



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

**ΚΕΡΑΙΕΣ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΕΣ ΣΕ ΣΥΝΘΕΤΕΣ**  
**ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΤΟΥ**

**ΙΩΑΝΝΗ Δ. ΡΕΤΣΟΥΛΗ**

**Επιβλέπων :** ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ Γ. ΚΩΤΤΗΣ  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2004









ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ  
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

## ΚΕΡΑΙΕΣ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΕΣ ΣΕ ΣΥΝΘΕΤΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΙΩΑΝΝΗ Δ. ΡΕΤΣΟΥΛΗ

**Επιβλέπων :** ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ Γ. ΚΩΤΤΗΣ  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 21<sup>η</sup> Ιουνίου 2004.

.....  
Παναγιώτης Κωττής  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Ιωάννης Κανελλόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Χρήστος Καμάλης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2004

.....  
ΙΩΑΝΝΗΣ Δ. ΠΕΤΣΟΥΛΗΣ

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

Copyright © ΙΩΑΝΝΗΣ Δ. ΠΕΤΣΟΥΛΗΣ, 2004.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

## **Ευχαριστίες**

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Ερευνητικό Κέντρο του Υπουργείου Εθνικής Άμυνας ΓΕΤΕΝ (Γραφείο Έρευνας και Τεχνολογικών Εξελίξεων Ναυτικού), κατόπιν συνεργασίας του Ε.Μ.Π. και της Υπηρεσίας υπό την επίβλεψη των κ. Παναγιώτη Κωττή, Καθηγητή του Ε.Μ.Π. και Δρ. Μηχ. Νικόλαου Ρούσσου, ειδικού επιστήμονα του ΓΕΤΕΝ.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω και τους δυο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν και την πολύτιμη βοήθειά τους κατά την διάρκεια της εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά και τα υπόλοιπα μέλη του ΓΕΤΕΝ για τις χρήσιμες πληροφορίες που μου έδωσαν και τον χρόνο που μου αφιέρωσαν.





## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....</b>	<b>1</b>
<b>Εισαγωγή.....</b>	<b>1</b>
1.1 Διατύπωση του προβλήματος .....	1
1.2 Επίλυση του προβλήματος χωρίς την βοήθεια υπολογιστικών μεθόδων προσομοίωσης.....	2
1.3 Επίλυση του προβλήματος με τη βοήθεια υπολογιστικών μεθόδων προσομοίωσης.....	3
1.4 Επιλογή κατάλληλης υπολογιστικής μεθόδου.....	4
1.5 Σύγχρονες εξελίξεις .....	5
 <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....</b>	 <b>7</b>
<b>Μέθοδος επίλυσης Η/Μ προβλημάτων χαμηλών ηλεκτρικών διαστάσεων.....</b>	<b>7</b>
2.1 Εισαγωγή .....	7
2.2 Αναλυτικό υπόβαθρο MoM.....	8
2.2.1 Εισαγωγή .....	8
2.2.2 Εξισώσεις Maxwell και κυματική εξίσωση.....	8
2.2.3 Αναπαράσταση εξισώσεων Maxwell με συναρτήσεις Green.....	9
2.2.4 Κατάσρωση ολοκληρωτικής εξίσωσης (IE) .....	9
2.2.5 IE για νηματοειδείς αγωγούς (wires).....	11
2.2.6 Γραμμικοί τελεστές και IE,DE .....	12
2.2.7 Rocklington's IE .....	13
2.3 Η Μέθοδος των Ροπών (MoM) .....	16
2.3.1 Εισαγωγή .....	16
2.3.2 Ανάλυση των βημάτων επίλυσης .....	16
2.3.3 Εκμετάλλευση συμμετριών .....	21
2.3.4 Ακρίβεια – Αξιοπιστία της μεθόδου.....	21
2.3.5 Συγκριτικές παρατηρήσεις για την MoM .....	24
2.3.6 Σύνοψη περί MoM.....	24
2.4 NEC2 - MoM.....	25

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....29****Μέθοδος επιλύσεως Η/Μ προβλημάτων υψηλών ηλεκτρικών διαστάσεων..... 29**

3.1 Εισαγωγή .....	29
3.2 Ενιαία θεωρία περίθλασης (UTD).....	30
3.2.1 Εισαγωγή .....	30
3.2.2 Γεωμετρική Οπτική (Geometrical Optics).....	32
3.2.2.1 Εισαγωγή .....	32
3.2.2.2 Αρχή του Fermat .....	33
3.2.2.3 Νόμος διατήρησης της ισχύος .....	34
3.2.2.4 Σχέση για το απευθείας / προσπίπτον διαδιδόμενο Η/Μ πεδίο .....	35
3.2.2.5 Σχέση για το ανακλώμενο Η/Μ πεδίο .....	36
3.2.3 Γεωμετρική Θεωρία Περίθλασης (GTD) .....	38
3.2.3.1 Εισαγωγή .....	38
3.2.3.2 Περίθλαση από ευθεία ακμή .....	40
3.2.3.3 Περίθλαση από κορυφή.....	44
3.2.3.4 Περίθλαση από επιφάνεια .....	45
3.2.4 Ενιαία Θεωρία Περίθλασης (UTD).....	47
3.3 NEC - BSC 2.2.18 .....	48
3.4 Υβριδική μέθοδος MoM/UTD .....	52

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....55****Πιστοποίηση NEC - BSC 2.2.18 , NEC2..... 55**

4.1 Εισαγωγή.....	55
4.2 Πιστοποίηση NEC – BSC 2.2.18.....	56
4.2.1 Παράδειγμα 1 .....	56
4.2.2 Παράδειγμα 2 .....	60
4.2.3 Παράδειγμα 3 .....	65
4.2.4 Παράδειγμα 4 .....	68
4.2.5 Παράδειγμα 5 .....	72
4.2.6 Παράδειγμα 6 .....	78
4.2.7 Παράδειγμα 7 .....	83
4.3 Πιστοποίηση NEC2.....	86

4.3.1 Παράδειγμα 1 .....	86
4.3.2 Παράδειγμα 2 .....	89
4.3.3 Παράδειγμα 3 .....	92
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....</b>	<b>96</b>
<b>Εφαρμογές .....</b>	<b>96</b>
5.1 Εισαγωγή.....	96
5.1.1 Περιγραφή Εφαρμογών .....	96
5.1.2 Περιγραφή Υπολογιστικού Περιβάλλοντος EMSIF (Electromagnetic Simulation Framework).....	97
5.2 ΠΟΛΙΤΙΚΟ ΟΧΗΜΑ DODGE.....	99
5.2.1 Εισαγωγή .....	99
5.2.2 Μελέτη VHF κεραιών.....	100
5.2.2.1 Διαγράμματα ακτινοβολίας μακρινού πεδίου κεραίας FM .....	102
5.2.2.2 Διαγράμματα ακτινοβολίας μακρινού πεδίου κεραίας VHF .....	118
5.2.2.3 Συγκριτικά στοιχεία προσομοίωσης.....	134
5.3 Ναυτικές επικοινωνίες μακρινών αποστάσεων σε HF συχνότητες .....	135
5.3.1 Εισαγωγή .....	135
5.3.2 Τυπικές κεραιές HF σε πλοία .....	136
5.4 ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ .....	138
5.4.1 Μελέτη HF κεραιών .....	138
5.4.1.1 Διαγράμματα ακτινοβολίας μακρινού πεδίου κεραίας 1 .....	140
5.4.1.2 Διαγράμματα ακτινοβολίας μακρινού πεδίου κεραίας 2 .....	168
5.4.1.3 Διαγράμματα ακτινοβολίας μακρινού πεδίου κεραίας 3 .....	196
5.4.1.3 Διαγράμματα ακτινοβολίας μακρινού πεδίου κεραίας 4.....	215
5.4.1.5 Συγκριτικά στοιχεία προσομοίωσης.....	243
5.4.1.6 Υπολογισμός κοντινού πεδίου HF κεραιών .....	244
5.5 Ναυτικές επικοινωνίες οπτικής επαφής (LOS) σε VHF/UHF συχνότητες .....	251
5.5.1 Εισαγωγή .....	251
5.5.2 Ground Plane VHF/UHF κεραιές σε πλοία .....	252
5.6 TINCODEROGA CLASS CRUISER .....	255
5.6.1 Εισαγωγή .....	255
5.6.2 Μελέτη HF κεραιών .....	256

5.6.2.1 Διαγράμματα ακτινοβολίας μακρινού πεδίου κεραίας 1 .....	258
5.6.2.2 Διαγράμματα ακτινοβολίας μακρινού πεδίου κεραίας 2 .....	286
5.6.2.3 Διαγράμματα ακτινοβολίας μακρινού πεδίου κεραίας 3 .....	305
5.6.2.4 Διαγράμματα ακτινοβολίας μακρινού πεδίου κεραίας 4 .....	333
5.6.2.5 Συγκριτικά στοιχεία προσομοίωσης .....	352
5.6.3 Μελέτη VHF/UHF ground plane κεραιών .....	353
5.6.3.1 Διαγράμματα ακτινοβολίας μακρινού πεδίου κεραίας 1 .....	355
5.6.3.2 Διαγράμματα ακτινοβολίας μακρινού πεδίου κεραίας 2 .....	364
5.6.3.3 Διαγράμματα ακτινοβολίας μακρινού πεδίου κεραίας 3 .....	373
5.6.3.4 Διαγράμματα ακτινοβολίας μακρινού πεδίου κεραίας 4 .....	382
5.6.3.5 Διαγράμματα ακτινοβολίας μακρινού πεδίου κεραίας 1' .....	391
5.6.3.6 Διαγράμματα ακτινοβολίας μακρινού πεδίου κεραίας 2' .....	395
5.6.3.7 Διαγράμματα ακτινοβολίας μακρινού πεδίου κεραίας 3' .....	399
5.6.3.8 Διαγράμματα ακτινοβολίας μακρινού πεδίου κεραίας 4' .....	403
5.6.3.9 Μελέτη σύζευξης VHF/UHF κεραιών (couplings study).....	407
5.6.3.10 Συγκριτικά στοιχεία προσομοίωσης .....	409
<b>BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>412</b>
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....</b>	<b>417</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>419</b>

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

Διάγραμμα 4.1α : Υπολογισθέν Εθ γραμμικό διάγραμμα σε σύγκριση με μετρηθείσες τιμές για κωνική τομή με $\theta=90^\circ$ . Προέλευση ΥΕΘΑ/ΓΕΤΕΝ [29].	58
Διάγραμμα 4.1β : Υπολογισθέν Εθ γραμμικό διάγραμμα σε σύγκριση με μετρηθείσες τιμές για μεγάλο κύκλο με $\varphi=0^\circ$ . Προέλευση ΥΕΘΑ/ΓΕΤΕΝ [29].	59
Διάγραμμα 4.2α : Υπολογισθέν Εφ γραμμικό διάγραμμα σε σύγκριση με μετρηθείσες τιμές για το δίπολο σε συνθήκες ελευθέρου χώρου. Προέλευση ΥΕΘΑ/ΓΕΤΕΝ [29].	63
Διάγραμμα 4.2β : Υπολογισθέν Εφ γραμμικό διάγραμμα σε σύγκριση με μετρηθείσες τιμές για το δίπολο παρουσία παράλληλου τελείως αγώγιμου τετραγωνικού επιπέδου πεπερασμένων διαστάσεων. Προέλευση ΥΕΘΑ/ΓΕΤΕΝ [29].	64
Διάγραμμα 4.3 : Υπολογισθέν Εθ γραμμικό διάγραμμα σε σύγκριση με μετρηθείσες τιμές για το δίπολο παρουσία διάταξης τελείως αγώγιμων πλακών πεπερασμένων διαστάσεων. Προέλευση ΥΕΘΑ/ΓΕΤΕΝ [29].	67
Διάγραμμα 4.4 : Υπολογισθέν Εθ γραμμικό διάγραμμα σε σύγκριση με μετρηθείσες τιμές. Προέλευση ΥΕΘΑ/ΓΕΤΕΝ [29].	71
Διάγραμμα 4.5α : Υπολογισθέν Εφ γραμμικό διάγραμμα σε σύγκριση με μετρηθείσες τιμές για κωνική τομή με $\theta=90^\circ$ . Προέλευση ΥΕΘΑ/ΓΕΤΕΝ [29].	75
Διάγραμμα 4.5β : Υπολογισθέν Εφ γραμμικό διάγραμμα σε σύγκριση με μετρηθείσες τιμές για μεγάλο κύκλο με $\varphi=0^\circ$ . Προέλευση ΥΕΘΑ/ΓΕΤΕΝ [29].	76
Διάγραμμα 4.5γ : Υπολογισθέν Εφ γραμμικό διάγραμμα σε σύγκριση με μετρηθείσες τιμές για μεγάλο κύκλο με $\varphi=0^\circ$ για το δίπολο του σχήματος 5β. Προέλευση ΥΕΘΑ/ΓΕΤΕΝ [29].	77
Διάγραμμα 4.6α : Υπολογισθέν Εθ γραμμικό διάγραμμα σε σύγκριση με μετρηθείσες τιμές για κωνική τομή με $\theta=89.5^\circ$ παρουσία μόνο του κάθετου τμήματος του καταρτιού. Προέλευση ΥΕΘΑ/ΓΕΤΕΝ [29].	81
Διάγραμμα 4.6β : Υπολογισθέν Εθ γραμμικό διάγραμμα σε σύγκριση με μετρηθείσες τιμές για κωνική τομή με $\theta=89.5^\circ$ παρουσία ολοκλήρου του καταρτιού. Προέλευση ΥΕΘΑ/ΓΕΤΕΝ [29].	82
Διάγραμμα 4.7 : Υπολογισθέν Εφ πολικό διάγραμμα σε σύγκριση με μετρηθείσες τιμές για κωνική τομή με $\theta=90^\circ$ .	85
Διάγραμμα 5.1 : DODGE, Κεραία FM σε συχνότητα 100 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 0^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .	103
Διάγραμμα 5.2 : DODGE, Κεραία FM σε συχνότητα 100 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 30^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .	104
Διάγραμμα 5.3 : DODGE, Κεραία FM σε συχνότητα 100 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 60^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .	105
Διάγραμμα 5.4 : DODGE, Κεραία FM σε συχνότητα 100 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 90^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .	106
Διάγραμμα 5.5 : DODGE, Κεραία FM σε συχνότητα 100 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 120^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .	107

Διάγραμμα 5.6 : DODGE, Κεραία FM σε συχνότητα 100 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 150^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .	108
Διάγραμμα 5.7 : DODGE, Κεραία FM σε συχνότητα 100 MHz για κωνική τομή με $\theta = 55^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .	109
Διάγραμμα 5.8 : DODGE, Κεραία FM σε συχνότητα 100 MHz για κωνική τομή με $\theta = 60^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .	110
Διάγραμμα 5.9 : DODGE, Κεραία FM σε συχνότητα 100 MHz για κωνική τομή με $\theta = 65^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .	111
Διάγραμμα 5.10 : DODGE, Κεραία FM σε συχνότητα 100 MHz για κωνική τομή με $\theta = 70^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .	112
Διάγραμμα 5.11 : DODGE, Κεραία FM σε συχνότητα 100 MHz για κωνική τομή με $\theta = 75^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .	113
Διάγραμμα 5.12 : DODGE, Κεραία FM σε συχνότητα 100 MHz για κωνική τομή με $\theta = 80^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .	114
Διάγραμμα 5.13 : DODGE, Κεραία FM σε συχνότητα 100 MHz για κωνική τομή με $\theta = 85^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .	115
Διάγραμμα 5.14 : DODGE, Κεραία FM σε συχνότητα 100 MHz για κωνική τομή με $\theta = 89^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .	116
Διάγραμμα 5.15 : DODGE, 3D διάγραμμα κέρδους ισχύος για κεραία FM σε συχνότητα 100 MHz με χρήση VRML .	117
Διάγραμμα 5.16 : DODGE, Κεραία VHF σε συχνότητα 146 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 0^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .	119
Διάγραμμα 5.17 : DODGE, Κεραία VHF σε συχνότητα 146 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 30^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .	120
Διάγραμμα 5.18 : DODGE, Κεραία VHF σε συχνότητα 146 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 60^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .	121
Διάγραμμα 5.19 : DODGE, Κεραία VHF σε συχνότητα 146 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 90^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .	122
Διάγραμμα 5.20 : DODGE, Κεραία VHF σε συχνότητα 146 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 120^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .	123
Διάγραμμα 5.21 : DODGE, Κεραία VHF σε συχνότητα 146 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 150^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .	124
Διάγραμμα 5.22 : DODGE, Κεραία VHF σε συχνότητα 146 MHz για κωνική τομή με $\theta = 55^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .	125
Διάγραμμα 5.23 : DODGE, Κεραία VHF σε συχνότητα 146 MHz για κωνική τομή με $\theta = 60^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .	126
Διάγραμμα 5.24 : DODGE, Κεραία VHF σε συχνότητα 146 MHz για κωνική τομή με $\theta = 65^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .	127
Διάγραμμα 5.25 : DODGE, Κεραία VHF σε συχνότητα 146 MHz για κωνική τομή με $\theta = 70^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .	128

Διάγραμμα 5.26 : DODGE, Κεραία VHF σε συχνότητα 146 MHz για κωνική τομή με $\theta = 75^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	129
Διάγραμμα 5.27 : DODGE, Κεραία VHF σε συχνότητα 146 MHz για κωνική τομή με $\theta = 80^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	130
Διάγραμμα 5.28 : DODGE, Κεραία VHF σε συχνότητα 146 MHz για κωνική τομή με $\theta = 85^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	131
Διάγραμμα 5.29 : DODGE, Κεραία VHF σε συχνότητα 146 MHz για κωνική τομή με $\theta = 89^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	132
Διάγραμμα 5.30 : DODGE, 3D διάγραμμα κέρδους ισχύος για κεραία VHF σε συχνότητα 146 MHz με χρήση VRML.....	133
Διάγραμμα 5.31 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 2 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 0^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	141
Διάγραμμα 5.32 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 2 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 45^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	142
Διάγραμμα 5.33 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 2 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 90^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	143
Διάγραμμα 5.34 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 2 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 135^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	144
Διάγραμμα 5.35 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 2 MHz για κωνική τομή με $\theta = 5^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	145
Διάγραμμα 5.36 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 2 MHz για κωνική τομή με $\theta = 10^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	146
Διάγραμμα 5.37 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 2 MHz για κωνική τομή με $\theta = 15^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	147
Διάγραμμα 5.38 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 2 MHz για κωνική τομή με $\theta = 20^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	148
Διάγραμμα 5.39 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, 3D διάγραμμα κέρδους ισχύος για κεραία 1 σε συχνότητα 2 MHz με χρήση VRML.....	149
Διάγραμμα 5.40 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 0^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	150
Διάγραμμα 5.41 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 45^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	151
Διάγραμμα 5.42 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 90^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	152
Διάγραμμα 5.43 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 135^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	153
Διάγραμμα 5.44 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με $\theta = 5^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	154
Διάγραμμα 5.45 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με $\theta = 10^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	155

Διάγραμμα 5.46 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με $\theta = 15^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	156
Διάγραμμα 5.47 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με $\theta = 20^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	157
Διάγραμμα 5.48 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, 3D διάγραμμα κέρδους ισχύος για κεραία 1 σε συχνότητα 5 MHz με χρήση VRML.....	158
Διάγραμμα 5.49 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 0^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	159
Διάγραμμα 5.50 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 45^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	160
Διάγραμμα 5.51 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 90^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	161
Διάγραμμα 5.52 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 135^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	162
Διάγραμμα 5.53 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με $\theta = 5^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	163
Διάγραμμα 5.54 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με $\theta = 10^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	164
Διάγραμμα 5.55 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με $\theta = 15^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	165
Διάγραμμα 5.56 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με $\theta = 20^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	166
Διάγραμμα 5.57 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, 3D διάγραμμα κέρδους ισχύος για κεραία 1 σε συχνότητα 7 MHz με χρήση VRML.....	167
Διάγραμμα 5.58 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 2 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 0^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	169
Διάγραμμα 5.59 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 2 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 45^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	170
Διάγραμμα 5.60 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 2 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 90^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	171
Διάγραμμα 5.61 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 2 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 135^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	172
Διάγραμμα 5.62 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 2 MHz για κωνική τομή με $\theta = 5^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	173
Διάγραμμα 5.63 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 2 MHz για κωνική τομή με $\theta = 10^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	174
Διάγραμμα 5.64 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 2 MHz για κωνική τομή με $\theta = 15^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	175
Διάγραμμα 5.65 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 2 MHz για κωνική τομή με $\theta = 20^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	176



Διάγραμμα 5.66 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, 3D διάγραμμα κέρδους ισχύος για κεραία 2 σε συχνότητα 2 MHz με χρήση VRML.....	177
Διάγραμμα 5.67 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 0^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	178
Διάγραμμα 5.68 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 45^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	179
Διάγραμμα 5.69 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 90^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	180
Διάγραμμα 5.70 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 135^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	181
Διάγραμμα 5.71 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με $\theta = 5^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	182
Διάγραμμα 5.72 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με $\theta = 10^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	183
Διάγραμμα 5.73 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με $\theta = 15^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	184
Διάγραμμα 5.74 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με $\theta = 20^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	185
Διάγραμμα 5.75 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, 3D διάγραμμα κέρδους ισχύος για κεραία 2 σε συχνότητα 5 MHz με χρήση VRML.....	186
Διάγραμμα 5.76 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 0^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	187
Διάγραμμα 5.77 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 45^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	188
Διάγραμμα 5.78 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 90^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	189
Διάγραμμα 5.79 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 135^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	190
Διάγραμμα 5.80 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με $\theta = 5^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	191
Διάγραμμα 5.81 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με $\theta = 10^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	192
Διάγραμμα 5.82 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με $\theta = 15^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	193
Διάγραμμα 5.83 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με $\theta = 20^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	194
Διάγραμμα 5.84 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, 3D διάγραμμα κέρδους ισχύος για κεραία 2 σε συχνότητα 7 MHz με χρήση VRML.....	195
Διάγραμμα 5.85 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 3 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 0^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	197

Διάγραμμα 5.86 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 3 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 45^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	198
Διάγραμμα 5.87 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 3 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 90^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	199
Διάγραμμα 5.88 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 3 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 135^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	200
Διάγραμμα 5.89 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 3 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με $\theta = 5^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	201
Διάγραμμα 5.90 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 3 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με $\theta = 10^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	202
Διάγραμμα 5.91 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 3 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με $\theta = 15^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	203
Διάγραμμα 5.92 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 3 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με $\theta = 20^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	204
Διάγραμμα 5.93 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, 3D διάγραμμα κέρδους ισχύος για κεραία 3 σε συχνότητα 5 MHz με χρήση VRML.....	205
Διάγραμμα 5.94 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 3 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 0^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	206
Διάγραμμα 5.95 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 3 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 45^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	207
Διάγραμμα 5.96 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 3 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 90^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	208
Διάγραμμα 5.97 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 3 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 135^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	209
Διάγραμμα 5.98 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 3 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με $\theta = 5^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	210
Διάγραμμα 5.99 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 3 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με $\theta = 10^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	211
Διάγραμμα 5.100 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 3 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με $\theta = 15^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	212
Διάγραμμα 5.101 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 3 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με $\theta = 20^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	213
Διάγραμμα 5.102 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, 3D διάγραμμα κέρδους ισχύος για κεραία 3 σε συχνότητα 7 MHz με χρήση VRML.....	214
Διάγραμμα 5.103 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 2 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 0^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	216
Διάγραμμα 5.104 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 2 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 45^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	217
Διάγραμμα 5.105 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 2 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 90^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	218

Διάγραμμα 5.106 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 2 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 135^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .	219
Διάγραμμα 5.107 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 2 MHz για κωνική τομή με $\theta = 5^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .	220
Διάγραμμα 5.108 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 2 MHz για κωνική τομή με $\theta = 10^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .	221
Διάγραμμα 5.109 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 2 MHz για κωνική τομή με $\theta = 15^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .	222
Διάγραμμα 5.110 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 2 MHz για κωνική τομή με $\theta = 20^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .	223
Διάγραμμα 5.111 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, 3D διάγραμμα κέρδους ισχύος για κεραία 4 σε συχνότητα 2 MHz με χρήση VRML.	224
Διάγραμμα 5.112 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 0^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .	225
Διάγραμμα 5.113 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 45^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .	226
Διάγραμμα 5.114 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 90^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .	227
Διάγραμμα 5.115 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 135^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .	228
Διάγραμμα 5.116 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με $\theta = 5^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .	229
Διάγραμμα 5.117 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με $\theta = 10^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .	230
Διάγραμμα 5.118 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με $\theta = 15^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .	231
Διάγραμμα 5.119 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με $\theta = 20^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .	232
Διάγραμμα 5.120 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, 3D διάγραμμα κέρδους ισχύος για κεραία 4 σε συχνότητα 5 MHz με χρήση VRML.	233
Διάγραμμα 5.121 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 0^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .	234
Διάγραμμα 5.122 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 45^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .	235
Διάγραμμα 5.123 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 90^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .	236
Διάγραμμα 5.124 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 135^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .	237
Διάγραμμα 5.125 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με $\theta = 5^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .	238

Διάγραμμα 5.126 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με $\theta = 10^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	239
Διάγραμμα 5.127 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με $\theta = 15^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	240
Διάγραμμα 5.128 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με $\theta = 20^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	241
Διάγραμμα 5.129 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, 3D διάγραμμα κέρδους ισχύος για κεραία 4 σε συχνότητα 7 MHz με χρήση VRML .....	242
Διάγραμμα 5.130 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 2 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 0^\circ$ και $\theta =$ $0 - 360^\circ$ .....	259
Διάγραμμα 5.131 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 2 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 45^\circ$ και $\theta$ $= 0 - 360^\circ$ .....	260
Διάγραμμα 5.132 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 2 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 90^\circ$ και $\theta$ $= 0 - 360^\circ$ .....	261
Διάγραμμα 5.133 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 2 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 135^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	262
Διάγραμμα 5.134 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 2 MHz για κωνική τομή με $\theta = 5^\circ$ και $\varphi = 0 -$ $360^\circ$ .....	263
Διάγραμμα 5.135 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 2 MHz για κωνική τομή με $\theta = 10^\circ$ και $\varphi = 0 -$ $360^\circ$ .....	264
Διάγραμμα 5.136 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 2 MHz για κωνική τομή με $\theta = 15^\circ$ και $\varphi = 0 -$ $360^\circ$ .....	265
Διάγραμμα 5.137 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 2 MHz για κωνική τομή με $\theta = 20^\circ$ και $\varphi = 0 -$ $360^\circ$ .....	266
Διάγραμμα 5.138 : CRUISER, 3D διάγραμμα κέρδους ισχύος για κεραία 1 σε συχνότητα 2 MHz με χρήση VRML .....	267
Διάγραμμα 5.139 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 0^\circ$ και $\theta =$ $0 - 360^\circ$ .....	268
Διάγραμμα 5.140 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 45^\circ$ και $\theta$ $= 0 - 360^\circ$ .....	269
Διάγραμμα 5.141 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 90^\circ$ και $\theta$ $= 0 - 360^\circ$ .....	270
Διάγραμμα 5.142 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 135^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	271
Διάγραμμα 5.143 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με $\theta = 5^\circ$ και $\varphi = 0 -$ $360^\circ$ .....	272
Διάγραμμα 5.144 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με $\theta = 10^\circ$ και $\varphi = 0 -$ $360^\circ$ .....	273
Διάγραμμα 5.145 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με $\theta = 15^\circ$ και $\varphi = 0 -$ $360^\circ$ .....	274

Διάγραμμα 5.146 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με $\theta = 20^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	275
Διάγραμμα 5.147 : CRUISER, 3D διάγραμμα κέρδους ισχύος για κεραία 1 σε συχνότητα 5 MHz με χρήση VRML.....	276
Διάγραμμα 5.148 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 0^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	277
Διάγραμμα 5.149 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 45^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	278
Διάγραμμα 5.150 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 90^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	279
Διάγραμμα 5.151 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 135^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	280
Διάγραμμα 5.152 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με $\theta = 5^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	281
Διάγραμμα 5.153 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με $\theta = 10^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	282
Διάγραμμα 5.154 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με $\theta = 15^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	283
Διάγραμμα 5.155 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με $\theta = 20^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	284
Διάγραμμα 5.156 : CRUISER, 3D διάγραμμα κέρδους ισχύος για κεραία 1 σε συχνότητα 7 MHz με χρήση VRML.....	285
Διάγραμμα 5.157 : CRUISER, Κεραία 2 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 0^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	287
Διάγραμμα 5.158 : CRUISER, Κεραία 2 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 45^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	288
Διάγραμμα 5.159 : CRUISER, Κεραία 2 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 90^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	289
Διάγραμμα 5.160 : CRUISER, Κεραία 2 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 135^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	290
Διάγραμμα 5.161 : CRUISER, Κεραία 2 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με $\theta = 5^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	291
Διάγραμμα 5.162 : CRUISER, Κεραία 2 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με $\theta = 10^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	292
Διάγραμμα 5.163 : CRUISER, Κεραία 2 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με $\theta = 15^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	293
Διάγραμμα 5.164 : CRUISER, Κεραία 2 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με $\theta = 20^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	294
Διάγραμμα 5.165 : CRUISER, 3D διάγραμμα κέρδους ισχύος για κεραία 2 σε συχνότητα 5 MHz με χρήση VRML.....	295

Διάγραμμα 5.166 : CRUISER, Κεραία 2 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 0^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	296
Διάγραμμα 5.167 : CRUISER, Κεραία 2 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 45^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	297
Διάγραμμα 5.168 : CRUISER, Κεραία 2 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 90^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	298
Διάγραμμα 5.169 : CRUISER, Κεραία 2 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 135^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	299
Διάγραμμα 5.170 : CRUISER, Κεραία 2 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με $\theta = 5^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	300
Διάγραμμα 5.171 : CRUISER, Κεραία 2 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με $\theta = 10^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	301
Διάγραμμα 5.172 : CRUISER, Κεραία 2 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με $\theta = 15^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	302
Διάγραμμα 5.173 : CRUISER, Κεραία 2 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με $\theta = 20^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	303
Διάγραμμα 5.174 : CRUISER, 3D διάγραμμα κέρδους ισχύος για κεραία 2 σε συχνότητα 7 MHz με χρήση VRML.....	304
Διάγραμμα 5.175 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 2 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 0^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	306
Διάγραμμα 5.176 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 2 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 45^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	307
Διάγραμμα 5.177 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 2 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 90^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	308
Διάγραμμα 5.178 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 2 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 135^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	309
Διάγραμμα 5.179 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 2 MHz για κωνική τομή με $\theta = 5^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	310
Διάγραμμα 5.180 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 2 MHz για κωνική τομή με $\theta = 10^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	311
Διάγραμμα 5.181 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 2 MHz για κωνική τομή με $\theta = 15^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	312
Διάγραμμα 5.182 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 2 MHz για κωνική τομή με $\theta = 20^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	313
Διάγραμμα 5.183 : CRUISER, 3D διάγραμμα κέρδους ισχύος για κεραία 3 σε συχνότητα 2 MHz με χρήση VRML.....	314
Διάγραμμα 5.184 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 0^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	315
Διάγραμμα 5.185 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 45^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	316

Διάγραμμα 5.186 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 90^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	317
Διάγραμμα 5.187 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 135^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	318
Διάγραμμα 5.188 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με $\theta = 5^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	319
Διάγραμμα 5.189 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με $\theta = 10^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	320
Διάγραμμα 5.190 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με $\theta = 15^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	321
Διάγραμμα 5.191 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με $\theta = 20^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	322
Διάγραμμα 5.192 : CRUISER, 3D διάγραμμα κέρδους ισχύος για κεραία 3 σε συχνότητα 5 MHz με χρήση VRML.....	323
Διάγραμμα 5.193 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 0^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	324
Διάγραμμα 5.194 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 45^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	325
Διάγραμμα 5.195 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 90^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	326
Διάγραμμα 5.196 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 135^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	327
Διάγραμμα 5.197 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με $\theta = 5^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	328
Διάγραμμα 5.198 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με $\theta = 10^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	329
Διάγραμμα 5.199 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με $\theta = 15^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	330
Διάγραμμα 5.200 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με $\theta = 20^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	331
Διάγραμμα 5.201 : CRUISER, 3D διάγραμμα κέρδους ισχύος για κεραία 3 σε συχνότητα 7 MHz με χρήση VRML.....	332
Διάγραμμα 5.202 : CRUISER, Κεραία 4 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 0^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	334
Διάγραμμα 5.203 : CRUISER, Κεραία 4 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 45^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	335
Διάγραμμα 5.204 : CRUISER, Κεραία 4 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 90^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	336
Διάγραμμα 5.205 : CRUISER, Κεραία 4 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 135^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	337

Διάγραμμα 5.206 : CRUISER, Κεραία 4 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με $\theta = 5^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	338
Διάγραμμα 5.207 : CRUISER, Κεραία 4 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με $\theta = 10^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	339
Διάγραμμα 5.208 : CRUISER, Κεραία 4 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με $\theta = 15^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	340
Διάγραμμα 5.209 : CRUISER, Κεραία 4 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με $\theta = 20^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	341
Διάγραμμα 5.210 : CRUISER, 3D διάγραμμα κέρδους ισχύος για κεραία 4 σε συχνότητα 5 MHz με χρήση VRML.....	342
Διάγραμμα 5.211 : CRUISER, Κεραία 4 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 0^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	343
Διάγραμμα 5.212 : CRUISER, Κεραία 4 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 45^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	344
Διάγραμμα 5.213 : CRUISER, Κεραία 4 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 90^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	345
Διάγραμμα 5.214 : CRUISER, Κεραία 4 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με $\varphi = 135^\circ$ και $\theta = 0 - 360^\circ$ .....	346
Διάγραμμα 5.215 : CRUISER, Κεραία 4 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με $\theta = 5^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	347
Διάγραμμα 5.216 : CRUISER, Κεραία 4 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με $\theta = 10^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	348
Διάγραμμα 5.217 : CRUISER, Κεραία 4 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με $\theta = 15^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	349
Διάγραμμα 5.218 : CRUISER, Κεραία 4 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με $\theta = 20^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	350
Διάγραμμα 5.219 : CRUISER, 3D διάγραμμα κέρδους ισχύος για κεραία 4 σε συχνότητα 7 MHz με χρήση VRML.....	351
Διάγραμμα 5.220 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 350 MHz για κωνική τομή με $\theta = 20^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	356
Διάγραμμα 5.221 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 350 MHz για κωνική τομή με $\theta = 30^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	357
Διάγραμμα 5.222 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 350 MHz για κωνική τομή με $\theta = 40^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	358
Διάγραμμα 5.223 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 350 MHz για κωνική τομή με $\theta = 50^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	359
Διάγραμμα 5.224 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 350 MHz για κωνική τομή με $\theta = 60^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	360
Διάγραμμα 5.225 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 350 MHz για κωνική τομή με $\theta = 70^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	361





Διάγραμμα 5.246 : CRUISER, Κεραία 4 σε συχνότητα 400 MHz για κωνική τομή με $\theta = 40^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	385
Διάγραμμα 5.247 : CRUISER, Κεραία 4 σε συχνότητα 400 MHz για κωνική τομή με $\theta = 50^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	386
Διάγραμμα 5.248 : CRUISER, Κεραία 4 σε συχνότητα 400 MHz για κωνική τομή με $\theta = 60^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	387
Διάγραμμα 5.249 : CRUISER, Κεραία 4 σε συχνότητα 400 MHz για κωνική τομή με $\theta = 70^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	388
Διάγραμμα 5.250 : CRUISER, Κεραία 4 σε συχνότητα 400 MHz για κωνική τομή με $\theta = 80^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	389
Διάγραμμα 5.251 : CRUISER, Κεραία 4 σε συχνότητα 400 MHz για κωνική τομή με $\theta = 89^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	390
Διάγραμμα 5.252 : CRUISER, Κεραία 1' σε συχνότητα 350 MHz για κωνική τομή με $\theta = 87^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	392
Διάγραμμα 5.253 : CRUISER, Κεραία 1' σε συχνότητα 350 MHz για κωνική τομή με $\theta = 88^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	393
Διάγραμμα 5.254 : CRUISER, Κεραία 1' σε συχνότητα 350 MHz για κωνική τομή με $\theta = 89^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	394
Διάγραμμα 5.255 : CRUISER, Κεραία 2' σε συχνότητα 160 MHz για κωνική τομή με $\theta = 87^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	396
Διάγραμμα 5.256 : CRUISER, Κεραία 2' σε συχνότητα 160 MHz για κωνική τομή με $\theta = 88^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	397
Διάγραμμα 5.257 : CRUISER, Κεραία 2' σε συχνότητα 160 MHz για κωνική τομή με $\theta = 89^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	398
Διάγραμμα 5.258 : CRUISER, Κεραία 3' σε συχνότητα 130 MHz για κωνική τομή με $\theta = 87^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	400
Διάγραμμα 5.259 : CRUISER, Κεραία 3' σε συχνότητα 130 MHz για κωνική τομή με $\theta = 88^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	401
Διάγραμμα 5.260 : CRUISER, Κεραία 3' σε συχνότητα 130 MHz για κωνική τομή με $\theta = 89^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	402
Διάγραμμα 5.261 : CRUISER, Κεραία 4' σε συχνότητα 400 MHz για κωνική τομή με $\theta = 87^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	404
Διάγραμμα 5.262 : CRUISER, Κεραία 4' σε συχνότητα 400 MHz για κωνική τομή με $\theta = 88^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	405
Διάγραμμα 5.263 : CRUISER, Κεραία 4' σε συχνότητα 400 MHz για κωνική τομή με $\theta = 89^\circ$ και $\varphi = 0 - 360^\circ$ .....	406

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΑ

Σχήμα 2.1 : Προσπίπτον κύμα στην επιφάνεια τέλειου νηματοειδούς αγωγού. ....	13
Σχήμα 2.2 : Ρευματική κατανομή πάνω στον νηματοειδή αγωγό.....	14
Σχήμα 2.3 : Αναπαράσταση ρεύματος σε νηματοειδή αγωγό και επέκταση σε ένα δυσδιάστατο αγωγίμο επίπεδο. ....	17
Σχήμα 2.4 : Συναρτήσεις παλμού και τμηματικά τριγωνικές συναρτήσεις.....	18
Σχήμα 2.5 : Συναρτήσεις τμηματικού ημιτόνου και τεμαχισμένου συνιμητόνου. ....	19
Σχήμα 2.6 : Ανεκτικότητα που εμφανίζει η MoM στο φυσικό ( $\epsilon_P$ ) και στο αριθμητικό ( $\epsilon_N$ ) σφάλμα κατά την μοντελοποίηση αγωγίμης σφαίρας με πλέγμα νημάτων. ....	23
Σχήμα 2.7 : Wire grid πολιτικού οχήματος ( DODGE). ....	26
Σχήμα 2.8 : Wire grid Πολεμικού αεροπλάνου F-16. ....	27
Σχήμα 2.9 : Wire grid Πολεμικού Πλοίου (LARGE PATROL SHIP). ....	27
Σχήμα 3.1 : Μηχανισμοί διάδοσης στην UTD. [23].....	30
Σχήμα 3.2 : Ευθύγραμμη πηγή πάνω από τελείως αγωγίμο αντικείμενο, αντιμετώπιση από την GO. ....	32
Σχήμα 3.3 : Διαδρομή προσπίπτουσας ακτίνας κατά την ανάκλαση σε επιφάνεια. [7].....	33
Σχήμα 3.4 : Σημειακή πηγή ακτινοβολούσα ισοτροπικώς σφαιρικά κύματα. ....	34
Σχήμα 3.5 : Ισοφασικές επιφάνειες για την γενικότερη περίπτωση ακτινοβολήσης. ....	35
Σχήμα 3.6 : Μηχανισμός ανάκλασης σε λεία και τελείως αγωγίμη επιφάνεια S. ....	36
Σχήμα 3.7 : Ισοφασικές επιφάνειες για την γενικότερη περίπτωση του τρισδιάστατου προβλήματος ανάκλασης σε λεία και τελείως αγωγίμη επιφάνεια S. ....	38
Σχήμα 3.8 : Ευθύγραμμη πηγή πάνω από τελείως αγωγίμο αντικείμενο, αντιμετώπιση από την GTD.....	39
Σχήμα 3.9 : Βομβαρδιστικό αεροσκάφος F-117 (stealth) , φαίνονται τα έντονα κοψίματα που έχει.....	40
Σχήμα 3.10 : Περίθλαση επί ακμής σε μια σφήνα σε τρισδιάστατη μορφή. [20].....	41
Σχήμα 3.11 : Περίθλαση επί ακμής σε μια σφήνα σε δυσδιάστατη μορφή. [20].....	42
Σχήμα 3.12 : Η προσπίπτουσα γωνία είναι ίση με $90^\circ$ και έτσι ο κώνος εκφυλίζεται σε δίσκο. [7].....	42
Σχήμα 3.13 : Οι διευθύνσεις ο και n σε μια σφήνα. ....	43
Σχήμα 3.14 : Περίθλαση σε κορυφή πλάκας , σε ενωμένες κορυφές πλακών, σε κορυφή κώνου.....	44
Σχήμα 3.16 : Μηχανισμός περιθλάσεως σε επιφάνεια. [21].....	46
Σχήμα 3.17 : Μοντέλο με χρήση πλακών Πολεμικού αεροπλάνου F-22. ....	50
Σχήμα 3.18 : Μοντέλο με χρήση πλακών και κυλίνδρων πολιτικού οχήματος (JEEP).....	50
Σχήμα 3.19 : Οι διαφορετικοί συντελεστές που λαμβάνονται υπόψη όταν συμπληρώνεται ο πίνακας αλληλεπιδράσεων της υβριδικής μεθόδου των MoM/UTD. [14].....	54
Σχήμα 4.1α : Δίπολο $\lambda/2$ παρουσία παράλληλου τελείως αγωγίμου τετραγωνικού επιπέδου.....	56
Σχήμα 4.1β : Δίπολο $\lambda/2$ παρουσία παράλληλου τελείως αγωγίμου τετραγωνικού επιπέδου με χρήση VRML. ....	56
Σχήμα 4.2α : Διάταξη μετρήσεως κοντινού πεδίου διπόλου $\lambda/2$ για $f = 3.985\text{GHz}$ κατά μήκος σημείων περιφέρειας κύκλου ακτίνας $37''$ , σε συνθήκες ελευθέρου χώρου. ....	60

Σχήμα 4.2β : Διάταξη μετρήσεως κοντινού πεδίου διπόλου $\lambda/2$ για $f = 3.985\text{GHz}$ κατά μήκος σημείων περιφέρειας κύκλου ακτίνας $37''$ , παρουσία παράλληλου τελείως αγωγίμου τετραγωνικού επιπέδου πεπερασμένων διαστάσεων. ....	60
Σχήμα 4.2γ : Διάταξη μετρήσεως κοντινού πεδίου διπόλου $\lambda/2$ για $f = 3.985\text{GHz}$ κατά μήκος σημείων περιφέρειας κύκλου ακτίνας $37''$ , παρουσία παράλληλου τελείως αγωγίμου τετραγωνικού επιπέδου πεπερασμένων διαστάσεων με χρήση VRML.....	61
Σχήμα 4.3α : Διάταξη μετρήσεως κοντινού πεδίου διπόλου $\lambda/2$ για $f = 3.985\text{GHz}$ κατά μήκος σημείων περιφέρειας κύκλου ακτίνας $36.75''$ , παρουσία διάταξης τελείως αγωγίμων πλακών πεπερασμένων διαστάσεων. ....	65
Σχήμα 4.3β : Διάταξη μετρήσεως κοντινού πεδίου διπόλου $\lambda/2$ για $f = 3.985\text{GHz}$ κατά μήκος σημείων περιφέρειας κύκλου ακτίνας $36.75''$ , παρουσία διάταξης τελείως αγωγίμων πλακών πεπερασμένων διαστάσεων με χρήση VRML. ....	66
Σχήμα 4.4α : Δίπολο $\lambda/2$ για $f = 9.94\text{GHz}$ , παρουσία τελείως αγωγίμου οκταπλεύρου. ....	68
Σχήμα 4.4β : Δίπολο $\lambda/2$ για $f = 9.94\text{GHz}$ , παρουσία τελείως αγωγίμου οκταπλεύρου με χρήση VRML. ..	68
Σχήμα 4.5α : Δίπολο $\lambda/2$ για $f = 9.94\text{GHz}$ παρουσία τελείως αγωγίμου κυκλικού κυλίνδρου πεπερασμένων διαστάσεων παράλληλο στο $xz$ επίπεδο με χρήση VRML. ....	72
Σχήμα 4.5β : Δίπολο $\lambda/2$ για $f = 9.94\text{GHz}$ παρουσία τελείως αγωγίμου κυκλικού κυλίνδρου πεπερασμένων διαστάσεων παράλληλο στο $xy$ επίπεδο με χρήση VRML. ....	73
Σχήμα 4.6α : Ground plane κεραία για $f = 4\text{GHz}$ , εγκατεστημένη σε κατάρτι με χρήση VRML.....	78
Σχήμα 4.6β : Ground plane κεραία για $f = 4\text{GHz}$ , εγκατεστημένη σε κατάρτι με χρήση VRML.....	79
Σχήμα 4.6γ : Ground plane κεραία για $f = 4\text{GHz}$ , εγκατεστημένη σε κατάρτι (κάτοψη και εμπρόσθια όψη). ....	79
Σχήμα 4.7α : Slot κεραία για $f = 1,746\text{ GHz}$ , πάνω σε φτερό αεροπλάνου Boeing 737. ....	83
Σχήμα 4.7β : Slot κεραία για $f = 1,746\text{ GHz}$ , πάνω σε φτερό αεροπλάνου Boeing 737 με χρήση VRML....	84
Σχήμα 4.8 : Δίπολο $\lambda/2$ για $f = 2997.5\text{ GHz}$ , τοποθετημένο παράλληλα στο $xy$ επίπεδο δίπλα σε πλάκα διαστάσεων $2\lambda \times 2\lambda$ , σε απόσταση $2\lambda$ . ....	86
Σχήμα 4.9 : Δίπολο $\lambda/2$ για $f = 2997.5\text{ GHz}$ , τοποθετημένο παράλληλα στο $xy$ επίπεδο στο μέσον της απόστασης $4\lambda$ που χωρίζει δυο παράλληλες πλάκες διαστάσεων $2\lambda \times 2\lambda$ έκαστη.....	89
Σχήμα 4.10 : Δίπολο $\lambda/2$ για $f = 2997.5\text{ GHz}$ , τοποθετημένο παράλληλα στο $xy$ επίπεδο δίπλα σε παραλληλεπίπεδο διαστάσεων $2\lambda \times 2\lambda \times \lambda/4$ , σε απόσταση $3\lambda$ . ....	92
Σχήμα 5.1 : Πολιτικό όχημα DODGE. ....	99
Σχήμα 5.2 : Wire grid Πολιτικού οχήματος DODGE με διαφανόμενη την κεραία FM/VHF που φέρει..	101
Σχήμα 5.3 : Επικοινωνία μεταξύ δυο πλοίων μέσω ιονόσφαιρας. ....	135
Σχήμα 5.4 : Κεραίες HF κατά σειρά : Monopole Whip, Twin Pole Whip και active monopole. ....	137
Σχήμα 5.5 : Wire grid ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟΥ ΠΛΟΙΟΥ με διαφανόμενες τις 4 κεραίες που φέρει.....	139
Σχήμα 5.6 : Διάγραμμα κοντινού πεδίου που αφορά σε οριζόντια τομή σάρωσης στο $z = 4.0\text{ m}$ με $x \in [-13, -1]\text{ m}$ και $y \in [+2.8, +4.6]$ . ....	245
Σχήμα 5.7 : Διάγραμμα κοντινού πεδίου που αφορά σε οριζόντια τομή σάρωσης στο $z = 6.0\text{ m}$ με $x \in [-13, -1]\text{ m}$ και $y \in [-2.7, +2.7]$ . ....	246

Σχήμα 5.8 : Διάγραμμα κοντινού πεδίου που αφορά σε οριζόντια τομή σάρωσης στο $z = 6.5$ m με $x \in [-13, -1]$ m και $y \in [-2.7, +2.7]$ .	247
Σχήμα 5.9 : Διάγραμμα κοντινού πεδίου που αφορά σε κάθετη τομή σάρωσης στο $y = 1.7$ m με $x \in [-13, -1]$ m και $z \in [+5.25, +19.95]$ .	248
Σχήμα 5.10 : Διάγραμμα κοντινού πεδίου που αφορά σε κάθετη τομή σάρωσης στο $y = 2.2$ m με $x \in [-13, -1]$ m και $z \in [+5.25, +19.95]$ .	249
Σχήμα 5.11 : Ship-to-Air VHF/UHF Επικοινωνίες.	251
Σχήμα 5.12 : Ανάθεση VHF/UHF συχνοτήτων Πολεμικού Ναυτικού.	251
Σχήμα 5.13 : Ground plane κεραίες εγκατεστημένες σε κατάρτι.	253
Σχήμα 5.14 : Είδη ground plane κεραίων.	253
Σχήμα 5.15 : Σύστημα τροφοδοσίας ground plane κεραίων.	254
Σχήμα 5.16 : Tincoderoga Class Cruiser.	255
Σχήμα 5.17 : Wire grid Tincoderoga Class Cruiser με διαφανόμενες τις 4 κεραίες που φέρει.	257
Σχήμα 5.18 : Μοντέλο πλακών και κυλίνδρων Tincoderoga Class Cruiser με διαφανόμενες τις 8 ground plane κεραίες που φέρει.	354



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟΙ ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 5.1 : Συγκριτικά στοιχεία προσομοίωσης των δυο VHF κεραιών που φέρει το όχημα DODGE. ....	134
Πίνακας 5.2 : Παράμετροι τυπικών HF κεραιών εκπομπής εγκατεστημένων σε πολεμικά πλοία. ....	137
Πίνακας 5.3 : Συγκριτικά στοιχεία προσομοίωσης των τεσσάρων HF κεραιών που φέρει το ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ. ....	243
Πίνακας 5.4 : Βασικοί περιορισμοί για ηλεκτρικά, μαγνητικά και ηλεκτρομαγνητικά πεδία (0 Hz - 300 GHz)	250
Πίνακας 5.5 : Επίπεδα αναφοράς για ηλεκτρικά, μαγνητικά και ηλεκτρομαγνητικά πεδία (0 Hz - 300 GHz, σταθερές τιμές rms).....	250
Πίνακας 5.6 : Συγκριτικά στοιχεία προσομοίωσης των τεσσάρων HF κεραιών που φέρει το TINCODEROGA CLASS CRUISER.....	352
Πίνακας 5.7 : Υπολογισθείσες τιμές των couplings για τα ζητούμενα ζεύγη κεραιών των οκτώ VHF/UHF κεραιών που φέρει το TINCODEROGA CLASS CRUISER.....	408
Πίνακας 5.8 : Συγκριτικά στοιχεία προσομοίωσης των οκτώ VHF/UHF κεραιών που φέρει το TINCODEROGA CLASS CRUISER.....	409





# *Κεφάλαιο 1*

## *Εισαγωγή*

### *1.1 Διατύπωση του προβλήματος*

Οι κεραιές αποτελούν ένα από τα πιο σημαντικά και συχνότατα χρησιμοποιούμενα μέσα επικοινωνίας, μεταδίδοντας σήματα ασύρματα από ένα σημείο (σταθερό ή κινητό) σε ένα άλλο (σταθερό ή κινητό). Για να μπορέσει κανείς να αξιοποιήσει το μέσο επικοινωνίας αυτό με βάση επιθυμητές προδιαγραφές πρέπει να γνωρίζει τις βασικές παραμέτρους που χαρακτηρίζουν μια κεραία, όπως είναι η απόδοση ακτινοβολίας (radiation efficiency), η σύνθετη αντίσταση (impedance), το εύρος ζώνης (bandwidth) και τα διαγράμματα μακρινού και κοντινού πεδίου (far and near field patterns).

Συνήθως, οι πληροφορίες που υπάρχουν για τις βασικές παραμέτρους των ποικίλων τύπων κεραιών αφορούν κυρίως την περίπτωση που αυτές λειτουργούν μόνες σε συνθήκες ελευθέρου χώρου (free space). Όμως, οι συνθήκες ελευθέρου χώρου δεν ισχύουν στην πραγματικότητα αφού, συνήθως πολλές κεραιές λειτουργούν παράλληλα σε ιδιάζοντα ηλεκτρομαγνητικά περιβάλλοντα, όπως η θάλασσα και είναι εγκατεστημένες σε σύνθετες δομικά κατασκευές, όπως πλοία, οχήματα, αεροπλάνα, δορυφόροι και κτιριακές εγκαταστάσεις συμβατικού και στρατιωτικού χαρακτήρα. Οι ιδιάζουσες αυτές συνθήκες λειτουργίας έχουν ως αποτέλεσμα την τροποποίηση των βασικών παραμέτρων των κεραιών και επομένως τη διαφορετική πλέον συμπεριφορά τους στο επιχειρησιακό τους περιβάλλον [15].

Η συστηματική μελέτη των κεραιών στο επιχειρησιακό τους περιβάλλον, δηλαδή εγκατεστημένων σε σύνθετες κατασκευές ή, απλώς, παρουσία αυτών και σε πραγματικές συνθήκες με ιδιάζοντα ηλεκτρομαγνητικά περιβάλλοντα, καθίσταται επιτακτική τόσο στο στάδιο της ανάπτυξης και υλοποίησης όσο και στο στάδιο της πιστοποίησης και τροποποίησης ώστε να ικανοποιηθούν οι επιθυμητές προδιαγραφές λειτουργίας. Η μελέτη αυτή όταν πραγματοποιείται στα στάδια της ανάπτυξης και υλοποίησης ή της τροποποίησης αφορά κυρίως την επιλογή των κατάλληλων τύπων κεραιών και την εύρεση των βέλτιστων για αυτές θέσεων. Σκοπός είναι η επίτευξη των επιθυμητών διαγραμμάτων μακρινού και κοντινού πεδίου και η επίτευξη ηλεκτρομαγνητικής

συμβατότητας (Electromagnetic Compatibility) προς αποφυγή ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών (Electromagnetic Interference) ή πιθανών κινδύνων ακτινοβολίας (Radiation Hazards). Όταν πραγματοποιείται στο στάδιο της πιστοποίησης αφορά την επιβεβαίωση της ορθής επίτευξης των ανωτέρων επιθυμητών προδιαγραφών.

## ***1.2 Επίλυση του προβλήματος χωρίς την βοήθεια υπολογιστικών μεθόδων προσομοίωσης***

Η εγκατάσταση των κεραιών σε μια σύνθετη κατασκευή περιλαμβάνει ως βασικό και πρωταρχικό ζητούμενο την επιλογή και τοποθέτησή τους στα καταλληλότερα σημεία της κατασκευής. Η δυσκολία καθρεφτίζεται χαρακτηριστικά στα δυο ακόλουθα συμπεράσματα [24] :

- 1) Για να γίνει η επιλογή και τοποθέτηση των κεραιών στα βέλτιστα σημεία της κατασκευής με βάση τις προδιαγραφές, πρέπει να γνωρίζει κανείς πλήρως και με σαφήνεια τους παράγοντες εκείνους που επηρεάζουν τη λειτουργία των κεραιών και σχετίζονται με τη δομή της κατασκευής αλλά και τη συμπεριφορά του ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος στο οποίο καλούνται να λειτουργήσουν.
- 2) Οι παράγοντες εκείνοι που επηρεάζουν τη λειτουργία των κεραιών και σχετίζονται με τη δομή της κατασκευής αλλά και τη συμπεριφορά του ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος στο οποίο καλούνται να λειτουργήσουν, μπορούν να προσδιορισθούν πλήρως και με σαφήνεια μόνο όταν έχει γίνει η τοποθέτηση των κεραιών στην κατασκευή.

Τα δυο παραπάνω αντικρουόμενα συμπεράσματα οδήγησαν μέχρι τη δεκαετία του 1970 στην επιλογή της μεθόδου των δοκιμών και μετρήσεων των βασικών παραμέτρων των κεραιών με στόχο τον προσδιορισμό των καταλλήλων κεραιών και των βέλτιστων θέσεων εγκατάστασης τους. Οι δοκιμές και οι μετρήσεις που λαμβάνονται κατά τη διάρκεια τους πραγματοποιούνται σε δύο στάδια :

- 1) Αρχικώς για πρακτικούς λόγους που σχετίζονται με την ευκολία και την πληθώρα των δοκιμών που μπορούν να γίνουν, κατασκευάζεται ένα μοντέλο της κατασκευής και των προς εγκατάσταση κεραιών με διαφορετική κλίμακα από την πραγματική (scale model) και λαμβάνονται μετρήσεις σε συχνότητα πολλαπλασιασμένη κατά την κλίμακα μοντελοποίησης. Αν, για παράδειγμα, η συχνότητα ενδιαφέροντας είναι το 1 GHz και το μοντέλο αποτελεί σμίκρυνση κατά το 1/8, τότε η συχνότητα μελέτης θα είναι τα 8 GHz. Οι προδιαγραφές με βάση τις οποίες κατασκευάζεται το μοντέλο έχουν καθορισθεί από τον Sinclair [8] και αφορούν σε επιλογή υλικού κατασκευής και καθορισμό των ηλεκτρομαγνητικών ιδιοτήτων του περιβάλλοντος μελέτης ώστε να καταστούν οι συνθήκες μελέτης ισοδύναμες με τις πραγματικές. Οι μετρήσεις σε αυτό το στάδιο μπορούν να πραγματοποιηθούν σε κατάλληλο με βάση τη συχνότητα ανηχοϊκό θάλαμο αλλά και σε ειδικά διαμορφωμένο υπαίθριο χώρο.
- 2) Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη μελέτη στο προηγούμενο στάδιο έχουν ως αποτέλεσμα την εύρεση περιοχών ή και σημείων πιθανής εγκατάστασης των κεραιών.

Έτσι καθίσταται πλέον πολύ πιο εύκολη η μελέτη του προβλήματος σε πραγματική κλίμακα (full scale) της κατασκευής και σε πραγματικές συνθήκες περιβάλλοντος. Πραγματοποιούνται μετρήσεις και επιλέγονται μετά από συγκρίσεις και με βάση τις προδιαγραφές οι κατάλληλες κεραιές και οι βέλτιστες για αυτές θέσεις.

### ***1.3 Επίλυση του προβλήματος με τη βοήθεια υπολογιστικών μεθόδων προσομοίωσης***

Η μελέτη κεραιών εγκατεστημένων σε σύνθετες κατασκευές βασιζόμενη στα δυο προαναφερθέντα στάδια των δοκιμών και των μετρήσεων που λαμβάνονται κατά τη διάρκεια τους, αρχικώς σε μοντέλα μη πραγματικής κλίμακας και κατόπιν σε μοντέλα πραγματικής κλίμακας, έχει τέσσερα σημαντικά μειονεκτήματα :

- 1) Μεγάλο χρόνο περάτωσης της μελέτης λόγω των πολλών και χρονοβόρων δοκιμών που απαιτούνται.
- 2) Μεγάλο κόστος λόγω των πολλών ωρών εργασίας αλλά και λόγω του ακριβού εξοπλισμού που χρησιμοποιείται.
- 3) Υπαρκτή πιθανότητα αδυναμίας εύρεσης βέλτιστων κεραιών και θέσεων για αυτές.
- 4) Μεγάλη δυσκολία έως και αδυναμία πραγματοποίησης της μελέτης λόγω μεγάλης πολυπλοκότητας ή λόγω μεταβαλλόμενου περιβάλλοντος λειτουργίας.

Με τη ραγδαία εξέλιξη των Η/Υ κατά τις δεκαετίες του 1970-80, συστηματοποιήθηκε η προσπάθεια ανάπτυξης υπολογιστικών μεθόδων επίλυσης των Η/Μ προβλημάτων, όπως είναι η μελέτη κεραιών στο επιχειρησιακό τους περιβάλλον. Απλώς, και μόνο με τη χρήση κατάλληλα σχεδιασμένου λογισμικού, μπορεί ο μηχανικός να προσομοιώσει τις κεραιές, την κατασκευή και το περιβάλλον ώστε να πάρει μια ενδεικτική εικόνα του προβλήματος που αντιμετωπίζει και σε συνδυασμό με την εμπειρία και την γνώση του να οδηγηθεί στα στάδια των μετρήσεων έχοντας ήδη εξαλείψει πολλές λανθασμένες επιλογές. Καθιερώθηκαν, πλέον, τρία στάδια μελέτης των κεραιών στο επιχειρησιακό τους περιβάλλον :

- 1) **Χρήση κατάλληλων κατά περίπτωση υπολογιστικών κωδίκων (λογισμικού) και προσομοίωση του εκάστοτε προβλήματος.**
- 2) **Δοκιμαστικές μετρήσεις σε μοντέλα μη πραγματικής κλίμακας (scale models).**
- 3) **Δοκιμαστικές μετρήσεις σε μοντέλα πραγματικής κλίμακας (full scale models).**

## 1.4 Επιλογή κατάλληλης υπολογιστικής μεθόδου

Οι υπολογιστικές μέθοδοι διακρίνονται σε δυο κατηγορίες. Η πρώτη αφορά τις μεθόδους που βασίζονται υπολογιστικά μόνο στις εξισώσεις του Maxwell είτε στη διαφορική τους μορφή, δηλαδή τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών (finite differences) και των πεπερασμένων στοιχείων (finite elements), είτε στην ολοκληρωτική τους μορφή, δηλαδή την μέθοδο των ροπών (Method of Moments). Η δεύτερη κατηγορία αναφέρεται στην υπολογιστική υλοποίηση ασυμπτωτικών μεθόδων επίλυσης των H/M προβλημάτων όπως την ενιαία θεωρία περιθλάσεως (Uniform Theory of Diffraction) και τη φυσική θεωρία περιθλάσεως (Physical Theory of Diffraction).

Βασικό κριτήριο για την αξιολόγηση κατά περίπτωση της καταλληλότητας των δυο αυτών κατηγοριών είναι το κριτήριο των ηλεκτρικών διαστάσεων του εκάστοτε προβλήματος. Με τον όρο ηλεκτρικές διαστάσεις ορίζεται ο λόγος των διαστάσεων προς το μήκος κύματος του προβλήματος, δηλαδή :

$$\text{ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ} = \frac{\text{ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ}}{\text{ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ } \lambda}$$

Σε ένα πρόβλημα μελέτης κεραιών εγκατεστημένων σε σύνθετη κατασκευή, πρώτο βήμα είναι να υπολογισθούν οι συνολικές αλλά και οι σημαντικότερες επιμέρους ηλεκτρικές διαστάσεις της κατασκευής που αφορούν σε μήκη, πλάτη, ύψη αλλά και αποστάσεις μεταξύ τμημάτων της κατασκευής και ειδικώς αυτών των τμημάτων στην περιοχή των οποίων είναι εγκατεστημένες οι κεραιές. Αν οι ηλεκτρικές διαστάσεις είναι **όλες** σχετικώς μεγαλύτερες από το 1 τότε το πρόβλημα χαρακτηρίζεται κατά χαλαρό τρόπο ως πρόβλημα υψηλών ηλεκτρικών διαστάσεων, ενώ αν είναι **έστω και μια** σχετικώς μικρότερη από 1 τότε χαρακτηρίζεται κατά χαλαρό τρόπο ως πρόβλημα χαμηλών ηλεκτρικών διαστάσεων. Υιοθετείται ο όρος χαλαρός διότι εμπειρικά έχει βρεθεί ότι υπάρχει μια περιοχή τομής των δυο αυτών συνόλων κοντά στο 1, όπου το πρόβλημα δεν μπορεί να χαρακτηριστεί αυστηρώς.

Οι υπολογιστικές μέθοδοι όπως οι μέθοδοι των ροπών, των πεπερασμένων διαφορών και των πεπερασμένων στοιχείων, παρουσιάζουν ικανοποιητική ακρίβεια. Μπορούν να εφαρμοσθούν σε οσοδήποτε πολύπλοκο πρόβλημα. Όμως, έχουν το μεγάλο μειονέκτημα της μεγάλης απαίτησης σε υπολογιστική ισχύ όταν πρόκειται για πρόβλημα υψηλών ηλεκτρικών διαστάσεων, δηλαδή χρειάζονται μεγάλη μνήμη για να διατηρήσουν μια ανεκτή ακρίβεια και είναι χρονοβόρες. Γιαυτό είναι κατάλληλες για προβλήματα χαμηλών ηλεκτρικών διαστάσεων.

Από την άλλη πλευρά, οι υπολογιστικώς υλοποιημένες ασυμπτωτικές μέθοδοι όπως η ενιαία θεωρία περίθλασης και η φυσική θεωρία περίθλασης, δεν είναι κατάλληλες για προβλήματα χαμηλών ηλεκτρικών διαστάσεων. Αφενός, διότι βασίζονται σε κατάτμηση σε επιμέρους μηχανισμούς σκέδασης επί της κατασκευής πράγμα που δεν είναι αξιόπιστο σε τέτοιου είδους προβλήματα χαμηλών ηλεκτρικών διαστάσεων και, αφετέρου, διότι οι προσεγγιστικές παραδοχές που εφαρμόζουν καθίστανται ανεκτά ακριβείς μόνο για υψηλές ηλεκτρικές διαστάσεις. Ακόμα εμφανίζουν αύξηση της ακρίβειας τους καθώς αυξάνουν οι ηλεκτρικές διαστάσεις, χωρίς ανάλογη αύξηση της απαιτούμενης υπολογιστικής ισχύος. Έτσι είναι κατάλληλες για προβλήματα υψηλών ηλεκτρικών διαστάσεων.

Συμπερασματικά [5], για την επίλυση των προβλημάτων κεραιών εγκατεστημένων σε σύνθετες κατασκευές που λειτουργούν στο επιχειρησιακό τους περιβάλλον, μπορούν να

χρησιμοποιηθούν κατά συνδυαστικό τρόπο οι μέθοδοι χαμηλών ηλεκτρικών διαστάσεων στις χαμηλές συχνότητες και οι μέθοδοι υψηλών ηλεκτρικών διαστάσεων στις υψηλές συχνότητες ή ακόμα και να χρησιμοποιήσει μια μόνο μέθοδο, ανεξαρτήτως συχνότητας, που θα ενοποιεί κατά υβριδικό τρόπο τις δυο προαναφερθείσες μεθόδους.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, επιλέχθηκαν για λόγους πρακτικούς που σχετίζονται με τη διαθεσιμότητα, την ευρεία και πολύχρονη χρήση και τη δοκιμασμένη αξιοπιστία τους [32], [5] ειδικά σε σύνθετες κατασκευές όπως πολεμικά πλοία [31], [24] που θα μελετηθούν στο κεφάλαιο 5 των εφαρμογών, η μέθοδος των ροπών (MoM) για τη μελέτη σε χαμηλές συχνότητες και η ενιαία θεωρία περίθλασης (UTD) για τη μελέτη σε υψηλές συχνότητες. Ως κύριο υπολογιστικό εργαλείο χρησιμοποιήθηκε το ενιαίο υπολογιστικό περιβάλλον **EMSIF** (**E**lectromagnetic **S**imulation **F**ramework) που αναπτύχθηκε στο Ερευνητικό Κέντρο του Υπουργείου Εθνικής Άμυνας **ΓΕΤΕΝ** [29] και το οποίο περιέχει, μεταξύ άλλων, τον υπολογιστικό κώδικα των NEC2 - MoM και του NEC - BSC (UTD). Περισσότερα για το **EMSIF** θα αναφερθούν στο κεφάλαιο 5 των εφαρμογών.

## 1.5 Σύγχρονες εξελίξεις

Η ανάπτυξη μεθοδολογίας για τη μελέτη κεραιών στο επιχειρησιακό τους περιβάλλον αποτελεί, λόγω μεγάλου πρακτικού ενδιαφέροντος τεχνολογία αιχμής (state of the art). Έρευνα γύρω από το θέμα πραγματοποιείται σε πολλά ερευνητικά κέντρα πανεπιστημιακού [32] αλλά και κυβερνητικού χαρακτήρα καθώς επίσης και από ιδιωτικές εταιρίες συνεργαζόμενες με τα προαναφερόμενα κέντρα.

Επιδιώκεται η περαιτέρω βελτίωση των διαθεσίμων υπολογιστικών μεθόδων ώστε να καταστούν λιγότερο απαιτητικές σε υπολογιστική ισχύ και ακριβέστερες στα αποτελέσματά τους. Από την άλλη πλευρά, γίνεται προσπάθεια επιτυχούς παραλληλισμού των μεθόδων ώστε να λειτουργούν κατά παράλληλο ή κατανεμημένο τρόπο εκμεταλλευόμενες τα πλεονεκτήματα πολλών Η/Υ. Παράλληλα αναπτύσσονται νέες μέθοδοι που κύριο χαρακτηριστικό έχουν την καταλληλότητα για ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων.



## ***Κεφάλαιο 2***

### ***Μέθοδος επίλυσης H/M προβλημάτων χαμηλών ηλεκτρικών διαστάσεων***

#### ***2.1 Εισαγωγή***

Στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρθηκε ότι για την επίλυση H/M προβλημάτων που αφορούν χαμηλές ηλεκτρικές διαστάσεις, κρίνεται κατάλληλη η χρησιμοποίηση υπολογιστικών μεθόδων επίλυσης, όπως η μέθοδος των ροπών (Method of Moments), η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (finite elements) και η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (finite differences method).

Από τις τρεις προαναφερθείσες μεθόδους, η πιο δημοφιλής, ευρέως δοκιμασμένη και χρησιμοποιούμενη σε πολλά υπολογιστικά πακέτα προσομοίωσης μέθοδος, είναι η μέθοδος των ροπών (MoM). Αυτό την καθιστά ως μέθοδο γνωστή και πιστοποιημένης ακρίβειας και αξιοπιστίας. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε ως η μέθοδος επίλυσης των H/M προβλημάτων σε χαμηλές συχνότητες στο κεφάλαιο 5 των εφαρμογών. Το παρόν κεφάλαιο λοιπόν, αναφέρεται εκτενώς στη μέθοδο των ροπών (MoM) [16].

Αρχικώς παρατίθεται προς εξοικείωση του αναγνώστη το αναλυτικό υπόβαθρο του H/M, στο οποίο και βασίζεται η ανάπτυξη της μεθόδου, ξεκινώντας από τις εξισώσεις του Maxwell, συνεχίζοντας την παρουσίαση τους με τη βοήθεια των εξισώσεων Green και καταλήγοντας στην πιο γνωστή μορφή ολοκληρωτικής εξίσωσης για λεπτό νηματοειδή αγωγό, την εξίσωση του Pocklington.

Κατόπιν παρατίθεται η ίδια η μέθοδος των ροπών (MoM), ξεκινώντας από τη φιλοσοφία της μεθόδου και των βημάτων που ακολουθούνται κατά την εφαρμογή της, συνεχίζοντας με περαιτέρω ανάλυση του εκάστοτε βήματος και των παραμέτρων που το χαρακτηρίζουν και κλείνοντας με μια σύντομη αναφορά στην ακρίβεια και την αξιοπιστία της μεθόδου.

Τέλος, γίνεται αναφορά στο υπολογιστικό πρόγραμμα προσομοίωσης NEC2-MoM που χρησιμοποιήθηκε στο κεφάλαιο 5 των εφαρμογών και ενσωματώνει τη μέθοδο των ροπών (MoM) ως μέθοδο επίλυσης των H/M προβλημάτων.

## 2.2 Αναλυτικό υπόβαθρο MoM

### 2.2.1 Εισαγωγή

Αναλυτικό υπόβαθρο για τον Η/Μ αποτελούν οι εξισώσεις του Maxwell, οι οποίες μπορούν να εκφραστούν κατά δύο τρόπους. Ο πρώτος και πιο γνωστός από τους δύο είναι με τη διαφορική τους μορφή (Differential Equations), δηλαδή με χρήση των διαφορικών τελεστών  $\text{div}$  και  $\text{curl}$ . Ο άλλος τρόπος αναπαράστασης είναι η ολοκληρωτική μορφή τους (Integral Equations), δηλαδή με χρήση κατάλληλων συναρτήσεων Green. Η διαφορά αυτών των δυο μορφών περιγραφής Η/Μ πεδίων και των υπολοίπων, όπως η ενιαία θεωρία περίθλασης, έγκειται στον τρόπο με τον οποίο συνδέονται το Η/Μ πεδίο και οι πηγές διέγερσης αυτού και, ουσιαστικά στο μαθηματικό τρόπο με τον οποίο περιγράφεται η διάδοση του Η/Μ πεδίου.

Οι δυο παραπάνω μορφές περιγραφής Η/Μ πεδίων μπορούν να αναλυθούν εξίσου στο πεδίο του χρόνου (Time Domain), με το χρόνο ως ανεξάρτητη μεταβλητή, αλλά και στο πεδίο της συχνότητας (Frequency Domain), υποθέτοντας εν γένει ημιτονοειδή μεταβολή του χρόνου  $\exp(j\omega t)$ , όπου  $\omega$  η κυκλική συχνότητα. Αριθμητικές μέθοδοι μπορούν να αναπτυχθούν με χρήση των ολοκληρωτικών εξισώσεων ή με χρήση των διαφορικών εξισώσεων, είτε στο πεδίο χρόνου είτε στο πεδίο της συχνότητας. Οι πιο γνωστές μέθοδοι που βασίζονται στις διαφορικές εξισώσεις είναι οι μέθοδοι των πεπερασμένων διαφορών (finite difference) και των πεπερασμένων στοιχείων (finite elements), ενώ αυτές που βασίζονται στις ολοκληρωτικές εξισώσεις είναι γνωστές ως μέθοδοι συνοριακών συνθηκών. Η πιο γνωστή τέτοια μέθοδος είναι η μέθοδος των ροπών (Method of Moments).

### 2.2.2 Εξισώσεις Maxwell και κυματική εξίσωση

Για άπειρα, ομοιογενή και ιστροπικά μέσα, οι εξισώσεις του Maxwell στο πεδίο του χρόνου και ως συνάρτηση της θέσης  $\vec{r}$  είναι

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{E}(\vec{r}, t) &= -\mu \frac{\partial}{\partial t} \vec{H}(\vec{r}, t) - \vec{K}(\vec{r}, t) \\ \nabla \cdot \vec{E}(\vec{r}, t) &= \vec{\rho}(\vec{r}, t) / \varepsilon \\ \nabla \times \vec{H}(\vec{r}, t) &= \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \vec{E}(\vec{r}, t) + \vec{J}(\vec{r}, t) \\ \nabla \cdot \vec{H}(\vec{r}, t) &= \vec{m}(\vec{r}, t) / \mu\end{aligned}\tag{2.1}$$

όπου  $\vec{E}(\vec{r}, t)$  και  $\vec{H}(\vec{r}, t)$  οι συνιστώσες του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου,  $\vec{J}(\vec{r}, t)$ ,  $\vec{K}(\vec{r}, t)$  οι πυκνότητες ηλεκτρικού και μαγνητικού ρεύματος,  $\vec{\rho}(\vec{r}, t)$ ,  $\vec{m}(\vec{r}, t)$  οι



πυκνότητες ηλεκτρικού και μαγνητικού φορτίου και  $\epsilon$ ,  $\mu$  η επιτρεπτότητα και η διαπερατότητα του μέσου. Οι αντίστοιχες εξισώσεις στο πεδίο της συχνότητας προκύπτουν από τη (2.1), διαχωρίζοντας τις δυο μεταβλητές χρόνου και θέσης με τη χρήση φασιθετών όπως  $F(x,t) = f(x,\omega)\exp(j\omega t)$ .

Η κυματική εξίσωση που προκύπτει από τη (2.1) για το ηλεκτρικό πεδίο  $\vec{E}(\vec{r},t)$  στο πεδίο του χρόνου είναι :

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E}(\vec{r},t) + \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{E}(\vec{r},t) = -\mu \frac{\partial}{\partial t} \vec{J}(\vec{r},t) - \nabla \times \vec{K}(\vec{r},t) \quad (2.2)$$

όπου  $c$  η ταχύτητα του φωτός στο μέσον, ίση προς  $1/\sqrt{\mu\epsilon}$ . Αντίστοιχη εξίσωση προκύπτει και για το μαγνητικό πεδίο.

### 2.2.3 Αναπαράσταση εξισώσεων Maxwell με συναρτήσεις Green

Κάνοντας χρήση της αρχής της επαλληλίας, τα διάφορα πεδία μπορούν να αναπαρασταθούν ολοκληρώνοντας τις συναρτήσεις Green στο χώρο οποιασδήποτε πηγής. Οι πηγές μπορεί να είναι είτε χωρικές ρευματικές κατανομές είτε κατανομές φορτίων ή ακόμα και εφαπτομενικές συνιστώσες των πεδίων πάνω σε κλειστές επιφάνειες που εσωκλείουν τις πηγές. Ακόμα, μπορούν να βρίσκονται και σε διαχωριστικές επιφάνειες μεταξύ δυο ηλεκτρικά διαφορετικών μέσων (διαφορετική επιτρεπτότητα ή και διαπερατότητα), όπως για παράδειγμα ένας τέλειος αγωγός και ο υπόλοιπος ελεύθερος χώρος. Η αρχή της επαλληλίας δίνει την ακόλουθη εξίσωση για το συνολικό ηλεκτρικό πεδίο στο πεδίο της συχνότητας

$$\vec{E}(\vec{r}) = T\vec{E}^{inc}(\vec{r}) - \frac{T}{4\pi} \int_S \{j\omega\mu(\vec{n}' \times \vec{H})\phi_\omega - (\vec{n}' \times \vec{E}) \times \nabla' \phi_\omega - (\vec{n}' \cdot \vec{E}) \nabla' \phi_\omega\} ds' \quad (2.3)$$

όπου  $\vec{n}$  το μοναδιαίο διάνυσμα, κάθετο στην επιφάνεια  $S$  και  $T = (1 - \Omega/4\pi)^{-1}$  ποσότητα που ορίζει τη θέση του σημείου παρατήρησης, με  $\Omega$  την στερεά γωνία που αντιστοιχεί στην επιφάνεια  $S$ . Στην γενική περίπτωση, η πηγαία κατανομή πάνω σε μια επιφάνεια, που καθορίζει το H/M πεδίο σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου, προκύπτει από την ικανοποίηση των οριακών συνθηκών για το προσπίπτον και το σκεδαζόμενο H/M πεδίο. Η μέθοδος επίλυσης αυτή αποτελεί το μοντέλο της επίλυσης μέσω ολοκληρωτικής εξίσωσης (IE).

### 2.2.4 Κατάστροψη ολοκληρωτικής εξίσωσης (IE)

Ο καταλληλότερος τρόπος κατάστροψης ολοκληρωτικών εξισώσεων για προβλήματα που αφορούν φυσικές επιφάνειες είναι μέσω της ικανοποίησης συνοριακών συνθηκών. Έστω ότι το σημείο παρατήρησης στη (2.3) είναι επί διαχωριστικής επιφάνειας τέτοιας ώστε για διαπερατό σύνορο να ικανοποιείται η συνθήκη συνέχειας της

εφαπτομενικής συνιστώσας, ενώ για τέλειο αγωγό (PEC)(αδιαπέραστο σύνορο) να ικανοποιείται η συνθήκη μηδενισμού της εφαπτομενικής συνιστώσας του ηλεκτρικού πεδίου, δηλαδή :

$$\vec{n} \times [\vec{E}^{scat}(\vec{r}) + \vec{E}^{inc}(\vec{r})] = 0 \quad (2.4)$$

όπου  $\vec{E}^{scat}(\vec{r})$  το H/M πεδίο που σκεδάζει η πηγή που έχει δημιουργηθεί λόγω του προσπίπτοντος  $\vec{E}^{inc}(\vec{r})$  H/M πεδίου. Για τους τέλειους αγωγούς μπορούν να προκύψουν δυο μορφές ολοκληρωτικών εξισώσεων είτε μέσω του προσπίπτοντος ηλεκτρικού πεδίου είτε μέσω του προσπίπτοντος μαγνητικού πεδίου τόσο στο πεδίο της συχνότητας όσο και στο πεδίο του χρόνου. Για τα διαπερατά αντικείμενα οι ολοκληρωτικές εξισώσεις προκύπτουν από το συνδυασμό των δυο πεδίων, του ηλεκτρικού και του μαγνητικού.

Για τέλειους αγωγούς, από τη (2.3) προκύπτουν οι εξής ολοκληρωτικές εξισώσεις στο πεδίο της συχνότητας

$$\vec{n} \times \vec{E}^{inc}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} \vec{n} \times \int_S \{j\omega\mu\vec{J}\phi_\omega + \frac{1}{j\omega}(\nabla \cdot \vec{J})\nabla' \phi_\omega\} ds' \quad (2.5)$$

$$\vec{J}(\vec{r}) = 2\vec{n} \times \vec{H}^{inc}(\vec{r}) + \frac{1}{2\pi} \vec{n} \times \int_S \vec{J} \times \nabla' \phi_\omega ds', \vec{r} \in S \quad (2.6)$$

όπου  $\vec{J}(\vec{r}) = \vec{n} \times \vec{H}^{inc}(\vec{r})$  το ρεύμα στην επιφάνεια του αγωγού, το οποίο μηδενίζεται στο εσωτερικό του, αφού εκεί  $\vec{n} \times \vec{H}^{inc}(\vec{r}) = 0$ . Η εξίσωση (2.5) αποτελεί την ολοκληρωτική εξίσωση που προκύπτει από το προσπίπτον ηλεκτρικό πεδίο και ονομάζεται EFIE (Electric Field Integral Equation). Η (2.6) ονομάζεται MFIE (Magnetic Field Integral Equation), επειδή προκύπτει από το προσπίπτον μαγνητικό πεδίο. Εξαιτίας της αλληλεξάρτησης του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου, ο προσδιορισμός ενός εκ των δύο οδηγεί σε πλήρη λύση του προβλήματος.

Οι δύο παραπάνω εξισώσεις κατατάσσονται στην κατηγορία των ολοκληρωτικών εξισώσεων Fredholm, πρώτου και δευτέρου είδους αντιστοίχως, αντίστοιχα με το αν ο άγνωστος εμφανίζεται μέσα στο ολοκλήρωμα ή και έξω. Ο,τιδήποτε βρίσκεται μέσα στο ολοκλήρωμα ονομάζεται πυρήνας (kernel) της ολοκληρωτικής εξίσωσης. Σε ότι αφορά την επιλογή για το ποια από τις δυο εξισώσεις θα χρησιμοποιηθεί και τότε, η μεν EFIE ενδείκνυται σε λεπτές ηλεκτρικά πλάκες και νήματα, ενώ η MFIE είναι κατάλληλη για λείες επιφάνειες.

Η γενική μορφή των EFIE και MFIE στο πεδίο του χρόνου είναι, αντίστοιχα

$$\vec{n} \times \vec{E}(\vec{r}, t) = \frac{1}{4\pi} \vec{n} \times \int_S [\mu \frac{\partial}{\partial t'} \vec{J}_s(\vec{r}', t') \frac{1}{R} - (\frac{1}{R} + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t'}) \frac{\rho_s(s', t')}{\epsilon} \frac{\vec{R}}{R^2}] da' \quad (2.7)$$

$$\vec{J}(\vec{r}, t) = 2\vec{n} \times \vec{H}^{inc}(\vec{r}, t) + \frac{1}{2\pi} \int_S \vec{n} \times \{ [\frac{1}{R} + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t'}] \cdot \vec{J}(\vec{r}', t) \times \frac{\vec{R}}{R^2} \} da' \quad (2.8)$$

όπου  $\rho_s$  η επιφανειακή πυκνότητα φορτίων που προκύπτει από τη συνθήκη συνέχειας επί της επιφάνειας  $S$  με ακτίνα ολοκλήρωσης  $R$ .

### 2.2.5 *IE για νηματοειδείς αγωγούς (wires)*

Η επίλυση H/M προβλημάτων μέσω της κατάστροφης ολοκληρωτικής εξίσωσης για νηματοειδείς αγωγούς έχει καταστεί ιδιαίτερος χρήσιμη και δημοφιλής. Αυτό οφείλεται στους εξής λόγους :

- 1) Η κατηγορία των νηματοειδών αγωγών αποτέλεσε την πρώτη κατηγορία κεραιών που χρησιμοποιήθηκε σε ασύρματες επικοινωνίες.
- 2) Οι λεπτοί νηματοειδείς αγωγοί αποτελούν μια από τις λίγες γεωμετρικές διατάξεις, άλλες είναι ο άπειρος κυκλικός κύλινδρος και η σφαίρα, που επιτρέπουν λύσεις μέσω της μεθόδου χωρισμού μεταβλητών, πράγμα που τις καθιστά κατάλληλες για επεξεργασία σε ψηφιακό υπολογιστή.
- 3) Κατάλληλη συλλογή από νηματοειδείς αγωγούς μπορεί να περιγράψει ικανοποιητικά, τόσο από φυσική όσο και από μαθηματική σκοπιά οποιαδήποτε πολύπλοκη γεωμετρική διάταξη, διαμορφώνοντας ένα πλέγμα νημάτων γνωστό και ως wire grid.

Οι ολοκληρωτικές εξισώσεις που καταστρώνονται για τα νήματα τόσο στο πεδίο της συχνότητας όσο και στο πεδίο του χρόνου βασίζονται στην προσέγγιση λεπτού νήματος (Thin Wire Approximation). Κατά την προσέγγιση αυτή, ως νήμα θεωρείται ένας κυκλικός κύλινδρος διαμέτρου  $D$  και μήκους  $L$  με :

$$\begin{aligned} D &\ll L \\ D &\ll \lambda \end{aligned} \quad (2.9)$$

όπου  $\lambda$  το μήκος κύματος.

Επιπλέον, η προσέγγιση λεπτού νήματος περιλαμβάνει και τις εξής υποθέσεις για κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων :

- 1) Η αξιμουθιακή συνιστώσα  $\phi$  του επιφανειακού ρεύματος στο νήμα θεωρείται αμελητέα.
- 2) Το ρεύμα  $I$  που ρέει στην επιφάνεια του νήματος είναι ανεξάρτητο του  $\phi$ .
- 3) Το ολοκλήρωμα που τελικά προκύπτει αναφέρεται σε ολοκλήρωση κατά μήκος της  $z$ -συνιστώσας, αφού δεν υπάρχει εξάρτηση του ρεύματος από το  $\phi$ .

Η πιο γνωστή, γενική και με ευρεία χρήση ολοκληρωτική εξίσωση για ευθύγραμμο λεπτό νήμα είναι η ολοκληρωτική εξίσωση του Pocklington, της οποίας η γενική μορφή στο πεδίο της συχνότητας (FDIE) και στο πεδίο του χρόνου (TDIE), αντίστοιχα, είναι

$$\vec{s} \vec{E}^{inc}(s) = -\frac{1}{4\pi j\omega\epsilon} \int_{C(\vec{r})} \vec{I}(s') \left[ k^2 \vec{s} \cdot \vec{s}' - \frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial}{\partial s'} \right] \cdot \frac{e^{-jkR}}{R} ds' \quad (2.10)$$

$$\vec{s}\vec{E}^{inc}(s,t) = \frac{\mu_o}{4\pi} \int_{C(\vec{r})} \left[ \left( \frac{\vec{s}\vec{s}'}{R} \frac{\partial}{\partial t'} \vec{I}(s',t') + c \frac{\vec{s}\vec{R}}{R^2} \frac{\partial}{\partial s'} \vec{I}(s',t') - c^2 \frac{\vec{s}\vec{R}}{R^3} q(s',t') \right) ds' \right] \quad (2.11)$$

όπου  $s \in C(\vec{r})$ , με  $C(\vec{r})$  την επιφάνεια του νήματος.

### 2.2.6 Γραμμικοί τελεστές και $IE, DE$

Έστω μαθηματική εξίσωση της μορφής

$$L(s) = g \quad (2.12)$$

όπου  $L$  είναι ένας γραμμικός τελεστής,  $s$  προσδιοριστέα συνάρτηση και  $g$  γνωστή συνάρτηση που εκφράζει την πηγή της H/M διάταξης. Οι γραμμικοί τελεστές ικανοποιούν τη σχέση

$$L(as_1 + bs_2) = aL(s_1) + bL(s_2) \quad (2.13)$$

όπου  $a$  και  $b$  σταθερές και  $s_1$  και  $s_2$  ανεξάρτητες συναρτήσεις. Η γραμμικότητα του τελεστή είναι θεμελιώδης ιδιότητα σε πολλές περιπτώσεις, όπως στη μέθοδο των ροπών που θα παρουσιασθεί στη συνέχεια.

Στα ηλεκτρομαγνητικά προβλήματα, η αναπαράσταση των ολοκληρωτικών και διαφορικών εξισώσεων με χρήση τελεστών στο πεδίο της συχνότητας γίνεται ως εξής

$$L(s, s'; \omega) f(s'; \omega) = g(s; \omega) \Rightarrow L(s, s') f(s') = g(s) \quad (2.14)$$

όπου η εξάρτηση από τη συχνότητα  $\omega$  έχει απαλειφθεί με χρήση φασιθετών. Ο όρος  $L(s, s')$  αντιπροσωπεύει το γραμμικό ολοκληρωτικοδιαφορικό τελεστή, ο όρος  $f(s')$  αντιπροσωπεύει τον άγνωστο, δηλαδή το επιφανειακό ρεύμα, και ο όρος  $g(s)$  αντιπροσωπεύει τη διέγερση - πηγή που καθορίζεται ανάλογα με το εάν υπάρχει πρόβλημα σκέδασης ή ακτινοβολήσης. Αντίστοιχη εξίσωση προκύπτει και στο πεδίο του χρόνου, όπου, και εκεί, οι όροι αντιπροσωπεύουν τις ίδιες ποσότητες :

$$L(s, s'; t, t') f(s'; t') = g(s; t) \quad (2.15)$$

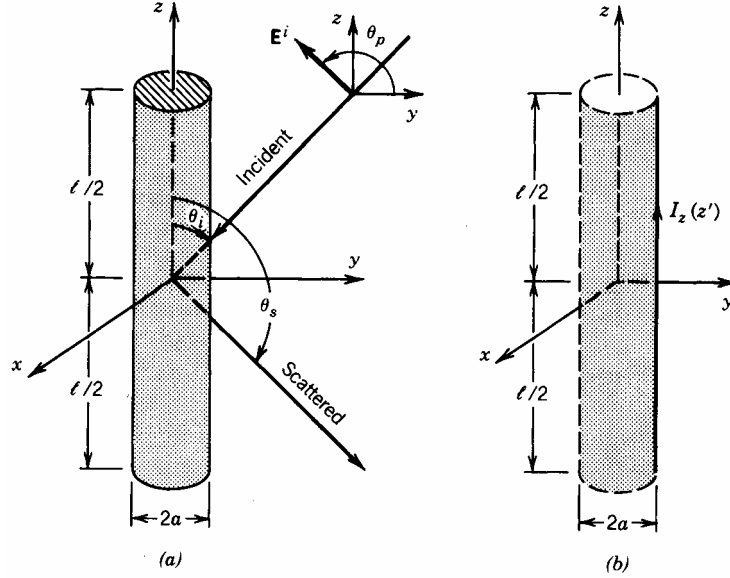
Τονίζεται ότι στις σχέσεις (2.14) και (2.15) δεν εμφανίζεται η πράξη του γινόμενου.

Πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι η αριθμητική αντιμετώπιση των ολοκληρωτικοδιαφορικών εξισώσεων μέσω της μεθόδου των ροπών που θα παρουσιασθεί στη συνέχεια, είναι ανεξάρτητη από το δεξιό σκέλος της (2.14) ή (2.15). Αυτό αιτιολογεί το γεγονός ότι η μέθοδος των ροπών χρησιμοποιείται εξίσου για ακτινοβολητές και σκεδαστές. Στην περίπτωση προβλημάτων σκέδασης ο όρος  $g$  είναι το επιβαλλόμενο προσπίπτον πεδίο, ενώ στην περίπτωση προβλημάτων ακτινοβολήσης είναι η τάση σε ένα τμήμα του νήματος.

### 2.2.7 Pocklington's IE

Για τη παρουσίαση της μεθόδου των ροπών θα αναλυθεί η πιο γνωστή ολοκληρωτική εξίσωση που χρησιμοποιείται για λεπτούς νηματοειδείς αγωγούς (wires) που συμπεριφέρονται ως ακτινοβολητές (radiators) ή ως σκεδαστές (scatterers) [4].

Όταν Η/Μ κύμα προσπέσει επί επιφάνειας τέλειου νηματοειδούς αγωγού δημιουργείται επιφανειακό ρεύμα στην επιφάνεια του αγωγίμου τμήματος όπως απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα 2.1



Σχήμα 2.1 : Προσπίπτον κύμα στην επιφάνεια τέλειου νηματοειδούς αγωγού.

Η συνθήκη μηδενισμού της εφαπτομενικής συνιστώσας του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια δίνει :

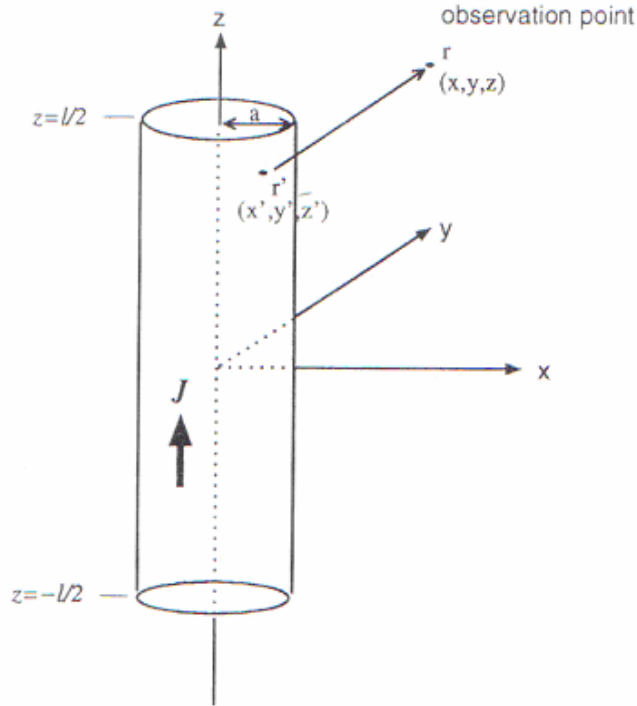
$$\vec{E}_z^s(\vec{r} = \vec{r}_s) = -\vec{E}_z^i(\vec{r} = \vec{r}_s) \quad (2.16)$$

Το διανυσματικό ηλεκτρικό δυναμικό  $A$  για οποιοδήποτε σημείο παρατήρησης όπως στο σχήμα 2.2 δίνεται από τη σχέση

$$\vec{A}(\vec{r}) = \mu \iint_S \vec{J}_s(\vec{r}') \cdot \frac{e^{-j\beta R}}{4\pi R} ds' \quad (2.17)$$

όπου  $J_s$  είναι η επιφανειακή πυκνότητα ρεύματος,  $\beta$  ο κυματαριθμός και  $R$  είναι η απόσταση ανάμεσα στο σημείο ολοκλήρωσης και το σημείο παρατήρησης :

$$R = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2} \quad (2.18)$$



Σχήμα 2.2 : Ρευματική κατανομή πάνω στο νηματοειδή αγωγό.

Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου για οποιοδήποτε σημείο παρατήρησης δίνεται από τη σχέση

$$\vec{E}^s(\vec{r}) = -j\omega\vec{A} - j\frac{1}{\omega\mu\epsilon}\nabla(\nabla\cdot\vec{A}) \quad (2.19)$$

Όμως, με την υπόθεση ότι η διεύθυνση του ρεύματος είναι παράλληλη προς τον άξονα z, για σημείο παρατήρησης επί της επιφάνειας υφίσταται μόνο η z-συνιστώσα του διανυσματικού δυναμικού και έτσι

$$A_z = \frac{\mu}{4\pi} \int_{-l/2}^{l/2} \int_0^{2\pi} J_z \frac{e^{-j\beta R}}{4\pi R} a d\phi' dz' \quad (2.20)$$

Για τον ίδιο λόγο, η (2.19) μεταπίπτει στην εξίσωση

$$E_z^s(r) = -j\frac{1}{\omega\mu\epsilon}(\beta^2 A_z + \frac{\partial^2 A_z}{\partial z^2}) \quad (2.21)$$

Με αντικατάσταση της σχέσης (2.20) στη σχέση (2.21), προκύπτει το εξής αποτέλεσμα για το ηλεκτρικό πεδίο  $E_z$

$$E_z^s(r) = -j\frac{\mu}{4\pi\omega\epsilon} \int_{-l/2}^{l/2} \int_0^{2\pi} (\beta^2 \frac{e^{-j\beta R}}{R} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \frac{e^{-j\beta R}}{R}) J_z a dz' \quad (2.22)$$

Εάν το νήμα θεωρηθεί πολύ λεπτό, πράγμα που θεωρείται ότι ισχύει όταν η ακτίνα  $a$  του αγωγού είναι πολύ μικρότερη από το  $1/10$  του μήκους κύματος, τότε η πυκνότητα του ρεύματος δεν έχει πλέον εξάρτηση από τη συντεταγμένη  $\phi$  και δίνεται από τη σχέση

$$J_z = \frac{1}{2\pi a} I_z(z') \quad (2.23)$$

όπου  $I_z(z')$  είναι το στοιχειώδες ρεύμα που ρέει στην επιφάνεια του αγωγού όπως στο σχήμα 2.1β. Η σχέση (2.22) λόγω της (2.23) καταλήγει στη

$$E_z^s(r) = -j \frac{1}{\omega \varepsilon} \int_{-1/2}^{1/2} (\beta^2 + \frac{\partial^2}{\partial z'^2}) G(z, z') I_z(z') dz' \quad (2.24)$$

όπου

$$G(z, z') = \frac{e^{-j\beta R}}{4\pi R} \quad (2.25)$$

Λόγω της (2.16) επί της επιφάνειας του νήματος όπου  $r=a$  προκύπτει τελικά η εξίσωση

$$E_z^i(r=a) = j \frac{1}{\omega \varepsilon} \int_{-1/2}^{1/2} (\beta^2 + \frac{\partial^2}{\partial z'^2}) G(z, z') I_z(z') dz' \quad (2.26)$$

Η εξίσωση (2.26) αποτελεί την ολοκληρωτικοδιαφορική εξίσωση του Pocklington και χρησιμοποιείται για να προσδιορισθεί η πυκνότητα ρεύματος σε νηματοειδή αγωγό λόγω του προσπίπτοντος ηλεκτρικού πεδίου. Στόχος είναι η εύρεση του σκεδαζόμενου πεδίου. Από τις σχέσεις (2.26) και (2.12), προκύπτει ο γραμμικός τελεστής για την εξίσωση του Pocklington, που είναι

$$L(E) = j \frac{1}{\omega \varepsilon} \int_{-1/2}^{1/2} (k^2 + \frac{\partial^2}{\partial z'^2}) G(z, z') E dz' \quad (2.27)$$

Η συνάρτηση  $g = E_z^i(r=a)$ , στην περίπτωση σκέδασης είναι το προσπίπτον πεδίο, ενώ στην περίπτωση ακτινοβολήσης είναι η τάση σε ένα τμήμα του νήματος.

## **2.3 Η Μέθοδος των Ροπών (MoM)**

### **2.3.1 Εισαγωγή**

Η μέθοδος των ροπών (Method of Moments, MoM) είναι χωρίς αμφιβολία η δημοφιλέστερη υπολογιστική (αριθμητική) τεχνική επίλυσης ολοκληρωτικών εξισώσεων στον Ηλεκτρομαγνητισμό. Παρόλο που σχετίζεται περισσότερο με την επίλυση ολοκληρωτικών εξισώσεων, αποτελεί μια γενική μέθοδο αριθμητικής επίλυσης διαφορικών, ολοκληρωτικών και ολοκληρωτικοδιαφορικών εξισώσεων τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο της συχνότητας.

Η MoM επιλύει τις εκάστοτε εξισώσεις αυτού του είδους αφού πρώτα τις μετατρέψει σε ένα γραμμικό σύστημα εξισώσεων, που μπορεί εύκολα να επιλυθεί σε H/Y. Τα βασικά βήματα της μεθόδου είναι γενικώς κοινά, ανεξάρτητα από το είδος της προς επίλυση εξίσωσης και των φυσικών φαινομένων που υπεισέρχονται (ακτινοβολήση ή σκέδαση).

Αν η επίλυση γίνεται στο πεδίο της συχνότητας, τότε τα βασικά βήματα επίλυσης της MoM είναι :

- 1) Προσεγγιστική αναπαράσταση των αγνώστων συναρτήσεων. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας το γραμμικό συνδυασμό καταλλήλων συναρτήσεων βάσης με προσδιοριστέους συντελεστές ανάπτυξης.
- 2) Διακριτοποίηση των εξισώσεων που δίδουν τη λύση των παραπάνω αγνώστων συναρτήσεων αναπαριστώντας αυτές με κατάλληλες συναρτήσεις βάρους (δοκιμής). Αυτό γίνεται με στόχο τη δημιουργία ποσοτικών σχέσεων μεταξύ των αγνώστων συντελεστών και το σχηματισμό ενός γραμμικού συστήματος εξισώσεων.
- 3) Επίλυση του γραμμικού συστήματος εξισώσεων χρησιμοποιώντας κατάλληλες μεθόδους αριθμητικής επίλυσης.

Αν η επίλυση γίνεται στο πεδίο του χρόνου, απαιτείται και ένα ακόμα βήμα που είναι :

- 4) Δημιουργία χρονικής απόκρισης, επαναλαμβάνοντας τα 3 προηγούμενα βήματα σε διαφορετικές χρονικές στιγμές.

### **2.3.2 Ανάλυση των βημάτων επίλυσης**

- 1) Τμηματοποίηση και κατά προσέγγιση αναπαράσταση των αγνώστων συναρτήσεων

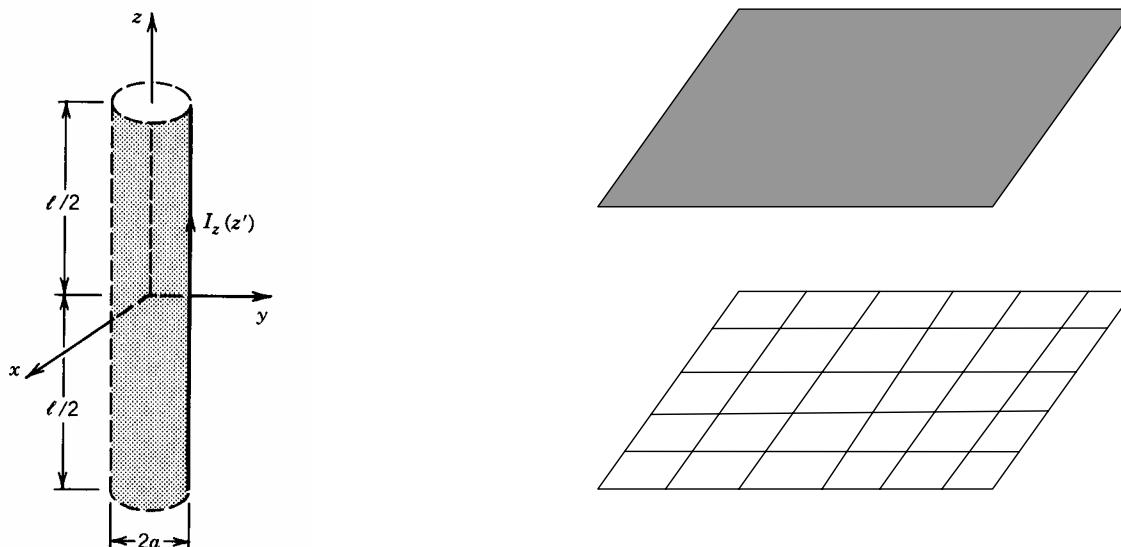


Οι συναρτήσεις βάσης που χρησιμοποιούνται συνήθως στον Η/Μ μπορούν να χωριστούν σε δυο γενικές κατηγορίες.

Η πρώτη κατηγορία αποτελείται από τις λεγόμενες ολικές συναρτήσεις (entire domain basis, EDB) που ορίζονται και είναι μη μηδενικές σε ολόκληρο το αντικείμενο ή χώρο που μοντελοποιούμε. Για ένα οποιοδήποτε αντικείμενο με επιφάνεια  $G(\mathbf{r})$ , η άγνωστη συνάρτηση μπορεί να εκφραστεί με χρήση ολικών συναρτήσεων υπό τη μορφή :

$$f(s) = \sum_{i=1}^{X_s} I_i b_i(s), \quad s \in G(\mathbf{r}) \quad (2.28)$$

όπου  $X_s$  είναι το πλήθος των άγνωστων συντελεστών  $I_i$  και  $b_i(s)$  είναι οι ολικές συναρτήσεις βάσης. Κατά την αναπαράσταση του ρεύματος σε νηματοειδή αγωγό (wire) ή σε ένα δισδιάστατο αγωγίμο επίπεδο (βλέπε Σχήμα 2.3)



Σχήμα 2.3 : Αναπαράσταση ρεύματος σε νηματοειδή αγωγό και επέκταση σε ένα δισδιάστατο αγωγίμο επίπεδο.

λόγω της ημιτονοειδούς κατανομής του, ενδείκνυται η χρήση ολικών συναρτήσεων. Για παράδειγμα

$$g_n(x) = \cos \left[ \frac{(2n - a)\pi x}{\ell} \right] \quad -\frac{\ell}{2} \leq x \leq \frac{\ell}{2} \quad (2.29)$$

Η αναπαράσταση με χρήση ολικών συναρτήσεων αναλογεί στην ανάπτυξη μιας συνάρτησης σε σειρά Fourier.

Η δεύτερη κατηγορία αποτελείται από τις λεγόμενες τμηματικές συναρτήσεις (subdomain basis, SDB) που ορίζονται και είναι μη μηδενικές μόνον σε ένα τμήμα του πεδίου ορισμού της υπό προσέγγιση συνάρτησης. Για πολύπλοκες γεωμετρίες όπως αυτή ενός αεροπλάνου η κατηγορία βάσεων αυτή είναι καταλληλότερη λόγω της ανωτέρας

ιδιότητας τους [16]. Οι συναρτήσεις αυτές οριζόμενες κατά τμήματα (segments),  $\Delta G_i(r)$ , της επιφάνειας του αντικειμένου ή χώρου έχουν την ακόλουθη μορφή

$$f(s) = \sum_{i=1}^{X_s} \sum_{j=1}^{N_i} I_{ij} U_i(s) b_{ij}(s) \quad (2.30)$$

με  $U_i(s) = 1$  για  $s \in \Delta G_i(r)$  και  $U_i(s) = 0$  αλλου

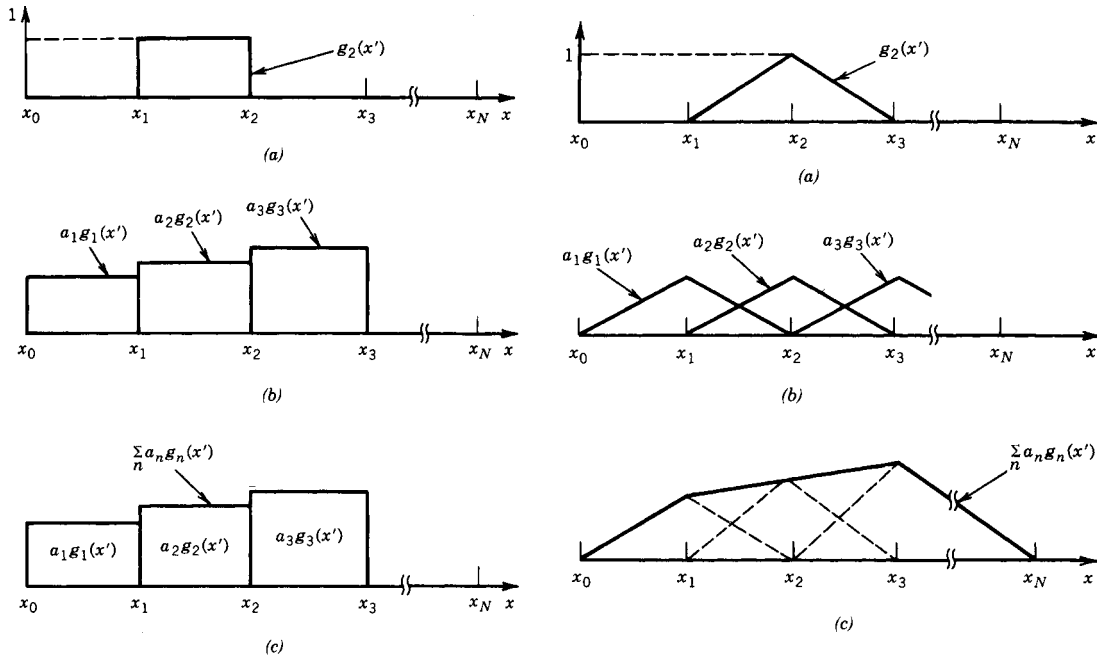
όπου  $X_s$  είναι ο αριθμός των υποχώρων και  $N_i$  οι όροι του τμήματος  $i$  της βάσης  $b_{ij}(s')$ .

Παραδείγματα αυτών των συναρτήσεων είναι οι συναρτήσεις παλμού (pieewise constant ή pulse functions) και οι τμηματικά γραμμικές ή τριγωνικές συναρτήσεις (pieewise linear ή triangle functions) που ορίζονται κατά σειρά ως εξής [4]

$$g_n(x) = \begin{cases} 1 & x_{n-1} \leq x \leq x_n \\ 0 & \text{αλλού} \end{cases} \quad (2.31)$$

$$g_n(x) = \begin{cases} \frac{x - x_{n-1}}{x_n - x_{n-1}} & x_{n-1} \leq x \leq x_n \\ \frac{x_{n+1} - x}{x_{n+1} - x_n} & x_n \leq x \leq x_{n+1} \\ 0 & \text{αλλού} \end{cases} \quad (2.32)$$

Γραφικά οι παλμικές συναρτήσεις βάσης και αντίστοιχα οι γραμμικές συναρτήσεις βάσης απεικονίζονται ως εξής [4]



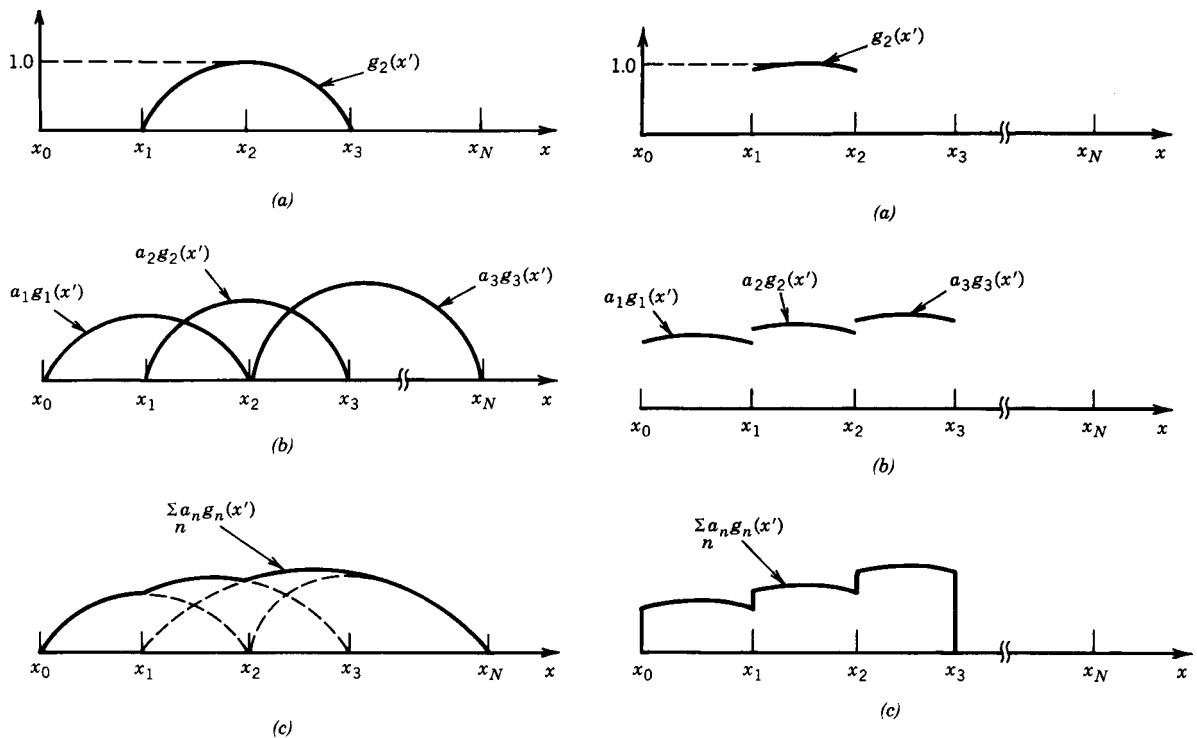
Σχήμα 2.4 : Συναρτήσεις παλμού και τμηματικά τριγωνικές συναρτήσεις.

Με σκοπό τη μείωση του πλήθους των αγνώστων στην (2.30) από  $X_s N_i$  σε  $X_s$ , γεγονός που ισοδυναμεί υπολογιστικά με αύξηση της ανοχής της μεθόδου σε υπολογιστικά λάθη, χρησιμοποιείται μια κατηγορία τμηματικών συναρτήσεων όπου δυο ή παραπάνω όροι σχηματίζουν ένα βαθμό συνεχείας. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι συναρτήσεις τμηματικού ημιτόνου (piecewise sinusoid) και τεμαχισμένου συνημιτόνου (truncated cosine). Αυτές ορίζονται αντίστοιχα ως εξής [4]

$$g_n(x) = \begin{cases} \frac{\sin[\beta(x - x_{n-1})]}{\sin[\beta(x_n - x_{n-1})]} & x_{n-1} \leq x \leq x_n \\ \frac{\sin[\beta(x_{n+1} - x)]}{\sin[\beta(x_{n+1} - x_n)]} & x_n \leq x \leq x_{n+1} \\ 0 & \text{αλλοίwise} \end{cases} \quad (2.33)$$

$$g_n(x) = \begin{cases} \cos\left[\beta\left(x - \frac{x_n + x_{n-1}}{2}\right)\right] & x_{n-1} \leq x \leq x_n \\ 0 & \text{αλλοίwise} \end{cases} \quad (2.34)$$

Οι συναρτήσεις τμηματικού ημιτόνου και τεμαχισμένου συνημιτόνου απεικονίζονται γραφικά στο σχήμα 2.5 [4].



Σχήμα 2.5 : Συναρτήσεις τμηματικού ημιτόνου και τεμαχισμένου συνημιτόνου.

Από τα δυο είδη συναρτήσεων βάσης, οι τμηματικές χρησιμοποιούνται συχνότερα στην πράξη. Αυτό συμβαίνει γιατί, σε αντίθεση με τις ολικές, μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς a priori γνώση της μορφής της συνάρτησης, που πρόκειται να αναπαραστήσουν [13]. Αν, όμως, η μορφή αυτή είναι γνωστή, τότε οι ολικές συναρτήσεις εμφανίζουν ένα πλεονέκτημα, καθώς δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα με χρήση λιγότερων όρων και κατά συνέπεια αγνώστων στο ανάπτυγμα. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο υβριδικός συνδυασμός των δυο κατηγοριών, ολικών και τμηματικών συναρτήσεων αποδεικνύεται πολύ χρήσιμος σε ειδικές περιπτώσεις.

2) Διακριτοποίηση των εξισώσεων που δίδουν τη λύση των αγνώστων συναρτήσεων και σχηματισμός ενός γραμμικού συστήματος εξισώσεων

Για να γίνει αυτό, πολλαπλασιάζονται και τα δύο μέλη της εξίσωσης (2.14) με ένα σύνολο συναρτήσεων δοκιμής  $t_j$  και, στη συνέχεια, γίνεται ολοκλήρωση πάνω σε όλη την επιφάνεια του αντικειμένου. Στην περίπτωση των ολικών αλλά και των τμηματικών συναρτήσεων προκύπτει το εξής σύστημα εξισώσεων :

$$\int_{G(r)} t_j(s) L(s, s') b_i(s') ds = \int_{G(r)} t_j(s) g(s) ds \quad (2.35)$$

$$i = 1, \dots, X_s, \dots, N_T$$

όπου  $t_j(s)$  είναι η  $j$ -στη συνάρτηση δοκιμής. Ο αριθμός των συναρτήσεων δοκιμής είναι τουλάχιστον  $X_s$  ώστε να παράγεται ίσος αριθμός εξισώσεων με τους αγνώστους. Οι συναρτήσεις δοκιμής, όπως και οι συναρτήσεις βάσης, αναπαρίστανται είτε ως ολικές συναρτήσεις δοκιμής (EDT) είτε ως τμηματικές συναρτήσεις δοκιμής (SDT) είτε με υβριδικό τρόπο. Το πιο σύνηθες παράδειγμα τμηματικής συνάρτησης δοκιμής είναι η συνάρτηση δέλτα. Όταν οι συναρτήσεις δοκιμής είναι ίδιες με τις συναρτήσεις βάσης, η MoM αποτελεί ειδική εφαρμογή της μεθόδου **Galerkin**. Η επιλογή αυτή κρίνεται σκόπιμη, αφού η μέθοδος Galerkin παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως η μεγάλη ακρίβεια υπολογισμού της άγνωστης συνάρτησης.

Κάθε εξίσωση – δείγμα, οδηγεί σε αριθμό FLOPS (πράξεις κινητής υποδιαστολής) που είναι σταθερός για διαφορικές εξισώσεις και ανάλογος με  $X_s$  για ολοκληρωτικές εξισώσεις. Έτσι, ο συνολικός αριθμός FLOPS για αυτό το βήμα της MoM είναι ανάλογος με  $N_T$  για διαφορικές εξισώσεις και  $N_T X_s$  για ολοκληρωτικές εξισώσεις [16].

Η (2.35) οδηγεί στο ακόλουθο σύστημα γραμμικών εξισώσεων

$$\sum_{j=1}^{X_s} Z_{i,j} I_j = V_j \quad (2.36)$$

$$j = 1, \dots, X_s, \dots, N_T$$

με :

$$Z_{i,j} = \int_{G(r)} t_j(s) L(s, s') b_i(s') ds$$

$$V_j = \int_{G(r)} t_j(s) g(s) ds \quad (2.37)$$

Το σύστημα αυτό είναι ανάλογο με το νόμο του Ohm, όπου ο πίνακας  $[Z_{i,j}]$  μπορεί να θεωρηθεί ως ο πίνακας των σύνθετων αντιστάσεων και  $[V_j]$  ως ο πίνακας των τάσεων, στην περίπτωση ενός EFIE μοντέλου.

**3)** Επίλυση του γραμμικού συστήματος εξισώσεων χρησιμοποιώντας κατάλληλες μεθόδους αριθμητικής επίλυσης πινάκων

Από τη στιγμή που τα στοιχεία του πίνακα έχουν υπολογισθεί, γενικώς οι άγνωστοι προκύπτουν αντιστρέφοντας τον πίνακα  $[Z_{i,j}]$  και στη συνέχεια πολλαπλασιάζοντας

$$[I_i] = [Z_{i,j}]^{-1}[V_j] \quad (2.38)$$

Για αυτό το βήμα ο αριθμός των FLOPS που απαιτούνται για διαφορικές εξισώσεις είναι  $O(X_s)$ . Για ολοκληρωτικές εξισώσεις υπάρχουν δυο γνωστές μέθοδοι επίλυσης, η CG (Conjugate Gaussian) και η αποσύνθεση πίνακα κατά LU. Για την CG, ο αριθμός των FLOPS είναι  $O(X_s^2)$  και η μνήμη που απαιτείται επίσης  $O(X_s^2)$ , ενώ για την LU ο αριθμός των FLOPS είναι  $O(X_s^3)$  και η μνήμη που απαιτείται  $O(X_s^2)$  [18].

Καθώς η πολυπλοκότητα του προβλήματος αυξάνει, αυξάνει το μέγεθος του πίνακα  $Z_{i,j}$ , με αποτέλεσμα το τρίτο αυτό βήμα της λύσης κυριαρχεί υπολογιστικά σε ότι αφορά στον αριθμό των FLOPS.

### 2.3.3 Εκμετάλλευση συμμετριών

Πολλά προβλήματα στον Η/Μ εμφανίζουν συμμετρία είτε εκ περιστροφής, είτε εκ μεταφοράς, είτε εξ ανακλάσεως. Η εκμετάλλευση αυτών των συμμετριών αποδεικνύεται ευεργετική για τη μείωση των απαιτήσεων τόσο σε υπολογιστικό χρόνο όσο και σε όγκο της απαιτούμενης αναγκαίας μνήμης. Κατά την εφαρμογή της MoM, λόγω συμμετρίας, είναι εκ των προτέρων γνωστή η μορφή του πίνακα  $[Z_{i,j}]$ , γεγονός που μειώνει τον αριθμό των μη γνωστών στοιχείων αυτού. Έχοντας, για παράδειγμα, μοντελοποιήσει ένα  $n$ -πλευρό κανονικό πολύγωνο χρησιμοποιώντας ένα τμήμα για κάθε πλευρά, τότε τα στοιχεία του προς υπολογισμό πίνακα θα είναι  $n$  και όχι  $n^2$ , δηλαδή θα προκύψει ένας κυκλικός πίνακας. Ένας τέτοιος πίνακας θα χρειαστεί αριθμό FLOPS  $O(n)$  και όχι  $O(n^3)$ .

### 2.3.4 Ακρίβεια – Αξιοπιστία της μεθόδου

Η πολυπλοκότητα της μεθόδου των ροπών εξαρτάται από δύο παράγοντες. Ο πρώτος από αυτούς είναι ο αριθμός των στοιχειωδών τμημάτων τα οποία απαιτούνται προκειμένου η λύση να είναι ακριβής. Ο δεύτερος παράγοντας είναι ο υπολογιστικός χρόνος που χρειάζεται για να συμπληρωθούν τα στοιχεία του πίνακα. Η συμπλήρωση του

πίνακα  $[Z_{i,j}]$  εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις συναρτήσεις στις οποίες αναπτύσσεται το ρεύμα και τις συναρτήσεις δοκιμής.

Η ακρίβεια της μεθόδου εκτιμάται μέσω δυο χαρακτηριστικών τιμών :

- 1) το φυσικό σφάλμα ( $\epsilon_P$ )
- 2) το αριθμητικό σφάλμα ( $\epsilon_N$ )

Η πρώτη χαρακτηριστική τιμή αποτιμά το φυσικό σφάλμα μοντελοποίησης ( $\epsilon_P$ ), που σχετίζεται με την προσέγγιση του προς μελέτη φυσικού αντικειμένου ειδικά εάν αυτό εμπεριέχει μεγάλο ποσοστό καμπύλων επιφανειών. Αν, για παράδειγμα, προσπαθήσει κανείς να αναπαραστήσει μια αγωγίμη σφαίρα διακριτοποιώντας την με ένα πλέγμα νημάτων (κυλινδρικής μορφής) πεπερασμένου μήκους  $l$  και ακτίνας  $a$  (wire grid), η αναπαράσταση θα προσεγγίζει ικανοποιητικά μόνο όταν το μήκος κύματος δεν γίνεται συγκρίσιμο σε σχέση με το φυσικό σφάλμα μοντελοποίησης. Αυτό πρακτικά συμβαίνει μόνο για μεγάλο αριθμό νημάτων, που, όπως θα φανεί στη συνέχεια, μας οδηγεί σε μεγάλες απαιτήσεις υπολογιστικού χρόνου και μνήμης αλλά, ενδεχομένως, και σε άλλες παρενέργειες.

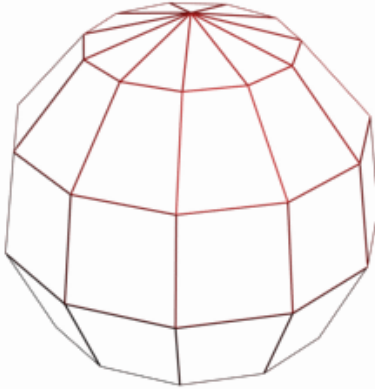
Η δεύτερη χαρακτηριστική τιμή μετρά το αμιγώς αριθμητικό σφάλμα ( $\epsilon_N$ ) που παρουσιάζεται κατά την εφαρμογή της MoM στη μοντελοποιημένη κατασκευή, όπου το κάθε νήμα θα χωρίζεται σε αριθμό τμημάτων (segments) ώστε το ρεύμα στο νήμα να προσεγγίζεται ικανοποιητικά. Έχει βρεθεί ότι το  $\epsilon_N$  χαρακτηρίζεται από τη σχέση

$$\epsilon_N \sim \exp(-kX_S) \quad (2.39)$$

Άρα καλύτερη σύγκλιση μπορεί να επιτευχθεί, αν αυξηθεί ο αριθμός των τμημάτων (segments)  $X_S$ . Η αύξηση του  $X_S$  κρίνεται επιτακτική για τη σύγκλιση της μεθόδου, κυρίως όταν η γεωμετρία που προσεγγίζεται είναι ηλεκτρικά πολύπλοκη και εμφανίζει μεγάλες ηλεκτρικές καμπυλότητες. Αυτό έχει ως συνέπεια τη μεγάλη δέσμευση μνήμης και αύξηση του χρόνου υπολογισμού, ώστε πολλές φορές να καθίσταται άσκοπη σε σχέση με τη βελτίωση του αποτελέσματος. Το γεγονός αυτό καθιστά την MoM ακατάλληλη για προβλήματα υψηλών συχνοτήτων. Ένα άλλο αρνητικό στοιχείο που εμφανίζει ενίοτε η αύξηση του  $X_S$  είναι η ασυμμετρία που εμφανίζουν τα αποτελέσματα συμμετρικών κατασκευών [19], ενώ δεν θα έπρεπε. Η κατάλληλη επιλογή του  $X_S$  αποτελεί δύσκολο πρόβλημα που αντιμετωπίζεται συνήθως μετά από δοκιμές. Για τις περισσότερες περιπτώσεις χαμηλών συχνοτήτων, η επιλογή του αριθμού των τμημάτων από 6 έως 20 ανά μήκος κύματος, έχει ως αποτέλεσμα κανονικοποιημένο σφάλμα σύγκλισης της τάξης του 0.01.

Ένας ακόμα παράγοντας, ο οποίος επηρεάζει σημαντικά την ακρίβεια της μεθόδου των ροπών, είναι ο λόγος ( $a/l$ ) της ακτίνας  $a$  του κάθε στοιχειώδους τμήματος προς το μήκος του  $l$ . Αριθμητικές μετρήσεις έχουν δείξει ότι μεγάλη ακρίβεια επιτυγχάνεται όταν ο λόγος  $a/l$  είναι μικρότερος από 0.1. Αν ο λόγος αυτός αυξηθεί πέρα από αυτό το όριο, η ένταση του ρεύματος στα ελεύθερα άκρα του αγωγού παρουσιάζει ταλαντωτική συμπεριφορά με αποτέλεσμα να εισάγονται μεγάλα λάθη κατά την επίλυση.

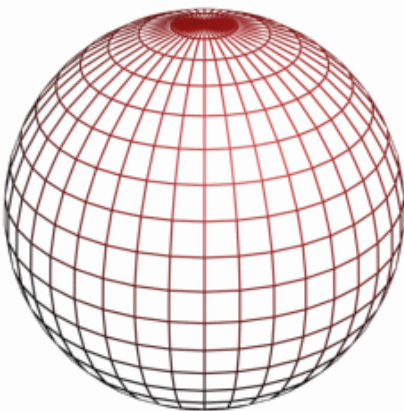
Για να γίνουν κατανοητά το φυσικό σφάλμα ( $\epsilon_P$ ) και το αριθμητικό σφάλμα ( $\epsilon_N$ ) καθώς και η ανοχή που εμφανίζει η MoM σε αυτά, παρατίθεται στο σχήμα 2.6 το παράδειγμα που αναφέρθηκε παραπάνω της μοντελοποίησης αγωγίμης σφαίρας με πλέγμα νημάτων :



**ΜΗ ΑΠΟΔΕΚΤΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ ΝΗΜΑΤΩΝ.  
ΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΣΦΑΛΜΑ ( $\epsilon_P$ ) ΕΙΝΑΙ  
ΣΥΓΚΡΙΣΙΜΟ ΜΕ ΤΟ ΣΥΓΚΕΚΡΙΜΕΝΟ  
ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ, ΑΡΑ ΜΕΓΑΛΟ. Η MoM  
ΔΕΝ ΘΑ ΔΩΣΕΙ ΣΩΣΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.**



**ΑΠΟΔΕΚΤΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ ΝΗΜΑΤΩΝ.  
ΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΣΦΑΛΜΑ ( $\epsilon_P$ ) ΔΕΝ ΕΙΝΑΙ  
ΣΥΓΚΡΙΣΙΜΟ ΜΕ ΤΟ ΣΥΓΚΕΚΡΙΜΕΝΟ  
ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ, ΑΡΑ ΜΙΚΡΟ.  
ΜΗ ΑΠΟΔΕΚΤΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ SEGMENTS ΣΤΑ  
ΝΗΜΑΤΑ.  
ΤΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΣΦΑΛΜΑ ( $\epsilon_N$ ) ΕΙΝΑΙ  
ΜΕΓΑΛΟ. Η MoM ΔΕΝ ΘΑ ΔΩΣΕΙ ΣΩΣΤΑ  
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.**



**ΑΠΟΔΕΚΤΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ ΝΗΜΑΤΩΝ.  
ΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΣΦΑΛΜΑ ( $\epsilon_P$ ) ΔΕΝ ΕΙΝΑΙ  
ΣΥΓΚΡΙΣΙΜΟ ΜΕ ΤΟ ΣΥΓΚΕΚΡΙΜΕΝΟ  
ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ, ΑΡΑ ΜΙΚΡΟ .  
ΑΠΟΔΕΚΤΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ SEGMENTS ΣΤΑ  
ΝΗΜΑΤΑ.  
ΤΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΣΦΑΛΜΑ ( $\epsilon_N$ ) ΕΙΝΑΙ  
ΜΙΚΡΟ. Η MoM ΘΑ ΔΩΣΕΙ ΣΩΣΤΑ  
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΛΛΑ ΘΑ ΑΠΑΙΤΗΘΕΙ  
ΜΕΓΑΛΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΚΑΙ  
ΜΕΓΑΛΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΝΗΜΗ ΚΑΙ  
ΙΣΧΥΣ.**

Σχήμα 2.6 : Ανοχή που εμφανίζει η MoM στο φυσικό ( $\epsilon_P$ ) και στο αριθμητικό ( $\epsilon_N$ ) σφάλμα κατά την μοντελοποίηση αγωγίμης σφαίρας με πλέγμα νημάτων.

### 2.3.5 Συγκριτικές παρατηρήσεις για την MoM

Συνοψίζοντας, αναφέρονται οι πιο σημαντικές διαφορές σε ότι αφορά την εφαρμογή της MoM σε ολοκληρωτικές και διαφορικές εξισώσεις στο πεδίο του χρόνου και στο πεδίο της συχνότητας :

- 1) Η εφαρμογή για διαφορικές εξισώσεις παράγει αραιούς πίνακες, ενώ για ολοκληρωτικές εξισώσεις παράγει πυκνούς.
- 2) Η εφαρμογή σε ολοκληρωτικές και διαφορικές εξισώσεις παράγει στο πεδίο της συχνότητας πίνακα  $[Z_{i,j}]$  με στοιχεία μιγαδικούς αριθμούς, ενώ στο πεδίο του χρόνου με στοιχεία πραγματικούς αριθμούς.
- 3) Για προβλήματα ομογενούς χώρου, η εφαρμογή για διαφορικές εξισώσεις απαιτεί διακριτοποίηση ανάλογη του  $f^D$ , ενώ για ολοκληρωτικές εξισώσεις ανάλογη του  $f^{D-1}$ , όπου D ο αριθμός των διαστάσεων του αντικειμένου που εξετάζεται και f η συχνότητα μελέτης.
- 4) Η εφαρμογή στο πεδίο του χρόνου δίνει λύση σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων αλλά για μία μόνο χωρική διέγερση. Αντίθετα, η εφαρμογή στο πεδίο της συχνότητας δίνει λύση σε μια μόνο συχνότητα αλλά για οποιαδήποτε χωρική διέγερση.

### 2.3.6 Σύνοψη περί MoM

Εξαιτίας της ευκολίας στην ανάπτυξη και υλοποίηση προγραμματιστικών πακέτων που παρουσιάζει η MoM, ιδίως στην επίλυση ολοκληρωτικών εξισώσεων στο πεδίο της συχνότητας, χρησιμοποιείται ευρέως στην ανάλυση πολλών ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων χαμηλών συχνοτήτων, δηλαδή για VHF και κάτω. Η εφαρμογή της μεθόδου μπορεί να γίνει τόσο σε διαφορικές όσο και σε ολοκληρωτικές εξισώσεις. Σε ότι αφορά το πεδίο εφαρμογής, στο πεδίο του χρόνου για μη γραμμικά και χρονικά μεταβαλλόμενα μέσα δίνει λύση σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων αλλά για μία μόνο χωρική διέγερση, ενώ στο πεδίο της συχνότητας δίνει λύση σε ένα στενό εύρος συχνοτήτων αλλά για οσεσδήποτε χωρικές διεγέρσεις.

Η μέθοδος των ροπών βελτιώνεται διαρκώς έτσι ώστε, αφενός, να μπορεί να αντιμετωπίσει ηλεκτρομαγνητικά προβλήματα με ειδικές διατάξεις και κατασκευές και, αφετέρου, να μειωθεί κατά το δυνατόν ο υπολογιστικός χρόνος και η μνήμη που απαιτούνται για την επίλυση των προβλημάτων είτε μέσω αποδοτικότερης λύσης του πίνακα αντιστάσεων είτε με παραλληλισμό της μεθόδου (ParallelMoM). Επιπλέον, έχουν γίνει επεκτάσεις της μεθόδου των ροπών προκειμένου να μπορεί να αντιμετωπίσει προβλήματα με αγωγούς που έχουν λόγο  $a/l$  μεγαλύτερο από 0.1, όπως επίσης και συμμετρικά προβλήματα αλλά και αντικείμενα που βρίσκονται πάνω από τελείως αγώγιμα επίπεδα.



## 2.4 NEC2 - MoM

Ένας από τους πιο διαδεδομένους υπολογιστικούς κώδικες που χρησιμοποιείται ευρέως εδώ και μερικές δεκαετίες για προβλήματα κεραιών χαμηλών συχνοτήτων παρουσία πολύπλοκων δομών και εφαρμόζει τη MoM, είναι ο αριθμητικός ηλεκτρομαγνητικός κώδικας (Numerical Electromagnetic Code, NEC2) [27], ο οποίος αναπτύχθηκε στα εργαστήρια Lawrence Livermore και χρηματοδοτήθηκε από το Αμερικανικό Ναυτικό.

Το NEC2 κατατάσσεται στην κατηγορία των νηματοειδών υπολογιστικών κωδίκων και δουλεύει κατεξοχήν με ολοκληρωτικές εξισώσεις στο πεδίο της συχνότητας. Χρησιμοποιεί επίλυση MFIE για λείες επιφάνειες, επίλυση EFIE για λεπτούς νηματοειδείς αγωγούς αλλά και υβριδική επίλυση των δυο ώστε να καλύπτει ένα μεγάλο εύρος κατασκευών τόσο σε περιβάλλον ελεύθερου χώρου όσο και με την παρουσία επίπεδης γης. Επειδή χρησιμοποιεί τη MoM για ολοκληρωτικές εξισώσεις, τις μετατρέπει σε πρόβλημα αριθμητικής επίλυσης πινάκων, πράγμα που καθιστά το NEC2 ακατάλληλο από πλευράς χρόνου και αξιοπιστίας για κατασκευές υψηλού ηλεκτρικού μήκους (διαστάσεις μερικών και πάνω μηκών κύματος). Για τυπικές ηλεκτρικές διαστάσεις κατασκευών ισοδυναμεί με καταλληλότητα για VHF και κάτω.

Ο NEC2 - MoM κώδικας παρέχει τα εξής :

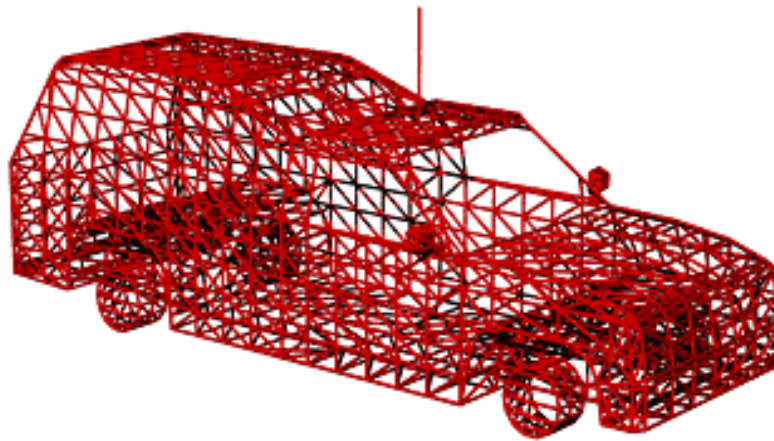
- 1) Τη δυνατότητα μελέτης προβλημάτων σκέδασης για οποιαδήποτε κατασκευή προσομοιωμένη από πλέγματα λεπτών νημάτων.
- 2) Τη δυνατότητα μελέτης κατασκευών πάνω από επίπεδη γη.
- 3) Τη μοντελοποίηση επιφανειών.
- 4) Απλοποιημένη προσέγγιση αλληλεπίδρασης μεγάλων σχετικά αποστάσεων.
- 5) Την ακριβή επίλυση προβλημάτων κεραιών που βρίσκονται κοντά σε έδαφος με απώλειες.
- 6) Τη δυνατότητα υπολογισμού της μέγιστης δυνατής σύζευξης μεταξύ κεραιών.

Για την επίλυση ενός προβλήματος και κατά τη μοντελοποίηση μιας κατασκευής από το NEC2 ακολουθούνται τα παρακάτω τέσσερα βήματα :

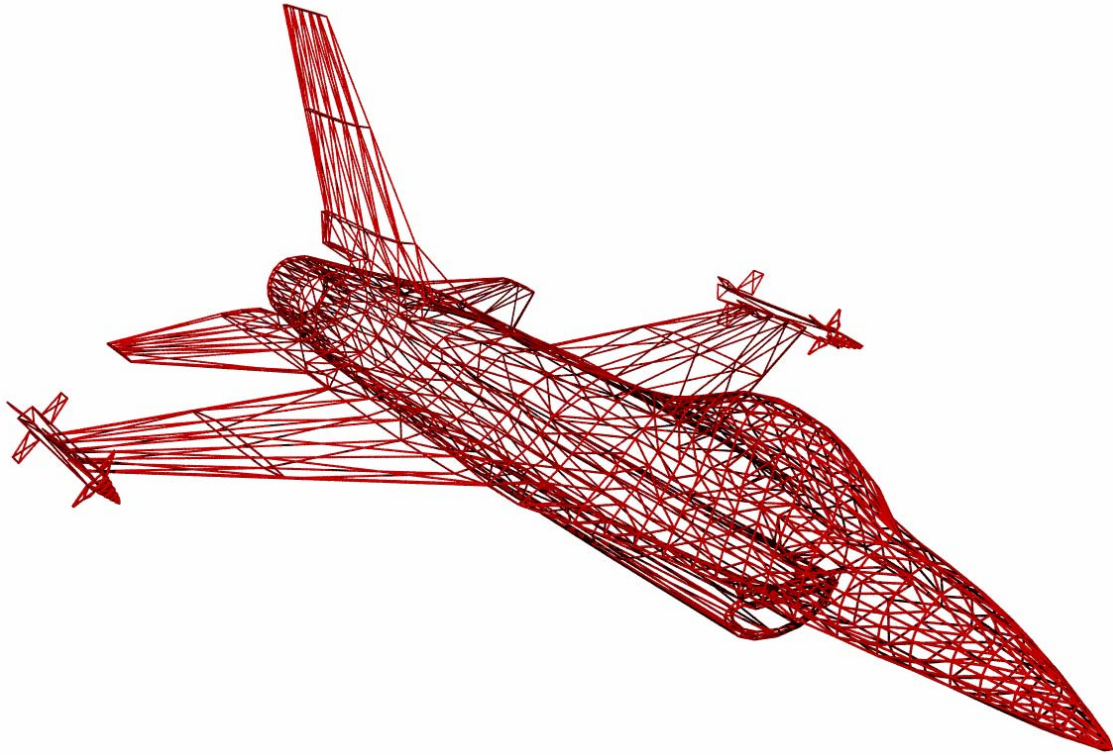
- 1) Διαίρεση της προς μοντελοποίηση κατασκευής σε μια σειρά αγωγίμων νημάτων , σχηματίζοντας ένα πλέγμα (wire grid) και έπειτα διαίρεση αυτών σε επιμέρους στοιχειώδη αγωγήματα τμήματα (segments), των οποίων οι διαστάσεις είναι πολύ μικρότερες από το μήκος κύματος.
- 2) Η επιλογή προκαθορισμένων συναρτήσεων βάσης για την αναπαράσταση του άγνωστου ρεύματος καθώς και η επιλογή αντίστοιχα προκαθορισμένων συναρτήσεων δοκιμής.

- 3) Η συμπλήρωση των στοιχείων του πίνακα σύνθετων αντιστάσεων  $[Z_{i,j}]$  και η εύρεση της άγνωστης ρευματικής κατανομής, επί της προς μελέτη γεωμετρικής διάταξης.
- 4) Επεξεργασία των τιμών του ρεύματος που προκύπτουν από την επίλυση της εξίσωσης, προκειμένου να βρεθούν τα χαρακτηριστικά κοντινού και μακρινού πεδίου ή άλλα χρήσιμα μεγέθη, όπως η σύνθετη αντίσταση εισόδου και η ισχύς ακτινοβολίας των κεραιών.

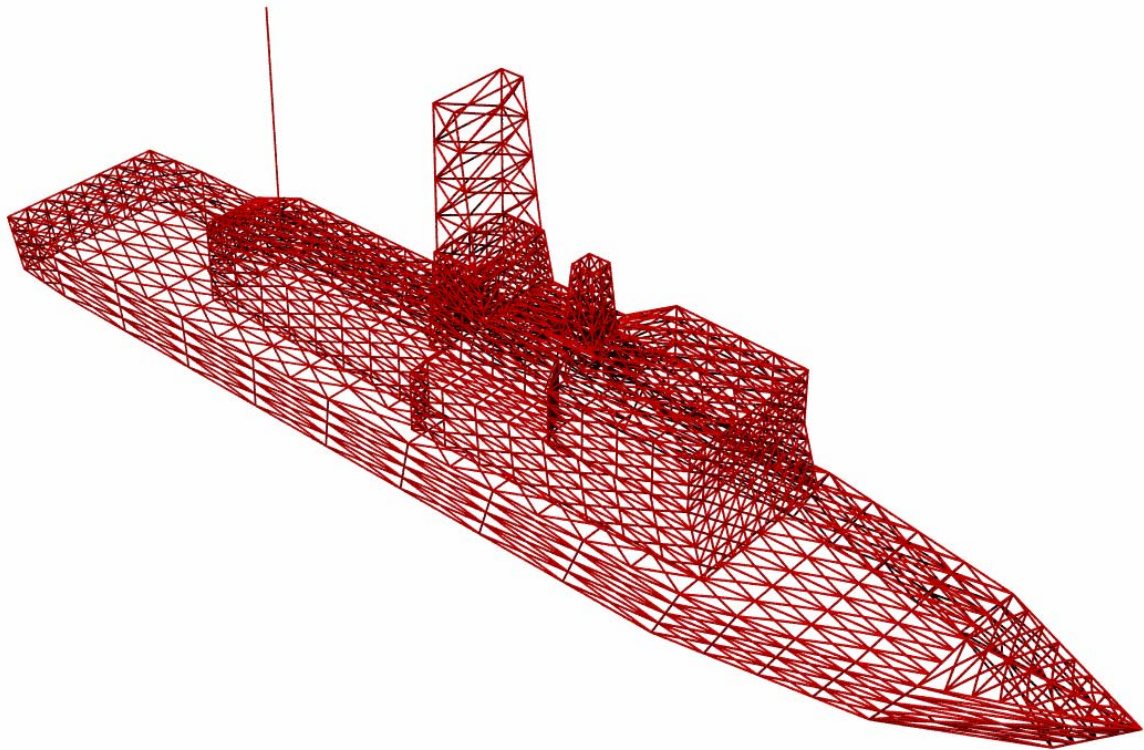
Στο σημείο αυτό παρατίθενται, προς εξοικείωση του αναγνώστη, παραδείγματα λεπτών νημάτινων πλεγμάτων (wire grid), που σχηματίστηκαν για το NEC2 για πολιτικό όχημα (DODGE) (σχήμα 2.7), για πολεμικό αεροπλάνο F-16 (σχήμα 2.8) και για πολεμικό πλοίο (LARGE PATROL SHIP) (σχήμα 2.9) .



**Σχήμα 2.7 : Wire grid πολιτικού οχήματος (DODGE).**



**Σχήμα 2.8 : Wire grid Πολεμικού αεροπλάνου F-16.**



**Σχήμα 2.9 : Wire grid Πολεμικού Πλοίου (LARGE PATROL SHIP).**

Σε ό,τι αφορά τη δυνατότητα μοντελοποίησης του προβλήματος από το NEC2-MoM κώδικα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μη ακτινοβολούντα δίκτυα και γραμμές μεταφοράς συνδεδεμένα σε μέρη της κατασκευής, τελείως, και μη αγώγιμους αγωγούς. Η κατασκευή μπορεί να βρίσκεται πάνω από τέλεια ή μη αγώγιμη γη. Η διέγερση μπορεί να είναι είτε πηγή ρεύματος είτε πηγή τάσης αλλά ακόμα και προσπίπτον επίπεδο κύμα γραμμικής ή ελλειπτικής πόλωσης. Η έξοδος μπορεί να είναι ρεύματα, φορτία, κοντινά ηλεκτρικά ή μαγνητικά πεδία (Near Field) και πεδία ακτινοβολίας (Far Field).

Σε ό,τι αφορά το αριθμητικό κομμάτι επίλυσης ο NEC2 χρησιμοποιεί τις συναρτήσεις δέλτα του Dirac ως συναρτήσεις δοκιμής και διαφορετικές από αυτές, για την ανάπτυξη της κατανομής του ρεύματος. Το ρεύμα σε κάθε στοιχειώδες αγωγίμο τμήμα στο NEC2 δίνεται υπό την ακόλουθη μορφή:

$$I_i(s) = a_i + b_i \sin[k(s - s_i)] + c_i \cos[k(s - s_i)] \quad (2.40)$$

Οι τρεις συντελεστές  $a_i$ ,  $b_i$  και  $c_i$  σχετίζονται με τη συνέχεια του ρεύματος από το ένα στοιχειώδες αγωγίμο τμήμα στο επόμενο, καθώς και με την ικανοποίηση οριακών συνθηκών στα άκρα του αγωγού. Στην επίλυση του σχηματιζόμενου πίνακα χρησιμοποιεί την τεχνική αποσύνθεσης LU, κατά την οποία σχηματίζει δυο τριγωνικούς πίνακες με αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους υπολογισμού και μνήμης.

**Συνοψίζοντας, με δεδομένη την ύπαρξη του κατασκευαστικού σχεδίου, ο NEC2-MOM κώδικας δύναται να χρησιμοποιηθεί στο αρχικό στάδιο της σχεδίασης και ανάπτυξης αλλά και στο στάδιο επαλήθευσης και πιστοποίησης, ως ένα εργαλείο ικανοποιητικής ακρίβειας και σχετικά ανεκτής απαίτησης υπολογιστικού χρόνου και μνήμης.**

Η χρήση του συνίσταται στην ανάλυση και μελέτη προβλημάτων ποικίλων τύπων κεραιών εγκαταστημένων σε διάφορες υπερκατασκευές, όπως αεροπλάνα, πλοία, ελικόπτερα, οχήματα και κτιριακές εγκαταστάσεις συμβατικού και στρατιωτικού χαρακτήρα. Για τις τυπικές ηλεκτρικές διαστάσεις των κατασκευών αυτών το NEC2-MOM είναι κατάλληλο για συχνότητες έως και VHF σε ορισμένες περιπτώσεις.

Ειδικότερα για κατασκευές που παρουσιάζουν μεγάλο ποσοστό καμπύλων επιφανειών, όπως αεροπλάνα και ελικόπτερα, η MoM παρουσιάζεται ιδιαίτερα απαιτητική για το άνω όριο των VHF, αφού για να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα απαιτεί πολύ μεγάλο αριθμό τμημάτων, πράγμα που συνεπάγεται μεγάλο υπολογιστικό χρόνο και μνήμη.

## ***Κεφάλαιο 3***

### ***Μέθοδος επίλυσης H/M προβλημάτων υψηλών ηλεκτρικών διαστάσεων***

#### ***3.1 Εισαγωγή***

Στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρθηκε ότι για την επίλυση H/M προβλημάτων που αντιστοιχούν σε υψηλές ηλεκτρικές διαστάσεις, κρίνεται κατάλληλη η χρησιμοποίηση ασυμπτωτικών μεθόδων επίλυσης, όπως η ενιαία θεωρία περίθλασης (Uniform Theory of Diffraction) και η φυσική θεωρία περίθλασης (Physical Theory of Diffraction).

Από τις δυο προαναφερθείσες μεθόδους, η πιο δημοφιλής μέθοδος, ευρέως δοκιμασμένη και χρησιμοποιούμενη σε αρκετά υπολογιστικά προγράμματα προσομοίωσης είναι η ενιαία θεωρία περίθλασης (Uniform Theory of Diffraction). Αυτό την καθιστά μέθοδο γνωστής και πιστοποιημένης ακριβείας και αξιοπιστίας. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε ως η μέθοδος για την επίλυση των H/M προβλημάτων σε υψηλές συχνότητες στο κεφάλαιο 5 των εφαρμογών. Το παρόν κεφάλαιο λοιπόν αναφέρεται εκτενώς στην ενιαία θεωρία περίθλασης.

Αρχικώς παρατίθεται εκτενώς προς εξοικείωση του αναγνώστη η θεωρία της γεωμετρικής οπτικής (GO) που αποτελεί βάση της ενιαίας θεωρίας περίθλασης. Αναφέρονται τα σημεία αδυναμίας της γεωμετρικής οπτικής (GO) και η εξέλιξη της στην ενιαία θεωρία περίθλασης.

Κατόπιν γίνεται αναφορά στο υπολογιστικό πρόγραμμα προσομοίωσης NEC-BSC 2.2.18 που χρησιμοποιήθηκε στο κεφάλαιο των εφαρμογών και ενσωματώνει την ενιαία θεωρία περίθλασης ως μέθοδο επίλυσης των H/M προβλημάτων.

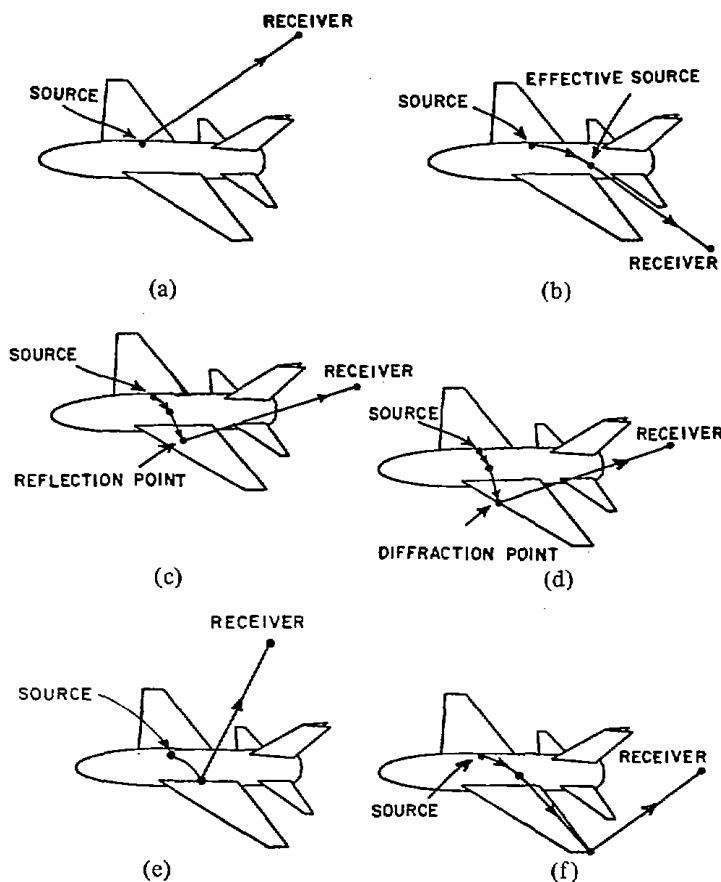
Τέλος, παρατίθεται συντόμως η υβριδική μέθοδος MoM/UTD που χρησιμοποιείται από αρκετά πακέτα προσομοίωσης για ένα εύρος συχνοτήτων από χαμηλές μέχρι και υψηλές και αποτελεί συνδυασμό της ενιαίας θεωρίας περίθλασης (Uniform Theory of Diffraction) και της μεθόδου των ροπών (MoM) που εξετάστηκε στο κεφάλαιο 2.

## 3.2 Ενιαία θεωρία περίθλασης (UTD)

### 3.2.1 Εισαγωγή

Όταν οι διαστάσεις του Η/Μ προβλήματος σε σχέση με το μήκος κύματος (ηλεκτρικές διαστάσεις) είναι σχετικά μεγάλες, τότε οι ασυμπτωτικές τεχνικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ικανοποιητική και αξιόπιστη επίλυση πολλών προβλημάτων που αφορούν σε υψηλών συχνοτήτων που διαφορετικά θα ήταν δύσκολο να επιλυθούν.

Η πιο γνωστή και ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική για υψηλές συχνότητες είναι η ενιαία θεωρία περίθλασης (UTD) [4],[17] που αποτελεί βελτίωση της γεωμετρικής θεωρίας περίθλασης, γνωστής και ως GTD (Geometrical Theory of Diffraction). Η GTD, που διατυπώθηκε αρχικώς από τον Keller και στη συνέχεια επεκτάθηκε από τους Kouyoumjian και Pathak, αποτελεί επέκταση της κλασικής γεωμετρικής οπτικής (Geometrical Optics) ή οπτικής των ακτίνων (ray optics), εισάγοντας το μηχανισμό της περίθλασης ακτίνων για να υπερβεί τους περιορισμούς που έχει η γεωμετρική οπτική που σχετίζεται μόνο με απευθείας πρόσπτωση (direct incidence), ανάκλαση (reflection) και διάθλαση (refraction) ακτίνων. Συνοπτικά οι διάφοροι μηχανισμοί διάδοσης που συνιστούν την UTD διακρίνονται στο επόμενο σχήμα 3.1 .



Σχήμα 3.1 : Μηχανισμοί διάδοσης στην UTD. [23]

Στις υψηλές συχνότητες, η περίθλαση, όπως η ανάκλαση και η διάθλαση, έχουν τοπικό χαρακτήρα και εξαρτώνται από δύο παράγοντες

- 1) Την τοπική γεωμετρία του αντικειμένου περί το σημείο στο οποίο συμβαίνει περίθλαση (κορυφή, ακμή, καμπύλη επιφάνεια).
- 2) Το μέτρο, τη φάση και την πόλωση του προσπίπτοντος H/M πεδίου στο σημείο της περίθλασης.

Η διάδοση της H/M ενέργειας συμβαίνει παράλληλα με ακτίνες, κάθε μια από τις οποίες συσχετίζεται με την ύπαρξη ενός H/M πεδίου. Έτσι το H/M πεδίο σε οποιοδήποτε σημείο, υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη όλες τις επιμέρους ακτίνες σε αυτό και αθροίζοντας τα συσχετιζόμενα με αυτές H/M πεδία. Το H/M πεδίο λόγω περίθλασης, όπως και λόγω ανάκλασης αλλά και λόγω διάθλασης, προκύπτει με επέκταση της αρχής του Fermat.

Το φαινόμενο της περίθλασης εμφανίζεται στα σημεία που παρουσιάζουν γεωμετρική ή και ηλεκτρική ασυνέχεια. Αυτά τα σημεία αποτελούν τα όρια της λεγόμενης περιοχής σκιάς (incident and reflected shadow boundaries, ISB and RSB) που ορίζει η γεωμετρική οπτική. Κατά την γεωμετρική θεωρία περίθλασης οι ακτίνες που περιθλώνται, εισέρχονται σε αυτές τις περιοχές, εμφανίζοντας και εκεί τιμές H/M πεδίου.

Η φάση του H/M πεδίου λόγω περίθλασης προκύπτει από το γινόμενο της οπτικής απόστασης που καλύπτει η ακτίνα συσχετιζόμενη με το H/M πεδίο με τον κυματαριθμό του μέσου διάδοσης. Το πλάτος προκύπτει μέσα από την αρχή διατηρήσεως της ισχύος για την κάθε ακτίνα.

Στη γεωμετρική οπτική, το ανακλώμενο H/M πεδίο προκύπτει μέσω του προσπίπτοντος H/M πεδίου και του κατάλληλου για την εκάστοτε γεωμετρία τανυστικού συντελεστή ανάκλασης. Κατά παρόμοιο τρόπο στην UTD το H/M πεδίο λόγω περίθλασης μπορεί να βρεθεί από το προσπίπτον H/M πεδίο και τον κατάλληλο για την γεωμετρία (κορυφή, ακμή, καμπύλη επιφάνεια) τανυστικού συντελεστή περίθλασης. Λόγω της αρχής του Fermat, οι διάφορες ακτίνες που συσχετίζονται με τα αντίστοιχα H/M πεδία διανύουν τις ελάχιστες δυνατές αποστάσεις μεταξύ των διαφόρων πηγών και των σημείων παρατήρησης. Διαδίδονται επομένως κατά ευθείες αν πρόκειται για ομογενή μέσα.

Οι γεωμετρίες για τις οποίες μέσω των συνοριακών τιμών υφίστανται λύσεις για τους συντελεστές περίθλασης και απόσβεσης, ονομάζονται κανονικές. Παραδείγματα τέτοιων γεωμετριών είναι η αγωγήμη σφήνα και η αγωγήμη λεία και κυρτή επιφάνεια. Κατά την εφαρμογή της UTD, σκοπός είναι η αποδοτική κατάτμηση της γεωμετρίας της εκάστοτε κατασκευής σε άθροισμα κανονικών γεωμετριών των οποίων οι συντελεστές περίθλασης είναι γνωστοί. Με τον τρόπο αυτό, Η λύση προκύπτει από την υπέρθεση των επιμέρους λύσεων των κανονικών γεωμετριών.

Τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η UTD είναι :

- 1) Η απλότητα εφαρμογής.
- 2) Μπορεί να χρησιμοποιηθεί προς επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων που δεν έχουν ακριβείς αναλυτικές λύσεις.

- 3) Παρέχει μια κατανοητή εικόνα των διαφόρων μηχανισμών ακτινοβολήσης και σκέδασης από τα διάφορα μέρη της εκάστοτε κατασκευής.
- 4) Τα αποτελέσματα που δίνει συγκρίνονται ικανοποιητικά με αυτά που προκύπτουν από μετρήσεις και άλλες υπολογιστικές μεθόδους.
- 5) Έχει τη δυνατότητα να συνδυάζεται αποδοτικά με άλλες υπολογιστικές μεθόδους, όπως η MoM, παράγοντας υβριδικά μοντέλα.

### 3.2.2 Γεωμετρική Οπτική (Geometrical Optics)

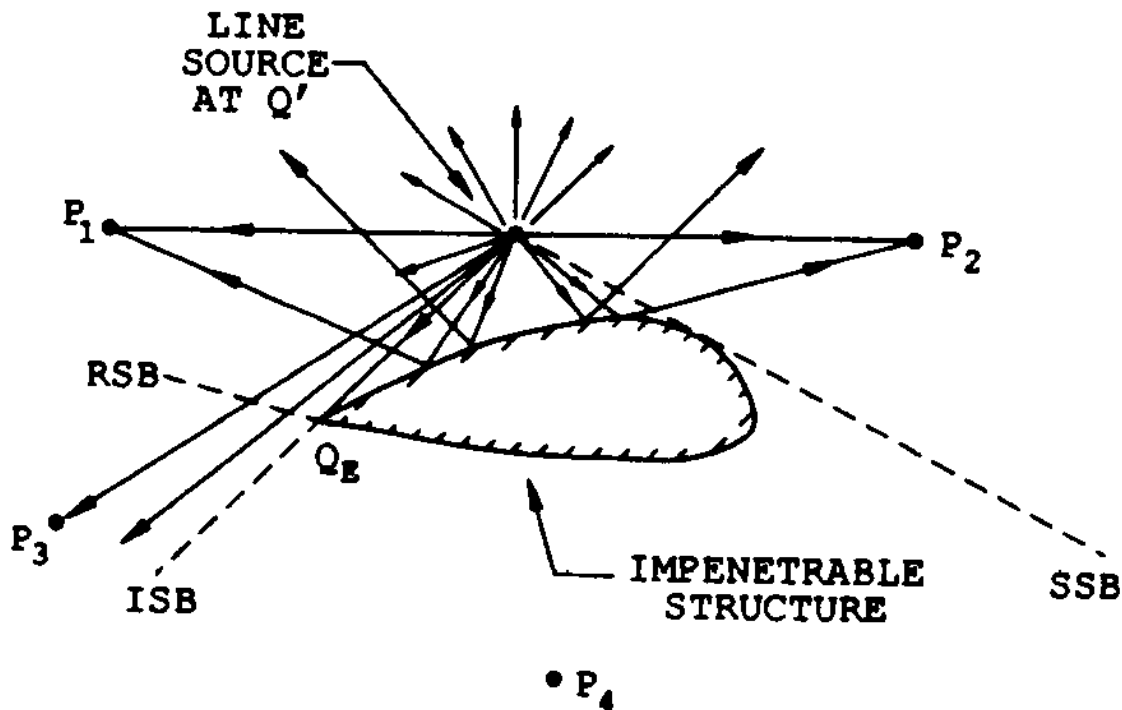
#### 3.2.2.1 Εισαγωγή

Η γεωμετρική οπτική (Geometrical Optics) είναι μια προσεγγιστική μέθοδος υψηλών συχνοτήτων που προσδιορίζει την διάδοση του απευθείας / προσπίπτοντος (direct / incident), ανακλώμενου (reflected) και διαθλούμενου (refracted) Η/Μ πεδίου. Ενδεικτικά μπορεί να γραφεί

$$GO = \text{ΠΡΟΣΠΤΩΣΗ} + \text{ΑΝΑΚΛΑΣΗ} + \text{ΔΙΑΘΛΑΣΗ}$$

Στην ανάλυση της γεωμετρικής οπτικής δεν θα αναφερθεί το φαινόμενο της διάθλασης, διότι για χάρη ευκολίας θεωρούνται μόνο τελείως αγώγιμες κατασκευές.

Για να γίνει κατανοητή η θεωρία της γεωμετρικής οπτικής, παρατίθεται ένα παράδειγμα ευθύγραμμης πηγής πάνω από τελείως αγώγιμο αντικείμενο όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2 που ακολουθεί



Σχήμα 3.2 : Ευθύγραμμη πηγή πάνω από τελείως αγώγιμο αντικείμενο, αντιμετώπιση από την GO.

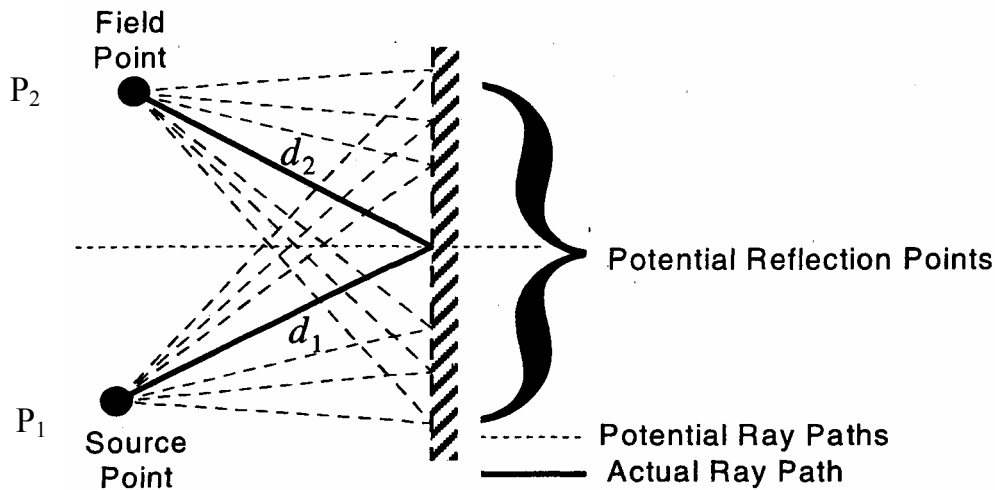


Κατά τη γεωμετρική οπτική, η Η/Μ ενέργεια διαδίδεται παράλληλα σε ακτίνες [2], που σύμφωνα με την αρχή του Fermat είναι ευθύγραμμες αν πρόκειται για ομογενή μέσα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.2. Για το λόγο αυτό, το εκάστοτε πρόβλημα ανάγεται σε γεωμετρική ανάλυση της διαδρομής των ακτίνων και των εμποδίων που ενδεχομένως αυτές συναντούν.

Από το σχήμα 3.2 φαίνεται ότι απευθείας / προσπίπτουσες και ανακλώμενες ακτίνες υφίστανται μόνον σε ορισμένες περιοχές του χώρου γύρω από το τελείως αγωγίμο αντικείμενο. Οι απευθείας διαδιδόμενες ακτίνες δεν υφίστανται πέραν του προσπίπτοντος ορίου σκιάς (ISB) καθοριζόμενου από τα σημεία αιχμής του αντικειμένου και πέραν του ορίου σκιάς επιφανείας (SSB) καθοριζόμενου από τη λεία επιφάνεια. Οι ανακλώμενες ακτίνες δεν υφίστανται πέραν του ανακλώμενου ορίου σκιάς (RSB) καθοριζόμενου επίσης από τα σημεία αιχμής του αντικειμένου. Ορίζεται έτσι μια περιοχή γνωστή και ως περιοχή σκιάς (shadow region), χαρακτηριστική της γεωμετρικής οπτικής στο εσωτερικό της οποίας δεν υπάρχει Η/Μ πεδίο.

### 3.2.2.2 Αρχή του Fermat

Με βάση την αρχή του Fermat, το μήκος του οπτικού δρόμου που καλύπτουν οι ακτίνες μεταξύ δυο οποιονδήποτε σημείων  $P_1$  και  $P_2$  αποτελεί ακρότατο, συνήθως ελάχιστο. Έστω μια οπτική ακτίνα που προέρχεται από το σημείο  $P_1$  (πηγή) και φθάνει ανακλώμενη στο σημείο  $P_2$  (σημείο παρατήρησης) όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3 : Διαδρομή προσπίπτουσας ακτίνας κατά την ανάκλαση σε επιφάνεια. [7]

Το μήκος οπτικού δρόμου ορίζεται μέσω της εξίσωσης :

$$L = \int_{\Gamma} n(s) ds \quad (3.1)$$

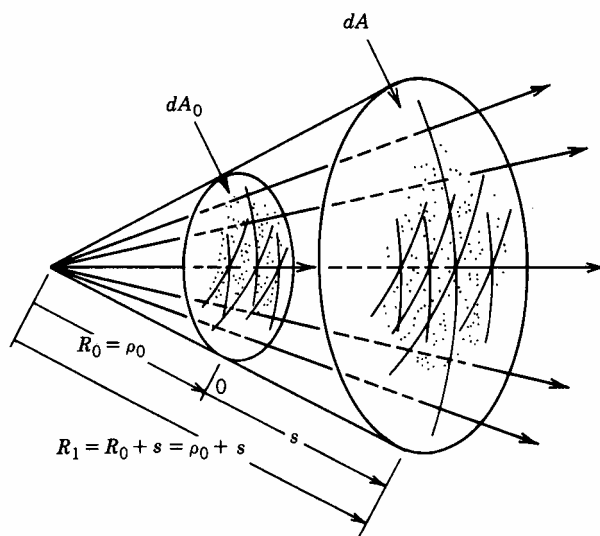
όπου  $n(s)$  ο δείκτης διάθλασης και  $ds$  το στοιχειώδες μήκος τόξου πάνω σε μια ακτίνα που περιγράφεται από το δρόμο  $\Gamma$  στο χώρο. Τότε, από την αρχή του Fermat, για τη διαφορά του μήκους των δυο οπτικών δρόμων που ακολουθεί η ακτίνα κατά την ανάκλαση ισχύει

$$\delta \int_{P_1}^{P_2} n(s) ds = 0 \quad (3.2)$$

Αν επιπλέον ο χώρος είναι ομογενής, δηλαδή ο δείκτης διάθλασης είναι σταθερός, η εξίσωση (3.2) υποδεικνύει ότι η διαδρομή της ακτίνας αποτελείται από δυο ίσα και ευθεία τμήματα όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3 με την έντονα μαύρη γραμμή. Η διαδρομή αυτή είναι η ελάχιστη δυνατή διαδρομή.

### 3.2.2.3 Νόμος διατήρησης της ισχύος

Έστω σημειακή πηγή που ακτινοβολεί ισοτροπικώς σφαιρικά κύματα, όπως στο σχήμα 3.4 .



Σχήμα 3.4 : Σημειακή πηγή ακτινοβολούσα ισοτροπικώς σφαιρικά κύματα.

Ας θεωρηθούν δυο ισοφασικές επιφάνειες στα σημεία  $s=0$  και  $s$  με εμβαδά  $dA_0$  και  $dA$ . Λόγω της διατήρησης της ισχύος, συσχετίζεται η πυκνότητα ισχύος  $S_0$  στο σημείο  $0$  με την πυκνότητα ισχύος  $S$  στο σημείο  $s$  μέσω της σχέσης

$$S_0 dA_0 = S dA \quad (3.3)$$

Η πυκνότητα ισχύος  $S$  σε οποιαδήποτε σημείο συνδέεται με την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο αυτό και την κυματική αντίσταση του μέσου με τη σχέση

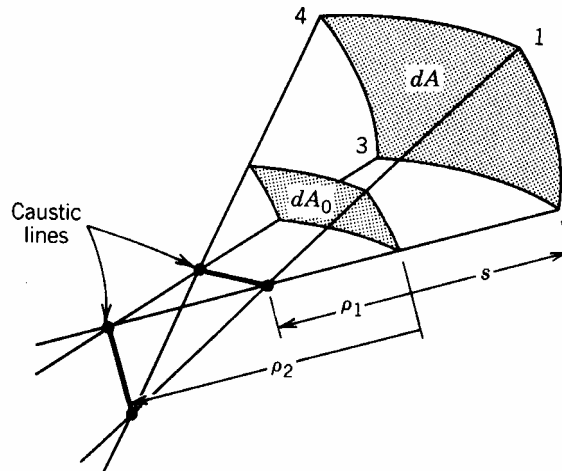
$$S(s) = \frac{1}{Z} |\vec{E}(s)|^2 \quad (3.4)$$

Από τις δυο ανωτέρω σχέσεις και τη σχέση που δίνει το εμβαδόν του σφαιρικού τομέα, προκύπτει η ακόλουθη βασική σχέση για τη διαδιδόμενη ηλεκτρική συνιστώσα του Η/Μ πεδίου σε οποιοδήποτε σημείο  $s$

$$\frac{|\vec{E}(s)|}{|\vec{E}(s=0)|} = \frac{\rho_0}{\rho_0 + s} \quad (3.5)$$

Στη γενική περίπτωση, όπου οι ισοφασικές επιφάνειες δεν είναι σφαιρικές όπως στο σχήμα 3.5, η (3.5) γράφεται

$$\frac{|\vec{E}(s)|}{|\vec{E}(s=0)|} = \sqrt{\frac{\rho_1 \rho_2}{(\rho_1 + s)(\rho_2 + s)}} \quad (3.6)$$



Σχήμα 3.5 : Ισοφασικές επιφάνειες για την γενικότερη περίπτωση ακτινοβολήσης.

#### 3.2.2.4 Σχέση για το απευθείας / προσπίπτον διαδιδόμενο Η/Μ πεδίο

Η σχέση (3.6) προσδιορίζει μόνο το μέτρο του απευθείας διαδιδόμενου / προσπίπτοντος ηλεκτρικού πεδίου σε οποιοδήποτε σημείο  $s$  σε σχέση με το σημείο αναφοράς όπου  $s=0$ . Δεν δίνει, όμως, καμία πληροφορία για τη φάση και την πόλωση που έχει η ηλεκτρική συνιστώσα του Η/Μ πεδίου σε εκείνο το σημείο.

Οι απαραίτητες πληροφορίες για τη φάση και την πόλωση δίνονται από το μοντέλο των Luneberg-Kline, αναπτύσσοντας τη συνιστώσα ηλεκτρικού πεδίου σε δυναμοσειρά και προσεγγίζοντάς την κατάλληλα. Προκύπτει έτσι η προσεγγιστική σχέση για το ηλεκτρικό πεδίο

$$\vec{E}(s) \approx \vec{E}_0(0)e^{j\phi_0(0)} \sqrt{\frac{\rho_1 \rho_2}{(\rho_1 + s)(\rho_2 + s)}} e^{-j\beta s} \quad (3.7)$$

όπου :

$\vec{E}_o(0)$  είναι η τιμή του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο αναφοράς  $s=0$ .

$\phi_o(0)$  είναι η φάση του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο αναφοράς  $s=0$ .

$\sqrt{\frac{\rho_1 \rho_2}{(\rho_1 + s)(\rho_2 + s)}}$  είναι η εξασθένηση του ηλεκτρικού πεδίου λόγω διάδοσης επί της οπτικής ακτίνας.

$e^{-j\beta s}$  είναι αντίστοιχος ο πολλαπλασιαστικός παράγοντας λόγω μεταβολής της φάσης του ηλεκτρικού πεδίου.

Αν οι συχνότητες των προβλημάτων που μελετώνται είναι υψηλές, όπως συμβαίνει για προβλήματα γεωμετρικής οπτικής, τότε η σχέση (3.7) δίνει ικανοποιητική λύση σε σύγκριση με τις αντίστοιχες μετρήσεις. Έτσι μπορεί να γράφει η σχέση

$$\vec{E}^i(s) = \vec{E}_o(0) e^{j\phi_o(0)} \sqrt{\frac{\rho_1 \rho_2}{(\rho_1 + s)(\rho_2 + s)}} e^{-j\beta s} U_i \quad (3.8)$$

όπου  $U_i = 0$  για την περιοχή σκιάς και  $U_i = 1$  για τον υπόλοιπο χώρο.

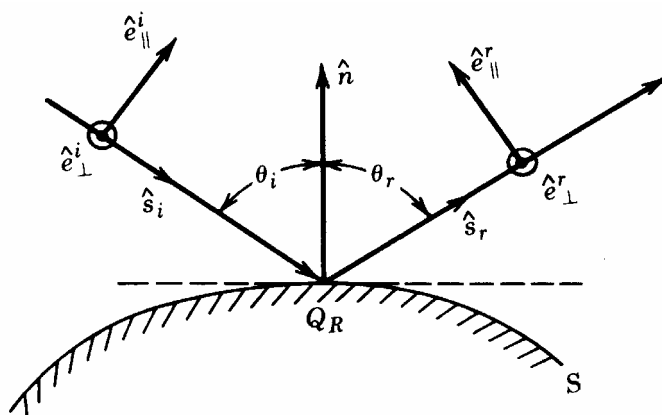
Τέλος, η συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου του απευθείας / προσπίπτοντος H/M πεδίου μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση

$$\vec{H}^i(s) = \frac{1}{Z} \hat{s} \times \vec{E}^i(s) U_i \quad (3.9)$$

### 3.2.2.5 Σχέση για το ανακλώμενο H/M πεδίο

Το φαινόμενο της ανάκλασης εμφανίζεται όταν οι διαδιδόμενες H/M ακτίνες προσπίπτουν σε λεία αντικείμενα, δηλαδή σε αντικείμενα με διαστάσεις πολύ μεγάλες σε σχέση με το μήκος κύματος. Στη γεωμετρική οπτική, το ανακλώμενο H/M πεδίο προκύπτει συναρτήσει του προσπίπτοντος H/M πεδίου μέσω του κατάλληλου για την εκάστοτε γεωμετρία τανυστικού συντελεστή ανάκλασης  $\vec{R}$ .

Έστω ακτίνα προσπίπτουσα επί λείας και τελείως αγωγίμης επιφάνειας S που ανακλάται σε σημείο  $Q_R$  όπως φαίνεται στο σχήμα 3.6.



Σχήμα 3.6 : Μηχανισμός ανάκλασης σε λεία και τελείως αγωγίμη επιφάνεια S.

Σε σχέση με το πρόβλημα πρόσπτωσης ορίζονται τα διανύσματα και οι γωνίες

$\hat{s}^i$  το μοναδιαίο διάνυσμα κατά τη διεύθυνση της προσπίπτουσας ακτίνας.

$\hat{s}^r$  το μοναδιαίο διάνυσμα κατά τη διεύθυνση της ανακλώμενης ακτίνας.

$\hat{e}_{\parallel}^i$  το μοναδιαίο διάνυσμα παράλληλο με το επίπεδο πρόσπτωσης.

$\hat{e}_{\parallel}^r$  το μοναδιαίο διάνυσμα παράλληλο με το επίπεδο ανάκλασης.

$\hat{e}_{\perp}^i$  το μοναδιαίο διάνυσμα κάθετο με το επίπεδο πρόσπτωσης.

$\hat{e}_{\perp}^r$  το μοναδιαίο διάνυσμα κάθετο με το επίπεδο ανάκλασης.

$\hat{n}$  το μοναδιαίο διάνυσμα κάθετο στην επιφάνεια S.

$\theta_i$  τη γωνία πρόσπτωσης που μετράται μεταξύ των διανυσμάτων  $\hat{n}$  και  $\hat{s}^i$ .

$\theta_r$  τη γωνία ανάκλασης που μετράται μεταξύ των διανυσμάτων  $\hat{n}$  και  $\hat{s}^r$ .

όπου για τις γωνίες πρόσπτωσης και ανάκλασης, ισχύει η σχέση :

$$\theta_i = \theta_r \quad (3.10)$$

Για το τανυστικό συντελεστή ανάκλασης  $\bar{R}$  ισχύει η σχέση

$$\bar{R} = [\hat{e}_{\parallel}^i \hat{e}_{\parallel}^r - \hat{e}_{\perp}^i \hat{e}_{\perp}^r] \quad (3.11)$$

Επομένως, γράφεται το ανακλώμενο H/M πεδίο στο σημείο όπου  $s=0$ , έστω το σημείο  $Q_R$  :

$$\vec{E}_o^r(s=0) = \vec{E}_o^i(Q_R) \cdot \bar{R} = \vec{E}_o^i(Q_R) \cdot [\hat{e}_{\parallel}^i \hat{e}_{\parallel}^r - \hat{e}_{\perp}^i \hat{e}_{\perp}^r] \quad (3.12)$$

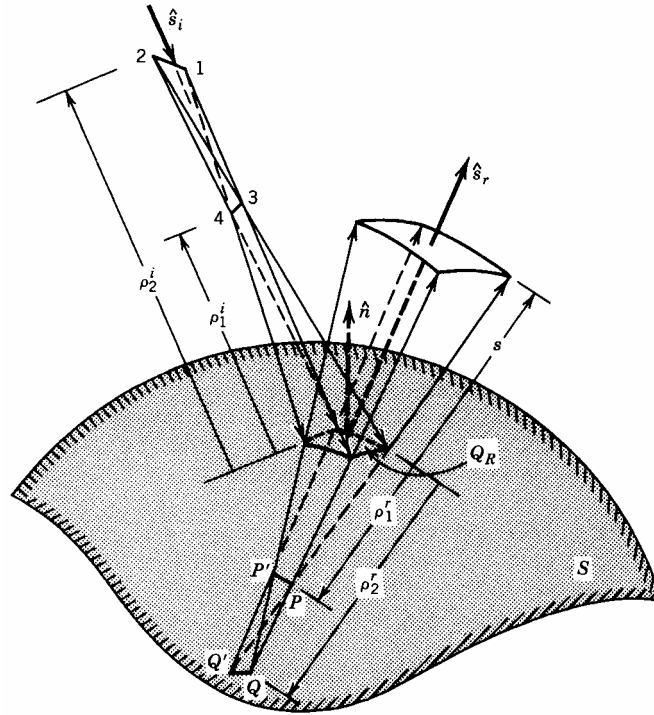
Για τη γενικότερη περίπτωση του τρισδιάστατου προβλήματος ανάκλασης επί λείας και τελείως αγωγίμης επιφάνειας S με τυχαίες ισοφασικές επιφάνειες όπως στο παρακάτω σχήμα 3.7, ισχύει λόγω και της (3.8) η ακόλουθη σχέση για το ανακλώμενο H/M πεδίο :

$$\vec{E}^r(s) = \vec{E}^i(Q_R) \cdot \bar{R} \sqrt{\frac{\rho_1 \rho_2}{(\rho_1 + s)(\rho_2 + s)}} e^{-j\beta s} U_r \quad (3.13)$$

όπου  $U_r = 0$  για την περιοχή σκιάς και  $U_r = 1$  για τον υπόλοιπο χώρο

Τέλος, η μαγνητική συνιστώσα του ανακλώμενου H/M πεδίου μπορεί να υπολογιστεί μέσω της σχέσης :

$$\vec{H}^r(s) = \frac{1}{Z} \hat{s} \times \vec{E}^r(s) U_r \quad (3.14)$$



Σχήμα 3.7 : Ισοφασικές επιφάνειες για τη γενική περίπτωση του τρισδιάστατου προβλήματος ανάκλασης σε λεία και τελείως αγωγίμη επιφάνεια S.

### 3.2.3 Γεωμετρική Θεωρία Περίθλασης (GTD)

#### 3.2.3.1 Εισαγωγή

Η GTD, που διατυπώθηκε αρχικώς από τον Keller και, στη συνέχεια επεκτάθηκε από τους Kouyoumjian και Pathak, αποτελεί επέκταση της γεωμετρικής οπτικής, εισάγοντας το μηχανισμό της περίθλασης ακτίνων για να αντιμετωπίσει τους περιορισμούς που έχει η γεωμετρική οπτική. Ενδεικτικά μπορεί να γραφεί :

$$GTD = GO + \text{ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ}$$

Το φαινόμενο της περίθλασης εμφανίζεται όταν οι διαδιδόμενες Η/Μ ακτίνες προσπίπτουν σε συγκρίσιμες με το μήκος κύματος γεωμετρικές ή ηλεκτρικές ασυνέχειες αλλά και στην περίπτωση πρόσπτωσης σε λεία, κυρτή επιφάνεια με τη γωνία πρόσπτωσης να είναι σχετικά κοντά στις  $90^\circ$  (grazing incidence).

Κατά την γεωμετρική θεωρία περίθλασης, το περιθλώμενο Η/Μ πεδίο προκύπτει συναρτήσεως του προσπίπτοντος Η/Μ πεδίου μέσω κατάλληλου για την εκάστοτε γεωμετρία (κορυφή, ακμή, επιφάνεια) τανυστικού συντελεστή περίθλασης  $\bar{D}$ . Έτσι, η σχέση για το περιθλώμενο Η/Μ πεδίο είναι :

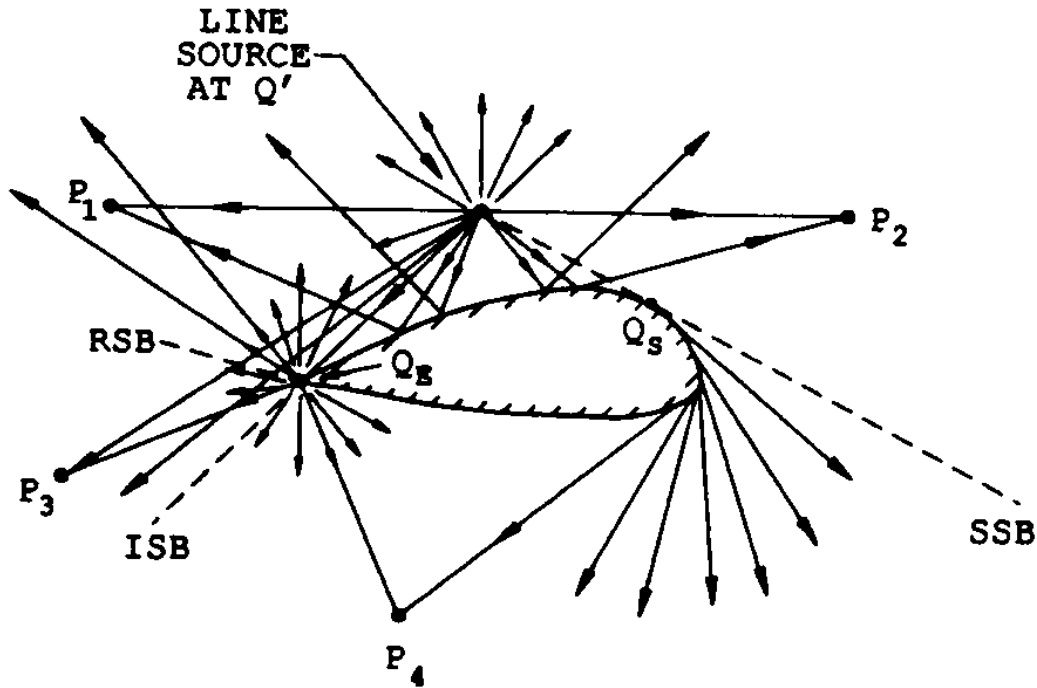
$$\vec{E}^d(s) = \vec{E}^i(Q_D) \cdot \bar{D} \sqrt{\frac{\rho_C}{s(\rho_C + s)}} e^{-j\beta s} \quad (3.15)$$

Για τη μαγνητική συνιστώσα του περιθλώμενου H/M πεδίου ισχύει

$$\vec{H}^d(s) = \frac{1}{Z} \hat{s} \times \vec{E}^d(s) \quad (3.16)$$

Οι γεωμετρίες για τις οποίες υπάρχουν λύσεις για τους συντελεστές περίθλασης ονομάζονται κανονικές (canonical).

Για να γίνει κατανοητή η θεωρία της γεωμετρικής θεωρίας περίθλασης, στο σχήμα 3.8 δίδεται το ίδιο παράδειγμα ευθύγραμμης πηγής πάνω από τελείως αγωγίμο αντικείμενο που δόθηκε και ως παράδειγμα εφαρμογής της γεωμετρικής οπτικής.



Σχήμα 3.8 : Ευθύγραμμη πηγή πάνω από τελείως αγωγίμο αντικείμενο, αντιμετώπιση από την GTD.

Κατά τη γεωμετρική θεωρία περίθλασης σε αντίθεση με τη γεωμετρική οπτική και σύμφωνα με πειραματικές μετρήσεις υφίσταται H/M πεδίο μέσα στην οριζόμενη από τη γεωμετρική οπτική περιοχή σκιάς. Οι απευθείας / προσπίπτουσες ακτίνες που ακολουθούν τη διεύθυνση της ευθείας του ορίου ISB περιθλώνται και διαδίδονται εξίσου προς όλες τις κατευθύνσεις. Οι απευθείας / προσπίπτουσες ακτίνες που ακολουθούν τη διεύθυνση της ευθείας του ορίου SSB, περιθλώνται και εισέρχονται με σταδιακά μειούμενο μέγεθος στην περιοχή σκιάς.

Το φαινόμενο της περίθλασης το εκμεταλλεύεται η σχεδίαση stealth κατασκευών, όπου αυτό που επιζητείται είναι η όσο το δυνατό ευρύτερη σκέδαση του προσπίπτοντος H/M κύματος του radar από το στόχο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα όπου φαίνεται η ιδιότητα αυτή είναι το βομβαρδιστικό αεροσκάφος F-117 (stealth) που απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα 3.9.



Σχήμα 3.9 : Βομβαρδιστικό αεροσκάφος F-117 (stealth) , φαίνονται τα έντονα κοψίματα που έχει.

### 3.2.3.2 Περίθλαση από ευθεία ακμή

Η θεωρία της περίθλασης από ακμές χρησιμοποιείται για να υπολογισθεί το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από περίθλαση σε ακμή μιας κατασκευής. Έτσι, η σχέση για το περιθλώμενο ηλεκτρικό πεδίο είναι

$$\vec{E}^d(s) = \vec{E}^i(Q_D) \cdot \bar{D} \sqrt{\frac{\rho_C}{s(\rho_C + s)}} e^{-j\beta s} \quad (3.17)$$

ενώ για το μαγνητικό περιθλώμενο πεδίο ισχύει

$$\vec{H}^d(s) = \frac{1}{Z} \hat{s} \times \vec{E}^d(s) \quad (3.18)$$

όπου  $\vec{E}^i(Q_D)$  το προσπίπτον Η/Μ πεδίο στο σημείο της ακμής όπου λαμβάνει χώρα η περίθλαση και  $\bar{D}$  τανυστικός συντελεστής που δίνεται από τη σχέση

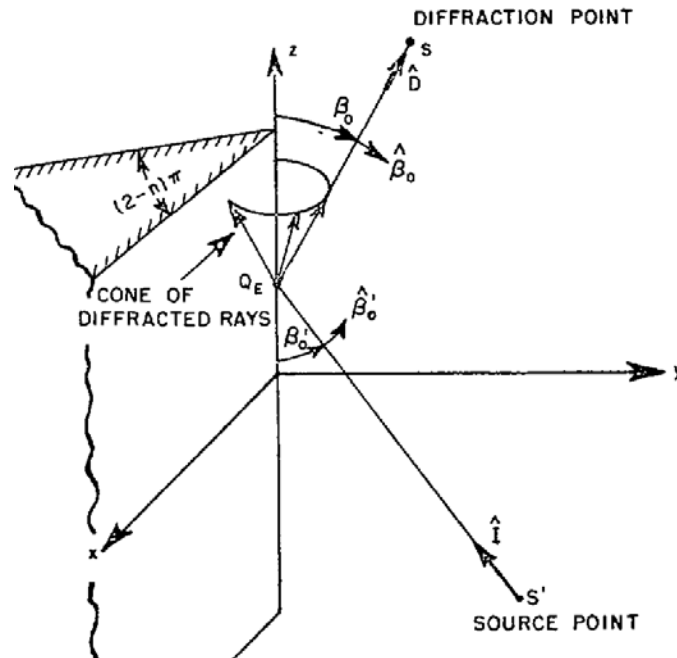
$$\tilde{\bar{D}} = \hat{\beta}_0' \hat{\beta}_0 D_s - \hat{\phi}' \hat{\phi} D_h \quad (3.19)$$



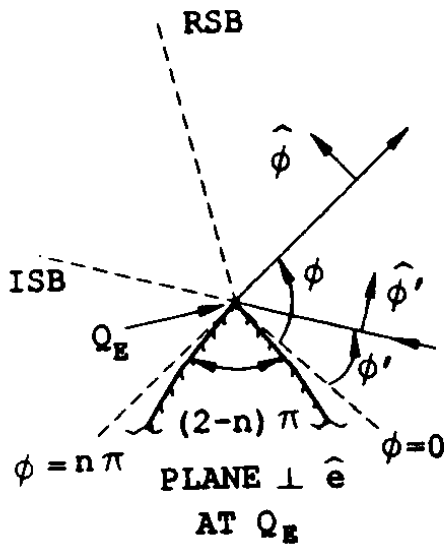
όπου  $D_s$  και  $D_h$  είναι οι δύο συντελεστές περίθλασης (soft και hard). Ο συντελεστής  $D_h$  εφαρμόζεται στο διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου που είναι κάθετο στο επίπεδο πρόσπτωσης, ενώ ο συντελεστής  $D_s$  εφαρμόζεται στο διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου που είναι παράλληλο στο επίπεδο πρόσπτωσης. Σε μορφή πινάκων τα πεδία λόγω περίθλασης δίνονται από τη σχέση

$$\begin{pmatrix} E_\beta^d \\ E_\phi^d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -D_s & 0 \\ 0 & -D_h \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_\beta^i(Q_e) \\ E_\phi^i(Q_e) \end{pmatrix} \quad (3.20)$$

όπου  $Q_e$  είναι το σημείο πάνω στην ακμή όπου παρατηρείται η περίθλαση. Παράδειγμα περίθλασης επί ακμής φαίνεται στα παρακάτω σχήματα 3.10 και 3.11 σε τρισδιάστατη και δίσδιαστατη μορφή, όπου και επεξηγούνται οι διευθύνσεις των διανυσμάτων των σχέσεων (3.19) και (3.20)

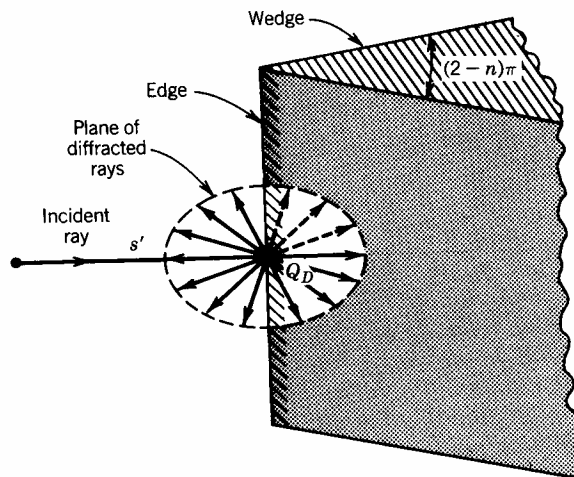


Σχήμα 3.10: Περίθλαση επί ακμής σε μια σφήνα σε τρισδιάστατη μορφή. [20]



Σχήμα 3.11 : Περίθλαση επί ακμής σε μια σφήνα σε δυσδιάστατη μορφή. [20]

Από τα σχήματα (3.10) και (3.11) γίνεται φανερός ο μηχανισμός της περίθλασης επί ακμής ο οποίος έχει ως αποτέλεσμα το διασκορπισμό της προσπίπτουσας H/M ενέργειας κατά περιθλώμενες ακτίνες που σχηματίζουν κώνο γωνίας ίσης με την προσπίπτουσα γωνία. Όταν δε η προσπίπτουσα γωνία είναι ίση με  $90^\circ$  τότε ο κώνος εκφυλίζεται σε δίσκο όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 3.12 .



Σχήμα 3.12 : Η προσπίπτουσα γωνία είναι ίση με  $90^\circ$  και έτσι ο κώνος εκφυλίζεται σε δίσκο. [7]

Οι τρισδιάστατοι συντελεστές περίθλασης  $D_s$  και  $D_h$  (soft και hard) δίνονται από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} D_s &= D_1 + D_2 - (D_3 + D_4) \\ D_h &= D_1 + D_2 + D_3 + D_4 \end{aligned} \quad (3.21)$$

όπου:

$$D_1 = \frac{-e^{-j\pi/4}}{2\nu\sqrt{2\pi k} \sin \beta} \cot \left[ \frac{\pi + (\phi - \phi')}{2n} \right] F[kL^i a^+(\phi - \phi')] \quad (3.22)$$

$$D_1 = \frac{-e^{-j\pi/4}}{2\nu\sqrt{2\pi k} \sin \beta} \cot \left[ \frac{\pi - (\phi - \phi')}{2n} \right] F[kL^i a^-(\phi - \phi')] \quad (3.23)$$

$$D_1 = \frac{-e^{-j\pi/4}}{2\nu\sqrt{2\pi k} \sin \beta} \cot \left[ \frac{\pi + (\phi - \phi')}{2n} \right] F[kL^m a^+(\phi - \phi')] \quad (3.24)$$

$$D_1 = \frac{-e^{-j\pi/4}}{2\nu\sqrt{2\pi k} \sin \beta} \cot \left[ \frac{\pi - (\phi - \phi')}{2n} \right] F[kL^{ro} a^-(\phi - \phi')] \quad (3.25)$$

όπου

F είναι μια συνάρτηση μεταφοράς

$L^i$  είναι η παράμετρος της απόστασης που συσχετίζεται με την περιοχή της σκίασης

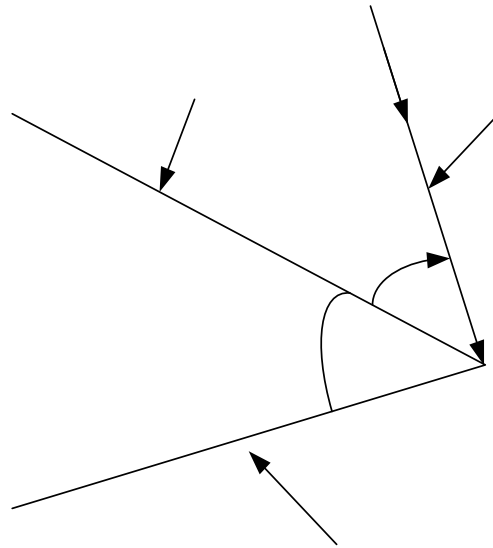
$L^m$  είναι η παράμετρος της απόστασης που σχετίζεται με την ανάκλαση κατά τη διεύθυνση  $\vec{n}$

$L^{ro}$  είναι η παράμετρος της απόστασης που σχετίζεται με την ανάκλαση κατά τη διεύθυνση  $\vec{o}$

$a^+$  είναι συνάρτηση που σχετίζεται με τη διεύθυνση  $\vec{n}$

$a^-$  συνάρτηση που σχετίζεται με τη διεύθυνση  $\vec{o}$

Οι διευθύνσεις  $\vec{n}$  και  $\vec{o}$  σχηματίζουν τις δύο πλευρές της σφήνας στις οποίες παρατηρείται περίθλαση. Ο προσδιορισμός για το ποια πλευρά χαρακτηρίζεται ως  $\vec{n}$  και ποια ως  $\vec{o}$  είναι αυθαίρετη. Ωστόσο, η συνήθης σύμβαση είναι όλες οι εξωτερικές γωνίες να μετρώνται με βάση τη διεύθυνση  $\vec{o}$ , όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.13.



Σχήμα 3.13: Οι διευθύνσεις  $\vec{o}$  και  $\vec{n}$  σε μια σφήνα.

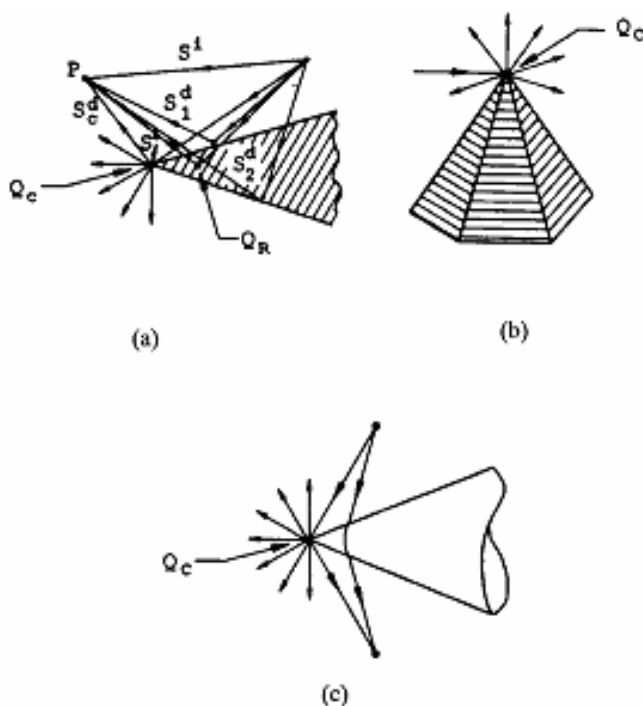
### 3.2.3.3 Περίθλαση από κορυφή

Στην προηγούμενη ενότητα, η περίθλαση αφορούσε ένα οποιοδήποτε σημείο πάνω στην ακμή, εκτός από την κορυφή στην οποία ενώνονται δύο ακμές. Η σχέση για το περιθλώμενο Η/Μ πεδίο προερχόμενο από κορυφή είναι

$$\begin{pmatrix} E_{\beta}^c \\ E_{\phi}^c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I & Z \\ M & Y \end{pmatrix} \frac{\sqrt{\sin(\beta_c)\sin(\beta)}}{\cos\beta - \cos\beta_c} F[kL_c a(\pi + \beta - \beta_c)] \quad (3.26)$$

όπου  $Z$  και  $Y$  είναι η σύνθετη αντίσταση και η αγωγιμότητα ελευθέρου χώρου αντίστοιχα, ενώ τα  $I$  και  $M$  αναφέρονται στα ισοδύναμα ρεύματα που παράγονται λόγω περίθλασης.

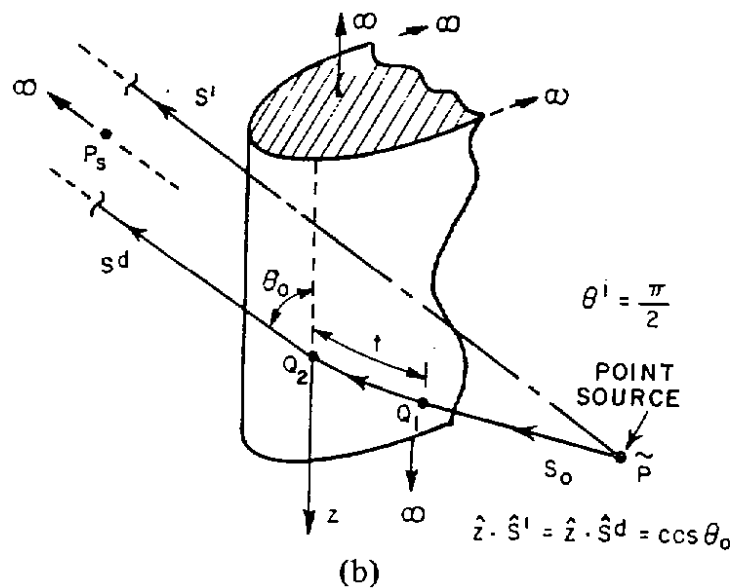
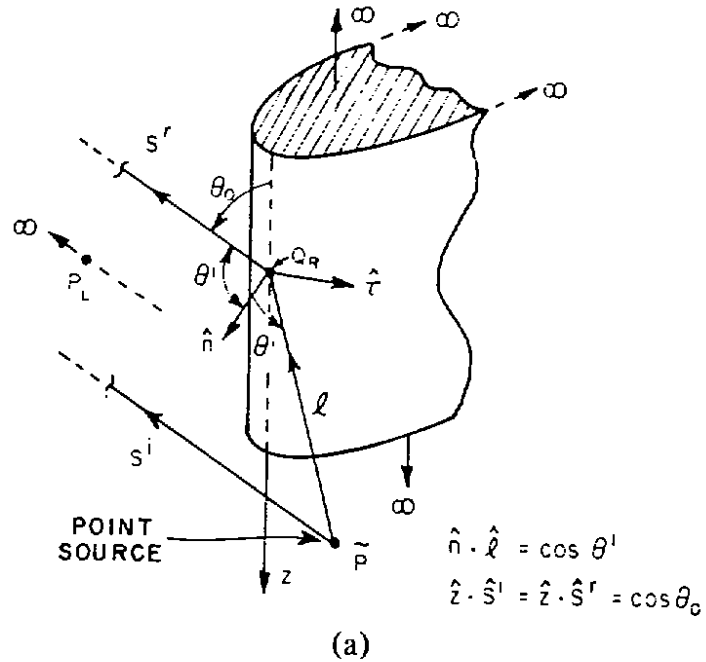
Χαρακτηριστικά παραδείγματα περίθλασης σε κορυφή είναι η περίθλαση σε κορυφή πλάκας, σε ενωμένες κορυφές πλακών αλλά και σε κορυφή κώνου όπως φαίνονται στο παρακάτω σχήμα 3.14.



Σχήμα 3.14 : Περίθλαση σε κορυφή πλάκας, σε ενωμένες κορυφές πλακών, σε κορυφή κώνου.

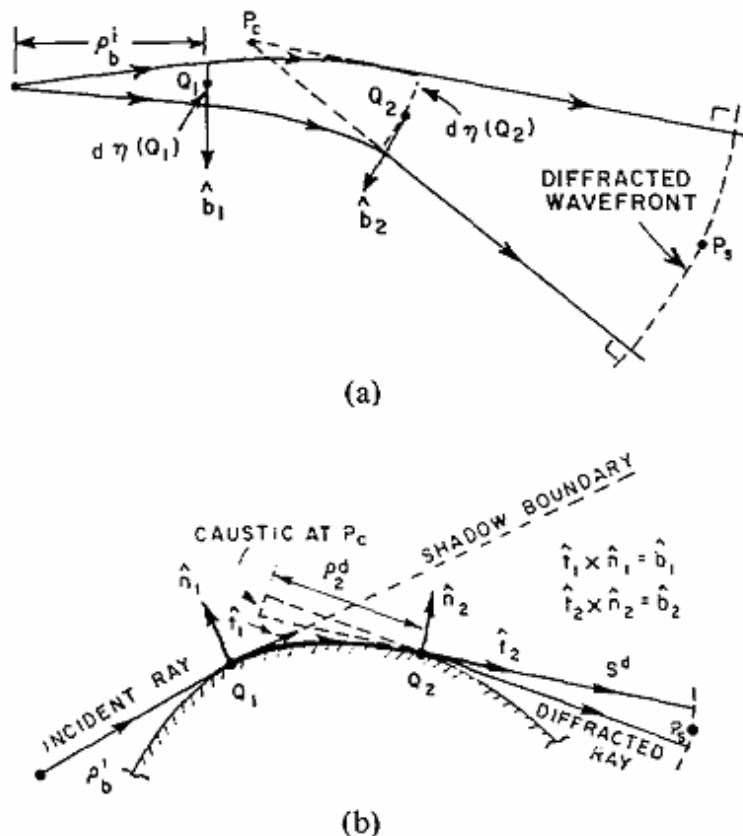
### 3.2.3.4 Περίθλαση από επιφάνεια

Το φαινόμενο της περίθλασης από επιφάνεια εμφανίζεται όταν οι διαδιδόμενες Η/Μ ακτίνες προσπίπτουν σε συγκρίσιμες με το μήκος κύματος λείες και κυρτές επιφάνειες, με τη γωνία πρόσπτωσης να είναι σχετικά κοντά στις 90° (grazing incidence). Παραδείγματα αυτού του είδους της περίθλασης φαίνονται στο παρακάτω σχήμα 3.15 .



Σχήμα 3.15 : Περίθλαση από επιφάνεια για δυο διαφορετικές γωνίες κοντινές στις 90°. [21]

Κατά την περίπτωση περίθλασης σε επιφάνεια, η προσπίπτουσα ακτίνα κινείται εφαπτομενικά πάνω στην επιφάνεια και εισέρχεται σταδιακά και μειούμενη στην περιοχή πίσω από την επιφάνεια. Ο μηχανισμός αυτός φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 3.16 .



Σχήμα 3.16 : Μηχανισμός περίθλασης σε επιφάνεια. [21]

Η σχέση για το περιθλώμενο ηλεκτρικό πεδίο είναι :

$$\vec{E}^d(s) = \vec{E}^i(Q_D) \cdot \bar{D} \frac{1}{s} \sqrt{\rho_C} e^{-j\beta s} \quad (3.27)$$

ενώ για το μαγνητικό περιθλώμενου πεδίο

$$\vec{H}^d(s) = \frac{1}{Z} \hat{s} \times \vec{E}^d(s) \quad (3.28)$$

όπου  $\vec{E}^i(Q_D)$  το προσπίπτον H/M πεδίο στο σημείο της επιφάνειας όπου λαμβάνει χώρα η περίθλαση και ο τανυστικός συντελεστής  $\bar{D}$  δίνεται και πάλι από τη σχέση (3.19), δηλαδή

$$\tilde{D} = \hat{\beta}_0' \hat{\beta}_0 D_s - \hat{\phi}' \hat{\phi} D_h$$

Σε μορφή πινάκων τα πεδία λόγω περίθλασης δίνονται κατά παρόμοιο τρόπο από τη σχέση:

$$\begin{pmatrix} E_{\beta}^d \\ E_{\phi}^d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -D_s & 0 \\ 0 & -D_h \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{\beta}^i(Q_e) \\ E_{\phi}^i(Q_e) \end{pmatrix} \quad (3.29)$$

όπου  $Q_e$  είναι το σημείο πάνω στην επιφάνεια όπου παρατηρείται η περίθλαση.

Οι τριδιάστατοι συντελεστές περίθλασης  $D_s$  και  $D_h$  (soft και hard) και στην περίπτωση περίθλασης από επιφάνεια δίνονται από τις σχέσεις (3.21) , (3.22) , (3.23), (3.24) , (3.25).

### 3.2.4 *Ενιαία Θεωρία Περίθλασης (UTD)*

Η GTD εμφανίζει υπολογιστικά προβλήματα σε μια γωνιακή περιοχή περί τα όρια (ISB, SSB, RSB) της οριζόμενης από την GO περιοχής σκιάς. Η γωνιακή αυτή περιοχή, της οποίας το εύρος της καθορίζεται κατά αντίστροφο τρόπο από τη συχνότητα, ονομάζεται περιοχή μετάβασης. Η UTD αποτελεί βελτίωση της GTD καθώς διορθώνει τη GTD στη συγκεκριμένη περιοχή μετάβασης. Ενδεικτικά μπορεί να γραφεί

$$UTD = GTD + \text{ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΣΤΑ ΟΡΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΣΚΙΑΣ ΤΗΣ GO}$$

### 3.3 NEC - BSC 2.2.18

Ένας από τους υπολογιστικούς κώδικες που χρησιμοποιείται για προβλήματα υψηλών συχνοτήτων κεραιών παρουσία πολύπλοκων δομών και εφαρμόζει την ενιαία θεωρία περιθλάσεως (UTD) είναι ο αριθμητικός ηλεκτρομαγνητικός κώδικας – βασικός κώδικας σκέδασης (Numerical Electromagnetic Code – Basic Scattering Code) [25], [26], ο οποίος αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο του Ohio των ΗΠΑ και χρηματοδοτήθηκε από το Αμερικανικό Ναυτικό.

Το NEC-BSC 2.2.18 χρησιμοποιεί μια τεχνική γνωστή από τη σχεδίαση γραφικών στους Η/Υ, την τεχνική ray tracing [7]. Η ray tracing εφαρμόζεται για την εύρεση όλων των διαδρομών που διανύουν οι Η/Μ ακτίνες ξεκινώντας από ένα σημείο (πομπό) και καταλήγοντας σε ένα άλλο σημείο (δέκτη), λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρία του περιβάλλοντος χώρου και τους μηχανισμούς διάδοσης που αναπτύσσονται σε αυτόν.

Σε ό,τι αφορά το πεδίο των εφαρμογών του, το NEC-BSC 2.2.18 έχει τη δυνατότητα υπολογισμού μακρινού και κοντινού πεδίου (Far and Near Field Calculations) προς εύρεση αντιστοιχών διαγραμμάτων ακτινοβολίας, συζεύξεων (couplings) μεταξύ κεραιών και ενδεχόμενων κινδύνων ακτινοβολίας (Radiation Hazards) στον περιβάλλοντα χώρο της εκάστοτε κατασκευής. Οι διαφορές προς προσομοίωση κατασκευές, μοντελοποιούνται με χρήση κατάλληλου συνδυασμού επίπεδων πλακών και πεπερασμένων τελείως αγωγίμων ελλειπτικών κυλίνδρων. Οι πλάκες μπορεί να είναι τελείως αγωγίμες αλλά και καθορισμένων από το χρήστη ηλεκτρομαγνητικών ιδιοτήτων με σχετικά μικρό πάχος στην περίπτωση αυτή. Δυο ή και περισσότερες πλάκες διαφορετικών ιδιοτήτων μπορούν να συνδυασθούν και να σχηματίσουν διηλεκτρικό στρώμα, προσομοιώνοντας έτσι υλικά μέσα που δεν έχουν σταθερές ιδιότητες σε όλο τον όγκο τους.

Καθότι ενσωματώνει τη UTD, χαρακτηρίζεται από ένα σημαντικό περιορισμό. Οι διαστάσεις των παραμέτρων του προβλήματος, όπως οι διαστάσεις των πλακών και των κυλίνδρων, οι αποστάσεις μεταξύ τους αλλά και οι αποστάσεις των κεραιών από την υπόλοιπη κατασκευή δεν πρέπει να είναι κάτω από ένα περίπου μήκος κύματος  $\lambda$  και για τους σκοπούς του μηχανικού το πολύ μέχρι  $\lambda/4$ . Για τυπικές ηλεκτρικές διαστάσεις κατασκευών ο NEC-BSC κώδικας είναι κατάλληλος για συχνότητες VHF και πάνω.

Ο NEC - BSC 2.2.18 κώδικας παρέχει τα εξής :

- 1) Τη δυνατότητα μελέτης προβλημάτων σκέδασης για οποιαδήποτε κατασκευή μοντελοποιημένη με χρήση κατάλληλου συνδυασμού επίπεδων πλακών και πεπερασμένων τελείως αγωγίμων ελλειπτικών κυλίνδρων.
- 2) Τη δυνατότητα εγκατάστασης κεραιών (πομπών και δεκτών) ακριβώς επάνω σε πλάκες (mounted on antennas).
- 3) Τη δυνατότητα μελέτης κατασκευών πάνω από επίπεδη γη καθοριζόμενων από τον χρήστη ιδιοτήτων.
- 4) Τη δυνατότητα οι κεραιές να είναι στάσιμες ή κινητές, γεγονός που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την εύρεση της βέλτιστης θέσης κατά τη μελέτη σύζευξης κεραιών.

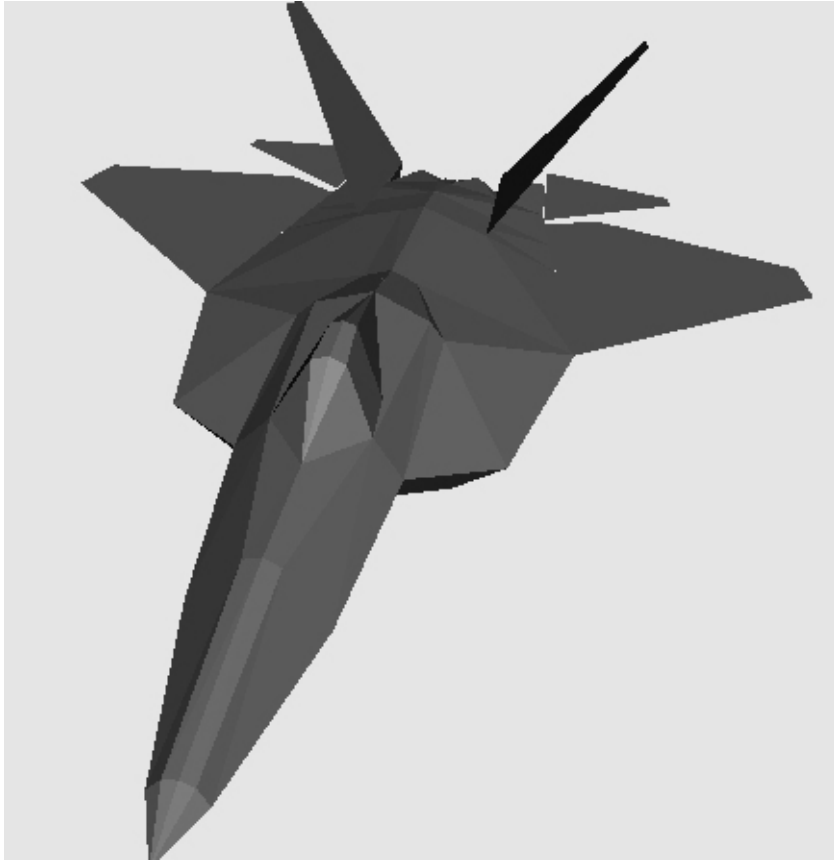


- 5) Πέραν των έτοιμων τύπων κεραιών που ενσωματώνει, δέχεται την εισαγωγή οποιασδήποτε κεραίας μέσω της περιγραφής της κατά τμήματα. Αυτό καθιστά το NEC-BSC 2.2.18 εύκολα συμβατό με προγράμματα όπως το NEC2 ή το NEC4 που χρησιμοποιούν τη MoM και προσομοιώνουν ιδανικά κεραίες σε περιβάλλον ελεύθερου χώρου.
- 6) Τη μελέτη του εκάστοτε προβλήματος σε μία η και περισσότερες συχνότητες.

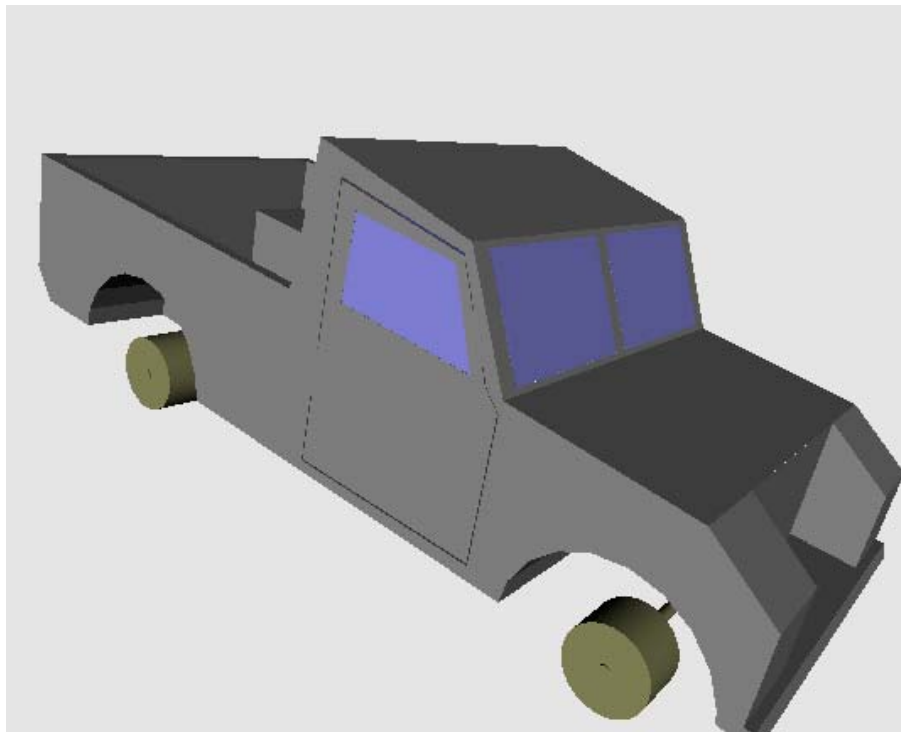
Για την επίλυση ενός προβλήματος από το NEC-BSC 2.2.18 ακολουθούνται συνοπτικά τα παρακάτω τέσσερα βήματα :

- 1) Μοντελοποίηση της κατασκευής με χρήση κατάλληλου συνδυασμού επίπεδων πλακών και πεπερασμένων τελείως αγωγίμων ελλειπτικών κυλίνδρων, διαστάσεων μεγαλύτερων  $\lambda/4$  και εισαγωγή των κεραιών του προβλήματος.
- 2) Εφαρμογή της τεχνικής ray tracing προς εύρεση όλων των διαδρομών που διανύουν οι H/M ακτίνες ξεκινώντας από την κεραία πομπό και καταλήγοντας στα σημεία όπου θα βρίσκεται η κεραία δέκτης ή οι κεραίες δέκτες, λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρία του περιβάλλοντος χώρου και τους μηχανισμούς διάδοσης που αναπτύσσονται σε αυτόν.
- 3) Υπολογισμός κατά αθροιστικό τρόπο του συνολικού H/M πεδίου που υφίσταται στις θέσεις ενδιαφέροντος με βάση τις προϋπολογισθείσες διαδρομές και κάνοντας χρήση των συντελεστών ανάκλασης, διάθλασης και περίθλασης και του H/M πεδίου που θα προέκυπτε αν η κεραία βρισκόταν σε περιβάλλον ελεύθερου χώρου.
- 4) Περαιτέρω επεξεργασία των τιμών του H/M πεδίου που προκύπτουν από την παραπάνω διαδικασία, προκειμένου να βρεθούν τα χαρακτηριστικά κοντινού και μακρινού πεδίου.

Στα παρακάτω σχήματα 3.17, 3.18 , παρατίθενται προς εξοικείωση του αναγνώστη παραδείγματα μοντέλων που σχηματίστηκαν για το NEC-BSC 2.2.18 με χρήση πλακών και κυλίνδρων, όπως το μοντέλο του πολεμικού αεροπλάνου F-22 και ενός πολιτικού οχήματος (JEEP).



Σχήμα 3.17 : Μοντέλο με χρήση πλακών Πολεμικού αεροπλάνου F-22.



Σχήμα 3.18 : Μοντέλο με χρήση πλακών και κυλίνδρων πολιτικού οχήματος (JEEP).

Συνοψίζοντας, με δεδομένη την ύπαρξη του κατασκευαστικού σχεδίου, ο NEC-BSC 2.2.18 κώδικας δύναται να χρησιμοποιηθεί στο αρχικό στάδιο της σχεδίασης και ανάπτυξης αλλά και στο στάδιο επαλήθευσης και πιστοποίησης, ως ένα εργαλείο ικανοποιητικής ακρίβειας και σχετικά ανεκτής απαίτησης υπολογιστικού χρόνου και μνήμης.

Η χρήση του συνίσταται στην ανάλυση και μελέτη προβλημάτων ποικίλων τύπων κεραιών εγκαταστημένων σε διάφορες υπερκατασκευές όπως αεροπλάνα, πλοία, ελικόπτερα, οχήματα, δορυφόροι και διαστημικές εγκαταστάσεις, συμβατικού και στρατιωτικού χαρακτήρα που για τις τυπικές ηλεκτρικές διαστάσεις των άνω κατασκευών ισοδυναμεί με καταλληλότητα από VHF και άνω κατά περίπτωση.

Ειδικότερα, στις τρέχουσες εκδόσεις του κώδικα (έκδοση 4 και άνω), ενσωματώνεται η δυνατότητα μοντελοποίησης των κατασκευών όχι μόνο με πλάκες και ελλειπτικούς κυλίνδρους αλλά και με κώνους, σφαίρες, σύνθετους κυλίνδρους και σφαιροειδή. Αυτό δίνει τη δυνατότητα καλύτερης μοντελοποίησης της κατασκευής αλλά και μείωσης της απαιτούμενης υπολογιστικής ισχύος. Ακόμα, ένα σημαντικό στοιχείο είναι ότι έχουν γίνει επιτυχείς προσπάθειες για τον παραλληλισμό του κώδικα, γεγονός που του προσδίδει μεγαλύτερες δυνατότητες.

### 3.4 Υβριδική μέθοδος MoM/UTD

Η υβριδική MoM/UTD τεχνική που χρησιμοποιείται ευρέως σε υπολογιστικούς κώδικες παρουσιάζεται συντόμως στη συνέχεια [22].

Η σχέση που πρέπει να επιλυθεί χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των ροπών είναι η ακόλουθη

$$L(J) = E \quad (3.29)$$

όπου  $L$  γραμμικός τελεστής. Ο γραμμικός τελεστής που χρησιμοποιείται επί παραδείγματι στο NEC2 είναι της σχέσης του Rocklington, η οποία συνδέει το παρατηρούμενο σκεδάζομενο ή ακτινοβολών ηλεκτρομαγνητικό πεδίο με την πυκνότητα επιφανειακού ρεύματος. Στη μέθοδο των ροπών, η πυκνότητα του επιφανειακού ρεύματος  $J$  στη διάταξη που μας ενδιαφέρει αναπτύσσεται σε σειρά με τη βοήθεια των συναρτήσεων βάσης  $J_1, J_2, J_3, \dots$ , όπως

$$J = \sum_{n=1}^N a_n J_n \quad (3.30)$$

όπου  $N$  είναι ο αριθμός των συναρτήσεων βάσης που χρησιμοποιούνται για να αναπαραστήσουν την πυκνότητα επιφανειακού ρεύματος και  $a_n$  άγνωστοι μιγαδικοί συντελεστές. Χρησιμοποιώντας μια σειρά συναρτήσεων βάρος,  $W_1, W_2, W_3, \dots$ , η σχέση (3.29) μετατρέπεται στην ακόλουθη

$$\sum_{n=1}^N a_n \langle W_m, L(J_n) \rangle = \langle W_m, E_m^i \rangle \quad (3.31)$$

όπου  $E_m^i$  παριστά το παραγόμενο ηλεκτρικό πεδίο. Η συνάρτηση βάρος που χρησιμοποιεί το NEC2 είναι η συνάρτηση δέλτα.

Η σχέση (3.31) αποτελεί μια μόνο γραμμή στον πίνακα της μεθόδου των ροπών. Η σχέση συνδέει όλα τα παραγόμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία λόγω των πηγών του ρεύματος με το  $m$ -στο σημείο παρατήρησης στο χώρο. Για  $m=1,2,\dots,M$  σημεία παρατήρησης η σχέση (3.31) μπορεί να εκφρασθεί υπό τη μορφή

$$[Z_{mm}][a_n] = [V_m] \quad (3.32)$$

όπου

$$Z_{mn} = \langle W_m, L(J_n) \rangle \quad (3.33)$$

Το εσωτερικό γινόμενο ορίζεται έτσι ώστε να ισχύουν οι ακόλουθες ιδιότητες:

$$\langle (aJ_1 + bJ_2), E \rangle = a\langle J_1, E \rangle + b\langle J_2, E \rangle \quad (3.34)$$

όπου  $a, \beta$  σταθερές.

$$\langle J, E \rangle = \langle E, J \rangle \quad (3.35)$$

$$\langle J^*, J \rangle > 0 \quad \text{αλλά} \quad \langle J^*, J \rangle = 0 \quad \text{αν } J=0 \quad (3.36)$$

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (3.34) και (3.35) μπορεί να δειχθεί ότι

$$\langle J, (aE_1 + bE_2) \rangle = a\langle J, E_1 \rangle + b\langle J, E_2 \rangle \quad (3.37)$$

όπου  $a$  και  $b$  είναι μιγαδικοί συντελεστές.

Τα στοιχεία του πίνακα αλληλεπίδρασης προκύπτουν από τη σχέση

$$Z'_{mn} = \langle W_m, [L(J_n)] + bL[J_n] \rangle \quad (3.38)$$

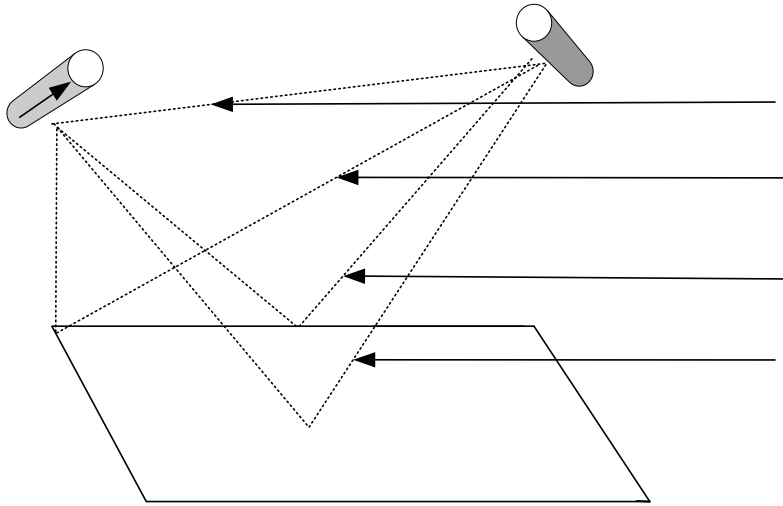
όπου  $L(J_n)$  είναι ο κλασικός υπολογισμός που γίνεται στον υπολογισμό της μεθόδου των ροπών και  $bL(J_n)$  πρόσθετη συνεισφορά στο H/M πεδίο στο συγκεκριμένο σημείο παρατήρησης, η οποία οφείλεται στην επιφανειακή πυκνότητα ρεύματος  $J_n$  και στην αλληλεπίδραση του H/M πεδίου με κάποιο εμπόδιο που περιγράφεται από τη θεωρία UTD. Η σχέση (3.38) με τη βοήθεια της σχέσης (3.37) έρχεται στη μορφή

$$Z'_{mn} = \langle W_m, [L(J_n)] \rangle + \langle W_m, bL[J_n] \rangle \quad (3.39)$$

ή

$$Z'_{mn} = Z_{mn} + Z_{mn}^{UTD} \quad (3.40)$$

Προκύπτει, λοιπόν, το συμπέρασμα ότι τα στοιχεία του πίνακα της μεθόδου των ροπών προστίθενται με αυτά που προκύπτουν από τα επιπρόσθετα H/M πεδία, τα οποία προκύπτουν από περιθλάσεις ή ανακλάσεις πάνω σε αντικείμενα που περιγράφονται με το μοντέλο UTD. Το σχήμα 3.19 δείχνει τους διαφορετικούς συντελεστές που λαμβάνονται υπόψη σε ένα μόνο στοιχείο του πίνακα επίλυσης του H/M προβλήματος. Ο όρος  $Z_{mn}$  προκύπτει από το H/M πεδίο που παρατηρείται σε δεδομένο σημείο και προέρχεται από απευθείας μετάδοση οπτικής επαφής, ενώ ο όρος  $Z_{mn}^{UTD}$  είναι το άθροισμα των κυμάτων που προέρχονται από ανάκλαση και περίθλαση λόγω ακμών και κορυφών ενός εμποδίου είτε αυτό είναι διηλεκτρική πλάκα ή κύλινδρος είτε κάποια άλλη γεωμετρική διάταξη.



Σχήμα 3.19 : Οι διαφορετικοί συντελεστές που λαμβάνονται υπόψη όταν συμπληρώνεται ο πίνακας αλληλεπιδράσεων της υβριδικής μεθόδου των MoM (UCP) [14]

$I(s)$

ΑΤ

Πηγή

Πεδίο από περ

Ε

## ***Κεφάλαιο 4***

### ***Πιστοποίηση NEC - BSC 2.2.18 , NEC2***

#### ***4.1 Εισαγωγή***

Για τις ανάγκες της εργασίας και για λόγους αξιολόγησης της αξιοπιστίας των υπολογιστικών προγραμμάτων NEC-BSC 2.2.18 (με τροποποιήσεις από το ΓΕΤΕΝ) και NEC2 που χρησιμοποιήθηκαν στο επόμενο κεφάλαιο για τα παραδείγματα εφαρμογών, κρίνεται αναγκαία η ενδεικτική πιστοποίηση τους μέσω απλών παραδειγμάτων.

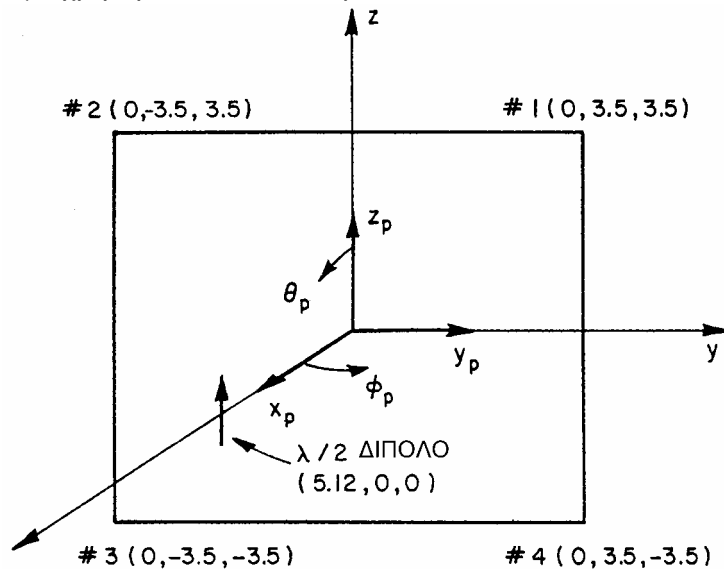
Για το μεν NEC-BSC 2.2.18 η αξιολόγηση έγινε με σύγκριση των τιμών που υπολογίσθηκαν και αντιστοίχων τιμών που προέκυψαν από μετρήσεις. Για το δε NEC2, έχοντας πλέον πιστοποιήσει το NEC-BSC 2.2.18, η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε με σύγκριση των τιμών που υπολογίσθηκαν από το NEC2 και των αντιστοίχων από το NEC-BSC 2.2.18 για την περιοχή τομής των ηλεκτρικών διαστάσεων. Πηγή των πειραματικών τιμών και των υπολογισθέντων διαγραμμάτων είναι το ΥΕΘΑ/ΓΕΤΕΝ [29].

Για κάθε παράδειγμα παρατίθενται οι γεωμετρικές διατάξεις του εκάστοτε προβλήματος που μελετάται, οι κώδικες εισόδου αν πρόκειται για το NEC-BSC 2.2.18 και τα διαγράμματα των υπολογισθέντων τιμών και των τιμών που προέκυψαν από μετρήσεις όπου αυτές ήταν διαθέσιμες. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για όλα τα παραπάνω αποτελέσματα, αναπτύχθηκε στο ΥΕΘΑ/ΓΕΤΕΝ και περιέχει τον υπολογιστικό κώδικα των NEC2 και του τροποποιημένου NEC-BSC 2.2.18 (double precision) για τους υπολογισμούς, και κατάλληλο κώδικα για τη γραφική απεικόνιση της γεωμετρίας και των διαγραμμάτων των πεδίων. Περισσότερα για αυτό το πρόγραμμα αναφέρονται στο επόμενο κεφάλαιο των εφαρμογών.

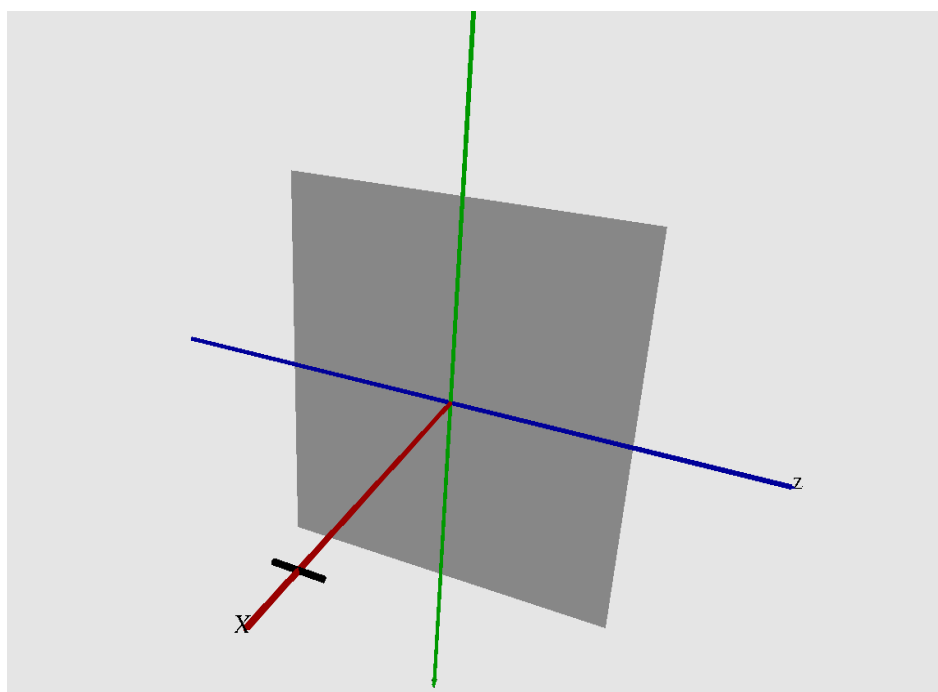
## 4.2 Πιστοποίηση NEC – BSC 2.2.18

### 4.2.1 Παράδειγμα 1

Το παράδειγμα 1 αφορά τον υπολογισμό μακρινού πεδίου (far field) ηλεκτρικού διπόλου  $\lambda/2$  για  $f = 8\text{GHz}$ , παρουσία παράλληλου τελείως αγωγίμου τετραγωνικού επιπέδου πεπερασμένων διαστάσεων. Σχηματικά η διάταξη απεικονίζεται στα παρακάτω σχήματα 4.1α και με χρήση VRML στο 4.1β.



Σχήμα 4.1α : Δίπολο  $\lambda/2$  παρουσία παράλληλου τελείως αγωγίμου τετραγωνικού επιπέδου.



Σχήμα 4.1β : Δίπολο  $\lambda/2$  παρουσία παράλληλου τελείως αγωγίμου τετραγωνικού επιπέδου με χρήση VRML.



Ο κώδικας εισόδου είναι :

**CE: FAR ZONE PLATE TEST, EXAMPLE 1A.**  
**UN: UNITS IN INCHES**  
**3**  
**FR: FREQUENCY IN GHZ.**  
**8.0**  
**PD: PATTERN CUT**  
**0.,0.,90.,0.**  
**T,90.**  
**0,360,1**  
**PG: PLATE GEOMETRY**  
**4,0**  
**0.,3.5,3.5**  
**0.,-3.5,3.5**  
**0.,-3.5,-3.5**  
**0.,3.5,-3.5**  
**SG: SOURCE GEOMETRY**  
**5.12,0.,0.**  
**0.,0.,90.,0.**  
**-2,0.5,0.**  
**L,0.**  
**XQ: EXECUTE CODE**  
**PD: PATTERN CUT**  
**0.,0.,90.,0.**  
**F,0.**  
**0,360,1**  
**XQ: EXECUTE CODE**  
**EN: END CODE**

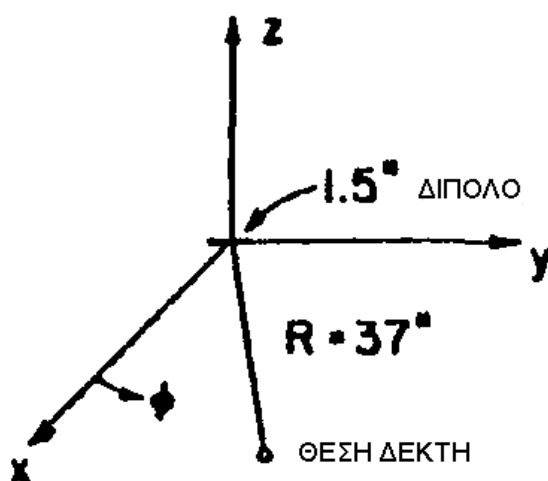
Στα παρακάτω διαγράμματα 4.1α και 4.1β απεικονίζονται το υπολογισθέν  $E\theta$  διάγραμμα σε σύγκριση με τις αντίστοιχες μετρηθείσες τιμές για κωνική τομή με  $\theta=90^\circ$  και το υπολογισθέν  $E\theta$  σε σύγκριση με τις αντίστοιχες μετρηθείσες τιμές για μεγάλο κύκλο με  $\varphi=0^\circ$ . Παρατηρείται πολύ καλή σύγκλιση των τιμών που υπολογίσθηκαν με τις αντίστοιχες τιμές από μετρήσεις.

**Διάγραμμα 4.1α : Υπολογισθέν Eθ γραμμικό διάγραμμα σε σύγκριση με μετρηθείσες τιμές για κωνική τομή με  $\theta=90^\circ$ . Προέλευση ΥΕΘΑ/ΓΕΤΕΝ [29].**

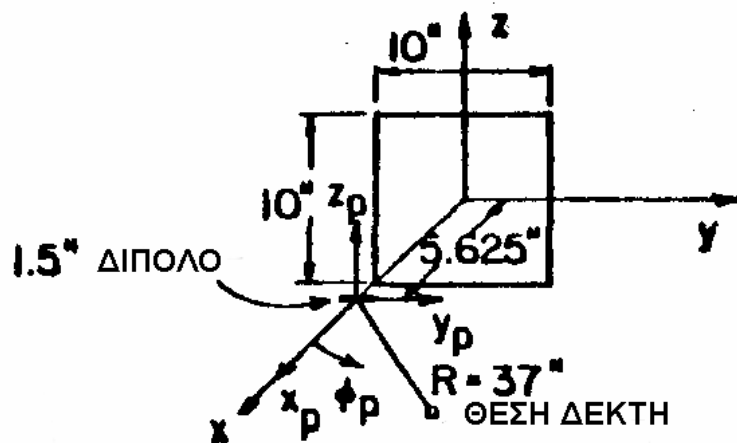
**Διάγραμμα 4.1β : Υπολογισθέν Εθ γραμμικό διάγραμμα σε σύγκριση με μετρηθείσες τιμές για μεγάλο κύκλο με  $\varphi=0^\circ$ . Προέλευση ΥΕΘΑ/ΓΕΤΕΝ [29].**

### 4.2.2 Παράδειγμα 2

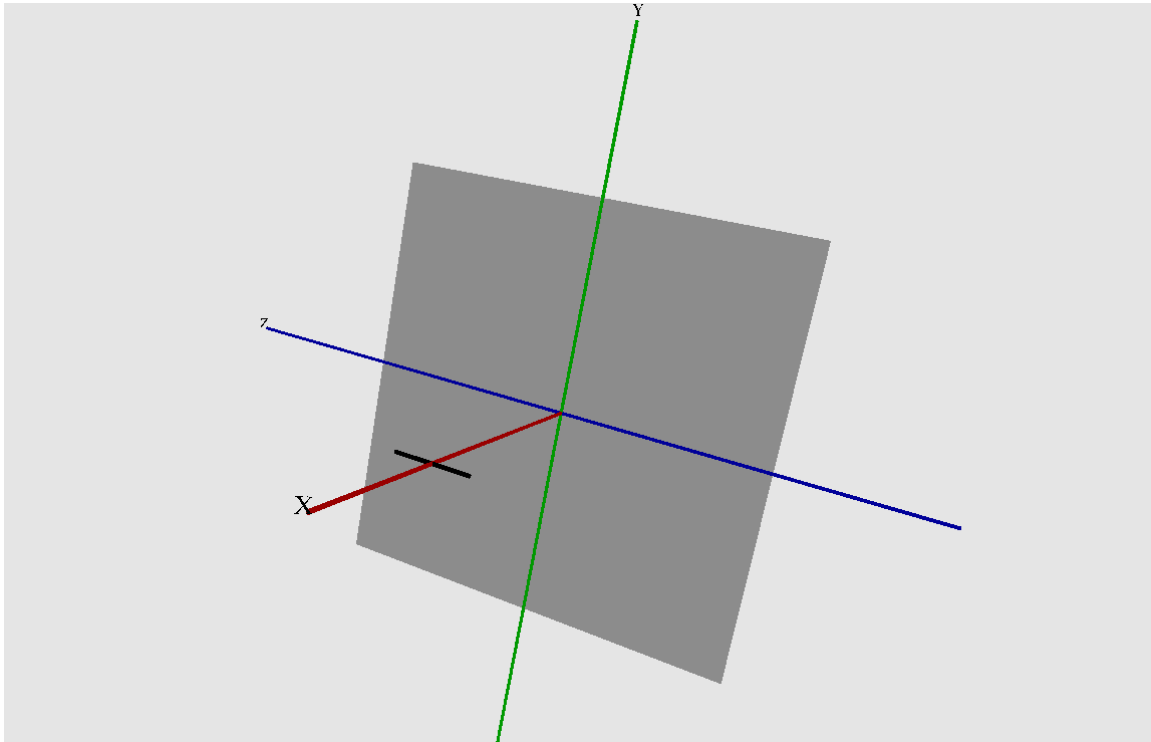
Το παράδειγμα 2 αφορά τον υπολογισμό κοντινού πεδίου (near field) ηλεκτρικού διπόλου  $\lambda/2$  για  $f = 3.985\text{GHz}$  κατά μήκος σημείων περιφέρειας κύκλου ακτίνας  $37''$  με κέντρο το κέντρο του διπόλου, σε συνθήκες ελευθέρου χώρου και παρουσία παράλληλου τελείως αγωγίμου τετραγωνικού επιπέδου πεπερασμένων διαστάσεων. Σχηματικά οι δυο διατάξεις απεικονίζονται στα παρακάτω σχήματα 4.2α και 4.2β, 4.2γ με χρήση VRML .



Σχήμα 4.2α : Διάταξη μέτρησης κοντινού πεδίου διπόλου  $\lambda/2$  για  $f = 3.985\text{GHz}$  κατά μήκος σημείων περιφέρειας κύκλου ακτίνας  $37''$ , σε συνθήκες ελευθέρου χώρου.



Σχήμα 4.2β: Διάταξη μέτρησης κοντινού πεδίου διπόλου  $\lambda/2$  για  $f = 3.985\text{GHz}$  κατά μήκος σημείων περιφέρειας κύκλου ακτίνας  $37''$ , παρουσία παράλληλου τελείως αγωγίμου τετραγωνικού επιπέδου πεπερασμένων διαστάσεων.



Σχήμα 4.2γ: Διάταξη μέτρησης κοντινού πεδίου διπόλου  $\lambda/2$  για  $f = 3.985\text{GHz}$  κατά μήκος σημείων περιφέρειας κύκλου ακτίνας  $37''$ , παρουσία παράλληλου τελείως αγωγίμου τετραγωνικού επιπέδου πεπερασμένων διαστάσεων με χρήση VRML.

Ο κώδικας εισόδου είναι :

```

CM: EXAMPLE 2.
CE: NEAR ZONE PLATE TEST
UN:
3
US:
3
FR:
3.985
SG:
5.625,0.,0.
90.,90.,0.,0.
-2,1.5,0.
L,0.
PN:
5.625,0.,0.
0.,0.,90.,0.
F
37.,90.,0.
0.,0.,1.
361
XQ: EXECUTE CODE
PG:
4,0
0.,5.,5.

```

0.,-5.,5.

0.,-5.,-5.

0.,5.,-5.

**XQ: EXECUTE CODE**

**EN: END CODE**

Στα παρακάτω γραμμικά διαγράμματα 4.2α και 4.2β απεικονίζονται το υπολογισθέν Εφ διάγραμμα σε σύγκριση με τις αντίστοιχες μετρηθείσες τιμές για το δίπολο σε συνθήκες ελευθέρου χώρου και το υπολογισθέν Εφ σε σύγκριση με τις αντίστοιχες μετρηθείσες τιμές για το δίπολο παρουσία παράλληλου τελείως αγωγίμου τετραγωνικού επιπέδου πεπερασμένων διαστάσεων. Παρατηρείται πολύ καλή σύγκλιση των τιμών που υπολογίσθηκαν με τις αντίστοιχες τιμές από μετρήσεις.

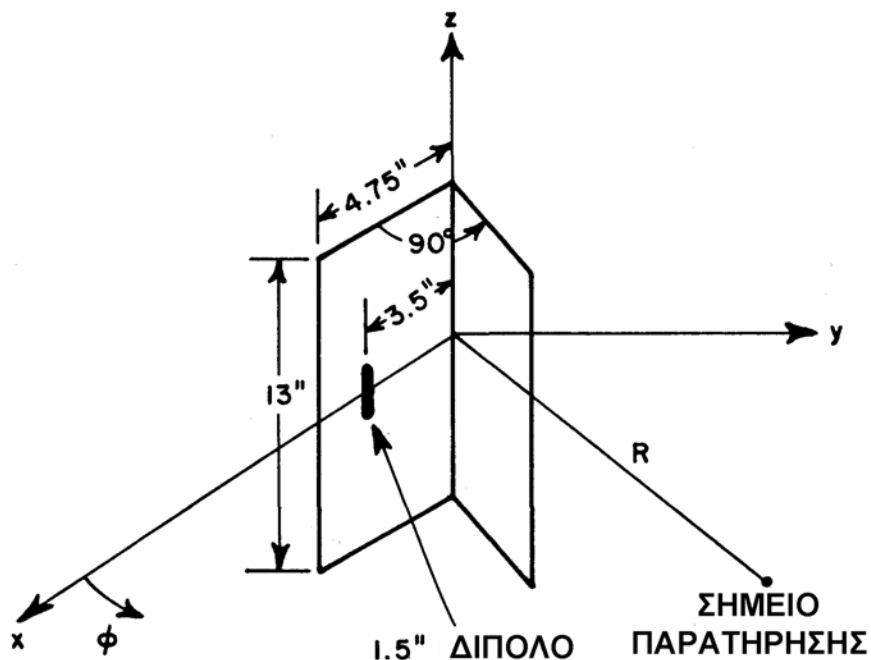
**Διάγραμμα 4.2α : Υπολογισθέν Εφ γραμμικό διάγραμμα σε σύγκριση με μετρηθείσες τιμές για το δίπολο σε συνθήκες ελευθέρου χώρου.  
Προέλευση ΥΕΘΑ/ΓΕΤΕΝ [29].**

**Διάγραμμα 4.2β : Υπολογισθέν Εφ γραμμικό διάγραμμα σε σύγκριση με μετρηθείσες τιμές για το δίπολο παρουσία παράλληλου τελείως αγωγίμου τετραγωνικού επιπέδου πεπερασμένων διαστάσεων. Προέλευση ΥΕΘΑ/ΓΕΤΕΝ [29].**



### 4.2.3 Παράδειγμα 3

Το παράδειγμα 3 αφορά τον υπολογισμό κοντινού πεδίου (near field) ηλεκτρικού διπόλου  $\lambda/2$  για  $f = 3,985$  GHz κατά μήκος σημείων περιφέρειας κύκλου ακτίνας  $36.75''$  με κέντρο το κέντρο των αξόνων, παρουσία διάταξης τελείως αγωγικών πλακών πεπερασμένων διαστάσεων. Σχηματικά η διάταξη απεικονίζεται στα παρακάτω σχήματα 4.3α και 4.3β με χρήση VRML.



Σχήμα 4.3α : Διάταξη μέτρησης κοντινού πεδίου διπόλου  $\lambda/2$  για  $f = 3.985$ GHz κατά μήκος σημείων περιφέρειας κύκλου ακτίνας  $36.75''$ , παρουσία διάταξης τελείως αγωγικών πλακών πεπερασμένων διαστάσεων.

Ο κώδικας εισόδου είναι :

```

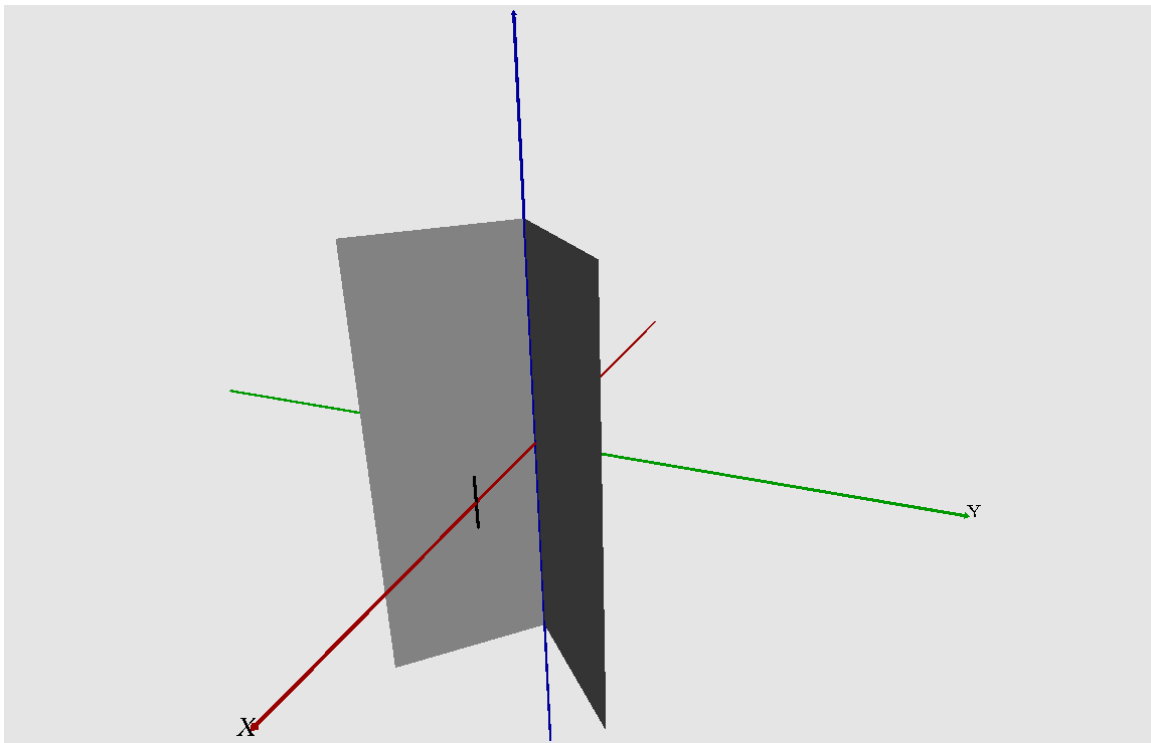
CM: EXAMPLE 3.
CE: NEAR ZONE CORNER REFLECTOR TEST
FR:
3.985
UN:
3
US:
3
SG:
3.5,0.,0.
0.,0.,90.,0.
-2,1.5,0.
1.,0.
PG:
40
0.,0.,-6.5
0.,0.,6.5

```

```

3.36,-3.36,6.5
3.36,-3.36,-6.5
PG:
4,0
0.,0.,6.5
0.,0.,-6.5
3.36,3.36,-6.5
3.36,3.36,6.5,
PN:
0.,0.,0.
0.,0.,90.,0.
F
36.75,90.,0.
0.,0.,1.
361
XQ: EXECUTE CODE
EN:

```



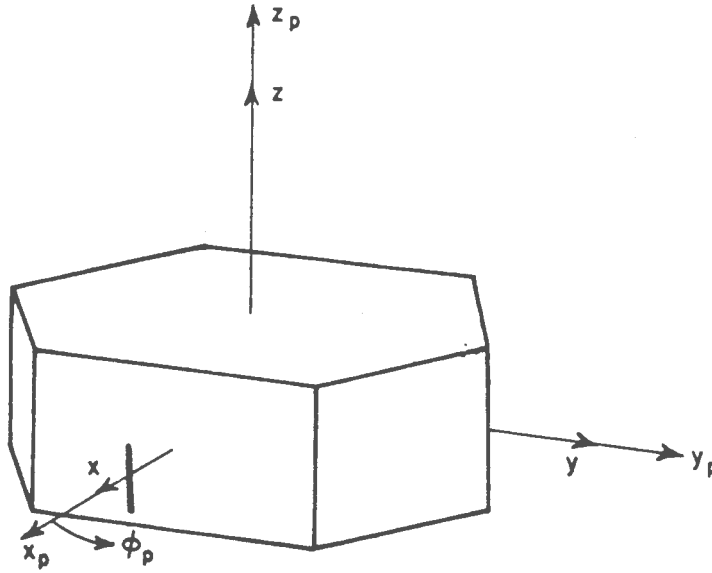
**Σχήμα 4.3β :** Διάταξη μέτρησης κοντινού πεδίου διπόλου  $\lambda/2$  για  $f = 3.985\text{GHz}$  κατά μήκος σημείων περιφέρειας κύκλου ακτίνας  $36.75''$ , παρουσία διάταξης τελείως αγωγίμων πλακών πεπερασμένων διαστάσεων με χρήση VRML.

Στο παρακάτω γραμμικό διάγραμμα 4.3 απεικονίζεται το υπολογισθέν  $E_{\theta}$  διάγραμμα σε σύγκριση με τις αντίστοιχες μετρηθείσες τιμές για το δίπολο παρουσία διάταξης τελείως αγωγίμων πλακών πεπερασμένων διαστάσεων. Παρατηρείται πολύ καλή σύγκλιση των τιμών που υπολογίσθηκαν με τις αντίστοιχες τιμές από μετρήσεις.

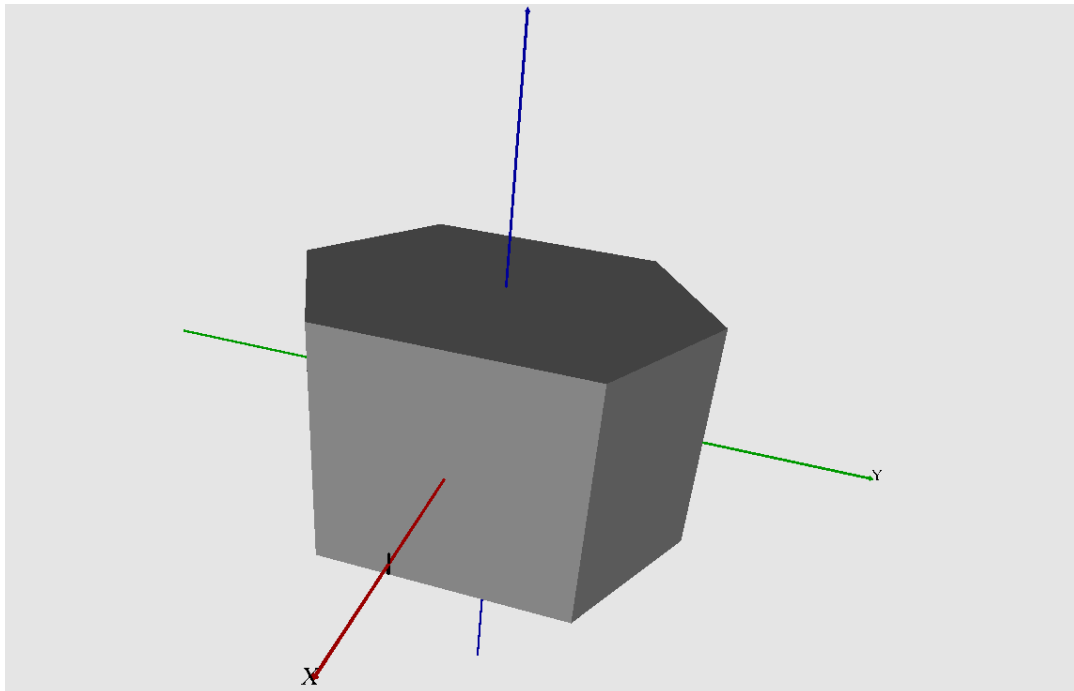
**Διάγραμμα 4.3 : Υπολογισθέν Εθ γραμμικό διάγραμμα σε σύγκριση με μετρηθείσες τιμές για το δίπολο παρουσία διάταξης τελείως αγωγίμων πλακών πεπερασμένων διαστάσεων. Προέλευση ΥΕΘΑ/ΓΕΤΕΝ [29].**

#### 4.2.4 Παράδειγμα 4

Το παράδειγμα 4 αφορά τον υπολογισμό μακρινού πεδίου (far field) ηλεκτρικού διπόλου  $\lambda/2$  για  $f = 9.94\text{GHz}$ , παρουσία τελείως αγωγίμου οκταπλεύρου. Σχηματικά η διάταξη απεικονίζεται στα παρακάτω σχήματα 4.4α και 4.4β με χρήση VRML.



Σχήμα 4.4α : Δίπολο  $\lambda/2$  για  $f = 9.94\text{GHz}$ , παρουσία τελείως αγωγίμου οκταπλεύρου.



Σχήμα 4.4β : Δίπολο  $\lambda/2$  για  $f = 9.94\text{GHz}$ , παρουσία τελείως αγωγίμου οκταπλεύρου με χρήση VRML.

Ο κώδικας εισόδου είναι :

**CE: EIGHT SIDED BOX TEST. EXAMPLE 4**

**FR:**

9,94

**PD:**

0.,0.,90.,0.

T,90.

0,360,1

**SG:**

0.212,0.,0.

0.,0.,90.,0.

-2,0.5,0.

1.,0.

**PG: FRONT**

4,0

0.122,0.1023,-0.1

0.122,0.1023,0.1

0.122,-0.1023,0.1

0.122,-0.1023,-0.1

**PG: RIGHT FRONT**

4,0

0.,0.1707,-0.1

0.,0.1707,0.1

0.122,0.1023,0.1

0.122,0.1023,-0.1

**PG: RIGHT BACK**

4,0

-0.122,0.1023,-0.1

-0.122,0.1023,0.1

0.,0.1707,0.1

0.,0.1707,-0.1

**PG: BACK**

4,0

-0.122,-0.1023,-0.1

-0.122,-0.1023,0.1

-0.122,0.1023,0.1

-0.122,0.1023,-0.1

**PG: LEFT BACK**

4,0

0.,-0.1707,-0.1

0.,-0.1707,0.1

-0.122,-0.1023,0.1

-0.122,-0.1023,-0.1

**PG: LEFT FRONT**

4,0

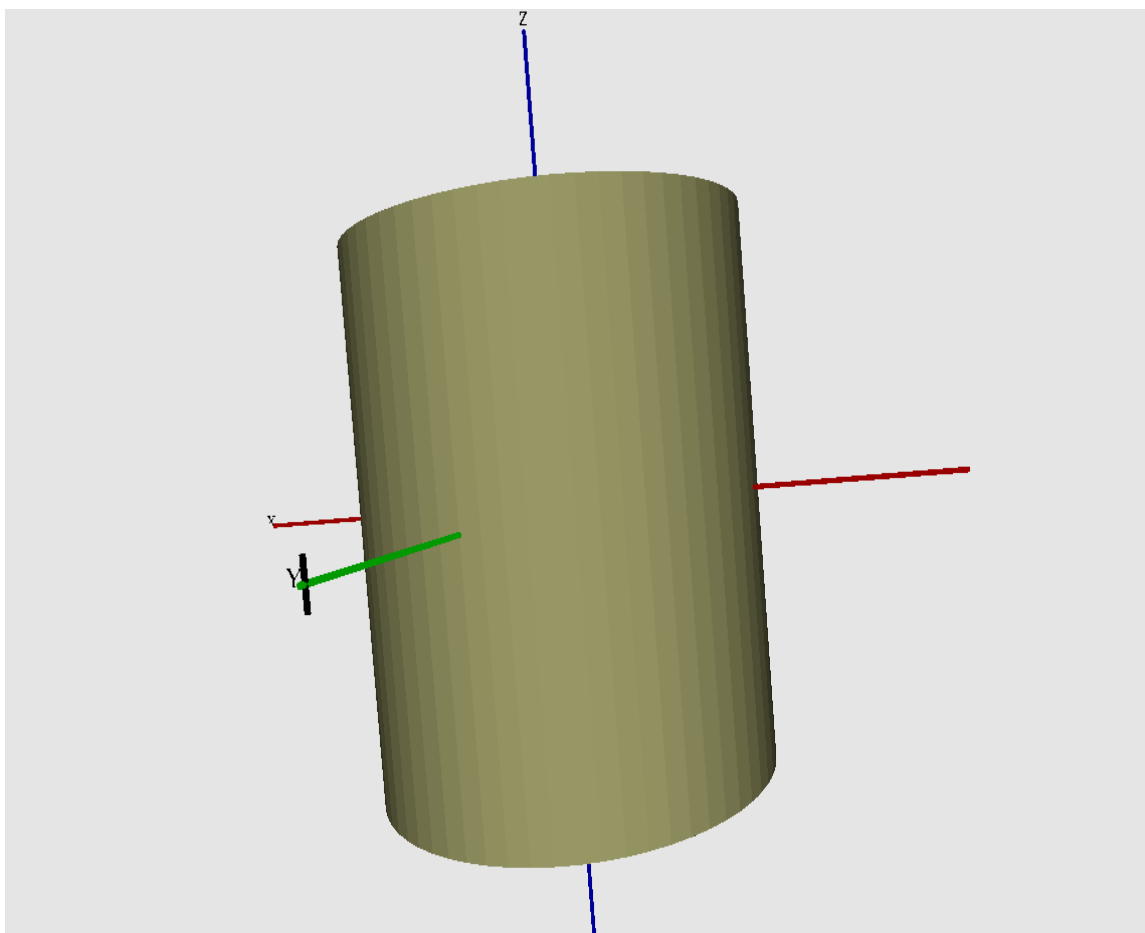
0.122,-0.1023,-0.1  
0.122,-0.1023,0.1  
0.,-0.1707,0.1  
0.,-0.1707,-0.1  
PG: TOP  
6,0  
0.,0.1707,0.1  
-0.122,0.1023,0.1  
-0.122,-0.1023,0.1  
0.,-0.1707,0.1  
0.122,-0.1023,0.1  
0.122,0.1023,0.1  
PG: BOTTOM  
6,0  
0.,0.1707,-0.1  
0.122,0.1023,-0.1  
0.122,-0.1023,-0.1  
0.,-0.1707,-0.1  
-0.122,-0.1023,-0.1  
-0.122,0.1023,-0.1  
XQ: EXECUTE CODE  
EN:

Στο παρακάτω γραμμικό διάγραμμα 4.4 απεικονίζεται το υπολογισθέν Εθ διάγραμμα σε σύγκριση με τις αντίστοιχες μετρηθείσες τιμές. Παρατηρείται πολύ καλή σύγκλιση των τιμών που υπολογίσθηκαν με τις αντίστοιχες τιμές από μετρήσεις.

**Διάγραμμα 4.4 : Υπολογισθέν Εθ γραμμικό διάγραμμα σε σύγκριση με μετρηθείσες τιμές. Προέλευση ΥΕΘΑ/ΓΕΤΕΝ [29].**

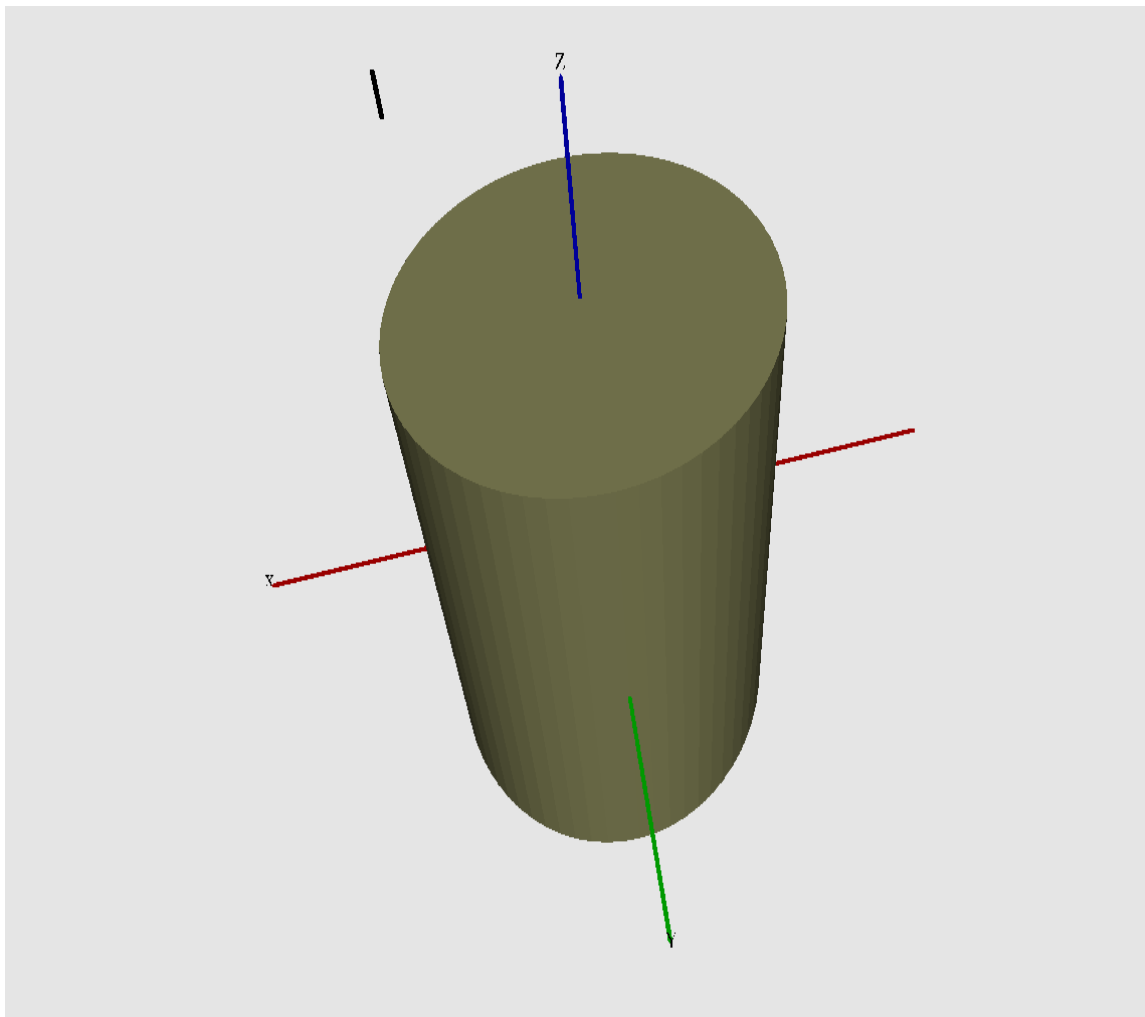
### 4.2.5 Παράδειγμα 5

Το παράδειγμα 5 αφορά τον υπολογισμό μακρινού πεδίου (far field) ηλεκτρικού διπόλου  $\lambda/2$  για  $f = 9.94\text{GHz}$  για δυο διαφορετικές θέσεις, παρουσία τελείως αγωγίμου κυκλικού κυλίνδρου πεπερασμένων διαστάσεων. Σχηματικά η διάταξη απεικονίζεται στα παρακάτω σχήματα 4.5α και 4.5β με χρήση VRML.



**Σχήμα 4.5α:** Δίπολο  $\lambda/2$  για  $f = 9.94\text{GHz}$  παρουσία τελείως αγωγίμου κυκλικού κυλίνδρου πεπερασμένων διαστάσεων παράλληλο στο xz επίπεδο με χρήση VRML.





Σχήμα 4.5β: Δίπολο  $\lambda/2$  για  $f = 9.94\text{GHz}$  παρουσία τελείως αγωγίμου κυκλικού κυλίνδρου πεπερασμένων διαστάσεων παράλληλο στο  $xy$  επίπεδο με χρήση VRML.

Ο κώδικας εισόδου είναι :

**CE: CYLINDER TEST, EXAMPLE 5A.**

**FR:**

**9.94**

**PD:**

**0.,0.,90.,0.**

**T,90.**

**0,360,1**

**SG:**

**0.,0.19,0.**

**90.,0.,180.,0.**

**-2,0.5,0.**

**L,0.**

**CG:**

**0.,0.,0.**

**0.,0.,90.,0.**

**0.1,0.1**  
**-0.11,90.,0.11,90.**  
**XQ:**  
**CE: CYLINDER TEST, EXAMPLE 5B.**  
**PD: CHANGE PATTERN CUT**  
**0.,0.,90.,0.**  
**F,90.**  
**0,360,1**  
**XQ:**  
**CE: CYLINDER TEST, EXAMPLE 5C.**  
**NS: CALL FOR NEW SOURCE**  
**SG:**  
**0.076,0.,0.2**  
**90.,0.,180.,0.**  
**-2,0.5,0.**  
**L,0.**  
**XQ:**  
**EN:**

Στα παρακάτω γραμμικά διαγράμματα 4.5α, 4.5β και 4.5γ απεικονίζονται αντίστοιχα το υπολογισθέν Εφ διάγραμμα σε σύγκριση με τις αντίστοιχες μετρηθείσες τιμές για κωνική τομή με  $\theta=90^\circ$ , το υπολογισθέν Εφ σε σύγκριση με τις αντίστοιχες μετρηθείσες τιμές για μεγάλο κύκλο με  $\varphi=0^\circ$  και το υπολογισθέν Εφ διάγραμμα σε σύγκριση με τις αντίστοιχες μετρηθείσες τιμές για μεγάλο κύκλο με  $\varphi=0^\circ$  για το δίπολο του σχήματος 4.5β. Παρατηρείται πολύ καλή σύγκλιση των τιμών που υπολογίσθηκαν με τις αντίστοιχες τιμές από μετρήσεις.

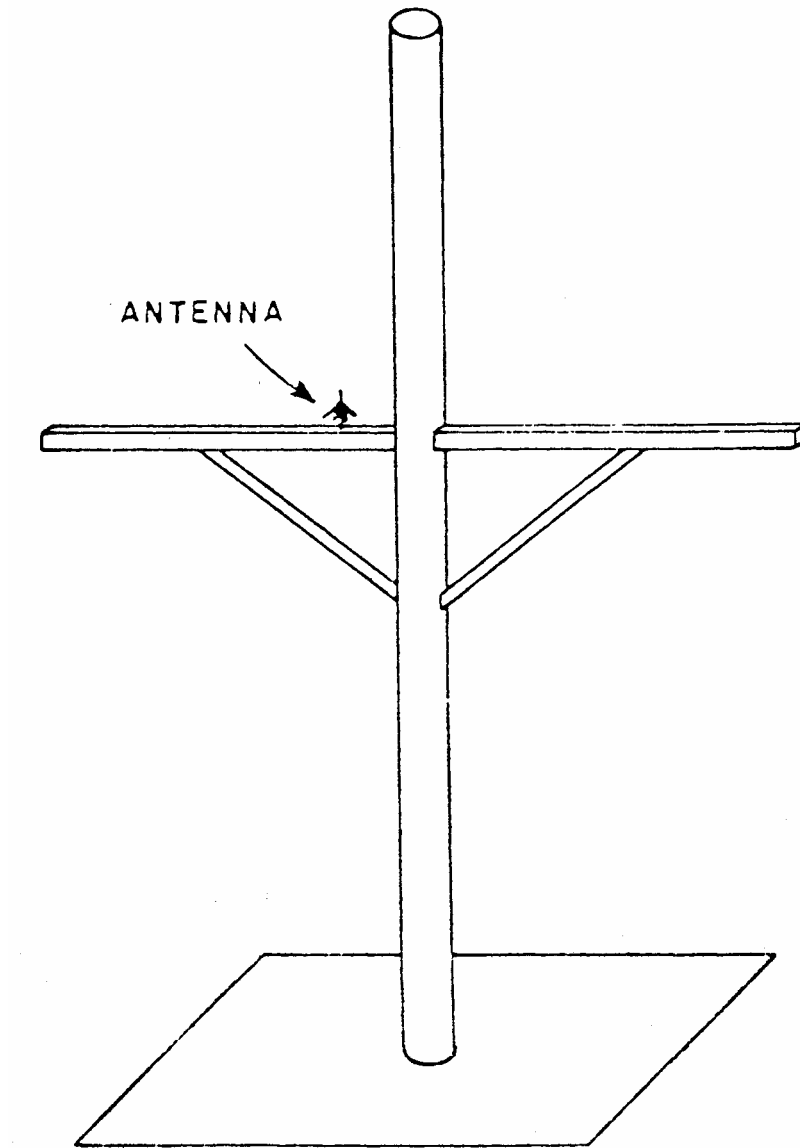
**Διάγραμμα 4.5α : Υπολογισθέν Εφ γραμμικό διάγραμμα σε σύγκριση με μετρηθείσες τιμές για κωνική τομή με  $\theta=90^\circ$ . Προέλευση ΥΕΘΑ/ΓΕΤΕΝ [29].**

**Διάγραμμα 4.5β : Υπολογισθέν Εφ γραμμικό διάγραμμα σε σύγκριση με μετρηθείσες τιμές για μεγάλο κύκλο με  $\varphi=0^\circ$ . Προέλευση ΥΕΘΑ/ΓΕΤΕΝ [29].**

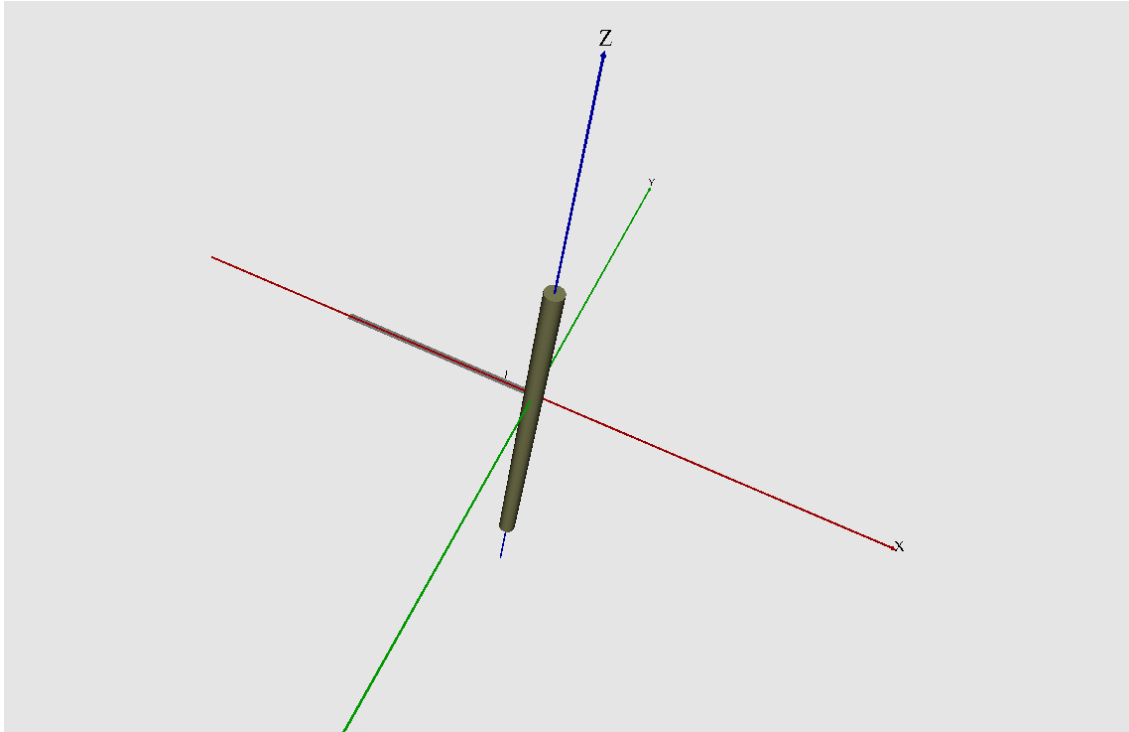
**Διάγραμμα 4.5γ : Υπολογισθέν Εφ γραμμικό διάγραμμα σε σύγκριση με μετρηθείσες τιμές για μεγάλο κύκλο με  $\varphi=0^\circ$  για το δίπολο του σχήματος 5β. Προέλευση ΥΕΘΑ/ΓΕΤΕΝ [29].**

### 4.2.6 Παράδειγμα 6

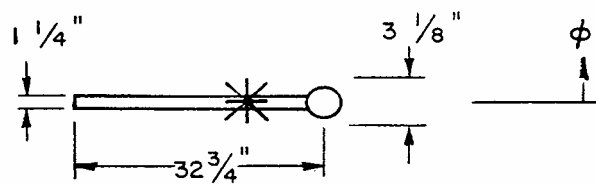
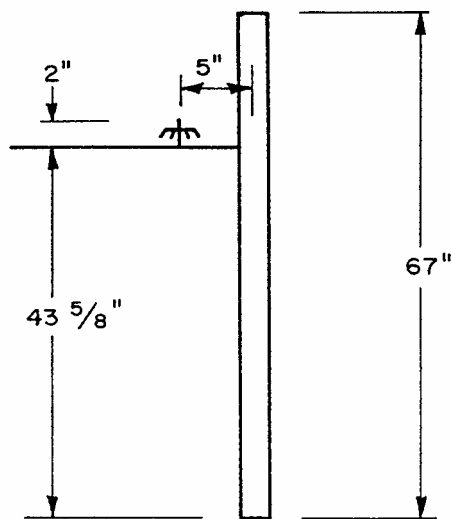
Το παράδειγμα 6 αφορά τον υπολογισμό μακρινού πεδίου (far field) ground plane κεραίας για  $f = 4\text{GHz}$ , εγκατεστημένη σε κατάρτι. Σχηματικά η διάταξη απεικονίζεται στα παρακάτω σχήματα 4.6α, 4.6β με χρήση VRML και 4.6γ



Σχήμα 4.6α: Ground plane κεραία για  $f = 4\text{GHz}$ , εγκατεστημένη σε κατάρτι με χρήση VRML.



Σχήμα 4.6β: Ground plane κεραία για  $f = 4\text{GHz}$ , εγκατεστημένη σε κατάρτι με χρήση VRML.



Σχήμα 4.6γ : Ground plane κεραία για  $f = 4\text{GHz}$ , εγκατεστημένη σε κατάρτι (κάτοψη και εμπρόσθια όψη).

Ο κώδικας εισόδου είναι :

**CM: EXAMPLE 6.**

**CE: YARDARM AND MAST EXAMPLE**

**PD:**

**0.,0.,90.,0.**

**T,89.5**

**0,360,1**

**FR:**

**4.**

**UN:**

**3**

**US:**

**3**

**SG:**

**-5.,0.,2.**

**0.,0.,90.,0.**

**-2,1.925,0.**

**1.,0.**

**CG:**

**0.,0.,0.**

**0.,0.,90.,0.**

**1.5625,1.5625**

**-43.625,90.,23.125,90.**

**PG:**

**4,0**

**-1.5625,0.625,0.**

**-32.75,0.625,0.**

**-32.75,-0.625,0.**

**-1.5625,-0.625,0.**

**XQ:**

**EN:**

Στα παρακάτω γραμμικά διαγράμματα 4.6α και 4.6β απεικονίζονται το υπολογισθέν Εθ διάγραμμα σε σύγκριση με τις αντίστοιχες μετρηθείσες τιμές για κωνική τομή με  $\theta=89.5^\circ$  παρουσία μόνο του κάθετου τμήματος του καταρτιού και ολοκλήρου του καταρτιού. Παρατηρείται πολύ καλή σύγκλιση των τιμών που υπολογίσθηκαν με τις αντίστοιχες τιμές από μετρήσεις.

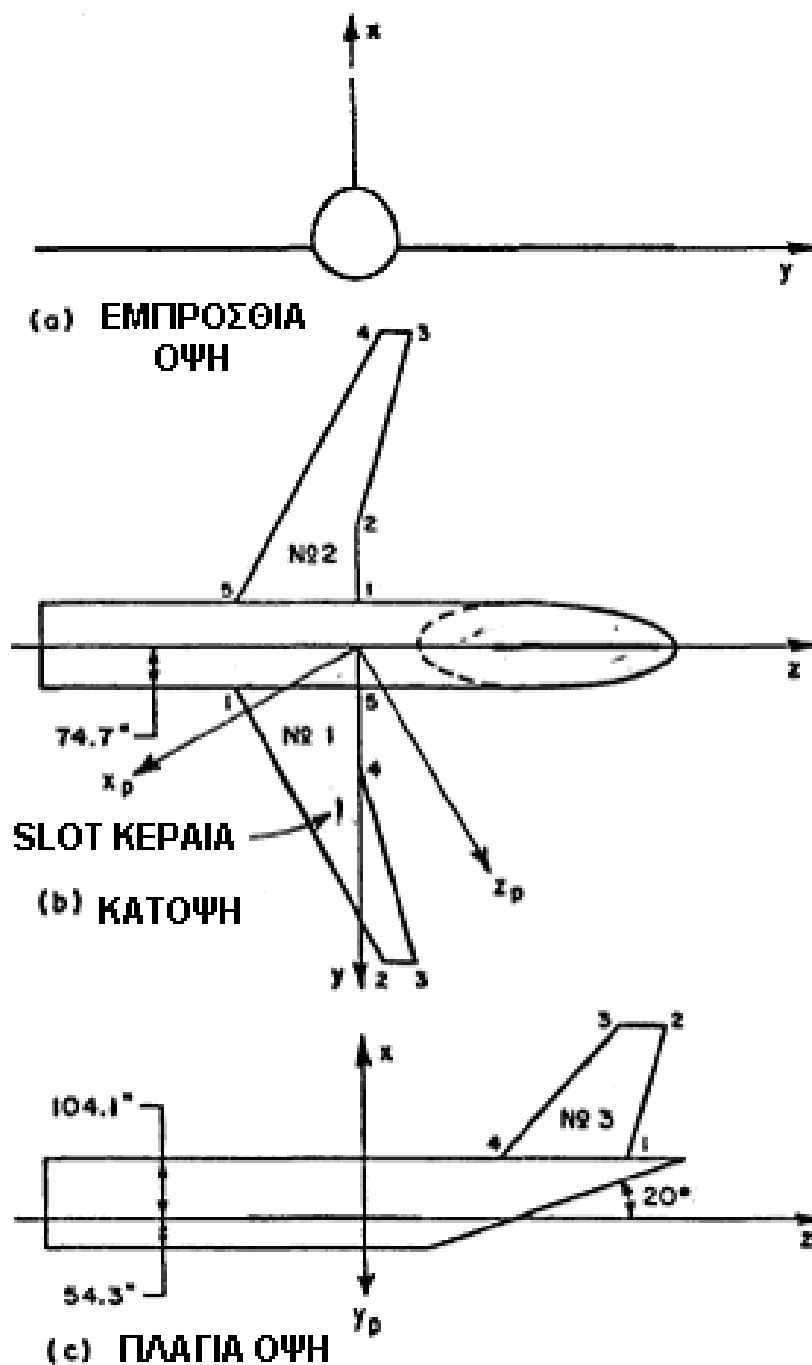


**Διάγραμμα 4.6α : Υπολογισθέν Εθ γραμμικό διάγραμμα σε σύγκριση με μετρηθείσες τιμές για κωνική τομή με  $\theta=89.5^\circ$  παρουσία μόνο του κάθετου τμήματος του καταρτιού. Προέλευση ΥΕΘΑ/ΓΕΤΕΝ [29].**

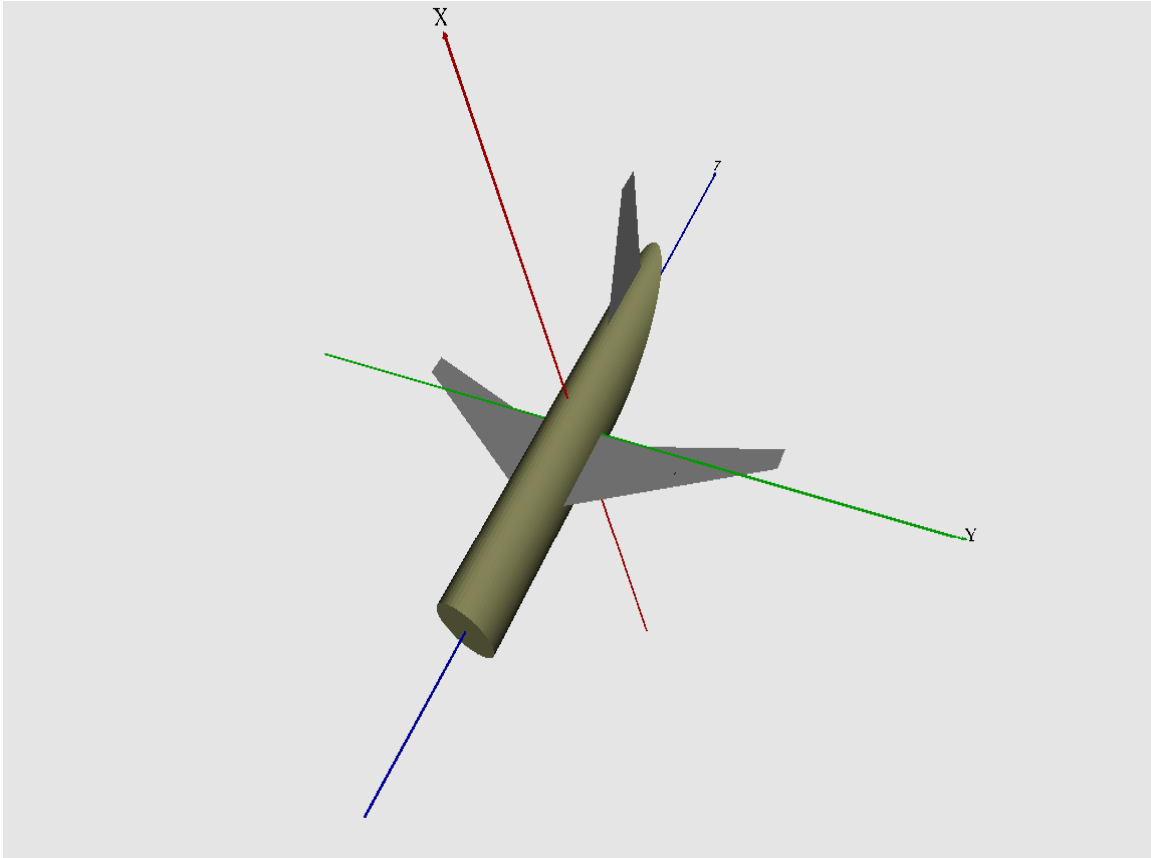
**Διάγραμμα 4.6β : Υπολογισθέν Εθ γραμμικό διάγραμμα σε σύγκριση με μετρηθείσες τιμές για κωνική τομή με  $\theta=89.5^\circ$  παρουσία ολοκλήρου του καταρτιού. Προέλευση ΥΕΘΑ/ΓΕΤΕΝ [29].**

### 4.2.7 Παράδειγμα 7

Το παράδειγμα αυτό αφορά τον υπολογισμό μακρινού πεδίου (far field) slot κεραίας για  $f = 1,746$  GHz, πάνω σε φτερό αεροπλάνου Boeing 737. Σχηματικά η διάταξη απεικονίζεται στα παρακάτω σχήματα 4.7α και 4.7β με χρήση VRML



Σχήμα 4.7α : Slot κεραία για  $f = 1,746$  GHz, πάνω σε φτερό αεροπλάνου Boeing 737.



Σχήμα 4.7β : Slot κεραία για  $f = 1,746$  GHz, πάνω σε φτερό αεροπλάνου Boeing 737 με χρήση VRML.

Ο κώδικας εισόδου είναι :

**CM: AIRCRAFT TEST, EXAMPLE 7.**  
**CE: BOEING 737 COMPUTER MODEL**  
**PD:**  
**60.,90.,150.,90.**  
**T,90.**  
**0,360,1**  
**FR:**  
**1.746**  
**UN:**  
**3**  
**CG:**  
**0.,0.,0.**  
**0.,0.,90.,0.**  
**104.1,74.7**  
**-570.5,90.,260.4,20.**  
**PG: LEFT WING**  
**5,0**

0.,74.7,-212.8  
 0.,547.9,40.8  
 0.,547.9,95.1  
 0.,203.8,0.  
 0.,74.7,0.  
**PG: RIGHT WING**  
 5,0  
 0.,-74.7,0.  
 0.,-203.8,0.  
 0.,-547.9,95.1  
 0.,-547.9,40.8  
 0.,-74.7,-212.8  
**PG: VERTICAL STABILIZER**  
 4,0  
 104.1,0.,448.3  
 344.1,0.,516.2  
 344.1,0.,443.7  
 104.1,0.,235.5  
**SG: FINITE WIDTH SLOT**  
 0.,312.4,-45.3  
 90.,90.,0.,0.  
 3,0.827837,0.413918  
 1.,0.  
**XQ:**  
**EN:**

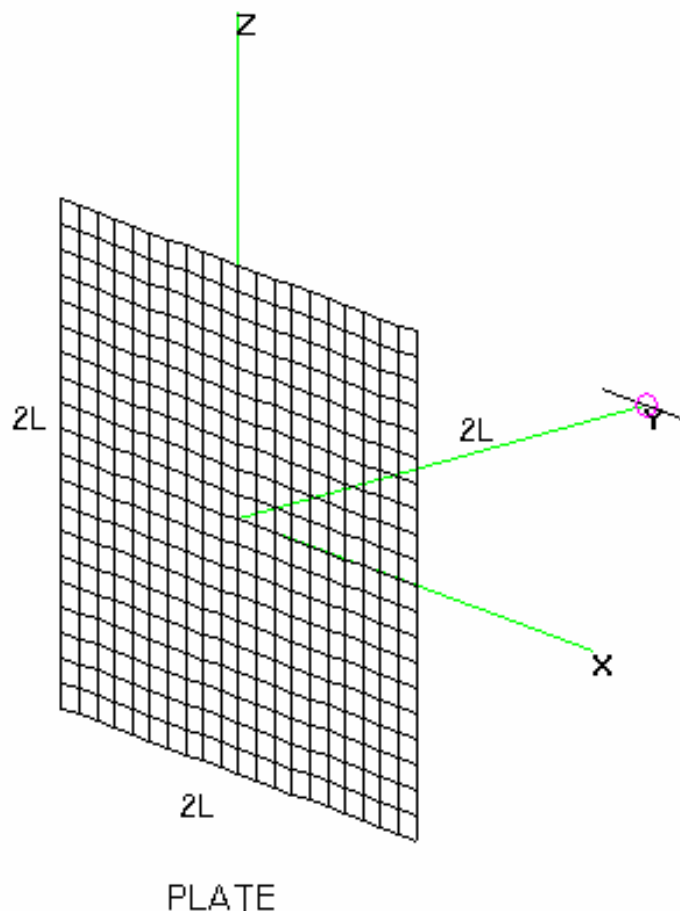
Στο παρακάτω διάγραμμα 4.7 απεικονίζεται το υπολογισθέν Εφ πολικό διάγραμμα σε σύγκριση με τις αντίστοιχες μετρηθείσες τιμές για κωνική τομή με  $\theta=90^\circ$ . Παρατηρείται πολύ καλή σύγκλιση των τιμών που υπολογίσθηκαν με τις αντίστοιχες τιμές από μετρήσεις.

**Διάγραμμα 4.7 : Υπολογισθέν Εφ πολικό διάγραμμα σε σύγκριση με μετρηθείσες τιμές για κωνική τομή με  $\theta=90^\circ$ .**

## 4.3 Πιστοποίηση NEC2

### 4.3.1 Παράδειγμα 1

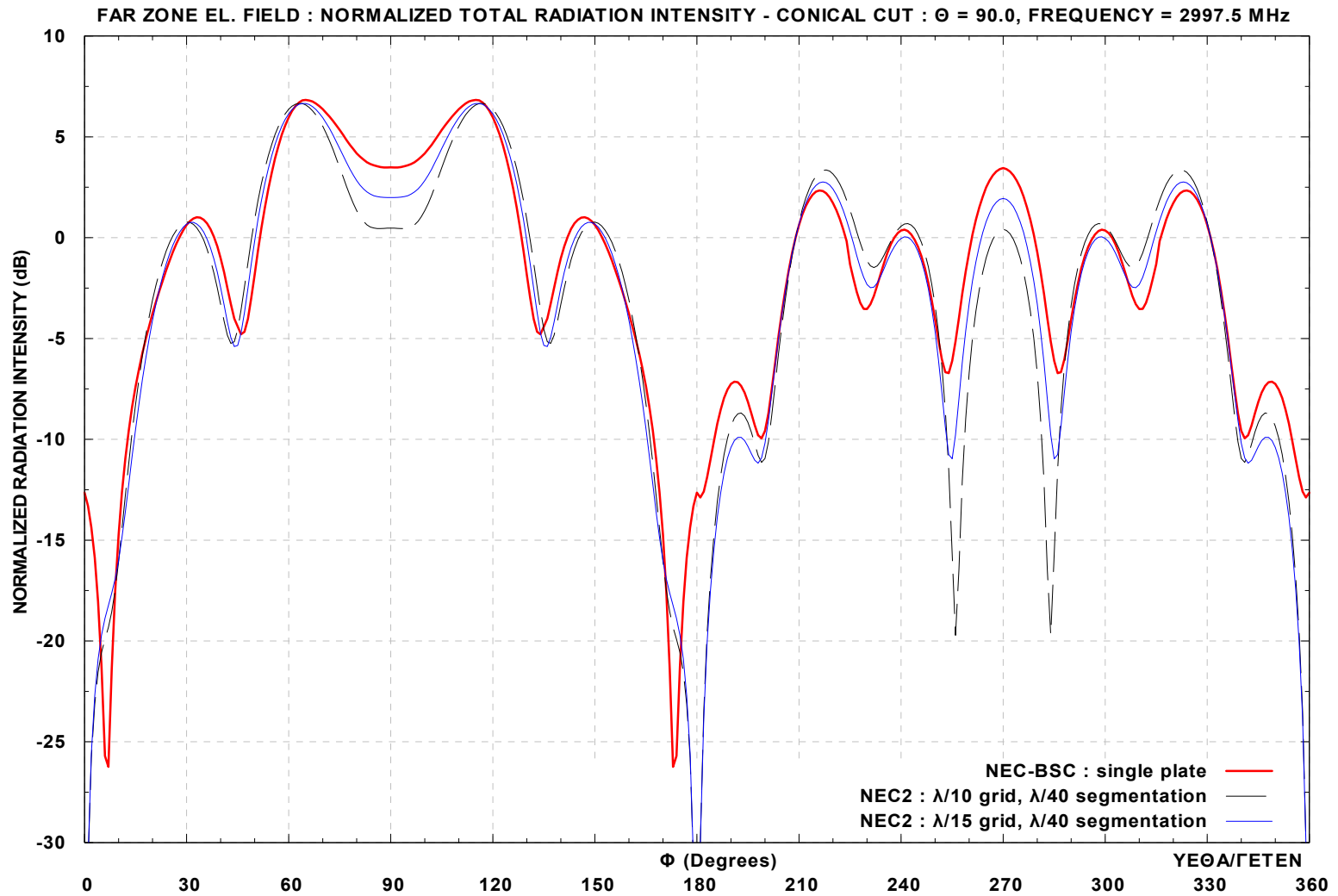
Το παράδειγμα 1 αφορά τον υπολογισμό μακρινού πεδίου (far field) διπόλου  $\lambda/2$  για  $f = 2997.5$  GHz, τοποθετημένο παράλληλα στο  $xy$  επίπεδο δίπλα σε πλάκα διαστάσεων  $2\lambda \times 2\lambda$ , σε απόσταση  $2\lambda$ . Σχηματικά η διάταξη απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα 4.8



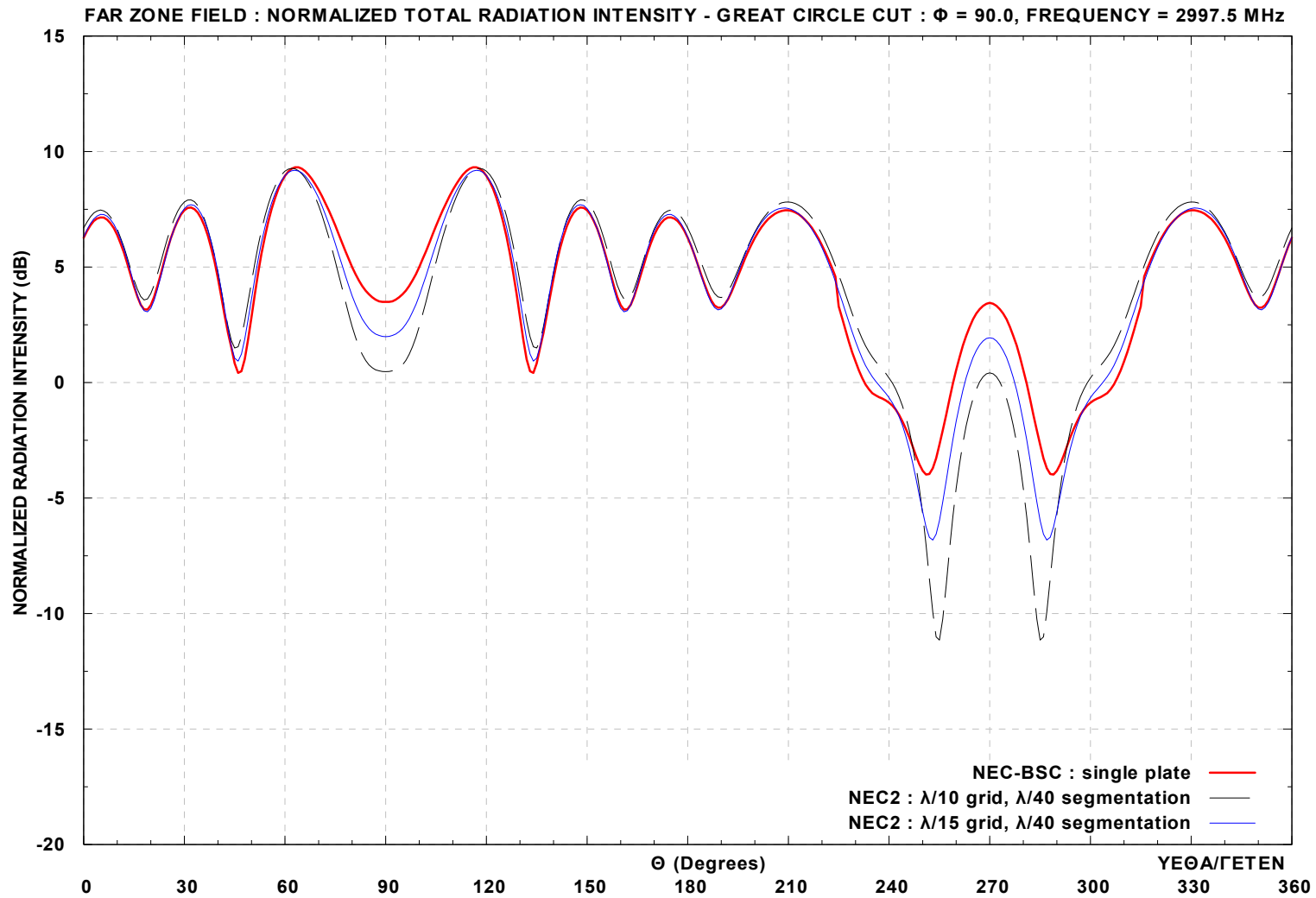
Σχήμα 4.8 : Δίπολο  $\lambda/2$  για  $f = 2997.5$  GHz, τοποθετημένο παράλληλα στο  $xy$  επίπεδο δίπλα σε πλάκα διαστάσεων  $2\lambda \times 2\lambda$ , σε απόσταση  $2\lambda$ .

Στα παρακάτω διαγράμματα 4.8α και 4.8β απεικονίζεται η κανονικοποιημένη ένταση ακτινοβολίας μακρινού πεδίου για κωνική τομή με  $\theta=90^\circ$  και αντίστοιχα για τομή μεγάλου κύκλου με  $\varphi = 90^\circ$ . Το σημείο κανονικοποίησης είναι και για τις δυο περιπτώσεις, το  $\Theta = 90^\circ$  και  $\Phi = 209^\circ$ .

Οι υπολογισμοί έχουν γίνει προς σύγκριση με το NEC-BSC 2.2.18 με χρήση μιας πλάκας και το NEC2 με χρήση wire grid για δυο διαφορετικά ποσοστά νηματοποίησης  $\lambda/10$  και  $\lambda/15$  και κοινό ποσοστό τμηματοποίησης  $\lambda/40$ . Παρατηρείται ότι καλύτερη σύγκλιση έχει επιτευχθεί όταν το ποσοστό νηματοποίησης είναι  $\lambda/15$ .



Διάγραμμα 4.8α : Σύγκριση υπολογισμών NEC2 και NEC-BSC. Πλάκα διαστάσεων  $2\lambda \times 2\lambda$  με δίοπολο στον άξονα  $y$  σε απόσταση  $2\lambda$ . Συχνότητα 2997.5 MHz ( $\lambda=0.1m$ ). Σημείο κανονικοποίησης :  $\Theta=90$ ,  $\Phi=209$ . Προέλευση ΥΕΘΑ/ΓΕΤΕΝ [29].

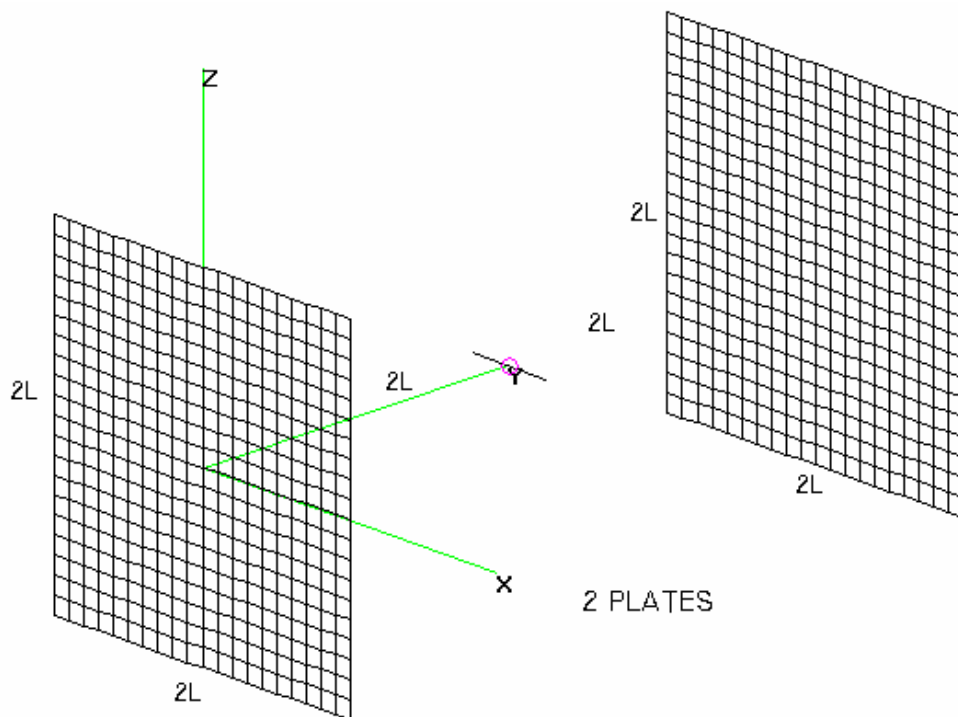


Διάγραμμα 4.8β : Σύγκριση υπολογισμών NEC2 και NEC-BSC. Πλάκα διαστάσεων  $2\lambda \times 2\lambda$  με δίοπολο στον άξονα y σε απόσταση  $2\lambda$ . Συχνότητα 2997.5 MHz ( $\lambda=0.1\text{m}$ ). Σημείο κανονικοποίησης :  $\Theta=90$ ,  $\Phi=209$ . Προέλευση YEOA/GETEN [29].



### 4.3.2 Παράδειγμα 2

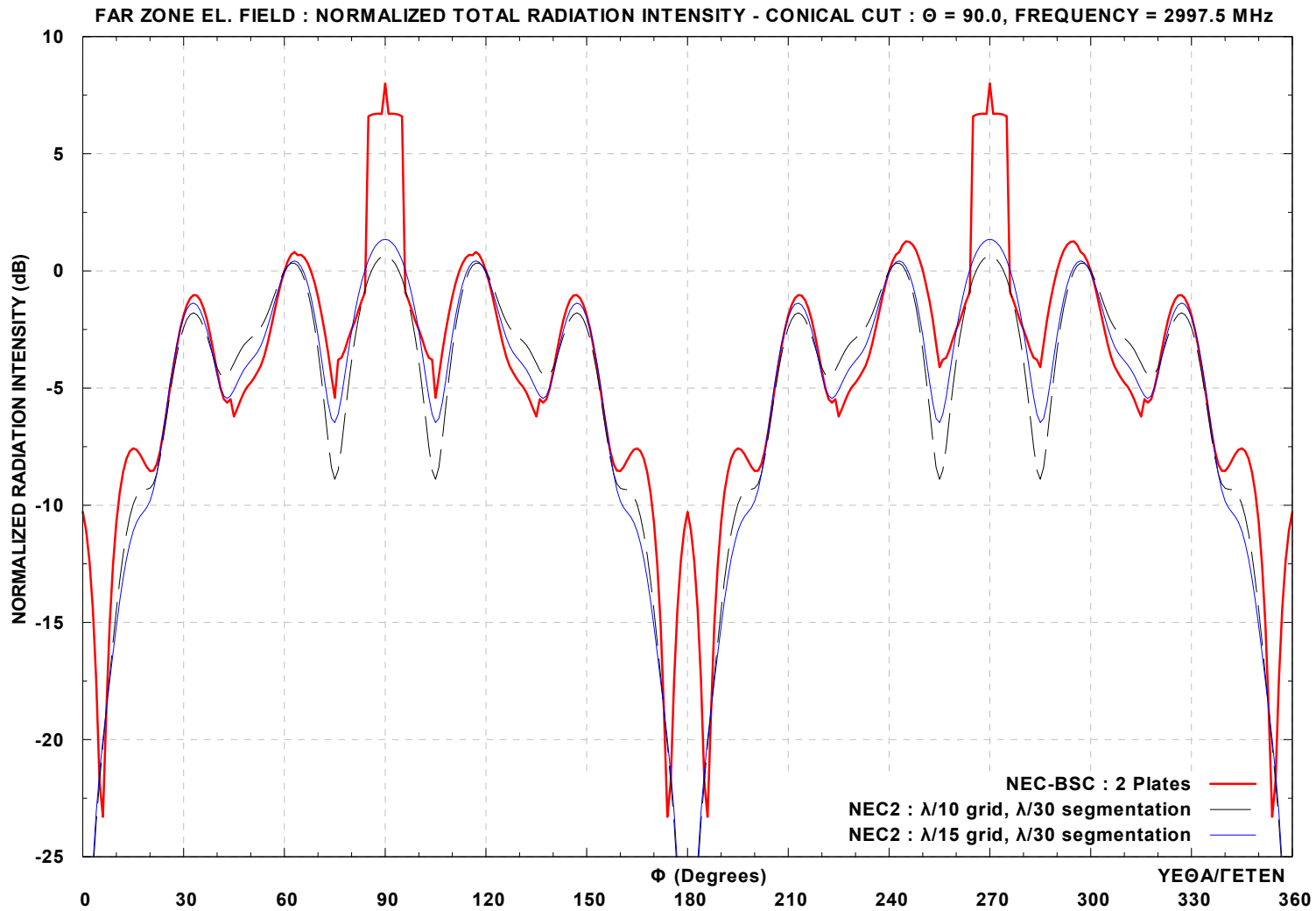
Το παράδειγμα 2 αφορά τον υπολογισμό μακρινού πεδίου (far field) διπόλου  $\lambda/2$  για  $f = 2997.5$  GHz, τοποθετημένου παράλληλα στο  $xy$  επίπεδο στο μέσον της απόστασης  $4\lambda$  που χωρίζει δυο παράλληλες πλάκες διαστάσεων  $2\lambda \times 2\lambda$  έκαστη. Σχηματικά η διάταξη απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα 4.9



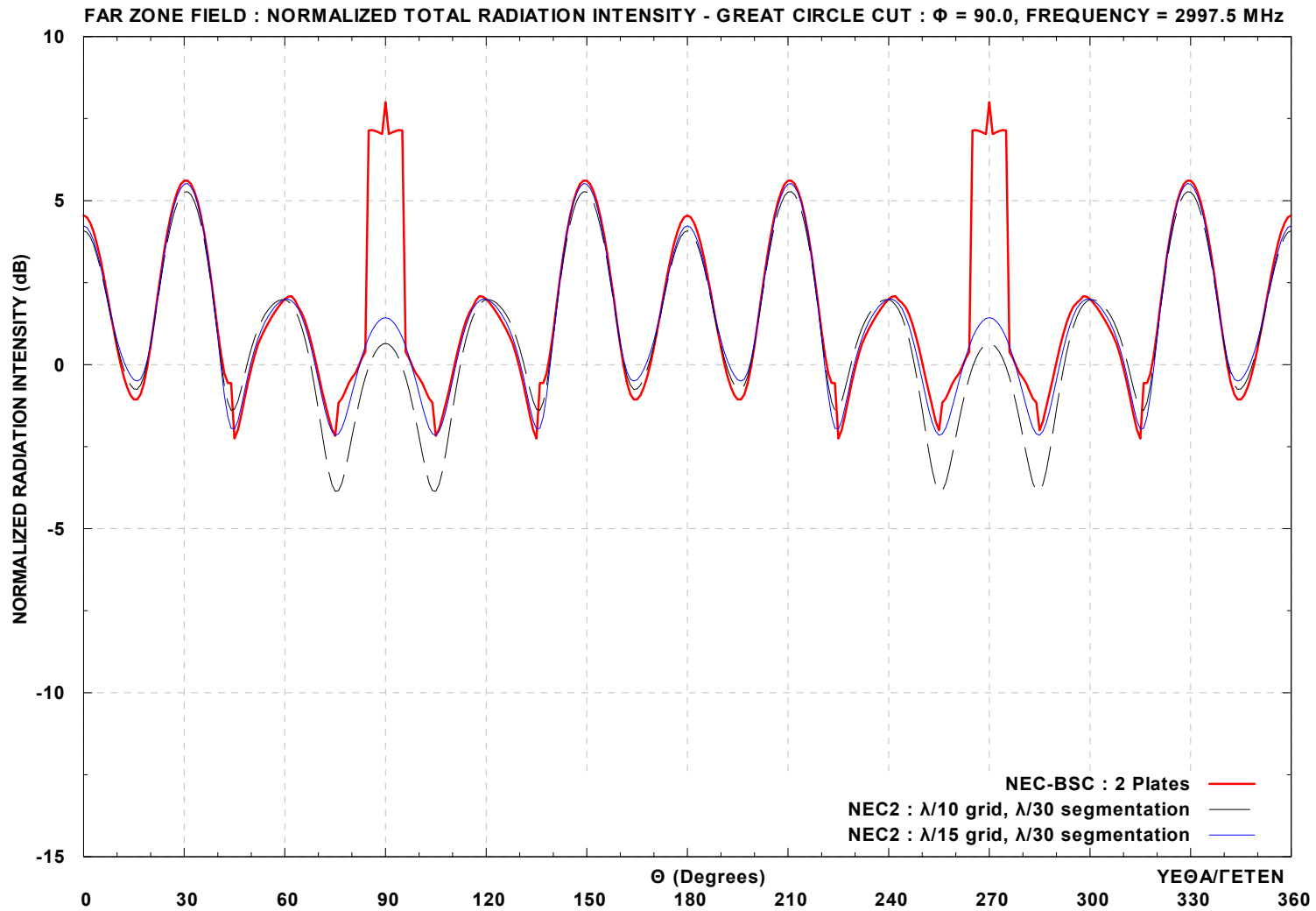
**Σχήμα 4.9 :** Δίπολο  $\lambda/2$  για  $f = 2997.5$  GHz, τοποθετημένο παράλληλα στο  $xy$  επίπεδο στο μέσον της απόστασης  $4\lambda$  που χωρίζει δυο παράλληλες πλάκες διαστάσεων  $2\lambda \times 2\lambda$  έκαστη.

Στα παρακάτω διαγράμματα 4.9α και 4.9β απεικονίζεται η κανονικοποιημένη ένταση ακτινοβολίας μακρινού πεδίου για κωνική τομή με  $\theta=90^\circ$  και αντίστοιχα για τομή μεγάλου κύκλου με  $\varphi = 90^\circ$ . Το σημείο κανονικοποίησης είναι και για τις δυο περιπτώσεις, το  $\Theta = 90^\circ$  και  $\Phi = 60^\circ$ .

Οι υπολογισμοί έχουν γίνει προς σύγκριση με το NEC-BSC 2.2.18 με χρήση δυο πλακών και το NEC2 με χρήση wire grid για δυο διαφορετικά ποσοστά νηματοποίησης  $\lambda/10$  και  $\lambda/15$  και κοινό ποσοστό τμηματοποίησης  $\lambda/30$ . Παρατηρείται ότι καλύτερη σύγκλιση έχει επιτευχθεί όταν το ποσοστό νηματοποίησης είναι  $\lambda/15$ .



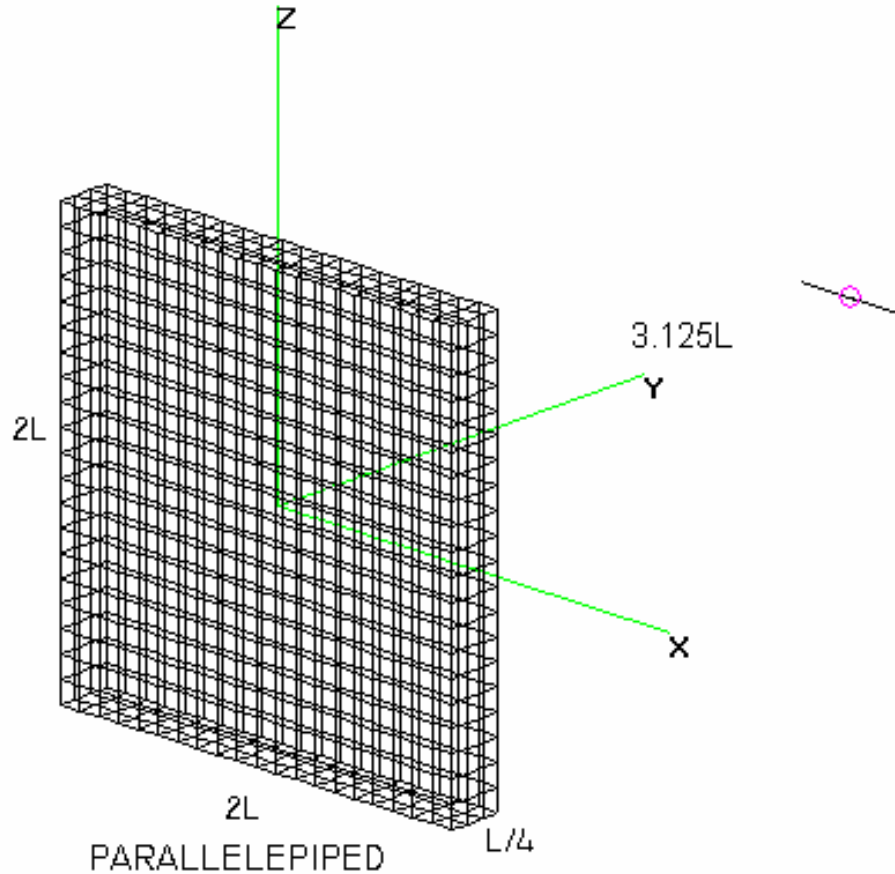
Διάγραμμα 4.9α : Σύγκριση υπολογισμών NEC2 και NEC-BSC. Δύο πλάκες διαστάσεων  $2\lambda \times 2\lambda$  σε απόσταση  $4\lambda$  και δίοπολο στο κέντρο του μεσοδιαστήματος ( $f=2997.5$  MHz). Σημείο κανονικοποίησης :  $\Theta=90$ ,  $\Phi=60$ . Προέλευση YΕΘΑ/ΓΕΤΕΝ [29].



Διάγραμμα 4.9β : Σύγκριση υπολογισμών NEC2 και NEC-BSC. Δύο πλάκες διαστάσεων  $2\lambda \times 2\lambda$  σε απόσταση  $4\lambda$  και δίοπολο στο κέντρο του μεσοδιαστήματος ( $f=2997.5$  MHz). Σημείο κανονικοποίησης :  $\theta=90$ ,  $\Phi=60$ . Προέλευση ΥΕΘΑ/ΓΕΤΕΝ [29].

### 4.3.3 Παράδειγμα 3

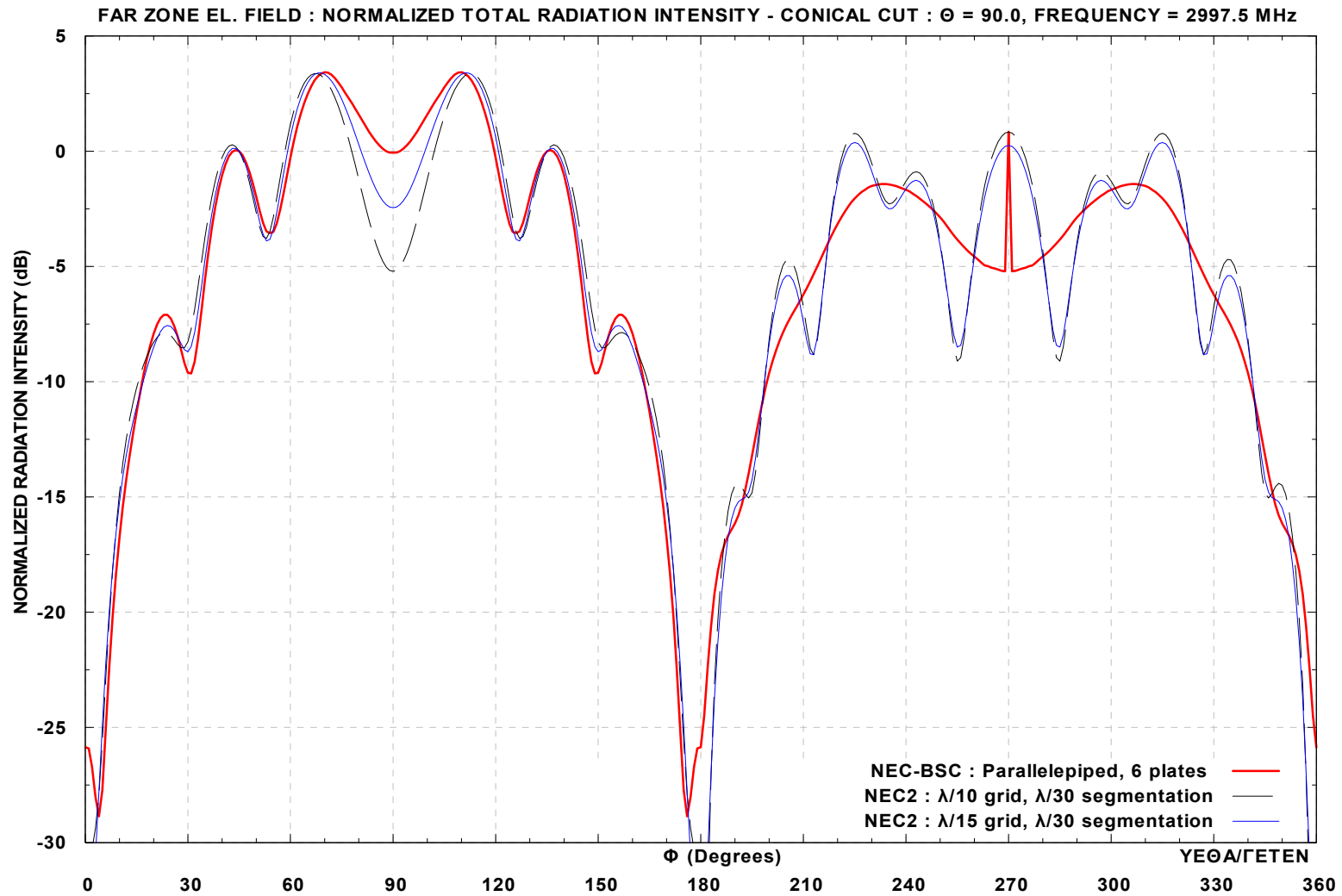
Το παράδειγμα 3 αφορά τον υπολογισμό μακρινού πεδίου (far field) διπόλου  $\lambda/2$  για  $f = 2997.5$  GHz, τοποθετημένου παράλληλα στο  $xy$  επίπεδο δίπλα σε παραλληλεπίπεδο διαστάσεων  $2\lambda \times 2\lambda \times \lambda/4$ , σε απόσταση  $3\lambda$ . Σχηματικά η διάταξη απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα 4.10



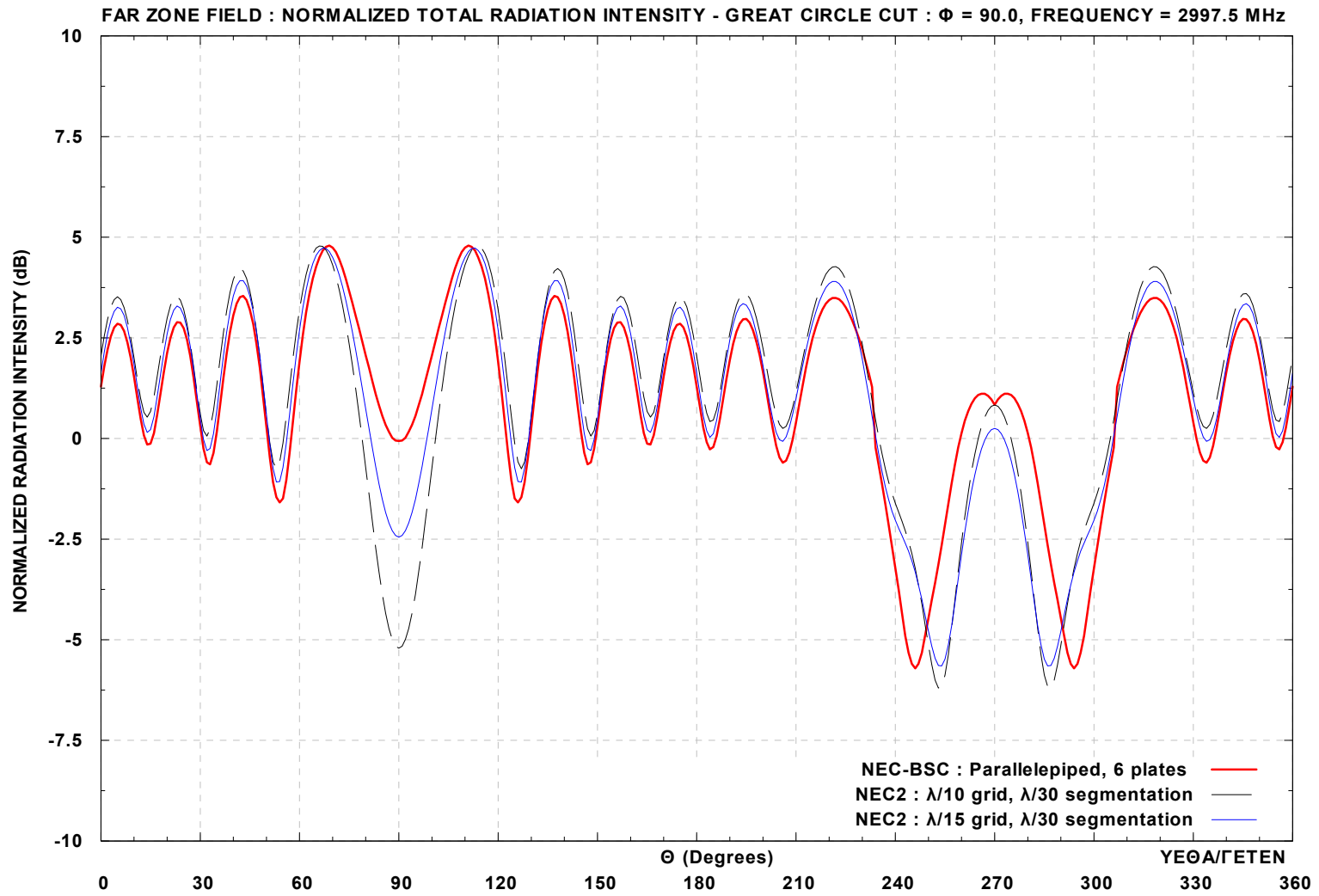
**Σχήμα 4.10 :** Δίπολο  $\lambda/2$  για  $f = 2997.5$  GHz, τοποθετημένο παράλληλα στο  $xy$  επίπεδο δίπλα σε παραλληλεπίπεδο διαστάσεων  $2\lambda \times 2\lambda \times \lambda/4$ , σε απόσταση  $3\lambda$ .

Στα παρακάτω διαγράμματα 4.10α και 4.10β απεικονίζεται η κανονικοποιημένη ένταση ακτινοβολίας μακρινού πεδίου για κωνική τομή με  $\theta=90^\circ$  και αντίστοιχα για τομή μεγάλου κύκλου με  $\varphi = 90^\circ$ . Το σημείο κανονικοποίησης είναι και για τις δυο περιπτώσεις, το  $\Theta = 90^\circ$  και  $\Phi = 45^\circ$ .

Οι υπολογισμοί έχουν γίνει προς σύγκριση με το NEC-BSC 2.2.18 με χρήση έξι πλακών και το NEC2 με χρήση wire grid για δυο διαφορετικά ποσοστά νηματοποίησης  $\lambda/10$  και  $\lambda/15$  και κοινό ποσοστό τμηματοποίησης  $\lambda/30$ . Παρατηρείται ότι καλύτερη σύγκλιση έχει επιτευχθεί όταν το ποσοστό νηματοποίησης είναι  $\lambda/15$ .



Διάγραμμα 4.10α : Σύγκριση υπολογισμών NEC2 και NEC-BSC. Παραλληλεπίπεδο διαστάσεων  $2\lambda \times \lambda/4 \times 2\lambda$  και δίπολο σε απόσταση  $3\lambda$  από  $xz$  επιφάνεια ( $f=2997.5$  MHz). Σημείο κανονικοποίησης :  $\Theta=90$ ,  $\Phi=45$ . Προέλευση YΕΘΑ/ΓΕΤΕΝ [29].



Διάγραμμα 4.10β : Σύγκριση υπολογισμών NEC2 και NEC-BSC. Παραλληλεπίπεδο διαστάσεων  $2\lambda \times \lambda/4 \times 2\lambda$  και δίοπολο σε απόσταση  $3\lambda$  από xz επιφάνεια ( $f=2997.5$  MHz). Σημείο κανονικοποίησης :  $\Theta=90$ ,  $\Phi=45$ . Προέλευση YΕΘΑ/ΓΕΤΕΝ [29].



## ***Κεφάλαιο 5***

### ***Εφαρμογές***

#### ***5.1 Εισαγωγή***

##### ***5.1.1 Περιγραφή Εφαρμογών***

Το παρόν περιλαμβάνει τρία ενδεικτικά παραδείγματα εφαρμογών των δυο τεχνικών επίλυσης Η/Μ προβλημάτων MoM και UTD που αναφέρθηκαν στα κεφάλαια 2 και 3 και μια σύντομη αναφορά στις ναυτικές επικοινωνίες μέσω ιονόσφαιρας (NLOS) στα HF, οπτικής επαφής (LOS) στα VHF/UHF καθώς και στις τυπικές κεραιές που χρησιμοποιούνται στις δυο περιπτώσεις. Και για τις τρεις εφαρμογές χρησιμοποιήθηκε Η/Υ τύπου Pentium 4 (Hyper threading) στα 2.8 GHz με 2 GB RAM.

Η πρώτη εφαρμογή περιλαμβάνει τη μελέτη δυο κεραιών μιας FM στα 100 MHz και μιας VHF στα 146 MHz εγκατεστημένων στην οροφή ενός πολιτικού οχήματος DODGE σε περιβάλλον ασφάλτου. Με βάση τις πραγματικές διαστάσεις του οχήματος, υπολογίζονται οι ηλεκτρικές διαστάσεις του προβλήματος και επιλέγεται η MoM ως μέθοδος επίλυσης αφού οι ηλεκτρικές διαστάσεις του οχήματος είναι μικρές. Κατασκευάζεται το wire grid μοντέλο του οχήματος από τις πραγματικές του διαστάσεις και υπολογίζονται τα διαγράμματα ακτινοβολίας μακρινού πεδίου (far field calculations) της εκάστοτε κεραιάς με σάρωση για  $\theta \in [0,90]$  και  $\phi \in [0,360]$ . Παρουσιάζονται πολικά διαγράμματα κέρδους ισχύος [1],[3] με κριτήριο την περιοχή ενδιαφέροντος της εφαρμογής και ακολούθως το τρισδιάστατο διάγραμμα με την αντίστοιχη χρωματική κλίμακα τιμών. Τέλος παρατίθενται σε μορφή πίνακα τα συγκριτικά στοιχεία των δυο προσομοιώσεων.

Η δεύτερη εφαρμογή περιλαμβάνει τη μελέτη τεσσάρων κεραιών HF, δυο εκπομπής (whip monopoles) και δυο λήψης (active monopoles), εγκατεστημένων στην υπερκατασκευή ενός απλοποιημένου πολεμικού περιπολικού πλοίου σε περιβάλλον θάλασσας. Η προσομοίωση των κεραιών διεξάγεται για τρεις χαρακτηριστικές συχνότητες των 2,5 και 7 MHz. Με βάση τις πραγματικές διαστάσεις του πλοίου, υπολογίζονται οι ηλεκτρικές διαστάσεις του προβλήματος και επιλέγεται η MoM ως μέθοδος επίλυσης αφού οι ηλεκτρικές διαστάσεις του πλοίου είναι μικρές. Κατασκευάζεται το wire grid μοντέλο του πλοίου από τις πραγματικές του διαστάσεις και υπολογίζονται τα διαγράμματα ακτινοβολίας μακρινού πεδίου



(far field calculations) της εκάστοτε κεραίας σαρωθήσας για  $\theta \in [0,90]$  και  $\varphi \in [0,360]$  και τα διαγράμματα κοντινού πεδίου (near field calculations) για 5 ενδεικτικές τομές επί του πλοίου. Παρουσιάζονται, πολικά διαγράμματα κέρδους ισχύος για το μακρινό πεδίο [1],[3] με κριτήριο την περιοχή ενδιαφέροντος της εφαρμογής και ακολούθως το τρισδιάστατο διάγραμμα με την αντίστοιχη χρωματική κλίμακα τιμών. Ακολουθούν για το κοντινό πεδίο διαγράμματα, σε μορφή σχηματικού, συνοδευόμενα επίσης από χρωματική κλίμακα τιμών για την εκάστοτε τομή. Επίσης, αναφέρονται τα υπάρχοντα όρια ασφάλειας προς εκτίμηση των τιμών κοντινού πεδίου. Τέλος, παρατίθενται σε μορφή πίνακα τα συγκριτικά στοιχεία των τεσσάρων προσομοιώσεων.

Η τρίτη εφαρμογή περιλαμβάνει τη μελέτη τεσσάρων κεραιών HF, δυο εκπομπής (whip monopole, twin-pole whip) και δυο λήψης (active monopoles), και τη μελέτη 8 ground plane VHF/UHF κεραιών εγκατεστημένων αντίστοιχα στην υπερκατασκευή και τα 2 κατάρτια του TINCODEROGA CLASS CRUISER πολεμικού πλοίου σε περιβάλλον θαλάσσης. Η προσομοίωση των HF κεραιών διεξάγεται για τρεις χαρακτηριστικές συχνότητες των 2,5 και 7 MHz, ενώ των ground plane VHF/UHF κεραιών σε τέσσερις (μια ανά ζεύγος κεραιών) χαρακτηριστικές συχνότητες των 130,160,350 και 400 MHz. Με βάση τις πραγματικές διαστάσεις του πλοίου, υπολογίζονται οι ηλεκτρικές διαστάσεις του προβλήματος και επιλέγεται η MoM ως μέθοδος επίλυσης για τις HF κεραιές αφού οι ηλεκτρικές διαστάσεις του πλοίου είναι μικρές στην περίπτωση αυτή και η UTD για τις ground plane VHF/UHF κεραιές αφού οι ηλεκτρικές διαστάσεις του πλοίου είναι μεγάλες στην περίπτωση αυτή.

Σε ό,τι αφορά τη μελέτη των HF, κατασκευάζεται το wire grid μοντέλο του πλοίου από τις πραγματικές του διαστάσεις και υπολογίζονται τα διαγράμματα ακτινοβολίας μακρινού πεδίου (far field calculations) της εκάστοτε κεραίας με σάρωση για  $\theta \in [0,90]$  και  $\varphi \in [0,360]$ . Παρουσιάζονται πολικά διαγράμματα κέρδους ισχύος με κριτήριο την περιοχή ενδιαφέροντος της εφαρμογής και ακολούθως το τρισδιάστατο διάγραμμα με την αντίστοιχη χρωματική κλίμακα τιμών. Τέλος, παρατίθενται σε μορφή πίνακα τα συγκριτικά στοιχεία των τεσσάρων προσομοιώσεων.

Σε ό,τι αφορά τη μελέτη των VHF/UHF, κατασκευάζεται το μοντέλο πλακών και κυλίνδρων του πλοίου από τις πραγματικές του διαστάσεις και υπολογίζονται τα διαγράμματα ακτινοβολίας μακρινού πεδίου (far field calculations) της εκάστοτε κεραίας για συγκεκριμένες τομές σάρωσης κατά  $\theta$  ανάλογα με τη θέση της κεραίας και  $\varphi$  στο διάστημα  $[0,360]$ . Παρουσιάζονται πολικά διαγράμματα έντασης ακτινοβολίας [1],[3] με κριτήριο την περιοχή ενδιαφέροντος της εφαρμογής και πραγματοποιείται μελέτη σύζευξης των κεραιών (couplings study). Τέλος, παρατίθενται σε μορφή πίνακα τα συγκριτικά στοιχεία των οκτώ προσομοιώσεων.

### **5.1.2 Περιγραφή Υπολογιστικού Περιβάλλοντος EMSIF (Electromagnetic Simulation Framework)**

Για τους υπολογισμούς των παραδειγμάτων εφαρμογών που ακολουθούν χρησιμοποιήθηκε το ενιαίο υπολογιστικό περιβάλλον EMSIF (Electromagnetic Simulation Framework) του ΥΕΘΑ/ΓΕΤΕΝ που αναπτύχθηκε από τον Ν. Ρούσσο για την προσομοίωση κεραιών εγκατεστημένων σε σύνθετης δομικής κατασκευής πλατφόρμες (π.χ. πλοία, οχήματα, εγκαταστάσεις εδάφους) [29].

Το υπολογιστικό περιβάλλον EMSIF περιέχει :

- 1) Τον υπολογιστικό κώδικα του **NEC2** (Numerical Electromagnetic Code) και του τροποποιημένου από το ΓΕΤΕΝ **NEC-BSC 2.2.18** (Numerical Electromagnetic Code-Basic Scattering Code) για τους υπολογισμούς.
- 2) Γραφικό σύστημα επικοινωνίας χρήστη / προγράμματος (pull-down/pop-up menus).
- 3) Κατάλληλο κώδικα για τη δισδιάστατη και δυναμική τρισδιάστατη γραφική απεικόνιση και εκτύπωση των διαγραμμάτων των πεδίων ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (μακρινό ή κοντινό πεδίο).
- 4) Κατάλληλο κώδικα για τη δυναμική τρισδιάστατη απεικόνιση της γεωμετρίας των κατασκευών.
- 5) Γραφικό σύστημα δημιουργίας / μετατροπής των τρισδιάστατων γεωμετρικών δεδομένων των δομικών κατασκευών (wire grid για το NEC2 και plates-cylinders για το NEC-BSC).

Οι τροποποιήσεις του **NEC-BSC** περιλαμβάνουν τη μετατροπή του κώδικα σε διπλής ακρίβειας (**double precision**), αλλαγές στους αλγόριθμους που σχετίζονται με τον επίπεδο χαρακτήρα των πλακών και διορθώσεις στο σύστημα διαχείρισης πλακών και κυλίνδρων ώστε να επιλύονται προβλήματα που περιλαμβάνουν μεγάλο αριθμό αυτών των γεωμετρικών στοιχείων.

Ο πηγαίος κώδικας των **NEC2** και **NEC-BSC** τροποποιήθηκε και προσαρμόστηκε για υπολογιστικό περιβάλλον ενός 32 bit προσωπικού Η/Υ και για τον compiler της Compaq Visual Fortran V 6.6.

Ο τρισδιάστατος σχεδιασμός των δομικών κατασκευών υλοποιείται εξωτερικά του **EMSIF** με την βοήθεια εμπορικών προγραμμάτων όπως το 3DSTUDIO MAX ή το AUTOCAD, και στη συνέχεια το **EMSIF** επιτρέπει τη μετατροπή των παραγόμενων 3D αρχείων σε wire grid για το NEC2 και plates-cylinders για το NEC-BSC (υποσυστήματα WGRID\_GEN και PLATE\_GEN).

Η δυναμική τρισδιάστατη απεικόνιση της γεωμετρίας των κατασκευών και η δυναμική τρισδιάστατη γραφική απεικόνιση των διαγραμμάτων των πεδίων ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας επιτυγχάνεται με τη δημιουργία από το **EMSIF** κατάλληλων **VRML** μοντέλων.

Το **EMSIF** δύναται, μεταξύ άλλων, να χρησιμοποιηθεί για :

- 1) Τον υπολογισμό / πρόβλεψη των διαγραμμάτων ακτινοβολίας κεραιών στο μακρινό ή κοντινό πεδίο (**Far or Near zone radiation field**) υπό την παρουσία κατασκευών που προκαλούν σκέδαση και περίθλαση.
- 2) Τον προσδιορισμό της Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας (Electromagnetic Compatibility - **EMC**) ή τη σύζευξη μεταξύ κεραιών σ' ένα σύνθετο (δομικά) περιβάλλον .
- 3) Τον προσδιορισμό πιθανών κινδύνων ακτινοβολίας (**Radiation Hazards**).

Ο πηγαίος κώδικας του NEC-BSC (Numerical Electromagnetic Code-Basic Scattering Code) υπόκειται σε περιορισμούς όσον αφορά τη διάθεση και χρήση του εκτός Κυβερνητικών Υπηρεσιών των Η.Π.Α και συνεργαζόμενων με αυτές Υπηρεσιών άλλων Κρατών.

Οι αυθεντικές εκδόσεις των προγραμμάτων NEC2 και NEC-BSC είναι δύσχρηστες, διότι δεν περιλαμβάνουν γραφικό σύστημα επικοινωνίας χρήστη - Η/Υ, δεν διαθέτουν δυνατότητα παρουσίασης των αποτελεσμάτων των υπολογισμών σε γραφική μορφή και δεν

περιλαμβάνουν γραφικό σύστημα εισόδου των τρισδιάστατων γεωμετρικών δεδομένων των δομικών κατασκευών. Επιπρόσθετα, η διατεθείσα στο ΓΕΤΕΝ έκδοση του προγράμματος NEC-BSC είχε αναπτυχθεί για να λειτουργεί σε υπολογιστικό περιβάλλον μεγάλου Η/Υ και όχι σε αυτό προσωπικού Η/Υ. Οι υπολογισμοί γίνονται με απλή ακρίβεια (**single precision**).

## **5.2 ΠΟΛΙΤΙΚΟ ΟΧΗΜΑ DODGE**

### **5.2.1 Εισαγωγή**

Η πρώτη κατασκευή που μελετήθηκε ήταν το πολιτικό όχημα DODGE που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 5.1 σε περιβάλλον ασφαλτόδρομου πόλης .



**Σχήμα 5.1 : Πολιτικό όχημα DODGE.**

Η μελέτη περιέλαβε την προσομοίωση 2 VHF κεραιών (μονόπολα  $\lambda/4$ ), μιας FM στα 100 MHz και μιας VHF στα 146 MHz που δύναται να φέρει το κάθε πολιτικό όχημα. Η επίλυση έγινε χρησιμοποιώντας τη μέθοδο MoM και κατασκευάζοντας το wire grid μοντέλο του οχήματος. Υπολογίσθηκαν αρχικά τα διαγράμματα ακτινοβολίας μακρινού πεδίου (Far Field calculations) των κεραιών και παρατέθηκαν κατόπιν σε μορφή πίνακα τα συγκριτικά στοιχεία της προσομοίωσης.

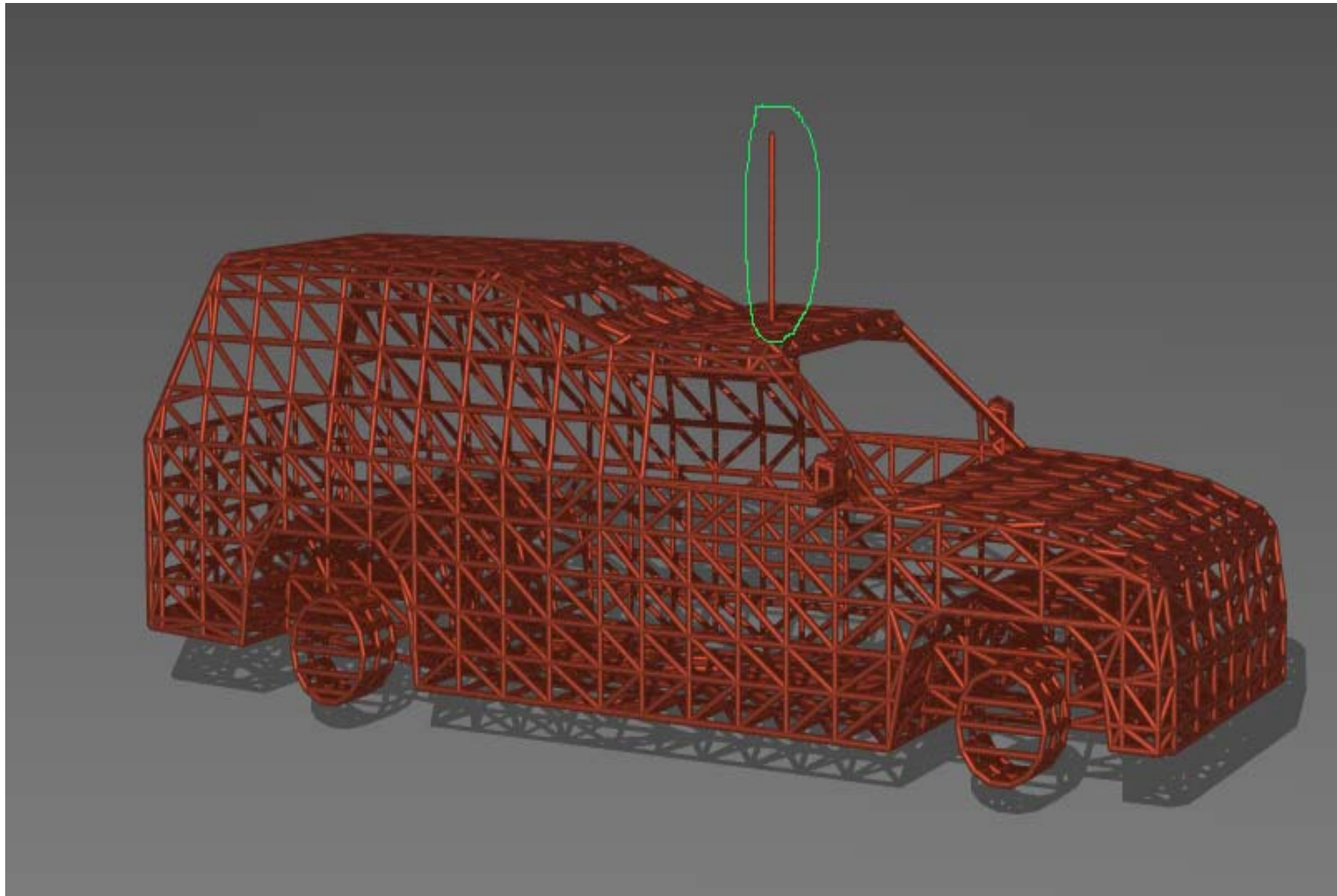
### 5.2.2 Μελέτη VHF κεραιών

Οι διαστάσεις αυτού του οχήματος είναι 5.54 x 1.78 x 1.76 m (από ζάντες). Για τις συχνότητες μελέτης των 100 και 146 MHz, οι αντίστοιχες ηλεκτρικές διαστάσεις, με βάση τη μέγιστη διάσταση των 5.54 m, είναι 1.85 και 2.67. Η μελέτη και για τις δυο αυτές συχνότητες κατατάσσεται στα προβλήματα χαμηλών ηλεκτρικών διαστάσεων και επομένως μπορεί να επιλυθεί με χρήση της MoM.

Με χρήση των προγραμμάτων 3DSTUDIO MAX για τη μοντελοποίηση του οχήματος και κατόπιν του WGRID\_GEN (ΓΕΤΕΝ NEC2 GRID GENERATOR) σχηματίστηκε σε περιβάλλον ασφαλτόδρομου πόλης το αντίστοιχο wire grid μοντέλο του οχήματος 3579 νημάτων, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 5.2 και προσομοιώθηκαν κατά σειρά και στην ίδια θέση τοποθετημένες 2 κεραιές VHF, μιας FM στα 100 MHz και μιας VHF στα 146 MHz. Η άσφαλτος προσομοιώθηκε με χρήση επίπεδης γης και για τις συχνότητες μελέτης έχει σύμφωνα με [27] τις εξής ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες :

$$\begin{aligned} \text{σχετική ηλεκτρική επιτρεπτότητα } \epsilon &= 3 \\ \text{σχετική μαγνητική διαπερατότητα } \mu &= 1 \\ \text{αγωγιμότητα } \sigma &= 1.0 \text{ mS/m} \end{aligned}$$

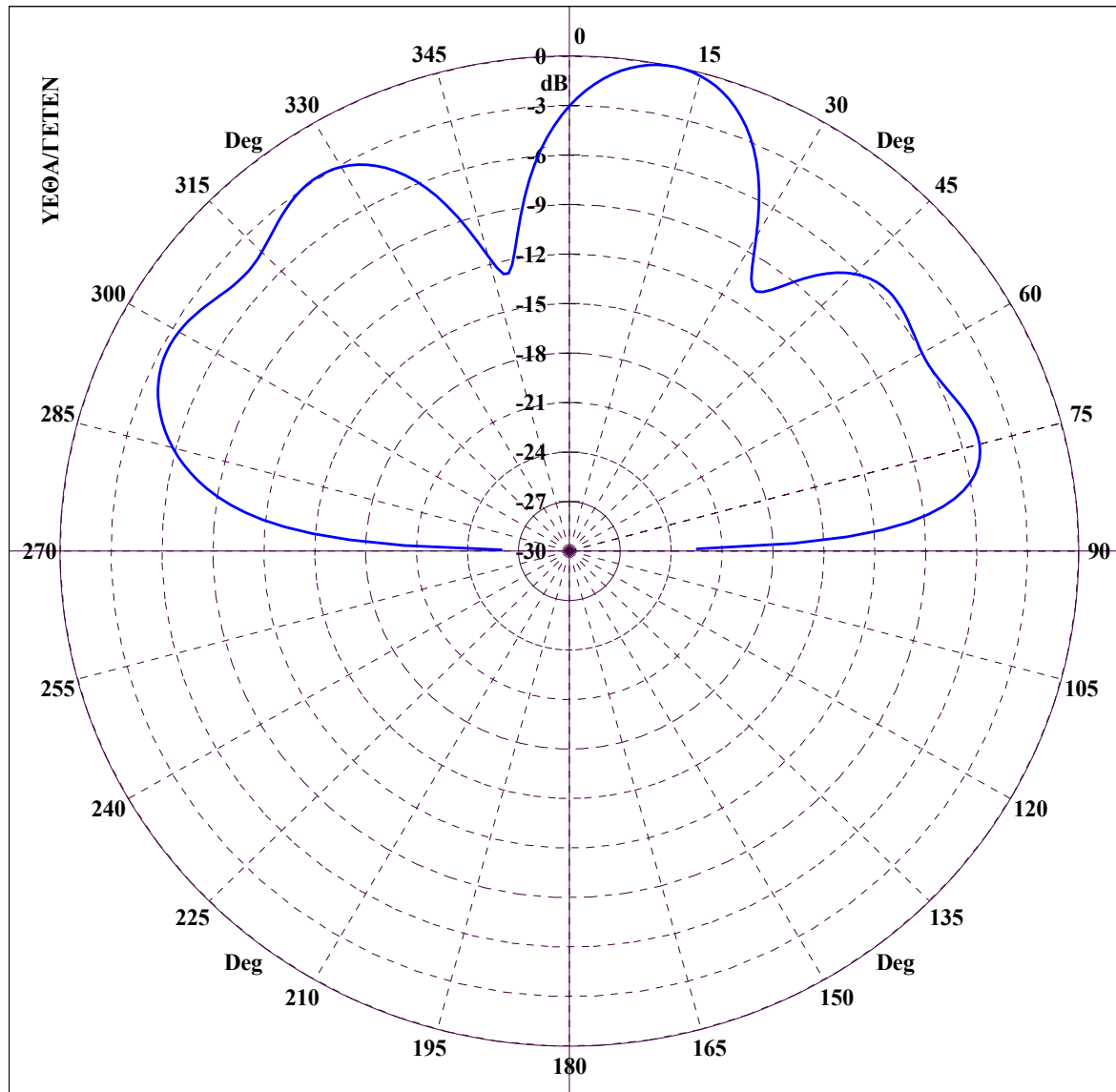
Αρχικώς παρατίθενται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ανά κεραία που αφορούν την εύρεση του διαγράμματος ακτινοβολίας μακρινού πεδίου (Far Field calculations) της εκάστοτε κεραιάς. Στη συνέχεια, παρατίθενται σε μορφή πίνακα τα συγκριτικά στοιχεία αυτών των προσομοιώσεων που αφορούν τον αριθμό νημάτων που χρησιμοποιήθηκαν αρχικώς για την κατασκευή του wire grid μοντέλου, σε ποσοστό τμηματοποίησης, δηλαδή σε αριθμό segments ανά μήκος κύματος  $\lambda$ , τον αριθμό των segments που τελικά παρήχθησαν από τη διαδικασία τμηματοποίησης καθώς και στο χρόνο που χρειάστηκε για την εκτέλεση της προσομοίωσης.



Σχήμα 5.2 : Wire grid Πολιτικού οχήματος DODGE με διαφαινόμενη την κεραία FM/VHF που φέρει.

### ***5.2.2.1 Διαγράμματα ακτινοβολίας μακρινού πεδίου κεραίας FM***

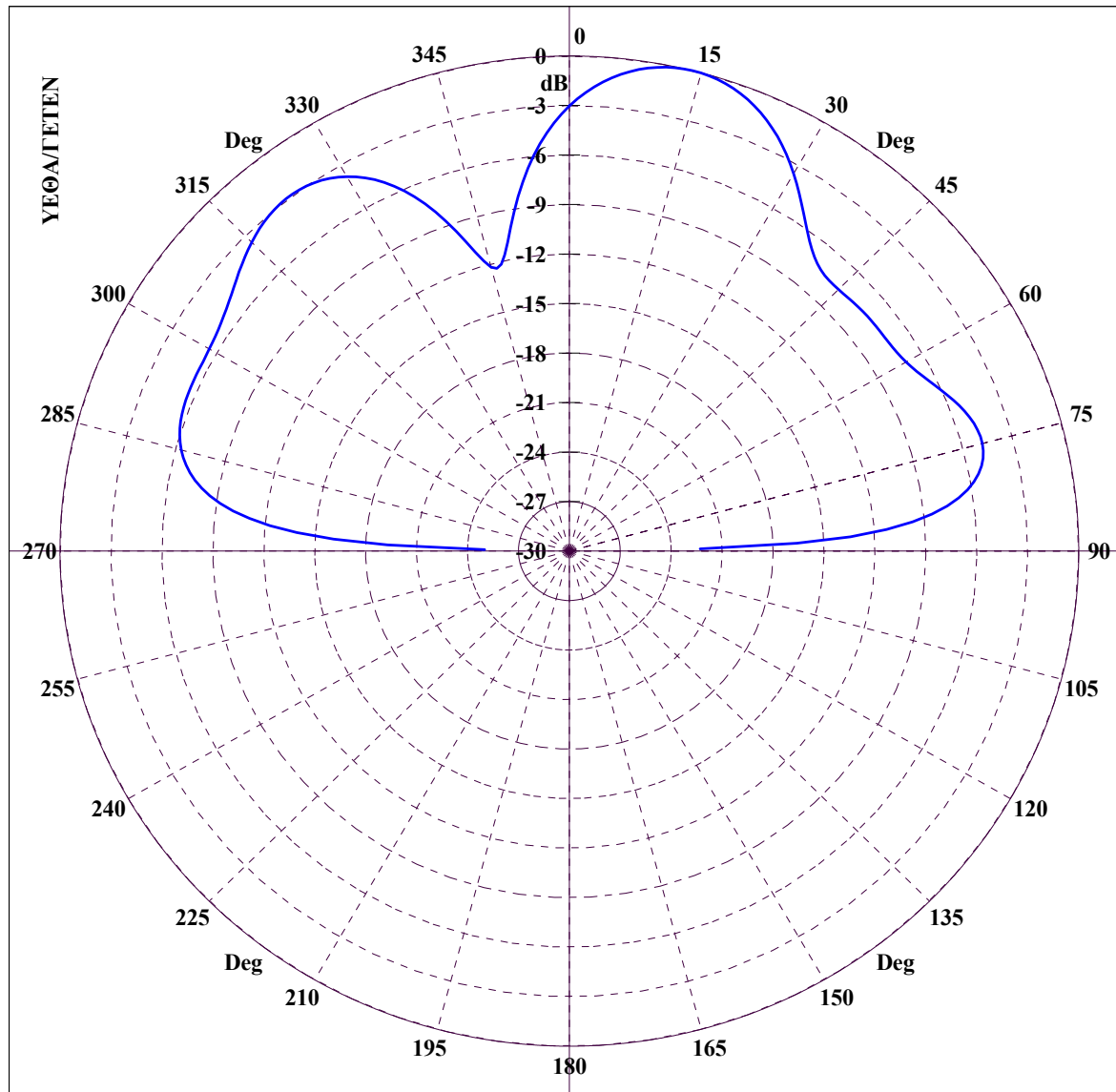
FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



File Name :DODGEA-NN100\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 0.00$ ,  $\Theta=0-360$ , FREQUENCY = 100.00 MHz

Διάγραμμα 5.1 : DODGE, Κεραία FM σε συχνότητα 100 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 0^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

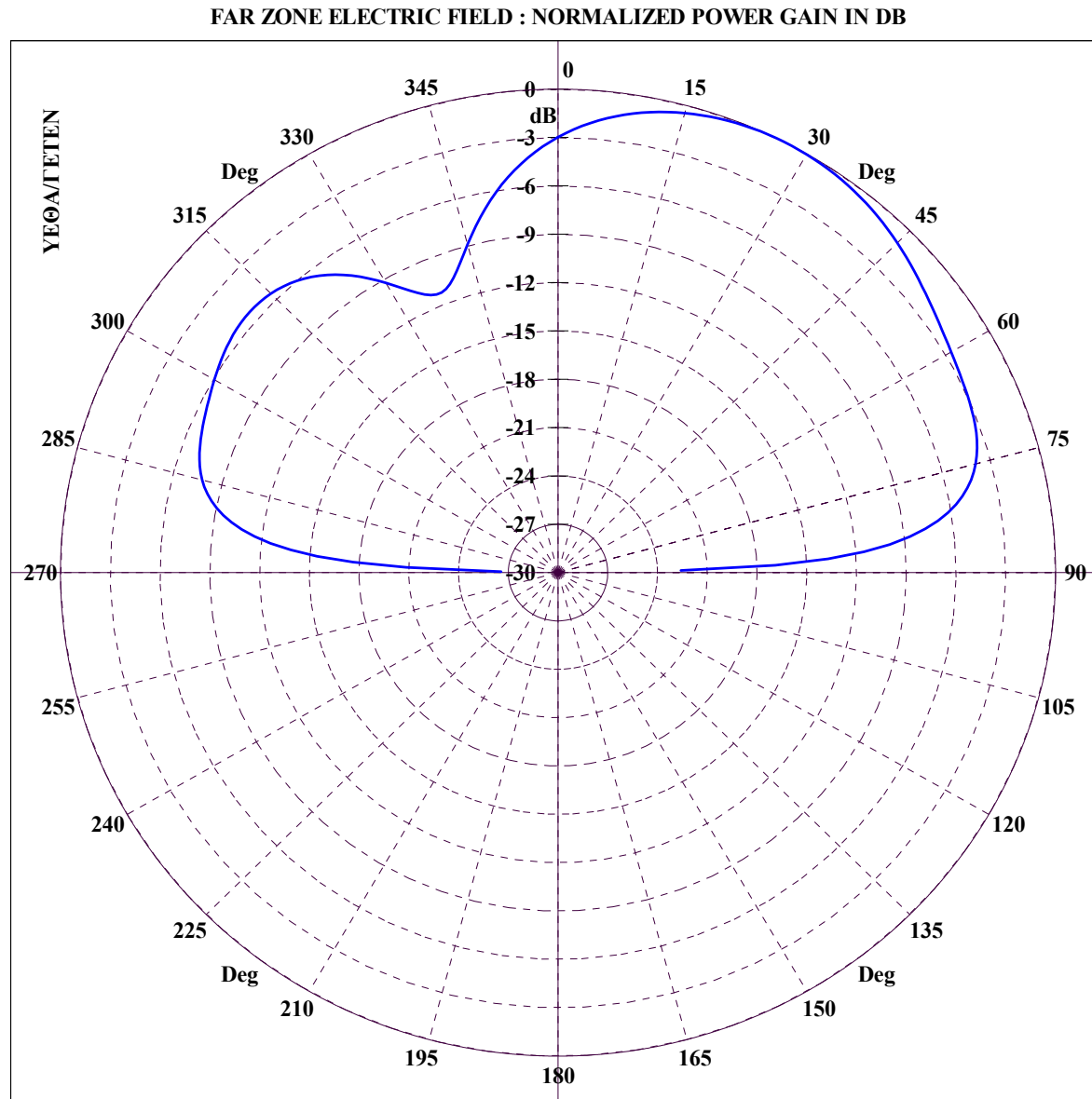
FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



File Name :DODGEA-NN100\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 30.00$ ,  $\Theta=0-360$ , FREQUENCY = 100.00 MHz

Διάγραμμα 5.2 : DODGE, Κεραία FM σε συχνότητα 100 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 30^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

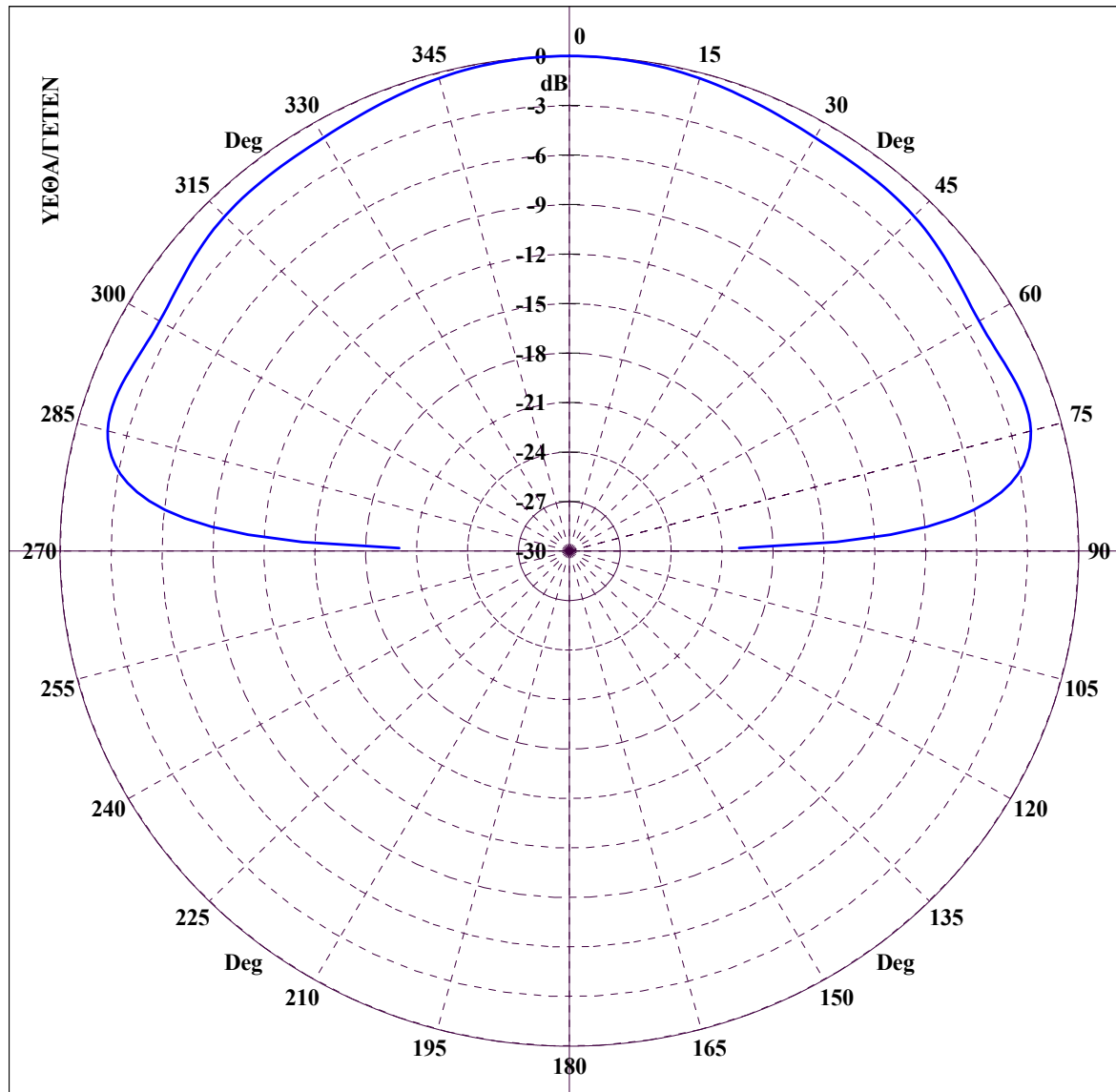




File Name :DODGEA-NN100\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 60.00$ ,  $\Theta=0-360$ , FREQUENCY = 100.00 MHz

Διάγραμμα 5.3 : DODGE, Κεραία FM σε συχνότητα 100 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 60^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

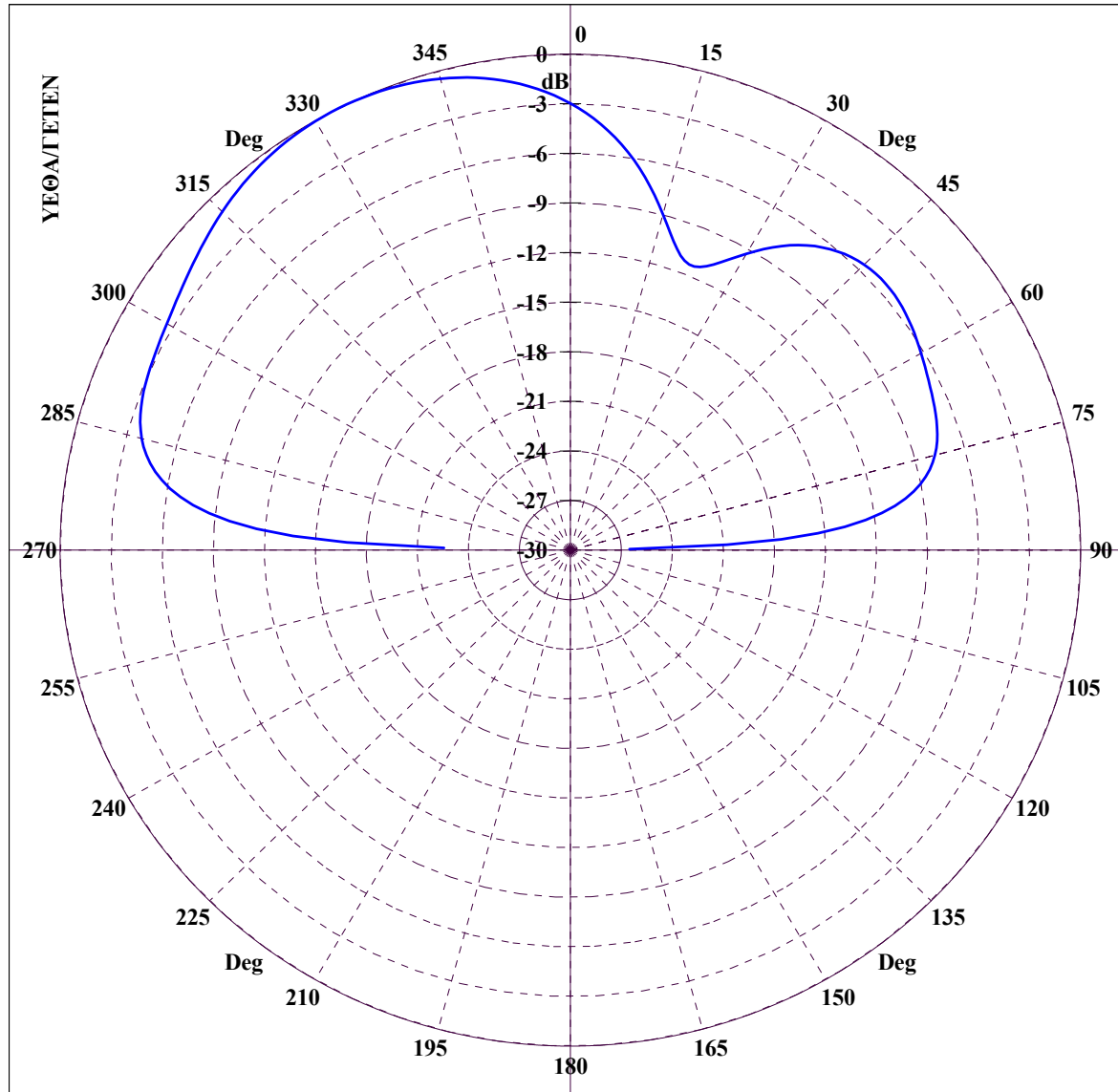
FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



File Name :DODGEA-NN100\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 90.00$ ,  $\Theta=0-360$ , FREQUENCY = 100.00 MHz

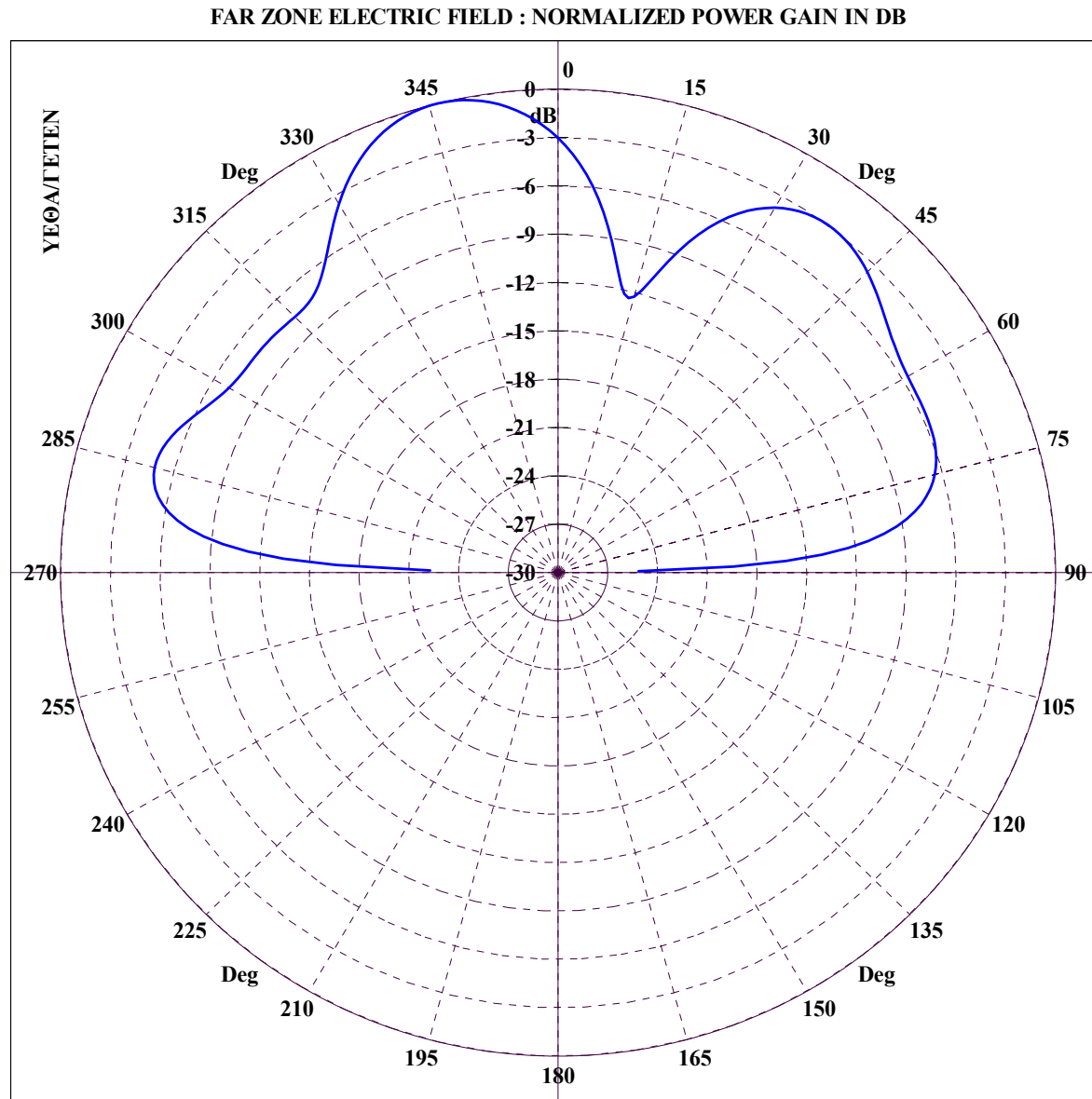
Διάγραμμα 5.4 : DODGE, Κεραία FM σε συχνότητα 100 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 90^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



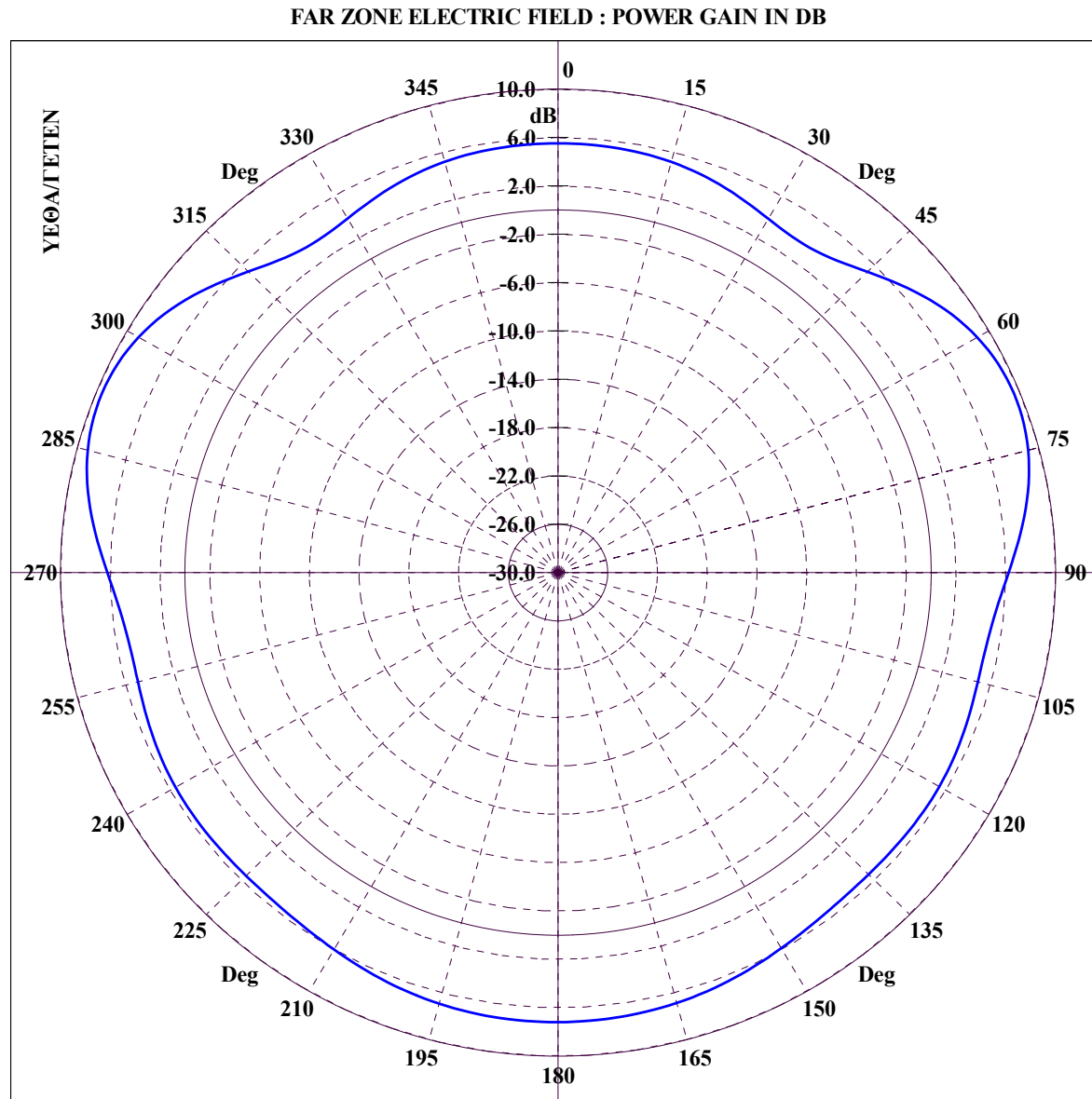
File Name :DODGEA-NN100\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 120.00$ ,  $\Theta=0-360$ , FREQUENCY = 100.00 MHz

Διάγραμμα 5.5 : DODGE, Κεραία FM σε συχνότητα 100 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 120^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .



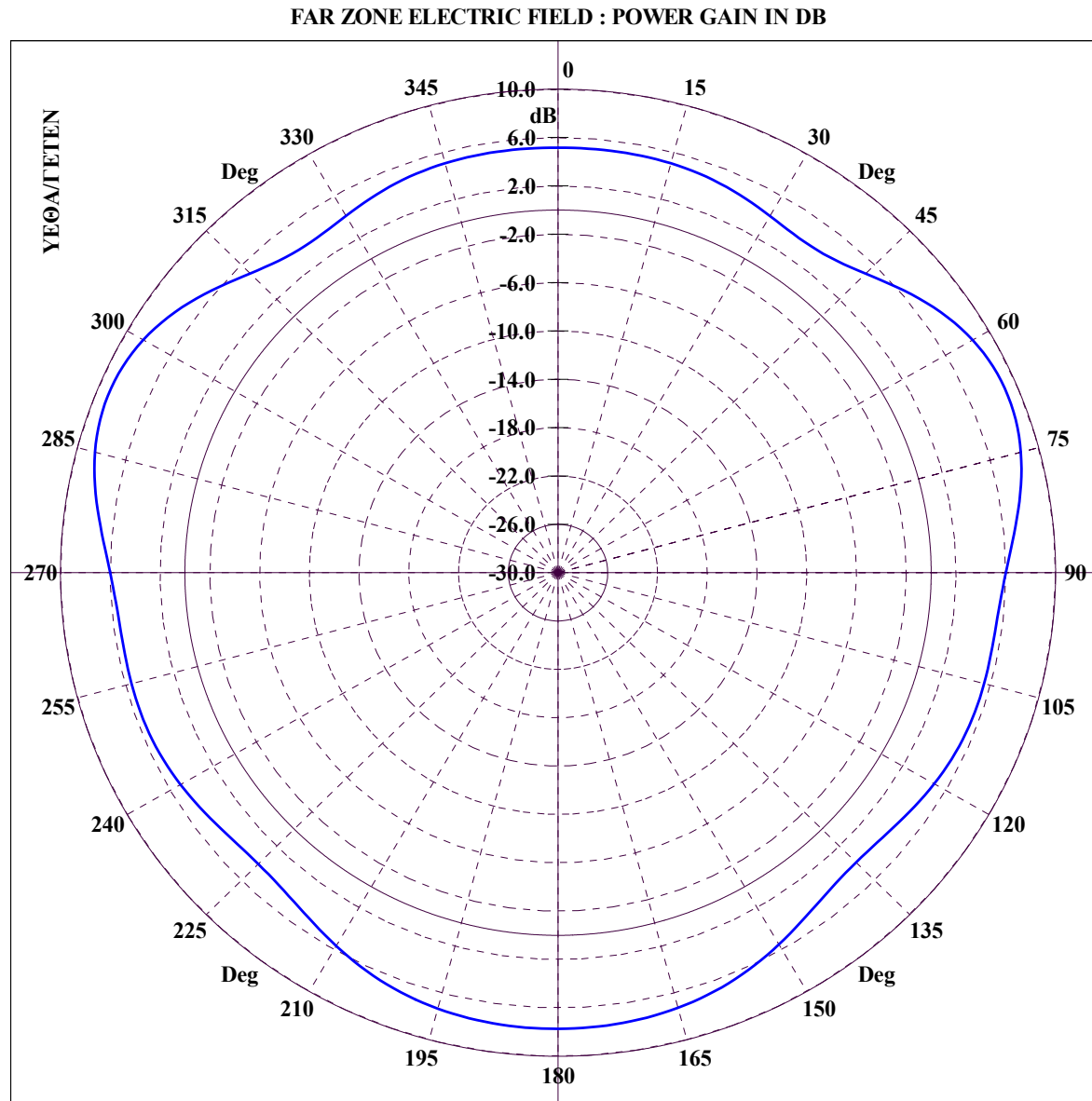
File Name :DODGEA-NN100\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 150.00$ ,  $\Theta=0-360$ , FREQUENCY = 100.00 MHz

Διάγραμμα 5.6 : DODGE, Κεραία FM σε συχνότητα 100 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 150^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .



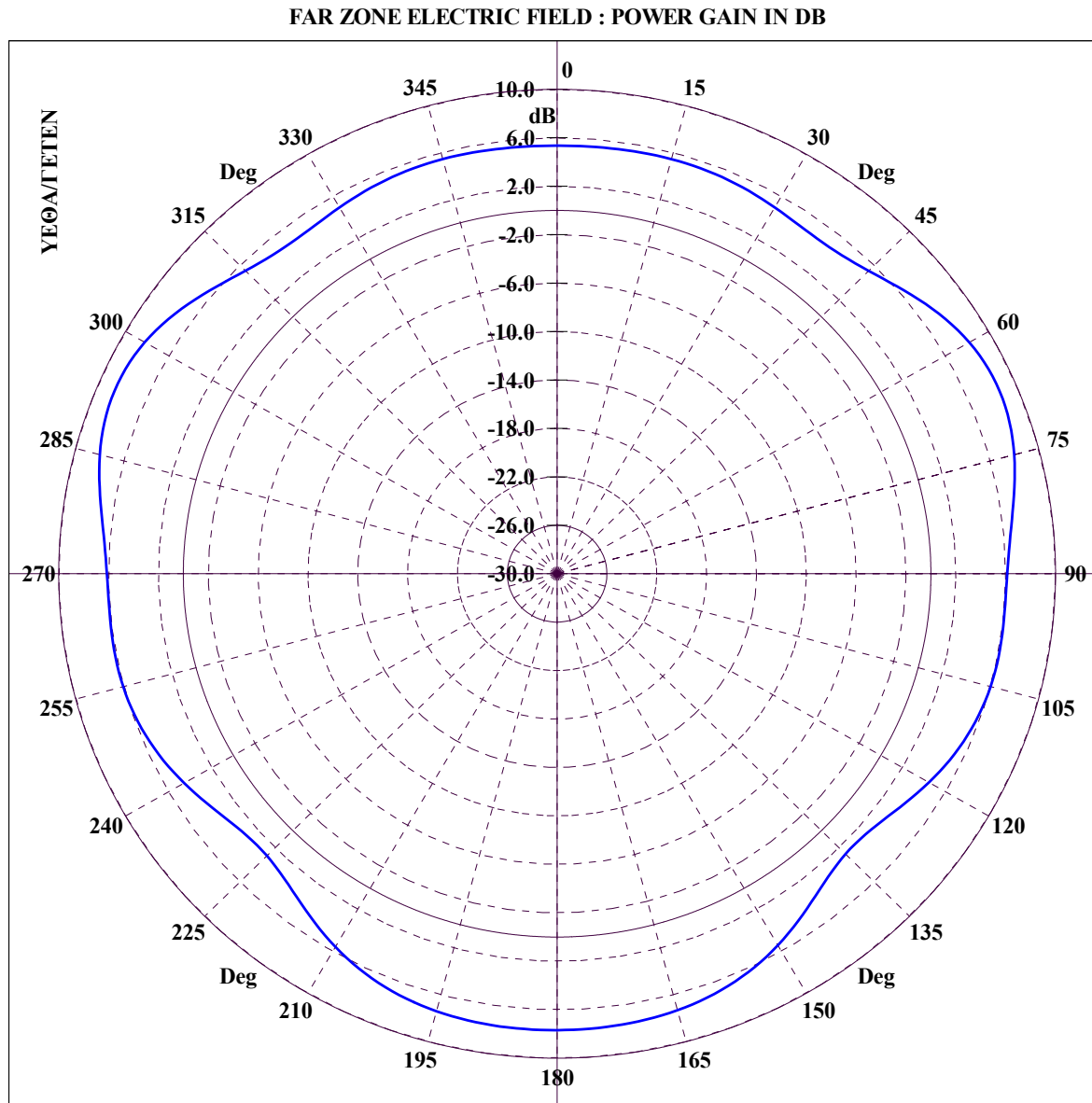
File Name :DODGEA-NN100\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 55.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 100.00 MHz

Διάγραμμα 5.7 : DODGE, Κεραία FM σε συχνότητα 100 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 55^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .



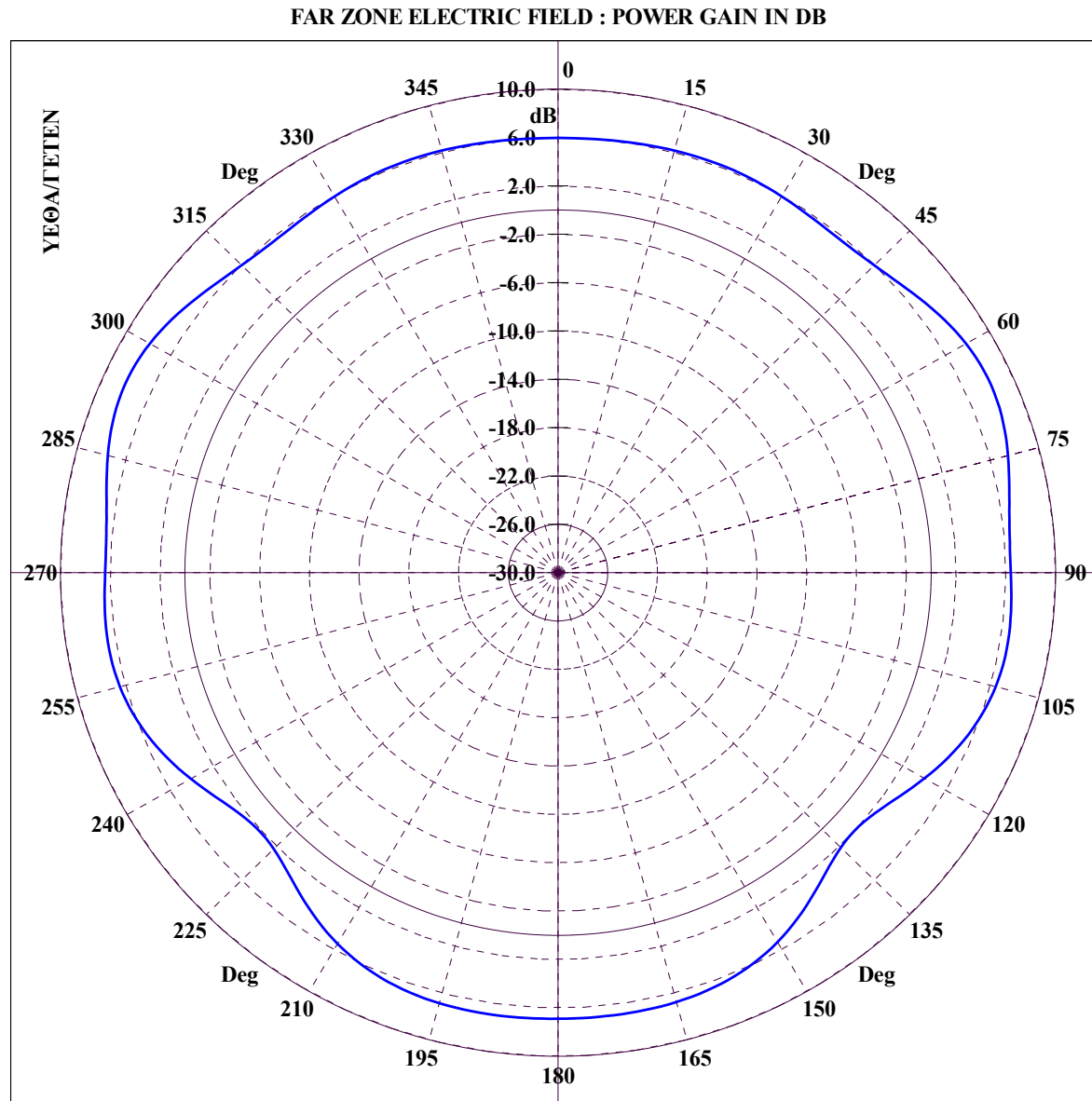
File Name :DODGEA-NN100\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 60.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 100.00 MHz

Διάγραμμα 5.8 : DODGE, Κεραία FM σε συχνότητα 100 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 60^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .



File Name :DODGEA-NN100\_CON. CONICAL CUT :  $\theta = 65.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 100.00 MHz

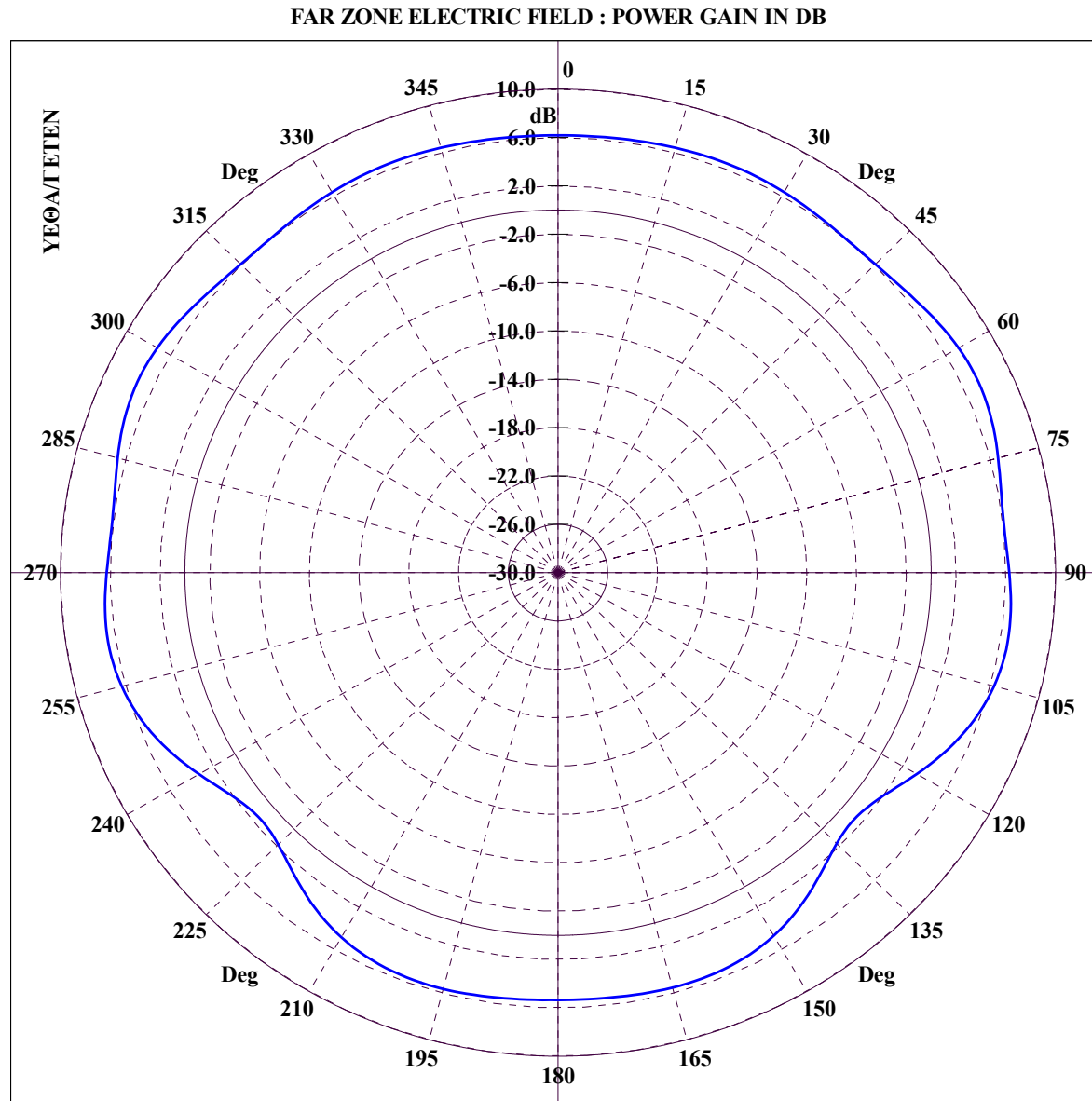
Διάγραμμα 5.9 : DODGE, Κεραία FM σε συχνότητα 100 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 65^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .



File Name :DODGEA-NN100\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 70.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 100.00 MHz

Διάγραμμα 5.10 : DODGE, Κεραία FM σε συχνότητα 100 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 70^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .

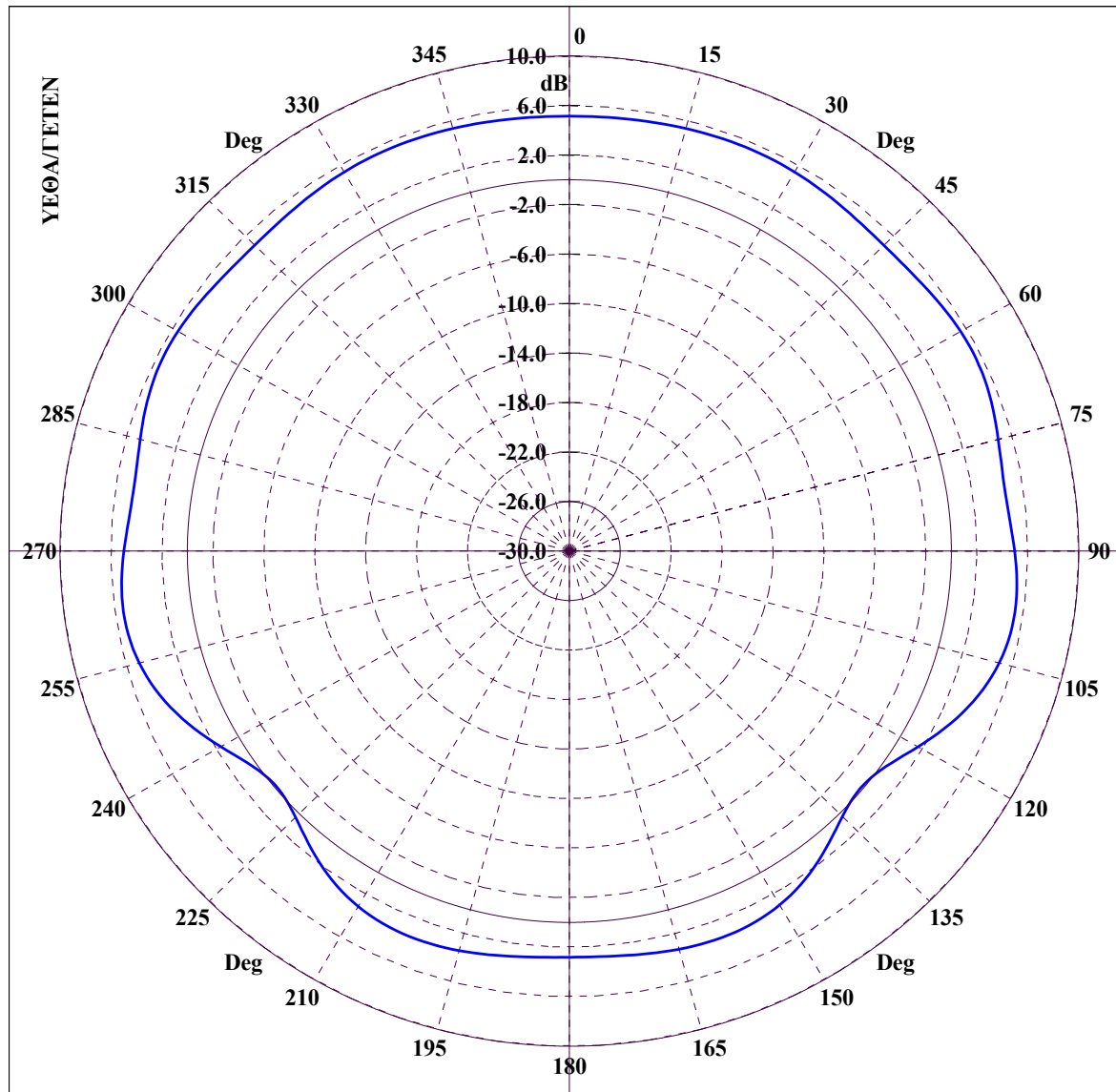




File Name :DODGEA-NN100\_CON. CONICAL CUT :  $\theta = 75.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 100.00 MHz

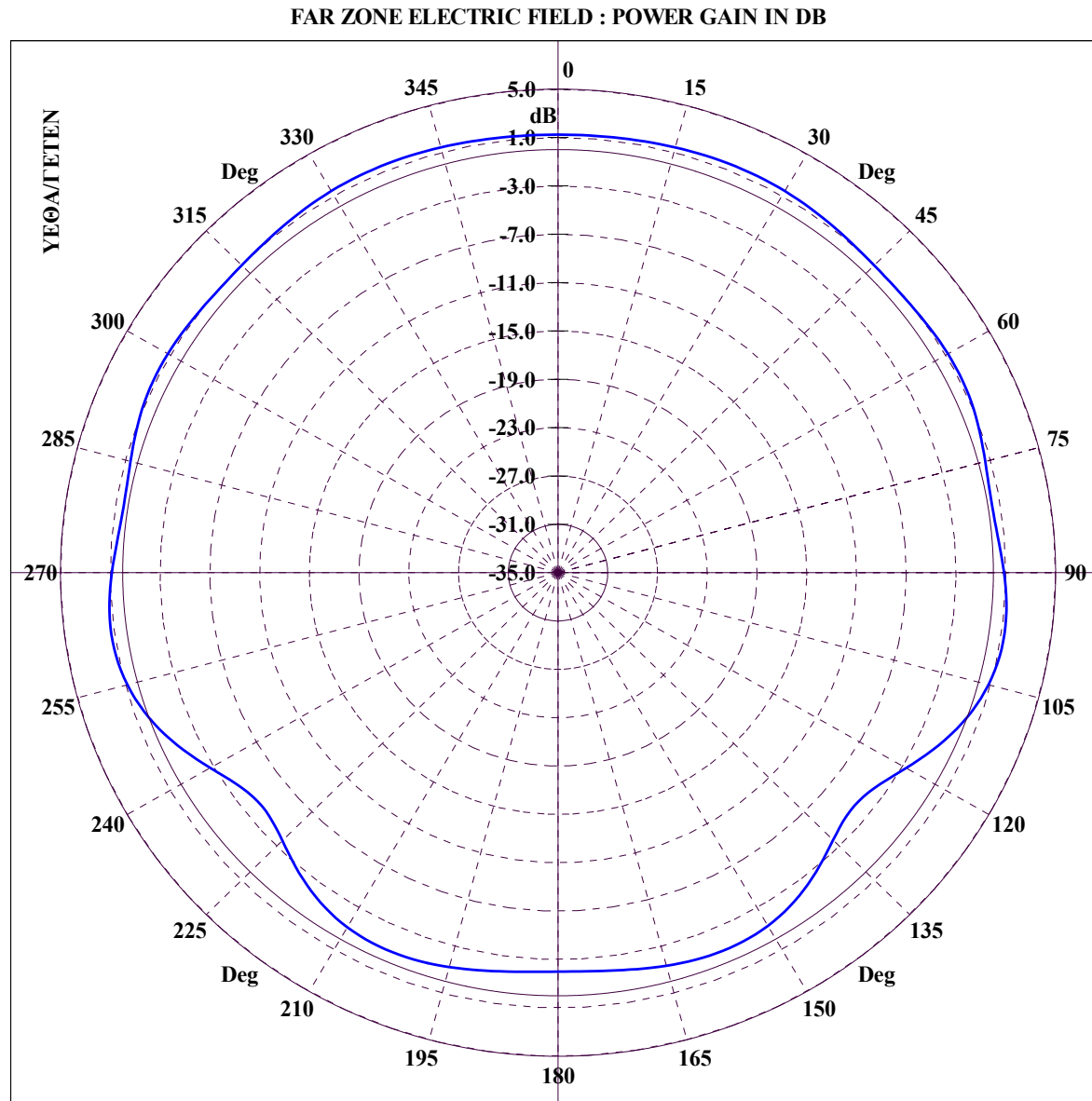
Διάγραμμα 5.11 : DODGE, Κεραία FM σε συχνότητα 100 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 75^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .

FAR ZONE ELECTRIC FIELD : POWER GAIN IN DB



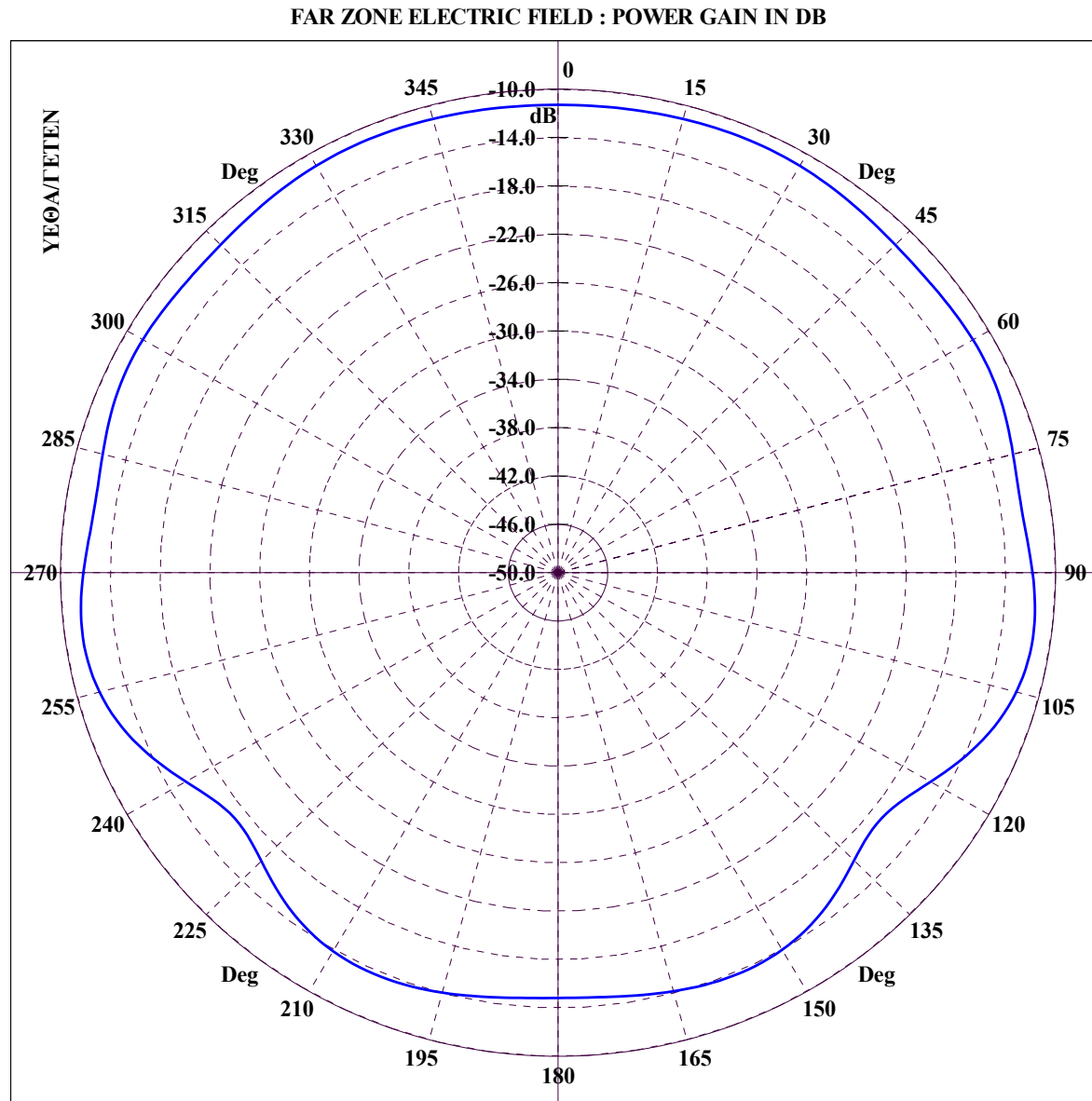
File Name :DODGEA-NN100\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 80.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 100.00 MHz

Διάγραμμα 5.12 : DODGE, Κεραία FM σε συχνότητα 100 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 80^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .



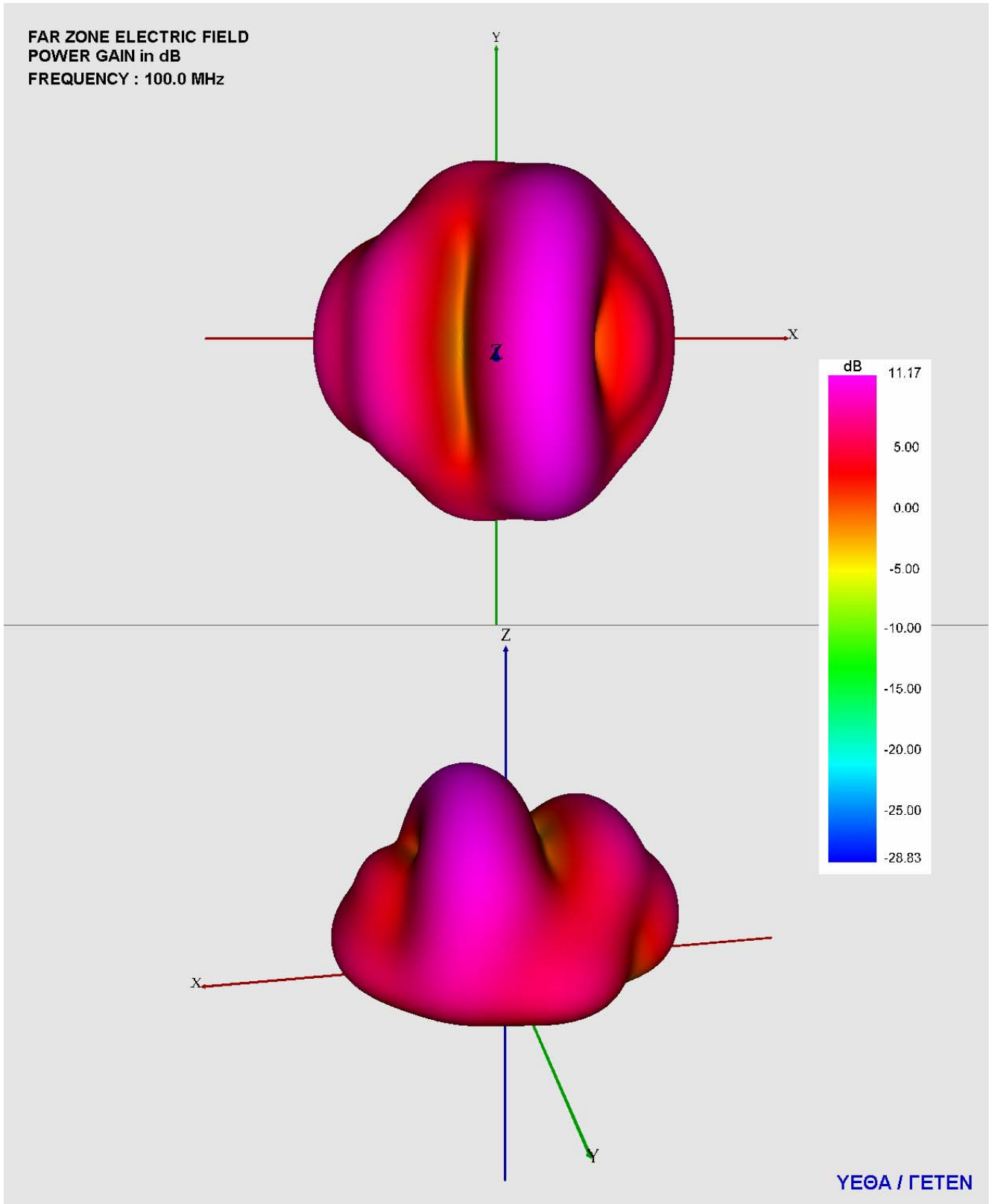
File Name :DODGEA-NN100\_CON. CONICAL CUT :  $\theta = 85.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 100.00 MHz

Διάγραμμα 5.13 : DODGE, Κεραία FM σε συχνότητα 100 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 85^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .



File Name :DODGEA-NN100\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 89.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 100.00 MHz

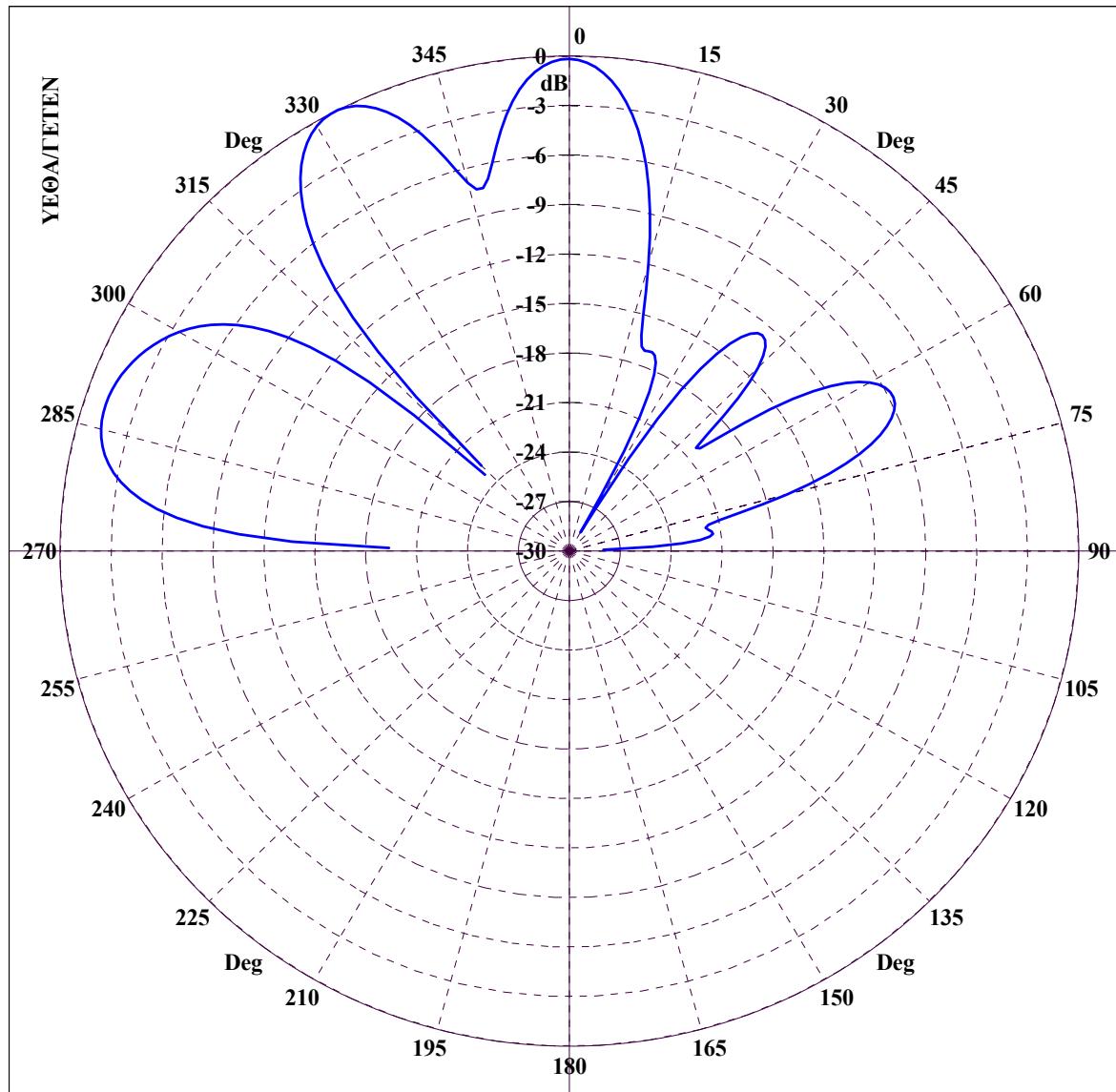
Διάγραμμα 5.14 : DODGE, Κεραία FM σε συχνότητα 100 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 89^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .



Διάγραμμα 5.15 : DODGE, 3D διάγραμμα κέρδους ισχύος για κεραία FM σε συχνότητα 100 MHz με χρήση VRML.

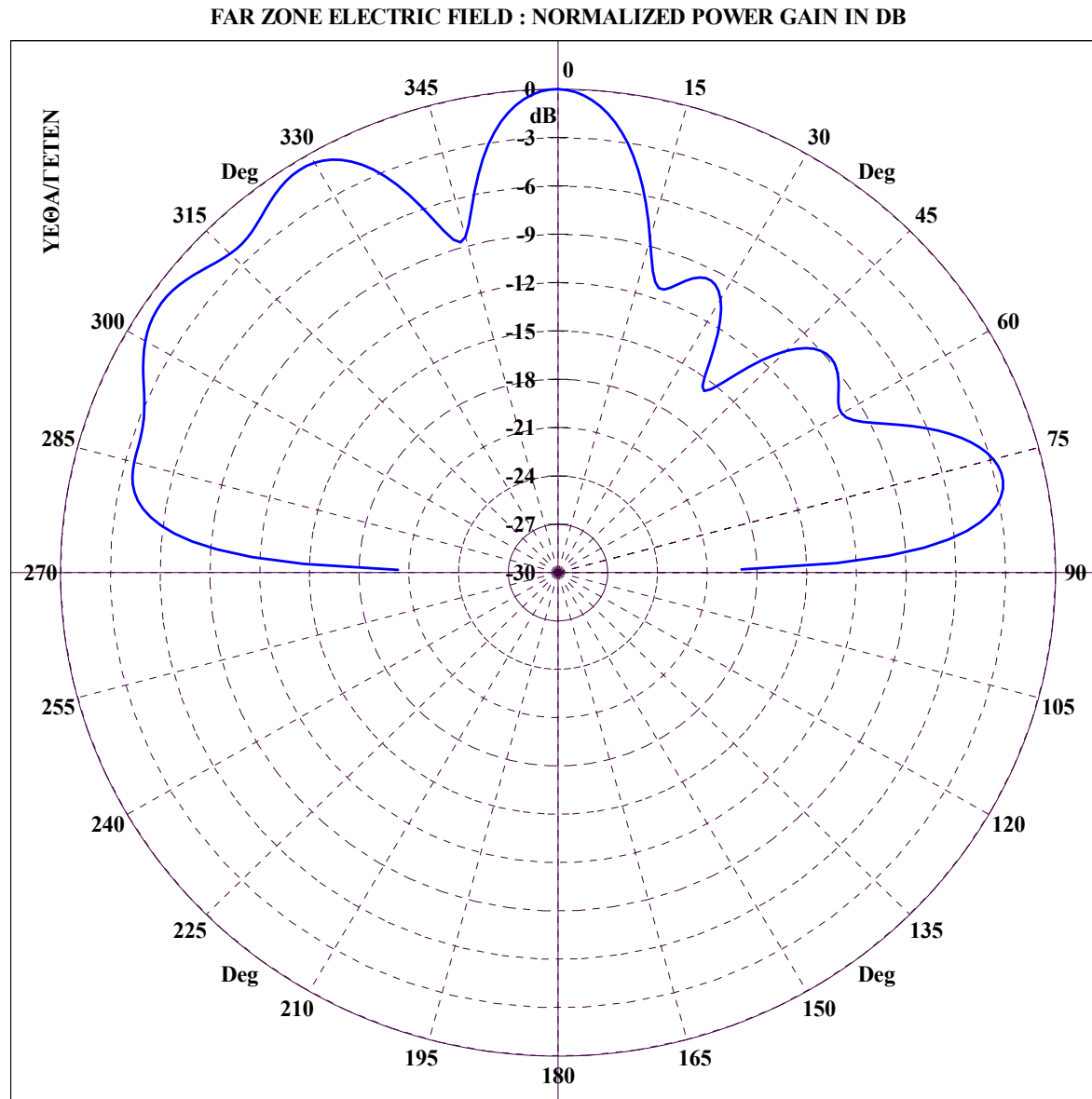
### ***5.2.2.2 Διαγράμματα ακτινοβολίας μακρινού πεδίου κεραίας VHF***

FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



File Name :DODGEA-NN146\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 0.00$ ,  $\Theta=0-360$ , FREQUENCY = 146.00 MHz

Διάγραμμα 5.16 : DODGE, Κεραία VHF σε συχνότητα 146 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 0^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

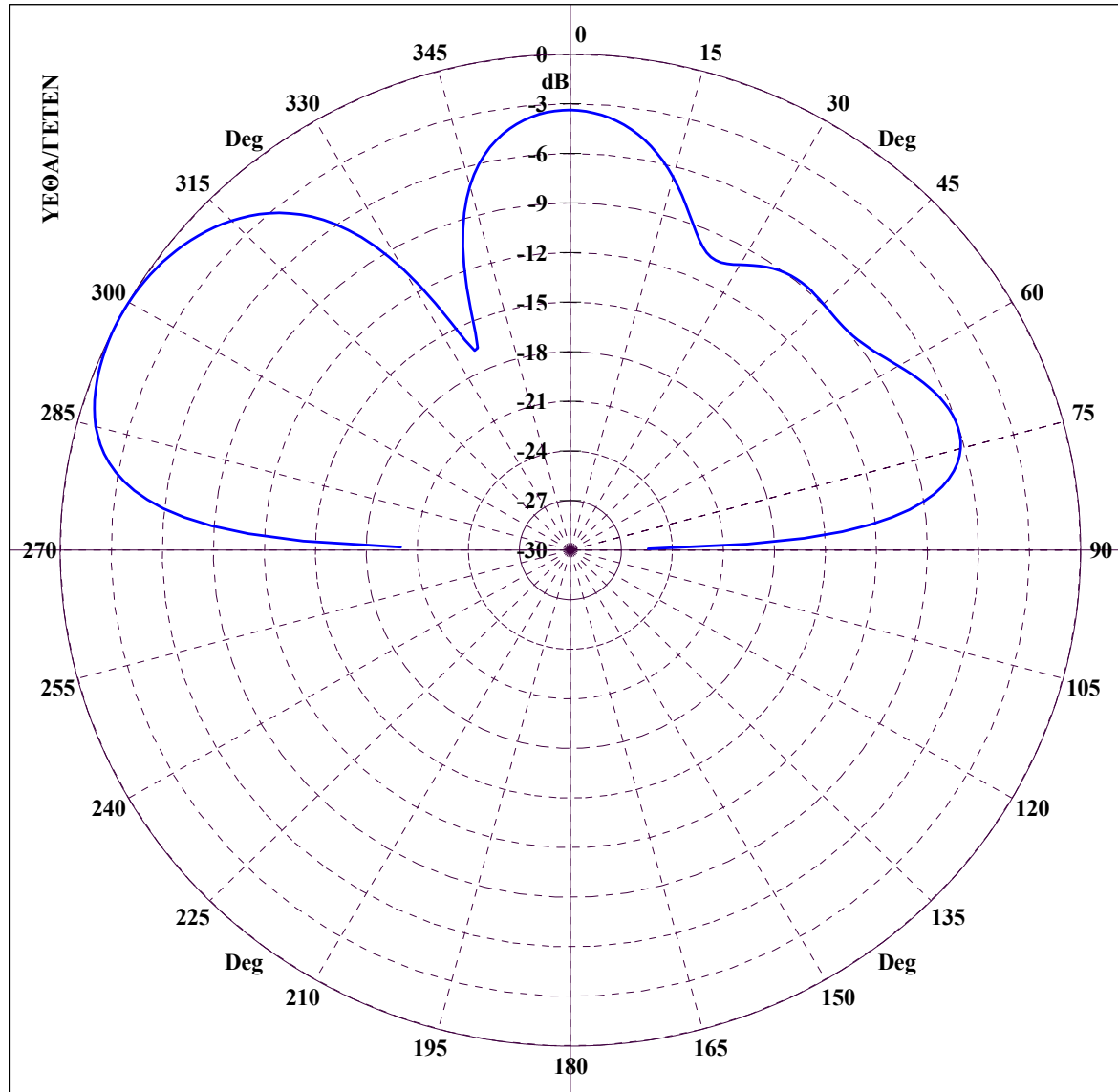


File Name :DODGEA-NN146\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 30.00$ ,  $\Theta=0-360$ , FREQUENCY = 146.00 MHz

Διάγραμμα 5.17 : DODGE, Κεραία VHF σε συχνότητα 146 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 30^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .



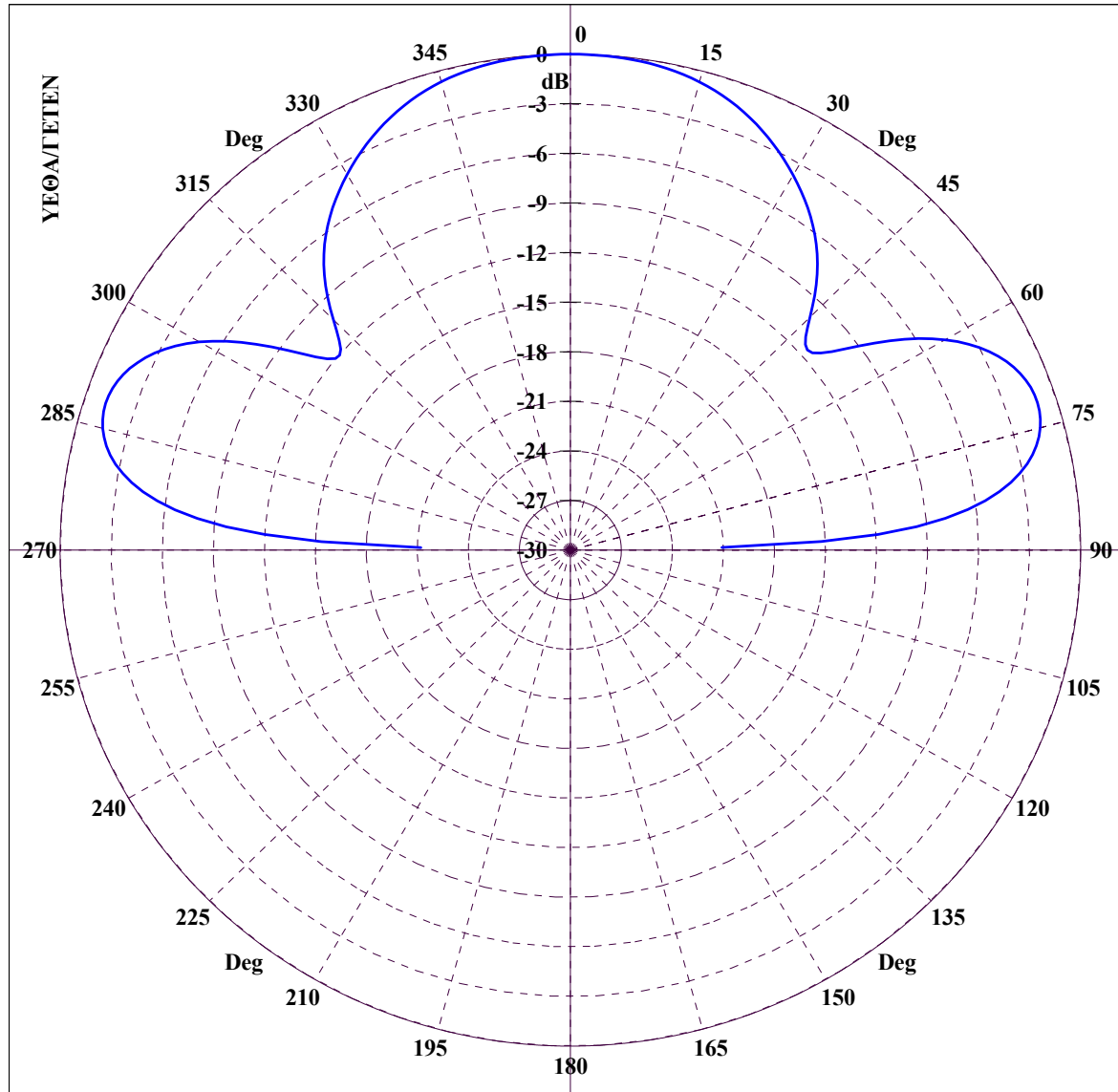
FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



File Name :DODGEA-NN146\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 60.00$ ,  $\Theta=0-360$ , FREQUENCY = 146.00 MHz

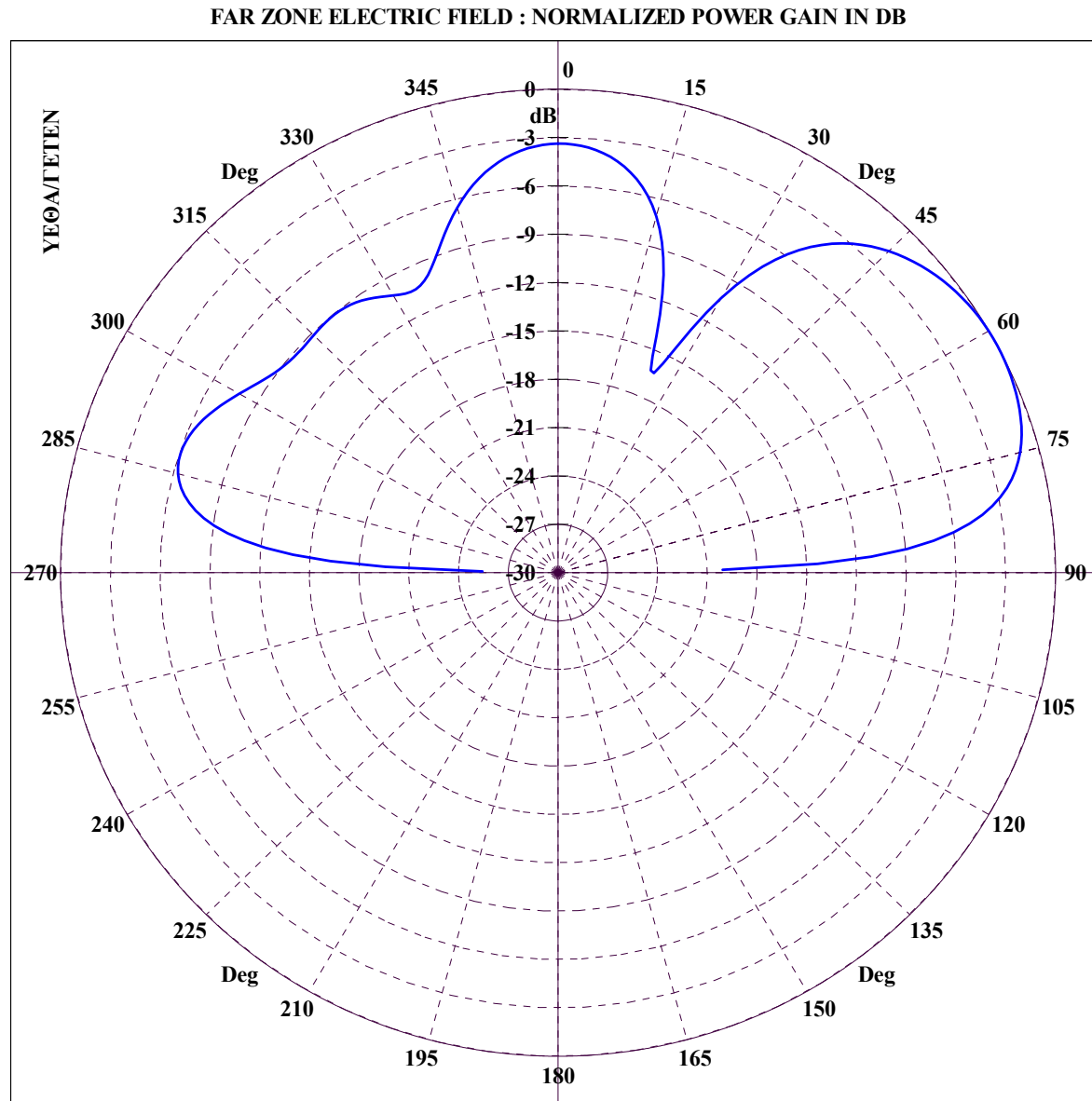
Διάγραμμα 5.18 : DODGE, Κεραία VHF σε συχνότητα 146 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 60^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



File Name :DODGEA-NN146\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 90.00$ ,  $\Theta=0-360$ , FREQUENCY = 146.00 MHz

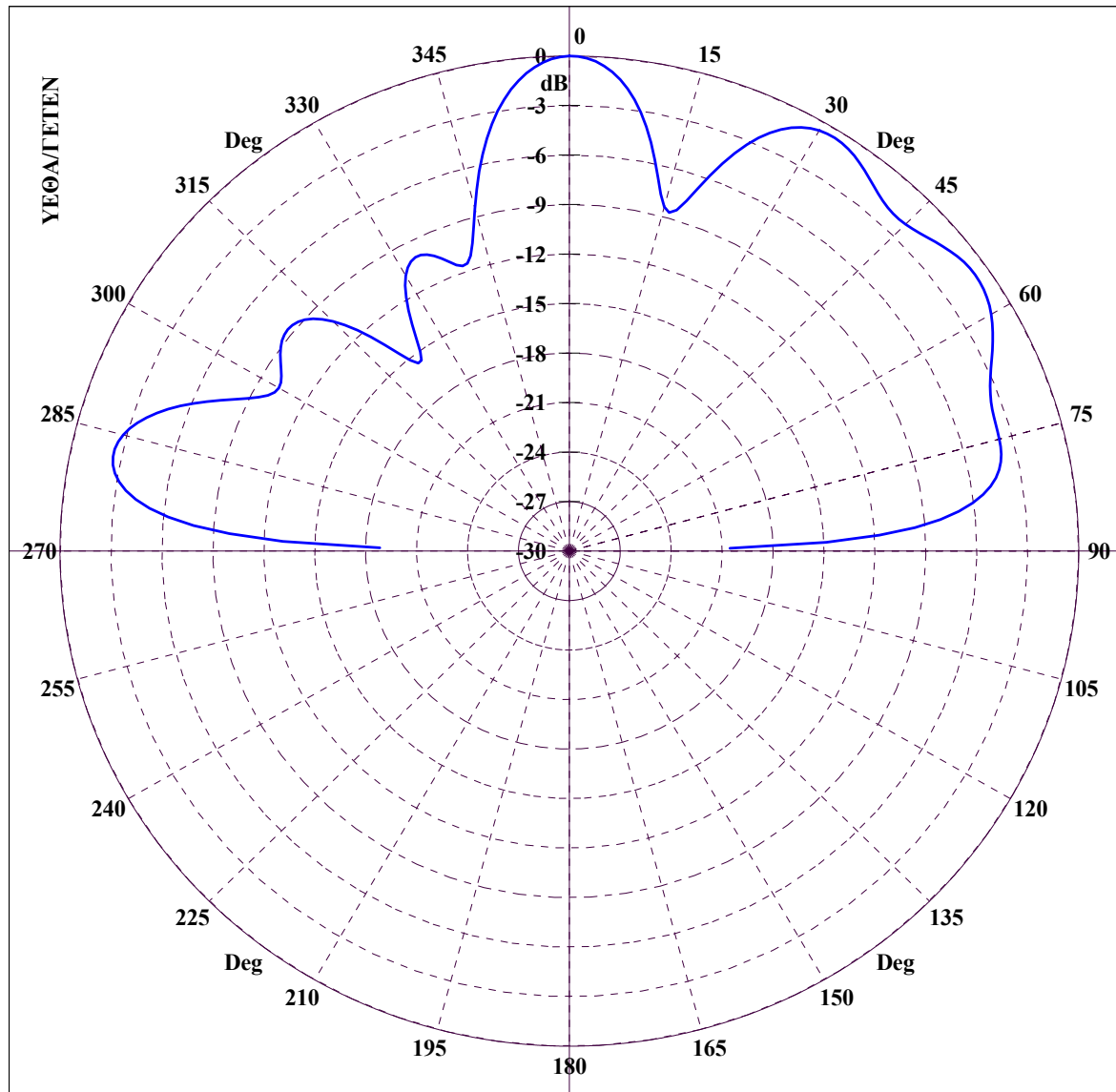
Διάγραμμα 5.19 : DODGE, Κεραία VHF σε συχνότητα 146 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 90^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .



File Name :DODGEA-NN146\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 120.00$ ,  $\Theta = 0-360$ , FREQUENCY = 146.00 MHz

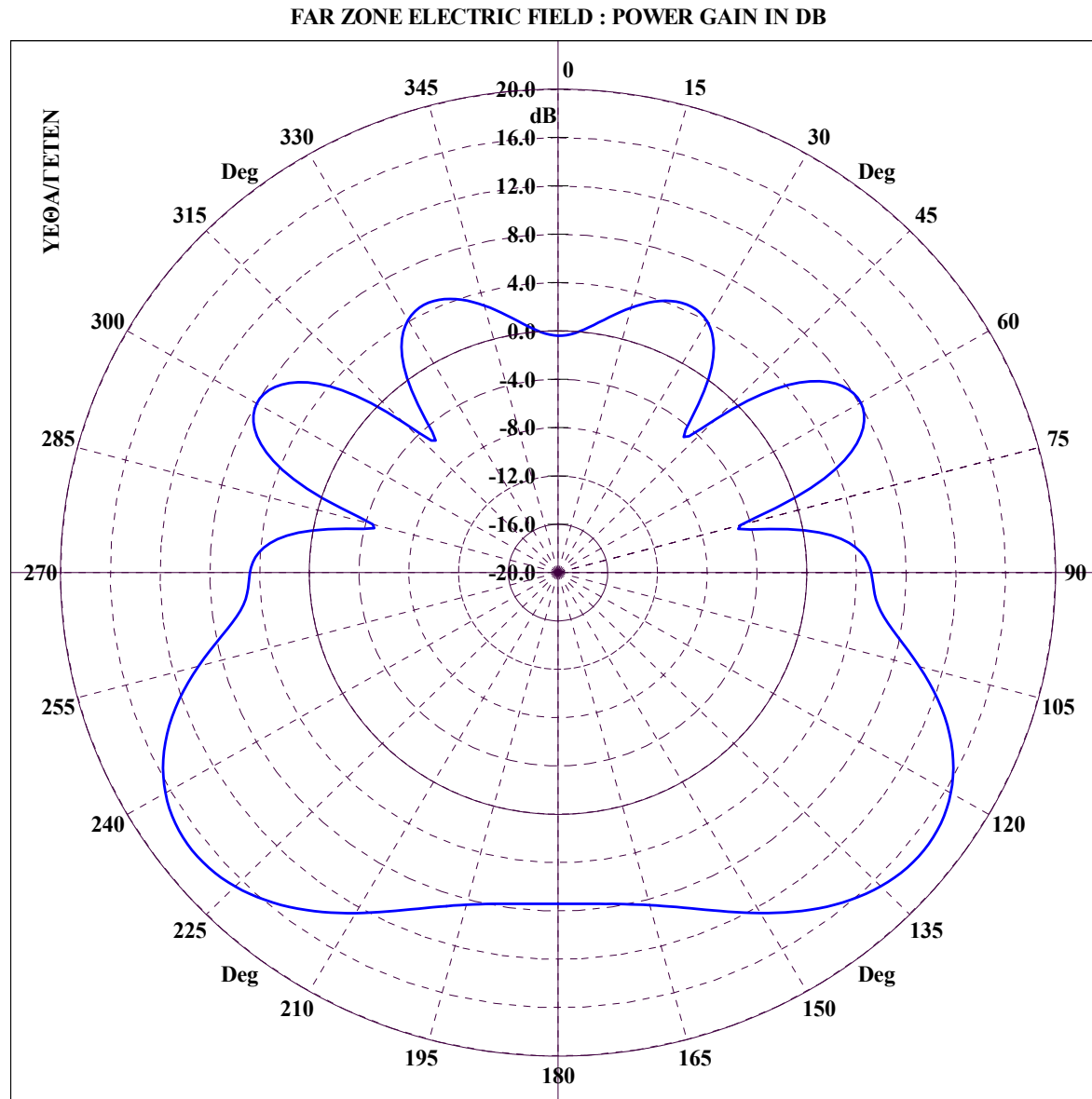
Διάγραμμα 5.20 : DODGE, Κεραία VHF σε συχνότητα 146 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 120^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



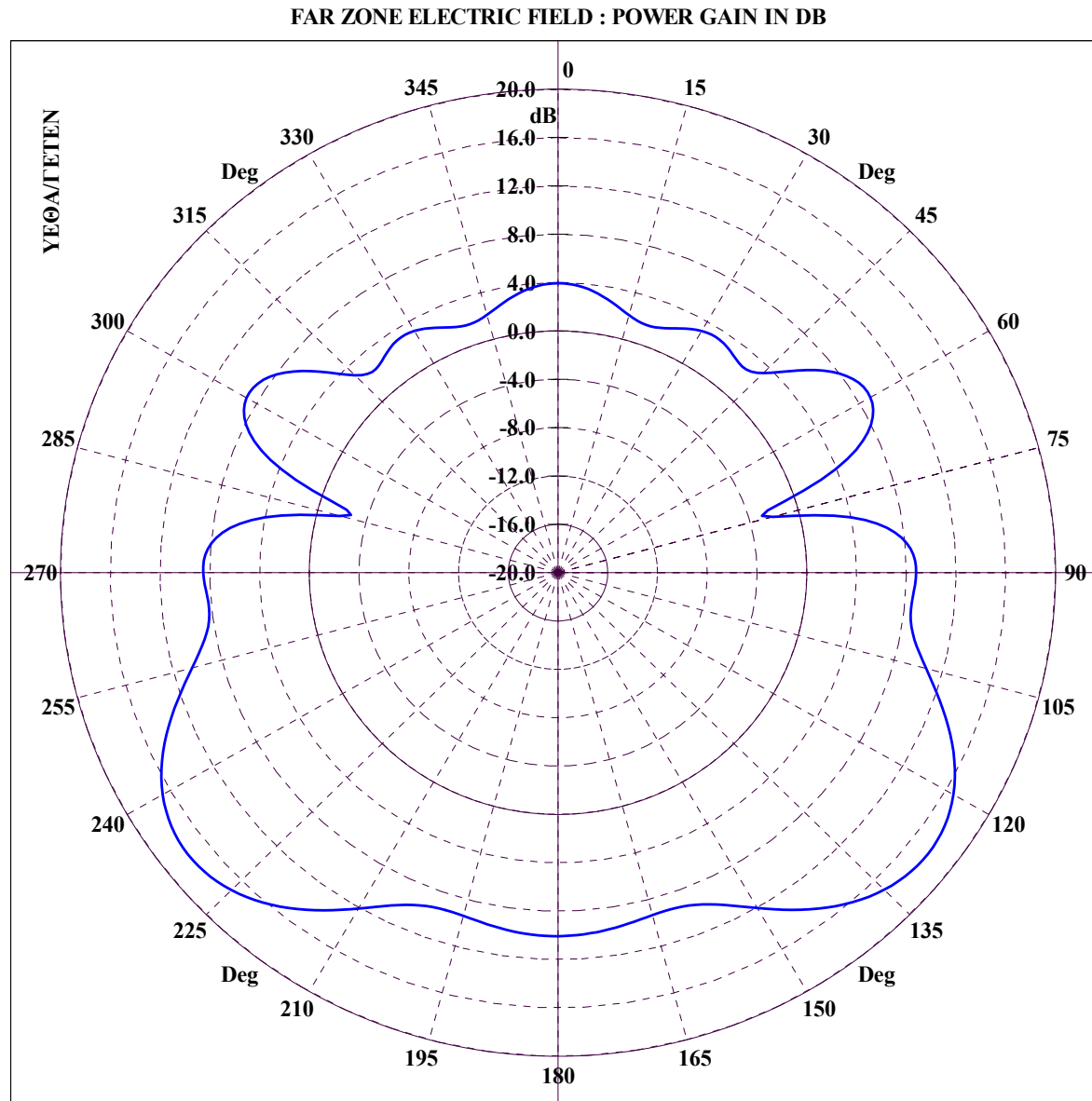
File Name :DODGEA-NN146\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 150.00$ ,  $\Theta = 0-360$ , FREQUENCY = 146.00 MHz

Διάγραμμα 5.21 : DODGE, Κεραία VHF σε συχνότητα 146 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 150^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .



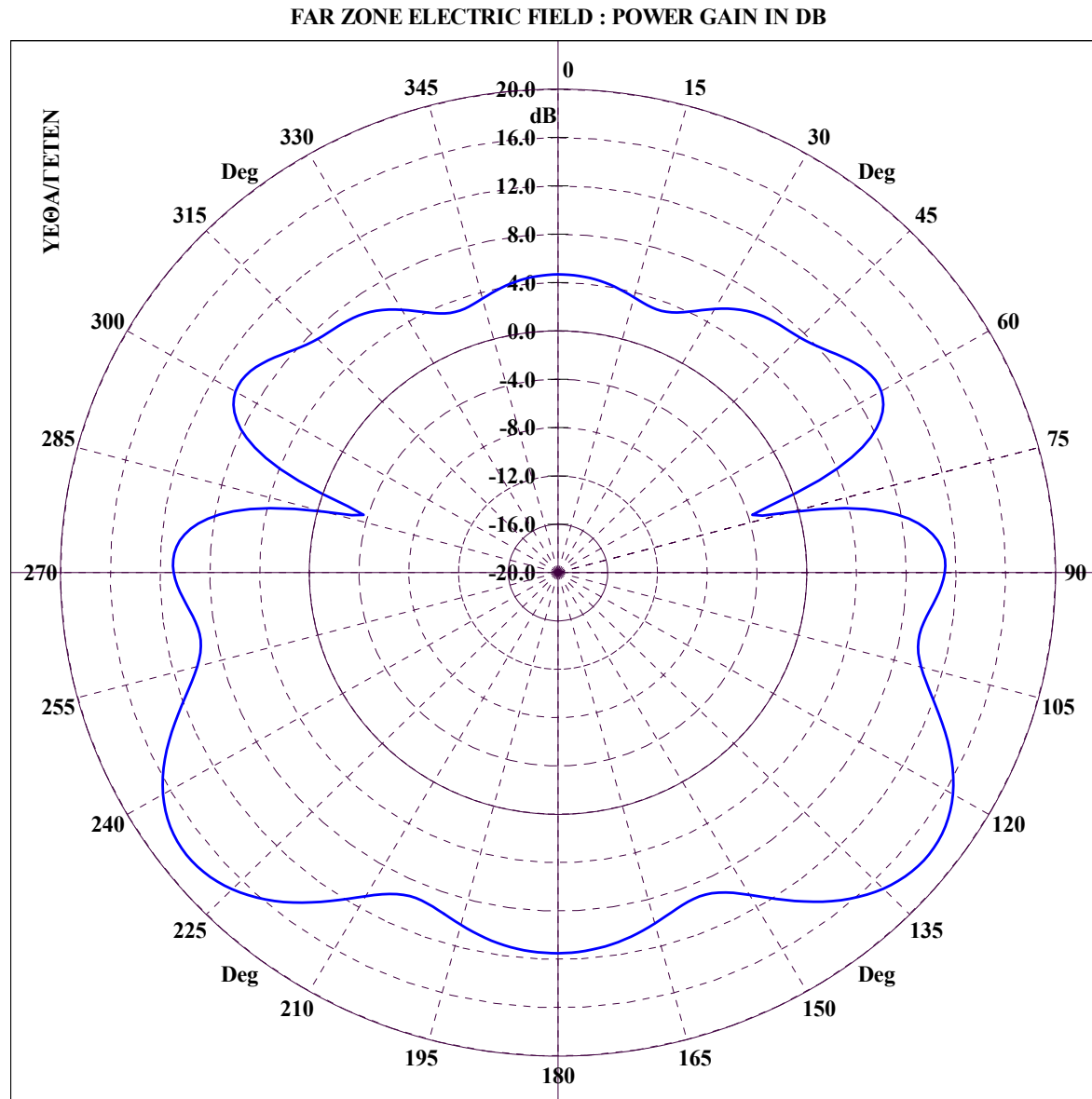
File Name :DODGEA-NN146\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 55.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 146.00 MHz

Διάγραμμα 5.22 : DODGE, Κεραία VHF σε συχνότητα 146 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 55^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .



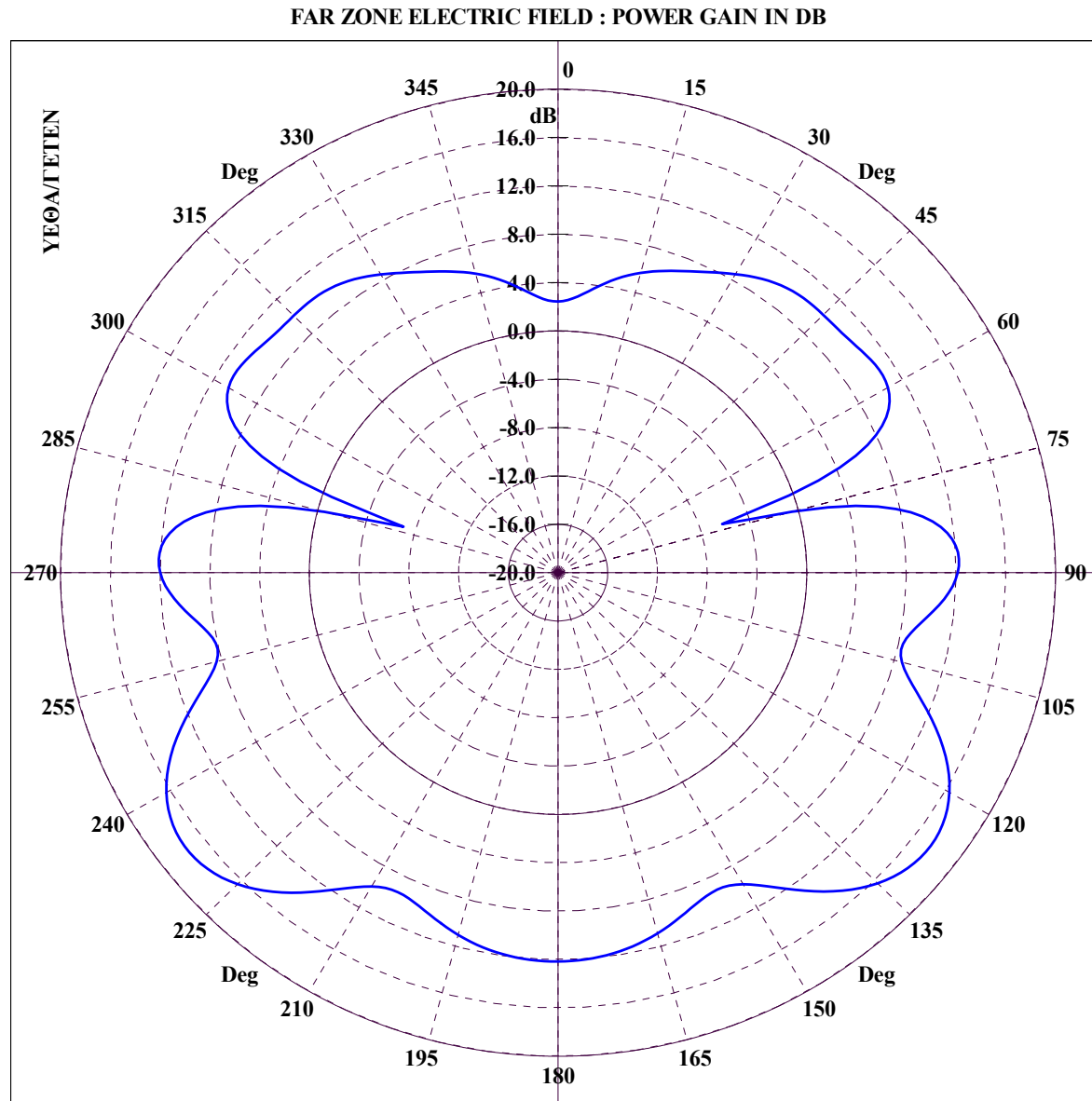
File Name :DODGEA-NN146\_CON. CONICAL CUT :  $\theta = 60.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 146.00 MHz

Διάγραμμα 5.23 : DODGE, Κεραία VHF σε συχνότητα 146 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 60^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .



File Name :DODGEA-NN146\_CON. CONICAL CUT :  $\theta = 65.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 146.00 MHz

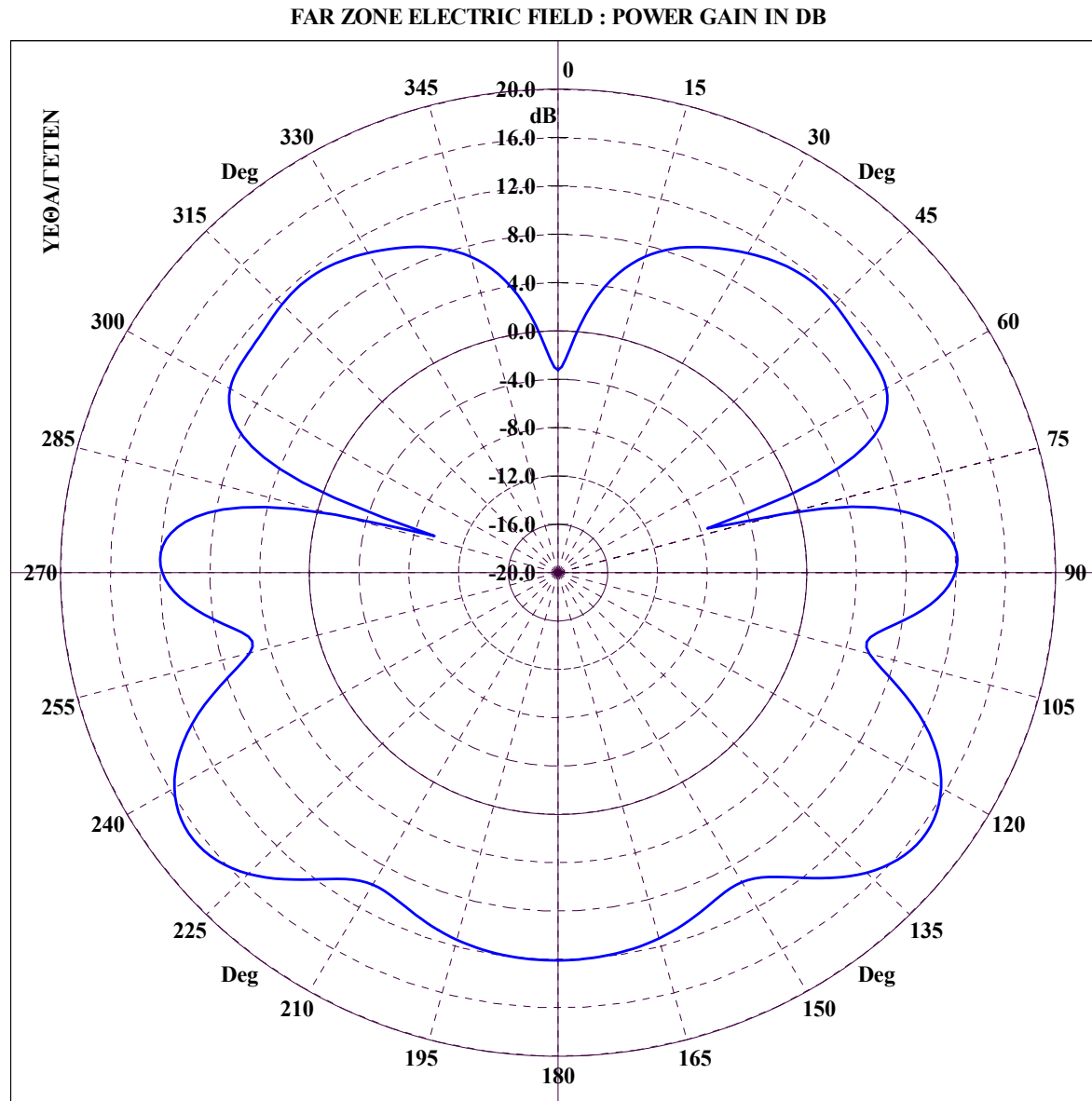
Διάγραμμα 5.24 : DODGE, Κεραία VHF σε συχνότητα 146 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 65^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .



File Name :DODGEA-NN146\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 70.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 146.00 MHz

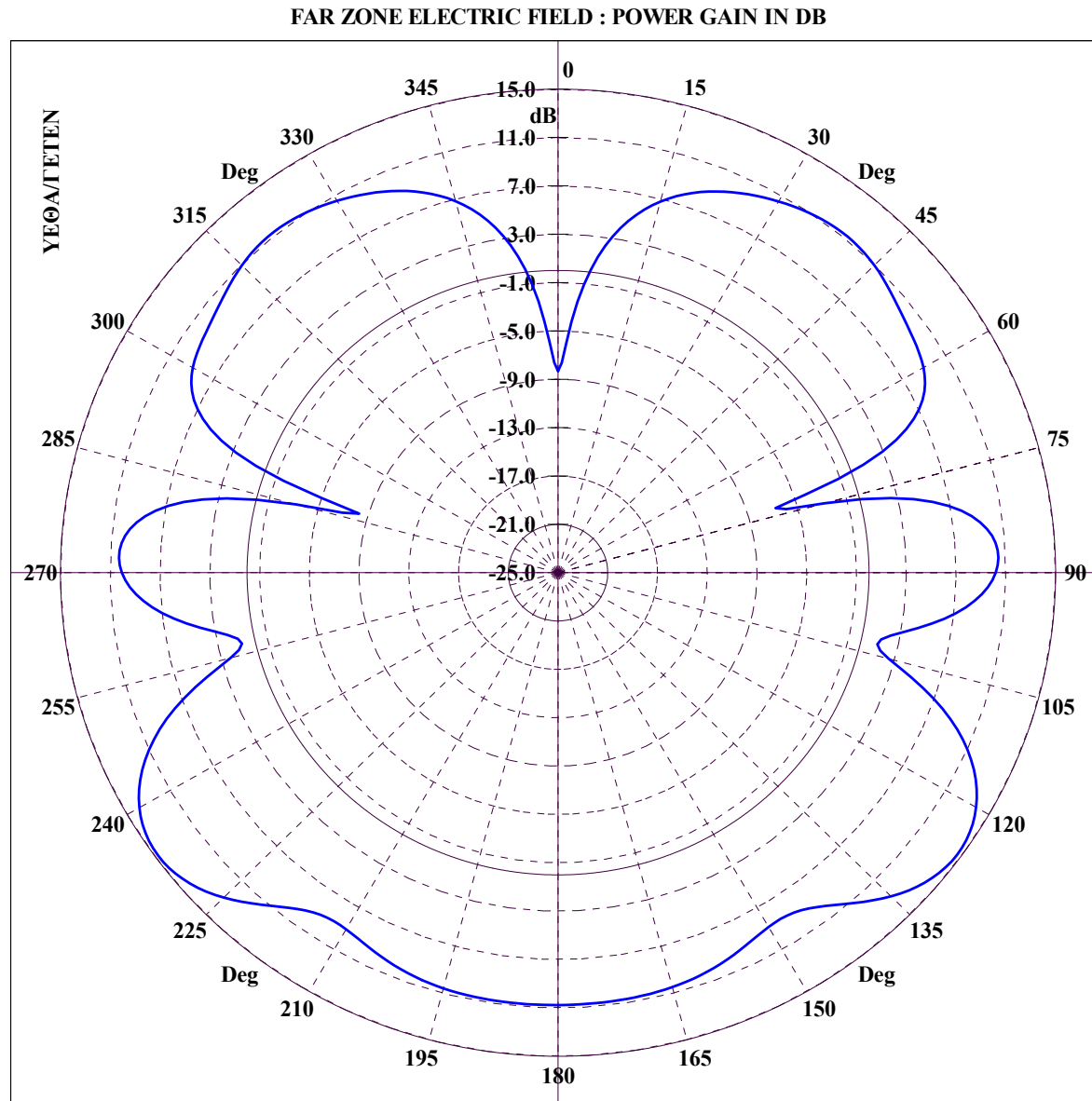
Διάγραμμα 5.25 : DODGE, Κεραία VHF σε συχνότητα 146 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 70^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .





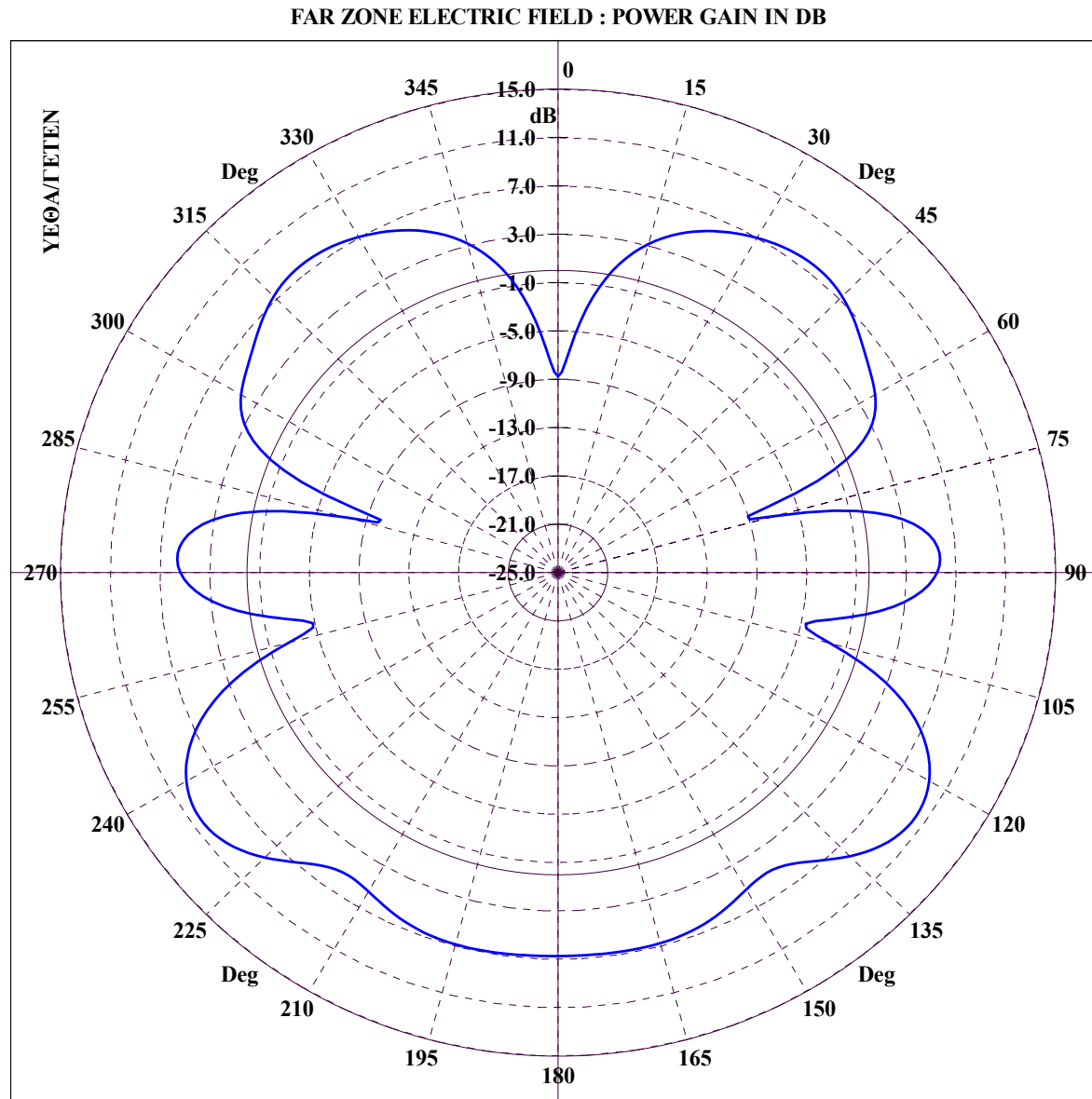
File Name :DODGEA-NN146\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 75.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 146.00 MHz

Διάγραμμα 5.26 : DODGE, Κεραία VHF σε συχνότητα 146 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 75^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .



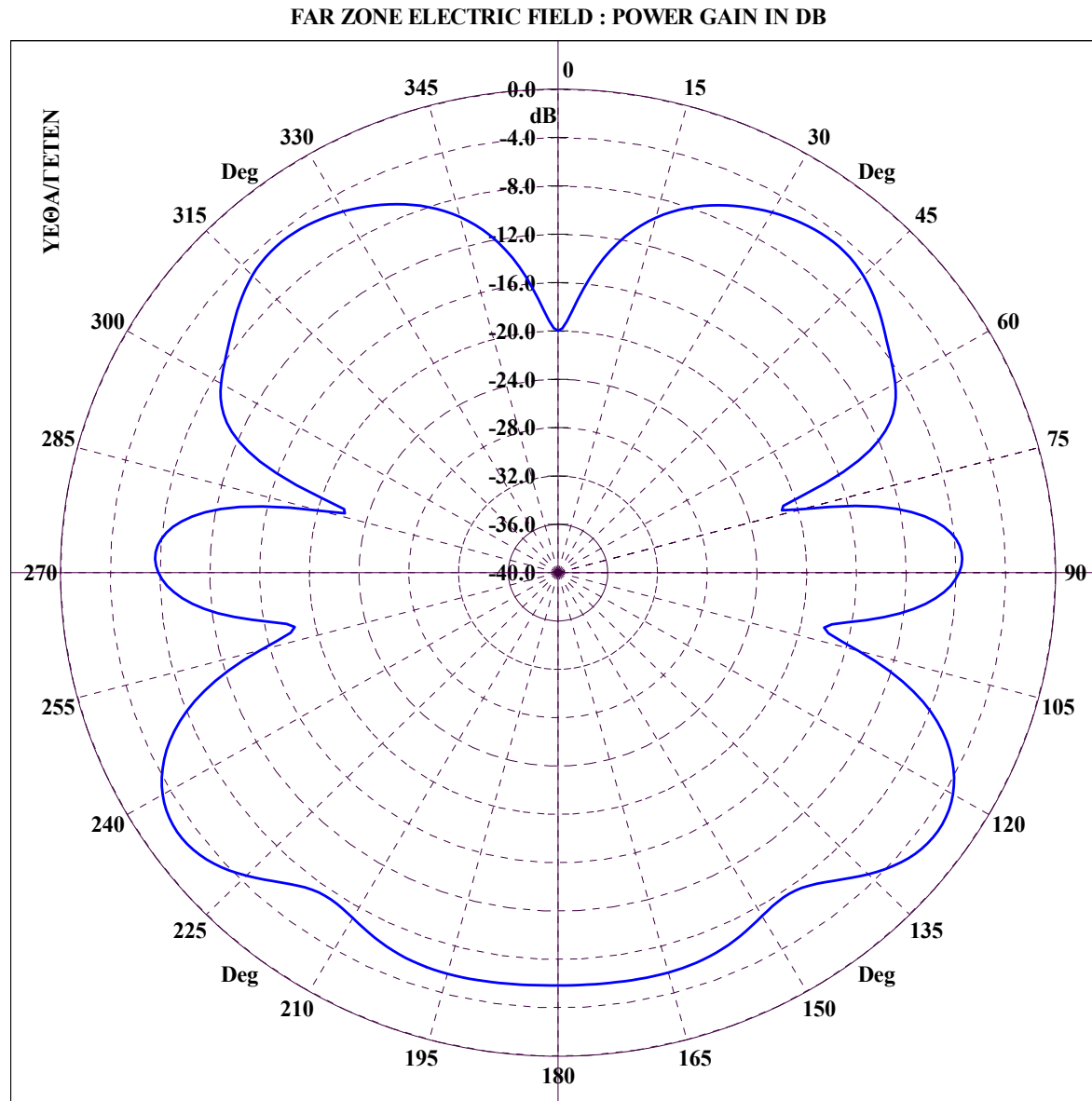
File Name :DODGEA-NN146\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 80.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 146.00 MHz

Διάγραμμα 5.27 : DODGE, Κεραία VHF σε συχνότητα 146 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 80^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .



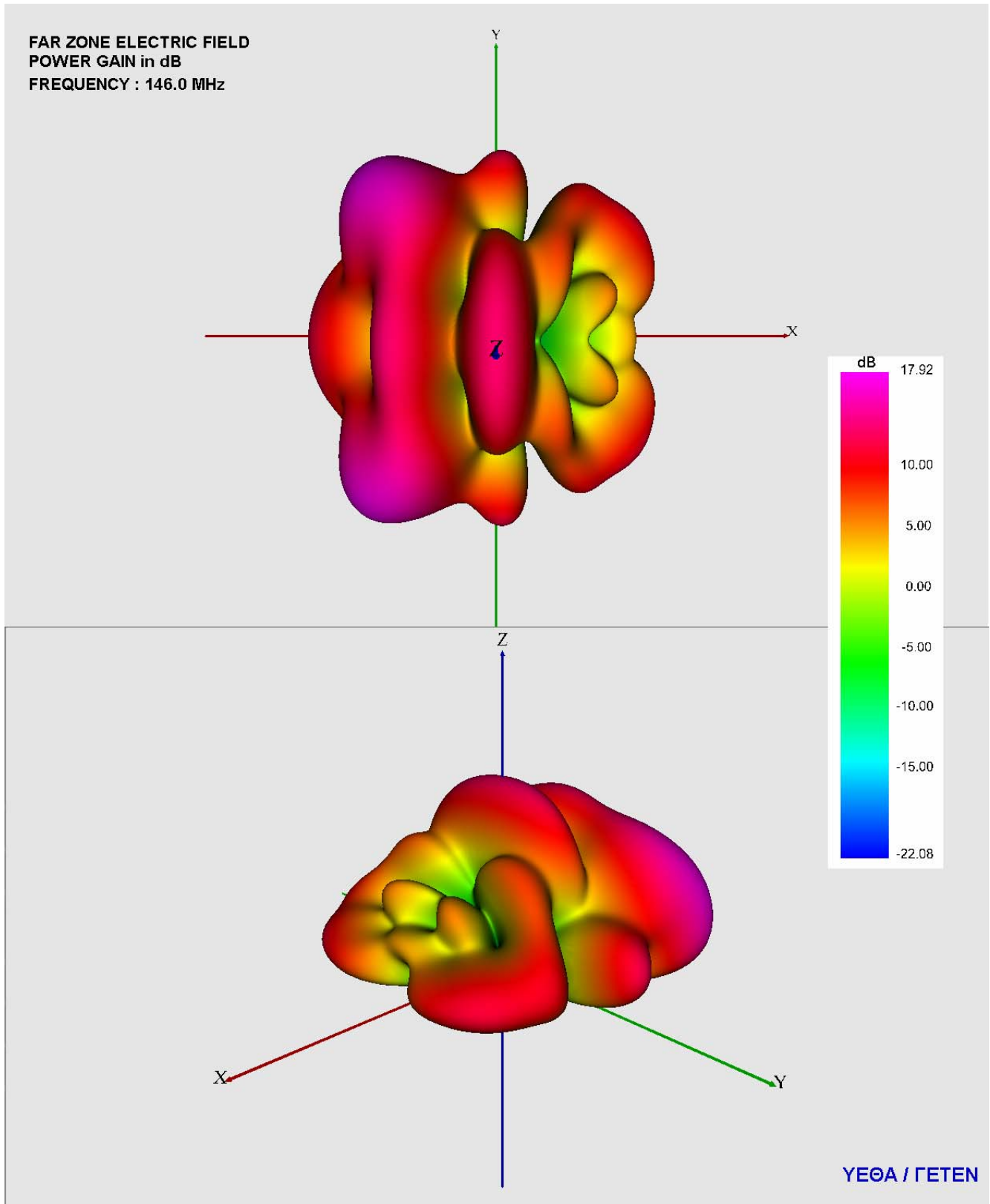
File Name :DODGEA-NN146\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 85.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 146.00 MHz

Διάγραμμα 5.28 : DODGE, Κεραία VHF σε συχνότητα 146 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 85^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .



File Name :DODGEA-NN146\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 89.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 146.00 MHz

Διάγραμμα 5.29 : DODGE, Κεραία VHF σε συχνότητα 146 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 89^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$



Διάγραμμα 5.30 : DODGE, 3D διάγραμμα κέρδους ισχύος για κεραία VHF σε συχνότητα 146 MHz με χρήση VRML.

### 5.2.2.3 Συγκριτικά στοιχεία προσομοίωσης

Παρακάτω παρατίθενται σε μορφή πίνακα τα συγκριτικά στοιχεία προσομοίωσης των κεραιών FM και VHF που φέρει το όχημα DODGE στις συχνότητες μελέτης των 100 και 146 MHz για την εύρεση των διαγραμμάτων ακτινοβολίας μακρινού πεδίου (Far Field calculations). Τα στοιχεία αυτά αφορούν τον αριθμό νημάτων που χρησιμοποιήθηκαν αρχικώς για την κατασκευή του wire grid μοντέλου, σε ποσοστό τμηματοποίησης, δηλαδή σε αριθμό segments ανά μήκος κύματος  $\lambda$ , στον αριθμό των segments που τελικά παρήχθησαν από τη διαδικασία τμηματοποίησης καθώς και το χρόνο που χρειάστηκε για την εκτέλεση της προσομοίωσης.

Συγκριτικά στοιχεία ανά κεραία και ανά συχνότητα λειτουργίας	Αριθμός νημάτων μοντέλου	Ποσοστό τμηματοποίησης	Αριθμός segments που παρήχθησαν	Χρόνος εκτελέσεως προσομοίωσης (sec)
<b>Κεραία FM</b>				
100 MHz	3579	$\lambda/20$	7247	1531.740
<b>Κεραία VHF</b>				
146 MHz	3579	$\lambda/20$	9147	2699.990

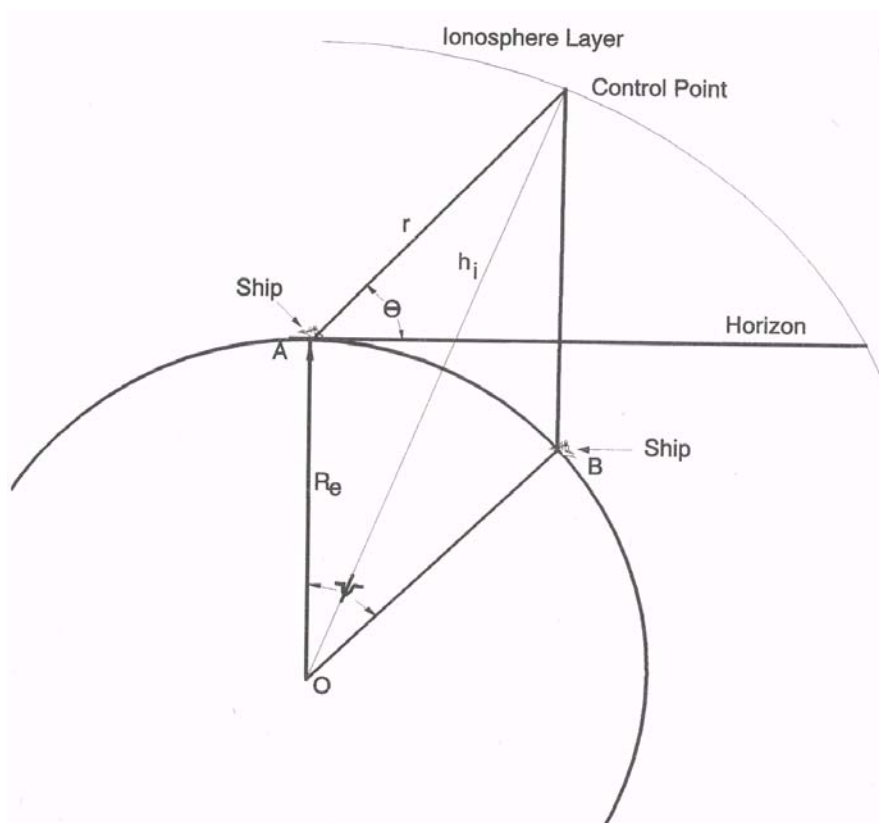
**Πίνακας 5.1 : Συγκριτικά στοιχεία προσομοίωσης των δυο VHF κεραιών που φέρει το όχημα DODGE.**

Παρατηρείται ότι οι μεγαλύτεροι χρόνοι εκτέλεσης αντιστοιχούν στην μεγαλύτερη συχνότητα των 146 MHz όπως και αναμενόταν αφού για αυτή τη συχνότητα, καθότι μεγαλύτερη εκ των δυο, ο αριθμός των segments που τελικά παρήχθησαν είναι ο μεγαλύτερος.

## 5.3 Ναυτικές επικοινωνίες μακρινών αποστάσεων σε HF συχνότητες

### 5.3.1 Εισαγωγή

Η μπάνα των HF συχνοτήτων [6],[9] ορίζεται τεχνικά ως η περιοχή συχνοτήτων από 3 έως και 30 MHz, πρακτικά, όμως, θεωρείται ως η περιοχή συχνοτήτων από 2 έως και 30 MHz καθότι αυτή η περιοχή χρησιμοποιείται σήμερα ευρύτατα για ναυτικές επικοινωνίες μακρινών αποστάσεων μη οπτικής επαφής (NLOS) στρατιωτικού περισσότερο χαρακτήρα. Οι επικοινωνίες στα HF πραγματοποιούνται κυρίως μέσω ιονόσφαιρας και καλύπτουν ένα μεγάλο ποσοστό των επικοινωνιών μεταξύ παρακτίων σταθμών και κάθε είδους ναυτικών μονάδων αλλά και των απευθείας επικοινωνιών μεταξύ των ιδίων των ναυτικών μονάδων (σχήμα 5.3), ειδικώς στην περίπτωση που οι δορυφορικές επικοινωνίες δεν είναι διαθέσιμες για οποιοδήποτε λόγο. Οι ζεύξεις στα HF είναι στενού φάσματος, κανάλια των 3 KHz για υπηρεσίες φωνής και ισοδύναμη ταχύτητα μετάδοσης έως και 2400bps για υπηρεσίες δεδομένων.



Σχήμα 5.3 : Επικοινωνία μεταξύ δυο πλοίων μέσω ιονόσφαιρας.

Ιστορικά, οι επικοινωνίες στα HF ήταν αρχικά ο μόνος τρόπος επικοινωνιών μακρινών αποστάσεων (NLOS) μεταξύ πλοίων τόσο πολιτικού όσο και στρατιωτικού χαρακτήρα. Αυτό οφειλόταν κυρίως σε δυο λόγους. Πρώτον, μολονότι οι ζεύξεις στα HF ήταν επιρρεπείς στις

διακυμάνσεις που εμφανίζει ανά περιοχή, ώρα, μέρα και εποχή η ιονόσφαιρα και στις διαλείψεις λόγω πολλαπλών διαδρομών, είχαν το μεγάλο πλεονέκτημα του χαμηλού ατμοσφαιρικού θορύβου, σε αντίθεση με τις χαμηλότερες συχνότητες (MF) που διαδίδονται και ιονοσφαιρικά. Δεύτερος λόγος ήταν ότι κατέστη δυνατή ήδη από τα πρώτα χρόνια των ραδιοεπικοινωνιών η κατασκευή αποδοτικών κεραιών κυρίως στα HF.

Στις πρόσφατες δεκαετίες, η ραγδαία ανάπτυξη στο χώρο της δορυφορικής τεχνολογίας, κατέστησε τις δορυφορικές επικοινωνίες (SATCOMS) ως ένα εναλλακτικό τρόπο επικοινωνιών μακρινών αποστάσεων (NLOS) μεταξύ πλοίων τόσο πολιτικού όσο και στρατιωτικού χαρακτήρα. Προσέφεραν τη δυνατότητα ευρυζωνικής παγκόσμιας διασύνδεσης και πολύ υψηλών επομένως ρυθμών μετάδοσης και ως εκ τούτου έγιναν ο πρωταρχικός τρόπος επικοινωνιών μακρινών αποστάσεων (NLOS) θέτοντας τις HF επικοινωνίες ως εφεδρικό μόνο μέσο επικοινωνίας.

Όμως, οι δορυφορικές επικοινωνίες σε στρατιωτικό επίπεδο διαπιστώθηκε ότι είχαν και κάποια πολύ σημαντικά μειονεκτήματα που σχετίζονται με το κόστος τους, αφενός και αφετέρου, με το ότι είναι ευάλωτες ηλεκτρονικά. Αυτό έφερε στο προσκήνιο και πάλι τις HF επικοινωνίες και τις κατέστησε πλέον ως ένα πολύ σημαντικό, αξιόπιστο και λιγότερο ευάλωτο τρόπο επικοινωνίας στρατιωτικού χαρακτήρα.

Σήμερα οι HF επικοινωνίες αναπτύσσονται ώστε να διαθέτουν τα εξής χαρακτηριστικά :

- 1) Υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης, για παράδειγμα 9600 bps.
- 2) Βελτιωμένο τρόπο εγκατάστασης ζεύξης σημείου προς σημείο (point-to-point).
- 3) Επιλογή συχνότητας μέσω προσαρμογής (Adaptive Systems).
- 4) Δυνατότητες αντί-παρεμβολών (Anti Jam capabilities).
- 5) Χαμηλή πιθανότητα εντοπισμού συχνότητας (Low Probability of Intercept) μέσω Frequency Hopping.

### ***5.3.2 Τυπικές κεραιές HF σε πλοία***

Οι τυπικές κεραιές HF που είναι εγκατεστημένες σε πολεμικά πλοία εμφανίζουν ομοιοκατευθυντικότητα ως προς το αζιμούθιο έτσι ώστε η λήψη να μην επηρεάζεται από την υπερκατασκευή του πλοίου. Αφού οι HF κεραιές πρέπει να τοποθετηθούν σε μια κατασκευή περιορισμένου χώρου, είναι συνήθως οι εξής : μονόπολα – μαστίγια (Monopole Whips), δίδυμα – μαστίγια (Twin Pole Whips), μακριού νήματος (Long-Wires), Fan-Type κεραιές κυρίως για εκπομπή και active κεραιές μονόπολα μήκους έως και 1.5 m για λήψη. Άλλου τύπου HF κεραιές όπως ελικοειδή μονόπολα (helix monopoles) και κατευθυντικές LPA (Log Periodic Arrays) προορίζονται για ειδικές εφαρμογές και δεν χρησιμοποιούνται σε πλοία.

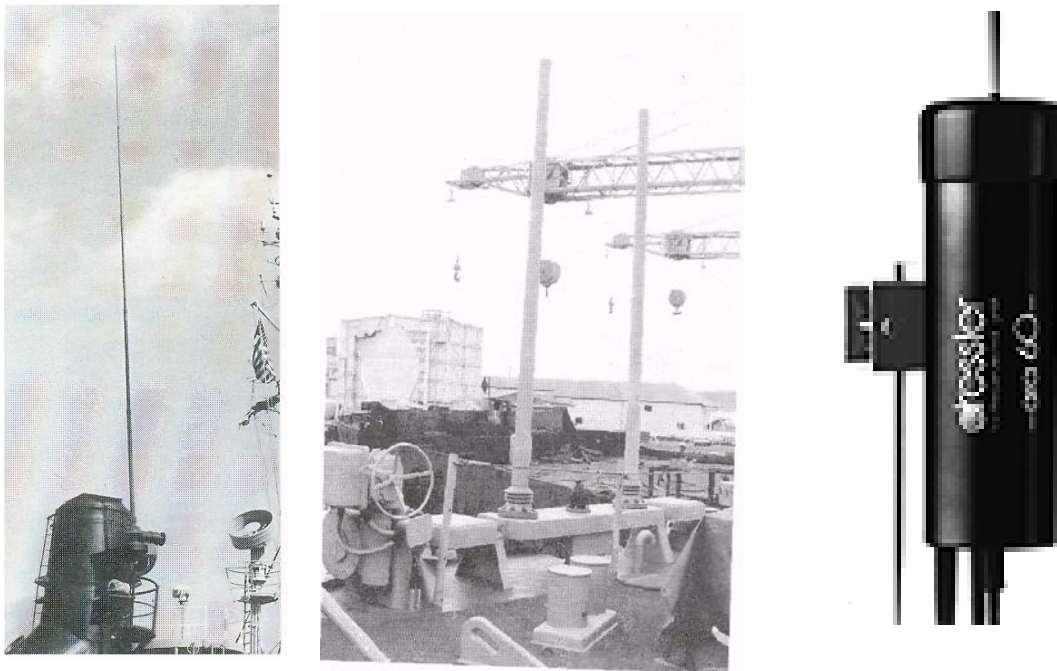
Κατά την επιλογή των κεραιών εκπομπής που θα χρησιμοποιήσει κανείς, πρέπει να λάβει υπόψη του τις εξής παραμέτρους : το εύρος ζώνης, τις διαστάσεις της κεραιάς και το διαθέσιμο ελεύθερο χώρο, το κέρδος ισχύος και το λόγο στασίμων (VSWR). Οι παράμετροι αυτές για τις 4 κατηγορίες HF κεραιών εκπομπής, παρατίθενται παρακάτω σε μορφή πίνακα :



Παράμετρος	Monopole Whip	Twin Pole Whip	Long-Wire	Fan-Type
Εύρος Ζώνης	1 Οκτάβα (2 : 1)	1 - 2 Οκτάβες (4 : 1 - 2 : 1)	1 - 2 Οκτάβες (4 : 1 - 2 : 1)	2 - 3 Οκτάβες (8 : 1 - 4 : 1)
Μέγιστη Διάσταση	6 - 10 m Ύψος	6 - 10 m Ύψος	15 - 25 m Μήκος	15 - 20 m Μήκος
Πόλωση	Κάθετη	Κάθετη	Περίπου Οριζόντια	Κάθετη
Λόγος Στασίων (VSWR)	2 : 1	2 : 1	3 : 1	3 : 1

**Πίνακας 5.2 : Παράμετροι τυπικών HF κεραιών εκπομπής εγκατεστημένων σε πολεμικά πλοία.**

Οι κεραιές που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη μελέτη των δυο πολεμικών πλοίων που ακολουθούν ήταν για τη μεν εκπομπή τα μονόπολα μαστίγια (Monopole Whips) 10 m και τα δίδυμα μαστίγια (Twin Pole Whips) 10 m, για τη δε λήψη οι active κεραιές μονόπολα 1.5 m. Παραδείγματα αυτών των κεραιών απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα 5.4 .



**Σχήμα 5.4 : Κεραιές HF κατά σειρά : Monopole Whip, Twin Pole Whip και Active Monopole λήψεως.**

## 5.4 ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ

### 5.4.1 Μελέτη HF κεραιών

Το πρώτο πολεμικό πλοίο που μελετήθηκε σε περιβάλλον θάλασσας ήταν ένα απλοποιημένο μοντέλο ενός μεγάλου περιπολικού πλοίου. Οι διαστάσεις αυτού του πλοίου είναι 55.5 x 9.4 x 3.8 m (από επιφάνεια θαλάσσης). Για τις συχνότητες μελέτης των 2, 5 και 7 MHz, οι αντίστοιχες ηλεκτρικές διαστάσεις, με βάση τη μέγιστη διάσταση των 55.5 m, είναι 0.37, 0.93 και 1.3. Η μελέτη κατατάσσεται στα προβλήματα χαμηλών ηλεκτρικών διαστάσεων και επομένως μπορεί να επιλυθεί με χρήση της MoM.

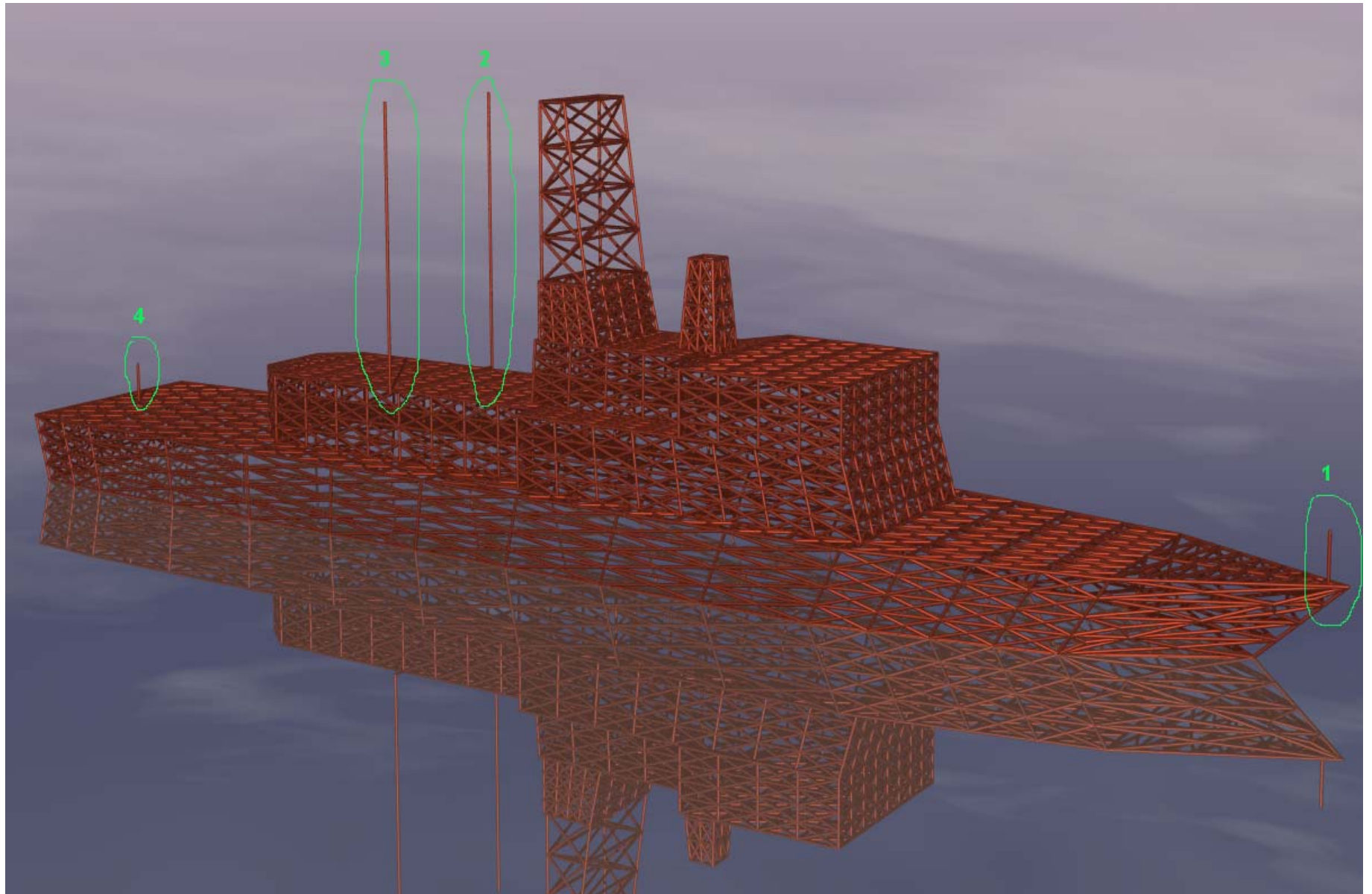
Με χρήση των προγραμμάτων 3DSTUDIO MAX για τη μοντελοποίηση του πλοίου και κατόπιν του WGRID\_GEN (GETEN NEC2 GRID GENERATOR) σχηματίστηκε το αντίστοιχο wire grid μοντέλο του πλοίου 5678 νημάτων σε περιβάλλον θάλασσας, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 5.5 και προσομοιώθηκαν 4 κεραιές HF, δυο εκπομπής και δυο λήψης, που αυτό φέρει για τις συχνότητες μελέτης των 2, 5 και 7 MHz. Η θάλασσα προσομοιώθηκε σύμφωνα με [12] με χρήση επίπεδης γης με τις εξής ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες :

σχετική ηλεκτρική επιτρεπτότητα  $\epsilon = 70$

σχετική μαγνητική διαπερατότητα  $\mu = 1$

αγωγιμότητα  $\sigma = 5.0 \text{ S/m}$

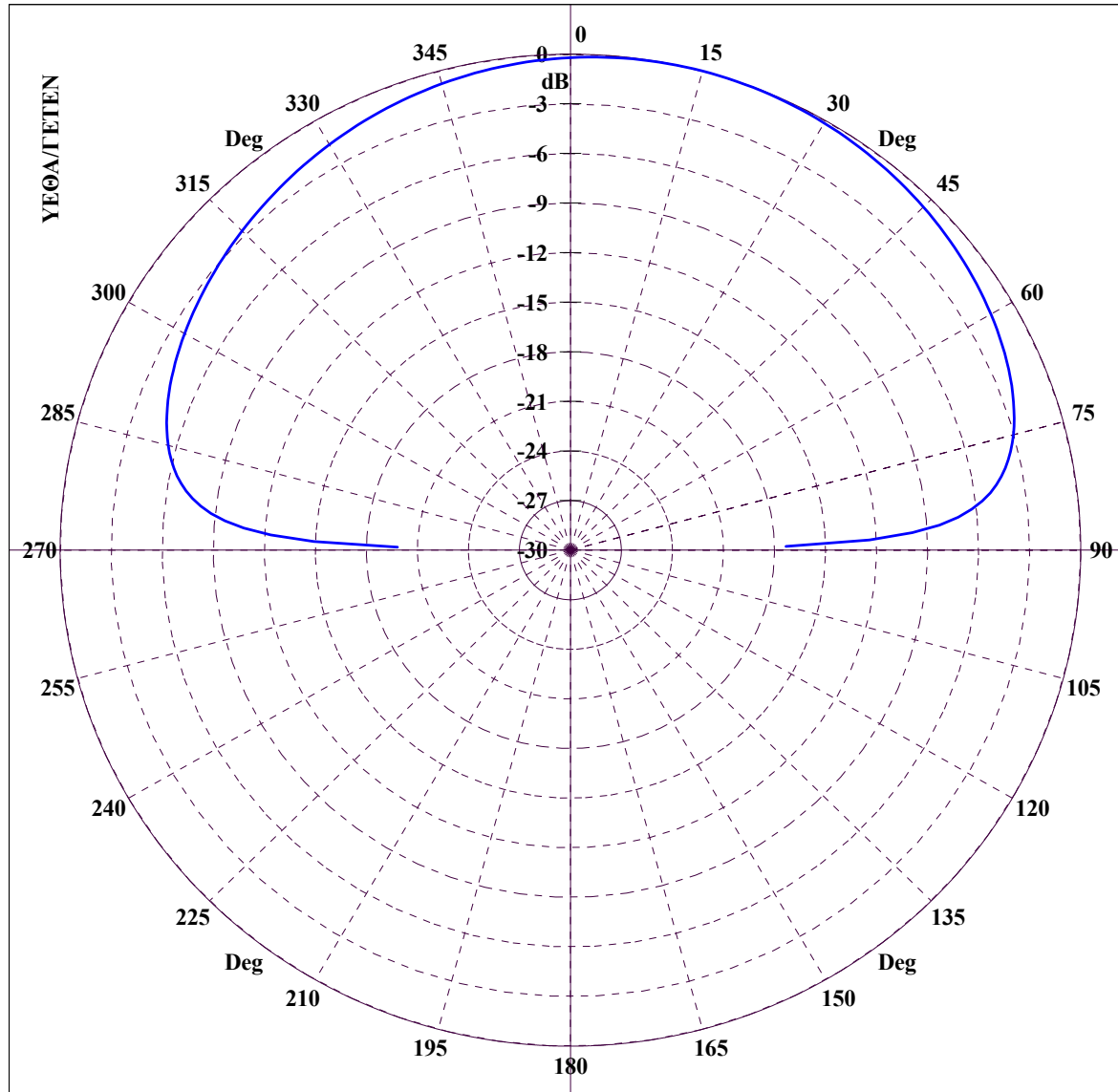
Αρχικώς παρατίθενται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ανά κεραία που αφορούν την εύρεση του διαγράμματος ακτινοβολίας μακρινού πεδίου της εκάστοτε κεραιάς. Στη συνέχεια, παρατίθενται σε μορφή πίνακα τα συγκριτικά στοιχεία αυτών των προσομοιώσεων που αφορούν τον αριθμό νημάτων που χρησιμοποιήθηκαν αρχικώς για την κατασκευή του wire grid μοντέλου, σε ποσοστό τμηματοποίησης, δηλαδή σε αριθμό segments ανά μήκος κύματος  $\lambda$ , τον αριθμό των segments που τελικά παρήχθησαν από τη διαδικασία τμηματοποίησης καθώς και τον χρόνο που χρειάστηκε για την εκτέλεση της προσομοίωσης. Τέλος, παρατίθεται με σχηματικό τρόπο η μελέτη κοντινού πεδίου που έγινε για ενδεικτικές τομές του πλοίου.



Σχήμα 5.5 : Wire grid ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟΥ ΠΛΟΙΟΥ με διαφαινόμενες τις 4 κεραιές που φέρει.

#### ***5.4.1.1 Διαγράμματα ακτινοβολίας μακρινού πεδίου κεραίας 1***

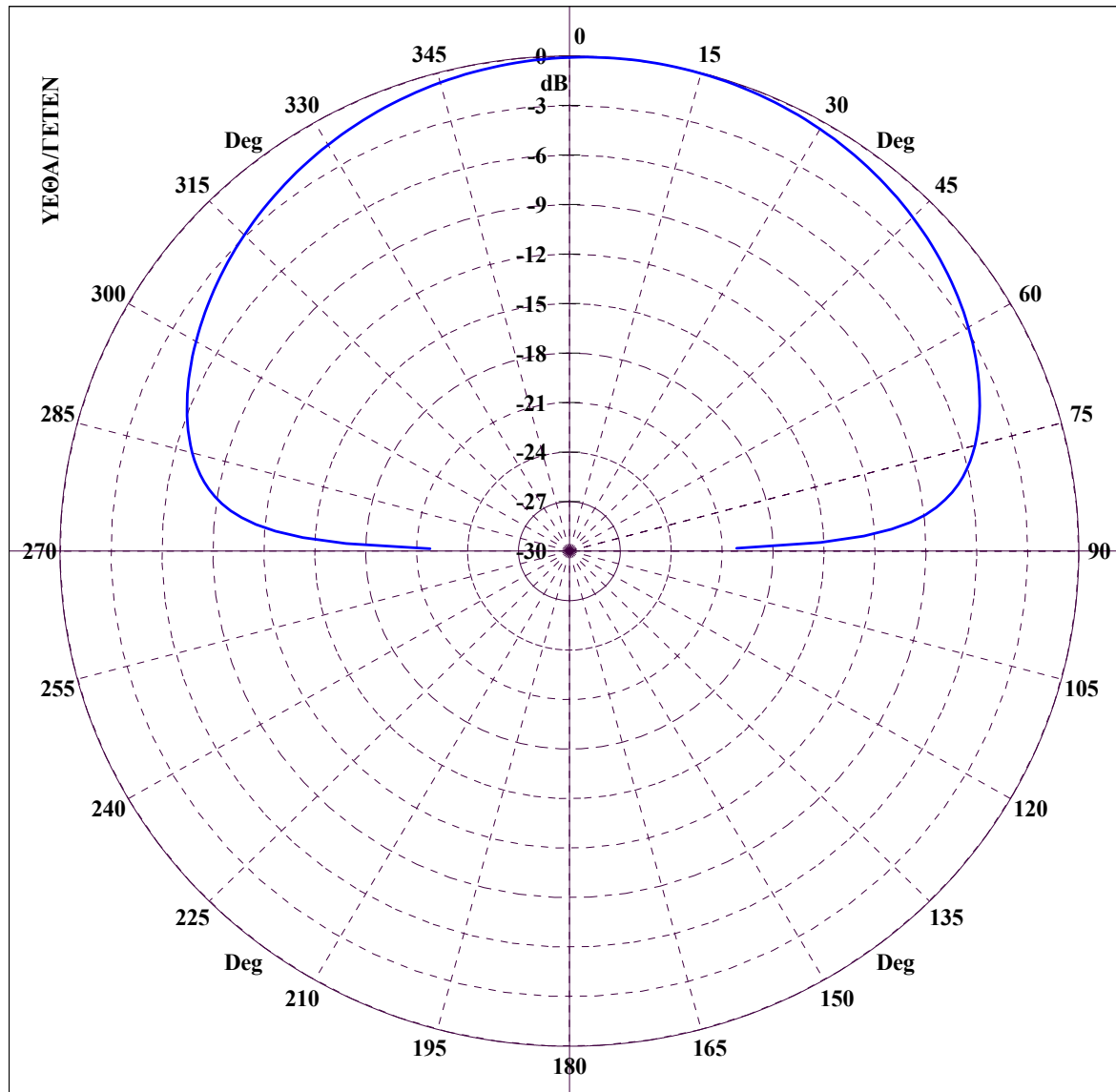
FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



File Name :TPK12-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 0.00$ ,  $\Theta=0-360$ , FREQUENCY = 2.00 MHz

Διάγραμμα 5.31 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 2 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 0^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

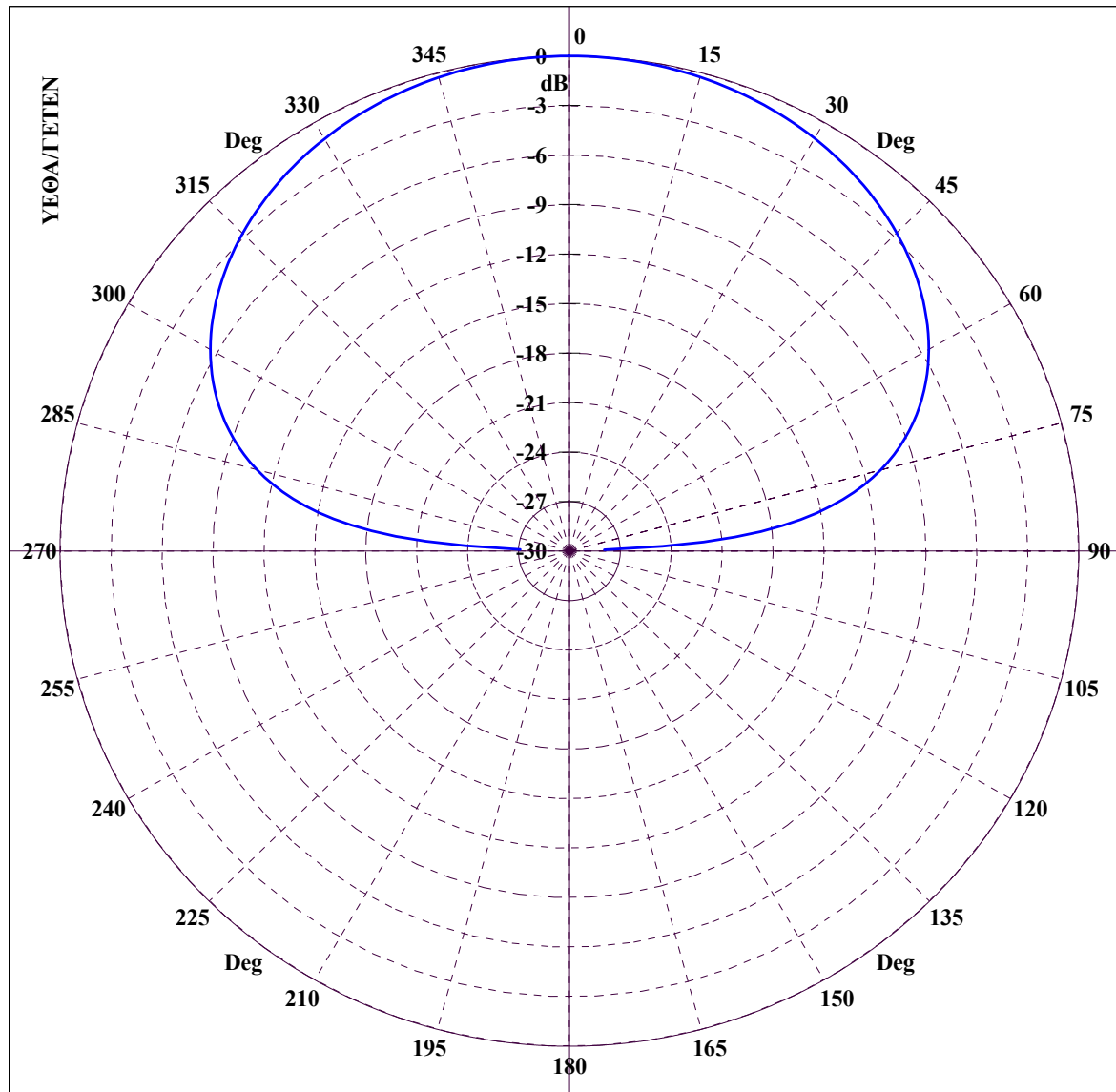
FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



File Name :TPK12-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 45.00$ ,  $\Theta = 0-360$ , FREQUENCY = 2.00 MHz

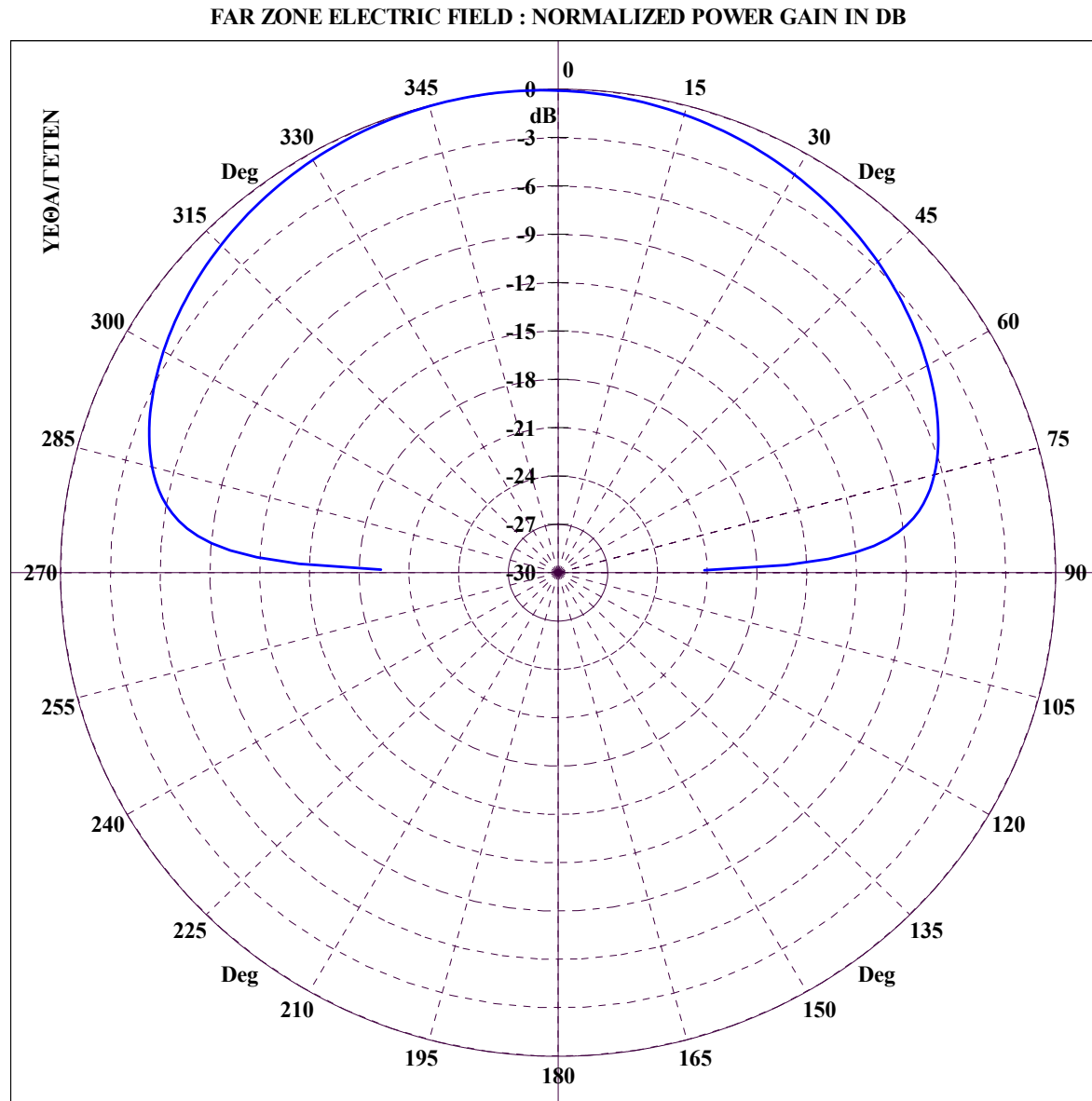
Διάγραμμα 5.32 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 2 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 45^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



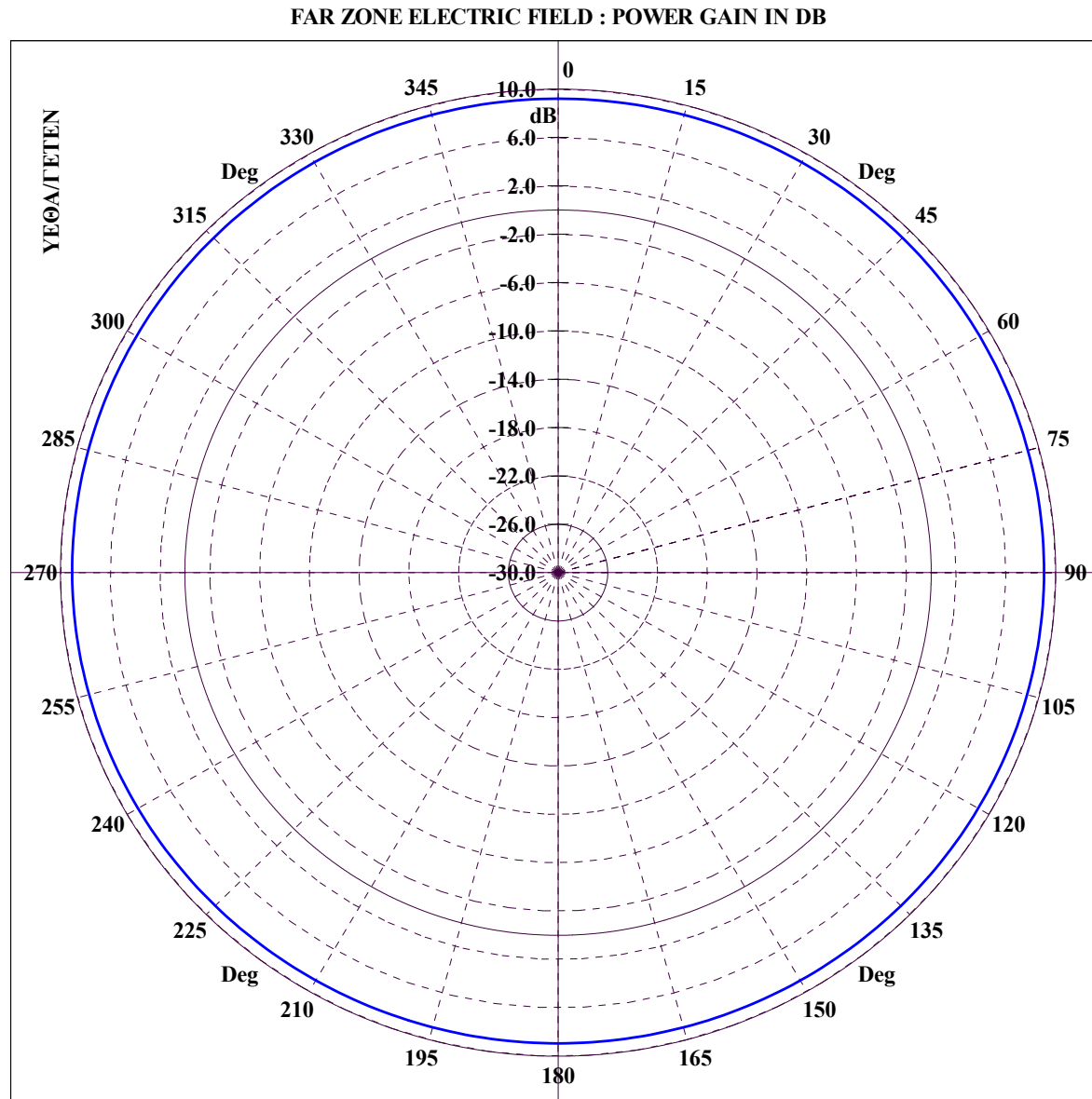
File Name :TPK12-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 90.00$ ,  $\Theta = 0-360$ , FREQUENCY = 2.00 MHz

Διάγραμμα 5.33 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 2 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\varphi = 90^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .



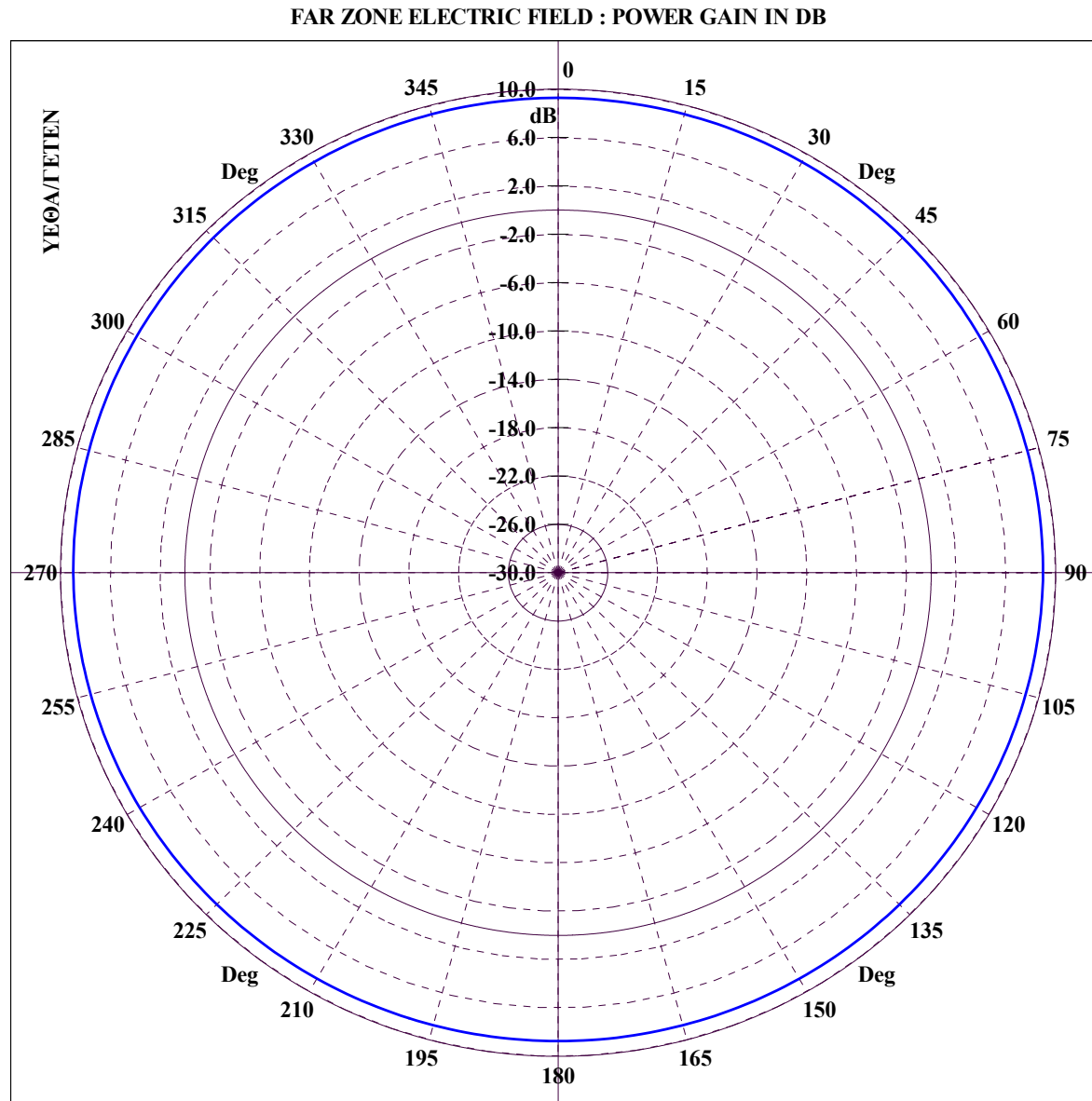
Διάγραμμα 5.34 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 2 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 135^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .



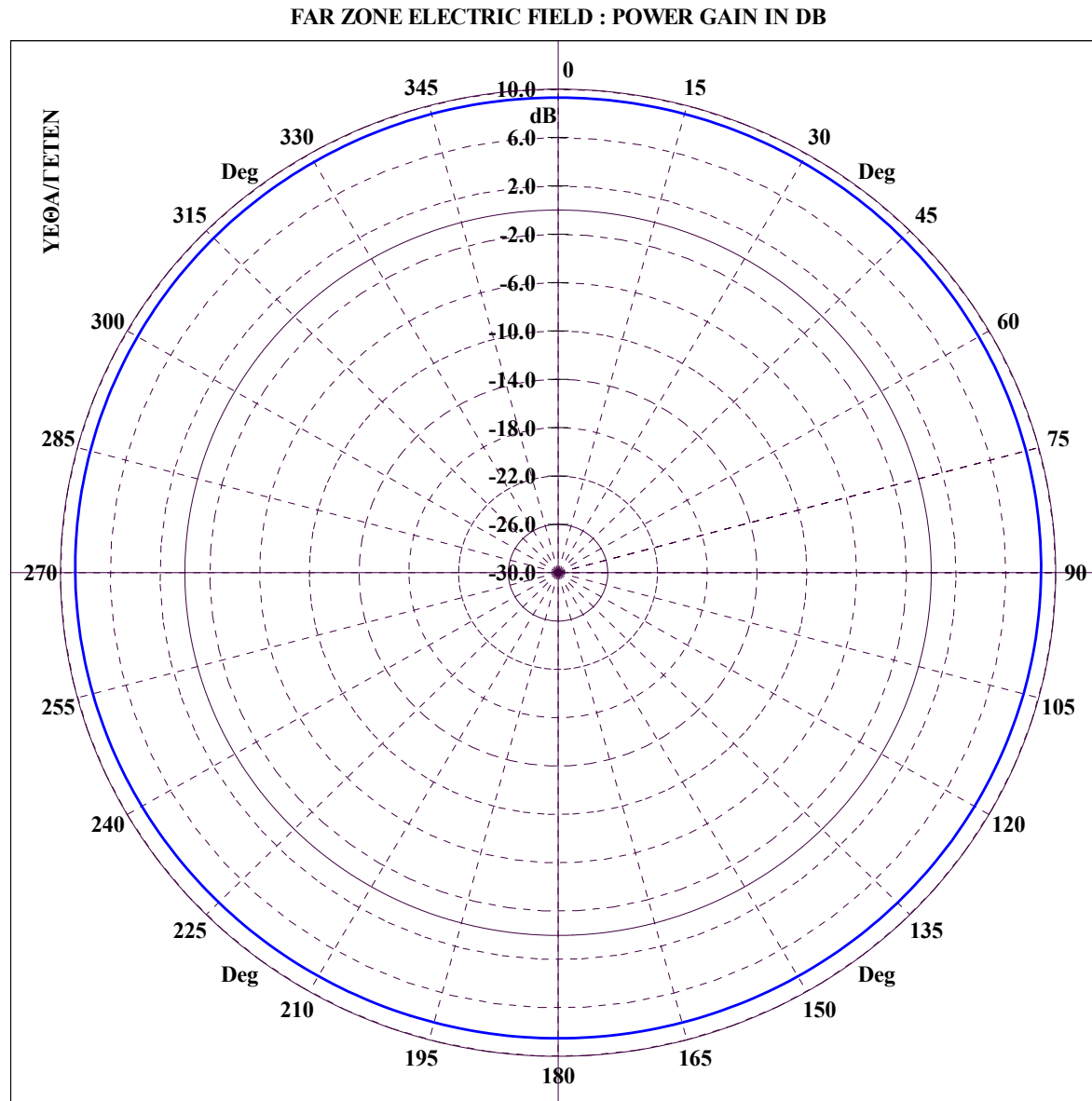


File Name :TPK12-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 5.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 2.00 MHz

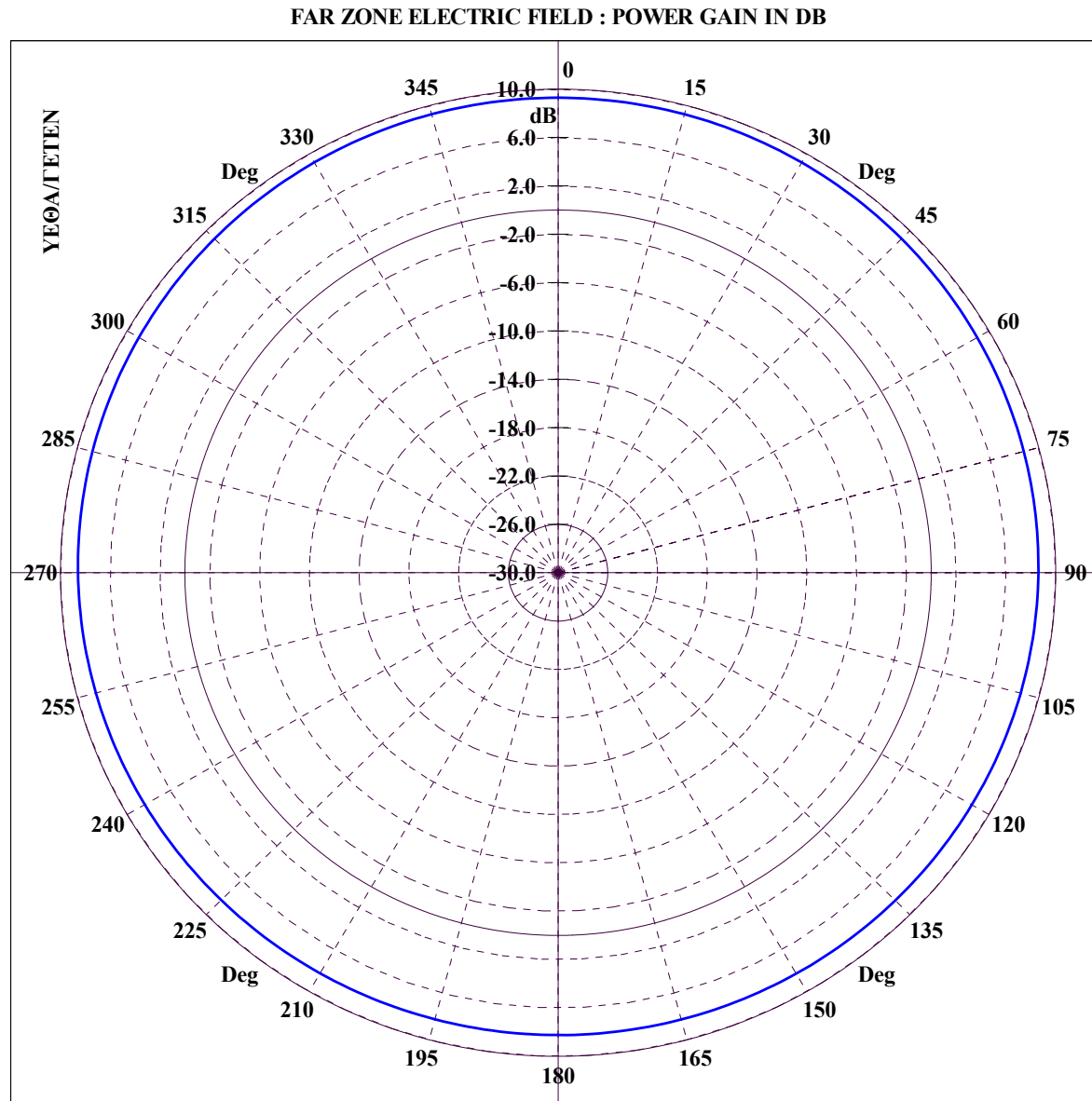
Διάγραμμα 5.35 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 2 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 5^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .



**Διάγραμμα 5.36 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 2 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 10^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .**

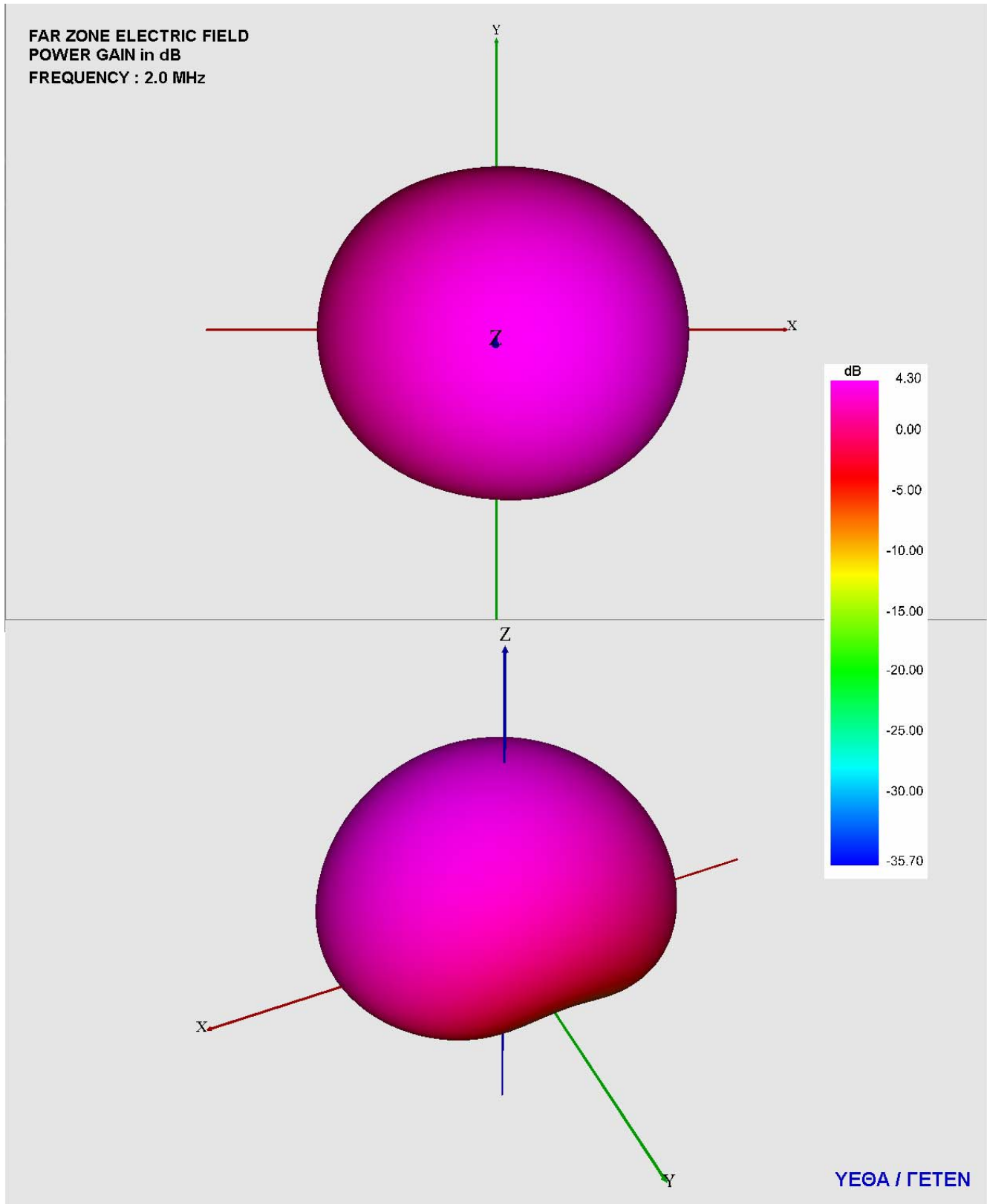


**Διάγραμμα 5.37 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 2 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 15^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .**

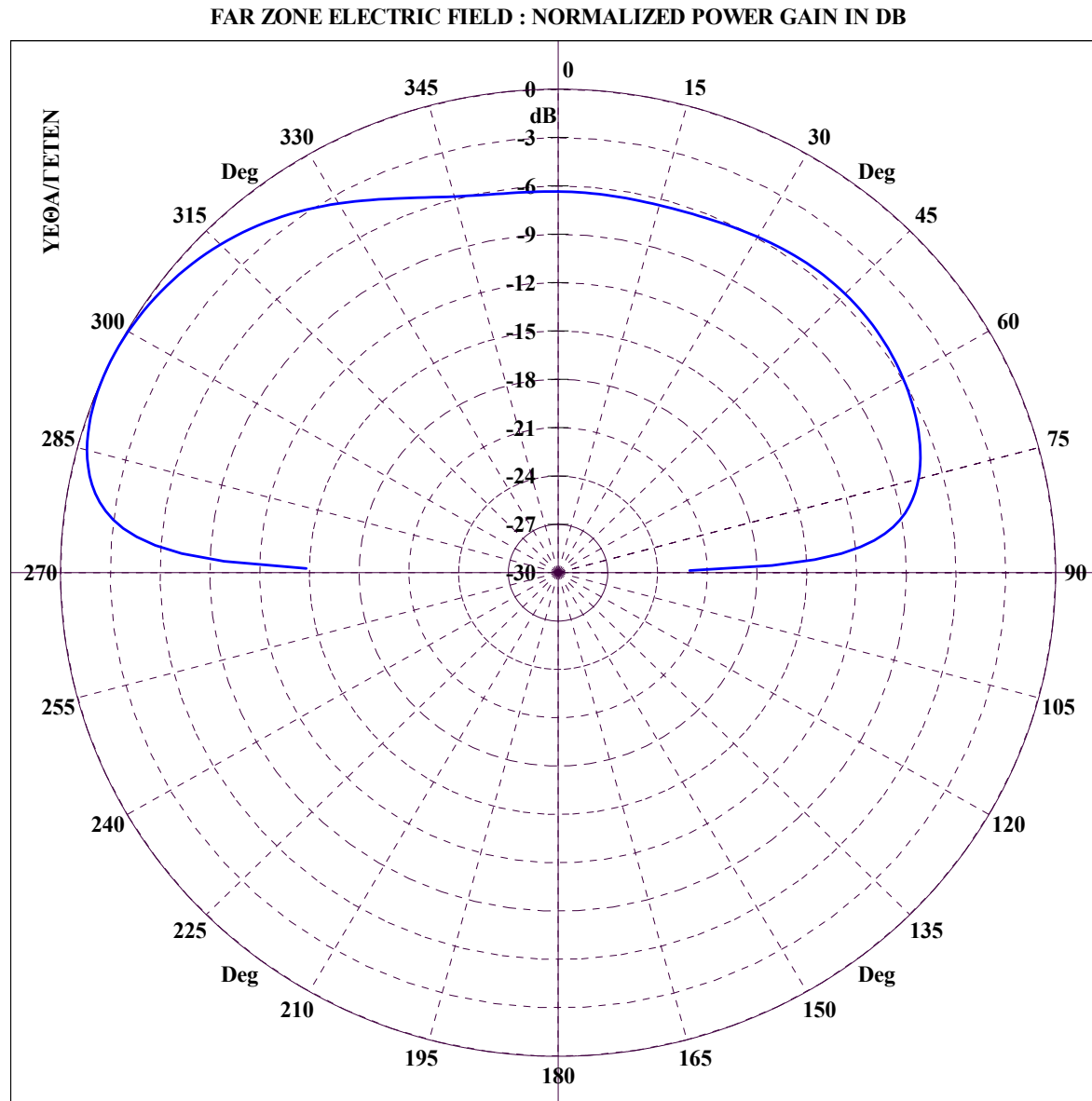


File Name :ΓΡΚ12-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\theta = 20.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 2.00 MHz

Διάγραμμα 5.38 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 2 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 20^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .



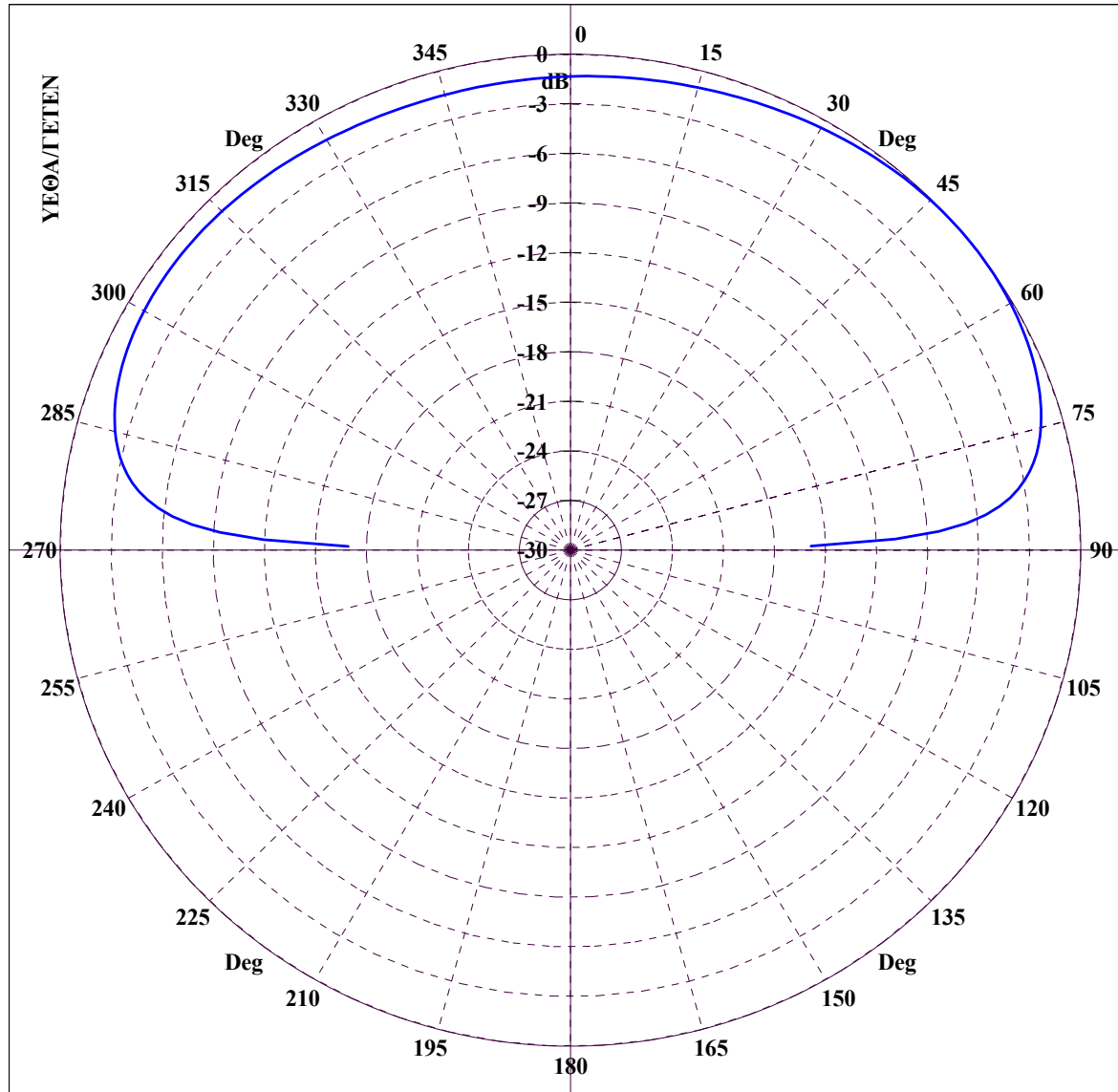
Διάγραμμα 5.39 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, 3D διάγραμμα κέρδους ισχύος για κεραία 1 σε συχνότητα 2 MHz με χρήση VRML.



File Name :TPK15-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 0.00$ ,  $\Theta=0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

Διάγραμμα 5.40 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 0^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

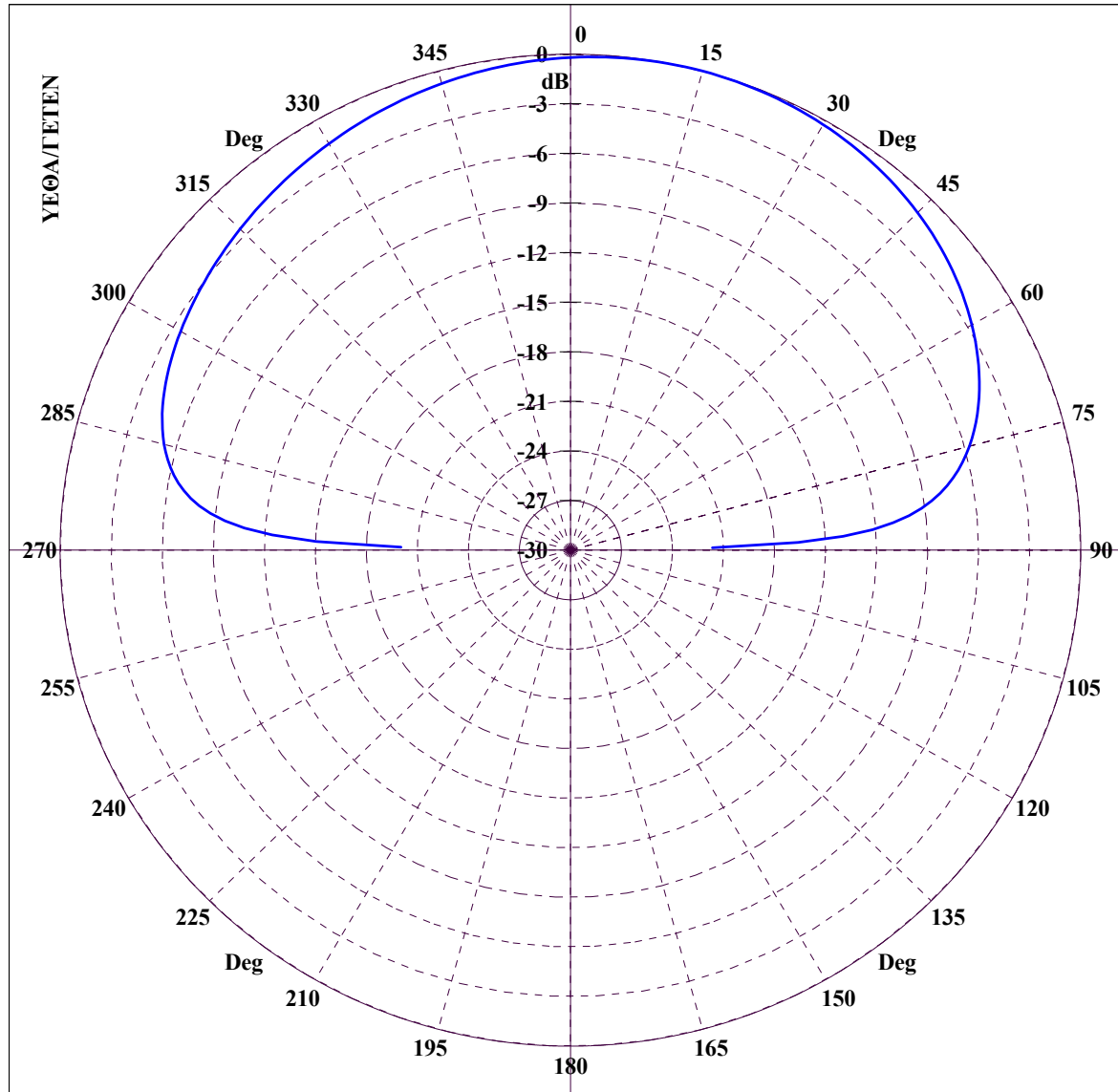
FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



File Name :TPK15-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 45.00$ ,  $\Theta = 0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

Διάγραμμα 5.41 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 45^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

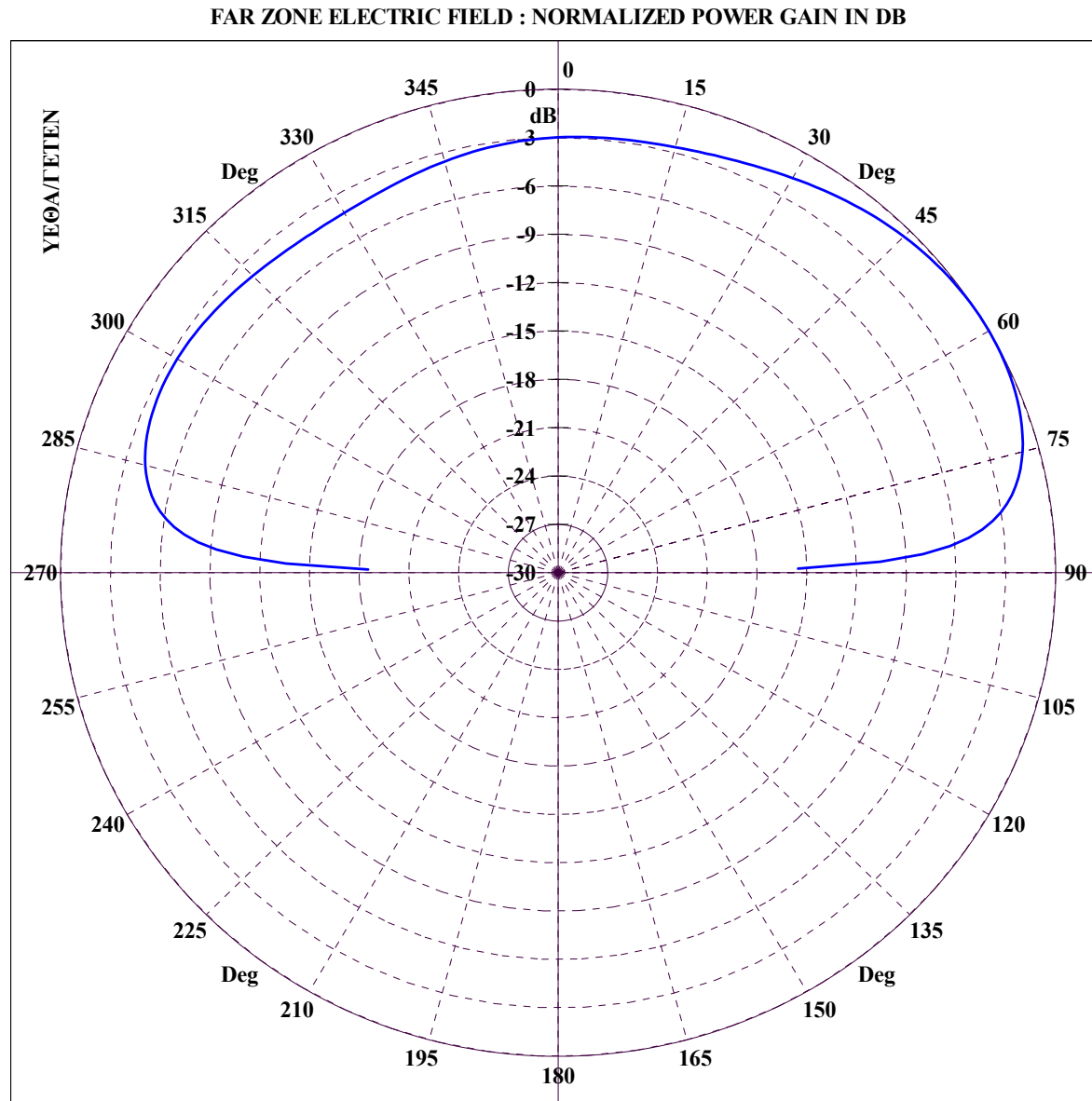
FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



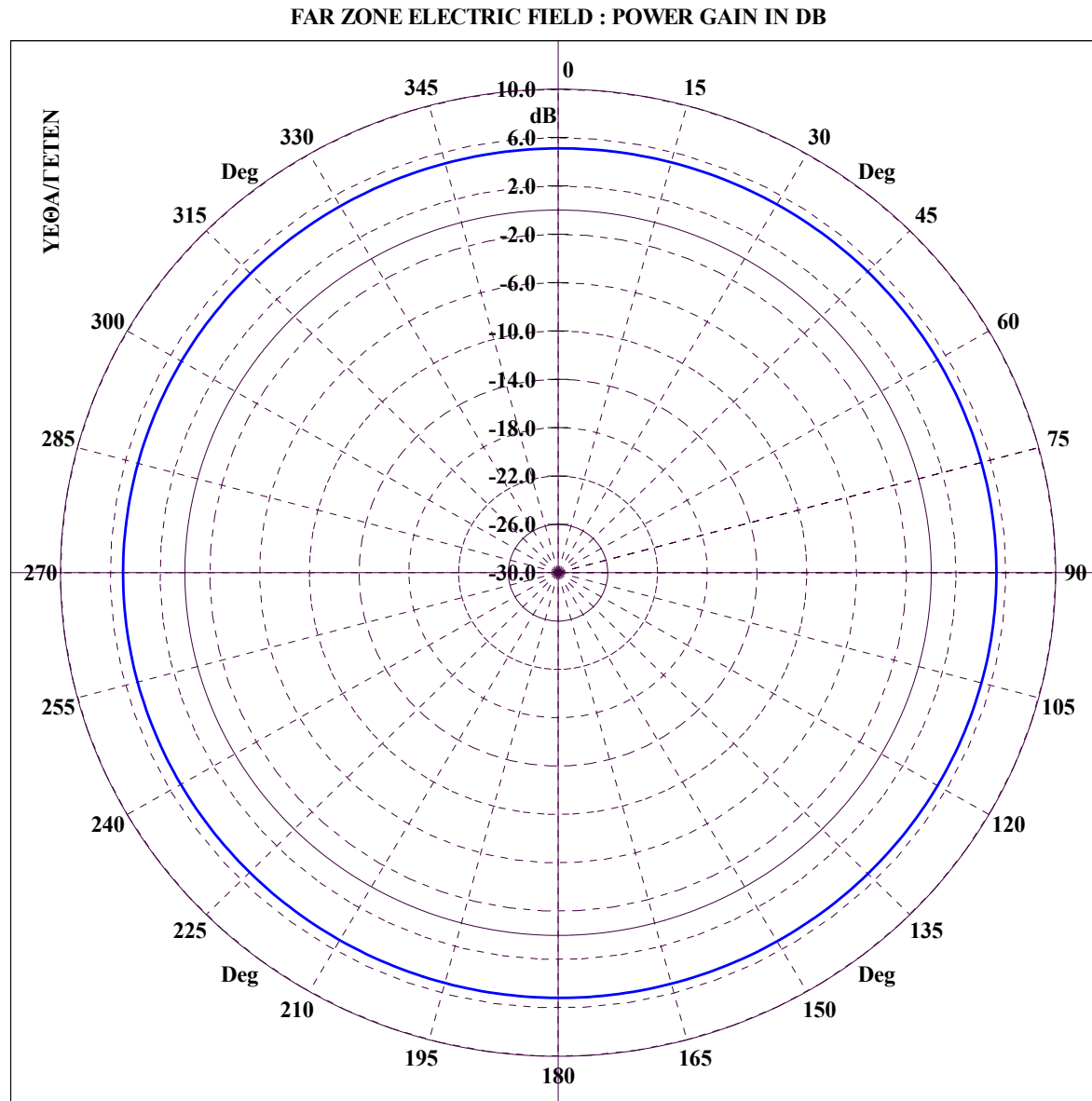
File Name :TPK15-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 90.00$ ,  $\Theta = 0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

Διάγραμμα 5.42 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\varphi = 90^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .



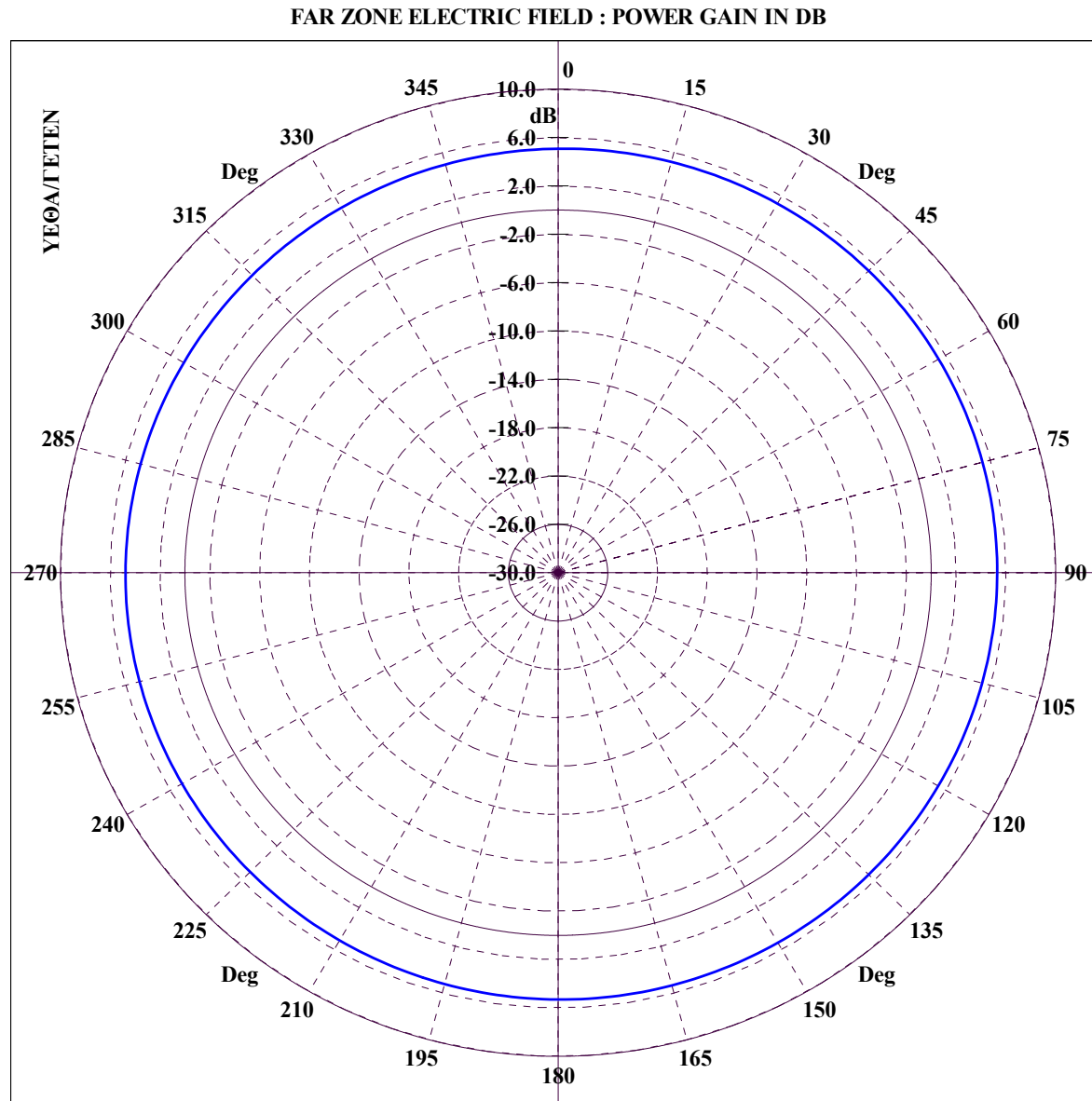


Διάγραμμα 5.43 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 135^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .



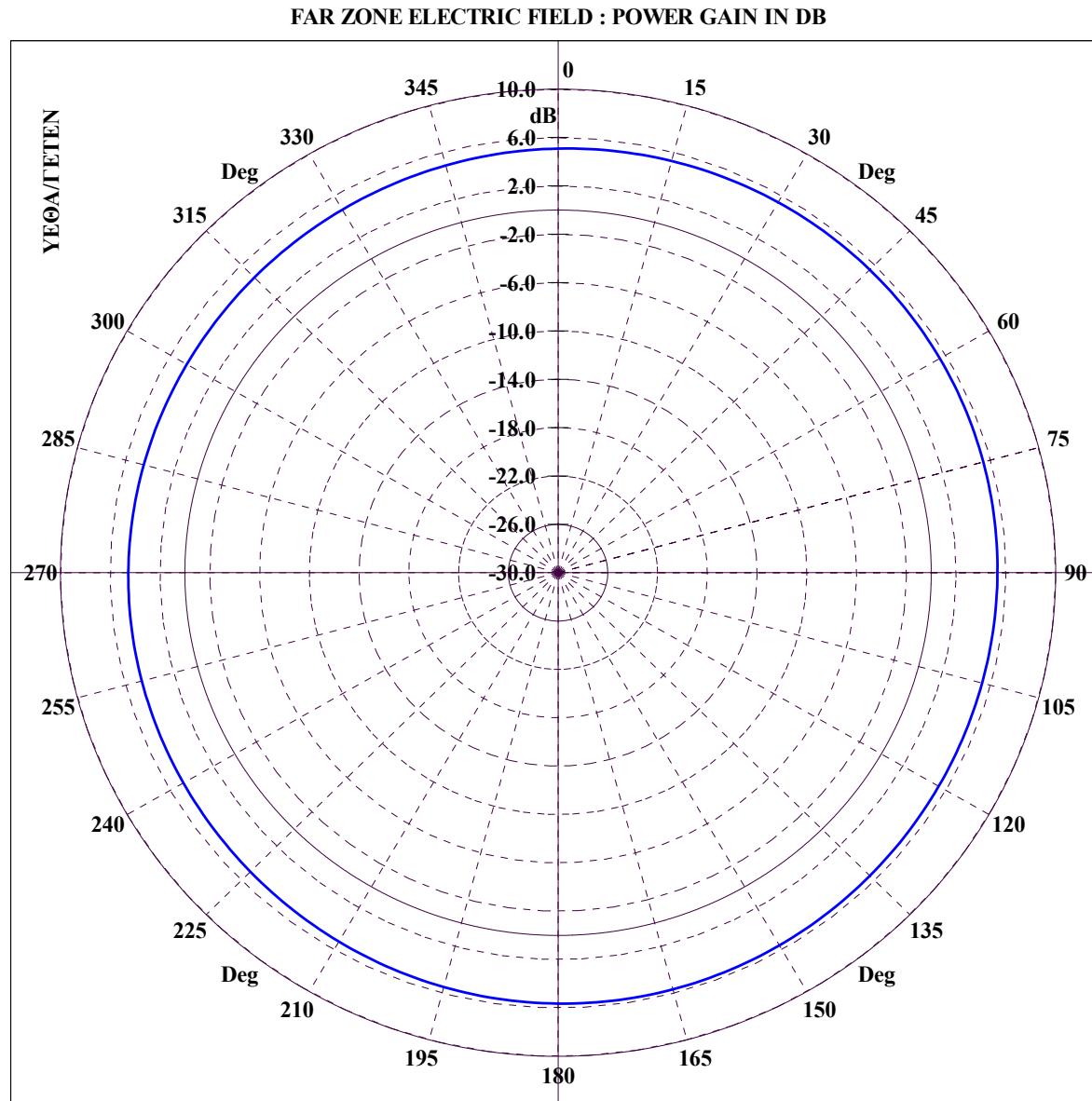
File Name :TPK15-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 5.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

Διάγραμμα 5.44 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 5^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .



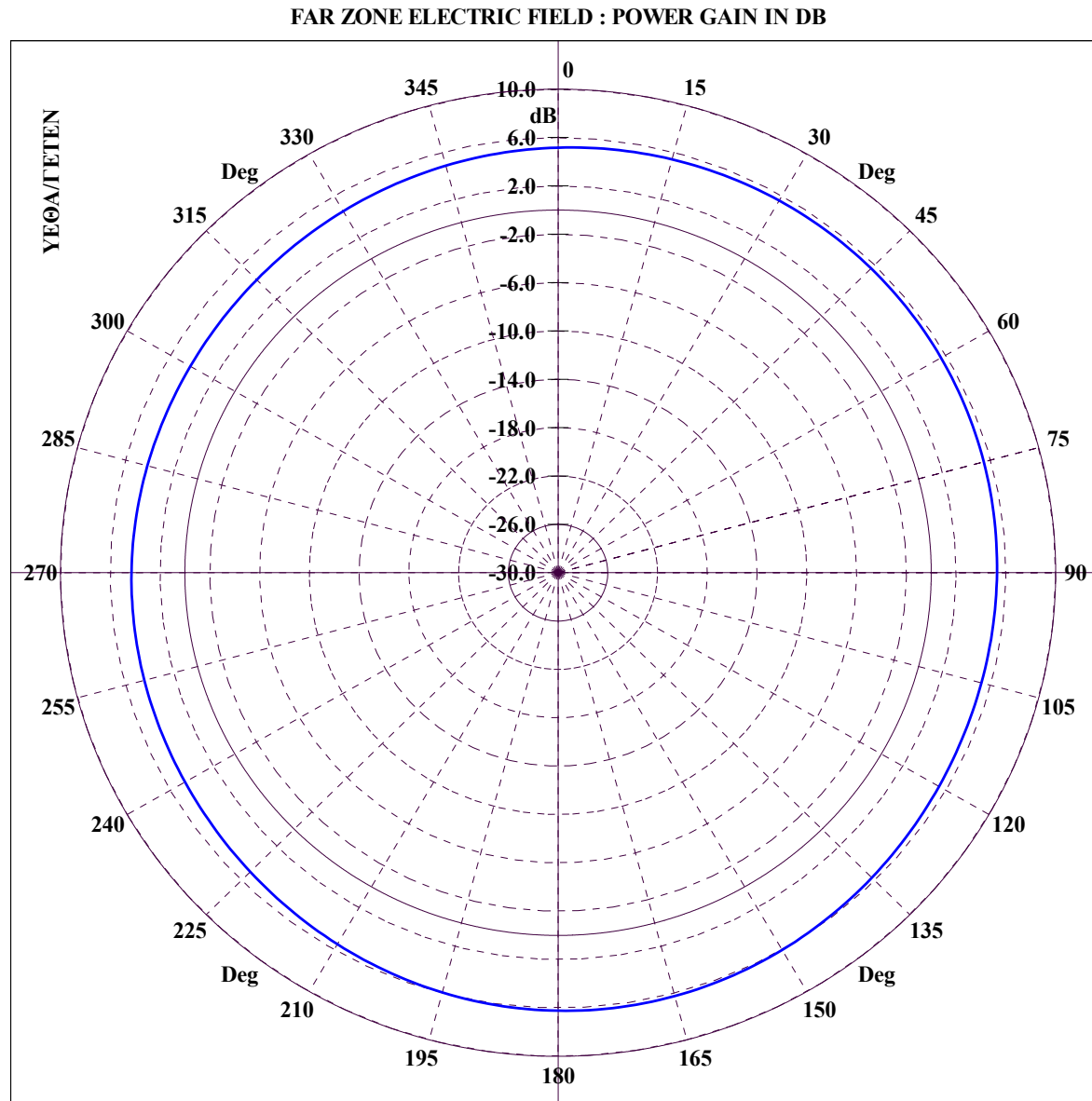
File Name :TPK15-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\theta = 10.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

Διάγραμμα 5.45 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 10^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .



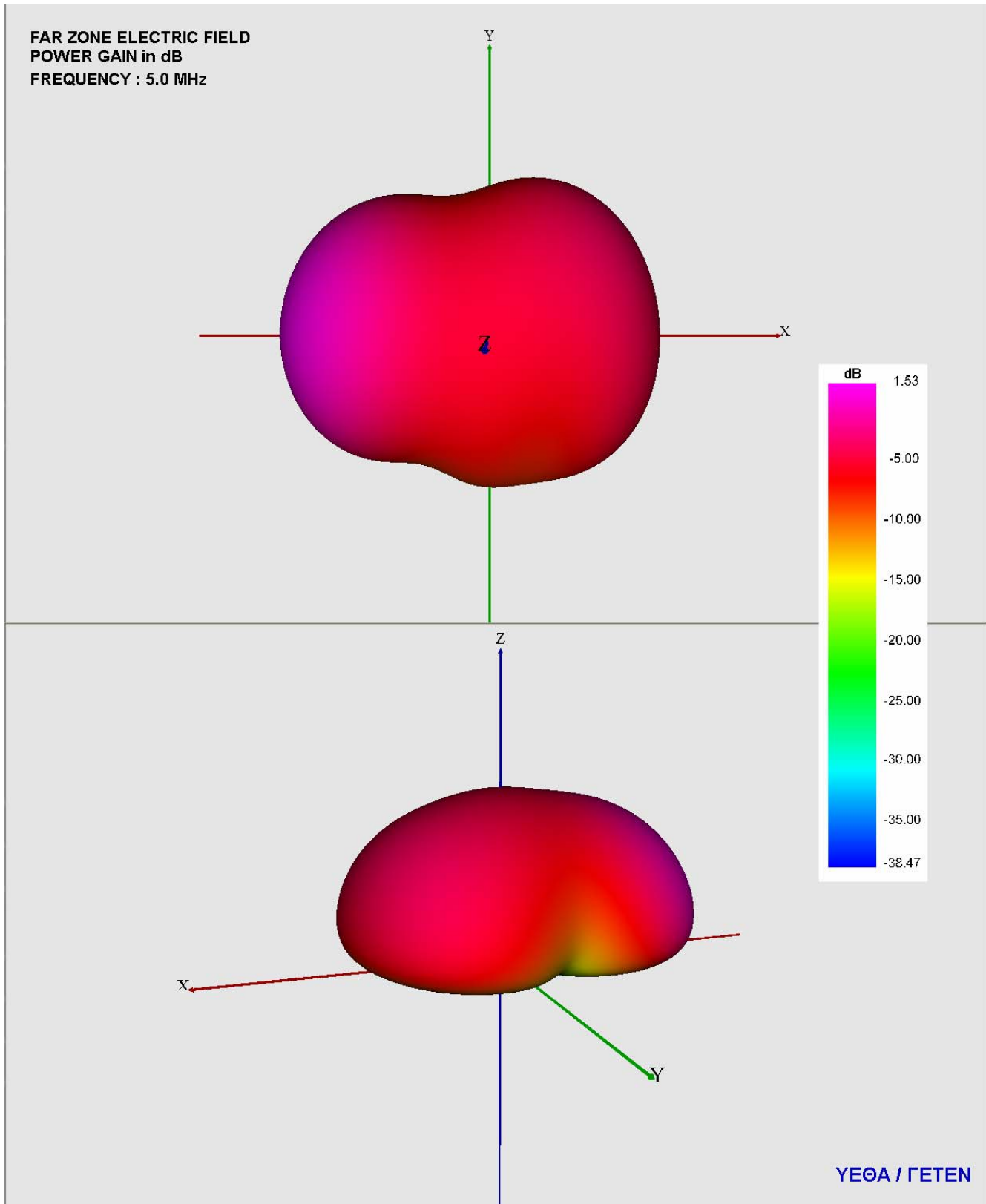
File Name :TPK15-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\theta = 15.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

Διάγραμμα 5.46 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 15^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .

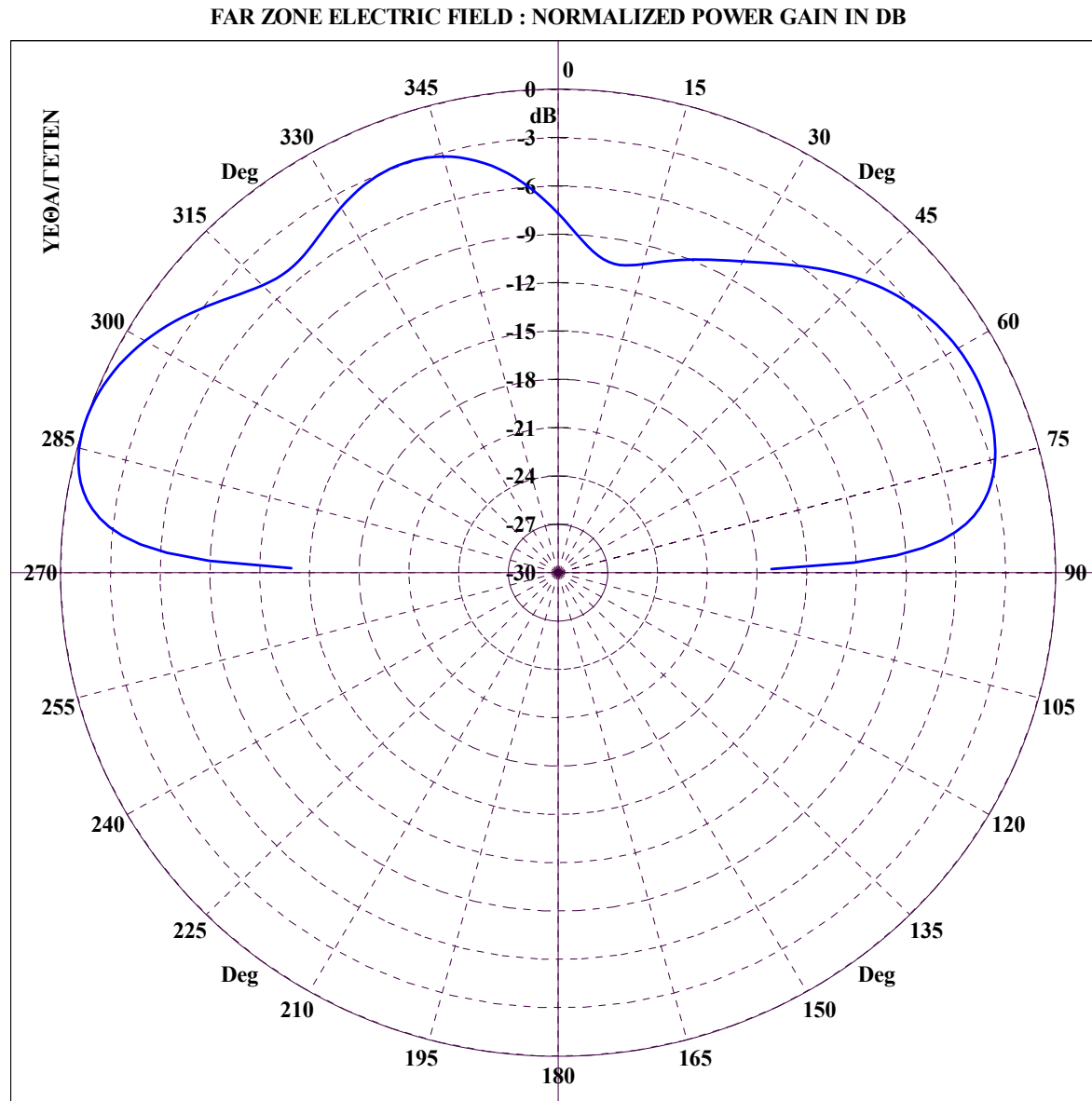


File Name :TPK15-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\theta = 20.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

Διάγραμμα 5.47 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 20^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .



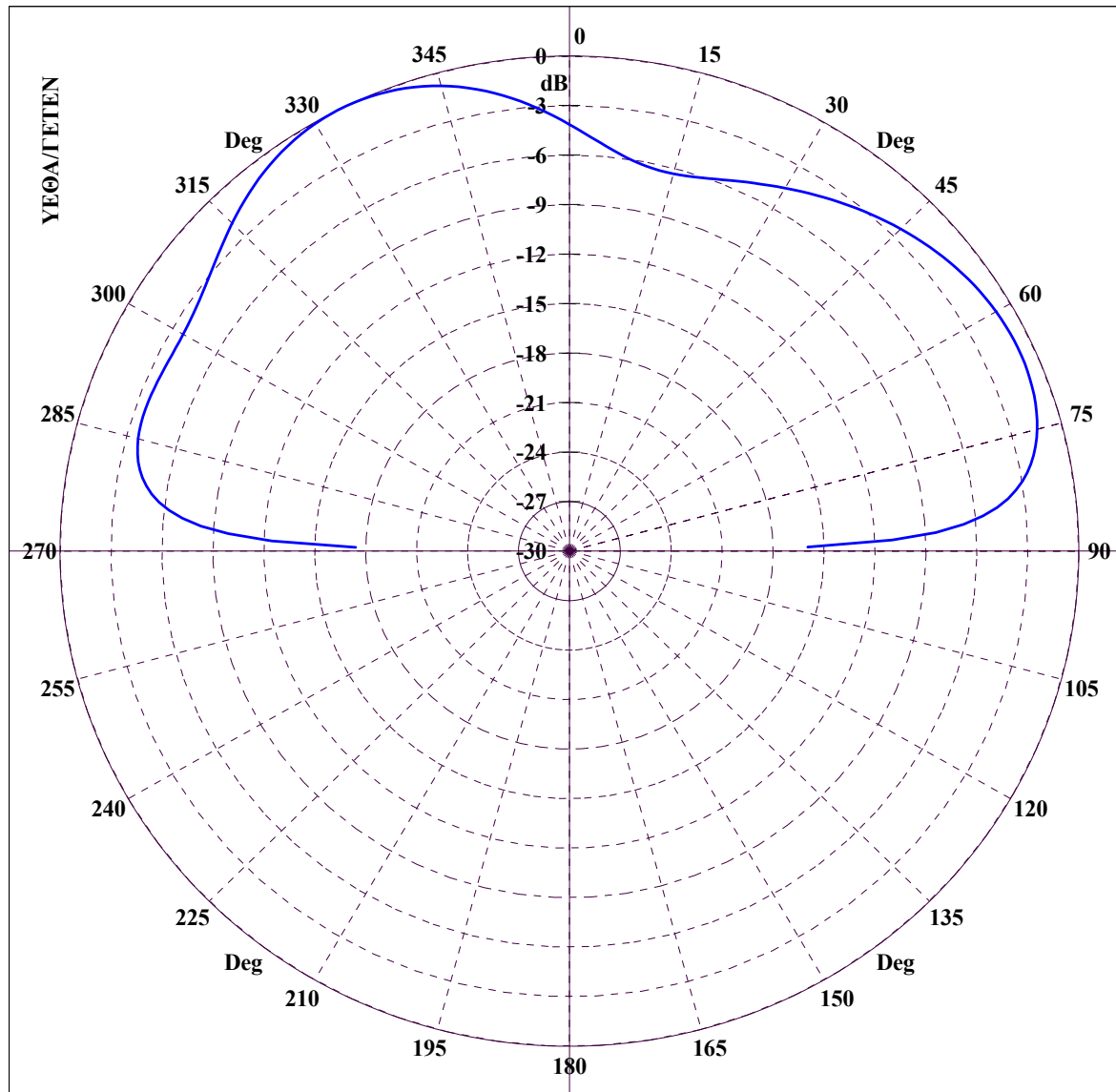
Διάγραμμα 5.48 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, 3D διάγραμμα κέρδους ισχύος για κεραία 1 σε συχνότητα 5 MHz με χρήση VRML



File Name :TPK17-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 0.00$ ,  $\Theta=0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

Διάγραμμα 5.49 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\varphi = 0^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB

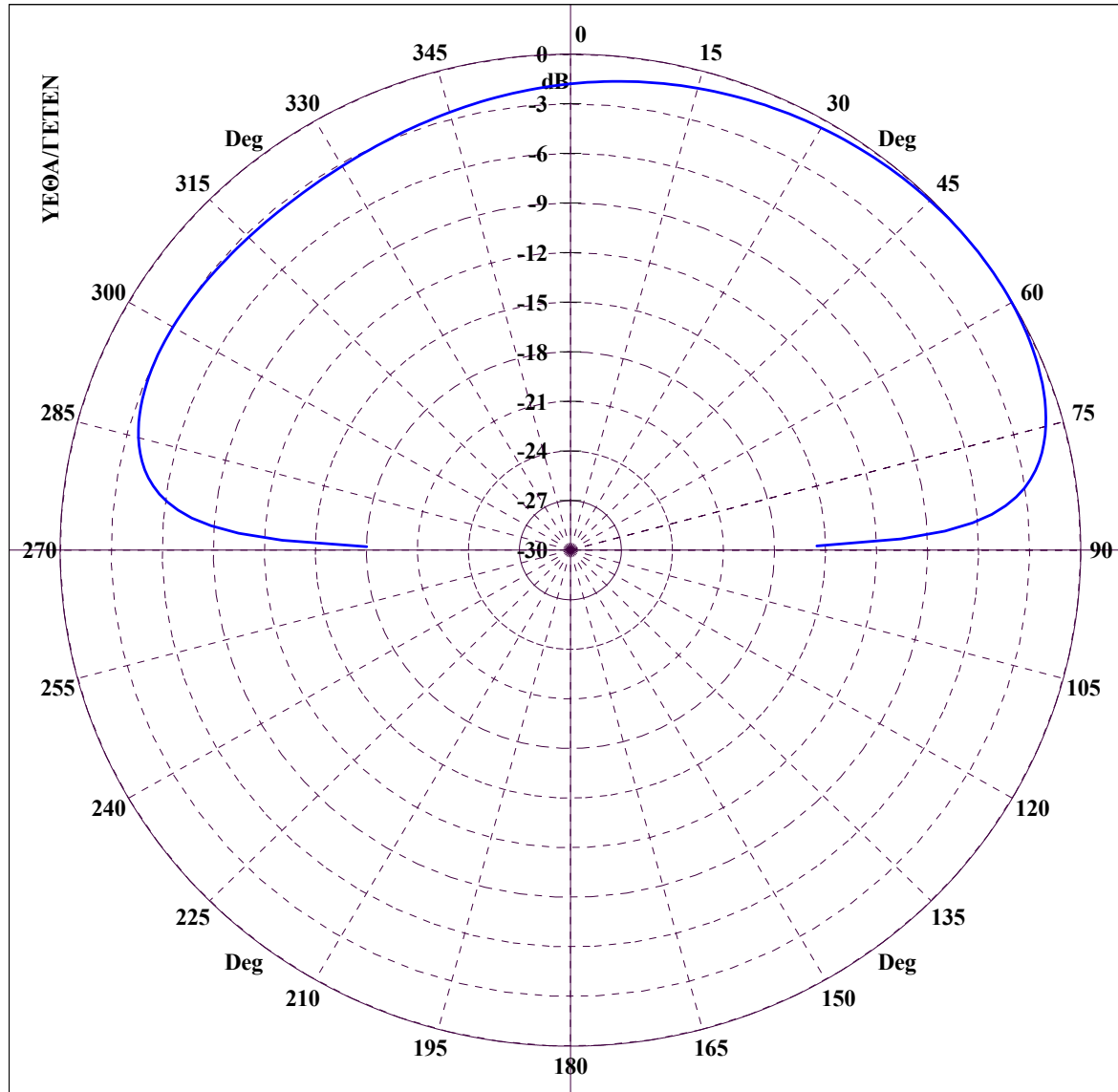


File Name :TPK17-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 45.00$ ,  $\Theta = 0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

Διάγραμμα 5.50 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 45^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

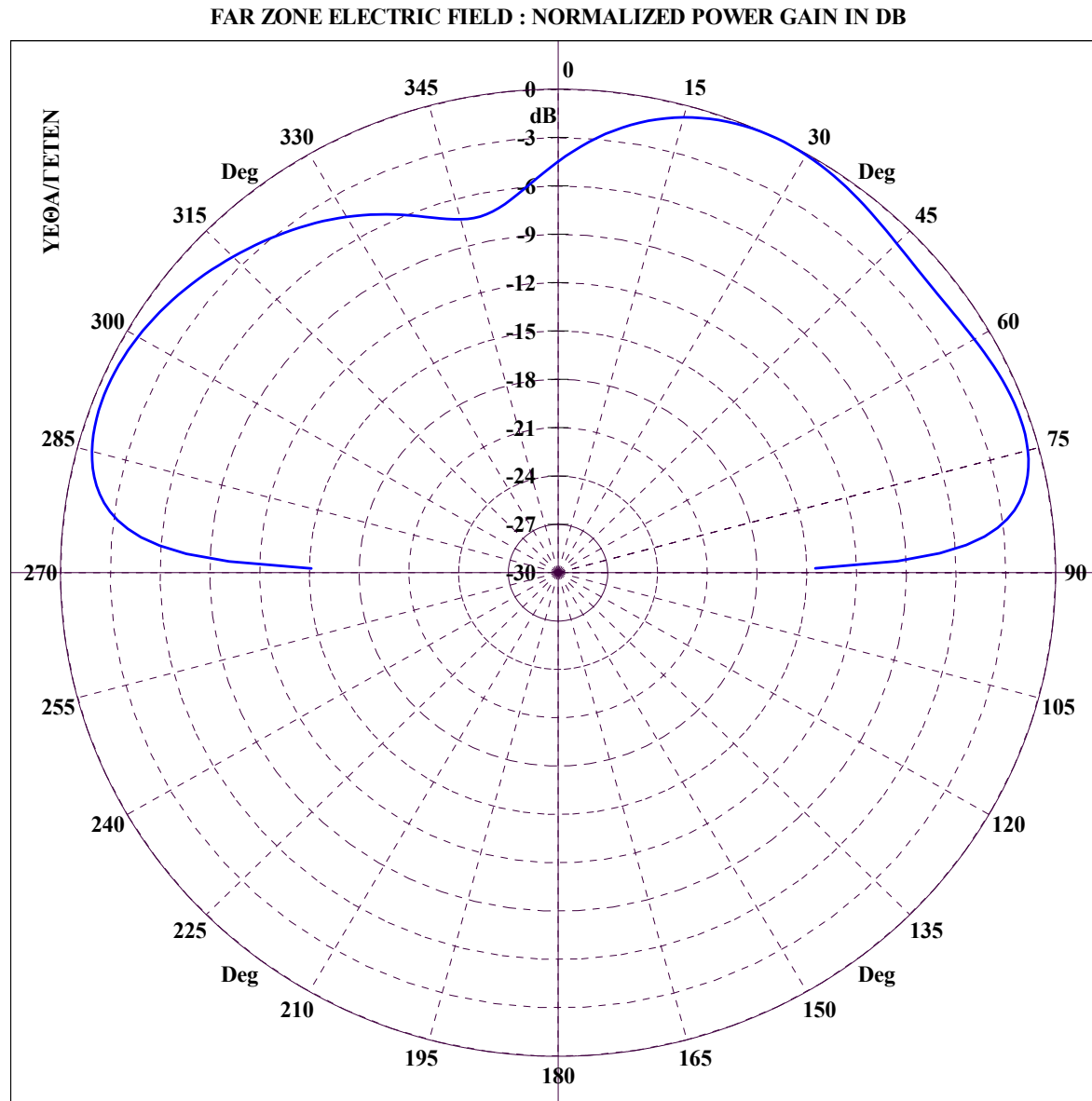


FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB

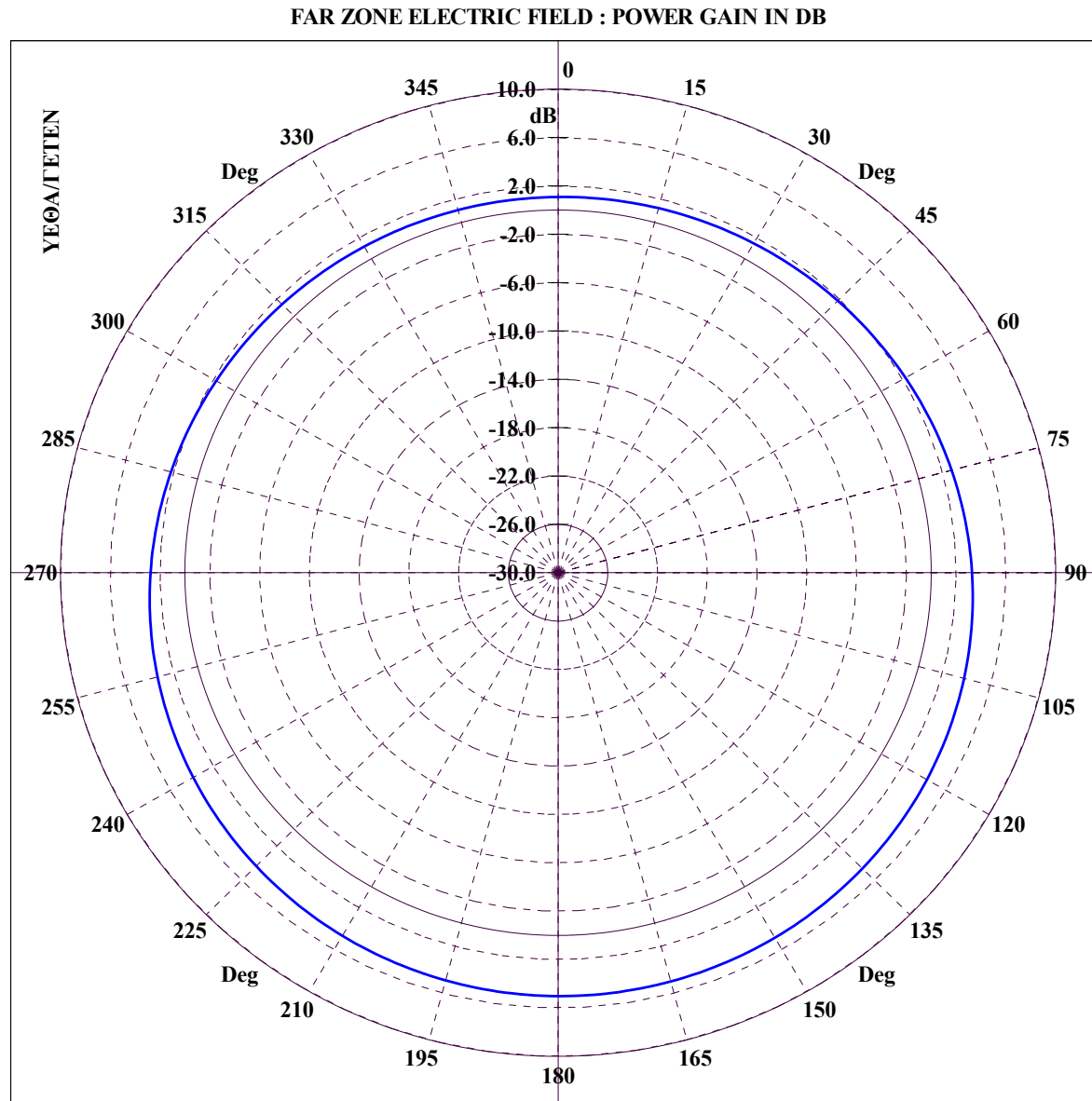


File Name :TPK17-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 90.00$ ,  $\Theta = 0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

Διάγραμμα 5.51 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 90^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

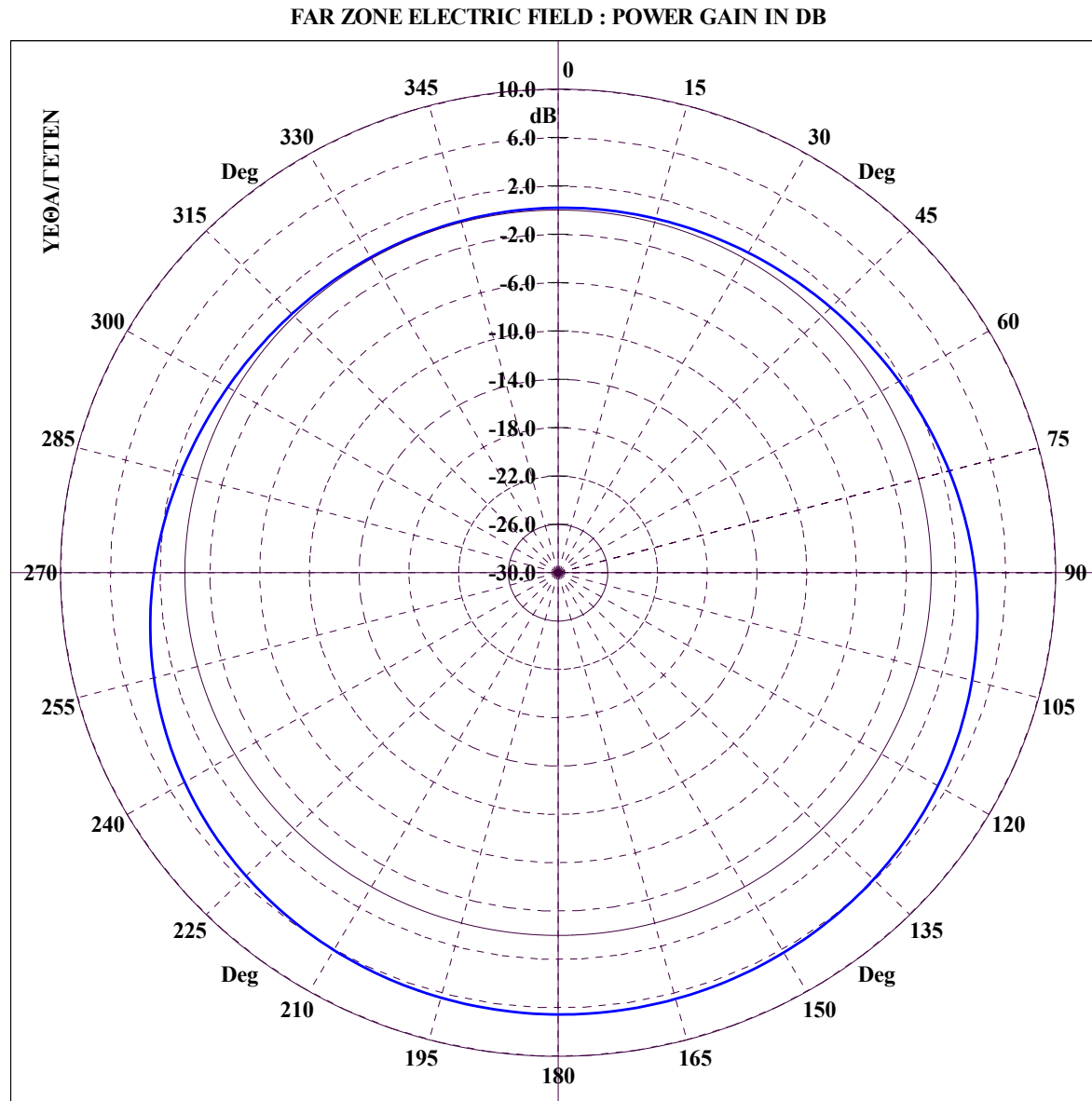


Διάγραμμα 5.52 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 135^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .



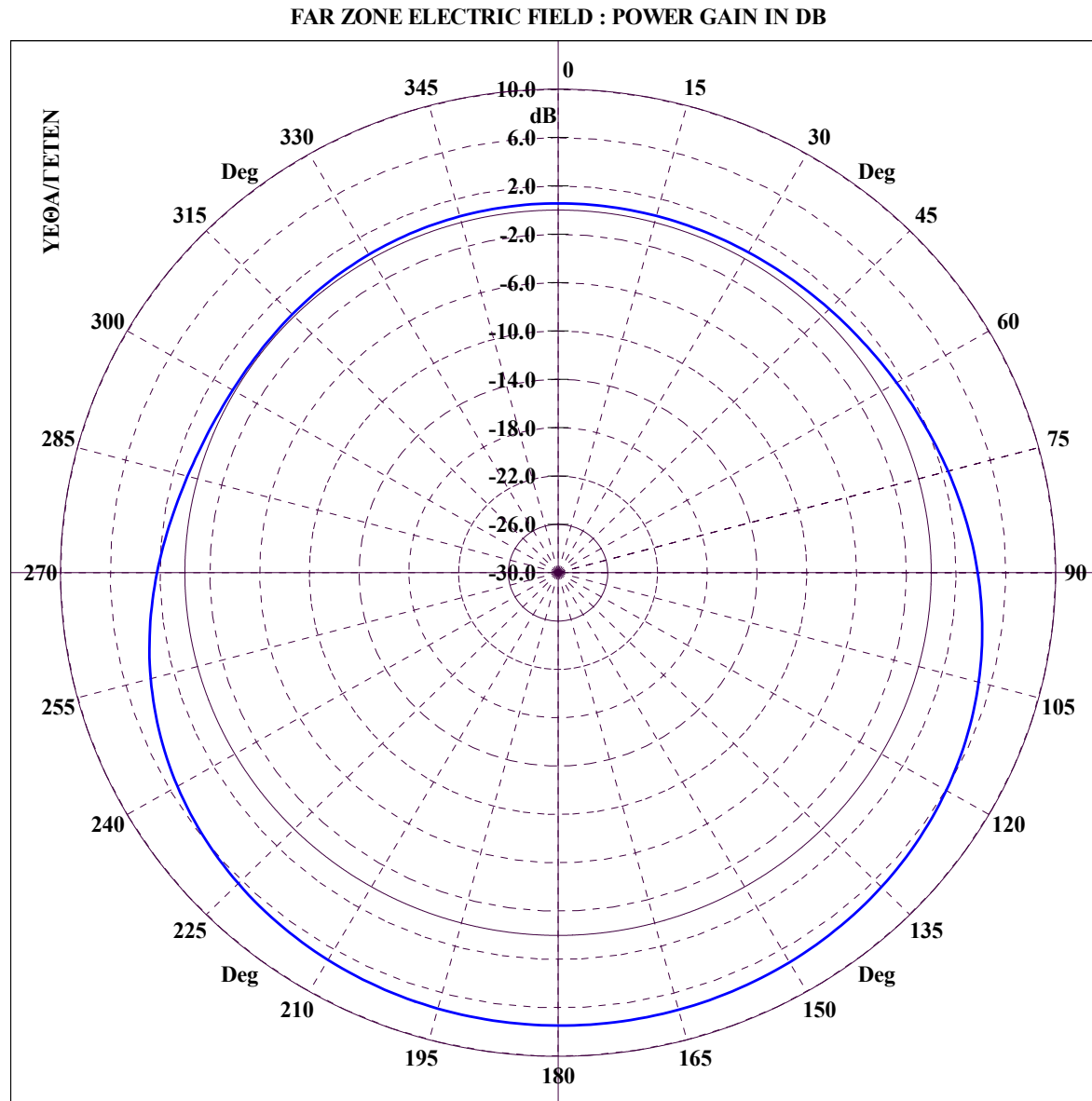
File Name :TPK17-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 5.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

Διάγραμμα 5.53 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 5^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .



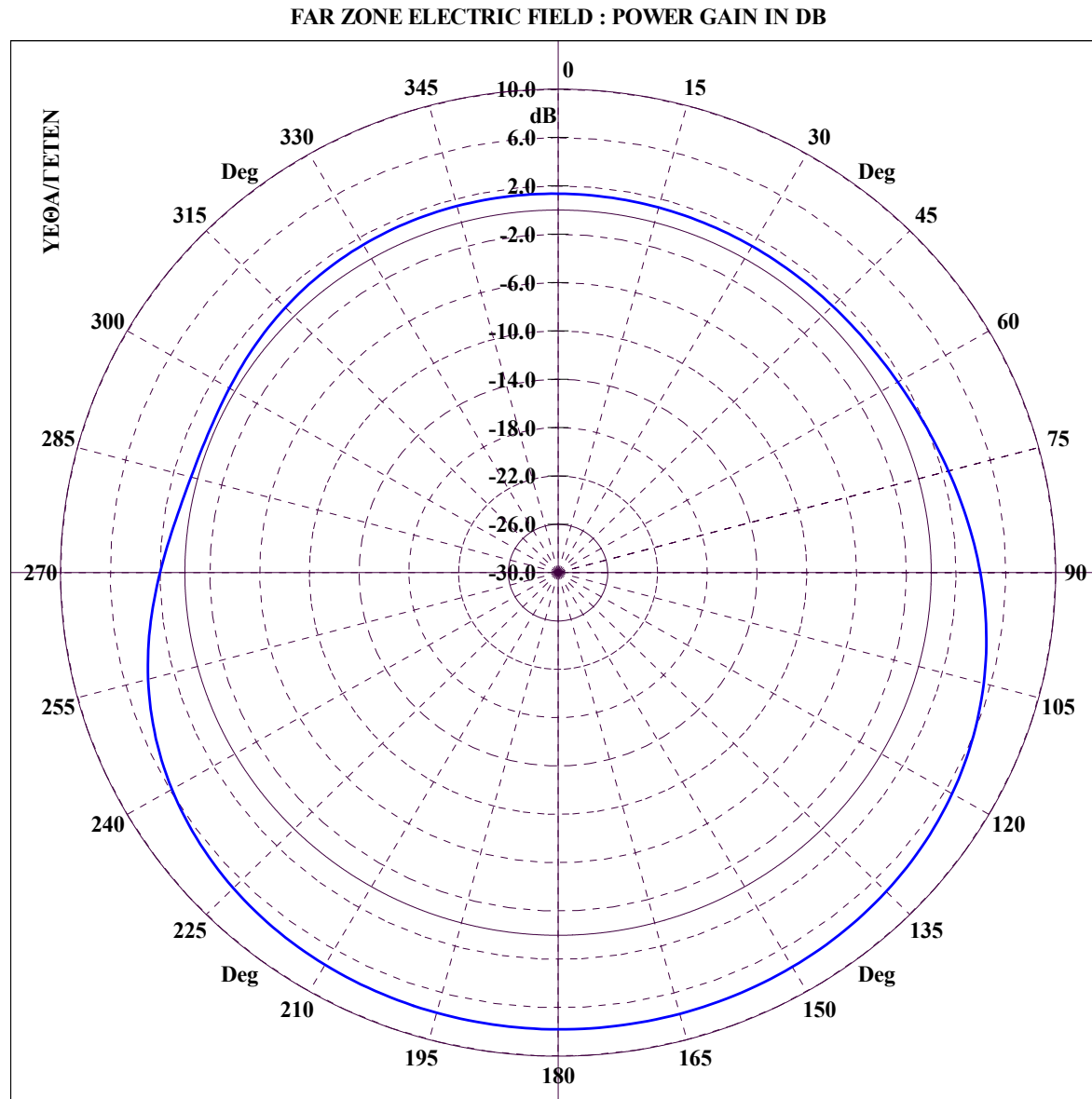
File Name :ΓΡΚ17-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 10.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

Διάγραμμα 5.54 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 10^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .



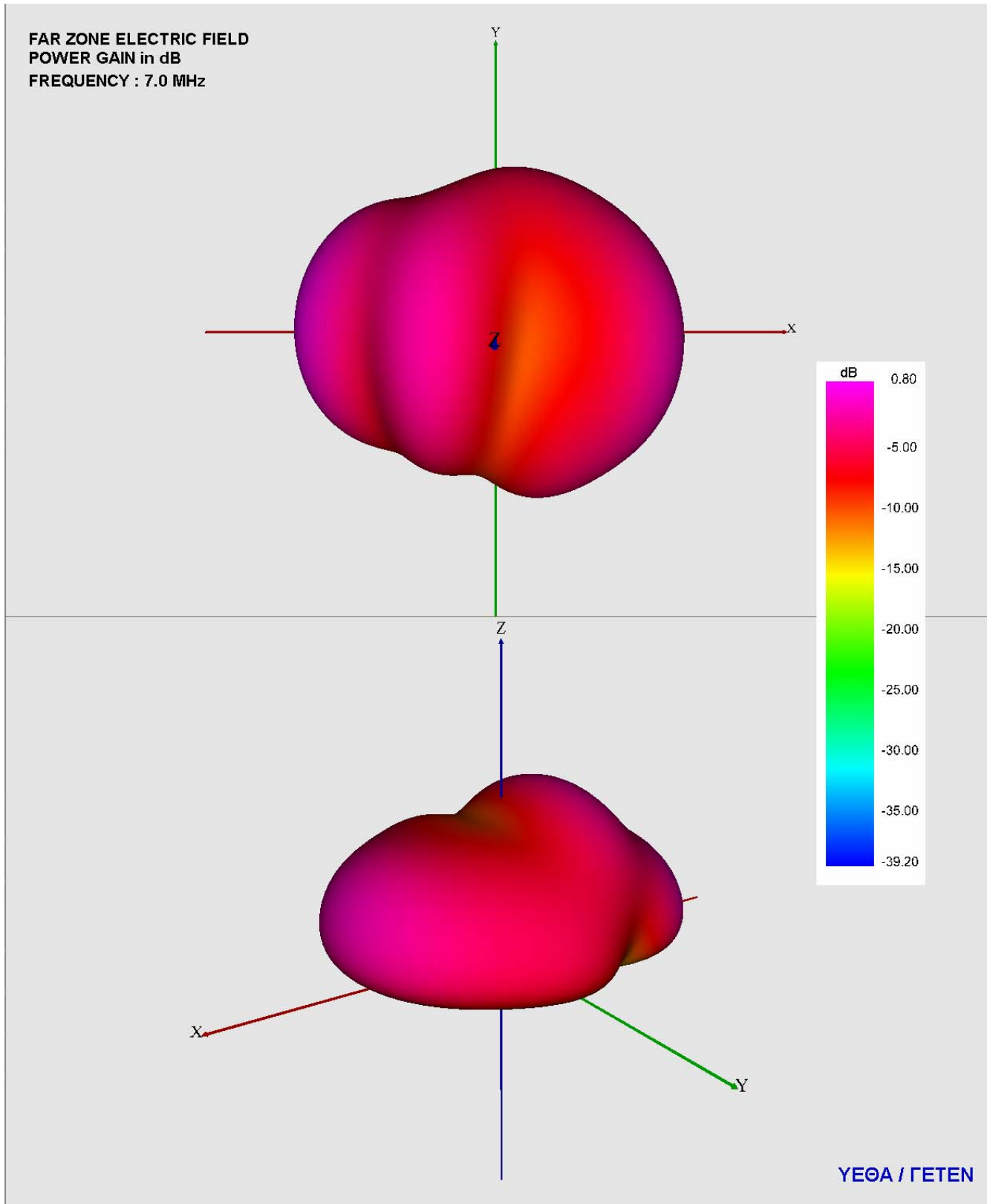
File Name :TPK17-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\theta = 15.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

Διάγραμμα 5.55 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 15^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .



File Name :TPK17-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 20.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

Διάγραμμα 5.56 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 1 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 20^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .

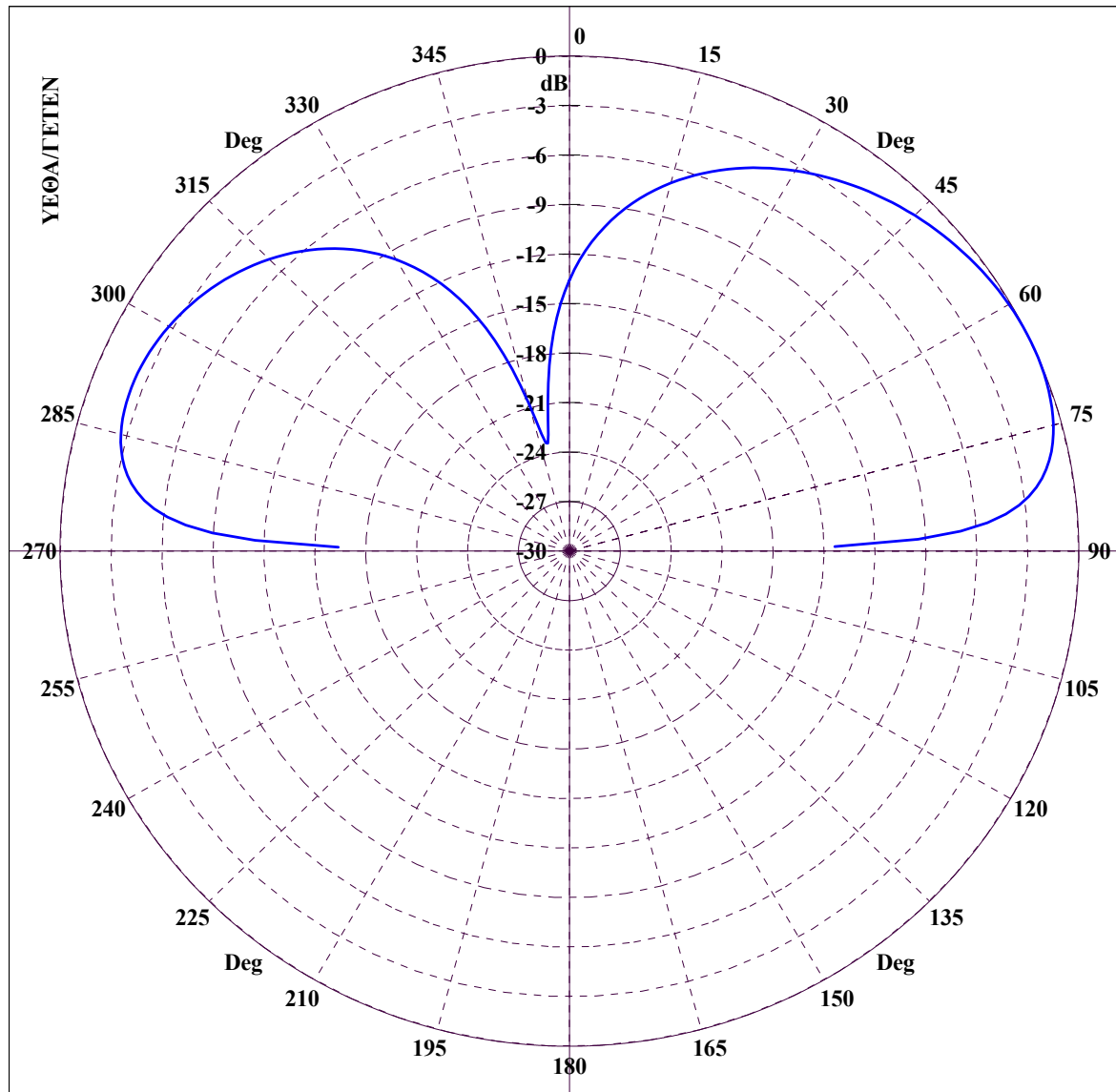


Διάγραμμα 5.57 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, 3D διάγραμμα κέρδους ισχύος για κεραία 1 σε συχνότητα 7 MHz με χρήση VRML.

#### ***5.4.1.2 Διαγράμματα ακτινοβολίας μακρινού πεδίου κεραίας 2***

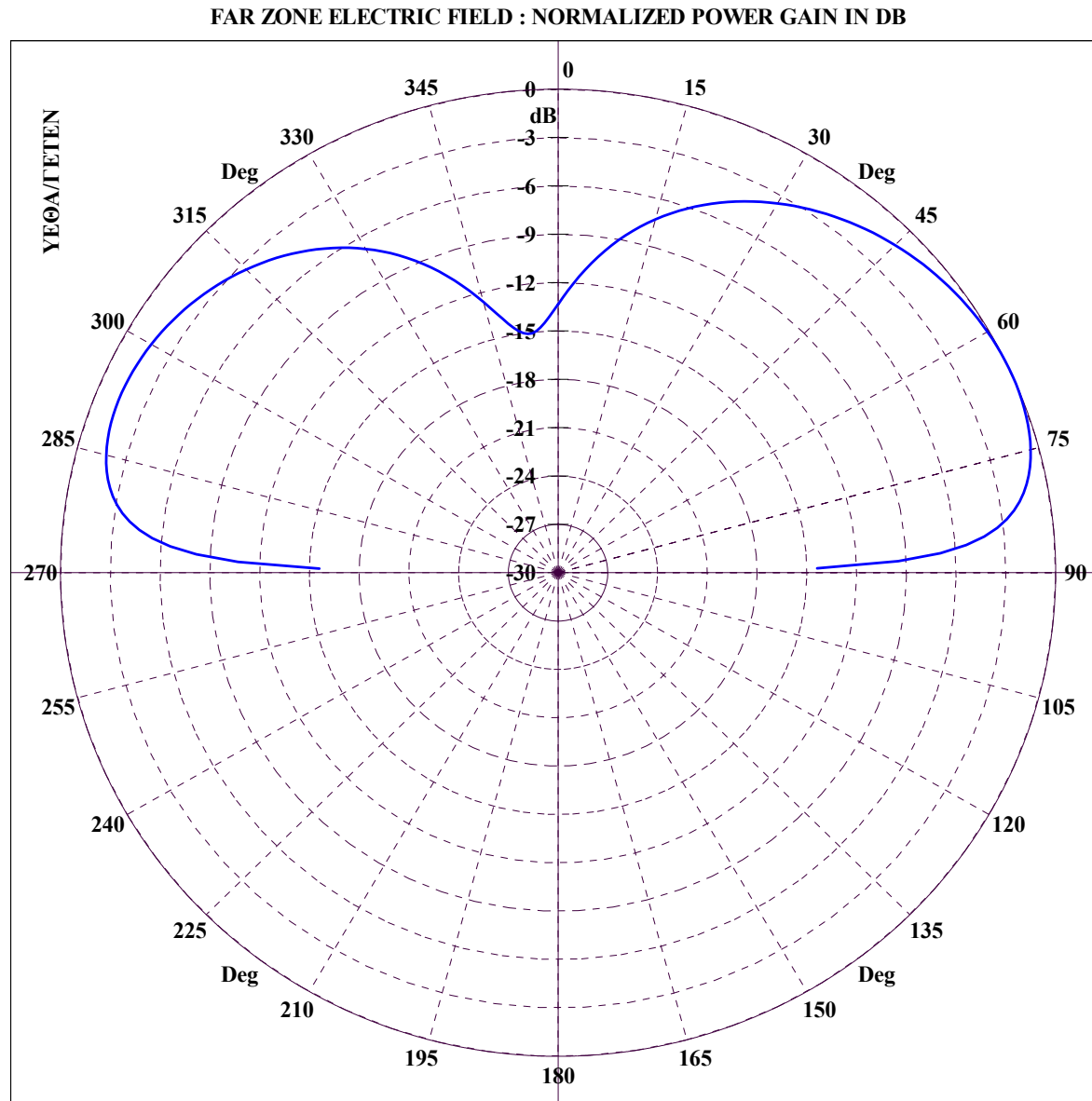


FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB

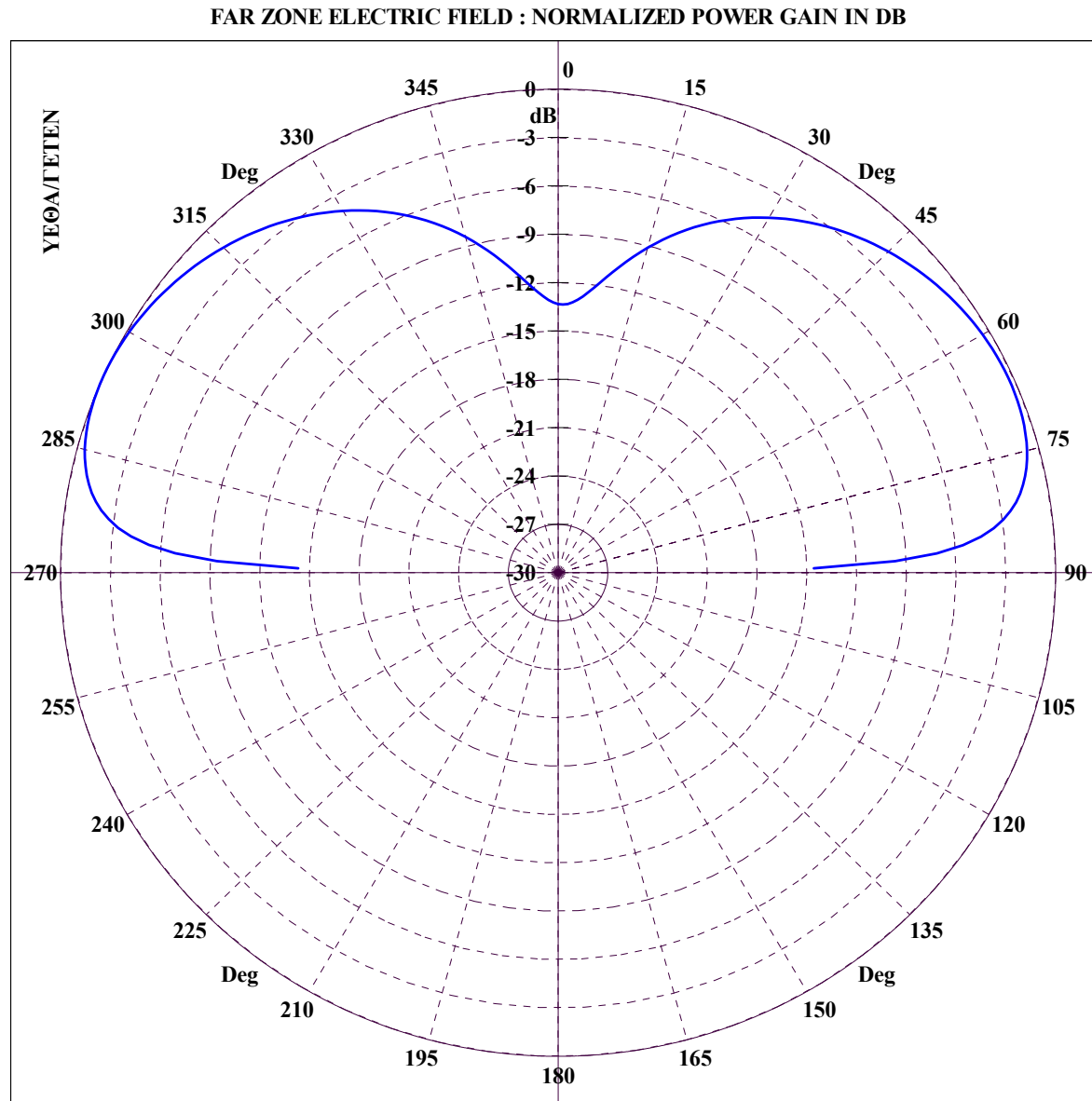


File Name :TPK22-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 0.00$ ,  $\Theta=0-360$ , FREQUENCY = 2.00 MHz

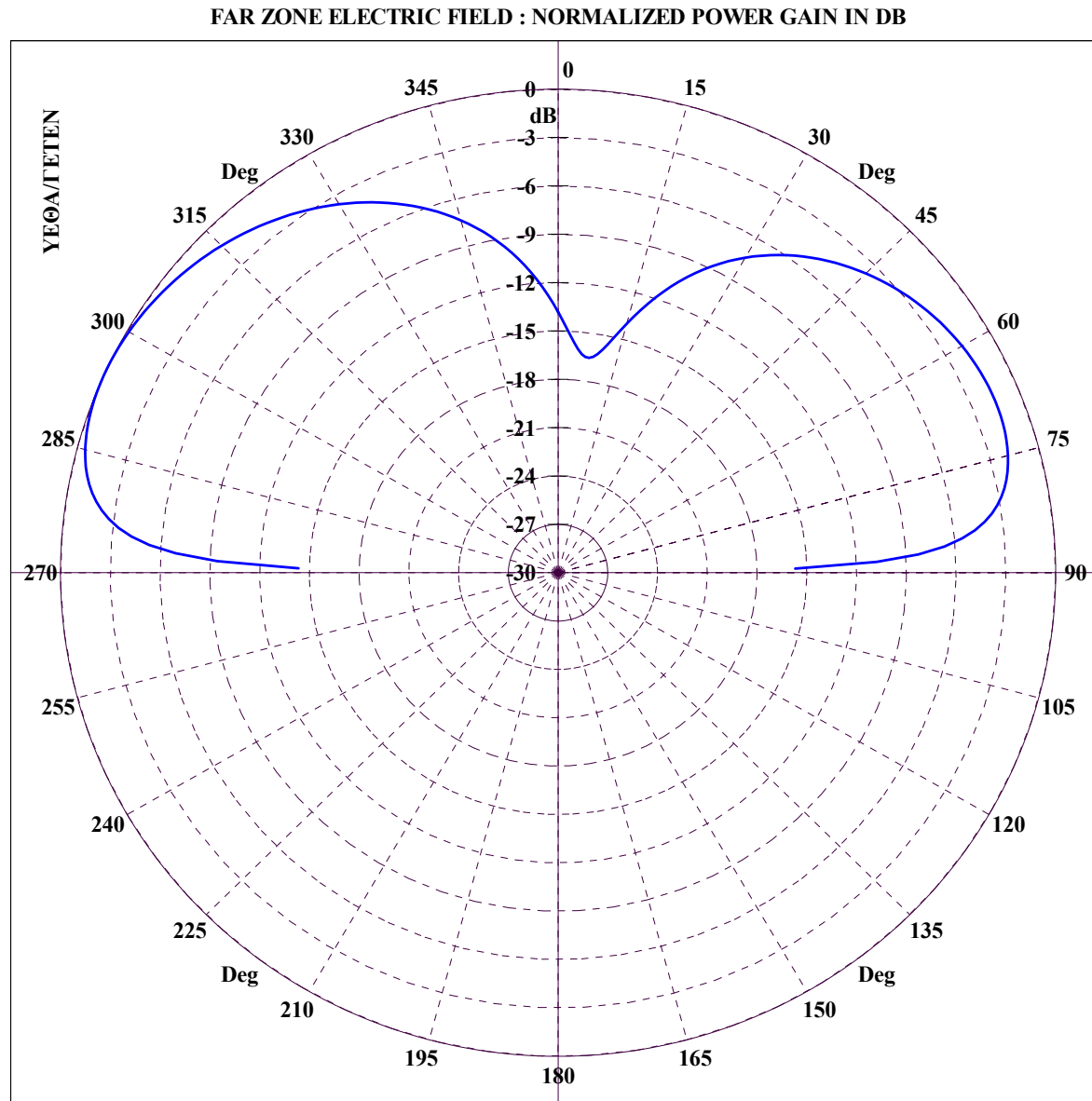
Διάγραμμα 5.58 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 2 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 0^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .



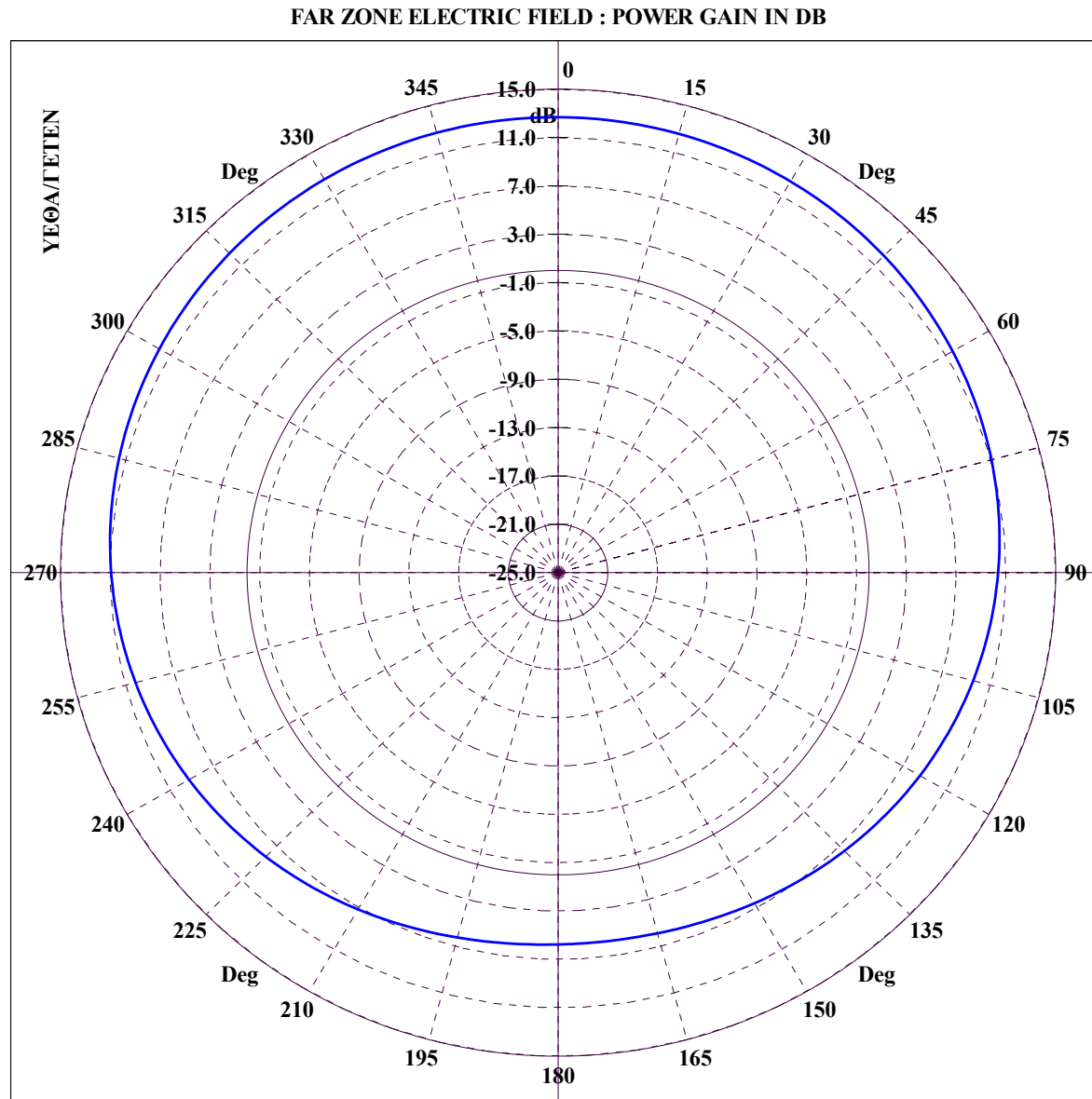
Διάγραμμα 5.59 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 2 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\varphi = 45^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .



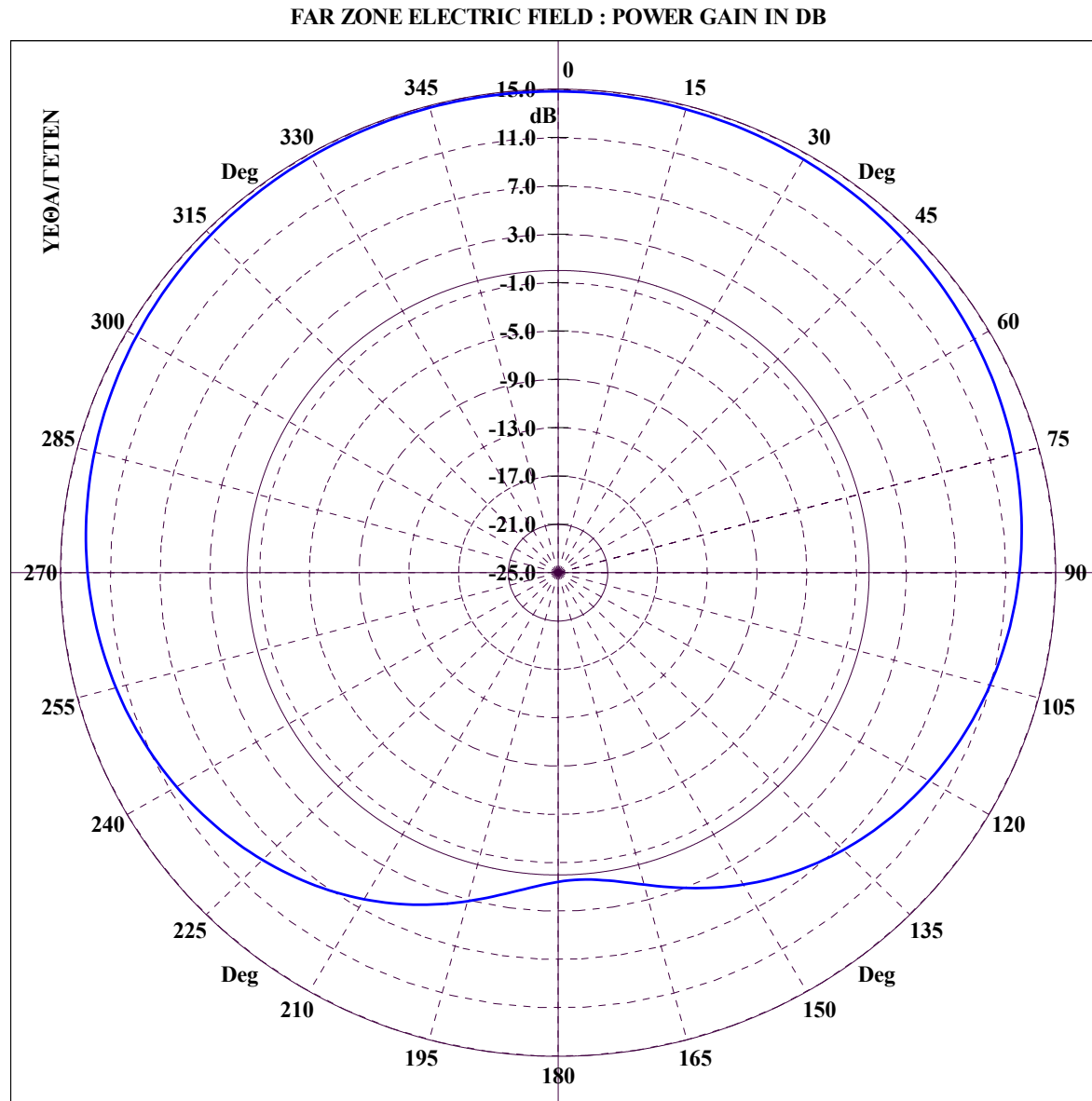
Διάγραμμα 5.60 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 2 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\varphi = 90^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .



Διάγραμμα 5.61 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 2 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 135^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

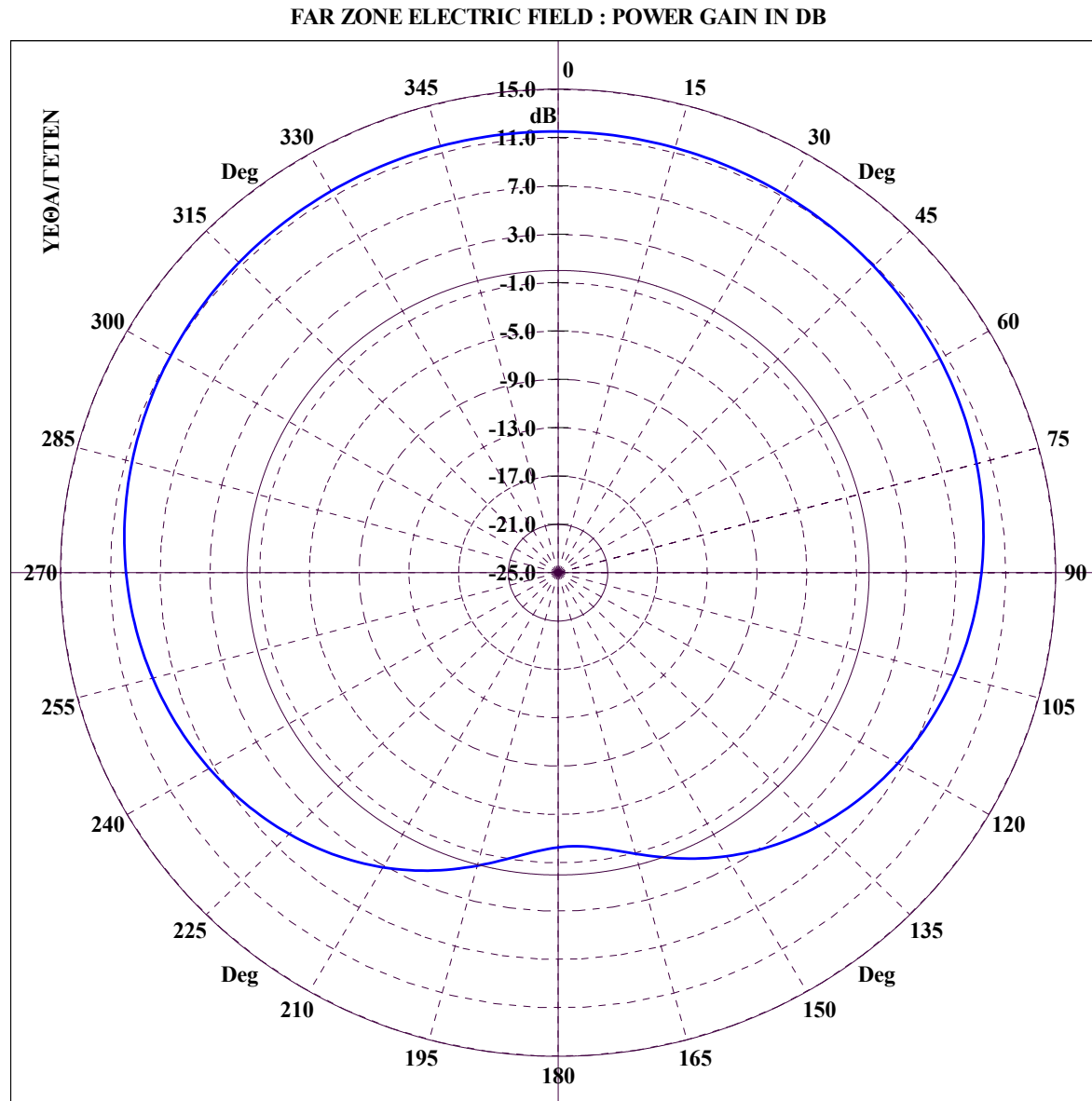


**Διάγραμμα 5.62 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 2 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 5^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .**



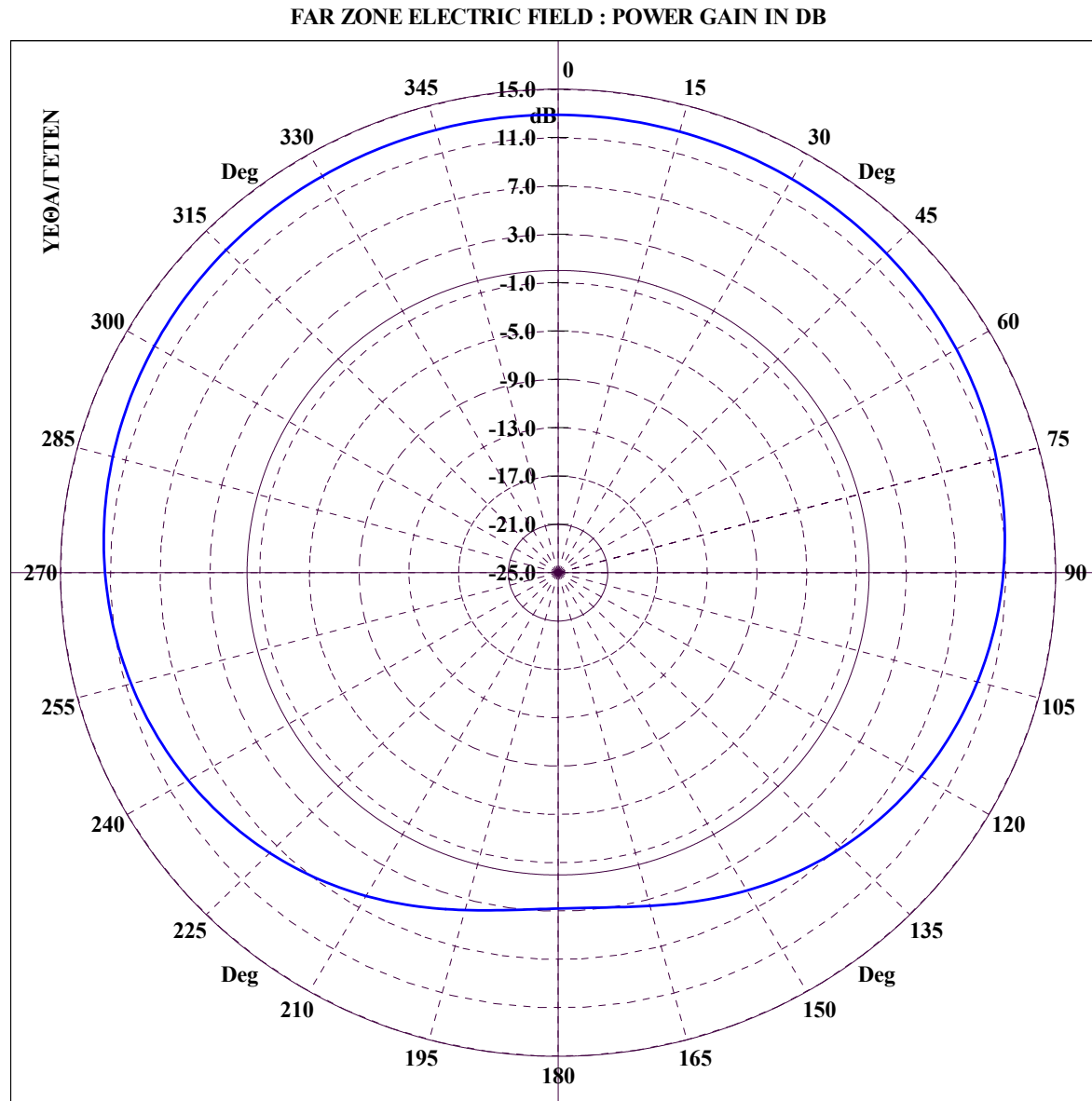
File Name :ΓΡΚ22-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\theta = 10.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 2.00 MHz

Διάγραμμα 5.63 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 2 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 10^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .



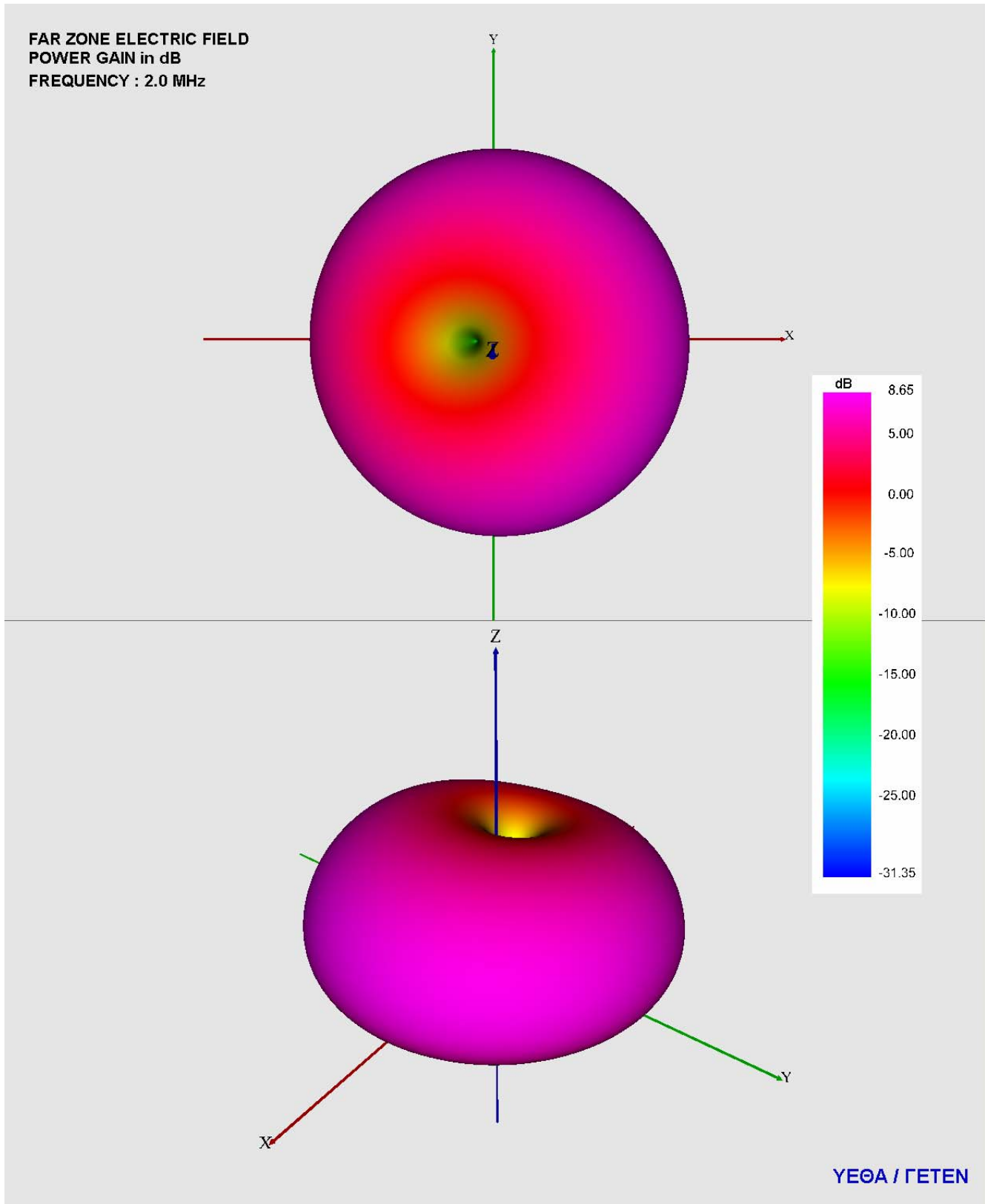
File Name :ΓΡΚ22-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\theta = 15.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 2.00 MHz

Διάγραμμα 5.64 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 2 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 15^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .

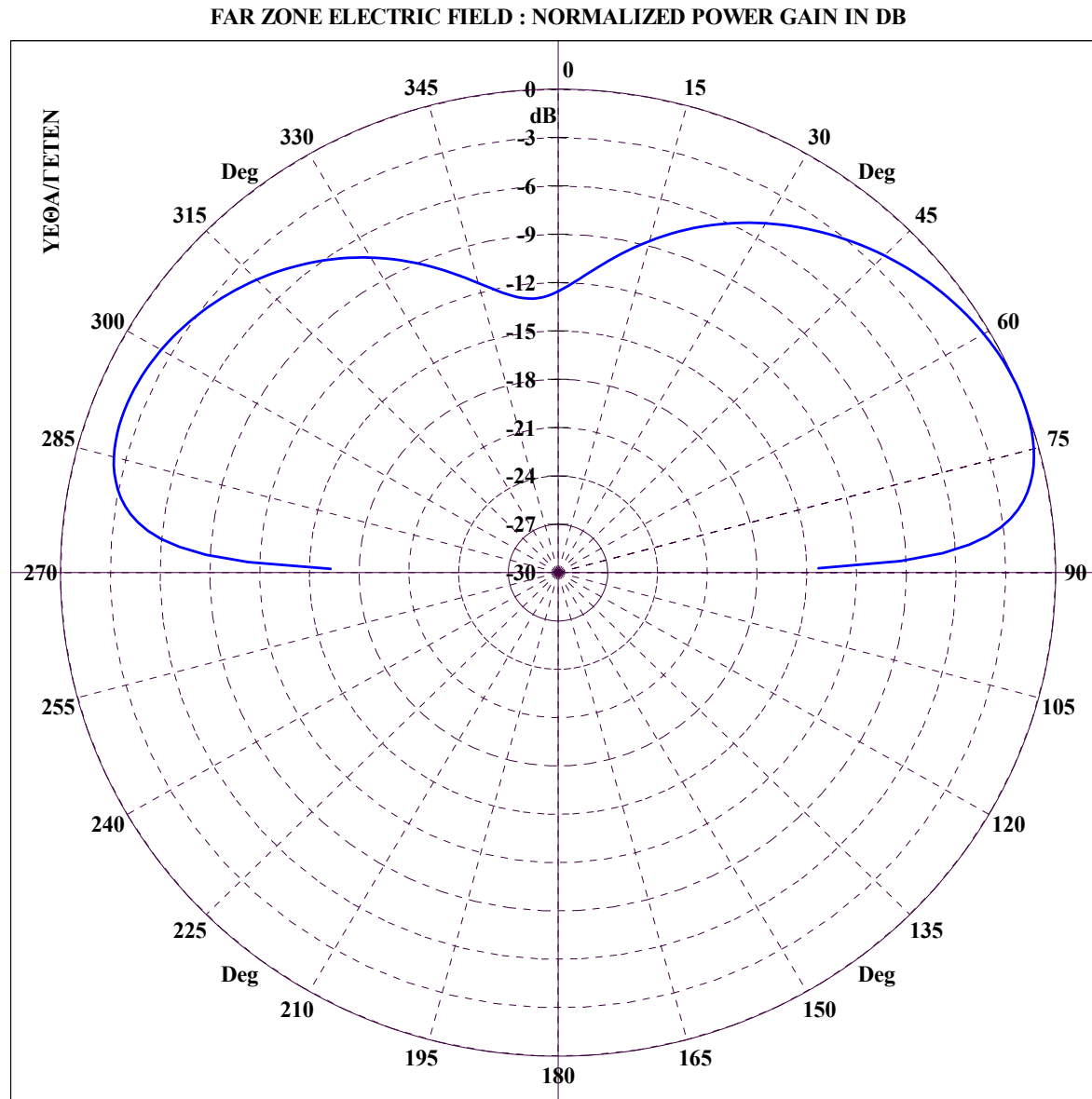


**Διάγραμμα 5.65 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 2 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 20^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .**

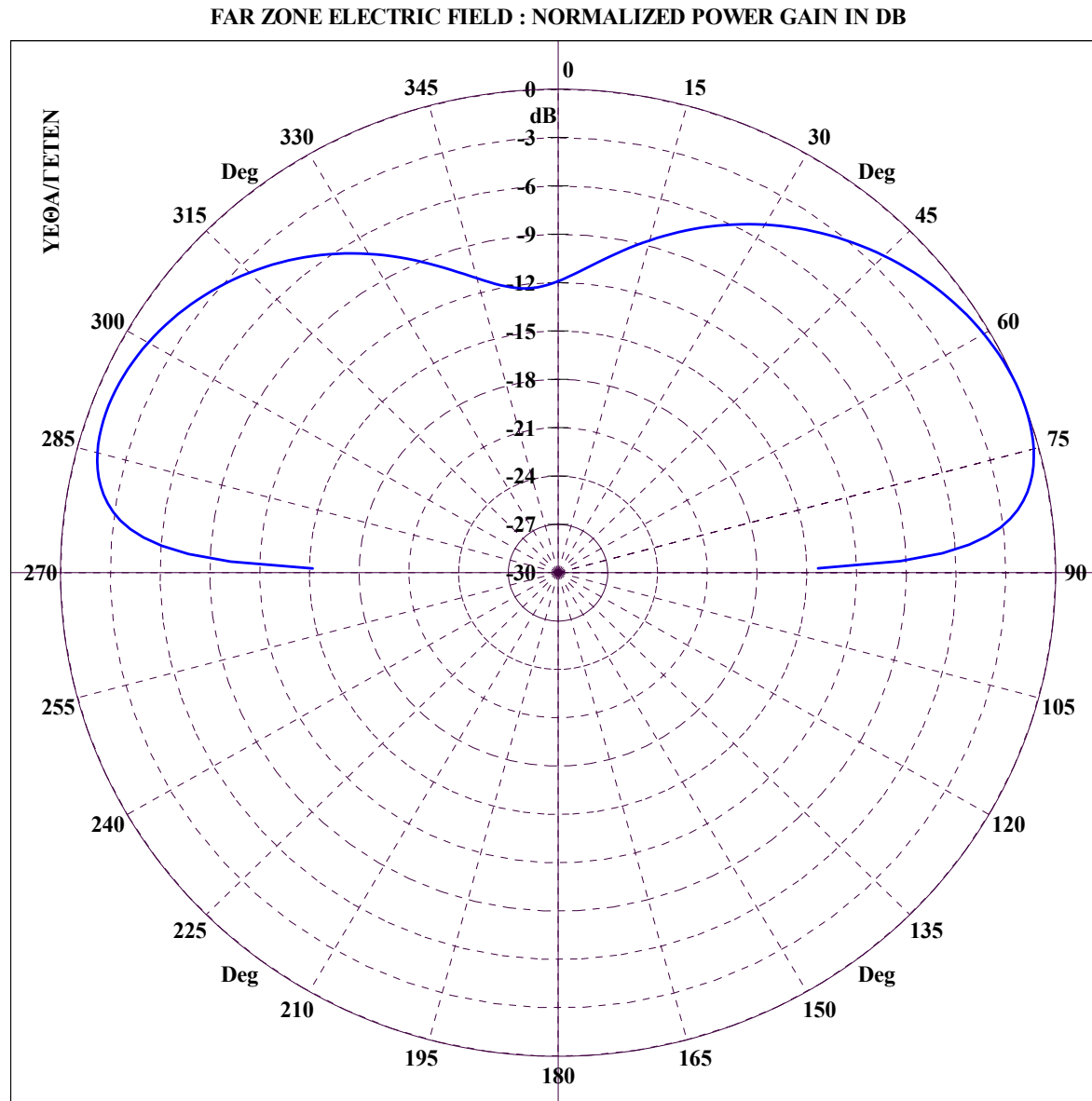




Διάγραμμα 5.66 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, 3D διάγραμμα κέρδους ισχύος για κεραία 2 σε συχνότητα 2 MHz με χρήση VRML.

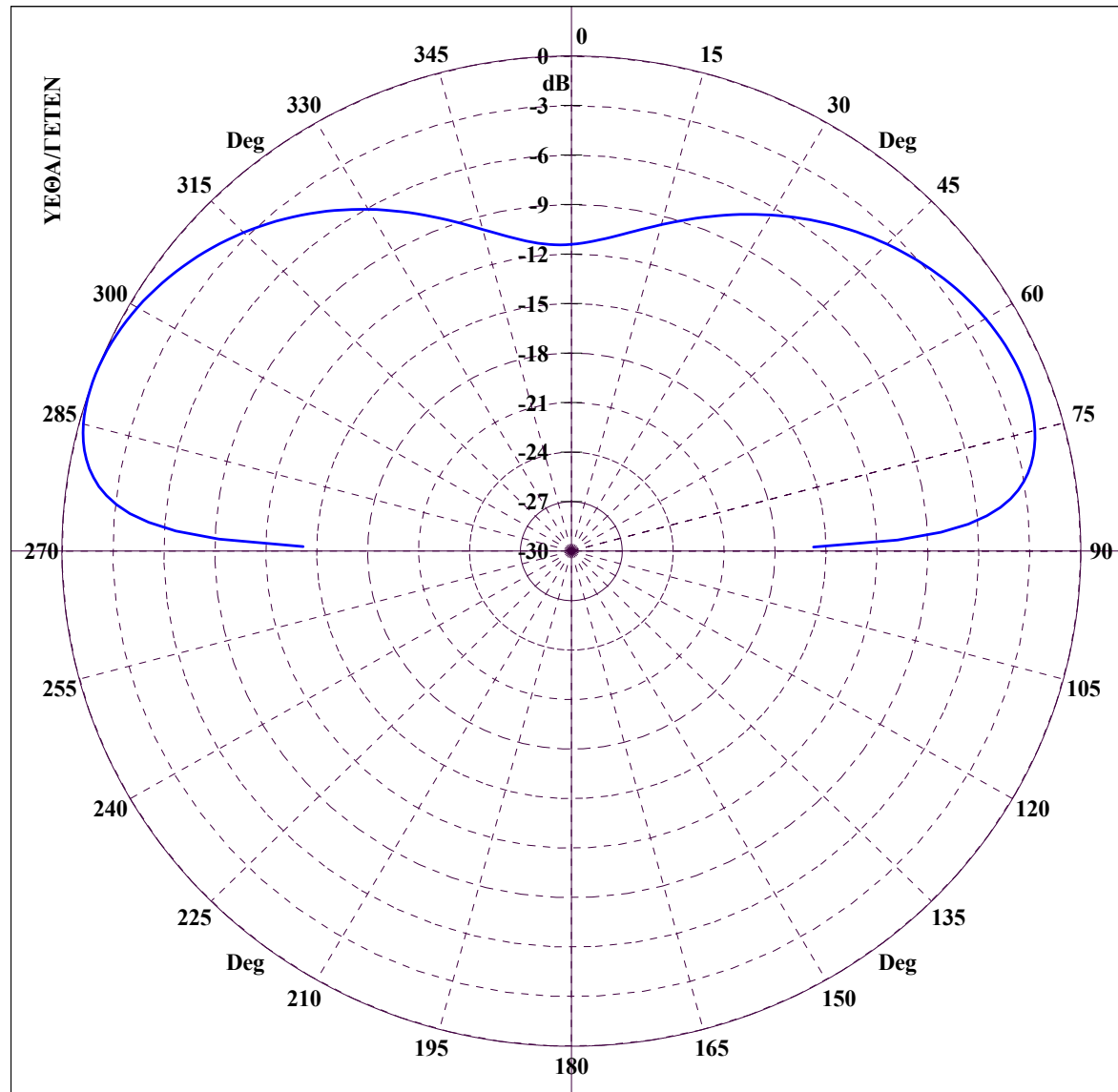


Διάγραμμα 5.67 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 0^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .



Διάγραμμα 5.68 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\varphi = 45^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

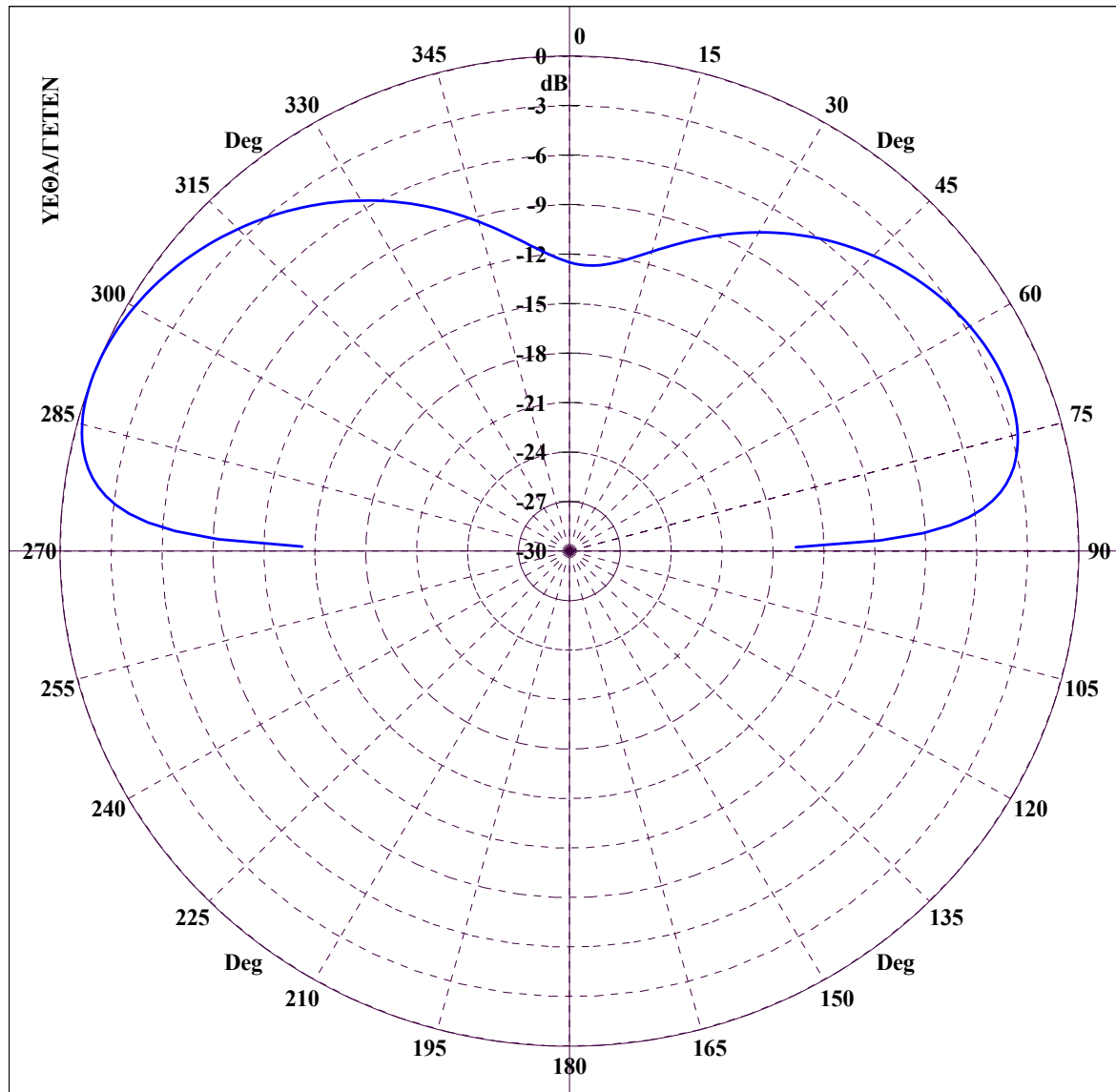
FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



File Name :TPK25-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 90.00$ ,  $\Theta=0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

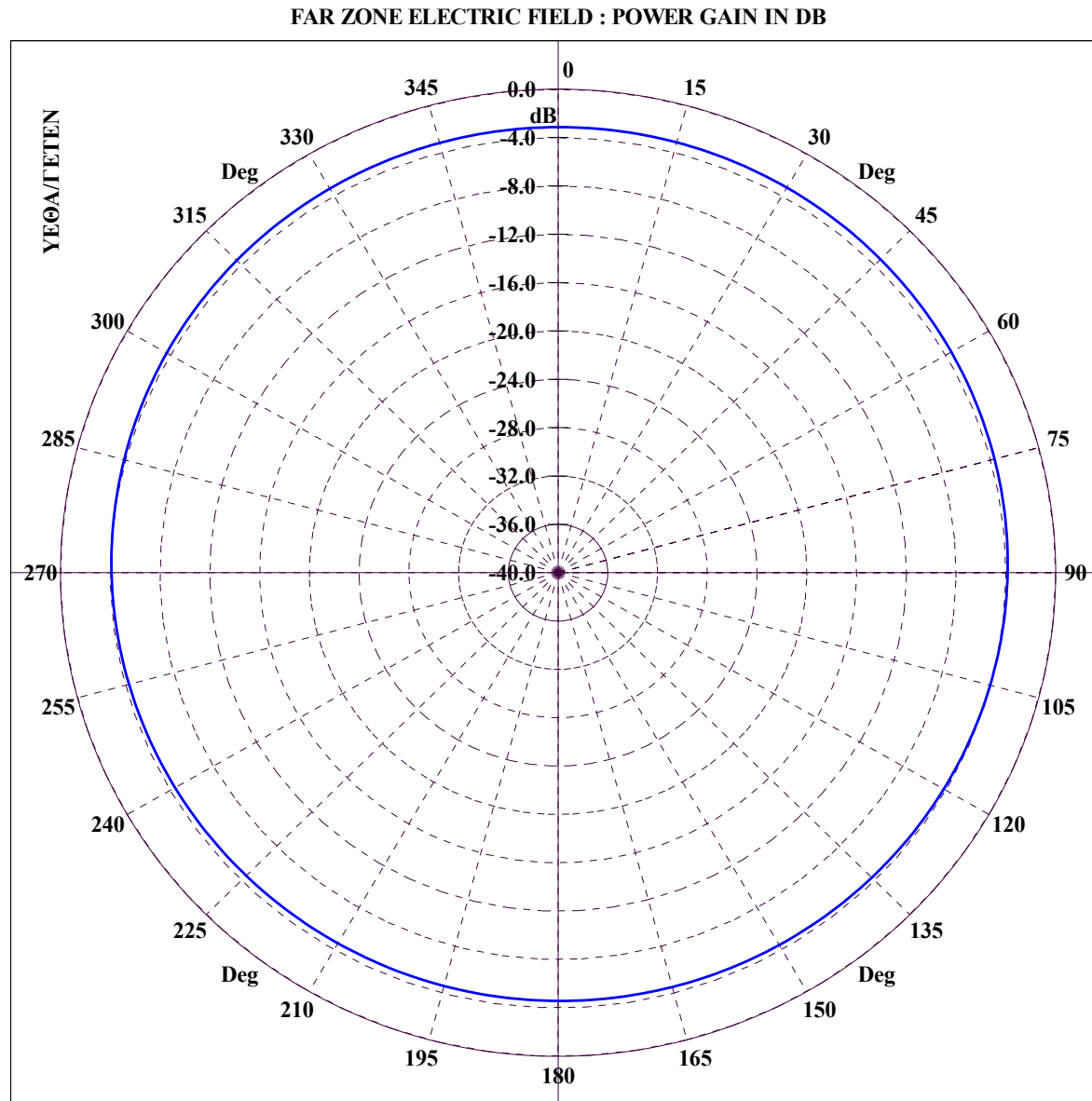
Διάγραμμα 5.69 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\varphi = 90^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB

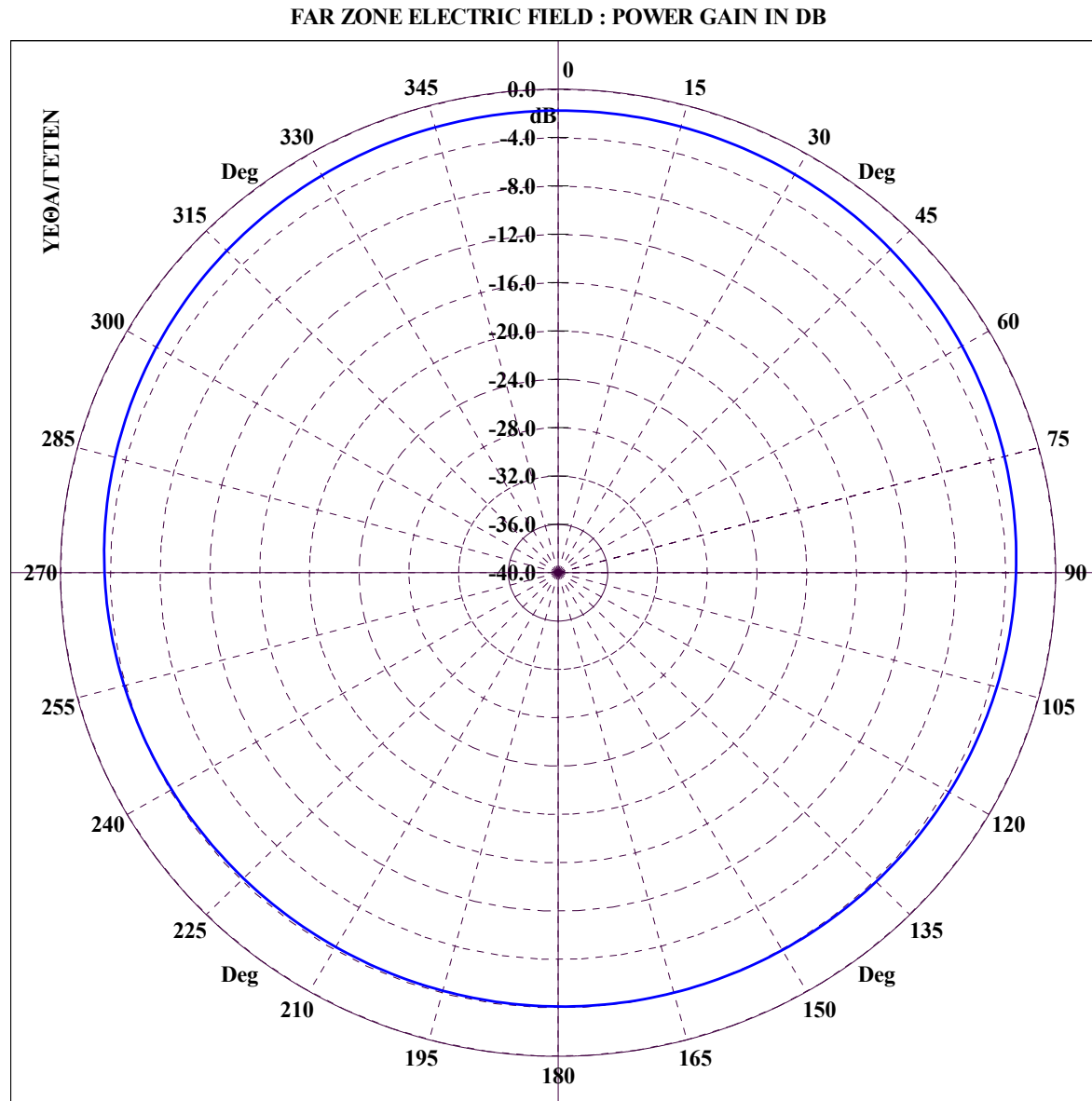


File Name :TPK25-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 135.00$ ,  $\Theta = 0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

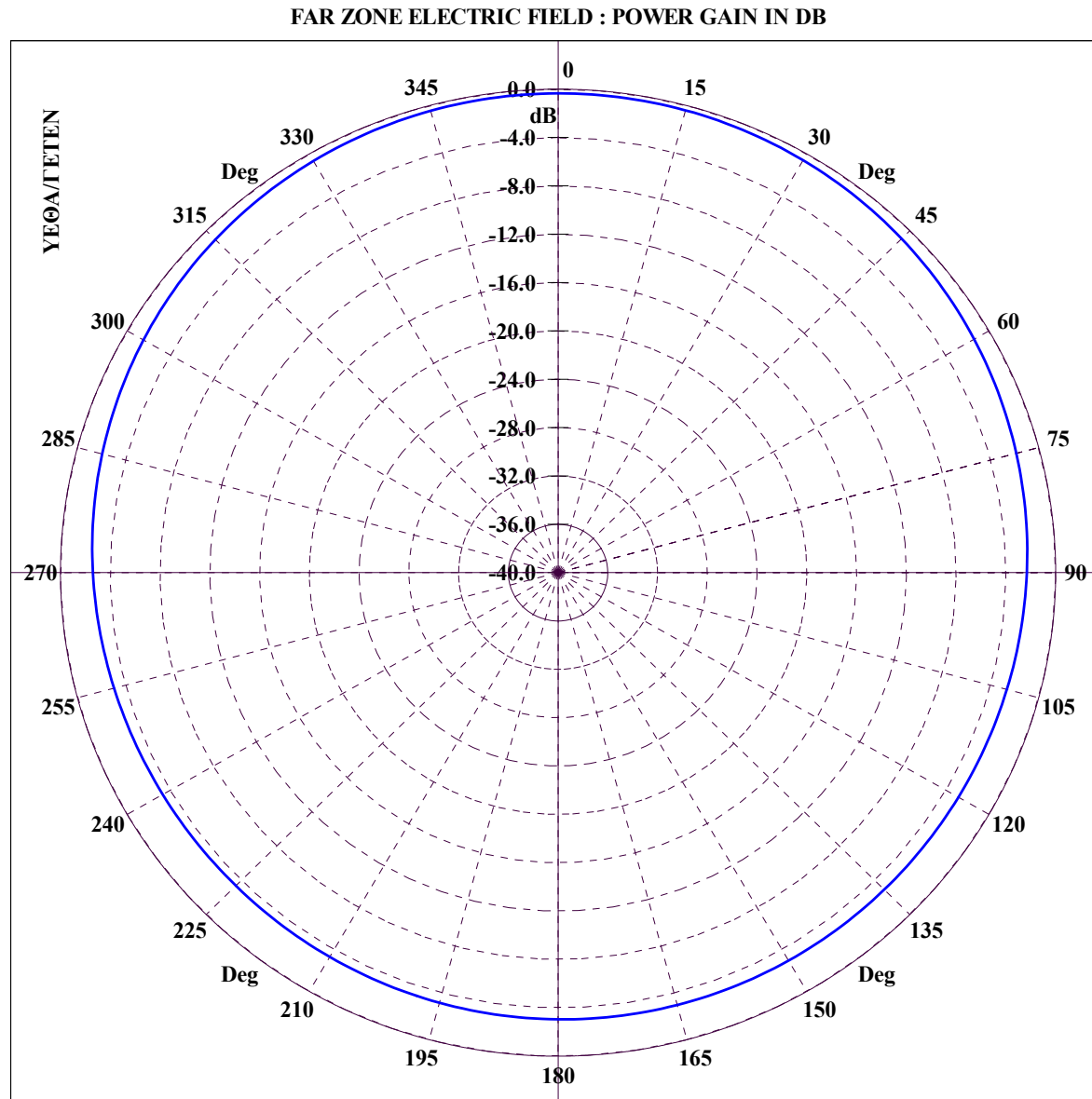
Διάγραμμα 5.70 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 135^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .



**Διάγραμμα 5.71 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 5^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .**

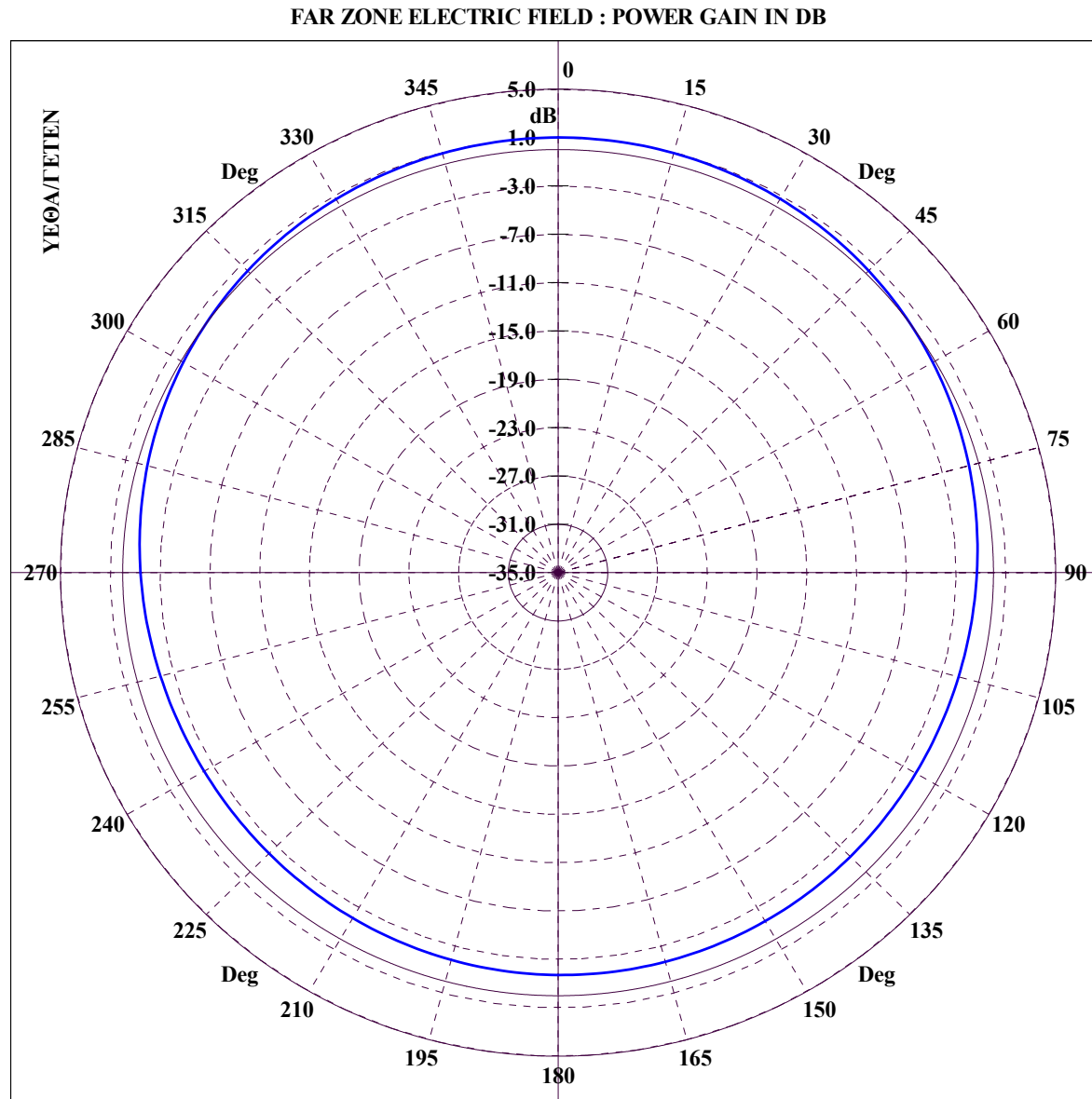


**Διάγραμμα 5.72 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 10^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .**



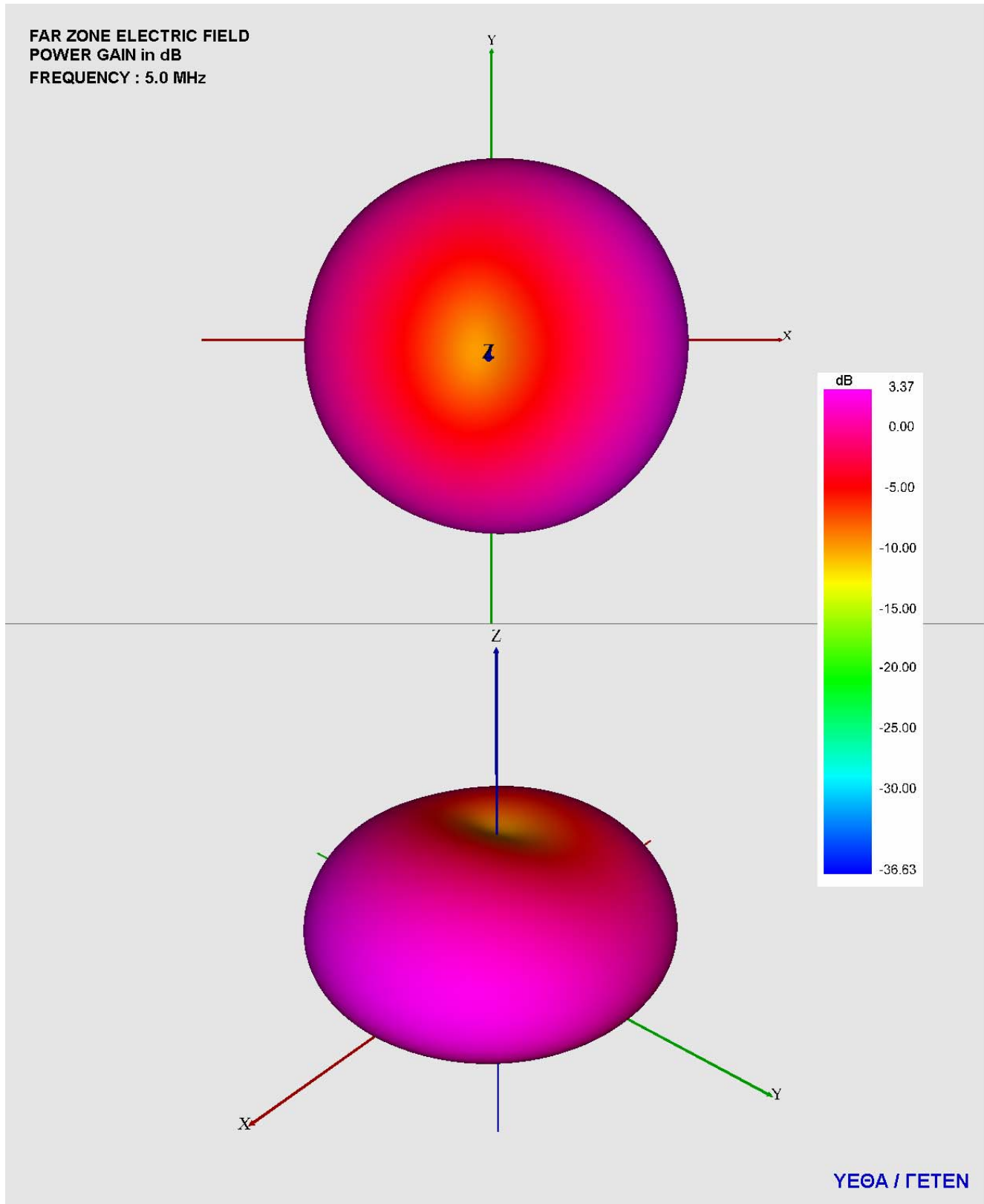
**Διάγραμμα 5.73 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 15^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .**



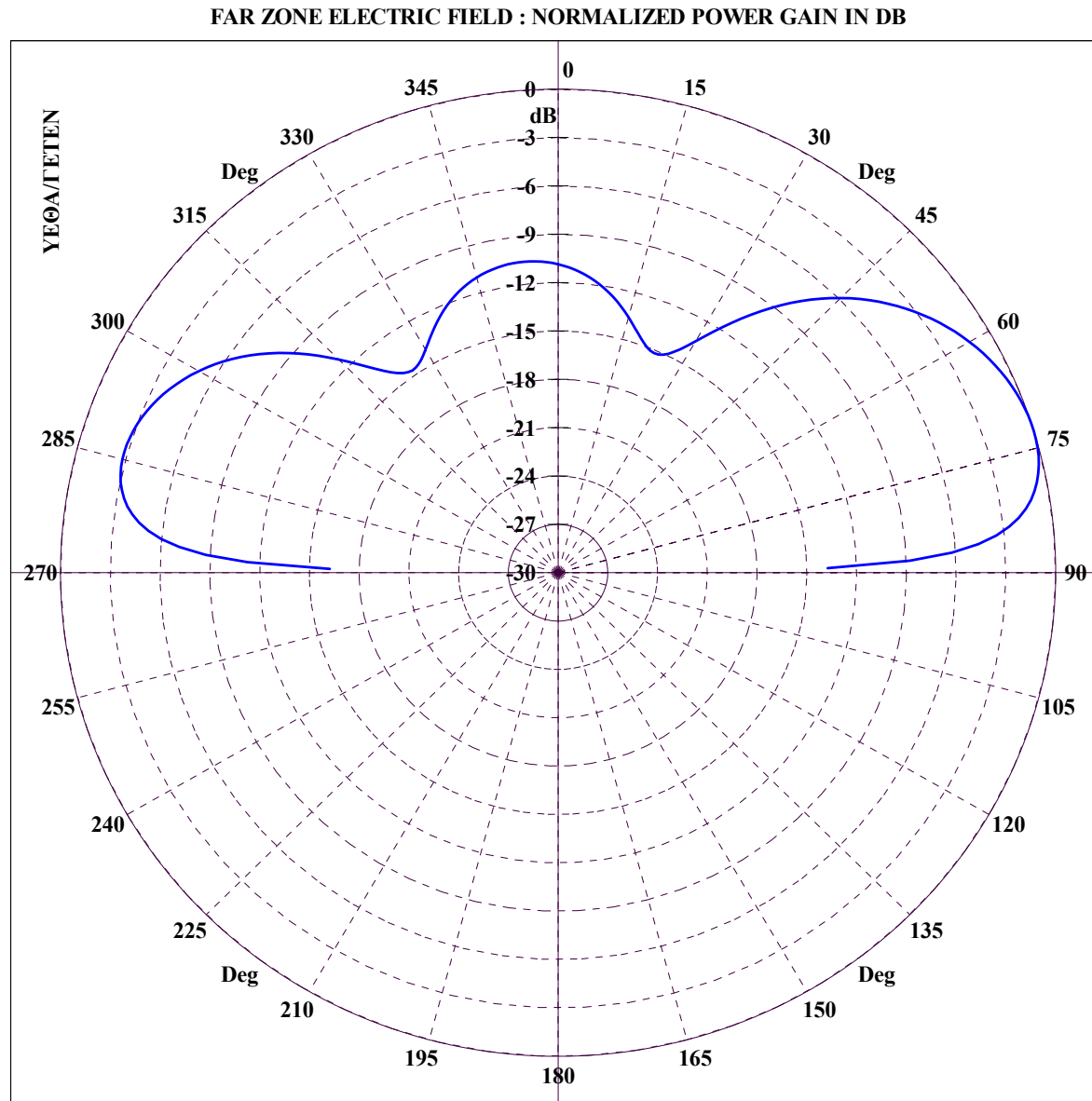


File Name :TPK25-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\theta = 20.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

Διάγραμμα 5.74 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 20^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .

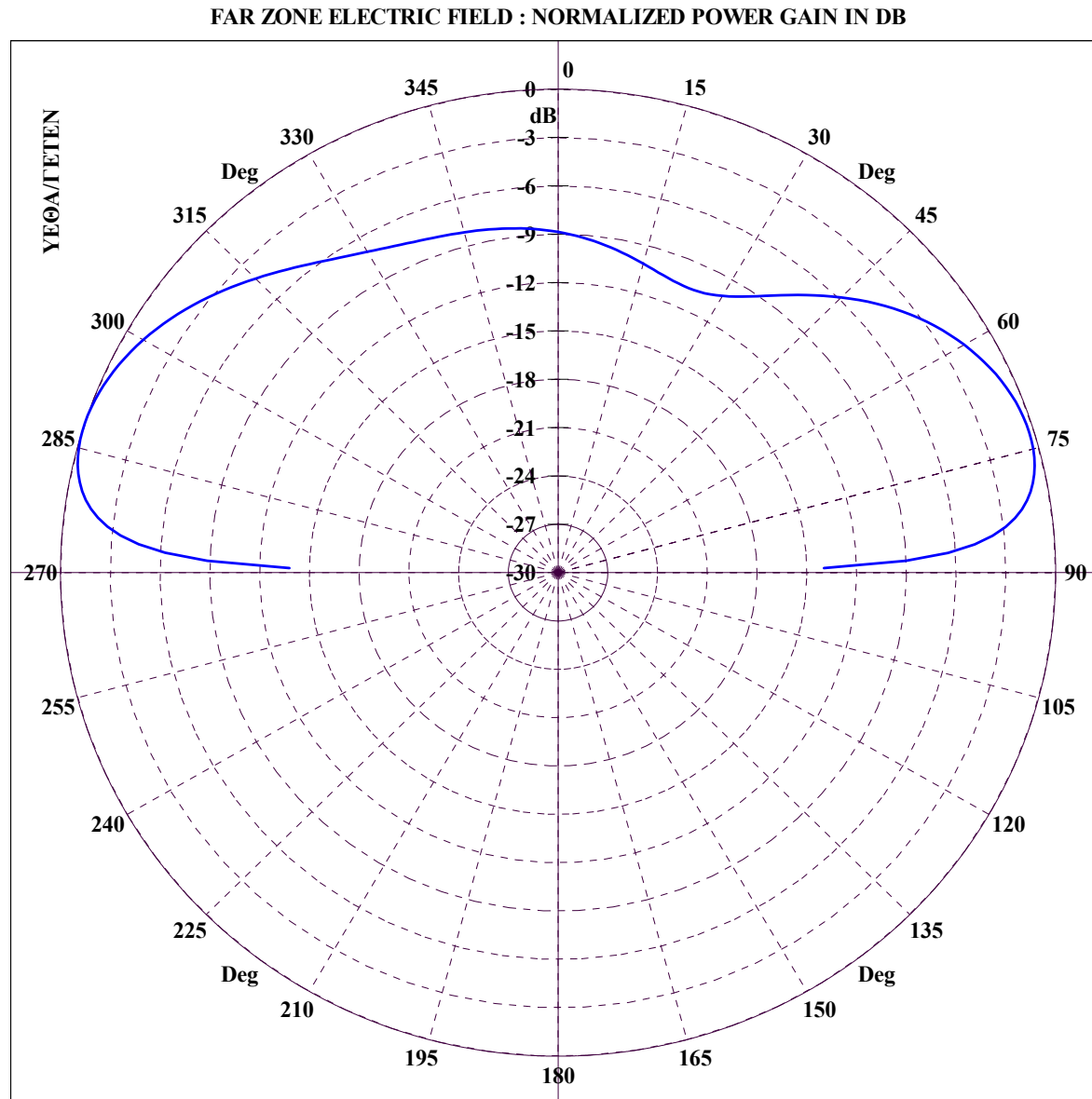


Διάγραμμα 5.75 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, 3D διάγραμμα κέρδους ισχύος για κεραία 2 σε συχνότητα 5 MHz με χρήση VRML



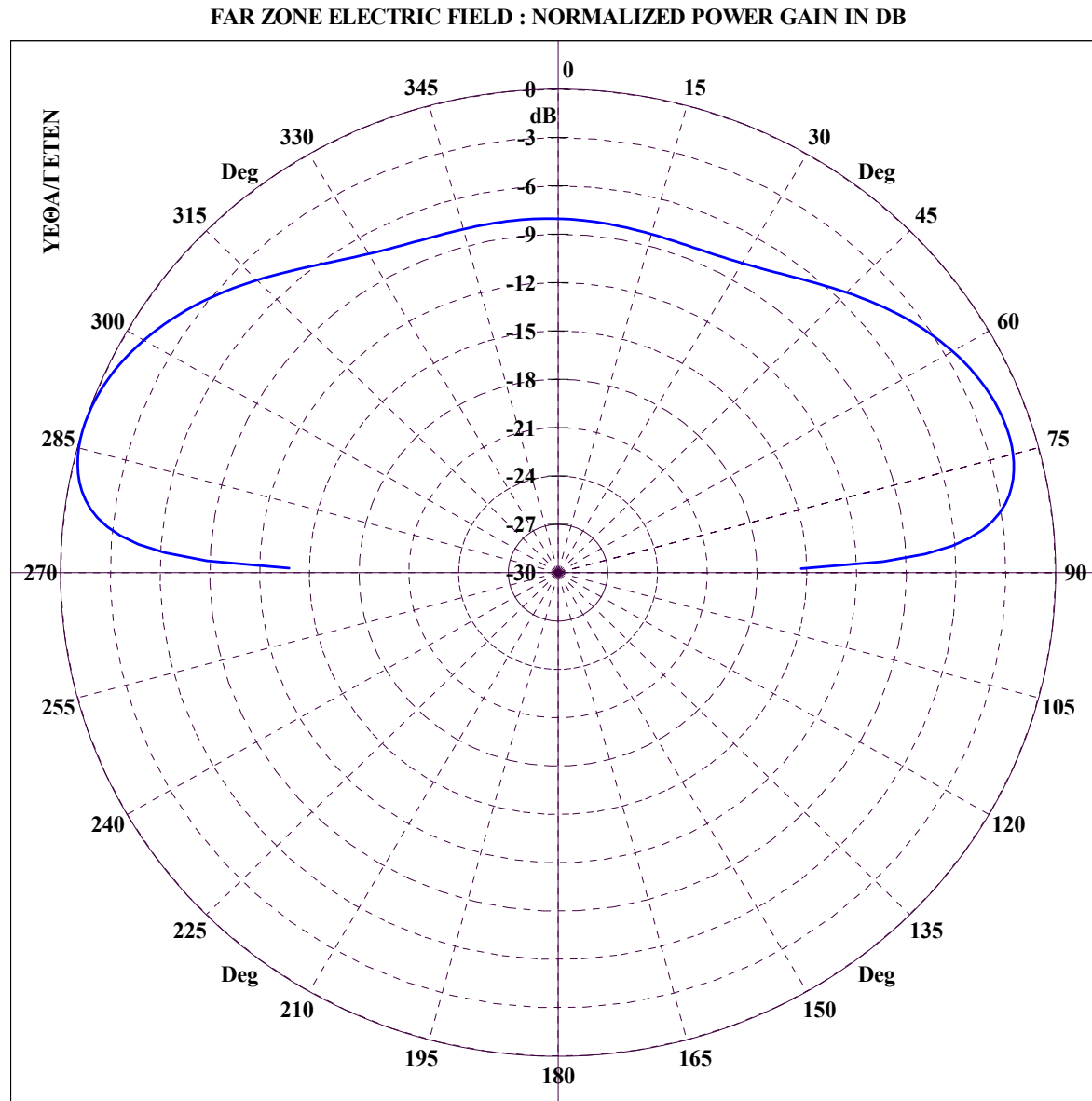
File Name :TPK27-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 0.00$ ,  $\Theta=0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

Διάγραμμα 5.76 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\varphi = 0^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

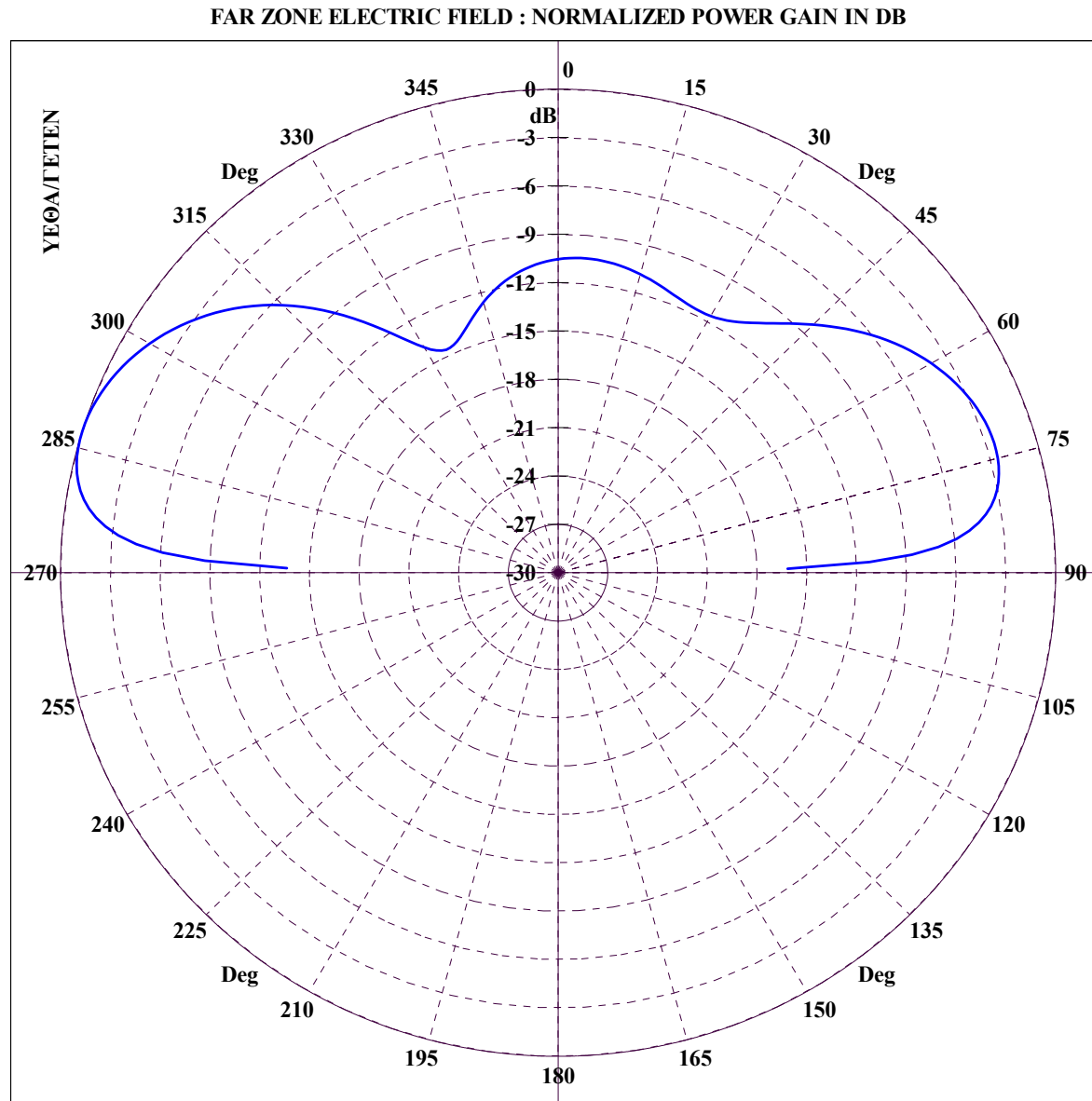


File Name :TPK27-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 45.00$ ,  $\Theta = 0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

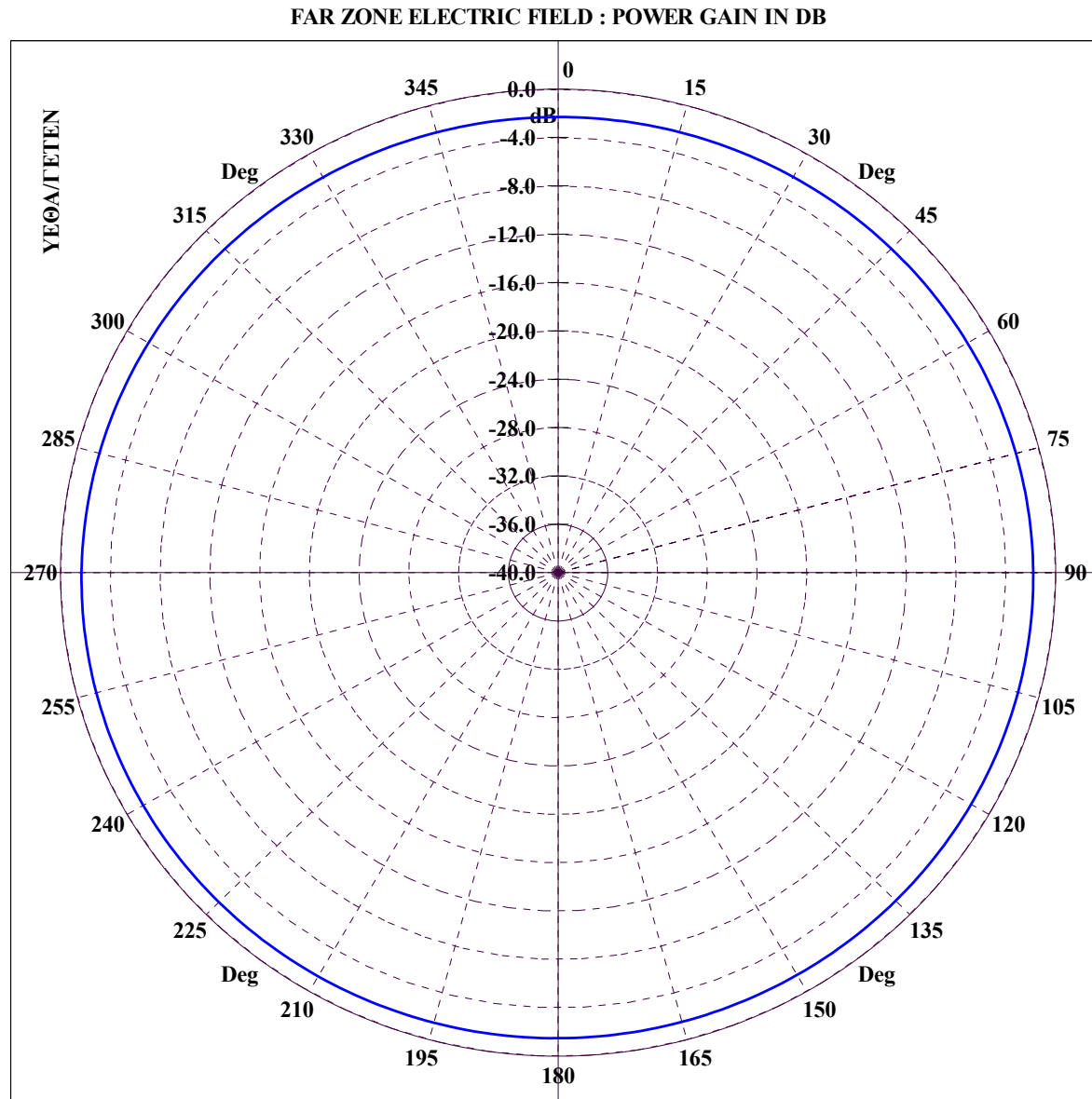
Διάγραμμα 5.77 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\varphi = 45^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .



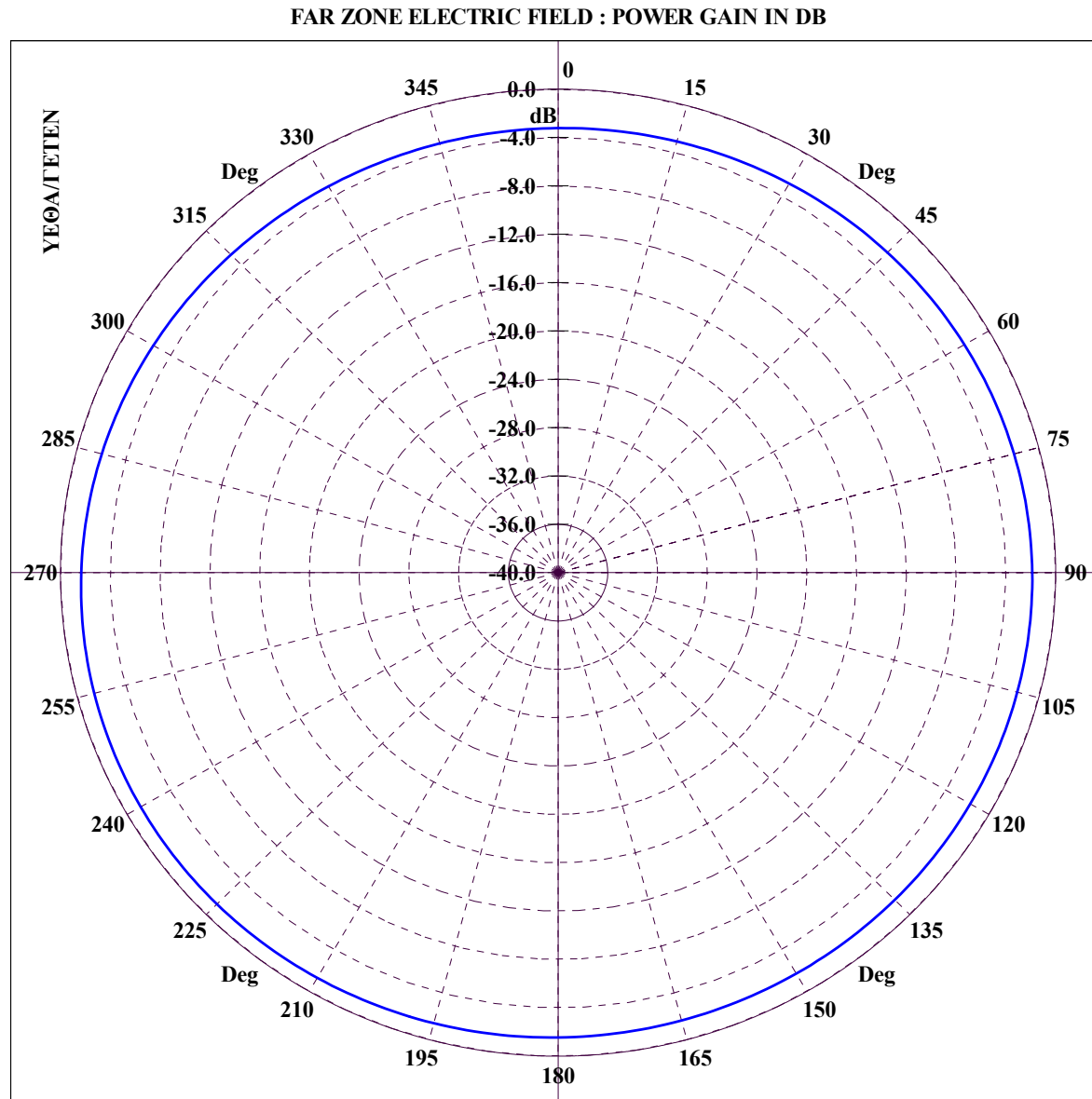
**Διάγραμμα 5.78 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\varphi = 90^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .**



Διάγραμμα 5.79 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 135^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

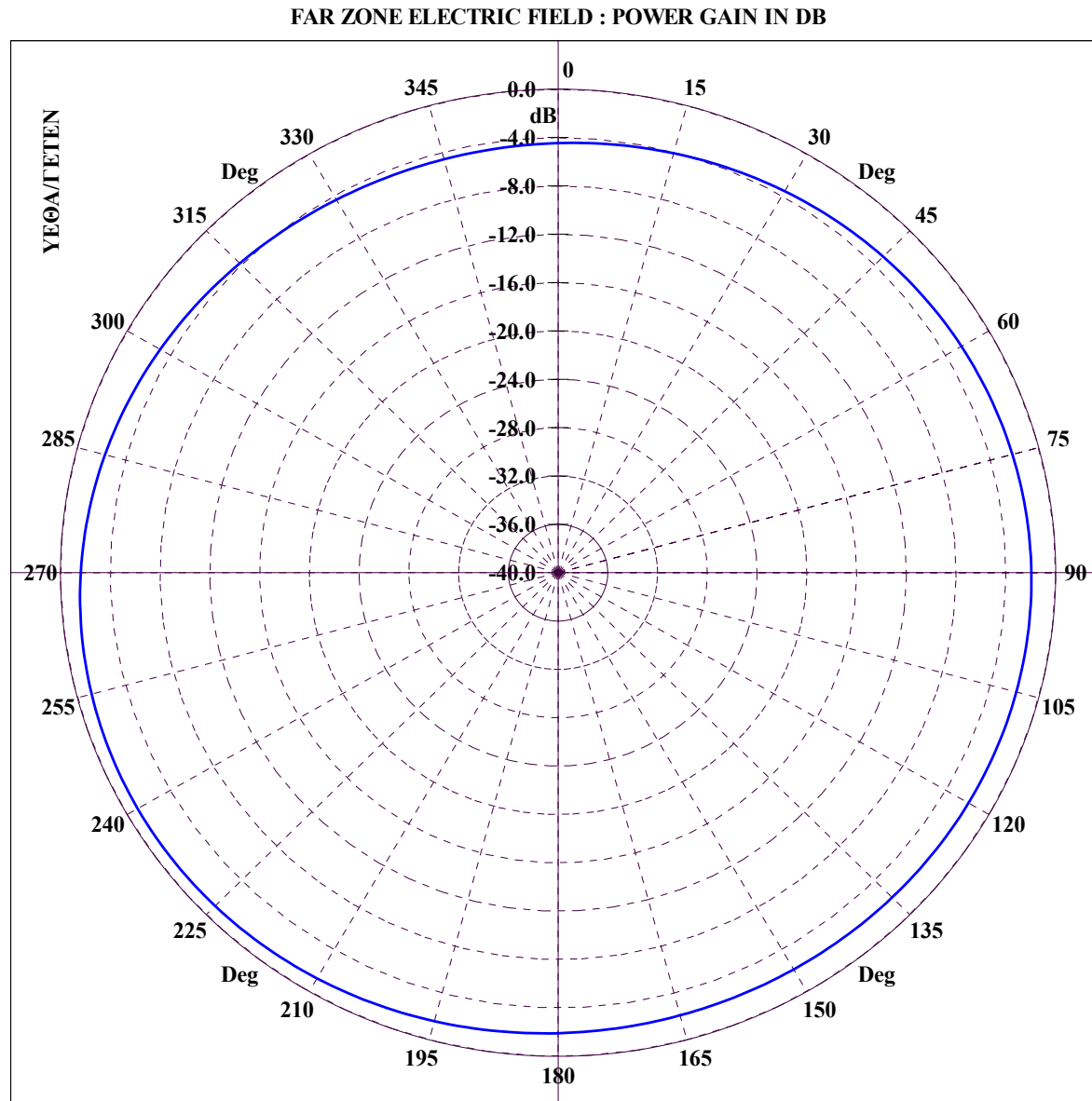


**Διάγραμμα 5.80 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 5^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .**



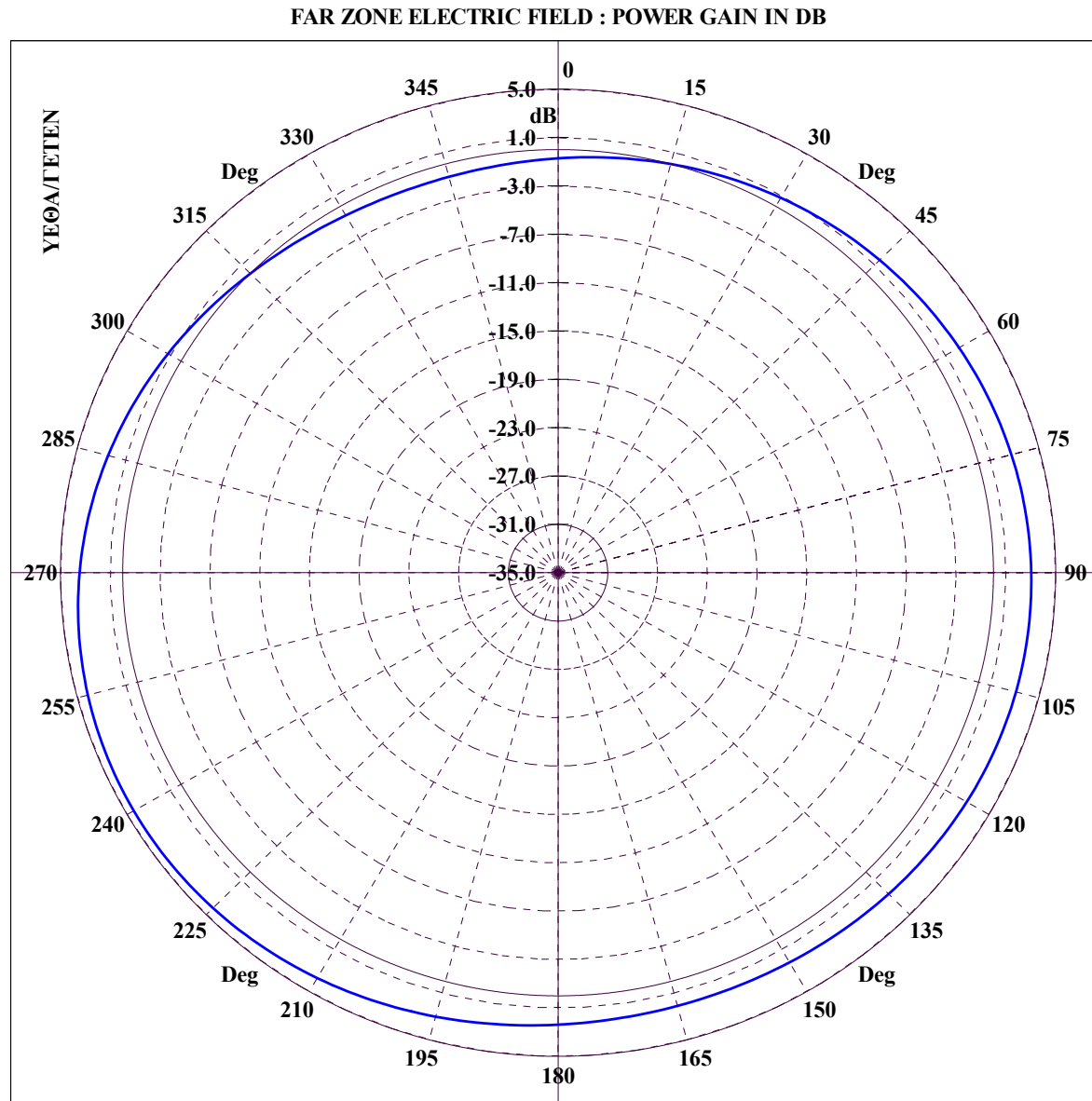
**Διάγραμμα 5.81 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 10^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .**





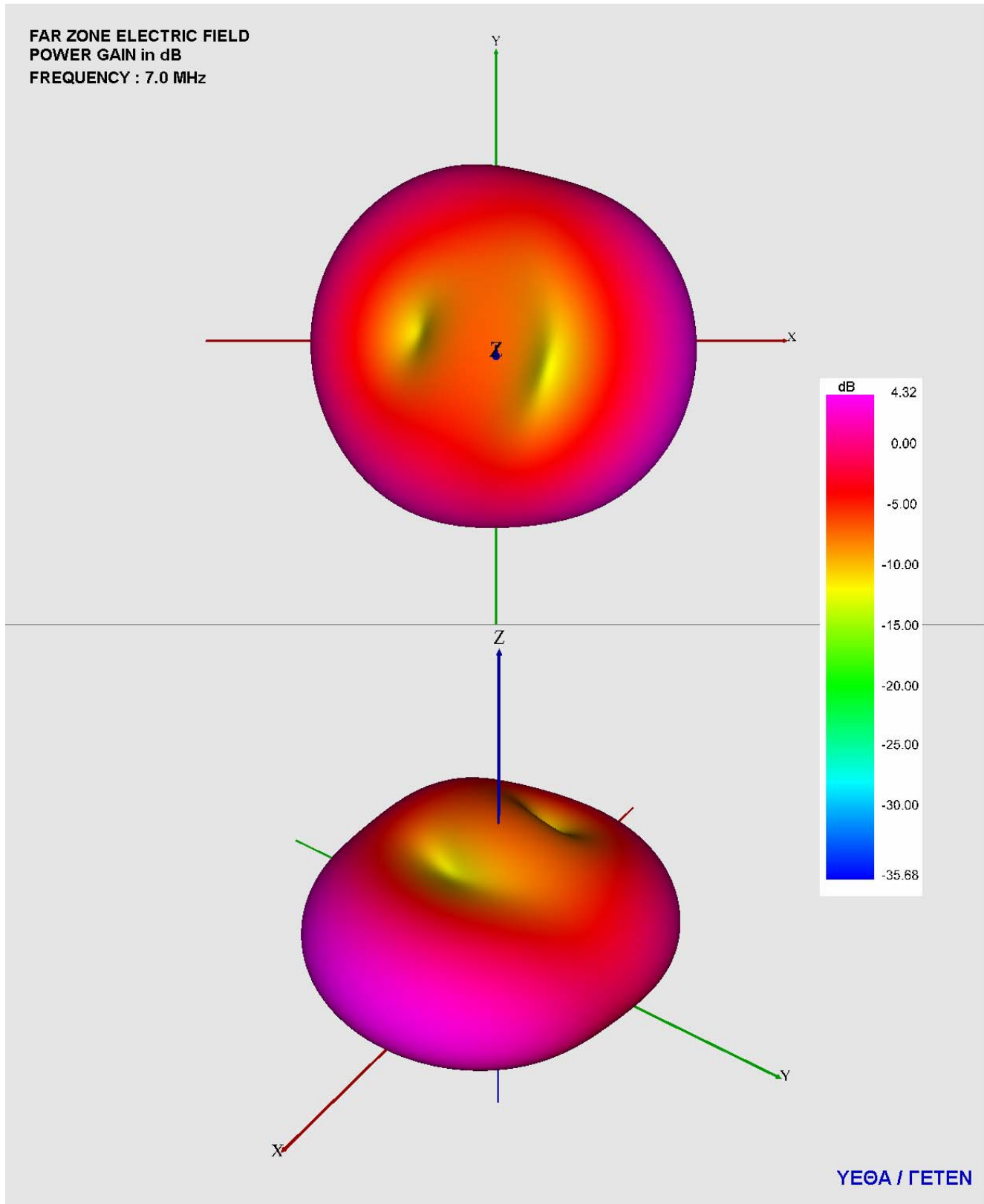
File Name :ΓΡΚ27-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\theta = 15.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

**Διάγραμμα 5.82 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 15^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .**



File Name :ΓΡΚ27-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 20.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

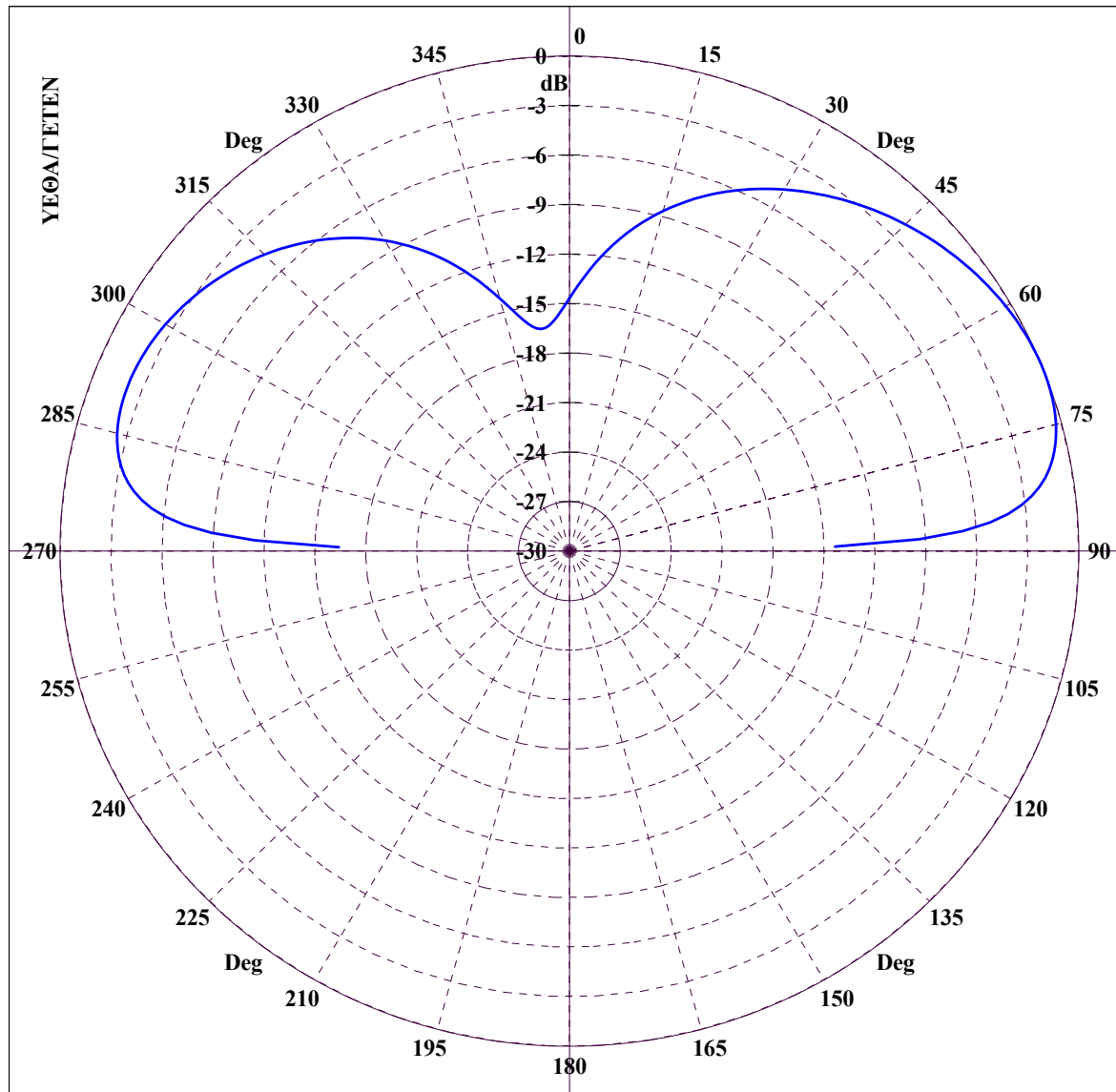
Διάγραμμα 5.83 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 2 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 20^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$



Διάγραμμα 5.84 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, 3D διάγραμμα κέρδους ισχύος για κεραία 2 σε συχνότητα 7 MHz με χρήση VRML.

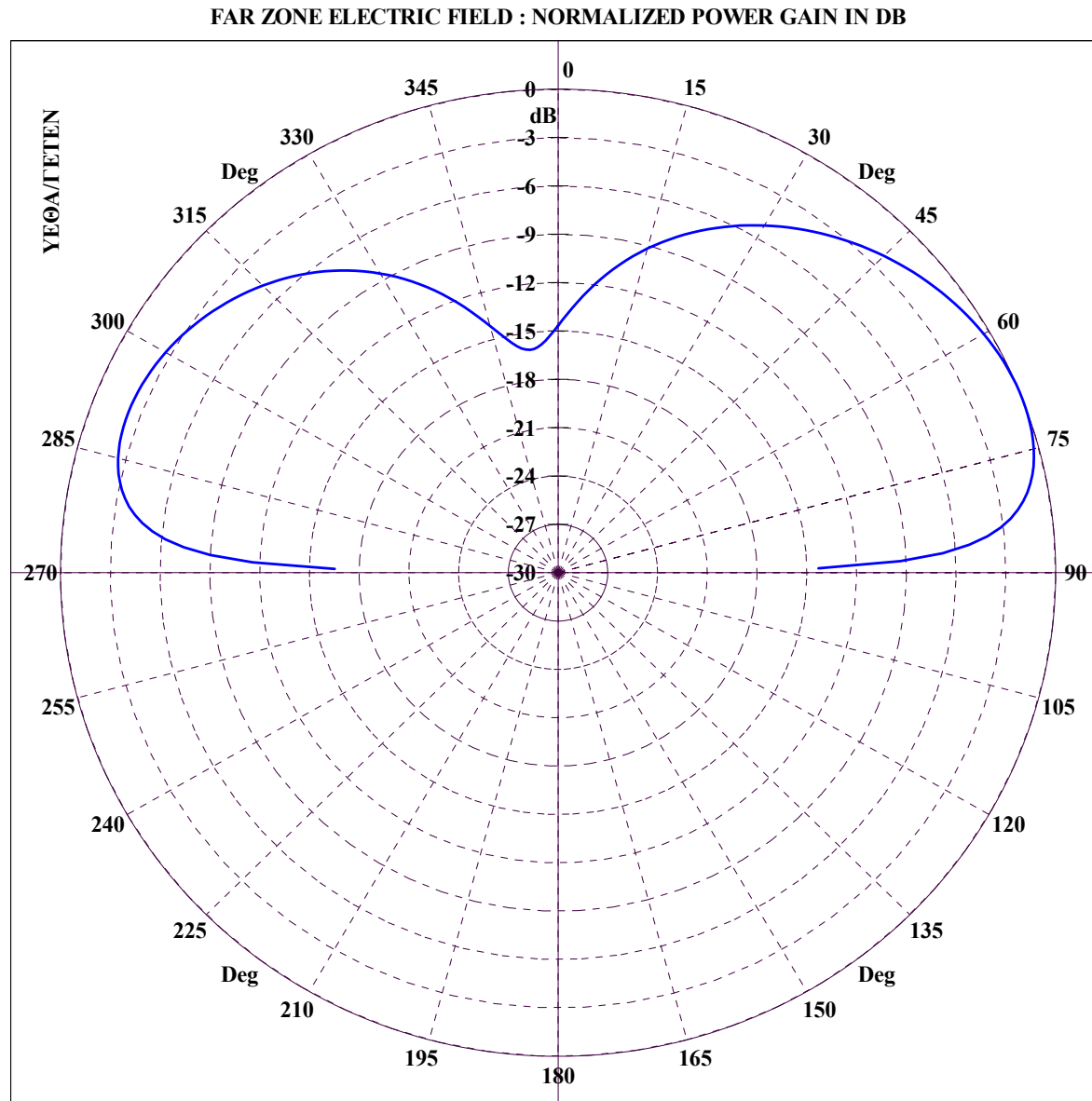
### ***5.4.1.3 Διαγράμματα ακτινοβολίας μακρινού πεδίου κεραίας 3***

FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



File Name :TPK35-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 0.00$ ,  $\Theta=0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

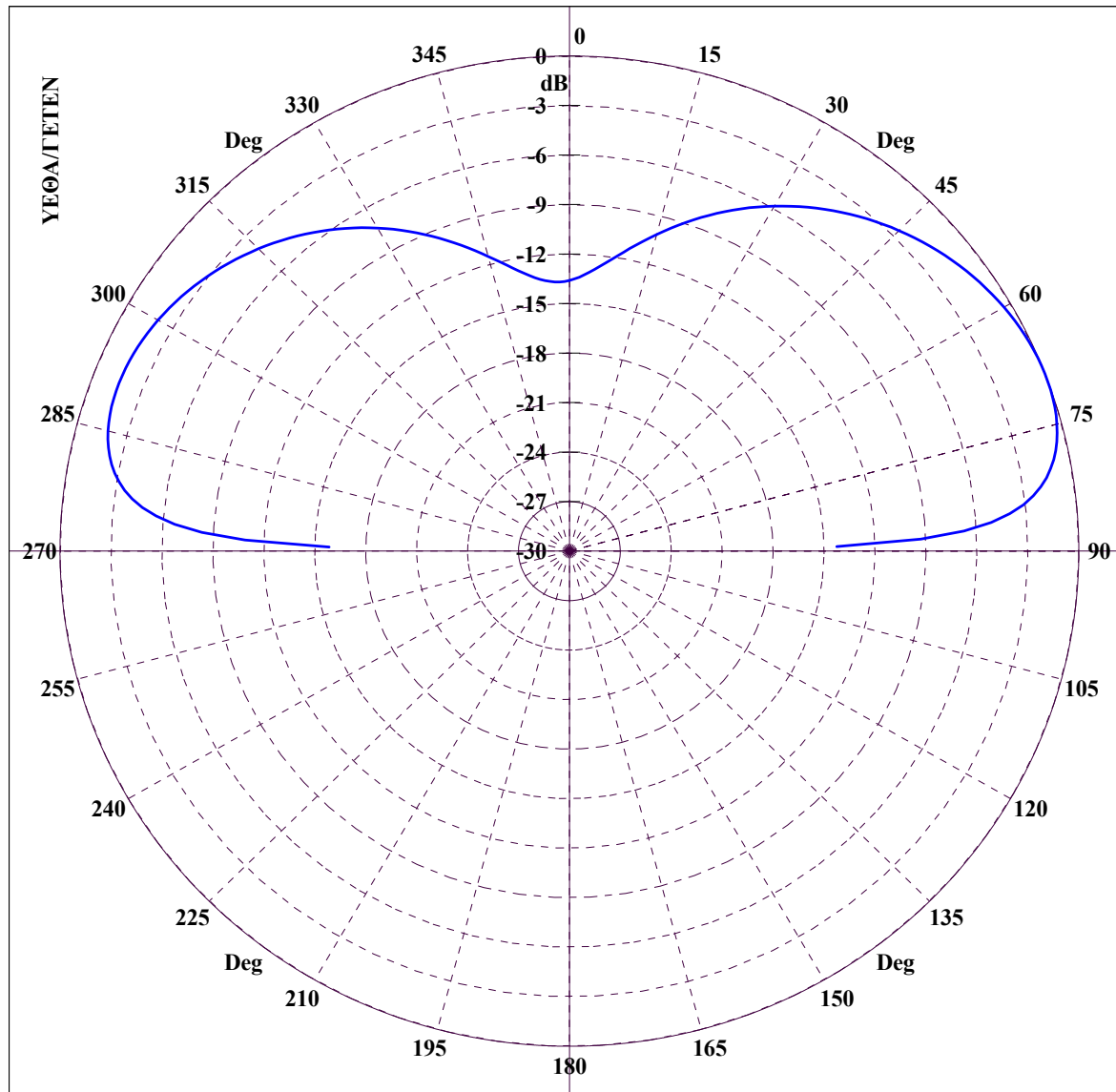
Διάγραμμα 5.85 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 3 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 0^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .



File Name :TPK35-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 45.00$ ,  $\Theta = 0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

Διάγραμμα 5.86 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 3 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 45^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

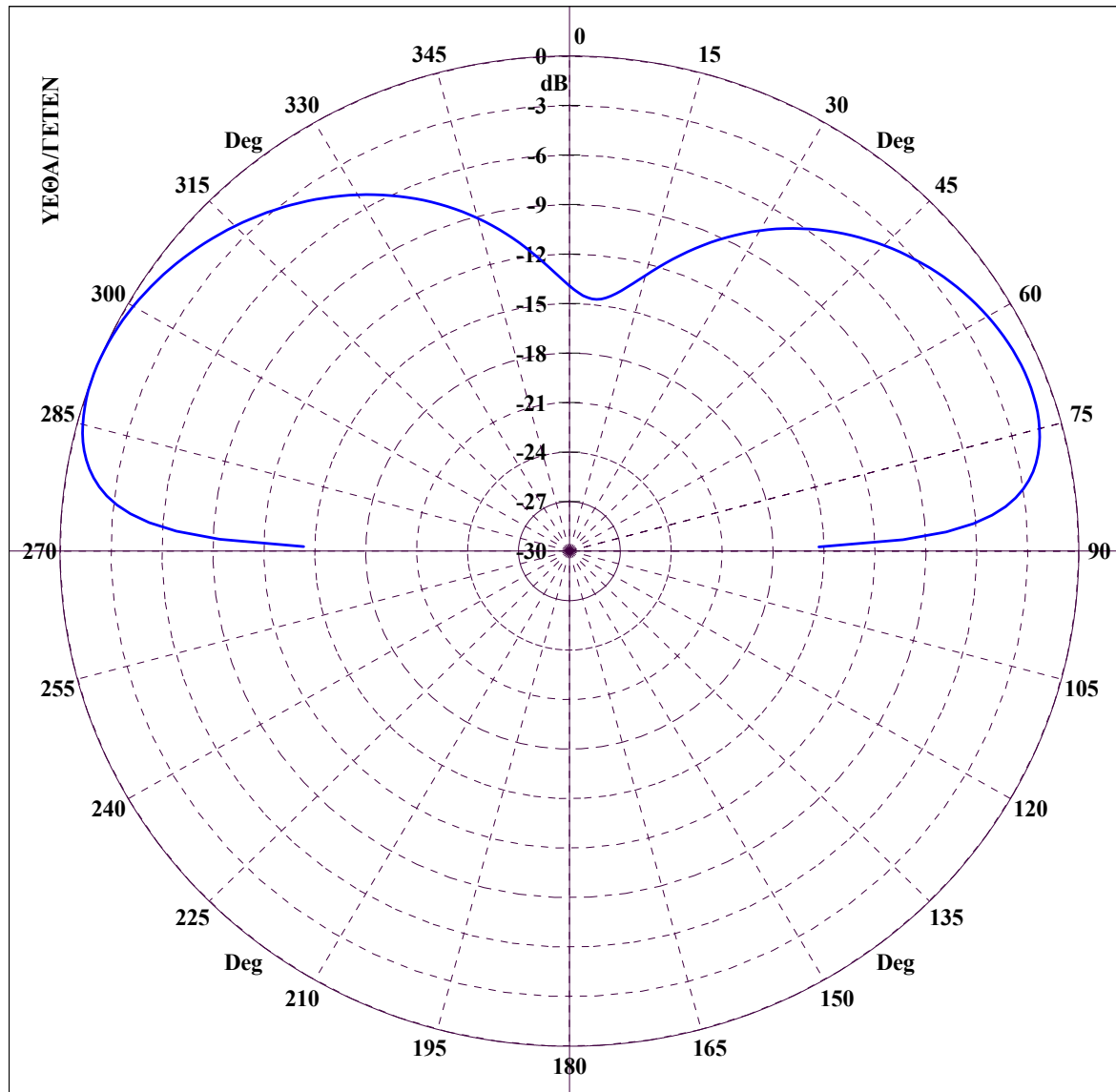
FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



File Name :TPK35-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 90.00$ ,  $\Theta = 0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

Διάγραμμα 5.87 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 3 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\varphi = 90^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

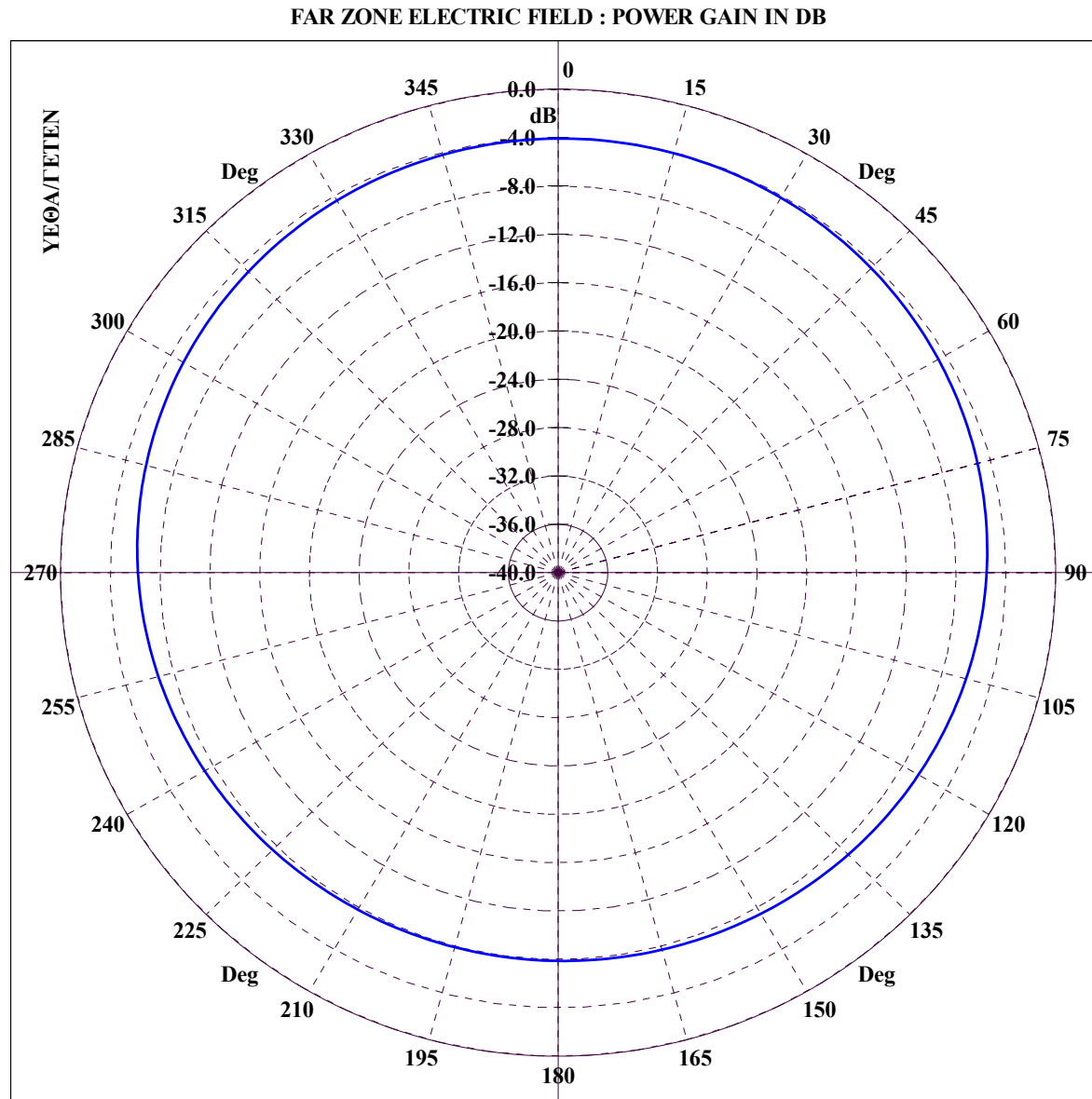
FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



File Name :TPK35-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 135.00$ ,  $\Theta = 0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

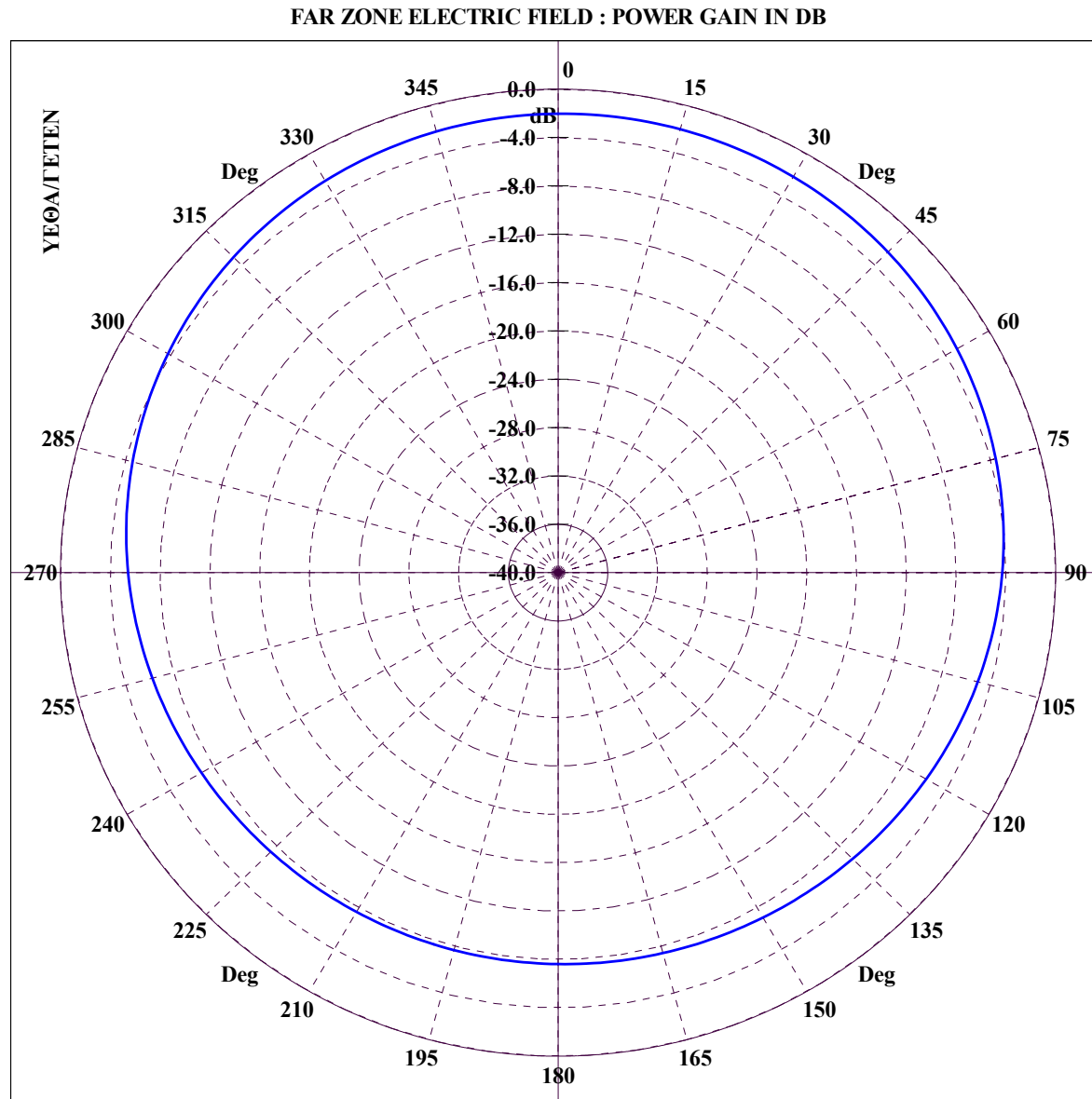
Διάγραμμα 5.88 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 3 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 135^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .



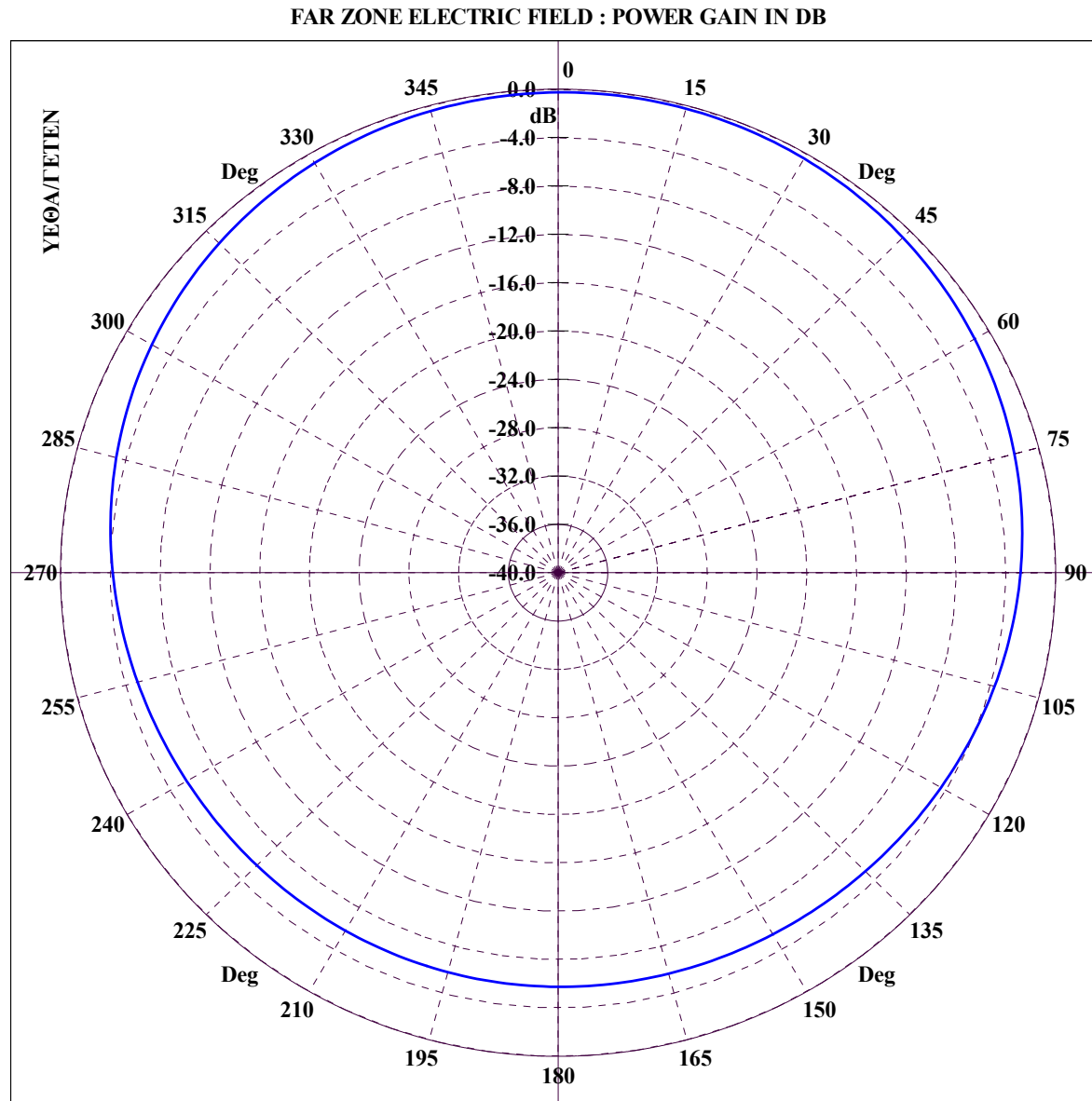


File Name :TPK35-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 5.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

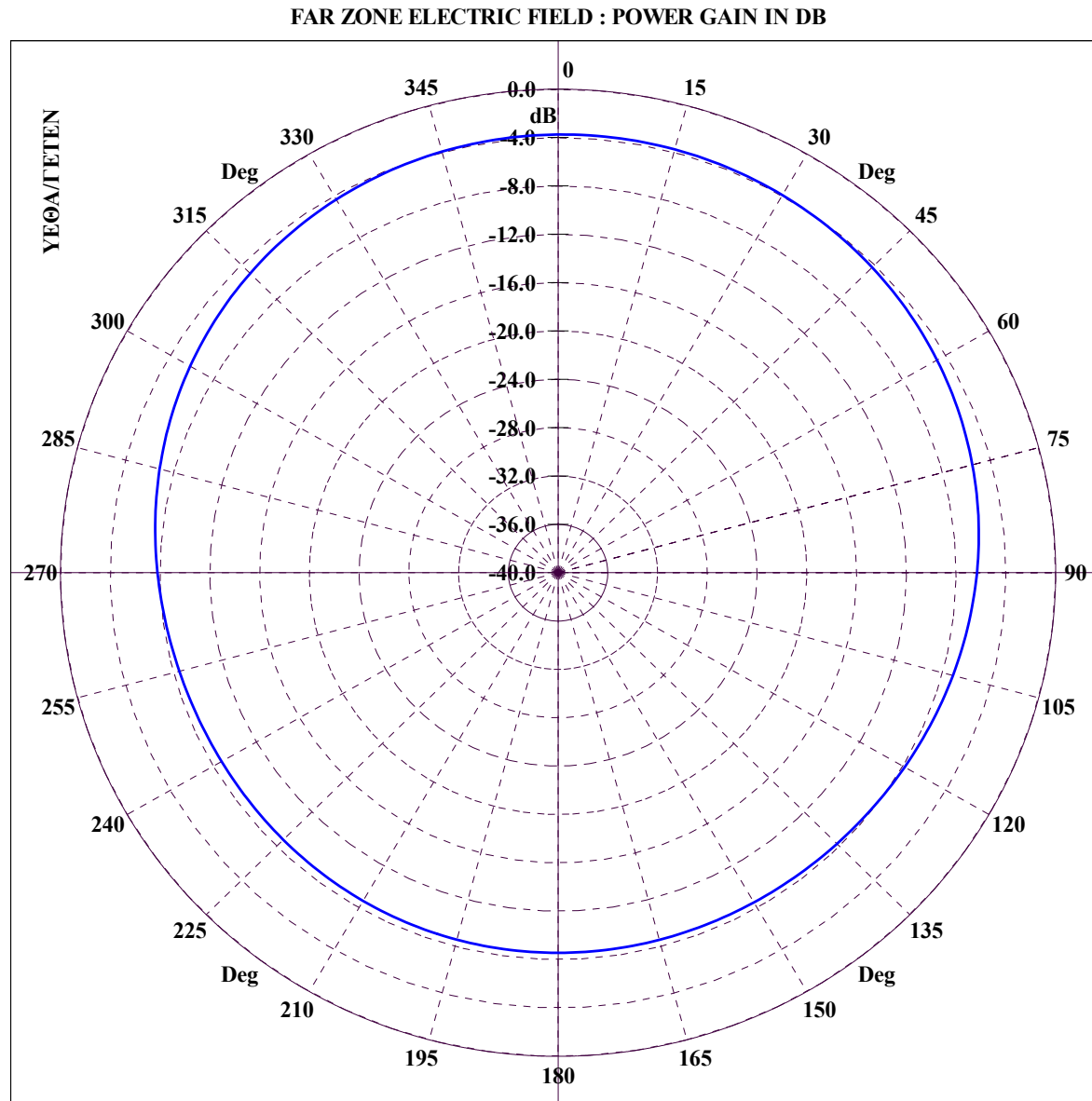
Διάγραμμα 5.89 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 3 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 5^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .



**Διάγραμμα 5.90 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 3 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 10^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .**

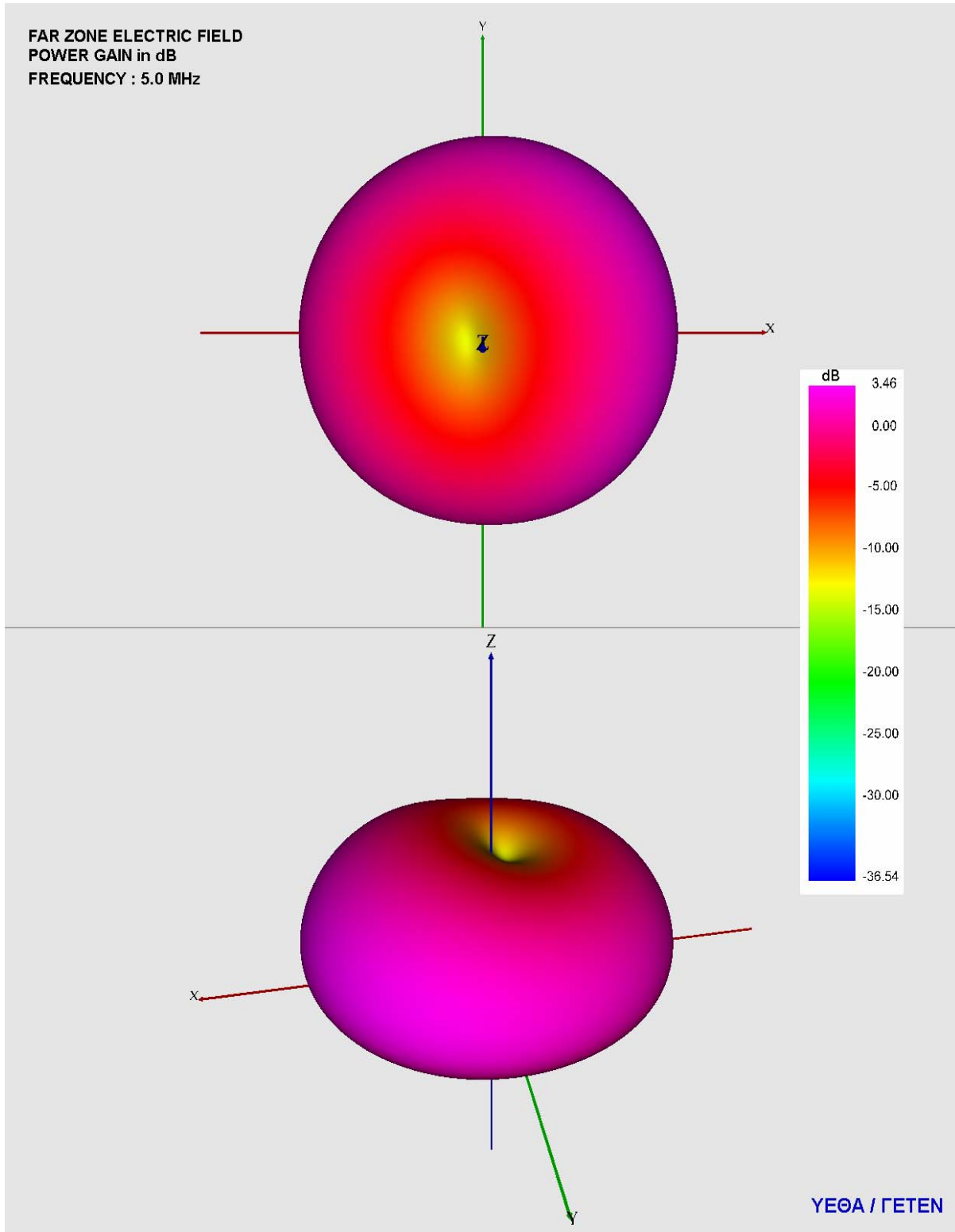


**Διάγραμμα 5.91 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 3 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 15^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .**

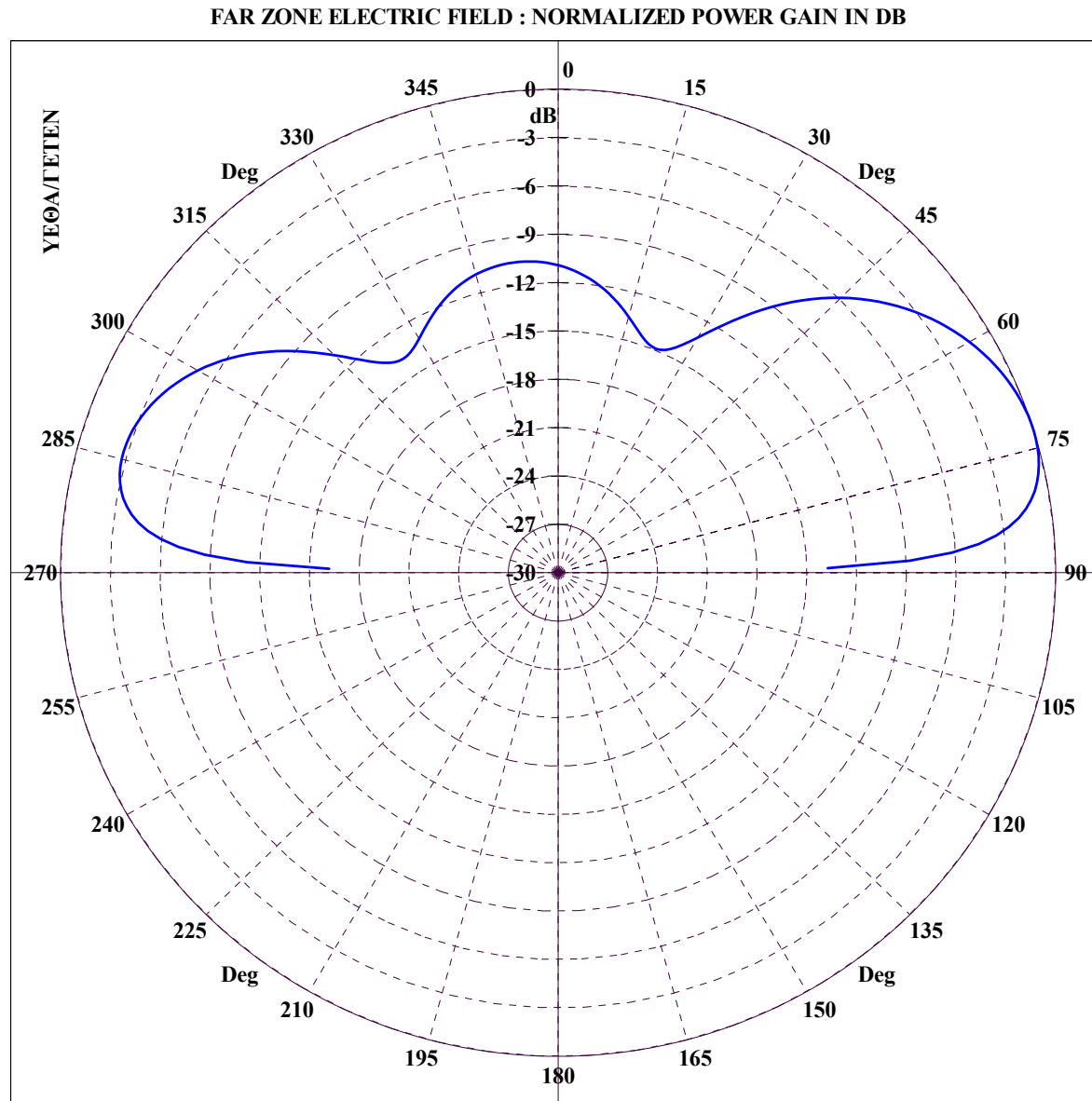


File Name :ΓΡΚ35-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\theta = 20.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

Διάγραμμα 5.92 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 3 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 20^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .

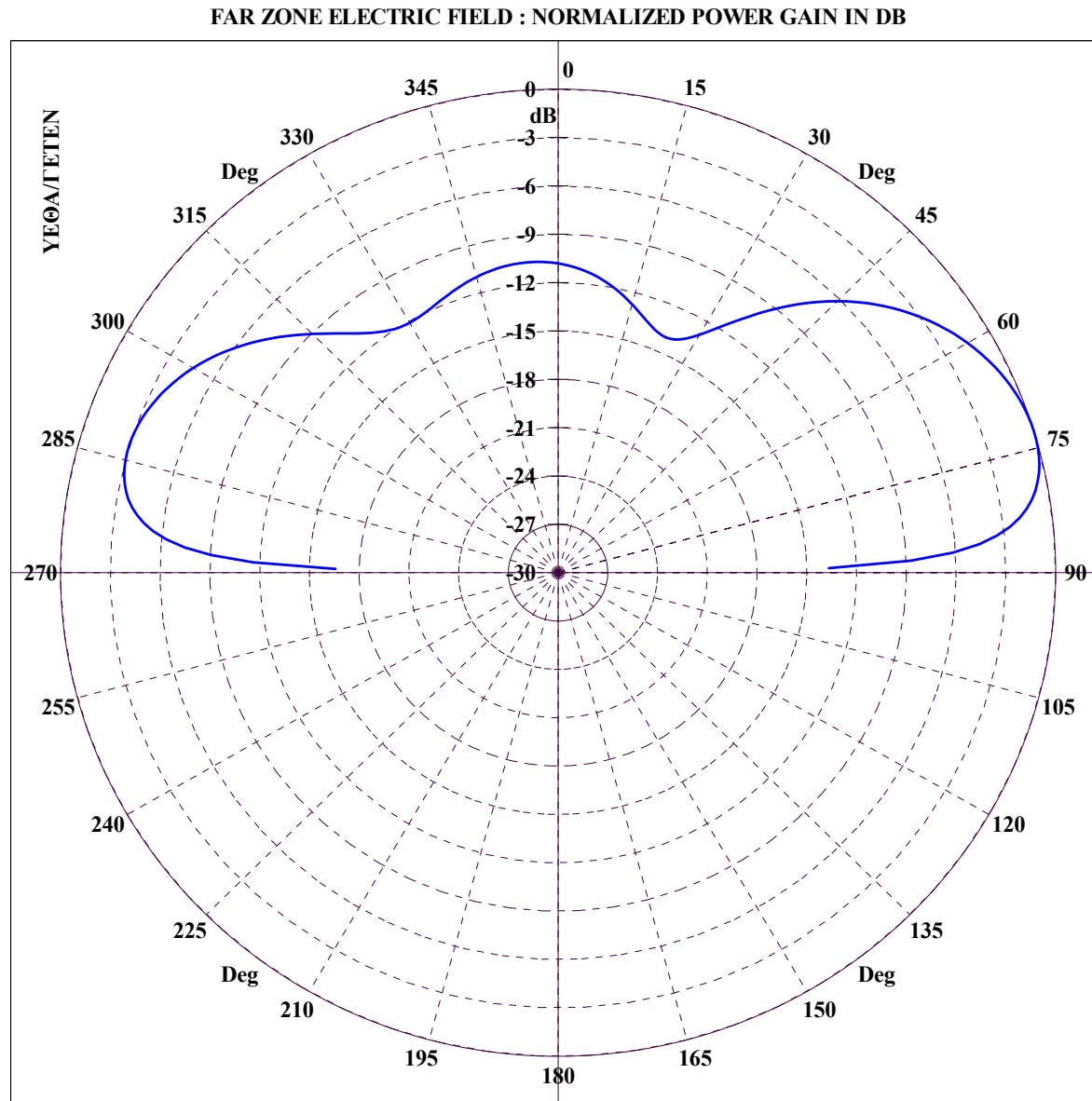


Διάγραμμα 5.93 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, 3D διάγραμμα κέρδους ισχύος για κεραία 3 σε συχνότητα 5 MHz με χρήση VRML.

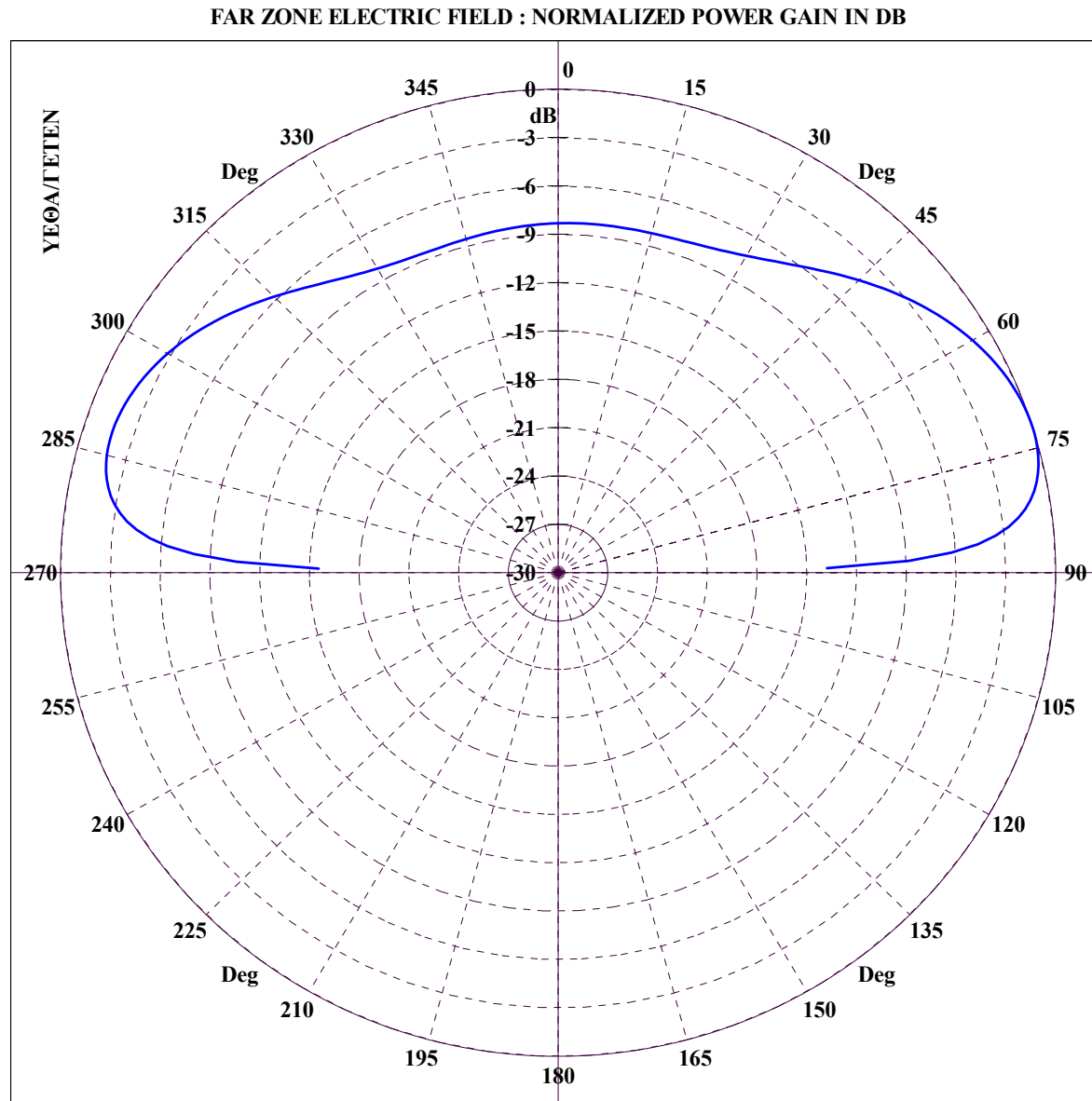


File Name :TPK37-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 0.00$ ,  $\Theta=0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

Διάγραμμα 5.94 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 3 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 0^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .



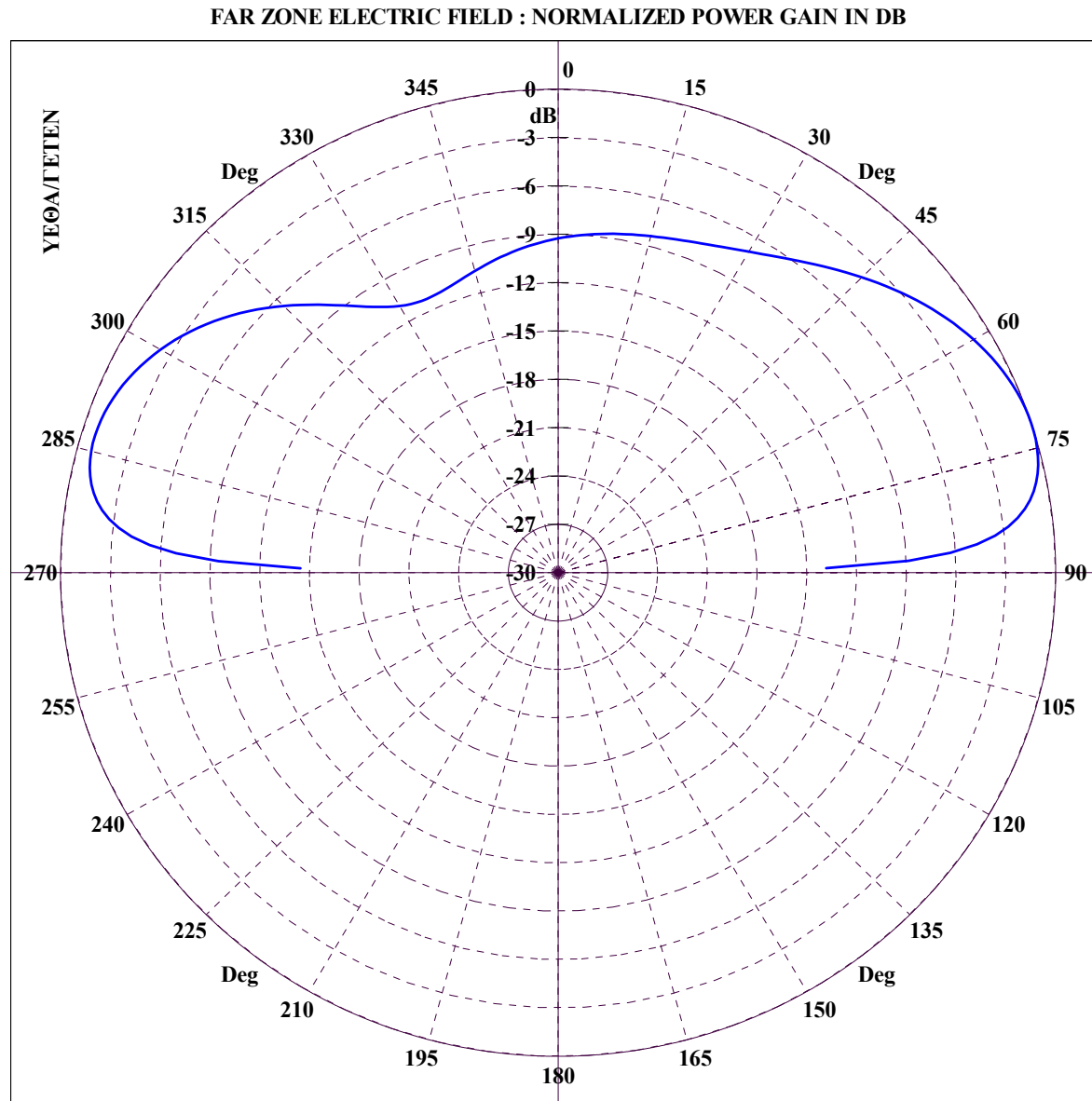
Διάγραμμα 5.95 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 3 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\varphi = 45^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .



File Name :TPK37-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 90.00$ ,  $\Theta = 0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

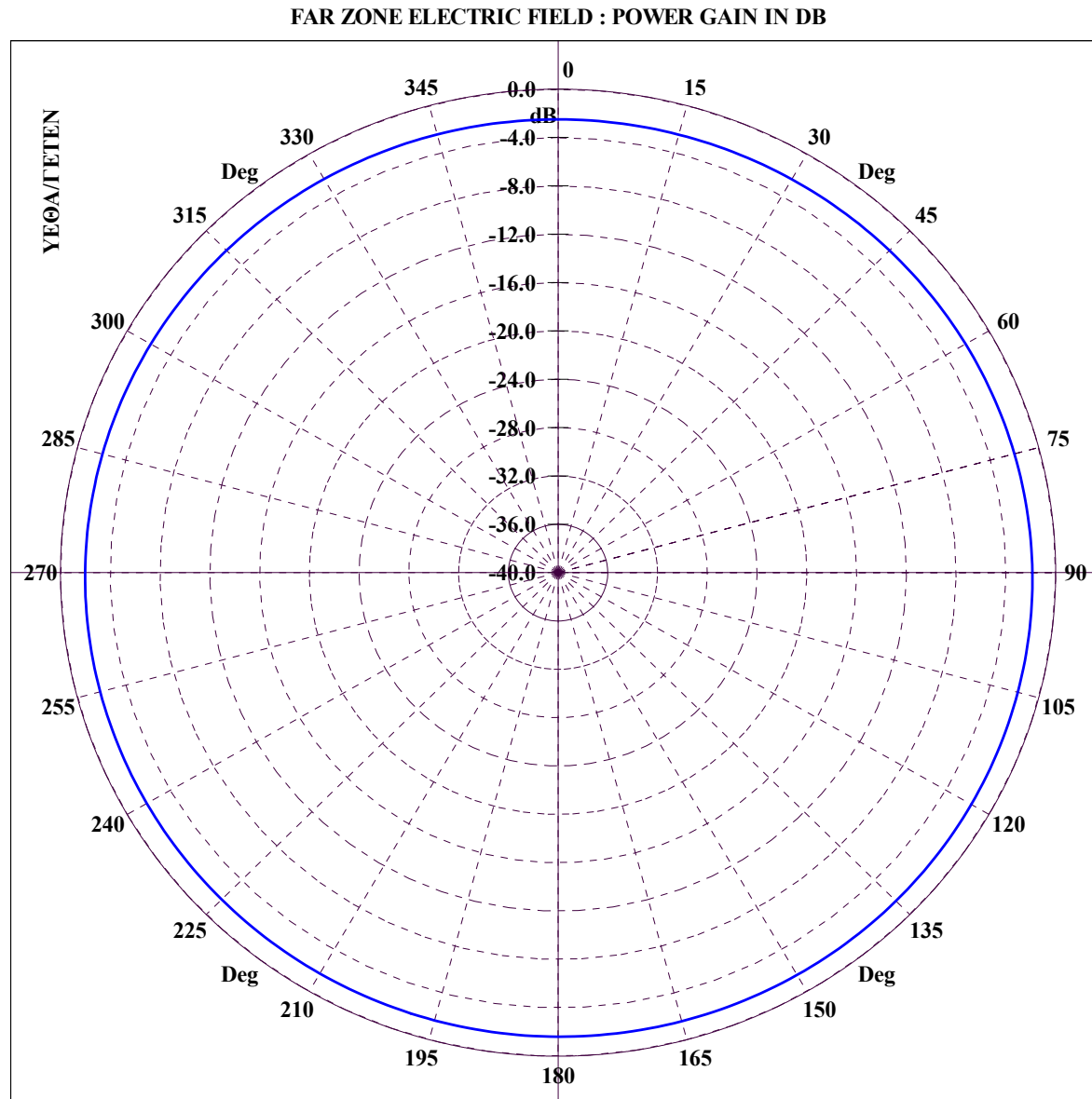
Διάγραμμα 5.96 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 3 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\varphi = 90^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .



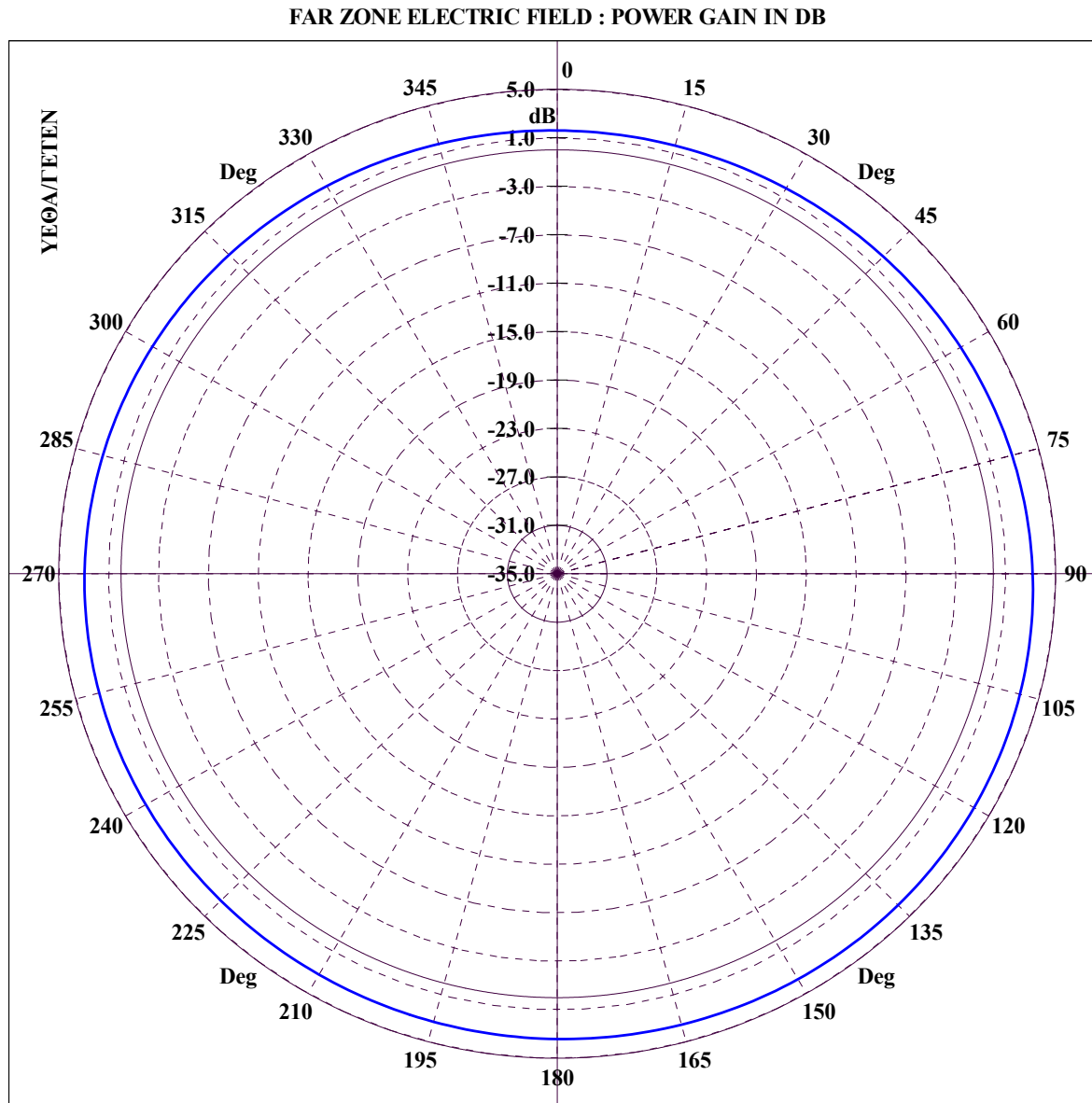


File Name :TPK37-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 135.00$ ,  $\Theta = 0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

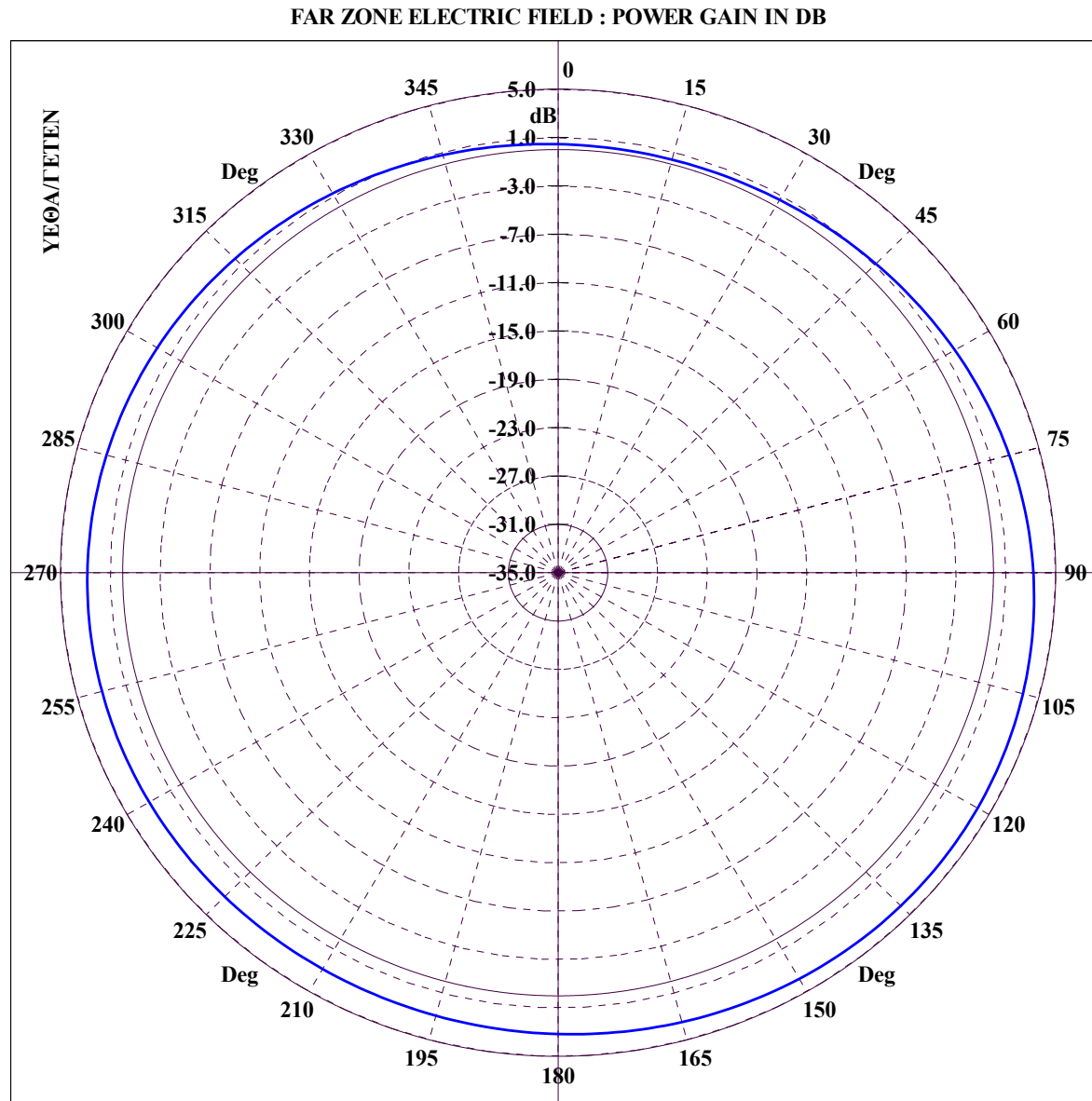
Διάγραμμα 5.97 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 3 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 135^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .



**Διάγραμμα 5.98 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 3 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 5^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .**

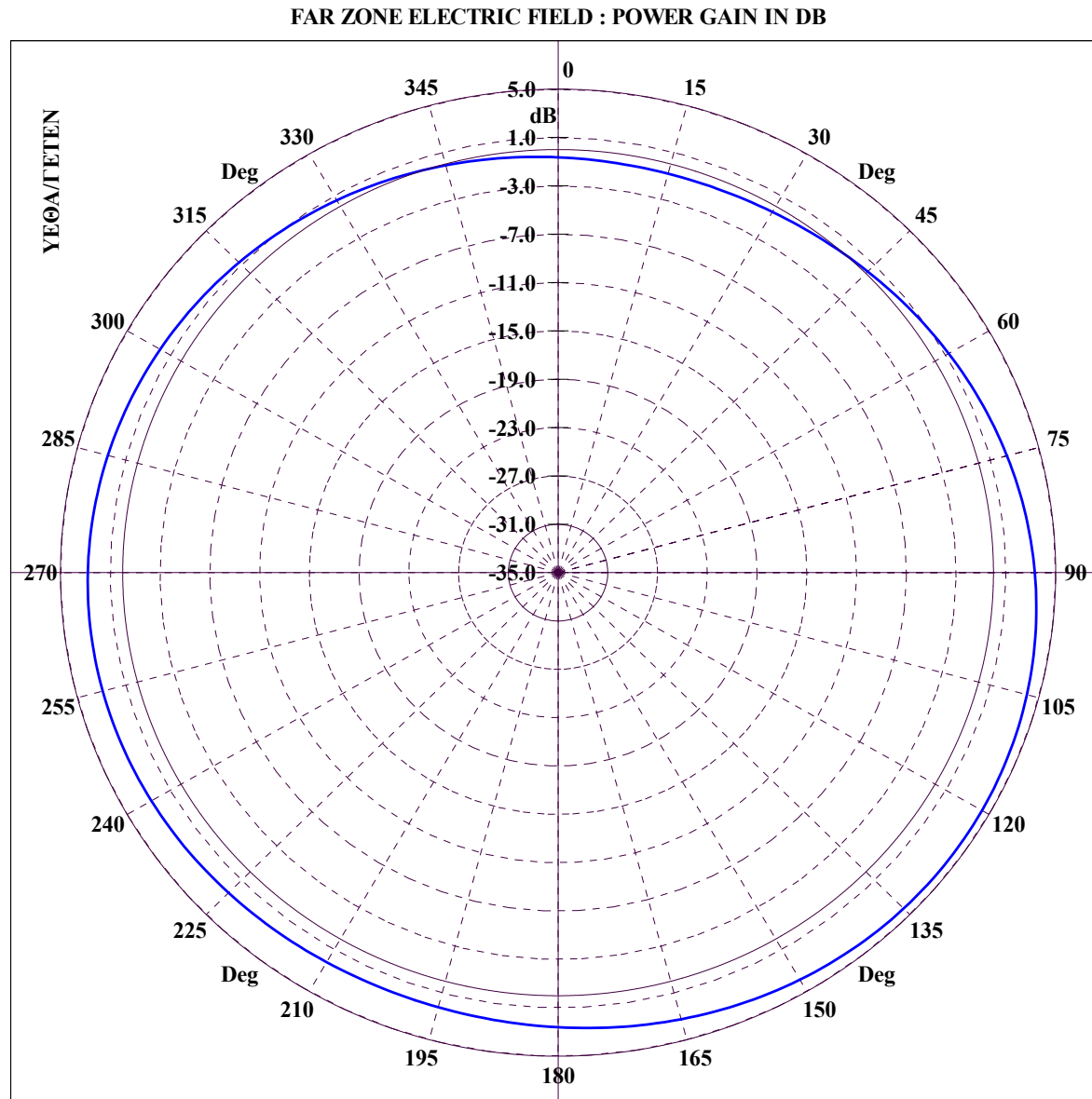


**Διάγραμμα 5.99 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 3 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 10^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .**



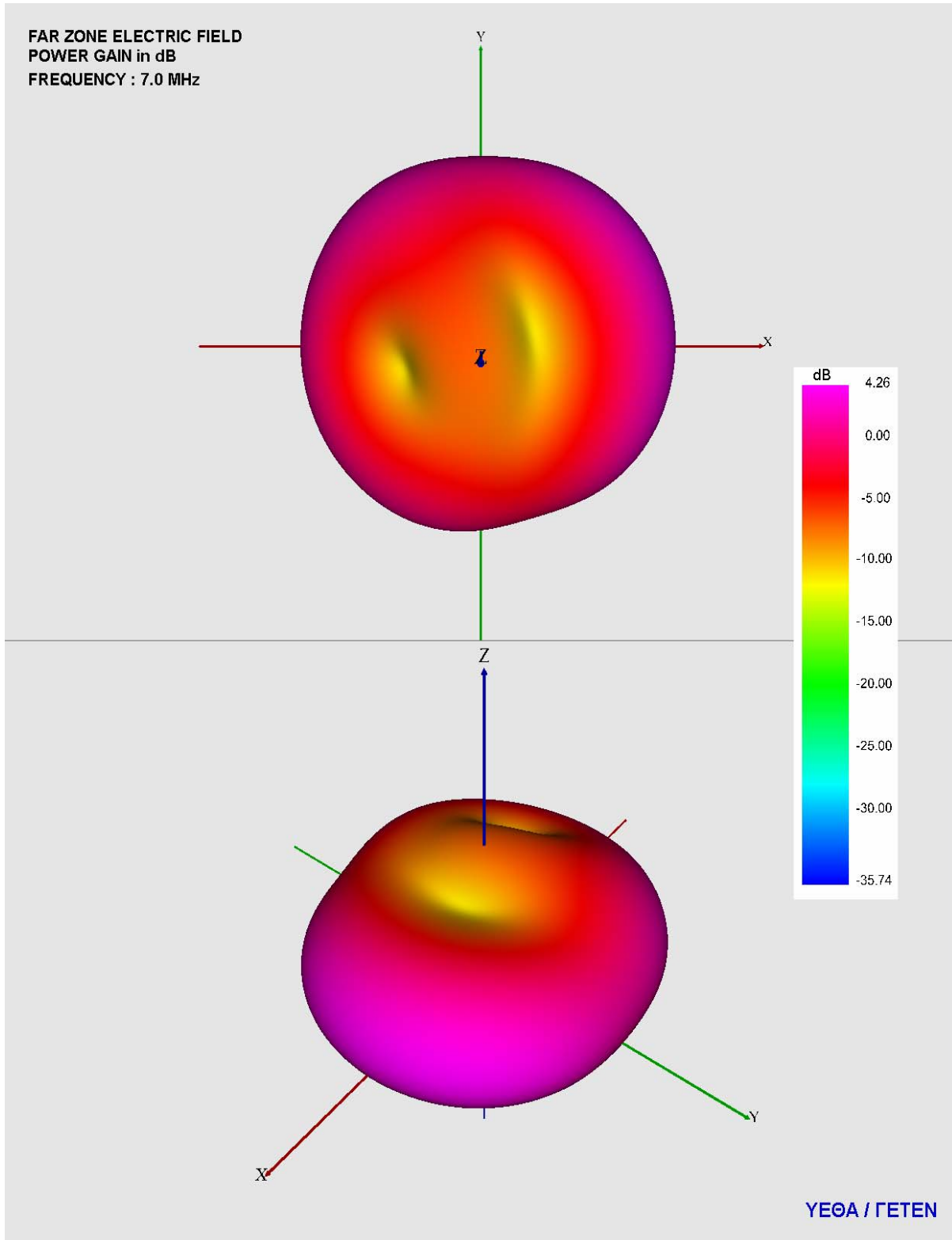
File Name :ΓΡΚ37-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 15.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

Διάγραμμα 5.100 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 3 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 15^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .



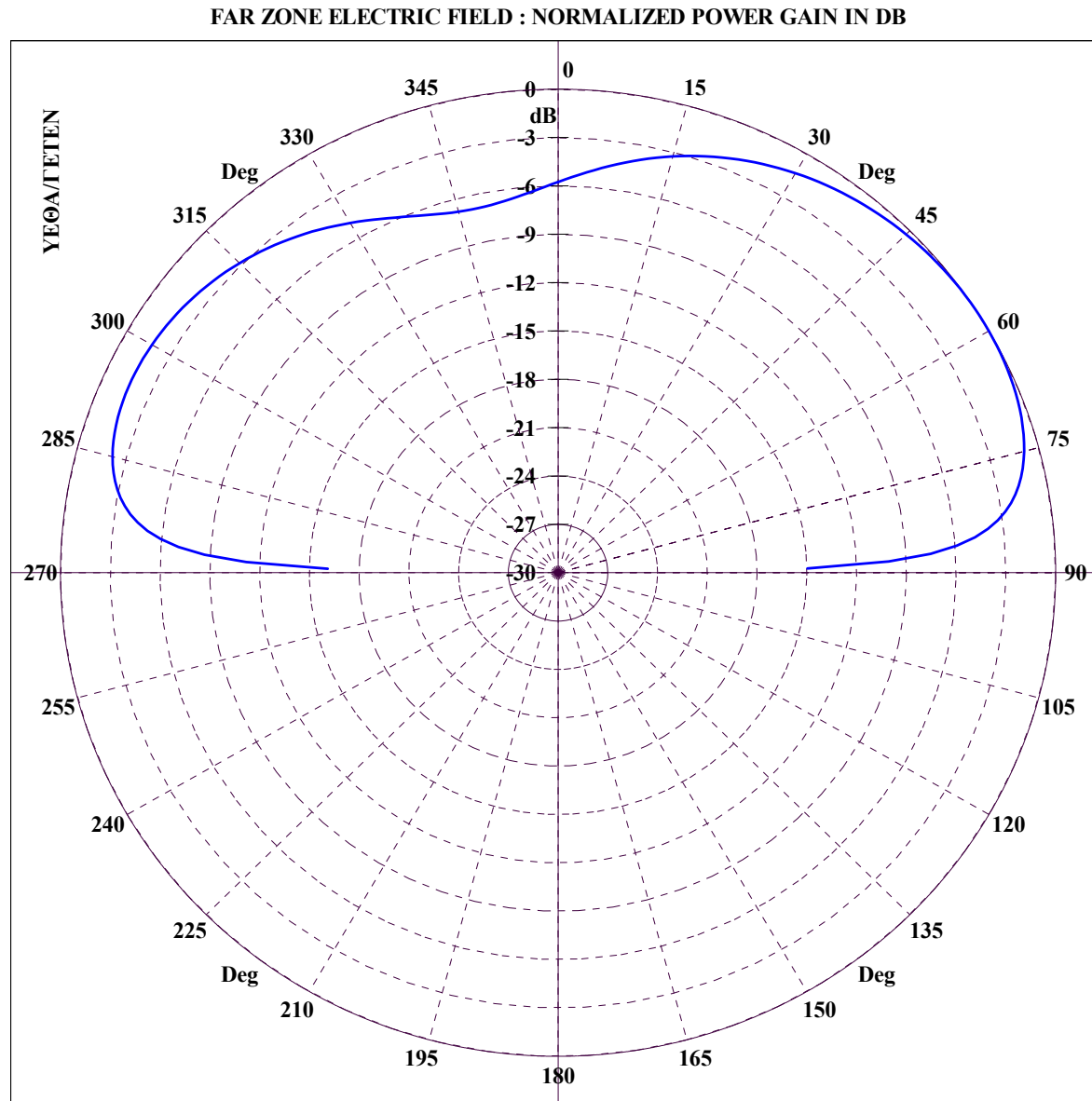
File Name :ΓPK37-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 20.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

Διάγραμμα 5.101 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 3 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 20^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .



Διάγραμμα 5.102 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, 3D διάγραμμα κέρδους ισχύος για κεραία 3 σε συχνότητα 7 MHz με χρήση VRML.

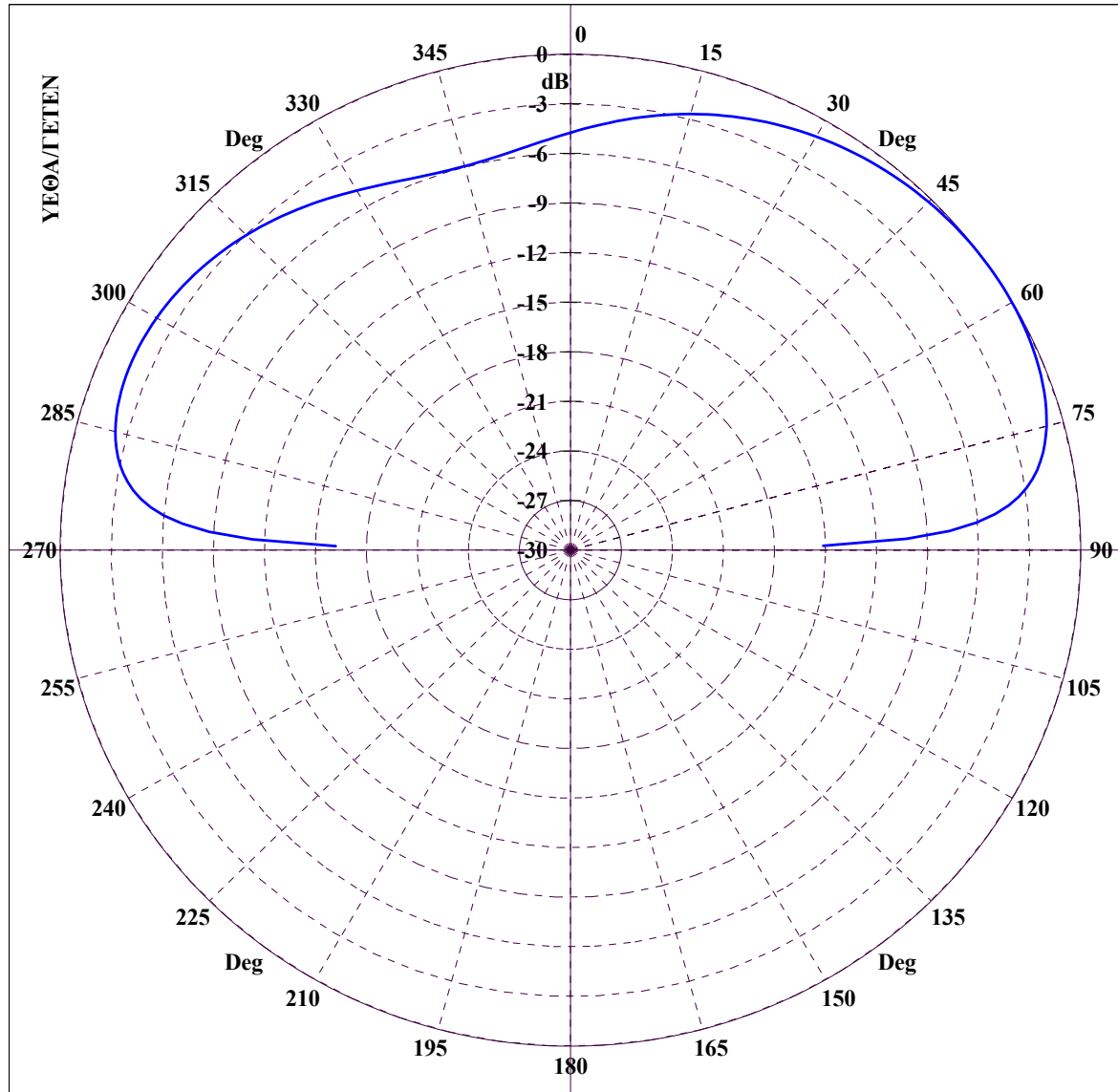
### ***5.4.1.3 Διαγράμματα ακτινοβολίας μακρινού πεδίου κεραίας 4***



**Διάγραμμα 5.103 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 2 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\varphi = 0^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .**

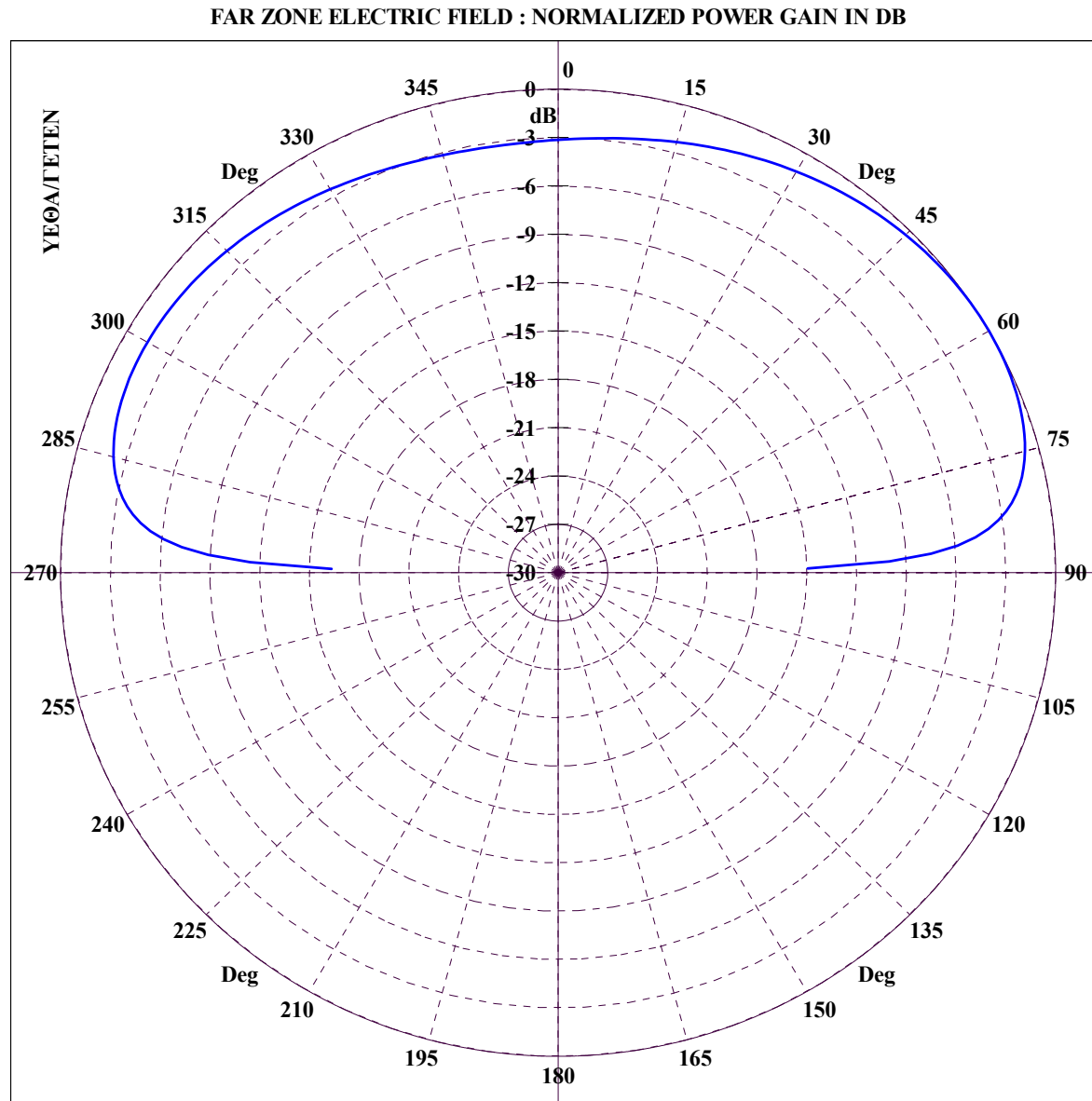


FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



File Name :TPK42-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 45.00$ ,  $\Theta = 0-360$ , FREQUENCY = 2.00 MHz

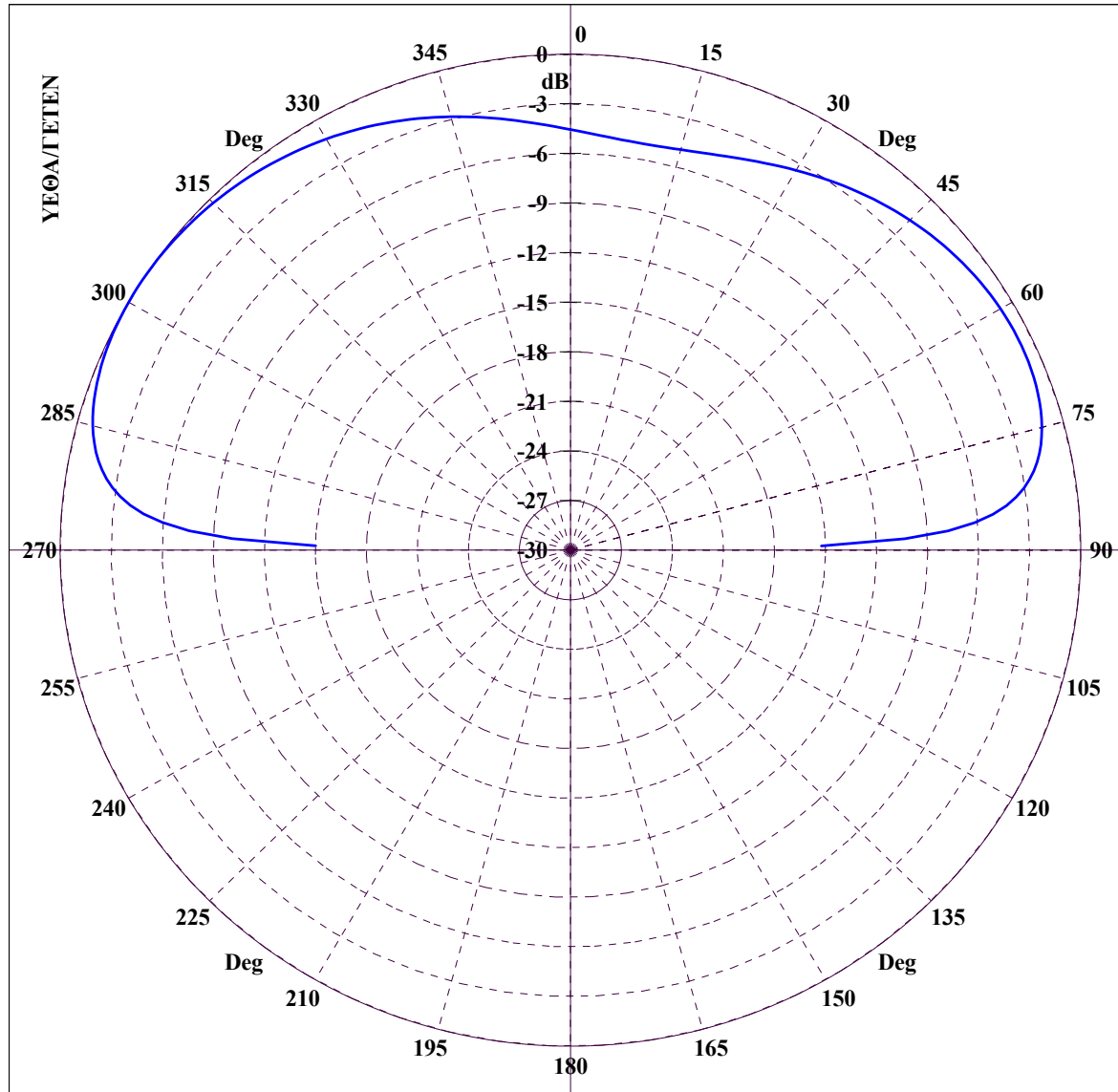
Διάγραμμα 5.104 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 2 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 45^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .



File Name :TPK42-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 90.00$ ,  $\Theta = 0-360$ , FREQUENCY = 2.00 MHz

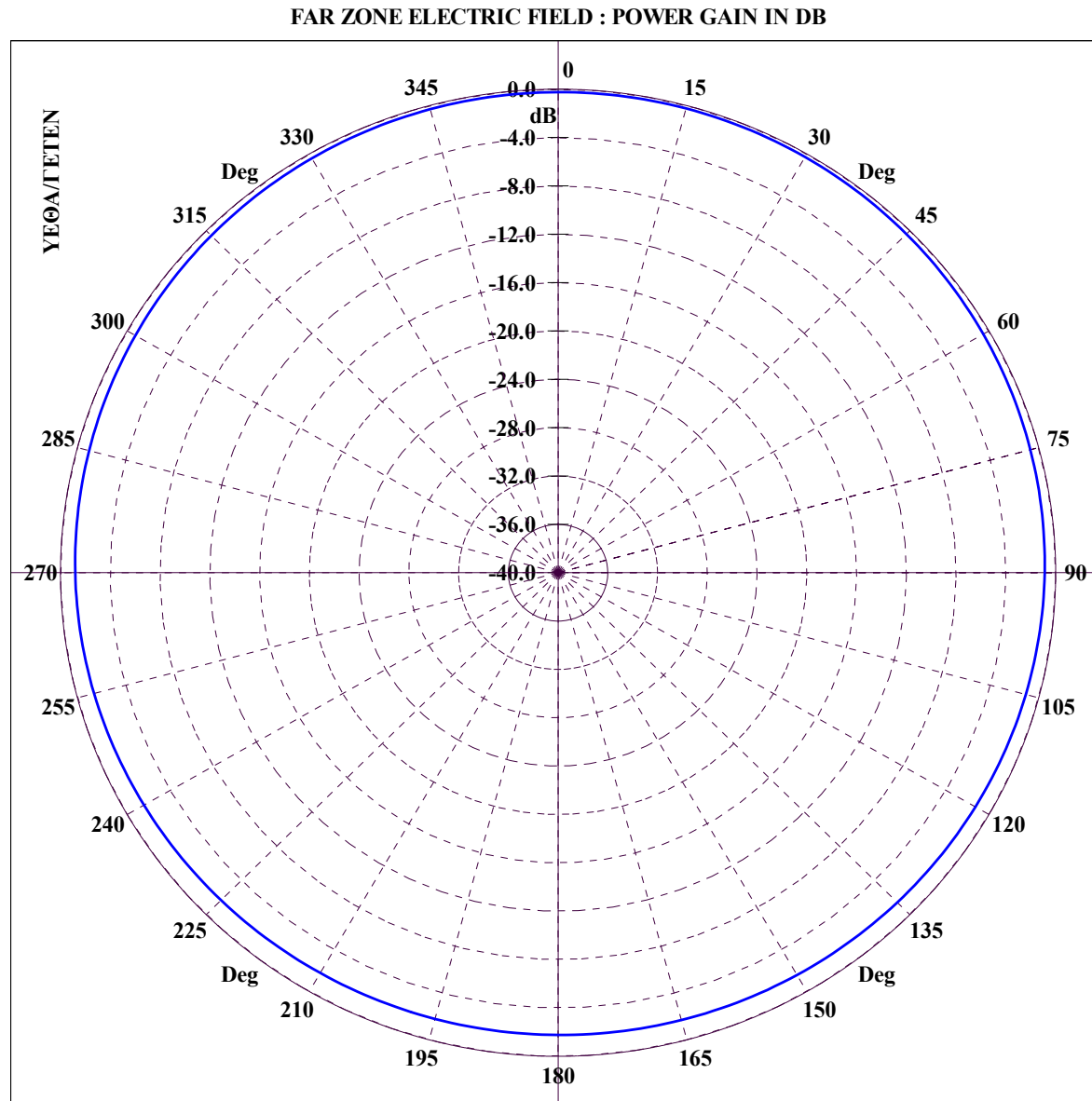
Διάγραμμα 5.105 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 2 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\varphi = 90^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB

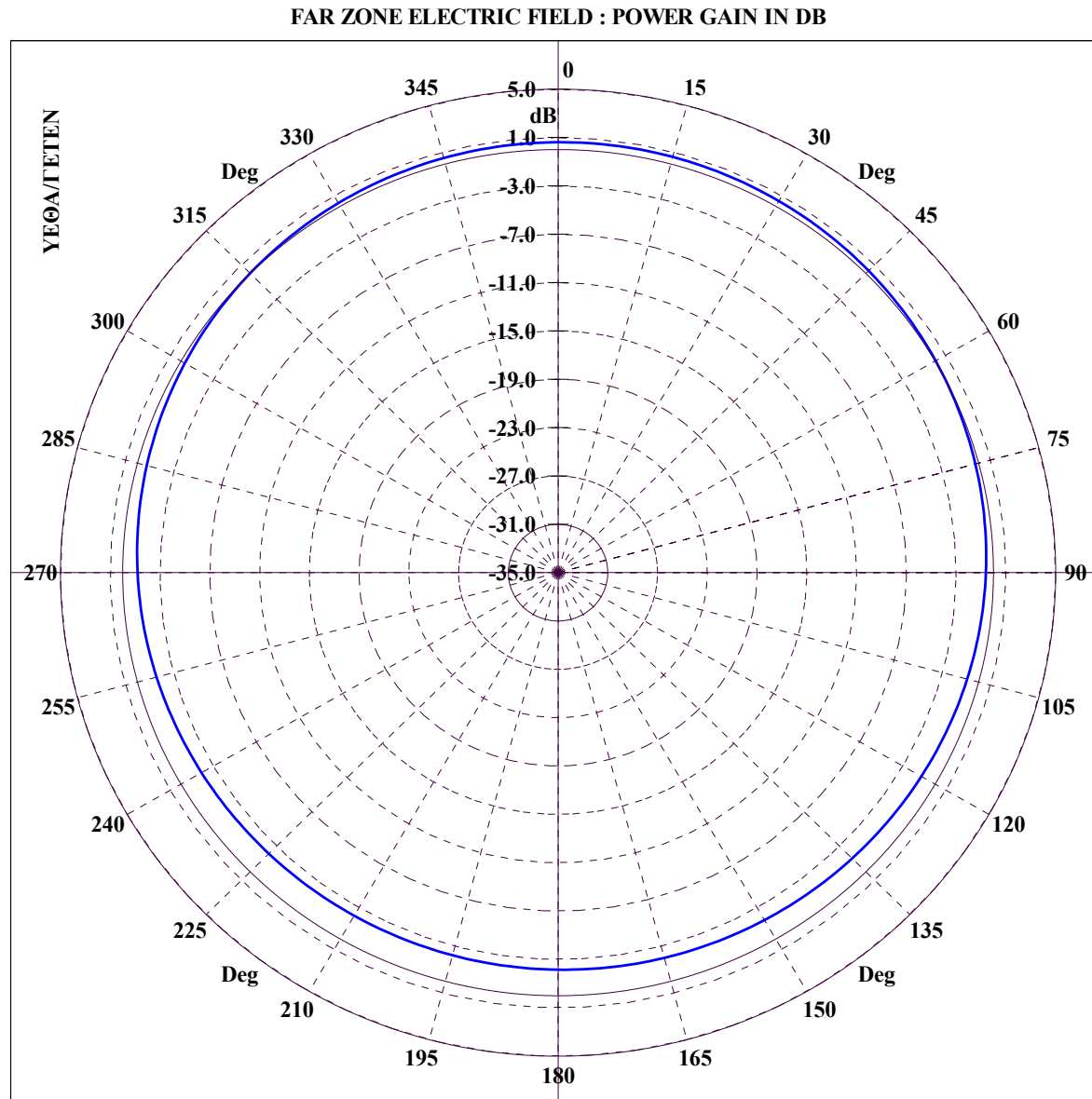


File Name :TPK42-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 135.00$ ,  $\Theta = 0-360$ , FREQUENCY = 2.00 MHz

Διάγραμμα 5.106 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 2 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\varphi = 135^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

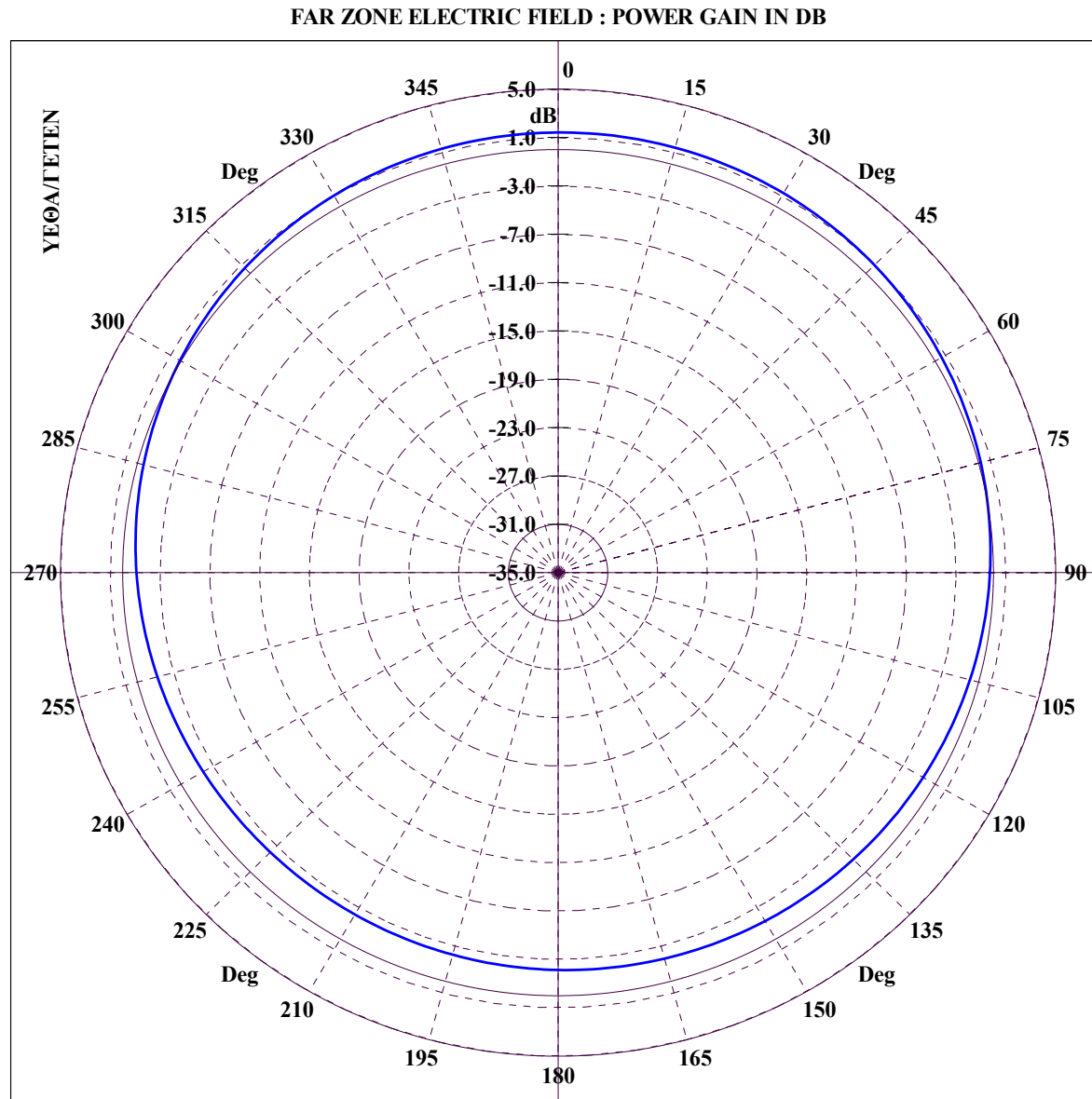


**Διάγραμμα 5.107 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 2 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 5^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .**



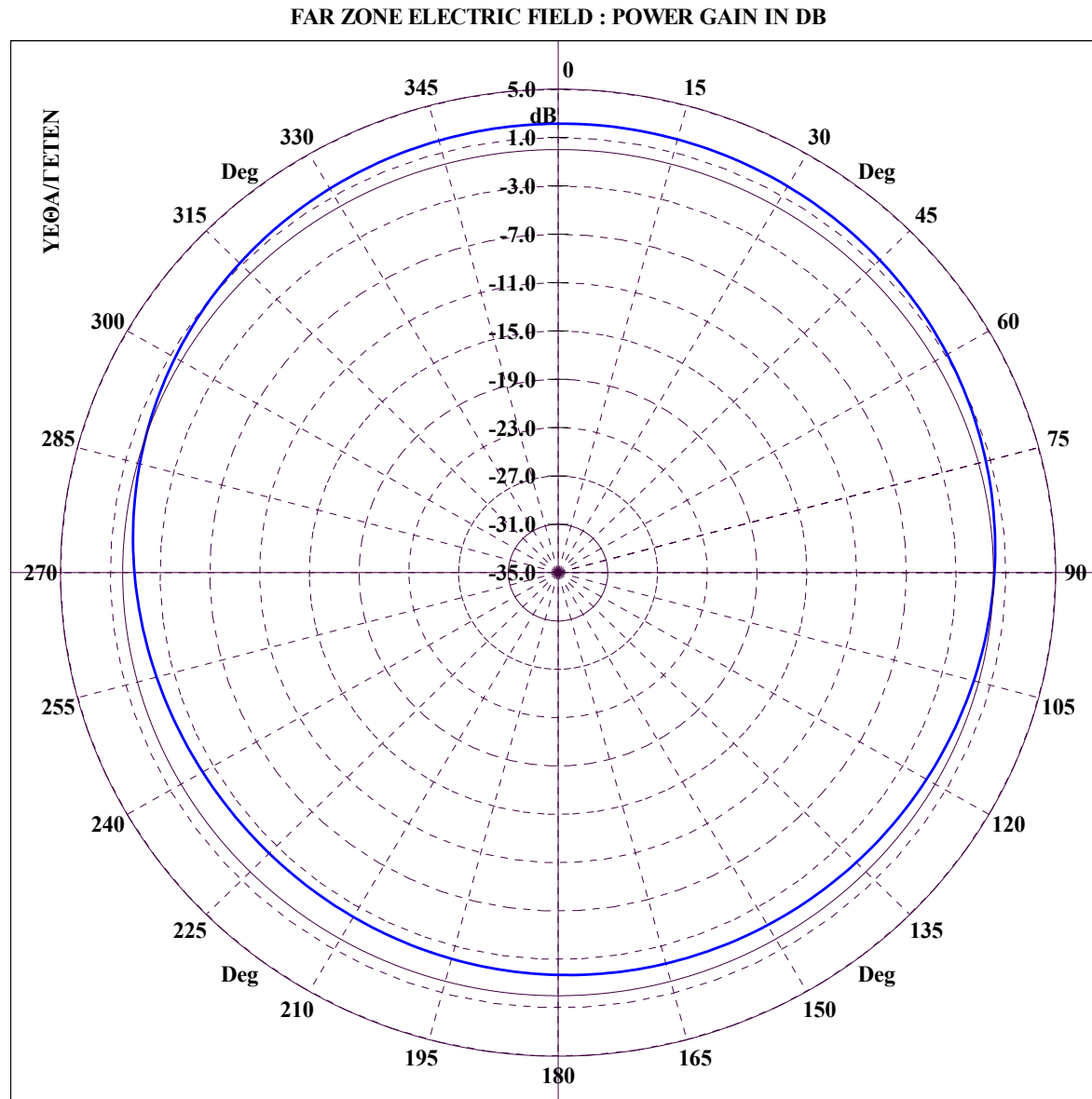
File Name :ΓΡΚ42-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 10.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 2.00 MHz

Διάγραμμα 5.108 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 2 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 10^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .



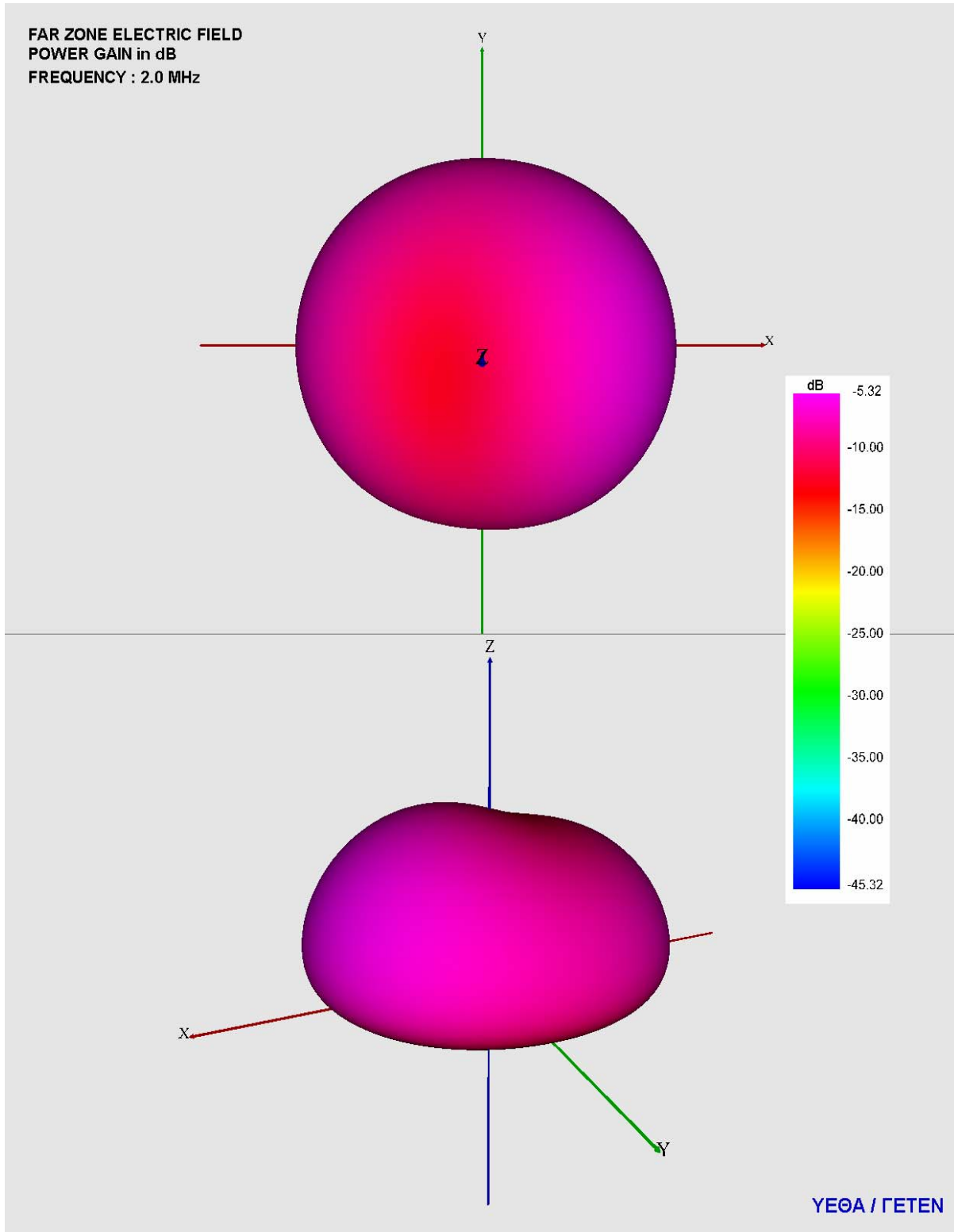
File Name :ΓΡΚ42-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 15.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 2.00 MHz

Διάγραμμα 5.109 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 2 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 15^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .



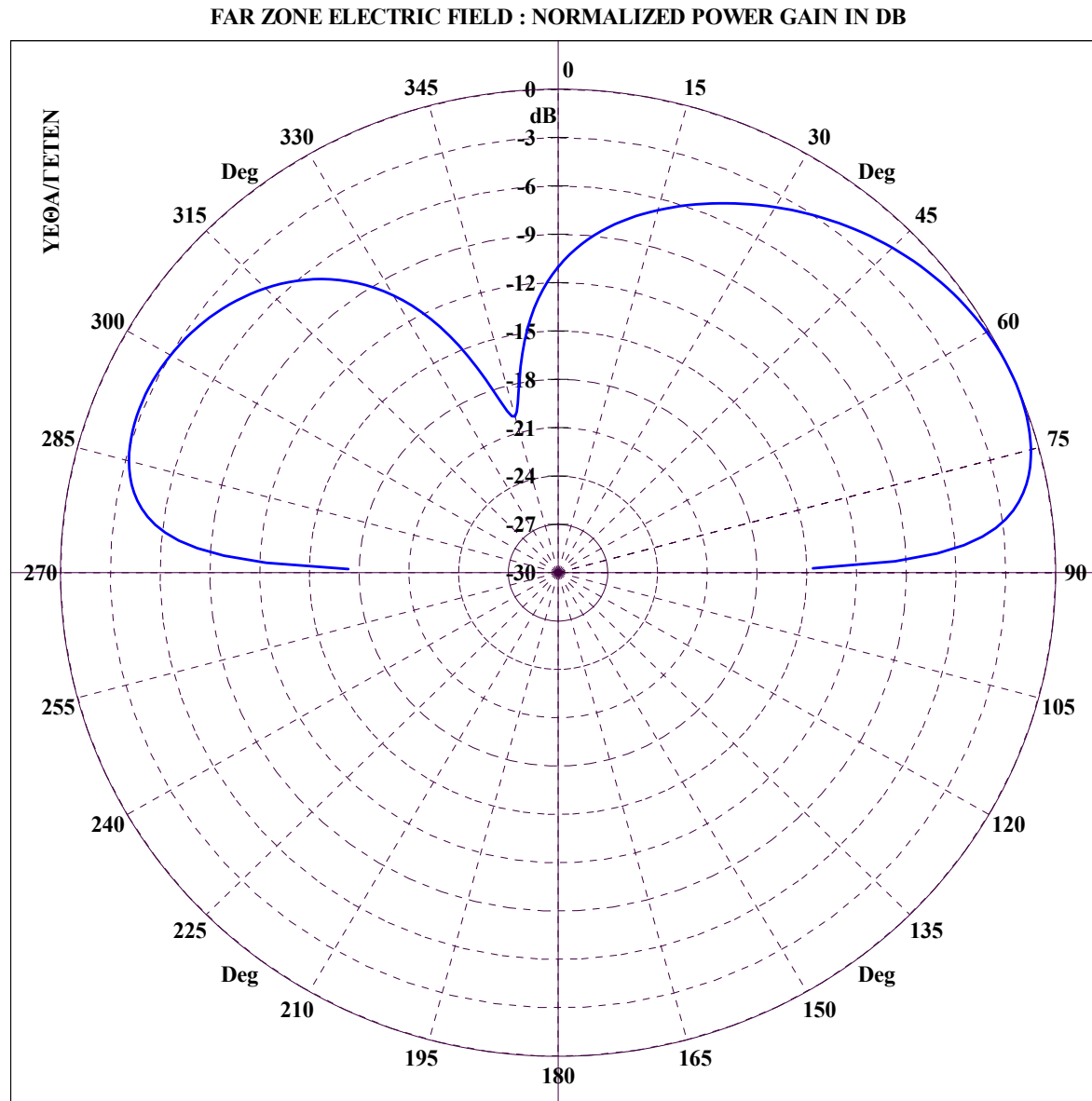
File Name :ΓΡΚ42-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 20.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 2.00 MHz

Διάγραμμα 5.110 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 2 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 20^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .



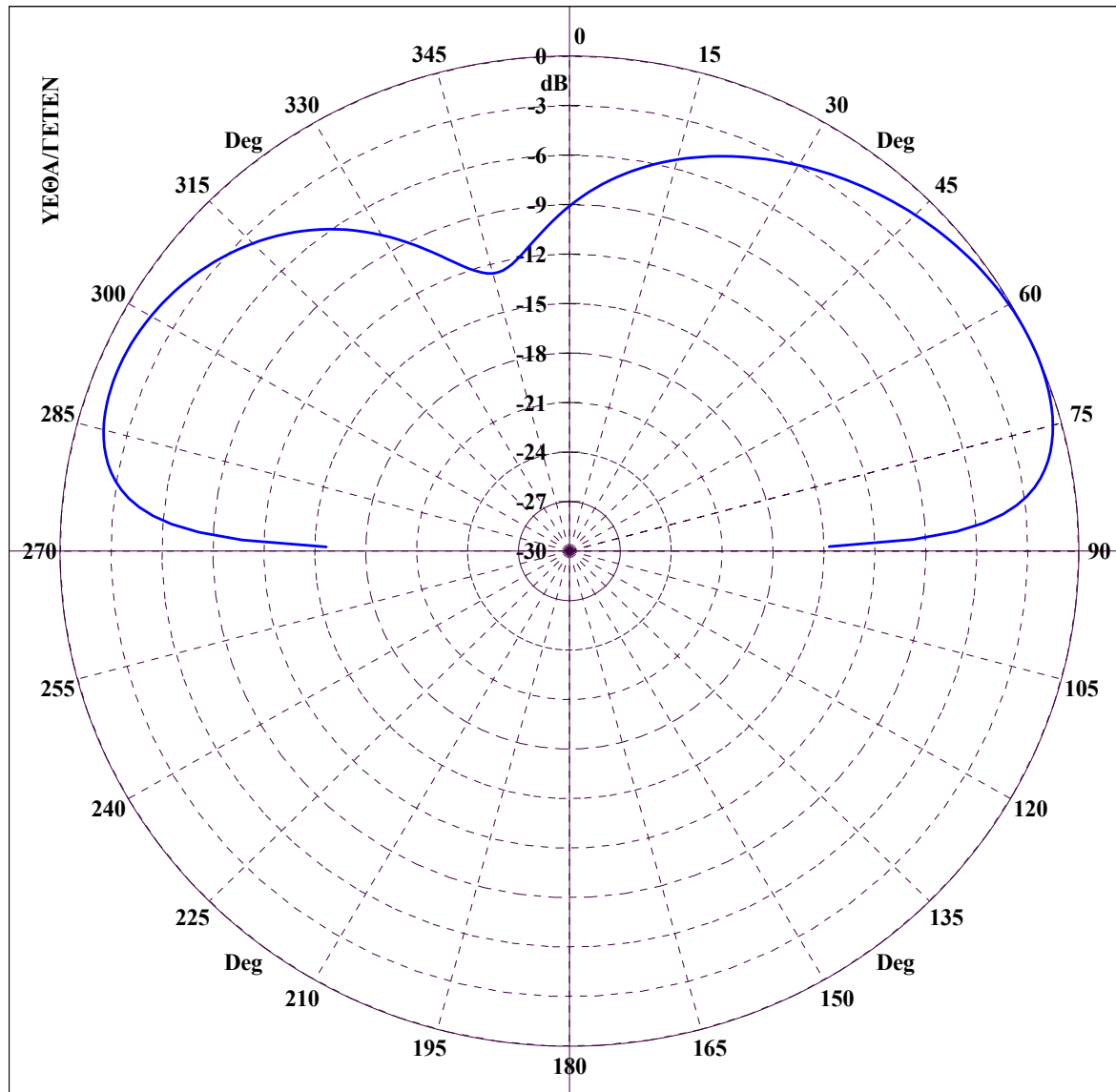
Διάγραμμα 5.111 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, 3D διάγραμμα κέρδους ισχύος για κεραία 4 σε συχνότητα 2 MHz με χρήση VRML.





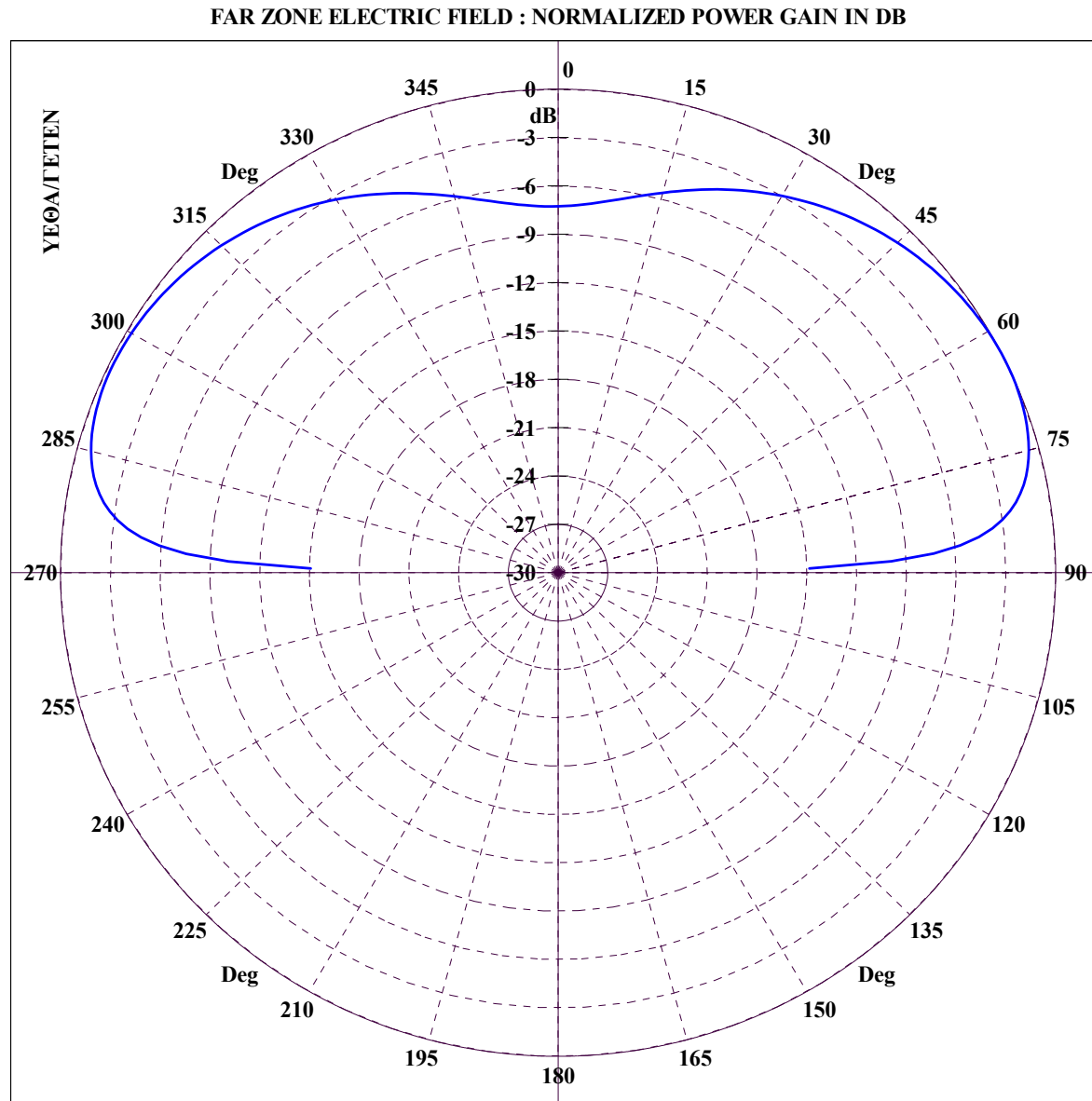
Διάγραμμα 5.112 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\varphi = 0^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB

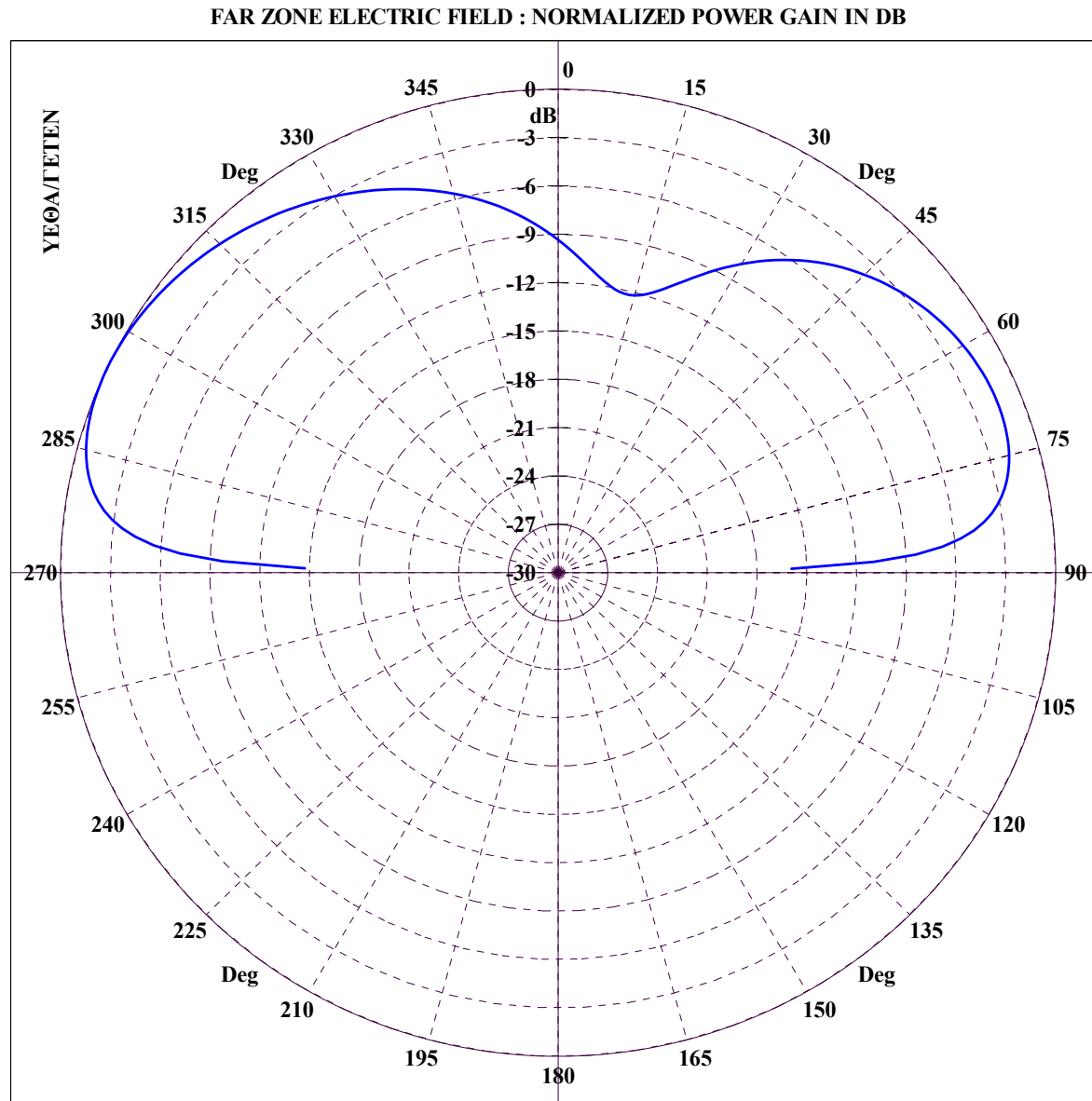


File Name :TPK45-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 45.00$ ,  $\Theta = 0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

Διάγραμμα 5.113 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 45^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

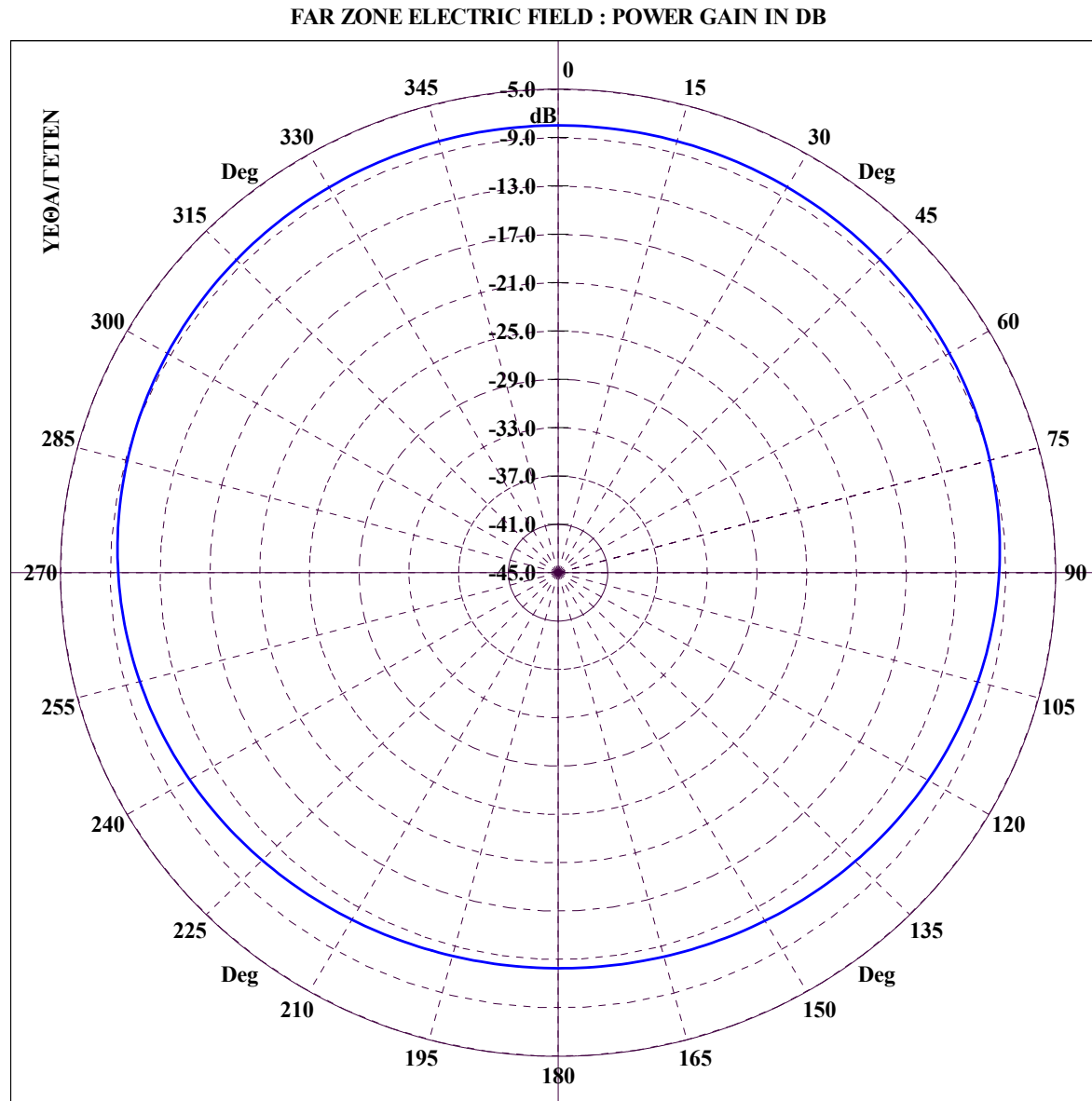


Διάγραμμα 5.114 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\varphi = 90^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

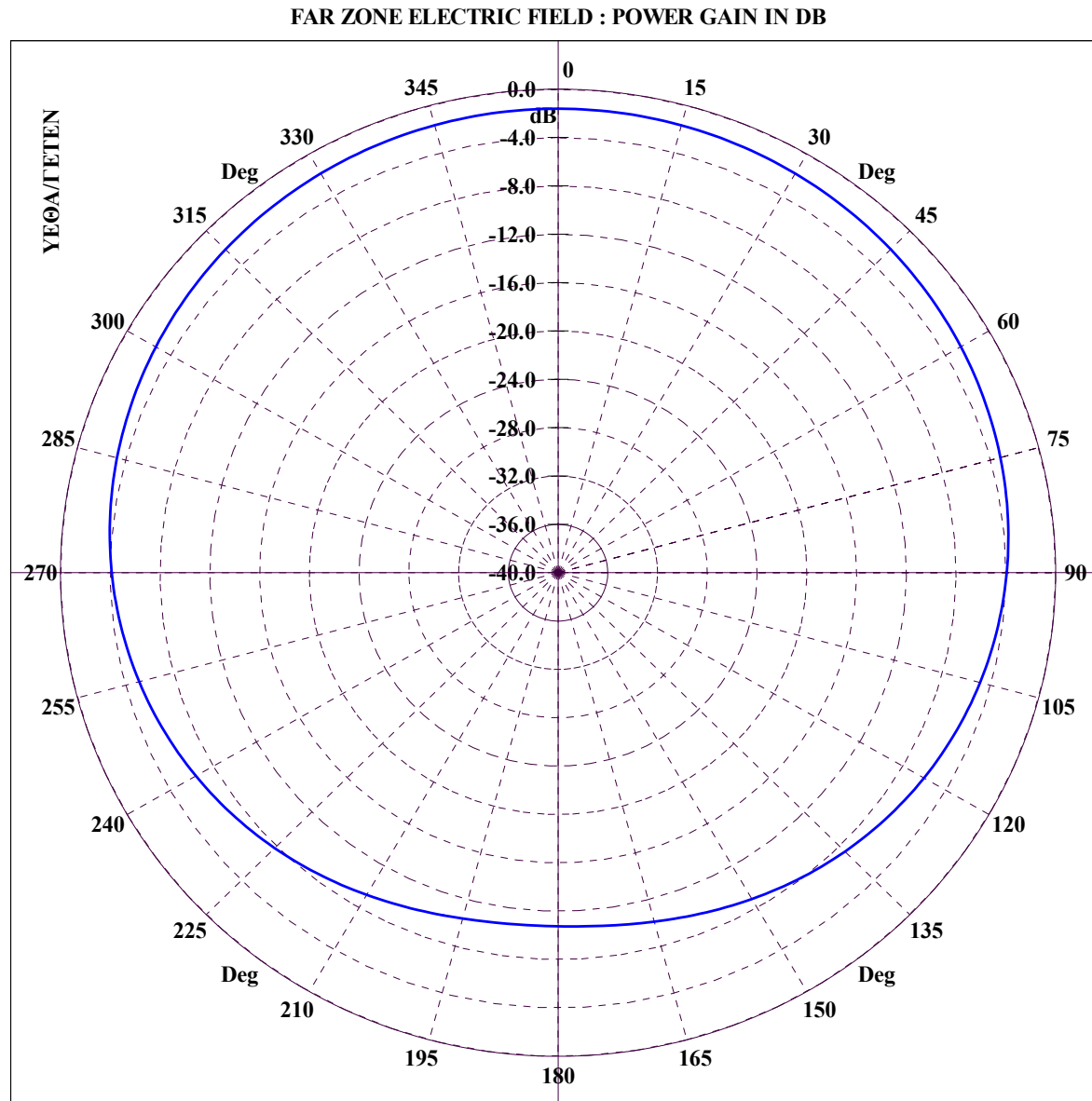


File Name :TPK45-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 135.00$ ,  $\Theta = 0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

Διάγραμμα 5.115 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\varphi = 135^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

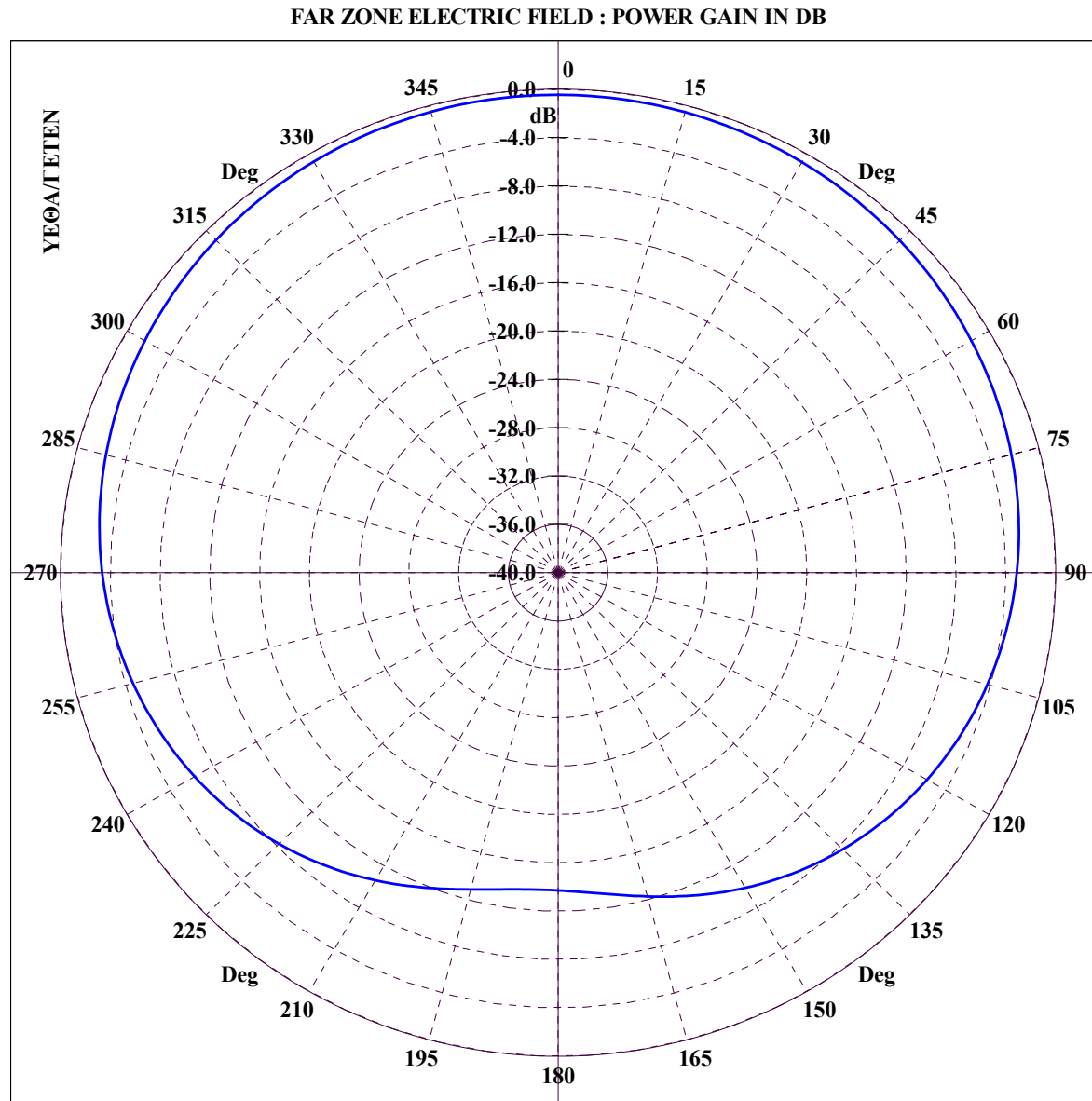


Διάγραμμα 5.116 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 5^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .



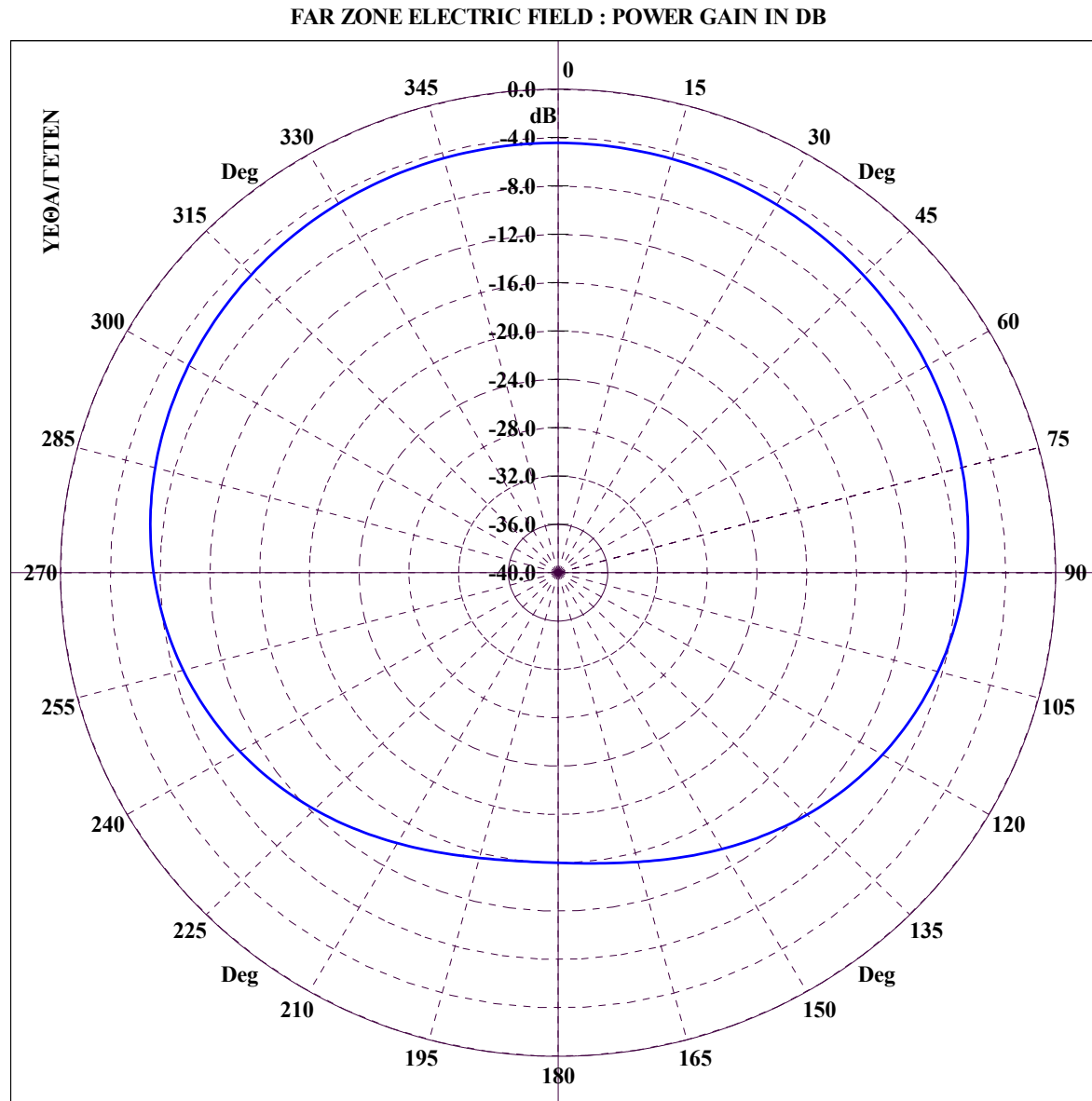
File Name :TPK45-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 10.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

Διάγραμμα 5.117 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 10^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .



File Name :TPK45-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 15.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

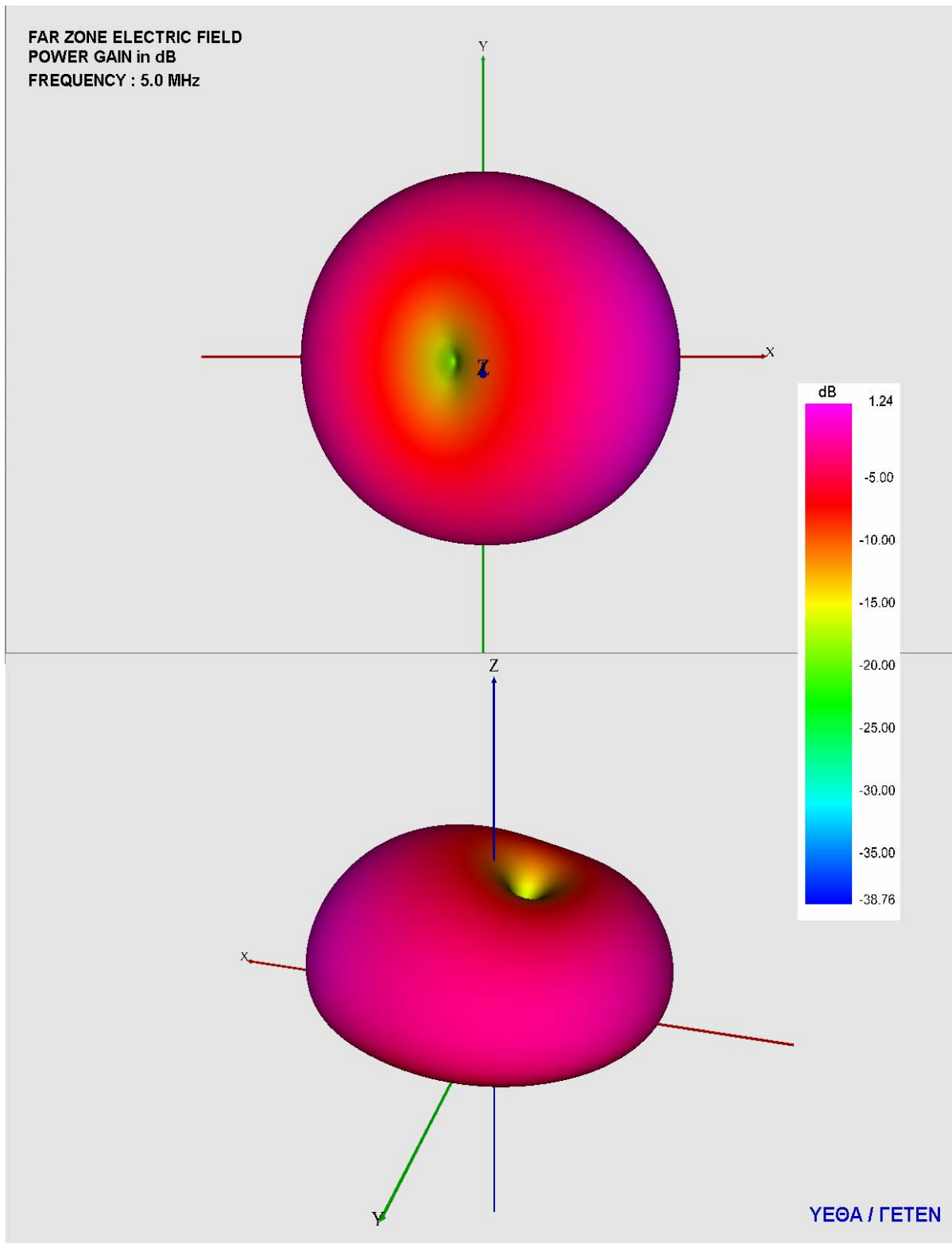
Διάγραμμα 5.118 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 15^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .



File Name :TPK45-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 20.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

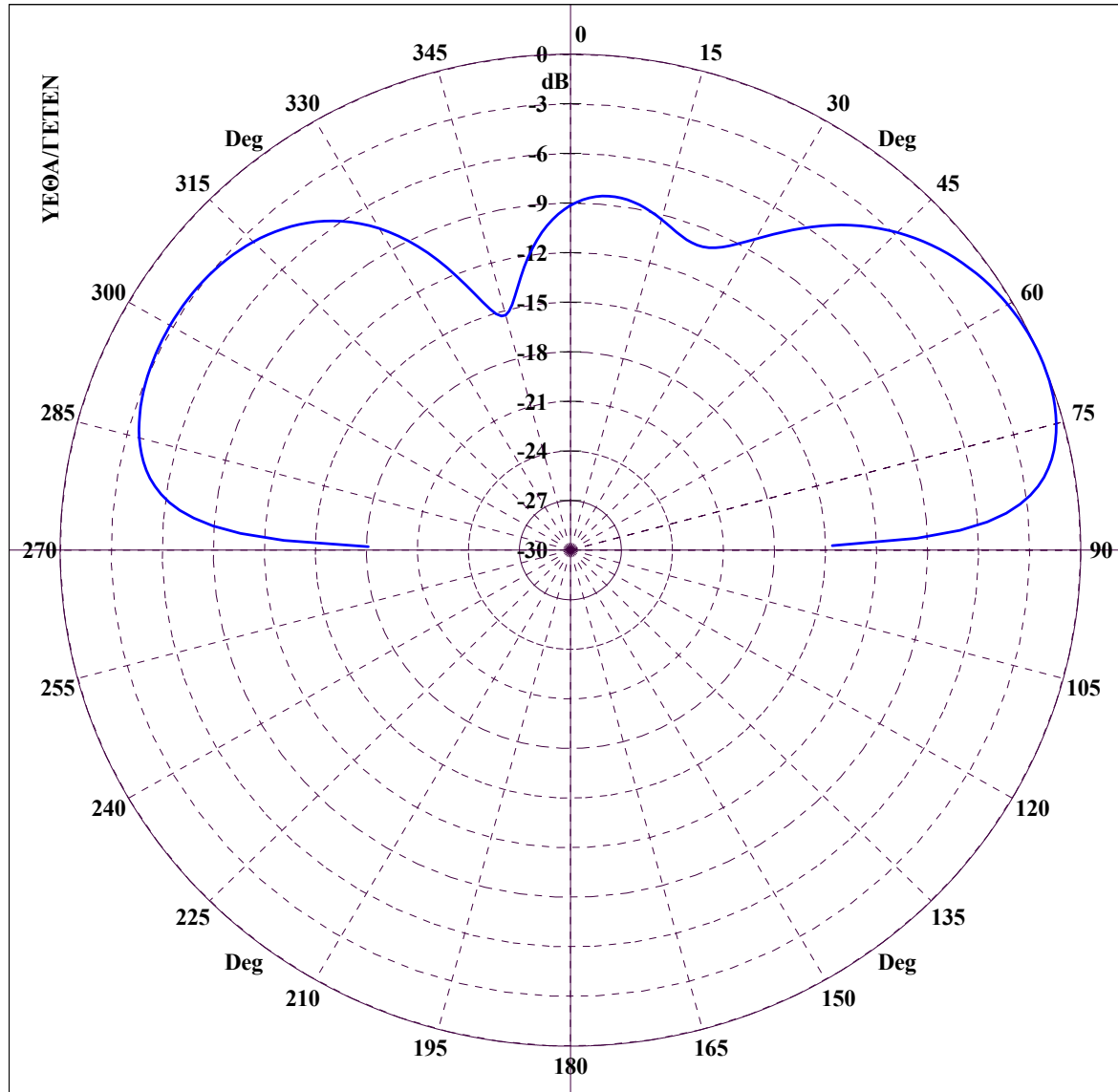
Διάγραμμα 5.119 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 20^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .





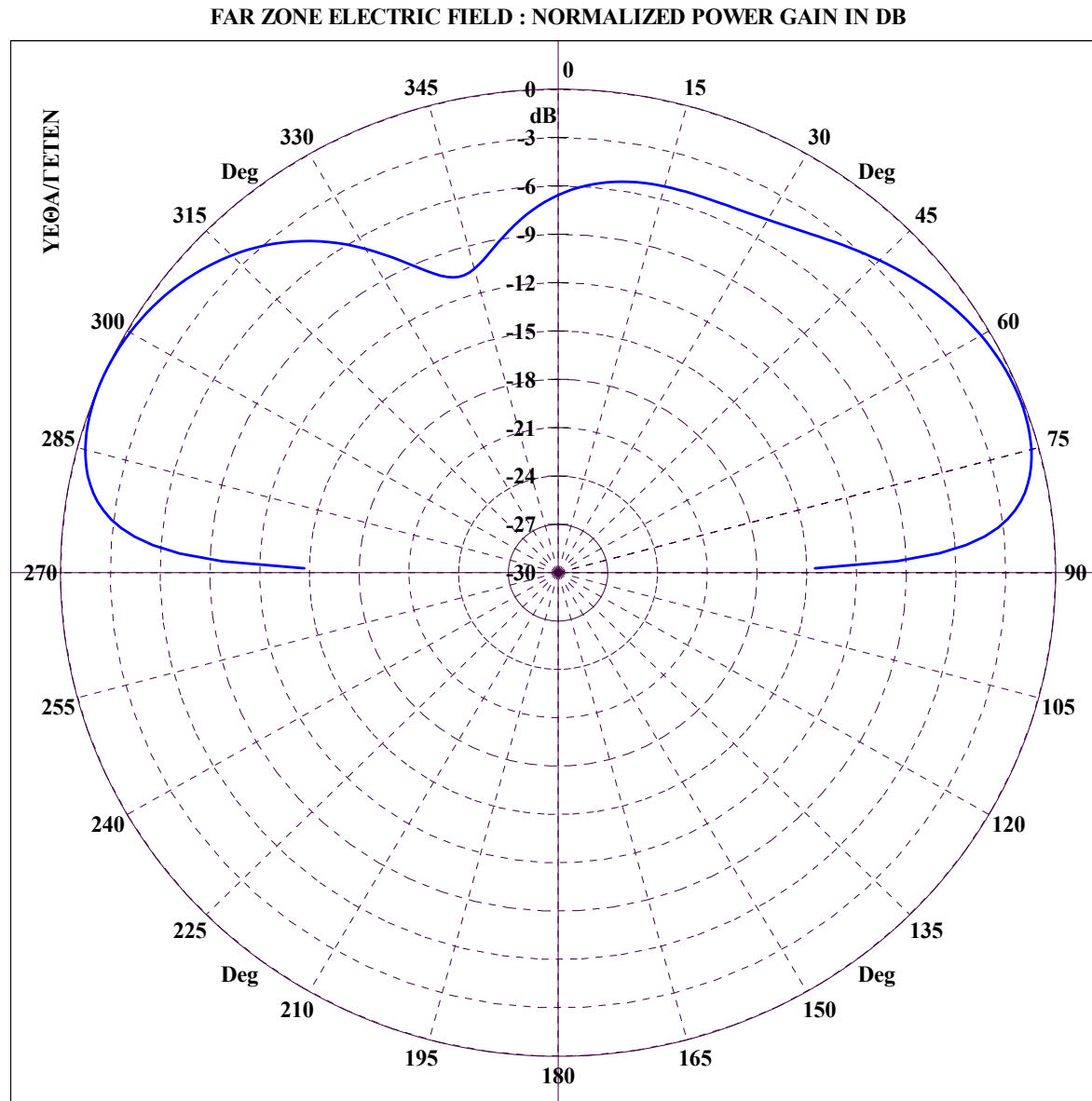
Διάγραμμα 5.120 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, 3D διάγραμμα κέρδους ισχύος για κεραία 4 σε συχνότητα 5 MHz με χρήση VRML.

FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



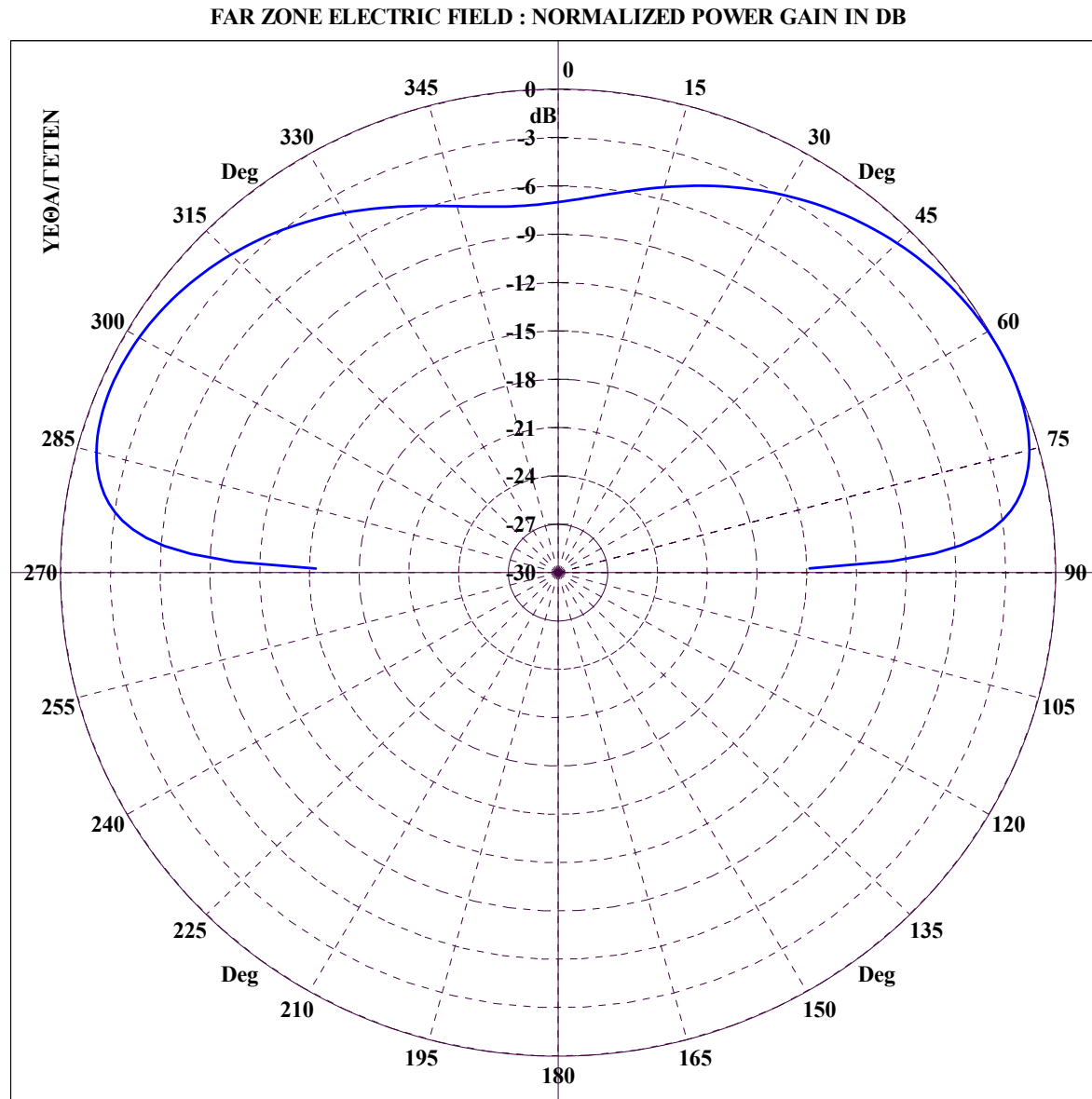
File Name :TPK47-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 0.00$ ,  $\Theta=0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

Διάγραμμα 5.121 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 0^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .



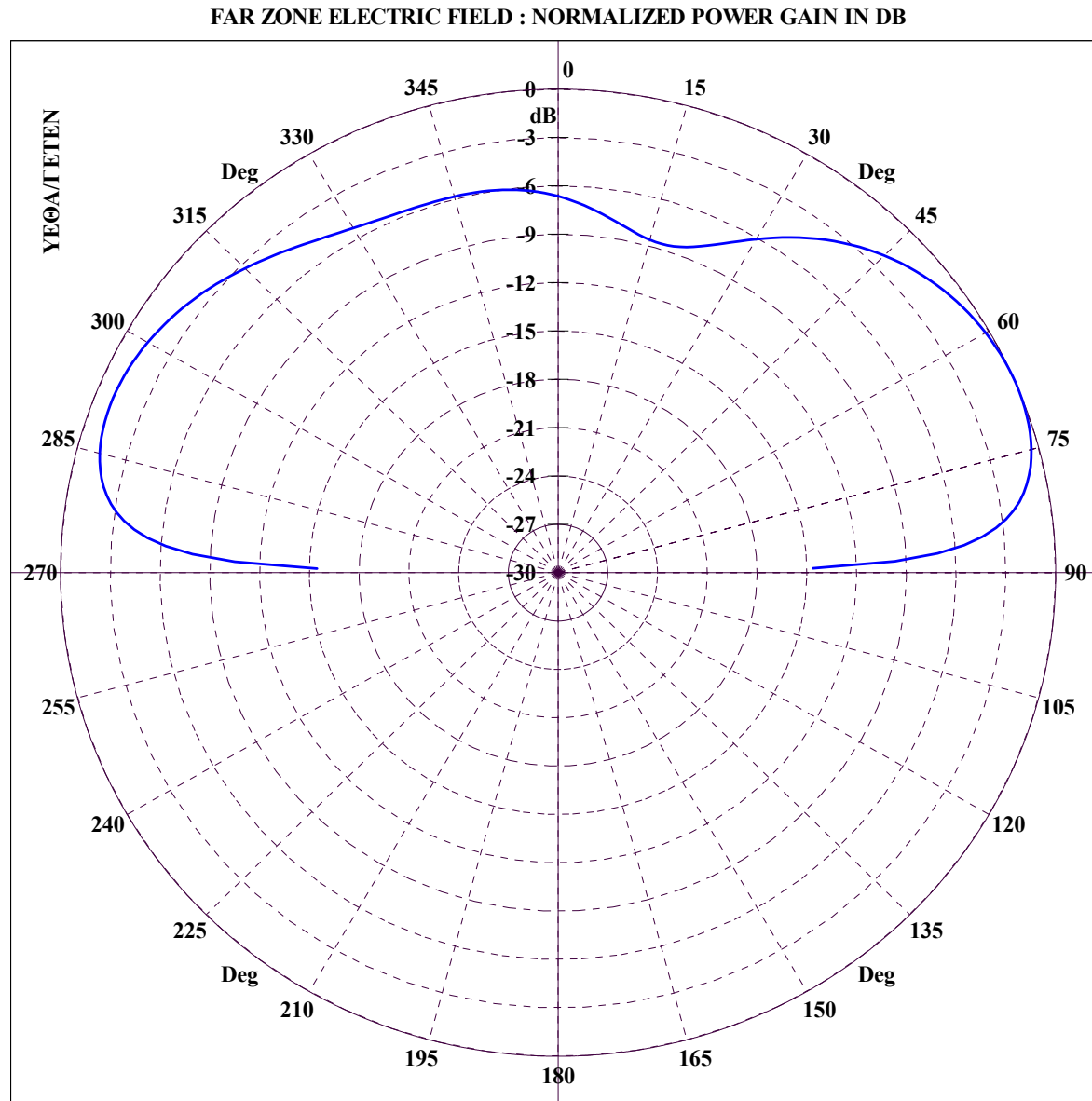
File Name :TPK47-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 45.00$ ,  $\Theta = 0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

Διάγραμμα 5.122 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 45^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .



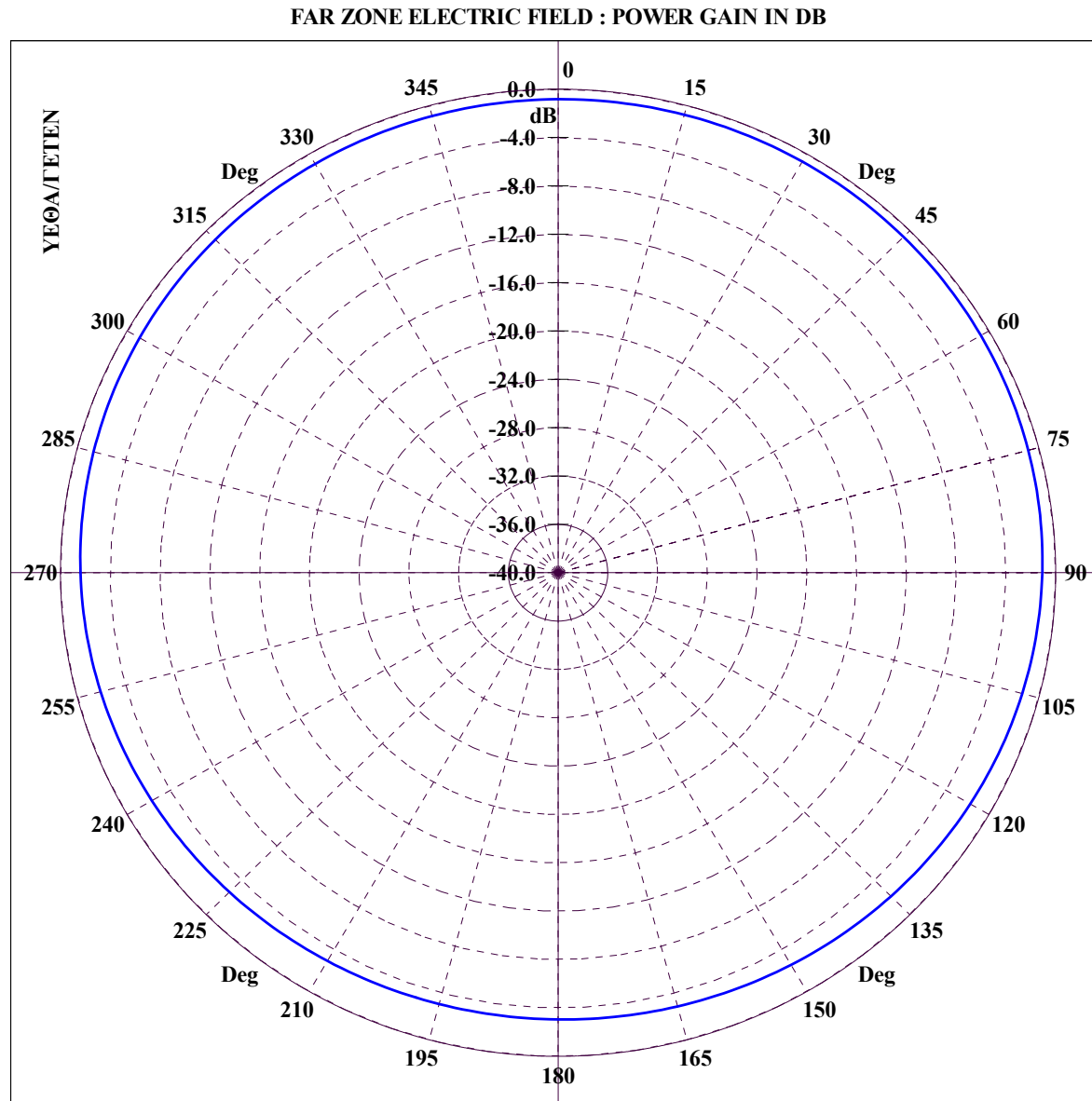
File Name :TPK47-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 90.00$ ,  $\Theta = 0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

Διάγραμμα 5.123 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 90^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

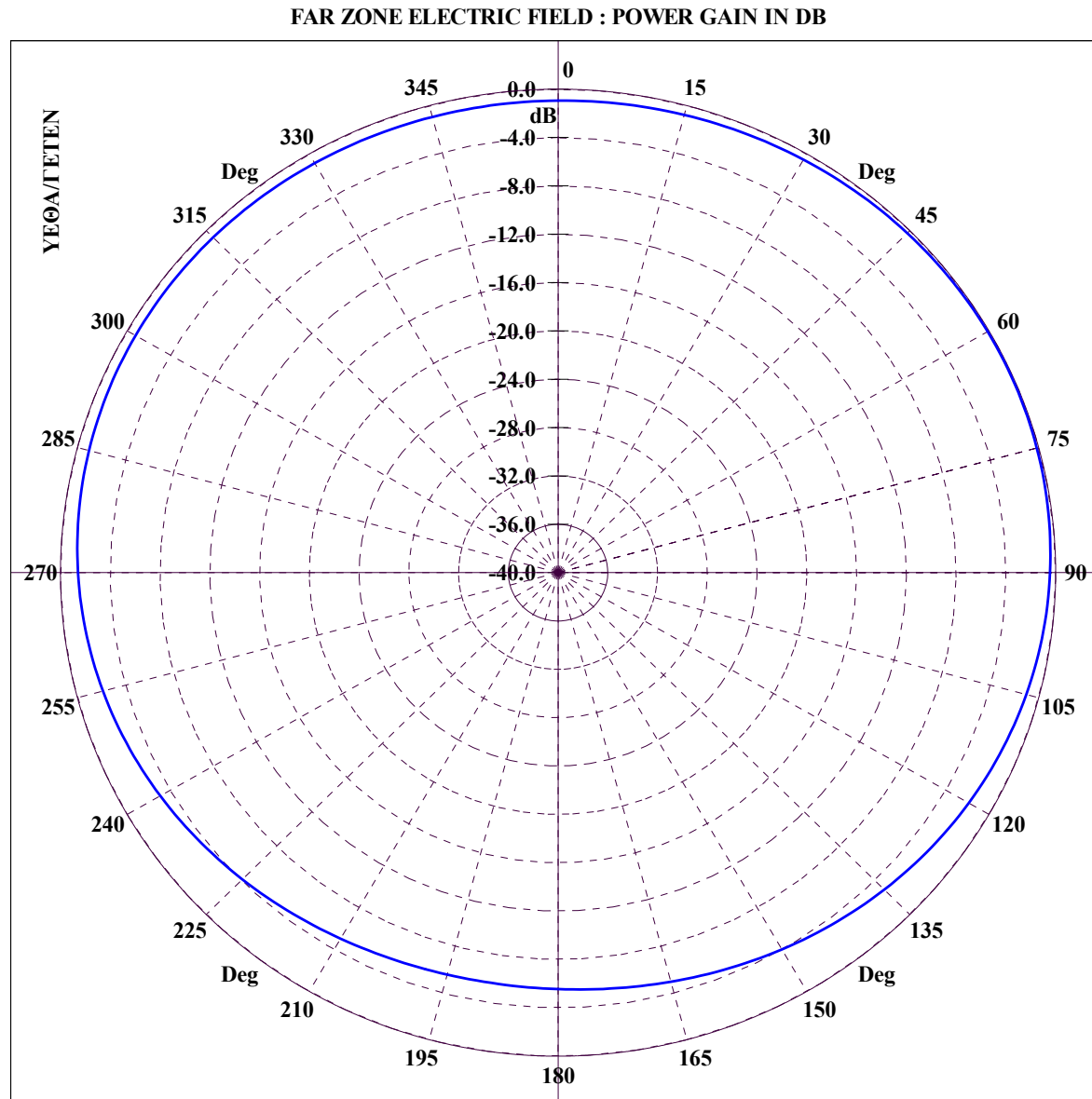


File Name :TPK47-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 135.00$ ,  $\Theta = 0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

Διάγραμμα 5.124 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\varphi = 135^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

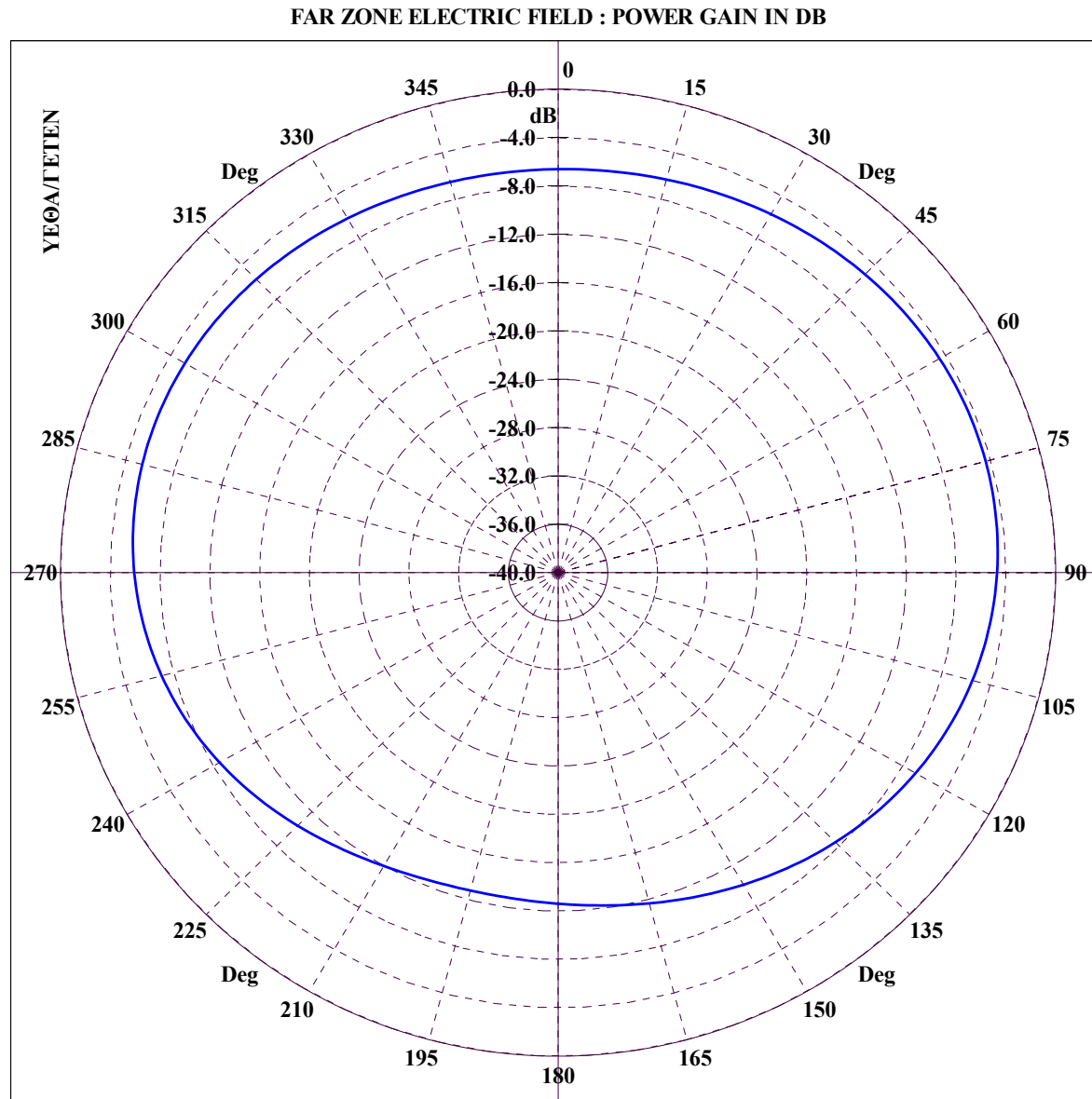


**Διάγραμμα 5.125 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 5^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .**



File Name :ΓΡΚ47-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 10.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

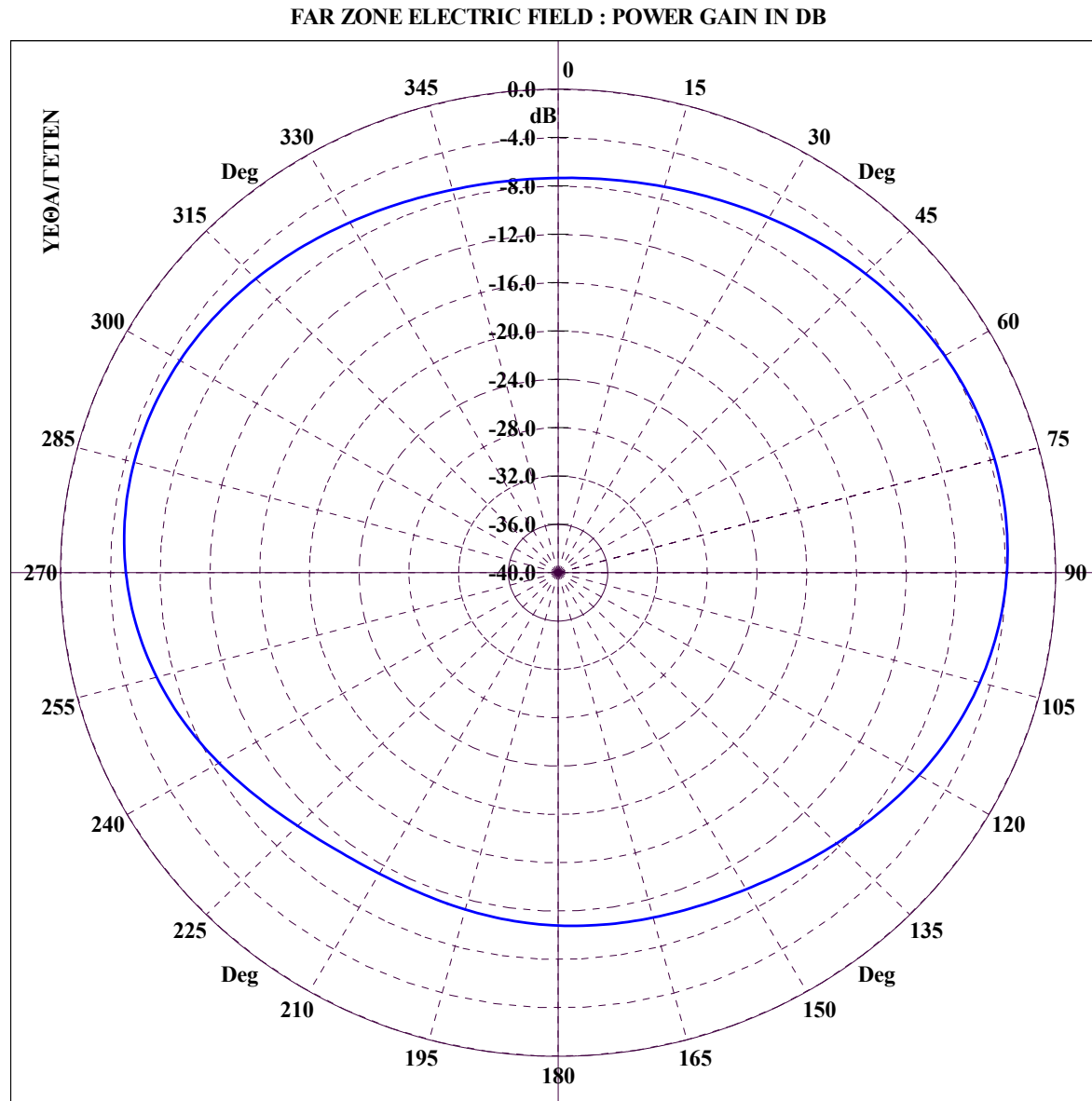
Διάγραμμα 5.126 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 10^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .



File Name :ΓΡΚ47-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 15.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

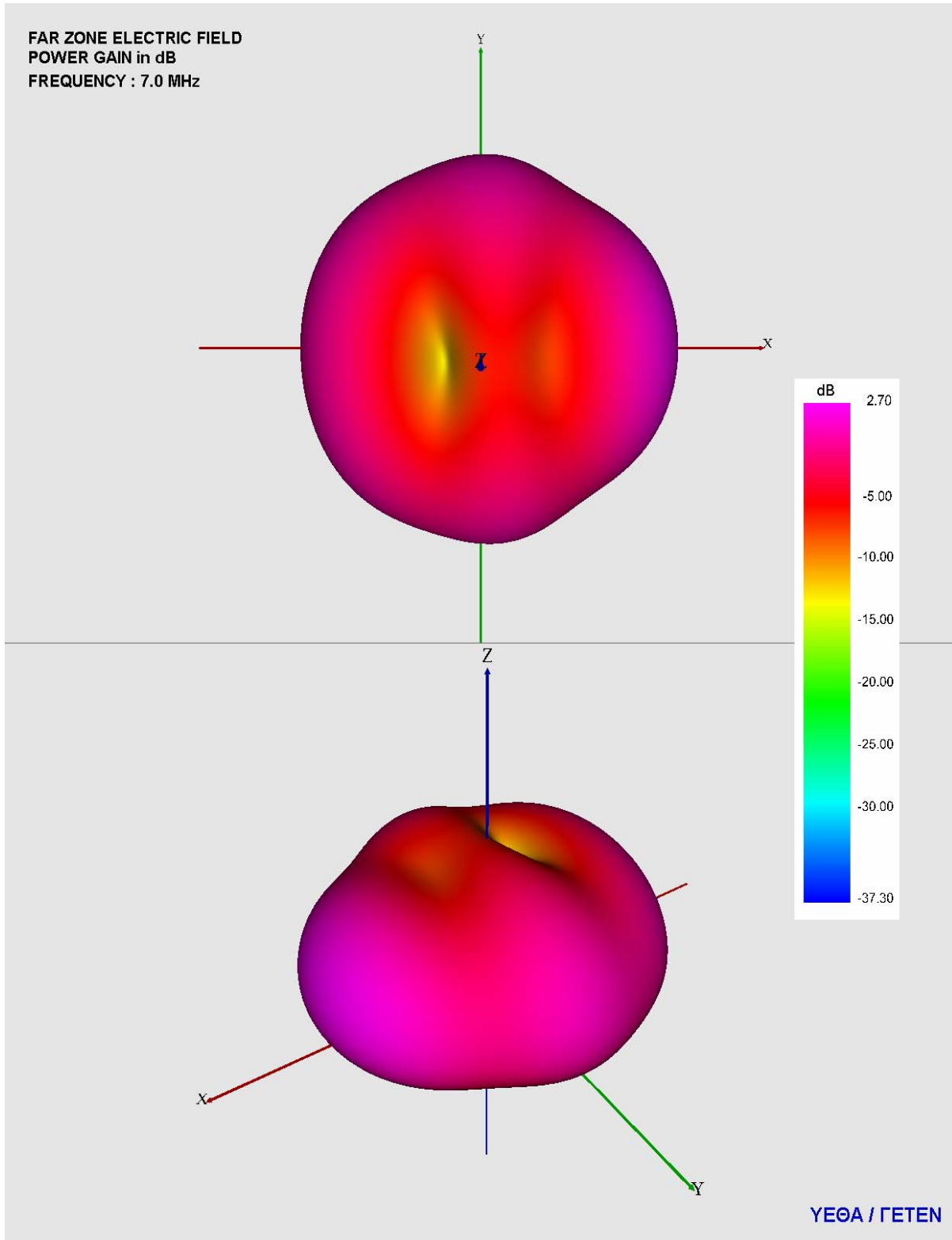
Διάγραμμα 5.127 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 15^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .





File Name :ΓΡΚ47-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 20.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

Διάγραμμα 5.128 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, Κεραία 4 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 20^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .



Διάγραμμα 5.129 : ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ, 3D διάγραμμα κέρδους ισχύος για κεραία 4 σε συχνότητα 7 MHz με χρήση VRML.

#### 5.4.1.5 Συγκριτικά στοιχεία προσομοίωσης

Παρακάτω παρατίθενται σε μορφή πίνακα τα συγκριτικά στοιχεία προσομοίωσης των τεσσάρων κεραιών που φέρει το ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ στις τρεις συχνότητες μελέτης των 2, 5, 7 MHz για την εύρεση των διαγραμμάτων ακτινοβολίας μακρινού πεδίου (Far Field calculations). Τα στοιχεία αυτά αφορούν τον αριθμό νημάτων που χρησιμοποιήθηκαν αρχικώς για την κατασκευή του wire grid μοντέλου, σε ποσοστό τμηματοποίησης, δηλαδή σε αριθμό segments ανά μήκος κύματος  $\lambda$ , τον αριθμό των segments που τελικά παρήχθησαν από την διαδικασία τμηματοποίησης καθώς και τον χρόνο που χρειάστηκε για την εκτέλεση της προσομοίωσης.

Συγκριτικά στοιχεία ανά κεραία και ανά συχνότητα λειτουργίας	Αριθμός νημάτων μοντέλου	Ποσοστό τμηματοποίησης	Αριθμός segments που παρήχθησαν	Χρόνος εκτέλεσεως προσομοίωσης (sec)
<b>Κεραία 1</b>				
2 MHz	5678	$\lambda/40$	6508	1233.750
5 MHz	5678	$\lambda/60$	8078	2083.590
7 MHz	5678	$\lambda/60$	9630	3294.350
<b>Κεραία 2</b>				
2 MHz	5678	$\lambda/40$	6508	1232.950
5 MHz	5678	$\lambda/60$	8078	2077.640
7 MHz	5678	$\lambda/60$	9630	3287.540
<b>Κεραία 3</b>				
2 MHz	5678	$\lambda/40$	6508	---
5 MHz	5678	$\lambda/60$	8078	2086.240
7 MHz	5678	$\lambda/60$	9630	3291.140
<b>Κεραία 4</b>				
2 MHz	5678	$\lambda/40$	6508	1233.020
5 MHz	5678	$\lambda/60$	8078	2084.570
7 MHz	5678	$\lambda/60$	9630	3292.270

Πίνακας 5.3 : Συγκριτικά στοιχεία προσομοίωσης των τεσσάρων HF κεραιών που φέρει το ΠΕΡΙΠΟΛΙΚΟ ΠΛΟΙΟ.

Παρατηρείται ότι οι μεγαλύτεροι χρόνοι εκτέλεσης αντιστοιχούν στη μεγαλύτερη συχνότητα των 7 MHz όπως και αναμενόταν, αφού για αυτή τη συχνότητα, καθότι μεγαλύτερη, ο αριθμός των segments που τελικά παρήχθησαν είναι ο μεγαλύτερος.

### 5.4.1.6 Υπολογισμός κοντινού πεδίου HF κεραιών

#### 5.4.1.6.1 Εισαγωγή

Υπολογίσθηκαν και παρατίθενται παρακάτω 5 χρωματικά διαγράμματα ηλεκτρικού πεδίου που αφορούν 5 διαφορετικές τομές σάρωσης. Πρόκειται για 3 οριζόντιες και 2 κάθετες τομές που σαρώθηκαν επί της υπερκατασκευής του πλοίου και κοντά στις κεραιές εκπομπής (whip monopoles) των 7 MHz με ισχύ τροφοδοσίας ιδιαίτερα μεγάλη και ίση με 1KW. Συγκεκριμένα, τα διαγράμματα παρατίθενται μαζί με το wire grid του πλοίου για καλύτερη κατανόηση της περιοχής την οποία αφορούν. Η χρωματική κλίμακα για την εκάστοτε περίπτωση είναι διαφορετική, αφού αντιστοιχείται στην κλίμακα τιμών του ηλεκτρικού πεδίου στην αντίστοιχη περιοχή σάρωσης. Αντίστοιχα σχήματα μπορούν να προκύψουν για το μαγνητικό πεδίο αλλά και για την πυκνότητα ισχύος ανάλογα με την περιοχή συχνοτήτων λειτουργίας.

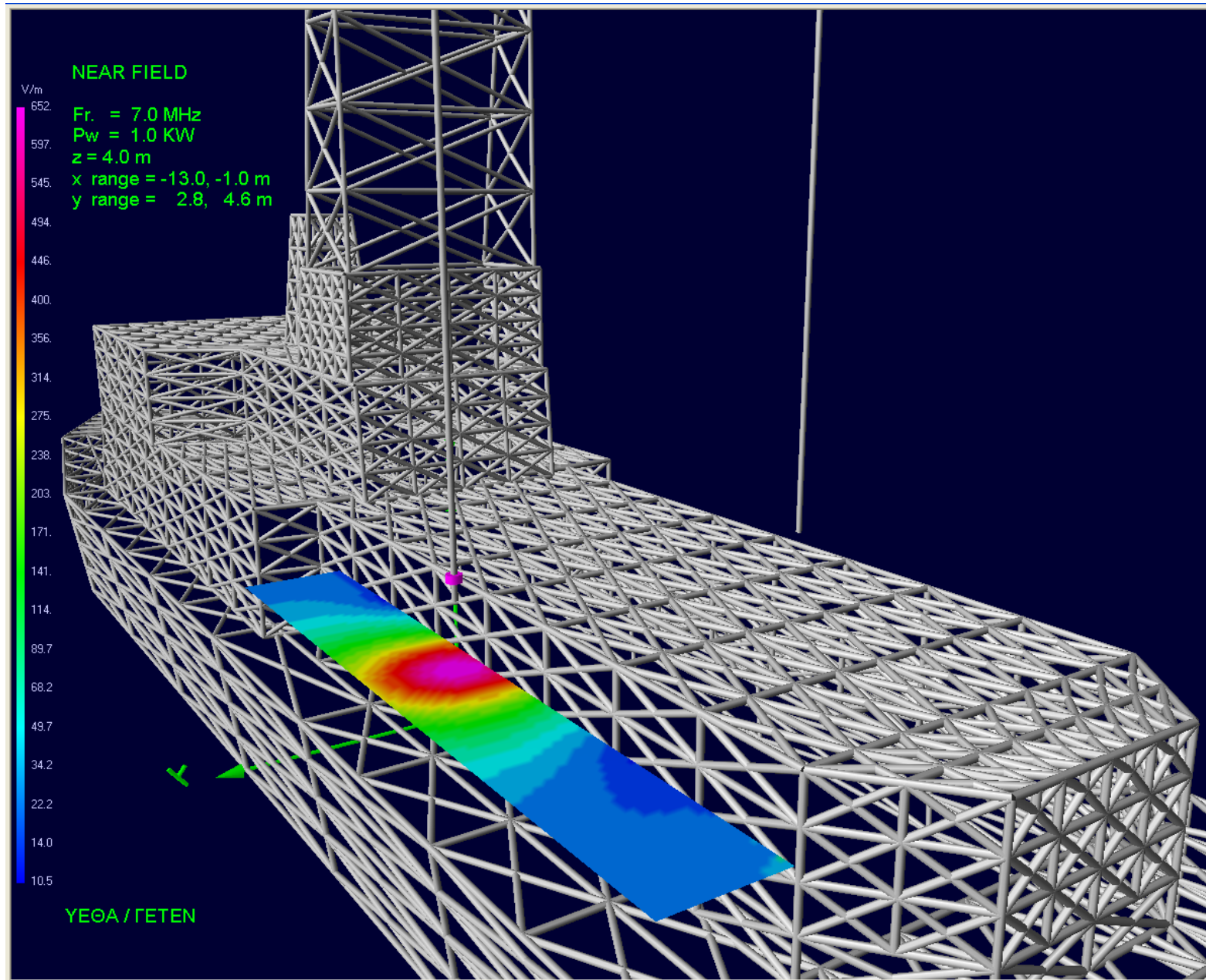
Ακόμα αναφέρονται στο τέλος τα υπάρχοντα όρια ασφάλειας που αφορούν το γενικό πληθυσμό με βάση τα οποία μπορεί κανείς να εκτιμήσει την επικινδυνότητα των τιμών που εμφανίζονται σε οποιαδήποτε μελέτη κοντινού και μακρινού πεδίου.

#### 5.4.1.6.2 Διαγράμματα

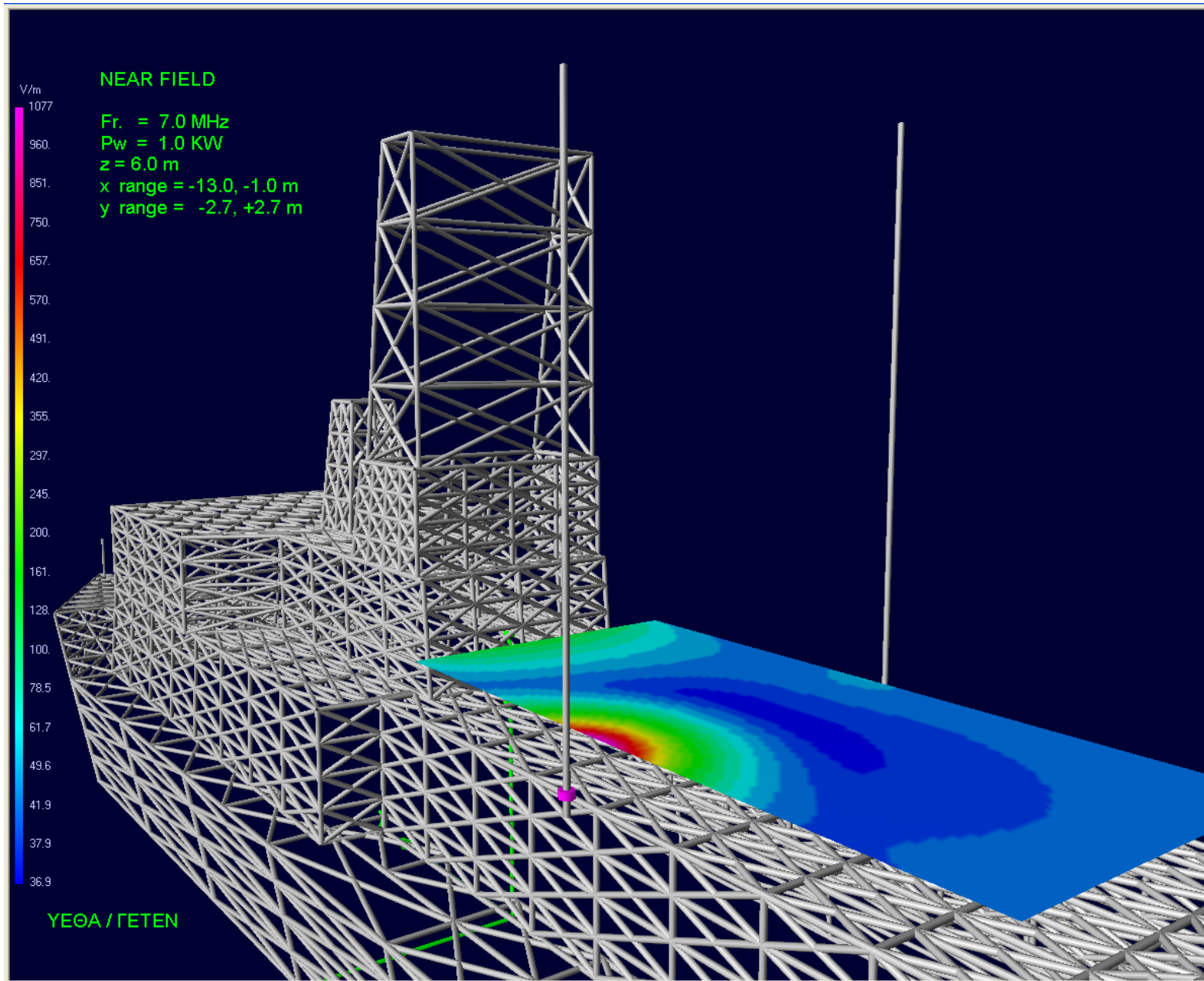
Οι κεραιές στο συγκεκριμένο πλοίο απέχουν κατά τον άξονα  $y$  0.5 m από το πάνω κατάστρωμα. Το πρώτο οριζόντιο διάγραμμα που φαίνεται στο σχήμα 5.6 αφορά τομή σάρωσης στο  $z = 4.0$  m με  $x \in [-13,-1]$  m και  $y \in [+2.8,+4.6]$ . Η τομή απέχει -1 m κατά  $z$  και 0.5 m κατά  $y$  από το σημείο τροφοδοσίας της κεραιάς εκπομπής και του κάτω καταστρώματος. Το δεύτερο οριζόντιο διάγραμμα που φαίνεται στο σχήμα 5.7 αφορά σε τομή σάρωσης στο  $z = 6.0$  m με  $x \in [-13,-1]$  m και  $y \in [-2.7,+2.7]$ . Η τομή απέχει 1 m κατά  $z$  και 0.5 m κατά  $y$  από το σημείο τροφοδοσίας της κεραιάς εκπομπής και του άνω καταστρώματος. Το τρίτο οριζόντιο διάγραμμα που φαίνεται στο σχήμα 5.8 αφορά σε τομή σάρωσης στο  $z = 6.5$  m με  $x \in [-13,-1]$  m και  $y \in [-2.7,+2.7]$ . Η τομή απέχει 1.5 m κατά  $z$  και 0.5 m κατά  $y$  από το σημείο τροφοδοσίας της κεραιάς εκπομπής και του άνω καταστρώματος.

Το πρώτο κάθετο διάγραμμα που φαίνεται στο σχήμα 5.9 αφορά σε τομή σάρωσης στο  $y = 1.7$  m με  $x \in [-13,-1]$  m και  $z \in [+5.25,+19.95]$ . Η τομή απέχει 1.5 m κατά  $y$  από τον άξονα της κεραιάς και το κάτω όριο της κατά  $z$  0.25 m από το σημείο τροφοδοσίας της κεραιάς εκπομπής και του άνω καταστρώματος. Το δεύτερο κάθετο διάγραμμα που φαίνεται στο σχήμα 5.10 αφορά σε τομή σάρωσης στο  $y = 2.2$  m με  $x \in [-13,-1]$  m και  $z \in [+5.25,+19.95]$ . Η τομή απέχει 1 m κατά  $y$  από τον άξονα της κεραιάς και το κάτω όριο της κατά  $z$  0.25 m από το σημείο τροφοδοσίας της κεραιάς εκπομπής και του άνω καταστρώματος.

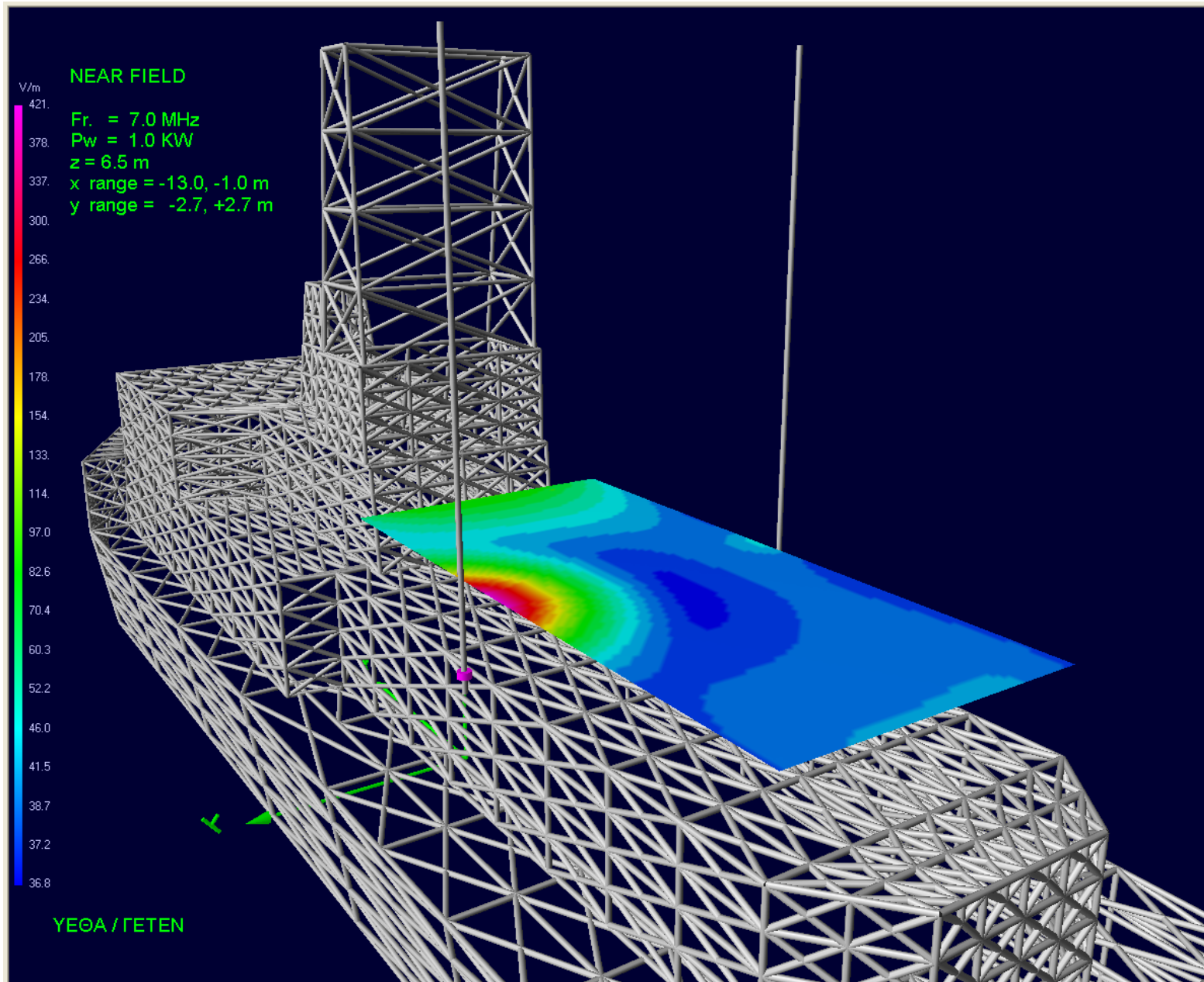
Παρατηρείται όπως αναμενόταν, ότι όσο πιο κοντά είναι οι τομές στην κεραιά τόσο πιο μεγάλες τιμές ηλεκτρικού πεδίου προκύπτουν. Ακόμα στις κάθετες στο πλοίο τομές σάρωσης μεγάλες τιμές εμφανίζονται στο σημείο τροφοδοσίας αλλά και περί το άκρο της κεραιάς. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι εκεί οι φορείς του ρεύματος εμφανίζουν τη μέγιστη επιτάχυνση.



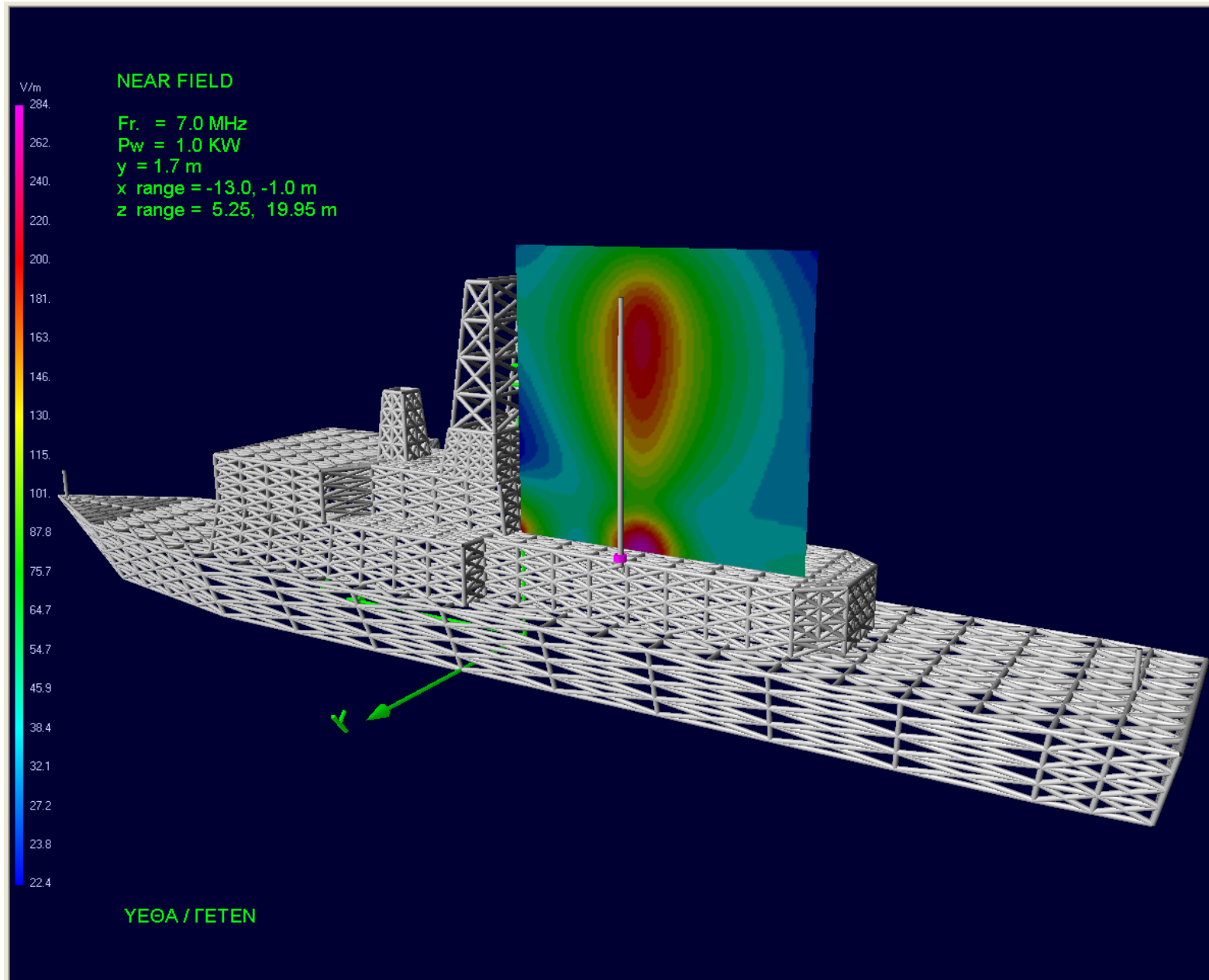
Σχήμα 5.6 : Διάγραμμα κοντινού πεδίου που αφορά σε οριζόντια τομή σάρωσης στο  $z = 4.0$  m με  $x \in [-13,-1]$  m και  $y \in [+2.8,+4.6]$ .



Σχήμα 5.7 : Διάγραμμα κοντινού πεδίου που αφορά σε οριζόντια τομή σάρωσης στο  $z = 6.0$  m με  $x \in [-13,-1]$  m και  $y \in [-2.7,+2.7]$ .

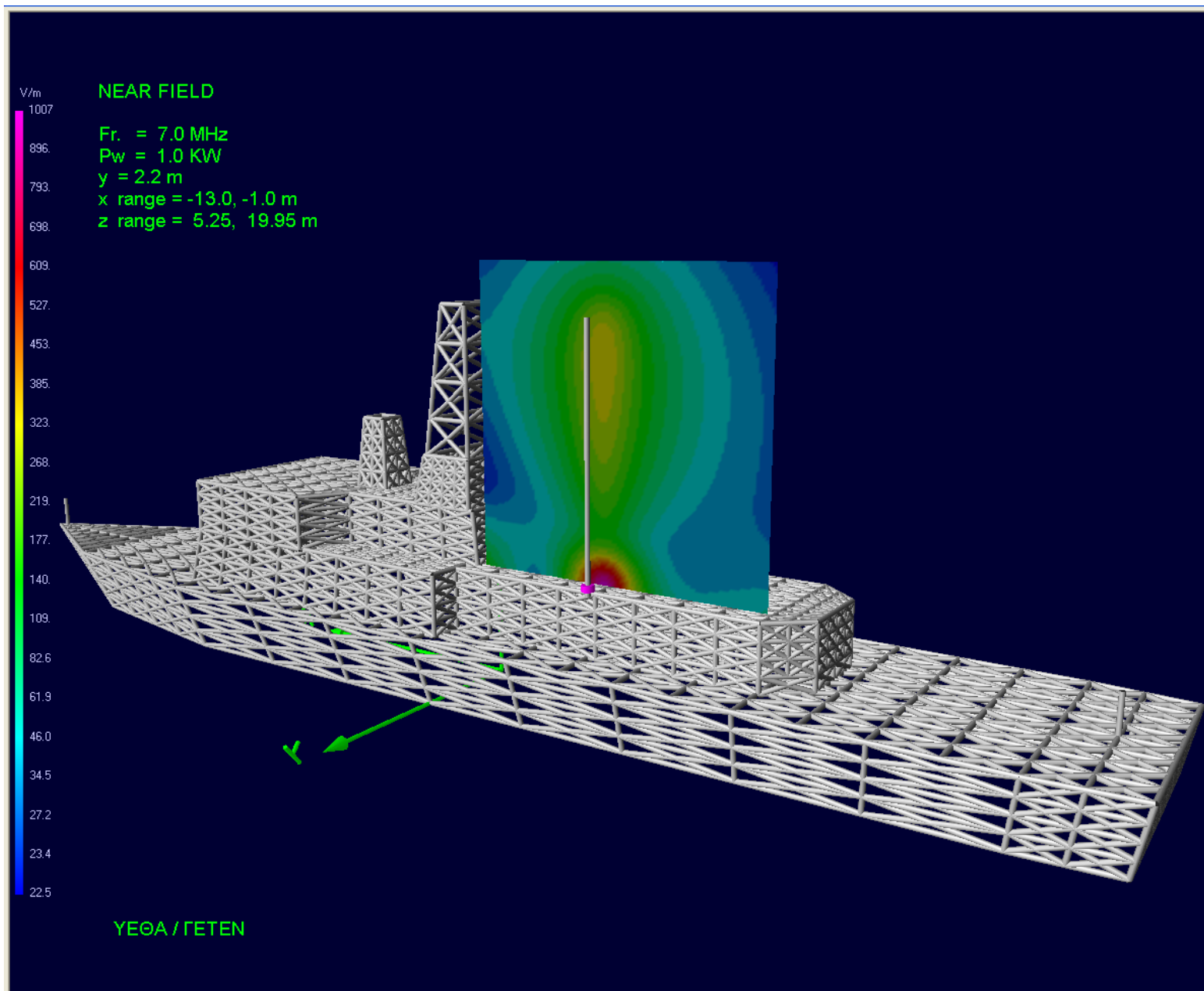


Σχήμα 5.8 : Διάγραμμα κοντινού πεδίου που αφορά σε οριζόντια τομή σάρωσης στο  $z = 6.5$  m με  $x \in [-13,-1]$  m και  $y \in [-2.7,+2.7]$ .



Σχήμα 5.9 : Διάγραμμα κοντινού πεδίου που αφορά σε κάθετη τομή σάρωσης στο  $y = 1.7$  m με  $x \in [-13,-1]$  m και  $z \in [+5.25,+19.95]$ .





Σχήμα 5.10 : Διάγραμμα κοντινού πεδίου που αφορά σε κάθετη τομή σάρωσης στο  $y = 2.2$  m με  $x \in [-13,-1]$  m και  $z \in [+5.25,+19.95]$ .

### 5.4.1.6.3 Όρια Ασφάλειας

Τα όρια ασφάλειας που αφορούν το γενικό πληθυσμό για τα ηλεκτρικά, μαγνητικά και ηλεκτρομαγνητικά πεδία με βάση τα οποία κρίνεται η επικινδυνότητα ενός σημείου ή μιας περιοχής, καθορίζονται από τους δυο ακόλουθους πίνακες [30] :

Ζώνη συχνοτήτων	Μαγνητική επαγωγή (mT)	Πυκνότητα ρεύματος (mA/m <sup>2</sup> ) (rms)	Μέσος ρυθμός ειδικής απορρόφησης για όλο το σώμα (W/kg)	Τοπικός ρυθμός ειδικής απορρόφησης (κεφάλι και κορμός) (W/kg)	Τοπικός ρυθμός ειδικής απορρόφησης (άκρα) (W/kg)	Πυκνότητα ισχύος S (W/m <sup>2</sup> )
0 Hz	40	-	-	-	-	-
> 0 - 1 Hz	-	8	-	-	-	-
1 - 4 Hz	-	8/f	-	-	-	-
4 - 1000 Hz	-	2	-	-	-	-
1 - 100 KHz	-	f/500	-	-	-	-
100 KHz - 10 MHz	-	f/500	0,08	2	4	-
10 MHz - 10 GHz	-	-	0,08	2	4	-
10 - 300 GHz	-	-	-	-	-	10

Πίνακας 5.4 : Βασικοί περιορισμοί για ηλεκτρικά, μαγνητικά και ηλεκτρομαγνητικά πεδία (0 Hz - 300 GHz).

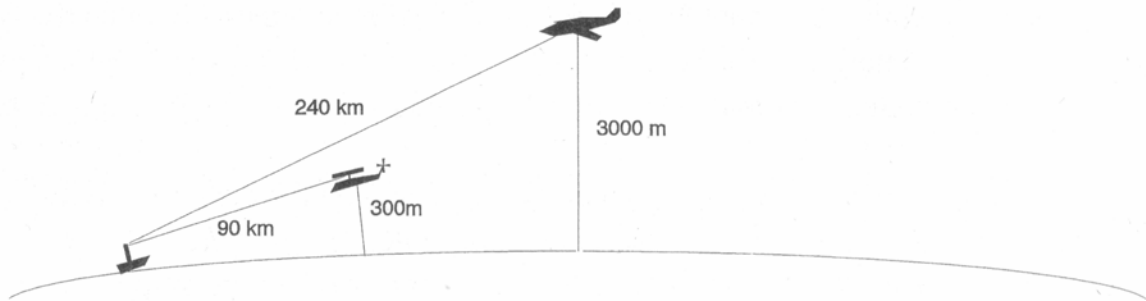
Ζώνη συχνοτήτων	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου - E (V/m)	Ένταση μαγνητικού πεδίου - H (A/m)	Μαγνητική επαγωγή πεδίου - B (μT)	Ισοδύναμη πυκνότητα ισχύος επιπέδου κύματος S <sub>eq</sub> (W/m <sup>2</sup> )
0-1 Hz	-	3.2x10 <sup>4</sup>	4x10 <sup>4</sup>	-
1-8 Hz	10.000	3.2x10/f <sup>4</sup>	4x10 <sup>4</sup> /f <sup>2</sup>	-
8-25 Hz	10 000	4.000/f	5.000/f	-
0.025-0.8 kHz	250/f	4/f	5/f	-
0.8-3 kHz	250/f	5	6.25	-
3-150 kHz	87	5	6.25	-
0.15-1 MHz	87	0.73/f	0.92/f	-
1-10 MHz	87/ f <sup>1/2</sup>	0.73/f	0.92/f	-
10-400 MHz	28	0.073	0.092	2
400-2000 MHz	1.375 f <sup>1/2</sup>	0.0037 f <sup>1/2</sup>	0.0046 f <sup>1/2</sup>	f/200
2-300 GHz	61	0.16	0.20	10

Πίνακας 5.5 : Επίπεδα αναφοράς για ηλεκτρικά, μαγνητικά και ηλεκτρομαγνητικά πεδία (0 Hz - 300 GHz, σταθερές τιμές rms).

## 5.5 Ναυτικές επικοινωνίες οπτικής επαφής (LOS) σε VHF/UHF συχνότητες

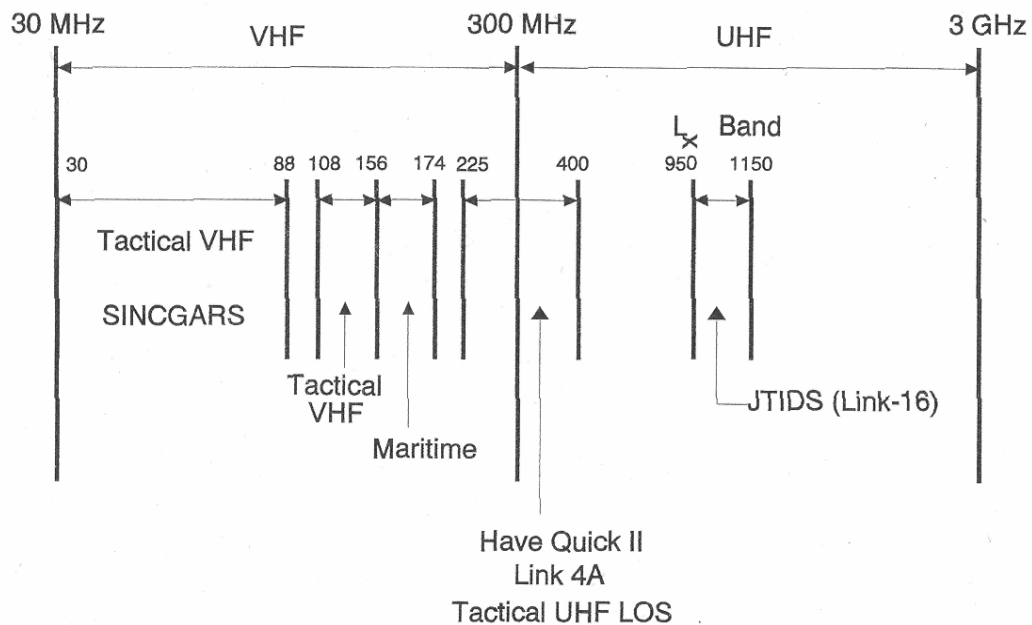
### 5.5.1 Εισαγωγή

Το ραδιοφάσμα ανάμεσα στα 30 MHz και στα 300 MHz αναφέρεται ως VHF μπάντα και αντίστοιχα η ζώνη συχνοτήτων από 300 MHz μέχρι τα 3 GHz ως UHF [6]. Οι ναυτικές επικοινωνίες στα VHF/UHF πραγματοποιούνται κυρίως κατά ευθείες οπτικής επαφής (Line Of Sight) και καλύπτουν ένα μεγάλο ποσοστό των επικοινωνιών μεταξύ πλοίων (Ship-to-Ship), μεταξύ πλοίων και παρακτίων σταθμών (Ship-to-Shore) και μεταξύ πλοίων και αεροπορικών μονάδων όπως αεροπλάνα ή ελικόπτερα (Ship-to-Air) (σχήμα 5.11).



Σχήμα 5.11 : Επικοινωνίες VHF/UHF μεταξύ πλοίων και αεροπορικών μονάδων.

Στο σχήμα 5.12 φαίνονται οι περιοχές του VHF/UHF ραδιοφάσματος που έχουν ανατεθεί σε επικοινωνίες στρατιωτικού χαρακτήρα.



Σχήμα 5.12 : Χρήση VHF/UHF συχνοτήτων Πολεμικού Ναυτικού.

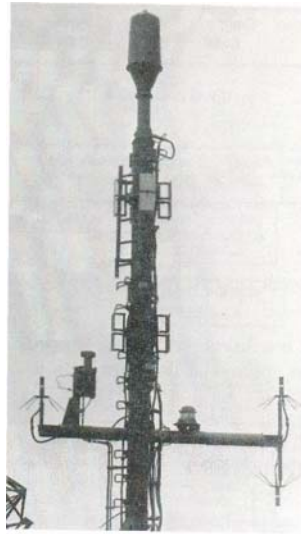
Συγκεκριμένα, η περιοχή από 30 MHz μέχρι και 88 MHz χρησιμοποιείται αποκλειστικά για τακτικές επικοινωνίες (στρατιωτικού χαρακτήρα και σε τοπική εμβέλεια μέχρι 50 km) πολεμικών πλοίων και παρακτίων σταθμών ή μονάδων (Ship-to-Shore) σε περιπτώσεις αμφίβιων επιχειρήσεων. Η περιοχή μεταξύ 108 MHz και 156 MHz χρησιμοποιείται επίσης για τακτικές επικοινωνίες πολεμικών πλοίων και παρακτίων σταθμών ή μονάδων (Ship-to-Shore) αλλά και για επικοινωνίες μεταξύ πολεμικών πλοίων και εμπορικών αεροπορικών μονάδων (Ship-to-Air Commercial). Η περιοχή μεταξύ 156 MHz και 174 MHz χρησιμοποιείται για επικοινωνίες πολεμικών πλοίων και εμπορικών πλοίων (Ship-to-Ship Commercial). Η περιοχή μεταξύ 225 MHz και 400 MHz χρησιμοποιείται για τακτικές επικοινωνίες πολεμικών πλοίων και πολεμικών αεροπορικών μονάδων (Ship-to-Ship, Ship-to-Air). Τέλος, η περιοχή μεταξύ 950 MHz και 1150 MHz χρησιμοποιείται για συστήματα αντί-παρεμβολών (anti-jamming radios).

Η ζώνη των VHF/UHF παρουσιάζει τα εξής πλεονεκτήματα :

1. Χρησιμοποιούνται μικρότερες κεραιές σε σχέση με τις αντίστοιχες των HF συχνοτήτων.
2. Επειδή η επικοινωνία συμβαίνει κατά ευθείες οπτικής επαφής (LOS), παρουσιάζει χαμηλή πιθανότητα εντοπισμού.
3. Το μεγάλο εύρος ζώνης που διαθέτουν καθιστά αποδοτική και συνεπώς ιδιαίτερα χρήσιμη τη χρησιμοποίηση τεχνικών όπως η διασπορά φάσματος (spread spectrum) και η αναπήδηση συχνότητας (frequency hopping).
4. Χαμηλή απόσταση ραδιοκάλυψης, όταν είναι επιθυμητό, μπορεί να επιτευχθεί εύκολα με μείωση της ισχύος εκπομπής.

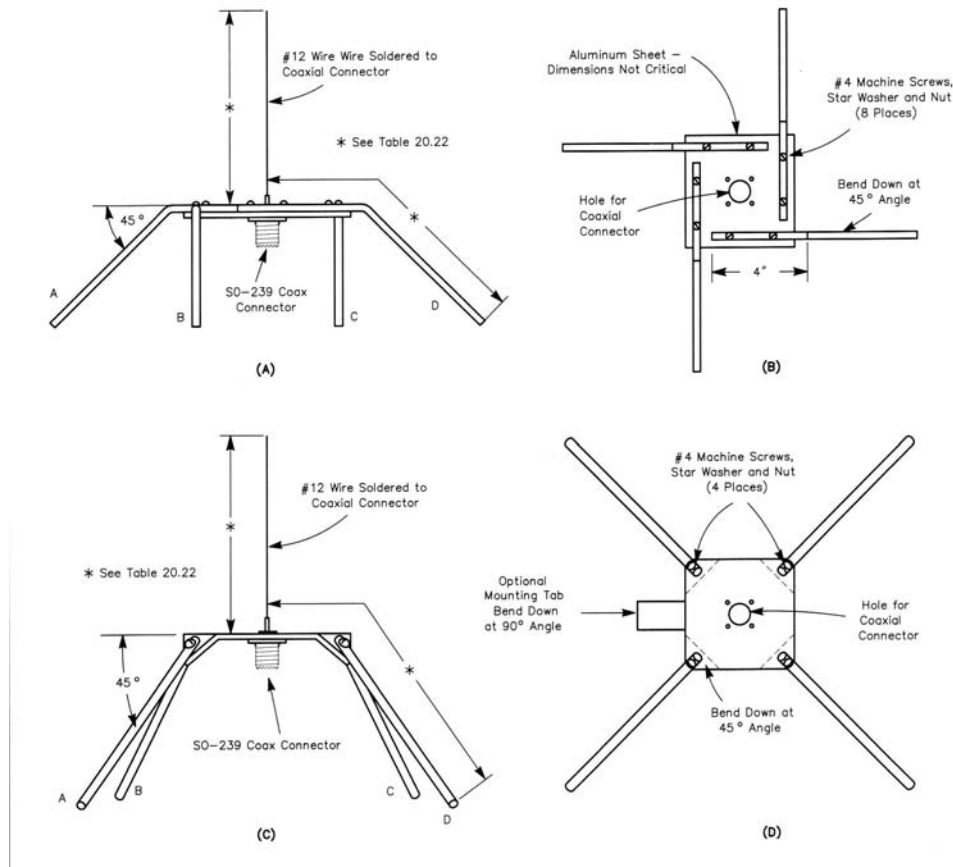
### ***5.5.2 Ground Plane VHF/UHF κεραιές σε πλοία***

Ο συνηθέστερος τύπος VHF/UHF κεραιών σε πλοία είναι οι κεραιές ground plane. Έχουν ενεργό μήκος ίσο με  $\lambda/4$  και διαθέτουν διάγραμμα ακτινοβολίας περίπου ίδιο με αυτό του αντιστοίχου δίπολου. Οι ground plane κεραιές εγκαθίσταται στα κατάρτια του πλοίου, πρώτον, διότι εκεί επηρεάζεται λιγότερο από την υπερκατασκευή του πλοίου και δεν αλλοιώνεται το επιθυμητό ομοιοκατευθυντικό ως προς φ διάγραμμα ακτινοβολίας τους και, δεύτερον, διότι ευρισκόμενες στο ψηλότερο σημείο διαθέτουν αυξημένο οπτικό ορίζοντα. Οι κεραιές ground plane χρησιμοποιούνται ως εφεδρικό σύστημα των multi κεραιών για την επικοινωνία του πολεμικού πλοίου με κάθε είδους άλλη μονάδα στρατιωτικού (Ship-to-Ship, Ship-to-Air) ή εμπορικού χαρακτήρα (Ship-to-Air Commercial, Ship-to-Ship Commercial). Στο σχήμα 5.13 που ακολουθεί παρατηρούνται 3 συνολικά ground plane κεραιές εγκατεστημένες στα άκρα ενός καταρτιού με τη multi κεραία εγκαταστημένη στο μέσον του.



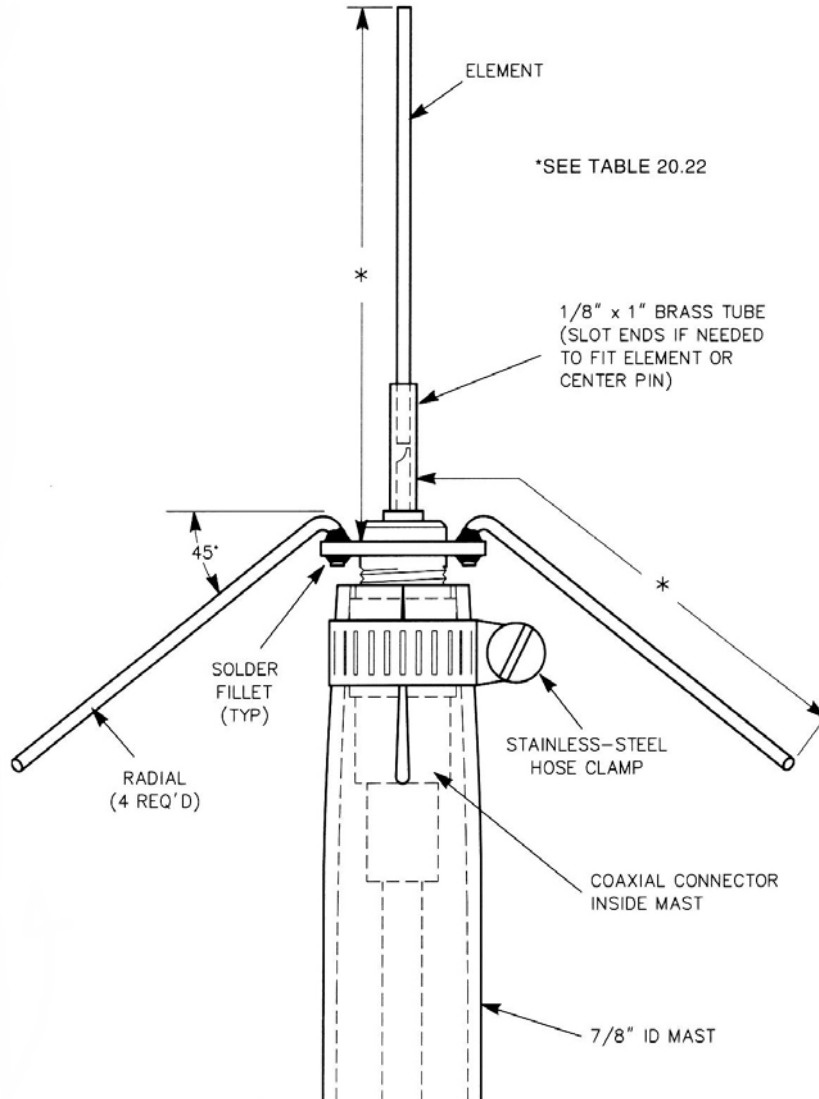
Σχήμα 5.13 : Ground plane κεραιές εγκατεστημένες σε κατάρτι.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι ground plane κεραιών όπως οι 4 που φαίνονται στο σχήμα 5.14 [11]. Από αυτούς συνηθέστερος στα πλοία είναι ο τρίτος κατά σειρά τύπος που φέρει ένα κάθετο στέλεχος μήκους  $\lambda/4$  στην κορυφή του και 4 ακτινωτά στελέχη κατακόρυφου μήκους επίσης  $\lambda/4$ . Τα ακτινωτά στελέχη σχηματίζουν  $45^\circ$  γωνία με τη βάση, ώστε να επιτυγχάνουν προσαρμογή σε γραμμή μεταφοράς των 50  $\Omega$ .



Σχήμα 5.14 : Είδη ground plane κεραιών.

Οι κεραιές ground plane μολονότι έχουν περίπου ίδιο διάγραμμα ακτινοβολίας με τα αντίστοιχα μονόπολα  $\lambda/2$ , προτιμούνται λόγω δυο πολύ χρήσιμων ιδιοτήτων που έχουν. Πρώτον διαθέτουν μεγάλη ευρυζωνικότητα από τα 120 MHz έως και τα 400 MHz. Είναι χαρακτηριστικό ότι εμφανίζουν VSWR 2 : 1 σε αυτό το εύρος συχνοτήτων. Ακόμα λόγω του συστήματος τροφοδοσίας και προσαρμογής που διαθέτουν (σχήμα 5.15), ξεπερνούν τα προβλήματα που συναντώνται κατά την εγκατάσταση αντιστοίχων μονοπόλων σε οποιοδήποτε κατάρτι.



Σχήμα 5.15 : Σύστημα τροφοδοσίας ground plane κεραιών.

## 5.6 *TINCODEROGA CLASS CRUISER*

### 5.6.1 *Εισαγωγή*

Το δεύτερο πολεμικό πλοίο που μελετήθηκε σε περιβάλλον θάλασσας ήταν το TINCODEROGA CLASS CRUISER σχήμα 5.16 .



**Σχήμα 5.16 : Tincoderoga Class Cruiser.**

Αρχικά, η μελέτη περιέλαβε την προσομοίωση 4 HF κεραιών που φέρει το πολεμικό πλοίο. Η επίλυση έγινε χρησιμοποιώντας τη MoM και κατασκευάζοντας το wire grid μοντέλο του πλοίου. Υπολογίστηκαν τα διαγράμματα ακτινοβολίας μακρινού πεδίου των κεραιών στις συχνότητες ενδιαφέροντος των 2, 5 και 7 MHz και παρατέθηκαν σε μορφή πίνακα τα συγκριτικά στοιχεία της προσομοίωσης.

Στη συνέχεια, προσομοιώθηκαν 8 VHF/UHF ground plane κεραιές που φέρει στα 2 του κατάρτια. Η επίλυση έγινε χρησιμοποιώντας την UTD και κατασκευάζοντας το μοντέλο πλακών και κυλίνδρων του πλοίου. Υπολογίστηκαν τα διαγράμματα ακτινοβολίας μακρινού πεδίου των κεραιών στις συχνότητες ενδιαφέροντος των 400, 350, 160 και 130 MHz και παρατέθηκαν σε μορφή πίνακα τα συγκριτικά στοιχεία της προσομοίωσης. Ακόμα έγινε μελέτη των συζεύξεων μεταξύ των κεραιών αυτών και παρατέθηκε σχετικός πίνακας τιμών.

### 5.6.2 Μελέτη HF κεραιών

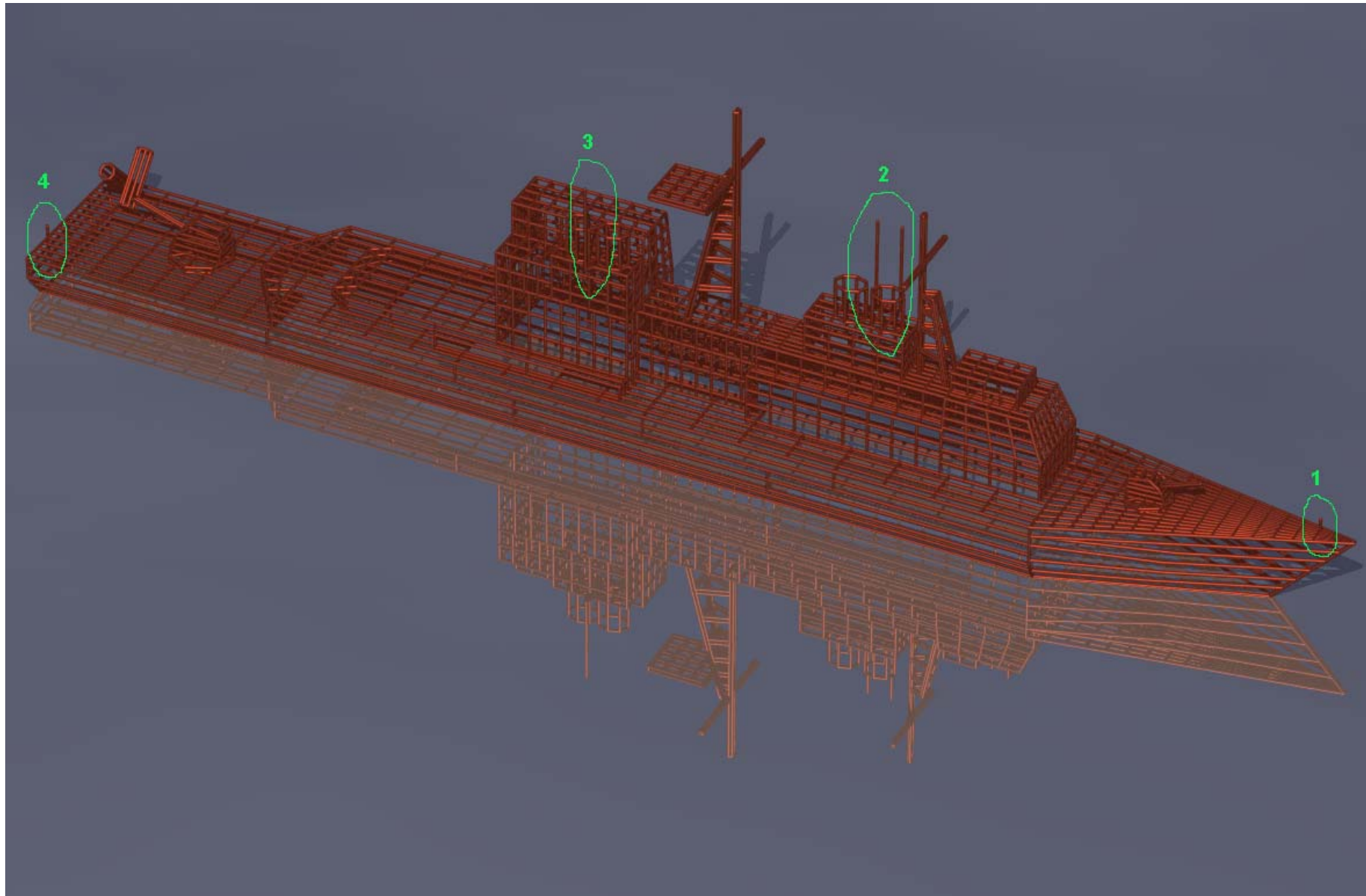
Οι διαστάσεις αυτού του πλοίου σύμφωνα με [10] είναι 172.8 x 16.8 x 9.5 m (από Sonar). Για τις συχνότητες μελέτης των 2, 5 και 7 MHz, οι αντίστοιχες ηλεκτρικές διαστάσεις, με βάση τη μέγιστη διάσταση των 172.8 m, είναι 1.15, 2.9 και 4. Η μελέτη για τις συχνότητες των 2 και 5 MHz κατατάσσεται στα προβλήματα χαμηλών ηλεκτρικών διαστάσεων και, επομένως, μπορεί να επιλυθεί με χρήση της MoM. Για τη συχνότητα των 7 MHz, η μελέτη κατατάσσεται και στα προβλήματα των υψηλών ηλεκτρικών διαστάσεων. Όμως, λόγω του ότι οι αποστάσεις των τμημάτων της υπερκατασκευής του πλοίου είναι μικρότερες σε πολλά σημεία από  $\lambda/4$ , δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί η UTD για την επίλυση του. Έτσι και στη περίπτωση αυτή, χρησιμοποιείται η MoM, ως είναι απαιτητική.

Με χρήση των προγραμμάτων 3DSTUDIO MAX για τη μοντελοποίηση του πλοίου και κατόπιν του WGRID\_GEN (GETEN NEC2 GRID GENERATOR) σχηματίστηκε σε περιβάλλον θάλασσης το αντίστοιχο wire grid μοντέλο του πλοίου 5217 νημάτων διαστάσεων 162.4 x 19.3 x 23.6 m (από επιφάνεια θαλάσσης), όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 5.17 και προσομοιώθηκαν 4 κεραιές HF, δύο εκπομπής και δύο λήψης, που αυτό φέρει για τις συχνότητες μελέτης των 2, 5 και 7 MHz. Η θάλασσα προσομοιώθηκε με χρήση επίπεδης γης και για τις συχνότητες μελέτης έχει σύμφωνα με [12] τις εξής ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες :

$$\begin{aligned} \text{σχετική ηλεκτρική επιτρεπτότητα } \epsilon &= 70 \\ \text{σχετική μαγνητική διαπερατότητα } \mu &= 1 \\ \text{αγωγιμότητα } \sigma &= 5.0 \text{ S/m} \end{aligned}$$

Αρχικώς, παρατίθενται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ανά κεραία που αφορούν στην εύρεση του διαγράμματος ακτινοβολίας μακρινού πεδίου της εκάστοτε κεραιάς. Στη συνέχεια παρατίθενται σε μορφή πίνακα τα συγκριτικά στοιχεία αυτών των προσομοιώσεων που αφορούν τον αριθμό νημάτων που χρησιμοποιήθηκαν αρχικώς για την κατασκευή του wire grid μοντέλου, σε ποσοστό τμηματοποίησης, δηλαδή τον αριθμό segments ανά μήκος κύματος  $\lambda$ , τον αριθμό των segments που τελικά παρήχθησαν από τη διαδικασία τμηματοποίησης καθώς και στο χρόνο που χρειάστηκε για την εκτέλεση της προσομοίωσης.

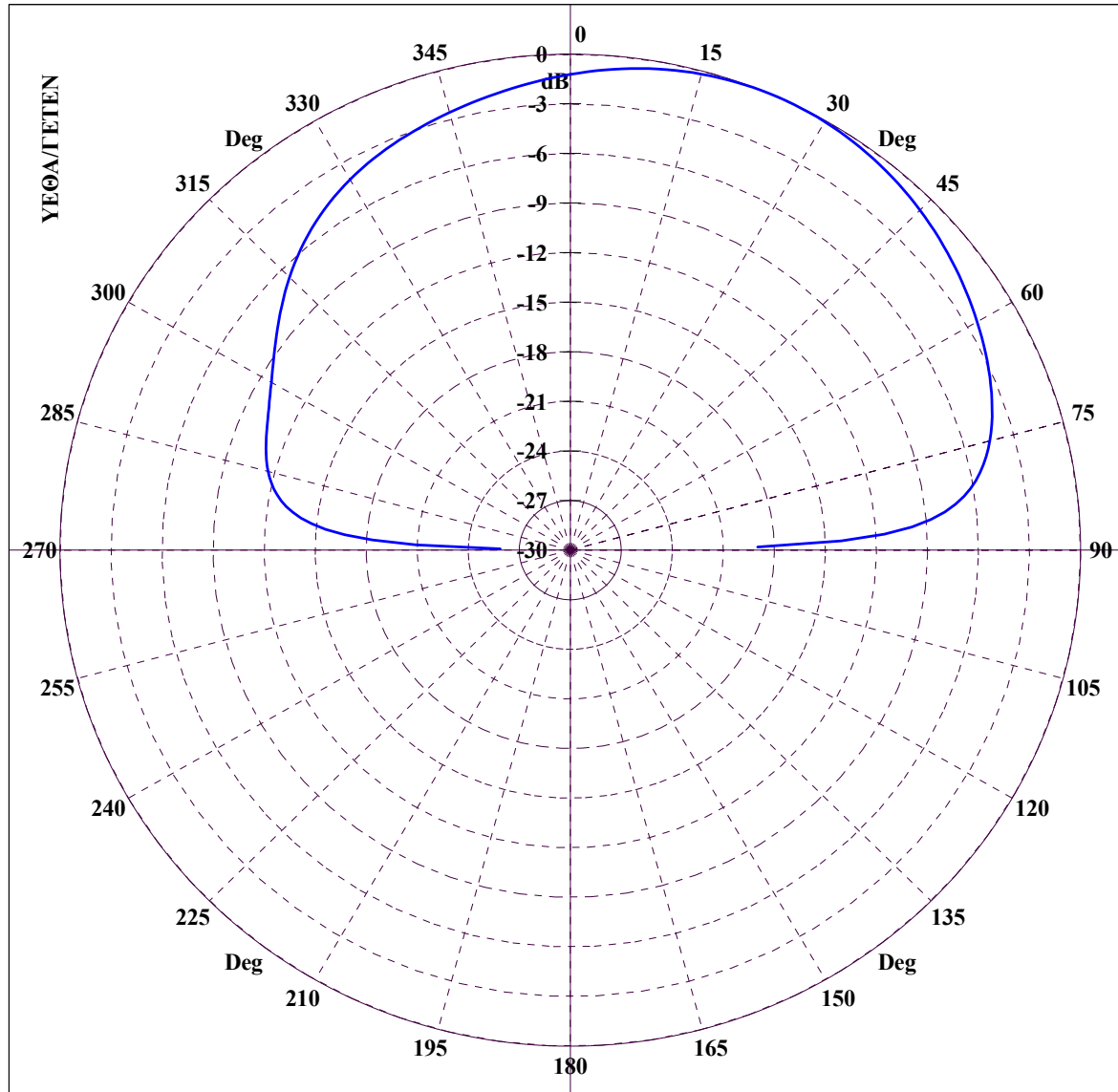




Σχήμα 5.17 : Wire grid Tincoderoga Class Cruiser με διαφαινόμενες τις 4 κεραίες που φέρει.

### *5.6.2.1 Διαγράμματα ακτινοβολίας μακρινού πεδίου κεραίας 1*

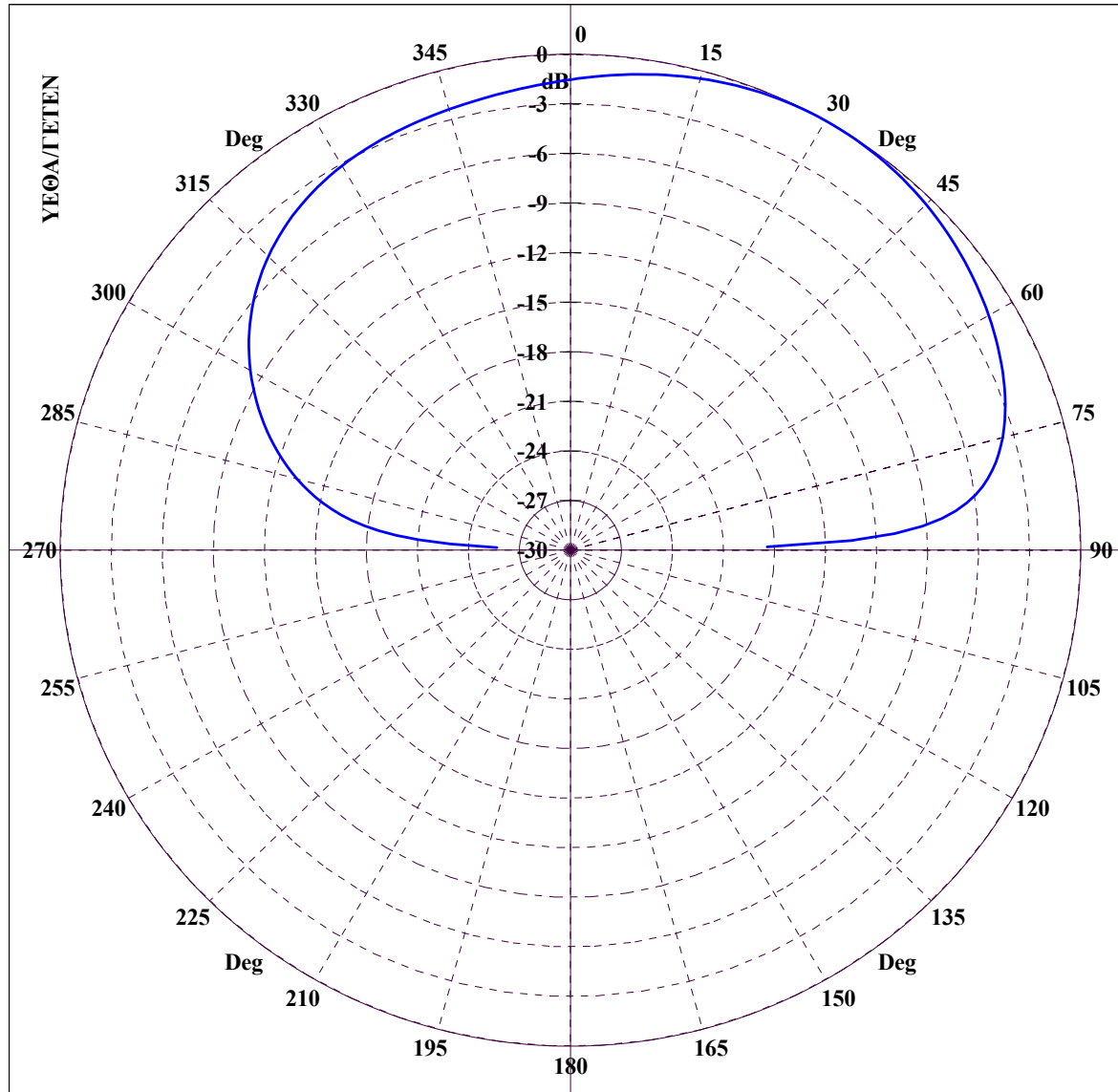
FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



File Name :CRU12-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 0.00$ ,  $\Theta=0-360$ , FREQUENCY = 2.00 MHz

Διάγραμμα 5.130 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 2 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 0^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

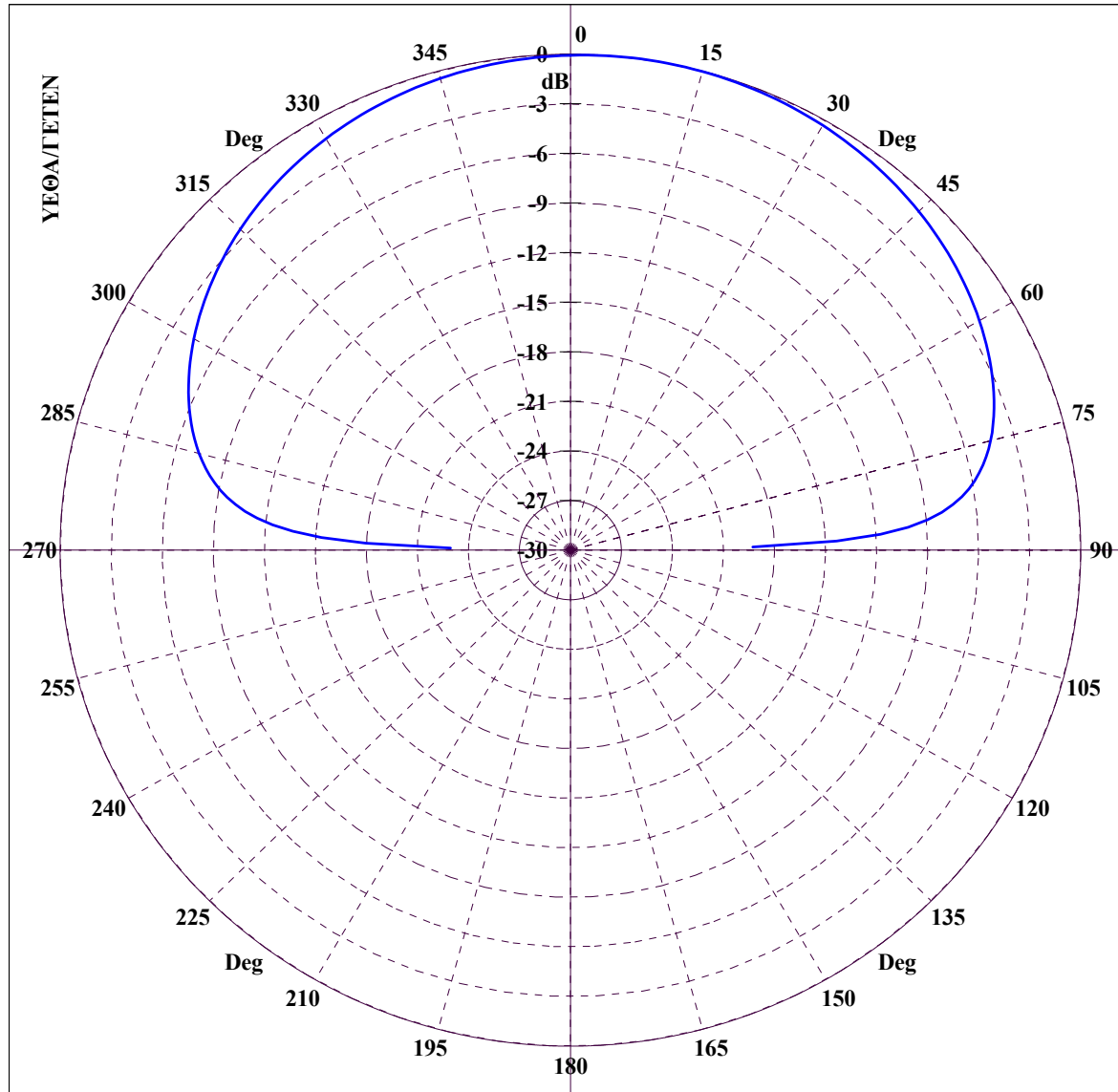
FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



File Name :CRU12-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 45.00$ ,  $\Theta = 0-360$ , FREQUENCY = 2.00 MHz

Διάγραμμα 5.131 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 2 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\varphi = 45^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

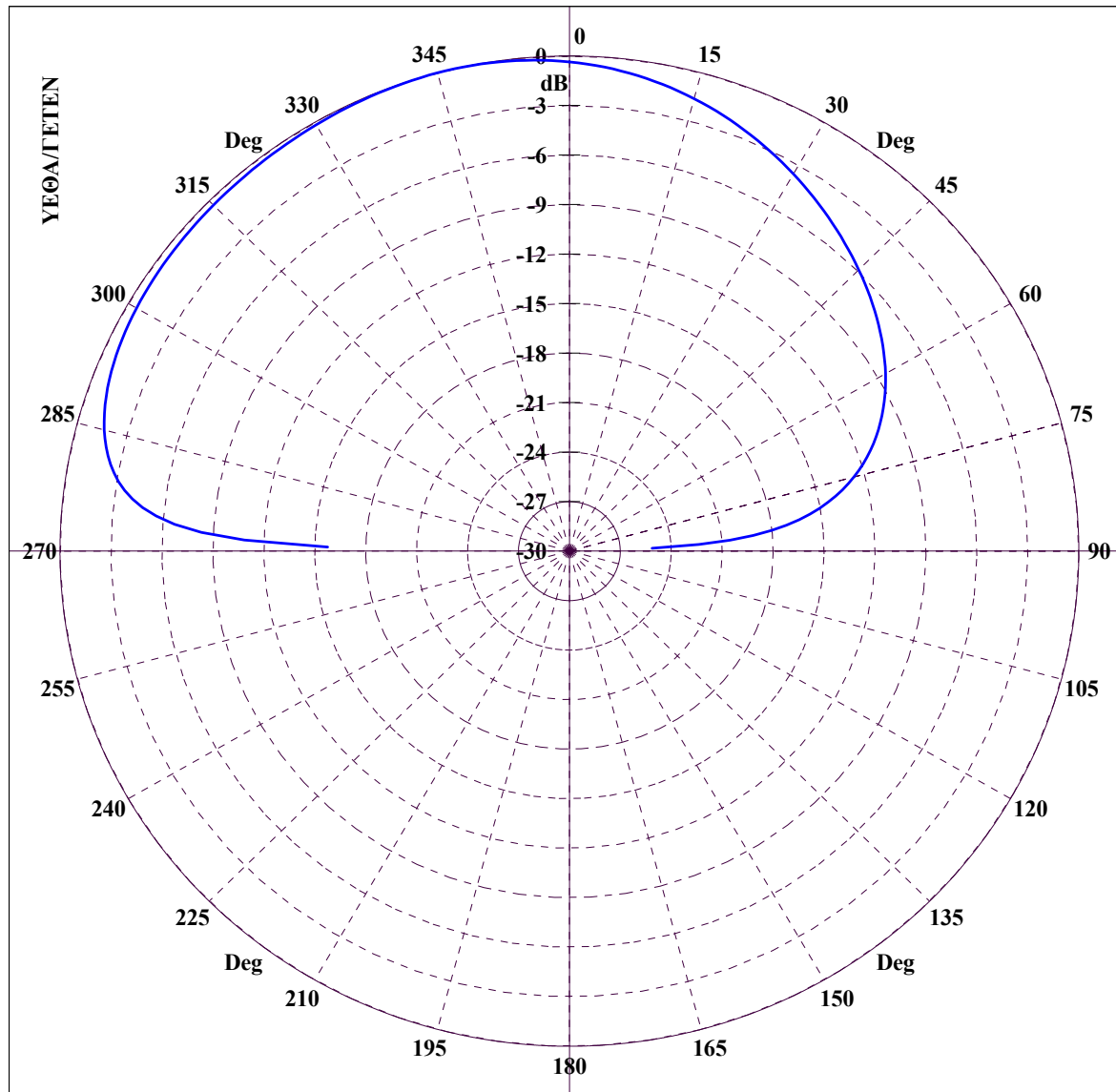
FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



File Name :CRU12-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 90.00$ ,  $\Theta = 0-360$ , FREQUENCY = 2.00 MHz

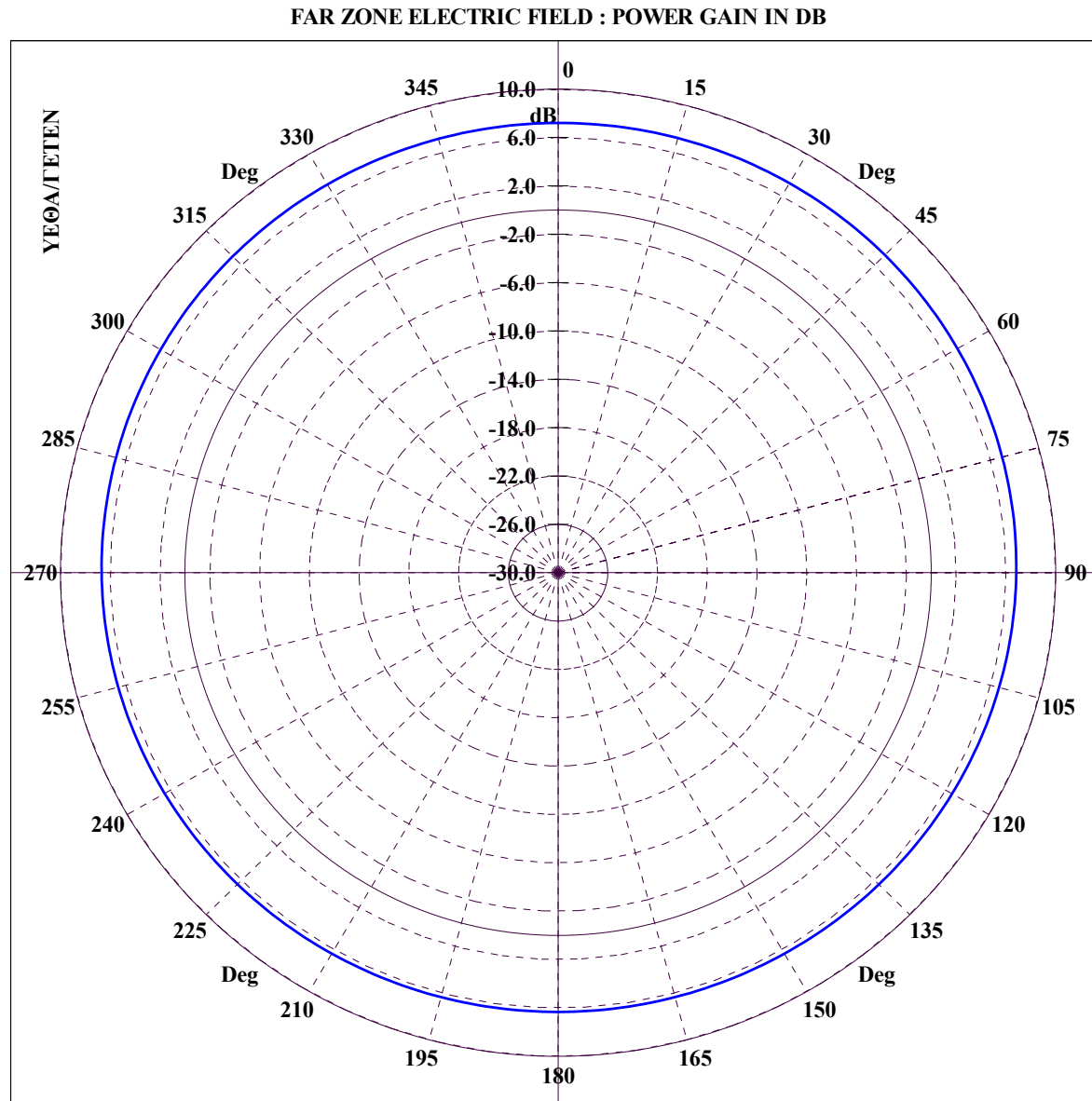
Διάγραμμα 5.132 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 2 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\varphi = 90^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



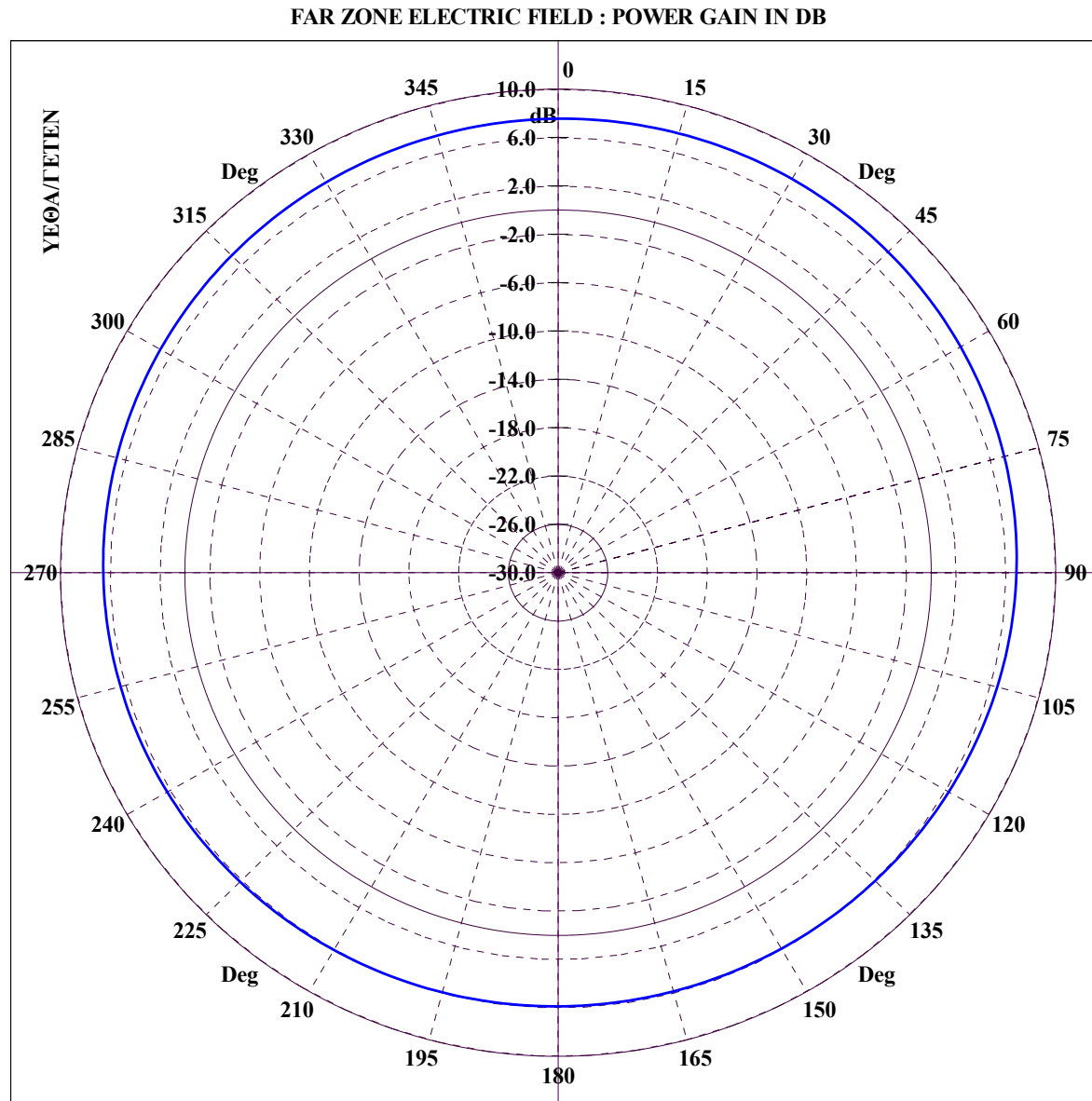
File Name :CRU12-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 135.00$ ,  $\Theta = 0-360$ , FREQUENCY = 2.00 MHz

Διάγραμμα 5.133 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 2 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 135^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .



File Name :CRU12-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 5.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 2.00 MHz

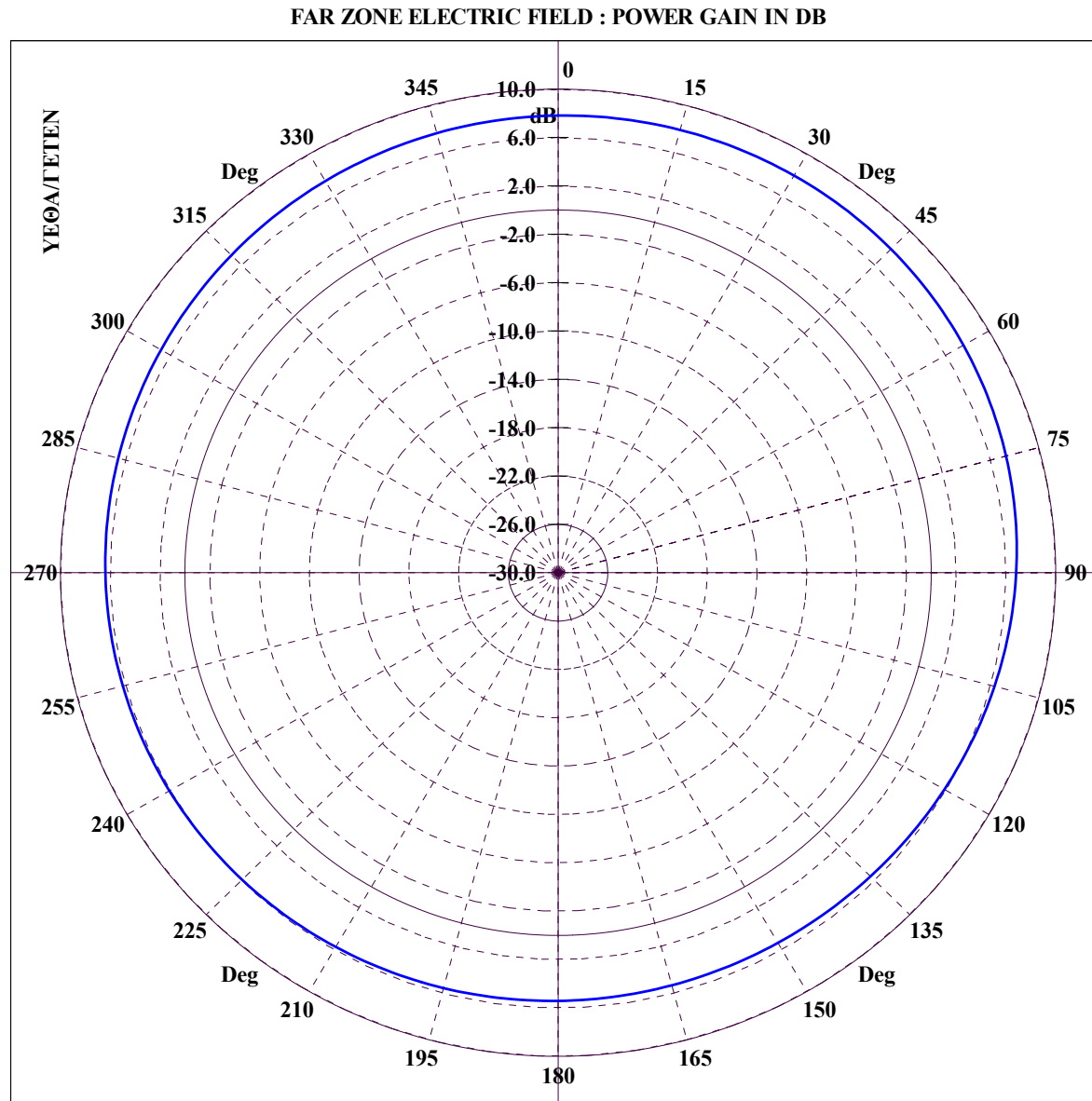
Διάγραμμα 5.134 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 2 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 5^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .



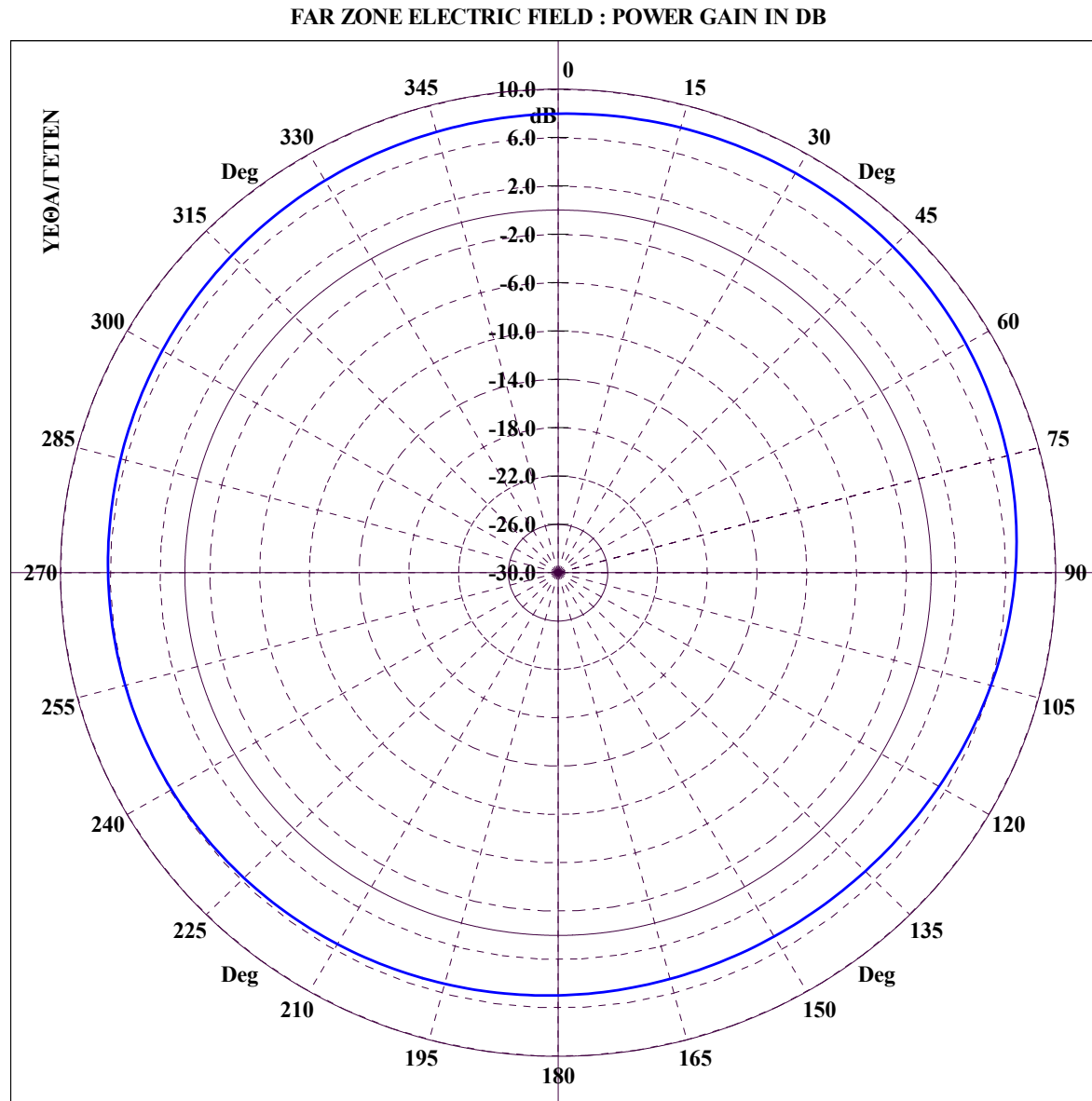
File Name :CRU12-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 10.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 2.00 MHz

Διάγραμμα 5.135 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 2 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 10^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .



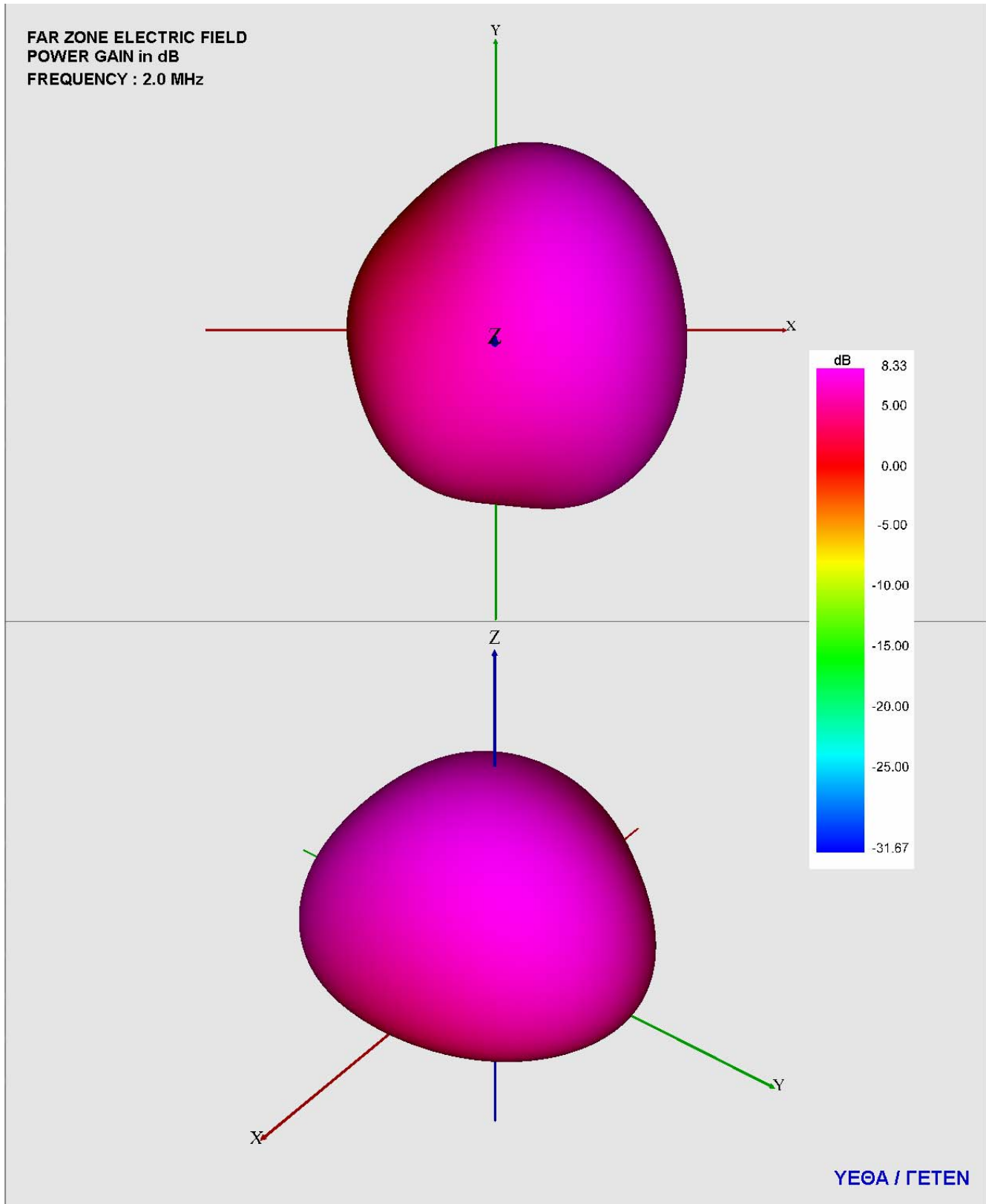


**Διάγραμμα 5.136 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 2 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 15^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .**



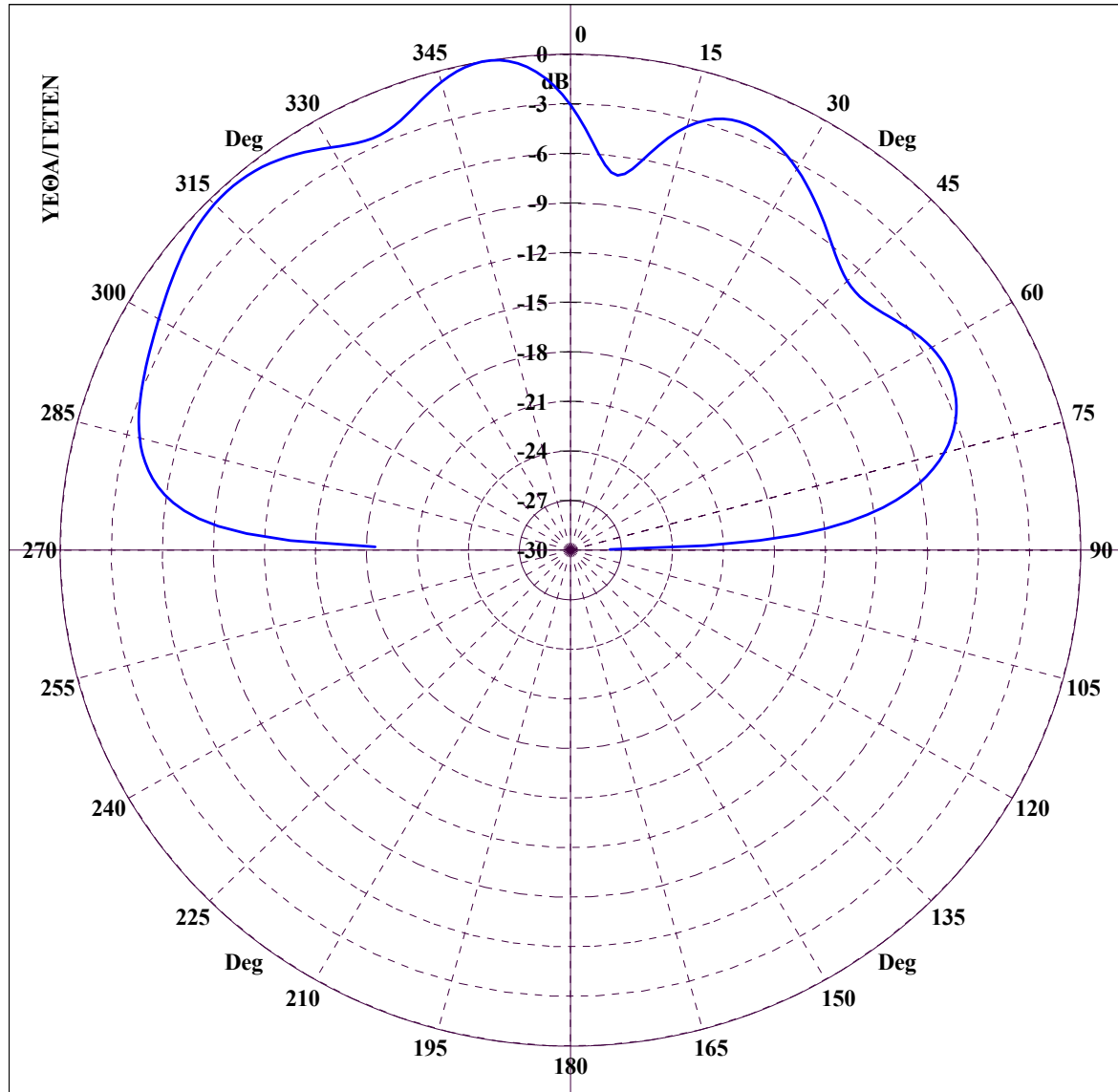
File Name :CRU12-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 20.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 2.00 MHz

Διάγραμμα 5.137 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 2 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 20^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .



Διάγραμμα 5.138 : CRUISER, 3D διάγραμμα κέρδους ισχύος για κεραία 1 σε συχνότητα 2 MHz με χρήση VRML.

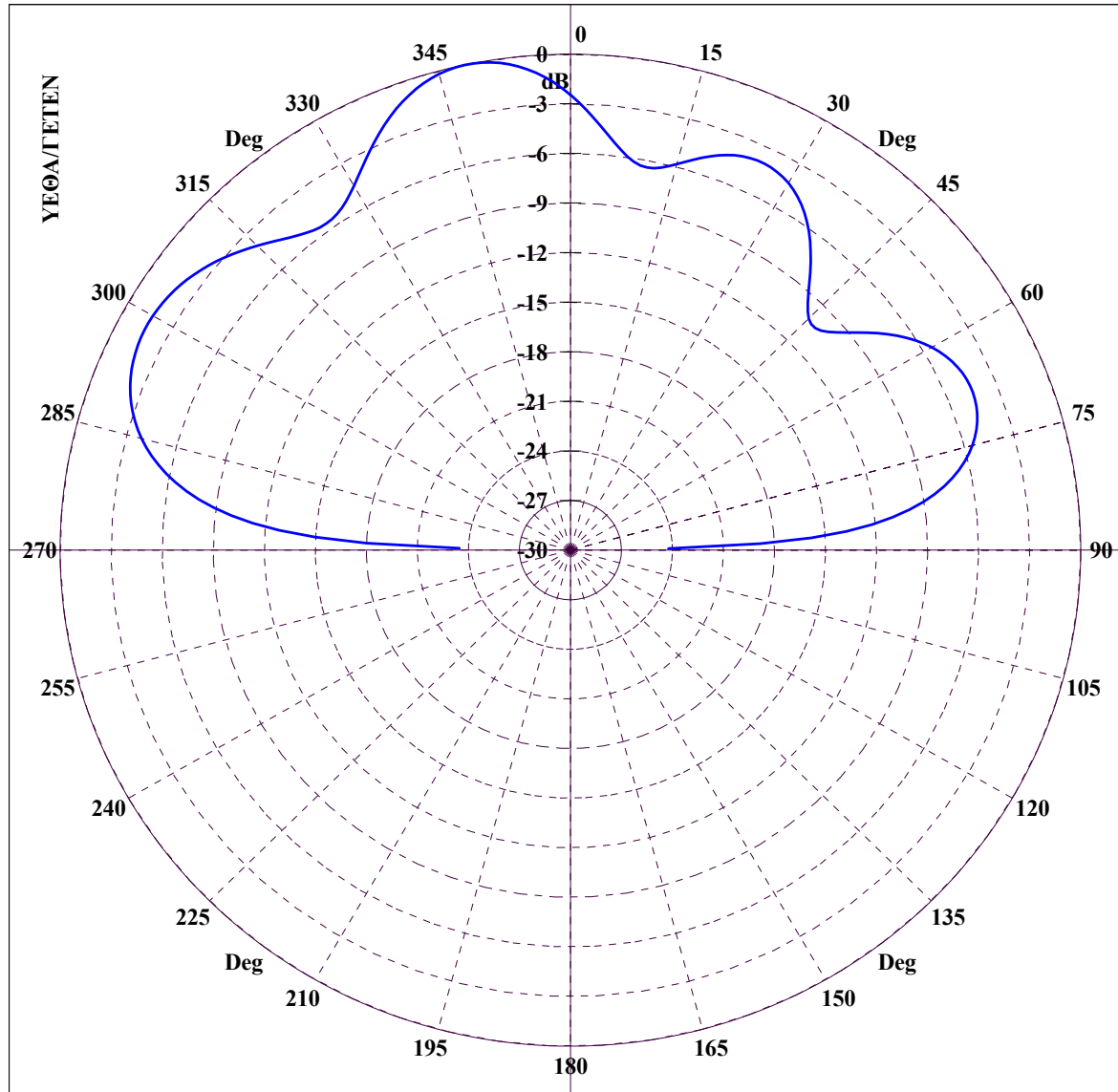
FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



File Name :CRU15-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 0.00$ ,  $\Theta=0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

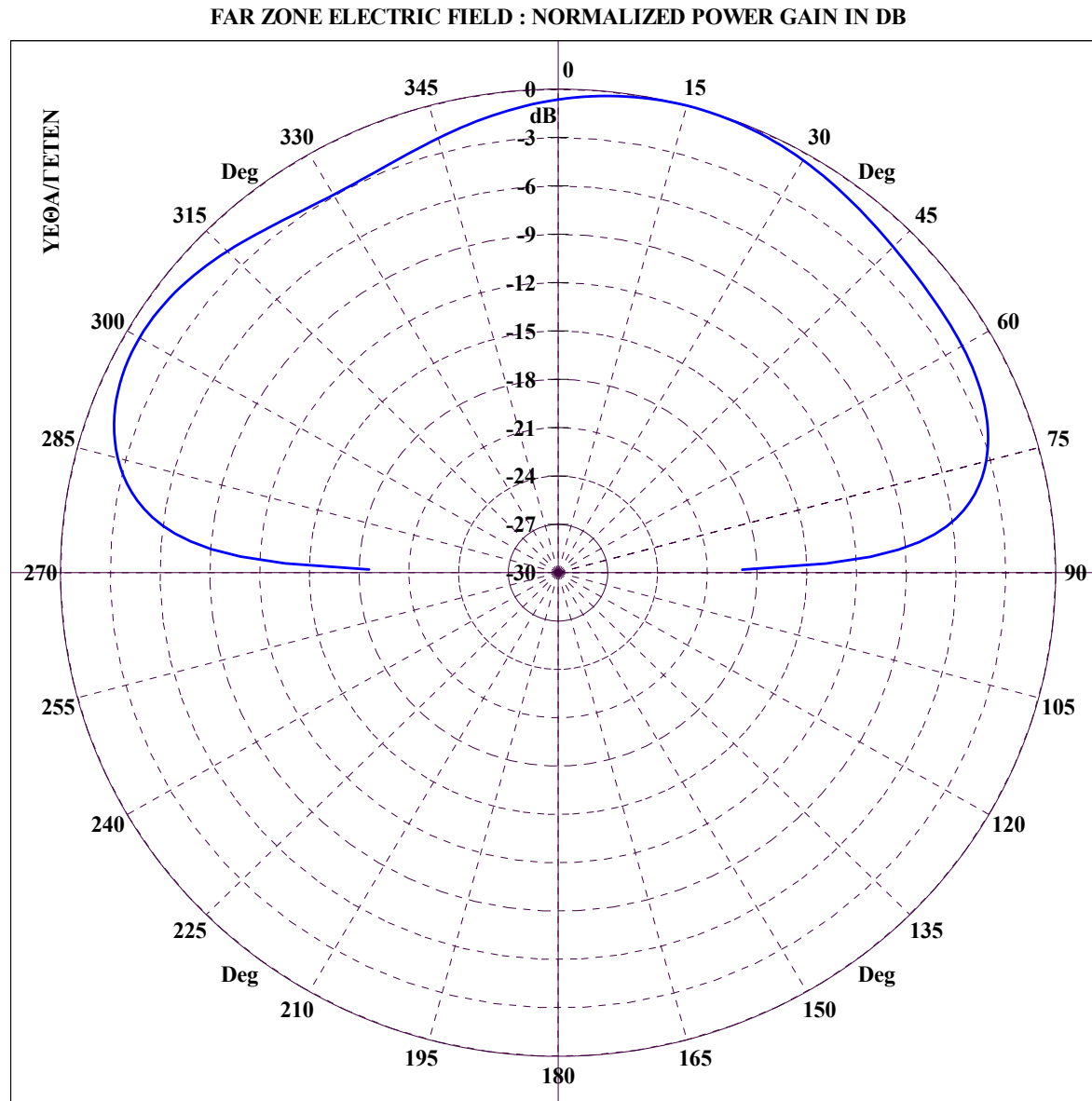
Διάγραμμα 5.139 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 0^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



File Name :CRU15-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 45.00$ ,  $\Theta = 0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

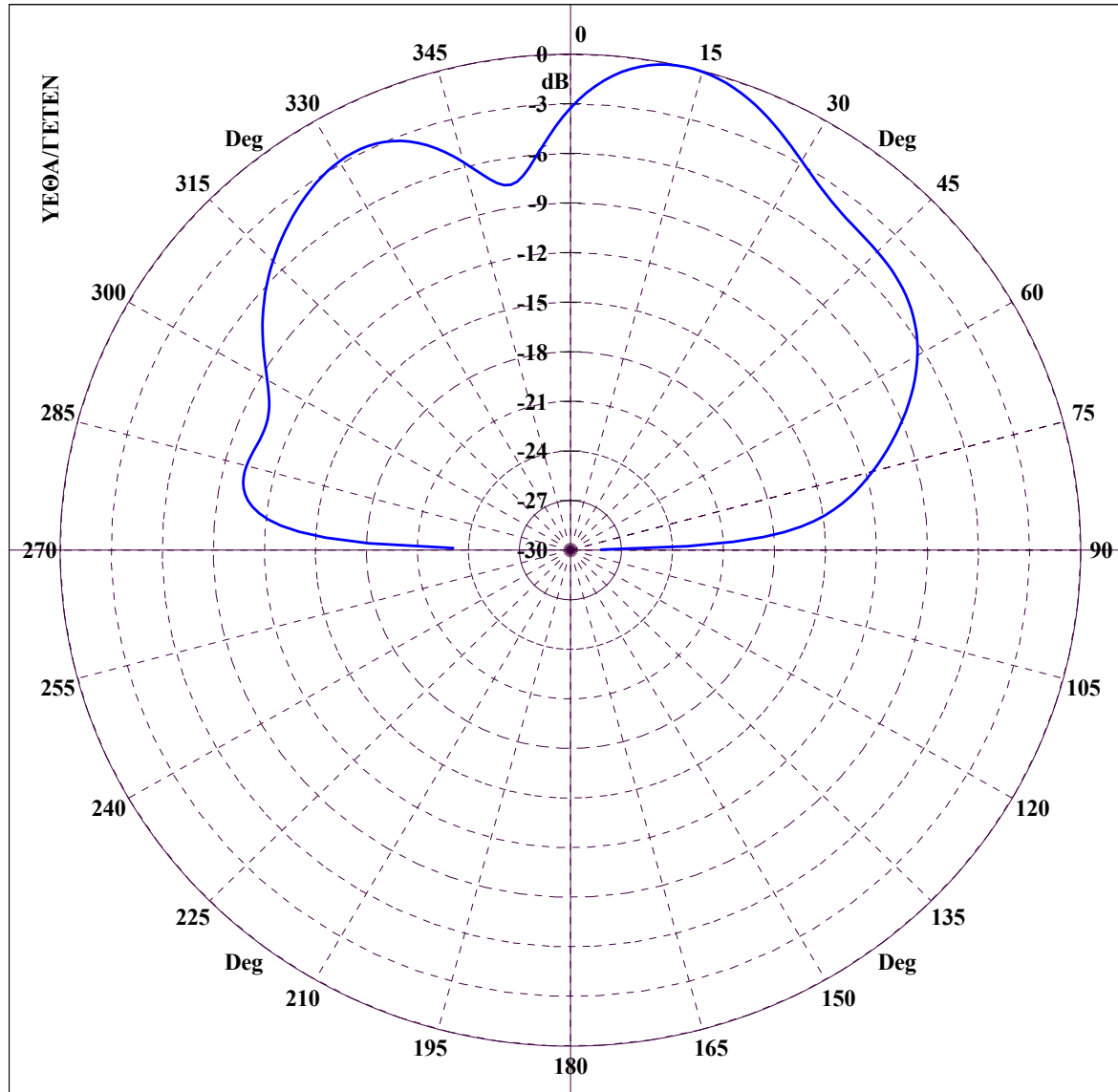
Διάγραμμα 5.140 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 45^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .



File Name :CRU15-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 90.00$ ,  $\Theta=0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

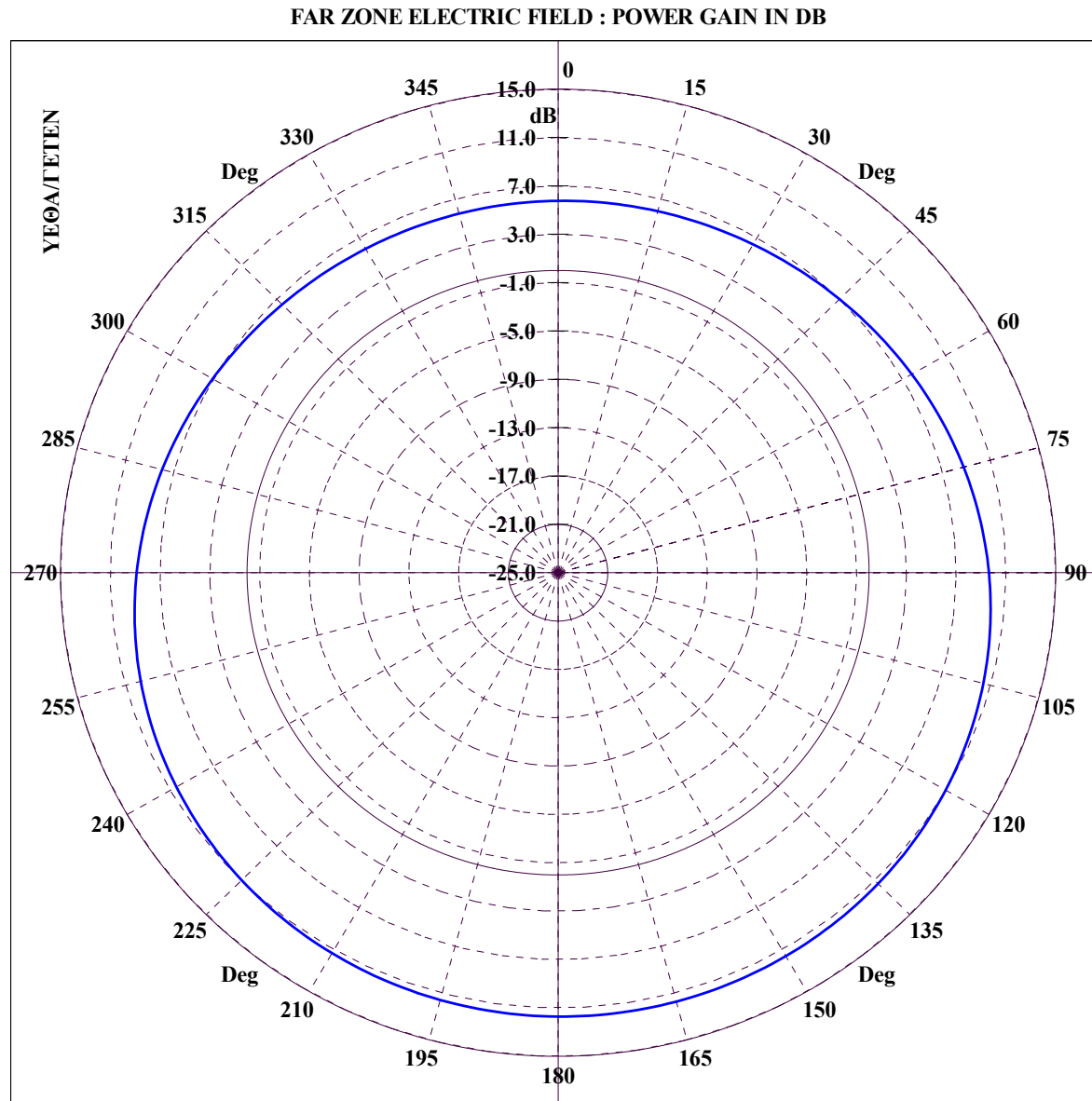
Διάγραμμα 5.141 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\varphi = 90^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



File Name :CRU15-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 135.00$ ,  $\Theta = 0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

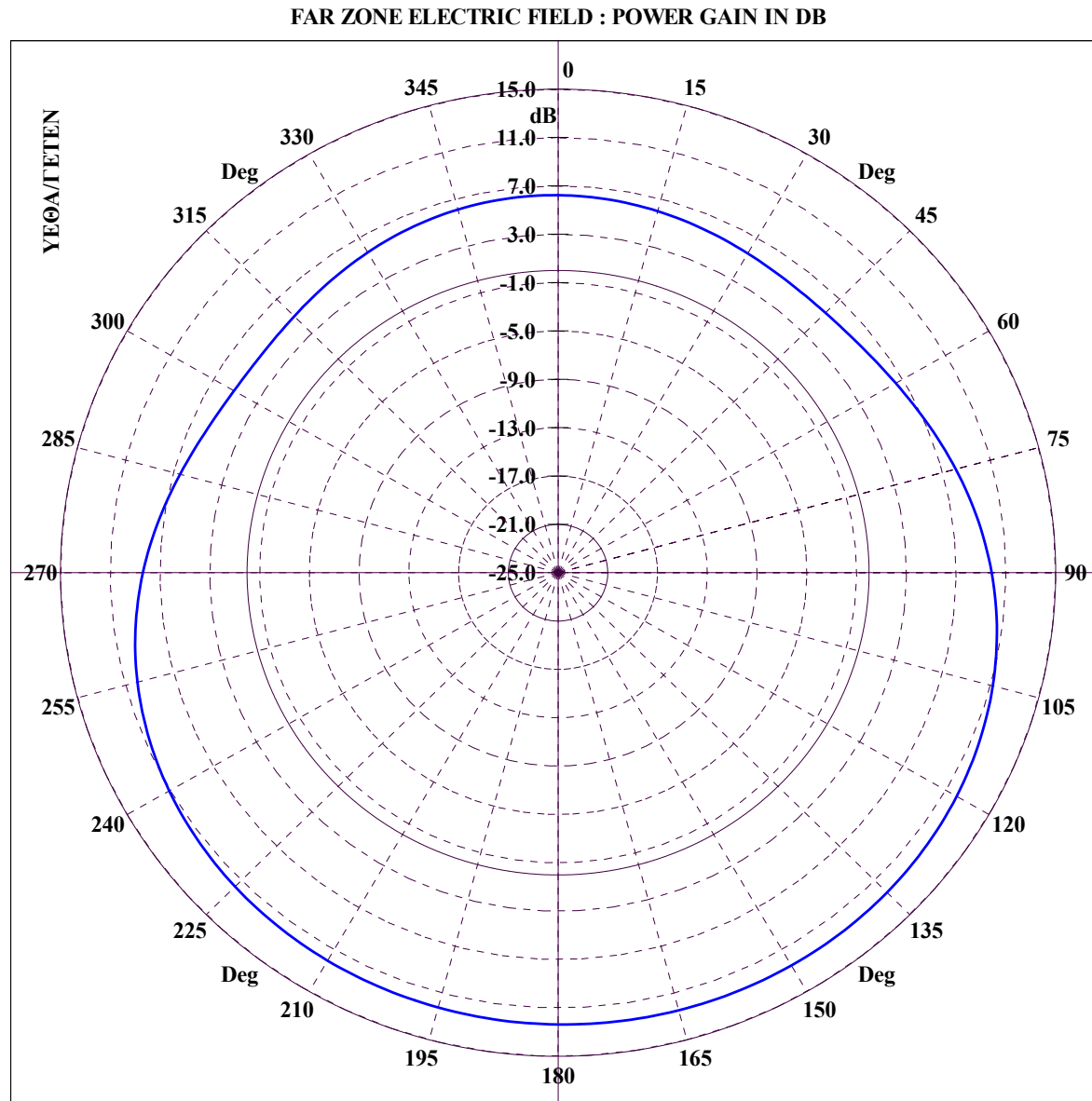
Διάγραμμα 5.142 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 135^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .



File Name :CRU15-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 5.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

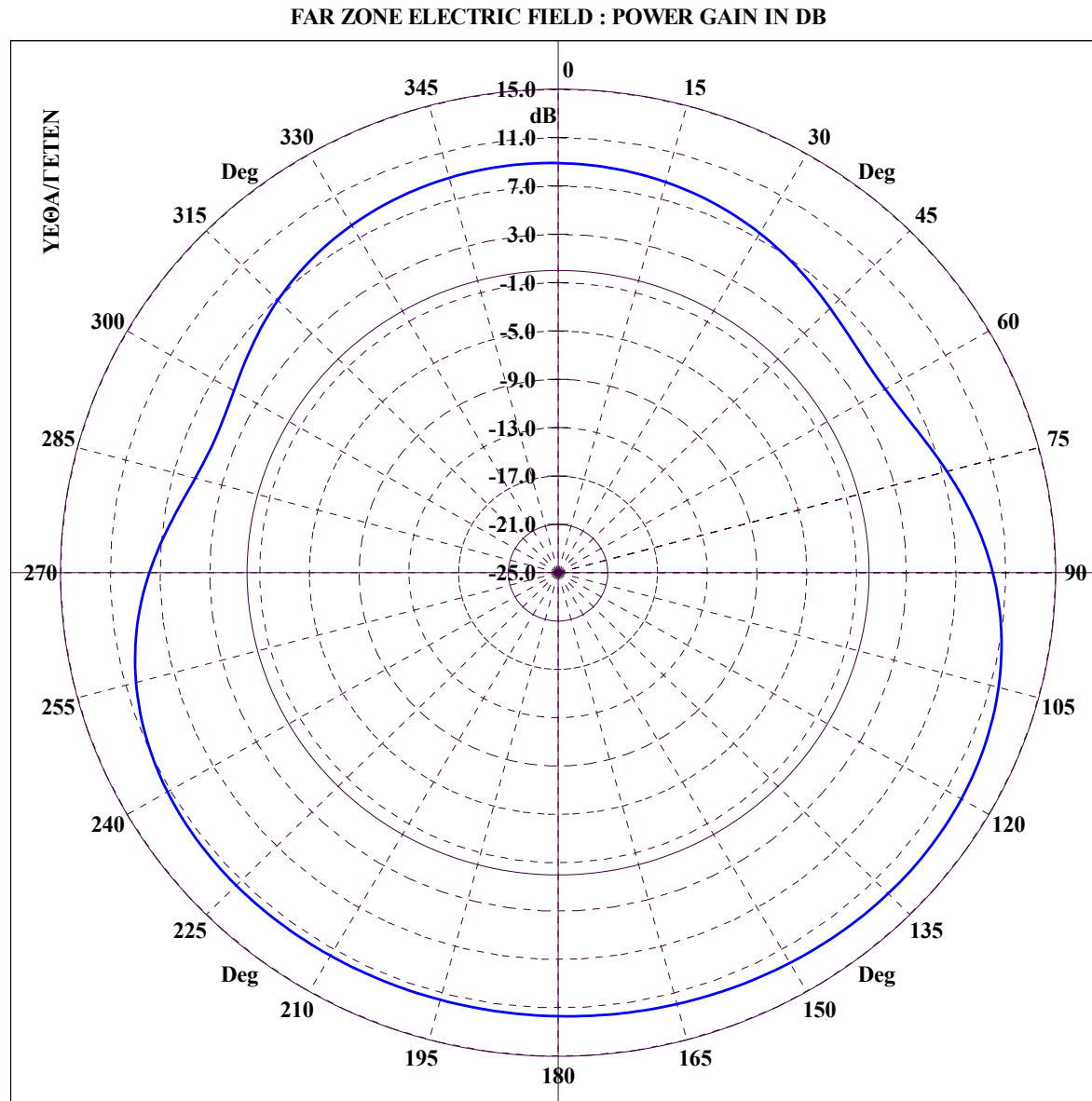
Διάγραμμα 5.143 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 5^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .





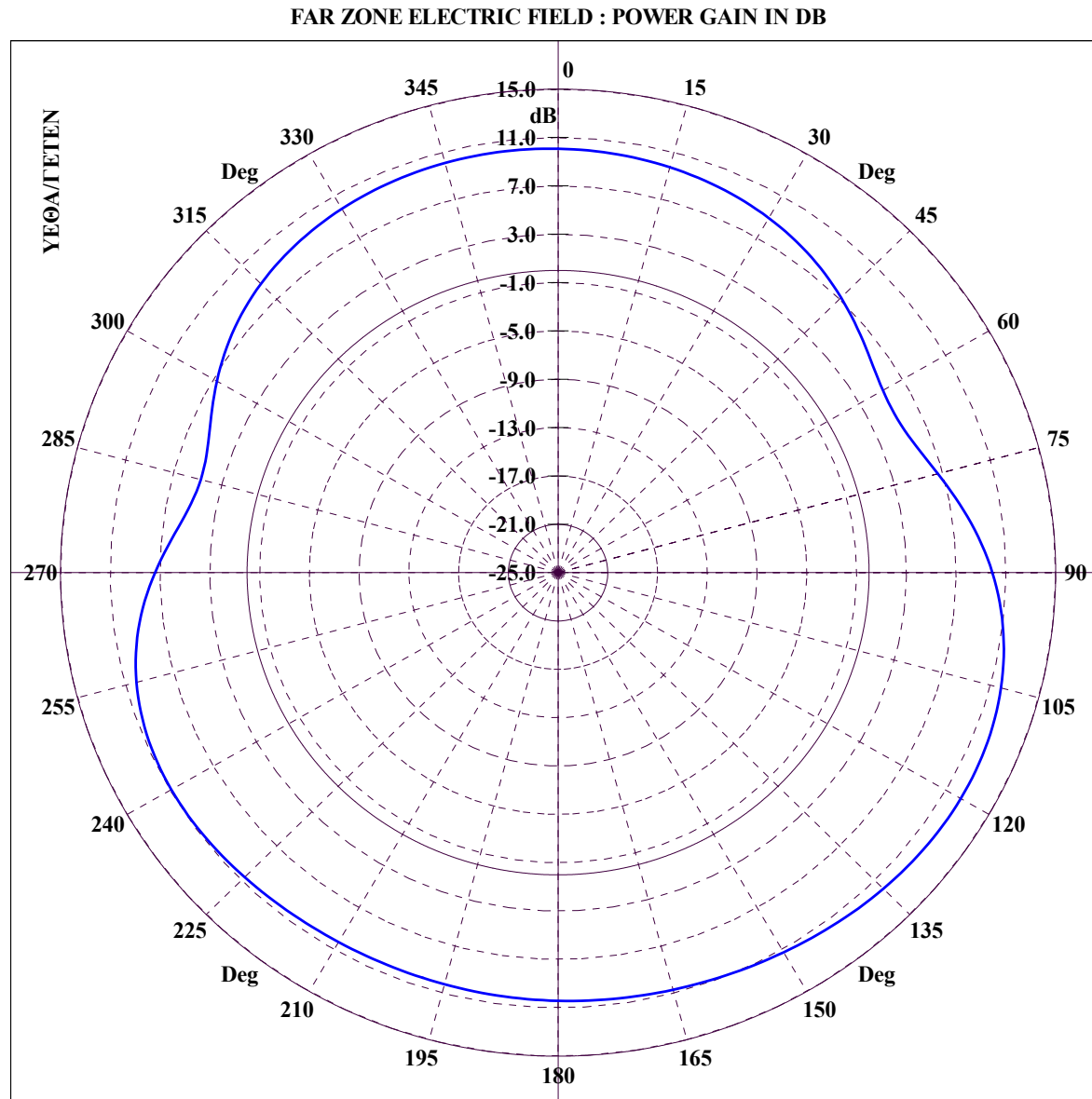
File Name :CRU15-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 10.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

Διάγραμμα 5.144 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 10^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .



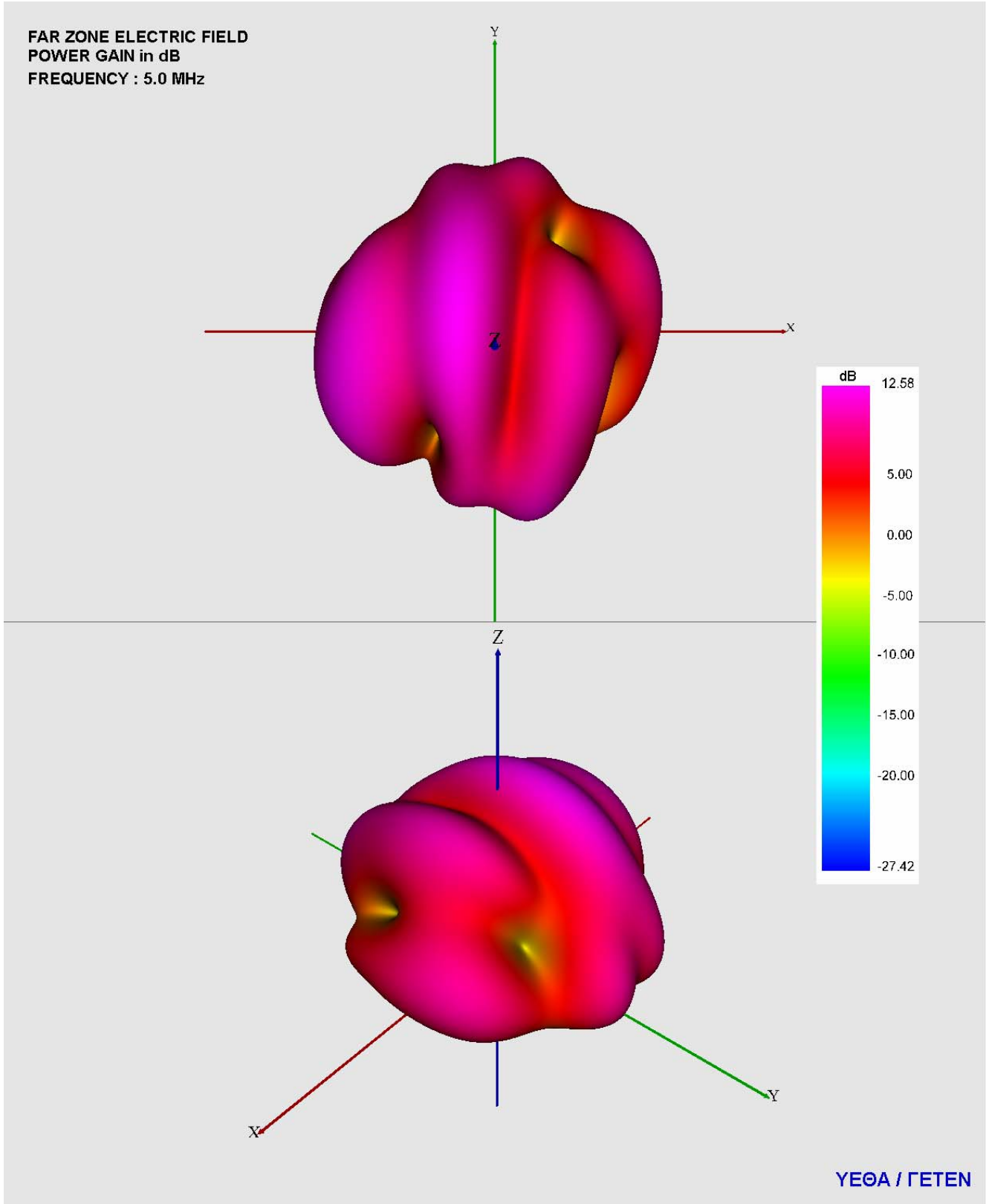
File Name :CRU15-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 15.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

Διάγραμμα 5.145 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 15^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .



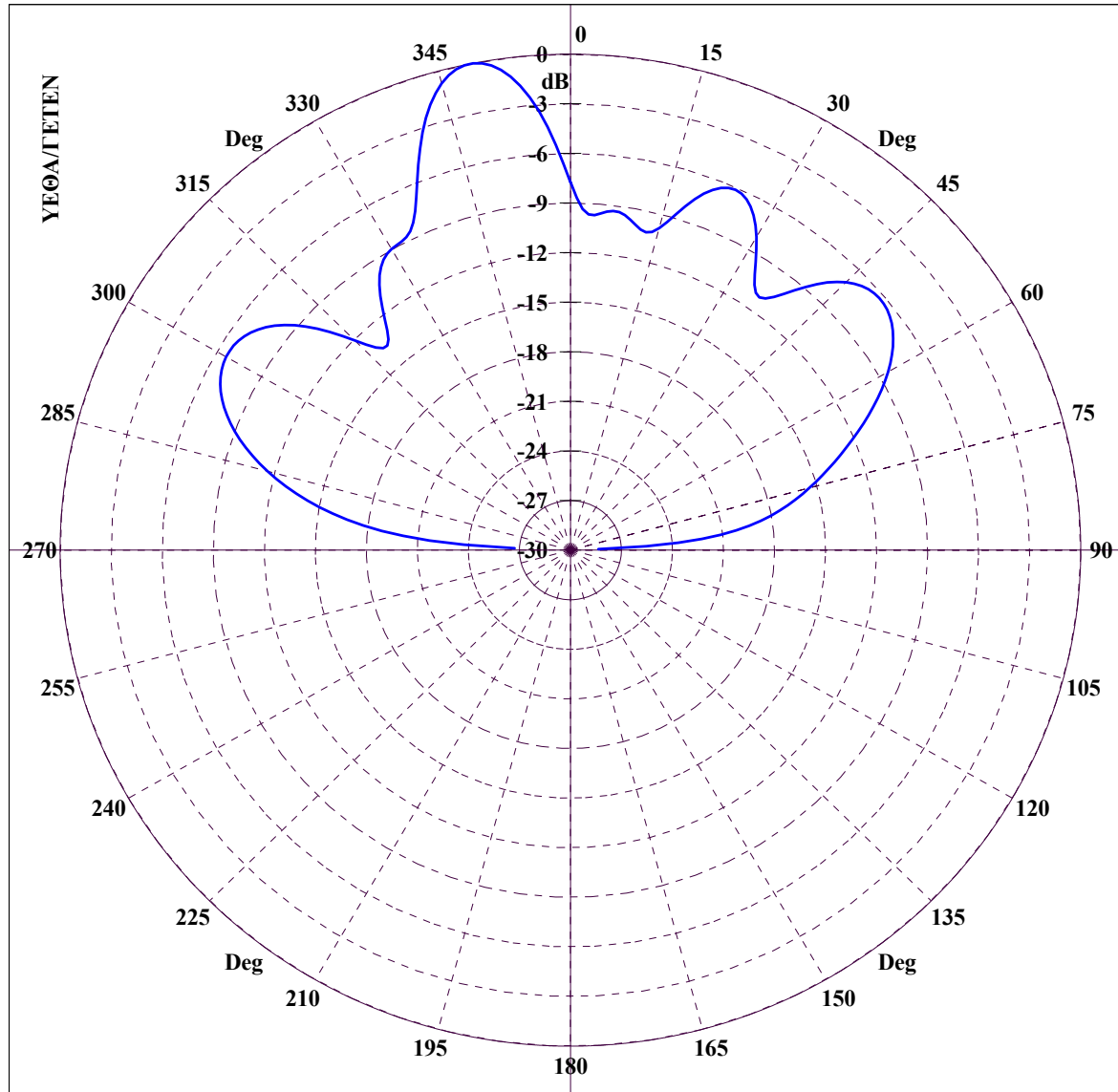
File Name :CRU15-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 20.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

Διάγραμμα 5.146 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 20^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .



Διάγραμμα 5.147 : CRUISER, 3D διάγραμμα κέρδους ισχύος για κεραία 1 σε συχνότητα 5 MHz με χρήση VRML.

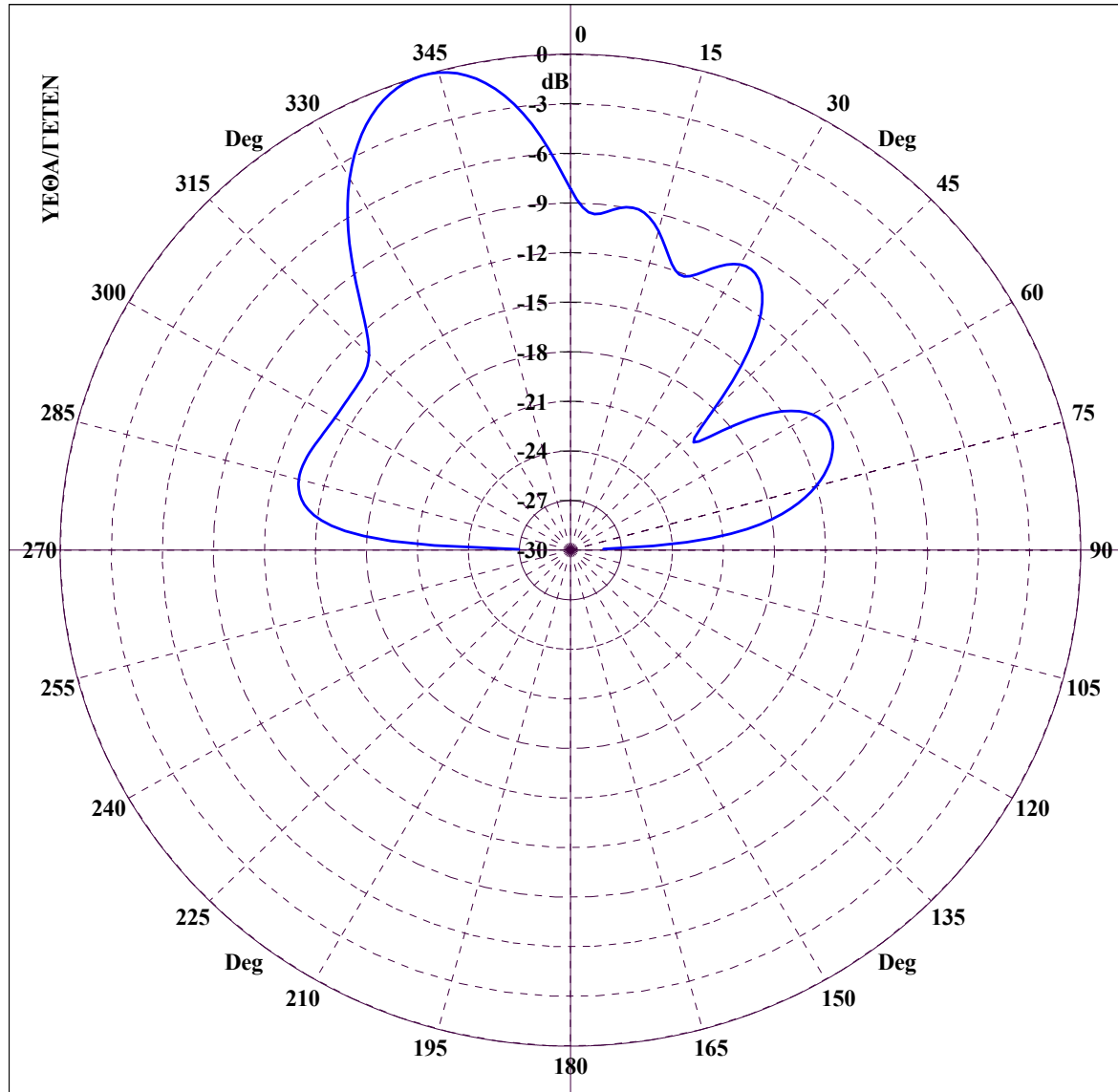
FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



File Name :CRU17-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 0.00$ ,  $\Theta=0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

Διάγραμμα 5.148 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\varphi = 0^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

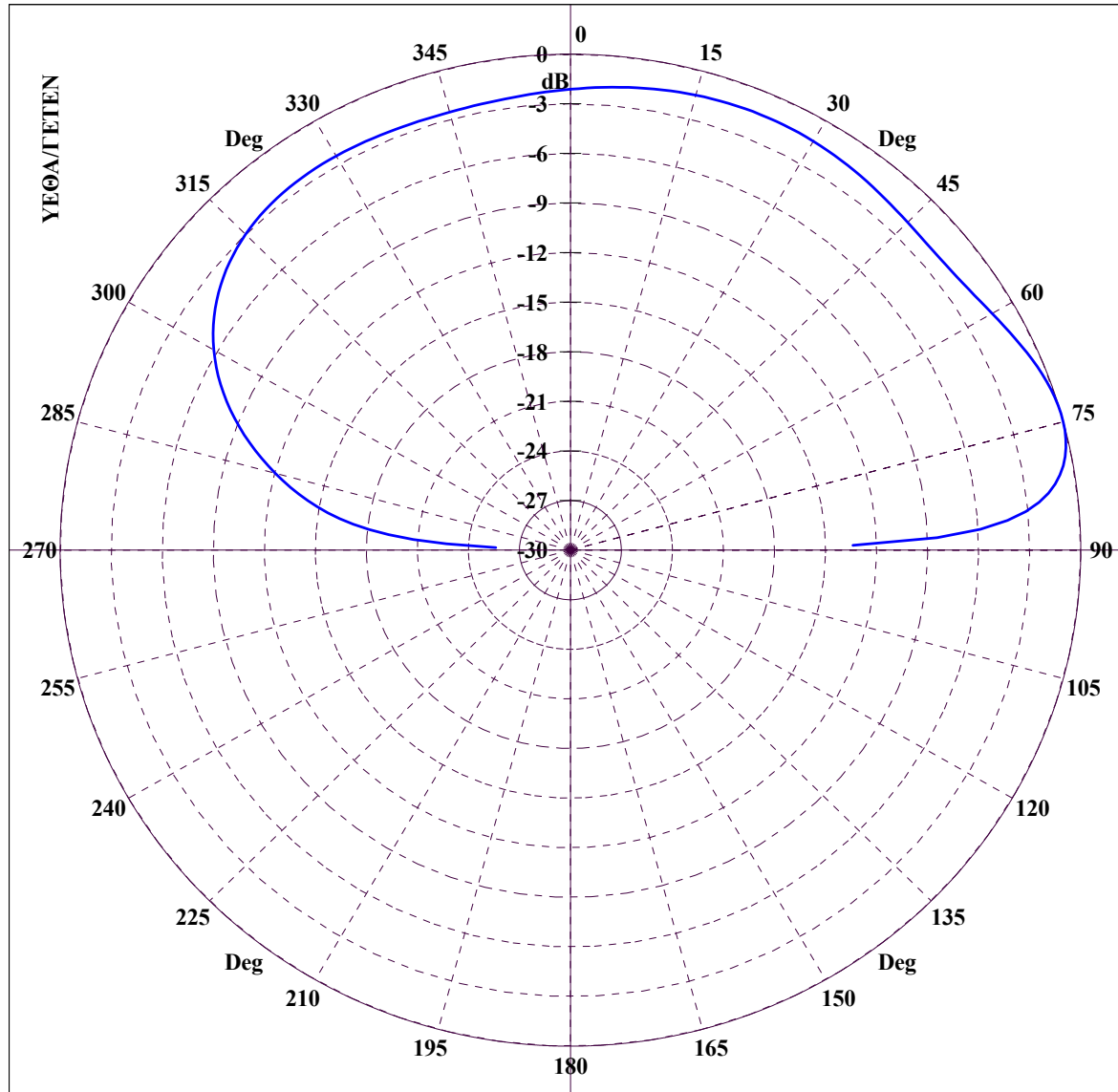
FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



File Name :CRU17-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 45.00$ ,  $\Theta=0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

Διάγραμμα 5.149 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\varphi = 45^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

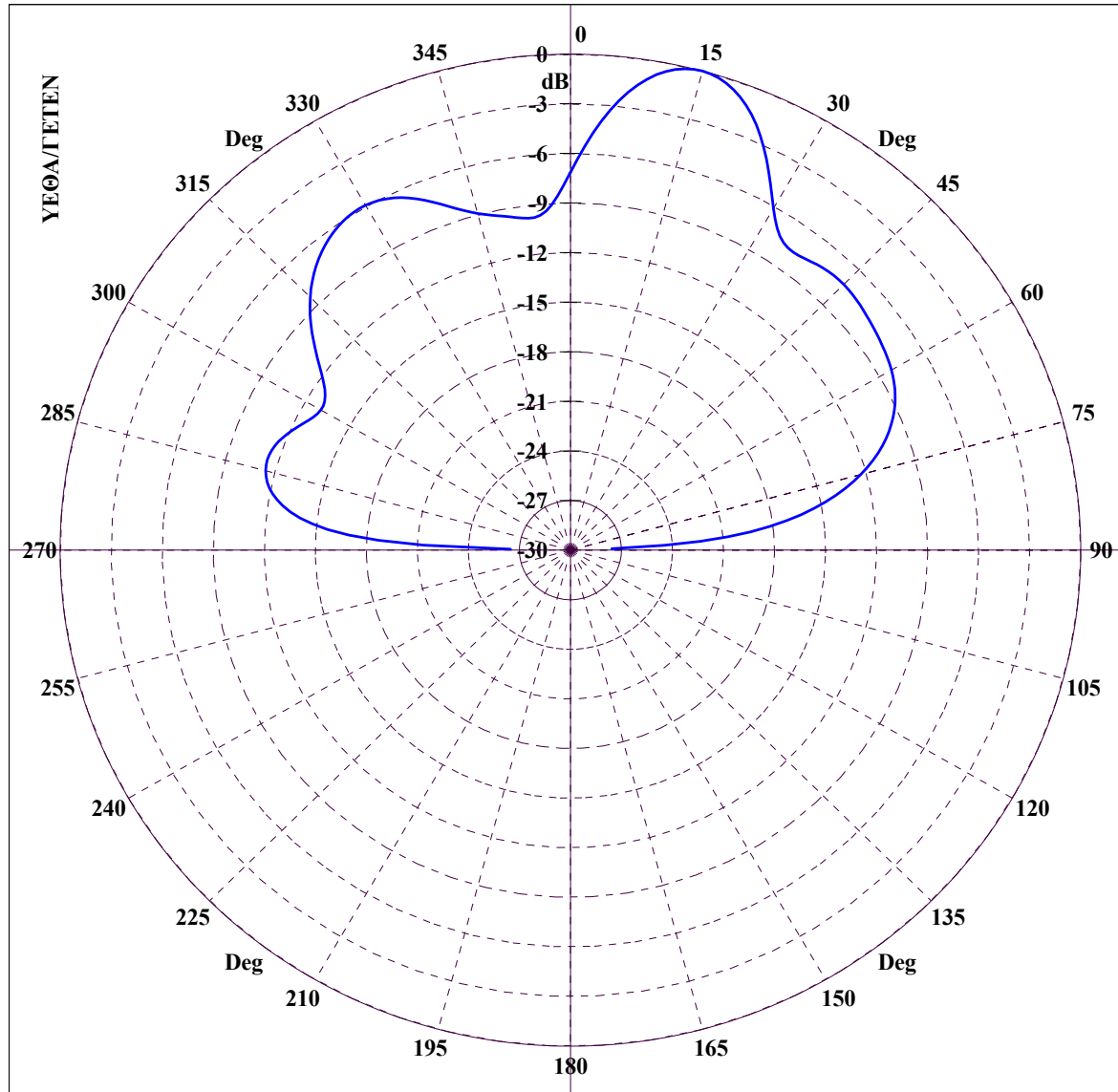
FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



File Name :CRU17-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 90.00$ ,  $\Theta = 0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

Διάγραμμα 5.150 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\varphi = 90^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

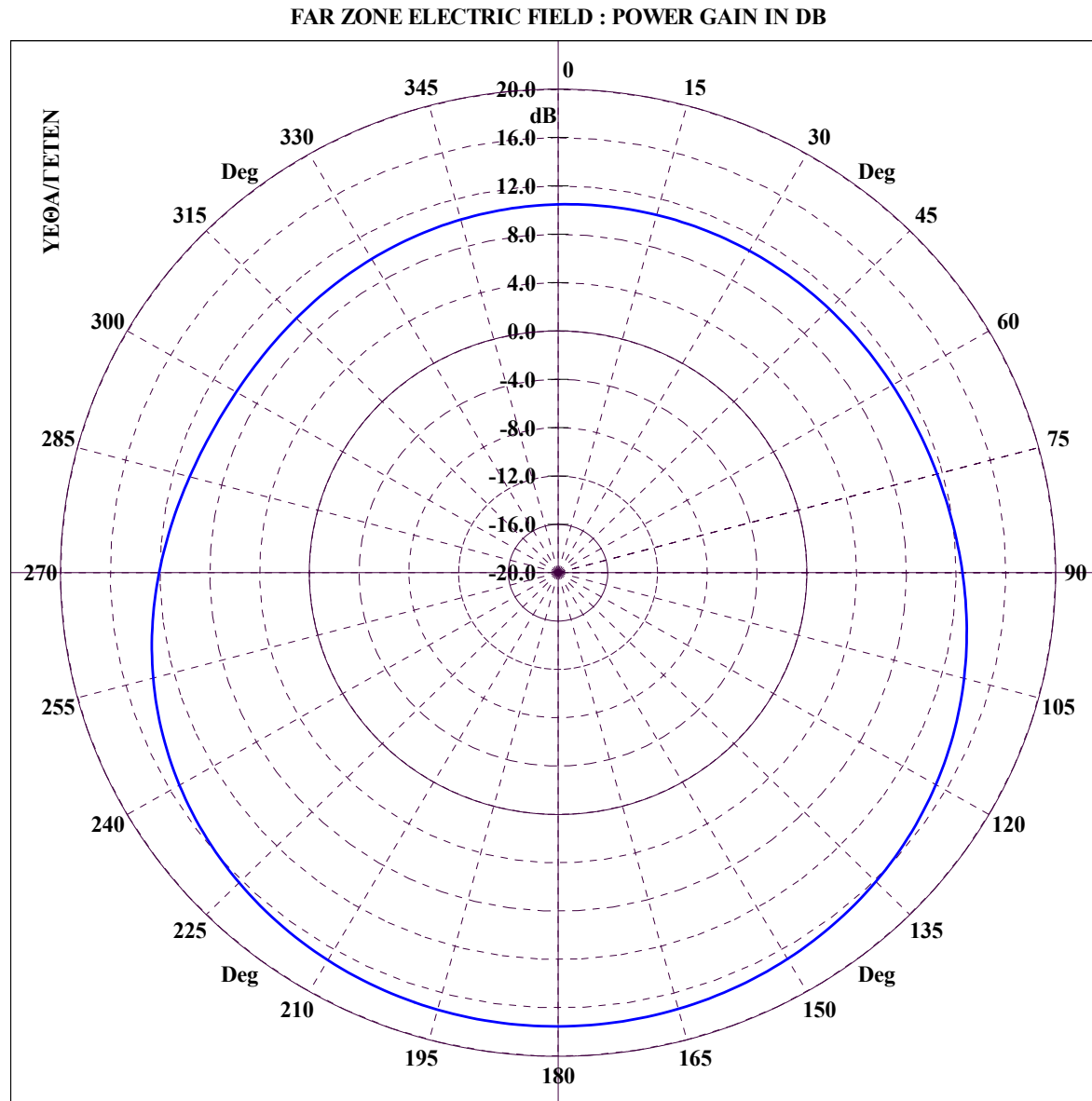
FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



File Name :CRU17-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 135.00$ ,  $\Theta = 0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

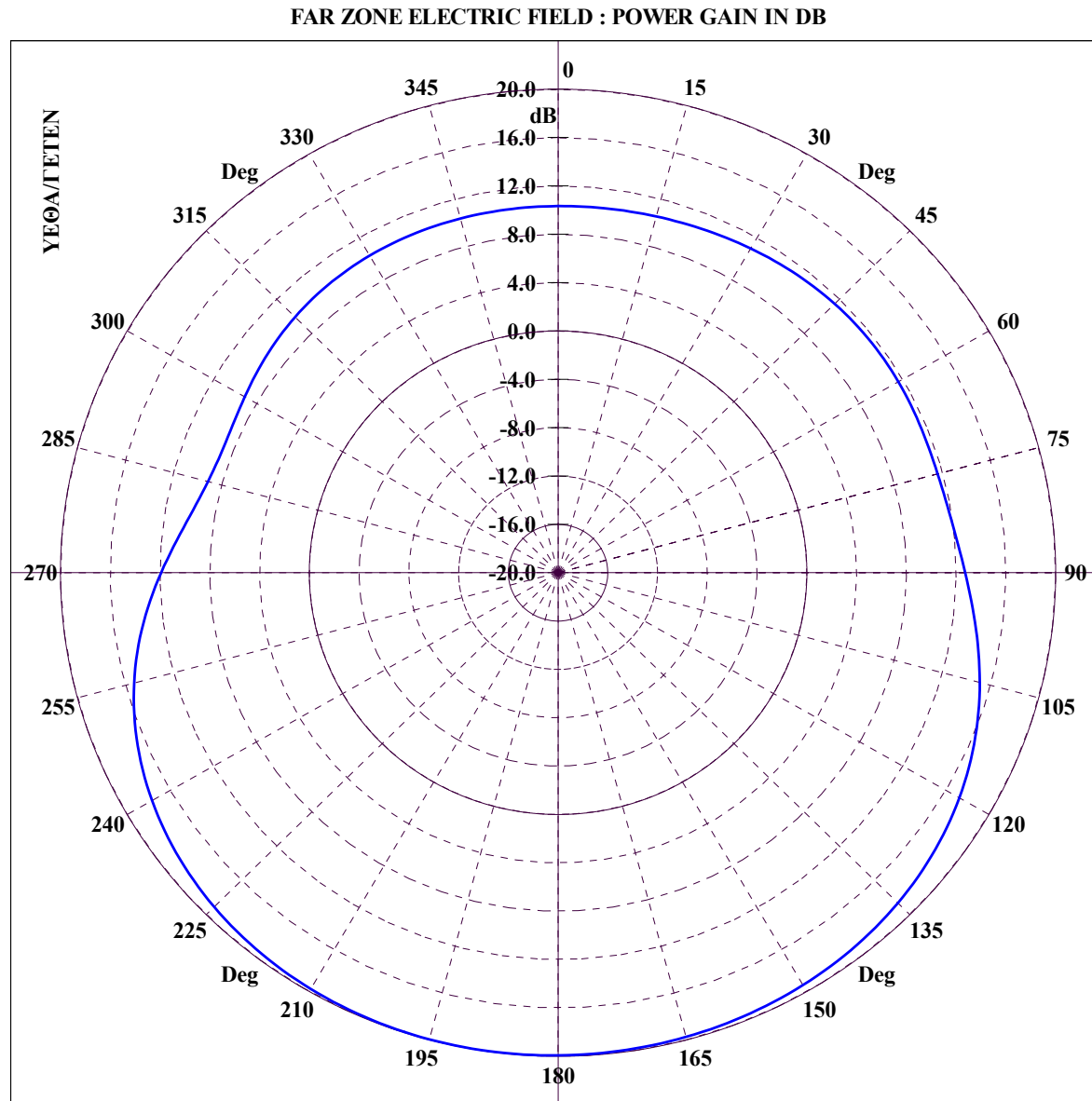
Διάγραμμα 5.151 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 135^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .





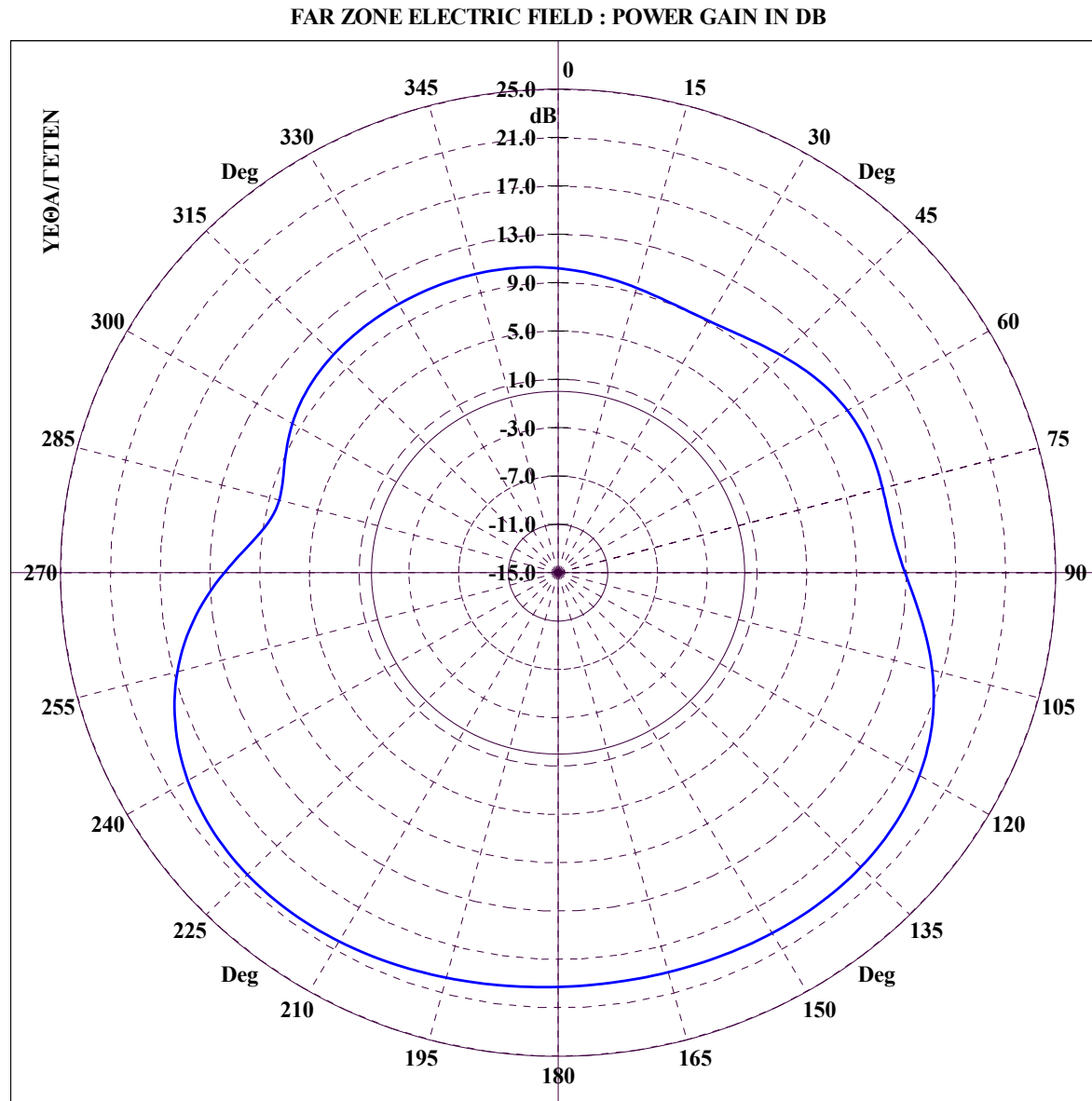
File Name :CRU17-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 5.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

Διάγραμμα 5.152 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 5^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .



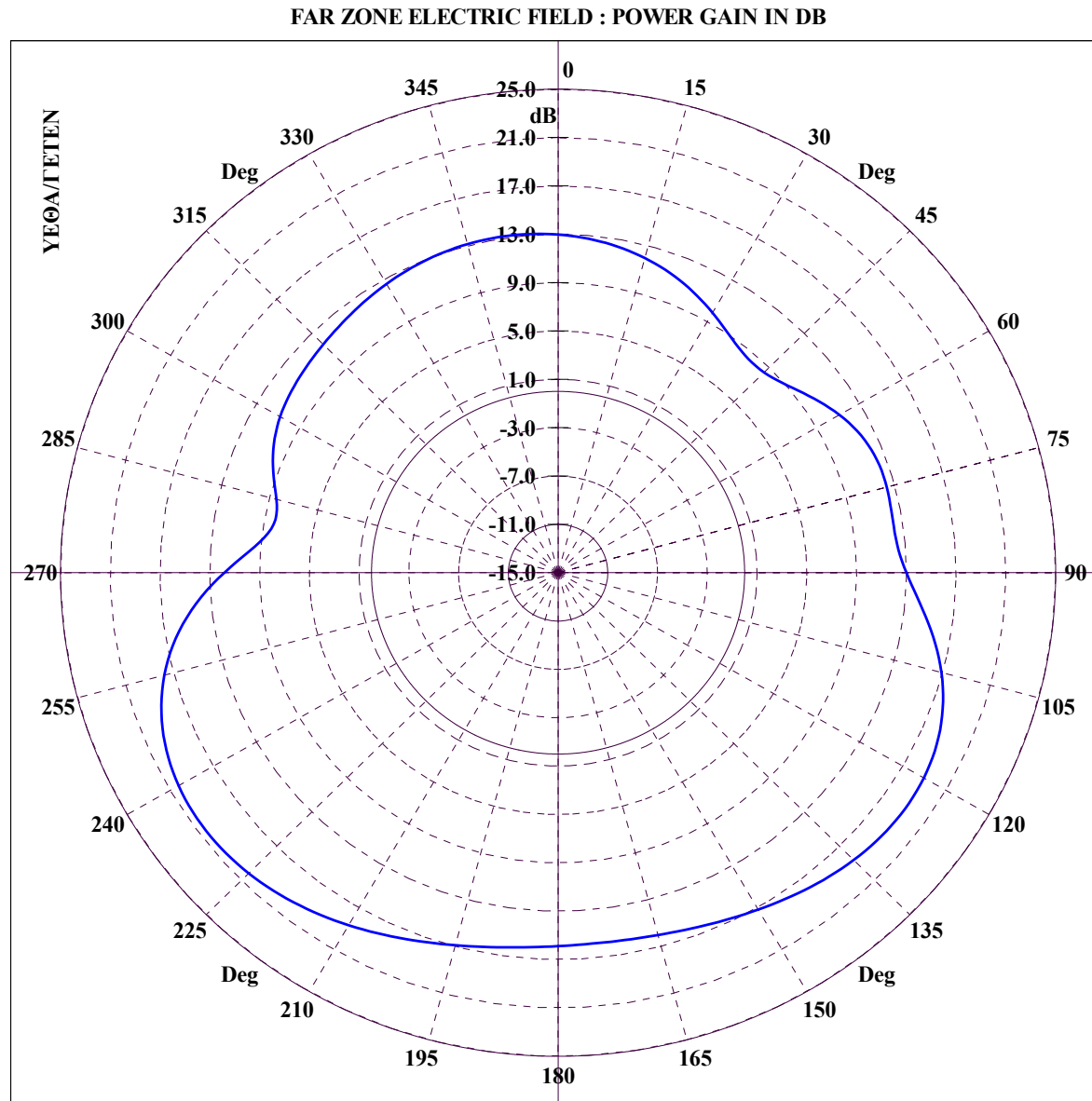
File Name :CRU17-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 10.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

Διάγραμμα 5.153 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 10^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .



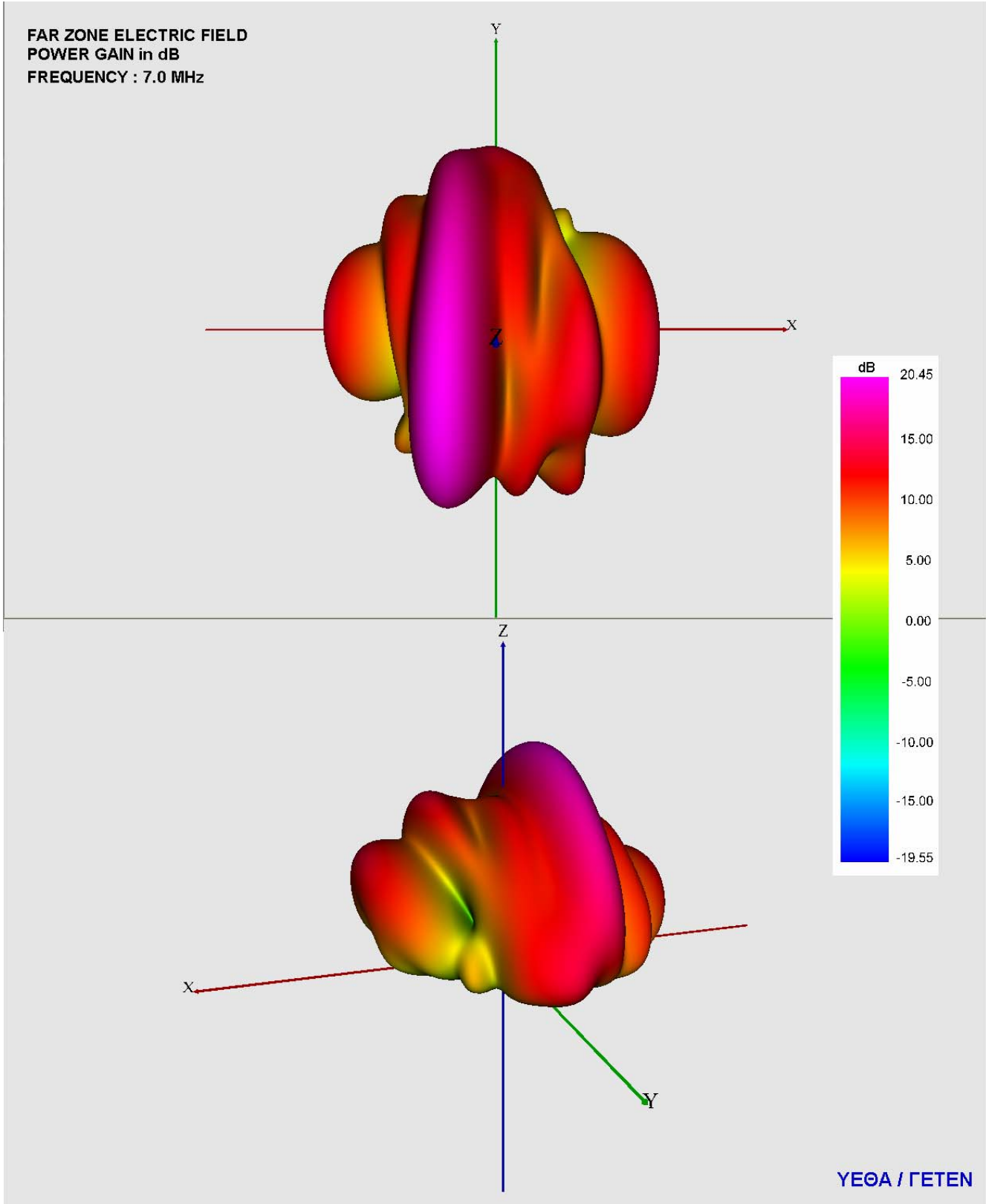
File Name :CRU17-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 15.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

Διάγραμμα 5.154 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 15^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .



File Name :CRU17-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 20.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

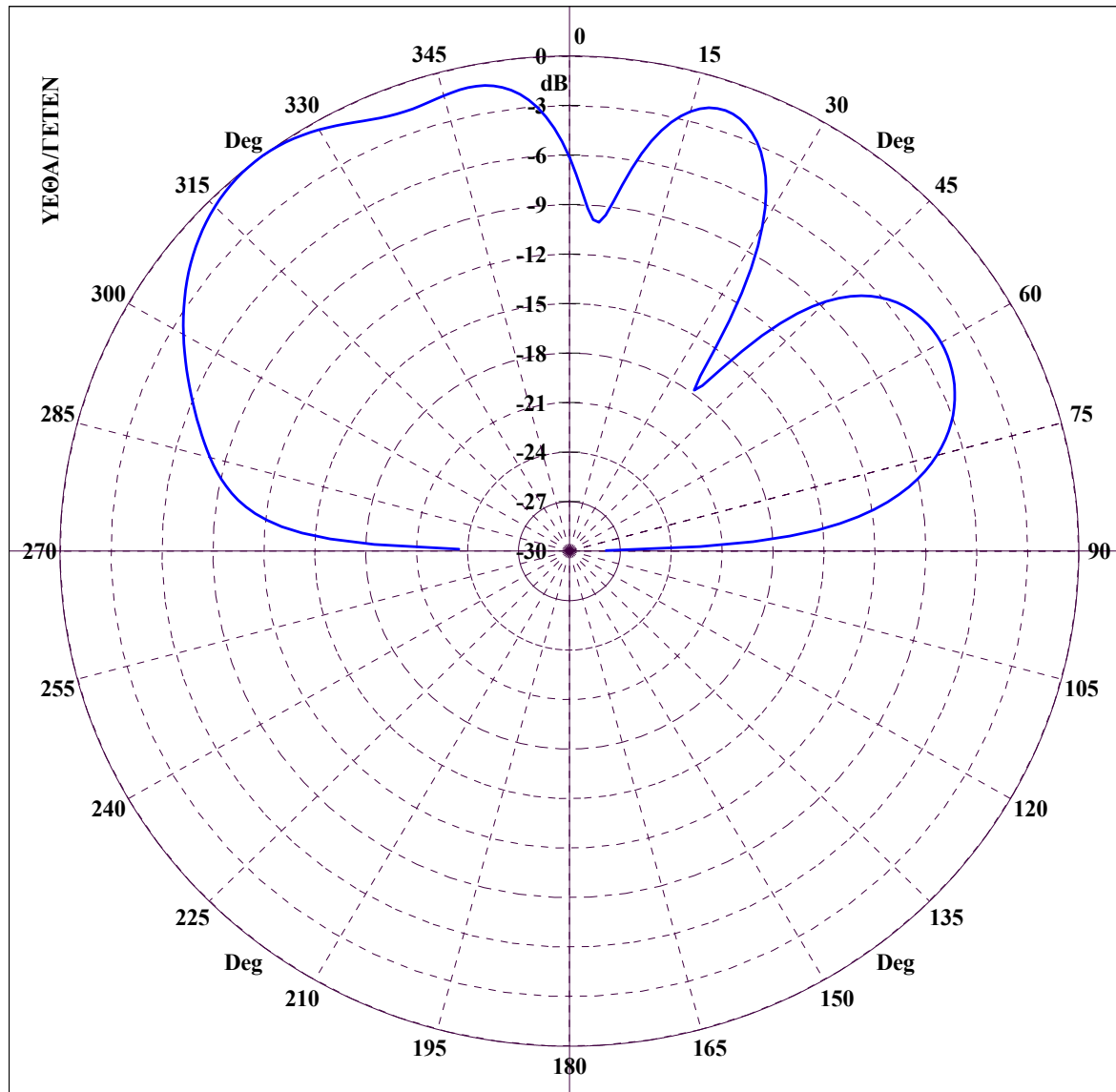
Διάγραμμα 5.155 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 20^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .



Διάγραμμα 5.156 : CRUISER, 3D διάγραμμα κέρδους ισχύος για κεραία 1 σε συχνότητα 7 MHz με χρήση VRML.

### ***5.6.2.2 Διαγράμματα ακτινοβολίας μακρινού πεδίου κεραίας 2***

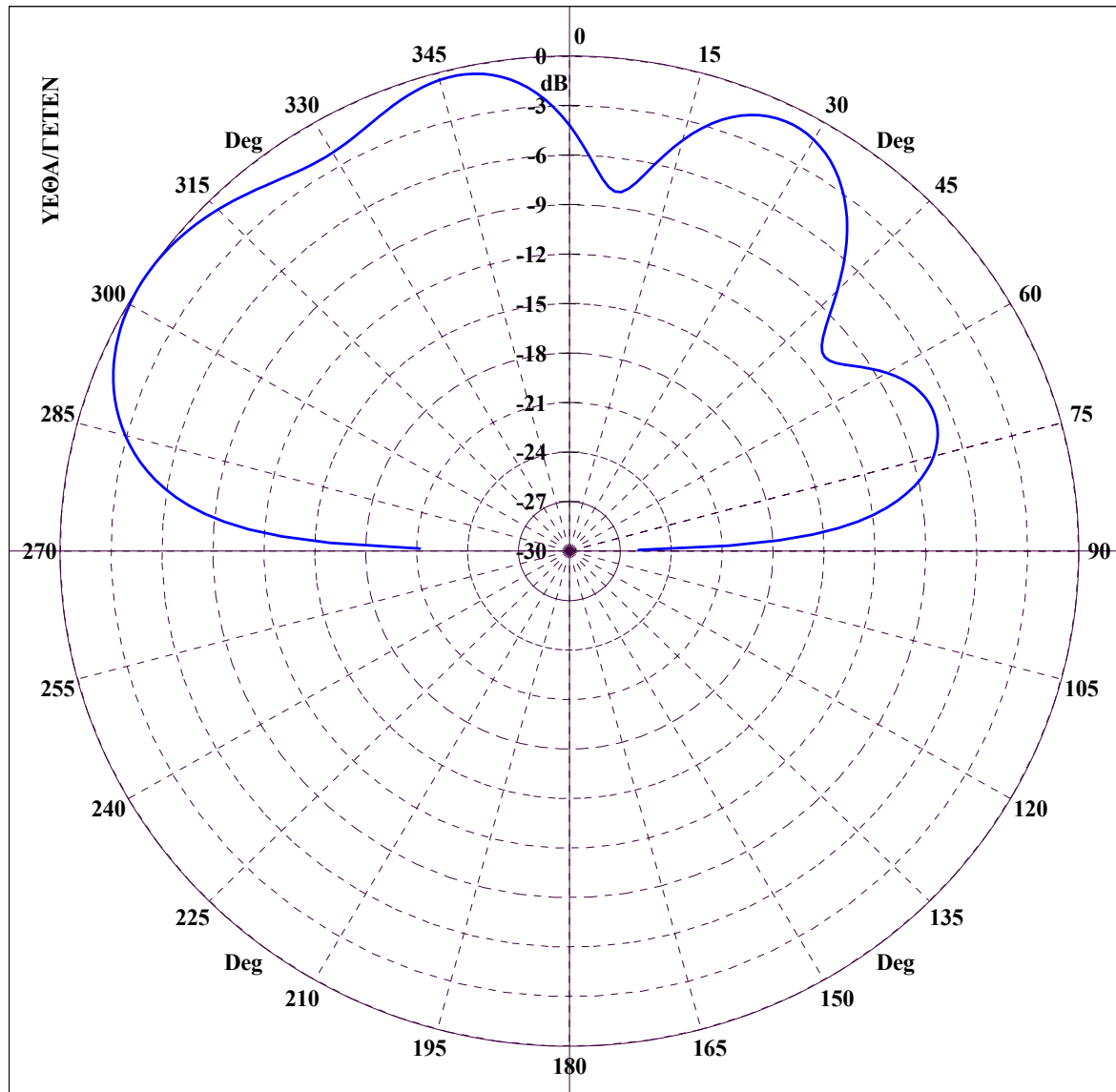
FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



File Name :CRU235-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 0.00$ ,  $\Theta = 0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

Διάγραμμα 5.157 : CRUISER, Κεραία 2 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 0^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB

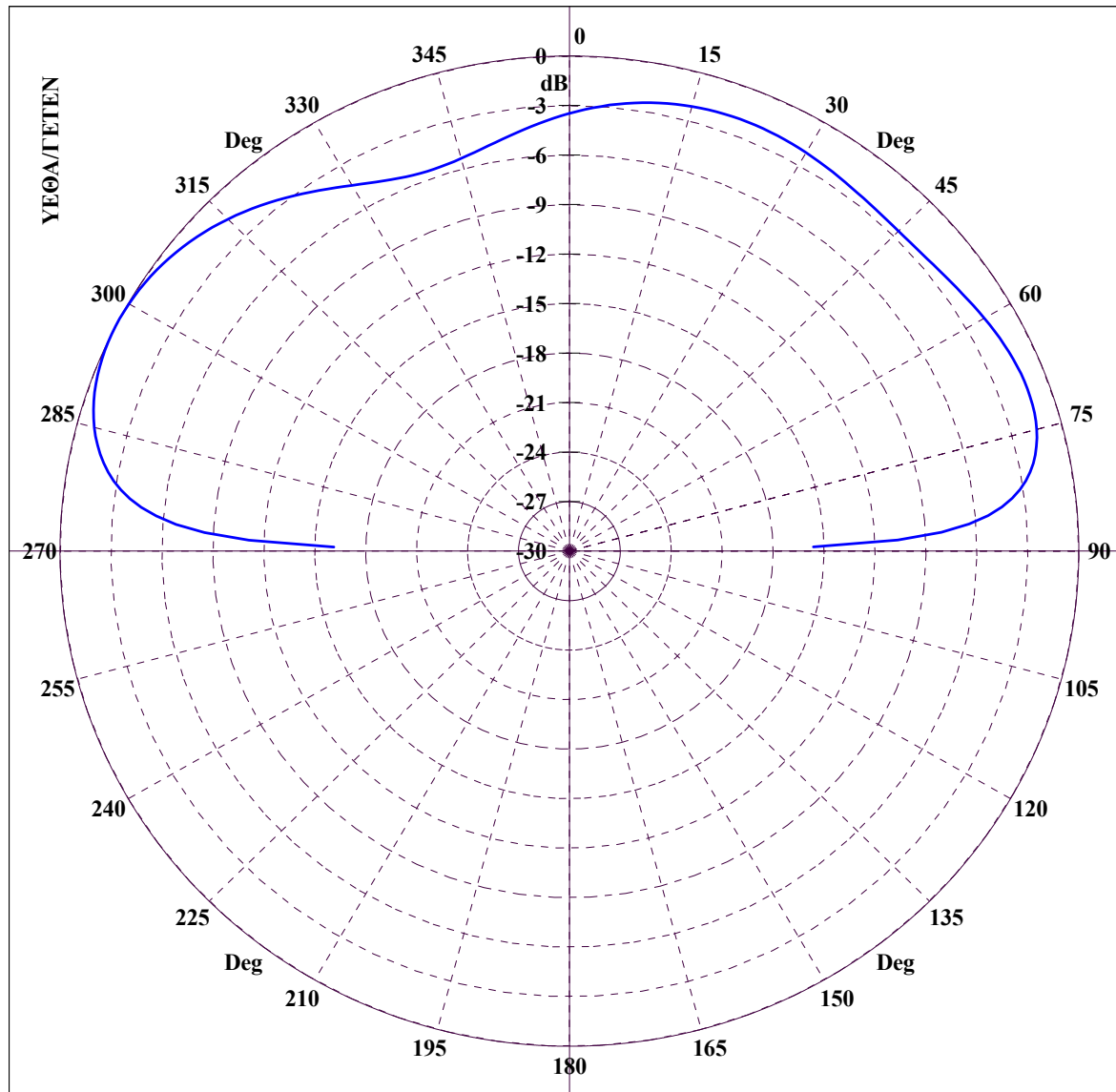


File Name :CRU235-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 45.00$ ,  $\Theta=0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

Διάγραμμα 5.158 : CRUISER, Κεραία 2 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 45^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .



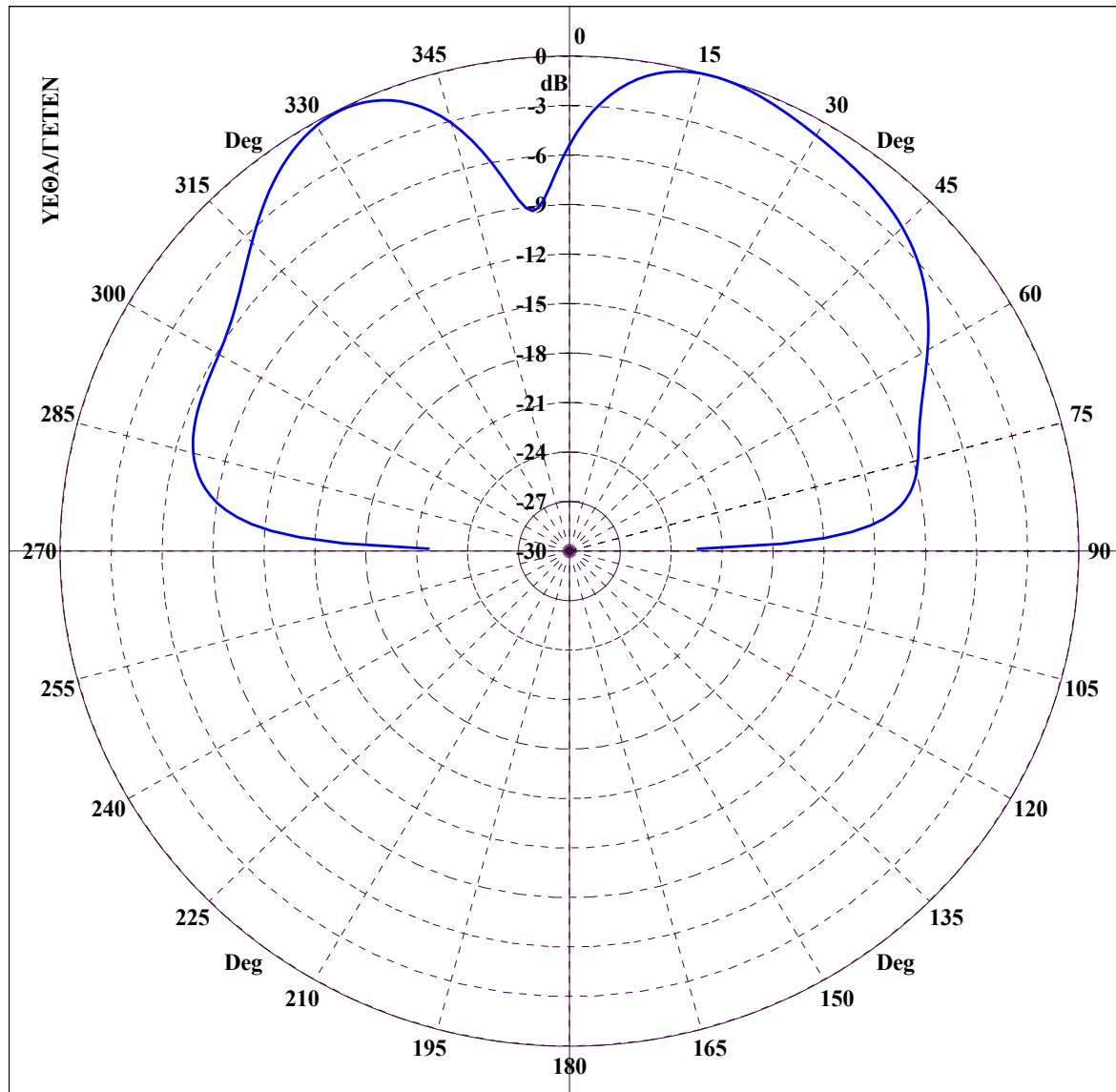
FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



File Name :CRU235-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 90.00$ ,  $\Theta=0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

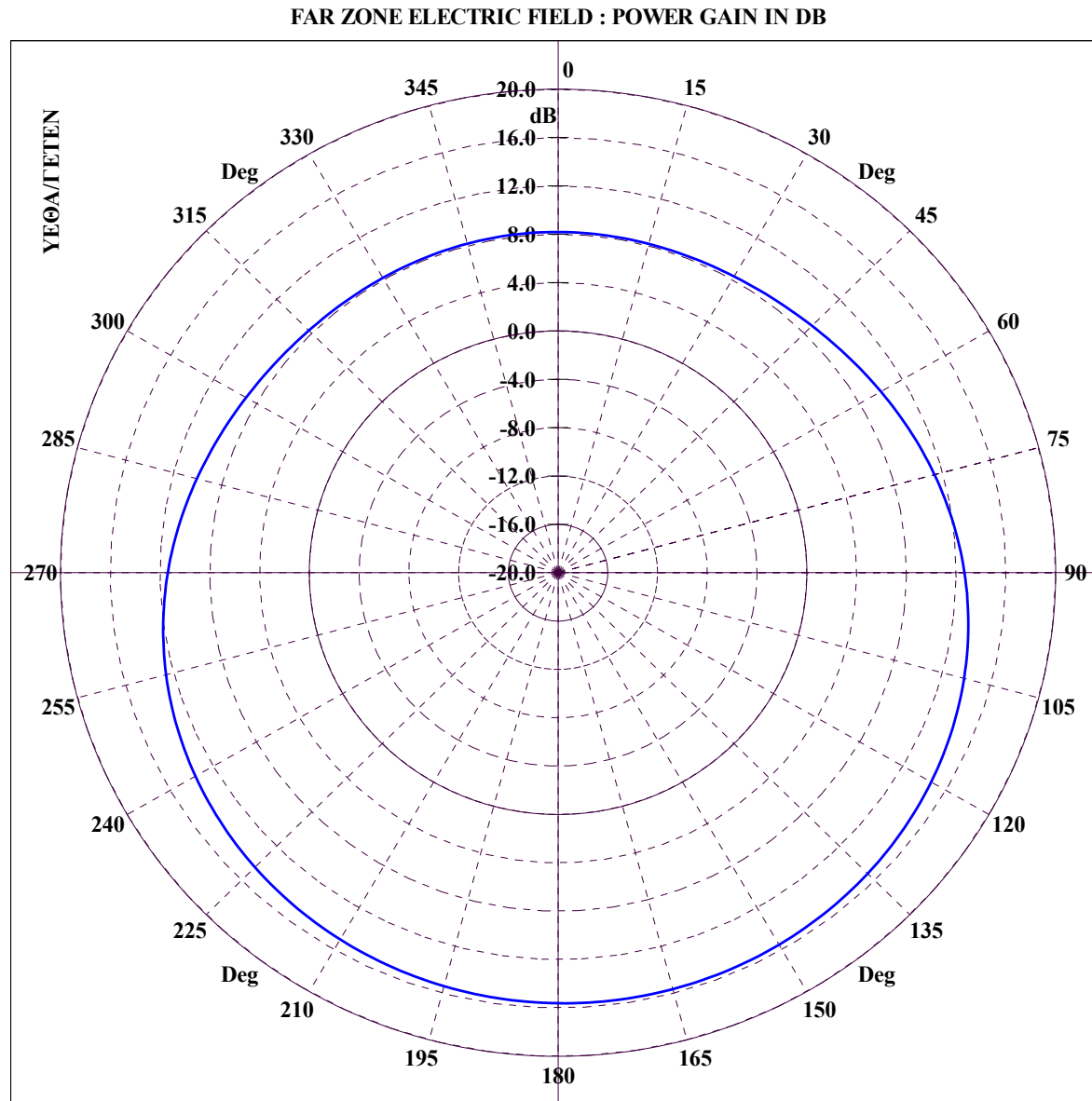
Διάγραμμα 5.159 : CRUISER, Κεραία 2 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\varphi = 90^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



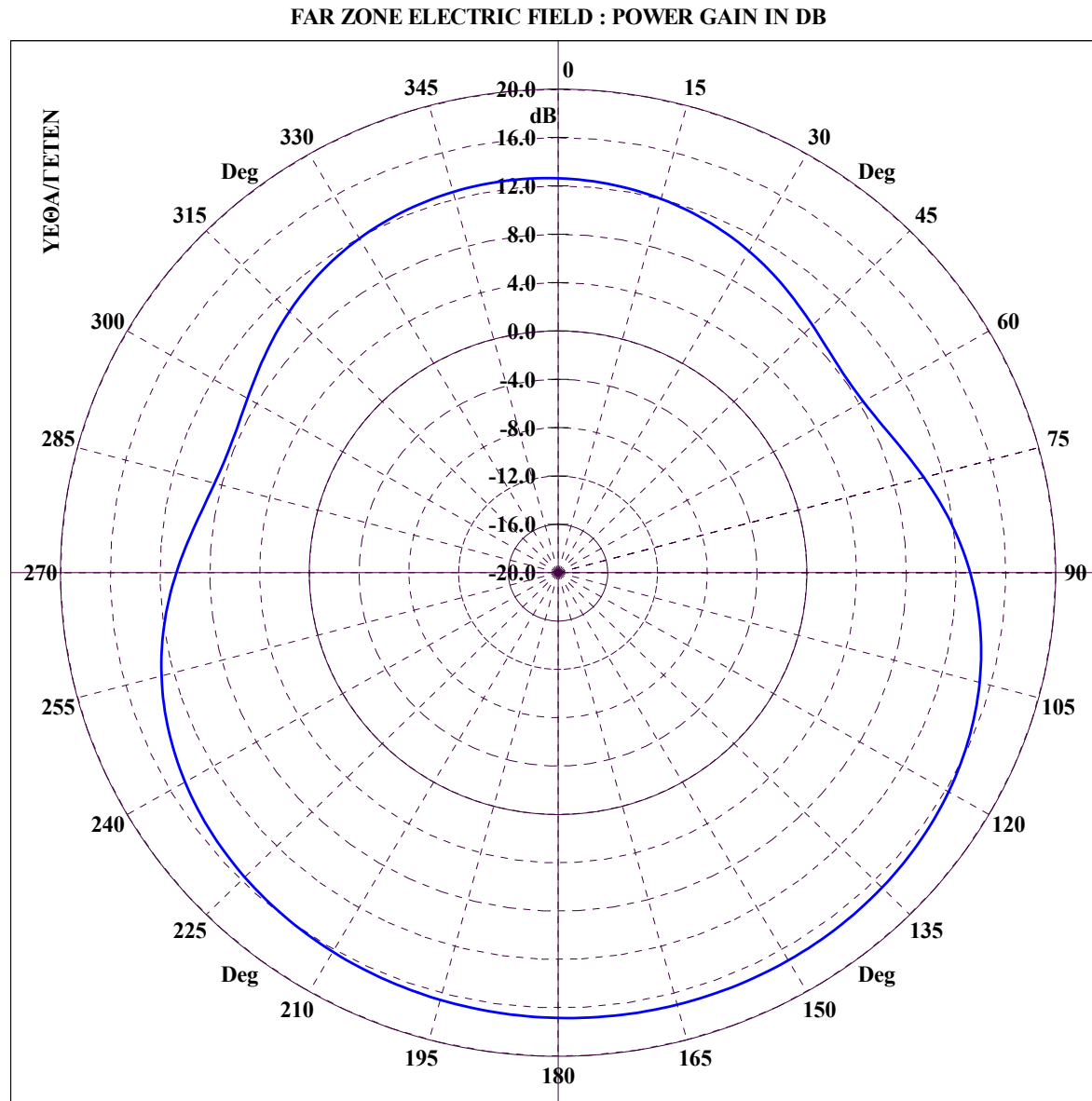
File Name :CRU235-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 135.00$ ,  $\Theta = 0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

Διάγραμμα 5.160 : CRUISER, Κεραία 2 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 135^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .



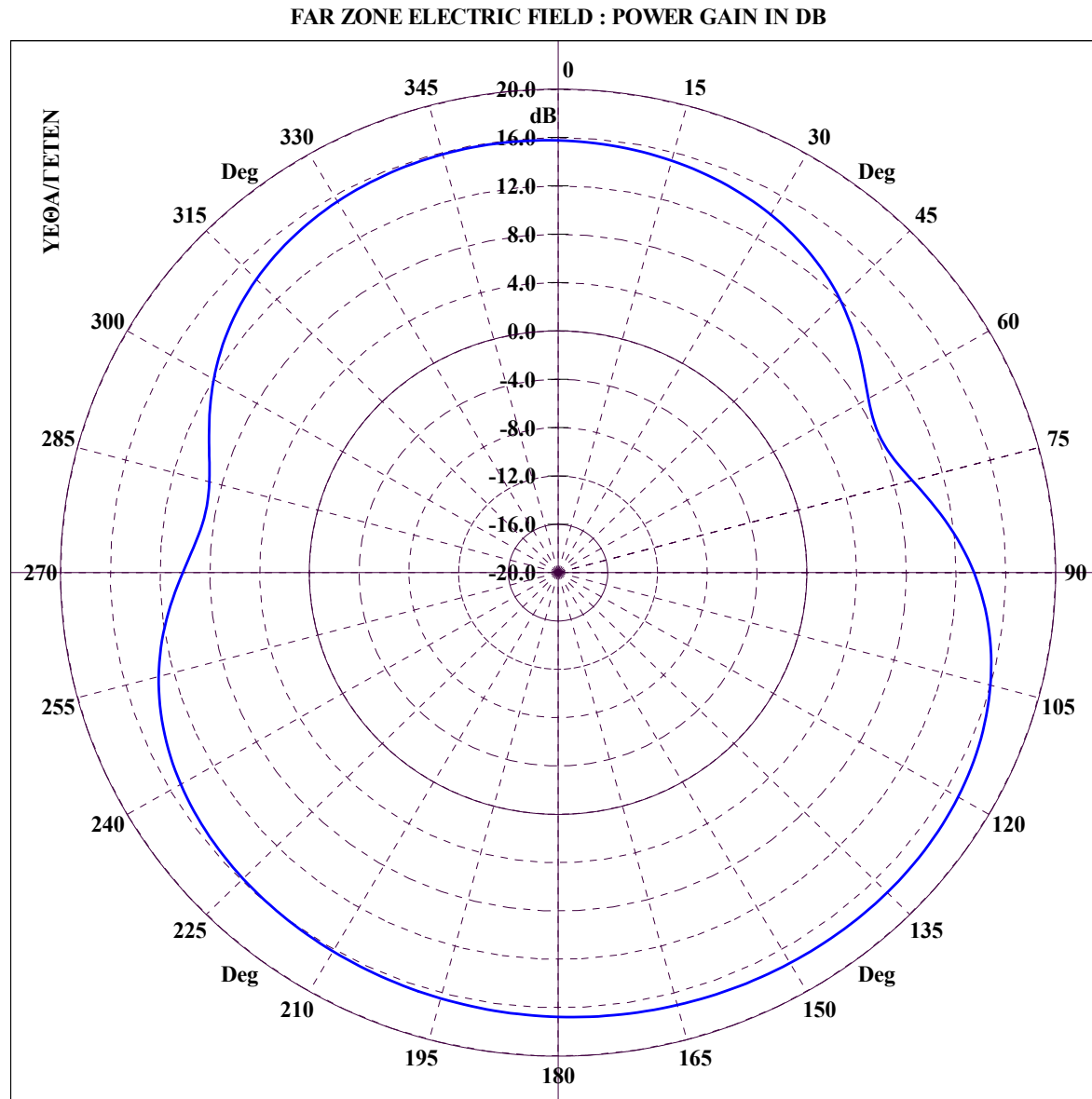
File Name :CRU235-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 5.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

Διάγραμμα 5.161 : CRUISER, Κεραία 2 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 5^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .



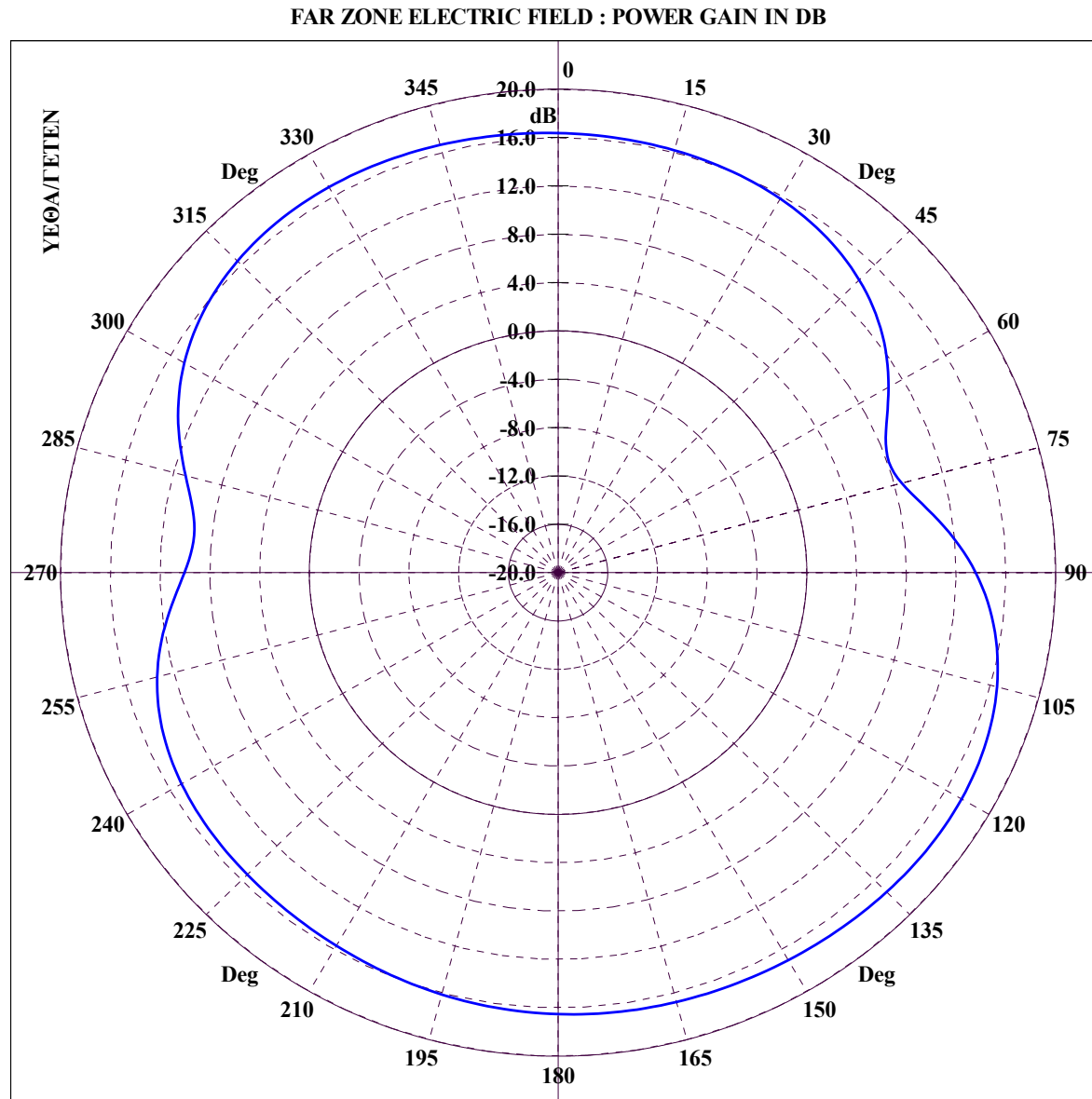
File Name :CRU235-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 10.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

Διάγραμμα 5.162 : CRUISER, Κεραία 2 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 10^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .



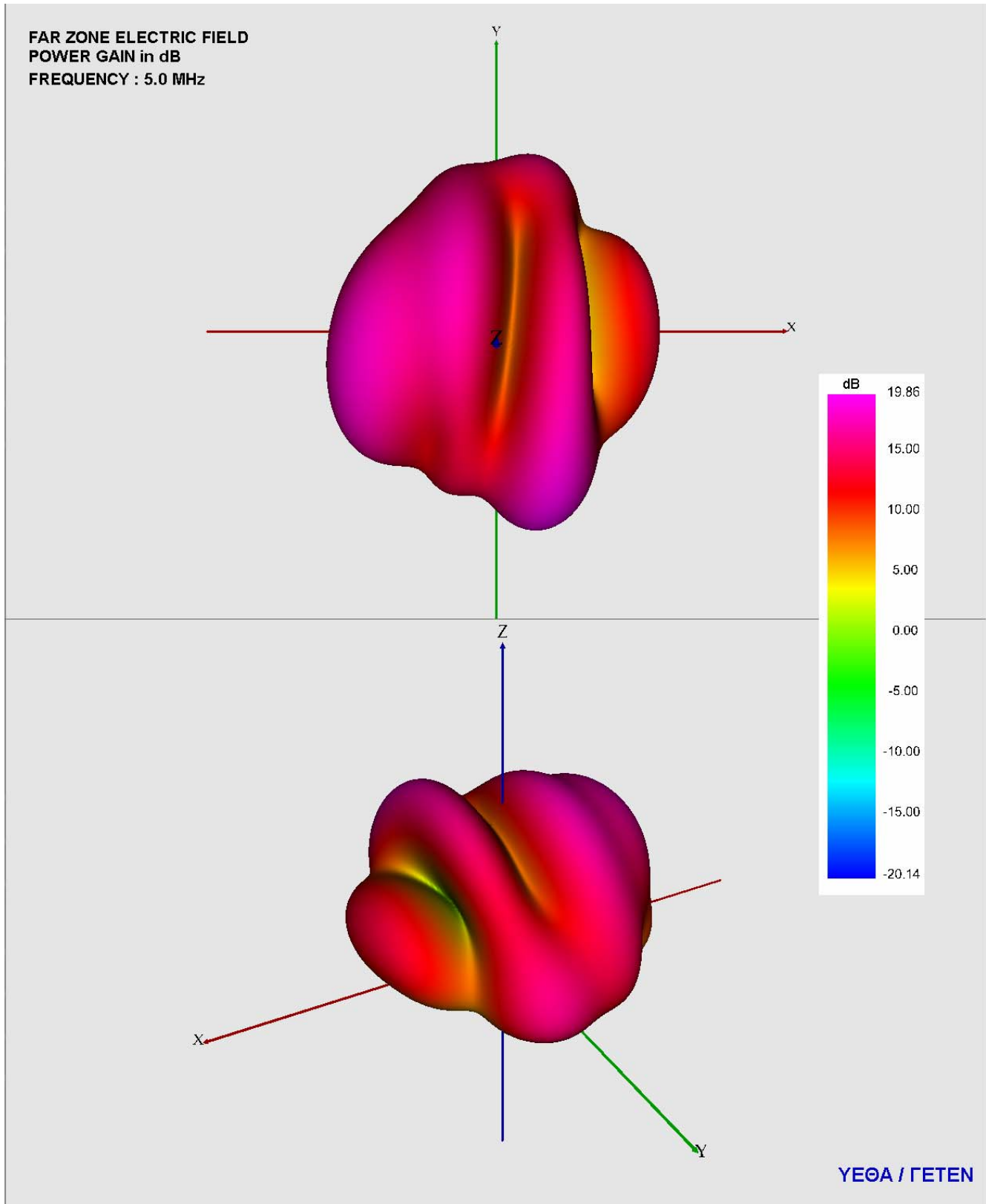
File Name :CRU235-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 15.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

Διάγραμμα 5.163 : CRUISER, Κεραία 2 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 15^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .



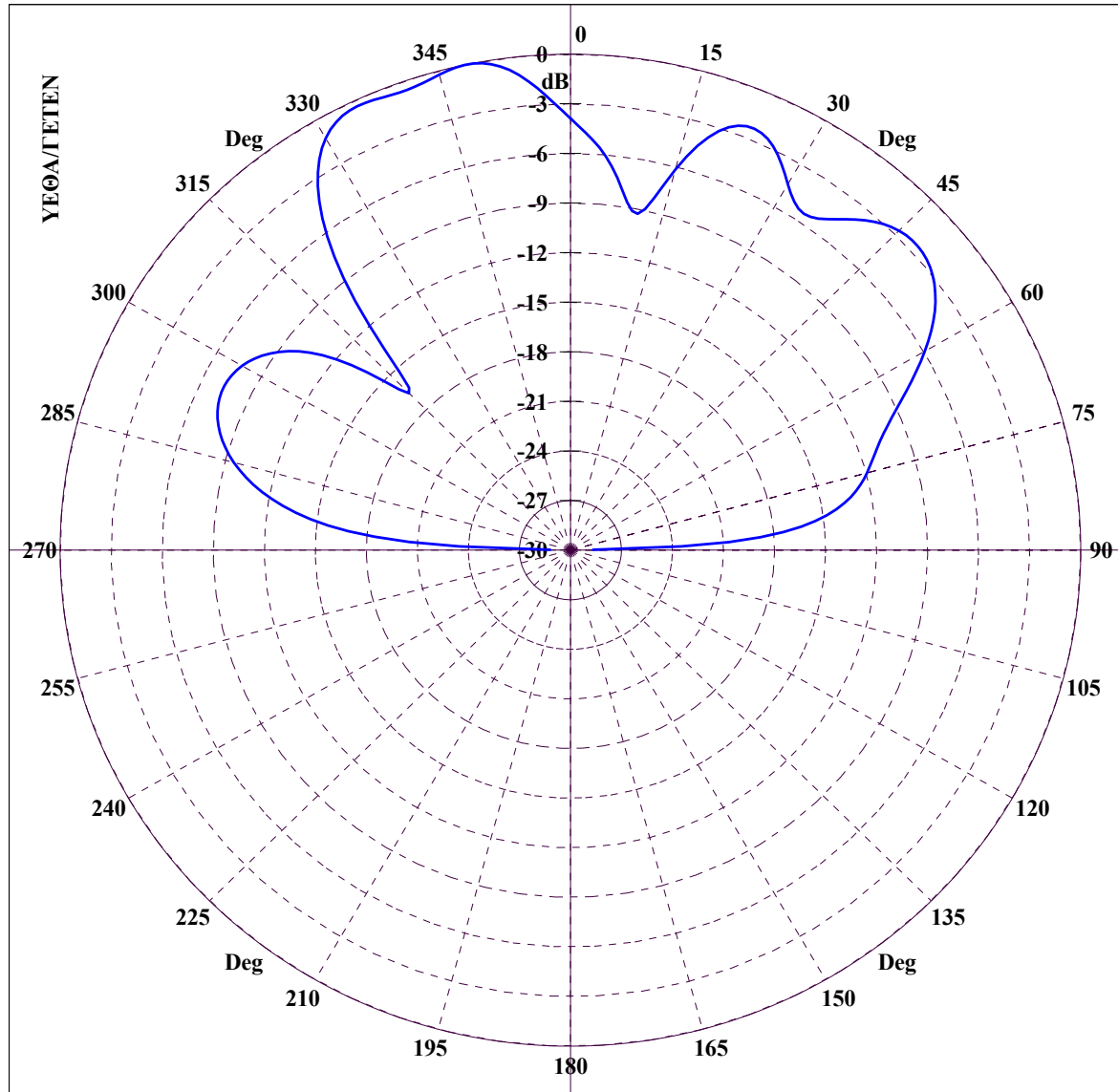
File Name :CRU235-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 20.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

Διάγραμμα 5.164 : CRUISER, Κεραία 2 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 20^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .



Διάγραμμα 5.165 : CRUISER, 3D διάγραμμα κέρδους ισχύος για κεραία 2 σε συχνότητα 5 MHz με χρήση VRML.

FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB

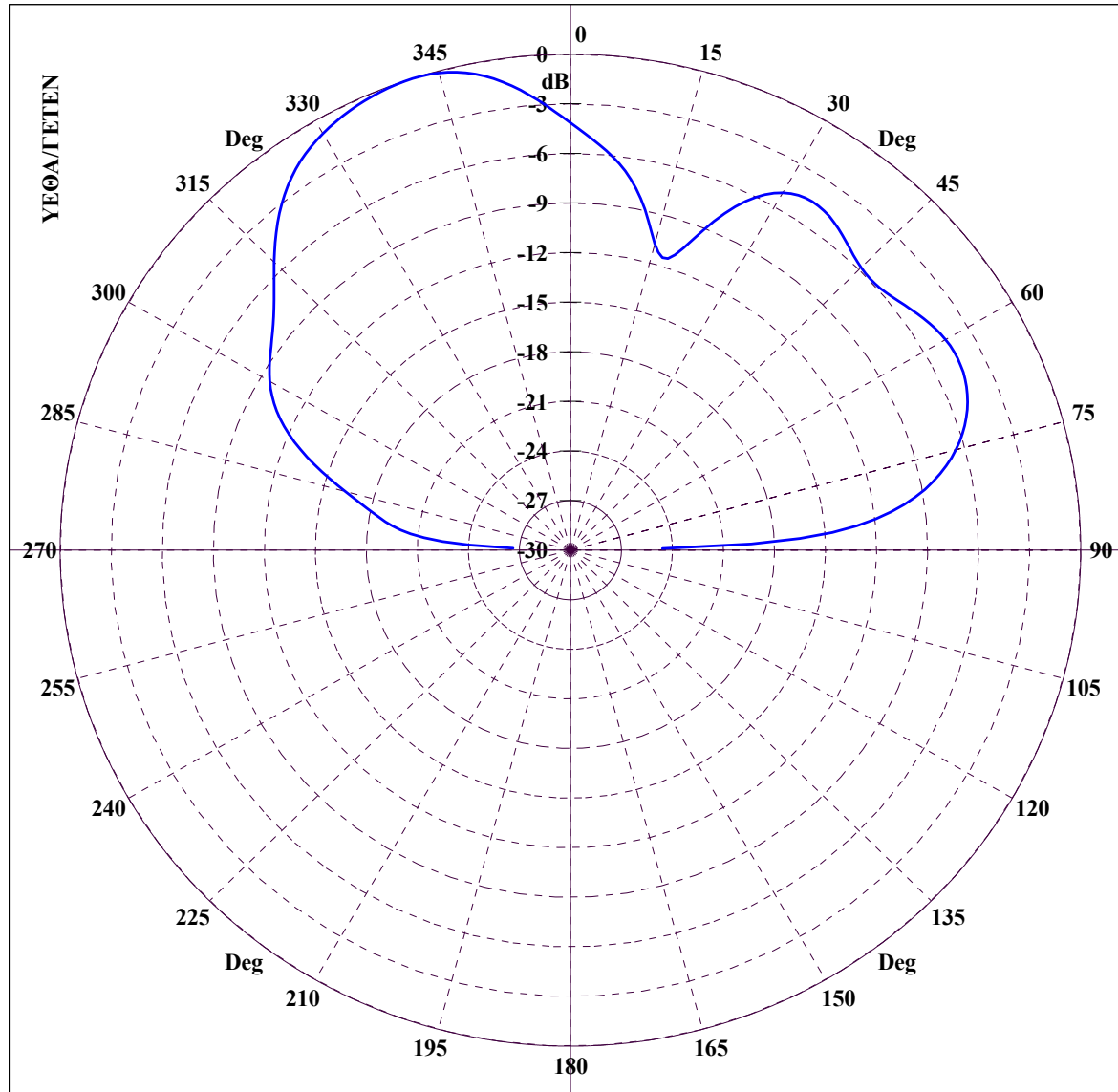


File Name :CRU237-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 0.00$ ,  $\Theta=0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

Διάγραμμα 5.166 : CRUISER, Κεραία 2 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 0^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .



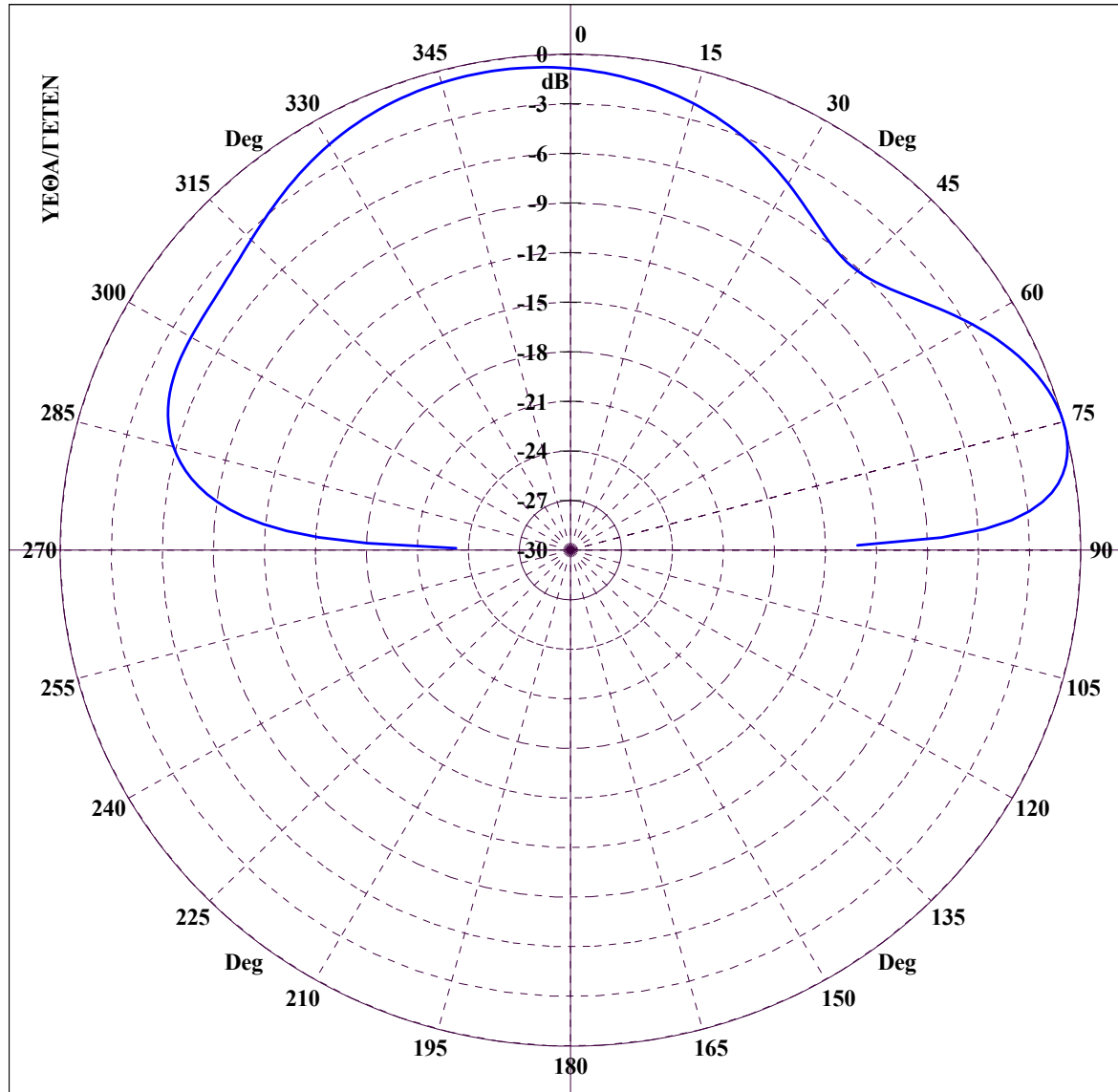
FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



File Name :CRU237-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 45.00$ ,  $\Theta=0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

Διάγραμμα 5.167 : CRUISER, Κεραία 2 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\varphi = 45^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

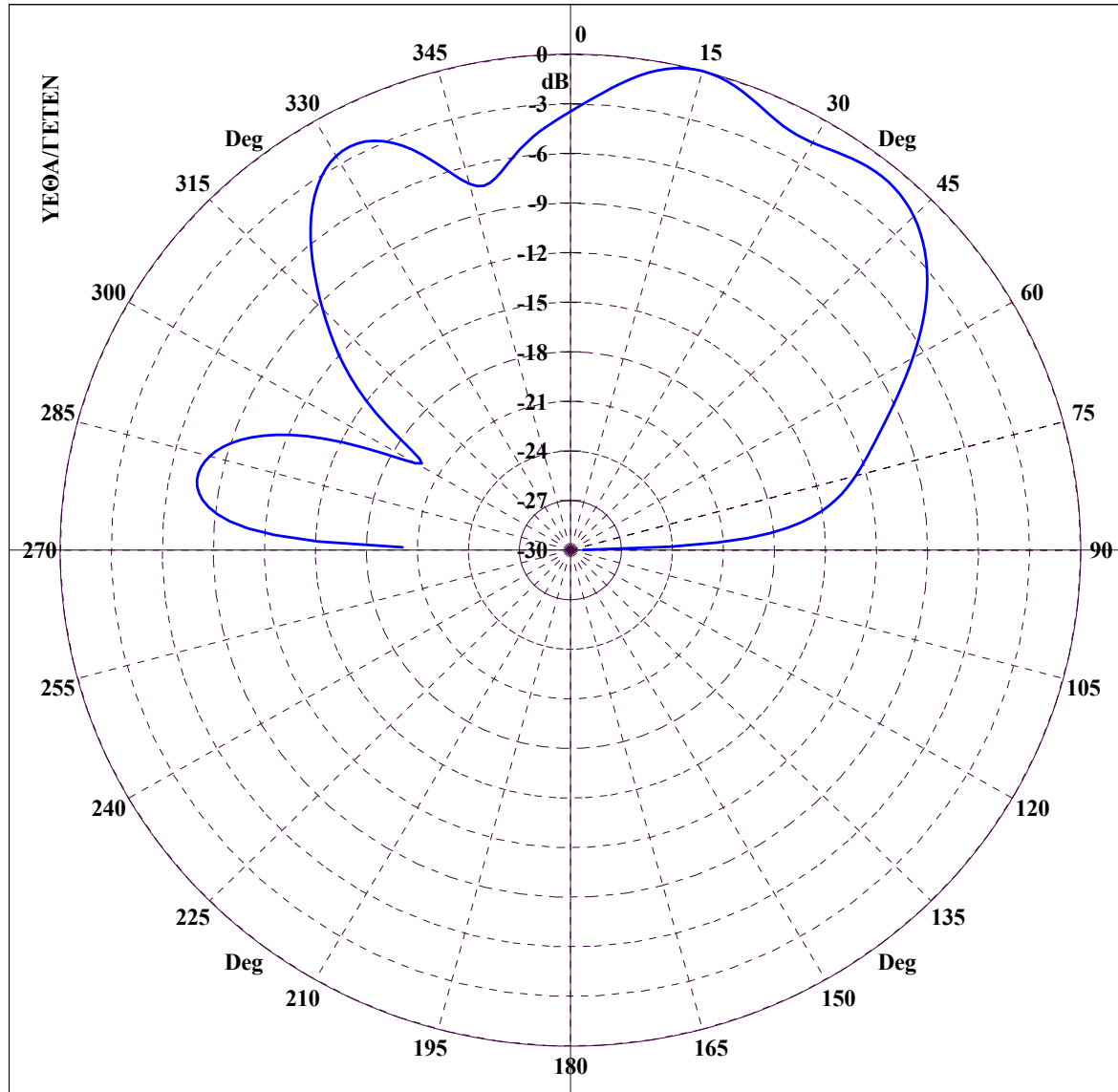
FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



File Name :CRU237-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 90.00$ ,  $\Theta=0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

Διάγραμμα 5.168 : CRUISER, Κεραία 2 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\varphi = 90^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

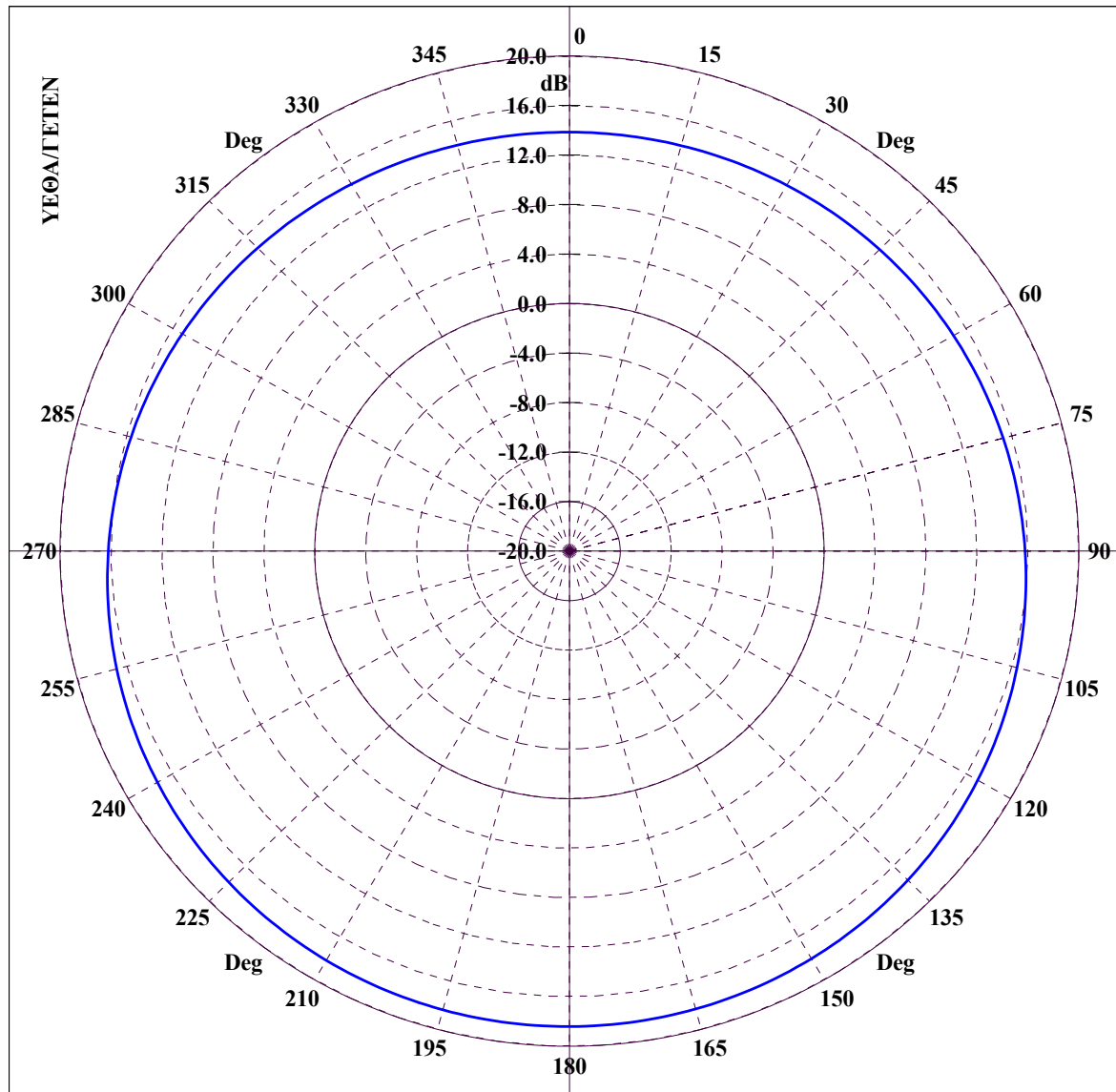
FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



File Name :CRU237-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 135.00$ ,  $\Theta = 0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

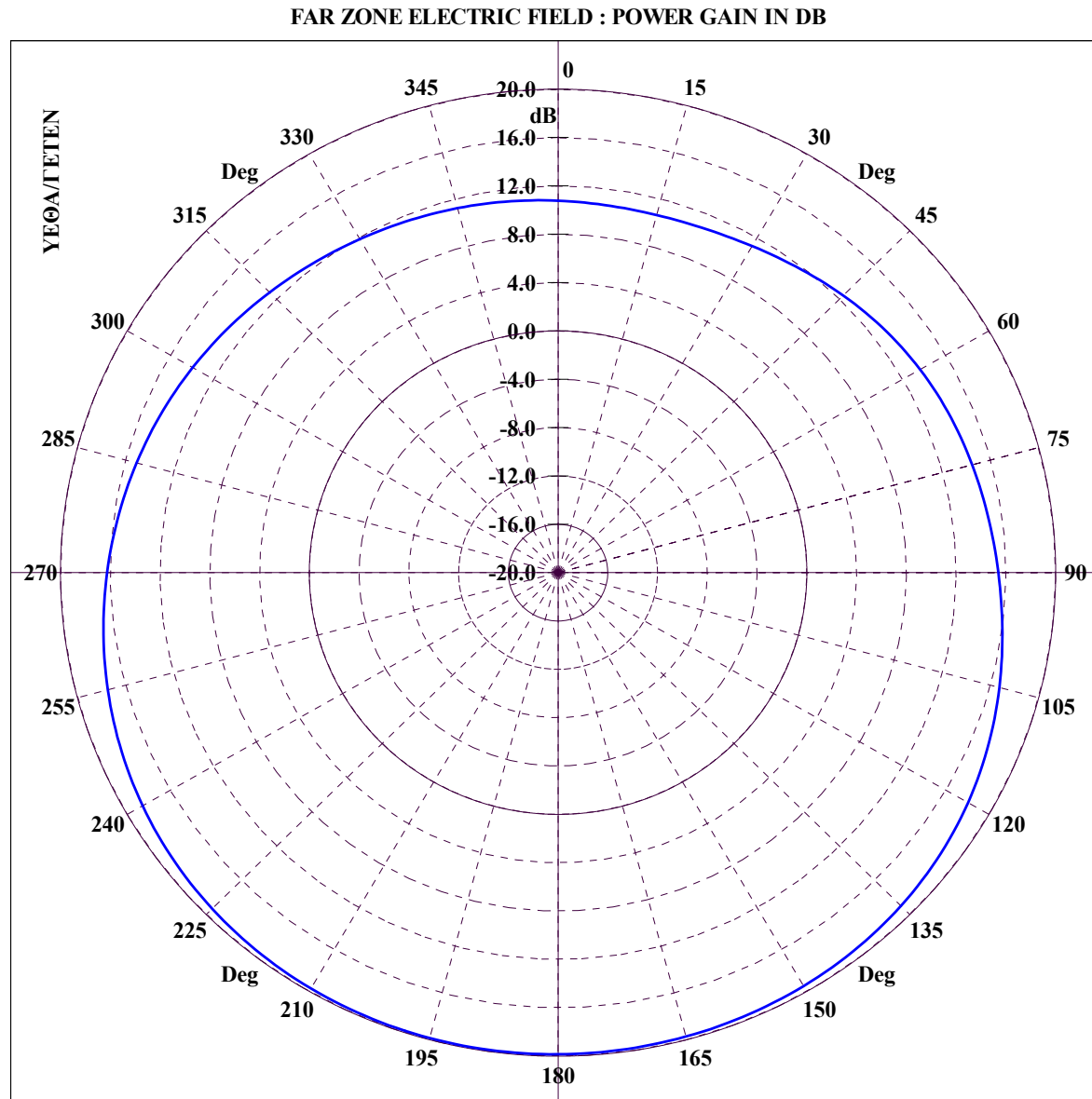
Διάγραμμα 5.169 : CRUISER, Κεραία 2 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 135^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

FAR ZONE ELECTRIC FIELD : POWER GAIN IN DB



File Name :CRU237-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 5.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

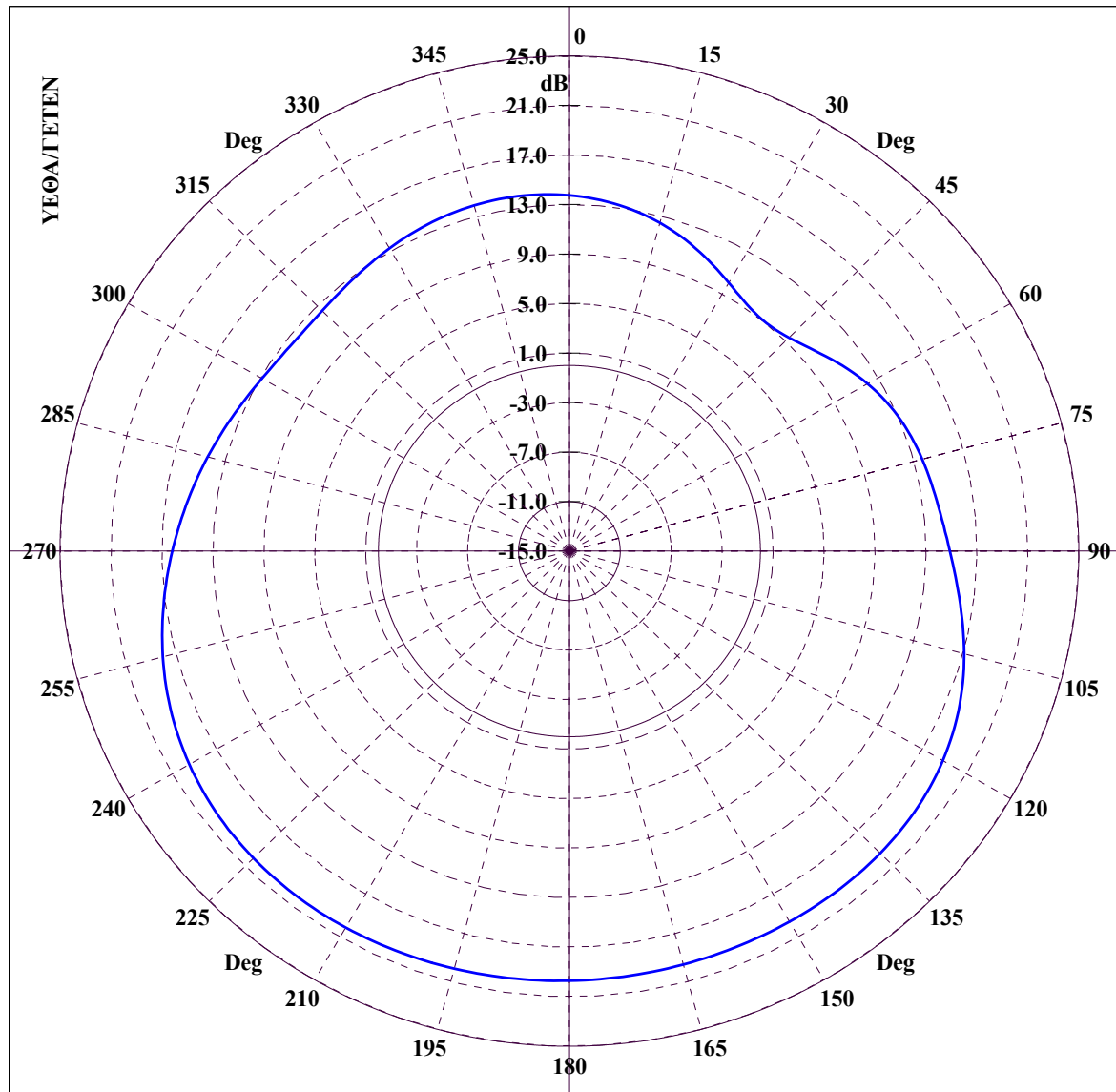
Διάγραμμα 5.170 : CRUISER, Κεραία 2 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 5^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .



File Name :CRU237-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 10.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

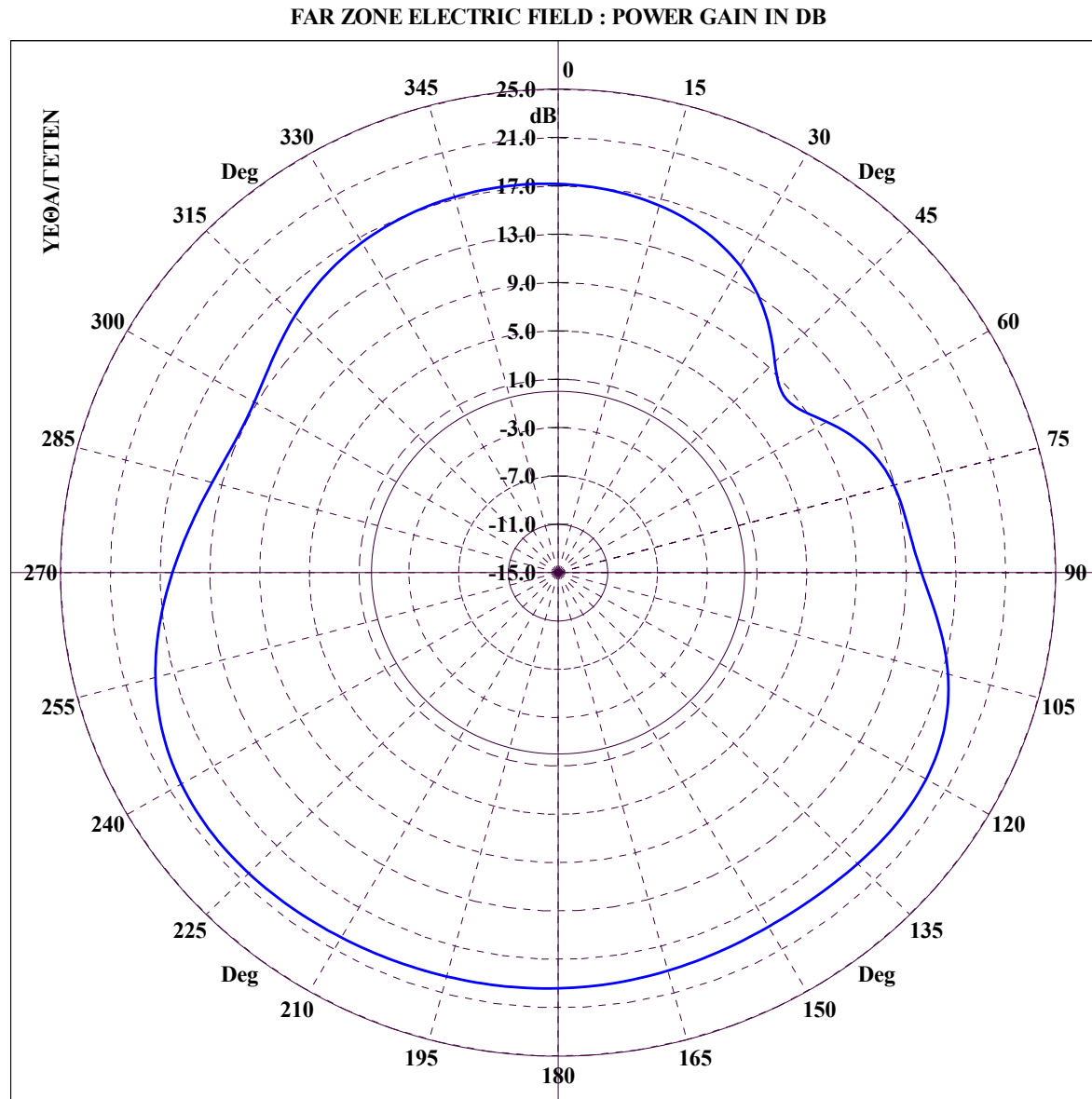
Διάγραμμα 5.171 : CRUISER, Κεραία 2 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 10^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .

FAR ZONE ELECTRIC FIELD : POWER GAIN IN DB



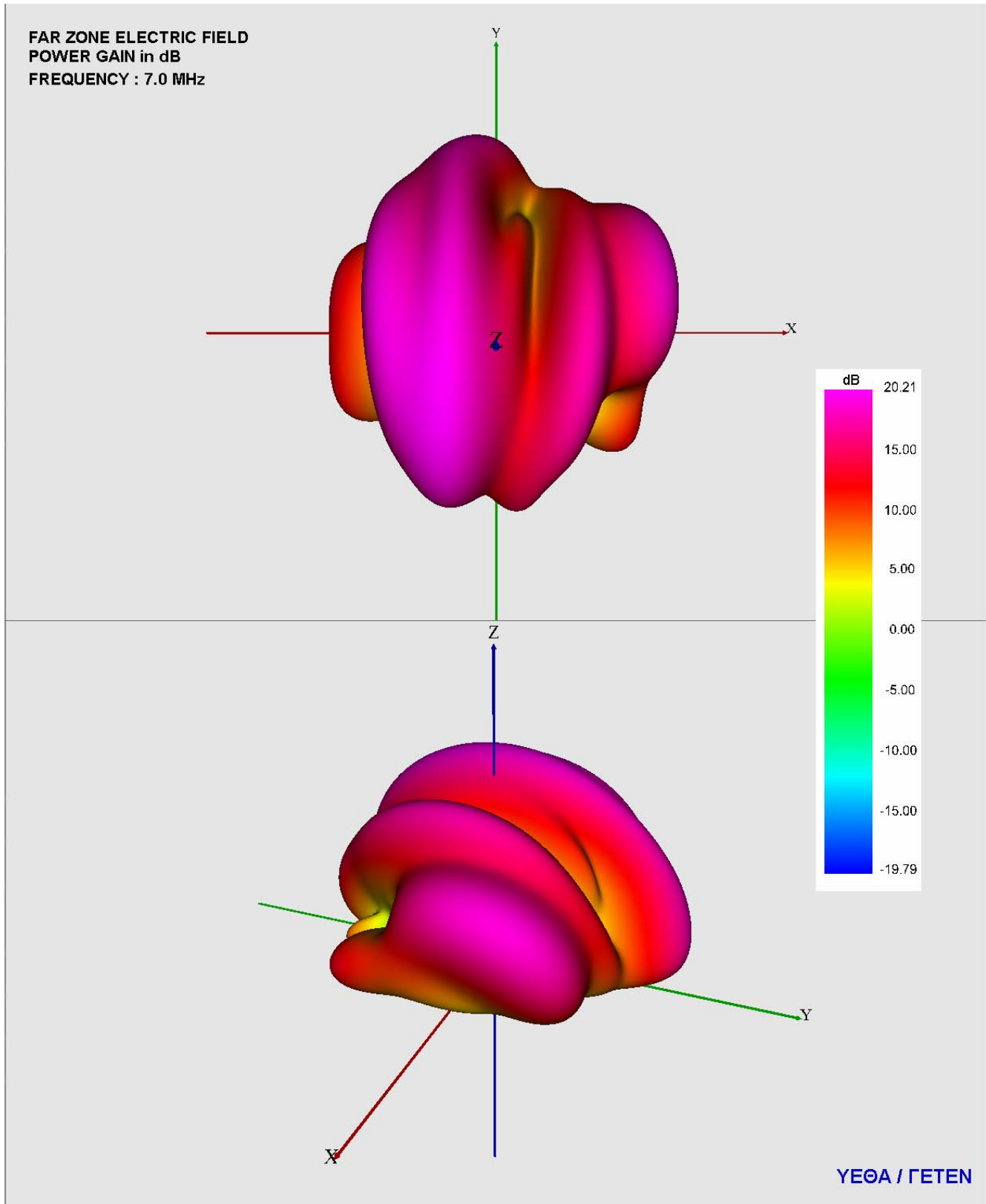
File Name :CRU237-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 15.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

Διάγραμμα 5.172 : CRUISER, Κεραία 2 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 15^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .



File Name :CRU237-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 20.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

Διάγραμμα 5.173 : CRUISER, Κεραία 2 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 20^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .

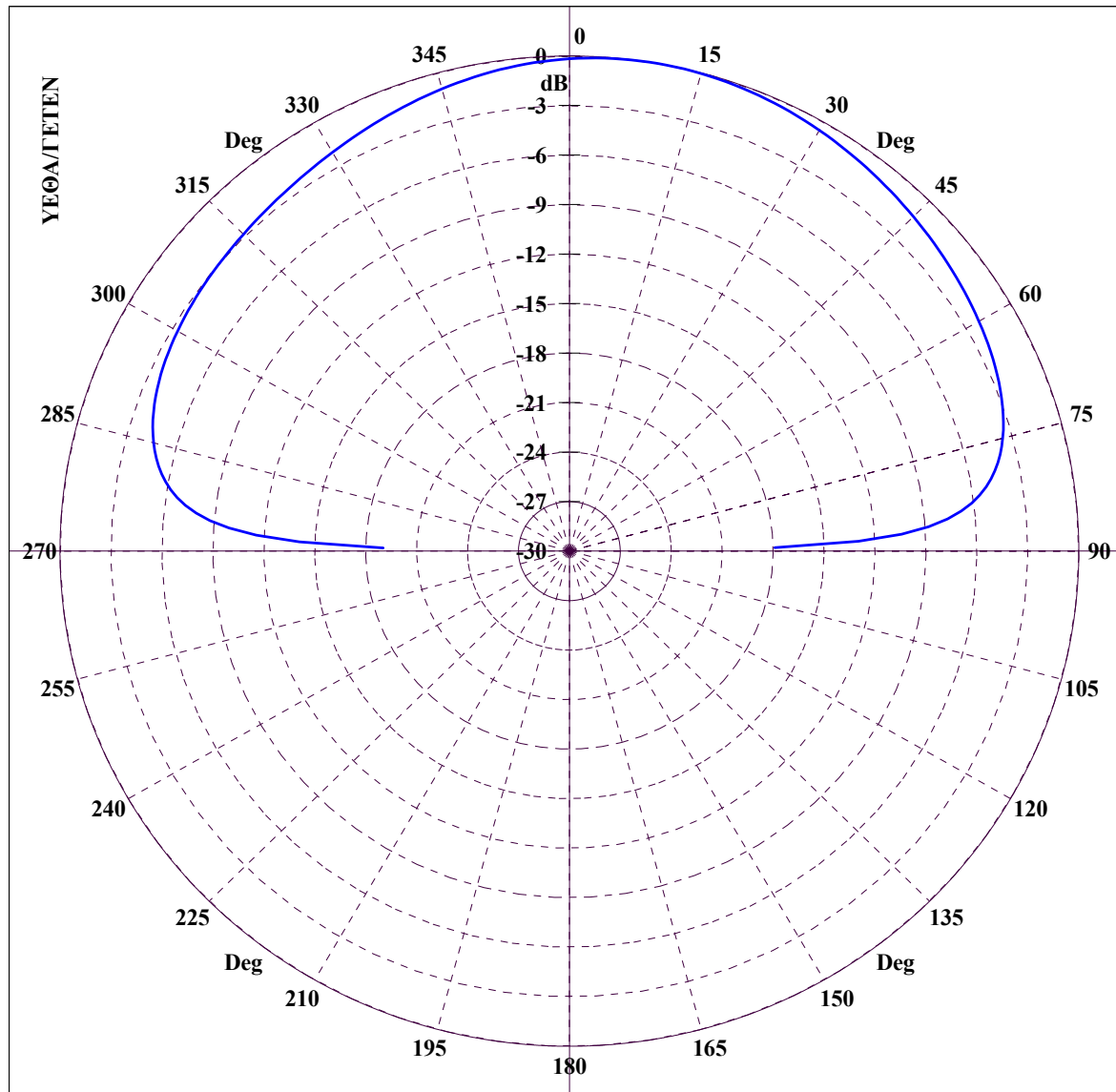


Διάγραμμα 5.174 : CRUISER, 3D διάγραμμα κέρδους ισχύος για κεραία 2 σε συχνότητα 7 MHz με χρήση VRML.



### ***5.6.2.3 Διαγράμματα ακτινοβολίας μακρινού πεδίου κεραίας 3***

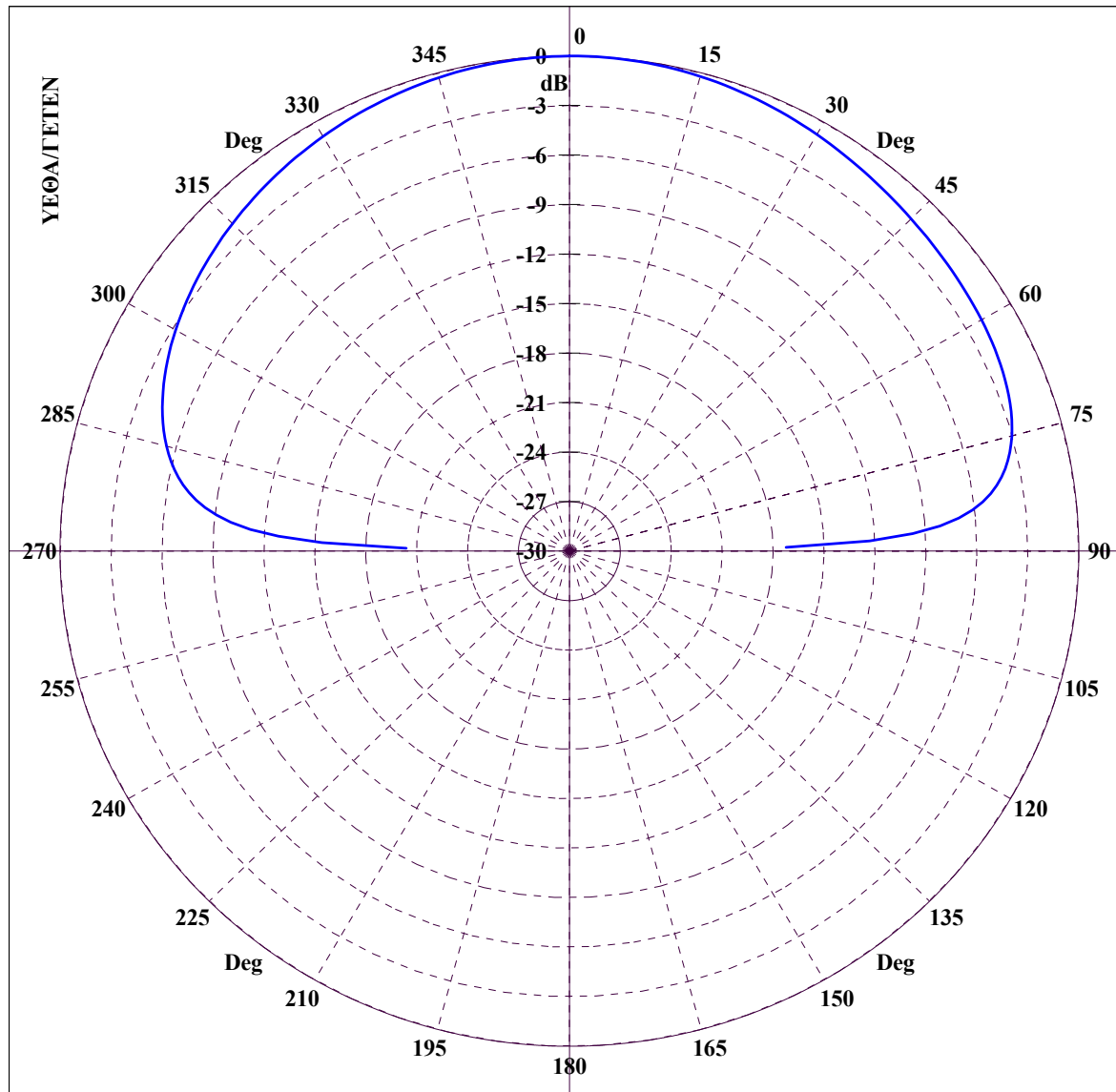
FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



File Name :CRU42-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 0.00$ ,  $\Theta=0-360$ , FREQUENCY = 2.00 MHz

Διάγραμμα 5.175 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 2 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 0^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

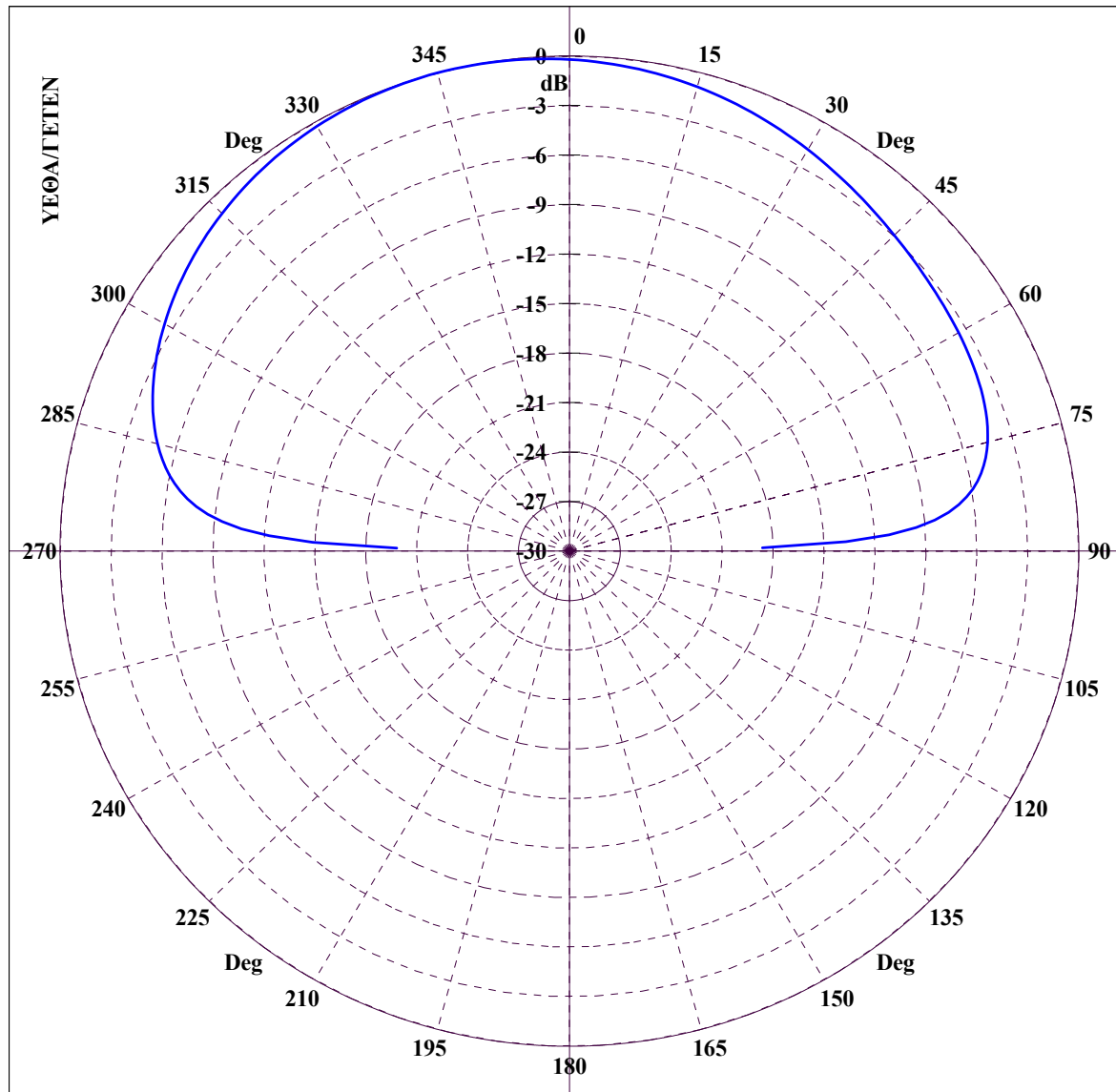
FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



File Name :CRU42-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 45.00$ ,  $\Theta = 0-360$ , FREQUENCY = 2.00 MHz

Διάγραμμα 5.176 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 2 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\varphi = 45^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

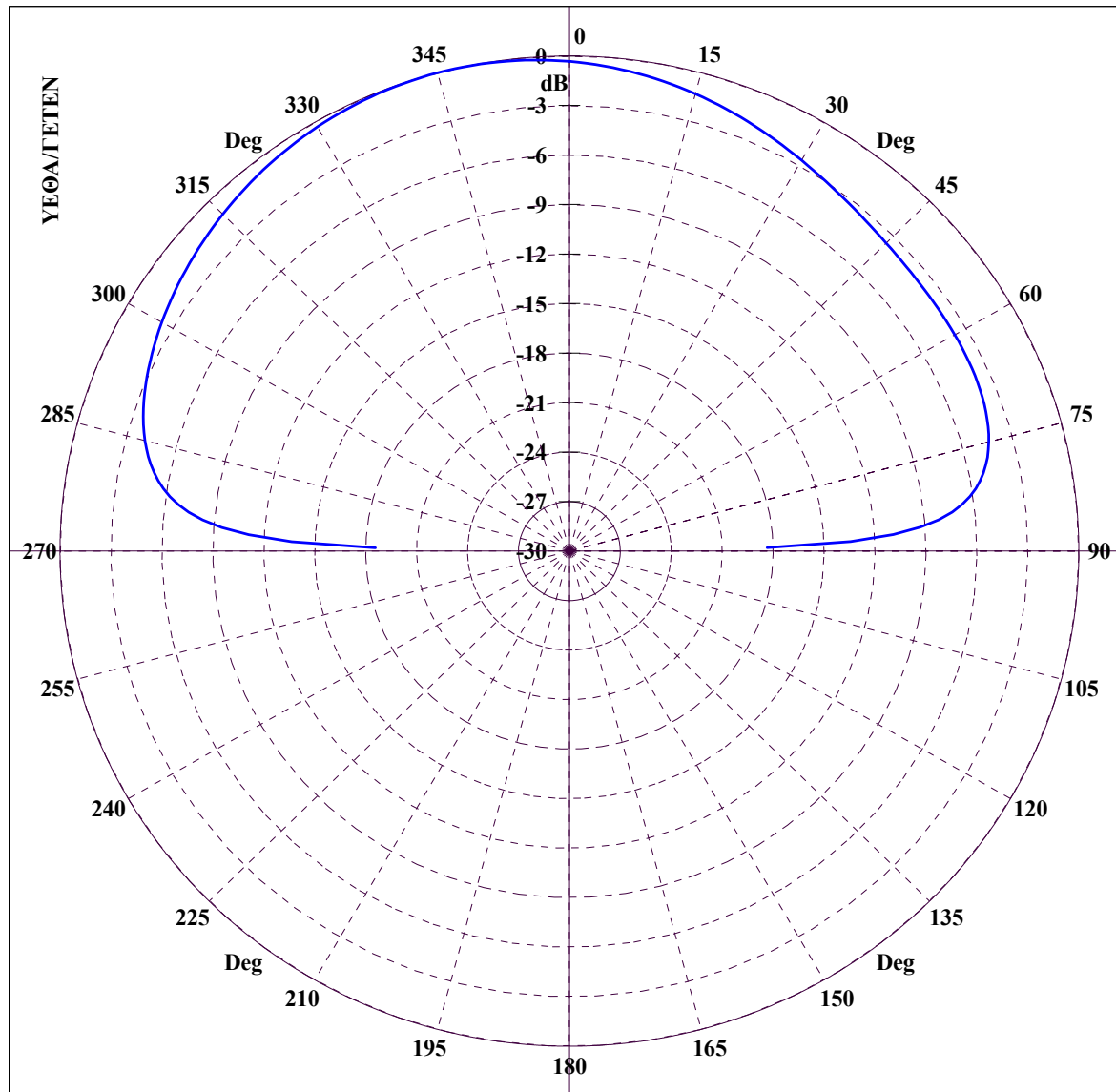
FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



File Name :CRU42-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 90.00$ ,  $\Theta=0-360$ , FREQUENCY = 2.00 MHz

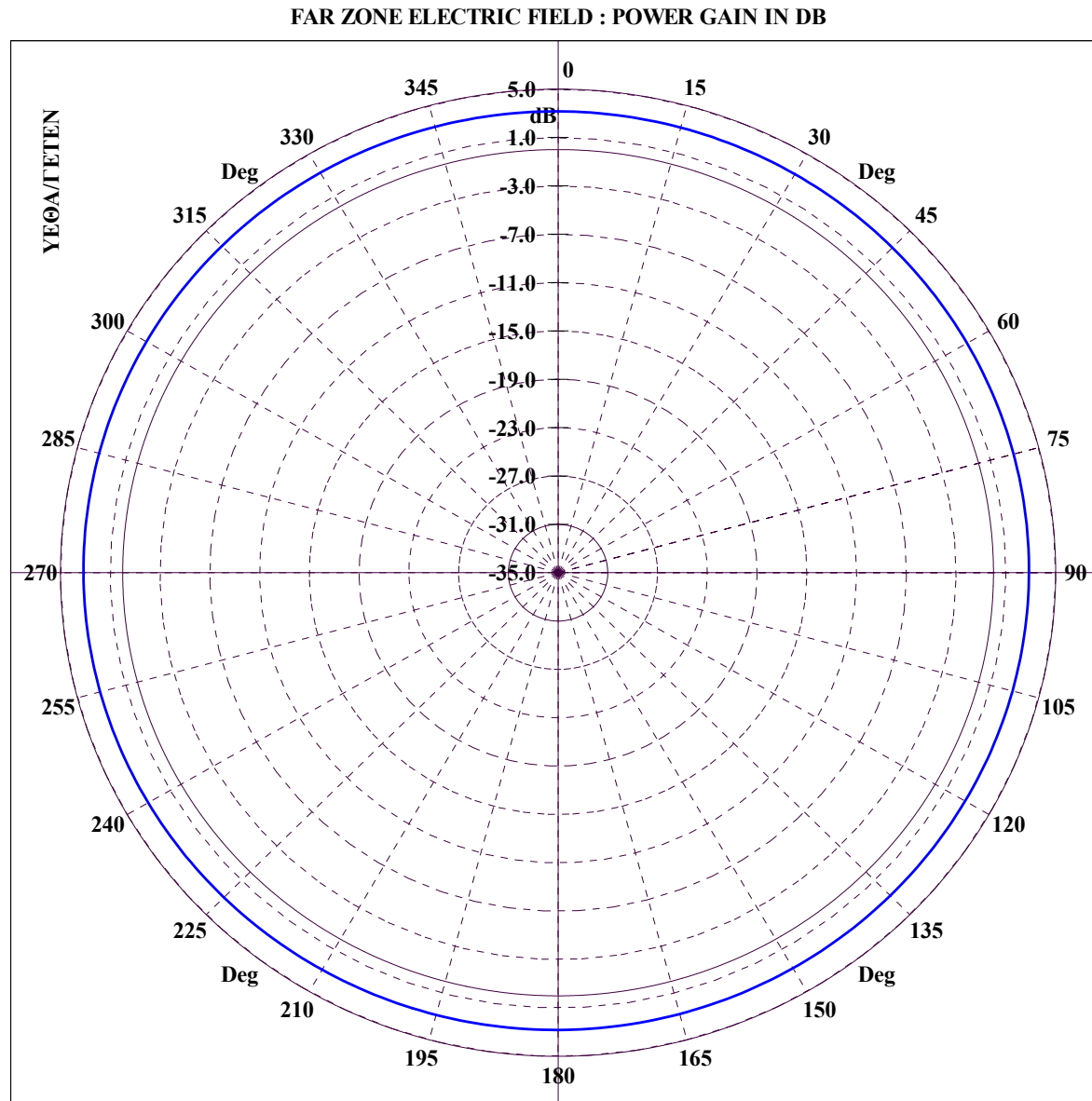
Διάγραμμα 5.177 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 2 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\varphi = 90^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



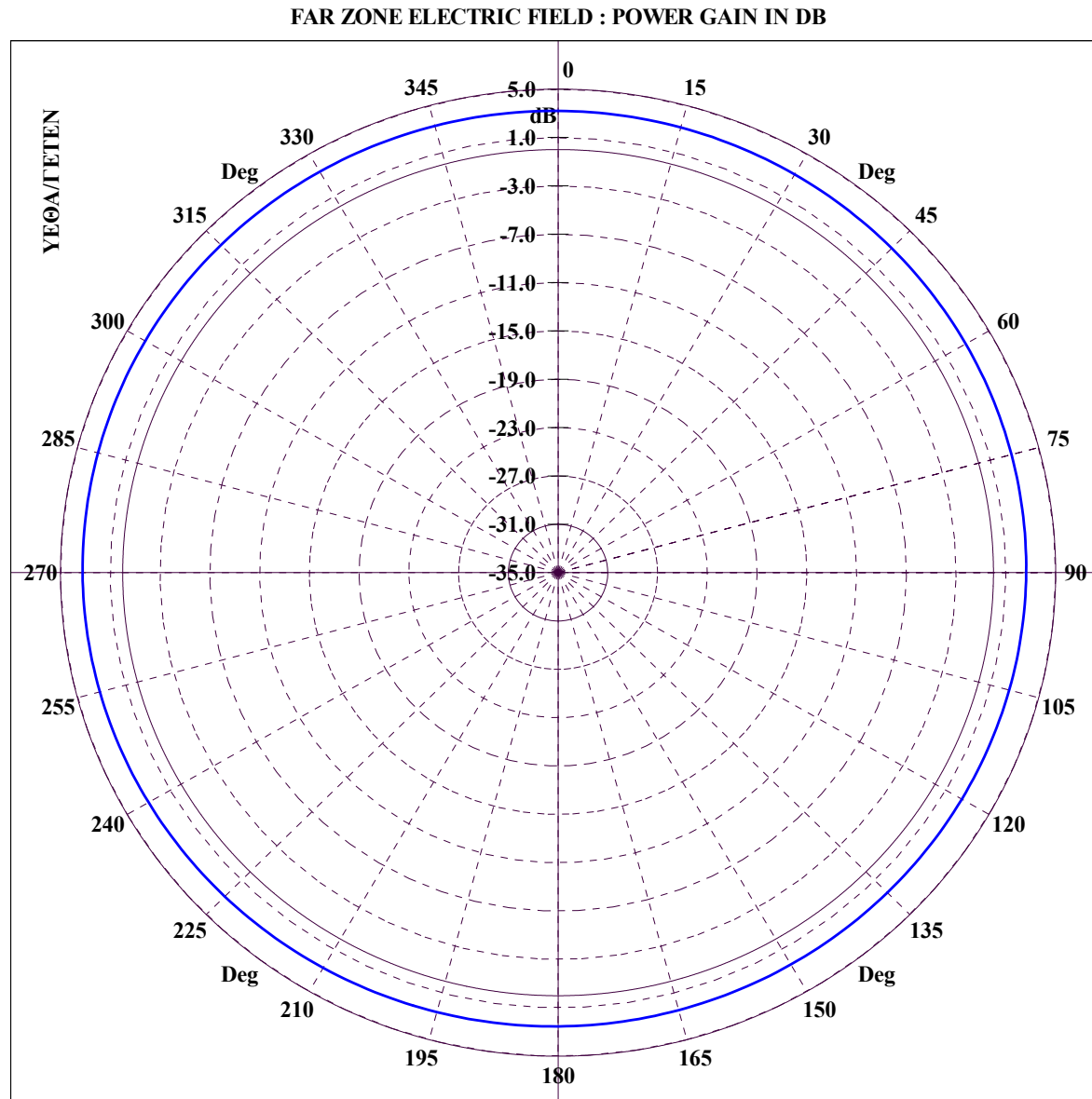
File Name :CRU42-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 135.00$ ,  $\Theta = 0-360$ , FREQUENCY = 2.00 MHz

Διάγραμμα 5.178 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 2 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 135^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .



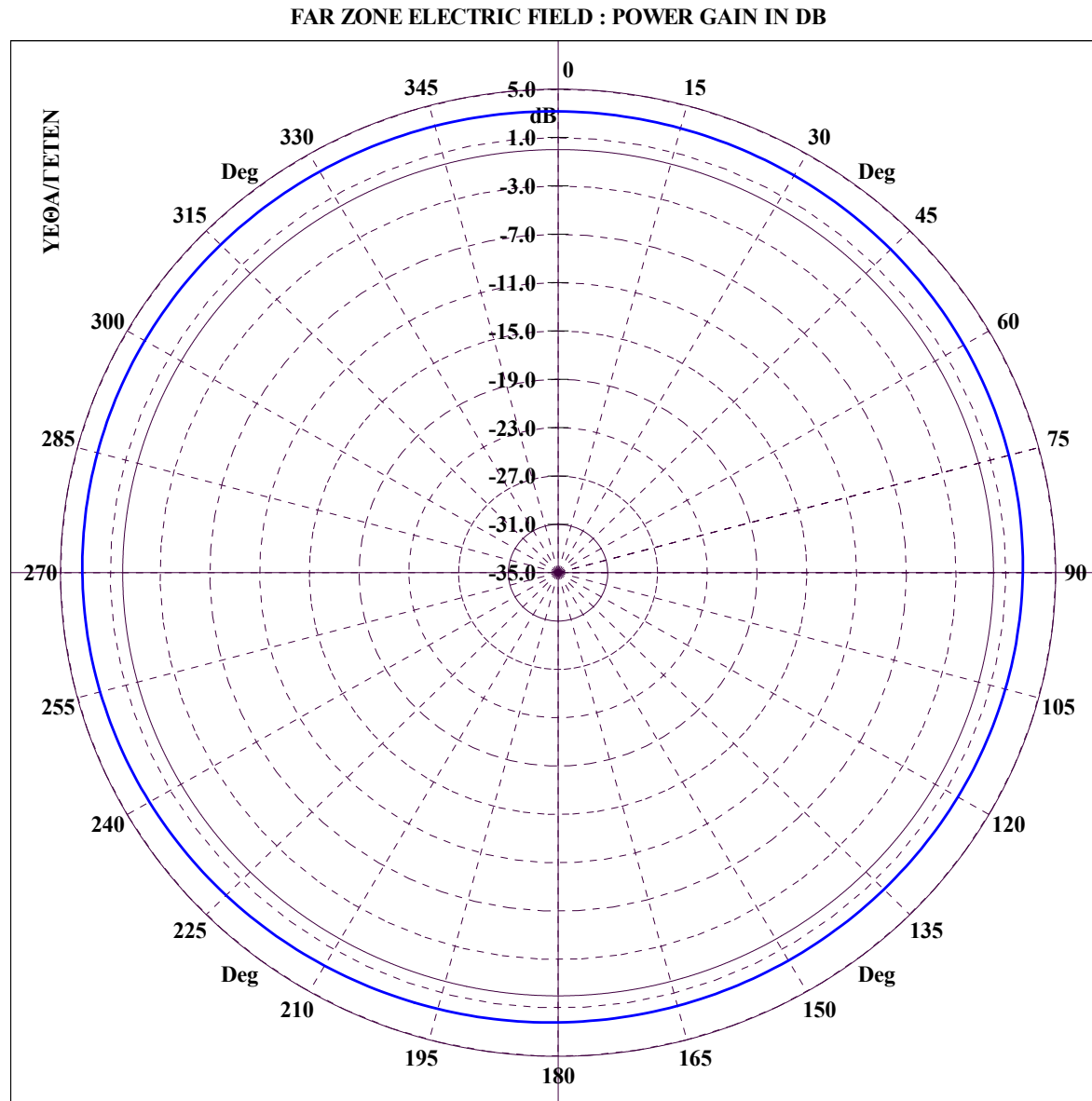
File Name :CRU42-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 5.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 2.00 MHz

Διάγραμμα 5.179 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 2 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 5^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .



File Name :CRU42-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 10.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 2.00 MHz

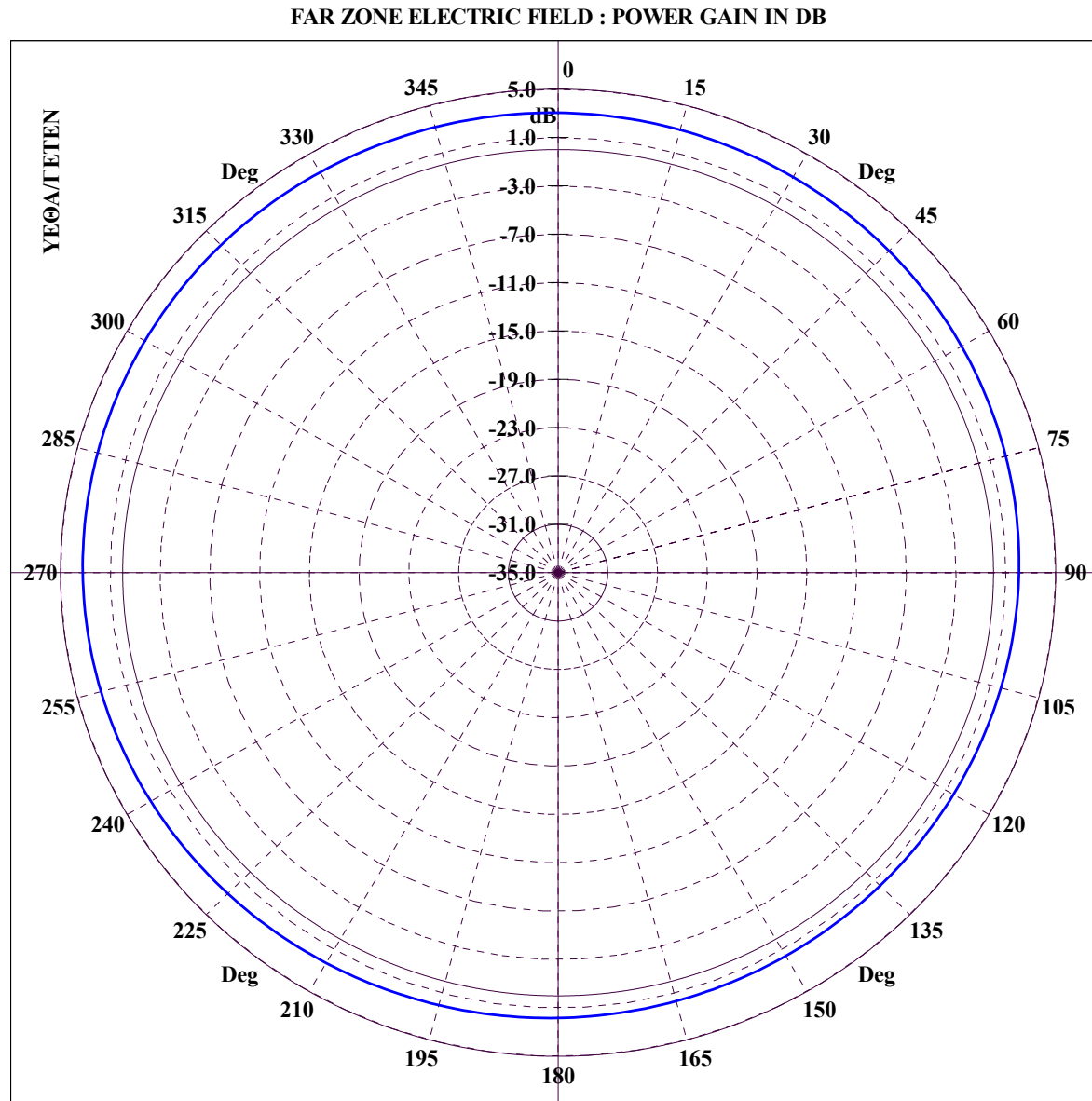
Διάγραμμα 5.180 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 2 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 10^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .



File Name :CRU42-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\theta = 15.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 2.00 MHz

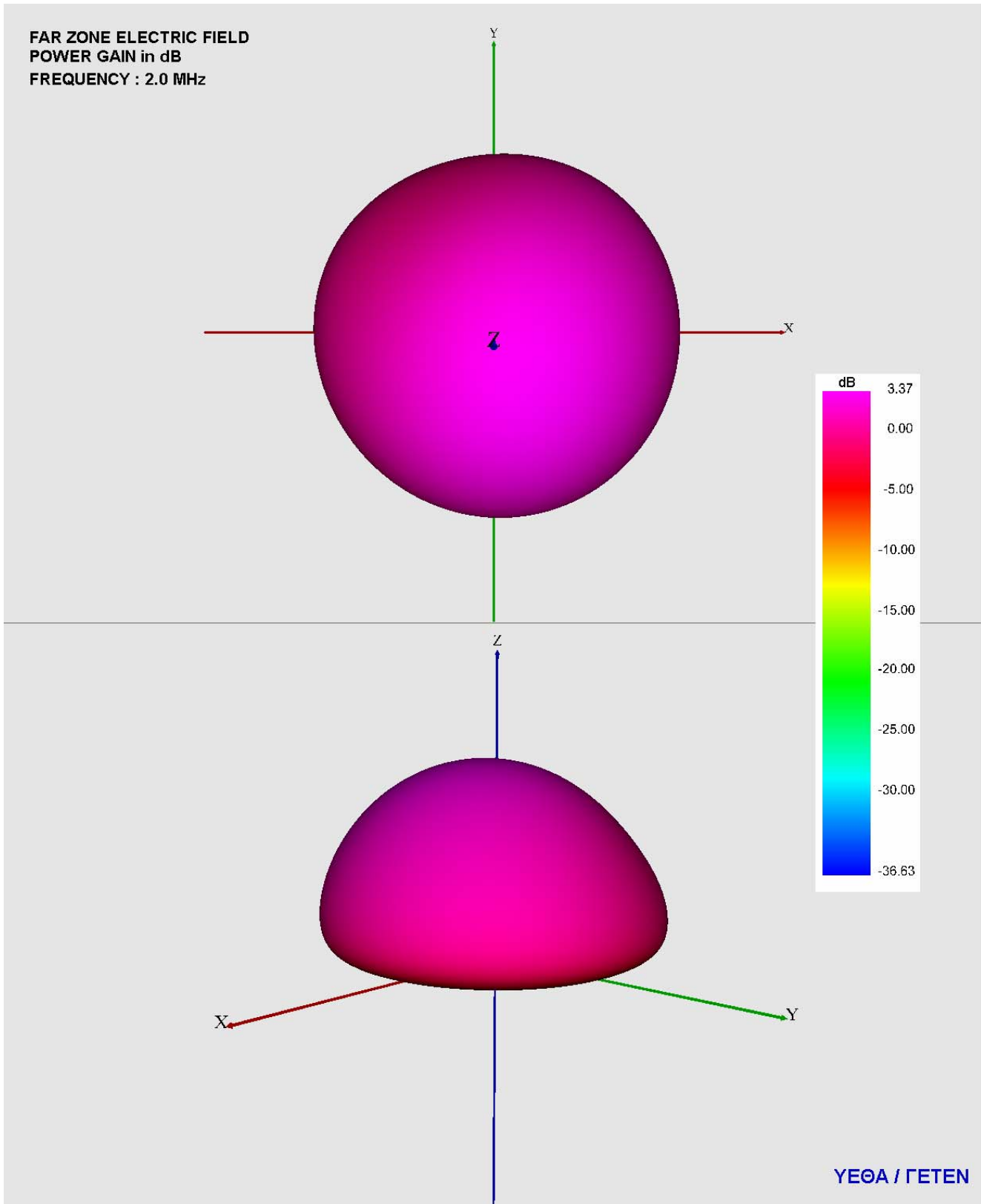
Διάγραμμα 5.181 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 2 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 15^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .





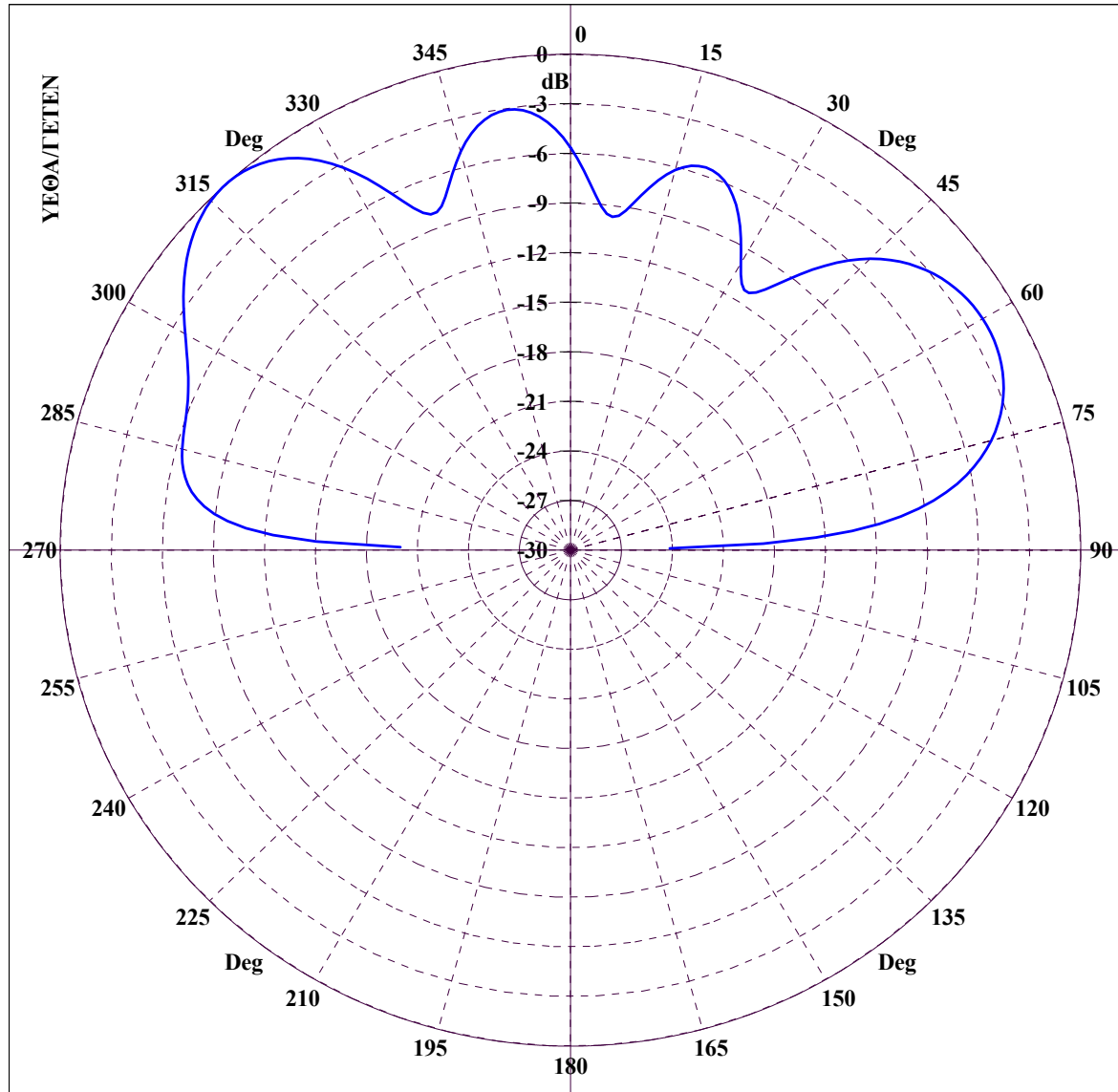
File Name :CRU42-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 20.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 2.00 MHz

Διάγραμμα 5.182 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 2 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 20^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .



Διάγραμμα 5.183 : CRUISER, 3D διάγραμμα κέρδους ισχύος για κεραία 3 σε συχνότητα 2 MHz με χρήση VRML.

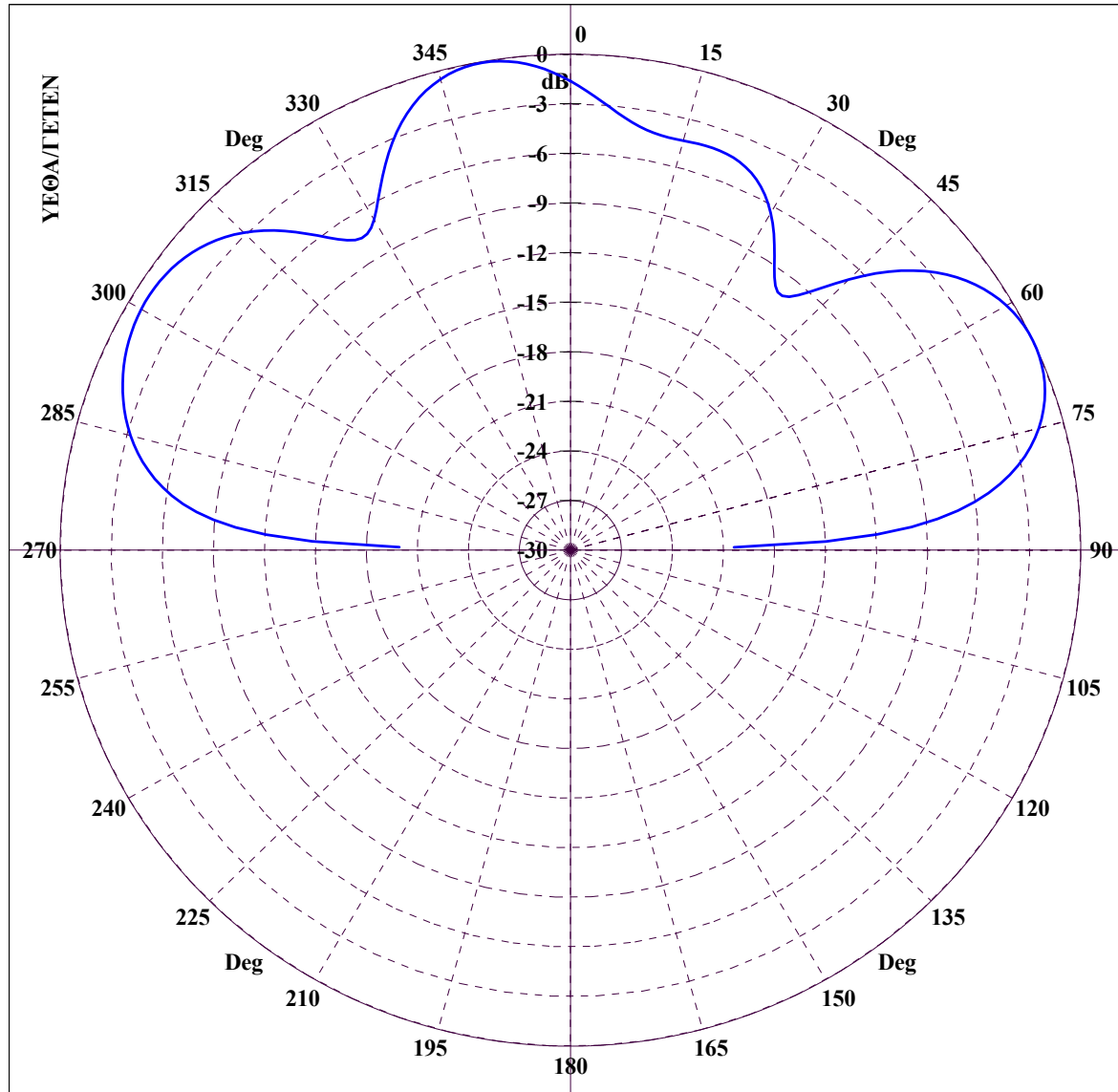
FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



File Name :CRU45-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 0.00$ ,  $\Theta=0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

Διάγραμμα 5.184 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 0^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

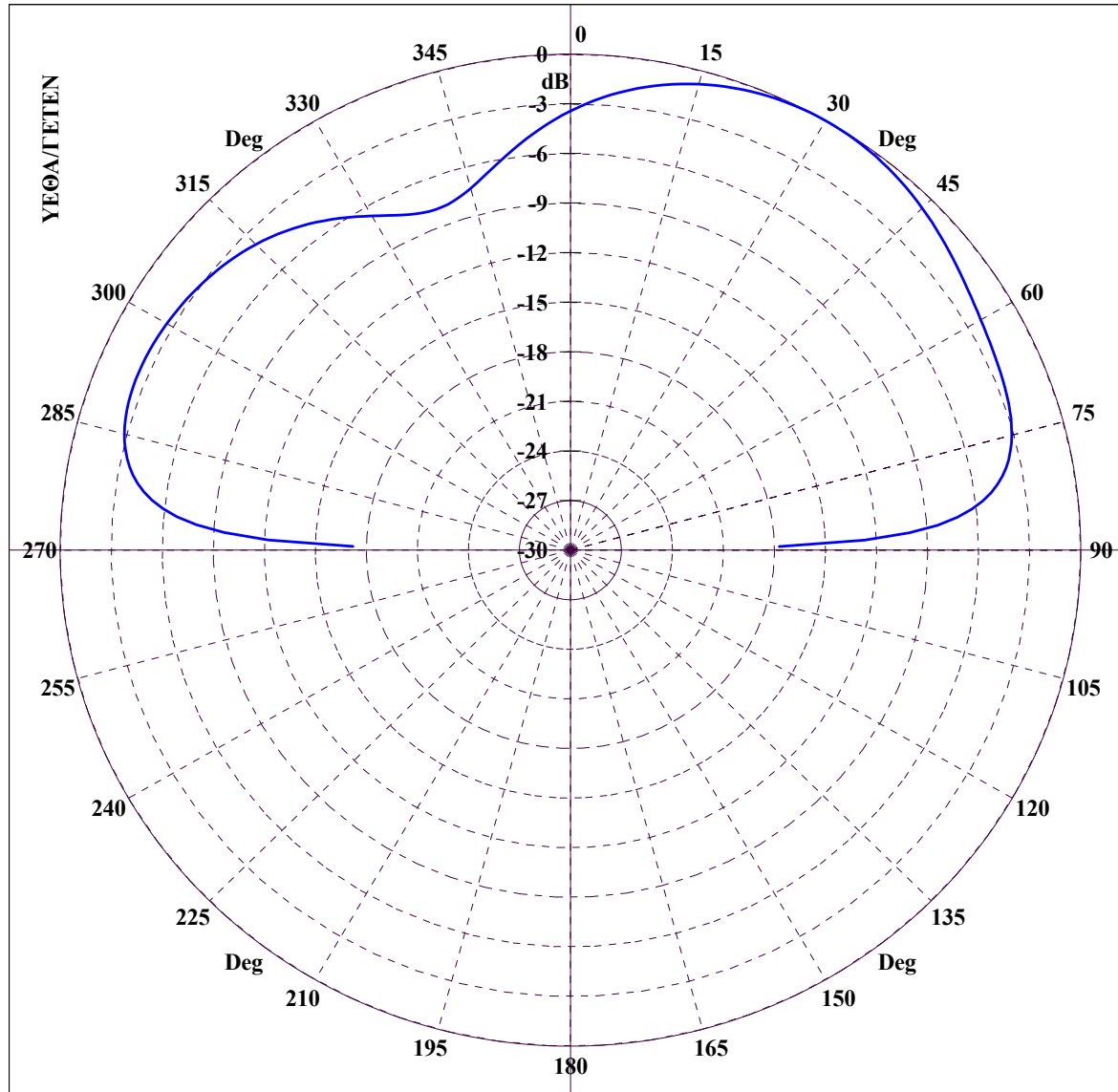
FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



File Name :CRU45-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 45.00$ ,  $\Theta = 0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

Διάγραμμα 5.185 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 45^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

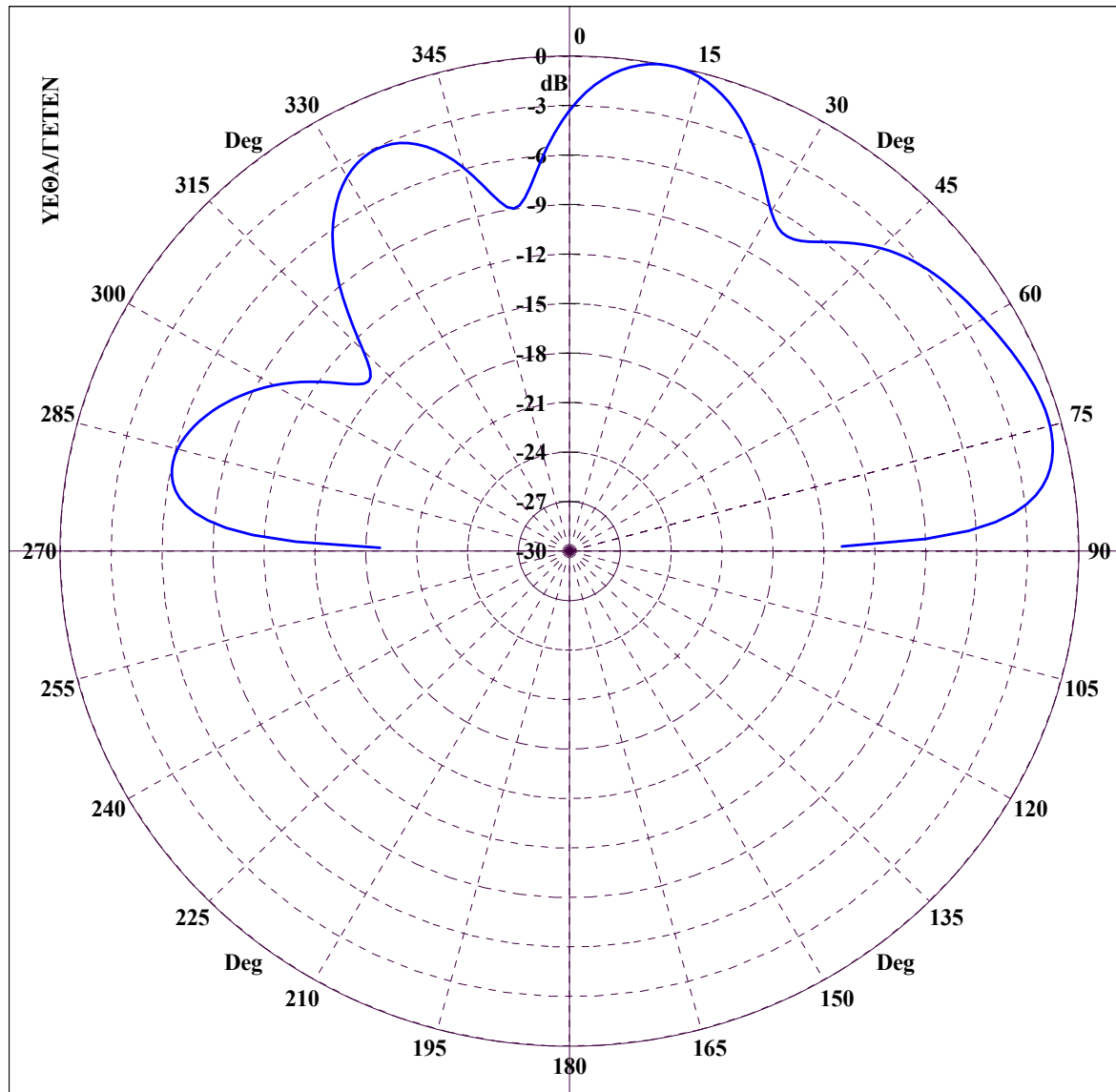
FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



File Name :CRU45-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 90.00$ ,  $\Theta = 0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

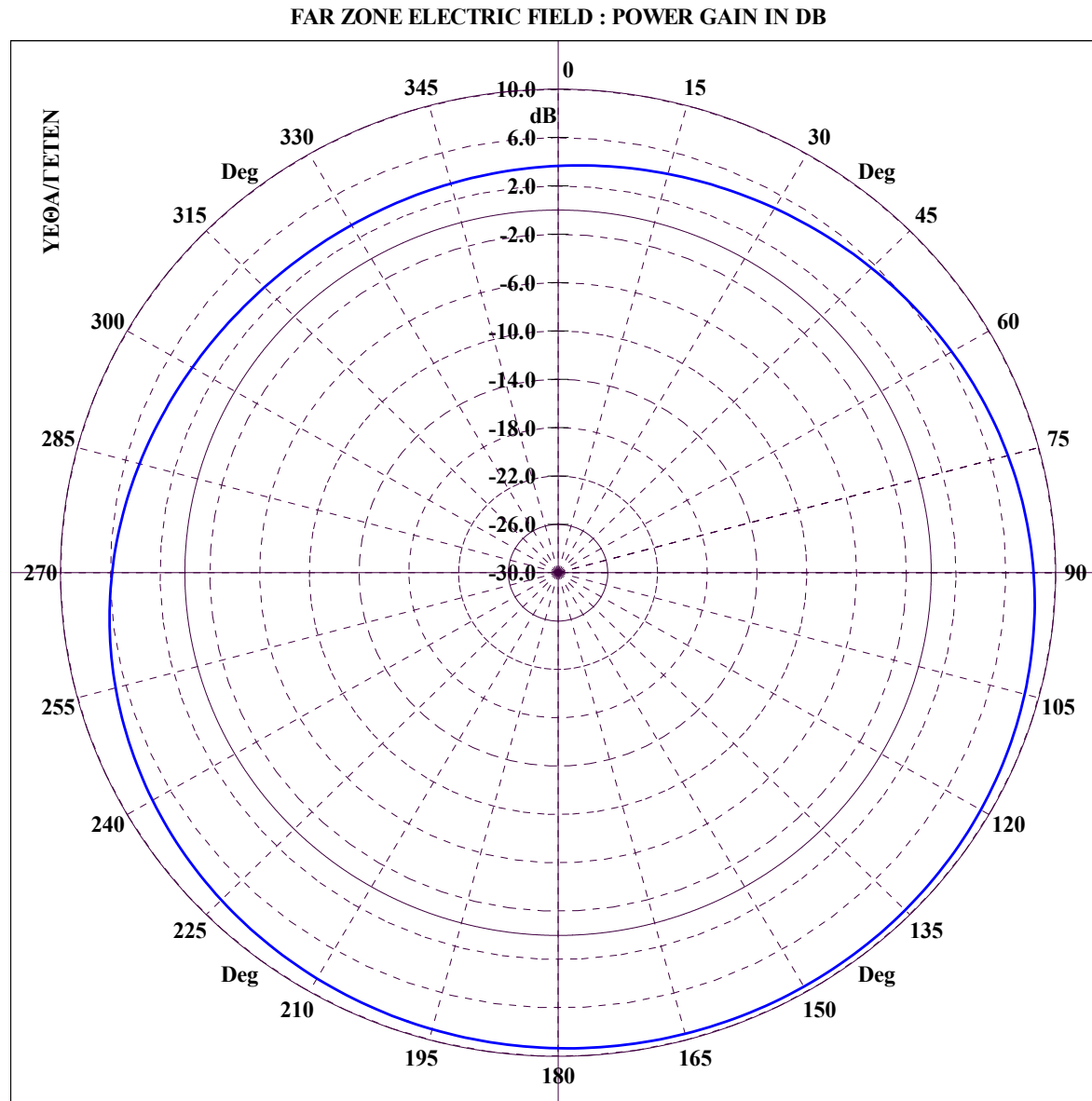
Διάγραμμα 5.186 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\varphi = 90^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



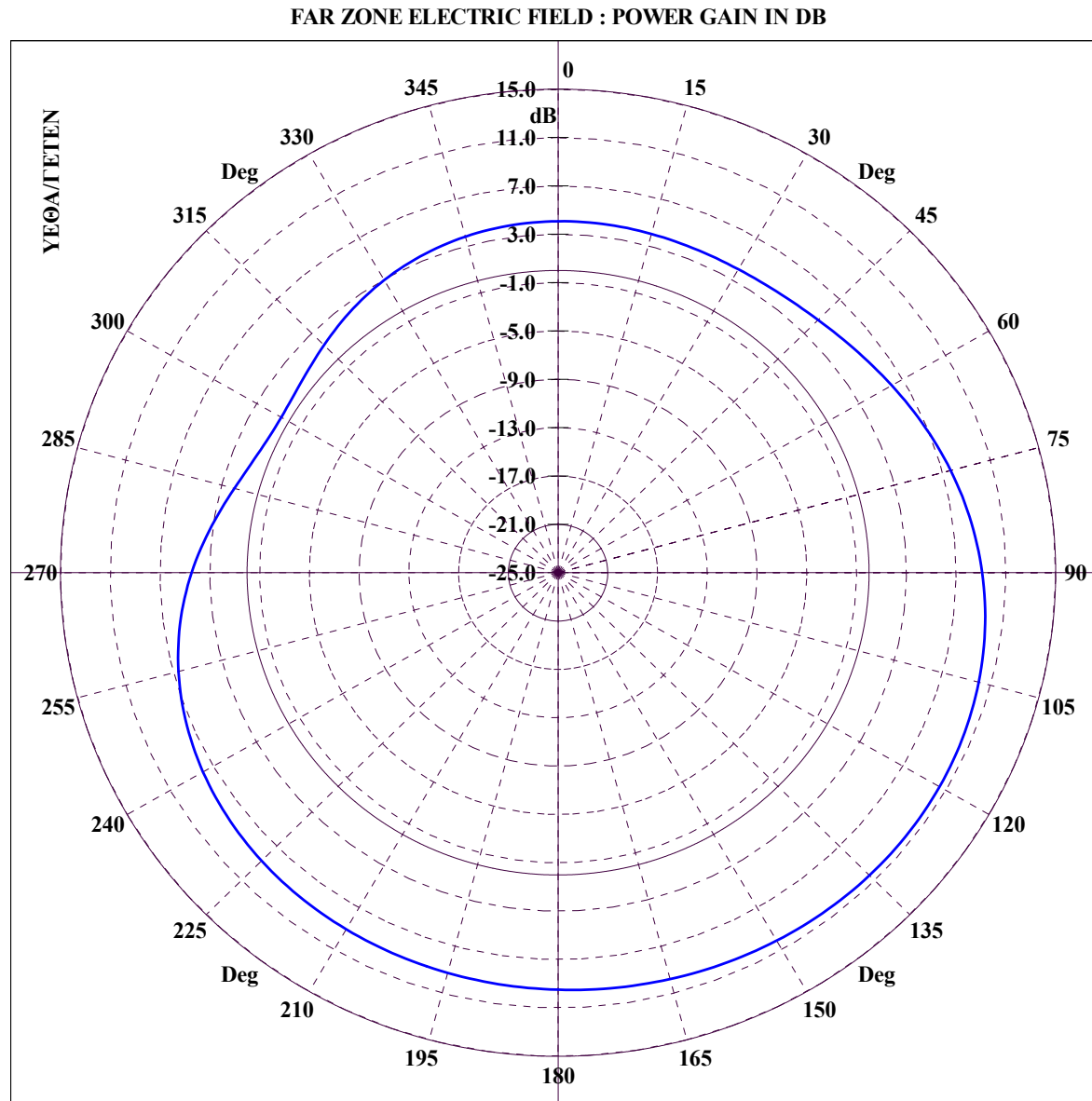
File Name :CRU45-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 135.00$ ,  $\Theta = 0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

Διάγραμμα 5.187 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 135^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .



File Name :CRU45-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 5.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

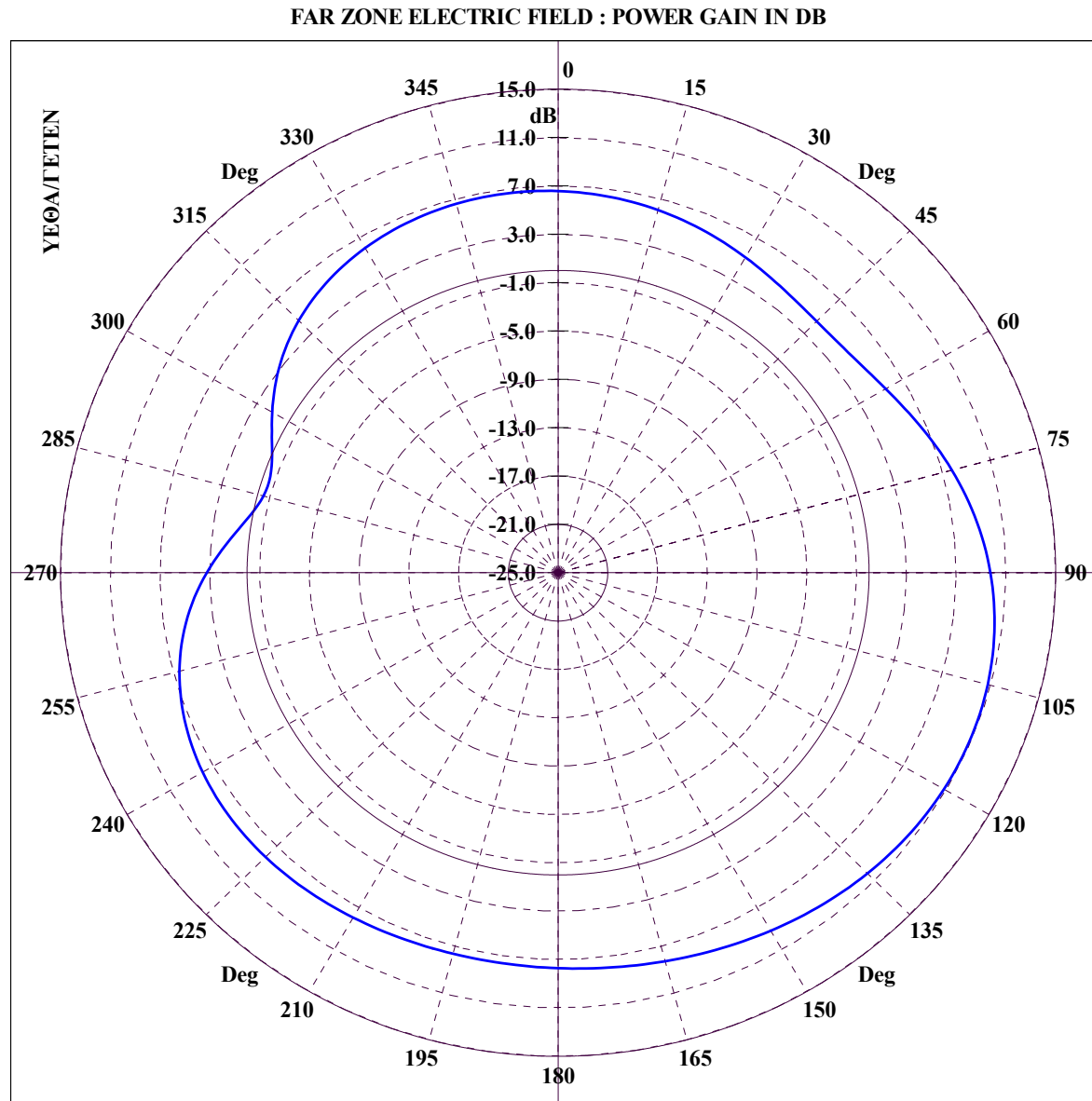
Διάγραμμα 5.188 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 5^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .



File Name :CRU45-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 10.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

Διάγραμμα 5.189 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 10^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .

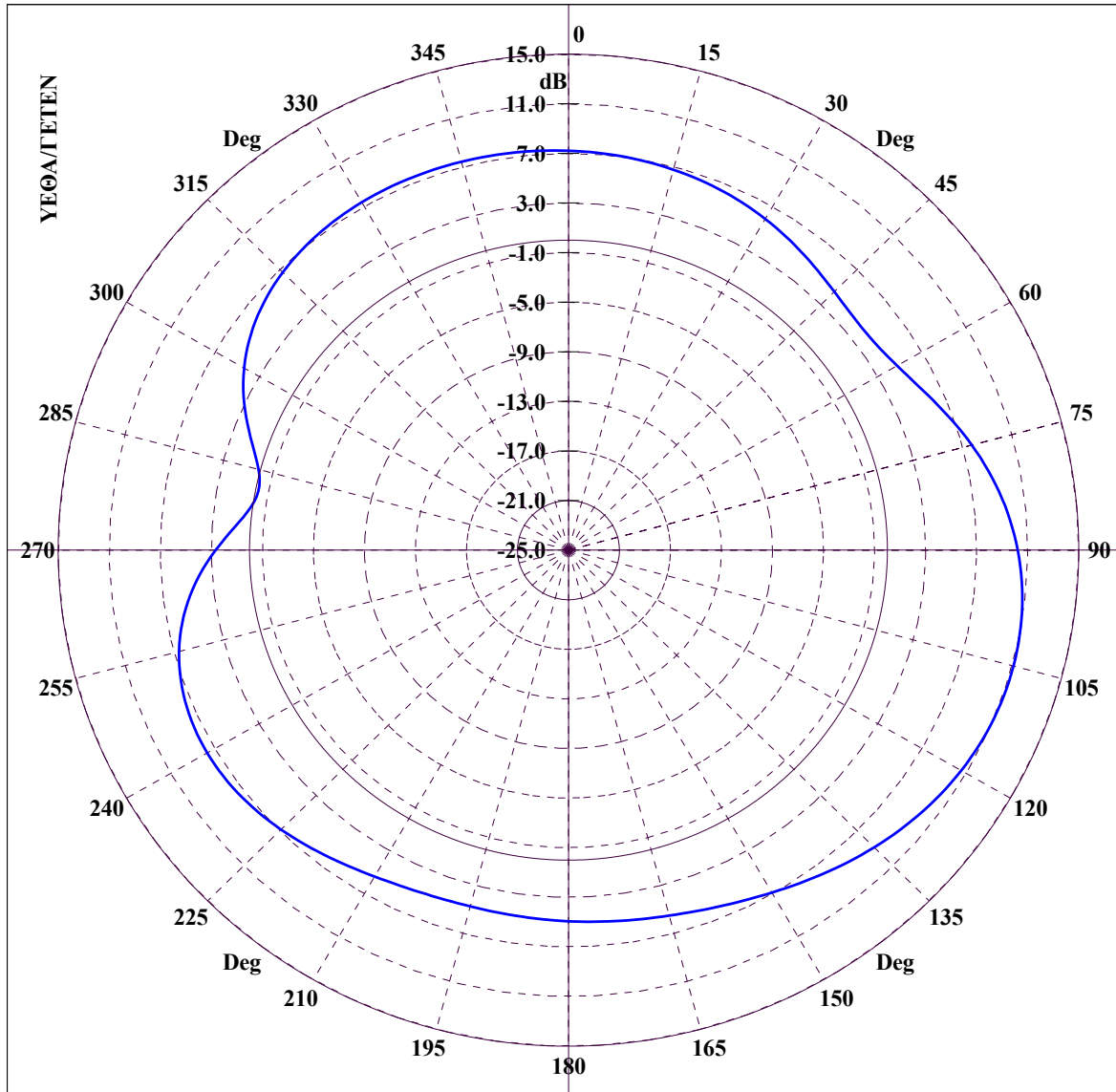




File Name :CRU45-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 15.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

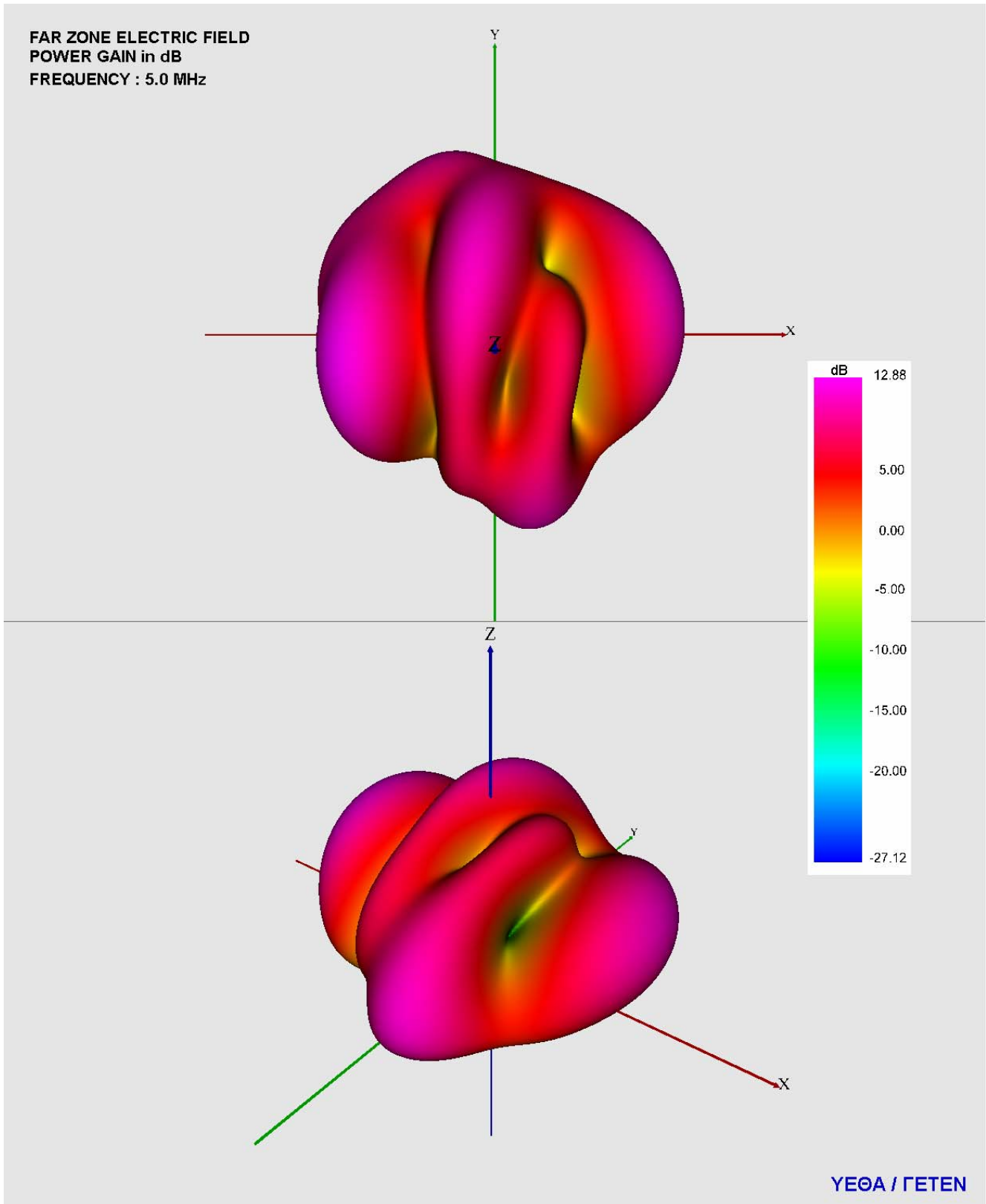
Διάγραμμα 5.190 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 15^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .

FAR ZONE ELECTRIC FIELD : POWER GAIN IN DB



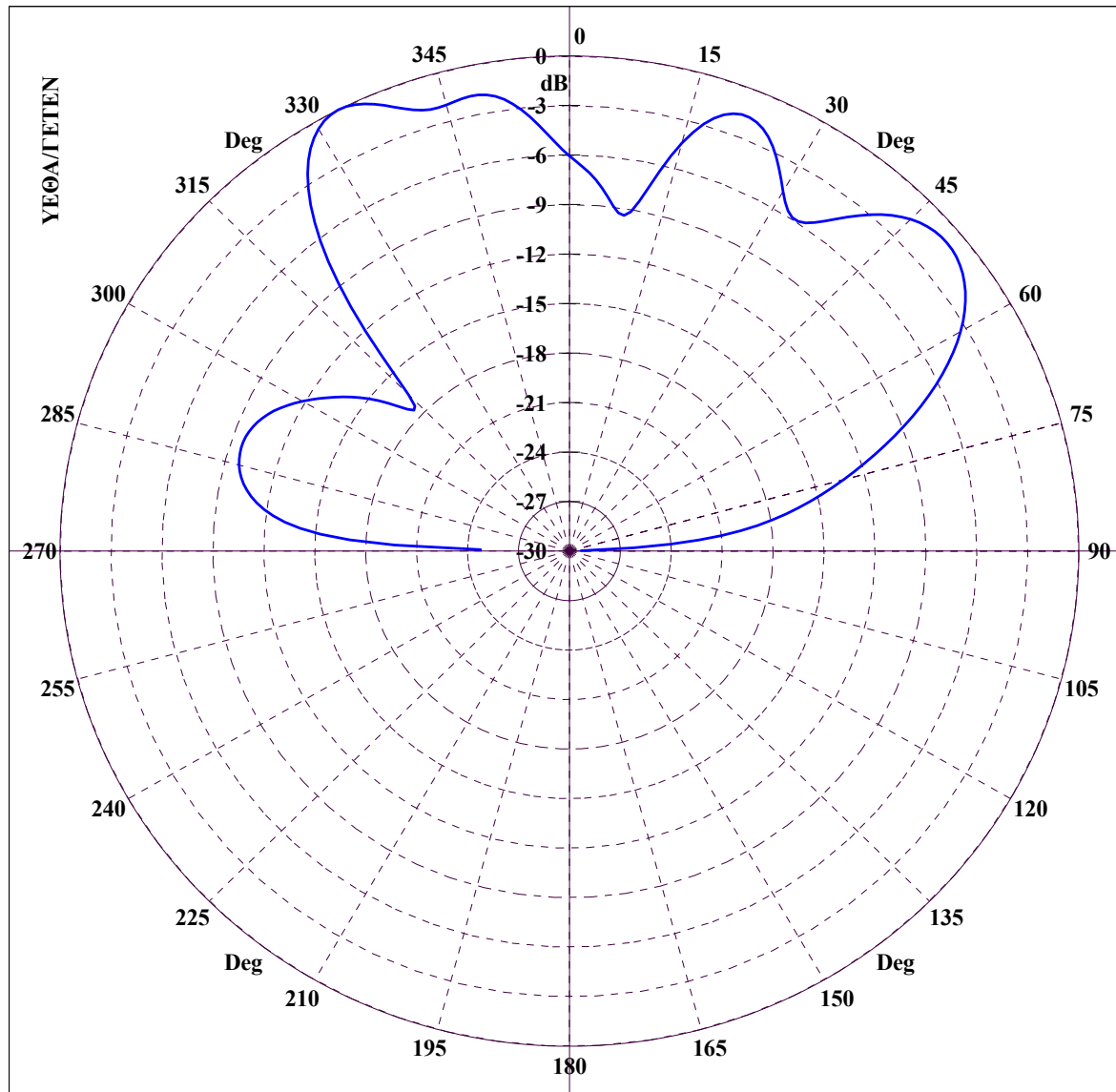
File Name :CRU45-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 20.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

Διάγραμμα 5.191 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 20^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .



Διάγραμμα 5.192 : CRUISER, 3D διάγραμμα κέρδους ισχύος για κεραία 3 σε συχνότητα 5 MHz με χρήση VRML.

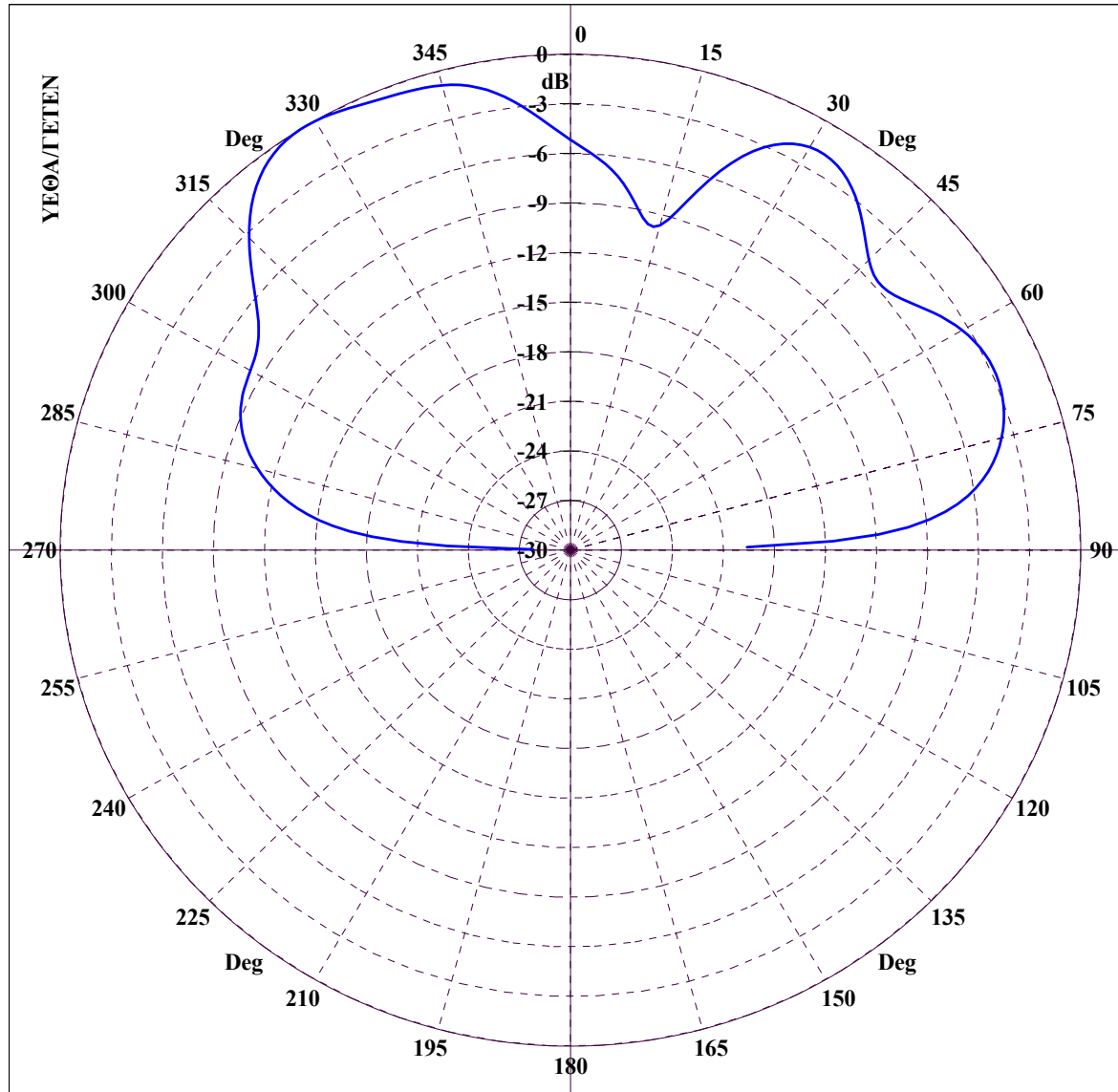
FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



File Name :CRU47-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 0.00$ ,  $\Theta=0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

Διάγραμμα 5.193 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 0^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

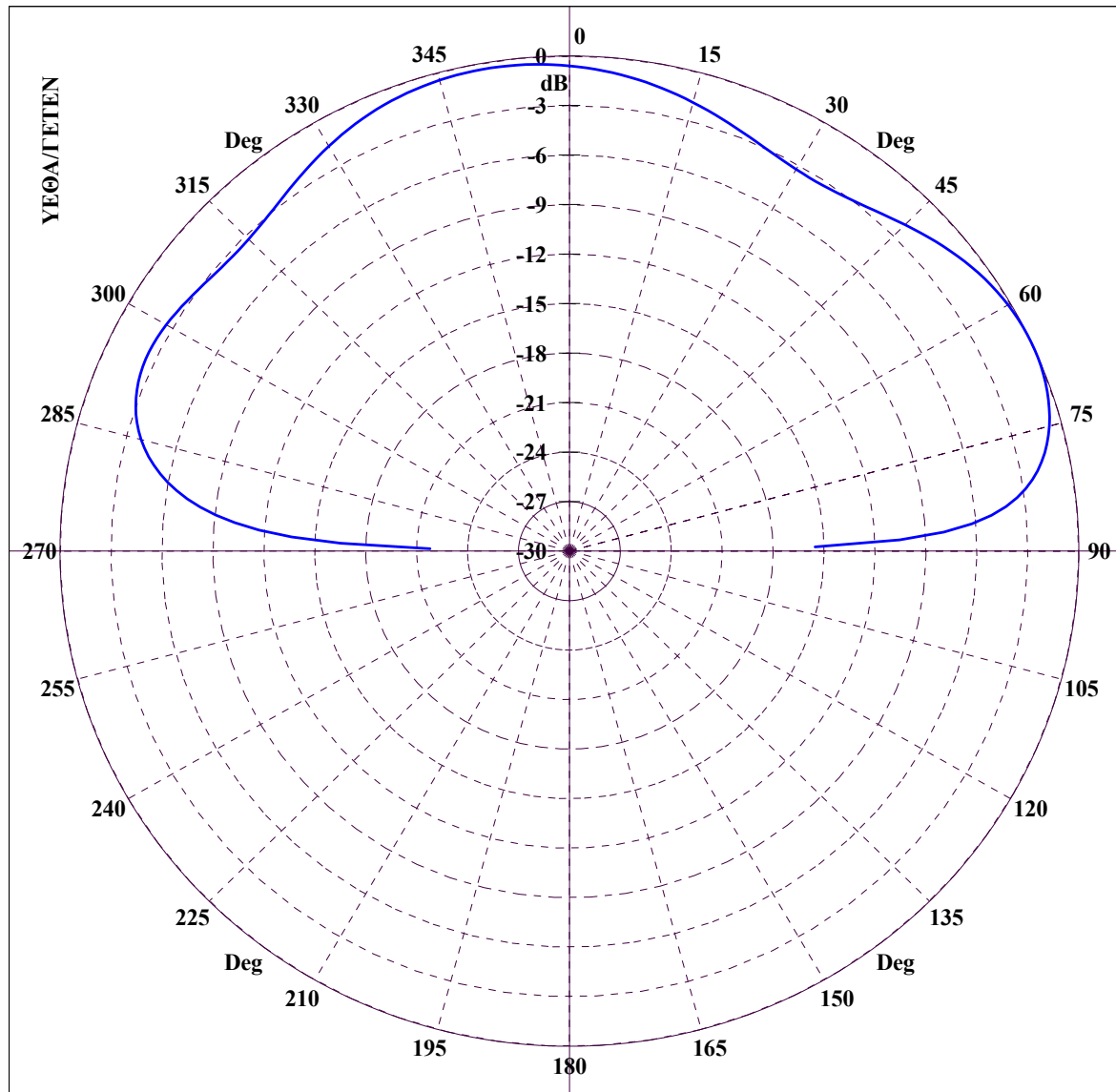
FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



File Name :CRU47-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 45.00$ ,  $\Theta = 0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

Διάγραμμα 5.194 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\varphi = 45^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

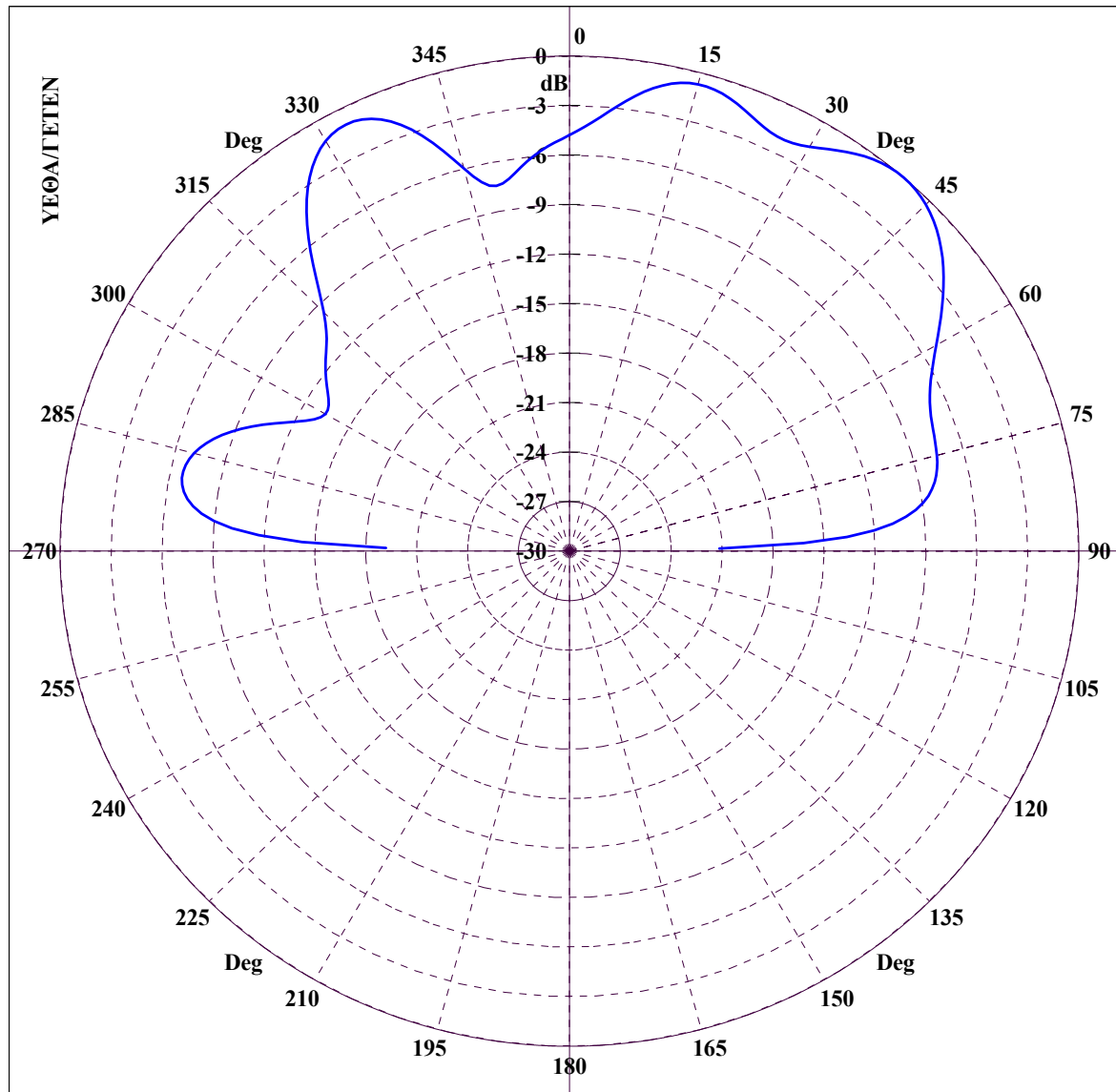
FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



File Name :CRU47-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 90.00$ ,  $\Theta=0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

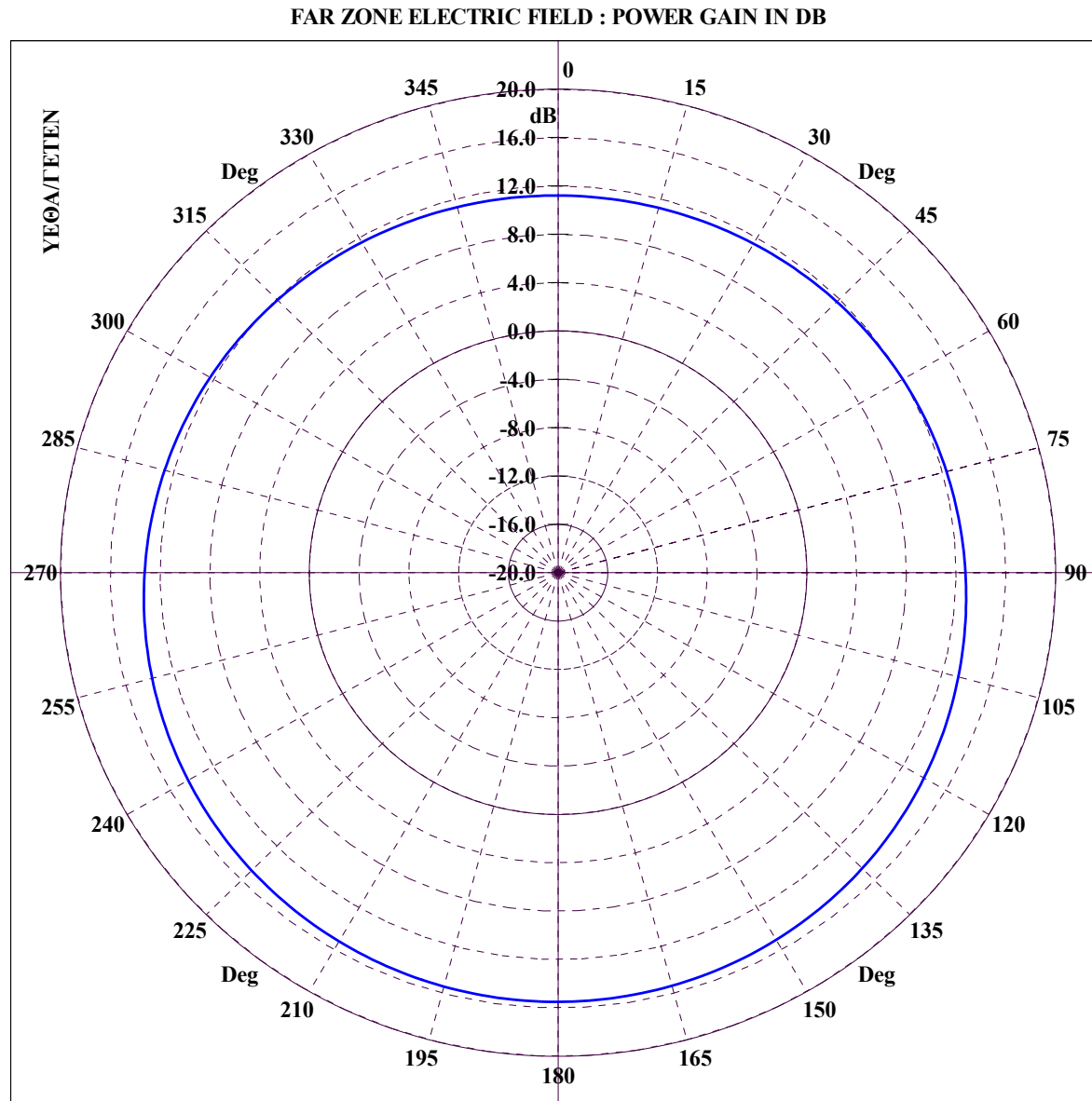
Διάγραμμα 5.195 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\varphi = 90^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



File Name :CRU47-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 135.00$ ,  $\Theta = 0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

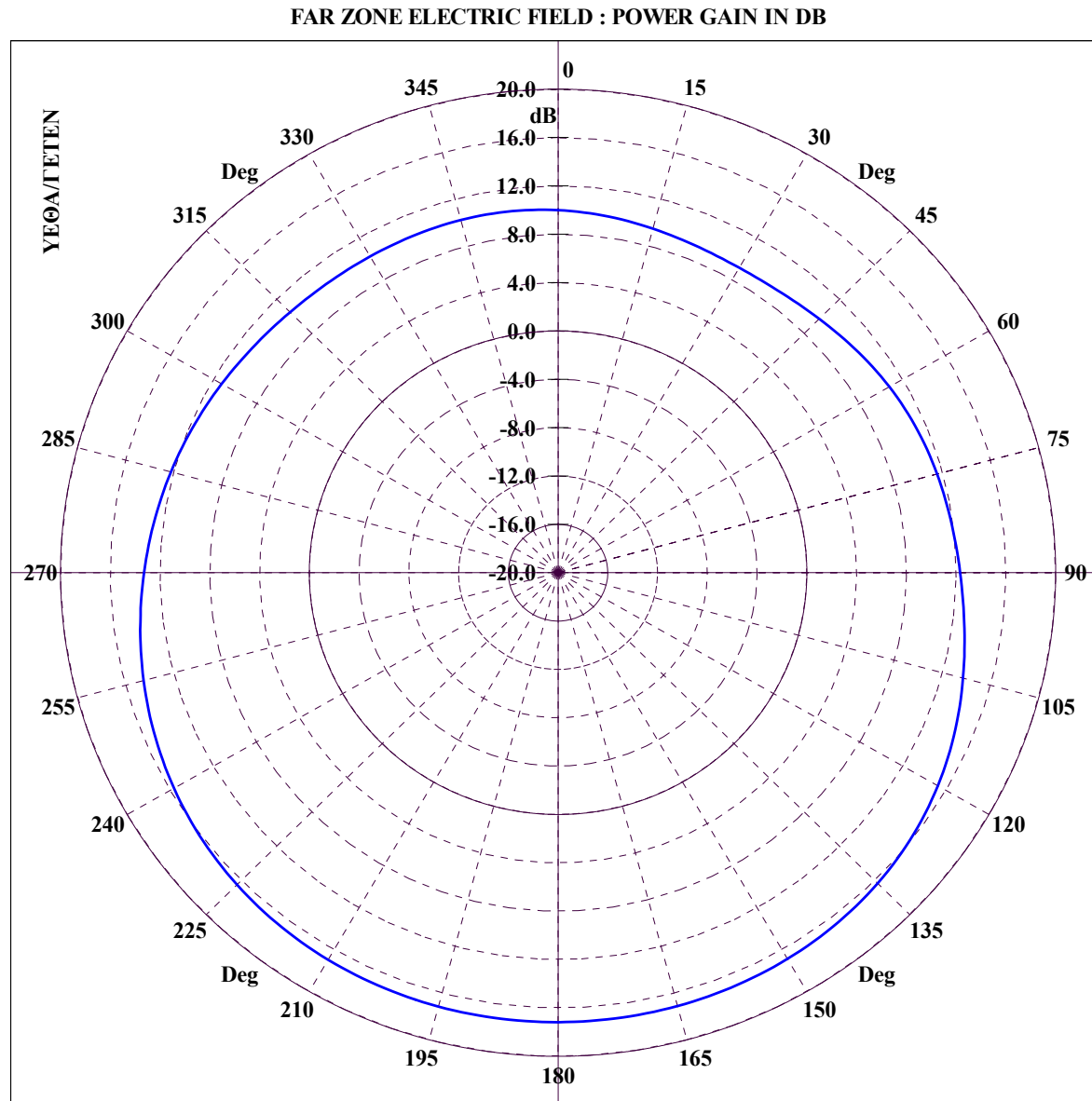
Διάγραμμα 5.196 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 135^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .



File Name :CRU47-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 5.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

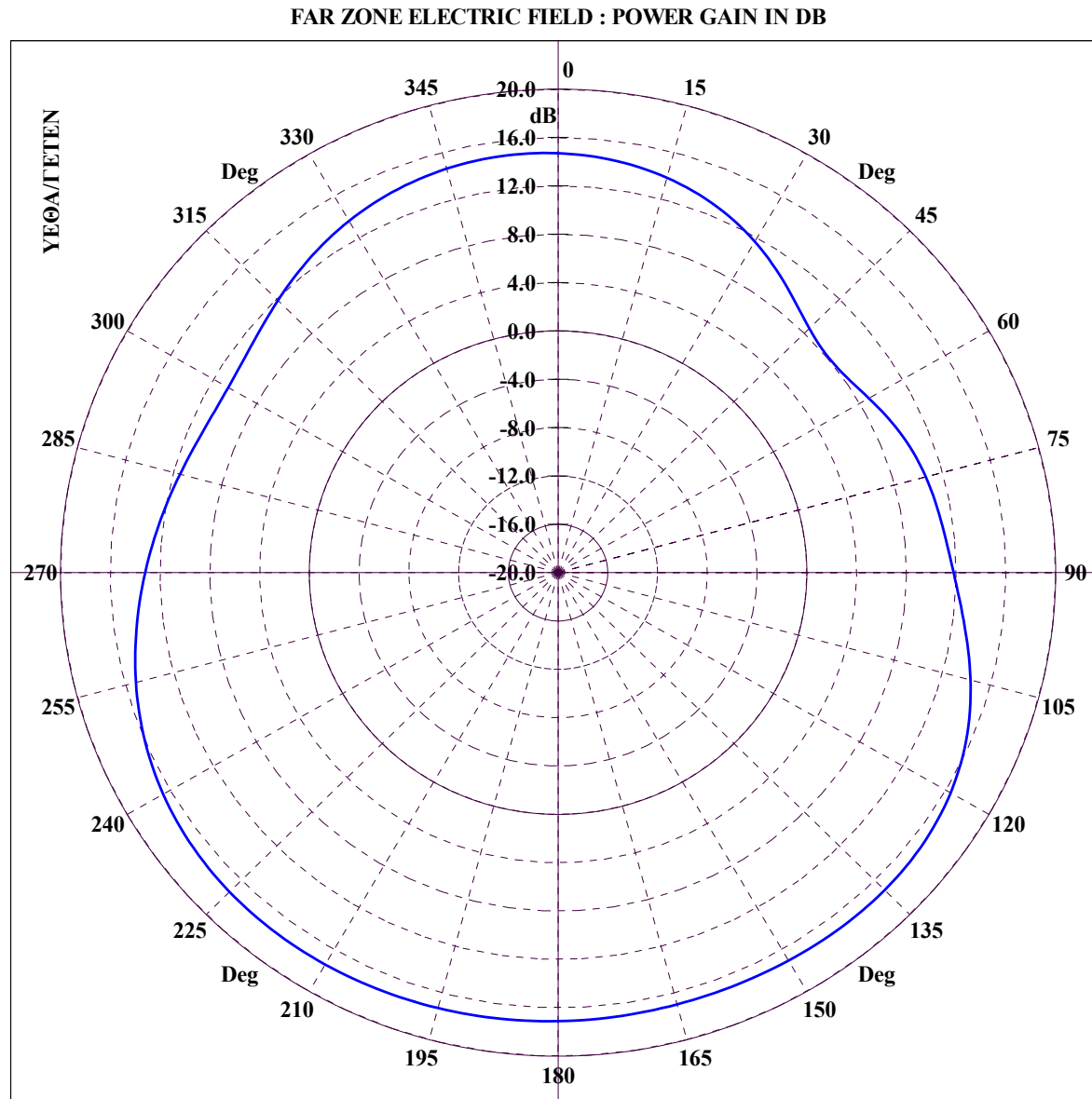
Διάγραμμα 5.197 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 5^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .





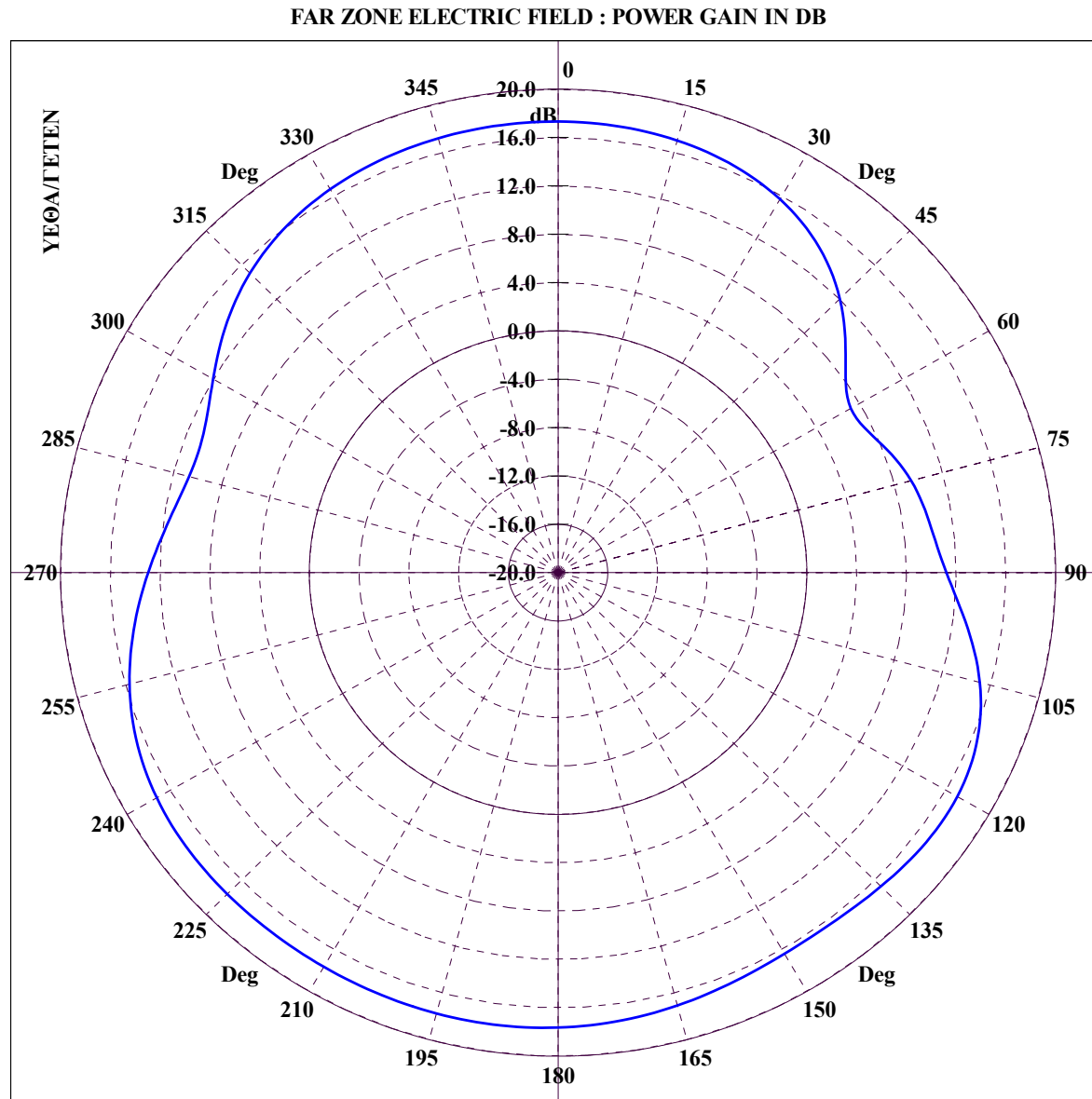
File Name :CRU47-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 10.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

Διάγραμμα 5.198 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 10^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .



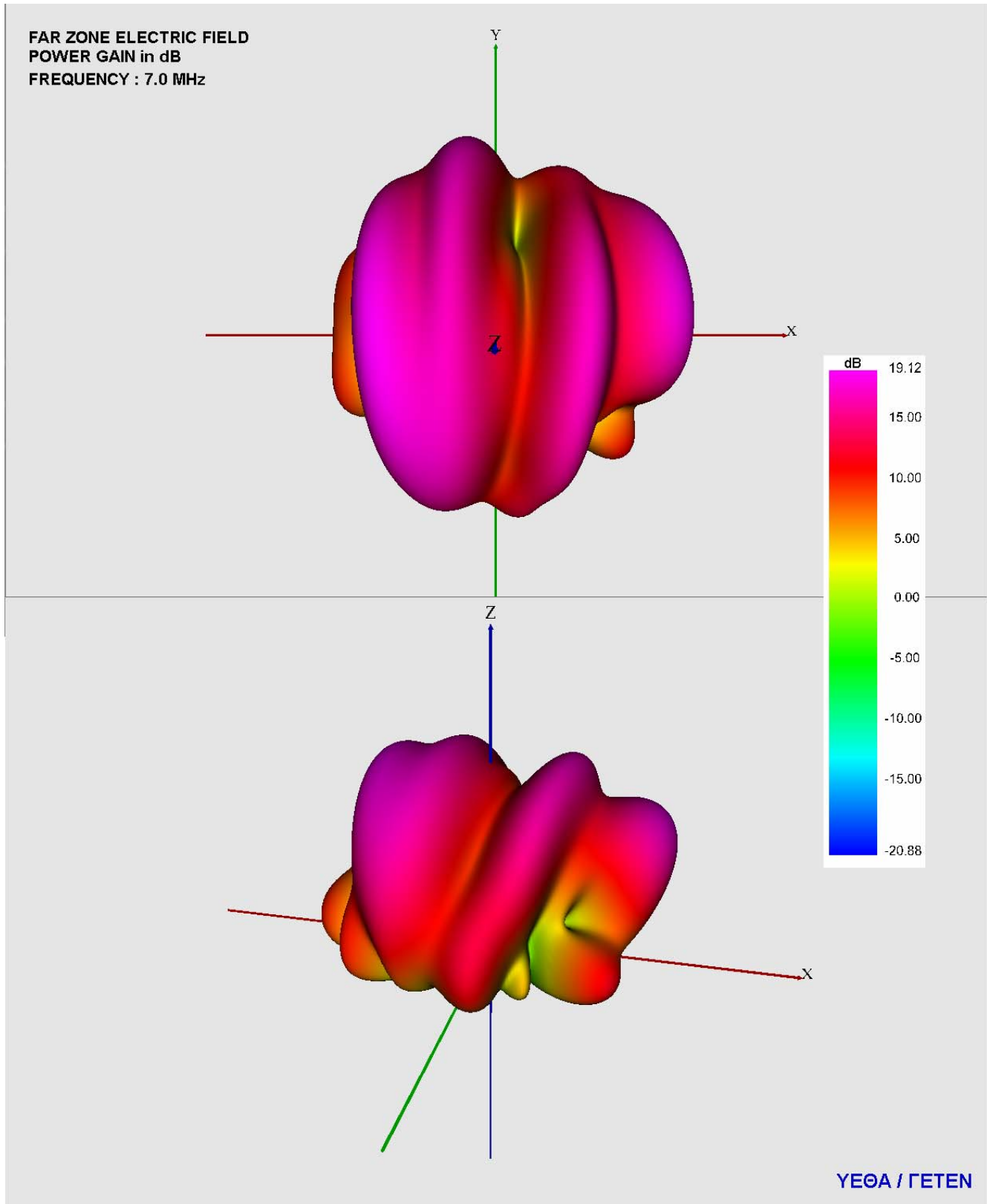
File Name :CRU47-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\theta = 15.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

Διάγραμμα 5.199 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 15^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .



File Name :CRU47-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 20.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

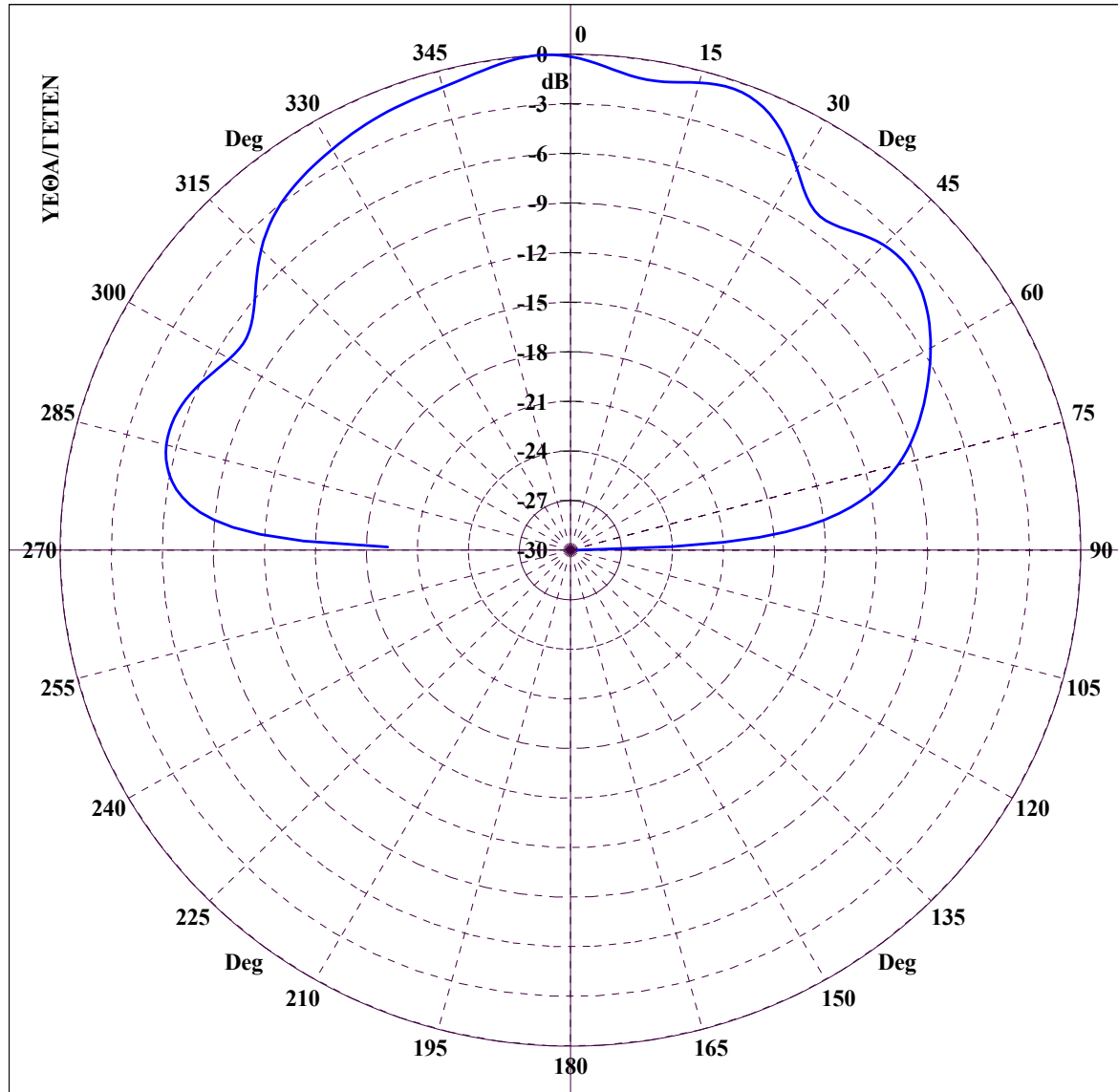
Διάγραμμα 5.200 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 20^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .



Διάγραμμα 5.201 : CRUISER, 3D διάγραμμα κέρδους ισχύος για κεραία 3 σε συχνότητα 7 MHz με χρήση VRML.

#### ***5.6.2.4 Διαγράμματα ακτινοβολίας μακρινού πεδίου κεραίας 4***

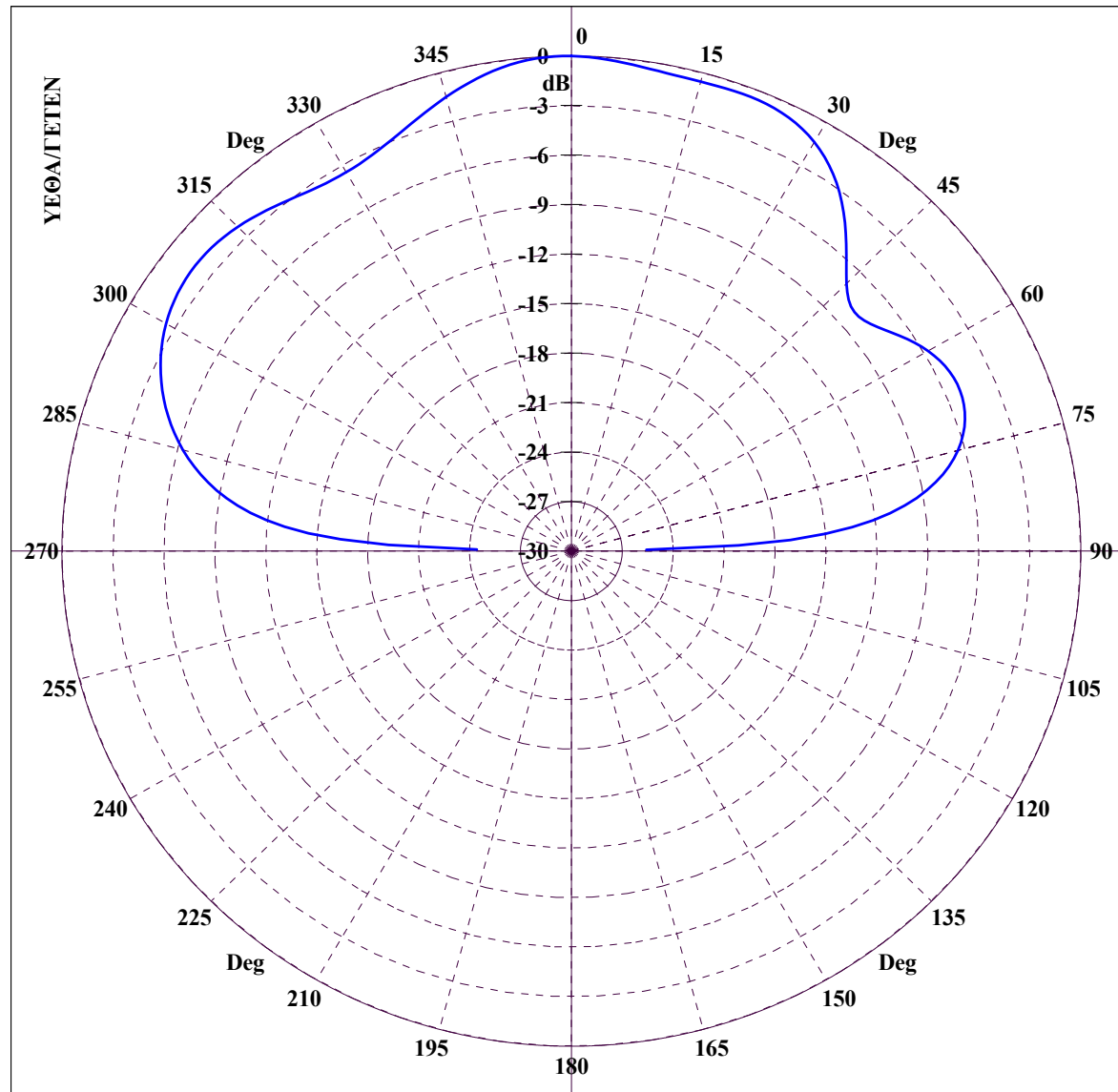
FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



File Name :CRU55-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 0.00$ ,  $\Theta=0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

Διάγραμμα 5.202 : CRUISER, Κεραία 4 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 0^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

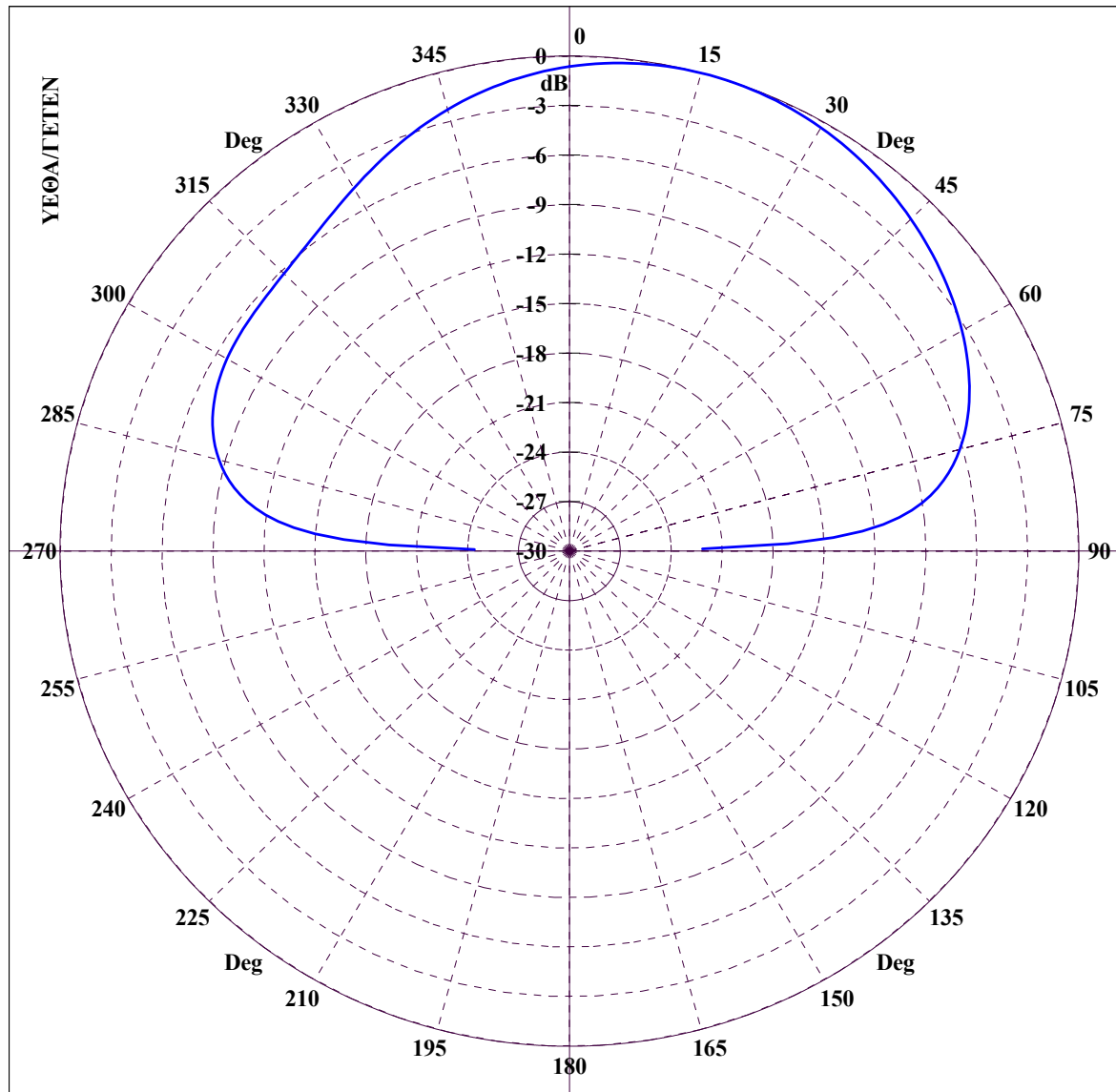
FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



File Name :CRU55-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 45.00$ ,  $\Theta = 0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

Διάγραμμα 5.203 : CRUISER, Κεραία 4 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\varphi = 45^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB

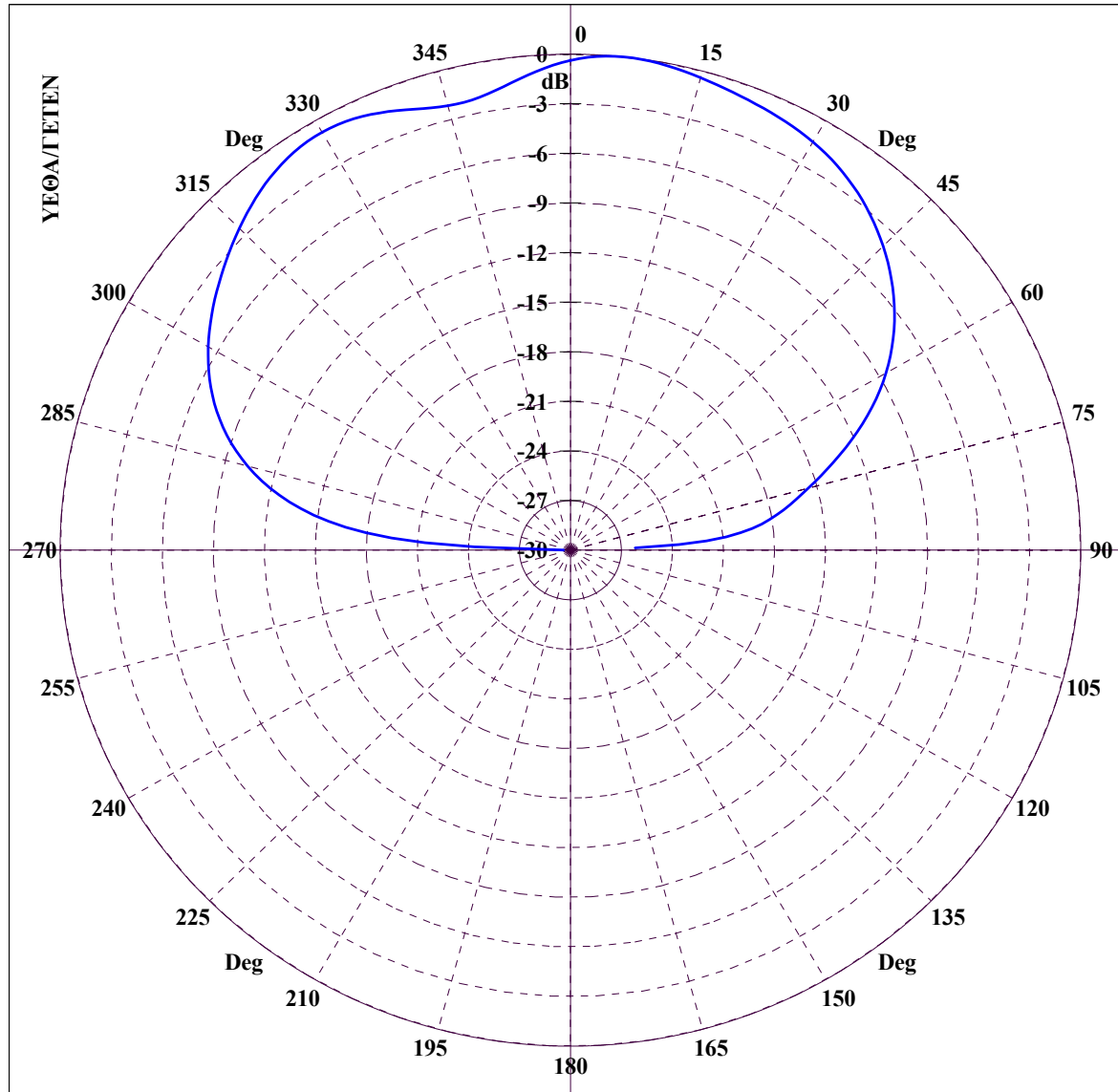


File Name :CRU55-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 90.00$ ,  $\Theta = 0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

Διάγραμμα 5.204 : CRUISER, Κεραία 4 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\varphi = 90^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

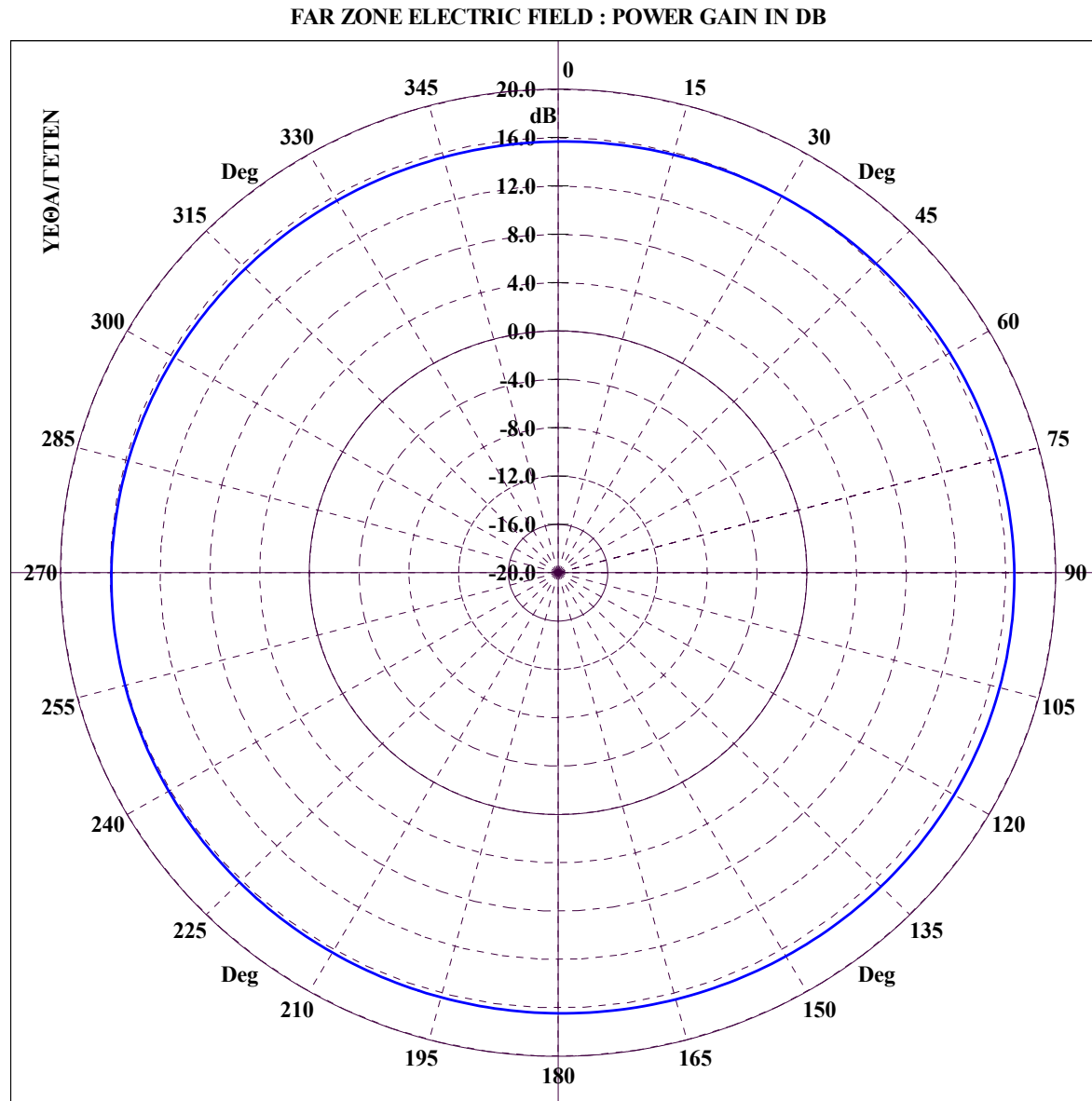


FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



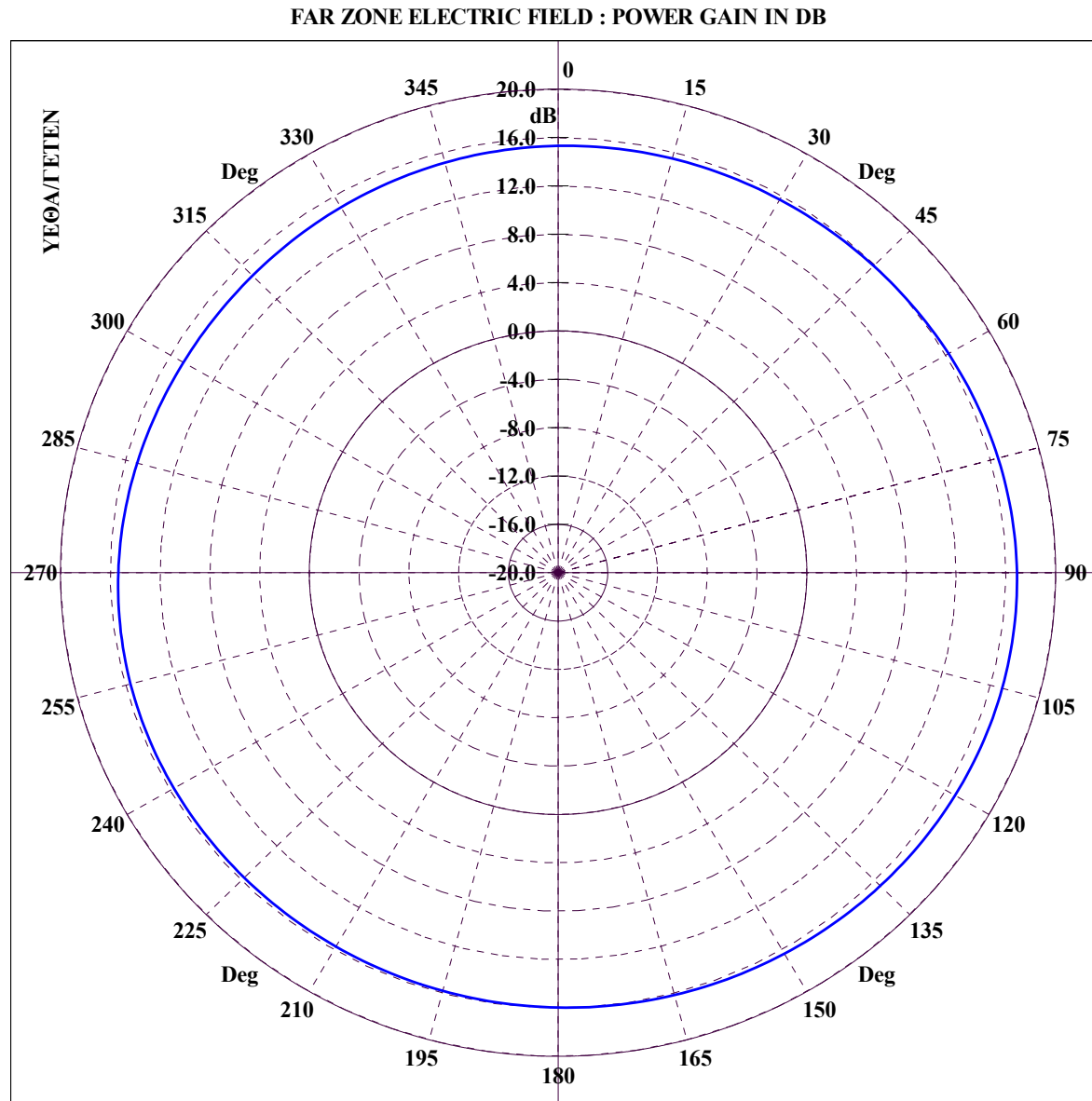
File Name :CRU55-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 135.00$ ,  $\Theta = 0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

Διάγραμμα 5.205 : CRUISER, Κεραία 4 σε συχνότητα 5 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 135^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .



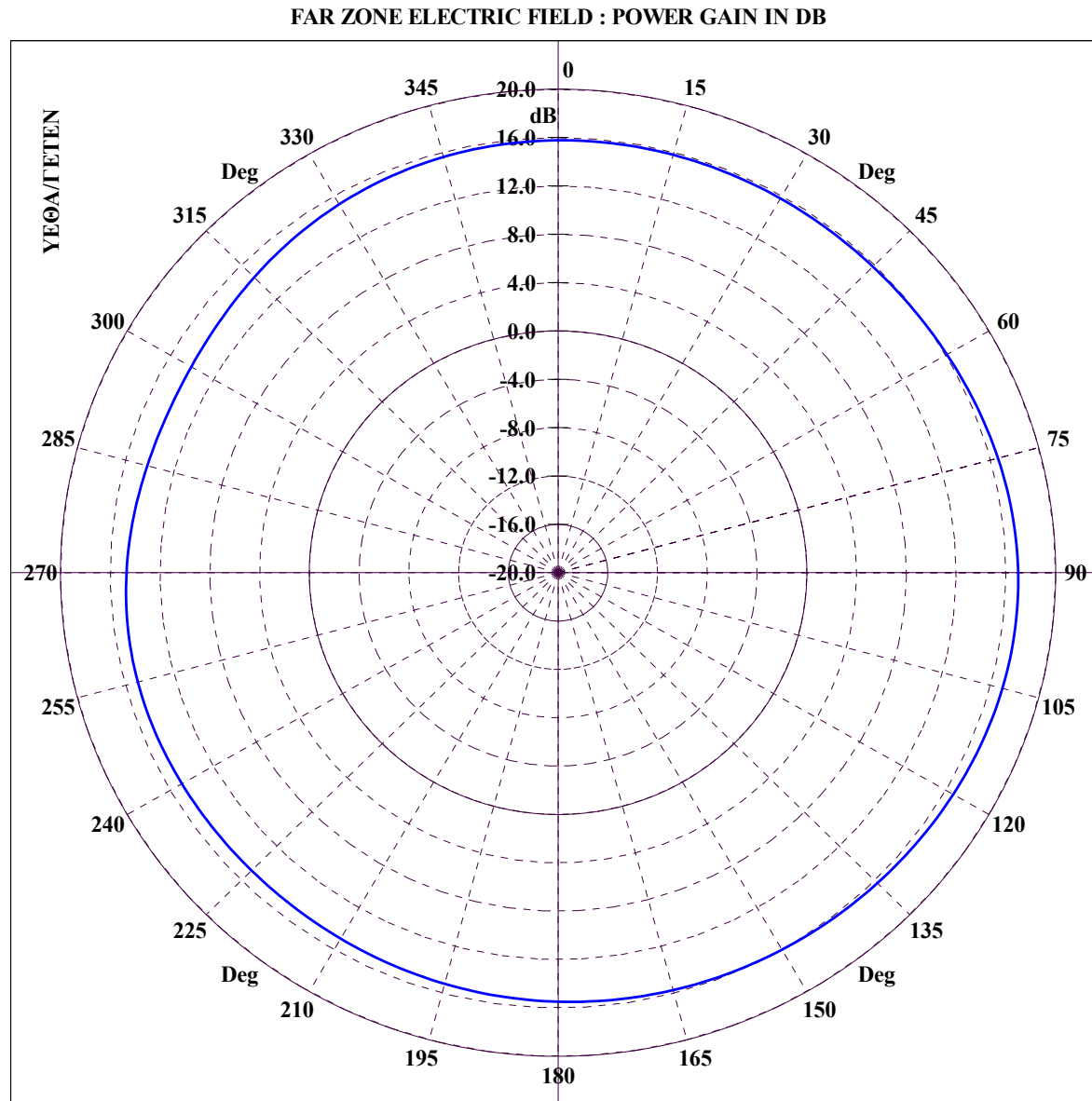
File Name :CRU55-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 5.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

Διάγραμμα 5.206 : CRUISER, Κεραία 4 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 5^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .



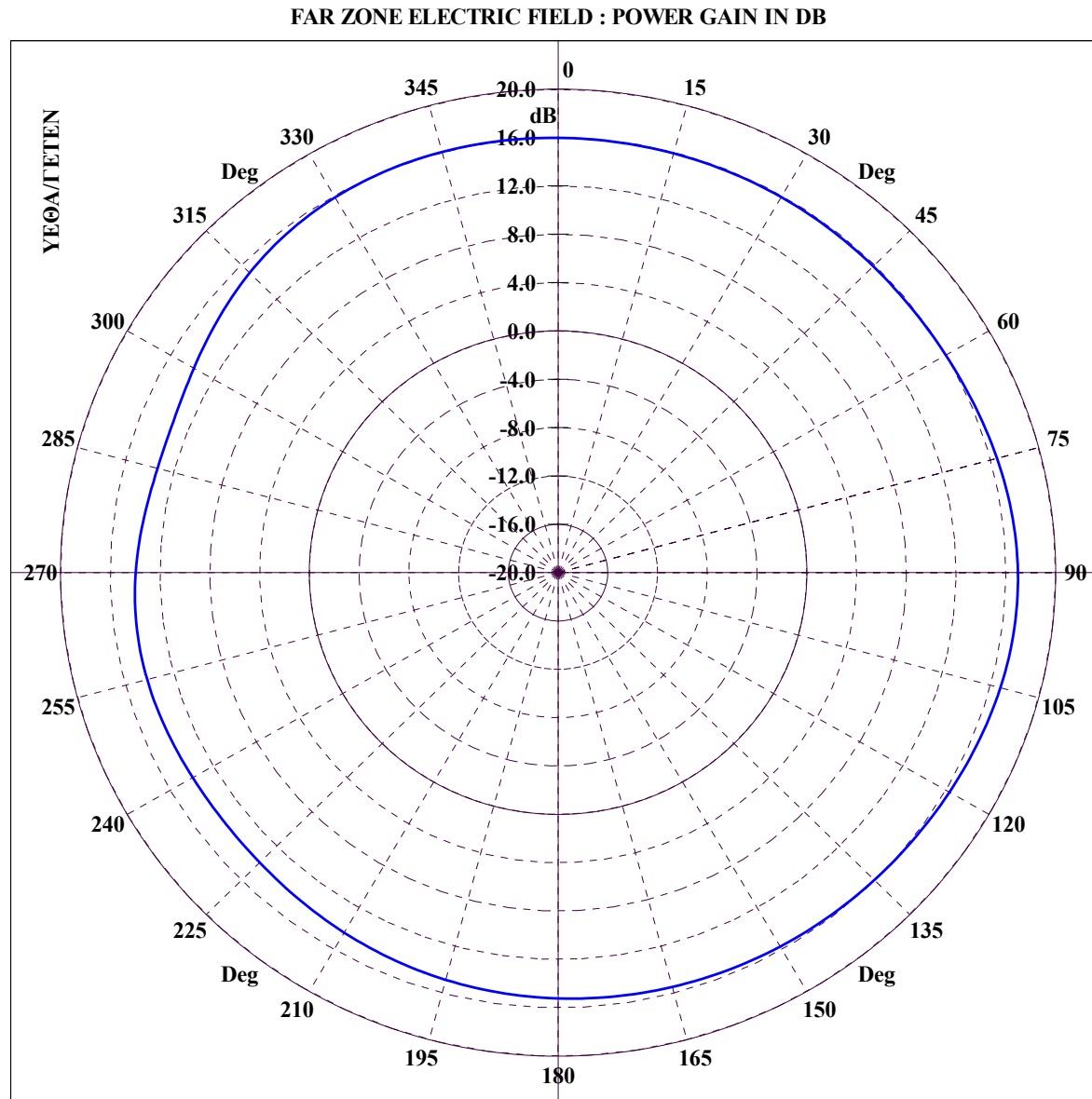
File Name :CRU55-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\theta = 10.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

Διάγραμμα 5.207 : CRUISER, Κεραία 4 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 10^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .



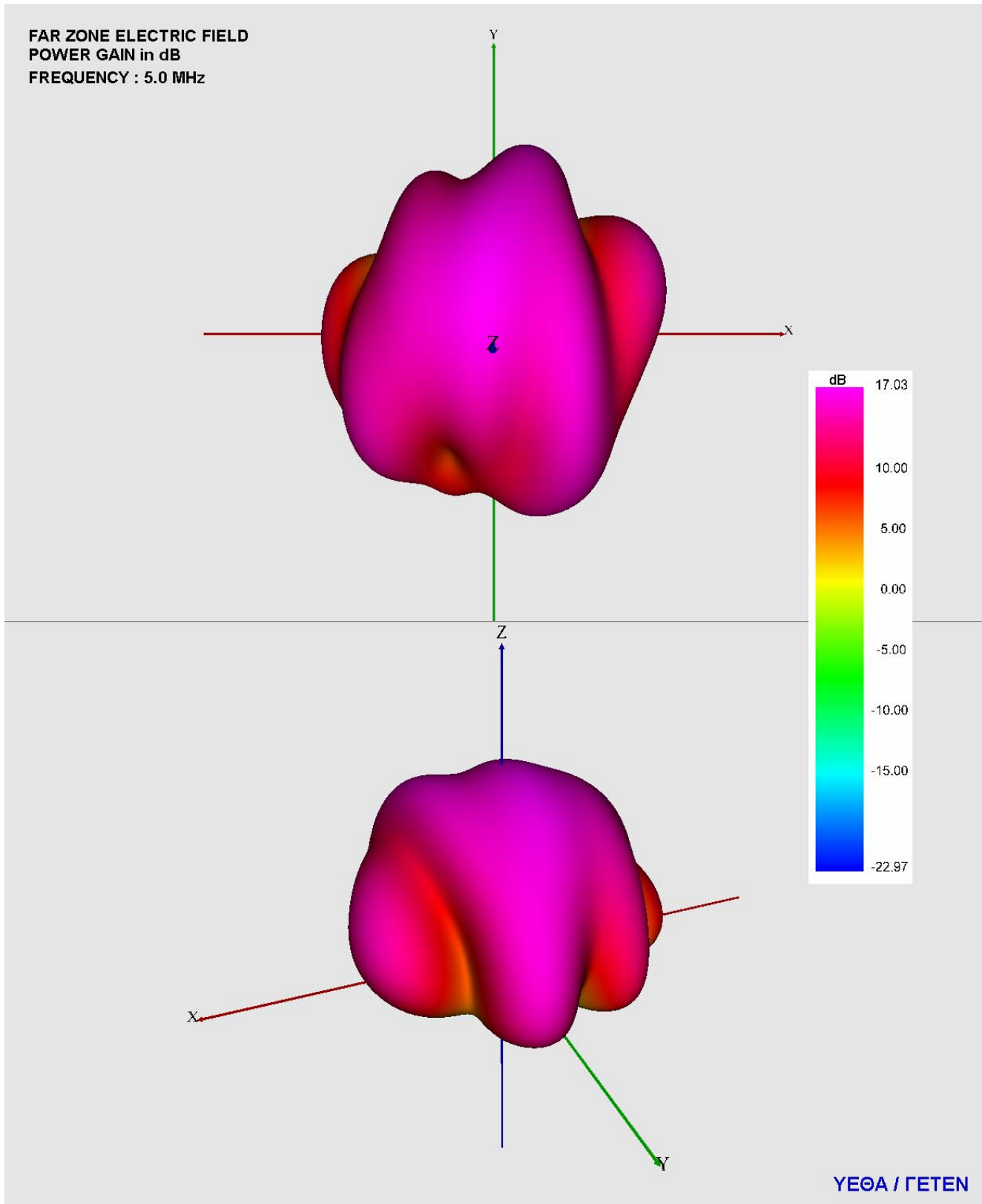
File Name :CRU55-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\theta = 15.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

Διάγραμμα 5.208 : CRUISER, Κεραία 4 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 15^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .



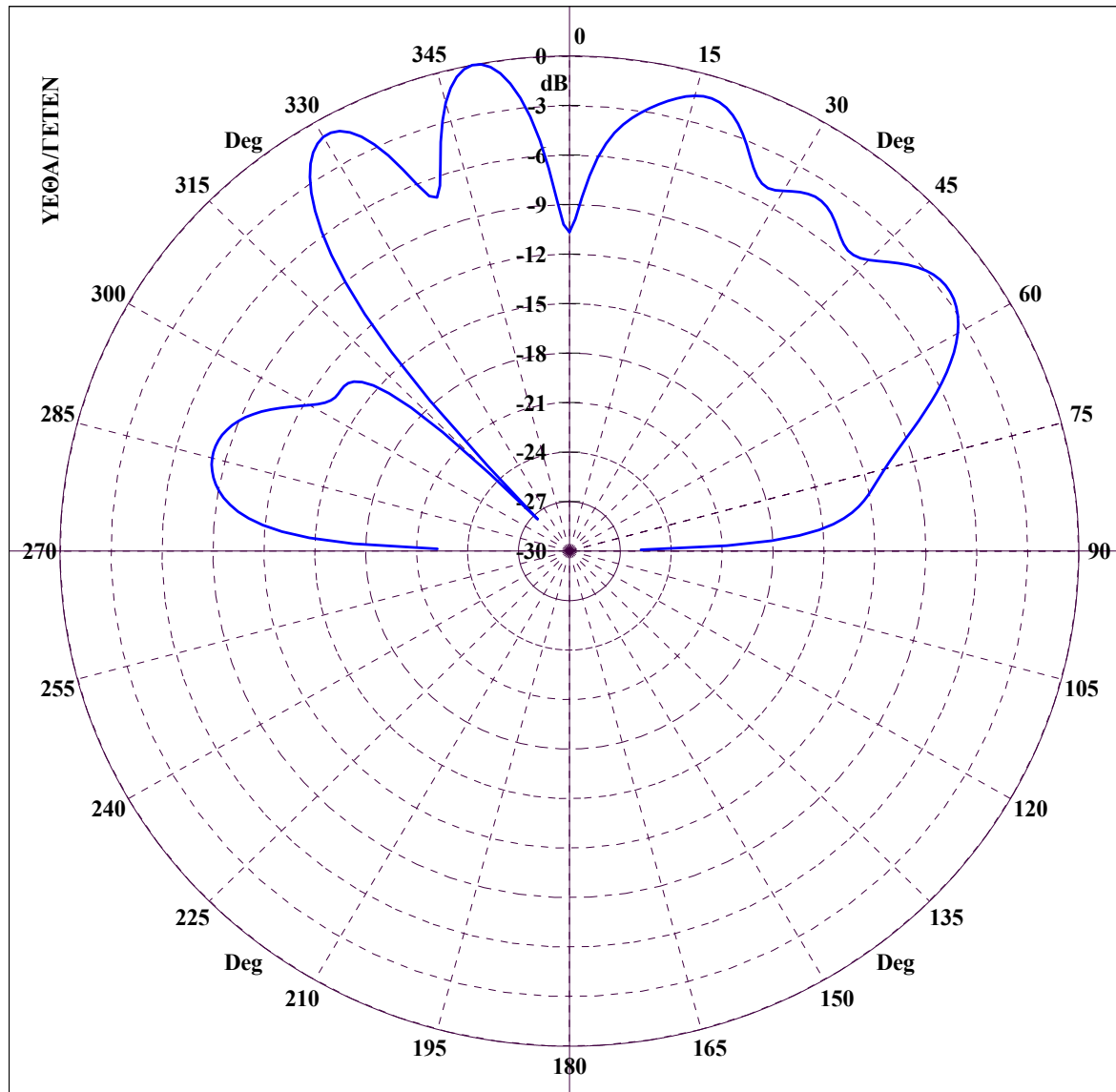
File Name :CRU55-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\theta = 20.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 5.00 MHz

Διάγραμμα 5.209 : CRUISER, Κεραία 4 σε συχνότητα 5 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 20^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .



Διάγραμμα 5.210 : CRUISER, 3D διάγραμμα κέρδους ισχύος για κεραία 4 σε συχνότητα 5 MHz με χρήση VRML.

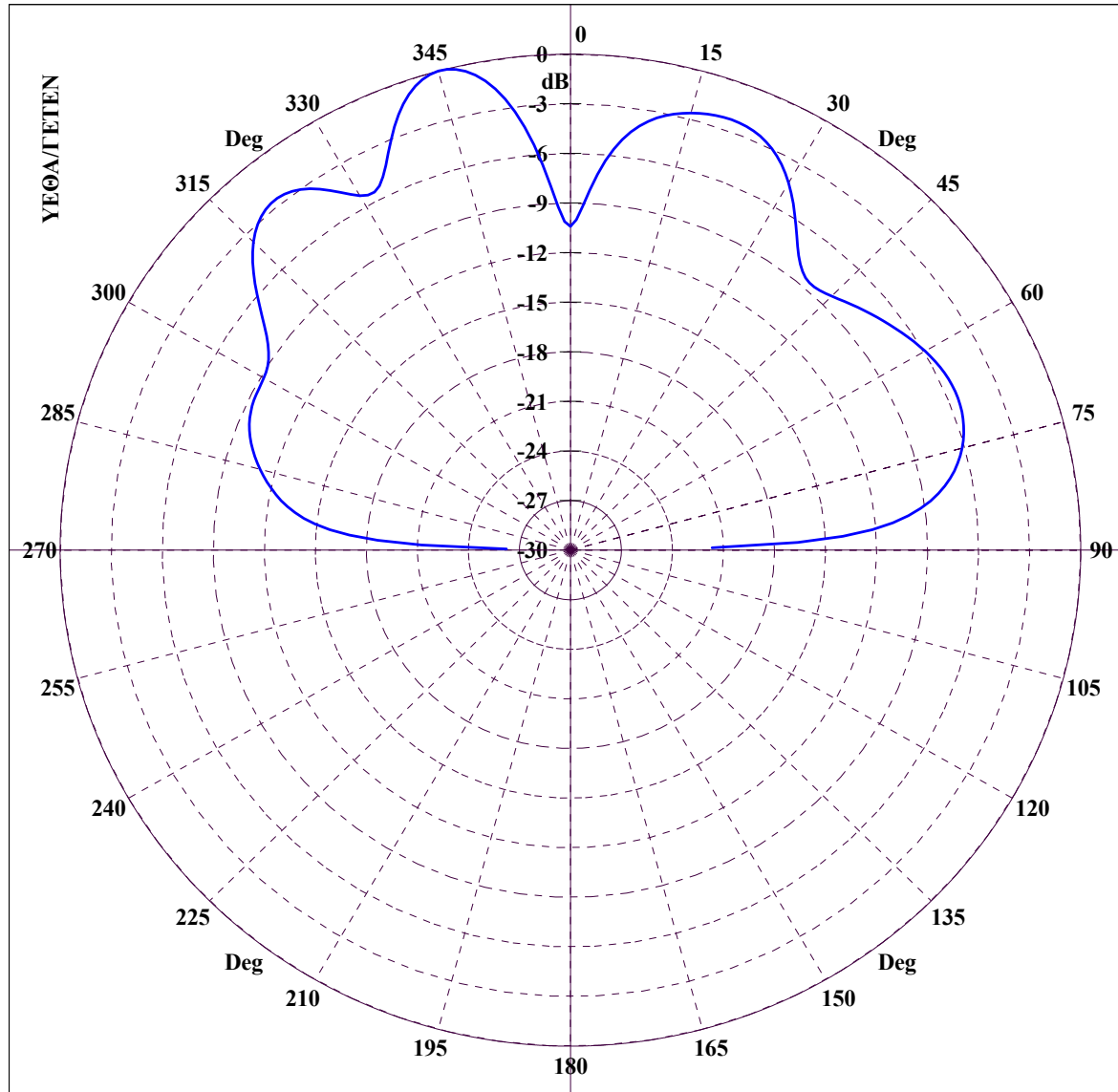
FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



File Name :CRU57-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 0.00$ ,  $\Theta=0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

Διάγραμμα 5.211 : CRUISER, Κεραία 4 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 0^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB

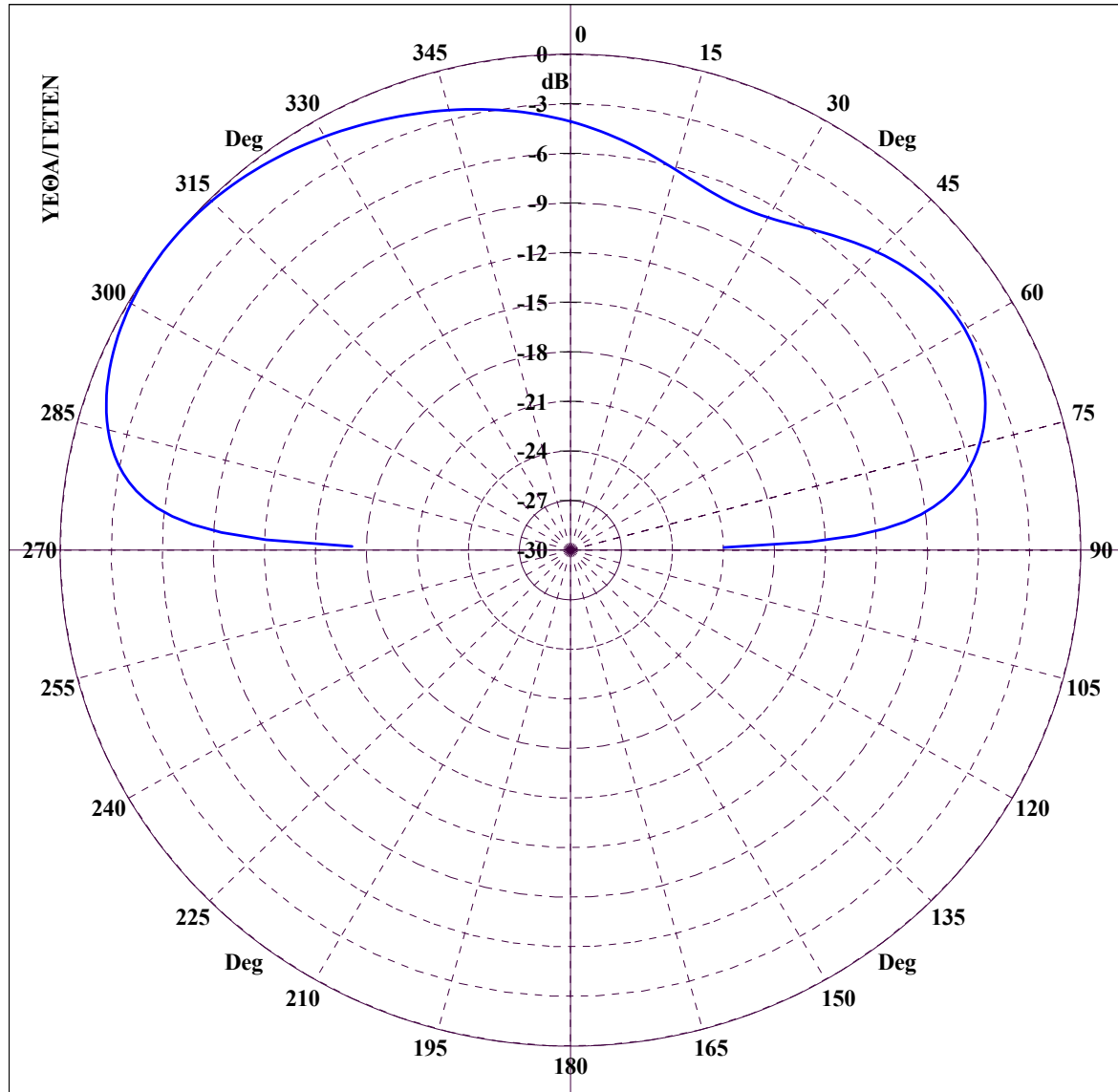


File Name :CRU57-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 45.00$ ,  $\Theta = 0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

Διάγραμμα 5.212 : CRUISER, Κεραία 4 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\varphi = 45^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .



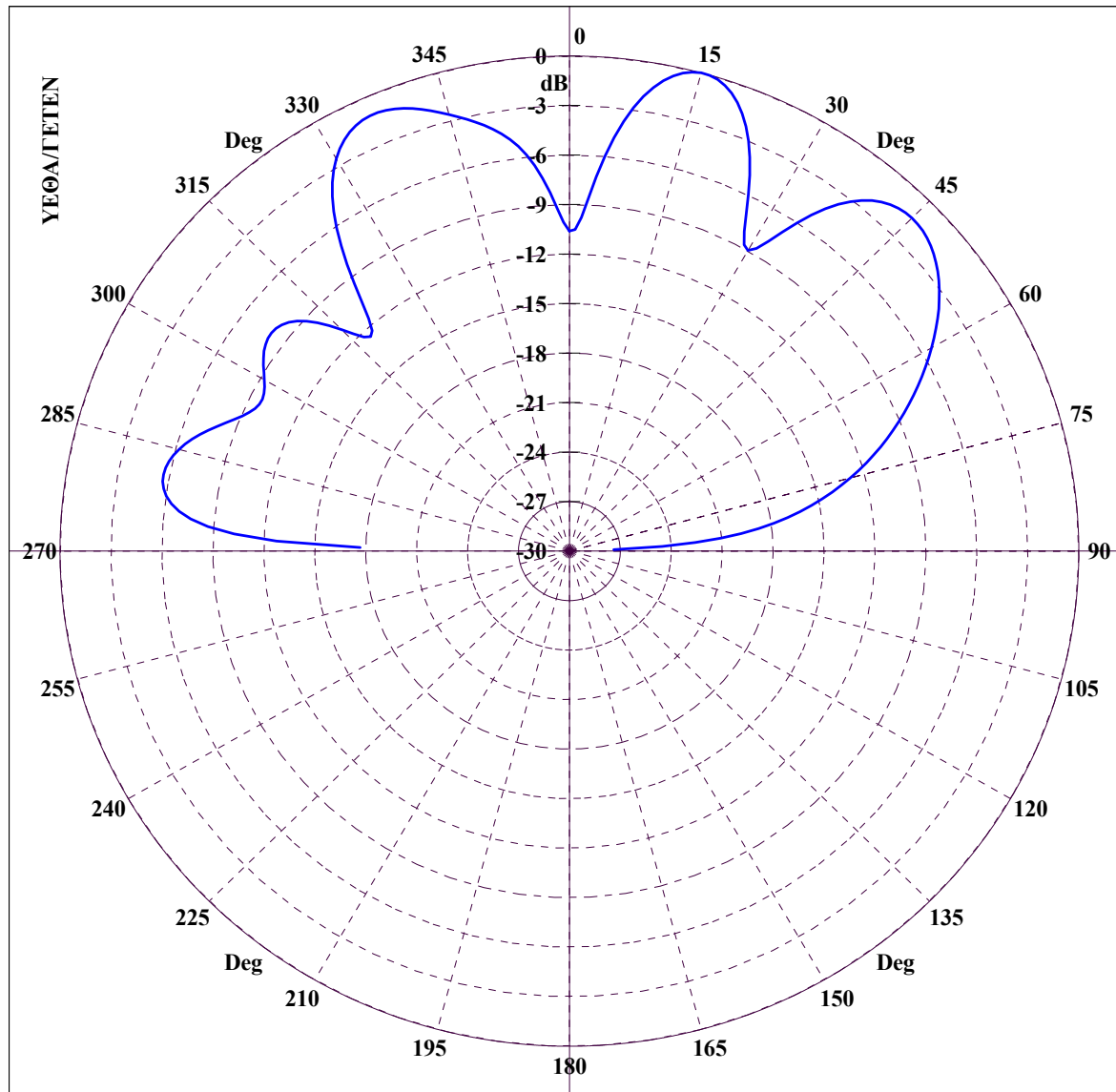
FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



File Name :CRU57-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 90.00$ ,  $\Theta = 0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

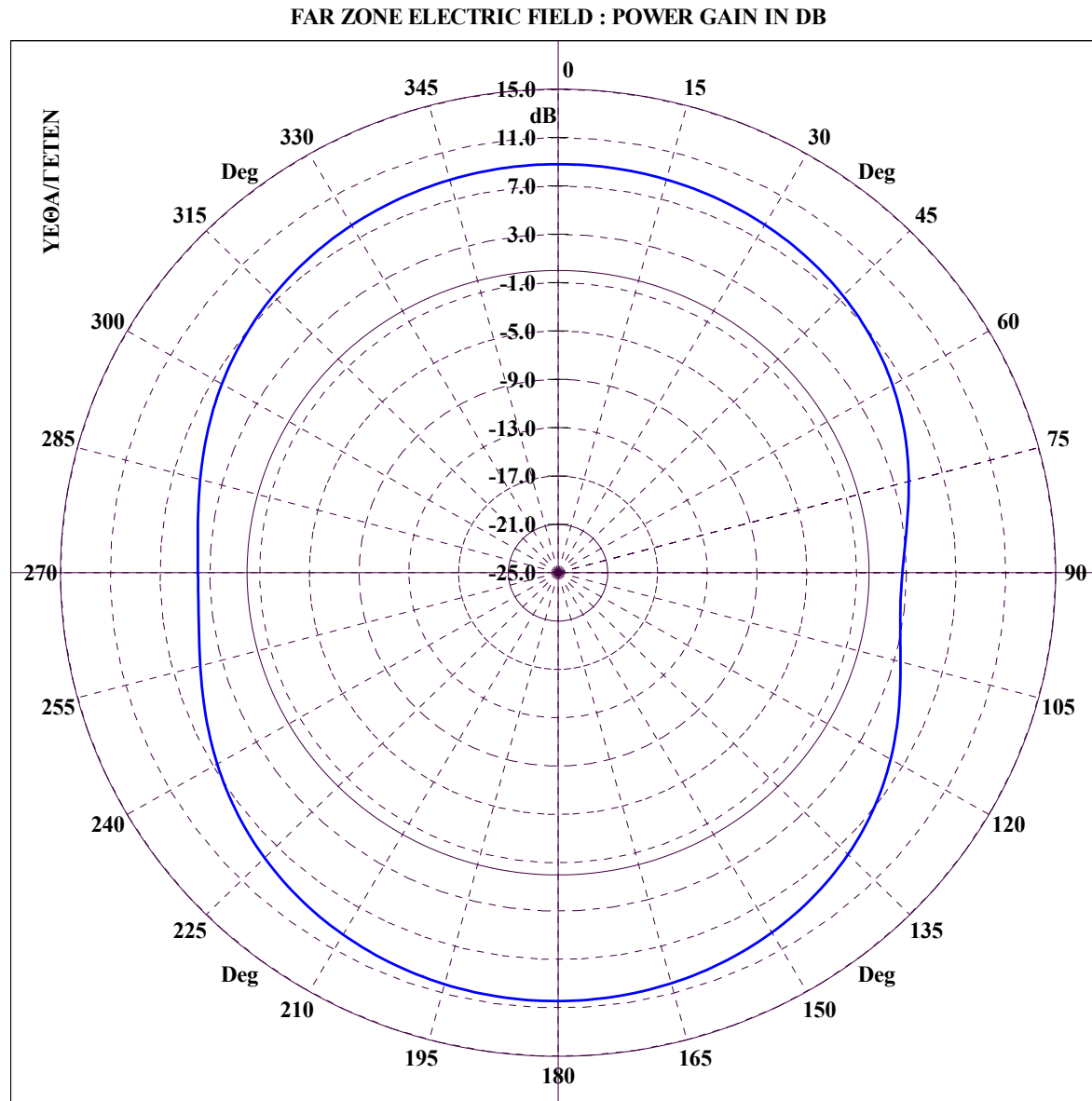
Διάγραμμα 5.213 : CRUISER, Κεραία 4 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 90^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .

FAR ZONE ELECTRIC FIELD : NORMALIZED POWER GAIN IN DB



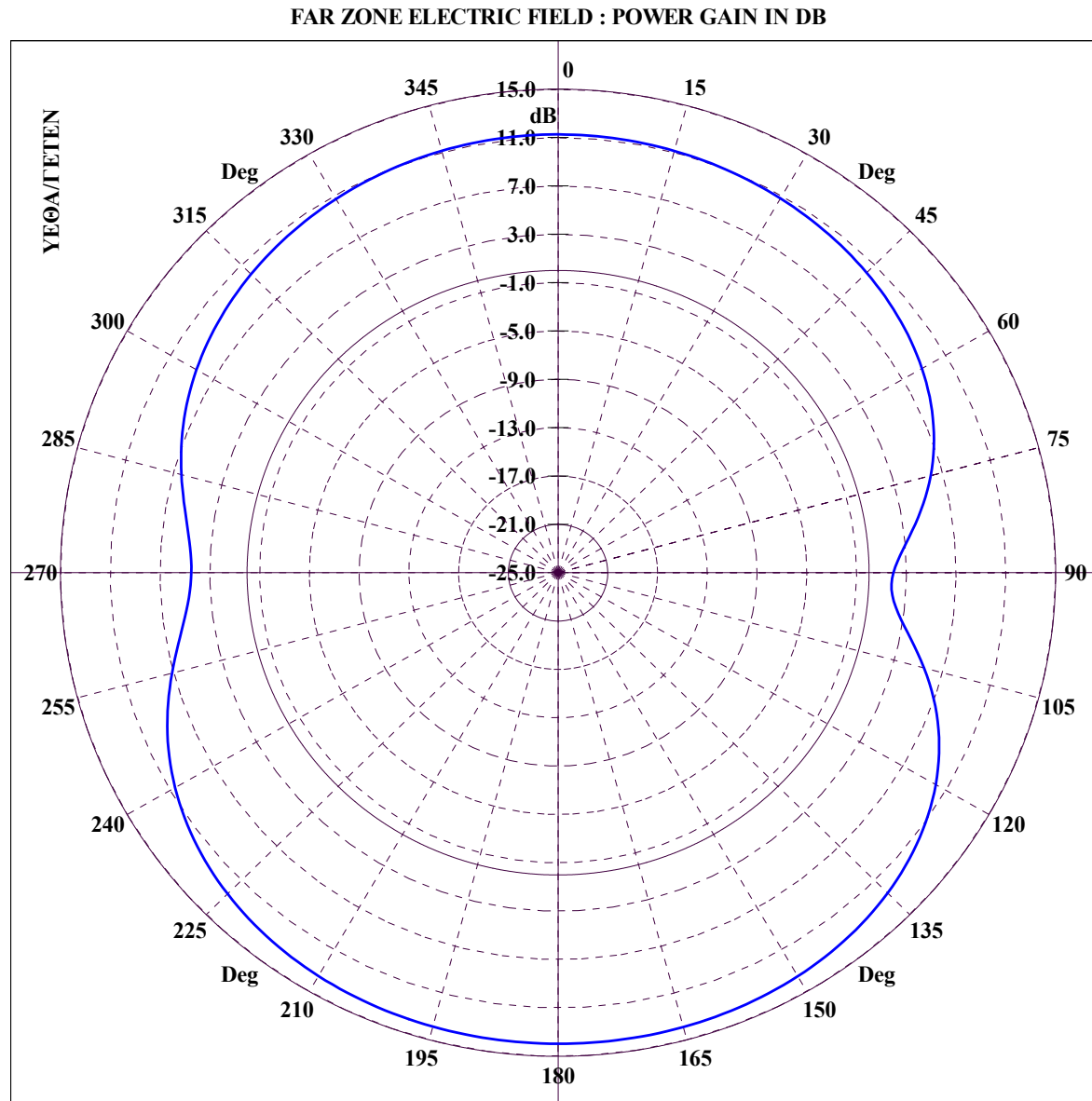
File Name :CRU57-NN\_GRC. GREAT CIRCLE CUT :  $\Phi = 135.00$ ,  $\Theta = 0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

Διάγραμμα 5.214 : CRUISER, Κεραία 4 σε συχνότητα 7 MHz για τομή μεγάλου κύκλου με  $\phi = 135^\circ$  και  $\theta = 0 - 360^\circ$ .



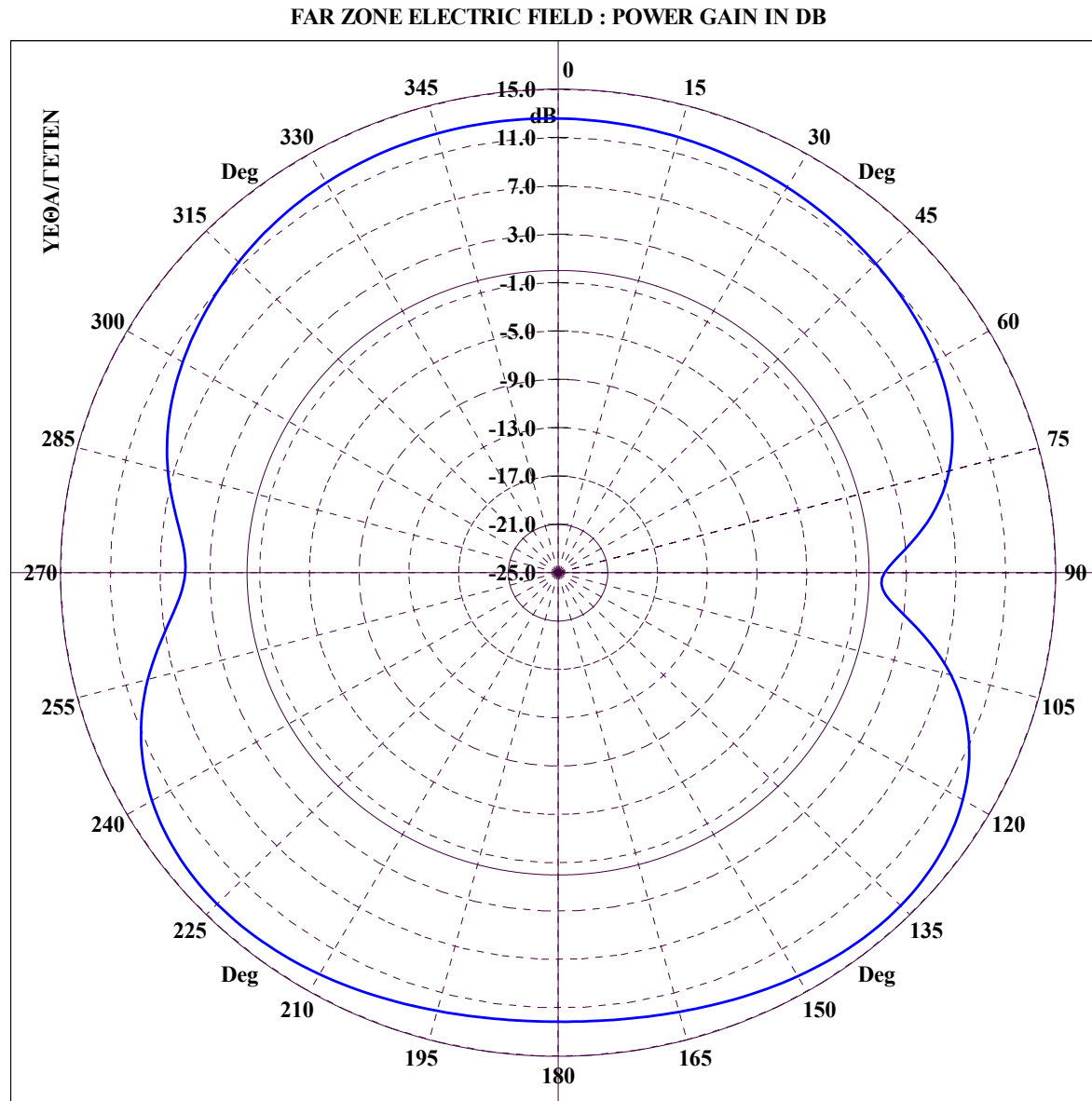
File Name :CRU57-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 5.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

Διάγραμμα 5.215 : CRUISER, Κεραία 4 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 5^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .



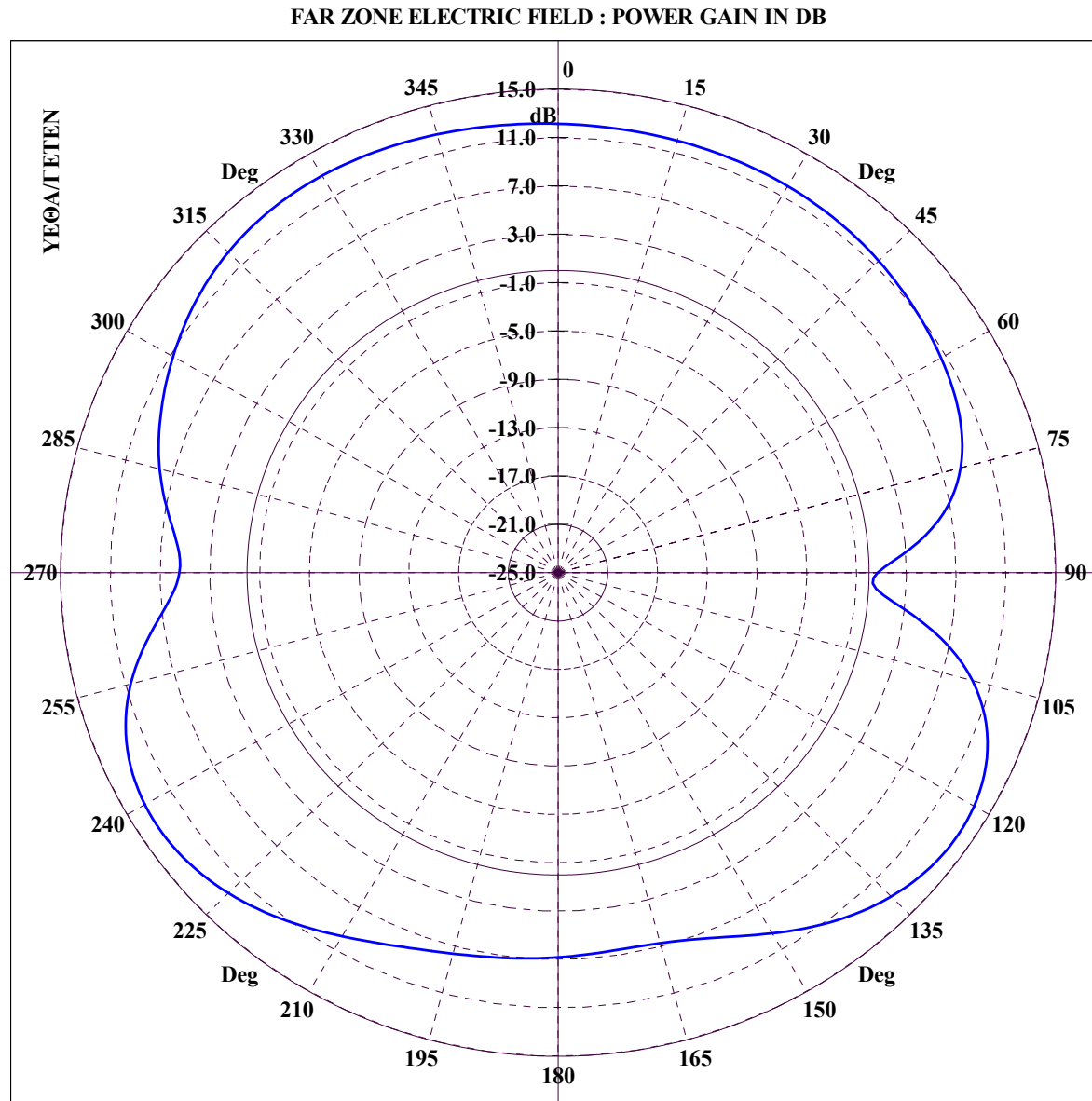
File Name :CRU57-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 10.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

Διάγραμμα 5.216 : CRUISER, Κεραία 4 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 10^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .



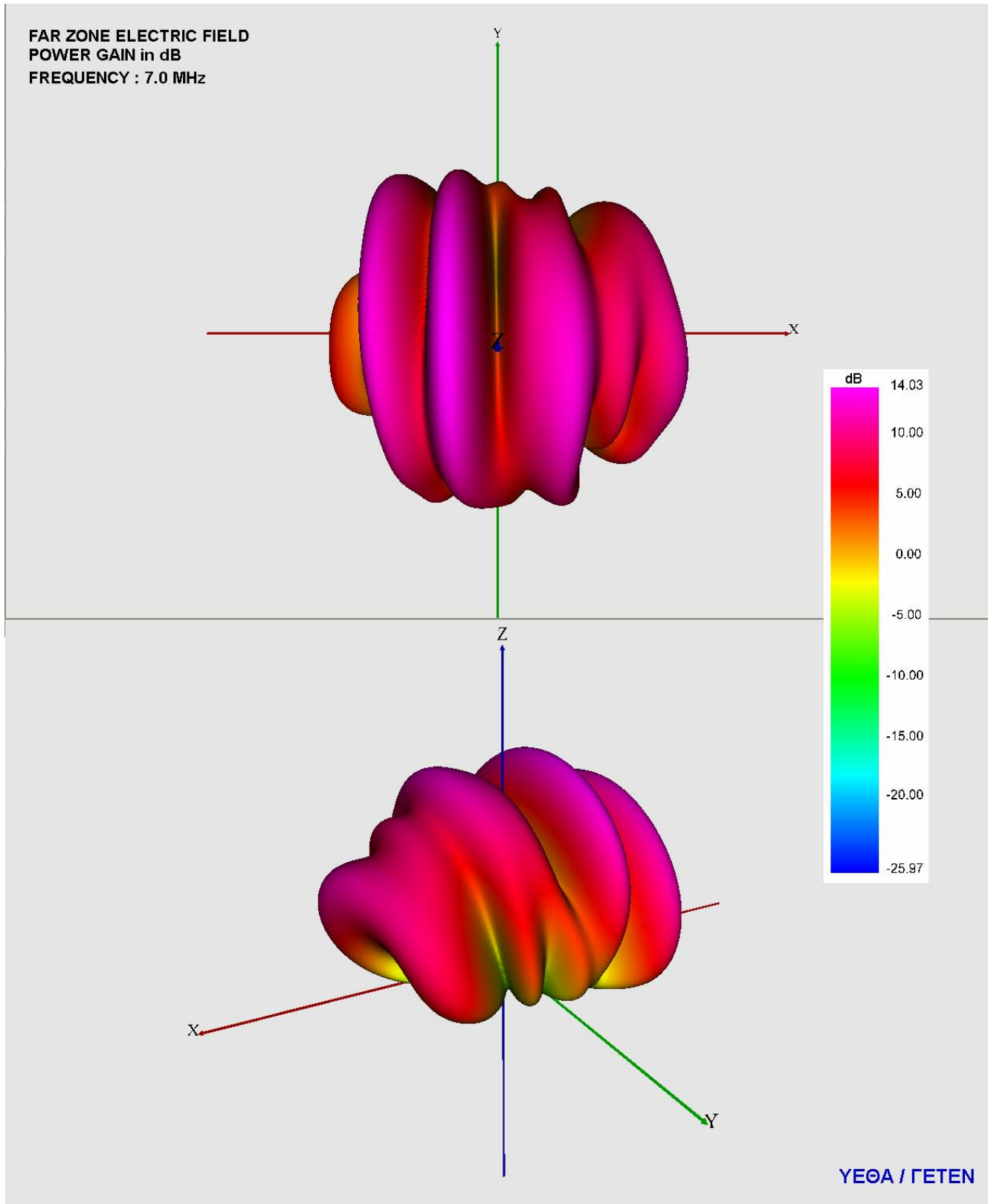
File Name :CRU57-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 15.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

Διάγραμμα 5.217 : CRUISER, Κεραία 4 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 15^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .



File Name :CRU57-NN\_CON. CONICAL CUT :  $\Theta = 20.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 7.00 MHz

Διάγραμμα 5.218 : CRUISER, Κεραία 4 σε συχνότητα 7 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 20^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .



Διάγραμμα 5.219 : CRUISER, 3D διάγραμμα κέρδους ισχύος για κεραία 4 σε συχνότητα 7 MHz με χρήση VRML.

### 5.6.2.5 Συγκριτικά στοιχεία προσομοίωσης

Παρακάτω παρατίθενται σε μορφή πίνακα τα συγκριτικά στοιχεία προσομοίωσης των τεσσάρων κεραιών που φέρει το TINCODEROGA CLASS CRUISER στις τρεις συχνότητες μελέτης των 2, 5, 7 MHz για την εύρεση των διαγραμμάτων ακτινοβολίας μακρινού πεδίου (Far Field calculations). Τα στοιχεία αυτά αφορούν τον αριθμό νημάτων που χρησιμοποιήθηκαν αρχικώς για την κατασκευή του wire grid μοντέλου, σε ποσοστό τμηματοποίησης, δηλαδή σε αριθμό segments ανά μήκος κύματος  $\lambda$ , τον αριθμό των segments που τελικά παρήχθησαν από τη διαδικασία τμηματοποίησης καθώς και το χρόνο που χρειάστηκε για την εκτέλεση της προσομοίωσης.

Συγκριτικά στοιχεία ανά κεραία και ανά συχνότητα λειτουργίας	Αριθμός νημάτων μοντέλου	Ποσοστό τμηματοποίησης	Αριθμός segments που παρήχθησαν	Χρόνος εκτελέσεως προσομοίωσης (sec)
<b>Κεραία 1</b>				
2 MHz	5217	$\lambda/40$	6357	1119.800
5 MHz	5217	$\lambda/20$	6577	1215.280
7 MHz	5217	$\lambda/30$	9763	3317.750
<b>Κεραία 2</b>				
2 MHz	5217	$\lambda/40$	6357	---
5 MHz	5217	$\lambda/20$	6577	1213.750
7 MHz	5217	$\lambda/30$	9763	3298.060
<b>Κεραία 3</b>				
2 MHz	5217	$\lambda/40$	6357	1124.330
5 MHz	5217	$\lambda/20$	6577	1207.160
7 MHz	5217	$\lambda/30$	9763	3322.760
<b>Κεραία 4</b>				
2 MHz	5217	$\lambda/40$	6357	---
5 MHz	5217	$\lambda/20$	6577	1215.220
7 MHz	5217	$\lambda/30$	9763	3321.750

**Πίνακας 5.6 : Συγκριτικά στοιχεία προσομοίωσης των τεσσάρων HF κεραιών που φέρει το TINCODEROGA CLASS CRUISER.**

Παρατηρείται ότι οι μεγαλύτεροι χρόνοι εκτέλεσης, αντιστοιχούν στη μεγαλύτερη συχνότητα των 7 MHz όπως και αναμενόταν, αφού για αυτή τη συχνότητα, καθότι μεγαλύτερη, ο αριθμός των segments που τελικά παρήχθησαν είναι ο μεγαλύτερος.



### 5.6.3 Μελέτη VHF/UHF ground plane κεραιών

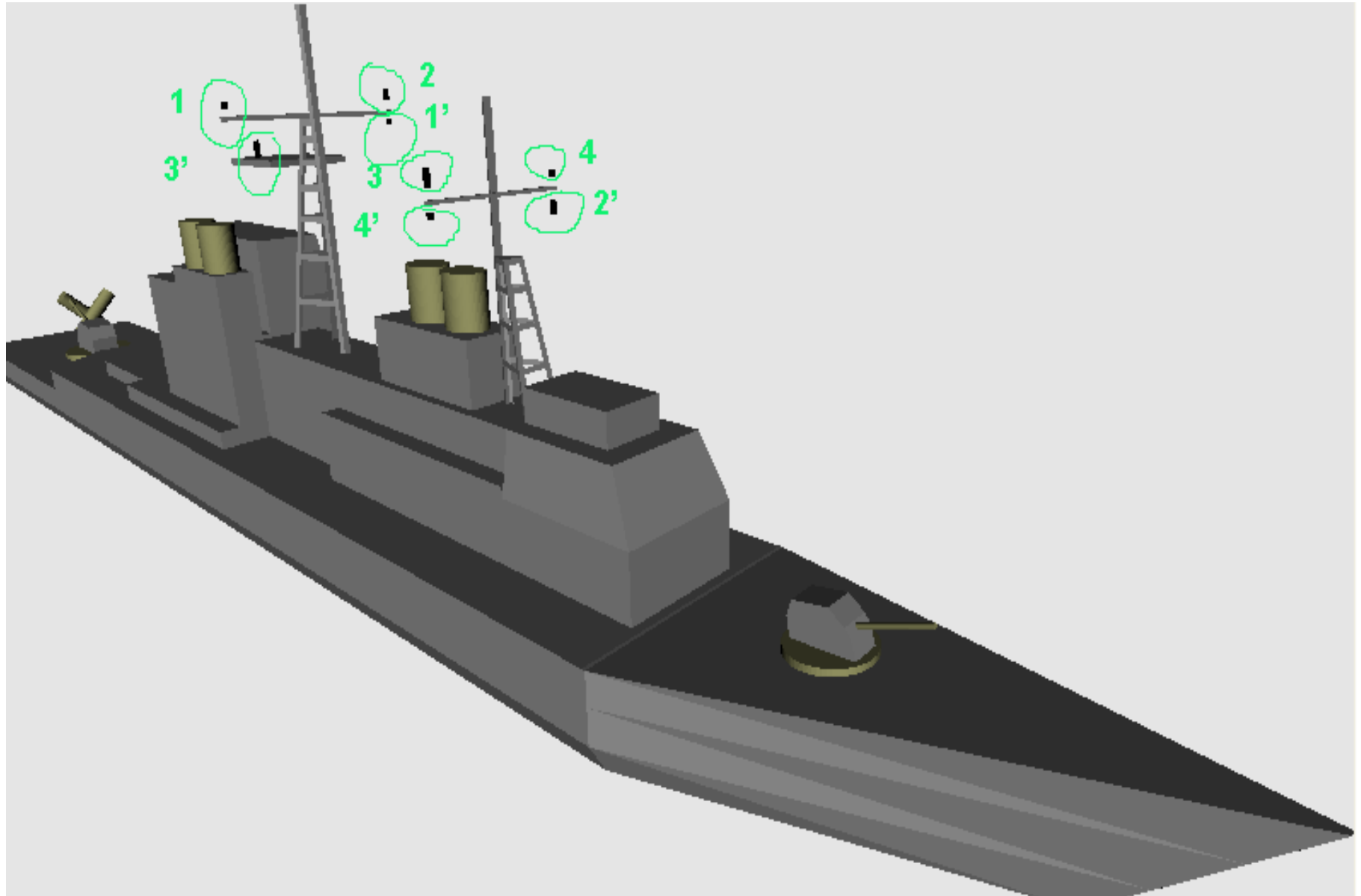
Οι διαστάσεις αυτού του πλοίου σύμφωνα με [10] είναι 172.8 x 16.8 x 9.5 m (από Sonar). Για τις συχνότητες μελέτης των 400, 350, 160 και 130 MHz, οι αντίστοιχες ηλεκτρικές διαστάσεις με βάση τη μέγιστη διάσταση των 172.8 m, είναι 230.4, 200.9, 92.2 και 74.8. Η μελέτη κατατάσσεται στα προβλήματα υψηλών ηλεκτρικών διαστάσεων και, επομένως, μπορεί να επιλυθεί με χρήση της UTD.

Με χρήση των προγραμμάτων 3DSTUDIO MAX για τη μοντελοποίηση του πλοίου και κατόπιν του PLATE\_GEN (ΓΕΤΕΝ NEC-BSC PLATE GENERATOR) σχηματίστηκε σε περιβάλλον θάλασσας το αντίστοιχο μοντέλο 172 πλακών και 10 κυλίνδρων του πλοίου διαστάσεων 162.4 x 19.3 x 23.6 m (από επιφάνεια θαλάσσης), όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 5.18 και προσομοιώθηκαν 8 κεραιές VHF/UHF, εκπομπής και λήψης, που αυτό φέρει για τις συχνότητες μελέτης των 400, 350, 160 και 130 MHz. Η θάλασσα προσομοιώθηκε με χρήση επίπεδης γης και για τις συχνότητες μελέτης έχει σύμφωνα με [12] τις εξής ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες :

$$\begin{aligned} \text{σχετική ηλεκτρική επιτρεπτότητα } \epsilon &= 70 \\ \text{σχετική μαγνητική διαπερατότητα } \mu &= 1 \\ \text{αγωγιμότητα } \sigma &= 5.0 \text{ S/m} \end{aligned}$$

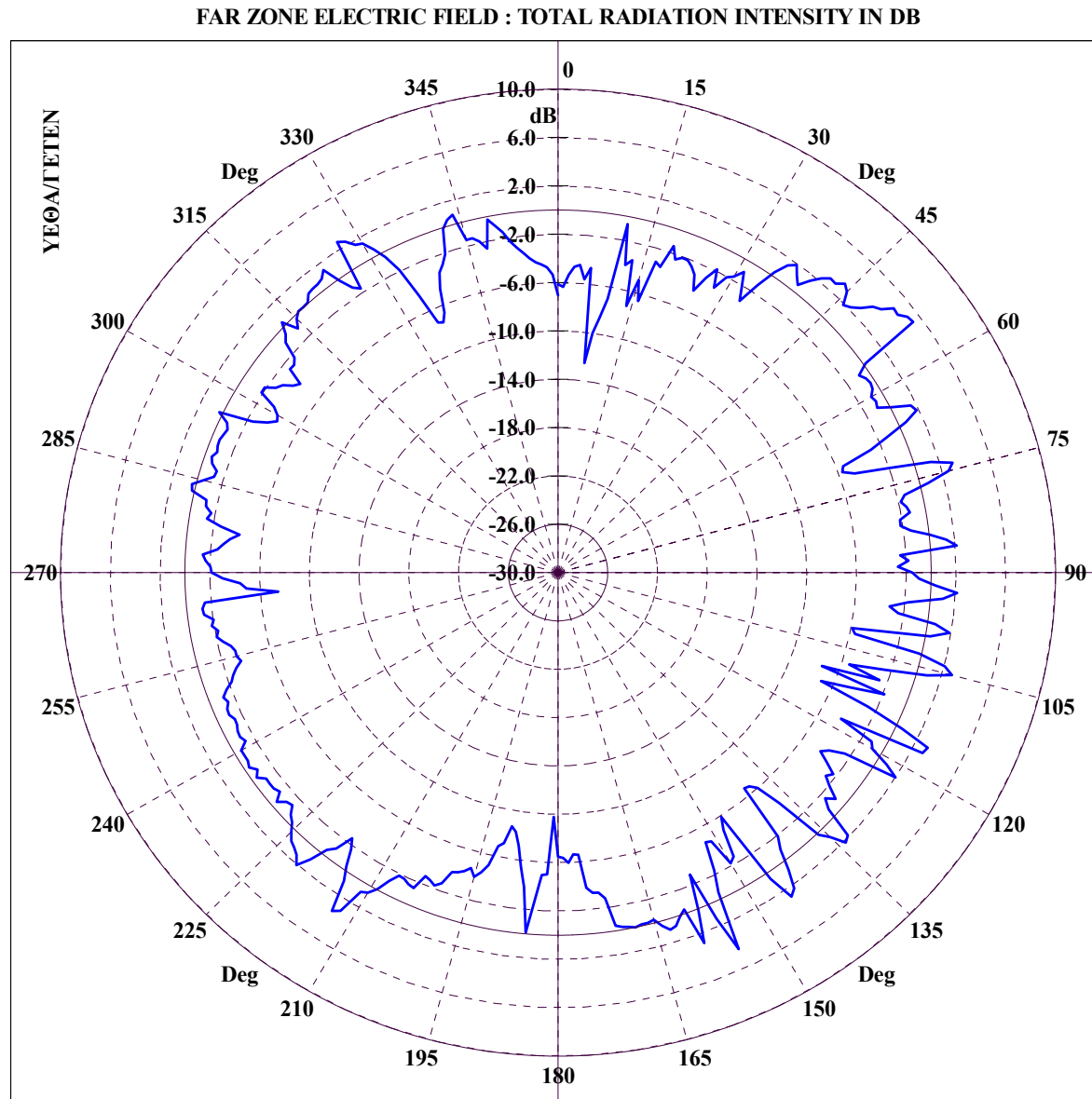
Αρχικά, παρατίθενται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ανά κεραία που αφορούν την εύρεση του διαγράμματος ακτινοβολίας μακρινού πεδίου της εκάστοτε κεραιάς. Στη συνέχεια, παρατίθενται σε μορφή πίνακα τα συγκριτικά στοιχεία αυτών των προσομοιώσεων που αφορούν αριθμό πλακών και κυλίνδρων που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του μοντέλου, τις κωνικές τομές που σαρώθηκαν καθώς και το χρόνο που χρειάστηκε για την εκτέλεση της προσομοίωσης.

Τέλος, παρατίθενται σε μορφή πίνακα όλες οι υπολογισθείσες τιμές των couplings για τα ζητούμενα ζεύγη κεραιών VHF/UHF που φέρει το TINCODEROGA CLASS CRUISER και στα δυο κατάρτια του.

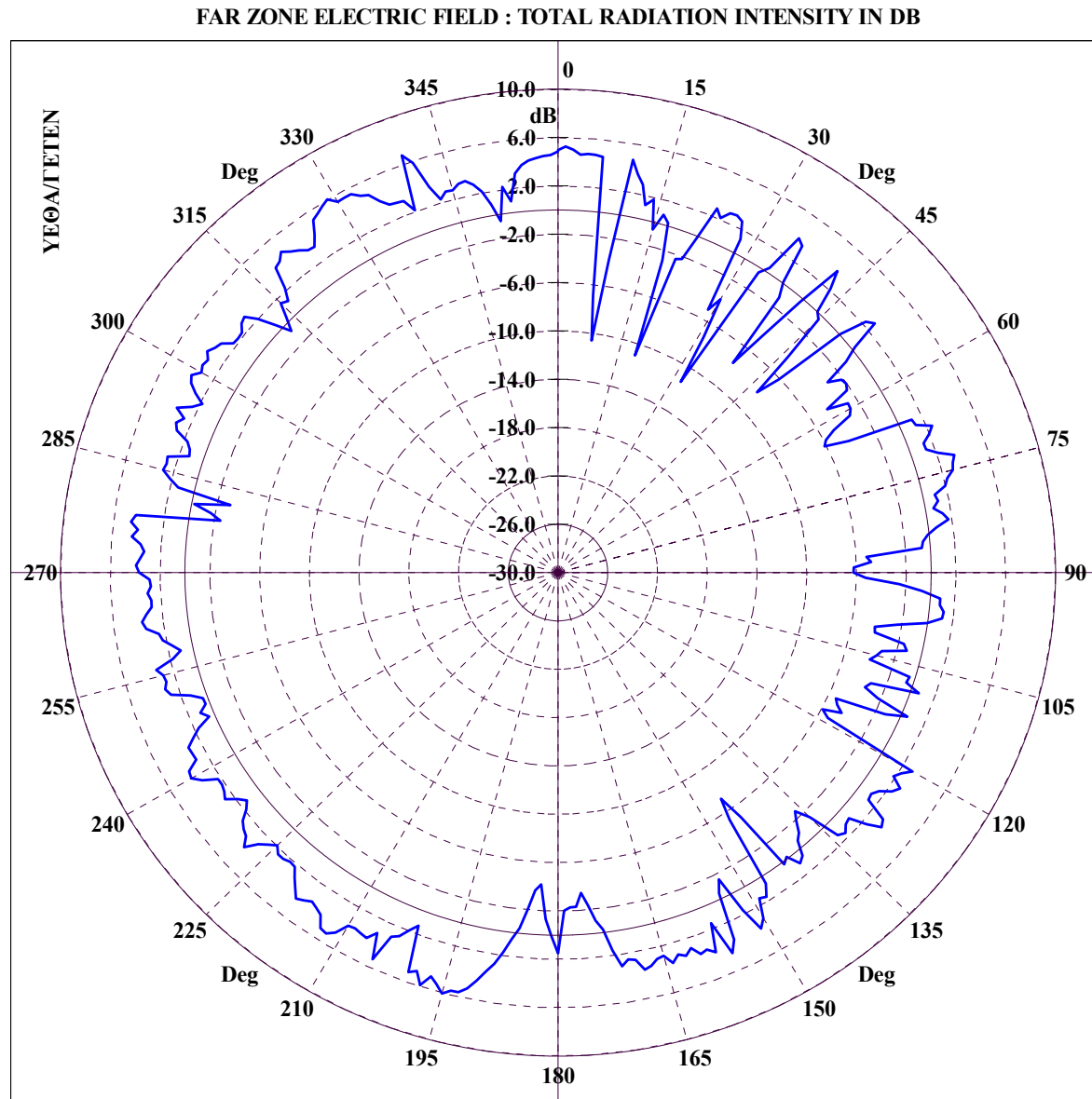


Σχήμα 5.18 : Μοντέλο πλακών και κυλίνδρων Tincoderoga Class Cruiser με διαφαινόμενες τις 8 ground plane κεραίες που φέρει.

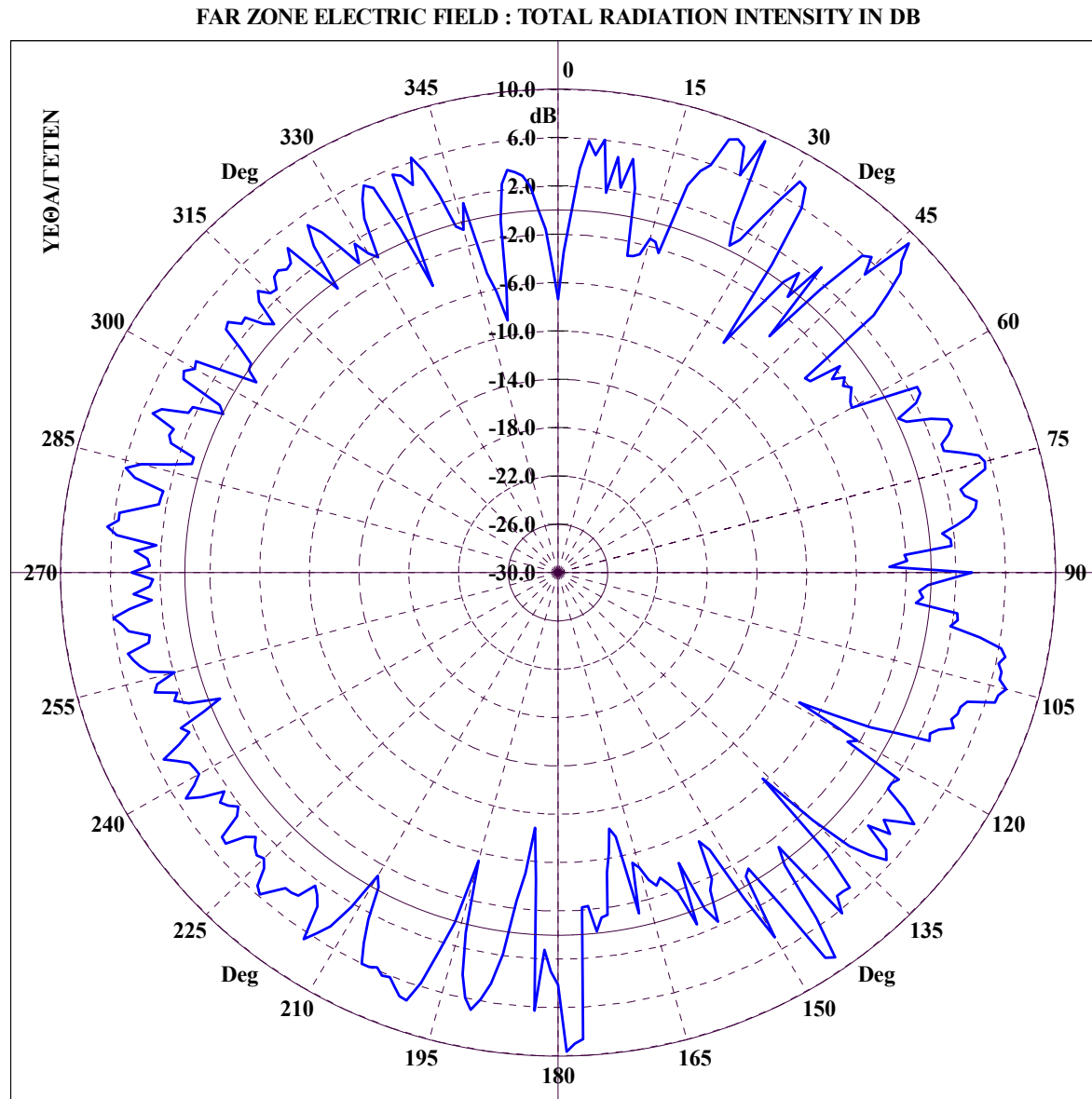
### ***5.6.3.1 Διαγράμματα ακτινοβολίας μακρινού πεδίου κεραίας 1***



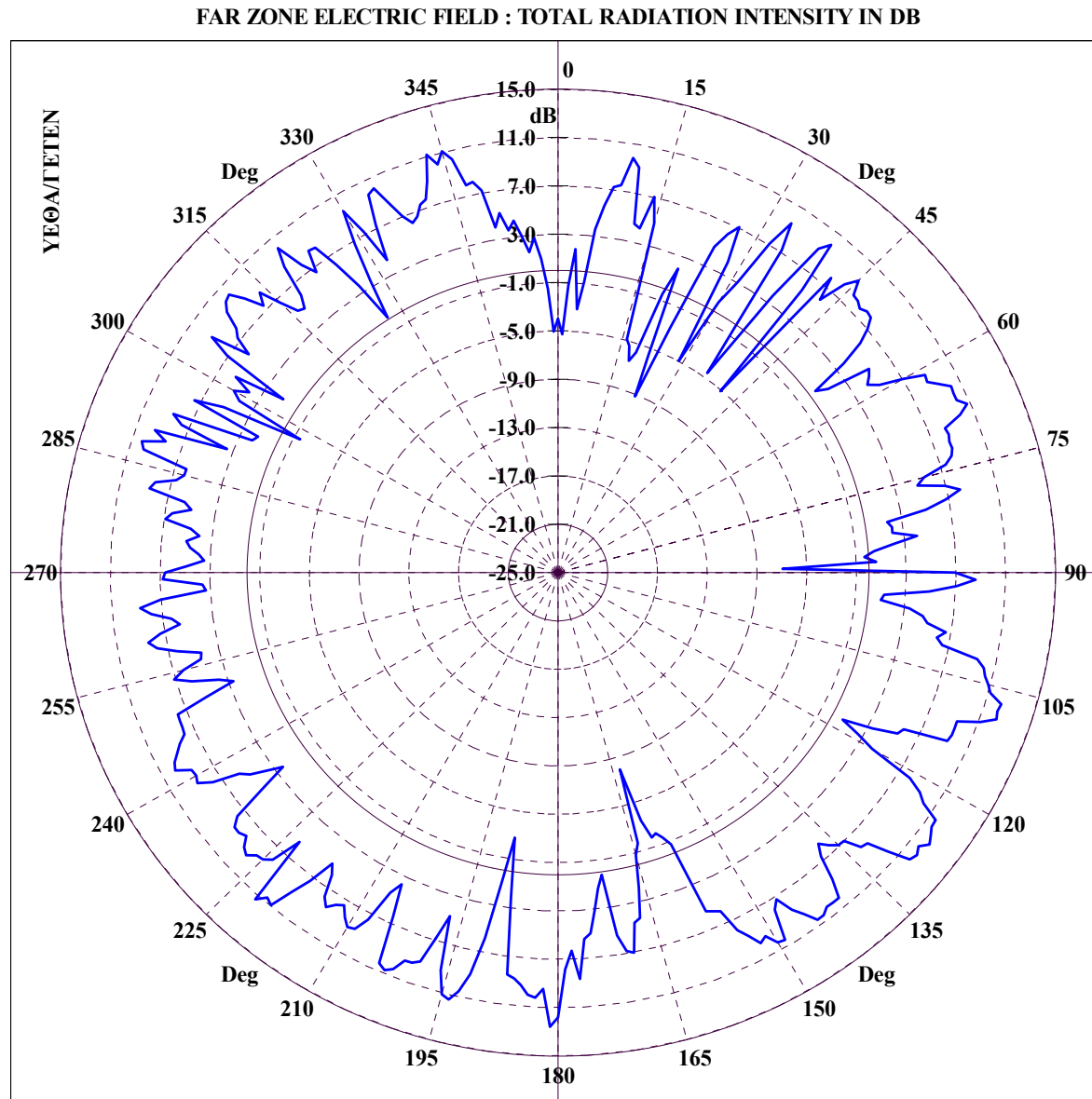
File Name :CRUISER-POL-FARFOR1TELIKOGIAERGASIA. CONICAL CUT :  $\Theta = 20.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY= 0.3500 GHz  
 Διάγραμμα 5.220 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 350 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 20^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .



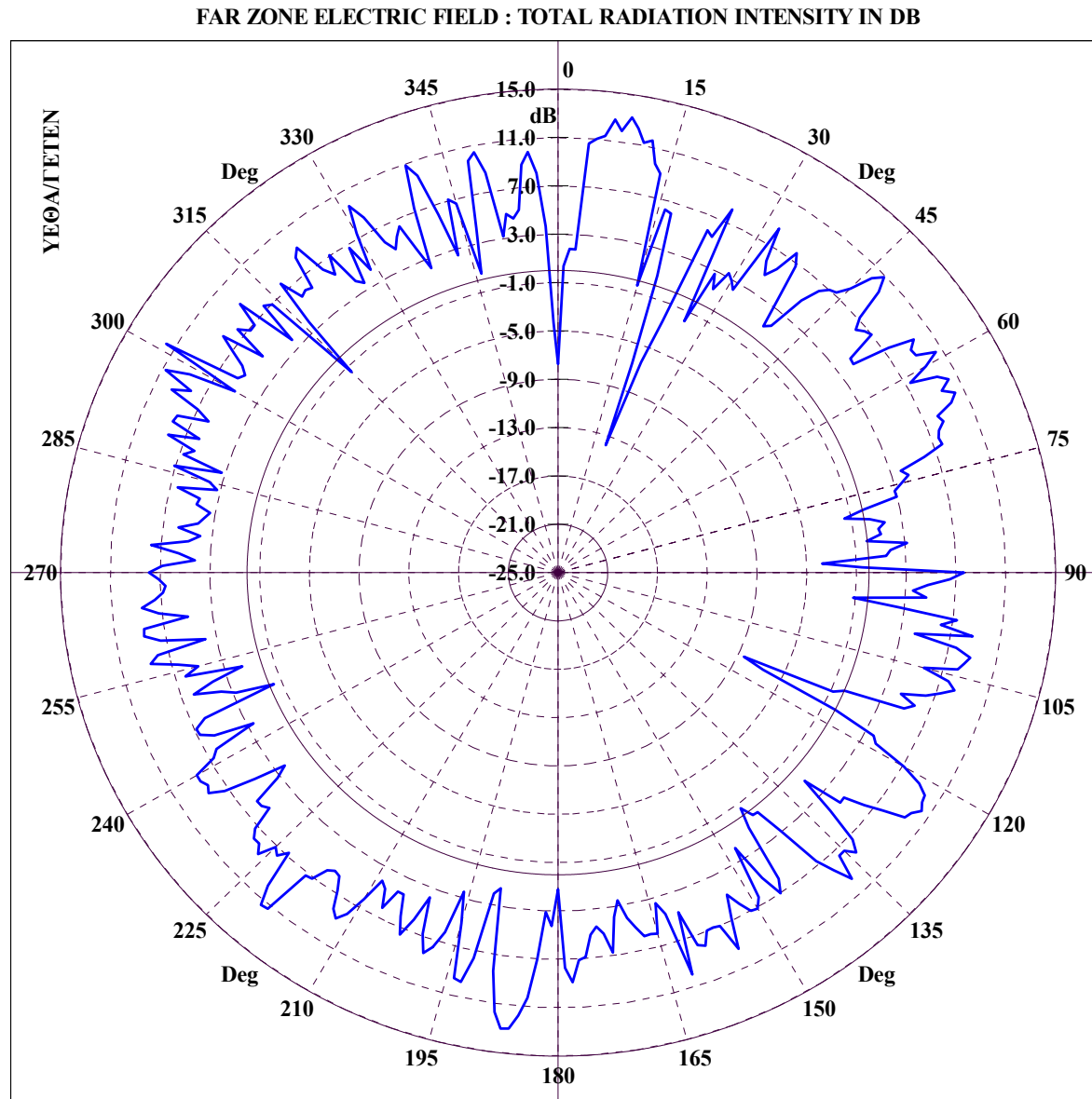
File Name :CRUISER-POL-FARFOR1TELIKOGIAERGASIA. CONICAL CUT :  $\Theta = 30.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY= 0.3500 GHz  
 Διάγραμμα 5.221 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 350 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 30^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .



File Name :CRUISER-POL-FARFOR1TELIKOGIAERGASIA. CONICAL CUT :  $\Theta = 40.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY= 0.3500 GHz  
 Διάγραμμα 5.222 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 350 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 40^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .

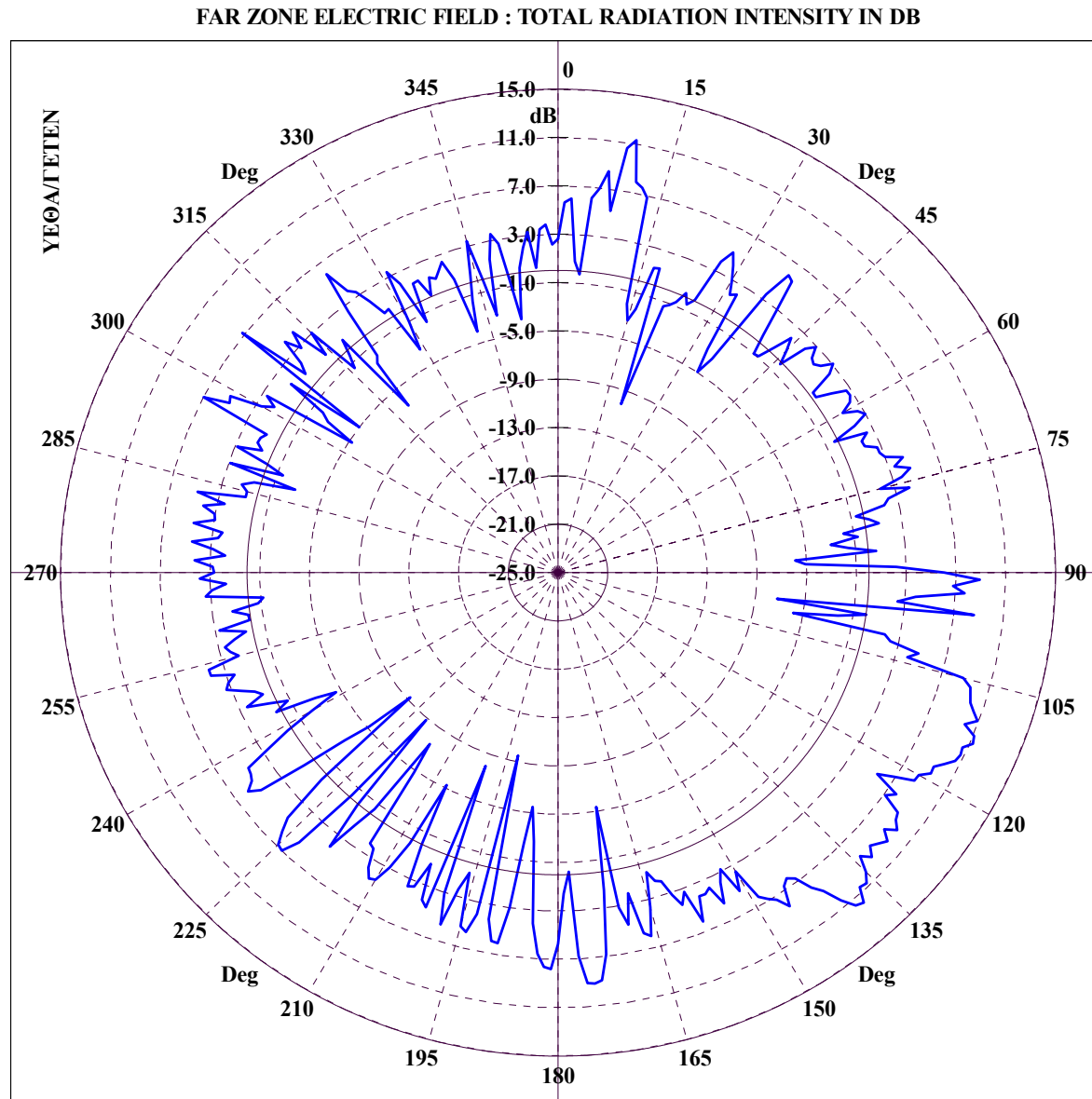


File Name :CRUISER-POL-FARFOR1TELIKOGIAERGASIA. CONICAL CUT :  $\Theta = 50.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY= 0.3500 GHz  
 Διάγραμμα 5.223 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 350 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 50^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .



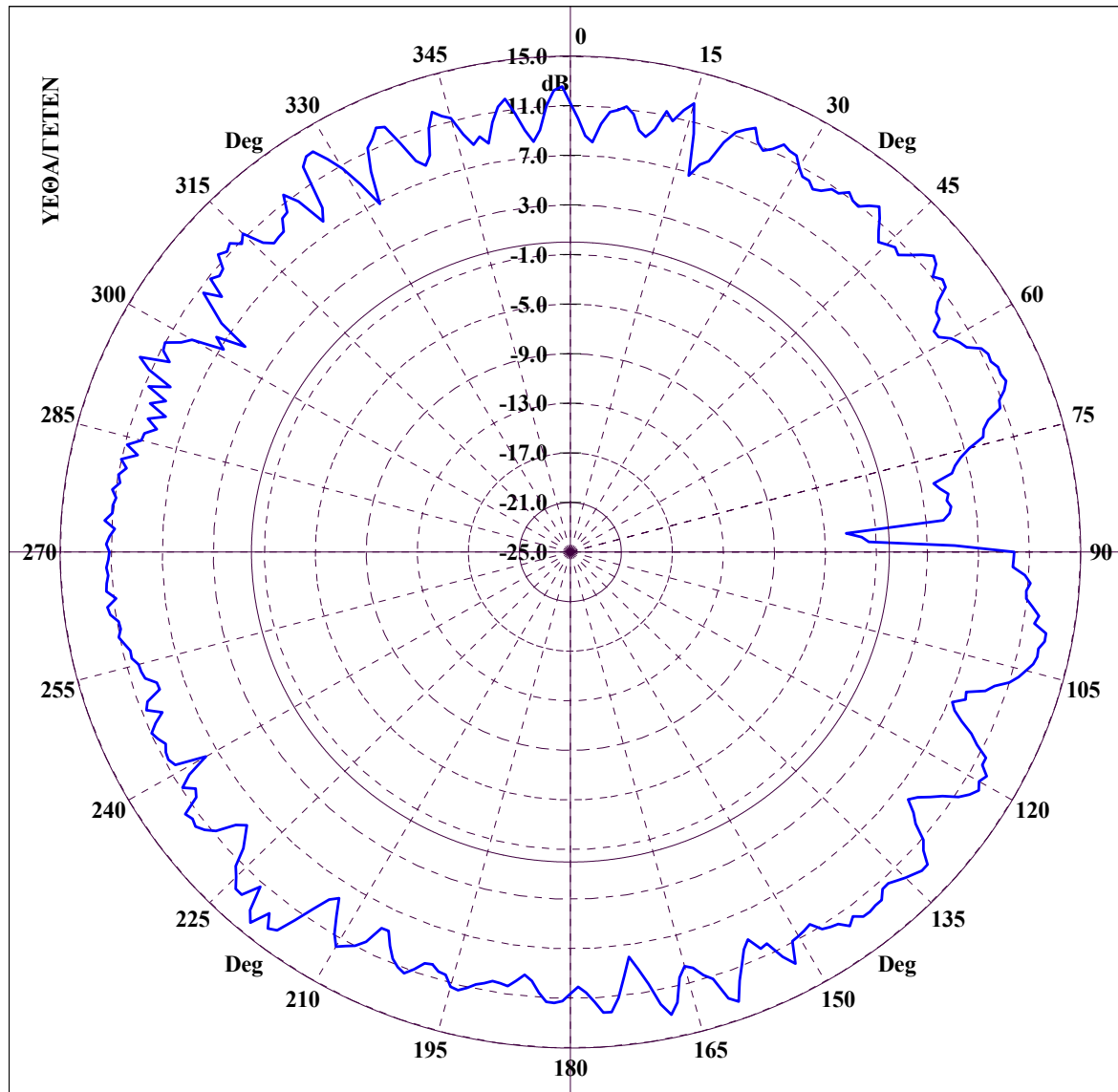
File Name :CRUISER-POL-FARFOR1TELIKOGIAERGASIA. CONICAL CUT :  $\Theta = 60.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY= 0.3500 GHz  
 Διάγραμμα 5.224 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 350 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 60^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .



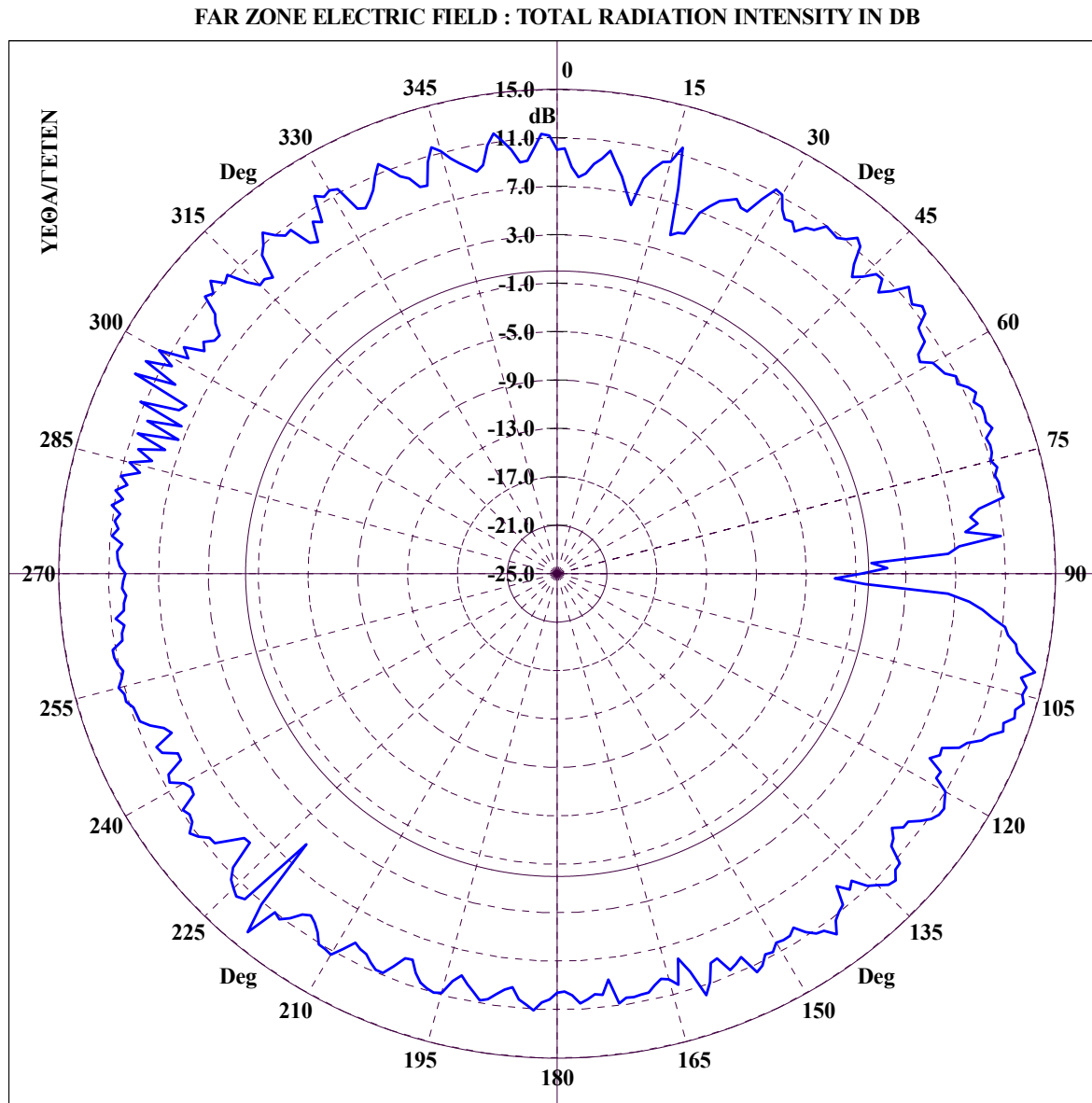


File Name :CRUISER-POL-FARFOR1TELIKOGIAERGASIA. CONICAL CUT :  $\Theta = 70.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY= 0.3500 GHz  
 Διάγραμμα 5.225 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 350 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 70^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .

FAR ZONE ELECTRIC FIELD : TOTAL RADIATION INTENSITY IN DB

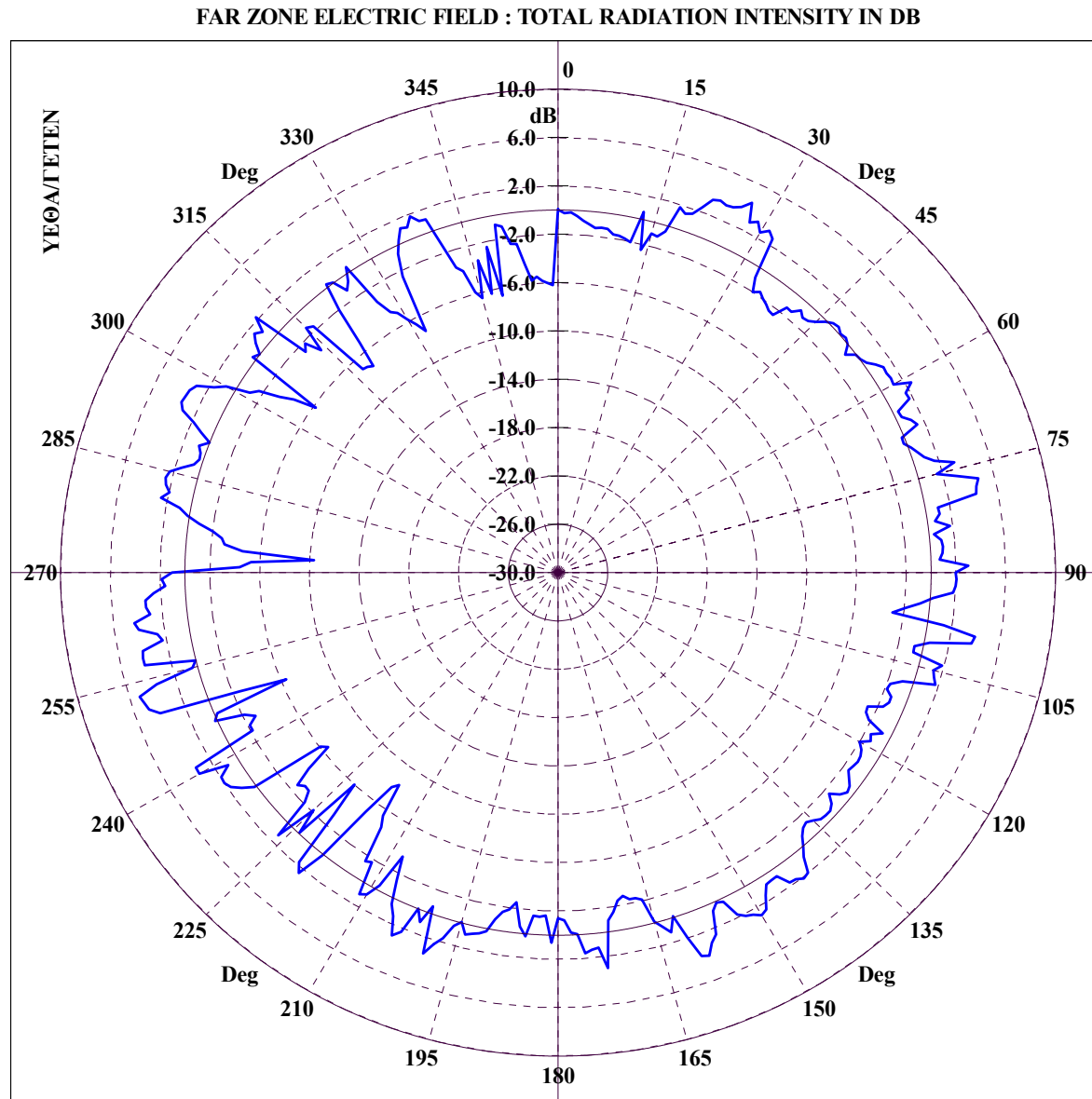


File Name :CRUISER-POL-FARFOR1TELIKOGIAERGASIA. CONICAL CUT :  $\Theta = 80.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY= 0.3500 GHz  
 Διάγραμμα 5.226 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 350 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 80^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .

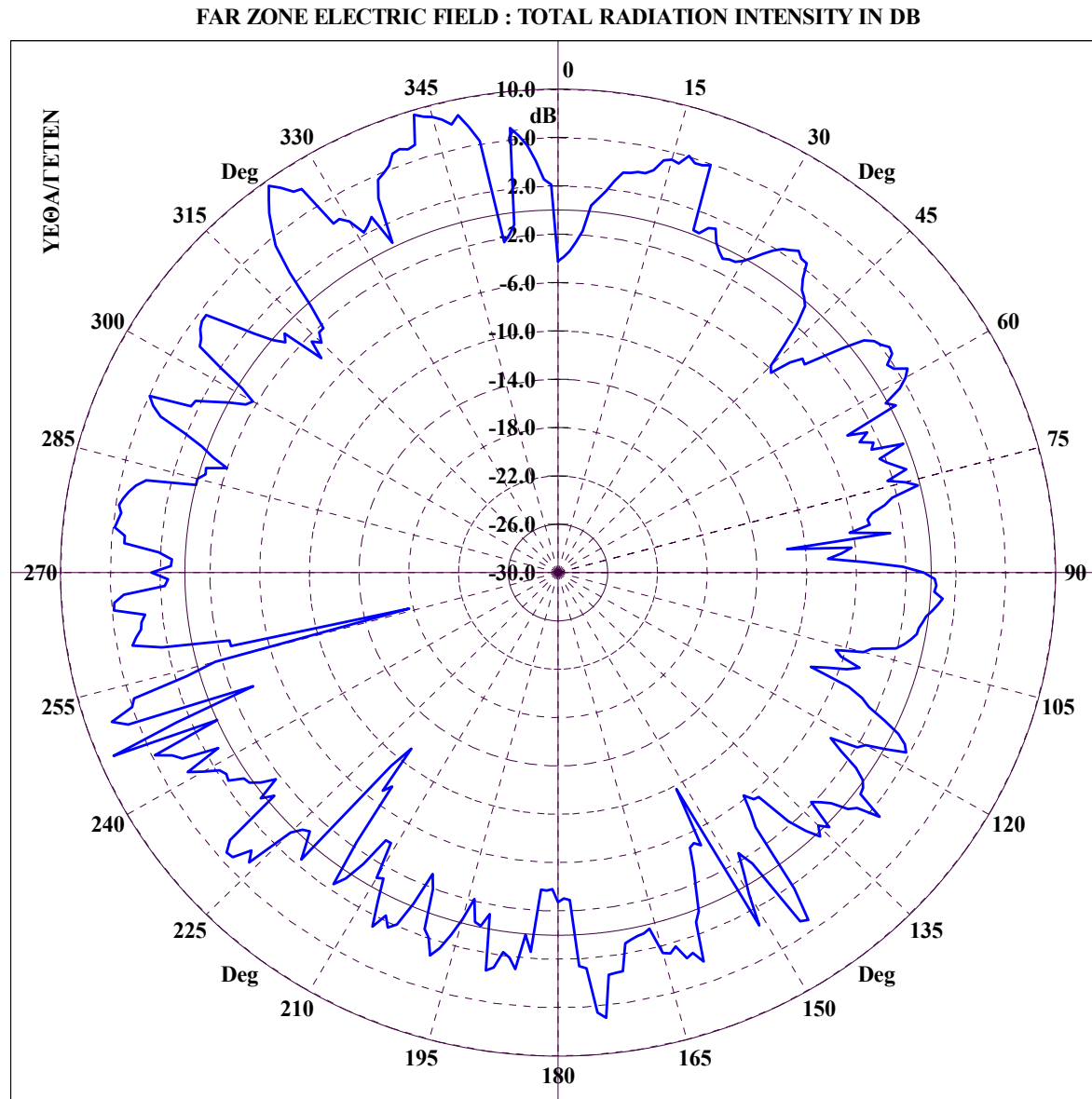


File Name :CRUISER-POL-FARFOR1TELIKOGIAERGASIA. CONICAL CUT :  $\Theta = 89.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 0.3500 GHz  
 Διάγραμμα 5.227 : CRUISER, Κεραία 1 σε συχνότητα 350 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 89^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .

### ***5.6.3.2 Διαγράμματα ακτινοβολίας μακρινού πεδίου κεραίας 2***

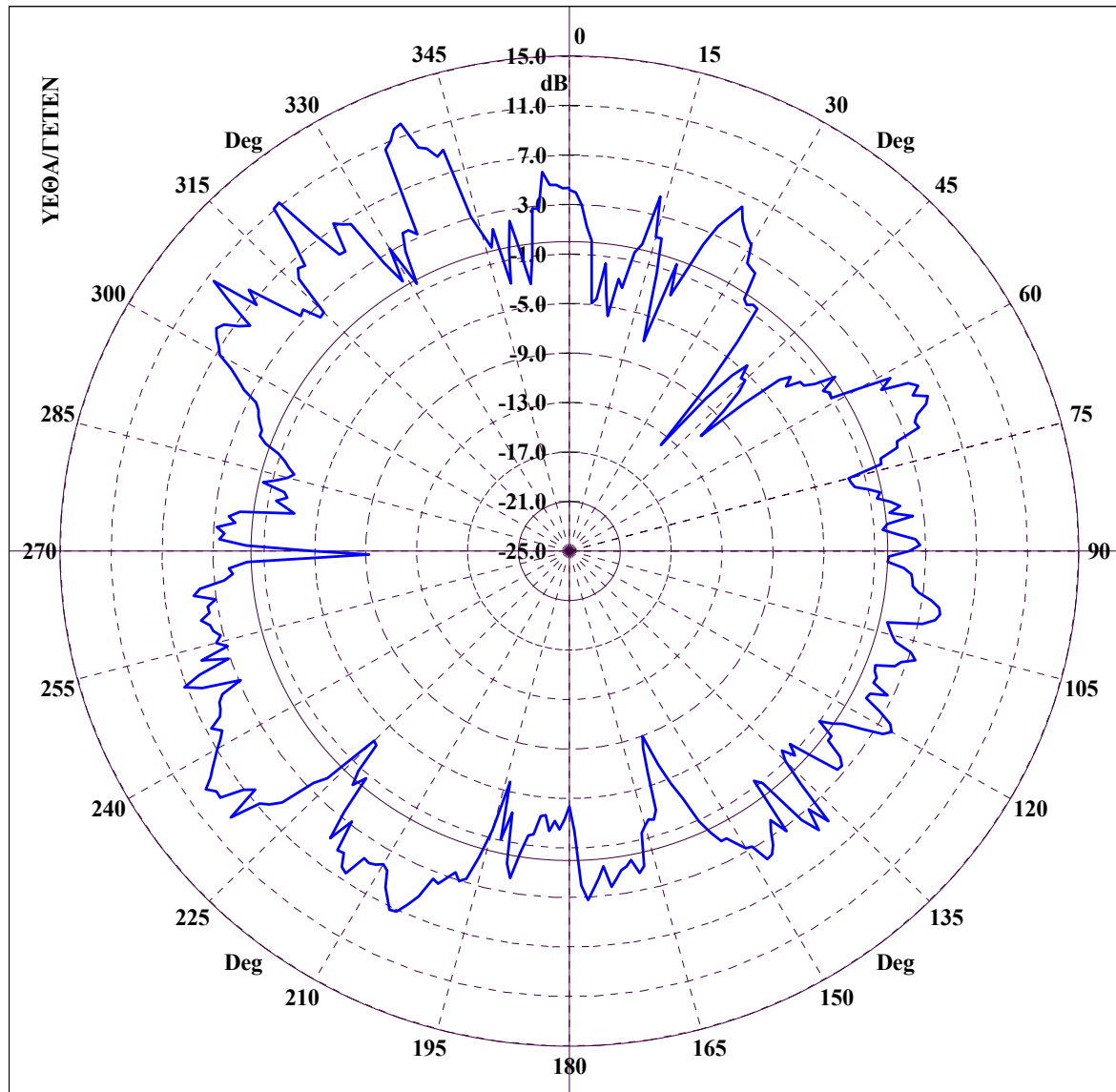


File Name :CRUISER-POL-FARFOR2TELIKOGIAERGASIA. CONICAL CUT :  $\Theta = 20.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY= 0.1600 GHz  
 Διάγραμμα 5.228 : CRUISER, Κεραία 2 σε συχνότητα 160 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 20^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .



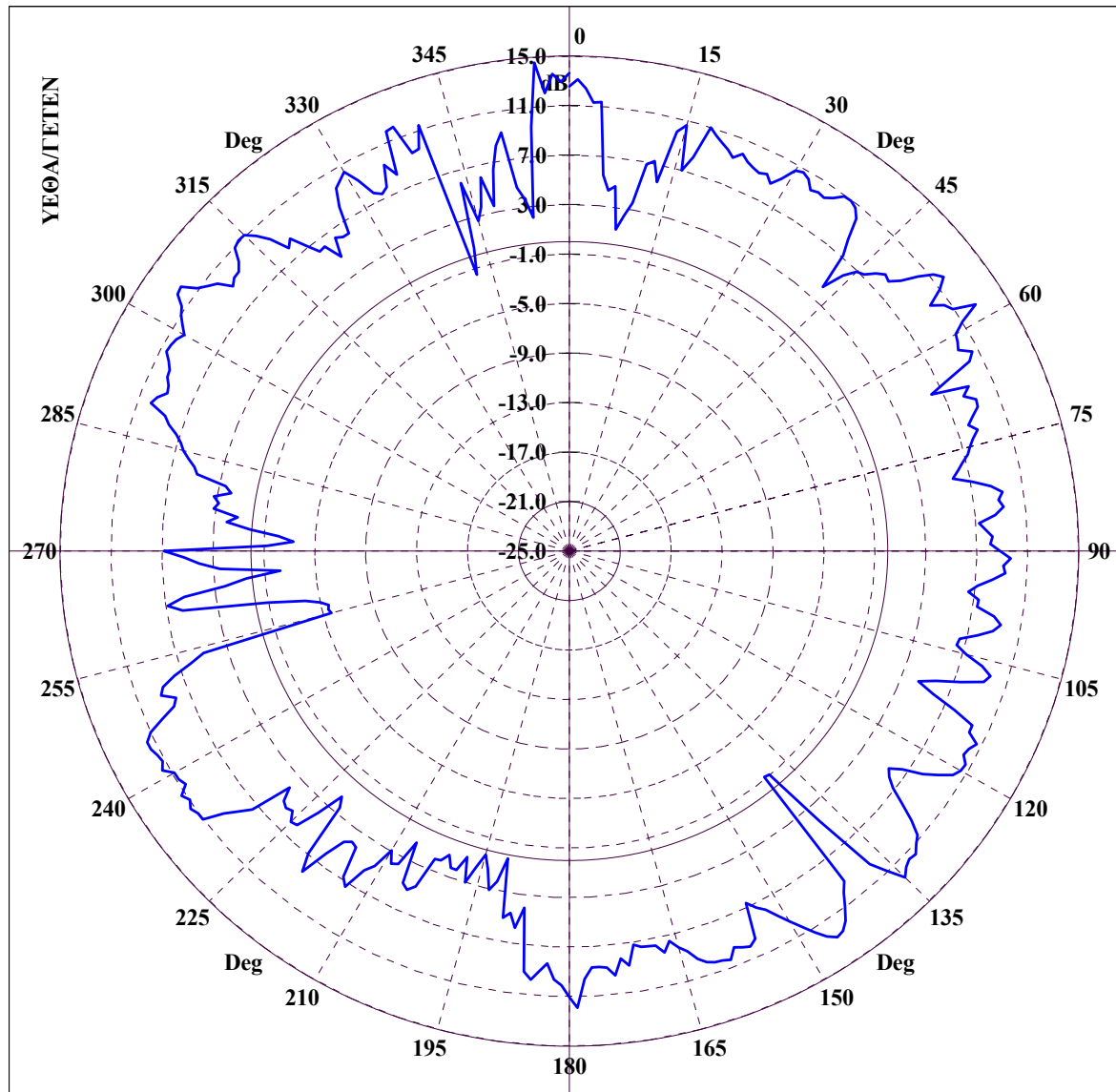
File Name :CRUISER-POL-FARFOR2TELIKOGIAERGASIA. CONICAL CUT :  $\Theta = 30.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY= 0.1600 GHz  
 Διάγραμμα 5.229 : CRUISER, Κεραία 2 σε συχνότητα 160 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 30^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .

FAR ZONE ELECTRIC FIELD : TOTAL RADIATION INTENSITY IN DB



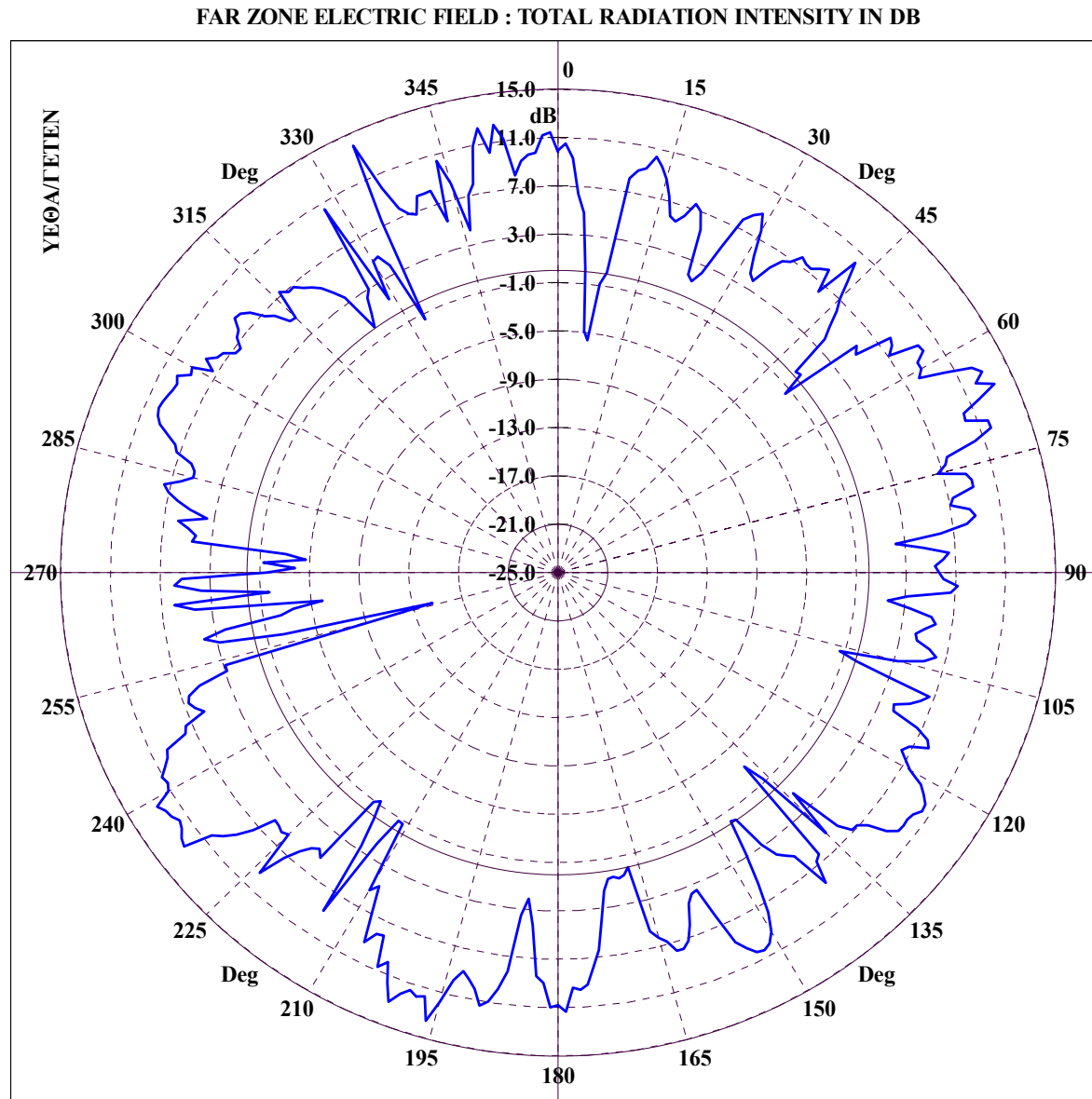
File Name :CRUISER-POL-FARFOR2TELIKOGIAERGASIA. CONICAL CUT :  $\Theta = 40.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY= 0.1600 GHz  
Διάγραμμα 5.230 : CRUISER, Κεραία 2 σε συχνότητα 160 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 40^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .

FAR ZONE ELECTRIC FIELD : TOTAL RADIATION INTENSITY IN DB

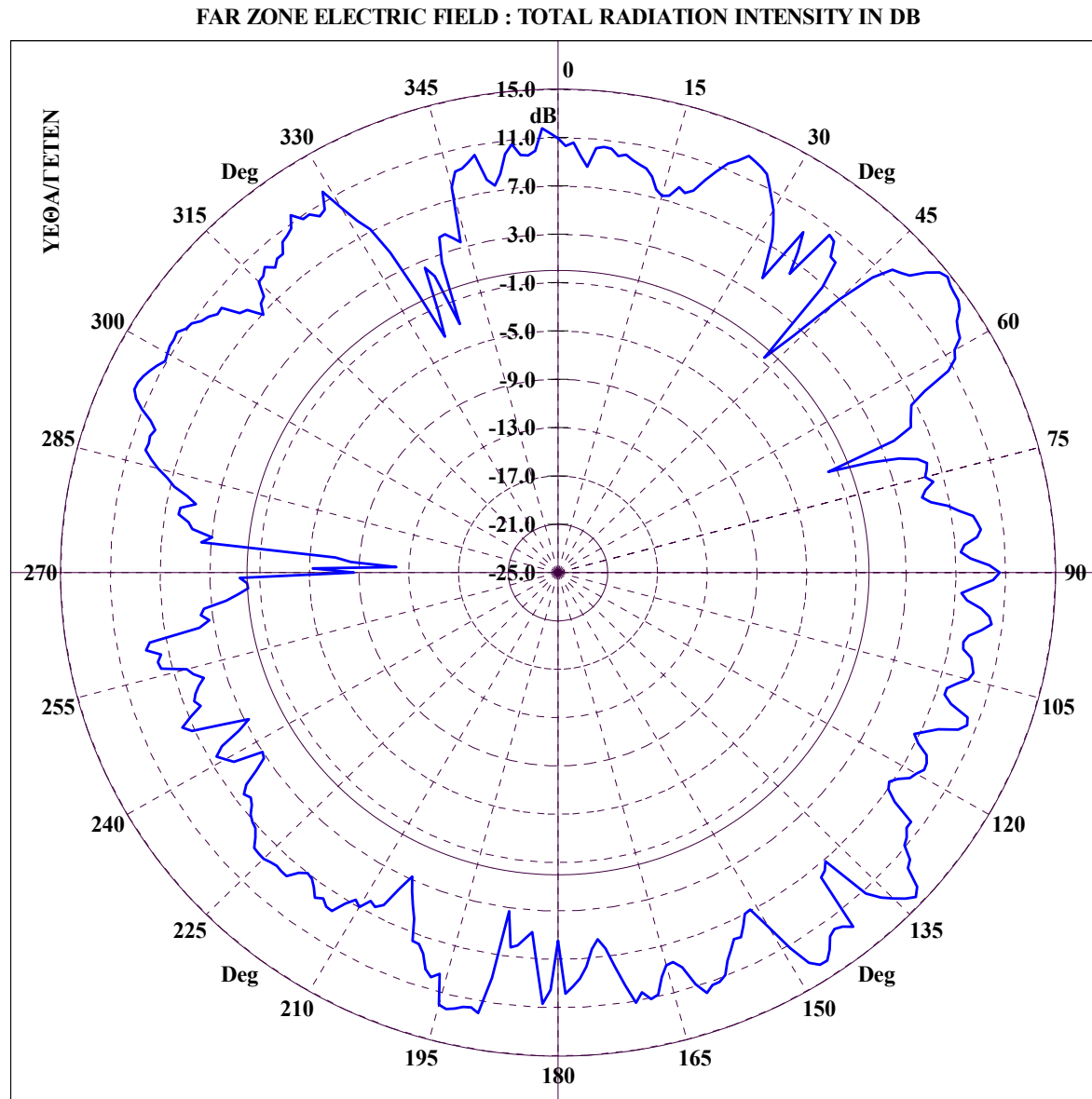


File Name :CRUISER-POL-FARFOR2TELIKOGIAERGASIA. CONICAL CUT :  $\Theta = 50.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY= 0.1600 GHz  
Διάγραμμα 5.231 : CRUISER, Κεραία 2 σε συχνότητα 160 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 50^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .

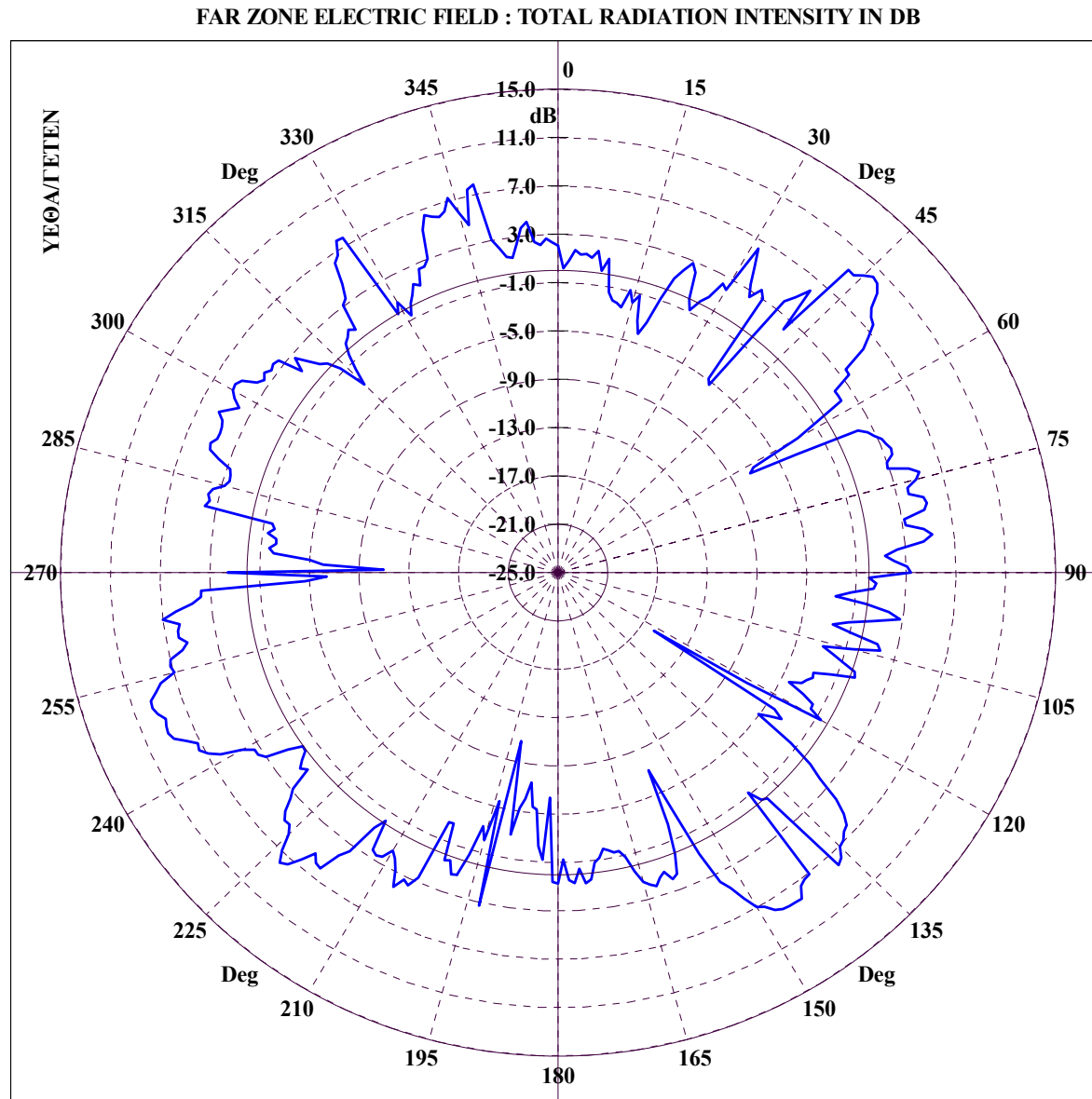




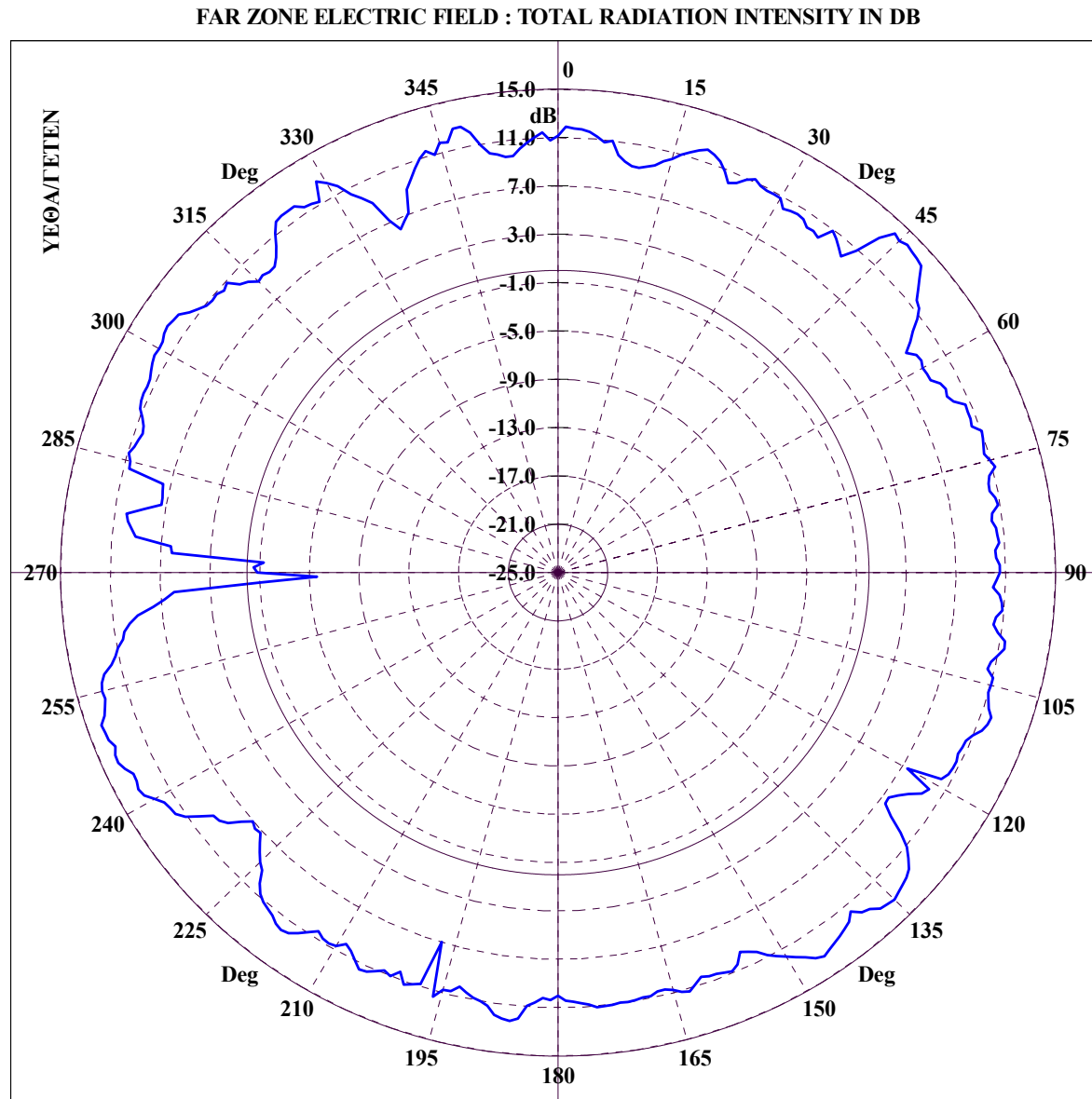
File Name :CRUISER-POL-FARFOR2TELIKOGIAERGASIA. CONICAL CUT :  $\Theta = 60.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY= 0.1600 GHz  
 Διάγραμμα 5.232 : CRUISER, Κεραία 2 σε συχνότητα 160 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 60^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .



File Name :CRUISER-POL-FARFOR2TELIKOGIAERGASIA. CONICAL CUT :  $\Theta = 70.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY= 0.1600 GHz  
 Διάγραμμα 5.233 : CRUISER, Κεραία 2 σε συχνότητα 160 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 70^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .

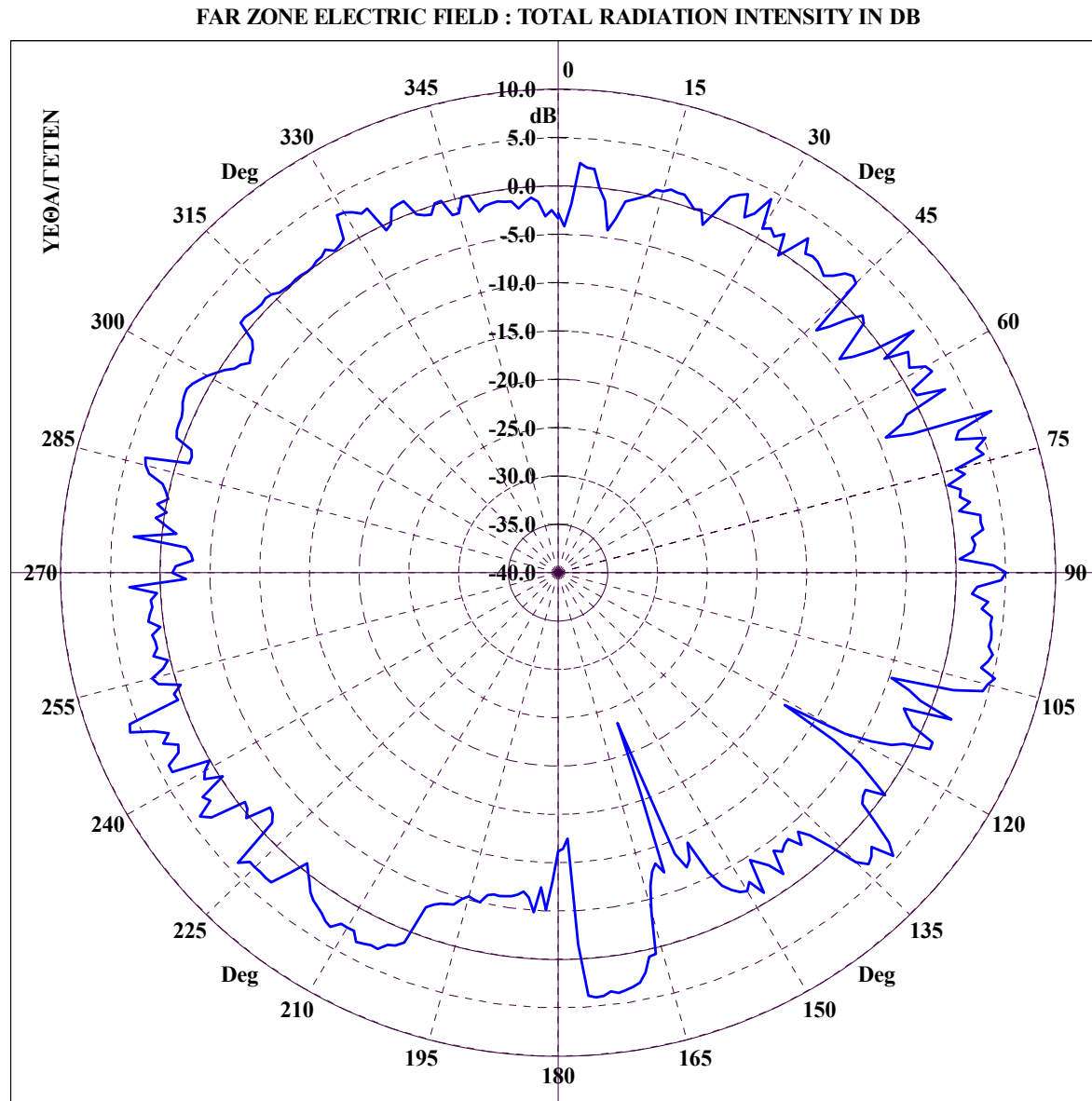


File Name :CRUISER-POL-FARFOR2TELIKOGIAERGASIA. CONICAL CUT :  $\Theta = 80.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY= 0.1600 GHz  
 Διάγραμμα 5.234 : CRUISER, Κεραία 2 σε συχνότητα 160 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 80^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .

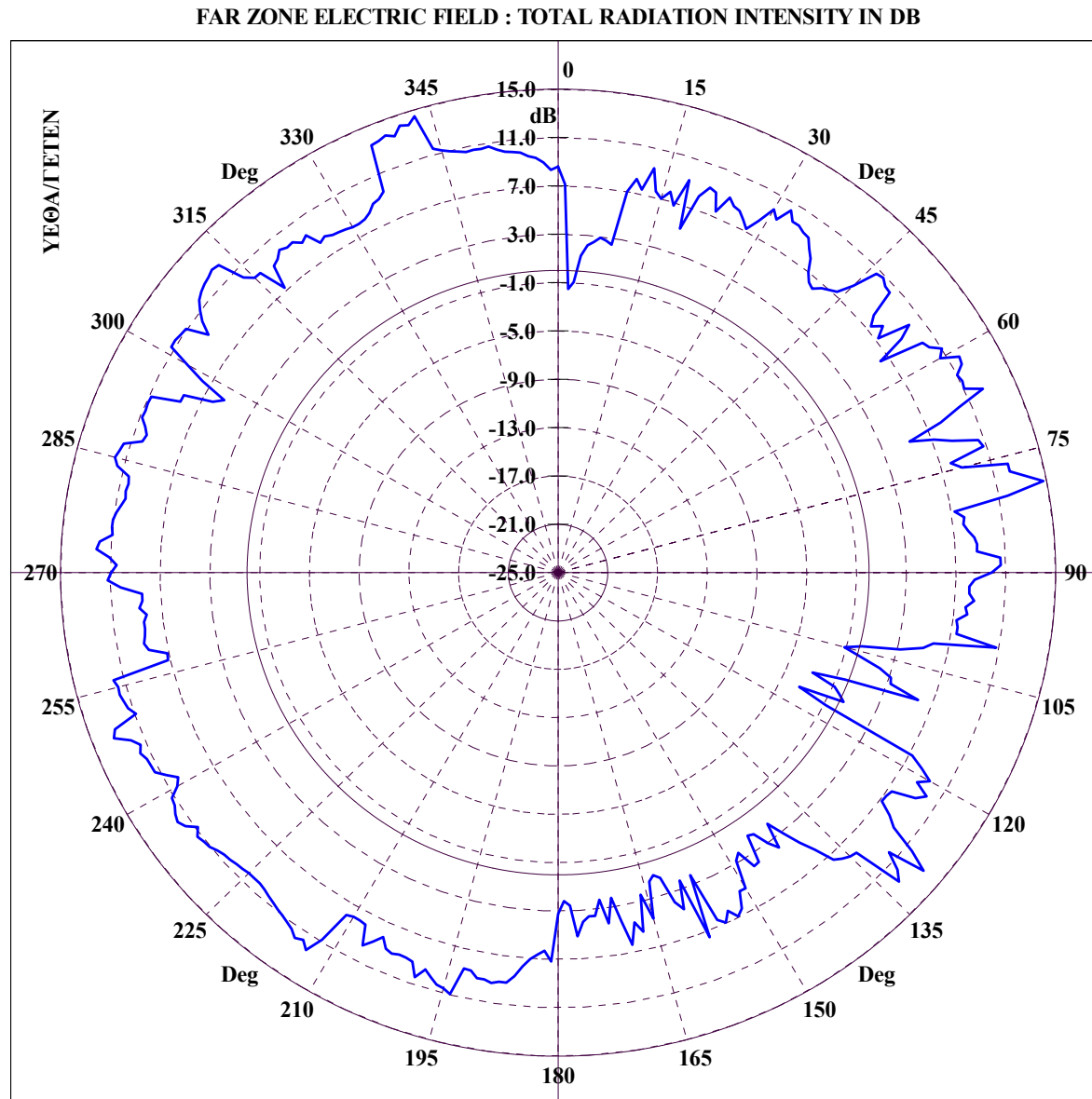


File Name :CRUISER-POL-FARFOR2TELIKOGIAERGASIA. CONICAL CUT :  $\Theta = 89.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY= 0.1600 GHz  
 Διάγραμμα 5.235 : CRUISER, Κεραία 2 σε συχνότητα 160 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 89^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .

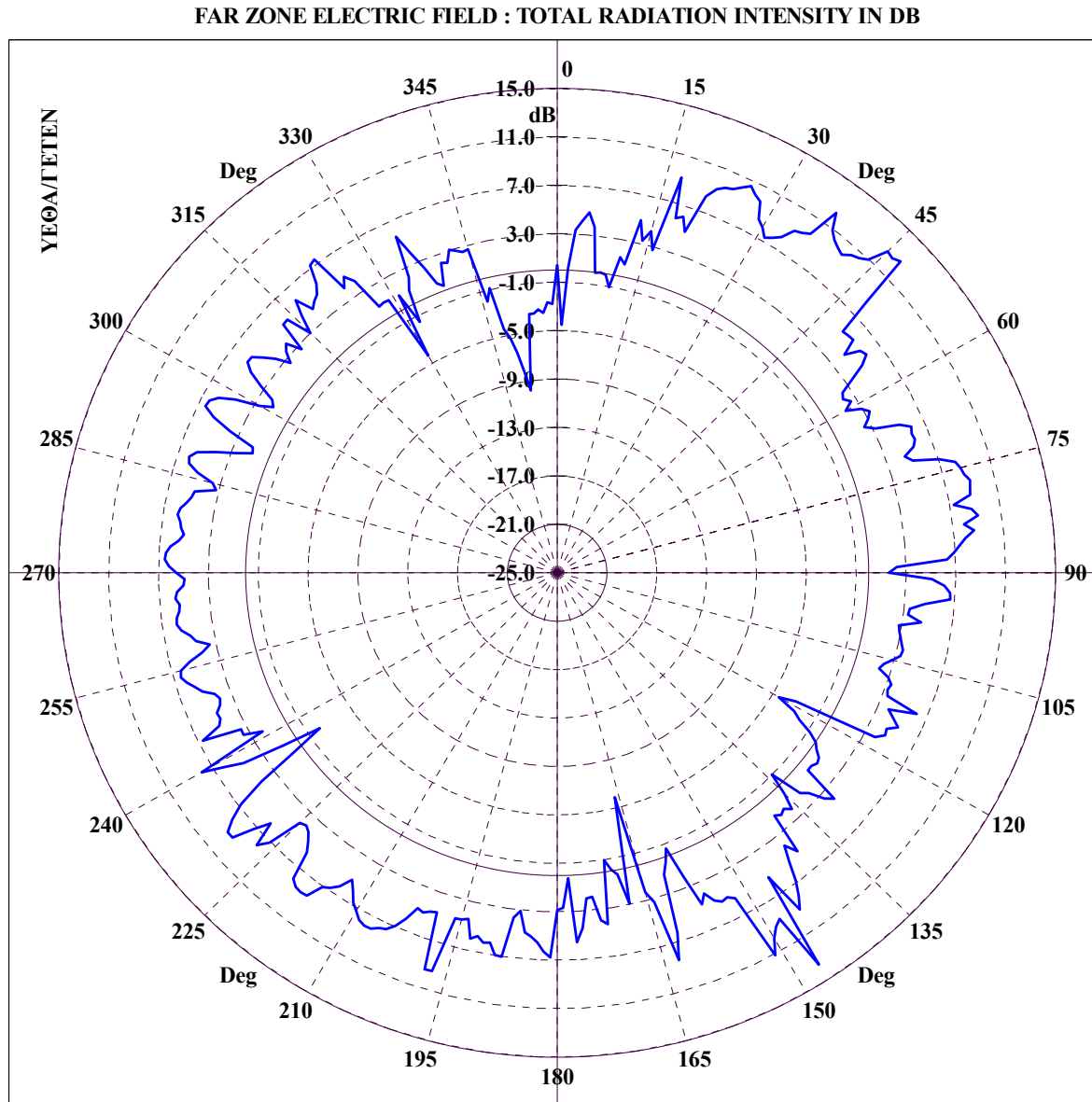
### ***5.6.3.3 Διαγράμματα ακτινοβολίας μακρινού πεδίου κεραίας 3***



File Name :CRUISER-POL-FARFOR3TELIKOGIAERGASIA. CONICAL CUT :  $\Theta = 20.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY= 0.3500 GHz  
 Διάγραμμα 5.236 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 130 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 20^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .

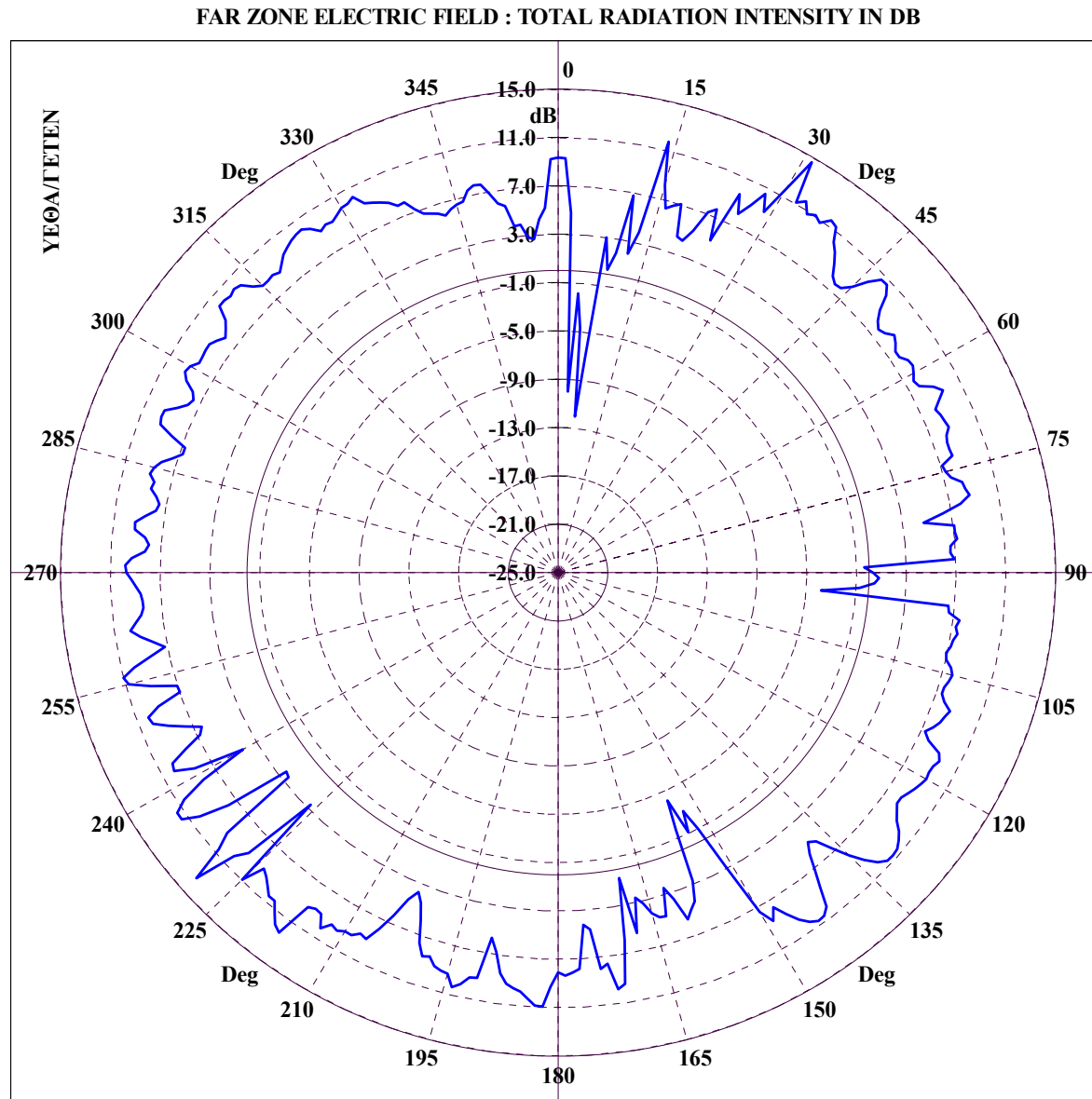


File Name :CRUISER-POL-FARFOR3TELIKOGIAERGASIA. CONICAL CUT :  $\Theta = 30.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY= 0.3500 GHz  
 Διάγραμμα 5.237 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 130 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 30^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .

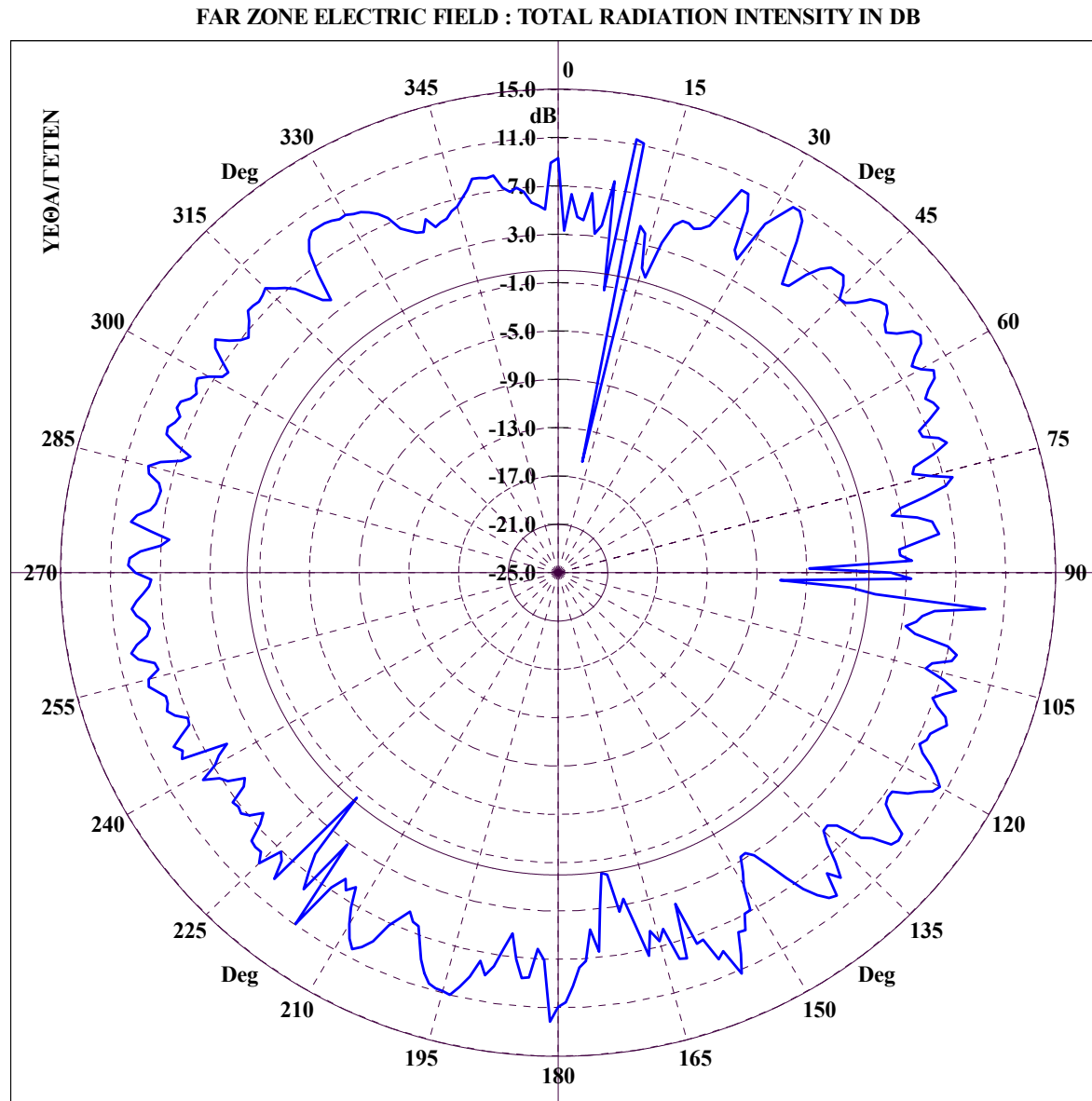


File Name :CRUISER-POL-FARFOR3TELIKOGIAERGASIA. CONICAL CUT :  $\Theta = 40.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY= 0.3500 GHz  
 Διάγραμμα 5.238 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 130 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 40^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .

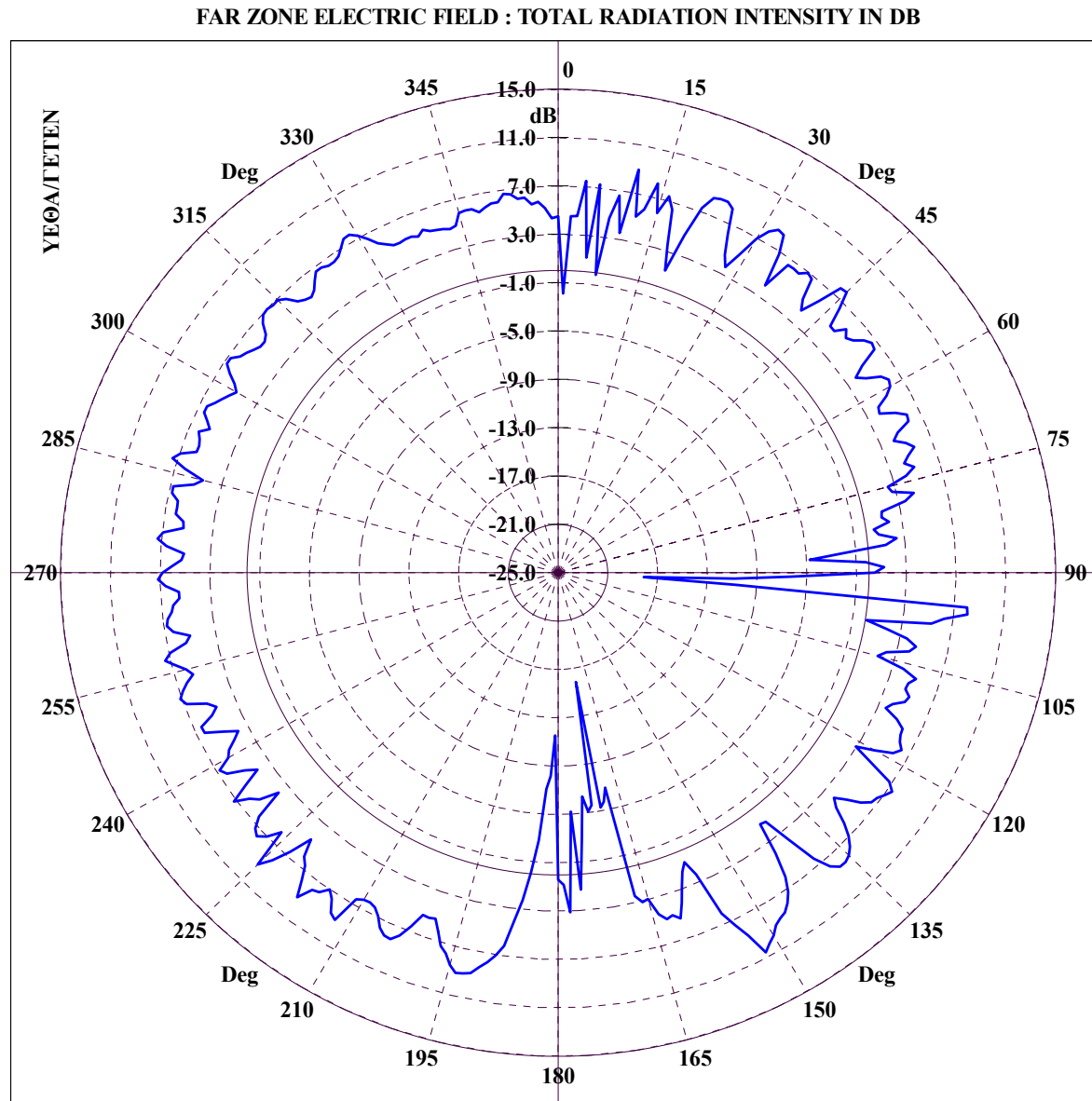




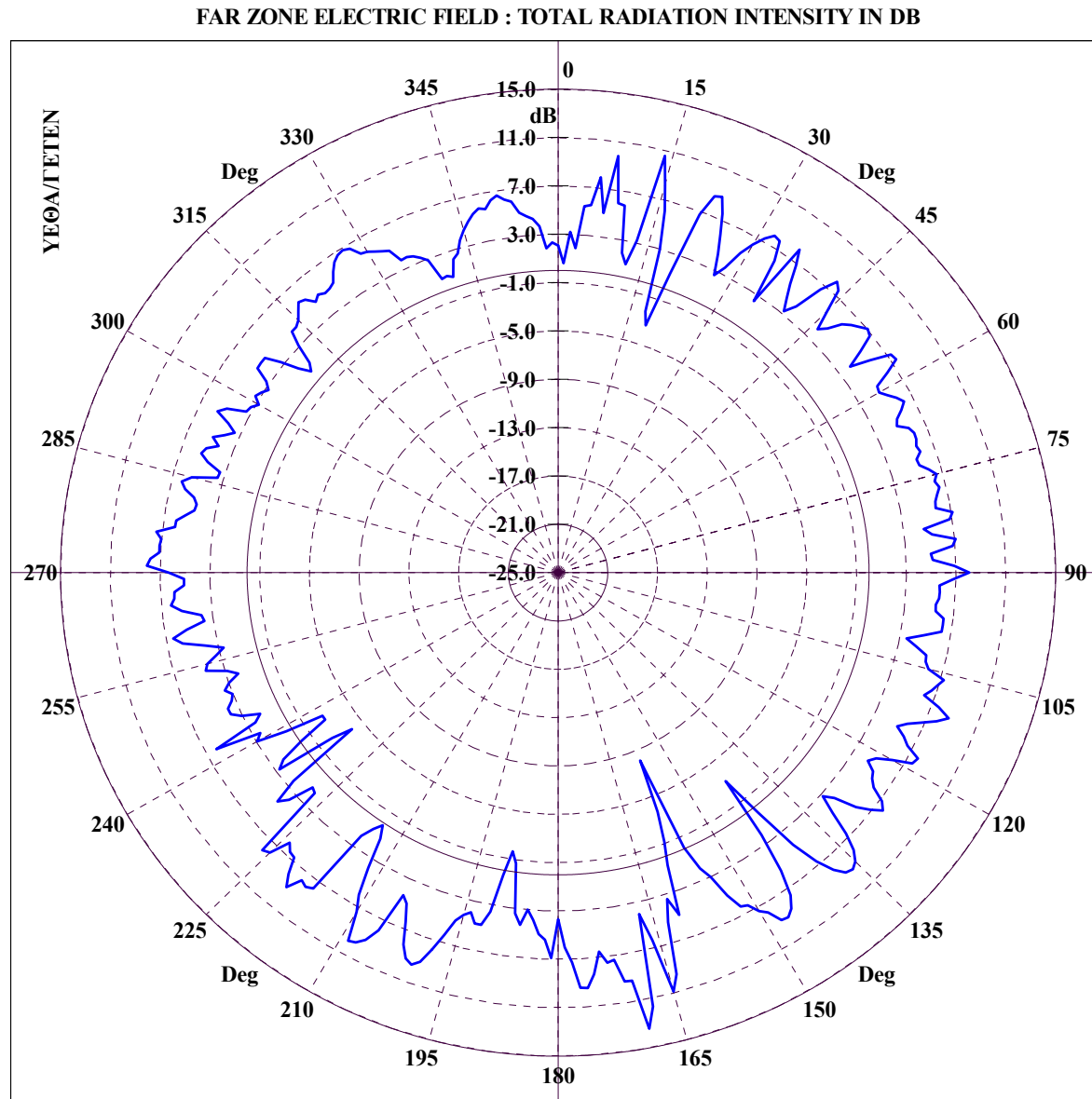
File Name :CRUISER-POL-FARFOR3TELIKOGIAERGASIA. CONICAL CUT :  $\Theta = 50.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY= 0.3500 GHz  
 Διάγραμμα 5.239 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 130 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 50^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .



File Name :CRUISER-POL-FARFOR3TELIKOGIAERGASIA. CONICAL CUT :  $\Theta = 60.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY= 0.3500 GHz  
 Διάγραμμα 5.240 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 130 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 60^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .

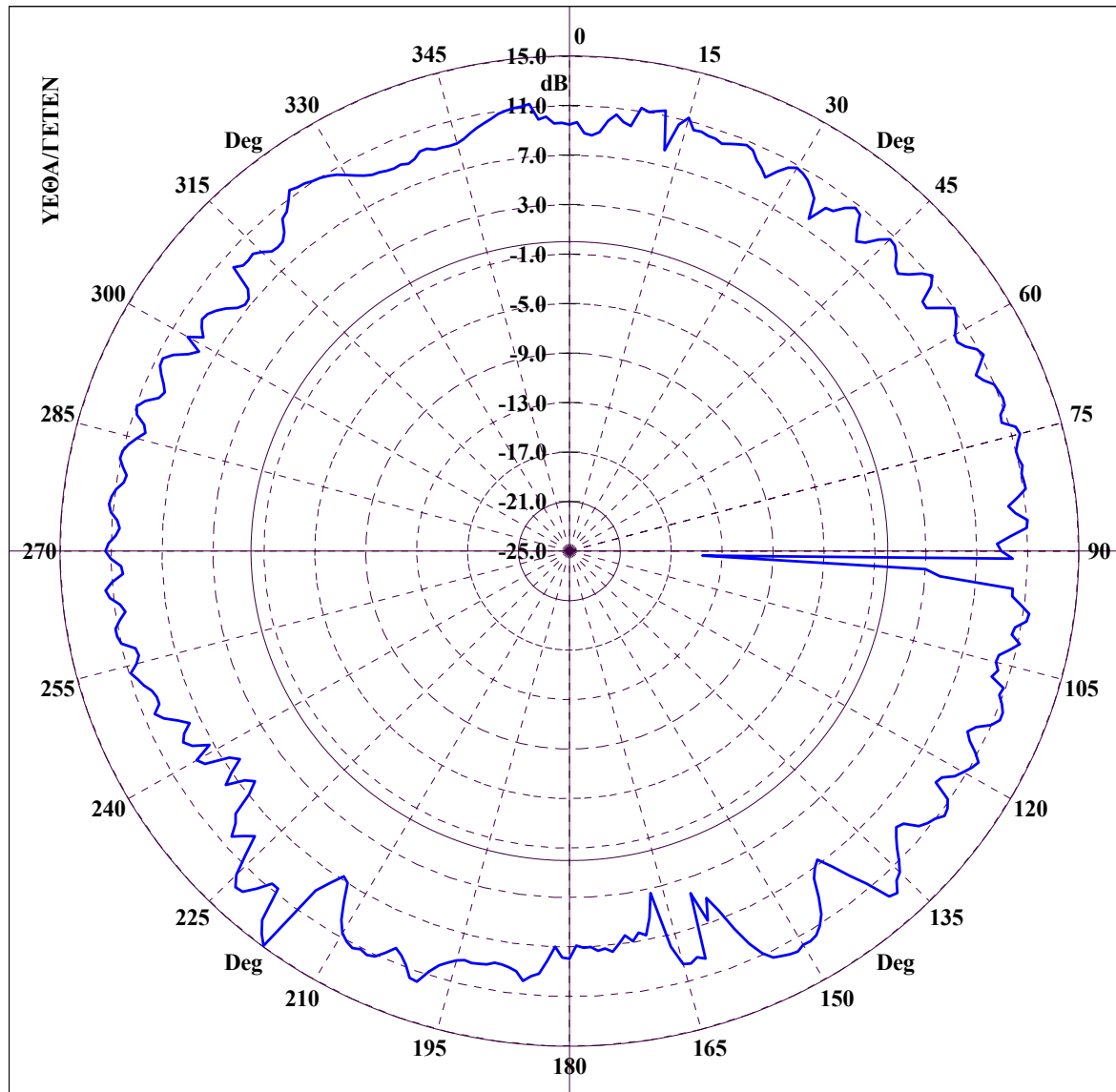


File Name :CRUISER-POL-FARFOR3TELIKOGIAERGASIA. CONICAL CUT :  $\Theta = 70.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY= 0.3500 GHz  
 Διάγραμμα 5.241 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 130 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 70^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .



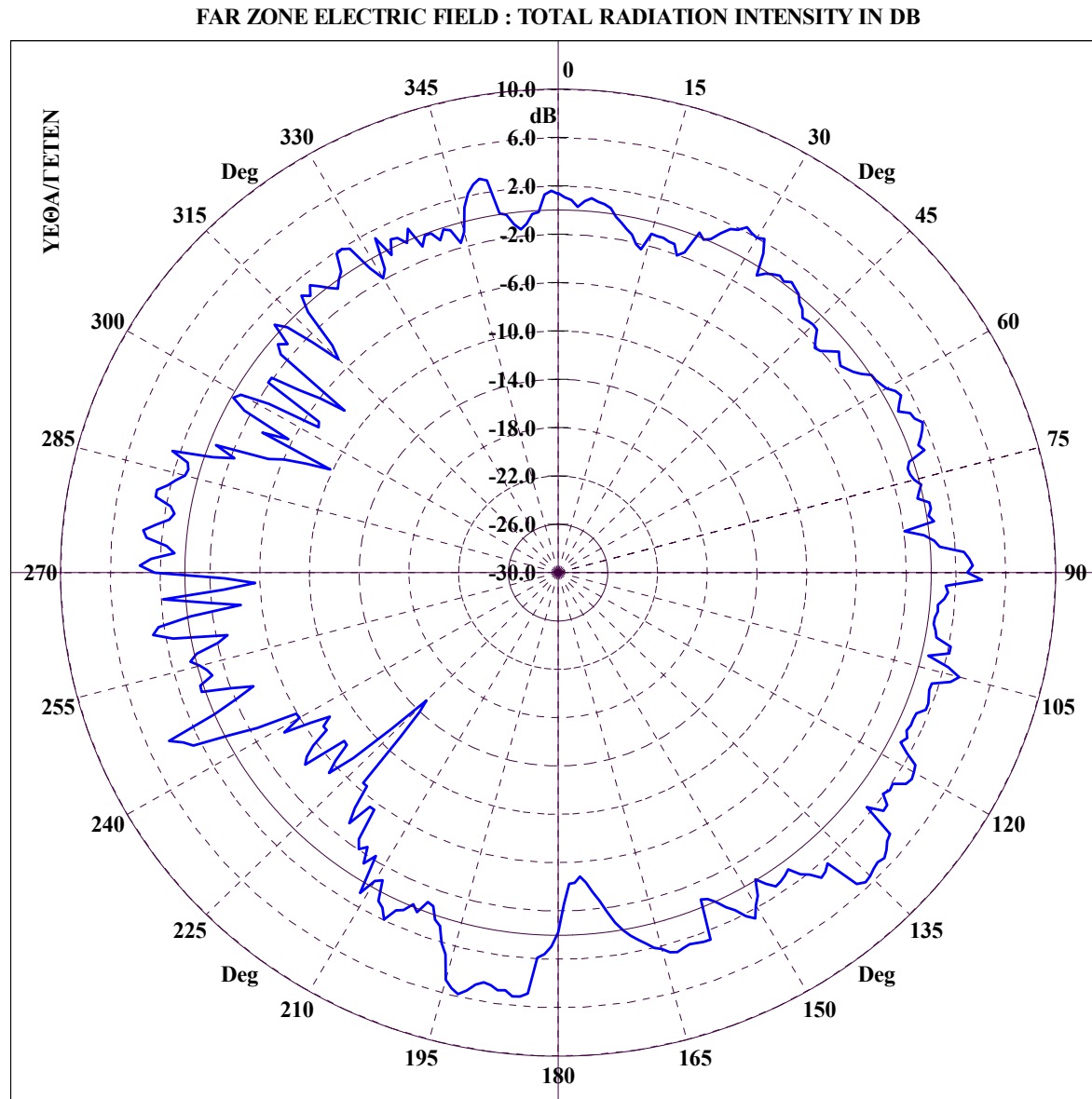
File Name :CRUISER-POL-FARFOR3TELIKOGIAERGASIA. CONICAL CUT :  $\Theta = 80.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY= 0.3500 GHz  
Διάγραμμα 5.242 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 130 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 80^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .

FAR ZONE ELECTRIC FIELD : TOTAL RADIATION INTENSITY IN DB

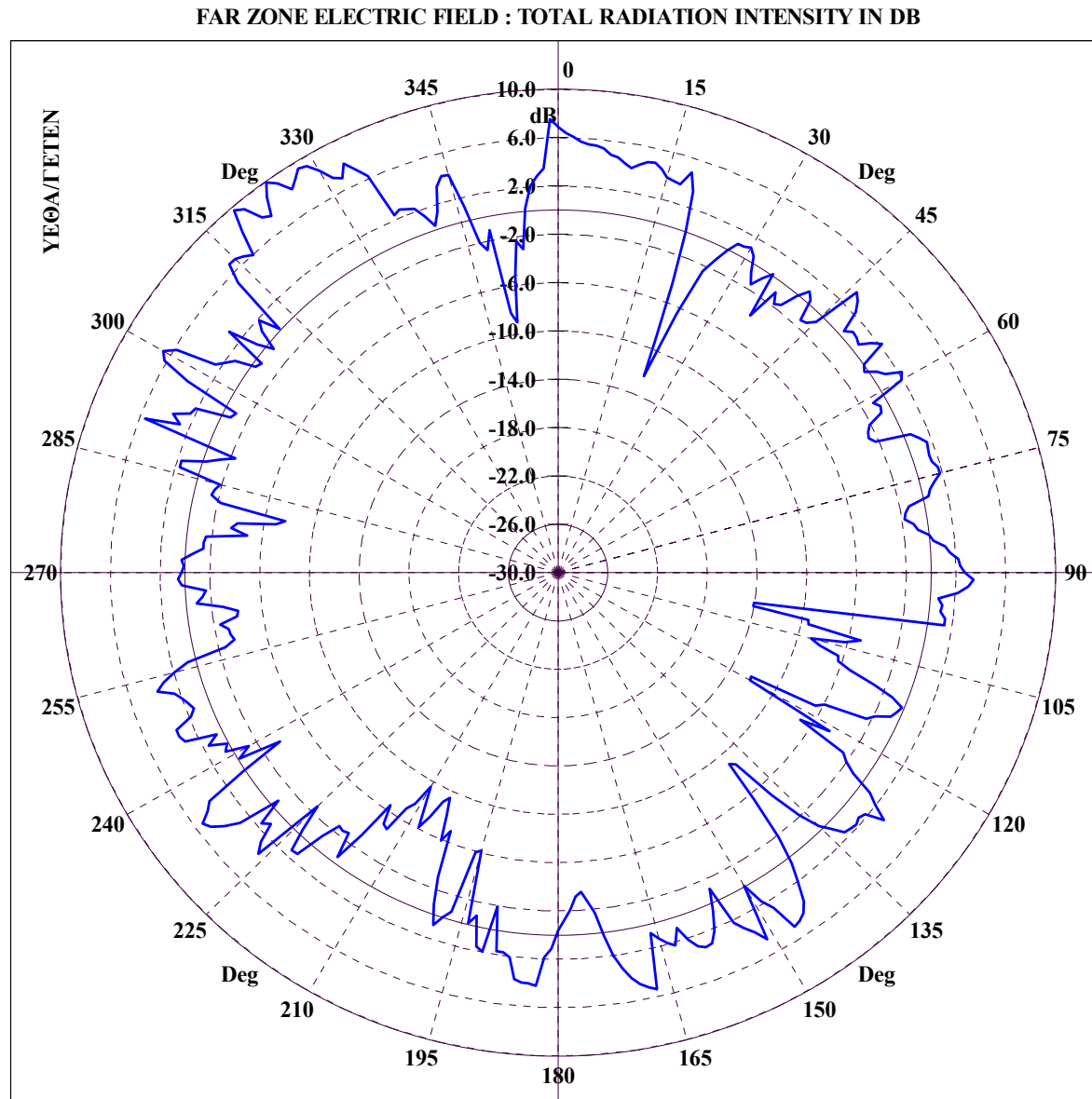


File Name :CRUISER-POL-FARFOR3TELIKOGIAERGASIA. CONICAL CUT :  $\Theta = 89.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY= 0.3500 GHz  
Διάγραμμα 5.243 : CRUISER, Κεραία 3 σε συχνότητα 130 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 89^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .

#### ***5.6.3.4 Διαγράμματα ακτινοβολίας μακρινού πεδίου κεραίας 4***



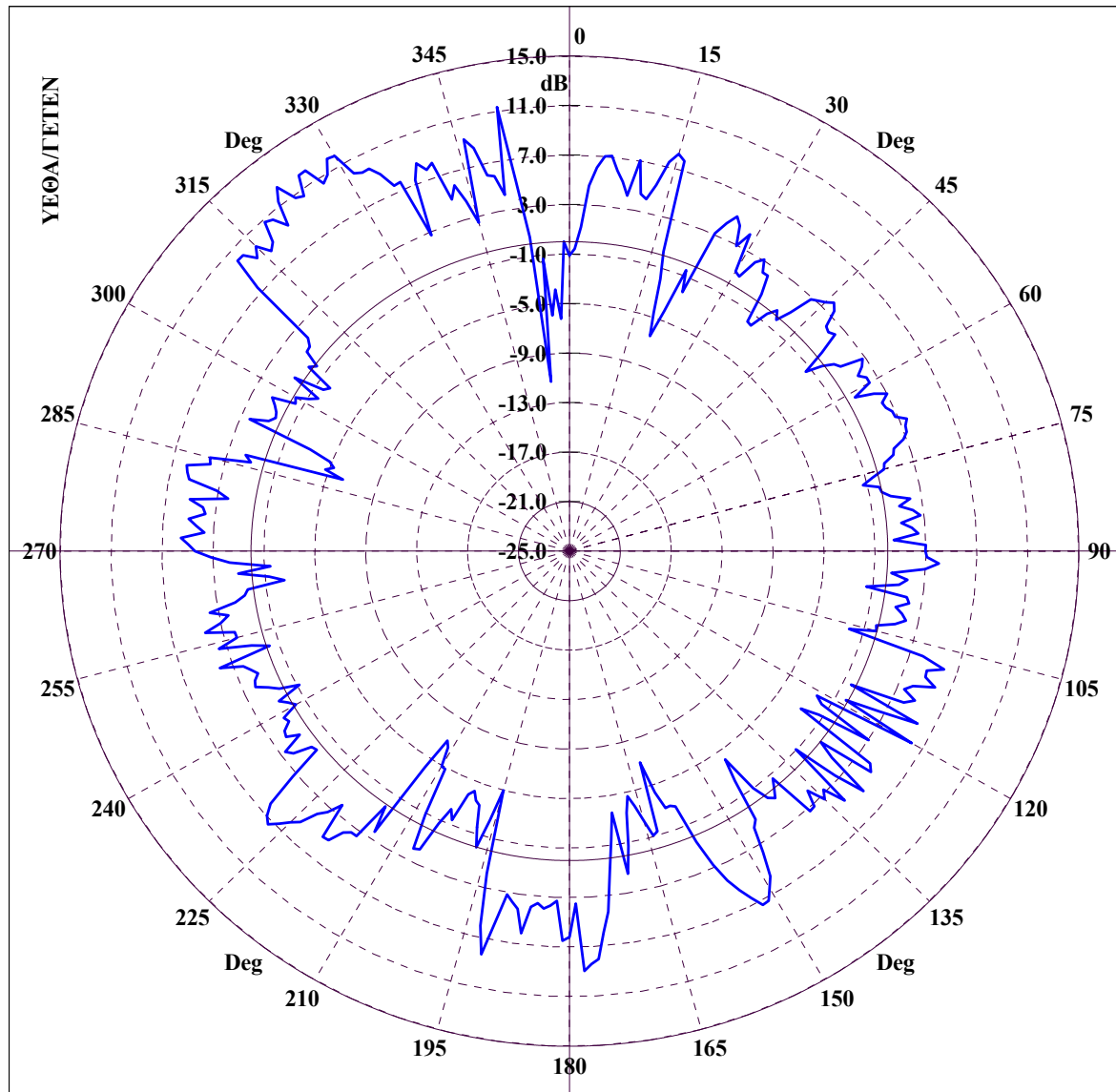
File Name :CRUISER-POL-FARFOR4TELIKOGIAERGASIA. CONICAL CUT :  $\Theta = 20.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY= 0.4000 GHz  
 Διάγραμμα 5.244 : CRUISER, Κεραία 4 σε συχνότητα 400 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 20^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .



File Name :CRUISER-POL-FARFOR4TELIKOGIAERGASIA. CONICAL CUT :  $\Theta = 30.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY= 0.4000 GHz  
 Διάγραμμα 5.245 : CRUISER, Κεραία 4 σε συχνότητα 400 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 30^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .

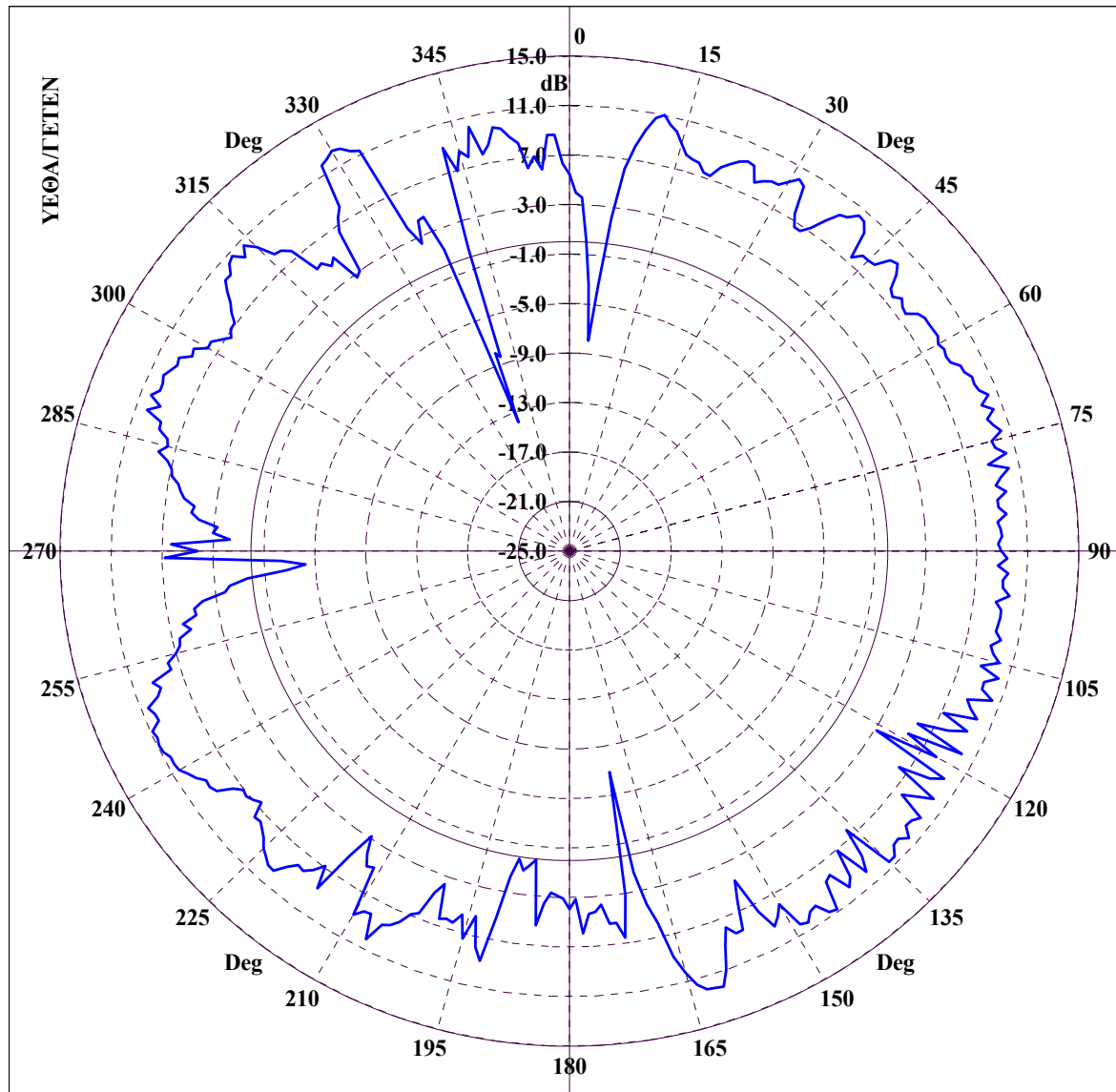


FAR ZONE ELECTRIC FIELD : TOTAL RADIATION INTENSITY IN DB



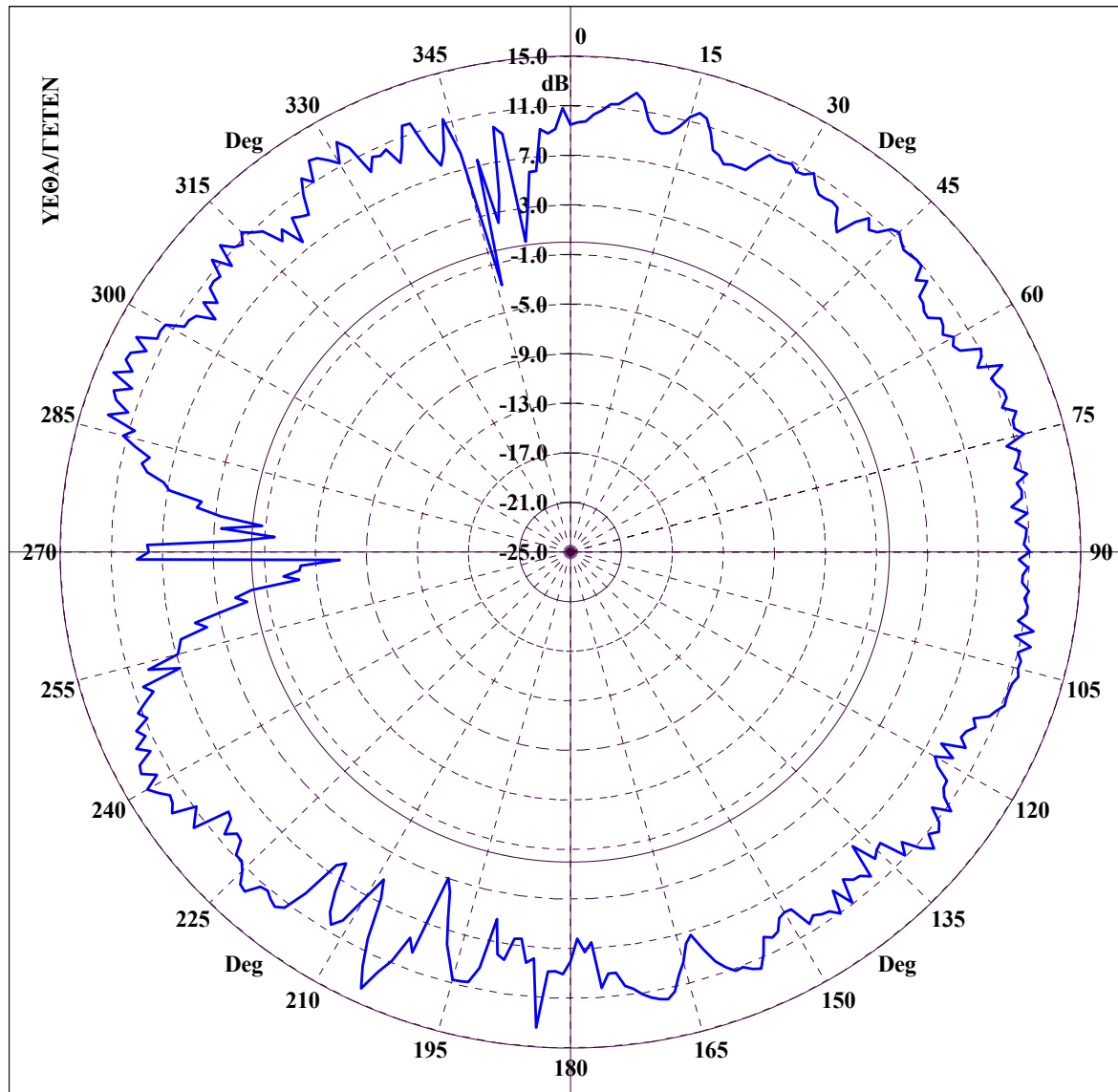
File Name :CRUISER-POL-FARFOR4TELIKOGIAERGASIA. CONICAL CUT :  $\Theta = 40.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY= 0.4000 GHz  
 Διάγραμμα 5.246 : CRUISER, Κεραία 4 σε συχνότητα 400 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 40^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .

FAR ZONE ELECTRIC FIELD : TOTAL RADIATION INTENSITY IN DB

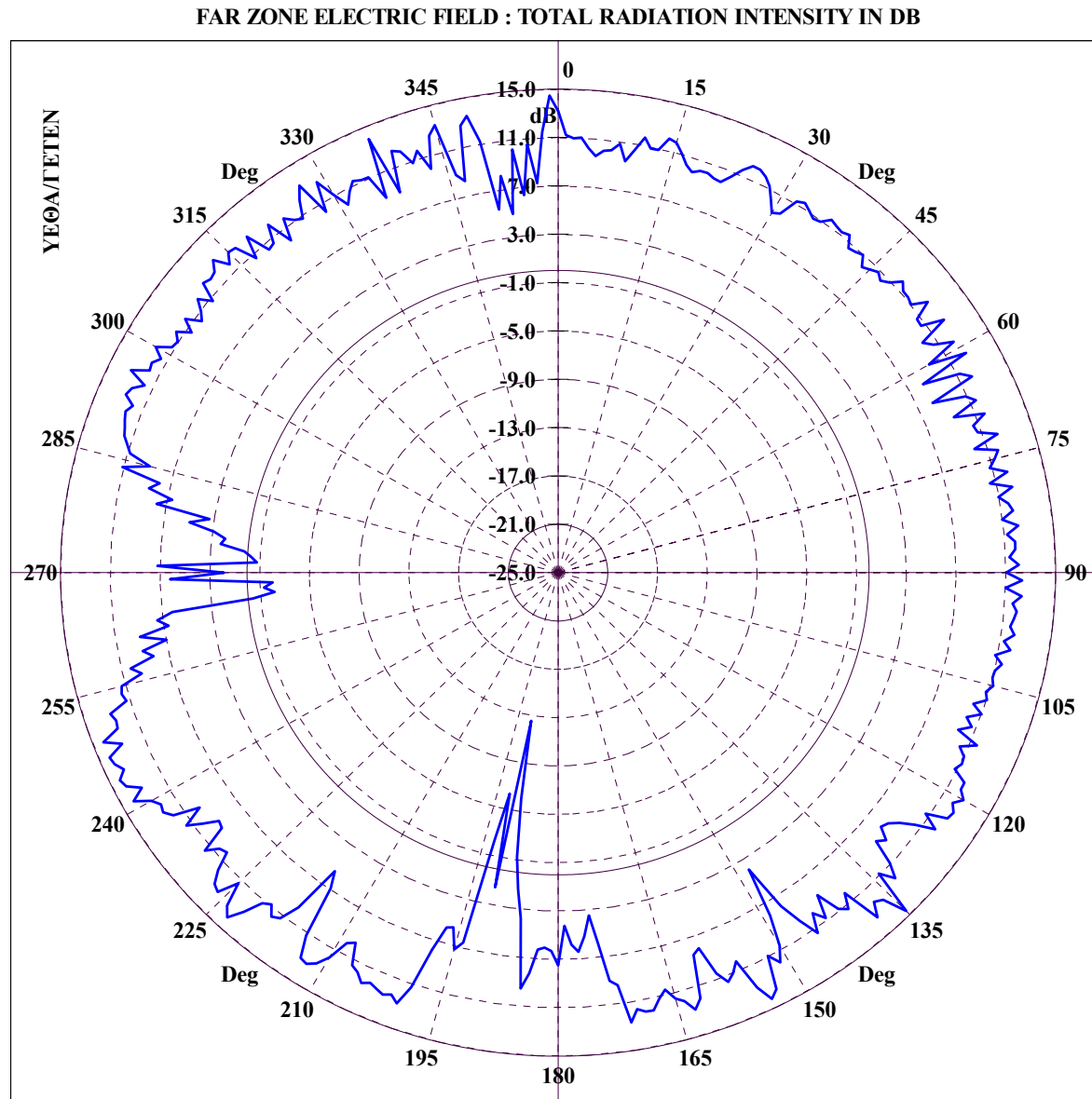


File Name :CRUISER-POL-FARFOR4TELIKOGIAERGASIA. CONICAL CUT :  $\Theta = 50.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 0.4000 GHz  
Διάγραμμα 5.247 : CRUISER, Κεραία 4 σε συχνότητα 400 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 50^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .

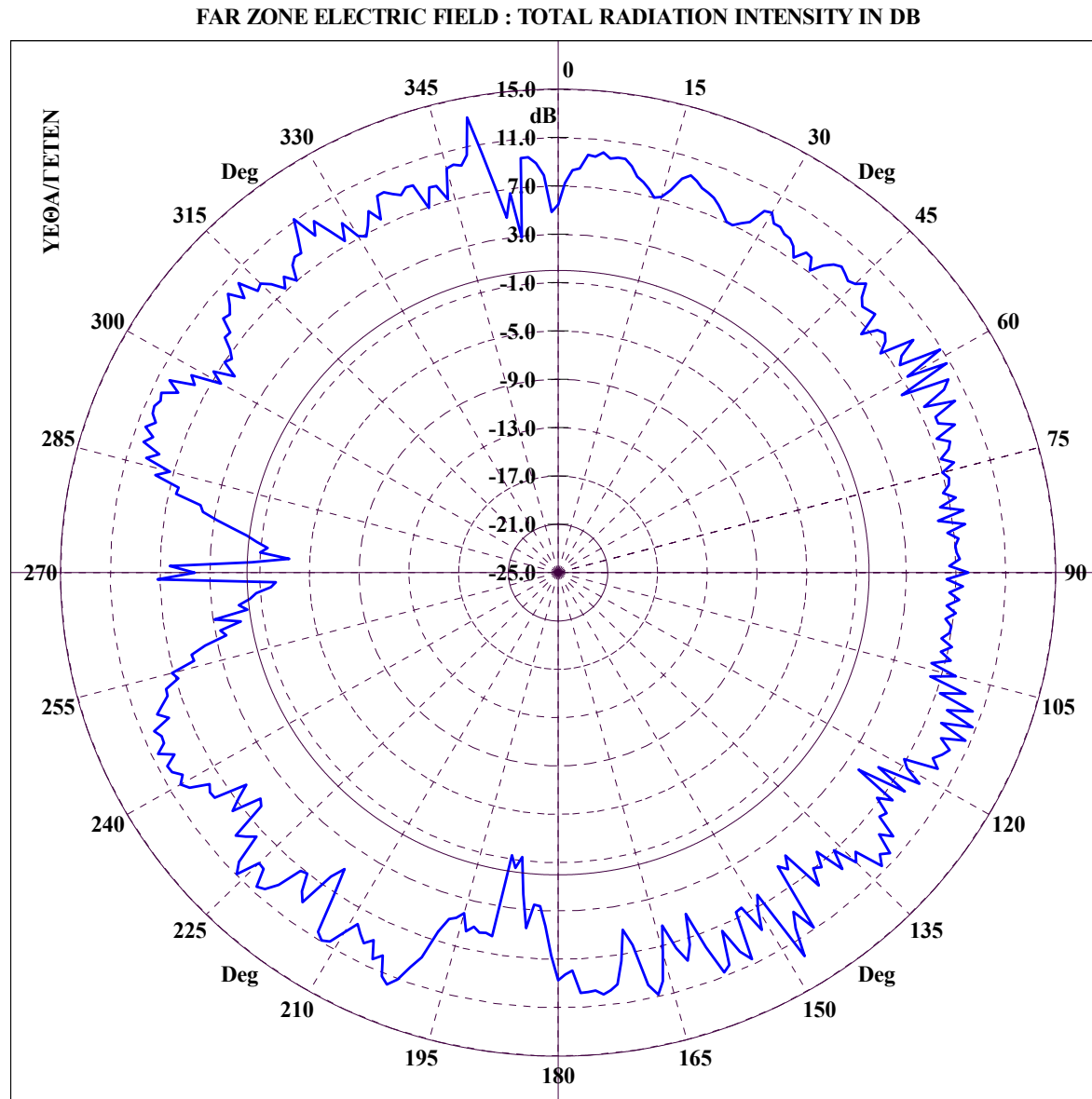
FAR ZONE ELECTRIC FIELD : TOTAL RADIATION INTENSITY IN DB



File Name :CRUISER-POL-FARFOR4TELIKOGIAERGASIA. CONICAL CUT :  $\Theta = 60.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY= 0.4000 GHz  
Διάγραμμα 5.248 : CRUISER, Κεραία 4 σε συχνότητα 400 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 60^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .

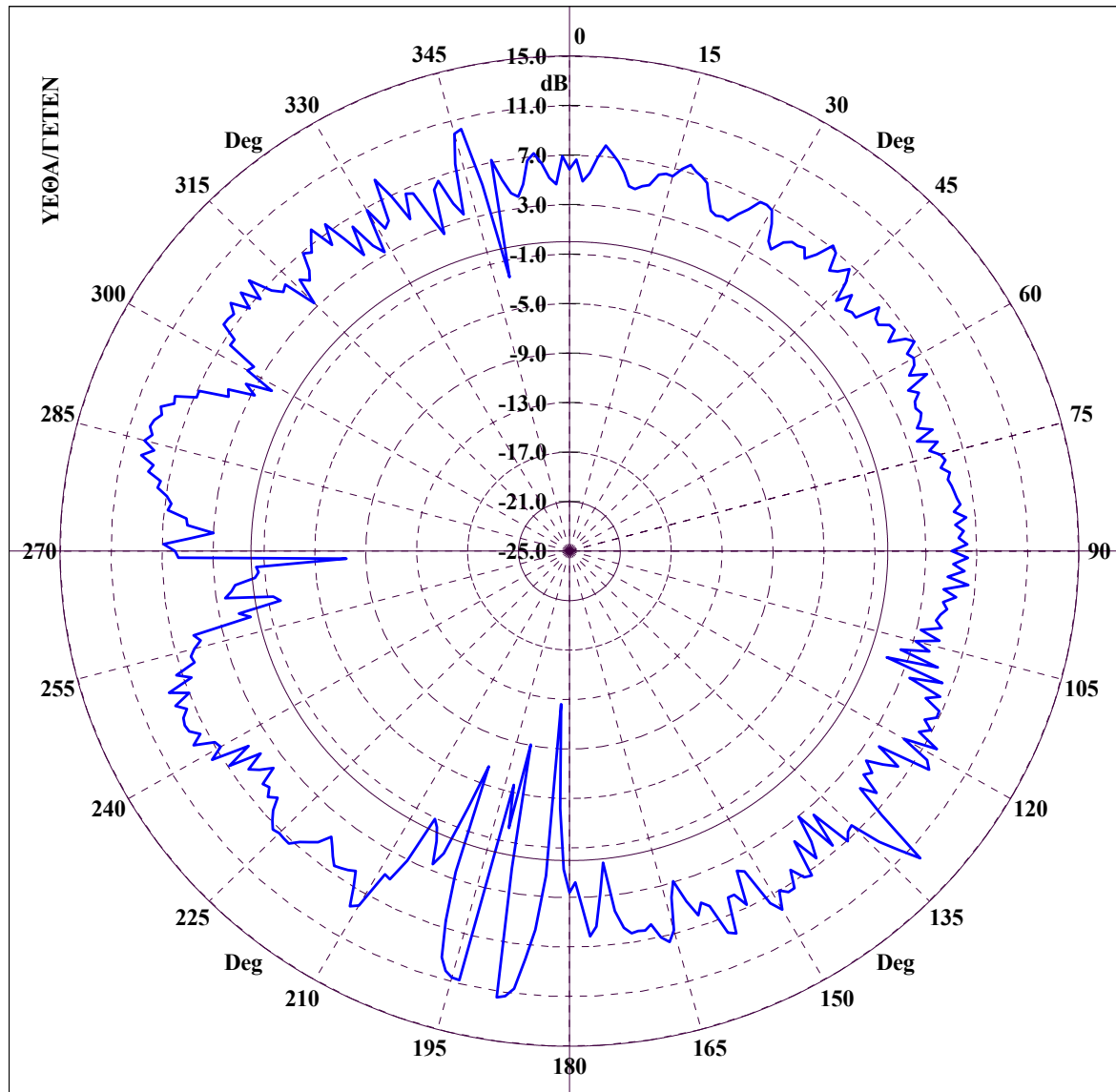


File Name :CRUISER-POL-FARFOR4TELIKOGIAERGASIA. CONICAL CUT :  $\Theta = 70.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY= 0.4000 GHz  
 Διάγραμμα 5.249 : CRUISER, Κεραία 4 σε συχνότητα 400 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 70^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .



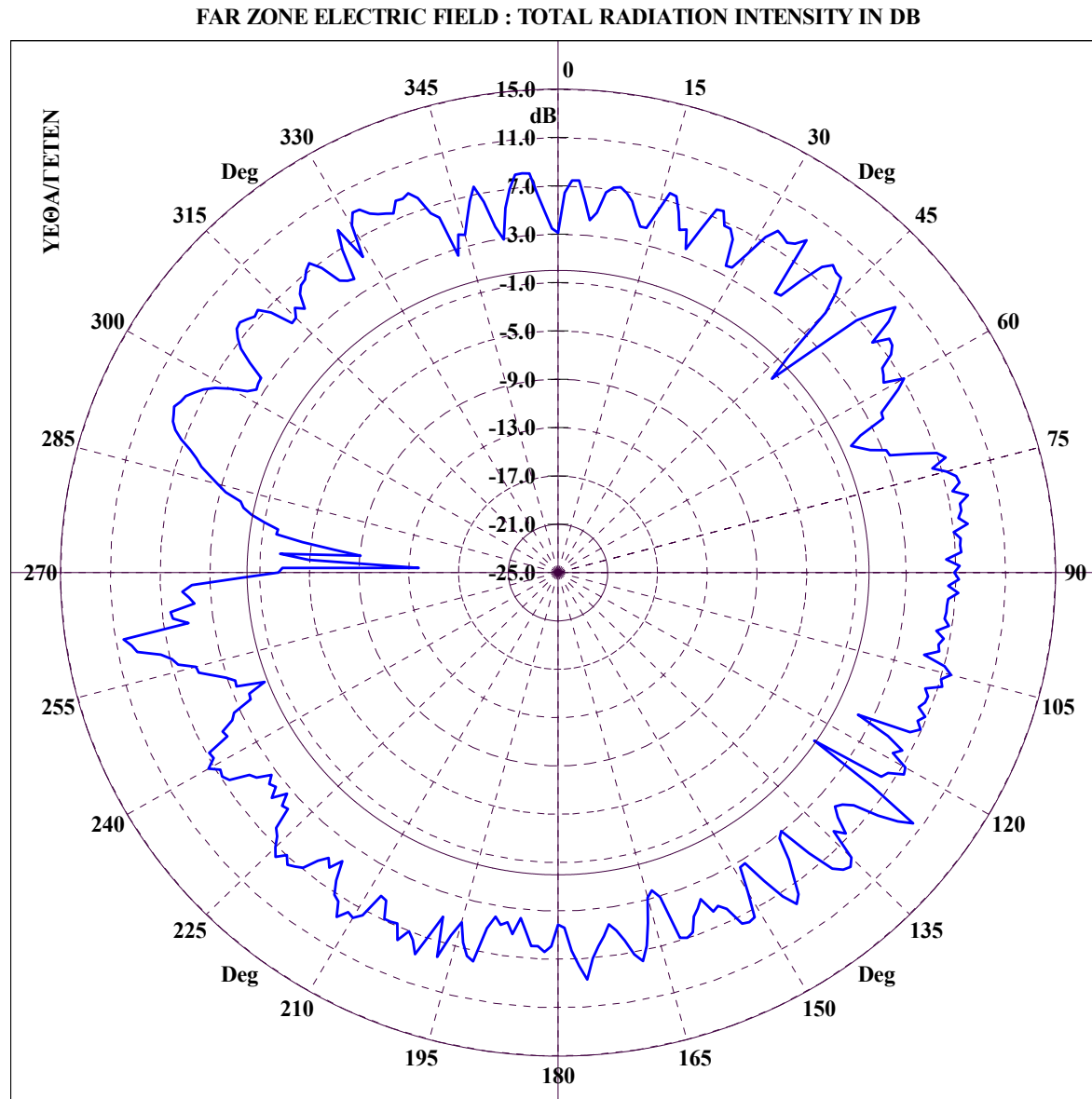
File Name :CRUISER-POL-FARFOR4TELIKOGIAERGASIA. CONICAL CUT :  $\Theta = 80.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY= 0.4000 GHz  
 Διάγραμμα 5.250 : CRUISER, Κεραία 4 σε συχνότητα 400 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 80^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .

FAR ZONE ELECTRIC FIELD : TOTAL RADIATION INTENSITY IN DB



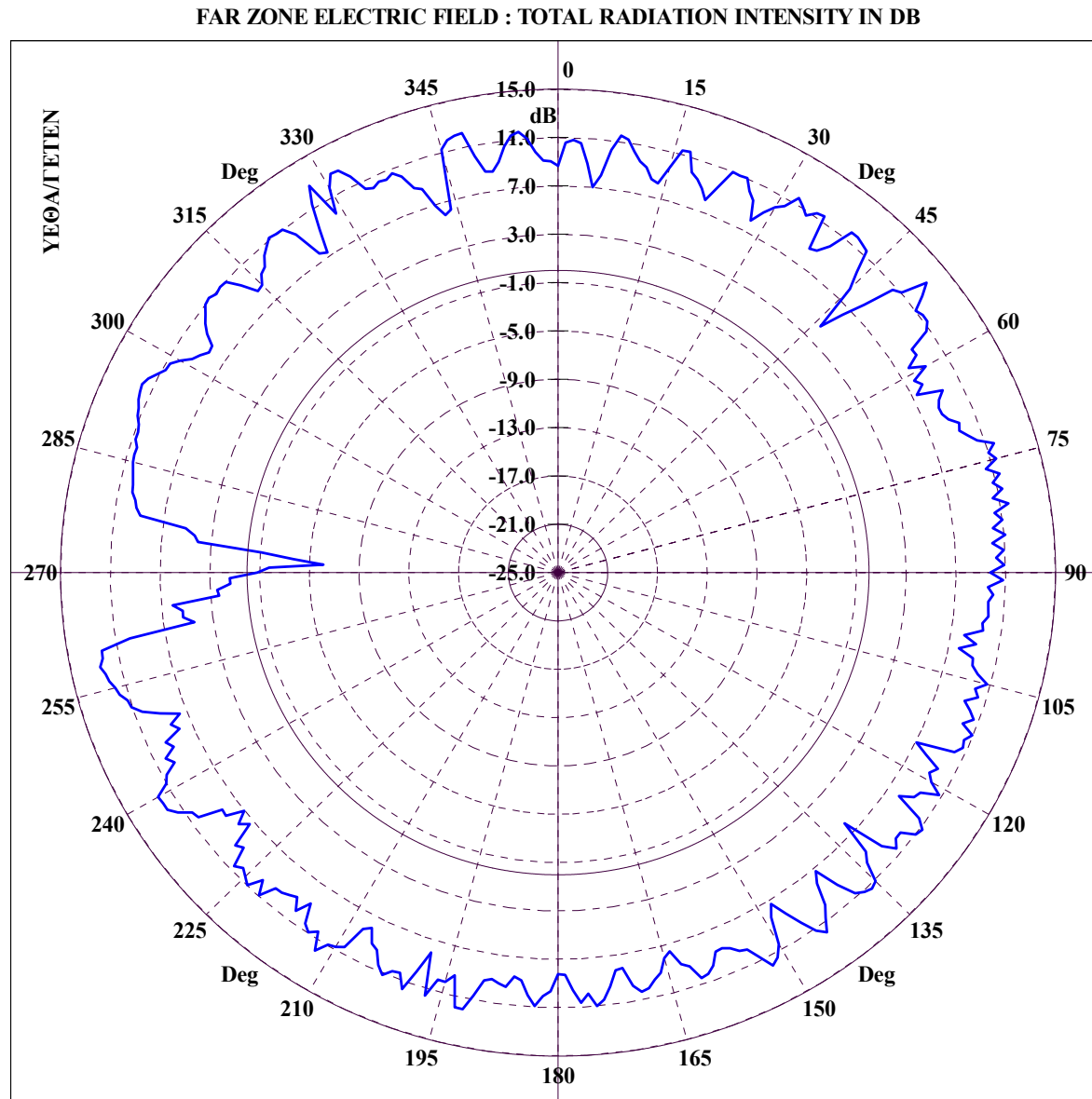
File Name :CRUISER-POL-FARFOR4TELIKOGIAERGASIA. CONICAL CUT :  $\Theta = 89.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY= 0.4000 GHz  
Διάγραμμα 5.251 : CRUISER, Κεραία 4 σε συχνότητα 400 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 89^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .

### ***5.6.3.5 Διαγράμματα ακτινοβολίας μακρινού πεδίου κεραίας 1'***

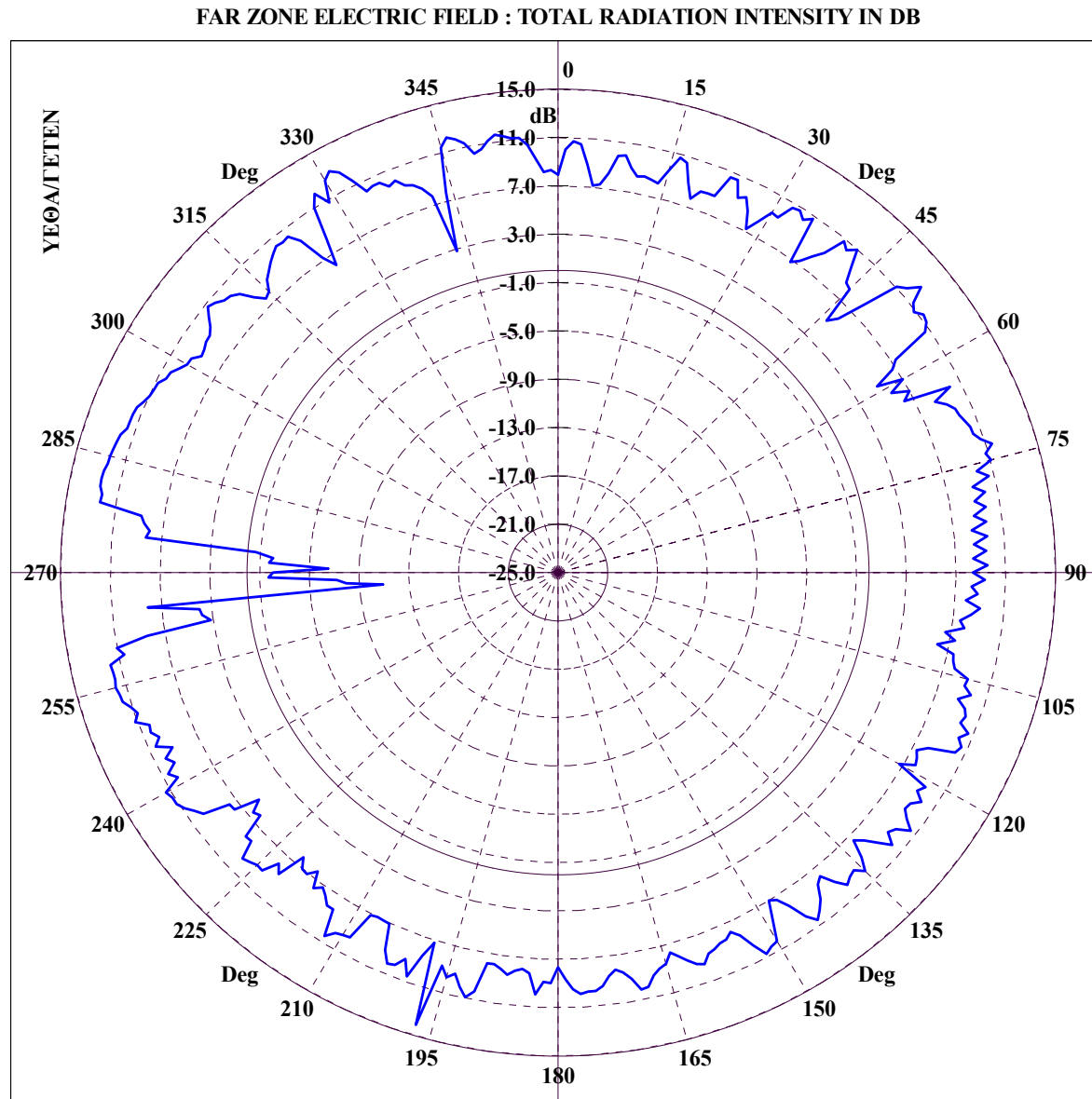


File Name :CRUISER-POL-FARFOR1TONOSTELIKOGIAERGASIA. CONICAL CUT :  $\Theta = 87.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 0.3500 GHz  
 Διάγραμμα 5.252 : CRUISER, Κεραία 1' σε συχνότητα 350 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 87^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .



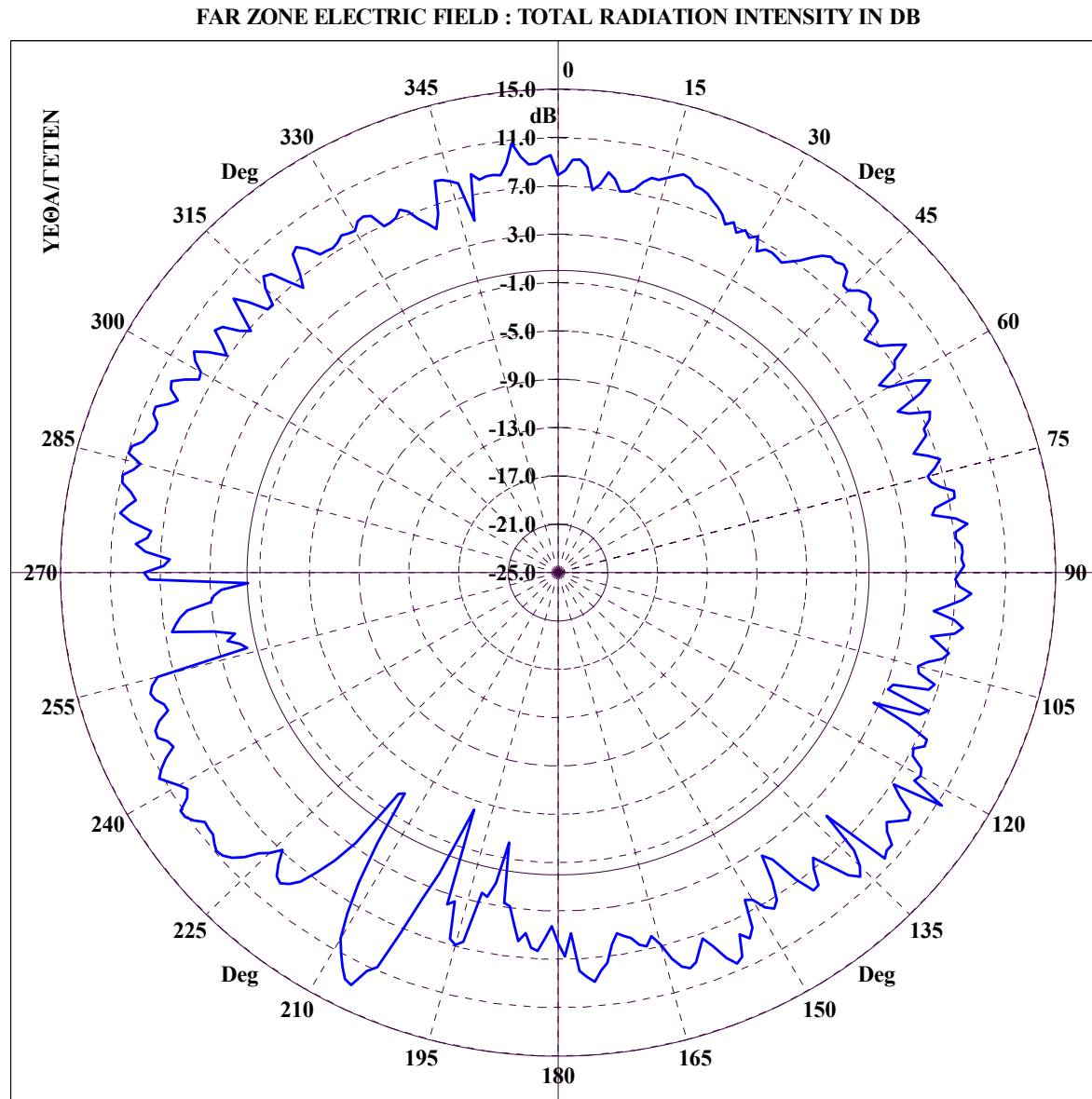


File Name :CRUISER-POL-FARFOR1TONOSTELIKOGIAERGASIA. CONICAL CUT :  $\Theta = 88.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 0.3500 GHz  
 Διάγραμμα 5.253 : CRUISER, Κεραία 1' σε συχνότητα 350 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 88^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .

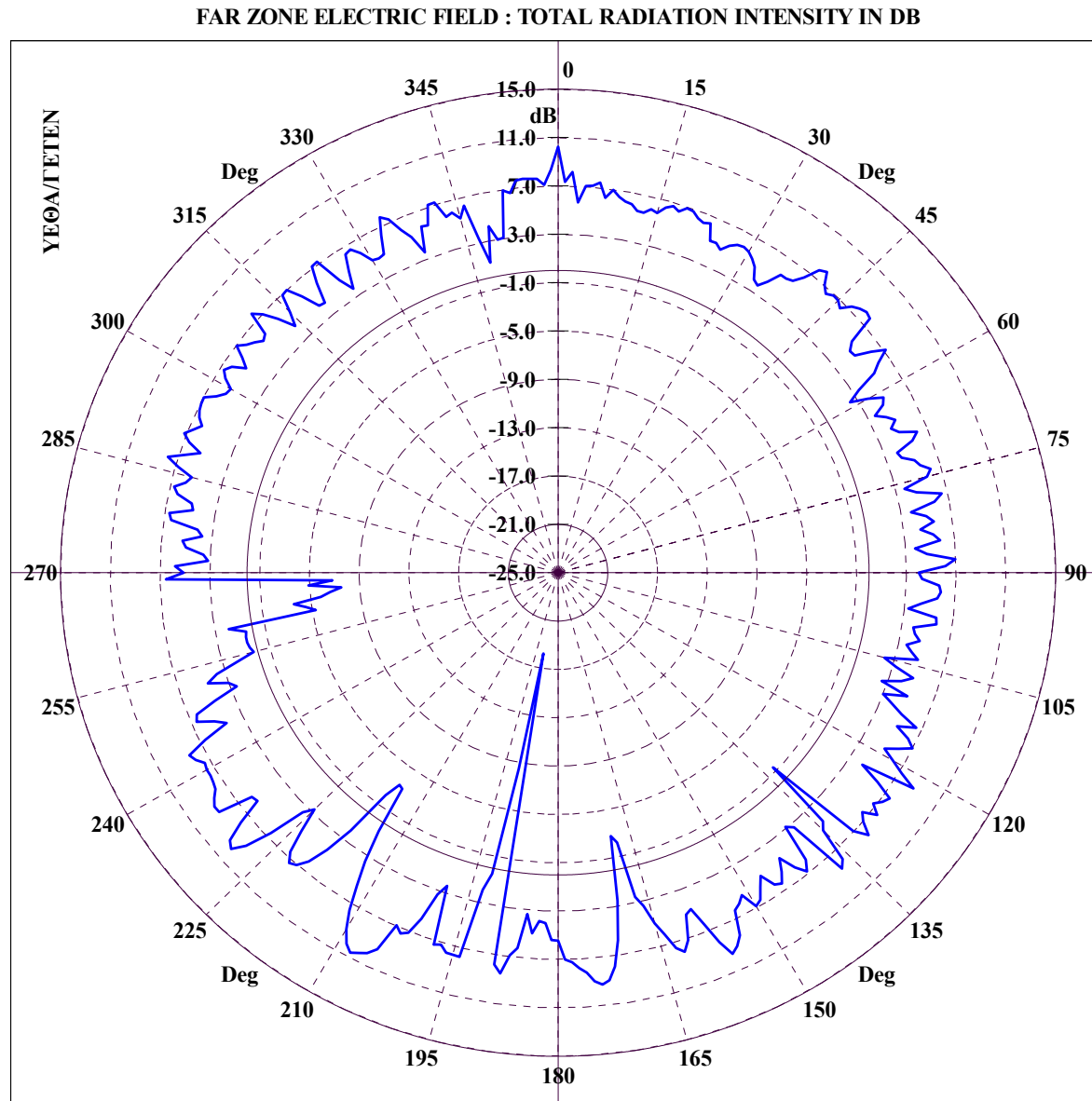


File Name :CRUISER-POL-FARFOR1TONOSTELIKOGIAERGASIA. CONICAL CUT :  $\Theta = 89.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 0.3500 GHz  
 Διάγραμμα 5.254 : CRUISER, Κεραία 1' σε συχνότητα 350 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 89^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .

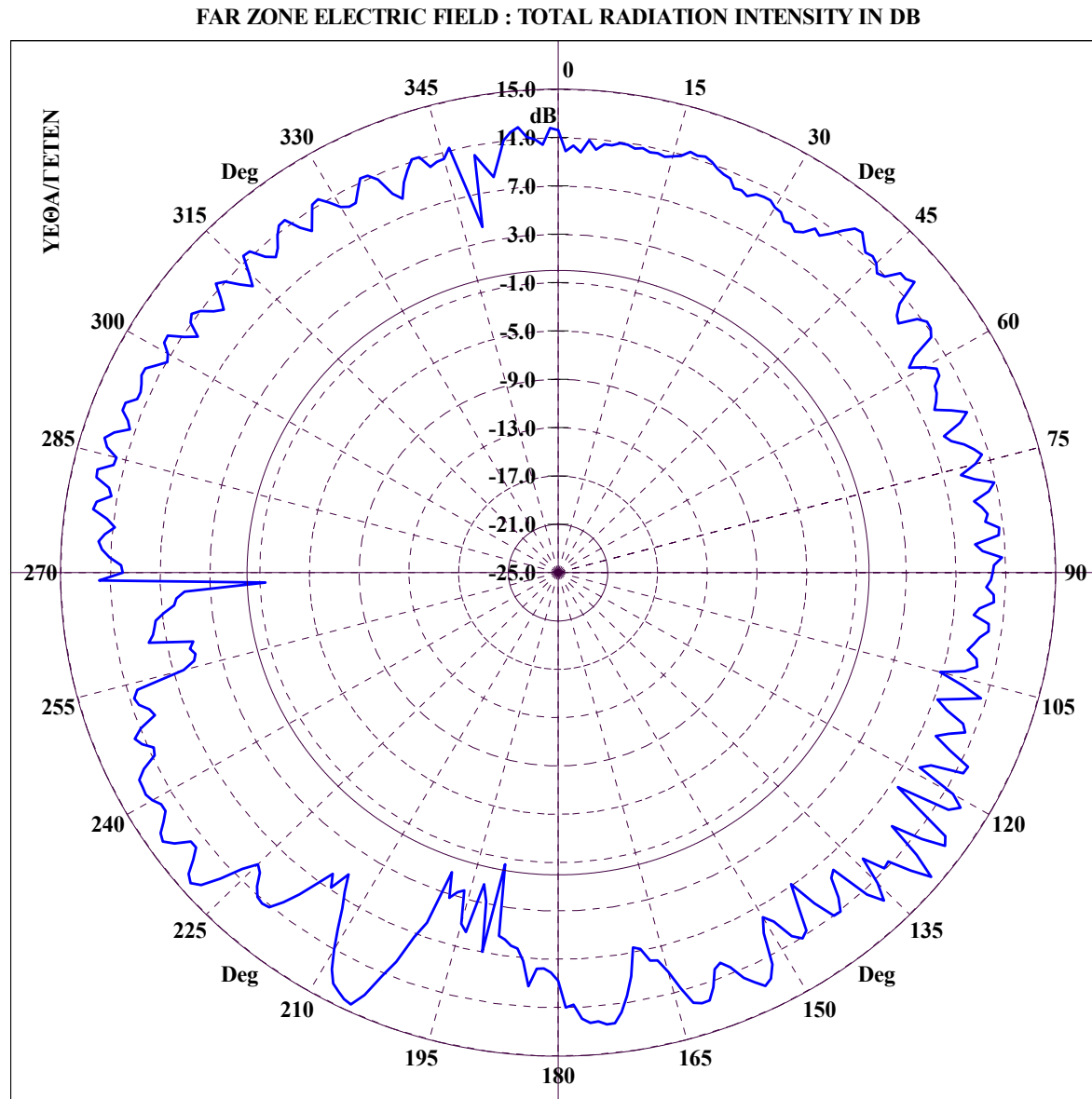
### ***5.6.3.6 Διαγράμματα ακτινοβολίας μακρινού πεδίου κεραίας 2'***



File Name :CRUISER-POL-FARFOR2TONOSTELIKOGIAERGASIA. CONICAL CUT :  $\Theta = 87.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 0.1600 GHz  
 Διάγραμμα 5.255 : CRUISER, Κεραία 2' σε συχνότητα 160 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 87^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .

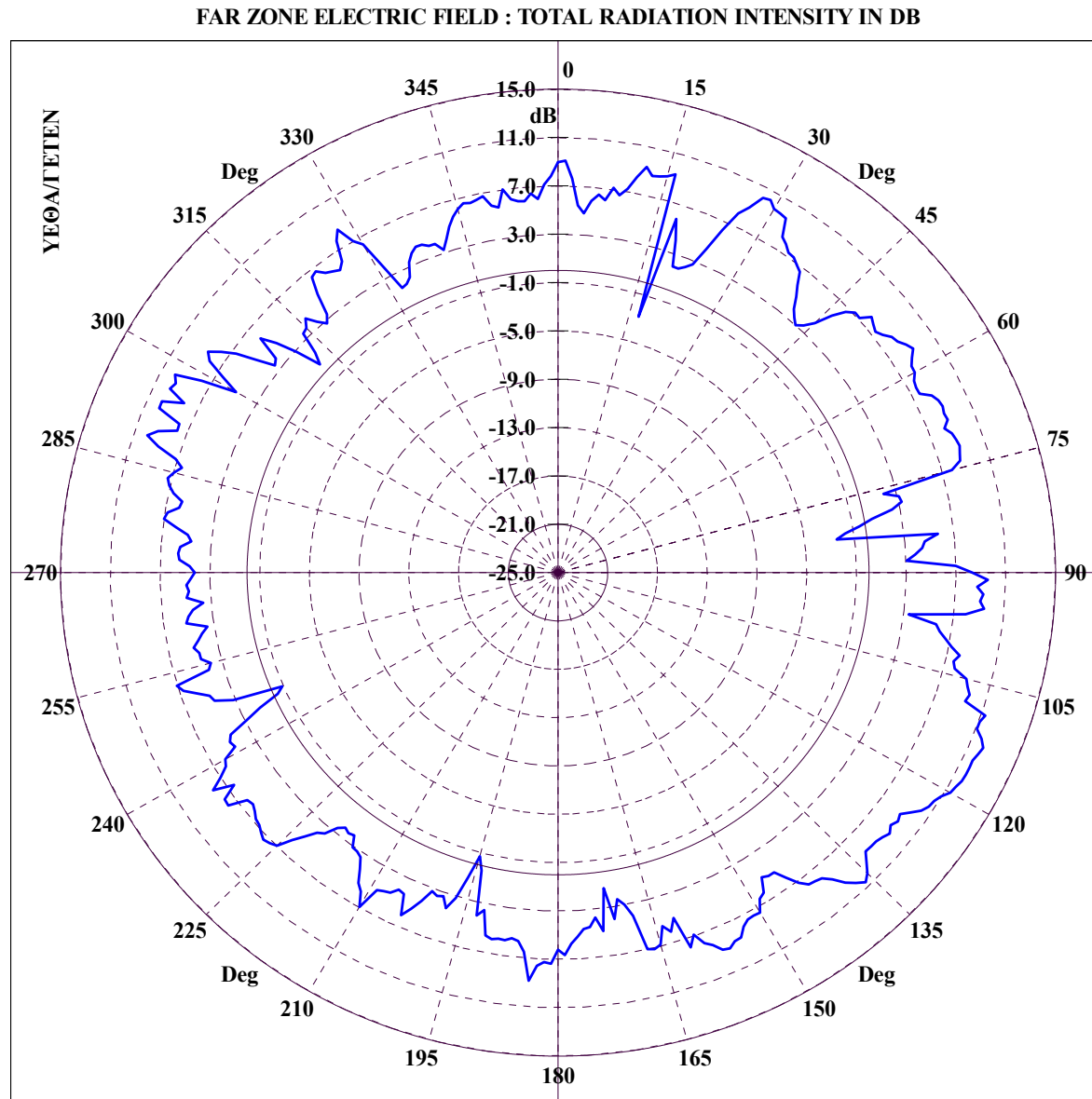


File Name :CRUISER-POL-FARFOR2TONOSTELIKOGIAERGASIA. CONICAL CUT :  $\Theta = 88.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 0.1600 GHz  
 Διάγραμμα 5.256 : CRUISER, Κεραία 2' σε συχνότητα 160 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 88^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .



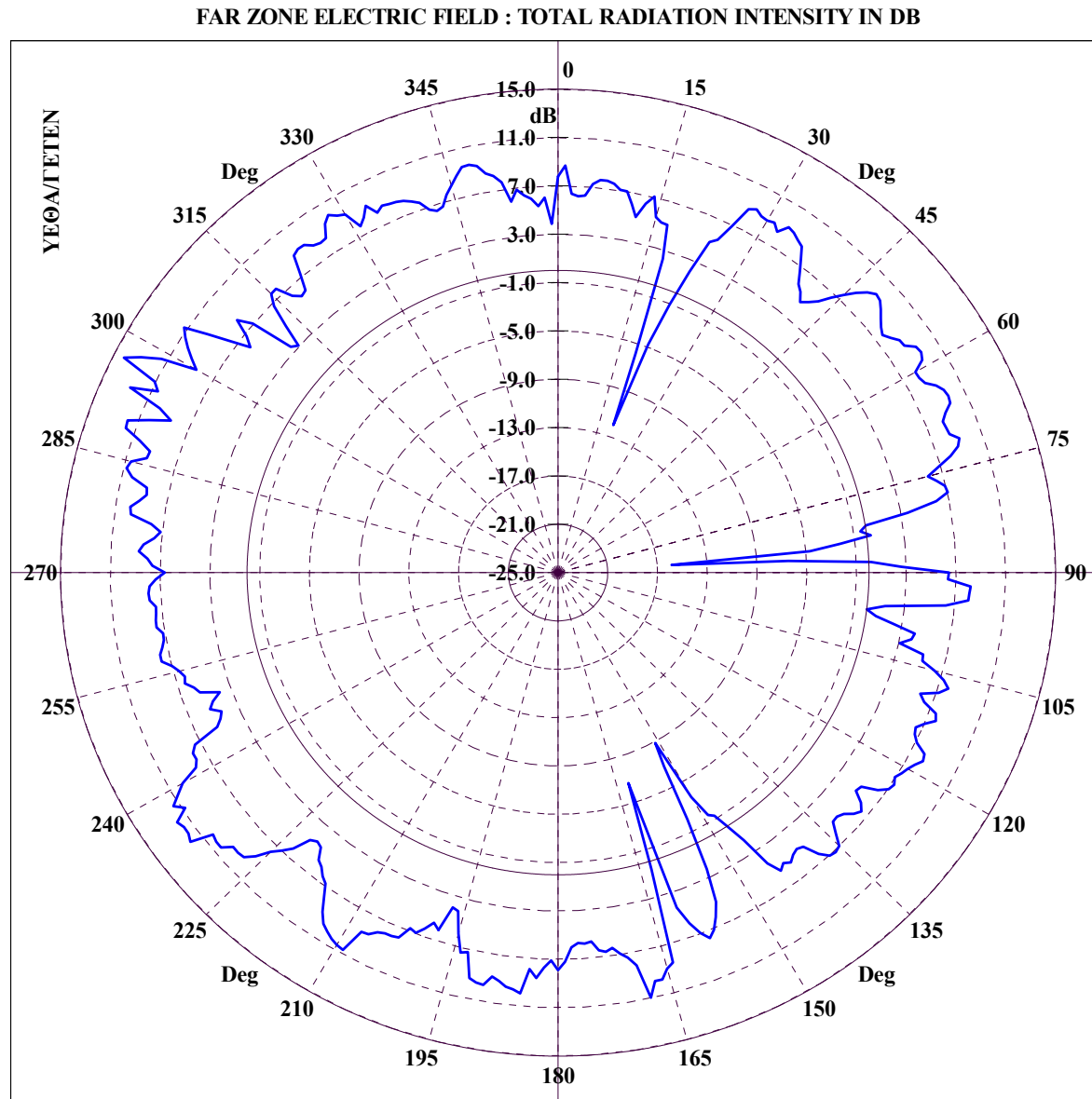
File Name :CRUISER-POL-FARFOR2TONOSTELIKOGIAERGASIA. CONICAL CUT :  $\Theta = 89.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 0.1600 GHz  
 Διάγραμμα 5.257 : CRUISER, Κεραία 2' σε συχνότητα 160 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 89^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .

### ***5.6.3.7 Διαγράμματα ακτινοβολίας μακρινού πεδίου κεραίας 3'***

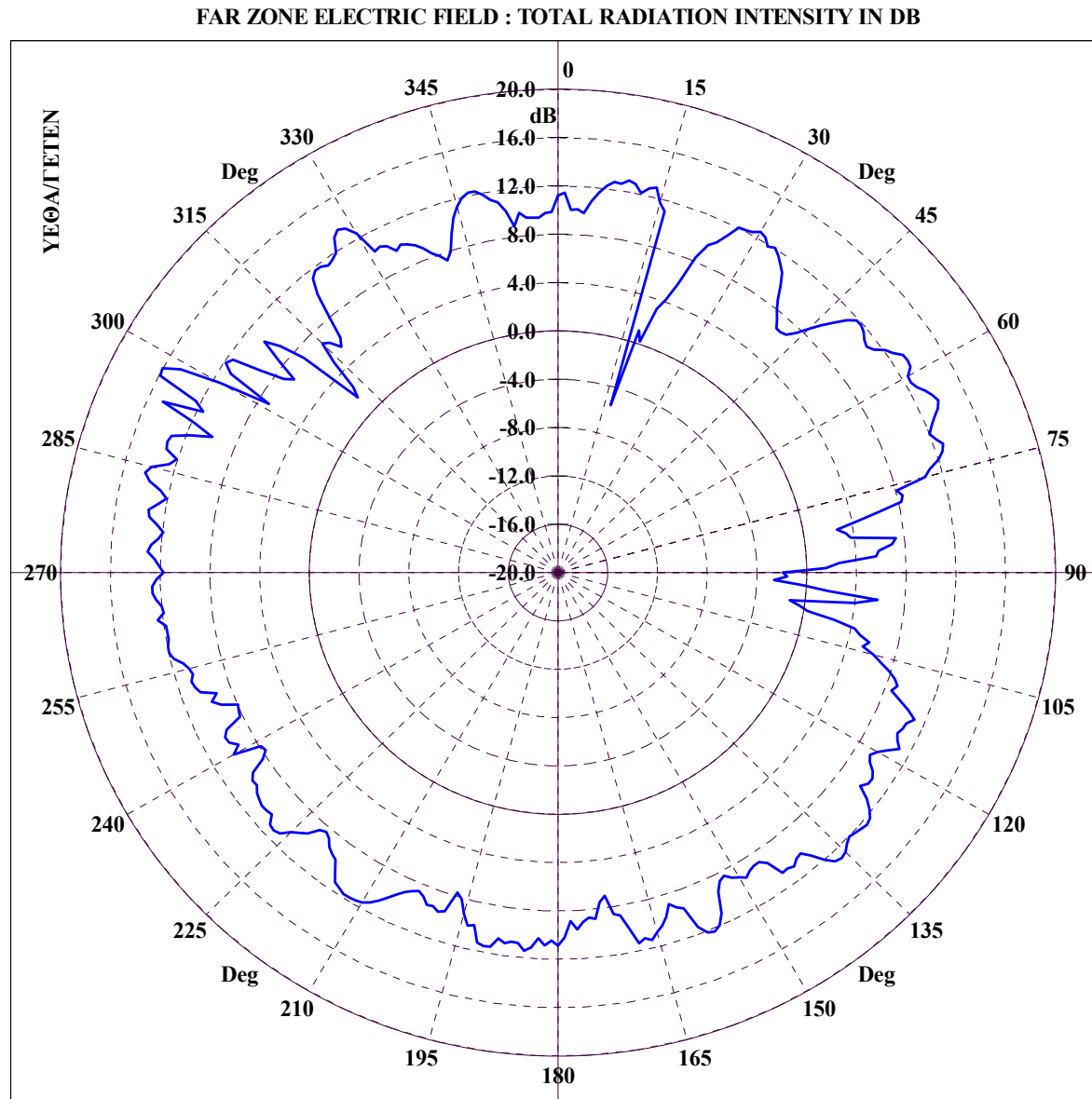


File Name :CRUISER-POL-FARFOR3TONOSTELIKOGIAERGASIA. CONICAL CUT :  $\Theta = 87.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 0.1300 GHz  
 Διάγραμμα 5.258 : CRUISER, Κεραία 3' σε συχνότητα 130 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 87^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .



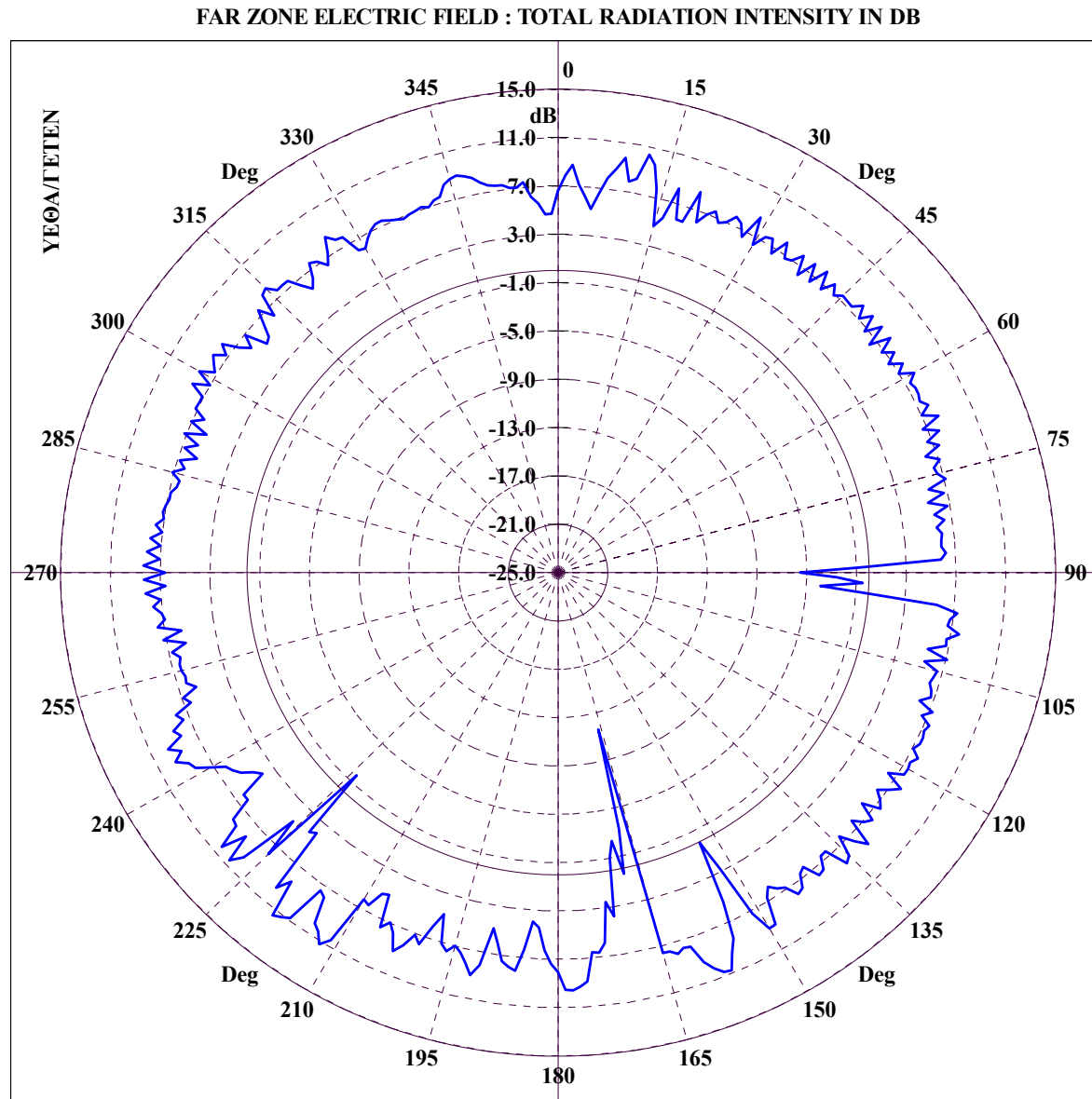


File Name :CRUISER-POL-FARFOR3TONOSTELIKOGIAERGASIA. CONICAL CUT :  $\Theta = 88.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 0.1300 GHz  
 Διάγραμμα 5.259 : CRUISER, Κεραία 3' σε συχνότητα 130 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 88^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .

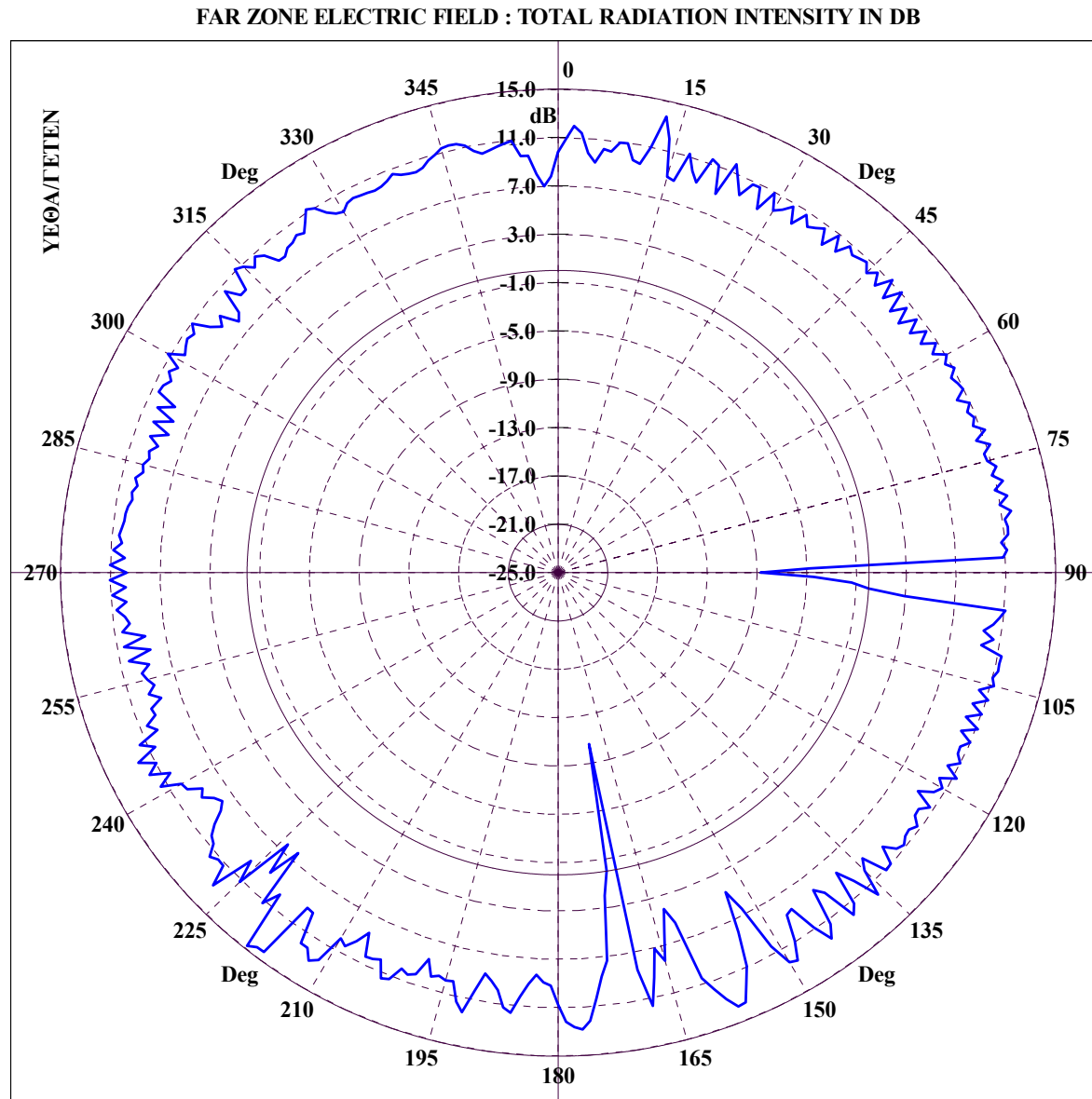


File Name :CRUISER-POL-FARFOR3TONOSTELIKOGIAERGASIA. CONICAL CUT :  $\Theta = 89.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 0.1300 GHz  
 Διάγραμμα 5.260 : CRUISER, Κεραία 3' σε συχνότητα 130 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 89^\circ$  και  $\varphi = 0 - 360^\circ$ .

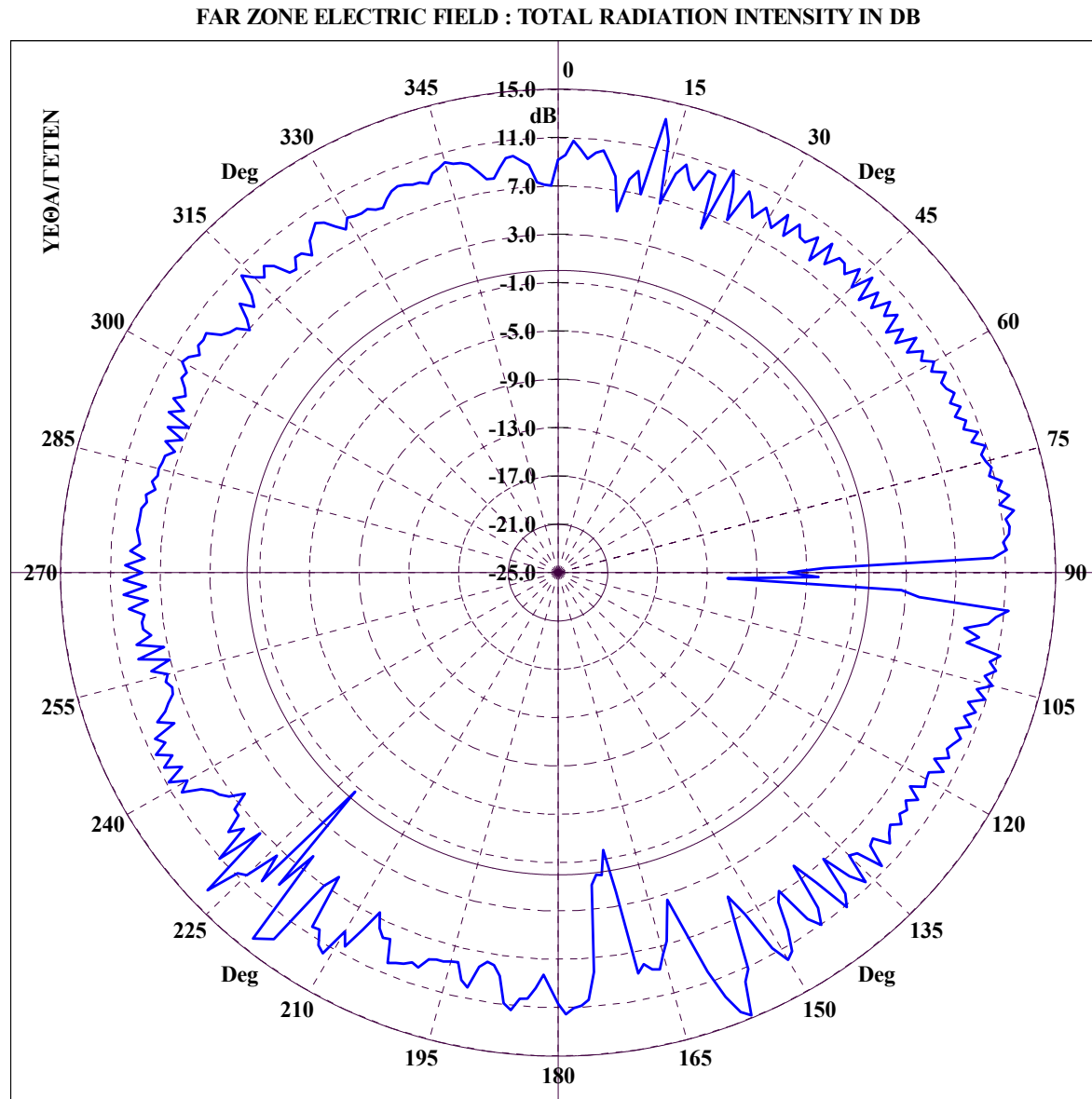
#### ***5.6.3.8 Διαγράμματα ακτινοβολίας μακρινού πεδίου κεραίας 4'***



File Name :CRUISER-POL-FARFOR4TONOSTELIKOGIAERGASIA. CONICAL CUT :  $\Theta = 87.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 0.4000 GHz  
 Διάγραμμα 5.261 : CRUISER, Κεραία 4' σε συχνότητα 400 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 87^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .



File Name :CRUISER-POL-FARFOR4TONOSTELIKOGIAERGASIA. CONICAL CUT :  $\Theta = 88.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 0.4000 GHz  
 Διάγραμμα 5.262 : CRUISER, Κεραία 4' σε συχνότητα 400 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 88^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .



File Name :CRUISER-POL-FARFOR4TONOSTELIKOGIAERGASIA. CONICAL CUT :  $\Theta = 89.00$ ,  $\Phi=0-360$ , FREQUENCY = 0.4000 GHz  
 Διάγραμμα 5.263 : CRUISER, Κεραία 4' σε συχνότητα 400 MHz για κωνική τομή με  $\theta = 89^\circ$  και  $\phi = 0 - 360^\circ$ .

### 5.6.3.9 Μελέτη συζεύξεως VHF/UHF κεραιών (couplings study)

Ένα οποιοδήποτε πολεμικό πλοίο φέρει πάνω του υπερπληθώρα κεραιών εγκατεστημένων σε ποικίλες και κοντινές θέσεις, λειτουργούσες σε πολλές παραπλήσιες συχνότητες. Για λόγους ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας και παρεμβολών (EMC/EMI) κρίνεται αναγκαία η μελέτη της αλληλεπίδρασης των κεραιών μέσω του υπολογισμού των συζεύξεων (couplings) αυτών.

Κατά τη διαδικασία των μετρήσεων, η μελέτη της σύζευξης (coupling) μεταξύ των κεραιών του πλοίου πραγματοποιείται ανά ζεύγη κεραιών, θεωρώντας τη μια ως πομπό και την άλλη ως δέκτη. Η τιμή του συντελεστή σύζευξης του ζεύγους κεραιών υπολογίζεται εν προκειμένω από την εξής σχέση :

$$Coupling_{T \rightarrow R} = 20 \log \frac{P_{OUT_{T \rightarrow R}}}{P_{IN_T}} \quad (5.1)$$

όπου :

$P_{OUT_{T \rightarrow R}}$  η ισχύς που φθάνει από την κεραία του πομπού στο σημείο τροφοδοσίας της κεραιάς του δέκτη.

$P_{IN_T}$  η ισχύς τροφοδοσίας της κεραιάς του πομπού.

**Η τιμή του συντελεστή μεταξύ δύο οποιονδήποτε κεραιών με βάση τις προδιαγραφές EMI/EMC κρίνεται ανεκτή όταν δεν είναι μεγαλύτερη από τα -40 dB.**

Το NEC-BSC 2.2.18 παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού της σύζευξης μεταξύ δυο κεραιών, λειτουργώντας στη λογική των μετρήσεων και κάνοντας χρήση του ακόλουθου τύπου για την εύρεση της τιμής του coupling, θεωρώντας συζυγή προσαρμογή και στις δυο κεραιές :

$$Coupling_{T \rightarrow R} = 10 \log \frac{|1/2 I_m V_{oc}|^2}{4 P_{rt} P_{rr}} = 20 \log \frac{P_{OUT_{T \rightarrow R}}}{P_{IN_T}} \quad (5.2)$$

όπου :

$I_m$  ο συντελεστής βαρύτητας του NEC-BSC 2.2.18 για τη κεραία του δέκτη.

$V_{oc}$  η ισοδύναμη τάση ανοιχτοκύκλωσης που δημιουργείται στην κεραία του δέκτη από την κεραία του πομπού.

$P_{rt}$  η ισχύς ακτινοβολίας της κεραιάς του πομπού.

$P_{rr}$  η ισχύς ακτινοβολίας που θα είχε η κεραία του δεκτή ως πομπός.

Χρησιμοποιώντας τη δυνατότητα που έχει το NEC-BSC 2.2.18, υπολογίσθηκαν και για τα δυο κατάρτια που φέρει το, TINCODEROGA CLASS CRUISER τα couplings όλων των δυνατών συνδυασμών ανά δυο των ευρισκόμενων στο ίδιο κατάρτι κεραιών.

Ο λόγος που δεν έγιναν υπολογισμοί ανάμεσα σε κεραιές ευρισκόμενες σε διαφορετικά κατάρτια είναι ότι τα δυο κατάρτια απέχουν 23 m, απόσταση που υπερβαίνει τη μέγιστη απόσταση των 15 m ανάμεσα σε κεραιές του ίδιου καταρτιού και για τις οποίες το coupling ήταν μικρότερο από -40 dB.

Παρακάτω παρατίθενται σε μορφή πίνακα όλες οι υπολογισθείσες τιμές των couplings για τα ζητούμενα ζεύγη κεραιών VHF/UHF που φέρει το TINCODEROGA CLASS CRUISER και στα δυο κατάρτια του :

<i>Σύζευξη μεταξύ κεραιών σε (dB)</i>	<b>Κεραία 1 (350 MHz)</b>	<b>Κεραία 2 (160 MHz)</b>	<b>Κεραία 3 (130 MHz)</b>	<b>Κεραία 4 (400 MHz)</b>	<b>Κεραία 1' (350 MHz)</b>	<b>Κεραία 2' (160 MHz)</b>	<b>Κεραία 3' (130 MHz)</b>	<b>Κεραία 4' (400 MHz)</b>
<b>Κεραία 1 (350 MHz)</b>	---				-93.91		-74.82	
<b>Κεραία 2 (160 MHz)</b>		---			-84.79		-75.39	
<b>Κεραία 3 (130 MHz)</b>			---			-58.28		-69.46
<b>Κεραία 4 (400 MHz)</b>				---		-66.70		-68.63
<b>Κεραία 1' (350 MHz)</b>	-80.93	-75.93			---			
<b>Κεραία 2' (160 MHz)</b>			-68.52	-72.54		---		
<b>Κεραία 3' (130 MHz)</b>	-79.91	-75					---	
<b>Κεραία 4' (400 MHz)</b>			-59.31	-68.04				---

**Πίνακας 5.7 : Υπολογισθείσες τιμές των couplings για τα ζητούμενα ζεύγη κεραιών των οκτώ VHF/UHF κεραιών που φέρει το TINCODEROGA CLASS CRUISER.**

Παρατηρείται ότι όλες οι τιμές είναι μικρότερες από -40 dB, πράγμα που ικανοποιεί τις προδιαγραφές EMI/EMC για αυτές τις κεραιές τοποθετημένες στις συγκεκριμένες θέσεις. Αυτό ήταν αναμενόμενο αφού ότι οι αποστάσεις για όλες τις κεραιές και για τις συχνότητες λειτουργίας τους είναι αρκετά μήκη κύματος μακριά.



### 5.6.3.10 Συγκριτικά στοιχεία προσομοίωσης

Στη συνέχεια, παρατίθενται σε μορφή πίνακα τα συγκριτικά στοιχεία προσομοίωσης των οκτώ κεραιών (ανά δυο ίδιας συχνότητας) που φέρει το TINCODEROGA CLASS CRUISER στα δυο κατάρτια του στις τέσσερις συχνότητες μελέτης των 400, 350, 160, 130 MHz για την εύρεση των διαγραμμάτων ακτινοβολίας μακρινού πεδίου (Far Field calculations). Τα στοιχεία αυτά αφορούν τον αριθμό πλακών και κυλίνδρων που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του μοντέλου, τις κωνικές τομές που σαρώθηκαν καθώς και το χρόνο που χρειάστηκε για την εκτέλεση της προσομοίωσης.

Συγκριτικά στοιχεία ανά κεραία	Αριθμός πλακών μοντέλου	Αριθμός κυλίνδρων μοντέλου	Κωνικές τομές σαρώσεως ( $\theta$ , $\varphi$ σε $^\circ$ )	Χρόνος εκτελέσεως προσομοίωσης (sec)
<b>Κεραία 1 (350 MHz)</b>	172	10	$\theta = 20,30,40,50,60,70,80,89$ με $\varphi \in [0, 360]$	7887.8
<b>Κεραία 2 (160 MHz)</b>	172	10	$\theta = 20,30,40,50,60,70,80,89$ με $\varphi \in [0, 360]$	8023.22
<b>Κεραία 3 (130 MHz)</b>	172	10	$\theta = 20,30,40,50,60,70,80,89$ με $\varphi \in [0, 360]$	8275.25
<b>Κεραία 4 (400 MHz)</b>	172	10	$\theta = 20,30,40,50,60,70,80,89$ με $\varphi \in [0, 360]$	7989.03
<b>Κεραία 1' (350 MHz)</b>	172	10	$\theta = 85,86,87,88,89$ με $\varphi \in [0, 360]$	4550.53
<b>Κεραία 2' (160 MHz)</b>	172	10	$\theta = 85,86,87,88,89$ με $\varphi \in [0, 360]$	4855.93
<b>Κεραία 3' (130 MHz)</b>	172	10	$\theta = 85,86,87,88,89$ με $\varphi \in [0, 360]$	4595.04
<b>Κεραία 4' (400 MHz)</b>	172	10	$\theta = 85,86,87,88,89$ με $\varphi \in [0, 360]$	4578.3

**Πίνακας 5.8 : Συγκριτικά στοιχεία προσομοίωσης των οκτώ VHF/UHF κεραιών που φέρει το TINCODEROGA CLASS CRUISER.**

Ξέροντας εκ των προτέρων ότι η κάθε τομή απαιτούσε εκτελούμενη μόνη της, περί τα 900 δευτερόλεπτα, οι συνολικοί χρόνοι εκτέλεσης συνάδουν με την αρχή σχεδίασης του κώδικα του NEC-BSC 2.2.18 που θέλει τις τομές να εκτελούνται σειριακά και αθροιστικά και, κατά συνέπεια, το συνολικό χρόνο να προκύπτει αθροιστικά από τον αριθμό των τομών που εκτελέστηκαν.

Αρχικά, Παρατηρείται ότι οι μεγαλύτεροι χρόνοι εκτέλεσης αντιστοιχούν στις κεραιές 1,2,3,4 που βρίσκονται τοποθετημένες στα δυο κατάρτια με φορά προς τα πάνω. Αυτό ήταν αναμενόμενο, αφού για αυτές τις κεραιές λόγω περιοχής ενδιαφέροντος σαρώθηκαν 9 τον αριθμό κωνικές τομές σε αντίθεση με τις υπόλοιπες κεραιές 1',2',3',4' με φορά προς τα κάτω για τις οποίες, επίσης λόγω περιοχής ενδιαφέροντος, σαρώθηκαν 5 κωνικές τομές.

Κατά δεύτερον, ανάμεσα στις κεραιές 1,2,3,4 που έχουν φορά προς τα πάνω ο μεγαλύτερος χρόνος ανήκει στην 3. Αυτό οφείλεται, αφενός, στο ότι έχει τη μικρότερη συχνότητα, πράγμα που ελαττώνει τις ηλεκτρικές διαστάσεις και, αφετέρου στο ότι

ευρισκόμενη στο χαμηλό κατάρτι, έχει πολυπλοκότερο περιβάλλον γύρω της σε σύγκριση με αυτό που θα είχε ευρισκόμενη στο υψηλό κατάρτι. Οι δυο αυτοί λόγοι συνηγορούν στο ότι η κεραία 3 “βλέπει” περισσότερες λεπτομέρειες και, επομένως, έχει συνολικά πιο βεβαρημένους “ray tracing” υπολογισμούς.

Τέλος, ανάμεσα στις κεραίες 1',2',3',4' που έχουν φορά προς τα κάτω ο μεγαλύτερος χρόνος ανήκει στην 2'. Στην περίπτωση αυτή, αυτό οφείλεται στο συνδυασμό, αφενός του ότι ευρισκόμενη στο χαμηλό κατάρτι, έχει πολυπλοκότερο περιβάλλον γύρω της σε σύγκριση με αυτό που θα είχε ευρισκόμενη στο υψηλό κατάρτι, και αφετέρου, του ότι έχει τη μικρότερη συχνότητα εκ των 2' και 4' που βρίσκονται στο χαμηλό κατάρτι, πράγμα που ελαττώνει τις ηλεκτρικές διαστάσεις. Ο συνδυασμός των δυο αυτών λόγων, συνηγορούν στο ότι η κεραία 2' “βλέπει” περισσότερες λεπτομέρειες και, επομένως, έχει συνολικά πιο βεβαρημένους “ray tracing” υπολογισμούς.



## ***Βιβλιογραφία***

- [1]. Constantine A. Balanis “Antenna Theory, Analysis and Design, Second Edition”, John Wiley & Sons, Inc, 1997.
- [2]. Νικόλαος Κ. Ουζούνογλου “Συστήματα Ραντάρ (Σημειώσεις)”, Εκδόσεις ΕΜΠ, 1990.
- [3]. Χρήστος Καψάλης και Παναγιώτης Κωττής “Κεραίες – Ασύρματες Ζεύξεις”, Εκδόσεις ΕΜΠ, 1999.
- [4]. Constantine A. Balanis “Advanced Engineering Electromagnetics”, John Wiley & Sons, Inc, 1989.
- [5]. Nikolaos K. Uzunoglu, Konstantina S. Nikita and Dimitra I. Kaklamani “Advanced Computational Electromagnetics, State of the Art and Future Trends”, Nato ASI Series, Springer – Verlag, 2000.
- [6]. John C. Kim and Eugen I. Muehldorf , “Naval Shipboard Communications Systems”, Prentice Hall PTR, 1995.
- [7]. Simon R. Saunders, “Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems”, John Wiley & Sons, 1999.
- [8]. “Modern Antenna Design Using Computers and Measurement : Application to Antenna Problems of Military Interest”, AGARD LECTURE SERIES 165, 1989.
- [9]. “Modern HF Communications”, AGARD LECTURE SERIES 127, 1983.
- [10]. Moore J. E. (CAPT.), “JANE'S FIGHTING SHIPS 1995-96”, McDonald & JANE'S, 1995.
- [11]. The ARRL Antenna Book American Radio Relay League, 1994-2000.
- [12]. A. E. Barios, “Advanced Propagation Model (APM) Computer Software Configuration Item (CSCI) Documents”, Technical Document 3033, August 1998.
- [13]. Δήμητρα-Θεοδώρα Ι. Κακλαμάνη “Υπολογιστικές Τεχνικές για Συστήματα Μετάδοσης Πληροφορίας”, Εκδόσεις ΕΜΠ, 2002.
- [14]. Andre Fourie and Derek Nitch “SuperNEC: Antenna and Indoor- Propagation Simulation Program”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol.42, No.3, June 2000.

- [15]. Ronald Joseph Marhefka and Walter Dennis Burnside “Antennas on Complex Platforms”, Proceedings of the IEEE, Vol. 80, No. 1, January 1992.
- [16]. Edmund K. Miller and Gerald J. Burke “Low – Frequency Computational Electromagnetics for Antenna Analysis”, Proceedings of the IEEE, Vol. 80, No. 1, January 1992.
- [17]. Prabhakar H. Pathak “High–Frequency Techniques for Antenna Analysis”, Proceedings of the IEEE, Vol. 80, No. 1, January 1992.
- [18]. Weng Cho Chew, Jian-Ming Jin, Cai-Cheng Lu, Eric Michielssen and Jiming M. Song “Fast Solution Methods in Electromagnetics”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 45, No. 3, March 1997.
- [19]. Ramzi Abou-Jaoude and Eric K. Walton “Numerical Modeling of On-Glass Conformal Automobile Antennas”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 46, No. 6, June 1998.
- [20]. Walter D. Burnside, Ronald J. Marhefka and Chong L. Yu “Roll-Plane Analysis of On-Aircraft Antennas”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 21, No. 6, November 1973.
- [21]. Prabhakar H. Pathak, Walter D. Burnside and Ronald J. Marhefka “A Uniform GTD Analysis of the Diffraction of Electromagnetic Waves by a Smooth Convex Surface”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 28, No. 5, September 1980.
- [22]. Gary A. Thiele “Overview of Selected Hybrid Methods in Radiating System Analysis”, Proceedings of the IEEE, Vol. 80, No. 1, January 1992.
- [23]. Jacob J. Kim and Walter D. Burnside “Simulation and Analysis of Antennas Radiating in a Complex Environment”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 34, No. 4, April 1986.
- [24]. Shing Ted Li, James C. Logan and John W. Rockway “Automated Procedure for Shipboard Exterior Communication RF System Design”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 22, No. 4, November 1980.
- [25]. Walter D. Burnside, Roger C. Rudduck and Ronald J. Marhefka “Summary of GTD Computer Codes Developed at the Ohio State University”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 22, No. 4, November 1980.
- [26]. Walter D. Burnside and Ronald J. Marhefka “NEC – BSC (VERSION 2.1), PART I : USER’S MANUAL”, December 1982.
- [27]. G. J. Burke, A. J. Poggio “NEC – MOM, USER’S MANUAL”, January 1981.
- [28]. Ν. Ρούσσοϋ (ΓΕΤΕΝ), Β. Γκικόπουλοϋ (ΚΕΤΑ) “Μελέτη αριθμητικῆϋ επιλύσεωϋ προβλημάτωϋ ηλεκτρομαγνητικῶν πεδίων και εφαρμογή σε υπολογιστικῶ περιβάλλον PC - Πρόγραμμα WinNEC-BSC” , Ιούλιοϋ 1997.

- [29]. Ν. Ρούσσοσ (ΥΕΘΑ/ΤΕΤΕΝ) “ Κεραίες επικοινωνιακών συστημάτων σε πλοία και οχήματα εδάφους. Ι. Μεθοδολογία υπολογισμού ηλεκτρομαγνητικών πεδίων κεραιών. Υπολογιστικό περιβάλλον EMSIF (Electromagnetic Simulation Framework)” , Σεπτέμβριος 2003.
- [30]. ΦΕΚ 1105/Β/6-9-2000.
- [31]. J. Perini and D. J. Buchanan, “Assessment of MOM techniques for shipboard applications”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 24, No. 1, February 1982.
- [32]. <http://esl.eng.ohio-state.edu>.



## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία μελετά κεραίες εγκατεστημένες σε σύνθετες κατασκευές, όπως πλοία, αεροπλάνα, οχήματα και κτιριακές εγκαταστάσεις εμπορικού και στρατιωτικού χαρακτήρα στο επιχειρησιακό τους περιβάλλον.

Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί μια γενική εισαγωγή του θέματος. Αρχικώς, διατυπώνονται οι ιδιαιτερότητες του προβλήματος και οι προς υπολογισμό παράμετροι, όπως η μελέτη μακρινού πεδίου (Far-Field calculations) και κοντινού πεδίου (Near-Field calculations) για υπολογισμούς H/M συμβατότητας (EMC) σύζευξης μεταξύ κεραιών (antenna to antenna spatial coupling) αλλά και κινδύνων ακτινοβολίας (RADHAZ). Παρατίθενται κατά ενότητες τα τρία στάδια μελέτης του προβλήματος που είναι η χρήση υπολογιστικών μεθόδων και οι μετρήσεις σε μοντέλα μη πραγματικής (scale models) και πραγματικής κλίμακας (full scale models). Στη συνέχεια, διατυπώνεται ανάλογα με τη συχνότητα το κριτήριο των ηλεκτρικών διαστάσεων, με βάση το οποίο το H/M πρόβλημα κατατάσσεται στα προβλήματα των χαμηλών ή υψηλών ηλεκτρικών διαστάσεων και επιλέγονται αντιστοίχως κατάλληλες υπολογιστικές μέθοδοι επίλυσης, όπως η μέθοδος των ροπών (MoM) και η ενιαία θεωρία περιθλάσεως (UTD).

Το δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται εκτενώς στη μέθοδο επίλυσης H/M προβλημάτων χαμηλών ηλεκτρικών διαστάσεων που χρησιμοποιήθηκε στο κεφάλαιο 5 των εφαρμογών, δηλαδή στη μέθοδο των ροπών (MoM). Αρχικώς, παρατίθεται το αναλυτικό υπόβαθρο του H/M, στο οποίο και βασίζεται η ανάπτυξη της μεθόδου, ξεκινώντας από τις εξισώσεις του Maxwell και καταλήγοντας στη πιο γνωστή μορφή ολοκληρωτικής εξίσωσης για λεπτό νηματοειδή αγωγό, την εξίσωση του Rocklington. Κατόπιν παρουσιάζεται η μέθοδος των ροπών (MoM), ξεκινώντας από τη φιλοσοφία της μεθόδου και των βημάτων που ακολουθούνται κατά την εφαρμογή της και συνεχίζοντας με μια σύντομη αναφορά στην ακρίβεια και την αξιοπιστία της. Τέλος, γίνεται αναφορά στο υπολογιστικό πρόγραμμα προσομοίωσης των κατασκευών μέσω πλέγματος νημάτων (wire grid model), NEC2-MoM, που χρησιμοποιήθηκε στο κεφάλαιο 5 των εφαρμογών και ενσωματώνει τη μέθοδο των ροπών (MoM) ως μέθοδο επίλυσης των H/M προβλημάτων.

Το τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται εκτενώς στη μέθοδο επίλυσης H/M προβλημάτων υψηλών ηλεκτρικών διαστάσεων που χρησιμοποιήθηκε στο κεφάλαιο 5 των εφαρμογών δηλαδή στην ενιαία θεωρία περίθλασης (UTD). Αρχικώς, παρατίθεται η θεωρία της γεωμετρικής οπτικής (GO) που αποτελεί βάση της ενιαίας θεωρίας περιθλάσεως. Αναφέρονται τα σημεία αδυναμίας της γεωμετρικής οπτικής και η εξέλιξη της στην ενιαία θεωρία περίθλασης. Κατόπιν, γίνεται αναφορά στο υπολογιστικό πρόγραμμα προσομοίωσης των κατασκευών μέσω μοντέλου πλακών και κυλίνδρων (plates - cylinders model), NEC-BSC 2.2.18, που χρησιμοποιήθηκε στο κεφάλαιο των εφαρμογών και ενσωματώνει την ενιαία θεωρία περίθλασης (Uniform Theory of Diffraction) ως μέθοδο επίλυσης των H/M προβλημάτων. Τέλος, παρατίθεται συντόμως η υβριδική μέθοδος MoM/UTD.

Το τέταρτο κεφάλαιο αποτελεί ενδεικτική πιστοποίηση μέσω απλών παραδειγμάτων των υπολογιστικών προγραμμάτων NEC-BSC 2.2.18 (με τροποποιήσεις από το GETEN) και NEC2 που χρησιμοποιήθηκαν στο κεφάλαιο 5 για τα παραδείγματα εφαρμογών. Για το μεν NEC-BSC 2.2.18 η αξιολόγηση έγινε μέσω σύγκρισης των τιμών που υπολογίσθηκαν και αντιστοίχων τιμών που προέκυψαν από μετρήσεις. Για το δε NEC2, έχοντας πλέον πιστοποιήσει το NEC-BSC 2.2.18, η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε με σύγκριση των τιμών που υπολογίσθηκαν από το NEC2 και των αντιστοίχων από το NEC-BSC 2.2.18 για την περιοχή τομής των ηλεκτρικών διαστάσεων. Πηγή των πειραματικών τιμών και των διαγραμμάτων που υπολογίσθηκαν είναι το YΘΑ/GETEN.

Το πέμπτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τρία ενδεικτικά παραδείγματα εφαρμογών των δυο τεχνικών επίλυσης H/M προβλημάτων MoM και UTD που αναφέρθηκαν στα κεφάλαια 2 και 3 και μια σύντομη αναφορά στις ναυτικές επικοινωνίες μέσω ιονόσφαιρας (NLOS) στα HF, οπτικής επαφής (LOS) στα VHF/UHF καθώς και στις τυπικές κεραίες που χρησιμοποιούνται στις δυο περιπτώσεις.



Η πρώτη εφαρμογή περιλαμβάνει την προσομοίωση και παράθεση αντιστοιχών συγκριτικών στοιχείων δυο κεραιών μιας FM στα 100 MHz και μιας VHF στα 146 MHz εγκατεστημένων στην οροφή ενός πολιτικού οχήματος DODGE σε περιβάλλον ασφάλτου με χρήση MoM.

Η δεύτερη εφαρμογή περιλαμβάνει την προσομοίωση και παράθεση αντιστοιχών συγκριτικών στοιχείων τεσσάρων κεραιών HF, δυο εκπομπής (whip monopoles) και δυο λήψης (active monopoles), εγκατεστημένων στην υπερκατασκευή ενός απλοποιημένου πολεμικού περιπολικού πλοίου σε θαλάσσιο περιβάλλον για τρεις χαρακτηριστικές συχνότητες με χρήση MoM.

Η τρίτη εφαρμογή περιλαμβάνει την προσομοίωση και παράθεση αντιστοιχών συγκριτικών στοιχείων τεσσάρων κεραιών HF, δυο εκπομπής (whip monopole, twin-pole whip) και δυο λήψεως (active monopoles) για τρεις χαρακτηριστικές συχνότητες και τη μελέτη 8 ground plane VHF/UHF κεραιών σε τέσσερις (μια ανά ζεύγος κεραιών) χαρακτηριστικές συχνότητες εγκατεστημένων αντίστοιχα στην υπερκατασκευή και τα 2 κατάρτια του TINCODEROGA CLASS CRUISER πολεμικού πλοίου σε θαλάσσιο περιβάλλον με χρήση MoM και UTD.

Ως κύριο υπολογιστικό εργαλείο χρησιμοποιήθηκε το ενιαίο υπολογιστικό περιβάλλον **EMSIF (Electromagnetic Simulation Framework)** που αναπτύχθηκε στο Ερευνητικό Κέντρο του Υπουργείου Εθνικής Άμυνας **ΓΕΤΕΝ** και το οποίο περιέχει, μεταξύ άλλων, τον υπολογιστικό κώδικα των NEC2 - MoM και του NEC - BSC 2.2.18 (UTD).

## Abstract

The present thesis studies antennas on complex structures such as ships, airplanes, vehicles and buildings, of both commercial and military character, in their operational environment.

The first chapter constitutes an introduction of the subject. Initially, the particularities of the problem are described and the parameters that need to be calculated are mentioned. These parameters have to do with the far field radiation study and the near field study that is used for E/M compatibility (EMC) and concerns antenna to antenna spatial coupling but also possible dangers of radiation (RADHAZ). The three stages that complement the study of the subject are mentioned. These are the simulation by the use of numerical methods of the models and the measurements taken on scale models and on full scale models. Afterwards the criterion of electric dimensions is formulated depending on the frequency. Based on that the E/M problem is classified as a problem of low or high electric dimensions and respectively a suitable numerical method is selected, such as the method of moments (MoM) and the uniform theory of diffraction (UTD).

The second chapter refers extensively to the method that was used in chapter 5 of applications for solving E/M problems of low electric dimensions, the method of moments (MoM). Initially the analytic background of Electromagnetics is mentioned, on which the formulation of the method is based, beginning from the Maxwell equations and leading to the oldest and most common form of integral equation for thin wires, Pocklington's integral equation. Then the method of moments (MoM) is presented, beginning from the philosophy of the method and the various steps that are followed through its application and continuing with a short report on the accuracy and the reliability of the method. Finally, word is made about the simulation program that simulates the various structures by forming a wire grid (wire grid model), NEC2-MoM, that was used in chapter 5 of applications and incorporates the method of moments (MoM) as the method for solving E/M problems.

The second chapter refers extensively to the method that was used in chapter 5 of applications for solving E/M problems of high electric dimensions, the uniform theory of diffraction (UTD). Initially, the theory of geometrical optics (GO) is mentioned, on which the formulation of the uniform theory of diffraction (UTD) is based. The points of weakness that the geometrical optics has and how it was extended to the uniform theory of diffraction are reported. Then, word is made about the simulation program that simulates the various structures via models of plates and finite elliptic cylinders (plates - cylinders model), NEC - BSC 2.2.18, that was used in chapter 5 of applications and incorporates the uniform theory of diffraction (UTD) as the method for solving E/M problems.

The fourth chapter constitutes indicative certification via simple examples of the simulation programs NEC - BSC 2.2.18, and NEC2 that were used in chapter 5 of applications. For the NEC - BSC 2.2.18 the certification was made via comparison of calculations and measurements. For the NEC2, having already certified the NEC - BSC 2.2.18, the certification was made via comparison of calculations by the NEC2 and calculations by the NEC - BSC 2.2.18 for the common region of electric dimensions. Source of the measurements and the calculated diagrams was the Hellenic Navy Research Centre (**GETEN**).

The fifth chapter includes three indicative applications of the two techniques for solving E/M problems, MoM and UTD that were mentioned in chapters 2 and a 3 and a short report in the naval communications via ionosphere (NLOS) at the HF band, and those of (LOS) at the VHF / UHF band as well as the common antennas that are used in these two cases.

The first application includes the simulation and comparison of two antennas, one FM at 100 MHz and one VHF at 146 MHz, on the roof of a commercial DODGE vehicle in the environment of asphalt with the use of MoM.

The second application includes the simulation and comparison of four HF antennas, two transmitters (whip monopoles) and two receivers (active monopoles), on the superstructure of a simplified large patrol ship in sea environment for three characteristic frequencies with the use of MoM.

The third application includes the simulation and comparison of four HF antennas, two transmitters (whip monopole, twin - pole whip) and two receivers (active monopoles) for three characteristic frequencies and the simulation and comparison of 8 ground plane VHF / UHF antennas (pairs of two) for four characteristic frequencies installed respectively on the superstructure and the 2 masts of the TINCODEROGA CLASS CRUISER in sea environment with the use of MoM and UTD.

The main simulation tool that was used, was the uniform simulation environment **EMSIF (Electromagnetic Simulation Framework)** that was developed within the Hellenic Navy Research Centre (**GETEN**) at the Ministry of Defense and contains, apart from others, the numerical code of NEC2 - MoM and the NEC - BSC 2.2.18 (UTD).