



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία
ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΕΚΤΥΠΩΜΕΝΩΝ ΚΕΡΑΙΩΝ ΜΙΜΟ ΚΑΤΑΛΛΗΛΩΝ ΓΙΑ
ΑΥΤΟΚΙΝΟΥΜΕΝΑ ΟΧΗΜΑΤΑ

Φοιτητής: Λάζαρος Κουγιούλης

AM: 50346355

Επιβλέπων Καθηγητής

Κωνσταντίνος Ν. Βουδούρης

Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ ΙΟΥΝΙΟΣ 2022



UNIVERSITY OF WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING

Diploma Thesis
PRINTED MIMO ANTENNAS DESIGN SUITABLE
FOR AUTONOMOUS VEHICLES

Student: Lazaros Kougioulis
Registration Number: 50346355

Supervisor

Konstantinos N. Voudouris
Professor of Wireless Communications

ATHENS JUNE 2022

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

Μέλος Α, Επιβλέπων	Μέλος Β	Μέλος Γ
Κωνσταντίνος Βουδούρης Καθηγητής	Στυλιανός Μυτιλιναίος Αναπληρωτής Καθηγητής	Στυλιανός Σαββαΐδης Καθηγητής

Copyright ©

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ Κουγιούλης Λάζαρος, Ιούνιος , 2022

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 τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

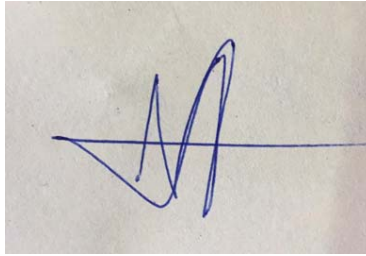
ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Κουγιούλης Λάζαρος του Ευαγγέλου, με αριθμό μητρώου 50346355 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος. Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου. Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι 01/07/23 και έπειτα από αίτησή μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντος καθηγητή.»

Ο Δηλών:



Λάζαρος Κουγιούλης

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Το ραντάρ αυτοκινούμενων οχημάτων έχει γίνει βασικό χαρακτηριστικό της τεχνολογίας, καθώς με την ικανότητά του να ανιχνεύει αντικείμενα και να μετρά την απόσταση και την ταχύτητά τους, αυτά τα συστήματα ραντάρ έχουν προσαρμοστεί ώστε να εκτελούν διάφορες λειτουργίες. Σε αυτήν την διατριβή θα εξετάσουμε και θα υλοποιήσουμε κεραιосύστημα κατάλληλο για αυτά τα ραντάρ και συχνότητες 77 με 81 Ghz.

Σκοπός και στόχοι

Ο στόχος αυτής της διατριβής είναι η κατασκευή των κεραιών λήψης και εκπομπής για ραντάρ αυτοκινήτου, οι κεραίες θα πρέπει να παρέχουν υψηλές επιδόσεις στο εύρος συχνοτήτων 76-81 GHz. Η τεχνολογία των μικροταινιών είναι μια καλή λύση για την κατασκευή μιας κεραίας και λογβ οικονομίας. Για μικρές συχνοτητες τυπου χιλιοστων οπου το κερδος είναι χαμηλό, χρησιμοποιούμε την μεθοδο των συστοιχιών για να αυξήσουμε το κέρδος.

Μεθοδολογία

Για την εκπλήρωση της διπλωματικής, ακολουθήθηκε μία συγκεκριμένη μεθοδολογία. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία μπορεί να σπάσει σε τέσσερα κομμάτια για να εξηγηθεί. Αρχικά η διπλωματική ξεκίνησε με την μελέτη του βιβλίου για την κατανόηση της θεωρίας, καθώς και την ανάγνωση σχετικών μελετών, που είχαν πραγματοποιηθεί από ανθρώπους του τομέα. Στην συνέχεια κρίθηκε απαραίτητη η εκμάθηση του λογισμικού CST studio για να είναι δυνατή η μοντελοποίηση της κεραίας. Σε συνέχεια με την καθοδήγηση και του επιβλέποντα καθηγητή έγιναν συγκεκριμένες βελτιώσεις στην σχεδίαση της κεραίας. Η συγγραφή της παρούσας διπλωματικής ήταν το τελευταίο βήμα στην διαδικασία εκπλήρωσης.

Δομή

Το συνολικό κείμενο της διπλωματικής χωρίζεται σε 4 κεφάλαια και στην συνέχεια ακολουθεί η σύνοψη. Στα πρώτα τρία κεφάλαια παρατίθεται θεωρία και στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μοντελοποίηση της κεραίας. Κάθε κεφάλαιο έχει υποενότητες, υποκεφάλαια, για να γίνει διαμερισματοποίηση του κειμένου και να είναι πιο ευνόητο το κείμενο. Το κείμενο συνδυάζεται με εικόνες για να γίνει πιο εύληπτο από τον αναγνώστη.

Περίληψη

Η διπλωματική εργασία που ακολουθεί, έχει ως κύριο θέμα την μελέτη κεραιών που λειτουργούν σε υψηλές συχνότητες και τις εφαρμογές τους σε αυτοκινούμενα οχήματα, και κυρίως την μοντελοποίηση της λειτουργίας μίας κεραίας 78 GHz. Αποτελεί μία προσπάθεια ανασκόπησης της βιβλιογραφίας και μοντελοποίησης μίας κεραίας με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η βιβλιογραφία που αφορά τις κεραίες. Γίνεται αρχικά μία ιστορική αναδρομή στην χρήση των κεραιών και των ραντάρ. Γίνεται επίσης μία σύνδεση της τεχνολογίας των κεραιών με τα αυτοκινούμενα οχήματα. Στην συνέχεια αναλύονται οι παράμετροι που αντιπροσωπεύουν μία κεραία και καταλήγοντας κατηγοριοποιούνται με βάση το είδος τους οι κεραίες.

Στο δεύτερο κεφάλαιο βρίσκεται η βιβλιογραφική αναφορά για τα αυτοκινούμενα οχήματα. Αφού οριστεί τι αποτελεί ένα αυτοκινούμενο όχημα, γίνεται μία ιστορική αναδρομή στα αυτοκινούμενα οχήματα. Έπονται οι αρχές λειτουργίας των αυτοκινούμενων οχημάτων και μία ανάλυση των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται η ανάλυση των κεραιών των κεραιών Multiple Input Multiple Output (MIMO), ξεκινώντας με την παρουσίαση των αρχών λειτουργίας τους. Έπειτα παρουσιάζονται διάφορες εφαρμογές καθώς και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των MIMO κεραιών.

Στο τελευταίο κεφάλαιο γίνεται η ανάλυση της μοντελοποίησης που πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό Studio CST. Παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα που παρήχθησαν μέσω του λογισμικού.

Ακολουθεί καταληκτικά ένα κεφάλαιο συμπερασμάτων, όπου συνοψίζεται η εργασία.

Abstract

The main topic of the dissertation is the study of antennas that operate at high frequencies and their applications in motor vehicles, and mainly the modeling of the operation of a 78 GHz antenna. It is an attempt to review the literature and model an antenna with specific characteristics.

The first chapter presents the literature on antennas. An initial review of the use of antennas and radar is made. It is also presented a connection between antenna technology and motor vehicles. Then the parameters that represent an antenna are analyzed and finally the antennas are categorized based on their type.

In the second chapter is the bibliographic reference for motor vehicles. After defining what a motor vehicle is, a historical review of motor vehicles is made. The following are the principles of operation of motor vehicles and an analysis of their advantages and disadvantages.

In the third chapter, the antennas of the Multiple Input Multiple Output (MIMO) antennas are analyzed, starting with the presentation of their operating principles. Then various applications are presented as well as the advantages and disadvantages of MIMO antennas.

The last chapter analyzes the modeling performed in Studio CST software. The results produced through the software are presented and commented.

Following is a concluding chapter, which summarizes the dissertation.

Περιεχόμενα

Copyright ©	4
Περίληψη.....	7
Abstract	8
Κεφάλαιο 1 ^ο : Ραντάρ και κεραιές	11
1.1 Ραντάρ	11
1.2 Κεραιές	11
1.3 Ραντάρ και κεραιές στην αυτοκινητοβιομηχανία	15
1.4 Οι εφαρμογές του ραντάρ στο αυτοκίνητο	18
1.5 Παράμετροι Σχεδίασης κεραιών	18
1.5.1 Διάγραμμα ακτινοβολίας (Radiation Pattern)	18
1.5.2 Εύρος δέσμης και κατευθυντικότητα.....	20
1.5.3 Κέρδος	22
1.5.4 Πόλωση κεραιών	24
1.5.5 Εύρος ζώνης	25
1.5.6 Απόδοση κεραιάς	26
1.5.7 Εμπέδηση Εισόδου	26
1.6 Κεραιές μικροταινίας	27
1.6.1 Βασική δομή κεραιών μικροταινίας.....	28
1.6.2 Βασική αρχή λειτουργίας και φαινόμενο κροσσών.....	29
1.6.3 Τροφοδοσία κεραιών μικροταινίας	31
1.7 Στοιχειοκεραίες	35
1.7.1 Στοιχειοκεραία N στοιχείων τοποθετημένα σε ευθεία γραμμή	37
1.8 Συστοιχία κεραιών.....	38
1.8.1 Λειτουργία συστοιχίας κεραιών.....	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : Αυτοκινούμενα οχήματα	44
2.1 Ορισμός	44
2.2 Ιστορική αναδρομή	45
2.2.1 Η ψηφιακή επανάσταση: Αέρας, γη και θάλασσα.....	45
2.2.2 Αυτόνομα αυτοκίνητα σήμερα	47
2.3 Πώς λειτουργούν τα αυτόνομα αυτοκίνητα	47
2.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των αυτοκινούμενων αυτοκινήτων.....	49
2.4.1 Πλεονεκτήματα	50

2.4.2 Μειονεκτήματα	51
2.5 Ανάπτυξη κεραιών για μελλοντικά ραντάρ αυτοκινήτων.....	52
2.5.1 Τεχνολογία αιχμής.....	55
Κεφάλαιο 3ο : MIMO	56
3.1 Εισαγωγή στις MIMO	57
3.2 Τυπικές διαμορφώσεις MIMO	59
3.2.1 Επιλογές κεραιάς για ραδιόφωνα MIMO	60
3.3 Εφαρμογές.....	61
3.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα MIMO	61
3.4.1 Πλεονεκτήματα του MIMO	61
3.4.2 Μειονεκτήματα του MIMO	62
Κεφάλαιο 4ο : Σχεδιασμός Κεραίας.....	63
4.1 Εισαγωγή	63
4.2 Σχεδίαση μοναδιαίας κεραιάς	63
4.3 Διαγραμμα ακτινοβολίας της κεραιάς	68
4.4 Στοιχειοκεραία 4x2.....	70
Συμπεράσματα	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
Βιβλιογραφία.....	72

Κεφάλαιο 1^ο : Ραντάρ και κεραίες

1.1 Ραντάρ

Το Radar χρησιμοποιείται για την ανίχνευση αντικειμένων για περισσότερο από έναν αιώνα. Το 1904 ένας Γερμανός εφευρέτης με το όνομα Christian Huelsmeyer όπου κατέκτησε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για ένα πρώιμο στάδιο του Radar το οποίο ονόμασε 'telemobiloscope' και είχε δυνατότητα να εντοπίσει πλοία σε απόσταση έως και 3 χιλιομέτρων. Ως εργαλείο είχε ένα κατευθυντικό πομπό με μήκος κύματος 40–50cm και έναν ξεχωριστό δέκτη. Στις πρώτες εκδόσεις ήταν δυνατός μόνο ο εντοπισμός του στόχου ενώ στη συνέχεια μπορούσε να γίνει και μια εκτίμηση για την απόσταση του στόχου. Τα Radar μας χρησιμεύουν ιδιαίτερα για δυο συστήματα, τα συστήματα αυτόματου φρεναρίσματος AEBS (Automatic Emergency Braking System) και για την διατήρηση και εξισορρόπησης της ταχύτητας του οχήματος ACC (Adaptive Cruise Control). Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται έχουν εμβέλεια 80–200m. Η συχνότητα του κύματος είναι περίπου τα 77GHz αυξάνοντας την ακρίβεια του αισθητήρα, την ανάλυση του αντικειμένου και με μήκος κύματος 3.9mm η κεραία έχει πολύ μικρό μέγεθος. Στα αυτοκίνητα χρησιμοποιούνται κυρίως ο τύπος Radar Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW) επειδή συνδυάζει υψηλή ανάλυση και αντίληψη βάθους και μπορεί να ανιχνεύει αντικείμενα όπως πεζοί και ποδήλατα. Σε αυτό τον τύπο Radar, ο πομπός και ο δέκτης λειτουργούν ταυτόχρονα. Ο πομπός λειτουργεί χρησιμοποιώντας έναν φορέα ο οποίος είναι ημιτονοειδής και με συχνότητα που μεταβάλλεται περιοδικά με το χρόνο. Το σήμα που φεύγει από τον πομπό ανακλάται στο αντικείμενο και επιστρέφει με διαφορετική συχνότητα στο δέκτη. Φυσικά, για να λειτουργήσει ένα σύστημα Ραντάρ, πρέπει να διαθέτει και ένα μέσο επικοινωνίας ώστε να λαμβάνει σήματα. Σε αυτό το σημείο λαμβάνει χώρα ένα σύστημα το οποίο ονομάζεται κεραία. (Chatterjee, 2018)

1.2 Κεραίες

Η κεραία είναι μια μεταλλική συσκευή η οποία χρησιμοποιείται για τη μετατροπή ρευμάτων σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα και αντίστροφα. Οι κεραίες μπορούν να χωριστούν σε κεραίες λήψης και κεραίες εκπομπής. Μια κεραία εκπομπής μετατρέπει σήματα σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα και εν συνεχεία τα μεταδίδει, ενώ μια κεραία λήψης μετατρέπει τα προσπίπτοντα ηλεκτρομαγνητικά κύματα σε σήματα. Οι

διαστάσεις, το σχήμα και το μέγεθος των κεραιών σχετίζονται και εξαρτώνται από το μήκος κύματος του εκπεμπόμενου σήματος.

Η πρώτη κεραία εμπνεύστηκε από τον Γερμανό φυσικό Heinrich Hertz. Στο τέλος της δεκαετίας του 1880 προχώρησε στην υλοποίηση ενός οροσήμου πειράματος για να επαληθεύσει τη θεωρία του Βρετανού μαθηματικοφυσικού James Clerk Maxwell, ότι το ορατό φως είναι μόνο ένα κομμάτι μιας πολύ μεγάλης κατηγορίας ηλεκτρομαγνητικών εφέ που θα είχαν την δυνατότητα να περάσουν από τον αέρα (ή κενό χώρο) διαδέχοντας το ένα κύμα το άλλο. Ο Hertz επινόησε έναν πομπό για τέτοιου είδους κύματα που απαρτίζονταν από δύο επίπεδες, τετράγωνες και μεταλλικές πλάκες. Καθεμία από αυτές συνδεόταν με μια ράβδο, οι οποίες με τη σειρά τους συνδέονταν με μεταλλικές σφαίρες που βρίσκονταν σε κάποια απόσταση μεταξύ τους. Με την χρήση ενός επαγωγικού πηνίου παράγονταν ταλαντωμένα σήματα στις ράβδους.

Ο Ιταλός φυσικός Guglielmo Marconi, ο κύριος εφευρέτης της ασύρματης τηλεγραφίας, δημιούργησε διάφορες κεραίες τόσο για την αποστολή όσο και για τη λήψη σημάτων, και ανακάλυψε επίσης τη σημασία της τοποθέτησης κεραιών σε ψηλά σημεία για τη μετάδοση σημάτων χαμηλής συχνότητας. Στις πρώτες δοκιμές κεραιών που υλοποιήθηκαν από τον Marconi και λοιπούς, οι συχνότητες λειτουργίας καθορίζονταν κατά βάση από το μέγεθος και το σχήμα της κεραίας. Σε μεταγενέστερες κεραίες η συχνότητα ρυθμίστηκε από έναν ταλαντωτή, ο οποίος παρήγαγε ένα πιο ισχυρό σήμα, το οποίο στην συνέχεια μεταδιδόταν. Οι κεραίες που κατασκευάστηκαν κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1920 είχαν τα στοιχεία τους τοποθετημένα σε έναν πίνακα. Κατά την επόμενη δεκαετία επινοήθηκαν οι κεραίες μεταλλικών κέρατων, μετά την ανάπτυξη κυματοδηγών που θα μπορούσαν να κατευθύνουν τη διάδοση σημάτων πολύ υψηλής συχνότητας. Με τα χρόνια, διάφοροι τύποι κεραιών έχουν αναπτυχθεί για διαφορετικούς σκοπούς. Μια κεραία μπορεί να σχεδιαστεί ειδικά για μετάδοση ή λήψη, αλλά υπάρχει η δυνατότητα κατασκευής κεραιάς που να επιτελεί και τις δύο λειτουργίες. Οι κεραίες κατηγοριοποιούνται είτε ανάλογα με την χρήση τους, είτε με τα Hertz λειτουργίας τους είτε μέσω του σκοπού για τον οποίον χρησιμοποιούνται.

Θα αναλυθούν συνοπτικά τα είδη των κεραιών και τις κατηγορίες τους.

- Κεραίες σύρματος (wire antennas): Οι κεραίες σύρματος είναι κάτι γνωστό σε όλους , επειδή τις χρησιμοποιούμε σχεδόν παντού. Σε αυτοκίνητα , κτίσματα , πλοία , αεροπλάνα , διαστημόπλοια κ. άλλα. Υπάρχουν ποικιλία στις κεραίες σύρματος , όπως ευθύγραμμο τμήμα (το δίπολο) , βρόχος καθώς και ελικοειδής. Οι κεραίες τύπου βρόχου δεν περιορίζονται σε κυκλικό σχήμα - μπορούν επίσης να είναι ορθογώνιες , τετράγωνες , ελλειπτικές ή άλλης μορφολογίας . Ο κυκλικός βρόχος είναι η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη μορφή , επειδή είναι απλούστερος στην κατασκευή .

- Κεραίες ανοίγματος : Οι κεραίες ανοίγματος (aperture antennas , αναφέρονται και ως κεραίες επιφάνειας) , χρησιμοποιούνται σήμερα περισσότερο από ότι στο παρελθόν , λόγω της διαρκώς αυξανόμενης ζήτησης για πολυπλοκότερες κεραίες, καθώς και της δυνατότητας τους να χρησιμοποιούν υψηλότερες συχνότητες . Τέτοιου είδους κεραίες είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για επικοινωνιακά συστήματα σε αεροσκάφη και διαστημόπλοια επειδή μπορούν να στερεωθούν στην επιφάνεια τους. Επιπρόσθετα , συνήθως προστατεύονται από διηλεκτρικά υλικά ώστε να αποφευχθούν ζημιές και απώλειες από δυσμενείς καιρικές συνθήκες .

- Κεραίες μικροταινίας: Οι κεραίες μικροταινίας (microstrip antennas) γνώρισαν μεγάλη επιτυχία κατά την δεκαετία του 1970 , κυρίως σε διαστημικές εφαρμογές. Σήμερα , χρησιμοποιούνται κυρίως σε εμπορικές εφαρμογές. Απαρτίζονται από μια μεταλλική λωρίδα (patch) πάνω σε γειωμένο υπόστρωμα. Η μεταλλική λωρίδα μπορεί να έχει διάφορες μορφές . Ωστόσο οι λωρίδες ορθογωνίου και κυκλικού σχήματος είναι οι πιο δημοφιλείς επειδή είναι εύκολες στην ανάλυση και στην κατασκευή ενώ ταυτόχρονα έχουν ελκυστικά χαρακτηριστικά ακτινοβολίας ιδιαίτερα σε χαμηλή ακτινοβολία κάθετης πόλωσης (cross polarization). Οι κεραίες μικροταινίας έχουν διακριτική εμφάνιση , είναι προσαρμόσιμες σε επίπεδες και μη επίπεδες επιφάνειες , είναι φθηνές και κατασκευάζονται εύκολα με την σύγχρονη τεχνολογία τυπωμένων κυκλωμάτων. Επιπλέον διαθέτουν μηχανική στιβαρότητα όταν στερεώνονται σε άκαμπτες επιφάνειες , είναι συμβατές με τις σχεδιάσεις MMIC , και επιτρέπουν εύκολη ρύθμιση της συχνότητας συντονισμού , της πόλωσης , του διαγράμματος ακτινοβολίας και της σύνθετης αντίστασης τους. Κεραίες αυτού του τύπου τοποθετούνται εύκολα στην επιφάνεια σύγχρονων αεροσκαφών , διαστημόπλοιων , δορυφόρων , πυραύλων , αυτοκινήτων ή ακόμα και φορητών συσκευών.

- **Στοιχειοκεραίες :** Σε ορισμένες περιπτώσεις δεν είναι δυνατό να επιτευχθούν τα επιθυμητά χαρακτηριστικά ακτινοβολίας με ένα μεμονωμένο στοιχείο ακτινοβολίας . Ωστόσο , η σύνθεση πολλαπλών στοιχείων ακτινοβολίας με συγκεκριμένο ηλεκτρικό και γεωμετρικό τρόπο σχηματίζοντας μία συστοιχία ή στοιχειοκεραία (array antenna) όπως είναι ευρέως γνωστή , μπορεί να δώσει ως αποτέλεσμα τα επιθυμητά χαρακτηριστικά ακτινοβολίας . Η διάταξη σύνδεσης μπορεί να γίνει κατά τρόπο ώστε η στοιχειοκεραία να δίνει μέγιστη ακτινοβολία σε συγκεκριμένη διεύθυνση , ελάχιστη σε άλλες , ή να σχεδιαστεί για να επιτύχει οποιαδήποτε άλλη επιθυμητή συμπεριφορά. Συνήθως ο όρος στοιχειοκεραία χρησιμοποιείται για διατάξεις στις οποίες τα επιμέρους στοιχεία ακτινοβολίας είναι ξεχωριστά. Επίσης , ο ίδιος όρος χρησιμοποιείται ευρύτερα για να περιγράψουμε ένα σύστημα στοιχείων ακτινοβολίας τα οποία είναι τοποθετημένα σε συνεχή δομή . (Sickinger, 2018)

- **Κεραίες ανακλαστήρα:** Οι επιτυχίες που σημειώνονται στην εξερεύνηση του διαστήματος έχουν δώσει μεγάλη ώθηση στην ανάπτυξη της θεωρίας των κεραίων . Η ανάγκη για επικοινωνίες πολύ μεγάλων αποστάσεων κατέστησε επιτακτική τη χρήση προηγμένων τύπων κεραίων , ικανών να εκπέμπουν και να λαμβάνουν σήματα που διανύουν εκατομμύρια χιλιόμετρα . Ένας ευρέως χρησιμοποιούμενος τύπος κεραίας για τέτοιες εφαρμογές , είναι ο παραβολικός ανακλαστήρας (parabolic reflector) . Κεραίες αυτού του τύπου έχουν κατασκευαστεί με διαμέτρους 305 μέτρων ή ακόμα μεγαλύτερες. Τέτοια μεγέθη είναι αναγκαία προκειμένου να επιτυγχάνεται το υψηλό κέρδος που απαιτείται για μετάδοση ή λήψη σημάτων τα οποία διανύουν τόσο μεγάλες αποστάσεις . Ένας ακόμη τύπος ανακλαστήρα , όχι τόσο συνηθισμένος όσο ο παραβολικός , είναι ο γωνιώδης ανακλαστήρας (corner reflector).

- **Φακοειδείς κεραίες:** Οι φακοί χρησιμοποιούνται κυρίως για την συγκέντρωση μιας αποκλίνουσας ενεργειακής δέσμης , αποτρέποντας την διασπορά της σε ανεπιθύμητες κατευθύνσεις. Με κατάλληλη επιλογή σχήματος και υλικού κατασκευής , οι φακοί μπορούν να μετασχηματίσουν διάφορες μορφές αποκλινουσών ενεργειακών δεσμών σε επίπεδα κύματα. Οι φακοειδείς κεραίες (lens antennas) μπορούν να χρησιμοποιούνται στην πλειονότητα των εφαρμογών όπου χρησιμοποιούνται παραβολικοί ανακλαστήρες , ιδιαίτερα δε στις υψηλότερες συχνότητες. Στις χαμηλές συχνότητες , οι διαστάσεις και το βάρος των φακών αυξάνονται υπερβολικά . Οι φακοειδείς κεραίες κατηγοριοποιούνται είτε βάσει του υλικού κατασκευής τους , είτε βάσει της γεωμετρίας τους. (Varoutas, 2015)



Σχήμα 1.1: Σύστημα κεραίας εκπομπής και λήψης (Chatterjee, 2018)

1.3 Ραντάρ και κεραίες στην αυτοκινητοβιομηχανία

Η ιδέα για χρήση συστημάτων ραντάρ σε οχήματα για την πρόληψη συγκρούσεων υπάρχει ήδη από το 1964. Τη δεκαετία του 1970 κατασκευάστηκαν μερικά πρωτότυπα ραντάρ αυτοκινήτων τα οποία δοκιμάστηκαν στο δρόμο . Όμως , εκείνη την εποχή το κόστος ήταν πολύ υψηλό και οι διαστάσεις των εξαρτημάτων αρκετά μεγάλες και αυτά καθιστούσαν την εμπορική τους εφαρμογή πολύ δύσκολη. Τη δεκαετία του 1990 οι μεγάλοι κατασκευαστές αυτοκινήτων ξεκίνησαν την έρευνα για ραντάρ αυτοκινήτων.

Από το 1992 το ραντάρ συχνότητας 24 GHz, το οποίο αξιοποιεί το φαινόμενο doppler, που αναπτύχθηκε από την Eaton VORAD Technologies έχει εγκατασταθεί σε περίπου 1700 λεωφορεία Greyhound και βοήθησε στη μείωση του ποσοστού ατυχημάτων κατά 25%. Στα τέλη της δεκαετίας του '90 η εταιρία Mercedes-Benz έκανε μία παρουσίαση για το σύστημα DISTRONIC το οποίο αφορά ραντάρ 77 GHz και έπειτα οι υπόλοιποι ανταγωνιστές εξήγαγαν αντίστοιχα προϊόντα. Σήμερα, παρατηρείται εκτεταμένη χρήση ραντάρ σε όλα τα είδη και μεγέθη αυτοκινήτων.

Υπάρχουν 2 εύρη συχνοτήτων τα οποία χρησιμοποιούνται για εφαρμογές ραντάρ αυτοκινήτων, 24 GHz και 77 GHz. Σαν λύση τα 77 GHz προσφέρουν πλεονεκτήματα όπως μικρότερο μέγεθος και μεγαλύτερο εύρος ζώνης, με μειονεκτήματα τον πολυπλοκότερο σχεδιασμό και υλοποίηση. Η ζώνη των 77 GHz χωρίζεται σε δύο υπομήματα : 76-77 GHz και 77-81 GHz. Το πρώτο εύρος ζώνης είναι εγκεκριμένο

και αποδεκτό από τις περισσότερες χώρες, ενώ το δεύτερο προς το παρόν είναι διαθέσιμο και υλοποιήσιμο μόνο μέσα στην Ευρώπη.

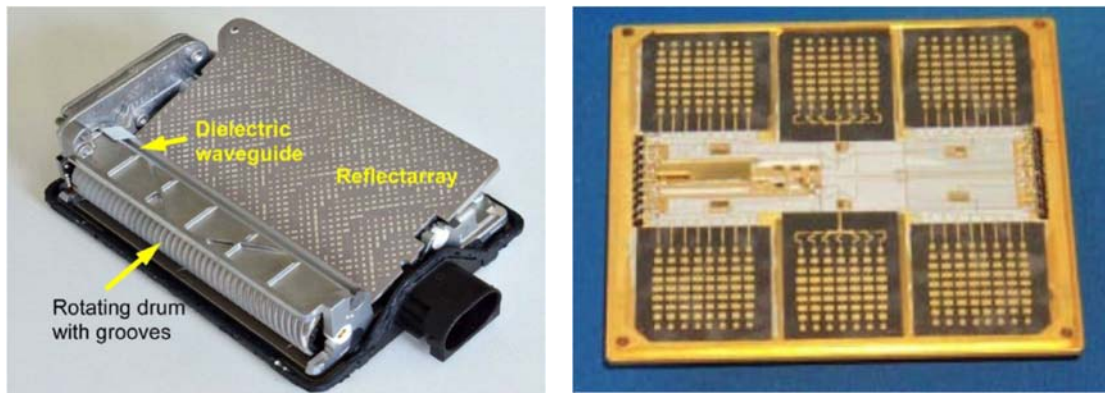
Οι αισθητήρες ραντάρ αυτοκινήτων ποικίλλουν ανάλογα με την επιθυμητή εμβέλεια τους. Τα radar μεγάλης εμβέλειας (Long Range Radar-LRR) έχουν μια στενή δέσμη και συνήθως τα τοποθετούμε στο εμπρόσθιο μέρος του αυτοκινήτου για τον υπολογισμό της απόστασης αντικειμένων τα οποία απέχουν έως 250 m. Ραντάρ μεγάλης εμβέλειας χρησιμοποιούνται για το adaptive cruise control. Τα ραντάρ μικρής εμβέλειας (Short Range Radar-SRR) διαθέτουν ευρύτερη δέσμη και χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση του γύρω περιβάλλοντος του αυτοκινήτου εντός 30 m, συχνές εφαρμογές τους αφορούν την παρακολούθηση του νεκρού σημείου και την υποβοήθηση παρκαρίσματος. Τέλος, υπάρχουν και ραντάρ μεσαίας εμβέλειας (Medium Range Radar-MRR). Αυτά εγκαθίστανται στο μπροστινό, στο πίσω μέρος ή στην πλαϊνή περιοχή ανάλογα με την εφαρμογή, συχνά χρησιμοποιούνται σε συστήματα αποφυγής σύγκρουσης. (Sicking, 2018)

Ως πιο σημαντικό κομμάτι ενός αισθητήρα ραντάρ καθιστάται η κεραία η οποία επηρεάζει την απόδοση, το μέγεθος και το κόστος του ραντάρ. Πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη για να διευκολύνει την ενσωμάτωση στο όχημα και πρέπει να είναι σχετικά οικονομική ανά κομμάτι ώστε να μπορεί να παραχθεί μαζικώς. Από άποψη απόδοσης, είναι επιθυμητό να διατηρείται χαμηλό επίπεδο πλευρικού λοβού, ώστε να μπορούν να αποφευχθούν οι εσφαλμένες ανιχνεύσεις. Όλες αυτές οι προϋποθέσεις αποτελούν έναν συνδυασμό πρόκλησης στον σχεδιασμό της κεραίας για ραντάρ αυτοκινήτων.



Σχήμα 1.2: Πρωταρχικά ραντάρ στην αυτοκινητοβιομηχανία. (WU, 2016)

Στις πρώτες μέρες των ραντάρ αυτοκινήτων, η παραβολική κεραία επιλέχθηκε για το σύστημα, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.2. Ωστόσο, οι διαστάσεις της ήταν απαγορευτικές για χρήση σε οχήματα, και επιπλέον το μεγάλο κόστος τις έκανε ακατάλληλες για μαζική παραγωγή. Σημαντική ανακάλυψη για τον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας ήταν οι τυπωμένες κεραίες, αφού είναι πιο συμπαγείς και μπορούν να παραχθούν μαζικά με πολύ χαμηλό κόστος, και έτσι είναι πιο κατάλληλες για εμπορικές εφαρμογές.



Σχήμα 1.3: Continental ARS 300 radar antenna και ραντάρ ASTYX's 77 GHz με στοιχειοκεραία μικροταινίας (Sickinger, Weissbrodt and Vossiek, 2018)

Δύο παραδείγματα κεραιών που χρησιμοποιούνται στην αυτοκινητοβιομηχανία παρουσιάζονται παρακάτω. Το σχήμα 3 δείχνει την κεραία που χρησιμοποιείται στον αισθητήρα ραντάρ 77 GHz της Continental ARS 300. Ο αισθητήρας ραντάρ 77 GHz της ASTYX για παράδειγμα αποτελείται από συστοιχίες κεραιών patch microstrip. Η συστοιχία αποτελείται από πολλές ορθογώνιες σειρές επιθεμάτων που τροφοδοτούνται σε σειρά.

Επειδή οι προαναφερθείσες υλοποιούνται χωριστά από τα μπροστινά τσιπ, οι ενδιάμεσες συνδέσεις θα καταλάβουν επιπλέον χώρο και συνεπώς θα υπάρξει αύξηση του συνολικού κόστους. Από τις αρχές της δεκαετίας του 2000, οι λύσεις για την περαιτέρω ενσωμάτωση της κεραίας διερευνήθηκαν και νέα ερευνητικά θέματα όπως κεραία ενσωματωμένη σε τσιπ (AoC). Το 2010, κάποιος επιστήμονας από την εταιρία Bosch έκανε λόγο για ένα τσιπ πομποδέκτη ραντάρ 77 GHz με δύο ενσωματωμένες κεραίες patch με απόσταση $\lambda/2$. Οι διαστάσεις του τσιπ ήταν $3,25 \times 3,25 \text{ mm}^2$. Τον επόμενο χρόνο, ο A. Fischer et al. έφτιαξε μια αναδιπλωμένη διπολική κεραία των 77

GHz με ενσωματωμένη συστοιχία πλέγματος σφαιρικής στάθμης πλακιδίων (eWLB). (Chatterjee, 2018)

1.4 Οι εφαρμογές του ραντάρ στο αυτοκίνητο

Το ραντάρ έχει γίνει βασικό χαρακτηριστικό της τεχνολογίας ADAS και των αυτόνομων οχημάτων. Με την ικανότητά τους να ανιχνεύουν αντικείμενα και να μετρούν την απόσταση και την ταχύτητά τους, αυτά τα συστήματα ραντάρ έχουν προσαρμοστεί ώστε να εκτελούν διάφορες λειτουργίες. Χάρη στη σύγχρονη τεχνολογία ημιαγωγών, οι διαστάσεις των συστημάτων ραντάρ έχουν συρρικνωθεί σε ένα ή περισσότερα μικροσκοπικά ολοκληρωμένα κυκλώματα. Το μικρό μέγεθος και το χαμηλό τους κόστος επέτρεψαν στους μηχανικούς να τα προσθέσουν στον σχεδιασμό τους, όπου μπορούν να βελτιώσουν την ασφάλεια του οχήματος και την ευκολία του οδηγού. Σήμερα, οι πιο συνηθισμένες εφαρμογές του ραντάρ είναι (Chatterjee, 2018):

- Προσαρμοστικός έλεγχος ταχύτητας
- Ανίχνευση σύγκρουσης, προειδοποίηση και αποφυγή
- Ανίχνευση τυφλών σημείων
- Προειδοποίηση αλλαγής/αποχώρησης λωρίδας κυκλοφορίας
- Ειδοποιήσεις διασταυρούμενης κυκλοφορίας
- Ανίχνευση αντικειμένου που υπάρχει στον δρόμο
- Βοήθεια στάθμευσης

1.5 Παράμετροι Σχεδίασης κεραιών

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται οι παράμετροι σχεδίασης που επηρεάζουν τη λειτουργία των κεραιών μικροταινίας.

1.5.1 Διάγραμμα ακτινοβολίας (Radiation Pattern)

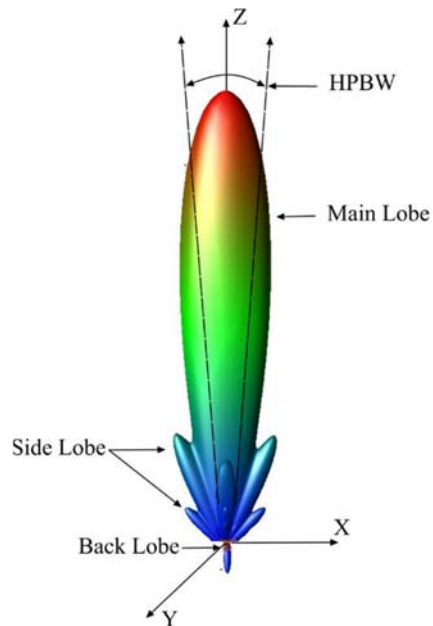
Το διάγραμμα ακτινοβολίας πρόκειται για μία μαθηματική έκφραση ή γραφική απεικόνιση της ακτινοβολούμενης ενέργειας συναρτήσει των χωρικών συντεταγμένων, και αποτελεί μέγεθος που αφορά το πεδίο μακριά από την κεραία

Ένα τέτοιο διάγραμμα δίνει πληροφορίες σχετικά με τις ιδιότητες του πεδίου ακτινοβολίας, όπως την ένταση της ακτινοβολίας, την πυκνότητα ισχύος, το εύρος δέσμης και την κατευθυντικότητα. Στα διαγράμματα ακτινοβολίας παρουσιάζεται η ισχύς που δέχεται ή ακτινοβολεί μια κεραία σε συνάρτηση σφαιρικών συντεταγμένων ϕ και θ . Ουσιαστικά πρόκειται για τον γεωμετρικό τόπο του πέρατος του διανύσματος Poynting, το οποίο δίνεται σε μιγαδική μορφή στην ακόλουθη εξίσωση.

$$\vec{S}(r, \theta, \phi) = \vec{E}(r, \theta, \phi) \times \vec{H}(r, \theta, \phi)$$

όπου, E το ηλεκτρικό πεδίο και H το μαγνητικό πεδίο.

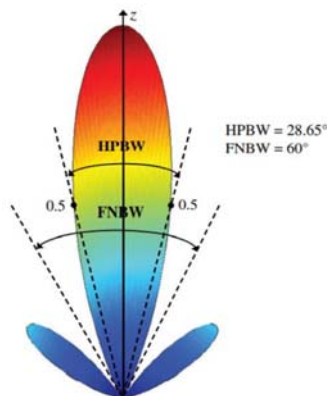
Στο σχήμα 1.4 απεικονίζεται ένα τυπικό διάγραμμα ακτινοβολίας, στο οποίο διακρίνονται ο κύριος λοβός, πλευρικοί λοβοί και ο οπίσθιος λοβός. Ο κύριος λοβός αναπαριστά την κατεύθυνση της μέγιστης ακτινοβολίας, συχνά αναφέρεται και ως κύρια δέσμη. Οι πλευρικοί λοβοί αναπαριστούν την ενέργεια που χάνεται, αφού ακτινοβολούν σε τυχαίες κατευθύνσεις και συνήθως έχουν πολύ χαμηλή ισχύ σε σχέση με τον κύριο λοβό. Τέλος ακόμα παρατηρείται ο οπίσθιος λοβός ο οποίος έχει κατεύθυνση αντίθετη από αυτή του κύριου λοβού, και τη μικρότερη ισχύ από τους υπόλοιπους λοβούς. Η ένταση της ακτινοβολίας αφορά το πεδίο μακριά από την κεραία και είναι η ισχύς που ακτινοβολείται από την κεραία ανα μονάδα γωνίας. (Chatterjee, 2018)



Σχήμα 1.1: Λοβοί ακτινοβολίας και εύρος ζώνης διαγράμματος ακτινοβολίας (Chatterjee, 2018)

Οι κεραιές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις (3) κατηγορίες ανάλογα με την κατεύθυνση της ακτινοβολίας. Αν μια κεραιά δύναται να λαμβάνει και να εκπέμπει όμοια σε όλες τις κατευθύνσεις είναι ιστροπική, ενώ αν η ακτινοβολία κατευθύνεται προς μια κατεύθυνση είναι κατευθυντική. Τέλος υπάρχει και μια τρίτη κατηγορία κεραιών οι ομοιοκατευθυντικές, στις οποίες παρατηρείται κατευθυντικότητα ως προς τη μια γωνία και ιστροπικότητα ως προς την άλλη.

1.5.2 Εύρος δέσμης και κατευθυντικότητα



Σχήμα 1.2: Δισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας (Chatterjee, 2018)

Ο βαθμός συγκέντρωσης της ακτινοβολίας γύρω από τον κεντρικό άξονα μίας κεραίας, καθορίζεται σημαντικά από το εύρος της δέσμης, το οποίο μπορεί να καθοριστεί μέσω 2 αντιθέτων σημείων σε ένα διάγραμμα ισχύος. Μέγεθος που έχει ενδιαφέρον μελέτης, είναι η γωνία που σχηματίζουν μεταξύ τους οι διευθύνσεις του 50% της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας, και το η οποία ονομάζεται: θ_{3dB} (Half Power Beam Width-HPBW). Ακόμα ένα σημαντικό μέγεθος είναι η γωνία μεταξύ των σημείων μηδενισμού της ενέργειας μετάδοσης, που ονομάζεται «εύρος πρώτου μηδενισμού» (First Null Beam Width-FNBW).

Κατευθυντικότητα ορίζεται ο λόγος της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από μια κεραία σε μια κατεύθυνση προς την ένταση της ίδιας ακτινοβολίας .Αν η κατεύθυνση δεν μπορεί να προσδιοριστεί, τότε χρησιμοποιείται η διεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας.

Η μαθηματική σχέση για την κατευθυντικότητα:

$$D_{max} = \frac{U(\theta, \phi)}{U_o} = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{W_{rad}}$$

Η κατευθυντικότητα είναι αδιάστατη και εκφράζεται σε dBi. Κατά την τρισδιάστατη ανάλυση η ακτινοβολία χωρίζεται σε επιμέρους συνιστώσες $D\theta$ και $D\phi$.

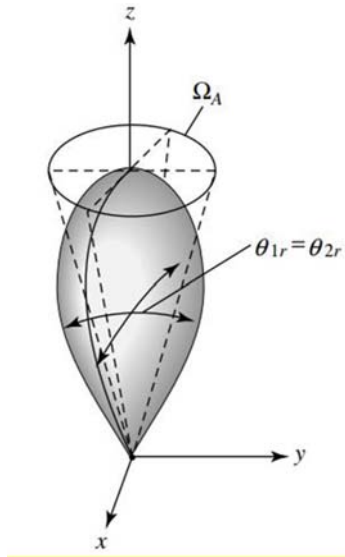
$$D_{max} = D\theta + D\phi$$

όπου,

$$D\theta = \frac{4\pi U_\theta}{W_{rad_\theta} + W_{rad_\phi}}$$

$$D\phi = \frac{4\pi U_\phi}{W_{rad_\theta} + W_{rad_\phi}}$$

Η κατευθυντικότητα περιγράφεται μέσω της στερεάς γωνίας δέσμης Ω_A . Όπως φαίνεται και στην σχήμα 1.6, η Ω_A αποτελεί ουσιαστικά μία τρύπα, μέσα από την οποία διέρχεται ολόκληρη η ένταση της ακτινοβολίας, και για τον υπολογισμό του μέτρου της αρκεί το γινόμενο του εύρους δέσμης μισής ισχύος στα δύο κάθετα μεταξύ τους επίπεδα ακτινοβολίας και έτσι μετράται σε μοίρες στο τετράγωνο.



Σχήμα 1.3: Ορισμός στερεάς γωνίας δέσμης σε τυπικό διάγραμμα ακτινοβολίας (Chatterjee, 2018)

Συνεπώς η κατευθυντικότητα προκύπτει από τις ακόλουθες σχέσεις. Πρόκειται για αδιάστατο λόγο με τιμή ≥ 1 , με την ισότητα να ισχύει μόνο σε περίπτωση ισοτροπικής κεραίας.

$$D_{max} = \frac{4\pi}{\Omega_A}$$

Αν μία κεραία έχει μόνο ένα κύριο λοβό, τότε η μέγιστη κατευθυντικότητα, μπορεί να υπολογιστεί μέσα από τον παρακάτω εμπειρικό τύπο:

$$D_{max} = \frac{41253}{\theta_{3dB} \phi_{3dB}}$$

Σε περίπτωση μελέτης στοιχειοκεραίας, όπως αυτή που μελετάται στην παρούσα εργασία η παραπάνω σχέση μετασχηματίζεται στην εξίσωση (Chatterjee, 2018):

$$D_{max} = \frac{32400}{\theta_{3dB} \phi_{3dB}}$$

1.5.3 Κέρδος

Το κέρδος της κεραίας ορίζεται ως το μέτρο της ικανότητας της να ακτινοβολεί ενέργεια σε έναν χώρο καθορισμένο αζιμουθιακά. Ουσιαστικά πρόκειται για τη σημαντικότερη παράμετρο αφού δηλώνει την ικανότητα της κεραίας να συγκεντρώνει και να εκπέμπει ακτινοβολία προς μια ορισμένη κατεύθυνση. Η εξίσωση που

περιγράφει το κέρδος δίνεται από την ακόλουθη σχέση, όπου η ένταση της ακτινοβολίας διαιρείται με την ισχύ P_{in} με την οποία τροφοδοτείται η κεραία.

$$G_g(\theta, \phi) = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}}$$

Το κέρδος ισχύος αναφέρεται στη διεύθυνση της μέγιστης ακτινοβολίας και εκφράζεται σε dBi. Η συνολική ακτινοβολουμένη ισχύς συνδέεται με την πηγή εισόδου P_{in} με την ακόλουθη σχέση:

$$P_{rad} = e_{cd} P_{in}$$

Η μέγιστη τιμή του κέρδους είναι συνδεδεμένη με την κατευθυντικότητα σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$G_{max}(\theta, \phi) = e_{cd} D_o$$

όπου e_{cd} είναι το γινόμενο της απόδοσης e_c με την διηλεκτρική απόδοση e_d , πρόκειται για αδιάστατο μέγεθος το οποίο υπολογίζεται πειραματικά. Η παραπάνω σχέση ισχύει μόνο θεωρητικά, στην πραγματικότητα πρέπει να συμπεριληφθεί και η απόδοση λόγω κακής προσαρμογής (ανάκλαση), e_r

$$e_r = (1 - |\Gamma|^2)$$

όπου Γ είναι ο συντελεστής ανάκλασης τάσης εισόδου της κεραίας και ορίζεται σύμφωνα με την επόμενη εξίσωση, συναρτήσει της εμπέδησης εισόδου Z_{in} και της εμπέδησης γραμμής μεταφοράς Z_o :

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_o}{Z_{in} + Z_o}$$

Εξαιτίας των ανακλάσεων και της απουσίας τέλει προσαρμογής της αντίστασης στη γραμμή μεταφοράς, δημιουργείται ένα στάσιμο κύμα.

Ο λόγος της μέγιστης προς την ελάχιστη τιμή του κύματος στη γραμμή μεταφοράς ονομάζεται VSWR:

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$$

Σε περίπτωση τέλει προσαρμογής ο παραπάνω λόγος έχει τιμή ίση με 1 και το Γ ισούται με 0.

Συνεπώς, η συνολική απόδοση της κεραίας είναι $e_o = e_r e_c e_d$

Έτσι η σχέση μετασχηματίζεται στην εξίσωση:

$$G(\theta, \phi)_{max} = e_o D_{max}$$

Προφανώς ισχύει $0 \leq e_o \leq 1$ λόγω ωμικών απωλειών, απωλειών ισχύος, απωλειών ακτινοβολίας και κακής προσαρμογής τροφοδοσίας, έτσι το κέρδος μιας κεραίας είναι πάντοτε μικρότερο σε τιμή από την κατευθυντικότητα.

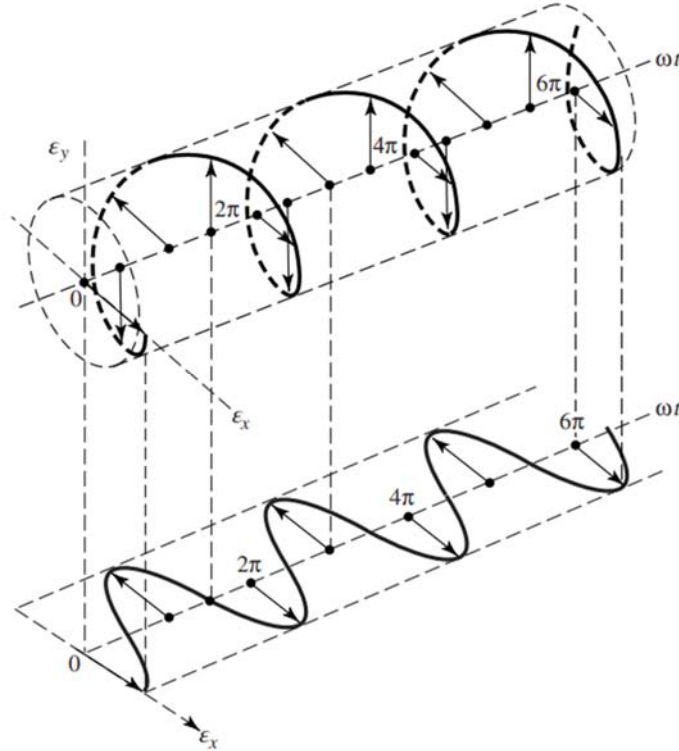
Η ισοδύναμη ιστροπικά ακτινοβλούμενη ισχύς EIRP (Equivalent Isotropically Rated Power) εκφράζει την ισχύ που χρειάζεται να ακτινοβολεί μία θεωρητική ιστροπική κεραία, έτσι ώστε να λαμβάνει το ίδιο σήμα στην κατεύθυνση της μέγιστης ακτινοβολίας μιας κατευθυντικής κεραίας.

$$EIRP(\theta, \phi) = P_{rad} G_{max}$$

1.5.4 Πόλωση κεραίων

Η πόλωση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος που ακτινοβολεί ή λαμβάνει μία κεραία σε μία συγκεκριμένη διεύθυνση είναι η πόλωση της κεραίας.

Όταν δεν αναφέρεται συγκεκριμένη κατεύθυνση τότε εννοείται η διεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας. Η πόλωση περιγράφει την τροχιά που διαγράφει το άκρο του διανύσματος του ηλεκτρικού πεδίου συναρτήσει του χρόνου. Στη γενική περίπτωση πρόκειται για ελλειπτική τροχιά. Ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα μπορεί να έχει γραμμική, κυκλική ή ελλειπτική πόλωση. Για να έχει ένα κύμα γραμμική πόλωση πρέπει η μια από τις δύο συνιστώσες του ηλεκτρικού πεδίου να είναι μηδενική ή διαφορά φάσης των δύο συνιστωσών να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του π . Στην περίπτωση της κυκλικής πόλωσης θα πρέπει τα πλάτη των δύο ορθογωνικών συνιστωσών να είναι ίσα και η διαφορά φάσης να είναι περιττό πολλαπλάσιο του $\pi/2$. Τέλος, αν κατά την κατεύθυνση διάδοσης του κύματος η διαγραφή της έλλειψης γίνεται κατά την ωρολογιακή φορά, η πόλωση ονομάζεται δεξιόστροφη (CW), ενώ αν γίνεται κατά την ανθωρολογιακή φορά ονομάζεται αριστερόστροφη (CCW).» (Chatterjee, 2018)



Σχήμα 1.4: Τροχιά του διανύσματος του ηλεκτρικού πεδίου. (Karlsson, 2018)

Συχνά η πόλωση του δέκτη και η πόλωση του πομπού δεν ταυτίζονται με αποτέλεσμα η ισχύς που λαμβάνει η κεραία να μην είναι η μέγιστη. Έτσι σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση ορίζεται ο παράγοντας απωλειών πόλωσης (Polarization Loss Factor - PLF), για κύμα το οποίο είναι πολωμένο κατά τη διεύθυνση $\widehat{\rho}_w$ ενώ η κεραία είναι πολωμένη κατά τη διεύθυνση $\widehat{\rho}_a$

$$PLF = |\widehat{\rho}_w - \widehat{\rho}_a|^2 = |\cos\psi_p|^2$$

όπου ψ_p η γωνία των δύο μοναδιαίων διανυσμάτων.

1.5.5 Εύρος ζώνης

Το εύρος ζώνης μιας κεραίας καθορίζει το εύρος των συχνοτήτων στις οποίες η κεραία εμφανίζει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά της ως προς την πόλωση, το κέρδος, την απόδοση. Πρακτικά πρόκειται για τη ζώνη συχνοτήτων όπου η κεραία είναι ικανοποιητικά προσαρμοσμένη ως προς την αντίσταση εισόδου. Το εύρος ζώνης υπολογίζεται ως η διαφορά της ελάχιστης από τη μέγιστη συχνότητα..

$$BW = f_H - f_L$$

Χρήσιμη ποσότητα είναι και το κλασματικό εύρος ζώνης, πρόκειται για το λόγο του εύρου ζώνης προς την κεντρική συχνότητα συντονισμού. Στις περισσότερες εφαρμογές το κλασματικό εύρος ζώνης είναι της τάξεως του 5%. (Chatterjee, 2018)

$$BW' = \frac{BW}{f_c} = \frac{f_H - f_L}{f_c}$$

1.5.6 Απόδοση κεραίας

Ο συντελεστής απόδοσης εκφράζει τις απώλειες που εμφανίζονται κατά τη λειτουργία μιας κεραίας λόγω κακής προσαρμογής μεταξύ κεραίας και γραμμής μεταφοράς, ωμικών απωλειών και απωλειών διηλεκτρικού. Οι ωμικές απώλειες και οι απώλειες διηλεκτρικού μετρώνται πειραματικά και περιλαμβάνονται στον συντελεστή απόδοσης ακτινοβολίας (radiation efficiency) e_{rad} . Έτσι η συνολική απόδοση της κεραίας δίδεται από την παρακάτω σχέση:

$$e_{total} = e_{rad} e_r,$$

όπου e_r είναι ο συντελεστής απόδοσης λόγω ανακλάσεων.

Η απόδοση ακτινοβολίας εκφράζεται ως ο λόγος της ακτινοβολουμένης ισχύος προς την εισερχόμενη ισχύ στην είσοδο της κεραίας, ή ισοδύναμα της ισχύος που παραδίδεται στην αντίσταση ακτινοβολίας R_r προς την ισχύ που παραδίδεται μαζί στις R_r και R_L (όπου R_L οι απώλειες αγωγιμότητας – διηλεκτρικού) (Chatterjee, 2018)

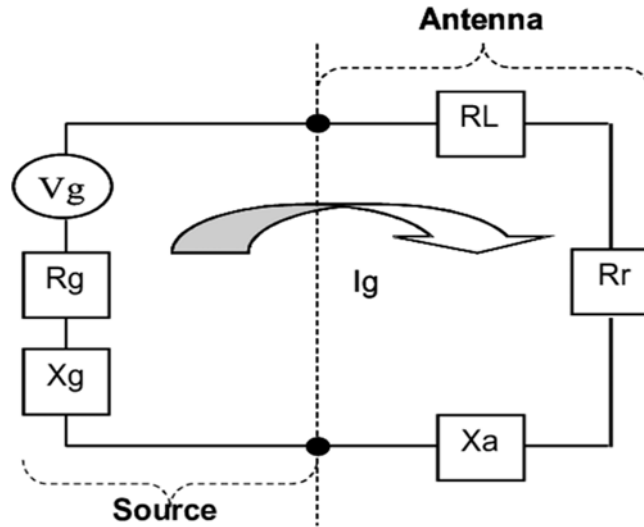
$$e_{rad} = \frac{P_{rad}}{P_{in}} = \frac{R_r}{R_r + R_L}$$

1.5.7 Εμπέδηση Εισόδου

Η εμπέδηση εισόδου είναι μιγαδικό μέγεθος που εξαρτάται από την συχνότητα. Μετράται στους ακροδέκτες εισόδου της κεραίας και ορίζεται ως το πηλίκο της τάσης προς το ρεύμα στους ακροδέκτες ή ως ο λόγος των κατάλληλων συνιστωσών του ηλεκτρικού προς το μαγνητικό πεδίο σε ένα σημείο και θα πρέπει να μην διαφοροποιείται πολύ από την χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής με στόχο να ελαχιστοποιούνται τα στάσιμα κύματα κατά το μήκος της γραμμής αλλά και οι απώλειες ανακλάσεων.

$$Z_A = R_A + jX_A$$

όπου Z_A , η σύνθετη αντίσταση της κεραίας στους ακροδέκτες της, R_A , η ωμική αντίσταση της κεραίας στους ακροδέκτες της που αποτελείται από δύο συνιστώσες την R_r (ωμική αντίσταση ακτινοβολίας της κεραίας) και την R_L (ωμική αντίσταση απωλειών της κεραίας) με $R_A = R_r + R_L$ και X_A , η φανταστική αντίσταση της κεραίας στους ακροδέκτες της (Σχήμα 1.8).



Σχήμα 1.5: Ισοδύναμο κύκλωμα κεραίας κατά Thevenin. (Chatterjee, 2018)

Σχετικά με τη σύνθετη αντίσταση εισόδου αυτή εξαρτάται από τη γεωμετρία της κεραίας καθώς και το μέσο διέγερσης της. Αξιοσημείωτο να αναφερθεί είναι πως για μέγιστη μεταφορά ηλεκτρομαγνητικής ισχύος από μία γραμμή μεταφοράς σύνθετης αντίστασης Z_0 στην είσοδο της κεραίας απαιτείται τέλεια προσαρμογή μεταξύ των τιμών Z_0 και Z_A . (Chatterjee, 2018)

1.6 Κεραίες μικροταινίας

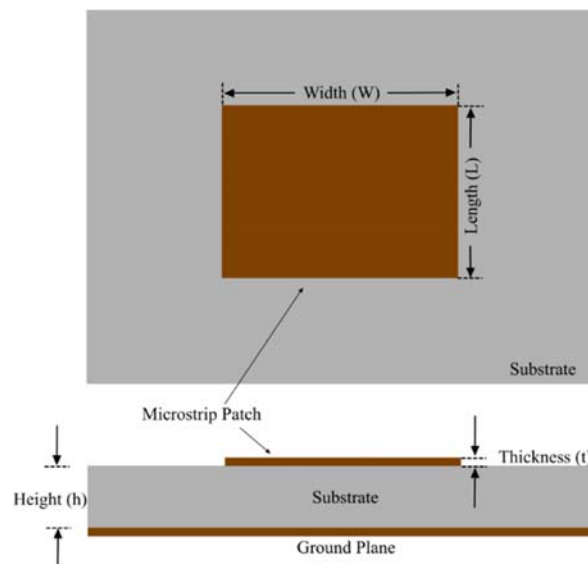
Η συνεχής έρευνα και ανάπτυξη στον τομέα των εξελιγμένων συσκευών επικοινωνίας οδήγησαν στην κατασκευή ηλεκτρικών κυκλωμάτων μικρών διαστάσεων, και συνεπώς στην ανάπτυξη κεραιών μειωμένου μεγέθους. Οι κεραίες μικροταινίας (microstrip antennas) ικανοποιούν τις απαιτήσεις των σύγχρονων συστημάτων αφού συνδυάζουν μικρές διαστάσεις, χαμηλό κόστος, εύκολη σχεδίαση και κατασκευή αλλά και ευελιξία. Ο σχεδιαστής μπορεί εύκολα να καθορίσει τα κυριότερα

χαρακτηριστικά τους όπως το εύρος ζώνης, τη συχνότητα συντονισμού και το διάγραμμα ακτινοβολίας. (Edwards and Steer, 2016)

1.6.1 Βασική δομή κεραιών μικροταινίας

Η βασική δομή μιας κεραιάς μικροταινίας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

Αποτελείται από μία πολύ λεπτή μεταλλική ταινία πάχους t η οποία είναι τοποθετημένη σε μία επίπεδη γείωση, μεταξύ των οποίων παρεμβάλλεται ένα διηλεκτρικό στρώμα, το υποστρώμα (substrate). Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των κεραιών αυτών, δηλαδή το πάχος της μεταλλικής ταινίας και το πάχος της γείωσης είναι συναρτήσεις του μήκους κύματος στον ελεύθερο χώρο. Το πάχος της μεταλλικής ταινίας (t) λαμβάνεται ίσο με το μήκος κύματος ενώ το πάχος του υποστρώματος επιλέγεται ως κλάσμα αυτού ($h \ll \lambda_0$), συνήθως ισχύει $0,003\lambda < h < 0,05\lambda$. Οι κεραιές μικροταινίας σχεδιάζονται ώστε το μέγιστο κέρδος ακτινοβολίας να εμφανίζεται κάθετα στην ταινία, αυτό επιτυγχάνεται καθορίζοντας κατάλληλα την πεδιακή κατανομή κάτω από την ταινία.

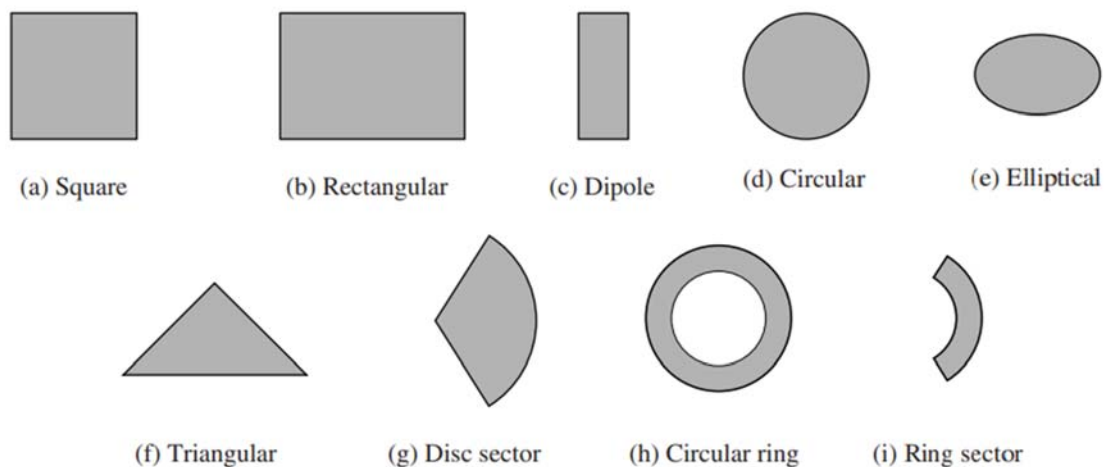


Σχήμα 1.6: Δομή κεραιάς μικροταινίας (Chatterjee, 2018)

Όσον αφορά τη διηλεκτρική σταθερά του υποστρώματος αυτή επιλέγεται μεταξύ των τιμών $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$. Η επιλογή παχέος υποστρώματος με διηλεκτρική σταθερά κοντά στο κάτω άκρο του πεδίου τιμών οδηγεί σε κεραιές με υψηλές επιδόσεις. Αυτές οι κεραιές χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερο εύρος ζώνης και χαλαρή σύνδεση

μεταξύ των πεδίων για ακτινοβολία στο χώρο, το μειονέκτημά τους όμως είναι το σχετικά μεγάλο μέγεθος. Σε εφαρμογές μικροκυματικών κυκλωμάτων επιλέγονται λεπτά υποστρώματα με μεγάλη διηλεκτρική σταθερά, διότι το μέγεθος των κεραίων είναι μικρό και η σύνδεση των πεδίων ισχυρή. Αυτές οι κεραίες έχουν μικρότερη απόδοση και εύρος ζώνης.

Τα συνηθέστερα σχήματα της ταινίας patch παρατίθενται στο επόμενο σχήμα. Συνήθως πρόκειται για ταινία ακτινοβολίας η οποία είναι τετράγωνη, ορθογώνια, κυκλική ή ελλειπτική λόγω της ευκολίας στην κατασκευή, στην ανάλυση αλλά και λόγω της χαμηλής σταυρωτής πόλωσης. Συχνά, προκειμένου να ικανοποιηθούν οι σχεδιαστικές απαιτήσεις όσον αφορά τις συχνότητες συντονισμού, το εύρος ζώνης και το κέρδος το σχήμα του patch μπορεί να πάρει ακανόνιστες γεωμετρικές μορφές όπως των γραμμάτων H, F, E, U ή του φιόγκου της τεθλασμένης γραμμής. (Edwards and Steer, 2016)

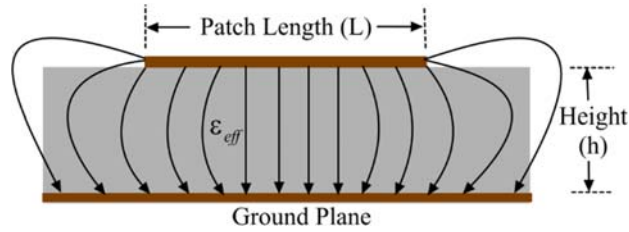


Σχήμα 1.7: Αντιπροσωπευτικά σχήματα patch (Sickinger, Weissbrodt and Vossiek, 2018)

1.6.2 Βασική αρχή λειτουργίας και φαινόμενο κροσσών

Η βασική αρχή λειτουργίας των κεραίων μικροταινίας οφείλεται στο φαινόμενο των κροσσών που αναπτύσσεται μεταξύ της ταινίας (patch) και της γείωσης. Το φαινόμενο αυτό είναι αποτέλεσμα των πεπερασμένων διαστάσεων του patch και του υποστρώματος, και παρουσιάζεται στην επόμενη σχήμα. Οι επεκτάσεις των δυναμικών γραμμών που αναπτύσσονται στα άκρα του patch ονομάζονται πεδία

κροσσών και επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό την συχνότητα συντονισμού της microstrip κεραίας.

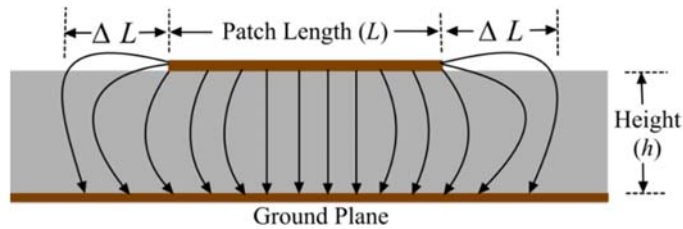


Σχήμα 1.8: Φαινόμενο κροσσών (Sickinger, Weissbrodt and Vossiek, 2018)

Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα το μεγαλύτερο ποσοστό των δυναμικών γραμμών βρίσκεται εντός του υποστρώματος, ωστόσο ένα μέρος αυτών συνεχίζει στον αέρα. Έτσι πρέπει να υπολογιστεί η ενεργός διηλεκτρική σταθερά ϵ_{eff} , η οποία είναι ελάχιστα μικρότερη σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$\epsilon_{eff} = \frac{(\epsilon_r + 1)}{2} + \frac{(\epsilon_r - 1)}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W}\right]^{-1/2}$$

Παράλληλα λόγω του φαινομένου των κροσσών αυξάνεται και το μήκος της κεραίας κατά ΔL αφού οι δυναμικές γραμμές εκτείνονται και πέρα από το τέλος του patch, η αύξηση αυτή παρουσιάζεται στο σχήμα 1.12 και υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση. Σχετικά με τις δυναμικές γραμμές που αναπτύσσονται κατά το πλάτος της ταινίας, έχουν αντίθετη κατεύθυνση και έτσι αλληλοακυρώνονται .



Σχήμα 1.9: Πραγματικό ενεργό μήκος κεραίας μικροταινίας (Sickinger, Weissbrodt and Vossiek, 2018)

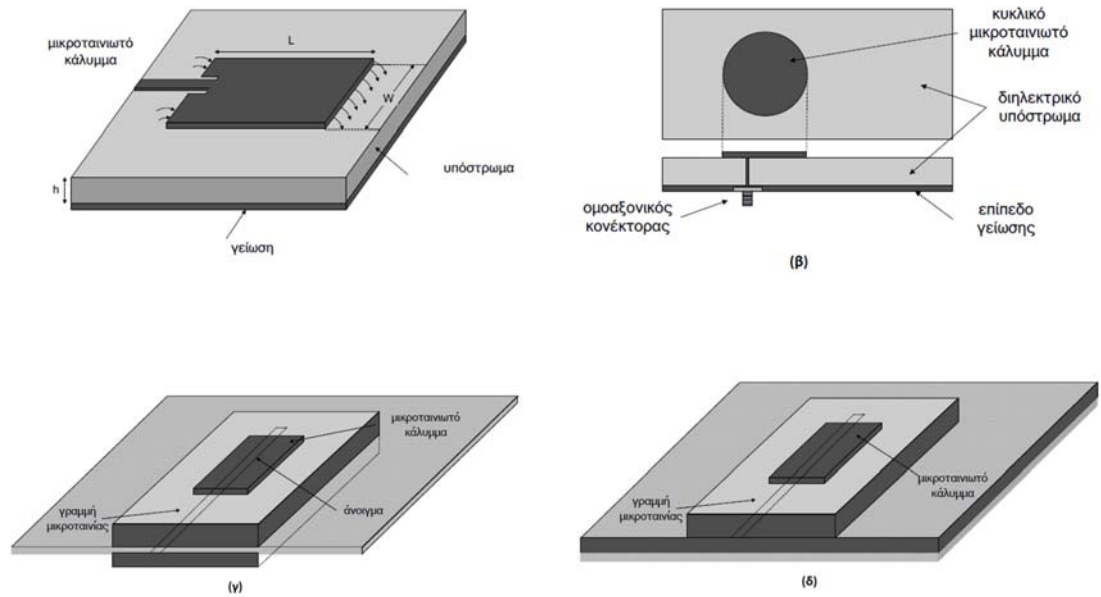
$$\Delta L = 0.412 \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8\right)}$$

Συνεπώς το πραγματικό και το ενεργό μήκος της μικροταινίας προκύπτουν ως εξής:

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}}}$$

$$L = L_{eff} - 2\Delta L$$

1.6.3 Τροφοδοσία κεραιών μικροταινίας



Σχήμα 1.10: Τροφοδοσία κεραιάς μικροταινίας: (α) με γραμμή μικροταινίας (microstrip line), (β) με ομοαξονικό καλώδιο (probe fed), (γ) μέσω ανοίγματος

**(aperture-coupled feed), (δ) σε γειννίαση με μικροταινία(Proximity-coupled).
(Sickinger, Weissbrodt and Vossiek, 2018)**

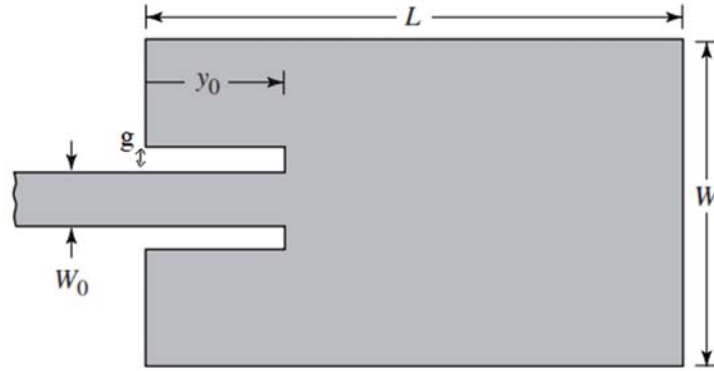
Μία αγώγιμη λωρίδα, με πλάτος αρκετά μικρότερο από ότι αυτό του patch της κεραίας, χρησιμοποιείται για την τροφοδότηση της κεραίας. Συνήθης μέθοδος επίτευξης της απαραίτητης αντίστασης είναι η χάραξη κατάλληλης εσοχής (βλ. σχήμα 1.13(α)). Η μέθοδος αυτή είναι η εύκολη σχεδιαστικά λύση, όμως σε περίπτωση διηλεκτρικού υποστρώματος με μεγάλο πάχος, αυξάνονται τα κύματα επιφανείας και μειώνεται το εύρος ζώνης της κεραίας.

Μία διαφορετική σχεδίαση τροφοδοσίας, φαίνεται στην σχήμα 1.13(β), όπου αναπαρίσταται ένα ομοαξονικό καλώδιο. Δεν θεωρείται βέλτιστος τρόπος, όπως ο προηγούμενος, με την αγώγιμη λωρίδα καθώς κατά την κατασκευή του δημιουργεί ασυμμετρίες, με αποτέλεσμα την διέγερση υψηλότερων συχνοτήτων.

Η τροφοδοσία μέσω ανοίγματος όπως φαίνεται στην Σχήμα 1.13(γ) είναι ο πιο δύσκολος τρόπος τροφοδοσίας όσον αφορά την κατασκευή και οδηγεί σε περιορισμένο εύρος ζώνης, όμως έχει την μικρότερη παρασιτική ακτινοβολία. Δύο στρώματα υπάρχουν αντικριστά, έχοντας ανάμεσα τους το επίπεδο γείωσης. Από την μία πλευρά υπάρχει μια γραμμή μικροταινίας, η οποία συνδέεται με το patch, και σε συνδυασμό με το υλικό υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς, από την μία πλευρά και χαμηλής διηλεκτρικής σταθεράς από την άλλη.

Τελευταίος τρόπος τροφοδοσίας που φαίνεται στην σχήμα 1.13(δ) είναι η διέγερση μέσω γειννίασης. Υπάρχουν δύο υποστρώματα στο patch, στο ένα υπόστρωμα υπάρχει μία μικροταινία τροφοδοσίας και στο δεύτερο η κεραία. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει το καλύτερο εύρος ζώνης, χαμηλή παρασιτική ακτινοβολία και πολύ καλά χαρακτηριστικά ακτινοβολίας.

Κατά τη σχεδίαση γίνεται προσπάθεια η διάταξη να εμφανίζει εμπέδηση εισόδου (Z_c) ίση με 50Ω . Στην περίπτωση που η τροφοδοσία του patch γίνεται με ένθετη μικροταινία τροφοδοσίας η το πλάτος αυτής w_0 καθορίζει την αντίσταση της τροφοδοσίας. (Hamieh, 2012)



Σχήμα 1.11: Patch με ένθετη μικροταινία τροφοδοσίας. (Karlsson, 2018)

Το πλάτος W_0 προκύπτει από την ακόλουθη εξίσωση συναρτήσει των γνωστών τιμών της αντίστασης εισόδου και της διηλεκτρικής σταθεράς ϵ_r .

$$W_0 = \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} h \text{ για } W_0/h < 2$$

$$W_0 = \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} (\ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r}) \right] h \text{ για } W_0/h > h$$

$$A = \frac{Z_c}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right)}$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_c\sqrt{\epsilon_r}}$$

Όσον αφορά το μήκος της ένθετης μικροταινίας τροφοδοσίας αυτό επηρεάζει αποκλειστικά την τιμή της ολίσθησης φάσης του ηλεκτρικού ρεύματος και όχι την εμπέδηση της εισόδου. Σε περίπτωση επιθυμητής τιμής ολίσθησης φάσης (ϕ) το μήκος προκύπτει από την εξίσωση

$$l = \frac{\phi(\pi/180)}{\sqrt{\epsilon_0 k_0}}$$

όπου ϵ_0 είναι η διηλεκτρική σταθερά του κενού και το k_0 όπως δίνεται από την εξίσωση

$$k_0 = \frac{2\pi f}{c}$$

Το ύψος της διείσδυσης y_0 υπολογίζεται από την εξίσωση

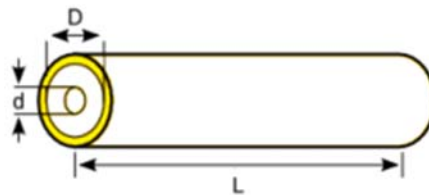
$$y_0 = \frac{L}{\pi} \cos^{-1} \sqrt{\frac{Z_c}{R_{in}}}$$

όπου R_{in} είναι η αντίσταση εισόδου του patch και μπορεί να προσδιοριστεί προσεγγιστικά από την εξίσωση

$$R_{in} = 90 \frac{\epsilon_r^2}{\epsilon_r - 1} \left(\frac{L}{W}\right)$$

Σχετικά με το μήκος του κενού g , βρίσκεται εντός του εύρους $W/40 \leq g \leq W/10$

Όσον αφορά την τροφοδοσία με ομοαξονικό καλώδιο, η επιλογή διηλεκτρικού υλικού και των διαμέτρων d και D που φαίνονται στο σχήμα 1.15, πρέπει να επιλεγούν ώστε υπάρχει εμπέδηση εισόδου Z_0 ίση με 50Ω . Επιπλέον η εμπέδηση Z_0 πρέπει να εμφανίζεται στην επιθυμητή συχνότητα, η οποία υπολογίζεται από την εξίσωση.



Σχήμα 12: Ομοαξονικό καλώδιο (Karlsson, 2018)

$$Z_0 = \frac{138 \log_{10} \left(\frac{D}{d}\right)}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

$$f_{cutoff} = \frac{11.8}{\sqrt{\epsilon_r} \pi \left(\frac{D+d}{2}\right)}$$

Οι συντεταγμένες της σύνδεσης της τροφοδοσίας (X_f, Y_f) προσδιορίζεται από τις παρακάτω σχέσεις.

$$X_f = \frac{L}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

$$Y_f = \frac{W}{2}$$

Τέλος, προκειμένου να διατηρηθεί το κέρδος της κεραίας στην επιθυμητή συχνότητα λειτουργίας οι διαστάσεις της γείωσης της κεραίας υπολογίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις

$$L_g = 6h + L$$

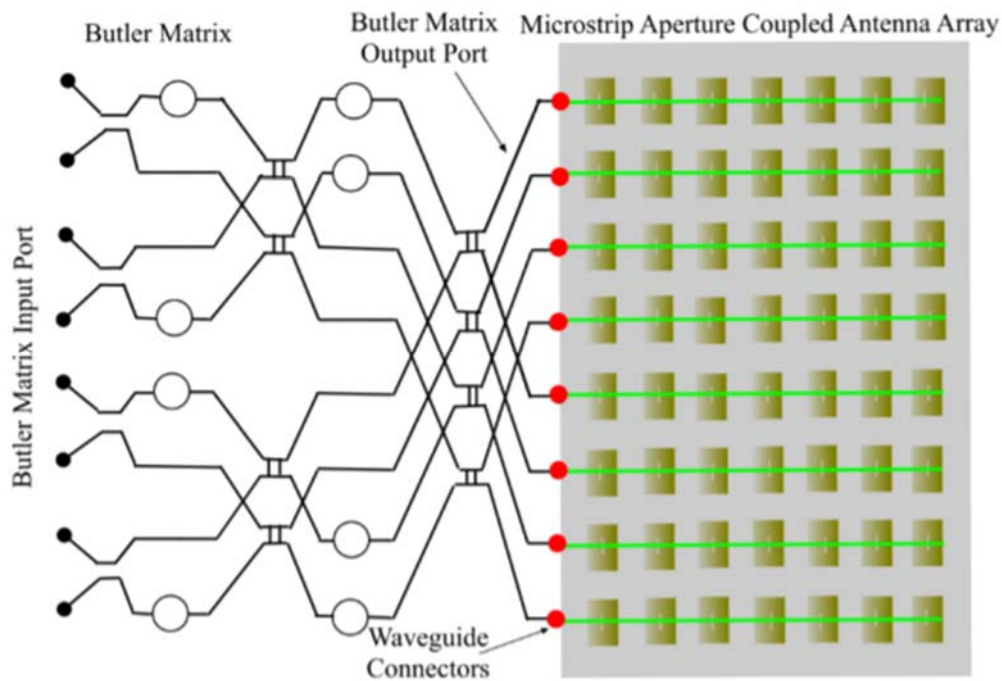
$$W_g = 6h + W$$

Οι σχέσεις που παρουσιάστηκαν παραπάνω δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα όσον αφορά την αρχική προσέγγιση της κεραίας. Οι σχέσεις αυτές χρησιμοποιούνται παράλληλα με ανεπτυγμένα λογισμικά που χρησιμοποιούν έξυπνους αλγορίθμους για τη βελτιστοποίηση μιας κεραίας patch και τη δημιουργία στοιχειοκεραιών. (Hamieh, 2012)

1.7 Στοιχειοκεραίες

Οι Στοιχειοκεραίες διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο καθώς λειτουργούν ως μονάδα εκπομπής αλλά και λήψης των συστημάτων ραντάρ. Οι επίπεδες στοιχειοκεραίες μπορούν να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις της αγοράς ραντάρ αυτοκινήτων για ικανότητα διεύθυνσης χαμηλού προφίλ, χαμηλού βάρους και γρήγορης δέσμης με χαμηλό κόστος. Οι παράμετροι της στοιχειοκεραίας, όπως το κέρδος, το εύρος ζώνης και η απόδοση ακτινοβολίας ορίζουν την απόδοση της διάταξης κεραίας. Οι κεραίες μικροταινίας προτιμώνται παραδοσιακά ως κεραίες ραντάρ καθώς είναι ελαφριές σε βάρος, εύκολα κατασκευάσιμες και φθηνές. Ωστόσο, ακόμη και με τα πλεονεκτήματα της απλούστερης κατασκευής και του χαμηλού κόστους, οι κεραίες μικροταινίας έχουν ιστορικά αναγνωριστεί ότι παρέχουν χαμηλότερο κέρδος. Ένα κέρδος 8 dBi ανά patch θεωρείται τυπικό όσον αφορά την απόδοση που παρέχεται από την κεραία. Είναι εξαιρετικά δύσκολο να σχεδιαστεί μια κεραία με υψηλό κέρδος, ικανή κατευθυντικότητα δέσμης και HPBW διατηρώντας ταυτόχρονα όλες τις προδιαγραφές που ορίζει η βιομηχανία αυτοκινούμενων οχημάτων. Ως εκ τούτου, οι κατασκευαστές αυτοκινούμενων οχημάτων βασίζονται σε στοιχειοκεραίες. Οι σύγχρονες αποτελεσματικές τεχνικές χρήσης μιας συσκευής διαμόρφωσης δέσμης διεύθυνσης, όπως ο φακός Butler Matrix ή ο φακός Rotman, μπορούν να βοηθήσουν στο να κατευθυνθεί η δέσμη στην επιθυμητή γωνία για να υπάρξει μια αποτελεσματική γωνιακή κάλυψη όπως απαιτείται για μια συγκεκριμένη απαίτηση

ασφαλείας. Το Butler Matrix μπορεί να βοηθήσει στην κατεύθυνση των δοκών σε διαφορετικές κατευθύνσεις σύμφωνα με τις απαιτήσεις. Επιπλέον, Η ιδέα της χρήσης μιας μήτρας Butler παρέχει μια ομοιόμορφη κατανομή πλάτους και τη σταθερή διαφορά φάσης μεταξύ των γειτονικών στοιχείων, ενώ εξασφαλίζει μια κατασκευή χαμηλού κόστους. Έτσι, ο συνδυασμός μιας μήτρας Butler και μιας διάταξης κεραίας μικροταινίας μπορεί να προσφέρει μια λύση υψηλής απόδοσης και ταυτόχρονα χαμηλού κόστους για ραντάρ αυτοκινήτων πολλαπλών εμβέλειας. Η σχήμα 1.16 παρουσιάζει τον προτεινόμενο συνδυασμό μήτρας Butler και τη διάταξη κεραίας μικροταινίας ως αναπόσπαστο μέρος ενός ραντάρ αυτοκινήτου



Σχήμα 1.16: Συνδυασμός μήτρας Butler και κεραίας μικροταινίας (Sickinger, Weissbrodt and Vossiek, 2018)

Τα διαγράμματα ακτινοβολίας των μεμονωμένων κεραιών παρουσιάζουν σχετικά χαμηλή κατευθυντικότητα και απολαβή. Οι περισσότερες εφαρμογές, που αφορούν την επικοινωνία μεταξύ μεγάλων αποστάσεων, απαιτούν τη χρήση κεραιών με υψηλή κατευθυντικότητα. Ένας αποδοτικός τρόπος για την κατασκευή κατευθυντικών συστημάτων ακτινοβολίας είναι η χρήση περισσότερων ακτινοβολητών με κατάλληλα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και σε συγκεκριμένη διάταξη. Η γεωμετρική θέση των επιμέρους στοιχείων είναι τέτοια ώστε τα επιμέρους πεδία να συμβάλλουν

ενισχυτικά σε μια επιθυμητή κατεύθυνση. Ένα σύστημα κεραιών με τις προαναφερθείσες ονομάζεται στοιχειοκεραία. Συνήθως, για λόγους ευκολίας στη σχεδίαση και την κατασκευή των επιμέρους στοιχείων είναι κεραιές του ίδιου τύπου. (Karlsson, 2018)

1.7.1 Στοιχειοκεραία N στοιχείων τοποθετημένα σε ευθεία γραμμή

Έστω ότι τοποθετούνται N σημειακές ιστροπικές πηγές σε ίσες αποστάσεις d με την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχει σύζευξη μεταξύ των πηγών, τροφοδοτούνται ομοίως και ότι οι παρατηρήσεις για το διάγραμμα ακτινοβολίας γίνονται σε ένα τυχαίο σημείο Π το οποίο ανήκει στο μακρινό πεδίο ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας. Τότε ολικό πεδίο ακτινοβολίας E ως προς το απομακρυσμένο σημείο Π ισούται με το άθροισμα των πεδίων του καθενός όποτε προκύπτει (Chatterjee, 2018)

$$E = 1 + e^{j\psi} + e^{j2\psi} + \dots + e^{j(N-1)\psi}$$

$$E e^{j\psi} = e^{j\psi} + e^{j2\psi} + \dots + e^{jN\psi}$$

$$E - E e^{j\psi} = 1 - e^{jN\psi}$$

$$E = \frac{1 - e^{jN\psi}}{1 - e^{j\psi}} = \frac{\sin(N\psi/2)}{\sin(\psi/2)}$$

Για αυτό ισχύει ότι: ψ

$$\psi = \frac{2\pi d}{\lambda} \cos\phi + \delta$$

όπου, δ η διαφορά φάσης μεταξύ των στοιχείων. Έστω ότι το ψ τείνει στο 0 ώστε η μέγιστη ακτινοβολία να καταγράφεται στις προκύπτει η κανονικοποιημένη έκφραση του πεδίου ακτινοβολίας E_n (Chatterjee, 2018)

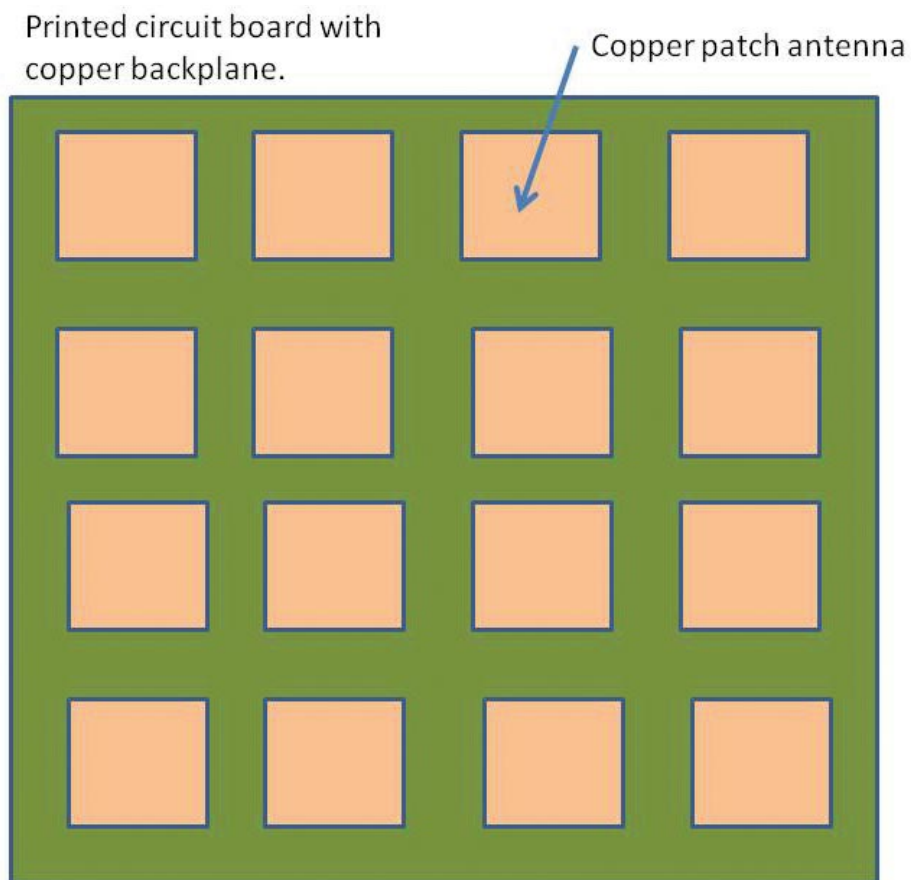
$$E_n = \frac{\sin(N\psi/2)}{N\sin(\psi/2)}$$

1.8 Συστοιχία κεραιών

Μια συστοιχία κεραιών είναι δύο ή περισσότερες κεραιές που χρησιμοποιούνται μαζί για να παρέχουν κάποια επιθυμητά χαρακτηριστικά ή ιδιότητες που δεν είναι διαθέσιμα με μία μόνο κεραία. Μια συστοιχία στην ουσία είναι ένα σύνολο από πολλαπλές κεραιές διατεταγμένες σε ισομερείς γραμμές και ισομερείς στήλες ή κάποιο άλλο σχετικό μοτίβο.

Η σχήμα 1.17 απεικονίζει ένα παράδειγμα που χρησιμοποιεί 16 τετράγωνες κεραιές patch σε ένα PCB σχέδιο . Οι κεραιές στο matrix τροφοδοτούνται από μεμονωμένες μονάδες, όμως

λειτουργούν συλλογικά μαζί ως μια ενιαία κεραία. Το πίσω μέρος του PCB έχει ένα χάλκινο επίπεδο που λειτουργεί ως ανακλαστήρας. Οι γραμμές τροφοδοσίας δεν εμφανίζονται.



Σχήμα 1.17: Μια συστοιχία 16 patches σε ένα σχέδιο PCB. Το οπίσθιο μέρος της επιφάνειας είναι ένα συμπαγές χάλκινο επίπεδο που χρησιμεύει ως ανακλαστήρας. Οι γραμμές τροφοδοσίας δεν εμφανίζονται. (Frenzel, 2021)

Η λογική του πίνακα είναι να υπάρξει το επιθυμητό αποτέλεσμα σε ορισμένα απαραίτητα χαρακτηριστικά.

Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι:

- Κέρδος — Το κέρδος είναι στην ουσία η ενίσχυση του σήματος. Κάποιοι τύποι κεραιών ενισχύουν το σήμα ή την αποτελεσματική ακτινοβολούμενη ισχύ (ERP) σαν να χρησιμοποιείται μεγαλύτερη ισχύς σήματος. Το κέρδος και αφορά και τη μετάδοση και τη λήψη.
- Κατευθυντικότητα — Η κατευθυντικότητα σημαίνει ότι η κεραία έχει καλύτερο αποτέλεσμα προς τη μία ή την άλλη κατεύθυνση. Κατευθυντικότητα σημαίνει ότι το σήμα κατευθύνεται προς μία κατεύθυνση. Αυτή η εστίαση σχετίζεται άμεσα με το κέρδος της κεραίας.
- Ελαχιστοποίηση παρεμβολών — Η κατεύθυνση της κεραίας προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση σημαίνει ότι δεν είναι τόσο αποτελεσματική στις υπόλοιπες κατευθύνσεις. Αυτό βοηθά στην εξάλειψη ή τη μείωση των παρεμβολών για τυχόντα σήματα που έρχονται από διαφορετικές κατευθύνσεις.
- Δυνατότητα ρύθμισης — Οι συστοιχίες φάσεων είναι δυνατό να ρυθμιστούν ώστε να τοποθετηθεί σωστά ένας λοβός. Η κατεύθυνση του σήματος πιθανώς να αλλάξει ηλεκτρονικά για να επιτευχθεί βελτιστοποίηση του κέρδους. Αυτό τους δίνει την δυνατότητα να σαρώνουν οριζόντια ή/και κάθετα. (Frenzel, 2021)

1.8.1 Λειτουργία συστοιχίας κεραιών

Οι συστοιχίες κεραιών υλοποιούν αυτό που ονομάζουμε beamforming.

Αυτό υλοποιείται με τη λήψη των μοτίβων ακτινοβολίας για καθεμία από όλες τις κεραίες στη συστοιχία και την σύζευξη τους με τέτοιο τρόπο ώστε να προσθέτουν την ενέργεια σε μια στενή δέσμη.

Τα μεμονωμένα σήματα κεραίας πιθανό να λειτουργούν μεταξύ τους εποικοδομητικά ή καταστροφικά,

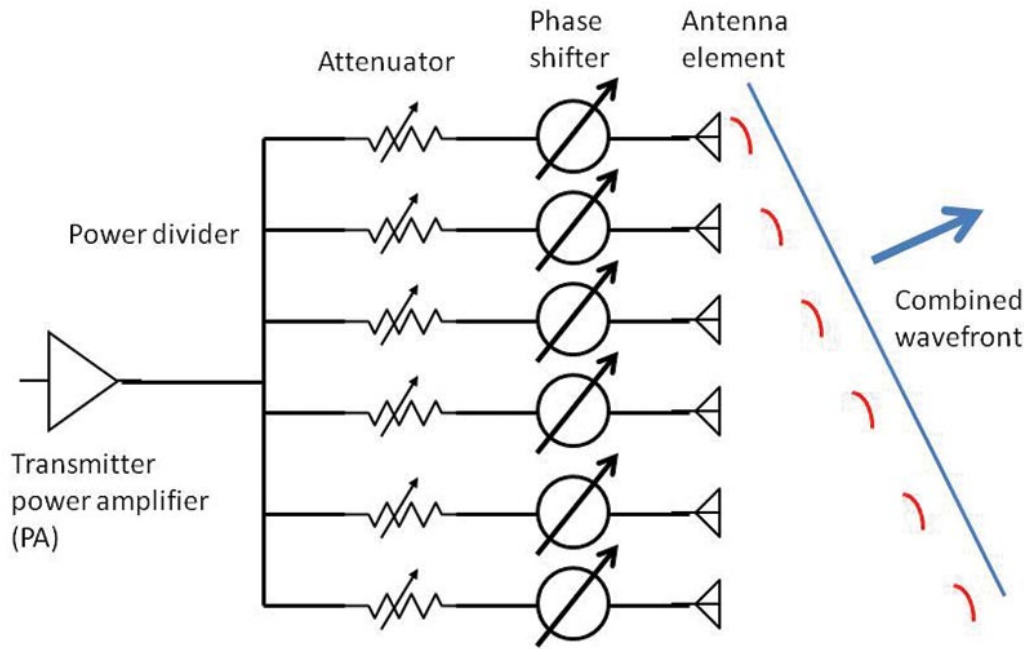
Κάποια σήματα συνδυάζονται ώστε να συνθέσουν

ένα ισχυρότερο σύνθετο σήμα, σε αντίθεση με άλλα που αναιρούν το ένα το άλλο.

Το ραδιοφωνικό σήμα που θα μεταδοθεί αποτελεί ένα ημιτονοειδές κύμα. Όταν προσθέτετε αλγεβρικά δύο ημιτονοειδή κύματα ίδιων συχνοτήτων αλλά

διαφορετικών φάσεων, λαμβάνετε ένα ακόμη ημιτονοειδές κύμα ίδιας συχνότητας αλλά με ένα διαφορετικό πλάτος και διαφορετική φάση. Με τις αλλαγές της φάσης και του πλάτους του σήματος σε μια κεραία, η σύνθετη δέσμη μπορεί να μεταβληθεί και στο πλάτος και στο μήκος της . Επιπρόσθετα, η δέσμη έχει την δυνατότητα να κατευθύνεται ώστε να δείχνει προς την αντίστοιχη επιθυμητή κατεύθυνση.

Υπάρχουν ποικίλοι τρόποι για την υλοποίηση μιας συστοιχίας. Η πιο παλιά αναλογική μέθοδος παρουσιάζεται στο σχήμα 1.18. Το σήμα ραδιοσυχνοτήτων από τον ενισχυτή ισχύος του πομπού (PA) αποστέλλεται σε ένα διαιρέτη ισχύος που διασπά το RF σε ισομερείς ποσότητες σήματος φτιάχνοντας πολλαπλές διαδρομές προς τις κεραίες. Τα σήματα περνούν από συστήματα εξασθενητών και μετατοπιστών φάσης που επιτρέπουν μεμονωμένη προσαρμογή του σήματος και της φάσης σε κάθε στοιχείο κεραίας.



Σχήμα 1.18: Μια πρωτότυπη προσέγγιση για την υλοποίηση ενός πίνακα με ξεχωριστά κυκλώματα.

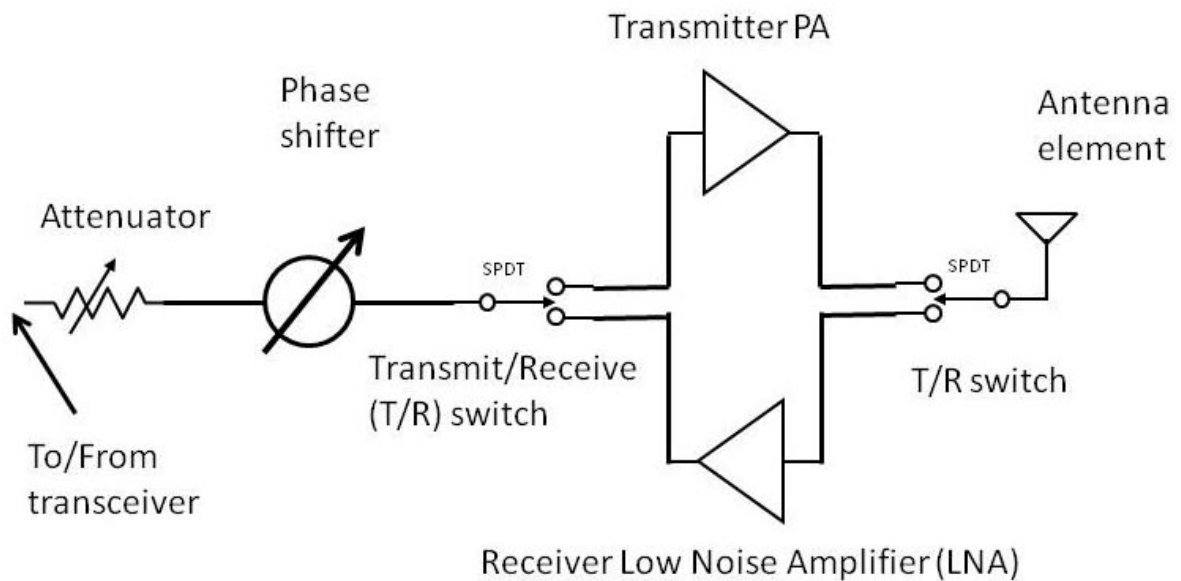
Οι επεκτάσεις φάσης επιλέγονται για τη δημιουργία ενός λοβού με το πλάτος και την κατεύθυνση που θέλουμε. (Sickinger, Weissbrodt and Vossiek, 2018)

Οι μεταβολές φάσης εισάγουν μια μικρή καθυστέρηση που μπορεί να ελεγχθεί.

Οι μεταβολές φάσης σε συνδυασμό με τους εξασθενητές σήματος έχουν την δυνατότητα να ρυθμιστούν ηλεκτρονικά έτσι ώστε να μπορούν να μεταβληθούν όσο δυνατόν το γρηγορότερο .

Το σχήμα 1.18 προβάλλει πώς οι μεταβολές φάσης σχετίζονται άμεσα με το σύνθετο σήμα. Η κόκκινη καμπύλη είναι το μέτωπο του κύματος από την κάθε κεραία. Χωρίς καθυστέρηση στην επάνω κεραία και ίδιες καθυστερήσεις στα κάτω στοιχεία, μπορούμε να διακρίνουμε ότι τα κύματα με καθυστέρηση εμφανίζονται πιο έξω στο χρόνο προς την δεξιά κατεύθυνση. Έπειτα, συνδυάζονται για να φτιάξουν ένα σύνθετο κύμα που μετακινείται προς τα πάνω υπό γωνία. (Frenzel, 2021) Αυτή η πιο παλιά μέθοδος χρησιμοποιούσε μεμονωμένους εξασθενητές όπως και μεταβολές φάσης και άλλα στοιχεία. Η πιο καινούργια προσέγγιση είναι πιο οργανωμένη. Δηλαδή, η στοιχειοκεραία και οι αντίστοιχοι ενισχυτές εκπομπής και λήψης, μεταβολές φάσης, εξασθενητές και διακόπτες ενώνονται ως μονάδα, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.19. Στη λειτουργία μετάδοσης -εκπομπής, το σήμα από τον πομποδέκτη περνά μέσα από τον

εξασθενητή, τον μετατροπέα φάσης και τον διακόπτη T/R στον ενισχυτή ισχύος και έπειτα στην κεραία.



Σχήμα 1.19: Η ολοκληρωμένη προσέγγιση για τη δημιουργία μαζικών συστοιχιών σταδιακής διάταξης με όλα τα στοιχεία ενωμένα σε ένα τσιπ.

Οι εξασθενητές και οι μεταβολείς φάσης ελέγχονται και αλλάζουν ηλεκτρονικά από έναν εξωτερικό μικροελεγκτή ο οποίος είναι προγραμματισμένος ώστε να προσαρμόζει την διάταξη έτσι ώστε να παράγει το επιθυμητό πλάτος και την επιθυμητή κατεύθυνση δέσμης. (Karlsson, 2018)

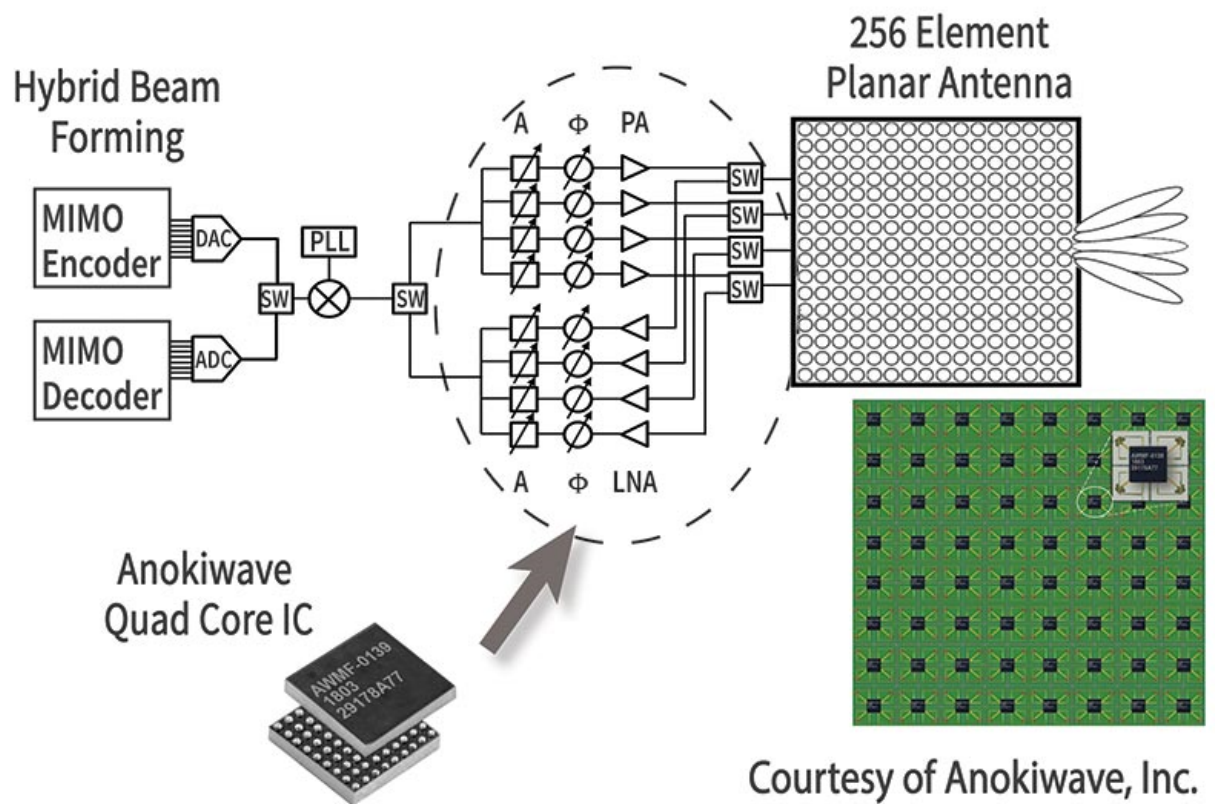
Στη λειτουργία λήψης, το σήμα από την κεραία περνά μέσω του διακόπτη T/R στον ενισχυτή χαμηλού θορύβου και μέσω του μετατροπέα φάσης και του εξασθενητή στο τμήμα του πομποδέκτη. Αυτές οι μονάδες μπορούν να ενωθούν μαζί ως συστοιχία όπως προβλέπεται. Σήμερα, η τεχνολογία ημιαγωγών δίνει την επιλογή τοποθέτησης μίας ή περισσότερων μονάδων σε ένα τσιπ.

Ένα καλό παράδειγμα ενός εμπορικού προϊόντος που διατίθεται για την υλοποίηση συστοιχιών φάσης είναι η οικογένεια των μπροστινών άκρων συστοιχιών φάσης κυμάτων χιλιοστών Anokiwave. Το AWMF-0139 λειτουργεί στη ζώνη από 24 έως 26 GHz που συμπεριλαμβάνεται στα επερχόμενα κυψελωτά δίκτυα 5G.

Περιλαμβάνει τέσσερις υποενότητες ανά IC.

το σχήμα 1.20 δείχνει πώς 64 από τα συγκεκριμένα τσιπ έχουν την δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν για να φτιάξουμε μια συστοιχία $4 \times 64 = 256$ στοιχείων. Ένα ακόμα παρεμφερές IC είναι το Analog Devices ADAR1000. (Frenzel, 2021)

5G Active Antenna Array Formation



Courtesy of Anokiwave, Inc.

Σχήμα 1.20: Το IC Anokiwave AWMF-0139 περιέχει τέσσερις μονάδες κεραίας.

Αυτά τα IC είναι πάνω στο οπίσθιο μέρος του PCB με τη διάταξη ενημερωμένης έκδοσης κώδικα στο μπροστινό μέρος. (WU, 2016)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : Αυτοκινούμενα οχήματα

2.1 Ορισμός

Ως αυτόνομο όχημα ορίζεται αυτό, το οποίο μπορεί να λειτουργεί χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση. Δεν χρειάζεται να ελέγχουν το όχημα ανά πάσα στιγμή άνθρωποι επιβάτες, ούτε να υπάρχουν άνθρωποι στο όχημα. Οι δυνατότητες των αυτόνομων αυτοκινήτων δεν διαφέρουν σε τίποτα από αυτές ενός συνηθισμένου αυτοκινήτου.

Το Υπουργείο Μεταφορών των ΗΠΑ, υιοθέτησε την πρόταση της Ένωσης Μηχανικών Αυτοκινούμενων Οχημάτων (SAE), για την κατηγοριοποίηση των αυτοκινούμενων αυτοκινήτων, βάση του επιπέδου αυτοματισμού τους σε 6 επίπεδα, από το πλήρως χειροκίνητο (Επίπεδο 0) στο πλήρως αυτόνομο (Επίπεδο 5).

Αυτόνομο όχημα ορίζουμε αυτό το οποίο μπορεί να οδηγηθεί αυτόνομα από ένα σημείο εκκίνησης σε έναν προκαθορισμένο τόπο με λειτουργία «αυτόματου πιλότου» χρησιμοποιώντας ποικίλες τεχνολογίες και διάφορους αισθητήρες εντός του οχήματος, όπως προσαρμοσμένο cruise control, ενεργό σύστημα διεύθυνσης και καθοδήγησης (steer by wire), σύστημα αντιμπλοκαρίσματος πέδησης, τεχνολογία πλοήγησης GPS, λέιζερ και ραντάρ.



Σχήμα 2.1: Αυτόνομο ηλεκτρικό ταξί (Hudson Valley Magazine, 2022)

2.2 Ιστορική αναδρομή

Η έμπνευση των αυτοκινούμενων οχημάτων λαμβάνει χώρα από το Futurama, από ένα σχέδιο στην Παγκόσμια Έκθεση της Νέας Υόρκης το 1939. Η εταιρία General Motors δημιούργησε την έκθεση ώστε να εκθέσει την ιδέα της για το πώς θα γινόταν ο κόσμος σε 20 χρόνια από τότε αυτή η ιδέα περιείχε ένα αυτοματοποιημένο σύστημα αυτοκινητοδρόμων που θα οδηγούσε τα αυτόνομα αυτοκίνητα. Ενώ ένας κόσμος με πλήθος ρομποτικών οχημάτων δεν είναι ακόμα πραγματικότητα, τα σύγχρονα αυτοκίνητα διαθέτουν αρκετά αυτόνομα χαρακτηριστικά, όπως συστήματα υποβοήθησης στάθμευσης καθώς και πέδησης. Παράλληλα, οι προσπάθειες για εντελώς αυτόνομα οχήματα συνεχίζονται, με στόχο να επιτύχουμε την μέγιστη ασφάλεια και εξυπηρέτηση στην οδήγηση,

Στην έκθεση της GM το 1939, ο Norman Bel Geddes επινόησε το πρώτο αυτοκινούμενο όχημα, το οποίο ήταν ένα ηλεκτρικό όχημα που οδηγούταν από ραδιοελεγχόμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία που φτιάχονταν με μαγνητισμένες μεταλλικές σχισμές ενσωματωμένες στο δρόμο. Ως το 1958, η General Motors είχε υλοποιήσει αυτήν την ιδέα. Στο εμπρόσθιο τμήμα του αυτοκινήτου ήταν συνδεδεμένοι αισθητήρες οι οποίοι μπορούσαν να εντοπίσουν το ρεύμα που ρέει μέσα από ένα σύρμα ενσωματωμένο στο δρόμο. Το ρεύμα θα προειδοποιούσε το όχημα να μετακινήσει το τιμόνι αριστερά ή δεξιά.

Το 1977, οι Ιάπωνες εξέλιξαν αυτήν την ιδέα, χρησιμοποιώντας ένα σύστημα κάμερας που έστελνε δεδομένα σε έναν υπολογιστή για την επεξεργασία εικόνων του δρόμου. Ωστόσο, αυτό το όχημα μπορούσε να οδηγηθεί μόνο με ταχύτητα κάτω των 32 χιλιομέτρων ανά ώρα. Η βελτίωση έγινε από τους Γερμανούς δέκα χρόνια αργότερα με τα VaMoRs, ενός οχήματος εξοπλισμένου με κάμερες που είχε την δυνατότητα να κινηθεί ασφαλώς έως και 89 χιλιομέτρων την ώρα. Καθώς η τεχνολογία βελτιωνόταν, το ίδιο έκανε και η ικανότητα των αυτοκινούμενων οχημάτων να εντοπίζουν και να αντιδρούν στο περιβάλλον τους. (What is an Autonomous Car? – How Self-Driving Cars Work | Synopsys, 2021)

2.2.1 Η ψηφιακή επανάσταση: Αέρας, γη και θάλασσα

Ο ψηφιακός υπολογιστής υποσχέθηκε να κάνει τα οχήματα έξυπνα με τρόπους που πριν την ανακάλυψη του, μπορούσαν να υπάρξουν μόνο σε ταινίες επιστημονικής φαντασίας. Μία από τις αρχικές λειτουργίες ήταν οι υπολογιστές καθοδήγησης για

πυρηνικούς πυραύλους. Οι τεράστιοι προϋπολογισμοί του ψυχρού πολέμου έδιναν το δικαίωμα στον σχεδιαστή να τους κατασκευάσει με τους καλύτερους ημιαγωγούς με τεχνολογία αιχμής. Στο τέλος της δεκαετίας του 1960, τα πειραματικά ρομπότ καθοδηγούνταν σε νέα περιβάλλοντα στο SRI και στο Στάνφορντ, [δοκιμάζοντας νέες ακόμα τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης]. Μέχρι το 1971, ημιαυτόνομοι διαστημικοί ανιχνευτές προσγειώνονταν σε άλλους κόσμους. Αν ένα αλεξίπτωτο δεν είχε αποτύχει, το σοβιετικό ρόβερ Mars 2 θα μπορούσε να σέρνεται μόνο του στην επιφάνεια του Άρη εκείνη τη χρονιά. Τώρα πια, τα αυτόνομα υποβρύχια μπορούν να ταξιδεύουν στις θάλασσες για χρόνια. Το διαστημικό σκάφος Voyager, το οποίο εκτοξεύτηκε το 1977 είναι το πρώτο υλικό αντικείμενο που ταξίδεψε εκτός του ηλιακού μας συστήματος .

Μέχρι τη δεκαετία του 1960, οι λάτρεις της τεχνητής νοημοσύνης (AI) στους υπολογιστές άρχισαν να ονειρεύονται αυτοκίνητα αρκετά έξυπνα ώστε να πλοηγούνται αυτόνομα στους δρόμους. Οι προκλήσεις ήταν τρομακτικές:

- 1) Αίσθηση του χώρου
- 2) Επεξεργασία των εισερχόμενων πληροφοριών (μοντελοποίηση του έξω κόσμου, λήψη αποφάσεων)
- 3) Αντίδραση, με κατάλληλη κίνηση

Τα πρώτα και τα τελευταία βήματα ήταν εφικτά με την τότε γνωστή τεχνολογία. Το δύσκολο μέρος ήταν η επεξεργασία, η εξυπνάδα μηχανής που χρειαζόταν ενδιάμεσα. Μεγάλο ρόλο αυτής της πρόκλησης έπαιξε η ερμηνεία. Ένα αυτοκίνητο του οποίου το «νοητικό» μοντέλο λανθάνει και διακρίνει έναν πεζό αντί για την αντανάκλασή του σε μια λακκούβα είναι επικίνδυνο.

Οι πρωτοπόροι της τεχνητής νοημοσύνης οραματίζονταν καινοτομίες που θα έφερναν ρομπότ που ήταν όμοιοι με ανθρώπους μέχρι το 2000μ.Χ ,η πραγματική πρόοδος ήταν περισσότερο σταδιακή παρά επαναστατική. Στη δεκαετία του 1980, ο Γερμανός πρωτοπόρος Ernst Dickmanns με επιτυχία έκανε ένα φορτηγό Mercedes να διανύσει αυτόνομα εκατοντάδες χιλιόμετρα αυτοκινητόδρομου, ένα μεγάλο κατόρθωμα ειδικά με την υπολογιστική ισχύ της εποχής. Σε όλο τον κόσμο, πολλοί άλλοι πρωτοπόροι συνέφεραν με τις δικές τους βελτιώσεις. (What is an Autonomous Car? – How Self-Driving Cars Work | Synopsys, 2021)

2.2.2 Αυτόνομα αυτοκίνητα σήμερα

Προς το παρόν, πολλά οχήματα στο δρόμο θεωρούνται ημιαυτόνομα λόγω χαρακτηριστικών ασφαλείας, όπως συστήματα υποβοήθησης στάθμευσης και πέδησης, και μερικά έχουν τη δυνατότητα να οδηγούν, να κατευθύνουν, να φρενάρουν και να παρκάρουν μόνα τους. Η τεχνολογία αυτοκινούμενων οχημάτων δίνει βάση στην τεχνολογία του GPS καθώς και σε προηγμένα συστήματα εντοπισμού που μπορούν να ανιχνεύσουν όρια λωρίδας, σήματα και ξαφνικά εμπόδια. Αν και η τεχνολογία δεν είναι ακόμη άπονη, αναμένεται να γίνει πιο διαδεδομένη καθώς βελτιώνεται, με αρκετούς να προβλέπουν ότι έως το 2025 μέχρι και τα μισά αυτοκίνητα που θα βγουν από τις γραμμές συναρμολόγησης θα είναι αυτόνομα. Πολλές πολιτείες των ΗΠΑ έχουν ήδη νόμους σχετικά με την οδήγηση αυτόνομων οχημάτων για την προετοιμασία όταν αυτή η τεχνολογία είναι συνηθισμένη.

Τα αυτοκινούμενα οχήματα προβλέπεται να φέρουν μαζί τους μερικά πρόσθετα οφέλη, αλλά το πιο σημαντικό είναι πιθανότατα η βελτιωμένη ασφάλεια στους δρόμους. Ο αριθμός των ατυχημάτων που προκαλούνται στους αυτοκινητόδρομους είναι πιθανό να μειωθεί σημαντικά, καθώς τα αυτοκίνητα δεν μπορούν να μεθύσουν ή να οδηγήσουν υπό την επήρεια ουσιών όπως οι άνθρωποι οδηγοί. Τα αυτοοδηγούμενα αυτοκίνητα επίσης δεν νυστάζουν και δεν χρειάζεται να ανησυχούν μήπως αποσπαστούν από μηνύματα κειμένου ή επιβάτες στο όχημα. Μια έρευνα της Εθνικής Υπηρεσίας Ασφάλειας Οδικής Κυκλοφορίας του 2015 διαπίστωσε ότι το 94 τοις εκατό των τροχαίων ατυχημάτων συμβαίνουν λόγω ανθρώπινης φύσεως : Βγάζοντας τους ανθρώπους σαν οδηγούς από το ποσοστό , τα αυτόνομα οχήματα αναμένεται να κάνουν τους δρόμους πολύ πιο ασφαλείς.

Το 2020, ο πρόεδρος του Εθνικού Συμβουλίου Ασφάλειας των ΗΠΑ δήλωσε ότι δεν υπάρχουν αυτοοδηγούμενα αυτοκίνητα ήταν διαθέσιμα στους καταναλωτές για αγορά στις ΗΠΑ το 2020:

Δεν υπάρχει επί του παρόντος διαθέσιμο όχημα για τους καταναλωτές των ΗΠΑ που να είναι αυτόνομο. Κάθε όχημα που πωλείται σε καταναλωτές στις ΗΠΑ συνεχίζει να απαιτεί από τον οδηγό να λάβει μέρος ενεργά στην οδήγηση, ακόμη και όταν τα προηγμένα συστήματα βοήθειας οδηγού ενεργοποιούνται. (Gringer, n.d.)

2.3 Πώς λειτουργούν τα αυτόνομα αυτοκίνητα

Τα αυτοκίνητα τα οποία μπορούν να οδηγηθούν μόνα τους έχουν ξεκινήσει να εμφανίζονται σε δρόμους σε όλο τον κόσμο και τα πλήρως αυτόματα οχήματα

αναμένεται να γίνουν ο κανόνας τα επόμενα χρόνια. Πώς λειτουργούν λοιπόν τα αυτοκινούμενα οχήματα;

Υπάρχουν πολλοί λόγοι για τους οποίους οι αυτοκινητοβιομηχανίες βιάζονται να δημιουργήσουν αυτοκίνητα χωρίς οδηγό, κυρίως επειδή προσφέρουν χαμηλότερες εκπομπές ρύπων και κάνουν πιο εύκολη την κυκλοφοριακή συμφόρηση, αλλά πρόκειται επίσης να μειωθεί ο αριθμός των ατυχημάτων στους δρόμους .

Πέρυσι, ο αμερικανικός τεχνολογικός κολοσσός Intel υπολόγισε ότι τα αυτόνομα αυτοκίνητα θα δημιουργήσουν μια βιομηχανία 7 τρισεκατομμυρίων δολαρίων το χρόνο έως το 2050, ή 5,65 τρισεκατομμύρια ευρώ. Η νέα «οικονομία επιβατών», όπου οι άνθρωποι αλλάζουν θέση από οδηγό σε αναβάτες, θα δημιουργήσει μεγάλες ευκαιρίες για νέες επιχειρήσεις.



Σχήμα 2.2: Προσομοίωση αυτόνομων αυτοκινήτων (Carey, 2022)

Παρόλο που είναι ακόμη σε πολύ νέο επίπεδο, η τεχνολογία αυτόνομης οδήγησης γίνεται ολοένα και πιο κοινή και θα μπορούσε να αλλάξει ριζικά τον τρόπο που φτάνουμε από το Α στο Β. Διαφορετικού είδους αυτοκίνητα είναι ικανά για διαφορετικά επίπεδα αυτόνομης οδήγησης σε κλίμακα από 0 έως 5.

- **Επίπεδο 0:** Όλα τα κύρια συστήματα ρυθμίζονται από ανθρώπους.
- **Επίπεδο 1:** Κάποια συστήματα, για παράδειγμα cruise control ή αυτόματη πέδηση, είναι εφικτό να ελεγχθούν από το αυτοκίνητο.
- **Επίπεδο 2:** Το όχημα προσφέρει το λιγότερο δύο ταυτόχρονες αυτοματοποιημένες λειτουργίες, όπως η επιτάχυνση και το τιμόνι. Παρόλα αυτά, οι άνθρωποι πρέπει να βεβαιώνονται για την ασφαλή λειτουργία.
- **Επίπεδο 3:** Το αυτοκίνητο μπορεί να διαχειρίζεται λειτουργίες ασφαλείας υπό ορισμένες συνθήκες, αλλά ο οδηγός προβλέπεται να αναλάβει όταν ειδοποιηθεί.
- **Επίπεδο 4:** Το αυτοκίνητο είναι πλήρως αυτόνομο σε κάποια σενάρια οδήγησης, αν και όχι σε όλα.
- **Επίπεδο 5:** Το αυτοκίνητο είναι εντελώς αυτόνομο σε οποιαδήποτε περίπτωση.

Τόσο οι εταιρείες τεχνολογίας όσο και οι αυτοκινητοβιομηχανίες έχουν φτιάξει τεχνολογίες αυτόνομης οδήγησης τα τελευταία χρόνια. Ενώ κάθε σχέδιο έχει ποικιλία, τα περισσότερα συστήματα αυτόνομης οδήγησης επινοούν και διατηρούν έναν εσωτερικό χάρτη του αντίστοιχου χώρου του οχήματος, βασισμένο σε ένα μεγάλο φάσμα αισθητήρων. Εν συνεχεία, το ενσωματωμένο λογισμικό επεξεργάζεται αυτές τις εισόδους, αναπτύσσει μια διαδρομή πλοήγησης και αποστέλλει οδηγίες όσον αφορά την επιτάχυνση, το φρενάρισμα του οχήματος και συστήματα διεύθυνσης. Τα αυτοκινούμενα οχήματα μπορεί επίσης να είναι «συνδεδεμένα», επιτρέποντάς τους να έχουν επικοινωνία με άλλα οχήματα ή μέσα, όπως τα φανάρια επόμενης γενιάς. (How do self-driving cars work?, 2018)

2.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των αυτοκινούμενων αυτοκινήτων

Η εξέλιξη των αυτοοδηγούμενων οχημάτων έχει εξελιχθεί σε αγώνα δρόμου την τελευταία δεκαετία. Στην πραγματικότητα, τα περισσότερα οχήματα που κυκλοφορούν σήμερα έχουν κάποια μορφή αυτοματισμού.

Αναλόγως με το που μένετε, τα εντελώς αυτοματοποιημένα οχήματα αυτόνομης οδήγησης είναι ή καθημερινό θέαμα ή όχι και τόσο μακρινή πραγματικότητα. Τα αυτόνομα οχήματα Waymo της Google διανύουν αποστάσεις πάνω-κάτω στους δρόμους του Phoenix εκ των αρχών του 2017.

Πλεονεκτήματα

- Λιγότερα ατυχήματα οχημάτων
- αποτελεσματικότερο ταξίδι
- Μειωμένη συμφόρηση κυκλοφορίας
- πιο εύκολη πρόσβαση για άτομα με αναπηρία και ηλικιωμένους

Μειονεκτήματα

- Απαιτείται ευρεία χρήση για να λειτουργήσει
- Μαζική μείωση θέσεων εργασίας στον τομέα των μεταφορών
- Χάκερ και κίνδυνοι στον κυβερνοχώρο
- Ηθικοί προβληματισμοί

2.4.1 Πλεονεκτήματα

Μειωμένα ατυχήματα οχημάτων

Η μεγάλη πλειονότητα των τροχαίων ατυχημάτων οφείλονται σε ανθρώπινο λάθος. Υπολογίζεται ότι τα εντελώς αυτοματοποιημένα οχήματα πιθανόν να μειώσουν τις συγκρούσεις οχημάτων κατά 90%.

Πιο αποτελεσματικό ταξίδι

Τα πλήρως αυτοματοποιημένα οχήματα μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω ενός δικτύου υπολογιστών. Αυτή η επικοινωνία λειτουργεί μέσω της ανάλυσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο που μπορεί να βοηθήσει στον προσδιορισμό των βέλτιστων διαδρομών ταξιδιού, όπως και στον υπολογισμό των βέλτιστων ταχυτήτων και αποστάσεων μεταξύ των οχημάτων κατά τη διάρκεια που είναι ανάγκη στα σημεία συμφόρησης σε ώρες αιχμής.

Μειωμένη συμφόρηση κυκλοφορίας

Με δεδομένο ότι τα αυτόνομα οχήματα επικοινωνούν σε αληθινό χρόνο, οι αποστάσεις μετακίνησης μεταξύ των οχημάτων μπορούν να εξελιχθούν προς το

καλύτερο. Αυτό είναι δυνατόν να βοηθήσει στη μείωση της κυκλοφορικής συμφόρησης.

Πιο εύκολη πρόσβαση για ηλικιωμένους και άτομα με ειδικές ανάγκες

Τα αυτοκινούμενα οχήματα θα μπορούσαν να είναι μια πιο ασφαλής και πιο προσιτή εναλλακτική λύση τόσο για τα άτομα με αναπηρία όσο και για τους ηλικιωμένους ανθρώπους . Σε μία μελέτη του 2017 από το Ruderman Family Foundation αναφέρεται πως: «Ο μετριασμός των εμποδίων που σχετίζονται με τις μεταφορές για τα άτομα με αναπηρία θα δώσει νέες ευκαιρίες απασχόλησης για περίπου 2 εκατομμύρια άτομα με αναπηρία και θα εξοικονομήσει 19 δισεκατομμύρια δολάρια ετησίως σε δαπάνες υγειονομικής περίθαλψης από χαμένα ιατρικά ραντεβού. Αυτό είναι στο πλαίσιο των αναμενόμενων ευρύτερων επιπτώσεων των αυτόνομων οχημάτων: 1,1 τρισεκατομμύρια ευρώ σε εξοικονόμηση από κέρδη παραγωγικότητας, κόστος καυσίμων, πρόληψη ατυχημάτων, και άλλων». (Negretti, 2021)

2.4.2 Μειονεκτήματα

Απαιτείται ευρεία χρήση από όλους

Έχει υποστηριχθεί ότι για όποιο από τα πλεονεκτήματα που αναφέρονται παραπάνω, ο μοναδικός τρόπος με τον οποίο μπορεί να λειτουργήσει ένα εντελώς αυτόνομο σύστημα είναι εφόσον όλα τα οχήματα είναι αυτόνομα. Το πρόβλημα όσον αφορά αυτήν την ιδέα είναι ότι ουσιαστικά θα στερούσε από τους ανθρώπους την ανεξάρτητη ικανότητά τους να οδηγούν.

Μαζικές μειώσεις θέσεων εργασίας σε ορισμένους οικονομικούς τομείς

Ένα σημαντικό μέρος του πληθυσμού είναι εξαρτημένο εξ ολοκλήρου από την αυτοκινητοβιομηχανία για τα προς το ζην. Μεγάλο ποσοστό από αυτούς που εργάζονται σε φορτηγά, δημόσια συγκοινωνία και υπηρεσίες παράδοσης θα σκέφτονταν ότι οι ρόλοι τους θα ήταν ξεπερασμένοι σε ένα μέλλον με πλήρη αυτοοδήγηση.

Αν και η Goldman Sachs έχει εκτιμήσει ότι η αυτοματοποίηση θα έχει ως αποτέλεσμα την εξάλειψη 300.000 θέσεων εργασίας που σχετίζονται με τις μεταφορές κάθε χρόνο, νέες ευκαιρίες απασχόλησης θα δημιουργηθούν με άλλους τρόπους.

Χάκερ και κίνδυνοι για την ασφάλεια στον κυβερνοχώρο

Τα θέματα ασφάλειας είναι ένα πολύ σοβαρό μειονέκτημα των αυτοκινούμενων οχημάτων. Όταν τα οχήματα βασίζονται σε υπολογιστές και δίκτυα για τη λειτουργία τους, είναι επιρρεπή σε κινδύνους στον κυβερνοχώρο.

Οι ηθικοί προβληματισμοί

Ένα πολύ σημαντικό θέμα που μπορεί να μην τραβήξει την προσοχή που του αξίζει στις συζητήσεις για τα αυτόνομα αυτοκίνητα: τα υπέρ και τα κατά δεν εξετάζουν πάντα ζητήματα ηθικής.

Το ηθικό δίλημμα εξαρτάται από την ιδέα ότι η τεχνητή νοημοσύνη στα αυτόνομα οχήματα δεν έχει την ικανότητα να κάνει κρίσεις μεταξύ πολλαπλών ευνοϊκών αποτελεσμάτων — ή «λιγότερο κακών» αποτελεσμάτων, για εκείνο το θέμα. Ένα σύνηθες παράδειγμα θα ήταν ένα αυτόνομο όχημα που επιλέγει να παρεκτραπεί από το δρόμο, σκοτώνοντας πιθανώς τον οδηγό μέσα, προσπαθώντας να αποφύγει να χτυπήσει ένα σχολικό όχημα γεμάτο παιδιά. (Negretti, 2021)

2.5 Ανάπτυξη κεραιών για μελλοντικά ραντάρ αυτοκινήτων

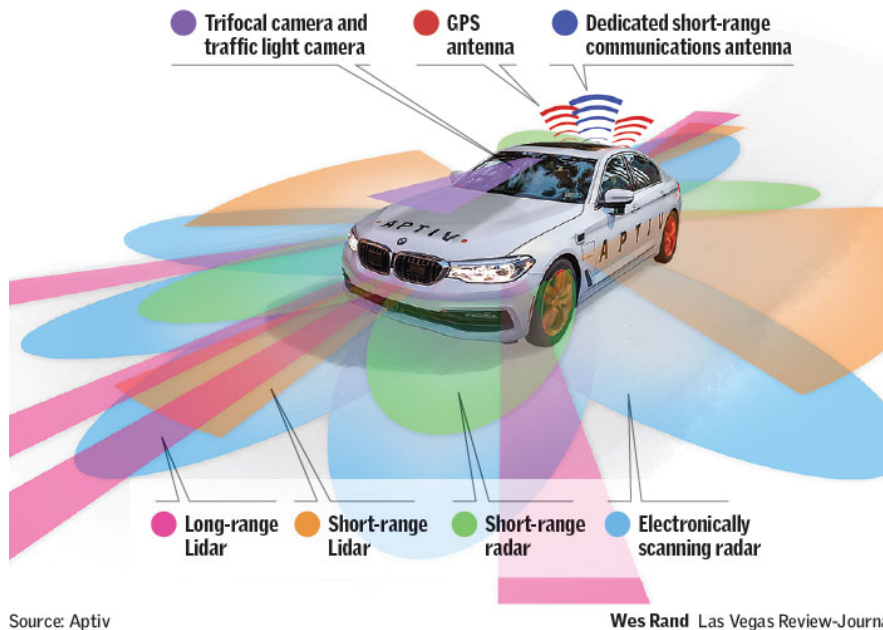
Το ραντάρ είναι ο πιο σημαντικός αισθητήρας για αυτόνομη οδήγηση. Η ικανότητα υψηλής χωρικής ανάλυσης πετυχαίνεται με τη χρήση ευρέως αριθμού κεραιών που όλες είναι απαραίτητο να συνδέονται με μεμονωμένες θύρες ενσωματωμένων IC ραντάρ. Κατά τη σχεδίαση των πολύπλοκων δικτύων σύνδεσης υψηλών συχνοτήτων, οι τεχνολογίες πλακέτας τυπωμένων κυκλωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν έως τώρα διαφέρουν από τα όριά τους.

Η ιδέα της αυτόνομης οδήγησης είναι πλέον εφικτή. Αυτό γίνεται μέσω της έξυπνης σύντηξης μιας σειράς διαφορετικών ενεργών αισθητήρων όπως LIDAR και ραντάρ όπως και αισθητήρων εξαρτημένους από υπέρηχους σε συνδυασμό με παθητικούς αισθητήρες με παράδειγμα τις κάμερες, τα επιταχυνσιόμετρα, τα ταχύμετρα, τους δέκτες για τα παγκόσμια δορυφορικά συστήματα πλοήγησης (GNSS) που σχετίζονται με ψηφιακούς χάρτες και την ανταλλαγή δεδομένων των οχημάτων με το περιβάλλον αυτών (επικοινωνία car-2-x). Το ραντάρ είναι πολύ σημαντικό μεταξύ των ενεργών

αισθητήρων. Μερικά από τα πλεονεκτήματα – εκτός από το σχετικά χαμηλό κόστος – είναι η ικανότητά του για παντός καιρού, η εμβέλεια και η ποικιλία των πληροφοριών που μπορούν να εξαχθούν από τα σήματα ραντάρ.

Self-driving cars

The 75 self-driving BMWs in Aptiv's fleet, including 30 used in partnership with Lyft, utilize over 20 sensors, cameras, antennas and computers on board to ensure the vehicles navigate Las Vegas roads as safely and as accurately as possible.

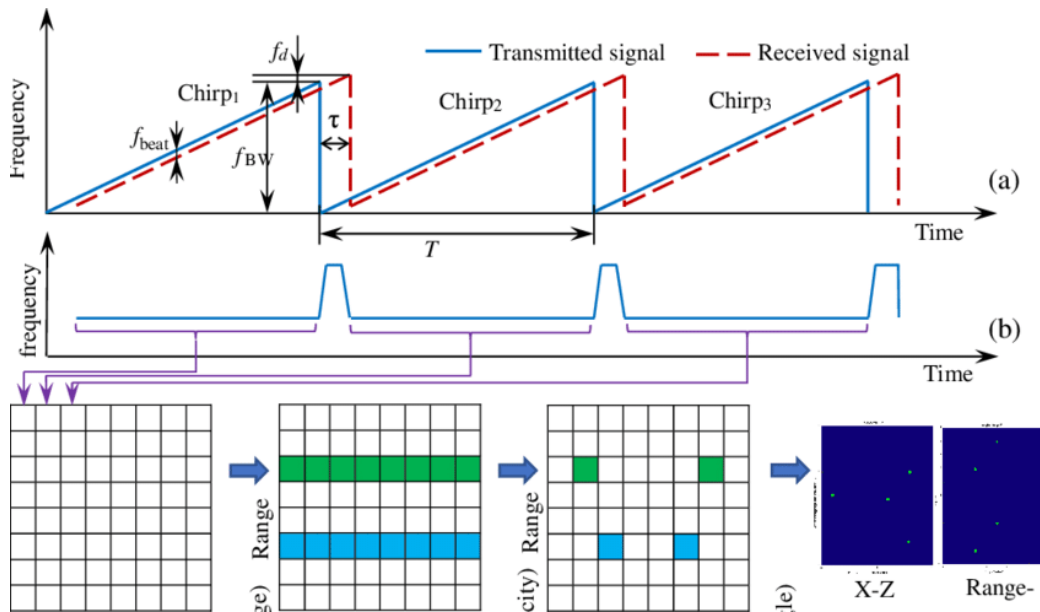


Σχήμα 2.3: Ραντάρ και κεραίες σε αυτοκινούμενο όχημα (Balwin, 2020)

Στη επιστήμη των ραντάρ, γνωρίζουμε έναν μεγάλο αριθμό διαφορετικών διαδικασιών που γίνεται να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της θέσης, της ταχύτητας και των ιδιαίτερων ιδιοτήτων ενός μεμονωμένου αντικειμένου και για την διαίρεση πολλαπλών αντικειμένων το ένα από το άλλο. Όσον αφορά τον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας, έχει καθιερωθεί ένας συνδυασμός διαμορφωμένων σημάτων συνεχούς κύματος, που βασίζεται στις συχνότητες τους, (FMCW) για τον προσδιορισμό της απόστασης και της ταχύτητας. Για αυτό χρησιμοποιούνται συνήθως ξεχωριστές κεραίες εκπομπής και λήψης. Η μικρότερη διαμόρφωση απαρτίζεται από μία κεραία εκπομπής και δύο κεραίες λήψης. Οι κεραίες λήψης είναι σε διάταξη οριζόντια με απόσταση μισού μήκους κύματος. Έτσι, υπό ιδανικές συνθήκες, μεμονωμένα αντικείμενα είναι δυνατόν να ανιχνευθούν στο οριζόντιο επίπεδο. Για να αντιμετωπίσουμε την επιδείνωση των συνθηκών διάδοσης των

κυμάτων, για παράδειγμα εκείνων που θα προκληθούν από ένα κάλυμμα κεραίας (radome) ή ένα επιπρόσθετο πλαστικό κάλυμμα (έμβλημα του κατασκευαστή, προφυλακτήρας κ.λπ.), κατασκευαστικές ανοχές ή σκόνη, και για να είναι είναι εφικτό να διαχωριστούν πολλαπλές αντανάκλασεις με την ίδια ακτινική απόσταση σε άλλες γωνίες, επί το πλείστον χρησιμοποιούνται τρεις ή και περισσότερες κεραίες λήψης. Η διάταξη των κεραιών λήψης είναι εφικτό επίσης να επιτευχθεί και στην κατακόρυφη κατεύθυνση. Αυτό δίνει την δυνατότητα μέτρησης του ύψους των αντικειμένων πάνω από το έδαφος.

Τέλος, το ακολουθούμενο επίπεδο διαμόρφωσης χρησιμοποιεί πολλές κεραίες εκπομπής σε αλληπάλληλες θέσεις. Μέσω της εφυσούς χωρικής κατανομής των κεραιών εκπομπής και λήψης, μπορεί να σχεδιαστεί μια κεραία εικονικής συστοιχίας σύμφωνα με την αρχή της πολλαπλής εισόδου/πολλαπλής εξόδου (MIMO). Η χωρική ικανότητα ανάλυσης της κεραίας συστοιχίας είναι με διαφορά καλύτερη από ό,τι θα μπορούσε με το πραγματικό διάφραγμα του αισθητήρα ραντάρ. Οι κατασκευαστές αισθητήρων ραντάρ αυτοκινήτων δουλεύουν συνήθως σε συστήματα με 12 κεραίες εκπομπής και 16 κεραίες λήψης. Τα εξαιρετικά ολοκληρωμένα κυκλώματα (MMIC) με τη επινόηση σήματος ραντάρ FMCW και τους αντίστοιχους δέκτες πωλούνται επί του παρόντος από αρκετούς μεγάλους κατασκευαστές IC όπως η Infineon, η Texas Instruments ή η NXP. Αυτά τα MMIC περιέχουν συνήθως τρία ανεξάρτητα κανάλια μετάδοσης και τέσσερα κανάλια λήψης. Συνεπώς, ένας από τους αισθητήρες ραντάρ που αναγράφονται παραπάνω μπορεί να κατασκευαστεί χρησιμοποιώντας τέσσερα από αυτά τα MMIC. (Bertuch, 2020)



Σχήμα 2.4: Αρχή λειτουργίας του ραντάρ FMCW. (Long et al., 2019)

Συνήθως, για λόγους κόστους, τυπωμένα στοιχεία ακτινοβολίας όπως κεραίες μικροταινιών ή κυματοδηγοί με ενσωματωμένη επιφάνεια με σχισμή (SIW) χρησιμοποιούνται ως στοιχεία κεραίας επειδή μπορούν να ενσωματωθούν μονολιθικά με τα ραντάρ MMIC και πιθανώς άλλα ηλεκτρονικά εξαρτήματα στην ίδια πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος. Με τα πολυάριθμα στοιχεία κεραίας που θέλει να χρησιμοποιήσει η τωρινή γενιά αισθητήρων ραντάρ, η διάταξη των γραμμών RF μεταξύ των MMIC και των κεραίων φαίνεται σαν μια μεγάλη πρόκληση.

2.5.1 Τεχνολογία αιχμής

Τα συστήματα ραντάρ αποτελούν απαραίτητη τεχνολογία των σύγχρονων συστημάτων ασφάλειας και άνετης χρήσης των οχημάτων. Αρκετά μοντέλα αυτοκινήτων επόμενης γενιάς έχουν προβάλλει ότι διαθέτουν έως και 10 αισθητήρες ραντάρ ανά όχημα, επιτρέποντας τη σχεδίαση μιας προβολής 360° βασισμένης σε ραντάρ, απαραίτητης για προχωρημένο στάδιο υποβοήθησης οδηγού καθώς και για ημιαυτόνομη λειτουργία. Για αυτό ακριβώς, η ζήτηση από την αυτοκινητοβιομηχανία για ραντάρ υψηλής ακρίβειας, πολλαπλών εφαρμογών είναι υψηλότερη από ποτέ, και οι περισσότερες απαιτήσεις σχετικά με τη λειτουργικότητα και τις δυνατότητες αισθητήρων προτρέπουν σε δραστηριότητες έρευνας και ανάπτυξης στον τομέα των συστημάτων ραντάρ αυτοκινήτων ιδιαίτερα στη βιομηχανία αλλά και σε ακαδημαϊκό επίπεδο.

Η τωρινή τεχνολογία ραντάρ αυτοκινήτων βασίζεται εντελώς στην αρχή λειτουργίας του ραντάρ συνεχών κυμάτων με διαμορφωμένη συχνότητα (FMCW), όπου είναι γνωστή εδώ και αρκετά χρόνια. Ωστόσο, μαζί με την εξέλιξη των δυνατοτήτων, όπως οι πιο υψηλές συχνότητες φορέα, το εύρος ζώνης διαμόρφωσης, όπως και η κλιμάκωση των καναλιών εκπομπής και λήψης που μεταχειρίζονται ταυτόχρονα με ανεξάρτητες δυνατότητες διαμόρφωσης, μεγαλύτερη ελευθερία έχει προστεθεί στο παραδοσιακό ραντάρ FMCW. (Bertuch, 2020)

Κεφάλαιο 3^ο : MIMO

Τα ραδιοφωνικά συστήματα που χρησιμοποιούν τεχνολογία MIMO (multiple-in, multiple-out) έχουν γίνει ολοένα και πιο κοινά τις τελευταίες δεκαετίες, με αξιοσημείωτα παραδείγματα τα δίκτυα Wi-Fi, το 3G / 4G και το τεράστιο σύστημα MIMO που αποτελεί ένα μεγάλο μέρος των σύγχρονων επικοινωνιακών υποδομών. Πιο πρόσφατα, η τεχνολογία MIMO βρίσκει το δρόμο της σε ταχέως αναπτυσσόμενες αγορές, όπως επαγγελματικούς τομείς μετάδοσης βίντεο, επιβολής του νόμου και κυβερνητικούς τομείς, χάρη στις νεότερες γενιές κεραιών που υποστηρίζουν την τεχνολογία MIMO. Με τις ανάγκες εύρους ζώνης που απαιτούν τα σημερινά συστήματα βίντεο, ήχου και δεδομένων, το MIMO είναι μια εξατομικευμένη λύση για επικοινωνία, κυρίως σε αποπνικτικά περιβάλλοντα όπου είναι πιο δύσκολο να επιτευχθεί καθαρή γραμμή, λόγω των πολλών συστημάτων ραδιοσυχνοτήτων / μικροκυμάτων που να δημιουργούν παρεμβολές. Υπάρχουν διάφοροι τύποι συστημάτων MIMO που μεταχειρίζονται αυτήν τη στιγμή, με διαφορετικούς κατασκευαστές ραδιοφώνου MIMO να προβάλλουν τις δικές τους εκδόσεις της τεχνολογίας με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα. Η νέα γενιά μικρών, μεγάλης απόδοσης τακτικών ραδιοφώνων MIMO επιτρέπει την εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων του MIMO από μικρές ομάδες καθώς και από μεγάλους οργανισμούς.



Σχήμα 3.1: Τυπική κεραία MIMO (Krumbein, 2017)

3.1 Εισαγωγή στις MIMO

Η τηλεπικοινωνία μέσω MIMO στέλνει τα ίδια δεδομένα με πολλά σήματα ταυτόχρονα μέσω πολλαπλών κεραιών, ενώ εξακολουθεί να χρησιμοποιεί ένα μόνο ραδιοφωνικό κανάλι. Τα δεδομένα διαχωρίζονται σε πολλές ροές δεδομένων στο σημείο μετάδοσης και επανασυνδέονται στην πλευρά λήψης από ένα διαφορετικό ραδιόφωνο MIMO που έχει δημιουργηθεί με τον ίδιο αριθμό κεραιών. Ο δέκτης έχει σχεδιαστεί για να αντιλαμβάνεται την μικρή χρονική διαφορά μεταξύ των λήψεων οποιουδήποτε σήματος, τυχόν πρόσθετους θορύβους ή παρεμβολές, ακόμη και σήματα που χάθηκαν. Με τη μετάδοση των ίδιων δεδομένων σε πολυάριθμες ροές, τα ραδιόφωνα MIMO μας δίνουν πολλές επιλογές στη μετάδοση δεδομένων, που οι κλασικές κεραίες SISO (Single In, Single out) δεν μπορούν να παρέχουν. Αυτό κάνει τα συστήματα MIMO να υπερισχύουν σε σχέση με τις τυπικές διαμορφώσεις SISO.

Τα ραδιόφωνα MIMO μπορούν να χρησιμοποιήσουν τις αναποδογυρισμένες και ανακυκλωμένες μεταδόσεις ραδιοσυχνοτήτων (γνωστές ως διάδοση πολλαπλών διαδρομών) για να βελτιώσουν πραγματικά την ισχύ του σήματος ακόμη και χωρίς σαφή γραμμή τοποθεσίας, καθώς λαμβάνουν και συνδυάζουν πολλαπλές ροές των ίδιων δεδομένων που λαμβάνονται σε ελαφρώς διαφορετικά χρονικά διαστήματα. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε περιβάλλοντα όπου ζουν πολλοί, όπου η υποβάθμιση του σήματος μεταξύ μεμονωμένων κεραιών χωρίς καθαρή γραμμή τοποθεσίας είναι

ένα φλέγον ζήτημα. Τα αστικά περιβάλλοντα παρέχουν αρκετές οδούς ανάκλασης για τα σήματα MIMO μεταξύ των ραδιοφώνων εκπομπής και λήψης.

Η τελική απόδοση είναι εφικτό να βελτιωθεί, επιτρέποντας υψηλότερη ποιότητα και ποσότητα βίντεο και άλλων δεδομένων που θα γίνονται αποστολή μέσω του δικτύου.

Με τη χρήση πολλαπλών ροών δεδομένων, προβλήματα όπως το ξεθώριασμα που προκαλεί απώλεια δεδομένων μπορούν να μειωθούν, με αποτέλεσμα καλύτερη ποιότητα βίντεο ή ήχου. (Krumbein, 2016)

Συγκεκριμένα ραδιοφωνικά συστήματα MIMO δίνουν επίσης δυνατότητα δικτύωσης Ad-Hoc, όπου ξεχωριστοί κόμβοι χρήστη (όπως ένα άτομο με ραδιόφωνο χειρός ή όχημα με ενσωματωμένο ραδιόφωνο MIMO και κεραίες) μπορούν να εισχωρήσουν ή να εκχωρήσουν από το δίκτυο MIMO ανά πάσα στιγμή, και αυτόματα να σταλούν τα δεδομένα τους σε άλλους χρήστες κόμβων μέσω του δικτύου, φτιάχνοντας ένα ανασχηματιζόμενο, αυτό βελτιωμένο δίκτυο που δεν βασίζεται σε μια κεντρική αρχή για να λειτουργήσει. Αυτό είναι όμοιο με τον τρόπο λειτουργίας των μεγάλων ραδιοφωνικών συστημάτων MANET. Η δυνατότητα εκμετάλλευσης αυτού του τύπου δικτύωσης θέτει τα ραδιοφωνικά συστήματα MIMO σε νέες ομάδες χρηστών που χρειάζονται αξιόπιστη, κλιμακούμενη εξασφάλιση δικτύου. Αυτά τα συστήματα είναι πρακτικότερα από κάθε άλλωτε, καθώς τα ραδιοφωνικά συστήματα MIMO συνεχίζουν να μικραίνουν και μπορούν να συσκευαστούν σε φορητές συσκευές ραδιοφώνου.

Μερικά από τα παραδείγματα ομάδων χρηστών που εκμεταλλεύονται τα συστήματα MIMO:

- Αρχικές ανταποκρίσεις που συχνά λειτουργούν σε μεταβαλλόμενες καταστάσεις και δεν μπορούν να στηριχτούν σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας ή άλλη τωρινή σταθερή υποδομή για να λειτουργήσουν όταν είναι ανάγκη λόγω φυσικών καταστροφών, διακοπών ρεύματος, υπερφορτωμένων δικτύων ή άλλων ζητημάτων.
- Μετάδοση τηλεοπτικού προγράμματος, όπως ζωντανές εκπομπές αθλητικών ή ειδήσεων, όπου η ιστορία είναι πιθανό να αλλάξει κατά την μετάδοση και οι τοποθεσίες μετάδοσης πρέπει να μετακινηθούν απροειδοποίητα ή όπου η λήψη μπορεί να περιλαμβάνει πολλές, ταυτόχρονες περιοχές. Η μείωση των μεγάλων διαδρομών καλωδίων είναι ένα άλλο μεγάλο πλεονέκτημα για αυτήν την αγορά.

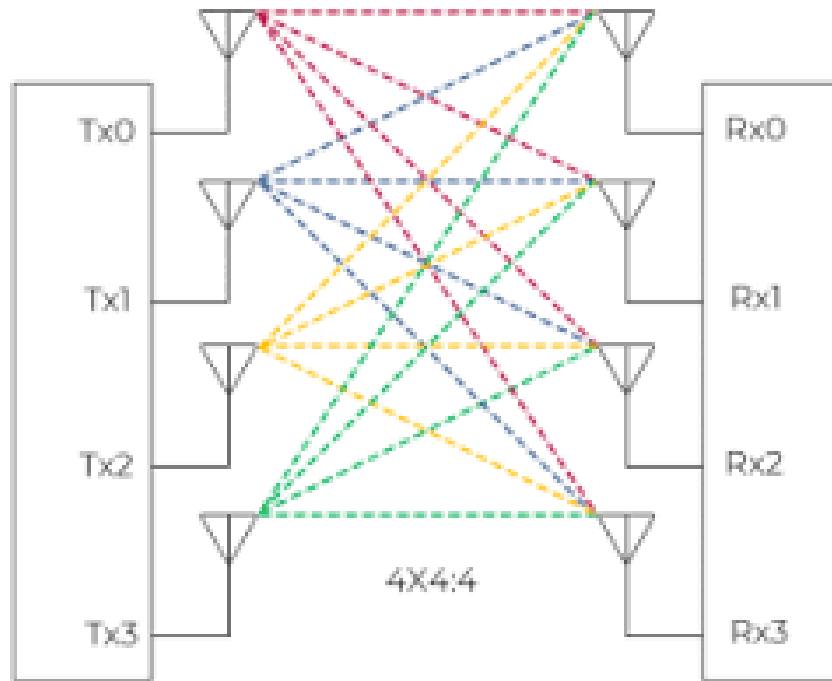
- Χρήστες που επιβάλλουν τον νόμο ή στρατιωτικοί που πρέπει να λειτουργούν με τα δικά τους μοναδικά δίκτυα επικοινωνίας σε αποκλειστικές ραδιοφωνικές ζώνες. Αυτό απαιτεί ενδοεπικοινωνία μεταξύ μικρών ομάδων, όπως και μεγαλύτερα δίκτυα που υπάγουν οχήματα εδάφους, συστήματα UAV/UGV και άλλα.

3.2 Τυπικές διαμορφώσεις MIMO

Τα ραδιοφωνικά συστήματα MIMO χρησιμοποιούν πολλές κεραιές για την εκπομπή και λήψη πολλών ροών δεδομένων ταυτόχρονα. Ο αριθμός των κεραιών που χρειάζονται καθορίζεται από τον κατασκευαστή του ραδιοφώνου με κριτήριο το πως θα επιτευχθεί η καλύτερη μετάδοση και λήψη με το ορισμένο υλικό και λογισμικό του. Οι τυπικές διαμορφώσεις είναι:

- 2X2 MIMO (δύο κεραιές εκπομπής, δύο κεραιές λήψης)
- 3X3 MIMO (τρεις κεραιές εκπομπής, τρεις κεραιές λήψης)
- 4X4 MIMO (τέσσερις κεραιές εκπομπής, τέσσερις κεραιές λήψης)
- 8X8 MIMO (οκτώ κεραιές εκπομπής, οκτώ κεραιές λήψης)

Σε γενικές γραμμές, όσο περισσότερες κεραιές έχει ένα σύστημα, τόσο περισσότερες ταυτόχρονες ροές δεδομένων μπορούν να μεταδοθούν ταυτόχρονα, βελτιώνοντας τη ραδιοζεύξη. Ωστόσο, οι ξεχωριστές ρυθμίσεις συστήματος, οι υπάρχουσες φυσικές και περιβαλλοντικές συνθήκες ραδιοσυχνοτήτων και η εξέλιξη στη τεχνολογία σημαίνουν ότι ακόμα περισσότερες κεραιές δεν σημαίνει πάντα καλύτερη απόδοση του συστήματος.



Σχήμα 3.2: Κεραία MIMO 4x4 (Krumbein, 2017)

3.2.1 Επιλογές κεραίας για ραδιόφωνα MIMO

Υπάρχουν πολλές επιλογές κεραίας για ραδιόφωνα MIMO, ανάλογα με το πώς ο χρήστης επιθυμεί να διαμορφώσει το ραδιοσύστημά του με βάση τις ανάγκες της εφαρμογής του. Σε γενικές γραμμές, οι κεραίες για χρήση MIMO μπορούν να αναλυθούν στις ακόλουθες κατηγορίες:

1. Παραδοσιακές κάθετα πολωμένες διπολικές κεραίες. Είναι ακριβώς οι ίδιες κεραίες που χρησιμοποιούνται στα συστήματα SISO, με διαφορά ότι το σύστημα MIMO θα μεταχειρίζεται δύο ή περισσότερες από τις ίδιες κεραίες.
2. Προϊόντα πολλαπλών κεραιών που συμπεριλαμβάνονται σε ένα μόνο κάλυμμα (radome) . Αυτές οι κεραίες έχουν δύο ή περισσότερες υποδοχές ραδιοσυχνοτήτων, στις οποίες η καθεμία συνδέεται σε ξεχωριστή κεραία εντός του καλύμματος. Συνήθως σχεδιάζονται με πλάγια πόλωση αριστερά και πλάγια δεξιά, με κάθε στοιχείο περιστρεφόμενο κατά 90 μοίρες (ορθογώνια) από το άλλο, παρέχοντας ποικιλία πόλωσης κεραίας για απαιτητικά περιβάλλοντα ραδιοσυχνοτήτων χωρίς να αυξάνει την δυσκολία εγκατάστασης του συστήματος για τον χρήστη. Όπως και με τα συστήματα SISO, τα συστήματα MIMO είναι εφικτό να μεταχειριστούν πανκατευθυντικές κεραίες ή κατευθυντικούς πίνακες και κεραίες για διαφορετικές περιπτώσεις επικοινωνίας και ανάγκες κάλυψης. (Krumbein, 2016)

3.3 Εφαρμογές

Η τρίτη γενιά δικτύου (3G) επιτρέπει την εφαρμογή σχημάτων διαφοροποίησης μετάδοσης χωροχρόνου, σε συνδυασμό με τη διαμόρφωση δέσμης μετάδοσης σε σταθμούς βάσης. Η τέταρτη γενιά (4G) LTE και LTE Advanced θεμελιώνεται σε μεγάλο βαθμό στις τεχνικές MIMO. Το LTE στοχεύει πρώτα στο MIMO μιας σύνδεσης που έχει βάση την χωρική πολυπλεξία και τη χώρο-χρονική κωδικοποίηση, ενώ το LTE-Advanced διευρύνει παραπάνω τη σχεδίαση σε MIMO πολλών χρηστών. Στα ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN), η τεχνολογία IEEE 802.11n (Wi-Fi), MIMO αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας τρεις διαφορετικές τεχνικές: πρώτα την επιλογή κεραίας, έπειτα την κωδικοποίηση χωροχρόνου και τέλος την διαμόρφωση δέσμης.

Οι αρχιτεκτονικές ασύρματων επικοινωνιών MIMO όπως και οι τεχνικές επεξεργασίας γίνεται να χρησιμοποιηθούν σε θέματα ανίχνευσης. Αυτό αναπτύσσεται σε έναν επιμέρους επιστημονικό κλάδο που ονομάζεται Ραντάρ MIMO.

Η τεχνολογία MIMO είναι εφικτό να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα μη ασύρματων επικοινωνιών. Ένα καλό παράδειγμα είναι το πρότυπο οικιακής δικτυώσεως ITU-TG.9963, που θέτει ένα σύστημα επικοινωνιών με γραμμή ισχύος που εκτελεί τεχνικές MIMO για τη αποστολή πολλών σημάτων μέσω πολλών καλωδίων AC. (Krumbein, 2016)

3.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα MIMO

3.4.1 Πλεονεκτήματα του MIMO

Ακολουθούν τα πλεονεκτήματα του MIMO:

- Ο υψηλός ρυθμός δεδομένων μπορεί να επιτευχθεί με τη συμβολή πολλών κεραιών και της τεχνικής SM (Spatial Multiplexing). Αυτό συμβάλλει στην επίτευξη υψηλής απόδοσης downlink και uplink.
- Βοηθά ακόμα στην μείωση του BER (Bit Error Rate) λόγω της εφαρμογής προηγμένων αλγορίθμων επεξεργασίας σήματος στα σήματα που λαμβάνουν δεδομένα από πολλές κεραίες
- Οι τεχνικές όπως STBC (Space Time Block Coding) και BF (Beamforming) όταν εφαρμόζονται στο σύστημα MIMO συμβάλλουν στην επέκταση της κάλυψης κυψελών.
- Το σύστημα που βασίζεται στο MIMO ελαχιστοποιεί τα φαινόμενα εξασθένισης από τις πληροφορίες που ταξιδεύουν από το τέλος της εκπομπής στο άκρο λήψης.

Αυτό οφείλεται σε διάφορες τεχνικές ποικιλομορφίας όπως ο χρόνος, η συχνότητα και ο χώρος.

- ➡ Υπάρχει λιγότερη ευαισθησία σε πιθανή προσπάθεια χτυπήματος από μη εξουσιοδοτημένα άτομα επειδή υπάρχουν πολλές κεραιές και αλγόριθμοι
- ➡ Τα συστήματα με MIMO παρέχουν υψηλό QoS (Quality of Service) με μεγαλύτερη φασματική απόδοση και ταχύτητες δεδομένων.
- ➡ Η ευρεία κάλυψη που προσφέρεται από το σύστημα MIMO συμβάλλει στην διατήρηση μεγάλου αριθμού συνδρομητών ανά κυψέλη.
- ➡ Το σύστημα που στηρίζεται στο MIMO χρησιμοποιείται ευρέως στα τελευταία ασύρματα πρότυπα, όπως WLAN (802.11n, 802.11ac κ.λπ.), WiMAX (IEEE 802.16e), LTE, LTE-Advanced κ.λπ

3.4.2 Μειονεκτήματα του MIMO

Ακολουθούν τα μειονεκτήματα του MIMO:

- ➡ Οι απαιτήσεις σε πόρους και η πολυπλοκότητα του υλικού είναι υψηλότερες σε σύγκριση με το σύστημα που βασίζεται σε μία κεραία. Κάθε κεραία χρειάζεται μεμονωμένες μονάδες RF για επεξεργασία ραδιοφωνικού σήματος. Ακόμα, απαιτείται σύγχρονο τσιπ DSP για την λύση προηγμένων μαθηματικών αλγορίθμων επεξεργασίας σήματος.
- ➡ Οι πόροι υλικού ανεβάζουν τις απαιτήσεις ισχύος. Η μπαταρία τελειώνει πιο γρήγορα λόγω της επεξεργασίας δύσκολων αλγορίθμων επεξεργασίας σήματος. Αυτό καθιστά μικρότερη τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας των συσκευών που στηρίζονται στο MIMO.
- ➡ Τα συστήματα που στηρίζονται σε MIMO είναι πιο ακριβά σε σύγκριση με τα συστήματα που έχουν βάση μία κεραία λόγω των μεγαλύτερων απαιτήσεων υλικού και προηγμένου λογισμικού. (Advantages of MIMO | Disadvantages of MIMO, n.d.

Κεφάλαιο 4^ο : Σχεδιασμός Κεραίας

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί ο σχεδιασμός της κεραίας MIMO που επιτεύχθηκε με το λογισμικό CST Studio Suite Lite (Student Version). Το CST Studio Suite Lite είναι ένα λογισμικό που έχει αναπτυχθεί για τον σχεδιασμό ηλεκτρομαγνητικών στοιχείων και στην συνέχεια την προσομοίωση της λειτουργίας τους. Χρησιμοποιείται κατά κόρων στις τηλεπικοινωνίες, σε αμυντικές βιομηχανίες, αεροναυπηγική και σε πολλές άλλες βιομηχανίες. Το CST Studio Suite αποτελεί ένα υπολογιστικό ηλεκτρομαγνητικό εργαλείο που επινοήθηκε από την Dassault Systèmes Simulia. Περιλαμβάνει αρκετές διαφορετικές μεθόδους προσομοίωσης, μαζί και την τεχνική πεπερασμένης ολοκλήρωσης (Finite Integration Technique FIT), της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method FEM), της μητέρας γραμμής μετάδοσης (Transmission Line Matrix TLM), της γρήγορης μεθόδου πολλών επιπέδων (Multilevel fast multipole method MLFMM). Η κεραία που σχεδιάστηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής είναι μία στοιχειοκεραία MIMO. Η κεραία σχεδιάστηκε με διηλεκτρική σταθερά ίση με 3.66 και ύψος υποστρώματος υποστρώματος 0.254 mm, με σκοπό να έχει συχνότητα λειτουργίας 78 GHz.

4.2 Σχεδίαση μοναδιαίας κεραίας.

Οι διαστάσεις της κεραίας μπορούν να υπολογιστούν με βάση γνωστούς τύπους από την βιβλιογραφία. Οι τύποι καθώς και οι υπολογισμοί φαίνονται παρακάτω:

$$W = \frac{c}{2fr\sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} = \frac{3 * 10^8}{2 * 77 * 10^8 \sqrt{\frac{3.66 + 1}{2}}} = 0.900mm$$

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W}\right]^{-1/2} = \frac{3.66 + 1}{2} + \frac{3.66 - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{0.254}{0.900}\right]^{-1/2} = 2.965$$

$$L_{eff} = \frac{c}{2fr\sqrt{\epsilon_{reff}}} = \frac{3 * 10^8}{2 * 77 * 10^8 \sqrt{2.965}} = 1.131 mm$$

$$\Delta L = 0.412 \frac{(\epsilon_{r_{eff}} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{r_{eff}} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} h = 0.412 \frac{(2.965 + 0.3) \left(\frac{0.900}{0.254} + 0.264 \right)}{(2.965 - 0.258) \left(\frac{0.900}{0.254} + 0.8 \right)} 0.254 = 0.111 \text{ mm}$$

$$L = L_{eff} - 2\Delta L = 1.131 - 2 * 0.111 = 0.909 \text{ mm}$$

$$L_g = 6h + L = 6 * 0.254 + 0.909 = 2.433 \text{ mm}$$

$$W_g = 6h + W = 6 * 0.254 + 0.900 = 2.424 \text{ mm}$$

Αμέσως μετά με την παρακάτω σχέση υπολογίζονται οι διαστάσεις του ομοαξονικού σηματολήπτη τροφοδοσίας. Το υλικό που χρησιμοποιείται για το coax είναι ιδανικός ηλεκτρικός αγωγός (PEC) (perfect electric conductor) εσωτερικής διαμέτρου $d=4.88$ mm και κενό διαμέτρου $D=11.25$ mm.

$$Z_0 = \frac{138 \log_{10} \left(\frac{D}{d} \right)}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{138 \log_{10} \left(\frac{11.25}{4.88} \right)}{\sqrt{1}} = 50 \Omega$$

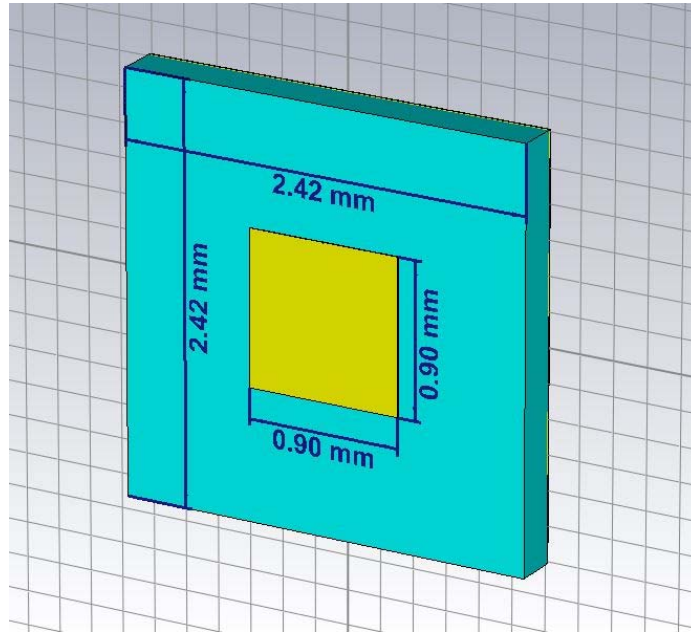
Μετά το πέρας των μαθηματικών υπολογισμών, χρησιμοποιώντας τις αριθμητικές αυτές τιμές, θα γίνει η μοντελοποίηση στο λογισμικό. Η διάταξη που θα σχεδιαστεί θα αποτελείται από χαλκό με πάχος 0.035 mm. Ως σημείο τροφοδοσίας επιλέχθηκε το μέσο του patch.

Συγκεντρωτικός πίνακας των σχεδιαστικών παραμέτρων:

c	300000000
fr	77000000000
er	3.66
h	0.254
W	0.900
ereff	2.965
Leff	1.131
ΔL	0.111
L	0.900
Lg	2.424
Wg	2.424
Zo	50.00
D	0.01125
d	0.004884699
er	1

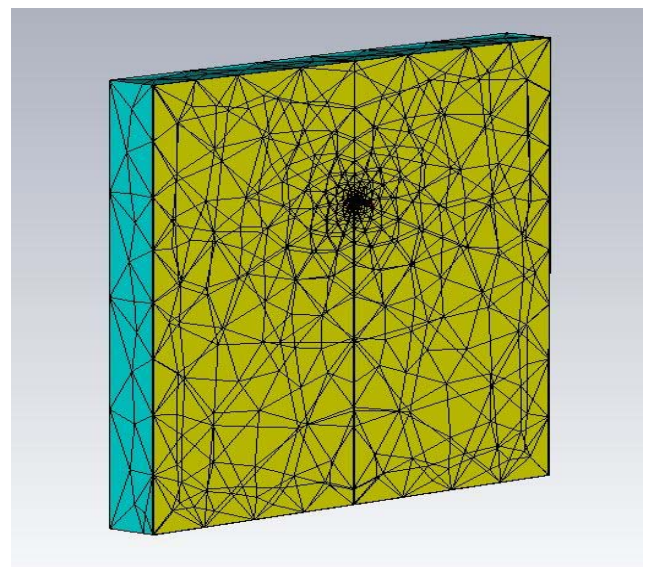
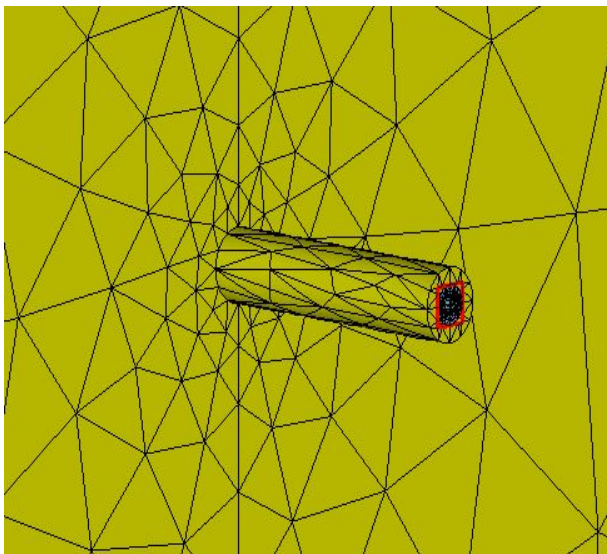
Σχήμα 4.1: Σχεδιαστικές Παράμετροι

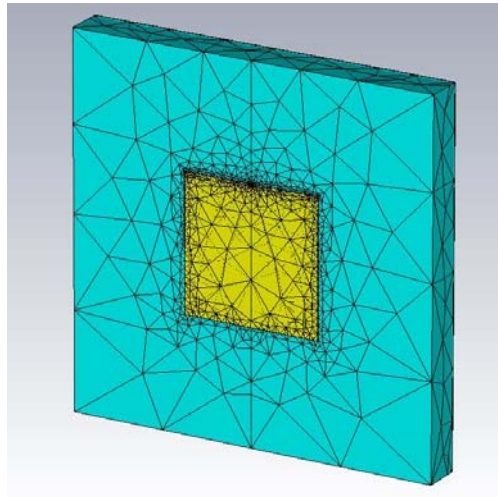
Με το λογισμικό CST Studio Suite Lite δημιουργήθηκε το παρακάτω μοντέλο:



Σχήμα 4.2: Προσομοίωση του μοναδιαίου στοιχείου

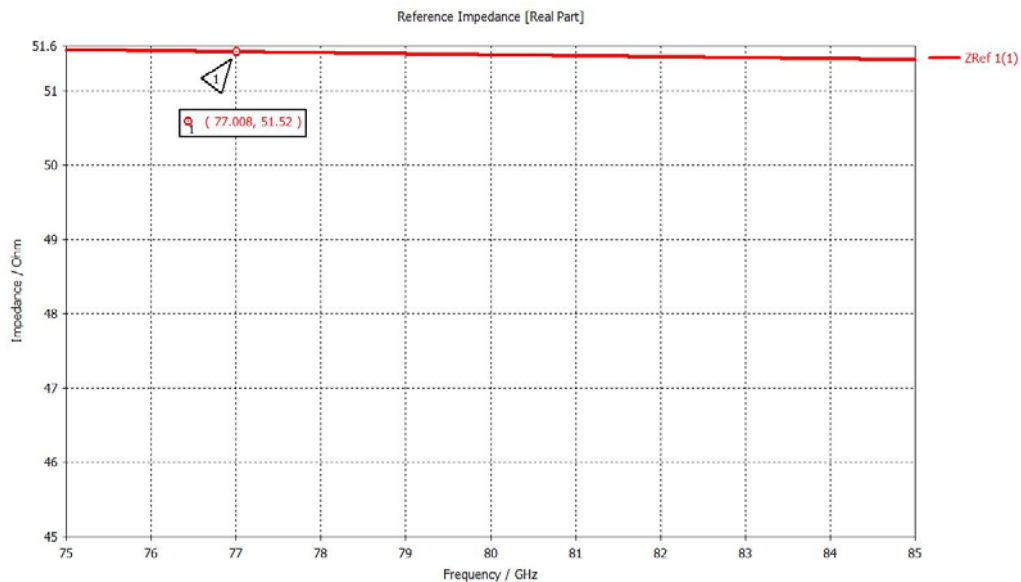
Στην συνέχεια με την βοήθεια του υπολογιστικού προγράμματος, εφαρμόζεται ένα πλέγμα πάνω στην κεραία, το οποίο διαιρεί την κεραία σε πολλαπλά επίπεδα τμήματα για να γίνει μία μαθηματική ολοκλήρωση, στο background, ώστε να υπολογιστεί η S παράμετρος. Ο υπολογισμός γίνεται με σφάλμα μικρότερο του 2%. Ακολουθούν οι φωτογραφίες με την πεπλεγμένη διακριτοποιημένη κεραία.





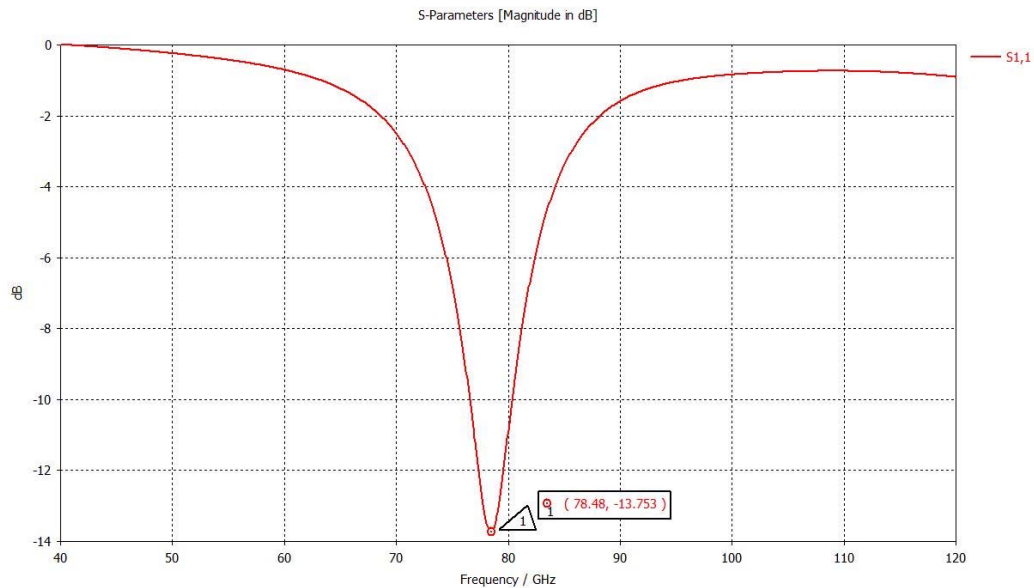
Σχήμα 4.3: Πλέγμα στοιχείου

Το πρώτο πράγμα που κάποιος πρέπει να ελέγξει σε μια τέτοια προσημείωση είναι η επιβεβαίωση του ότι για την συγκεκριμένη συχνότητα εμφανίζει 50 Ω αντίσταση το ομοαξονικό καλώδιο έτσι ώστε σε περίπτωση κατασκευής της διάταξης να μην υπάρξει πρόβλημα κατά την διαδικασία των πραγματικών μετρήσεων. Στο σχήμα 4.4 είναι εμφανές ότι η αντίσταση είναι επαρκώς κοντά στα 50 Ω.



Σχήμα 4.4: Είσοδος τροφοδοσίας σηματολήπτη

Στην συνέχεια θα ελεγχθεί το σημείο συντονισμού:

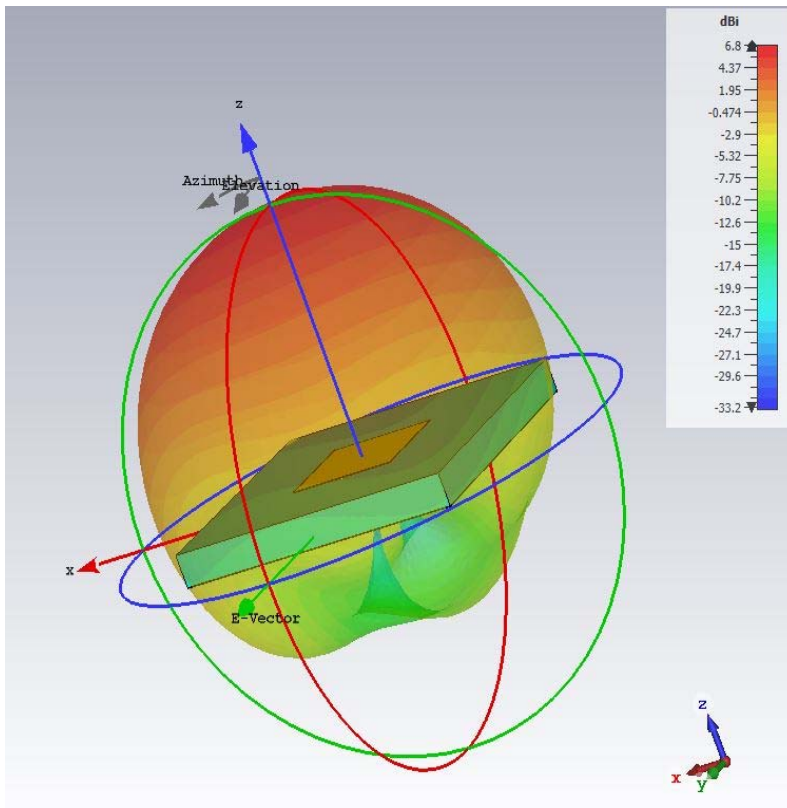


Σχήμα 4.5: Συντονισμός λειτουργίας της διάταξης

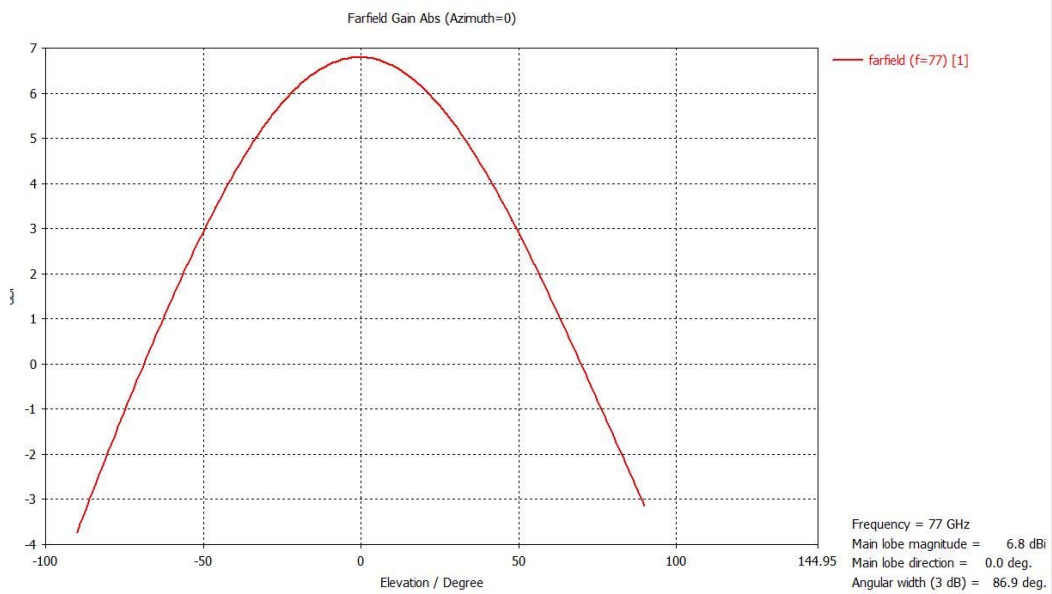
Επειδή οι τύποι που χρησιμοποιήσαμε για τον σχεδιασμό της κεραίας δεν είναι απολύτως ακριβείς, έχουν ως αποτέλεσμα την μη εμφάνιση συντονισμού στην ακριβή τιμή της συχνότητας λειτουργίας. Εδώ ο συντονισμός επιτυγχάνεται στα 78.48 GHz, έχοντας μία λογική απόκλιση από τα 78 GHz, τα οποία είναι ο στόχος.

4.3 Διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας

Το κέρδος των κεραιών μικροκυμάτων δίνεται συνήθως σε dBi και εκφράζει την ενίσχυση μιας κεραίας σε σχέση με μια θεωρητική ιστροπική κεραία. Το CST μπορεί να σχεδιάσει το διάγραμμα ακτινοβολίας σε μία σε δύο και σε τρεις διαστάσεις από πολλές οπτικές γωνίες. Εδώ έχει παραχθεί μία κεραία με μέγιστη ακτινοβολία τα 6.8 dBi, τα οποία αντιστοιχούν σε πολύ καλή απόδοση. Τα μεμονωμένα patch με πεπερασμένο μέγεθος γείωσης συνήθως έχουν ακτινοβολία ίση με 5 έως 7.5 dBi. Η σχεδίαση του patch κρίνεται ικανοποιητική.



Σχήμα 4.6 : Τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας μοναδιαίου στοιχείου (μονής κεραίας) με κέρδος 6,8 dBi.

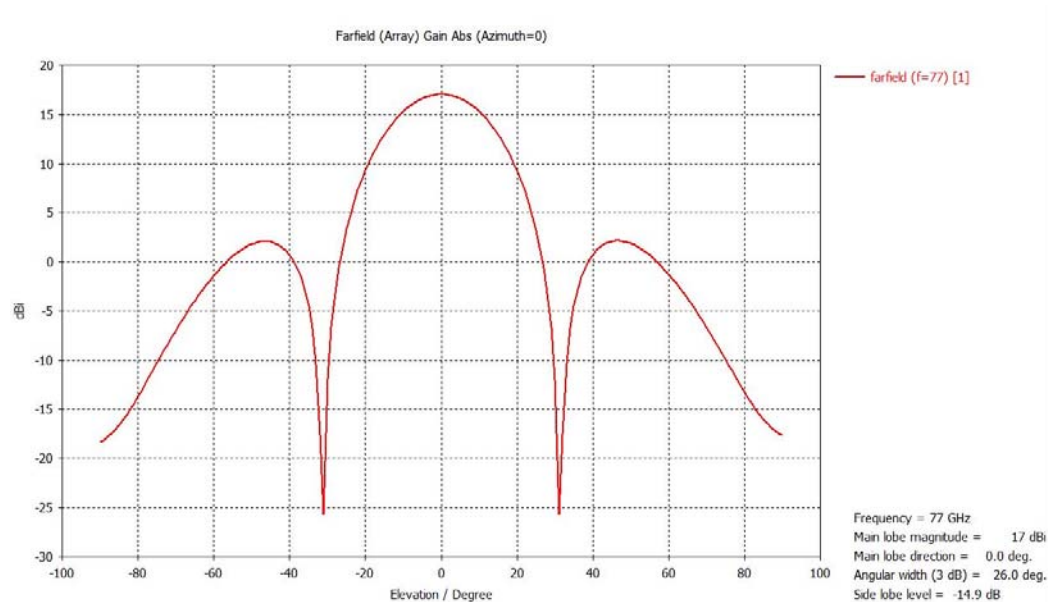


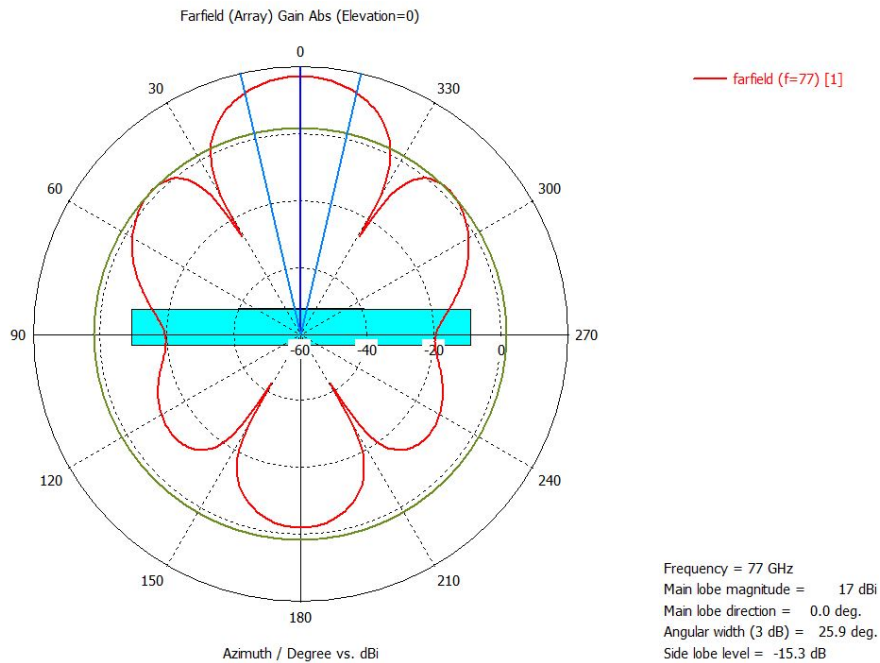
Σχήμα 4.7: Διάγραμμα ακτινοβολίας μεμονωμένου στοιχείου σε διάφορες μορφές.

Τα αποτελέσματα είναι αναμενόμενα με την θεωρία και την βιβλιογραφία. Το μέγιστο κέρδος είναι κάθετο στην επιφάνεια της κεραίας και πρόκειται για ένα διάγραμμα ακτινοβολίας χαμηλής κατευθυντικότητας το οποίο διαθέτει 6.8 dBi κέρδος, αναμενόμενη τιμή από την βιβλιογραφία.

4.4 Στοιχειοκεραία 4x4

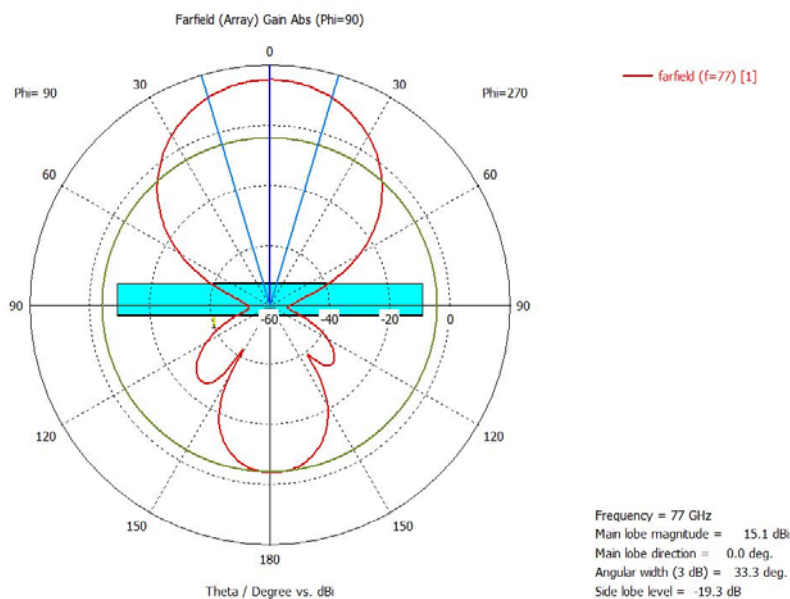
Στο λογισμικό CST είναι εύκολο να σχεδιαστεί μία κεραία με πολλά στοιχεία. Η επιλογή που έγινε ήταν για μία κεραία 4x4, δηλαδή 4 στοιχείων στον κατακόρυφο άξονα και 4 στοιχεία στον οριζόντιο άξονα. Οι κύριες εντολές του λογισμικού που βοηθούν στην σχεδίαση της κεραίας 4x4, είναι το transform και το Boolean Add. Μέσω του transform είναι δυνατόν να τοποθετηθεί σε συγκεκριμένη σχέση ένα όμοιο με το αρχικό στοιχείο ακτινοβολίας και με το Boolean add αυτά τα κομμάτια να ενωθούν μεταξύ τους. Το συνολικό διάγραμμα ακτινοβολίας της διάταξης στην συχνότητα συντονισμού των 78 GHz είναι απαλλαγμένο από μεγάλους πλευρικούς λοβούς καθώς η απόσταση d μεταξύ των στοιχείων ακτινοβολίας έχει οριστεί για $\lambda/2$.





Σχήμα 4.8: Λοβός ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας 4x4

Η μέγιστη τιμή κέρδους είναι κάθετη στην επιφάνεια της στοιχειοκεραίας και ισούται με 17 dBi. Είναι μια τιμή αναμενόμενη σύμφωνα και με παρόμοιες στοιχειοκεραίες που βρέθηκαν σε δημοσιεύσεις. Σύμφωνα με την θεωρία, βλέπουμε ότι η στοιχειοκεραία σε σχέση με το patch, έχει υψηλότερο κέρδος και αυξημένη κατευθυντικότητα του λοβού ακτινοβολίας.



Σχήμα 4.9: Τρισδιάστατο διάγραμμα που συνδέει το κέρδος (dBi) με την γωνία φ της στοιχειοκεραίας 4X4

Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός μίας κεραίας 4x4 patch, για την επίτευξη συχνότητας λειτουργίας 78 GHz. Οι κεραίες αυτής της συχνότητας βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή στους αισθητήρες των αυτοκινήτων. Στα αυτοκίνητα είναι κύριο μέρος των αισθητήρων ελέγχου, π.χ. cruise control, καθώς και των αισθητήρων ελέγχου του χώρου, π.χ. αισθητήρες παρκαρίσματος. Όσον αφορά την νέα τεχνολογία αυτοκινούμενων οχημάτων, π.χ. Tesla, οι κεραίες έχουν βιοτικής σημασίας ρόλο, διότι δημιουργούν τις συνθήκες για να γνωρίζει το όχημα που θα κινηθεί.

Στην αρχή της εργασίας παρατέθηκαν ιστορικά στοιχεία που αφορούν τις κεραίες καθώς και την χρήση αυτών, στην συνέχεια αναλύθηκε το θεωρητικό και μαθηματικό υπόβαθρο της σχεδίασης, με εκτεταμένη παρουσίαση των μαθηματικών τύπων που διέπουν τα φαινόμενα. Στο τρίτο μέρος της εργασίας παρουσιάστηκε το κύριο αντικείμενο εφαρμογής των κεραίων, τα αυτοκινούμενα οχήματα και τα αυτοκίνητα, καθώς και τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα αυτών.

Στην διαδικασία σχεδίασης της κεραίας μελετήθηκε η έννοια του διαγράμματος ακτινοβολίας και παρουσιάστηκαν οι εξισώσεις που διέπουν το φαινόμενο. Μελετήθηκε επίσης η επίδραση του μεγέθους της γείωσης στην κεραία, καθώς και ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζεται το διάγραμμα ακτινοβολίας μέσω της γείωσης. Στην εργασία έγινε ειδική αναφορά στους πλευρικούς λοβούς, την αμοιβαία σύζευξη και την διαφορετική τροφοδότηση των patch της συστοιχίας κατά φάση και ισχύ. Η εργασία μέσω της μεθοδολογίας εκτέλεσης της, κατάφερε να επιτύχει τον σκοπό της, δηλαδή την σχεδίαση της στοιχειοκεραίας των 78 GHz. Είναι σαφές από το θεωρητικό μέρος της εργασίας, πως οι κεραίες έχουν ένα ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο, στον σύγχρονο κόσμο, όντας παρούσες σε πλήθος καθημερινών, απαραίτητων για την σύγχρονη ζωή, αντικειμένων και οχημάτων.

Βιβλιογραφία

- Bahl, I., 2006. Lumped Elements for RF and Microwave Circuits. Boston, MA: Artech House.
- Balwin, R., 2020. IIHS Study: Autonomous Cars Won't Avoid Majority of Vehicle Crashes. [online] Car and Driver. Available at: <<https://www.caranddriver.com/news/a32783046/iihs-autonomous-cars-not-as-safe-study/>> [Accessed 19 April 2022].
- Bertuch, T., 2020. Antenna development for future automotive radars. [online] Fraunhofer Institute for High Frequency Physics and Radar Techniques FHR. Available at: <<https://www.fhr.fraunhofer.de/en/businessunits/traffic/antenna-development-for-future-automotive-radars.html>> [Accessed 1 January 2022].
- Carey, J., 2022. Pressure Grows for Federal Data Breach Legislation - AArete US. [online] AArete US. Available at: <<https://www.aarete.com/insights/pressure-grows-for-federal-data-breach-legislation/>> [Accessed 19 April 2022].
- Chatterjee, S., 2018. [online] Scholar.uwindsor.ca. Available at: <<https://scholar.uwindsor.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=8506&context=etd>> [Accessed 1 January 2022].
- Edwards, T. and Steer, M., 2016. Foundations for microstrip circuit design. Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons Inc.
- En.wikipedia.org. 2021. Self-driving car - Wikipedia. [online] Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/Self-driving_car> [Accessed 1 January 2022].
- Frenzel, L., 2021. How Phased Array Antennas Work. [online] Nuts and Volts Magazine. Available at: <<https://www.nutsvolts.com/magazine/article/how-phased-array-antennas-work>> [Accessed 1 January 2022].
- Gringer, B., n.d. History of the Autonomous Car. [online] TitleMax | Get your title back with TitleMax®. Available at:

- <<https://www.titlemax.com/resources/history-of-the-autonomous-car/>>
[Accessed 1 January 2022].
- Hamieh, I., 2012. A 77 GHz Reconfigurable Micromachined Microstrip Antenna Array. [online] Scholar.uwindsor.ca. Available at: <<https://scholar.uwindsor.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=1127&context=etd>> [Accessed 1 January 2022].
 - Hudson Valley Magazine, 2022. The Future of the Electric Car is Not a Car – Meet ZOOX | Hudson Valley Style Magazine. [online] Hudson Valley Style Magazine | Experience the Magic of Hudson Valley. Available at: <<https://hudsonvalleystylemagazine.com/the-future-of-the-electric-car-is-not-a-car-meet-zoox/>> [Accessed 19 April 2022].
 - hyundai.news. 2018. How do self-driving cars work?. [online] Available at: <<https://www.hyundai.news/eu/articles/stories/how-do-self-driving-cars-work.html>> [Accessed 1 January 2022].
 - Karlsson, H., 2018. Design of Gap Waveguide Antenna System for 77 GHz Automotive Radar. Postgraduate. CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY.
 - Krumbein, A., 2016. Understanding the Basics of MIMO Communication Technology. [ebook] Southwest Antennas. Available at: <<https://www.rfmw.com/data/swa-mimo-basics.pdf>> [Accessed 1 January 2022].
 - Krumbein, A., 2017. White Paper: Understanding the Basics of MIMO Communication Technology | Southwest Antennas - High Performance RF and Microwave Antennas & Custom Antenna Manufacturing. [online] Southwestantennas.com. Available at: <<https://www.southwestantennas.com/white-papers/white-paper-understanding-basics-mimo-communication-technology>> [Accessed 19 April 2022].
 - Long, N., Wang, K., Cheng, R., Yang, K., Hu, W. and Bai, J., 2019. Assisting the visually impaired: multitarget warning through millimeter wave radar and RGB-depth sensors. Journal of Electronic Imaging, 28(01), p.1.
 - Negretti, J., 2021. Self-Driving Cars: Pros and Cons – Negretti & Associates. [online] Negretti Law. Available at: <<https://negrettilaw.com/news/self-driving-cars-pros-and-cons/>> [Accessed 1 January 2022].
 - Pozar, D., 2005. Microwave engineering. 4th ed. New York: John Wiley & Sons, .

- Rfwireless-world.com. n.d. Advantages of MIMO | Disadvantages of MIMO. [online] Available at: <<https://www.rfwireless-world.com/Terminology/Advantages-and-Disadvantages-of-MIMO.html>> [Accessed 1 January 2022].
- Sickinger, F., 2018. 76–81 GHz LTCC antenna for an automotive miniature radar frontend. [online] Ieeexplore.ieee.org. Available at: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8249225>> [Accessed 1 January 2022].
- Sickinger, F., Weissbrodt, E. and Vossiek, M., 2018. 76–81 GHz LTCC antenna for an automotive miniature radar frontend. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 10(5-6), pp.729-736.
- Synopsys.com. 2021. What is an Autonomous Car? – How Self-Driving Cars Work | Synopsys. [online] Available at: <<https://www.synopsys.com/automotive/what-is-autonomous-car.html>> [Accessed 1 January 2022].
- Varoutas, D., 2015. *Antenna Types*. [ebook] Athens: National Kapodistrian University of Athens. Available at: <<https://docplayer.gr/36246191-Keraies-enotita-4-typoi-keraiion-dimitris-varoytas-aristeidis-tsipoyras-sholi-thetikon-epistimon-tmima-pliroforikis-kai-tilepikoinonion.html>> [Accessed 1 January 2022].
- Wu, D., 2016. 76-81 GHz Planar Antenna Development and Utilization for Automotive Radar Applications. [online] Publications.lib.chalmers.se. Available at: <<https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/235807/235807.pdf>> [Accessed 1 January 2022].