



ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
**ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΩΝ**
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ



Σχεδίαση κεραιών MIMO για Ασύρ- ματα Δίκτυα 5G

ΑΚΡΙΒΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ
Αριθμός Μητρώου: 157

Επιβλέπων Καθηγητής
Κωνσταντίνος Αγγέλης, Καθηγητής

Αρτα 18/06/2024

Η Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Ο Επιβλέπων Καθηγητής

Κωνσταντίνος Αγγέλης

Καθηγητής

Φώτιος Βαρτζιώτης

Επίκουρος Καθηγητής

Ανδρέας Τσορμπατζόγλου

Επίκουρος Καθηγητής

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο υπογράφων Ακρίβης Κωνσταντίνος του Νικολάου, με αριθμό μητρώου 157 φοιτητής του Τμήματος Πληροφορικής και Δικτύων της Σχολής Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και 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».

Ημερομηνία

Ο Δηλών

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον εισηγητή και επιβλέπων της διπλωματικής εργασίας καθηγητή κύριο Κωνσταντίνο Αγγέλη.

Οι συζητήσεις μαζί του με βοήθησαν για την περάτωση της εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω το τμήμα Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων που μου έδωσε την δυνατότητα να παρακολουθήσω το συγκεκριμένο ΠΜΣ και έτσι να εμπλουτίσω τις γνώσεις μου στον τομέα της Πληροφορικής και Δικτύων.

Τέλος, η εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας θα ήταν αδύνατη χωρίς τη στήριξη και τη βοήθεια της οικογένειάς μου, που βρίσκεται πάντα ανιδιοτελώς δίπλα μου. Η διπλωματική μου εργασία είναι αφιερωμένη σε εκείνους.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται η μελέτη σχεδίασης εκτυπωμένων κεραιών MIMO κατάλληλων για προηγμένα ασύρματα δίκτυα. Η μελέτη περιλαμβάνει την ανάλυση του απαραίτητου θεωρητικού υπόβαθρου και στη συνέχεια με την χρήση λογισμικών κατασκευάζεται μια διάταξη που μπορεί να λειτουργήσει αποτελεσματικά στο φάσμα των συχνοτήτων του 5G.

Το πρώτο κεφάλαιο ξεκινά με βασικές παραμέτρους των κεραιών, όπως τα χαρακτηριστικά ενός διαγράμματος ακτινοβολίας, το κέρδος, και η κατευθυντικότητα, που είναι έννοιες οι οποίες είναι απαραίτητες για την υλοποίηση μιας τέτοιας κατασκευής. Στη συνέχεια, το δεύτερο κεφάλαιο εξετάζει τις στοιχειοκεραίες, οι οποίες αποτελούν ένα βασικό κομμάτι της διπλωματικής εργασίας. Είναι φανερό ότι οι στοιχειοκεραίες είναι θεμελιώδεις στη δημιουργία ασύρματων δικτύων νέας γενιάς, καθώς μπορούν να εκπέμπουν και στις τρεις διαστάσεις του χώρου. Επιπλέον, γίνεται περιγραφή και άλλων ειδών στοιχειοκεραιών, όπως η ευρυζωνική και η ακροπυροδοτική στοιχειοκεραία, καθώς και η ανάλυση σε πίνακες για διάφορους υπολογισμούς.

Αμέσως μετά, το τρίτο κεφάλαιο επικεντρώνεται στην πέμπτη γενιά τηλεπικοινωνιακών δικτύων (5G) περιγράφοντας τόσο τα πλεονεκτήματα και την ανάγκη να εξελιχθούν οι τηλεπικοινωνίες αλλά και τις απαιτήσεις των χαρακτηριστικών που θέτουν μια κεραία ικανή να υποστηρίξει ένα τέτοιο δίκτυο.

Το τέταρτο κεφάλαιο, ασχολείται με τις ασύρματες επικοινωνίες και τους διάφορους τρόπους μετάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος από τον πομπό στον δέκτη. Επιπλέον, περιγράφει την πολυδιαδρομική διάδοση και τα συστήματα κεραιών MIMO. Το πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζει την τεχνολογία OFDM, τον βασικό μηχανισμό λειτουργίας της καθώς και τον σχεδιασμό της μεθόδου αυτής και των διαφορετικών παραμέτρων της. Παρουσιάζονται, επίσης τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα διαγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν και το λογισμικό με το οποίο έγιναν οι προσομοιώσεις.

Στο έβδομο κεφάλαιο αναλύονται οι διαφορετικές περιπτώσεις με τις ρυθμίσεις που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις.

Τέλος, στο τελευταίο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και τα συμπεράσματα που αντλήθηκαν.

Λέξεις – κλειδιά

Κεραία, στοιχειοκεραία, 5G, Πολλαπλής Εισόδου – Πολλαπλής Εξόδου, MIMO, OFDM, AWR, Phased Array

Abstract

In this thesis, we present a study on the design of printed MIMO (Multiple Input Multiple Output) antennas suitable for advanced wireless networks. The study encompasses the analysis of essential theoretical background, followed by the practical implementation using software tools to create an effective arrangement operating within the 5G frequency spectrum.

We begin with fundamental antenna parameters, such as radiation pattern characteristics, gain, and directivity. These concepts are crucial for constructing such designs. Element antennas play a pivotal role in this thesis. They are fundamental components of next-generation wireless networks, capable of transmitting in all three spatial dimensions.

We also describe other types of element antennas, including broadband and omnidirectional antennas, along with tabulated analyses for various calculations.

The third chapter focuses on 5G networks, discussing both their advantages and the need for telecommunications to evolve. We explore the requirements placed on antennas to support such networks effectively.

The fourth chapter delves into wireless communications and the various methods for transmitting electromagnetic waves from transmitters to receivers. We cover multi-path propagation and MIMO antenna systems.

Chapter five introduces OFDM technology, the fundamental operating mechanism, and the design considerations for this method. We also discuss its pros and cons.

In the sixth chapter, the diagrams used and the software used for the simulations are presented.

In the seventh chapter, the different scenarios with the settings used in the simulations are analyzed.

In conclusion, in the last chapter of the thesis, the results of the simulations are presented along with the conclusions drawn.

Keywords

Antenna, antenna array, 5G, Multiple Input Multiple Output (MIMO), Massive MIMO, Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), AWR (Advanced Design System), Phased Array

Πίνακας περιεχομένων

1	Κεφάλαιο 1 ^ο : Κεραίες	18
1.1	Ορισμός	18
1.2	Ιστορική Εξέλιξη	18
1.3	Βασική ανάλυση του πεδίου ακτινοβολίας	20
1.4	Μοτίβα ακτινοβολίας	23
1.5	Τύποι κεραιών	24
1.6	Πυκνότητα ισχύος και ένταση ακτινοβολίας	27
1.7	Κατευθυντικότητα κεραίας	28
1.8	Απόδοση και κέρδος κεραίας	29
1.9	Κύκλωμα και εμπέδηση κεραίας	30
2	Κεφάλαιο 2ο: Στοιχειοκεραίες	32
2.1	Στοιχειοκεραία δυο στοιχείων	32
2.1.1	Ειδικές περιπτώσεις στοιχειοκεραίας δυο στοιχείων	34
		36
		36
2.2	Στοιχειοκεραία N στοιχείων τοποθετημένα σε ευθεία γραμμή	38
2.2.1	Ειδικές περιπτώσεις στοιχειοκεραίας N στοιχείων τοποθετημένα σε ευθεία γραμμή	40
2.3	Επιπεδική Στοιχειοκεραία N x M στοιχείων	43
3	5G	47
3.1	Ιστορική αναδρομή	47
3.2	Τα Δίκτυα 5ης Γενιάς (5G)	48
3.3	Τεχνολογίες του 5G	50
3.3.1	Χιλιοστομετρικά Κύματα (Millimeter Waves)	51
3.3.2	Small Cells	52
3.3.3	Massive MIMO	54
3.3.4	Beamforming	55
3.3.5	Full duplex	56

3.4	Εφαρμογές της τεχνολογίας 5G	57
4	Τεχνολογία MIMO	61
4.1	Κεραίες ενός στοιχείου εναντίον συστήματος πολλαπλών κεραιών	63
4.2	Βασικές αρχές MIMO	64
4.2.1	Δομή MIMO συστήματος	65
4.3	Κανάλι μετάδοσης	65
4.3.1	Χωρητικότητα καναλιού	66
4.4	Αμοιβαία σύζευξη	67
4.4.1	Αμοιβαία σύζευξη κατά την εκπομπή και λήψη	67
4.4.2	Τρόποι αντιμετώπισης αμοιβαίας σύζευξης	68
4.5	Απομόνωση και ECC	70
4.6	Μέσο ενεργό κέρδος	71
4.7	Ενεργό κατευθυντικό κέρδος	72
4.8	Συχνότητες MIMO και 5G	72
4.9	Συγκριτική μελέτη SISO, MIMO και Massive MIMO συστημάτων	74
5	Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)	77
5.1	Ορθογωνικότητα	78
5.2	Πλεονεκτήματα του OFDM	81
5.3	Υλοποίηση του OFDM	81
5.3.1	Αντίστροφος ταχύς μετασχηματισμός Fourier (IFFT)	81
5.3.2	Το Πρόθεμα Κυκλικής Αναφοράς (Cyclic Prefix)	83
5.4	Δυσκολίες του OFDM	84
5.4.1	Αναλογία Μέγιστης προς Μέσης Ισχύος (PAPR)	84
5.4.2	Διαμόρφωση Μεταξύ-Φορέων	86
5.5	Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access (OFDMA)	86
5.5.1	Ευκαιριακός χρονοπρογραμματισμός	88
5.6	Single-Carrier FDMA	89
6	Διαγράμματα προσομοίωσης	91
6.1.1	Το διάγραμμα συστήματος “Phased Array Response”	92
6.1.1.1	SWPVAR	92

6.1.1.2	TONE	93
6.1.1.3	Test Point: TP	94
6.1.1.4	Phased Array Assembly, Data-file based: PHARRAY_F	94
6.1.1.5	LOAD	95
6.1.2	Το διάγραμμα συστήματος “Phased Array with Modulated Signals”	95
6.1.3	Το διάγραμμα συστήματος “Phased Array Yield Analysis”	95
6.2	Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε AWR	96
7	Το αρχείο Array config	97
7.1	SELECT=0	97
7.2	SELECT=1	98
7.3	SELECT=2	98
7.4	SELECT=3	99
7.5	SELECT=4	99
8	Αποτελέσματα προσομοιώσεων	100
8.1	Προσομοιώσεις στα 3.5GHz	100
8.1.1	SELECT=0	100
8.1.2	SELECT=1	102
8.1.3	SELECT=2	105
8.1.4	SELECT=3	108
8.1.5	SELECT=4	111
8.2	Προσομοιώσεις στα 5.8GHz	113
8.2.1	SELECT=0	114
8.2.2	SELECT=1	116
8.2.3	SELECT=2	119
8.2.4	SELECT=3	122
8.2.5	SELECT=4	125
8.3	Συμπεράσματα	127
8.4	Σύνοψη	129

Πίνακας εικόνων

Εικόνα 1.1 Τεχνική Small Cells	13
Εικόνα 1.2 Τεχνική MIMO	14
Εικόνα 1.3 Τεχνική beamforming	15
Εικόνα 1.1.1 Ραντάρ Β' Παγκοσμίου Πολέμου.	19
Εικόνα 1.2 Εξέλιξη γενιάς κινητών επικοινωνιών	20
Εικόνα 1.3 Περιοχές ή Ζώνες Πεδίου μιας κεραίας	21
Εικόνα 1.4 Διάγραμμα ακτινοβολίας	22
Εικόνα 1.5 Ομοιοκατευθυντική κεραία στο αζιμουθιακό επίπεδο (xy) και κατευθυντική στο επίπεδο ανύψωσης (xz)	22
Εικόνα 1.6 Μοτίβα ακτινοβολίας κεραίας	23
Εικόνα 1.7 Απλές κεραίες	24
Εικόνα 1.8 Μοτίβα ακτινοβολίας σε τρεις διαστάσεις	25
Εικόνα 1.9 Παραβολική κεραία αντανάκλασης	27
Εικόνα 1.10 Διάγραμμα κατευθυντικότητας διπόλου $\lambda/2$	29
Εικόνα 1.11 Ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin για εκπομπή	31
Εικόνα 1.12 Ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin για λήψη	32
Εικόνα 2.1 Γεωμετρία στοιχειοκεραίας δύο στοιχείων	33
Εικόνα 3.1 Εξέλιξη των ασύρματων δικτύων	47
Εικόνα 3.2 Δυνατότητες των δικτύων 5ης γενιάς (5G)	49
Εικόνα 3.3 Βασικές εφαρμογές του 5G	50
Εικόνα 3.4 Πρότυπη μορφή κυψελωτού δικτύου	51
Εικόνα 3.5 Σύγκριση της τεχνικής MIMO σε δίκτυο 4G και 5G	51
Εικόνα 3.6 Η εφαρμογή της τεχνικής small cells	52
Εικόνα 3.7 Είδη σχηματισμού των συστημάτων massive MIMO	54
Εικόνα 3.8 Η τεχνική Beamforming	56
Εικόνα 3.9 Η τεχνική Full Duplex	57
Εικόνα 3.10 Εφαρμογή στο IoT	58
Εικόνα 3.11 Εφαρμογή στα Smart Homes	58
Εικόνα 3.12 Η νέα μορφή των πόλεων με τη χρήση του 5G	59
Εικόνα 3.13 Η χρήση του 5G στην αυτοκίνηση	59
Εικόνα 3.14 Παράδοση με χρήση drone 5G	60
Εικόνα 3.15 Η χρήση του 5G στην Ιατρική	60
Εικόνα 3.16 Smart Farming	61
Εικόνα 4.1 Λειτουργία τεχνικής MIMO	63
Εικόνα 4.2 Διαφορετικά συστήματα κεραίων	64
Εικόνα 4.3 Ροή πληροφορίας σε MIMO διάυλο επικοινωνίας	65
Εικόνα 4.4 Πολυδιαδρομή σήματος πληροφορίας σε σύγχρονο περιβάλλον	66
Εικόνα 4.5 Διάγραμμα μηχανισμού της αμοιβαίας σύζευξης κατά την εκπομπή και λήψη	68
Εικόνα 4.6 Όψεις σχεδίασης MIMO συστήματος με και χωρίς CSRR	68
Εικόνα 4.7 Κατηγοριοποίηση των μεταλλικών σύμφωνα με την αγωγιμότητα ϵ και τη διαπερατότητα μ	69
Εικόνα 4.8 Κατανομή επιφανειακού ρεύματος με και χωρίς μεταλλικό	69
Εικόνα 4.9 Σχεδίαση συστοιχίας πάνω σε μεταεπιφάνειες	69
Εικόνα 4.10 Σχεδίαση στοιχειοκεραίας με το κύκλωμα απόζευξης	70
Εικόνα 4.11 Σχεδίαση στοιχειοκεραίας με παρασιτικά στοιχεία	70
Εικόνα 4.12 Αναπαράσταση της μέσης ισχύος που στέλνει και λαμβάνει μια κινητή κεραία σε πολυδιαδρομικό περιβάλλον	71

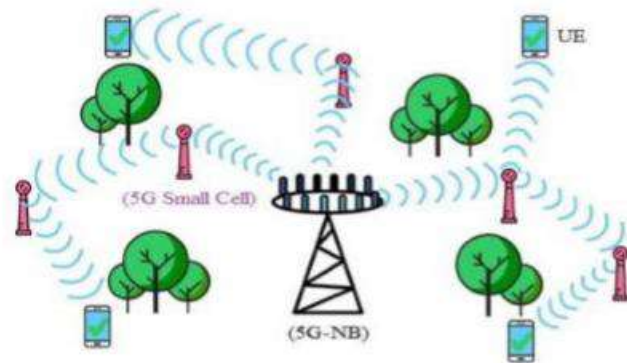
Εικόνα 4.13 Μπάντες συχνοτήτων 5G	72
Εικόνα 4.14 Συστημική αναπαράσταση SISO συστημάτων	75
Εικόνα 4.15 Συστημική αναπαράσταση SU-MIMO συστημάτων	75
Εικόνα 4.16 Συστημική αναπαράσταση MU-MIMO συστημάτων	76
Εικόνα 4.17 Συστημική αναπαράσταση Massive MIMO συστημάτων	77
Εικόνα 5.1 Εννοιολογική κατανόηση του OFDM	78
Εικόνα 5.2 Αναπαράσταση της ορθογωνικότητας στο OFDM	80
Εικόνα 5.3 Υλοποίηση OFDM με IFFT	83
Εικόνα 5.4 Κυκλικό πρόθεμα	84
Εικόνα 5.5 Χαρακτηριστικά Ιδανικού και Πρακτικού Ενισχυτή	85
Εικόνα 5.6 Παραδείγματα αποτελεσμάτων Γραμμικού και Μη Γραμμικού Ενισχυτή	85
Εικόνα 5.7 OFDM & OFDMA	87
Εικόνα 5.8 Απλοποιημένο διάγραμμα για SC-FDMA & OFDMA	90
Εικόνα 5.9 Παράδειγμα OFDMA & SC-FDMA	91
Εικόνα 6.1 Διάγραμμα Phased Array Response	92
Εικόνα 6.2 Το σύμβολο για το SWPVAR	93
Εικόνα 6.3 Το σύμβολο για το TONE	93
Εικόνα 6.4 Το σύμβολο για το TEST POINT	94
Εικόνα 6.5 Το σύμβολο που χρησιμοποιείται για το PHARRAY_F	94
Εικόνα 6.6 Το σύμβολο για το LOAD	95
Εικόνα 6.7 Phased Array with modulated signals	95
Εικόνα 6.8 Phased Array Yield Analysis	96

Εισαγωγή

Ο κλάδος των τηλεπικοινωνιών έχει σημειώσει σημαντική πρόοδο τα τελευταία χρόνια, με στόχο να καλύψει τις ανάγκες των σύγχρονων κοινωνιών. Η βασική απαίτηση όλων των ασύρματων δικτύων επικοινωνίας είναι η αποτελεσματική μετάδοση μεγάλου όγκου δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις, ενώ παράλληλα πρέπει να εξοικονομείται ενέργεια. Αυτή η απαίτηση αποτελεί κίνητρο για την ανάπτυξη νέων δικτύων και πρωτοκόλλων ασύρματης επικοινωνίας. Στον τομέα αυτό, η κεραία παραμένει ζωτικό κομμάτι της υποδομής των ασύρματων δικτύων επικοινωνίας.

Η πέμπτη γενιά κινητής τηλεφωνίας (5G) επιτρέπει ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων που φτάνουν τα 20 Gbits/s, με χρόνους απόκρισης της τάξης του 1 ms. Αυτό επιτυγχάνεται χάρη σε τεχνολογίες όπως οι millimeter waves, small cells, massive MIMO, beam forming και full duplex.

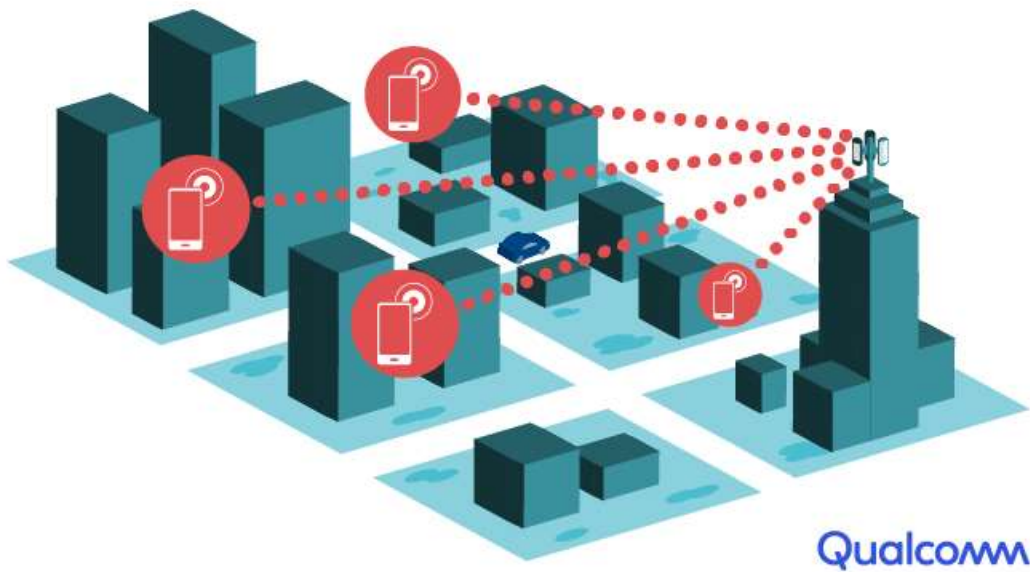
Η τεχνική των small cells αποτελεί μια δομή δικτύου που χρησιμοποιεί μικρούς σταθμούς βάσης που τοποθετούνται μέσα σε πόλεις. Κάθε σταθμός βάσης τοποθετείται σε απόσταση περίπου 250 μέτρων από τον άλλον. Το κύριο χαρακτηριστικό αυτής της διάταξης είναι η κάλυψη μεγάλου όγκου εξυπηρέτησης χρηστών και δεδομένων, ενώ παράλληλα επιτυγχάνεται με μικρή κατανάλωση ενέργειας.



Εικόνα 1.1 Τεχνική Small Cells

Στα ασύρματα δίκτυα 5G, ο όρος MIMO (Multiple Input Multiple Output) περιγράφει τον τρόπο κατασκευής των κεραιών του δικτύου. Αντί για μία μόνο κεραία, χρησιμοποιούνται πολλές κεραιές που λειτουργούν ταυτόχρονα. Αυτό επιτρέπει την πολλαπλή είσοδο και έξοδο σήματος, δηλαδή πολλαπλούς πομπούς και δέκτες.

Για να προσδιοριστεί μια διάταξη ως massive MIMO, απαιτείται τουλάχιστον μία στοιχειοκεραία με 64 στοιχεία. Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων και βελτιωμένη απόδοση στα ασύρματα δίκτυα.

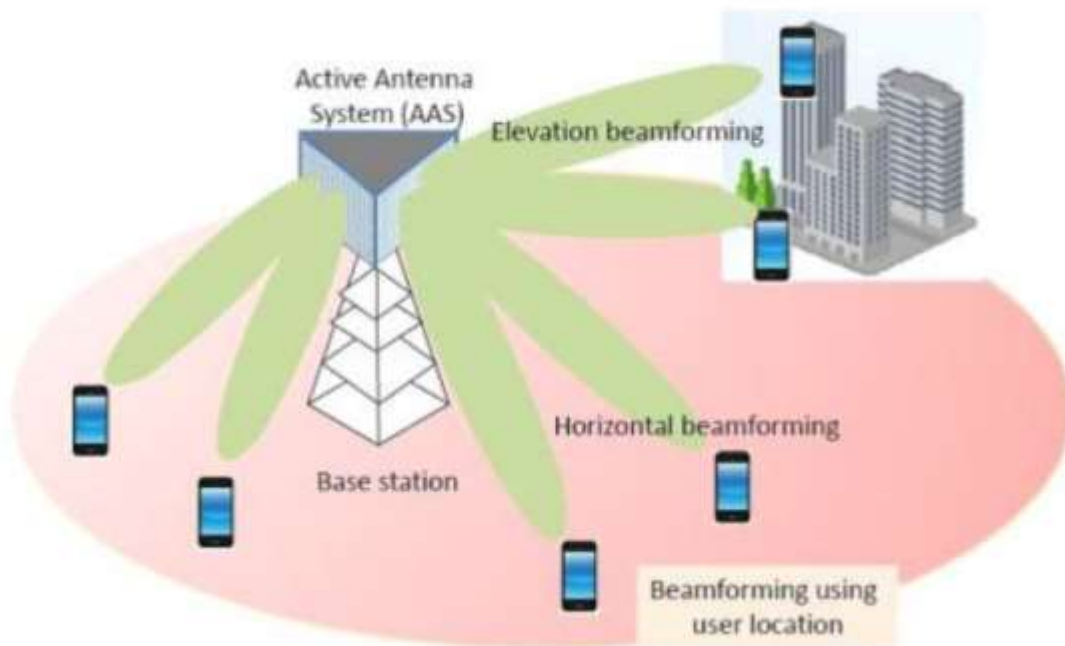


Εικόνα 1.2 Τεχνική MIMO

Η τεχνική του beam forming είναι ιδιαίτερα σημαντική στα ασύρματα δίκτυα, ειδικά στα 5G. Μέσω αυτής της διαδικασίας, επιτυγχάνεται η βέλτιστη διαδρομή μετάδοσης της πληροφορίας από τον πομπό προς τον δέκτη. Συγκεκριμένα:

- Οι κεραίες προσαρμόζουν το σήμα που εκπέμπουν, έτσι ώστε να ενισχύεται η συγκεκριμένη κατεύθυνση προς τον δέκτη.
- Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητας μετάδοσης των δεδομένων, καθώς μειώνεται η παρεμβολή από άλλα κεραιοσυστήματα και περιοχές σκέδασης.

Συνολικά, το beam forming βελτιώνει την απόδοση των ασύρματων δικτύων, επιτρέποντας ταχύτερη και πιο αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων.



Εικόνα 1.3 Τεχνική beamforming

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην ανάλυση και μελέτη συστημάτων MIMO (πολλαπλές εισόδους - πολλαπλές εξόδους) για ασύρματα δίκτυα νέας γενιάς 5G. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η δημιουργία μιας στοιχειοκεραίας στις συχνότητες των 3.5 και των 5.8GHz μέσω του προγράμματος AWR. Στη συνέχεια θα μελετηθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με διάφορες ρυθμίσεις του συστήματος.

Η παραπάνω μελέτη παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς η ασύρματη επικοινωνία έχει γνωρίσει σημαντική εξέλιξη τα τελευταία χρόνια. Η κάλυψη των αναγκών των ανθρώπων, η αύξηση της χωρητικότητας και οι υψηλές ταχύτητες αποτελούν σημαντικά ζητήματα που διαρκώς απασχολούν τον κλάδο των τηλεπικοινωνιών. Αναμένεται ότι η συνεχής ανάπτυξη θα οδηγήσει στην ανακάλυψη νέων τεχνολογιών που θα επιτρέπουν ακόμα μεγαλύτερες ταχύτητες και αυξημένη χωρητικότητα.

Σκοπός και στόχοι

Η επιλογή του θέματος μελέτης που αφορά τις MIMO (Multiple Input Multiple Output) κεραίες στα 5G δίκτυα είναι ιδιαίτερα σημαντική. Ας εξετάσουμε τις βασικές πτυχές:

1. Λειτουργία των MIMO Κεραίων:
 - Οι MIMO κεραίες επιτρέπουν την ταυτόχρονη μετάδοση και λήψη πολλαπλών σημάτων.
 - Κάθε κεραία διαθέτει πολλαπλά στοιχεία πομπού και δέκτη.

- Η συνδυασμένη λειτουργία των στοιχείων προσφέρει αυξημένη ταχύτητα μετάδοσης και βελτιωμένη απόδοση.

2. Παράμετροι Σχεδίασης:

- Κατά τη σχεδίαση των MIMO κεραιών, πολλές παράμετροι επηρεάζουν το διάγραμμα ακτινοβολίας:

- Αριθμός στοιχείων κεραίας: Η επιλογή του αριθμού στοιχείων επηρεάζει την κατεύθυνση και το πλάτος του διαγράμματος ακτινοβολίας.

- Κατεύθυνση και γωνία κάλυψης: Η κατεύθυνση των στοιχείων επηρεάζει την κάλυψη του δικτύου.

- Απόσταση μεταξύ των στοιχείων: Η απόσταση επηρεάζει την αποτελεσματικότητα της MIMO τεχνολογίας.

3. Σχεδιασμός Ικανής Διάταξης:

- Ο στόχος είναι να σχεδιαστεί μια διάταξη MIMO κεραιών που να καλύπτει τις απαιτητικές ανάγκες του 5G δικτύου.

- Η επιλογή του αριθμού στοιχείων, των γωνιών κάλυψης και των αποστάσεων πρέπει να γίνει με προσοχή.

Συνολικά, η κατανόηση των MIMO κεραιών και η σχεδίαση ικανής διάταξης να καλύψει τις ανάγκες του δικτύου 5G είναι ο απώτερος σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την επίτευξη του παραπάνω στόχου είναι χωρισμένη σε τέσσερα βασικά στάδια. Το πρώτο στάδιο είναι η μελέτη της θεωρίας για την περιγραφή της λειτουργίας μιας MIMO εκτυπωμένης κεραίας μέσα από βιβλία και δημοσιεύσεις. Το δεύτερο στάδιο είναι η εκμάθηση των ειδικών λογισμικών ώστε να σχεδιαστεί η διάταξη και να μελετηθούν τα αποτελέσματα των προσημειώσεων. Το τρίτο στάδιο είναι οι παρατηρήσεις των προσομοιώσεων και οι βελτιστοποιήσεις στο σχεδιασμό της κεραίας με σκοπό να σχολιαστούν νέα αποτελέσματα προσημειώσεων. Το τέταρτο και τελευταίο στάδιο είναι η συγγραφή της παρούσας διπλωματικής εργασίας έτσι ώστε να αποτελεί ολοκληρωμένη και πλήρη έρευνα στο αντικείμενο της.

Δομή

Η διπλωματική εργασία απαρτίζεται από κεφάλαια τα οποία χωρίζονται σε μικρότερα υποκεφάλαια. Η λογική όλου του έργου είναι η σταδιακή πλαισίωση, ώστε να παρουσιαστεί το αντικείμενο της μελέτης σε βάθος. Οι ενότητες και οι υποενότητες όχι μονό συνδυάζονται μεταξύ τους αλλά διαδέχονται η μια την άλλη για να υπάρχει ορθολογική σειρά στις έννοιες που περιέχουν. Όπου κρίνεται αναγκαίο υπάρχουν σχήματα εντός των παραγράφων, ώστε να γίνουν κατανοητές

οι πολύπλοκες θεωρίες που είναι απαραίτητες για την γνώση της σχεδίασης εκτυπωμένων κεραιών mimo κατάλληλων για ασύρματα δίκτυα νέας γενιάς.

1 Κεφάλαιο 1^ο: Κεραίες

1.1 Ορισμός

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν διάφορες εκφράσεις για τον ορισμό της κεραίας. Για παράδειγμα, το διάσημο αμερικανικό λεξικό Webster's Dictionary, που εκδόθηκε το 1913, ορίζει τον όρο κεραία ως μεταλλική συσκευή κατάλληλη για τη μετάδοση ή τη λήψη ραδιοκυμάτων, ενώ το έγκριτο Institute of Electrical and Electronic Engineers IEEE, επίσης αμερικανικής προέλευσης, το 1963 ορίζει την κεραία ως μέσο εκπομπής ή λήψης ραδιοκυμάτων. Το IEEE ορίζει την κεραία ως μέσο κατάλληλο για τη μετάδοση ή τη λήψη ραδιοκυμάτων. Περιγραφικά, μια κεραία είναι ένας σύνδεσμος μεταξύ των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και του περιβάλλοντος, καθώς μετατρέπει την ηλεκτρομαγνητική ενέργεια που ταξιδεύει κατά μήκος των γραμμών μεταφοράς ή των κυματοδηγών σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα στο χώρο και αντίστροφα. Οι κεραίες, που ονομάζονται κεραίες εκπομπής, αφενός, μετατρέπουν τα σήματα της ηλεκτρικής πηγής μέσω συνδεδεμένων γραμμών μεταφοράς ή κυματοδηγών σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα που μεταδίδονται στον ελεύθερο χώρο. Μια κεραία λήψης, από την άλλη πλευρά, μετατρέπει τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που προσπίπτουν στον ελεύθερο χώρο σε ηλεκτρικά σήματα στη γραμμή μεταφοράς ή στον κυματοδηγό. Φυσικά, μια κεραία μπορεί να εκτελεί και τις δύο λειτουργίες ταυτόχρονα, καθιστώντας την ταυτόχρονα πομπό και δέκτη.

1.2 Ιστορική Εξέλιξη

Η ιστορική εξέλιξη των κεραιών και των δικτύων ασύρματης επικοινωνίας ξεκίνησε με τον James Clerk Maxwell το 1861 και συνεχίζεται σήμερα με τη δημιουργία προηγμένων δικτύων ασύρματης επικοινωνίας.

Το 1861, ο Σκωτσέζος θεωρητικός φυσικός (James Clerk Maxwell) απέδειξε την ύπαρξη ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και το 1873 συνδύασε τις θεωρίες του για τον ηλεκτρισμό και τον μαγνητισμό με τις περίφημες εξισώσεις Maxwell για να τεκμηριώσει ότι το φως είναι ηλεκτρομαγνητικό φαινόμενο. Το 1886, ο Γερμανός φυσικός Χάινριχ Ρούντολφ Χερτζ κατάφερε να δημιουργήσει σπινθήρα με μήκος κύματος 4 m στο χώρο μεταξύ διπολικών κεραιών, αποδεικνύοντας την ορθότητα της θεωρίας του Μάξγουελ και ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται στο χώρο. Ο Ιταλός εφευρέτης Guglielmo Marconi εγκαινίασε την πρώτη υπερατλαντική ασύρματη επικοινωνία μεταξύ Αγγλίας και Βόρειας Αμερικής χρησιμοποιώντας ένα κατακόρυφο ψηλό σύρμα για την κεραία εκπομπής και λήψης. Πράγματι, στις 12 Δεκεμβρίου 1901, τρία σύντομα σήματα κωδικοποιημένα με το S του κώδικα Μορς διέσχισαν τον Ατλαντικό. Καθώς η τεχνολογία προόδευσε κατά τη δεκαετία μεταξύ 1905 και 1915, εφευρέθηκαν οι ενισχυτές και οι ταλαντωτές λυχνίας κενού και μέχρι το 1940 η κεραία είχε γίνει ένα συρμάτινο στοιχείο που μετέδιδε σήματα επικοινωνίας σε συχνότητες UHF. Μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο, απαιτήθηκε έρευνα για τη βελτίωση των ραδιοεπικοινωνιών, με αποτέλεσμα την εξέλιξη των κεραιών και το πρώτο RADAR. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου μελετήθηκαν οι πρωτόγονες συστοιχίες κεραιών και διερευνήθηκε η βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών ακτινοβολίας που μπορούσαν να παρέχουν. Το 1950, με το τέλος του Β' Παγκοσμίου Πολέμου και την εφεύρεση του τρανζίστορ, γεννήθηκαν τα πρώτα συστήματα κινητών επικοινωνιών.

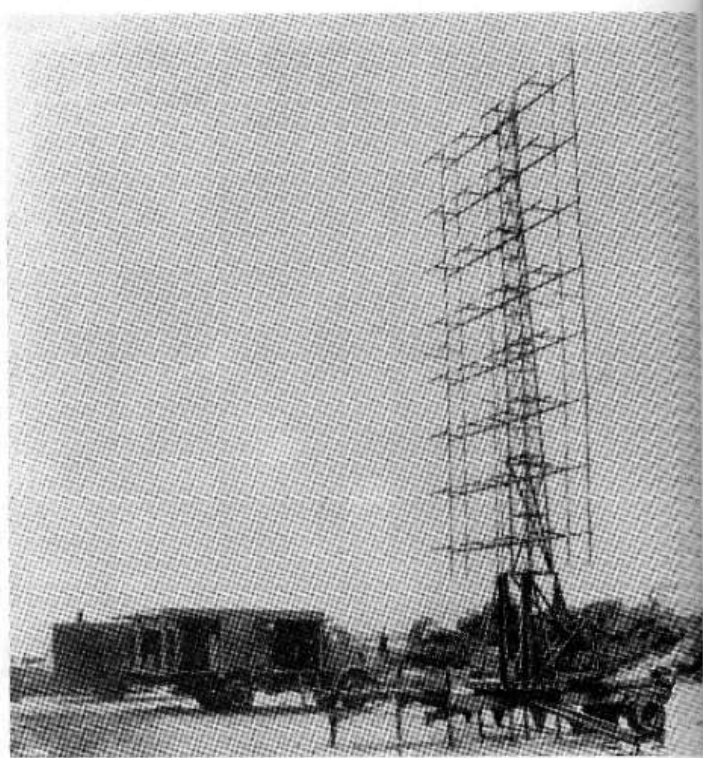
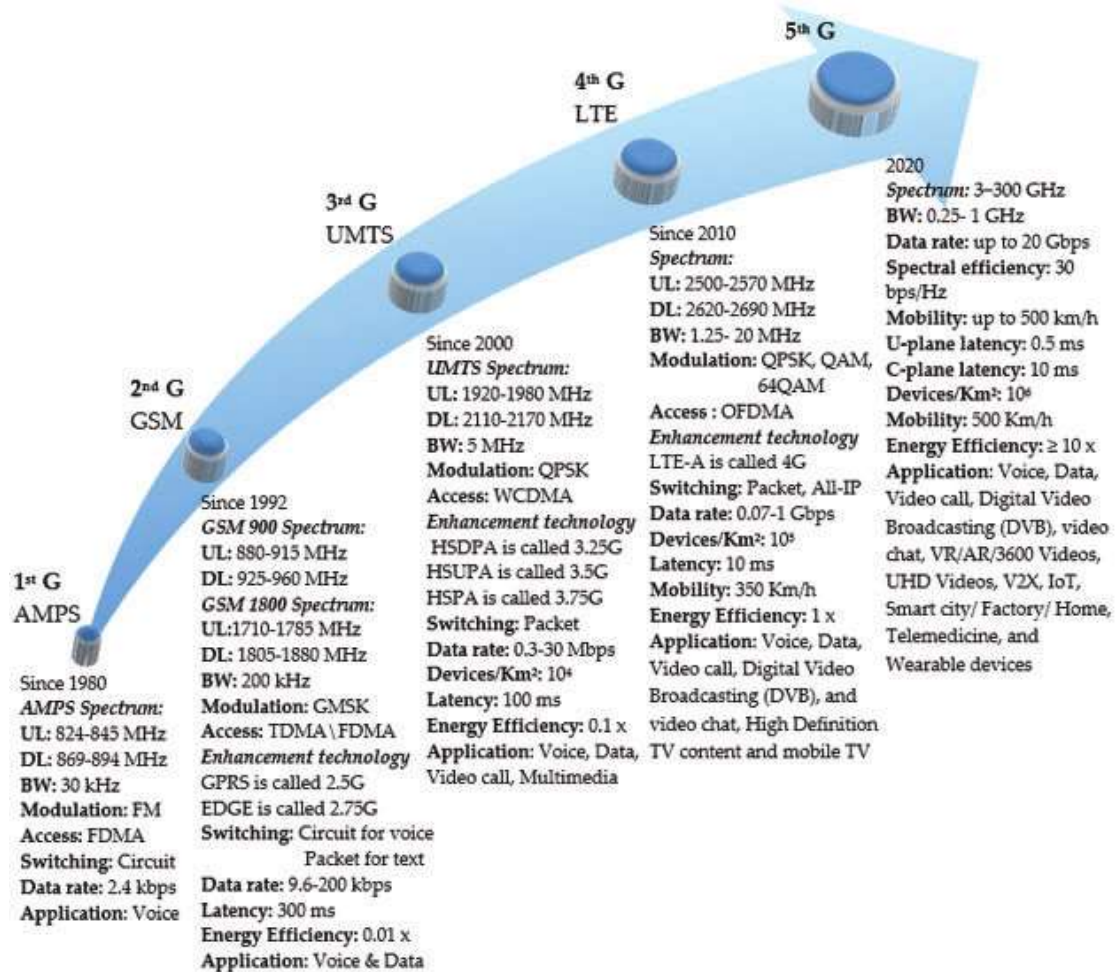


Fig. 2. SCR-270 air surveillance radar.

Εικόνα 1.1.1 Ραντάρ Β' Παγκοσμίου Πολέμου.

Η ανάπτυξη των κινητών επικοινωνιών προανήγγειλε μια νέα εποχή στα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών: Το 1970, εισηγήθησαν κεραιές μικροταινίας με την ιδέα των ευφυών συστημάτων κεραιών και το 1981 αναπτύχθηκε το πρότυπο κυψελοειδούς τηλεφωνίας πρώτης γενιάς 1G. Με μέγιστο ρυθμό μετάδοσης πληροφοριών 2,4 Kbps, η πρώτη γενιά ασύρματης κυψελοειδούς τεχνολογίας υποστήριζε μόνο μετάδοση φωνής χαμηλής ποιότητας. Αργότερα, το 1991, δημιουργήθηκε το πρότυπο κινητής τηλεφωνίας δεύτερης γενιάς 2G, το οποίο επέτρεψε τη μετάδοση μηνυμάτων SMS και εικόνων MMS. Η ζήτηση για μεγάλες μεταδόσεις δεδομένων οδήγησε στην τρίτη γενιά τηλεπικοινωνιών, όπου οι βιντεοκλήσεις μέσω κινητού τηλεφώνου και η πρόσβαση στο Διαδίκτυο έκαναν γνωστό τον όρο κινητή ευρυζωνικότητα. Οι ρυθμοί μεταφοράς πληροφοριών για μεγάλους όγκους δεδομένων παραμένουν χαμηλοί στα 2 Mbps, οδηγώντας σε δίκτυα τέταρτης γενιάς με μέγιστους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων 1 Gbps. Η τέταρτη γενιά κινητών επικοινωνιών κατέστησε εφικτές δυνατότητες για τους χρήστες, όπως τα διαδικτυακά παιχνίδια, η κινητή τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας και η τρισδιάστατη τηλεόραση, ενώ ταυτόχρονα βελτίωσε σημαντικά όλες τις υπηρεσίες που προσέφερε η προηγούμενη γενιά κινητών επικοινωνιών. Σήμερα, η διάδοση των δικτύων πέμπτης γενιάς έχει φέρει επανάσταση στις ασύρματες επικοινωνίες, με ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων που φτάνουν τα 20 Gbps.

Σχεδόν 160 χρόνια μετά τη σημαντική ανακάλυψη του James Clerk Maxwell, η ανθρωπότητα μπορεί πλέον να υλοποιήσει αμέτρητες καινοτομίες όπως το Διαδίκτυο των πραγμάτων, τα έξυπνα σπίτια, οι έξυπνες πόλεις, τα αυτοκίνητα χωρίς οδηγό, τα drones, η έξυπνη γεωργία και η τηλεϊατρική με τη χρήση του 5G και των κατάλληλων κεραιών.



Εικόνα 1.2 Εξέλιξη γενιάς κινητών επικοινωνιών

1.3 Βασική ανάλυση του πεδίου ακτινοβολίας

Τρεις θεωρητικές περιοχές μπορούν να διακριθούν στον ελεύθερο χώρο γύρω από την κεραία ακτινοβολίας.

Υπάρχουν τρεις ζώνες. Η πρώτη ζώνη, ξεκινώντας από το κέντρο της ακτινοβολίας, είναι η ζώνη που ονομάζεται αντιδρών κοντινό πεδίο (reactive near field), καθώς αυξάνεται η απόσταση από το κέντρο η δεύτερη περιοχή κοντινό πεδίο ακτινοβολίας (radiating near field) ή ζώνη Fresnel, ενώ η τρίτη ζώνη ορίζεται ως μακρινό πεδίο (far field) ή ζώνη Fraunhofer.

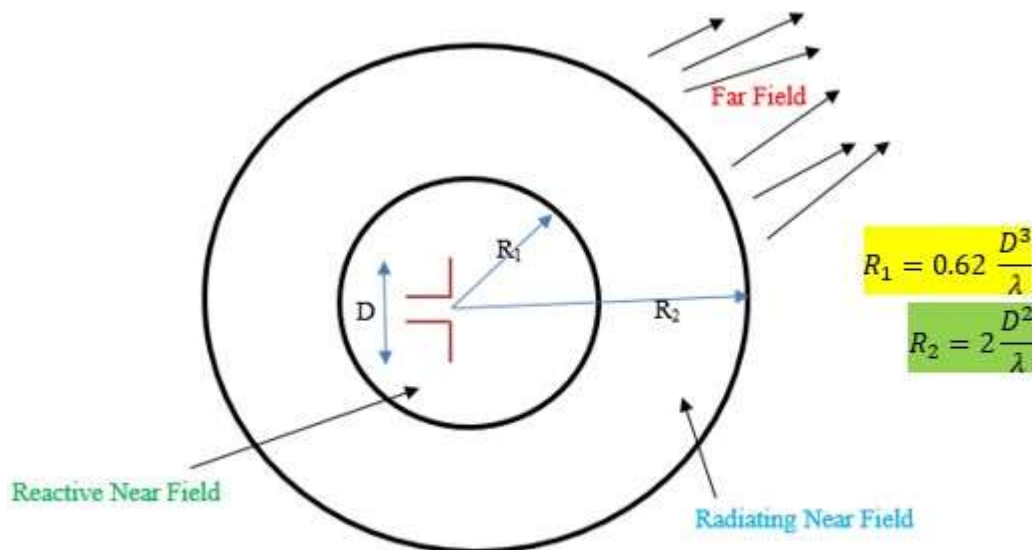


Figure: Field Regions surrounding an Antenna

Εικόνα 1.3 Περιοχές ή Ζώνες Πεδίου μιας κεραίας

Αν και τα όρια κάθε περιοχής δεν είναι πάντα εύκολα αναγνωρίσιμα, η ακτίνα R_1 της περιοχής της εγγύς κεραίας υπολογίζεται ως εξής

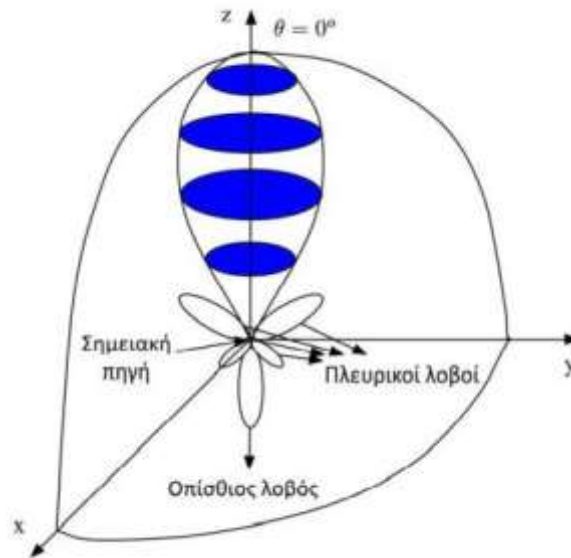
$$R_1 = 0,62 \sqrt{\frac{2D^2}{\lambda}}$$

όπου D είναι η μέγιστη φυσική διάσταση της κεραίας και για να ισχύει αυτή η εξίσωση το D πρέπει να είναι μεγάλο σε σύγκριση με το μήκος κύματος λ . Κοντινό πεδίο ακτινοβολίας εκτείνεται κατά μήκος της απόστασης R_2 από το κέντρο ακτινοβολίας και προσδιορίζεται ως εξής

$$R_2 = \frac{2D^2}{\lambda}$$

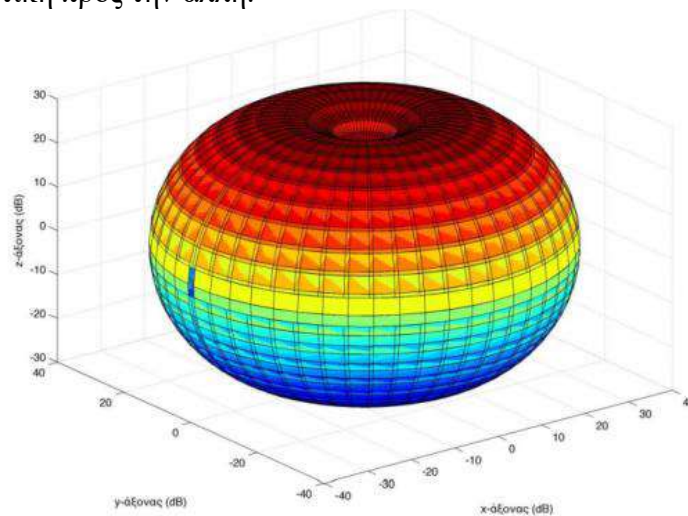
Οτιδήποτε βρίσκεται πέρα από αυτή την περιοχή, ανήκει στο πεδίο ακτινοβολίας μακρινής εμβέλειας, στο οποίο η κύρια παρατήρηση είναι η ανάλυση του πεδίου ακτινοβολίας. Ο ακτινοβολητής θεωρείται ως σημειακή πηγή.

Ένας μαθηματικός τρόπος έκφρασης του τρόπου με τον οποίο μια κεραία ακτινοβολεί ως συνάρτηση των χωρικών συντεταγμένων της στην περιοχή του μακρινού πεδίου είναι η γραφική αναπαράσταση του διαγράμματος ακτινοβολίας. Με την ανάλυση τέτοιων γραφικών παραστάσεων μπορούν να εξαχθούν σημαντικά συμπεράσματα για τα χαρακτηριστικά του πεδίου ακτινοβολίας, το σημαντικότερο από τα οποία είναι η ένταση ακτινοβολίας. Αυτά τα διαγράμματα ισχύος είναι ουσιαστικά τρισδιάστατα σε μονάδες μέτρησης dB ως συνάρτηση των συντεταγμένων κατεύθυνσης ως προς τις γωνίες θ και ϕ .



Εικόνα 1.4 Διάγραμμα ακτινοβολίας

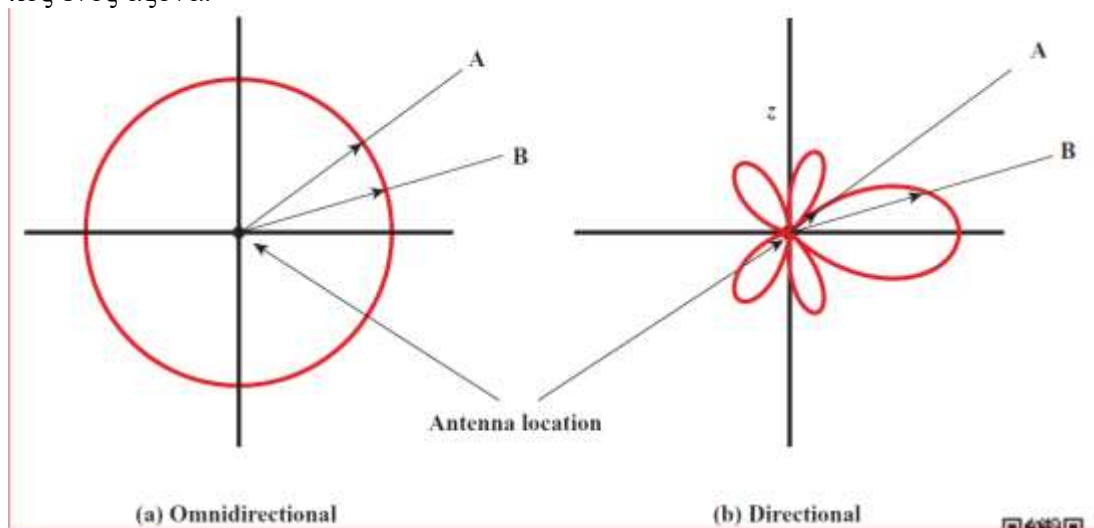
Ο κύριος λοβός και η κατεύθυνσή του στο διάγραμμα ακτινοβολίας μπορούν εύκολα να διακριθούν από το μέγεθός του. Ο κύριος λοβός περιέχει τη διεύθυνση της μέγιστης ακτινοβολίας. Σε τέτοια διαγράμματα ο πλευρικός λοβός και η κατεύθυνσή του πρέπει να διατηρούνται σε πολύ χαμηλότερο επίπεδο, όπως -20 dB ή -30 dB, σε σύγκριση με τον κύριο λοβό, όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα. Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι λοβοί μπορεί να εμφανίζονται σε διαφορετική κατεύθυνση από τον κύριο λοβό και να έχουν σημαντική ακτινοβολία, οι λοβοί αυτοί ονομάζονται δευτερεύοντες λοβοί. Οι λοβοί αυτοί ονομάζονται δευτερεύοντες λοβοί. Επιπλέον, στο διάγραμμα ακτινοβολίας εμφανίζονται οι οπίσθιοι λοβοί, οι οποίοι έχουν αντίθετη κατεύθυνση από τον κύριο λοβό. Μια ματιά στο διάγραμμα ακτινοβολίας επιτρέπει την ταξινόμηση της κεραίας σε μια από τις τρεις κατηγορίες. Για παράδειγμα, μια κεραία ονομάζεται ισότροπη εάν στέλνει και λαμβάνει το ίδιο προς όλες τις κατευθύνσεις, ενώ ονομάζεται κατευθυντική εάν κατευθύνει το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειάς της προς μια κατεύθυνση, όπως στην παραπάνω εικόνα. Ωστόσο, υπάρχει και μια τρίτη κατηγορία κεραιών που ονομάζεται ομοιοκατευθυντική, η οποία είναι κατευθυντική προς τη μία κατεύθυνση και ομοιοκατευθυντική προς την άλλη.



Εικόνα 1.5 Ομοιοκατευθυντική κεραία στο αξιμωθιακό επίπεδο (xy) και κατευθυντική στο επίπεδο ανύψωσης (xz)

1.4 Μοτίβα ακτινοβολίας

Μια κεραία θα εκπέμπει ισχύ σε όλες τις κατευθύνσεις, αλλά συνήθως δεν αποδίδει εξίσου καλά σε όλες τις κατευθύνσεις. Ένας κοινός τρόπος να χαρακτηρίζεται η απόδοση μιας κεραίας είναι το μοτίβο ακτινοβολίας, το οποίο είναι μια γραφική αναπαράσταση των ακτινοβολιακών ιδιοτήτων μιας κεραίας ως λειτουργία των χωρικών συντεταγμένων. Το πιο απλό μοτίβο παράγεται από μια ιδεατή κεραία που είναι γνωστή ως ιστροπική κεραία. Μια ιστροπική κεραία είναι ένα σημείο στο χώρο που ακτινοβολεί ισχύ σε όλες τις κατευθύνσεις εξίσου. Το πραγματικό μοτίβο ακτινοβολίας για την ιστροπική κεραία είναι μια σφαίρα με την κεραία στο κέντρο. Ωστόσο, τα μοτίβα ακτινοβολίας απεικονίζονται σχεδόν πάντα ως δισδιάστατο διακοπτικό τμήμα του τρισδιάστατου μοτίβου. Το μοτίβο για την ιστροπική κεραία φαίνεται στο Εικόνα 1.6α. Η απόσταση από την κεραία σε κάθε σημείο του μοτίβου ακτινοβολίας είναι ανάλογη με την ισχύ που ακτινοβολεί η κεραία σε αυτή την κατεύθυνση. Το Εικόνα 1.6β δείχνει το μοτίβο ακτινοβολίας μιας άλλης ιδεατής κεραίας. Αυτή είναι μια κατευθυντική κεραία όπου η προτιμώμενη κατεύθυνση ακτινοβολίας είναι κατά μήκος ενός άξονα.



Εικόνα 1.6 Μοτίβα ακτινοβολίας κεραίας

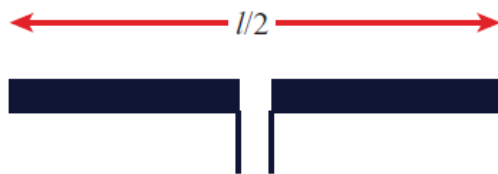
Το πραγματικό μέγεθος ενός μοτίβου ακτινοβολίας είναι αυθαίρετο. Το σημαντικό είναι η σχετική απόσταση από τη θέση της κεραίας σε κάθε κατεύθυνση. Η σχετική απόσταση καθορίζει τη σχετική ισχύ. Για να προσδιοριστεί η σχετική ισχύς σε μια δεδομένη κατεύθυνση, σχεδιάζεται μια γραμμή από τη θέση της κεραίας υπό τον κατάλληλη γωνία, και προσδιορίζεται το σημείο τομής με το μοτίβο ακτινοβολίας. Η Εικόνα 1.6 δείχνει μια σύγκριση δύο γωνιών μετάδοσης, A και B, που σχεδιάζονται στα δύο μοτίβα ακτινοβολίας. Η ιστροπική κεραία παράγει ένα μοτίβο ακτινοβολίας ομοκατευθυντικό με ίση ισχύ σε όλες τις κατευθύνσεις, έτσι τα διανύσματα A και B έχουν ίσους μήκους. Για το μοτίβο κεραίας της Εικόνας 1.6β, το διάνυσμα B είναι μεγαλύτερο από το διάνυσμα A, υποδεικνύοντας ότι περισσότερη ισχύς ακτινοβολείται στην κατεύθυνση B από ό, τι στην κατεύθυνση A, και τα σχετικά μήκη των δύο διανυσμάτων είναι ανάλογα με την ποσότητα της ισχύς που ακτινοβολείται στις δύο κατευθύνσεις. Σημειώστε ότι αυτός ο τύπος διαγράμματος δείχνει το σχετικό κέρδος κεραίας σε κάθε κατεύθυνση, όχι τη σχετική απόσταση κάλυψης, αν και φυσικά είναι σχετικά. Το μοτίβο ακτινοβολίας παρέχει ένα βολικό μέσο για τον προσδιορισμό του πλάτους δέσμης μιας κεραίας, το οποίο είναι ένα κοινό μέτρο της κατευθυντικότητας μιας κεραίας. Το πλάτος δέσμης είναι η γωνία μέσα στην οποία η ισχύς που ακτινοβολείται από την κεραία είναι τουλάχιστον η μισή από ό, τι είναι στην προτιμώμενη

κατεύθυνση. Όταν μια κεραία χρησιμοποιείται για λήψη, το μοτίβο ακτινοβολίας γίνεται μοτίβο λήψης. Η μεγαλύτερη ενότητα του μοτίβου δείχνει την καλύτερη κατεύθυνση για τη λήψη.

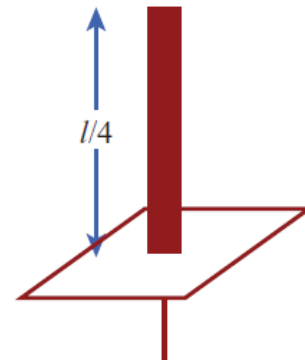
1.5 Τύποι κεραιών

Διπολικές κεραιές

Δύο από τις πιο απλές και βασικές κεραιές είναι το δίπολο half-wave, ή κεραία Hertz (Εικόνα 1.7α) και η κάθετη quarter-wave κεραία, ή κεραία Marconi (Εικόνα 1.7β). Το half-wave δίπολο αποτελείται από δύο ευθείς συγγραμμικούς αγωγούς ίσου μήκους, διαχωρισμένους από μια μικρή απόσταση. Το μήκος της κεραίας είναι το μισό του μήκους κύματος του σήματος που μπορεί να μεταδοθεί με τον πιο αποτελεσματικό τρόπο. Μια κάθετη κεραία quarter-wave είναι ο τύπος που συνήθως χρησιμοποιείται για ραδιόφωνα αυτοκινήτων και φορητά ραδιόφωνα. Ένα half-wave δίπολο έχει ένα ομοιόμορφο ή ομοκατευθυντικό μοτίβο ακτινοβολίας σε μία διάσταση και ένα μοτίβο σχήματος οκταδίων στις άλλες δύο διαστάσεις (Εικόνα 1.8α). Αυτό σημαίνει ότι η ενέργεια κατευθύνεται κατά μήκος του εδάφους. Πολύ λιγότερη ενέργεια απορρίπτεται κατακόρυφα (και χάνεται) σε σύγκριση με μια ισοτροπική κεραία.

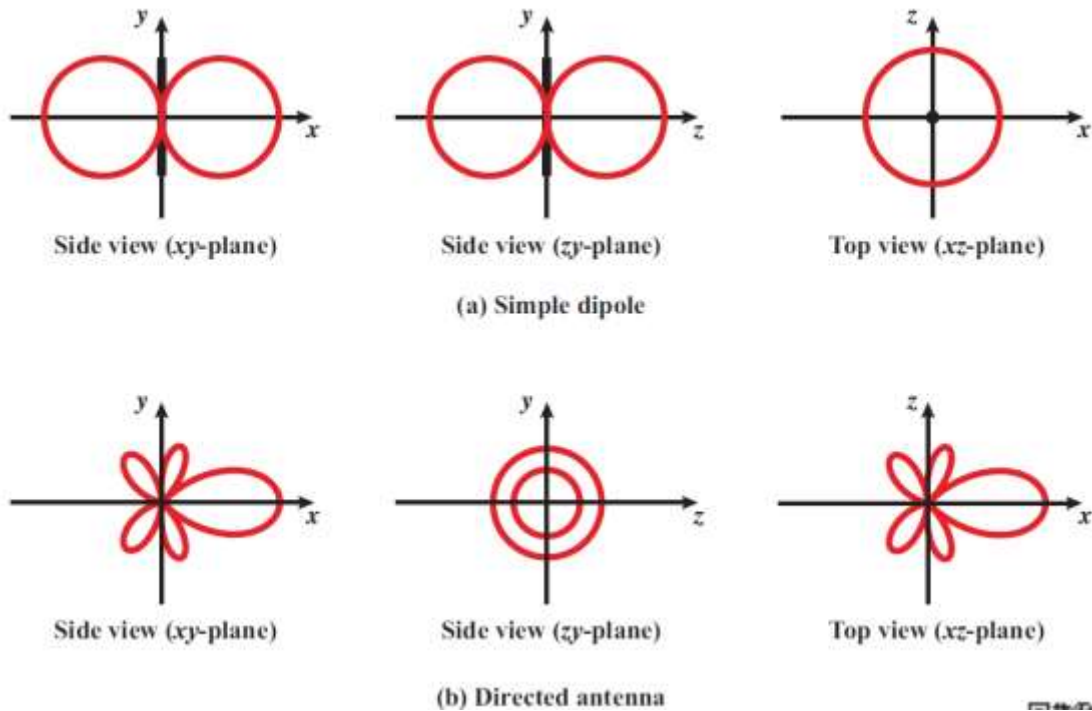


(a) Half-wave dipole



(b) Quarter-wave antenna

Εικόνα 1.7 Απλές κεραιές



Εικόνα 1.8 Μοτίβα ακτινοβολίας σε τρεις διαστάσεις

Κατευθυντικές κεραιές

Εάν πολλαπλές κεραιές ρυθμίζονται σε έναν πίνακα κεραιών, αυτές οι πολλαπλές κεραιές μπορούν να παράγουν μια κατευθυντική δέσμη. Η ακτινοβολία του ηλεκτρικού πεδίου από μια μονή κεραιά είναι

$$E = \frac{E_0}{d} \operatorname{Re} \left[\exp \left(j \left(\omega t - \frac{2\pi d}{\lambda} \right) \right) \right] = \frac{E_0}{d} \cos \left(\omega t - \frac{2\pi d}{\lambda} \right)$$

Με πολλαπλές κεραιές, τα σήματα προς κάθε κεραιά μπορούν να προσαρμοστούν με πολύπλοκα βάρη z_i για να επιβάλλονται συγκεκριμένες φάσεις, πλάτη κύματος και καθυστερήσεις χρόνου, έτσι ώστε το άθροισμα των μοτίβων των κεραιών να στέλνει ή να ακούει πιο δυνατά σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Έτσι έχουμε

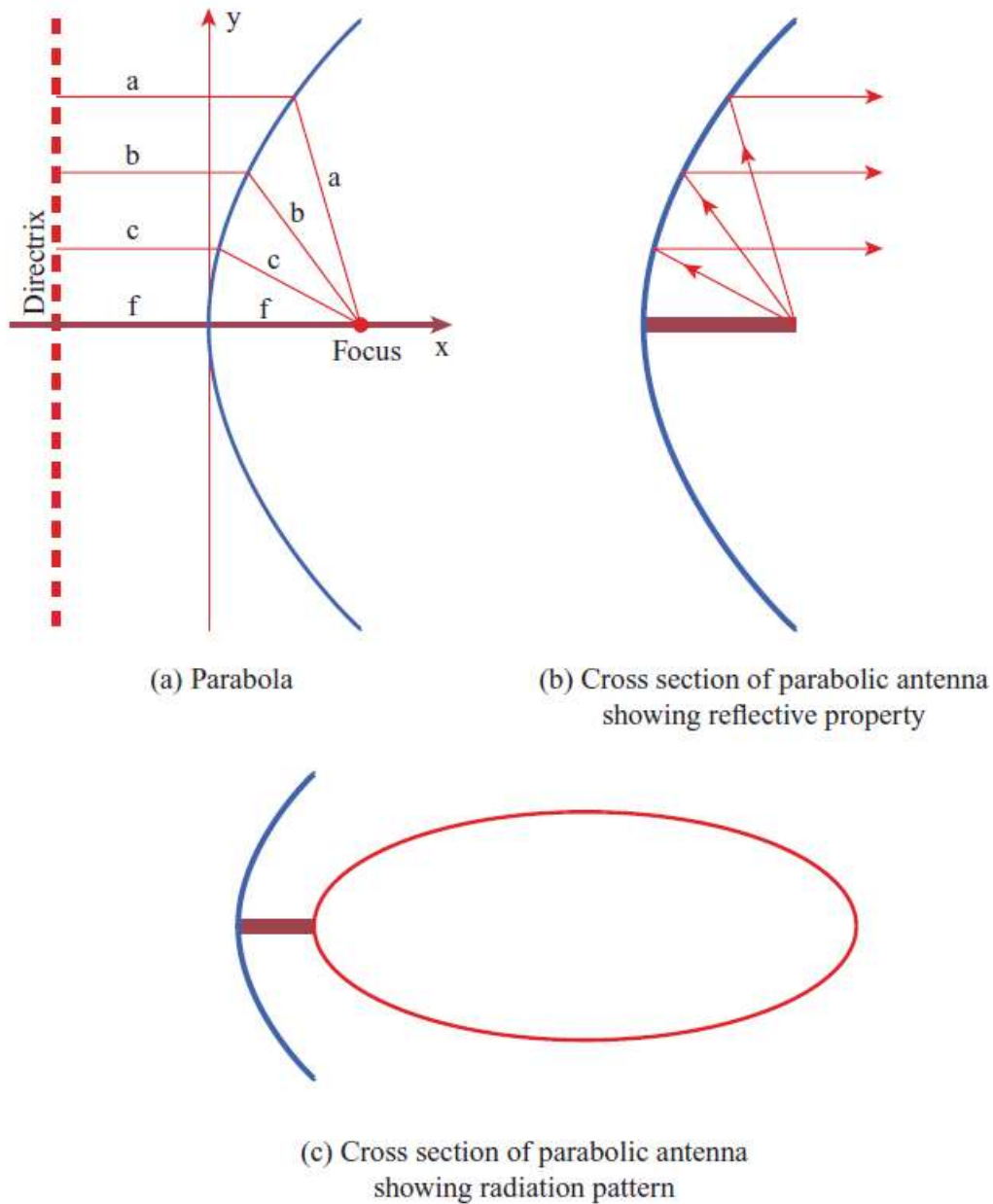
$$E = \frac{E_0}{d} \operatorname{Re} \left[E_0 \exp(j\omega t) \sum_{i=1}^N z_i \frac{1}{d_k} \exp \left(-\frac{j2\pi d_k}{\lambda} \right) \right]$$

όπου d_k είναι η απόσταση από κάθε στοιχείο κεραιάς στον δέκτη. Τα βάρη βελτιστοποιούνται ανάλογα με διαφορετικά κριτήρια. Για παράδειγμα, εάν οι κεραιές τοποθετηθούν σε ένα γραμμικό πίνακα κεραιών, ένα τυπικό διευθυντικό μοτίβο ακτινοβολίας φαίνεται στην Εικόνα 1.8β. Αυτό το μοτίβο παράγει έναν κύριο λοβό με εύρος 60° . Αυτό απαιτεί τέσσερις κεραιές και παράγεται από ένα γραμμικό πίνακα όπου οι κεραιές τοποθετούνται κάθε μισό μήκος κύματος. Σε αυτό το παράδειγμα, η κύρια ισχύς της κεραιάς είναι στην κατεύθυνση x . Σημειώστε ότι ενέργεια κατευθύνεται προς τις πλευρές και την πίσω μεριά της κεραιάς, σε σημεία που ονομάζονται παραθυρικοί λοβοί. Ωστόσο, υπάρχουν και τυφλά σημεία στα μοτίβα, όπου κατευθύνεται πολύ λίγη ενέργεια σήματος σε αυτές τις κατευθύνσεις. Οι διευθυντικές κεραιές γίνονται όλο και πιο πρακτικές και χρήσιμες στα σύγχρονα συστήματα, αλλά έχουν χρησιμοποιηθεί πραγματικά εδώ και πολλά χρόνια. Για παράδειγμα, μια τυπική περιοχή κάλυψης κινητής τηλεφωνίας χωρίζεται σε τρεις, 120° τομείς χρησιμοποιώντας τρία σύνολα διευθυντικών κεραιών σε μια τριγωνική διάταξη κεραιών. Για μοντέρνες εφαρμογές, οι διευθυντικές κεραιές μπορούν να διαμορφωθούν δυναμικά για να

ακολουθούν ατομικά ή ομάδες χρηστών, προσφέροντας ισχυρή κέρδος σε επιθυμητές κατευθύνσεις και τυφλά προς παρεμβαλλόμενους. Αυτές οι κεραίες θα θεωρούνταν προσαρμοστικοί πίνακες κεραιών ή διακοπτόμενοι πίνακες κεραιών.

Κεραίες με παραβολικό ανακλαστήρα

Ένας σημαντικός τύπος κεραίας είναι η παραβολική αντανάκλασης, η οποία χρησιμοποιείται σε εφαρμογές επίγειου μικροκυμάτων και δορυφορικών. Μια παραβολή είναι η τοποθέτηση όλων των σημείων που έχουν ίση απόσταση από μια σταθερή γραμμή και ένα σταθερό σημείο που δεν βρίσκεται στη γραμμή. Το σταθερό σημείο ονομάζεται εστία και η σταθερή γραμμή ονομάζεται ευθεία διέλευσης (Εικόνα 1.9α). Εάν μια παραβολή περιστραφεί γύρω από τον άξονά της, η επιφάνεια που προκύπτει ονομάζεται παραβολοειδής. Μια τομή μέσω του παραβολοειδούς παράλληλα με τον άξονά του σχηματίζει μια παραβολή και μια τομή κάθετη στον άξονα σχηματίζει έναν κύκλο. Τέτοιες επιφάνειες χρησιμοποιούνται σε φώτα αυτοκινήτων, οπτικά και ραδιοτηλεσκόπια και κεραίες μικροκυμάτων λόγω της ακόλουθης ιδιότητας: Αν μια πηγή ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας (ή ήχου) τοποθετηθεί στην εστία του παραβολοειδούς, και αν το παραβολοειδές είναι αντανακλαστική επιφάνεια, το κύμα θα αναπηδήσει πίσω σε γραμμές παράλληλες με τον άξονα του παραβολοειδούς. Η Εικόνα 1.9β δείχνει αυτό το φαινόμενο σε τομή. Θεωρητικά, αυτό το φαινόμενο δημιουργεί μια παράλληλη δέσμη χωρίς διασπορά. Στην πράξη, θα υπάρχει κάποια διασπορά, επειδή η πηγή ενέργειας πρέπει να καταλαμβάνει περισσότερα από ένα σημείο. Η αντίστροφη περίπτωση είναι επίσης αληθής. Εάν τα εισερχόμενα κύματα είναι παράλληλα με τον άξονα του αντανακλαστικού παραβολοειδούς, το αποτέλεσμα θα συγκεντρωθεί στην εστία.



Εικόνα 1.9 Παραβολική κεραία αντανάκλασης

1.6 Πυκνότητα ισχύος και ένταση ακτινοβολίας

Η πυκνότητα ισχύος είναι ένα μέγεθος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει την ισχύ ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος, δεδομένου ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα αναγνωρίζονται ως φορείς ισχύος και ενέργειας. Το διάνυσμα Poynting χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση της πυκνότητας ισχύος.

$$W = E \times H$$

όπου W είναι το στιγμιαίο διάνυσμα Poynting σε (W/m^2), E είναι η στιγμιαία ένταση του ηλεκτρικού πεδίου (V/m) και H είναι η στιγμιαία ένταση του μαγνητικού πεδίου (A/m). Δεδομένου ότι η πυκνότητα ισχύος αντιπροσωπεύεται από το διάνυσμα του σήματος, η συνολική ισχύς σε μια κλειστή επιφάνεια ορίζεται ως εξής

$$P = \oiint W \cdot ds$$

Δηλαδή η συνολική ισχύς είναι η διπλή ολοκλήρωση της πυκνότητας ισχύος του διανύσματος Poynting σε μια κλειστέ επιφάνεια ds .

Από τα παραπάνω περισσότερο ενδιαφέρον έχει η μέση πυκνότητα ισχύος όπου υπολογίζεται μέσω της σχέσης

$$W_{av} = \frac{1}{2} \text{Re}[E \times H]$$

Συνεπώς η μέση ακτινοβολούμενη ισχύς υπολογίζεται:

$$P = \frac{1}{2} \oiint \text{Re}[E \times H] \cdot ds$$

Η ένταση ακτινοβολίας που ισχύει στο μακρινό πεδίο και υπολογίζεται από την σχέση

$$U = r^2 W_{rad}$$

όπου είναι ο πολλαπλασιασμός της μέσης πυκνότητας ισχύος του διανύσματος Poynting με το τετράγωνο της απόστασης r και U είναι η ένταση ακτινοβολίας σε (W/μονάδα στερεάς γωνίας) και W_{rad} είναι η πυκνότητα ακτινοβολίας σε (W/m²).

1.7 Κατευθυντικότητα κεραίας

Μια άλλη σημαντική παράμετρος της κεραίας είναι η κατευθυντικότητα. Η κατευθυντικότητα ορίζεται ως ο λόγος της έντασης ακτινοβολίας σε μια κατεύθυνση προς τη μέση ένταση ακτινοβολίας σε όλες τις κατευθύνσεις. Για ισότροπες κεραίες, η ένταση ακτινοβολίας U είναι ανεξάρτητη από τις γωνίες θ και ϕ . Επομένως, η ένταση ακτινοβολίας υπολογίζεται ως εξής :

$$U_o = \frac{P_{rad}}{4\pi}$$

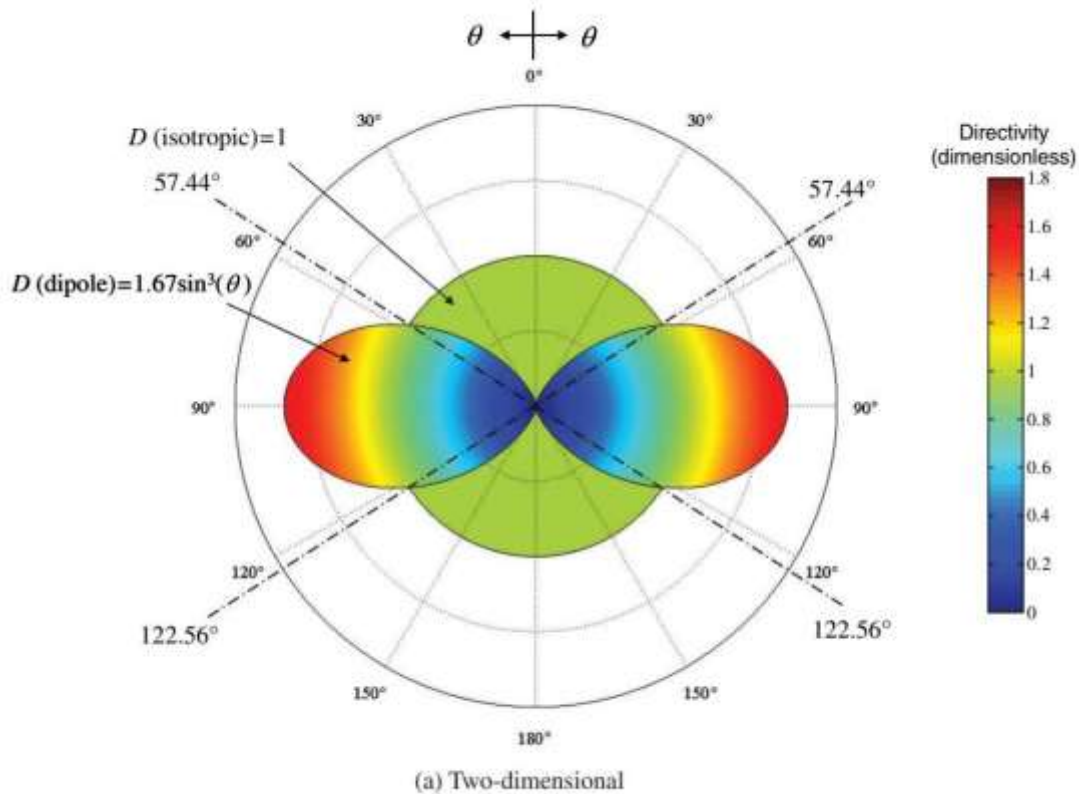
όπου P_{rad} είναι η συνολική ακτινοβολούμενη ισχύς. Συνεπώς η κατευθυντικότητα μιας μη-ισοτροπικής κεραίας υπολογίζεται από την σχέση :

$$D = \frac{U}{U_o} = \frac{4\pi U}{P_{rad}}$$

Όταν δεν προσδιορίζεται η διεύθυνση, τότε εννοείται η διεύθυνση μέγιστης έντασης άρα και η μέγιστη κατευθυντικότητα.

$$D = \frac{U}{U_o} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}}$$

όπου D συμβολίζει την κατευθυντικότητα, D_o είναι η μέγιστη κατευθυντικότητα, U σε (W/ανά μονάδα στερεάς γωνίας) είναι η ένταση ακτινοβολίας, U_{max} σε (W/ανά μονάδα στερεάς γωνίας) είναι η μέγιστη ένταση ακτινοβολίας, U_o σε (W/ανά μονάδα στερεάς γωνίας) είναι η ένταση ακτινοβολίας ισοτροπικής κεραίας, P_{rad} σε (W) είναι η συνολική ακτινοβολούμενη ισχύς.



Εικόνα 1.10 Διάγραμμα κατευθυντικότητας διπόλου $\lambda/2$

Επιπλέον για να περιγράψουμε την κατευθυντικότητα, χρησιμοποιείται και άλλο ένα μέγεθος που ονομάζεται στερεά γωνία εύρους δέσμης. Συνήθως η ιδιότητα αυτή είναι χρήσιμη όταν ο κύριος λοβός είναι αρκετά στενός και οι πλευρικοί λοβοί αμελητέοι. Οπότε η μέγιστη κατευθυντικότητα ορίζεται από την σχέση

$$D_o = \frac{4\pi}{\%OMEGA_A} = \frac{4\pi}{\theta_{1r}\theta_{2r}}$$

Το Ω_A είναι η στερεά γωνία δέσμης

$$\%OMEGA_A \approx \theta_{1r}\theta_{2r}$$

Εαν το εύρος δέσμης είναι σε μοίρες τότε η μέγιστη κατευθυντικότητα παίρνει την μορφή

$$D_o = \frac{41.253}{\theta_{1r}\theta_{2r}}$$

Και για επιπεδικές στοιχειοκεραίες παίρνει την μορφή

$$D_o = \frac{32.400}{\theta_{1r}\theta_{2r}}$$

1.8 Απόδοση και κέρδος κεραίας

Ένα άλλο χρήσιμο χαρακτηριστικό που καθορίζει μια κεραία είναι το κέρδος ή η απολαβή, το οποίο χρησιμοποιείται για να περιγράψει την απόδοση μιας κεραίας. Το κέρδος μιας κεραίας είναι ο λόγος της κατευθυντικότητας της προς την ισχύ εισόδου της.

$$G = \frac{4\pi U}{P_{in}}$$

Το κέρδος ισχύος μιας κεραίας υπολογίζεται ως προς την κατεύθυνση της μέγιστης ακτινοβολίας. Συμπερασματικά, η ισχύς εισόδου τροφοδοσίας σχετίζεται άμεσα με την ακτινοβολούμενη ισχύ.

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

Το $e_{cd} = e_{ced}$ εκφράζει την απόδοση ακτινοβολίας της κεραίας. Τα μεγέθη ec , ed εκφράζουν την απόδοση λόγω πεπερασμένης αγωγιμότητας της κεραίας και την διηλεκτρική απόσταση αντίστοιχα και υπολογίζονται πειραματικά.

Για τέλεια προσαρμογή, δηλαδή για κέρδος χωρίς απώλειες, όταν η αντίσταση εισόδου είναι ίση με τη χαρακτηριστική αντίσταση $Z_{in} = Z_0$, το κέρδος εκφράζεται ως εξής:

$$G(\theta, \varphi) = e_{cd} D(\theta, \varphi)$$

Για το κέρδος στο οποίο συμπεριλαμβάνονται και οι απώλειες δηλαδή, υπάρχουν ανακλάσεις στην γραμμή μεταφοράς τότε το κέρδος υπολογίζεται:

$$G_{re}(\theta, \varphi) = e_o D(\theta, \varphi)$$

Η σχέση $e_o = e_{re} e_{cd}$ εκφράζει την συνολική απόδοση της κεραίας. Ο παραπάνω όρος μπορεί να απλοποιηθεί ως $e_o = e_r(1 - |\Gamma|^2)$ όπου Γ ο συντελεστής ανάκλασης και υπολογίζεται από την σχέση

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0}$$

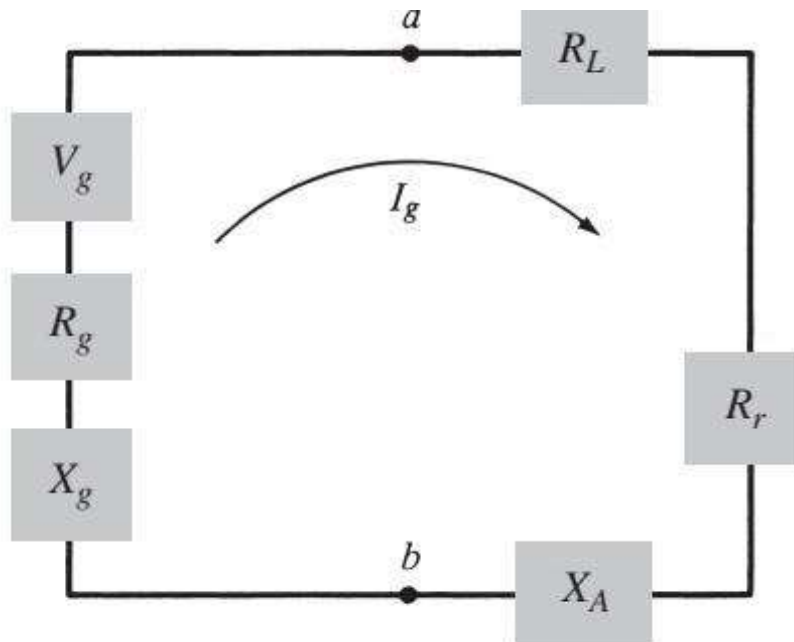
Z_{in} , Z_0 είναι η αντίσταση εισόδου και η χαρακτηριστική αντίσταση αντίστοιχα. Όπως προαναφέρθηκε αν η αντίσταση εισόδου είναι ίση με την χαρακτηριστική τότε θα ο συντελεστής ανάκλασης θα είναι 0 ($\Gamma = 0$), συνεπώς θα υπάρχει προσαρμογή. Σε αυτήν την περίπτωση το κέρδος με και χωρίς απώλειες θα είναι ίσα. Επίσης μπορεί να υπολογιστεί και ο λόγος τάσεων στάσιμου κύματος VSWR.

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

Στην περίπτωση που υπάρχει προσαρμογή το VSWR ισούται με 1 ($VSWR = 1$).

1.9 Κύκλωμα και εμπέδηση κεραίας

Ένα ακόμη βασικό χαρακτηριστικό της κεραίας αποτελεί η εμπέδηση, που ορίζεται ως η σύνθετη αντίσταση στους ακροδέκτες της κεραίας. Η χρήση κατάλληλου ισοδύναμου κυκλώματος μπορεί να οδηγήσει στην μέγιστη μεταφορά ισχύος και να οδηγηθεί μέσω των γραμμών μεταφοράς στην κεραία. Ένα ισοδύναμο κύκλωμα που παρουσιάζεται είναι το κύκλωμα Thevenin.



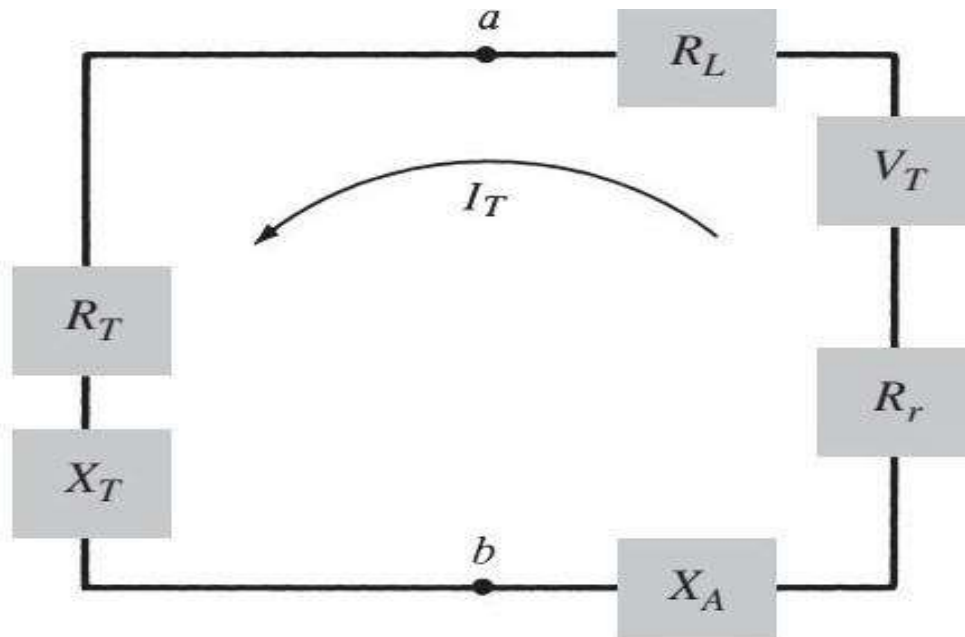
Εικόνα 1.11 Ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin για εκπομπή

Στην εικόνα (1.7) αποδίδεται η εμπέδηση εισόδου που είναι $Zg=Rg+jXg$. Η RL είναι η αντίσταση απωλειών κεραίας, Rr είναι η αντίσταση ακτινοβολίας, XA είναι η άεργη αντίσταση στους ακροδέκτες a-b, Rg το ωμικό μέρος της εμπέδησης και Xg είναι το άεργο μέρος της εμπέδησης. Συνεπώς αν θεωρηθεί ότι χρησιμοποιείται σε κατάσταση εκπομπής τότε η μέγιστη ισχύς που αποδίδεται στην κεραία σε συνθήκη συζυγούς προσαρμογής, δηλαδή $Rr+RL=Rg$, $XA=-Xg$ είναι:

$$P_S = \frac{|V_g|^2}{4} \left[\frac{1}{R_r+R_L} \right]$$

Εφαρμόζοντας την ίδια διαδικασία αλλά αυτή την φορά με την κεραία σε κατάσταση λήψης, η ισχύς που λαμβάνεται στην κεραία υπό συνθήκες συζυγούς προσαρμογής με V_T ανάλογη της V_g είναι:

$$P_c = \frac{|V_T|^2}{4} \left[\frac{1}{R_r+R_L} \right]$$



Εικόνα 1.12 Ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin για λήψη

2 Κεφάλαιο 2ο: Στοιχειοκεραίες

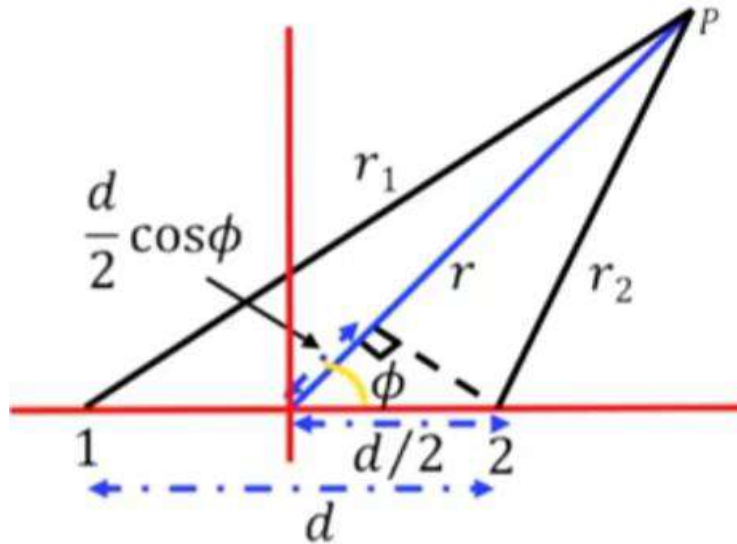
Στοιχειοκεραία ονομάζεται μια δομή που αποτελείται από ακτινοβολητές, συνήθως πανομοιότυπους με συγκεκριμένη ηλεκτρική και γεωμετρική μορφή. Οι στοιχειοκεραίες χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση επικοινωνιών μεγάλων αποστάσεων αφού ένα μόνο στοιχείο παρέχει χαμηλή κατευθυντικότητα και απολαβή. Για να αυξηθεί η κατευθυντικότητα και η απολαβή είναι απαραίτητη είτε η αύξηση του ηλεκτρικού μεγέθους της κεραίας είτε η χρήση πολλαπλών στοιχείων. Η γεωμετρική θέση των στοιχείων αν δηλαδή αυτά τοποθετηθούν γραμμικά ή ορθογωνικά ή κυκλικά και ούτω καθ' εξής, η μεταξύ τους απόσταση, το πλάτος και η φάση διέγερσης του καθενός, μας δίνουν τη δυνατότητα να σχεδιάσουμε μια δομή με υψηλή κατευθυντικότητα και κέρδος σε συγκεκριμένη περιοχή σκόπευσης. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο ακτινοβολεί μια συστοιχία δύο κεραιών, οι γραμμικές και οι επιπεδικές κεραίες καθώς και η κατευθυντικότητά τους.

2.1 Στοιχειοκεραία δυο στοιχείων

Έστω δύο ισοτροπικές σημειακές πηγές ακτινοβολίας τοποθετημένες σε απόσταση d μεταξύ τους όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα και ένα τυχαίο σημείο P σε απόσταση r από την μέση απόσταση των κεραιών, τέτοια ώστε η τιμή της να είναι πολύ μεγαλύτερη από την απόσταση d για να ανήκει το σημείο στο μακρινό πεδίο ακτινοβολίας. Με αυτή την παραδοχή και την γεωμετρία της παρακάτω διάταξης οι αποστάσεις r_1 και r_2 των κεραιών από το τυχαίο σημείο ακτινοβολίας P υπολογίζονται ως εξής:

$$r_1 = r + \frac{d}{2} \cos\varphi$$

$$r_2 = r - \frac{d}{2} \cos\varphi$$



Εικόνα 2.1 Γεωμετρία στοιχειοκεραίας δύο στοιχείων

Για τον υπολογισμό του ολικού πεδίου E που ακτινοβολείται στο σημείο P υποθέτουμε πως δεν υπάρχει σύζευξη (coupling) αλλά απομόνωση (isolation) μεταξύ των ακτινοβολητών (οι παραπάνω έννοιες παρουσιάζονται σε επόμενο κεφάλαιο). Οι ακτινοβολητές τροφοδοτούνται με το ίδιο μετρώ διέγερσης E_0 ωστόσο είναι φανερό ότι η απόσταση r_1 είναι μεγαλύτερη από την r_2 και καθώς η ακτινοβολία ταξιδεύει με την ταχύτητα c του φωτός χρειάζεται περισσότερο χρόνο να φτάσει στο σημείο P . Το φαινόμενο αυτό δημιουργεί και την γωνία ϕ της γεωμετρίας της παραπάνω διάταξης. Οπότε το πεδίο ακτινοβολίας E μπορεί να υπολογιστεί με την βοήθεια φασόρων ως εξής:

$$E = E_0 e^{-j\beta r_1} + E_0 e^{-j\beta r_2}$$

όπου β

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$$

το οποίο δείχνει τη φάση κατά την οποία προπορεύεται το ρεύμα του ενός στοιχείου σε σχέση με το άλλο λόγω της διαφοράς των αποστάσεων r_1 και r_2 . Να σημειωθεί πως στην βιβλιογραφία μπορεί να συναντήσουμε το β και ως k .

Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις μπορούμε να υπολογίσουμε το πεδίο ακτινοβολίας E ως εξής:

$$E = E_0 e^{-j\beta r} \left[e^{-j\beta \frac{d}{2} \cos \phi} + e^{j\beta \frac{d}{2} \cos \phi} \right] \Rightarrow$$

$$E = E_0 e^{-j\beta r} \left[e^{-j\frac{\psi}{2}} + e^{j\frac{\psi}{2}} \right] \Rightarrow$$

$$E = 2E_0 \cos \frac{\psi}{2} = 2E_0 \cos \left(\frac{\pi d}{\lambda} \cos \phi \right)$$

Όπου ψ ισχύει ότι:

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

2.1.1 Ειδικές περιπτώσεις στοιχειοκεραίας δυο στοιχείων

1η περίπτωση

Στην παραπάνω διάταξη προσθέτουμε την παραδοχή της απόστασης d με το μισό της απόστασης του μήκους κύματος λ του κύματος ακτινοβολίας ενώ στις ισοτροπικές πηγές το πλάτος παραμένει το ίδιο. Συνεπώς, και αφού

$$d = \frac{\lambda}{2}$$

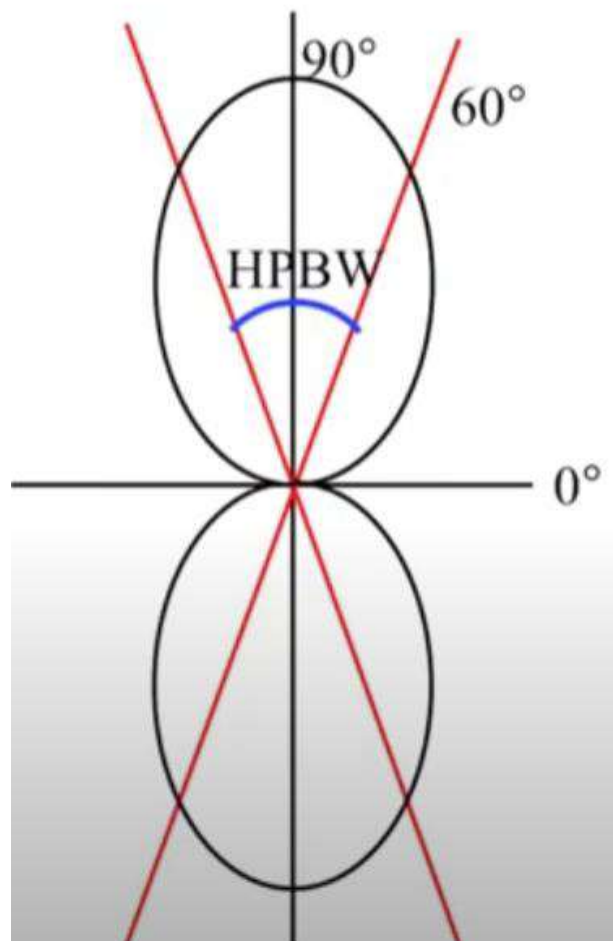
έχουμε

$$E = \cos\left(\frac{\pi}{2} \cos\varphi\right)$$

Δοκιμάζοντας στην παραπάνω εξίσωση διάφορες τιμές παίρνουμε τον παρακάτω πίνακα και το αντίστοιχο διάγραμμα

φ	0°	60°	90°
E	0	$1/\sqrt{2}$	1

Πίνακας 1 Πεδίο ακτινοβολίας E δύο στοιχείων για διάφορες τιμές της γωνίας φ



Εικόνα 2.2 Διάγραμμα ακτινοβολίας δύο ισοτροπικών πηγών για $d = \lambda/2$

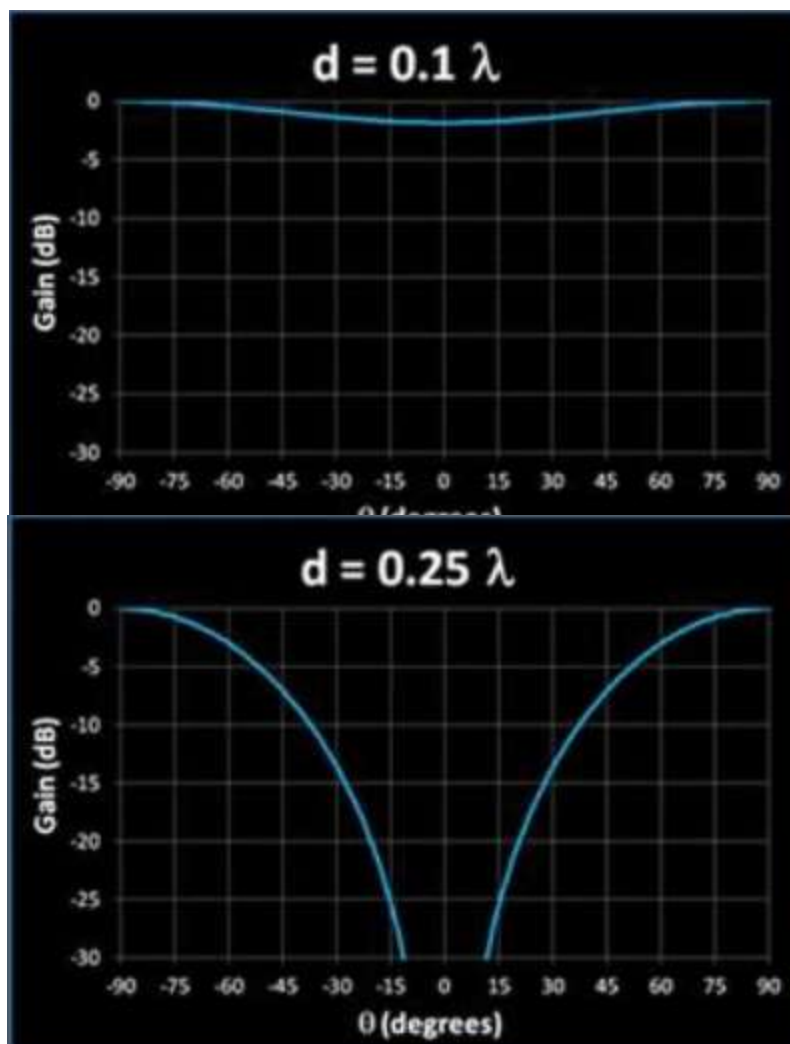
Παρατηρούμε πως το εύρος ημισείας ισχύος έχει άνοιγμα περίπου 60 μοίρες δίνοντας

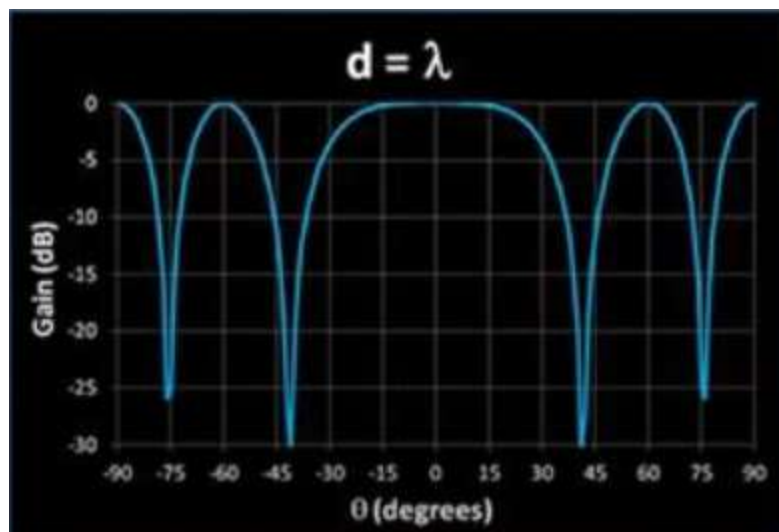
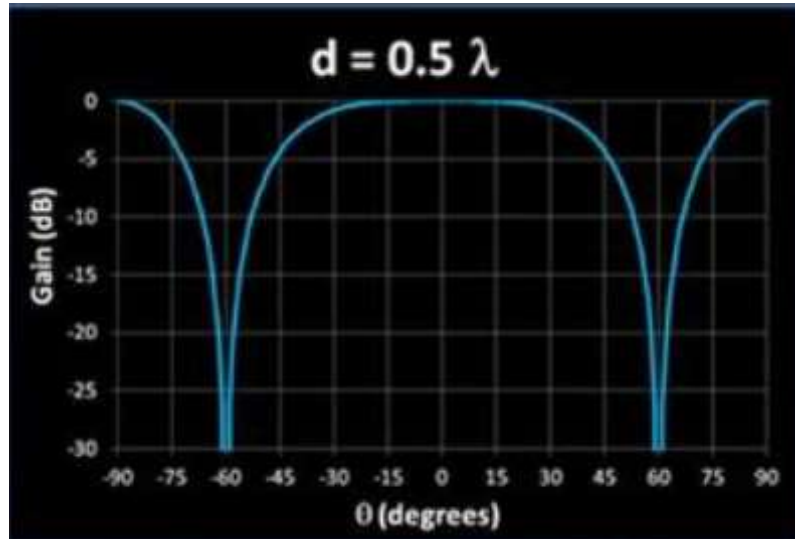
κατευθυντικότητα στον κύριο λοβό χωρίς να υπάρχουν πλευρικοί λοβοί ακτινοβολίας. Σημαντικά συμπεράσματα αντλούνται για το ρόλο που παίζει το μέγεθος της απόστασης d στο διάγραμμα ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας από την παραπάνω κανονικοποιημένη σχέση για διάφορες τιμές της απόστασης d . Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι απόλυτες τιμές που προκύπτουν από την παραπάνω κανονικοποιημένη σχέση.

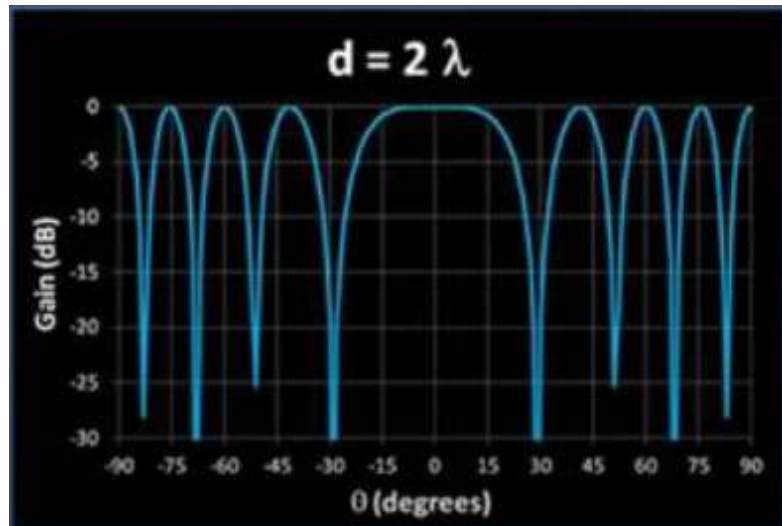
d	$E_{norm}, \varphi=0^\circ$	$E_{norm}, \varphi=60^\circ$	$E_{norm}, \varphi=90^\circ$
$\lambda/2$	0	0.7	1
$\lambda/10$	0.95	0.99	1
λ	1	0	1
$3\lambda/2$	0	0.7	1

Πίνακας 2 Υπολογισμός πεδίου ακτινοβολίας E συναρτήσει του φ και της απόστασης d δύο στοιχείων

Από τις τιμές του πίνακα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι για πολύ μικρή απόσταση d μεταξύ των κεραιών σε σχέση με το μήκος κύματος λ το διάγραμμα ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας έχει μηδενική κατευθυντικότητα ενώ όταν η απόσταση μεταξύ των κεραιών γίνει ίση με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας στενεύει πολύ ο κύριος λοβός αλλά αυξάνονται παρά πολύ οι πλευρικοί λοβοί. Όσο αυξάνουμε την απόσταση d οι πλευρικοί λοβοί αποκτούν σχεδόν ίδιο μέγεθος με τον κύριο λοβό και αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο προτιμάται οι στοιχειοκεραίες σε οποιαδήποτε διάταξη και αριθμό στοιχείων να έχουν απόσταση d μεταξύ τους ίση με το μισό μήκος κύματος λ της ακτινοβολίας.







Εικόνα 2.3 Μορφή λοβού ακτινοβολίας για διάφορες τιμές d μεταξύ δύο ακτινοβολητών

Για να συνεχιστεί η μελέτη για τις ειδικές περιπτώσεις στοιχειοκεραίας δύο στοιχείων αντικαθίστανται τα ιστροπικά στοιχεία με οριζόντια δίπολα. Δίπολα ονομάζουμε τις κεραίες που αποτελούνται από ένα ευθύγραμμο σύρμα με μήκος l πολύ μικρότερο από αυτό του μήκους κύματος ακτινοβολίας λ και έχουν κατευθυντικό κύριο λοβό ακτινοβολίας κάθετο ως προς αυτά όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα με κίτρινο χρώμα. Τα στοιχεία τροφοδοτούνται και πάλι με το ίδιο πλάτος και την ίδια φάση. Σε ένα οριζόντιο δίπολο η κανονικοποιημένη μορφή της εξίσωσης για το πεδίο ακτινοβολίας E είναι:

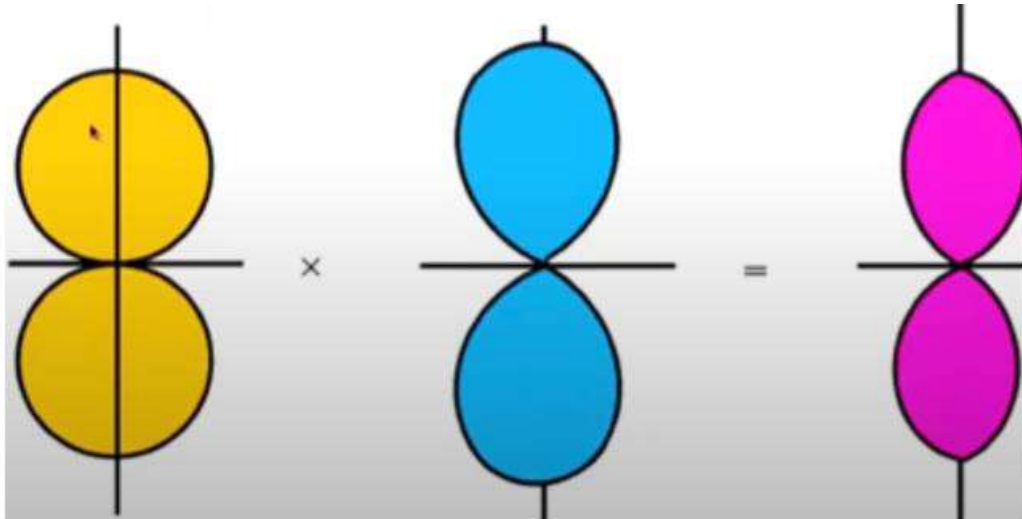
$$E_n = \sin\varphi$$

και ο παράγοντας συστοιχίας AF της νέας αυτής διάταξης είναι:

$$AF = \cos\left(\frac{\psi}{2}\right)$$

Ο παράγοντας συστοιχίας είναι συνάρτηση της γεωμετρίας της στοιχειοκεραίας και της φάσης διέγερσης των στοιχείων. Το ολικό πεδίο E της ακτινοβολίας μπορεί να υπολογιστεί μέσω του πολλαπλασιασμού του παράγοντα συστοιχίας με την κανονικοποιημένη μορφή της εξίσωσης του πεδίου ακτινοβολίας.

$$E = \sin\varphi \cos\left(\frac{\psi}{2}\right)$$

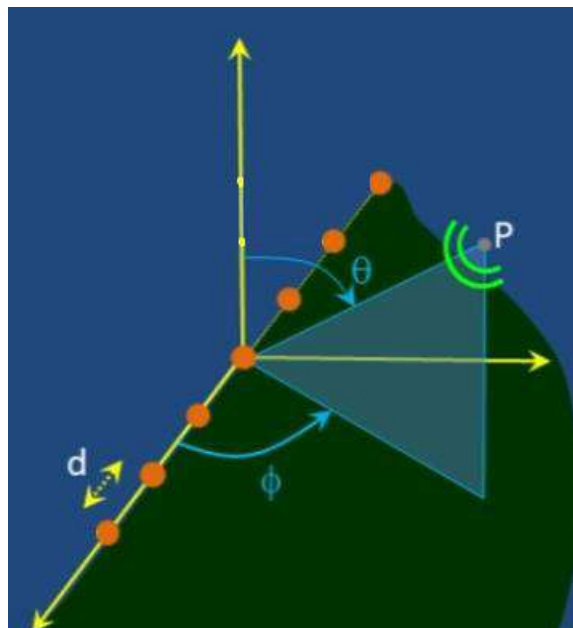


Εικόνα 2.4 Αποτέλεσμα διαγράμματος μεμονωμένου στοιχείου ακτινοβολίας πολλαπλασιασμένο με τον παράγοντα συστοιχίας

Στην παραπάνω εικόνα αναπαριστάται γραφικά ο πολλαπλασιασμός των παραπάνω σχέσεων. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε το τελικό πεδίο ακτινοβολίας E έχει μικρότερο εύρος ημισείας ισχύος αλλά υψηλότερη κατευθυντικότητα και κέρδος. Η διαδικασία που απεικονίζεται ονομάζεται πολλαπλασιασμός διαγραμμάτων για στοιχειοκεραίες όμοιων στοιχείων και ισχύει για στοιχειοκεραίες με οποιοδήποτε αριθμό όμοιων στοιχείων.

2.2 Στοιχειοκεραία N στοιχείων τοποθετημένα σε ευθεία γραμμή

Ας υποθέσουμε τώρα ότι η γεωμετρία του αρχικού σχήματος του κεφαλαίου αλλάζει και τοποθετούνται N σημειακές ιστροπικές πηγές, η μια δίπλα στην άλλη, σε ίσες



Εικόνα 2.5 Γεωμετρία μακρινού πεδίου για στοιχειοκεραία N στοιχείων

αποστάσεις d με την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχει σύζευξη μεταξύ των πηγών, τροφοδοτούνται όμοια και οι παρατηρήσεις για το διάγραμμα ακτινοβολίας γίνονται σε ένα τυχαίο σημείο P το οποίο ανήκει στο μακρινό πεδίο ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας.

Το ολικό πεδίο ακτινοβολίας E ως προς το απομακρυσμένο σημείο P ισούται με το άθροισμα των πεδίων του καθενός όποτε προκύπτει :

$$E = 1 + e^{j\psi} + e^{2j\psi} + \dots + e^{j(N-1)\psi} \Rightarrow$$

$$\text{αφού } E e^{j\psi} = e^{j\psi} + e^{2j\psi} + \dots + e^{jN\psi}$$

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

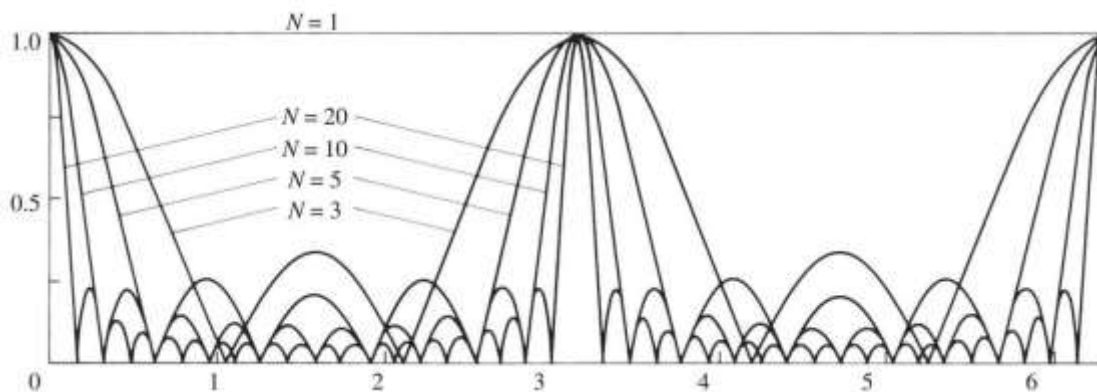
$$E = \frac{1 - e^{jN\psi}}{1 - e^{j\psi}} = \frac{\sin(N\psi/2)}{\sin(\psi/2)}$$

$$\text{όπου } \psi = \frac{2\pi d}{\lambda} \cos\varphi + \delta$$

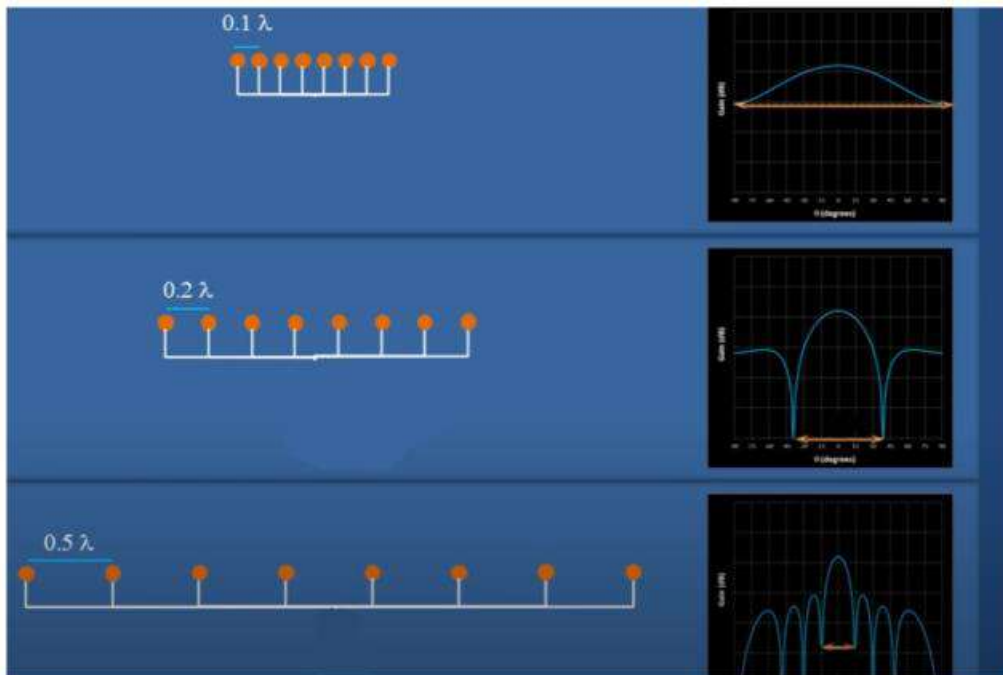
και δ η διαφορά φάσης μεταξύ των στοιχείων. Αν θεωρήσουμε ότι το ψ τείνει στο 0 ώστε η μέγιστη ακτινοβολία να καταγράφεται στις 90ο προκύπτει η κανονικοποιημένη έκφραση του πεδίου ακτινοβολίας E .

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

Όσο προστίθενται στοιχεία ακτινοβολίας στην δομή της στοιχειοκεραίας οι πλευρικοί λοβοί πολλαπλασιάζονται άλλα χαμηλώνει το επίπεδο τους και αυξάνεται η κατευθυντικότητα και το κέρδος στο διάγραμμα ακτινοβολίας της συστοιχιάς όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Σε σύνδεση με τα προηγούμενα ισχύει ότι μειώνοντας την απόσταση των στοιχείων σε τιμές μικρότερες του $\lambda/2$ μειώνεται η κατευθυντικότητα της στοιχειοκεραίας αλλά η τιμή του μέγιστου κέρδους εξαρτάται μόνο από τον αριθμό των στοιχείων που αποτελούν την στοιχειοκεραία.



Εικόνα 2.6 Καμπύλες της συνάρτησης



Εικόνα 2.7 Μορφή λοβού ακτινοβολίας για διάφορες τιμές d μεταξύ N ακτινοβολητών

2.2.1 Ειδικές περιπτώσεις στοιχειοκεραίας N στοιχείων τοποθετημένα σε ευθεία γραμμή

Έστω $N=4$ σημειακές πηγές ισοτροπικής ακτινοβολίας τοποθετημένες σε ευθεία γραμμή με απόσταση d ίση με $\lambda/2$ χωρίς να υπάρχει σύζευξη μεταξύ τους. Ισχύει ότι όλες οι πηγές τροφοδοτούνται χωρίς να υπάρχει διαφορά φάσης δ μεταξύ των στοιχείων. Οπότε έχουμε:

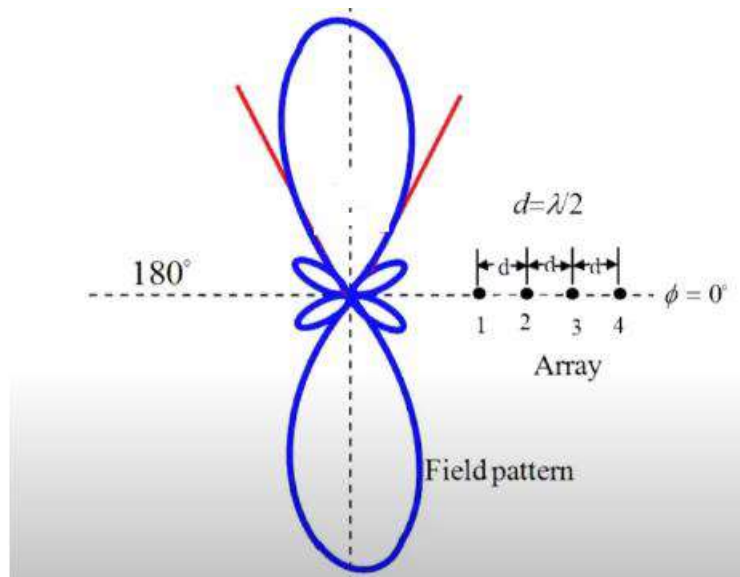
$$\delta=0, \delta=\frac{\lambda}{2}, N=4 \Rightarrow$$

$$\psi = \pi \cos \varphi$$

$$E_n = \frac{\sin(2\psi)}{4\sin(\psi/2)}$$

Αν τοποθετήσουμε διάφορες τιμές για τη γωνία φ όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα λαμβάνουμε το παρακάτω διάγραμμα ακτινοβολίας της συστοιχίας.

φ	ψ	E
0°	π	0
60°	$\pi/2$	0
90°	0	1



Εικόνα 2.8 Διάγραμμα ακτινοβολίας 180ο συστοιχίας 4 στοιχείων εν σειρά

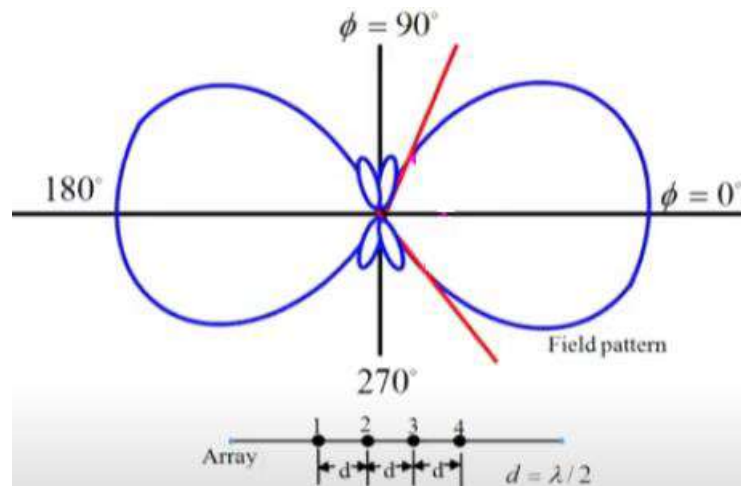
Όπως φαίνεται όπου μηδενίζεται το ψ η ακτινοβολία παίρνει τη μέγιστη τιμή της και το εύρος ζώνης πρώτου μηδενισμού BWFN είναι στις 60° .

Αν χρησιμοποιήσουμε την ίδια στοιχειοκεραία αλλάζοντας την τιμή του d και του ϕ η μέγιστη ακτινοβολία αντί να βρίσκεται στις 90° να μετακινηθεί στις 180° . Η εξίσωση που αφορά το E_n παραμένει ίδια καθώς ο αριθμός των στοιχείων δεν αλλάζει, θεωρείτε διαφορά φάσης μεταξύ των στοιχείων d ίση με $-\pi$ και ισχύει:

$$\psi = \pi(\cos\phi - 1)$$

Αν χρησιμοποιήσουμε διάφορες τιμές για τη γωνία ϕ όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα παίρνουμε το αντίστοιχο διάγραμμα ακτινοβολίας.

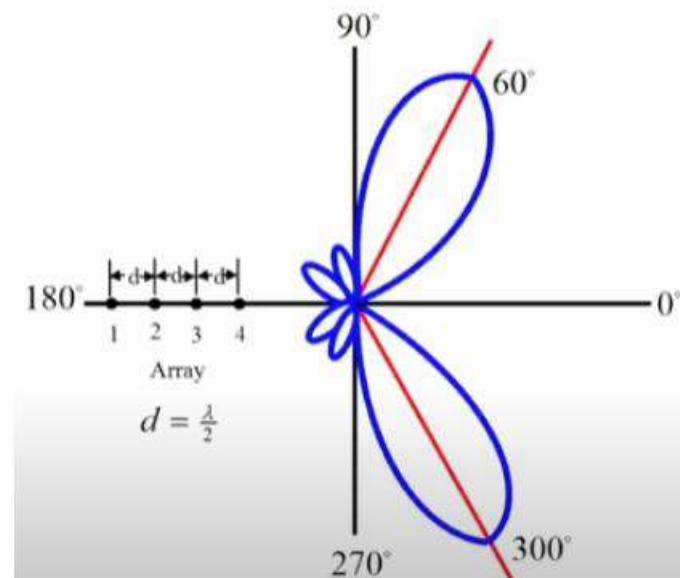
ϕ	ψ	E
0°	0	1
60°	$-\pi/2$	0
90°	π	0



Εικόνα 2.9 Διάγραμμα ευρύπλευρης ακτινοβολίας 4 στοιχείων εν σειρά

Ομοίως με την προηγούμενη περίπτωση όπου μηδενίζεται το ψ η ακτινοβολία παίρνει τη μέγιστη τιμή της και το εύρος ζώνης πρώτου μηδενισμού BWFN είναι στις 120° .

Συνεχίζοντας με την ίδια διάταξη ο κύριος λοβός μπορεί να στρίψει σε οποιαδήποτε κατεύθυνση στις δυο διαστάσεις του χώρου x-y (beam steering). Αν υποθέσουμε ότι η μέγιστη ακτινοβολία χρειάζεται να εμφανίζεται στις 60° θα πρέπει σύμφωνα με τα παραπάνω το ψ να είναι 0 για την γωνία ϕ των 60° άρα θα πρέπει μεταξύ των στοιχείων να υπάρχει διαφορά φάσης δ ίση με $-\pi/2$.



Εικόνα 2.10 Διάγραμμα ακτινοβολίας 60° συστοιχίας 4 στοιχείων εν σειρά

Η προοδευτική ολίσθηση φάσης δ μεταξύ των στοιχείων κατά την τροφοδοσία της στοιχειοκεραίας επιτυγχάνεται με διάφορους τρόπους. Ένας από αυτούς είναι οι phase shifters και η λειτουργία αλλά και η τοποθέτηση τους αναλύεται παρακάτω κατά την εξέταση του κυκλώματος τροφοδοσίας της στοιχειοκεραίας.

Μια στοιχειοκεραία που αποτελείται από όμοια στοιχεία σε γραμμική διάταξη με ίδιο μέτρο τροφοδοσίας για κάθε στοιχείο αλλά με προοδευτική διαφορά φάσης μεταξύ των στοιχείων έχει τον ακόλουθο παράγοντα συστοιχίας ο οποίος υπολογίζεται θεωρώντας τα στοιχεία ως σημειακές πηγές.

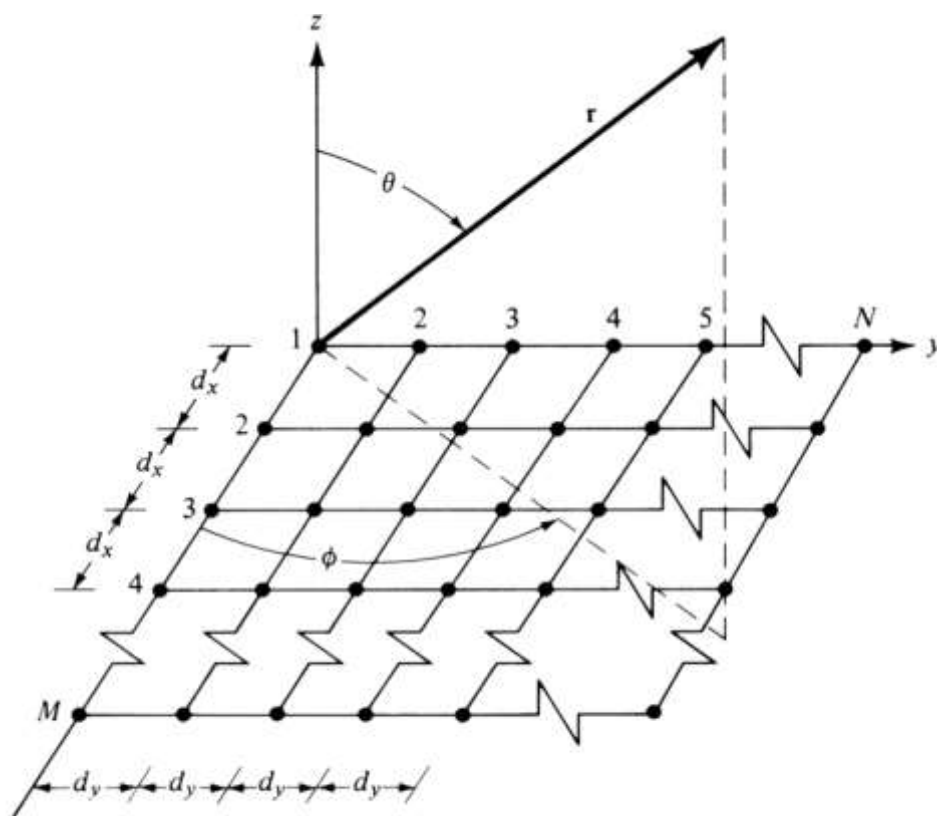
$$AF = \left| \frac{\sin \frac{N\psi}{2}}{N \sin \frac{\psi}{2}} \right|$$

Το ολικό πεδίο E της ακτινοβολίας για οποιαδήποτε γραμμική ομοιομερή στοιχειοκεραία μπορεί να υπολογιστεί πολλαπλασιάζοντας τον παράγοντα συστοιχίας με την κανονικοποιημένη μορφή της εξίσωσης του πεδίου ακτινοβολίας.

2.3 Επιπεδική Στοιχειοκεραία $N \times M$ στοιχείων

Για να δημιουργήσουμε μια επιπεδική στοιχειοκεραία τοποθετούμε τα στοιχεία της σε μορφή πλέγματος όπως στην παρακάτω εικόνα. Η συγκεκριμένη διάταξη μας δίνει το πλεονέκτημα της μετακίνησης του λοβού ακτινοβολίας όχι μόνο στις 2 διαστάσεις x και y αλλά σε οποιοδήποτε σημείο στο χώρο.

Αν θεωρήσουμε και πάλι τις πηγές σημειακές και ισοτροπικές δεδομένου ότι υπάρχει απομόνωση μεταξύ των κατά ίσο μέτρο τροφοδοτημένων ακτινοβολητών πολύ εύκολα μπορεί να υπολογιστεί άμεσα ο παράγοντας συστοιχίας μιας στοιχειοκεραίας με



Εικόνα 2.11 Γεωμετρία επιπεδικής στοιχειοκεραίας

την παραπάνω μορφή. Κατά τον άξονα x υπάρχουν M στοιχεία και κατά τον άξονα y υπάρχουν N στοιχεία οπότε η νέα κανονικοποιημένη σχέση που προκύπτει είναι:

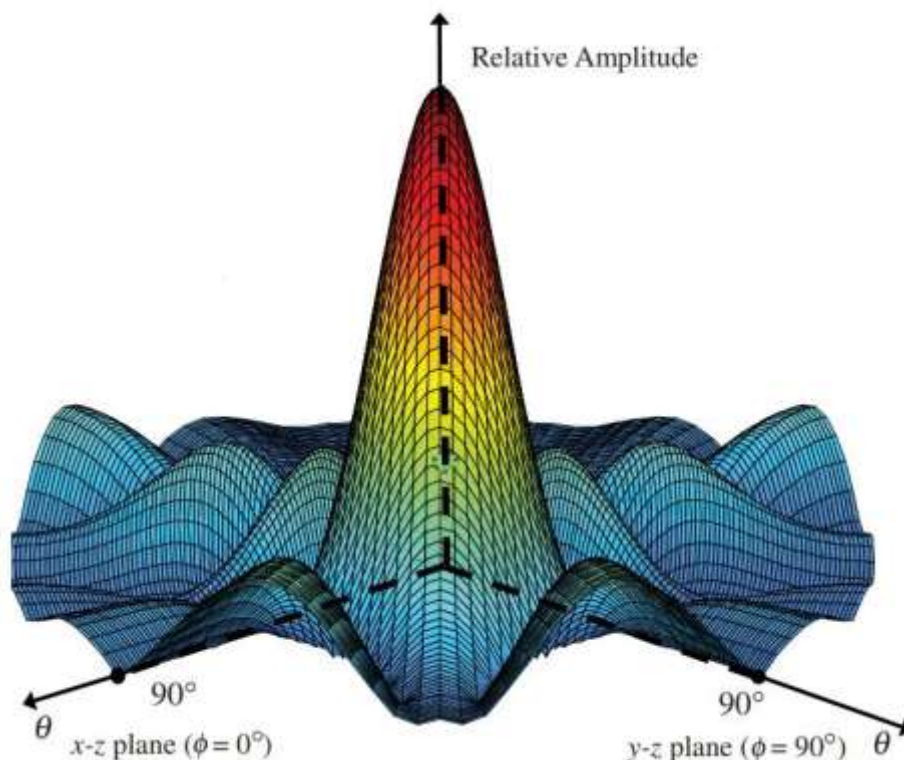
$$AFn(\theta, \varphi) = \left[\frac{1}{M} \frac{\sin\left(\frac{M}{2}\psi_x\right)}{\sin\left(\frac{\psi_x}{2}\right)} \right] \left[\frac{1}{N} \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi_y\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y}{2}\right)} \right]$$

όπου ψ_x και ψ_y ισούνται με

$$\psi_x = \frac{2\pi}{\lambda} d_x \sin\theta \cos\varphi + \beta_x$$

$$\psi_y = \frac{2\pi}{\lambda} d_y \sin\theta \sin\varphi + \beta_y$$

Και σε αυτή τη διάταξη για να αποφευχθεί η δημιουργία οχληρών λοβών, δηλαδή λοβών που δεν είναι κύριοι, θα πρέπει, όσον αφορά την απόσταση μεταξύ των στοιχείων, το d να ισούται με $\lambda/2$. Η προοδευτική διάφορα φάσης β_y μεταξύ των στοιχείων που ανήκουν στην ίδια γραμμή με την προοδευτική διάφορα φάσης β_x μεταξύ των στοιχείων που ανήκουν στην ίδια στήλη είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους αλλά για να υπάρχει μόνο μια κύρια δέσμη κατά την επιθυμητή κατεύθυνση θα πρέπει οι γωνίες φ και θ να είναι οι ίδιες στις παραπάνω σχέσεις. Εάν δεν υπάρχει προοδευτική διαφορά φάσης άρα β_x ισούται με β_y ο κύριος λοβός ακτινοβολίας εμφανίζεται στο φ ίσον με θ ίσον με 0 όπως φαίνεται στην εικόνα παρακάτω.



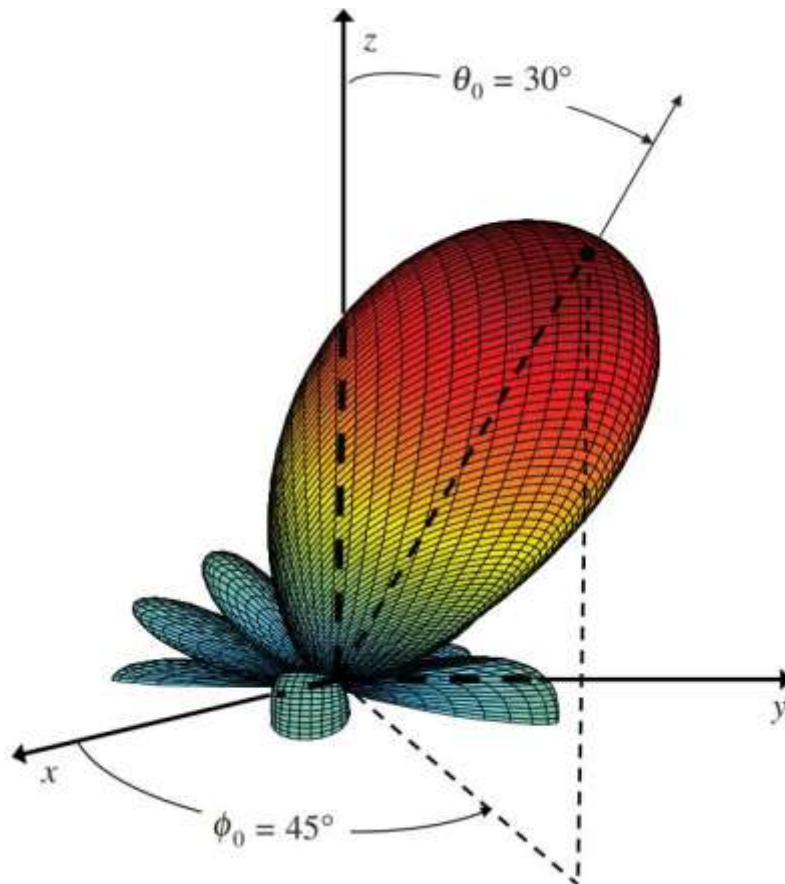
Εικόνα 2.12 Τρισδιάστατο διάγραμμα επιπεδικής στοιχειοκεραίας ισοτροπικών στοιχείων σε απόσταση $dx=dy=\lambda/2$ με διέγερση ίσου πλάτους

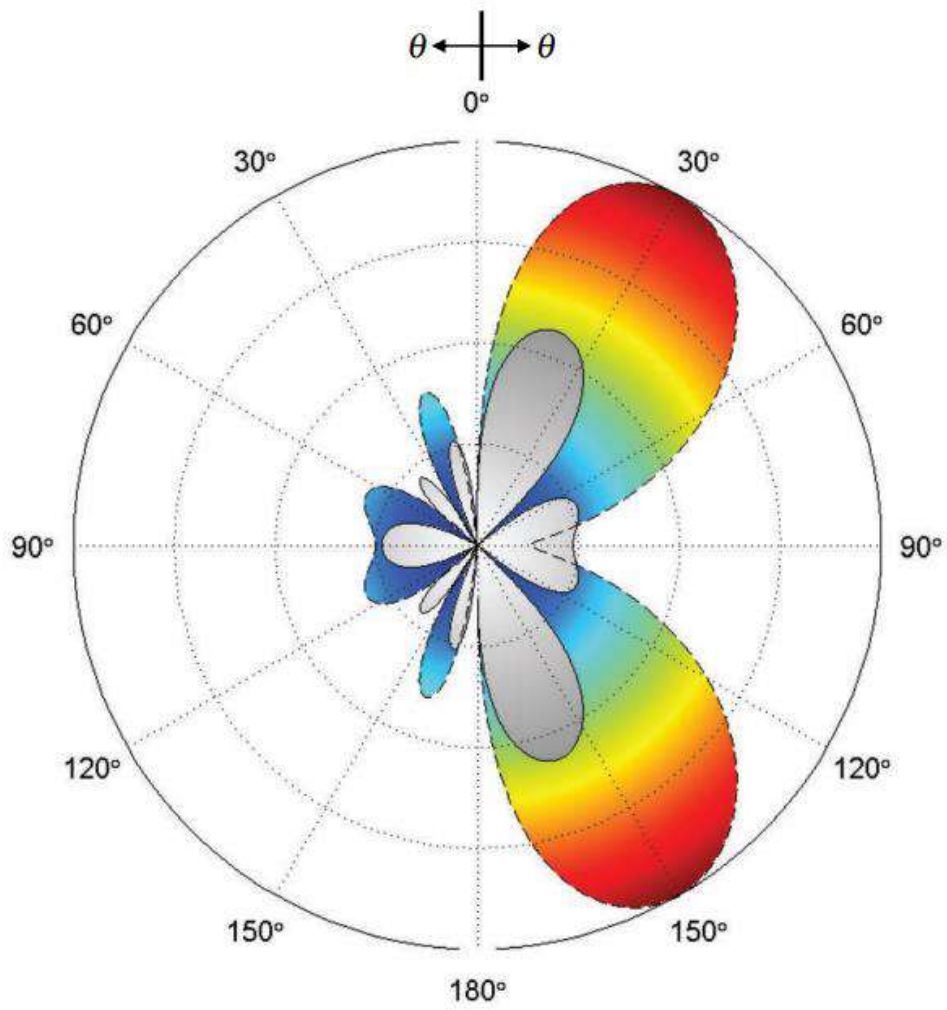
Έστω ότι πρέπει να τροφοδοτηθούν τα στοιχεία της ορθογώνιας δομής με $d=\lambda/2$ έτσι ώστε ο κύριος λοβός ακτινοβολίας να είναι στραμμένος στο $\theta=30^\circ$ και $\phi=45^\circ$ τότε υπολογίζονται τα β_y και β_x από τις παραπάνω σχέσεις θεωρώντας ψ_x και ψ_y ίσον με το 0.

$$\beta_x = -\frac{2\pi}{\lambda} d_x \sin\theta \cos\phi = -\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\lambda}{2} \sin 30 \cos 45 = \frac{-\pi}{2\sqrt{2}}$$

$$\beta_y = -\frac{2\pi}{\lambda} d_y \sin\theta \sin\phi = -\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\lambda}{2} \sin 30 \sin 45 = \frac{-\pi}{2\sqrt{2}}$$

Στο τελικό διάγραμμα ακτινοβολίας, για να έχουμε έναν κύριο λοβό ή και δυο μειωμένους σε κατευθυντικότητα, πρέπει να χρησιμοποιηθούν οι προοδευτικές διαφορές φάσης. Στην πρώτη περίπτωση η προοδευτική ολίσθηση φάση τροφοδοσίας μεταξύ των στοιχείων που ανήκουν στις ίδιες γραμμές ορίζεται ώστε να ισχύουν οι ακολουθίες $(0, \beta_x, 2\beta_x, (M-1)\beta_x)$ και $(0, \beta_y, 2\beta_y, (N-1)\beta_y)$. Ενώ στην δεύτερη περίπτωση η προοδευτική ολίσθηση φάση τροφοδοσίας μεταξύ των στοιχείων που ανήκουν στις ίδιες γραμμές μπορεί να ορίζεται με διάφορους τρόπους όπως $(0, \beta_x, 0, \beta_x)$ για $M-1$ φορές και $(0, \beta_y, 0, \beta_y)$ για $N-1$ φορές.





Εικόνα 2.13 Τρισδιάστατο και δυσδιάστατο διάγραμμα επιπεδικής στοιχειοκεραίας ισοτροπικών στοιχείων σε απόσταση $dx=dy=\lambda/2$ με διέγερση ίσου πλάτους και προοδευτική ολίσθηση φάσης

Ο υπολογισμός της φάσης τροφοδοσίας ώστε αυτή να διαφέρει προοδευτικά μεταξύ των $N \times M$ στοιχείων υπολογίζεται ανεξάρτητα από τον αριθμό των στοιχείων της στοιχειοκεραίας ωστόσο οι τρεις παραπάνω εικόνες δείχνουν τα διαγράμματα ακτινοβολίας στοιχειοκεραίας με ίδιο αριθμό στοιχείων. Αυτό που παρατηρείτε είναι πως η στροφή του κύριου λοβού μειώνει την κατευθυντικότητα του είτε αυτός είναι ένας ή πόσο μάλλον και περισσότεροι αφού αυξάνεται η γωνιά μισής ισχύος.

3 5G

3.1 Ιστορική αναδρομή

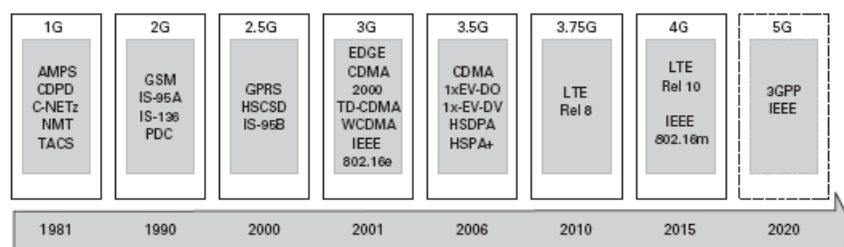
Οι ασύρματες επικοινωνίες έχουν προχωρήσει πολύ τα τελευταία 40 χρόνια. Τη δεκαετία του 1950 και τη δεκαετία του '60, αναπτύχθηκε το πρώτο εμπορικό σύστημα αναλογικών κινητών επικοινωνιών με χαμηλή διείσδυση.

Δίκτυα 1ης Γενιάς (1G)

Τα πρότυπα κινητής τηλεφωνίας πρώτης γενιάς αναπτύχθηκαν το 1981 και ονομάζονται αναλογικά πρότυπα. Το 1G είναι η πρώτη γενιά ασύρματης κυβελοειδούς τεχνολογίας και υποστηρίζει μόνο κλήσεις φωνής. Το 1G συγκαταλέγεται στην αναλογική τεχνολογία και τα τηλέφωνα που το χρησιμοποιούσαν είχαν μικρή διάρκεια ζωής της μπαταρίας και κακή ποιότητα φωνής, ελάχιστη ασφάλεια και ήταν επιρρεπείς σε πτώσεις κλήσεων. Η μέγιστη ταχύτητα της τεχνολογίας 1G είναι 2,4 Kbps.

Δίκτυα 2ης Γενιάς (2G, 2.5G, 2.75G)

Το 1991 αναπτύχθηκε διεθνώς το Παγκόσμιο Σύστημα 2ης Γενιάς (2G) για κινητές επικοινωνίες (GSM), το οποίο εισήγαγε κρυπτογράφηση κλήσεων και κειμένου, καθώς και υπηρεσίες δεδομένων όπως SMS, εικονομηνύματα και MMS. Τα δίκτυα αυτά παρείχαν βελτίωση στην ποιότητα της φωνής και τη χωρητικότητα του δικτύου. Πριν τη μετάβαση από τα 2G στα 3G, εμφανίστηκαν τα πρότυπα 2.5G και 2.75G, τα οποία δεν ορίστηκαν επίσημα ως ασύρματα πρότυπα. Το 2.5G εισήγαγε μια νέα τεχνική μεταγωγής πακέτων που ήταν αποδοτικότερη από την τεχνολογία 2G. Αυτό οδήγησε στο 2.75G, που έδωσε μια θεωρητική τριπλασιασμό της ταχύτητας. Τα 2.5G και 2.75G χρησίμευσαν κυρίως ως εργαλεία μάρκετινγκ για την προώθηση νέων χαρακτηριστικών κινητών τηλεφώνων στο κοινό.



Εικόνα 3.1 Εξέλιξη των ασύρματων δικτύων

Δίκτυα 3ης Γενιάς (3G, 3.5G, 3.75G)

Η εισαγωγή των δικτύων 3G το 1998 επέφερε αυξημένες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, επιτρέποντας τη χρήση του κινητού τηλεφώνου για πιο απαιτητικές εφαρμογές, όπως κλήσεις βίντεο και πρόσβαση στο διαδίκτυο μέσω κινητής σύνδεσης. Ο όρος "mobile broadband" εισήχθη για πρώτη φορά με την τεχνολογία 3G. Όπως και στην περίπτωση του 2G, το 3G εξελίχθηκε σε πιο γρήγορα πρότυπα όπως το 3.5G και

το 3.75G, ενώ επιπλέον χαρακτηριστικά εισήχθησαν για τη μετάβαση στο 4G. Η μέγιστη ταχύτητα που προσφέρει το 3G εκτιμάται ότι φτάνει περίπου τα 2Mbps για στατικές συσκευές και 384 Kbps για κινούμενα οχήματα.

Δίκτυα 4ης Γενιάς (4G)

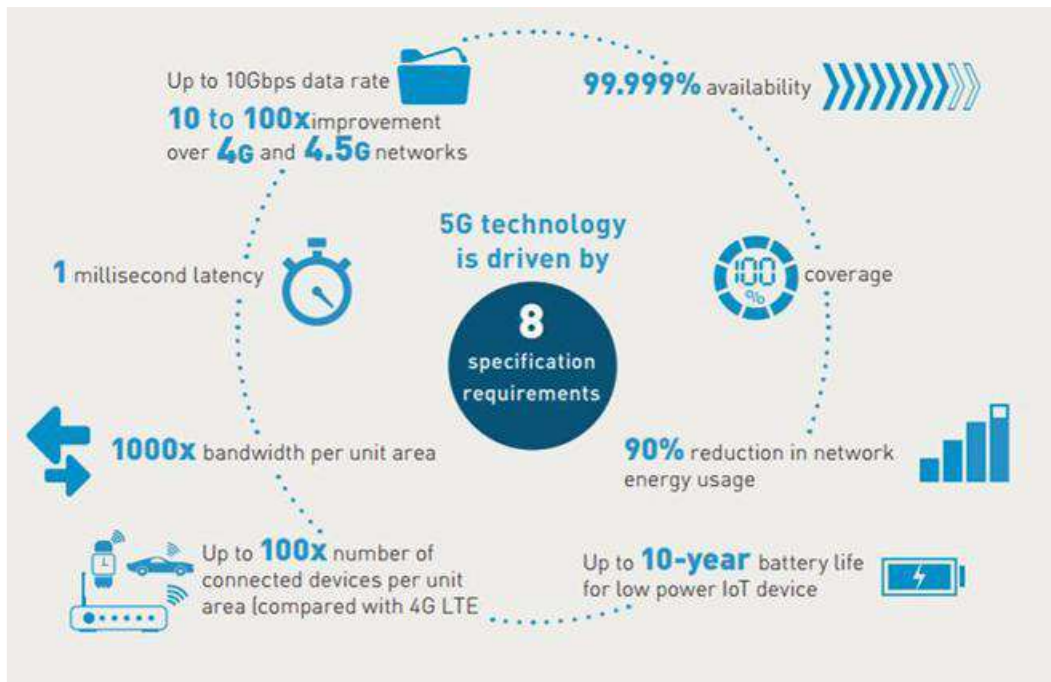
Το 4G, η τέταρτη γενιά δικτύωσης που κυκλοφόρησε το 2008, επιτρέπει την πρόσβαση στο διαδίκτυο όπως το 3G, αλλά και υποστηρίζει υπηρεσίες όπως τα παιχνίδια σε κινητές συσκευές, την HD mobile TV, τις τηλεδιασκέψεις, την 3D TV και άλλα χαρακτηριστικά που απαιτούν υψηλές ταχύτητες. Η μέγιστη ταχύτητα ενός δικτύου 4G όταν η συσκευή κινείται είναι 100 Mbps. Σε περιβάλλοντα χαμηλής κινητικότητας, όπως όταν ο χρήστης είναι ακίνητος ή περπατάει, η ταχύτητα αυξάνεται στα 1 Gbps. Τα περισσότερα μοντέλα κινητών τηλεφώνων υποστηρίζουν ταυτόχρονα τεχνολογίες 4G και 3G.

Δίκτυα 5ης Γενιάς (5G)

Έως το 2015, τα δίκτυα 4G είχαν εγκατασταθεί σε ολόκληρο τον κόσμο. Ωστόσο, η ζήτηση για ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων στην τάξη των πολλών Gbps αυξάνεται λόγω της αύξησης της κυκλοφορίας βίντεο και της ροής υψηλής ευκρίνειας. Αυτό οδηγεί στην εισαγωγή του δικτύου 5ης γενιάς, γνωστού ως 5G. Η ανάπτυξη των συστημάτων τηλεπικοινωνίας 5G αναμένεται να εφαρμοστεί κατά προσέγγιση σύμφωνα με το προγραμματισμό που έχει οριστεί για τις αρχές του 2020. Η χρονιά αυτή αποτελεί ένα σημαντικό ορόσημο στην ασύρματη επικοινωνία, καθώς το 5G φέρνει νέες κεραιές, νέες συσκευές και νέες εφαρμογές για τις ασύρματες επικοινωνίες.

3.2 Τα Δίκτυα 5ης Γενιάς (5G)

Οι προσδοκίες για το δίκτυο 5ης γενιάς (5G) περιλαμβάνουν τη μαζική χρήση της τεχνολογίας Massive MIMO, την πλήρη αμφίδρομη επικοινωνία (full duplexing), τις επικοινωνίες συσκευής με συσκευή (device-to-device communications), την προσωρινή αποθήκευση (caching) και τις επικοινωνίες χιλιοστομετρικών κυμάτων (mmWave). Η έννοια της ενσωμάτωσης προηγμένων δομικών στοιχείων είναι ο κυρίαρχος παράγοντας για την επιτυχία του 5G. Η εξέλιξη των υπάρχοντων δικτύων δεν είναι αρκετή για την αντιμετώπιση των απαιτητικών προκλήσεων, αλλά απαιτούνται επαναστατικές αλλαγές τόσο στο δίκτυο ασύρματης πρόσβασης (radio access network) όσο και στον κεντρικό πυρήνα (core network). Όπως και τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 2G, 3G και 4G των προηγούμενων γενιάς, τα δίκτυα 5G είναι ψηφιακά κυψελοειδή, όπου η περιοχή κάλυψης χωρίζεται σε μικρές γεωγραφικές περιοχές που ονομάζονται κυψέλες. Όλες οι ασύρματες συσκευές 5G σε μια κυψέλη επικοινωνούν μέσω ραδιοκυμάτων με μια τοπική συστοιχία κεραιών και έναν αυτοματοποιημένο πομποδέκτη χαμηλής ισχύος, εκμεταλλευόμενα τη συχνότητα καναλιών που εκχωρείται από μια κοινή βάση συχνοτήτων. Οι τοπικές κεραιές συνδέονται με το δίκτυο τηλεπικοινωνιών και το Διαδίκτυο μέσω οπτικών ινών υψηλής εύρους ζώνης ή ασύρματης σύνδεσης οπισθόγεμης (backhaul). Όταν ένας χρήστης μετακινείται από μια κυψέλη σε μια άλλη, η κινητή συσκευή του μεταβαίνει αυτόματα στην κεραιά της νέας κυψέλης. Τα κύρια πλεονεκτήματα των δικτύων 5G είναι οι πολύ υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων, έως και 10 Gbps, που είναι ταχύτεροι από το τρέχον καλωδιακό διαδίκτυο και 100 φορές ταχύτεροι από την προηγούμενη τεχνολογία 4G LTE. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι η μικρότερη καθυστέρηση του δικτύου, κάτω από 1 ms, σε σύγκριση με 30 - 70 ms στο 4G.



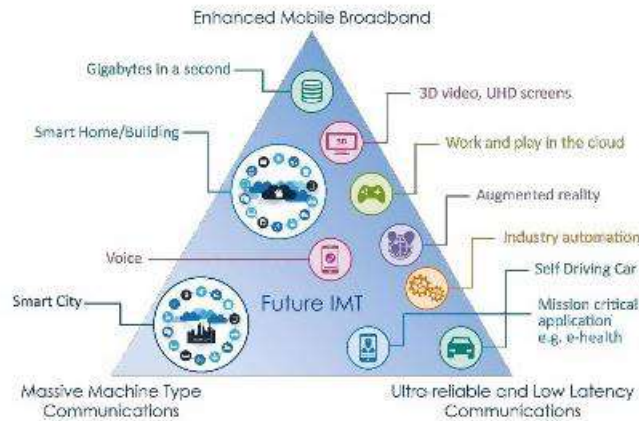
Εικόνα 3.2 Δυνατότητες των δικτύων 5ης γενιάς (5G)

Λόγω των υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης δεδομένων, τα δίκτυα 5G προορίζονται να λειτουργήσουν όχι μόνο ως κινητά τηλέφωνα, αλλά επίσης ως γενικοί πάροχοι οικιακής δικτύωσης και δικτύωσης γραφείου, ανταγωνιζόμενοι με τους ενσύρματους παρόχους όπως το καλώδιο. Τα προηγούμενα κυψελοειδή δίκτυα παρείχαν χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης πρόσβασης στο διαδίκτυο, κατάλληλους για κινητά τηλέφωνα, αλλά ένας κυψελωτός πύργος δεν μπορούσε να παρέχει αρκετό εύρος ζώνης για να λειτουργήσει ως γενικός πάροχος διαδικτύου για οικιακούς υπολογιστές.

Τα δίκτυα 5G επιτυγχάνουν αυτούς τους υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων χρησιμοποιώντας ραδιοκύματα υψηλότερης συχνότητας στη ζώνη χιλιοστομετρικών κυμάτων από 30 έως 300 GHz, ενώ τα προηγούμενα κυψελοειδή δίκτυα χρησιμοποιούν συχνότητες στη ζώνη μικροκυμάτων μεταξύ 700 MHz και 3 GHz. Μια δεύτερη χαμηλότερη περιοχή συχνοτήτων στη ζώνη μικροκυμάτων, κάτω από 6 GHz, θα χρησιμοποιηθεί από μερικούς παρόχους 5G, αλλά αυτό δεν θα έχει τις υψηλές ταχύτητες των νέων συχνοτήτων. Λόγω του μεγαλύτερου εύρους ζώνης σε συχνότητες χιλιοστομετρικών κυμάτων, τα δίκτυα 5G θα χρησιμοποιούν ευρύτερα συχνοτικά κανάλια, μέχρι 400 MHz, για επικοινωνία με την ασύρματη συσκευή, σε σύγκριση με 20 MHz στο 4G LTE. Έτσι μπορούν να μεταδίδουν περισσότερα δεδομένα (bits) ανά δευτερόλεπτο. Χρησιμοποιείται διαμόρφωση OFDM (orthogonal frequency division multiplexing), στην οποία μεταδίδονται πολλαπλά φέροντα κύματα στη συχνότητα καναλιού, έτσι ώστε να μεταφέρονται παράλληλα πολλαπλά bits πληροφορίας ταυτόχρονα.

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζονται κάποιες από τις αναμενόμενες μελλοντικές χρήσεις του 5G σύμφωνα με την ITU.

5G Usage scenarios



Εικόνα 3.3 Βασικές εφαρμογές του 5G

Η προηγμένη τεχνολογία 5G έχει τη δυνατότητα να παρέχει ευρεία κάλυψη και διαθεσιμότητα, αυξημένη πυκνότητα δικτύου, βελτιωμένη σύνδεση για υπηρεσίες Machine to Machine (M2M) και Internet of Things (IoT), και νέες συνδέσεις Device to Device (D2D), καθώς επίσης και μειωμένες απαιτήσεις ενέργειας. Γενικά, η τεχνολογία 5G προσφέρει:

- Εκπλήρωση των αναγκών της κοινωνίας για αυξημένο όγκο πληροφοριών και εφαρμογών στην καθημερινή ζωή.
- Εξάλειψη του προβλήματος της χωρητικότητας που παρατηρείται ήδη στα υπάρχοντα συστήματα 4G LTE.
- Ανάπτυξη της βιομηχανίας μέσω της ψηφιοποίησης πολλών τομέων.
- Μαζική σύνδεση μηχανών, ενισχύοντας την επικοινωνία των συσκευών μεταξύ τους.
- Δημιουργία νέων ζωνών φάσματος.
- Ενσωμάτωση λειτουργιών κινητικότητας και ασφάλειας στο δίκτυο.

3.3 Τεχνολογίες του 5G

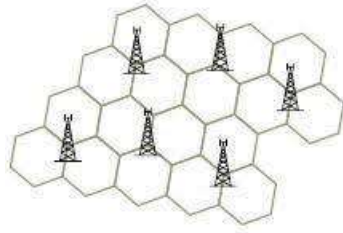
Καθώς ο αριθμός των χρηστών κινητής τηλεφωνίας και η ζήτηση για δεδομένα αυξάνονται, η τεχνολογία 5G πρέπει να αντιμετωπίσει πολύ μεγαλύτερη επισκευσιμότητα σε πολύ υψηλότερες ταχύτητες από τους σταθμούς βάσης που αποτελούν τα σημερινά κυψελοειδή δίκτυα κινητής τηλεφωνίας.

Για να επιτευχθεί αυτό, οι μηχανικοί αναπτύσσουν μια σειρά από ολοκαίνουργιες τεχνολογίες. Αυτές οι τεχνολογίες θα παρέχουν δεδομένα με πολύ μικρότερη καθυστέρηση από 1 ms (σε σύγκριση με περίπου 30-70 ms στα σημερινά δίκτυα 4G) και θα προσφέρουν στους χρήστες μέγιστες ταχύτητες λήψης 20 gigabits ανά δευτερόλεπτο (σε σύγκριση με 1 Gb/s στο 4G).

Οι τεχνολογίες αυτές περιλαμβάνουν:

- Χρήση χιλιοστομετρικών κυμάτων (mmWaves)
- Εφαρμογή small cells
- Χρήση massive MIMO
- Υιοθέτηση πλήρους διπλής (full duplex)
- Χρήση τεχνικής beamforming

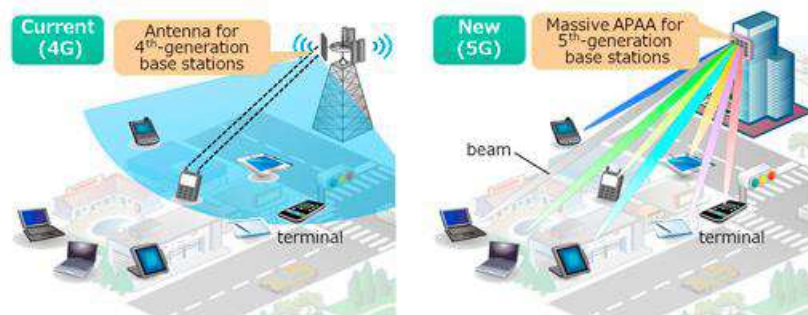
Προτού αναλύσουμε αυτές τις τεχνολογίες, είναι σημαντικό να ορίσουμε την Έξοδο Δικτύου (Network Throughput), ένα κλειδί για την καλύτερη κατανόηση του θέματος.



Εικόνα 3.4 Πρώτη μορφή κυψελωτού δικτύου

Ο δεύτερος παράγοντας αφορά το διαθέσιμο εύρος ζώνης (bandwidth). Η ανάγκη για εκμετάλλευση μικροκυματικών συχνοτήτων προκύπτει επειδή οι υπάρχουσες μάντες συχνοτήτων έχουν ήδη φτάσει σε κορεσμό. Επίσης, όσο αυξάνεται η συχνότητα, τόσο πιο γρήγορα παρατηρείται απόσβεση στον ελεύθερο χώρο, επιτρέποντας την τοποθέτηση των σταθμών βάσης σε πιο κοντινή απόσταση και επιτρέποντας έτσι περισσότερους σταθμούς βάσης για επιπλέον βελτίωση της πυκνότητας των κυψελών. Η προσπάθεια για την ανάπτυξη της νέας τεχνολογίας 5G συνδέεται στενά με αυτόν τον παράγοντα.

Ο τρίτος παράγοντας, δηλαδή η φασματική απόδοση και οι τρόποι βελτίωσής της, συνδέεται αναπόσπαστα με την τεχνολογία που χρησιμοποιείται στο σύστημα. Μελετήθηκε πώς ο αριθμός των κεραιών τόσο στον πομπό όσο και στο δέκτη μπορεί να επηρεάσει τη φασματική απόδοση. Η ιδέα να τοποθετηθούν περισσότερες κεραιές προέκυψε από την αύξηση της κατευθυντικότητας. Για να ανταποκριθούμε στις σημερινές ανάγκες, σχεδιάζουμε συστήματα massive MIMO με 100 ή 200 κεραιές που καλύπτουν τις ανάγκες πλήθους χρηστών κατά πολύ μεγαλύτερο βαθμό, για παράδειγμα, 20 χρήστες.



Εικόνα 3.5 Σύγκριση της τεχνικής MIMO σε δίκτυο 4G και 5G

Στη συνέχεια για να γίνει κατανοητό πώς το 5G θα διαφέρει από τα σημερινά 4G δίκτυα, είναι χρήσιμο να αναλύσουμε μία προς μία τις πέντε παραπάνω τεχνολογίες και να εξετάσουμε τη σημασία της καθεμιάς για τους ασύρματους χρήστες.

3.3.1 Χιλιστομετρικά Κύματα (Millimeter Waves)

Τα υπάρχοντα ασύρματα δίκτυα αντιμετωπίζουν πρόβλημα. Μεγαλύτερος αριθμός ανθρώπων και συσκευών ανταλλάσσουν περισσότερα δεδομένα από ποτέ, αλλά παραμένουν στις ίδιες ζώνες συχνοτήτων που χρησιμοποιούνταν πάντα από τους παρόχους κινητής τηλεφωνίας. Αυτό οδηγεί σε μικρότερο εύρος ζώνης για όλους, προκαλώντας αργή εξυπηρέτηση και περισσότερες αποσυνδέσεις.

Ένας τρόπος αντιμετώπισης αυτού του προβλήματος είναι η μετάδοση σήματος σε μια εντελώς νέα ζώνη συχνοτήτων που δεν έχει χρησιμοποιηθεί ποτέ για κινητή υπηρεσία. Αυτό είναι ο λόγος για τον οποίο οι πάροχοι πειραματίζονται με τη μετάδοση

σε mmWaves, οι οποίες χρησιμοποιούν υψηλότερες συχνότητες από τα ραδιοκύματα που χρησιμοποιούνται εδώ και πολύ καιρό για κινητά τηλέφωνα.

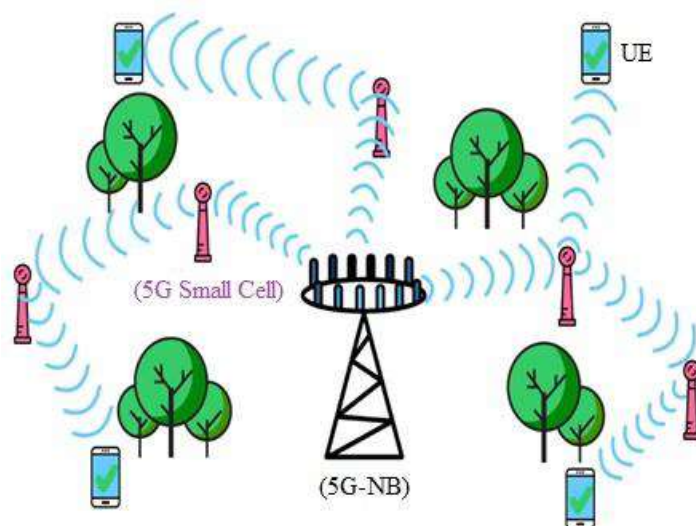
Οι mmWaves μεταδίδονται σε συχνότητες μεταξύ 30 και 300 GHz, σε σύγκριση με τις ζώνες κάτω των 6 GHz που χρησιμοποιούνται για κινητές συσκευές στο παρελθόν. Ονομάζονται mmWaves επειδή ποικίλουν σε μήκος από 1 έως 10 mm, σε σύγκριση με τα ραδιοκύματα που εξυπηρετούν τα σημερινά smartphones, τα οποία έχουν δεκάδες εκατοστά μήκος.

Μέχρι στιγμής, οι mmWaves χρησιμοποιούνταν μόνο σε δορυφόρους και συστήματα ραντάρ για πραγματικές εφαρμογές. Τώρα, ορισμένοι πάροχοι κινητής τηλεφωνίας έχουν αρχίσει να τις χρησιμοποιούν για να στέλνουν δεδομένα μεταξύ σταθερών σημείων, όπως δύο σταθμών βάσης. Ωστόσο, η χρήση των mmWaves για τη σύνδεση κινητών χρηστών με κοντινό σταθμό βάσης είναι μια εντελώς νέα προσέγγιση.

Υπάρχει, ωστόσο, ένα μεγάλο μειονέκτημα των mmWaves, και αυτό είναι ότι δεν μπορούν εύκολα να διαπεράσουν κτίρια ή εμπόδια και μπορούν να απορροφηθούν από τη βροχή και το φύλλωμα των δέντρων. Γι' αυτό το λόγο, τα δίκτυα 5G πιθανόν να αυξήσουν τους παραδοσιακούς κυψελοειδείς πύργους με μια άλλη νέα τεχνολογία, που ονομάζεται small cells.

3.3.2 Small Cells

Τα small cells είναι μικροσκοπικοί σταθμοί βάσης που μπορούν να τοποθετηθούν κάθε περίπου 250 μέτρα σε όλη την έκταση των πόλεων. Χρειάζονται ελάχιστη ισχύ λειτουργίας και μπορούν να σχηματίσουν ένα πυκνό δίκτυο σαν relay team, λαμβάνοντας σήματα από άλλους σταθμούς βάσης και στέλνοντας δεδομένα στους χρήστες σε οποιαδήποτε θέση, προκειμένου να αποφευχθεί η πτώση των σημάτων. Μπορούν να εγκατασταθούν χιλιάδες από αυτούς τους σταθμούς σε μια πόλη, δημιουργώντας ένα πυκνό δίκτυο που καλύπτει ομαλά την περιοχή.



Εικόνα 3.6 Η εφαρμογή της τεχνικής small cells

Ενώ τα παραδοσιακά κυψελοειδή δίκτυα επίσης αναπτύσσονται με αυξανόμενο αριθμό σταθμών βάσης, η επίτευξη των επιδόσεων 5G απαιτεί ακόμη μεγαλύτερη υποδομή. Η χρήση κεραιών στα small cells μπορεί να είναι πολύ μικρότερη από τις παραδοσιακές, ιδίως όταν μεταδίδουν mmWaves. Αυτή η διαφορά στο μέγεθος καθιστά ευκολότερη την τοποθέτηση κυψελών σε φωτεινούς στύλους και στις κορυφές κτιρίων.

Αυτή η δομή δικτύου θα πρέπει να προσφέρει πιο στοχοθετημένη και αποτελεσματική χρήση του φάσματος. Με περισσότερους σταθμούς, οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν για να εξυπηρετήσουν περισσότερους πελάτες σε διαφορετικές περιοχές. Ωστόσο, η εγκατάσταση του απαιτούμενου αριθμού small cells για το δίκτυο 5G μπορεί να είναι δύσκολη σε αγροτικές περιοχές. Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τους τύπους 5G Small Cell με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά τους, συμπεριλαμβανομένων των σεναρίων ανάπτυξης, του αριθμού των υποστηριζόμενων χρηστών, της εμβέλειας ισχύος και της κάλυψης από αυτά τα μικρά κύτταρα.

5G Small Cell types	Deployment	Number of concurrent users	Power range	Distance coverage
Femtocell	Χρησιμοποιείται κυρίως σε κατοικίες και επιχειρήσεις	4-8 χρήστες (κατοικίες) 16-32 χρήστες (επιχειρήσεις)	10-100 mW (Indoor) 0.2-1 Watt (Outdoor)	Δεκάδες μετρα
Picocell	Δημόσιοι χώροι όπως εσωτερικοί χώροι, εξωτερικοί χώροι, αεροδρόμια, εμπορικά κέντρα, σιδηροδρομικοί σταθμοί	64-128 χρήστες	100-250 mW (Indoor) 1-5 Watt (Outdoor)	Δεκάδες μέτρα
Microcell	Αστικές περιοχές για την κάλυψη κενών ευρείας κλίμακας	128-256 χρήστες	5-10 Watt (Outdoor)	Λίγες εκατοντάδες μέτρα
Metrocell	Αστικές περιοχές για την παροχή επιπλέον χωρητικότητας	>250 χρήστες	10-20 Watt (Outdoor)	Εκατοντάδες μέτρα
WiFi	Κατοικίες, γραφεία, επιχειρήσεις	<50 χρήστες	20-100 mW (Indoor) 0.2-1 Watt (Outdoor)	Λίγες δεκάδες μέτρα

Πίνακας 3 Κατηγορίες των 5G small cells

Πλεονεκτήματα των 5G Small Cells :

➤ Βελτιώνουν την επικάλυψη σε περιοχές όπου το σήμα είναι ασθενές ή ανύπαρκτο λόγω παρεμβολών.

- Παρέχουν υποστήριξη σε περισσότερους χρήστες σε δίκτυο 5G κυψελοειδούς δομής.
- Η κοντινή απόσταση των small cells από τους χρήστες οδηγεί σε ταχύτερες υπηρεσίες δεδομένων λόγω μικρότερης καθυστέρησης.
- Καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια λόγω της χαμηλής ισχύος λειτουργίας.
- Λόγω του μικρού μεγέθους τους, είναι εύκολο να εγκατασταθούν και να διαχειριστούν.
- Συμβάλλουν στην αποσυμφόρηση της κυψελοειδούς κυκλοφορίας για αποτελεσματικότερη εξυπηρέτηση των χρηστών με βελτιωμένη ποιότητα σήματος.

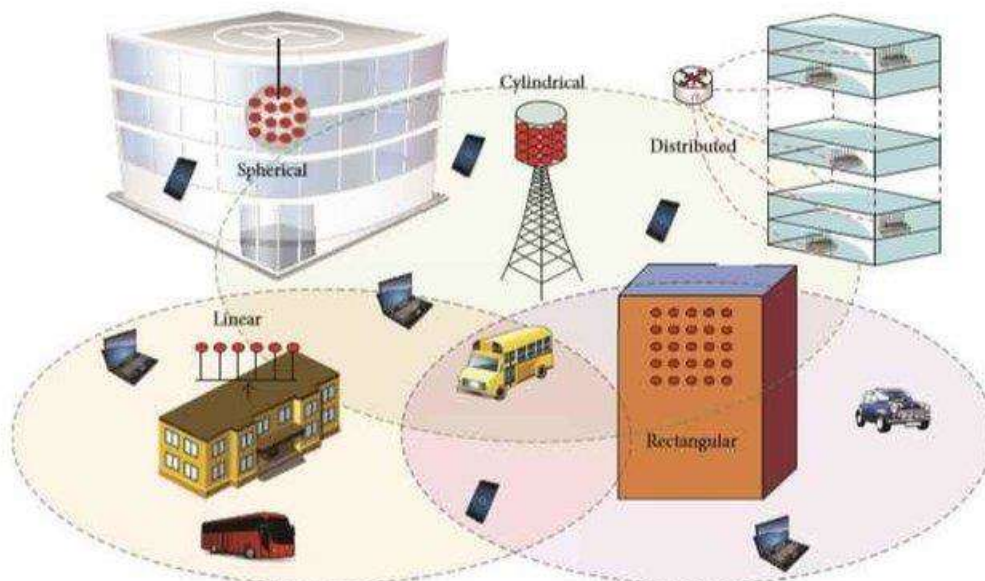
Εκτός από την εκπομπή σε mmWaves, οι σταθμοί βάσης του 5G θα έχουν επίσης πολύ περισσότερες κεραιές σε σχέση με τους σταθμούς βάσης των σημερινών κυψελοειδών δικτύων, επωφελούμενοι από την τεχνολογία του massive MIMO.

3.3.3 Massive MIMO

Οι τωρινοί σταθμοί βάσης 4G διαθέτουν δώδεκα θύρες για κεραιές που χειρίζονται την κυψελοειδή κίνηση, οκτώ για πομπούς και τέσσερις για δέκτες. Ωστόσο, οι σταθμοί βάσης 5G μπορούν να υποστηρίξουν περίπου εκατό θύρες, οπότε πολλές περισσότερες κεραιές μπορούν να χωρέσουν σε μία μόνο συστοιχία. Αυτή η δυνατότητα σημαίνει ότι ένας σταθμός βάσης θα μπορούσε να στέλνει και να λαμβάνει σήματα από πολλούς περισσότερους χρήστες ταυτόχρονα, αυξάνοντας την χωρητικότητα των κινητών δικτύων κατά έναν παράγοντα 22 ή και μεγαλύτερο.

Αυτή η τεχνολογία γνωστή ως massive MIMO επεκτείνει την ιδέα του MIMO (multiple-input multiple-output). Το MIMO περιγράφει ασύρματα συστήματα που χρησιμοποιούν δύο ή περισσότερους πομπούς και δέκτες για να στέλνουν και να λαμβάνουν περισσότερα δεδομένα ταυτόχρονα. Το massive MIMO πηγαίνει ένα βήμα παραπέρα, ενσωματώνοντας δεκάδες κεραιές σε μία μόνο συστοιχία.

Υπάρχουν πολλά είδη διαμορφώσεων συστοιχίας για συστήματα massive MIMO. Οι πιο διαδεδομένες που χρησιμοποιούνται ευρέως είναι η γραμμική, η σφαιρική, η κυλινδρική, η τετράγωνη και η κατανεμημένη. Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται οι πέντε προαναφερθείσες διατάξεις.



Εικόνα 3.7 Είδη σχηματισμού των συστημάτων massive MIMO

Η δομή της κεραίας επηρεάζει σημαντικά τις ιδιότητες του καναλιού και την αποδοτικότητα του συστήματος massive MIMO. Κάθε δομή προορίζεται για διαφορετικές εφαρμογές. Η γραμμική κεραία κυρίως διαδίδει σήματα σε δύο διαστάσεις, περιορίζοντας την εφαρμογή της σε ρεαλιστικά περιβάλλοντα. Αντίθετα, η σφαιρική, η κυλινδρική και η τετράγωνη κεραία ακτινοβολούν σε 3 διαστάσεις και χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλές πρακτικές εφαρμογές. Η κατανεμημένη κεραία κυρίως χρησιμοποιείται για τη βελτίωση της εσωτερικής επικοινωνίας.

Το MIMO έχει ήδη ενσωματωθεί σε μερικούς σταθμούς βάσης 4G. Από την άλλη πλευρά, το massive MIMO έχει δοκιμαστεί μόνο σε εργαστήρια και σε ορισμένες πειραματικές δοκιμές. Στις πρώτες δοκιμές, έχει καθιερώσει νέα ρεκόρ στην αποδοτικότητα φάσματος, το οποίο μετρά πόσα bits δεδομένων μπορούν να μεταδοθούν σε έναν ορισμένο αριθμό χρηστών ανά δευτερόλεπτο.

Το massive MIMO φαίνεται πολύ ελπιδοφόρο για το μέλλον του 5G. Ωστόσο, η εγκατάσταση τόσων πολλών κεραιών για τη διαχείριση του κυψελοειδούς τροχιάς προκαλεί περισσότερες παρεμβολές αν τα σήματα αυτά διασταυρωθούν. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο οι σταθμοί 5G πρέπει να υιοθετήσουν το beamforming.

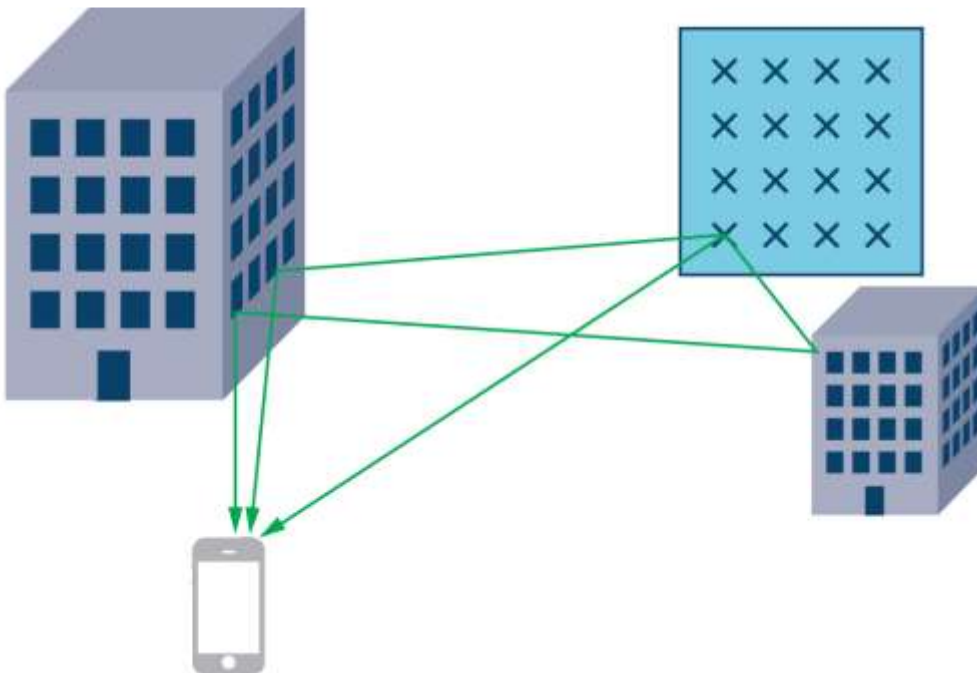
Το massive MIMO επιτρέπει υψηλής ανάλυσης beamforming και είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε υψηλές συχνότητες, όπου τα στοιχεία κεραιών μπορεί να είναι πολύ μικρά.

Μπορεί να αυξήσει τη χωρητικότητα και να βελτιώσει την ακτινοβολούμενη ενεργειακή απόδοση. Επιπλέον, παρέχει μεγάλο αριθμό βαθμών ελευθερίας, τους οποίους μπορεί να αξιοποιήσει με τη χρήση του beamforming εάν είναι διαθέσιμες οι πληροφορίες κατάστασης καναλιού. Ένα άλλο πλεονέκτημα του massive MIMO είναι η ενεργειακή του απόδοση, καθώς κάθε στοιχείο κεραίας αναμένεται να χρησιμοποιεί εξαιρετικά χαμηλή ισχύ.

3.3.4 Beamforming

Το Beamforming είναι ένα σύστημα σήμανσης κυκλοφορίας για κυψελωτούς σταθμούς βάσης που προσδιορίζει την βέλτιστη διαδρομή μετάδοσης δεδομένων προς ένα συγκεκριμένο χρήστη και μειώνει τις παρεμβολές για τους χρήστες που βρίσκονται

στην περιοχή. Ανάλογα με την κατάσταση και την τεχνολογία, υπάρχουν διάφοροι τρόποι υλοποίησης αυτού του συστήματος στα 5G δίκτυα.



Εικόνα 3.8 Η τεχνική Beamforming

Το beamforming συμβάλλει στην αποτελεσματική χρήση του φάσματος για τις συστοιχίες massive MIMO. Η κύρια πρόκληση για το massive MIMO είναι η μείωση των παρεμβολών και η ταυτόχρονη μετάδοση περισσότερων πληροφοριών από πολλές κεραιές. Στους σταθμούς βάσης με massive MIMO, οι αλγόριθμοι επεξεργασίας σήματος υπολογίζουν τη βέλτιστη διαδρομή μετάδοσης για κάθε χρήστη και μετά μπορούν να μεταδώσουν πακέτα δεδομένων σε πολλές κατευθύνσεις, αποφεύγοντας τα εμπόδια με ένα ακριβώς συντονισμένο μοτίβο. Με αυτό τον τρόπο, το beamforming επιτρέπει σε πολλούς χρήστες και κεραιές να ανταλλάσσουν πολύ περισσότερες πληροφορίες ταυτόχρονα.

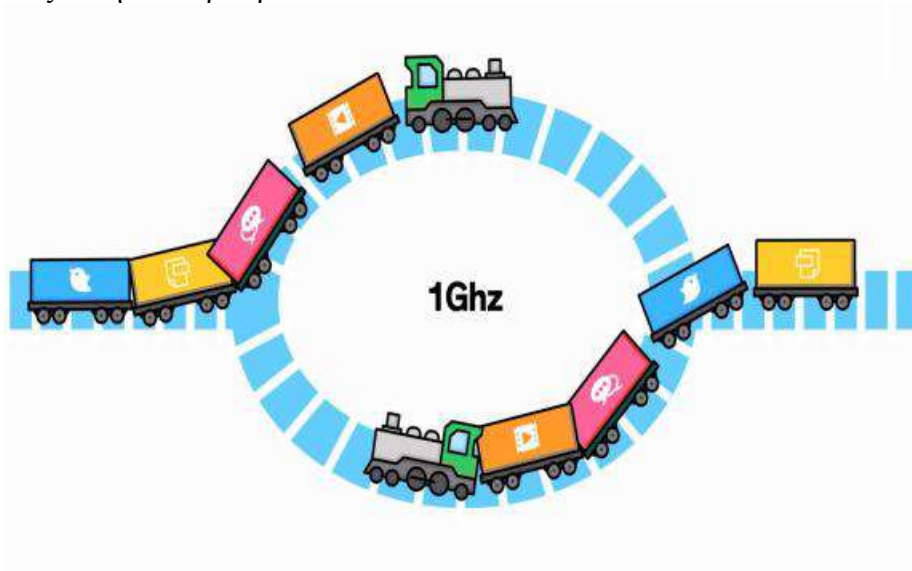
Όσον αφορά τα mmWaves, το beamforming χρησιμοποιείται κυρίως για να αντιμετωπίσει προβλήματα που προκύπτουν. Τα σήματα σε αυτές τις συχνότητες είναι επιρρεπή σε εμπόδια και αποσβένουν σε μεγάλες αποστάσεις. Το beamforming μπορεί να εστιάσει ένα σήμα σε μια συγκεκριμένη δέσμη που αντιμετωπίζει έναν συγκεκριμένο χρήστη, αντί να το μεταδίδει σε πολλές κατευθύνσεις ταυτόχρονα. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να ενισχύσει τις πιθανότητες ακεραιότητας του σήματος και να μειώσει τις παρεμβολές.

Εκτός από την αύξηση του ρυθμού μεταφοράς δεδομένων με τη χρήση mmWaves και την ενίσχυση της αποδοτικότητας του φάσματος με το massive MIMO, οι μηχανικοί εργάζονται επίσης προς την κατεύθυνση της επίτευξης υψηλού throughput και χαμηλής καθυστέρησης, οι οποίες απαιτούνται για το 5G, μέσω της τεχνολογίας που ονομάζεται full duplex.

3.3.5 Full duplex

Οι σημερινοί σταθμοί βάσης και κινητά τηλέφωνα χρησιμοποιούν πομποδέκτες που λειτουργούν εναλλάξ, μεταδίδοντας και λαμβάνοντας πληροφορίες είτε στην ίδια είτε σε διαφορετικές συχνότητες ανάλογα με τις ανάγκες του χρήστη. Με την εισαγωγή του 5G, ένας πομποδέκτης θα μπορεί να λειτουργεί σε full duplex, μεταδίδοντας και

λαμβάνοντας δεδομένα ταυτόχρονα στην ίδια συχνότητα. Αυτή η τεχνολογία μπορεί να διπλασιάσει τη χωρητικότητα των ασύρματων δικτύων. Για να κατανοήσουμε αυτήν την τεχνική, μπορούμε να σκεφτούμε το εξής παράδειγμα: αν δύο άτομα μιλούν ταυτόχρονα και μπορούν να καταλαβαίνουν ο ένας τον άλλο, η συνομιλία τους θα μπορούσε να διαρκέσει μόνο τον μισό χρόνο και η επόμενη συζήτησή τους θα μπορούσε να ξεκινήσει νωρίτερα.



Εικόνα 3.9 Η τεχνική Full Duplex

Για να επιτευχθεί πλήρης αμφίδρομη λειτουργία σε προσωπικές συσκευές, οι ερευνητές πρέπει να αναπτύξουν ένα κύκλωμα που να μπορεί να διαχειρίζεται ταυτόχρονα εισερχόμενα και εξερχόμενα σήματα, ώστε να μην προκαλούνται συγκρούσεις κατά τη μετάδοση και λήψη δεδομένων στην ίδια συχνότητα. Αυτό είναι ιδιαίτερα δύσκολο λόγω της αμοιβαιότητας (reciprocity) των ραδιοκυμάτων, που ταξιδεύουν τόσο προς τα εμπρός όσο και προς τα πίσω στην ίδια συχνότητα. Πρόσφατα όμως, οι ειδικοί ανέπτυξαν τρανζίστορ πυριτίου που λειτουργούν ως διακόπτες υψηλής ταχύτητας για να αποκλείσουν την προς τα πίσω κίνηση των κυμάτων, επιτρέποντάς τους να μεταδίδουν και να λαμβάνουν σήματα στην ίδια συχνότητα την ίδια στιγμή.

Ένα μειονέκτημα της full duplex λειτουργίας είναι ότι δημιουργεί επίσης περισσότερη παρεμβολή σήματος μέσω μιας ενοχλητικής ηχούς. Κατά τη μετάδοση ενός σήματος, το σήμα αυτό είναι πιο δυνατό και κοντά στην κεραία της συσκευής από οποιοδήποτε άλλο σήμα που λαμβάνει. Η προσδοκία για μια κεραία να μπορεί να μεταδώσει και να λάβει σήματα ταυτόχρονα επιτυγχάνεται μόνο με ειδική τεχνολογία ακύρωσης ηχούς.

3.4 Εφαρμογές της τεχνολογίας 5G

Όπως έχει αναφερθεί, τα δίκτυα 5ης γενιάς θα διακρίνονται από πολύ υψηλές ταχύτητες και άμεση απόκριση. Αυτά τα χαρακτηριστικά καθιστούν τα δίκτυα 5G πολύ προοδευτικά για το μέλλον, καθώς αναμένεται να βρουν εφαρμογή σε πολλούς τομείς. Στη συνέχεια περιγράφουμε μερικούς από αυτούς τους τομείς όπου αναμένεται να χρησιμοποιηθούν και να βελτιώσουν τα δίκτυα 5ης γενιάς.

1. Internet of Things (IoT)



Εικόνα 3.10 Εφαρμογή στο IoT

Το Internet of Things (IoT) αναπτύσσεται ευρέως με τη χρήση του ασύρματου δικτύου 5G. Το IoT θα συνδέσει όλα τα αντικείμενα, αισθητήρες, συσκευές και εφαρμογές στο Διαδίκτυο. Οι εφαρμογές IoT θα συλλέγουν μεγάλο όγκο δεδομένων από εκατομμύρια συσκευές και αισθητήρες. Αυτό απαιτεί ένα αποτελεσματικό δίκτυο για τη συλλογή, επεξεργασία, μετάδοση, έλεγχο και ανάλυση σε πραγματικό χρόνο. Το 5G μπορεί να εκμεταλλευτεί τις δυνατότητες του IoT λόγω της ευελιξίας του, της αξιοποίησης του ανέκδοτου ραδιοφάσματος και των λύσεων χαμηλού κόστους για την ανάπτυξη τέτοιου δικτύου.

2. Smart Home



Εικόνα 3.11 Εφαρμογή στα Smart Homes

Με την πρόοδο της τεχνολογίας 5G, δημιουργείται η δυνατότητα να δημιουργηθούν έξυπνες οικιακές συσκευές που επιτρέπουν τον έλεγχο ακόμα και όταν ο χρήστης είναι μακριά από το σπίτι. Πέρα από έξυπνες τηλεοράσεις που έχουν ήδη αντικαταστήσει αυτές που δεν είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο, η νέα γενιά έξυπνων ηλεκτρικών συσκευών έρχεται να εμπλουτίσει το σπίτι μας, προσφέροντας μια εικόνα του σύγχρονου τρόπου ζωής στον 21ο αιώνα.

3. Smart Cities

Οι εφαρμογές έξυπνων πόλεων, όπως η ρύθμιση της κυκλοφορίας, η άμεση ενημέρωση καιρού, η διαχείριση ενέργειας, το έξυπνο δίκτυο ηλεκτρισμού, ο έξυπνος φωτισμός των δρόμων, και η διαχείριση των υδάτινων πόρων, αποτελούν λύσεις για καθημερινά προβλήματα που επηρεάζουν τη ζωή των κατοίκων των μεγάλων πόλεων.



Εικόνα 3.12 Η νέα μορφή των πόλεων με τη χρήση του 5G

4. Αυτοκίνηση

Η ιδέα των αυτόνομων οχημάτων έχει εξεταστεί εδώ και πολύ καιρό, αλλά τώρα, με την είσοδο του 5G, μπορεί να γίνει πραγματικότητα. Με την υψηλή ταχύτητα και τη γρήγορη ανταπόκριση του 5G, τα αυτοκίνητα θα μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους σε πραγματικό χρόνο, γνωρίζοντας πότε ένα άλλο όχημα αλλάζει λωρίδα ή φρενάρει, και προσαρμόζοντας ανάλογα την οδηγική τους συμπεριφορά. Έτσι, τα αυτοκίνητα μπορούν να αντιλαμβάνονται πριν από τους οδηγούς εάν ένα φορτηγό που βρίσκεται μακριά ξαφνικά φρενάρει ή εάν ένα αυτοκίνητο βρίσκεται στη νεκρή γωνία. Έτσι, η εφαρμογή του 5G στον τομέα της αυτοκίνησης είναι ιδιαίτερα σημαντική και μπορεί να βοηθήσει στην πρόληψη ατυχημάτων.



Εικόνα 3.13 Η χρήση του 5G στην αυτοκίνηση

5. Drones

Τα drones γίνονται όλο και πιο δημοφιλή λόγω των πολλαπλών λειτουργιών τους, όπως η ψυχαγωγία, η λήψη βίντεο, η ιατρική και η έκτακτη πρόσβαση. Το δίκτυο 5G παρέχει ισχυρή υποστήριξη με υψηλή ταχύτητα ασύρματης σύνδεσης στο διαδίκτυο για τις λειτουργίες των drones. Για παράδειγμα, σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, όπως φυσικές καταστροφές, όπου οι άνθρωποι έχουν περιορισμένη πρόσβαση, οι drones μπορούν να προσεγγίσουν και να συλλέξουν χρήσιμες πληροφορίες.



Εικόνα 3.14 Παράδοση με χρήση drone 5G

6. Υγεία



Εικόνα 3.15 Η χρήση του 5G στην Ιατρική

Η τεχνολογία του 5G θα επιτρέψει στους γιατρούς να εκτελούν προηγμένες ιατρικές επεμβάσεις μέσω αξιόπιστης ασύρματης σύνδεσης, ακόμα και από απόσταση. Αυτό θα έχει τεράστιο αντίκτυπο στη χειρουργική από απόσταση, την παροχή υγειονομικής

περίθαλψης σε απομακρυσμένες περιοχές και την υποστήριξη ειδικευμένων γιατρών. Οι άνθρωποι με χρόνιες παθήσεις θα επωφεληθούν από την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο και τις έξυπνες συσκευές. Οι γιατροί θα μπορούν να συνδεθούν και να συμβουλευθούν ασθενείς ανά πάσα στιγμή. Η βιομηχανία υγειονομικής περίθαλψης πρέπει να επωμιστεί τη λειτουργικότητα μέσω ενός ισχυρού δικτύου. Το 5G θα ενισχύσει τη βιομηχανία υγειονομικής περίθαλψης με έξυπνες ιατρικές συσκευές, το Διαδίκτυο των Ιατρικών Πραγμάτων, έξυπνες αναλύσεις και τεχνολογίες ιατρικής απεικόνισης υψηλής ευκρίνειας. Τα wearables θα παρακολουθούν συνεχώς την κατάσταση του ασθενούς και θα ειδοποιούν σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης. Τα νοσοκομεία θα λαμβάνουν τις ειδοποιήσεις και θα ανταποκρίνονται γρήγορα για τη διάγνωση και τη θεραπεία.

7. Smart Farming

Στο μέλλον, η τεχνολογία του 5G θα εφαρμοστεί και στη γεωργία, στο πλαίσιο της έξυπνης γεωργίας. Μέσω έξυπνων RFID αισθητήρων και GPS, οι αγρότες θα μπορούν να εντοπίζουν τη θέση των ζώων και να τα διαχειρίζονται εύκολα. Οι έξυπνοι αισθητήρες θα επιτρέπουν τον έλεγχο της άρδευσης, την παρακολούθηση της πρόσβασης και τη διαχείριση της ενέργειας. Για παράδειγμα, η εταιρεία NimbeLink έχει αναπτύξει ένα σύστημα που ανιχνεύει και διαχειρίζεται βασικά περιβαλλοντικά δεδομένα, όπως θερμοκρασία, υγρασία, κίνηση και τοποθεσία μελισσών, μεταφέροντας αυτά τα δεδομένα σε ειδικούς για ανάλυση.



Εικόνα 3.16 Smart Farming

4 Τεχνολογία MIMO

Με την άνθηση των συστημάτων επικοινωνίας πέμπτης γενιάς (5G), η τεχνολογία MIMO (multiple-input multiple-output) αποτελεί μία από τις πιο ελπιδοφόρες τεχνολογίες για τη μελλοντική κινητή επικοινωνία. Η ζήτηση του συστήματος 5G

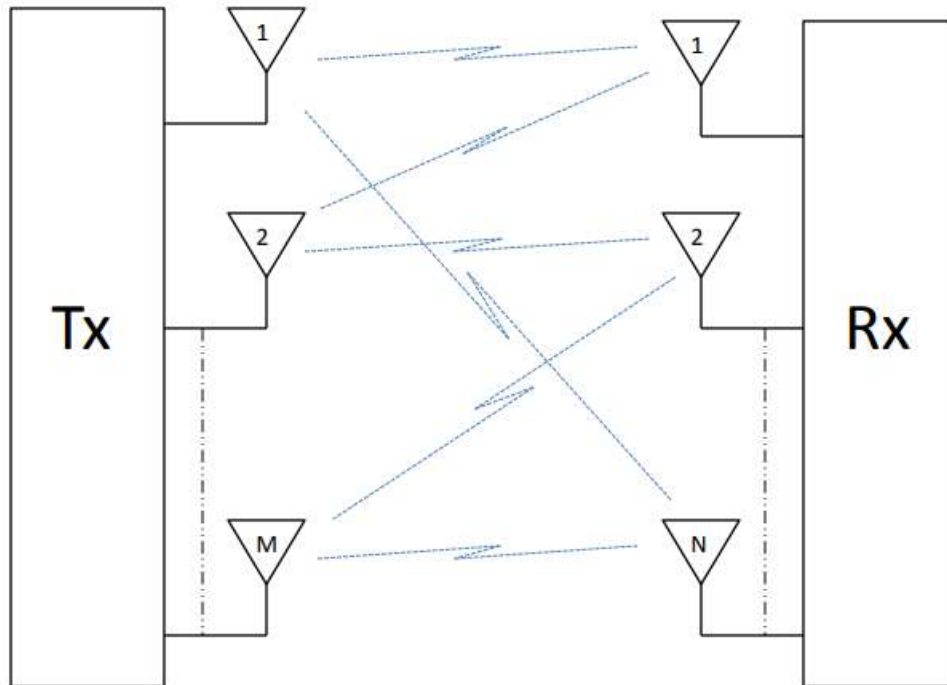
αυξάνεται λόγω του υψηλού ρυθμού μετάδοσης, της χαμηλής καθυστέρησης σε σύγκριση με το τρέχον σύστημα 4G. Η Διεθνής Τηλεπικοινωνιακή Ένωση (ITU) έχει αναφέρει τα φάσματα συχνοτήτων 3.4–3.6 GHz, 5–6 GHz, 24.25–27.5 GHz, 37–40.5 GHz και 66–76 GHz για την επικοινωνία 5G, ενώ η Επιτροπή Ομοσπονδιακών Επικοινωνιών (FCC) έχει καθορίσει το φάσμα συχνοτήτων 27.5–28.35 GHz για το 5G. Στα συστήματα MIMO, η χωρική πολυπλεξία χρησιμοποιείται για να διαιρέσει τα πλήρη δεδομένα σε χαμηλότερους ρυθμούς μετάδοσης για να μεταδοθούν χρησιμοποιώντας n-κεραίες. Για να διακρίνουν αυτές τις διαφορετικές ροές δεδομένων στον δέκτη, ο λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR) πρέπει να είναι πολύ υψηλός, κάτι που μπορεί να βελτιωθεί χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα πρωτόκολλα επικοινωνίας. Οι τεχνικές Πλήρους Διπλού Διαδρόμου και Χωρικής Συστολής μπορούν εύκολα να αντιμετωπίσουν τα προβλήματα που υπάρχουν στα συμβατικά συστήματα MIMO για τις επικοινωνίες 4G, όπως η εμπλοκή πολλαπλών RF αλυσίδων, ο συγχρονισμός μεταξύ πολλαπλών ακτινοβολούμενων στοιχείων και η διασυνδεδεμένη παρεμβολή καναλιού. Για να επιτευχθεί κέρδος πολυπλεξίας μετάδοσης με την ταυτόχρονη μετάδοση των πληροφοριών, απαιτείται πολλαπλός αριθμός ακτινοβολούμενων στοιχείων τόσο στην πλευρά λήψης (Rx) όσο και στην πλευρά μετάδοσης (Tx). Επομένως, το σύστημα κεραιών MIMO αποτελεί την προϋπόθεση για την ικανοποίηση της μεγάλης ροής με το διαθέσιμο εύρος ζώνης.

Η ροή του συστήματος MIMO (χωρητικότητα καναλιού) μπορεί να ενισχυθεί εύκολα με την αύξηση του αριθμού των ακτινοβολούμενων στοιχείων τόσο στο σταθμό βάσης όσο και στο κινητό τερματικό ταυτόχρονα. Το MIMO παρέχει υψηλή ποιότητα υπηρεσιών για διάφορες εφαρμογές πολυμέσων για τα ασύρματα συστήματα επικοινωνίας των μελλοντικών γενεών. Παρά το γεγονός ότι η ποικιλία και η χωρική πολυπλεξία του συστήματος μπορούν να βελτιωθούν, η πολυπλοκότητα αυξάνεται λόγω του μεγάλου αριθμού ακτινοβολούμενων στοιχείων· ως εκ τούτου, αυξάνεται επίσης το κόστος της αλυσίδας ραδιοσυχνοτήτων (RF). Το σύστημα MIMO με N_t αποδέκτες κεραίες και N_t πομπούς κεραίες απαιτεί πλήρη αριθμό αλυσίδων RF $N_t \times N_t$ που περιλαμβάνουν ενισχυτή χαμηλού θορύβου (LNA), χαμηλής συχνότητας μετατροπέα και αναλογοψηφιακό μετατροπέα (ADC). Έτσι, ο επιπλέον αριθμός ψηφιακής επεξεργασίας σήματος και ο μεγάλος αριθμός αλυσίδων RF καθιστούν το σύστημα MIMO περίπλοκο και ακριβό.

Ένα από τα κύρια μειονεκτήματα του συστήματος MIMO είναι αυτό του κόστους. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, μία από τις δυνατές λύσεις είναι η εφαρμογή διαφόρων τεχνικών βελτιστοποίησης για την επιλογή βέλτιστου αριθμού κεραιών χωρίς να μειώνεται η απόδοσή του. Ο γενετικός αλγόριθμος (GA) είναι μία από τις πιο αποτελεσματικές προσεγγίσεις για τη βελτιστοποίηση του αριθμού των αποδεκτών και πομπών κεραιών σε σύστημα MIMO με χαμηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα. Άλλα χαρακτηριστικά για τον προσδιορισμό της απόδοσης των συστημάτων MIMO μεγάλου αριθμού κεραιών ($n > 8$) είναι ο αμοιβαίος συσχετισμός. Οι δομές ηλεκτρομαγνητικής ζώνης με σκοπό να ξεπεραστεί το μειονέκτημα του αμοιβαίου συσχετισμού χρησιμοποιούνται στα συμβατικά συστήματα κεραιών MIMO. Οι τεχνολογίες MIMO υψηλών συχνοτήτων millimeter-wave με υψηλό κέρδος κεραίες υπόσχονται καλύτερα αποτελέσματα για εφαρμογές υψηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, όπως η ροή βίντεο υψηλής ποιότητας (8K) με μειωμένη απώλεια πορείας. Η ενσωμάτωση της γνωστικής ραδιοφωνίας σε τέτοιες αρχιτεκτονικές ενισχύει τη δυνατότητα χρησιμοποίησης του φάσματος ενός συστήματος, το οποίο είναι αναγκαίο για την επικοινωνία 5G. Αυτή τη στιγμή, η συχνότητα των 2.6 GHz χρησιμοποιείται στην τεχνολογία MIMO για τους τελικούς χρήστες 4G. Για τις φορητές συσκευές επικοινωνίας 5G

στα φάσματα συχνοτήτων κάτω των 6 GHz, η συχνότητα των 3.6 GHz φαίνεται υποσχόμενη.

Το κύριο πλεονέκτημα του συστήματος MIMO είναι η συμπαγής διάταξη των ενσωματωμένων ακτινοβολούμενων στοιχείων, τα οποία επιτρέπουν τη λειτουργία σε υψηλότερες συχνότητες καθώς και τη μείωση των παρεμβολών χωρίς επέκταση του εύρους ζώνης.



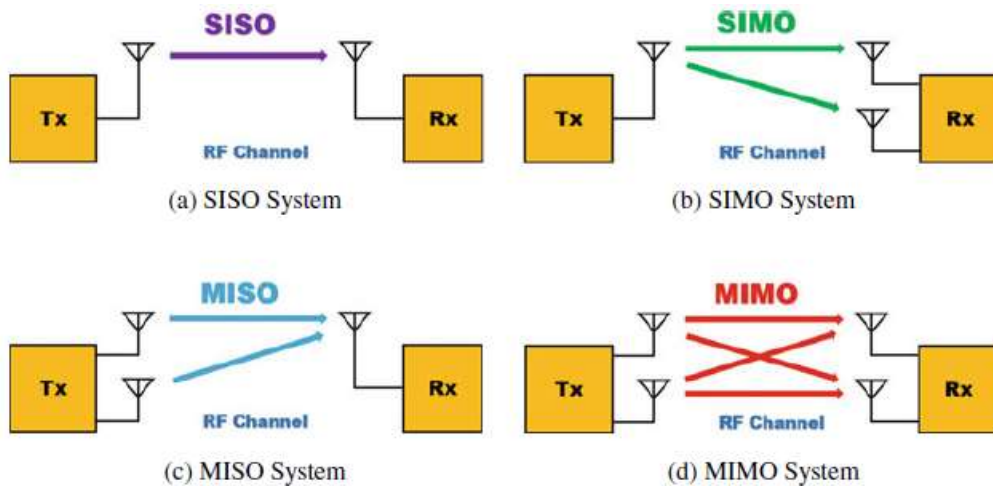
Εικόνα 4.1 Λειτουργία τεχνικής MIMO

4.1 Κεραίες ενός στοιχείου εναντίον συστήματος πολλαπλών κεραιών

Υπάρχουν πολλές προκλήσεις του συστήματος κεραίας SISO όπως η πολυπορευτική φθορά και η χαμηλή χωρητικότητα καναλιού (C). Η χωρητικότητα καναλιού (C) ενός συστήματος επικοινωνίας μπορεί να δοθεί μαθηματικά ως:

$$C = \log_2 \left(1 + \frac{P_t}{\sigma_n^2} |h|^2 \right)$$

Όπου $\frac{P_t}{\sigma_n^2} |h|^2$ είναι η αναλογία σήματος-θορύβου (SNR), P_t η δύναμη που μεταδίδεται, σ_n^2 η ένταση θορύβου και $|h|$ ο πίνακας καναλιού.



Εικόνα 4.2 Διαφορετικά συστήματα κεραιών

Λόγω της αυξανόμενης ζήτησης για ασύρματη μεταφορά δεδομένων, η ζώνη συχνοτήτων των υπερυψηλών συχνοτήτων millimeter-wave (30–300 GHz) αποτελεί το προφανές μέσο για το σύστημα επικοινωνίας 5G. Αντιμετωπίζει μεγάλη απώλεια διάδοσης λόγω της υψηλής συχνότητας του κυματοφόρου στα millimeter-wave και των υψηλών ατμοσφαιρικών απωλειών λόγω των μορίων οξυγόνου και νερού που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα. Για να αντιμετωπιστούν αυτές οι απώλειες, απαιτούνται κεραιές υψηλής κατευθυντικότητας και κεραιές με στρεβλήσιμη στενή δέσμη. Χρησιμοποιώντας μία μόνο κεραία, είναι πολύ δύσκολο να αντισταθμιστούν αυτού του είδους οι απώλειες. Έτσι, αντί να χρησιμοποιηθεί μία μόνο κεραία, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σύνολα κεραιών για την παραγωγή υψηλής κατευθυντικής κέρδους και τη στρέψη του κύριου δέσμης. Σε υψηλές συχνότητες, το μέγεθος της κεραιάς θα είναι πολύ μικρό, οπότε μία μόνο κεραία δεν είναι επαρκής για την παραγωγή υψηλής κατευθυντικής κέρδους σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Επομένως, για να ξεπεραστούν τα μειονεκτήματα του συστήματος SISO, το σύστημα κεραιάς MIMO εφαρμόζεται για τα μελλοντικά δίκτυα επικοινωνίας 5G.

4.2 Βασικές αρχές MIMO

Υπάρχουν τρεις κατηγορίες στοιχειοκεραιών που χρησιμοποιούνται σε ένα σύστημα MIMO. Τα στοιχεία μπορεί να είναι ομοιόμορφα, προκαλώντας την ονομασία της κεραιάς ως "πολλαπλών στοιχείων" (multi element antenna - MEA), η οποία είναι η πιο συνηθισμένη μορφή. Ωστόσο, τα στοιχεία μπορεί να έχουν διαφορετική πόλωση και διαφορετικά διαγράμματα ακτινοβολίας, ονομάζοντας τις κεραιές "πολλαπλής πόλωσης" (multipolarized antenna - MPOA) και "πολλαπλών ρυθμών" (multimode antenna - MMA) αντίστοιχα. Τα συστήματα MIMO κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τις δύο τεχνικές μετάδοσης που χρησιμοποιούν. Η πρώτη είναι η "χωρική πολυπλεξία", όπου ανεξάρτητα σύμβολα πληροφορίας αποστέλλονται από κάθε κεραία μετάδοσης. Τα σύμβολα εξόδου μετατρέπονται σε σχήμα παλμού και εκπέμπονται από διαφορετικές κεραιές στην ίδια συχνότητα. Αυτή η τεχνική προσφέρει αύξηση της χωρητικότητας για υψηλά σήμα-προς-θόρυβο (SNR) είτε με γνώση της κατάστασης του καναλιού μέσω αλγορίθμων CSI είτε όχι.

$$SNR = \frac{P}{NoB}$$

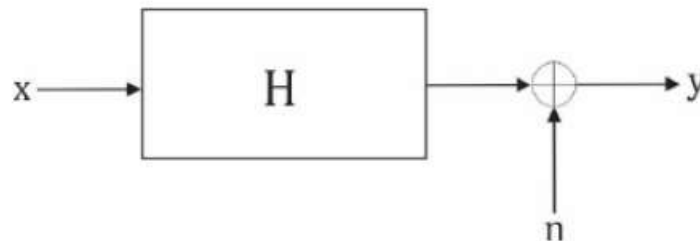
όπου N_0 είναι η πυκνότητα ισχύος του θορύβου σε (Watts / Hz), B είναι το εύρος ζώνης σε (Hz) και P είναι η μέση ισχύς του σήματος σε (Watts). Η δεύτερη τεχνική, γνωστή ως διαφορισμός κωδικοποίησης, αποτελείται από τη μετάδοση του ίδιου συμβόλου πληροφορίας από κάθε κεραία, το οποίο υπόκειται σε κωδικοποίηση με τεχνικές που ονομάζονται κώδικες χώρου-χρόνου (spacetime code). Η κωδικοποίηση αυτή ελαχιστοποιεί τα λάθη λήψης από το δέκτη, κάτι που την καθιστά ιδανική επιλογή όταν η κατάσταση του καναλιού είναι άγνωστη. Οι δύο αυτές τεχνικές συνδυάζονται στη γνωστή διαμόρφωση OFDM. Για να επιτευχθεί κέρδος συστοιχίας σε ένα σύστημα MIMO, είναι λογικό να διανεμηθούν σωστά τα σύμβολα πληροφορίας σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα στις κεραίες εκπομπής, ώστε η μετάδοση να είναι ανθεκτική σε σφάλματα και διαλείψεις (fading). Για να επιτευχθεί αυτό, είναι απαραίτητο να είναι γνωστά τα χαρακτηριστικά του καναλιού επικοινωνίας.

4.2.1 Δομή MIMO συστήματος

Η δομή του MIMO είναι ένα πολύθυρο τηλεπικοινωνιακό σύστημα το οποίο αποτελείται από M κεραίες στον πομπό και N κεραίες στον δέκτη και ονομάζεται $M \times N$ -MIMO. Η σχέση μεταξύ εισόδου και εξόδου του συστήματος περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$y = Hx + n$$

όπου H συμβολίζεται ο πίνακας καναλιού (channel matrix) διαστάσεων $N \times M$. Τα δεδομένα που περιέχονται στον πίνακα H αντιστοιχούν σε πληροφορίες σχετικά με το πλάτος και τη φάση των διαδρομών διάδοσης και αναπαριστούν την αναλογία μεταξύ της τάσης V_g στην κεραία εκπομπής και της τάσης V_T που λαμβάνεται από την κεραία λήψης. Τα εκπεμπόμενα σύμβολα συμβολίζονται με το x και έχουν μήκος διανύσματος M , ενώ τα λαμβανόμενα σύμβολα συμβολίζονται με το y και έχουν μήκος διανύσματος N . Το διάνυσμα n , με ίδιες διαστάσεις με το N , αναπαριστά τον συνήθη προσθετικό λευκό γκαουσιανό θόρυβο (AWGN) που χρησιμοποιείται για την ανάλυση της συμπεριφοράς του καναλιού.



Εικόνα 4.3 Ροή πληροφορίας σε MIMO διάλογο επικοινωνίας

Ο πίνακας H έχει την κάτωθι μορφή όπου το στοιχείο H_{ij} αναφέρεται στους συντελεστές του καναλιού μεταξύ της κεραίας εκπομπής j και της κεραίας λήψης i .

$$H = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \cdots & \alpha_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{N1} & \cdots & \alpha_{NM} \end{pmatrix}$$

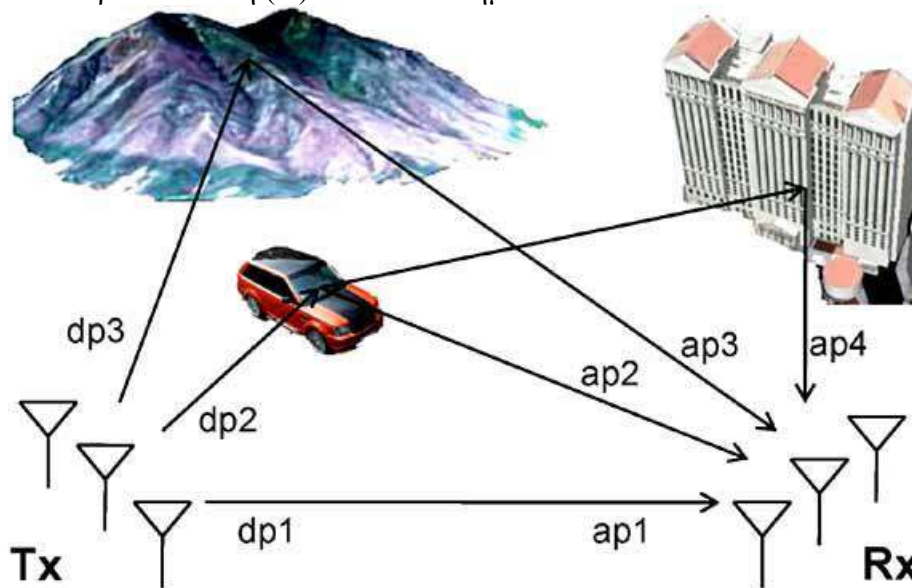
4.3 Κανάλι μετάδοσης

Ο χώρος μεταξύ της κεραίας πομπού και της κεραίας δέκτη ονομάζεται κανάλι μετάδοσης. Σε μια απλή περίπτωση όπου οι κεραίες έχουν οπτική επαφή (light of sight propagation), το σήμα μετάδοσης συνήθως δεν παρουσιάζει σφάλματα ψηφίου πληροφορίας (Bit Error Rate - BER), εκτός από το θερμικό θόρυβο και τις απώλειες ελεύθερου χώρου (free space loss), όπου η μείωση της ισχύος του σήματος είναι

ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης. Ωστόσο, στις σύγχρονες πόλεις, η οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη δεν είναι πάντα εφικτή λόγω των οικοδομημάτων, επομένως χρησιμοποιούνται πολλοί μικροί σταθμοί βάσης για τη μείωση των παραμορφώσεων του σήματος.

Επιπροσθέτως, υπάρχουν τέσσερα βασικά φαινόμενα που επηρεάζουν τη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων: ανάκλαση, διάθλαση, περίθλαση και σκέδαση. Η ανάκλαση αφορά την αλλαγή κατεύθυνσης των κυμάτων μέσα στο ίδιο μέσο λόγω πρόσκρουσής τους σε διαχωριστική επιφάνεια. Η διάθλαση είναι η εκτροπή των κυμάτων κατά τη διέλευσή τους από ένα μέσο σε ένα άλλο. Η περίθλαση περιγράφει τη διάχυση των κυμάτων που συναντούν εμπόδια παρόμοια με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Η σκέδαση περιγράφει τη διάχυση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος προς διαφορετικές κατευθύνσεις. Ως αποτέλεσμα, ο δέκτης λαμβάνει πολλά αντίγραφα του αρχικού σήματος με διαφορετικό πλάτος και φάση, γνωστό ως διάδοση πολλαπλών διαδρομών, και αντιμετωπίζει παραμορφώσεις σήματος και διαλείψεις.

Τα συστήματα MIMO εκμεταλλεύονται αυτές τις περιβαλλοντικές δομές για να αυξήσουν την απόδοση της ζεύξης και να αντισταθμίσουν τις διαλείψεις. Το κέρδος του χωρικού διαχωρισμού επιτυγχάνεται καθώς πολλά αντίγραφα του ίδιου σήματος φτάνουν στον δέκτη μέσω διαφορετικών κεραιών, τα οποία είναι φυσικά ασυσχέτιστα λόγω των ανεξάρτητων διαδρομών που ακολουθούν. Το κέρδος του χωρικού διαχωρισμού G_d υπολογίζεται ως το γινόμενο του αριθμού των κεραιών πομπού (M) επί τον αριθμό των κεραιών δέκτη (N) σε ένα σύστημα $M \times N$ MIMO.



Εικόνα 4.4 Πολυδιαδρομή σήματος πληροφορίας σε σύγχρονο περιβάλλον

4.3.1 Χωρητικότητα καναλιού

Η παράλληλη πολλαπλή μετάδοση μπορεί να αυξήσει την χωρητικότητα του καναλιού. Η χωρητικότητα ενός MIMO καναλιού μέσα από την θεωρία του Shannon αποδεικνύεται ότι υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση και οι μονάδες μέτρησης είναι σε bit/sec/Hz:

$$C = B \sum_{i=1}^k \left(\log \left(1 + \lambda_i \frac{P_i}{\sigma_n^2} \right) \right)$$

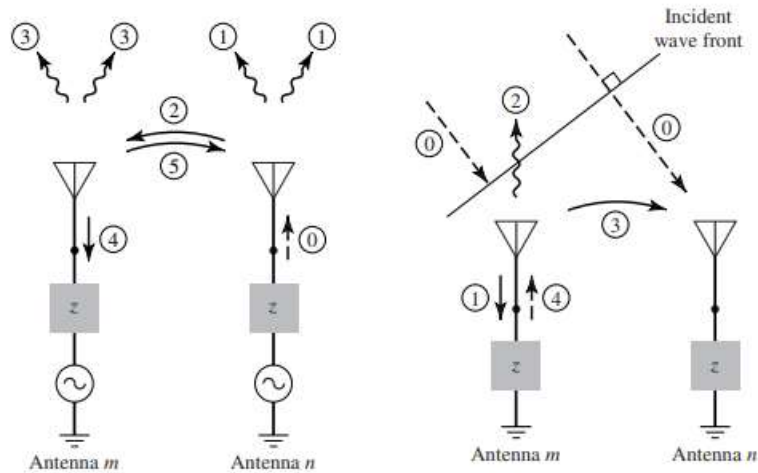
η οποία εκφράζει την συνολική χωρητικότητα ως άθροισμα των χωρητικοτήτων των παράλληλων καναλιών k που δημιουργούνται εξαιτίας των πολλαπλών κεραιών. Είναι προφανές ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των στοιχειοκεραιών που απαρτίζουν μια στοιχειοκεραία, τόσο αυξάνεται και η χωρητικότητα του καναλιού. Με δεδομένο ένα εύρος ζώνης B , και χωρίς την ανάγκη να αντιστοιχίσουμε περισσότερα ψηφία πληροφορίας σε ένα σύμβολο - το οποίο θα απαιτούσε αύξηση της ισχύος εκπομπής P_i από κάθε κεραία για να μην εμφανιστούν παραμορφώσεις στο σήμα - η χρήση συστημάτων MIMO είναι αρκετή για την αύξηση της χωρητικότητας του καναλιού. Η πυκνότητα του λευκού γκαουσιανού θορύβου συμβολίζεται με σ , ενώ το κέρδος ισχύος κάθε ανεξάρτητου καναλιού με λ_i . Με την χρήση της τεχνικής Water Filling και γνωρίζοντας τα δεδομένα του πίνακα H , δηλαδή τις συνθήκες που επικρατούν στο κανάλι, είναι δυνατό να κατανεμηθεί η ισχύς τροφοδοσίας P_i σε κάθε κεραία, επωφελούμενοι κάθε υπο-κανάλι ανάλογα, με αποτέλεσμα να αυξηθεί η χωρητικότητα του καναλιού και η ταχύτητα μετάδοσης της πληροφορίας.

4.4 Αμοιβαία σύζευξη

Ένα βασικό αίτημα των συστημάτων MIMO είναι η απομόνωση μεταξύ των στοιχείων της στοιχειοκεραίας που χρησιμοποιούνται από τη διάταξη. Τα στοιχεία της κεραίας, λόγω της πολύ κοντινής απόστασης μεταξύ τους, παρουσιάζουν αμοιβαία σύζευξη. Αυτή η αμοιβαία σύζευξη ορίζεται ως η ενέργεια που απορροφά μια κεραία από μια άλλη που λειτουργεί σε κοντινή απόσταση. Η ενέργεια αυτή προκύπτει λόγω της μη κατευθυντικότητας της ακτινοβολίας του μεμονωμένου στοιχείου, οπότε όταν αυτό εκπέμπει ενέργεια, το δίπλα στοιχείο μπορεί να τη λάβει, καθώς και λόγω των σκεδάσεων που υφίσταται η ακτινοβολία που πέφτει στην επιφάνεια της κεραίας. Έτσι, οι κεραίες μπορούν να λειτουργούν ως δευτερογενείς πομποί. Η αμοιβαία σύζευξη επηρεάζει το διάγραμμα ακτινοβολίας, τους συντελεστές ανάκλασης και την εσωτερική αντίσταση των κεραιών MIMO, ενώ εξαρτάται κυρίως από τον τρόπο μετάδοσης και λήψης.

4.4.1 Αμοιβαία σύζευξη κατά την εκπομπή και λήψη

Σε μια απλούστερη περίπτωση συστοιχίας με δύο συνολικά ακτινοβολητές m και n , οι αντίστοιχες πηγές των στοιχείων παρέχουν ξεχωριστή ενέργεια που ακτινοβολείται στο χώρο από κάθε κεραία αντίστοιχα. Ωστόσο, ένα μέρος της ενέργειας μεταφέρεται από τη μία κεραία στην άλλη, με το συνολικό αποτέλεσμα να είναι το διανυσματικό άθροισμα των δύο ακτινοβολουμένων πεδίων, όπως καθορίζεται από την παραπάνω σχέση. Έτσι, η αμοιβαία σύζευξη επηρεάζει και αλλάζει το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας. Η ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των κεραιών αυξάνει τις ανακλάσεις των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, με αποτέλεσμα να αυξάνονται ο λόγος στάσιμου κύματος και η εσωτερική αντίσταση της κεραίας. Ο συντελεστής ανάκλασης των συστημάτων MIMO Γ ορίζεται από το λόγο της τετραγωνικής ρίζας της συνολικής ανακλώμενης ισχύος προς την τετραγωνική ρίζα της συνολικής προσπίπτουσας ισχύος. Με βάση την απλή τοπολογία του σχήματος, φαίνεται ότι κατά τη λήψη, ένα τμήμα της ενέργειας του κύματος ακτινοβολίας που φτάνει πρώτο στην κεραία m απορροφάται από την ίδια την κεραία m , ενώ ένα άλλο μέρος ανακλάται και κατευθύνεται προς την κεραία n .

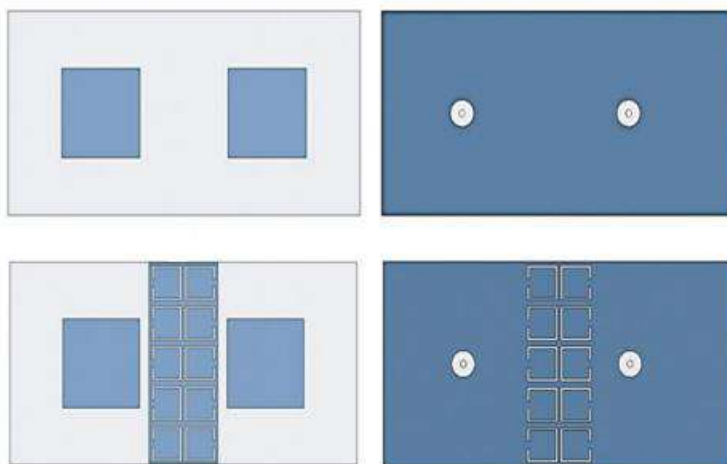


Εικόνα 4.5 Διάγραμμα μηχανισμού της αμοιβαίας σύζευξης κατά την εκπομπή και λήψη

4.4.2 Τρόποι αντιμετώπισης αμοιβαίας σύζευξης

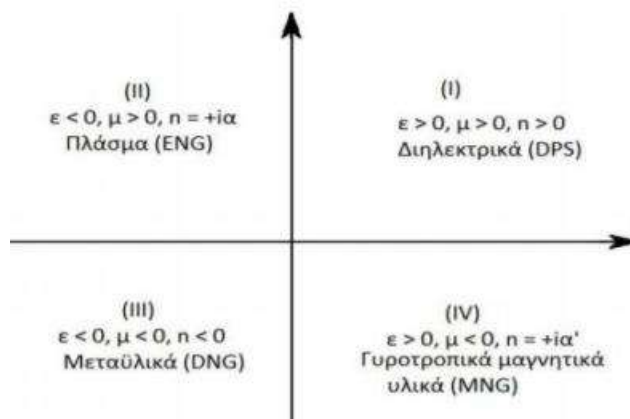
Η αμοιβαία σύζευξη αντιμετωπίζεται με διάφορες τεχνικές, μερικές από τις πιο δημοφιλείς είναι οι δακτυλίοι CSRR, οι μεταλλικές-μεταεπιφάνειες, οι γραμμές ουδετεροποίησης και τα παρασιτικά στοιχεία.

Οι CSRR (Complementary Split Ring Resonator) είναι συνήθως περιοδικές διατάξεις ομόκεντρων μεταλλικών δακτυλίων με σχισμές που μπορούν να απομονώσουν τα στοιχεία σε μια MIMO κεραία. Η δομή του δακτυλίου γύρω από ένα εκτυπωμένο στοιχείο ακτινοβολίας εμποδίζει το ρεύμα που το διαρρέει να διεγείρει το διπλανό του στοιχείο. Οι δομές CSRR μπορούν να τοποθετηθούν γύρω από patch αλλά και γύρω από γραμμές μεταφοράς, κάνοντας έτσι την κατασκευή της κεραίας πιο εύκολη σε μια επιφάνεια. Ωστόσο, σε περιπτώσεις που το patch καλύπτεται εξ ολοκλήρου από CSRR, μπορεί να μειωθεί το κέρδος της κεραίας, εκτός από τη μείωση της αμοιβαίας σύζευξης. Σε μια MIMO κεραία, τα patch τοποθετούνται σε αποστάσεις $\lambda/2$ μεταξύ τους, όπως αποδεικνύεται και από το κεφάλαιο 2, επομένως, συνήθως οι CSRR τοποθετούνται σε απόσταση $\lambda/4$. Επιπλέον, για απομονώσεις της τάξης των -50dB, η αύξηση της απόστασης $\lambda/2$ κατά περίπου 20% αποτελεί αποτελεσματική λύση.



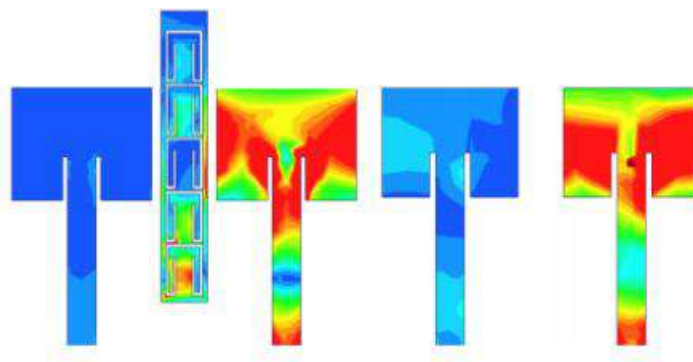
Εικόνα 4.6 Όψεις σχεδίασης MIMO συστήματος με και χωρίς CSRR

Τα μεταλλικά είναι τεχνητά υλικά και πρώτο εμφανιστήκαν το 1967 το όνομα τους οφείλεται στο ότι έχουν διαφορετικές ιδιότητες από ότι τα φυσικά υλικά, δηλαδή μπορούν να έχουν αρνητική διηλεκτρική σταθερά ($-\epsilon$) και αρνητική μαγνητική διαπερατότητα ($-\mu$).



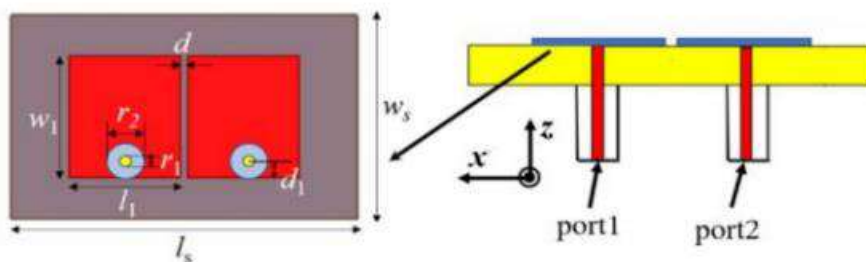
Εικόνα 4.7 Κατηγοριοποίηση των μεταυλικών σύμφωνα με την αγωγιμότητα ϵ και τη διαπερατότητα μ

Η πιο γνωστή ιδιότητα των μεταυλικών υλικών είναι ο αρνητικός δείκτης διάθλασης ($n < 0$), αλλά δεν είναι η μοναδική, καθώς διαθέτουν και άλλες ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες, όπως η αντίστροφη επίδραση Doppler. Οι κεραιές αξιοποιούν αυτές τις διάφορες ιδιότητες για να επιτύχουν καινοτόμες λειτουργίες, βελτιώνοντας την απόδοση, το κέρδος, το μέγεθος, την κατευθυντικότητα, το εύρος λειτουργίας και μειώνοντας την αμοιβαία σύζευξη. Η μεταυλική διάταξη τοποθετείται μεταξύ των στοιχείων ακτινοβολίας ή γύρω από τα patch.



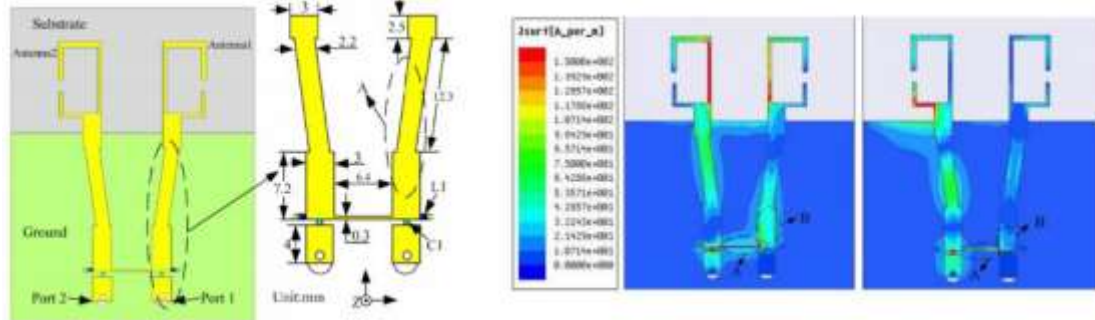
Εικόνα 4.8 Κατανομή επιφανειακού ρεύματος με και χωρίς μεταυλικό

Μια εναλλακτική πρόταση για την απομόνωση μεταξύ των στοιχείων της στοιχειοκεραίας, με ταυτόχρονη βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών της κεραιάς, είναι η εκτύπωση των patch πάνω σε μεταεπιφάνειες, με αύξηση της απόστασης μεταξύ τους κατά περίπου $\lambda/2$, περίπου 20%. Ωστόσο, η λύση αυτή προκαλεί αύξηση των οχληρών λοβών, όπως παρατηρείται στο δεύτερο κεφάλαιο. Οι μεταεπιφάνειες έχουν τη δυνατότητα να φιλοξενήσουν στοιχεία σε απόσταση περίπου $0,017 \lambda$, που για μια συχνότητα 4,9 GHz αντιστοιχεί σε απόσταση (d) μεταξύ των στοιχείων ίση περίπου με 1mm.



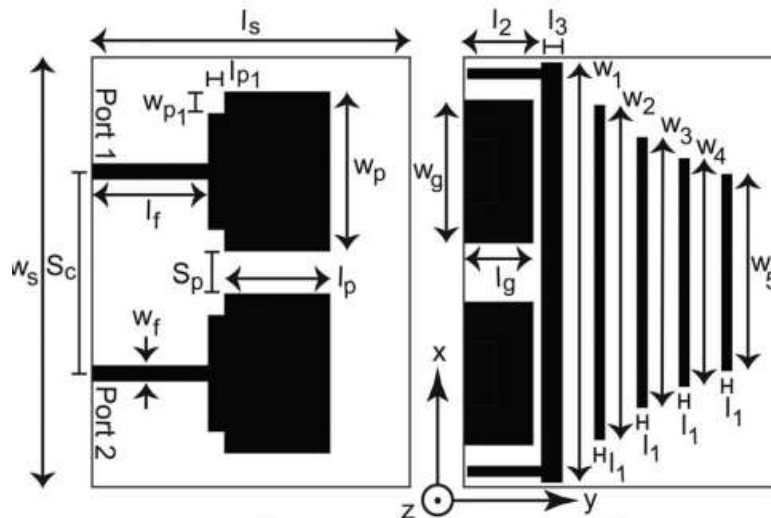
Εικόνα 4.9 Σχεδίαση συστοιχίας πάνω σε μεταεπιφάνειες

Ανάλογα με το σχήμα του patch και το επιθυμητό μέγεθος της στοιχειοκεραίας, υπάρχουν διάφοροι τρόποι να συνδυαστούν οι μεταεπιφάνειες με τα μεταυλικά. Οι γραμμές ουδετεροποίησης αφορούν μικρού πλάτους μεταλλικές κατασκευές και, πέρα από την απομόνωση μεταξύ των στοιχείων στη στοιχειοκεραία, αποτελούν μια λύση και για το πρόβλημα της προσαρμογής. Αυτή η τεχνική είναι κατάλληλη για MIMO, αλλά όχι για massive MIMO, και είναι εύκολη στην κατασκευή και στην τοποθέτηση, ανάλογα με το σχήμα του patch. Οι γραμμές ουδετεροποίησης απορροφούν μια ποσότητα ενέργειας από τη θύρα τροφοδοσίας.



Εικόνα 4.10 Σχεδίαση στοιχειοκεραίας με το κύκλωμα απόζευξης

Η ενσωμάτωση παρασιτικών στοιχείων στον σχεδιασμό μιας στοιχειοκεραίας έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία πολλαπλών διαδρομών σύζευξης, με αποτέλεσμα τη μείωση της αμοιβαίας σύζευξης μεταξύ των στοιχείων. Το ρεύμα δεν μεταδίδεται από ένα patch στο δίπλα του, αλλά διασυνδέεται μέσω του παρασιτικού στοιχείου. Η προσθήκη παρασιτικών στοιχείων είναι ένας απλός σχεδιασμός.



Εικόνα 4.11 Σχεδίαση στοιχειοκεραίας με παρασιτικά στοιχεία

Η απομόνωση που προσφέρει αυτή η τεχνική είναι της τάξεως των -15dB. Τα σχήματα των παρασιτικών στοιχείων μπορεί να είναι διάφορα ανάμεσα στα patch.

4.5 Απομόνωση και ECC

Η απομόνωση μεταξύ των στοιχείων ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας περιγράφεται με τις παραμέτρους S , ενώ η απομόνωση μεταξύ των στοιχείων i, j συμβολίζεται με S_{ij} . Στα σύγχρονα MIMO συστήματα, είναι ζωτικής σημασίας να επιτευχθεί απομόνωση της τάξεως των -20 έως -30 dB μεταξύ των στοιχείων.

Ο συντελεστής συσχέτισης ECC (Envelope Correlation Coefficient) ορίζεται μεταξύ των δύο θυρών ενός MIMO συστήματος. Οι κεραίες MIMO πρέπει να σχεδιάζονται

με χαμηλό ECC, ώστε να διασφαλίζεται η ανεξαρτησία των καναλιών μετάδοσης και η υψηλή χωρητικότητα του διαύλου. Ο συντελεστής συσχέτισης υπολογίζεται βάσει του διαγράμματος ακτινοβολίας των κεραιών της στοιχειοκεραίας, με τιμή κάτω από 0.5 για MIMO εφαρμογές.

Για πολύ αποδοτικές κεραιές, η σχέση που συνδέει το ECC και την απομόνωση μεταξύ δύο στοιχείων είναι η εξής:

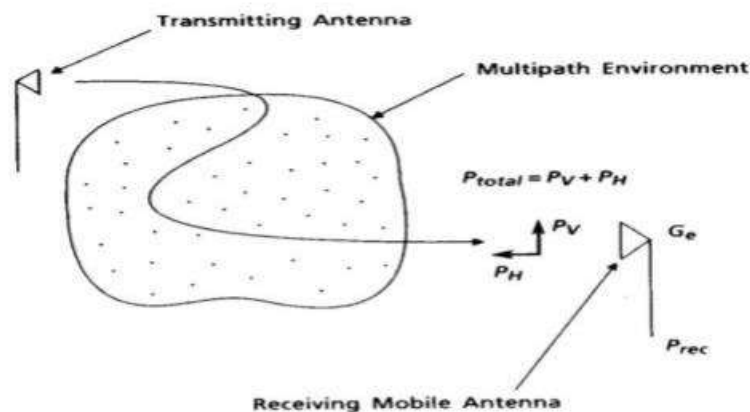
$$\rho_e = \frac{|S_{11} * S_{12} + S_{21} * S_{22}|^2}{(1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2)(1 - |S_{22}|^2 - |S_{12}|^2)}$$

Ενώ για ένα σύστημα NxN στοιχείων ισχύει ότι:

$$\rho_e = \frac{|\sum_{n=1}^N S_{*i,n} S_{n,j}|^2}{\prod_{i,j} [1 - \sum_{n=1}^N S_{*k,n} S_{k,j}]}$$

4.6 Μέσο ενεργό κέρδος

Σε ένα περιβάλλον μετάδοσης ακτινοβολίας, όπου υπάρχουν διάφορες διαδρομές λόγω ανάκλασης, διάθλασης και σκέδασης, είναι αδύνατο να υπολογιστεί το κατευθυντικό κέρδος της κεραιάς. Σε μια τέτοια διάταξη, για την αξιολόγηση της απόδοσης της κεραιάς, προσδιορίζεται η μέση τιμή των σημάτων που λαμβάνονται ενώ η κεραιά κινείται σε μια επιλεγμένη διαδρομή. Έτσι, το μέσο ενεργό κέρδος (MEG - Mean Effective Gain) της κεραιάς λήψης υπολογίζεται συγκρίνοντας τη μέση ισχύ της άγνωστης κεραιάς με αυτήν της κεραιάς αναφοράς.



Εικόνα 4.12 Αναπαράσταση της μέσης ισχύος που στέλνει και λαμβάνει μια κινητή κεραιά σε πολυδιαδρομικό περιβάλλον

Η συνολική λαμβανόμενη ισχύς, που συμβολίζεται με (P_{total}) , θεωρείται ως το μέσο ενεργό κέρδος και ισούται με το άθροισμα της ισχύος που λαμβάνεται κάθετα (P_v) και οριζόντια (P_h) . Αυτή η τεχνική αξιολόγησης της κεραιάς είναι πολύ χρήσιμη στις κινητές επικοινωνίες.

Το περιβάλλον στο οποίο λαμβάνει μέρος αυτού του είδους μέτρησης συνήθως χαρακτηρίζεται ως ομοιόμορφο. Αυτό συμβαίνει επειδή η μεταδιδόμενη ισχύς (P_{θ}) (P_{ϕ}) ακολουθεί γκαουσιανή κατανομή κατά την ακτινική απόσταση και ομοιόμορφη κατανομή κατά μήκος του αζιμουθιακού επιπέδου.

Ειδικότερα, για την περίπτωση του ομοιόμορφου περιβάλλοντος μετάδοσης, ισχύει ότι το μέσο ενεργό κέρδος της $(n \times n)$ -οστής κεραίας ισούται με:

$$MEG_v = \frac{e_{ov}}{2}$$

Όπου e_{ov} είναι η συνολική απόδοση της n -οστής κεραίας.

Ένα MIMO σύστημα έχει την ικανότητα να μετριάξει την εξασθένιση (diversity performance) όταν κατά την λήψη μεταξύ των στοιχείων i, j της στοιχειοκεραίας ισχύει ότι:

$$\rho_{eij} > 0.5 \& \frac{MEG_i}{MEG_j} \cong 1$$

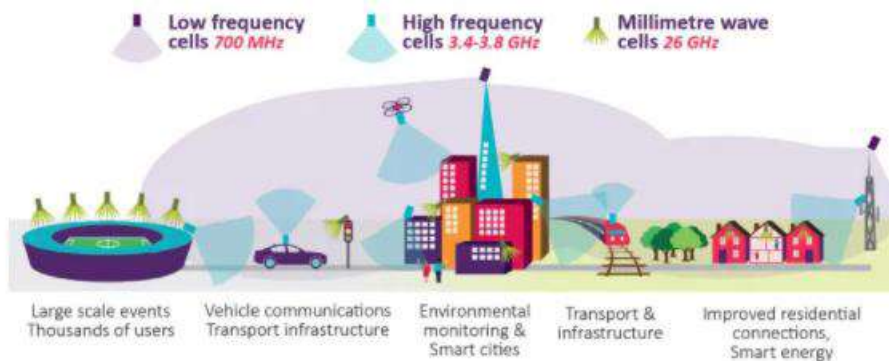
4.7 Ενεργό κατευθυντικό κέρδος

Ένα ευρέως αναγνωρισμένο μέτρο για την αξιολόγηση της MIMO κεραίας είναι η καθορισμός του Ενεργού Κατευθυντικού Κέρδους (EDG) (Effective Diversity Gain), το οποίο ορίζεται ως ο λόγος της πραγματικής λαμβανόμενης ισχύος προς την ισχύ που θα λαμβάνονταν από έναν ισοτροπικό ακτινοβολητή με μοναδιαία απόδοση ακτινοβολίας. Το EDG συνδέεται με το ECC μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$EDG = 10e_o \sqrt{1 - |ECC|}$$

4.8 Συχνότητες MIMO και 5G

Από το 2018, έχουν αρχίσει να αναπτύσσονται τα ασύρματα συστήματα 5ης γενιάς, με τις κεραίες MIMO που τα συνοδεύουν να σχεδιάζονται έτσι ώστε να λειτουργούν σε εύρος ζώνης συχνοτήτων που είναι ταυτόχρονα συμβατό με το 4G, αλλά και να υποστηρίζουν νέες καθορισμένες συχνότητες. Οι υψηλές συχνότητες του 5G βρίσκονται στις ζώνες των 26, 28, 38 και 60 GHz, και σε συνδυασμό με την τεχνολογία MIMO, προσφέρουν ταχύτητες μετάδοσης που φτάνουν έως και 20GB/s. Παράλληλα, υπάρχουν και οι χαμηλές και μεσαίες ζώνες συχνοτήτων του 5G, που κυμαίνονται από τα 600 MHz έως τα 6 GHz, με το ειδικό ενδιαφέρον να εστιάζεται στο τμήμα μεταξύ 3.5 GHz και 4.2 GHz. Οι διάφορες ζώνες συχνοτήτων προορίζονται για διαφορετικές εφαρμογές και χρήσεις.



Εικόνα 4.13 Μπάντες συχνοτήτων 5G

Το φάσμα χαμηλής ζώνης εξακολουθεί να χρησιμοποιείται για εφαρμογές 3G, με τις ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων να μην ξεπερνούν τα 100Mbps, και το εύρος ζώνης να εξαντλείται γρήγορα λόγω των υψηλών απαιτήσεων. Στο φάσμα των μεσαίων συχνοτήτων, η μέγιστη ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων είναι στο 1Gbps, ωστόσο αυτό είναι ένα φάσμα όπου οι δομές των κεραιών και των σταθμών είναι εύκολο να εξελιχθούν. Στο φάσμα υψηλών συχνοτήτων, γνωστό και ως super data layer, επιτρέπονται ταχύτητες μέχρι και δεκάδες Gbps. Το πρόβλημα είναι ότι οι κυψέλες και οι κινητές συσκευές που απαρτίζουν το ασύρματο δίκτυο πρέπει να έχουν απαιτητική σχεδίαση

με υψηλό κόστος για να λειτουργήσουν σε αυτές τις συχνότητες. Επιπροσθέτως, συχνά στις ζώνες υψηλών συχνοτήτων αντιμετωπίζονται προβλήματα φασματικής γειννίας με δορυφορικές εφαρμογές.

Ακολουθούν πίνακες επισκόπησης ζωνών συχνοτήτων σύμφωνα με την Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών & Ταχυδρομείων ΕΕΤΤ:

Ζώνη	Εύρος (MHz)	Εναρμόνιση σε ΕΕ	Εναρμόνιση στην Ελλάδα
700 MHz (694-790 MHz)	2x30+20 (Δυνατότητα διάθεσης έως 4 blocks των 5MHz για SDL σε εθνικό επίπεδο)	Ναι	Σε εξέλιξη
800 MHz (790-862 MHz)	2x30	Ναι	Ναι
900 MHz (880-915 MHz/ 925-960 MHz)	2x35	Ναι	Ναι
1500 MHz (1427-1517 MHz)	90(SDL)	Ναι	Ναι
1.8 GHz (1710-1785 MHz/ 1805-1880 MHz)	2x75	Ναι	Ναι
2.1 GHz (1920-1980 MHz/ 2110-2170 MHz)	2x60	Ναι	Ναι
2.3 GHz (2300-2400 MHz)	100	Όχι	Όχι
2.6 GHz (2500-2690 MHz)	2x70+50	Ναι	Ναι
3.6 GHz (3400-3800 MHz)	400	Ναι	Ναι
Σύνολο:	1260 MHz	1160 MHz	1030 MHz

Πίνακας 4 Εναρμονισμένες ζώνες για δίκτυα κινητών και σταθερών επικοινωνιών 5G κάτω από 6 GHz

Ζώνη	Εύρος (GHz)	Εναρμόνιση σε ΕΕ/Προτεραιότητα CEPT
26 GHz (24.25-27.5 GHz)	3.25	Υπό διαμόρφωση
42 GHz (40.5-43.5 GHz)	3	Προτεραιότητα CEPT
66-71 GHz	5	Προτεραιότητα CEPT
Σύνολο	11.25 GHz	

Πίνακας 5 Οι ζώνες συχνοτήτων πάνω από τα 24 GHz που είναι υπό εναρμόνιση και σε προτεραιότητα για εναρμόνιση σε επίπεδο (European Conference of Postal and Telecommunications Administrations) (CEPT) για δίκτυα κινητών και σταθερών επικοινωνιών 5G

Ακολουθούν πίνακες επισκόπησης ζωνών συχνοτήτων σε παγκόσμιο επίπεδο σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union) (ITU):

Geographical Area	5G Frequency Band
Europe	3400-3800 MHz (awarding trial licenses)
China	3300-3600 MHz (onging trial)
China	4400-4500 MHz
China	4800-4990 MHz
Japan	3600-4200 MHz
Japan	4400-4900 MHz
Korea	3400-3700 MHz
USA	3100-3550 MHz
USA	3700-4200 MHz

Πίνακας 6 Μεσαίες μπάντες συχνοτήτων σε παγκόσμιο επίπεδο

Geographical Area	5G Frequency Band
Europe	24.25-27.5 GHz for commercial deployments from 2020
China	Focusing on 24.25-27.5 GHz and 37-43.5 GHz studies
Japan	27.5-28.28 GHz trials planned from 2017 and potentially commercial deployments in 2020
Korea	26.5-29.5 GHz trials in 2018 and commercial deployments in 2019
USA	27.5-28.35 GHz and 37-40 GHz pre-commercial deployments in 2018

Πίνακας 7 Υψηλές μπάντες συχνοτήτων σε παγκόσμιο επίπεδο

4.9 Συγκριτική μελέτη SISO, MIMO και Massive MIMO συστημάτων

Τα συστήματα SISO χρησιμοποιούν ένα μόνο ακτινοβολούμενο στοιχείο στις ακραίες μεταδόσεις (Tx) και λήψεις (Rx), ενώ στο σύστημα MIMO χρησιμοποιούνται πολλαπλά στοιχεία σε και τις δύο ακραίες. Σε σύγκριση με το σύστημα SISO, το σύστημα MIMO έχει πολύ καλύτερη θρησκεία συστήματος και αξιοπιστία. Το κέρδος διαμόρφωσης, το κέρδος ποικιλίας και το κέρδος πίνακα του συστήματος κεραιών MIMO είναι επίσης πολύ υψηλότερα από το σύστημα κεραιών SISO. Το κέρδος ποικιλίας του συστήματος MIMO εξαρτάται από τον αριθμό των καναλιών μεταξύ των ακραίων Tx και Rx που ευθύνονται για το κέρδος ποικιλίας, το οποίο μπορεί να αυξηθεί αν υπάρχουν περισσότερα κανάλια. Από την άλλη πλευρά, το μέγιστο κέρδος διαμόρφωσης του συστήματος MIMO μπορεί να επιτευχθεί ενώ υπάρχει μικρότερος αριθμός κεραιών στις ακραίες Tx και Rx. Επομένως, υπάρχει πάντα ένας συμβιβασμός μεταξύ αυτών των δύο κερδών, και είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθούν αυτά τα παράμετροι ταυτόχρονα. Στο σύστημα μαζικής MIMO, χρησιμοποιούνται μεγαλύτεροι αριθμοί ακτινοβολούμενων στοιχείων σε σύγκριση με το συμβατικό σύστημα MIMO. Η απόδοση του συστήματος μπορεί να αξιολογηθεί σε τέσσερις καταστάσεις - σύστημα κεραιών SISO, σύστημα μονοχρήστη MIMO (SU-MIMO), πολυχρήστη MIMO (MU-MIMO) και σύστημα μαζικής MIMO. Το μοντέλο επικοινωνίας έχει N_t αριθμό μεταδιδόμενων κεραιών στο άκρο του πομπού και M_r αριθμό λαμβανόμενων κεραιών για κάθε χρήστη K_u στο άκρο του δέκτη.



Εικόνα 4.14 Συστημική αναπαράσταση SISO συστημάτων

Σύστημα SISO [$N_t = 1, M_r = 1$ και $K_u = 1$]:

Το σύστημα SISO αποτελείται από ένα μόνο στοιχείο σε κάθε μονάδα πομπού και λήψης, που επικοινωνεί χρησιμοποιώντας ένα μόνο κανάλι όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.14. Στο σύστημα SISO, οι μονάδες πομπού και λήψης έχουν μόνο μία μοναδική κεραία και το ληφθέν σήμα y συμβολίζεται ως:

$$y = Hx + n$$

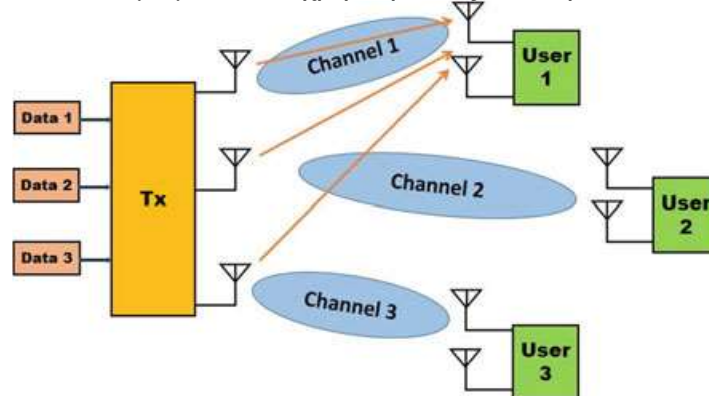
όπου H είναι ο πίνακας καναλιού, x είναι το διάνυσμα μετάδοσης και n είναι το διάνυσμα θορύβου που είναι πρόσθετος λευκός θόρυβος Gauss (AWGN). Εδώ, ο θόρυβος είναι μια σύνθετη κανονική κατανομή συνάρτησης που συμβολίζεται ως $CN(0, \sigma)$, όπου η μέση τιμή είναι μηδέν και η τυπική απόκλιση είναι σ . Για το σύστημα SISO, ο πίνακας καναλιού θα είναι μονοδιάστατος, οπότε το ληφθέν σήμα (y) μπορεί να γραφτεί ως η χωρητικότητα καναλιού SISO (bits/s/Hz) μπορεί να οριστεί ως:

$$C_{SISO} = \log_2(1 + \gamma) = \log_2 \left(1 + h^2 \frac{P_t}{\sigma_n^2} \right)$$

όπου h είναι ο συντελεστής καναλιού, P_t είναι η ισχύς μετάδοσης, σ_n^2 είναι η ισχύς θορύβου και γ είναι ο λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR). Επομένως, η καναλιού χωρητικότητα ενός συστήματος SISO μπορεί να βελτιωθεί αυξάνοντας το SNR του συστήματος.

SU-MIMO Σύστημα [$N_t > 1, M_r > 1$, and $K_u = 1$]:

Το σύστημα SU-MIMO αποτελείται από πολλαπλά στοιχεία τόσο στις μονάδες πομπού όσο και στις μονάδες λήψης, τα οποία επικοινωνούν χρησιμοποιώντας πολλαπλά παράλληλα κανάλια με μοναδικό χρήστη, όπως αναπαρίσταται στο Σχήμα 1.6.



Εικόνα 4.15 Συστημική αναπαράσταση SU-MIMO συστημάτων

Στο σύστημα κεραιών MIMO, η φασματική αποδοτικότητα και ο ρυθμός μετάδοσης αυξάνονται σημαντικά χωρίς να επηρεαστεί το SNR ή το εύρος ζώνης λόγω του πλήθους κεραιών που υπάρχουν τόσο στις πλευρές Tx όσο και Rx. Η επιπλέον χωρητικότητα καναλιού ενός συστήματος MIMO προκύπτει λόγω της χωρικής διαμόρφωσης μέσω πολυκαναλικής μετάδοσης από πολλαπλά ακτινοβολούμενα στοιχεία (Mattigiri και Warty 2013). Η επιπλέον χωρητικότητα του καναλιού έρχεται σε βάρος του χώρου (συνήθως για κινητά τηλέφωνα), του κόστους για τον εκσυγχρονισμό πολλαπλών

ακτινοβολούμενων στοιχείων και της πολυπλοκότητας επεξεργασίας σήματος (Goldsmith 2005). Στο σύστημα SU-MIMO, μόνο ένας χρήστης θα εξυπηρετηθεί μεταξύ K αριθμού χρηστών μέσα σε ένα μόνο χρονικό διάστημα μετάδοσης και το διάστημα λήψης σήματος μπορεί να περιγραφεί ως

$$y_m = \sqrt{\rho} H_{mn} x_n + n_m$$

όπου x_n είναι το διάνυσμα μετάδοσης σήματος ($x_n \in C^{N_t \times 1}$), n_m είναι το διάνυσμα θορύβου ($n_m \in C^{M_r \times 1}$) και n είναι ο αριθμός των κεραιών που μεταδίδουν ($n = 1, 2, 3 \dots N_t$), ενώ m είναι ο αριθμός των κεραιών λήψης ($m = 1, 2, 3 \dots M_r$). H_{mn} είναι ο πίνακας καναλιού, ρ αντιπροσωπεύει την κανονικοποιημένη μεταδοτική ισχύ και η συνολική ισχύς του συστήματος είναι μονάδα ($E[x_n]^2 = 1$). Η χωρητικότητα καναλιού (bits/s/Hz) ενός συστήματος SU-MIMO μπορεί να γραφτεί ως

$$C_{SU-MISO} = \log_2 \left| 1 + \frac{\rho}{N_t} H H^* \right|$$

Εδώ I είναι ο πίνακας ταυτότητας και η χωρητικότητα καναλιού του συστήματος SU-MIMO είναι φραγμένη από:

$$\log_2(1 + \rho M_r) \leq C_{SU-MISO}$$

$$\log_2(1 + \rho M_r) \leq \min(N_t, M_r) \log_2 \left(1 + \frac{\rho \max(N_t, M_r)}{N_t} \right)$$

MU-MIMO Σύστημα [$N_t > 1$, $M_r > 1$, $M_{Ku} = 1$ and $K_u = 1$]:

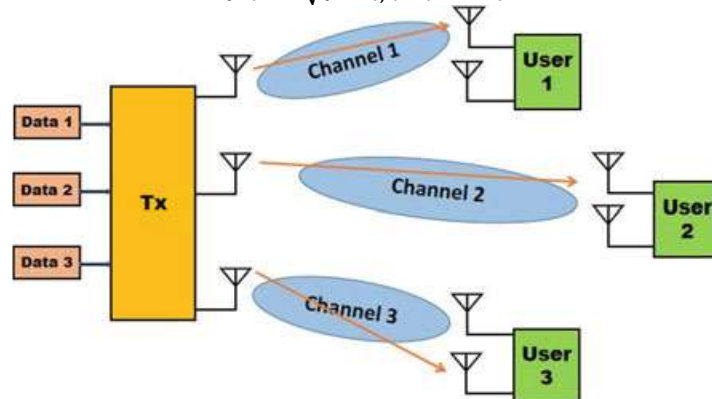
Το σύστημα MU-MIMO αποτελείται από πολλαπλά στοιχεία τόσο στις μονάδες πομπού όσο και στις μονάδες λήψης, τα οποία επικοινωνούν χρησιμοποιώντας πολλαπλά κανάλια που είναι ανατεθειμένα σε κάθε χρήστη, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 4.16.

Το MU-MIMO έχει πολλά πλεονεκτήματα έναντι του συστήματος SU-MIMO, όπως (1) επιτυγχάνει πολυχρηστική ποικιλία στο χωρικό πεδίο διαχειρίζοντας τους συνολικούς πόρους για τους πολλαπλούς χρήστες για χωρικά συσχετισμένα κανάλια (Li et al. 2010).

(2) οι κεραιές μετάδοσης του MU-MIMO μπορούν να μεταδώσουν το σήμα σε πολλούς χρήστες ταυτόχρονα και, συνεπώς, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια μόνο κεραία στο άκρο του χρήστη για να μειωθεί το κόστος του συστήματος.

(3) είναι συγκριτικά λιγότερο ευαίσθητο για την προπαγανδική διασπορά (Kim και Malladi 2012). Το ληφθέν διάνυσμα σήματος ($y_k \in C^{K_u \times 1}$) ενός συστήματος MU-MIMO μπορεί να εκφραστεί ως:

$$y_k = \sqrt{\rho} H_{k,n} x_n + n_k$$



Εικόνα 4.16 Συστημική αναπαράσταση MU-MIMO συστημάτων

όπου $H_{k,n}$ είναι ο πίνακας καναλιού ($H_{k,n} \in C^{K_u \times N_t}$), x_n είναι το διάνυσμα μετάδοσης σήματος ($x_n \in C^{N_t \times 1}$) και n_k είναι το διάνυσμα θορύβου ($n_k \in C^{K_u \times 1}$) του συστήματος

MU-MIMO. Η χωρητικότητα ενός συστήματος MU-MIMO μπορεί να αναπαρασταθεί ως:

$$|C_{MU-MISO} = \max \log_2 |I + \rho H P H^*|$$

όπου P είναι ένας διαγώνιος πίνακας ($P = p_1, p_2, \dots, p_k$) με κατανομή ισχύος. Τα τελευταία χρόνια, έχουν αναπτυχθεί διάφορα συστήματα κεραιών MU-MIMO λόγω της καλύτερης απόδοσης του συστήματος όσον αφορά τη χωρητικότητα και την αξιοπιστία (Li et al. 2010).

Massive MIMO Σύστημα [$N_t \gg M_r$ and $N_t \rightarrow \infty$ or $M_r \gg N_t$ and $M_r \rightarrow \infty$]:

Το σύστημα Massive MIMO είναι παρόμοιο με το MU-MIMO, αλλά ο αριθμός των στοιχείων ακτινοβολήσης είναι πολύ μεγάλος είτε στη μονάδα πομπού είτε στη μονάδα λήψης, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 4.17.

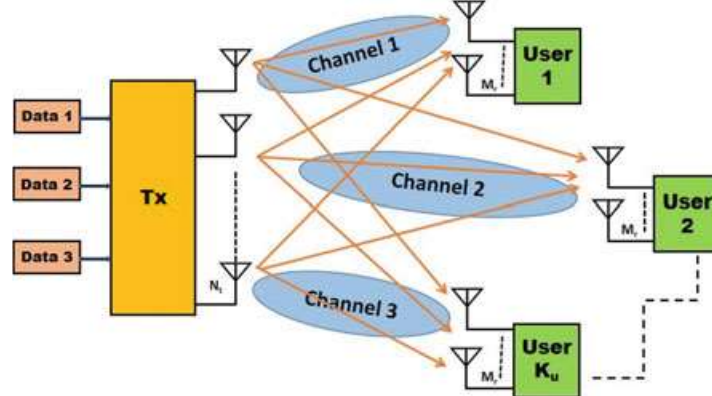
Στο σύστημα Massive MIMO, η φασματική αποδοτικότητα αυξάνεται τεράστια λόγω της παρουσίας ενός τεράστιου αριθμού κεραιών (Larsson et al. 2014; Lu et al. 2014). Για την πρώτη συνθήκη ($N_t \gg M_r$ και $N_t \rightarrow \infty$), η χωρητικότητα καναλιού του συστήματος Massive MIMO μπορεί να εκφραστεί ως

$$C_{Massive MIMO} \approx M_r \log_2(1 + \rho)$$

Και για τη δεύτερη συνθήκη ($M_r \gg N_t$ και $M_r \rightarrow \infty$), η χωρητικότητα καναλιού γίνεται

$$C_{Massive MIMO} \approx N_t \log_2\left(1 + \frac{\rho M_r}{N_t}\right)$$

Από αυτές τις δύο εξισώσεις, παρατηρείται ότι η χωρητικότητα του καναλιού ενός μαζικού συστήματος αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση του αριθμού των κεραιών τόσο στις μονάδες πομπού όσο και στις μονάδες λήψης.



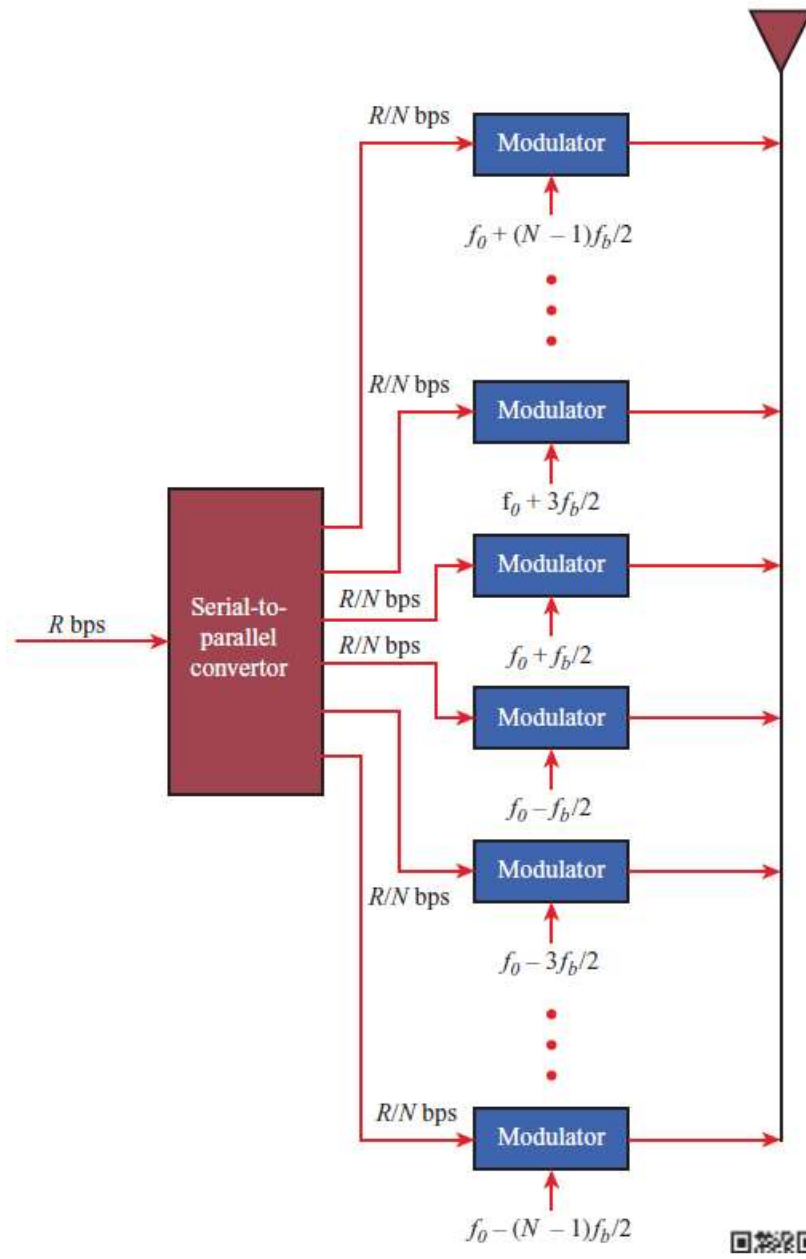
Εικόνα 4.17 Συστημική αναπαράσταση Massive MIMO συστημάτων

5 Orthological Frequency Division Multiplexing (OFDM)

Το OFDM, επίσης γνωστό ως πολυφορέας διαμόρφωσης (multicarrier modulation), χρησιμοποιεί πολλαπλούς φορείς σε διαφορετικές συχνότητες, στέλνοντας κάποια από τα bits σε κάθε κανάλι. Αυτό είναι παρόμοιο με τη διαμόρφωση πολυπλεξίας συχνότητας (FDM). Ωστόσο, στην περίπτωση του OFDM, πολλοί υποφορείς είναι αφιερωμένοι σε μια μόνο πηγή δεδομένων.

Η Εικόνα 5.1 εικονογραφεί μια έννοιακή κατανόηση του OFDM. Η πραγματική λειτουργία του πομπού είναι απλοποιημένη, αλλά η βασική έννοια μπορεί να κατανοηθεί εδώ πρώτα. Ας υποθέσουμε ότι έχουμε μια ροή δεδομένων δυαδικών bits λειτουργώντας στο R bps και ένα διαθέσιμο εύρος ζώνης Nf_b , κεντραρισμένο στο f_0 . Ολόκληρο το εύρος ζώνης θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να στείλει τη ροή δεδομένων, με

αποτέλεσμα η διάρκεια κάθε bit να είναι $1/R$. Η εναλλακτική είναι να διασπαστεί η ροή δεδομένων σε N υποροές, χρησιμοποιώντας ένα μετατροπέα σειριακής-προς-παράλληλης μετατροπής. Κάθε υποροή έχει ρυθμό δεδομένων R/N bps και μεταδίδεται σε έναν ξεχωριστό υποφορέα, με ένα διάκενο μεταξύ των γειτονικών υποφορέων f_b . Τώρα η διάρκεια του bit είναι N/R , η οποία είναι σημαντικά μεγαλύτερη και δημιουργεί ειδικές δυνατότητες για να αντιμετωπιστεί η πολλαπλή πορεία.



Εικόνα 5.1 Εννοιολογική κατανόηση του OFDM

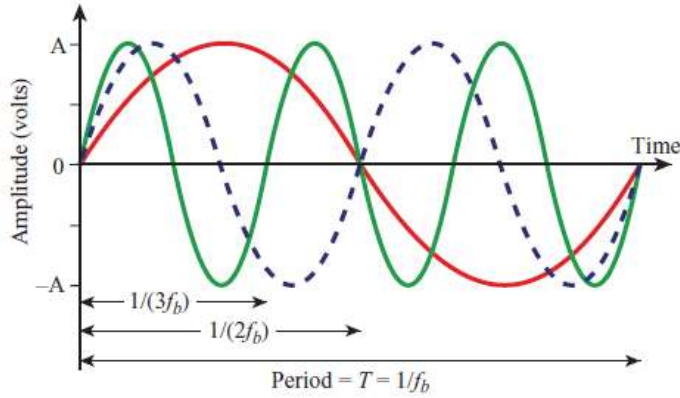
5.1 Ορθογωνικότητα

Για να αποκτήσουμε μια πιο κατανοητή εικόνα του OFDM, ας εξετάσουμε το σχήμα σε σχέση με την βασική συχνότητά του, f_b . Αυτός είναι ο χαμηλότερος υποφορέας συχνότητας. Όλοι οι άλλοι υποφορείς είναι ακέραιοι πολλαπλασιασμοί της βασικής συχνότητας, δηλαδή, $2f_b$, $3f_b$, κ.λπ., όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.2. Το σχήμα OFDM χρησιμοποιεί προηγμένες τεχνικές ψηφιακής επεξεργασίας σήματος για να διανεμίει τα δεδομένα πάνω σε πολλαπλούς φορείς σε ακριβείς συχνότητες.

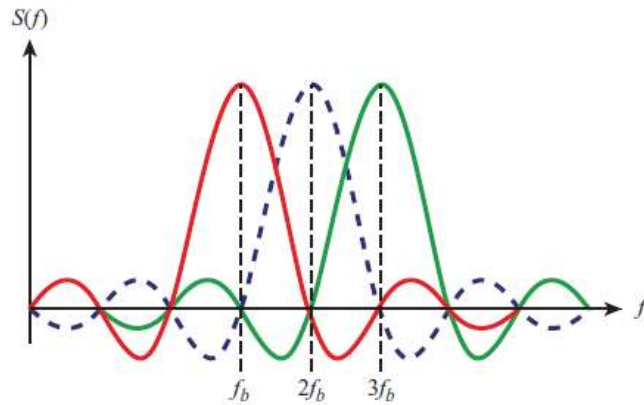
Η σχέση μεταξύ των υποφορέων ονομάζεται ορθογωνικότητα. Το αποτέλεσμα φαίνεται στην Εικόνα 5.2b. Φαίνεται ότι τα σήματα είναι πολύ κοντά μεταξύ τους επειδή επικαλύπτονται σημαντικά, αλλά μια ιδιότητα της ορθογωνικότητας είναι ότι οι κορυφές της πυκνότητας της ενέργειας ισχύος του κάθε υποφορέα συμβαίνουν σε ένα σημείο όπου η ισχύς των άλλων υποφορέων είναι μηδέν. Προηγούμενες προσεγγίσεις FDM φαίνονται στην Εικόνα 5.2c, όπου υποθέτει ότι τα σήματα θα έπρεπε να είναι αρκετά απομακρυσμένα σε συχνότητα για να

- αποφευχθεί η επικάλυψη στα φάσματα συχνότητας και (2)
- να παρέχεται επιπλέον απόσταση, γνωστή ως περιοχές φύλαξης, για να αποτραπούν τα επιπλέον εφέ από την παρεμβολή γειτονικών φορέων εκτός ζώνης.

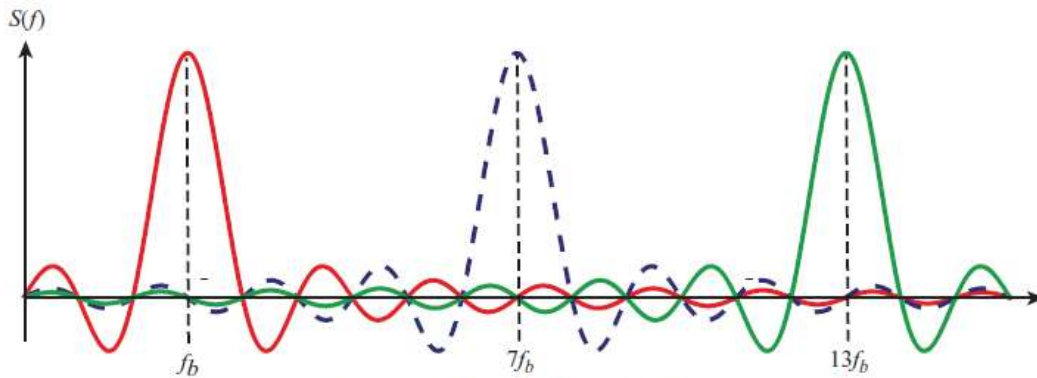
Αλλά το OFDM είναι σε θέση να βελτιώσει δραστικά τη χρήση του φάσματος συχνοτήτων.



(a) Three subcarriers in time domain



(b) Three orthogonal subcarriers in frequency domain



(c) Three carriers using traditional FDM

Εικόνα 5.2 Αναπαράσταση της ορθογωνικότητας στο OFDM

Παρατηρώντας την Εικόνα 5.2b συγκριτικά με την 5.2c, ο αριθμός των σημάτων που μπορούν να υποστηριχθούν έχει αυξηθεί κατά ένα παράγοντα 6!

Με το OFDM, οι υποφορείς μπορούν να διαταχθούν πυκνά μαζί επειδή υπάρχει ελάχιστη παρεμβολή μεταξύ των γειτονικών υποφορέων (μηδενική παρεμβολή εάν ο χώρος μεταξύ των φορέων δεν παραμορφωθεί). Η ορθογωνικότητα καθορίζεται από ένα σημαντικό μαθηματικό αρχή. Δύο σήματα, $s_1(t)$ και $s_2(t)$, είναι ορθογώνια αν ο μέσος όρος σε χρόνο bit για τα δύο σήματα ισούται με μηδέν.

Στον πομπό στέλνουμε το σήμα

$$s(t) = s_1(t) + s_2(t)$$

Στον δέκτη που προορίζεται να εξάγει το σήμα $s_1(t)$ από το ληφθέν σήμα, το πολλαπλασιάζει με το $s_1(t)$ και το μέσο όρο. Εφόσον τα σήματα είναι ορθογώνια ο μέσος όρος σε χρόνο bit για το $s_1(t)s(t)$ είναι $s_1(t)s_1(t) + s_1(t)s_2(t) = s_1^2(t) + 0$.

Αν τα σήματα είναι όλα ορθογώνια, ο δέκτης μπορεί να αφαιρέσει όλα τα άλλα σήματα και να έχει μόνο ξανά το $s_1(t)$.

Εδώ είναι η απαίτηση για ορθογώνια ψηφιακά σήματα που είναι υποφορείς του OFDM. Αν ο χρόνος bit ενός υποφορέα είναι T , τότε η βασική συχνότητα f_b πρέπει να επιλεγεί ώστε να είναι πολλαπλάσιο του $1/T$. Κάθε άλλο σήμα θα είναι πολλαπλάσιο της f_b , έτσι ώστε $Mf_b = MT$ για κάποιο ακέραιο M . Όλα τα σήματα θα είναι ορθογώνια. Ένα παράδειγμα του OFDM είναι αυτό που χρησιμοποιείται για την τεχνολογία κινητής τηλεφωνίας LTE της τέταρτης γενιάς, η οποία χρησιμοποιεί ένα διάστημα υποφορέα των 15 kHz.

Η Εικόνα 5.2 απεικονίζει το σύνολο των υποφορέων OFDM σε ένα φάσμα συχνοτήτων που αρχίζει από τη βασική συχνότητα. Για τη μετάδοση, το σύνολο των υποφορέων OFDM μεταφράζεται περαιτέρω σε ένα υψηλότερο φάσμα συχνοτήτων. Για παράδειγμα, το σχήμα OFDM στο πρότυπο ασύρματου δικτύου LAN IEEE 802.11n αποτελείται από 48 υποφορείς σε ένα κανάλι 20 MHz ή 108 υποφορείς για ένα κανάλι 40 MHz με μια βασική συχνότητα $f_b = 0,3125$ MHz. Αυτό το σύνολο υποφορέων μεταφράζεται στη συνέχεια στο εύρος 2,4 GHz ή 5 GHz για τη μετάδοση.

5.2 Πλεονεκτήματα του OFDM

Το OFDM έχει αρκετά πλεονεκτήματα. Πρώτον, η επιλεκτική διαρροή συχνότητας επηρεάζει μόνο ορισμένους υποφορείς και όχι ολόκληρο το σήμα. Εάν η ροή δεδομένων προστατεύεται από έναν κώδικα προώθησης σφάλματος, αυτός ο τύπος διαρροής εύκολα αντιμετωπίζεται. Ωστόσο, το OFDM ξεπερνάει τη διασυμβολική παρεμβολή (ISI) σε ένα πολλαπλό μονοπάτι περιβάλλον. Η ISI (intersymbol interference) έχει μεγαλύτερη επίδραση στις υψηλότερες ρυθμίσεις bit. Επειδή η απόσταση μεταξύ bit ή συμβόλων είναι μικρότερη, η διάδοση του χρόνου λόγω πολλαπλών μονοπατιών επηρεάζει εύκολα τα επόμενα bit. Με το OFDM, ο ρυθμός δεδομένων ανά κατανομή μειώνεται κατά έναν παράγοντα N , οπότε ο χρόνος συμβόλου αυξάνεται κατά έναν παράγοντα N . Επομένως, αν η περίοδος συμβόλου είναι T_s για τη ροή πηγής, η περίοδος για τα σήματα OFDM είναι NT_s . Αυτό μειώνει δραματικά την επίδραση της ISI επειδή τα σύμβολα είναι σημαντικά μεγαλύτερα. Ως κριτήριο σχεδίασης, επιλέγεται ένα N έτσι ώστε το NT_s να είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το ριζικό μέσο τετράγωνο διάστημα καθυστέρησης του καναλιού. Ακόμα και η διάχυση στους χρόνους καθυστέρησης των συνιστωσών πολλαπλών μονοπατιών δεν επηρεάζει σημαντικά το σήμα.

Ως αποτέλεσμα αυτών των σκέψεων, με τη χρήση του OFDM, μπορεί να μην είναι απαραίτητο να τοποθετηθούν ισορροπητές για να αντιμετωπιστεί η ISI. Οι ισορροπητές είναι σύνθετες και ακριβές συσκευές οι οποίες αυξάνουν την πολυπλοκότητα με τη σοβαρότητα της ISI.

5.3 Υλοποίηση του OFDM

Η υλοποίηση του OFDM περιλαμβάνει δύο σημαντικές λειτουργίες που συμβάλλουν στα οφέλη που μόλις περιγράφηκαν. Αυτές είναι η χρήση του αντίστροφου ταχύος μετασχηματισμού Fourier (IFFT) και του κυκλικού προθέματος (CP).

5.3.1 Αντίστροφος ταχύς μετασχηματισμός Fourier (IFFT)

Παρόλο που το OFDM χρονολογείται περίπου 40 χρόνια πριν, μόνο από τα 1990s πραγματοποιήθηκε ένα σημαντικό βήμα για να γίνει το OFDM μια οικονομικά εφικτή τεχνολογία. Η Εικόνα 5.1 παρουσίασε μια εννοιολογική κατανόηση του OFDM όπου ένα ρεύμα δεδομένων διαιρείται σε πολλά ρεύματα χαμηλότερης ταχύτητας και στη

συνέχεια πολλαπλασιάζεται σε πολλούς διαφορετικούς υποφέροντες. Μια τέτοια προσέγγιση, ωστόσο, θα οδηγούσε σε έναν πολύ ακριβό πομπό και δέκτη επειδή θα περιλάμβανε τόσους ακριβούς ταλαντωτές. Ευτυχώς, το OFDM μπορεί να υλοποιηθεί αντί αυτού εκμεταλλευόμενο τις ιδιότητες του διακριτού μετασχηματισμού Fourier (DFT) που αναφέρεται σε οποιοδήποτε αλγόριθμο που παράγει μια ποσοτικοποιημένη μετασχηματισμό Fourier, $X[k]$, ενός διακριτού χρόνου-πεδίου συνάρτησης, $x[n]$.

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j \frac{2\pi kn}{N}}$$

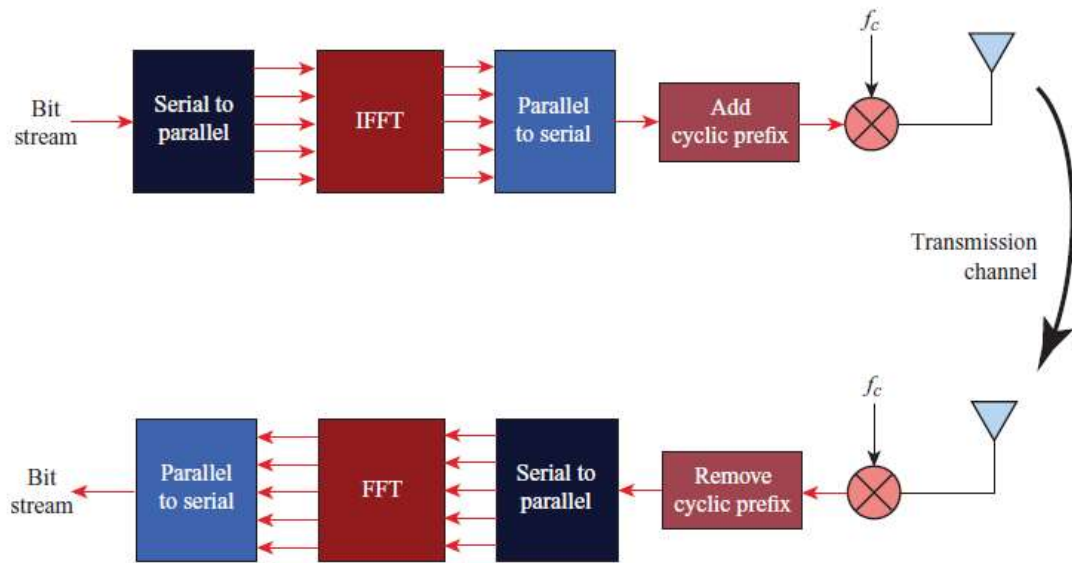
Ο αντίστροφος διακριτός μετασχηματισμός Fourier, ο οποίος μετατρέπει τις τιμές συχνότητας πίσω σε τιμές πεδίου χρόνου, έχει την ακόλουθη μορφή.

$$x[n] = \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{j \frac{2\pi kn}{N}}$$

Όταν αυτή η συνάρτηση εφαρμόζεται χρησιμοποιώντας έναν αριθμό σημείων δεδομένων N που είναι δύναμη του δύο, ο χρόνος υπολογισμού μειώνεται σημαντικά και αυτές οι συναρτήσεις ονομάζονται ταχεία μετασχηματισμοί Fourier (FFT) και αντίστροφος ταχείας μετασχηματισμού Fourier (IFFT).

Η υλοποίηση του OFDM χρησιμοποιώντας το FFT και το IFFT απεικονίζεται στην Εικόνα 5.3. Η ροή δεδομένων υποβάλλεται σε μια λειτουργία σειριακού προς παράλληλο (S/P), η οποία παίρνει ένα δείγμα από κάθε υποφορέα και δημιουργεί μια ομάδα δειγμάτων που ονομάζεται σύμβολο OFDM. Κάθε τιμή στην ουσία δίνει ένα βάρος για κάθε υποφορέα. Στη συνέχεια, ο IFFT (όχι FFT) παίρνει τις τιμές αυτών των υποφορέων και υπολογίζει τη ροή δεδομένων πεδίου χρόνου προς μετάδοση, η οποία αποτελεί συνδυασμό αυτών των υποφορέων. Η λειτουργία IFFT έχει το αποτέλεσμα να εξασφαλίζει ότι οι υποφορείς δεν αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Αυτές οι τιμές επιστρέφονται σε μια σειριακή ροή με μια λειτουργία P/S, και στη συνέχεια η ροή κωδικοποιείται στον υποφορέα χρησιμοποιώντας έναν ταλαντωτή. Στον δέκτη, πραγματοποιείται η αντίστροφη λειτουργία. Ένας ενότητα FFT χρησιμοποιείται για να αντιστοιχίσει το εισερχόμενο σήμα πίσω στους M υποφορείς, από τους οποίους επαναφέρονται οι ροές δεδομένων καθώς τα βάρη για κάθε υποφορέα ανακτώνται για κάθε δείγμα.

Να σημειωθεί ότι στο OFDM ο όρος "σύμβολο" έχει διαφορετική σημασία από τη χρήση του σε άλλα πλαίσια. Αυτό ενδέχεται αρχικά να προκαλέσει σύγχυση. Εδώ, ένα σύμβολο OFDM είναι μια ομάδα δειγμάτων, ένα από κάθε υποφορέα. Αυτό είναι το εισερχόμενο στη λειτουργία IFFT. Επομένως, είναι εντελώς δυνατόν ότι αν κάποιος χρησιμοποιούσε ένα σχήμα 16QAM και μέγεθος τμήματος OFDM οκτώ δειγμάτων, θα ήταν δυνατή η μετάδοση ενός συμβόλου OFDM από 8 σύμβολα 16-πολικής κυρτής διαμόρφωσης (QAM)!



FFT = fast Fourier transform
 IFFT = inverse fast Fourier transform

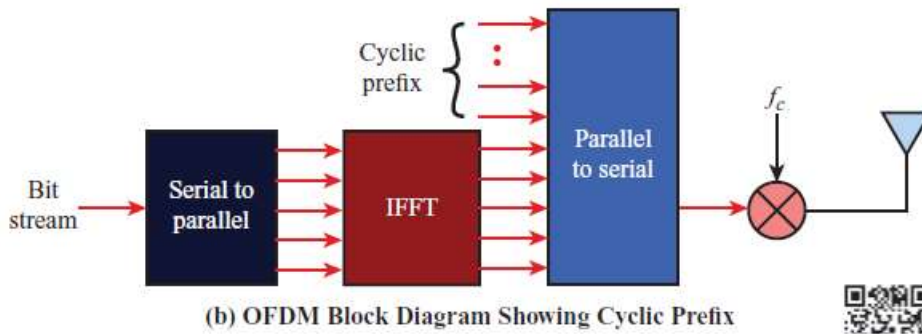
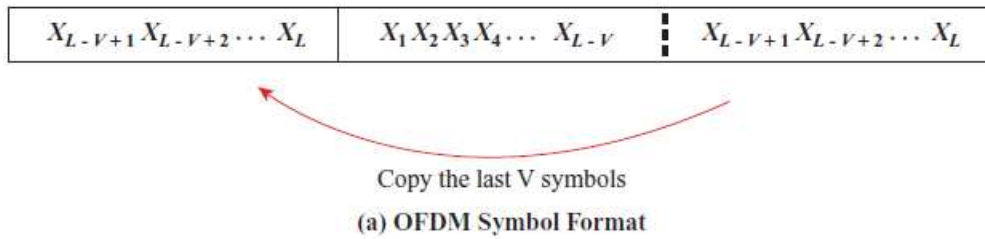


Εικόνα 5.3 Υλοποίηση OFDM με IFFT

5.3.2 Το Πρόθεμα Κυκλικής Αναφοράς (Cyclic Prefix)

Παρόλο που το OFDM κατά ορισμό περιορίζει την ISI χρησιμοποιώντας μακρινούς χρόνους συμβόλων, το OFDM χρησιμοποιεί επίσης ένα πρόθεμα κυκλικής αναφοράς που πηγαίνει ένα βήμα παραπέρα για την καταπολέμηση της ISI και την απόλυτη εξάλειψη της ανάγκης για εξισορρόπηση. Η κυκλική αναφορά απεικονίζεται στην Εικόνα 5.4. Οι τιμές X_i είναι τα σύμβολα OFDM. Αυτό επιτυγχάνει δύο λειτουργίες:

1. Προστίθεται επιπλέον χρόνος, γνωστός ως περιοχή φύλαξης, στην αρχή του συμβόλου OFDM πριν αρχίσουν τα πραγματικά δεδομένα. Αυτό επιτρέπει σε όλη την υπολειπόμενη ISI να μειωθεί πριν επηρεάσει τα ληφθέντα δεδομένα.
2. Αυτή η περίοδος αρχής είναι γεμάτη με δεδομένα που αποτελούν ακριβές αντίγραφο των δεδομένων από το τέλος του συμβόλου OFDM που αποστέλλονται. Αυτό μετατρέπει την μαθηματική επεξεργασία του σήματος σε μια κυκλική λειτουργία αντί για μια γραμμική. Αυτό απομονώνει τα παράλληλα υποκανάλια και επιτρέπει απλές τεχνικές ψηφιακής επεξεργασίας σήματος στο πεδίο της συχνότητας.



Εικόνα 5.4 Κυκλικό πρόθεμα

5.4 Δυσκολίες του OFDM

Παρόλο που το OFDM έχει τεράστια οφέλη και η διαδικασία υλοποίησης έχει απλοποιηθεί σημαντικά, υπάρχουν ακόμα δύο βασικά θέματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν για την επιτυχή υλοποίηση του OFDM.

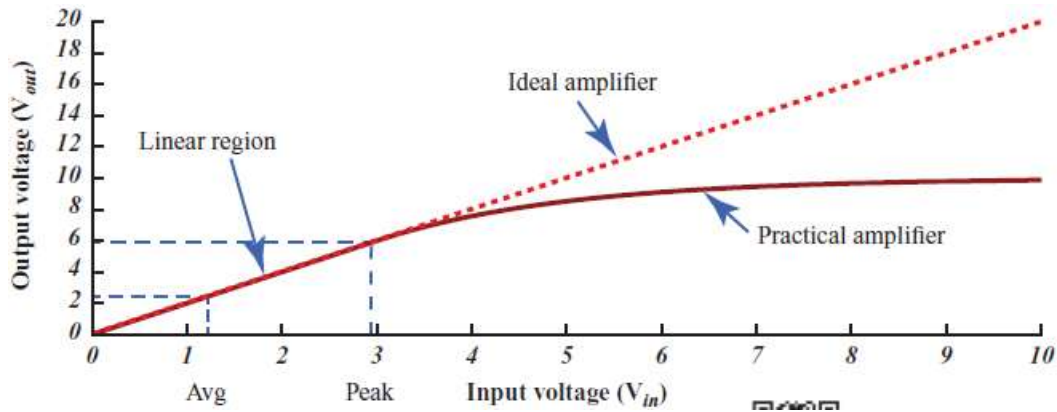
5.4.1 Αναλογία Μέγιστης προς Μέσης Ισχύος (PAPR)

Τα σήματα OFDM έχουν υψηλότερη αναλογία μέγιστης προς μέση ισχύος (PAPR) σε σύγκριση με τα μονοφωνικά σήματα επειδή, στο πεδίο του χρόνου, ένα πολυφωνικό σήμα είναι η άθροιση πολλών στενοζωνικών σημάτων. Σε ορισμένες χρονικές στιγμές, αυτό το άθροισμα είναι μεγάλο και σε άλλες στιγμές είναι μικρό, πράγμα που σημαίνει ότι η μέγιστη τιμή του σήματος είναι σημαντικά μεγαλύτερη από τη μέση τιμή. Αυτή είναι μία από τις πιο σημαντικές προκλήσεις για την υλοποίηση του OFDM επειδή αυξάνει το κόστος των ενισχυτών ισχύος.

Ο στόχος ενός ενισχυτή ισχύος είναι να αυξήσει το εύρος ενός σήματος κατά κάποιο παράγοντα K . Αυτό θα οδηγούσε σε μια εξίσωση της σχέσης μεταξύ της εισόδου και της εξόδου τάσης ως εξής:

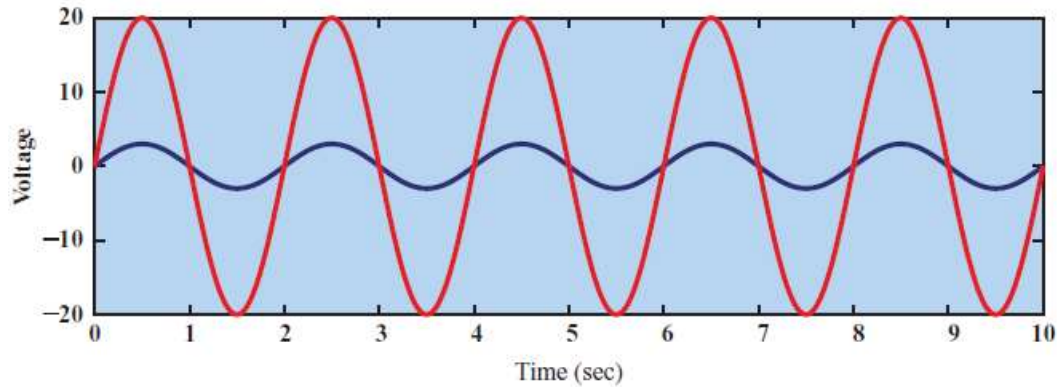
$$V_{\text{out}} = KV_{\text{in}}$$

Αυτή είναι μια εξίσωση της ευθείας στην Εικόνα 5.5 που επισημαίνεται ως ο ιδανικός ενισχυτής. Ιδανικά, αυτή η σχέση θα υπήρχε για όλες τις τιμές εισόδου, αλλά αντ' αυτού όλοι οι ενισχυτές έχουν μια μη γραμμική περιοχή όπου ο ενισχυτής κορείζεται, πράγμα που σημαίνει ότι δεν μπορεί να παράγει καμία υψηλότερη τάση εξόδου ανεξάρτητα από την τάση εισόδου. Αυτό εμφανίζεται από την πρακτική καμπύλη του ενισχυτή στην Εικόνα 5.5. Μέχρι την τάση εισόδου 3 V, η καμπύλη είναι γραμμική, αλλά στη συνέχεια η καμπύλη γίνεται μη γραμμική και ο ενισχυτής δεν μπορεί να παράγει μια έξοδο πέρα από τα 10 V ανεξάρτητα από την τάση εισόδου.

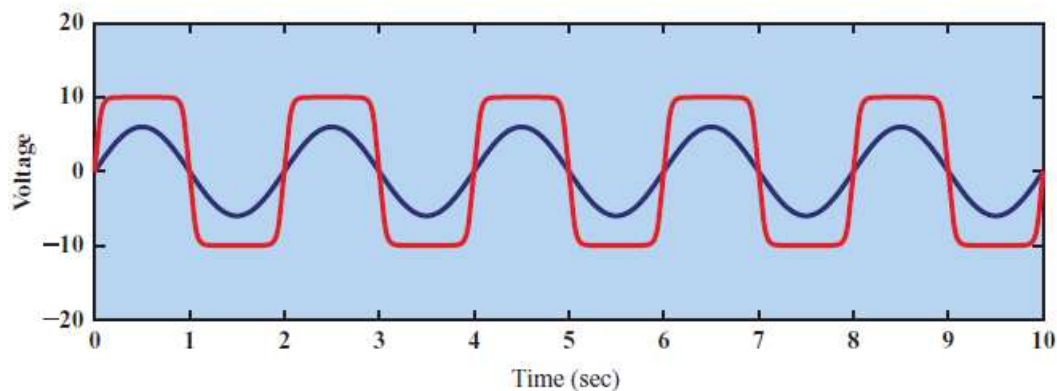


Εικόνα 5.5 Χαρακτηριστικά Ιδανικού και Πρακτικού Ενισχυτή

Η Εικόνα 5.6 επιδεικνύει το αποτέλεσμα που ένας τέτοιος ενισχυτής όπως αυτός που φαίνεται στην Εικόνα 5.5 έχει στα σήματα εξόδου. Η Εικόνα 5.6α δείχνει δύο σήματα με πλάτη τάσης 20 V και 2 V, αντίστοιχα. Η Εικόνα 5.6β δείχνει τα σήματα εξόδου με το μικρότερο σήμα να ενισχύεται κατά έναν παράγοντα 2 χωρίς παραμόρφωση. Ωστόσο, το μεγαλύτερο σήμα έχει υποστεί κοπή από τον ενισχυτή. Το σήμα έχει πλέον παραμορφωθεί. Εάν τέτοια παραμόρφωση είναι παρούσα σε συστήματα OFDM, το αποτέλεσμα θα είναι απώλεια ορθογωνικότητας, εκπομπές εκτός ζώνης και αύξηση του ρυθμού σφαλμάτων bit (BER).



(a) Input to amplifier



(b) Output from amplifier

Εικόνα 5.6 Παραδείγματα αποτελεσμάτων Γραμμικού και Μη Γραμμικού Ενισχυτή

Είναι, επομένως, σημαντικό να μειωθεί η πραγματική PAPR στο σήμα OFDM. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για το uplink από ένα κινητό προς μια βάση σταθμού. Για το downlink, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν πιο ακριβές προσεγγίσεις και

ενισχυτές, επειδή οι βάσεις σταθμών είναι λίγες σε αριθμό, αλλά τα κινητά είναι πολλά και ευαίσθητα στο κόστος. Τεχνικές μείωσης της PAPR που έχουν προταθεί περιλαμβάνουν εξειδικευμένο κωδικοποίηση, ρυθμίσεις φάσης, κοπή χρησιμοποιώντας κανονικές συναρτήσεις Gauss και ενεργή επέκταση συνάθροισης. Συστήματα όπως το LTE έχουν χρησιμοποιήσει τον μονοφορέα πολυπολικό συχνότητας πολλαπλών πρόσβασης (SC-FDMA).

5.4.2 Διαμόρφωση Μεταξύ-Φορέων

Για να αποδιαμορφωθεί ένα σήμα OFDM, είναι απαραίτητος ο συγχρονισμός στο χρόνο και στη συχνότητα. Επειδή οι χρόνοι συμβόλων OFDM είναι μεγάλοι, οι απαιτήσεις για συγχρονισμό στο χρόνο είναι κάπως χαλαρές σε σύγκριση με άλλα συστήματα. Αντίθετα, επειδή οι συχνότητες OFDM είναι τοποθετημένες όσο το δυνατόν πιο κοντά, οι απαιτήσεις για συγχρονισμό στη συχνότητα είναι σημαντικά πιο αυστηρές. Αν δεν ικανοποιηθούν, θα προκύψει διακαναλική παρεμβολή (ICI-InterCarrier Interference). Οι αλγόριθμοι συγχρονισμού στο χρόνο και στη συχνότητα είναι ευθύνη κάθε κατασκευαστή εξοπλισμού, και αυτά τα προβλήματα αποτελούν μερικά από τα πιο προκλητικά για την υλοποίηση του OFDM.

Το κυκλικό πρόθεμα παρέχει ένα εξαιρετικό τρόπο εξασφάλισης της ορθογωνικότητας των φορέων, καθώς εξαλείφει τις επιπτώσεις του πολυπλοκότητας. Ωστόσο, επειδή το CP προκαλεί μείωση της φασματικής αποδοτικότητας, μπορεί να ανεχθεί ένα επίπεδο ICI σε μια προσπάθεια να μειωθεί η διάρκεια του CP. Επιπλέον, ο Doppler shift ή οι μη ταιριασμένοι ταλαντωτές ακόμα και ενός υποφορέα μπορούν να προκαλέσουν ICI σε πολλούς γειτονικούς υποφορείς. Αν ανατρέξουμε ξανά στην Εικόνα 5.2 είναι εύκολο να δούμε ότι η απόσταση μεταξύ υποφορέων είναι περιορισμένη και μπορεί εύκολα να διαταραχθεί.

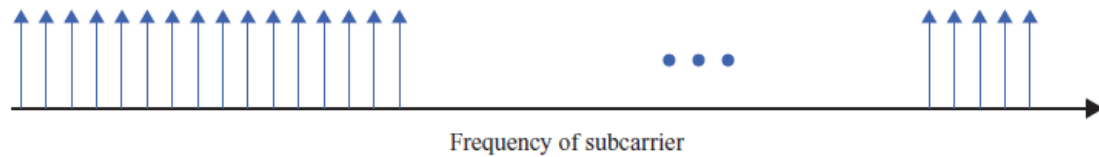
Επειδή η ICI μπορεί να είναι ένας περιοριστικός παράγοντας για τα συστήματα OFDM, οι υλοποιήσεις θα επιδιώξουν να βρουν μια ισορροπία μεταξύ της απόστασης των φορέων και της διάρκειας του συμβόλου OFDM. Η μείωση της διάρκειας του συμβόλου θα μειώσει την ICI που προκαλείται από το Doppler, αλλά μπορεί επίσης να προκαλέσει το CP να είναι ένα απαράδεκτα μεγάλο μέρος της διάρκειας του συμβόλου OFDM. Τα συστήματα μπορούν επίσης να χρησιμοποιούν διαφορετικά σχήματα παλμών OFDM, να χρησιμοποιούν ακύρωση αυτοδιαταγμάτων-παρεμβολών μετατοπίζοντας πληροφορίες σε πολλούς φορείς για τη μείωση της ICI, και να εφαρμόσουν εξομίωση της συχνότητας περιοχές.

5.5 Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access (OFDMA)

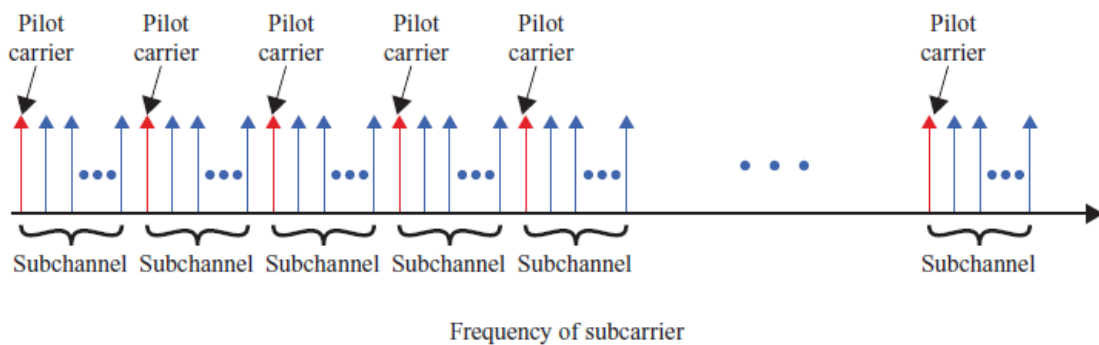
Πολλαπλές μέθοδοι πρόσβασης χρησιμοποιούν ένα ασύρματο κανάλι εκμεταλλευόμενες προγραμματισμένους χρόνους (πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση χρόνου), τυχαίους χρόνους πρόσβασης (πολλαπλή πρόσβαση με ανίχνευση φορέα), προγραμματισμένη χρήση συχνοτήτων (πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση συχνότητας), κωδικοποίηση εξάπλωσης σημάτων (ευρείας φάσματος κατακερματισμός ακολουθίας) και/ή κωδικοποίηση αλλαγής συχνότητας σημάτων (ευρείας φάσματος κατακερματισμός συχνότητας). Σε όλο το κείμενο, ένα από τα προσδιοριστικά χαρακτηριστικά μιας τεχνολογίας είναι πώς επιτυγχάνει την πολλαπλή πρόσβαση, τόσο όσον αφορά τις προσεγγίσεις που μόλις αναφέρθηκαν όσο και τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται για τις φορητές συσκευές να συνεργάζονται.

Η Ορθογώνια Πολλαπλή Πρόσβαση με Διαίρεση Συχνοτήτων (OFDMA) χρησιμοποιεί μια συνδυασμένη προσέγγιση της FDMA και TDMA επιτρέποντας σε διαφορετικούς χρήστες να χρησιμοποιούν ένα υποσύνολο των υποφορέων σε διαφορετικές

χρονικές στιγμές. Όλες οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούν OFDM δεν χρησιμοποιούν OFDMA. Για παράδειγμα, μερικές μορφές του 802.11 χρησιμοποιούν OFDM για τη μετάδοση σήματος, αλλά CSMA για πολλαπλή πρόσβαση. Ο πομπός χρησιμοποιεί το σύνολο των υποφορέων κατά τη μετάδοση. Το LTE χρησιμοποιεί μόνο OFDMA στην κατερχόμενη ζεύξη(downlink) , αλλά αντίθετα χρησιμοποιεί μια προσέγγιση μόνου φορέα στην ανερχόμενη(uplink).



(a) OFDM



(b) OFDMA (adjacent subcarriers)

Εικόνα 5.7 OFDM & OFDMA

Το OFDMA χρησιμοποιεί το OFDM, το οποίο χρησιμοποιεί πολλαπλούς κατά μήκος και κοντά τοποθετημένους υποφορείς, αλλά οι υποφορείς διαιρούνται σε ομάδες υποφορειών επειδή δεν θα ήταν υπολογιστικά δυνατό (λόγω των εκατοντάδων υποφορειών) ή επαρκές (επειδή κάθε υποφορέας μεταφέρει μόνο μια μικρή χωρητικότητα) να προγραμματιστούν μεμονωμένα. Κάθε ομάδα ονομάζεται υπο-κανάλι. Στην κατεύθυνση κάτω, ένα υπο-κανάλι μπορεί να προορίζεται για διαφορετικούς δέκτες. Στην ανερχόμενη κατεύθυνση, ένας πομπός μπορεί να ανατεθεί ένα ή περισσότερα υπο-κανάλια. Η υπο-καναλοποίηση στην ανερχόμενη κατεύθυνση μπορεί να εξοικονομήσει την ισχύ μετάδοσης της συσκευής χρήστη επειδή μπορεί να επικεντρωθεί μόνο σε συγκεκριμένα υπο-κανάλια που του ανατίθενται. Αυτό το χαρακτηριστικό εξοικονόμησης ενέργειας είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για τις συσκευές χρηστών με μπαταρίες, το πιθανό σενάριο στο κινητό 4G. Η Εικόνα 5.7 αντιδιαστέλλει το OFDM και το OFDMA· στην περίπτωση του OFDMA, παρουσιάζεται η χρήση διπλανών υποφορέων για τον σχηματισμό ενός υπο-καναλιού. Τα υπο-κανάλια μπορούν να δημιουργηθούν χρησιμοποιώντας τρεις διαφορετικές μεθόδους:

- **Διπλανοί υποφορείς:** Όλοι οι υποφορείς θα μπορούσαν να αντιστοιχιστούν σε ένα συνεχές μπλοκ συχνοτήτων. Όλοι οι SINR θα ήταν περίπου ίσοι. Αυτό θα μπορούσε να είναι ένα πρόβλημα εάν αυτές οι συχνότητες είχαν κακή απόδοση, αλλά αυτό παρέχει επίσης μια ευκαιρία εάν το σύστημα μπορεί να επιλέξει ανάμεσα σε πολλά δυνατά μπλοκ για να βρει την καλύτερη ανάθεση των μπλοκ σε διάφορους χρήστες που μπορεί να

βελτιστοποιήσει έναν ισοζυγισμό απόδοσης καναλιού, απαιτήσεων χρήστη, προτεραιότητας και δικαιοσύνης. Αυτή η προσέγγιση, ωστόσο, απαιτεί από το σύστημα να γνωρίζει με ακρίβεια το κανάλι εξάπλωσης σε όλο το εύρος ζώνης συστήματος για κάθε χρήστη και να προσαρμόζεται καθώς αυτά τα χαρακτηριστικά αλλάζουν. Αυτό απαιτεί σύμβολα και σήματα πιλότου, καθώς και μηχανισμούς πρόβλεψης επειδή η πληροφορία θα μπορούσε να είναι ήδη ξεπερασμένη όταν είναι ελήφθη και πλήρως επεξεργασμένη. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί από LTE και WiMAX.

- **Τακτικά ανάλογοι υποφορείς:** Αυτοί μπορούν να θεωρηθούν ως «κατανεμημένη» ή «χτένα» ανάθεση. Αυτό παρέχει διαφοροποίηση συχνοτήτων ώστε να υπάρχουν αρκετοί καλοί υποφορείς, ανεξάρτητα από τους επιλεγμένους. Το βάρος της εκτίμησης του καναλιού δεν είναι τόσο σημαντικό. Αυτή η προσέγγιση μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί από το LTE.
- **Τυχαία ανάλογοι υποφορείς:** Αυτό έχει παρόμοια οφέλη με τους τακτικά αναδιαμορφωμένους υποφορείς, αλλά έχει επίσης οφέλη από τη μειωμένη ενδιάμεση εμπλοκή κυττάρου. Αυτό μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί από WiMAX.

5.5.1 Ευκαιριακός χρονοπρογραμματισμός

Η υπο-καναλοποίηση καθορίζει υπο-κανάλια, που ονομάζονται Επιχειρησιακά Μπλοκ από το LTE, τα οποία μπορούν να εκχωρηθούν σε σταθμούς συνδρομητών (SSs) ανάλογα με τις συνθήκες του καναλιού τους και τις απαιτήσεις δεδομένων τους. Ειδικά επίπεδα ισχύος θα μπορούσαν επίσης να προσδιοριστούν για αυτούς τους σταθμούς για να βελτιστοποιηθεί ο ρυθμός μετάδοσης και να περιοριστεί η παρεμβολή.

Μπορεί κανείς να νομίσει ότι η μεταβαλλόμενη με το χρόνο και η πολυδρομική φύση των ασύρματων επικοινωνιών θα περιορίζει τη δυνατότητα αποτελεσματικής χρήσης του ασύρματου καναλιού, αλλά συμβαίνει το αντίθετο. Τέτοιες μεταβολές παρέχουν ευκαιρίες που μπορούν να εκμεταλλευτούν. Δεδομένου ότι οι συνθήκες του καναλιού αλλάζουν και αναμένεται να αλλάζουν, οι εκχωρήσεις πόρων μπορούν να προσαρμοστούν δυναμικά. Επομένως, χρησιμοποιείται ο όρος ευκαιριακός χρονοπρογραμματισμός. Ειδικές υλοποιήσεις και πάροχοι εξοπλισμού μπορεί να προσεγγίσουν αυτό το πρόβλημα με τρόπους που τους παρέχουν ανταγωνιστικό πλεονέκτημα, επειδή τα περισσότερα πρότυπα δεν προδιαγράφουν προσεγγίσεις χρονοπρογραμματισμού OFDMA. Υπάρχουν διάφορες σκέψεις όσον αφορά τον προγραμματισμό τέτοιων υπο-καναλιών.

- **Αποτελεσματικότητα:** Τα υπο-κανάλια θα μπορούσαν να προγραμματιστούν με βάση τους χρήστες με το υψηλότερο SINR για αυτή τη χρονική υπο-οπή.

Αυτοί οι χρήστες θα μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση για να επιτύχουν πολύ υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης από άλλους με χαμηλότερο SINR. Η συνολική αποδοτικότητα και χωρητικότητα θα ήταν υψηλότερη, και η μεταβαλλόμενη φύση του καναλιού θα εκμεταλλεύονταν στο μέγιστο το πλεονέκτημα.

- **Δικαιοσύνη:** Αν ο προγραμματισμός βασιζόταν μόνο στην αποτελεσματικότητα, ορισμένοι χρήστες (πιθανότατα αυτοί που είναι μακριά από τους βασικούς σταθμούς) θα λάμβαναν ελάχιστο ή καθόλου ρυθμό μετάδοσης. Μια εντελώς δίκαιη κατανομή θα μπορούσε να δώσει τον ίδιο αριθμό υπο-καναλιών ή τον ίδιο ρυθμό μετάδοσης σε όλους τους χρήστες, αλλά αυτό θα μπορούσε να θυσιάσει την αποτελεσματικότητα. Μια δημοφιλής προσέγγιση που βρίσκει ένα συμβιβασμό είναι γνωστή ως αναλογική δικαιοσύνη, στην οποία κάθε χρήστης υπολογίζει την ακόλουθη μετρική κατά τη διάρκεια μιας απόφασης εκχώρησης πόρων:

$$\text{μετρική αναλογικής δικαιοσύνης} = \frac{r_i}{\bar{r}_i}$$

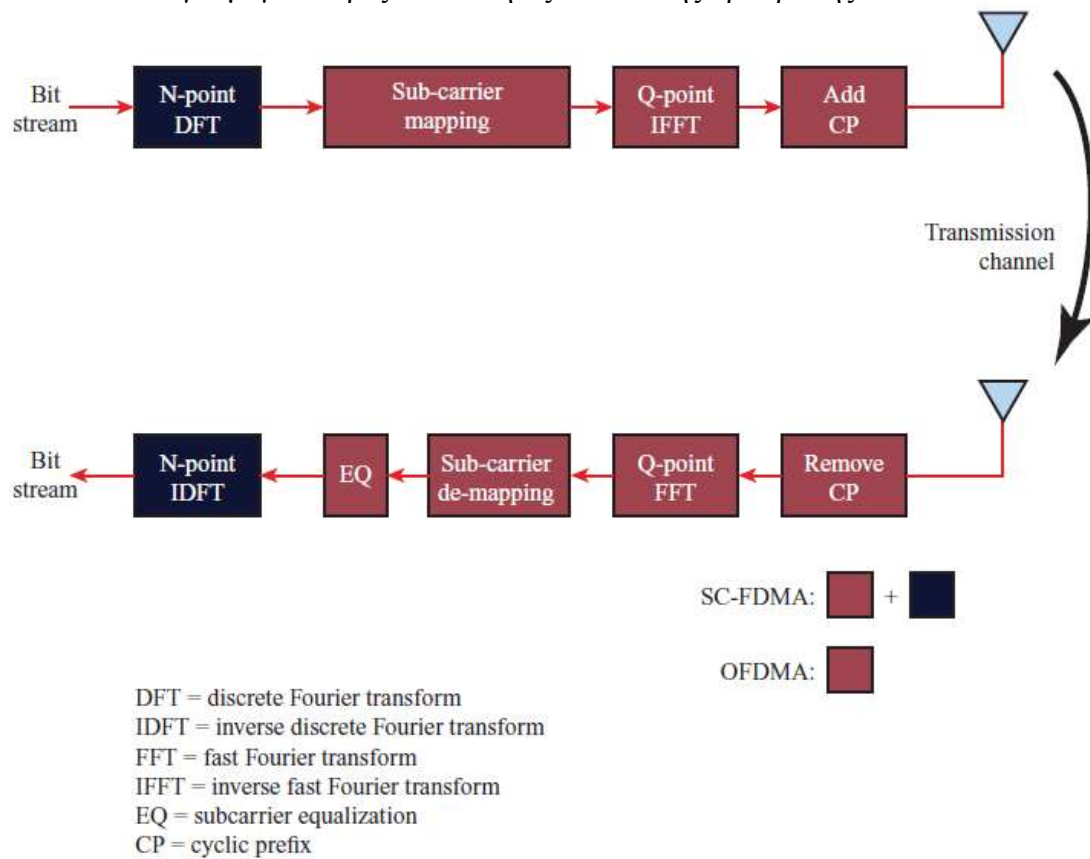
Αυτή είναι η αναλογία του ρυθμού που θα μπορούσε να επιτευχθεί για τον χρήστη i σε αυτή τη χρονική υπο-οπή για αυτό το υπο-κανάλι, r_i , διαιρεμένη με τον μέσο ρυθμό που έχει επιτευχθεί για τον χρήστη i σε αυτό το υπο-κανάλι, \bar{r}_i . Ουσιαστικά, οι χρήστες συγκρίνονται με τους ίδιους τους εαυτούς τους και όχι με άλλους. Αυτοί που έχουν καλή ευκαιρία για αυτούς θα έχουν καλύτερες πιθανότητες να προγραμματιστούν.

- **Απαιτήσεις:** Εφαρμογές όπως η ήχου και το βίντεο μπορεί να έχουν απαιτήσεις σε καθυστέρηση και jitter. Αυτά πρέπει να ληφθούν υπόψη.
- **Προτεραιότητα:** Χρήστες με προτεραιότητα όπως αστυνομικοί, πυροσβέστες, ασθενοφόρα ή άλλοι εργαζόμενοι στη δημόσια ασφάλεια ενδέχεται να χρειάζονται ειδικές προτεραιότητες σε εκτάκτες καταστάσεις, ανεξαρτήτως των συνθηκών του καναλιού τους. Σημειώστε, ωστόσο, ότι ακόμα και για αυτούς τους χρήστες, οι συνθήκες του καναλιού τους μπορεί να βελτιωθούν σημαντικά μέσα σε λίγα χιλιοστά του δευτερολέπτου.

5.6 Single-Carrier FDMA

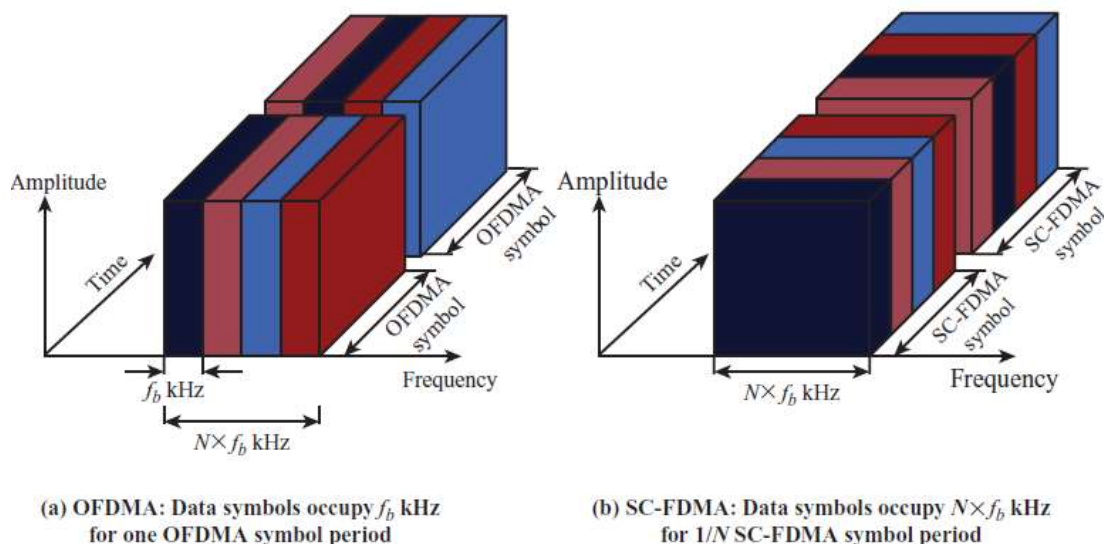
Το FDMA ενός φορέα (SC-FDMA) είναι μια σχετικά πρόσφατα αναπτυχθείσα τεχνική πολλαπλής πρόσβασης που έχει παρόμοια δομή και επίδοση με την OFDMA. Ένα προεξέχον πλεονέκτημα της SC-FDMA έναντι της OFDMA είναι η χαμηλότερη PAPR της μετάδοσης κυματομορφής, το οποίο ευνοεί τον χρήστη κινητής όσον αφορά τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, την αποδοτικότητα ενέργειας και το χαμηλότερο κόστος. Παρόλο που ο όρος "μονόφωνη FDMA" ακούγεται παρόμοιος με τη

βασική OFDM, δεν είναι ίδιος επειδή πραγματοποιεί μια επιπλέον λειτουργία DFT και μια λειτουργία εξισορρόπησης συχνότητας στον πομπό και στο δέκτη. Η SC-FDMA χρησιμοποιείται στο uplink και η OFDMA εξακολουθεί να χρησιμοποιείται στο downlink για μεγαλύτερες πιθανότητες πολλαπλής πρόσβασης.



Εικόνα 5.8 Απλοποιημένο διάγραμμα για SC-FDMA & OFDMA

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.8, η SC-FDMA πραγματοποιεί μια DFT πριν από τη λειτουργία IFFT, η οποία διασπά τα σύμβολα δεδομένων σε όλα τα υποκάναλια που μεταφέρουν πληροφορίες και παράγει μια εικονική δομή μονόφωνου φορέα. Έπειτα, αυτό περνά από τις ενότητες επεξεργασίας OFDM για να διασπάσει το σήμα σε υποκάναλια. Τώρα, όμως, κάθε σύμβολο δεδομένων μεταφέρεται από κάθε υποκάνάλι. Η Εικόνα 5.9 είναι ένα παράδειγμα για το πώς εμφανίζονται τα σήματα OFDM και SC-FDMA.



Εικόνα 5.9 Παράδειγμα OFDMA & SC-FDMA

Λαμβάνοντας υπόψη την Εικόνα 5.9, μπορούμε να κάνουμε αρκετές παρατηρήσεις. Για την OFDM, ένα ρεύμα δεδομένων πηγής διαιρείται σε N ξεχωριστά ρεύματα δεδομένων και αυτά τα ρεύματα ρυθμίζονται και μεταδίδονται παράλληλα σε N ξεχωριστά υποκανάλια, καθένα με εύρος ζώνης f_b . Το ρεύμα δεδομένων πηγής έχει ρυθμό δεδομένων R bps, και ο ρυθμός δεδομένων σε κάθε υποκανάλι είναι R/N bps. Για την SC-FDMA, φαίνεται από την Εικόνα 5.9 ότι το ρεύμα δεδομένων πηγής ρυθμίζεται σε ένα μόνο φορέα (εξ ου και το πρόθεμα SC στο όνομα) με εύρος ζώνης $N * f_b$ και μεταδίδεται σε ρυθμό δεδομένων R bps. Τα δεδομένα μεταδίδονται σε υψηλότερο ρυθμό, αλλά σε μεγαλύτερο εύρος ζώνης σε σύγκριση με τον ρυθμό δεδομένων σε ένα μόνο υποκανάλι της OFDM. Ωστόσο, λόγω της πολύπλοκης επεξεργασίας σήματος της SC-FDMA, η προηγούμενη περιγραφή δεν είναι ακριβής. Κατά κύριο λόγο, το ρεύμα δεδομένων πηγής αντιγράφεται N φορές, και κάθε αντίγραφο του ρεύματος δεδομένων μεταδίδεται και ρυθμίζεται ανεξάρτητα σε ένα υποκανάλι, με ρυθμό δεδομένων σε κάθε υποκανάλι των R bps. Σε σύγκριση με την OFDM, μεταδίδουμε σε πολύ υψηλότερο ρυθμό δεδομένων σε κάθε υποκανάλι, αλλά επειδή στέλνουμε το ίδιο ρεύμα δεδομένων σε κάθε υποκανάλι, είναι ακόμα δυνατή η αξιόπιστη ανάκτηση του αρχικού ρεύματος δεδομένων στον δέκτη.

Μια τελική παρατήρηση αφορά τον όρο πολλαπλή πρόσβαση. Με την OFDMA, είναι δυνατή η ταυτόχρονη μετάδοση είτε από είτε προς διαφορετικούς χρήστες με τον ανάθεση των υποκαναλιών κατά οποιοδήποτε χρονικό διάστημα σε πολλαπλούς χρήστες. Αυτό δεν είναι δυνατό με την SC-FDMA: Σε κάθε δεδομένη στιγμή, όλα τα υποκανάλια μεταφέρουν το ίδιο ρεύμα δεδομένων και συνεπώς πρέπει να αφιερωθούν σε έναν μόνο χρήστη. Ωστόσο, με την πάροδο του χρόνου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.9, είναι δυνατή η παροχή πολλαπλής πρόσβασης. Επομένως, ένας καλύτερος όρος για την SC-FDMA θα μπορούσε να είναι SC-OFDM-TDMA, αν και αυτός ο όρος δεν χρησιμοποιείται.

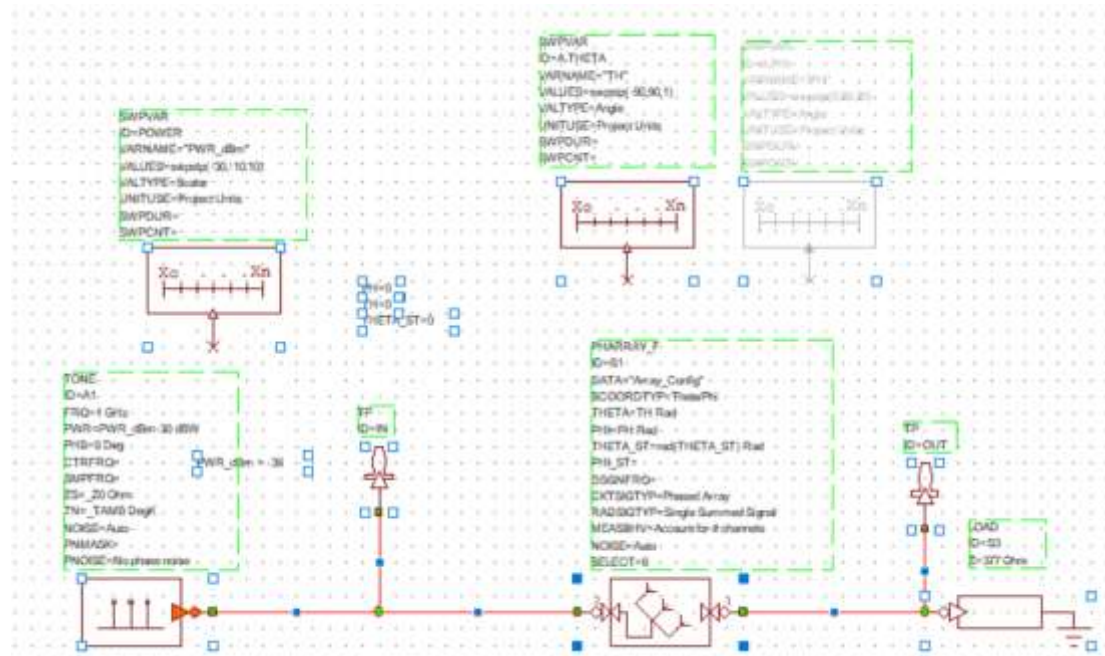
6 Διαγράμματα προσομοίωσης

Στο πειραματικό μέρος έχουμε τρεις διαφορετικές εφαρμογές που χρησιμοποιούν την ίδια διάταξη πίνακα. Χρησιμοποιούνται φίλτρα προσομοίωσης για να ενεργοποιούν/απενεργοποιούν διαγράμματα συστήματος και να εμφανίζουν τα αποτελέσματα

πιο γρήγορα. Χρησιμοποιείται μια διεπαφή βασισμένη σε αρχεία. Το phased array σε αυτό το έργο ρυθμίζεται μέσω του αρχείου δεδομένων Array_Config. Αυτό το αρχείο διαμορφώνει πολλαπλές διατάξεις πίνακα, οι οποίες μπορούν να επιλεγούν μέσω μιας μεταβλητής, σε αυτήν την περίπτωση η μεταβλητή ονομάζεται SELECT. Κάθε διάταξη μπορεί να ορίζει διαφορετικά phased arrays ή παραλλαγές του ίδιου πίνακα. Οι διαμορφώσεις κεραίας και RF link μπορούν να οριστούν σε γραμμή ή σε ξεχωριστά αρχεία δεδομένων και να συμπεριληφθούν στο αρχείο διαμόρφωσης. Κοινές κεραίες και/ή RF links μπορούν να οριστούν/συμπεριληφθούν στην κορυφή του αρχείου διαμόρφωσης.

6.1.1 Το διάγραμμα συστήματος “Phased Array Response”

Το διάγραμμα συστήματος “Phased Array Response” χρησιμοποιείται για να αξιολογήσει την απόκριση του phased array σε όλο το εύρος της γωνίας αζιμούθιου, TH, και σε ένα εύρος επιπέδων ισχύος στην είσοδό του. Τα αποτελέσματα εμφανίζονται στα διαγράμματα “Array Response” και “Array Response Polar”. Το φίλτρο προσομοίωσης “Array Response RFB” ρυθμίζεται για να ενεργοποιεί μόνο αυτήν τη μέτρηση και να απενεργοποιεί τις υπόλοιπες. Το αρχείο δεδομένων Array_Config περιέχει διάφορες διαμορφώσεις του phased array. Είναι ευρείας χρήσης μέσω της μεταβλητής SELECT. Οι διαμορφώσεις που αντιστοιχούν στο SELECT=0 και SELECT=1 διαφέρουν μόνο λόγω του ότι η δεύτερη υλοποιεί Mutual Coupling μεταξύ των στοιχείων, όπως ορίζεται στο αρχείο δεδομένων Coupling A. Η επίδραση του Mutual Coupling μπορεί να αξιολογηθεί με τη ρύθμιση της παραμέτρου SELECT=1 στο διάγραμμα συστήματος Phased Array Response.



Εικόνα 6.1 Διάγραμμα Phased Array Response

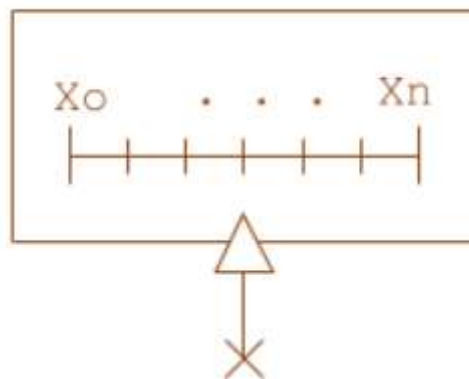
6.1.1.1 SWPVAR

Το SWPVAR χρησιμοποιείται για την εκτέλεση προσομοιώσεων με μεταβαλλόμενες μεταβλητές. Το SWPVAR καθορίζει τη μεταβλητή που θα υποστεί μεταβολή,

συμπεριλαμβανομένων των τιμών για τη μεταβολή αυτή. Είναι επίσης ικανό να ελέγχει τη μεταβολή.

Υπάρχουν δύο συστατικά για τις προσομοιώσεις με μεταβαλλόμενες μεταβλητές στο VSS. Πρώτον, πρέπει να καθοριστούν μία ή περισσότερες τιμές που θα υποστούν μεταβολή, μαζί με την τιμή για κάθε μεταβολή. Δεύτερον, (ισχύει μόνο για προσομοιώσεις στο πεδίο του χρόνου), πρέπει να λεχθεί στην προσομοίωση πότε να ξεκινήσει μια νέα μεταβολή.

Το SWPVAR καθορίζει τη μεταβολή που θα υποστεί η μεταβλητή μέσω των παραμέτρων VARNAME και VALUES. Το VNA υποστηρίζει τη μεταβολή της ισχύος και/ή της συχνότητας στον κόμβο εξόδου ως τις τιμές που υποστηρίζουν τη μεταβολή, με



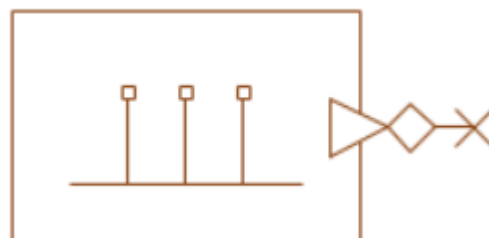
Εικόνα 6.2 Το σύμβολο για το SWPVAR

τις τιμές μεταβολής της ισχύος να καθορίζονται από τις παραμέτρους PSTART, PSTOP και PSTEP και οι τιμές μεταβολής της συχνότητας να καθορίζονται από τις παραμέτρους FSTART, FSTOP και FSTEP. Το VSA και οι μετρητές σφαλμάτων μπορούν να ρυθμιστούν για να καθορίζουν την τιμή που υποστεί μεταβολή ως μια μεταβλητή παρόμοια με το SWPVAR.

6.1.1.2 TONE

Το TONE παράγει έναν ή περισσότερους ημιτονικούς τόνους είτε στο σύνολο περιβλήματος είτε ως πραγματικό σήμα. Καθορίζεται η ισχύς του τόνου.

Το TONE υποστηρίζει μοντελοποίηση φάσης, θερμικού θορύβου και αντιστοιχίας αντίστασης.



Εικόνα 6.3 Το σύμβολο για το TONE

6.1.1.3 Test Point: TP

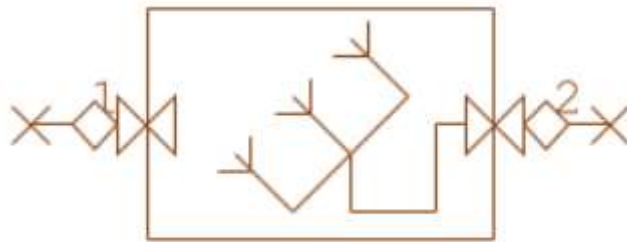
Το TP χρησιμοποιείται για να πραγματοποιεί μετρήσεις από τις εξόδους των τμημάτων του διαγράμματος του συστήματος.



Εικόνα 6.4 Το σύμβολο για το TEST POINT

6.1.1.4 Phased Array Assembly, Data-file based: PHARRAY_F

Το PHARRAY_F προσομοιώνει μια διάταξη πίνακα κατανομής (phased array assembly), υποστηρίζοντας τη διαμόρφωση της γεωμετρίας των στοιχείων του πίνακα, τα χαρακτηριστικά της κεραίας για κάθε στοιχείο, τα χαρακτηριστικά του RF link όταν λειτουργεί είτε σε λειτουργία RX είτε σε λειτουργία TX, και τα κοινά γραμμικά χαρακτηριστικά του συνδυαστή/διαχωριστή που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση των στοιχείων.



Εικόνα 6.5 Το σύμβολο που χρησιμοποιείται για το PHARRAY_F

Οι ρυθμίσεις γίνονται κυρίως μέσω ενός αρχείου δεδομένων κειμένου, με κοινά ρυθμιζόμενες ρυθμίσεις που καθορίζονται είτε απευθείας μέσω των παραμέτρων του μπλοκ (όπως γωνίες κατεύθυνσης), είτε καθορίζονται στο αρχείο δεδομένων αλλά μπορούν να υποκατασταθούν μέσω των παραμέτρων του μπλοκ (όπως ατομικές ρυθμίσεις κέρδους και φάσης ανά στοιχείο). Η ρύθμιση υποστηρίζει ανεξάρτητες μεταβλητές χρησιμοποιώντας τη δήλωση VAR στο αρχείο δεδομένων κειμένου. Οι ανεξάρτητες μεταβλητές εμφανίζονται δυναμικά ως παράμετροι του μπλοκ και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εξεταστούν διάφορες ρυθμίσεις διάταξης του πίνακα. Το μπλοκ μπορεί να ρυθμιστεί σε λειτουργία MIMO (Πολλαπλές Εισόδους Πολλαπλές Εξόδους). Για πολλαπλές εισόδους ή εξόδους, το μπλοκ υποστηρίζει διάυλους. Αυτό το μπλοκ μπορεί να λειτουργήσει είτε σε λειτουργία RX είτε σε λειτουργία TX. Στη λειτουργία RX, η θύρα 1 (που αντιπροσωπεύει τη σύνδεση με το ακτινοβολούμενο σήμα) συνδέεται ως θύρα εισόδου, και η θύρα 2 (που αντιπροσωπεύει την ηλεκτρική θύρα της διάταξης) συνδέεται ως θύρα εξόδου. Στη λειτουργία TX, η θύρα 1 συνδέεται ως θύρα εξόδου και η θύρα 2 συνδέεται ως θύρα εισόδου.

6.1.1.5 LOAD

Τα τερματικά φορτία (LOAD blocks) χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν την αντίσταση τερματισμού ενός κυκλώματος ραδιοσυχνοτήτων όταν το έξοδο του τελευταίου προκαταρκτικού κύκλου RF δεν συνδέεται με άλλον κύκλο

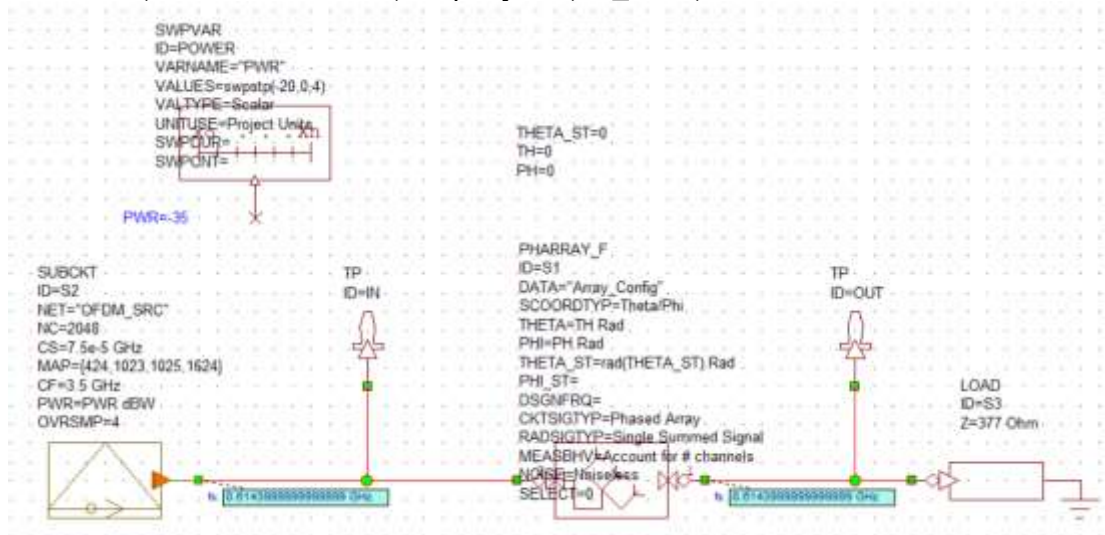


Εικόνα 6.6 Το σύμβολο για το LOAD

Μεταξύ PHARRAY_F και LOAD υπάρχει το TP (TEST POINT) OUT με όμοια λειτουργία όπως και το TP IN που περιεγράφηκε προηγουμένως με τη διαφορά ότι το ένα αναφέρεται στην είσοδο και το άλλο στην έξοδο.

6.1.2 Το διάγραμμα συστήματος “Phased Array with Modulated Signals”

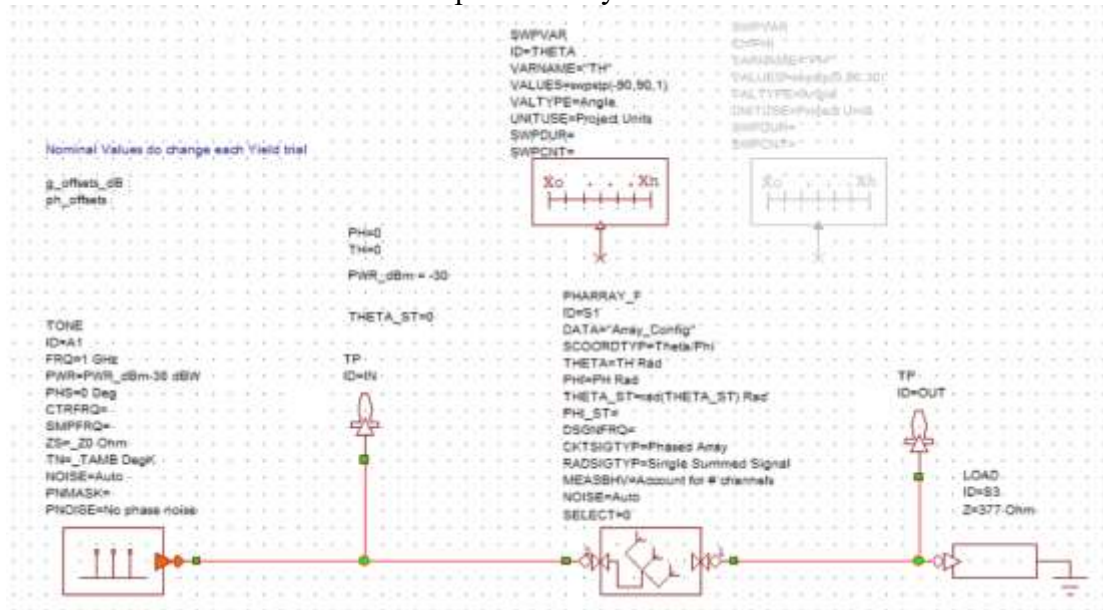
Το διάγραμμα συστήματος “Phased Array with Modulated Signals” αξιολογεί την επίδραση του phased array όταν ρυθμίζεται για να μεταδίδει διαμορφωμένα σήματα. Μια διαμορφωμένη πηγή που έχει ρυθμιστεί σύμφωνα με τις προδιαγραφές που ορίζονται από το Verizon 5G Technical Forum () μεταδίδεται μέσω του phased array και το φάσμα του σήματος παρατηρείται στο boresight και εμφανίζεται στο διάγραμμα “VZ 5G thru PHARRAY_F”. Αυτή η μέτρηση συνδέεται με το φίλτρο προσομοίωσης “Modulated Signals TD”. Εμφανίζονται τα αποτελέσματα για 6 διαφορετικές τιμές του PWR (0, -4, -8, -12, -16, -20) στην έξοδο (TP_OUT).



Εικόνα 6.7 Phased Array with modulated signals

6.1.3 Το διάγραμμα συστήματος “Phased Array Yield Analysis”

Το διάγραμμα συστήματος “Phased Array Yield Analysis” πραγματοποιεί ανάλυση απόδοσης στατιστικών διακυμάνσεων του κέρδους και της φάσης του phased array. Για να επιτευχθεί αυτό, ορίζονται αρκετές μεταβλητές στο παράθυρο “Global Definitions” και στη συνέχεια χρησιμοποιούνται στις δευτερεύουσες παραμέτρους GOFFSETS και PHOFFSETS του phased array.



Εικόνα 6.8 Phased Array Yield Analysis

6.2 Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε AWR

Το λογισμικό AWR είναι ένα λογισμικό προσομοίωσης συστημάτων που χρησιμοποιείται για τη σχεδίαση και την ανάλυση κυκλωμάτων υψηλής συχνότητας, όπως κυκλώματα RF, κυκλώματα μικροκυμάτων, και κυκλώματα αντένας. Το λογισμικό περιλαμβάνει πολλά εργαλεία προσομοίωσης, όπως το Microwave Office, το Visual System Simulator (VSS), και το AXIEM, τα οποία χρησιμοποιούνται για την ανάλυση και την προσομοίωση κυκλωμάτων και συστημάτων υψηλής συχνότητας. Το λογισμικό υποστηρίζει τη διανεμημένη και απομακρυσμένη προσομοίωση, καθώς και τη δυνατότητα προσομοίωσης σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, το λογισμικό παρέχει εκτεταμένη τεκμηρίωση και υποστήριξη για τους χρήστες του.

7 Το αρχείο Array config

Το αρχείο "Array config" περιέχει πληροφορίες σχετικά με τη διαμόρφωση ενός πίνακα κεραιών (array) και των συνδέσεών τους σε ένα σύστημα επικοινωνιών. Συγκεκριμένα:

- Ορισμός των RF Links: Καθορίζονται οι συνδέσεις RF A, RF B και RF C, καθένας με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά όπως το κέρδος, η είσοδος OP1dB και η θορυβογένεση (NF).
- Ορισμός των κεραιών: Ορίζονται οι κεραίες A και B, με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά όπως το κέρδος και οι απώλειες.
- Ορισμός του array geometry: Καθορίζονται οι γεωμετρικές παράμετροι του πίνακα κεραιών, όπως ο αριθμός των στοιχείων, η απόσταση μεταξύ τους και ο τύπος κωνικού κέρδους taper.
- Ορισμός του coupling pattern: Καθορίζεται το μοτίβο συζεύξεων μεταξύ των στοιχείων του πίνακα κεραιών.
- Κατανομή των στοιχείων στον πίνακα: Ορίζεται ποιες κεραίες και συνδέσεις RF αντιστοιχούν σε κάθε στοιχείο του πίνακα κεραιών.

Συνοπτικά, το αρχείο "Array config" καθορίζει τη διάταξη των κεραιών, των συνδέσεων RF και τον τρόπο σύζευξής τους σε ένα σύστημα επικοινωνιών.

Το αρχείο "Array config" περιέχει πέντε διαφορετικές περιπτώσεις (cases) που αντιστοιχούν σε διαφορετικές διαμορφώσεις του συστήματος επικοινωνιών. Ανάλογα με την τιμή της μεταβλητής SELECT, εφαρμόζεται ένα διαφορετικό σύνολο ρυθμίσεων. Αναλύονται παρακάτω οι περιπτώσεις για κάθε τιμή του SELECT.

7.1 SELECT=0

- Συνδέσεις RF (RF links): Ορίζονται τρεις συνδέσεις RF με τις ονομασίες RF A, RF B και RF C. Οι RF A και RF B ορίζονται από τα αντίστοιχα αρχεία που παρέχονται ενώ η σύνδεση RF C ορίζεται στο αρχείο
- Κεραίες (Antennas): Ορίζεται η κεραία A με καθορισμένο κέρδος(-1dB) και απώλειες(2dB). Για την κεραία B χρησιμοποιείται η παράμετρος

"RADPAT" που ορίζει το αρχείο δεδομένων πρότυπου ακτινοβολίας που χρησιμοποιείται για τη χαρακτηριστική αναπαράσταση της κεραίας "B" στο περιβάλλον προσομοίωσης.

- Γεωμετρία πίνακα κεραιών (array geometry): Καθορίζονται ο αριθμός των στοιχείων στον πίνακα, η απόσταση μεταξύ τους και η γεωμετρία του πίνακα. Στην προκειμένη περίπτωση ορίζεται σε Lattice με 16 στοιχεία σε μία στήλη με απόσταση μεταξύ τους 0.5 και στους δυο άξονες.
- Ο συντελεστής κωνικού κέρδους ορίζεται σαν μη κανονικοποιημένος (Not normalized) ενώ το κωνικό κέρδος ως standard και ο τύπος κωνικού κέρδους σε Dolph-Chebyshev.
- Στον πίνακα των στοιχείων ορίζεται το ποια κεραία και ποια σύνδεση θα χρησιμοποιήσει κάθε στοιχείο.
- Συζευξιακό πρότυπο (coupling pattern): Δεν ορίζεται.

7.2 SELECT=1

Παρόμοια με την περίπτωση 0, αλλά προστίθεται ορισμός συζευξιακού προτύπου.

- Ορίζεται το συζευξιακό πρότυπο "Coupling A", χωρίς να παραμετροποιείται η σύζευξη μεταξύ των στοιχείων. Το πρότυπο ορίζεται από το αντίστοιχο αρχείο που παρέχεται.

7.3 SELECT=2

- Κεραίες και σύνδεση με RF: Ορίζεται η κεραία A και η σύνδεσή της με το RF A. Επίσης ορίζεται όπως και πριν το πρότυπο ακτινοβολίας (Radiation Pattern) από το αρχείο Patch Antenna elements.
- Γεωμετρία πίνακα κεραιών: Καθορίζεται η γεωμετρία του πίνακα, αλλά με προσαρμογή του κέρδους. Καθορίζονται και τα δύο από τον χρήστη (User Defined). Τα στοιχεία είναι 64 σε θέσεις που ορίζονται στο αρχείο.
- Συζευξιακό πρότυπο: Δεν ορίζεται.

7.4 SELECT=3

- Κεραίες και συνδέσεις RF: Ορίζονται δύο κεραίες, A και B, με τις αντίστοιχες συνδέσεις τους με τα RF A και RF B με τιμές που δίνονται στο αρχείο.
- Γεωμετρία πίνακα κεραιών: Ορίζεται η γεωμετρία του πίνακα κεραιών. Στην περίπτωση αυτή είναι γραμμική (Lattice) , με 4 στήλες στον άξονα των X και 3 στήλες στον άξονα των Y και με απόσταση μεταξύ τους 1 και στους δύο άξονες. Ακόμη ορίζεται η γωνία μεταξύ των αξόνων X και Y σε radians.
- Συζευξιακό πρότυπο: Δεν ορίζεται.
- Στον πίνακα των στοιχείων ορίζεται το ποια κεραία και ποια σύνδεση θα χρησιμοποιήσει κάθε στοιχείο.

7.5 SELECT=4

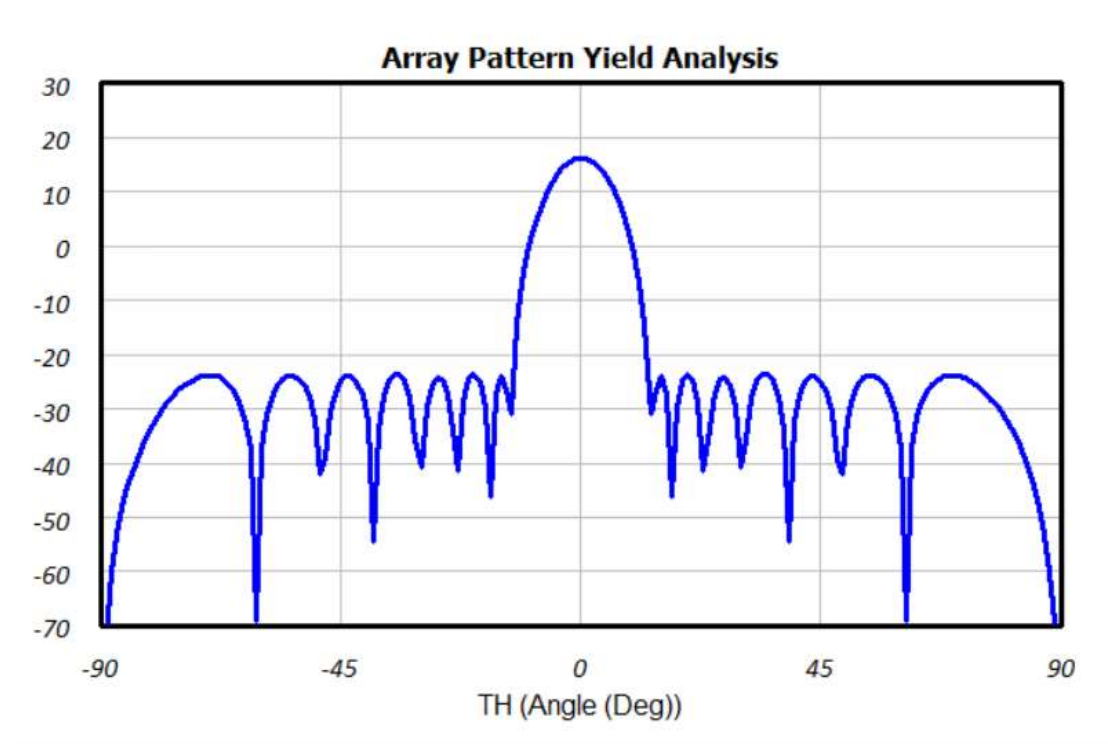
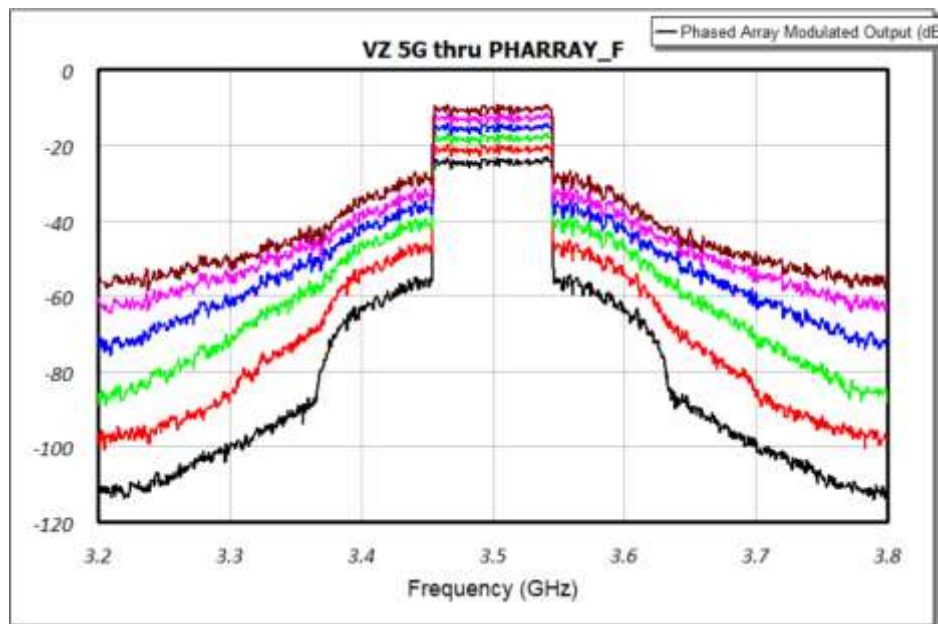
Παρόμοια με την περίπτωση 3, αλλά η γεωμετρία του πίνακα κεραιών ορίζεται με διαφορετικό τρόπο και χρησιμοποιείται διαφορετικός τύπος για το gain taper. Συγκεκριμένα η γεωμετρία του πίνακα κεραιών ορίζεται από τον χρήστη σε 75 στοιχεία τα οποία τοποθετούνται σε συγκεκριμένες θέσεις που δίνονται. Το κωνικό κέρδος ορίζεται σαν standard ενώ ο τύπος του σε Dolph-Chebyshev και ο συντελεστής του σε κανονικοποιημένος (Normalized). Ο πίνακας των στοιχείων είναι ο ίδιος με την προηγούμενη περίπτωση.

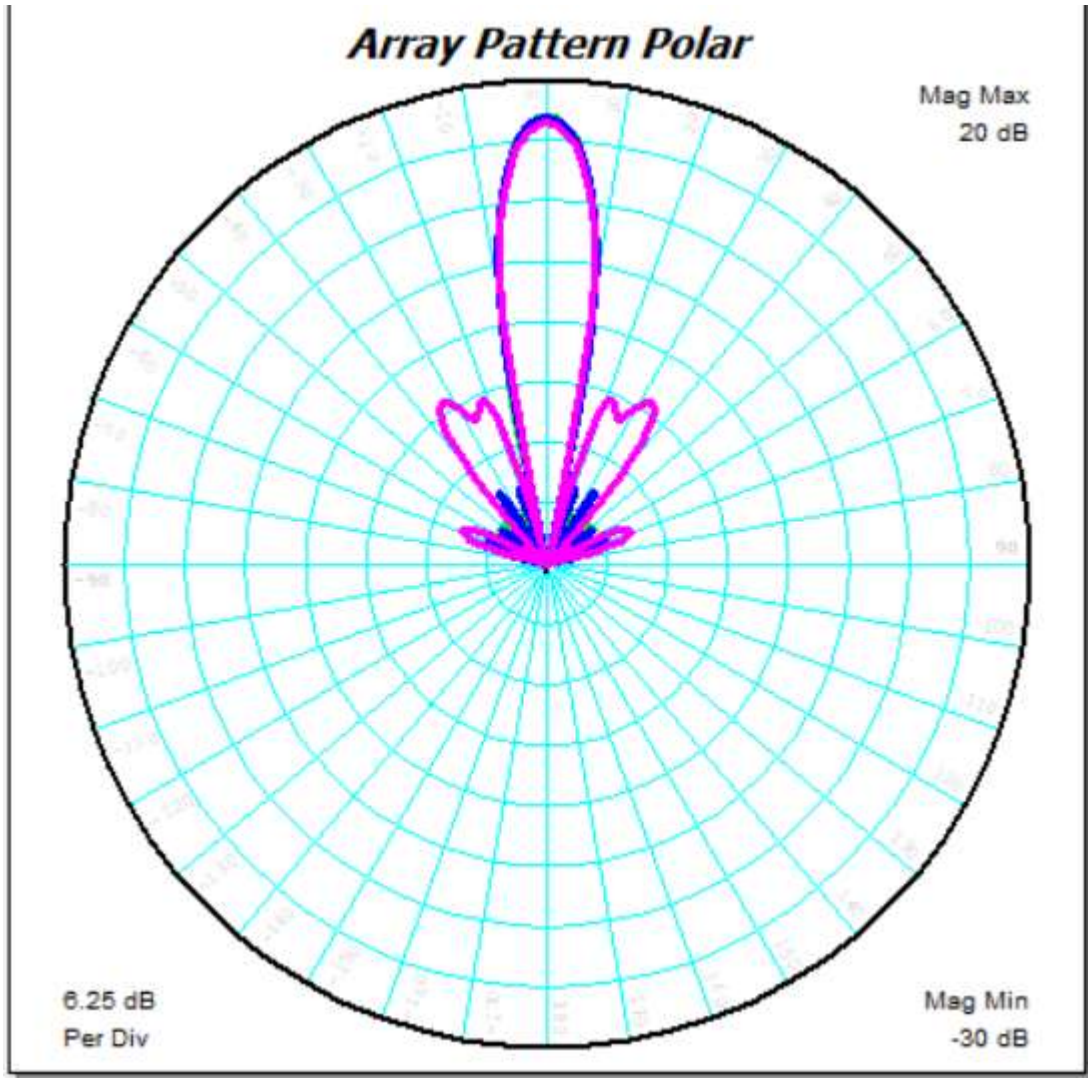
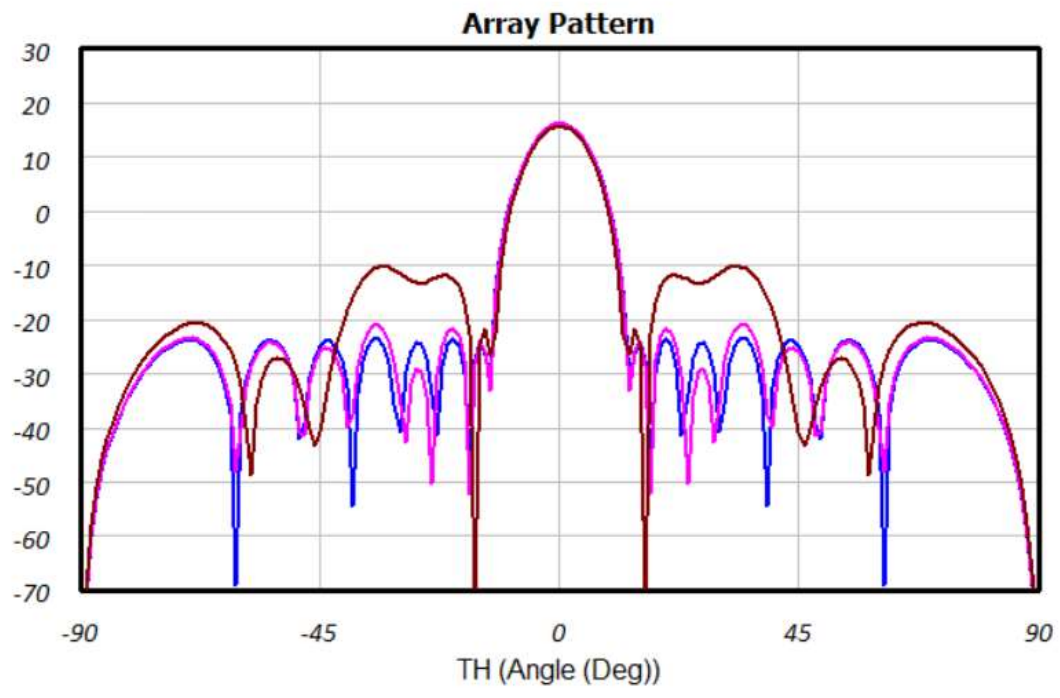
8 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα που παράγονται από τις προσομοιώσεις για κάθε μία από τις περιπτώσεις που υπάρχουν στο αρχείο Array config και για όλες τις τιμές της μεταβλητής SELECT στα 3.5GHz και 5.8GHz αντίστοιχα.

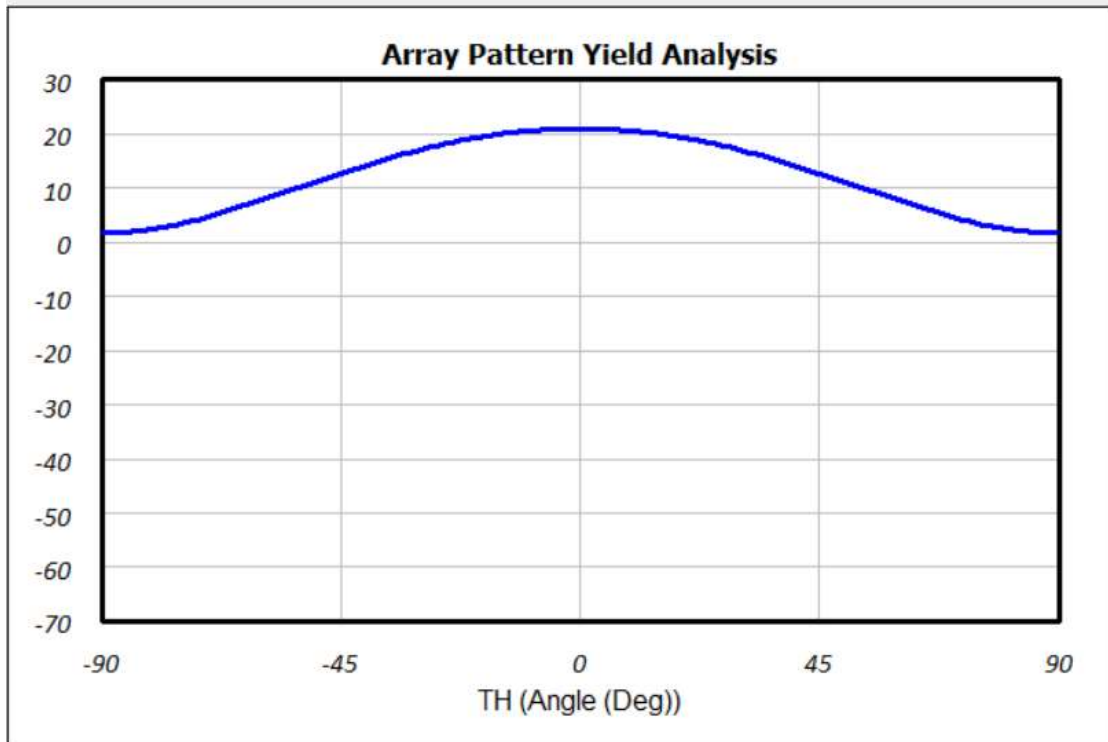
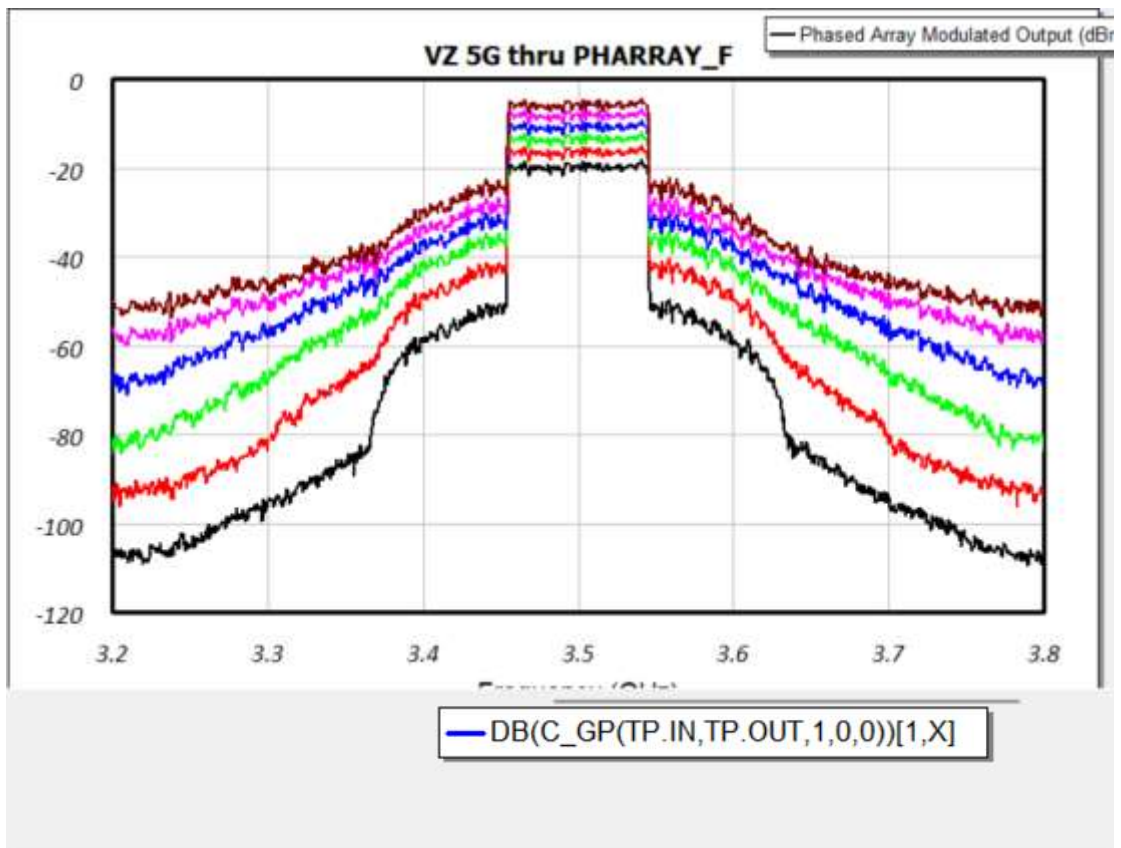
8.1 Προσομοιώσεις στα 3.5GHz

8.1.1 SELECT=0



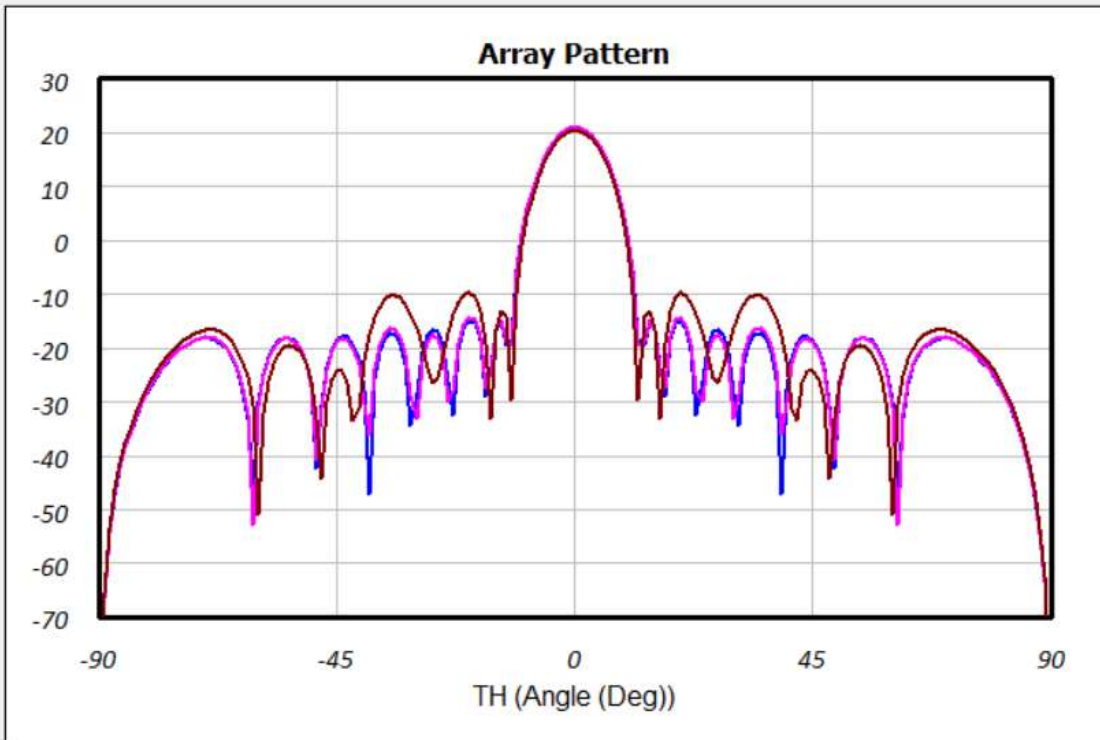


8.1.2 SELECT=1

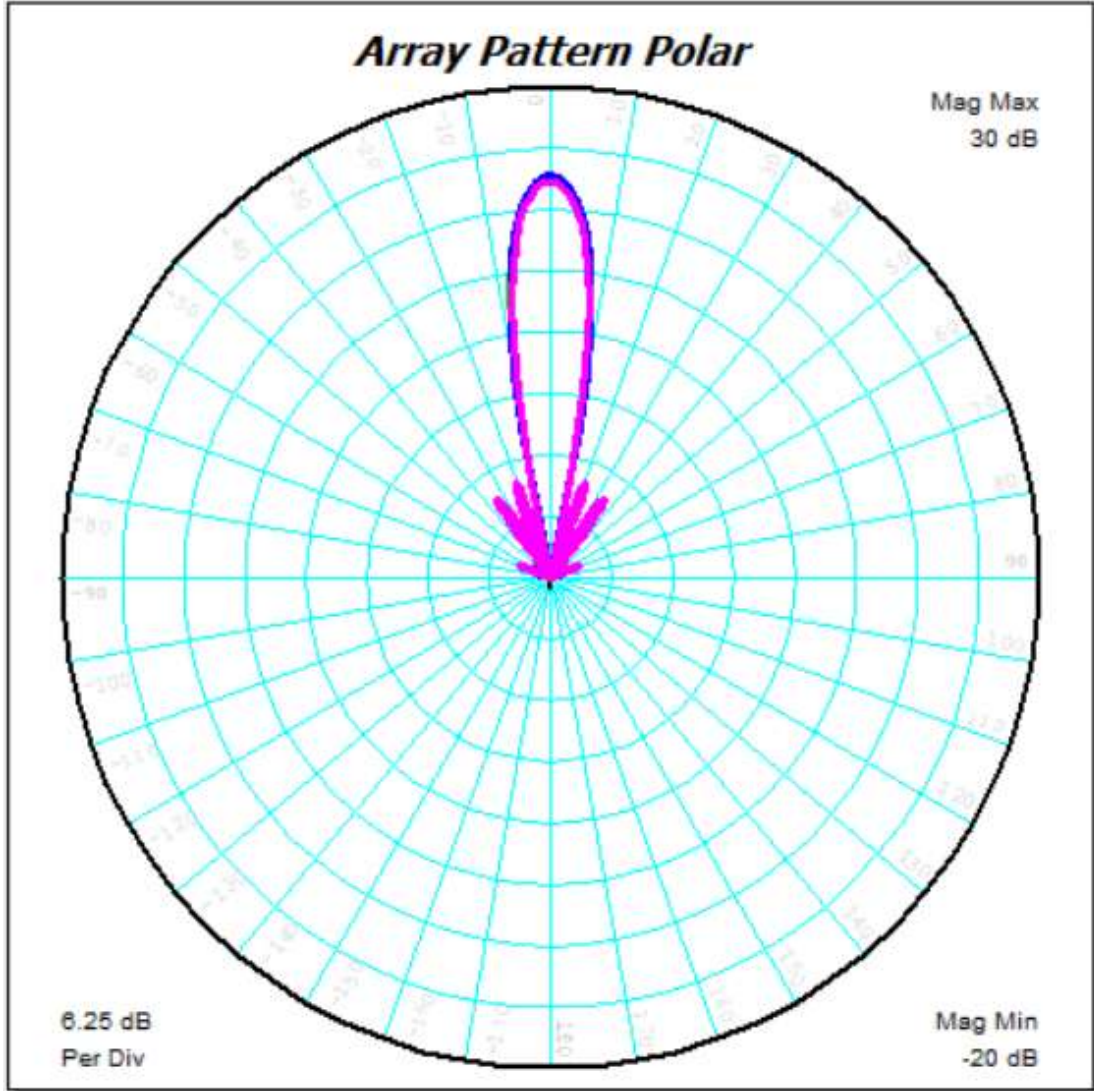


Array Pattern

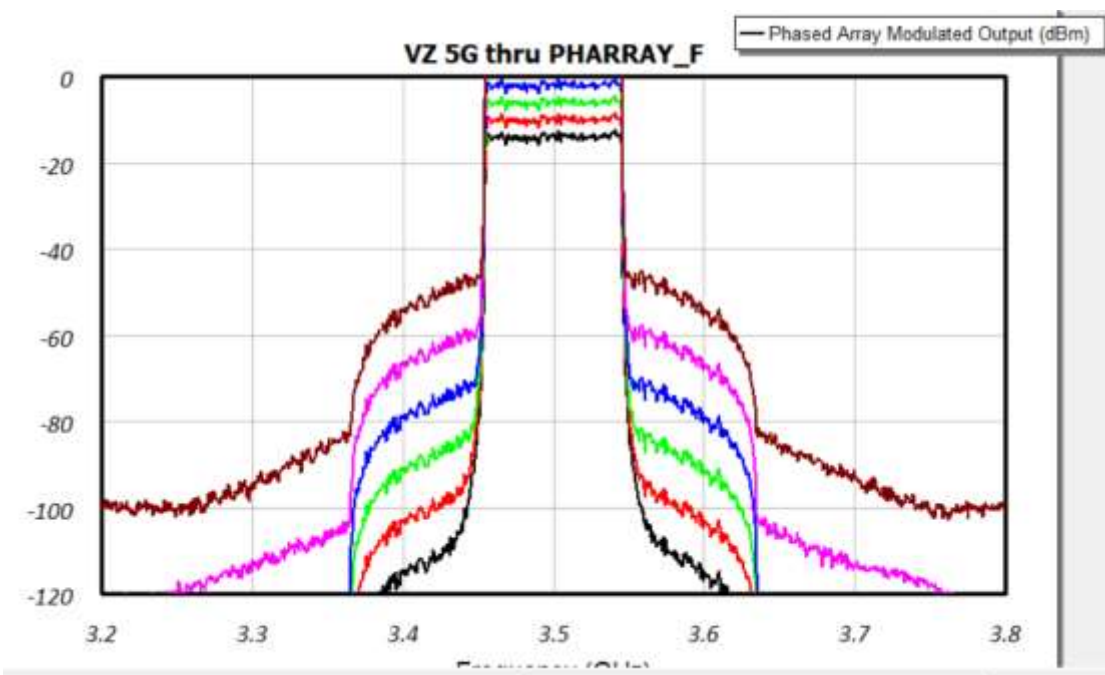
— DB(C_GP(TP.IN,TP.OUT,1,0,0))[1,X,*]



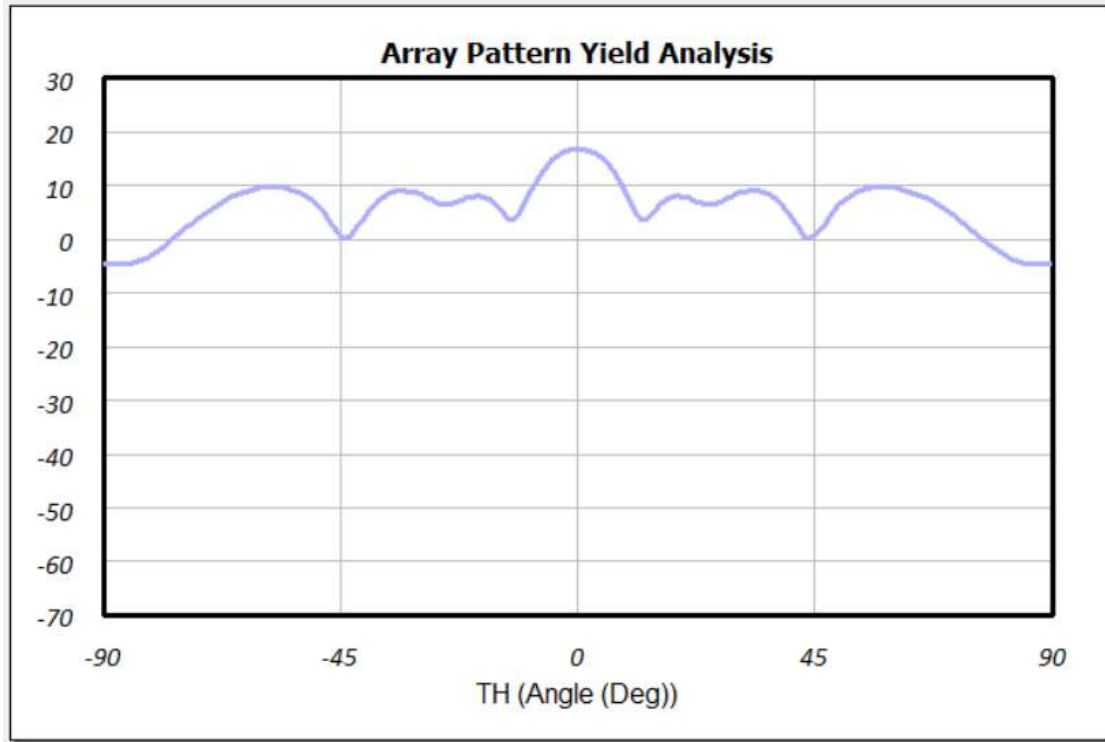
— Phased Array Response



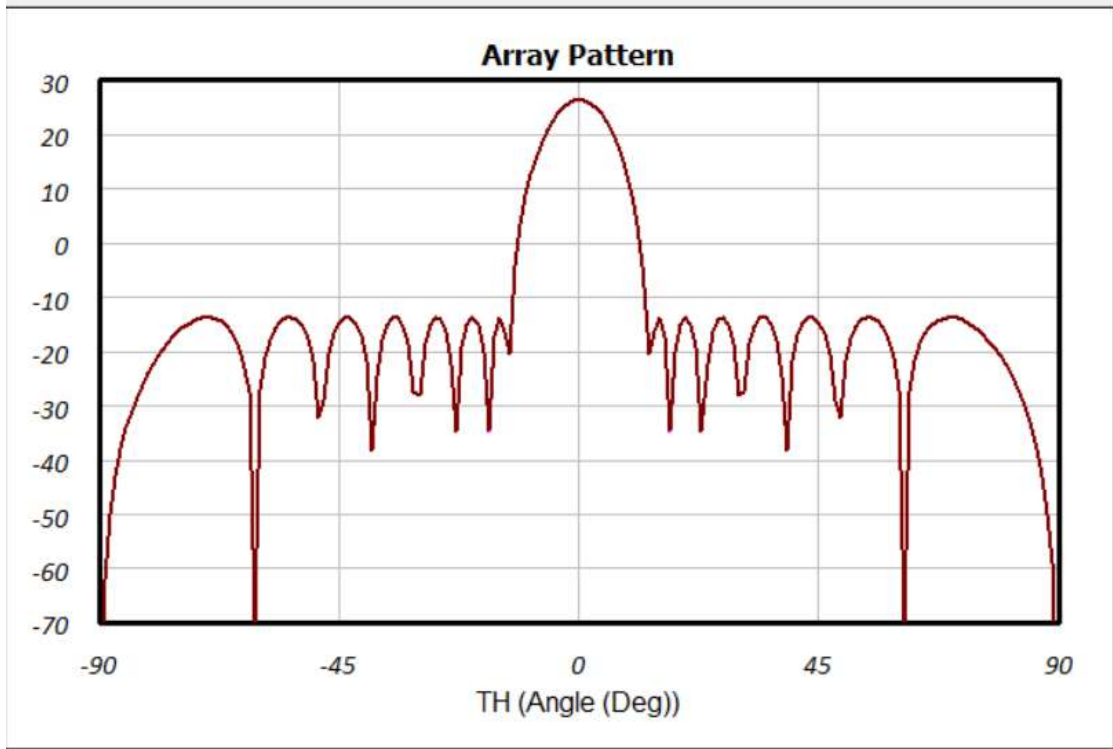
8.1.3 SELECT=2



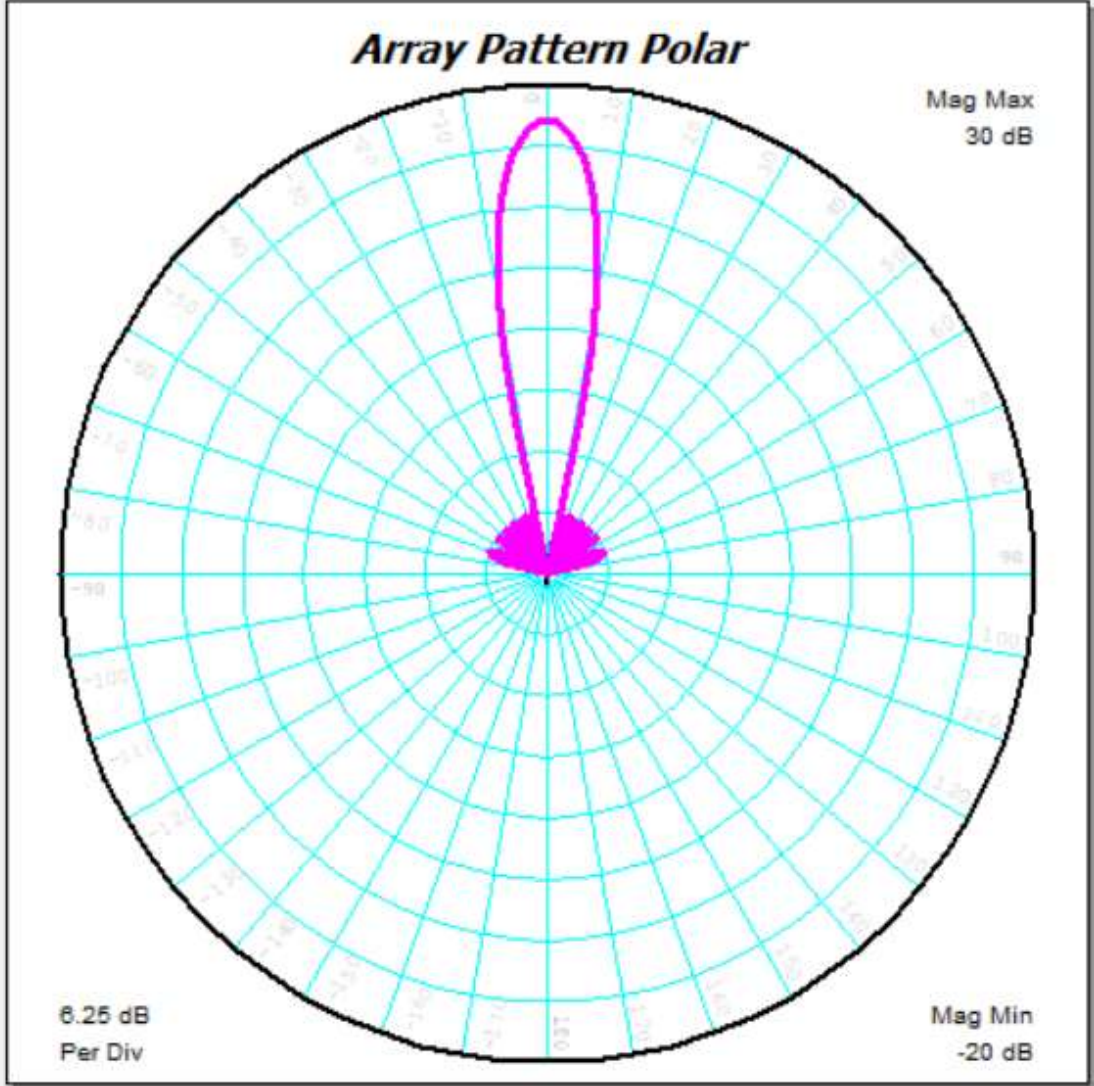
— DB(C_GP(TP.IN,TP.OUT,1,0,0))[1,X]



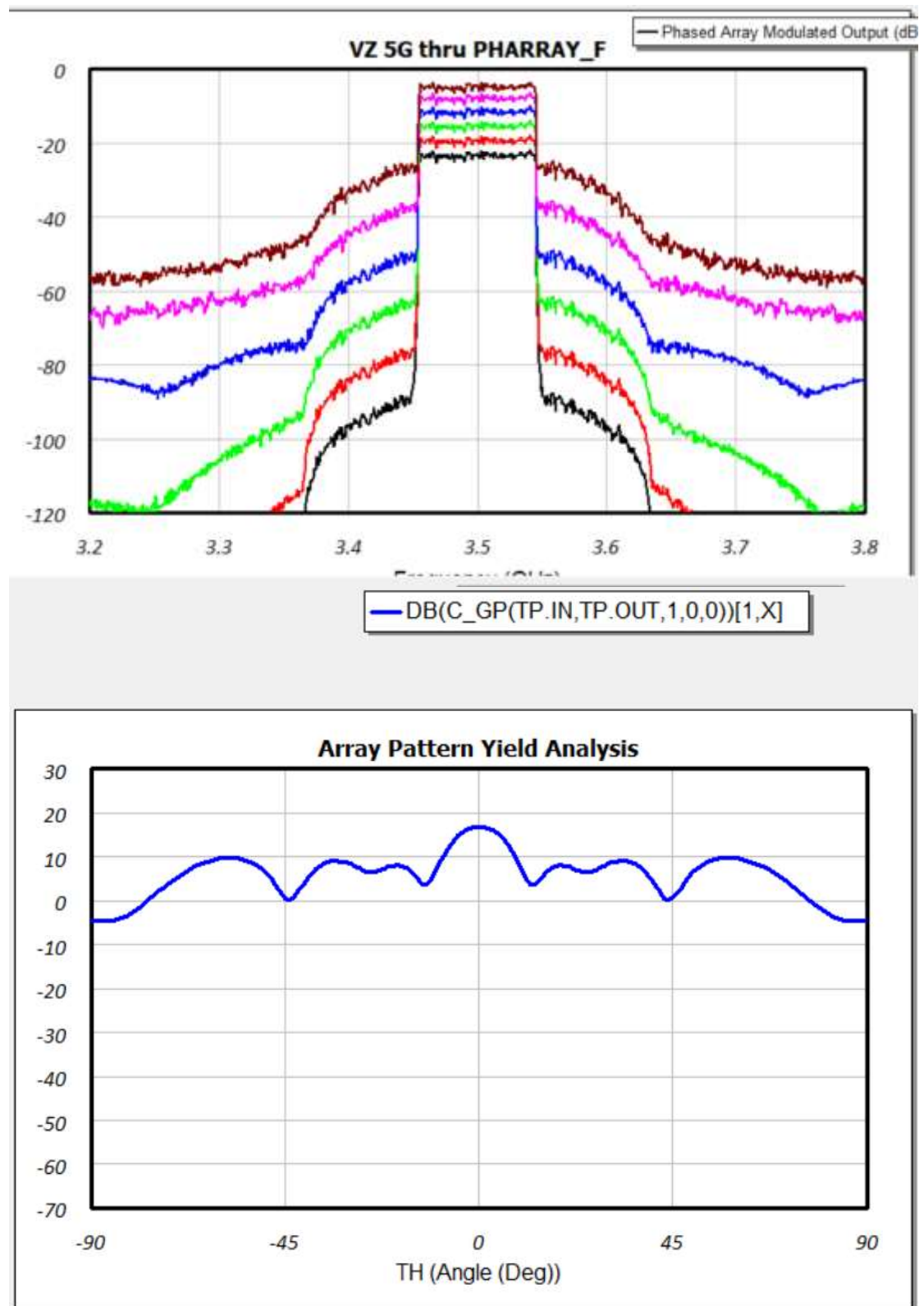
— DB(C_GP(TP.IN,TP.OUT,1,0,0))[1,X,*]



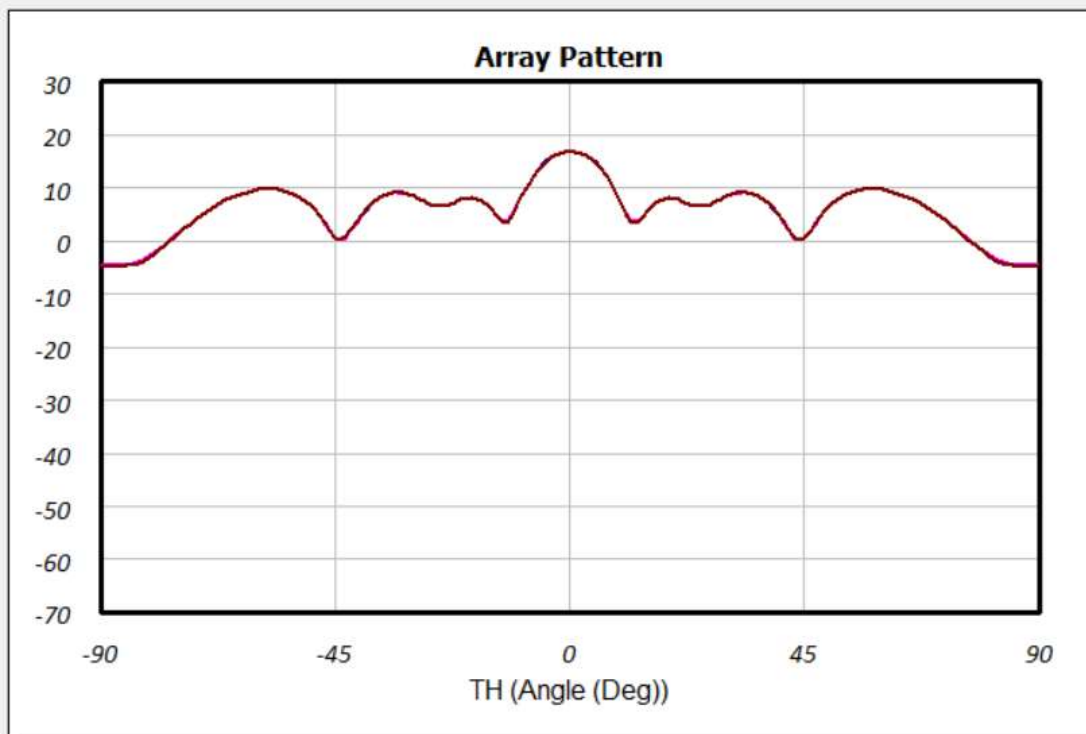
— Phased Array Response



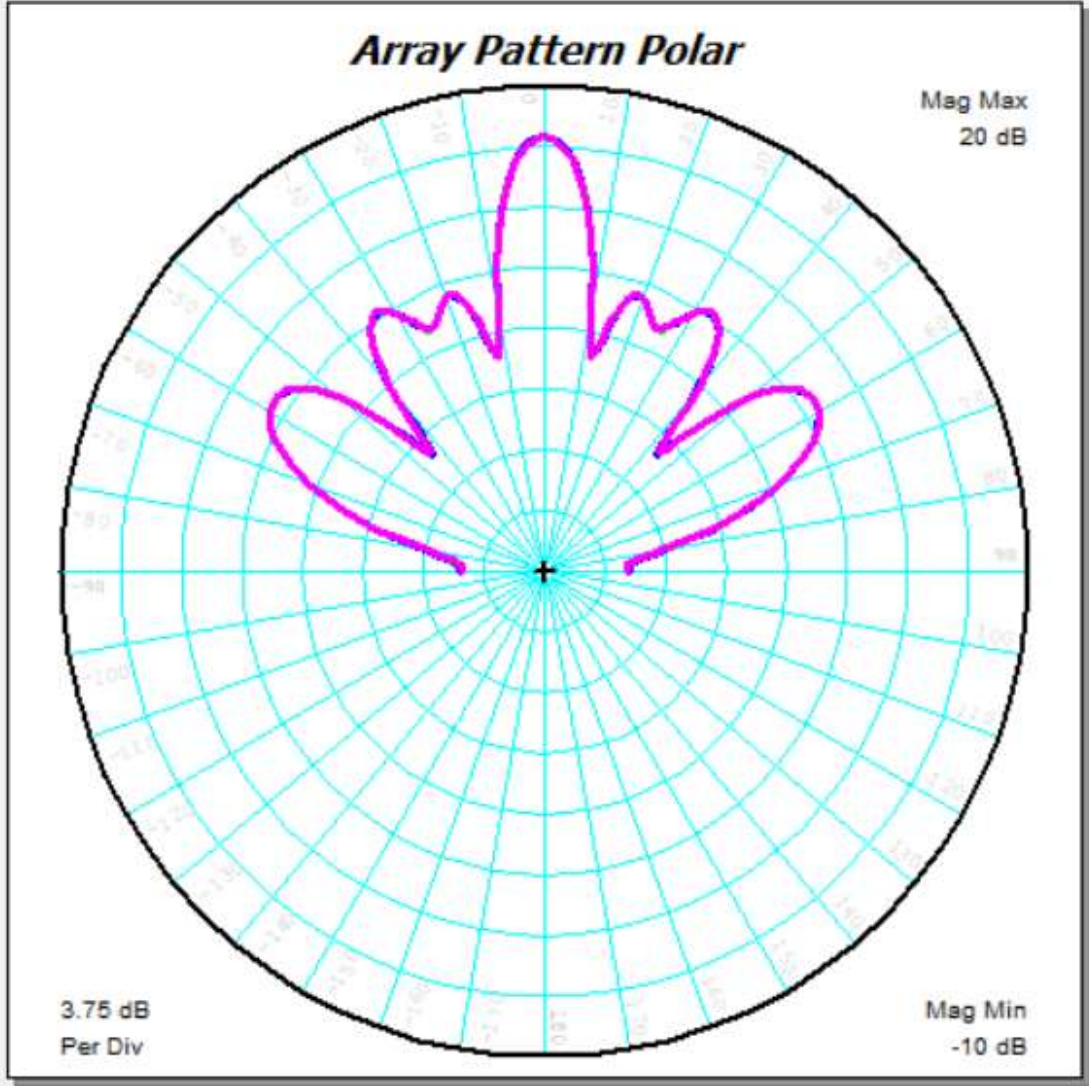
8.1.4 SELECT=3



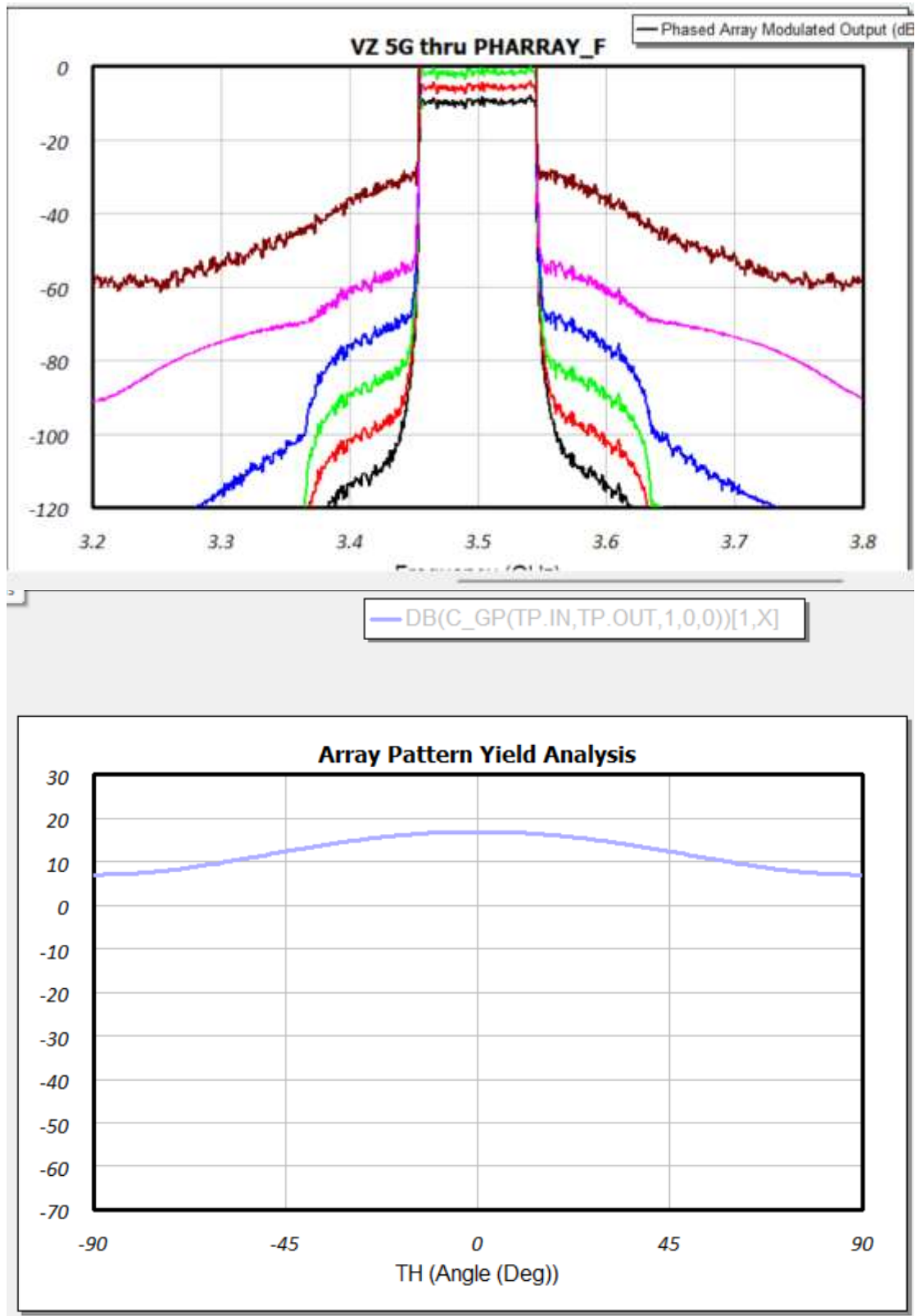
— DB(C_GP(TP.IN,TP.OUT,1,0,0))[1,X,*]



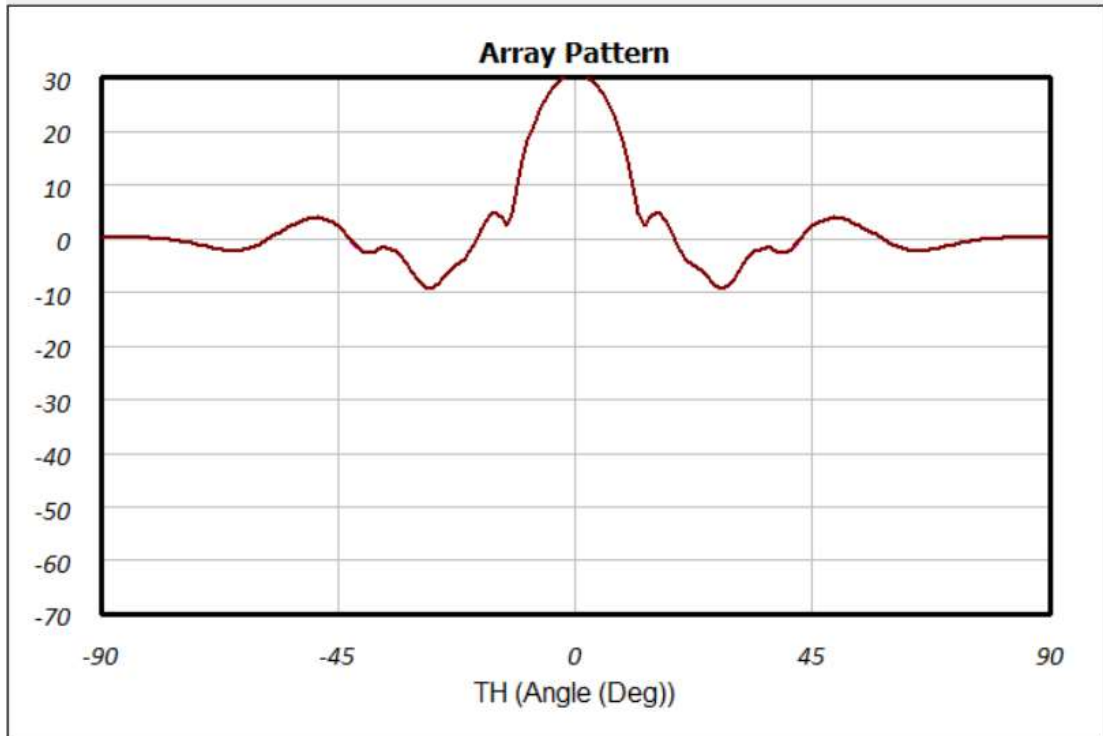
— Phased Array Response



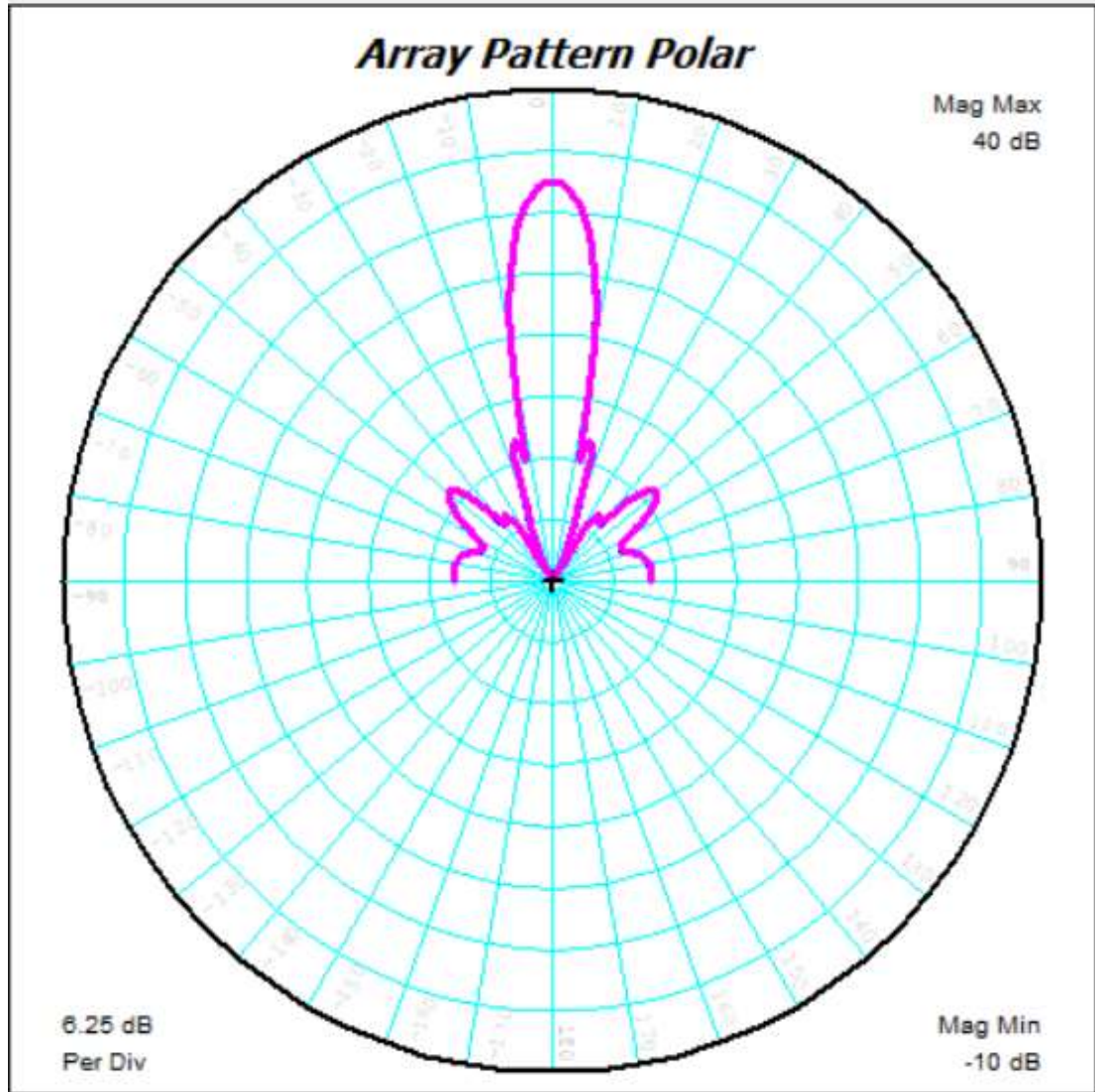
8.1.5 SELECT=4



— DB(C_GP(TP.IN,TP.OUT,1,0,0))[1,X,*]



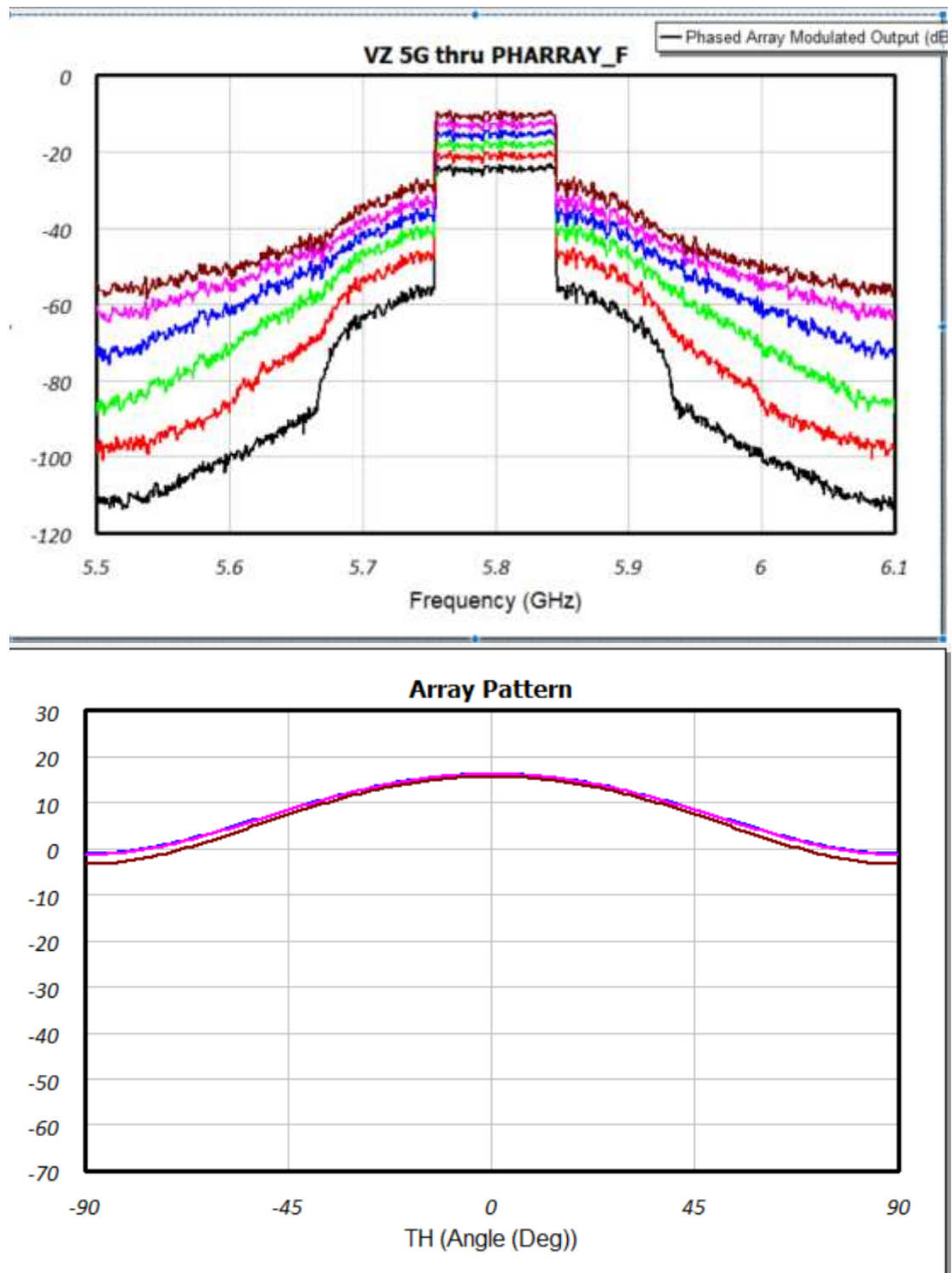
— Phased Array Response



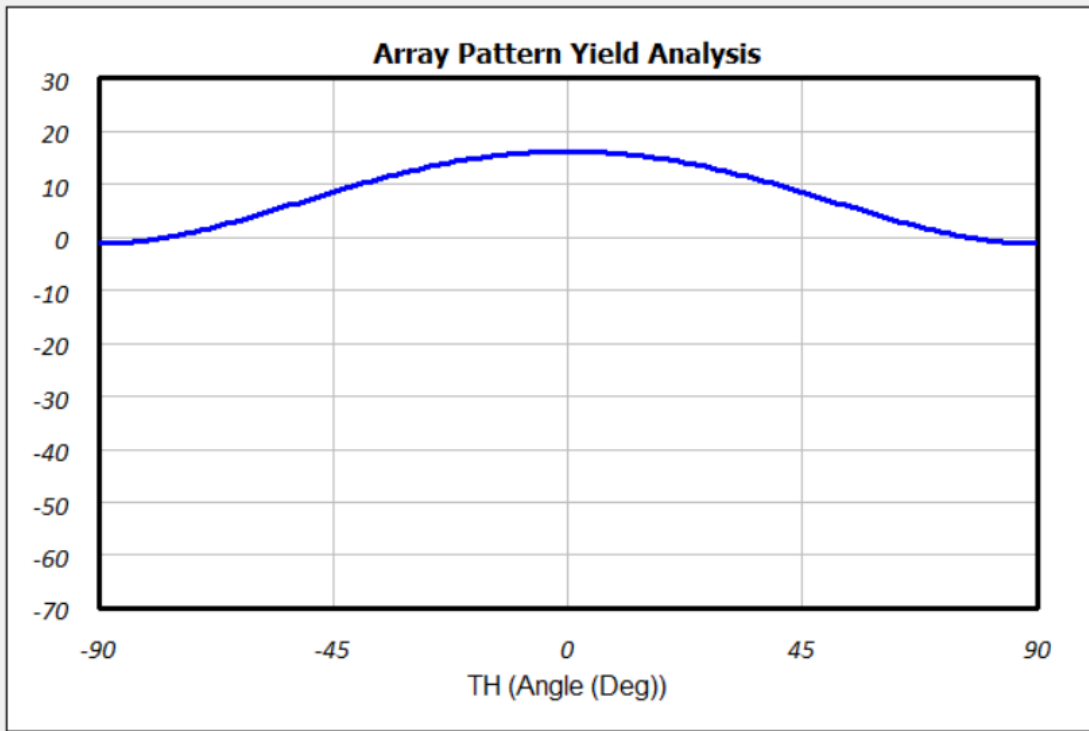
8.2 Προσομοιώσεις στα 5.8GHz

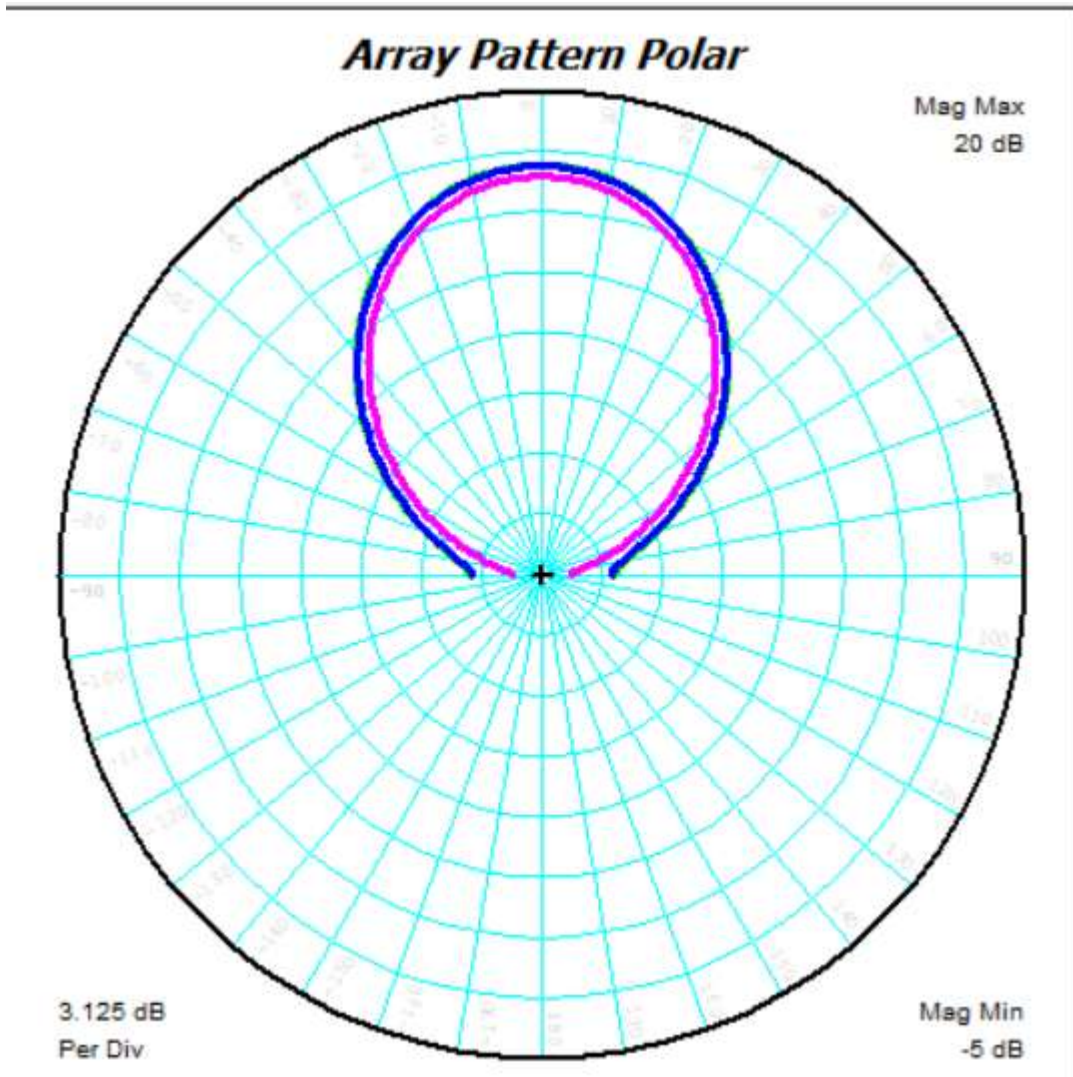
Για να αλλάξουμε τη συχνότητα αλλάζουμε την παράμετρο DSGNFRQ, που βρίσκεται στο αντικείμενο PHARRAY_F, στα 5.8GHz για κάθε ένα από τα σχήματα. Επίσης αλλάζουμε στο αντικείμενο SUBCKT το σχήμα Phased Array with Modulated Signals to CF σε 5.8GHz. Έτσι λαμβάνουμε τα παρακάτω αποτελέσματα.

8.2.1 SELECT=0

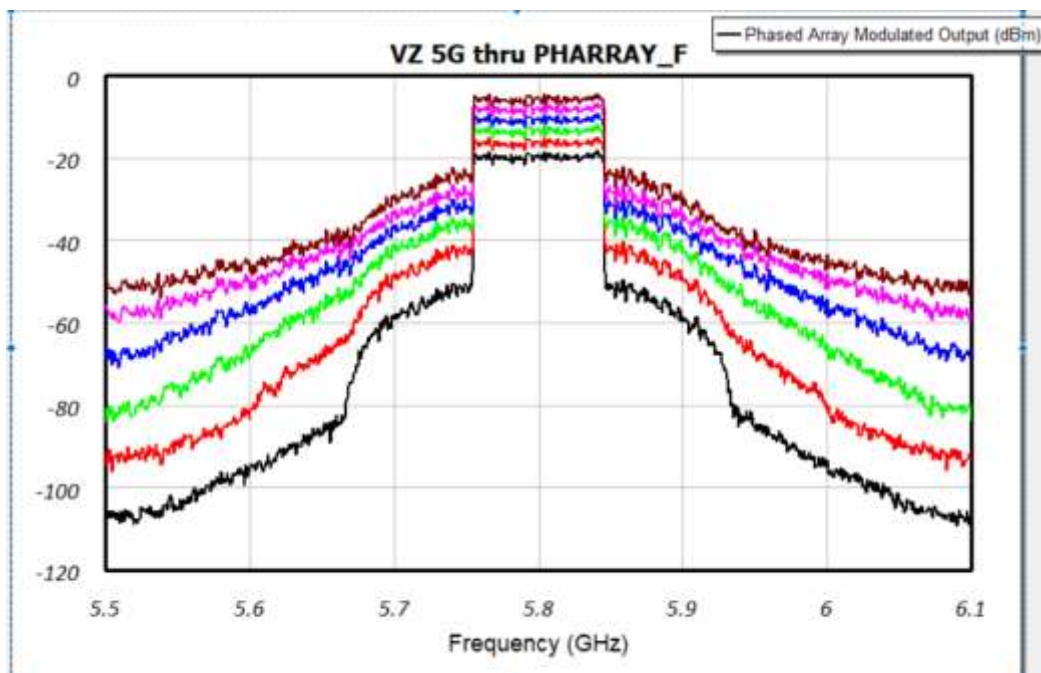


— DB(C_GP(TP.IN,TP.OUT,1,0,0))[1,X]

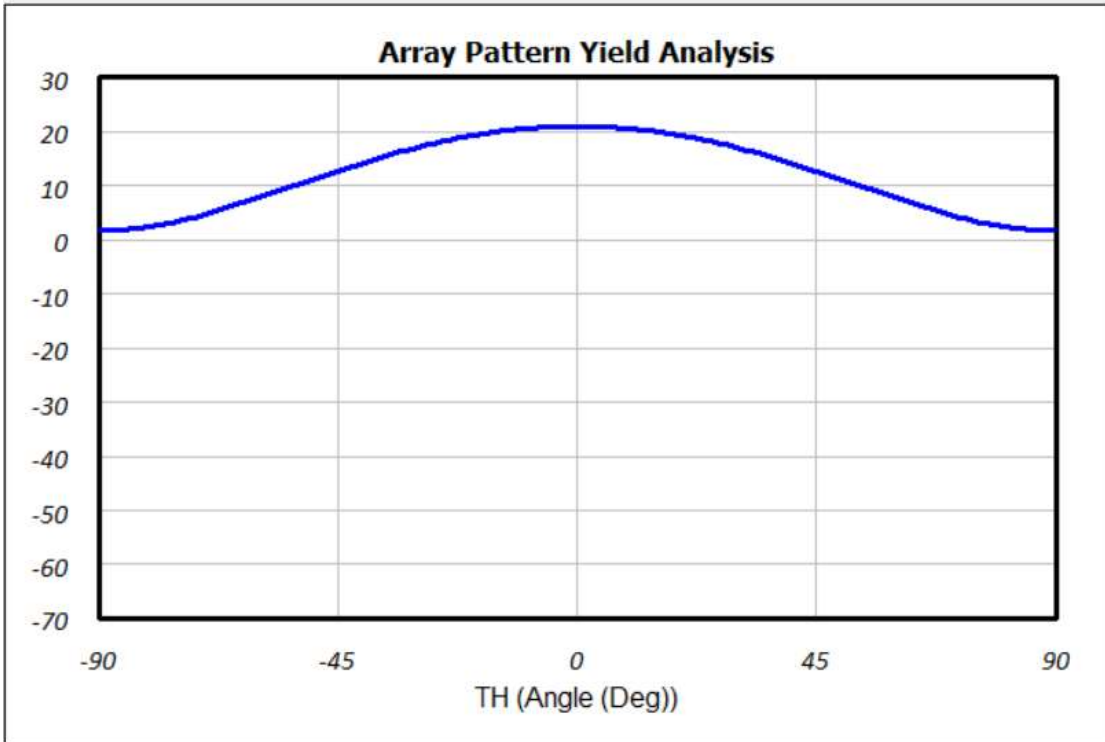




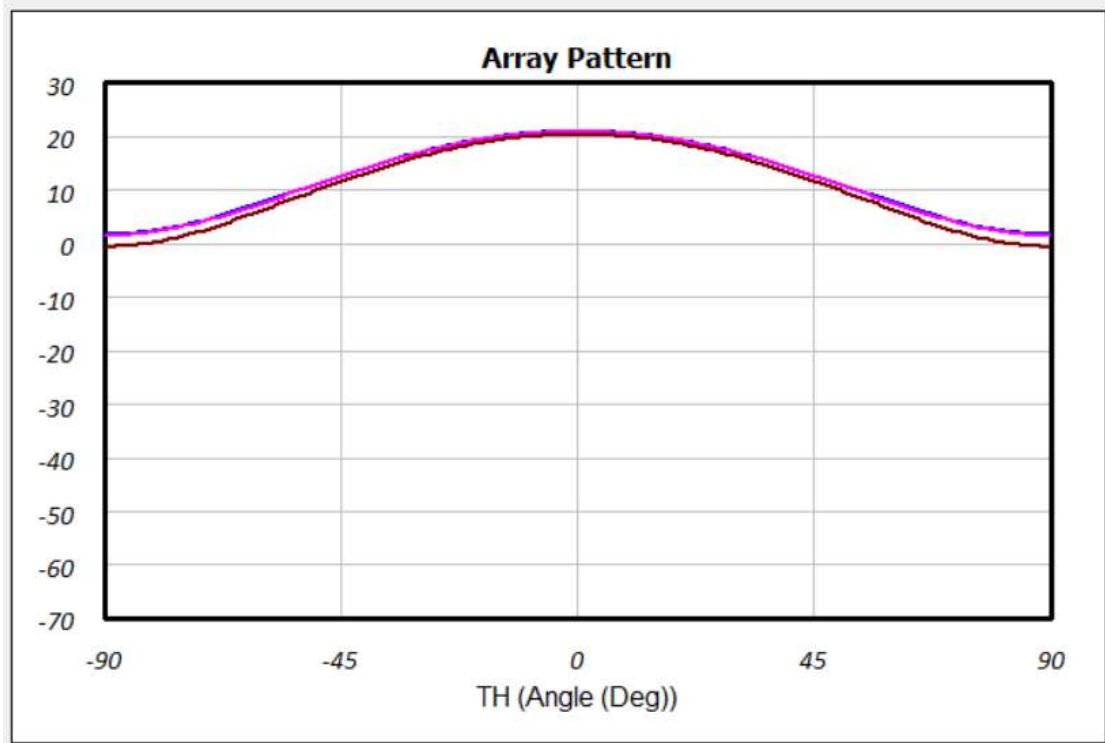
8.2.2 SELECT=1



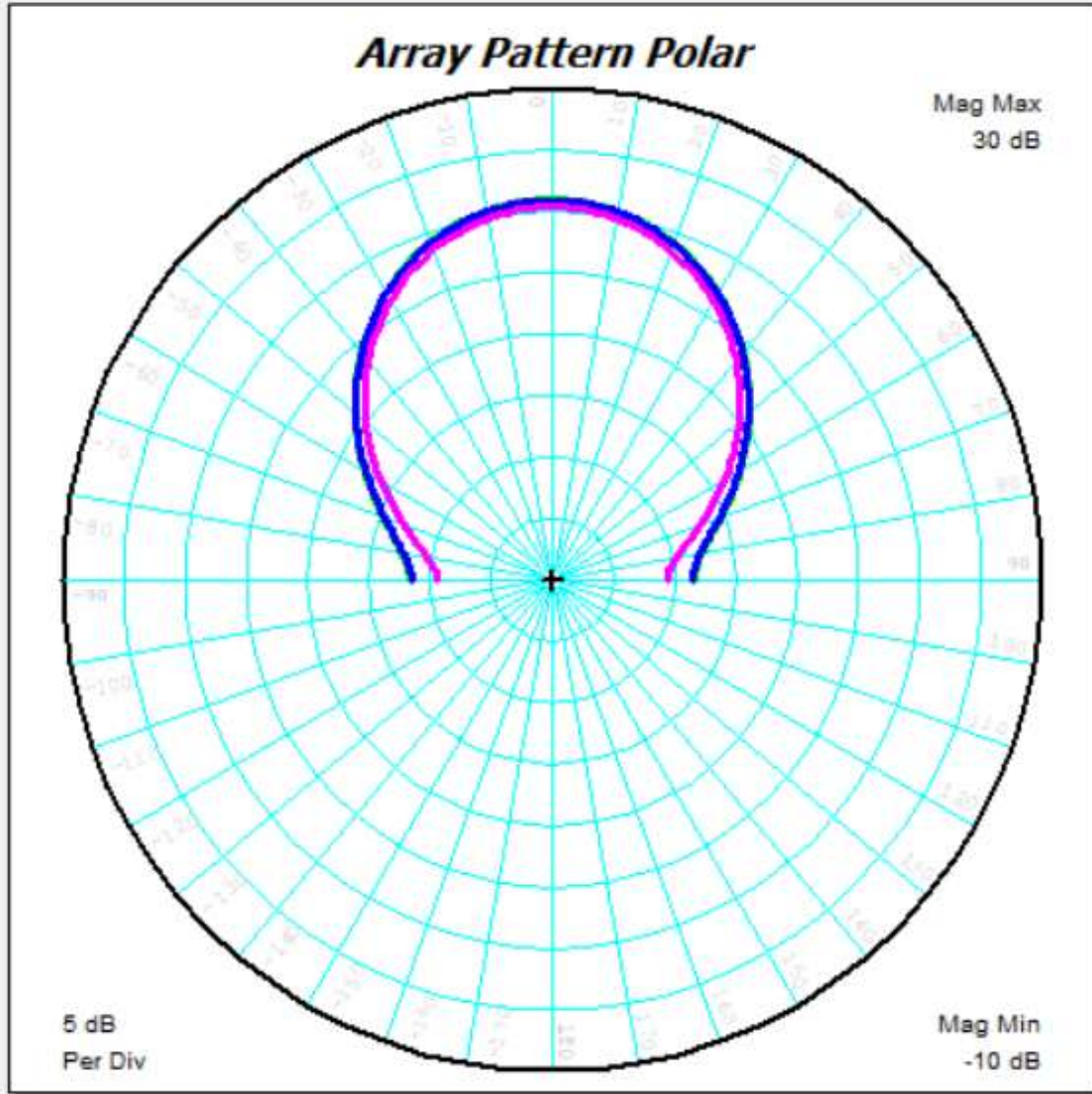
— DB(C_GP(TP.IN,TP.OUT,1,0,0))[1,X]



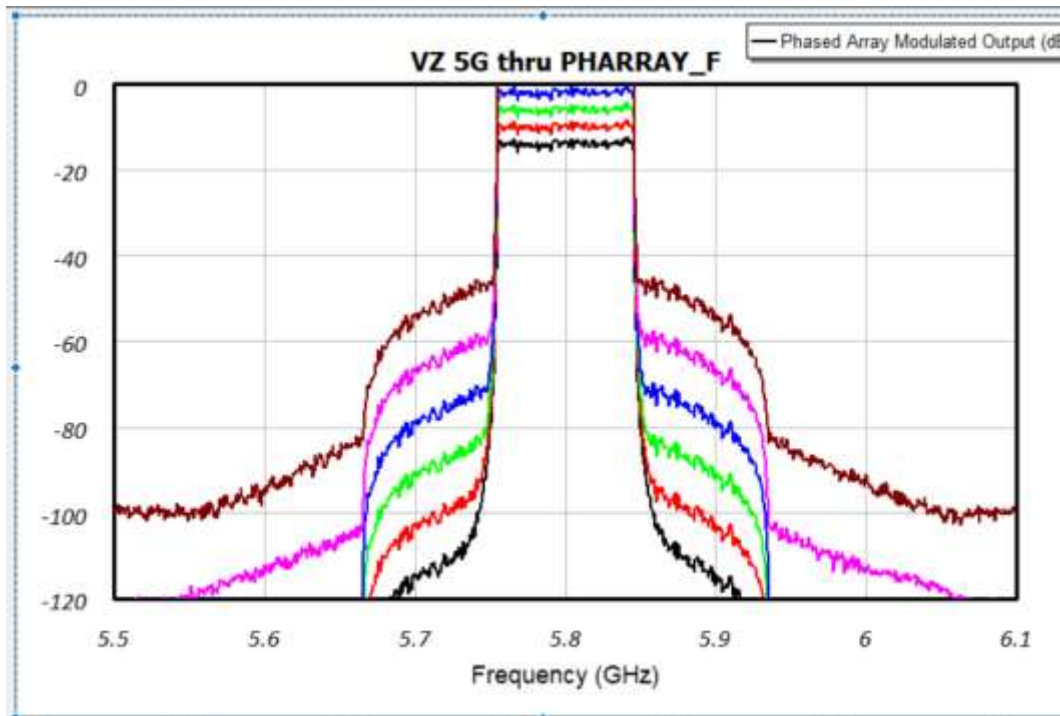
— DB(C_GP(TP.IN,TP.OUT,1,0,0))[1,X,*]



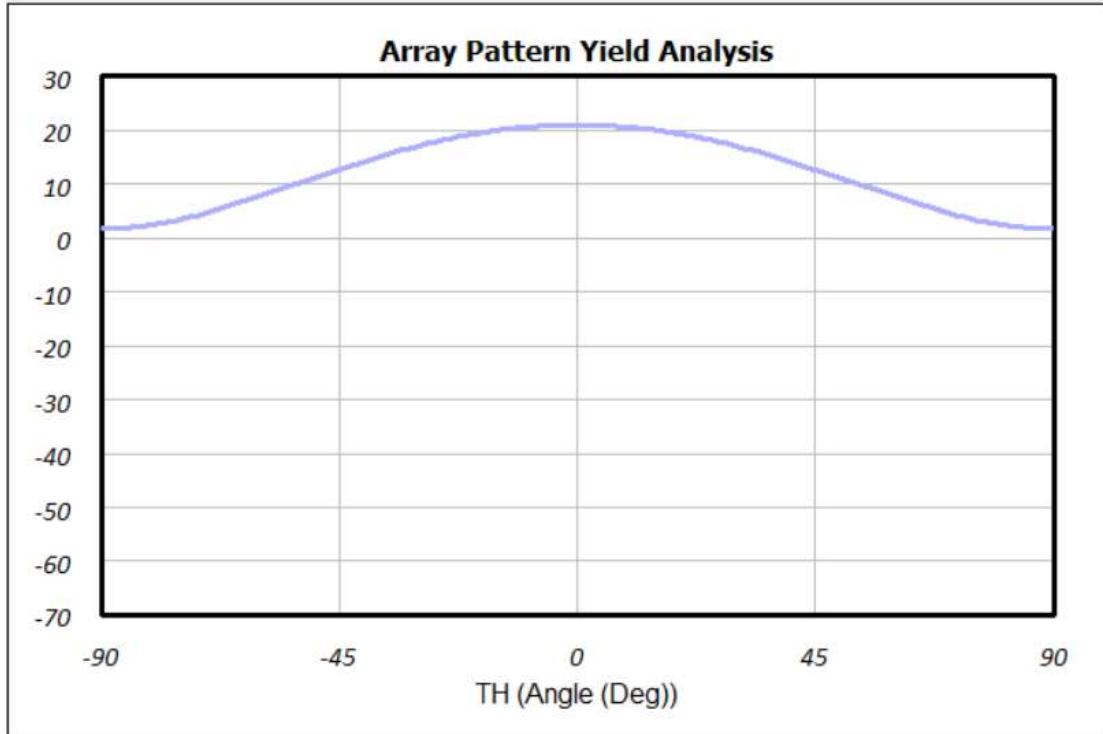
— Phased Array Response



8.2.3 SELECT=2

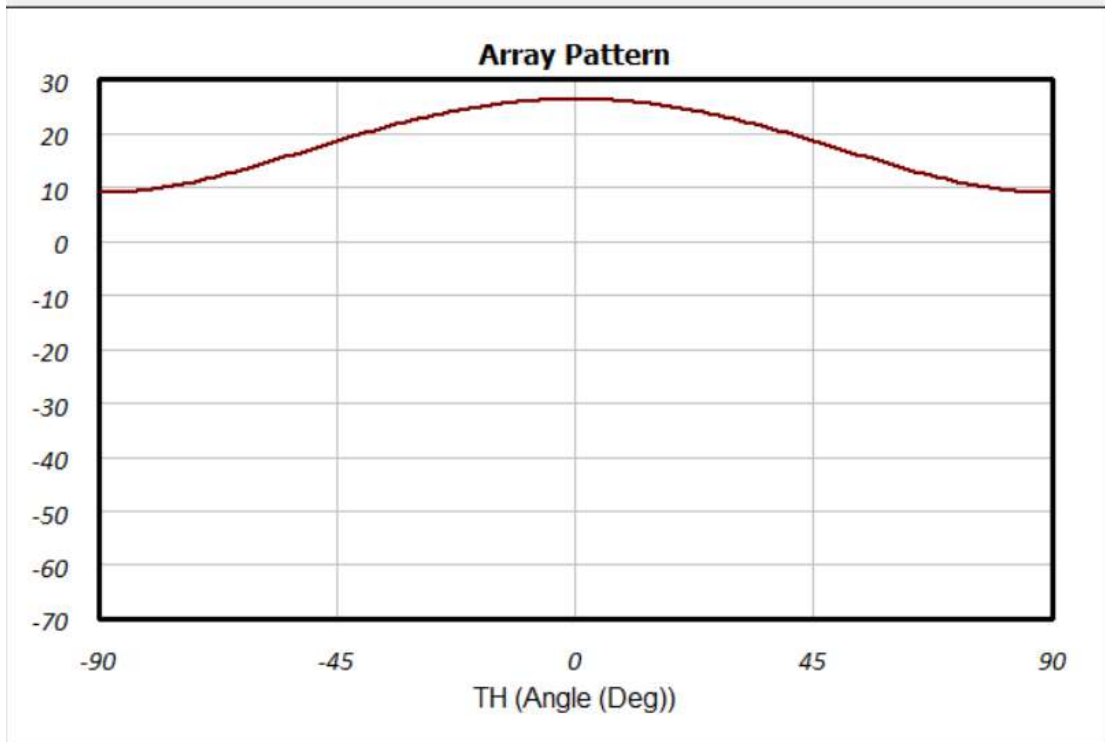


— DB(C_GP(TP.IN,TP.OUT,1,0,0))[1,X]

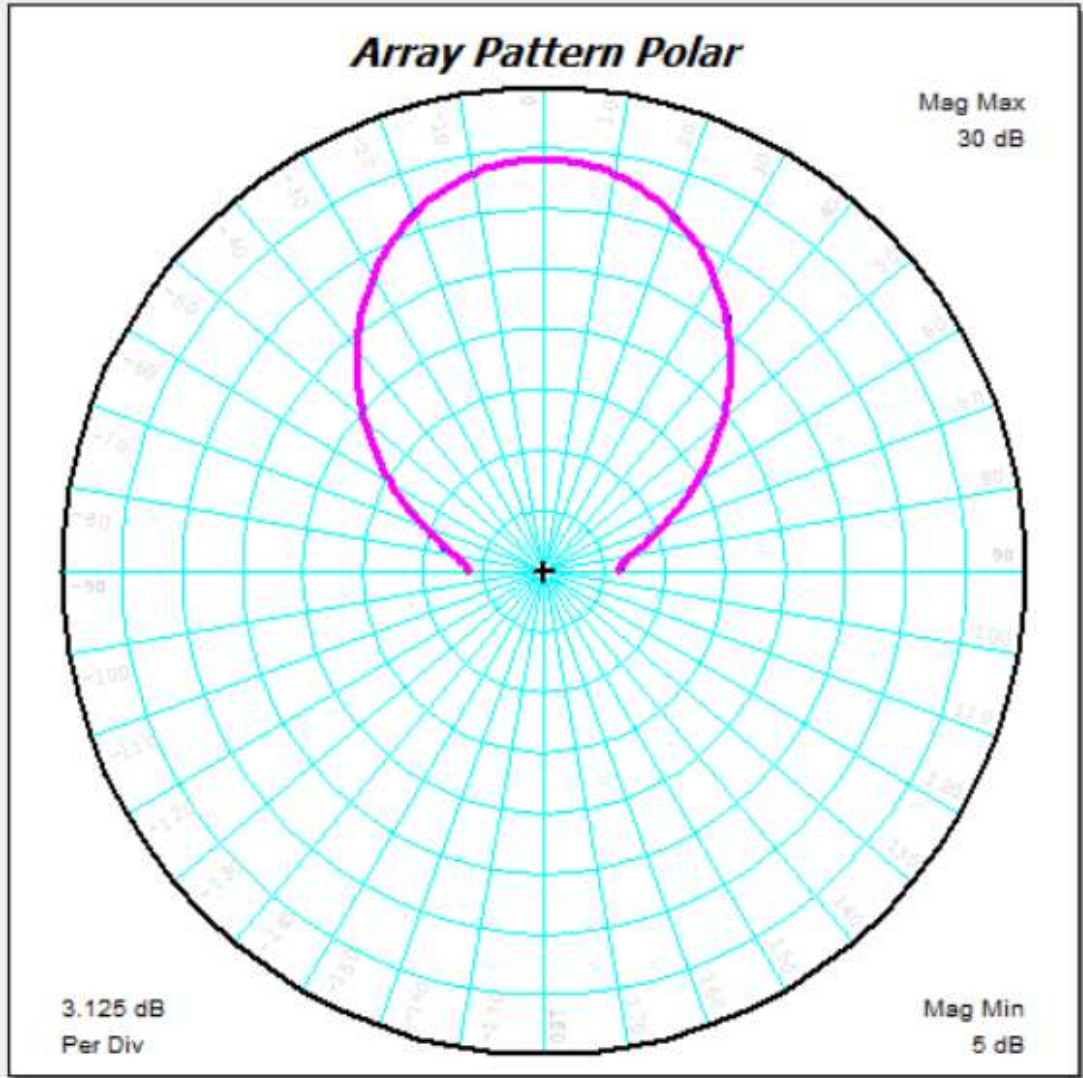


Array Pattern

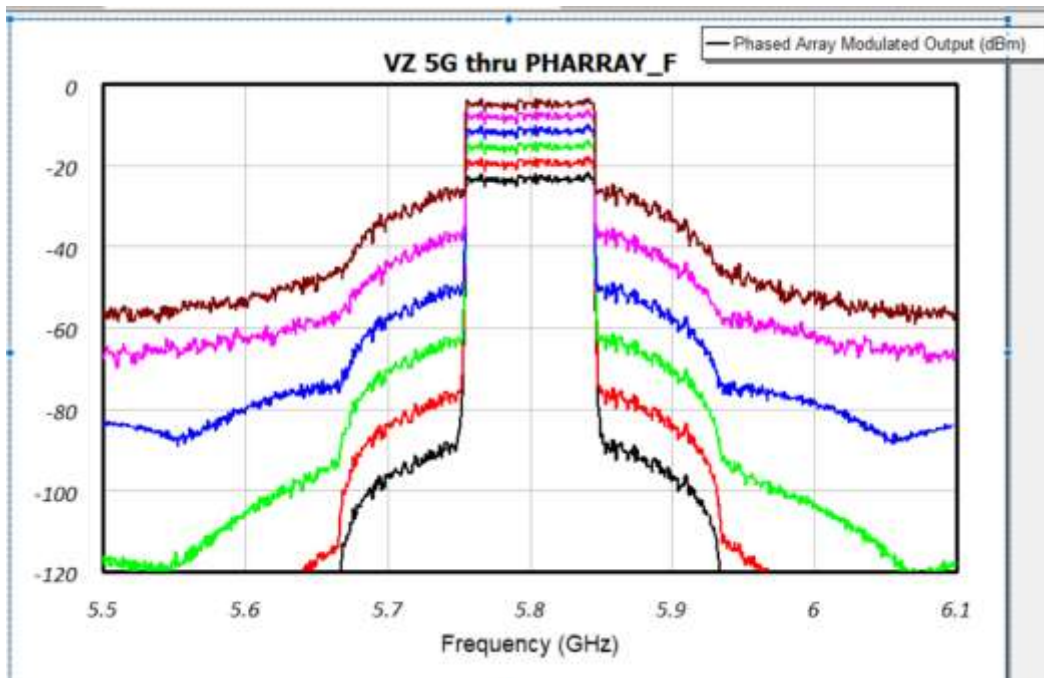
— DB(C_GP(TP.IN,TP.OUT,1,0,0))[1,X,*]



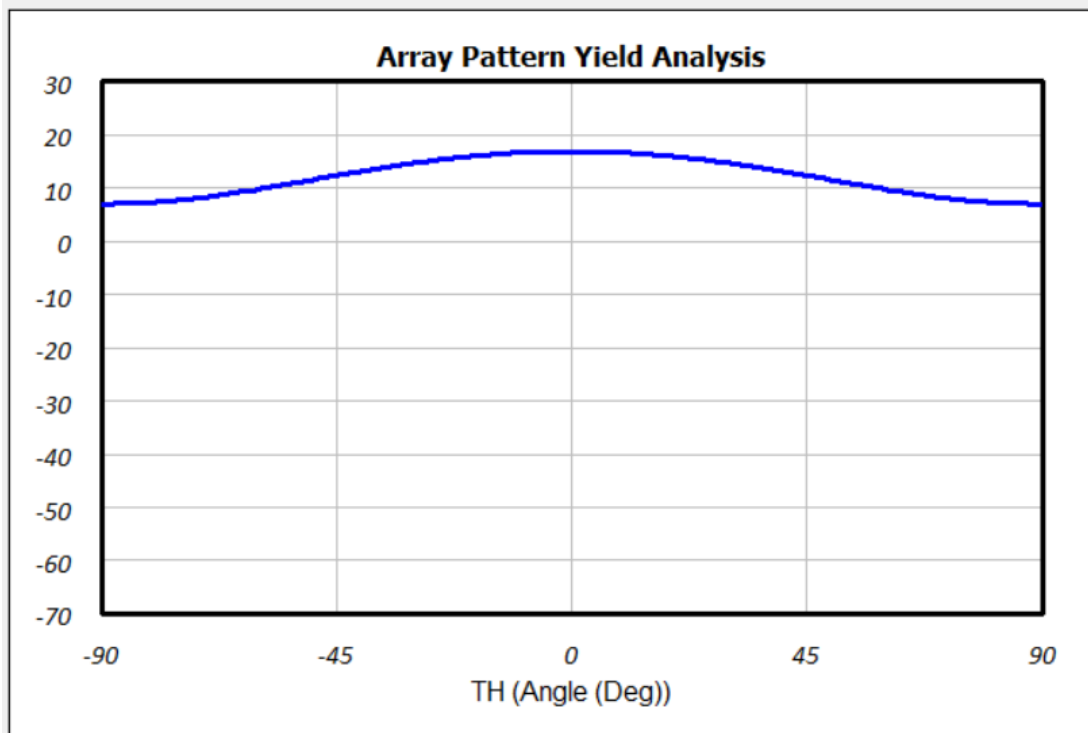
— Phased Array Response



8.2.4 SELECT=3

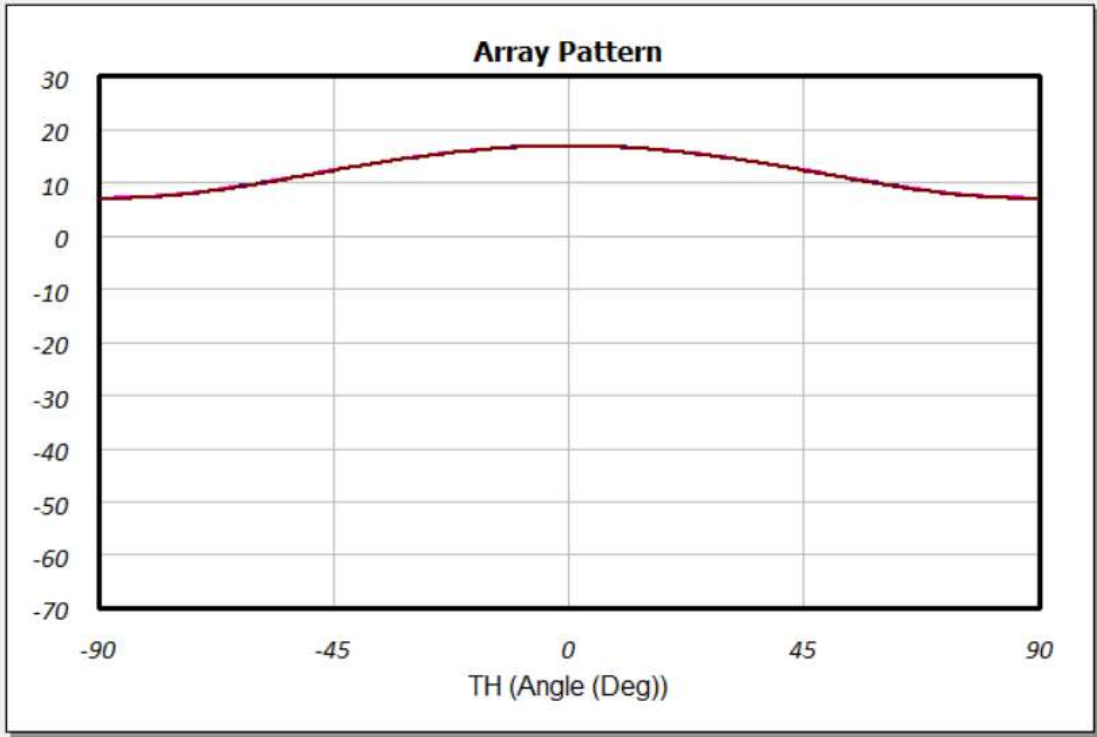


— DB(C_GP(TP.IN,TP.OUT,1,0,0))[1,X]

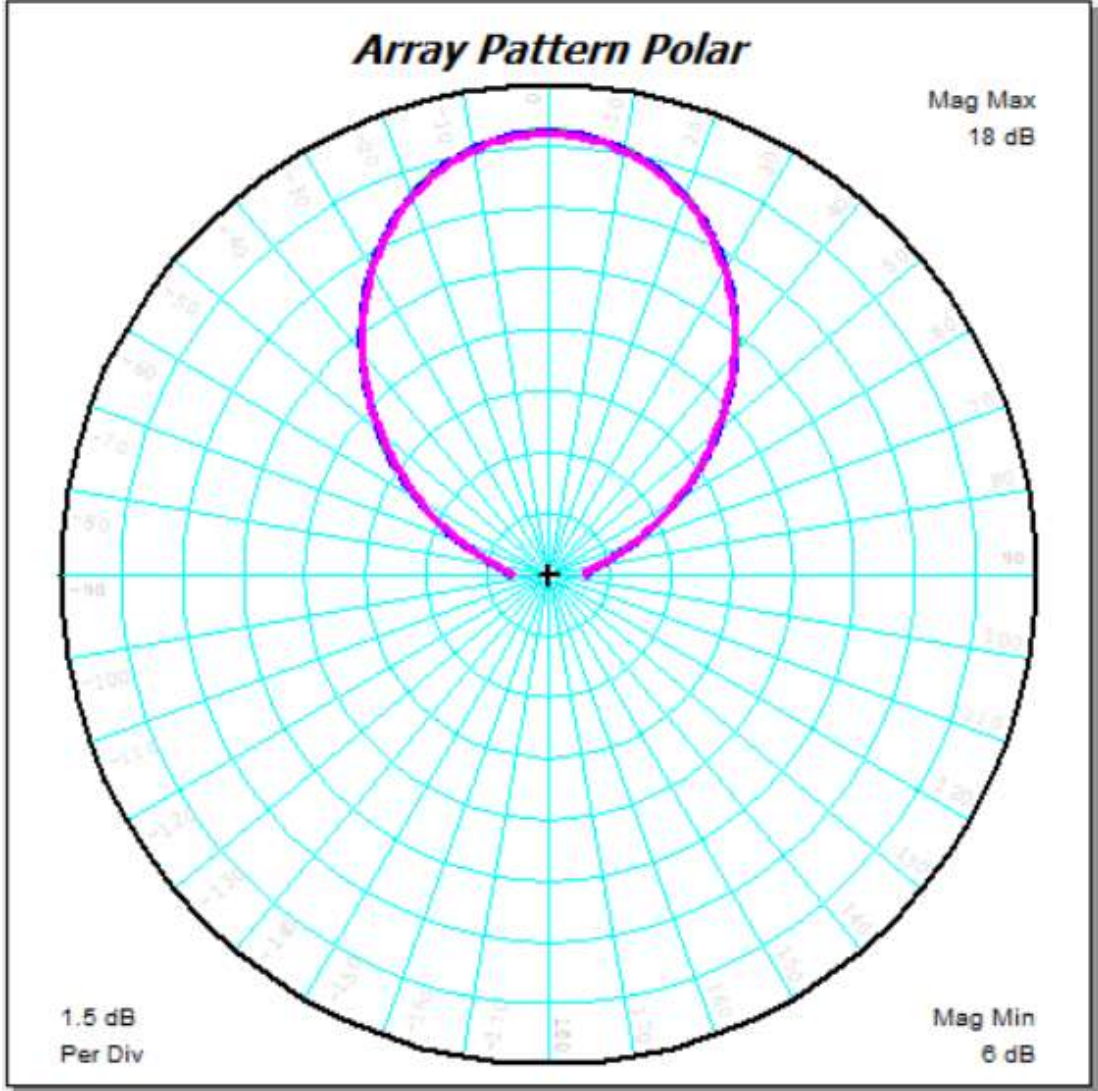


Array Pattern

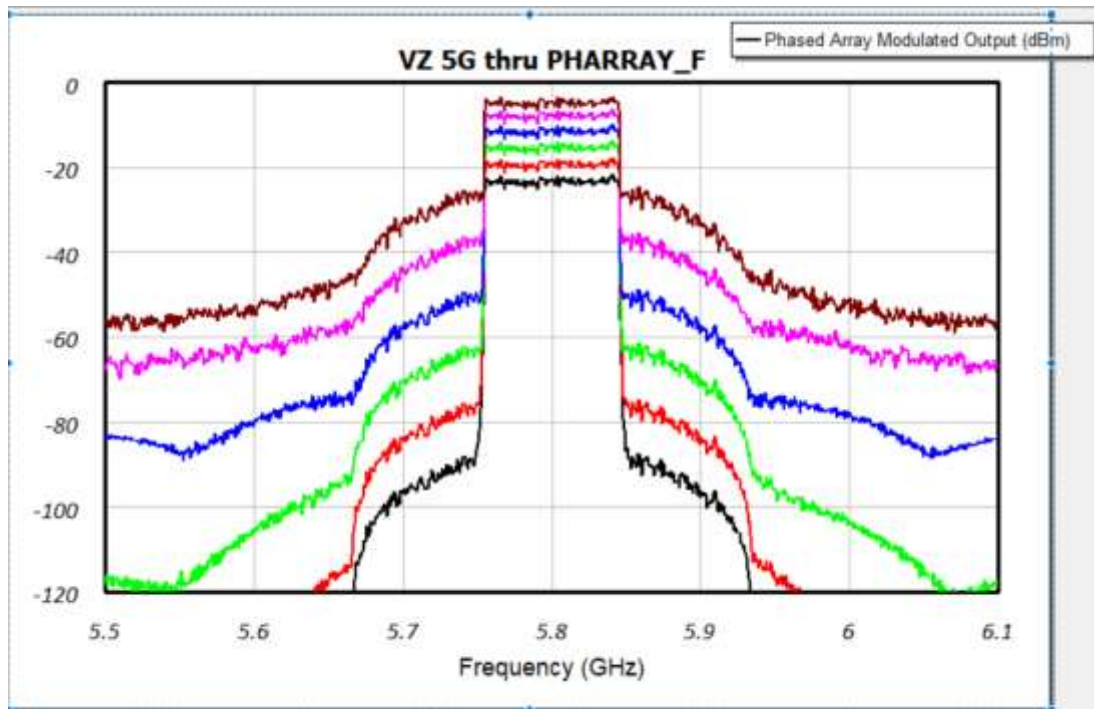
— DB(C_GP(TP.IN,TP.OUT,1,0,0))[1,X,*]



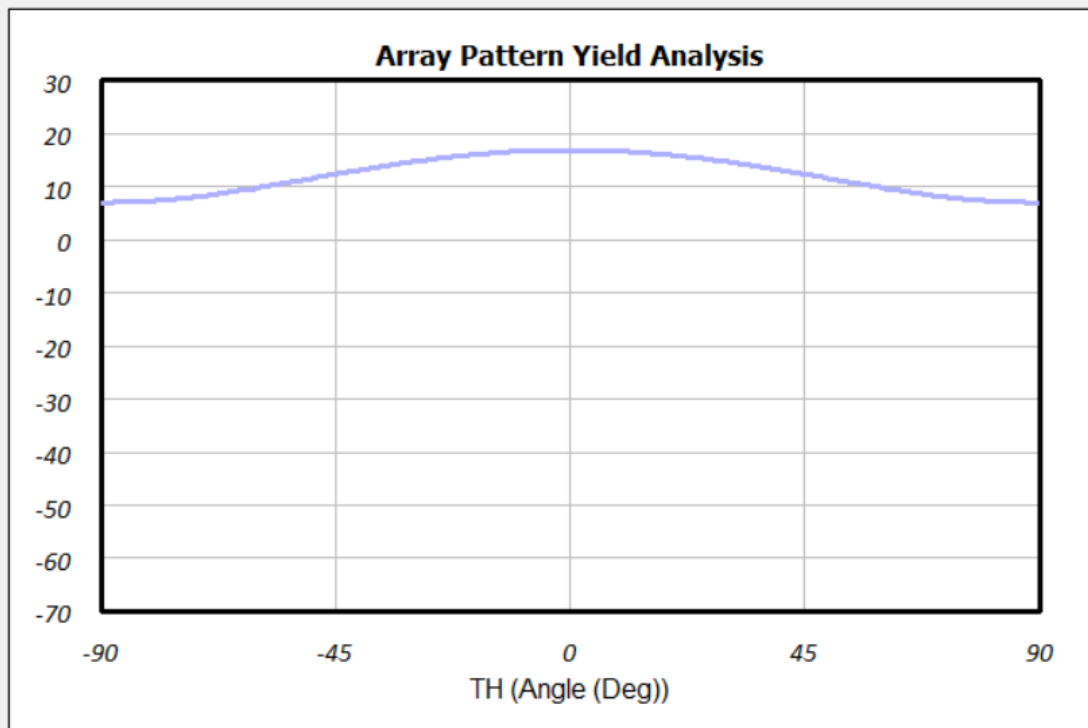
— Phased Array Response



8.2.5 SELECT=4

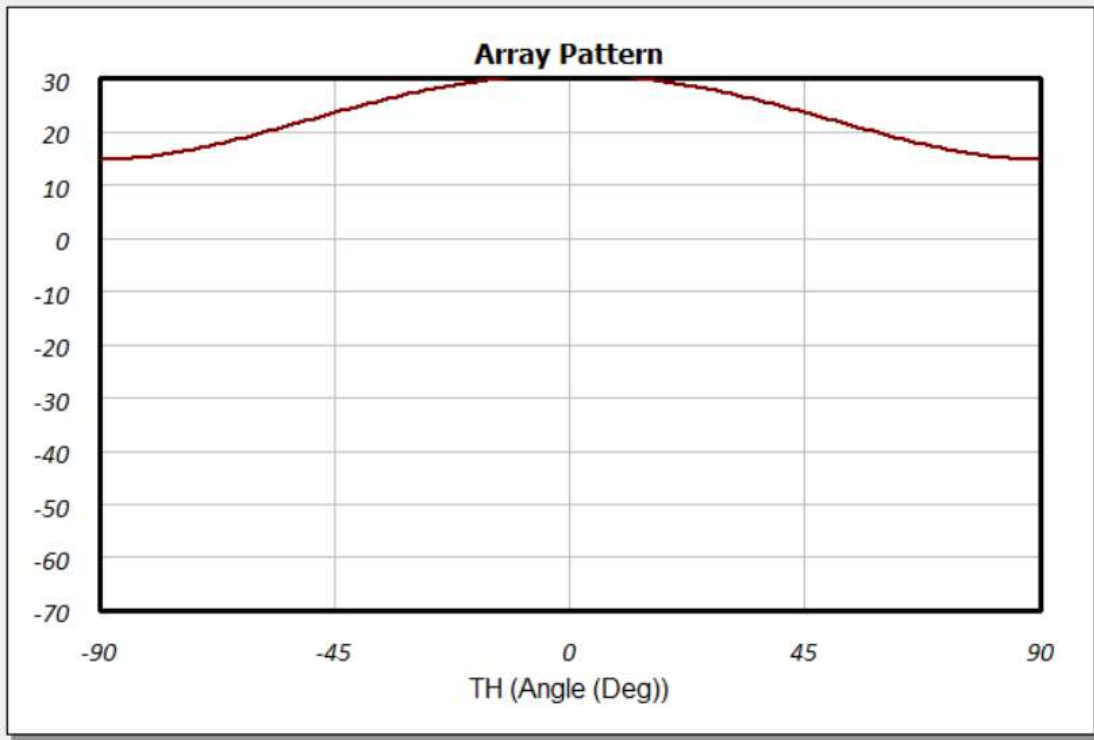


— DB(C_GP(TP.IN,TP.OUT,1,0,0))[1,X]

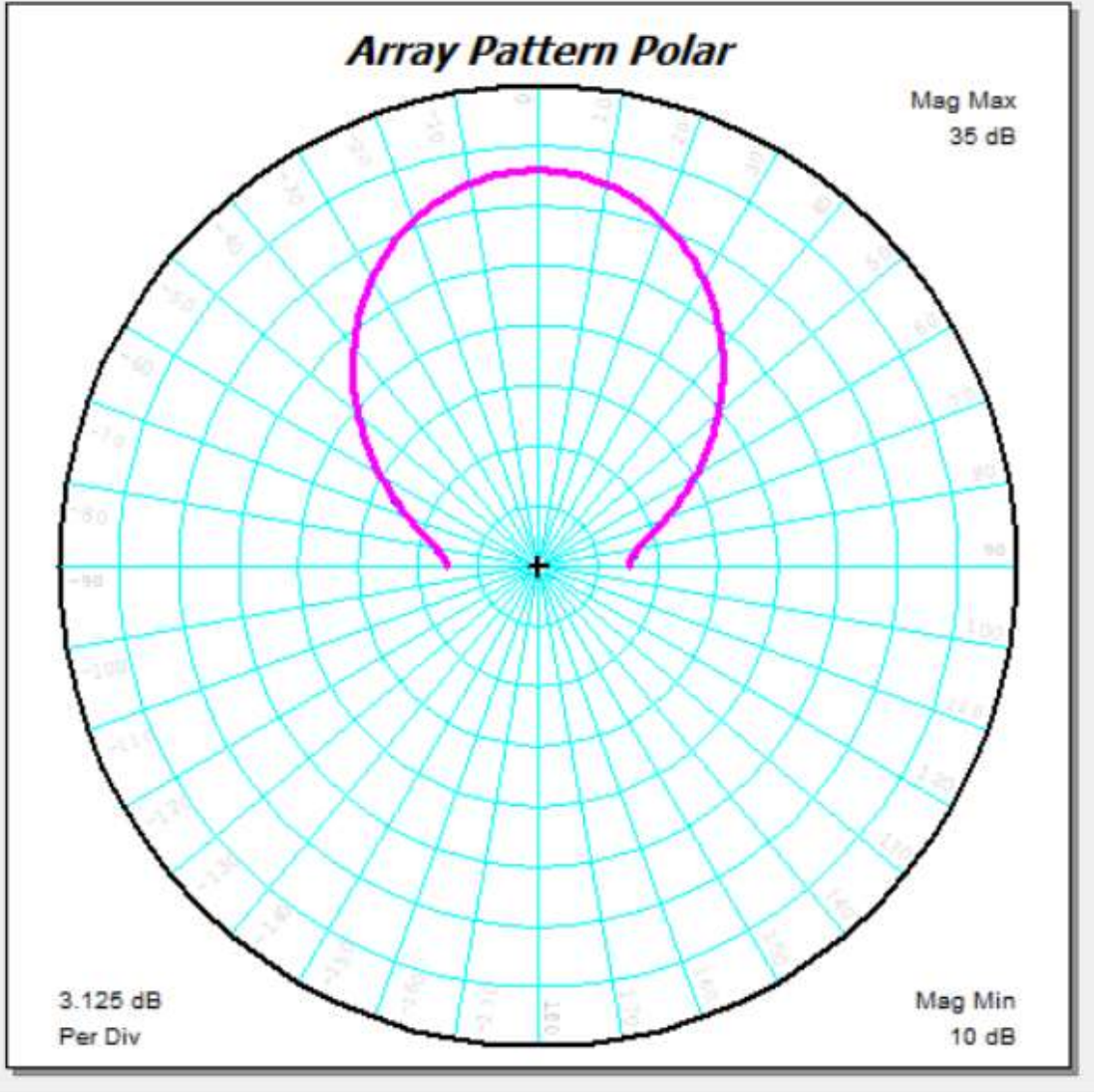


Array Pattern

— DB(C_GP(TP.IN,TP.OUT,1,0,0))[1,X,*]



— Phased Array Response



8.3 Συμπεράσματα

Το πρώτο γράφημα απεικονίζει την φάση του συνόλου των φασματικών σημάτων του VZ 5G μέσω του PHARRAY_F. Ας δούμε τι συγκεκριμένα απεικονίζει:

Άξονας X (Συχνότητα - GHz): Ο άξονας X αναπαριστά τη συχνότητα σε GHz. Η συχνότητα κυμαίνεται από 3.2 έως 3.8 GHz.

Άξονας Y (Φάση του Σήματος - dB): Ο άξονας Y δείχνει τη φάση του συνόλου των φασματικών σημάτων σε μονάδες dB. Η τιμή της φάσης κυμαίνεται από 0 έως -120 dB.

Πολλαπλές Γραμμές Δεδομένων: Οι πολύχρωμες γραμμές αντιπροσωπεύουν διάφορα σύνολα δεδομένων. Όλα τα σύνολα δεδομένων έχουν παρόμοια τάση: αρχικά

μειώνονται, στη συνέχεια αυξάνονται κοντά στα 3.5 GHz και στη συνέχεια μειώνονται ξανά.

Το δεύτερο γράφημα είναι μια αναπαράσταση του Αναλυτικού Προτύπου Πίνακα. Ας δούμε αναλυτικά τι απεικονίζει:

Άξονας X (Γωνία - Μοίρες): Ο άξονας X αναπαριστά τη γωνία σε μοίρες. Η γωνία κυμαίνεται από -90 έως 90 μοίρες.

Άξονας Y (Μέγιστη Ενίσχυση - dB): Ο άξονας Y δείχνει τη μέγιστη ενίσχυση του προτύπου σε μονάδες dB. Οι σημειώσεις στον άξονα Y είναι:

Μέγιστη ενίσχυση: 20 dB

Ελάχιστη ενίσχυση: -30 dB

Κάθε διαίρεση αντιστοιχεί σε 6.25 dB.

Πρότυπο Ενίσχυσης: Στο γράφημα, υπάρχει ένα πρότυπο ενίσχυσης που απεικονίζεται με μπλε γραμμή. Το πρότυπο έχει πολλά κορυφαία σημεία και κοίλα, με την υψηλότερη κορυφή να φτάνει λίγο πάνω από το 20 στον άξονα Y στις 0 μοίρες στον άξονα X.

Είναι ένα γράφημα που απεικονίζει το πρότυπο ενίσχυσης σε σχέση με τη γωνία.

Το τρίτο γράφημα είναι μια αναπαράσταση του Αναλυτικού Προτύπου Πίνακα. Ας δούμε αναλυτικά τι απεικονίζει:

Άξονας X (Γωνία - Μοίρες): Ο άξονας X αναπαριστά τη γωνία σε μοίρες. Η γωνία κυμαίνεται από -90 έως 90 μοίρες.

Άξονας Y (Μέγιστη Ενίσχυση - dB): Ο άξονας Y δείχνει τη μέγιστη ενίσχυση του προτύπου σε μονάδες dB. Οι σημειώσεις στον άξονα Y είναι:

Μέγιστη ενίσχυση: 20 dB

Ελάχιστη ενίσχυση: -30 dB

Κάθε διαίρεση αντιστοιχεί σε 6.25 dB.

Πρότυπο Ενίσχυσης: Στο γράφημα, υπάρχει ένα πρότυπο ενίσχυσης που απεικονίζεται με μπλε γραμμή. Το πρότυπο έχει πολλά κορυφαία σημεία και κοίλα, με την υψηλότερη κορυφή να φτάνει λίγο πάνω από το 20 στον άξονα Y στις 0 μοίρες στον άξονα X.

Είναι ένα γράφημα που απεικονίζει το πρότυπο ενίσχυσης σε σχέση με τη γωνία.

Το τελευταίο γράφημα είναι ένα πολικό διάγραμμα με την ετικέτα “Array Pattern Polar”. Ας δούμε αναλυτικά τι απεικονίζει:

Άξονας X (Γωνία): Ο άξονας X αναπαριστά τη γωνία σε έναν κύκλο. Η γωνία μετρείται σε μοίρες (degrees) ή ακτίνια (radians).

Άξονας Y (Μέγιστη Ενίσχυση - dB): Ο άξονας Y δείχνει τη μέγιστη ενίσχυση του σήματος σε μονάδες dB. Οι σημειώσεις στον άξονα Y είναι:

Μέγιστη ενίσχυση: 20 dB

Ελάχιστη ενίσχυση: -30 dB

Κάθε διαίρεση αντιστοιχεί σε 6.25 dB.

Πολύπλοκο Πρότυπο: Στο γράφημα, υπάρχει ένα πολύπλοκο πρότυπο που απεικονίζεται σε μοβ χρώμα. Το πρότυπο έχει ένα κυρίως λοβό που εκτείνεται προς τα πάνω και αρκετούς μικρότερους λοβούς που ακτινοβατούν προς διάφορες γωνίες.

8.4 Σύνοψη

Συνοψίζοντας το παραπάνω κείμενο, η μελέτη επικεντρώνεται στη σχεδίαση μιας MIMO στοιχειοκεραίας στις συχνότητες των 3.5 και των 5.8GHz. Η κατασκευή της δεν θα ήταν δυνατή χωρίς τη βασική θεωρία, η οποία αποτελεί το υπόβαθρο για την πρακτική υλοποίηση.

Το κατασκευαστικό κομμάτι αποτελεί το σημαντικότερο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας. Σε αυτό μελετήθηκαν οι παράμετροι, τα διαγράμματα ακτινοβολίας και η περιστροφή του λοβού ως προς οποιαδήποτε διεύθυνση στο χώρο. Ο στόχος ήταν να επιτευχθεί συντονισμός της κεραίας στις επιθυμητές συχνότητες των 3.5 και των 5.8GHz. Στη συνέχεια μελετήθηκαν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με διάφορες ρυθμίσεις του συστήματος και αντλήθηκαν τα αντίστοιχα συμπεράσματα.

Επιπλέον, κάθε κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας αποτελεί σημαντικό κομμάτι της θεωρίας των κεραιών, καθώς αποτελεί τη βάση για την κατασκευή της MIMO στοιχειοκεραίας.

Τέλος, οι τηλεπικοινωνίες θα συνεχίσουν να εξελίσσονται, καθώς οι απαιτήσεις των χρηστών αυξάνονται συνεχώς. Αναμένεται να εμφανιστούν καινοτόμες λύσεις και τεχνολογίες που θα αποσκοπούν σε μεγαλύτερες ταχύτητες και αύξηση της χωρητικότητας.

Βιβλιογραφικές αναφορές

- [1] Balanis, C. A. (2016). Antenna theory. Wiley.
- [2] Alexiou, A. (2017). 5G Wireless Technologies. IET.
- [3] Amy Nordrum, Kristen Clark (2017, January 27). “Everything you need to know about 5G”. IEEE Spectrum magazine
- [4] Woon Hau Chin, Zhong Fan, Russell Haines (2014). “Emerging technologies and research challenges for 5G wireless networks”. IEEE Wireless Communications/mwc.
- [5] Jonathan Rodriguez (2015). “Fundamentals of 5G Mobile Networks”. John Wiley & Sons.
- [6] Durga Malladi (2019).”Making 5G NR mm Wave a reality for 2019 smartphones”.RCR Wireless News
- [7] Cory Beard, William Stallings (2015) “Wireless Communications Networks and Systems”
- [8] Manish Mandloi, Devendra Gurjar, Prabina Pattanayak, Ha Nguyen (2020) “5G and Beyond Wireless Systems”
- [9] Antenna Parameters. (2006). Array and Phased Array Antenna Basics
- [10] Hubregt J. Visser (2006). “The Planar Array and Phased Array Antenna” Research Gate
- [11] 5G learning (2018). “A detailed introduction to beamforming”
- [12] Louis E. Frenzel (2020). “ How phased array antennas work” Nuts and Volts
- [13] Waleed Tariq Sethi (2016). “ State of the Art Antenna Technology for Cloud Radio Access Networks” Intechopen
- [14] Petropoulos Ioannis (2012). “Phased Array Antenna Receives 4G Networks” Microwaves & RF
- [15] Robert J. Mailloux (1994), “Phased Array Antenna Handbook, Second edition”
- [16] <https://kb.awr.com/pages/viewpage.action?pageId=13599499>