



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Μελέτη και υλοποίηση αλγορίθμων για τον
έλεγχο διατάξεων οπτικών στοιχειοκεραιών**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

Γεώργιου Ν. Λυμπεράκη

Επιβλέπων: Η. Αβραμόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΩΤΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Αθήνα, Μάρτιος 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Μελέτη και υλοποίηση αλγορίθμων για τον έλεγχο διατάξεων οπτικών στοιχειοκεραιών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Γεώργιου Ν. Λυμπεράκη

Επιβλέπων: Η. Αβραμόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 21^η Μαρτίου 2023

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....

Η. Αβραμόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Α. Παναγόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Γ. Ματσόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

(Υπογραφή)

.....

Γεώργιος Ν. Λυμπεράκης

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

Copyright © Γεώργιος Ν. Λυμπεράκης, 2023.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Τις τελευταίες δεκαετίες οι οπτικές στοιχειοκεραίες χαίρουν μεγάλου ενδιαφέροντος για εφαρμογές στις οποίες απαιτείται στροφή μίας οπτικής δέσμης στο χώρο, καθώς μπορούν να υλοποιηθούν σε ολοκληρωμένη μορφή και να προσφέρουν μικρές σε μέγεθος, οικονομικές και εύρωστες λύσεις. Χαρακτηριστικά παραδείγματα εφαρμογών αποτελούν οι ασύρματες τηλεπικοινωνιακές ζεύξεις και τα συστήματα τηλεσκοπίησης που βρίσκουν εφαρμογές στην αυτόνομη οδήγηση. Ωστόσο, για τη χρήση των οπτικών στοιχειοκεραίων απαιτούνται κατάλληλοι αλγόριθμοι για τον έλεγχο τους, ειδικά όταν το πλήθος των στοιχείων τους αυξάνεται σημαντικά. Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η μελέτη, υλοποίηση και πειραματική αξιολόγηση αυτών των αλγορίθμων. Αρχικά προτείνονται αλγόριθμοι για την αρχικοποίηση των φάσεων, ώστε η ισχύς της στοιχειοκεραίας να συγκεντρωθεί στο κέντρο των αξόνων, αντισταθμίζοντας με αυτό τον τρόπο την διαφορά φάσης που οφείλεται στους οπτικούς δρόμους διαφορετικού μήκους και σε πιθανές κατασκευαστικές ατέλειες. Στη συνέχεια υλοποιείται αλγόριθμος για τη στροφή της δέσμης σε οποιοδήποτε σημείο μέσα στην περιοχή θέασης (FoV) της στοιχειοκεραίας. Οι αλγόριθμοι πρώτα υλοποιούνται επιτυχώς σε επίπεδο προσομοίωσης (MATLAB) και στη συνέχεια αξιολογούνται πειραματικά. Οι οπτικές στοιχειοκεραίες που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική αξιολόγηση βασίζονται στην φωτονική μονορυθμική πλατφόρμα ολοκλήρωσης PolyBoard και περιλαμβάνουν τέσσερις και οχτώ εκπομπούς (αξονικοί κυματοδηγοί) σε ένα και δύο επίπεδα αντίστοιχα.

Λέξεις Κλειδιά

3D φωτονική ολοκλήρωση, αρχικοποίηση φάσεων, οπτικές στοιχειοκεραίες, οπτικά πολυμερή, στροφή δέσμης, συστήματα τηλεσκοπίησης

Abstract

The last few decades, optical phased arrays are of strong interest for applications requiring spatial point accessing because they can be designed in integrated circuits and provide solid state, low cost and robust solutions. Such applications are wireless communication links and light detection and ranging (LiDAR) technology, that is used for example in autonomous driving. However, control algorithms are needed for the usage of optical phased arrays, especially when the number of emitters increases significantly. The above technic is studied and implemented in this current work, in which phase calibration algorithms are firstly proposed, to achieve power concentration in the center of the axis, as to compensate for the phase difference between optical paths of different length and possible fabrication failures. Subsequently, a beam steering algorithm is implemented for accessing any point in the field of view of the antenna array. The algorithms are studied and verified at simulation level (MATLAB) and then experimentally. The optical phased arrays used in the experimental setup were implemented in the photonic single-mode integration platform PolyBoard and include four and eight emitters (end-fire waveguides) in one and two layers respectively.

Keywords

3D photonics integration, LiDAR systems, optical phased arrays, optical polymers, phase calibration, beam steering

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Αβραμόπουλο για την ευκαιρία που μου έδωσε να εργαστώ στο Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών (PCRL) και να συμμετέχω στην ομάδα του εργαστηρίου του. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστώ τον υποψήφιο διδάκτορα Αδάμ Ραπτάκη για τη διαρκή βοήθεια και υποστήριξη του αλλά και για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου. Η συνεισφορά του υπήρξε καθοριστική για την διεκπεραίωση της εργασίας και τον ευχαριστώ πολύ για όλα. Επιπλέον, θέλω να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλα τα παιδιά του εργαστηρίου, τα οποία από την πρώτη στιγμή με έκαναν να νιώθω μέρος της υπέροχης ομάδας τους.

Ένα τεράστιο ευχαριστώ θέλω να δώσω στην οικογένεια μου και συγκεκριμένα στους γονείς μου Νίκο και Γλυκερία και στα αδέρφια μου Σπύρο και Ευανθία, που με στηρίζουν αδιαλείπτως όλα αυτά τα χρόνια. Επιπλέον, θέλω να ευχαριστήσω τις κολλητές μου Ολίνα Μπότσαρη και Εύα Λουκίσα, οι οποίες είναι δίπλα μου και με στηρίζουν καθημερινά όλα αυτά τα χρόνια. Η αλληλεπίδραση μαζί τους με κάνει έναν καλύτερο άνθρωπο, που βλέπει τον κόσμο με περισσότερη αισιοδοξία. Τέλος, θέλω επίσης να ευχαριστήσω τις εξαιρετικές μου φίλες Άννα Τσουκάτου, Ντανιέλα Στογιάν και Κωνσταντίνα Καραϊνδρου και τον καλό μου φίλο Χριστόφορο Βαρδάκη.

στους γονείς μου

Περιεχόμενα

Περίληψη	1
Abstract	3
Ευχαριστίες	5
Περιεχόμενα	8
Κατάλογος Σχημάτων	11
1 Εισαγωγή	16
1.1 Φωτονική Τεχνολογία	16
1.2 Φωτονικά Ολοκληρωμένα Κυκλώματα (PIC)	17
1.3 Οπτικές Στοιχειοκεραίες (Optical Phased Arrays)	17
1.3.1 Υλοποίηση με Συζεύκτες Φράγματος (Grating Couplers)	18
1.3.2 Υλοποίηση με Αξονικούς Κυματοδηγούς (End-Fire Waveguide)	19
1.4 Μετρολογία και Calibration	19
1.5 Αντικείμενο της διπλωματικής	19
2 Θεωρία Κεραίων	22
2.1 Ηλεκτρομαγνητική Θεωρία	22
2.1.1 Εξισώσεις του Maxwell	22
2.1.2 Οριακές Συνθήκες	23
2.1.3 Συντακτικές Σχέσεις	24
2.1.4 Ημιτονοειδής Μόνιμη Κατάσταση (HMK)	24
2.1.5 Ηλεκτρομαγνητική ενέργεια και ισχύς	25
2.2 Εισαγωγή στη Θεωρία Κεραίων	26
2.2.1 Ορισμός Κεραίας	26
2.2.2 Είδη Κεραίων	26
2.2.3 Θεμελιώδης Παράμετροι Κεραίων	27
2.2.4 Στοιχειοκεραίες	30
2.2.5 Ανάλυση Στοιχειοκεραίων	31
3 PolyBoard Platform και OPAs	34
3.1 PolyBoard Πλατφόρμα	34
3.2 Ανάλυση End-Fire OPAs	35
4 Αλγόριθμοι Βελτιστοποίησης	42
4.1 Ορισμός Αλγορίθμου	42
4.2 Περιγραφή Προβλημάτων Βελτιστοποίησης	42
4.3 Αλγόριθμοι Βελτιστοποίησης	44
4.4 Gradient Descent	44

4.4.1	Batch Gradient Descent (BGD)	44
4.4.2	Stochastic Gradient Descent (SGD)	44
4.4.3	Mini-Batch Gradient Descent	45
4.4.4	Stochastic Parallel Gradient Descent (SPGD)	45
4.5	Γενετικοί Αλγόριθμοι (GA)	46
5	Υλοποίηση Αλγορίθμων	49
5.1	Περιγραφή Προβλήματος Αρχικοποίησης (Phase Tuning)	49
5.2	Παρουσίαση Προτεινόμενων Αλγορίθμων Αρχικοποίησης	52
5.2.1	Batch Gradient Descent Based Algorithms	53
5.2.1.1	BGD	53
5.2.1.2	BGD with Deterministic Expansion (DE-BGD)	55
5.2.1.3	BGD with Deterministic and Specific Expansion (SDE-BGD)	57
5.2.2	Stochastic Parallel Gradient Descent	59
5.3	Σύγκριση Αλγορίθμων Αρχικοποίησης	61
5.4	Υλοποίηση Αλγορίθμου Ελέγχου OPAs	62
5.4.1	Beam Steering	62
5.4.2	Απόκλιση επιθυμητής με πραγματικής γωνία στρέψης	62
5.4.3	Αλγόριθμος για στροφής δέσμης	64
6	Πειραματικό Μέρος	67
6.1	Η πειραματική Διάταξη	67
6.2	Driver Calibration	69
6.3	Διέγερση Phase Shifters	70
6.4	Προσδιορισμός $I_{2\pi}$ των PSs	71
6.5	Setup Times	72
6.6	Πειραματικά Αποτελέσματα Αλγορίθμων Αρχικοποίησης	74
6.6.1	Για 1×4 OPA	74
6.6.2	Για 2×4 OPA	76
6.7	Πειραματικά Αποτελέσματα Αλγορίθμου Ελέγχου	78
7	Συμπεράσματα και Προεκτάσεις	80
7.1	Σύνοψη και Συμπεράσματα	80
7.2	Μελλοντικές Επεκτάσεις	80
	Παράρτημα	83
	Α Οριζόντιο Σύστημα Συντεταγμένων	83
	Β Διαφορετικά PS-States σε $N \times M$ OPA	84
	Γ Experimental Setup GUI	84
	Βιβλιογραφία	88

Κατάλογος σχημάτων

1.1	Σχηματική απεικόνιση των μηχανισμών sensing σε ένα τυπικό Photonic Integrated Circuit και τα μεγέθη που μπορούν να μετρηθούν-προσδιοριστούν. Το σχήμα πάρθηκε από το [5].	16
1.2	Σχηματικό ενός PIC (όχι σε κλίμακα) όπου εμφανίζονται διάφορα οπτικά στοιχεία. Το σχήμα πάρθηκε από το [10].	17
1.3	Η τομή ενός Grating Coupler.	18
1.4	Τρισδιάστατη απεικόνιση ενός End-Fire Waveguide.	19
1.5	(Αριστερά) Το διάγραμμα ακτινοβολίας μίας οπτικής στοιχειοκεραίας 2×4 πριν γίνει η βαθμονόμηση των φάσεων των ολισθητών φάσης.(Δεξιά) Το διάγραμμα ακτινοβολίας της ίδιας στοιχειοκεραίας αφού γίνει η βαθμονόμηση.	20
1.6	(Αριστερά) Το διάγραμμα ακτινοβολίας όπου ο κύριος λοβός είναι στραμμένος στο σημείο ($az = -3^\circ, el = 0^\circ$). (Δεξιά) Ομοίως με αριστερά αλλά για σημείο στόχευσης ($az = 3^\circ, el = 0^\circ$).	20
2.1	Οι περιοχές ακτινοβολίας μιας κεραίας. Η εικόνα πάρθηκε από [22].	28
2.2	Πολικό Διάγραμμα ακτινοβολίας μιας κεραίας, όπου παρουσιάζονται οι λοβοί που το αποτελούν και οι γωνίες $A_0, A_3 \text{ dB}$	30
2.3	Σύστημα συντεταγμένων για ανάλυση στοιχειοκεραιών.	31
3.1	Η ροή κατασκευής με επαναλαμβανόμενα βήματα για την δημιουργία πολλαπλών επιπέδων κυματοδηγησης και κατακόρυφων MMI couplers για την μετάβασή του φωτός από το ένα επίπεδο στο άλλο. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα απεικονίζεται ένα PIC με 2 επίπεδα κυματοδηγησης και 1 κατακόρυφος MMI coupler. Η εικόνα πάρθηκε από [17].	34
3.2	Το σύστημα συντεταγμένων και η γεωμετρία του προς μοντελοποίηση end-fire PolyBoard κυματοδηγού σαν κεραία ανοίγματος (aperture antenna).	35
3.3	Τομή ενός μονορυθμικού κυματοδηγού υλοποιημένου στην PolyBoard πλατφόρμα στα 1550 nm	38
3.4	Το προφίλ της έντασης ενός end-fire waveguide στο τέλος του.	38
3.5	(Αριστερά) Διάγραμμα ακτινοβολίας του μοναδιαίου εκπομπού για $\varphi = 0^\circ$ και $\theta \in [-20^\circ, 20^\circ]$. (Δεξιά) Διάγραμμα ακτινοβολίας του μοναδιαίου εκπομπού στο επίπεδο $az - el$ από -20° μέχρι 20°	39
3.6	Σύστημα συντεταγμένων και η γεωμετρία του προς μοντελοποίηση OPA με end-fire κυματοδηγούς στην πλατφόρμα PolyBoard.	40

3.7	3D απεικόνιση ενός OPA 2×4 υλοποιημένο στην πλατφόρμα PolyBoard. Με κίτρινο χρώμα είναι οι PS, με κόκκινο χρώμα το πρώτο επίπεδο End-Fire κυματοδηγών και με μπλε το δεύτερο.	41
3.8	(Αριστερά) Εμπρόσθια όψη ενός 1×4 OPA όπου αναγράφονται οι αποστάσεις των κυματοδηγών από το υπόστρωμα και από την επιφάνεια του PIC. (Δεξιά) Ομοίως με την αριστερή εικόνα αλλά για 2×4 OPA, όπου σε αυτήν σημειώνονται και οι αποστάσεις μεταξύ των κυματοδηγών που είναι σε δύο επίπεδα.	41
4.1	Γραφική Απεικόνιση ενός αλγορίθμου.	43
4.2	Ταξινόμηση αλγορίθμων βελτιστοποίησης.	44
4.3	Ψευδοκώδικας γενετικών αλγορίθμων.	47
5.1	Σχηματικό διάγραμμα των End-Fire κυματοδηγών μαζί με τους PSs.	49
5.2	Το διάγραμμα ακτινοβολίας ενός OPA $U(\theta, \varphi)$ όπου παρουσιάζεται το SLSR.	52
5.3	Παρουσιάζεται ποιοτικά η ιδέα των BGD αλγορίθμων, όπου σε κάθε επανάληψη μεταβάλλουμε την φάση της κάθε κεραίας κατά $+\delta\varphi_i$ και $-\delta\varphi_i$ και βλέπουμε για κάθε μεμονωμένο ακτινοβολητή της επίδραση που έχει η κάθε μεταβολή στον QF.	53
5.4	Ψευδοκώδικας αλγορίθμου BGD (Pure Approach).	54
5.5	(Αριστερά) Ραβδόγραμμα το οποίο παρουσιάζει την ταχύτητα σύγκλισης του αλγορίθμου BGA για τις στοιχειοκεραίες $\{1,2,4\} \times 16$. (Δεξιά) Διάγραμμα του QF συναρτήσει του κύκλου i	55
5.6	Η ιδέα της ντετερμινιστικής επέκτασης του BGD. Παρατηρούμε την επιφάνεια S όπου έχει συγκεντρωθεί η ενέργεια και το κέντρο της έλλειψης (target) όπου με βάση αυτό το σημείο υπολογίζονται οι φάσεις, που πρέπει να αφαιρεθούν, ώστε η έλλειψη να έρθει στο κέντρο των αξόνων.	56
5.7	Ψευδοκώδικας αλγορίθμου DE-BGD	56
5.8	(Αριστερά) Ραβδόγραμμα το οποίο παρουσιάζει την ταχύτητα σύγκλισης του αλγορίθμου DE-BGA για τις στοιχειοκεραίες $\{1,2,4\} \times 16$. (Δεξιά) Διάγραμμα του QF συναρτήσει του κύκλου i	57
5.9	Ψευδοκώδικας αλγορίθμου DE-BGD	58
5.10	(Αριστερά) Ραβδόγραμμα το οποίο παρουσιάζει την ταχύτητα σύγκλισης του αλγορίθμου SDE-BGA για τις στοιχειοκεραίες $\{1,2,4\} \times 16$. (Δεξιά) Διάγραμμα του QF συναρτήσει του κύκλου i	58
5.11	Παρουσιάζεται ποιοτικά η ιδέα των SPGD αλγορίθμων, όπου σε κάθε επανάληψη μεταβάλλουμε ταυτόχρονα τις φάσεις όλων των κεραίων κατά $+\delta\varphi_i$ και $-\delta\varphi_i$ και βλέπουμε για όλη την στοιχειοκεραία επίδραση που έχει η κάθε μεταβολή στον QF.	59

5.12	Ψευδοκώδικας αλγορίθμου SPGD	60
5.13	(Αριστερά) Ραβδόγραμμα το οποίο παρουσιάζει την ταχύτητα σύγκλισης του αλγορίθμου SPGD για τις στοιχειοκεραίες $\{1,2,4\} \times 16$. (Δεξιά) Διάγραμμα του QF συναρτήσει του κύκλου i	60
5.14	Διάγραμμα σύγκρισης των τεσσάρων αλγορίθμων σε διάφορες στοιχειοκεραίες. (Δεξιά) Σύγκριση μεταξύ των αλγορίθμων SDE-BGD και SPGD για 1-D OPAs	61
5.15	Πλέγμα στο επίπεδο $az - el$	62
5.16	(1 ^η Γραμμή) Στα αριστερά παρουσιάζεται το διάγραμμα ακτινοβολίας του 8×8 OPA με γωνία στόχευσης $(0^\circ, 0^\circ)$ και δεξιά οι φάσεις $a_{n,m}$ που αντιστοιχούν σε κάθε ακτινοβολητή. (2 ^η Γραμμή) Ομοίως με την 1 ^η αλλά για γωνία στόχευσης $(3^\circ, 0^\circ)$. (3 ^η Γραμμή) Ομοίως με την 1 ^η αλλά για γωνία στόχευσης $(0^\circ, 3^\circ)$. (4 ^η Γραμμή) Ομοίως με την 1 ^η αλλά για γωνία στόχευσης $(3^\circ, 3^\circ)$	63
5.17	Ψευδοκώδικας αλγορίθμου για την στροφή της δέσμης (Beam Steering). Με $r_{AE,x}(n)$ και $r_{AE,y}(m)$ συμβολίζεται η τετμημένη και η τεταγμένη της κεραίας (n,m) σύμφωνα με το σύστημα συντεταγμένων του Σχήματος 3.6	64
6.1	Σχηματική απεικόνιση του πειραματικού setup και του Fourier συστήματος εικόνας για τον χαρακτηρισμό του διαγράμματος ακτινοβολίας (Far Field) των PolyBoard OPAs. Η εικόνα πάρθηκε από το [17].	67
6.2	Εικόνα του setup	68
6.3	Απλοποιημένο διάγραμμα του Driver όπου απεικάζονται οι πηγές ρεύματος του (τα κανάλια του)	69
6.4	Τοπολογία που υλοποιήθηκε για την βαθμονόμηση του Driver	69
6.5	(Αριστερά) Η χαρακτηριστική ρεύματος εισόδου-εξόδου του δέκατου καναλιού του Driver (κόκκινη ευθεία) που προκύπτει από τις πειραματικές τιμές (μπλε κουκίδες), επίσης παρουσιάζεται και η ιδανική χαρακτηριστική (πράσινη ευθεία). (Δεξιά) Ομοίως με την αριστερή εικόνα αλλά για ενδέκατο κανάλι του Driver.	70
6.6	Η χαρακτηριστική διέγερσης $\phi - I$ (φάση-ρεύμα) ενός PS	70
6.7	Το ρεύμα διέγερσης ενός PS συναρτήσει του χρόνου	71
6.8	Ψευδοκώδικας αλγορίθμου για την εύρεση του ρεύματος $I_{2\pi}$	71
6.9	(Αριστερά) Διάγραμμα του δείκτη OI συναρτήσει του ρεύματος διέγερσης του PS (από το 2×4 OPA) που επιδιώκεται ο προσδιορισμός του ρεύματος $I_{2\pi}$ του. Παρατηρούμε ότι για μικρά ρεύματα η εισαγωγή της καθυστέρησης είναι αρκετά μικρή (λόγω του τετραγωνικός νόμου). (Δεξιά) Ομοίως με την αριστερή εικόνα αλλά για OPA 1×4	72

6.10	Στο αριστερό τμήμα παρουσιάζονται οι διαδικασίες που συντελούν στον χρόνο διαμόρφωσης (configuration time) και στο δεξιό στον χρόνο επεξεργασίας των δεδομένων	73
6.11	Κάτοψη του 1 × 4 OPA. Στο αριστερό τμήμα της εικόνας εμφανίζεται η οπτική ίνα, στο κέντρο του PIC, με χρυσό χρώμα παρατηρούμε τους τέσσερις PS (ένας PS ανά κεραία) και με γκρι τα DC Probes με τα οποία διεγείρονται οι PS	74
6.12	(Αριστερά) Ραβδόγραμμα με δεδομένα προσομοίωση, το οποίο παρουσιάζει τον αριθμό των κύκλων που χρειάζεται ο εκάστοτε αλγόριθμος για να ξεπεράσει τα αντίστοιχα κατώφλια της συνάρτησης κόστους. (Δεξιά) Ομοίως με αριστερά αλλά για τα πειραματικά δεδομένα.	75
6.13	Παράδειγμα 1 × 4 Uniform OPA όπου παρουσιάζονται οι αποκλίσεις των θεωρητικών θέσεων των ακτινοβολητών (διακεκομμένα τετράγωνα) με τις πραγματικές θέσεις (μπλε τετράγωνα)	75
6.14	(Αριστερά) Διάγραμμα ακτινοβολίας 1 × 4 OPA πριν προηγηθεί η αρχικοποίηση, δηλαδή οι PSs διεγείρονται με μηδενικά ρεύματα. (Δεξιά) Διάγραμμα ακτινοβολίας της ίδιας στοιχειοκεραίας μετά το πέρας της αρχικοποίησης, όπου παρατηρούμε ότι την ισχύς να έχει συγκεντρωθεί στο κέντρο της εικόνας.	76
6.15	Κάτοψη του 2 × 4 OPA	76
6.16	(Αριστερά) Ραβδόγραμμα με δεδομένα προσομοίωση, το οποίο παρουσιάζει τον αριθμό των κύκλων που χρειάζεται ο εκάστοτε αλγόριθμος για να ξεπεράσει τα αντίστοιχα κατώφλια της συνάρτησης κόστους. (Δεξιά) Ομοίως με αριστερά αλλά για τα πειραματικά δεδομένα.	77
6.17	(Αριστερά) Διάγραμμα ακτινοβολίας 2 × 4 OPA πριν προηγηθεί η αρχικοποίηση, δηλαδή οι PSs διεγείρονται με μηδενικά ρεύματα. (Δεξιά) Διάγραμμα ακτινοβολίας της ίδιας στοιχειοκεραίας μετά το πέρας της αρχικοποίησης, όπου παρατηρούμε την ισχύ να έχει συγκεντρωθεί στο κέντρο της εικόνας.	77
6.18	(1 ^η Γραμμή) Διάγραμμα ακτινοβολίας για σημείο στόχευσης (0°, 0°) και (1°, 2.5°). (2 ^η Γραμμή) Ομοίως με την 1 ^η αλλά για (0°, 2°) και (0°, -1°). (3 ^η Γραμμή) Ομοίως με την 1 ^η αλλά για (-3°, 0°) και (3°, 0°).	78
Π.1	Το οριζόντιο σύστημα συντεταγμένων	83
Π.2	Η γραφική διεπαφή χρήστη που υλοποιήθηκε για τις ανάγκες του setup, το οποίο αποτελείται από πέντε καρτέλες, τις Main Tab, Camera Control, Phase Extraction, Beam Steering και Drivers	86

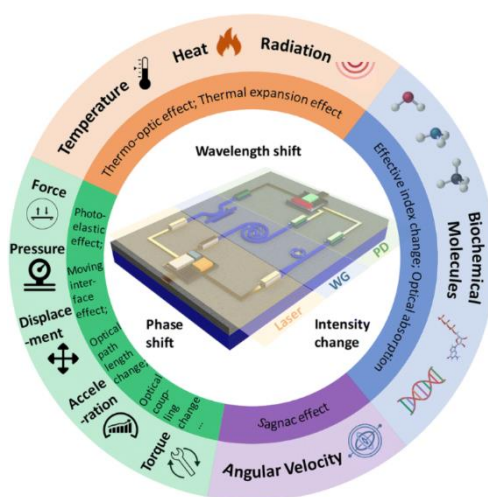
Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Φωτονική Τεχνολογία

Η φωτονική τεχνολογία είναι η επιστήμη που ασχολείται με το φως. Αυτή περιλαμβάνει την δημιουργία, τον χειρισμό, την κυματοδότηση, την ενίσχυση και τον εντοπισμό του φωτός [1]. Στην καθημερινότητα μας, η φωτονική τεχνολογία, κυρίως έμμεσα, κατέχει έναν εξαιρετικά σημαντικό ρόλο σε πάρα πολλούς τομείς, ενδεικτικά αναφέρονται η υγεία, η ασφάλεια, η βιομηχανία και οι τηλεπικοινωνίες.

Αρχικά, η δημιουργία αισθητήρων με χρήση του φωτός χαρακτηρίζονται από ακρίβεια (μεγάλη ευαισθησία) και ταχύτητα στις μετρήσεις που λαμβάνονται και για αυτό τους καθιστά εξαιρετικά ωφέλιμους σε πάρα πολλές εφαρμογές. Ειδικότερα, στην υγεία επιτυγχάνουν την πρόληψη ασθενειών με ασφάλεια μιας και δεν χρειάζεται η επέμβαση στον ασθενή αλλά και στην έρευνα των ασθενειών, ώστε να κατανοηθούν και να μελετηθούν καλύτερα [1]. Επιπροσθέτως, η βιομηχανία τροφίμων αποτελεί τομέα όπου αναδεικνύονται οι δυνατότητες των οπτικών αισθητήρων. Παραδείγματα τέτοιων αισθητήρων αποτελεί η ερευνητική εργασία ανάπτυξης αισθητήρων για ανάλυση τροφίμων βασισμένους σε micro-ring-resonators (MRR) [2] και η ανάπτυξη αισθητήρων μέτρησης της δόνησης επιφανειών σε επίπεδο PIC [3]-[4]. Στην εικόνα 1.1 παρουσιάζονται συνοπτικά πληθώρα μεγεθών, τα οποία μπορούν να μετρηθούν με χρήση αισθητήρων που βασίζονται στο φως μαζί με το φαινόμενο που αξιοποιούν για την επίτευξη αυτού του στόχου.

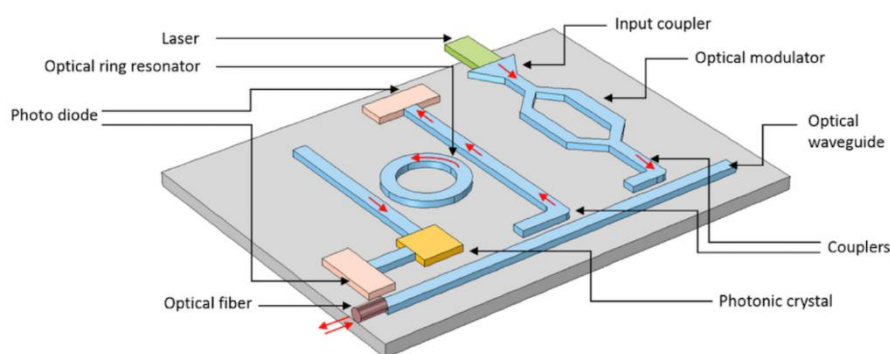


Σχήμα 1.1: Σχηματική απεικόνιση των μηχανισμών sensing σε ένα τυπικό Photonic Integrated Circuit και τα μεγέθη που μπορούν να μετρηθούν-προσδιοριστούν. Το σχήμα πάρθηκε από το [5].

Στις τηλεπικοινωνίες η συνεισφορά της φωτονικής επιστήμης είναι ανεκτίμητη καθώς καταφέρνει να καλύπτει τις απαιτήσεις των χρηστών για γρήγορες ταχύτητες, αξιοπιστία και ασφάλεια . Πιο συγκεκριμένα, η υψηλή συχνότητα φέροντος προσφέρει και τις μεγάλες ταχύτητες μετάδοσης της πληροφορίας [6]-[7]. Η κυματοδότηση του φωτός στις ενσύρματες ζεύξεις γίνεται με χρήση διηλεκτρικών κυματοδηγών, των οπτικών ινών, στις μπάντες συχνοτήτων O και C.

1.2 Φωτονικά Ολοκληρωμένα Κυκλώματα (PIC)

Με τον όρο φωτονικό ολοκληρωμένο κύκλωμα αναφερόμαστε σε έναν αριθμό από φωτονικές διατάξεις, όπως για παράδειγμα κυματοδηγούς, οπτικούς ενισχυτές και φωτοδιόδους, υλοποιημένα στο ίδιο τοπίο όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 1.2. Η αγορά των PIC διαρκώς επεκτείνεται καθώς αποτελούν την καλύτερη λύση σε πληθώρα εφαρμογών, όπως σε τηλεπικοινωνιακές ζεύξεις μεγάλου εύρους ζώνης (Bandwidth). Οι κύριοι παράγοντες που τα καθιστούν τόσο δημοφιλείς είναι η ακρίβεια (Precision), το εύρος ζώνης και η χαμηλή κατανάλωση που έχουν (Energy Efficiency) [9]-[10].



Σχήμα 1.2: Σχηματικό ενός PIC (όχι σε κλίμακα) όπου εμφανίζονται διάφορα οπτικά στοιχεία. Το σχήμα πάρθηκε από το [10].

Από τις πρώτες ερευνητικές εργασίες πάνω στα PIC θεωρήθηκε ότι θα ακολουθήσουν το ίδιο μονοπάτι όπως έγινε και με την ολοκλήρωση μικροηλεκτρονικών διατάξεων (IC). Πράγματι, η πορεία εξέλιξη τους ως προς την πυκνότητα ολοκλήρωσης και της πολυπλοκότητας των διατάξεων συμβαδίζει με αυτή των IC που περιγράφεται από το Νόμο του Moore (Moore's Law) [11]. Ωστόσο, υπάρχουν και μεγάλες διαφορές ανάμεσα στην φωτονική και ηλεκτρονική ολοκλήρωση. Για παράδειγμα, οι φωτονικές διατάξεις είναι ενεργά και πιο ογκώδη συστήματα και καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια από τα ηλεκτρονικά.

1.3 Οπτικές Στοιχειοκεραίες (Optical Phased Arrays)

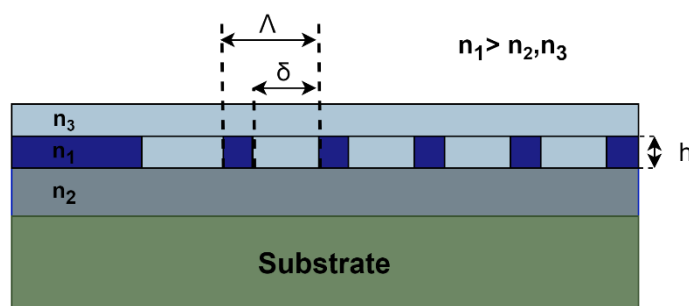
Οι οπτικές στοιχειοκεραίες είναι το οπτικό ανάλογο των RF στοιχειοκεραίων, όπου εδώ ρυθμίζοντας τη φάση και το πλάτος του φωτός επιτυγχάνεται η αλλαγή της μορφής του διαγράμματος ακτινοβολίας της διάταξης [12].

Οι οπτικές στοιχειοκεραίες αποτελούν οπτικά κυκλώματα που προσφέρουν την δυνατότητα για compact solid-state συστήματα που επιτρέπουν το optical sensing και τις ασύρματες επικοινωνίες, αντικαθιστώντας με αυτόν τον τρόπο τους κινούμενους καθρέφτες και φακούς (bulky components). Παράλληλα αυτή η λύση είναι εύρωστη (robust) και χαμηλού κόστους. Σε επίπεδο PIC οι οπτικές στοιχειοκεραίες υλοποιούνται από ένα σύνολο από outcoupling δομές που συμπεριφέρονται ως ακτινοβολητές και από ένα σύνολο από οπτικών διαχωριστών που χωρίζουν την ισχύς της πηγής και την κατανέμουν στους ακτινοβολητές.

Τα τελευταία χρόνια οι οπτικές στοιχειοκεραίες αποτελούν πόλο έλξης για πολλούς ερευνητές που προσπαθούν να τις εξελίσσουν. Χαρακτηριστική εφαρμογή των OPAs είναι στα συστήματα τηλεσκοπικής , LiDAR (Light Detection And Range), καθώς προσφέρει μια solid-state λύση. Επίσης, η συνεισφορά τους στις ασύρματες (wireless) επικοινωνίες (free space optical links) είναι εξαιρετική καθώς με χρήση OPA για πομπή και δέκτη επιτυγχάνεται επίσης και ελαχιστοποίηση της διάταξης (miniaturization) [13]-[14]. Παρακάτω αναφέρονται συνοπτικά οι δύο πιο συνηθισμένοι τρόποι οπτικών στοιχειοκεραίων που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση οπτικών στοιχειοκεραίων.

1.3.1 Υλοποίηση με Συζεύκτες Φράγματος (Grating Couplers)

Οι συζεύκτες φράγματος τοποθετούνται στην επιφάνεια του PIC και έχουν την ικανότητα να εκτρέπουν το διερχόμενο από αυτούς φως προς το περιβάλλον. Επομένως, με αυτόν τον τρόπο λειτουργούν σαν ακτινοβολητές [15]. Στο Σχήμα 1.4 παρουσιάζεται μια τυπική δομή ενός Grating Coupler μαζί με τις χαρακτηριστικές αποστάσεις του.

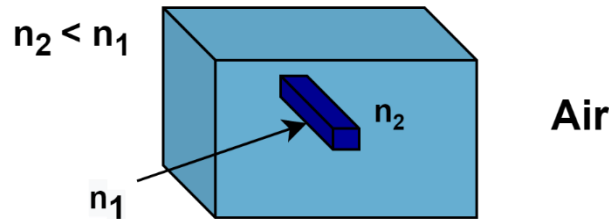


Σχήμα 1.3: Η τομή ενός Grating Coupler.

Όπως αναφέρθηκε και προηγούμενος οι οπτικές στοιχειοκεραίες πρέπει να έχουν την δυνατότητα της στροφής της κύριας δέσμης τους (Beam Forming). Αυτό επιτυγχάνεται με κατάλληλο έλεγχο της καθυστέρησης κάθε σήματος ώστε όταν φθάνουν στον ακτινοβολητή να φθάνουν με συγκεκριμένες διαφορές φάσης. Επομένως σε μια μονοδιάστατη (1D) στοιχειοκεραία επιτυγχάνεται με αυτό τον τρόπο στροφή στο αζιμουθιακό επίπεδο (azimuth plane) ενώ σε μια διδιάστατη (2D) και στο επίπεδο του ύψους (elevation plane). Ωστόσο οι υλοποιήσεις OPA με Grating Couplers έχουν την ιδιομορφία ότι με μεταβολή του μήκους κύματος του φέροντος σήματος επιτυγχάνεται στροφή της δέσμης στο elevation plane και με κατάλληλες δομές που προσθέτουν ελεγχόμενη φάση στα σήματα (Phase Shifters) προκύπτει και η στροφή στο azimuth plane. Οπότε, με 1D στοιχειοκεραίες επιτυγχάνεται η στροφή δέσμης σε όλο το επίπεδο και άρα εξοικονομείται που σε άλλη περίπτωση θα χρειαζόταν για μια 2D υλοποίηση [16].

1.3.2 Υλοποίηση με Αξονικούς Κυματοδηγούς (End-Fire Waveguide)

Η δεύτερη υλοποίηση οπτικών στοιχειοκεραίων πραγματοποιείται με δομές κυματοδηγών καναλιού το μήκος των οποίων φθάνει μέχρι το τέλος του PIC όπου εκεί η έδρα τους έρχεται σε επαφή με τον αέρα [17]. Η συγκεκριμένη δομή απεικονίζεται στο κάτωθι Σχήμα 1.4, όπου με χρώμα μπλε σκούρο απεικονίζεται ο κυματοδηγός.



Σχήμα 1.4: Τρισδιάστατη απεικόνιση ενός End-Fire Waveguide.

Επομένως, με κατάλληλες δομές που εισάγουν καθυστέρηση επιτυγχάνεται η στροφή της δέσμης στο azimuth plane για 1D συστοιχία κεραιών και σε όλο το επίπεδο για 2D συστοιχία κεραιών. Οπότε, η συγκεκριμένη υλοποίηση υστερεί σε σχέση με την επιφάνεια που χρειάζεται για την επίτευξη της σάρωσης όλου του χώρου σε σχέση με την προηγούμενη, βέβαια έχουν το πλεονέκτημα ότι ο κάθε ακτινοβολητής είναι μικρότερος σε μέγεθος.

1.4 Μετρολογία και Calibration

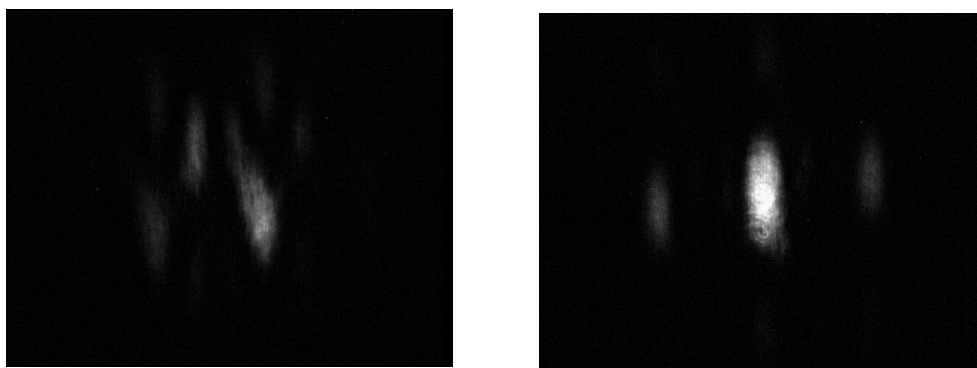
Μετρολογία είναι ο επιστημονικός τομέας που ασχολείται με τις μετρήσεις, καθαρίζοντας τόσο τις πειραματικές αλλά και τις θεωρητικές αβεβαιότητες σε κάθε επίπεδο αλλά και σε κάθε επιστήμη. Μέσω της μετρολογίας εξασφαλίζεται το τεχνικό υπόβαθρο για την επίτευξη της ποιότητας, μέσω των ασφαλών μετρήσεων φυσικών μεγεθών, ώστε κάθε αντικείμενο να μπορεί να αξιολογηθεί σε σχέση με προκαθορισμένες απαιτήσεις [18].

Με τον όρο calibration (βαθμονόμηση) αναφερόμαστε στην διαδικασία με την οποία διαμορφώνουμε ένα οποιοδήποτε σύστημα, ώστε να συμπεριφέρεται μέσα στο επιτρεπτό όρο. Επιπλέον, επιδιώκεται η εξάλειψη ή ο περιορισμός από τους παράγοντες που εισάγουν σφάλμα στις μετρήσεις [19].

1.5 Αντικείμενο της διπλωματικής

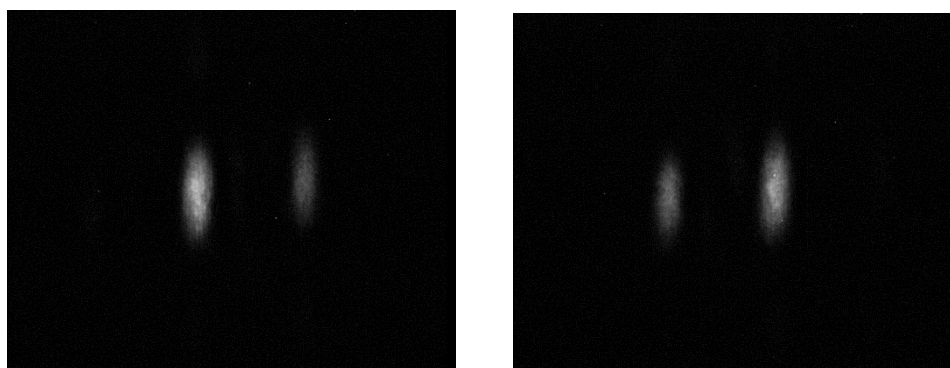
Κατά τη διαδικασία δημιουργίας ενός PIC οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται (etching) δεν καταφέρνουν να δημιουργήσουν επακριβώς τις φωτονικές δομές που ζητούνται. Ειδικότερα, αν αναφερθούμε στους κυματοδηγούς: το μήκος, το πλάτος τους, η πυκνότητα υλικού του διηλεκτρικού τους είναι ορισμένα παραδείγματα από σημεία

πιθανών κατασκευαστικών ατελειών. Επομένως, το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι αρχικά η μελέτη και πειραματική υλοποίηση αλγορίθμων για το calibration οπτικών στοιχειοκεραιών, που υλοποιούνται με αξονικούς κυματοδηγούς, δηλαδή με αλγορίθμους που θα προσπαθήσουν να καμουφλάρουν με κατάλληλες αρχικές φάσεις στους ολισθητές φάσης τις παραπάνω κατασκευαστικές αστοχίες [20] μαζί με τις διαφορές φάσεις που οφείλονται σε διαφορετικού μήκους οπτικούς δρόμους. Για να γίνει καλύτερα κατανοητή η αξία αυτής της διαδικασίας, στις παρακάτω εικόνες, Σχήμα 1.6, παρουσιάζεται το διάγραμμα ακτινοβολίας ενός OPA πριν και μετά την αρχικοποίηση (βαθμονόμηση) του.



Σχήμα 1.5: (Αριστερά) Το διάγραμμα ακτινοβολίας μίας οπτικής στοιχειοκεραίας 2×4 πριν γίνει η βαθμονόμηση των φάσεων των ολισθητών φάσης. (Δεξιά) Το διάγραμμα ακτινοβολίας της ίδιας στοιχειοκεραίας αφού γίνει η βαθμονόμηση.

Το δεύτερο σκέλος της εργασίας περιλαμβάνει την ανάπτυξη αλγορίθμου για την στροφή της δέσμης (beam steering) των οπτικών στοιχειοκεραιών εκάστοτε διάταξης με εφαρμογή κατάλληλης διαφοράς φάσης μεταξύ των σημάτων μέσω των ολισθητών φάσης. Στο Σχήμα 1.7 παρουσιάζεται τα διάγραμμα ακτινοβολίας μια στοιχειοκεραίας 2×4 τα οποία στοχεύουν ο κύριος λοβός τους είναι στα σημεία ($az = -3^\circ, el = 0^\circ$) και ($az = 3^\circ, el = 0^\circ$).



Σχήμα 1.6: (Αριστερά) Το διάγραμμα ακτινοβολίας όπου ο κύριος λοβός είναι στραμμένος στο σημείο ($az = -3^\circ, el = 0^\circ$). (Δεξιά) Ομοίως με αριστερά αλλά για σημείο στόχευσης ($az = 3^\circ, el = 0^\circ$).

Οπότε, και με βάση το παραπάνω οπτικό παράδειγμα αναδεικνύεται η αξία και η ανάγκη για την αρχικοποίηση των οπτικών στοιχειοκεραιών, ώστε αφού προηγηθεί αυτό το PIC είναι έτοιμο ώστε να λάβει τις κατάλληλες διεγέρσεις, μέσω των αλγορίθμων στροφής δέσμης, που του επιτρέπουν την δυνατότητα να εκτελέσει την όποια εφαρμογή για την οποία έχει σχεδιαστεί, όπως για παράδειγμα την σάρωση που παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.7 .

Κεφάλαιο 2

Θεωρία Κεραιών

2.1 Ηλεκτρομαγνητική θεωρία

Στην πρώτη ενότητα παρουσιάζονται συνοπτικά οι βασικές έννοιες της κλασικής θεωρίας του ηλεκτρομαγνητισμού [21], οι οποίες αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι και στην ανάλυση των κεραιών.

2.1.1 Εξισώσεις του Maxwell

Η θεωρία των κεραιών στηρίζεται στις εξισώσεις του Maxwell που διατυπώνονται μαθηματικά (σε ολοκληρωτική μορφή) με τους παρακάτω τέσσερις νόμους, ως εξής:

Νόμος του Gauss:

$$\oiint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \iiint_V \rho dV \quad (2.1)$$

Απουσία μαγνητικών μονοπόλων:

$$\oiint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (2.2)$$

Νόμος της επαγωγής Faraday- Maxwell:

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{\partial}{\partial t} \left(\iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \right) \quad (2.3)$$

Νόμος Ampere-Maxwell:

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = \iint_S \vec{j} \cdot d\vec{S} + \frac{\partial}{\partial t} \left(\iint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} \right) \quad (2.4)$$

όπου τα ηλεκτρομαγνητικά μεγέθη που εμφανίζονται στις παραπάνω εξισώσεις είναι εν γένει διανυσματικές ή βαθμωτές συναρτήσεις του χρόνου και του χώρου.

Πιο συγκεκριμένα, οι πηγές (αίτια) των ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων είναι:

- $\rho(\vec{r}, t)$: χωρική πυκνότητα του ηλεκτρικού φορτίου (σε C/m^3)
- $\vec{j}(\vec{r}, t)$: χωρική πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος (σε A/m^2)

ενώ, οι αποκρίσεις (ηλεκτρομαγνητικά πεδία) είναι:

- $\vec{E}(\vec{r}, t)$: Ένταση του ηλεκτρικού πεδίου (σε V/m)
- $\vec{D}(\vec{r}, t)$: Πυκνότητα της ηλεκτρικής ροής (σε C/m)
- $\vec{H}(\vec{r}, t)$: Ένταση του μαγνητικού πεδίου (σε A/m)
- $\vec{B}(\vec{r}, t)$: Πυκνότητα της μαγνητικής ροής (σε Wb/m^2)

Τα μεγέθη \vec{E}, \vec{B} θεωρούνται θεμελιώδη μεγέθη, ενώ τα D, H παράγωγα μεγέθη.

Η ανάλυση των κεραιών διευκολύνεται με την εισαγωγή συναρτήσεων δυναμικού. Πιο συγκεκριμένα, από την εξίσωση (2.3) μπορεί η μαγνητική επαγωγή B να εκφραστεί με τη χρήση του διανυσματικού δυναμικού \vec{A} ως

$$\vec{B}(\vec{r}, t) = \vec{\nabla} \times \vec{A}(\vec{r}, t) \quad (2.5)$$

Και συνδυάζοντας τις σχέσεις (2.5) και (2.3) καταλήγουμε στην παρακάτω σχέση

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = -\vec{\nabla}\varphi(\vec{r}, t) - \frac{\partial \vec{A}(\vec{r}, t)}{\partial t} \quad (2.6)$$

Όπου το φ ονομάζεται βαθμωτό διανυσματικό.

Επιπροσθέτως, παίρνοντας την απόκλιση και στα δύο μέρη της σχέσης (2.4) προκύπτει η παρακάτω εξίσωση, που είναι γνωστή ως εξίσωση συνέχειας και εκφράζει την αρχή διατήρησης του ηλεκτρικού φορτίου.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{j}(\vec{r}, t) + \frac{\partial \rho(\vec{r}, t)}{\partial t} = 0 \quad (2.7)$$

2.1.2 Οριακές Συνθήκες

Στα σύνορα των διαφόρων υλικών μπορεί να εμφανίζονται φορτία ή ρεύματα .

Επομένως, με κατάλληλο χειρισμό των εξισώσεων του Maxwell και της εξίσωσης συνέχειας προκύπτουν οι παρακάτω πέντε οριακές συνθήκες.

$$\hat{n} \cdot (\vec{D}_2 - \vec{D}_1) = \sigma \quad (2.8)$$

$$\hat{n} \cdot (\vec{B}_2 - \vec{B}_1) = 0 \quad (2.9)$$

$$\hat{n} \times (\vec{E}_2 - \vec{E}_1) = 0 \quad (2.10)$$

$$\hat{n} \times (\vec{H}_2 - \vec{H}_1) = \vec{K} \quad (2.11)$$

$$\hat{n} \cdot (\vec{J}_2 - \vec{J}_1) = -\vec{\nabla} \cdot \vec{K} - \frac{\partial \sigma}{\partial t} \quad (2.12)$$

Όπου

- \hat{n} : το μοναδιαίο διάνυσμα κάθετο στη διαχωριστική επιφάνεια το οποίο έχει φορά από το υλικό 1 προς το υλικό 2. Ενώ οι δείκτες 1 και 2 υποδηλώνουν την πλευρά του υλικού που μας ενδιαφέρει η τιμή του πεδίου.
- $\sigma(\vec{r}, t)$: επιφανειακή πυκνότητα του ηλεκτρικού φορτίου (σε C/m^2)
- $\vec{K}(\vec{r}, t)$: χωρική πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος (σε A/m)

2.1.3 Συντακτικές σχέσεις

Όπως γίνεται αντιληπτό από τις εξισώσεις του Maxwell, η γνώση των ρ, \vec{J} δεν επαρκεί για την εύρεση των πεδιακών μεγεθών αλλά απαιτούνται επιπλέον εξισώσεις. Οι σχέσεις που συνδέουν τα πεδιακά μεγέθη ονομάζονται συντακτικές σχέσεις.

Εν γένει $\vec{D} = f(\vec{E}, \vec{B})$ και $\vec{H} = g(\vec{E}, \vec{B})$ όπου οι συναρτήσεις f, g εξαρτώνται από τα υλικά μέσα στα οποία υπάρχουν τα πεδία.

Στην περίπτωση των ασυρμάτων ζεύξεων όπου ο χώρος που διαδίδεται το H/M κύμα είναι (συνήθως) το κενό, οπότε έχουμε ότι

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} \quad (2.13)$$

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu_0} * \vec{B} \quad (2.14)$$

Όπου ϵ_0 ονομάζεται η επιτρεπτικότητα του κενού και μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα του κενού.

2.1.4 Ημιτονοειδής Μόνιμη Κατάσταση (ΗΜΚ)

Στις περιπτώσεις που τα αίτια είναι ημιτονοειδής συναρτήσεις του χρόνου τότε και οι αποκρίσεις θα εμφανίζουν ημιτονοειδής συμπεριφορά (γραμμικότητα συστήματος).

Για την ανάλυση τέτοιων διατάξεων συμφέρει η χρήση φασιθετών, όπου αν έχουμε ένα τυχαίο μέγεθος

$$r(x, y, z, t) = a(x, y, z) \cos(\omega t + \varphi(x, y, z)) \quad (2.15)$$

ο φασιθέτης του είναι ο

$$R(x, y, z) = a(x, y, z) e^{j\varphi(x, y, z)} \quad (2.16)$$

Επομένως, στην ΗΜΚ οι εξισώσεις του Maxwell μετασχηματίζονται σε

$$\vec{\nabla} \times \vec{E}(\vec{r}) = -j\omega \vec{B}(\vec{r}) = -j\omega\mu(\omega) \vec{H}(\vec{r}) \quad (2.17)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H}(\vec{r}) = \vec{J}(\vec{r}) + j\omega \vec{D}(\vec{r}) = \vec{J}(\vec{r}) + j\omega\varepsilon(\omega) \vec{E}(\vec{r}) \quad (2.18)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D}(\vec{r}) = \varepsilon(\omega) \vec{\nabla} \cdot \vec{E}(\vec{r}) = \rho(\vec{r}) \quad (2.19)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B}(\vec{r}) = \mu(\omega) \vec{\nabla} \cdot \vec{H}(\vec{r}) = 0 \quad (2.20)$$

Όπου οι διεγέρσεις και αποκρίσεις στις παραπάνω εξισώσεις αντιστοιχούν στους φασιθέτες των μεγεθών και όχι στις στιγμιαίες τιμές τους.

2.1.5 Ηλεκτρομαγνητική ενέργεια και ισχύς

Στην Η/Μ θεωρία η Αρχή Διατήρησης Ενέργειας (ΑΔΕ) εκφράζεται (σε ολοκληρωτική μορφή) ως

$$\oint_S (\vec{E} \times \vec{H}) \cdot d\vec{S} + \frac{d}{dt} \left\{ \iiint_V w_{em} dV \right\} + \iiint_V \sigma(\vec{E} \cdot \vec{E}) dV = - \iiint_V (\vec{E} \cdot \vec{J}_s) dV \quad (2.21)$$

Όπου

$$w_{em} = \frac{1}{2} [\varepsilon |\vec{E}|^2 + \mu |\vec{H}|^2] \quad (2.22)$$

και αναφέρεται η ΑΔΕ ως θεώρημα Poynting.

Ορίζουμε,

$$\vec{N}(\vec{r}, t) \triangleq \vec{E}(\vec{r}, t) \times \vec{H}(\vec{r}, t) \quad (2.23)$$

το διάνυσμα Poynting το οποίο μπορεί να έχει τη φυσική σημασία της ροής της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας.

Στην ανάλυση κεραιών εργαζόμαστε στην ΗΜΚ όπου πιο σημαντική αξία έχει ο μέσος όρος του διανύσματος Poynting, δηλαδή το

$$\langle \vec{N}(\vec{r}, t) \rangle = \frac{1}{2} \text{Re}\{\vec{E}(\vec{r}) \times \vec{H}(\vec{r})^*\} = \vec{P}_{av}(\vec{r}) \quad (2.24)$$

Επιπροσθέτως, ορίζεται και το διάνυσμα

$$\vec{S}(\vec{r}) \triangleq \frac{1}{2} \vec{E}(\vec{r}) \times \vec{H}(\vec{r})^* \quad (2.25)$$

που ονομάζεται μιγαδικό διάνυσμα Poynting

2.2 Εισαγωγή στη Θεωρία Κεραιών

Στη δεύτερη ενότητα λαμβάνει χώρα μία συνοπτική εισαγωγή στη θεωρία κεραιών και εξετάζονται βασικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται τόσο στην ανάλυση όσο και στη σχεδίαση [22].

2.2.1 Ορισμός κεραιάς

Σύμφωνα με το «IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas» (IEEE Std 145-1983) ως κεραιά ορίζεται το μέρος ενός πομπού ή δέκτη το οποίο έχει σχεδιαστεί ώστε να ακτινοβολεί ή να λαμβάνει ηλεκτρομαγνητικά κύματα [23].

2.2.2 Είδη κεραιών

Τα είδη των υπάρχων κεραιών είναι πάρα πολλά. Παρακάτω αναφέρονται ονομαστικά μερικά από αυτά.

- Γραμμικές κεραιές (wire antennas)
- Κεραιές ανοίγματος (aperture antennas)
- Μικροταινιακές κεραιές (microstrip antennas)
- Στοιχειοκεραιές (array antennas)
- Κεραιές ανακλαστήρας (reflector antennas)
- Φακοειδείς κεραιές (lens antennas)

Περισσότερες πληροφορίες για τις στοιχειοκεραίες θα δοθούν στις ενότητες 2.2.4 και 2.2.5 .

2.2.3 Θεμελιώδεις παράμετροι κεραιών

Στο τρέχων υποκεφάλαιο θα παρουσιαστούν μερικές από τις θεμελιώδεις παραμέτρους των κεραιών ώστε στη συνέχεια να αναπτυχθεί η μεθοδολογία ανάλυσης στοιχειοκεραιών.

Περιοχές Ακτινοβολίας Κεραιών

Ο χώρος γύρω από μια κεραία μπορεί να διακριθεί σε τρεις περιοχές:

- Την κοντινή περιοχή
- Την περιοχή Fresnel
- Τη μακρινή περιοχή (Fraunhofer)

Στην κάθε περιοχή η διαφορά στη δομή των πεδιακών μεγεθών είναι διακριτή. Τα όρια των περιοχών δεν ορίζονται με μοναδικό τρόπο και για αυτό υπάρχουν διάφορα κριτήρια χαρακτηρισμού τους.

Η κοντινή περιοχή είναι η περιοχή στην οποία το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο εμφανίζει άεργη συμπεριφορά και άρα δεν ακτινοβολείται ενέργεια. Η περιοχή αυτή περιορίζεται χωρικά στο εσωτερικό σφαίρας με ακτίνα

$$R_1 = 0.62 \left(\frac{D^3}{\lambda} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.26)$$

Όπου D η μέγιστη διάσταση του ακτινοβολητή και λ το μήκος κύματος που αντιστοιχεί στη φέρουσα συχνότητα.

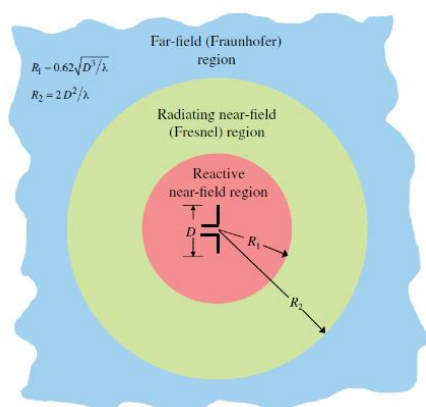
Η περιοχή Fresnel είναι η ενδιάμεση περιοχή μεταξύ κοντινής και μακρινής περιοχής μια κεραίας. Στην συγκεκριμένη περιοχή, το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο εμφανίζει συμπεριφορά ακτινοβολίας αλλά οι εγκάρσιες συνιστώσες του διατηρούν και ακτινική εξάρτηση. Η συγκεκριμένη περιοχή περιορίζεται από τις σφαίρες με ακτίνες R_1 και

$$R_2 = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (2.27)$$

Στην περίπτωση ακτινοβολητών με μικρές διαστάσεις σε σχέση με το μήκος κύματος λειτουργίας, η περιοχή Fresnel δεν υπάρχει.

Η μακρινή περιοχή χαρακτηρίζεται από την ανεξαρτησία των ηλεκτρομαγνητικών μεγεθών από την απόσταση από την κεραία. Η περιοχή αυτή εκτείνεται συνήθως σε αποστάσεις από τον ακτινοβολητή μεγαλύτερες από R_2 .

Κλείνοντας, οι προαναφερθείσες περιοχές παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.1



Σχήμα 2.1: Οι περιοχές ακτινοβολίας μιας κεραίας. Η εικόνα πάρθηκε από [22].

Ένταση Ακτινοβολίας

Η ένταση ακτινοβολίας (radiation intensity) ορίζεται ως η ισχύς που ακτινοβολεί η κεραία ανά μονάδα στερεάς γωνίας (σε μια ορισμένη διεύθυνση). Το μέγεθος αυτό ορίζεται μόνο στο μακρινό πεδίο αυτής και εκφράζεται ως

$$U(\theta, \varphi) = r^2 |\vec{P}_{av}(\vec{r})| \quad (2.28)$$

Με βάσει την παραπάνω σχέση μπορεί να υπολογιστεί η συνολική ισχύς που ακτινοβολεί μια κεραία με ολοκλήρωση της σε ολόκληρη τη στερεά γωνία Ω . Δηλαδή,

$$W_{rad} = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi d\theta [U(\theta, \varphi) \sin(\theta)] \quad (2.29)$$

Κατευθυντικότητα και Κέρδος

Η κατευθυντικότητα (D) μιας κεραίας ορίζεται ως ο λόγος της έντασης ακτινοβολίας μιας κεραίας σε μια δεδομένη διεύθυνση, προς την μέση ένταση ακτινοβολίας που εκπέμπεται συνολικά σε όλες τις κατευθύνσεις. Αν η διεύθυνση δεν προσδιορίζεται, εκλαμβάνεται η διεύθυνση όπου η ένταση της ακτινοβολίας είναι μέγιστη.

Με μαθηματικό τρόπο έχουμε

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{W_{rad}} \quad (2.30)$$

Και αν η διεύθυνση δεν προσδιορίζεται, εκλαμβάνεται η διεύθυνση μέγιστη έντασης ακτινοβολίας, οπότε,

$$D_{max} = \frac{4\pi U_{max}}{W_{rad}} \quad (2.31)$$

Όπου

D : κατευθυντικότητα (αδιάστατο μέγεθος)

D_0 : μέγιστη κατευθυντικότητα (αδιάστατο μέγεθος)

U : ένταση ακτινοβολίας ($\frac{Watt}{\text{μονάδα στερεάς γωνίας}}$)

U_{max} : μέγιστη ένταση ακτινοβολίας ($\frac{Watt}{\text{μονάδα στερεάς γωνίας}}$)

U_0 : ένταση ακτινοβολίας ισοτροπικής πηγής ($\frac{Watt}{\text{μονάδα στερεάς γωνίας}}$)

W_{rad} : ολική ακτινοβολούμενη ισχύς ($Watt$)

Ένα άλλο μέτρο για τον προσδιορισμό της αποδοτικότητας μιας κεραίας είναι το κέρδος ισχύος (σε μια συγκεκριμένη διεύθυνση) ορίζεται ως

$$G = \frac{4\pi U}{W_{in}} \quad (2.32)$$

Το παραπάνω μέγεθος όταν αναφέρεται στην διεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας, ονομάζεται απλώς κέρδος της κεραίας και ισούται με

$$G = \frac{4\pi U_{max}}{W_{in}} \quad (2.33)$$

Όπου αν n_r ο συντελεστής απόδοσης της κεραίας ισχύει

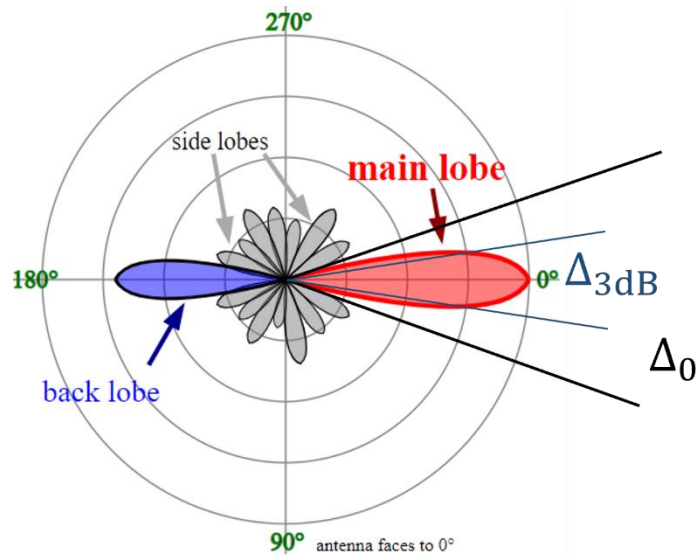
$$W_{rad} = n_r W_{in} \quad (2.34)$$

Διάγραμμα Ακτινοβολίας

Το διάγραμμα ακτινοβολίας είναι η γραφική παράσταση του τρόπου ακτινοβολίας μιας κεραίας καθώς μεταβάλλεται το σημείο παρατήρησης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Στις περισσότερες εφαρμογές το διάγραμμα ακτινοβολίας προσδιορίζεται για την μακρινή περιοχή της κεραίας. Τα μεγέθη των οποίων δίδεται το διάγραμμα ακτινοβολίας είναι η ένταση ακτινοβολίας και η ένταση του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου. Το διάγραμμα της έντασης ακτινοβολίας ονομάζεται διάγραμμα ισχύος, ενώ το διάγραμμα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου ονομάζεται διάγραμμα πεδίου.

Σημαντική έννοια στα διαγράμματα ακτινοβολίας έχουν οι λοβοί ακτινοβολίας που ορίζονται ως τα τμήματα του διαγράμματος που οριοθετούνται από περιοχές πολύ ασθενούς (συνήθως μηδενικού) πεδίου. Ως κύριος λοβός ονομάζεται αυτός που περιέχει τη διεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας ενώ όλοι οι υπόλοιποι λοβοί ονομάζονται πλευρικοί. Επιπλέον, ο πλευρικός λοβός που βρίσκεται στην αντίθετη κατεύθυνση από αυτήν του κύριου ονομάζεται οπίσθιος λοβός. Ιδιαίτερη σημασία για την περιγραφή των

κατευθυντικών ιδιοτήτων μιας κεραίας έχει το γωνιακό εύρος Δ_0 του κύριου λοβού, που είναι η γωνία που σχηματίζουν οι διευθύνσεις μηδενισμού μεταξύ των οποίων παρεμβάλλεται η διεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας. Επίσης, μεγάλη αξία έχει το άνοιγμα μισής ισχύος Δ_{3dB} που ορίζεται ως η γωνία που σχηματίζουν οι διευθύνσεις εκατέρωθεν της διεύθυνσης μεγίστου για τις οποίες η ένταση ακτινοβολίας είναι η μισή της μέγιστης τιμής (βλ. Σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.2: Πολικό Διάγραμμα ακτινοβολίας μιας κεραίας, όπου παρουσιάζονται οι λοβοί που το αποτελούν και οι γωνίες Δ_0, Δ_{3dB} .

2.2.4 Στοιχειοκεραίες

Σύμφωνα με το “IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas” (IEEE Std 145-1993) ως στοιχειοκεραία (array antenna) ορίζεται η διάταξη που αποτελείται από ένα πλήθος ταυτόσημων ακτινοβολητών «καλώς» τακτοποιημένους στο χώρο (regular arrangement) και διεγερμένους με τρόπο που δημιουργείται το επιθυμητό διάγραμμα ακτινοβολίας.

Σε περίπτωση τυχαίας θέσης των κεραιών στο χώρο ή/και δεν είναι ταυτόσημοι οι ακτινοβολητές, η στοιχειοκεραία ονομάζεται τυχαία στοιχειοκεραία (random antenna array).

Ο λόγος ύπαρξης των στοιχειοκεραιών είναι οι δυνατότητες που προσδίδουν σε ευρεία γκάμα εφαρμογών [24]. Πιο συγκεκριμένα, επιτυγχάνουν

- Αύξηση της κατευθυντικότητας
- Σύνθεση επιθυμητών διαγραμμάτων ακτινοβολία
- Στροφή του διαγράμματος ακτινοβολίας με ηλεκτρονικό τρόπο

2.2.5 Ανάλυση Στοιχειοκεραίων

Στο τρέχων εδάφιο παρουσιάζεται η μέθοδος ανάλυσης στοιχειοκεραίων όπου οι ακτινοβολητές που την απαρτίζουν είναι ταυτόσημοι ενώ οι θέσεις τους στο χώρο είναι τυχαίες (ωστόσο με ίδιο προσανατολισμό τοποθετημένες οι κεραίες) [24].

Έστω στη γενική περίπτωση ότι στο χώρο υπάρχουν M ίδιοι ακτινοβολητές σε τυχαίες θέσεις $\vec{r}_m(r_m, \varphi_m, \theta_m)$ στο χώρο και έχουν τον ίδιο προσανατολισμό. Στόχος είναι να βρεθεί η ένταση ακτινοβολίας στο τυχαίο σημείο παρατήρησης $P(r, \theta, \varphi)$ που βρίσκεται στη μακρινή περιοχή.

Ο τύπος που δίνει την ένταση ακτινοβολίας μιας στοιχειοκεραίας $U(\theta, \varphi)$ ισούται με

$$U(\theta, \varphi) = U_0(\theta, \varphi) |AF(\theta, \varphi)|^2 \quad (2.35)$$

Όπου $U_0(\theta, \varphi)$ η ένταση ακτινοβολίας του ακτινοβολητή αναφοράς και $AF(\theta, \varphi)$ είναι ο παράγοντας διάταξης (Array Factor) που εκφράζει την επίδραση της στοιχειοκεραίας στο συνολικό διάγραμμα ακτινοβολίας.

$$AF(\theta, \varphi) = \sum_{0 \leq m \leq M-1} c_m e^{j(kr_m \cos(\psi_m))} \quad (2.36)$$

Όπου,

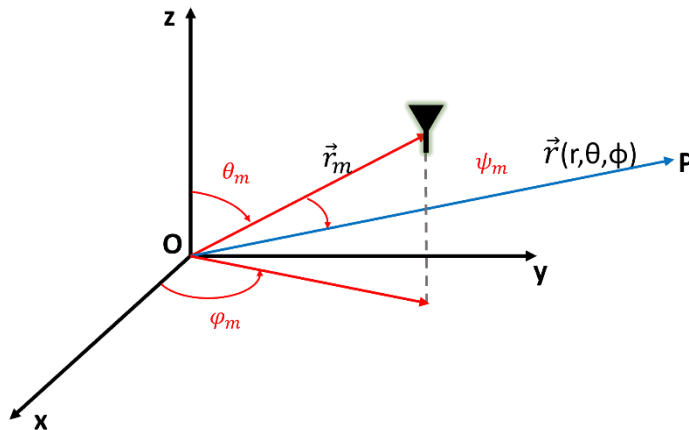
$$\cos(\psi_m) = \cos(\theta_m) \cos(\theta) + \sin(\theta_m) \sin(\theta) \cos(\varphi - \varphi_m) \quad (2.37)$$

Και,

$$c_m = \frac{I_m}{I_0} = a_m e^{jb_m} \quad (2.38)$$

Με I_0 συμβολίζεται ο φασιθέτης του ρεύματος διέγερσης του στοιχείου της στοιχειοκεραίας που θεωρείται ως στοιχείο αναφοράς και I_m του στοιχείου m . Ο μιγαδικός αριθμός c_m που αποτελεί τον κατάλληλο συντελεστή αναλογίας ονομάζεται ρευματικός συντελεστής του στοιχείου m .

Με τη βοήθεια του Σχήματος 2.3 παρουσιάζεται η διάταξη που περιεγράφηκε παραπάνω και οι αποστάσεις-γωνίες που περιλαμβάνονται στην έκφραση του παράγοντα διάταξης.



Σχήμα 2.3: Σύστημα συντεταγμένων για ανάλυση στοιχειοκεραίων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η εξαγωγή της έκφρασης του παράγοντα διάταξη προϋποθέτει την ικανοποίηση της αρχής της επαλληλίας, δηλαδή ότι η παρουσία ενός ακτινοβολητή δεν επηρεάζει την λειτουργία οποιουδήποτε άλλου. Επιπροσθέτως, με απλή ενοποίηση του παράγοντα διάταξης παρατηρείται ότι εξαρτάται από τη συχνότητα λειτουργίας καθώς και από τη γεωμετρική διάταξη, το πλήθος και τη σχετική διέγερση των στοιχείων. Κλείνοντας, όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη υπό ενότητα ένα πλεονέκτημα των στοιχειοκεραιών είναι η στροφή του διαγράμματος ακτινοβολίας ως προς την τυχαία κατεύθυνση (φ_0, θ_0) . Πιο συγκεκριμένα, αυτό επιτυγχάνεται μέσω κατάλληλων τιμών στους ρευματικούς συντελεστές έτσι ώστε

$$(\theta_0, \varphi_0) = \operatorname{argmax}\{AF(\theta, \varphi; c_1, \dots, c_m)\} \quad (2.39)$$

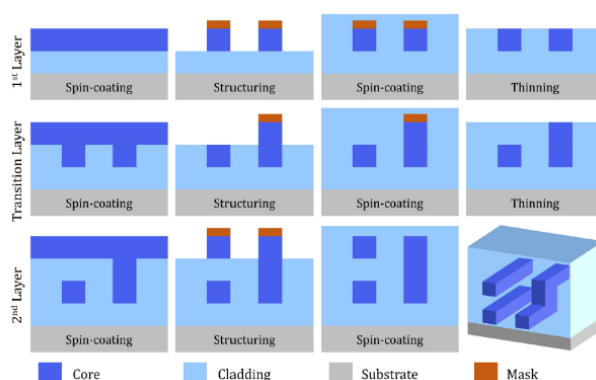
Κεφάλαιο 3

PolyBoard Platform και OPAs

3.1 PolyBoard Πλατφόρμα

Η φωτονική πλατφόρμα PolyBoard είναι μια μονορυθμική πλατφόρμα ολοκλήρωσης φωτονικών διατάξεων που βασίζεται σε πολυμερικά υλικά, τα οποία προσφέρουν χαμηλές απώλειες διάδοσης στα 1550 nm ($0.7\frac{\text{dB}}{\text{cm}}$) και δυνατότητες για PICs όπου υποστηρίζουν πολλαπλές λειτουργικότητες [25]-[26]. Τα δύο πολυμερή που χρησιμοποιούνται κατά την κατασκευή (fabrication) των PICs είναι δύο πολυμερικές ρητίνες (πυρήνας και μανδύας) με δείκτες διάθλασης $n_{\text{core}} = 1.48$ και $n_{\text{clad}} = 1.45$. Επομένως, με κατάλληλα βήματα εναπόθεσης δημιουργούνται διατάξεις όπως κυματοδηγοί, Multi-Mode Interference (MMI) couplers, Thermal Phase Shifters, Mach-Zehnder Interferometers κτλ.

Τα βήματα εναπόθεσης περιλαμβάνουν το spin-coating [27] της ρητίνης μανδύα σε υπόστρωμα πυριτίου, το spin-coating της ρητίνης πυρήνα, τη δημιουργία του στρώματος του κυματοδηγού χρησιμοποιώντας Ultra-Violet (UV)-λιθογραφία και χάραξη με ιόντα και spin-coating του δεύτερου επιπέδου της ρητίνης μανδύα για τον σχηματισμό του άνω μέρους του μανδύα. Η παραπάνω διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί με διαφορετικές μάσκες, υλοποιώντας έτσι πολλαπλά επίπεδα κυματοδήγησης. Επιπροσθέτως, η δυνατότητα χρήσης ενδιάμεσων βημάτων κατά την εναπόθεση επιτρέπει την υλοποίηση κατακόρυφων MMI συζευκτών, όπως παρουσιάζεται τα βήματα εναπόθεσης (process flow) στο Σχήμα 3.1.

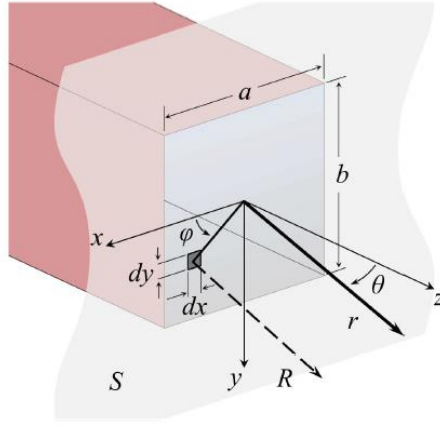


Σχήμα 3.1: Η ροή κατασκευής με επαναλαμβανόμενα βήματα για την δημιουργία πολλαπλών επιπέδων κυματοδήγησης και κατακόρυφων MMI couplers για την μετάβασή του φωτός από το ένα επίπεδο στο άλλο. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα απεικονίζεται ένα PIC με 2 επίπεδα κυματοδήγησης και 1 κατακόρυφος MMI coupler. Η εικόνα πάρθηκε από [17].

3.2 Ανάλυση End-Fire OPAs

Όπως επισημάνθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο τα οπτικά κυκλώματα στοιχειοκεραίων που μελετήθηκαν στην τρέχουσα εργασία είναι υλοποιημένα με End-Fire κυματοδηγούς. Επομένως, στο τρέχον εδάφιο θα παρουσιαστεί εν συντομία η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό τους διαγράμματος ακτινοβολίας ενός End-Fire ακτινοβολητή [17]. Ειδικότερα, για τον υπολογισμό των πεδιακών μεγεθών της κεραίας ανοίγματος (aperture antenna) στην μακρινή περιοχή ακτινοβολίας εφαρμόζεται η Αρχή της Ισοδυναμίας Πεδίου (Field Equivalence Principle) που είναι γνωστή και ως Αρχή του Huygens (Huygens' Principle) [28].

Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται η γεωμετρία του προβλήματος, όπου βλέπουμε τον κυματοδηγό με διαστάσεις a, b και την φανταστική επιφάνεια S που περικλείει τις πραγματικές πηγές ακτινοβολίας και επεκτείνεται στο άπειρο. Αξίζει να σημειωθεί ότι η επιφάνεια επιλέγεται με τρόπο τέτοιο ώστε στο εσωτερικό της να είναι γνωστές οι εφαπτομενικές συνιστώσες των πεδιακών μεγεθών.



Σχήμα 3.2: Το σύστημα συντεταγμένων και η γεωμετρία του προς μοντελοποίηση end-fire PolyBoard κυματοδηγού σαν κεραία ανοίγματος (aperture antenna).

Το επόμενο βήμα, σύμφωνα με το θεώρημα, είναι η αντικατάσταση των πηγών ακτινοβολίας με ισοδύναμες πηγές ηλεκτρικού ρεύματος J_S και μαγνητικού ρεύματος M_S τέτοιες ώστε να επάγουν ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο E_o, H_o στην περιοχή ενδιαφέροντος, δηλαδή στον όγκο εκτός της επιλεγμένης επιφάνειας. Επιπλέον, τα πεδία που βρίσκονται εντός της περιοχής που περικλείεται από την επιφάνεια S μπορούν να πάρουν οποιαδήποτε τιμή οπότε τα θέτουμε ίσα με μηδέν. Άρα με βάση όλα τα παραπάνω, υπολογίζονται οι παραπάνω πηγές από τις κάτωθι οριακές σχέσεις στην συνοριακή επιφάνεια S

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

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

Όπου \hat{n} το μοναδιαίο κάθετο στην επιφάνεια διάνυσμα. Οι συνιστώσες $H_{ox}, H_{oy}, E_{ox}, E_{oy}$ μπορούν άμεσα να συνδεθούν με τις συνιστώσες H_x, H_y, E_x, E_y του ρυθμού που κυματοδηγείται λαμβάνοντας υπόψιν ότι η περιοχή ενδιαφέροντος αποτελείται από αέρα και όχι από το διηλεκτρικό υλικό που είναι ο οπτικός κυματοδηγός φτιαγμένος. Ο ΤΕ ρυθμός έχει μη μηδενικές τις συνιστώσες E_x και H_y , ενώ ο ΤΜ τις E_y και H_x .

Επομένως, οι παραπάνω εξισώσεις γράφονται ως:

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

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

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

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

Ανάλογα με την πόλωση που θα επιλεγθεί για να διεγερθεί ο κυματοδηγός υπολογίζονται οι πυκνότητες ροής \vec{J}_S, \vec{M}_S μέσω των εξισώσεων (3.3) – (3.6) ώστε στη συνέχεια να υπολογισθούν οι φασιθέτες των διανυσματικών δυναμικών του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου \vec{N}, \vec{L} αντίστοιχα. Οι εξισώσεις που ικανοποιούν τα διανυσματικά δυναμικά είναι οι

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

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

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

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

Όπου, θ, φ είναι οι σφαιρικές συντεταγμένες του σημείου παρατήρησης, k ο κυματάρριθμος του κενού, $ds' = dx'dy'$ είναι η διαφορική περιοχή πάνω στην επιφάνεια S , r' είναι το πλάτος του διανύσματος που αντιστοιχεί στην διαφορική περιοχή και ψ η γωνία μεταξύ του διανύσματος της διαφορικής περιοχής r' και του διανύσματος παρατήρησης r .

Από τη γεωμετρία της διάταξης έχουμε ότι

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

Τελικά έχουμε ότι τα πεδιακά μεγέθη ισούνται με

$$E_r(\theta, \varphi) \approx 0 \quad (3.12)$$

$$E_\theta(\theta, \varphi) \approx -\frac{j \cdot k \cdot e^{-j \cdot k \cdot r}}{4\pi r} [L_\varphi(\theta, \varphi) + \eta \cdot N_\theta(\theta, \varphi)] \quad (3.13)$$

$$E_\varphi(\theta, \varphi) \approx \frac{j \cdot k \cdot e^{-j \cdot k \cdot r}}{4\pi r} [L_\theta(\theta, \varphi) - \eta \cdot N_\varphi(\theta, \varphi)] \quad (3.14)$$

$$H_r(\theta, \varphi) \approx 0 \quad (3.15)$$

$$H_\theta(\theta, \varphi) \approx \frac{j \cdot k \cdot e^{-j \cdot k \cdot r}}{4\pi r} \left[N_\varphi(\theta, \varphi) - \frac{L_\theta(\theta, \varphi)}{\eta} \right] \quad (3.16)$$

$$H_\varphi(\theta, \varphi) \approx -\frac{j \cdot k \cdot e^{-j \cdot k \cdot r}}{4\pi r} \left[N_\theta(\theta, \varphi) - \frac{L_\varphi(\theta, \varphi)}{\eta} \right] \quad (3.17)$$

Οπότε, αφού προσδιορίστηκε το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο στην μακρινή περιοχή ακτινοβολίας της κεραίας μπορεί να προσδιοριστεί το διάνυσμα Poynting

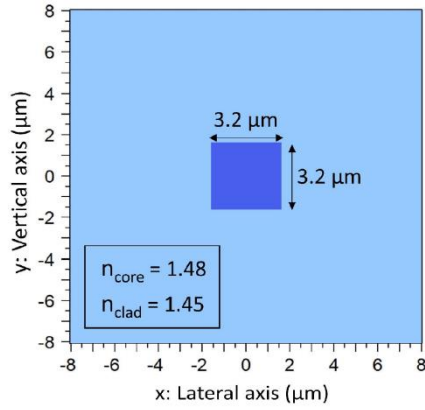
$$\vec{P}_{av}(r, \theta, \varphi) = \frac{1}{2} Re [E_\theta \cdot H_\varphi^* - E_\varphi \cdot H_\theta^*] \cdot \hat{r} \quad (3.18)$$

Τελικά, η ένταση ακτινοβολίας του μοναδιαίου εκπομπού ισούται με

$$U_o(\theta, \varphi) = r^2 \cdot |\vec{P}_{av}(r, \theta, \varphi)| \quad (3.19)$$

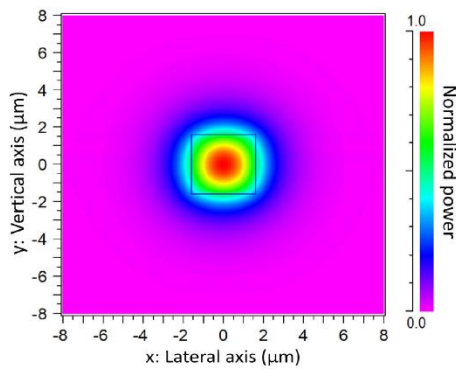
Όπου και πια όλα τα μεγέθη είναι γνωστά.

Το μόνο σημείο μέχρι στιγμής που δεν έχει διευκρινιστεί είναι ο τρόπος εύρεσης του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίο στην τελευταία επιφάνεια του κυματοδηγού. Για τον προσδιορισμό αυτών των πεδιακών μεγεθών έγινε χρήση του λογισμικού RSoft στο οποίο υλοποιήθηκε ο κυματοδηγός και στη συνέχεια υπολογίστηκε ο τρόπος διάδοσης του φωτός κατά μήκος του κυματοδηγού. Επομένως, με αυτό τον τρόπο εξήχθησαν οι τιμές του μαγνητικού και ηλεκτρικού πεδίο στο τέλος του κυματοδηγού. Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζεται η τομή του κυματοδηγού, ο οποίος έχει διαστάσεις $3.2 \mu m \times 3.2 \mu m$ και δείκτης διάθλασης πυρήνα και μανδύα 1.48 και 1.45 αντίστοιχα.



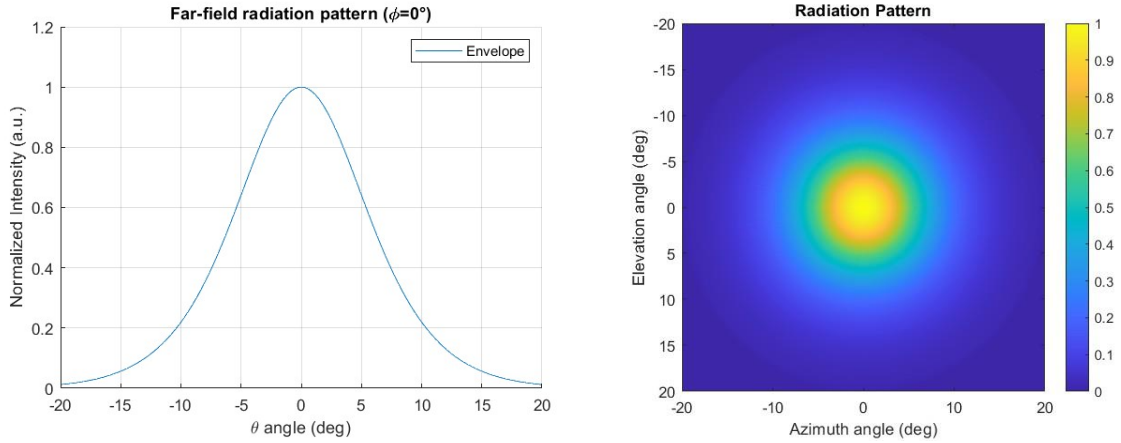
Σχήμα 3.3: Τομή ενός μονοθημικού κυματοδηγού υλοποιημένου στην PolyBoard πλατφόρμα στα 1550 nm .

Επομένως, με την χρήση του RSoft υπολογίσθηκαν τα απαιτούμενα πεδιακά μεγέθη και στο κάτωθι σχήμα παρουσιάζεται η κατανομή της ισχύος στο τέλος του κυματοδηγού.



Σχήμα 3.4: Το προφίλ της έντασης ενός end-fire waveguide στο τέλος του.

Με βάσει όλα τα παραπάνω παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.5 το διάγραμμα ακτινοβολίας στο επίπεδο $U(\varphi = 0 \text{ deg}, \theta)$ και το διάγραμμα ακτινοβολίας $U(az, el)$ στο αζιμουθιακό-ύψος επίπεδο (βλ. Παράρτημα Α).



Σχήμα 3.5: (Αριστερά) Διάγραμμα ακτινοβολίας του μοναδιαίου εκπομπού για $\varphi = 0^\circ$ και $\theta \in [-20^\circ, 20^\circ]$. (Δεξιά) Διάγραμμα ακτινοβολίας του μοναδιαίου εκπομπού στο επίπεδο $az - el$ από -20° μέχρι 20° .

Αξίζει να σημειωθεί ότι η κατεύθυνση μέγιστης ισχύος είναι η $\theta = 0 \text{ deg}$ και εμφανίζει συμμετρία ως προς τον άξονα z . Επίσης, το εύρος ημίσειας ισχύος $\Delta_{3 \text{ dB}}$ ισούται με 12.7 deg και υπάρχει ανεξαρτησία από τον αζιμουθιακό άξονα.

Επομένως, προσθέτοντας σε κατάλληλες θέσεις αξονικούς κυματοδηγούς υλοποιείται η οπτική στοιχειοκεραία (OPA) και με κατάλληλη ρύθμιση των συντελεστών c_m πραγματοποιείται η στροφή του διαγράμματος ακτινοβολίας. Ειδικότερα με βάση την διάταξη των αξονικών κυματοδηγών (σχηματισμός γραμμικής στοιχειοκεραίας- Linear Antenna Array) και του συστήματος συντεταγμένων (Σχήμα 2.3)

$$AF(\theta, \varphi) = \sum_{1 \leq n \leq N} \sum_{1 \leq m \leq M} c_{n,m} e^{j(kr_{n,m} \cos(\psi_{n,m}))} \quad (3.20)$$

Όπου, θεωρώντας όμοιο πλάτος σήματος διέγερσης σε κάθε ακτινοβολητή και φάση αυξανόμενη κατά ένα σταθερό όρο έχουμε

$$c_{n,m} = b_{n,m} e^{ja_{n,m}} = e^{ja_{n,m}} \quad (3.21)$$

με

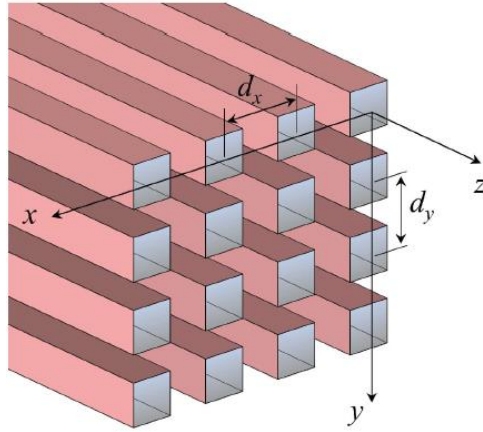
$$a_{n,m} = r_n \cdot P + r_m \cdot Q = a_n + a_m \quad (3.22)$$

$$P = -k_0 \sin(\theta_0) \cos(\varphi_0) \quad (3.23)$$

$$Q = -k_0 \sin(\theta_0) \sin(\varphi_0) \quad (3.24)$$

Όπου (φ_0, θ_0) η Διεύθυνση του κύριου λοβού (σημείο μεγιστοποίησης παράγοντα διάταξης). Τελικά, προκύπτει ο παρακάτω παράγοντας διάταξης

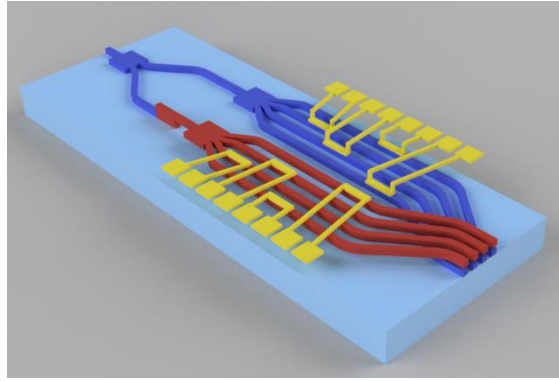
$$AF(\theta, \varphi) = \left(\sum_{1 \leq n \leq N} e^{j(kr_n \sin(\theta) \cos(\varphi) + a_n)} \right) \cdot \left(\sum_{1 \leq m \leq M} e^{j(kr_m \sin(\theta) \sin(\varphi) + a_m)} \right) \quad (3.25)$$



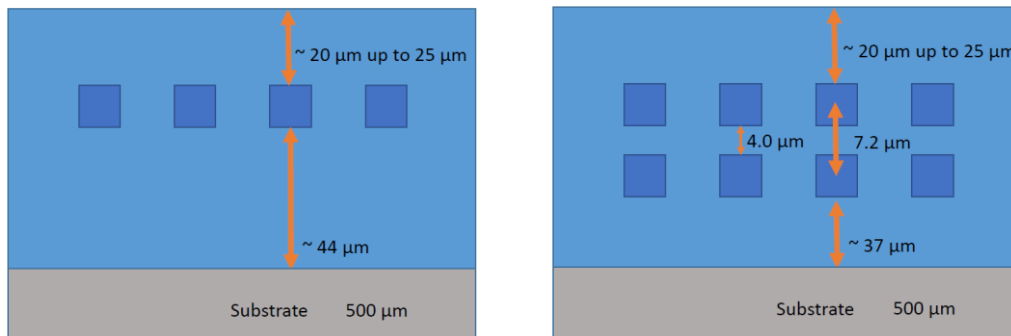
Σχήμα 3.6: Σύστημα συντεταγμένων και η γεωμετρία του προς μοντελοποίηση OPA με end-fire κυματοδηγούς στην πλατφόρμα PolyBoard.

Σε αυτό το σημείο επισημαίνεται ότι η κάθε στοιχειοκεραία με NM κεραίες προσδιορίζεται από δύο αριθμούς M, N ($M \times N$ OPA) όπου ο πρώτος αναφέρεται στο πλήθος των επιπέδων (γραμμών) και ο δεύτερος στο πλήθος των στηλών που την απαρτίζουν. Επομένως με αυτό τον τρόπο προσδιορίζεται ο τρόπος που είναι τοποθετημένες οι κεραίες.

Κλείνοντας το τρέχων κεφάλαιο στο Σχήμα 3.7 παρουσιάζεται σε τρισδιάστατη απεικόνιση η στοιχειοκεραία 2×4 υλοποιημένη στην πλατφόρμα PolyBoard μαζί με τους PSs που ο κάθε κυματοδηγός έχει για τον έλεγχο του μεγέθους $a_{n,m}$ στον παράγοντα διάταξης και κατ' επέκταση της διεύθυνσης μέγιστης ισχύος. Ενώ, στο Σχήμα 3.8 παρουσιάζονται οι εμπρόσθιες όψεις των 1×4 και 2×4 OPA μαζί με τις κατακόρυφες αποστάσεις μεταξύ των End-Fire κυματοδηγών από το τους υπόλοιπους και από το υπόστρωμα (substrate).



Σχήμα 3.7: 3D απεικόνιση ενός OPA 2×4 υλοποιημένο στην πλατφόρμα PolyBoard. Με κίτρινο χρώμα είναι οι PS, με κόκκινο χρώμα το πρώτο επίπεδο End-Fire κυματοδηγών και με μπλε το δεύτερο.



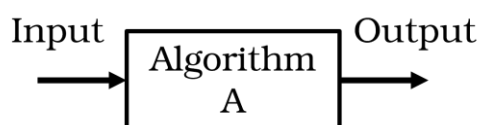
Σχήμα 3.8: (Αριστερά) Εμπρόσθια όψη ενός 1×4 OPA όπου αναγράφονται οι αποστάσεις των κυματοδηγών από το υπόστρωμα και από την επιφάνεια του PIC. (Δεξιά) Ομοίως με την αριστερή εικόνα αλλά για 2×4 OPA, όπου σε αυτήν σημειώνονται και οι αποστάσεις μεταξύ των κυματοδηγών που είναι σε δύο επίπεδα.

Κεφάλαιο 4

Αλγόριθμοι Βελτιστοποίησης

4.1 Ορισμός Αλγορίθμου

Ως αλγόριθμος ορίζεται μια πεπερασμένη σειρά ενεργειών, αυστηρά καθορισμένων και εκτελέσιμων σε πεπερασμένο χρόνο, που στοχεύουν στην επίλυση ενός προβλήματος. Κάθε αλγόριθμος μπορεί να έχει μια είσοδο και μια έξοδο (βλ. Σχήμα 4.1), τα οποία είναι καλώς ορισμένα αντικείμενα, πχ. ακολουθίες από αριθμούς ή/και γράμματα. Ιστορικά στοιχεία αναφέρουν ότι ο Πέρσης μαθηματικός Mohammed ibn-Musa al-Khu-warizmi (750-850 μ.Χ.) εισήγαγε την έννοια του αλγορίθμου αναφερόμενος σε συστηματικές τυποποιημένες λύσεις αλγεβρικών προβλημάτων [29].



Σχήμα 4.1: Γραφική Απεικόνιση ενός αλγορίθμου

4.2 Περιγραφή Προβλημάτων Βελτιστοποίησης

Τα περισσότερα προβλήματα βελτιστοποίησης είναι εφικτό να γραφούν στην μορφή

$$\text{minimize}_{\vec{x} \in \mathbb{R}^n} \{f_i(\vec{x})\} \forall i = 1, \dots, M \quad (4.1)$$

με

$$\varphi_i(\vec{x}) = 0 \quad \forall i = 1, \dots, J \quad (4.2)$$

$$\psi_k(\vec{x}) \leq 0 \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (4.3)$$

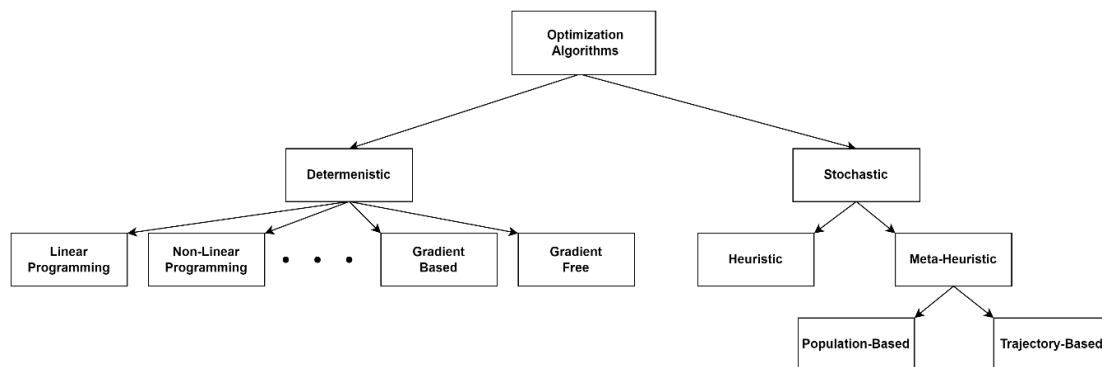
$$L_i \leq x_i \leq H_i \quad \mu\epsilon i = 1, \dots, N \quad (4.4)$$

Όπου $f_i(\vec{x}), \varphi_i(\vec{x}), \psi_k(\vec{x})$ συναρτήσεις ως προς το design vector \vec{x} . Οι συνιστώσες του \vec{x} ονομάζονται decision variables και μπορούν να είναι συνεχείς μεταβλητές, να παίρνουν διακριτές τιμές ή συνδυασμός και των δύο. Η συνάρτηση $f_i(\vec{x})$ καλείται αντικειμενική συνάρτηση (objective function) ή συνάρτηση κόστους (cost function) ή συντελεστής ποιότητας (Quality factor). Οι ισότητες και οι ανισότητες για τα $\varphi_i(\vec{x}), \psi_k(\vec{x})$ αντίστοιχα καλούνται περιορισμοί (constrains). Σε πολλές

περιπτώσεις οι συναρτήσεις $f_i(\vec{x}), \varphi_i(\vec{x}), \psi_k(\vec{x})$ εμπεριέχουν ολοκληρώματα, τα οποία αυξάνουν την πολυπλοκότητα του προβλήματος της βελτιστοποίησης. Σε αυτήν την περίπτωση, η βελτιστοποίηση δεν αφορά συναρτήσεις αλλά συναρτησιακά και γίνεται χρήση της ανάλυσης διαφορών (calculus of variations).

4.3 Αλγόριθμοι Βελτιστοποίησης

Κατά την βελτιστοποίηση ενός συστήματος ο στόχος είναι κάποια ιδιότητα-χαρακτηριστικό του να λάβει αποδεκτές τιμές. Ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης είναι η διαδικασία με την οποία συγκρίνονται διάφορες λύσεις μέχρι να βρεθεί η ιδανική ή κάποια ικανοποιητική λύση ως προς το εξεταζόμενο χαρακτηριστικό. Οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης μπορούν εν γένει να διαχωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τους ντετερμινιστικούς και τους στοχαστικούς. Οι ντετερμινιστικοί αλγόριθμοι χαρακτηρίζονται από μια ακριβής πορεία βημάτων, ενώ οι στοχαστικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης, όπως αναφέρουν και το όνομα τους, εμπεριέχουν μια τυχαιότητα στην πορεία τους. Στο παρακάτω Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται μια κατηγοριοποίηση των αλγορίθμων βελτιστοποίησης. Παρατηρούμε ότι οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τους ντετερμινιστικούς και τους στοχαστικούς. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι πολλές υποκατηγορίες βασίζονται στην φύση όπως για παράδειγμα οι γενετικοί αλγόριθμοι (evolutionary-based) και οι Gravitational Search Algorithms (Newton) [30]-[31].



Σχήμα 4.2: Ταξινόμηση αλγορίθμων βελτιστοποίησης

4.4 Gradient Descent

Αρχικά, παρακάτω επιλέγεται να παρουσιαστεί συνοπτικά ο Gradient Descent αλγόριθμος, καθώς αυτός σε διάφορες παραλλαγές επιλέγεται με μεγάλη συχνότητα για την επίλυση του προβλήματος αρχικοποίησης των φάσεων των οπτικών στοιχειοκεραιών [32]-[33]. Επιπροσθέτως, οι Gradient Descent αλγόριθμοι (GDA) είναι από τους πιο

δημοφιλούς αλγορίθμους για προβλήματα βελτιστοποίησης και ειδικότερα νευρωνικών δικτύων. Οι GDA έχουν εξαιρετικές επιδόσεις σε κυρτά προβλήματα βελτιστοποίησης (convex optimization problems) όπου επιτυγχάνουν την εύρεση του ολικού ελαχίστου της συνάρτησης κόστους με σχετική ευκολία, ενώ τα μη κυρτά προβλήματα αποτελούν μια πρόκληση για τους αλγορίθμους αυτούς, μιας και βασίζουν την επίδοσή τους στην τιμή της κλίσης της συνάρτησης κόστους [34]-[35]. Συμβολίζουμε τον ρυθμό μάθησης (learning rate) με η , ο οποίος αποτελεί μια υπερπαράμετρο που καθορίζει το βάρος (ποσοστό) με το οποίο θα συνεισφέρει ο παράγοντας της κλίσης (grad) της συνάρτησης κόστους (f) για την μετάβαση του διανύσματος σχεδίασης (\vec{x}_{n-1}) στην επόμενη κατάσταση του (\vec{x}_n). Στις αναλύσεις που θα ακολουθήσουν, για χάριν απλότητας, γίνεται η υπόθεση ότι η συνάρτηση κόστους είναι της μορφής $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$. Οι GD αλγόριθμοι μπορούν να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με το πλήθος των δεδομένων που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της κλίσης (gradient) της συνάρτησης κόστους [36].

4.4.1 Batch Gradient Descent (BGD)

Στην πρώτη εκδοχή χρησιμοποιούνται όλες οι συνιστώσες του διανύσματος \vec{x} για τον υπολογισμό της κλίσης. Επομένως, σε κάθε βήμα του αλγορίθμου ($n - 1$) η ανανέωση της κατάστασης \vec{x} για την επόμενη κατάσταση (n) γίνεται σύμφωνα με τον κάτωθι τύπο

$$\vec{x}_n = \vec{x}_{n-1} - \eta \cdot \vec{\nabla}_{\vec{x}} f(\vec{x}_{n-1}) \quad (4.5)$$

όπου με $\vec{\nabla}$ συμβολίζεται ο τελεστής της κλίσης και με f η συνάρτηση κόστους.

4.4.2 Stochastic Gradient Descent (SGD)

Η προηγούμενη περίπτωση έχει ένα μεγάλο μειονέκτημα, το οποίο είναι η μεγάλη πολυπλοκότητα που μπορεί να έχει η συνάρτηση κόστους $f(\vec{x})$. Την λύση του προβλήματος αυτού έρχεται να δώσει ο Stochastic GD, οποίος κάνει την διαισθητική προσέγγιση στο πρόβλημα, δηλαδή να υπολογιστεί ένα μέρος της συνάρτησης $f(\vec{x})$, με τυχαίοτητα στην επιλογή του συγκεκριμένου κομματιού. Επομένως, αν \tilde{f} είναι η προσεγγιστική συνάρτηση κόστους, τότε η ενημέρωση του διανύσματος προς προσδιορισμό του \vec{x} σε κάθε επανάληψη είναι η κάτωθι

$$\vec{x}_n = \vec{x}_{n-1} - \eta \cdot \vec{\nabla}_{\vec{x}} \tilde{f}(\vec{x}_{n-1}) \quad (4.6)$$

Η συγκεκριμένη προσέγγιση επιτυγχάνει τόσο την βελτίωση του χρόνου υπολογισμού της συνάρτησης κόστους αλλά και την αύξηση της ταχύτητας σύγκλισης. Ωστόσο, ένα μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι καθώς εισχωρεί στην ζώνη σύγχυσης (Confusion Zone) μπορούν να υπάρξουν έντονες διακυμάνσεις ως προς τις τιμές της συνάρτησης $f(\vec{x})$ καθώς στην συγκεκριμένη περιοχή δεν ισχύει παντού η προσέγγιση $f(\vec{x}) \approx \tilde{f}(\vec{x})$. Φυσικά ρόλο στην επιτυχία του SGD έχει και η τυχαία επιλογή του κομματιού, $\tilde{f}(\vec{x})$, που θα επιλεγεί για να υπολογιστεί η προσεγγιστική συνάρτηση κόστους (πχ ομοιόμορφη κατανομή).

4.4.3 Mini-Batch Gradient Descent

Τέλος, η περίπτωση Mini-Batch GD προχωράει την ιδέα του SGD επιλέγοντας αντί ενός συγκεκριμένου μέρους της συνάρτησης κόστους κάθε φορά, να επιλέγεται ένα τυχαίο πλήθος « κομματιών » της συνάρτησης $f(\vec{x})$.

Επομένως, προκύπτει η παρακάτω σχέση

$$\vec{x}_n = \vec{x}_{n-1} - \frac{\eta}{|I_{n-1}|} \cdot \sum_{j \in I_{n-1}} \vec{\nabla}_{\vec{x}} \tilde{f}_j(\vec{x}_{n-1}) \quad (4.7)$$

Όπου, I_{n-1} το σύνολο των δεικτών που αντιστοιχούν στα κομμάτια της συνάρτησης κόστους που επιλέγονται για να υπολογιστική η προσέγγιση της. Επομένως, ο Mini-Batch GD αλγόριθμος βελτιστοποίησης είναι μια περίπτωση μεταξύ του Batch GD και του Stochastic GD, καθώς κρατά ένα μέρος του συνόλου δεδομένου (training set) και ούτε όλο (όπως ο Batch GD) ούτε ένα μοναδικό (όπως ο Stochastic GD).

Ο Mini-Batch GD προσπαθεί να βρει μια ισορροπία μεταξύ της σθεναρότητας (robustness) του SGD και της αποδοτικότητας (efficiency) του Batch GD. Για αυτό το λόγο αποτελεί ίσως και την πιο συνηθισμένη υλοποίηση ενός GD αλγορίθμου στο πεδίο της βαθιάς μάθησης. Φυσικά και υπάρχουν πάρα πολλές παραλλαγές των παραπάνω αλγορίθμων ώστε να αυξηθεί η ικανότητα τους στα προβλήματα που καλούνται να λύσουν.

4.4.4 Stochastic Parallel Gradient Descent (SPGD)

Ο SPGD είναι ένας δημοφιλής αλγόριθμος βελτιστοποίησης ο οποίος προτάθηκε από τον M.A. Vorontsov [37]-[38]. Αρχικά, αναπτύχθηκε για την εκμάθηση με επίβλεψη νευρωνικών δικτύων και σήμερα είναι δημοφιλής σαν μια προσαρμοστική τεχνική ελέγχου του μετώπου των κυμάτων. Η ιδέα του συγκεκριμένου αλγορίθμου βελτιστοποίησης βασίζεται στην ταυτόχρονη διέγερση (parallel perturbation) των συνιστωσών του διανύσματος σχεδίασης. Δηλαδή αν θεωρήσουμε ότι η αντικειμενική μας συνάρτηση είναι η $J(\vec{x})$ και $\delta\vec{x} = \begin{pmatrix} \delta x_1 \\ \vdots \\ \delta x_n \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^n$ οι μικρές μεταβολές τότε η κάθε επόμενη κατάσταση προσδιορίζεται από την κάτωθι σχέση

$$\vec{x}_n = \vec{x}_{n-1} - \eta \cdot \delta \vec{J}_{n-1} \cdot \delta \vec{x}_{n-1} \quad (4.8)$$

Όπου, η μεταβολή της μετρικής ισούται με

$$\delta \vec{J} \stackrel{\text{def}}{=} \vec{J} \begin{pmatrix} x_1 + \delta x_1 \\ \vdots \\ x_n + \delta x_n \end{pmatrix} - \vec{J} \begin{pmatrix} x_1 - \delta x_1 \\ \vdots \\ x_n - \delta x_n \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

Ενώ, οι διαταραχές $\delta\vec{x}$ επιλέγονται να είναι στατιστικά ανεξάρτητες μεταβλητές με μηδενική μέση τιμή και ίση διασπορά, άρα

$$\mathbb{E}[\delta x_i] = 0 \quad \text{και} \quad \mathbb{E}[\delta x_i \cdot \delta x_j] = \delta_{i,j} \stackrel{\text{def}}{=} \begin{cases} 1, & \text{αν } i = j \\ 0, & \text{αν } i \neq j \end{cases} \quad (4.10)$$

4.5 Γενετικοί Αλγόριθμοι (GA)

Μία επίσης γνωστή κατηγορία αλγορίθμων βελτιστοποίησης είναι οι γενετικοί (Genetic) αλγόριθμοι οι οποίο βασίζονται στην θεωρία της εξέλιξης του Charles Darwin. Η πορεία του αλγορίθμου αντικατοπτρίζει την διαδικασία της φυσικής επιλογής (natural selection), όπου τα πιο δυνατά άτομα επιλέγονται για να συμβάλουν στην παραγωγή της επόμενης γενιάς [39]-[40].

Ο γενετικός αλγόριθμος περιλαμβάνει τρία στάδια (τελεστές): την επιλογή (selection), την διασταύρωση (crossover) και την μετάλλαξη (mutation). Αρχικά, στο πρώτο στάδιο ο αλγόριθμος επιλέγει τα χρωμοσώματα που θα χρησιμοποιηθούν για την αναπαραγωγή του πληθυσμού. Όσο καταλληλότερο είναι ένα χρωμόσωμα τόσο πιο πολλές φορές, είναι πιθανό, να χρησιμοποιηθεί για την αναπαραγωγική διαδικασία. Στην συνέχεια, ο τελεστής της διασταύρωσης επιλέγει τυχαία δύο χρωμοσώματα και ένα τυχαίο, αλλά κοινό, σημείο στο χρωμόσωμα τους (crossover point), όπου τα γονίδια πριν το crossover point ανταλλάζουν τιμές ενώ τα γονίδια μετά το σημείο τομής μένουν αναλλοίωτα. Τελευταία φάση είναι η μετάλλαξη των χρωμοσωμάτων σε συγκεκριμένα άτομα της νέας γενιάς, δηλαδή στο επιλεγμένο χρωμόσωμα αλλάζουν οι τιμές ορισμένων γονιδίων του. Ο αλγόριθμος πριν ξεκινήσει πρέπει αρχικά να ορίσει έναν αρχικό πληθυσμό, ώστε να εφαρμοσθούν σε αυτόν οι τρεις παραπάνω τελεστές. Επίσης, ορίζεται και μια συνάρτηση κόστους η οποία πρέπει να μεγιστοποιηθεί.

Κλείνοντας, ακολουθεί ένας στοιχειώδης ψευδοκώδικας για την περιγραφή της λογικής των γενετικών αλγορίθμων. Φυσικά, η έρευνα για την βελτίωση των GA συνεχίζεται διαρκώς και έχουν προταθεί πολλές παραλλαγές της παραπάνω βασικής ιδέας για την αύξηση της ταχύτητας της σύγκλισης του.

ALGORITHM 1: GENETIC ALGORITHM

- 1 **START**
 - 2 Generate the initial population
 - 3 Compute fitness
 - 4 **REPEAT**
 - 5 Selection
 - 6 Crossover
 - 7 Mutation
 - 8 Compute fitness
 - 9 **UNTIL POPULATION HAS CONVERGED**
 - 10 **END**
-

Σχήμα 4.3: Ψευδοκώδικας γενετικών αλγορίθμων.

Κεφάλαιο 5

Υλοποίηση Αλγορίθμων

5.1 Περιγραφή Προβλήματος Αρχικοποίησης (Phase Tuning)

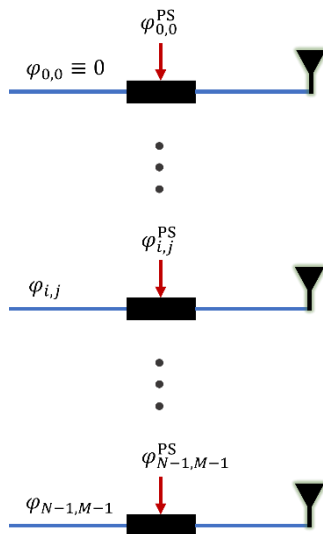
Σε αυτή την παράγραφο περιγράφουμε το πρόβλημα, το οποίο καλούμαστε να επιλύσουμε. Αρχικά, έστω ότι έχουμε μια $M \times N$ στοιχειοκεραία όπου λόγω των παραγόντων που αναφέρθηκαν στην Ενότητα 1.5 σχετικά με τις κατασκευαστικές ατέλειες και τα διαφορετικά μήκη των κυματοδηγών, τα σήματα φθάνουν με φάσεις διαφορετικές ως προς τη φάση $\varphi_{0,0}$ του στοιχείου αναφοράς. Επομένως, ο παρακάτω πίνακας περιγράφει τις προαναφερθείσες διαφορές φάσης, που έχει το κάθε σήμα όταν φθάνει στο τέλος του κυματοδηγού.

$$\boldsymbol{\varphi} = \begin{bmatrix} \varphi_{0,0} & \cdots & \varphi_{0,M-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_{N-1,0} & \cdots & \varphi_{N-1,M-1} \end{bmatrix} = [\varphi_{i,j}]_{N \times M} \in \mathbb{R}^{N \times M} \quad \text{με } i = 0, \dots, N-1 \text{ και } j = 0, \dots, M-1 \quad (5.1)$$

όπου,

$$0 \leq \varphi_{i,j} < 2\pi \text{ και } \varphi_{0,0} \equiv 0 \text{ (στοιχείο αναφοράς)} \quad (5.2)$$

Στο παρακάτω Σχήμα 5.1 παρουσιάζεται η μοντελοποίηση των μη ιδανικών κυματοδηγών με ιδανικούς-ισομήκεις αλλά με την κατάλληλη προσθήκη διαφοράς φάσης, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως για κάθε σήμα. Επίσης, απεικονίζονται οι μετατοπιστές φάσης (Phase Shifters ή απλώς PSs) που εισάγουν φάση $\varphi_{i,j}^{PS}$ στο κάθε σήμα που κυματοδηγείται στον αντίστοιχο κυματοδηγό.



Σχήμα 5.1: Σχηματικό διάγραμμα των End-Fire κυματοδηγών μαζί με τους PSs.

Επομένως, ο στόχος είναι να εξαχθούν (extraction) τέτοιες φάσεις για τους PSs, που θα δημιουργήσουν μηδενικές διαφορές φάσεις ανάμεσα σε όλα τα σήματα, ώστε ο άξονας μέγιστης ισχύος να είναι ο $z = 0$. Αξίζει να σημειωθεί ότι η εξαγωγή των φάσεων μπορεί να γίνει για οποιοδήποτε σημείο μέγιστης ισχύος (az_0, el_0) (σημείο στόχευσης) και για απλοποίηση επιλέγεται το $(0,0)$ – άξονας z . Οπότε, η προς ικανοποίηση συνθήκη για τις φάσεις είναι η

$$(\varphi_{i,j} + \varphi_{i,j}^{PS}) = \varphi_{0,0} \quad (5.3)$$

Αναλυτικά, η σχέση (5.3) μπορεί να γραφτεί και αναλυτικά ως

$$\left\{ \begin{array}{l} (\varphi_{1,0} + \varphi_{1,0}^{PS}) = \varphi_{0,0} \\ (\varphi_{2,0} + \varphi_{1,0}^{PS}) = \varphi_{0,0} \\ \vdots \\ (\varphi_{N-1,M-2} + \varphi_{N-1,M-2}^{PS}) = \varphi_{0,0} \\ (\varphi_{N-1,M-1} + \varphi_{N-1,M-1}^{PS}) = \varphi_{0,0} \end{array} \right. \quad (5.4)$$

και άρα οι αρχικές φάσεις $\varphi_{i,j}$ ισούνται (ως προς την φάση του στοιχείου αναφοράς) με

$$\boxed{\varphi_{i,j} = \varphi_{0,0} - \varphi_{i,j}^{PS}} \quad (5.5)$$

Παραπάνω έχει τεθεί $\varphi_{0,0}^{PS} \equiv 0$ για απλοποίηση, καθώς είναι πλεονάζουσα μεταβλητή για το σύστημα των παραπάνω εξισώσεων και με αυτό τον τρόπο το σύστημα έχει μοναδική λύση. Μεγάλο ενδιαφέρον έχει το γεγονός ότι γνωρίζοντας ένα PS-State (δηλαδή τιμές για τους PSs που συγκεντρώνουν την ισχύ στο κέντρο των αξόνων, όταν ένας τυχαίος PS είναι μόνιμα κλειστός) είναι απευθείας γνωστά και τα υπόλοιπα $N \cdot M - 1$ PS-States από την θεωρητική ανάλυση του γραμμικού συστήματος των παρακάτω εξισώσεων (βλ. Παράρτημα Β).

Ωστόσο, χρειάζεται να σημειωθεί ότι καθώς δοκιμάζονται οι κατάλληλες φάσεις στους PSs δεν είναι εφικτό το να γνωρίζουμε αν οι τιμές αυτές είναι κοντά στις ζητούμενες τιμές που θα δημιουργήσουν μηδενικές διαφορές δρόμου ανάμεσα στα σήματα. Οπότε, χρειάζεται να ορισθεί η κατάλληλη συνάρτηση κόστους η οποία θα αποτελεί και τον δείκτη του πόσο κοντά είμαστε από τον τελικό στόχο. Για την διαδικασία αυτή έχουν προταθεί αρκετές διαφορετικές μετρικές, όπου μερικές από τις σημαντικότερες παρουσιάζονται παρακάτω.

Ολοκλήρωμα Επικάλυψης (Overlap Integral)

Η πρώτη αντικειμενική συνάρτηση που θα εξεταστεί είναι το ολοκλήρωμα επικάλυψης (OI), το οποίο ορίζεται ως

$$OI(f(\vec{x}), g(\vec{x})) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\left| \int_S (f(\vec{x})g^*(\vec{x})) \cdot (dx_1 \cdot \dots \cdot dx_n) \right|^2}{\int_S |f(\vec{x})|^2 \cdot (dx_1 \cdot \dots \cdot dx_n) \int_S |g(\vec{x})|^2 \cdot (dx_1 \cdot \dots \cdot dx_n)} \in (0,1] \quad (5.6)$$

Όπου, $f, g: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, $\vec{x} \in \mathbb{R}^n$, S η επιφάνεια ολοκλήρωσης και με το σύμβολο $*$ συμβολίζεται η συζυγής μορφή της συνάρτησης. Η παραπάνω μετρική είναι φραγμένη με άνω όριο την μονάδα σύμφωνα με ανισότητα Cauchy-Schwartz.

Επιπλέον, εύκολα αποδεικνύεται ότι

$$(f(\vec{x}), r \cdot f(\vec{x})) = \operatorname{argmax}(OI(f(\vec{x}), g(\vec{x}))) \text{ με } r \in \mathbb{R} \quad (5.7)$$

Στην περίπτωση μας η παραπάνω ποσότητα ισούται με

$$OI(U(az, el), U_{ideal}(az, el)) = \frac{\left| \iint_{az=-a, el=-b}^{az=a, el=b} (U(az, el) U_{ideal}^*(az, el)) \cdot (daz \cdot del) \right|^2}{\iint_{az=-a, el=-b}^{az=a, el=b} |U(az, el)|^2 \cdot (daz \cdot del) \iint_{az=-a, el=-b}^{az=a, el=b} |U_{ideal}(az, el)|^2 \cdot (daz \cdot del)} \quad (5.8)$$

Όπου, az και el η αζιμουθιακή και ανύψωσης γωνία αντίστοιχα, $\alpha = 17^\circ$ και $b = 14^\circ$, U το διάγραμμα ακτινοβολίας και U_{ideal} το θεωρητικό-ιδανικό διάγραμμα ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας, που μελετάτε, για γωνία στόχευσης το κέντρο των αξόνων.

Integral of Intensity over a Region

Μια άλλη συνάρτηση κόστους, ίσως και η πιο γνωστή για το συγκεκριμένο πρόβλημα, αρχικοποίησης είναι το ολοκλήρωμα της ενέργειας σε μια επιφάνεια της εικόνας (συνήθως με κέντρο την αρχή των αξόνων), δηλαδή η παρακάτω παράσταση

$$J = \int_S I(x, y) ds \in [0, +\infty) \quad (5.9)$$

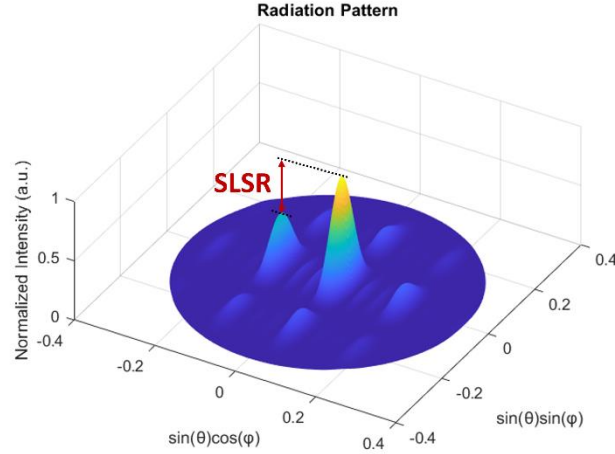
Όπου $I: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ η συνάρτηση (κατανομή) της έντασης του φωτός (light Intensity) ή απλά η ένταση στον αισθητήρα και S η επιφάνεια ολοκλήρωσης της έντασης. Δηλαδή, στην πράξη, το πεδίο ορισμού της συνάρτησης είναι οι συντεταγμένες του κάθε εικονοστοιχείου της κάμερας, το σύνολο τιμών είναι η τιμή του κάθε εικονοστοιχείου και η επιφάνεια είναι μια περιοχή της κάμερας που μας ενδιαφέρει (Region Of Interest).

Side Lobe Suppression Ratio (SLSR)

Μία τρίτη συνάρτηση κόστους είναι ο λόγος της ισχύς του κύριου προς του πλευρικού λοβού (SLSR), το οποίο ορίζεται ως το παρακάτω πηλίκο

$$SLSR = \frac{P_{Main\ Lobe}}{P_{Grating\ Lobe}} \quad (5.10)$$

Όπου, με P συμβολίζεται η ισχύς που ακτινοβολείται και ο δείκτης αντιστοιχεί στην εκάστοτε διεύθυνση του λοβού που μας ενδιαφέρει. Στο κάτωθι Σχήμα 5.2 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα υπολογισμού του SLSR.



Σχήμα 5.2: Το διάγραμμα ακτινοβολίας ενός OPA $U(\theta, \varphi)$ όπου παρουσιάζεται το SLSR.

Απόσταση Μεγίστου από τον επιθυμητό στόχο

Η τελευταία συνάρτηση κόστους που παρουσιάζεται είναι η απόσταση του μεγίστου μια συνάρτησης, g , $argmax(g(\vec{x})) = \vec{x}^* \in \mathbb{R}$ (5.11) από το σημείο που επιθυμείτε να είναι αυτό $\vec{x}^{target} \in \mathbb{R}$.

Οπότε, μας ενδιαφέρει η παράσταση (τετράγωνο ευκλείδεια απόσταση)

$$\sum_{1 \leq i \leq n} (x_i^* - x_i^{target})^2 \quad (5.12)$$

Άρα για συνάρτηση κόστους μπορεί να ορισθεί κάλλιστα η παραπάνω παράσταση ή η παρακάτω που είναι και φραγμένη από το μηδέν και το ένα.

$$Distance\ from\ Target(g(\vec{x}); \vec{x}^{target}) = \frac{A}{A + \sum_{1 \leq i \leq n} (x_i^* - x_i^{target})^2} \in (0,1] \quad (5.13)$$

με A μια αυθαίρετη θετική σταθερά.

5.2 Παρουσίαση Προτεινόμενων Αλγορίθμων Αρχικοποίησης

Στην τρέχουσα ενότητα παρουσιάζονται οι αλγόριθμοι, που έχουν υλοποιηθεί για την αρχικοποίηση των φάσεων των PSs. Ειδικότερα, υλοποιήθηκε ένας αλγόριθμος σύμφωνα με την λογική των BGD αλγορίθμων, όπου σε αυτόν έγιναν συγκεκριμένες επεκτάσεις για την επιτάχυνση της σύγκλισης του, και ένας σύμφωνα με την λογική του SPGD. Η συνάρτηση κόστους, που χρησιμοποιήθηκε για όλους τους αλγορίθμους είναι το ολοκλήρωμα επικάλυψης. Ενώ το διάνυσμα σχεδίασης είναι οι φάσεις που εισάγουν οι PSs.

5.2.1 Batch Gradient Descent Based Algorithms

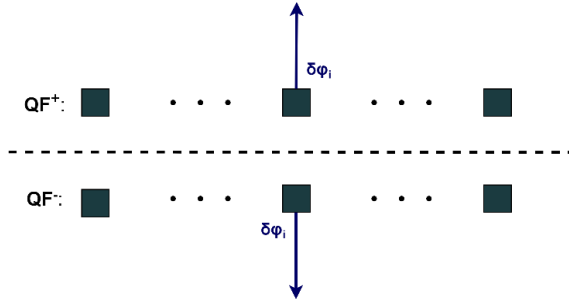
Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 4 οι αλγόριθμοι Gradient Descent βασίζονται στον υπολογισμό της κλίσης της συνάρτησης κόστους και με βάση την τιμή αυτή αλλά και την τρέχουσα κατάσταση του διανύσματος σχεδίασης (design vector) ενημερώνονται οι τιμές του.

5.2.1.1 BGD

Αρχικά, η πρώτη υλοποίηση είναι ο BGD αλγόριθμος χωρίς κάποια παραπάνω επέκταση. Η λογική του αλγορίθμου είναι η εξής: εξετάζω μία προς μία την κάθε κεραία και μεταβάλλω την φάση του συντελεστή διέγερσης $a_{n,m}$ της κάθε μιας, μέσω του PS της, κατά $-\delta\varphi$ και $+\delta\varphi$ και υπολογίζω την τιμή της συνάρτησης κόστους QF^+ για την πρώτη μεταβολή και QF^- για την δεύτερη μεταβολή (βλ. Σχήμα 5.3). Ανάλογα με την μεταβολή που έδωσε την μεγαλύτερη αύξηση της αντικειμενικής συνάρτησης, στην επόμενη επανάληψη η φάση της διέγερσης θα ισούται με το άθροισμα της τιμής της που έχει μαζί με την συγκεκριμένη μεταβολή, που έδωσε την μεγαλύτερη αύξηση. Ο ψευδοκώδικας του συγκεκριμένου αλγορίθμου παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.4 ενώ παρακάτω περιγράφεται ο συμβολισμός που χρησιμοποιήθηκε

- QF_{max} : Η τιμή κατωφλίου για την συνάρτηση κόστους, όπου πάνω από αυτήν ο αλγόριθμος σταματάει (έλαβε την τιμή 0.98).
- i_{TH} : Ο μέγιστος αριθμός κύκλων (έλαβε την τιμή 25).
- i : Ο τρέχων κύκλος. Με τον όρο κύκλος επισημαίνεται ότι έχουν ενημερωθεί όλα τα στοιχεία που απαρτίζουν την στοιχειοκεραία.
- $\mathbb{1}_{n,m}$: Ο μηδενικός πίνακας $\mathbb{O}_{N \times M}$ όπου στη θέση n, m έχει αντί για τιμή μηδέν την τιμή ένα (βλ. Παράρτημα Β).
- $\delta\varphi_i$: Η μεταβολή της φάσης κάθε κεραίας στην εκάστοτε επανάληψη, η οποία ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα $[0^\circ, 50^\circ]$.
- Φ_i : Πίνακας $N \times M$ ο οποίος περιέχει τις φάσεις διέγερσης των PSs όλων των κεραίων στον κύκλο i .
- $\Delta\Phi$: Πίνακας $N \times M$ στον οποίο κάθε στοιχείο του αντιστοιχεί και στην διέγερση $\pm \delta\varphi_i$ που στον εκάστοτε κύκλο έδωσε την μεγαλύτερη αύξηση της συνάρτησης κόστους.
- *best phases*: Οι φάσεις διέγερσης των PSs για τις οποίες η συνάρτηση κόστους λαμβάνει την μέγιστη τιμή της.
- *argmax()*: Ο τελεστής που βρίσκει το όρισμα το οποίο μεγιστοποιεί τη συνάρτηση ενδιαφέροντος.
- *max()*: Ο τελεστής που επιστρέφει την μέγιστη τιμή της συνάρτησης ενδιαφέροντος.
- *sign(x)*: Η συνάρτηση πρόσημου η οποία ορίζεται ως

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} -1 & \text{εάν } x < 0 \\ 0 & \text{εάν } x = 0 \\ +1 & \text{εάν } x > 0 \end{cases} \quad (5.14)$$



Σχήμα 5.3: Παρουσιάζεται ποιοτικά η ιδέα των BGD αλγορίθμων, όπου σε κάθε επανάληψη μεταβάλλουμε την φάση της κάθε κεραίας κατά $+\delta\varphi_i$ και $-\delta\varphi_i$ και βλέπουμε για κάθε μεμονωμένο ακτινοβολητή της επίδραση που έχει η κάθε μεταβολή στον QF.

ALGORITHM 2: BGD FOR OPA PHASE CALIBRATION

```

1:  START
2:  initialize  $\Phi_0, QF_{max}, i_{TH}$ 
3:   $i \leftarrow 1$ 
4:  while  $i \leq i_{TH}$  or  $QF \leq QF_{max}$  do:
5:    for each antenna element  $n, m$  do:
6:      Compute  $QF^+(\Phi_{i-1} + \delta\varphi_i \cdot \mathbb{1}_{n,m})$ 
7:      Compute  $QF^-(\Phi_{i-1} - \delta\varphi_i \cdot \mathbb{1}_{n,m})$ 
8:
9:       $\Delta\Phi_{n,m} \leftarrow \text{sign}(QF^+ - QF^-) \cdot \delta\varphi_i$ 
10:
11:      $\Phi_i \leftarrow \Phi_{i-1} + \Delta\Phi$ 
12:     Compute  $QF_i(\Phi_i)$ 
13:      $i \leftarrow i + 1$ 
14:  return  $best\ phases \leftarrow \text{argmax}[\max_{j \leq i}(QF_j)]$ 
15:  END

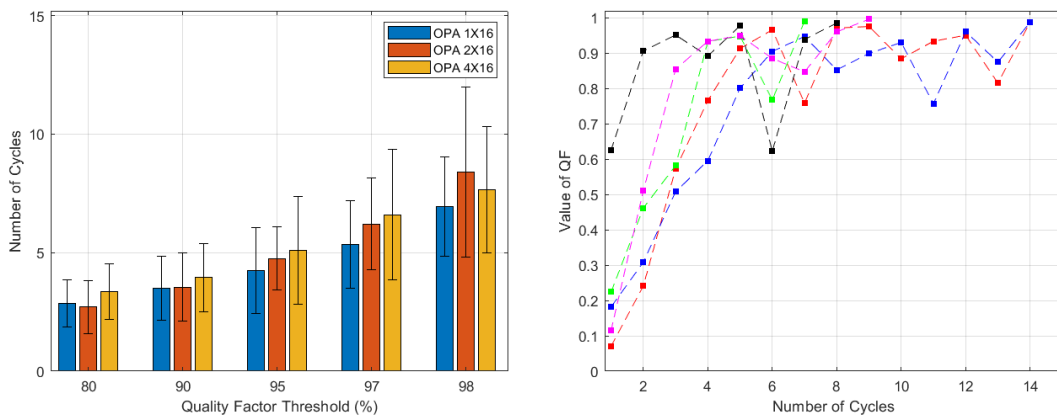
```

Σχήμα 5.4: Ψευδοκώδικας αλγορίθμου BGD (Pure Approach).

Επομένως, για την αξιολόγηση της επίδοσης του αλγορίθμου διενεργήθηκαν, στο MATLAB, 20 εκτελέσεις (runs) του κώδικα ανά στοιχειοκεραία σε τοπολογίες $\{1,2,4\} \times 16$. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.5 όπου στο αριστερό διάγραμμα παρουσιάζεται το πλήθος των κύκλων κατά μέσο όρο, και η αντίστοιχη τυπική απόκλιση σ , που απαιτούνται ώστε η συνάρτηση κόστους (QF) να υπερβεί το κατώφλι στο 80, 90, 95, 97 και 98 επί της εκατό. Στο δεξιά διάγραμμα παρουσιάζεται η πορεία της συνάρτησης κόστους QF σε κάθε κύκλο σε πέντε εκτελέσεις (runs) για την τοπολογία 4×16 .

Αρχικά, στο ραβδόγραμμα παρατηρούμε ότι και για τις τρεις στοιχειοκεραίες μέσα στους πρώτους έξι κύκλους επανάληψης επιτυγχάνουν την υπέρβαση και του τέταρτου κατώφλιου (κατά μέσο όρο), 97%, και μάλιστα η διασπορά των αποτελεσμάτων

κυμαίνεται σε δύο με τέσσερις κύκλους. Επιπροσθέτως, αξίζει να τονισθεί ότι κατά μέσο όρο απαιτούνται μεταξύ επτά με οχτώ κύκλων για την υπέρβαση του τελευταίου κατώφλιου (98%) για τις τρεις στοιχειοκεραίες. Συμπληρωματικά, η στοιχειοκεραία 1×16 συγκλίνει γρηγορότερα από τις άλλες δύο ωστόσο η διαφορά από τις άλλες είναι της τάξης του ενός με δύο κύκλους και άρα αρκετά μικρή. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως στο δεξιά σχήμα παρατηρείται η πορεία της τιμής της συνάρτησης κόστους συναρτήσει των κύκλων επανάληψης όπου αρχικά παρατηρούνται οι μεγάλες διακυμάνσεις και μη σταθερή μονοτονία της συνάρτησης κόστους και δεύτερον η επίτευξη τιμών που υπερβαίνουν το τελευταίο κατώφλι σε λιγότερους από οχτώ κύκλους για τα τρεις από τις πέντε εκτελέσεις και σε δεκατέσσερις κύκλους για δύο.



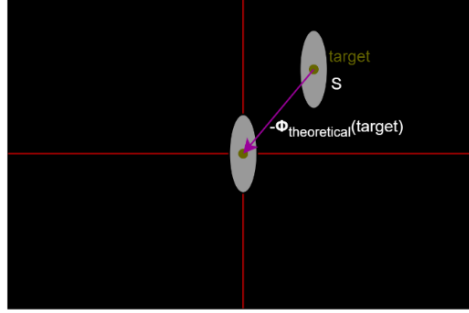
Σχήμα 5.5: (Αριστερά) Ραβδόγραμμα το οποίο παρουσιάζει την ταχύτητα σύγκλισης του αλγορίθμου BGD για τις στοιχειοκεραίες $\{1,2,4\} \times 16$. (Δεξιά) Διάγραμμα του QF συναρτήσει του κύκλου i .

5.2.1.2 BGD with Deterministic Expansion (DE-BGD)

Η πρώτη προσθήκη στον παραπάνω αλγόριθμο βασίζεται στην παρατήρηση ότι υπάρχουν μεταβολές της φάσης της διέγερσης μιας κεραίας όπου παρατηρούνται στο διάγραμμα ακτινοβολίας περιοχές με συγκεντρωμένη την ισχύ εκεί. Επομένως, η λογική πίσω από την Ντετερμινιστική επέκταση (Deterministic Expansion) είναι η εξής: όταν συγκεντρωθεί ισχύς πάνω από ένα κατώφλι σε μια περιοχή S του διαγράμματος ακτινοβολίας $U(az, el)$, τότε θεωρείται ότι με τις συγκεκριμένες διεγέρσεις η οπτική στοιχειοκεραία έχει στοχεύσει στο κέντρο (βάρους) της περιοχής S (az_0, el_0). Ωστόσο, οι γωνίες που απαιτούνται στο θεωρητικό μοντέλο για στόχευση στο στόχο (az_0, el_0) είναι γνωστές ($\Phi_{theoretical}(target)$) οπότε αφαιρώντας τες από τις τρέχουσες γωνίες προσπαθούμε να φέρουμε τον λοβό αυτόν στο κέντρο των αξόνων (βλ. Σχήμα 5.6). Επομένως, στο τέλος του κάθε κύκλου συγκρίνεται η τιμή του QF η οποία προκύπτει από αυτό που ορίζει ο BGD αλγόριθμος ($QF_{classic}$) με τον QF ο οποίος προκύπτει από την μεταφορά της έλλειψης (με την περισσότερη ισχύ) από το σημείο στόχευσης στο κέντρο των αξόνων και ανάλογα με την τιμή που είναι μεγαλύτερη καθορίζεται και η επόμενη κατάσταση του διανύσματος Φ_i .

Ο αλγόριθμος DE-BGD παρουσιάζεται αναλυτικά στο Σχήμα 5.7 όπου για τον συμβολισμό ισχύουν τα ίδια με προηγουμένως ενώ τα επιπλέον σύμβολα εξηγούνται παρακάτω

- $\langle I_{LOBE} \rangle^\pm$: Η μέση τιμή της φωτεινής έντασης στην περιοχή S του διαγράμματος ακτινοβολίας, στην οποία έχει συγκεντρωθεί η περισσότερη ισχύς. Ο εκθέτης \pm αντιστοιχεί στην διέγερση $\pm \delta\varphi_i$, ενώ το σύμβολο $\langle \ \rangle$ στη μέση τιμή της φωτεινής έντασης.
- $target$: Το κέντρο της έλλειψης S , στην οποία η μέση φωτεινότητα εικονοστοιχείου είναι μέγιστη στον κύκλο i .
- $\Phi_{theoretical}(target)$: Οι φάσεις διέγερσης, που μεταφέρουν τον κύριο λοβό από το $\binom{0}{0}$ στο σημείο $target = \binom{az_0}{el_0}$ ή $\binom{\theta_0}{\varphi_0}$.



Σχήμα 5.6: Η ιδέα της νετερμιστικής επέκτασης του BGD. Παρατηρούμε την επιφάνεια S όπου έχει συγκεντρωθεί η ενέργεια και το κέντρο της έλλειψης ($target$) όπου με βάση αυτό το σημείο υπολογίζονται οι φάσεις, που πρέπει να αφαιρεθούν, ώστε η έλλειψη να έρθει στο κέντρο των αξόνων.

ALGORITHM 3: DE-BGD FOR OPA PHASE CALIBRATION

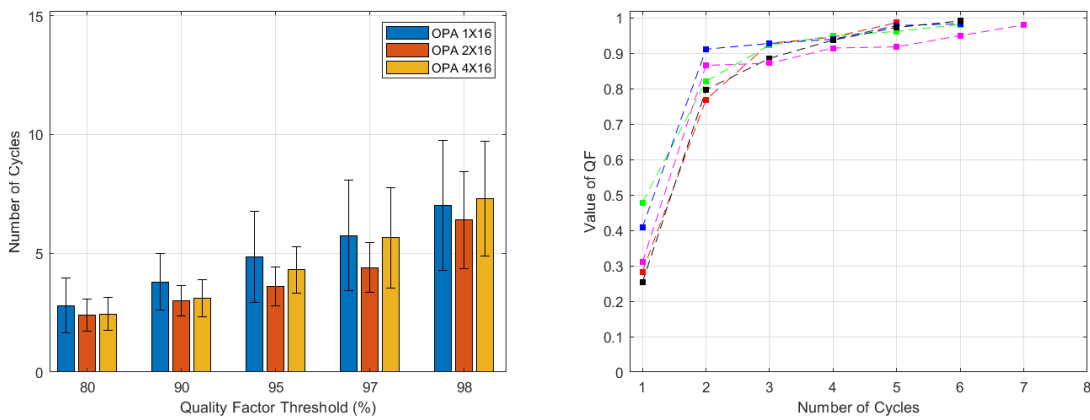
```

1:  START
2:  initialize  $\Phi_0, QF_{max}, i_{TH}$ 
3:   $i \leftarrow 1$ 
4:  while ( $i \leq i_{TH}$  or  $QF \leq QF_{max}$ ) do:
5:    for each antenna element  $n, m$  do:
6:      Compute  $QF^+(\Phi_{i-1} + \delta\varphi_i \cdot \mathbb{1}_{n,m})$  &  $\langle I_{LOBE} \rangle_{n,m}^+$ 
7:      Compute  $QF^-(\Phi_{i-1} - \delta\varphi_i \cdot \mathbb{1}_{n,m})$  &  $\langle I_{LOBE} \rangle_{n,m}^-$ 
8:
9:       $\Delta\Phi_{n,m} \leftarrow \text{sign}(QF^+ - QF^-) \cdot \delta\varphi_i$ 
10:
11:    $\Phi_{classic} \leftarrow \Phi_{i-1} + \Delta\Phi$ 
15:   Compute  $QF_{classic} \leftarrow QF(\Phi_{classic})$ 
16:
17:    $\Phi_{Beam\ position} \leftarrow \text{argmax}[\max_{n,m}(\langle I_{LOBE} \rangle_{n,m}^+, \langle I_{LOBE} \rangle_{n,m}^-)]$ 
18:    $target \leftarrow \text{Center of Ellipse corresponds to } \Phi_{Beam\ position}$ 
19:    $\Phi_{deterministic} \leftarrow \Phi_{Beam\ position} - \Phi_{theoretical}(target)$ 
20:   Compute  $QF_{deterministic} \leftarrow QF(\Phi_{deterministic})$ 
21:
22:    $QF_i \leftarrow \max(QF_{classic}, QF_{deterministic})$ 
23:    $\Phi_i \leftarrow \text{argmax}(QF_i)$ 
24:    $i \leftarrow i + 1$ 
25: return  $best\ phases \leftarrow \text{argmax}[\max_{j \leq i}(QF_j)]$ 

```

Σχήμα 5.7: Ψευδοκώδικας αλγορίθμου DE-BGD.

Δοκιμάζοντας τον αλγόριθμο DE-BGD στις ίδιες τοπολογίες που δοκιμάστηκε και ο αλγόριθμος BGD παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.8 τα ίδια γραφήματα με προηγουμένως. Αρχικά, στο ραβδόγραμμα παρατηρείται μια μείωση της τάξης των ένα με δύο κύκλων για την υπέρβαση των μεγαλύτερων κατωφλίων (97% & 98%) και η διασπορά των αποτελέσματα των μετρήσεων είναι αρκετά μικρότερη. Στο δεξιά διάγραμμα πρωτίστως παρατηρείται η εξάλειψη των διακυμάνσεων της συνάρτησης κόστους, οδηγώντας την σε μια σταθερότερη μονοτονία, καθώς και σύγκλιση του αλγορίθμου στους πέντε με έξι κύκλους.



Σχήμα 5.8: (Αριστερά) Ραβδόγραμμα το οποίο παρουσιάζει την ταχύτητα σύγκλισης του αλγορίθμου DE-BGA για τις στοιχειοκεραίες $\{1,2,4\} \times 16$. (Δεξιά) Διάγραμμα του QF συναρτήσει του κύκλου i .

5.2.1.3 BGD with Specific and Deterministic Expansion (SDE-BGD)

Κλείνοντας τους BGD αλγόριθμους, παρουσιάζεται ο SDE-BGD αλγόριθμος, ο οποίος σαν συνέχεια του προηγούμενου DE-BGD, έχει την ίδια δομή με αυτόν όμως με μία επιπλέον επέκταση. Ειδικότερα, στο τέλος του κάθε κύκλου i η επόμενη κατάσταση του διανύσματος Φ_i καθορίζεται από την μέγιστη τιμή των $QF_{classic}$, $QF_{deterministic}$ αλλά και του όρου $QF_{specific}$, όπου ο τρίτος ισούται με την μέγιστη τιμή που υπολογίστηκε κατά τις ατομικές μεταβολές των φάσεων διέγερσης κάθε κεραίας ($2NM$ μεταβολές). Στο Σχήμα 5.9 παρουσιάζεται ο ψευδοκώδικας του αλγορίθμου SDE-BGD, ο οποίος αποτελεί και την τελική έκδοση των BGD αλγορίθμων, που αναπτύχθηκαν στην τρέχουσα εργασία.

Αρχικά, στο ραβδόγραμμα παρατηρούμε την περαιτέρω μείωση των κύκλων, που απαιτούνται για την υπέρβαση των εκάστοτε κατωφλίων της συνάρτησης κόστους και επίσης ότι η διασπορά των αποτελεσμάτων μειώθηκε σε ακόμα μεγαλύτερο βαθμό σε σχέση με τους προηγούμενους αλγορίθμους BGD, DE-BGD. Στο διάγραμμα $QF - Cycle$ συμπεραίνεται αυτό που εντοπίστηκε και στο ραβδόγραμμα αριστερά του, δηλαδή την αύξηση της ταχύτητας υπέρβασης του τελευταίου κατωφλίου.

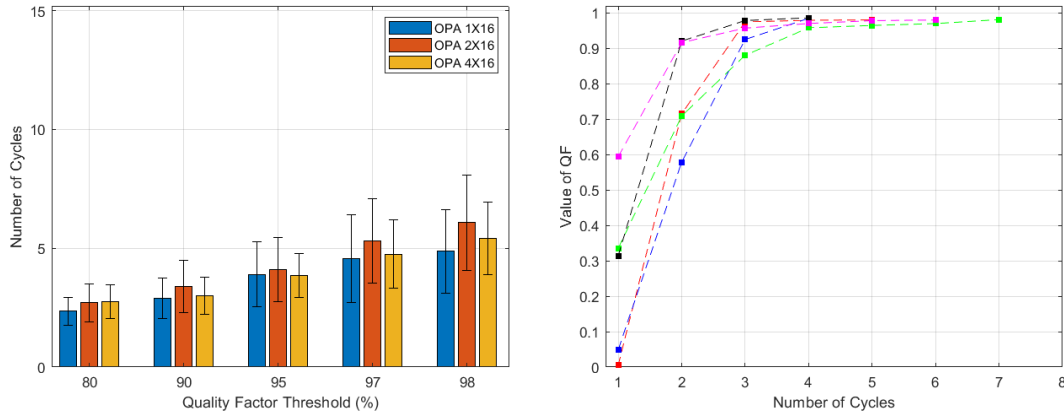
ALGORITHM 4: SDE-BGD FOR OPA PHASE CALIBRATION

```

1:  START
2:  initialize  $\Phi_0, Q_{F_{TH}}, i_{TH}$ 
3:   $i \leftarrow 1$ 
4:  while ( $i \leq i_{TH}$  or  $QF \leq Q_{F_{TH}}$ ) do:
5:    for each antenna element  $n, m$  do:
6:      Compute  $QF^+(\Phi_{i-1} + \delta\varphi_i \cdot \mathbb{1}_{n,m})$  &  $\langle I_{LOBE} \rangle_{n,m}^+$ 
7:      Compute  $QF^-(\Phi_{i-1} - \delta\varphi_i \cdot \mathbb{1}_{n,m})$  &  $\langle I_{LOBE} \rangle_{n,m}^-$ 
8:
9:       $\Delta\Phi_{n,m} \leftarrow \text{sign}(QF^+ - QF^-) \cdot \delta\varphi_i$ 
10:
11:
12:     $\Phi_{classic} \leftarrow \Phi_{i-1} + \Delta\Phi$ 
13:    Compute  $QF_{classic} \leftarrow QF(\Phi_{classic})$ 
14:
15:     $\Phi_{Beam\ position} \leftarrow \text{argmax}[\max_{n,m}(\langle I_{LOBE} \rangle_{n,m}^+, \langle I_{LOBE} \rangle_{n,m}^-)]$ 
16:     $target \leftarrow \text{Center of Ellipse corresponds to } \Phi_{Beam\ position}$ 
17:     $\Phi_{deterministic} \leftarrow \Phi_{Beam\ position} - \Phi_{theoretical}(target)$ 
21:    Compute  $QF_{deterministic} \leftarrow QF(\Phi_{deterministic})$ 
22:
23:     $\Phi_{specific} \leftarrow \text{argmax}\{\max_{n,m}[\max(QF_{n,m}^+, QF_{n,m}^-)]\}$ 
24:    Compute  $QF_{specific} \leftarrow QF(\Phi_{specific})$ 
25:
26:     $QF_i \leftarrow \max(QF_{classic}, QF_{deterministic}, QF_{specific})$ 
27:     $\Phi_i \leftarrow \text{argmax}(QF_i)$ 
28:     $i \leftarrow i + 1$ 
29:  return  $best\ phases \leftarrow \text{argmax}[\max_{j \leq i}(QF_j)]$ 
30:  END

```

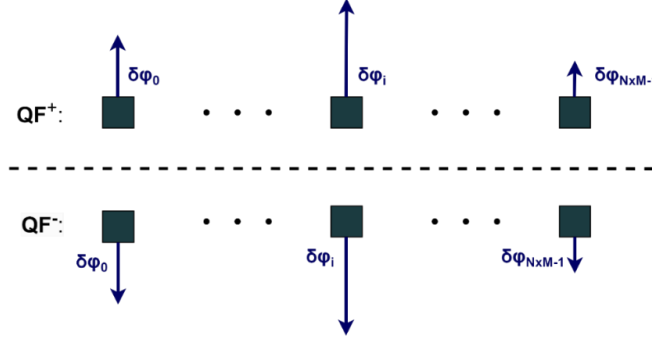
Σχήμα 5.9: Ψευδοκώδικας αλγορίθμου DE-BGD.



Σχήμα 5.10: (Αριστερά) Ραβδόγραμμα το οποίο παρουσιάζει την ταχύτητα σύγκλισης του αλγορίθμου SDE-BGA για τις στοιχειοκεραίες $\{1,2,4\} \times 16$. (Δεξιά) Διάγραμμα του QF συναρτήσει του κύκλου i .

5.2.2 Stochastic Parallel Gradient Descent

Μετά τους BGD αλγόριθμους δοκιμάστηκε ο SPGD αλγόριθμος η λογική, του οποίου είναι η ταυτόχρονη διέγερση όλων των στοιχείων όπως παρουσιάζεται και στο κάτωθι Σχήμα 5.11. Ο αλγόριθμος SPGD αποτελεί την ίσως την πιο δημοφιλή κατηγορία αλγορίθμου, που επιλύει το πρόβλημα της αρχικοποίησης των φάσεων των PSs. Να σημειωθεί ότι και εδώ το OI χρησιμοποιήθηκε ως συνάρτηση κόστους.



Σχήμα 5.11: Παρουσιάζεται ποιοτικά η ιδέα των SPGD αλγορίθμων, όπου σε κάθε επανάληψη μεταβάλλουμε ταυτόχρονα τις φάσεις όλων των κεραιών κατά $+\delta\varphi_i$ και $-\delta\varphi_i$ και βλέπουμε για όλη την στοιχειοκεραία επίδραση που έχει η κάθε μεταβολή στον QF.

Πριν παρουσιαστεί ο ψευδοκώδικας του αλγορίθμου SPGD χρειάζεται να διευκρινιστεί ότι ένας κύκλος επανάληψης του τρέχοντος αλγορίθμου (i_{SPGD}) δεν ισούται με κύκλο επανάληψης των BGD αλγορίθμων (i_{BGD}), καθώς το πλήθος των διεγέρσεων ($\pm\delta\varphi_i$) των φάσεων των κεραιών είναι διαφορετικό. Επομένως η σχέση που συνδέει τα δύο παραπάνω μεγέθη είναι η κάτωθι

$$i_{BGD} = \frac{3 \cdot i_{SPGD}}{2 \cdot (NM) + 1} \quad (5.15)$$

Συμπληρωματικά, οι φάσεις διέγερσης σε αντίθεση με τους τρεις BGD αλγορίθμους είναι συνάρτηση της τιμής της συνάρτησης κόστους και δίνονται, μετά από μελέτη, από τον παρακάτω τύπο

$$\delta\varphi_i = \begin{cases} u([0^\circ, 50^\circ]) & \text{αν } QF \leq 0.9 \\ u([0^\circ, 25^\circ]) & \text{αν } QF > 0.9 \end{cases} \quad (5.16)$$

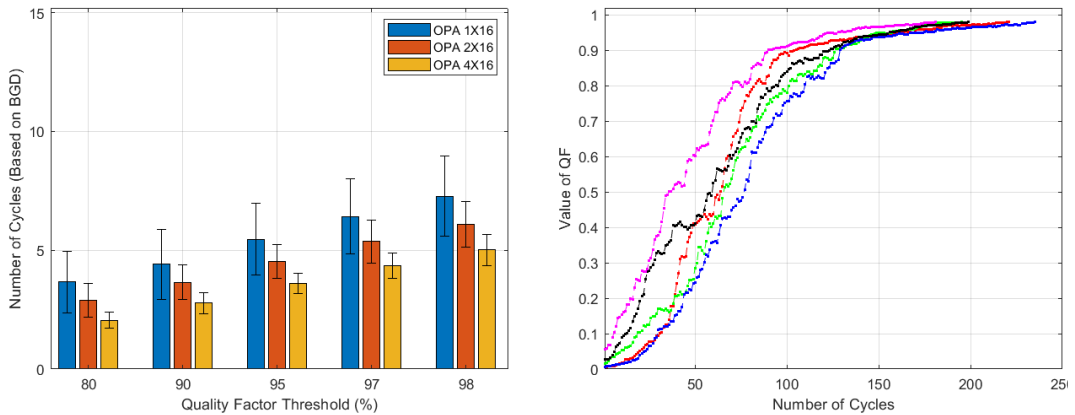
Όπου με u συμβολίζουμε την ομοιόμορφη κατανομή και με τα δύο ορίσματα το διάστημα τιμών της τυχαίας μεταβλητής. Ενώ ο ρυθμός εκμάθησης, η , ισούται με 0.5 .

Επομένως, στο Σχήμα 5.12 παρουσιάζεται ο ψευδοκώδικας του αλγορίθμου SPGD ενώ στο Σχήμα 5.13 τα αποτελέσματα από το επίπεδο προσομοίωσης. Στο ραβδόγραμμα πρωτίστως παρατηρούμε ότι για μεγαλύτερο πλήθος στοιχείων απαιτούνται περισσότεροι κύκλοι επανάληψη και δεύτερον ότι η διασπορά των κύκλων είναι αρκετά μικρότερη σε σχέση με τους BGD αλγορίθμους αλλά και καθώς αυξάνεται το μέγεθος της στοιχειοκεραίας. Στο δεξιά διάγραμμα του ίδιου σχήματος βλέπουμε την πορεία της συνάρτησης κόστους καθώς προχωράνε οι κύκλοι επανάληψης όπου η μονοτονία είναι αύξουσα.

ALGORITHM 5: PHASES EXTRACTION (SPGD)

```
1: START
2: initialize  $\Phi_0, QF_{TH}, i_{TH}, a$ 
3:  $i \leftarrow 1$ 
4: while  $i \leq i_{TH}$  or  $QF \leq QF_{TH}$  do:
5:     Compute  $QF^+(\Phi_{i-1} + \delta\phi_i)$ 
6:     Compute  $QF^-(\Phi_{i-1} - \delta\phi_i)$ 
7:
8:      $\delta QF \leftarrow \text{sign}(QF^+ - QF^-)$ 
9:
10:     $\Phi_i \leftarrow \Phi_{i-1} + a \cdot \delta QF \cdot \delta\phi_i$ 
11:    Compute  $QF_i(\Phi_i)$ 
12:     $i \leftarrow i + 1$ 
13: return best phases  $\leftarrow \text{argmax}[\max_{j \leq i}(QF_j)]$ 
14: END
```

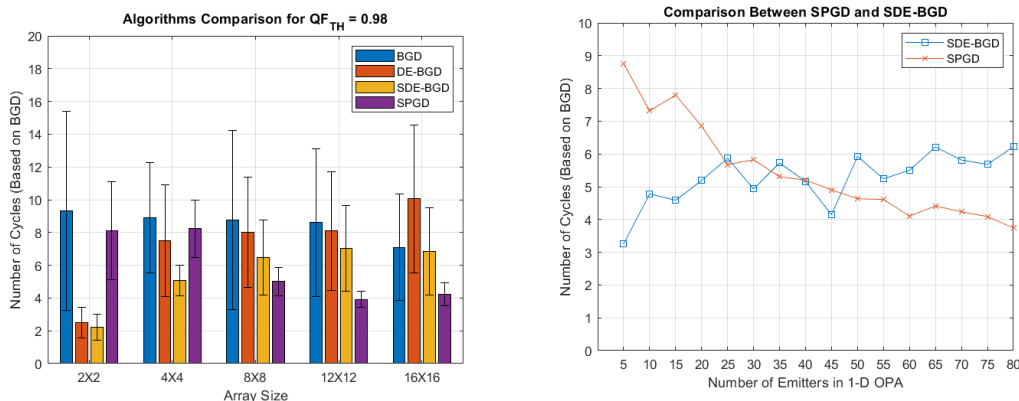
Σχήμα 5.12: Ψευδοκώδικας αλγορίθμου SPGD.



Σχήμα 5.13: (Αριστερά) Ραβδόγραμμα το οποίο παρουσιάζει την ταχύτητα σύγκλισης του αλγορίθμου SPGD για τις στοιχειοκεραίες $\{1,2,4\} \times 16$. (Δεξιά) Διάγραμμα του QF συναρτήσει του κύκλου i .

5.3 Σύγκριση Αλγορίθμων Αρχικοποίησης

Στα προηγούμενα εδάφια παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν οι τέσσερις αλγόριθμοι αρχικοποίησης, που υλοποιήθηκαν για να επιλύσουν το πρόβλημα της αρχικοποίησης των φάσεων των PSs. Επόμενο βήμα αποτελεί η ευθεία σύγκριση των συγκεκριμένων αλγορίθμων και συγκεκριμένα στο δεξιό γράφημα στο Σχήμα 5.14 απεικονίζονται οι μέσες τιμές κύκλων (και οι αντίστοιχες διασπορές) που απαιτούνται για την υπέρβαση του κατωφλίου 0.98 από τους τέσσερις αλγορίθμους για τις τετραγωνικές $N \times N$ οπτικές στοιχειοκεραίες με $N = 2, 4, 8, 12$ και 16. Ενώ στο αριστερό γράφημα απεικονίζεται η επίδοση του SDE-BGD και SPGD συναρτήσει του πλήθους των στοιχείων σε μια μονοδιάστατη κεραία, ώστε να αναδειχθεί η τιμή των στοιχείων και πάνω που ο ένας αλγόριθμος είναι καλύτερος από τον άλλον.



Σχήμα 5.14: (Αριστερά) Διάγραμμα σύγκρισης των τεσσάρων αλγορίθμων σε διάφορες στοιχειοκεραίες. (Δεξιά) Σύγκριση μεταξύ των αλγορίθμων SDE-BGD και SPGD για 1-D OPAs.

Σε πρώτη φάση παρατηρείται η ικανότητα του SPGD αλγορίθμου όχι μόνο να υπερβαίνει το επιθυμητό κατώφλι σε πολύ λιγότερους κύκλους από τους υπόλοιπους για τις μεγαλύτερες διατάξεις OPAs αλλά και η τυπική απόκλιση του να είναι της τάξης του μισού κύκλου. Επομένως, ο SPGD αποδεικνύεται μια εύρωστη (robust) επιλογή για το πρόβλημα της αρχικοποίησης για διατάξεις που περιλαμβάνουν παραπάνω από 50 κεραίες. Από την άλλη περίπτωση, από τους BGD αλγορίθμους ξεχωρίζει ο SDE-BGD ο οποίος σε μικρές τοπολογίες (μέχρι 50 κεραίες) επιτυγχάνει τις καλύτερες επιδόσεις και από τους τέσσερις σύμφωνα με το δεξιά σχήμα.

Επίσης, παρατηρείται ότι ενώ αρχικά οι τρεις αλγόριθμοι BGD εμφανίζουν μια διαφοροποίηση στις επιδόσεις τους με καλύτερο των SDE-BGD και χειρότερο τον BGD (pure approach) καθώς αυξάνεται το μέγεθος της στοιχειοκεραίας οι διαφορές τους γίνονται μικρότερες. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι το πλήθος των στοιχείων είναι μεγαλύτερο οπότε μειώνεται η πιθανότητα οι φάσεις να συμπέσουν, ώστε το ντετερμινιστικό κομμάτι (Deterministic Expansion) να δώσει περισσότερες λύσεις. Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω, έπεται το συμπέρασμα ότι για μεγάλες οπτικές στοιχειοκεραίες συμφέρει η επιλογή του αλγορίθμου SPGD ενώ για μικρές του SDE-BGD.

5.4 Υλοποίηση Αλγορίθμου Στροφής Δέσμης

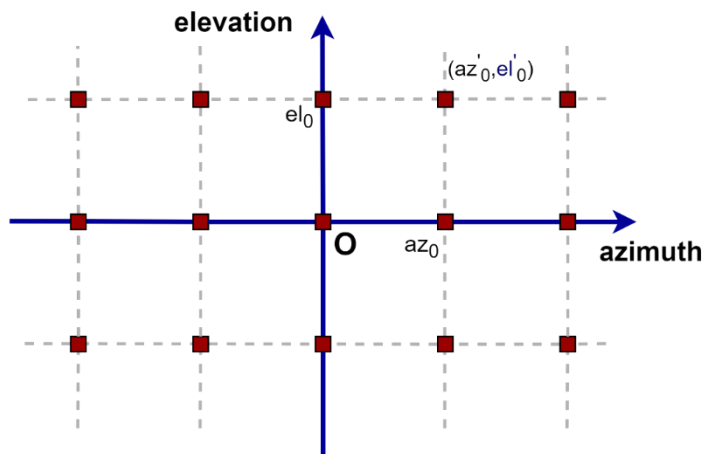
Στην τελευταία υπό ενότητα του κεφαλαίου παρουσιάζεται η ανάλυση και ο αλγόριθμος για την στροφή της δέσμης των οπτικών στοιχειοκεραιών μαζί με την επίλυση του προβλήματος της απόκλισης μεταξύ θεωρητικής και πραγματικής στροφής της δέσμης.

5.4.1 Beam Steering

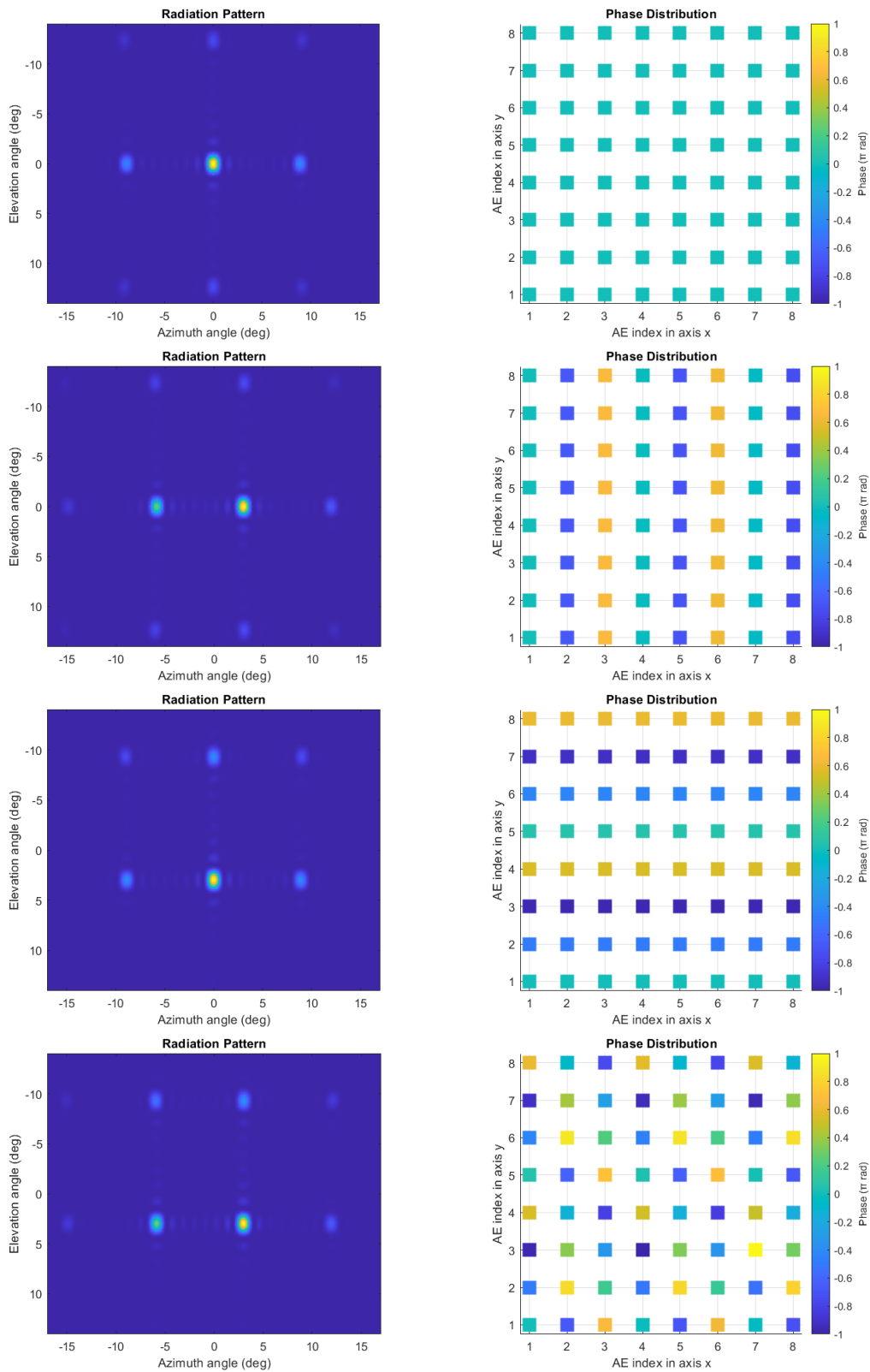
Όπως διεξοδικά αναφέρθηκε και στην Ενότητα 3.2 η στροφή της δέσμης μιας στοιχειοκεραίας επιτυγχάνεται μέσω της κατάλληλων τιμών των συντελεστών $a_{n,m}$. Επομένως, επιλέγοντας αρχικά την επιθυμητή διεύθυνση στόχευσης (θ_0, φ_0) υπολογίζονται από τις σχέσεις (3.22) – (3.24) οι απαραίτητες διεγέρσεις που πρέπει να λάβουν χώρα μέσω των PSs. Αξίζει σε αυτό το σημείο να αναφερθεί ότι η γωνία στόχευσης είναι πιο εύχρηστο να αναφέρεται στο Οριζόντιο Σύστημα Συντεταγμένων (βλ. Παράρτημα Α), δηλαδή σε (az_0, el_0) και κατόπιν να μετασχηματίζεται στο Σφαιρικό Σύστημα Συντεταγμένων (καθώς οι εξισώσεις για την διέγερση είναι σε αυτό το σύστημα). Στο Σχήμα 5.16 παρουσιάζεται τα διαγράμματα ακτινοβολίας μαζί με τις τιμές των συντελεστών $a_{n,m}$ για γωνίες στόχευσης $(az, el) = \{(0^\circ, 0^\circ), (3^\circ, 0^\circ), (0^\circ, 3^\circ), (3^\circ, 3^\circ)\}$.

5.4.2 Απόκλιση επιθυμητής με πραγματικής γωνίας στρέψης

Από την θεωρία είναι ήδη γνωστό ότι η γωνία στόχευσης που επιλέγεται (θ_0, φ_0) ή (az_0, el_0) είναι διαφορετική από αυτήν που θα βρεθεί ο κύριος λοβός ακτινοβολίας (θ'_0, φ'_0) ή (az'_0, el'_0) . Η εργασία [41] μελετά με παραδείγματα την προαναφερθείσα απόκλιση μεταξύ των επιθυμητών γωνιών στρέψης και σε αυτές που εν τέλει πηγαίνει. Επομένως, για την λύση αυτής της αστοχίας προτείνεται η δημιουργία ενός πλέγματος (grid) όπου για κάθε στόχο (az_0, el_0) υπάρχει και η αντίστοιχη τιμή (az'_0, el'_0) που πρέπει τελικά να επιλεγεί για την επιθυμητή στόχευση (βλ. Σχήμα 5.15). Η δημιουργία του πλέγματος μπορεί να επιτευχθεί είτε με χρήση αλγορίθμων Gradient Descent όπου η αντικειμενική συνάρτηση (\mathcal{QF}) θα είναι για παράδειγμα η «Απόσταση μεγίστου από τον επιθυμητό στόχο» ή πιο εύκολα με έναν αλγόριθμο trial & error [42].



Σχήμα 5.15: Πλέγμα στο επίπεδο $az - el$.



Σχήμα 5.16: (1^η Γραμμή) Στα αριστερά παρουσιάζεται το διάγραμμα ακτινοβολίας του 8×8 OPA με γωνία στόχευσης $(0^\circ, 0^\circ)$ και δεξιά οι φάσεις $a_{n,m}$ που αντιστοιχούν σε κάθε ακτινοβολητή. (2^η Γραμμή) Ομοίως με την 1^η αλλά για γωνία στόχευσης $(3^\circ, 0^\circ)$. (3^η Γραμμή) Ομοίως με την 1^η αλλά για γωνία στόχευσης $(0^\circ, 3^\circ)$. (4^η Γραμμή) Ομοίως με την 1^η αλλά για γωνία στόχευσης $(3^\circ, 3^\circ)$.

5.4.3 Αλγόριθμος Στροφή Δέσμης

Παραπάνω αναφέρθηκε ο τρόπος που αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της απόκλισης μεταξύ θεωρητική και γωνίας στόχευσης σε επίπεδο προσομοίωσης. Στο συγκεκριμένο εδάφιο παρουσιάζεται ο τρόπος επίλυσης του στο πειραματικό επίπεδο. Πιο συγκεκριμένα, η Σχέση 5.17 παρουσιάζει συνοπτικά τους όρους (τα βήματα), που απαιτούνται για την στροφή της δέσμης πειραματικά στο στόχο $\begin{pmatrix} az_0 \\ el_0 \end{pmatrix}$. Υπενθυμίζεται ότι με το σύμβολο Φ αναφερόμαστε στην φάση που εισάγει ο κάθε PS.

$$\Phi \left(\begin{pmatrix} az_0 \\ el_0 \end{pmatrix} \right) = \Phi_{calibration} + \Phi \left(\begin{pmatrix} az'_0 \\ el'_0 \end{pmatrix} \right) + \Phi_{err} \left(\begin{pmatrix} az_0 \\ el_0 \end{pmatrix} \right) \quad (5.17)$$

Ο πρώτος όρος, $\Phi_{calibration}$, αναφέρεται στο γεγονός ότι πριν προβούμε σε οποιαδήποτε λειτουργία του OPA πρέπει να προηγηθεί η αρχικοποίηση των φάσεων των PSs ώστε να συγκεντρωθεί η ισχύς στο κέντρο των αξόνων (0,0), χρησιμοποιώντας κάποιον από τους προαναφερθέντες αλγόριθμους αρχικοποίησης (BGD/SPGD). Ο επόμενος όρος, $\Phi \left(\begin{pmatrix} az'_0 \\ el'_0 \end{pmatrix} \right)$, προκύπτει από την χρήση του πλέγματος για την αντιστοίχιση του επιθυμητού στόχου με αυτόν που πρέπει τελικά να επιλεγεί χρησιμοποιώντας το πλέγμα που έχει υλοποιηθεί στο επίπεδο της προσομοίωσης. Διεγείροντας λοιπόν τους PSs με καταλληλά ρεύματα που αντιστοιχούν σε φάσεις $\Phi_{calibration} + \Phi \left(\begin{pmatrix} az'_0 \\ el'_0 \end{pmatrix} \right)$ επιτυγχάνεται η στροφή της δέσμης σε σημείο γειτονικού του επιθυμητού $\begin{pmatrix} az_0 \\ el_0 \end{pmatrix}$. Επομένως, όπως ήταν αναμενόμενο λόγω των γεωμετρικών ατελειών αλλά και γενικότερα λόγω των πιθανών αστοχιών της διάταξης απαιτείται ένα επιπλέον βήμα που αντιστοιχεί στον όρο σφάλματος για την επίτευξη του εκάστοτε στόχου $\Phi_{err} \left(\begin{pmatrix} az_0 \\ el_0 \end{pmatrix} \right)$. Ο όρος αυτός προσδιορίζεται, όπως και ο όρος διόρθωσης του σφάλματος μεταξύ επιθυμητής και πραγματικής γωνίας στόχευσης, δηλαδή είτε με κάποιον Gradients Descent αλγόριθμο είτε με κάποιον Trial & Error αλγόριθμο. Κλείνοντας, στο Σχήμα 5.17 παρουσιάζεται ο ψευδοκώδικας του αλγορίθμου για της στροφής της δέσμης, δηλαδή οι φάσεις, που πρέπει να εισαχθούν από κάθε PS ώστε να επιτευχθεί ο εκάστοτε στόχος.

ALGORITHM 6: BEAM STEERING

- 1: **START**
- 2: **choose** target $\begin{pmatrix} az_0 \\ el_0 \end{pmatrix}$
- 3:
- 4: **read** the corresponding value $\begin{pmatrix} az'_0 \\ el'_0 \end{pmatrix}$ from the theoretical grid
- 5: **read** the corresponding phase error $\Phi_{err} \left(\begin{pmatrix} az_0 \\ el_0 \end{pmatrix} \right)$
- 6: **transform** $\begin{pmatrix} az'_0 \\ el'_0 \end{pmatrix}$ to $\begin{pmatrix} \theta'_0 \\ \varphi'_0 \end{pmatrix}$
- 7:
- 8: $P \leftarrow -k_0 \sin(\theta'_0) \cos(\varphi'_0)$
- 9: $Q \leftarrow -k_0 \sin(\theta'_0) \sin(\varphi'_0)$

```

10:
11:  $a_{n,m} \leftarrow r_{AE,x}(n) \cdot P + r_{AE,x}(m) \cdot Q$  with  $n = 0, \dots, N - 1$  &  $m = 0, \dots, M - 1$ 
12:
13:  $\Phi_{\text{target}} \leftarrow \Phi_{\text{calibration}} + \mathbf{a} + \Phi_{\text{err}}$ 
14:
15: stimulate the phase shifters with currents corresponding to phases  $\Phi_{\text{target}}$ 
16:
17: End

```

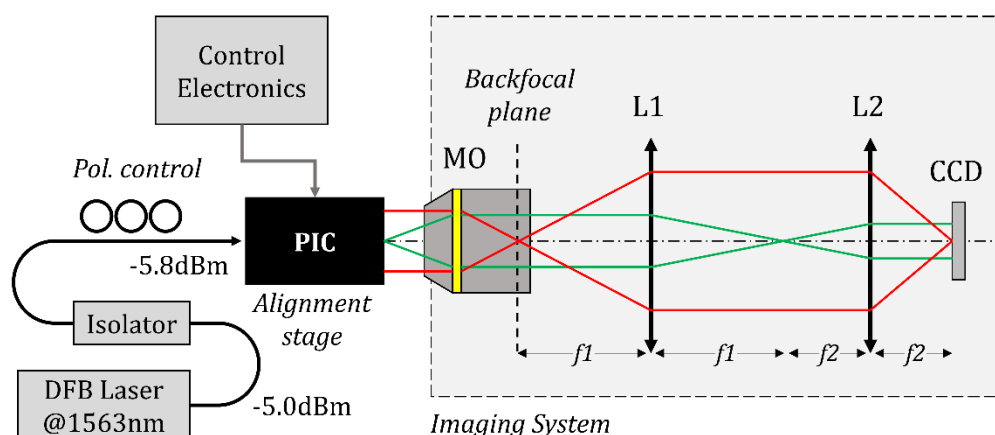
Σχήμα 5.17: Ψευδοκώδικας αλγορίθμου για την στροφή της δέσμης (Beam Steering). Με $r_{AE,x}(n)$ και $r_{AE,y}(m)$ συμβολίζεται η τετμημένη και η τεταγμένη της κεραίας (n, m) σύμφωνα με το σύστημα συντεταγμένων του Σχήματος 3.6 .

Κεφάλαιο 6

Πειραματικό Μέρος

6.1 Η πειραματική διάταξη

Στην πρώτη ενότητα του πέμπτου κεφαλαίου παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη (setup) που χρησιμοποιήθηκε για τον χαρακτηρισμό του διαγράμματος ακτινοβολίας των 1D-2D OPAs (PolyBoard PICs) και την εφαρμογή των αλγορίθμων αρχικοποίησης και ελέγχου. Στο παρακάτω Σχήμα 6.1 παρουσιάζεται, σε μορφή block διαγράμματος, το setup όπου αρχικά παρατηρείται το distributed feedback (DFB) laser το οποίο προσφέρει ένα συνεχές κύμα (CW) στα 1563 nm . Το φως κυματοδηγείται μέσω οπτικής ίνας και διέρχεται από τον οπτικό απομονωτή (optical isolator) και τον ρυθμιστή πόλωσης (polarization controller). Στη συνέχεια το φως εισέρχεται από τα αριστερά του PIC με την τεχνική του Butt coupling, όπου και καθώς το διασχίζει μέσω των αξονικών κυματοδηγών, εξέρχεται από τα δεξιά του PIC μέσω των end-fire κυματοδηγών.



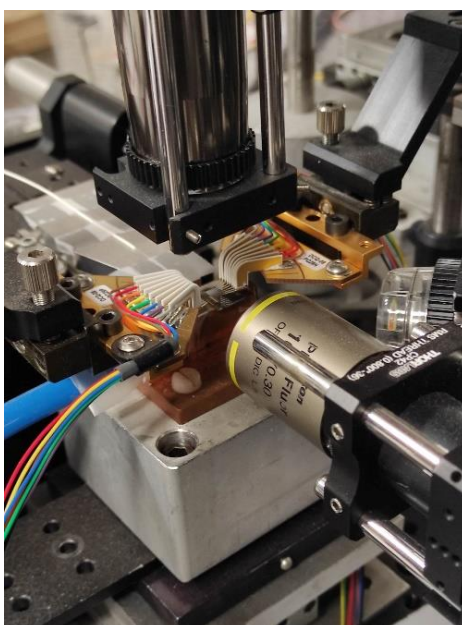
Σχήμα 6.1: Σχηματική απεικόνιση του πειραματικού setup και του Fourier συστήματος εικόνας για τον χαρακτηρισμό του διαγράμματος ακτινοβολίας (Far Field) των PolyBoard OPAs. Η εικόνα πάρθηκε από το [17].

Αφού το φως εξέλθει από το PIC συλλέγεται με το κατάλληλο σύστημα φακών το οποίο υλοποιεί ένα Fourier σύστημα εικόνας. Στο συγκεκριμένο σύστημα, το μακρινό πεδίο αποτυπώνεται στο back-focal επίπεδο του Microscope Objective (MO) φακού, και στη συνέχεια με την τοποθέτηση δύο φακών το φως οδηγείται στον αισθητήρα (κάμερα CCD). Ο MO φακός έχει αριθμητικό άνοιγμα (Numerical Aperture- NA) ίσο με 0.3 και τα μήκη εστίασης των φακών f_1, f_2 ισούται με $100\text{ mm}, 500\text{ mm}$ αντίστοιχα. Τα μήκη αυτά έχουν επιλεγθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ολόκληρη η επιφάνεια του

αισθητήρα στο δεξιό μέρος του συστήματος εικόνας για την ανίχνευση του φωτός. Ο αισθητήρας που χρησιμοποιείται είναι μια 1/2" Charge-Coupled Device (CCD) Near Infrared (NIR) κάμερα με 768×494 εικονοστοιχεία όπου το κάθε εικονοστοιχείο έχει μέγεθος $8.4 \mu m \times 9.8 \mu m$. Με αυτό το σύστημα εικόνας (imaging system) επιτυγχάνεται η μέτρηση γωνιών μέχρι τις 17° στο αζιμουθιακό επίπεδο (azimuth plane) και τις 14° στο επίπεδο ανύψωσης (elevation plane).

Το εκπεμπόμενο φως περνά δια μέσου του κύριου άξονα (principle axis) του imaging system και « χτυπά » στο κέντρο της εικόνας λήψης, το οποίο αντιστοιχεί για στροφή δέσμης στις 0° . Το φως που εκπέμπεται προς τις θετικές αζιμουθιακές γωνίες αντιστοιχούν στο δεξιό μέρος της εικόνας, ενώ το φως που εκπέμπεται προς τις θετικές ύψους γωνίες αντιστοιχούν στο πάνω μέρος της εικόνας. Αξίζει να σημειωθεί ότι πριν γίνει η δημιουργία του συστήματος εικόνας έλαβε χώρα η βαθμονόμηση της κάμερας, δηλαδή η αντιστοίχιση του κάθε εικονοστοιχείου σε γωνίες (az, el). Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε ένα βοηθητικό Laser με collimated δέσμη το οποίο τοποθετήθηκε πάνω σε μια στρεφόμενη βάση. Η θέση της στρεφόμενης βάσης τοποθετήθηκε επακριβώς στη θέση που τοποθετούνται τα OPAs. Επομένως, μέσω συγκεκριμένης γωνίας στροφής της δέσμης του Laser, που είναι γνωστή από την στρεφόμενη βάση είναι εφικτή η βαθμονόμηση της κάμερας (αντιστοίχιση εικονοστοιχείου με αζιμουθιακή και ανύψωσης γωνία).

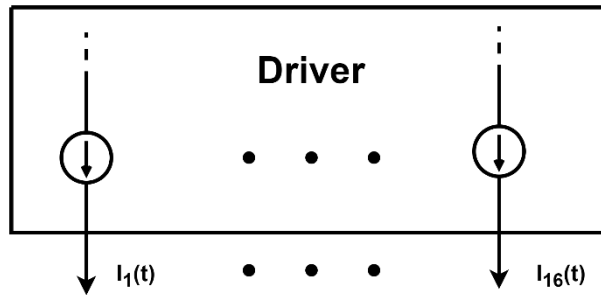
Για την καλύτερη είσοδο του φωτός στο PIC χρησιμοποιείται ένα 6-axis alignment stage, ώστε να υπάρχει και στους 3 άξονες ελευθερία κίνησης για την οπτική ίνα. Τα pads που έχει το κάθε OPA αντιστοιχούν ένα προς ένα με κάθε AE και τα ρεύματα με τα οποία διεγείρονται στέλνονται από πηγές ρεύματος (Electronics Drivers). Επιπλέον, 2×16 DC pin probes, με απόσταση $50 \mu m$ μεταξύ κάθε probe, χρησιμοποιούνται για να υλοποιήσουν την διεπαφή μεταξύ των ηλεκτρονικών drivers και των pads των PICs. Η CCD κάμερα συνδέεται με τον υπολογιστή ώστε η εικόνα να επεξεργάζεται. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται χρήση ενός Γκαουσιανού Φίλτρου (βαθυπερατό μη ομοιόμορφο φίλτρο), ώστε να μειωθεί ο λευκός θόρυβος που υπάρχει, χωρίς φυσικά να αλλοιώνεται το pattern της εικόνας.



Σχήμα 6.2: Εικόνα του setup.

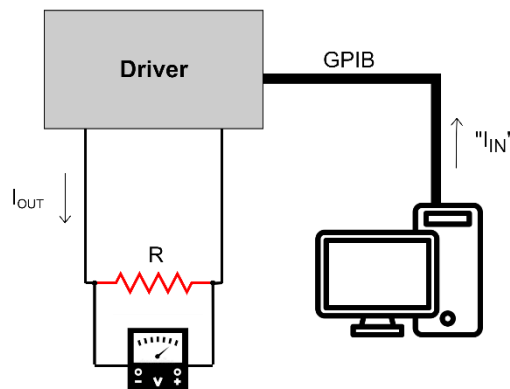
6.2 Driver Calibration

Για την διέγερση των PSs με τα κατάλληλα ρεύματα χρησιμοποιήθηκε ένας ηλεκτρονικός driver, ο οποίος αποτελείται από 16 πηγές ρεύματος, των οποίων οι τιμές ρευμάτων τους, ελέγχονται είτε χειροκίνητα από το μηχάνημα είτε απομακρυσμένα από τον υπολογιστή με χρήση ενός GPIB καλωδίου. Στο Σχήμα 6.3 παρουσιάζεται ένα σχηματικό του Driver με τα 16 κανάλια ρεύματος του.



Σχήμα 6.3: Απλοποιημένο διάγραμμα του Driver όπου απεικάζονται οι πηγές ρεύματος του (τα κανάλια του).

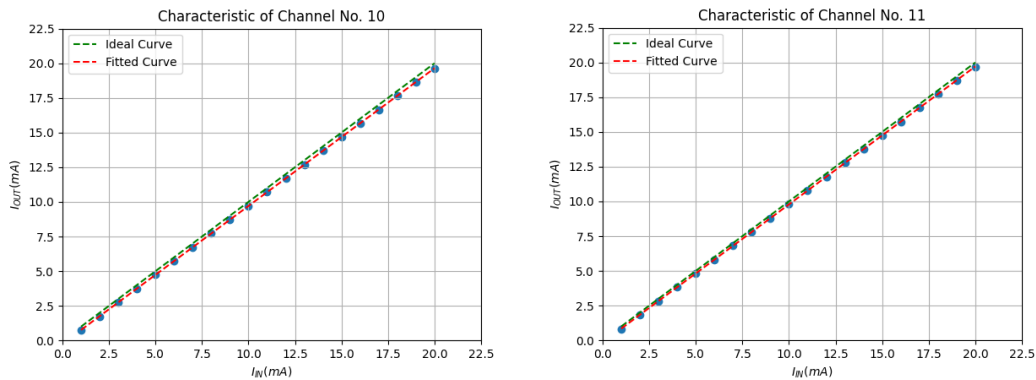
Ωστόσο, το επιθυμητό ρεύμα που ζητά ο υπολογιστής, μέσω του GPIB, να δώσει ο Driver δεν ισούται με το ρεύμα του καναλιού, επομένως χρειάζεται να γίνει η βαθμονόμηση του Driver. Με την παρακάτω απλή διάταξη (Σχήμα 6.4) πραγματοποιήθηκε η βαθμονόμηση του κάθε καναλιού.



Σχήμα 6.4: Τοπολογία που υλοποιήθηκε για την βαθμονόμηση του Driver.

Πιο συγκεκριμένα, ο υπολογιστής μέσω του GPIB καταχωρεί στον Driver την τιμή ρεύματος εξόδου που επιθυμεί και μέσω μιας αντίστασης και ενός βολτομέτρου μετريείται το ρεύμα εξόδου του καναλιού (I_{out}). Επομένως, στο Σχήμα 6.5 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι χαρακτηριστικές ρεύματος εισόδου-εξόδου δύο καναλιών όπου με πράσινο και κόκκινο χρώμα έχουν σχεδιαστεί η ιδανική χαρακτηριστική ($I_{OUT} = I_{IN}$) και η χαρακτηριστική που προκύπτει από τα πειραματικά δεδομένα αντίστοιχα και η οποία είναι της μορφής $I_{OUT, fitted} = aI_{IN} + b$ όπου a, b σταθερές. Επομένως, αντιστρέφοντας της

παραπάνω συνάρτηση προκύπτει η τιμή που πρέπει να αποστέλλεται για την επιθυμητή διέγερση του εκάστοτε PS.



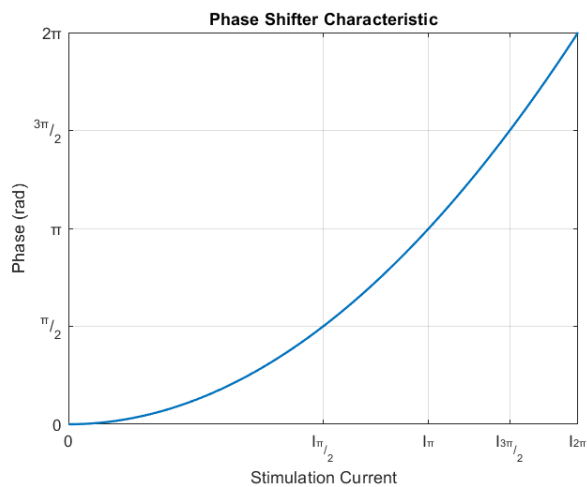
Σχήμα 6.5: (Αριστερά) Η χαρακτηριστική ρεύματος εισόδου-εξόδου του δέκατου καναλιού του Driver (κόκκινη ευθεία) που προκύπτει από τις πειραματικές τιμές (μπλε κουκίδες), επίσης παρουσιάζεται και η ιδανική χαρακτηριστική (πράσινη ευθεία). (Δεξιά) Ομοίως με την αριστερή εικόνα αλλά για ενδέκατο κανάλι του Driver.

6.3 Διέγερση Phase Shifters

Το ρεύμα διέγερσης των PSs που υπάρχουν στο PIC της PolyBoard είναι ρεύματα DC με τιμές μέχρι τα 25 mA για ασφαλή λειτουργία και αποφυγή ζημιών στο PIC. Πιο συγκεκριμένα, για να προσθέσει φάση φ ακτίνια ο PS πρέπει να διεγερθεί με ρεύμα

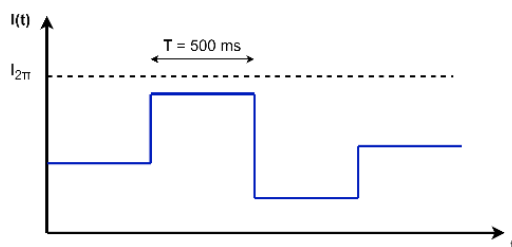
$$I_{PS} = I_{2\pi} \left(\sqrt{\frac{\varphi}{2\pi}} \right) \quad (6.1)$$

Όπου το $I_{2\pi}$ είναι το ρεύμα με το οποίο πρέπει να διεγερθεί ο PS ώστε να προκαλέσει στροφή φάσης ίση με 2π (βλ. Σχήμα 6.6).



Σχήμα 6.6: Η χαρακτηριστική διέγερσης $\varphi - I$ (φάση-ρεύμα) ενός PS.

Στο Σχήμα 6.7 παρουσιάζεται μια τυχαία ακολουθία ρευμάτων που διεγείρουν έναν PS μέσω της πηγής ρεύματος του Driver. Οι PSs της φωτονικής πλατφόρμας ολοκλήρωσης PolyBoard μπορούν να φτάσουν σε συχνότητα μέχρι το 1 kHz . Ωστόσο, για λόγους συνεχής εποπτείας της διάταξης και της αρμονικής επικοινωνίας μεταξύ υπολογιστή, κάμερας και Driver επιλέχθηκε μετά από κάθε διέγερση να ακολουθεί χρόνος 500 ms μέχρι να διαβάζεται η εικόνα (frame) της κάμερας.



Σχήμα 6.7: Το ρεύμα διέγερσης ενός PS συναρτήσει του χρόνου

6.4 Προσδιορισμός $I_{2\pi}$ των PSs

Κάθε PS, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, χαρακτηρίζεται από το δικό του ρεύμα $I_{2\pi}$. Στο Σχήμα 6.8 παρουσιάζεται ο αλγόριθμος που υλοποιήθηκε για τον υπολογισμό του συγκεκριμένου μεγέθους. Η ιδέα του κάτωθι αλγορίθμου είναι η εξής: κρατώντας το ρεύμα του PS που μας ενδιαφέρει μηδενικό ($I_{PS_i} = 0$), βρίσκουμε κατάλληλες φάσεις για τους υπόλοιπους PSs, ώστε να συγκεντρωθεί η ισχύς στο κέντρο της εικόνας (χρησιμοποιώντας τους αλγορίθμους του Κεφαλαίου 5) και έστω $RP(I_{PS_i} = 0)$ το διάγραμμα ακτινοβολίας που έχει προκύψει. Στη συνέχεια, μεταβάλλοντας το ρεύμα του PS (I_{PS_i}) από I_{min} μέχρι I_{max} υπολογίζουμε το ολοκλήρωμα επικάλυψης με ορίσματα το τρέχων διάγραμμα ακτινοβολίας $RP(I_{PS_i})$ και το αρχικό διάγραμμα ακτινοβολίας $RP(I_{PS_i} = 0)$. Όταν το ολοκλήρωμα επικάλυψης γίνει ίσο με την μονάδα τότε έχουμε επαναφέρει το αρχικό διάγραμμα ακτινοβολίας και άρα η φάση που έχει ο PS ισούται με 2π . Τέλος, στο Σχήμα 6.9 παρουσιάζεται τα αποτελέσματα του αλγορίθμου για έναν PS ενός 1×4 και ενός 2×4 OPA, όπου $I_{2\pi,1 \times 4} = 17.2\text{ mA}$ & $I_{2\pi,2 \times 4} = 18\text{ mA}$. Παρατηρούμε ότι η βύθιση του ΟΙ είναι αρκετά μεγαλύτερη για το 1×4 OPA σε σχέση με το 2×4 OPA καθώς στο πρώτο PIC υπάρχουν οι μισοί PSs από ότι στο δεύτερο, οπότε και η επίδραση του κάθε PS είναι μεγαλύτερη στην εικόνα. Όσο αυξάνονται οι εκπομποί της στοιχειοκεραίας η επίδραση του καθενός στο διάγραμμα ακτινοβολίας γίνεται όλο και μικρότερη, επομένως ο αλγόριθμος αυτός εφαρμόζεται αποδοτικά σε διατάξεις με σχετικά μικρό πλήθος στοιχείων (<32). Μία πιθανή λύση προκειμένου να χρησιμοποιηθεί ο συγκεκριμένος αλγόριθμος σε διατάξεις περισσότερων στοιχείων είναι η οργάνωση της στοιχειοκεραίας σε υπό-ομάδες με μικρότερο πλήθος στοιχείων (π.χ. <32).

ALGORITHM 7: PHASE SHIFTER $I_{2\pi}$ EXTRACTION

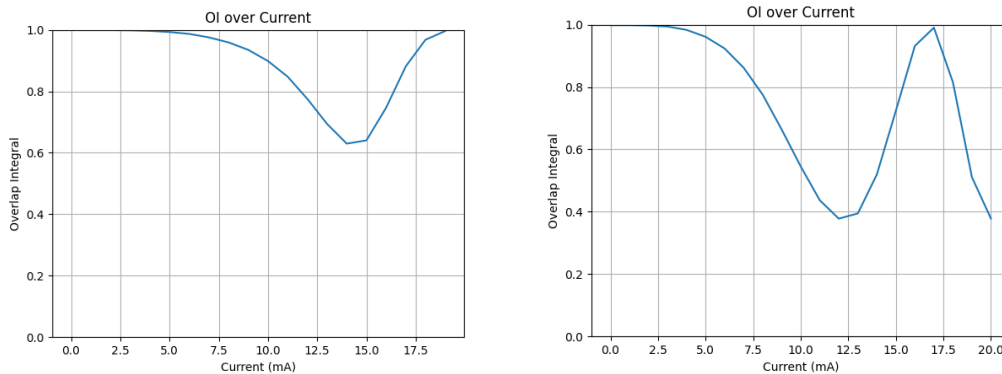
- 1: **START**
- 2: **choose** a Phase Shifter (PS_i)
- 3:
- 4: **run** an algorithm for OPA Phase Calibration with $I_{PS_i} = 0$
- 5:
- 6: **for** I_{PS_i} current in range $[I_{min}, I_{max}]$ **do**:

```

7:
8:     Compute  $OI[RP(I_{PS_i}), RP(I_{PS_i} = 0)]$ 
9:
10:    if  $OI = 1$  do:
11:        return  $I_{2\pi,i} \leftarrow I_{PS_i}$ 
12:
13:    End

```

Σχήμα 6.8: Ψευδοκώδικας αλγορίθμου για την εύρεση του ρεύματος $I_{2\pi}$.



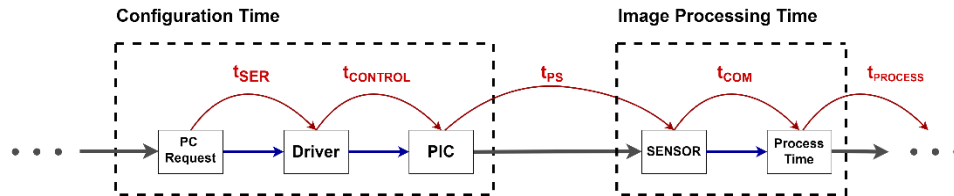
Σχήμα 6.9: (Αριστερά) Διάγραμμα του δείκτη OI συναρτήσει του ρεύματος διέγερσης του PS (από το 2×4 OPA) που επιδιώκεται ο προσδιορισμός του ρεύματος $I_{2\pi}$ του. Παρατηρούμε ότι για μικρά ρεύματα η εισαγωγή της καθυστέρησης είναι αρκετά μικρή (λόγω του τετραγωνικός νόμου). (Δεξιά) Ομοίως με την αριστερή εικόνα αλλά για OPA 1×4 .

6.5 Setup Times

Στην πρώτη ενότητα του κεφαλαίου παρουσιάστηκε η πειραματική διάταξη, η οποία χρησιμοποιήθηκε για τον χαρακτηρισμό και την εφαρμογή των αλγορίθμων αρχικοποίησης και στροφής δέσμης για OPAs. Όπως έγινε αντιληπτό παραπάνω, είναι κρίσιμος ο σωστός συγχρονισμός μεταξύ των υποσυστημάτων, δηλαδή μεταξύ του υπολογιστή, της CCD κάμερας, των Driver και του PIC. Οπότε, ο στόχος της συγκεκριμένης παραγράφου είναι η παρουσία των χρόνων επικοινωνίας μεταξύ των παραπάνω υποσυστημάτων, αλλά και η «μετάφραση» των κύκλων (cycle) που χρειάζονται οι αλγόριθμοι για να συγκλίνουν σε πραγματικό χρόνο (real time). Για το σκοπό αυτό το Σχήμα 6.10 απεικονίζει την αλυσίδα των υποσυστημάτων που επικοινωνούν μεταξύ τους μαζί με τους αντίστοιχους χρόνους, ώστε να πραγματοποιηθεί ένα αίτημα διέγερσης των PSs του PIC από τον υπολογιστή (PC) μέχρι να λάβει χώρα η επεξεργασία της εικόνας της κάμερας (sensor) και ο υπολογιστής να είναι πάλι έτοιμος να δώσει το επόμενο αίτημα προς τα ηλεκτρονικά (Drivers).

Πιο συγκεκριμένα, ο υπολογιστής στέλνει αίτημα στον Driver για τα επιθυμητά ρεύματα διέγερσης που θέλει οι PSs του OPA να διεγερθούν (χρόνος t_{SER}) κατόπιν ο Driver χρειάζεται χρόνο $t_{CONTROL}$ ώστε να διεγείρει τους PSs που βρίσκονται στο PIC. Οι PSs δεν αντιδρούν ακαριαία στην διέγερση αλλά χρειάζονται χρόνο t_{PS} ώστε να προσθέσουν τις συγκεκριμένες φάσεις στα σήματα. Όλοι οι παραπάνω χρόνοι αποτελούν τον χρόνο διαμόρφωσης (configuration time- $t_{configuration}$). Τα επόμενα βήματα που έπονται είναι η ανάγνωση της εικόνας από την κάμερα (χρόνος t_{COM}) και η επεξεργασία

του σήματος αυτού (χρόνος $t_{PROCESS}$). Συνολικά οι χρόνοι ανάγνωσης και επεξεργασία αναφέρονται ως χρόνος επεξεργασίας εικόνας $t_{image\ processing}$. Επομένως, η προαναφερθείσα αλληλουχία ενεργειών επαναλαμβάνεται σε κάθε πρόσβαση στο PIC και το άθροισμα των χρόνων διαμόρφωσης και επεξεργασίας συνθέτουν το χρόνο πρόσβασης στο PIC, t_{access} .



Σχήμα 6.10: Στο αριστερό τμήμα παρουσιάζονται οι διαδικασίες που συντελούν στον χρόνο διαμόρφωσης (configuration time) και στο δεξιό στον χρόνο επεξεργασίας των δεδομένων.

Οπότε, σε έναν κύκλο επανάληψης i των αλγορίθμων BGD λαμβάνουν χώρα $2 \cdot (NM) + 1$ προσβάσεις στο PIC ενώ στον αλγόριθμο SPGD 3 προσβάσεις. Εάν υποθέσουμε ότι ο BGD και ο SPGD χρειάζεται N_{BGD} και N_{SPGD} κύκλους για να υπερβούν το επιθυμητό κατώφλι αντίστοιχα, τότε ο πραγματικός χρόνος που απαιτείται ισούται με

$$t_{BGD} = N_{BGD} \cdot [2 \cdot (NM) + 1] \cdot t_{access} \quad (6.2)$$

$$t_{SPGD} = N_{SPGD} \cdot 3 \cdot t_{access} \quad (6.3)$$

Για παράδειγμα, εάν θεωρήσουμε ένα 16×16 OPA τότε σύμφωνα με το ραβδόγραμμα του Σχήματος 5.14 ο SDE-BGD και ο SPGD χρειάζονται κατά μέσο όρο 6.85 και 4.23 κύκλους αντίστοιχα. Επίσης, εάν υποθέσουμε (για απλοποίηση) ότι για τους χρόνους της πειραματικής διάταξης ισχύει ότι

$$t_{access} = t_{configuration} + t_{image\ processing} \approx t_{PS} \approx 500\ ms \quad (6.4)$$

τότε οι χρόνοι που απαιτούνται είναι ίση με

$$t_{BGD} = 29.28\ min$$

$$t_{SPGD} = 18.08\ min$$

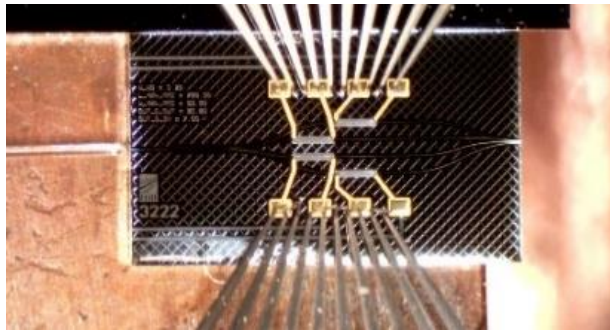
Οπότε, συμπεραίνουμε όπως αναμέναμε και από την θεωρητική ανάλυση του προηγούμενου Κεφαλαίου 5 την ταχύτερη αρχικοποίηση των φάσεων με τον αλγόριθμο SPGD.

6.6 Πειραματικά Αποτελέσματα Αλγορίθμων Αρχικοποίησης

Στην τρέχουσα υπό ενότητα παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα από την εφαρμογή των αλγορίθμων αρχικοποίησης που αναπτύχθηκαν στο προηγούμενο Κεφάλαιο 5. Τα διαθέσιμα PIC που χρησιμοποιήθηκαν είναι δύο, το 1×4 και το 2×4 . Το πρώτο βήμα πριν εκτελεστούν οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι αρχικοποίησης είναι η εφαρμογή του αλγορίθμου για τον προσδιορισμό του ρεύματος $I_{2\pi}$ κάθε PS. Για να επιτευχθεί η συγκέντρωση της ισχύς στο κέντρο των αξόνων (4^η γραμμή στο Σχήμα 6.8) όλα τα ρεύματα $I_{2\pi}$ αρχικοποιήθηκαν με τιμή ίση με 16 mA .

6.6.1 Για 1×4 OPA

Αρχικά, στο Σχήμα 6.11 παρουσιάζεται η κάτοψη του πρώτου PIC, που χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο της επίδοσης των αλγορίθμων αρχικοποίησης. Στο συγκεκριμένο PIC εφαρμόστηκαν οι 3 BGD αλγόριθμοι, που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 6, δηλαδή οι BGD, DE-BGD και ο SDE-BGD. Ο κάθε αλγόριθμος, όπως και στο επίπεδο της προσομοίωσης εκτελέστηκε 20 φορές και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωμένα στο παρακάτω ραβδόγραμμα (βλ. Σχήμα 6.12).

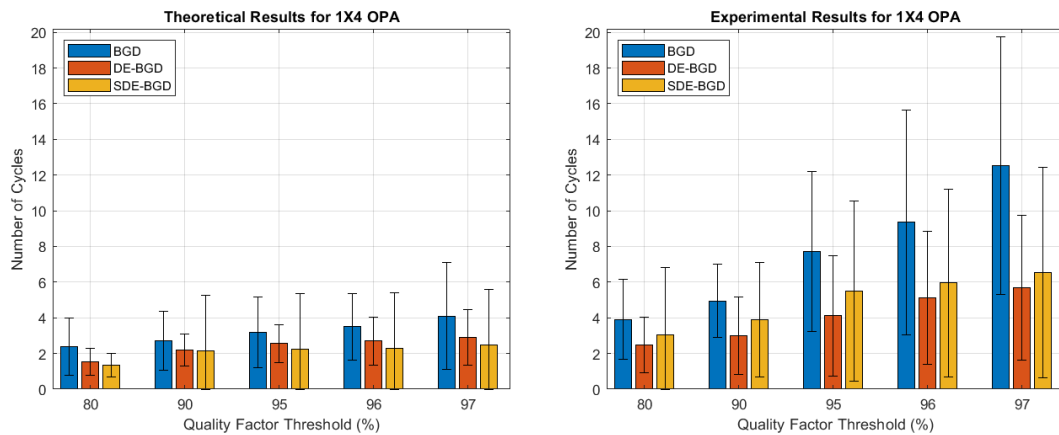


Σχήμα 6.11: Κάτοψη του 1×4 OPA. Στο αριστερό τμήμα της εικόνας εμφανίζεται η οπτική ίνα, στο κέντρο του PIC, με χρυσό χρώμα παρατηρούμε τους τέσσερις PS (ένας PS ανά κεραία) και με γκρι τα DC Probes με τα οποία διεγείρονται οι PS.

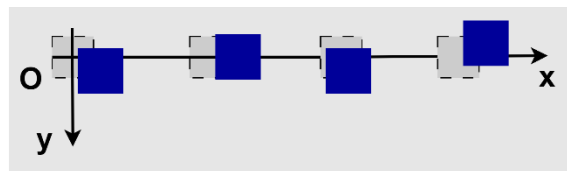
Πιο συγκεκριμένα, παρατηρούμε ότι οι σχετικές επιδόσεις των τριών αλγορίθμων τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πειραματικό επίπεδο είναι αρκετά κοντά, βέβαια αξίζει να τονιστεί ότι ενώ περιμέναμε ο SDE-BGD να είναι ο ταχύτερος και πειραματικά αυτό δεν ισχύει, ωστόσο η διαφορά που εμφανίζει με τον DE-BGD είναι αμελητέα. Επιπροσθέτως, στο πειραματικό μέρος παρατηρούμε την ανάγκη για περισσότερους κύκλους, που χρειάζονται οι αλγόριθμοι για να συγκλίνουν στην επιθυμητή τιμή καθώς και την μεγαλύτερη διασπορά των μετρήσεων. Για να γίνουν κατανοητές αυτές οι αποκλίσεις πρέπει να συγκριθούν οι διαφορές μεταξύ της θεωρητικής πλατφόρμας και της πειραματικής διάταξης.

Πρωτίστως, το οπτικό σύστημα (imaging system), το οποίο χρησιμοποιείται στην πειραματική διάταξη βασίζεται σε οπτο-μηχανικά εξαρτήματα. Η ακρίβεια της ευθυγράμμισης τους και η σχετική τους θέση ως προς το PIC εμπεριέχουν πεπερασμένη ακρίβεια, επομένως αποτελούν μια πηγή σφαλμάτων. Μία ακόμα πηγή σφαλμάτων είναι ο θόρυβος του αισθητήρα CCD που χρησιμοποιείται στο οπτικό σύστημα. Όπως

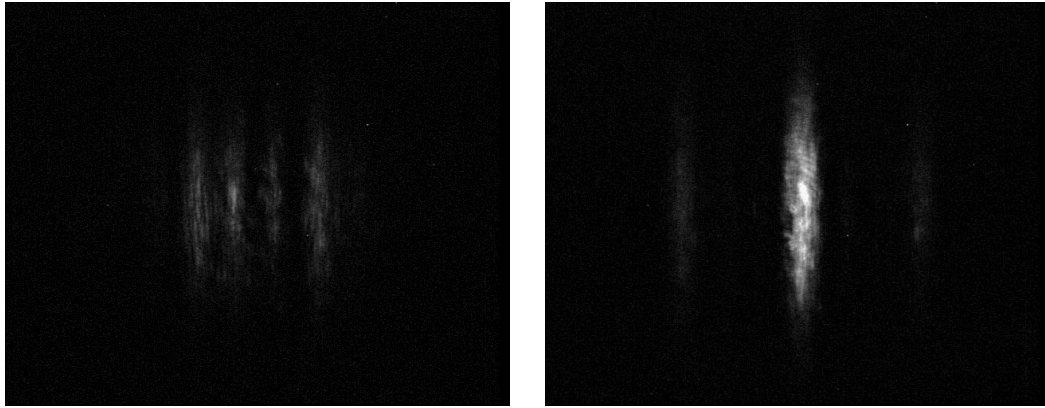
αναφέρθηκε και στην πρώτη ενότητα του κεφαλαίου, προκειμένου να μειωθεί η επίδραση του θορύβου του αισθητήρα στη μέτρηση του διαγράμματος ακτινοβολίας, εφαρμόζεται ένα Γκαουσιανό φίλτρο στην εικόνα που λαμβάνεται. Επιπροσθέτως, κατά την διαδικασία της δημιουργίας του PIC σε πολλά σημεία μπορούν να προκύψουν κατασκευαστικές αστοχίες. Μια κατηγορία αστοχιών είναι αυτές που επηρεάζουν τον παράγοντα διάταξης της στοιχειοκεραίες, όπως οι πιθανές αποκλίσεις των θέσεων των ακτινοβολητών-end fire κυματοδηγών σε σχέση με τις ιδανικές-αναμενόμενες. Για να γίνει καλύτερα κατανοητή η συγκεκριμένη αστοχία παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.13 ένα σχετικό παράδειγμα αποκλίσεων ως προς τις θεωρητικές θέσεις. Επιπλέον, η διεπαφή μεταξύ οπτικής ίνας και PIC είναι ένα άλλο κρίσιμο σημείο. Δηλαδή εάν ένα μικρό μέρος της οπτικής ισχύος δεν κυματοδηγείται μέσα στον πυρήνα αλλά σκεδάζεται μέσα από το υλικό του μανδύα και λαμβάνεται από το οπτικό σύστημα ως background θόρυβος. Επομένως, όσο καλύτερη η σύζευξη της οπτικής ισχύος στον κυματοδηγό του PIC, τόσο λιγότερος ο θόρυβος που εμφανίζεται στην κάμερα μας. Εν κατακλείδι, στο Σχήμα 6.14 απεικονίζεται το διάγραμμα ακτινοβολίας πριν και μετά την αρχικοποίηση (phase tuning) όπου παρατηρούμε το τελικό διάγραμμα ακτινοβολίας να τείνει προς το αντίστοιχο θεωρητικό.



Σχήμα 6.12: (Αριστερά) Ραβδόγραμμα με δεδομένα προσομοίωση, το οποίο παρουσιάζει τον αριθμό των κύκλων που χρειάζεται ο εκάστοτε αλγόριθμος για να ξεπεράσει τα αντίστοιχα κατώφλια της συνάρτησης κόστους. (Δεξιά) Ομοίως με αριστερά αλλά για τα πειραματικά δεδομένα.



Σχήμα 6.13: Παράδειγμα 1 × 4 Uniform OPA όπου παρουσιάζονται οι αποκλίσεις των θεωρητικών θέσεων των ακτινοβολητών (διακεκομμένα τετράγωνα) με τις πραγματικές θέσεις (μπλε τετράγωνα).

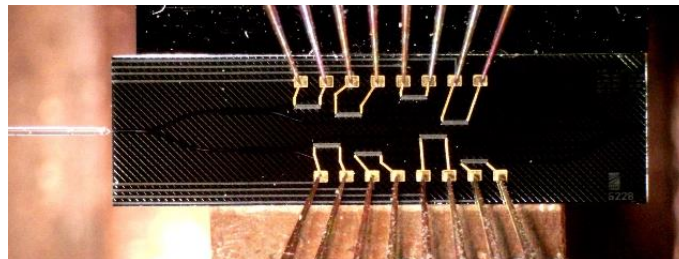


Σχήμα 6.14: (Αριστερά) Διάγραμμα ακτινοβολίας 1×4 OPA πριν προηγηθεί η αρχικοποίηση, δηλαδή οι PSs διεγείρονται με μηδενικά ρεύματα. (Δεξιά) Διάγραμμα ακτινοβολίας της ίδιας στοιχειοκεραίας μετά το πέρας της αρχικοποίησης, όπου παρατηρούμε ότι την ισχύς να έχει συγκεντρωθεί στο κέντρο της εικόνας.

Κλείνοντας, η συνάρτηση κόστους που χρησιμοποιήθηκε είναι το ολοκλήρωμα επικάλυψης μεταξύ του εκάστοτε διαγράμματος ακτινοβολίας και του ιδεατού. Οπότε, σε καμιά περίπτωση δεν αναμένεται στο πειραματικό κομμάτι να επιτευχθούν οι ίδιες τιμές για την συνάρτηση κόστους όπως στο επίπεδο προσομοίωσης και για αυτό τα πειραματικά αποτελέσματα κανονικοποιούνται στην μέγιστη τιμή. Ενδεικτικά αναφέρονται ότι οι μέγιστες τιμές κυμαίνονται στο διάστημα $[0.85 - 0.88]$.

6.6.2 Για 2×4 OPA

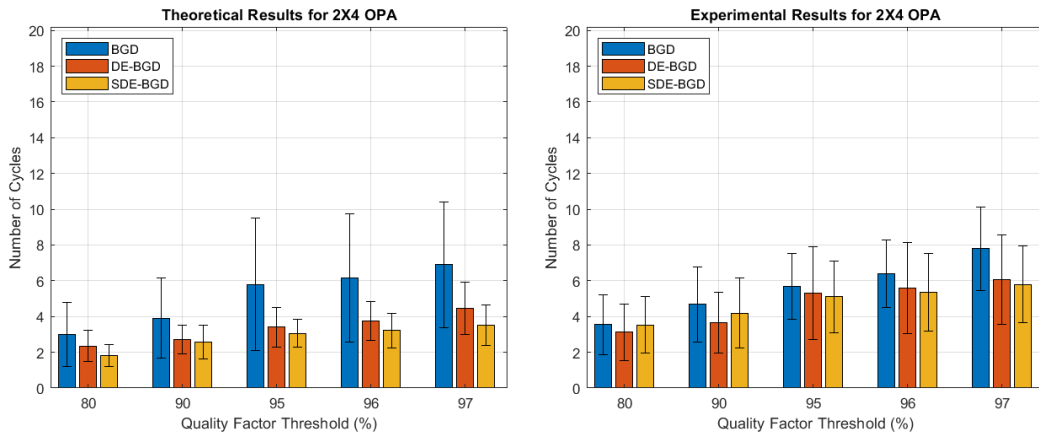
Στη συνέχεια, το 1×4 OPA έδωσε τη θέση του στο 2×4 OPA, όπου και εδώ εφαρμόστηκαν οι τρεις BGD αλγόριθμοι ακριβώς όπως στο πρώτο PIC. Στο Σχήμα 6.15 παρουσιάζεται η κάτοψη του δεύτερου ολοκληρωμένου.



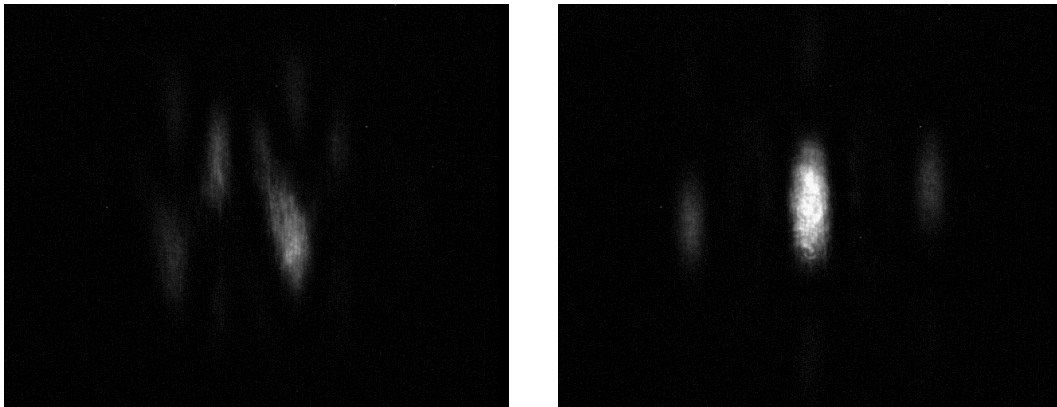
Σχήμα 6.15: Κάτοψη του 2×4 OPA.

Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από το 2×4 OPA μαζί με τα αντίστοιχα θεωρητικά παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.16. Αρχικά, παρατηρείται ότι και οι τρεις

αλγόριθμοι παρουσιάζουν τόσο θεωρητικά όσο και πειραματικά την ίδια ταξινόμηση στην ταχύτητα σύγκλισης τους, ωστόσο όπως και προηγουμένως, πειραματικά απαιτούνται περισσότεροι κύκλοι για να ξεπεραστεί το εκάστοτε κατώφλι της συνάρτησης κόστους. Επιπλέον, παρατηρείται ότι ναι μεν η διασπορά των μετρήσεων είναι μεγαλύτερη στις πειραματικές μετρήσεις ωστόσο σε σύγκριση με τις αντίστοιχες θεωρητικές είναι κοντά. Κλείνοντας, και εδώ ισχύουν οι ίδιοι λόγοι όσον αφορά τις αποκλίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων ενώ στο Σχήμα 6.17 απεικονίζεται το διάγραμμα ακτινοβολίας πριν και μετά την αρχικοποίηση των φάσεων.



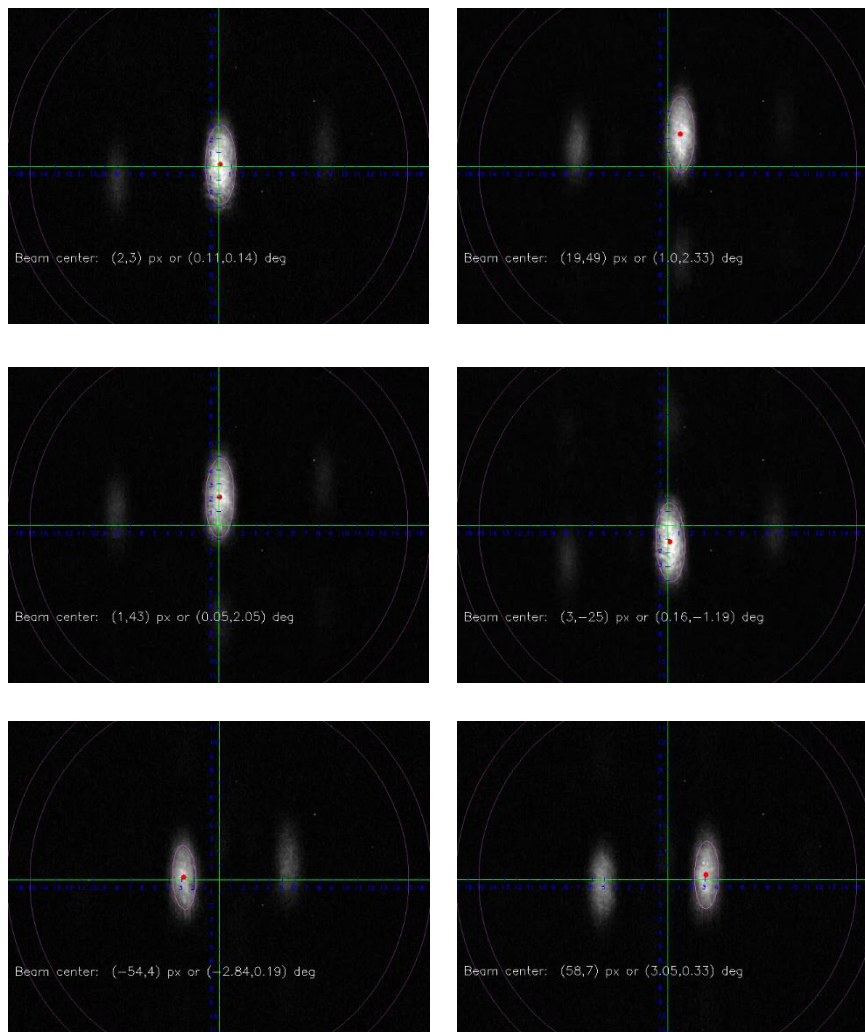
Σχήμα 6.16: (Αριστερά) Ραβδόγραμμα με δεδομένα προσομοίωση, το οποίο παρουσιάζει τον αριθμό των κύκλων που χρειάζεται ο εκάστοτε αλγόριθμος για να ξεπεράσει τα αντίστοιχα κατώφλια της συνάρτησης κόστους. (Δεξιά) Ομοίως με αριστερά αλλά για τα πειραματικά δεδομένα.



Σχήμα 6.17: (Αριστερά) Διάγραμμα ακτινοβολίας 2 × 4 OPA πριν προηγηθεί η αρχικοποίηση, δηλαδή οι PSs διεγείρονται με μηδενικά ρεύματα. (Δεξιά) Διάγραμμα ακτινοβολίας της ίδιας στοιχειοκεραίας μετά το πέρας της αρχικοποίησης, όπου παρατηρούμε την ισχύ να έχει συγκεντρωθεί στο κέντρο της εικόνας.

6.7 Πειραματικά Αποτελέσματα Αλγορίθμου Στροφής Δέσμης

Μετά την αρχικοποίηση των οπτικών στοιχειοκεραίων το επόμενο βήμα είναι η εφαρμογή του αλγορίθμου στροφής δέσμης (βλ. Σχήμα 5.17). Επομένως, βασιζόμενοι στις ιδέες, που περιεγράφηκαν στην Ενότητα 5.4 προσδιορίστηκε με χρήση ενός trial & error αλγορίθμου τα πειραματικό σφάλμα και κατόπιν πραγματοποιήθηκε η στόχευση. Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 6.18 παρουσιάζεται, για την στοιχειοκεραία 2×4 , το διάγραμμα ακτινοβολίας για σημεία στόχευσης $(az, el) \in \{(0^\circ, 0^\circ), (1^\circ, 2.5^\circ), (0^\circ, 2^\circ), (0^\circ, -1^\circ), (-3^\circ, 0^\circ), (3^\circ, 0^\circ)\}$. Επιπροσθέτως, στα παρακάτω διαγράμματα ακτινοβολίας παρατηρούμε την έλλειψη, που περικλείει την ισχύ του κύριου λοβού και με την κόκκινη βούλα το κέντρο θάρους της έλλειψης, δηλαδή το σημείο στόχευσης (target).



Σχήμα 6.18: (1^η Γραμμή) Διάγραμμα ακτινοβολίας για σημείο στόχευσης $(0^\circ, 0^\circ)$ και $(1^\circ, 2.5^\circ)$. (2^η Γραμμή) Ομοίως με την 1^η αλλά για $(0^\circ, 2^\circ)$ και $(0^\circ, -1^\circ)$. (3^η Γραμμή) Ομοίως με την 1^η αλλά για $(-3^\circ, 0^\circ)$ και $(3^\circ, 0^\circ)$.

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα και Προεκτάσεις

7.1 Σύνοψη και Συμπεράσματα

Οι οπτικές στοιχειοκεραίες αποτελούν ένα σύγχρονο ερευνητικό πεδίο, το οποίο έχει την δυνατότητα να προσφέρει λύσεις (solid state) για παράδειγμα στην αυτόνομη οδήγηση, σε ασύρματες ζεύξεις σημείου προς σημείου (point-to-point link) με ταχύτητες *Gbps* και σε πάρα πολλές άλλες εφαρμογές. Στην συγκεκριμένη εργασία παρουσιάστηκαν αλγόριθμοι αρχικοποίησης και ελέγχου οπτικών στοιχειοκεραιών, από τους οποίους οι μεν πρώτοι αντισταθμίζουν σε μεγάλο βαθμό τις κατασκευαστικές ατέλειες και τους διαφορετικού μήκους οπτικούς δρόμους και οι δε δεύτεροι την δυνατότητα στροφής της δέσμης της στοιχειοκεραίας στην επιθυμητή διεύθυνση. Ειδικότερα, για το πρόβλημα της αρχικοποίησης των OPAs προτάθηκαν τέσσερις υποψήφιοι αλγόριθμοι, τρεις βασισμένους στην λογική των BGD αλγορίθμων και έναν στην λογική του SPGD. Σε επίπεδα προσομοίωσης ο αλγόριθμος SPGD ξεχώρισε για την ταχύτητα σύγκλισης του ειδικά σε μεγάλες διατάξεις, καθώς αυτές αποτελούν και τις πιο ενδιαφέρουσες- δύσκολες περιπτώσεις. Από τους BGD ξεχώρισε ο SDE-BGD ο οποίος σε διατάξεις μέχρι μερικές δεκάδες κεραίες επιτυγχάνει τα εξαιρετικότερα αποτελέσματα. Οι αλγόριθμοι BGD δοκιμάστηκαν και στο πειραματικό setup στο οποίο και επέδωσαν πολύ θετικά αποτελέσματα πλησιάζοντας σε ικανοποιητικό βαθμό τα αντίστοιχα θεωρητικά. Κατόπιν, δοκιμάστηκε ο αλγόριθμος ελέγχου, ο οποίος σε επίπεδο προσομοίωσης λειτουργεί εξαιρετικά, και στο πειραματικό setup επιτυγχάνει την στρέψη της δέσμης προς την επιθυμητή κατεύθυνση. Συνοψίζοντας, στην τρέχουσα εργασία προσφέρονται αλγόριθμοι, οι οποίοι όχι μόνο σε θεωρητικό αλλά και σε πειραματικό επίπεδο επιτυγχάνουν τους στόχους τους και επομένως οι οπτικές στοιχειοκεραίες είναι ένα μεγάλο βήμα πιο κοντά στο να αποτελέσουν το κύριο υποσύστημα για τις εφαρμογές που απαιτούνται.

7.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Η πειραματική διαδικασία ανέδειξε την επιτυχία των προτεινόμενων αλγορίθμων ως προς την αρχικοποίηση και τον έλεγχο των οπτικών στοιχειοκεραιών για τα OPAs 1×4 και 2×4 . Επιπροσθέτως, η θεωρητική ανάλυση των αλγορίθμων αρχικοποίησης έδειξε ικανοποιητική ταχύτητα σύγκλισης για διατάξεις με εκατοντάδες κεραίες, μιας και αυτές έχουν μεγαλύτερο πρακτικό ενδιαφέρον. Ωστόσο, σε κάθε μελέτη υπάρχει ο χώρος για περαιτέρω βελτίωση και η τρέχουσα δεν αποτελεί εξαιρέσεις. Επομένως, παρακάτω αναλύονται δυνητικές επεκτάσεις της τρέχουσας εργασίας:

- ❖ Πειραματική υλοποίηση του αλγορίθμου SPGD στα 1×4 και 2×4 OPAs και σύγκριση των αποτελεσμάτων τους με τα αντίστοιχα θεωρητικά. Επιπλέον, υλοποίηση του αλγορίθμου “Nesterov Accelerated Gradient” σε συνδυασμό με τον SPGD και πειραματική αξιολόγηση του [33].
- ❖ Μελέτη της απόδοσης των αλγορίθμων σε μη περιοδικές διατάξεις OPAs
- ❖ Εκτέλεση των αλγορίθμων αρχικοποίησης και ελέγχου σε OPAs με περισσότερους ακτινοβολητές, ώστε τα αποτελέσματα να συγκριθούν με τα αντίστοιχα θεωρητικά.
- ❖ Μελέτη και υλοποίηση διαφορετικής κατηγορίας αλγορίθμων αρχικοποίησης όπως Hill Climbing [43], γενετικών [44]-[45], και Particle Swarm Optimization αλγορίθμων [46].
- ❖ Χρήση νευρωνικών δικτύων και βαθιάς μάθησης για την αρχικοποίηση και τον έλεγχο των διατάξεων OPAs [47].
- ❖ Αναβάθμιση της πλατφόρμας μελέτης αλγορίθμων αρχικοποίησης και ελέγχου. Μια πρώτη ιδέα είναι η εισαγωγή θορύβου (λευκού) και μελέτη της επίδρασης των τυχαίων γεωμετρικών αστοχιών στην ταχύτητα σύγκλισης των αλγορίθμων, ώστε να εξεταστεί η ευρωστία τους.
- ❖ Υλοποίηση αλγορίθμων για πιο ακριβή βαθμονόμηση των PSs ώστε να μειωθεί το σφάλμα κατά τη διέγερση τους.

Παράρτημα

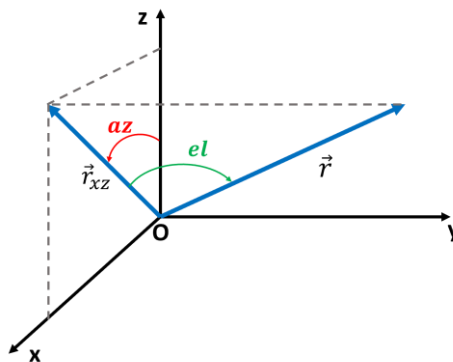
A. Οριζόντιο Σύστημα Συντεταγμένων

Το Οριζόντιο Σύστημα Συντεταγμένων (Horizontal Coordinate System) χρησιμοποιεί ως σημείο αναφοράς την θέση του τοπικού παρατηρητή και με βάση αυτήν ορίζονται οι χαρακτηριστικές γωνίες του συστήματος, αζιμουθιακή (azimuth) και ύψος (elevation). Πιο συγκεκριμένα, οι γωνίες αυτές θα ορισθούν με την βοήθεια του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων.

Επομένως, έστω $\vec{r} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$ ένα τυχαίο σημείο του χώρου \mathbb{R}^3 και \vec{r}_{xz} η προβολή του διανύσματος \vec{r} στο επίπεδο $y = 0$ (επίπεδο xz) τότε έχουμε

$$\Delta az = (\widehat{\vec{r}_{xz}, \hat{z}}) \quad \& \quad \Delta el = (\widehat{\vec{r}, \vec{r}_{xz}})$$

Τα παραπάνω διανύσματα μαζί με τις απαραίτητες γωνίες παρουσιάζονται στο κάτωθι Σχήμα Π.1 .



Σχήμα Π.1: Το οριζόντιο σύστημα συντεταγμένων

B. Διαφορετικά PS-States σε $N \times M$ OPA

Αρχικά ορίζεται το PS-State (PSS) αναφοράς με «ανενεργό» (δηλαδή με μηδενικό ρεύμα διέγερσης) τον PS αναφοράς. Στην τρέχουσα ανάλυση επιλέχθηκε ο PS του πρώτου AE να είναι κλειστός. Οπότε αφού γίνει η εύρεση των φάσεων των PS που μεγιστοποιούν την μετρική προκύπτει το κάτωθι PSS αναφοράς

$$PSS_{(\varphi_{0,0}^{PS}=0)} = \begin{pmatrix} 0 & \cdots & \varphi_{0,M-1}^{PS} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_{N-1,0}^{PS} & \cdots & \varphi_{N-1,M-1}^{PS} \end{pmatrix}_{N \times M}$$

Επομένως, τα υπόλοιπα $(N \times M - 1)$ PSS είναι ήδη γνωστά και δίνονται από την κάτωθι σχέση

$$PSS_{(\varphi_{i,j}^{PS}=0)} = (-\varphi_{i,j}^{PS}) \cdot \mathbb{I}_{N \times M}^{i,j} + PSS_{(\varphi_{0,0}^{PS}=0)}$$

με

$$\mathbb{I}_{N \times M}^{i,j} = (\mathbb{I}_{k,l})^{i,j} = \begin{cases} 0, & k = i \text{ και } l = j \\ 1, & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

Γ. Experimental Setup GUI

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάστηκε το πειραματικό setup που χρησιμοποιήθηκε για την αρχικοποίηση, τον χαρακτηρισμό και τον έλεγχο των End-Fire οπτικών στοιχειοκεραιών. Για την υλοποίηση όλων αυτών των λειτουργιών χρειάζεται ο συγχρονισμός μεταξύ του Driver, της κάμερας και του υπολογιστή. Επομένως, υλοποιήθηκε σε Python (όπως και ο υπόλοιπος κώδικας για το πείραμα) μια γραφική διεπαφή χρήστη (GUI) για της εποπτεία της όλης διαδικασίας. Οπότε, στο Σχήμα Π.2 παρουσιάζεται η διεπαφή μαζί με τις λειτουργικότητες που επιτελούσε, οι οποίες είναι εξής:

- (1): Τερματισμός προγράμματος.
- (2): Επανεκκίνηση προγράμματος.
- (3): Επιλογή ακτίνας του Γκαουσιανού φίλτρου.
- (4): Σημείο τοποθέτησης του άξονα x για την γραφική απεικόνισή του διαγράμματος ακτινοβολίας $U_{x=x_0}$.
- (5): Σημείο τοποθέτησης του άξονα y για την γραφική απεικόνισή του διαγράμματος ακτινοβολίας $U_{y=y_0}$.
- (6): Προβολή ή μη των διαγραμμάτων $U_{x=x_0}$ και $U_{y=y_0}$.
- (7): Προβολή ή μη των σημείων της εικόνας, όπου υπάρχει κορεσμός. Δηλαδή η ένταση των πίξελ είναι μεγαλύτερη ή ίση του 255.
- (8): Ενημέρωση των νέων παραμέτρων για το (3) πεδίο.
- (9): Αποθήκευση της τρέχουσας εικόνας του αισθητήρα.
- (10): Υπολογισμός του Quality Factor (που εδώ είναι το OI) και η δυνατότητα για συνεχή υπολογισμό του (μέσω του check box).

(11): Υπολογισμός της μέσης έντασης του φωτός του στην περιοχή που έχει συσσωρευτεί η περισσότερη ακτινοβολία.

(12): Προβολή ή μη της φάσης διέγερσης των PSs του PIC.

(13): Προβολή ή μη των διαγραμμάτων $QF - cycle$, $OI - cycle$, $Power at Sensor Center - cycle$, $Argamx Distance from zero - cycle$.

(14): Επιλογή αλγορίθμου αρχικοποίησης (BGD ή SPGD).

(15): Έναρξη αλγορίθμου αρχικοποίησης.

(16): Τερματισμός αλγορίθμου αρχικοποίησης.

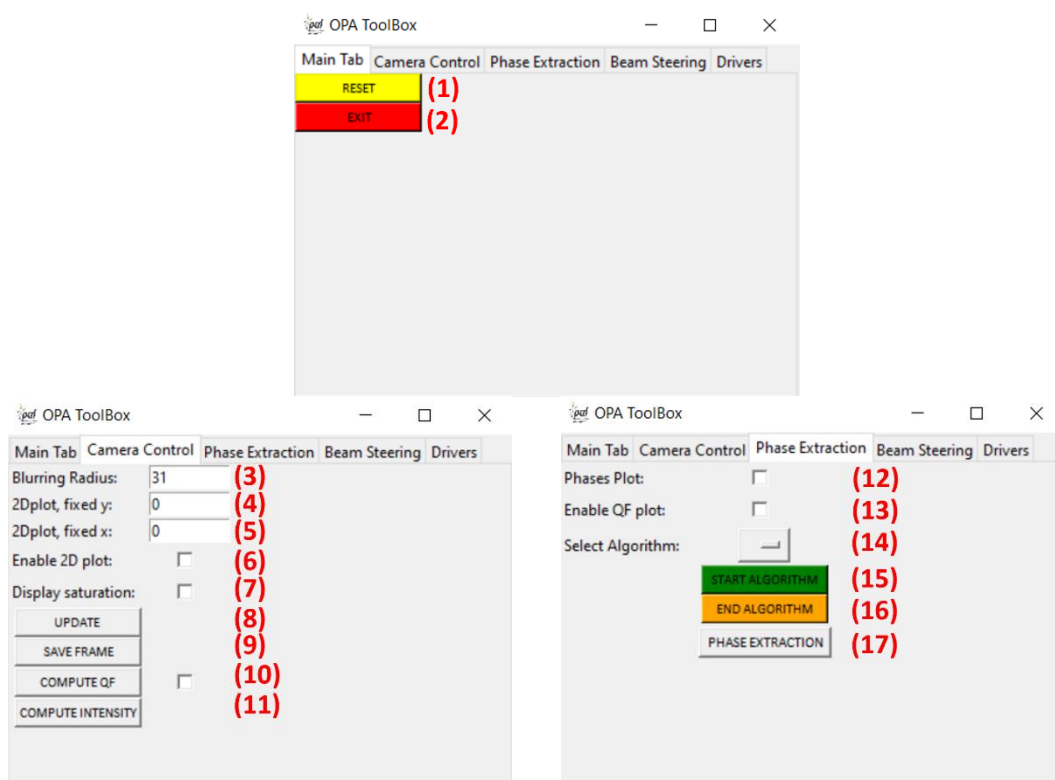
(17): Διέγερση των PSs με ρεύματα που αρχικοποιούν τις φάσεις του OPA.

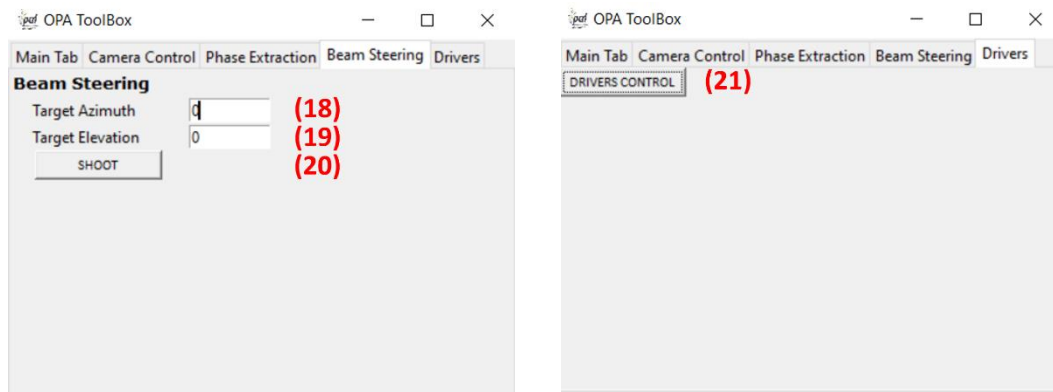
(18): Επιλογή της αζιμουθιακής γωνίας στόχευσης.

(19): Επιλογή της γωνίας ανύψωσης του σημείου στόχευσης.

(20): Διέγερση των PSs ώστε να στοχεύσεις στο σημείο που έχει προσδιορίσει από τις παραπάνω γωνίες.

(21): Δυνατότητα χειροκίνητου ελέγχου του Driver μέσω του τερματικού του υπολογιστή.





Σχήμα Π.2: Η γραφική διεπαφή χρήστη που υλοποιήθηκε για τις ανάγκες του setup, το οποίο αποτελείται από πέντε καρτέλες, τις Main Tab, Camera Control, Phase Extraction, Beam Steering και Drivers.

Βιβλιογραφία

- [1] European Commission (n.d.). *Photonics*. Shaping Europe's Digital Future ([link](#)).
- [2] Gounaridis, Lefteris & Groumas, Panos & Schreuder, Erik & Heideman, R.G. & Katopodis, Vasilis & Kouloumentas, Christos & Avramopoulos, Hercules. (2015). Design of grating couplers and MMI couplers on the TriPleX platform enabling ultra-compact photonic-based biosensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 209. 1057-1063. 10.1016/j.snb.2014.11.098.
- [3] Laser Doppler vibrometer. (2022, December 27). In Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Laser_Doppler_vibrometer
- [4] Raptakis, Adam & Gounaridis, Lefteris & Kleinert, Moritz & Weigel, Madeleine & Epping, Jörn & Schreuder, Erik & Wolfer, Marco & Dräbenstedt, Alexander & Pessina, Roberto & Groumas, Panos & Aukes, Thomas & Seyfried, Volker & Keil, Norbert & Heideman, R.G. & Avramopoulos, Hercules & Kouloumentas, Christos. (2023). Fully integrated Laser Doppler Vibrometer (LDV) based on hybrid 3D integration of silicon nitride and polymer photonic circuits with operation in the kHz regime.
- [5] Fig.1 from Ma, Y., Dong, B. & Lee, C. Progress of infrared guided-wave nanophotonic sensors and devices. *Nano Convergence* 7, 12 (2020). <https://doi.org/10.1186/s40580-020-00222-x>
- [6] Fiber-optic communication. (2023, March 3). In Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Fiber-optic_communication
- [7] QUANTUMXCHANGE. (n.d.). Quantum Cryptography, Explained. <https://quantumxc.com/blog/quantum-cryptography-explained/>
- [8] EPIC (n.d.). Photonic Integrated Circuits. <https://epic-assoc.com/technologies/photonic-integrated-circuits/>
- [9] Smit, Meint & Williams, Kevin & Tol, J.J.G.M.. (2019). 1.3 Integration of Photonics and Electronics. 29-34. 10.1109/ISSCC.2019.8662321.
- [10] COMSOL (n.d.). Silicon Photonics: Designing and Prototyping Silicon Waveguides. <https://www.comsol.com/blogs/silicon-photonics-designing-and-prototyping-silicon-waveguides/>
- [11] Moore's law. (2023, March 9). In Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Moore%27s_law
- [12] P. F. McManamon et al., "Optical phased array technology," in Proceedings of the IEEE, vol. 84, no. 2, pp. 268-298, Feb. 1996, doi: 10.1109/5.482231.

- [13] M. J. Byrd, C. V. Poulton, M. Khandaker, E. Timurdogan, D. Vermeulen, and M. R. Watts, "Free-space Communication Links with Transmitting and Receiving Integrated Optical Phased Arrays," in *Frontiers in Optics / Laser Science*, OSA Technical Digest (Optica Publishing Group, 2018), paper FTu4E.1.
- [14] Poulton, Christopher & Byrd, Matthew & Russo, Peter & Timurdogan, Erman & Khandaker, Murshed & Vermeulen, Diedrik & Watts, M.R.. (2019). Long-Range LiDAR and Free-Space Data Communication with High-Performance Optical Phased Arrays. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. PP. 1-1. 10.1109/JSTQE.2019.2908555.
- [15] Cheng, Lirong & Mao, Simei & Li, Zhi & Han, Yaqi & FU, H. Y.. (2020). Grating Couplers on Silicon Photonics: Design Principles, Emerging Trends and Practical Issues. *Micromachines*. 11. 666. 10.3390/mi11070666.
- [16] Lee, Sang-Shin & Im, Chul-Soon & Bhandari, Bishal & Lee, Kyeong-Pyo & Kim, Sungmoon & Oh, Min-Cheol. (2020). Silicon nitride optical phased array based on a grating antenna enabling wavelength-tuned beam steering. *Optics Express*. 28. 10.1364/OE.383304.
- [17] 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>
- [18] Nanostructured Materials: Metrology A. Jorio, M.S. Dresselhaus, in Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, 2016.1 Definitions for Metrology and Nanometrology
- [19] What Is Calibration? ADVANCED INSTRUMENTS. <https://www.aicompanies.com/education-training/calibration/what-is-calibration/#:~:text=Calibration%20is%20the%20process%20of,fundamental%20aspect%20of%20instrumentation%20design>
- [20] Sun, H.; Qiao, Q.; Guan, Q.; Zhou, G. Silicon Photonic Phase Shifters and Their Applications: A Review. *Micromachines* 2022, 13, 1509. <https://doi.org/10.3390/mi13091509>
- [21] Griffiths, D.J. (2013) *Introduction to Electrodynamics*. 4th Edition, Cambridge University Press, Cambridge.
- [22] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*. 3rd ed., Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2005.
- [23] "IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas," in *IEEE Std 145-1993*, vol., no., pp.1-32, 18 July 1993, doi: 10.1109/IEEESTD.1993.119664.

- [24] X. Καψάλης και Π. Κωπτής, «Κεραίες Ασύρματες Ζεύξεις», Εκδόσεις Τζιόλα, 2008.
- [25] M. Kleinert et al., “Photonic integrated devices and functions on hybridpolymer platform,” in Proc. Phys. Simul. Optoelectron. Devices, 2017,Art. no. 100981A.
- [26] V. Katopodis *et al.*, “Polymer enabled 100 Gbaud connectivity for datacomapplications,” *Opt. Commun.*, vol. 362, pp. 13–21, 2016, [Online].Available: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2015.07.064>.
- [27] Cost Effective Equipment (n.d.). Spin Coating Theory. <https://www.costeffectiveequipment.com/service-support/technical-resources/spin-coating-theory/>
- [28] Huygens–Fresnel principle. (2023, March 1). In Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Huygens%E2%80%93Fresnel_principle
- [29] Algorithm. (2023, March 8). In Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/Algorithm>
- [30] X. Yang, Engineering Optimization, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- [31] (2002). Optimization Algorithms in Physics. Alexander K. Hartmann, Heiko Rieger.
- [32] Tin Komljenovic and Paolo Pintus, "On-chip calibration and control of optical phased arrays," *Opt. Express* 26, 3199-3210 (2018)
- [33] Wang, Zheng & Yang, Yibo & Wang, Ruiting & Luo, Guangzhen & Wang, Pengfei & Su, Yanmei & Pan, Jiaoqing & Zhang, Yejin. (2022). Improved SPGD Algorithm for Optical Phased Array Phase Calibration. *Applied Sciences*. 12. 7879. 10.3390/app12157879.
- [34] IBM (n.d.). <https://www.ibm.com/topics/gradient-descent#:~:text=Gradient%20descent%20is%20an%20optimization,each%20iteration%20of%20parameter%20updates>
- [35] Convex optimization. (2022, December 17). In Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Convex_optimization
- [36] Ruder, Sebastian. “An overview of gradient descent optimization algorithms.” ArXiv abs/1609.04747 (2016): n. pag.
- [37] Vorontsov, M A.; Carhart, G.W.; Ricklin, J.C. Adaptive phase-distortion correction based on parallel gradient-descent optimization. *Opt. Lett.* 1997, 22, 907–909.

- [38] Vorontsov, M.A. Decoupled stochastic parallel gradient descent optimization for adaptive optics: Integrated approach for wave-front sensor information fusion. *JOSA A* 2002, 19, 356-368.
- [39] Mitchell, M. (1996). An introduction to genetic algorithms.
- [40] Katoch, S., Chauhan, S.S. & Kumar, V. A review on genetic algorithm: past, present, and future. *Multimed Tools Appl* 80, 8091-8126 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11042-020-10139-6>
- [41] Γεωργιόπουλος, Γ. (2021). Διπλωματική Εργασία. Μελέτη οπτικής στοιχειοκεραίας σε πολυμερική πλατφόρμα φωτονικής ολοκλήρωσης για εφαρμογές τηλεσκοπικής. Artemis (Digital Repository).
- [42] Trial and error. (2023, March 10). In *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/Trial_and_error
- [43] Doyle, K.J.; Heck, M.J.R.; Bovington, J.T.; Peters, J.D.; Coldren, L.A.; Bowers, J.E. Two-Dimensional Free-Space Beam Steering with an Optical Phased Array on Silicon-on-Insulator. *Opt. Express* 2011, 19, 21595-21604
- [44] Liu, Q.; Lu, Y.; Wu, B.; Jiang, P.; Cao, R.; Feng, J.; Guo, J.; Jin, L. Silicon Optical Phased Array Side Lobe Suppression Based on an Improved Genetic Algorithm. In *Proceedings of the 2020 Asia Communications and Photonics Conference (ACP) and International Conference on Information Photonics and Optical Communications (IPOC)*, Beijing, China, 24-27 October 2020; pp. 1-3.
- [45] M. C. Shin, A. Mohanty, K. Watson, G. R. Bhatt, C. T. Phare, S. A. Miller, M. Zadka, B. S. Lee, X. Ji, I. Datta, and M. Lipson, "Chip-scale blue light phased array," *Opt. Lett.* 45(7), 1934 (2020).
- [46] X. He, T. Dong, J. He and Y. Xu, "Design of an Optical Phased Array with Low Side-lobe Level and Wide-angle Steering Range Based on Particle Swarm Optimization," *2020 Asia Communications and Photonics Conference (ACP) and International Conference on Information Photonics and Optical Communications (IPOC)*, Beijing, China, 2020, pp. 1-3.
- [47] Lemeng Leng, Zhaobang Zeng, Guihan Wu, Zhongzhi Lin, Xiang Ji, Zhiyuan Shi, and Wei Jiang, "Phase calibration for integrated optical phased arrays using artificial neural network with resolved phase ambiguity," *Photon. Res.* 10, 347-356 (2022)