



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΥΛΙΚΩΝ

**Μελέτη οπτικής στοιχειοκεραίας σε
πολυμερική πλατφόρμα φωτονικής ολοκλήρωσης
για εφαρμογές τηλεσκόπησης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

Γεωργιόπουλου Μιχαήλ

Επιβλέπων: Η. Αβραμόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΩΤΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2021



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

Τομέας Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας & Τεχνολογίας Υλικών

Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών

Μελέτη οπτικής στοιχειοκεραίας σε πολυμερική πλατφόρμα φωτονικής ολοκλήρωσης για εφαρμογές τηλεσκόπησης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

Γεωργιόπουλου Μιχαήλ

Επιβλέπων: Η. Αβραμόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 15^η Σεπτεμβρίου 2021.

(Υπογραφή)

.....
Η. Αβραμόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....
Γ. Ματσόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....
Α.Δ. Παναγόπουλος
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2021

(Υπογραφή)

.....

Μιχαήλ Β. Γεωργιόπουλος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π

© 2021 – All rights reserved



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

Τομέας Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας & Τεχνολογίας Υλικών

Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών

Copyright © - All rights reserved Μιχαήλ Β. Γεωργιόπουλος, 2021

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας διπλωματικής 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 διπλωματικής εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

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

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2020 -2021 στον τομέα Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών, της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ευχαριστώ τον κ. Αβραμόπουλο για την δυνατότητα και την ευκαιρία που μου προσέφερε, να δουλέψω στο Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών (PCRL) και να συμμετέχω ενεργά στην ομάδα του Εργαστηρίου. Ευχαριστώ ιδιαίτερα τούς Δρ. Χρήστο Κουλουμέντα και υποψήφιο διδάκτορα Αδάμ Ραπτάκη για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση τους, κατά την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αλλά και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν από την πρώτη στιγμή της συνεργασίας μας. Ευχαριστώ επίσης και όλα τα παιδιά του Εργαστηρίου για την βοήθεια τους και συγκεκριμένα τους Λευτέρη Γουναρίδη, Χρήστο Τσόκο, Παναγιώτη Γκρούμα και Στάθη Ανδριανόπουλο.

Επιπλέον ευχαριστώ την Διεύθυνση Τεχνικού για την ευκαιρία που μου έδωσε να συμμετέχω στις κατατακτήριες εξετάσεις της Σχολής και για την εκπαιδευτική άδεια που μου χορήγησε προκειμένου να περατώσω τις σπουδές μου.

Ευχαριστώ επίσης τους γονείς μου Βασίλειο Γεωργιόπουλο και Ανδριανή Γεωργιοπούλου γιατί έθεσαν τις βάσεις για την πορεία μου και ήταν σταθερά δίπλα μου όλα αυτά τα χρόνια και τις αδερφές μου Μαρία και Δήμητρα για την υποστήριξη και το ενδιαφέρον τους.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την σύζυγό μου Γεωργία Μπαβέλα που με την καθημερινή της στάση, την κατανόηση, την παρακίνηση και την αμέριστη υποστήριξη της στάθηκε πολύτιμος αρωγός στην προσπάθεια μου και την κόρη μας, που ήρθε στη ζωή μας κατά την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας και έκανε την ζωή μας ομορφότερη.

Μιχαήλ Β. Γεωργιόπουλος

Σεπτέμβριος 2021

Περίληψη

Στη παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται μια καινοτόμα ιδέα για την υλοποίηση μιας δισδιάστατης οπτικής στοιχειοκεραίας (OPAs), της οποίας τα στοιχεία (antenna elements – AEs) είναι αξονικοί κυματοδηγοί (end-fire waveguides). Η καινοτομία αφορά την κατασκευή της σε ένα τρισδιάστατο ολοκληρωμένο φωτονικό κύκλωμα (Photonic integrated circuits - PICs) με πολλαπλά επίπεδα κυματοδότησης με χρήση της πολυμερικής πλατφόρμας PolyBoard. Στην απλούστερη μορφή του ένα τρισδιάστατο PICs περιλαμβάνει τα στοιχεία της στοιχειοκεραίας κατανομημένα στα επίπεδα του, κάθετους και οριζόντιους συζεύκτες για την διανομή του φωτός στα στοιχεία της και ολισθητές φάσης για την εκτέλεση της σάρωσης του οπτικού σήματος και στις δυο διαστάσεις. Χρησιμοποιώντας την αρχή της ισοδυναμίας πεδίου μοντελοποιήθηκε το προφίλ ακτινοβολίας (στο μακρινό πεδίο) του αξονικού κυματοδηγού, που αποτελεί το βασικό στοιχείο της στοιχειοκεραίας και υπολογίστηκε ότι το εύρος ημίσειας ισχύος του κύριου λοβού του είναι 12.7° . Επιπλέον μοντελοποιείται το προφίλ ακτινοβολίας για OPAs με 2,4,8 και 16 στοιχεία και με αποστάσεις μεταξύ τους (pitch) οι οποίες κυμαίνονται από $4\mu\text{m}$ έως $10\mu\text{m}$ για κάθε μια από τις προηγούμενες περιπτώσεις. Για όλες αυτές τις περιπτώσεις παρουσιάζονται αναλυτικά διαγράμματα για το προφίλ ακτινοβολίας και τα εύρη ημίσειας ισχύος τους καθώς και για τις κύριες παραμέτρους σάρωσης, όπως η μέγιστη γωνία στροφής της κατεύθυνσης του κύριου λοβού και η σχετική ένταση μεταξύ κύριου και grating lobe. Για OPAs αποτελούμενα από 4 στοιχεία και απόσταση $6\mu\text{m}$ μεταξύ τους, υπολογίστηκε ότι η μέγιστη γωνία στροφής της κατεύθυνσης του κύριου λοβού είναι 14° ενώ το γωνιακό εύρος που μπορεί να επιτευχθεί, ώστε η ένταση του κύριου λοβού να παραμείνει μεγαλύτερη από την ένταση του/των grating lobe κατά 3,6 και 10 dB είναι 10.8° , 7.6° και 2.8° αντίστοιχα. Στο Κεφάλαιο 1 περιγράφεται το ερευνητικό πεδίο στο οποίο αναφέρεται η διπλωματική, παρουσιάζεται η πλατφόρμα PolyBoard και πως αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή τρισδιάστατων PICs επιτρέποντας έτσι την υλοποίηση δισδιάστατων OPAs από αξονικούς κυματοδηγούς. Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται ορισμένες από τις θεμελιώδεις αρχές της θεωρίας κεραιών. Στο Κεφάλαιο 3 μοντελοποιείται ο αξονικός κυματοδηγός στην πολυμερική πλατφόρμα και υπολογίζεται το μακρινό του πεδίο μέσω της αρχής ισοδυναμίας πεδίου και της θεωρίας των κεραιών διαφράγματος. Στη συνέχεια η μοντελοποίηση επεκτείνεται για τις μονοδιάστατες και δισδιάστατες οπτικές στοιχειοκεραίες. Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και τέλος στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και σκιαγραφούνται τα επόμενα βήματα.

Λέξεις Κλειδιά

Οπτική φασιθετημένη συστοιχία κυματοδηγών – οπτική στοιχειοκεραία, οπτική σάρωση δέσμης, οπτικά πολυμερή, τρισδιάστατη φωτονική ολοκλήρωση, συστήματα ανίχνευσης και σκόπευσης φωτός.

Abstract

We investigate a novel concept for the implementation of 2-dimensional (2D) optical phased arrays (OPAs) with end-fire waveguides as antenna elements (AEs), and we present its theoretical model and simulation results. The concept is based on the use of 3-dimensional (3D) photonic integrated circuits (PICs) with multiple waveguiding layers on the PolyBoard platform. In their simplest form, the 3D PICs comprise AEs at different layers, vertical and lateral couplers for the distribution of light among the AEs, and phase shifters for the execution of the 2D beam scanning process. Using the field equivalence principle, we model the radiated field from the single-mode waveguide of the platform at 1550 nm, and we find that the expected beam width is 12.7° . We then model the radiated field for OPAs with 2,4,8 and 16 AEs while the pitch varies from $4\ \mu\text{m}$ to $10\ \mu\text{m}$ for each one of the previous cases. For all of the cases mentioned before we demonstrate detailed diagrams for the beam profiles, their full-width at half maximum (FWHM) and the main scanning parameters such as the maximum steering angle and the relative intensity between the main and the grating lobes. For OPAs with $6\ \mu\text{m}$ pitch and 4 AEs, we find that the maximum steering angle is 14.0° and the expected angular clearance, wherein the main radiation lobe is higher than any grating lobe by at least 3, 6 and 10 dB is 10.8° , 7.6° and 2.8° , respectively. The remainder of the thesis is organized as follows: In Chapter 1 we describe the research field to which this thesis refers. We also present the PolyBoard platform and describe its possibility for development of 3D PICs with multiple waveguiding layers and for light transition between those layers via vertical couplers. We describe next how this possibility enables the development of 2D OPAs with end-fire antennas. In Chapter 2 we introduce some of the fundamental principles of antenna theory which are necessary for the understanding of the concepts. In Chapter 3 we introduce the standard single-mode waveguide of the PolyBoard platform as an elementary optical antenna, we calculate its far-field using the field equivalence principle and the theory of aperture antennas, and we extend our modelling to the case of 1D and 2D OPAs. In Chapter 4 we present the simulation results through detailed figures. Finally in Chapter 5 we outline our next steps and conclude.

Keywords

Optical phased arrays, optical beam scanning, optical polymers, 3D photonic integration, LIDAR systems.

Πίνακας περιεχομένων

Ευχαριστίες.....	1
Περίληψη.....	3
Λέξεις Κλειδιά.....	3
Abstract.....	5
Keywords.....	5
Κατάλογος Σχημάτων.....	10
1 Εισαγωγή.....	19
1.1 Υλοποίηση οπτικών στοιχειοκεραιών με ζεύκτες φράγματος (grating couplers).....	21
1.2 Υλοποίηση οπτικών στοιχειοκεραιών με αξονικούς κυματοδηγούς (end-fire waveguides).....	22
1.3 Η πολυμερική πλατφόρμα PolyBoard.....	23
2 Θεωρία Κεραίων.....	25
2.1 Κεραίες.....	25
2.1.1 Θεμελιώδης Παράμετροι Κεραίων.....	25
2.2 Στοιχειοκεραίες.....	32
2.2.1 Ανάλυση Στοιχειοκεραιών.....	33
2.2.2 Γραμμικές Στοιχειοκεραίες.....	35
2.2.3 Γραμμικές Στοιχειοκεραίες με Στρεφόμενο Διάγραμμα Ακτινοβολίας.....	37
3 Μοντελοποίηση.....	40
3.1 Μοντελοποίηση αξονικού κυματοδηγού στο RSoft.....	40
3.2 Μοντελοποίηση της οπτικής στοιχειοκεραίας στο Matlab.....	43
3.2.1 Μακρινό πεδίο αξονικού κυματοδηγού (end-fire waveguide), τοποθετημένου σε PolyBoard PICs.....	43
3.2.2 Μακρινό πεδίο μονοδιάστατης οπτικής στοιχειοκεραίας (1D optical phased arrays – OPAs), τοποθετημένης σε PolyBoard PICs.....	50
3.2.3 Μακρινό πεδίο δισδιάστατης οπτικής στοιχειοκεραίας (2D optical phased arrays – OPAs), τοποθετημένης σε PolyBoard PICs.....	60

4	Αποτελέσματα Προσομοίωσης.....	63
4.1	Διαγράμματα οπτικής στοιχειοκεραίας (OPAs) που αποτελείται από 2 στοιχεία (AEs).....	65
4.1.1	Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 4μm.	66
4.1.2	Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 5μm.	67
4.1.3	Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 6μm.	68
4.1.4	Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 7μm	69
4.1.5	Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 8μm	70
4.1.6	Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 9μm	71
4.1.7	Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 10μm	72
4.2	Διαγράμματα οπτικής στοιχειοκεραίας (OPAs) που αποτελείται από 4 στοιχεία (AEs).....	73
4.2.1	Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 4μm.	74
4.2.2	Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 5μm.	75
4.2.3	Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 6μm.	76
4.2.4	Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 7μm.	77
4.2.5	Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 8μm.	78
4.2.6	Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 9μm.	79
4.2.7	Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 10μm.	80
4.3	Διαγράμματα οπτικής στοιχειοκεραίας (OPAs) που αποτελείται από 8 στοιχεία (AEs).....	81
4.3.1	Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 4μm.	82
4.3.2	Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 5μm.	83
4.3.3	Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 6μm.	84
4.3.4	Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 7μm.	85
4.3.5	Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 8μm.	86
4.3.6	Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 9μm.	87
4.3.7	Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 10μm.	88
4.4	Διαγράμματα οπτικής στοιχειοκεραίας (OPAs) που αποτελείται από 16 στοιχεία (AEs).....	89
4.4.1	Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 4μm.	90
4.4.2	Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 5μm.	91

4.4.3	Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 6μm.	92
4.4.4	Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 7μm.	93
4.4.5	Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 8μm.	94
4.4.6	Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 9μm.	95
4.4.7	Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 10μm.	96
4.5	Τελικά διαγράμματα οπτικής στοιχειοκεραίας (OPAs).....	97
4.5.1	Διαγράμματα εύρους ημίσειας ισχύος Δ_{3dB} (FWHM) του κύριου λοβού συναρτήσει της γωνίας στροφής του	98
4.5.2	Διάγραμμα εύρους ημίσειας ισχύος Δ_{3dB} (FWHM) του κύριου λοβού συναρτήσει της απόστασης μεταξύ των στοιχείων της στοιχειοκεραίας (pitch). ...	100
4.5.3	Διαγράμματα επιτεύξιμου οπτικού πεδίου (Field of View – FOV) ..	101
5	Συμπεράσματα & Προοπτικές.....	102
5.1	Σύνοψη και συμπεράσματα	102
5.2	Μελλοντικές επεκτάσεις.....	104
	Βιβλιογραφία.....	105

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Διάταξη 4x4 οπτικής στοιχειοκεραίας (OPAs) που αποτελείται από αξονικούς κυματοδηγούς και είναι κατασκευασμένη σε PolyBoard PICs [1].	24
Σχήμα 2.1: Σύστημα συντεταγμένων για ανάλυση κεραιών [30].	27
Σχήμα 2.2: Λοβοί ακτινοβολίας και γωνιακά εύρη ισχύος μιας κεραιάς σε πολικό διάγραμμα ακτινοβολίας[30].	28
Σχήμα 2.3: Λοβοί ακτινοβολίας και γωνιακά εύρη ισχύος μιας κεραιάς σε γραμμικό διάγραμμα ακτινοβολίας [30].	29
Σχήμα 2.4 Περιοχές ακτινοβολίας κεραιών [30].	30
Σχήμα 2.5 Σύστημα συντεταγμένων για την ανάλυση στοιχειοκεραιών [29].	34
Σχήμα 2.6: Γεωμετρία χωρικά ομοιόμορφης γραμμικής στοιχειοκεραίας [29].	35
Σχήμα 2.7: Τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας γραμμικής στοιχειοκεραίας με ομοιοκατευθυντικούς ακτινοβολητές [31].	38
Σχήμα 3.1: Τετραγωνική διατομή και ένταση ακτινοβολίας του αξονικού κυματοδηγού στα 1550nm [1].	41
Σχήμα 3.2: Σύγκριση εγκάρσιων πεδίων κατά την διάδοση του φωτός στο μακρινό πεδίο.	42
Σχήμα 3.3: Γεωμετρία και σύστημα συντεταγμένων του αξονικού κυματοδηγού (end-fire waveguide) προκειμένου να μοντελοποιηθεί σαν μια κεραία ανοίγματος (aperture antenna) για να χρησιμοποιηθεί η αρχή της ισοδυναμίας πεδίου (Field Equivalence Principle). Επιπλέον φαίνεται η επιλεγθείσα φανταστική επιφάνεια S [1].	44
Σχήμα 3.4: Πολικό διάγραμμα ακτινοβολίας της έντασης του αξονικού κυματοδηγού για σταθερή γωνία ανύψωσης ($\theta = 0^\circ$).	48
Σχήμα 3.5: Πολικό διάγραμμα ακτινοβολίας της έντασης του αξονικού κυματοδηγού για σταθερή γωνία αζιμούθιου ($\varphi = 0^\circ$).	48
Σχήμα 3.6: Τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας της έντασης του αξονικού κυματοδηγού.	49
Σχήμα 3.7: Κανονικοποιημένο δισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας της έντασης του αξονικού κυματοδηγού. Το διάγραμμα είναι σχεδιασμένο με κόκκινο για το αζιμουθιακό επίπεδο και με μπλε για το επίπεδο ανύψωσης [1].	49
Σχήμα 3.8: Γεωμετρία και σύστημα συντεταγμένων της οπτικής στοιχειοκεραίας (optical phased arrays – OPAs). Τα στοιχεία της είναι οι αξονικοί κυματοδηγοί (end-fire waveguide) που μελετήθηκαν στην προηγούμενη υποπαράγραφο [1].	51
Σχήμα 3.9: Πολικό διάγραμμα ακτινοβολίας της έντασης της στοιχειοκεραίας, αποτελούμενης από 4 στοιχεία με απόσταση 6μm, για σταθερή γωνία ανύψωσης ($\theta = 0^\circ$).	52

Σχήμα 3.10: Πολικό διάγραμμα ακτινοβολίας της έντασης της στοιχειοκεραίας, αποτελούμενης από 4 στοιχεία με απόσταση $6\mu\text{m}$, για σταθερή γωνία αζιμούθιου ($\varphi = 0^\circ$).	52
Σχήμα 3.11: Τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας της έντασης της στοιχειοκεραίας, αποτελούμενης από 4 στοιχεία με απόσταση $6\mu\text{m}$.	53
Σχήμα 3.12: Κανονικοποιημένο δισδιάστατο διάγραμμα της έντασης ακτινοβολίας. Η μπλε γραμμή αφορά τον αξονικό κυματοδηγό (end-fire waveguide), ενώ η κόκκινη γραμμή αφορά την γραμμική στοιχειοκεραία (1D OPAs) αποτελούμενη από 4 στοιχεία με απόσταση $6\mu\text{m}$.	54
Σχήμα 3.13: Παράγοντας διάταξης που αντιστοιχεί σε γραμμική στοιχειοκεραία 4 στοιχείων με απόσταση $6\mu\text{m}$ και γωνία στροφής 0° .	56
Σχήμα 3.14: Απόσταση μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe συναρτήσσει του βήματος της στοιχειοκεραίας, όταν αυτή αποτελείται από 4 στοιχεία.	56
Σχήμα 3.15 Πολικό διάγραμμα ακτινοβολίας της έντασης της στοιχειοκεραίας, αποτελούμενης από 4 στοιχεία με απόσταση $6\mu\text{m}$, για σταθερή γωνία ανύψωσης ($\theta = 0^\circ$). Στην περίπτωση αυτή έχει πραγματοποιηθεί στροφή 5° στην διεύθυνση του κύριου λοβού.	57
Σχήμα 3.16: Πολικό διάγραμμα ακτινοβολίας της έντασης της στοιχειοκεραίας, αποτελούμενης από 4 στοιχεία με απόσταση $6\mu\text{m}$, για σταθερή γωνία αζιμούθιου ($\varphi = 0^\circ$). Στην περίπτωση αυτή έχει πραγματοποιηθεί στροφή 5° στην διεύθυνση του κύριου λοβού.	58
Σχήμα 3.17: Τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας της έντασης της στοιχειοκεραίας, αποτελούμενης από 4 στοιχεία με απόσταση $6\mu\text{m}$ και στροφή 5° στην διεύθυνση του κύριου λοβού.	58
Σχήμα 3.18: Κανονικοποιημένο δισδιάστατο διάγραμμα της έντασης ακτινοβολίας. Η μπλε γραμμή αφορά τον αξονικό κυματοδηγό (end-fire waveguide), ενώ η κόκκινη γραμμή αφορά την γραμμική στοιχειοκεραία (1D OPAs) αποτελούμενη από 4 στοιχεία με απόσταση $6\mu\text{m}$. Στην περίπτωση αυτή έχει πραγματοποιηθεί στροφή 5° στην διεύθυνση του κύριου λοβού.	59
Σχήμα 3.19: Τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας της έντασης της επίπεδης οπτικής στοιχειοκεραίας, αποτελούμενης από 4 στοιχεία με απόσταση $6\mu\text{m}$ και στα δύο επίπεδα.	61
Σχήμα 3.20: Τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας της έντασης της επίπεδης οπτικής στοιχειοκεραίας, αποτελούμενης από 4 στοιχεία με απόσταση $6\mu\text{m}$ και στα δύο επίπεδα και στροφή 5° στην διεύθυνση του κύριου λοβού στο αζιμουθιακό επίπεδο.	62
Σχήμα 4.1: Κανονικοποιημένο δισδιάστατο διάγραμμα της έντασης ακτινοβολίας. Η μπλε γραμμή αφορά τον αξονικό κυματοδηγό (end-fire waveguide), ενώ η κόκκινη γραμμή αφορά την γραμμική στοιχειοκεραία (1D OPAs) αποτελούμενη από 2 στοιχεία με απόσταση $6\mu\text{m}$.	65
Σχήμα 4.2: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (2 AEs, $4\mu\text{m}$ pitch).	66

Σχήμα 4.3: Διάγραμμα απώλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (2 AEs, 4μm pitch).....	66
Σχήμα 4.4: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (2 AEs, 4μm pitch).....	66
Σχήμα 4.5: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (2 AEs, 4μm pitch).	66
Σχήμα 4.6: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (2 AEs, 5μm pitch).	67
Σχήμα 4.7: Διάγραμμα απώλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (2 AEs, 5μm pitch).....	67
Σχήμα 4.8: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (2 AEs, 5μm pitch).....	67
Σχήμα 4.9: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (2 AEs, 5μm pitch).	67
Σχήμα 4.10: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (2 AEs, 6μm pitch).	68
Σχήμα 4.11: Διάγραμμα απώλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (2 AEs, 6μm pitch).....	68
Σχήμα 4.12: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (2 AEs, 6μm pitch).....	68
Σχήμα 4.13: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (2 AEs, 6μm pitch).	68
Σχήμα 4.14: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (2 AEs, 7μm pitch).	69
Σχήμα 4.15: Διάγραμμα απώλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (2 AEs, 7μm pitch).....	69
Σχήμα 4.16: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (2 AEs, 7μm pitch).....	69
Σχήμα 4.17: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (2 AEs, 7μm pitch).	69
Σχήμα 4.18: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (2 AEs, 8μm pitch).	70
Σχήμα 4.19: Διάγραμμα απώλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (2 AEs, 8μm pitch).....	70
Σχήμα 4.20: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (2 AEs, 8μm pitch).....	70
Σχήμα 4.21: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (2 AEs, 8μm pitch).	70
Σχήμα 4.22: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (2 AEs, 9μm pitch).	71
Σχήμα 4.23: Διάγραμμα απώλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (2 AEs, 9μm pitch).....	71

Σχήμα 4.24: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (2 AEs, 9μm pitch).....	71
Σχήμα 4.25: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (2 AEs, 9μm pitch).	71
Σχήμα 4.26: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (2 AEs, 10μm pitch).	72
Σχήμα 4.27: Διάγραμμα απώλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (2 AEs, 10μm pitch).....	72
Σχήμα 4.28: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (2 AEs, 10μm pitch).....	72
Σχήμα 4.29: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (2 AEs, 10μm pitch).	72
Σχήμα 4.30: Κανονικοποιημένο δισδιάστατο διάγραμμα της έντασης ακτινοβολίας. Η μπλε γραμμή αφορά τον αξονικό κυματοδηγό (end-fire waveguide), ενώ η κόκκινη γραμμή αφορά την γραμμική στοιχειοκεραία (1D OPAs) αποτελούμενη από 4 στοιχεία με απόσταση 6μm.	73
Σχήμα 4.31: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (4 AEs, 4μm pitch).	74
Σχήμα 4.32: Διάγραμμα απώλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (4 AEs, 4μm pitch).....	74
Σχήμα 4.33: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (4 AEs, 4μm pitch).....	74
Σχήμα 4.34: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (4 AEs, 4μm pitch).	74
Σχήμα 4.35: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (4 AEs, 5μm pitch).	75
Σχήμα 4.36: Διάγραμμα απώλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (4 AEs, 5μm pitch).....	75
Σχήμα 4.37: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (4 AEs, 5μm pitch).....	75
Σχήμα 4.38: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (4 AEs, 5μm pitch).	75
Σχήμα 4.39: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (4 AEs, 6μm pitch).	76
Σχήμα 4.40: Διάγραμμα απώλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (4 AEs, 6μm pitch).....	76
Σχήμα 4.41: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (4 AEs, 6μm pitch).....	76
Σχήμα 4.42: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (4 AEs, 6μm pitch).	76
Σχήμα 4.43: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (4 AEs, 7μm pitch).	77

Σχήμα 4.44: Διάγραμμα απώλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (4 AEs, 7μm pitch).....	77
Σχήμα 4.45: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (4 AEs, 7μm pitch).....	77
Σχήμα 4.46: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (4 AEs, 7μm pitch).	77
Σχήμα 4.47: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (4 AEs, 8μm pitch).	78
Σχήμα 4.48: Διάγραμμα απώλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (4 AEs, 8μm pitch).....	78
Σχήμα 4.49: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (4 AEs, 8μm pitch).....	78
Σχήμα 4.50: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (4 AEs, 8μm pitch).	78
Σχήμα 4.51: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (4 AEs, 9μm pitch).	79
Σχήμα 4.52: Διάγραμμα απώλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (4 AEs, 9μm pitch).....	79
Σχήμα 4.53: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (4 AEs, 9μm pitch).....	79
Σχήμα 4.54: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (4 AEs, 9μm pitch).	79
Σχήμα 4.55: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (4 AEs, 10μm pitch).	80
Σχήμα 4.56: Διάγραμμα απώλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (4 AEs, 10μm pitch).....	80
Σχήμα 4.57: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (4 AEs, 10μm pitch).....	80
Σχήμα 4.58: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (4 AEs, 10μm pitch).	80
Σχήμα 4.59: Κανονικοποιημένο δισδιάστατο διάγραμμα της έντασης ακτινοβολίας. Η μπλε γραμμή αφορά τον αξονικό κυματοδηγό (end-fire waveguide), ενώ η κόκκινη γραμμή αφορά την γραμμική στοιχειοκεραία (1D OPAs) αποτελούμενη από 8 στοιχεία με απόσταση 6μm.	81
Σχήμα 4.60: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (8 AEs, 4μm pitch).	82
Σχήμα 4.61: Διάγραμμα απώλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (8 AEs, 4μm pitch).....	82
Σχήμα 4.62: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (8 AEs, 4μm pitch).....	82
Σχήμα 4.63: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (8 AEs, 4μm pitch).	82

Σχήμα 4.64: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (8 AEs, 5μm pitch).	83
Σχήμα 4.65: Διάγραμμα απώλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (8 AEs, 5μm pitch).	83
Σχήμα 4.66: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (8 AEs, 5μm pitch).	83
Σχήμα 4.67: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (8 AEs, 5μm pitch).	83
Σχήμα 4.68: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (8 AEs, 6μm pitch).	84
Σχήμα 4.69: Διάγραμμα απώλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (8 AEs, 6μm pitch).	84
Σχήμα 4.70: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (8 AEs, 6μm pitch).	84
Σχήμα 4.71: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (8 AEs, 6μm pitch).	84
Σχήμα 4.72: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (8 AEs, 7μm pitch).	85
Σχήμα 4.73: Διάγραμμα απώλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (8 AEs, 7μm pitch).	85
Σχήμα 4.74: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (8 AEs, 7μm pitch).	85
Σχήμα 4.75: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (8 AEs, 7μm pitch).	85
Σχήμα 4.76: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (8 AEs, 8μm pitch).	86
Σχήμα 4.77: Διάγραμμα απώλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (8 AEs, 8μm pitch).	86
Σχήμα 4.78: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (8 AEs, 8μm pitch).	86
Σχήμα 4.79: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (8 AEs, 8μm pitch).	86
Σχήμα 4.80: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (8 AEs, 9μm pitch).	87
Σχήμα 4.81: Διάγραμμα απώλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (8 AEs, 9μm pitch).	87
Σχήμα 4.82: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (8 AEs, 9μm pitch).	87
Σχήμα 4.83: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (8 AEs, 9μm pitch).	87
Σχήμα 4.84: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (8 AEs, 10μm pitch).	88

Σχήμα 4.85: Διάγραμμα απώλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (8 AEs, 10μm pitch).....	88
Σχήμα 4.86: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (8 AEs, 10μm pitch).....	88
Σχήμα 4.87: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (8 AEs, 10μm pitch).	88
Σχήμα 4.88: Κανονικοποιημένο δισδιάστατο διάγραμμα της έντασης ακτινοβολίας. Η μπλε γραμμή αφορά τον αξονικό κυματοδηγό (end-fire waveguide), ενώ η κόκκινη γραμμή αφορά την γραμμική στοιχειοκεραία (1D OPAs) αποτελούμενη από 16 στοιχεία με απόσταση 6μm.	89
Σχήμα 4.89: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (16 AEs, 4μm pitch).	90
Σχήμα 4.90: Διάγραμμα απώλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (16 AEs, 4μm pitch).....	90
Σχήμα 4.91: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (16 AEs, 4μm pitch).....	90
Σχήμα 4.92: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (16 AEs, 4μm pitch).	90
Σχήμα 4.93: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (16 AEs, 5μm pitch).	91
Σχήμα 4.94: Διάγραμμα απώλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (16 AEs, 5μm pitch).....	91
Σχήμα 4.95: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (16 AEs, 5μm pitch).....	91
Σχήμα 4.96: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (16 AEs, 5μm pitch).	91
Σχήμα 4.97: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (16 AEs, 6μm pitch).	92
Σχήμα 4.98: Διάγραμμα απώλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (16 AEs, 6μm pitch).....	92
Σχήμα 4.99: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (16 AEs, 6μm pitch).....	92
Σχήμα 4.100: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (16 AEs, 6μm pitch).	92
Σχήμα 4.101: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (16 AEs, 7μm pitch).	93
Σχήμα 4.102: Διάγραμμα απώλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (16 AEs, 7μm pitch).....	93
Σχήμα 4.103: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (16 AEs, 7μm pitch).....	93
Σχήμα 4.104: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (16 AEs, 7μm pitch).	93

Σχήμα 4.105: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (16 AEs, 8μm pitch).	94
Σχήμα 4.106: Διάγραμμα απώλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (16 AEs, 8μm pitch).	94
Σχήμα 4.107: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (16 AEs, 8μm pitch).	94
Σχήμα 4.108: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (16 AEs, 8μm pitch).	94
Σχήμα 4.109: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (16 AEs, 9μm pitch).	95
Σχήμα 4.110: Διάγραμμα απώλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (16 AEs, 9μm pitch).	95
Σχήμα 4.111: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (16 AEs, 9μm pitch).	95
Σχήμα 4.112: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (16 AEs, 9μm pitch).	95
Σχήμα 4.113: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (16 AEs, 10μm pitch).	96
Σχήμα 4.114: Διάγραμμα απώλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (16 AEs, 10μm pitch).	96
Σχήμα 4.115: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (16 AEs, 10μm pitch).	96
Σχήμα 4.116: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (16 AEs, 10μm pitch).	96
Σχήμα 4.117: Διάγραμμα εύρους ημίσειας ισχύος κύριου λοβού συναρτήσει της γωνίας στροφής του, για 4μm pitch.	98
Σχήμα 4.118: Διάγραμμα εύρους ημίσειας ισχύος κύριου λοβού συναρτήσει της γωνίας στροφής του, για 5μm pitch.	98
Σχήμα 4.119: Διάγραμμα εύρους ημίσειας ισχύος κύριου λοβού συναρτήσει της γωνίας στροφής του, για 6μm pitch.	98
Σχήμα 4.120: Διάγραμμα εύρους ημίσειας ισχύος κύριου λοβού συναρτήσει της γωνίας στροφής του, για 7μm pitch.	98
Σχήμα 4.121: Διάγραμμα εύρους ημίσειας ισχύος κύριου λοβού συναρτήσει της γωνίας στροφής του, για 8μm pitch.	99
Σχήμα 4.122: Διάγραμμα εύρους ημίσειας ισχύος κύριου λοβού συναρτήσει της γωνίας στροφής του, για 9μm pitch.	99
Σχήμα 4.123: Διάγραμμα εύρους ημίσειας ισχύος κύριου λοβού συναρτήσει της γωνίας στροφής του, για 10μm pitch.	99
Σχήμα 4.124: Διάγραμμα εύρους ημίσειας ισχύος κύριου λοβού συναρτήσει του pitch [1].	100

Σχήμα 4.125: Διάγραμμα επιτεύξιμου οπτικού πεδίου (Field of View – FOV) κατά το οποίο η ένταση του κύριου λοβού παραμένει μεγαλύτερη από την ένταση του/των grating lobe κατά 0 dB.....	101
Σχήμα 4.126: Διάγραμμα επιτεύξιμου οπτικού πεδίου (Field of View – FOV) κατά το οποίο η ένταση του κύριου λοβού παραμένει μεγαλύτερη από την ένταση του/των grating lobe κατά 3 dB.....	101
Σχήμα 4.127: Διάγραμμα επιτεύξιμου οπτικού πεδίου (Field of View – FOV) κατά το οποίο η ένταση του κύριου λοβού παραμένει μεγαλύτερη από την ένταση του/των grating lobe κατά 6 dB.....	101
Σχήμα 4.128: Διάγραμμα επιτεύξιμου οπτικού πεδίου (Field of View – FOV) κατά το οποίο η ένταση του κύριου λοβού παραμένει μεγαλύτερη από την ένταση του/των grating lobe κατά 10 dB.....	101

1

Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια διεθνούς συνεργασίας του Ερευνητικού Εργαστηρίου Φωτονικών Επικοινωνιών (Photonics Communications Research Laboratory – PCRL) το οποίο ανήκει στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών (School of Electrical and Computer Engineering) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (National Technical University of Athens – NTUA) και το περιεχόμενο της αποτέλεσε μέρος δημοσίευσης στο Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE), με τίτλο “2D Optical Phased Arrays for Laser Beam Steering Based on 3D Polymer Photonic Integrated Circuits” [1].

Σκοπός της είναι η θεωρητική μοντελοποίηση και μελέτη μιας οπτικής στοιχειοκεραίας (optical phased arrays – OPAs), η οποία είναι κατασκευασμένη σε τρισδιάστατη πολυμερική πλατφόρμα (PolyBoard) φωτονικής ολοκλήρωσης (Photonic integrated circuit – PICs). Η χρήση της πλατφόρμας PolyBoard για την κατασκευή του ολοκληρωμένου PICs αποτελεί μια καινοτόμα ιδέα των ερευνητών του Εργαστηρίου Φωτονικών Επικοινωνιών (PCRL). Στην συνέχεια της εργασίας και επειδή η μετάφραση ορισμένων εννοιών στα ελληνικά δεν είναι απόλυτα ακριβής, θα χρησιμοποιείται όπου κρίνεται σκόπιμο και η αγγλική ορολογία εντός παρενθέσεων, προκειμένου να μην αλλοιώνεται η έννοια του κειμένου.

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται περιγραφή του ερευνητικού πεδίου στο οποίο αναφέρεται η διπλωματική εργασία και παρουσιάζεται η χρήση της πλατφόρμας PolyBoard για την κατασκευή του ολοκληρωμένου PICs.

Οι οπτικές στοιχειοκεραίες (optical phased arrays – OPAs) είναι το οπτικό ανάλογο των στοιχειοκεραιών που έχουν εφαρμογή στα ραδιοκύματα (radio-wave phased array). Ουσιαστικά αφορούν την τεχνολογία με την οποία ελέγχεται η φάση και το πλάτος των κυμάτων φωτός που εκπέμπονται, αντανακλούν ή λαμβάνονται από μία δισδιάστατη επιφάνεια μέσω συγκεκριμένων στοιχείων, τοποθετημένων στην επιφάνεια αυτή. Τα

στοιχεία αυτά είναι ουσιαστικά πανομοιότυπες κεραιές και η διάταξη που σχηματίζεται από το σύνολο τους, αποτελεί την οπτική στοιχειοκεραία.

Ελέγχοντας δυναμικά τις οπτικές ιδιότητες τις επιφάνειας, καθίσταται δυνατός ο έλεγχος της κατεύθυνσης των ακτινών φωτός, χωρίς την ύπαρξη κινούμενων μερών. Εξαιτίας αυτού, μπορούν να αντικαταστήσουν τους κινούμενους φακούς και καθρέφτες από τους οποίους αποτελούνται κατά κόρον οι μονάδες σάρωσης των συστημάτων ανίχνευσης φωτός, που χρησιμοποιούνται στις επικοινωνίες ελευθέρου χώρου, ενώ ταυτόχρονα θα μειώσουν το κόστος τους και θα οδηγήσουν σε ανθεκτικότερες και στιβαρότερες κατασκευές [1], [3], [4].

Μια οπτική στοιχειοκεραία (optical phased arrays – OPAs), υπό την μορφή ενός τρισδιάστατου ολοκληρωμένου φωτονικού κυκλώματος (Photonic integrated circuit – PICs), αποτελείται συνήθως από:

- i. μια μονάδα σύζευξης του φωτός. Πρόκειται ουσιαστικά για τα στοιχεία (antenna elements – AEs) από τα οποία αποτελείται η οπτική στοιχειοκεραία.
- ii. ολισθητές φάσης (phase shifters), οι οποίοι ρυθμίζουν την σχετική φάση μεταξύ των στοιχείων της οπτικής στοιχειοκεραίας.
- iii. οπτικούς συζεύκτες - αποσυζεύκτες (optical couplers), οι οποίοι χωρίζουν το φως σε ξεχωριστές διαδρομές, οδηγώντας έτσι προς το στοιχείο εκπομπής του.

Το προφίλ ακτινοβολίας της οπτικής στοιχειοκεραίας στο μακρινό πεδίο, προκύπτει από την υπέρθεση των προφίλ ακτινοβολίας των στοιχείων (antenna elements – AEs) από τα οποία αποτελείται. Επιπλέον μέσω κατάλληλης διάταξης των στοιχείων της στοιχειοκεραίας στην επιφάνειά της και του σωστού συντονισμού των σχετικών τους φάσεων, μπορούμε να ελέγξουμε με ακρίβεια την κατεύθυνση του κύριου λοβού που θα έχει το προφίλ ακτινοβολίας της, στο μακρινό πεδίο. Επειδή όμως η απόσταση μεταξύ των στοιχείων της στοιχειοκεραίας είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερη από το μισό του μήκους κύματος ($\lambda/2$, $\lambda=1550\text{nm}$), εμφανίζονται ανεπιθύμητοι πλευρικοί λοβοί (ghost – grating lobes) στο προφίλ ακτινοβολίας της. Αυτοί οι λοβοί μειώνουν την απόδοσή της και γενικά είναι επιζήμιοι για τις οπτικές εφαρμογές διότι προσθέτουν θόρυβο στις επικοινωνίες [5]. Επιπλέον περιορίζουν σημαντικά τον έλεγχο της κατεύθυνσης του κύριου λοβού μειώνοντας την μέγιστη επιτεύξιμη στροφή του και κατ' επέκταση το μέγιστο επιτεύξιμο οπτικό πεδίο (Field of view – FOV) που προσφέρεται από την στοιχειοκεραία.

Οι δύο πιο συνηθισμένοι τύποι οπτικών στοιχείων (antenna elements – AEs) που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση μιας οπτικής στοιχειοκεραίας είναι ο ζεύκτης φράγματος (grating coupler) και οι αξονικοί κυματοδηγοί (end-fire waveguides) [5] οι οποίοι θα αναλυθούν στη συνέχεια.

1.1 Υλοποίηση οπτικών στοιχειοκεραιών με ζεύκτες φράγματος (grating couplers)

Οι ζεύκτες φράγματος τοποθετούνται επάνω στην επιφάνεια του επίπεδου ολοκληρωμένου φωτονικού κυκλώματος (Photonic integrated circuit – PICs) και λειτουργούν ως δομές εκπομπής φωτός, διότι εκτρέπουν εκτός της επιφάνειας, το διερχόμενο από αυτούς φως. Στην απλούστερη μορφή τους σχηματίζουν γραμμικές συστοιχίες (linear array) στην επιφάνεια του PICs και με την βοήθεια των ολισθητών φάσεως, επιτυγχάνουν τον έλεγχο – σάρωση μίας δέσμης φωτός σε ένα μόνο επίπεδο [6] - [9]. Η σάρωση μίας δέσμης φωτός και στα δύο επίπεδα έχει επιτευχθεί χρησιμοποιώντας δύο τεχνικές.

Η πρώτη τεχνική βασίζεται στην εξάρτηση της γωνίας εκτροπής από το μήκος κύματος λειτουργίας. Στην περίπτωση αυτή η γραμμική διάταξη των ζευκτών φράγματος διατηρείται. Εξαιτίας αυτής της εξάρτησης, με κατάλληλη ρύθμιση του μήκους κύματος, εντός του εύρους συντονισμού της πηγής εκπομπής του φωτός, ελέγχεται αποτελεσματικά η κατεύθυνση της δέσμης στο επίπεδο που είναι κάθετο στον άξονα των ζευκτών φράγματος, ενώ η κατεύθυνση της στο επίπεδο που είναι παράλληλο στον άξονα των ζευκτών φράγματος ελέγχεται από τους ολισθητές φάσης. Χρησιμοποιώντας αυτή την τεχνική έχει πραγματοποιηθεί ο έλεγχος – σάρωση της δέσμης φωτός και στα δύο επίπεδα σε φωτονικές πλατφόρμες (Photonic integrated circuit – PICs) πυριτίου επί μονωτή (silicon-on-insulator – SOI) και πλατφόρμες αποτελούμενες από νιτρίδια του πυριτίου (silicon-nitride), με γραμμικές συστοιχίες αποτελούμενες με έως και 512 στοιχεία (antenna elements – AEs) [10]-[16].

Στη δεύτερη τεχνική, οι ζεύκτες φράγματος σχηματίζουν δισδιάστατη συστοιχία (plane array) επάνω στην επιφάνεια του επίπεδου ολοκληρωμένου φωτονικού κυκλώματος (Photonic integrated circuit – PICs) και επιτρέπουν τον έλεγχο – σάρωση της δέσμης και στις δύο διαστάσεις, χωρίς να είναι απαραίτητη η ρύθμιση του μήκους κύματος. Ωστόσο, στη τεχνική αυτή υπάρχουν αυστηρές απαιτήσεις όσον αφορά την πυκνότητα ολοκλήρωσης και το μέγιστο μήκος των ζευκτών φράγματος. Οι απαιτήσεις αυτές μπορούν να ικανοποιηθούν εν μέρη, αξιοποιώντας την υψηλή πυκνότητα ολοκλήρωσης που έχουν οι φωτονικές πλατφόρμες (Photonic integrated circuit – PICs) πυριτίου επί μονωτή (silicon-on-insulator – SOI). Έτσι έχει επιτευχθεί η κατασκευή νανο-ζευκτών φράγματος με μήκος μικρότερο των 4μm που οδήγησαν στην δημιουργία δισδιάστατων οπτικών στοιχειοκεραιών αποτελούμενων από 8x8 στοιχεία (antenna elements – AEs) [17]-[20].

1.2 Υλοποίηση οπτικών στοιχειοκεραιών με αξονικούς κυματοδηγούς (*end-fire waveguides*)

Στους αξονικούς κυματοδηγούς (*end-fire waveguides*) το φως που κυματοδηγείται εκπέμπεται στον αέρα από την τελευταία πλευρική έδρα, δηλαδή την τελευταία επιφάνεια του κυματοδηγού κατά μήκος της διάδοσης του φωτός.

Όταν χρησιμοποιούνται για την δημιουργία γραμμικών συστοιχιών, υπερτερούν σε σύγκριση με τους ζεύκτες φράγματος διότι η απόδοση της ακτινοβολίας τους είναι πάντα ίδια χωρίς να παρουσιάζει αποκλίσεις, ενώ το προφίλ ακτινοβολίας τους είναι ομαλό και καθορίζεται από τον ρυθμό (ή ρυθμούς) που επικρατεί στον κυματοδηγό. Επιπλέον, το μέγεθος τους είναι το μικρότερο δυνατό, γεγονός που επιτρέπει την υλοποίηση οπτικών στοιχειοκεραιών με μεγάλο αριθμό στοιχείων (*antenna elements – AEs*) και με πολύ μικρές αποστάσεις μεταξύ τους (*βήμα/pitch*).

Στο [21] παρουσιάζεται μία οπτική στοιχειοκεραία σε φωτονική πλατφόρμα (*Photonic integrated circuit – PICs*) από νιτρίδια του πυριτίου (*silicon-nitride*), η οποία λειτουργεί στο μήκος κύματος των 1550nm και έχει για στοιχεία της (*antenna elements – AEs*), 256 αξονικούς κυματοδηγούς. Αντίστοιχα στο [22] παρουσιάζεται μία οπτική στοιχειοκεραία σε φωτονική πλατφόρμα (*Photonic integrated circuit – PICs*) πυριτίου επί μονωτή (*silicon-on-insulator – SOI*), στην οποία η απόσταση (*pitch*) μεταξύ των στοιχείων της είναι 775nm (το μισό του μήκους κύματος λειτουργίας της).

Το μεγαλύτερο όμως μειονέκτημα τους είναι ότι δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο – σάρωση μιας δέσμης φωτός σε 2 επίπεδα. Για να ξεπεραστεί αυτό, αναπτύχθηκαν τρισδιάστατες δομές από υαλώδης πυρίτιο (*vitreous silica/glass*) αποτελούμενες από πολλαπλά επίπεδα αξονικών κυματοδηγών με τις οποίες επιτεύχθηκε ο έλεγχος – σάρωση και στα δυο επίπεδα [23]. Χρησιμοποιώντας αυτές τις δομές κατασκευάστηκε μία οπτική στοιχειοκεραία αποτελούμενη από 4x4 στοιχεία (*antenna elements – AEs*) [24], κατά την οποία χρησιμοποιήθηκε ένα εξαιρετικά γρήγορο λείζερ προκειμένου να εγγράψει τις διαδρομές κυματοδότησης επάνω στην δομή του πυριτίου [25]. Η χρήση όμως των δομών πυριτίου εμφανίζει δυο σημαντικά μειονεκτήματα. Το πρώτο είναι η ανάγκη για υβριδική ολοκλήρωση της δομής πυριτίου σε μια πλατφόρμα φωτονικής ολοκλήρωσης (*Photonic integrated circuit – PICs*) η οποία θα υποστηρίξει την χρήση των οπτικών συζευκτών και των ολισθητών φάσης. Το δεύτερο μειονέκτημα είναι, ότι οι κυματοδηγοί πυριτίου έχουν μικρή συγκράτηση του φωτός εντός της διαδρομής κυματοδότησης, με αποτέλεσμα να δημιουργείται οπτική σύζευξη μεταξύ των κυματοδηγών όταν βρίσκονται κοντά ο ένας στον άλλον. Επομένως προκειμένου να χρησιμοποιηθούν οι δομές πυριτίου για την υλοποίηση μιας οπτικής στοιχειοκεραίας που θα επιτρέπει την σάρωση της δέσμης σε δυο επίπεδα, απαιτείται να υπάρχει μεγάλη απόσταση μεταξύ των στοιχείων της (*pitch*), το οποίο πέραν του ότι περιορίζει τον αριθμό των στοιχείων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν οδηγεί και σε περιορισμό του

επιτεύξιμου οπτικού πεδίου (Field of view – FOV), δηλαδή της συνολικής γωνίας στην οποία μπορεί να στραφεί η οπτική στοιχειοκεραία.

Όπως αναφέρθηκε και στη αρχή του κεφαλαίου, στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται μια οπτική στοιχειοκεραία (optical phased arrays – OPAs), η οποία είναι κατασκευασμένη σε τρισδιάστατη πολυμερική πλατφόρμα (PolyBoard) φωτονικής ολοκλήρωσης (Photonic integrated circuit – PICs). Η χρήση της πλατφόρμας PolyBoard για την κατασκευή του ολοκληρωμένου κυκλώματος PICs εφαρμόστηκε για πρώτη φορά και αποτελεί μια καινοτόμα ιδέα. Στη συνέχεια του κεφαλαίου θα παρουσιαστεί αναλυτικά η πολυμερική πλατφόρμα PolyBoard.

1.3 Η πολυμερική πλατφόρμα PolyBoard

Το PolyBoard είναι μια μονορυθμική πολυμερική πλατφόρμα, η οποία υποστηρίζει τη μονολιθική ολοκλήρωση αρκετών δομών και επομένως μπορεί να λειτουργήσει ως μια μητρική πλακέτα, στην οποία θα ενσωματώνονται υβριδικά ετερογενή στοιχεία (υβριδική ολοκλήρωση) [26]. Τέτοια ετερογενή στοιχεία είναι τα ιντερφερόμετρα Mach-Zehnder, οι θερμικοί ολισθητές φάσης, οι συζεύκτες MMI (Multi-mode interference) και τα φράγμα συστοιχίας κυματοδηγών (arrayed waveguide gratings).

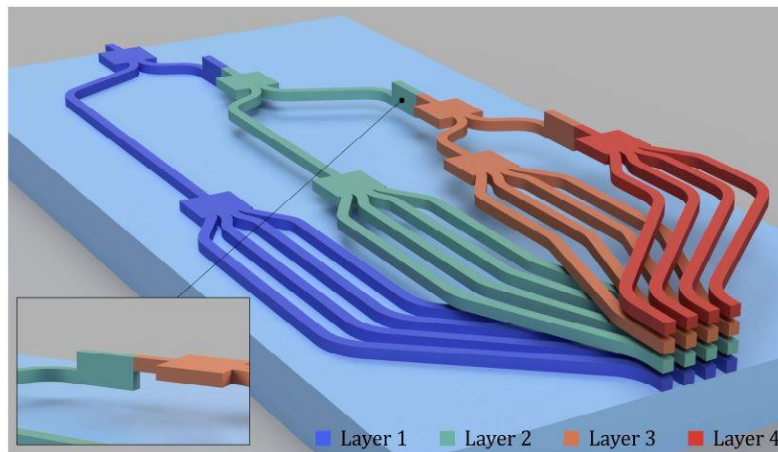
Ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα και του μανδύα της είναι $n_{\text{core}} = 1.48$ και $n_{\text{clad}} = 1.45$ αντίστοιχα. Το πλεονέκτημα από την χρήση της συγκεκριμένης πλατφόρμας είναι ότι στο μήκος κύματος 1550nm (ή σε συχνότητα λειτουργίας 193.5THz), παρουσιάζει πολύ μικρές απώλειες διάδοσης, περίπου 0.7 dB/cm.

Η κατασκευή του είναι αρκετά απλή και επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη τρισδιάστατων ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (Photonic integrated circuit – PICs) που θα αποτελούνται από πολλαπλά στρώματα κυματοδήγησης και από κάθετα τοποθετημένους οπτικούς συζεύκτες προκειμένου να μεταδίδεται το φως μεταξύ αυτών των στρωμάτων [27]. Για την κατασκευή ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος PICs από PolyBoard (από εδώ και στο εξής θα αναφέρεται ως PolyBoard PICs) με ένα μόνο επίπεδο κυματοδήγησης χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικές ρητίνες πολυμερούς (μια για τις γραμμές κυματοδήγησης και μια για τον μανδύα), οι οποίες ενσωματώνονται ακολουθώντας διαδοχικά βήματα εναπόθεσης στρώματος. Αρχικά το υπόστρωμα πυριτίου (Si) επικαλύπτεται με την ρητίνη του μανδύα χρησιμοποιώντας την τεχνική spin-coating. Σύμφωνα με αυτή την τεχνική η ρητίνη τοποθετείται στο κέντρο του πυριτίου, το οποίο στη συνέχεια στρέφεται μέσω ενός μηχανισμού (spin-coater) με πολύ μεγάλη ταχύτητα. Εξαιτίας της φυγόκεντρου δύναμης που αναπτύσσεται, η ρητίνη επικαλύπτεται ομοιόμορφα σε όλη την επιφάνεια του πυριτίου. Πάνω από την ρητίνη του μανδύα επικαλύπτεται μέσω της ίδιας τεχνικής, η ρητίνη του κυματοδηγού. Ακολουθεί η χάραξη των γραμμών κυματοδήγησης χρησιμοποιώντας υπεριώδη λιθογραφία και ιοντική χάραξη (reactive ion etching). Στη συνέχεια γίνεται ξανά επικάλυψη με την ρητίνη του μανδύα προκειμένου να σχηματιστεί το πάνω επίπεδο του μανδύα. Επαναλαμβάνοντας την

παραπάνω διαδικασία χρησιμοποιώντας διαφορετικά σετ μάσκας, μπορούν να κατασκευαστούν PolyBoard PICs με πολλαπλά επίπεδα κυματοδότησης [28]. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα των διαδοχικών βημάτων εναπόθεσης είναι ότι επιτρέπουν την κατασκευή κάθετων συζευκτών MMI (Multi-mode interference) οι οποίοι μπορούν να συζεύξουν το φως μεταξύ των διαδοχικών στρωμάτων.

Επομένως καθίσταται δυνατή η υλοποίηση PolyBoard PICs που θα αποτελούνται από κάθετους και οριζόντιους συζεύκτες MMI (Multi-mode interference) και από θερμικούς ολισθητές φάσης, οι οποίοι δέχονται στην είσοδό τους ένα οπτικό σήμα και το διανέμουν στους κυματοδηγούς προκειμένου να εκπεμφθεί. Το διαφορετικό μήκος των γραμμών κυματοδότησης επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο της φάσης του οπτικού σήματος. Λόγω των πολλαπλών επιπέδων κυματοδότησης είναι εφικτή η υλοποίηση μιας δισδιάστατης συστοιχίας αποτελούμενης από αξονικούς κυματοδηγούς (end-fire waveguides) τοποθετημένους στο τελευταίο πλευρικό άκρο του PolyBoard PICs. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος – σάρωση των οπτικών ακτίνων τόσο στο αζιμουθιακό (azimuthal) επίπεδο όσο και στο επίπεδο ανύψωσης (elevation).

Στο Σχήμα 1.1 βλέπουμε αυτή τη δισδιάστατη οπτική στοιχειοκεραία (optical phased arrays – OPAs) κατασκευασμένη σε PolyBoard PICs. Η 4x4 στοιχειοκεραία έχει σαν στοιχεία της (antenna elements – AEs), αξονικούς κυματοδηγούς (end-fire waveguides) και επιπλέον, όπως προαναφέρθηκε, αποτελείται από κάθετους και οριζόντιους συζεύκτες MMI (Multi-mode interference) και από θερμικούς ολισθητές φάσης. Οι συζεύκτες αυτοί φαίνονται στην ένθετη εικόνα του σχήματος.



Σχήμα 1.1: Διάταξη 4x4 οπτικής στοιχειοκεραίας (OPAs) που αποτελείται από αξονικούς κυματοδηγούς και είναι κατασκευασμένη σε PolyBoard PICs [1].

Η οριζόντια απόσταση (pitch) μεταξύ των στοιχείων της στοιχειοκεραίας καθορίζεται από την απόσταση (pitch) των αξονικών κυματοδηγών στο επίπεδο αυτό, ενώ η κατακόρυφη απόσταση (pitch) μεταξύ των στοιχείων της, καθορίζεται από την απόσταση μεταξύ των επιπέδων κυματοδότησης.

2

Θεωρία Κεραιών

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλυθούν οι θεμελιώδεις έννοιες της θεωρίας των κεραιών όπως το διάγραμμα ακτινοβολίας ενός ακτινοβολητή, οι συστοιχίες κεραιών και ο παράγοντας διάταξης. Οι έννοιες αυτές απαντώνται πολλές φορές μέσα στην διπλωματική και η ανάλυσή τους θα συνεισφέρει στην καλύτερη κατανόηση του συνολικού περιεχομένου της.

2.1 Κεραίες

Η κεραία είναι μια μεταλλική κατασκευή που μετατρέπει την ηλεκτρομαγνητική ενέργεια που οδηγείται σε αυτήν μέσω ενός οδηγού (όπως είναι το ομοαξονικό καλώδιο ή ο κυματοδηγός), σε εκπεμπόμενη ενέργεια υπό την μορφή ηλεκτρομαγνητικού κύματος στον ελεύθερο χώρο. Στην περίπτωση αυτή η κεραία ονομάζεται πομπός. Η παραπάνω διαδικασία μπορεί να γίνει και αντίστροφα, οπότε η κεραία ονομάζεται δέκτης. Το μέγεθος, το σχήμα και το υλικό της κεραίας επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την κατεύθυνση και την ζώνη συχνοτήτων στην οποία μπορεί να λειτουργήσει, καθώς και την αποδοτικότητα της παραπάνω μετατροπής. Η μέγιστη αποδοτικότητα σχετίζεται άμεσα με την δυνατότητα της κεραίας να συγκεντρώσει την εκπεμπόμενη ενέργεια σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Επομένως οι διαστάσεις της κεραίας, το σχήμα της και η διάταξη των εκπεμπόμενων στοιχείων παίζουν καθοριστικό ρόλο για μια αποδοτική μετάδοση.

2.1.1 Θεμελιώδεις Παράμετροι Κεραιών

Στο υποκεφάλαιο αυτό θα συζητηθούν ορισμένα από τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά των κεραιών τα οποία θα βοηθήσουν στην κατανόηση των μετρικών με τις οποίες αξιολογήθηκαν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που θα περιγράψουν στο Κεφάλαιο 4. Τα εν λόγω χαρακτηριστικά αφορούν την ακτινοβολία της κεραίας. Με τον όρο

ακτινοβολία νοείται η ενέργεια που μεταφέρεται από το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο, συνιστώντας το ηλεκτρομαγνητικό κύμα που μεταδίδεται στον ελεύθερο χώρο.

2.1.1.1 Διάνυσμα Poynting

Η ισχύς που μεταφέρεται κατά τη διάδοση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος συνδέεται με το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο που δημιουργούνται στο μέσο διάδοσης μέσω του διανύσματος Poynting [29]:

$$\vec{p}(\vec{r}, t) = \vec{e}(\vec{r}, t) \times \vec{h}(\vec{r}, t) \quad (2.1)$$

όπου $\vec{e}(\vec{r}, t)$ και $\vec{h}(\vec{r}, t)$ είναι οι στιγμιαίες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου αντίστοιχα. Το διάνυσμα Poynting εκφράζει τη στιγμιαία ροή ηλεκτρομαγνητικής ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας και μετριέται σε W/m^2 . Εισάγοντας τους φασιθέτες των αντίστοιχων μεγεθών προκύπτει η μέση ισχύς που ακτινοβολείται από την κεραία, η οποία είναι κα το μέγεθος που τελικά μας ενδιαφέρει:

$$\vec{P}_{av}(\vec{r}) = \frac{1}{2} Re\{\vec{E}(\vec{r}) \times \vec{H}(\vec{r})^*\} \quad (2.2)$$

2.1.1.2 Ένταση ακτινοβολίας

Η ένταση ακτινοβολίας είναι μέγεθος που χαρακτηρίζει τη μακρινή περιοχή μιας κεραίας και εκφράζει την ισχύ που ακτινοβολείται ανά μονάδα στερεάς γωνίας μέσω της σχέσης [29]:

$$U(\theta, \varphi) = r^2 |\vec{P}_{av}(\vec{r})| \quad (2.3)$$

2.1.1.3 Ισχύς ακτινοβολίας

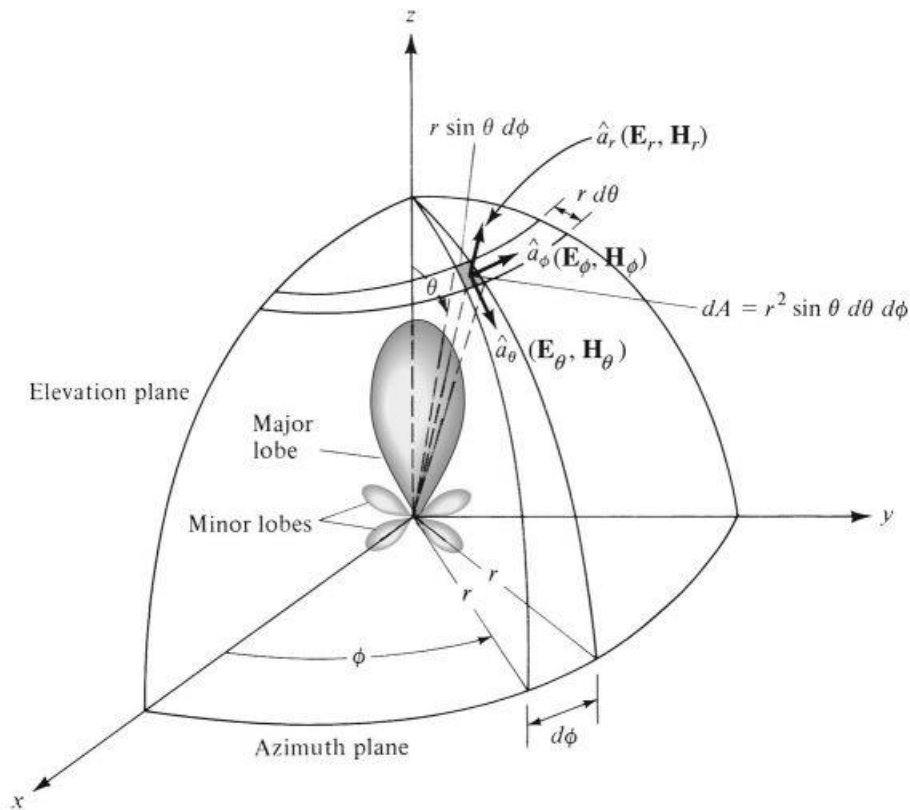
Η συνολική ισχύς που ακτινοβολεί μια κεραία προκύπτει με ολοκλήρωση της έντασης της ακτινοβολίας σε ολόκληρη την στερεά γωνία Ω που περιβάλλει την κεραία [29]:

$$W_{rad} = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi d\theta [U(\theta, \varphi) \sin(\theta)] \quad (2.4)$$

2.1.1.4 Διάγραμμα ακτινοβολίας

Το διάγραμμα ακτινοβολίας ορίζεται ως μια μαθηματική συνάρτηση ή μια γραφική αναπαράσταση των ιδιοτήτων ακτινοβολίας της κεραίας συναρτήσεως των χωρικών συντεταγμένων. Στις περισσότερες περιπτώσεις που ενδιαφέρουν, το διάγραμμα ακτινοβολίας προσδιορίζεται στη μακρινή περιοχή ακτινοβολίας, ως συνάρτηση μόνο των

συντεταγμένων διεύθυνσης θ και ϕ (γωνία ανύψωσης – elevation, αζιμούθιο – azimuthal) ενός κατάλληλα επιλεγμένου συστήματος σφαιρικών συντεταγμένων με κέντρο, συνήθως, το γεωμετρικό κέντρο της κεραίας [30] όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα:



Σχήμα 2.1: Σύστημα συντεταγμένων για ανάλυση κεραίων [30].

Στις ιδιότητες ακτινοβολίας της κεραίας που απεικονίζονται στο διάγραμμα ακτινοβολίας ανήκουν χωρίς αυτό να είναι δεσμευτικό οι:

- i. Πυκνότητα ροής ισχύος
- ii. Ένταση ακτινοβολίας
- iii. Ισχύς πεδίου
- iv. Κατευθυντικότητα
- v. Φάση ή Πολικότητα

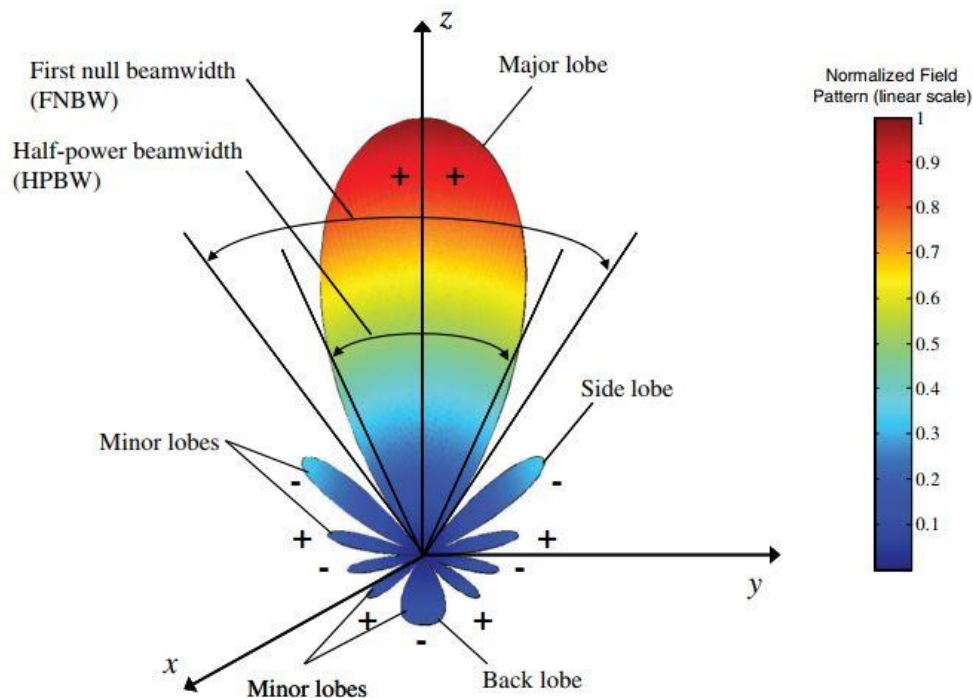
Η ιδιότητα της ακτινοβολίας που παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον είναι η δισδιάστατη ή τρισδιάστατη κατανομή της ακτινοβολουμένης ενέργειας, ως συνάρτηση της θέσης του παρατηρητή, καθώς αυτός κινείται σε μια γραμμή ή αντίστοιχα σε μια επιφάνεια σταθερής ακτίνας. Η απεικόνιση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε σταθερή ακτίνα ονομάζεται *διάγραμμα πεδίου*, ενώ η απεικόνιση των χωρικών μεταβολών της πυκνότητας ισχύος σε σταθερή ακτίνα ονομάζεται *διάγραμμα ισχύος* [30].

Συχνά τα διαγράμματα πεδίου και ισχύος κανονικοποιούνται ως προς τη μέγιστη τιμή τους, δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο το *κανονικοποιημένο διάγραμμα πεδίου ή ισχύος*. Το διάγραμμα ισχύος συνηθίζεται να παρουσιάζεται σε λογαριθμική κλίμακα (decibels, dB), με απώτερο σκοπό τον τονισμό των σημείων όπου το διάγραμμα λαμβάνει πολύ μικρές τιμές. Τα σημεία αυτά ονομάζονται δευτερεύοντες λοβοί και θα αναλυθούν παρακάτω [30]. Επομένως για μια κεραία το:

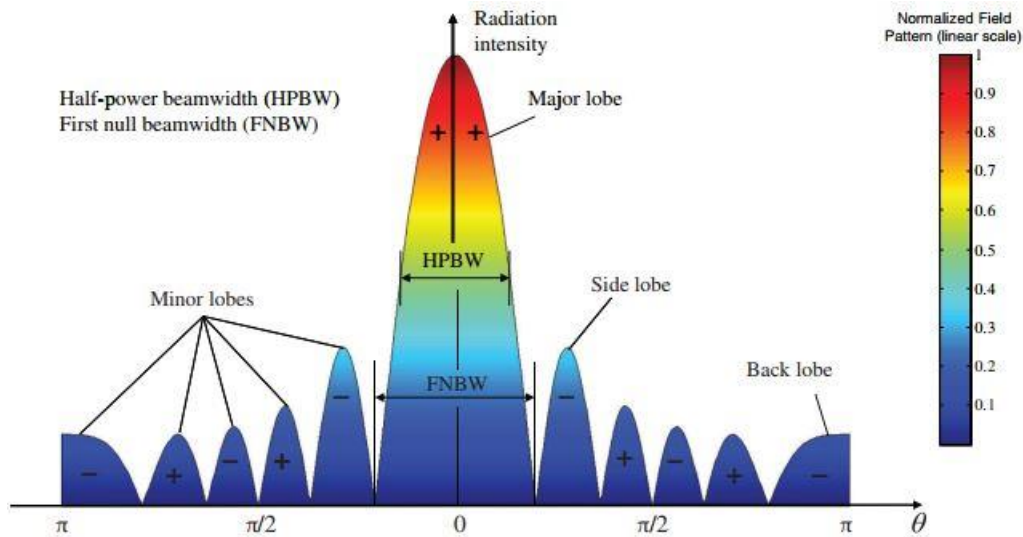
- i. Διάγραμμα Πεδίου (σε γραμμική κλίμακα) αποτελεί μια απεικόνιση του πλάτους του ηλεκτρικού ή του μαγνητικού πεδίου, ως συνάρτηση των συντεταγμένων διεύθυνσης (θ και φ)
- ii. Διάγραμμα Ισχύος (σε γραμμική κλίμακα) αποτελεί μια απεικόνιση του τετραγώνου του πλάτους του ηλεκτρικού ή μαγνητικού πεδίου, ως συνάρτηση των συντεταγμένων διεύθυνσης.
- iii. Διάγραμμα Ισχύος (σε λογαριθμική κλίμακα) αποτελεί μια απεικόνιση του πλάτους του ηλεκτρικού ή του μαγνητικού πεδίου σε decibels (dB), ως συνάρτηση των συντεταγμένων διεύθυνσης.

2.1.1.5 Λοβοί Ακτινοβολίας

Λοβός Ακτινοβολίας ονομάζεται το τμήμα του διαγράμματος ακτινοβολίας που οριοθετείται από περιοχές πολύ ασθενούς και συνήθως μηδενικής, έντασης ακτινοβολίας [30]. Οι λοβοί ενός διαγράμματος ακτινοβολίας, όπως φαίνονται στα παρακάτω Σχήματα, δύναται να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:



Σχήμα 2.2: Λοβοί ακτινοβολίας και γωνιακά εύρη ισχύος μιας κεραίας σε πολικό διάγραμμα ακτινοβολίας[30].



Σχήμα 2.3: Λοβοί ακτινοβολίας και γωνιακά εύρη ισχύος μιας κεραίας σε γραμμικό διάγραμμα ακτινοβολίας[30].

- i. Κύριος Λοβός (Main Lobe)
- ii. Δευτερεύον Λοβός (Minor Lobe)
- iii. Πλευρικός Λοβός (Side Lobe)
- iv. Οπίσθιος Λοβός (Back Lobe)

Κύριος Λοβός ακτινοβολίας ονομάζεται αυτός που περιέχει τη διεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας, η οποία είναι και η διεύθυνση ενδιαφέροντος της κεραίας. Σε πολλές περιπτώσεις σύνθετων ακτινοβολητών, όπως είναι οι στοιχειοκεραίες, μπορεί να υπάρχουν παραπάνω από ένας κύριος λοβός ακτινοβολίας οι οποίοι ονομάζονται *Ghost Lobes* ή *Grating Lobes* και είναι αποτέλεσμα του παράγοντα διάταξης της στοιχειοκεραίας. Περισσότερα για τις στοιχειοκεραίες θα αναλυθούν στη συνέχεια του κεφαλαίου. Δευτερεύων Λοβός ακτινοβολίας ονομάζεται κάθε λοβός που δεν είναι κύριος. Οι λοβοί αυτοί συνήθως είναι ανεπιθύμητοι και θα πρέπει να ελαχιστοποιούνται. Οι Πλευρικοί Λοβοί ακτινοβολίας υπάγονται στους δευτερεύοντες λοβούς και είναι οι λοβοί οι οποίοι δεν περιέχουν την κατεύθυνση της μέγιστης ακτινοβολίας. Τέλος, ο Οπίσθιος Λοβός ακτινοβολίας ανήκει και αυτός στους δευτερεύοντες λοβούς και ονομάζεται ο λοβός που περιλαμβάνει τη διεύθυνση ακτινοβολίας που είναι αντίθετη με αυτή του κύριου λοβού.

Στους λοβούς ακτινοβολίας και κυρίως στον κύριο λοβό μας ενδιαφέρουν δύο βασικά χαρακτηριστικά τα οποία είναι σημαντικά για τον χαρακτηρισμό της κατευθυντικότητας της κεραίας[30]:

- i. Το γωνιακό εύρος Δ_0 (First Null Beamwidth – FNBW), που είναι η γωνία που σχηματίζουν οι διευθύνσεις μηδενισμών ή ελαχίστων μεταξύ των οποίων περιλαμβάνεται η μέγιστη ένταση ακτινοβολίας, δηλαδή ο κύριος λοβός.
- ii. Το εύρος ημίσειας ισχύος Δ_{3dB} (Half Power Beamwidth – HPBW), που είναι η γωνία που σχηματίζεται εκατέρωθεν της διεύθυνσης μεγίστου, από τις γωνίες

για τις οποίες η ένταση ακτινοβολίας ισούται με το μισό της μέγιστης τιμής της.

2.1.1.6 Ισοτροπικός Ακτινοβολητής

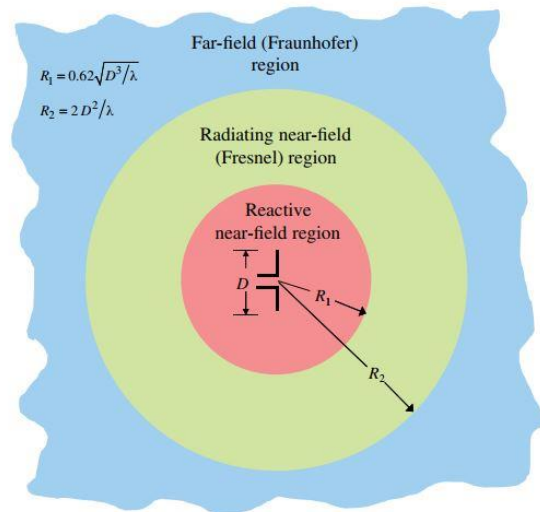
Ισοτροπικός ακτινοβολητής ονομάζεται η υποθετική κεραία που ακτινοβολεί εξίσου προς όλες της κατευθύνσεις, χωρίς απώλειες. Είναι υποθετική διότι τέτοιου είδους κεραία μπορεί να επιτευχθεί μόνο από την σημειακή πηγή. Αν και δεν έχει πραγματική υπόσταση, αποτελεί την κεραία αναφοράς με βάση την οποία συγκρίνονται όλες οι υπόλοιπες κεραίες ως προς τις κατευθυντικές τους ιδιότητες [29]. Λόγω της σημειακής φύσης του ισοτροπικού ακτινοβολητή το διάνυσμα Poynting έχει ακτινική διεύθυνση και εξαρτάται μόνο από την απόσταση του σημείου παρατήρησης από την πηγή όπως περιγράφεται και στον παρακάτω τύπο:

$$\vec{P}_o(\vec{r}) = \frac{W_{rad}}{4\pi r^2} \hat{r} \quad (2.5)$$

όπου W_{rad} είναι η ισχύς ακτινοβολίας

2.1.1.7 Περιοχές Ακτινοβολίας Κεραίων

Ο χώρος που περιβάλλει μια κεραία υποδιαιρείται σε τρεις περιοχές ο διαχωρισμός των οποίων εξαρτάται από την μέγιστη διάσταση του ακτινοβολητή D και το μήκος κύματος λ που αντιστοιχεί στην συχνότητα λειτουργίας της κεραίας. Οι περιοχές αυτές που φαίνονται στο Σχήμα 2.4 διακρίνονται και ως προς την συμπεριφορά του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από τον ακτινοβολητή και δεν εμφανίζονται απότομες μεταβολές κατά την διάσχιση των ορίων τους [30].



Σχήμα 2.4 Περιοχές ακτινοβολίας κεραιών [30].

Κοντινή περιοχή (Near – Field Region) είναι η περιοχή όπου το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο εμφανίζει άεργη συμπεριφορά, το οποίο σημαίνει ότι δεν ακτινοβολείται ηλεκτρομαγνητική ενέργεια [29]. Η περιοχή αυτή περιορίζεται χωρικά στο εσωτερικό μιας σφαίρας με ακτίνα:

$$R_1 = 0.62\left(\frac{D^3}{\lambda}\right)^{1/2} \quad (2.6)$$

Περιοχή Fresnel είναι η ενδιάμεση περιοχή μεταξύ της κοντινής και της μακρινής περιοχής ενός ακτινοβολητή. Στην περιοχή αυτή, το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο εμφανίζει συμπεριφορά ακτινοβολίας αλλά οι εγκάρσιες συνιστώσες του έχουν και ακτινική εξάρτηση [29]. Η περιοχή Fresnel εκτείνεται στον χώρο που περιορίζεται από τις σφαίρες με ακτίνα R_1 και R_2 όπου

$$R_2 = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (2.7)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση όπου η μεγαλύτερη διάσταση της κεραίας είναι μικρή συγκριτικά με το μήκος κύματός της, τότε η περιοχή αυτή μπορεί και να μην υπάρχει.

Η μακρινή περιοχή (Fraunhofer Region) εκτείνεται σε απόσταση από τον ακτινοβολητή μεγαλύτερη της ακτίνας R_2 . Στην περιοχή αυτή οι εγκάρσιες συνιστώσες του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου είναι ανεξάρτητες της ακτινικής συνιστώσας [29]. Στην εργασία αυτή τα διαγράμματα ακτινοβολίας που θα παρουσιαστούν καθώς και όλη η ανάλυση έχει γίνει για την μακρινή περιοχή της κεραίας.

2.1.1.8 Κατευθυντικό Κέρδος και Κατευθυντικότητα

Ως *κατευθυντικό κέρδος* $D_g(\theta, \varphi)$ ορίζεται ο λόγος της έντασης ακτινοβολίας μιας κεραίας, προς την ένταση ακτινοβολίας U_0 ενός ισοτροπικού ακτινοβολητή που εκπέμπει την ίδια ισχύ ακτινοβολίας [29], δηλαδή:

$$D_g(\theta, \varphi) = \frac{U(\theta, \varphi)}{U_0} = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)}{W_{rad}} \quad (2.8)$$

Κατευθυντικότητα D_m μιας κεραίας είναι η μέγιστη τιμή του κατευθυντικού της κέρδους:

$$D_m = D_g(\theta, \varphi)|_{max} = \frac{U(\theta, \varphi)|_{max}}{U_0} = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)|_{max}}{W_{rad}} \quad (2.9)$$

όπου $U(\theta, \varphi)|_{max}$ είναι η μέγιστη τιμή της έντασης ακτινοβολίας και W_{rad} είναι η ισχύς ακτινοβολίας της κεραίας. Η κατευθυντικότητα εκφράζεται συνήθως σε dB.

2.1.1.9 Κέρδος Ισχύος

Το κέρδος ισχύος είναι ένα επιπλέον μέτρο προσδιορισμού του πόσο αποδοτικά ακτινοβολεί μια κεραία [29] και ορίζεται ως:

$$G_g(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)}{W_{in}} \quad (2.10)$$

όπου W_{in} είναι η ισχύς τροφοδότησης της κεραίας. Η παραπάνω σχέση διαφέρει από την αντίστοιχη σχέση ορισμού του κατευθυντικού κέρδους ως προς το ότι λαμβάνει υπόψη της, την ισχύ τροφοδοσίας αντί της ακτινοβολουμένης ισχύος. Έτσι, εκτός των κατευθυντικών ιδιοτήτων μιας κεραίας στο κέρδος ισχύος λαμβάνεται υπόψη και πόσο αποδοτικά τροφοδοτείται η κεραία. Στις συνήθειες περιπτώσεις το κέρδος ισχύος αναφέρεται στη διεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας, οπότε και ονομάζεται απλώς κέρδος της κεραίας, δηλαδή:

$$G = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)|_{max}}{W_{in}} \quad (2.11)$$

Η ισχύς ακτινοβολίας συνδέεται με την ισχύ τροφοδότησης μέσω της σχέσης:

$$W_{rad} = n_r W_{in} \quad (2.12)$$

όπου n_r είναι ο *συντελεστής απόδοσης* της κεραίας, ο οποίος περιγράφει τις διάφορες απώλειες της κεραίας, χωρίς όμως να συνυπολογίζει τις ανακλάσεις λόγω έλλειψης προσαρμογής. Βάση των παραπάνω, προκύπτει η σχέση μεταξύ κατευθυντικού κέρδους και κέρδους ισχύος μιας κεραίας:

$$G_g(\theta, \varphi) = n_r D_g(\theta, \varphi) \quad (2.13)$$

2.2 Στοιχειοκεραίες

Οι *στοιχειοκεραίες* είναι διατάξεις που αποτελούνται από πολλαπλούς ακτινοβολητές (στοιχεία) με τον ίδιο προσανατολισμό. Οι ακτινοβολητές μπορεί να είναι όμοιοι μεταξύ τους, όπως συμβαίνει στις περισσότερες περιπτώσεις, ή μπορεί να είναι και διαφορετικοί, όπως συμβαίνει στις διατάξεις Yagi – Uda. Ανάλογα με τη χωροταξική διάταξη τους, οι στοιχειοκεραίες διακρίνονται στις χωρικά ομοιόμορφες και στις χωρικά ανομοιόμορφες. Στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές χρησιμοποιούνται οι χωρικά ομοιόμορφες στοιχειοκεραίες, μιας και για αυτές υπάρχουν περισσότεροι μέθοδοι ανάλυσης. Αντίθετα στις χωρικά ανομοιόμορφες η ανάλυση είναι δυσκολότερη λόγω των αυξημένων βαθμών ελευθερίας του σχεδιαστή [30].

Το συνολικό ακτινοβολούμενο πεδίο της στοιχειοκεραίας προκύπτει από την διανυσματική άθροιση όλων των πεδίων που ακτινοβολούνται από τα επιμέρους στοιχεία της. Για την δημιουργία υψηλά κατευθυντικών διαγραμμάτων ακτινοβολίας, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η προσθετική συμβολή των πεδίων των επιμέρους στοιχείων στην επιθυμητή κατεύθυνση ακτινοβολίας, σε συνδυασμό με την αναιρετική συμβολή τους σε όλο τον υπόλοιπο χώρο [30].

Το συνολικό διάγραμμα ακτινοβολίας μιας στοιχειοκεραίας εξαρτάται από τα παρακάτω πέντε βασικά στοιχεία:

- i. Το γεωμετρικό σχήμα της διάταξης της στοιχειοκεραίας (πχ γραμμικό , τετραγωνικό, τριγωνικό).
- ii. Τη σχετική απόσταση μεταξύ των στοιχείων της κεραίας.
- iii. Το πλάτος του ρεύματος διέγερσης κάθε στοιχείου.
- iv. Τη φάση του ρεύματος διέγερσης κάθε στοιχείου.
- v. Το σχετικό διάγραμμα ακτινοβολίας κάθε στοιχείου.

Οι στοιχειοκεραίες βρίσκουν ευρεία εφαρμογή λόγω της βελτίωσης της κατευθυντικότητας που προφέρουν σε σχέση με τον απλό ακτινοβολητή και τη δυνατότητα σύνθεσης επιθυμητών διαγραμμάτων ακτινοβολίας με στροφή του κύριου λοβού προς την επιθυμητή κατεύθυνση.

2.2.1 Ανάλυση Στοιχειοκεραιών

Όπως προαναφέρθηκε το πλάτος και η φάση των ρευμάτων τροφοδότησης κάθε στοιχείου παίζει καταλυτικό ρόλο στη διαμόρφωση του ακτινοβολούμενου πεδίου της στοιχειοκεραίας. Δεδομένου ότι στην παρούσα μελέτη οπτικής στοιχειοκεραίας έχουμε χρησιμοποιήσει όμοιους ακτινοβολητές, στο παρόν υποκεφάλαιο θα γίνει ανάλυση του τρόπου ακτινοβολίας χωρικά ομοιόμορφων στοιχειοκεραιών που αποτελούνται από όμοιους ακτινοβολητές. Αν I_0 είναι ο φασιθέτης του ρεύματος διέγερσης του στοιχείου της στοιχειοκεραίας που θεωρείται ως στοιχείο αναφοράς, τότε το ρεύμα διέγερσης των υπολοίπων στοιχείων μπορεί να εκφρασθεί υπό τη μορφή:

$$I_m = c_m I_0 \quad m = 0, 1, 2, \dots, M - 1 \quad (2.14)$$

όπου M το πλήθος των στοιχείων της στοιχειοκεραίας και c_m ο ρευματικός συντελεστής του στοιχείου m . Πρόκειται για έναν μιγαδικό αριθμό που αποτελεί έναν συντελεστή αναλογίας.

Η συνολική ένταση ακτινοβολίας $U(\theta, \varphi)$ της στοιχειοκεραίας, λαμβάνοντας υπόψη ότι βρισκόμαστε στην μακρινή περιοχή προκύπτει ως [30]:

$$U(\theta, \varphi) = U_0(\theta, \varphi) \times |S(\theta, \varphi)|^2 \quad (2.15)$$

όπου $U_0(\theta, \varphi)$ είναι η ένταση ακτινοβολίας των όμοιων στοιχείων ακτινοβολίας και $S(\theta, \varphi)$ ο παράγοντας διάταξης της στοιχειοκεραίας. Ο παράγοντας διάταξης είναι μια

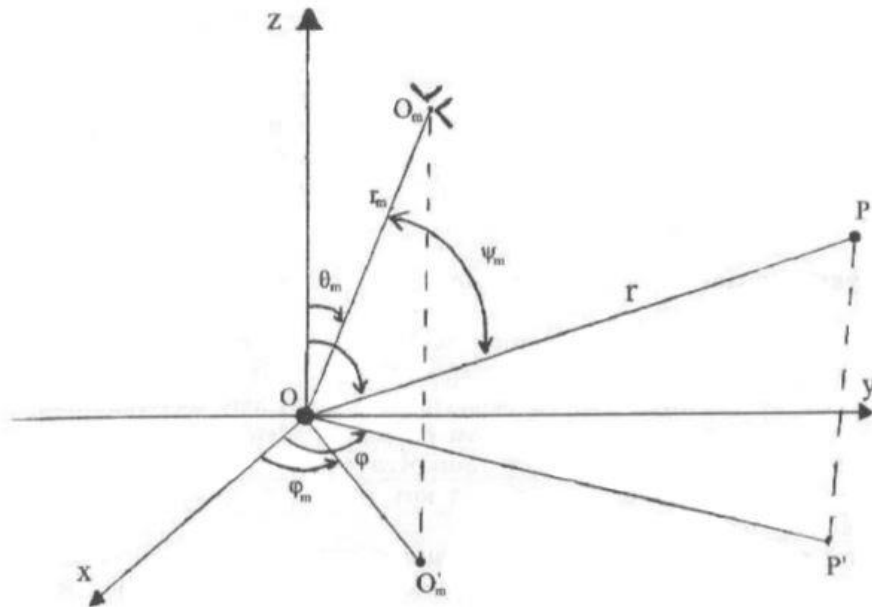
συνάρτηση που εκφράζει την επίδραση της στοιχειοκεραίας στην συνολική ένταση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας.

Με την βοήθεια της γεωμετρίας που φαίνεται στο Σχήμα 2.5, ο παράγοντας διάταξης προσδιορίζεται συναρτήσει των συντεταγμένων θέσης και των ρευμάτων διέγερσης κάθε στοιχείου της στοιχειοκεραίας ως:

$$S(\theta, \varphi) = \sum_{m=0}^{M-1} c_m \exp(jkr_m \cos \psi_m) \quad (2.16)$$

όπου

$$\cos \psi_m = \cos \theta_m \cos \theta + \sin \theta_m \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_m) \quad (2.17)$$



Σχήμα 2.5 Σύστημα συντεταγμένων για την ανάλυση στοιχειοκεραιών [29].

Από την εξίσωση (2.16) φαίνεται πως ο παράγοντας διάταξης της στοιχειοκεραίας και κατ' επέκταση η ένταση ακτινοβολίας της, εξαρτώνται από τη συχνότητα λειτουργίας της, από τη γεωμετρική διάταξή της, από το πλήθος των στοιχείων που την αποτελούν και από την ρευματική διέγερσή τους. Επίσης φαίνεται πως ο παράγοντας διάταξης δεν εξαρτάται από το είδος των ακτινοβολητών που την αποτελούν και συνήθως προσδιορίζεται αντικαθιστώντας για ευκολία τα στοιχεία ακτινοβολίας με ισοτροπικούς ακτινοβολητές τοποθετημένους στα κέντρα διέγερσής τους [29].

Πρέπει επίσης να τονιστεί ότι το μέτρο του παράγοντα διάταξης μιας στοιχειοκεραίας είναι μέγεθος που αφορά την μακρινή περιοχή και δεν μεταβάλλεται όταν

υπάρξει μετατόπιση του κέντρου συντεταγμένων. Αυτό σημαίνει ότι μια στοιχειοκεραία με συγκεκριμένη γεωμετρική διάταξη, συγκεκριμένο πλήθος στοιχείων και συγκεκριμένη ρευματική διέγερση αυτών έχει μοναδικό κατά μέτρο παράγοντα διάταξης, ως συνάρτηση της συχνότητας λειτουργίας ή του μήκους κύματος αυτής και ανεξάρτητο από την επιλογή του κέντρου συντεταγμένων. Η επιλογή του κέντρου συντεταγμένων είναι ελεύθερη και γίνεται με κριτήριο την ευκολία προσδιορισμού του παράγοντα διάταξης και την απλότητα της μαθηματικής του έκφρασης. Συνήθως επιλέγεται το γεωμετρικό κέντρο της στοιχειοκεραίας ή κάποιο χαρακτηριστικό σημείο της γεωμετρικής της διάταξης [29].

Το κατευθυντικό κέρδος μιας στοιχειοκεραίας δίνεται από την σχέση:

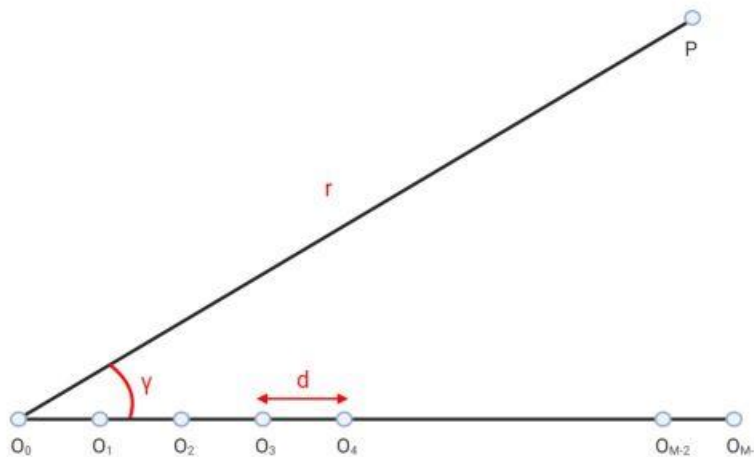
$$D_g = 4\pi \frac{U_0(\theta, \varphi) |S(\theta, \varphi)|}{\iint U_0(\theta, \varphi) |S(\theta, \varphi)| d\Omega} \quad (2.18)$$

Συγκεκριμένα για τις στοιχειοκεραίες ορίζεται το γεωμετρικό κατευθυντικό κέρδος ως:

$$D_s = 4\pi \frac{|S(\theta, \varphi)|}{\iint |S(\theta, \varphi)| d\Omega} \quad (2.19)$$

2.2.2 Γραμμικές Στοιχειοκεραίες

Οι χωρικά ομοιόμορφες στοιχειοκεραίες αποτελούν κατηγορία στοιχειοκεραιών με μεγάλο πρακτικό ενδιαφέρον. Πρόκειται για στοιχειοκεραίες των οποίων τα βασικά στοιχεία βρίσκονται πάνω σε μία ευθεία, η οποία ονομάζεται άξονας στοιχειοκεραίας. Μια τέτοια διάταξη μπορούμε να δούμε στο παρακάτω Σχήμα:



Σχήμα 2.6: Γεωμετρία χωρικά ομοιόμορφης γραμμικής στοιχειοκεραίας [29].

Με βάση τη γεωμετρία που φαίνεται στο Σχήμα 2.6, υπολογίζεται ο παράγοντας διάταξης της στοιχειοκεραίας και θεωρώντας ως κέντρο της στοιχειοκεραίας το σημείο O₀ του στοιχείου τάξης m = 0, προκύπτουν τα ακόλουθα:

$$r_m = md \quad (2.20)$$

και

$$\psi_m = \gamma \quad (2.21)$$

όπου

- i. $m = 0, 1, 2, \dots, M - 1$ η τάξη των στοιχείων της κεραίας,
- ii. d η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών στοιχείων η οποία ονομάζεται και βήμα της στοιχειοκεραίας και
- iii. γ η γωνία που σχηματίζει ο άξονας της στοιχειοκεραίας με την ευθεία OP. Η ευθεία OP ορίζεται από το κέντρο της στοιχειοκεραίας O_0 και το σημείο παρατήρησης $P(r, \theta, \varphi)$.

Με βάση τα παραπάνω ο παράγοντας διάταξης της γραμμικής στοιχειοκεραίας προκύπτει:

$$S(\gamma) = c_0 + c_1 e^{jkdcos\gamma} + c_2 e^{2jkdcos\gamma} + \dots + c_{M-1} e^{(M-1)jkdcos\gamma} \quad (2.22)$$

όπου c_i , $i = 0, 1, 2, \dots, M - 1$ οι μιγαδικοί ρευματικοί συντελεστές των στοιχείων της στοιχειοκεραίας.

Η εξάρτηση του παράγοντα διάταξης της στοιχειοκεραίας από τις συντεταγμένες διεύθυνσης (θ, φ) του σημείου παρατήρησης υποκρύπτεται στην εξάρτησή του από τη γωνία κλίσης γ [29], η οποία σχετίζεται με τις συντεταγμένες διεύθυνσης μέσω των εξισώσεων (2.17) και (2.21). Ανάλογα λοιπόν με το που είναι τοποθετημένος ο άξονας της στοιχειοκεραίας, υπάρχει και διαφορετική εξάρτηση του παράγοντα διάταξης από τις συντεταγμένες διεύθυνσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις ο άξονας της στοιχειοκεραίας ταυτίζεται με έναν από τους άξονες x, y οπότε η (2.17) διαμορφώνεται αντίστοιχα ως εξής:

$$\text{Ταύτιση με άξονα } x: \quad \cos\gamma = \sin\theta\cos\varphi \quad (2.23)$$

$$\text{Ταύτιση με άξονα } y: \quad \cos\gamma = \sin\theta\sin\varphi \quad (2.24)$$

Σε πολλές περιπτώσεις έχουμε σταθερή διαφορά φάσης μεταξύ των ρευμάτων τροφοδότησης δυο διαδοχικών στοιχείων, οπότε ο ρευματικός συντελεστής μπορεί να γραφτεί σε πολική μορφή ως:

$$c_m = a_m e^{jm\beta} \quad (2.25)$$

όπου a_m θετικοί πραγματικοί αριθμοί.

Ο συνολικός παράγοντας διάταξης μπορεί να γραφεί πλέον ως:

$$S(\gamma) = \sum_{m=0}^{M-1} A_m e^{jm(kd\cos\gamma=\beta)} \quad (2.26)$$

Για διευκόλυνση της ανάλυσης ορίζουμε την μεταβλητή ψ μέσω της σχέσης:

$$\psi = kd\cos\gamma + \beta \quad (2.27)$$

Σε μια γραμμική στοιχειοκεραία η βοηθητική μεταβλητή ψ ενσωματώνει τη διεύθυνση ακτινοβολίας, το ηλεκτρικό βήμα και τη διαφορά φάσης κατά την τροφοδότηση των στοιχείων της.

Έτσι με βάση τις εξισώσεις (2.26) και (2.27) ο παράγοντας διάταξης μιας γραμμικής στοιχειοκεραίας μπορεί να γραφτεί ως:

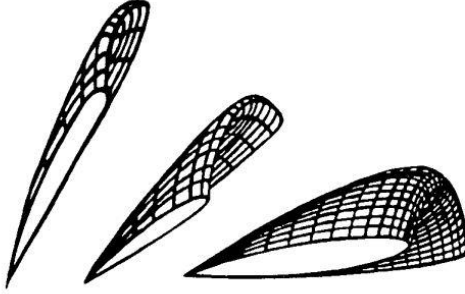
$$S(\gamma) = \sum_{m=0}^{M-1} A_m e^{jm\psi} \quad (2.28)$$

διευκολύνοντας σημαντικά την ανάλυσή του.

2.2.3 Γραμμικές Στοιχειοκεραίες με Στρεφόμενο Διάγραμμα Ακτινοβολίας

Με βάση την ανάλυση που έχει προηγηθεί γίνεται εμφανές ότι με την χρήση στοιχειοκεραιών μπορούμε να αυξήσουμε την κατευθυντικότητα σε ένα δεδομένο σύστημα κεραιών. Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα τους, το οποίο θα αναλυθεί στο παρόν υποκεφάλαιο, είναι η δυνατότητα που προσφέρουν, ως προς τον έλεγχο τόσο της διεύθυνσης της μέγιστης ακτινοβολίας (δηλ. την διεύθυνση του κύριου λοβού) όσο και του σχήματος της δέσμης. Ο έλεγχος αυτός γίνεται με κατάλληλη επεξεργασία των ρευμάτων τροφοδότησης του κάθε στοιχείου τόσο ως προς την φάση όσο και ως προς το πλάτος.

Έστω λοιπόν ότι επιθυμούμε να στρέψουμε την διεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας σε μία αυθαίρετη γωνία γ_0 η οποία αντιστοιχεί σε συντεταγμένες διεύθυνσης (θ_m, ϕ_m) και επιπλέον ας υποθέσουμε ότι όλοι οι ακτινοβολητές είναι ομοιοκατευθυντικοί, που σημαίνει ότι εκπέμπουν ομοιόμορφα σε κάθε σημείο του χώρου. Ο γεωμετρικός τόπος των σημείων παρατήρησης $P(r, \theta_m, \phi_m)$ στον χώρο που σχηματίζουν γωνία γ_0 με τον άξονα της στοιχειοκεραίας, είναι κώνος με κλίση γ_0 που εκτυλίσσεται γύρω από τον άξονα της στοιχειοκεραίας [31]. Στις περισσότερες περιπτώσεις πρακτικού ενδιαφέροντος, η στοιχειοκεραία βρίσκεται σε γειωμένη επιφάνεια, με αποτέλεσμα η περιοχή αυτή να είναι ημικώνος. Στο Σχήμα 2.7 γίνεται γραφική απεικόνιση των γεωμετρικών τόπων αυτών.



Σχήμα 2.7: Τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας γραμμικής στοιχειοκεραίας με ομοιοκατευθυντικούς ακτινοβολητές [31].

Οι στοιχειοκεραίες που ακτινοβολούν κάθετα στον άξονά τους ονομάζονται *μετωπικές στοιχειοκεραίες* και χαρακτηρίζονται από γωνία $\gamma_0 = 90^\circ$. Η εκπεμπόμενη ισχύς τους στον χώρο είναι πάλι ημικώνας με γωνία $\gamma_0 = 90^\circ$, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.7α. Αντίθετα οι στοιχειοκεραίες που ακτινοβολούν παράλληλα στον άξονά τους ονομάζονται *ακροφλεγείς στοιχειοκεραίες*. Αυτές χαρακτηρίζονται από γωνία $\gamma_0 = 0^\circ$ ή $\gamma_0 = 180^\circ$ και το διάγραμμα ακτινοβολίας τους απεικονίζεται στο Σχήμα 2.7γ.

Προκειμένου να στρίψουμε τον κύριο λοβό του διαγράμματος ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας, δηλαδή τη διεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας, κατά γωνία γ_0 θα πρέπει ο παράγοντας διάταξης να λαμβάνει την μέγιστη τιμή του για $\gamma = \gamma_0$. Δηλαδή:

$$S(\gamma_0) = \max_{\gamma} S(\gamma) \quad (2.29)$$

Αυτή η συνθήκη επιτυγχάνεται όταν η φάση του ρεύματος τροφοδότησης με το οποίο διεγείρεται το m -οστό στοιχείο της κεραίας είναι:

$$\beta = -kdc\cos\gamma_0 \Rightarrow \beta + kdc\cos\gamma_0 = 0 \quad (2.30)$$

Η παραπάνω σχέση αποτελεί την βασική συνθήκη για την στροφή του διαγράμματος ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας. Με βάση λοιπόν την (2.30), η (2.28) από την οποία υπολογίζεται ο παράγοντας διάταξης παίρνει την μορφή:

$$S(\gamma) = \sum_{m=0}^{M-1} A_m e^{jmkd(\cos\gamma - \cos\gamma_0)} \quad (2.31)$$

και για $\gamma = \gamma_0$ παίρνουμε την μέγιστη τιμή του παράγοντα διάταξης η οποία είναι:

$$S(\gamma_0) = \sum_{m=0}^{M-1} A_m \quad (2.32)$$

Στην αρχή του υποκεφαλαίου αναφέρθηκε ότι μπορούμε να επηρεάσουμε το διάγραμμα ακτινοβολίας με έλεγχο της φάσης και του πλάτους των ρευμάτων τροφοδότησης του κάθε στοιχείου της στοιχειοκεραίας. Είδαμε λοιπόν ότι ο έλεγχος της

φάσης των ρευμάτων τροφοδότησης, μας επιτρέπει να στρέφουμε την διεύθυνση του κύριου λοβού προς την επιθυμητή κατεύθυνση. Αντίστοιχα ο έλεγχος του πλάτους των ρευμάτων τροφοδότησης, μας επιτρέπει να επηρεάσουμε το σχήμα του κύριου λοβού, δηλαδή την κατευθυντικότητα της στοιχειοκεραίας και το πλάτος των πλευρικών λοβών.

Χρησιμοποιώντας τεχνικές διέγερσης με σκοπό την καταπίεση των πλευρικών λοβών έχουμε και ταυτόχρονη μείωση της κατευθυντικότητας. Τέτοιες τεχνικές είναι οι:

- i. Διωνυμική διέγερση [30]
- ii. Διέγερση Chebyshev [30]
- iii. Γκαουσιανή Διέγερση [32]

Αντίθετα χρησιμοποιώντας ομοιόμορφη διέγερση, κατά την οποία όλα τα ρεύματα που τροφοδοτούν τα στοιχεία της στοιχειοκεραίας έχουν το ίδιο πλάτος, αυξάνουμε την κατευθυντικότητα της κεραίας μειώνοντας το γωνιακό εύρος του κύριου λοβού, με τίμημα το αυξημένο σε σχέση με άλλες διεγέρσεις πλάτος των πλευρικών λοβών. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης μελέτης που αφορά την παρούσα πτυχιακή εργασία, χρησιμοποιήθηκε ομοιόμορφη διέγερση καθώς σκοπός ήταν η όσο το δυνατόν μεγαλύτερη κατευθυντικότητα της οπτικής στοιχειοκεραίας κεραίας.

Στο επόμενο Κεφάλαιο θα παρουσιαστεί η θεωρητική μοντελοποίηση αυτής της οπτικής στοιχειοκεραίας πάνω σε πολυμερική πλατφόρμα φωτονικής ολοκλήρωσης και θα μελετηθεί το προφίλ ακτινοβολίας της στο μακρινό πεδίο.

3

Μοντελοποίηση

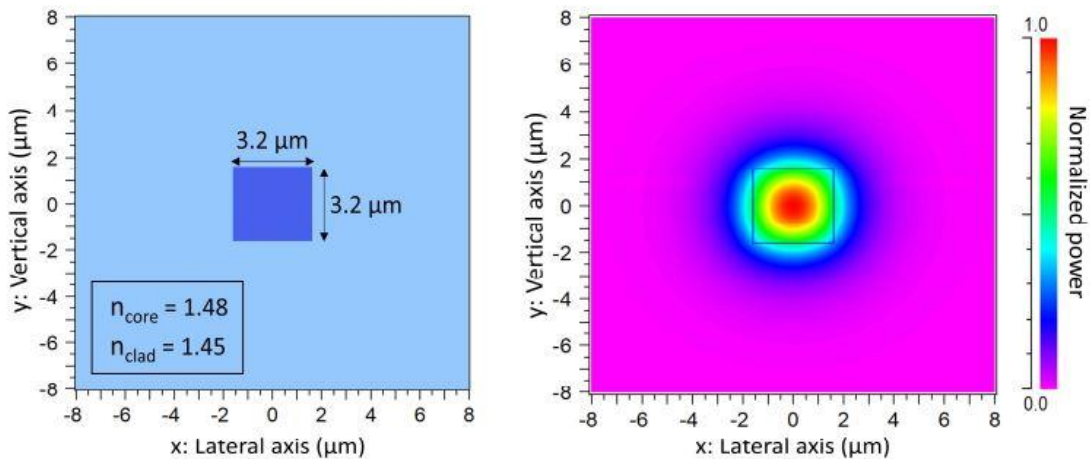
Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, η διπλωματική αυτή εργασία αποτελεί κομμάτι μιας ευρύτερης μελέτης όπου υλοποιήσαμε μια καινοτόμα ιδέα, κατά την οποία προτάθηκε η κατασκευή μιας δισδιάστατης οπτικής στοιχειοκεραίας (optical phased arrays – OPAs), της οποίας τα στοιχεία (antenna elements – AEs) θα είναι αξονικοί κυματοδηγοί (end-fire waveguides). Για την υλοποίηση της παραπάνω στοιχειοκεραίας χρησιμοποιήθηκε ένα τρισδιάστατο ολοκληρωμένο φωτονικό κύκλωμα (Photonic integrated circuit – PICs) με πολλαπλά επίπεδα κυματοδότησης, το οποίο είναι κατασκευασμένο πάνω στην πολυμερική πλατφόρμα PolyBoard, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1. Η διπλωματική ασχολείται μόνο με την θεωρητική μοντελοποίηση μιας τέτοιας στοιχειοκεραίας, η οποία θα παρουσιαστεί στο κεφάλαιο που ακολουθεί.

3.1 Μοντελοποίηση αξονικού κυματοδηγού στο RSoft

Για την υλοποίηση της μελέτης χρησιμοποιήσαμε αρχικά το RSoft Photonic Device Tools, το οποίο είναι ένα πρόγραμμα προσομοίωσης εξειδικευμένο στην φωτονική τεχνολογία. Το πρόγραμμα αυτό αποτελείται από διάφορα υποπρογράμματα. Το κύριο υποπρόγραμμα είναι το RSoft CAD Environment, που επιτρέπει την κατασκευή ενός οπτικού κυματοδηγού συγκεκριμένων χαρακτηριστικών όπως είναι το υλικό, ο δείκτης διάθλασης πυρήνα και μανδύα, οι διαστάσεις και η συχνότητα λειτουργίας. Επίσης υπάρχει το υποπρόγραμμα BeamPROP το οποίο είναι ένα εργαλείο σχεδίασης που βασίζεται στην μέθοδο διάδοσης κυμάτων, Beam Propagation Method (BPM). Με αυτό προσομοιώνεται η διάδοση του φωτός από την αρχή του κυματοδηγού μέχρι μία απόσταση που εξαρτάται από τον χρήστη. Βάζοντας σαν απόσταση το μήκος του κυματοδηγού τότε το πρόγραμμα προσομοιώνει την κυματοδότηση του φωτός μέσα σε αυτόν. Σαν αποτέλεσμα δίνονται τα εγκάρσια πεδία E_x , E_y , H_x και H_y στην τελευταία επιφάνεια του κυματοδηγού, ακριβώς πριν την εκπομπή του φωτός. Βάζοντας σαν απόσταση ένα μήκος μεγαλύτερο της ακτίνας R_2 (σύμφωνα με την εξίσωση (2.7)) τότε το πρόγραμμα προσομοιώνει την κυματοδότηση

του φωτός στο μακρινό πεδίο. Σαν αποτέλεσμα δίνονται τα εγκάρσια πεδία E_x , E_y , H_x και H_y στο μακρινό πεδίο.

Χρησιμοποιώντας λοιπόν το RSoft CAD Environment, σχεδιάστηκε ο αξονικός κυματοδηγός (end-fire waveguide), ο οποίος αποτελεί το βασικό στοιχείο (AEs) της οπτικής στοιχειοκεραίας (OPAs) που θα μελετήσουμε. Συγκεκριμένα όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.1α, ο κυματοδηγός είναι τετραγωνικός, διαστάσεων $(3.2 \times 3.2)\mu\text{m}$. Είναι κατασκευασμένος σε PolyBoard το οποίο είναι μια πλατφόρμα αποτελούμενη από οπτικά πολυμερή, και επιτρέπει την κυματοδότηση ενός μόνο ρυθμού (single mode optical fiber – SMF). Ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα είναι $n_{\text{core}} = 1.48$ και ο δείκτης διάθλασης του μανδύα είναι $n_{\text{clad}} = 1.45$. Το πλεονέκτημα από την χρήση της συγκεκριμένης πλατφόρμας είναι ότι στο μήκος κύματος 1550nm (ή σε συχνότητα λειτουργίας 193.5THz , που είναι και η συχνότητα στην οποία θα γίνει η κυματοδότηση), παρουσιάζει πολύ μικρές απώλειες διάδοσης, περίπου 0.7 dB/cm .



Σχήμα 3.1: Τετραγωνική διατομή και ένταση ακτινοβολίας του αξονικού κυματοδηγού στα 1550nm [1].

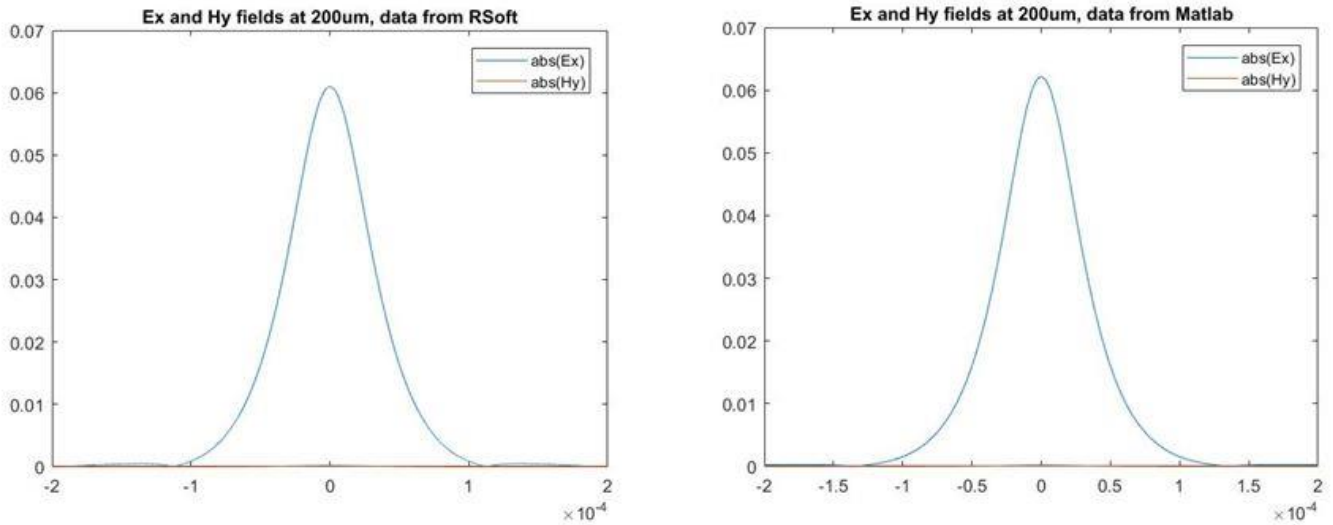
Λόγω της συμμετρίας της διατομής, ο ρυθμός κυματοδότησης (η μετρούμενη ένταση του πεδίου σε επίπεδο κάθετο στην κατεύθυνση διάδοσης του κύματος) είναι υβριδικός, δηλαδή αποτελείται τόσο από την εγκάρσια ηλεκτρική - TE (Transverse Electric), όσο και από την εγκάρσια μαγνητική - TM (Transverse Magnetic) συνιστώσα. Παρόλα αυτά το ποιος από τους 2 ρυθμούς θα επικρατήσει εξαρτάται από την ηλεκτρική διέγερση του κυματοδηγού.

Μετά την σχεδίαση του κυματοδηγού και χρησιμοποιώντας το υποπρόγραμμα BeamPROP, προσομοιώσαμε την διάδοση του φωτός για τις δύο περιπτώσεις που ακολουθούν:

- i. Στην πρώτη περίπτωση προσομοιώθηκε η διάδοση του φωτός μέσα στον κυματοδηγό. Όπως ειπώθηκε και πιο πάνω, αυτό μας έδωσε τα εγκάρσια πεδία E_x , E_y , H_x και H_y στην τελευταία επιφάνεια του κυματοδηγού. Από αυτά κρατήσαμε τα πεδία E_x και H_y τα οποία όπως θα δούμε παρακάτω τα

χρησιμοποιήσαμε στο περιβάλλον του Matlab για την εύρεση του προφίλ ακτινοβολίας του κυματοδηγού στο μακρινό πεδίο μέσω της αρχής της ισοδυναμίας πεδίου (Field Equivalence Principle [30]).

- ii. Στην δεύτερη περίπτωση προσομοιώθηκε η διάδοση του φωτός κατευθείαν στο μακρινό πεδίο. Πάλι το πρόγραμμα μας έδωσε τα εγκάρσια πεδία E_x , E_y , H_x και H_y στο μακρινό πεδίο, μέσω της μεθόδου διάδοσης κυμάτων, Beam Propagation Method (BPM). Τα δεδομένα αυτά τα χρησιμοποιήσαμε προκειμένου να συγκρίνουμε το προφίλ ακτινοβολίας του αξονικού κυματοδηγού που υπολογίσαμε στο περιβάλλον του Matlab, με αυτό που μας έδωσε κατευθείαν το RSoft. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2, τα δύο διαγράμματα είναι ακριβώς ίδια, γεγονός που επιβεβαιώνει την ορθότητα της εύρεσης του προφίλ ακτινοβολίας μέσω της αρχής της ισοδυναμίας πεδίου (Field Equivalence Principle [30]).



Σχήμα 3.2: Σύγκριση εγκάρσιων πεδίων κατά την διάδοση του φωτός στο μακρινό πεδίο.

Σημειώνεται ότι τα διαγράμματα έχουν υπολογιστεί σε απόσταση $200\mu\text{m}$ από τον κυματοδηγό. Με βάση την εξίσωση (2.7) προκύπτει ότι $R_2 \approx 14\mu\text{m}$ (δεδομένου ότι $D = 3.2\mu\text{m}$ και $\lambda = 1550\text{nm}$), άρα στα $200\mu\text{m}$ βρισκόμαστε πράγματι στο μακρινό πεδίο.

Στο σημείο αυτό αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι παρότι το RSoft μας δίνει το προφίλ ακτινοβολίας του αξονικού κυματοδηγού στο μακρινό πεδίο, η μοντελοποίησή του στο Matlab και η εύρεσή του μέσω του Field Equivalence Principle είναι προτιμητέα για λόγους ευελιξίας και κέρδους χρόνου. Αναλυτικότερα, στο RSoft οι προσομοιώσεις είναι αρκετά χρονοβόρες (συνήθως αρκετές ώρες) σε σχέση με το Matlab που ο χρόνος της προσομοίωσης μειώνεται σημαντικά (συνήθως μερικά λεπτά). Επιπλέον στο RSoft προκειμένου να μοντελοποιηθούν οι διάφορες περιπτώσεις (θα αναλυθούν στο Κεφάλαιο 4) της οπτικής στοιχειοκεραίας θα έπρεπε να σχεδιάζεται από την αρχή διάταξη της, κάτι το οποίο είναι χρονοβόρο, κουραστικό και χωρίς αντικειμενική αξία, ενώ στο Matlab αρκεί η τροποποίηση της τιμής ορισμένων μεταβλητών.

3.2 Μοντελοποίηση της οπτικής στοιχειοκεραίας στο Matlab

Μετά την μοντελοποίηση του αξονικού κυματοδηγού (end-fire waveguide), ο οποίος αποτελεί το βασικό στοιχείο (AEs) της οπτικής στοιχειοκεραίας (OPAs) και την εύρεση των εγκάρσιων πεδίων E_x και H_y στην τελευταία επιφάνεια του κυματοδηγού που προέρχονται από την κυματοδότηση του φωτός σε αυτόν, έπρεπε να υπολογιστούν τα διαγράμματα ακτινοβολίας στο μακρινό πεδίο τόσο του αξονικού κυματοδηγού, όσο και της συνολικής οπτικής στοιχειοκεραίας. Ο υπολογισμός αυτών των προφίλ ακτινοβολίας έγινε στο περιβάλλον του Matlab.

3.2.1 Μακρινό πεδίο αξονικού κυματοδηγού (end-fire waveguide), τοποθετημένου σε

PolyBoard PICs

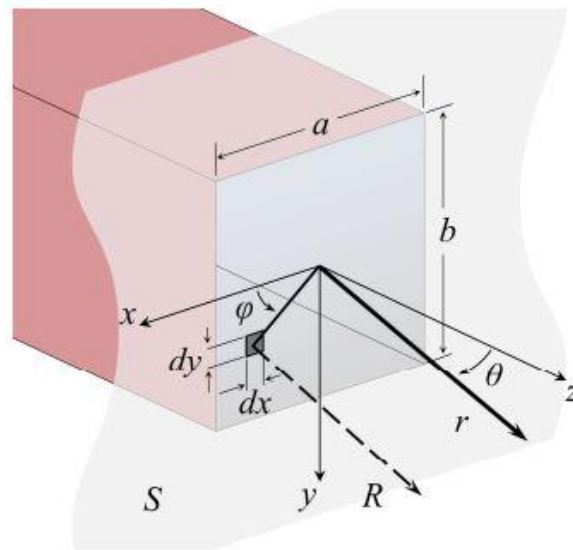
Όπως αναφέρθηκε στην αρχή του κεφαλαίου, ένας αξονικός κυματοδηγός (end-fire waveguide) αποτελείται από ένα τρισδιάστατο ολοκληρωμένο φωτονικό κύκλωμα (Photonic integrated circuit – PICs) με πολλαπλά επίπεδα κυματοδότησης, το οποίο είναι κατασκευασμένο πάνω σε μία πλατφόρμα PolyBoard. Στην πραγματικότητα η διάταξη αυτή μπορεί με ασφάλεια να θεωρηθεί ως μία ορθογωνική κεραία ανοίγματος ή διαφράγματος (aperture antenna). Επομένως μπορούμε να υπολογίσουμε την ακτινοβολία που εκπέμπεται από την τελευταία επιφάνεια του κυματοδηγού στο μακρινό πεδίο, χρησιμοποιώντας την αρχή της ισοδυναμίας πεδίου (Field Equivalence Principle [30]) που είναι γνωστή και ως αρχή του Huygens' (Huygens' Principle).

Η αρχή του Huygens' αναφέρει πως κάθε σημείο ενός μετώπου κύματος, μπορεί να θεωρηθεί σαν μια δευτερεύουσα πηγή σφαιρικού κύματος και πως η θέση του νέου μετώπου κύματος θα είναι η κοινή περιβάλλουσα όλων αυτών των σφαιρικών κυμάτων [30]. Σύμφωνα με αυτή, η διαδικασία υπολογισμού της ακτινοβολίας μιας κεραίας ανοίγματος (aperture antenna) στο μακρινό πεδίο αποτελείται από τέσσερα βήματα:

- i. Στο πρώτο βήμα επιλέγεται μία φανταστική επιφάνεια που περικλείει της πραγματικές πηγές ακτινοβολίας. Η επιλογή της φανταστικής αυτής επιφάνειας πρέπει να είναι τέτοια ώστε στο εσωτερικό της να είναι γνωστές με ακρίβεια ή έστω κατά προσέγγιση, οι εφαπτομενικές συνιστώσες του ηλεκτρικού και/ή του μαγνητικού πεδίου. Στις περισσότερες περιπτώσεις επιλέγεται μια επίπεδη επιφάνεια, η οποία εκτείνεται μέχρι το άπειρο.
- ii. Στο δεύτερο βήμα οι πραγματικές πηγές ακτινοβολίας αντικαθίσταται από ισοδύναμες - εικονικές πηγές, οι οποίες βρίσκονται εντός της επιλεγμένης επιφάνειας του πρώτου βήματος και εκπέμπουν την ίδια ακτινοβολία όπως οι πραγματικές, εντός της περιοχής ενδιαφέροντος. Η περιοχή ενδιαφέροντος είναι στην πραγματικότητα ο όγκος εκτός της επιλεγμένης κλειστής επιφάνειας του πρώτου βήματος.

- iii. Στο τρίτο βήμα υπολογίζονται οι ισοδύναμες πηγές ακτινοβολίας, χρησιμοποιώντας τις οριακές συνθήκες της φανταστικής επιφάνειας. Για να γίνει αυτός ο υπολογισμός πρέπει να γνωρίζουμε την πραγματική τιμή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου (εξ ου και η επιλογή στο πρώτο βήμα) στην επιφάνεια και επιπλέον να υποθέσουμε ότι το αντίστοιχο πεδίο στον όγκο που περικλείεται από την επιφάνεια είναι μηδενικό.
- iv. Στο τέταρτο και τελευταίο βήμα, οι ισοδύναμες πηγές που έχουν υπολογιστεί στο τρίτο βήμα, χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του διανυσματικού δυναμικού και του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στον όγκο εκτός της επιλεγμένης - φανταστικής επιφάνειας.

Προκειμένου λοιπόν να υπολογίσουμε για το μακρινό πεδίο, το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που εκπέμπεται από τον αξονικό κυματοδηγό (end-fire waveguide) που έχουμε σχεδιάσει, θα πρέπει να εφαρμόσουμε τα παραπάνω τέσσερα βήματα. Η γεωμετρία του αξονικού κυματοδηγού (end-fire waveguide) φαίνεται στο σχήμα 3.3. Είναι λοιπόν βολικό να θεωρήσουμε το επίπεδο στο τελευταίο άκρο του κυματοδηγού ως μία φανταστική επιφάνεια που εκτείνεται μέχρι το άπειρο και περικλείει την πηγή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται από το άκρο του. Η επιλογή αυτής της φανταστικής επιφάνειας έγινε διότι σε αυτήν γνωρίζουμε (παράγραφος 3.1, σελίδα 30,i) τις εφαπτομενικές συνιστώσες του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου. Έτσι μπορούμε αρχικά να προσδιορίσουμε το πραγματικό πεδίο στην φανταστική επιλεγθείσα επιφάνεια και τελικά να υπολογίσουμε την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία του κυματοδηγού στο μακρινό πεδίο.



Σχήμα 3.3: Γεωμετρία και σύστημα συντεταγμένων του αξονικού κυματοδηγού (end-fire waveguide) προκειμένου να μοντελοποιηθεί σαν μια κεραία ανοίγματος (aperture antenna) για να χρησιμοποιηθεί η αρχή της ισοδυναμίας πεδίου (Field Equivalence Principle). Επιπλέον φαίνεται η επιλεγθείσα φανταστική επιφάνεια S [1].

Αφού λοιπόν επιλέξαμε κατάλληλα την φανταστική επιφάνεια S που φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, αντικαθιστούμε τις πραγματικές πηγές ακτινοβολίας με ισοδύναμες πηγές που έχουν πυκνότητα ηλεκτρικής ροής \mathbf{J}_s και πυκνότητα μαγνητικής ροής \mathbf{M}_s . Οι ισοδύναμες πηγές ακτινοβολίας βρίσκονται επάνω στη επιφάνεια S και εκπέμπουν στην περιοχή εκτός της επιφάνειας (περιοχή ενδιαφέροντος), την ίδια ακτινοβολία, έστω \mathbf{E}_o και \mathbf{H}_o , με αυτή που εξέπεμπαν οι πραγματικές πηγές. Τα αντίστοιχα πεδία που βρίσκονται εντός της περιοχής που περικλείεται από την επιφάνεια S , μπορούν να πάρουν οποιαδήποτε τιμή. Επομένως είναι βολικό όπως περιγράφεται και στο τρίτο βήμα να υποθέσουμε ότι οι τιμές των πεδίων αυτών είναι μηδενικές (Lore's Equivalence Principle [30]). Με βάση λοιπόν τον ισχυρισμό αυτό οι οριακές συνθήκες στην επιφάνεια S μπορούν να γραφούν ως:

$$\mathbf{J}_s = \hat{n} \times \mathbf{H}_o = \hat{z} \times (\hat{x}H_{ox} + \hat{y}H_{oy}) = \hat{y}H_{ox} - \hat{x}H_{oy} \quad (3.1)$$

$$\mathbf{M}_s = -\hat{n} \times \mathbf{E}_o = -\hat{z} \times (\hat{x}E_{ox} + \hat{y}E_{oy}) = -\hat{y}E_{ox} + \hat{x}E_{oy} \quad (3.2)$$

Όπου \hat{n} είναι το μοναδιαίο διάνυσμα της επιφάνειας S . Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι το μέσο στην εξωτερική πλευρά της επιφάνειας S είναι ο αέρας και όχι το διηλεκτρικό υλικό από το οποίο αποτελείται ο κυματοδηγός. Επομένως τα πεδία E_{ox}, E_{oy}, H_{ox} και H_{oy} ουσιαστικά αντιστοιχούν στα εγκάρσια πεδία E_x, E_y, H_x και H_y που έχουμε πάρει από την προσομοίωση στο RSoft.

Λόγω της συμμετρίας της διατομής, ο ρυθμός κυματοδότησης είναι υβριδικός. Αποτελείται τόσο από την εγκάρσια ηλεκτρική - TE (Transverse Electric) συνιστώσα, δηλαδή τα πεδία E_x και H_y , όσο και από την εγκάρσια μαγνητική - TM (Transverse Magnetic) συνιστώσα, δηλαδή τα πεδία E_y και H_x . Το ποιος από τους 2 ρυθμούς θα επικρατήσει εξαρτάται από την ηλεκτρική διέγερση του κυματοδηγού. Επομένως οι εξισώσεις (3.1) και (3.2) γράφονται ως:

$$J_s^{TE} = -\hat{x}H_{oy} \quad (3.3)$$

$$J_s^{TM} = +\hat{y}H_{ox} \quad (3.4)$$

$$M_s^{TE} = -\hat{y}E_{ox} \quad (3.5)$$

$$M_s^{TM} = +\hat{x}E_{oy} \quad (3.6)$$

Ανάλογα με την πόλωση που θα επιλέξουμε, μέσω της ηλεκτρικής διέγερσης, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις εξισώσεις από (3.3) έως (3.6) που αντιστοιχούν στην επιλεγθείσα πόλωση και να υπολογίσουμε τις πυκνότητες ροής \mathbf{J}_s και \mathbf{M}_s των ισοδύναμων πηγών ακτινοβολίας. Στη συνέχεια υπολογίζονται με χρήση αυτών, οι φασιθέτες \mathbf{N} και \mathbf{L} των διανυσματικών δυναμικών του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου αντίστοιχα, σε σφαιρικές συντεταγμένες, μέσω των εξισώσεων:

$$N_{\theta}(\theta, \varphi) = \iint_S [J_x \cos\theta \cos\varphi + J_y \cos\theta \sin\varphi] e^{ikr' \cos\psi} ds' \quad (3.7)$$

$$N_{\varphi}(\theta, \varphi) = \iint_S [-J_x \sin\varphi + J_y \cos\varphi] e^{ikr' \cos\psi} ds' \quad (3.8)$$

$$L_{\theta}(\theta, \varphi) = \iint_S [M_x \cos\theta \cos\varphi + M_y \cos\theta \sin\varphi] e^{ikr' \cos\psi} ds' \quad (3.9)$$

$$L_{\varphi}(\theta, \varphi) = \iint_S [-M_x \sin\varphi + M_y \cos\varphi] e^{ikr' \cos\psi} ds' \quad (3.10)$$

όπου θ και φ είναι οι σφαιρικές συντεταγμένες του σημείου παρατήρησης, το οποίο έχει μοναδιαίο διάνυσμα το r , k είναι ο κυματάριθμος (wavenumber in free space, $k = 2\pi/\lambda$), ds' είναι το διαφορικό της επιφάνειας S στην οποία γίνεται η ολοκλήρωση, r' είναι το μοναδιαίο διάνυσμα που αντιστοιχεί στην περιοχή ολοκλήρωσης και ψ είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ r' και r .

Λόγω της γεωμετρίας που φαίνεται στο Σχήμα 3.3 (βρισκόμαστε στο επίπεδο x,y), οι παράγοντες $r' \cos\psi$ και ds' οι οποίοι εμπεριέχονται στις εξισώσεις (3.7) έως (3.10) παίρνουν την μορφή:

$$r' \cos\psi = x' \sin\theta \cos\varphi + y' \sin\theta \sin\varphi \quad (3.11)$$

$$ds' = dx' dy' \quad (3.12)$$

Τέλος χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (3.7) έως (3.10) και αντικαθιστώντας σε αυτές τις εξισώσεις (3.11) και (3.12) μπορούμε να υπολογίσουμε το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο (στο μακρινό πεδίο) που ακτινοβολείται από τον αξονικό κυματοδηγό μέσω των εξισώσεων:

$$E_r(\theta, \varphi) \approx 0 \quad (3.13)$$

$$E_{\theta}(\theta, \varphi) \approx -\frac{ike^{-ikr}}{4\pi r} [L_{\varphi}(\theta, \varphi) + \eta N_{\theta}(\theta, \varphi)] \quad (3.14)$$

$$E_{\varphi}(\theta, \varphi) \approx +\frac{ike^{-ikr}}{4\pi r} [L_{\theta}(\theta, \varphi) + \eta N_{\varphi}(\theta, \varphi)] \quad (3.15)$$

$$H_r(\theta, \varphi) \approx 0 \quad (3.16)$$

$$H_{\theta}(\theta, \varphi) \approx + \frac{ike^{-ikr}}{4\pi r} \left[N_{\varphi}(\theta, \varphi) - \frac{L_{\theta}(\theta, \varphi)}{\eta} \right] \quad (3.17)$$

$$H_{\varphi}(\theta, \varphi) \approx - \frac{ike^{-ikr}}{4\pi r} \left[N_{\theta}(\theta, \varphi) - \frac{L_{\varphi}(\theta, \varphi)}{\eta} \right] \quad (3.18)$$

όπου η είναι η κυματική αντίσταση του μέσου διάδοσης (για το κενό: $\eta = 120\pi$). Όπως είναι αναμενόμενο από τις παραπάνω εξισώσεις επιβεβαιώνεται πως $E_{\theta}(\theta, \varphi) = \eta H_{\varphi}(\theta, \varphi)$ και $E_{\varphi}(\theta, \varphi) = -\eta H_{\theta}(\theta, \varphi)$.

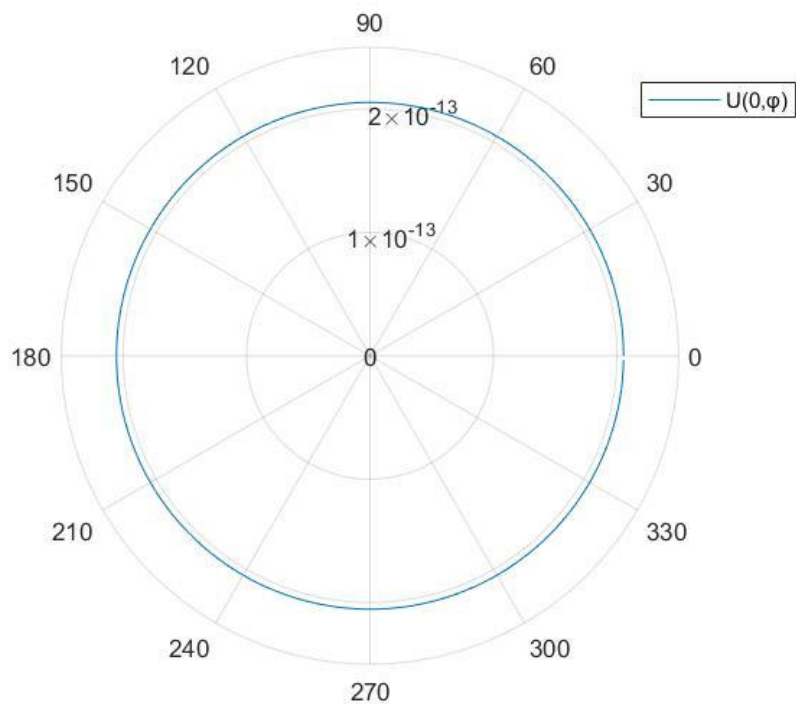
Υπολογίσαμε επομένως το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο (στην μακρινή περιοχή), που ακτινοβολείται από τον αξονικό κυματοδηγό (end-fire waveguide) θεωρώντας τον ως μια ορθογωνική κεραία ανοίγματος (aperture antenna). Στη συνέχεια μέσω των εξισώσεων (2.2) και (2.3) μπορούμε να υπολογίσουμε το διάνυσμα Poynting και την ένταση της ακτινοβολίας ως:

$$P_{rad}(r, \theta, \varphi) = \frac{1}{2} \text{Re}[E_{\theta}H_{\varphi}^* - E_{\varphi}H_{\theta}^*] \hat{r} \quad (3.19)$$

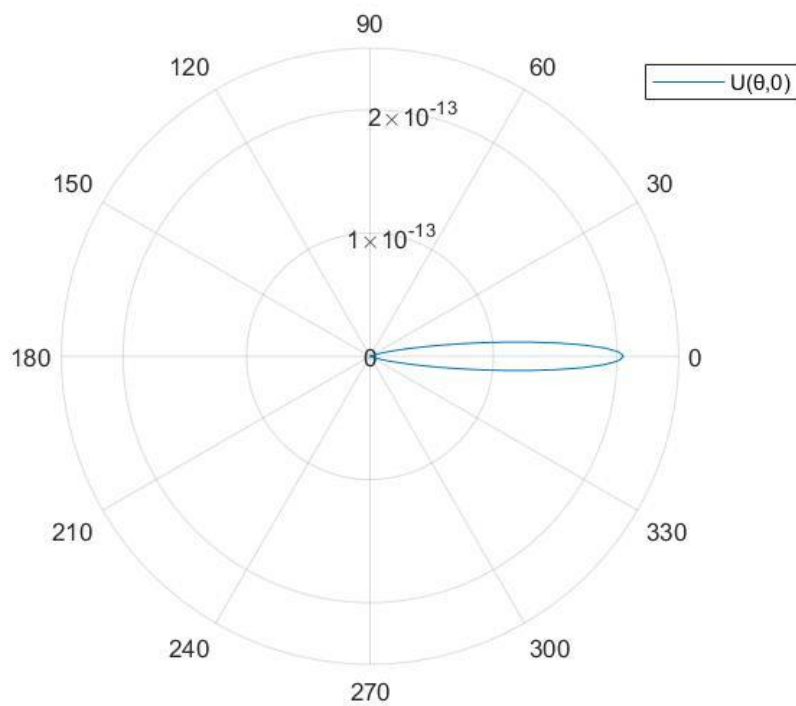
$$U_o(r, \theta, \varphi) = r^2 P_{rad}(r, \theta, \varphi) \quad (3.20)$$

Η ένταση ακτινοβολίας που υπολογίσαμε αποτελεί ίσως το πιο σημαντικό μέγεθος, μιας και μέσω αυτού μπορούμε να καταλάβουμε διαισθητικά τον τρόπο με τον οποίο ακτινοβολεί η κεραία, ο οποίος φαίνεται στα διαγράμματα ακτινοβολίας. Επιπλέον μέσω της έντασης ακτινοβολίας μπορούμε να υπολογίσουμε τις παραμέτρους που χαρακτηρίζουν μία κεραία οι οποίες είναι το γωνιακό εύρος Δ_0 (First Null Beamwidth – FNBW), το εύρος ημίσειας ισχύος Δ_{3dB} (Half Power Beamwidth – HPBW ή Full Width Half Maximum - FWHM) και η κατευθυντικότητα.

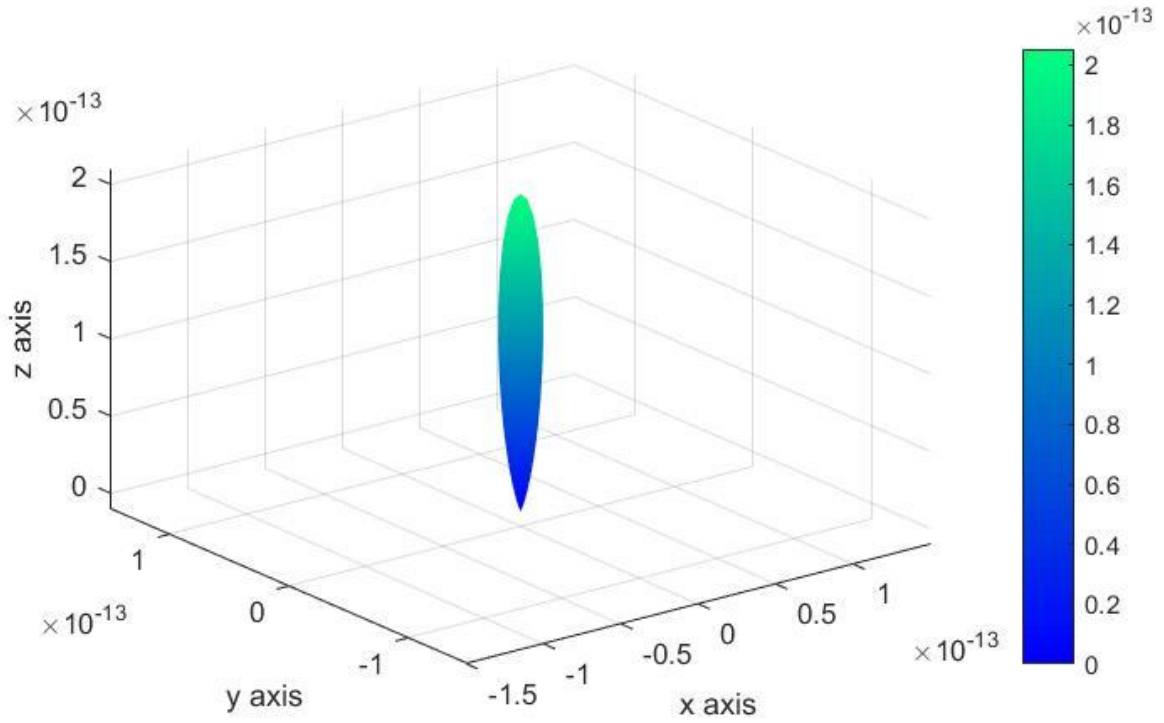
Εφαρμόζοντας λοιπόν όλα τα παραπάνω στο Matlab προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα ακτινοβολίας που περιγράφουν τον τρόπο με τον οποίο ακτινοβολεί ο αξονικός κυματοδηγός (end-fire waveguide) στο μακρινό πεδίο.



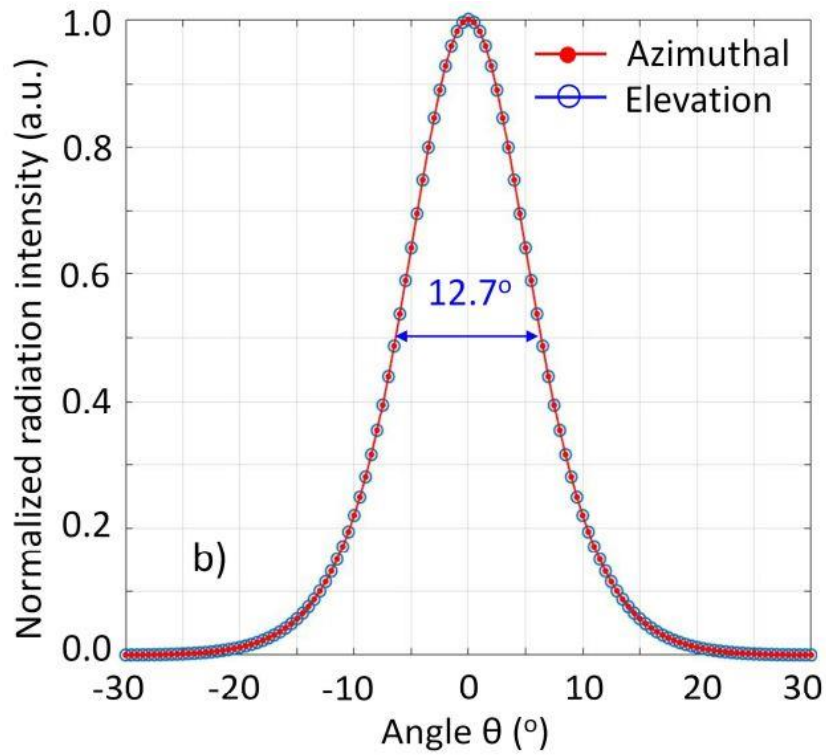
Σχήμα 3.4: Πολικό διάγραμμα ακτινοβολίας της έντασης του αξονικού κυματοδηγού για σταθερή γωνία ανόψωσης ($\theta = 0^\circ$).



Σχήμα 3.5: Πολικό διάγραμμα ακτινοβολίας της έντασης του αξονικού κυματοδηγού για σταθερή γωνία αξιμούθιου ($\varphi = 0^\circ$).



Σχήμα 3.6: Τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας της έντασης του αξονικού κυματοδηγού.



Σχήμα 3.7: Κανονικοποιημένο διδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας της έντασης του αξονικού κυματοδηγού. Το διάγραμμα είναι σχεδιασμένο με κόκκινο για το αζιμουθιακό επίπεδο και με μπλε για το επίπεδο ανύψωσης [1].

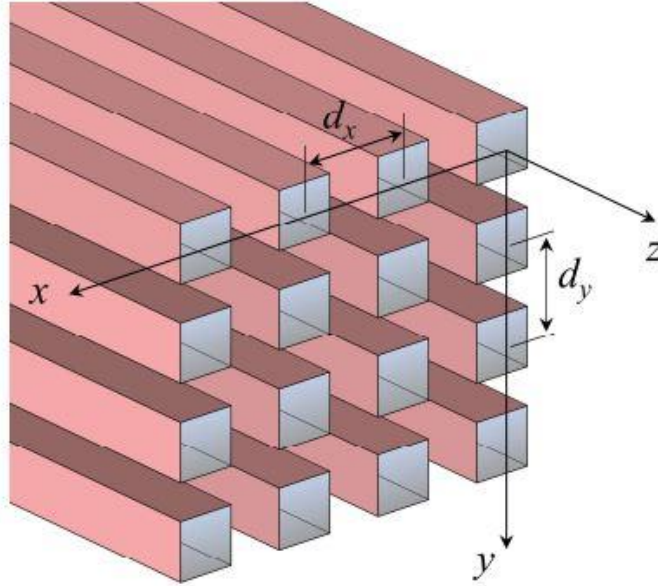
Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, λόγω της συμμετρίας της διατομής του αξονικού κυματοδηγού, που φαίνεται στο Σχήμα 3.3, ο ρυθμός κυματοδότησης είναι υβριδικός. Αποτελείται τόσο από την εγκάρσια ηλεκτρική - TE (Transverse Electric) συνιστώσα, δηλαδή τα πεδία E_x και H_y , όσο και από την εγκάρσια μαγνητική - TM (Transverse Magnetic) συνιστώσα, δηλαδή τα πεδία E_y και H_x . Επίσης το ποιος από τους 2 ρυθμούς θα επικρατήσει εξαρτάται από την ηλεκτρική διέγερση του κυματοδηγού. Στην εργασία αυτή επιλέξαμε να δουλέψουμε με την εγκάρσια ηλεκτρική - TE (Transverse Electric) συνιστώσα. Παρόλα αυτά τα διαγράμματα ακτινοβολίας που προκύπτουν και στις δύο περιπτώσεις είναι πανομοιότυπα.

Όπως φαίνεται στα Σχήματα (Σχήμα 3.5 έως Σχήμα 3.7) υπάρχει ένας κύριος λοβός ο οποίος εμφανίζει μέγιστο για γωνία ανύψωσης $\theta = 0^\circ$ και είναι συμμετρικός ως προς τον άξονα z. Από το Σχήμα 3.4 συμπεραίνουμε επίσης ότι υπάρχει ανεξαρτησία από την γωνία αζιμουθίου φ . Το εύρος ημίσειας ισχύος Δ_{3dB} (Half Power Beamwidth – HPBW ή Full Width Half Maximum - FWHM) είναι 12.7° .

Στο Σχήμα 3.7 η κόκκινες τελείες αντιστοιχούν στο αζιμουθιακό επίπεδο και μας δείχνουν την ένταση ακτινοβολίας ως προς την γωνία θ για $\varphi = 0^\circ$ (θετικός ημιάξονας θ) και $\varphi = 180^\circ$ (αρνητικός ημιάξονας θ). Οι μπλε τελείες αντιστοιχούν στο επίπεδο ανύψωσης και μας δείχνουν την ένταση ακτινοβολίας ως προς την γωνία θ για $\varphi = 90^\circ$ (θετικός ημιάξονας θ) και $\varphi = 270^\circ$ (αρνητικός ημιάξονας θ).

3.2.2 Μακρινό πεδίο μονοδιάστατης οπτικής στοιχειοκεραίας (1D optical phased arrays – OPAs), τοποθετημένης σε PolyBoard PICs

Στο υποκεφάλαιο αυτό θα υπολογίσουμε την ένταση ακτινοβολίας της μονοδιάστατης οπτικής στοιχειοκεραίας (optical phased arrays – OPAs) στο μακρινό πεδίο. Όπως είδη έχει αναφερθεί η οπτική στοιχειοκεραία (optical phased arrays – OPAs) έχει ως στοιχεία της (antenna elements – AEs) τους αξονικούς κυματοδηγούς (end-fire waveguides) που μελετήσαμε στην υποπαράγραφο 3.2.1. Στο σχήμα που ακολουθεί βλέπουμε την γεωμετρία μιας τέτοιας οπτικής στοιχειοκεραίας.



Σχήμα 3.8: Γεωμετρία και σύστημα συντεταγμένων της οπτικής στοιχειοκεραίας (optical phased arrays – OPAs). Τα στοιχεία της είναι οι αξονικοί κυματοδηγοί (end-fire waveguide) που μελετήθηκαν στην προηγούμενη υποπαράγραφο [1].

Όταν έχουμε μόνο ένα επίπεδο κυματοδότησης (έστω στον άξονα x) τότε η παραπάνω διάταξη αποτελεί μία γραμμική στοιχειοκεραία. Με βάση την ανάλυση που έγινε στην παράγραφο 2.2 η ένταση ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$U(r, \theta, \varphi) = U_0(r, \theta, \varphi) \times [S(\theta, \varphi)]^2 \quad (3.21)$$

όπου ο παράγοντας διάταξης $S(\theta, \varphi)$ της στοιχειοκεραίας υπολογίζεται από την σχέση:

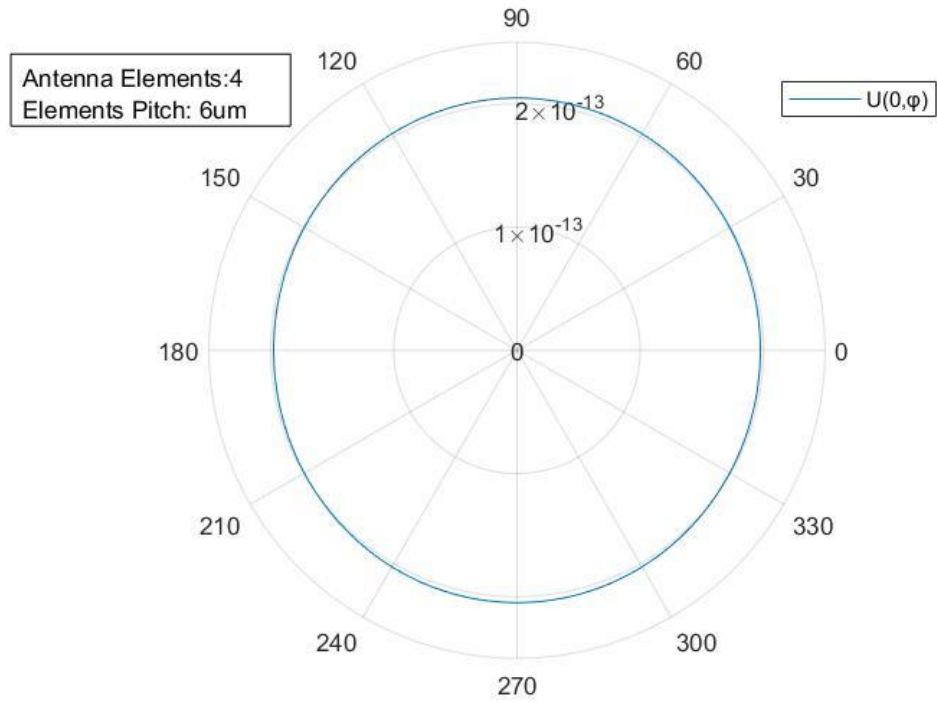
$$S(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N e^{i(n-1)(kd_x \sin\theta \cos\varphi + \beta_x)} \quad (3.22)$$

Στην παραπάνω σχέση N είναι ο αριθμός των στοιχείων της στοιχειοκεραίας, d_x είναι το βήμα της γραμμικής στοιχειοκεραίας και k είναι ο κυματάρριθμος (wavenumber in free space, $k = 2\pi/\lambda$).

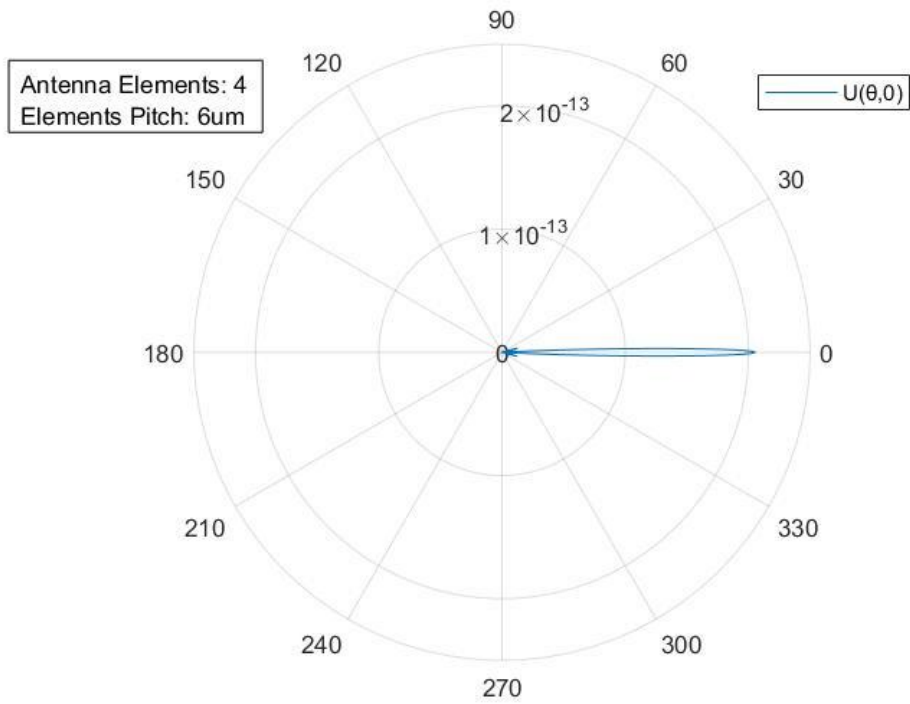
Η στοιχειοκεραία που σχεδιάστηκε είναι ομοιόμορφη. Αυτό σημαίνει ότι:

- i. τα στοιχεία της έχουν σταθερό βήμα, δηλαδή η απόσταση μεταξύ δυο διαδοχικών στοιχείων παραμένει σταθερή.
- ii. Το πλάτος του ρεύματος διέγερσης είναι ίδιο για όλα τα στοιχεία.
- iii. Η φάση του ρεύματος διέγερσης β κάθε στοιχείου παραμένει σταθερή.

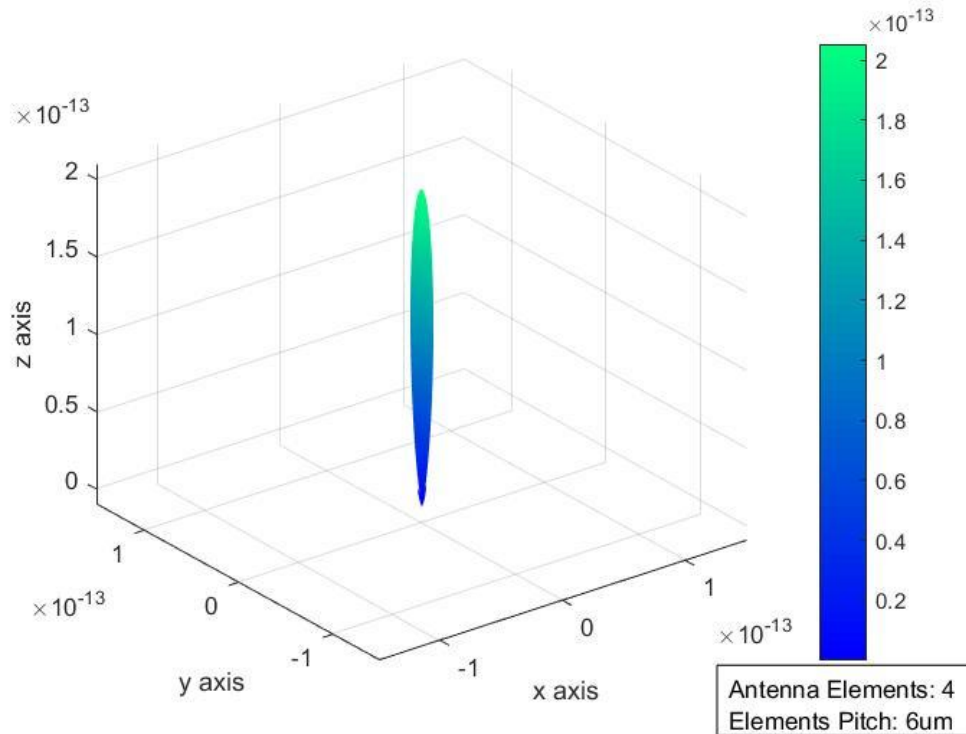
Εφαρμόζοντας λοιπόν όλα τα παραπάνω στο Matlab προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα ακτινοβολίας που περιγράφουν τον τρόπο με τον οποίο ακτινοβολεί η γραμμική στοιχειοκεραία (1D optical phased arrays – OPAs).



Σχήμα 3.9: Πολικό διάγραμμα ακτινοβολίας της έντασης της στοιχειοκεραίας, αποτελούμενης από 4 στοιχεία με απόσταση 6μm, για σταθερή γωνία ανύψωσης ($\theta = 0^\circ$).

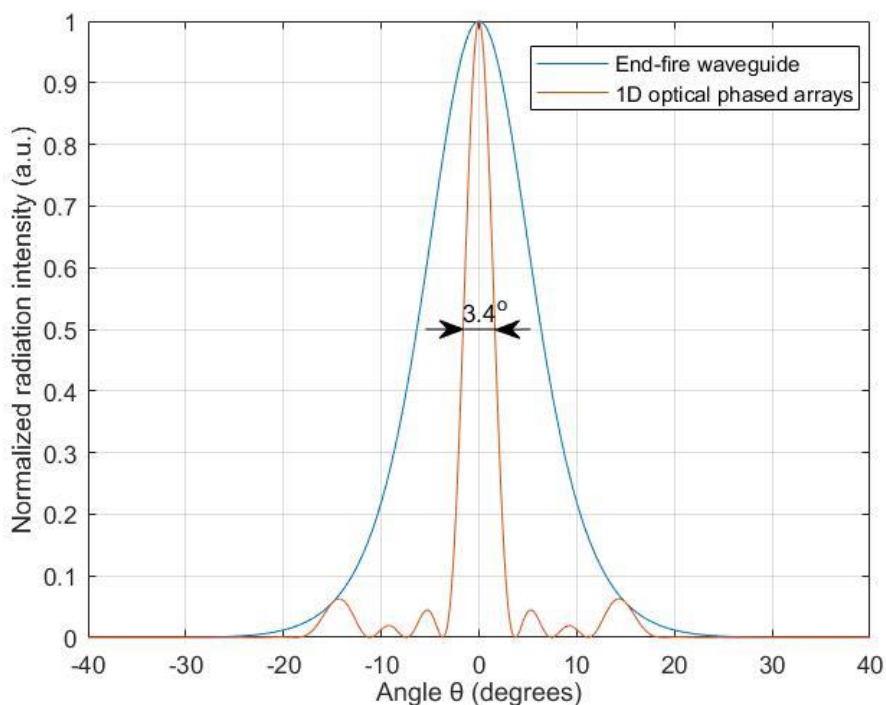


Σχήμα 3.10: Πολικό διάγραμμα ακτινοβολίας της έντασης της στοιχειοκεραίας, αποτελούμενης από 4 στοιχεία με απόσταση 6μm, για σταθερή γωνία αζιμούθιου ($\varphi = 0^\circ$).



Σχήμα 3.11: Τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας της έντασης της στοιχειοκεραίας, αποτελούμενης από 4 στοιχεία με απόσταση 6μm.

Συγκρίνοντας τα Σχήματα (Σχήμα 3.4 και Σχήμα 3.8) βλέπουμε όπως είναι αναμενόμενο, ότι η ανεξαρτησία από την γωνία αζιμουθίου φ παραμένει, ενώ από την σύγκριση των Σχημάτων (Σχήμα 3.5 και Σχήμα 3.6 με τα αντίστοιχα Σχήμα 3.9 και Σχήμα 3.10) παρατηρούμε μία εμφανή μείωση στο γωνιακό εύρος του λοβού. Αυτό σημαίνει ότι η στοιχειοκεραία έγινε περισσότερο κατευθυντική σε σχέση με την κατευθυντικότητα των στοιχείων (αξονικοί κυματοδηγοί) που την απαρτίζουν. Ταυτόχρονα όμως με την αύξηση της κατευθυντικότητας έχουμε και την εμφάνιση πλευρικών – οπίσθιων λοβών. Μάλιστα όσο περισσότερα είναι τα στοιχεία που την απαρτίζουν τόσο αυξάνεται και η κατευθυντικότητα της συνολικής στοιχειοκεραίας και τόσο περισσότεροι πλευρικοί λοβοί εμφανίζονται.



Σχήμα 3.12: Κανονικοποιημένο δισδιάστατο διάγραμμα της έντασης ακτινοβολίας. Η μπλε γραμμή αφορά τον αξονικό κυματοδηγό (end-fire waveguide), ενώ η κόκκινη γραμμή αφορά την γραμμική στοιχειοκεραία (1D OPAs) αποτελούμενη από 4 στοιχεία με απόσταση 6μm.

Το διάγραμμα που φαίνεται στο Σχήμα 3.12 είναι σχεδιασμένο στο αζιμουθιακό επίπεδο. Με κόκκινο χρώμα βλέπουμε το διάγραμμα ακτινοβολίας της γραμμικής στοιχειοκεραίας (1D optical phased arrays – OPAs), ενώ η περιβάλλουσα, που έχει σχεδιαστεί με μπλε χρώμα, αντιστοιχεί στην ένταση ακτινοβολίας του αξονικού κυματοδηγού (end-fire waveguide) και ταυτίζεται με το διάγραμμα που φαίνεται στο Σχήμα 3.7. Μπορούμε να δούμε καθαρά την μείωση στο εύρος ημίσειας ισχύος Δ_{3dB} του κύριου λοβού της γραμμικής στοιχειοκεραίας που από 12.7° (αξονικού κυματοδηγού) έγινε 3.4° (γραμμική στοιχειοκεραία).

Τα αποτελέσματα λοιπόν συμβαδίζουν με τα όσα είδαμε θεωρητικά στην υποπαράγραφο 2.2.3, στην οποία εξηγήθηκε ότι μπορούμε να αυξήσουμε την κατευθυντικότητα σε ένα δεδομένο σύστημα κεραιών χρησιμοποιώντας στοιχειοκεραίες. Στην ίδια υποπαράγραφο εξηγήθηκε ότι ένα ακόμα σημαντικό πλεονέκτημά τους, είναι η δυνατότητα που προσφέρουν, ως προς τον έλεγχο της διεύθυνσης της μέγιστης ακτινοβολίας (δηλ. την διεύθυνση του κύριου λοβού).

Η στροφή της διεύθυνσης της μέγιστης ακτινοβολίας (ή καταχρηστικά στροφή του διαγράμματος ακτινοβολίας), επιτυγχάνεται μέσω του παράγοντα β της εξίσωσης (3.22), με την οποία υπολογίζεται ο παράγοντας διάταξης της στοιχειοκεραίας. Επειδή όμως η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών στοιχείων της στοιχειοκεραίας (βήμα : 4 – 10μm) είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από το μισό του μήκους κύματος που αντιστοιχεί στην συχνότητα

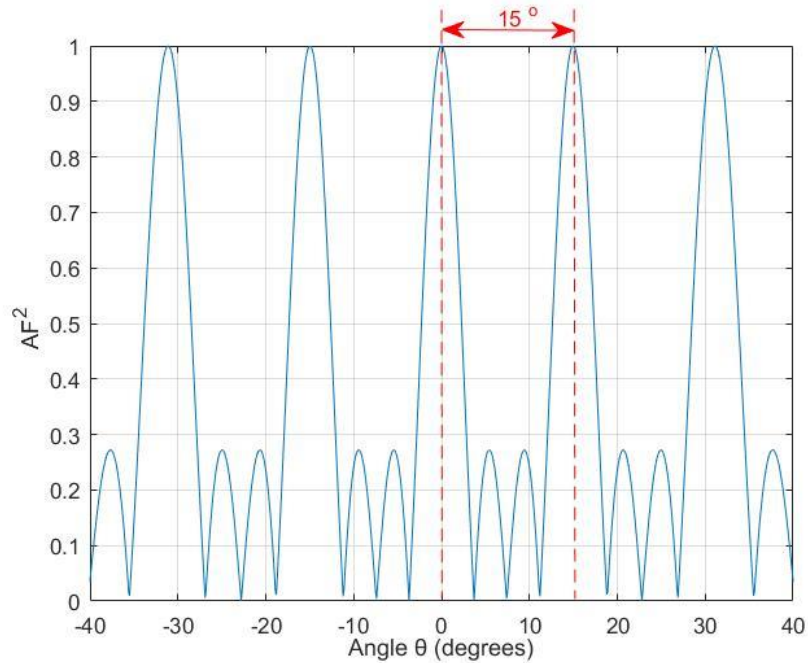
λειτουργίας ($\lambda/2$, $\lambda=1550\text{nm}$), εμφανίζονται στον παράγοντα διάταξης ghost ή grating lobes, οι οποίοι περιορίζουν την μέγιστη επιτεύξιμη στροφή της έντασης ακτινοβολίας.

Οι ghost ή grating lobes αποτελούν αντίγραφα του κύριου λοβού σε κάποια απόσταση από αυτόν. Το πόσο κοντά ή μακριά του θα είναι εξαρτάται από την σχετική απόσταση των στοιχείων της στοιχειοκεραίας. Όσο αυξάνεται η απόσταση μεταξύ των στοιχείων της στοιχειοκεραίας τόσο πλησιάζουν οι grating lobe τον κύριο λοβό (Σχήμα 3.14). Οι grating lobe επηρεάζουν την μέγιστη επιτεύξιμη στροφή της έντασης ακτινοβολίας, διότι σύμφωνα με την εξίσωση (3.21), πολλαπλασιάζονται όπως και ο κύριος λοβός με την ένταση ακτινοβολίας του στοιχείου της στοιχειοκεραίας. Το αποτέλεσμα είναι να "κλέβουν" ενέργεια από τον κύριο λοβό. Όταν η απόσταση τους γίνει τέτοια ώστε να απέχουν απόσταση μικρότερη από το εύρος ημίσειας ισχύος $\Delta_{3\text{dB}}$, του διαγράμματος ακτινοβολίας του στοιχείου της στοιχειοκεραίας, τότε η επίδραση που επιφέρουν είναι μη ανεκτή, καθώς η ενέργεια τους είναι συγκρίσιμη με την ενέργεια του κύριου λοβού.

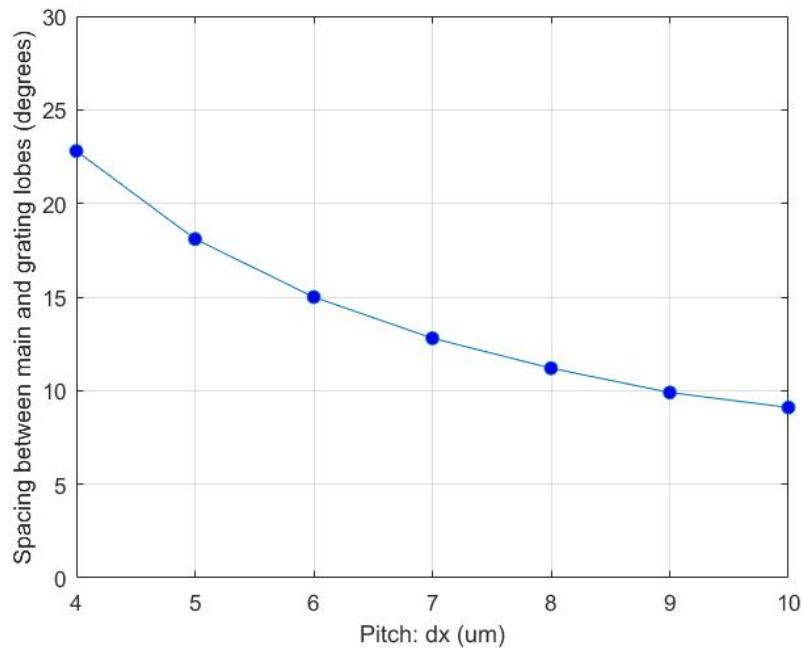
Στο Σχήμα 3.13 μπορούμε να δούμε τους ghost lobes που εμφανίζονται στον παράγοντα διάταξης, στην περίπτωση που η οπτική στοιχειοκεραία (optical phased arrays – OPAs) αποτελείται από τέσσερα στοιχεία (antenna elements – AEs) με απόσταση $6\mu\text{m}$ μεταξύ τους. Στην περίπτωση αυτή, βλέπουμε πως η απόσταση μεταξύ κύριου λοβού και του πρώτου ghost lobe είναι 15° . Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι ακόμα δεν έχει πραγματοποιηθεί στροφή στην ένταση ακτινοβολίας, δηλαδή ο κύριος λοβός εμφανίζει μέγιστο για $\theta = 0^\circ$.

Οι λοβοί αυτοί φαίνονται και στο Σχήμα 3.12. Είναι αυτοί που εμφανίζονται στις $\pm 15^\circ$ στην κόκκινη γραμμή, η οποία αφορά την ένταση ακτινοβολίας της γραμμικής στοιχειοκεραίας. Η επίδραση τους εδώ δεν είναι σημαντική διότι η απόσταση τους από τον κύριο λοβό είναι αρκετά μεγαλύτερη από το εύρος ημίσειας ισχύος $\Delta_{3\text{dB}}$, του διαγράμματος ακτινοβολίας του αξονικού κυματοδηγού (που είναι το στοιχείο της στοιχειοκεραίας).

Επιπλέον στο Σχήμα 3.14, για την περίπτωση που η οπτική στοιχειοκεραία (optical phased arrays – OPAs) αποτελείται από τέσσερα στοιχεία (antenna elements – AEs), έχει σχεδιαστεί η απόσταση του κύριου λοβού με τον πρώτο ghost lobe συναρτήσει του βήματος (pitch) των στοιχείων της στοιχειοκεραίας. Και σε αυτή την περίπτωση δεν έχει πραγματοποιηθεί στροφή στην ένταση ακτινοβολίας. Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η απόσταση μεταξύ των στοιχείων της οπτικής στοιχειοκεραίας τόσο περισσότερο πλησιάζουν οι ghost ή grating lobes τον κύριο λοβό. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να αυξάνεται και ο περιορισμός που επιφέρουν στην μέγιστη επιτεύξιμη στροφή της έντασης ακτινοβολίας, δεδομένου ότι το εύρος ημίσειας ισχύος $\Delta_{3\text{dB}}$ (HPBW ή FWHM) είναι 12.7° .



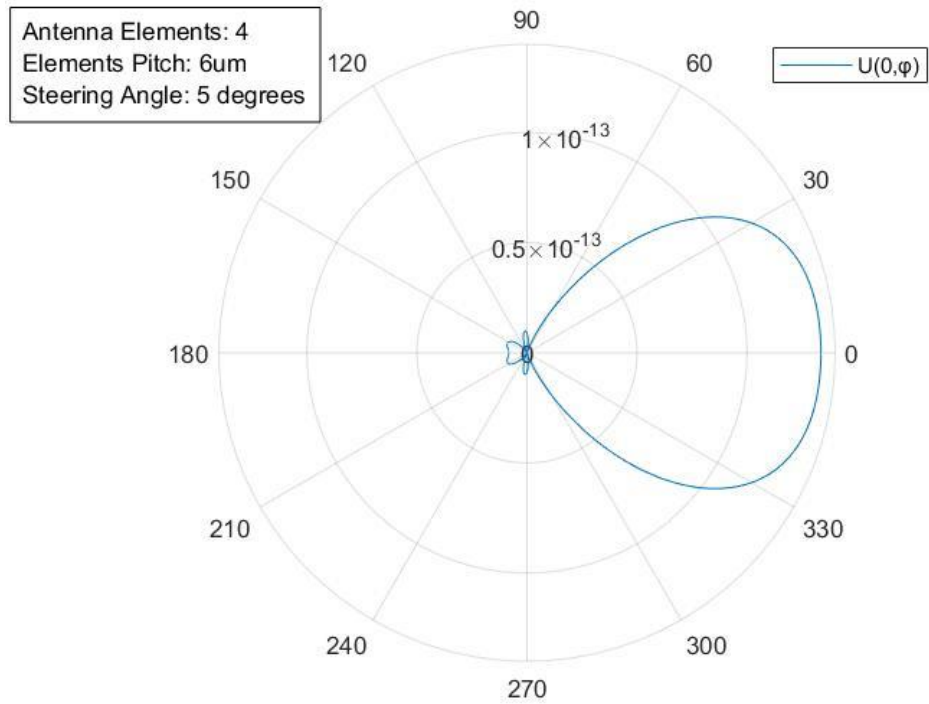
Σχήμα 3.13: Παράγοντας διάταξης που αντιστοιχεί σε γραμμική στοιχειοκεραία 4 στοιχείων με απόσταση 6μm και γωνία στροφής θ° .



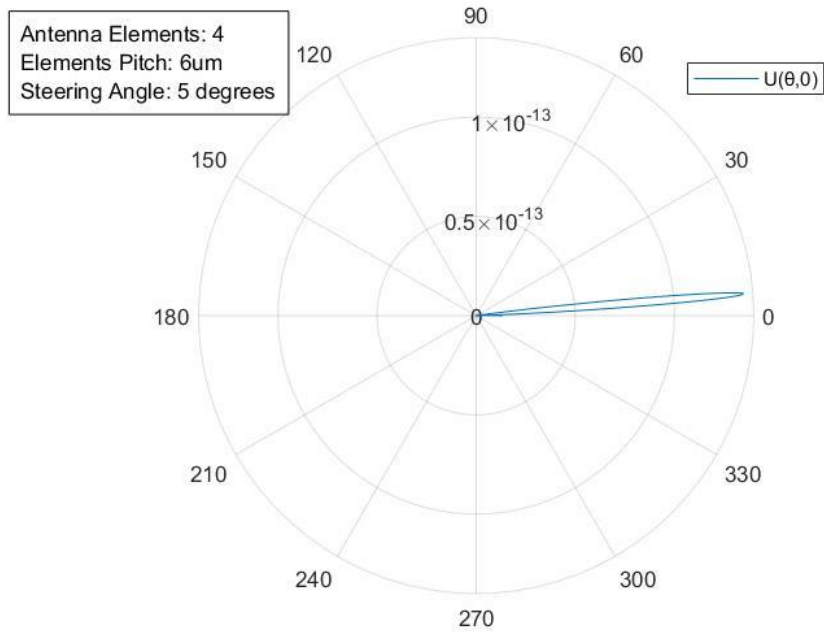
Σχήμα 3.14: Απόσταση μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe συναρτήσει του βήματος της στοιχειοκεραίας, όταν αυτή αποτελείται από 4 στοιχεία.

Μέχρι τώρα παρουσιάστηκαν τα διαγράμματα που αφορούν την γραμμική οπτική στοιχειοκεραία με τέσσερα στοιχεία που απέχουν μεταξύ τους 6μm. Στα παραπάνω διαγράμματα δεν έχουμε στρέψει το διάγραμμα ακτινοβολίας. Δηλαδή, η ένταση της

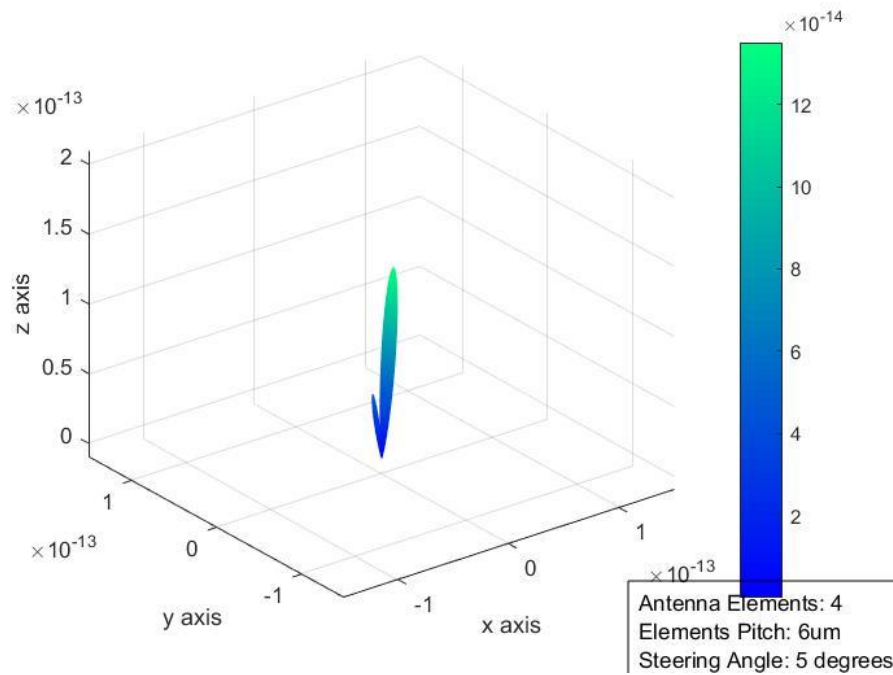
μέγιστης ακτινοβολίας (του κύριου λοβού) είναι στην γωνία $\theta = 0^\circ$. Στα σχήματα που ακολουθούν θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα ακτινοβολίας της γραμμικής οπτικής στοιχειοκεραία (για την ίδια περίπτωση: 4 στοιχεία, απόσταση 6mm), με στροφή της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας κατά 5° .



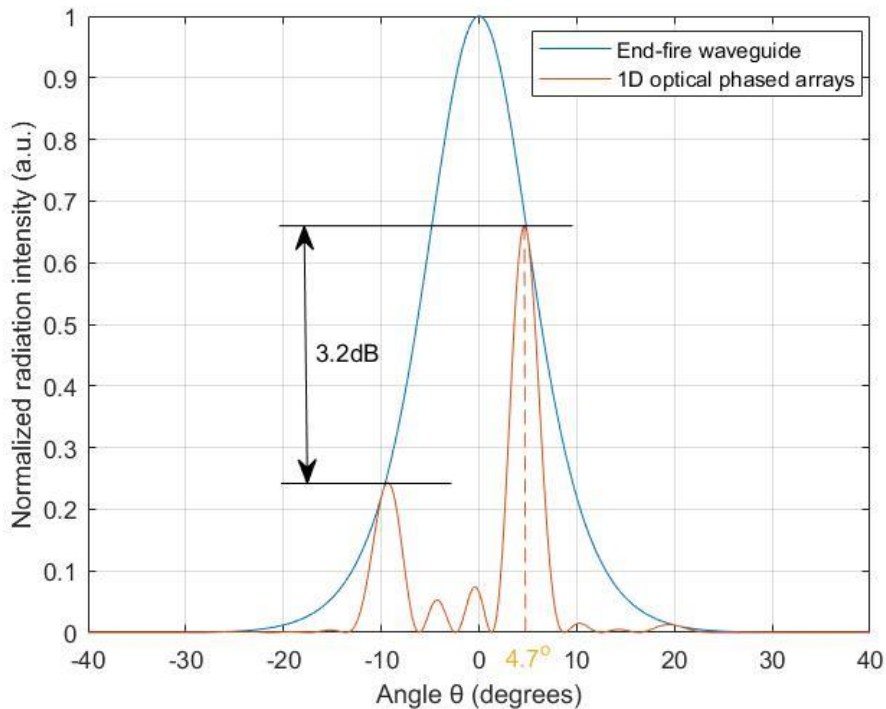
Σχήμα 3.15 Πολικό διάγραμμα ακτινοβολίας της έντασης της στοιχειοκεραίας, αποτελούμενης από 4 στοιχεία με απόσταση 6mm, για σταθερή γωνία ανώμωσης ($\theta = 0^\circ$). Στην περίπτωση αυτή έχει πραγματοποιηθεί στροφή 5° στην διεύθυνση του κύριου λοβού.



Σχήμα 3.16: Πολικό διάγραμμα ακτινοβολίας της έντασης της στοιχειοκεραίας, αποτελούμενης από 4 στοιχεία με απόσταση 6μm, για σταθερή γωνία αζιμούθιου ($\varphi = 0^\circ$). Στην περίπτωση αυτή έχει πραγματοποιηθεί στροφή 5° στην διεύθυνση του κύριου λοβού.



Σχήμα 3.17: Τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας της έντασης της στοιχειοκεραίας, αποτελούμενης από 4 στοιχεία με απόσταση 6μm και στροφή 5° στην διεύθυνση του κύριου λοβού.



Σχήμα 3.18: Κανονικοποιημένο δισδιάστατο διάγραμμα της έντασης ακτινοβολίας. Η μπλε γραμμή αφορά τον αξονικό κυματοδηγό (end-fire waveguide), ενώ η κόκκινη γραμμή αφορά την γραμμική στοιχειοκεραία (1D OPAs) αποτελούμενη από 4 στοιχεία με απόσταση 6μm. Στην περίπτωση αυτή έχει πραγματοποιηθεί στροφή 5° στην διεύθυνση του κύριου λοβού.

Στο Σχήμα 3.15 βλέπουμε ξανά το πολικό διάγραμμα της έντασης ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας (4 στοιχεία με απόσταση 6μm) που είχε σχεδιαστεί στο Σχήμα 3.9, με την διαφορά ότι πλέον, η διεύθυνση της μέγιστης ακτινοβολίας έχει στραφεί (του κύριου λοβού) κατά 5°. Η στροφή αυτή δεν είναι εύκολα αντιληπτή καθώς το διάγραμμα ακτινοβολίας είναι σχεδιασμένο στο αζιμουθιακό επίπεδο. Συγκρίνοντας παρόλα αυτά τα δύο σχήματα, παρατηρούμε την εμφανή μείωση στην ένταση ακτινοβολίας του κύριου λοβού και την εμφάνιση πλευρικών λοβών, με μεγαλύτερο εξ αυτών τον grating lobe.

Η στροφή των 5° γίνεται ευκολότερα αντιληπτή στο διάγραμμα ακτινοβολίας που αντιστοιχεί στο επίπεδο ανύψωσης. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 3.16, ενώ συγκρίνοντας το με το Σχήμα 3.10 βλέπουμε πέραν της στροφής και την μείωση στην ένταση ακτινοβολίας του κύριου λοβού.

Στο Σχήμα 3.17 (σύγκριση με το αντίστοιχο Σχήμα 3.11) έχει σχεδιαστεί η τρισδιάστατη απεικόνιση του διαγράμματος ακτινοβολίας της στραμμένης στοιχειοκεραίας, ενώ στο Σχήμα 3.18 (σύγκριση με το αντίστοιχο Σχήμα 3.12) μπορούμε να δούμε την δισδιάστατη απεικόνιση του στο αζιμουθιακό επίπεδο, σε κανονικοποιημένη μορφή. Σε αυτά, η μορφή του διαγράμματος ακτινοβολίας είναι ευκολότερα κατανοητή.

Στο Σχήμα 3.18 μπορούμε να κάνουμε τρεις βασικές παρατηρήσεις. Η πρώτη παρατήρηση αφορά την στροφή του κύριου λοβού η οποία είναι κάτι λιγότερο από 5° και για την ακρίβεια είναι 4.7°. Η δεύτερη παρατήρηση αφορά την απόσταση του grating lobe από τον κύριο. Ο grating lobe έχει μέγιστο στις -9.3° και απέχει από το μέγιστο του κύριου λοβού 14°. Στο Σχήμα 3.14 είχαμε δει ότι η απόσταση κύριου και δευτερεύοντα λοβού για την περίπτωση στοιχειοκεραίας 4 στοιχείων με βήμα 6μm, είναι 15°. Οι διαφορές αυτές και στις δύο περιπτώσεις οφείλονται στην καταπίεση των δύο λοβών λόγω του πολλαπλασιασμού του παράγοντα διάταξης με την ένταση ακτινοβολίας του βασικού στοιχείου της στοιχειοκεραίας, όπως αυτός εκφράζεται στην εξίσωση 3.21.

Η τρίτη παρατήρηση αφορά στην διαφορά της έντασης μεταξύ του grating και του κύριου λοβού. Στην συγκεκριμένη περίπτωση βλέπουμε ότι οι δύο λοβοί διαφέρουν κατά 3.2dB. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω ο grating lobe επιδρά αρνητικά στο κύριο λοβό μειώνοντας την ένταση του και περιορίζοντας έτσι την μέγιστη επιτεύξιμη στροφή του διαγράμματος ακτινοβολίας. Σαν αποτέλεσμα περιορίζεται το μέγιστο επιτεύξιμο οπτικό πεδίο (Field of view – FOV), δηλαδή η συνολική γωνία στην οποία μπορώ να στρέψω την οπτική στοιχειοκεραία.

Μέχρι τώρα είδαμε το μακρινό πεδίο της γραμμικής οπτικής στοιχειοκεραίας (1D optical phased arrays – OPAs) που έχει σαν στοιχεία της (antenna elements – AEs), τέσσερις αξονικούς κυματοδηγούς (end-fire waveguide) με βήμα 6μm. Στα πλαίσια της εργασίας, έγινε εκτενής μελέτη της οπτικής αυτής στοιχειοκεραίας ως προς τον αριθμό των στοιχείων που θα περιλαμβάνει, την μεταξύ τους απόσταση, το εύρος ημίσειας ισχύος Δ_{3dB} που επιτυγχάνεται και την μέγιστη επιτεύξιμη στροφή του διαγράμματος ακτινοβολίας (δηλαδή το μέγιστο FOV που μπορεί να επιτευχθεί). Τα παραπάνω θα παρουσιαστούν αναλυτικά στο κεφάλαιο 4.

3.2.3 Μακρινό πεδίο δισδιάστατης οπτικής στοιχειοκεραίας (2D optical phased arrays – OPAs), τοποθετημένης σε PolyBoard PICs

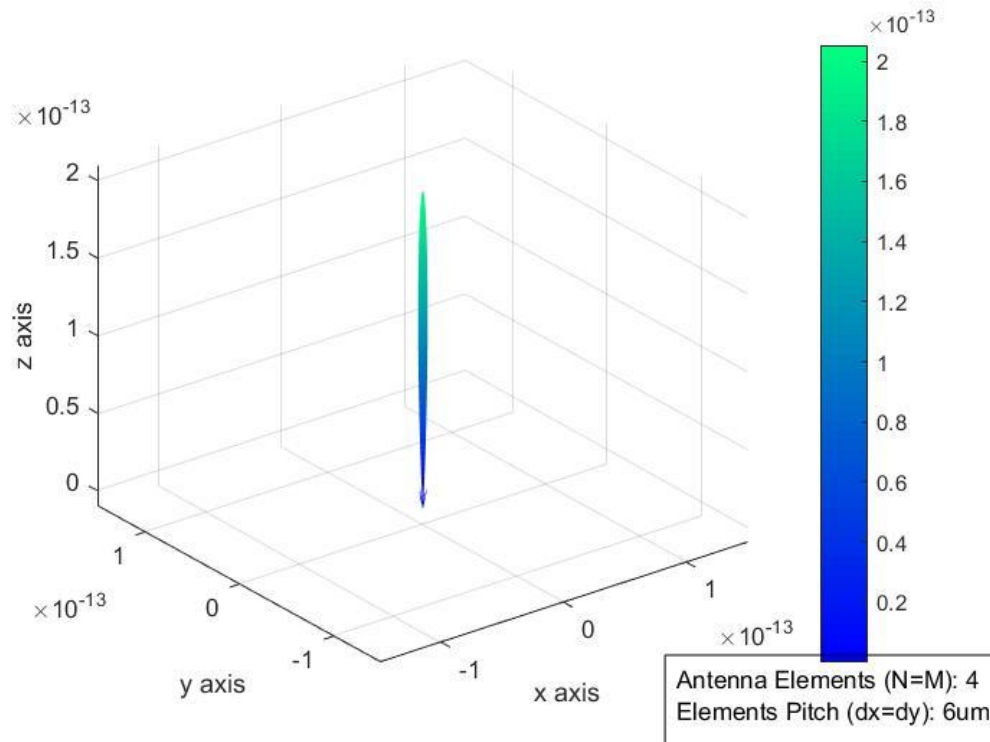
Στο υποκεφάλαιο αυτό θα υπολογίσουμε την ένταση ακτινοβολίας της δισδιάστατης οπτικής στοιχειοκεραίας (2D optical phased arrays – OPAs) στο μακρινό πεδίο. Όταν υπάρχουν δύο επίπεδα κυματοδότησης η διάταξη που φαίνεται στο Σχήμα 3.8, αποτελεί μία επίπεδη στοιχειοκεραία. Η ένταση ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας εξακολουθεί να υπολογίζεται από την εξίσωση (3.21) με την διαφορά ότι ο παράγοντας διάταξης $S(\theta, \varphi)$ της στοιχειοκεραίας υπολογίζεται πλέον από την σχέση:

$$S(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M e^{i(n-1)(kd_x \sin\theta \cos\varphi + \beta_x)} e^{i(m-1)(kd_y \sin\theta \sin\varphi + \beta_y)} \quad (3.23)$$

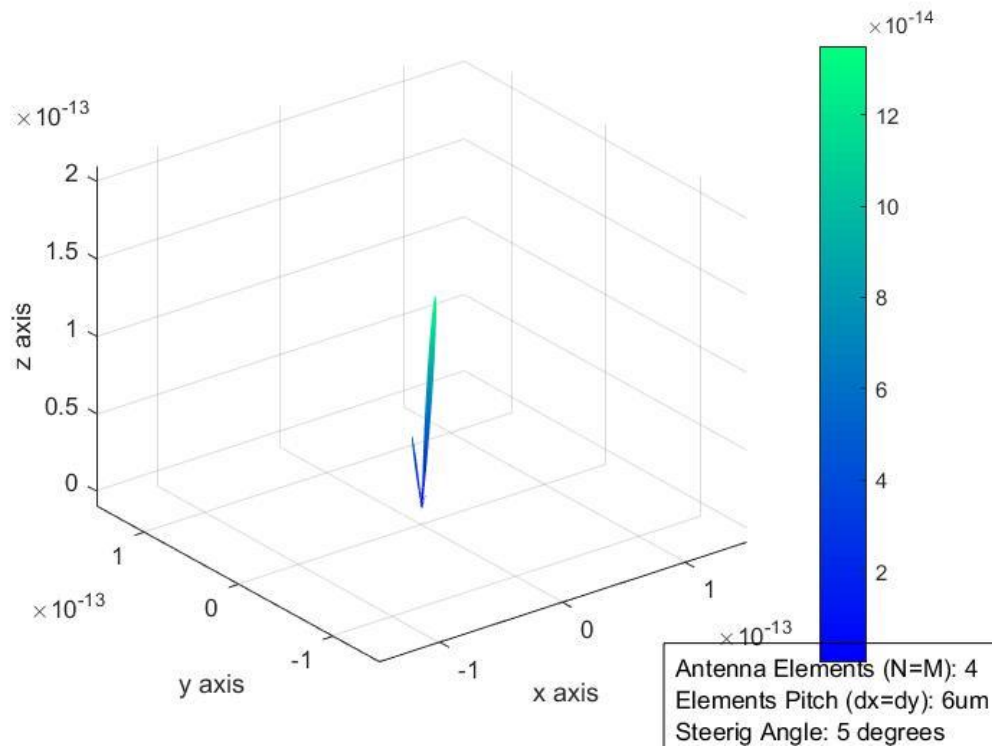
όπου N, M και είναι οι αριθμοί των στοιχείων της στοιχειοκεραίας στα επίπεδα x και y αντίστοιχα, d_x , d_y είναι τα βήματα της στοιχειοκεραίας στα επίπεδα x και y αντίστοιχα και k είναι ο κυματάρηθος (wavenumber in free space, $k = 2\pi/\lambda$).

Λόγω της συμμετρίας των επιπέδων x και y της γεωμετρίας της στοιχειοκεραίας (Σχήμα 3.8), ως προς τον αριθμό των στοιχείων ($N = M$) και ως προς τις μεταξύ του αποστάσεις ($d_x = d_y$) και επιπλέον λόγω του ότι η οπτική στοιχειοκεραία είναι ομοιόμορφη, τα διαγράμματα ακτινοβολίας που παρουσιάστηκαν στην υποπαράγραφο 3.2.2 για την γραμμική στοιχειοκεραία και αφορούν το αζιμουθιακό επίπεδο, μπορούν να επεκταθούν χωρίς καμία αλλαγή και στην περίπτωση της επίπεδης στοιχειοκεραίας με τέσσερα στοιχεία στο κάθε επίπεδο (4×4) και με βήματα $d_x = d_y = 6\mu\text{m}$.

Η προσθήκη του επιπλέον επιπέδου κάνει την οπτική στοιχειοκεραία περισσότερο κατευθυντική, όπως φαίνεται από την σύγκριση των Σχημάτων (Σχήμα 3.11 και Σχήμα 3.17 με τα αντίστοιχα Σχήμα 3.19 και Σχήμα 3.20), ενώ ταυτόχρονα επιτρέπει τον έλεγχο της οπτικής στοιχειοκεραίας όχι μόνο στο αζιμουθιακό επίπεδο (azimuthal plane), αλλά και στο επίπεδο ανύψωσης (elevation plane).



Σχήμα 3.19: Τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας της έντασης της επίπεδης οπτικής στοιχειοκεραίας, αποτελούμενης από 4 στοιχεία με απόσταση $6\mu\text{m}$ και στα δύο επίπεδα.



Σχήμα 3.20: Τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας της έντασης της επίπεδης οπτικής στοιχειοκεραίας, αποτελούμενης από 4 στοιχεία με απόσταση 6μm και στα δύο επίπεδα και στροφή 5^ο στην διεύθυνση του κύριου λοβού στο αζιμουθιακό επίπεδο.

4

Αποτελέσματα Προσομοίωσης

Στο προηγούμενο κεφάλαιο είδαμε την ένταση ακτινοβολίας της οπτικής στοιχειοκεραίας στο μακρινό πεδίο. Τα διαγράμματα ακτινοβολίας αφορούσαν όμως μόνο μια περίπτωση στοιχειοκεραίας, στην οποία υπήρχαν τέσσερις αξονικοί κυματοδηγοί (end-fire waveguides) σαν στοιχεία (antenna elements – AEs), που απείχαν μεταξύ τους απόσταση (pitch) 6μm. Τα εν λόγω διαγράμματα παρουσιάστηκαν και για στροφή 5° στην διεύθυνση της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας, δηλαδή την διεύθυνση του κύριου λοβού.

Σκοπός όμως τις εργασίας δεν ήταν η εύρεση της ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας, μόνο στη συγκεκριμένη περίπτωση, αλλά η εκτενής μελέτη και ανάλυση όλων των πιθανών προφίλ ακτινοβολίας της και όλων των στοιχείων που αφορούν τον έλεγχο της ως προς το αζιμουθιακό επίπεδο (azimuthal plane) και το επίπεδο ανύψωσης (elevation plane), προκειμένου να βρούμε το μέγιστο επιτεύξιμο οπτικό πεδίο (Field of view – FOV). Το FOV αφορά το εύρος των γωνιών που μπορεί να στραφεί η διεύθυνση του κύριου λοβού έτσι ώστε η ένταση του να παραμένει αρκετά μεγαλύτερη από τον ή τους grating lobe που εμφανίζονται λόγω του παράγοντα διάταξης.

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα από την μελέτη που έγινε στην οπτική στοιχειοκεραία (optical phased arrays – OPAs). Προκειμένου λοιπόν να βγάλουμε σαφή συμπεράσματα για τα παραπάνω στοιχεία μελετήσαμε την οπτική στοιχειοκεραία ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα:

- i. Η στοιχειοκεραία να αποτελείται αρχικά από 2, στη συνέχεια 4, κατόπιν από 8 και τέλος από 16 στοιχεία (antenna elements – AEs).
- ii. Σε κάθε μια από τις παραπάνω περιπτώσεις μεταβάλλαμε την απόσταση των στοιχείων της (pitch) από 4μm έως 10μm (αυξάνοντας κάθε φορά κατά 1μm).
- iii. Για κάθε μία από τις υποπεριπτώσεις του δεύτερου βήματος στρέψαμε την οπτική στοιχειοκεραία στο αζιμουθιακό επίπεδο από τις -20° έως τις +20°. Αυτό το εύρος γωνιών είναι το μέγιστο θεωρητικό εύρος που μπορούμε να στρίψουμε την οπτική στοιχειοκεραία, δεδομένου ότι είναι το εύρος του

λοβού του αξονικού κυματοδηγού που αποτελεί το στοιχείο της στοιχειοκεραίας όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.7.

Για όλες τις υποπεριπτώσεις του τρίτου βήματος μετρούσαμε:

- i. Την ένταση ακτινοβολίας του κύριου λοβού.
- ii. Το γωνιακό εύρος Δ_0 (First Null Beamwidth – FNBW) και το εύρος ημίσειας ισχύος Δ_{3dB} (Half Power Beamwidth – HPBW ή Full Width Half Maximum - FWHM) του κύριου λοβού.
- iii. Την ένταση ακτινοβολίας του ή των grating lobe, που εμφανίζονταν λόγω του παράγοντα διάταξης.
- iv. Την απόσταση μεταξύ των λοβών (όπως σχολιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο είναι πάντα μικρότερη από αυτή που φαίνεται στο Σχήμα 3.14 εξαιτίας της καταπίεσης που υφίστανται ο grating lobe από τον πολλαπλασιασμό του παράγοντα διάταξης με την ένταση ακτινοβολίας του βασικού στοιχείου της στοιχειοκεραίας).
- v. Την επιτευχθείσα στροφή της διεύθυνσης του κύριου λοβού (όπως σχολιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο είναι πάντα μικρότερη από την επιθυμητή εξαιτίας της καταπίεσης που υφίστανται ο κύριος λοβός από τον πολλαπλασιασμό του παράγοντα διάταξης με την ένταση ακτινοβολίας του βασικού στοιχείου της στοιχειοκεραίας).

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω μετρήσεις σχεδιάστηκαν για όλες τις υποπεριπτώσεις του τρίτου βήματος τα παρακάτω διαγράμματα:

- i. *Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής, στη διεύθυνση του κύριου λοβού.* Στο διάγραμμα αυτό ο άξονας x περιλαμβάνει τις γωνίες στροφής στις οποίες υποβάλλεται ο κύριος λοβός και ο άξονας y περιλαμβάνει τις γωνίες που τελικά γίνεται η στροφή (και οι δύο γωνίες αναφέρονται στο αζιμουθιακό επίπεδο). Επομένως με την χρήση του διαγράμματος αυτού μπορούμε να επιλέξουμε την επιθυμητή γωνία στροφής (από τον άξονα y) και να βρούμε την γωνία στροφής στην οποία πρέπει να υποβάλλουμε τον κύριο λοβό (από τον άξονα x) προκειμένου να στρίψει στην επιθυμητή γωνία. Σημειώνεται ότι στο διάγραμμα αυτό σχεδιάζονται μόνο οι "θετικές" γωνίες στροφής δηλαδή από 0° έως $+20^\circ$. Η στροφή προς την αντίθετη κατεύθυνση (-20° έως 0°) είναι συμμετρική.
- ii. *Διάγραμμα απώλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού.* Στο διάγραμμα αυτό μπορούμε να δούμε, την μεταβολή της μέγιστης έντασης του κύριου λοβού (άξονας y) σε κάθε γωνία στροφής (άξονας x), στο αζιμουθιακό επίπεδο.
- iii. *Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe.* Στο διάγραμμα αυτό εμφανίζεται η μέγιστη ένταση ακτινοβολίας κύριου και πρώτου grating lobe (άξονας y) για κάθε γωνία στροφής (άξονας x), στο αζιμουθιακό επίπεδο.

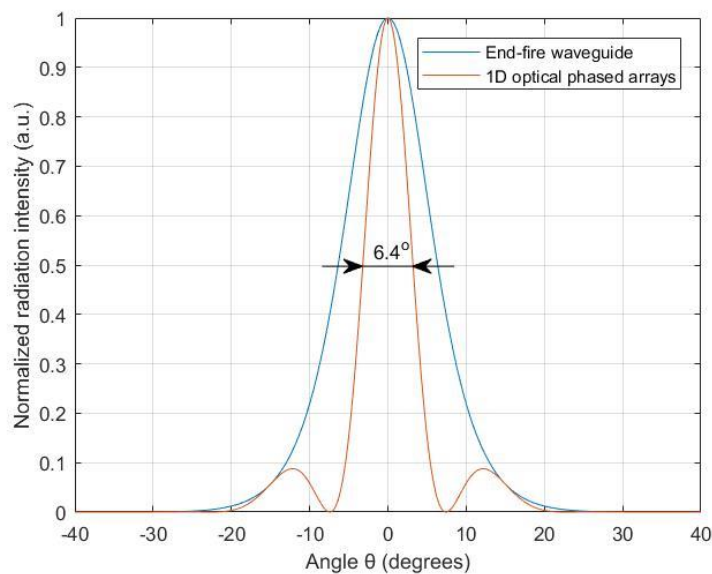
- iv. *Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe.* Στο διάγραμμα αυτό παρουσιάζεται ο λόγος ισχύος σε dB μεταξύ κύριου και πρώτου grating lobe (άξονας y) για κάθε γωνία στροφής (άξονας x), στο αξιμουθιακό επίπεδο.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου θα παρουσιαστούν τα παραπάνω διαγράμματα για όλες τις υποπεριπτώσεις και κατόπιν αυτών θα παρουσιαστούν τα τελικά διαγράμματα που συνοψίζουν όλες τις πληροφορίες που χρειαζόμαστε για την οπτική στοιχειοκεραία.

4.1 Διαγράμματα οπτικής στοιχειοκεραίας (OPAs) που αποτελείται από 2 στοιχεία (AEs)

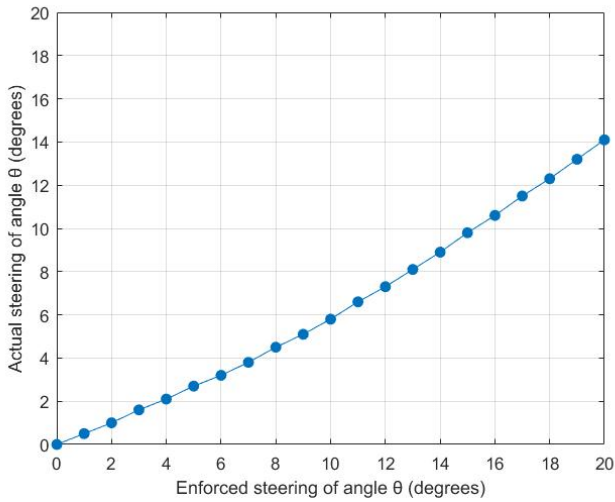
Στο υποκεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα που περιγράφηκαν στην αρχή του κεφαλαίου και αφορούν την οπτική στοιχειοκεραία (optical phased arrays – OPAs), η οποία έχει για στοιχεία της (antenna elements – AEs) δύο αξονικούς κυματοδηγούς (end-fire waveguides). Η κατηγοριοποίηση τους θα γίνει με βάση την απόσταση μεταξύ των στοιχείων της (pitch), η οποία κυμαίνεται από 4μm έως 10μm.

Προκειμένου να κατανοήσουμε το προφίλ ακτινοβολίας της οπτικής στοιχειοκεραίας με δύο στοιχεία, στο Σχήμα 4.1 έχει σχεδιαστεί το κανονικοποιημένο διδιάστατο διάγραμμα της έντασης ακτινοβολίας της, στην περίπτωση που τα στοιχεία της απέχουν μεταξύ τους 6μm (pitch). Όπως βλέπουμε το εύρος ημίσειας ισχύος Δ_{3dB} (FWHM) είναι 6.4° .

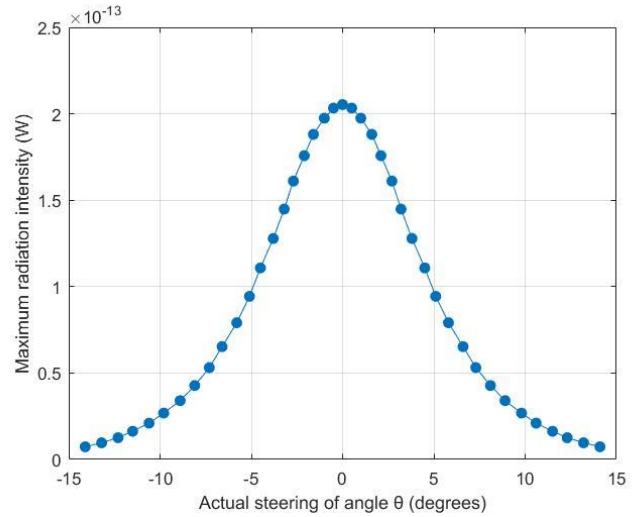


Σχήμα 4.1: Κανονικοποιημένο διδιάστατο διάγραμμα της έντασης ακτινοβολίας. Η μπλε γραμμή αφορά τον αξονικό κυματοδηγό (end-fire waveguide), ενώ η κόκκινη γραμμή αφορά την γραμμική στοιχειοκεραία (1D OPAs) αποτελούμενη από 2 στοιχεία με απόσταση 6μm.

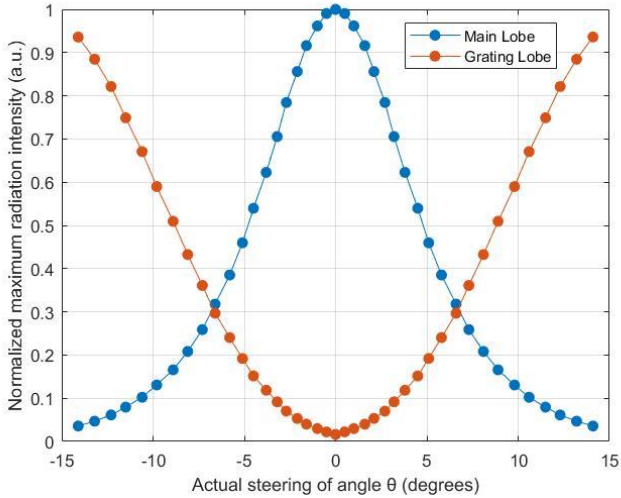
4.1.1 Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 4μm.



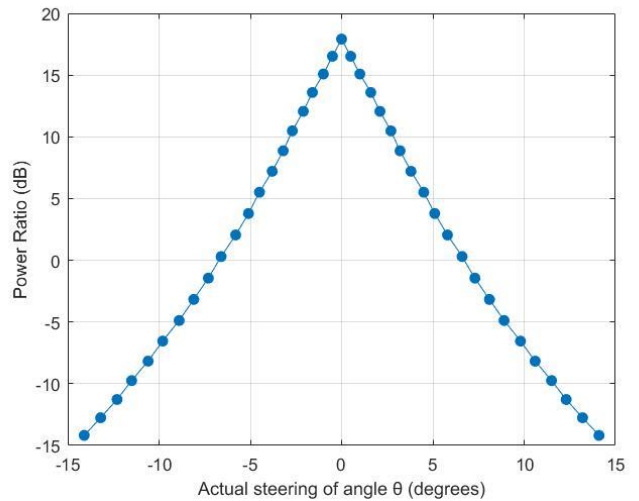
Σχήμα 4.2: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (2 AEs, 4μm pitch).



Σχήμα 4.3: Διάγραμμα απόλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (2 AEs, 4μm pitch).

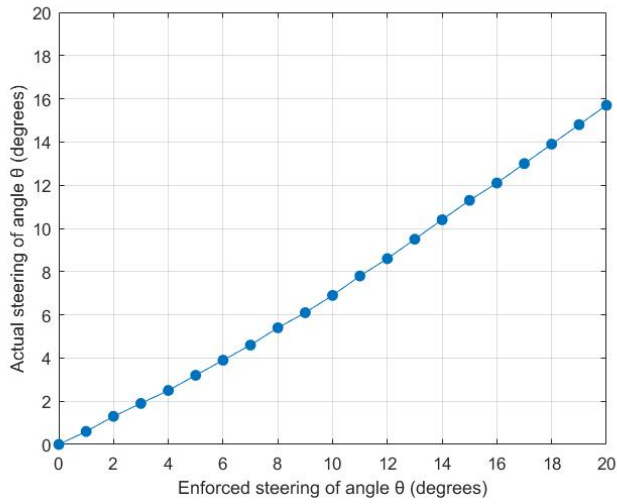


Σχήμα 4.4: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (2 AEs, 4μm pitch).

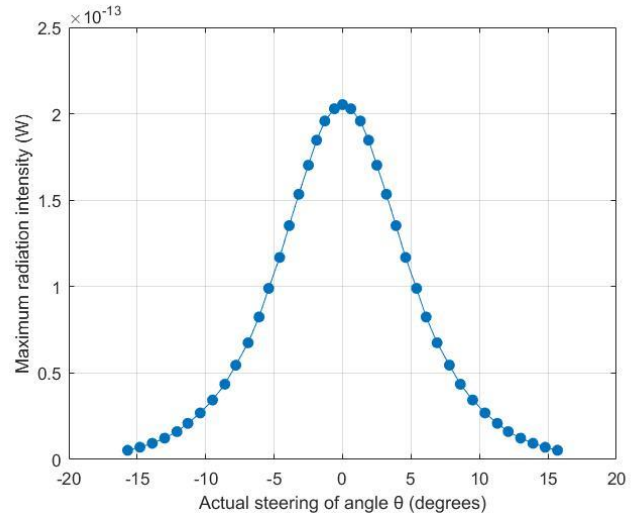


Σχήμα 4.5: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (2 AEs, 4μm pitch).

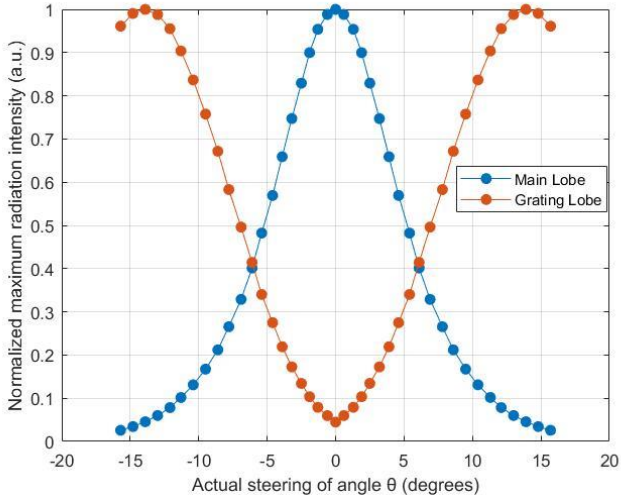
4.1.2 Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 5μm.



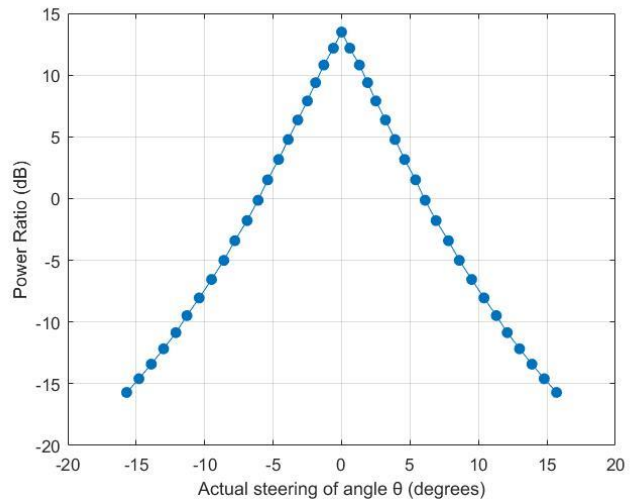
Σχήμα 4.6: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (2 AEs, 5μm pitch).



Σχήμα 4.7: Διάγραμμα απόλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (2 AEs, 5μm pitch).

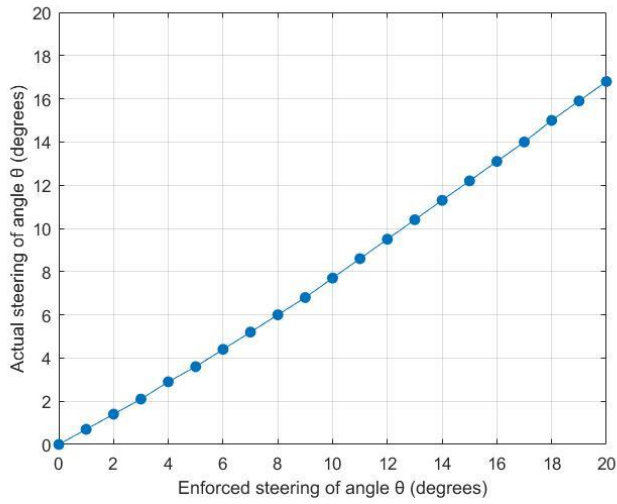


Σχήμα 4.8: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (2 AEs, 5μm pitch).

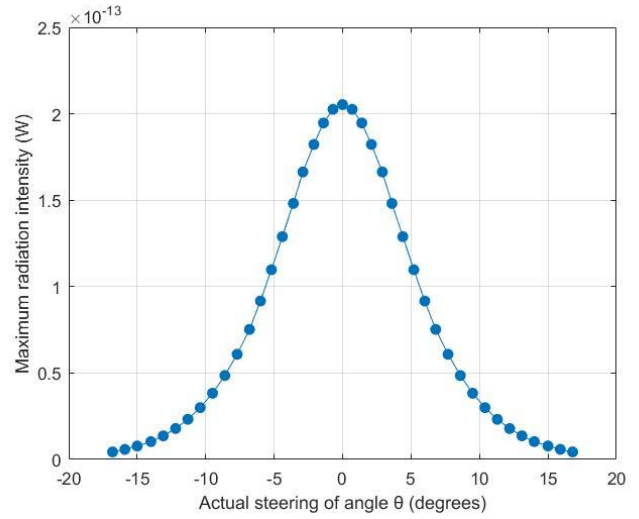


Σχήμα 4.9: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (2 AEs, 5μm pitch).

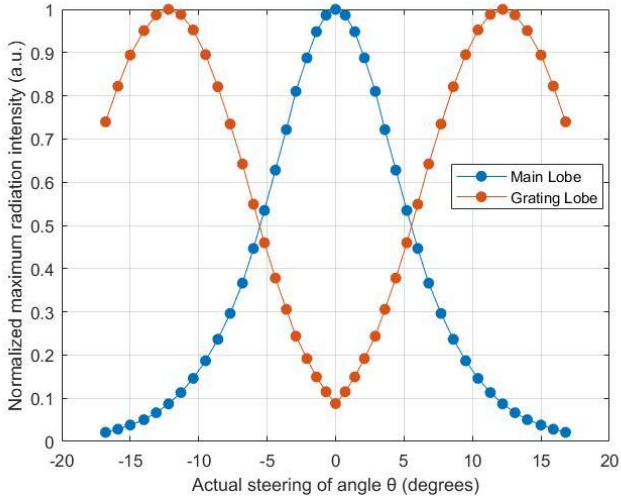
4.1.3 Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 6μμ.



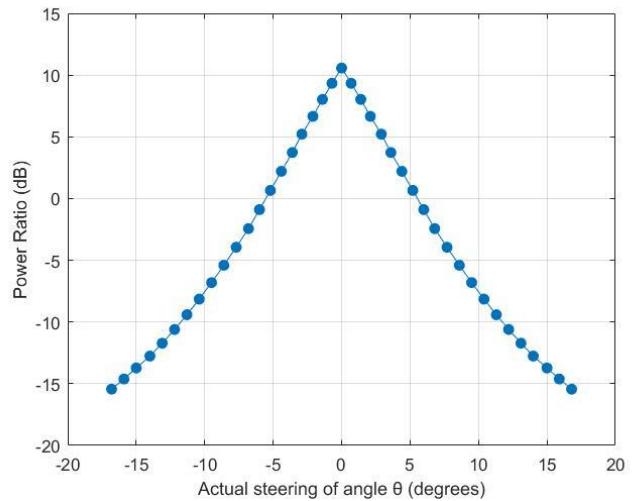
Σχήμα 4.10: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (2 AEs, 6μμ pitch).



Σχήμα 4.11: Διάγραμμα απόλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (2 AEs, 6μμ pitch).

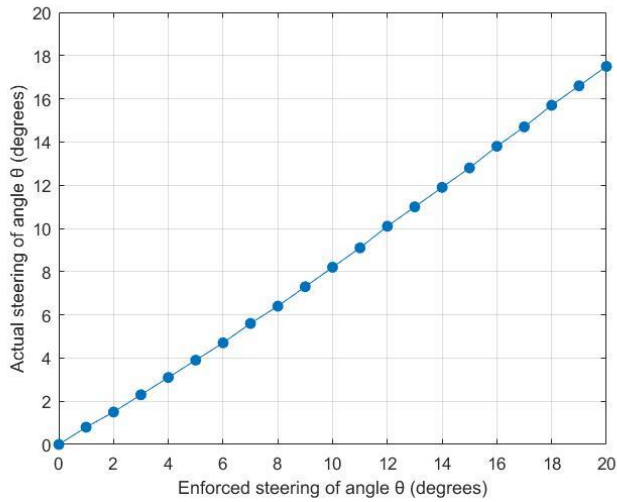


Σχήμα 4.12: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (2 AEs, 6μμ pitch).

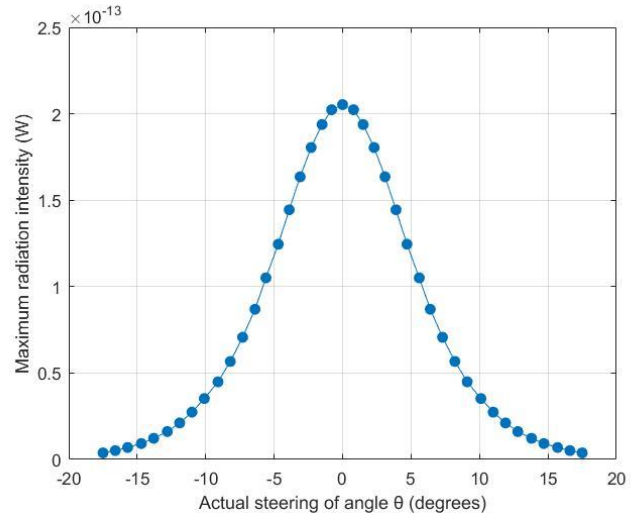


Σχήμα 4.13: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (2 AEs, 6μμ pitch).

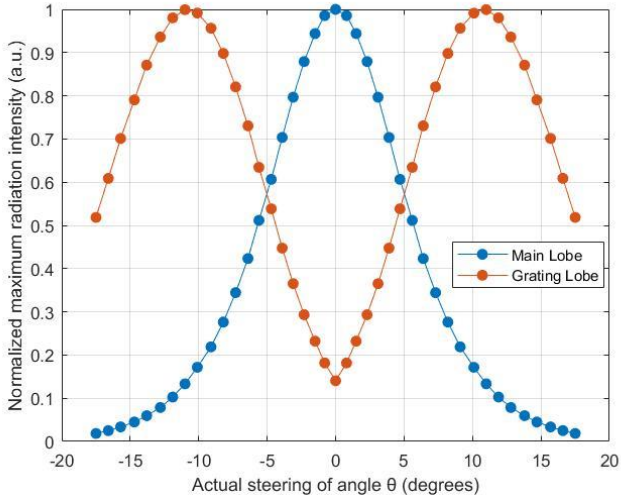
4.1.4 Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 7μm



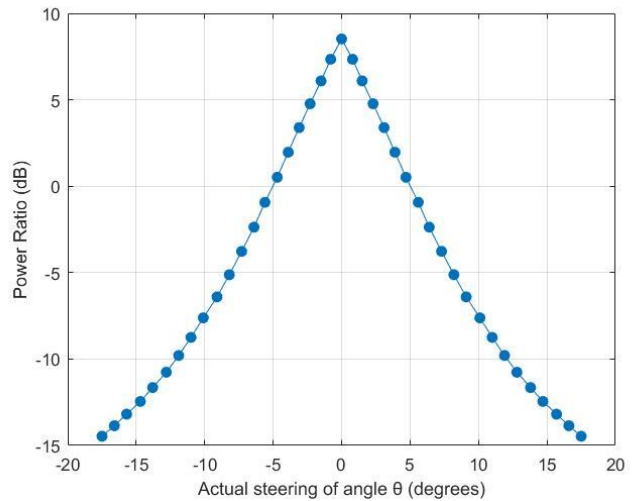
Σχήμα 4.14: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (2 AEs, 7μm pitch).



Σχήμα 4.15: Διάγραμμα απόλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (2 AEs, 7μm pitch).

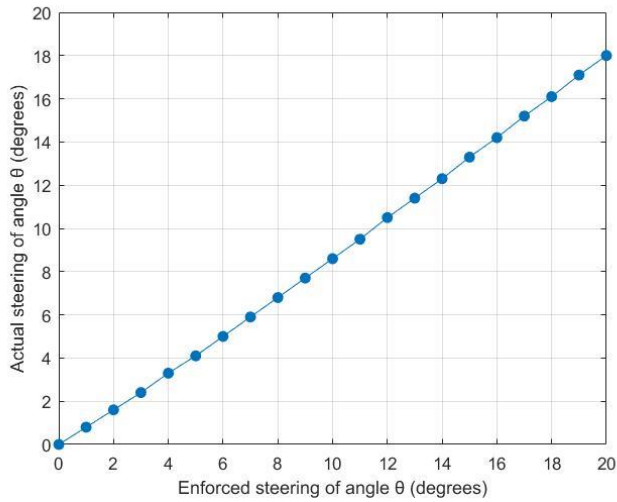


Σχήμα 4.16: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (2 AEs, 7μm pitch).

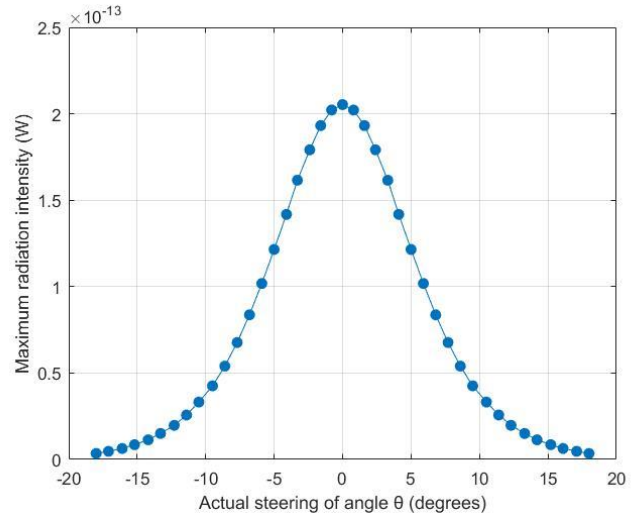


Σχήμα 4.17: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (2 AEs, 7μm pitch).

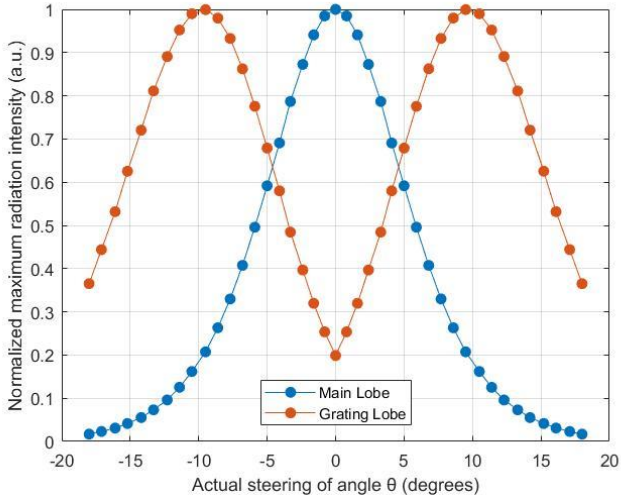
4.1.5 Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 8μm



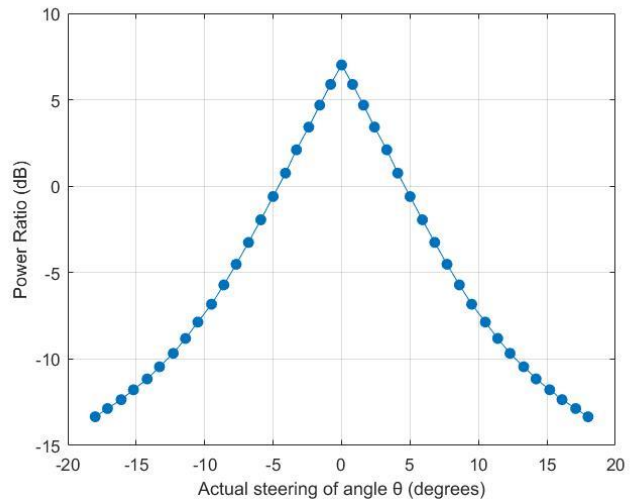
Σχήμα 4.18: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (2 AEs, 8μm pitch).



Σχήμα 4.19: Διάγραμμα απόλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (2 AEs, 8μm pitch).

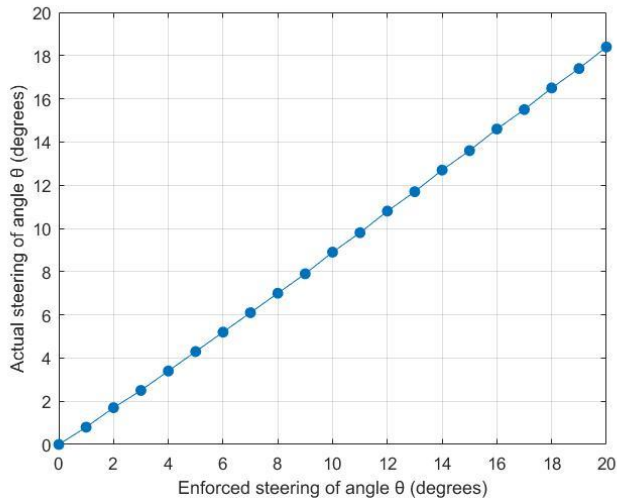


Σχήμα 4.20: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (2 AEs, 8μm pitch).

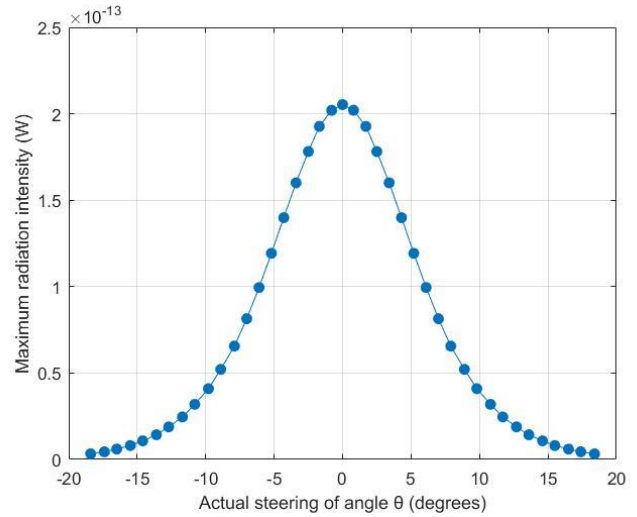


Σχήμα 4.21: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (2 AEs, 8μm pitch).

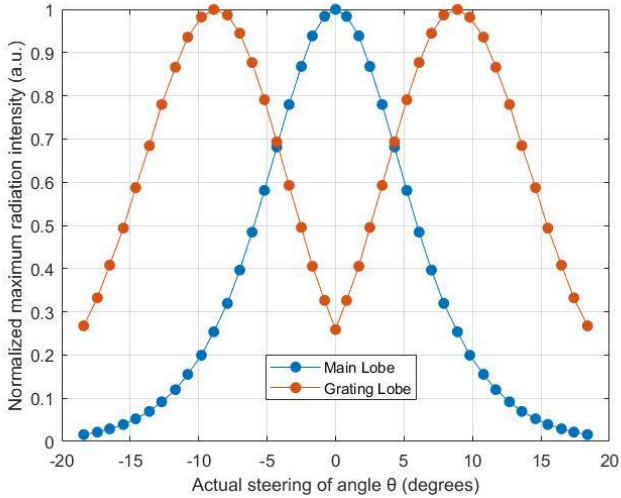
4.1.6 Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 9μm



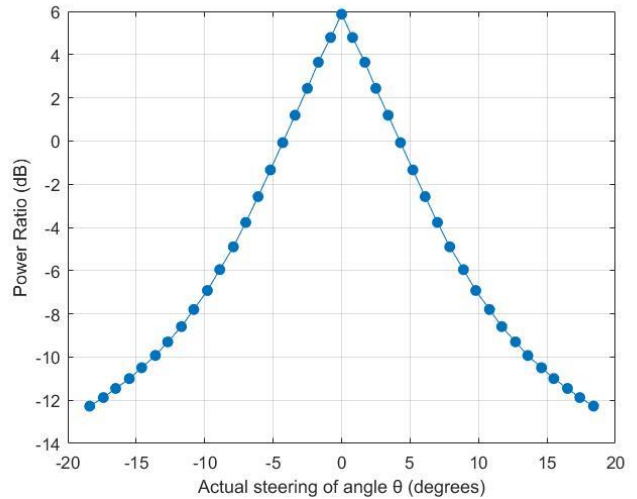
Σχήμα 4.22: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (2 AEs, 9μm pitch).



Σχήμα 4.23: Διάγραμμα απόλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (2 AEs, 9μm pitch).

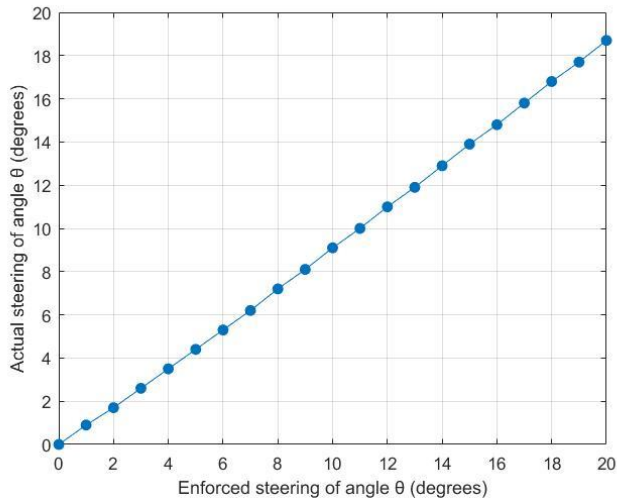


Σχήμα 4.24: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (2 AEs, 9μm pitch).

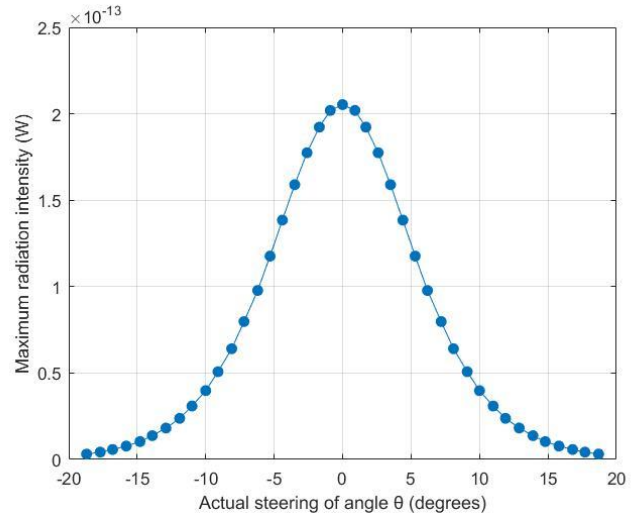


Σχήμα 4.25: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (2 AEs, 9μm pitch).

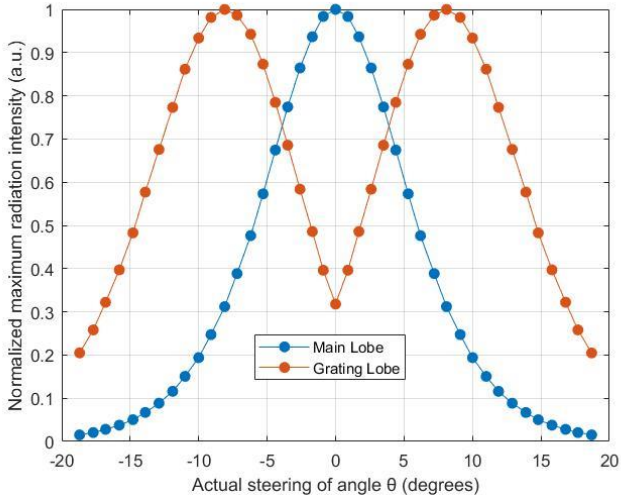
4.1.7 Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 10 μ m



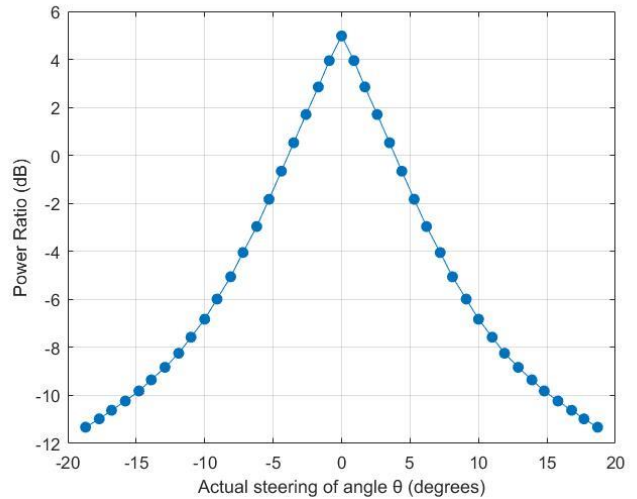
Σχήμα 4.26: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (2 AEs, 10 μ m pitch).



Σχήμα 4.27: Διάγραμμα απόλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (2 AEs, 10 μ m pitch).



Σχήμα 4.28: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (2 AEs, 10 μ m pitch).

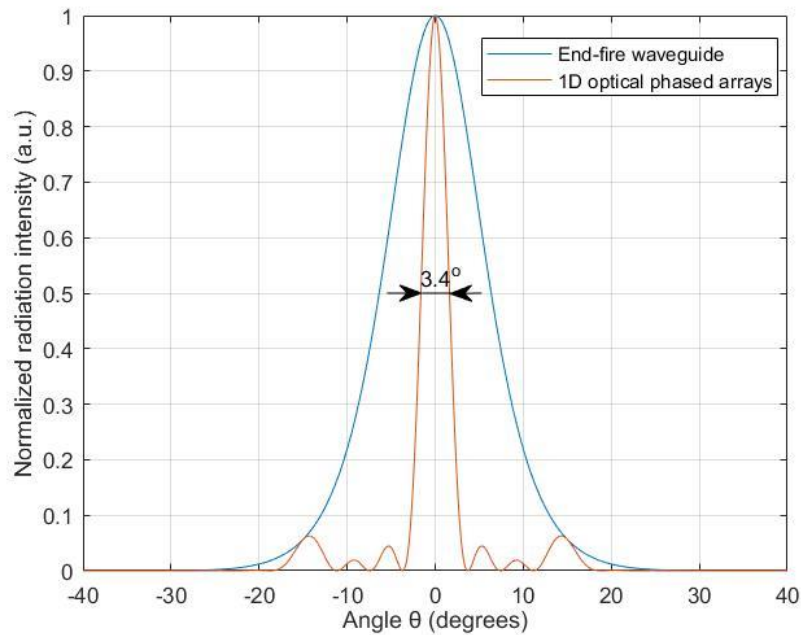


Σχήμα 4.29: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (2 AEs, 10 μ m pitch).

4.2 Διαγράμματα οπτικής στοιχειοκεραίας (OPAs) που αποτελείται από 4 στοιχεία (AEs)

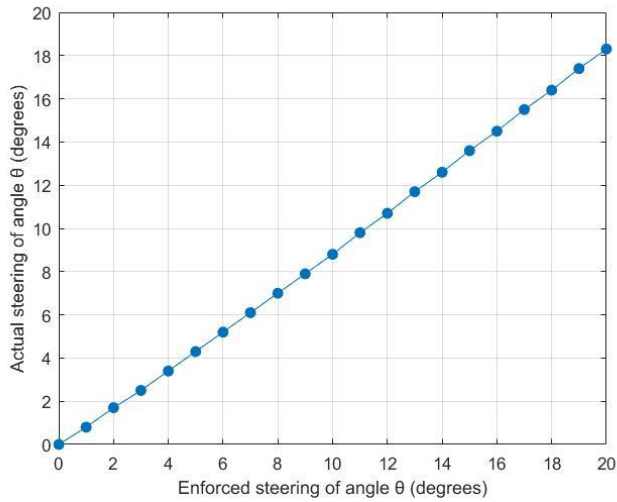
Στο υποκεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα που περιγράφηκαν στην αρχή του κεφαλαίου και αφορούν την οπτική στοιχειοκεραία (optical phased arrays – OPAs), η οποία έχει για στοιχεία της (antenna elements – AEs) τέσσερις αξονικούς κυματοδηγούς (end-fire waveguides). Η κατηγοριοποίηση τους θα γίνει με βάση την απόσταση μεταξύ των στοιχείων της (pitch), η οποία κυμαίνεται από 4μm έως 10μm.

Προκειμένου να κατανοήσουμε το προφίλ ακτινοβολίας της οπτικής στοιχειοκεραίας με τέσσερα στοιχεία, στο Σχήμα 4.30 (ίδιο με Σχήμα 3.12) έχει σχεδιαστεί το κανονικοποιημένο δισδιάστατο διάγραμμα της έντασης ακτινοβολίας της, στην περίπτωση που τα στοιχεία της απέχουν μεταξύ τους 6μm (pitch). Όπως βλέπουμε το εύρος ημίσειας ισχύος Δ_{3dB} (FWHM) είναι 3.4°.

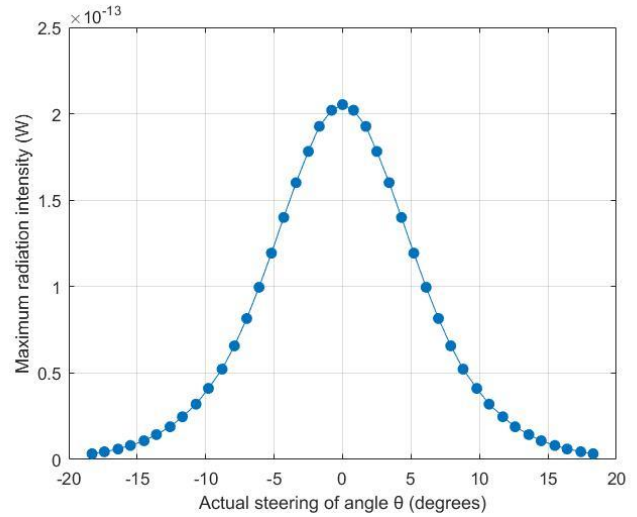


Σχήμα 4.30: Κανονικοποιημένο δισδιάστατο διάγραμμα της έντασης ακτινοβολίας. Η μπλε γραμμή αφορά τον αξονικό κυματοδηγό (end-fire waveguide), ενώ η κόκκινη γραμμή αφορά την γραμμική στοιχειοκεραία (1D OPAs) αποτελούμενη από 4 στοιχεία με απόσταση 6μm.

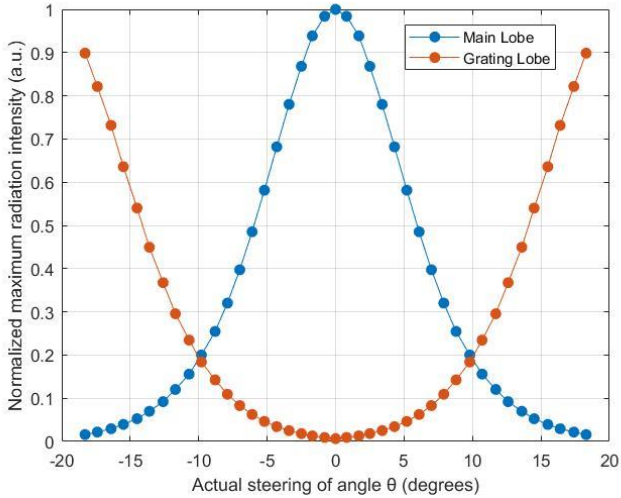
4.2.1 Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 4μm.



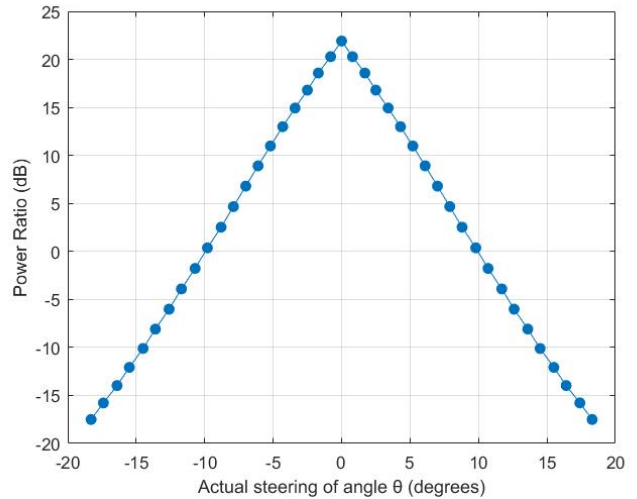
Σχήμα 4.31: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (4 AEs, 4μm pitch).



Σχήμα 4.32: Διάγραμμα απόλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (4 AEs, 4μm pitch).

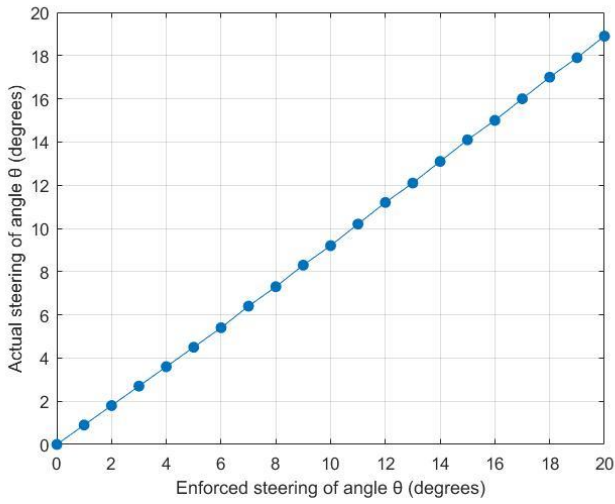


Σχήμα 4.33: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (4 AEs, 4μm pitch).

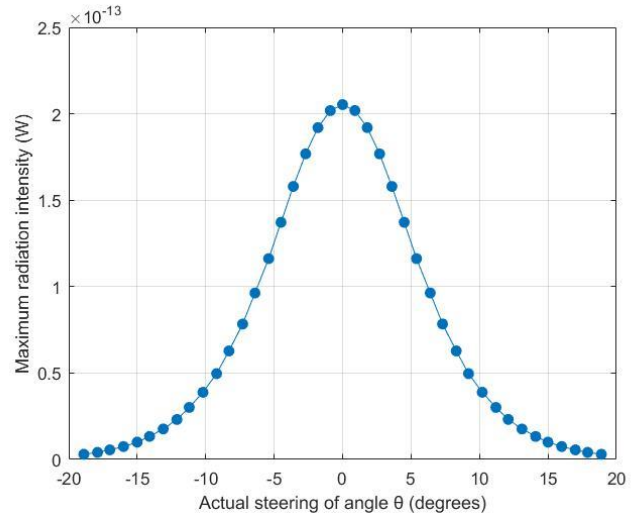


Σχήμα 4.34: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (4 AEs, 4μm pitch).

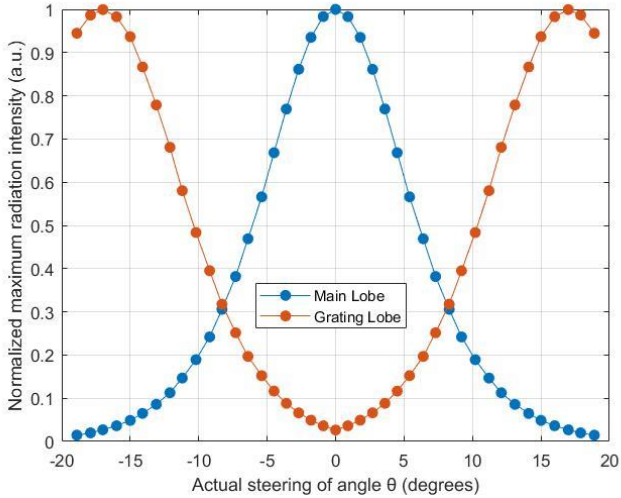
4.2.2 Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 5μm.



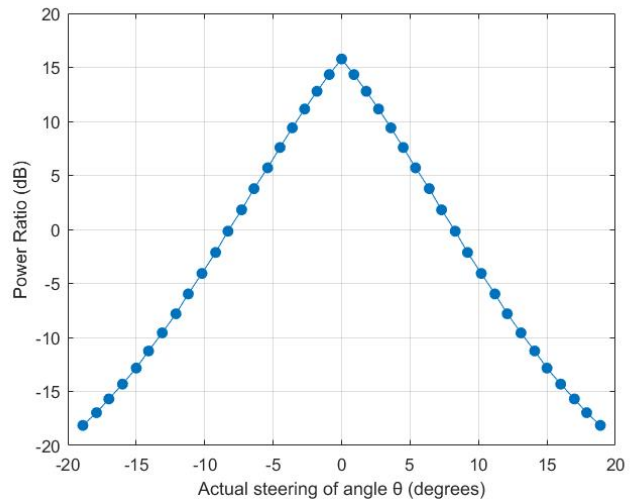
Σχήμα 4.35: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (4 AEs, 5μm pitch).



Σχήμα 4.36: Διάγραμμα απόλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (4 AEs, 5μm pitch).

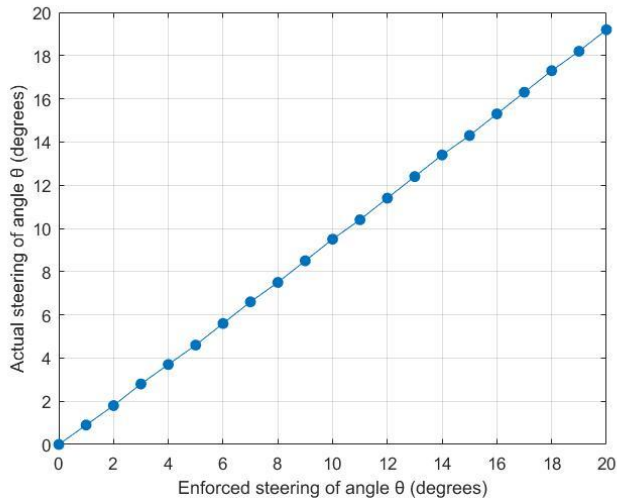


Σχήμα 4.37: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (4 AEs, 5μm pitch).

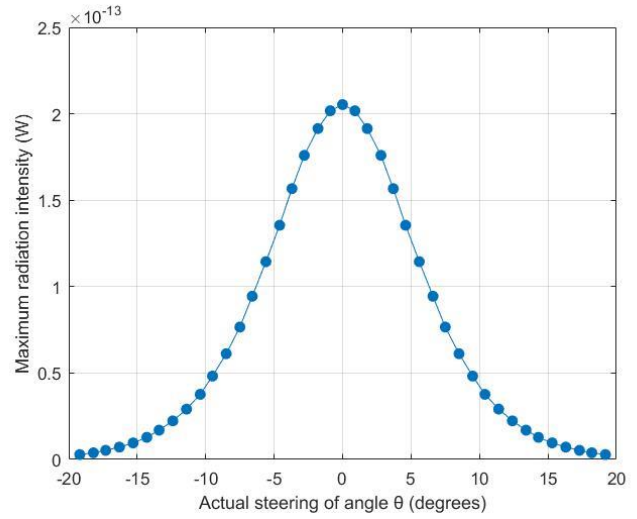


Σχήμα 4.38: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (4 AEs, 5μm pitch).

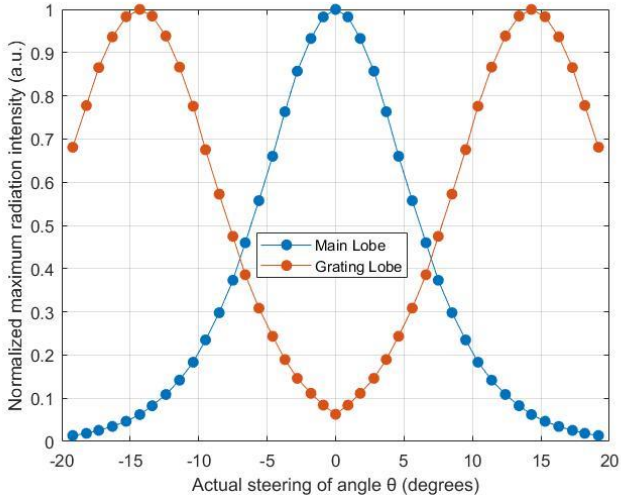
4.2.3 Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 6μm.



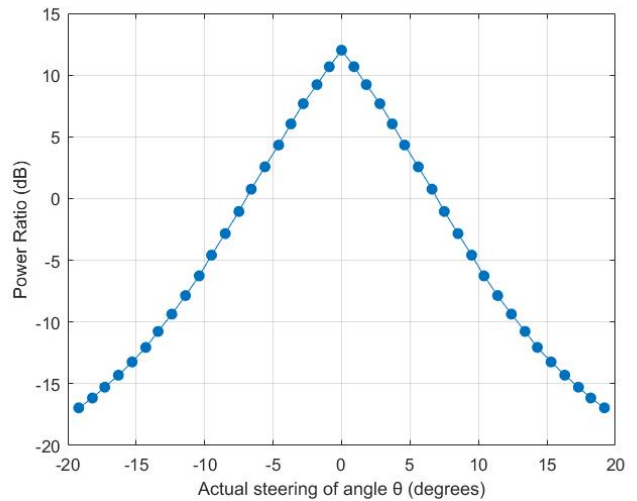
Σχήμα 4.39: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (4 AEs, 6μm pitch).



Σχήμα 4.40: Διάγραμμα απόλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (4 AEs, 6μm pitch).

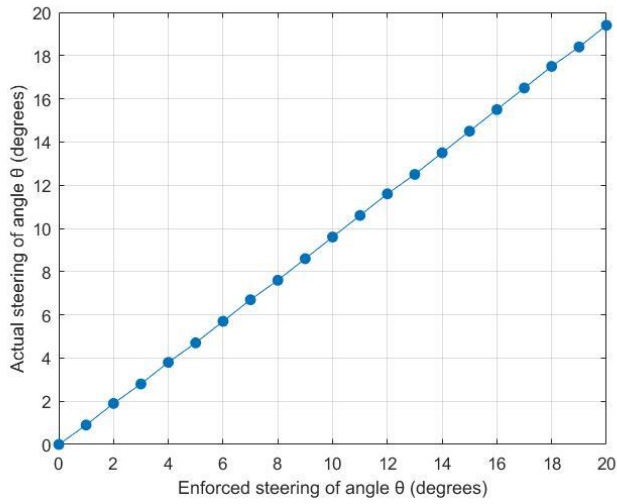


Σχήμα 4.41: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (4 AEs, 6μm pitch).

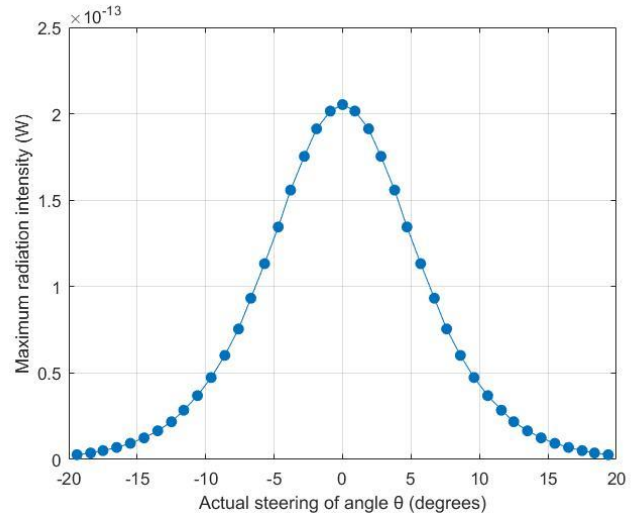


Σχήμα 4.42: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (4 AEs, 6μm pitch).

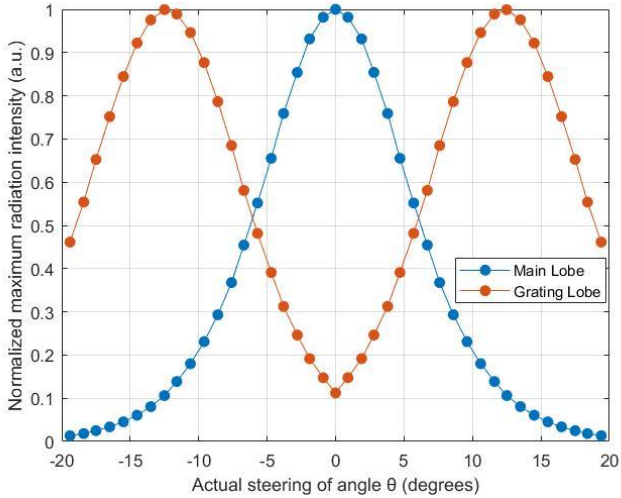
4.2.4 Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 7 μm .



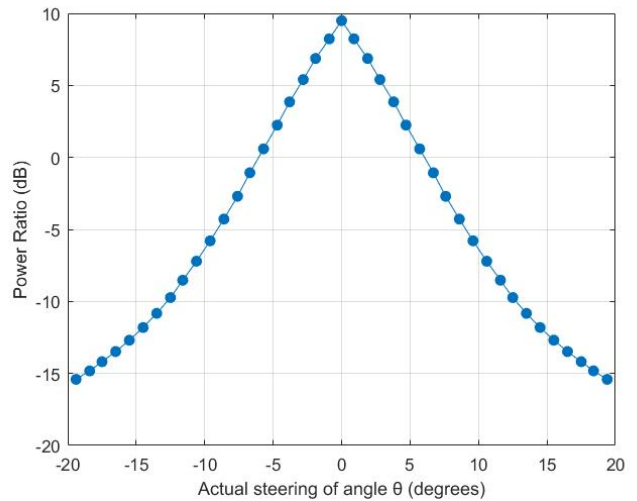
Σχήμα 4.43: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (4 AEs, 7 μm pitch).



Σχήμα 4.44: Διάγραμμα απόλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (4 AEs, 7 μm pitch).

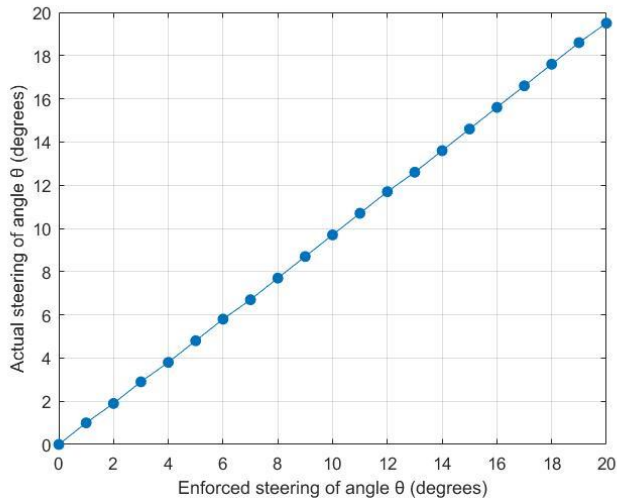


Σχήμα 4.45: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (4 AEs, 7 μm pitch).

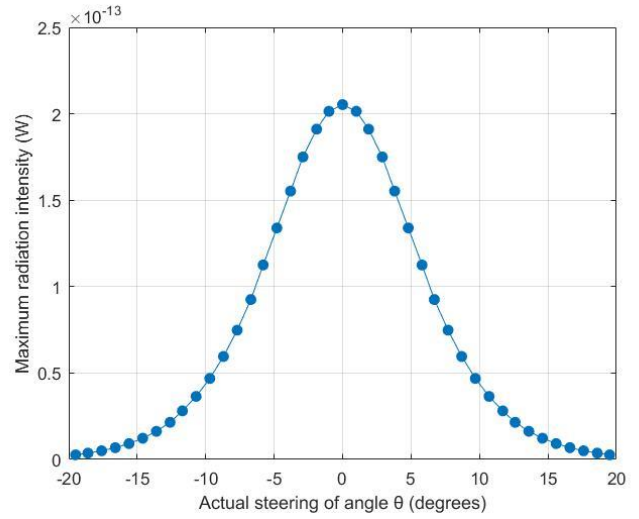


Σχήμα 4.46: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (4 AEs, 7 μm pitch).

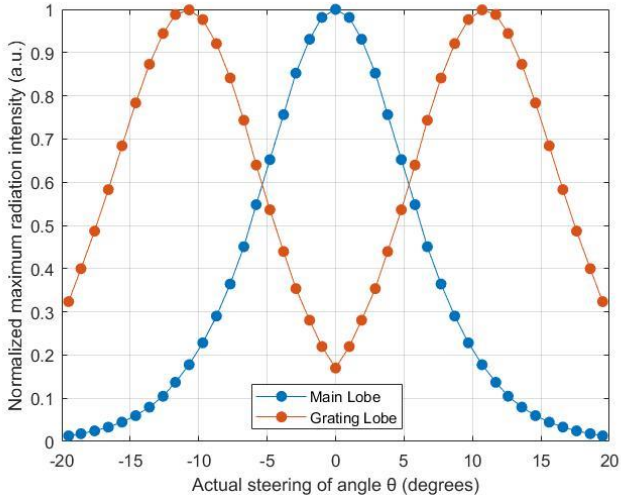
4.2.5 Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 8μm.



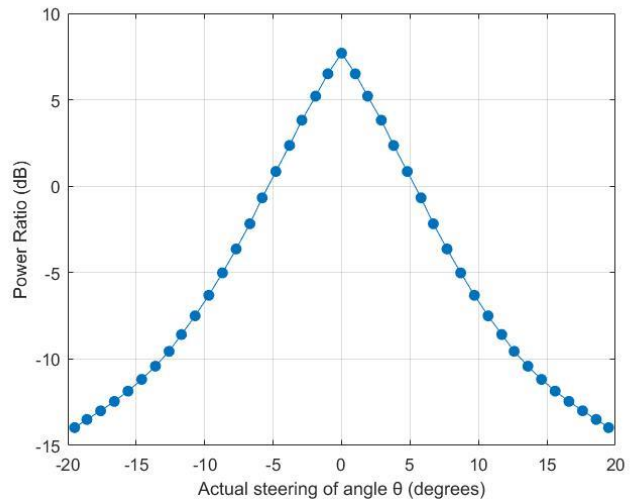
Σχήμα 4.47: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (4 AEs, 8μm pitch).



Σχήμα 4.48: Διάγραμμα απόλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (4 AEs, 8μm pitch).

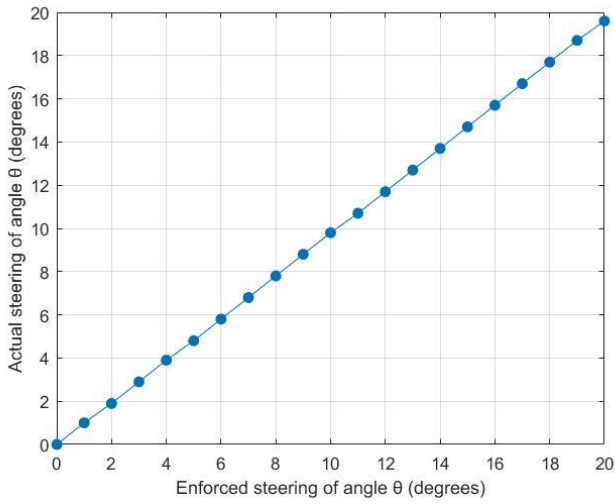


Σχήμα 4.49: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (4 AEs, 8μm pitch).

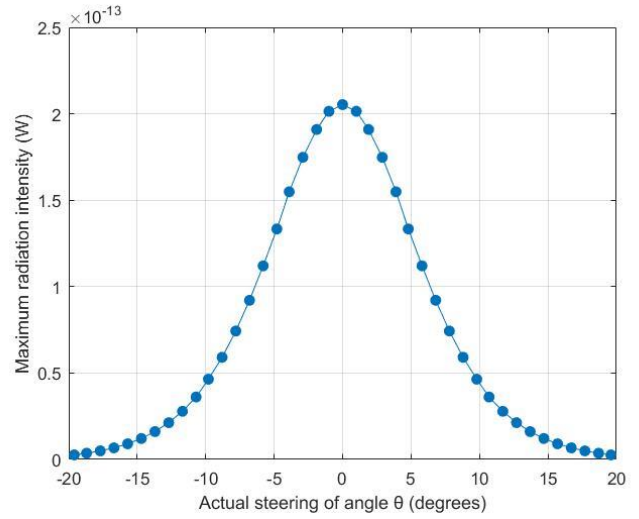


Σχήμα 4.50: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (4 AEs, 8μm pitch).

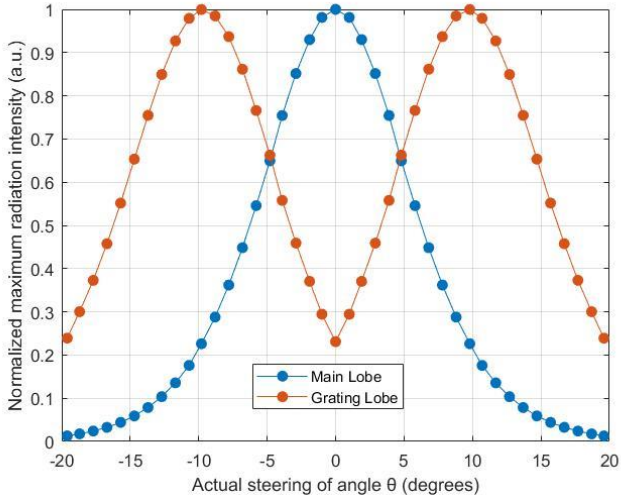
4.2.6 Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 9μm.



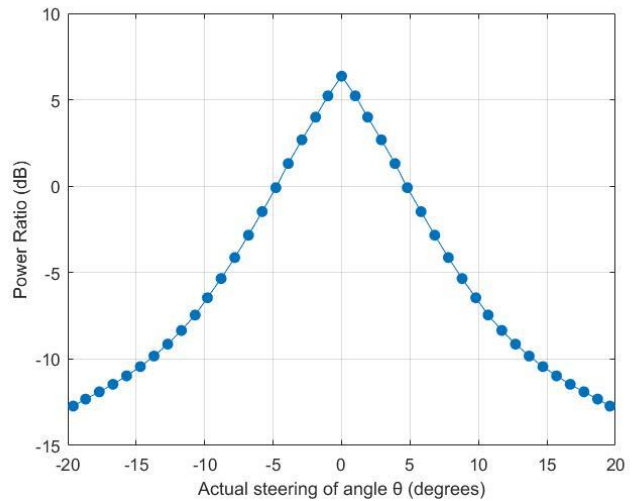
Σχήμα 4.51: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (4 AEs, 9μm pitch).



Σχήμα 4.52: Διάγραμμα απόλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (4 AEs, 9μm pitch).

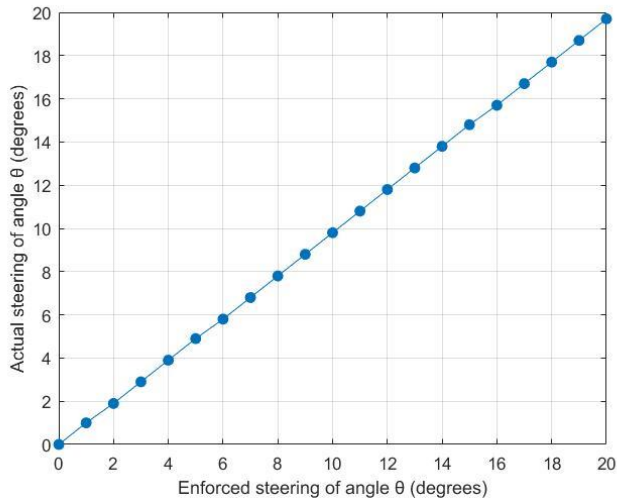


Σχήμα 4.53: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (4 AEs, 9μm pitch).

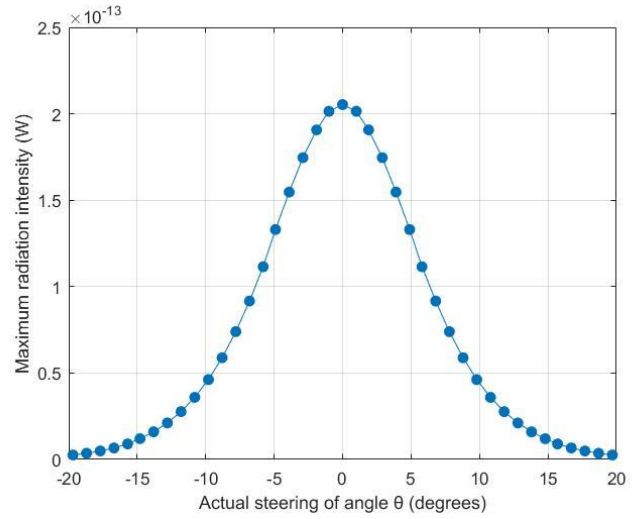


Σχήμα 4.54: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (4 AEs, 9μm pitch).

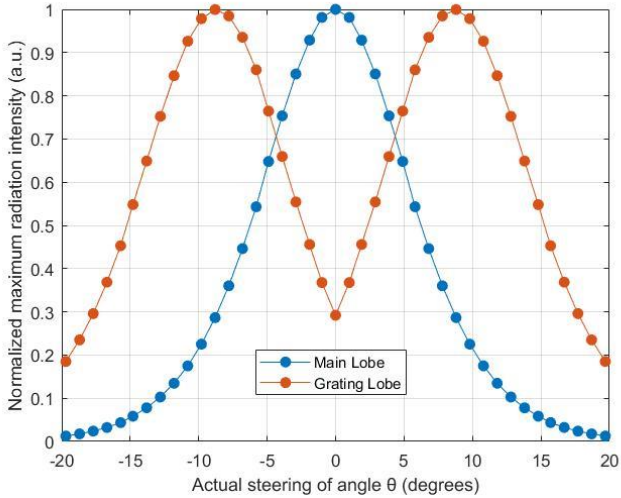
4.2.7 Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 10 μ m.



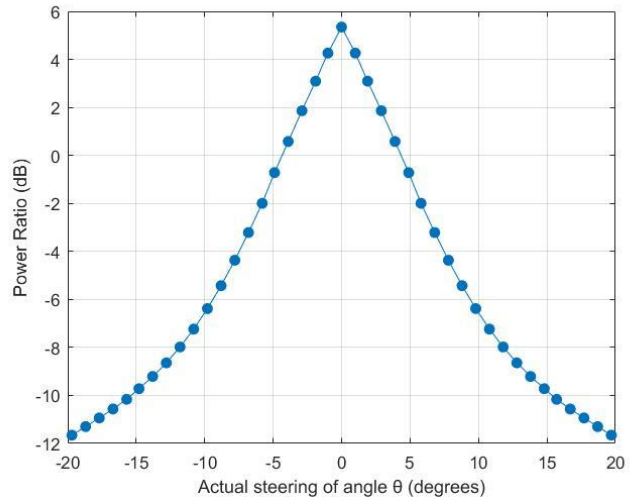
Σχήμα 4.55: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (4 AEs, 10 μ m pitch).



Σχήμα 4.56: Διάγραμμα απόλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (4 AEs, 10 μ m pitch).



Σχήμα 4.57: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (4 AEs, 10 μ m pitch).

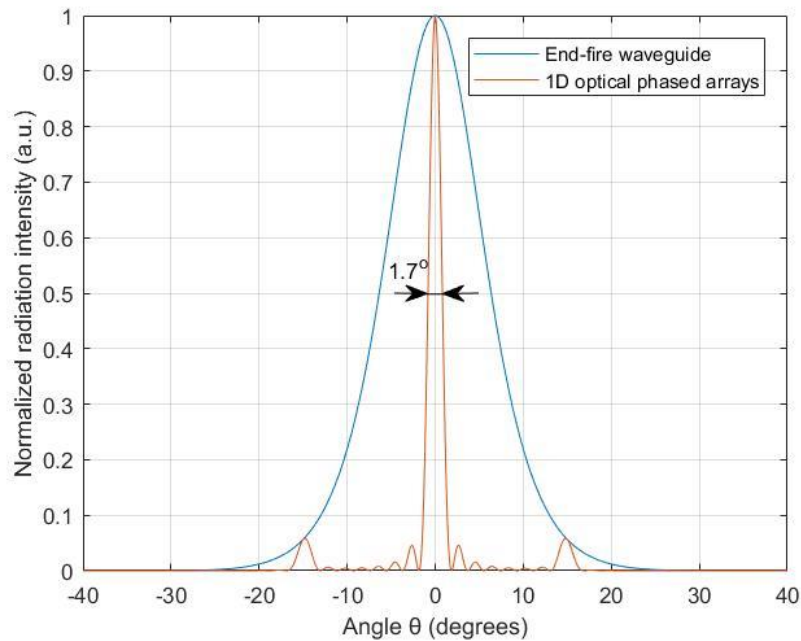


Σχήμα 4.58: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (4 AEs, 10 μ m pitch).

4.3 Διαγράμματα οπτικής στοιχειοκεραίας (OPAs) που αποτελείται από 8 στοιχεία (AEs)

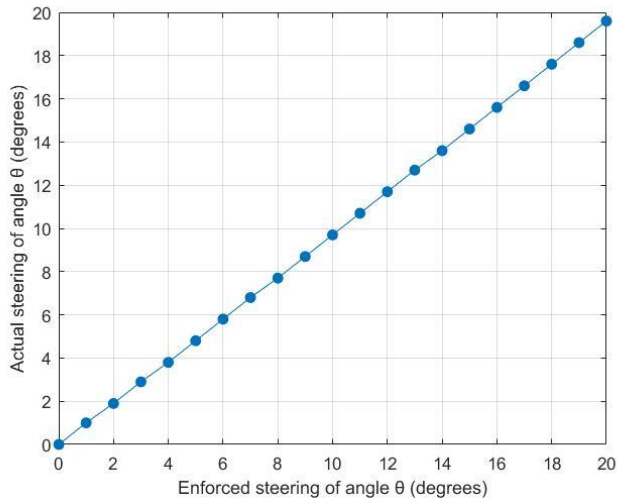
Στο υποκεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα που περιγράφηκαν στην αρχή του κεφαλαίου και αφορούν την οπτική στοιχειοκεραία (optical phased arrays – OPAs), η οποία έχει για στοιχεία της (antenna elements – AEs) οκτώ αξονικούς κυματοδηγούς (end-fire waveguides). Η κατηγοριοποίηση τους θα γίνει με βάση την απόσταση μεταξύ των στοιχείων της (pitch), η οποία κυμαίνεται από 4μm έως 10μm.

Προκειμένου να κατανοήσουμε το προφίλ ακτινοβολίας της οπτικής στοιχειοκεραίας με οκτώ στοιχεία, στο Σχήμα 4.59 έχει σχεδιαστεί το κανονικοποιημένο δισδιάστατο διάγραμμα της έντασης ακτινοβολίας της, στην περίπτωση που τα στοιχεία της απέχουν μεταξύ τους 6μm (pitch). Όπως βλέπουμε το εύρος ημίσειας ισχύος Δ_{3dB} (FWHM) είναι 1.7°.

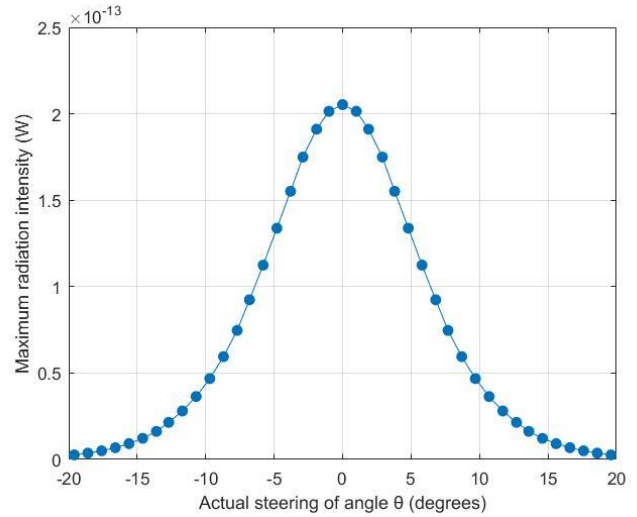


Σχήμα 4.59: Κανονικοποιημένο δισδιάστατο διάγραμμα της έντασης ακτινοβολίας. Η μπλε γραμμή αφορά τον αξονικό κυματοδηγό (end-fire waveguide), ενώ η κόκκινη γραμμή αφορά την γραμμική στοιχειοκεραία (1D OPAs) αποτελούμενη από 8 στοιχεία με απόσταση 6μm.

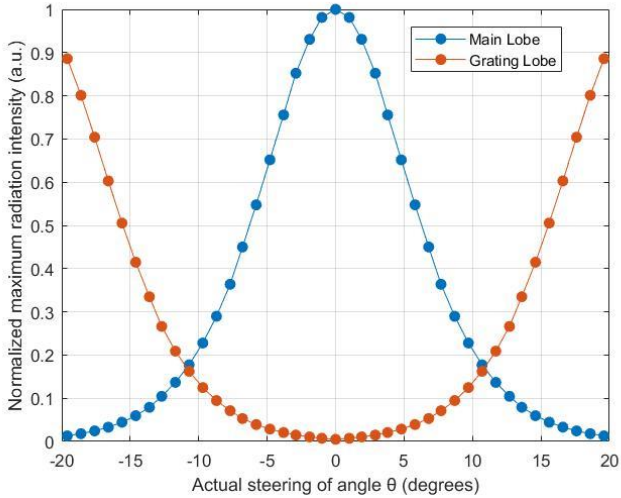
4.3.1 Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 4μm.



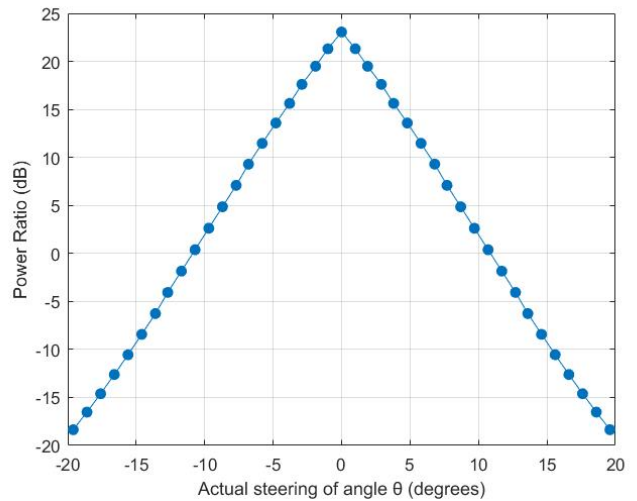
Σχήμα 4.60: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (8 AEs, 4μm pitch).



Σχήμα 4.61: Διάγραμμα απόλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (8 AEs, 4μm pitch).

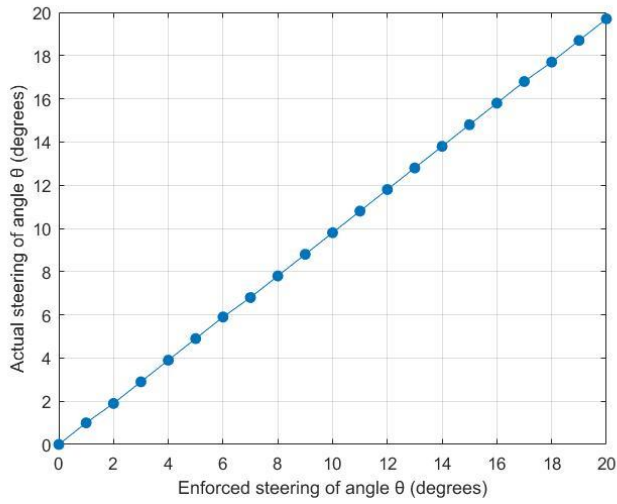


Σχήμα 4.62: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (8 AEs, 4μm pitch).

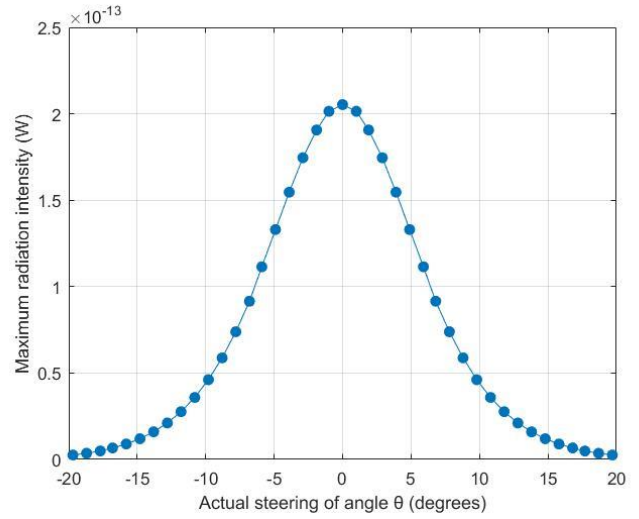


Σχήμα 4.63: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (8 AEs, 4μm pitch).

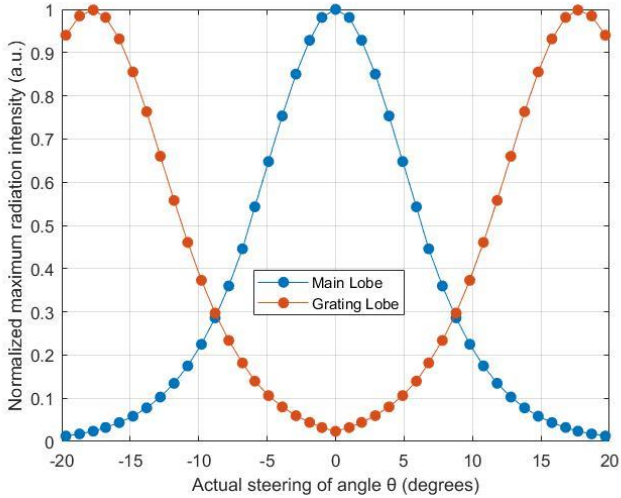
4.3.2 Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 5μm.



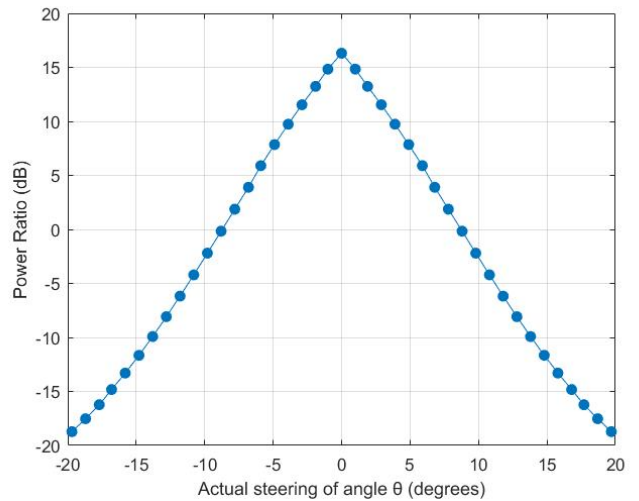
Σχήμα 4.64: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (8 AEs, 5μm pitch).



Σχήμα 4.65: Διάγραμμα απόλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (8 AEs, 5μm pitch).

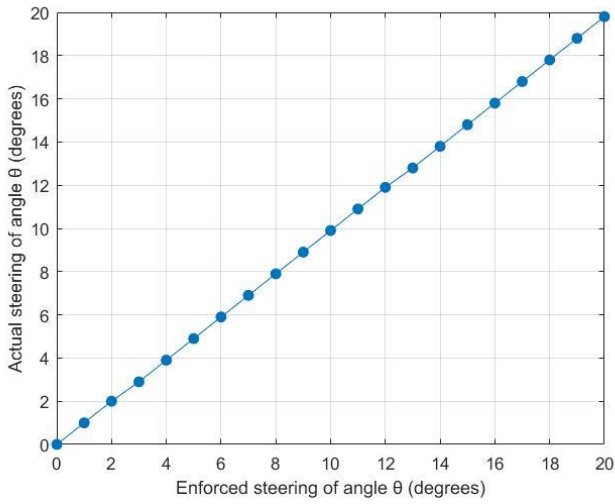


Σχήμα 4.66: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (8 AEs, 5μm pitch).

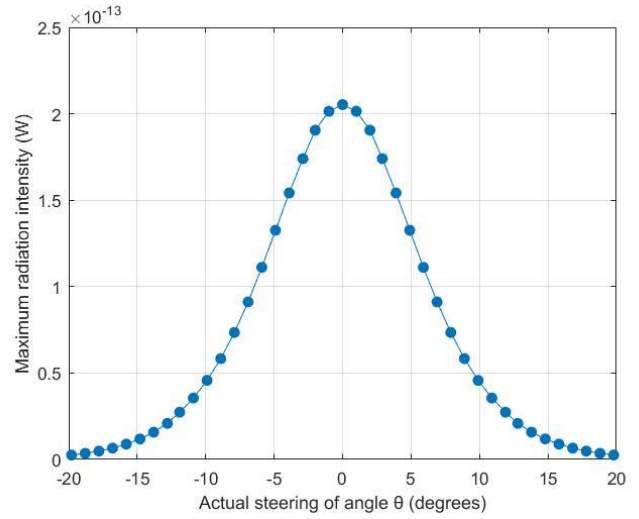


Σχήμα 4.67: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (8 AEs, 5μm pitch).

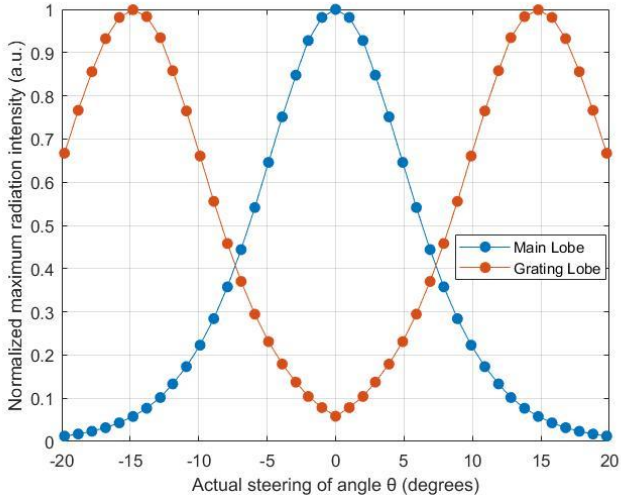
4.3.3 Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 6μm.



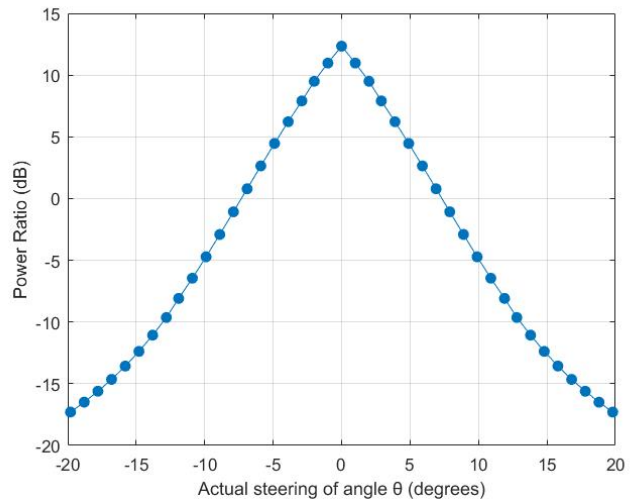
Σχήμα 4.68: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (8 AEs, 6μm pitch).



Σχήμα 4.69: Διάγραμμα απόλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (8 AEs, 6μm pitch).

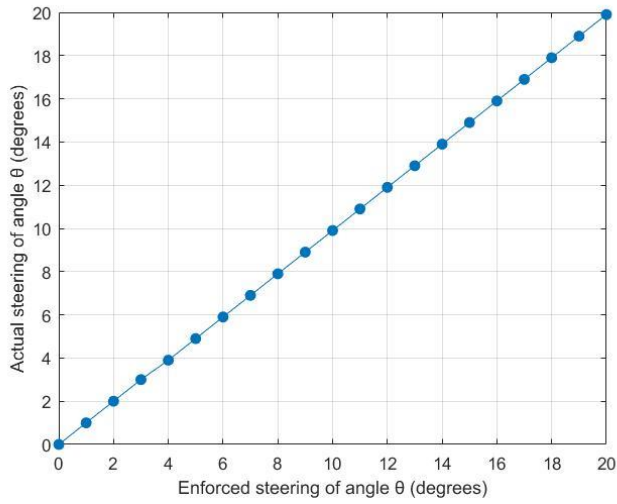


Σχήμα 4.70: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (8 AEs, 6μm pitch).

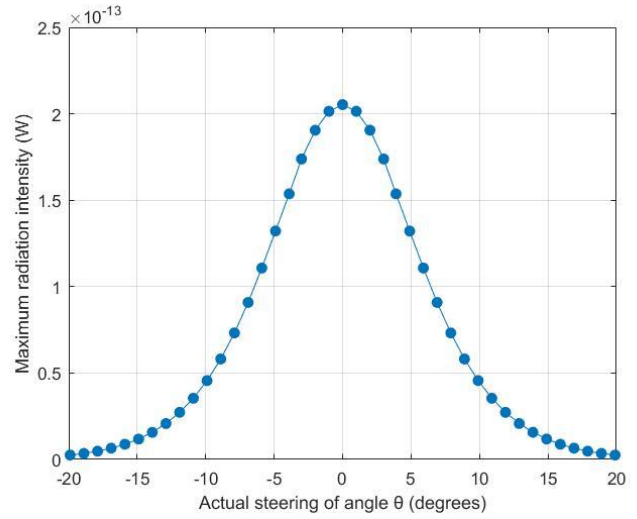


Σχήμα 4.71: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (8 AEs, 6μm pitch).

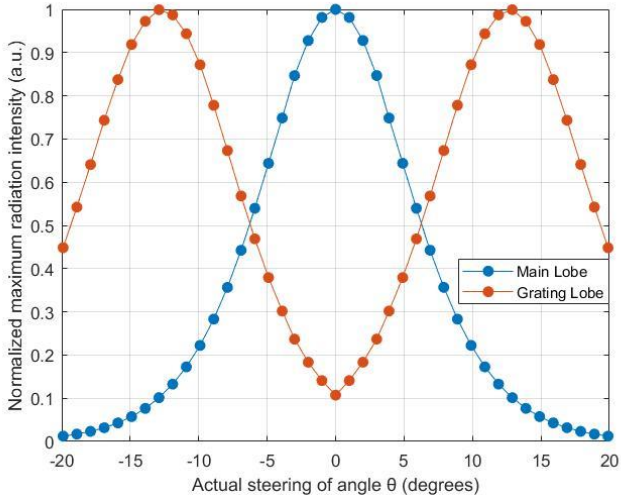
4.3.4 Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 7 μm .



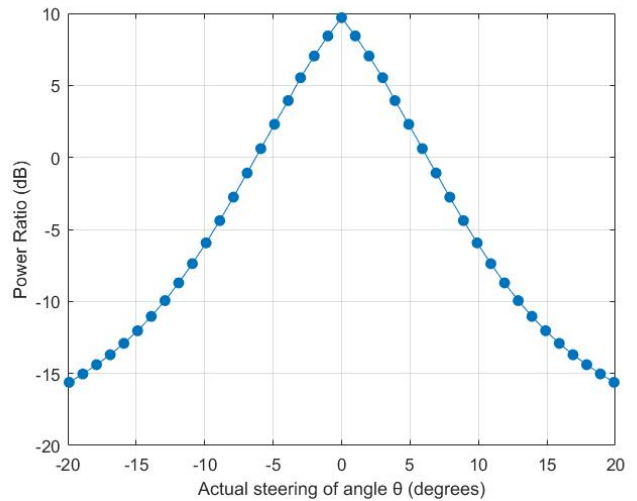
Σχήμα 4.72: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (8 AEs, 7 μm pitch).



Σχήμα 4.73: Διάγραμμα απόλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (8 AEs, 7 μm pitch).

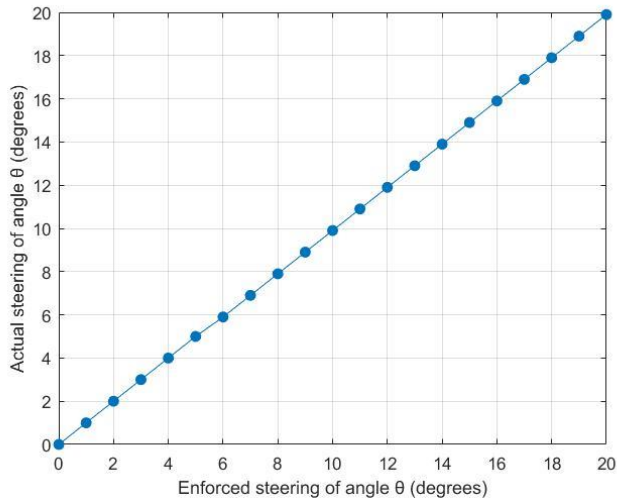


Σχήμα 4.74: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (8 AEs, 7 μm pitch).

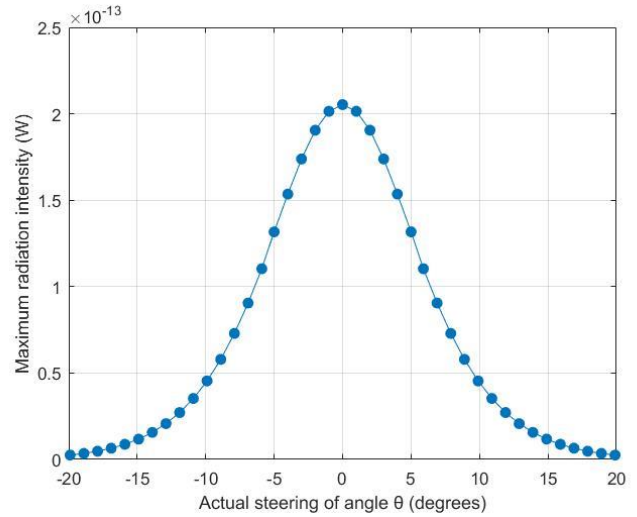


Σχήμα 4.75: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (8 AEs, 7 μm pitch).

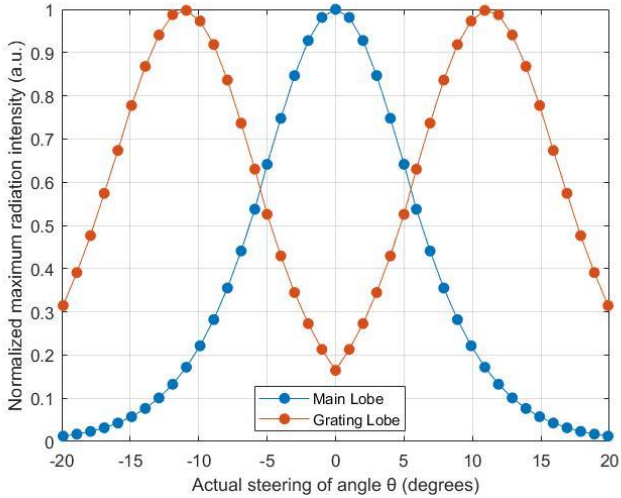
4.3.5 Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 8μm.



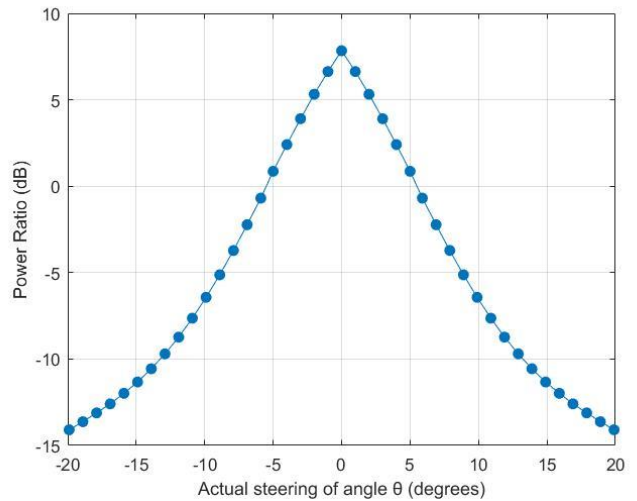
Σχήμα 4.76: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (8 AEs, 8μm pitch).



Σχήμα 4.77: Διάγραμμα απόλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (8 AEs, 8μm pitch).

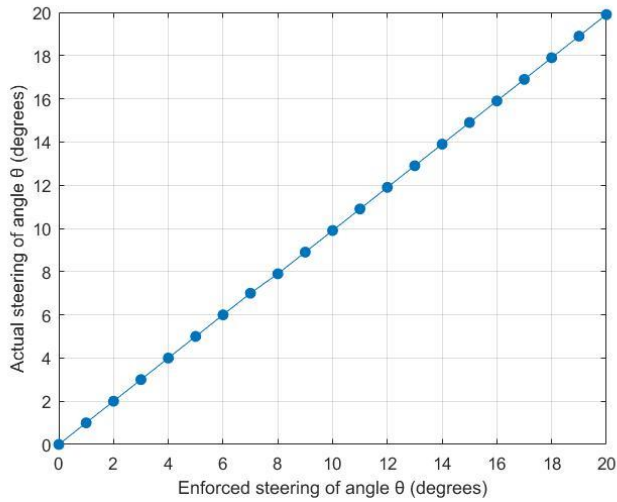


Σχήμα 4.78: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (8 AEs, 8μm pitch).

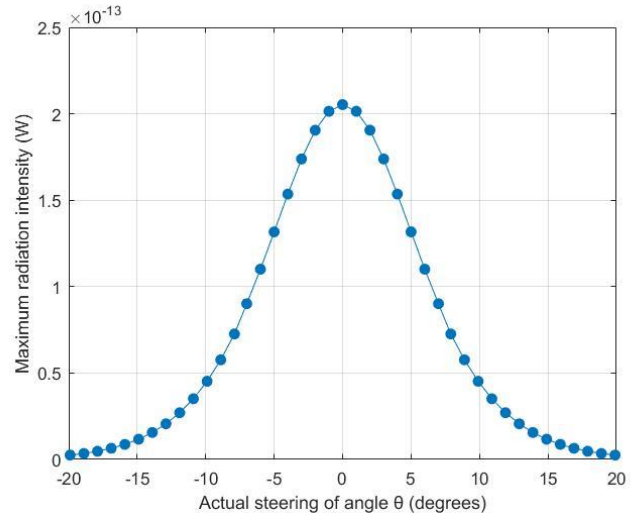


Σχήμα 4.79: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (8 AEs, 8μm pitch).

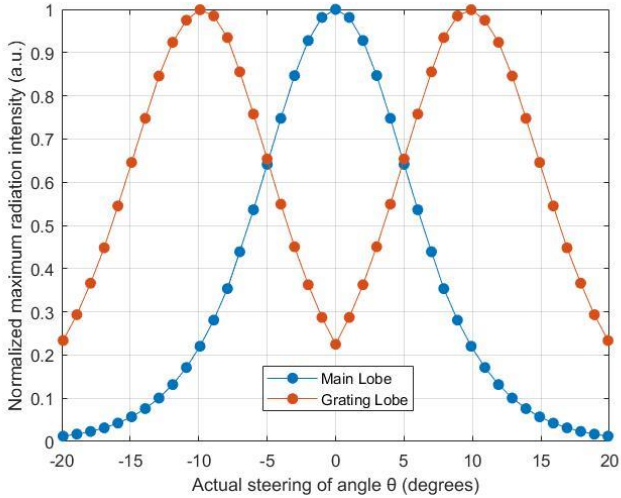
4.3.6 Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 9μm.



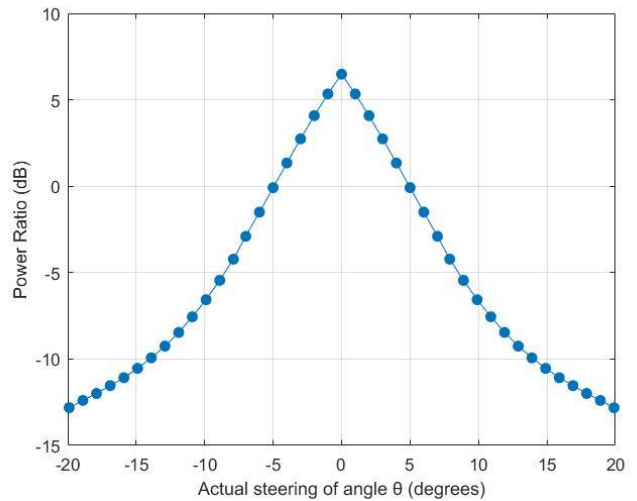
Σχήμα 4.80: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (8 AEs, 9μm pitch).



Σχήμα 4.81: Διάγραμμα απόλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (8 AEs, 9μm pitch).

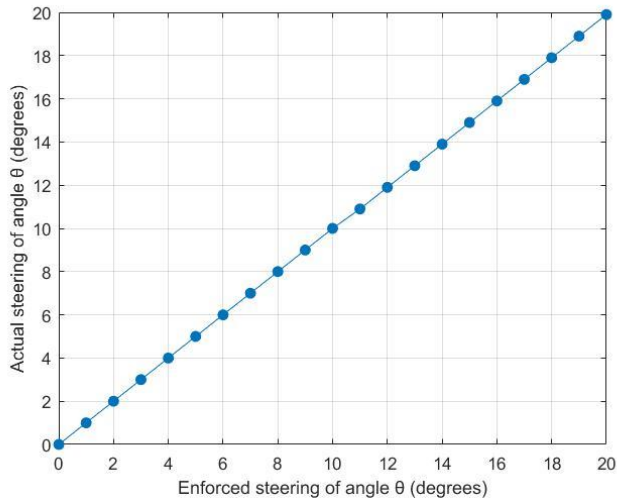


Σχήμα 4.82: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (8 AEs, 9μm pitch).

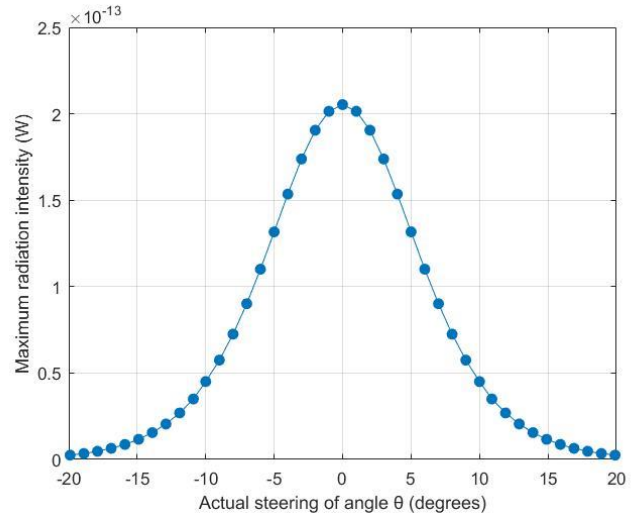


Σχήμα 4.83: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (8 AEs, 9μm pitch).

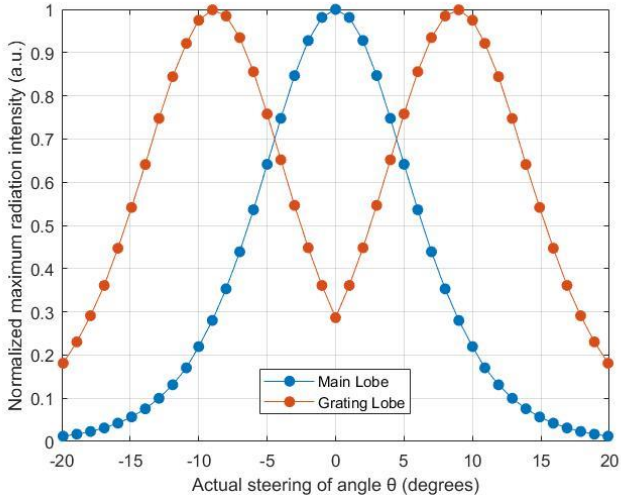
4.3.7 Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 10 μ m.



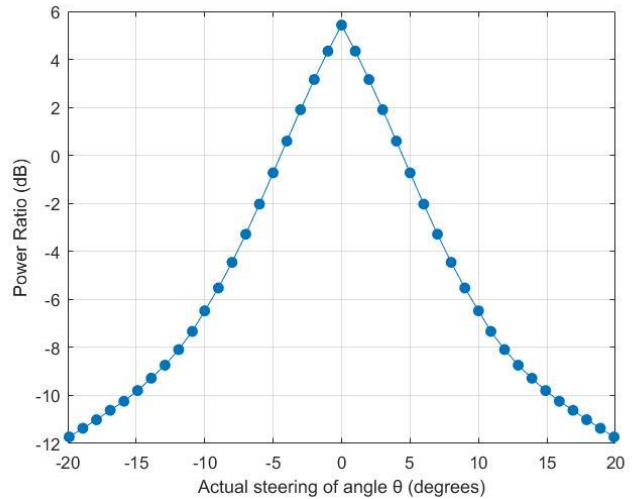
Σχήμα 4.84: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (8 AEs, 10 μ m pitch).



Σχήμα 4.85: Διάγραμμα απόλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (8 AEs, 10 μ m pitch).



Σχήμα 4.86: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (8 AEs, 10 μ m pitch).

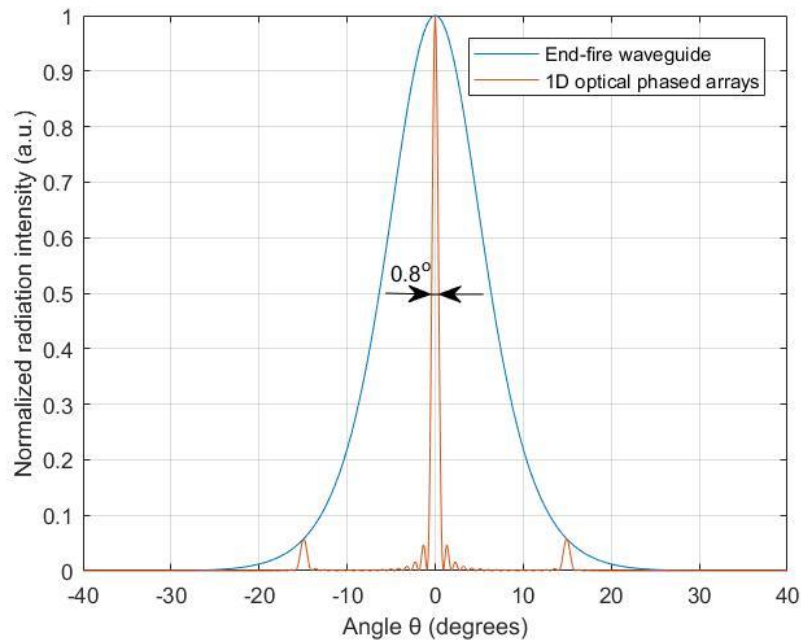


Σχήμα 4.87: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (8 AEs, 10 μ m pitch).

4.4 Διαγράμματα οπτικής στοιχειοκεραίας (OPAs) που αποτελείται από 16 στοιχεία (AEs)

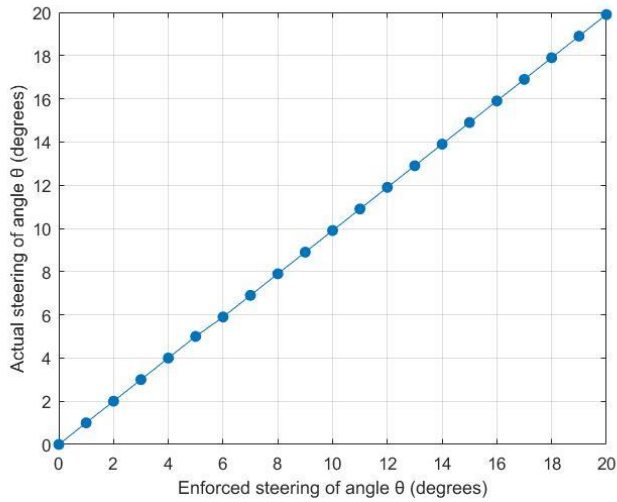
Στο υποκεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα που περιγράφηκαν στην αρχή του κεφαλαίου και αφορούν την οπτική στοιχειοκεραία (optical phased arrays – OPAs), η οποία έχει για στοιχεία της (antenna elements – AEs) δεκαέξι αξονικούς κυματοδηγούς (end-fire waveguides). Η κατηγοριοποίηση τους θα γίνει με βάση την απόσταση μεταξύ των στοιχείων της (pitch), η οποία κυμαίνεται από 4μm έως 10μm.

Προκειμένου να κατανοήσουμε το προφίλ ακτινοβολίας της οπτικής στοιχειοκεραίας με δεκαέξι στοιχεία, στο Σχήμα 4.88 έχει σχεδιαστεί το κανονικοποιημένο δισδιάστατο διάγραμμα της έντασης ακτινοβολίας της, στην περίπτωση που τα στοιχεία της απέχουν μεταξύ τους 6μm (pitch). Όπως βλέπουμε το εύρος ημίσειας ισχύος Δ_{3dB} (FWHM) είναι 0.8° .

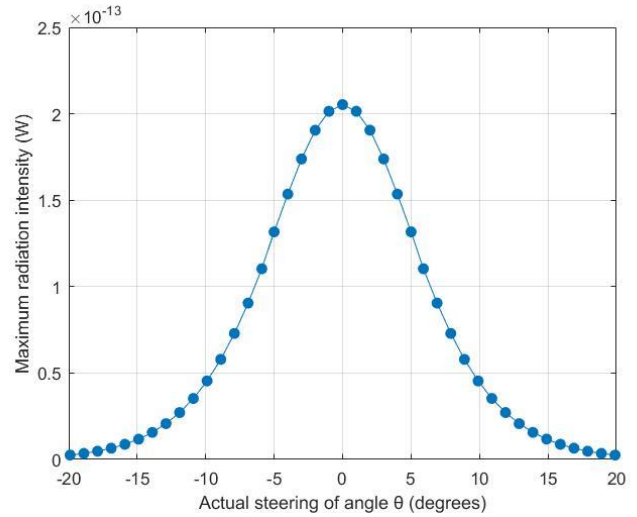


Σχήμα 4.88: Κανονικοποιημένο δισδιάστατο διάγραμμα της έντασης ακτινοβολίας. Η μπλε γραμμή αφορά τον αξονικό κυματοδηγό (end-fire waveguide), ενώ η κόκκινη γραμμή αφορά την γραμμική στοιχειοκεραία (1D OPAs) αποτελούμενη από 16 στοιχεία με απόσταση 6μm.

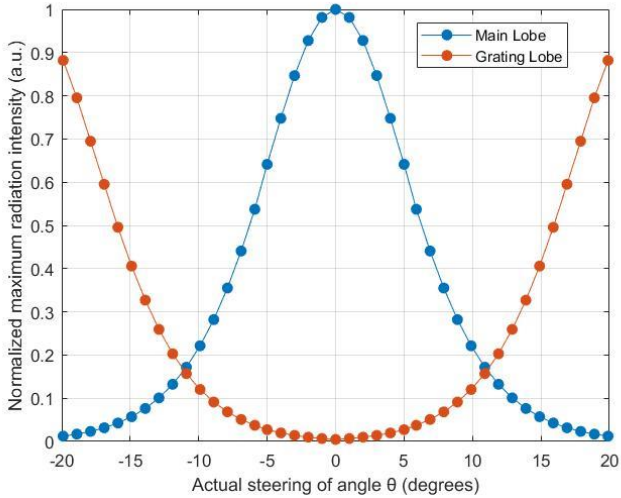
4.4.1 Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 4μm.



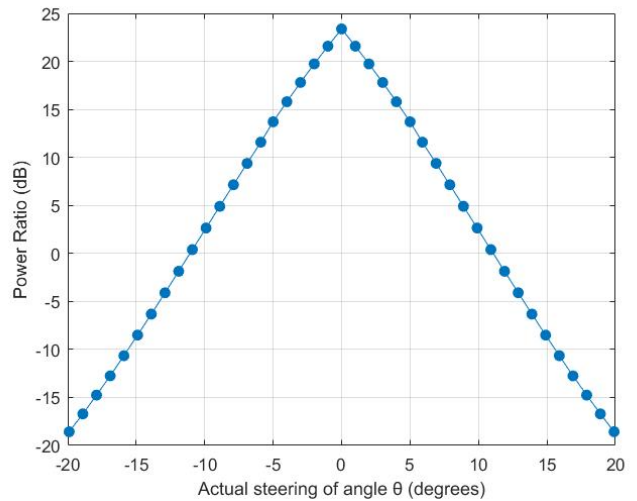
Σχήμα 4.89: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (16 AEs, 4μm pitch).



Σχήμα 4.90: Διάγραμμα απόλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (16 AEs, 4μm pitch).

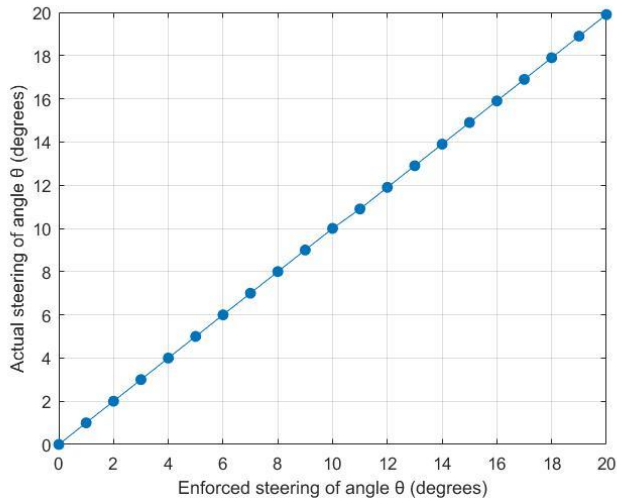


Σχήμα 4.91: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (16 AEs, 4μm pitch).

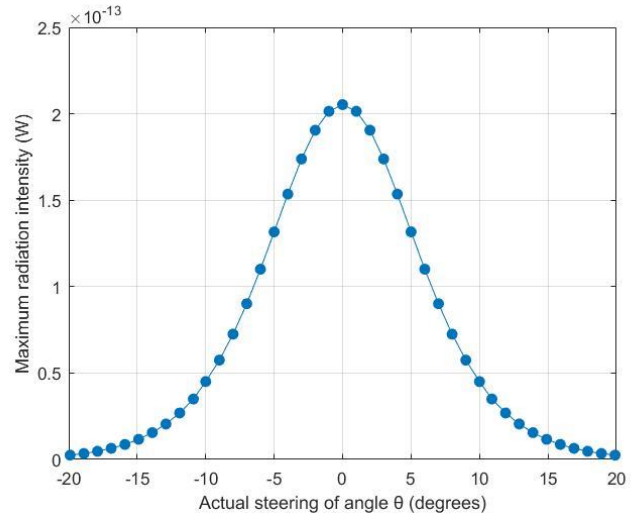


Σχήμα 4.92: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (16 AEs, 4μm pitch).

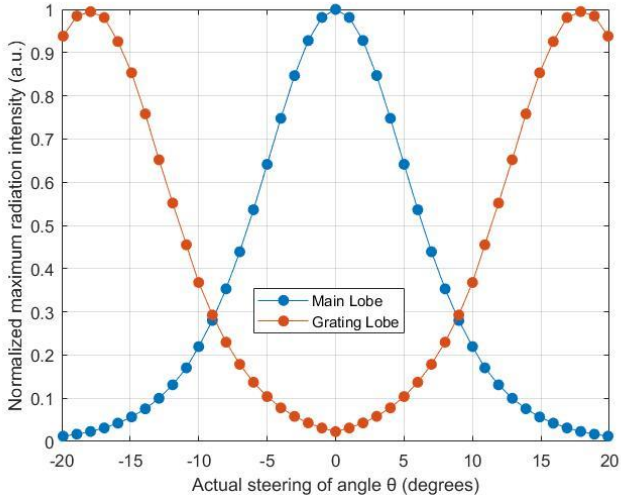
4.4.2 Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 5μm.



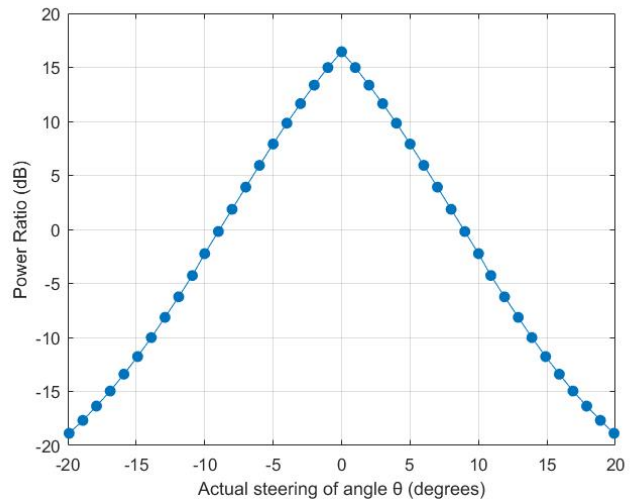
Σχήμα 4.93: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (16 AEs, 5μm pitch).



Σχήμα 4.94: Διάγραμμα απόλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (16 AEs, 5μm pitch).

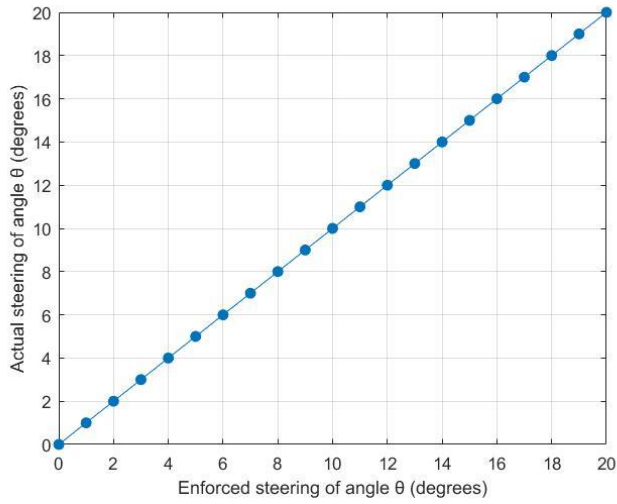


Σχήμα 4.95: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (16 AEs, 5μm pitch).

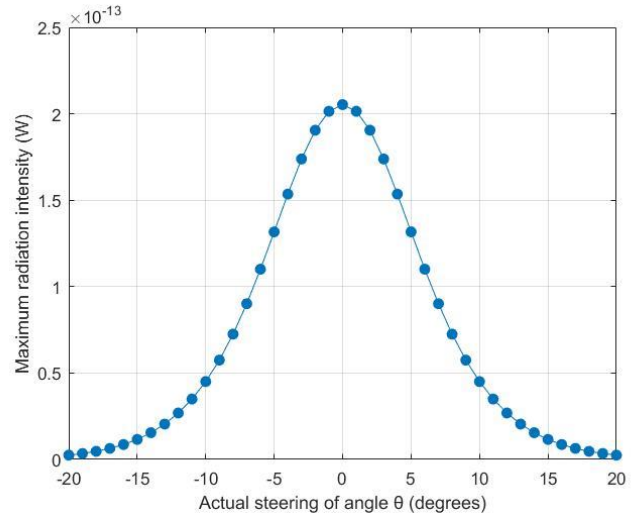


Σχήμα 4.96: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (16 AEs, 5μm pitch).

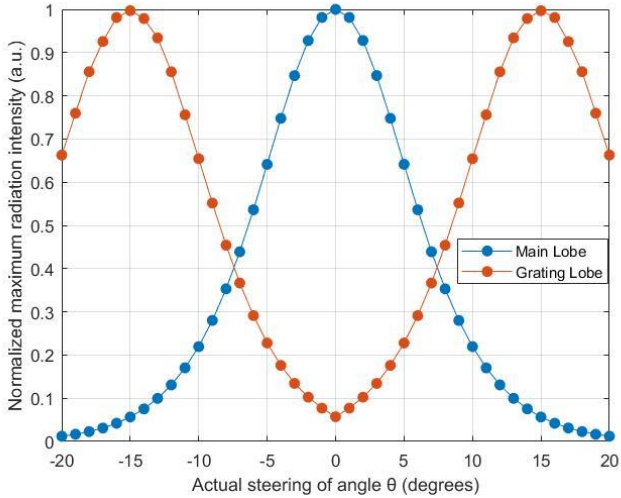
4.4.3 Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 6μm.



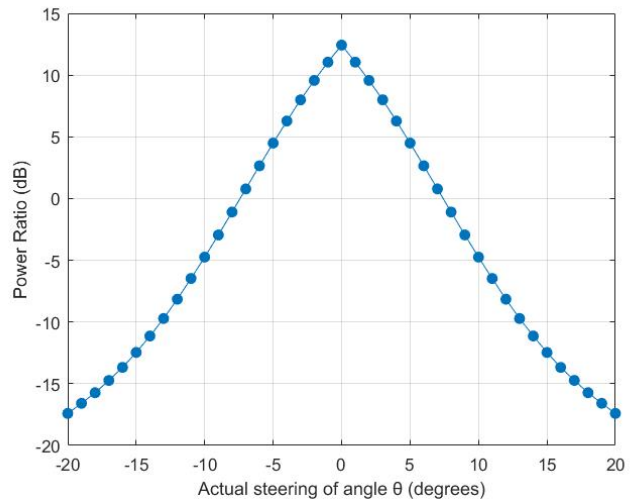
Σχήμα 4.97: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (16 AEs, 6μm pitch).



Σχήμα 4.98: Διάγραμμα απόλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (16 AEs, 6μm pitch).

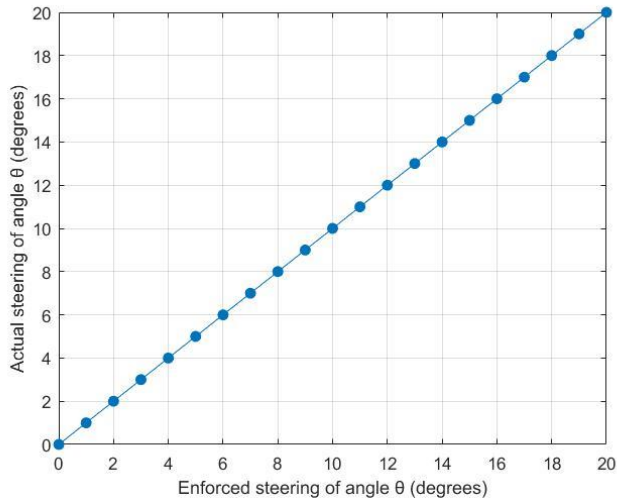


Σχήμα 4.99: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (16 AEs, 6μm pitch).

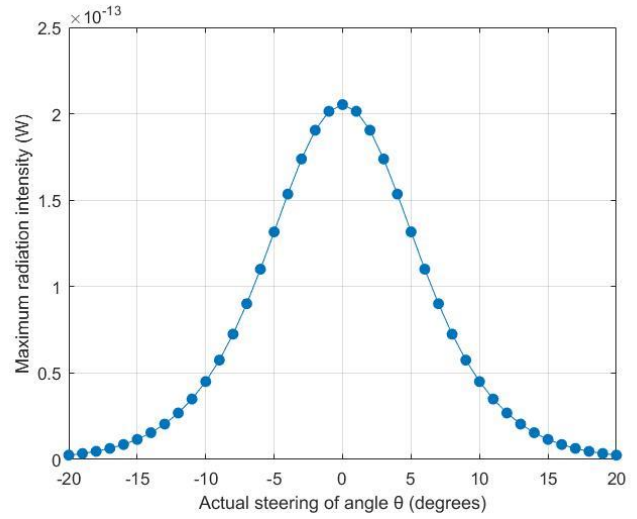


Σχήμα 4.100: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (16 AEs, 6μm pitch).

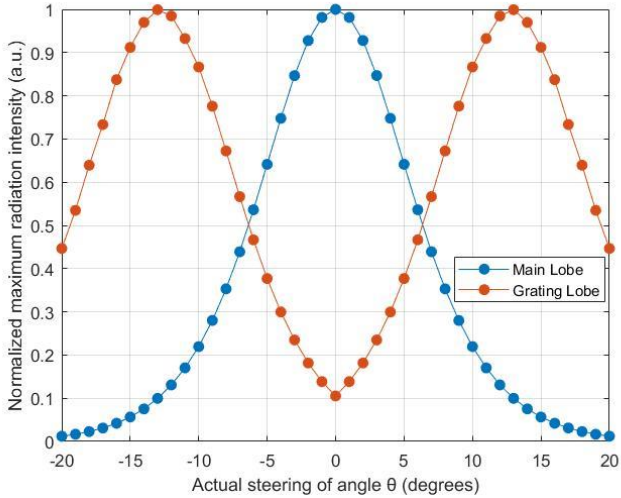
4.4.4 Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 7μm.



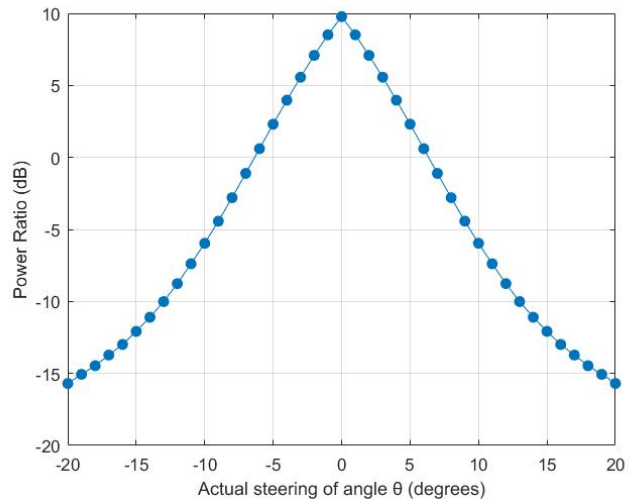
Σχήμα 4.101: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (16 AEs, 7μm pitch).



Σχήμα 4.102: Διάγραμμα απώλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (16 AEs, 7μm pitch).

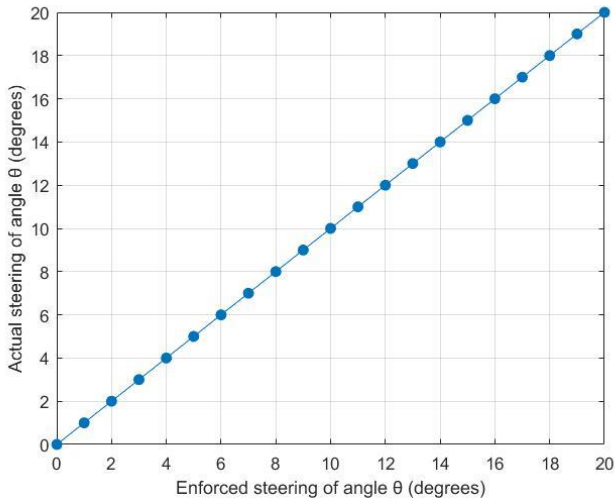


Σχήμα 4.103: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (16 AEs, 7μm pitch).

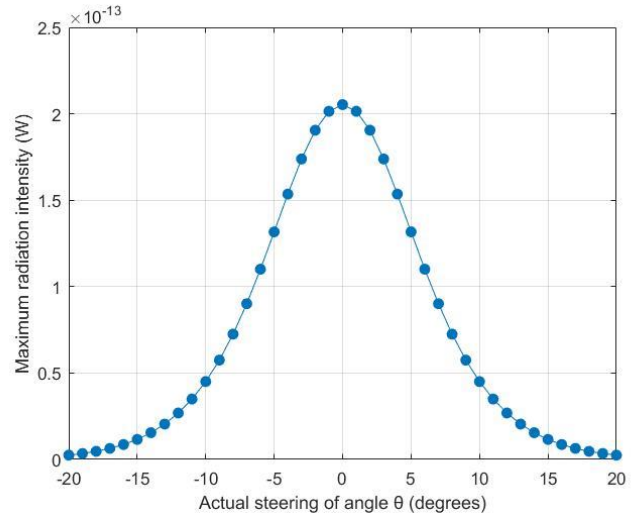


Σχήμα 4.104: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (16 AEs, 7μm pitch).

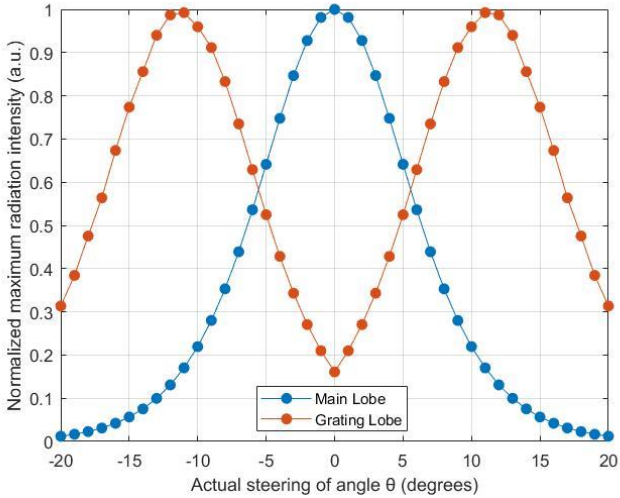
4.4.5 Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 8μm.



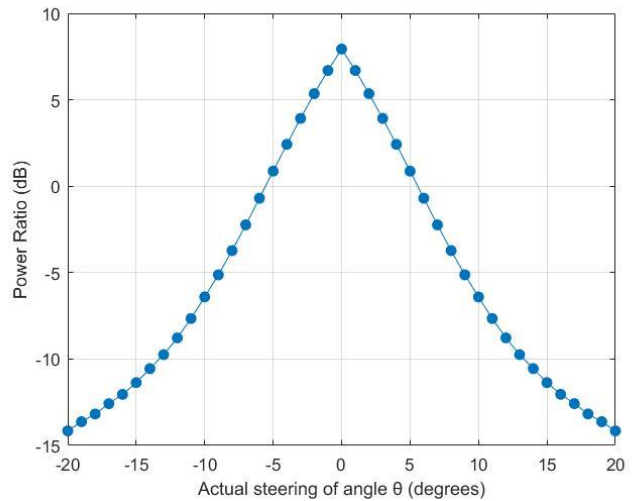
Σχήμα 4.105: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (16 AEs, 8μm pitch).



Σχήμα 4.106: Διάγραμμα απώλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (16 AEs, 8μm pitch).

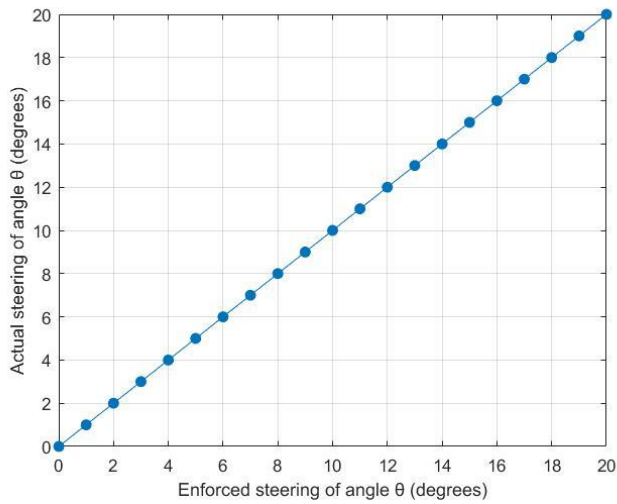


Σχήμα 4.107: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (16 AEs, 8μm pitch).

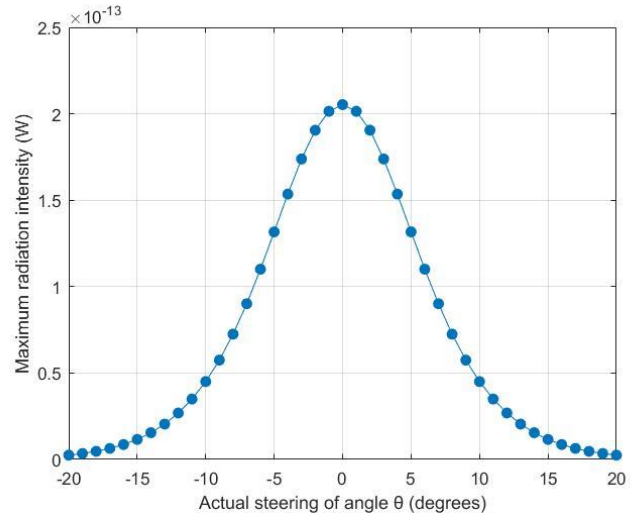


Σχήμα 4.108: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (16 AEs, 8μm pitch).

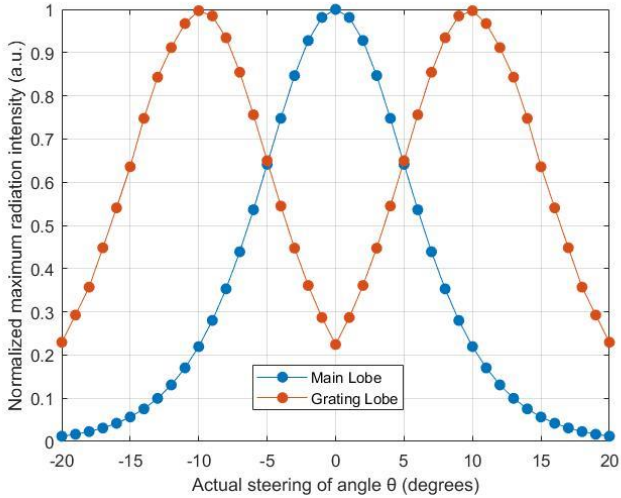
4.4.6 Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 9μm.



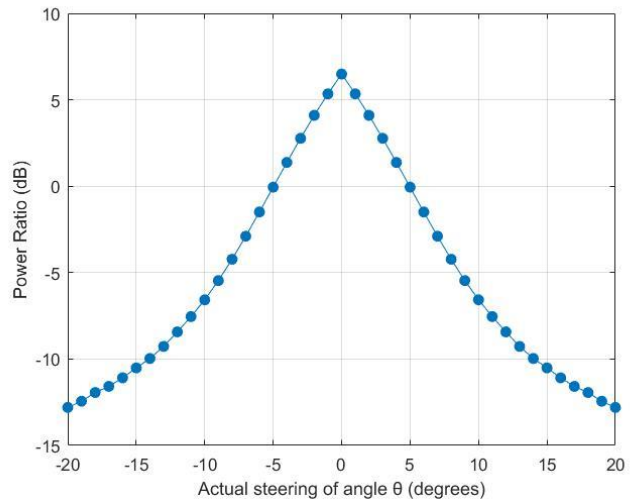
Σχήμα 4.109: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (16 AEs, 9μm pitch).



Σχήμα 4.110: Διάγραμμα απώλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (16 AEs, 9μm pitch).

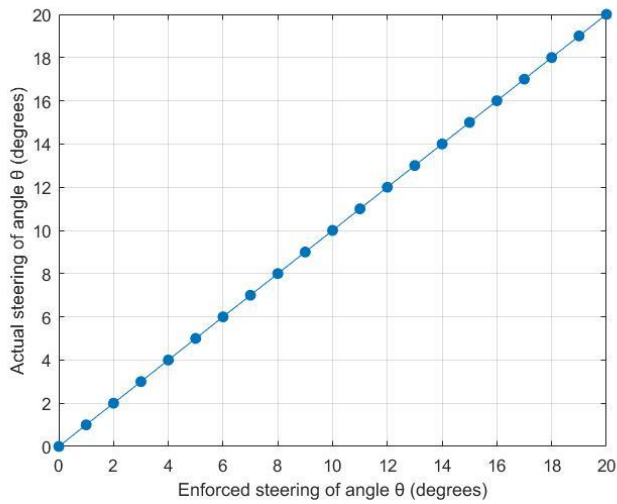


Σχήμα 4.111: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (16 AEs, 9μm pitch).

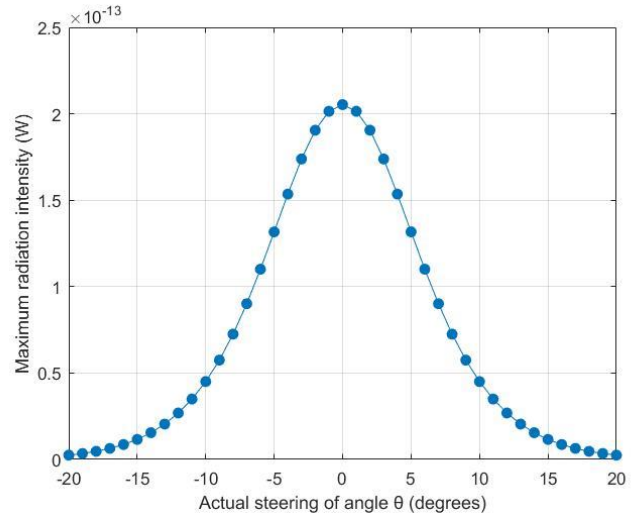


Σχήμα 4.112: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (16 AEs, 9μm pitch).

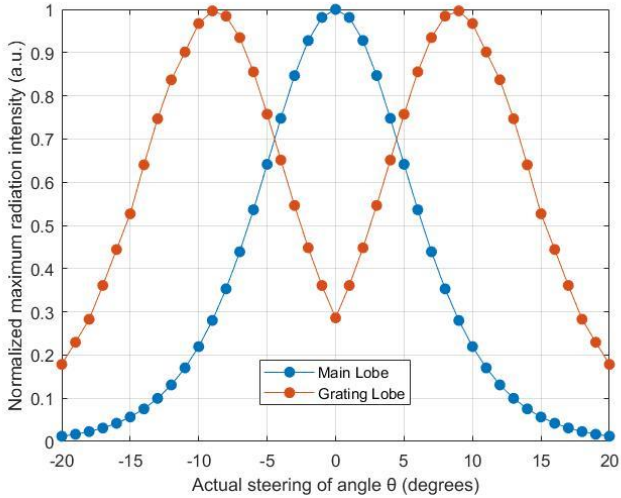
4.4.7 Διαγράμματα για βήμα (pitch) στοιχειοκεραίας 10 μ m.



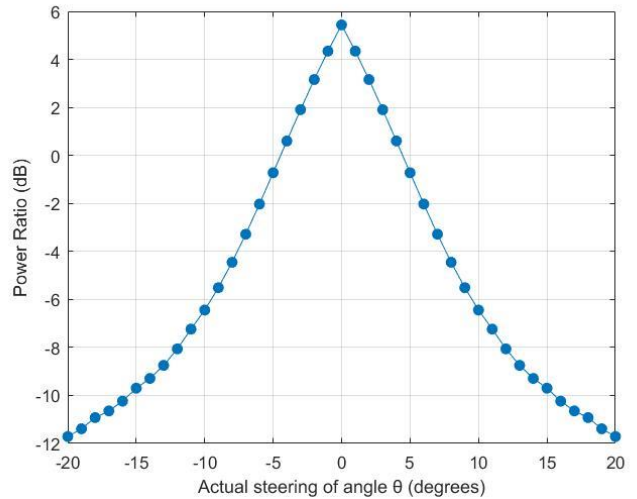
Σχήμα 4.113: Διάγραμμα απόκλισης γωνίας επιβαλλόμενης στροφής στη διεύθυνση του κύριου λοβού, (16 AEs, 10 μ m pitch).



Σχήμα 4.114: Διάγραμμα απώλειας της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας του κύριου λοβού, (16 AEs, 10 μ m pitch).



Σχήμα 4.115: Κανονικοποιημένο διάγραμμα συσχέτισης των μέγιστων εντάσεων ακτινοβολίας κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (16 AEs, 10 μ m pitch).



Σχήμα 4.116: Διάγραμμα συσχέτισης ισχύος (Power Ratio) μεταξύ κύριου λοβού και πρώτου grating lobe, (16 AEs, 10 μ m pitch).

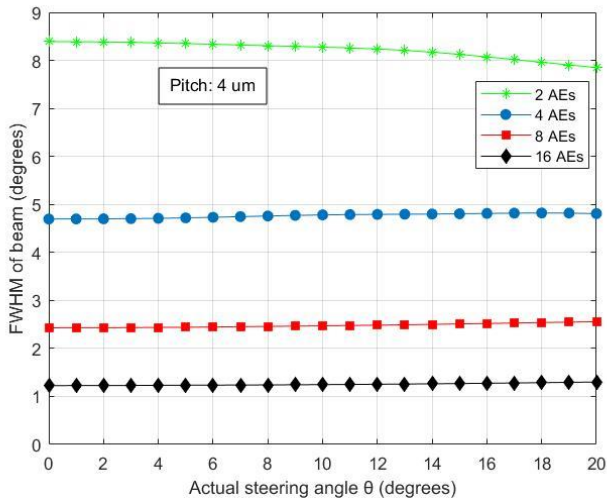
4.5 Τελικά διαγράμματα οπτικής στοιχειοκεραίας (OPAs)

Μετά την μελέτη όλων των περιπτώσεων που αναφέρθηκαν και την σχεδίαση των παραπάνω διαγραμμάτων, σχεδιάστηκαν τα τελικά διαγράμματα τα οποία συνοψίζουν τις απαραίτητες πληροφορίες που χρειαζόμαστε προκειμένου να αποφασίσουμε για την σύσταση της στοιχειοκεραίας. Τα διαγράμματα αυτά είναι τα παρακάτω:

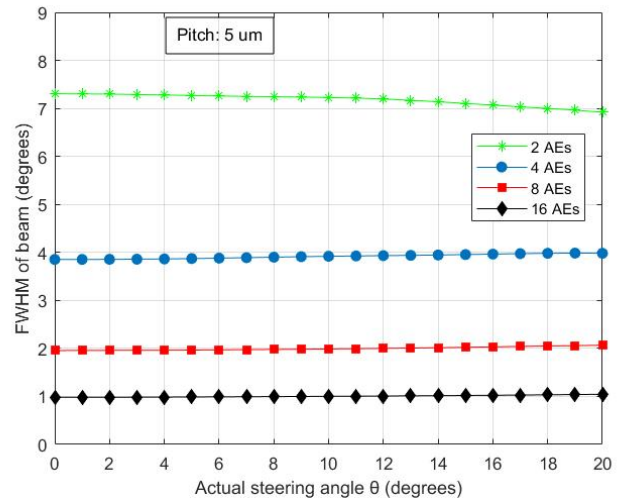
- i. *Διάγραμμα εύρους ημίσειας ισχύος Δ_{3dB} (FWHM) του κύριου λοβού συναρτήσει της γωνίας στροφής του.* Στο διάγραμμα αυτό μπορούμε να δούμε το εύρος ημίσειας ισχύος του κύριου λοβού (άξονας y) για κάθε γωνία στροφής (άξονας x). Η πράσινη καμπύλη αφορά στην περίπτωση που η οπτική στοιχειοκεραία αποτελείται από 2 στοιχεία (AEs), η μπλε από 4 στοιχεία (AEs), η κόκκινη από 8 στοιχεία (AEs) και η μαύρη από 16 στοιχεία (AEs).
- ii. *Διάγραμμα εύρους ημίσειας ισχύος Δ_{3dB} (FWHM) του κύριου λοβού συναρτήσει της απόστασης μεταξύ των στοιχείων της στοιχειοκεραίας (pitch).* Στο διάγραμμα αυτό μπορούμε να δούμε ξανά το εύρος ημίσειας ισχύος του κύριου λοβού (άξονας y) αλλά αυτή την φορά σαν συνάρτηση της απόστασης των στοιχείων τις οπτικής στοιχειοκεραίας (άξονας x). Στο διάγραμμα είναι σχεδιασμένες οι παρακάτω περιπτώσεις:
 - α. Πράσινη συνεχής γραμμή: 2 στοιχεία (AEs) και γωνία στροφής κύριου λοβού στις 0° .
 - β. Πράσινο διακεκομμένη γραμμή: 2 στοιχεία (AEs) και γωνία στροφής κύριου λοβού στις 5° .
 - γ. Μπλε συνεχής γραμμή: 4 στοιχεία (AEs) και γωνία στροφής κύριου λοβού στις 0° .
 - δ. Μπλε διακεκομμένη γραμμή: 4 στοιχεία (AEs) και γωνία στροφής κύριου λοβού στις 5° .
 - ε. Κόκκινη συνεχής γραμμή: 8 στοιχεία (AEs) και γωνία στροφής κύριου λοβού στις 0° .
 - στ. Κόκκινη διακεκομμένη γραμμή: 8 στοιχεία (AEs) και γωνία στροφής κύριου λοβού στις 5° .
 - ζ. Μαύρη συνεχής γραμμή: 16 στοιχεία (AEs) και γωνία στροφής κύριου λοβού στις 0° .
 - η. Μαύρη διακεκομμένη γραμμή: 16 στοιχεία (AEs) και γωνία στροφής κύριου λοβού στις 5° .
- iii. *Διάγραμμα επιτεύξιμου οπτικού πεδίου (Field of View – FOV).* Στα διαγράμματα αυτά μπορούμε να δούμε το εύρος των γωνιών (άξονας y) που μπορεί να στραφεί η διεύθυνση του κύριου λοβού (στο αζιμουθιακό επίπεδο), έτσι ώστε η ένταση του να παραμείνει μεγαλύτερη από την ένταση του/των grating lobe κατά 0,3,6 και 10 dB συναρτήσει της απόστασης (pitch) των στοιχείων τις οπτικής στοιχειοκεραίας (άξονας x). Η πράσινη καμπύλη

αντιστοιχεί σε 2 στοιχεία (AEs), η μπλε σε 4 στοιχεία (AEs), η κόκκινη σε 8 στοιχεία (AEs) και η μαύρη σε 16 στοιχεία (AEs).

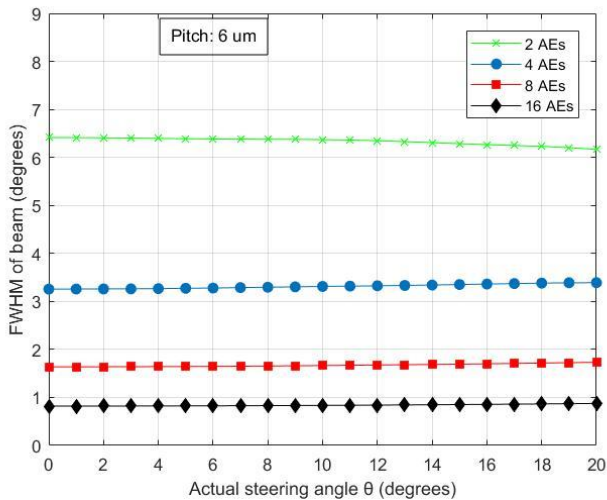
4.5.1 Διαγράμματα εύρους ημίσειας ισχύος Δ_{3dB} (FWHM) του κύριου λοβού συναρτήσει της γωνίας στροφής του



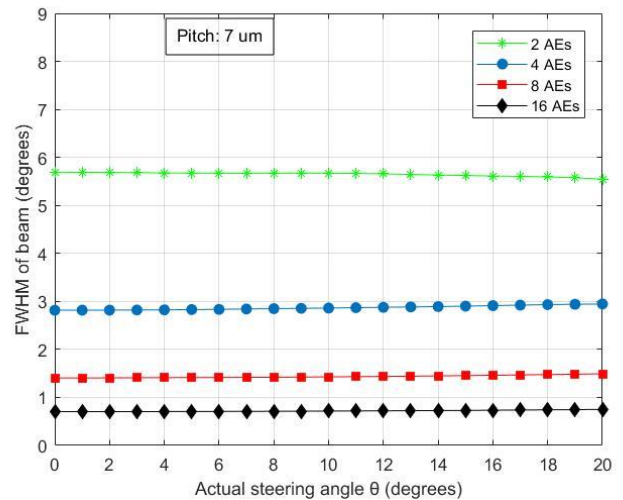
Σχήμα 4.117: Διάγραμμα εύρους ημίσειας ισχύος κύριου λοβού συναρτήσει της γωνίας στροφής του, για 4μm pitch.



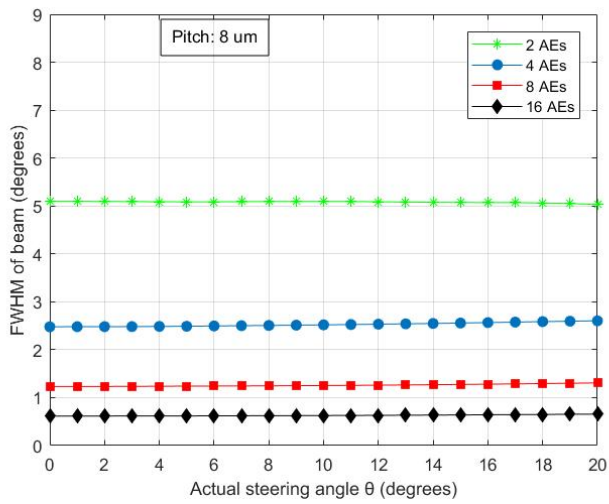
Σχήμα 4.118: Διάγραμμα εύρους ημίσειας ισχύος κύριου λοβού συναρτήσει της γωνίας στροφής του, για 5μm pitch.



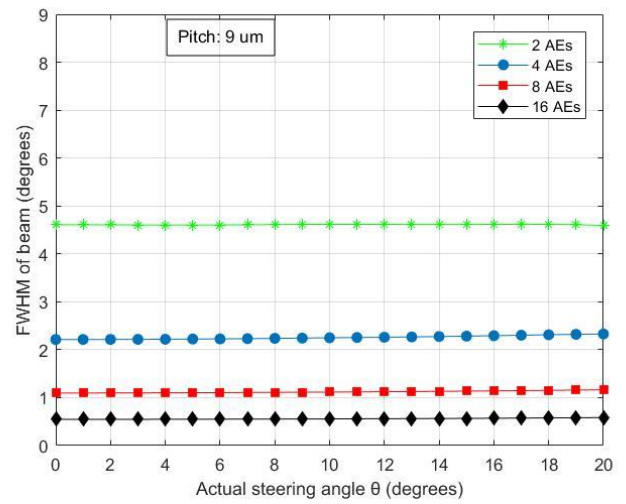
Σχήμα 4.119: Διάγραμμα εύρους ημίσειας ισχύος κύριου λοβού συναρτήσει της γωνίας στροφής του, για 6μm pitch.



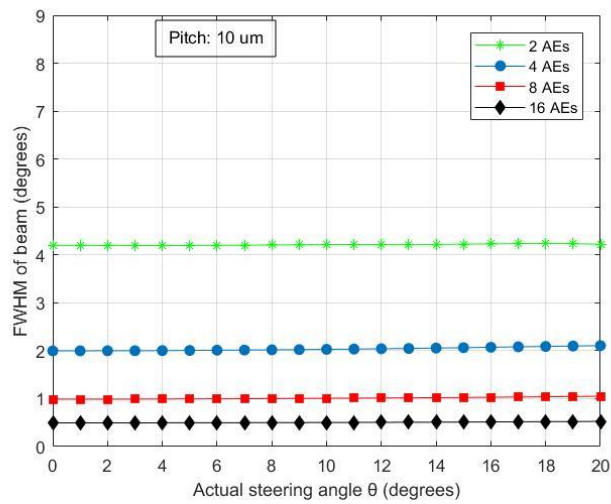
Σχήμα 4.120: Διάγραμμα εύρους ημίσειας ισχύος κύριου λοβού συναρτήσει της γωνίας στροφής του, για 7μm pitch.



Σχήμα 4.121: Διάγραμμα εύρους ημίσειας ισχύος κύριου λοβού συναρτήσει της γωνίας στροφής του, για 8μm pitch.

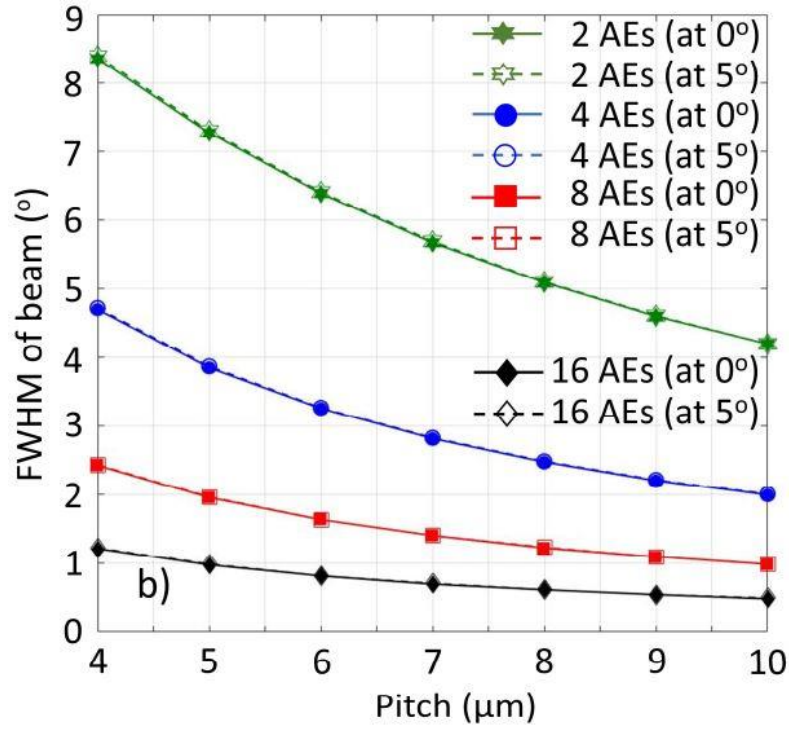


Σχήμα 4.122: Διάγραμμα εύρους ημίσειας ισχύος κύριου λοβού συναρτήσει της γωνίας στροφής του, για 9μm pitch.



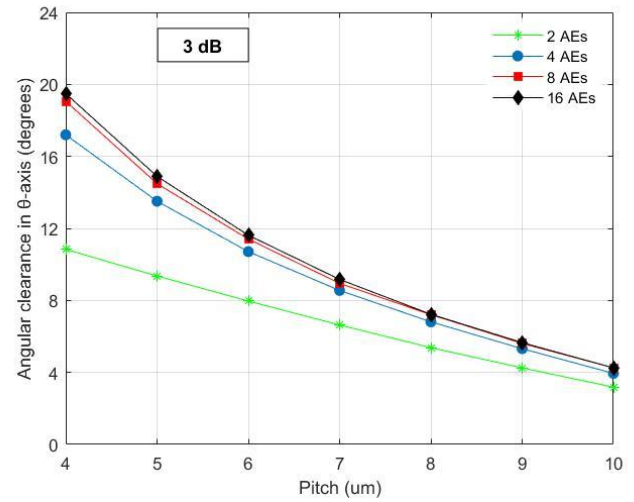
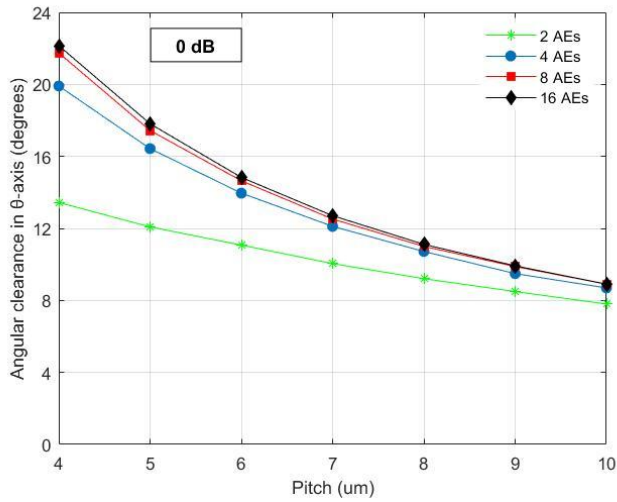
Σχήμα 4.123: Διάγραμμα εύρους ημίσειας ισχύος κύριου λοβού συναρτήσει της γωνίας στροφής του, για 10μm pitch.

4.5.2 Διάγραμμα εύρους ημίσειας ισχύος Δ_{3dB} (FWHM) του κύριου λοβού συναρτήσει της απόστασης μεταξύ των στοιχείων της στοιχειοκεραίας (pitch).



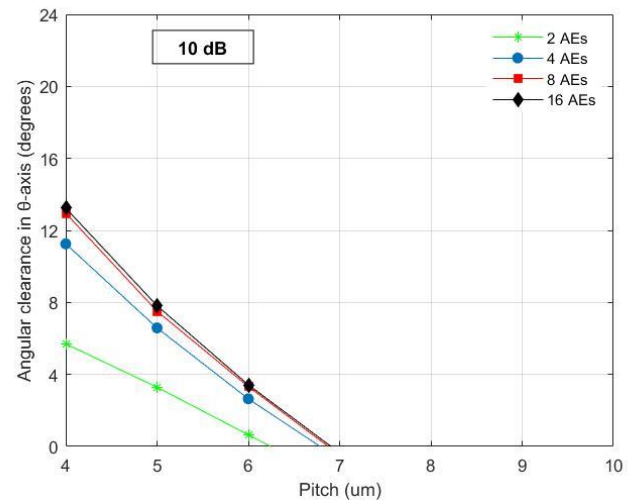
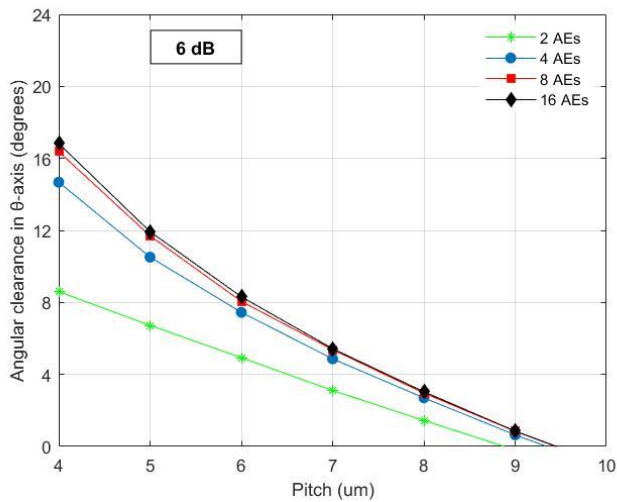
Σχήμα 4.124: Διάγραμμα εύρους ημίσειας ισχύος κύριου λοβού συναρτήσει του pitch [1].

4.5.3 Διαγράμματα επιτεύξιμου οπτικού πεδίου (Field of View – FOV)



Σχήμα 4.125: Διάγραμμα επιτεύξιμου οπτικού πεδίου (Field of View – FOV) κατά το οποίο η ένταση του κύριου λοβού παραμένει μεγαλύτερη από την ένταση του/των grating lobe κατά 0 dB.

Σχήμα 4.126: Διάγραμμα επιτεύξιμου οπτικού πεδίου (Field of View – FOV) κατά το οποίο η ένταση του κύριου λοβού παραμένει μεγαλύτερη από την ένταση του/των grating lobe κατά 3 dB.



Σχήμα 4.127: Διάγραμμα επιτεύξιμου οπτικού πεδίου (Field of View – FOV) κατά το οποίο η ένταση του κύριου λοβού παραμένει μεγαλύτερη από την ένταση του/των grating lobe κατά 6 dB.

Σχήμα 4.128: Διάγραμμα επιτεύξιμου οπτικού πεδίου (Field of View – FOV) κατά το οποίο η ένταση του κύριου λοβού παραμένει μεγαλύτερη από την ένταση του/των grating lobe κατά 10 dB.

5

Συμπεράσματα & Προοπτικές

5.1 Σύνοψη και συμπεράσματα

Σκοπός της διπλωματικής εργασία ήταν η θεωρητική μοντελοποίηση και μελέτη μιας δισδιάστατης οπτικής στοιχειοκεραίας (optical phased arrays – OPAs), κατάλληλης για εφαρμογές ελέγχου – σάρωσης ακτίνων λέιζερ. Η κατασκευή της έγινε σε ολοκληρωμένο κύκλωμα (PICs) με πολλαπλά επίπεδα κυματοδότησης, χρησιμοποιώντας την πολυμερική πλατφόρμα PolyBoard. Όπως ειπώθηκε και στη εισαγωγή, η χρήση του PolyBoard στο PICs αποτελεί μια καινοτόμα ιδέα των ερευνητών του Εργαστηρίου Φωτονικών Επικοινωνιών (PCRL).

Τα στοιχεία (antenna elements – AEs) της στοιχειοκεραίας υλοποιήθηκαν μέσω αξονικών κυματοδηγών (end-fire waveguides), τα άκρα των οποίων τοποθετήθηκαν στη τελευταία πλευρική ακμή του ολοκληρωμένου PICs (Σχήμα 1.1). Ο διαχωρισμός του φωτός μεταξύ των επιπέδων της στοιχειοκεραίας έγινε με την χρήση κάθετων συζευκτών, ενώ μεταξύ των στοιχείων που βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο έγινε με την χρήση οριζόντιων συζευκτών. Επιπλέον για τον έλεγχο της φάσης του κάθε στοιχείου χρησιμοποιήθηκαν θερμικοί ολισθητές φάσης.

Χρησιμοποιώντας την αρχή της ισοδυναμίας πεδίου (Field Equivalence Principle) υπολογίστηκε το μακρινό πεδίο του αξονικού κυματοδηγού που χρησιμοποιήθηκε σαν βασικό στοιχείο στην στοιχειοκεραία, στο μήκος κύματος των 1550nm. Ο κύριος λοβός που εμφανίζει το διάγραμμα ακτινοβολίας του έχει εύρος ημίσειας ισχύος Δ_{3dB} (FWHM) 12.7°. Στη συνέχεια μελετήθηκαν τα προφίλ ακτινοβολίας της γραμμικής (linear) και της επίπεδης (planar) στοιχειοκεραίας και στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάστηκαν τα διαγράμματα τον προσομοιώσεων.

Στο Σχήμα 4.124 που προκύπτει από την σύγκριση των Σχημάτων (Σχήμα 4.117 έως Σχήμα 4.123), παρατηρούμε την σημαντική εξάρτιση του FWHM από το πλήθος των

στοιχείων (AEs) και την μικρότερη εξάρτησή του από την σχετική τους απόστασης (pitch). Τα μεγέθη αυτά μεταβάλλονται ανάλογα. Από την άλλη πλευρά βλέπουμε ότι το FWHM δεν επηρεάζεται όταν το διάγραμμα στρέφεται σε γωνίες εντός του εύρους ενδιαφέροντος (περίπου έως τις 8°).

Στα Σχήματα (Σχήμα 4.125 έως Σχήμα 4.128) φαίνεται το γωνιακό εύρος (angular clearance), γύρω από τις 0° , που μπορεί να επιτευχθεί, ώστε η ένταση του κύριου λοβού να παραμείνει μεγαλύτερη από την ένταση του/των grating lobe κατά 0,3,6 και 10 dB αντίστοιχα. Το διάγραμμα που έχει σχεδιαστεί στο Σχήμα 4.125 (0dB) ουσιαστικά μας δείχνει την απόσταση του κύριου λοβού από τους grating lobes για το αντίστοιχο πλήθος στοιχείων (AEs) και την αντίστοιχο βήμα (pitch), ενώ τα υπόλοιπα τρία διαγράμματα (3,6,10dB) μπορούν να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να εκτιμηθεί το εύρος του εφικτού οπτικού πεδίου (Field of View – FOV), συναρτήσει των απαιτήσεων της κάθε εφαρμογής (καταπίεση grating lobe, πλήθος AEs, απόσταση AEs). Για την περίπτωση OPAs με 4 AEs και pitch 6μm, από το Σχήμα 4.125 προκύπτει ότι το μέγιστο γωνιακό εύρος στροφής είναι 14° , ενώ από τα Σχήματα (Σχήμα 4.126 έως Σχήμα 4.128) προκύπτει ότι το μέγιστο εφικτό FOV, ώστε η ένταση του κύριου λοβού να είναι μεγαλύτερη από την ένταση του/των grating lobe κατά 0,3,6 και 10 dB είναι 10.8° , 7.7° και 2.8° αντίστοιχα.

Συνοψίζοντας λοιπόν θα επικεντρωθούμε σε δύο σημαντικούς συμβιβασμούς (trade off) που προκύπτουν. Ο πρώτος συμβιβασμός αφορά το πλήθος των αξονικών κυματοδηγών (antenna elements – AEs) που θα έχει η στοιχειοκεραία. Η αύξηση του πλήθους τους οδηγεί σε μείωση του εύρους ημίσειας ισχύος Δ_{3dB} (FWHM) τόσο του κύριου όσο και των grating lobe και κατ' επέκταση σε αύξηση της κατευθυντικότητας της στοιχειοκεραίας. Επιπλέον πλεονέκτημα είναι ότι λόγω της μείωσης του FWHM των λοβών, η καταπίεση που δέχονται από τον πολλαπλασιασμό του παράγοντα διάταξης με την ένταση ακτινοβολίας του βασικού στοιχείου της στοιχειοκεραίας είναι μικρότερη, γεγονός που οδηγεί σε μεγαλύτερη ακρίβεια στον έλεγχο – σάρωση της δέσμης λέιζερ. Από την άλλη πλευρά αυξάνοντας πολύ το πλήθος των στοιχείων της στοιχειοκεραίας και στα δύο επίπεδα αυξάνονται κατά πολύ και οι οπτικές απώλειες που υπεισέρχονται από την χρήση των κάθετων συζευκτών, οι οποίοι όπως είδαμε στην Εισαγωγή χρησιμοποιούνται για να διαχωριστεί το φως μεταξύ των διαδοχικών επιπέδων κυματοδηγησης. Οι οπτικές απώλειες αυτές θα μπορούσαν να μειωθούν με έναν καλύτερο σχεδιασμό του ολοκληρωμένου PICs που ενδεχομένως θα περιλάμβανε ένα κεντρικό επίπεδο κυματοδηγησης, από το οποίο θα τροφοδοτούνταν (κεντρικά πλέον και όχι διαδοχικά) τα υπόλοιπα επίπεδα και ένα μεγαλύτερο κάθετο συζεύκτη, ο οποίος μεταφέρει το οπτικό σήμα κατευθείαν στον κεντρικό επίπεδο κυματοδηγησης. Παρόλα αυτά οι οπτικές απώλειες που επιφέρουν οι συζεύκτες δεν μπορούν να εκμηδενιστούν και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη.

Ο δεύτερος συμβιβασμός αφορά την απόσταση (pitch) μεταξύ των στοιχείων της οπτικής στοιχειοκεραίας (antenna elements – AEs). Ιδανικά θα θέλαμε η απόστασή τους να είναι το μισό του μήκους κύματος ($\lambda/2$, $\lambda=1550\text{nm}$), κάτι το οποίο θα οδηγούσε στην εξάλειψη των grating lobe. Όπως όμως είδαμε στην Εισαγωγή, αυτό δεν είναι εφικτό στα

ολοκληρωμένα PICs, στα οποία η απόσταση μεταξύ των στοιχείων της στοιχειοκεραίας είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερη, με αναπόφευκτη την εμφάνιση των grating lobe. Όσο πιο μικρή είναι η απόσταση αυτή, τόσο περισσότερο απομακρύνονται οι grating lobe από τον κύριο λοβό και ως συνέπεια αυξάνεται το επιτεύξιμο οπτικό πεδίο (FOV). Από την άλλη πλευρά, πλησιάζοντας αρκετά κοντά τους αξονικούς κυματοδηγούς (AEs) εμφανίζεται το φαινόμενο crosstalk. Το φαινόμενο αυτό είναι επιβλαβές καθώς οι κυματοδηγοί αρχίζουν να συζευγνύουν μεταξύ τους. Έτσι τα πεδία των σημάτων που διαδίδονται σε αυτούς, παύουν να είναι ανεξάρτητα και καταστρέφεται η επιθυμητή συμβολή τους. Το φαινόμενο αυτό πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη κατά το σχεδιασμό της οπτικής στοιχειοκεραίας.

Στο [1] έγινε η πειραματική προσομοίωση του crosstalk. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι για αποστάσεις (pitch) μεγαλύτερες των 8μm το φαινόμενο αυτό και οι διαταραχές που επιφέρει είναι αμελητέες. Για αποστάσεις μεταξύ 6μm και 8μm εμφανίζονται διαταραχές αλλά παραμένουν μικρές και μπορούν να διαχειριστούν κατάλληλα. Αντίθετα για αποστάσεις μικρότερες των 6μm το φαινόμενο αυτό καταστρέφει την επιθυμητή συμβολή των σημάτων που διαδίδονται. Επομένως τα διαγράμματα που έχουν σχεδιαστεί στο Κεφάλαιο 4 είναι αληθή για αποστάσεις (pitch) μεγαλύτερες ή ίσες των 6μm.

5.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Μέχρι τώρα έχουμε μελετήσει τόσο θεωρητικά όσο και πειραματικά τις οπτική στοιχειοκεραία δύο επιπέδων (2D OPAs) σε PolyBoard PICs αποτελούμενης από αξονικούς κυματοδηγούς (AEs). Η πειραματική τους μελέτη βρίσκεται στο [1] και αφορά την κατασκευή και τον χαρακτηρισμό τριών γραμμικών 1x4 στοιχειοκεραίων με αποστάσεις στοιχείων (lateral pitch) 6,8 και 10μm και τριών επίπεδων 2x4 στοιχειοκεραίων με απόσταση επιπέδων 7.2μm (vertical pitch) και με αποστάσεις στοιχείων (lateral pitch) 6,8 και 10μm αντίστοιχα. Η μελέτη αυτή έδειξε ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αρκετές εφαρμογές τηλεσκόπησης με μεγαλύτερη απόδοση σε συστήματα αναγνώρισης μικρής εμβέλειας (εξαιτίας του μικρού αριθμού επιπέδων που μπορούν να φτιαχτούν – μέχρι και 32) και σε εφαρμογές που απαιτούν μικρή ταχύτητα σάρωσης (λόγω των αργών θερμικών ολισθητών φάσης) .

Σε επόμενα βήματα θα μελετηθούν ομοιόμορφες (σταθερό pitch μεταξύ των AEs) οπτικές στοιχειοκεραίες OPAs μεγαλύτερων διαστάσεων όπως 4x8 και 4x16 και η μελέτη αυτή θα επεκταθεί σε ανομοιόμορφες (μεταβλητό – απεριοδικό pitch μεταξύ των AEs) οπτικές στοιχειοκεραίες, στις οποίες οι grating lobes απέχουν περισσότερο από τον κύριο λοβό με αποτέλεσμα να επιτυγχάνονται μεγαλύτερα οπτικά πεδία (Field of view – FOV).

Τέλος θα ερευνηθεί η βιωσιμότητα της οπτικής στοιχειοκεραίας (OPAs) σε PolyBoard PICs από πλευράς εμπορευματοποίησης της δεδομένου ότι τα τεχνικά της χαρακτηρίστηκα ταιριάζουν καλύτερα στο μικρό μέγεθος και κόστος των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές τηλεσκόπησης.

Βιβλιογραφία

- [1] Raptakis, A., Gounaridis, L., Weigel, M., Kleinert, M., Georgiopoulos, M., Mylonas, E., Groumas, P., Tsokos, C., Keil, N., Avramopoulos, H., & Kouloumentas, C. (2021). "2D Optical Phased Arrays for Laser Beam Steering Based on 3D Polymer Photonic Integrated Circuits." *Journal of Lightwave Technology*. <https://doi.org/10.1109/JLT.2021.3099009>
- [2] X. Sun, L. Zhang, Q. Zhang, and W. Zhang, "Si Photonics for Practical LiDAR Solutions," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 20, p. 4225, Oct. 2019.
- [3] Christopher V. Poulton, Ami Yaacobi, David B. Cole, Matthew J. Byrd, Manan Raval, Diedrik Vermeulen, and Michael R. Watts, "Coherent solid-state LIDAR with silicon photonic optical phased arrays," *Opt. Lett.* 42, 4091-4094 (2017).
- [4] Fu, X. J., Yang, F., Liu, C. X., Wu, X. J., Cui, T. J., Terahertz Beam Steering Technologies: From Phased Arrays to Field-Programmable Metasurfaces. *Adv. Optical Mater.* 2020, 8, 1900628. <https://doi.org/10.1002/adom.201900628>
- [5] Heck, Martijn J.R.. "Highly integrated optical phased arrays: photonic integrated circuits for optical beam shaping and beam steering" *Nanophotonics*, vol. 6, no. 1, 2017, pp. 93-107. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2015-0152>
- [6] K. Van Acoleyen, W. Bogaerts, J. Jágerská, N. Le Thomas, R. Houdré, and R. Baets, "Off-chip beam steering with a one-dimensional optical phased array on silicon-on-insulator," *Opt. Lett.* 34, 1477-1479 (2009).
- [7] K. Van Acoleyen, K. Komorowska, W. Bogaerts and R. Baets, "One-Dimensional Off-Chip Beam Steering and Shaping Using Optical Phased Arrays on Silicon-on-Insulator," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 29, no. 23, pp. 3500-3505, Dec.1, 2011, doi: 10.1109/JLT.2011.2171477.
- [8] J. K. Doylend, M. J. R. Heck, J. T. Bovington, J. D. Peters, M. L. Davenport, L. A. Coldren, and J. E. Bowers, "Hybrid III/V silicon photonic source with integrated 1D free-space beam steering," *Opt. Lett.* 37, 4257-4259 (2012).
- [9] Ami Yaacobi, Jie Sun, Michele Moresco, Gerald Leake, Douglas Coolbaugh, and Michael R. Watts, "Integrated phased array for wide-angle beam steering," *Opt. Lett.* 39, 4575-4578 (2014).
- [10] J. K. Doylend, M. J. R. Heck, J. T. Bovington, J. D. Peters, L. A. Coldren, and J. E. Bowers, "Two-dimensional free-space beam steering with an optical phased array on silicon-on-insulator," *Opt. Express* 19, 21595-21604 (2011).
- [11] David Kwong, Amir Hosseini, John Covey, Yang Zhang, Xiaochuan Xu, Harish Subbaraman, and Ray T. Chen, "On-chip silicon optical phased array for two-dimensional beam steering," *Opt. Lett.* 39, 941-944 (2014).

- [12] J. C. Hulme, J. K. Doylend, M. J. R. Heck, J. D. Peters, M. L. Davenport, J. T. Bovington, L. A. Coldren, and J. E. Bowers, "Fully integrated hybrid silicon two dimensional beam scanner," *Opt. Express* 23, 5861-5874 (2015).
- [13] David N. Hutchison, Jie Sun, Jonathan K. Doylend, Ranjeet Kumar, John Heck, Woosung Kim, Christopher T. Phare, Avi Feshali, and Haisheng Rong, "High-resolution aliasing-free optical beam steering," *Optica* 3, 887-890 (2016).
- [14] C. V. Poulton, A. Yaacobi, Z. Su, M. J. Byrd, and M. R. Watts, "Optical Phased Array with Small Spot Size, High Steering Range and Grouped Cascaded Phase Shifters," in *Advanced Photonics 2016 (IPR, NOMA, Sensors, Networks, SPPCom, SOF)*, OSA technical Digest (online) (Optical Society of America, 2016), paper IW1B.2.
- [15] Steven A. Miller, You-Chia Chang, Christopher T. Phare, Min Chul Shin, Moshe Zadka, Samantha P. Roberts, Brian Stern, Xingchen Ji, Aseema Mohanty, Oscar A. Jimenez Gordillo, Utsav D. Dave, and Michal Lipson, "Large-scale optical phased array using a low-power multi-pass silicon photonic platform," *Optica* 7, 3-6 (2020).
- [16] Yu Zhang, Yi-Chun Ling, Kaiqi Zhang, Cale Gentry, David Sadighi, Greg Whaley, James Colosimo, Paul Suni, and S. J. Ben Yoo, "Sub-wavelength-pitch silicon-photonic optical phased array for large field-of-regard coherent optical beam steering," *Opt. Express* 27, 1929-1940 (2019).
- [17] Karel Van Acoleyen, Hendrik Rogier, and Roel Baets, "Two-dimensional optical phased array antenna on silicon-on-insulator," *Opt. Express* 18, 13655-13660 (2010).
- [18] Firooz Aflatouni, Behrooz Abiri, Angad Rekhi, and Ali Hajimiri, "Nanophotonic projection system," *Opt. Express* 23, 21012-21022 (2015).
- [19] Sun, J., Timurdogan, E., Yaacobi, A. et al. Large-scale nanophotonic phased array. *Nature* 493, 195–199 (2013). <https://doi.org/10.1038/nature11727>
- [20] Jie Sun, Ehsan shah Hosseini, Ami Yaacobi, David B. Cole, Gerald Leake, Douglas Coolbaugh, and Michael R. Watts, "Two-dimensional apodized silicon photonic phased arrays," *Opt. Lett.* 39, 367-370 (2014).
- [21] C. Qin, K. Shang, S. Feng, G. Liu, S. Pathak and S. J. B. Yoo, "1×256 multi-layer, low-loss, Si₃N₄ waveguide optical phased arrays with 0.050° instantaneous-field-of-view," 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), San Jose, CA, USA, 2017, pp. 1-2.
- [22] M. R. Kossey, C. Rizk, and A. C. Foster, "End-fire silicon optical phased array with half-wavelength spacing," *APL Photonics* 3(1), 011301 (2018).
- [23] A. Hosseini, D. Kwong, Y. Zhang, S.A. Chandorkar, F. Crnogorac, A. Carlson, B. Fallah, S. Bank, E. Tutuc, J. Rogers, R.F.W. Pease, R.T. Chen, "On the fabrication of three-dimensional silicon-on-insulator based optical phased array for agile and large angle laser beam steering systems," *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena*, 28(6), C6O1-C6O7 (2010).

- [24] B. Guan, C. Qin, R. P. Scott, B. Ercan, N. K. Fontaine, T. Su, and S. J. B. Yoo, "Hybrid 3D Photonic Integrated Circuit for Optical Phased Array Beam Steering," in CLEO: 2015, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2015), paper STu2F.1.
- [25] Gross, S. and Withford, M. J. "Ultrafast-laser-inscribed 3D integrated photonics: challenges and emerging applications" *Nanophotonics*, vol. 4, no. 3, 2015, pp. 332-352. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2015-0020>
- [26] Zhang, Z.; Felipe, D.; Katopodis, V.; Groumas, P.; Kouloumentas, C.; Avramopoulos, H.; Dupuy, J.-Y.; Konczykowska, A.; Dede, A.; Beretta, A.; Vannucci, A.; Cangini, G.; Dinu, R.; Schmidt, D.; Moehrle, M.; Runge, P.; Choi, J.-H.; Bach, H.-G.; Grote, N.; Keil, N.; Schell, M. Hybrid Photonic Integration on a Polymer Platform. *Photonics* 2015, 2, 1005-1026. <https://doi.org/10.3390/photonics2031005>
- [27] M. Nuck et al., "Low-Loss Vertical MMI Coupler for 3D Photonic Integration," 2018 European Conference on Optical Communication (ECOC), Rome, Italy, 2018, pp. 1-3, doi: 10.1109/ECOC.2018.8535479.
- [28] Z. Zhang et al., "Multicore Polymer Waveguides and Multistep 45° Mirrors for 3D Photonic Integration," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 26, no. 19, pp. 1986-1989, 1 Oct.1, 2014, doi: 10.1109/LPT.2014.2344116.
- [29] X. Καψάλης και Π. Κωπτής, «Κεραίες Ασύρματες Ζεύξεις», Εκδόσεις Τζιόλα, 2008.
- [30] *Antenna Theory: Analysis and Design* (4th Edition) (John Wiley & Sons, 2016) Author: Constantine A. Balanis.
- [31] Robert J. Mailloux. *Phased Array Antenna Handbook, Second Edition*. Artech House Inc., 2005.
- [32] Georges Kaddoum et al. "On Using Gaussian Excitation Amplitudes to Improve the Antenna Array Radiation Characteristics". In: Dec. 2014. doi: 10.1109/APACE.2014.7043760