

ΑΝΩΤΑΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ.
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών Τ.Ε.



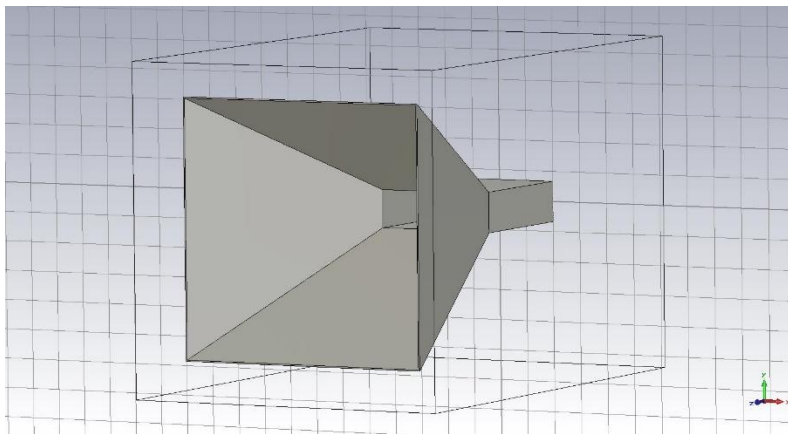
PIRAEUS UNIVERSITY of APPLIED SCIENCES
FACULTY OF ENGINEERING
Department of Electronics Engineering

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
Διαδικτυωμένα Ηλεκτρονικά Συστήματα

Master of Science in
Internetworked Electronic Systems

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σχεδίαση και ανάπτυξη phased array χοανοκεραιών
για χρήση με σύστημα HPM



Μεταπτυχιακός Φοιτητής: Στέφανος Τσαντήλας, Α.Μ. 0006

Επιβλέπων: Στυλιανός Μυτιληναίος, Επίκουρος Καθηγητής

ΑΙΓΑΛΕΩ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2017

ΑΝΩΤΑΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ.
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών Τ.Ε.



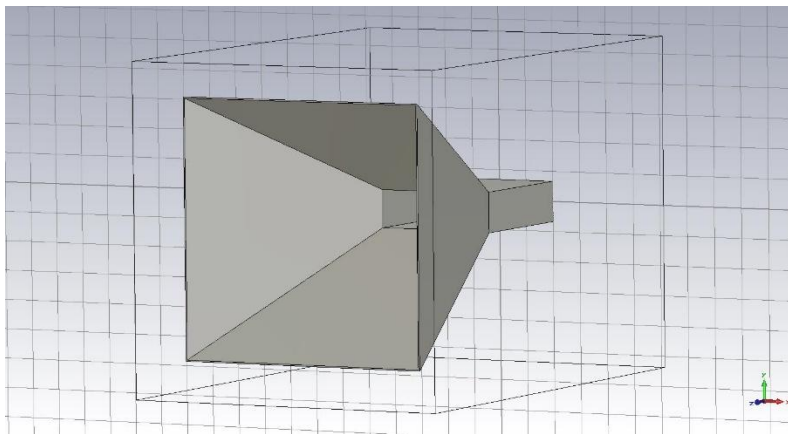
PIRAEUS UNIVERSITY of APPLIED SCIENCES
FACULTY OF ENGINEERING
Department of Electronics Engineering

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
Διαδικτυωμένα Ηλεκτρονικά Συστήματα

Master of Science in
Internetworked Electronic Systems

MSc Thesis

Design and development of a horn antenna phased array
for use in HPM systems



Student: Stefanos Tsantilas, Reg. Nr. 0006

MSc Thesis Supervisor: Stylianos Mitilineos, Assistant Professor

ATHENS-EGALEO, SEPTEMBER 2017

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε μία μέθοδος σχεδιασμού γραμμικών στοιχειοκεραιών αποτελούμενων από κεραίες χοάνης. Οι κεραίες χοάνης έχουν εκ φύσεως μεγάλη κατευθυντικότητα επομένως παράγουν ένα σχετικά στενό εύρος δέσμης. Το αποτέλεσμα είναι ότι όταν χρησιμοποιούνται ως στοιχεία σε μία στοιχειοκεραία, η συμβολή των γειτονικών διαγραμμάτων ακτινοβολίας είναι μικρή άρα και το εύρος σάρωσης του κύριου λοβού είναι περιορισμένο. Επιπλέον, λόγω φυσικών περιορισμών, οι αποστάσεις μεταξύ των στοιχείων χοάνης είναι πολλαπλάσιες του μήκους κύματος, γεγονός το οποίο συντελεί στην εμφάνιση ισχυρών πλευρικών λοβών.

Για την αντιμετώπιση του μικρού εύρους σάρωσης προτάθηκε η χρήση της τεχνικής pattern oscillation. Η τεχνική αυτή μπορεί να εφαρμοστεί με την προϋπόθεση ότι στο διάγραμμα ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας εμφανίζονται αρκούντως ισχυροί πλευρικοί λοβοί, γεγονός το οποίο συμβαίνει στην περίπτωση μας. Τροφοδοτώντας τις κεραίες με κατάλληλες διαφορές φάσης εμφανίζεται στροφή του διαγράμματος ακτινοβολίας η οποία δημιουργεί ένα ισοδύναμο εύρος δέσμης μεγαλύτερο από το εύρος σάρωσης κύριου λοβού, ενώ ταυτόχρονα η ισχύς ακτινοβολίας είναι ίση ή μεγαλύτερη από την ημίσεια ισχύ της αρχικής κεραίας.

Η μελέτη πραγματοποιήθηκε για στοιχειοκεραίες αποτελούμενες από N όμοιες κεραίες καθώς και από δύο ή τρεις διαφορετικές κεραίες. Αποδεικνύεται ότι η τεχνική pattern oscillation αποτελεί μία καλή λύση διότι δεν προκύπτει συμβιβασμός μεταξύ του μέγιστου ισοδύναμου εύρους δέσμης και της απαιτούμενης ισχύος.

ΛΕΞΕΙΣ-ΚΛΕΙΔΙΑ: χοανοκεραία, στοιχειοκεραία, φασική διάταξη, ισοδύναμο εύρος δέσμης, πλευρικοί λοβοί, ταλάντωση διαγράμματος ακτινοβολίας

ABSTRACT

In this thesis, a method for the design of linear phased arrays consisting of horn antennas is proposed. Horn antennas are inherently highly directional and produce a relatively narrow beamwidth. This results in low neighboring pattern interference in the H-plane when used as linear array elements, thus reducing the main lobe scanning angle. Furthermore, physical restrictions dictate that the minimum distance between array elements be much larger than the operating wavelength.

The implementation of a pattern oscillation scheme is proposed in order to overcome the main beam scanning width. Pattern oscillation can be successfully implemented provided that sufficiently powerful side lobes are present in the total radiation pattern of the array, which is true in our case. Phase shifted array elements feeding results in an oscillating radiation pattern thus creating a beamwidth that is larger than the main lobe scanning angle, while simultaneously maintaining a power level greater than or equal to that of the original antenna's half power.

The study takes into consideration linear arrays with N identical antennas as well as arrays consisting of two or three different antennas. It is demonstrated that the pattern oscillation technique is a viable solution that does not trade between maximum equivalent beamwidth and output power.

KEYWORDS: horn antenna, phased array, equivalent beamwidth, side lobes, pattern oscillation

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ: Αντικείμενο και διάρθρωση της εργασίας	5
1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Θεωρητικό πλαίσιο.....	7
1.1. Χοανοκεραίες.....	7
1.2. Στοιχειοκεραίες.....	9
1.2.1. Γραμμική στοιχειοκεραία δύο στοιχείων	9
1.2.2. Γραμμική στοιχειοκεραία N στοιχείων	10
1.2.3. Φασική στοιχειοκεραία (phased array).....	13
1.2.4. Pattern oscillation	15
2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Προτεινόμενη Μέθοδος.....	18
2.1. Προσομοίωση κεραιών – διαγράμματα ακτινοβολίας	18
2.2. Ανάπτυξη κώδικα MATLAB	19
2.2.1. Υπολογισμός array με δοθείσες παραμέτρους	19
2.2.2. Βελτιστοποίηση του array	20
2.2.3. Επίδραση του πλήθους και της απόστασης των κεραιών στο ισοδύναμο εύρος δέσμης	22
2.2.4. Σύγκριση με τεχνική σάρωσης του κύριου λοβού.....	22
3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Εφαρμογή και Αποτελέσματα	23
3.1. Κατασκευή 3D μοντέλων και Η/Μ προσομοίωση στο CST	23
3.2. Εισαγωγή δεδομένων από το CST στο MATLAB	30
3.3. Υπολογισμός array με το CST.....	32
3.4. Υπολογισμός array με το MATLAB.....	34
3.4.1. Α' τρόπος: Array Factor.....	34
3.4.2. Β' τρόπος: Υπολογιστικός.....	35
3.4.3. Σύγκριση Α' και Β' τρόπου	36
3.4.4. Επέκταση κώδικα	37
3.5. Σύγκριση αποτελεσμάτων MATLAB και CST.....	38
3.5.1. Σύγκριση με το farfield array του CST.....	38
3.5.2. Σύγκριση με full wave simulation	40
3.6. Κώδικας για Pattern Oscillation.....	44
3.6.1. Ανίχνευση πλευρικών λοβών και μέγιστου εύρους δέσμης	44
3.6.2. Εύρεση μέγιστου ισοδύναμου εύρους δέσμης με oscillation.....	46

3.6.3.	Επίδραση του πλήθους και της απόστασης των κεραιών στο ισοδύναμο εύρος δέσμης.	47
3.6.4.	Επέκταση κώδικα για 2 και 3 διαφορετικές κεραιές.....	50
3.6.5.	Σύγκριση του ισοδύναμου oscillation εύρους με το εύρος σάρωσης του κύριου λοβού..	51
4.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ανάλυση Αποτελεσμάτων – Συζήτηση.....	57
4.1.	Σχέση oscillation εύρους δέσμης – απόστασης κεραιών – πλήθους κεραιών.....	57
4.2.	Ανάλυση για 2 και 3 διαφορετικές κεραιές.....	58
4.3.	Σύγκριση Pattern Oscillation – Σάρωσης κύριου λοβού.....	60
5.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Σύνοψη – Συμπεράσματα.....	64
5.1.	Μελλοντικές προεκτάσεις	65
	Βιβλιογραφία – Αναφορές.....	66

Αντικείμενο και διάρθρωση της εργασίας

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η σχεδίαση και ανάπτυξη ενός phased array συστήματος αποτελούμενου από χοανοκεραίες για χρήση σε σύστημα παραγωγής **μικροκυματικών παλμών υψηλής ισχύος (HPM)**. Το βασικό κίνητρο για την εκπόνηση της εργασίας είναι η συμβολή στην έρευνα σχετικά με την παραγωγή και ακτινοβολία μικροκυματικών παλμών υψηλής ισχύος και μικρού εύρους (μεγάλου εύρους ζώνης, > 100 MHz). Πιθανή εφαρμογή των όποιων ερευνητικών αποτελεσμάτων θα μπορούσε να είναι η δημιουργία παρεμβολών σε ηλεκτρονικά συστήματα, με στόχο τον απομακρυσμένο έλεγχο λειτουργίας τους.

Οι παλμοί ακτινοβολούνται από χοανοκεραία η οποία εκ φύσεως έχει μεγάλη κατευθυντικότητα. Το αποτέλεσμα είναι ότι η ακτινοβολία περιορίζεται σε ένα μικρό τομέα του χώρου και ως εκ τούτου είναι λιγότερο πιθανό ένας παλμός να πετύχει το κινούμενο όχημα. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος προτείνεται η ανάπτυξη ενός phased array. Πρόκειται ουσιαστικά για μία στοιχειοκεραία (array) αποτελούμενη από δύο ή περισσότερες χοανοκεραίες, με την επιπλέον δυνατότητα να μπορεί το κάθε στοιχείο (κεραία) να τροφοδοτείται με διαφορετική φάση. Αυτή η διαφορά φάσης τροφοδοσίας προκαλεί στροφή (steering) του διαγράμματος ακτινοβολίας και επομένως την κάλυψη μεγαλύτερου τομέα. Ο στόχος είναι να χρησιμοποιηθεί αυτή η ιδιότητα έτσι ώστε το array να έχει ένα ισοδύναμο εύρος δέσμης μεγαλύτερο από ή ίσο με αυτό της αρχικής κεραίας, ενώ παράλληλα οι παλμοί να ακτινοβολούνται με ισχύ τουλάχιστον ίση με την αρχική. Εδώ, ως ισοδύναμο εύρος δέσμης ορίζεται το εύρος γωνιών τις οποίες η φασική στοιχειοκεραία μπορεί δυνητικά να καλύψει με ισχύ ίση ή μεγαλύτερη από την ημίσεια της μέγιστης ισχύος του κάθε στοιχείου (χοάνης). Ο προσδιορισμός δυνητικά χρησιμοποιείται για να εννοήσει ότι το ισοδύναμο εύρος δέσμης προκύπτει μέσω της αλλαγής της φάσης τροφοδοσίας των στοιχείων, δηλαδή η κεραία δεν καλύπτει διαρκώς το εύρος γωνιών που ορίζεται από το ισοδύναμο εύρος δέσμης.

Κατά τη διάρκεια μελέτης του προβλήματος βρέθηκε ότι μια πιο ικανοποιητική λύση είναι η τεχνική του pattern oscillation. Το pattern oscillation αναφέρεται στη συνεχή μεταβολή των φάσεων τροφοδοσίας των στοιχείων του array που έχει ως αποτέλεσμα την ταλάντωση του διαγράμματος ακτινοβολίας μέσα σε κάποια όρια. Χαρακτηριστικό αυτής της τεχνικής είναι ότι εκτός από τον κύριο λοβό ακτινοβολίας λαμβάνονται υπόψιν και οι πλευρικοί λοβοί, με αποτέλεσμα να έχουμε αύξηση του ισοδύναμου εύρους δέσμης. Επιπλέον, το σχήμα λειτουργίας του pattern oscillation δεν απαιτεί την χρήση συστήματος εντοπισμού της θέσης του ακτινοβολουμένου στόχου, γεγονός που διευκολύνει σημαντικά την ανάπτυξη του προτεινόμενου συστήματος. Στην πορεία της εργασίας μελετώνται οι απαιτήσεις καθώς και οι περιορισμοί ενός τέτοιου συστήματος και πραγματοποιείται η σχεδίασή του.

Στο κεφάλαιο 1 γίνεται μια θεωρητική ανασκόπηση που περιλαμβάνει τις χοανοκεραίες, τα phased arrays και το pattern oscillation. Γίνεται επεξήγηση της λειτουργίας ενός phased array αλλά και ποιά είναι η φιλοσοφία πίσω από την τεχνική του pattern oscillation. Εισάγονται κύριες έννοιες όπως το

εύρος κύριου λοβού ακτινοβολίας και το ισοδύναμο εύρος δέσμης, η κατανόηση των οποίων κρίνεται απαραίτητη για τη συνέχεια της εργασίας.

Στο κεφάλαιο 2 αναλύεται η μέθοδος που ακολουθήθηκε εστιάζοντας στα επιμέρους προβλήματα που παρουσιάζονται και στον τρόπο επίλυσής τους. Παρουσιάζονται επίσης τα εργαλεία λογισμικού που χρησιμοποιήθηκαν και δίνονται τα διαγράμματα ροής για τα επιμέρους κομμάτια κώδικα που αναπτύχθηκαν.

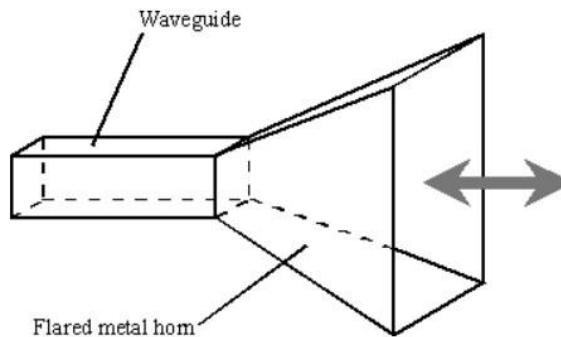
Στο κεφάλαιο 3 περιγράφεται η εφαρμογή της μεθόδου και τα αποτελέσματα που προκύπτουν. Παρουσιάζεται πρώτα η διαδικασία παραγωγής των διαγραμμάτων ακτινοβολίας των διαθέσιμων κεραιών χοάνης καθώς και των διαγραμμάτων ακτινοβολίας του agray. Εν συνεχεία αναλύεται η μέθοδος με την οποία γίνεται η μελέτη των χαρακτηριστικών του agray και τέλος η βελτιστοποίησή του όσον αφορά την ακτινοβολούμενη ισχύ και το ισοδύναμο εύρος δέσμης.

Στο κεφάλαιο 4 γίνεται ανάλυση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων, παρατίθενται τα συμπεράσματα και προτείνονται ενδεχόμενες μελλοντικές προεκτάσεις της εργασίας.

1.1. Χοανοκεραίες

Η χοανοκεραία είναι ένας τύπος κεραίας που χρησιμοποιείται ευρέως σε μικροκυματικές εφαρμογές – συνήθως από 300 MHz και πάνω. Συναντάται ως στοιχείο τροφοδοσίας σε παραβολικές κεραίες και σε στοιχειοκεραίες με φασική διάταξη (phased arrays). Χρησιμοποιείται επίσης σε εργαστηριακές εφαρμογές ως πρωτότυπη κεραία για την βαθμονόμηση άλλων κεραίων.

Κατασκευαστικά, πρόκειται για ένα κυματοδηγό ο οποίος αντί να είναι ορθογώνιος έχει το σχήμα μιας χοάνης. Στην Εικόνα 1-1 φαίνεται το βασικό αυτό σχήμα.



Εικόνα 1-1: Πυραμιδοειδής χοανοκεραία, [1]

Βασικό πλεονέκτημα των κεραίων χοάνης είναι το μεγάλο εύρος ζώνης τους (bandwidth). Το χρήσιμο εύρος ζώνης μιας τέτοιας κεραίας μπορεί να είναι της τάξης έως και 20:1. Αυτό σημαίνει για παράδειγμα ότι μπορεί να λειτουργεί σε συχνότητες από 1GHz έως 20GHz κ.ο.κ. Παρουσιάζει επίσης χαμηλό λόγο στασίμων κυμάτων σε όλο το εύρος λειτουργίας κάτι που σημαίνει καλύτερη προσαρμογή. Το κέρδος των κεραίων χοάνης μπορεί να φτάσει και τα 25dBi, με τυπικές τιμές να κυμαίνονται από 10 έως 20 dBi. Παρουσιάζουν επίσης μικρές απώλειες και κατά συνέπεια η κατευθυντικότητα είναι περίπου ίση με το κέρδος, [7],[8].

Μερικά είδη χοανοκεραίων είναι τα παρακάτω:

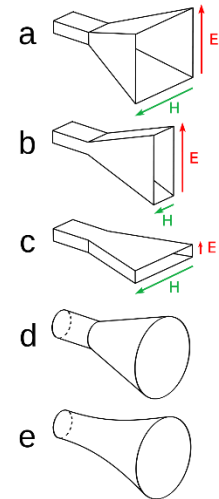
Πυραμιδοειδής χοάνη (Εικόνα 1-2, α): το σχήμα της μοιάζει με πυραμίδα και είναι ο πιο διαδεδομένος τύπος. Η ακτινοβολία της έχει γραμμική πόλωση.

Χοάνη E-επιπέδου (b): Το άνοιγμά της μεγαλώνει κατά τη διεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου δηλαδή κατακόρυφα, εάν θεωρηθεί ότι η τροφοδοσία της πραγματοποιείται από ένα ορθογώνιο κυματοδηγό με τη μεγάλη διάστασή του να ορίζει το οριζόντιο επίπεδο.

Χοάνη H-επιπέδου (c): Το άνοιγμά της μεγαλώνει βαθμιαία κατά τη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου. Μαζί με τη χοάνη E-επιπέδου συναντώνται σε συστοιχίες ραντάρ.

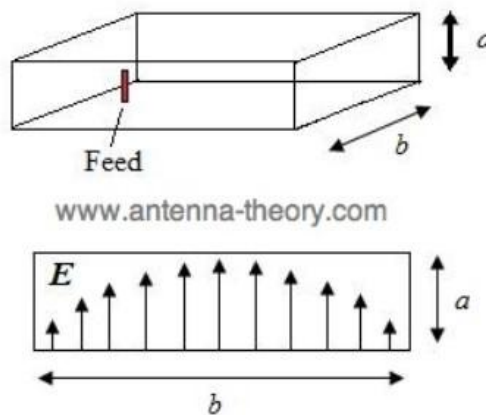
Κωνική χοάνη (d): έχει κυκλική διατομή και τροφοδοτείται από κυλινδρικό κυματοδηγό.

Εκθετική – βαθμωτή χοάνη (e): Οι πλευρές της αυξάνουν ως εκθετική συνάρτηση του μήκους. Μπορεί να έχει πυραμιδοειδή ή κωνική μορφή. Παρουσιάζουν σταθερή αντίσταση εισόδου σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων και χρησιμοποιούνται σε τηλεπικοινωνιακούς δορυφόρους και ραδιοτηλεσκόπια.



Εικόνα 1-2: Τύποι κεραιών χοάνης

Στις περισσότερες περιπτώσεις οι χοανοκεραίες τροφοδοτούνται από ορθογώνιο κυματοδηγό ο οποίος με τη σειρά του τροφοδοτείται από ένα μικρό δίπολο, όπως φαίνεται στην εικόνα 1-3.



Εικόνα 1-3: Ορθογώνιος κυματοδηγός με δίπολο τροφοδοσίας, [2]

Στην ίδια εικόνα φαίνεται και η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου μέσα στον κυματοδηγό.

Στην παρούσα εργασία είχαμε διαθέσιμες τρεις πυραμιδοειδείς κεραιές χοάνης διαφορετικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών. Η πρώτη είναι κατασκευασμένη από την εταιρεία Amplifier Research και οι άλλες δύο (όμοιες) από την Vector Technologies. Η έρευνα βασίστηκε σε αυτούς τους δύο τύπους κεραιών.

1.2. Στοιχειοκεραίες

Σε πολλές περιπτώσεις εφαρμογών, όπως για παράδειγμα σε τηλεπικοινωνιακές ζεύξεις, είναι απαραίτητη η χρήση κεραιών μεγάλου κέρδους. Αυτό επιτυγχάνεται κατά βάση με την αύξηση του ηλεκτρικού μεγέθους της κεραίας, [3]. Ένας τρόπος για να γίνει αυτό είναι να αυξηθούν οι διαστάσεις της κεραίας κάτι που δεν είναι πάντα εφικτό για λόγους κόστους, δυσκολίας στην κατασκευή και την τοποθέτηση κλπ. Ένας διαφορετικός τρόπος είναι να χρησιμοποιηθούν παραπάνω από ένα στοιχεία ακτινοβολίας σε μία διάταξη που ονομάζεται στοιχειοκεραία (array). Τα στοιχεία μπορεί να είναι όμοια ή και διαφορετικά μεταξύ τους, είναι όμως προτιμότερο να είναι όμοια γιατί απλοποιείται έτσι η σχεδίαση και η ανάλυση της στοιχειοκεραίας.

Το συνολικό ακτινοβολούμενο πεδίο της στοιχειοκεραίας προκύπτει από το διανυσματικό άθροισμα των πεδίων των επιμέρους στοιχείων, προϋποθέτοντας ότι το ρεύμα σε κάθε στοιχείο είναι το ίδιο με το ρεύμα που θα εμφανιζόταν στο στοιχείο αν αυτό ήταν απομονωμένο. Αυτό σημαίνει ότι δεν λαμβάνεται υπόψιν το φαινόμενο της σύζευξης μεταξύ των στοιχείων, η επίδραση της οποίας εξαρτάται από την μεταξύ τους απόσταση. Οι παράμετροι που ελέγχουν την τελική μορφή του πεδίου μιας στοιχειοκεραίας είναι:

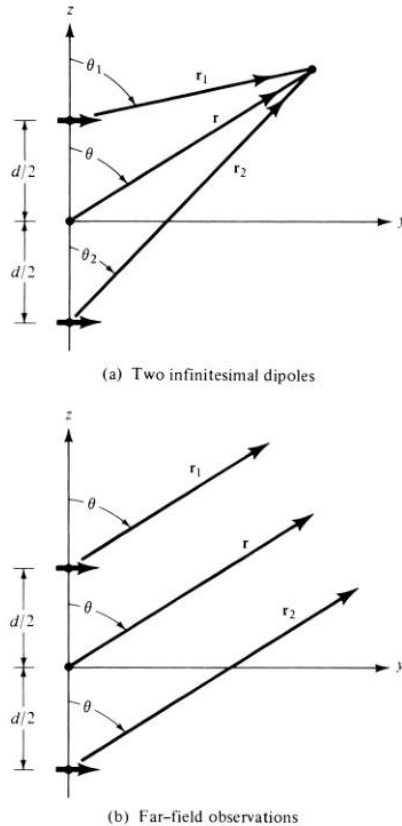
- Η τοπολογία της στοιχειοκεραίας (γραμμική, κυκλική, σφαιρική κλπ.)
- Η απόσταση μεταξύ των επιμέρους στοιχείων
- Το πλάτος τροφοδοσίας κάθε στοιχείου
- Η φάση τροφοδοσίας κάθε στοιχείου
- Το διάγραμμα ακτινοβολίας του κάθε στοιχείου

1.2.1. Γραμμική στοιχειοκεραία δύο στοιχείων

Αρχικά γίνεται μελέτη για στοιχειοκεραία που αποτελείται από δύο οριζόντια δίπολα τοποθετημένα κατά μήκος του άξονα z (εικόνα 1-4). Το συνολικό πεδίο είναι το άθροισμα των δύο πεδίων, θεωρώντας ότι δεν υπάρχει σύζευξη μεταξύ τους και δίνεται από τη σχέση:

$$E_t = E_1 + E_2 = \hat{a}_\theta j\eta \frac{kI_0 l}{4\pi} \left\{ \frac{e^{-j[kr_1 - (\beta/2)]}}{r_1} \cos\theta_1 + \frac{e^{-j[kr_2 + (\beta/2)]}}{r_2} \cos\theta_2 \right\} \quad (1.1)$$

όπου β είναι η διαφορά φάσης τροφοδοσίας μεταξύ των στοιχείων.



Εικόνα 1-4: Στοιχειοκεραία δύο στοιχείων τοποθετημένων κατά μήκος του άξονα z, [3].

Η εξίσωση (1.1) γίνεται:

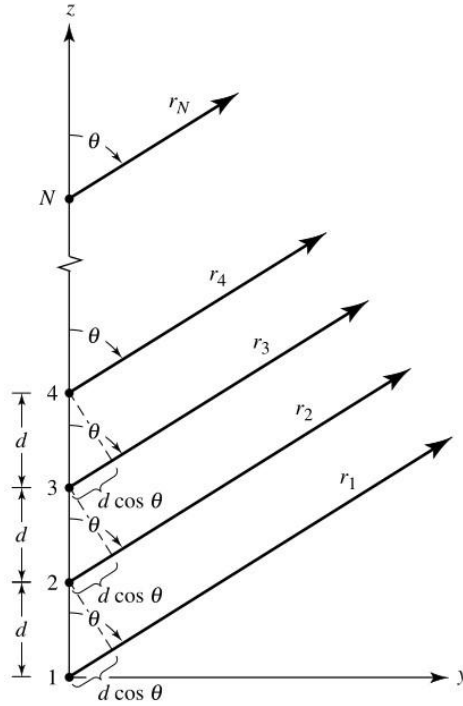
$$E_t = \hat{a}_\theta j\eta \frac{kI_0 l e^{-jkr}}{4\pi r} \cos\theta \left\{ 2 \cos \left[\frac{1}{2} (kd \cos\theta + \beta) \right] \right\} \quad (1.2)$$

Είναι φανερό από την (1.2) ότι το ολικό πεδίο της στοιχειοκεραίας είναι ίσο με το πεδίο του ενός στοιχείου πολλαπλασιασμένο με ένα παράγοντα ο οποίος είναι γνωστός ως «παράγοντας στοιχειοκεραίας» (array factor). Έτσι μπορούμε για γραμμική στοιχειοκεραία δύο στοιχείων να ορίσουμε το array factor ως, [3]:

$$AF = 2 \cos \left[\frac{1}{2} (kd \cos\theta + \beta) \right] \quad (1.3)$$

1.2.2. Γραμμική στοιχειοκεραία N στοιχείων

Για την γενίκευση των παραπάνω θεωρούμε γραμμική στοιχειοκεραία αποτελούμενη από N στοιχεία (Εικόνα 1-5).



Εικόνα 1-5: Γραμμική στοιχειοκεραία N στοιχείων, [3]

Στην περίπτωση αυτή το array factor είναι:

$$AF = 1 + e^{j(kd \cos\theta + \beta)} + e^{j2(kd \cos\theta + \beta)} + \dots + e^{j(N-1)(kd \cos\theta + \beta)}$$

$$AF = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)(kd \cos\theta + \beta)} \quad (1.4)$$

ή

$$AF = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)\psi} \quad (1.5)$$

όπου $\psi = kd \cos\theta + \beta$.

Πολλαπλασιάζοντας και τα δύο μέλη της (1.5) με $e^{j\psi}$ έχουμε:

$$(AF)e^{j\psi} = e^{j\psi} + e^{j2\psi} + e^{j3\psi} + \dots + e^{j(N-1)\psi} + e^{jN\psi} \quad (1.6)$$

Αφαιρώντας την (1.5) από την (1.6) έχουμε:

$$AF(e^{j\psi} - 1) = (-1 + e^{jN\psi}) \quad (1.7)$$

$$AF = \left[\frac{e^{jN\psi} - 1}{e^{j\psi} - 1} \right] = e^{j[(N-1)/2]\psi} \left[\frac{e^{j(N/2)\psi} - e^{-j(N/2)\psi}}{e^{j(1/2)\psi} - e^{-j(1/2)\psi}} \right] = e^{j[(N-1)/2]\psi} \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\psi\right)} \right] \quad (1.8)$$

Τέλος, αν το σημείο αναφοράς είναι το φυσικό κέντρο της στοιχειοκεραίας τότε το array factor γίνεται:

$$AF = \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\psi\right)} \right] \quad (1.9)$$

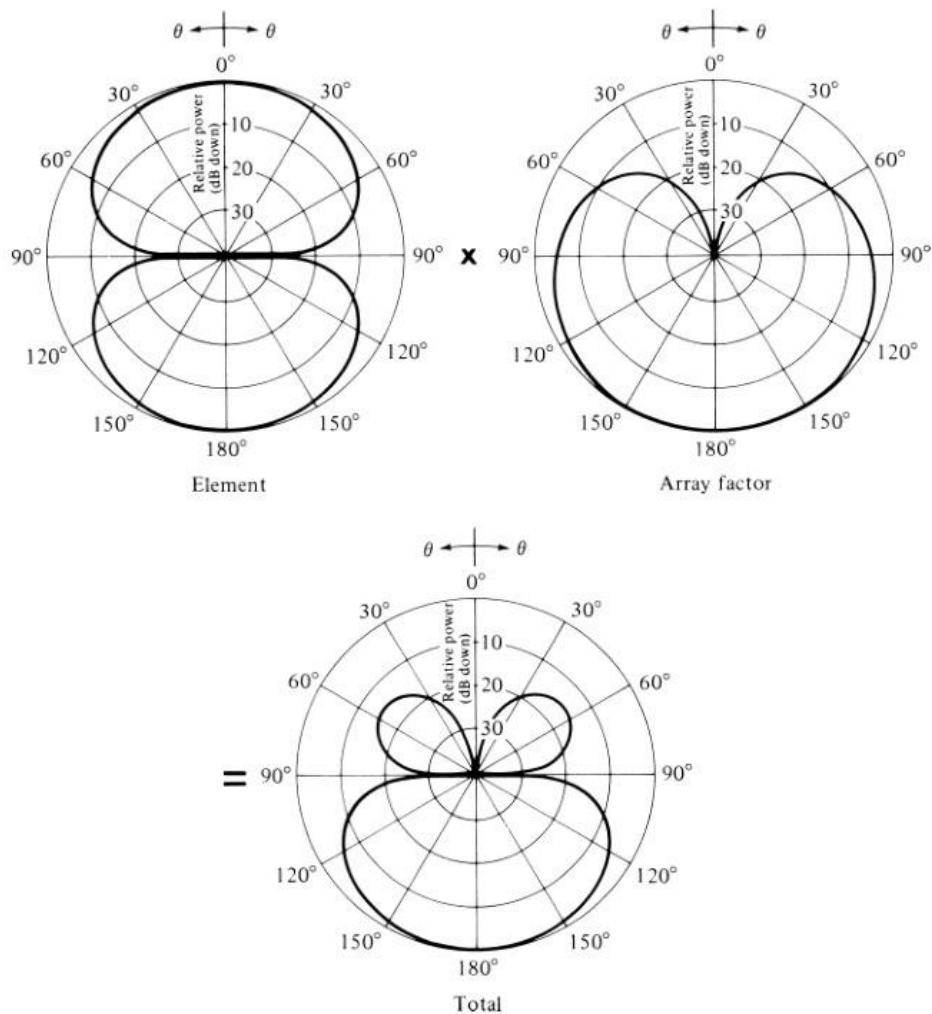
όπου $\psi = kd \cos\theta + \beta$.

Επομένως, εάν έχουμε μία στοιχειοκεραία αποτελούμενη από N όμοια στοιχεία σε απόσταση d και διαφορά φάσης τροφοδοσίας β , μπορούμε να βρούμε το συνολικό ακτινοβολούμενο πεδίο πολλαπλασιάζοντας το πεδίο του ενός στοιχείου με το array factor. Στην εικόνα 1-6 βλέπουμε μία γραφική αναπαράσταση του array factor και του αποτελέσματος όταν αυτό πολλαπλασιάζεται με το διάγραμμα πεδίου ενός στοιχείου.

Έχει δειχθεί επίσης, [4], ότι το συνολικό ηλεκτρικό πεδίο στοιχειοκεραίας δίνεται από τη σχέση:

$$U(\theta, \varphi) = \left| \sum_{m=1}^M c_m \exp(jkR_m \cos\psi_m) L_m(\theta, \varphi) \right| \quad (1.10)$$

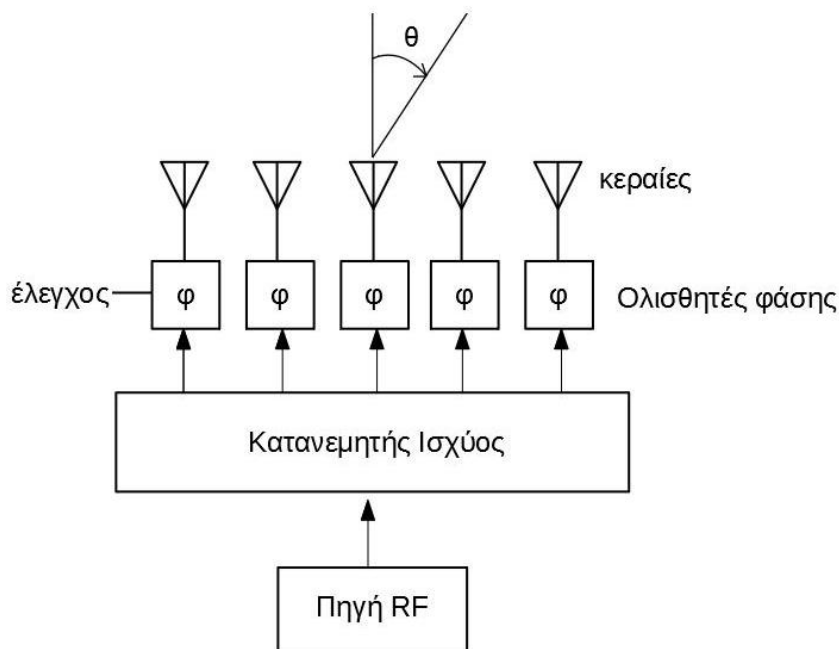
όπου L_m είναι ένας παράγοντας που αντιστοιχεί στο ηλεκτρικό πεδίο του κάθε στοιχείου, c_m είναι οι μιγαδικοί ρευματικού συντελεστές που αντιστοιχούν στην τροφοδότηση κάθε στοιχείου (φάση τροφοδοσίας) και R_m είναι η απόσταση μεταξύ των στοιχείων.



Εικόνα 1-6: α) Διάγραμμα ακτινοβολίας στοιχείου, β) Array factor, γ) Τελικό διάγραμμα ακτινοβολίας στοιχειοκεραίας, [3]

1.2.3. Φασική στοιχειοκεραία (phased array)

Η φασική στοιχειοκεραία ή phased array είναι μία διάταξη η οποία παρέχει τη δυνατότητα ηλεκτρονικού ελέγχου της κατεύθυνσης της δέσμης ακτινοβολίας, [9]-[15]. Σε ένα τέτοιο σύστημα η ισχύς από τον πομπό τροφοδοτείται στις κεραίες διαμέσου ολισθητών φάσης (phase shifters). Ο ολισθητής είναι μία διάταξη που επιτρέπει μέσω ηλεκτρονικού ελέγχου την αλλαγή της φάσης του διερχόμενου σήματος. Κάθε κεραία τροφοδοτείται μέσω μιας τέτοιας διάταξης. Έτσι, με τη χρήση μιας υπολογιστικής μονάδας που θα ελέγχει τους ολισθητές μπορεί να επιτευχθεί η «στροφή» (electronic steering) του διαγράμματος ακτινοβολίας του array, χωρίς να χρειάζεται η φυσική μετατόπιση των κεραίων. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το μπλοκ διάγραμμα ενός phased array.



Εικόνα 1-7:Μπλοκ διάγραμμα ενός phased array με πέντε στοιχεία

Οι δύο βασικές κατηγορίες των phased arrays είναι τα **δυναμικά** (dynamic phased arrays) και τα **στατικά** (fixed phased arrays).

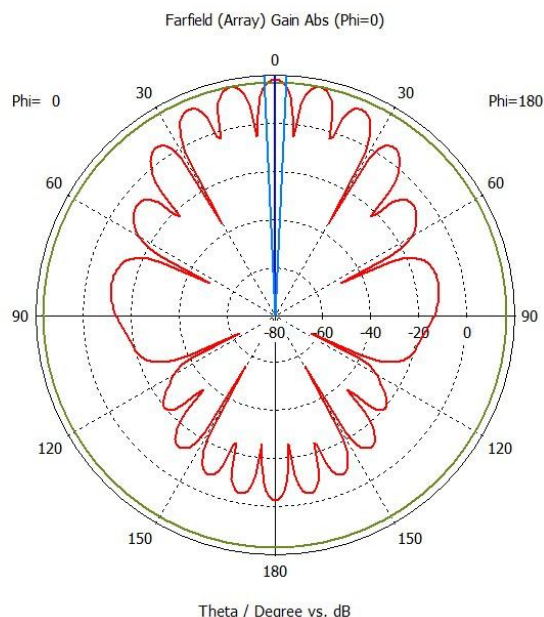
Στο δυναμικό phased array το κάθε στοιχείο τροφοδοτείται με ξεχωριστό ολισθητή φάσης. Ο έλεγχος γίνεται σε όλους τους ολισθητές με σκοπό να παραχθεί το επιθυμητό διάγραμμα ακτινοβολίας. Ο έλεγχος και άρα η στροφή της δέσμης γίνεται με ηλεκτρονικό τρόπο και δεν απαιτείται η μετακίνηση των κεραιών, κάτι που αποτελεί πολύ σημαντικό πλεονέκτημα. Ένα ακόμα πλεονέκτημα εμφανίζεται σε ραντάρ στρατιωτικών εφαρμογών όπου η τυχαιότητα της κατεύθυνσης της δέσμης δυσχεραίνει την εφαρμογή αντίμετρων από τον εχθρό.

Τα στατικά phased arrays κατασκευάζονται με ολισθητές φάσης που δεν επιδέχονται ηλεκτρονικό έλεγχο, επομένως οι φάσεις τροφοδοσίας καθορίζονται κατά τον σχεδιασμό και παραμένουν σταθερές. Ως εκ τούτου σταθερό παραμένει και το διάγραμμα ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας. Οι περισσότερες κεραιές ραδιοφωνίας FM και τηλεόρασης χρησιμοποιούν στατικά phased arrays από δίπολα.

Η δυνατότητα κατασκευής κεραιών με δυνατότητα ελέγχου της κατεύθυνσης της δέσμης ακτινοβολίας (beam steering) ανοίγει το δρόμο για την ανάπτυξη έξυπνων κεραιών (smart antennas) οι οποίες μπορούν να προσαρμόζουν με δυναμικό τρόπο τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας στις εκάστοτε συνθήκες εκπομπής και λήψης, [5],[6].

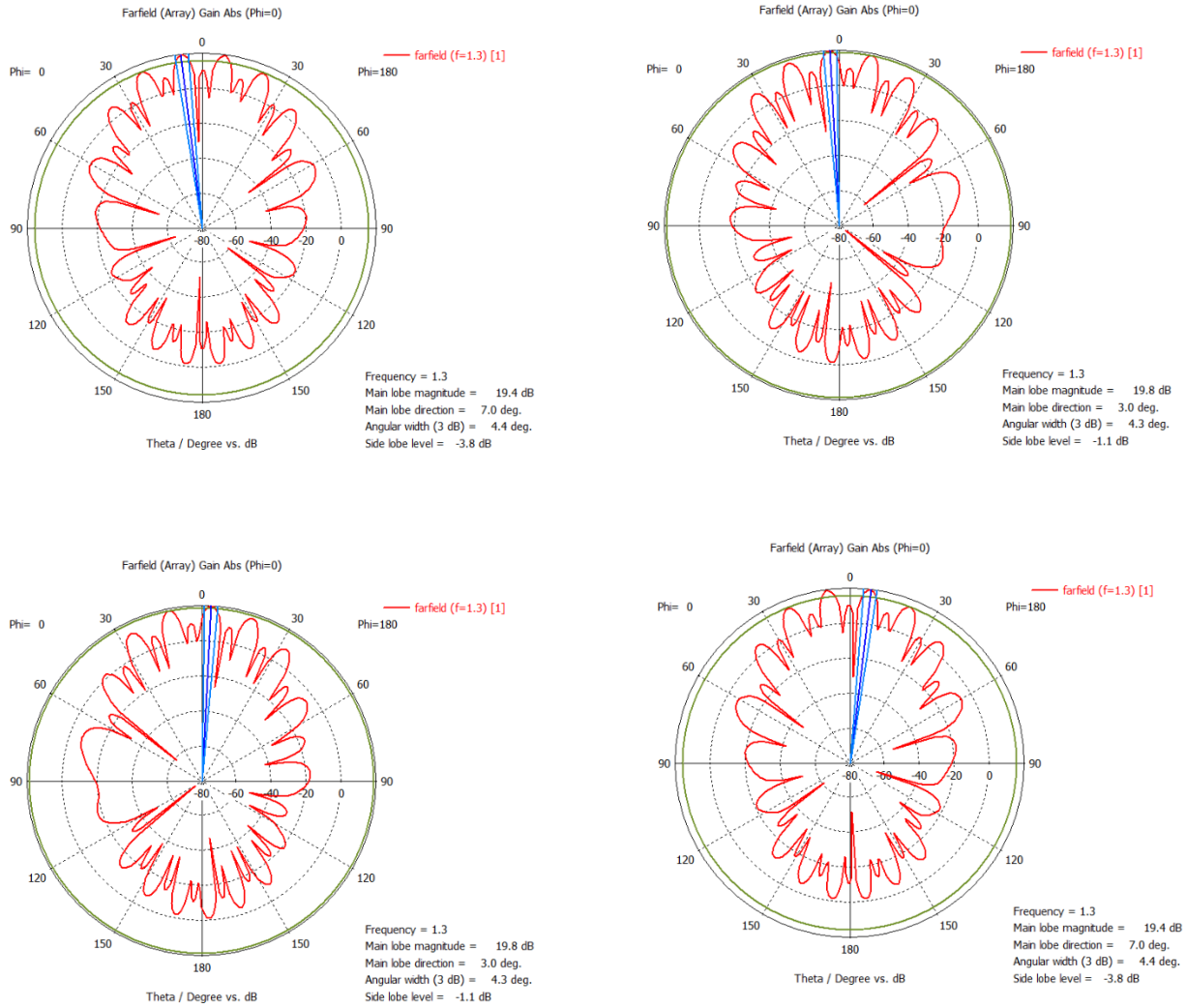
1.2.4. Pattern oscillation

Μέχρι στιγμής έχουμε δει τον τρόπο με τον οποίο γίνεται ο ηλεκτρονικός έλεγχος της δέσμης ενός array. Κατά βάση, σε ένα phased array μας ενδιαφέρει η κατεύθυνση του κύριου λοβού ακτινοβολίας αφού εκεί βρίσκεται η περισσότερη ισχύς. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις όπου το διάγραμμα ακτινοβολίας παρουσιάζει εκτός από τον κύριο λοβό και αρκετά ισχυρούς πλευρικούς λοβούς (εικόνα 1-8).



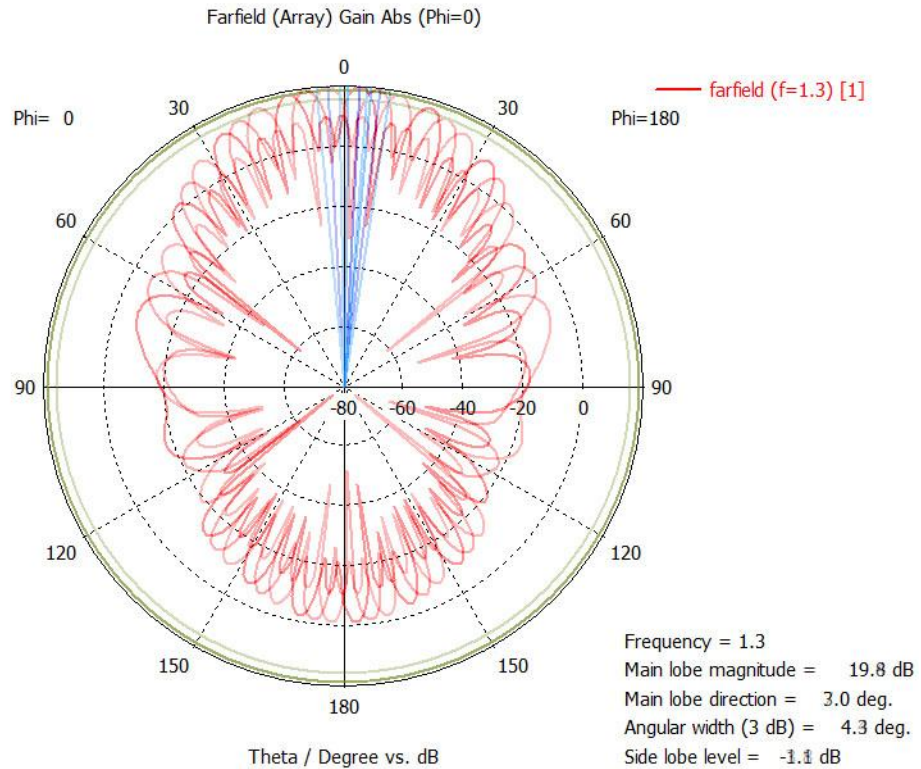
Εικόνα 1-8: Διάγραμμα ακτινοβολίας array με ισχυρούς πλευρικούς λοβούς

Σε αυτή την περίπτωση είναι δυνατό να εκμεταλλευτούμε την ισχύ των πλευρικών λοβών για να καλύψουμε ένα μεγαλύτερο τομέα του χώρου. Η τεχνική του pattern oscillation αναφέρεται στην παραγωγή ενός ταλαντούμενου διαγράμματος με χρήση κατάλληλου εύρους φάσεων τροφοδοσίας, έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένα ισοδύναμο εύρος δέσμης το οποίο θα είναι μεγαλύτερο από το εύρος του κύριου λοβού. Στην παρακάτω εικόνα 1-9 φαίνονται διάφορα στιγμιότυπα του διαγράμματος ακτινοβολίας καθώς μεταβάλλεται η φάση τροφοδοσίας. Στο συγκεκριμένο σχήμα απεικονίζονται διαγράμματα ακτινοβολίας για μεταβολή της φάσης τροφοδοσίας από -170° έως 170° , με βήμα 85° . Παρατηρούμε αφενός ότι ο κύριος λοβός έχει πολύ στενό εύρος και μικρή απόκλιση λόγω διαφοράς φάσης. Αφετέρου διακρίνουμε την ύπαρξη πλευρικών λοβών μεγάλης ισχύος. Το διάγραμμα αυτό είναι ιδανικό για την εφαρμογή του pattern oscillation.



Εικόνα 1-9: Στιγμιότυπα του pattern oscillation

Στην εικόνα 1-10 φαίνεται η επικάλυψη των παραπάνω σχημάτων. Με αυτή την απεικόνιση διακρίνεται ευκολότερα ο τρόπος με τον οποίο οι πλευρικοί λοβοί καθώς κινούνται καλύπτουν ένα τμήμα του χώρου το οποίο ονομάζουμε εν τέλει «ισοδύναμο εύρος δέσμης».



Εικόνα 1-10: pattern oscillation

Βλέπουμε ότι καθώς μεταβάλλεται το διάγραμμα ακτινοβολίας οι πλευρικοί λοβοί έρχονται να καλύψουν τα σημεία στα οποία προηγουμένως υπήρχαν μηδενισμοί. Έτσι με αυτό τον τρόπο δημιουργείται ένα ισοδύναμο εύρος δέσμης πολύ μεγαλύτερο από το εύρος του κύριου λοβού. Στο προτεινόμενο σχήμα ταλάντωσης των διαγραμμάτων ακτινοβολίας, η κεραία θα καλύπτει το ισοδύναμο εύρος δέσμης σε διαδοχικές χρονικές στιγμές. Εν τέλει, σε κάθε κύκλο, θα υπάρχει τουλάχιστον μια χρονοθυρίδα κατά την οποία η ισχύς που θα ακτινοβολείται προς κάθε γωνία του ισοδύναμου εύρους δέσμης θα είναι μεγαλύτερη ή ίση της ημίσειας ισχύος εκάστου στοιχείου.

Μία χρήση για το pattern oscillation είναι η εφαρμογή του σε τηλεπικοινωνιακά κανάλια με σκοπό την εξάλειψη του φαινομένου των διαλείψεων (fading) [16]-[20]. Για παράδειγμα ένας σταθμός βάσης κινητής τηλεφωνίας μπορεί να χρησιμοποιεί pattern oscillation για να εξασφαλίσει την κάλυψη παρά την τυχαιότητα της θέσης του κινητού χρήστη και των εμποδίων που εμφανίζονται στο χώρο.

Η τεχνική pattern oscillation θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια της εργασίας για την αντιμετώπιση του αρχικού προβλήματος που έχει τεθεί, δηλαδή την σχεδίαση μίας στοιχειοκεραίας αποτελούμενης από κεραίες χοάνης, με σκοπό την αύξηση του ποσοστού επιτυχίας κινούμενου στόχου. Όπως θα δούμε παρακάτω αυτό θα επιτευχθεί με τη δημιουργία ενός ισοδύναμου εύρους δέσμης μέσα στο οποίο η ισχύς της ακτινοβολίας θα διατηρείται σε επίπεδο τουλάχιστον ίσο με αυτό της αρχικής κεραίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Προτεινόμενη Μέθοδος

Η μέθοδος που προτείνεται βασίζεται στην ιδέα του pattern oscillation δηλαδή της ταλάντωσης του διαγράμματος ακτινοβολίας με σκοπό τη δημιουργία ενός ισοδύναμου εύρους δέσμης μεγαλύτερου από το εύρος δέσμης του κύριου λοβού. Εδώ, ως ισοδύναμο εύρος δέσμης ορίζεται το εύρος γωνιών μέσα στο οποίο το ταλαντούμενο διάγραμμα ακτινοβολίας παρουσιάζει έστω μια τιμή κέρδους μεγαλύτερη ή ίση από το κέρδος ημίσειας ισχύος του διαγράμματος ακτινοβολίας του κάθε στοιχείου της στοιχειοκεραίας. Στόχος είναι η ανάπτυξη μιας μεθόδου για την βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών εκείνων που επηρεάζουν τη λειτουργία του array όσον αφορά το pattern oscillation. Οι παράγοντες που καθορίζουν τη μορφή του διαγράμματος ακτινοβολίας του array είναι:

1. Το διάγραμμα ακτινοβολίας έκαστης κεραίας
2. Η απόσταση μεταξύ των κεραιών
3. Το είδος των κεραιών (αν είναι όμοιες ή διαφορετικές)
4. Το πλήθος των κεραιών
5. Η διαφορά φάσης τροφοδοσίας των κεραιών

Η μελέτη γίνεται για δύο κύριες υποπεριπτώσεις:

- Για array αποτελούμενο από N τον αριθμό όμοιες κεραίες
- Για array αποτελούμενο από 2 ή 3 διαφορετικές κεραίες

Σε κάθε περίπτωση ζητούμενο είναι να ευρεθεί η βέλτιστη απόσταση, το βέλτιστο πλήθος και η βέλτιστη διαφορά φάσης των κεραιών. Κριτήριο για την βελτιστοποίηση είναι να παράγεται πάντα το μεγαλύτερο δυνατό ισοδύναμο εύρος δέσμης. Ειδικά για την περίπτωση των διαφορετικών κεραιών ενδιαφέρον παρουσιάζει και η διερεύνηση για το αν και κατά πόσο η διάταξη των κεραιών στο χώρο επιδρά στο αποτέλεσμα.

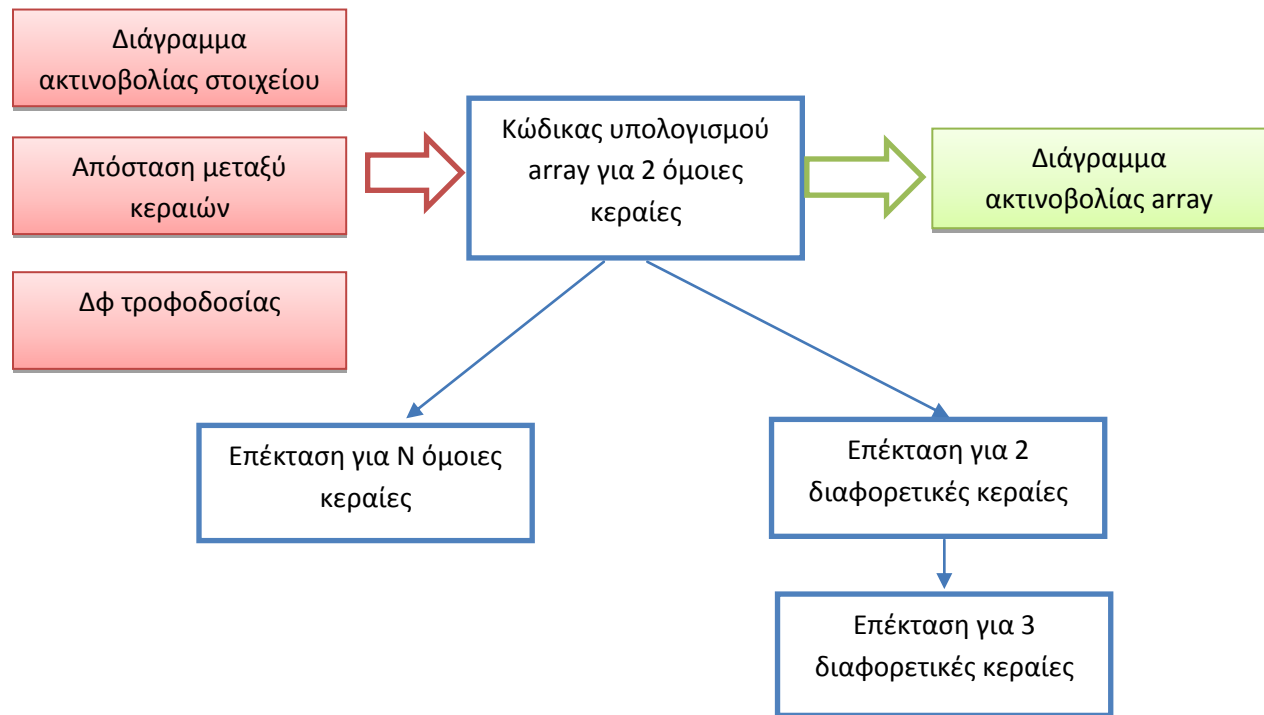
2.1. Προσομοίωση κεραιών – διαγράμματα ακτινοβολίας

Βασική προϋπόθεση για την πραγματοποίηση της μελέτης είναι να παραχθούν τα διαγράμματα ακτινοβολίας των δύο διαθέσιμων τύπων κεραιών AR και VT. Έγινε επιτόπου μέτρηση των φυσικών διαστάσεων των κεραιών ώστε βάσει αυτών να κατασκευαστούν τα τρισδιάστατα μοντέλα στο CST. Έχοντας τα μοντέλα των κεραιών είναι εύκολο να γίνει η ηλεκτρομαγνητική προσομοίωση τους και να παραχθούν τα διαγράμματα ακτινοβολίας μακρινού πεδίου για κάθε μία ξεχωριστά.

2.2. Ανάπτυξη κώδικα MATLAB

2.2.1. Υπολογισμός array με δοθείσες παραμέτρους

Ο βασικός πυρήνας της μεθόδου είναι το πρώτο κομμάτι κώδικα το οποίο θα πρέπει να δέχεται ως είσοδο τα διαγράμματα ακτινοβολίας της κάθε κεραίας, όπως υπολογίζονται από τον ηλεκτρομαγνητικό επιλυτή της επιλογής μας, και να παράγει το διάγραμμα ακτινοβολίας του array με δοθείσες παραμέτρους (πλήθος κεραιών, απόσταση, φάση τροφοδοσίας, καθώς και αν πρόκειται για όμοιες ή για διαφορετικές μεταξύ τους κεραίες). Στην αρχική αυτή φάση ο κώδικας δέχεται τις παραμέτρους χειροκίνητα και δεν υπάρχει η δυνατότητα αυτοματοποιημένης εύρεσης των τιμών για βελτιστοποίηση του ισοδύναμου εύρους δέσμης. Αρχικά ο κώδικας υπολογίζει το array για δύο όμοιες κεραίες και κατόπιν επεκτείνεται για όλες τις πιθανές περιπτώσεις. Η πορεία αυτή αποτυπώνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



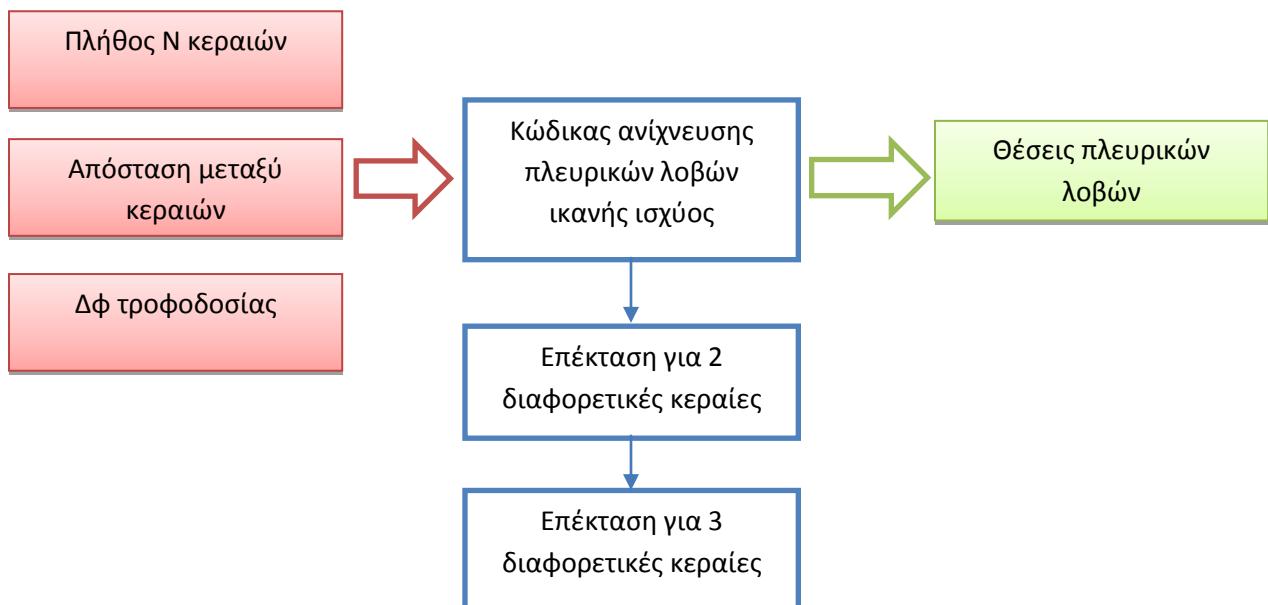
Εικόνα 2-1: Κώδικας υπολογισμού διαγράμματος ακτινοβολίας array

Είναι επίσης δυνατό να γίνει επαλήθευση της ορθής λειτουργίας του κώδικα συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με αυτά του CST. Η επαλήθευση γίνεται σε δύο βήματα:

1. Σύγκριση αποτελεσμάτων κώδικα με το εργαλείο farfield array του CST. Το farfield array μπορεί να υπολογίσει το διάγραμμα μακρινού πεδίου ενός array δεδομένου ότι υπάρχει το διάγραμμα ακτινοβολίας του ενός στοιχείου.
2. Σύγκριση με τα αποτελέσματα πλήρους ηλεκτρομαγνητικής προσομοίωσης με το CST. Σε αυτή την περίπτωση συνυπολογίζεται και η επίδραση της σύζευξης (coupling) μεταξύ των στοιχείων του array. Είναι σημαντικό να διαπιστωθεί κατά πόσο η επίδραση αυτή επηρεάζει τα αποτελέσματα έτσι ώστε να κρίνουμε αν θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν.

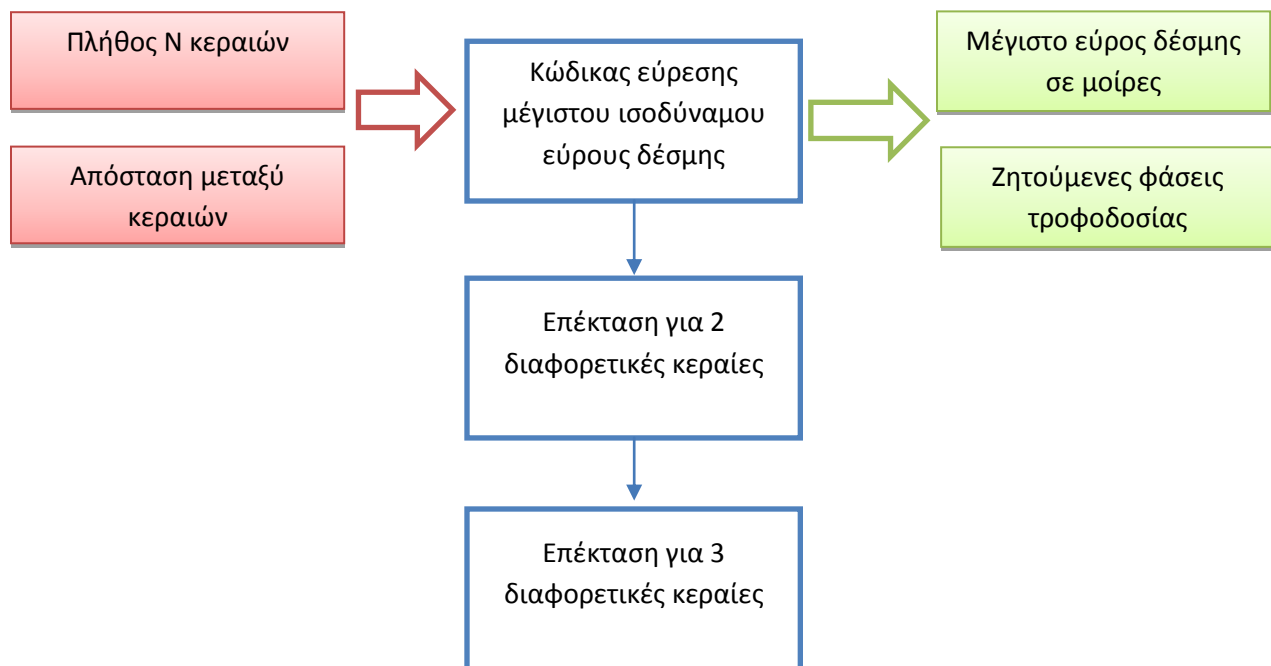
2.2.2. Βελτιστοποίηση του array

Έχοντας το διάγραμμα ακτινοβολίας του array το επόμενο βήμα είναι να γίνει η βελτιστοποίησή του ως προς το ισοδύναμο εύρος δέσμης. Για να γίνει αυτό θα πρέπει πρώτα να υπάρχει τρόπος ανίχνευσης των πλευρικών λοβών που έχουν ισχύ ίση η μεγαλύτερη με την ημίσεια ισχύ της αρχικής κεραίας, αρχικά για N όμοιες κεραίες και έπειτα για 2 και 3 διαφορετικές κεραίες. Ο κώδικας αυτός θα πρέπει να παίρνει ως είσοδο το διάγραμμα ακτινοβολίας, την απόσταση των κεραίων και τη διαφορά φάσης τροφοδοσίας τους. Σε κάθε εκτέλεση του κώδικα δίνουμε μία τιμή για τη διαφορά φάσης και παίρνουμε ως αποτέλεσμα τις θέσεις των πλευρικών λοβών που ικανοποιούν το κριτήριο ισχύος. Πρακτικά αυτό που γίνεται είναι αναγνώριση των τοπικών μεγίστων του διαγράμματος (που είναι οι πλευρικοί λοβοί) και μετά σύγκριση των τιμών των μεγίστων με το κριτήριο ισχύος που έχουμε θέσει. Παρακάτω φαίνεται η πορεία ανάπτυξης του κώδικα.



Εικόνα 2-2: Κώδικας ανίχνευσης πλευρικών λοβών

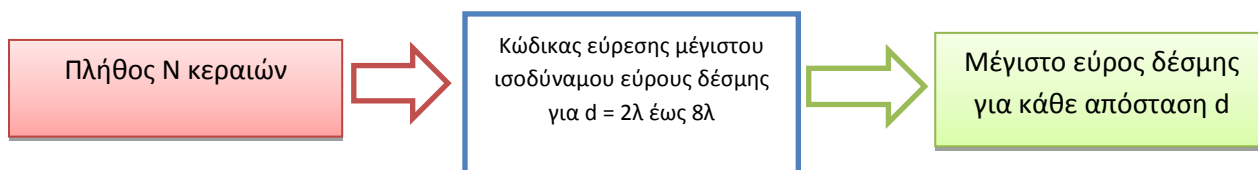
Έχοντας ως δομική μονάδα τον προηγούμενο κώδικα το επόμενο βήμα είναι να βρεθεί για ποιές φάσεις τροφοδοσίας καθώς στρέφεται το διάγραμμα ακτινοβολίας, οι πλευρικοί λοβοί καλύπτουν τον μεγαλύτερο δυνατό τομέα. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι δεν αρκεί να βρεθούν οι δύο τιμές φάσης για τις οποίες εμφανίζονται οι δύο ακραίοι πλευρικοί λοβοί διότι αυτό δεν μας εξασφαλίζει ότι όλος ο τομέας σάρωσης έχει καλυφθεί. Άρα θα πρέπει εξ' αρχής το κριτήριο να είναι η κάλυψη του τομέα με λοβούς ικανής ισχύος. Πιο αναλυτικά θα πρέπει να γίνεται πρώτα αναγνώριση του μέγιστου ισοδύναμου εύρους δέσμης (δηλαδή των θέσεων των ακραίων πλευρικών λοβών) και έπειτα εύρεση του εύρους των $\Delta\phi$ εκείνων για το οποίο οι πλευρικοί λοβοί καλύπτουν όλο το ισοδύναμο εύρος δέσμης. Η διαφορά με τον προηγούμενο κώδικα είναι ότι τώρα δεν χρειάζεται να δώσουμε ως είσοδο τη διαφορά φάσης διότι ο κώδικας τρέχει αυτόματα για όλα τα $\Delta\phi$ από 0 έως 359 μοίρες και βρίσκει δύο τιμές $\Delta\phi$ για τις οποίες παρουσιάζεται το μέγιστο εύρος δέσμης. Αν για παράδειγμα το αποτέλεσμα είναι 60° μέγιστο εύρος δέσμης και $\Delta\phi = 30^\circ$ και 140° τότε αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να τροφοδοτήσουμε τις κεραίες με διαφορές φάσης $30^\circ, 31^\circ, 32^\circ, \dots, 139^\circ, 140^\circ$ ώστε συνολικά να καλυφθεί το μέγιστο εύρος των 60° . Παρακάτω φαίνεται η διαδικασία αυτή.



Εικόνα 2-3: Εύρεση ισοδύναμου εύρους δέσμης oscillation

2.2.3. Επίδραση του πλήθους και της απόστασης των κεραιών στο ισοδύναμο εύρος δέσμης

Μέχρι στιγμής δεν έχει γίνει βελτιστοποίηση του array όσον αφορά το πλήθος N των κεραιών και της απόστασης d μεταξύ τους. Το επόμενο βήμα αφορά ακριβώς αυτή τη διερεύνηση. Είναι ένα εξαιρετικά σημαντικό σημείο διότι μαζί με την εύρεση των κατάλληλων φάσεων τροφοδοσίας αποτελεί ουσιαστικά οδηγία για μία ενδεχόμενη πρακτική εφαρμογή. Η διερεύνηση έχει νόημα να γίνει για ρεαλιστικές τιμές των N και d , για παράδειγμα $N = 2$ έως 16 κεραιές και $d = 2\lambda$ έως 8λ . Ο κώδικας μπορεί να έχει την παρακάτω δομή και να επαναλαμβάνεται για τις επιθυμητές τιμές N .



Εικόνα 2-4: Διερεύνηση επίδρασης του πλήθους N και της απόστασης d στο μέγιστο εύρος δέσμης

2.2.4. Σύγκριση με τεχνική σάρωσης του κύριου λοβού

Τέλος, απομένει να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα του pattern oscillation με την τεχνική σάρωσης του κύριου λοβού η οποία δίνει μικρότερο ισοδύναμο εύρος δέσμης αλλά μεγαλύτερη ισχύ ακτινοβολίας σε αυτό το εύρος. Θα επιχειρηθεί να δοθεί μία ποσοτική σύγκριση μεταξύ των δύο τεχνικών για διάφορες τοπολογίες array. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε να γίνει η σύγκριση των αποτελεσμάτων για arrays 2, 4 και 8 κεραιών και για αποστάσεις $d = 2\lambda$ και 3λ . Οι τιμές που παρουσιάζουν ενδιαφέρον είναι το μέγιστο ισοδύναμο εύρος δέσμης και η ελάχιστη τιμή της ισχύος.

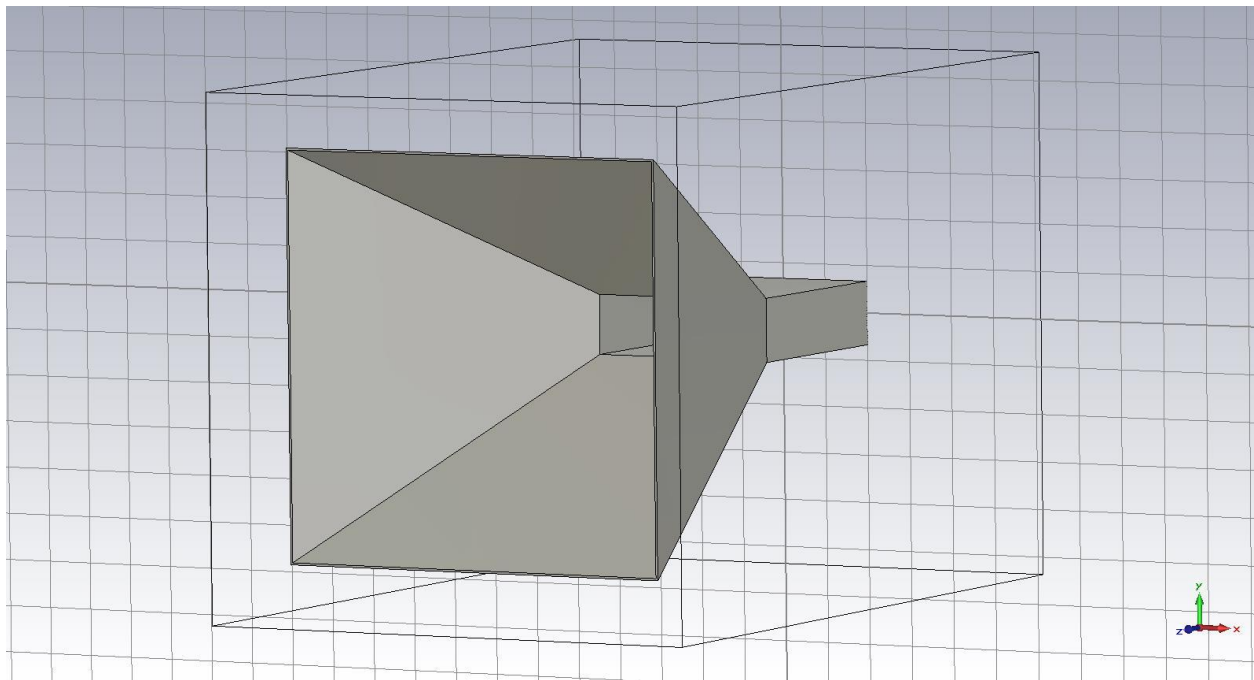
Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται βήμα προς βήμα η εφαρμογή της παραπάνω μεθόδου καθώς και τα αποτελέσματα που προκύπτουν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Εφαρμογή και Αποτελέσματα

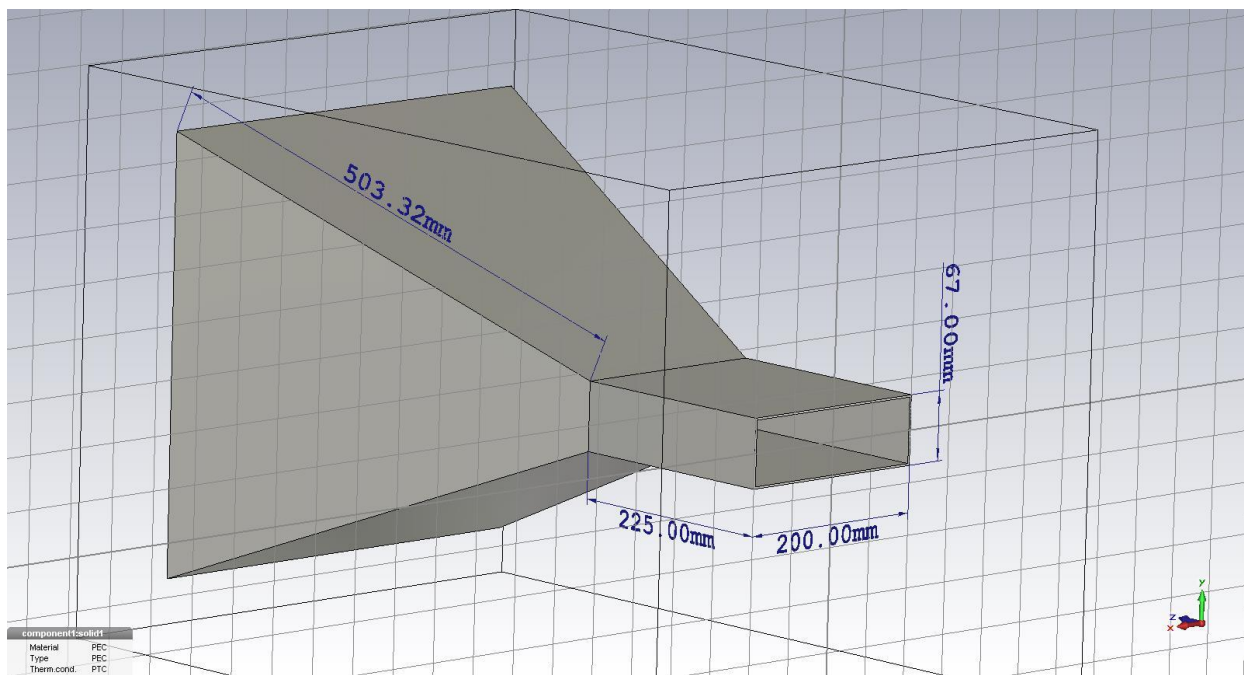
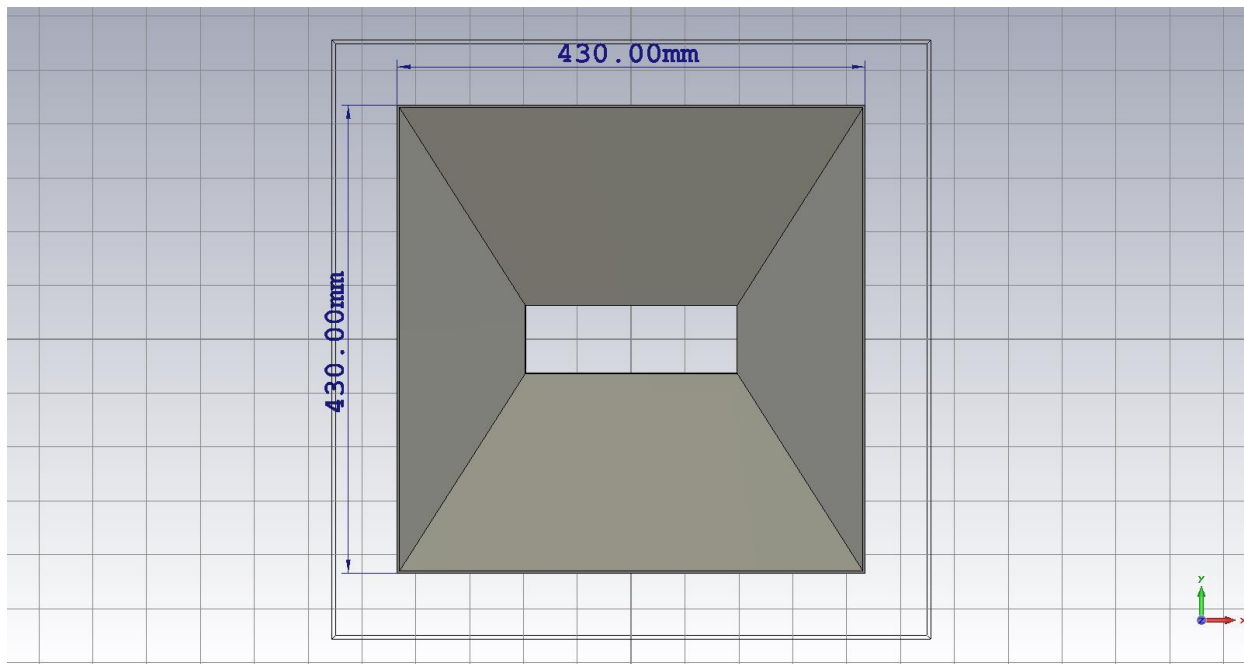
Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται βήμα – βήμα η διαδικασία που ακολουθήθηκε στα δύο βασικά υπολογιστικά προγράμματα CST και MATLAB. Το πρώτο σκέλος είναι η κατασκευή των τρισδιάστατων μοντέλων των κεραιών στο CST και η ηλεκτρομαγνητική προσομοίωση αυτών με σκοπό την παραγωγή των διαγραμμάτων ακτινοβολίας μακρινού πεδίου. Στη συνέχεια περιγράφεται η ανάπτυξη κώδικα στο MATLAB που χρησιμοποιεί τα παραχθέντα διαγράμματα ακτινοβολίας για την επίτευξη του τελικού σκοπού που είναι η βελτιστοποίηση του array.

3.1. Κατασκευή 3D μοντέλων και Η/Μ προσομοίωση στο CST

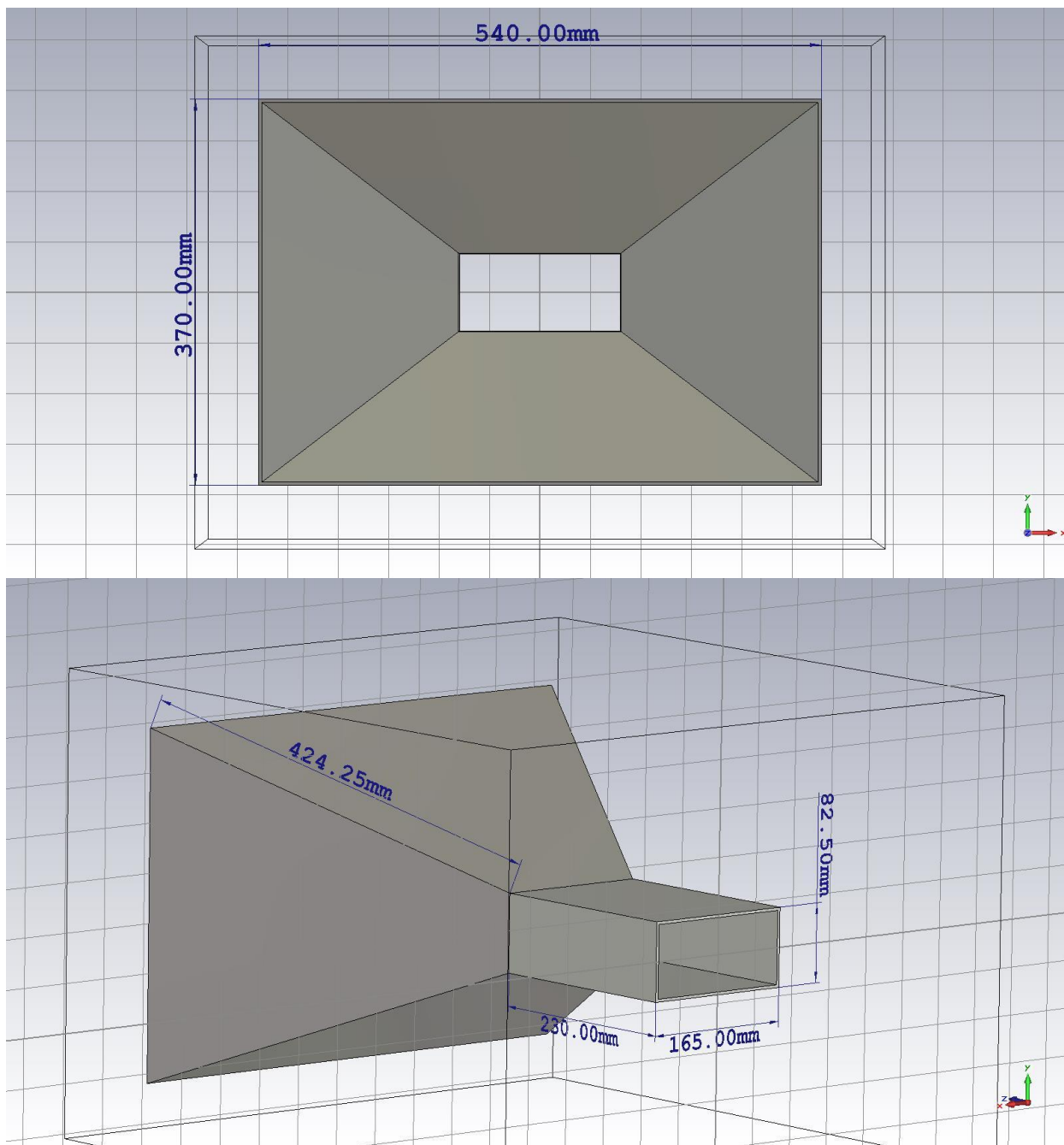
Αρχικά μετρήθηκαν οι ακριβείς φυσικές διαστάσεις των διαθέσιμων κεραιών (AR, VT) ώστε να μπορέσουν να μοντελοποιηθούν στο περιβάλλον του CST. Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται τα τρισδιάστατα μοντέλα για τις δύο κεραιές.



Εικόνα 3-1: Μοντέλο κεραιάς AR

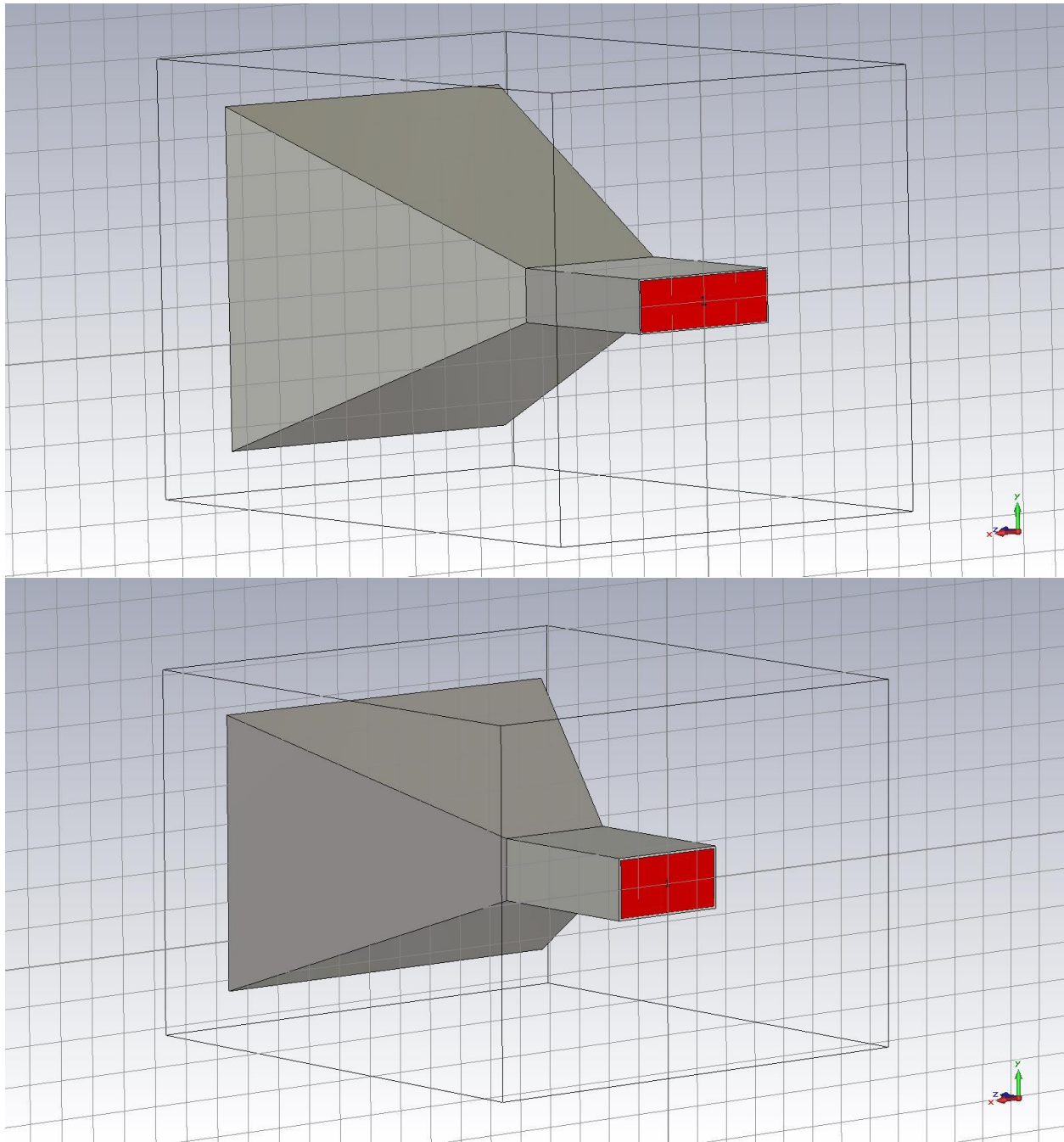


Εικόνα 3-2: Διαστάσεις κεραίας AR



Εικόνα 3-3: Μοντέλο και διαστάσεις κεραίας VT

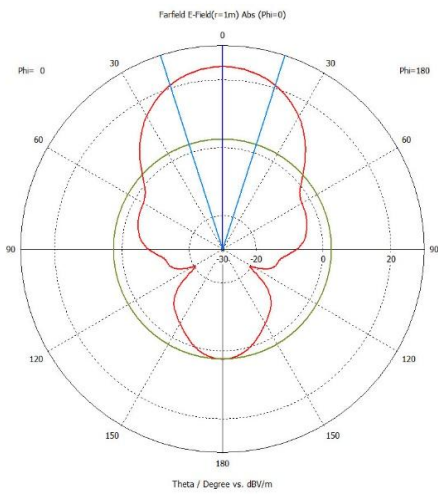
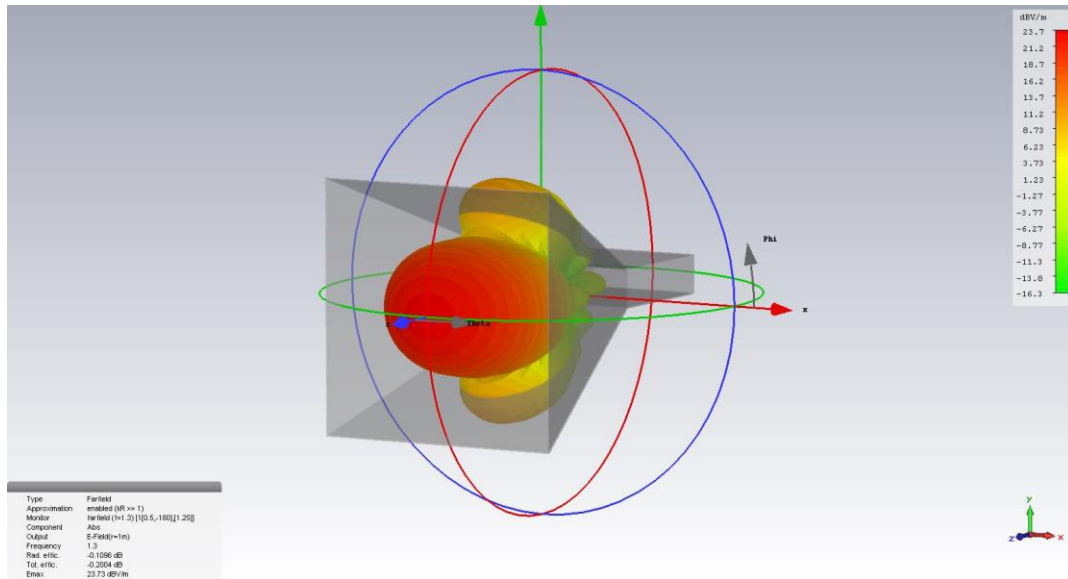
Στη συνέχεια, για την εφαρμογή της διέγερσης δημιουργήθηκαν Waveguide Ports στην είσοδο των κεραίων όπως φαίνεται παρακάτω:



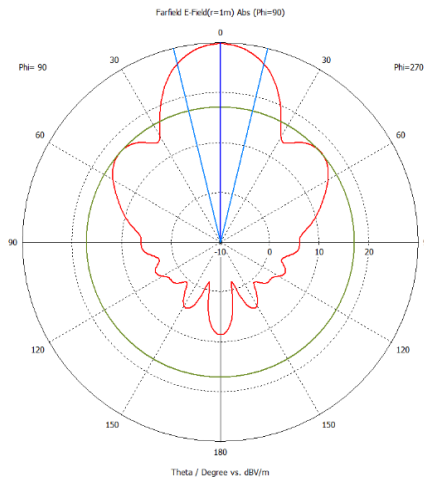
Εικόνα 3-4: Δημιουργία Waveguide Port για την τροφοδοσία των κεραιών AR και VT

Μετά τη δημιουργία του μοντέλου έγινε ηλεκτρομαγνητική προσομοίωση χρησιμοποιώντας τον Time Domain Solver του CST. Ο συγκεκριμένος solver επιλέχθηκε γιατί δίνει επαρκή και γρήγορα αποτελέσματα για αντικείμενα χωρίς μεγάλη γεωμετρική πολυπλοκότητα όπως είναι οι υπό μελέτη κεραιές. Το εύρος της προσομοίωσης καθορίστηκε στα 1GHz έως 1.5GHz, ενώ τοποθετήθηκε ένα farfield monitor στα 1.3 GHz που είναι η συχνότητα ενδιαφέροντος έτσι ώστε να παραχθούν τα

ζητούμενα αποτελέσματα. Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται γραφικά τα αποτελέσματα για την AR κεραία (ομοίως παράγονται και τα αποτελέσματα για την κεραία VT).

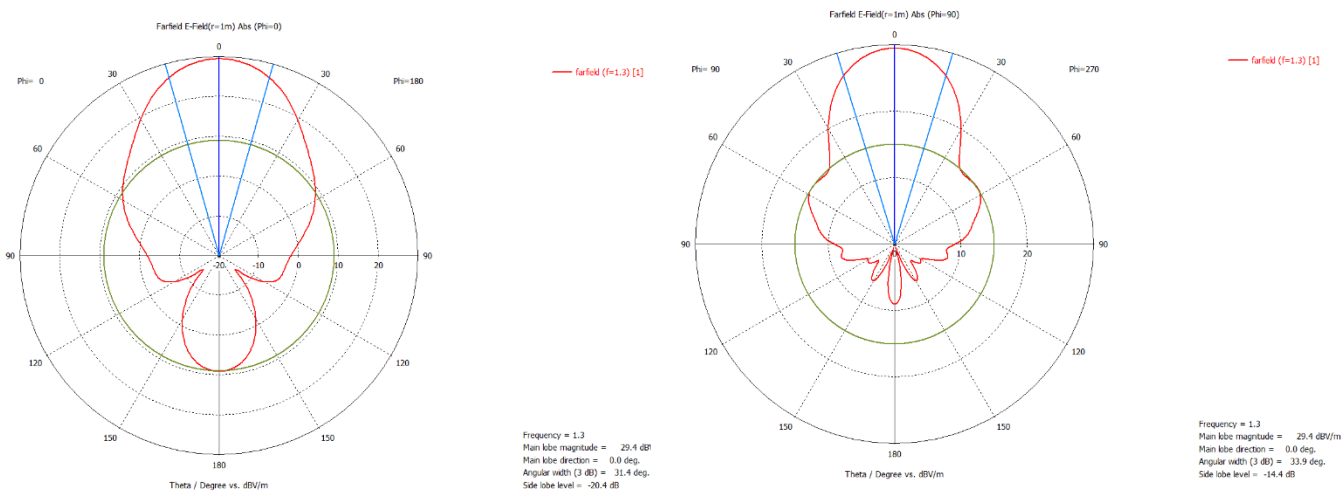
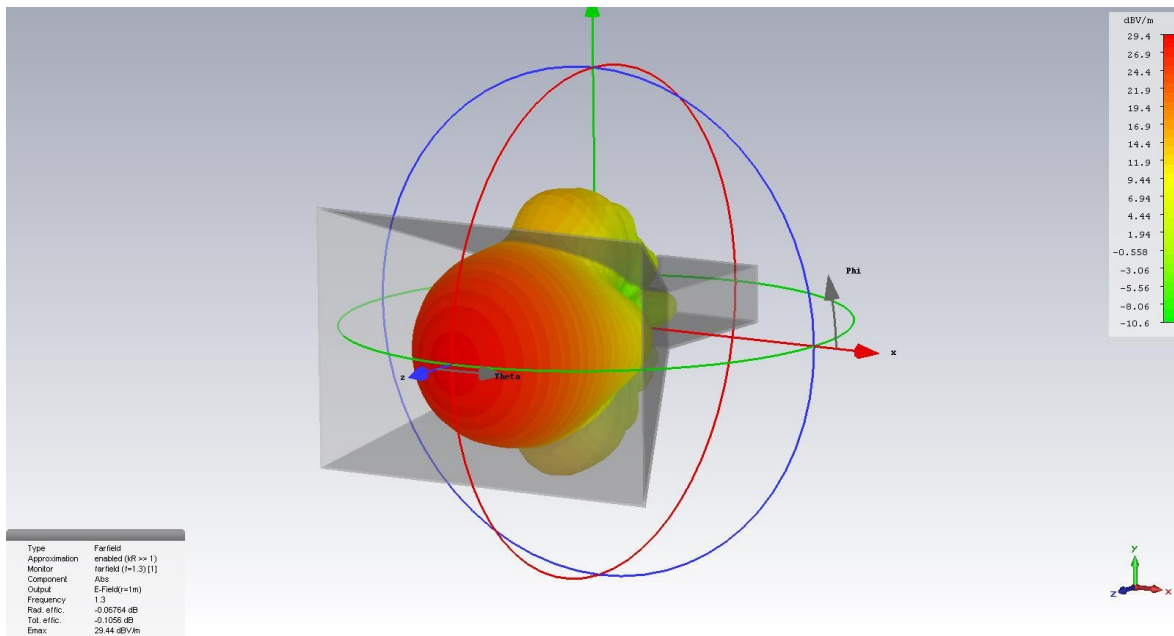


— farfield (r=1.3) [1][0.5,-18...



— farfield (r=1.3) [1]

Εικόνα 3-5: 3D και 2D διάγραμμα ακτινοβολίας farfield της κεραίας AR για τα δύο πρωτεύοντα επίπεδα – H και E αντίστοιχα



Εικόνα 3-6: 3D και 2D διάγραμμα ακτινοβολίας farfield της κεραίας VT για τα δύο πρωτεύοντα επίπεδα – Η και Ε αντίστοιχα

Ιδιαίτερη σημασία για τη συνέχεια της μελέτης έχουν οι τιμές Main lobe magnitude, angular width, side lobe level που αναφέρονται στον πολικό διάγραμμα του ηλεκτρικού πεδίου.

Πίνακας 3-1: Πλάτος κύριου λοβού, εύρος δέσμης και πλάτος πλευρικών λοβών των δύο κεραίων

	AR	VT
Main lobe magnitude	23.7 dBV/m	29.4 dBV/m
Angular width	35.7 deg.	31.4 deg.
Side lobe level	-21.4 dB	-20.4 dB

Οι τιμές του μακρινού πεδίου παράγονται ανά μία μοίρα από 0 έως 359 μοίρες και λαμβάνονται από το CST σε μορφή .txt αρχείου. Ενδεικτικά το αρχείο έχει την παρακάτω μορφή:

1	Theta [deg.]	Phi [deg.]	Abs(E) [V/m]	Abs(Theta) [V/m]	Phase(Theta) [deg.]	Abs(Phi) [V/m]	Phase(Phi) [deg.]	Ax.Ratio[]
2								
3	0.000	0.000	2.966e+001	6.531e-005	251.754	2.966e+001	11.207	1.000e+002
4	1.000	0.000	2.961e+001	6.397e-005	252.628	2.961e+001	11.169	1.000e+002
5	2.000	0.000	2.949e+001	6.238e-005	253.548	2.949e+001	11.058	1.000e+002
6	3.000	0.000	2.928e+001	6.057e-005	254.528	2.928e+001	10.873	1.000e+002
7	4.000	0.000	2.899e+001	5.856e-005	255.586	2.899e+001	10.614	1.000e+002
8	5.000	0.000	2.863e+001	5.639e-005	256.739	2.863e+001	10.284	1.000e+002
9	6.000	0.000	2.818e+001	5.408e-005	258.011	2.818e+001	9.883	1.000e+002
10	7.000	0.000	2.767e+001	5.169e-005	259.427	2.767e+001	9.414	1.000e+002
11	8.000	0.000	2.709e+001	4.925e-005	261.011	2.709e+001	8.878	1.000e+002
12	9.000	0.000	2.645e+001	4.680e-005	262.791	2.645e+001	8.279	1.000e+002
13	10.000	0.000	2.576e+001	4.440e-005	264.793	2.576e+001	7.618	1.000e+002
14	11.000	0.000	2.501e+001	4.207e-005	267.037	2.501e+001	6.900	1.000e+002
15	12.000	0.000	2.422e+001	3.987e-005	269.537	2.422e+001	6.128	1.000e+002
16	13.000	0.000	2.339e+001	3.784e-005	272.294	2.339e+001	5.305	1.000e+002
17	14.000	0.000	2.253e+001	3.601e-005	275.291	2.253e+001	4.438	1.000e+002
18	15.000	0.000	2.165e+001	3.441e-005	278.489	2.165e+001	3.531	1.000e+002
19	16.000	0.000	2.075e+001	3.306e-005	281.824	2.075e+001	2.589	1.000e+002
20	17.000	0.000	1.983e+001	3.197e-005	285.209	1.983e+001	1.617	1.000e+002
21	18.000	0.000	1.892e+001	3.113e-005	288.547	1.892e+001	0.623	1.000e+002
22	19.000	0.000	1.800e+001	3.052e-005	291.731	1.800e+001	359.614	1.000e+002
23	20.000	0.000	1.709e+001	3.011e-005	294.665	1.709e+001	358.595	1.000e+002
24	21.000	0.000	1.619e+001	2.986e-005	297.270	1.619e+001	357.574	1.000e+002
25	22.000	0.000	1.530e+001	2.974e-005	299.493	1.530e+001	356.559	1.000e+002
26	23.000	0.000	1.445e+001	2.969e-005	301.303	1.445e+001	355.556	1.000e+002
27	24.000	0.000	1.361e+001	2.969e-005	302.694	1.361e+001	354.573	1.000e+002
28	25.000	0.000	1.281e+001	2.968e-005	303.676	1.281e+001	353.615	1.000e+002
29	26.000	0.000	1.204e+001	2.965e-005	304.272	1.204e+001	352.688	1.000e+002
30	27.000	0.000	1.131e+001	2.957e-005	304.512	1.131e+001	351.796	1.000e+002
31	28.000	0.000	1.061e+001	2.941e-005	304.431	1.061e+001	350.940	1.000e+002
32	29.000	0.000	9.959e+000	2.917e-005	304.065	9.959e+000	350.121	1.000e+002
33	30.000	0.000	9.347e+000	2.884e-005	303.450	9.347e+000	349.337	1.000e+002
34	31.000	0.000	8.776e+000	2.844e-005	302.617	8.776e+000	348.539	1.000e+002
35	32.000	0.000	8.247e+000	2.786e-005	301.602	8.247e+000	347.839	1.000e+002
36	33.000	0.000	7.759e+000	2.722e-005	300.431	7.759e+000	347.105	1.000e+002
37	34.000	0.000	7.310e+000	2.649e-005	299.133	7.310e+000	346.358	1.000e+002
38	35.000	0.000	6.899e+000	2.567e-005	297.730	6.899e+000	345.578	1.000e+002
39	36.000	0.000	6.525e+000	2.477e-005	296.245	6.525e+000	344.744	1.000e+002
40	37.000	0.000	6.183e+000	2.381e-005	294.698	6.183e+000	343.829	1.000e+002
41	38.000	0.000	5.872e+000	2.280e-005	293.105	5.872e+000	342.810	1.000e+002
42	39.000	0.000	5.589e+000	2.175e-005	291.481	5.589e+000	341.661	1.000e+002
43	40.000	0.000	5.331e+000	2.068e-005	289.839	5.331e+000	340.359	1.000e+002
44	41.000	0.000	5.095e+000	1.960e-005	288.190	5.095e+000	338.886	1.000e+002

Εικόνα 3-7: Μορφή των δεδομένων του farfield που εξάγονται από το CST

Για την μελέτη μας ενδιαφέρει η συνιστώσα φ του πεδίου δηλαδή η στήλη Abs(phi) που είναι το μέτρο και η στήλη Phase(phi) που είναι η φάση του πεδίου. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές του πεδίου που παράγονται δεν είναι σε dB αλλά σε V/m. Αυτό γίνεται για να είναι μετέπειτα ευκολότερος ο χειρισμός των δεδομένων στο MATLAB. Το αρχείο *antenna_1.txt* αντιστοιχεί στην κεραία AR και το *antenna_2.txt* στην κεραία VT.

3.2. Εισαγωγή δεδομένων από το CST στο MATLAB

Δημιουργήθηκε ένα κομμάτι κώδικα (`singlePlot.m`) το οποίο εισάγει τα δεδομένα του ηλεκτρικού πεδίου στο χώρο εργασίας (`workspace`) του MATLAB και τα αποθηκεύει σε μεταβλητές. Για το σκοπό αυτό γίνεται χρήση της εντολής `load` με την οποία φορτώνονται οι γραμμικές τιμές αλλά και οι τιμές σε dB του πεδίου όπως εξάγονται από το CST, έτσι ώστε να γίνει μια πρώτη σύγκριση και επαλήθευση. Για την παραγωγή του διαγράμματος ακτινοβολίας χρησιμοποιήθηκε η εντολή `polarplot`.

```
clear all;
clf;
load('antenna_1.txt')
load('antenna_2.txt')

magAR = antenna_1(:,6);
phaseAR = antenna_1(:,7)*pi/180;
magVT = antenna_2(:,6);
phaseVT = antenna_2(:,7)*pi/180;

load('AR_moni_dB.txt')
load('VT_moni_dB.txt')
magAR_CST = AR_moni_dB(:,6);
magVT_CST = VT_moni_dB(:,6);

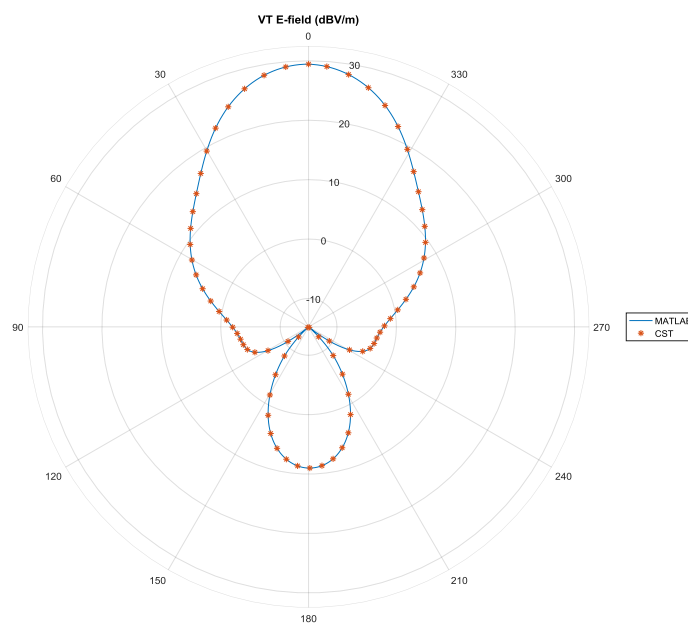
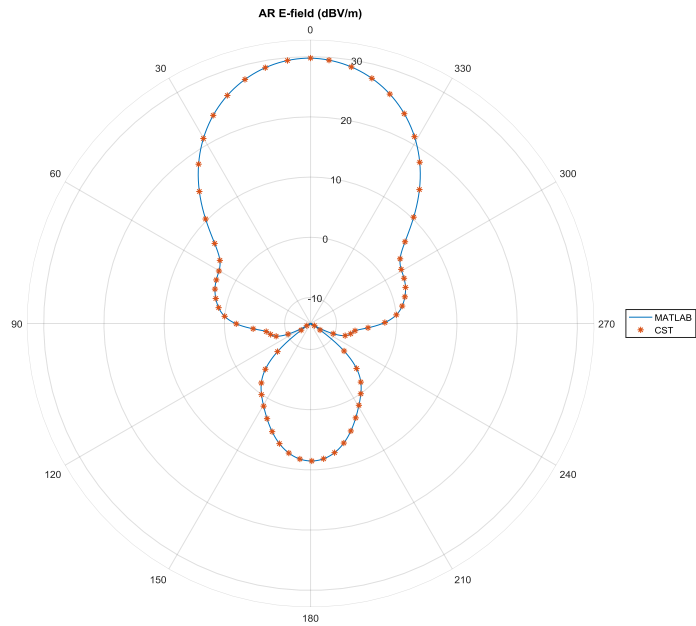
theta = linspace(0,2*pi,360)';

dBpatAR = 20*log10(magAR);
dBpatVT = 20*log10(magVT);

polarplot(theta,dBpatAR,theta(1:5:length(theta)),
magAR_CST(1:5:length(theta)), '*');
rlim([min(dBpatAR) max(dBpatAR) + 3])
legend('MATLAB','CST');
title('AR E-field (dBV/m)')
ax = gca;
d = ax.ThetaZeroLocation;
ax.ThetaZeroLocation = 'top';

figure(2)
polarplot(theta,dBpatVT,theta(1:5:length(theta)),
magVT_CST(1:5:length(theta)), '*');
rlim([min(dBpatVT) max(dBpatVT) + 3])
legend('MATLAB','CST');
title('VT E-field (dBV/m)')
ax = gca;
d = ax.ThetaZeroLocation;
ax.ThetaZeroLocation = 'top';
```

Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα για τις δύο κεραίες.



Εικόνα 3-8: Αναπαράσταση του διαγράμματος ακτινοβολίας των δύο κεραιών με χρήση κώδικα MATLAB

Η ταύτιση των διαγραμμάτων μας δείχνει καταρχήν ότι η διαδικασία εξαγωγής των δεδομένων από το CST είναι σωστή.

3.3. Υπολογισμός array με το CST

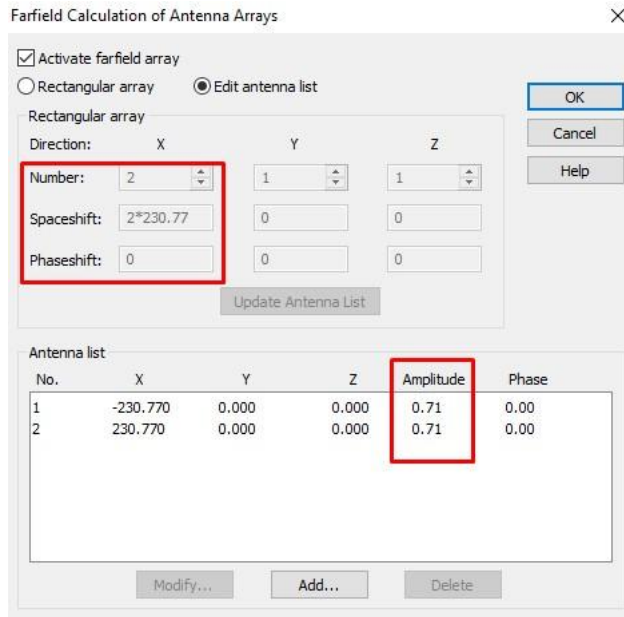
Το CST δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού του μακρινού πεδίου ενός array που αποτελείται από όμοια στοιχεία, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η σύζευξη μεταξύ των στοιχείων (επιλογή farfield array).



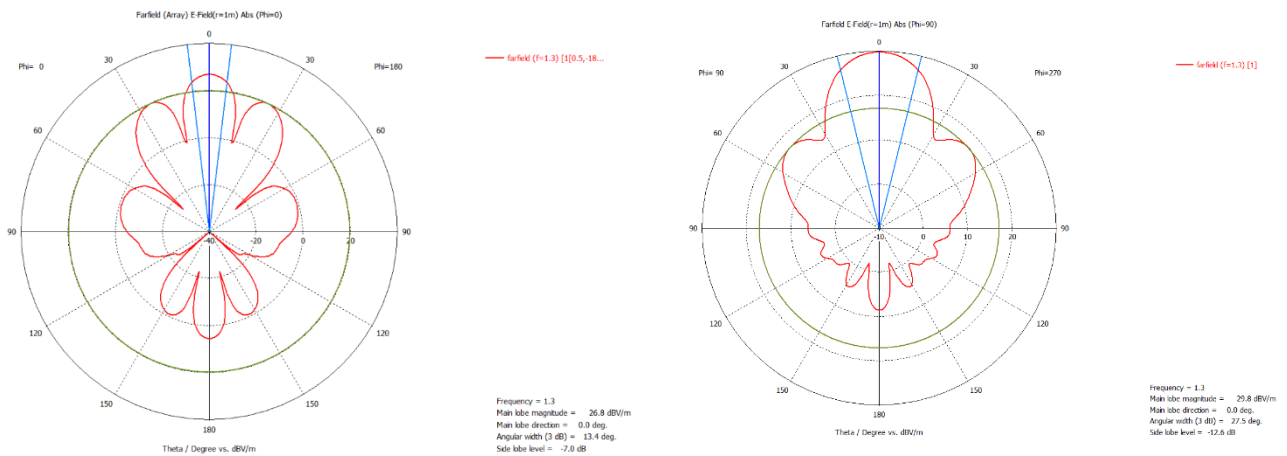
Με το εργαλείο αυτό και έχοντας ως δεδομένο το διάγραμμα ακτινοβολίας του ενός στοιχείου, μπορεί κανείς να παράγει το διάγραμμα ακτινοβολίας ενός array με τις εξής παραμέτρους:

- Το πλήθος των στοιχείων
- Την απόσταση μεταξύ τους
- Την μεταξύ τους διαφορά φάσης τροφοδοσίας
- Το πλάτος του σήματος τροφοδοσίας

Αξίζει να σημειωθεί ότι το συγκεκριμένο εργαλείο επιτρέπει τη δημιουργία array με τοποθέτηση στοιχείων σε όλο τον χώρο που ορίζεται από τις κατευθύνσεις X, Y, Z. Για την παρούσα μελέτη ενδιαφέρον έχει το γραμμικό array επομένως τοποθετούμε το πλήθος των στοιχείων μόνο στην κατεύθυνση X. Την απόσταση μεταξύ των στοιχείων τη θέτουμε ίση με 2λ (μικρότερες αποστάσεις είναι ανέφικτες επειδή περιοριζόμαστε από τις φυσικές διαστάσεις των κεραιών). Η τροφοδοσία είναι ισοφασική. Τέλος, είναι πολύ σημαντικό να εξασφαλίσουμε ότι η κάθε κεραία λαμβάνει τη μισή από την ολική ισχύ τροφοδοσίας και για να γίνει αυτό θέτουμε το πλάτος τροφοδοσίας ίσο με $\frac{\sqrt{2}}{2} = 0.707$ του ολικού. Ο λόγος για αυτή την επιλογή είναι προκειμένου να γίνει ορθή σύγκριση μεταξύ του κέρδους του array και του κέρδους του κάθε στοιχείου. Το αποτέλεσμα είναι το εξής:



Εικόνα 3-9: Επιλογές του εργαλείου Farfield Array



Εικόνα 3-10: Συνολικό διάγραμμα ακτινοβολίας α) H-ριπέ και β) E-ριπέ, δύο κεραιών AR τοποθετημένες σε απόσταση 2λ και τροφοδοτούμενες ισοφασικά

Στην υπό μελέτη περίπτωση, επειδή το array είναι γραμμικό, μας ενδιαφέρει μόνο το πρώτο διάγραμμα που αντιστοιχεί στο H-ριπέ.

Μερικές αρχικές παρατηρήσεις σε σχέση με το διάγραμμα της μίας κεραιάς είναι ότι:

- Το πλάτος του κύριου λοβού αυξάνεται κατά 3 dB
- Το εύρος ημίσειας ισχύος μειώνεται κατά πολύ (λιγότερο από το μισό)

- Οι **πλευρικοί λοβοί** είναι σημαντικά μεγαλύτεροι

Όπως θα φανεί και στη συνέχεια και θα εξηγηθεί αναλυτικά, τα χαρακτηριστικά αυτά αποτελούν τον ακρογωνιαίο λίθο της παρούσας μελέτης.

3.4. Υπολογισμός array με το MATLAB

Το εργαλείο farfield array του CST είναι πολύ χρήσιμο για να δίνει στατικά αποτελέσματα υστερεί όμως σε δύο βασικά σημεία:

- Δεν μπορεί να γίνει διερεύνηση των χαρακτηριστικών ενός array με σκοπό τη βελτιστοποίησή του (πρακτικά γίνεται αλλά η διαδικασία είναι χειροκίνητη και εξαιρετικά χρονοβόρα)
- Περιορίζεται στο να δίνει αποτελέσματα μόνο για array όμοιων στοιχείων

Για να ξεπεραστούν αυτοί οι περιορισμοί γράφτηκαν διάφορα κομμάτια κώδικα στο MATLAB που αποτελούν και τον κύριο όγκο της παρούσας εργασίας. Γνώμονας είναι η βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών του array (απόσταση μεταξύ κεραιών, διαφορά φάσης τροφοδοσίας) για 2 όμοιες κεραιές και για 2 ή 3 διαφορετικές κεραιές, με επιθυμητή επέκταση της μεθόδου για μεγαλύτερο πλήθος όμοιων ή μη κεραιών.

Με σκοπό την επαλήθευση των αποτελεσμάτων υλοποιούνται δύο διαφορετικές προσεγγίσεις: η πρώτη βάσει της θεωρίας του array factor και η δεύτερη με υπολογίζοντας το διάγραμμα ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας μέσω συνδυασμού του διαγράμματος ακτινοβολίας του κάθε στοιχείου ξεχωριστά. Εξάγοντας τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων επαληθεύεται η ορθότητα και των δύο μέσω της συμφωνίας αυτών.

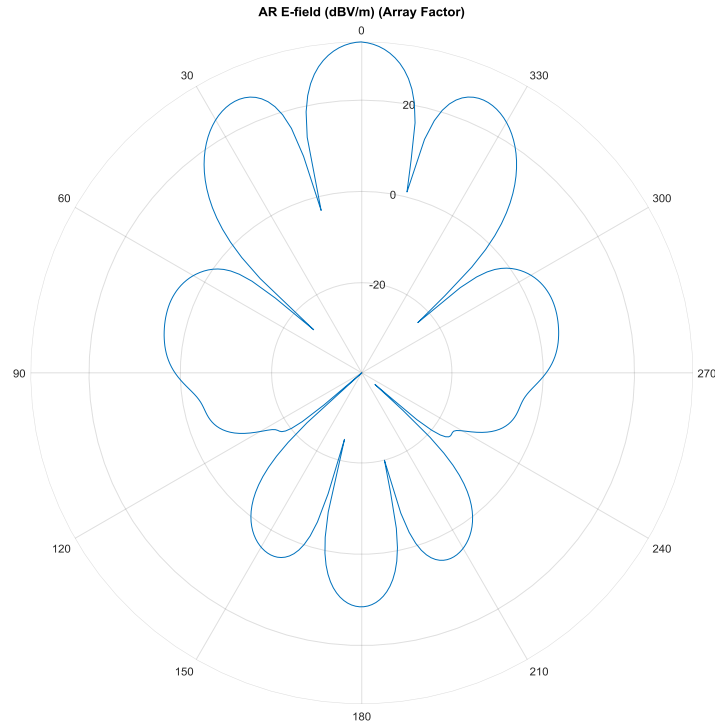
3.4.1. Α' τρόπος: Array Factor

Ο κώδικας `array_factor.m` λαμβάνει ως είσοδο το διάγραμμα ακτινοβολίας της μίας κεραιάς και το πολλαπλασιάζει με το εκάστοτε array factor για να παράγει το διάγραμμα του array. Υπενθυμίζεται ότι για N όμοιες κεραιές το array factor [3] δίνεται από τη σχέση:

$$AF = \frac{\sin \left[\frac{N}{2} (kd \cos \theta + \beta) \right]}{\sin \left[\frac{1}{2} (kd \cos \theta + \beta) \right]} \quad (3.1)$$

Όπου d η απόσταση μεταξύ των δύο κεραιών και β η διαφορά φάσης τροφοδοσίας.

Ο κώδικας αυτός περιορίζεται στο να δίνει αποτελέσματα για δύο όμοιες κεραιές. Το αποτέλεσμα από την εκτέλεση του κώδικα είναι το παρακάτω:



Εικόνα 3-11: Υπολογισμός διαγράμματος ακτινοβολίας με *array factor*

3.4.2. Β' τρόπος: Υπολογιστικός

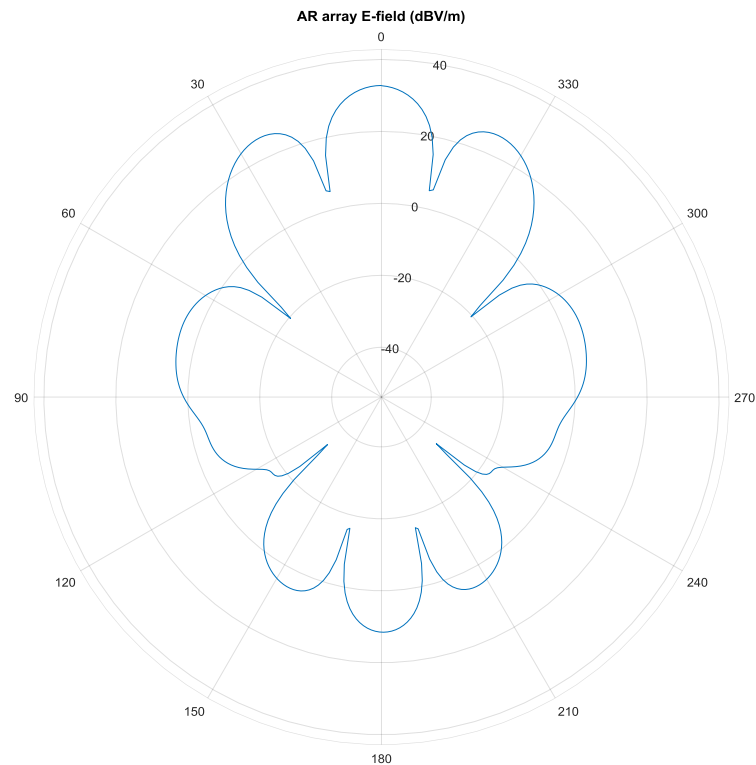
Ο κώδικας `twoElementArray.m` βασίζεται για τον υπολογισμό του `array` στη σχέση:

$$U(\theta, \varphi) = \left| \sum_{m=1}^M c_m \exp(jkR_m \cos\psi_m) L_m(\theta, \varphi) \right| \quad (3.2)$$

Όπου c_m είναι μιγαδικός συντελεστής φάσης, R_m είναι η απόσταση των στοιχείων και L_m είναι τα διαγράμματα ακτινοβολίας των κεραιών [4] τα οποία διαβάζονται ως `input` από τον κώδικα. Ο κώδικας `twoElementArray.m` μπορεί να δεχθεί σαν είσοδο δύο διαφορετικά διαγράμματα ακτινοβολίας επομένως δίνει την πολύ σημαντική δυνατότητα παραγωγής αποτελεσμάτων για δύο ίδιες ή δύο

διαφορετικές κεραιές. Για αυτό το λόγο αποτελεί τη βασική δομική μονάδα όλων των υπόλοιπων προγραμμάτων που αναπτύχθηκαν.

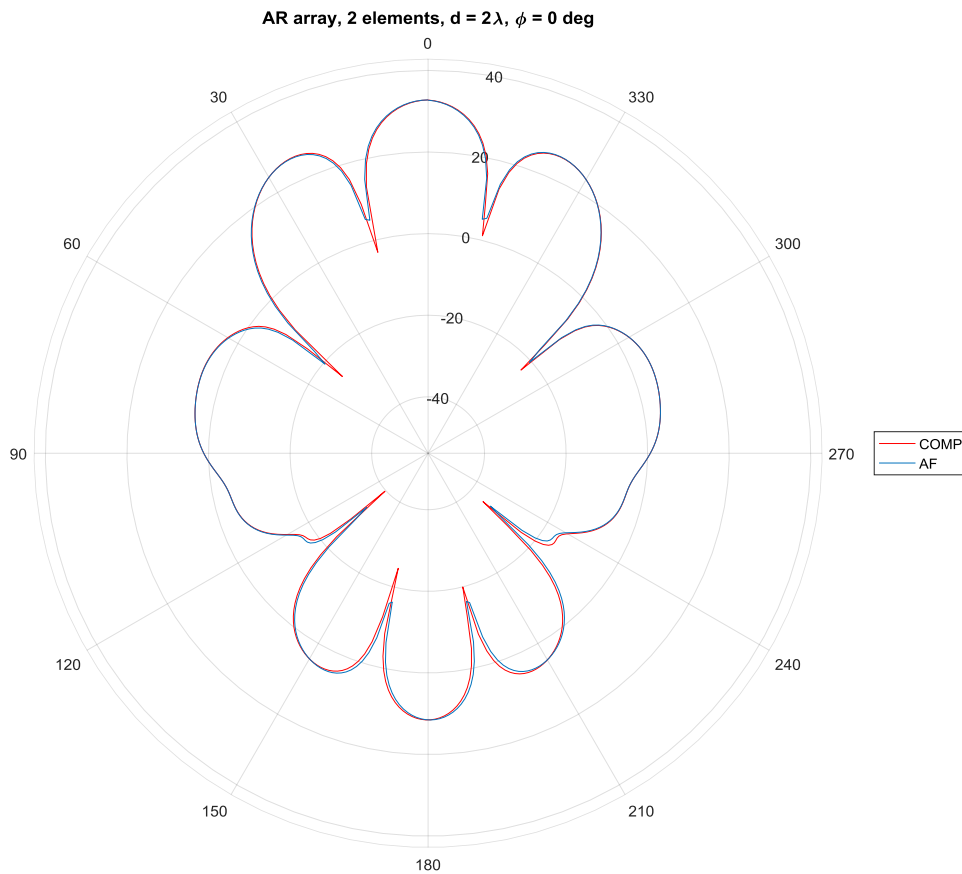
Παράγει το εξής διάγραμμα:



Εικόνα 3-12: Υπολογισμός διαγράμματος ακτινοβολίας με υπολογιστικό τρόπο

3.4.3. Σύγκριση Α' και Β' τρόπου

Με σκοπό να γίνει μία πρώτη επαλήθευση της ορθότητας του κώδικα γίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων που δίνουν οι δύο διαφορετικές προσεγγίσεις:

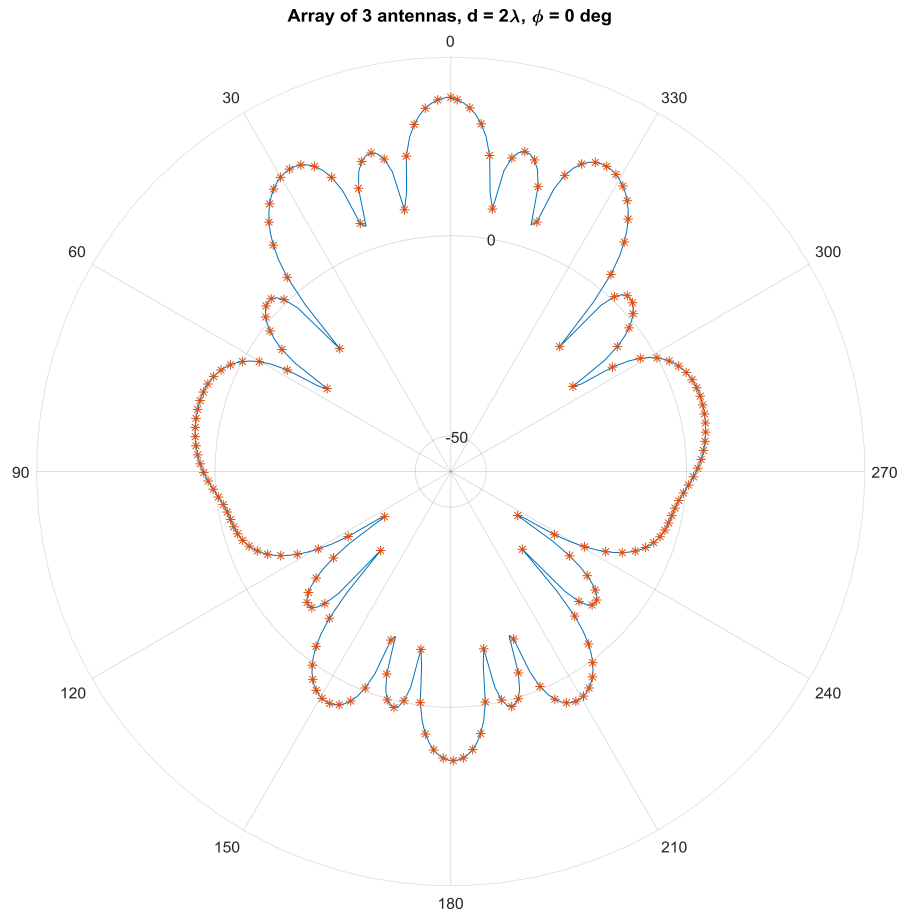


Εικόνα 3-13: Σύγκριση array factor και αναλυτικού τρόπου. Τιμές σε dBV/m.

Είναι φανερό ότι υπάρχει απόλυτη ταύτιση των αποτελεσμάτων.

3.4.4. Επέκταση κώδικα

Ο κώδικας `twoElementArray.m` είναι χρήσιμο να επεκταθεί και για περισσότερες από δύο κεραιές. Αρχικά αναπτύχθηκε ο κώδικας `threeElementArray.m` ο οποίος παράγει το διάγραμμα ακτινοβολίας τριών διαφορετικών κεραιών. Εν συνεχεία αναπτύχθηκε ο κώδικας `NelementArray.m` που δίνει αποτελέσματα για array N όμοιων κεραιών. Για να επαληθευτεί η ορθότητα των δύο αυτών επεκτάσεων συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα για 3 όμοιες κεραιές και βρέθηκαν σε απόλυτη ταύτιση:

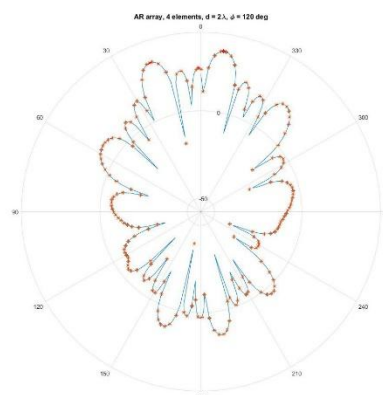
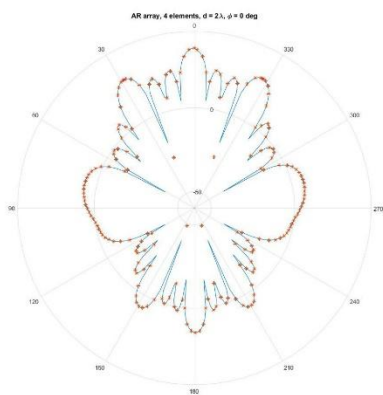
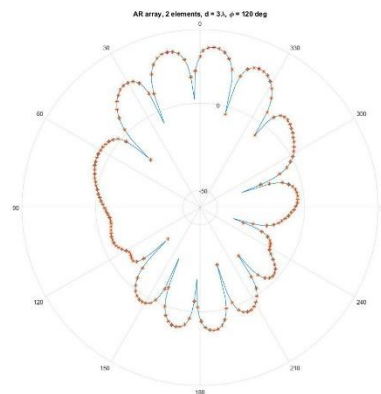
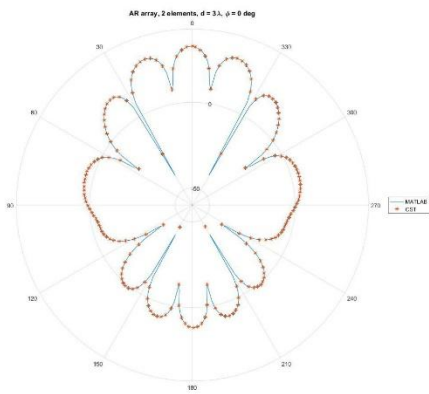
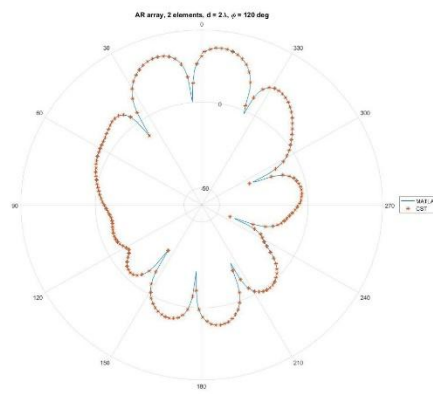
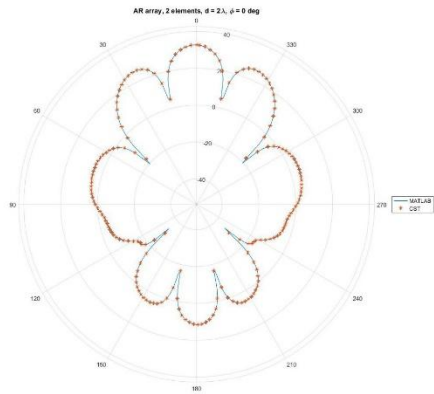


Εικόνα 3-14: Σύγκριση κώδικα για τρεις όμοιες κεραιές με κώδικα για τρεις διαφορετικές κεραιές - τιμές σε dBV/m.

3.5. Σύγκριση αποτελεσμάτων MATLAB και CST

3.5.1. Σύγκριση με το farfield array του CST

Το επόμενο βήμα για την επαλήθευση του κώδικα είναι να συγκριθούν τα αποτελέσματα με αυτά που δίνει το farfield array του CST. Με σκοπό να καλυφθούν περισσότερες από μία περιπτώσεις έγινε η σύγκριση των αποτελεσμάτων για 2 και 4 κεραιές, για αποστάσεις 2λ και 3λ και για διαφορά φάσης 0 και 120 μοίρες.



Εικόνα 3-15: Σύγκριση αποτελεσμάτων farfield από MATLAB και CST

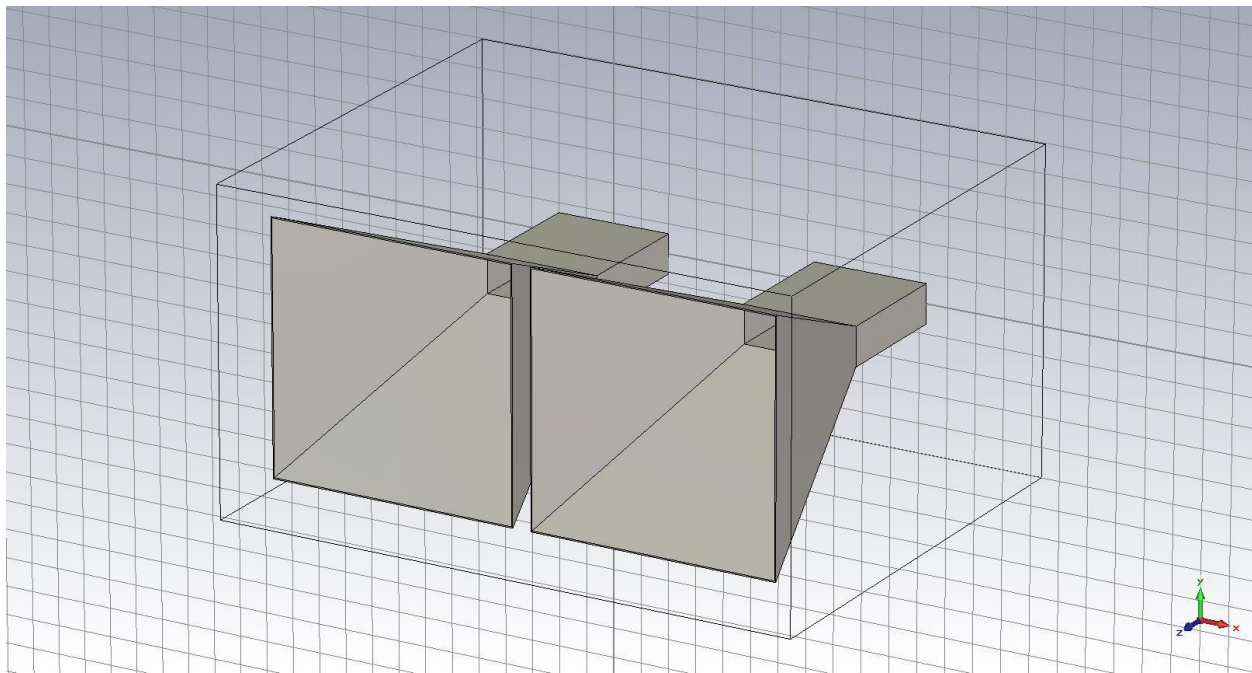
Παρατηρούμε ότι σε κάθε περίπτωση υπάρχει απόλυτη ταύτιση των αποτελεσμάτων. Το βήμα αυτό αποτελεί μια πολύ καλή απόδειξη για την ορθότητα της λειτουργίας του κώδικα.

3.5.2. Σύγκριση με full wave simulation

Απομένει ένα ακόμα βήμα για την εγκυροποίηση των μέχρι τώρα δεδομένων και αυτό είναι η διερεύνηση για το αν τυχόν η σύζευξη (coupling) μεταξύ των κεραιών έχει σημαντική επίδραση. Λόγω της μεγάλης κατευθυντικότητας που παρουσιάζουν οι κεραιές χοάνης, η επίδραση του coupling αναμένεται να είναι μικρή.

Για να ληφθεί υπόψιν η σύζευξη στο CST θα πρέπει να γίνει εκ νέου πλήρης ηλεκτρομαγνητική προσομοίωση που να περιλαμβάνει και τις υπόλοιπες κεραιές του array. Η σύγκριση γίνεται ξανά για 2 και 4 κεραιές, για αποστάσεις 2λ και 3λ και για διαφορά φάσης 0 και 120 μοίρες.

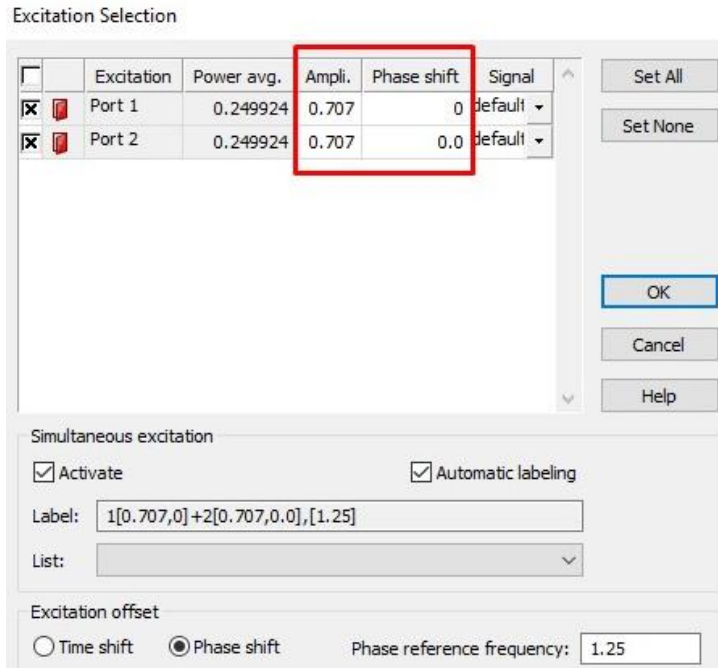
Η πρώτη περίπτωση είναι για 2 κεραιές και απόσταση 2λ. Εδώ να σημειωθεί ότι δεν είναι δυνατή η τοποθέτηση των στοιχείων σε αποστάσεις μεταξύ τους μικρότερες από 2λ λόγω φυσικών περιορισμών που προκύπτουν από τις διαστάσεις τους. Παρακάτω φαίνεται το νέο 3D μοντέλο που περιλαμβάνει και τη δεύτερη κεραία.



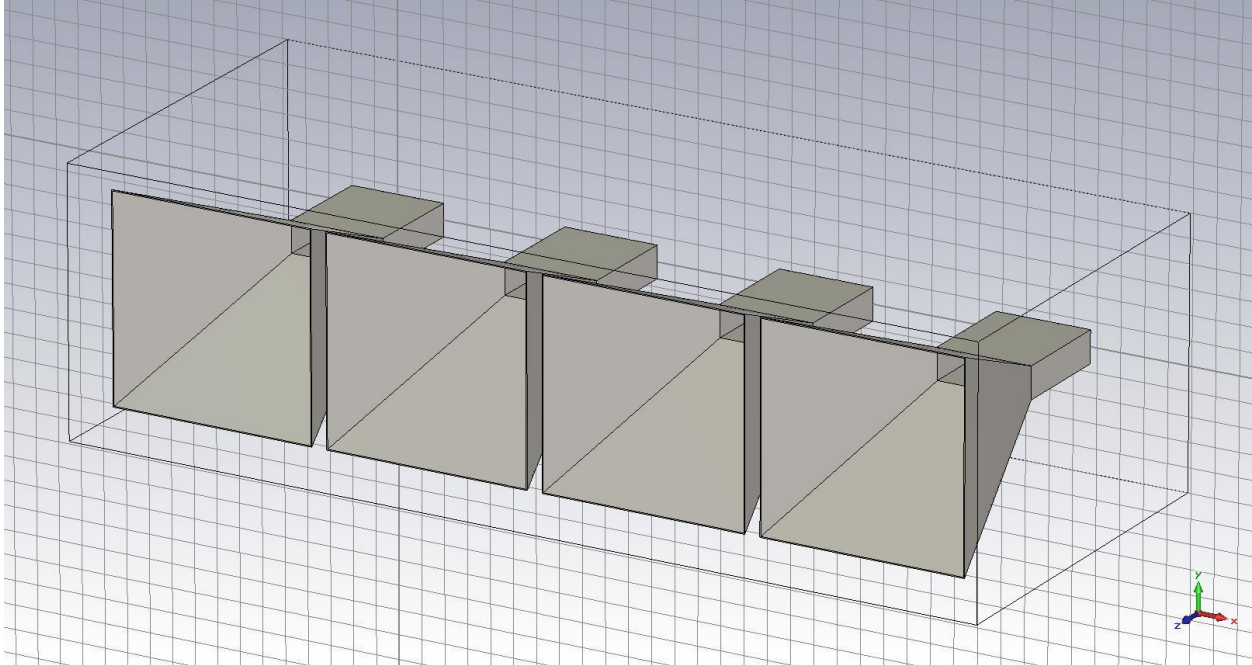
Εικόνα 3-16: 3D μοντέλο δύο AR κεραιών σε απόσταση 2λ

Για την κατασκευή του νέου μοντέλου αντιγράφηκε η πρώτη κεραία ως ενιαίο αντικείμενο και το αντίγραφο τοποθετήθηκε σε απόσταση 2λ. Αντιγράφηκε με τον ίδιο τρόπο και το waveguide port.

Έχοντας πλέον δύο ports φροντίζουμε από τις επιλογές του solver να τροφοδοτήσουμε την κάθε κεραία με το κατάλληλο πλάτος -0,707- και την κατάλληλη φάση, καθώς και να ενεργοποιήσουμε την επιλογή simultaneous excitation έτσι ώστε να παραχθεί το farfield όταν εκπέμπουν και οι δύο κεραίες ταυτόχρονα.



Για την προσομοίωση τεσσάρων κεραιών κατασκευάστηκε στο CST το παρακάτω μοντέλο:



Εικόνα 3-17: 3D μοντέλο τεσσάρων AR κεραιών σε απόσταση 2λ

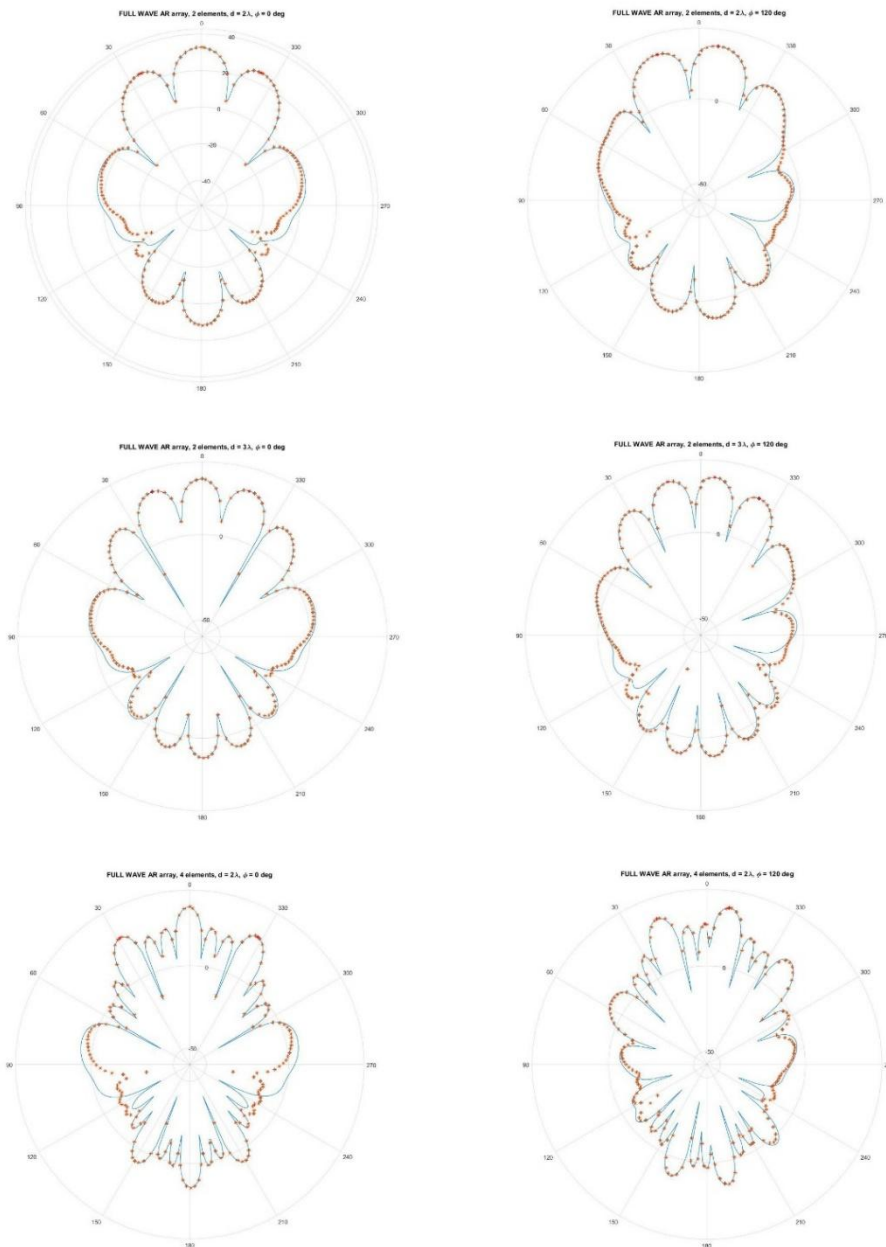
Ομοίως με προηγουμένως αντιγράφηκαν οι κεραιές και τα ports με τη διαφορά ότι πλέον η διαθέσιμη ισχύς μοιράζεται ισομερώς στις 4 κεραιές επομένως πρέπει η κάθε μια να τροφοδοτείται με πλάτος $\frac{1}{\sqrt{N}} = \frac{1}{\sqrt{4}} = 0.5$ του αρχικού.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων γίνονται export έτσι ώστε να γίνει η σύγκριση με τον κώδικα MATLAB. Στην Εικόνα 3-18 παρατίθενται τα αποτελέσματα της σύγκρισης για δύο κεραιές. Για τη σύγκριση χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας `NelementArray.m`. Το διάγραμμα με την μπλε γραμμή είναι εκείνο που παράγει ο κώδικας ενώ το διάγραμμα με τα αστεράκια είναι το αποτέλεσμα του full wave simulation.

Σε όλες τις περιπτώσεις παρατηρούμε ότι το φαινόμενο της σύζευξης επηρεάζει κατά ελάχιστο βαθμό μόνο τους πολύ ασθενείς λοβούς ακτινοβολίας (εικόνα 3-18). Ο κύριος λοβός καθώς και οι ισχυροί πλευρικοί λοβοί είναι εντελώς ανεπηρέαστοι, οπότε μπορούμε με ασφάλεια να υποθέσουμε ότι το φαινόμενο της σύζευξης δεν χρειάζεται να μας απασχολήσει.

Ανακεφαλαιώνοντας, έχει επιτευχθεί μέχρι στιγμής η παραγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων για arrays που αποτελούνται από:

- N ίδιες κεραιές
- 2 διαφορετικές κεραιές
- 3 διαφορετικές κεραιές



Εικόνες 3-18 και 3-19: Σύγκριση κώδικα με full wave simulation

3.6. Κώδικας για Pattern Oscillation

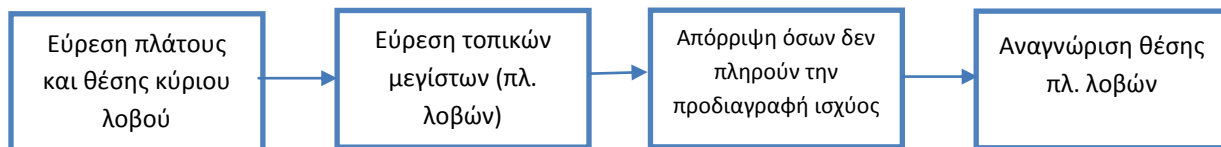
3.6.1. Ανίχνευση πλευρικών λοβών και μέγιστου εύρους δέσμης

Για την υλοποίηση του pattern oscillation θα πρέπει αρχικά να υπάρχει τρόπος να ανιχνεύονται εκείνοι οι πλευρικοί λοβοί οι οποίοι έχουν ισχύ ίση ή μεγαλύτερη της ημίσειας ισχύος του κύριου λοβού της μονής κεραίας. Το σκοπό αυτό τον εξυπηρετεί ο κώδικας `sideLobeTrackingN.m`. Στον πίνακα 2 παρατίθενται οι παράμετροι του κώδικα και οι έξοδοι που δίνει ως αποτέλεσμα.

Πίνακας 3-2: Κώδικας `sideLobeTracking`

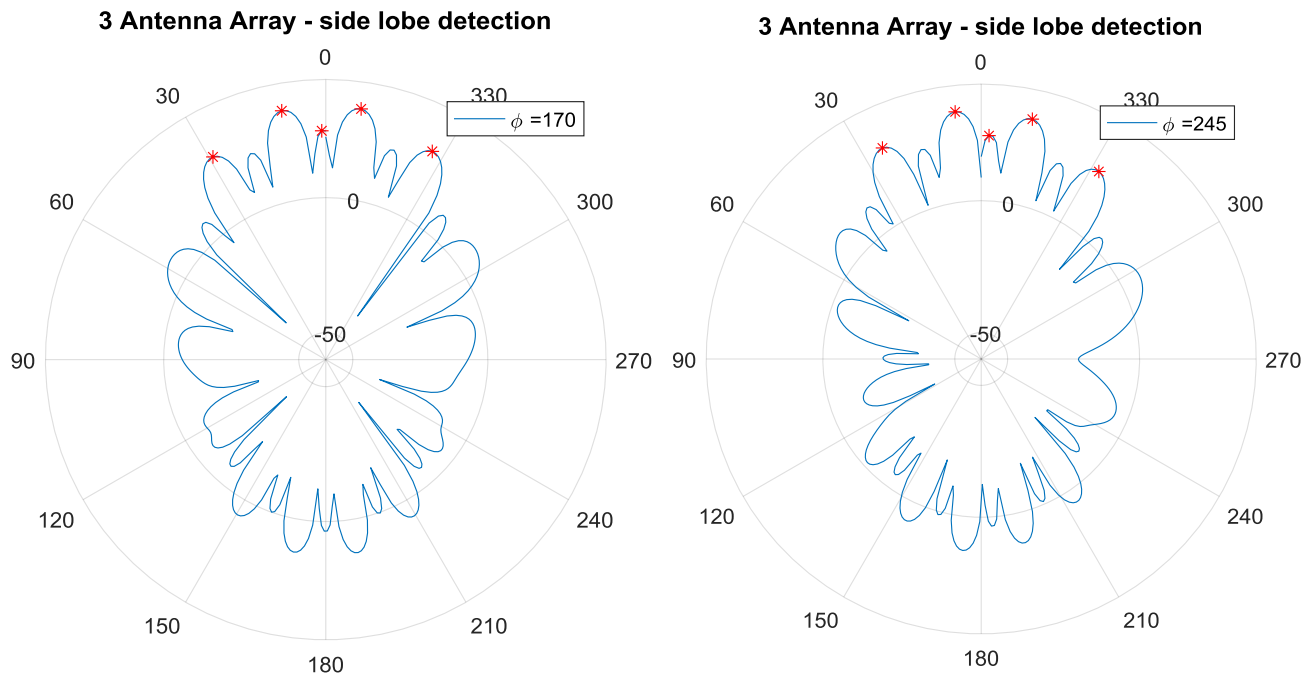
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΟΥΤΡΥΤ
Πλήθος κεραιών N	Πλάτος και θέση κύριου λοβού
$\Delta\varphi$ τροφοδοσίας	Μέγιστη γωνία πλ. λοβού
Απόσταση μεταξύ κεραιών	

Ο κώδικας ακολουθεί την εξής ροή:



Εικόνα 3-20: Διάγραμμα ροής κώδικα ανίχνευσης πλευρικών λοβών

Ενδεικτικά, για 3 κεραιές με διαφορές φάσης 170 και 245 μοίρες και απόσταση 3λ λαμβάνονται τα παρακάτω αποτελέσματα:



Εικόνα 3-21: Υπολογισμός διαγράμματος ακτινοβολίας και εύρεση πλευρικών λοβών για $\Delta\phi = 170^\circ$ και 245°

 3 identical antennas, 3.0 lamda apart

Phase diff: 170 degrees
 Main lobe mag: 33.77 dBV/m
 Main lobe pos: 352 degrees
 Max side lobe angle: 30 degrees

 3 identical antennas, 3.0 lamda apart

Phase diff: 245 degrees
 Main lobe mag: 34.19 dBV/m
 Main lobe pos: 7 degrees
 Max side lobe angle: 26 degrees

Στην εικόνα 3-20 φαίνεται το διάγραμμα ακτινοβολίας του array και με κόκκινα σημεία οι πλευρικοί λοβοί που πληρούν την προδιαγραφή ισχύος. Το πρώτο διάγραμμα αντιστοιχεί σε διαφορά φάσης τροφοδοσίας 170° και το δεύτερο σε 245° . Διακρίνεται η στροφή του διαγράμματος – και κατ' επέκταση των πλευρικών λοβών – όταν αλλάζει η φάση τροφοδοσίας. Αυτό φαίνεται και από τα αριθμητικά αποτελέσματα όπου βλέπουμε ότι στην πρώτη περίπτωση η μέγιστη θέση πλευρικού λοβού (max side lobe angle) είναι στις 30° και με την αλλαγή φάσης μετατοπίζεται στις 26° .

Παράλληλα, ο κώδικας υπολογίζει το πλάτος του κυρίως λοβού (main lobe mag) καθώς και τη γωνία του (main lobe pos). Για τις συγκεκριμένες τιμές φάσεις παρατηρούμε ότι ο κύριος λοβός μετατοπίστηκε από τις 352° στις 7° ενώ το πλάτος του από 33.77dBV/m έγινε 34.19dBV/m. Η διαδικασία αυτή μας επιτρέπει να βρίσκουμε τους πλευρικούς λοβούς για κάθε Δφ ώστε να βρούμε στο τέλος το ισοδύναμο εύρος δέσμης. Ο κώδικας sideLobeTrackingN.m στη συνέχεια επεκτάθηκε για 2 και 3 διαφορετικές κεραίες (sideLobeTracking2.m, sideLobeTracking3.m).

3.6.2. Εύρεση μέγιστου ισοδύναμου εύρους δέσμης με oscillation

Το επόμενο βήμα είναι να αναπτυχθεί κώδικας (maxWidthN.m) ο οποίος να κάνει βελτιστοποίηση του ισοδύναμου εύρους δέσμης, με άλλα λόγια να μας δίνει τη δυνατότητα να βρίσκουμε τον μεγαλύτερο δυνατό τομέα (σε μοίρες) που μπορεί να καλύψει το oscillation και για ποιες φάσεις τροφοδοσίας είναι εφικτό αυτό. Η λογική είναι να χρησιμοποιηθεί ο κώδικας sideLobeTrackingN.m μέσα σε μία επαναληπτική διαδικασία ώστε να γίνει διερεύνηση για όλες τις πιθανές φάσεις τροφοδοσίας. Ο κώδικας ακολουθεί την εξής διαδικασία:

1. Εύρεση ακραίων θέσεων των πλευρικών λοβών (μέγιστη κάλυψη)
2. Για ποια φάση τροφοδοσίας έχουμε πλευρικό λοβό στο ένα άκρο του καλυπτόμενου τομέα.
3. Κινούμενοι από το πρώτο άκρο του τομέα αυξάνοντας τη φάση τροφοδοσίας, για ποια τιμή της φάσης έχουμε καλύψει όλο τον τομέα με λοβούς οι οποίοι έχουν επαρκή ισχύ (τουλάχιστον ίση με την ημίσεια ισχύ της αρχικής κεραίας).

Στον πίνακα 3 δίνονται οι παράμετροι του κώδικα και τα αποτελέσματα που παράγει.

Πίνακας 3-3: Κώδικας MaxWidthN

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΟΥΤΡΥΤ
Πλήθος κεραιών N	Μέγιστο εύρος δέσμης σε μοίρες
Απόσταση μεταξύ κεραιών	Ζητούμενες φάσεις τροφοδοσίας

Η μορφή των παραγόμενων αποτελεσμάτων είναι η παρακάτω:

```
-----
2 identical antennas, 2.0 lamda apart
-----
Active area:          -27 to 29 degrees
Total maximum angle: 56 degrees
Required phase shift: -41 to 62 degrees
```

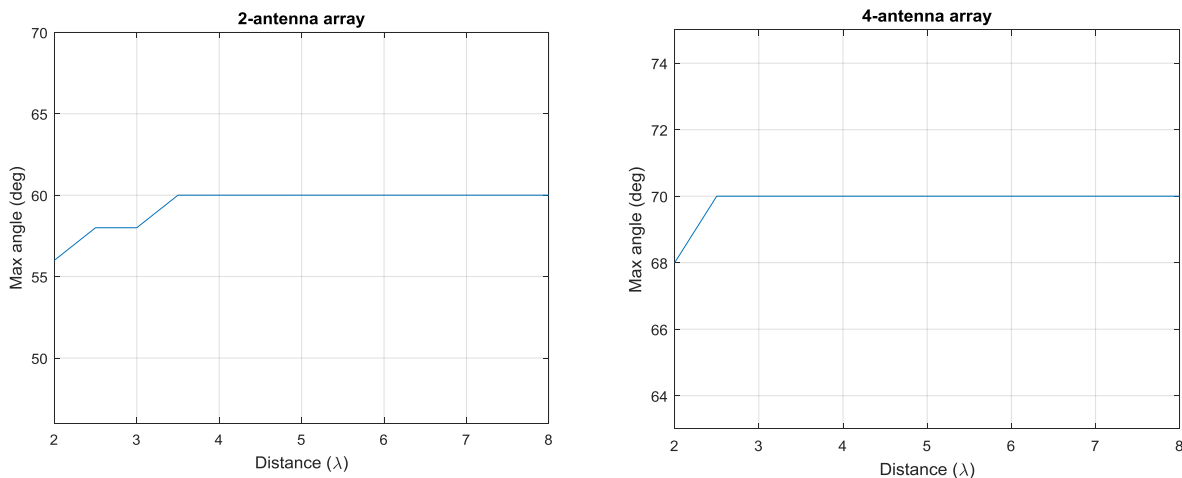

Εδώ μπορούμε να δούμε ότι ο κώδικας υπολογίζει το μέγιστο ισοδύναμο εύρος δέσμης με oscillation (total maximum angle) και τις ακραίες θέσεις αυτού του εύρους (active area). Στο παραπάνω παράδειγμα βλέπουμε ότι το oscillation εύρος δέσμης είναι 56° και οι πλευρικοί λοβοί που δημιουργούν αυτό το εύρος κινούνται στην περιοχή από -27° έως 29° καθώς μεταβάλλεται η φάση τροφοδοσίας. Η απαραίτητη μεταβολή της φάσης δίνεται από το Required phase shift. Δηλαδή για να επιτύχουμε το μέγιστο ισοδύναμο εύρος δέσμης πρέπει να τροφοδοτήσουμε τις κεραίες με ένα εύρος διαφορών φάσεων από -41° έως 62° στην προκειμένη περίπτωση.

3.6.3. Επίδραση του πλήθους και της απόστασης των κεραιών στο ισοδύναμο εύρος δέσμης

Έχοντας ως βάση τον παραπάνω κώδικα μπορούμε να διερευνήσουμε:

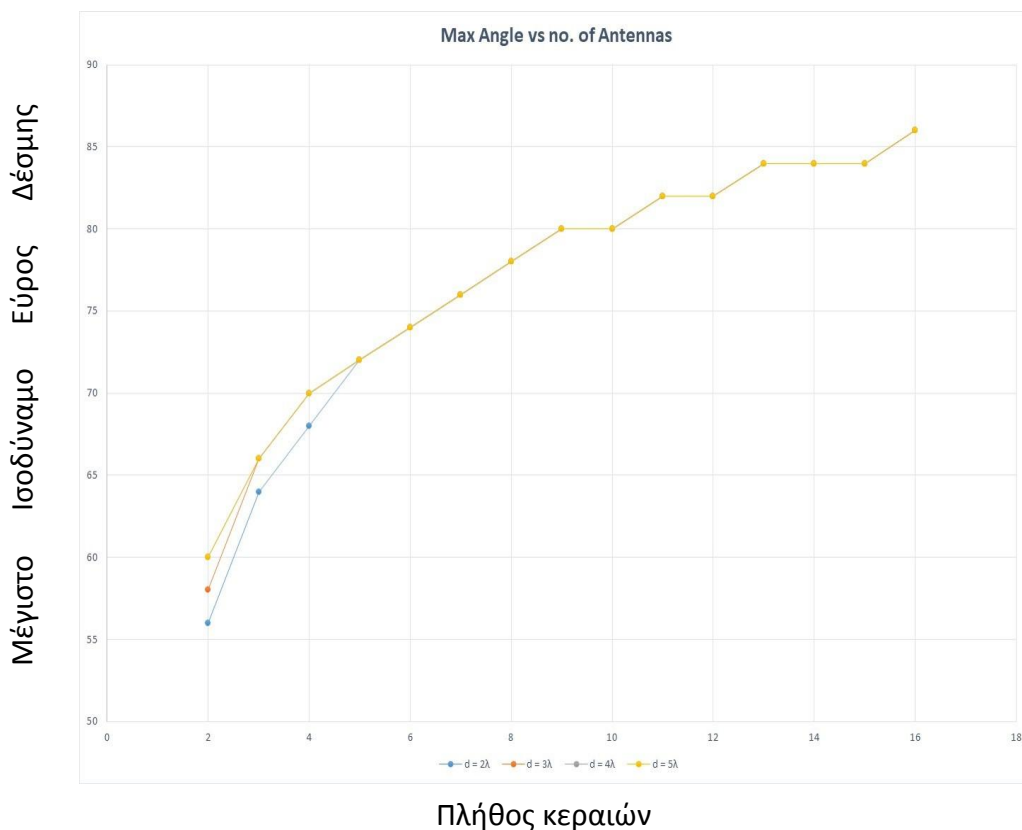
- A) Την επίδραση που έχει στο ισοδύναμο εύρος δέσμης η απόσταση μεταξύ των κεραιών.
- B) Την επίδραση που έχει στο ισοδύναμο εύρος δέσμης ο αριθμός N των κεραιών.

Ο κώδικας `distancePlotN.m` αναλαμβάνει ακριβώς αυτό. Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα για αποστάσεις από 2λ έως 8λ (με βήμα 0.5λ) και για N = 2 και 4 κεραίες.



Εικόνα 3-22: σχέση απόστασης κεραιών με το ισοδύναμο εύρος δέσμης oscillation

Φαίνεται αρχικά ότι η αύξηση του αριθμού κεραιών προκαλεί αύξηση του ισοδύναμου εύρους δέσμης ενώ η απόσταση μεταξύ των κεραιών έχει μικρή επίδραση και μόνο για μικρές αποστάσεις και μικρό πλήθος κεραιών. Συμπληρωματικά αναπτύχθηκε ο κώδικας `leastSQ.m` για περαιτέρω διερεύνηση του φαινομένου. Αυτή τη φορά λαμβάνονται δεδομένα για N = 2 έως 16 κεραίες και για αποστάσεις 2,3,4 και 5 μήκη κύματος λ.



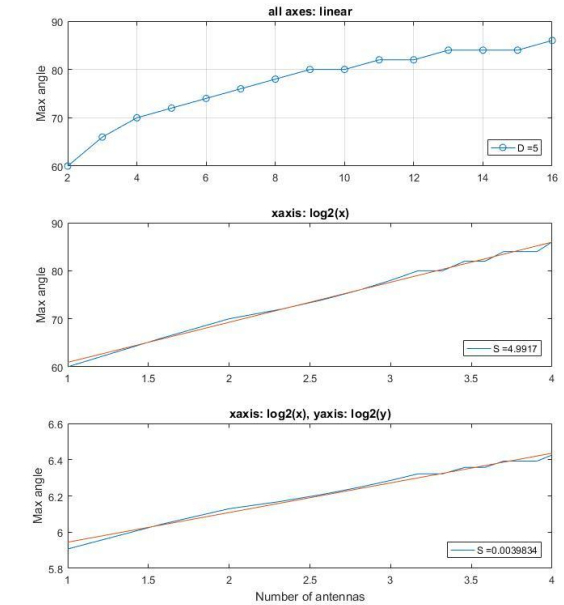
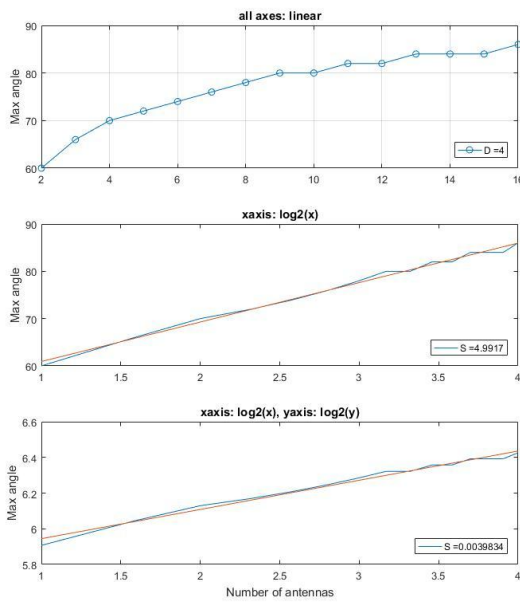
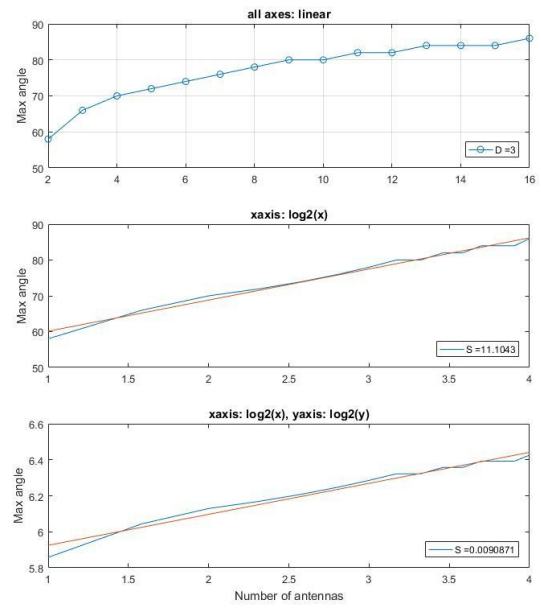
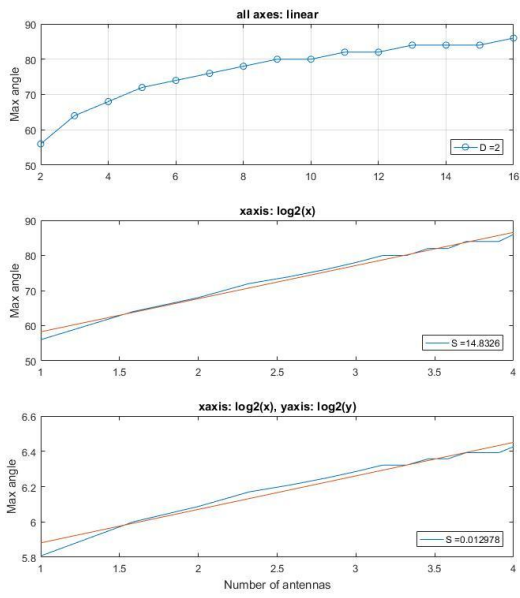
Εικόνα 3-23: Σχέση απόστασης και πλήθους κεραιών με το ισοδύναμο εύρος δέσμης oscillation

Εδώ φαίνεται ότι υπάρχει μία λογαριθμική σχέση μεταξύ του ισοδύναμου εύρους και του πλήθους των κεραιών. Ο κώδικας `leastSQ.m` περιλαμβάνει το fitting των δεδομένων με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων για να εξακριβωθεί η προηγούμενη υπόθεση. Αυτό γίνεται με

A) λογαρίθμιση με βάση το 2 του άξονα X

B) λογαρίθμιση με βάση το 2 του άξονα X και του άξονα Y

και εν τέλει εύρεση των συντελεστών α και β της ευθείας $y = \alpha x + \beta$ για τις περιπτώσεις A και B που προσεγγίζει καλύτερα την καμπύλη καθώς και το άθροισμα S των τετραγώνων των αποστάσεων των σημείων της καμπύλης από την ευθεία. Ως γνωστόν η καμπύλη με το μικρότερο S είναι και η καλύτερη προσέγγιση.



Εικόνα 3-24: Προσαρμογή (fitting) με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων για αποστάσεις $d = 2, 3, 4$ και 5λ

Στην Εικόνα 3-23 βλέπουμε τα αποτελέσματα για τις περιπτώσεις $d=2\lambda, 3\lambda, 4\lambda$ και 5λ . Σε κάθε στιγμιότυπο απεικονίζεται η συνάρτηση μεταξύ του πλήθους κεραιών και του μέγιστου ισοδύναμου εύρους δέσμης, χρησιμοποιώντας τρία διαφορετικά σετ αξόνων: α) Γραμμικοί άξονες x, y , β) άξονας x λογαριθμικός με βάση το 2 – άξονας y γραμμικός, γ) άξονες x, y λογαριθμικοί με βάση το 2. Παρατηρούμε ότι υπάρχει καλύτερη προσέγγιση με την λογαρίθμιση και των δύο αξόνων, επομένως συμπεραίνουμε ότι υπάρχει προσέγγιση γραμμικής σχέσης μεταξύ του λογαρίθμου με βάση 2 του πλήθους των κεραιών και του λογαρίθμου με βάση το 2 του μέγιστου ισοδύναμου εύρους δέσμης. Αυτό μας δείχνει ότι κάθε φορά που διπλασιάζεται το πλήθος των κεραιών, το ισοδύναμο εύρος δέσμης πολλαπλασιάζεται με ένα σταθερό παράγοντα. Οι τιμές του εύρους δέσμης για πλήθος κεραιών $N = 2, 4, 8$ και 16 είναι αντίστοιχα $54^\circ, 66^\circ, 80^\circ, 96^\circ$. Παρατηρούμε ότι η κάθε τιμή είναι 1.2 φορές μεγαλύτερη από την προηγούμενη. Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι με τον διπλασιασμό των κεραιών το ισοδύναμο εύρος δέσμης αυξάνεται κατά 20%.

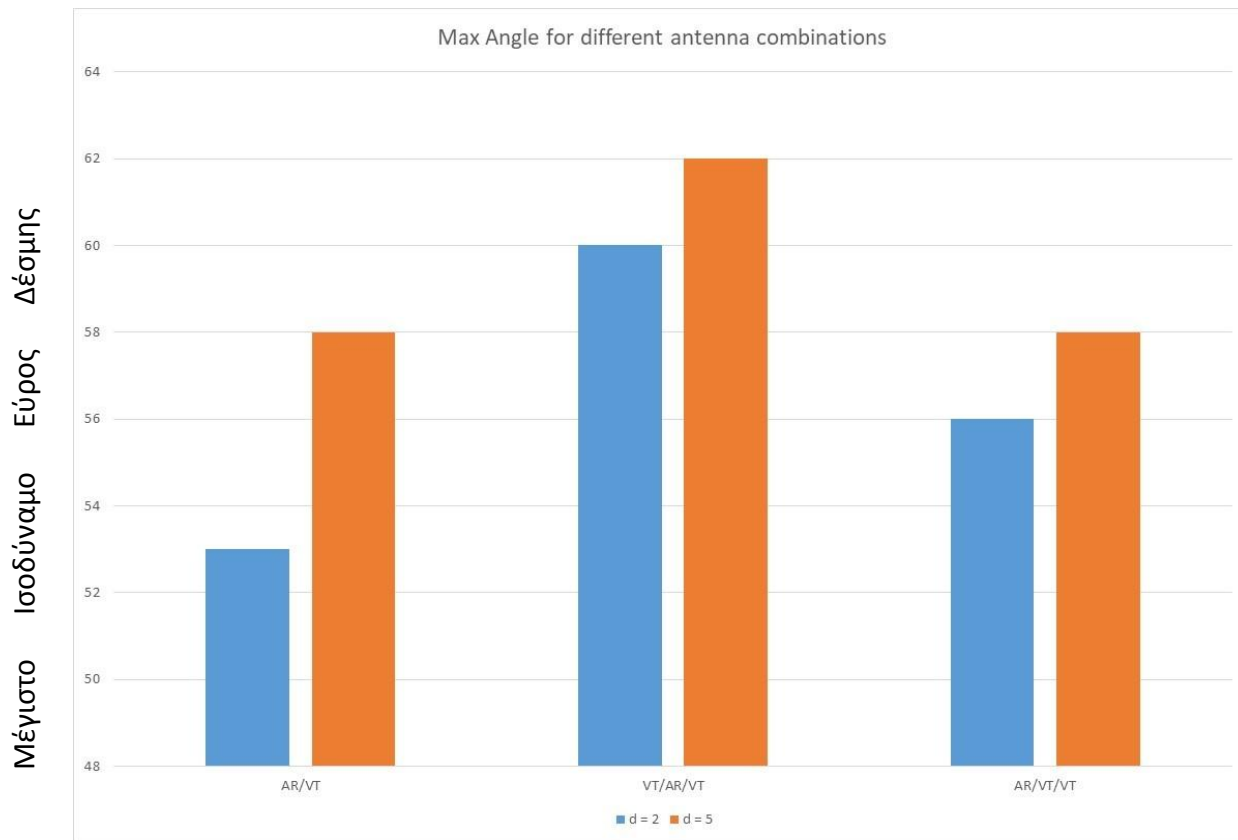
Συνοψίζοντας, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το μέγιστο ισοδύναμο εύρος δέσμης δεν εξαρτάται σημαντικά από την απόσταση των κεραιών, εξαρτάται όμως από το πλήθος τους σύμφωνα με τη λογαριθμική σχέση που περιγράφηκε.

3.6.4. Επέκταση κώδικα για 2 και 3 διαφορετικές κεραιές

Ο κώδικας `maxWidthN.m` επεκτάθηκε έτσι ώστε να παράγει αποτελέσματα για 2 διαφορετικές κεραιές (`maxWidth2.m`) και 3 διαφορετικές κεραιές (`maxWidth3.m`). Ελήφθησαν αποτελέσματα για αποστάσεις 2λ και 5λ και για τους συνδυασμούς κεραιών:

1. AR/VT
2. VT/AR/VT
3. AR/VT/VT

Τα αποτελέσματα φαίνονται γραφικά στην Εικόνα 3-24. Από το διάγραμμα, φαίνεται ότι παίζει ρόλο η σειρά των κεραιών στο χώρο και ότι το βέλτιστο αποτέλεσμα εμφανίζεται όταν υπάρχει χωρική συμμετρία, δηλαδή η κεραιά AR βρίσκεται ανάμεσα στις δύο VT κεραιές. Επίσης βλέπουμε και την επίδραση που έχει η απόσταση στο ισοδύναμο εύρος δέσμης. Παρατηρούμε ότι τη μεγαλύτερη διαφορά στο εύρος δέσμης την έχουμε στην περίπτωση των δύο κεραιών (AR/VT) όταν μεταβαίνουμε από $d=2\lambda$ σε $d=5\lambda$. Υπενθυμίζεται ότι για αποστάσεις πάνω από 5λ δεν υπάρχει μεταβολή στο ισοδύναμο εύρος δέσμης.



Εικόνα 3-25: Μέγιστο ισοδύναμο εύρος δέσμης για διαφορετικούς συνδυασμούς κεραιών

3.6.5. Σύγκριση του ισοδύναμου oscillation εύρους με το εύρος σάρωσης του κύριου λοβού

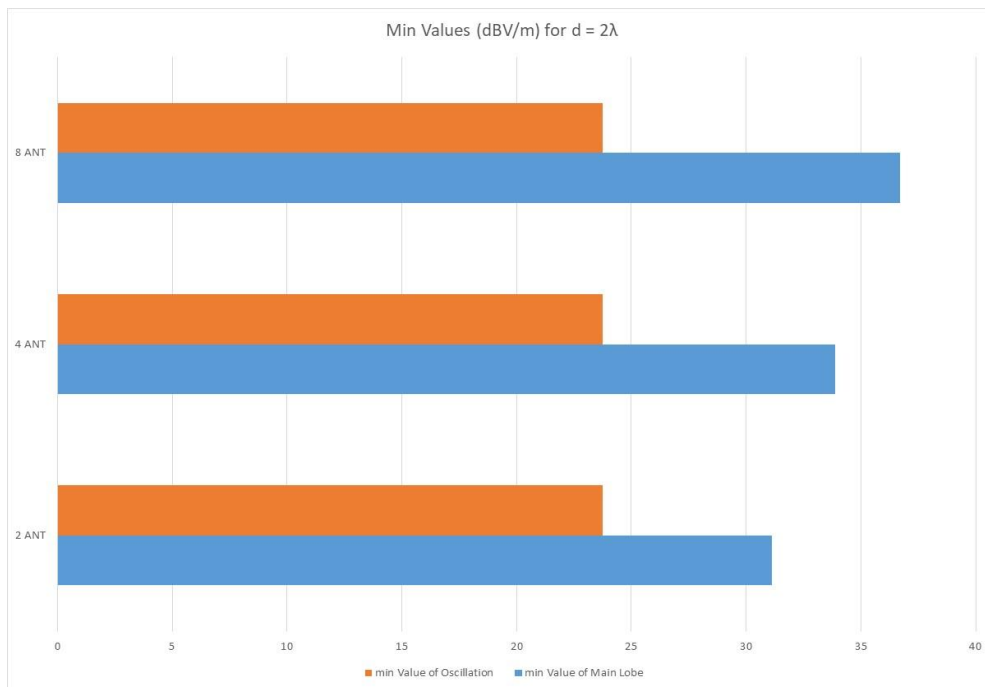
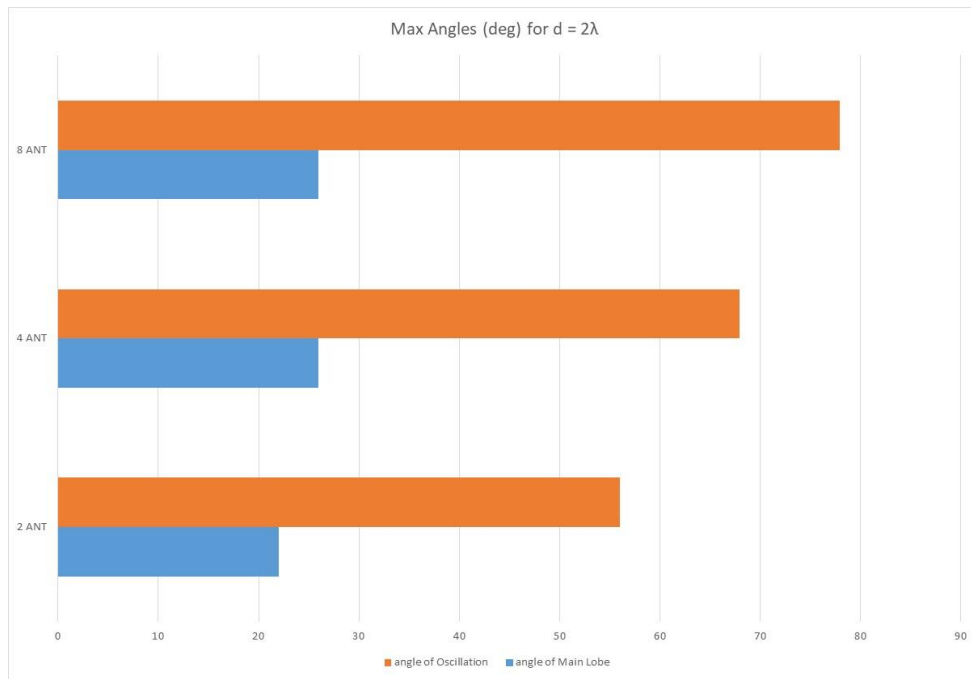
Για να διαπιστωθεί ότι υπάρχει όφελος με τη χρήση του oscillation αναπτύχθηκε ένα τελευταίο κομμάτι κώδικα (mainLobeTrackingN.m) το οποίο ανιχνεύει την κίνηση και το πλάτος του κύριου λοβού του array καθώς το διάγραμμα ακτινοβολίας στρέφεται. Καταγράφει το εύρος των γωνιών του χώρου για το οποίο ο κύριος λοβός διατηρεί πλάτος τουλάχιστον ίσο με το πλάτος ημίσειας ισχύος της αρχικής κεραιάς, καθώς και την ελάχιστη τιμή του μέσα σε αυτό το εύρος. Βρίσκει δηλαδή το ωφέλιμο εύρος όταν γίνεται σάρωση του κύριου λοβού και το συγκρίνει με το αντίστοιχο εύρος του pattern oscillation. Τα παραγόμενα αποτελέσματα έχουν την παρακάτω μορφή:

8 identical antennas, 3.0 lamda apart

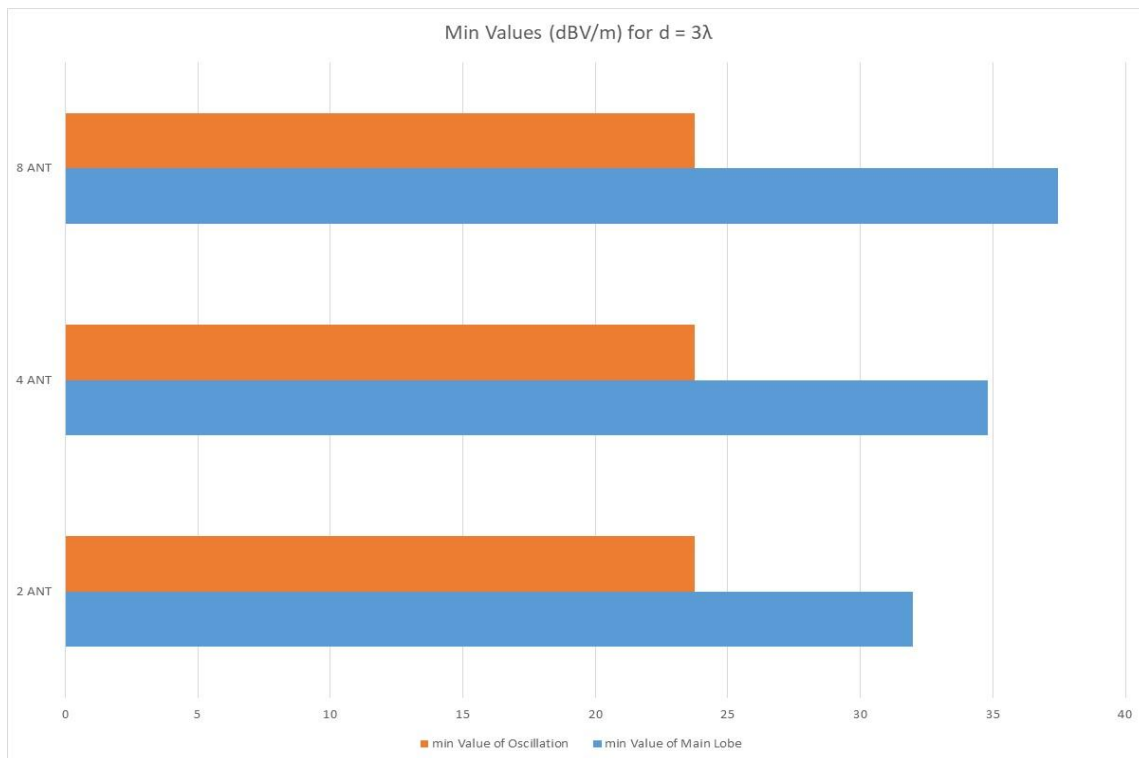
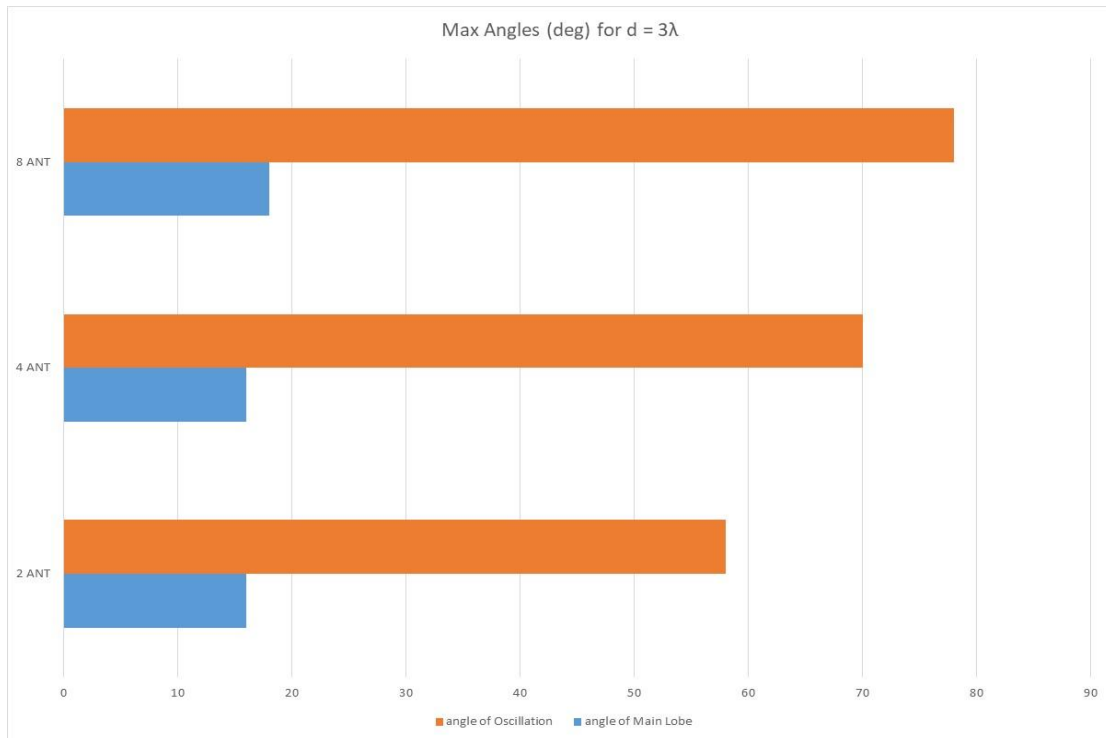
Main Lobe: min Value, max Angle: 37.45 dBV/m, 18 degrees
Active oscillation area: -38 to 40 degrees
Oscillation min Val, max Angle: 23.76 dBV/m, 78 degrees
Required phase shift: 38 to 318 degrees

- Το *Main Lobe min Value* είναι το ελάχιστο πλάτος του κύριου λοβού ακτινοβολίας και το *max Angle* είναι το μέγιστο εύρος του τομέα που μπορεί να καλύψει ο λοβός με την μεταβολή της φάσης τροφοδοσίας.
- Το *Active oscillation area* είναι η περιοχή που καλύπτει το ισοδύναμο εύρος oscillation.
- Το *Oscillation min Val* είναι η ελάχιστη τιμή πλάτους των πλευρικών λοβών στην περίπτωση του pattern oscillation. Υπενθυμίζεται εδώ ότι έχει τεθεί ως κριτήριο το πλάτος αυτό να είναι τουλάχιστον ίσο με το πλάτος ημίσειας ισχύος έκαστης κεραίας, επομένως η τιμή αυτή θα είναι πάντα σταθερή. Το αντίστοιχο *max Angle* είναι το μέγιστο εύρος του τομέα που καλύπτει η τεχνική pattern oscillation.
- Το *Required phase shift* είναι το απαιτούμενο εύρος τιμών των φάσεων τροφοδοσίας για το οποίο επιτυγχάνουμε το μέγιστο ισοδύναμο εύρος δέσμης (Oscillation max angle).

Για την σύγκριση των δύο τεχνικών παρήχθησαν αποτελέσματα για 2, 4 και 8 κεραίες και για αποστάσεις 2λ και 3λ η αναπαράσταση των οποίων γίνεται στα παρακάτω διαγράμματα (εικόνες 3-25 και 3-26).



Εικόνα 3-26: Σύγκριση α) ισοδύναμου εύρους δέσμης, β) ελάχιστης τιμής πλάτους μεταξύ της τεχνικής *pattern oscillation* και της σάρωσης του κύριου λοβού για απόσταση μεταξύ κεραιών $d=2\lambda$



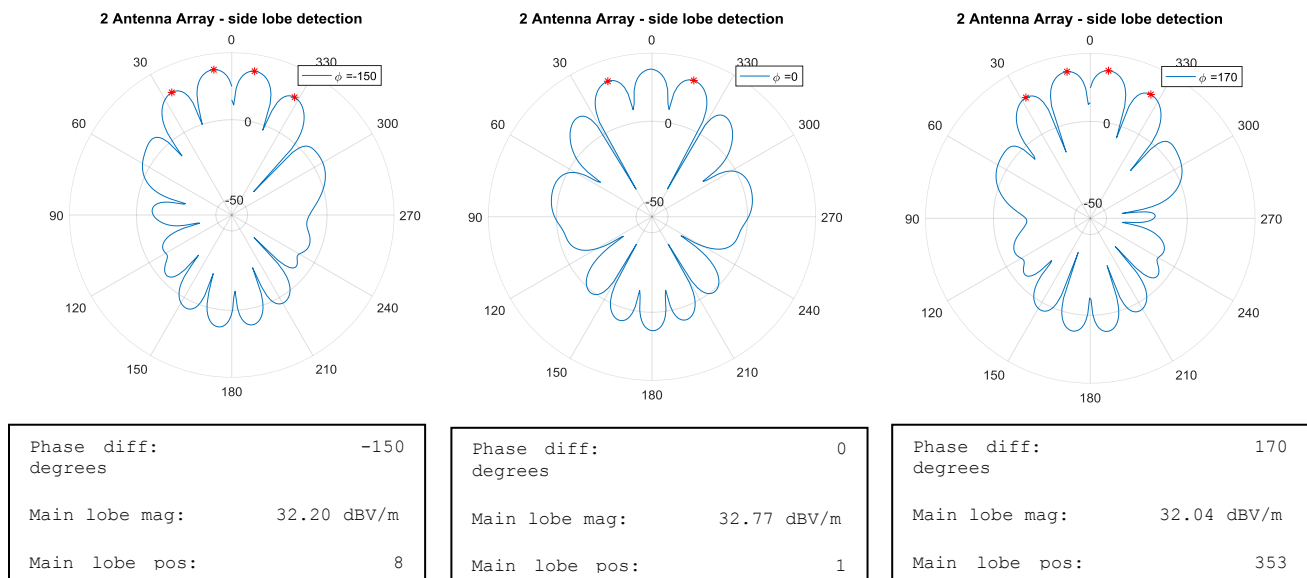
Εικόνα 3-27: Σύγκριση α)ισοδύναμου εύρους δέσμης, β)ελάχιστης τιμής ισχύος μεταξύ της τεχνικής *pattern oscillation* και της σάρωσης του κύριου λοβού για απόσταση μεταξύ κεραιών $d=3\lambda$

Στην εικόνα 3-25 βλέπουμε τα αποτελέσματα για απόσταση μεταξύ των κεραιών $d=2\lambda$. Στο πρώτο γράφημα φαίνεται με πορτοκαλί χρώμα το μέγιστο ισοδύναμο εύρος δέσμης για την περίπτωση του oscillation και με μπλε χρώμα το μέγιστο εύρος σάρωσης του κύριου λοβού. Είναι φανερό ότι το ισοδύναμο εύρος δέσμης oscillation είναι σε κάθε περίπτωση πολύ μεγαλύτερο από το εύρος σάρωσης κύριου λοβού και μάλιστα για μεγαλύτερο πλήθος κεραιών η διαφορά μεταξύ των δύο τεχνικών γίνεται ακόμα μεγαλύτερη.

Στο δεύτερο γράφημα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την ελάχιστη τιμή πλάτους, πορτοκαλί για την περίπτωση του oscillation και μπλε για την σάρωση κύριου λοβού. Όπως ήταν αναμενόμενο, στην περίπτωση του oscillation η ελάχιστη τιμή πλάτους είναι σταθερή και ίση με την τιμή πλάτους ημίσειας ισχύος της κεραίας. Όπως εξηγήσαμε, η τιμή αυτή αποτελεί κριτήριο για την κατασκευή του ισοδύναμου εύρους δέσμης oscillation. Αντίθετα, η ελάχιστη τιμή πλάτους του κύριου λοβού αυξάνεται, κάτι που είναι λογικό από τη στιγμή που γνωρίζουμε ότι το κέρδος της στοιχειοκεραίας αυξάνεται με την προσθήκη περισσότερων στοιχείων.

Στην εικόνα 3-26 επαναλαμβάνονται τα αποτελέσματα, αυτή τη φορά για απόσταση μεταξύ των κεραιών $d=3\lambda$. Παρατηρούμε ότι σε σχέση με την απόσταση $d=2\lambda$ το εύρος σάρωσης του κύριου λοβού έγινε μικρότερο ενώ το ισοδύναμο εύρος oscillation έχει παραμείνει στα ίδια επίπεδα. Εδώ μπορούμε να επισημάνουμε αυτό το πλεονέκτημα που έχει η τεχνική pattern oscillation, δηλαδή την αναισθησία στις μεταβολές της απόστασης d όσον αφορά το ισοδύναμο εύρος δέσμης. Στο δεύτερο γράφημα βλέπουμε όπως και πριν τις ελάχιστες τιμές πλάτους για κάθε τεχνική. Όπως ήταν αναμενόμενο δεν παρατηρείται ουσιαστική μεταβολή διότι αφενός στην περίπτωση του pattern oscillation έχουμε το κριτήριο ημίσειας ισχύος και αφετέρου γνωρίζουμε ότι για το μακρινό πεδίο το πλάτος του κύριου λοβού (και κατ' επέκταση το κέρδος) εξαρτάται μόνο από το πλήθος των κεραιών.

Τα παραπάνω γίνονται ευκολότερα κατανοητά βλέποντας τα στιγμιότυπα του διαγράμματος ακτινοβολίας καθώς μεταβάλλεται η φάση τροφοδοσίας (εικόνα 3-27). Μπορούμε να δούμε ότι καθώς η φάση τροφοδοσίας μεταβάλλεται από -150° έως $+170^\circ$ ο κύριος λοβός στρέφεται από τις 8° στις 353° , δηλαδή καλύπτει ένα τομέα $8^\circ - (360^\circ - 353^\circ) = 15^\circ$. Είναι φανερό ότι καθώς στρέφεται το διάγραμμα οι πλευρικοί λοβοί (κόκκινα σημεία) καλύπτουν πολύ μεγαλύτερο τομέα, περίπου ίσο με 60° . Επαληθεύεται επίσης ότι ο κύριος λοβός διατηρεί ένα ελάχιστο πλάτος 32dBV/m .



Εικόνα 3-28: Στιγμιότυπα του διαγράμματος ακτινοβολίας του array για διαφορετικές φάσης τροφοδοσίας

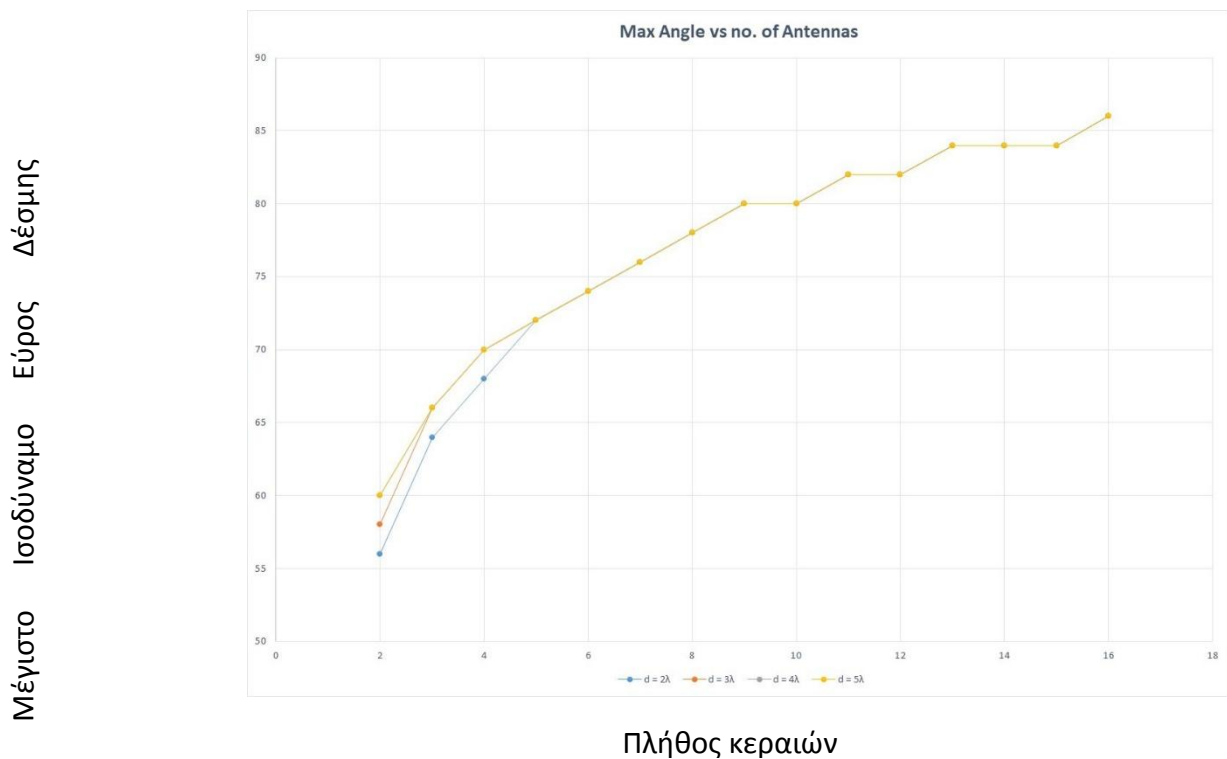
Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι η αρχική υπόθεση επαληθεύεται, διότι η τεχνική της σάρωσης του κύριου λοβού έχει μεν το πλεονέκτημα όσον αφορά την ισχύ, θυσιάζει όμως το ισοδύναμο εύρος δέσμης. Αντίθετα, με το pattern oscillation έχουμε πολύ καλό ισοδύναμο εύρος δέσμης και ικανοποιητικό επίπεδο ισχύος.

Στο επόμενο κεφάλαιο αναλύονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ανάλυση Αποτελεσμάτων – Συζήτηση

4.1. Σχέση oscillation εύρους δέσμης – απόστασης κεραιών – πλήθους κεραιών

Το πρώτο σημαντικό αποτέλεσμα της έρευνας που έγινε είναι η διαπίστωση ότι η απόσταση μεταξύ των κεραιών επηρεάζει το ισοδύναμο εύρος δέσμης του oscillation μόνο για μικρές αποστάσεις και μικρό πλήθος κεραιών. Ο παράγοντας που επηρεάζει δραματικά το εύρος είναι το πλήθος των κεραιών. Η διερεύνηση έγινε για αποστάσεις από 2λ έως 8λ. Υπενθυμίζεται ότι λόγω των φυσικών διαστάσεων των κεραιών η μικρότερη απόσταση που μπορούν να τοποθετηθούν είναι 2λ (46,2 cm).



Εικόνα 4-1: Εξάρτηση του ισοδύναμου εύρους δέσμης από το πλήθος των κεραιών και την μεταξύ τους απόσταση

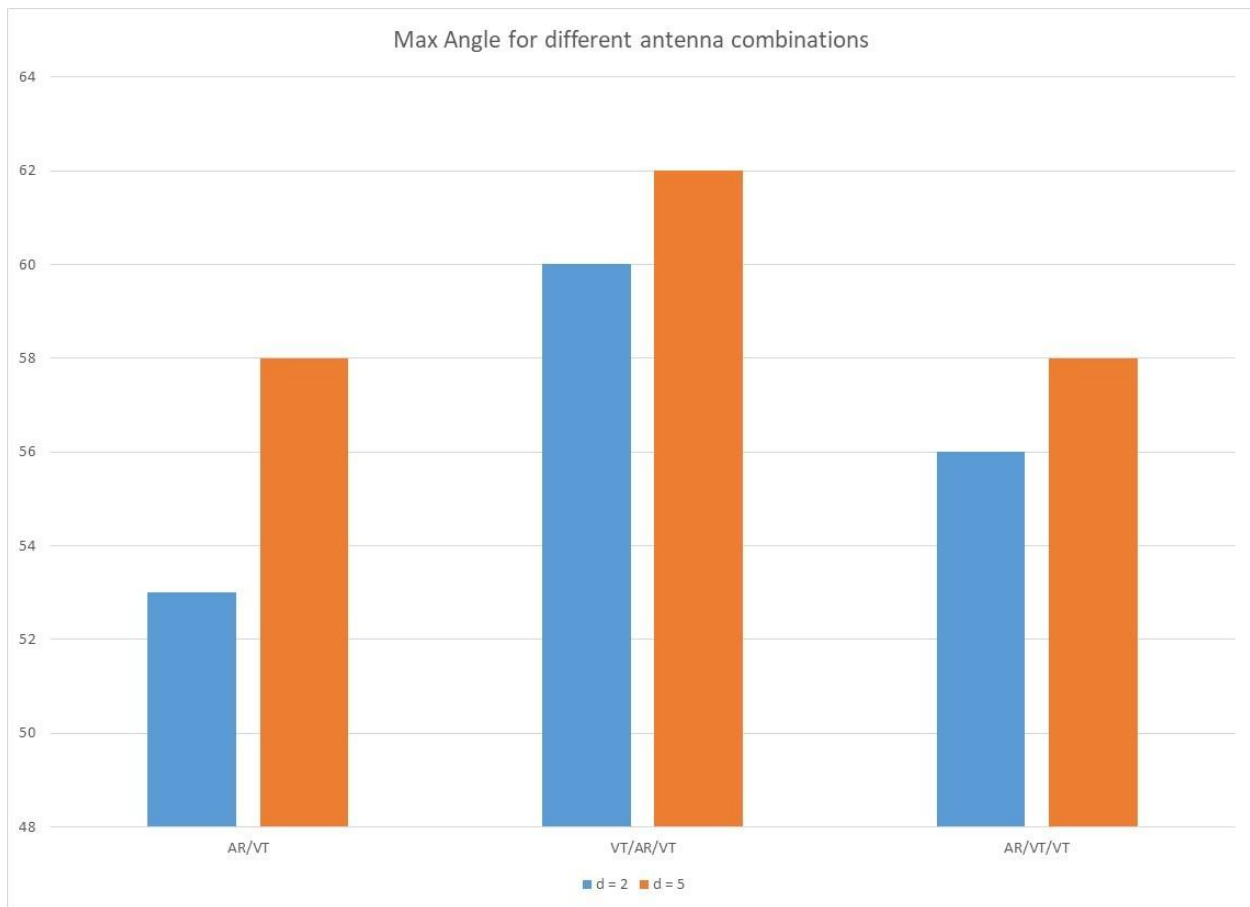
Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι για πλήθος κεραιών από 2 έως 4 έχουμε μία αύξηση του ισοδύναμου εύρους δέσμης κατά λιγότερο από 5 μοίρες όταν μεταβαίνουμε από $d=2\lambda$ σε $d=4\lambda$. Για μεγαλύτερες αποστάσεις ή περισσότερες κεραιές δεν παρατηρείται διακύμανση των τιμών του

μέγιστου εύρους. Βρέθηκε επίσης ότι υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ του λογάριθμου με βάση το 2 του πλήθους των κεραιών και του λογάριθμου με βάση το 2 του μέγιστου εύρους.

Το τελικό συμπέρασμα είναι ότι αν έχουμε array 2 κεραιών και θέλουμε να μεγιστοποιήσουμε το ισόδυναμο εύρος δέσμης θα πρέπει οι κεραιές να τοποθετηθούν σε απόσταση μεταξύ τους τουλάχιστον 4λ. Για 3 και 4 κεραιές η βέλτιστη απόσταση είναι 3λ ενώ για 5 κεραιές και πάνω δεν υπάρχει διαφοροποίηση στο εύρος.

4.2. Ανάλυση για 2 και 3 διαφορετικές κεραιές

Το επόμενο βήμα ήταν η μελέτη της συμπεριφοράς του array όταν αυτό αποτελείται από 2 ή τρεις διαφορετικές κεραιές.



Εικόνα 4-2: Ισοδύναμο εύρος δέσμης για διαφορετικούς συνδυασμούς κεραιών στο χώρο

Στην Εικόνα 4-2 απεικονίζεται το μέγιστο ισόδυναμο εύρος δέσμης για τρεις διαφορετικούς συνδυασμούς κεραιών: α)AR/VT, β)VT/AR/VT και γ)AR/VT/VT. Με μπλε χρώμα είναι τα αποτελέσματα για απόσταση κεραιών $d=2\lambda$ και με πορτοκαλί για απόσταση $d=5\lambda$.

Η πρώτη παρατήρηση είναι ότι επιβεβαιώνονται τα αποτελέσματα της προηγούμενης μελέτης καθ' ότι για δύο κεραίες η απόκλιση στο ισοδύναμο εύρος δέσμης είναι περίπου 5 μοίρες όταν αυξάνεται η απόσταση τους από 2λ σε 5λ, ενώ για 3 κεραίες η απόκλιση είναι μικρότερη. Το σημαντικότερο εύρημα όμως είναι ότι όταν οι κεραίες είναι διαφορετικές παίζει ρόλο και η θέση τους στο χώρο. Είναι εμφανές ότι για να έχουμε βελτιστοποίηση του ισοδύναμου εύρους δέσμης θα πρέπει η κεραία AR να βρίσκεται ανάμεσα στις δύο κεραίες VT δηλαδή το array να παρουσιάζει συμμετρία.

Ως τελική οδηγία για τη βελτιστοποίηση όσον αφορά το ισοδύναμο εύρος δέσμης oscillation μπορούμε να πούμε τα εξής:

Εάν έχουμε στη διάθεση μας N όμοιες κεραίες τότε η βελτιστοποίηση περιγράφεται από τον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4-1: Βελτιστοποίηση array αποτελούμενο από N κεραίες τύπου AR

Array από κεραίες AR				
	N = 2 κεραίες	N = 3 κεραίες	N = 4 κεραίες	N = 5 κεραίες
d	4λ	3λ	3λ	3λ
Μεγ.εύρος	60°	66°	70°	72°
Ζητούμενες φάσεις τροφ.	-33° έως 130°	114° έως 310°	91° έως 327°	77° έως 319°

Πίνακας 4-2: Βελτιστοποίηση array αποτελούμενο από N κεραίες τύπου VT

Array από κεραίες VT				
	N = 2 κεραίες	N = 3 κεραίες	N = 4 κεραίες	N = 5 κεραίες
d	4λ	3λ	2λ	2λ
Μεγ.εύρος	54°	62°	66°	70°
Ζητούμενες φάσεις τροφ.	32° έως 252°	17° έως 151°	-45° έως 188°	-60° έως 198°

Μπορούμε να σχολιάσουμε για τα παραπάνω αποτελέσματα ότι η κεραία AR δίνει ελαφρώς μεγαλύτερο ισοδύναμο εύρος δέσμης (κατά 4 μοίρες) έναντι της κεραίας VT.

Φυσικά ο κώδικας `maxWidthN.m` μας δίνει τη δυνατότητα να βελτιστοποιήσουμε το array για οποιοδήποτε πλήθος N.

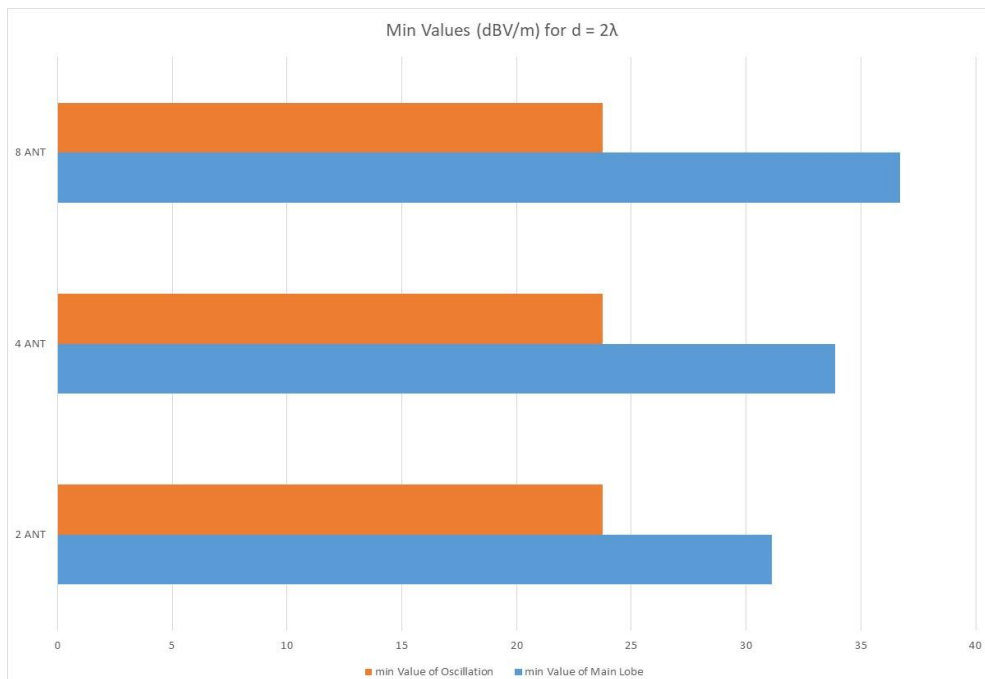
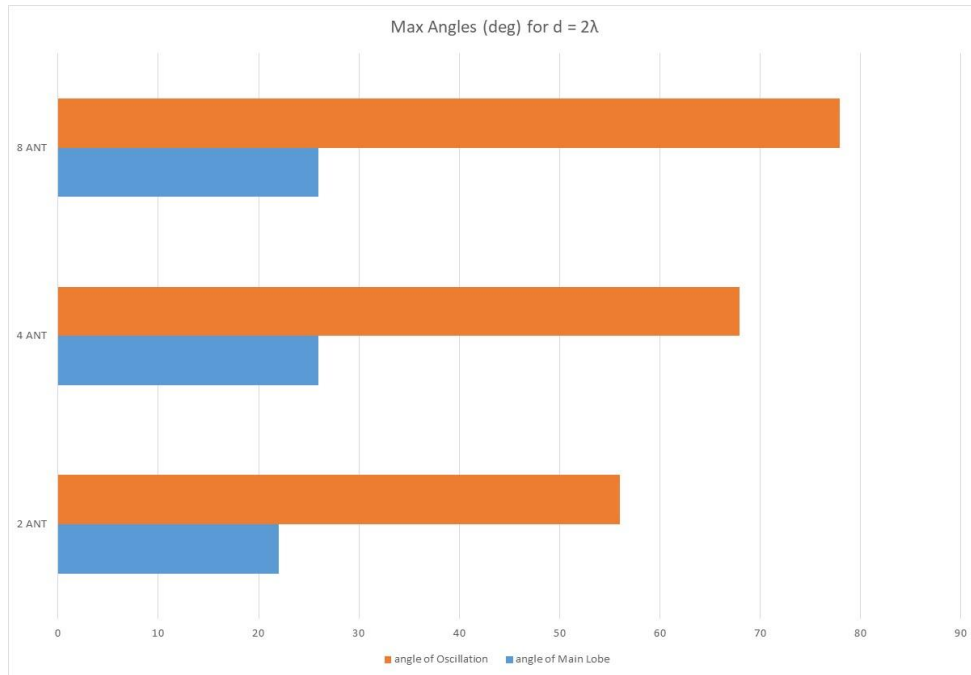
- Στην περίπτωση που έχουμε στη διάθεσή μας 2 ή 3 διαφορετικές κεραίες (π.χ. μία κεραία AR και δύο κεραίες VT) τότε η βελτιστοποίηση περιγράφεται από τον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4-3: Βελτιστοποίηση array αποτελούμενου από δύο διαφορετικά είδη κεραιών

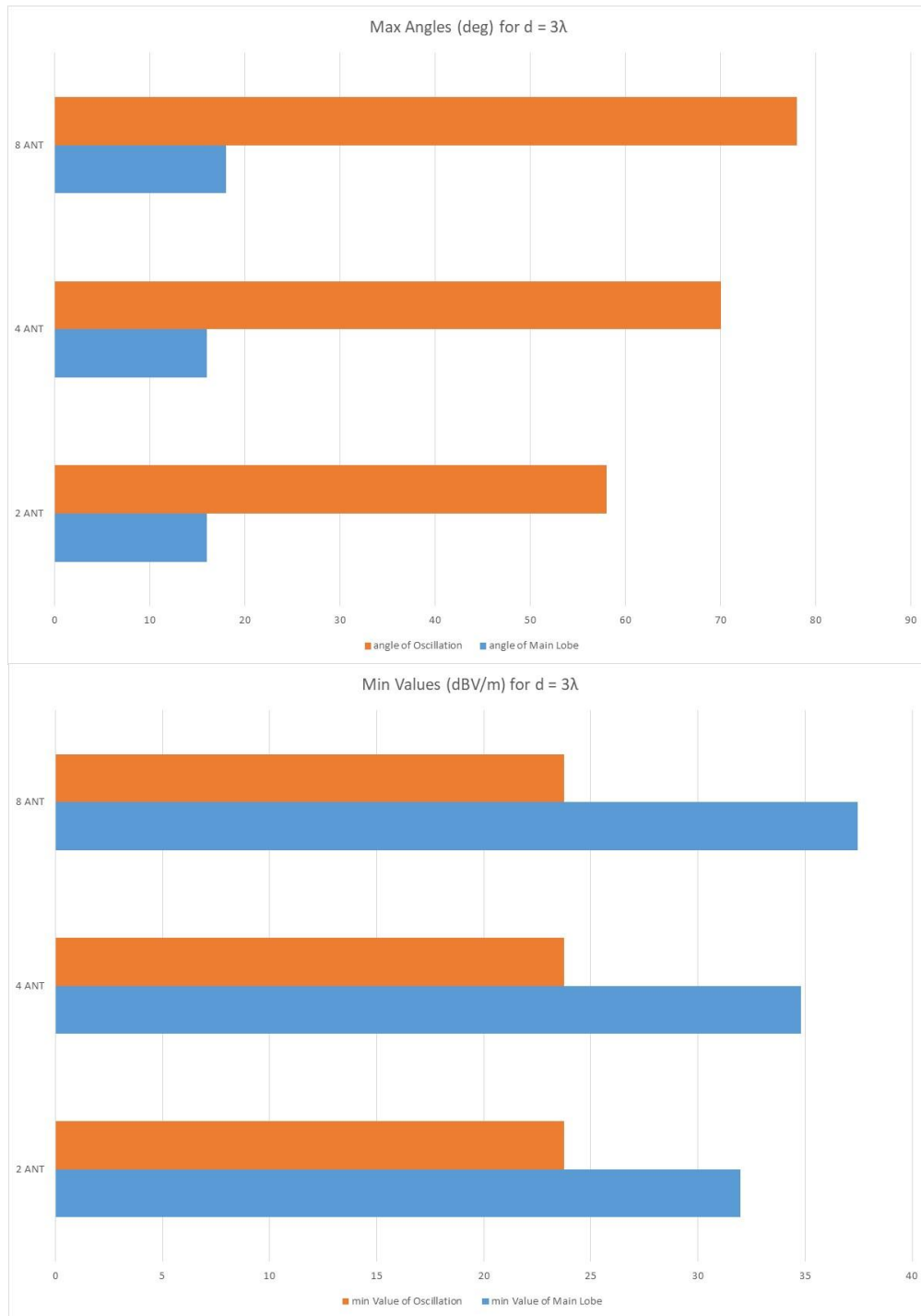
	AR/VT	VT/AR/VT
d	5λ	3λ
Μεγ. εύρος	58°	62°
Ζητούμενες φάσεις τροφ.	-29° έως 277°	-30° έως 199°

4.3. Σύγκριση Pattern Oscillation – Σάρωσης κύριου λοβού

Το τελευταίο κομμάτι της μελέτης κρίνεται ιδιαίτερος σημαντικό καθώς αποτελεί απόδειξη ότι η τεχνική του Pattern Oscillation υπερτερεί όσον αφορά το ισοδύναμο εύρος δέσμης έναντι της τεχνικής σάρωσης μόνο του κύριου λοβού.



Εικόνα 4-3: Σύγκριση α) ισοδύναμου εύρους δέσμης, β) ελάχιστης τιμής ισχύος μεταξύ της τεχνικής pattern oscillation και της σάρωσης του κύριου λοβού για απόσταση μεταξύ κεραιών $d=2\lambda$



Εικόνα 4-4: Σύγκριση α) ισodύναμου εύρους δέσμης, β) ελάχιστης τιμής ισχύος μεταξύ της τεχνικής *pattern oscillation* και της σάρωσης του κύριου λοβού για απόσταση μεταξύ κεραιών $d=3\lambda$

Στην Εικόνα 4-3α απεικονίζεται το ισοδύναμο εύρος δέσμης στην περίπτωση του oscillation (πορτοκαλί) και στην περίπτωση σάρωσης κύριου λοβού (μπλε), για απόσταση $d=2\lambda$. Είναι φανερό ότι το ισοδύναμο εύρος δέσμης oscillation είναι σε κάθε περίπτωση πολύ μεγαλύτερο από το εύρος σάρωσης κύριου λοβού και μάλιστα για μεγαλύτερο πλήθος κεραιών η διαφορά μεταξύ των δύο τεχνικών γίνεται ακόμα μεγαλύτερη.

Στην Εικόνα 4-3β παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για την ελάχιστη τιμή πλάτους κάθε τεχνικής, πορτοκαλί για την περίπτωση του oscillation και μπλε για την σάρωση κύριου λοβού. Όπως ήταν αναμενόμενο, στην περίπτωση του oscillation η ελάχιστη τιμή πλάτους είναι σταθερή και ίση με την τιμή πλάτους ημίσειας ισχύος της κεραιάς. Όπως εξηγήσαμε, η τιμή αυτή αποτελεί κριτήριο για την κατασκευή του ισοδύναμου εύρους δέσμης oscillation. Αντίθετα, η ελάχιστη τιμή πλάτους του κύριου λοβού αυξάνεται, κάτι που είναι λογικό από τη στιγμή που γνωρίζουμε ότι το κέρδος της στοιχειοκεραίας αυξάνεται με την προσθήκη περισσότερων στοιχείων.

Στην Εικόνα 4-4 επαναλαμβάνονται τα αποτελέσματα, αυτή τη φορά για απόσταση μεταξύ των κεραιών $d=3\lambda$. Παρατηρούμε ότι σε σχέση με την απόσταση $d=2\lambda$ το εύρος σάρωσης του κύριου λοβού έγινε μικρότερο ενώ το ισοδύναμο εύρος oscillation έχει παραμείνει στα ίδια επίπεδα. Εδώ μπορούμε να επισημάνουμε αυτό το πλεονέκτημα που έχει η τεχνική pattern oscillation, δηλαδή την αναισθησία στις μεταβολές της απόστασης d όσον αφορά το ισοδύναμο εύρος δέσμης. Στο δεύτερο γράφημα βλέπουμε όπως και πριν τις ελάχιστες τιμές πλάτους για κάθε τεχνική. Όπως ήταν αναμενόμενο δεν παρατηρείται ουσιαστική μεταβολή διότι αφενός στην περίπτωση του pattern oscillation έχουμε το κριτήριο ημίσειας ισχύος και αφετέρου γνωρίζουμε ότι για το μακρινό πεδίο το πλάτος του κύριου λοβού (και κατ' επέκταση το κέρδος) εξαρτάται μόνο από το πλήθος των κεραιών.

Από τα προηγούμενα διαγράμματα μπορούμε να εξάγουμε τα εξής συμπεράσματα:

- Το εύρος σάρωσης του κύριου λοβού είναι κατά πολύ μικρότερο από το ισοδύναμο εύρος του oscillation. Ακόμα και στη χειρότερη περίπτωση των 2 κεραιών η τεχνική του pattern oscillation δίνει περίπου 3 φορές μεγαλύτερο εύρος.
- Σε κάθε περίπτωση η ελάχιστη ισχύς του oscillation είναι εξ ορισμού ίση με την ημίσεια ισχύ της αρχικής κεραιάς. Αντίθετα ο κύριος λοβός διατηρεί μεγαλύτερη ελάχιστη ισχύ η οποία μάλιστα αυξάνεται όσο αυξάνεται το πλήθος των κεραιών, κάτι που φυσικά ήταν αναμενόμενο. Ενδεικτικά, στην περίπτωση των δύο κεραιών η ελάχιστη τιμή του πλάτους κύριου λοβού είναι κατά 40% μεγαλύτερη, ενώ γίνεται περίπου 60% μεγαλύτερη για 8 κεραιές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:

Σύνοψη – Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η συμπεριφορά και οι ιδιότητες ενός array αποτελούμενο από πυραμιδοειδείς κεραίες χοάνης. Βασικός άξονας της μελέτης είναι η χρήση των κεραιών σε σύστημα μικροκυματικών παλμών υψηλής ισχύος, με τελικό σκοπό την βελτιστοποίηση της ακτινοβολήσης ενός κινούμενου στόχου (αυτοκινήτου). Η προσπάθεια εστιάστηκε στο να ξεπεραστεί ο περιορισμός που έχουν εν γένει οι κεραίες χοάνης όσον αφορά το εύρος δέσμης λόγω της μεγάλης κατευθυντικότητας που παρουσιάζουν. Το στενό εύρος δέσμης, εφόσον η κεραία είναι στατική, περιορίζει την εύρεση του στόχου σε ένα μικρό σχετικά τομέα επομένως η πιθανότητα να βρίσκεται ο στόχος εντός εμβέλειας τη σωστή στιγμή είναι μικρή.

Μία πρόταση για να ξεπεραστεί αυτός ο περιορισμός είναι να χρησιμοποιηθούν παραπάνω από μία κεραίες έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένα array από χοανοκεραίες, όπου με έλεγχο της φάσης τροφοδοσίας έκαστης κεραίας να υπάρχει η δυνατότητα περιστροφής του διαγράμματος ακτινοβολίας, με σκοπό την κάλυψη μεγαλύτερου τομέα του χώρου. Είδαμε αρχικά ότι ακριβώς επειδή οι κεραίες είναι κατευθυντικές δεν υπάρχει αρκετή επικάλυψη των διαγραμμάτων ακτινοβολίας και κατ'επέκταση η απόκλιση που εμφανίζει ο κύριος λοβός σε μοίρες, λόγω της μη ισοφασικής τροφοδοσίας, είναι αρκετά περιορισμένη, δηλαδή η σάρωση του κύριου λοβού δεν καλύπτει αρκετά μεγάλο τμήμα του χώρου.

Η επόμενη παρατήρηση που έγινε είναι ότι η διάταξη αυτή παράγει ένα διάγραμμα ακτινοβολίας με αρκετά ισχυρούς πλευρικούς λοβούς. Προτάθηκε να γίνει η εκμετάλλευση αυτών των λοβών έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένα ισοδύναμο εύρος δέσμης το οποίο θα είναι μεγαλύτερο από το εύρος δέσμης του κύριου λοβού. Για την επίτευξη του στόχου αυτού εισήχθη η έννοια του pattern oscillation. Το pattern oscillation είναι η ταλάντωση του διαγράμματος ακτινοβολίας του array λόγω της μεταβαλλόμενης φάσης τροφοδοσίας των κεραιών. Σκοπός είναι λοιπόν να βρεθούν οι απαιτούμενες φάσεις τροφοδοσίας για τις οποίες οι αρκούντως ισχυροί πλευρικοί λοβοί «διατρέχουν» το μεγαλύτερο δυνατό τμήμα του χώρου. Με την έννοια «αρκούντως ισχυροί» εννοούνται οι πλευρικοί λοβοί οι οποίοι έχουν ισχύ τουλάχιστον ίση ή μεγαλύτερη από την ημίσεια ισχύ έκαστης κεραίας. Αυτό αποδείχθηκε ότι είναι εφικτό επομένως υπάρχει πλέον η δυνατότητα δημιουργίας ενός ισοδύναμου εύρους δέσμης το οποίο είναι μεγαλύτερο από το εύρος σάρωσης του κύριου λοβού και παράλληλα διατηρεί ικανή ισχύ.

Έχοντας ως βάση το παραπάνω συμπέρασμα αυτό που μένει είναι να αναπτυχθεί μία μεθοδολογία η οποία θα επιτρέπει τη σχεδίαση ενός array με βέλτιστα χαρακτηριστικά. Ως παράμετροι του προβλήματος τέθηκαν οι εξής:

- Το είδος του array (αν αποτελείται από όμοιες ή διαφορετικές κεραίες)

- Το πλήθος των κεραιών του array
- Η απόσταση μεταξύ των κεραιών στο χώρο
- Η διαφορά φάσης τροφοδοσίας των κεραιών

Η ανάπτυξη της μεθοδολογίας αυτής αποτέλεσε και τον κύριο κορμό της παρούσας εργασίας και περιεγράφηκε αναλυτικά στα προηγούμενα κεφάλαια. Εν τέλει, δείχθηκε ότι μπορούμε να κατασκευάσουμε ένα array, είτε αυτό αποτελείται από όμοιες κεραιές είτε από διαφορετικές, με τις κατάλληλες παραμέτρους έτσι ώστε να πετύχουμε αφενός το μεγαλύτερο δυνατό ισοδύναμο εύρος δέσμης (σε σχέση με την περίπτωση σάρωσης μόνο του κύριου λοβού) και αφετέρου τη διασφάλιση ότι η ισχύς εκπομπής μέσα σε αυτό το εύρος παραμένει ίση ή μεγαλύτερη από την ισχύ της αρχικής κεραιάς. Δείξαμε ότι η τεχνική του *rpattern oscillation* αποτελεί μία καλή λύση διότι οι πολλοί πλευρικοί λοβοί που εμφανίζονται εγγυώνται ότι σε κάθε θέση μέσα στο ισοδύναμο εύρος δέσμης το αυτοκίνητο δέχεται ισχύ τουλάχιστον ίση με την ημίσεια ισχύ του κάθε στοιχείου, επομένως δεν αποτελεί συμβιβασμό έναντι της τεχνικής σάρωσης του κύριου λοβού. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ότι μακροσκοπικά έχουμε ένα σύστημα λιγότερο κατευθυντικό από το αρχικό, κάτι που συνεπάγεται αύξηση της πιθανότητας εύρεσης του στόχου.

5.1. Μελλοντικές προεκτάσεις

Ενδεχόμενη προέκταση της παρούσας έρευνας θα μπορούσε να περιλαμβάνει μελέτη για την υλοποίηση ενός πραγματικού array με μηχανικούς *phase shifters* ελεγχόμενους από *controller*. Οι *shifters* είναι απαραίτητο να είναι μηχανικοί και όχι ηλεκτρονικοί λόγω της υψηλής ισχύος λειτουργίας.

Η μελέτη θα μπορούσε επιπλέον να επεκταθεί για διδιάστατα arrays ορθογωνικού σχήματος, δηλαδή με στοιχεία τοποθετημένα τόσο στον άξονα x όσο και στον άξονα y .

Βιβλιογραφία – Αναφορές

- [1] “Search Mobile Computing - Horn Antenna.” [Online]. Available at URL: <http://searchmobilecomputing.techtarget.com/definition/horn-antenna>. [Accessed: 19-Oct-2017].
 - [2] “Antenna Theory - The horn antenna” [Online]. Available at URL: <http://www.antenna-theory.com/antennas/aperture/horn.php>. [Accessed: 19-Oct-2017].
 - [3] C. A. Balanis, *Antenna Theory : Analysis and Design*, (3rd Ed.) Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2005.
 - [4] Σ. Α. Μυτιληναίος, “Εξομάλυνση Διαλείψεων Πολυδιαδρομικής Διάδοσης με Χρήση Ευφυών Κεραίων,” Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα, 2006.
 - [5] S. A. Mitilineos, K. S. Mougialkos, and S. C. A. Thomopoulos, “Design and optimization of ESPAR antennas via impedance measurements and a genetic algorithm [antenna designer’s notebook],” *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 51, no. 2, pp. 118–123, 2009.
 - [6] S. A. Mitilineos and C. N. Capsalis, “A new, low-cost, switched beam and fully adaptive antenna array for 2.4 GHz ISM applications,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 55, no. 9, pp. 2502–2508, 2007.
 - [7] B. Cao, J. Xue, and A. L. P. Horn, “The Polarization Properties of Horn Antenna,” *Int. Conf. Intelligent Control Computing Applications (ICCA 2016)*, pp. 433–436, 2016.
 - [8] S. Ordek and A. Kizilay, “Horn Array Antenna Design for Ku-Band Applications,” *9th Intl. Conf. Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, pp. 351–354, 2015.
 - [9] P. D. Patel, “Fundamentals of Phased Arrays,” ASTRON, The Netherlands, 2007.
 - [10] R. J. Mailloux, *Phased Array Antenna Handbook*, (2nd Ed.) Norwood, MA: Artech House Antennas & Propagation Library, 2005.
 - [11] S. J. Blank and M. F. Hute, “On the Empirical Optimization of Antenna Arrays,” *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 47, no. 2, pp. 1–15, 2005.
 - [12] H. A. Ragheb, “Implementation of linear phased arrays using dual mode horns,” in *Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics*, 1990.
 - [13] A. Khidre, F. Yang and A. Elsherbini, “Radiation characteristics of linear phased arrays consisting of beam scanning reconfigurable antenna,” in *4th IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications*, 2011.
 - [14] A. Nafe and G. M. Rebeiz, “On The Phase Center Analysis of Linear Phased-Array Antennas,” in *IEEE Int. Symp. Antennas Propag. Usn. Natl. Radio Sci. Meet.*, no. 3, pp. 2023–2024, 2017.
-

- [15] G. Yang, J. Li, D. Wei, and R. Xu, "Study on Wide-Angle Scanning Linear Phased Array Antenna," *IEEE Trans. Antennas Propagation*, no. c, pp. 1–1, 2017.
 - [16] P. K. Teh and S. A. Zekavat, "Achieving Directionality and Transmit Diversity via Integrating Beam Pattern Scanning (BPS) Antenna Arrays and OFDM," *Wirel. Sens. Netw.*, vol. 2, no. 2, pp. 186–196, 2010.
 - [17] P. K. Teh and S. A. Zekavat, "Beam Pattern Scanning (BPS) versus Space-Time Block Coding (STBC) and Space-Time Trellis Coding (STTC)," *Int. J. Commun. Netw. Syst. Sci.*, vol. 2, no. 6, pp. 469–479, 2009.
 - [18] S. A. Zekavat and P. K. Teh, "Beam-Pattern-Scanning Dynamic-Time Block Coding: Achieving High Performance," vol. 5, no. 9, pp. 2334–2337, 2006.
 - [19] S. A. Zekavat, C. R. Nassar, and S. Shattil, "Oscillating-beam smart antenna arrays and multicarrier systems: achieving transmit diversity, frequency diversity, and directionality," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 51, no. 5, pp. 1030–1039.
 - [20] S. A. Zekavat and C. R. Nassar, "Achieving high-capacity wireless by merging multicarrier CDMA systems and oscillating-beam smart antenna arrays," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 52, no. 4, pp. 772–778, 2003.
-