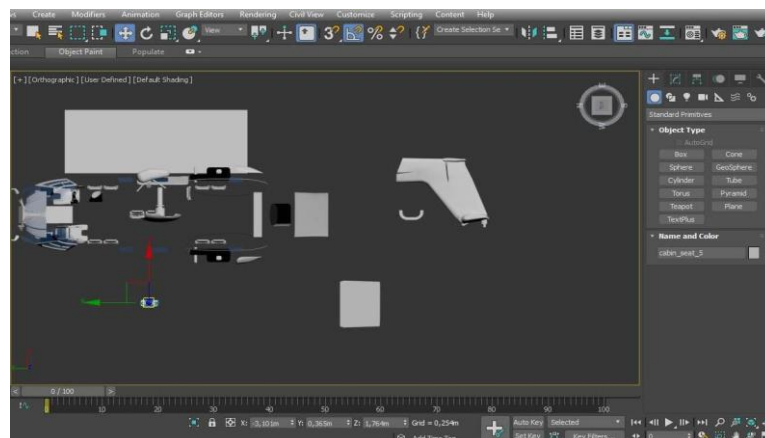


Εικόνα 2.18 προσπάθεια κατασκευής της ατράκτου του Ε/Π ΝΗ90 στο AUTODESK 3Ds MAX

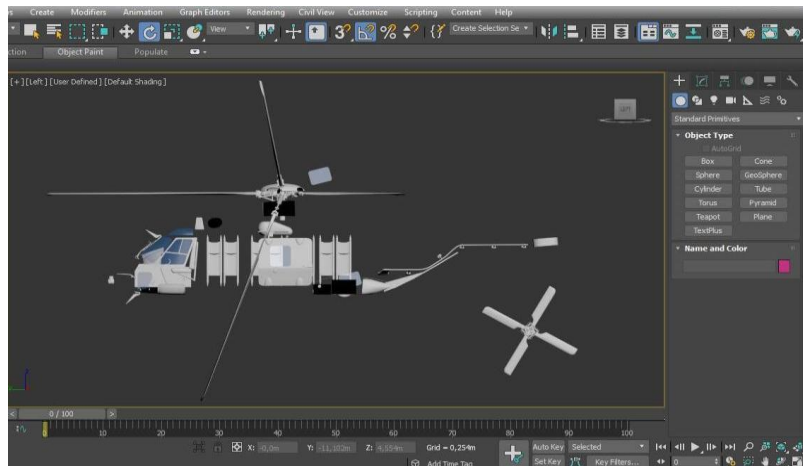


Εικόνα 2.19 3D προσπάθεια κατασκευής της ατράκτου του Ε/Π NH90 στο AUTODESK 3Ds MAX

Για τη δημιουργία των περυγών κυρίως και ουραίου στροφείου, αλλά και την εισαγωγή στοιχείων εσωτερικού φόρτου του ελικοπτέρου, όπως καθίσματα πιλότων και επιβατών, δημιουργήθηκαν λωρίδες (splines), οριζόντιες και κατακόρυφες στο πρόγραμμα οι οποίες συνενώθηκαν, κυρτώθηκαν (curved) και λειάνθηκαν (smoothed), προκειμένου να δώσουν το αναμενόμενο αισθητικό αποτέλεσμα. Οπουδήποτε απαιτήθηκε, οι λωρίδες αυτές κλωνοποιήθηκαν (cloned), για να διευκολυνθεί η διαδικασία της σχεδίασης [39], [40]. Στις εικόνες 2.20, 2.21 παρουσιάζονται αποσπάσματα από τη διεργασία που αναφέρθηκε.

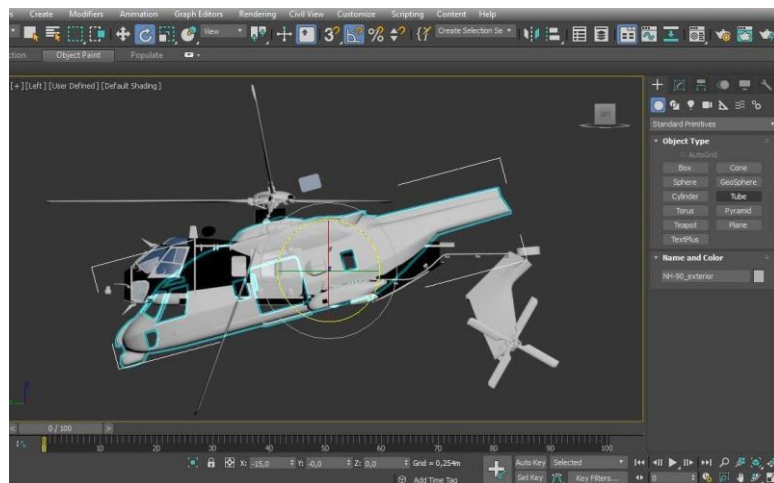


Εικόνα 2.20 3D προσπάθεια κατασκευής των συγκροτημάτων εσωτερικού φόρτου καθώς και των περυγών κυρίως – ουραίου στροφείου του Ε/Π NH90 στο AUTODESK 3Ds MAX



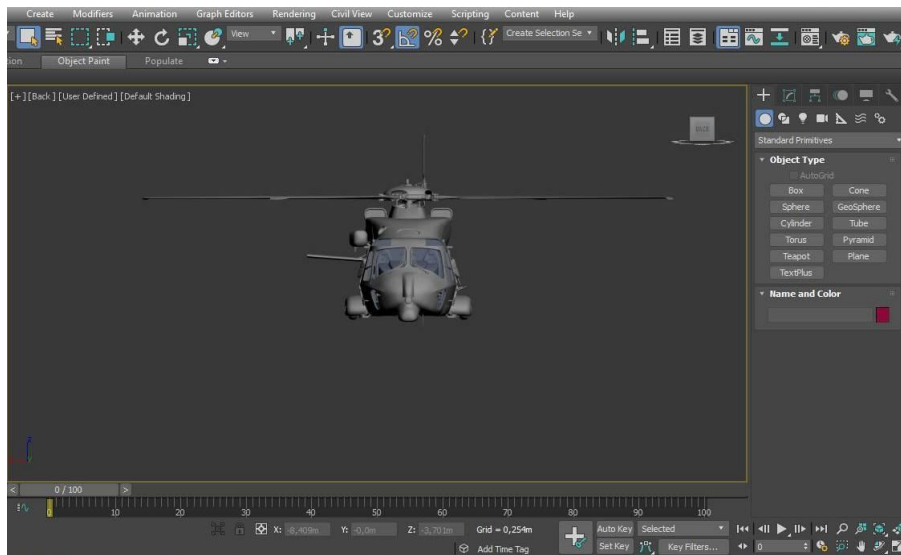
Εικόνα 2.21 3D προσπάθεια κατασκευής των συγκροτημάτων εσωτερικού φόρτου καθώς και των περυγών κυρίως – ουραίου στροφείου του Ε/Π ΝΗ90 στο AUTODESK 3Ds MAX

Το τελικό αποτέλεσμα δόθηκε μετά την μετατροπή των λωρίδων (splines) σε πλέγματα (meshes), τη μετακίνηση των πλεγμάτων και των κορυφών (vertices) των γεωμετρικών σχημάτων που σχηματίστηκαν, τη μετακίνηση των κορυφών στα πλέγματα. Στην εικόνα 2.22 απεικονίζεται το ελικόπτερο της έρευνας λίγα στάδια πριν την τελική δημιουργία του, λίγο πριν την τελική συνένωση όλων των συγκροτημάτων που το απαρτίζουν [39], [40].



Εικόνα 2.22 3D προσπάθεια συνένωσης των συγκροτημάτων του Ε/Π ΝΗ90 στο
AUTODESK 3Ds MAX

Η πρόσθεση μιας απεικόνισης της κίνησης (animation) του συστήματος προσγείωσης, όπως συμβαίνει στην πραγματικότητα στο Ε/Π NH90, καθώς και της δυνατότητας αναδίπλωσης του ουραίου στροφείου έγινε για χάρη απόδοσης του ελικοπτερου με μεγαλύτερη ακρίβεια [39], [40]. Συνολικά το μοντέλο της έρευνας που κατασκευάστηκε παρουσιάζει ακρίβεια απόδοσης άνω του 95% σε σχέση με το πραγματικό. Αποτελείται από 155.153 πολύγωνα (polygons) και 86.625 κορυφές (vertices). Στις εικόνες 2.23, 2.24, 2.25, 2.26, 2.27, 2.28, 2.29, 2.30, 2.31 απεικονίζεται το ελικοπτερο NH90 ολοκληρωμένο.



Εικόνα 2.23 3D εμπρόσθια απεικόνιση του ολοκληρωμένου Ε/Π NH90 στο AUTODESK 3Ds MAX



Εικόνα 2.24 3D πανοραμική εμπρόσθια απεικόνιση του ολοκληρωμένου Ε/Π NH90 στο AUTODESK 3Ds MAX



Εικόνα 2.25 3D δεξιά πλευρική απεικόνιση του ολοκληρωμένου Ε/Π NH90 στο AUTODESK 3Ds MAX



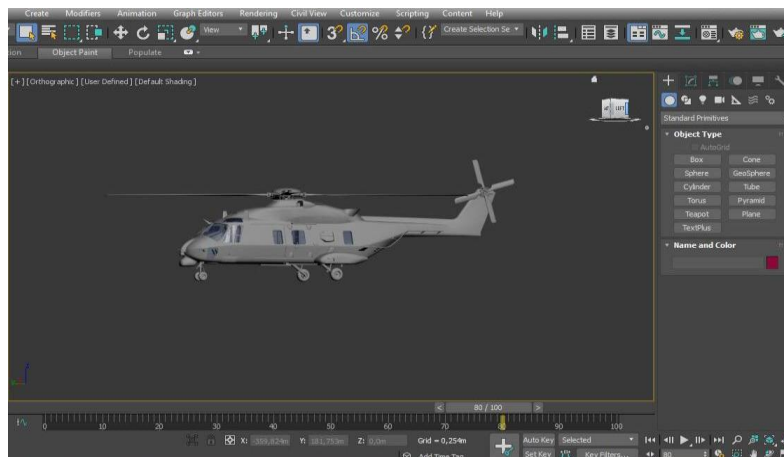
Εικόνα 2.26 3D κάτωθι απεικόνιση του ολοκληρωμένου Ε/Π ΝΗ90 στο AUTODESK 3Ds MAX



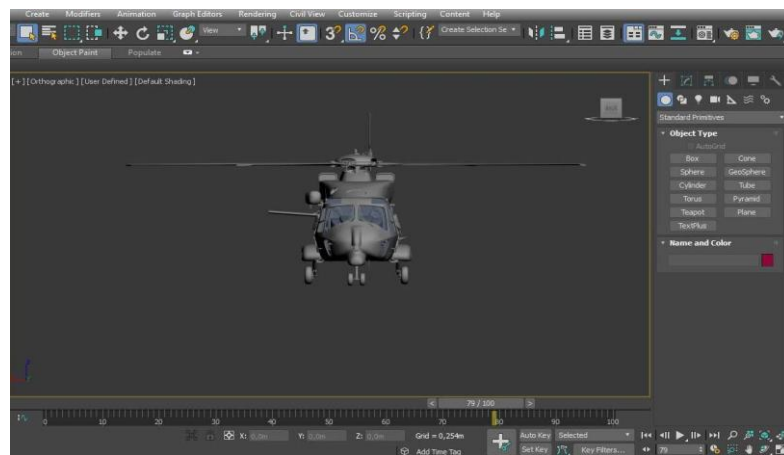
Εικόνα 2.27 3D πανοραμική απεικόνιση του ολοκληρωμένου Ε/Π ΝΗ90 στο AUTODESK 3Ds MAX



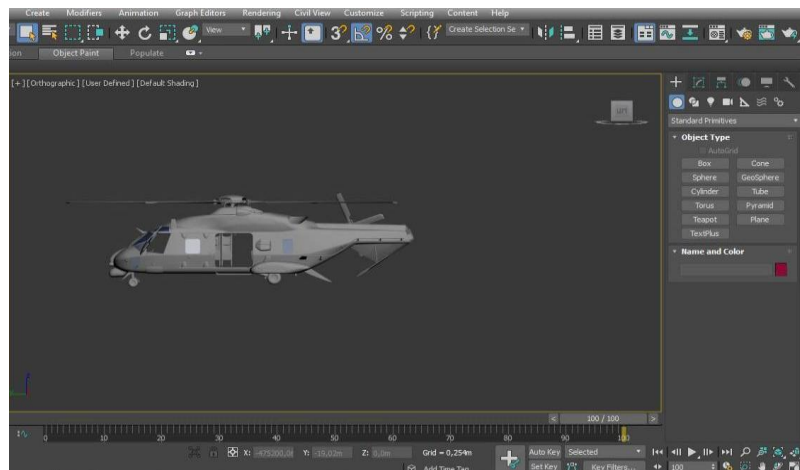
Εικόνα 2.28 3D οπίσθια απεικόνιση του ολοκληρωμένου Ε/Π ΝΗ90 στο AUTODESK 3Ds MAX



Εικόνα 2.29 3D αριστερή πλευρική απεικόνιση του ολοκληρωμένου Ε/Π NH90 (σύστημα προσγείωσης εκτεταμένο) στο AUTODESK 3Ds MAX



Εικόνα 2.30, 3D εμπρόσθια απεικόνιση του ολοκληρωμένου Ε/Π NH90 (σύστημα προσγείωσης εκτεταμένο), στο AUTODESK 3Ds MAX



Εικόνα 2.31 3D αριστερή πλευρική απεικόνιση του ολοκληρωμένου Ε/Π NH90 (ουραίο τμήμα αναδιπλωμένο, σύστημα προσγείωσης εκτεταμένο και πόρτες ανοικτές), στο AUTODESK 3Ds MAX

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο

Διαδικασία Προσομοίωσης Εναέριου Στόχου

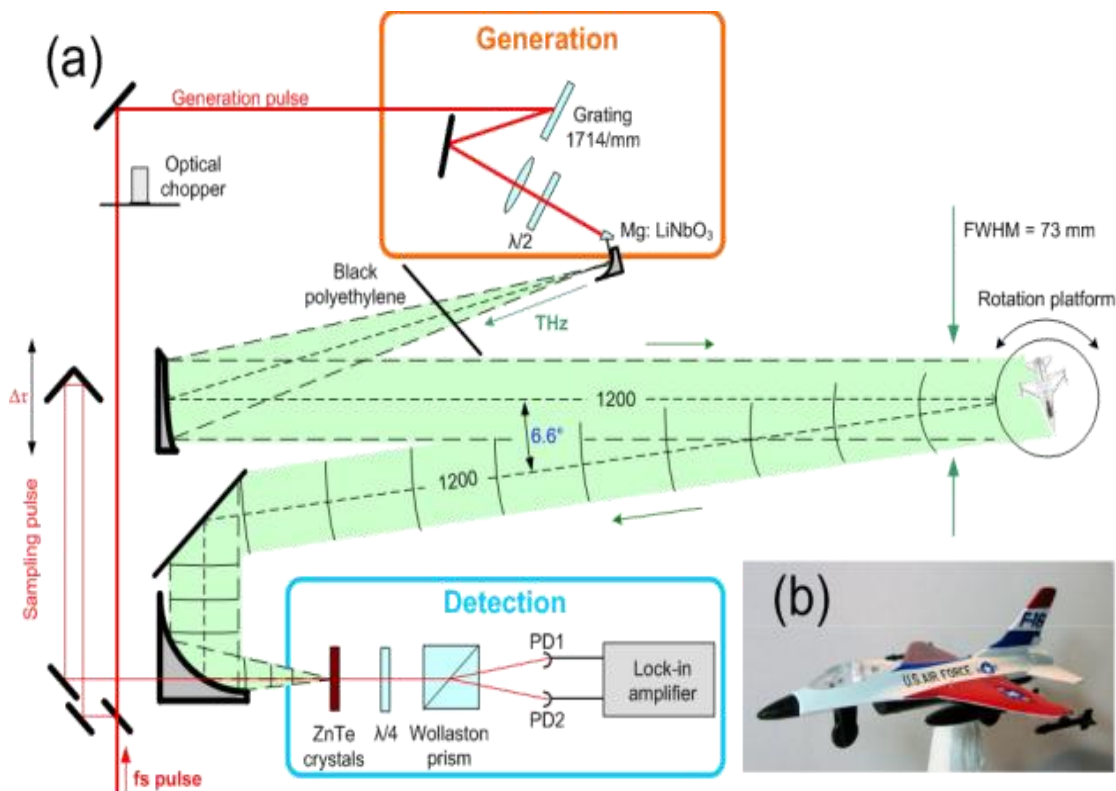
3.1 Γενικά περί Προσομοίωσης Εναέριων Στόχων (για την Εκτίμηση της Ραδιοδιατομής τους)

Η διαδικασία εύρεσης της ραδιοδιατομής ενός εναέριου στόχου (η πειραματική μέτρηση του RCS), πραγματοποιείται είτε σε πεδίο μέτρησης ανακλαστικότητας όπου το αντικείμενο τοποθετείται σε μη ανακλαστικό στήριγμα είτε σε ένα ανηχοϊκό θάλαμο με απουσία ανακλάσεων και θορύβου (anechoic chamber) [37], [41]. Το αντικείμενο τοποθετείται σε διάφορες θέσεις και ακτινοβολείται από Η/Μ κύμα, ενώ στη συνέχεια μετρείται η ανακλώμενη ακτινοβολία σε κάθε διεύθυνση. Στην εικόνα 3.1, απεικονίζεται το αεροσκάφος F-35 της Lockheed Martin να υποβάλλεται σε μέτρηση του RCS του.



Εικόνα 3.1 Α/Φ F-35 της Lockheed Martin υποβάλλεται σε μέτρηση υπολογισμού τιμών RCS [41]

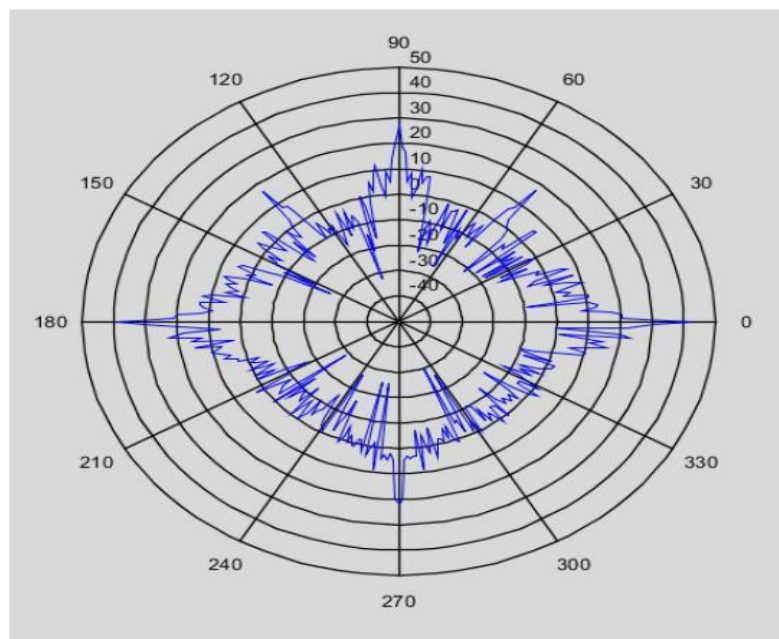
Σε απουσία τέτοιου ανηχοϊκού θαλάμου, μετρήσεις για την εύρεση του RCS μπορούν να πραγματοποιηθούν και με συσκευές προσομοίωσης σε εξωτερικό χώρο, με τη μέθοδο προσαρμογής της κλίμακας ακτινοβολίας. Το αντικείμενο προς εξέταση ακτινοβολείται με H/M κύμα συχνότητας 0.1 – 2THz και στη συνέχεια με υπολογιστικές μεθόδους, εξάγεται και αναπροσαρμόζεται το RCS του σε μικρότερες συχνότητες κυμάτων της τάξης των MHz – GHz [42]. Στην εικόνα 3.2 αναλύεται η παραπάνω τεχνική.



Εικόνα 3.2 (α) Σχηματικό διάγραμμα υπολογισμού RCS αντικειμένου, ακτινοβολώντας το με κύμα συχνότητας 0.1 – 2THz. (β) Μεταλλικό μοντέλο 10εκ σε κλίμακα 1:150 του μαχητικού αεροσκάφους F-16 [42]

Εφόσον δεν υφίσταται η δυνατότητα υπολογισμού του RCS με τους παραπάνω τρόπους, το RCS ενός αντικειμένου μπορεί εναλλακτικά να υπολογιστεί θεωρητικά με μοντελοποίηση του αντικειμένου σε ηλεκτρονικό υπολογιστή και εφαρμογή στη συνέχεια κάποιας από τις θεωρητικές μεθόδους υπολογισμού. Στην έρευνα που πραγματεύεται η εργασία θα χρησιμοποιηθεί ο κώδικας POFACETS.

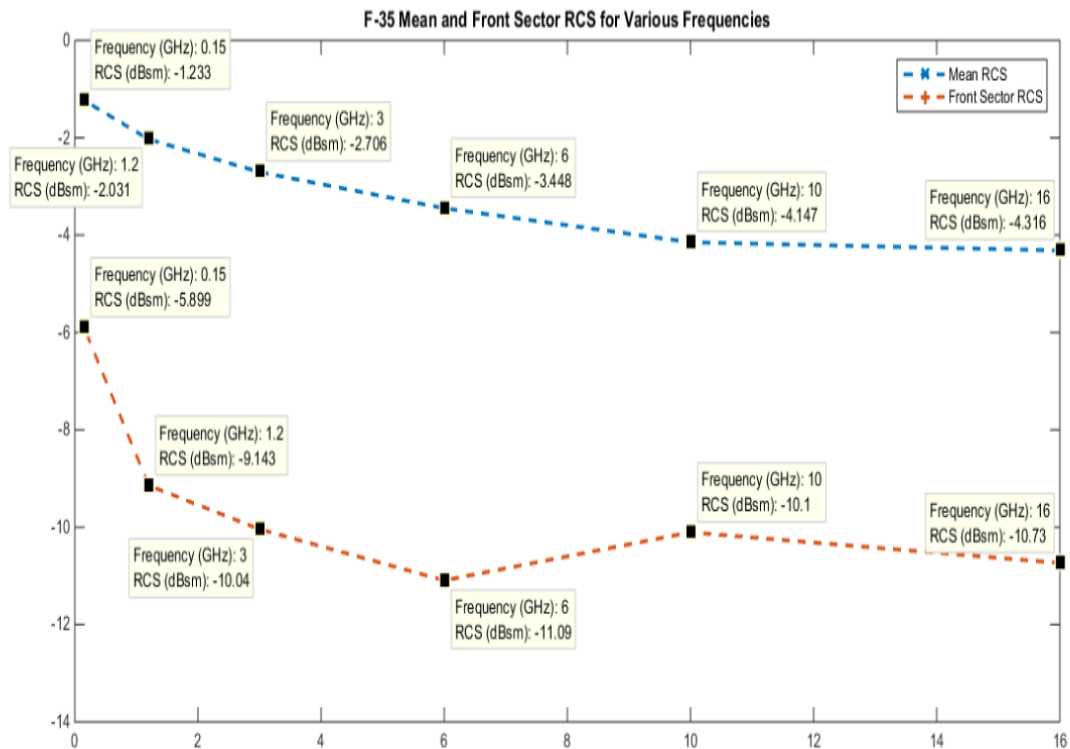
Σύμφωνα με το άρθρο των Touzoroulos et al για το παράδειγμα της Ενότητας 2.2.2 η ραδιοδιατομή του F-16 υπολογίστηκε για ραντάρ στη Ζώνη X που εκπέμπει στα 10GHz. Η μορφή της ραδιοδιατομής φαίνεται στην Εικόνα 3.3 και αντιστοιχεί στο πολικό διάγραμμα της RCS του μαχητικού F-16, όπως φαίνεται από το ίδιο ύψος ($\theta=90^\circ$ και φ με τιμές από 0° έως 360°). Ακόμη, η μέση μετωπική ραδιοδιατομή είναι $-2,8 \text{ dBsm}$ ή $0,525\text{m}^2$, υπολογισμένη βάσει των τιμών αζιμούθιου από -30° έως $+30^\circ$ (με βήμα 1°) και τιμών ανυψώσεως από -15° έως $+15^\circ$ (με βήμα των 5°).



Εικόνα 3.3 Πολικό διάγραμμα ραδιοδιατομής του μοντέλου του F-16, για τη συχνότητα 10 GHz και για το οριζόντιο επίπεδο του αεροσκάφους [16]

Η μέση ραδιοδιατομή του F-16C αναφέρεται ότι είναι στα $1,2\text{m}^2$, ενώ αντίστοιχα η ραδιοδιατομή του F-16IN (μία αναβαθμισμένη έκδοση του F-16 που είχε προταθεί στην Ινδία, στο πλαίσιο του παλαιότερου διαγωνισμού MMRCAs), είναι της τάξης του $0,1\text{m}^2$ (με ραντάρ AESA). Συνεπώς, το αποτέλεσμα που λαμβάνεται από την προτεινόμενη προσέγγιση είναι λογικό, καθώς βρισκείται ανάμεσα σε δύο τιμές ραδιοδιατομής. Από πλευράς υπολογιστικών απαιτήσεων, η πλήρης εκτέλεση του υπολογισμού της ραδιοδιατομής του F-16 με το φ να μεταβάλλεται από 0° έως 360° , με βήμα 1° , απαιτεί λιγότερο από μία ώρα με έναν συνήθη επεξεργαστή Intel i3 που λειτουργεί στα $2,5\text{GHz}$.

Αντίστοιχα, σύμφωνα με το μοντέλο του F-35 που παρουσιάστηκε στην ενότητα 2.2.3 το οποίο εισήχθη στον αλγόριθμο POFACETS και χρησιμοποιήθηκε σε μια σειρά προσομοιώσεων, στην εκτίμηση της ραδιοδιατομής δεν λαμβάνεται υπόψη πιθανή επι κάλυψη του αεροσκάφους με υλικό απορρόφησης ακτινοβολίας ραντάρ (υλικό RAM) που μειώνει τη ραδιοδιατομή με κατανεμημένη φόρτιση (distributed loading). Το F-35 διαθέτει προηγμένα υλικά RAM «fiber mat», που είναι ανθεκτικά και δεν χρειάζονται αρκετή συντήρηση σε σχέση με τις επικαλύψεις παλαιότερων μαχητικών stealth. Πιο πρόσφατες αναφορές κάνουν λόγο για τεχνολογία νανοσωλήνων άνθρακα (carbon nanotubes-CNT), που απορροφούν ηλεκτρομαγνητικά κύματα σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων. Έτσι, σύμφωνα με τα παραπάνω οι πραγματικές τιμές ραδιοδιατομής είναι χαμηλότερες από αυτές που δίνει ο αλγόριθμος POFACETS [16].

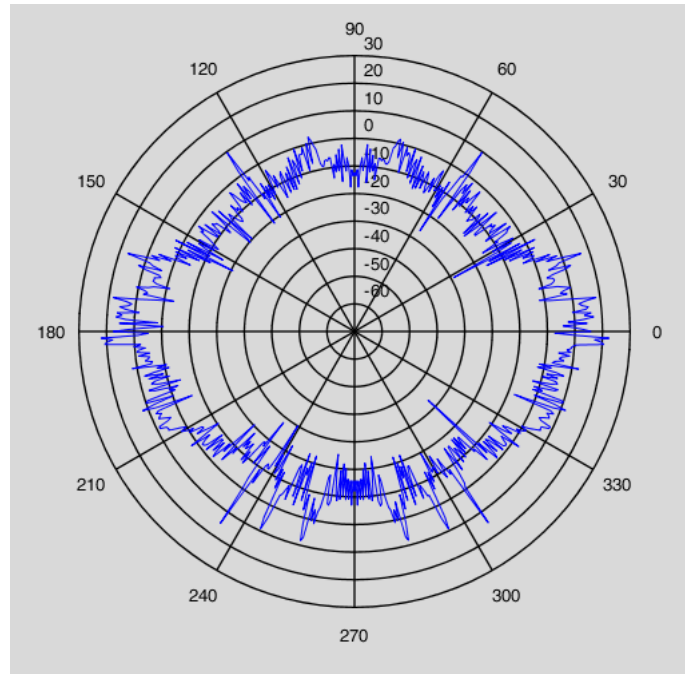


Εικόνα 3.4 Η μέση συνολική ραδιοδιατομή και η μέση μετωπική ραδιοδιατομή του μοντέλου του F-35, σε συνάρτηση με τη συχνότητα

Η μέση τιμή της ραδιοδιατομής και η μέση μετωπική ραδιοδιατομή υπολογισμένη στα διαστήματα από -30° έως $+30^\circ$ σε αζιμούθιο, με βήμα 1° , και με ανύψωση από τις -15° έως $+15^\circ$, με βήμα των 5° υπολογίστηκαν σε διάφορες ζώνες συχνοτήτων, από τη VHF μέχρι την Ku. Τα αποτελέσματα φαίνονται στην Εικόνα 3.4, από το οποίο προκύπτει ότι η ραδιοδιατομή δεν είναι τόσο μικρή στις χαμηλότερες ζώνες συχνοτήτων.

Στην Εικόνα 3.5, παρουσιάζεται η συνολική ραδιοδιατομή του F-35, βλέποντας τον στόχο από χαμηλότερο επίπεδο υπό γωνία 10° , σε συχνότητα φέροντος 10GHz. Η ραδιοδιατομή φαίνεται σχετικά μικρή σε έναν ευρύ μετωπικό τομέα, εκτός από τις αιχμές

που προκαλούνται από τα χείλη προσβολής των πτερύγων (περίπου σε γωνία 35° ως προς τον διαμήκη άξονα), ενώ διατηρεί υψηλές τιμές στα πλευρά (όπως αναμένεται, εξ αιτίας των πτερύγων και της ατράκτου) [16].



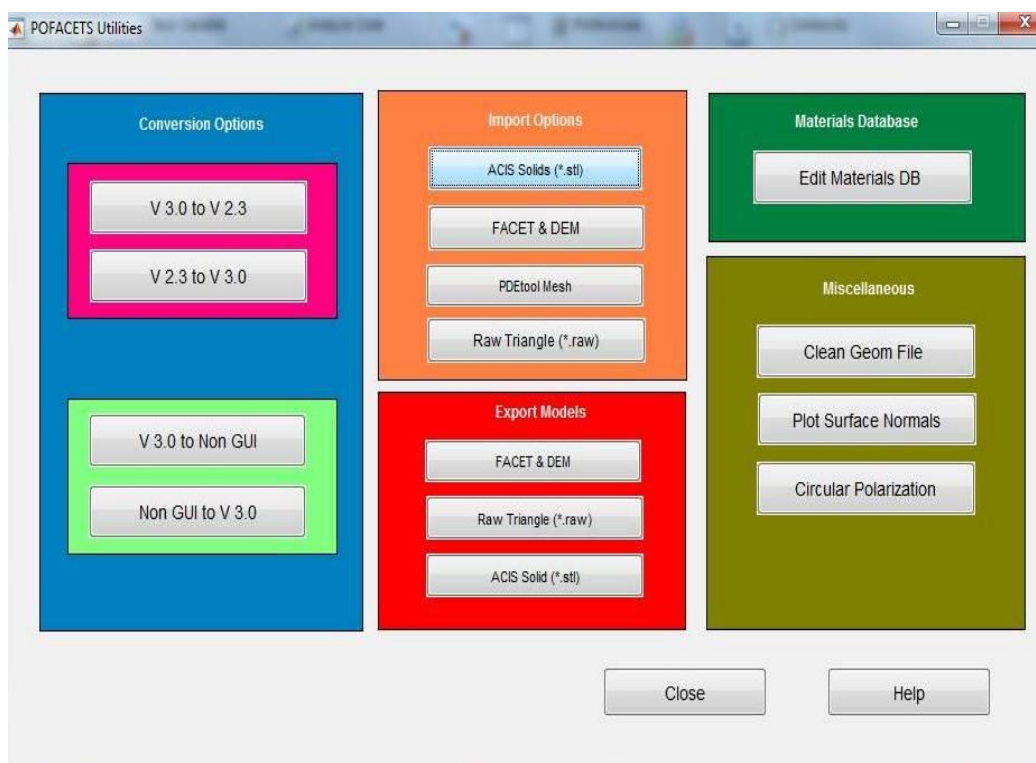
Εικόνα 3.5 Πολικό διάγραμμα ραδιοδιατομής του μοντέλου του F-35, υπό γωνία 10° , για συχνότητα φέροντος στα 10GHz [16]

3.2 Εισαγωγή Ε/Π ΝΗ90 στο Matlab και Προσομοίωση με Κώδικα POFACETS

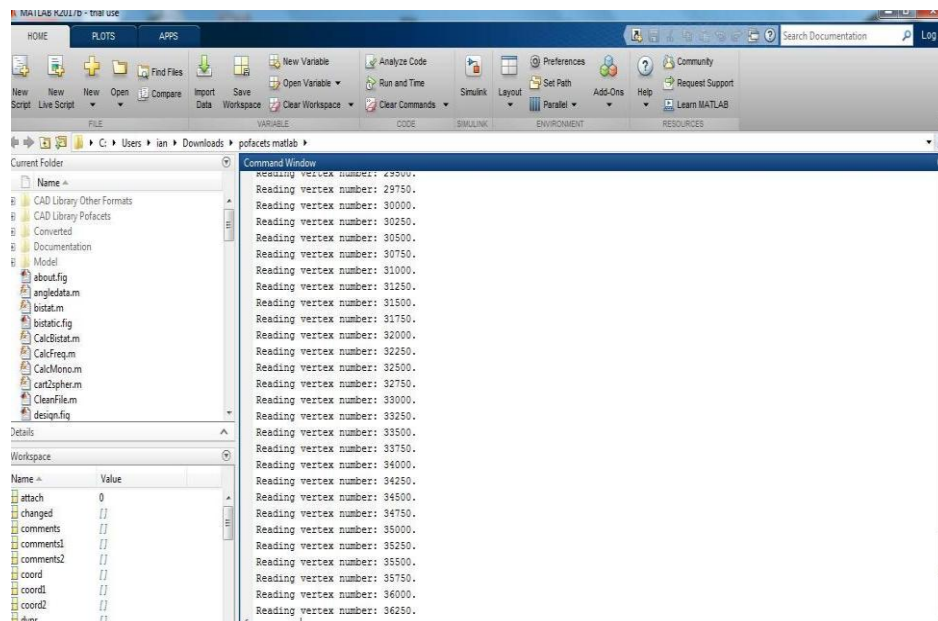
Ο κώδικας POFACETS 4.1 που χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί η ραδιοδιατομή του στόχου με τη χρήση της Οπτικής Φυσικής όπως αναφέραμε και παραπάνω, εκτελείται στο περιβάλλον του MATLAB. Έτσι, αρχεία που αποθηκεύονται σε μορφή στέρεο-λιθογραφικού κειμένου (stereo-lithographic text format *.stl) μπορούν να εισαχθούν και να μετατραπούν σε αρχεία τύπου .m, ώστε να γίνει η επεξεργασία τους με MATLAB. Το 3D

μοντέλο του ελικοπτερου NH90 εξήχθη από το πρόγραμμα Autodesk σε μορφή .stl και εισήχθη στο POFACETS (Εικόνες 3.6, 3.7 και 3.8).

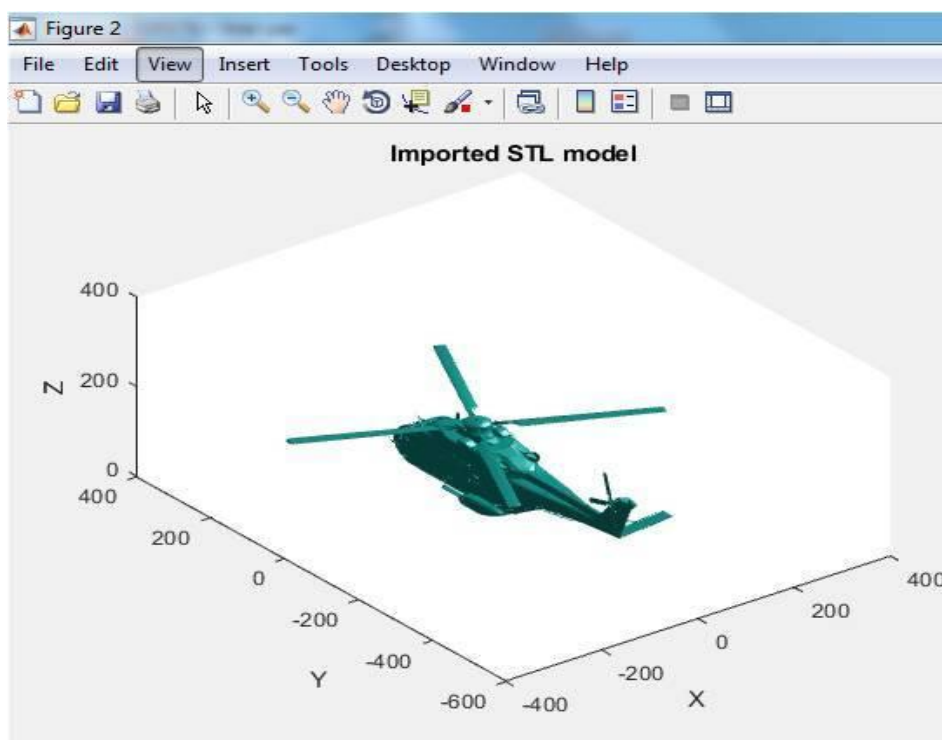
Είναι σημαντικό σε αυτό το σημείο να τονίσουμε ότι αυτή η μορφή αρχείου, μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε μοντέλα του AUTOCAD, που αποτελούνται από σχήματα που ορίζονται ως στερεά και όχι σε μοντέλα που αποτελούνται από επιφάνειες. Επίσης τα μοντέλα που εισάγονται θεωρούνται τέλειοι ηλεκτρικοί αγωγοί [13].



Εικόνα 3.6 Επιλογές εισαγωγής και εξαγωγής στο POFACETS 4.1 [13]



Εικόνα 3.7 Εισαγωγή του 3D Μοντέλου Ε/Π ΝΗ90 στο POFACTS 4.1 [13]



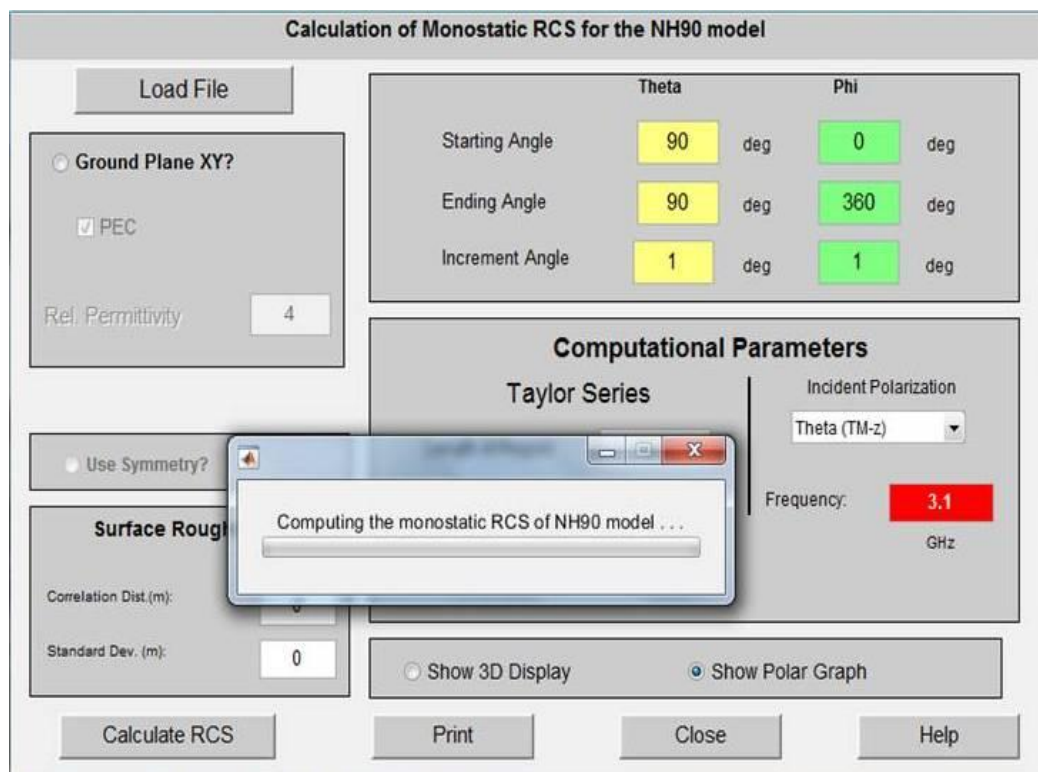
Εικόνα 3.8 Απεικόνιση του 3D Μοντέλου Ε/Π ΝΗ90 στο POFACTS 4.1 [13]

Στην συνέχεια υπολογίστηκε η μονοστατική ραδιοδιατομή του μοντέλου, δηλαδή η ραδιοδιατομή υπολογιζόμενη για κοινή θέση πομπού και δέκτη. Κάνοντας κλικ στην επιλογή Calculate Monostatic RCS στο κύριο παράθυρο του POFACETS (Εικόνα 3.9) εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο υπολογισμού μονοστατικού RCS με τις προκαθορισμένες τιμές και παραμέτρους όπως φαίνονται στην Εικόνα 3.9.

Εικόνα 3.9 Παράθυρο υπολογισμού μονοστατικού RCS [13]

Επιλέχθηκε το 3D μοντέλο του Ε/Π ΝΗ90 κάνοντας κλικ στο κουμπί φόρτωση αρχείου (Load File) και ορίστηκαν παράμετροι (τιμές γωνιών θ και φ). Η γωνία παρατήρησης θ με τιμές έναρξης και λήξης από -360° έως 360° , επιλέχθηκε να πάρει τιμές στις μετρήσεις της έρευνας από $+70^\circ$ έως $+110^\circ$ και τιμή προσαύξησης (βήμα) 1° . Η γωνία παρατήρησης φ με τιμές έναρξης και λήξης από -360° έως 360° , επιλέχθηκε να πάρει τιμές στις μετρήσεις της έρευνας από 0° έως 360° και τιμή προσαύξησης (βήμα) 1° .

Οι τιμές της συχνότητας που επιλέχθηκαν ήταν 1.3, 3.1, 9.2, 11.3GHz. Οι τιμές αφορούν στις συχνότητες εκπομπής αρκετών ραντάρ. Επομένως λήφθηκαν αποτελέσματα και εξήχθησαν μέσες τιμές ραδιοδιατομής για το NH90 σε ευρύ φάσμα συχνοτήτων. Στην εικόνα 3.10, απεικονίζεται η εκτέλεση μέτρησης υπολογισμού του RCS του NH90 στα 3.1GHz με τιμές θ 90° και φ 0° - 360° .



Εικόνα 3.10 διαδικασία εκτέλεσης μέτρησης υπολογισμού RCS του NH90 στα 3.1GHz με τιμές θ 90° και φ 0° - 360° βήμα 1° .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο

Αποτελέσματα Προσομοίωσης

Αποτελέσματα Προσομοίωσης - Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

Αντικείμενο της παρούσας έρευνας αποτέλεσε η εκτίμηση της ραδιοδιατομής του Ε/Π ΝΗ90. Για το λόγο αυτό, κατασκευάστηκε ένα 3D μοντέλο ΝΗ90. Αρχικά μετρήθηκε η απόδοση της ραδιοδιατομής του σε τέσσερις (4) διαφορετικές συχνότητες. Συγκεκριμένα, στα 1.3, 3.1, 9.2 και 11.3 GHz. Οι υπόψη συχνότητες είναι πολύ κοινές και συναντώνται σε διάφορα στρατιωτικά ραντάρ.

Από διάφορες γωνίες, με δεδομένο τις παραπάνω τιμές συχνοτήτων, εκτελέστηκαν υπολογισμοί προσομοίωσης. Οι γωνίες που επιλέχθηκαν ήταν: 70°, 80°, 100° και 110°. Οι γωνίες 70° και 80° επιλέχθηκαν προκειμένου να γίνει προσομοίωση ραντάρ εδάφους, ενώ οι γωνίες 100° και 110° για προσομοίωση εναέριου ραντάρ. Σφάλμα στην έρευνά μας παρουσίασαν οι μετρήσεις υπό γωνία 90°, καθώς μας οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι το ελικόπτερο παρουσιάζει στατική συμπεριφορά, όπως όταν βρίσκεται σε λειτουργία εδάφους. Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης γωνίας δεν λήφθηκαν υπόψη στην εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

Οι τιμές που εξήχθηκαν, αρχικά διορθώθηκαν (αφαίρεση 10dBsm), για να γίνει η προσομοίωση της επίδρασης των υλικών RAM (Radar Absorbing Materials), με τα οποία επικαλύπτεται το Ε/Π. Τα υλικά RAM, έχουν την ιδιότητα να απορροφούν μεγάλο μέρος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας [35], [36], [37], [44], [45], [46].

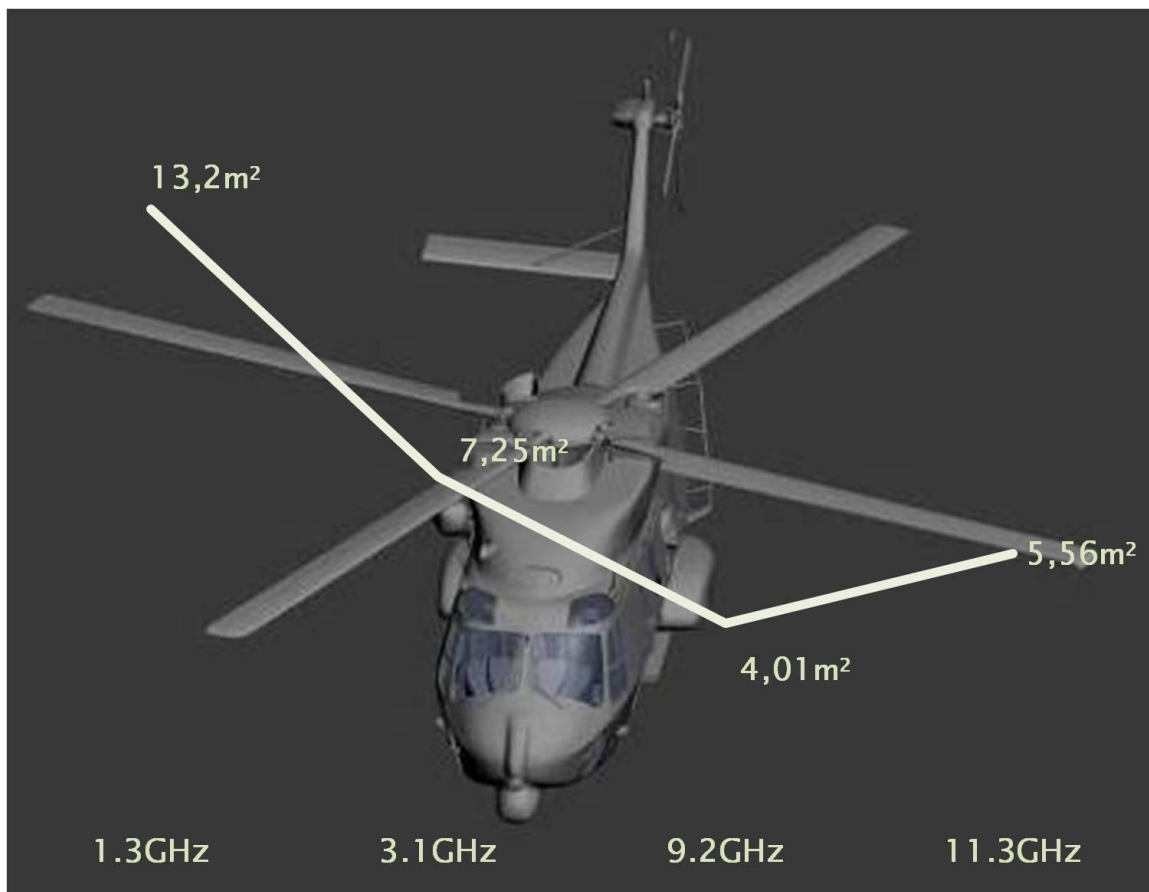
Από τις προαναφερθείσες συχνότητες και γωνίες, εξήχθησαν τα παρακάτω αποτελέσματα:

- Στη συχνότητα 1.3GHz, η μέση τιμή του RCS είναι 21,2dBsm, (βλέπε διαγράμματα 1-4, Παράρτημα). Αφαιρώντας 10dBsm έχουμε ως τελική τιμή 11,2dBsm, ή αλλιώς κάνοντας χρήση του τύπου μετατροπής $\text{dBsm} = 10 \times \log_{10}(\text{RCS}/1\text{m}^2)$, $13,2\text{m}^2$ [43].
- Στη συχνότητα 3.1GHz η μέση τιμή του RCS είναι 18,6dBsm, (βλέπε διαγράμματα 5-8 του Παραρτήματος). Αφαιρώντας 10dBsm έχουμε ως τελική τιμή 8,6dBsm, $7,25\text{m}^2$.
- Στη συχνότητα 9.2GHz 16,1dBsm, (βλέπε διαγράμματα 9-12 του Παραρτήματος). Αφαιρώντας 10dBsm έχουμε ως τελική τιμή 6,1dBsm, $4,01\text{m}^2$.
- Στη συχνότητα 11.3GHz η μέση τιμή του RCS είναι 17,45dBsm, (βλέπε διαγράμματα 13-16 του Παραρτήματος). Αφαιρώντας 10dBsm παίρνουμε ως τιμή 7,45dBsm, $5,56\text{m}^2$.

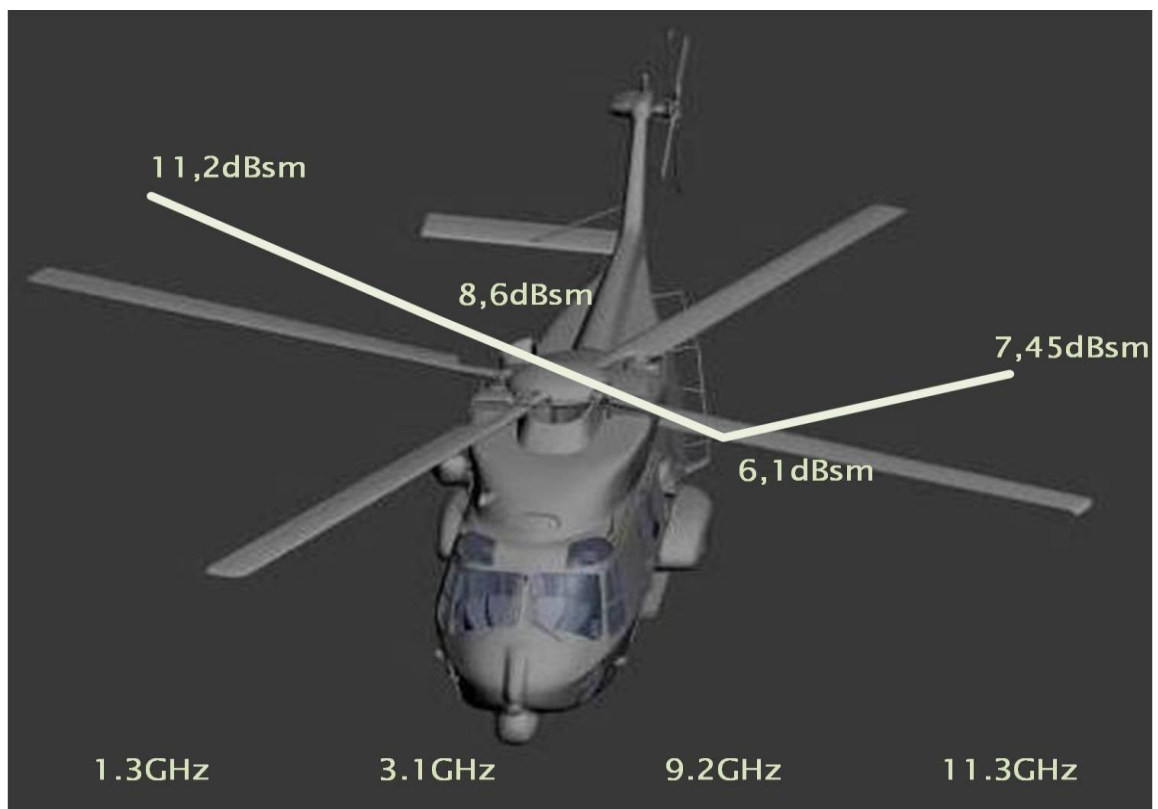
Προκειμένου να καταλήξουμε στα άνωθεν συμπεράσματα "ακτινοβολήσαμε" ολόπλευρα το υπό εξέταση αντικείμενο (0° - 360°). Στη συνέχεια βρήκαμε, προσθέτοντας και διαιρώντας, το μέσο όρο του RCS για κάθε συχνότητα.

Από τους υπολογισμούς και τις μετρήσεις προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα, τα οποία μπορούν να λαμβάνονται υπόψη στη σχεδίαση μελλοντικών επιχειρήσεων, για το ίχνος – μέγεθος της ραδιοδιατομής που παρουσιάζει το Ε/Π NH90. Παρατηρούμε λοιπόν, ότι στις χαμηλές συχνότητες εκπομπής ραντάρ 1.3 και 3.1GHz, το ελικόπτερο παρουσιάζει το μεγαλύτερο ίχνος αποκάλυψης σε σχέση με τις λοιπές μετρήσεις. Καθώς ανεβαίνει η τιμή της

εκπεμπόμενης συχνότητας ακτινοβολίας, το RCS μειώνεται σημαντικά, σχεδόν στο μισό της αρχικής του τιμής. Συνεχίζει να μειώνεται η τιμή του, έως και τη συχνότητα των 9.2GHz, όπου σχεδόν υποδιπλασιάζεται. Στη συχνότητα των 11.3GHz, η τιμή του RCS παρουσιάζει μικρή αύξηση (Εικόνες 4.1, 4.2).



Εικόνα 4.1 Διάγραμμα Αποτελεσμάτων Μέτρησης RCS Ελικοπτέρα ΝΗ90 σε m²



Εικόνα 4.2 Διάγραμμα Αποτελεσμάτων Μέτρησης RCS Ελικοπτέρου ΝΗ90 σε dBsm

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, ήταν να διερευνήσει τη ραδιοδιατομή (Radar Cross Section) ενός εναέριου στόχου, δημιουργώντας για τον σκοπό αυτό ένα τρισδιάστατο μοντέλο ελικοπτέρα NH90.

Από τις αναλύσεις που έγιναν, συγκεντρώθηκαν κάποιες σημαντικές πληροφορίες και συσχετίσεις μεταξύ των ερευνητικών ερωτημάτων που διατυπώθηκαν. Περιορισμό στην έρευνά μας, αποτέλεσε το γεγονός ότι ο κώδικας POFACETS του προγράμματος MATLAB, δεν αναγνώριζε τα σύνθετα υλικά – μέρη του ελικοπτέρα, εφόσον το ελικόπτερο διαθέτει ελάχιστα μεταλλικά τμήματα όπως οι κινητήρες (τιτάνιο) και το σύστημα προσγείωσης (αλουμίνιο), οπότε η έρευνά μας επικεντρώθηκε και πραγματοποιήθηκε κάνοντας μετρήσεις μόνο σε τρισδιάστατα μεταλλικά μέρη.

Ολοκληρώνοντας τη συγγραφή της συγκεκριμένης μελέτης, καταλήγουμε στο εξής σημαντικό συμπέρασμα: το Ε/Π NH90 εμφανίζεται ευάλωτο και μπορεί να αποκαλυφθεί ευκολότερα, όταν οι συχνότητες εκπομπής επίγειου ή εναέριου ραντάρ είναι χαμηλές, ενώ στις υψηλές συχνότητες παρουσιάζει μικρότερη πιθανότητα αποκάλυψης. Τα ραντάρ αεροσκαφών λειτουργούν γύρω και λίγο κάτω από τα 10GHz. Επομένως, το NH90 παρουσιάζει το ελάχιστο RCS στην μπάνα λειτουργίας των ραντάρ αεροσκαφών. Στην μπάνα αυτή, λειτουργούν και αρκετά ραντάρ αντιαεροπορικών συστημάτων.

Τελειώνοντας, θεωρούμε ότι η παρούσα διπλωματική εργασία θα μπορούσε να αποτελέσει αντικείμενο για περαιτέρω έρευνα και διερεύνηση. Πρότασή μας είναι να συσχετισθούν οι τιμές RCS που βρήκαμε μέσω του κώδικα POFACETS, με τις πραγματικές δυνατότητες των επίγειων και ενάεριων ραντάρ, που αποτελούν απειλή για τις ελληνικές Ένοπλες Δυνάμεις.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Basic Electronic Warfare issued on the authority of the Commandant, Canadian Forces School of Aerospace Studies, Version 2.2, May 02 [34]

Dr Carlo Kopp “Advances in Russian and Chinese Active Electronically Steered Arrays” 5th International Symposium on Phased Array Systems and Technology, Boston, 15th-18th October, 2013 [9]

Eugene F. Knott, John F. Schaeffer, Michael T. Tuley, Radar Cross Section, 2nd edition, Artech House, 1993 [45]

EW 101, A First Course in Electronic Warfare, David L. Adamy, 2004 [35]

EW 102, A Second Course in Electronic Warfare, David L. Adamy, 2004 [36]

F. Chatzigeorgiadis: Development of code for a Physical Optics Radar Cross Section prediction and analysis application, Naval Postgraduate School, Monterey, California, USA, thesis, 2004 [13]

Garrido, Elmo Jr., “Graphical User Interface for a Physical Optics Radar Cross Section Prediction Code”, Master’s Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, California, September 2000. [20]

Hristos T. Anastassiou, “A closed form, physical optics expression for the radar cross section of a perfectly conducting flat plate over a dielectric half-space”, Radio Science, vol.38, no.2, 1027, 2003 [14]

Introducing Autodesk 3D’s Max, Randi L. Derakhshani – Dariush Derakhshani, 2011 [39]

JA-A-FM_GD-00-V1-P-SX-TGRAA03-V2.2-ED, Hellenic Armed Forces NH90 Helicopter aircrew information TTH-TGRA 3rd batch volume 1: general description [37]

Jenn, David C., Microwave Devices and Radar Lecture Notes, Version 4.7, 2004 [11]

Jenn, David C., Radar and Laser Cross Section Engineering, AIAA Educations Series, Washington D.C., 1995 [12]

Konstantinos Zikidis (Maj, HAF), Alexios Skondras (2nd Lt, HAF), Charisios Tokas (2nd Lt, HAF), Low Observable Principles, Stealth Aircraft and Anti-Stealth Technologies, Journal of Computations & Modelling, vol.4, no.1, 2014, pp 129-165 [7]

Mastering Autodesk 3D's Max, Jeffrey M. Harper, 2013 [40]

P. Touzopoulos, D. Boviatsis, and K. Zikidis, "Constructing a 3D Model of a Complex Object from 2D Images, for the Purpose of Estimating its Radar Cross Section", Journal of Computations & Modelling, Scienpress Ltd, vol. 7, no. 1 pages 15-28, 2017 [16]

Radar absorbing materials – mechanisms and materials, Kevin Gaylor, 1989 [46]

Radar Handbook, Merrill I. Skolnik, 2008 [33]

Review of Radar Absorbing Materials, Paul Saville, Technical Memorandum DRDC Atlantic TM 2005-003 January 2005 [44]

Skolnick, M.I., "Introduction to Radar Systems", McGraw-Hill, 3d edition 2001. [1]

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΕ 3-1 (ΠΑ), Θεωρία Ραντάρ, 2011 [37]

ΕΕ 3-2 (ΠΑ), Ηλεκτρονικός Πόλεμος, 2011 [38]

Επγός (ΜΗ) Κωνσταντίνος Ζηκίδης, ΙΚ IV (Ι) Σκόνδρας Αλέξιος, ΙΚ IV (Ι) Τόκας Χαρίσιος, «Αεροσκάφη Χαμηλής Παρατηρησιμότητας (Stealth) Μέρος Β : Αντιμετώπιση» Αεροπορική Επιθεώρηση 96, Δεκ. 12, σελ. 56-83. [5]

Ουζούνoglou Ν.Κ., «Συστήματα ραντάρ», Αθήνα 2006 [2]

ΙΣΤΟΤΟΠΟΙ

<https://airandspace.si.edu/multimedia-gallery/radar-diagram> [3]

<http://www.ekke.gr/estia/Cooper/Radar.html> [4]

<http://www.ausairpower.net/APA-52E6MU-Struna.html> [6]

http://www.leonardocompany.com/documents/63265270/75201279/mm08042_Aulos_LQ.pdf [8]

<http://www.kbradar.by/en/products/radiolokatsiya/radiolokatsionnye-stantsii/81/> [10]

MathWorks-File Exchange-POFACETS 4.1 by David Jenn, 27 Mar 2012
<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/35861-pofacets4-1> [15]

GNU Image Manipulation Program (GIMP).
<https://www.gimp.org/> [17]

F-16.net forum, F-16 vs SU-30, page 2, 01 Dec 2004
<http://www.f-16.net/forum/viewtopic.php?p=1237> [18]

<http://missiledefenseadvocacy.org/missile-threat-and-proliferation/missile-proliferation/china/dong-feng-15/> [19]

RCS calcuations using the physical optics codes
<http://aircraftdesign.nuaa.edu.cn/LO/software/pocodes.pdf> [21]

https://www.thalesgroup.com/sites/default/files/asset/document/tha0053_datasheet_smart-l_ewc_hr.pdf [22]

<https://www.thalesgroup.com/en/germany/news/smart-l-ewc-radar-provides-ballistic-missile-defence-capability> [23]

<https://vimeo.com/143001811> [24]

Lockheed Martin. “AN/FPS-117 LONG-RANGE AIR SURVEILLANCE RADARS”
<https://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed/data/ms2/documents/FPS-117-fact-sheet.pdf> [25]

https://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed/data/ms2/documents/ground-based-air-surveillance/FPS117_brochure.pdf [26]

<https://www.youtube.com/watch?v=iX857ib0K3s> [27]

http://www.mobileradar.org/Documents/TPS_77.pdf [28]

EZ GUARD – Over-The-Horizon HF Coastal Surveillance Radar ELM-2270 - Israel Aerospace Industries ELTA, 2011

http://www.iai.co.il/Sip_Storage//FILES/1/42061.pdf [29]

<http://radiocom-review.blogspot.gr/2012/11/iai-ez-guard-elm-2270.html> [30]

<https://www.ainonline.com/aviation-news/defense/2015-06-18/iai-unveils-uhf-radar> [31]

http://www.iai.co.il/Sip_Storage//FILES/4/41524.pdf [32]

<http://www.nhindustries.com/site/en/ref/home.html> [38]

http://thehowlandcompany.com/radar_stealth/RCS-Lockheed_F-35.htm [41]

http://terahertz.dk/?page_id=189 [42]

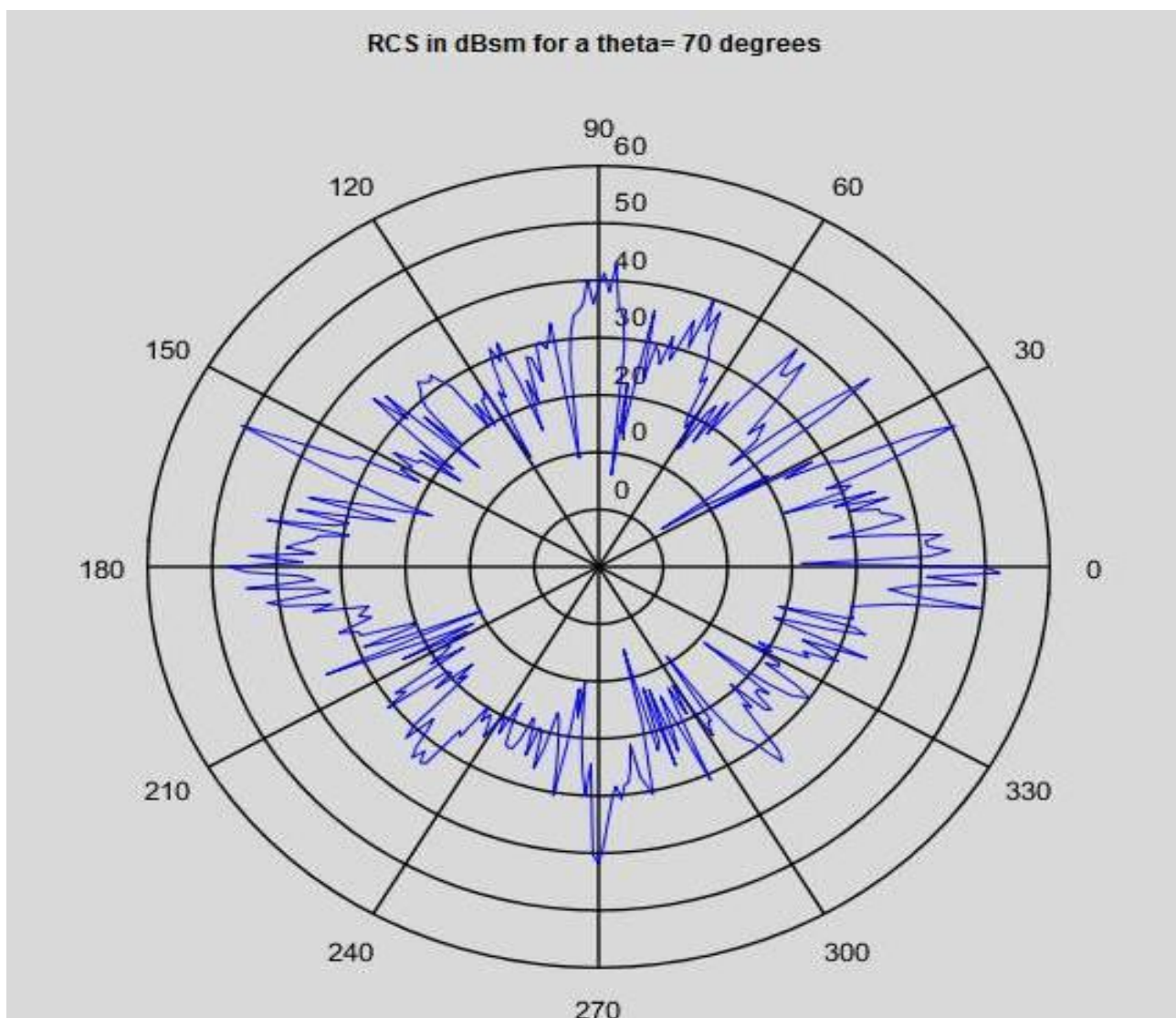
http://www.alternatewars.com/BBOW/Radar/Decibels_Radars.htm [43]

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Αποτελέσματα Προσομοίωσης – Πολικά Διαγράμματα RCS

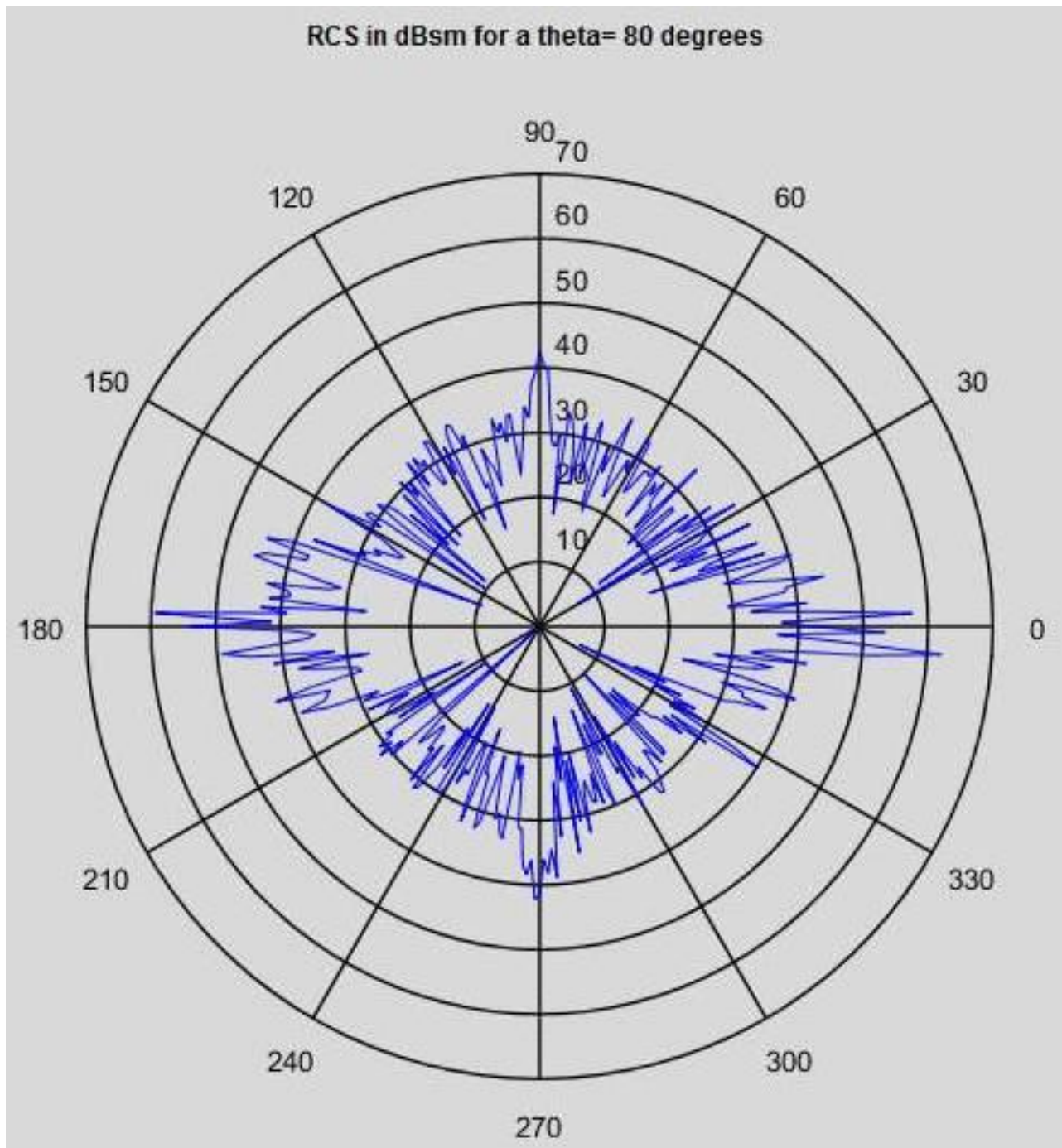
Διάγραμμα 1,

Υπολογισμός RCS του Ε/Π ΝΗ90 υπό γωνία 70° στη συχνότητα 1.3GHz



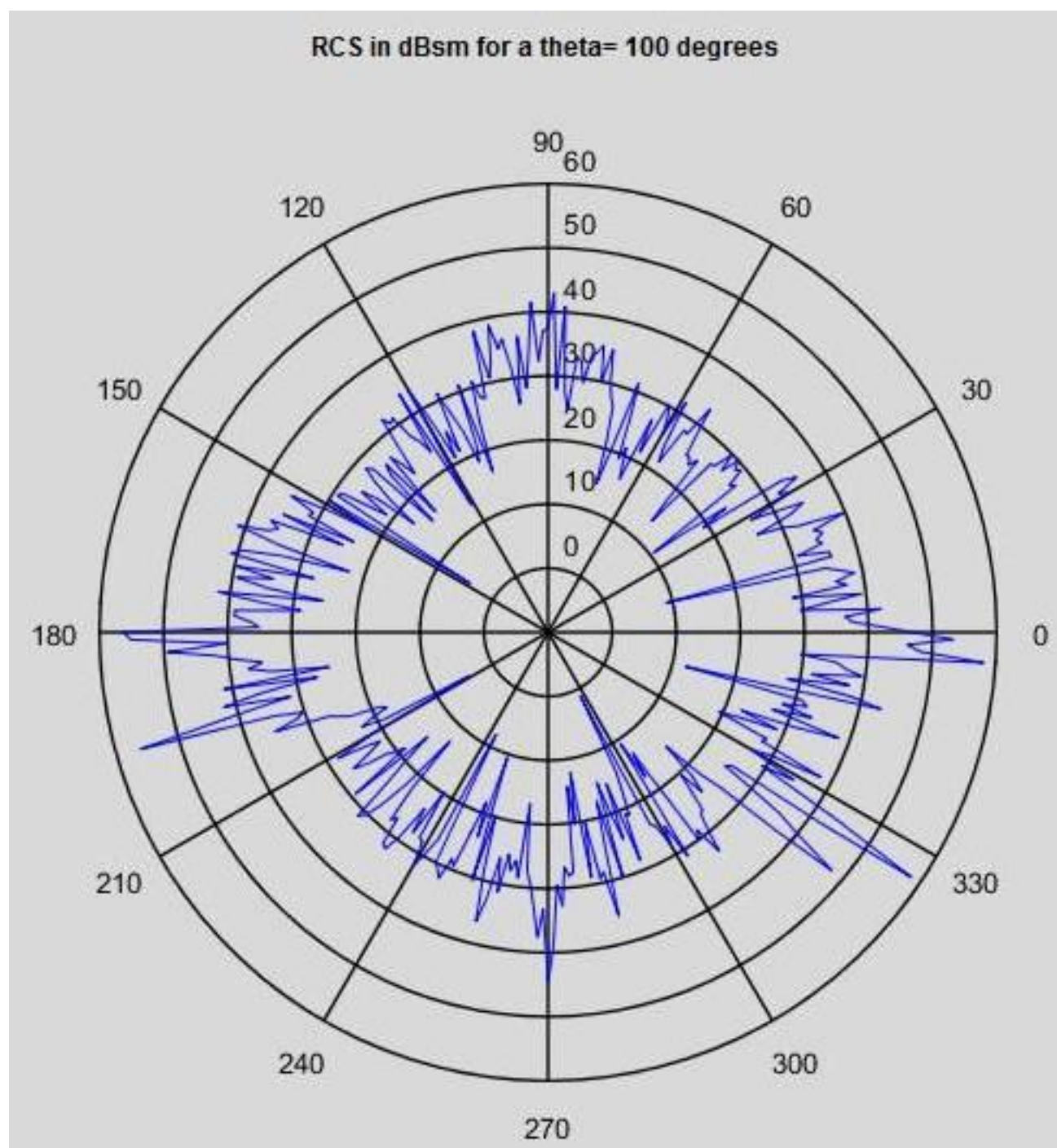
Διάγραμμα 2,

Υπολογισμός RCS του Ε/Π ΝΗ90 υπό γωνία 80° στη συχνότητα 1.3GHz



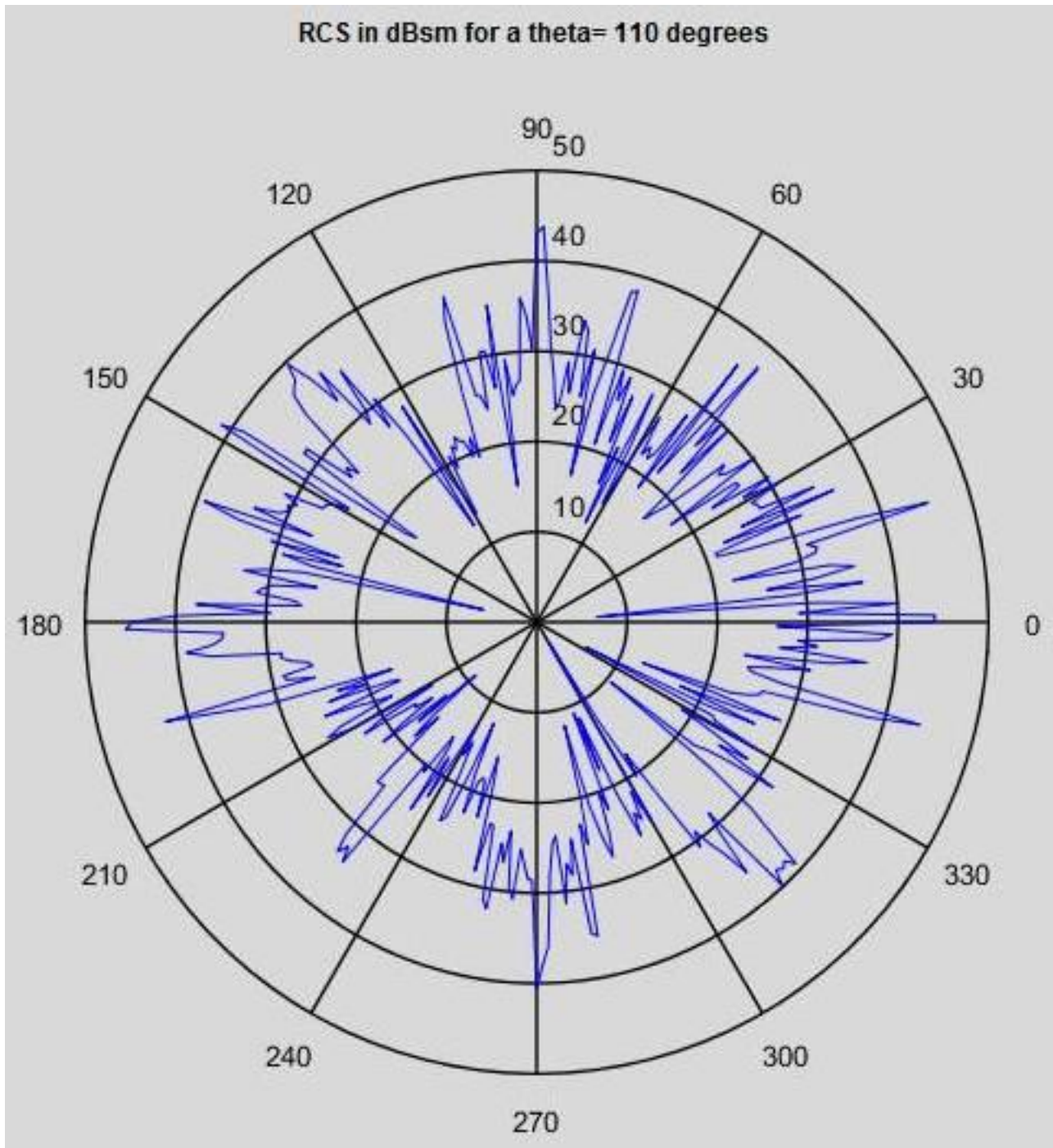
Διάγραμμα 3,

Υπολογισμός RCS του Ε/Π ΝΗ90 υπό γωνία 100° στη συχνότητα 1.3GHz



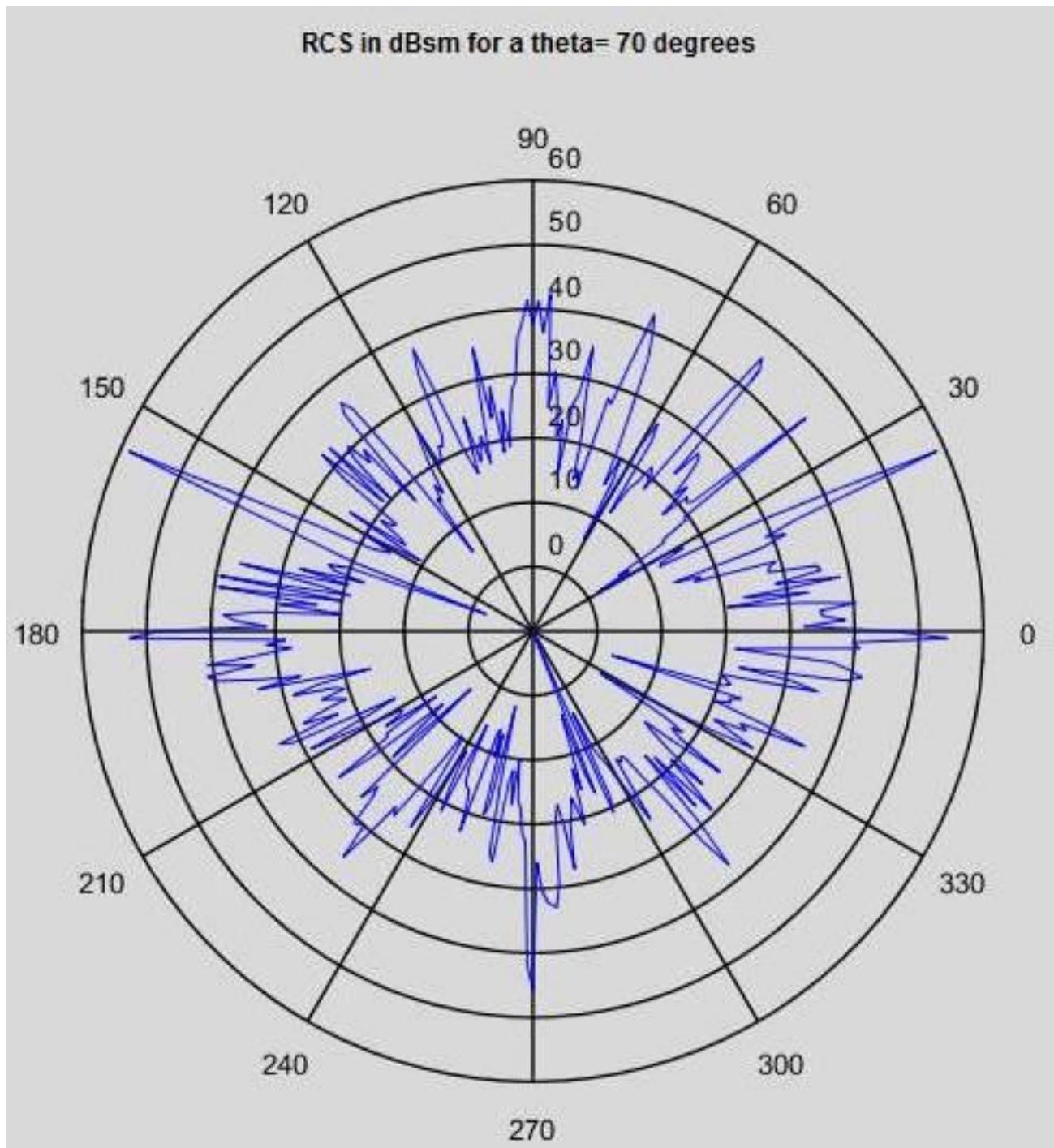
Διάγραμμα 4,

Υπολογισμός RCS του Ε/Π ΝΗ90 υπό γωνία 110° στη συχνότητα 1.3GHz



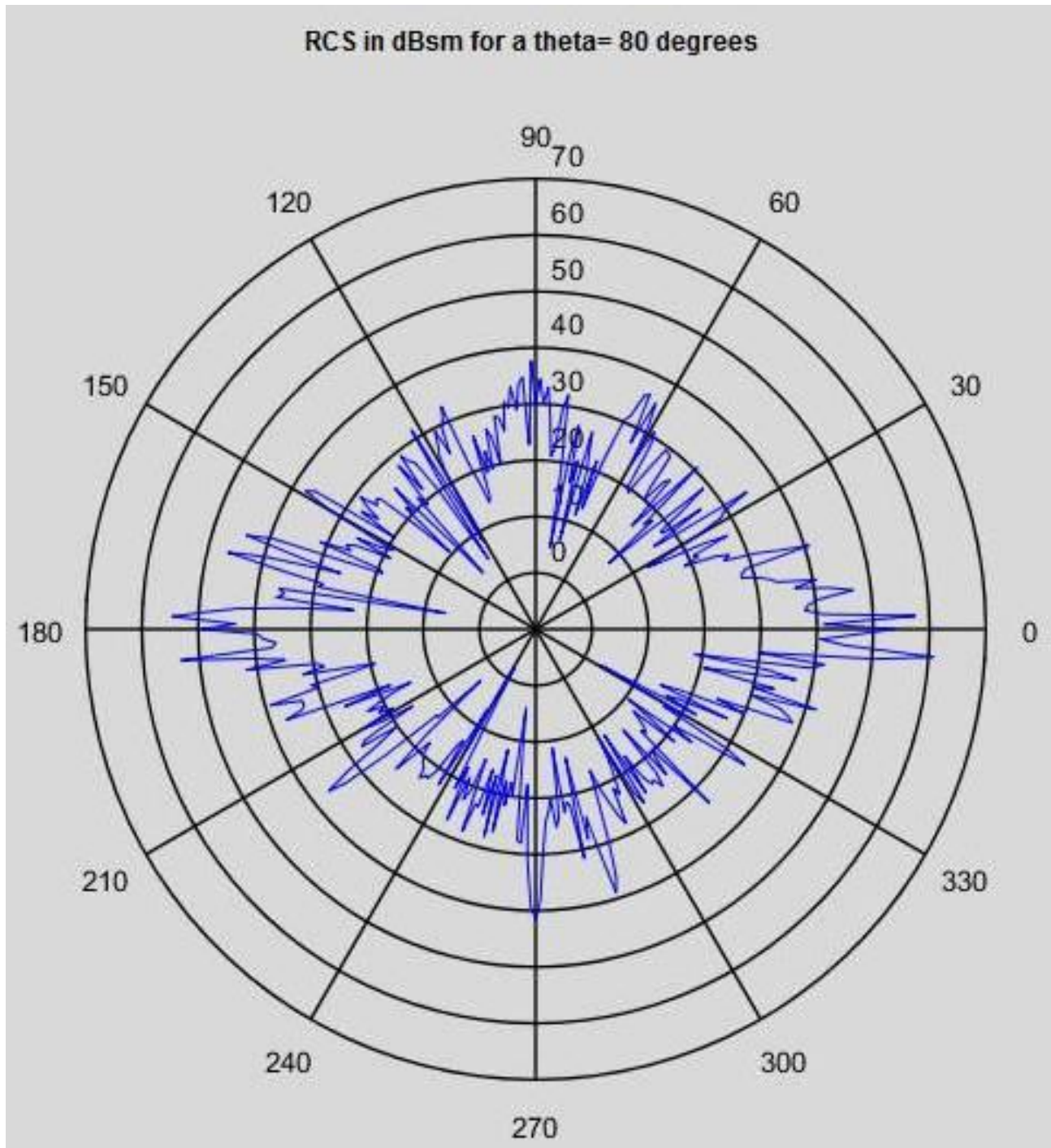
Διάγραμμα 5,

Υπολογισμός RCS του Ε/Π ΝΗ90 υπό γωνία 70° στη συχνότητα 3.1GHz



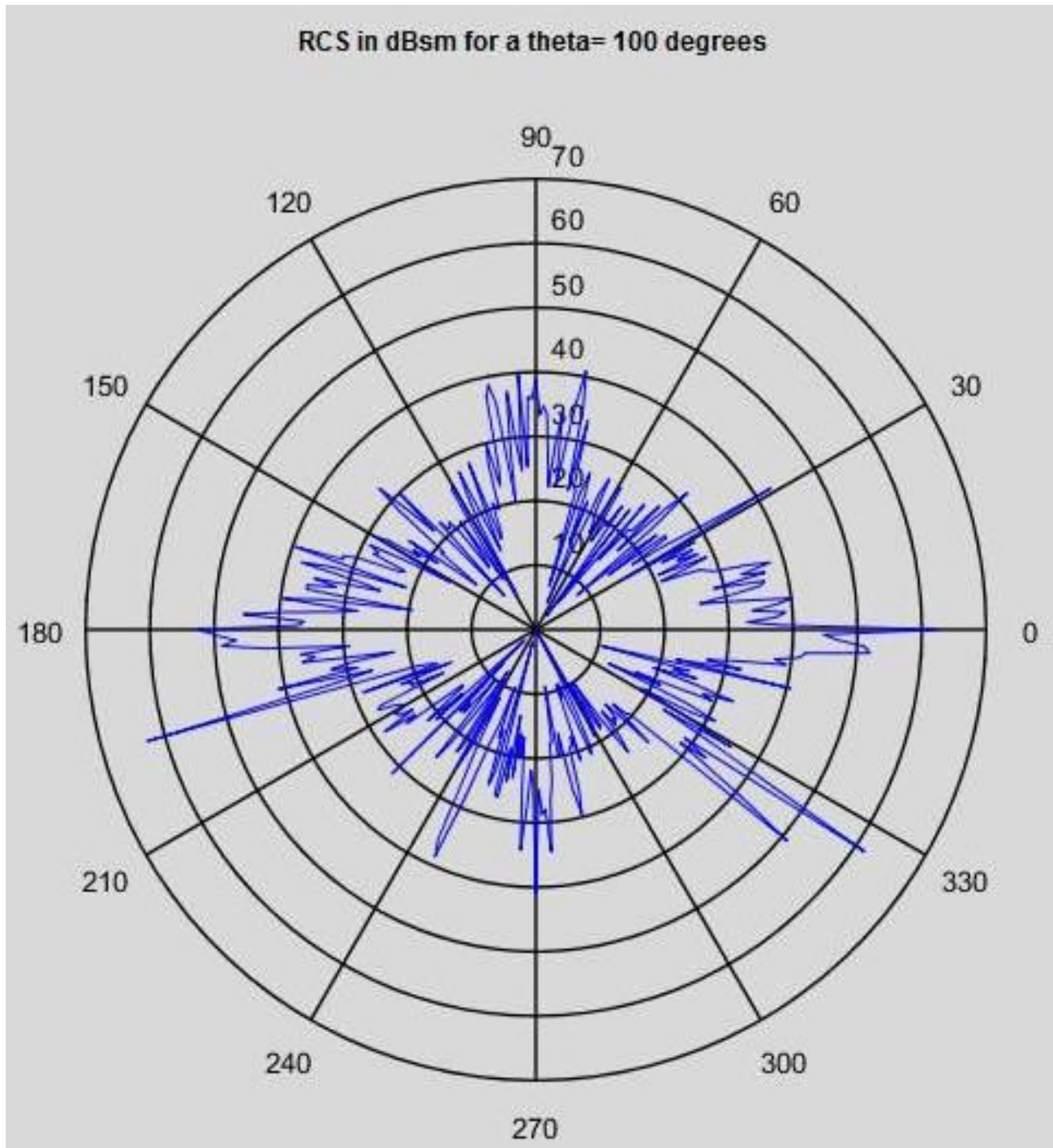
Διάγραμμα 6,

Υπολογισμός RCS του Ε/Π ΝΗ90 υπό γωνία 80° στη συχνότητα 3.1GHz



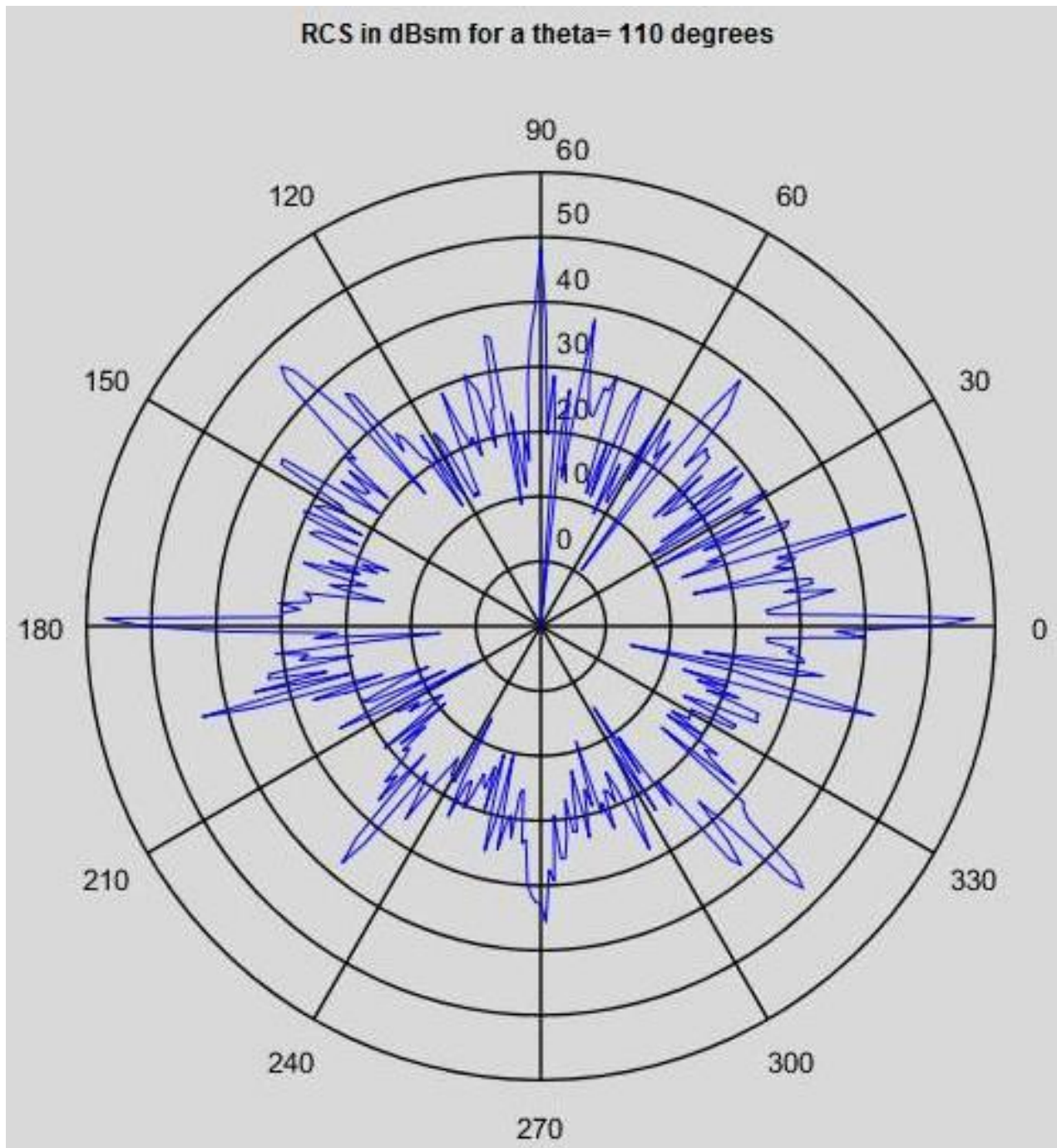
Διάγραμμα 7,

Υπολογισμός RCS του Ε/Π ΝΗ90 υπό γωνία 100° στη συχνότητα 3.1GHz



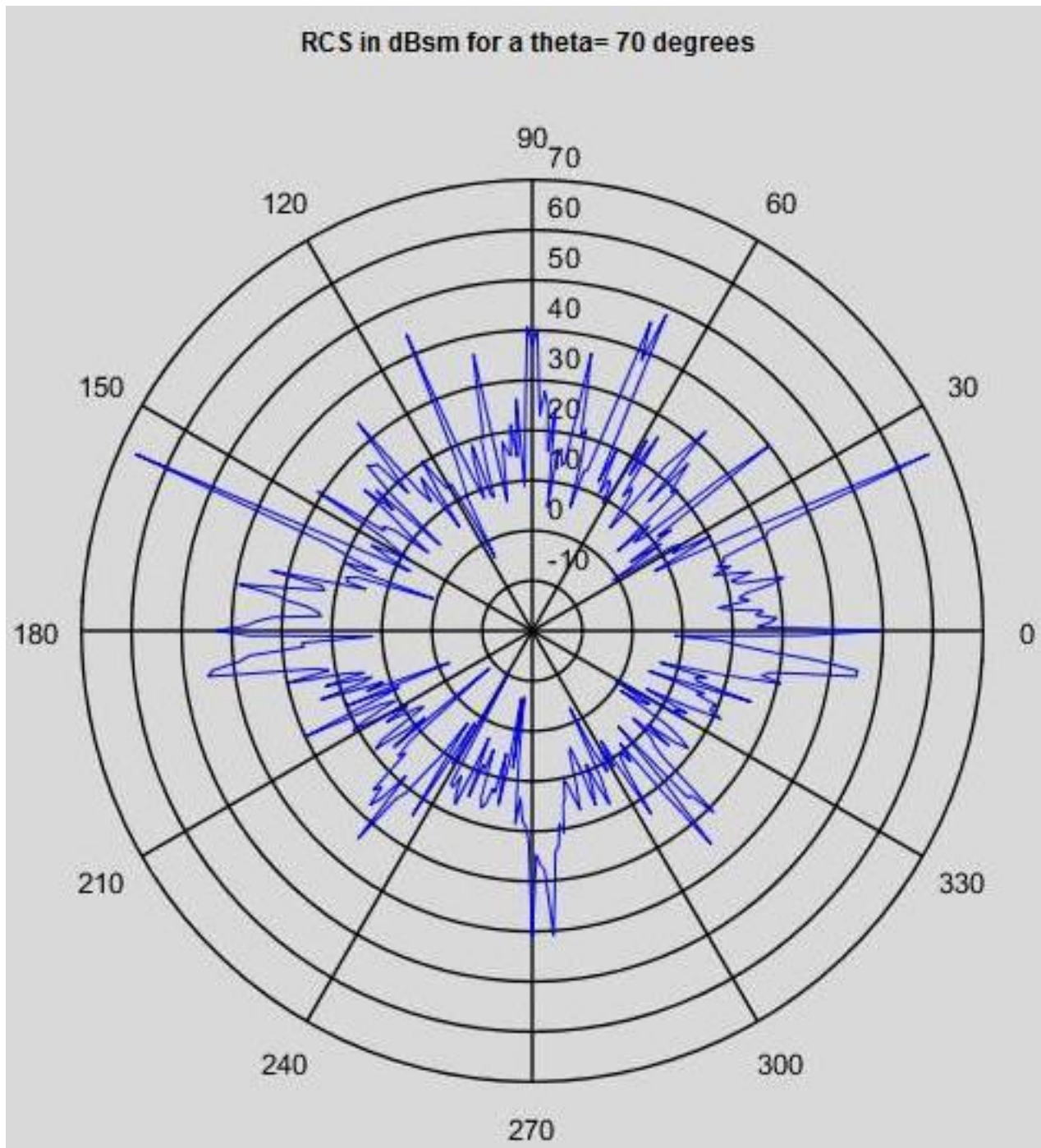
Διάγραμμα 8,

Υπολογισμός RCS του Ε/Π ΝΗ90 υπό γωνία 110° στη συχνότητα 3.1GHz



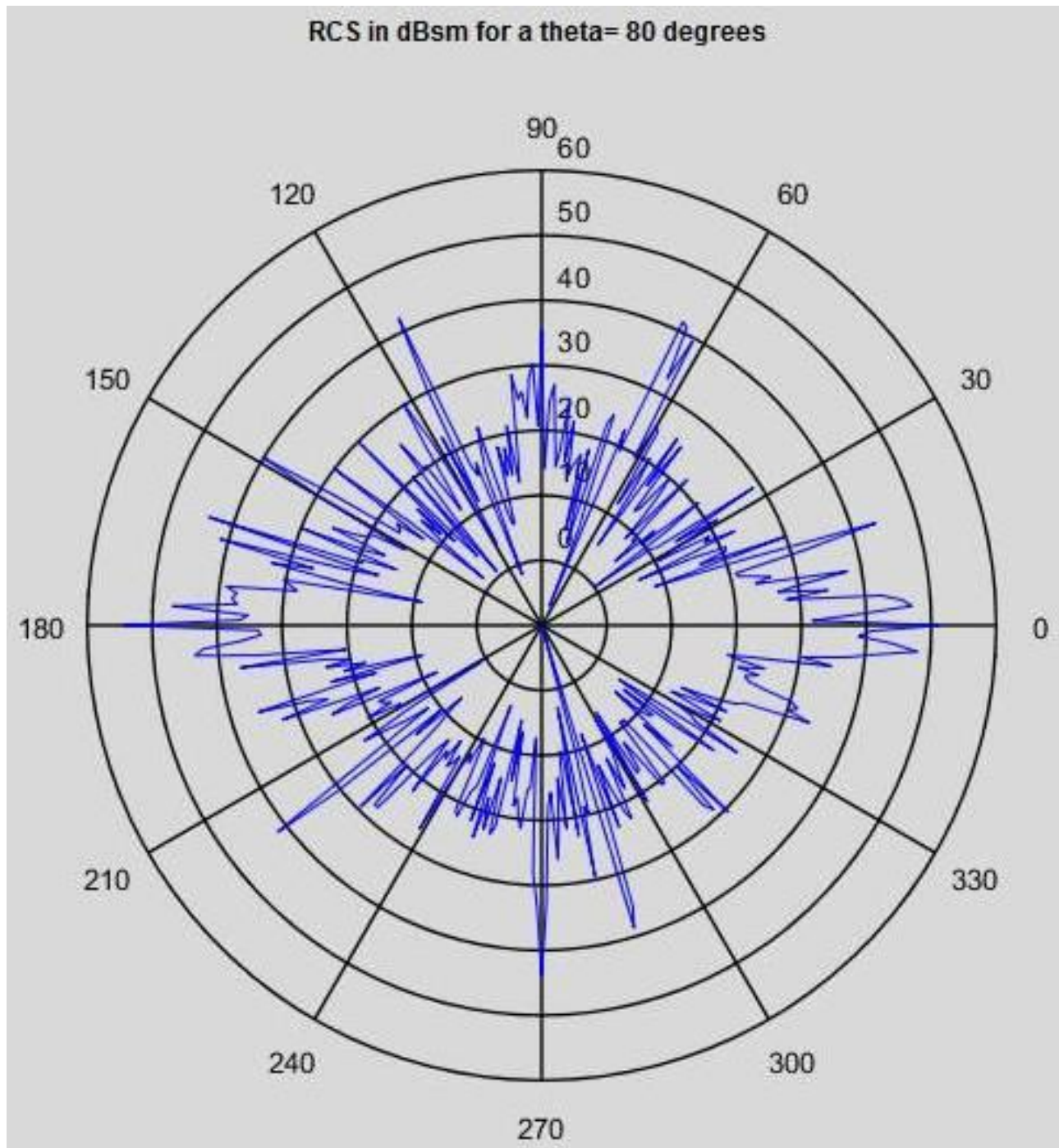
Διάγραμμα 9,

Υπολογισμός RCS του Ε/Π ΝΗ90 υπό γωνία 70° στη συχνότητα 9.2GHz



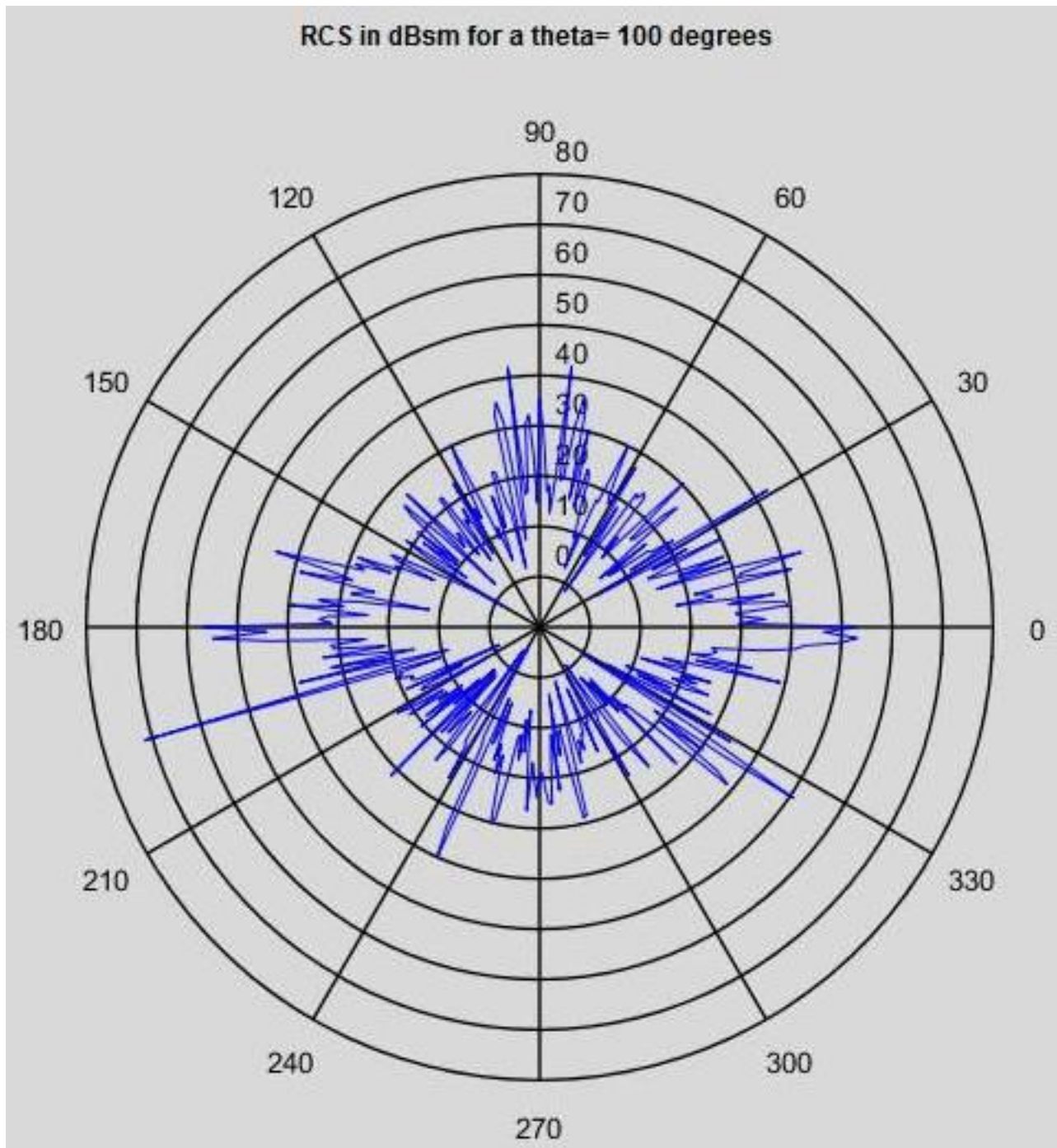
Διάγραμμα 10,

Υπολογισμός RCS του Ε/Π ΝΗ90 υπό γωνία 80° στη συχνότητα 9.2GHz



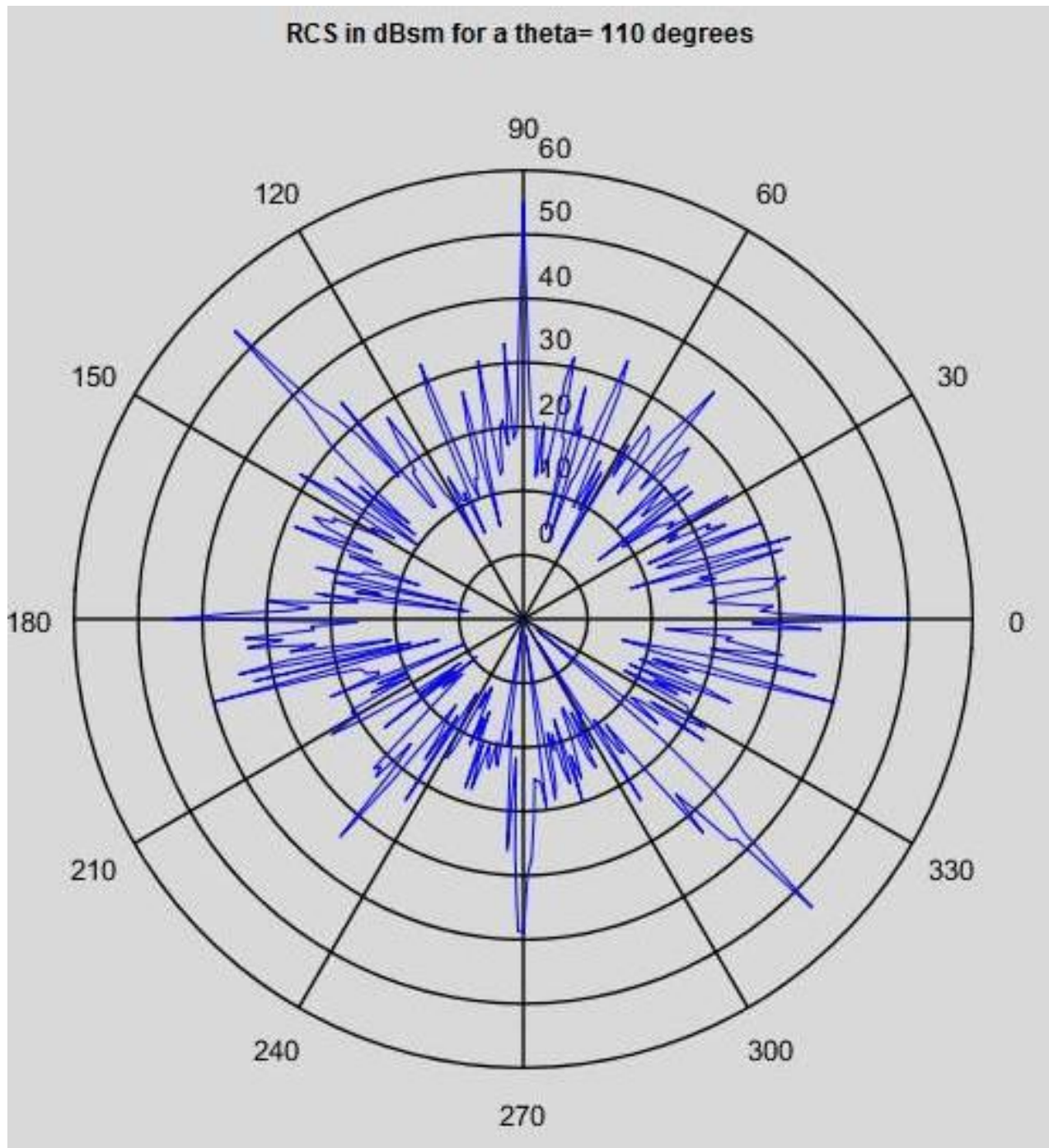
Διάγραμμα 11,

Υπολογισμός RCS του Ε/Π ΝΗ90 υπό γωνία 100° στη συχνότητα 9.2GHz



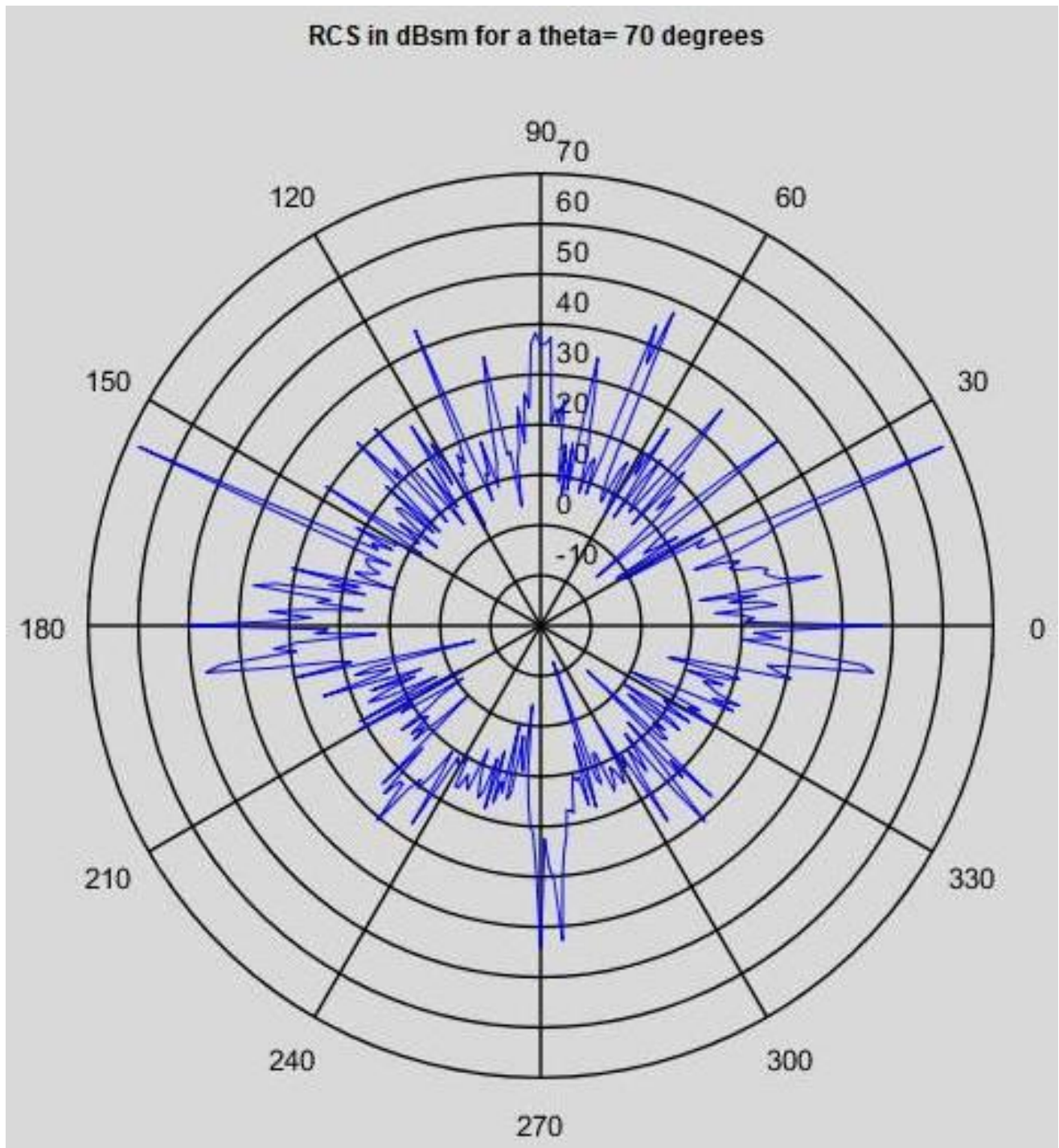
Διάγραμμα 12,

Υπολογισμός RCS του Ε/Π ΝΗ90 υπό γωνία 110° στη συχνότητα 9.2GHz



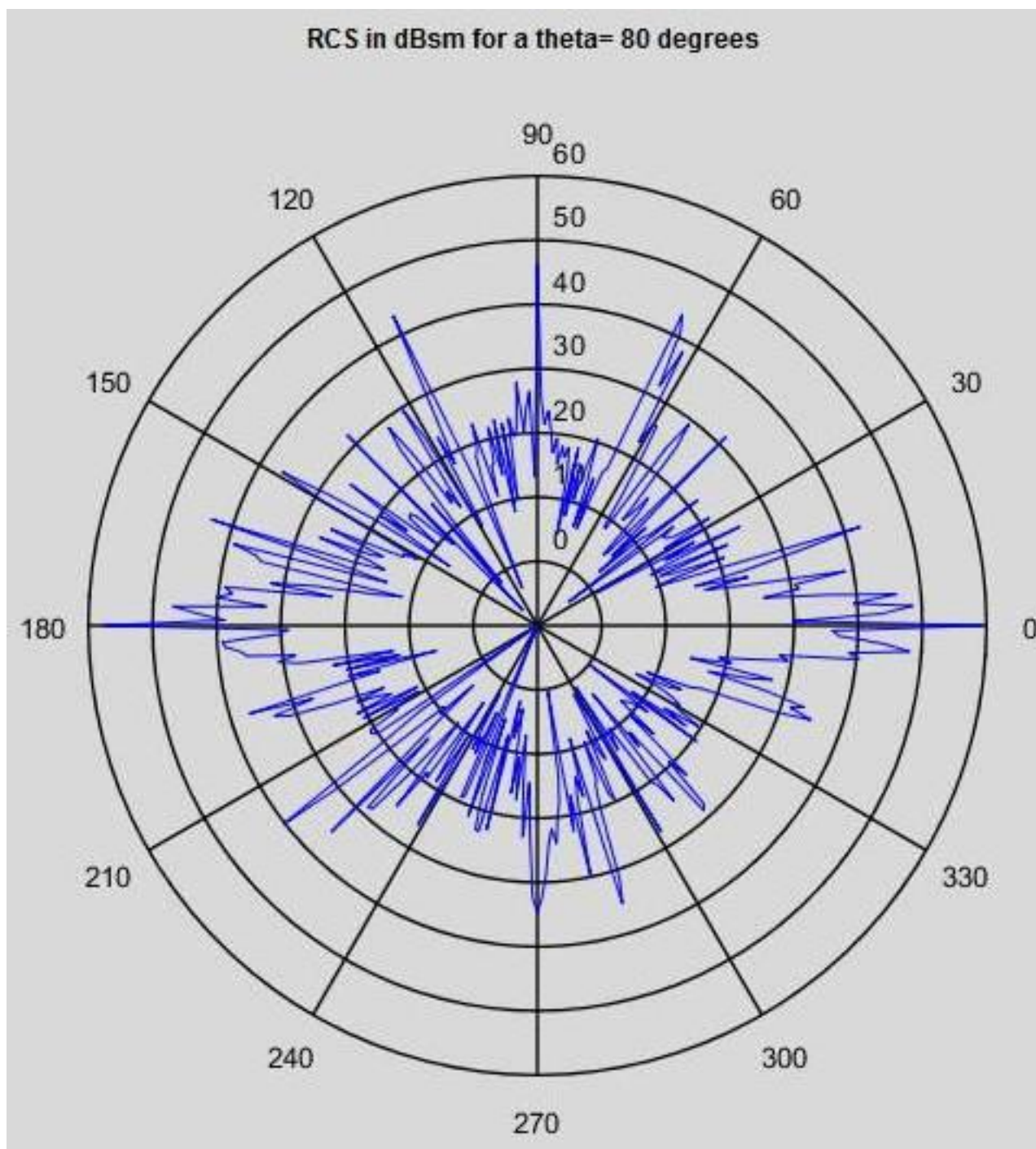
Διάγραμμα 13,

Υπολογισμός RCS του Ε/Π ΝΗ90 υπό γωνία 70° στη συχνότητα 11.3GHz



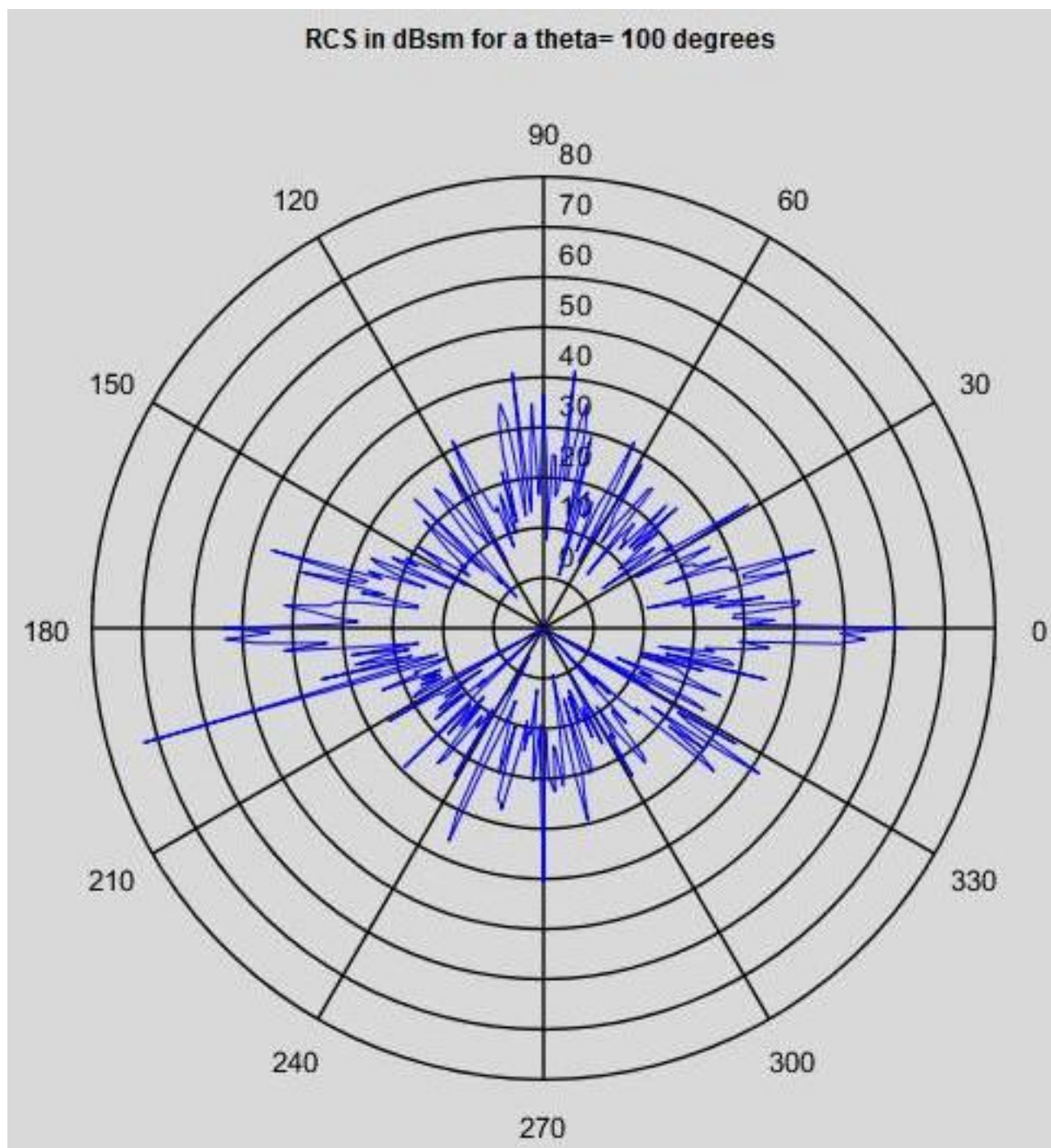
Διάγραμμα 14,

Υπολογισμός RCS του Ε/Π ΝΗ90 υπό γωνία 80° στη συχνότητα 11.3GHz



Διάγραμμα 15,

Υπολογισμός RCS του Ε/Π ΝΗ90 υπό γωνία 100° στη συχνότητα 11.3GHz



Διάγραμμα 16,

Υπολογισμός RCS του Ε/Π ΝΗ90 υπό γωνία 110° στη συχνότητα 11.3GHz

