



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΔΙΚΩΝ

Μελέτη και Πειραματική Αξιολόγηση Οπτικών Διατάξεων για τη Σχηματοποίηση Πολλαπλών Ανεξάρτητων Μικροκυματικών Δεσμών σε Ασύρματα Δίκτυα Πέμπτης Γενεάς με Ικανότητα Υποστήριξης Πολυεκπομπής

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Ευστάθιου Ανδριανόπουλου

Επιβλέπων: Η. Αβραμόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΩΤΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ
Αθήνα, Μάρτιος 2020



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας & Τεχνολογίας Υλικών
Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών

Μελέτη και Πειραματική Αξιολόγηση Οπτικών
Διατάξεων για τη Σχηματοποίηση Πολλαπλών
Ανεξάρτητων Μικροκυματικών Δεσμών σε
Ασύρματα Δίκτυα Πέμπτης Γενεάς με
Ικανότητα Υποστήριξης Πολυεκπομπής

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Ευστάθιου Ανδριανόπουλου

Επιβλέπων: Η. Αβραμόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 9η Μαρτίου 2020.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....

Η. Αβραμόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Γ. Ματσόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

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

Αθήνα, Μάρτιος 2020

(Υπογραφή)

.....

ΕΥΣΤΑΘΙΟΣ ΑΝΔΡΙΑΝΟΠΟΥΛΟΣ

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

© 2019 – All rights reserved

Copyright © –All rights reserved Ευστάθιος Ανδριανόπουλος, 2020.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

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



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

Τομέας Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας & Τεχνολογίας Υλικών

Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Κο Αβραμόπουλο για την δυνατότητα που μου προσέφερε να δουλέψω στο Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών και να συμμετέχω στην ομάδα του εργαστηρίου. Θα ήθελα επίσης ιδιαίτερα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Χρήστο Τσώκο για την υπερπολύτιμη βοήθειά και την καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αλλά και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε από την πρώτη στιγμή της συνεργασίας μας. Ευχαριστώ επίσης όλα τα παιδιά από το εργαστήριο για τη βοήθειά τους, και συγκεκριμένα τους Δρ. Χρήστο Κουλουμέντα, Παναγιώτη Γκρούμα, Λευτέρη Γουναρίδη, Αδάμ Ραπτάκη και Δρ. Νικόλα Λύρα.

Θα ήθελα ιδιαίτερα να ευχαριστήσω την κοπέλα μου, Αριάδνη Μπαρμπαρούση, για την αμέριστη υποστήριξή της κατά τη διάρκεια της φοίτησής μου, την αδερφή μου Νάνσυ Ανδριανοπούλου και τη μητέρα μου Καλλιόπη Γώγου, για την στήριξη που μου προσφέρουν όλα αυτά τα χρόνια, και τους συμφοιτητές μου, Ανδρέα Αθανασόπουλο, Αναστασία Κουταλιανού, Ευφροσύνη Αθανασούλα και Γιώργο Λιβιτσάνο, για την ανιδιοτελή βοήθεια που μου προσέφεραν κατά τη φοίτησή μας.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία μελετά και αναλύει δύο καταρχήν διαφορετικές διατάξεις οπτικών δικτύων σχηματοποίησης δέσμης, με γνώμονα αξιολόγησης τη δυνατότητα που παρέχουν σε εφαρμογές πολυεκπομπής (multicast), υπό το πρίσμα των δικτύων πέμπτης γενεάς. Η πρώτη διάταξη βασίζεται στη χρήση ολισθητών φάσης και συμβολόμετρων Mach-Zehnder (MZI), χωροταξικά τοποθετημένα σε έναν Blass Matrix, ενώ η δεύτερη κάνει χρήση στοιχείων πραγματικής καθυστέρησης (True Time Delay, TTD) και συγκεκριμένα οπτικών γραμμών καθυστέρησης (Optical Delay Lines, ODLs), αλλά και ρυθμιζόμενων οπτικών εξασθενητών ισχύος. Η ειδοποιός διαφορά των δύο διατάξεων έγκειται στον τρόπο με τον οποίο εισαγάγει η κάθε μία την απαιτούμενη στροφή φάσης στην εκάστοτε επιθυμητή περίπτωση. Γίνεται εκτενής μελέτη του φαινομένου beamsquint που εμφανίζεται στην περίπτωση του Blass Matrix, ποσοτικοποιώντας την υποβάθμιση που προκαλεί σε μία τηλεπικοινωνιακή ζεύξη. Αναλύεται η διάταξη με τα TTD στοιχεία ως μία πιθανή λύση στο παραπάνω πρόβλημα, και επιβεβαιώνεται τόσο προσομοιωτικά αλλά και πειραματικά μέσω διάταξης που υλοποιήθηκε στο Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών, η αρχή λειτουργίας της συγκεκριμένης διάταξης. Προσομοιώνοντας μία γραμμική στοιχειοκεραία τεσσάρων στοιχείων, επιβεβαιώνεται η δυνατότητα της συγκεκριμένης πειραματικής διάταξης για άρτια μετάδοση διαμορφωμένων σημάτων, μέχρι και σε τρεις διαφορετικές κατευθύνσεις. Πειραματικά, χρησιμοποιήθηκαν σχήματα διαμόρφωσης μέχρι και 16-QAM, με φέρουσα συχνότητα στα 15 GHz και ρυθμό συμβόλων 1 GBaud. Σε κάθε περίπτωση, το Bit Error Ratio παρέμεινε χαμηλότερο από 10^{-5} επιβεβαιώνοντας ακράδαντα την άρτια λειτουργία της εν λόγω πειραματικής διάταξης.

Λέξεις Κλειδιά

5G, Blass Matrix, σχηματοποίηση δέσμης, πολυεκπομπή, λειτουργία πολλαπλής εκπομπής, Microwave Photonics, γραμμικές στοιχειοκεραίες, φωτονική ολοκλήρωση, στοιχεία πραγματικής καθυστέρησης.

Abstract

We assess the performance of two optical beamforming networks (OBFNs) able to support multibeam and multicast operation in wireless 5G systems. Assuming operation in the downlink direction, these networks are based on reconfigurable optical matrices that have the ability to transmit up to M different information signals, by feeding an N -element antenna array with the appropriate excitation signals. Each transmitted signal can be steered independently either to a single angle, in the case of multibeam operation, or to different angles in the case of multicast operation, by properly tuning the phase and the amplitude relationships of the excitation signals. The first OBFN is based on the use of an $M \times N$ optical Blass matrix architecture. Each node of the matrix relies on the use of an optical phase shifter and a Mach-Zehnder Interferometer which tune the phase and the amplitude of the optical signals with respect to the beamforming parameters and the mode of operation. The second OBFN uses wavelength division multiplexing techniques to form the signals that correspond to each antenna element, and a matrix comprising of optical delay lines and optical attenuators for the processing of the corresponding optical signals. In this paper, we present the required optical techniques for the use of the two OBFNs in both operation modes and through simulation studies, we assess their beamforming performance at 15 GHz with respect to the number of the antenna elements, modulation order, symbol rate and pulse shaping parameters. The evaluation of the performance of the OBFNs is performed through the off-line calculation of the bit-error-ratio (BER) of the received signals at the corresponding observation angles. In addition, regarding the second architecture, we experimentally validate its proof of concept, when operating in the multicast and multibeam mode using an OBFN based on commercially available components.

Keywords

5G, Blass Matrix, Beamforming, Multicast, Multibeam Operation, Microwave Photonics, Linear Phased Array, Photonic Integration, True Time Delay Elements

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	1
Περίληψη	3
Abstract	5
Περιεχόμενα	8
Κατάλογος Σχημάτων	11
Κατάλογος Πινάκων	14
1 Εισαγωγή	15
1.1 Όραμα των Δικτύων Πέμπτης Γενεάς 5G	15
1.2 Δίκτυα Σχηματοποίησης Δέσμης	16
1.3 Microwave Photonics (MWP)	18
1.4 Πολυεκπομπή	19
1.4.1 Πολυεκπομπή στα Δίκτυα 5G	20
1.4.2 Multicast Use Cases	21
2 Θεωρία Κεραιών - Δίκτυα Σχηματοποίησης Δέσμης	25
2.1 Κεραίες	25
2.1.1 Θεμελιώδεις Παράμετροι Κεραιών	25
2.2 Το Στοιχειώδες Δίπολο	32
2.3 Στοιχειοκεραίες	34
2.3.1 Ανάλυση Στοιχειοκεραιών	35
2.3.2 Γραμμικές Στοιχειοκεραίες	37
2.4 Δίκτυο Σχηματοποίησης Δέσμης	40
3 Οπτικά Δίκτυα Σχηματοποίησης Δέσμης	47
3.1 Βασικές Οπτικές Διατάξεις	47
3.1.1 Θεμελιώδη στοιχεία ενός IMWP συστήματος	47
3.1.2 Οπτικές Διατάξεις για τον βασισμένο σε TTD στοιχεία OBFN	49

3.1.3	Οπτικές Διατάξεις για τον Blass Matrix OBFN	51
3.2	Περιγραφή Διατάξεων OBFN	52
3.2.1	Περιγραφή Διάταξης OBFN Βασισμένης σε TTD Στοιχεία	53
3.2.2	Περιγραφή Διάταξης OBFN - Blass Matrix	56
4	Προσομοιωτική Μελέτη των Διατάξεων	59
4.1	Μαθηματική Ανάλυση των Διατάξεων	59
4.2	Περιγραφή Αλγορίθμου	62
4.3	Αποτελέσματα και Παρατηρήσεις Προσομοιώσεων	64
4.3.1	Αποτελέσματα και Παρατηρήσεις - Διάταξη Blass Matrix	68
4.3.2	Αποτελέσματα και Παρατηρήσεις - Διάταξη με TTD στοιχεία	75
5	Πειραματική ανάλυση	83
5.1	Περιγραφή της Πειραματικής Διάταξης	83
5.2	Διαδικασία Πειράματος	85
5.3	Πειραματικά Αποτελέσματα	86
5.3.1	Μονοεκπομπή	86
5.3.2	Πολυεκπομπή	87
5.3.3	Πολλαπλή Εκπομπή	90
5.3.4	Επίπτωση σε Συγκεκριμένο Λοβό Λόγω Ύπαρξης Επιπλέον Λοβών	93
6	Συμπεράσματα & Προοπτικές	97
6.1	Σύνοψη και συμπεράσματα	97
6.2	Μελλοντικές επεκτάσεις	98
	Βιβλιογραφία	99

Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Στόχοι 5G Δικτύων	16
1.2	Ενδεικτική απεικόνιση Beamforming	17
1.3	Ενδεικτική Απεικόνιση Αλυσίδας Microwave Photonics	18
1.4	Ενδεικτική απεικόνιση Point-To-Multipoint μεταδόσεων	20
1.5	Απεικόνιση Εφαρμογών Πολυεκπομπής	21
2.1	Σύστημα Συντεταγμένων για Ανάλυση Κεραιών	27
2.2	Δισδιάστατο (Πολικό) Διάγραμμα Ακτινοβολίας	28
2.3	Περιοχές Ακτινοβολίας Κεραιών	30
2.4	Βραχύ Δίπολο στο κέντρο του συστήματος συντεταγμένων	33
2.5	Πολικό Διάγραμμα Έντασης Ακτινοβολίας Διπόλου Hertz	34
2.6	Σύστημα Συντεταγμένων για Ανάλυση Στοιχειοκεραιών	36
2.7	Γεωμετρία Χωρικά Ομοιόμορφης Στοιχειοκεραίας	37
2.8	Τρισδιάστατο Διάγραμμα Ακτινοβολίας Γραμμικής Στοιχειοκεραίας με Ομοιοκατευθυντικούς Ακτινοβολητές	39
2.10	Δίκτυο Σχηματοποίησης Δέσμης	42
3.1	Εξωτερική Διαμόρφωση	49
3.2	Οπτικός Διαχωριστής Δύο Εξόδων	50
3.3	Συμβολόμετρο Mach Zehnder	52
3.4	Πρώτη Διάταξη: OBFN Βασισμένο σε TTD στοιχεία - Downlink Κατεύθυνση	54
3.5	Πρώτη Διάταξη: OBFN Βασισμένο σε TTD στοιχεία - Uplink Κατεύθυνση	55
3.6	Φασματική Απεικόνιση για τα Διάφορα Στάδια της Διάταξης OBFN με TTD Στοιχεία, για M=2 Σήματα Πληροφορίας. 1 → μετά τα lasers, 2,3 → μετά τους διαμορφωτές, 4 → μετά τον AWG, 5 → μετά τη φωτοδίοδο (Αγνοώντας τους τόνους που δεν ενδιαφέρουν)	56
3.7	Σχηματική Αναπαράσταση OBFN - Blass Matrix Αρχιτεκτονικής	57
3.8	Σχηματική Αναπαράσταση της Διαδικασίας Επεξεργασίας Σήματος στον OBFN-Blass	58

4.1	Γραφική Απεικόνιση του φαινομένου της απόκλισης γωνίας σε στοιχειοκεραία με $d = \frac{\lambda}{2}$ και $N=4$ στοιχεία με επιθυμητές γωνίες, 60° και 120° . Οι κάθετες γραμμές απεικονίζουν τις γωνίες στόχευσης, ενώ με κύκλο επί του σχήματος βρίσκονται τα μέγιστα του διαγράμματος ακτινοβολίας. Ομοιόμορφη Διέγερση Πλατών	65
4.4	Γραφική απεικόνιση του φαινομένου της απόκλισης γωνίας σε στοιχειοκεραία με $d = \frac{\lambda}{2}$ και $N=8$ στοιχεία με 3 επιθυμητές γωνίες, $45^\circ, 90^\circ$ και 135° . Οι κάθετες γραμμές απεικονίζουν τις γωνίες στόχευσης, ενώ με κύκλο επί του σχήματος βρίσκονται τα μέγιστα του διαγράμματος ακτινοβολίας. Ομοιόμορφη Διέγερση Πλατών.	68
4.5	Διαγράμματα Αστερισμού για Γωνίες 40° (πάνω αριστερά), 120° (πάνω δεξιά), 90° (κάτω αριστερά) και 105° (κάτω δεξιά).	69
4.6	Διαγράμματα Αστερισμού για Γωνίες 60° (πάνω αριστερά), 140° (πάνω δεξιά), 90° (κάτω αριστερά) και 105° (κάτω δεξιά).	70
4.7	Διαγράμματα Ακτινοβολίας για τις Παραπάνω Περιπτώσεις - Δεξιά Πρώτη Περίπτωση - Αριστερά Δεύτερη Περίπτωση.	71
4.12	Διαγράμματα Αστερισμού Πίνακα 1 - Γωνίες: 40° (πάνω αριστερά), 120° (πάνω δεξιά), 90° (κάτω αριστερά) και 105° (κάτω δεξιά).	76
4.13	Διαγράμματα Αστερισμού Πίνακα 1 - Γωνίες: 60° (πάνω αριστερά), 140° (πάνω δεξιά), 90° (κάτω αριστερά) και 105° (κάτω δεξιά).	77
4.14	Γραμμικό Διάγραμμα Ακτινοβολίας - TTD - Σταδιακή Αύξηση των Μεταδι- δόμενων Διευθύνσεων	78
4.15	Διαγράμματα Αστερισμού Σήματος 16-QAM για τις 4 Γωνίες: 40° (πάνω αρι- στερά), 70° (πάνω δεξιά), 105° (κάτω αριστερά) και 140° (κάτω δεξιά)	79
4.16	Διαγράμματα Αστερισμού Σήματος 16-QAM για Γωνία Παρατήρησης 60° : Μονοεκπομπή (πάνω αριστερά), Πολυεκπομπή Δύο Λοβών (πάνω δεξιά), Πο- λυεκπομπή Τριών Λοβών (κάτω αριστερά) και Υβριδική Εκπομπή Τριών Λοβών (κάτω δεξιά)	80
4.17	Διαγράμματα Αστερισμού Σήματος 16-QAM για Γωνία Παρατήρησης 40° : Μονοεκπομπή (πάνω αριστερά), Πολυεκπομπή Δύο Λοβών (πάνω δεξιά), Πο- λυεκπομπή Τριών Λοβών (κάτω αριστερά) και Υβριδική Εκπομπή Τριών Λοβών (κάτω δεξιά)	81
4.18	Διαγράμματα Αστερισμού Σήματος για Γωνία Παρατήρησης 40° : 16-QAM (αριστερά), 64-QAM (δεξιά)	81
4.19	Διαγράμματα Αστερισμού Σήματος για Γωνία Παρατήρησης 40° για $N=8$ στοι- χεία με Διέγερση Chebyshev: 16-QAM (αριστερά), 64-QAM (δεξιά) - Με- τάδοση Άνευ Σφαλμάτων σε Κάθε Περίπτωση	82
5.1	Σχηματική Απεικόνιση της Πειραματικής Διάταξης	84
5.3	Πειραματικά Διαγράμματα Ακτινοβολίας - Πολυεκπομπή - 2 Λοβοί - $[40^\circ, 105^\circ]$ Αριστερά - $[60^\circ, 120^\circ]$ Κέντρο - $[75^\circ, 140^\circ]$ Δεξιά	88

5.5	Πειραματικά Διαγράμματα Ακτινοβολίας - Πολυεκπομπή - 3 Λοβοί - $[60^\circ, 90^\circ, 120^\circ]$ Αριστερά - $[40^\circ, 90^\circ, 140^\circ]$ Δεξιά	89
5.6	Πειραματικά Διαγράμματα Αστερισμού - Πολυεκπομπή - 3 Λοβοί	91
5.7	Πειραματικά Διαγράμματα Ακτινοβολίας - Πολλαπλή Εκπομπή - 2 Λοβοί - $[60^\circ, 120^\circ]$ Αριστερά - $[75^\circ, 120^\circ]$ Δεξιά	91

Κατάλογος Πινάκων

4.1	Πρώτη Περίπτωση Blass Matrix - Υβριδική Λειτουργία Πολλαπλής Πολυεκπομπής. Μετάδοση με ρυθμό συμβόλων 1 GBaud, με παράγοντα εξάπλωσης 1 και κεντρική συχνότητα λειτουργίας $f = 15GHz$, για $N=8$ στοιχεία - Σχήμα 4.5	69
4.2	Δεύτερη Περίπτωση Blass Matrix - Υβριδική Λειτουργία Πολλαπλής Πολυεκπομπής. Μετάδοση με ρυθμό συμβόλων 1 GBaud, με παράγοντα εξάπλωσης 1 και κεντρική συχνότητα λειτουργίας $f = 15GHz$, για $N=8$ στοιχεία - Σχήμα 4.7	69
4.3	Πρώτη Περίπτωση TTD Matrix - Υβριδική Λειτουργία Πολλαπλής Πολυεκπομπής. Μετάδοση με ρυθμό συμβόλων 1 GBaud, με παράγοντα εξάπλωσης 1 και κεντρική συχνότητα λειτουργίας $f = 15GHz$, για $N=8$ στοιχεία - Σχήμα 4.12	75
4.4	Δεύτερη Περίπτωση TTD Matrix - Υβριδική Λειτουργία Πολλαπλής Πολυεκπομπής. Μετάδοση με ρυθμό συμβόλων 1 GBaud, με παράγοντα εξάπλωσης 1 και κεντρική συχνότητα λειτουργίας $f = 15GHz$, για $N=8$ στοιχεία - Σχήμα 4.13	76
5.1	Πειραματικό Case: 1 - Μονοεκπομπή. Bit Error Ratio ως προς τις διάφορες γωνίες για δύο διάφορα σχήματα διαμόρφωσης - Λαμβανόμενη Οπτική Ισχύς στην Είσοδο του Δικτύου Σχηματοποίησης Δέσμης: -1dBm για κάθε κανάλι	86
5.2	Πειραματικό Case: 2 - Πολυεκπομπή Δύο Λοβών - Βέλτιστες Διεγέρσεις σε Κάθε Ζευγάρι Γωνιών - Τελική Αναλογία Πλατών μετά τη Σύνθεση των Επιμέρους Διεγέρσεων	87
5.3	Πειραματικό Case: 2 - Πολυεκπομπή Δύο Λοβών. Bit Error Ratio ως προς τα διάφορα ζεύγη γωνιών για δύο διάφορα σχήματα διαμόρφωσης - Λαμβανόμενη Οπτική Ισχύς στην Είσοδο του Δικτύου Σχηματοποίησης Δέσμης: -1dBm για κάθε κανάλι	88
5.4	Πειραματικό Case: 3 - Πολυεκπομπή Τριών Λοβών - Βέλτιστες Διεγέρσεις σε Κάθε Τριάδα Γωνιών - Τελική Αναλογία Πλατών μετά τη Σύνθεση των Επιμέρους Διεγέρσεων	90
5.5	Πειραματικό Case: 3 - Πολυεκπομπή Τριών Λοβών. Bit Error Ratio ως προς τις διάφορες Τριάδες γωνιών - Λαμβανόμενη Οπτική Ισχύς στην Είσοδο του Δικτύου Σχηματοποίησης Δέσμης: +1dBm για κάθε κανάλι	90

- 5.6 Πειραματικό Case: 4 - Πολλαπλή Εκπομπή. Bit Error Ratio ως προς τα
διάφορα ζεύγη γωνιών - Λαμβανόμενη Οπτική Ισχύς στην Είσοδο του Δικτύου
Σχηματοποίησης Δέσμης: 0dBm για κάθε κανάλι 93
- 5.7 Πειραματικό Case: 5 - Μελέτη Επίπτωσης ως προς το BER της Ύπαρξης
Επιπλέον Λοβών σε Έναν Λοβό Αναφοράς - (ORP - Optical Received Power) 93

Κεφάλαιο 1

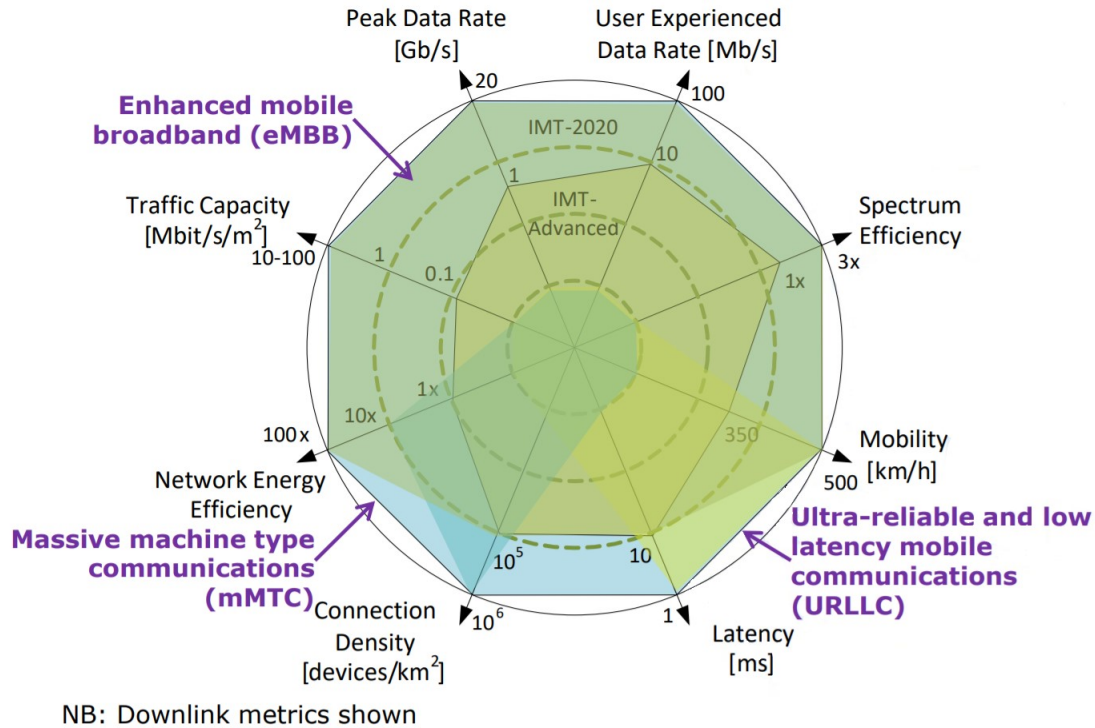
Εισαγωγή

Το συγκεκριμένο κεφάλαιο περιγράφει το ερευνητικό πεδίο με άξονα το οποίο εκπονήθηκε η παρούσα διπλωματική εργασία. Γίνεται μια σύντομη περιγραφή των σύγχρονων τάσεων στις τηλεπικοινωνίες και συγκεκριμένα σε ότι αφορά τα σύγχρονα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών, υπογραμμίζοντας την καταλυτική βοήθεια που προσφέρουν οι οπτικές διατάξεις σε αυτά, κάνοντας έτσι μια εισαγωγή στο πεδίο των Microwave Photonics (MWP). Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στα δίκτυα σχηματοποίησης δέσμης (Beamforming Networks) αλλά και στις εφαρμογές πολυεκπομπής (multicast), τα οποία αποτελούν και το κύριο αντικείμενο έρευνας της εργασίας, και στην επιτακτική ανάγκη για χρησιμοποίησή τους στη σύγχρονη γενεά ασυρμάτων δικτύων. Τέλος, περιγράφεται ο στόχος και οι φιλοδοξίες που προσπαθεί να επιτύχει η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία.

1.1 Όραμα των Δικτύων Πέμπτης Γενεάς 5G

Ενώ οι πρώτες γενιές δικτύων καινοτόμησαν ως προς την βελτίωση της ποιότητας φωνής και την αύξηση των ρυθμών δεδομένων, τα επερχόμενα δίκτυα πέμπτης γενεάς (5G Δίκτυα) υπόσχονται να καταφέρουν πολλά περισσότερα. Τα 5G δίκτυα καλούνται να επαναπροσδιορίσουν τις υπάρχουσες υποδομές, διασυνδέοντας ανθρώπους και μηχανές με πλήρη ευελιξία, ανοίγοντας τον δρόμο για ριζικές αλλαγές στον τρόπο με τον οποίο αντιλαμβανόμαστε σήμερα τα πράγματα. Μία από τις φιλοδοξίες που αποτελούν βασικό άξονα των 5G δικτύων είναι η υλοποίηση του Internet of Things, το οποίο έγγειται στην διασυνδεσιμότητα όλων των μηχανών (Machine to Machine Type Communication) σε μία μικροκυψέλη (microcell). Επίσης, στόχος των 5G δικτύων είναι η εκμετάλλευση και η αποδοτική χρήση υψηλότερων συχνοτικών ζωνών που είναι μέχρι τώρα ανεκμετάλλευτες, προσφέροντας δυνατότητες για μεγάλα εύρη ζώνης και άρα μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων.

Πρόκληση των δικτύων πέμπτης γενεάς αποτελεί η σχεδιάσή τους με τρόπο τέτοιο ώστε να καλύψουν τις ανάγκες ανερχόμενων εφαρμογών που ακόμα δεν έχουν οριστεί πλήρως, ή δεν είναι ακόμα γνωστές. Χαρακτηριστικό παράδειγμα του παραπάνω αποτελεί ο αντίκτυπος που είχαν τα smartphones στα δίκτυα τέταρτης γενεάς, πράγμα που κανείς δεν φανταζόταν όταν συλλήφθηκαν για πρώτη φορά σαν ιδέα το 2004. Τα 5G καλούνται λοιπόν να προβλέψουν



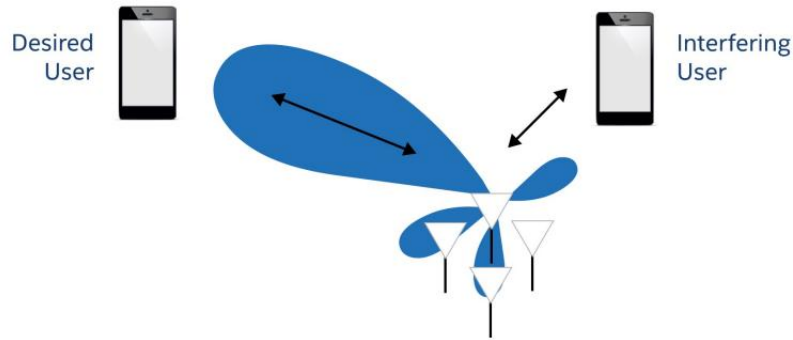
Σχήμα 1.1: Στόχοι 5G Δικτύων

τέτοιες ανερχόμενες εφαρμογές, και υπό αυτό το πρίσμα σχεδιάζονται με γνώμονα την ευελιξία και την επεκτασιμότητά τους, με σκοπό να αποτελέσουν την ενοτική πλατφόρμα μελλοντικών καινοτομιών στον χώρο της τεχνολογίας. Σήμερα, η βιομηχανία κινητών τηλεπικοινωνιών έχει συμφωνήσει στον ορισμό τριών βασικών κατηγοριών υπηρεσιών των 5G δικτύων: ενισχυμένη κινητή ευρυζωνική σύνδεση, εδραίωση του Internet of Things, και υποστήριξη κρίσιμων υπηρεσιών, όπου κάθε ένα από τα παραπάνω έχουν διαφορετικές απαιτήσεις και ανάγκες.

1.2 Δίκτυα Σχηματοποίησης Δέσμης

Με τον όρο *σχηματοποίηση δέσμης* περιγράφεται η τεχνική με την οποία ελέγχεται το διάγραμμα ακτινοβολίας μιας στοιχειοκεραίας με σκοπό τη ρύθμισή του, τόσο ως προς τη γωνία του κύριου λοβού ακτινοβολίας, όσο και ως προς το πλάτος των πλευρικών λοβών. Αυτό επιτυγχάνεται με την κατάλληλη τροφοδότηση κάθε στοιχείου που αποτελεί τη στοιχειοκεραία, ως προς τη φάση και το πλάτος των εισαγόμενων ρευμάτων αντίστοιχα. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται εφικτή η προσαρμογή του διαγράμματος ακτινοβολίας της κεραίας του πομπού ως προς τον δέκτη, συγκεντρώνοντας την ισχύ εκπομπής της κεραίας στην επιθυμητή κατεύθυνση, αυξάνοντας τον σηματοθροβικό λόγο στον δέκτη (Signal to Noise Ratio, SNR) και μειώνοντας δραστικά την επίδραση των παρεμβολών που υπεισέρχονται στη ζεύξη.

Την ευθύνη για τη δημιουργία των κατάλληλων σημάτων, και την τροφοδότησή τους στα στοιχεία της κεραίας (Antenna Elements, AEs) έχει το *Δίκτυο Σχηματοποίησης Δέσμης* (Beamforming Network, ή απλά *beamformer*), το οποίο μπορεί να επεξεργάζεται τα σήμα-



Σχήμα 1.2: Ενδεικτική απεικόνιση Beamforming

τα στον ηλεκτρικό τομέα μέσω καθαρά ηλεκτρικών διατάξεων, ή να μετατρέπει το σήμα σε οπτικό μέσω ηλεκτροοπτικών μετατροπών (E/O Converters), και μέσω οπτικών διατάξεων να επεξεργάζεται τα σήματα προτού γίνει ακόμα μια μετατροπή μέσω οπτοηλεκτρικών μετατροπών (O/E Converters) στον ηλεκτρικό τομέα με απώτερο σκοπό την τροφοδότησή τους στην στοιχειοκεραία.

Η δεύτερη περίπτωση περιγράφει το *Οπτικό Δίκτυο Σχηματοποίησης Δέσμης (Optical Beamforming Network, OBFN)* το οποίο θα είναι το κύριο αντικείμενο μελέτης της διπλωματικής εργασίας, και ανήκει στο πεδίο των Microwave Photonics (MWP), πάνω στο οποίο θα γίνει εκτενής ανάλυση στη συνέχεια. Όσο λοιπόν υπάρχει τάση για όλο και υψηλότερες συχνότητες λειτουργίας, όπως γίνεται στα δίκτυα πέμπτης γενεάς (5G), και πλησιάζουμε στην περιοχή του millimeter wave (mmW Regime, 110-300 GHz), οι σύγχρονες αμιγώς ηλεκτρικές διατάξεις σχηματοποίησης δέσμης υποφέρουν από σοβαρούς περιορισμούς εύρους ζώνης, θέματα ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών, υψηλή κατανάλωση ισχύος και υψηλό κόστος, καθιστώντας επιτακτική την εισαγωγή υβριδικών ηλεκτροοπτικών διατάξεων.

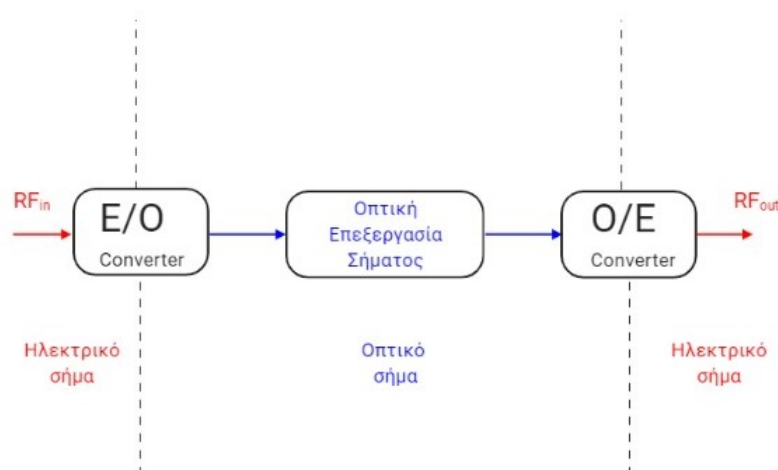
Ο στόχος που φιλοδοξούν να πετύχουν τα δίκτυα πέμπτης γενεάς (5G) ως προς τα παραπάνω, είναι η προσαρμοζόμενη σχηματοποίηση δέσμης (Adaptive Beamforming) σε πραγματικό χρόνο (real time) βάσει της θέσης του εκάστοτε δέκτη, εκμεταλλευόμενα τις πληροφορίες της κατάστασης του καναλιού (Channel State Information, CSI). Πρόκειται για καινοτομία στο χώρο των ασύρματων τηλεπικοινωνιών καθώς, σύμφωνα με τις ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες, η σχηματοποίηση δέσμης πραγματοποιείται με προκαθορισμένο τρόπο, με την τεχνική του *fixed beamforming*, κατά την οποία μέσω του *switched beamformer* επιλέγεται η καταλληλότερη από τις δέσμες που έχουν ήδη δημιουργηθεί και λαμβάνουν χώρο γύρω από την κεραία εκπομπής. Αυτή η τεχνική υποφέρει από θέματα επεκτασιμότητας (scalability), και κυρίως από την επιρροή των πλευρικών λοβών που δημιουργούνται και παρεμβαίνουν στην εκάστοτε κύρια κατεύθυνση ακτινοβολίας.

Αναλυτικότερη αναφορά του τρόπου με τον οποίο πετυχαίνουμε τη σχηματοποίηση δέσμης

θα γίνει στο Κεφάλαιο 2.

1.3 Microwave Photonics (MWP)

Το πεδίο των Microwave Photonics είναι ένα πολυεπιστημονικό πεδίο που περιλαμβάνει το πεδίο των Οπτικών και των Ασυρμάτων επικοινωνιών. Δημιουργήθηκε λόγω της όλο και αυξανόμενης πολυπλοκότητας που άρχιζαν να παρουσιάζουν τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, με σκοπό την εκμετάλλευση των καταλυτικών πλεονεκτημάτων που προσφέρει η επεξεργασία αλλά και η μετάδοση των μικροκυματικών σημάτων στον οπτικό τομέα. Μερικά από τα οφέλη που παρουσιάζουν τα MWP σε σύγκριση με τα αμιγώς ηλεκτρικά συστήματα επικοινωνιών είναι η μεγάλη ευελιξία σε ότι αφορά τη συχνότητα λειτουργίας, η οποία μπορεί να εκτείνεται από μερικά kHz μέχρι και κάποιες εκατοντάδες THz, σε λειτουργίες καθαρά σχετιζόμενες με τον οπτικό τομέα, με δυνατότητα αξιοποίηση μεγάλων εύρων ζώνης (της τάξης των Gigahertz). Οι υψηλές ταχύτητες μετάδοσης συγκριτικά με τις ασύρματες επικοινωνίες σε συνδυασμό με την σταθερά χαμηλή εξασθένιση σε όλο το εύρος συχνοτήτων της μικροκυματικής μπάντας αποτελούν έναν ακόμα πολύ σημαντικό λόγο χρησιμοποίησης των MWP.



Σχήμα 1.3: Ενδεικτική Απεικόνιση Αλυσίδας Microwave Photonics

Στην απλούστερη μορφή ενός MWP συστήματος, το ηλεκτρικό σήμα μεταφέρεται στον οπτικό τομέα μέσω ενός ηλεκτροοπτικού μετατροπέα (E/O Converter). Ένας τέτοιος μετατροπέας μπορεί να είναι ένας απλός οπτικός διαμορφωτής. Στη συνέχεια το σήμα μεταδίδεται μέσω ενός οπτικού μέσου μετάδοσης και επεξεργάζεται με αμιγώς οπτικές διατάξεις, μέχρι να ανιχνευτεί και να γίνει πάλι ηλεκτρικό, μέσω ενός οπτοηλεκτρικού μετατροπέα (O/E Converter). Μία τέτοια οπτική συσκευή ανίχνευσης μπορεί να είναι μία φωτοδίοδος. Με τον τρόπο αυτό, γίνεται εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων της διαχείρισης των σημάτων στον οπτικό τομέα, όπου αποκτά τα επιθυμητά χαρακτηριστικά και μπορεί πλέον να μεταδοθεί. Η επεξεργασία των σημάτων στον οπτικό τομέα μπορεί να περιλαμβάνει ενίσχυση του σήματος, φιλτράρισμα, αλλαγή φάσης, αλλά και δρομολόγηση και μεταγωγή σημάτων.

Integrated Microwave Photonics (IMWP)

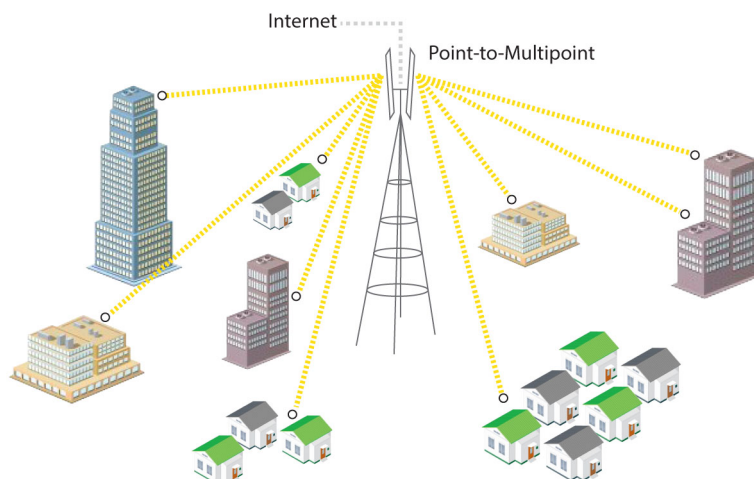
Αν και οι φωτονικές λύσεις πετυχαίνουν τα επιθυμητά αποτελέσματα ως προς την ταχύτητα μετάδοσης, την ευελιξία ως προς τη συχνότητα κτλ, συχνά αντιμετωπίζονται με ιδιαίτερο σκεπτικισμό, λόγω του μεγάλου όγκου που παρουσιάζουν, ιδιαίτερα εν συγκρίσει με τις λύσεις που προσφέρει ο τομέας της μικροηλεκτρονικής. Σε αυτό το πλαίσιο, ο τομέας των ολοκληρωμένων MWP (*Integrated Microwave Photonics, IMWP*) φαντάζει η ιδανική λύση καθώς προσφέρει τα πλεονεκτήματα και των δύο διαφορετικών εκδοχών.

Πέρα λοιπόν από τα πλεονεκτήματα που παρέχονται εγγενώς με τα συστήματα MWP, η ολοκλήρωσή τους σε chips και η ενσωμάτωσή τους στα συστήματα αυτά προσφέρει ιδιαίτερα οφέλη όπως είναι το μειωμένο μέγεθος (chips με διαστάσεις στην τάξη μερικών cm^2), το χαμηλό βάρος, η χαμηλή κατανάλωση ισχύος, η ατρωσία τόσο σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές όσο και σε επιδράσεις του περιβάλλοντος. Συγκεκριμένες διατάξεις IMWP θα συζητηθούν αναλυτικότερα στο Κεφάλαιο 3.

1.4 Πολυεκπομπή

Η ζήτηση για εφαρμογές πολυεκπομπής (multicast) αυξάνεται με ραγδαίους ρυθμούς στα κυψελοειδή συστήματα επικοινωνίας και αναμένεται να παίξουν πρωταγωνιστικό ρόλο κατά την αναδυόμενη πέμπτη γενεά δικτύων (5G)[15]. Με τον όρο πολυεκπομπή περιγράφεται η μετάδοση ενός σήματος πληροφορίας σε μία συγκεκριμένη ομάδα χρηστών με επιθυμητά χαρακτηριστικά. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τη φύση των σημερινών επικοινωνιών που βασίζονται σε μεταδόσεις ευρείας εκπομπής (broadcast) κατά τις οποίες η πληροφορία μεταδίδεται σε όλους τους δέκτες που βρίσκονται στην κυψέλη. Το multicasting καθίσταται λοιπόν ένας αποδοτικός μηχανισμός για *Point-To-Multipoint Μεταδόσεις* κατά τις οποίες μόνο οι ενδιαφερόμενοι χρήστες λαμβάνουν τη μεταδιδόμενη πληροφορία, περιορίζοντας τη συνολική ισχύ εκπομπής σε σχέση με την αντίστοιχη μετάδοση ευρείας εκπομπής αφού πια η εκπεμπόμενη ισχύς έχει συγκεκριμένες κατευθύνσεις, και μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο δραστικά τις παρεμβολές σε και από άλλους χρήστες και συστήματα.

Ο τρόπος με τον οποίο επιτυγχάνεται η πολυεκπομπή ενός σήματος είναι χρήση τεχνικών σχηματοποίησης δέσμης (Multicast Beamforming) σε πραγματικό χρόνο, κατά τις οποίες τα ρεύματα που τροφοδοτούν τα στοιχεία της κεραίας τροποποιούνται με κατάλληλο τρόπο ώστε να δημιουργήσουν δύο ή περισσότερους λοβούς ακτινοβολίας, με κατεύθυνση την κατεύθυνση των ενδιαφερόμενων χρηστών. Η μέθοδος αυτή μπορεί και εκμεταλλεύεται σε πραγματικό χρόνο τις πληροφορίες κατάστασης του καναλιού (Channel State Information, CSI) επιτυγχάνοντας τη βέλτιστη επικοινωνία μεταξύ πομπού και δέκτη ανά πάσα στιγμή. Με τον όρο Channel State Information στα ασύρματα συστήματα επικοινωνίας, περιγράφεται η γνώση των ιδιοτήτων μιας τηλεπικοινωνιακής ζεύξης. Αυτές οι ιδιότητες έγκεινται στον τρόπο με τον οποίο ένα σήμα διαδίδεται από τον πομπό στο δέκτη, και αντιπροσωπεύουν για παράδειγμα τα φαινόμενα περιθλάσεων, τα φαινόμενα σχεδασμών, τις απώλειες λόγω σκίασης, την εξασθένηση ισχύος λόγω απόστασης κ.α. Το CSI καθιστά δυνατή την προσαρμογή της εκάστοτε



Σχήμα 1.4: Ενδεικτική απεικόνιση Point-To-Multipoint μεταδόσεων

μετάδοσης στις τρέχουσες συνθήκες του καναλιού, γεγονός που αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την επίτευξη αξιόπιστων ζεύξεων με υψηλούς ρυθμούς δεδομένων.

1.4.1 Πολυεκπομπή στα Δίκτυα 5G

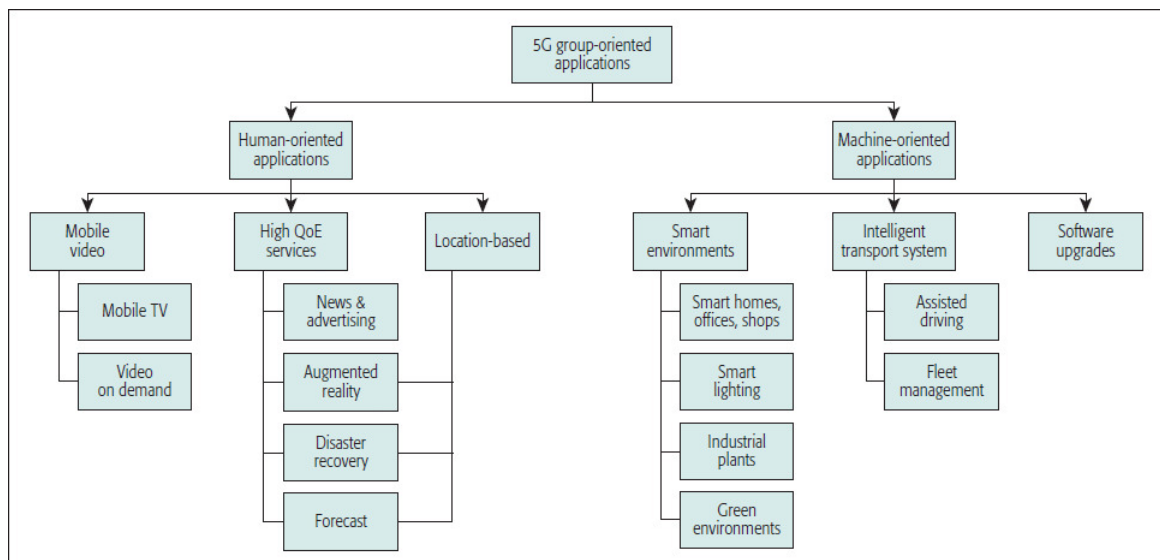
Μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις που καλούνται να αντιμετωπίσουν τα δίκτυα πέμπτης γενιάς είναι η κατανάλωση ισχύος με τον αποδοτικότερο δυνατό τρόπο. Για να αντιμετωπίσουν αυτήν την πρόκληση, τα σύγχρονα δίκτυα ασυρμάτων επικοινωνιών χρησιμοποιούν τεχνικές επιθετικής επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων. Καθώς όμως διαφορετικοί πομποί επικοινωνούν στο ίδιο συχνοτικό φάσμα, η προσέγγιση αυτή οδηγεί σε ισχυρά φαινόμενα συχνοτικών παρεμβολών. Ταυτόχρονα, γεννιάται η τάση για πιο πυκνά δίκτυα στα 5G με χρησιμοποίηση όλο και αυξανόμενων σε αριθμό μηχανών χαμηλής κατανάλωσης ισχύος που υποστηρίζουν την εισαγωγή του Internet of Things (IoT), και που ανταλλάσσουν μεταξύ τους μικρές ποσότητες δεδομένων χρησιμοποιώντας *Machine-Type Communications (MTC)*. Σε αυτό το πλαίσιο, η χρησιμοποίηση πολυεκπομπής για MTC, αλλά και για την επικοινωνία μεταξύ σταθμού βάσης και χρήστη φαντάζει μία ιδανική λύση για την εξασφάλιση αποδοτικής χρήσης ενέργειας και αποδοτικής χρησιμοποίησης φάσματος στα επερχόμενα κυψελωτά δίκτυα.

Οι προσπάθειες της ερευνητικής κοινότητας γύρω από το multicast beamforming έχουν επικεντρωθεί κυρίως σε δύο διαφορετικές κατηγορίες: το *Quality of Service (QoS) Beamforming* και το *Max Min SINR (MMS) Beamforming* [9]. Και οι δύο αυτές τεχνικές έχουν απώτερο σκοπό την εύρεση μεθόδων για την αποδοτικότερη χρήση ισχύος. Στόχος του QoS beamforming αποτελεί η ελαχιστοποίηση της συνολικής κατανάλωσης ισχύος από έναν σταθμό βάσης, ενώ ταυτόχρονα εγγυάται ότι ο λαμβανόμενος λόγος σήματος ως προς τις παρεμβολές και τον θόρυβο (Signal to Interference and Noise Ratio, SINR) σε κάθε δέκτη είναι μεγαλύτερος από ένα προκαθορισμένο κατώφλι. Σε παρόμοια λογική, στόχος του MMS beamforming είναι η μεγιστοποίηση του ελάχιστου λαμβανόμενου SINR ανάμεσα σε όλους τους ενδιαφερόμενους δέκτες, υπό συγκεκριμένους περιορισμούς ισχύος που υφίστανται από

τον πομπό (σταθμό βάσης).

1.4.2 Multicast Use Cases

Οι εφαρμογές τεχνικών πολυεκπομπής στα ανερχόμενα 5G δίκτυα δύνανται να διαχωριστούν σε δύο καταρχήν διαφορετικές ως προς τον τύπο των υπηρεσιών κατηγορίες. Η πρώτη αφορά στις προσαρμοσμένες σε *ανθρώπινους χρήστες* εφαρμογές, ενώ η δεύτερη γεννήθηκε λόγω της καινής ανάγκης για αυξημένη επικοινωνία μεταξύ μηχανών, όπως υπόσχεται το Internet of Things και αφορά στις προσανατολισμένες σε *μηχανές* εφαρμογές[3]. Καθώς λοιπόν εξελίσσονται οι υποδομές ασυρμάτων επικοινωνιών και μεταβαίνουμε από τα 4G Long Term Evolution (LTE) δίκτυα στα 5G, καθίσταται επιτακτική η αναθεώρηση του σημερινού LTE eMBMS (Long Term Evolution evolved Multimedia Broadcast Media Service) [10] με σκοπό την προσαρμογή του στις ανάγκες του μέλλοντος.



Σχήμα 1.5: Απεικόνιση Εφαρμογών Πολυεκπομπής

Εφαρμογές Προσανατολισμένες σε Ανθρώπινους Χρήστες

Σήμερα, η πιο καίρια εφαρμογή πολυεκπομπής για ανθρώπινους χρήστες είναι η μετάδοση βίντεο. Σύμφωνα με τη Cisco, η κίνηση βίντεο που υποστηρίζεται από τα ασύρματα δίκτυα ξεπερνά τα 15 exabytes (10^{18} bytes), νούμερο 13 φορές μεγαλύτερο από το αντίστοιχο του 2014. Αυτό καθίσταται κατανοητό αν αναλογιστεί κανείς για παράδειγμα την όλο και αυξανόμενη ζήτηση για Ultra High Definition (UHD), 4K και 3D βίντεο, πολλά από τα οποία συνοδεύονται με ανάγκη για διαδραστικές εφαρμογές και γενικά εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Από ζωντανές μεταδόσεις αθλητικών αγώνων μέχρι streaming ταινιών και σειρών, υπάρχει μια πληθώρα εφαρμογών που παρουσιάζουν όλο και αυξανόμενη ζήτηση και αποτελούν μία περίπτωση μετάδοσης σε συγκεκριμένες ομάδες ανθρώπων. Πρόκειται για εφαρμογές που, λόγω

της ζήτησης για UHD, απαιτούν μεγάλα εύρη ζώνης, μεγάλους ρυθμούς μετάδοσης με μικρό φαινόμενο jitter και εξασφάλιση συνδεσιμότητας παντού, ιδιαίτερα όταν ο χρήστης βρίσκεται εν κινήσει, και επομένως μπορούν να εκμεταλλευτούν τα οφέλη που προσφέρει η πολυεκπομπή ως προς την αποδοτική χρήση του συχνοτικού φάσματος και την ευελιξία της σχηματοποίησης δέσμης σε πραγματικό χρόνο.

Εφαρμογές οι οποίες εξασφαλίζουν υψηλό Quality of Experience (QoE) στο δέκτη αποτελούν μία μεγάλη πρόκληση κατά την εφαρμογή των 5G δικτύων[3],[10], και δύνανται να επωφεληθούν σημαντικά από τεχνικές πολυεκπομπής. Ένα τέτοιο σενάριο θα μπορούσε να είναι η προώθηση στοχευμένων νέων και διαφημίσεων, βάσει ενός προφίλ χρήστη, με σκοπό ο χρήστης να βλέπει πράγματα στα οποία έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να ενδιαφέρεται.

Στο ίδιο πλαίσιο βρίσκονται και εφαρμογές που κάνουν χρήση της τοποθεσίας του χρήστη και συμβαδίζουν με την γενικότερη ιδέα των δικτύων πέμπτης γενέας, σύμφωνα με την οποία ο χρήστης βρίσκεται πλήρως συνδεδεμένος με το περιβάλλον γύρω του. Σε αυτήν την υποκατηγορία υπόκεινται εφαρμογές πολυεκπομπής επανεξημένης πραγματικότητας (Augmented Reality) για εμπορικούς ή τουριστικούς λόγους, επιτρέποντας στους χρήστες να λαμβάνουν περαιτέρω πληροφορίες από το περιβάλλον τους, όπως για παράδειγμα σε ένα μουσείο οι χρήστες να μπορούν να λάβουν διαδραστικό υλικό σχετικό με τα εκθέματα που κοιτούν κάθε χρονική στιγμή. Επίσης, σε περίπτωση κάποιας φυσικής καταστροφής (πχ σεισμός, πυρκαγιά), τέτοιες εφαρμογές πολυεκπομπής βασισμένης στη θέση του χρηστών μπορούν να τεθούν σε λειτουργία, δίνοντας τις κατάλληλες οδηγίες στους χρήστες για τη σωστή αντιμετώπιση της κατάστασης (τόσο στα θύματα όσο και στους διασώστες), με γνώμονα τη διασφάλιση της δημόσιας υγείας.

Εφαρμογές Προσανατολισμένες σε Μηχανές

Τα οφέλη της πολυεκπομπής στην επικοινωνία μηχανής με μηχανή καθίστανται εμφανή αν αναλογιστεί κανείς την τεράστια αύξηση των ενδοσυνδεδεμένων μηχανών και αισθητήρων που αναμένεται υπάρξει κατά την εφαρμογή των 5G συστημάτων. Δραματική καινοτομία σε αυτό το πλαίσιο αποτελεί το γεγονός ότι, κατά την εφαρμογή των 5G δικτύων, θα παρέχεται στον χρήστη η δυνατότητα να επιλέγει μέσω μίας μηχανής (πχ smartphone) το σύνολο των συσκευών που επιθυμεί ανά πάσα στιγμή να συμπεριλάβει στην ενδοεπικοινωνία. Γίνεται λοιπόν εύκολα αντιληπτή η ανάγκη για εισαγωγή τεχνικών πολυεκπομπής.

Όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 1.5, μία περίπτωση χρήσης που μπορεί να επωφεληθεί σημαντικά από τεχνικές πολυεκπομπής σε επικοινωνία μηχανής με μηχανή είναι τα Έξυπνα Περιβάλλοντα (Smart Environments). Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι εφαρμογές έξυπνου φωτισμού οι οποίες μπορούν να λάβουν χώρα σε σπίτια, γραφεία, εργοστασιακά περιβάλλοντα, δρόμους κ.α, κατά τις οποίες διαχειρίζεται ο φωτισμός που απαιτείται σε πραγματικό χρόνο, με απώτερο σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας αλλά και κόστους, κάτι που αποτελεί θεμελιώδη φιλοδοξία των δικτύων 5G. Πρακτικό παράδειγμα θα μπορούσε να είναι η διαχείριση του φωτισμού στο δρόμο ενός βουνού, ώστε να ανοίγει μια συγκεκριμένη ομάδα φωτισμών, ανάλογα με την εκάστοτε κίνηση στον δρόμο. Άλλο παράδειγμα αποτελεί η εφαρμογή πολυ-

εκπομπής σε έξυπνες βιομηχανικές εγκαταστάσεις, για μετάδοση μηνυμάτων που μπορεί να αφορούν διαχειριστικά θέματα, θέματα ασφαλείας, προειδοποιήσεις κ.α. Σε περίπτωση βλάβης στην αλυσίδα παραγωγής θα μπορεί να αποστέλλεται μήνυμα για την καταστολή της λειτουργίας των αντίστοιχων άμεσα σχετιζόμενων μηχανών.

Μία από τις φιλοδοξίες που καλούνται να υλοποιήσουν τα 5G δίκτυα αφορά στην διασύνδεση στους δρόμους, με σκοπό την ενδοεπικοινωνία μεταξύ οχημάτων, σηματοδοτών κ.α. Οι δρόμοι θα είναι εξοπλισμένοι με αισθητήρες και μηχανές επικοινωνίας με σκοπό τη δημιουργία μικροκυψελών (microcells) για τη μετάδοση και τη λήψη μηνυμάτων, από και προς τα οχήματα του δρόμου σε πραγματικό χρόνο. Υπό αυτό το πρίσμα, η πολυεκπομπή σε συγκεκριμένες ομάδες οχημάτων μπορεί να φανεί ιδιαίτερα χρήσιμη, σε εφαρμογές διαχείρισης της κίνησης στον δρόμο, ή σε ενημέρωση σχετικά με κάποιο τροχαίο ατύχημα, κατά τις οποίες τα οχήματα μπορούν να ομαδοποιηθούν με κατάλληλο τρόπο, ώστε να μεταδίδονται οι αντίστοιχες πληροφορίες στα άμεσα ενδιαφερόμενα οχήματα. Με αντίστοιχο τρόπο μπορούν να επωφεληθούν και συστήματα διαχείρισης στόλου.

Κεφάλαιο 2

Θεωρία Κεραιών - Δίκτυα Σχηματοποίησης Δέσμης

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα γίνει ανάλυση των εννοιών εκείνων που αφορούν στο μικροκυματικό κομμάτι που ενδιαφέρει την παρούσα διπλωματική εργασία. Θα παρουσιαστούν βασικές έννοιες που αφορούν στη θεωρία κεραιών. Υπό αυτό το πρίσμα, θα συζητηθούν έννοιες όπως είναι το διάγραμμα ακτινοβολίας ενός ακτινοβολητή, οι συστοιχίες κεραιών και η διαδικασία σχηματοποίησης δέσμης, έννοιες των οποίων η ανάλυση αποσκοπεί στην καλύτερη κατανόηση του συνολικού περιεχομένου της διπλωματικής.

2.1 Κεραίες

Η κεραία είναι μία μεταλλική κατασκευή που μετατρέπει ηλεκτρομαγνητική ενέργεια από έναν οδηγό (οδηγούμενη ενέργεια π.χ. από ένα ομοαξονικό καλώδιο ή από έναν κυματοηγό) σε εκπεμπόμενη ενέργεια υπό τη μορφή ηλεκτρομαγνητικού κύματος στον ελεύθερο χώρο, και αντίστροφα. Το μέγεθος, το σχήμα αλλά και το υλικό μιας κεραίας επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την κατεύθυνση και τη ζώνη σχυνοτήτων στις οποίες μπορεί να λειτουργήσει η κεραία, καθώς και την αποδοτικότητα της παραπάνω μετατροπής. Όπως είναι προφανές, είναι επιθυμητή η μετάδοση ραδιοκυμάτων με τη μέγιστη δυνατή αποδοτικότητα προς τον δέκτη, γεγονός το οποίο είναι άμεσα σχετιζόμενο με τη δυνατότητα της κεραίας να συγκεντρώσει την εκπεμπόμενη ενέργεια σε μία συγκεκριμένη κατεύθυνση. Υπό αυτό το πλαίσιο, οι φυσικές διαστάσεις της κεραίας, το σχήμα της και η διάταξη των εκπεμπόμενων στοιχείων παίζουν καθοριστικό ρόλο για μία αποδοτική μετάδοση.

2.1.1 Θεμελιώδεις Παράμετροι Κεραιών

Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο θα συζητηθούν κάποια από τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά των κεραιών τα οποία θα είναι απαραίτητα για την κατανόηση τόσο της θεωρίας σχηματοποίησης δέσμης, όσο και των μετρικών βάσει των οποίων αξιολογήθηκαν οι εξομοιώσεις που θα περιγραφούν στο Κεφάλαιο 4. Τα χαρακτηριστικά αυτά αφορούν στην ακτινοβολία της

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

Διάνυσμα Poynting

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

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

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

$$P_{av}(\vec{r}) = \frac{1}{2} Re\{\vec{E}(\vec{r}) \times \vec{H}(\vec{r})^*\}$$

Ένταση Ακτινοβολίας

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

$$U(\theta, \varphi) = r^2 |P_{av}(\vec{r})|$$

Η συνολική ισχύς που ακτινοβολεί μια κεραία προκύπτει και μέσω της έντασης ακτινοβολίας με ολοκλήρωση της σε ολόκληρη τη στερεά γωνία Ω που περιβάλλει την κεραία, δηλαδή:

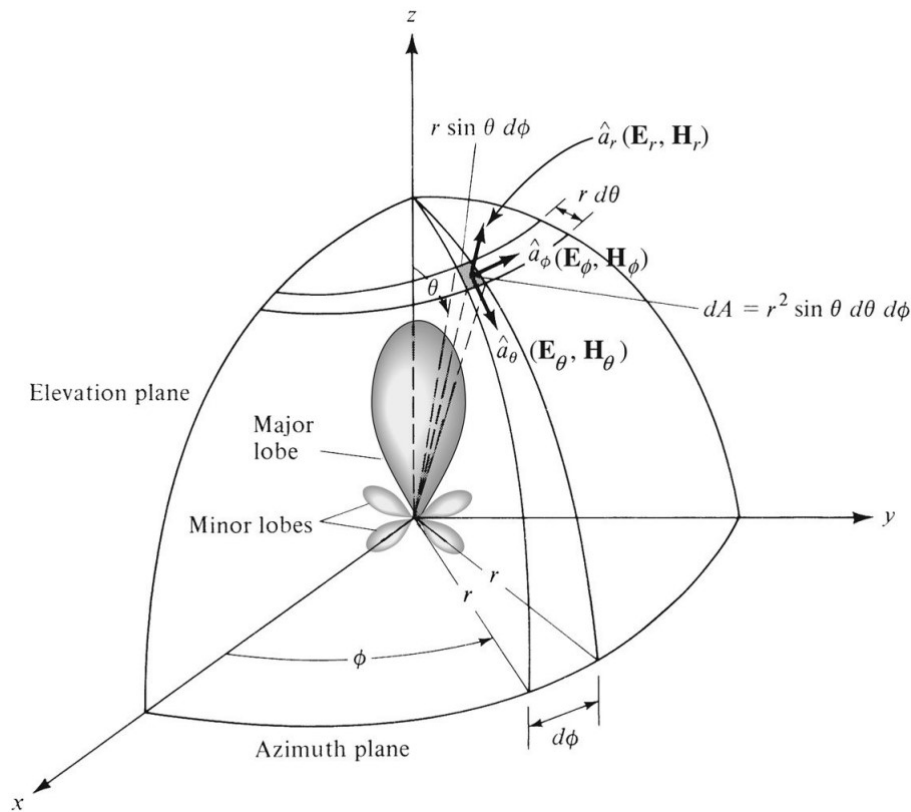
$$W_{rad} = \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^\pi d\theta [U(\theta, \varphi) \sin(\theta)]$$

Διάγραμμα Ακτινοβολίας

Το διάγραμμα ακτινοβολίας ορίζεται ως μία μαθηματική συνάρτηση ή μία γραφική αναπαράσταση των ιδιοτήτων ακτινοβολίας της κεραίας συναρτήσει των χωρικών συντεταγμένων. Στις περισσότερες περιπτώσεις που ενδιαφέρουν, το διάγραμμα ακτινοβολίας προσδιορίζεται στη μακρινή περιοχή ακτινοβολίας, ως συνάρτηση μόνο των συντεταγμένων διεύθυνσης θ και φ (αζιμούθιο και γωνία ανύψωσης) ενός κατάλληλα επιλεγμένου συστήματος σφαιρικών συντεταγμένων με κέντρο, συνήθως, το γεωμετρικό κέντρο της κεραίας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1. Αυτές οι ιδιότητες συμπεριλαμβάνουν, αλλά δεν περιορίζονται στις παρακάτω:

- Πυκνότητα ροής ισχύος

- Ένταση ακτινοβολίας
- Ισχύς πεδίου
- Κατευθυντικότητα
- Φάση ή Πολικότητα

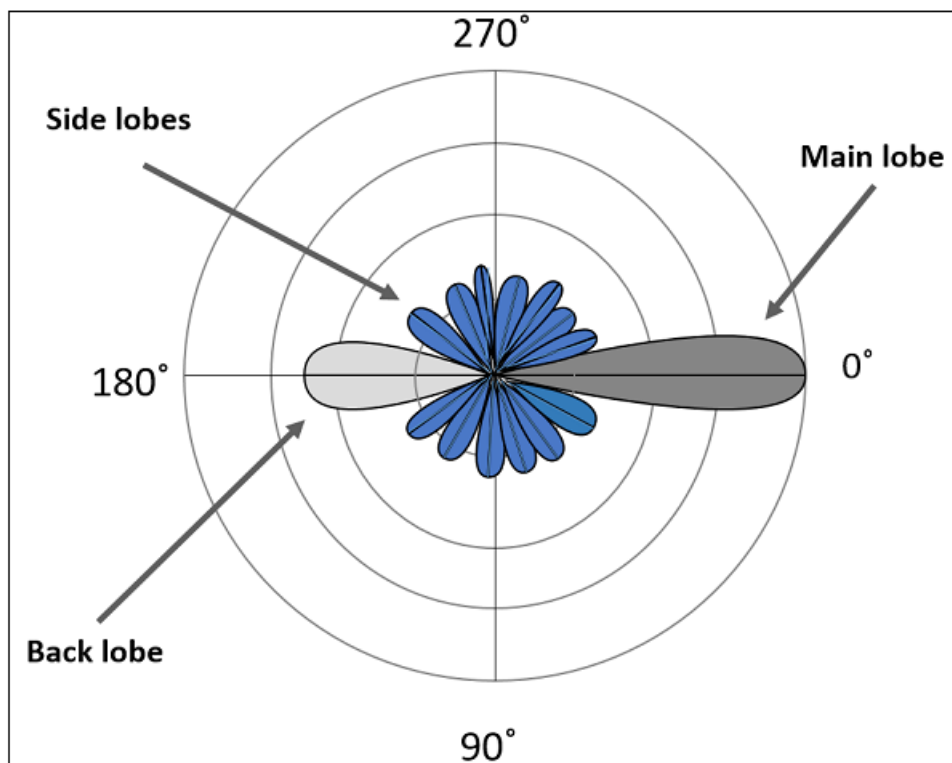


Σχήμα 2.1: Σύστημα Συντεταγμένων για Ανάλυση Κεραίων

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

Συχνά, τα διαγράμματα πεδίου ισχύος κανονικοποιούνται ως προς τη μέγιστη τιμή τους, δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο το *κανονικοποιημένο διάγραμμα πεδίου ή ισχύος*. Επίσης, συνηθίζεται το διάγραμμα ισχύος να παρουσιάζεται σε λογαριθμική κλίμακα (σε decibels dB), με απώτερο σκοπό τον τονισμό των σημείων όπου το διάγραμμα λαμβάνει πολύ μικρές τιμές. Αυτά τα σημεία, όπως θα δούμε και παρακάτω, ονομάζονται δευτερεύοντες λοβοί. Για μία κεραία λοιπόν το:

1. **Διάγραμμα Πεδίου** (σε γραμμική κλίμακα) αποτελεί μία απεικόνιση του πλάτους του ηλεκτρικού ή του μαγνητικού πεδίου, ως συνάρτηση των συντεταγμένων διεύθυνσης (θ και φ)
2. **Διάγραμμα Ισχύος** (σε γραμμική κλίμακα) αποτελεί μία απεικόνιση του τετραγώνου του πλάτους του ηλεκτρικού ή του μαγνητικού πεδίου, ως συνάρτηση των συντεταγμένων διεύθυνσης
3. **Διάγραμμα Ισχύος** (σε λογαριθμική κλίμακα) αποτελεί μία απεικόνιση του πλάτους του ηλεκτρικού ή του μαγνητικού πεδίου σε decibels (dB), ως συνάρτηση των συντεταγμένων διεύθυνσης



Σχήμα 2.2: Δισδιάστατο (Πολικό) Διάγραμμα Ακτινοβολίας

Λοβοί Διαγράμματος Ακτινοβολίας

Με τον όρο **Λοβός Ακτινοβολίας** αναφέρεται κάποιο τμήμα του διαγράμματος ακτινοβολίας που οριοθετείται από περιοχές πολύ ασθενούς, συνήθως μηδενικής, έντασης ακτινοβολίας. Οι λοβοί ενός διαγράμματος ακτινοβολίας δύνανται να κατηγοριοποιηθούν στις παρακάτω κατηγορίες:

- Κύριος Λοβός
- Δευτερέων Λοβός

- Πλευρικός Λοβός
- Οπίσθιος Λοβός

Κύριος Λοβός ακτινοβολίας ονομάζεται αυτός που περιέχει τη διεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας. Σε πολλές περιπτώσεις σύνθετων ακτινοβολητών, όπως είναι οι στοιχειοκεραίες τις οποίες θα αναλύσουμε εκτενώς στη συνέχεια του κεφαλαίου, μπορεί να υπάρχουν παραπάνω από ένας κύριοι λοβοί ακτινοβολίας οι οποίοι μπορεί να εμφανίζονται ανεπιθύμητα, στην οποία περίπτωση πρέπει να αποφεύγονται με κατάλληλη σχεδίαση, ή να εμφανίζονται επιθυμητά, όταν επιθυμούμε να κάνουμε μετάδοση σε δύο ή περισσότερες διαφορετικές κατευθύνσεις (Multicasting, Point-to-Multipoint Transmission). Δευτερεύων Λοβός ακτινοβολίας ονομάζεται κάθε λοβός που δεν είναι κύριος. Οι Πλευρικοί Λοβοί ακτινοβολίας υπάγονται στην κατηγορία των δευτερευόντων λοβών, και πρόκειται για τους λοβούς που δεν περιέχουν τη διεύθυνση ενδιαφέροντος της κεραίας. Τέλος, Οπίσθιος Λοβός ακτινοβολίας ονομάζεται ο λοβός που περιλαμβάνει τη διεύθυνση που είναι αντίθετη αυτής του κυρίου λοβού. Τα παραπάνω εμφανίζονται σχηματικά στο Σχήμα 2.2.

Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των λοβών ακτινοβολίας, και κυρίως του κυρίου λοβού ακτινοβολίας, αποτελούν το γωνιακό εύρος Δ_0 , που είναι η γωνία που σχηματίζουν οι διευθύνσεις μηδενισμών ή ελαχίστων μεταξύ των οποίων περιλαμβάνεται η μέγιστη διεύθυνση ακτινοβολίας, και το εύρος ανοήματος ημίσειας ισχύος Δ_{3dB} , που είναι η γωνία που σχηματίζεται εκατέρωθεν της διεύθυνσης μεγίστου, από τις γωνίες για τις οποίες η ένταση ακτινοβολίας παίρνει τη μισή της μέγιστης τιμής της. Τα δύο αυτά μεγέθη είναι ιδιαίτερα σημαντικά για τον χαρακτηρισμό της κατευθυντικότητας της κεραίας.

Ισοτροπικός Ακτινοβολητής

Ισοτροπικός ακτινοβολητής ορίζεται ως η υποθετική χωρίς απώλειες κεραία που ακτινοβολεί εξίσου προς όλες τις διευθύνσεις. Είναι υποθετική, γιατί τέτοιου είδους ακτινοβολία μπορεί να επιτύχει μόνο η σημειακή πηγή. Αν και ο ισοτροπικός ακτινοβολητής δεν έχει πραγματική υπόσταση, αποτελεί την κεραία αναφοράς προς την οποία συγκρίνονται ως προς τις κατευθυντικές τους ιδιότητες όλες οι κεραίες που χρησιμοποιούνται στις διάφορες εφαρμογές. Λόγω της σημειακής φύσης του ισοτροπικού ακτινοβολητή, το διάνυσμα Poynting έχει ακτινική διεύθυνση και εξαρτάται μόνο από την απόσταση του σημείου παρατήρησης από την πηγή, όπως περιγράφεται παρακάτω:

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

Όπου W_{rad} η ισχύς ακτινοβολίας

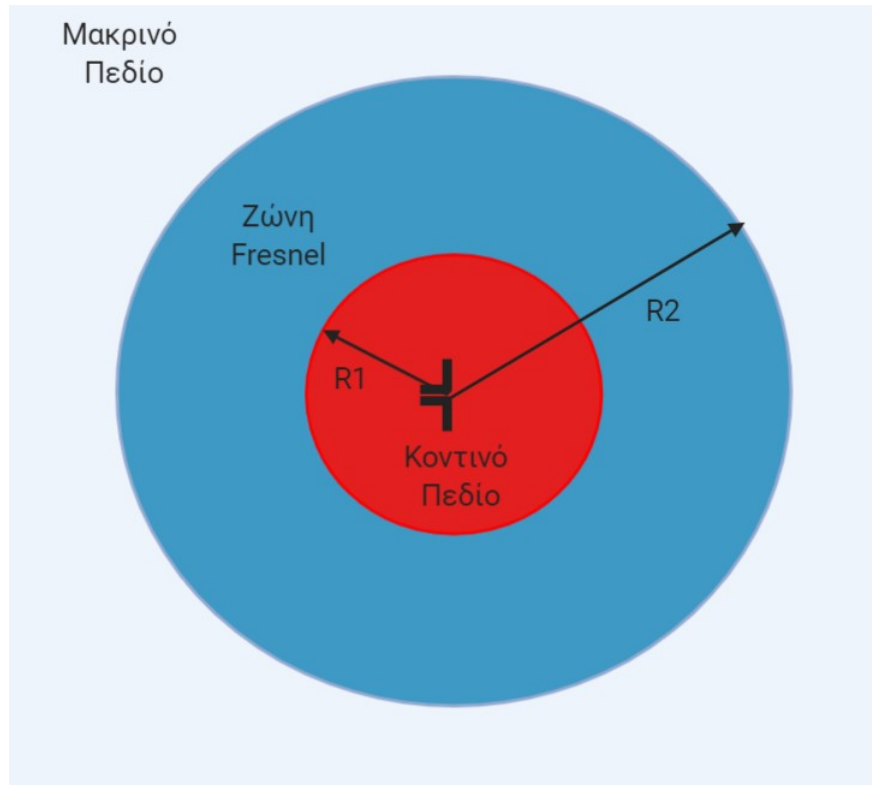
Περιοχές Ακτινοβολίας Κεραιών

Ο χώρος που περιβάλλει μία κεραία συνήθως υποδιαιρείται σε τρεις περιοχές:

- Την κοντινή περιοχή

- Την περιοχή (ή ζώνη) Fresnel
- Την μακρινή περιοχή ή περιοχή Fraunhofer

Σχηματική απεικόνιση των τριών αυτών περιοχών φαίνεται στο σχήμα 2.3//



Σχήμα 2.3: Περιοχές Ακτινοβολίας Κεραιών

Οι περιοχές αυτές διακρίνονται ως προς τη συμπεριφορά του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από τον ακτινοβολητή, και διαχωρίζονται μεταξύ τους βάσει καθιερωμένων κριτηρίων. Αν και δεν εμφανίζονται απότομες μεταβολές κατά τη διάσχιση των ορίων μεταξύ των περιοχών, οι περιοχές αυτές είναι καταρχήν διαφορετικές.

Η *κοντινή περιοχή* είναι η περιοχή όπου το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο εμφανίζει άεργη συμπεριφορά, δηλαδή δεν ακτινοβολείται ηλεκτρομαγνητική ενέργεια. Η περιοχή αυτή περιορίζεται χωρικά στο εσωτερικό μιας σφαίρας με ακτίνα

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

που περιβάλλει την κεραία (σχήμα 2.3). Στην παραπάνω εξίσωση, D είναι η μέγιστη διάσταση του ακτινοβολητή και λ το μήκος κύματος που αντιστοιχεί στη συχνότητα λειτουργίας.

Η *περιοχή Fresnel* ορίζεται ως η ενδιάμεση περιοχή μεταξύ της κοντινής και της μακρινής περιοχής ενός ακτινοβολητή. Στην περιοχή αυτή, το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο εμφανίζει συμπεριφορά ακτινοβολίας αλλά οι εγχάρσεις συνιστώσες του διατηρούν και ακτινική εξάρτηση.

Η περιοχή Fresnel εκτείνεται στο χώρο που περιορίζεται από τις σφαίρες με ακτίνες R_1 και R_2 όπου

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

που περιβάλλουν τον ακτινοβολητή. Αξίζει να σημειωθεί πως στην περίπτωση κεραίων με μικρές διαστάσεις σε σχέση με το μήκος κύματος λειτουργίας, η περιοχή Fresnel δεν υφίσταται.

Τέλος, η μακρινή περιοχή έχει ως χαρακτηριστικό την ανεξαρτησία της μορφής των εγκάρσιων συνιστωσών του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου από την ακτινική συνιστώσα. Η περιοχή αυτή συνήθως εκτείνεται σε αποστάσεις από τον ακτινοβολητή μεγαλύτερες από R_2 . Στην παρούσα εργασία, όποτε γίνεται αναφορά σε διαγράμματα ακτινοβολίας ή σχηματοποίηση δέσμης, θα γίνεται η υπόθεση ότι βρισκόμαστε στη μακρινή περιοχή.

Κατευθυντικό Κέρδος - Κατευθυντικότητα

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

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

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

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

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

Κέρδος Ισχύος

Το κέρδος ισχύος είναι ένα ακόμα μέτρο για τον προσδιορισμό του πόσο αποδοτικά ακτινοβολεί μια κεραία, και ορίζεται βάσει της παρακάτω σχέσης

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

όπου W_{in} η ισχύς τροφοδότησης της κεραίας. Η παραπάνω σχέση διαφέρει από την αντίστοιχη σχέση ορισμού του κατευθυντικού κέρδους ως προς το ότι λαμβάνεται υπόψη η ισχύς τροφοδότησης αντί της ακτινοβολουμένης ισχύος. Έτσι, εκτός των κατευθυντικών ιδιοτήτων μιας κεραίας, στο κέρδος ισχύος λαμβάνεται υπόψη και πόσο αποδοτικά τροφοδοτείται η κεραία.

Στις συνήθεις περιπτώσεις, το κέρδος ισχύος αναφέρεται στη διεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας, οπότε και ονομάζεται απλώς κέρδος της κεραίας, δηλαδή:

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

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

$$W_{rad} = n_r W_{in}$$

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

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

2.2 Το Στοιχειώδες Δίπολο

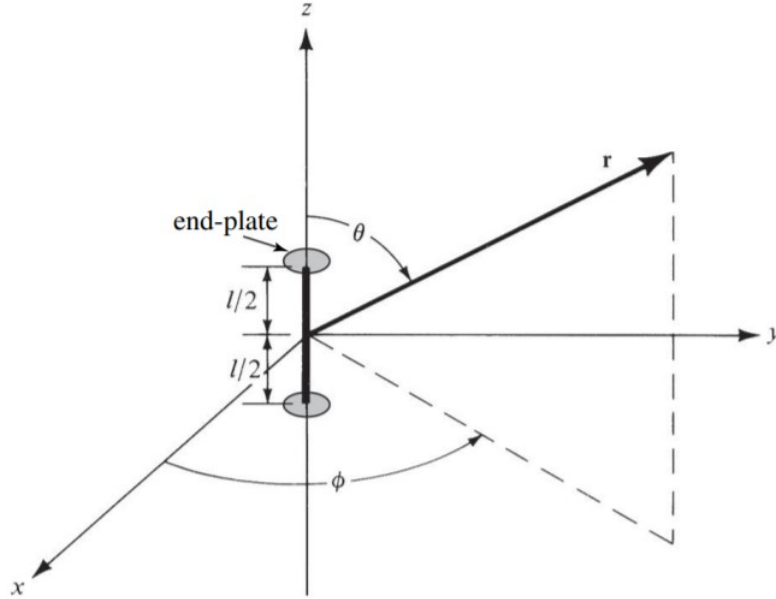
Σε συχνότητες κάτω από την μικροκυματική περιοχή, οι κεραίες που χρησιμοποιούνται συνήθως ανήκουν στην κατηγορία των γραμμικών κεραιών ή διπόλων, που βασίζονται στην ακτινοβολία αγωγών διαρρεόμενων από ηλεκτρικό ρεύμα. Οι βασικές ιδιότητες ακτινοβολίας των γραμμικών κεραιών μπορούν να μελετηθούν με τη βοήθεια του στοιχειώδους ακτινοβολητή που ονομάζεται δίπολο του Hertz ή βραχύ δίπολο. Το βραχύ δίπολο είναι ο ευθύγραμμος ακτινοβολητής με μήκος L κατά πολύ μικρότερο του μήκους κύματος λειτουργίας ($L \ll \lambda$) και κατανομή ρεύματος σταθερή. Στο Σχήμα 2.4 φαίνεται ένα βραχύ δίπολο τοποθετημένο στο κέντρο του συστήματος συντεταγμένων.

$$\vec{J}(x, y, z) = \begin{cases} I\delta(x)\delta(y)\hat{z} & -L/2 \leq z \leq L/2 \\ 0 & |z| > L/2 \end{cases}$$

όπου $\delta(x), \delta(y)$ κρουστικές συναρτήσεις που προκύπτουν λόγω της υπόθεσης μηδενικού πάχους του διπόλου, και $I = dq/dt$ σταθερή ρευματική κατανομή που διαρρέει το δίπολο. Επιλύοντας τις εξισώσεις του Maxwell για το μακρινό πεδίο, προκύπτουν οι εκφράσεις για το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο, και χρήση του διανύσματος Poynting υπολογίζεται ότι:

$$\vec{P}_{av} = P_r(r, \theta)\hat{r} = \frac{nk^2 I^2 L^2}{32\pi^2 r^2} \sin^2(\theta)\hat{r}$$

όπου το n είναι η κυματική αντίσταση του μέσου διάδοσης (συνήθως $n=120\pi \Omega$ για διάδοση στο κενό), και k ο κυματάνριθμος $2\pi/\lambda$.



Σχήμα 2.4: Βραχύ Δίπολο στο κέντρο του συστήματος συντεταγμένων

Χαρακτηριστικά ακτινοβολίας βραχέος διπόλου

Η ένταση ακτινοβολίας του βραχέος διπόλου, βάσει των όσων έχουν συζητηθεί παραπάνω, είναι της μορφής:

$$U(\theta) = r^2 P_r(r, \theta) = \frac{nk^2 I^2 L^2}{32\pi^2} \sin^2(\theta)$$

Βάσει της παραπάνω σχέσης, καθίσταται εμφανές ότι η ένταση ακτινοβολίας δεν έχει εξάρτηση από το αζιμούθιο, αλλά μόνο από τη γωνία ανύψωσης θ . Αυτό σημαίνει ότι εκπέμπει ομοιοκατευθυντικά ως προς τη γωνία ϕ . Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 2.5) απεικονίζεται το πολικό διάγραμμα ακτινοβολίας ως προς θ ενός διπόλου Hertz.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα, το διάγραμμα παρουσιάζει μέγιστο για $\theta = 90^\circ$ και ελάχιστα (μηδενισμούς) στις γωνίες $\theta = 0^\circ$ και $\theta = 180^\circ$. Υπενθυμίζεται σε αυτό το σημείο ότι η γωνία ανύψωσης θ παίρνει τιμές από 0 έως 180 μοίρες.

Η συνολική ισχύς που ακτινοβολεί το βραχύ δίπολο προκύπτει βάσει των παραπάνω

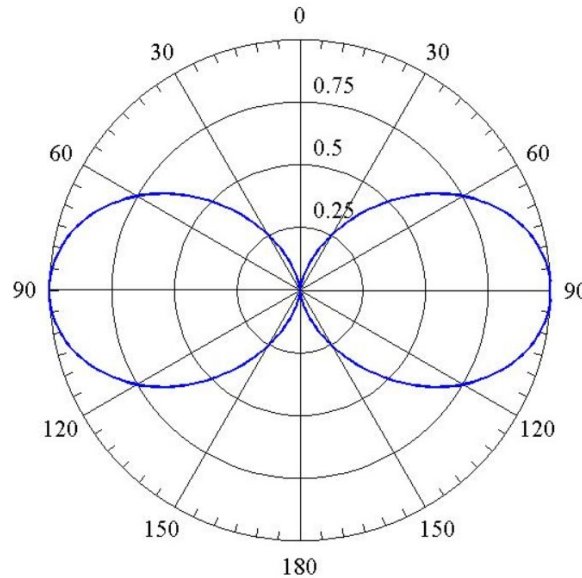
$$W_{rad} = \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^\pi d\theta \left[\frac{nk^2 I^2 L^2}{32\pi^2} \sin^2(\theta) \sin(\theta) \right] = 40\pi^2 I^2 \frac{L^2}{\lambda^2}$$

Αντίστοιχα το κατευθυντικό κέρδος χρήσει του ορισμού και των παραπάνω σχέσεων προκύπτει:

$$D_g(\theta) = 4\pi \frac{U(\theta)}{W_{rad}} = \frac{3}{2} \sin^2(\theta)$$

Τέλος, η κατευθυντικότητα του βραχέος διπόλου προκύπτει ως η τιμή του κατευθυντικού κέρδους στην κατεύθυνση μεγίστης ακτινοβολίας $\theta = 90^\circ$. Συνεπώς:

$$D_m = \frac{3}{2} = 1.5 \cong 1.76 \text{ dB}$$



Σχήμα 2.5: Πολικό Διάγραμμα Έντασης Ακτινοβολίας Διπόλου Hertz

2.3 Στοιχειοκεραίες

Μία ιδέα για έναν καινούριο τύπο κεραιών ήρθε από τον γερμανό ερευνητή και κάτοχο βραβείου Νόμπελ Karl Ferdinand Braun, με σκοπό την αύξηση της αποδοτικότητας στις τηλεπικοινωνίες, ο οποίος για πρώτη φορά έκανε επίδειξη ενισχυμένων μεταδόσεων ραδιοκυμάτων σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις. Χρησιμοποιώντας πολλαπλές κεραίες σε συγκεκριμένες διατάξεις, καθίσταται εφικτή η αύξηση του SNIR (Signal to Noise and Interference Ratio) και κατ' επέκταση του ρυθμού δεδομένων. Αντίστοιχα, η χρησιμοποίηση τέτοιων διατάξεων στον δέκτη μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τη λήψη ισχύος σε περίπτωση ασθενών σημάτων. Τέτοιες διατάξεις κεραιών ονομάζονται στοιχειοκεραίες.

Οι στοιχειοκεραίες αποτελούνται από πολλαπλούς ακτινοβολητές (στοιχεία) που έχουν τον ίδιο προσανατολισμό, και είναι τοποθετημένοι σε συγκεκριμένες διατάξεις. Αυτοί οι ακτινοβολητές μπορεί να είναι όμοιοι, όπως συμβαίνει στη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων, ή μπορεί να είναι και διαφορετικοί, όπως συμβαίνει για παράδειγμα στις διατάξεις Yagi - Uda. Επίσης, ανάλογα με τη χωροταξική διάταξή τους, οι στοιχειοκεραίες διακρίνονται στις χωρικά ομοιόμορφες στοιχειοκεραίες και στις χωρικά ανομοιόμορφες. Στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές χρησιμοποιείται η πρώτη κατηγορία, καθώς για αυτές υπάρχουν περισσότερες μέθοδοι ανάλυσης σε αντίθεση με τις ανομοιόμορφες, των οποίων η ανάλυση είναι σαφώς δυσκολότερη, λόγω των αυξημένων βαθμών ελευθερίας του σχεδιαστή.

Το συνολικό ακτινοβολούμενο πεδίο της στοιχειοκεραίας προκύπτει από τη διανυσματική άθροιση όλων των πεδίων που ακτινοβολούνται από το κάθε στοιχείο ξεχωριστά. Για τη δημιουργία υψηλά κατευθυντικών διαγραμμάτων ακτινοβολίας, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η προσθετική συμβολή των πεδίων των στοιχείων στην επιθυμητή (ή στις επιθυμητές) κατεύθυνση ακτινοβολίας, σε συνδυασμό με την αναιρετική συμβολή τους στον υπόλοιπο χώρο.

Η σχηματοποίηση δέσμης σε μία στοιχειοκεραία επαφίεται σε πέντε βασικά σημεία ελέγχου. Αυτά είναι τα παρακάτω:

1. Το γεωμετρικό σχήμα της διάταξης της στοιχειοκεραίας (πχ γραμμικό, τετραγωνικό, τριγωνικό κτλ)
2. Η σχετική μετατόπιση μεταξύ της θέσης των στοιχείων της κεραίας
3. Το πλάτος του ρεύματος διέγερσης κάθε στοιχείου
4. Η φάση του ρεύματος διέγερσης κάθε στοιχείου
5. Το σχετικό διάγραμμα ακτινοβολίας κάθε στοιχείου

Οι στοιχειοκεραίες βρίσκουν ευρεία εφαρμογή λόγω της βελτίωσης της κατευθυντικότητας που προσφέρουν σε σχέση με τον απλό ακτινοβολητή και τη δυνατότητα σύνθεσης επιθυμητών διαγραμμάτων ακτινοβολίας μέσω τεχνικών σχηματοποίησης δέσμης, τόσο σε συστήματα μετάδοσης όσο και λήψης.

2.3.1 Ανάλυση Στοιχειοκεραιών

Όπως είδαμε παραπάνω, το πλάτος και η φάση των ρευμάτων τροφοδότησης κάθε στοιχείου παίζει καταλυτικό ρόλο στη διαμόρφωση του ακτινοβολουμένου πεδίου της στοιχειοκεραίας. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα γίνει ανάλυση του τρόπου ακτινοβολίας χωρικά ομοιόμορφων στοιχειοκεραιών που αποτελούνται από όμοιους ακτινοβολητές. Αν I_0 είναι ο φασιδέτης του ρεύματος διέγερσης του στοιχείου της στοιχειοκεραίας που θεωρείται ως στοιχείο αναφοράς, το ρεύμα διέγερσης κάποιου στοιχείου μπορεί να εκφρασθεί υπό τη μορφή:

$$I_m = c_m I_0 \quad m = 0, 1, 2, \dots, M - 1 \quad (2.1)$$

Όπου M το πλήθος των στοιχείων της στοιχειοκεραίας. Ο μιγαδικός αριθμός c_m που αποτελεί τον κατάλληλο συντελεστή αναλογίας ονομάζεται *ρευματικός συντελεστής* του στοιχείου m .

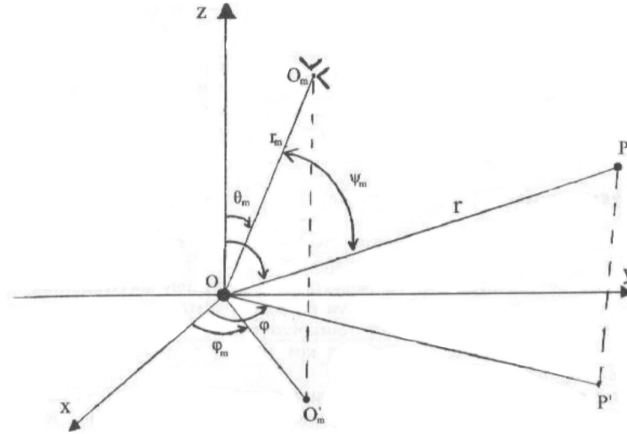
Η συνολική ένταση ακτινοβολίας $U(\theta, \phi)$ της στοιχειοκεραίας, λαμβάνοντας υπόψη τις παραδοχές για τη μακρινή περιοχή προκύπτει:

$$U(\theta, \phi) = U_0(\theta, \phi) \times |S(\theta, \phi)|^2 \quad (2.2)$$

Όπου $U_0(\theta, \phi)$ η ένταση ακτινοβολίας των ομοίων στοιχείων ακτινοβολίας, και $S(\theta, \phi)$ συνάρτηση που εκφράζει την επίδραση της στοιχειοκεραίας και ονομάζεται *παράγοντας διάταξης* της στοιχειοκεραίας.

Με τη βοήθεια του σχήματος 2.6 ο παράγοντας διάταξης προσδιορίζεται συναρτήσει των συντεταγμένων θέσης και των ρευμάτων διεγέρσης του κάθε στοιχείου της στοιχειοκεραίας ως:

$$S(\theta, \phi) = \sum_{m=0}^{M-1} c_m \exp(jkr_m \cos \psi_m) \quad (2.3)$$



Σχήμα 2.6: Σύστημα Συντεταγμένων για Ανάλυση Στοιχειοκεραιών

όπου

$$\cos\psi_m = \cos\theta_m\cos\theta + \sin\theta_m\sin\theta\cos(\phi - \phi_m) \quad (2.4)$$

Από τη σχέση 2.3 φαίνεται πως ο παράγοντας διάταξης της στοιχειοκεραίας και κατ' επέκταση η ένταση ακτινοβολίας της εξαρτώνται από τη συχνότητα λειτουργίας της, από τη γεωμετρική διάταξή της, από το πλήθος των στοιχείων καθώς και από τη ρευματική διέγερσή τους. Από την άλλη καθίσταται εμφανές ότι ο παράγοντας διάταξης της στοιχειοκεραίας δεν εξαρτάται από το είδος των ακτινοβολητών που την αποτελούν και συνήθως προσδιορίζεται αντικαθιστώντας για ευκολία τα στοιχεία ακτινοβολίας με ισοτροπικούς ακτινοβολητές τοποθετημένους στα κέντρα διέγερσής τους.

Πρέπει να σημειωθεί επίσης ότι το μέτρο του παράγοντα διάταξης μιας στοιχειοκεραίας είναι μέγεθος που αφορά τη μακρινή περιοχή και δεν μεταβάλλεται όταν υπάρξει πεπερασμένη μετατόπιση του κέντρου των συντεταγμένων. Αυτό σημαίνει ότι στοιχειοκεραία με συγκεκριμένο πλήθος, γεωμετρική διάταξη και σχετική διέγερση των στοιχείων της, έχει μοναδικό κατά μέτρο παράγοντα διάταξης, ως συνάρτηση της συχνότητας λειτουργίας, ανεξάρτητα από την επιλογή του κέντρου συντεταγμένων. Η επιλογή του κέντρου των συντεταγμένων είναι ελεύθερη και γίνεται με κριτήριο την ευκολία προσδιορισμού του παράγοντα διάταξης και την απλότητα της μαθηματικής έκφρασής του. Συνήθως επιλέγεται το γεωμετρικό κέντρο μιας στοιχειοκεραίας, ή κάποιο χαρακτηριστικό σημείο της γεωμετρικής διάταξής της.

Το κατευθυντικό κέρδος μιας στοιχειοκεραίας δίνεται από τη σχέση:

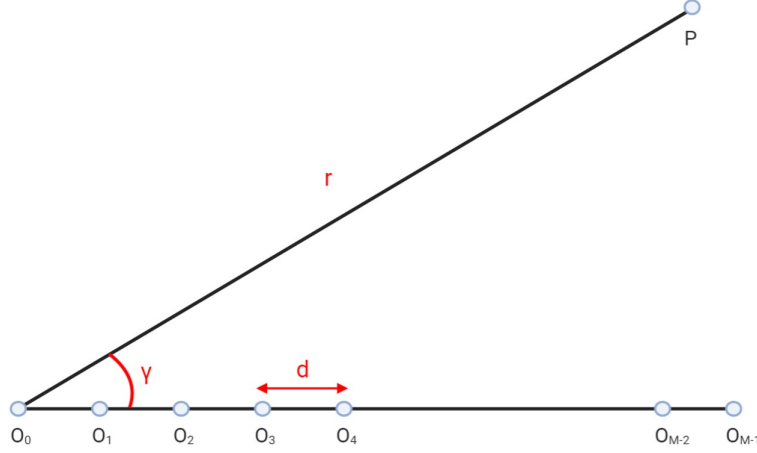
$$D_g = 4\pi \frac{U_0(\theta, \phi)|S(\theta, \phi)|}{\oint U_0(\theta, \phi)|S(\theta, \phi)|d\Omega} \quad (2.5)$$

Συγκεκριμένα για τις στοιχειοκεραίες ορίζεται το γεωμετρικό κατευθυντικό κέρδος ως:

$$D_s = 4\pi \frac{|S(\theta, \phi)|}{\oint |S(\theta, \phi)|d\Omega} \quad (2.6)$$

2.3.2 Γραμμικές Στοιχειοκεραίες

Οι χωρικά ομοιόμορφες γραμμικές στοιχειοκεραίες αποτελούν κατηγορία στοιχειοκεραιών με μεγάλο πρακτικό ενδιαφέρον, γύρω από τις οποίες έγινε η μελέτη στην παρούσα διπλωματική εργασία. Πρόκειται για στοιχειοκεραίες των οποίων τα στοιχεία βρίσκονται πάνω σε έναν άξονα (μία ευθεία), ο οποίος ονομάζεται *άξονας της στοιχειοκεραίας*, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7: Γεωμετρία Χωρικά Ομοιόμορφης Στοιχειοκεραίας

Βάσει του σχήματος, και των όσων συζητήθηκαν προηγουμένως, θεωρώντας ως κέντρο των συντεταγμένων της στοιχειοκεραίας το O_0 , στο οποίο βρίσκεται το στοιχείο της κεραίας τάξης $m = 0$, προκύπτουν τα παρακάτω

$$r_m = md \quad (2.7)$$

και

$$\psi_m = \gamma \quad (2.8)$$

όπου

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

Επομένως ο παράγοντας διάταξης της γραμμικής στοιχειοκεραίας προκύπτει μέσω των παραπάνω:

$$S(\gamma) = c_0 + c_1 e^{jkd \cos \gamma} + c_2 e^{2jkd \cos \gamma} + \dots + c_{M-1} e^{(M-1)jkd \cos \gamma} \quad (2.9)$$

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

Η εξάρτηση του παράγοντα διάταξης της στοιχειοκεραίας από τις μεταβλητές κατεύθυνσης (θ, φ) υποκρύπτεται στην εξάρτησή του από τη γωνία γ , η οποία σχετίζεται με αυτές βάσει των εξισώσεων (2.4), (2.8). Έτσι, ανάλογα πού είναι τοποθετημένος ο άξονας της στοιχειοκεραίας, υπάρχει και διαφορετική εξάρτηση από τις μεταβλητές κατεύθυνσης. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, ο άξονας της στοιχειοκεραίας ταυτίζεται με έναν από τους άξονες x, y . Στην περίπτωση που ταυτίζεται με τον άξονα x προκύπτει άμεσα:

$$\cos\gamma = \sin\theta\cos\varphi \quad (2.10)$$

ενώ στην περίπτωση που ταυτίζεται με τον άξονα y :

$$\cos\gamma = \sin\theta\sin\varphi \quad (2.11)$$

Εκφράζοντας τον μιγαδικό συντελεστή σε πολική μορφή ως

$$c_m = a_m e^{jm\beta} \quad (2.12)$$

όπου a_m θετικοί πραγματικοί αριθμοί, ο συνολικός παράγοντας διάταξης γίνεται,

$$S(\gamma) = \sum_{m=0}^{M-1} A_m e^{jm(kd\cos\gamma + \beta)} \quad (2.13)$$

Προς ευκολία, ορίζεται η μεταβλητή ψ μέσω της σχέσης

$$\psi = kd\cos\gamma + \beta \quad (2.14)$$

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

Σύμφωνα με τα παραπάνω, ο παράγοντας διάταξης μπορεί να γραφεί ως:

$$S(\gamma) = \sum_{m=0}^{M-1} A_m e^{jm\psi} \quad (2.15)$$

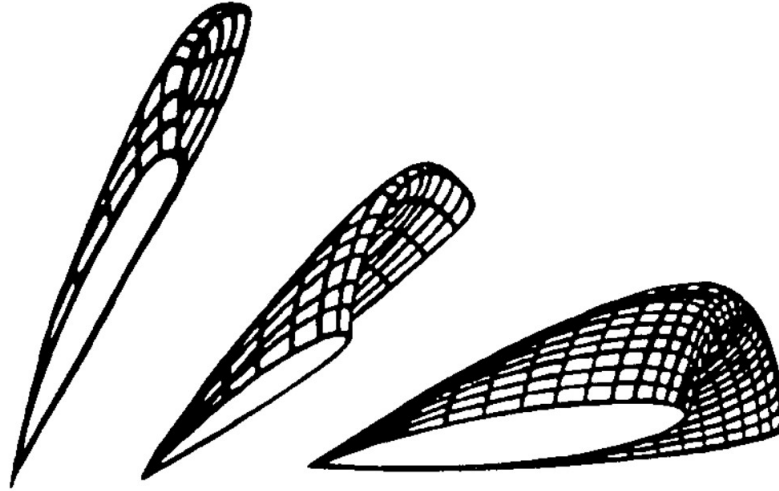
διευκολύνοντας σημαντικά την ανάλυσή του.

Γραμμικές Στοιχειοκεραίες με Στρεφόμενο Διάγραμμα Ακτινοβολίας

Με την ανάλυση που έχει γίνει μέχρι τώρα, καθίσταται εμφανής η δυνατότητα των στοιχειοκεραιών να αυξήσουν την κατευθυντικότητα σε ένα δεδομένο σύστημα κεραιών. Στη συνέχεια αναλύεται η δυνατότητα που προσφέρουν οι στοιχειοκεραίες ως προς τον έλεγχο του σχήματος της δέσμης, και τη διεύθυνσης μέγιστης ακτινοβολίας, ελέγχοντας τα ρεύματα που τροφοδοτούνται σε κάθε στοιχείο, τόσο ως προς τη φάση και το πλάτος τους.

Ας υποθέσουμε ότι θέλουμε να στρέψουμε τη διεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας σε μία αυθαίρετη γωνία γ_0 που αντιστοιχεί σε μεταβλητές διεύθυνσης (θ_m, φ_m) . Ας υποθέσουμε επίσης

ότι οι ακτινοβολητές μας είναι ομοιοκατευθυντικοί, που σημαίνει ότι εκπέμπουν ομοιόμορφα σε κάθε σημείο του χώρου. Ο γεωμετρικός τύπος των σημείων παρατήρησης $P(r, \theta_m, \varphi_m)$ στον χώρο που σχηματίζουν γωνία γ_0 με τον άξονα της στοιχειοκεραίας είναι κώνος με κλίση γ_0 που εκτυλίσσεται γύρω από τον άξονα της στοιχειοκεραίας. Στις περισσότερες περιπτώσεις πρακτικού ενδιαφέροντος, όπου η στοιχειοκεραία είναι βρίσκεται σε γειωμένη επιφάνεια, αυτή η περιοχή είναι ημικώνος. Σχηματική απεικόνιση των παραπάνω φαίνεται στο σχήμα 2.8.



Σχήμα 2.8: Τρισδιάστατο Διάγραμμα Ακτινοβολίας Γραμμικής Στοιχειοκεραίας με Ομοιοκατευθυντικούς Ακτινοβολητές

Στοιχειοκεραίες που ακτινοβολούν κάθετα στον άξονά τους, ονομάζονται *μετωπικές στοιχειοκεραίες* και χαρακτηρίζονται από γωνία $\gamma_0 = 90^\circ$. Η εκπεμπόμενη ισχύς τους στον χώρο είναι πάλι ημικώνος με γωνία $\gamma_0 = 90^\circ$, το οποίο προσεγγίζει ένα ημιεπίπεδο, όπως απεικονίζεται στην πρώτη περίπτωση του σχήματος 2.8. Αντίθετα, *ακροφλεγείς* στοιχειοκεραίες ονομάζονται αυτές που εκπέμπουν παράλληλα με τον άξονα τους, με $\gamma_0 = 0^\circ$ ή 180° , όπως φαίνεται στην τρίτη περίπτωση του σχήματος 2.8.

Για τη στροφή της μέγιστης διεύθυνσης ακτινοβολίας, και άρα του κύριου λοβού του διαγράμματος ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας σε γωνία γ_0 , θα πρέπει ο παράγοντας διάταξης να λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του για $\gamma = \gamma_0$ ή

$$S(\gamma_0) = \max_{\gamma} S(\gamma) \quad (2.16)$$

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

$$\beta = -kdcos\gamma_0 \implies \beta + kdcos\gamma_0 = 0 \quad (2.17)$$

Η σχέση αυτή αποτελεί τη βασική συνθήκη για τη στροφή του διαγράμματος ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας, και άρα των τεχνικών σχηματοποίησης δέσμης. Χρήσει αυτής της σχέσης, ο παράγοντας διάταξης προκύπτει:

$$S(\gamma) = \sum_{m=0}^{M-1} A_m e^{jmkd(\cos\gamma - \cos\gamma_0)} \quad (2.18)$$

Είναι εμφανές, ότι όταν $\gamma = \gamma_0$ ο παράγοντας διάταξης παίρνει τιμή:

$$S(\gamma_0) = \sum_{m=0}^{M-1} A_m \quad (2.19)$$

το οποίο αποδεικνύεται ότι είναι η μέγιστη τιμή του παράγοντα διάταξης.

Πέρα από τη φυσική διέγερση των κεραιών, για τη σχηματοποίηση δέσμης καθοριστικό ρόλο παίζουν και τα πλάτη των ρευμάτων που τροφοδοτούνται στα στοιχεία της κεραίας. Σημειώνεται ότι ο έλεγχος των πλατών δεν διαμορφώνει το διάγραμμα ακτινοβολίας ως προς τη διεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας, αλλά ως προς το σχήμα του κύριου λοβού, άρα την κατευθυντικότητα της κεραίας, και το πλάτος των πλευρικών λοβών. Υπάρχει λοιπόν η δυνατότητα για ρευματική διέγερση των στοιχείων με τεχνικές καταπίεσης πλευρικών λοβών, με τίμημα τη διεύρυνση του κύριου λοβού και άρα τη μείωση της κατευθυντικότητας. Τέτοιες τεχνικές περιέχουν, αλλά δεν περιορίζονται στις:

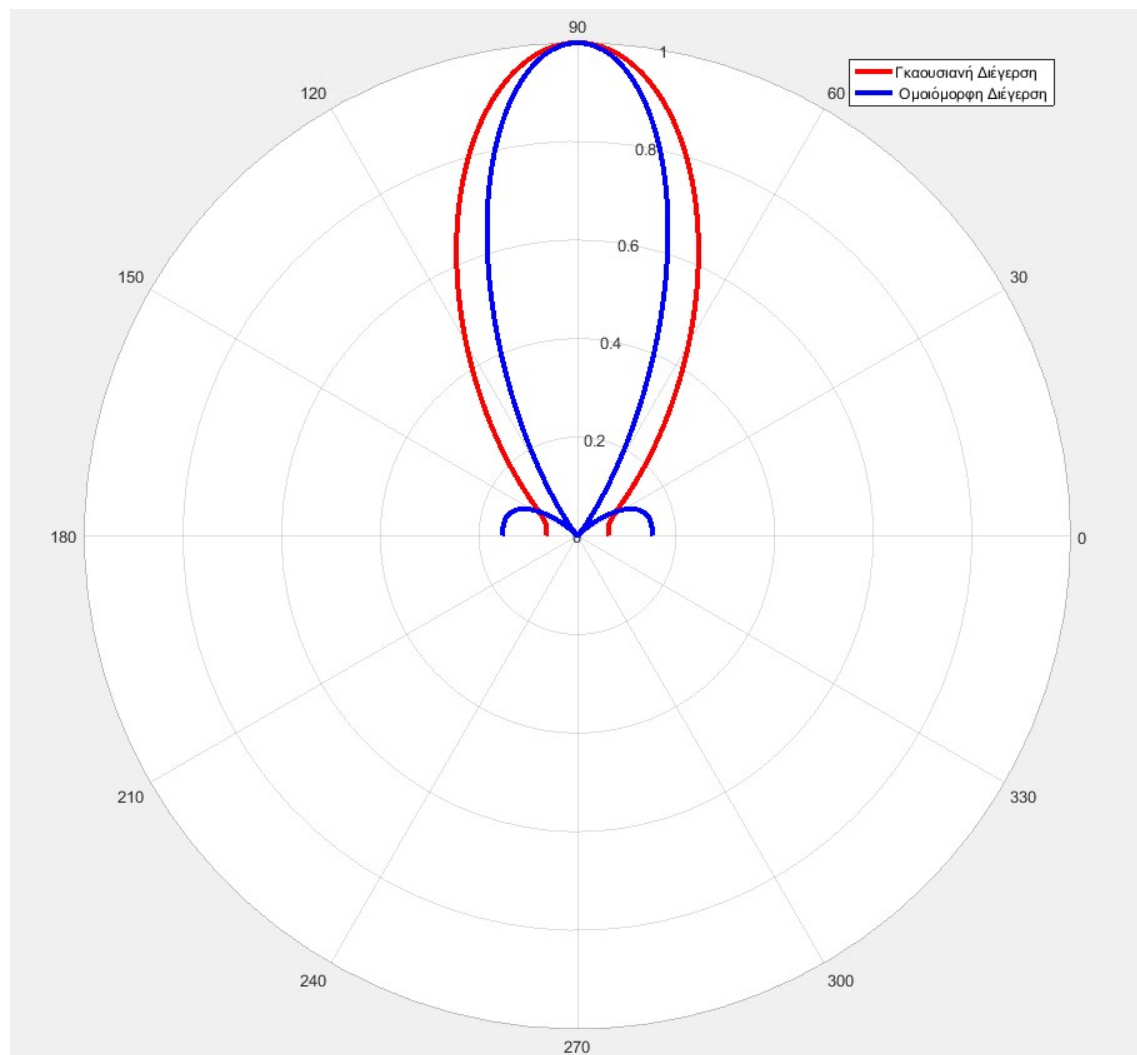
- Διωνυμική διέγερση [1]
- Διέγερση Chebyshev [1]
- Γκαουσιανή Διέγερση [8]

Από την άλλη, η ομοιόμορφη διέγερση κατά την οποία όλα τα ρεύματα που τροφοδοτούν τα στοιχεία της κεραίας έχουν το ίδιο πλάτος, προσφέρει αυξημένη κατευθυντικότητα, μειώνοντας το γωνιακό εύρος του κυρίου λοβού, με τίμημα το αυξημένο σε σχέση με άλλες διεγέρσεις πλάτος των πλευρικών λοβών. Σχηματική απεικόνιση των παραπάνω παρουσιάζεται στα σχήματα 2.9α', 2.9β'

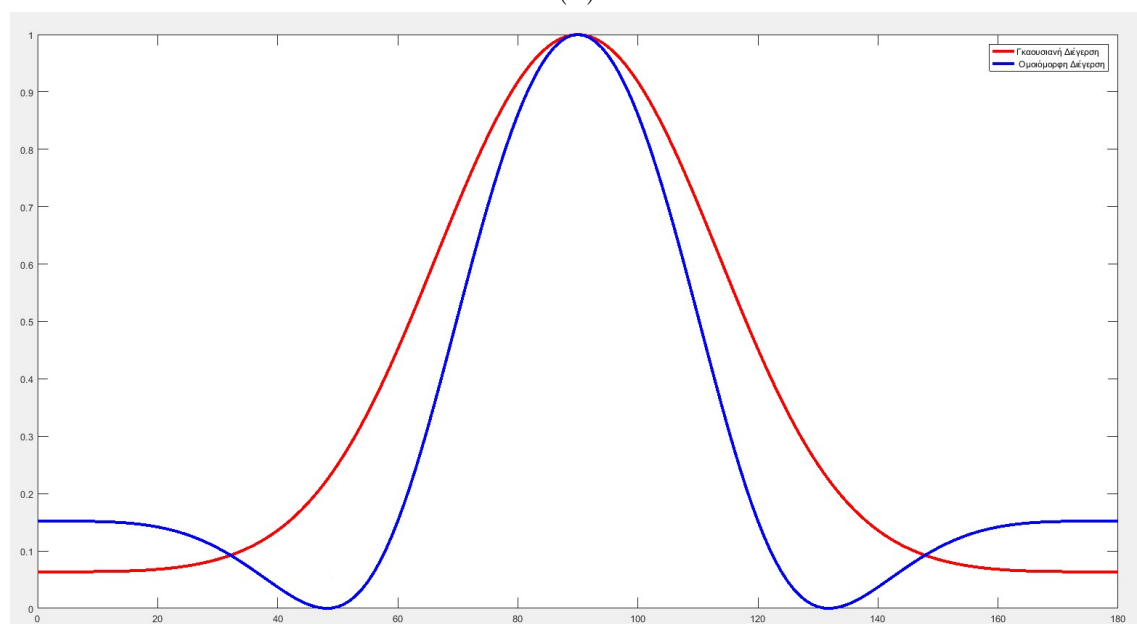
2.4 Δίκτυο Σχηματοποίησης Δέσμης

Στις προηγούμενες παραγράφους είδαμε ότι, ελέγχοντας το πλάτος και τη φάση των ρευμάτων που τροφοδοτούνται στους ακτινοβολητές μιας στοιχειοκεραίας, είναι δυνατή η στροφή του κύριου λοβού ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας, καθώς και η ως έναν βαθμό μορφοποίησή του. Το σύστημα το οποίο είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο των ρευμάτων και την κατάλληλη τροφοδότηση των στοιχείων, ονομάζεται *Δίκτυο Σχηματοποίησης Δέσμης*. Ενδεικτική απεικόνιση ενός τέτοιου συστήματος φαίνεται στο σχήμα 2.10.

Ένα τυπικό Δίκτυο Σχηματοποίησης Δέσμης αποτελείται από μία βαθμίδα ελέγχου του πλάτους των ρευμάτων και μπορεί να περιλαμβάνει ενισχυτές και εξασθενητές, και μία βαθμίδα ελέγχου της φάσης των ρευμάτων που αντιστοιχεί σε κάθε στοιχείο, πριν εντέλει αυτά τροφοδοτηθούν στον κατάλληλο ακτινοβολητή. Ως προς τη ρύθμιση της φάσης, αυτό που ενδιαφέρει στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές, δεν είναι τα απόλυτα νούμερα της στροφής φάσης που

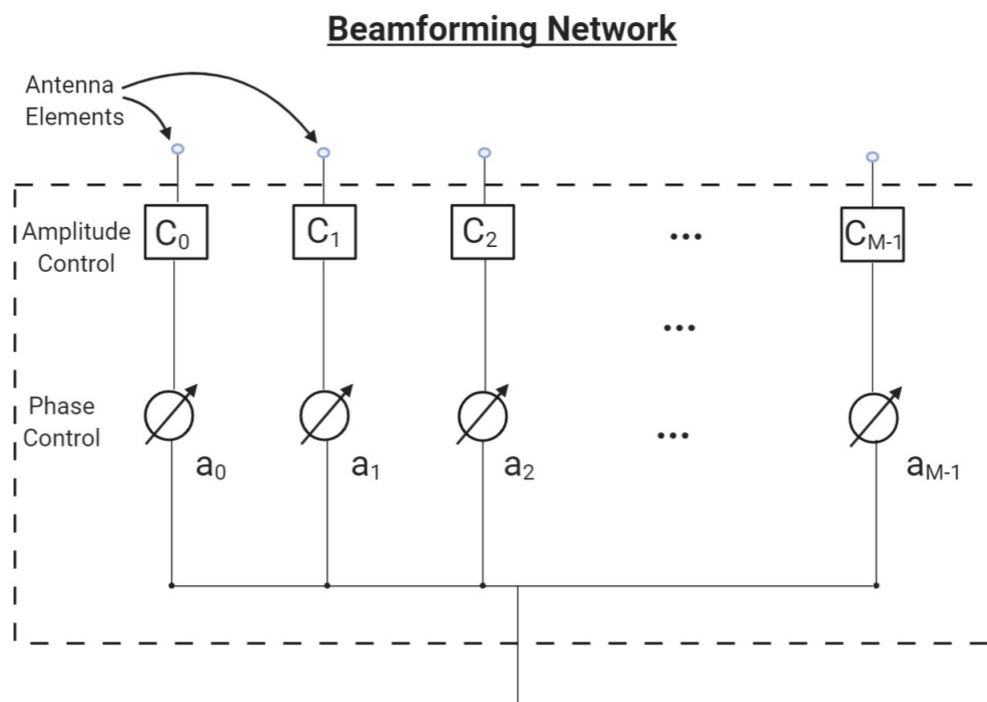


(α')



(β')

Σχήμα 2.9: (α') Γραφική Απεικόνιση Γκαουσιανής Διέγερσης (Κόκκινο Χρώμα) - Ομοιόμορφης Διέγερσης (Μπλε Χρώμα) για $d = \frac{\lambda}{2}$ και $M=4$ σε Πολικές Συντεταγμένες (β') Γραφική Απεικόνιση Γκαουσιανής Διέγερσης - Ομοιόμορφης Διέγερσης για $d = \frac{\lambda}{2}$ και $M=4$ σε Πολικές Συντεταγμένες



Σχήμα 2.10: Δίκτυο Σχηματοποίησης Δέσμης

πρέπει να εισαχθεί στο σήμα, αλλά η *σχετική διαφορά φάσης* μεταξύ των σημάτων που εισάγονται σε κάθε στοιχείο. Στην πράξη αυτές οι στροφές φάσεις εισάγονται μέσω ρυθμιζόμενων μικροκυματικών δίθυρων διατάξεων που ονομάζονται *ολισθητές φάσης (Phase Shifters, PS)*. Όπως προδίδει το όνομά τους, οι διατάξεις αυτές λαμβάνουν ως είσοδο ένα σήμα, το οποίο βγαίνει από την έξοδο με μία ρυθμιζόμενη διαφορά φάσης, της οποίας η τιμή επαφίεται στην επιλογή του σχεδιαστή του συστήματος ανάλογα με την εκάστοτε επιθυμητή λειτουργία.

Εν γένει χρησιμοποιούνται δύο καταρχήν διαφορετικοί τύποι στροφών φάσης. Αυτοί είναι:

- Ο ολισθητής σταθερής φάσης ή πραγματικός ολισθητής φάσης, ο οποίος δημιουργεί διαφορά φάσης *σταθερή* ως προς τη συχνότητα. Η τιμή της εφαρμοζόμενης ολίσθησης φάσης κυμαίνεται μεταξύ 0° και 360° .
- Ο ολισθητής σταθερής καθυστέρησης ή καθυστέρησης πραγματικού χρόνου (True-Time Delay, TTD), ο οποίος δημιουργεί διαφορά φάσης *γραμμική* ως προς τη συχνότητα. Η τιμή της εφαρμοζόμενης ολίσθησης φάσης στη κεντρική συχνότητα λειτουργίας δύναται να ξεπεράσει τις 360° .

Οι συνέπειες της χρησιμοποίησης κάθε μίας από τις παραπάνω διατάξεις γίνονται ξεκάθαρες όταν εξετάζεται η απόδοση του γενικότερου συστήματος ως προς τη συχνότητα, και συγκεκριμένα ως προς τη συμπεριφορά του σε αλλαγές της συχνότητας λειτουργίας, ως προς την ονομαστική κεντρική συχνότητα σχεδιασμού της στοιχειοκεραίας. Η συμπεριφορά αυτή θα καθορίσει την ικανότητα του συστήματος για λειτουργία μετάδοσης ευρυζωνικών σημάτων,

λειτουργία που είναι ολοένα και πιο επίκαιρη με την εφαρμογή των δικτύων πέμπτης γενεάς, και των δικτύων Beyond 5G, πηγαίνοντας σε συχνοτικές μπάντες ανεξερεύνητες με δυνατότητες για εκμετάλλευση μεγάλων εύρων ζώνης.

Ανάλυση των Ολισθητών Φάσης

Στην μέχρι τώρα ανάλυση έχει υποθεθεί σταθερά διάδοσης k που αντιστοιχεί στο μήκος κύματος λ και αντίστοιχα σε συχνότητα $f = c/\lambda$, όπου c η ταχύτητα διάδοσης του φωτός στο μέσο διάδοσης, που συνδεόνται βάσει της σχέσης:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{c} \quad (2.20)$$

Ας υποθέσουμε γραμμική στοιχειοκεραία M στοιχείων. Ο παράγοντας διάταξης βάσει της εξίσωσης 2.13, χρήσει της 2.20 μπορεί να γραφεί ως:

$$S(\gamma, f) = \sum_{m=0}^{M-1} A_m e^{jm\beta} e^{jm\frac{2\pi f}{c} d \cos \gamma} \quad (2.21)$$

Για να στραφεί ο κύριος λοβός σε γωνία γ_0 , η φασική διέγερση του m -οστού στοιχείου δίνεται από τη σχέση 2.17, η οποία επαναλαμβάνεται παρακάτω για λόγους ευκολίας:

$$\beta = -k d \cos \gamma_0 \quad (2.22)$$

Ολισθητής σταθερής φάσης

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η διαφορά φάσης που εισάγεται από τον ολισθητή σταθερής φάσης είναι σταθερή ως προς τη συχνότητα. Αυτό μαθηματικά εκφράζεται με την παρακάτω σχέση, βάσει της 2.22:

$$\beta = -k_0 d \cos \gamma_0 = -\frac{2\pi f_0}{c} d \cos \gamma_0 \quad (2.23)$$

όπου ο υποδείκτης 0 δηλώνει σταθερή συχνότητα, την ονομαστική συχνότητα λειτουργίας του συστήματος.

Είναι λοιπόν εμφανές ότι στην παραπάνω εξίσωση η ολίσθηση φάσης δεν εξαρτάται από τη συχνότητα. Εισάγοντας την εξίσωση 2.23 στην 2.21, προκύπτει:

$$S(\gamma, f) = \sum_{m=0}^{M-1} A_m e^{jm\frac{2\pi f}{c} d (\cos \gamma - \frac{f_0}{f} \cos \gamma_0)} \quad (2.24)$$

Η γωνία μέγιστης ακτινοβολίας όπως είδαμε προηγουμένως είναι εκείνη για την οποία ο εκθέτης μηδενίζεται, άρα η γωνία για την οποία ισχύει:

$$\cos \gamma = \frac{f_0}{f} \cos \gamma_0 \quad (2.25)$$

$$\gamma = \arccos\left[\frac{f_0}{f} \cos \gamma_0\right] \quad (2.26)$$

Η παραπάνω εξίσωση υποδηλώνει την εξάρτηση της γωνίας μέγιστης ακτινοβολίας από τη συχνότητα. Όταν το σύστημα λειτουργεί στην ονομαστική συχνότητα λειτουργίας f_0 , τότε το διάγραμμα στρέφεται στην επιθυμητή κατεύθυνση γ_0 . Σε κάθε άλλη περίπτωση εμφανίζεται μία απόκλιση μεταξύ της επιθυμητής κατεύθυνσης ακτινοβολίας και της πραγματικής κατεύθυνσης μέγιστης ακτινοβολίας. Αυτή η απόκλιση ονομάζεται *αλληθώρισμα λόγω συχνότητας* (frequency beamsquint). Αποτέλεσμα του φαινομένου αυτού είναι ότι οι διάφορες φασματικές συνιστώσες του σήματος πληροφορίας, λόγω της εγγενούς απόκλισής τους από την ονομαστική συχνότητα λειτουργίας, μεταδίδονται σε διαφορετικές κατευθύνσεις. Καθίσταται λοιπόν εμφανές ότι η ύπαρξη αυτού του φαινομένου περιορίζει δραματικά την ικανότητα του συστήματος να επεξεργαστεί και να μεταδώσει ευρυζωνικά σήματα πληροφορίας.

Ολισθητής σταθερής καθυστέρησης

Ας αναλύσουμε τώρα τί γίνεται όταν χρησιμοποιείται μια γραμμή καθυστέρησης για την εισαγωγή της επιθυμητής διαφοράς φάσης. Η διαφορά φάσης που δημιουργείται από μία γραμμή καθυστέρησης μήκους L είναι:

$$\beta = -bL \quad (2.27)$$

όπου $b = 2\pi/\lambda = 2\pi f/U_p$, η σταθερά διάδοσης σε μία γραμμή καθυστέρησης χωρίς απώλειες, λ το μήκος κύματος και $U_p = 1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0\epsilon_r}$ είναι η ταχύτητα φάσης μέσα στη γραμμή καθυστέρησης. Τα μεγέθη μ_0 , ϵ_0 είναι η μαγνητική διαπερατότητα και η ηλεκτρική επιτρεπτότητα στο κενό αντίστοιχα, και ϵ_r η σχετική διηλεκτρική σταθερά του υλικού.

Το μήκος της γραμμής που χρησιμοποιείται για τη τροφοδότηση του ρεύματος στο m -οστό στοιχείο καθορίζεται μονοσήμαντα χρησιμοποιώντας τη σχέση 2.22 ως:

$$\underbrace{m\beta = -mkdcos\gamma_0}_{\text{επιθυμητή διέγερση φάσης}} = -bL_m = -\frac{2\pi f}{U_p}L_m \quad (2.28)$$

Αναλύοντας την παραπάνω σχέση, κάνοντας χρήση της 2.20 και αντικαθιστώντας $c = 1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$, το κατάλληλο μήκος για στροφή γ_0 προκύπτει:

$$L_m = m \frac{U_p(f_0)}{c} dcos\gamma_0 = \frac{mdcos\gamma_0}{\sqrt{\epsilon_r(f_0)}} \quad (2.29)$$

Σε γραμμή μεταφοράς χωρίς φαινόμενα διασποράς, η σχετική διηλεκτρική ϵ_r σταθερά του υλικού είναι σταθερή ως προς τη συχνότητα. Κατεπέκταση, η ταχύτητα φάσης U_p είναι σταθερή ως προς τη συχνότητα και άρα όλες οι φασματικές συνιστώσες που συντελούν το σήμα διαδίδονται με την ίδια ταχύτητα. Αυτό επιβεβαιώνει το γεγονός ότι η διαφορά φάσης bL_m όπου $b = 2\pi f/U_p$ είναι γραμμική ως προς τη συχνότητα. Βάσει λοιπόν των παραπάνω προκύπτει:

$$m\beta = -m \frac{2\pi f}{c} dcos\gamma_0 \frac{\sqrt{\epsilon_r(f)}}{\epsilon_r(f_0)} \quad (2.30)$$

όπου στην περίπτωση που δεν υπάρχουν φαινόμενα διασποράς στη γραμμή μεταφοράς, όπως συζητήθηκε παραπάνω, προκύπτει

$$m\beta = -m \frac{2\pi f}{c} d \cos \gamma_0 \quad (2.31)$$

Τέλος, αντικαθιστώντας την παραπάνω σχέση στον παράγοντα διάταξης της σχέσης 2.21 καταλήγουμε στο παρακάτω αποτέλεσμα:

$$S(\gamma, f) = \sum_{m=0}^{M-1} A_m e^{jm \frac{2\pi f}{c} d (\cos \gamma - \cos \gamma_0)} \quad (2.32)$$

Παρατηρούμε τώρα ότι η γωνία για την οποία μεγιστοποιείται ο παράγοντας διάταξης, δηλαδή η γωνία που μηδενίζει τον εκθέτη είναι η $\gamma = \gamma_0$, και είναι ανεξάρτητη της συχνότητας.

Κεφάλαιο 3

Οπτικά Δίκτυα Σχηματοποίησης Δέσμης

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα συζητηθούν βασικές οπτικές διατάξεις που συνατώνται σε μία IMWP δομή, αναλύοντας συνοπτικά τη λειτουργία τους, οι οποίες αποτελούν και το θεωρητικό υπόβαθρο των οπτικών δικτύων σχηματοποίησης δέσμης που μελετάει η παρούσα διπλωματική εργασία. Θα γίνει αναφορά στην ήδη υπάρχουσα μελέτη της ερευνητικής κοινότητας σε διάφορες τεχνικές οπτικής σχηματοποίησης δέσμης αλλά και σχηματοποίηση δέσμης για εφαρμογές πολυεκπομπής, και θα αναλυθούν οι αρχές λειτουργίας των δύο διαφορετικών οπτικών διατάξεων που θα μας απασχολήσουν.

3.1 Βασικές Οπτικές Διατάξεις

Για την κατανόηση των διατάξεων οπτικής σχηματοποίησης δέσμης που θα συζητηθούν παρακάτω, απαραίτητη προϋπόθεση είναι πρώτα η κατανόηση των επιμέρους οπτικών διατάξεων που τις αποτελούν. Για το σκοπό αυτό στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο θα γίνει συνοπτική ανάλυση των στοιχείων που συνιστούν κάθε διάταξη ξεχωριστά, καθώς και των κοινών στοιχείων μεταξύ των δύο, στοιχεία που αποτελούν θεμέλια ενός IMWP συστήματος.

3.1.1 Θεμελιώδη στοιχεία ενός IMWP συστήματος

Οπτικές Πηγές

Η οπτική πηγή αποτελεί το βασικό στοιχείο ενός οπτικού συστήματος επικοινωνιών, και κατεπέκταση ενός συστήματος MWP ή IMWP. Ως οπτική πηγή μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε μία δίοδος εκπομπής φωτός (Light Emitting Diode, LED) είτε ένα laser ημιαγωγού. Η επιλογή του κάθε ενός από τα παραπάνω επηρεάζει σημαντικά την απόδοση του συνολικού συστήματος, λόγω των διαφορών που υπάρχουν εγγενώς σε αυτά τα δύο. Στις περισσότερες περιπτώσεις, και στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, ως οπτική πηγή χρησιμοποιείται laser ημιαγωγού λόγω:

- Του στενού φασματικού εύρους και άρα της καλής χρονικής συμφωνίας

- Της ευκολίας σύζευξης του παραγόμενου φωτός στις οπτικές ίνες, και
- Του μικρού μεγέθους, της αξιοπιστίας και της υψηλής απόδοσης

Σε ότι αφορά τη συχνότητα λειτουργίας των laser, συνήθως επιλέγεται η περιοχή των 1550 nm, το οποίο ισοδυναμεί στην περιοχή των 193.4 THz, λόγω των χαμηλών απωλειών ισχύος που παρατηρούνται σε αυτές τις περιοχές. Έτσι, και στη συγκεκριμένη διπλωματική θεωρείται laser συνεχούς κύματος (Continuous Wave, CW) που λειτουργεί σε αυτήν την περιοχή. Το ιδανικό πεδίο που δημιουργεί μία τέτοια οπτική πηγή είναι:

$$\vec{E}_{cw} = \sqrt{P_s} \vec{e}_s e^{j(\omega_s t + \varphi_s)} \quad (3.1)$$

όπου $\sqrt{P_s}$ το πλάτος του πεδίου, ω_s , φ_s και e_s η κυκλική συχνότητα, η φάση και η πόλωση του οπτικού φέροντος αντίστοιχα.

Διαμορφωτές

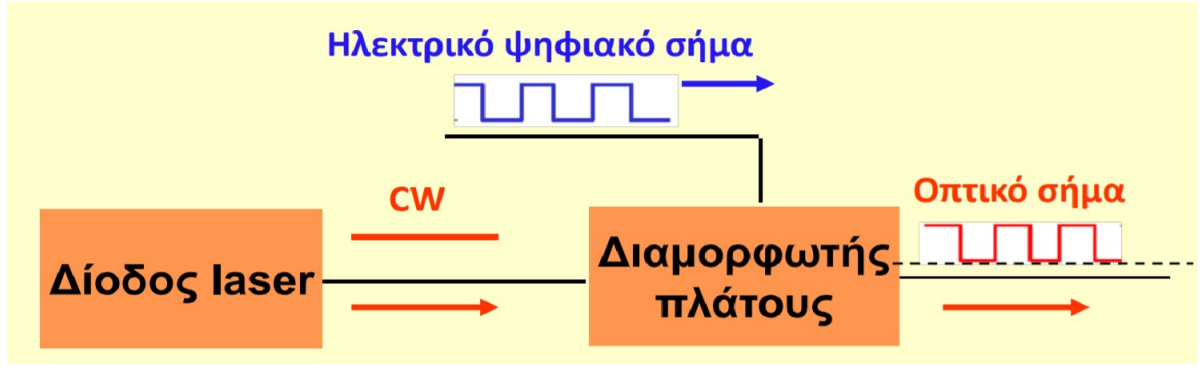
Η οπτική διαμόρφωση αποτελεί θεμελιώδη διαδικασία στα MWP συστήματα καθώς αποτελεί τη γέφυρα μετάβασης από το μικροκυματικό στο οπτικό πεδίο. Η μετατροπή αυτή από τον ηλεκτρικό στον οπτικό τομέα έχει σαν στόχο να "γραφτεί" η πληροφορία που υπάρχει στο ηλεκτρικό σήμα πάνω στο οπτικό φέρον. Για τη διαμόρφωση υπάρχουν δύο κατάρχην διαφορετικές τεχνικές: η εξωτερική και η απευθείας διαμόρφωση. Στο σύστημα με το οποίο ασχολείται η παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται χρήση τεχνικών εξωτερικής διαμόρφωσης, με δύο διαμορφωτές βασισμένους σε διαφορετικά φαινόμενα για την πραγματοποίηση της διαμόρφωσης.

Ο πρώτος διαμορφωτής που χρησιμοποιήθηκε είναι ένας Mach Zehnder Modulator (MZM) ο οποίος βασίζεται στο Ηλεκτρο-οπτικό φαινόμενο (Φαινόμενο Pockels). Το φαινόμενο αυτό εκμεταλλεύεται τη συσχέτιση που υπάρχει μεταξύ της φάσης ενός κύματος που κυματοδηγείται και του δείκτη διάθλασης του κυματοδηγού, και εφαρμόζοντας τάση μέσω του ηλεκτρικού σήματος πληροφορίας, διαφοροποιεί το δείκτη διάθλασης και κατεπέκταση τη φάση του κύματος που οδηγείται. Για τη μετατροπή της διαφοράς φάσης σε διαφορά (διαμόρφωση) πλάτους γίνεται χρήση συμβολόμετρου Mach-Zehnder (MZI), στου οποίου την λειτουργία θα γίνει αναφορά στη συνέχεια.

Ο δεύτερος διαμορφωτής που χρησιμοποιήθηκε στο σύστημα είναι ένας Ηλεκτρο-απορροφητικός διαμορφωτής (Electro-absorption modulator, EAM) του οποίου η λειτουργία βασίζεται στο ηλεκτρο-απορροφητικό φαινόμενο. Το φαινόμενο αυτό περιγράφει την εξάρτηση του συντελεστή απορρόφησης συγκεκριμένων υλικών από την εφαρμοζόμενη ηλεκτρική τάση.

Φωτοανίχνευση

Η διαδικασία της φωτοανίχνευσης αποτελεί τη μετάβαση από το οπτικό πεδίο στο ηλεκτρικό, επιτελώντας επί της ουσίας την αντίστροφη λειτουργία από αυτήν της οπτικής διαμόρφωσης. Καθίσταται λοιπόν εμφανές ότι η φωτοανίχνευση αποτελεί θεμελιώδη κομμάτι των MWP ζεύξεων. Η πιο συνήθης διάταξη φωτοανίχνευσης είναι η φωτοδίοδος p-i-n η οποία παράγει



Σχήμα 3.1: Εξωτερική Διαμόρφωση

ζεύγη ηλεκτρονίων από τα προσκρουόμενα φωτόνια στην είσοδό της. Η παρακάτω σχέση δείχνει τη σχέση παραγόμενου ρεύματος - λαμβανόμενης οπτικής ισχύος της φωτοδιόδου:

$$I_{pin} = \eta \frac{\lambda q}{hc} = R \times P \quad (3.2)$$

όπου η η αποδοτικότητα της φωτοδιόδου, q το φορτίο του ηλεκτρονίου, c η ταχύτητα του φωτός και $\frac{\lambda}{h}$ η ενέργεια του φωτονίου. Αξίζει να σημειωθεί πως το ρεύμα που παράγεται και άρα το σήμα στην έξοδο της φωτοδιόδου είναι ανάλογο του τετραγώνου του πλάτους του οπτικού σήματος στην είσοδο της φωτοδιόδου, όπως φαίνεται στις παρακάτω σχέσεις:

$$I = P \propto |E|^2 \quad (3.3)$$

ή

$$y(t) \propto x(t) \times x^*(t) \quad (3.4)$$

όπου $x(t)$ το προσπίπτον οπτικό σήμα στη φωτοδιόδο, $x^*(t)$ ο μιγαδικός συζυγής του και $y(t)$ το ηλεκτρικό σήμα στην έξοδο της φωτοδιόδου. Η εξίσωση 3.4, στο πεδίο της συχνότητας υποδηλώνει συνέλιξη των δύο αυτών σημάτων όπως φαίνεται παρακάτω:

$$Y(F) \propto X(F) * X^*(-F) \quad (3.5)$$

Η παραπάνω σχέση θα φανεί πολύ χρήσιμη στη συνέχεια της εργασίας.

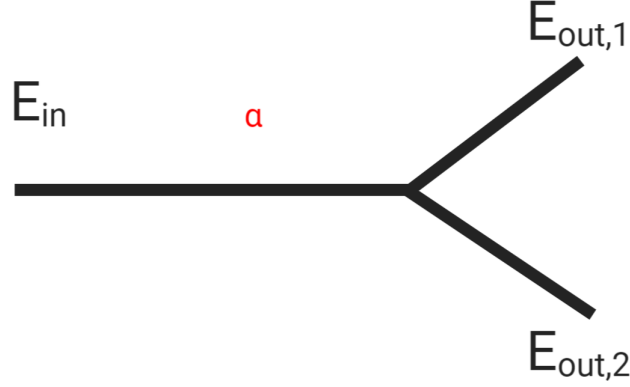
Βάσει των 3.3, 3.4 προκύπτει ότι στην έξοδο της φωτοδιόδου χάνεται η πληροφορία της φάσης του προσπίπτοντος σήματος. Ένας τρόπος για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού είναι η επανασύνδεση του φέροντος σήματος πριν την πρόσπτωση στην είσοδο της φωτοδιόδου [19].

3.1.2 Οπτικές Διατάξεις για τον βασισμένο σε TTD στοιχείο OBFN

Πέρα από τις διατάξεις που συζητήθηκαν παραπάνω, για την κατανόηση του οπτικού δικτύου σχηματοποίησης δέσμης που βασίζεται στα στοιχεία πραγματικής καθυστέρησης, απαραίτητη είναι η κατανόηση των παρακάτω στοιχείων:

Οπτικοί Διαχωριστές

Πρόκειται για παθητικές διατάξεις, διαστάσεων $1 \times N$ που χρησιμοποιούνται για τον διαχωρισμό της ισχύος του σήματος εισόδου στις N εξόδους. Στις περισσότερες περιπτώσεις, όπως και στην παρούσα διπλωματική εργασία, χρησιμοποιούνται 1×2 διαχωριστές. Η αναλογία ισχύος μεταξύ των δύο εξόδων ονομάζεται λόγος διαχωρισμού και αποτελεί το κύριο χαρακτηριστικό αυτών των διατάξεων.



Σχήμα 3.2: Οπτικός Διαχωριστής Δύο Εξόδων

Σύμφωνα με τα παραπάνω προκύπτει:

$$E_{out,1} = \sqrt{\alpha} \times E_{in} \quad (3.6)$$

$$E_{out,2} = \sqrt{1 - \alpha} \times E_{in} \quad (3.7)$$

Οπτικές Γραμμές Καθυστέρησης

Οι οπτικές γραμμές καθυστέρησης (Optical Delay Lines, ODLs) αποτελούν ένα στοιχείο εισαγωγής πραγματικής καθυστέρησης και χρησιμοποιούνται με σκοπό, όπως προδίδει το όνομά τους, να εισάγουν χρονική καθυστέρηση στο προσπίπτον σήμα. Πρόκειται για ρυθμιζόμενη διάταξη, γεγονός που προσφέρει ευελιξία στην εισαγόμενη καθυστέρηση και κατά συνέπεια στη διαφορά φάσης του σήματος στην έξοδο του ODL ως προς το αντίστοιχο σήμα στην είσοδο. Στο συγκεκριμένο σημείο αξίζει να υπενθυμιστεί μία βασική ιδιότητα του Μετασχηματισμού Fourier:

$$x(t - t_o) \xrightarrow{\mathcal{F}} X(\omega)e^{-j\omega t_o} \quad (3.8)$$

Ο βασικός λόγος που χρησιμοποιούνται ODLs στο παρόν σύστημα οπτικής σχηματοποίησης δέσμης είναι η ανάγκη για εισαγωγή διαφοράς φάσης με τρόπο τέτοιο ώστε να μην χαθεί η συγκεκριμένη πληροφορία κατά την φωτοανίχνευση του σήματος από τη φωτοδίοδο. Εισάγοντας λοιπόν καθυστέρηση στο πεδίο του χρόνου, η συγκεκριμένη πληροφορία παραμένει αναλλοίωτη κατά την έξοδο του σήματος από τη φωτοδίοδο.

Οπτικοί Εξασθενητές

Οι οπτικοί εξασθενητές χρησιμοποιούνται για την εξασθένιση του οπτικού σήματος εισόδου με σκοπό την επίτευξη του επιθυμητού πλάτους στην εκάστοτε περίπτωση. Στη συγκεκριμένη διάταξη της διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιούνται με σκοπό την προσαρμογή του διαγράμματος ακτινοβολίας, και την επίτευξη των επιθυμητών διεγέρσεων των πλατών των ρευμάτων που τροφοδοτούνται στα στοιχεία της κεραίας, όπως συζητήθηκε στην παράγραφο 2.3.2.

3.1.3 Οπτικές Διατάξεις για τον Blass Matrix OBFN

Αντίστοιχα, στον OBFN που είναι βασισμένος σε διάταξη Blass Matrix, θα συζητηθούν οι παρακάτω διατάξεις.

Ολισθητές Σταθερής Φάσης

Οι οπτικοί ολισθητές φάσης βασίζονται στο ηλεκτρο-οπτικό φαινόμενο που συζητήθηκε παραπάνω, εκμεταλλευόμενοι το γεγονός ότι ο δείκτης διάθλασης του υλικού και συνεπώς ο ενεργός δείκτης διάθλασης του κυματοδηγού σε συγκεκριμένα υλικά αλλάζει αν εφαρμοστεί η κατάλληλη εξωτερική τάση. Εμπορικά συνήθως χρησιμοποιούνται κυματοδηγοί τοποθετημένοι σε ένα ηλεκτρο-οπτικό υπόστρωμα κατασκευασμένο από νιοβικό λίθιο (LiNbO_3). Η σχέση που περιγράφει τα παραπάνω είναι:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta n}{\lambda}L \quad (3.9)$$

και

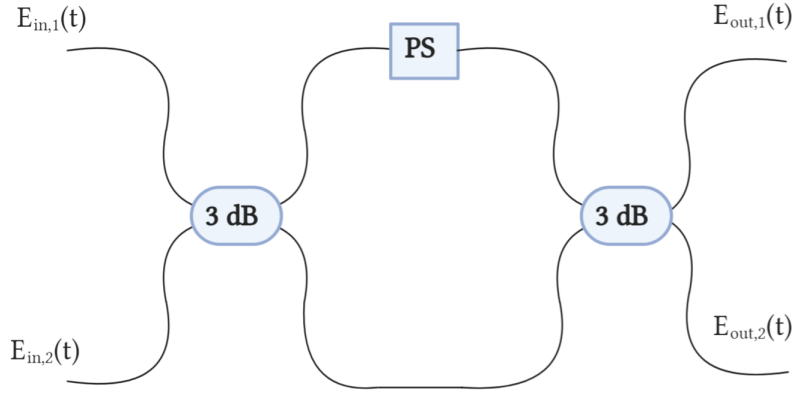
$$\Delta n \propto rE \quad (3.10)$$

όπου r , ηλεκτρο-οπτικός συντελεστής.

Συμβολόμετρα Mach Zehnder

Πρόκειται για διατάξεις οι οποίες, εκμεταλλευόμενες το ηλεκτρο-οπτικό φαινόμενο, καταφέρνουν να ρυθμίζουν το πλάτος του σήματος στην έξοδό τους. Ο τρόπος με τον οποίο το πετυχαίνουν αυτό βασίζεται στο φαινόμενο της συμβολής κυμάτων, κατά το οποίο δύο κύματα όταν προστίθενται (συμβάλλουν), και έχουν σχετική διαφορά φάσης 0 ή ακέραιο πολλαπλάσιο του 2π , τότε το πλάτος του συνολικού κύματος μεγιστοποιείται και λέμε ότι έχουμε *ενισχυτική συμβολή*, ενώ όταν η σχετική διαφορά φάσης ανάμεσα στα δύο κύματα είναι περιττό πολλαπλάσιο του π , το πλάτος του συμβαλλόμενου κύματος μηδενίζεται, στην οποία περίπτωση λέμε ότι έχουμε *αναιρετική συμβολή*. Ένα τέτοιο συμβολόμετρο παρουσιάζεται στο σχήμα 3.3.

Όπως φαίνεται, πρόκειται για οπτική διάταξη 2×2 που περιέχει οπτικούς συζεύκτες και στροφείς φάσης με σκοπό τον έλεγχο του τρόπου με τον οποίο συμβάλλουν τα κύματα στις εξόδους του. Τα MZI χαρακτηρίζονται από τους συντελεστές r, k που ονομάζονται



Σχήμα 3.3: Συμβολόμετρο Mach Zehnder

συντελεστής αυτοσύζευξης (self-coupling coefficient) και συντελεστής ετεροσύζευξης (cross-coupling coefficient). Οι δύο αυτοί συντελεστές, για κάθε ένα από τα δύο σήματα εισόδου ορίζονται ως εξής:

$$r_1 = \frac{1}{2}(e^{j\varphi} - 1) \quad (3.11)$$

$$r_2 = \frac{1}{2}(-e^{j\varphi} + 1) = -r_1 \quad (3.12)$$

$$k_1 = \frac{1}{2}e^{j\frac{\pi}{2}}(e^{j\varphi} + 1) \quad (3.13)$$

$$k_2 = \frac{1}{2}e^{j\frac{\pi}{2}}(e^{j\varphi} + 1) = k_1 \quad (3.14)$$

όπου φ η ολίσθηση φάσης που προκαλείται από τους ολισθητές φάσης.

Βάσει των εξισώσεων 3.11 - 3.14, για τους συντελεστές ισχύει

$$|k_1|^2 + |r_1|^2 = |k_2|^2 + |r_2|^2 = 1 \quad (3.15)$$

Έτσι, τα πεδία στην έξοδο του συμβολόμετρου, συναρτήσει των αντίστοιχων πεδίων στην είσοδο γράφονται:

$$E_{out,1} = r_1 \cdot E_{in,1} + k_2 \cdot E_{in,2} \quad (3.16\alpha')$$

$$E_{out,2} = k_1 \cdot E_{in,1} + r_2 \cdot E_{in,2} \quad (3.16\beta')$$

3.2 Περιγραφή Διατάξεων OBFN

Στο σημείο αυτό σημειώνεται ότι οι διατάξεις που θα συζητηθούν μελετήθηκαν από τα μέλη του Εργαστηρίου Φωτονικών Επικοινωνιών στα [19], [20], υπό το πρίσμα του Ευρωπαϊκού Ερευνητικού Προγράμματος ICT-Hamlet (Contract Number:688750). Στόχος της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η γενικοποίηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν κατά

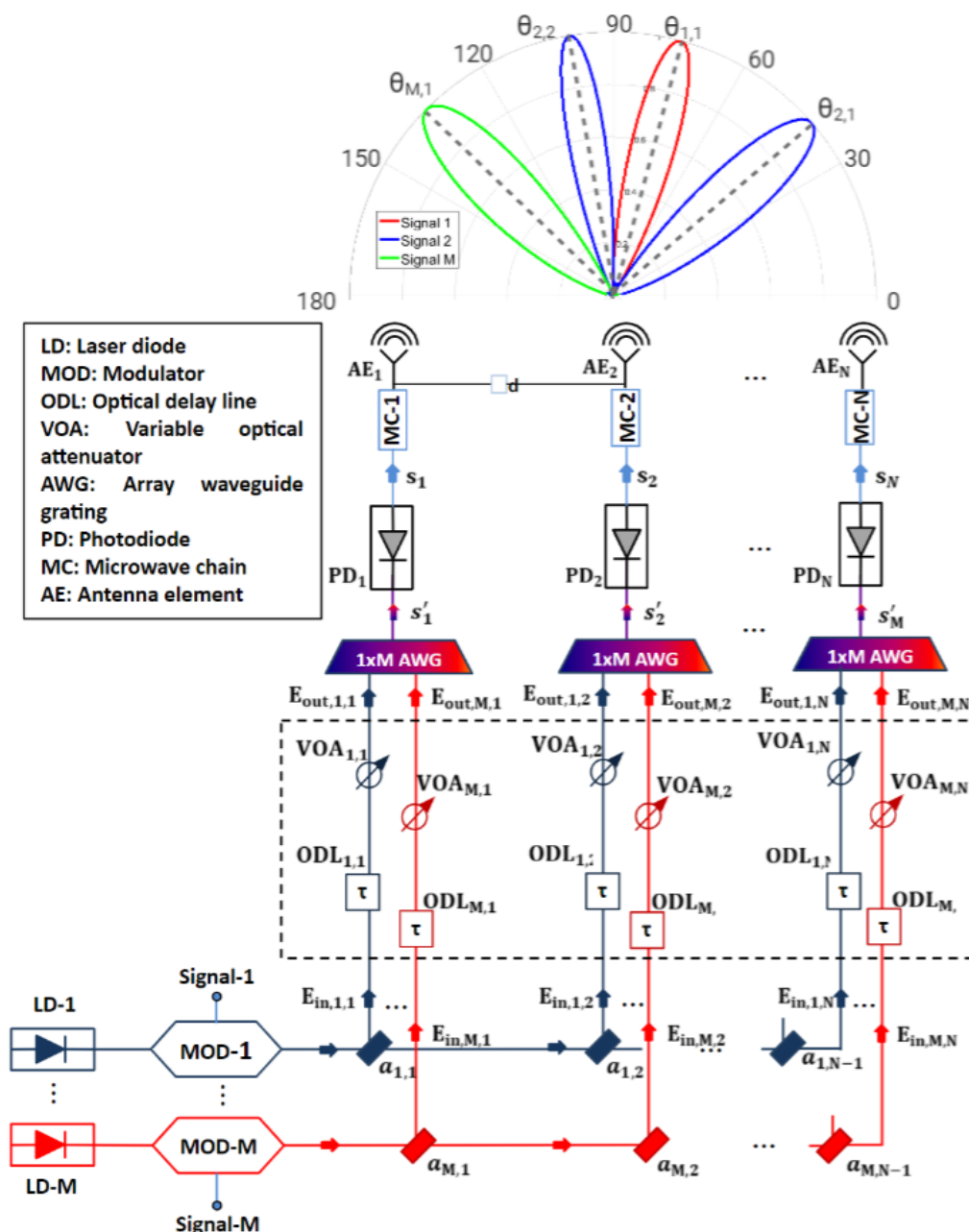
την εκπόνηση του ICT-Hamlet, ώστε τα δίκτυα αυτά να περιλαμβάνουν δυνατότητες πολυεκπομπής (multicast), για μεταδόσεις Point to Multipoint, αλλά και δυνατότητες ταυτόχρονης μετάδοσης μονοεκπομπής (unicast, Point to Point) και πολυεκπομπής διαφορετικών πληροφοριών στους ενδιαφερόμενους χρήστες, αυξάνοντας σημαντικά το βαθμό πολυπλοκότητας του συστήματος..

Έχουν γίνει διάφορες προσπάθειες από την ερευνητική κοινότητα πάνω στα δίκτυα σχηματοποίησης δέσμης. Μερικές από αυτές φαίνονται στη βιβλιογραφία. Σε ό,τι αφορά τα οπτικά δίκτυα σχηματοποίησης δέσμης, έχουν προταθεί πολλές διαφορετικές τεχνικές που περιλαμβάνουν οπτικά μικρό-δαχτυλίδια αντηχητών (Optical Micro-Ring Resonators), χωρικούς διαμορφωτές φωτός (Spatial Light Modulators), κιγκλιδώματα ίνας (Fiber Gratings) κ.α. Η πλειοψηφία των τεχνικών αυτών περιορίζεται στην παραγωγή ενός μόνο λοβού ακτινοβολίας και άρα στη μετάδοση ενός μόνο σήματος πληροφορίας [6],[14]. Στα [2]-[5] φαίνονται προσπάθειες που έχουν γίνει για σχηματοποίηση πολλαπλών δεσμών με οπτικά δίκτυα σχηματοποίησης δέσμης, τα περισσότερα εκ των οποίων υστερούν ως προς την ευελιξία του συστήματός τους, καθώς έχουν σχεδιαστεί με διακριτά στοιχεία, και όχι ρυθμιζόμενα, και άρα δεν προσφέρουν επιλογή συνεχόμενων γωνιών, αλλά διακριτών. Επίσης, στα [4]-[9] εντοπίζονται προσπάθειες για υλοποίηση δικτύων σχηματοποίησης δέσμης, τα οποία υποστηρίζουν εφαρμογές πολυεκπομπής. Οι προτάσεις αυτές όμως περιορίζονται σε μικροκυματικές τεχνικές. Μέχρι την ημερομηνία υλοποίησης της συγκεκριμένης διπλωματικής, φαίνεται να γίνεται προσπάθεια για πρώτη φορά για οπτικά δίκτυα σχηματοποίησης δέσμης που να υποστηρίζουν και εφαρμογές πολυεκπομπής.

3.2.1 Περιγραφή Διάταξης OBFN Βασισμένης σε TTD Στοιχεία

Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο θα περιγραφεί η πρώτη διάταξη OBFN από τις δύο που μελετήθηκαν στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία. Η διάταξη αυτή βασίζεται όπως είδαμε παραπάνω στη χρήση οπτικών γραμμών καθυστέρησης για την εισαγωγή της κατάλληλης διαφοράς φάσης στα ρεύματα των στοιχειοκεραίων και οπτικών εξασθενητών για την κατάλληλη προσαρμογή των πλατών, δημιουργώντας εν τέλει την επιθυμητή διέγερση στα στοιχεία των κεραίων, σύμφωνα με την εκάστοτε επιθυμητή λειτουργία. Η διάταξη για την downlink και την uplink κατεύθυνση παρουσιάζεται στα σχήματα 3.4 και 3.5 αντίστοιχα.

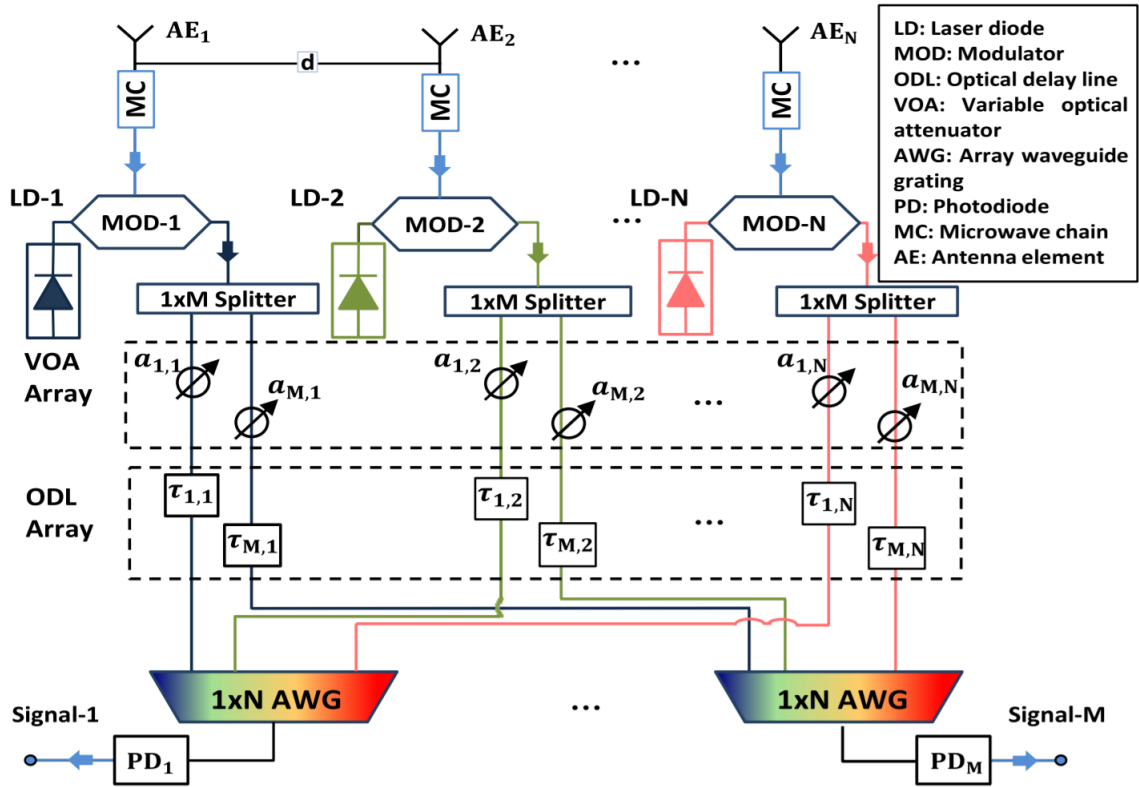
Η διάταξη του σχήματος απεικονίζει ένα $M \times N$ δίκτυο σχηματοποίησης δέσμης, όπου M είναι τα διαφορετικά σήματα πληροφορίας και N τα συνολικά στοιχεία της κεραίας. Η ανάλυση έχει γίνει αναλυτικά στο [20] αλλά για λόγους ευκολίας και για να δειχθούν οι διαφοροποιήσεις του συγκεκριμένου σχεδιασμού, επαναλαμβάνονται τα βασικά στοιχεία της ανάλυσης εδώ. Μία σημαντική διαφορά σε σχέση με την ήδη υπάρχουσα ανάλυση είναι ότι στην επερχόμενη ανάλυση, με M συμβολίζονται τα διαφορετικά σήματα πληροφορίας που επιθυμούμε να στείλουμε σε αντίθεση με την ανάλυση στο [20], κατά την οποία M ήταν τόσο τα διαφορετικά σήματα πληροφορίας όσο και οι συνολικοί λοβοί πληροφορίας (beams) που δημιουργούσε η στοιχειοκεραία. Αυτό συμβαίνει καθώς η ανάλυση που διεκπεραιώνεται στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία έχει ως βασικό άξονα το φαινόμενο της πολυεκπομπής, κατά το οποίο ένα



Σχήμα 3.4: Πρώτη Διάταξη: OBFN Βασισμένο σε TTD στοιχεία - Downlink Κατεύθυνση

σήμα πληροφορίας μεταδίδεται σε παραπάνω από μία κατεύθυνση, και επομένως δημιουργεί πάνω από έναν λοβό. Έτσι, με K θα συμβολίζεται από εδώ και στο εξής ο συνολικός αριθμός των λοβών που δημιουργούνται και θα ισχύει προφανώς $M \leq K$.

Για την περιγραφή της λειτουργίας της παραπάνω διάταξης στην downlink κατεύθυνση θεωρούμε ένα μονοπάτι από τα M της διάταξης. Αρχικά το laser δημιουργεί ένα οπτικό φέρον που ταλαντώνεται στην περιοχή των 1550 nm (193.4 THz). Το οπτικό αυτό φέρον διαμορφώνεται από τον αντίστοιχο μικροκυματικό carrier με τρόπο όπως αυτοί που συζητήθηκαν σε προηγούμενες παραγράφους. Στη συνέχεια, το σήμα αυτό προωθείται σε μία σειρά από



Σχήμα 3.5: Πρώτη Διάταξη: OBFN Βασισμένο σε TTD στοιχεία - Uplink Κατεύθυνση

$N - 1$ οπτικούς διαχωριστές με απώτερο σκοπό την εξασφάλιση του σωστού διαμοιρασμού της ισχύος σε κάθε ένα από τα N μονοπάτια που οδηγούν στα αντίστοιχα στοιχεία της κεραίας. Για την επίτευξη της παραπάνω συνθήκης, ο λόγος διαχωρισμού κάθε ενός από τους $N-1$ διαχωριστές είναι:

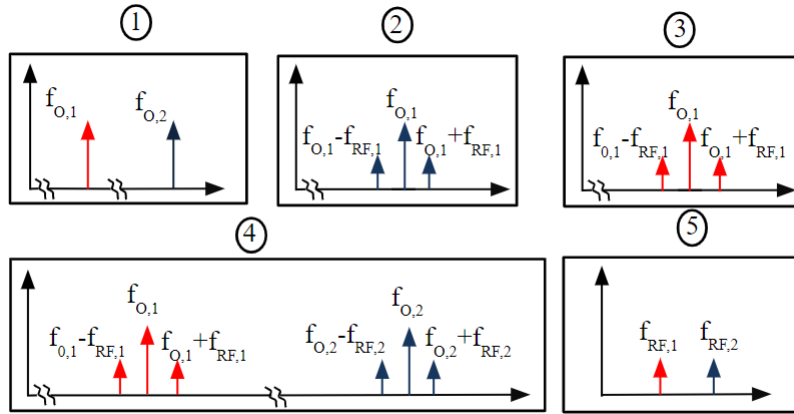
$$a_{m,i} = \frac{1}{N - i + 1} \quad i = 1, 2, \dots, N - 1 \quad (3.17)$$

όπου το m δηλώνει τα διάφορα μονοπάτια για τα αντίστοιχα σήματα πληροφορίας (εδώ θεωρήσαμε 1). Σημειώνεται ότι με a συμβολίζεται ο συντελεστής επί της μονάδας της ισχύος που προχωράει προς τον OBFN και επομένως $1 - a$ προχωράει προς τον επόμενο διαχωριστή.

Κάθε ένα από τα N μονοπάτια που υπάρχουν στον OBFN αποτελείται από μία γραμμή καθυστέρησης (Optical Delay Line, ODL) που εισάγει χρονική καθυστέρηση, και έναν ρυθμιζόμενο οπτικό ενισχυτή (Variable Optical Attenuator, VOA) για την κατάλληλη ρύθμιση του πλάτους. Με αυτόν τον τρόπο καταφέρνουμε να ρυθμίσουμε πλήρως το οπτικό σήμα, το οποίο θα μετατραπεί σε ρεύμα στην έξοδο της φωτοδιόδου. Για στροφή της παραγόμενης δέσμης σε γωνία γ_0 , η καθυστέρηση που πρέπει να εισάγει το n -οστό στοιχείο βάσει των εξισώσεων 2.17, 3.8 είναι:

$$\tau_n = \frac{nd \cos \gamma}{c} \quad n = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (3.18)$$

Σε ότι αφορά τους εξασθενητές, ο ρόλος τους είναι να ρυθμίζουν την αναλογία των πλατών των τροφοδοτούμενων σημάτων στα στοιχεία της κεραίας, ανάλογα με την επιθυμητή διέγερση. Τα σήματα που προκύπτουν μετά τους εξασθενητές τροφοδοτούνται σε έναν $1 \times M$ AWG (Array Waveguide Grating), ο οποίος πρακτικά επιτελεί το ρόλο ενός $1 \times M$ πολυπλέκτη. Το σήμα στην έξοδό του, δεν είναι παρά η επαλληλία των τροφοδοτούμενων M σημάτων. Φασματικά μετά τον AWG έχουμε διάφορους τόνους της τάξης των THz στις συχνότητες των M οπτικών φέροντων και, ανάλογα το σχήμα διαμόρφωσης, κάποιους τόνους σε απόσταση f_{RF} δεξιά και αριστερά από τα αντίστοιχα οπτικά φέροντα. Σχηματική απεικόνιση του φάσματος παρουσιάζεται στο σχήμα 3.6.



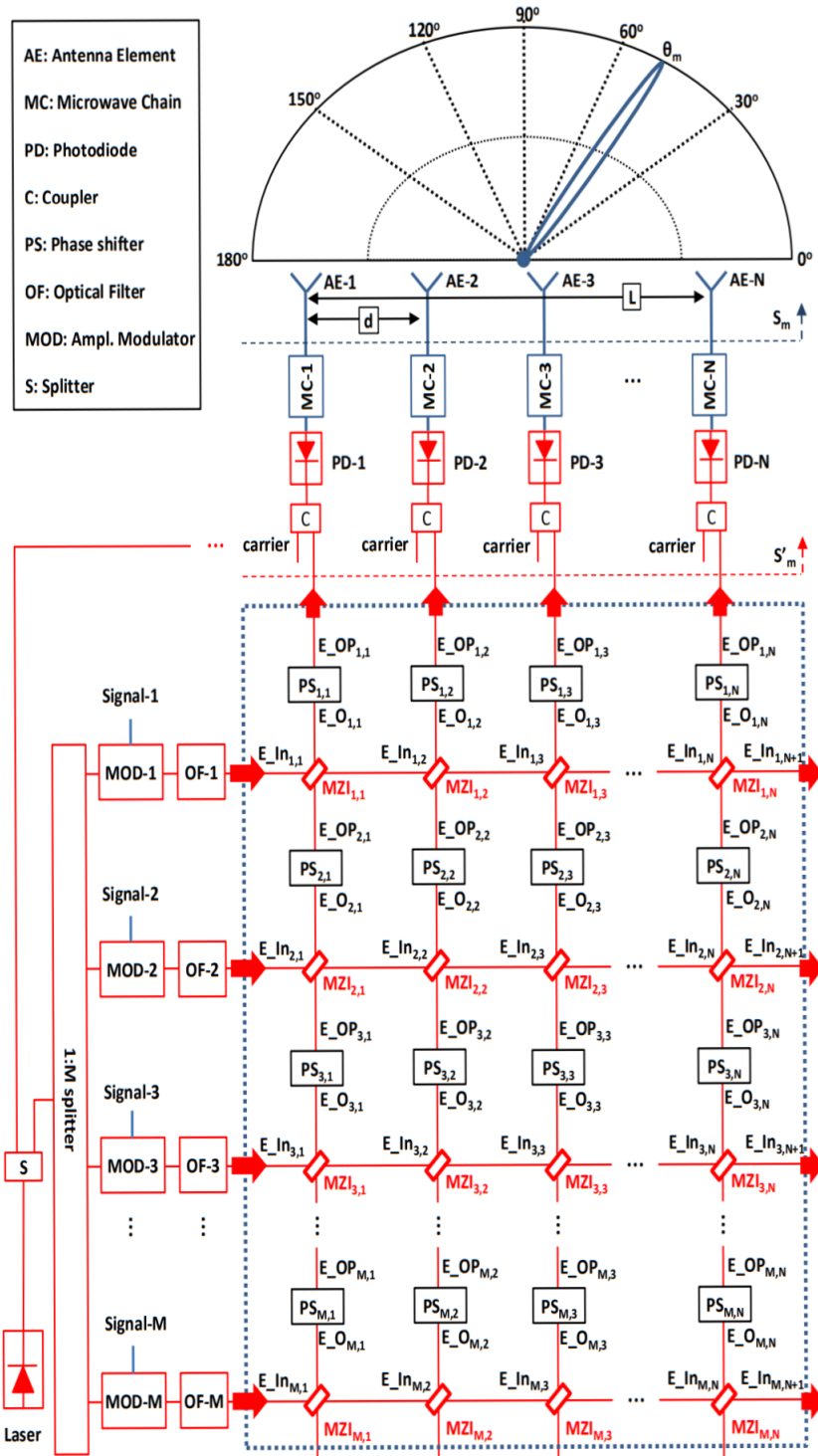
Σχήμα 3.6: Φασματική Απεικόνιση για τα Διάφορα Στάδια της Διάταξης OBPN με TTD Στοιχεία, για $M=2$ Σήματα Πληροφορίας. 1 $\rightarrow$ μετά τα lasers, 2,3 $\rightarrow$ μετά τους διαμορφωτές, 4 $\rightarrow$ μετά τον AWG, 5 $\rightarrow$ μετά τη φωτοδιόδο (Αγνοώντας τους τόνους που δεν ενδιαφέρουν)

Τα M οπτικά σήματα μετά τους AWG προσπίπτουν στις αντίστοιχες N φωτοδιόδους και προκύπτουν τα N ηλεκτρικά σήματα τα οποία περνούν από μικροκυματική αλυσίδα επεξεργασίας πριν εν τέλει καταλήξουν στα στοιχεία της κεραίας. Όπως είδαμε στο 3.5, η φωτοδιόδος επιτελεί την πράξη της συνέλιξης στο πεδίο της συχνότητας. Αυτό μαθηματικά σημαίνει ότι στην έξοδό της θα βλέπουμε τόνους, σε όλες τις ανά δύο συχνοτικές διαφορές των φασματικών τόνων από τους οποίους αποτελείται το σήμα εισόδου της φωτοδιόδου. Όλοι οι τόνοι που προκύπτουν από τη συνέλιξη, πέρα των επιθυμητών, απορρίπτονται λόγω του εύρους ζώνης λειτουργίας της κεραίας αλλά και μέσω κάποιου φίλτρου στη μικροκυματική αλυσίδα.

3.2.2 Περιγραφή Διάταξης OBPN - Blass Matrix

Η περιγραφή και η μαθηματική ανάλυση της συγκεκριμένης διάταξης έχει γίνει σε προηγούμενη διπλωματική του εργαστηρίου [16]. Για λόγους πληρότητας, και για την καλύτερη κατανόηση του Κεφαλαίου 4, οι βασικές αρχές λειτουργίας και οι σημαντικές διαφορές που παρουσιάζει η συγκεκριμένη διάταξη από την διάταξη που συζητήθηκε προηγουμένως αναφέρονται παρακάτω.

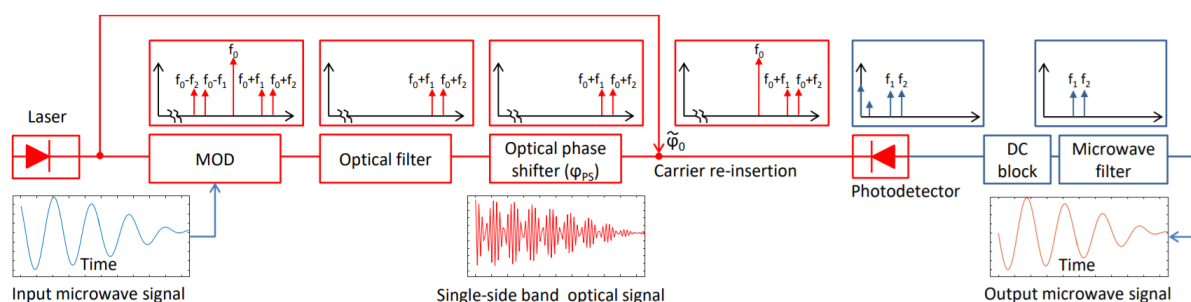
Η σχηματική αναπαράσταση της διάταξης απεικονίζεται στο σχήμα 3.7. Για την κατανόηση



Σχήμα 3.7: Σχηματική Αναπαράσταση OBFN - Blass Matrix Αρχιτεκτονικής

του σχήματος είναι απαραίτητη η κατανόηση της έννοιας της επανασύνδεσης φέροντος, και της χρησιμότητάς του. Όπως έχει αναφερθεί, η ειδοποιός διαφορά που παρουσιάζει η συγκεκριμένη διάταξη με την διάταξη των TTD στοιχείων είναι το γεγονός ότι χρησιμοποιεί ολισθητές

πραγματικής φάσης για τη στροφή του διαγράμματος ακτινοβολίας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να χάνεται η πληροφορία της φάσης, καθώς το σήμα διέρχεται από τη φωτοδίοδο, όπως συζητήθηκε προηγουμένως. Για την αντιμετώπιση του παραπάνω προβλήματος ακολουθείται η διαδικασία που παρουσιάζεται σχηματικά στο σχήμα 3.8. Όπως παρατηρούμε, το σήμα μετά τη διαμόρφωση περνάει από οπτικό φίλτρο στο οποίο κόβεται το φέρον και ένα από τα δύο side bands. Έπειτα, οι εναπομείναντες τόνοι παίρνουν τη στροφή φάσης που εισάγεται από τους ολισθητές, και επανασυνδέονται με το αρχικό οπτικό φέρον, το οποίο όμως δεν έχει πάρει τη στροφή φάσης του ολισθητή. Εξέχουσα σημασία στη συγκεκριμένη διαδικασία έχει τα μήκη που διανύουν τα οπτικά φέροντα να είναι ίσα, έτσι ώστε να "μαζεύουν" την ίδια φάση κατά τη διάδοσή τους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη διατήρηση της πληροφορίας της ολίσθησης φάσης μετά τη φωτοδίοδο. Σε περίπτωση που τα σήματα προσπίπτανε χωρίς φιλτράρισμα στη φωτοδίοδο, τότε η στροφή φάσης που εισάγουν οι ολισθητές θα ήταν κοινή σε όλους τους φασματικούς τόνους και άρα η πληροφορία θα χανόταν. Η διαδικασία που ακολουθείται μετά τη φωτοδίοδο είναι κοινή με αυτή που αναφέρθηκε στην περίπτωση των TTD στοιχείων.



Σχήμα 3.8: Σχηματική Αναπαράσταση της Διαδικασίας Επεξεργασίας Σήματος στον OBFN-Blass

Το οπτικό φέρον λοιπόν διαχωρίζεται σε $M + 1$ κομμάτια, τα οποία αντιστοιχούν στα M σήματα πληροφορίας και στο επιπλέον οπτικό φέρον που χρησιμοποιείται για τη διαδικασία που προαναφέρθηκε. Έπειτα, τα M οπτικά φέροντα διαμορφώνονται από τα αντίστοιχα ηλεκτρικά σήματα πληροφορίας, φιλτράρονται βάσει των παραπάνω και περνάνε από έναν πίνακα που αποτελείται από συμβολόμετρα Mach-Zehnder και ολισθητές φάσης για την κατάλληλη ρύθμιση των πλατών και της φάσης των σημάτων που καταλήγουν στις φωτοδιόδους.

Κεφάλαιο 4

Προσομοιωτική Μελέτη των Διατάξεων

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει μελέτη σε επίπεδο προσομοίωσης σε περιβάλλον MATLAB των διατάξεων που συζητήθηκαν παραπάνω για περιπτώσεις μονοεκπομπής (Point-To-Point), πολλαπλής μονοεκπομπής (Multibeam), πολυεκπομπής (Point-To-Multipoint), αλλά και της υβριδικής λειτουργίας πολλαπλής πολυεκπομπής. Θα γίνει ανάλυση των αλγορίθμων, υπογραμμίζοντας τις διαφορές που υπάρχουν σε κάθε περίπτωση και τις ιδιαιτερότητες της κάθε διάταξης που επηρεάζουν την επίδοση του συνολικού συστήματος. Λόγω της μετέπειτα σύγκρισης των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν από την προσομοίωση με τα πειραματικά αποτελέσματα του Κεφαλαίου 5, για λόγους συνέχειας και πληρότητας, οι διατάξεις θα αξιολογηθούν ως προς την επίδοσή τους στη μετάδοση σημάτων μικροκυματικού φέροντος στα 15 GHz, λόγω των περιορισμών που υφίστανται από τα όργανα του εργαστηρίου. Θα γίνει μελέτη διαφόρων σχημάτων διαμόρφωσης και μορφοποιητικών παλμών για σταθερό ρυθμό συμβόλων, αξιολογώντας σε κάθε περίπτωση την απόδοση του συστήματος μέσω Error-Vector Magnitude, με μετρική απόδοσης το λόγο εσφαλμένων ψηφίων (Bit Error Ratio, BER).

4.1 Μαθηματική Ανάλυση των Διατάξεων

Όπως σημειώθηκε προηγουμένως, το κομμάτι μετά τις φωτοδιόδους στις διατάξεις που συζητήθηκαν παραμένει το ίδιο. Το κομμάτι αυτό αφορά στο μικροκυματικό πεδίο, και συγκεκριμένα στα N ρεύματα διέγερσης που τροφοδοούνται στα στοιχεία της κεραίας. Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο λοιπόν θα αναλυθεί το συγκεκριμένο κομμάτι των διατάξεων, το κομμάτι δηλαδή της ρευματικής διέγερσης της κεραίας. Για δεδομένη επιθυμητή λειτουργία του εκάστοτε δικτύου σχηματοποίησης δέσμης, τα ιδανικά σήματα που εξέρχονται από τη φωτοδίοδο είναι πανομοιότυπα, και διαφέρει ο τρόπος με τον οποίον επιτυγχάνουμε αυτή την επιθυμητή διέγερση.

Μετάδοση Μονοεκπομπής (Point-To-Point Transmission)

Στο Κεφάλαιο 2, είδαμε ότι για τη στροφή της διεύθυνσης μέγιστης ακτινοβολίας σε γωνία γ_0 σε μία γραμμική στοιχειοκεραία N στοιχείων με βήμα d , η προοδευτική φάση που πρέπει να λαμβάνουν τα στοιχεία δίνεται από την εξίσωση 2.17 η οποία επαναλαμβάνεται παρακάτω για λόγους ευκολίας

$$\beta = -kdc\cos\gamma_0 \quad (4.1)$$

Ορίζουμε λοιπόν διάνυσμα διέγερσης το διάνυσμα διαστάσεων $1 \times N$ που έχει ως στοιχείο s_n , $n = 1, 2, \dots, N$ την κατάλληλη διέγερση του n -οστού στοιχείου για την επιθυμητή στροφή του λοβού. Έτσι, το n -οστό στοιχείο μπορεί να γραφτεί ως:

$$s_n = |s_n| \cdot e^{j(n-1)\beta} = |s_n| \cdot e^{-j(n-1)kdc\cos\gamma_0} \quad (4.2)$$

όπου $|s_n|$ το πλάτος διέγερσης του n -οστού στοιχείου της κεραίας. Το πλάτος αυτό καθορίζεται ανάλογα την περίπτωση, όπως συζητήθηκε στο 2.3.2. Για λόγους συνέχειας, τα πλάτη των διεγέρσεων θα κανονικοποιούνται με σκοπό η συνολική ισχύς της διέγερσης να είναι μοναδιαίας. Υπό αυτό το πρίσμα, για ομοιόμορφη διέγερση, το πλάτος σε όλα τα στοιχεία θα είναι ίδιο και ίσο με $\frac{1}{\sqrt{N}}$.

Λειτουργία Πολλαπλών Δεσμών (Multibeam Operation)

Στην περίπτωση που επιθυμούμε να στείλουμε πολλαπλά σήματα πληροφορίας, σε μία συγκεκριμένη κατεύθυνση για το κάθε σήμα, λέμε ότι έχουμε λειτουργία πολλαπλών δεσμών (Multibeam Operation). Υποθέτοντας λοιπόν ότι θέλουμε να μεταδώσουμε m σήματα πληροφορίας, και ότι τα σήματα αυτά έχουν την ίδια μικρομυματική συχνότητα φέροντος, ορίζουμε αντίστοιχα με πριν τον Πίνακα διέγερσης διαστάσεων $M \times N$, που έχει ως γραμμές τα m διανύσματα διέγερσης για μετάδοση της m -οστής πληροφορίας στη γωνία γ_m . Μαθηματικά αυτό περιγράφεται παρακάτω:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \vec{S}_1 \\ \vec{S}_2 \\ \vdots \\ \vec{S}_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{1,1} & s_{1,2} & \dots & s_{1,N} \\ s_{2,1} & s_{2,2} & \dots & s_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{M,1} & s_{M,2} & \dots & s_{M,N} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Στην παραπάνω εξίσωση, οι γραμμές όπως είπαμε είναι τα διανύσματα διέγερσης που αντιστοιχούν στην m -οστή γωνία μετάδοσης, ενώ οι στήλες αντιπροσωπεύουν τα σήματα που πρέπει να υπερτεθούν σε κάθε στοιχείο της κεραίας για τη σχηματοποίηση των επιθυμητών δεσμών.

Μετάδοση Πολυεκπομπής (Point-to-Multipoint Transmission)

Όταν επιθυμούμε να μεταδώσουμε ένα σήμα πληροφορίας σε παραπάνω από έναν δέκτη έχουμε μετάδοση πολυεκπομπής. Στη συγκεκριμένη λειτουργία γίνεται ένας συνδυασμός των σχέσεων που αναπτύχθηκαν προηγουμένως. Έστω λοιπόν ότι επιθυμούμε να μεταδώσουμε

ένα σήμα πληροφορίας σε K διαφορετικές κατευθύνσεις με γωνίες $\gamma_k, k = 1, 2, \dots, K$ και $K \geq 2$. Η εύρεση της κατάλληλης ρευματικής διέγερσης βασίζεται στο θεώρημα της επαλληλίας, και συγκεκριμένα στην επαλληλία K ανεξάρτητων μεταδόσεων μονοεκπομπής, κάθε μία εκ των οποίων με διεύθυνση γ_k . Τότε, το κατάλληλο διάνυσμα διέγερσης βρίσκεται βάσει των παραπάνω και της εξίσωσης 4.2, και υπολογίζεται ως:

$$s_{multicast}^{\vec{}} = \left[\underbrace{(s_{1,1} + s_{2,1} + \dots + s_{K,1})}_{\text{Διέγερση 1}^{ου} \text{ στοιχείου}} \underbrace{(s_{1,2} + s_{2,2} + \dots + s_{K,2})}_{\text{Διέγερση 2}^{ου} \text{ στοιχείου}} \dots \underbrace{(s_{1,N} + s_{2,N} + \dots + s_{K,N})}_{\text{Διέγερση N-οστού στοιχείου}} \right] \quad (4.4)$$

Σημειώνεται ότι η παραπάνω σχέση περιγράφει διάνυσμα, αφού μιλάμε για ένα συγκεκριμένο σήμα πληροφορίας, που μεταδίδεται σε πολλαπλές κατευθύνσεις.

Υβριδική Λειτουργία Πολλαπλής Πολυεκπομπής (Hybrid Operation - Multibeam w/ Multicast)

Τέλος, αν επιθυμούμε να μεταδώσουμε M σήματα πληροφορίας, εκ των οποίων κάποια από αυτά (ή και όλα) σε περισσότερες από μία γωνίες, τότε έχουμε ένα συνονθύλευμα των παραπάνω, λειτουργία που στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας ονομάζεται Υβριδική Λειτουργία Πολλαπλής Πολυεκπομπής. Η συγκεκριμένη λειτουργία προσφέρει πλήρη ευελιξία στο οπτικό δίκτυο σχηματοποίησης δέσμης, και επομένως αυξάνει σημαντικά την πολυπλοκότητά του.

Η μήτρα διεγέρσεων είναι, όπως στην περίπτωση του multibeam, διαστάσεων $M \times N$ όπου M ο αριθμός των προς μετάδοση σημάτων πληροφορίας και N τα στοιχεία της κεραίας. Έστω λοιπόν ότι επιθυμούμε να μεταδώσουμε κάθε ένα από τα M σήματα σε K_m διαφορετικές γωνίες όπου προφανώς $m = 1, 2, \dots, M$. Τότε, συνδυάζοντας τις εξισώσεις 4.3, 4.4, η μήτρα επιθυμητών διεγέρσεων προκύπτει:

$$S_{\text{hybrid}} = \begin{bmatrix} S_{multicast,1}^{\vec{}} \\ S_{multicast,2}^{\vec{}} \\ \vdots \\ S_{multicast,M}^{\vec{}} \end{bmatrix} = \quad (4.5\alpha')$$

$$\begin{bmatrix} s_{1,1,1} + s_{1,2,1} + \dots + s_{1,K_1,1} & s_{1,1,2} + s_{1,2,2} + \dots + s_{1,K_1,2} & \dots & s_{1,1,N} + s_{1,2,N} + \dots + s_{1,K_1,N} \\ s_{2,1,1} + s_{2,2,1} + \dots + s_{2,K_2,1} & s_{2,1,2} + s_{2,2,2} + \dots + s_{2,K_2,2} & \dots & s_{2,1,N} + s_{2,2,N} + \dots + s_{2,K_2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{M,1,1} + s_{M,2,1} + \dots + s_{M,K_M,1} & s_{M,1,2} + s_{M,2,2} + \dots + s_{M,K_M,2} & \dots & s_{M,1,N} + s_{M,2,N} + \dots + s_{M,K_M,N} \end{bmatrix} \quad (4.5\beta')$$

όπου το στοιχείο $s_{m,k,n}$ υποδηλώνει τη μιγαδική διέγερση που αντιστοιχεί στο σήμα m , στη γωνία k για το στοιχείο της κεραίας n τάξης. Υπογραμμίζεται σε αυτό το σημείο ότι η φάση και το πλάτος του ρεύματος που εισάγεται σε κάθε στοιχείο της κεραίας, βάσει της αρχής της επαλληλίας, είναι η υπέρθεση των στοιχείων κάθε στήλης της μήτρας, καταλήγοντας με αυτόν τον τρόπο στο $1 \times N$ διάνυσμα των κατάλληλων διεγέρσεων για τα N στοιχεία της κεραίας.

4.2 Περιγραφή Αλγορίθμου

Βάσει λοιπόν της εκάστοτε περίπτωσης, ο αλγόριθμος ξεκινάει με τον ορισμό της γωνίας ή των γωνιών στόχευσης, αλλά και του τύπου διέγερσης πλάτους σε κάθε περίπτωση. Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις διαφορετικοί τύποι διέγερσης πλάτους: Ομοιόμορφη, Γκαουσιανή, Διωνυμική και Chebyshev [1]. Σε κάθε περίπτωση χρήσει των παραπάνω υπολογίζεται το ιδανικό διάνυσμα διεγέρσεων και επιβεβαιώνεται η κατάρχη ορθή σχηματοποίηση του διαγράμματος ακτινοβολίας, κάνοντας τον υπολογισμό του παράγοντα διάταξης. Στη συνέχεια, υποθέτοντας μοναδιαία ισχύ στην είσοδο του OBFN, υπολογίζονται οι τιμές των εξασθενήσεων και των χρονικών καθυστερήσεων που πρέπει να εισάγουν τα αντίστοιχα στοιχεία της διάταξης για να πετύχουμε το παραπάνω διάνυσμα διεγέρσεων. Συγκεκριμένα αυτό γίνεται με τα παρακάτω βήματα, τα οποία επαναλαμβάνονται για κάθε διαφορετικό σήμα πληροφορίας:

1. Γνωρίζοντας το πλάτος του κανονικοποιημένου ρεύματος διέγερσης του n -οστού στοιχείου $|s_n|$, και λαμβάνοντας υπόψιν τον τετραγωνισμό που εισάγει η φωτοδίοδος όπως συζητήθηκε προηγουμένως, η εξασθένιση που πρέπει να εισάγει ο αντίστοιχος εξασθενητής είναι:

$$Att_n = \frac{1}{\sqrt{\max(s_n)}} \sqrt{\frac{|s_n|}{P_{in}}} \quad (4.6)$$

όπου εδώ έχει υποτεθεί μοναδιαία ισχύς εισόδου η οποία μέσω των διαχωριστών ισχύων ισομοιράζεται στα N διαφορετικά μονοπάτια. Άρα προκύπτει:

$$Att_n = \frac{1}{\sqrt{\max(|s_n|)}} \sqrt{\frac{|s_n|}{1/N}} = \frac{\sqrt{N|s_n|}}{\sqrt{\max(s_n)}} \quad (4.7)$$

με $|s_n| < 1$ αφού το διάνυσμα είναι κανονικοποιημένο. Σημειώνεται ότι δεν μας ενδιαφέρει το απόλυτο νούμερο του πλάτους, στην περίπτωση διέγερσης με σκοπό καταπίεση των πλευρικών λοβών, αλλά η αναλογία των πλατών των ρευμάτων των στοιχείων. Ο συντελεστής $\frac{1}{\sqrt{\max(s_n)}}$ είναι εκεί για να διαβεβαιώσει ότι $Att_n < 1$

2. Γνωρίζοντας τη κατάλληλη φασική ρευματική διέγερση που πρέπει να τροφοδοτηθεί στο n -οστό στοιχείο της κεραίας, υπολογίζεται η στροφή φάσης που πρέπει να εισάγει το στοιχείο πραγματικής καθυστέρησης, ως:

$$\underbrace{\Delta\varphi_n}_{0-2\pi} = \arg\left(\frac{s_n}{P_{in}}\right) = \arg(s_n) \quad (4.8)$$

αφού έχουμε υποθέσει αρχικά μοναδιαία ισχύ στην είσοδο του OBFN. Η συνάρτηση $\arg(x)$ υπολογίζει τη γωνία της μεταβλητής x , επιστρέφοντας τιμές από 0 έως 2π .

3. Με την πληροφορία της κατάλληλης στροφής φάσης, και λαμβάνοντας υπόψιν ότι η γωνία είναι κανονικοποιημένη ως προς $[0, 2\pi]$, για τον υπολογισμό της χρονικής καθυστέρησης που πρέπει να εισαγάγουν τα στοιχεία πραγματικής καθυστέρησης χρησιμοποιείται πρώτα

η συνάρτηση *unwrap* της MATLAB, η οποία διορθώνει αυτή τη κανονικοποίηση της φάσης, και με την πραγματική στροφή φάσης, η κατάλληλη χρονική καθυστέρηση που πρέπει να εισάγουν τα στοιχεία υπολογίζεται ως εξής:

$$TTD_n = \frac{\Delta\varphi_n}{2\pi f} \quad (4.9)$$

όπου f η συχνότητα του μικροκυματικού φέροντος.

4. Έχοντας πλέον υπολογίσει τις κατάλληλες καθυστερήσεις και εξασθενήσεις για την επιθυμητή διέγερση των στοιχείων, επιβεβαιώνουμε την ορθή λειτουργία του συστήματος ποιοτικά δημιουργώντας το διάγραμμα ακτινοβολίας, και συγκρίνοντάς το με το θεωρητικό διάγραμμα ακτινοβολίας που δημιουργήθηκε στην αρχή.
5. Έχοντας επιβεβαιώσει την ορθή ρύθμιση των παραμέτρων, εισάγουμε το σήμα πληροφορίας στην είσοδο του OBFN. Στο πλαίσιο της διπλωματικής δοκιμάστηκαν τετραγωνικά σχήματα διαμόρφωσης, και συγκεκριμένα: QPSK, 16-QAM, 64-QAM και 256-QAM, με τρεις διαφορετικούς μορφοποιητικούς παλμούς: raised cosine, root raised cosine, και τετραγωνικούς για τις διάφορες τιμές του παράγοντα εξάπλωσης $\alpha \in [0, 1]$ (rolloff factor).
6. Έχοντας πλέον διαμορφωμένο σήμα στην είσοδο του OBFN, το σήμα διασπάται σε N κομμάτια ίσης ισχύος στους splitters, εισάγεται στο σήμα η καθυστέρηση που υπολογίστηκε στο βήμα 3, και αποκτά μια επιπλέον εξασθένιση από τους πλέον ρυθμισμένους εξασθενητές. Για την εισαγωγή της χρονικής καθυστέρησης, το σήμα περνάει στο πεδίο της συχνότητας όπου πολλαπλασιάζεται με το κατάλληλο εκθετικό $e^{j2\pi f \cdot TTD_n}$, και γυρνάει ξανά στο πεδίο του χρόνου. Η διαδικασία αυτή περιγράφεται από την εξίσωση 3.8
7. Τα m -σήματα πληροφορίας συντίθενται μέσω του AWG πριν ανιχνευτούν από τη φωτοδίοδο.
8. Έχοντας πλέον το κατάλληλο σήμα στις κεραίες, γίνεται πάλι ποιοτικός έλεγχος μέσω του διαγράμματος ακτινοβολίας, και επιλέγεται το σήμα που αντιστοιχεί στην εκάστοτε ή στις εκάστοτε γωνίες στόχευσης, δημιουργώντας το αντίστοιχο διάγραμμα αστερισμού. Η αξιολόγηση του σήματος, και άρα της συνολικής λειτουργίας του OBFN γίνεται με την εύρεση του Bit Error Ratio (BER) χρήσει Error-Vector Magnitude (EVM).

Ανάλυση Αλγορίθμου για τον Blass Matrix

Η ανάλυση του αλγορίθμου στην περίπτωση του OBFN Blass Matrix έχει γίνει όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη διπλωματική του εργαστηρίου [16]. Οι διαφορές ως προς την ανάλυση στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία έγκεινται στην περίπτωση της πολυεκπομπής (Multicast και Multibeam w/ Multicast). Για την ενσωμάτωση της συγκεκριμένης λειτουργίας στο συγκεκριμένο αλγόριθμο, ακολουθείται η διαδικασία που περιγράφηκε στο Υποκεφάλαιο 4.1.

4.3 Αποτελέσματα και Παρατηρήσεις Προσομοιώσεων

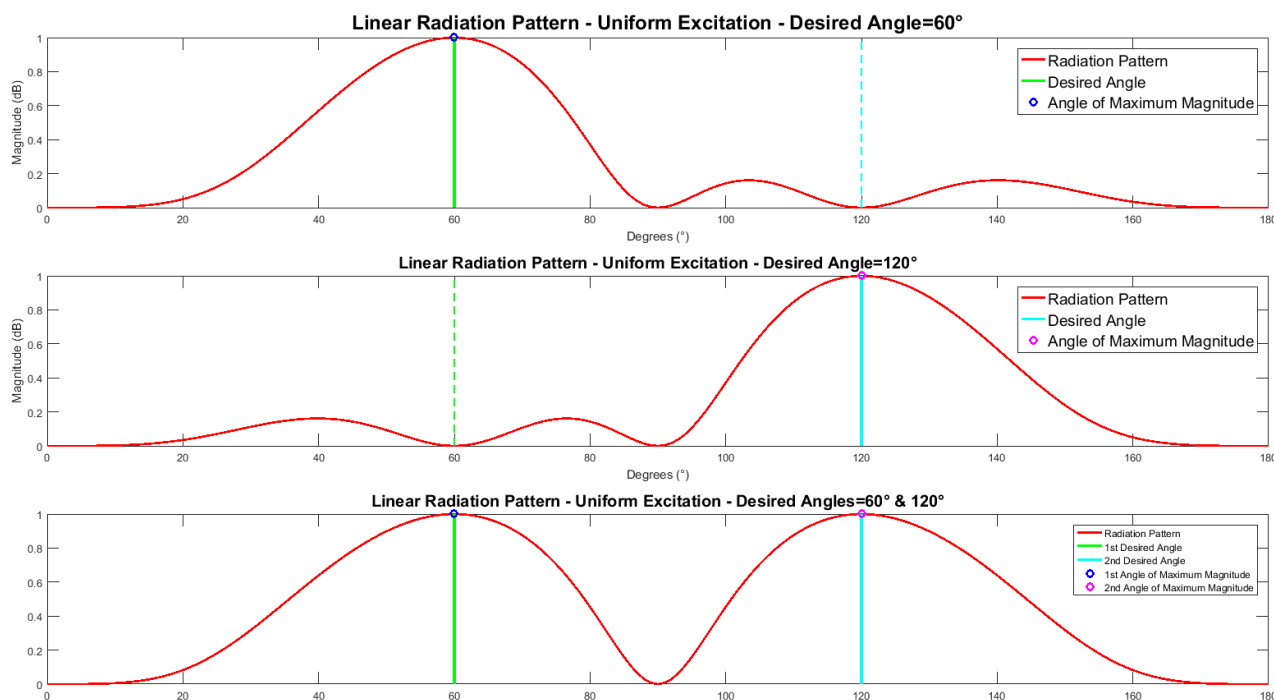
Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο θα γίνει παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις σε κάθε περίπτωση, υπογραμμίζοντας τις διαφορές που παρουσιάζουν μεταξύ τους οι δύο διατάξεις υπό συζήτηση. Πριν όμως γίνει ανάλυση της κάθε περίπτωση ξεχωριστά, αξίζει να αναφερθεί ένας περιορισμός που υφίστανται και οι δύο διατάξεις στην περίπτωση σχηματοποίησης άνω του ενός λοβών ακτινοβολίας (όπως στις περιπτώσεις πολυεκπομπής, πολλαπλής δέσμης και πολλαπλής πολυεκπομπής) και υπάρχει εγγενώς στα μικροκυματικά συστήματα μετάδοσης που χρησιμοποιούν στοιχειοκεραίες και τεχνικές σχηματοποίησης δέσμης. Ο περιορισμός αυτός εντείνεται όταν ο αριθμός των στοιχείων της στοιχειοκεραίας μικραίνει, και έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση μιας απόκλισης μεταξύ της επιθυμητής γωνίας στόχευσης, και της γωνίας μέγιστης ακτινοβολίας. Το φαινόμενο αυτό, το οποίο, στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας, θα αναφέρεται ως *απόκλιση γωνίας*, οφείλεται στην ύπαρξη πλευρικών λοβών του κάθε διαγράμματος ακτινοβολίας που αντιστοιχεί σε κάθε γωνία στόχευσης ξεχωριστά.

Υπογραμμίζεται ότι, αν και αυτός ο περιορισμός δεν προκαλείται από τα οπτικά στοιχεία (όπως για παράδειγμα το φαινόμενο του beamsquint που συζητήθηκε παραπάνω και θα αναλυθεί στη συνέχεια), θα γίνει αναφορά σε αυτόν και θα αναλυθεί καθώς παρατηρείται σε πολλές περιπτώσεις παρακάτω, και ιδιαίτερα στην πειραματική διάταξη που θα συζητηθεί στο Κεφάλαιο 5. Σχηματικά, ο παραπάνω περιορισμός απεικονίζεται στα σχήματα 4.2α', 4.2β', 4.3α', 4.3β' και 4.4. Όπως φαίνεται και στα συγκεκριμένα σχήματα, και ιδιαίτερα στα 4.2α' και 4.3α', η στοιχειοκεραία αδυνατεί να στοχεύσει ακριβώς στην επιθυμητή γωνία, παρά το γεγονός ότι η φασική διέγερση των ρευμάτων της κεραίας είναι η κατάλληλη. Αυτό συμβαίνει καθώς, κατά τη δημιουργία δύο ή περισσότερων λοβών ακτινοβολίας, προστίθενται τα πεδία που δημιουργούν οι κεραίες σε κάθε γωνία ξεχωριστά. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να επηρεάζεται το τελικό διάγραμμα ακτινοβολίας ως προς τη διεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας από τους πλευρικούς λοβούς που δημιουργούνται από τις υπόλοιπες επιθυμητές διευθύνσεις. Κατά τη σύνθεση λοιπόν των επιμέρους διαγραμμάτων ακτινοβολίας, αν και κάθε ένα ξεχωριστά πετυχαίνει με ακρίβεια την επιθυμητή διεύθυνση, το συνολικό διάγραμμα ενδέχεται να παρουσιάζει κάποια απόκλιση, όπως και συμβαίνει στα προαναφερθέντα σχήματα.

Το παραπάνω καθίσταται ακόμα πιο εμφανές κοιτώντας το σχήμα 4.1. Στο συγκεκριμένο σχήμα παρατηρούμε ότι, αν και δημιουργούνται δύο λοβοί ακτινοβολίας, δεν παρατηρείται καμία απόκλιση γωνίας. Αυτό συμβαίνει καθώς το κάθε μεμονωμένο διάγραμμα ξεχωριστά που αντιστοιχεί στις δύο γωνίες, παρουσιάζει μηδενισμό στην περιοχή που η άλλη παρουσιάζει μέγιστο. Επομένως, η επιρροή των πλευρικών λοβών στο συνολικό διάγραμμα είναι αμελητέα και άρα δεν εμφανίζεται καμία απόκλιση γωνίας.

Κάτι τέτοιο δεν φαίνεται να συμβαίνει στο σχήμα 4.2α' όπου η επιρροή των πλευρικών λοβών δεν είναι αμελητέα και παρατηρείται απόκλιση 3 μοιρών στην πρώτη επιθυμητή γωνία (από 70° στις 67°) και 5 μοιρών στη δεύτερη (από 140° στις 145°). Για να αντιμετωπισθεί ο παραπάνω περιορισμός έγινε χρήση τεχνικών καταπίεσης των πλευρικών λοβών, όπως συζητήθηκε στο Κεφάλαιο 2. Συγκεκριμένα στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε Γκαουσιανή

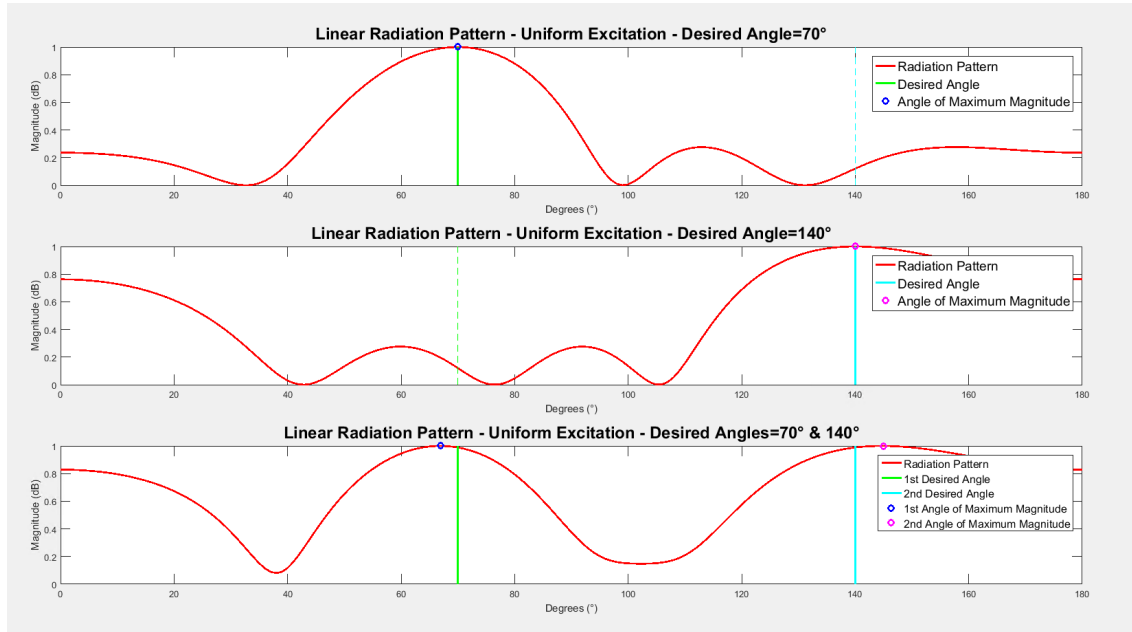
διέγερση με τυπική απόκλιση $\sigma = 1.5$. Όπως φαίνεται και στα πρώτα δύο σχήματα του 4.2β', οι πλευρικοί λοβοί έχουν εξαφανιστεί, και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην εμφανίζεται καμία απόκλιση σε καμία από τις δύο επιθυμητές διευθύνσεις μέγιστης ακτινοβολίας. Το αντάλλαγμα είναι βέβαια η διεύρυνση του λοβού, όπως συζητήθηκε και στο Κεφάλαιο 2, και άρα η μείωση της κατευθυντικότητας.



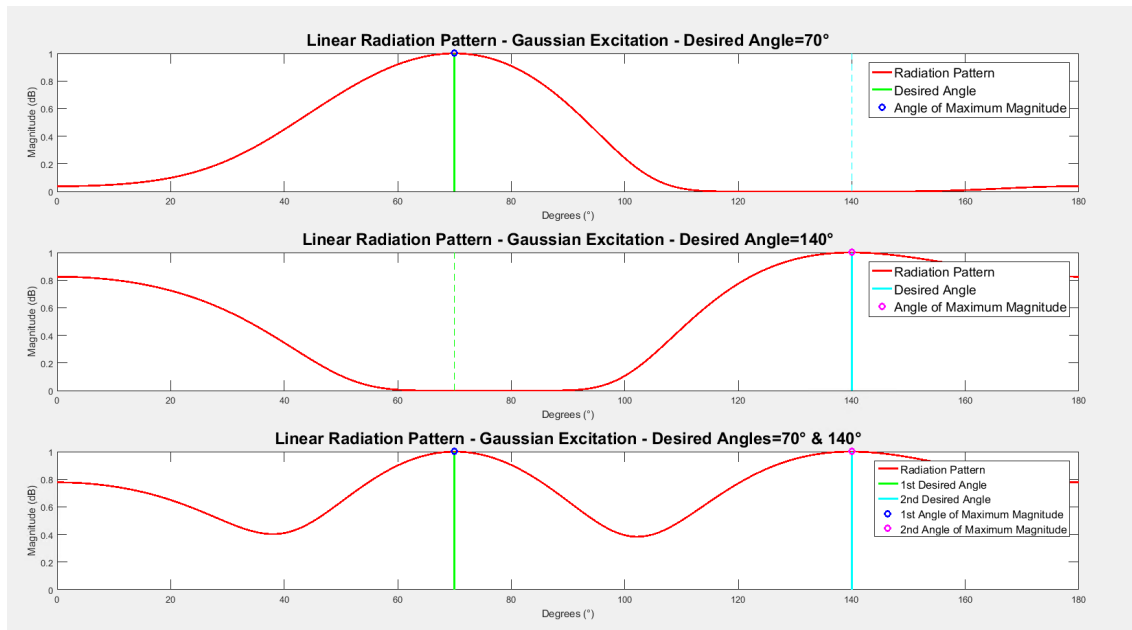
Σχήμα 4.1: Γραφική Απεικόνιση του φαινομένου της απόκλισης γωνίας σε στοιχειοκεραία με $d = \frac{\lambda}{2}$ και $N=4$ στοιχεία με επιθυμητές γωνίες, 60° και 120° . Οι κάθετες γραμμές απεικονίζουν τις γωνίες στόχευσης, ενώ με κύκλο επί του σχήματος βρίσκονται τα μέγιστα του διαγράμματος ακτινοβολίας. Ομοιόμορφη Διέγερση Πλατών

Παρόμοια, στα σχήματα 4.3α', 4.3β' ακολουθείται η ίδια διαδικασία για τη δημιουργία τριών διαφορετικών γωνιών. Το συγκεκριμένο παράδειγμα είναι σαφώς πιο δύσκολο ως προς την υλοποίηση καθώς για τη δημιουργία τριών λοβών από τέσσερα στοιχεία κεραίας υπάρχει μικρή ευελιξία ως προς τις γωνίες. Παρά το γεγονός αυτό, είναι εμφανές ότι χρησιμοποιώντας Γκαουσιανή διέγερση με τυπική απόκλιση $\sigma = 2$ καταφέρνουμε να περιορίσουμε και σε αυτήν την περίπτωση το φαινόμενο αυτό, αυξάνοντας όμως το εύρος του λοβού.

Ένας ακόμα τρόπος για την καταπολέμηση του φαινομένου αυτού, χωρίς να μειωθεί η κατευθυντικότητα του συστήματος είναι η αύξηση του αριθμού των στοιχείων της κεραίας. Αυξάνοντας τον αριθμό των ακτινοβολητών, ο κύριος λοβός ακτινοβολίας σε κάθε περίπτωση παίρνει μεγαλύτερη ισχύ, και άρα αυξάνεται ο λόγος ισχύος ανάμεσα στον κύριο λοβό ακτινοβολίας και τους πλευρικούς. Κάτι που επίσης βοηθά στα παραπάνω είναι ότι με την αύξηση του αριθμού των κεραίων, αυξάνονται οι μηδενισμοί που παρατηρούνται στο διάγραμμα ακτι-

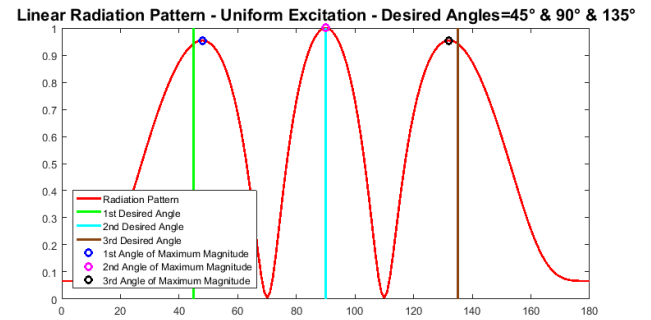
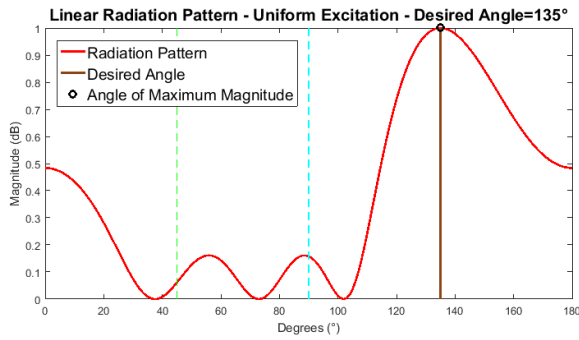
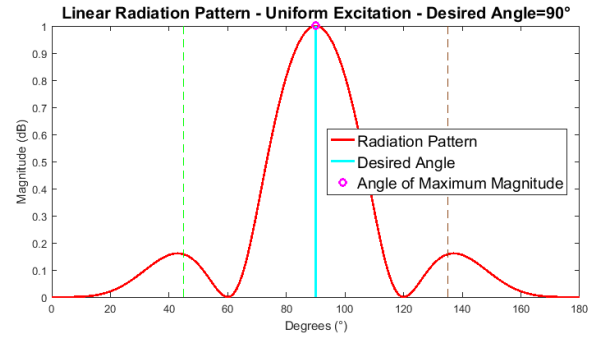
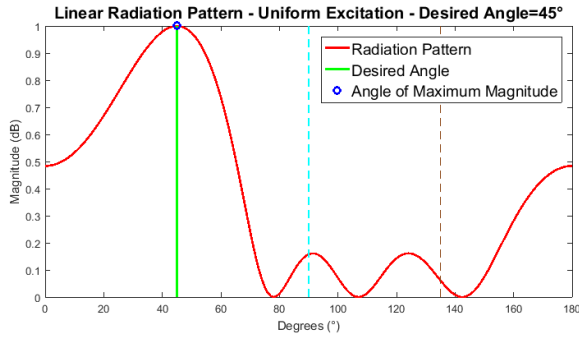


(α')

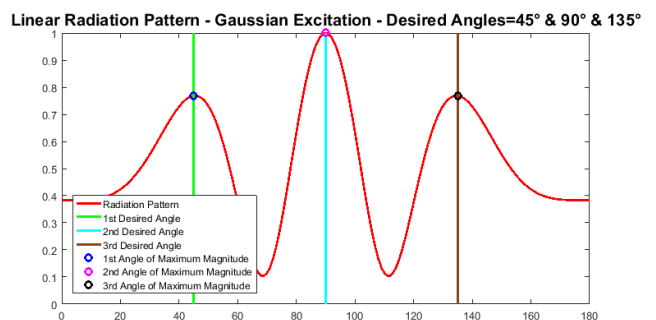
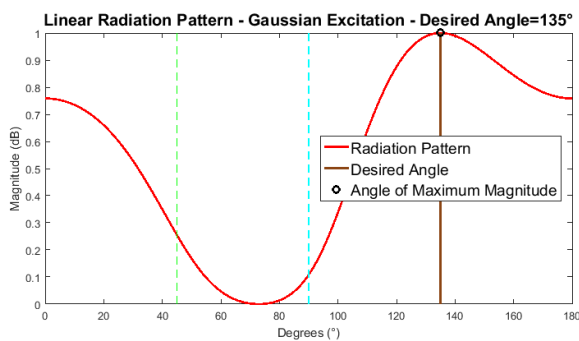
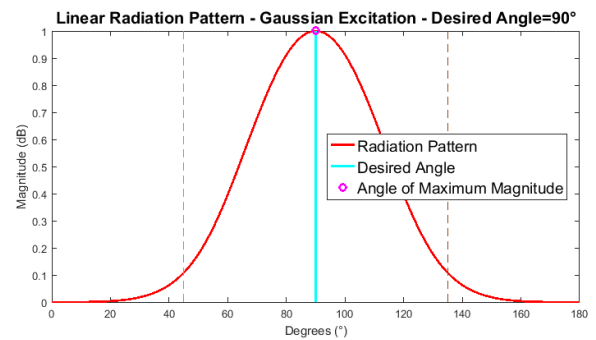
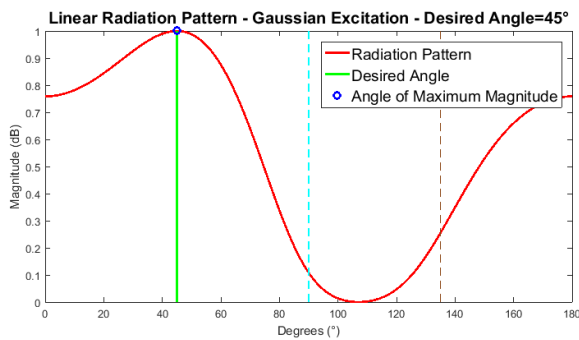


(β')

Σχήμα 4.2: Γραφική Απεικόνιση του φαινομένου της απόκλισης γωνίας σε στοιχειοκεράια με $d = \frac{\lambda}{2}$ και $N=4$ στοιχεία με επιθυμητές γωνίες 70° και 140° . Οι κάθετες γραμμές απεικονίζουν τις γωνίες στόχευσης, ενώ με κύκλο επί του σχήματος βρίσκονται τα μέγιστα του διαγράμματος ακτινοβολίας. (α') Ομοιόμορφη Διέγερση Πλατών (β') Γκαουσιανή Διέγερση Πλατών με τυπική απόκλιση $\sigma = 1.5$

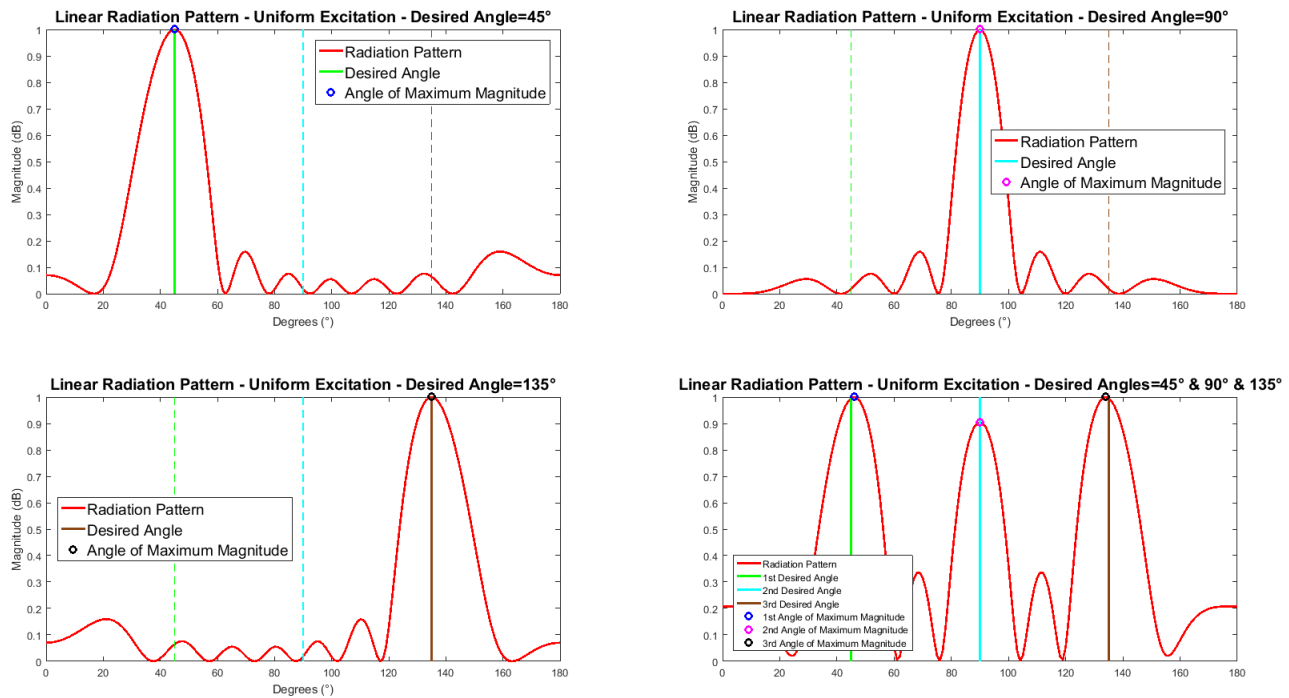


(α')



(β')

Σχήμα 4.3: Γραφική απεικόνιση του φαινομένου της απόκλισης γωνίας σε στοιχειοκεραία με $d = \frac{\lambda}{2}$ και $N=4$ στοιχεία με 3 επιθυμητές γωνίες, $45^\circ, 90^\circ$ και 135° . Οι κάθετες γραμμές απεικονίζουν τις γωνίες στόχευσης, ενώ με κύκλο επί του σχήματος βρίσκονται τα μέγιστα του διαγράμματος ακτινοβολίας. (α') Ομοιόμορφη Διέγερση Πλατών (β') Γκαουσιανή Διέγερση Πλατών με τυπική απόκλιση $\sigma = 2$



Σχήμα 4.4: Γραφική απεικόνιση του φαινομένου της απόκλισης γωνίας σε στοιχειοκεραία με $d = \frac{\lambda}{2}$ και $N=8$ στοιχεία με 3 επιθυμητές γωνίες, $45^\circ, 90^\circ$ και 135° . Οι κάθετες γραμμές απεικονίζουν τις γωνίες στόχευσης, ενώ με κύκλο επί του σχήματος βρίσκονται τα μέγιστα του διαγράμματος ακτινοβολίας. Ομοιόμορφη Διέγερση Πλατών.

νοβολίας της κεραίας [1], κρατώντας με αυτόν τον τρόπο τις στάθμες των πλευρικών λοβών χαμηλότερα.

Σχηματική απεικόνιση του παραπάνω παρουσιάζεται στο σχήμα 4.4, στο οποίο τα στοιχεία της κεραίας είναι πλέον οκτώ. Παρατηρούμε ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση, αν και η διέγερση που χρησιμοποιείται είναι ομοιόμορφη, η απόκλιση που εμφανίζεται στις γωνίες είναι μηδαμινή σε σχέση με την αντίστοιχη του σχήματος 4.3α', στο οποίο χρησιμοποιείται πάλι ομοιόμορφη διέγερση, με τέσσερα στοιχεία αντί για οκτώ.

4.3.1 Αποτελέσματα και Παρατηρήσεις - Διάταξη Blass Matrix

Στη συγκεκριμένη παράγραφο θα μελετηθεί η διάταξη Blass Matrix ως προς την απόδοσή της σε εφαρμογές πολυεκπομπής. Θα γίνει απεικόνιση των διαγραμμάτων ακτινοβολίας που δημιουργούνται από τη διάταξη, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στο φαινόμενο του beamsquint και στην αξιολόγηση του κατά πόσο περιορίζει δυνητικά τη ζεύξη.

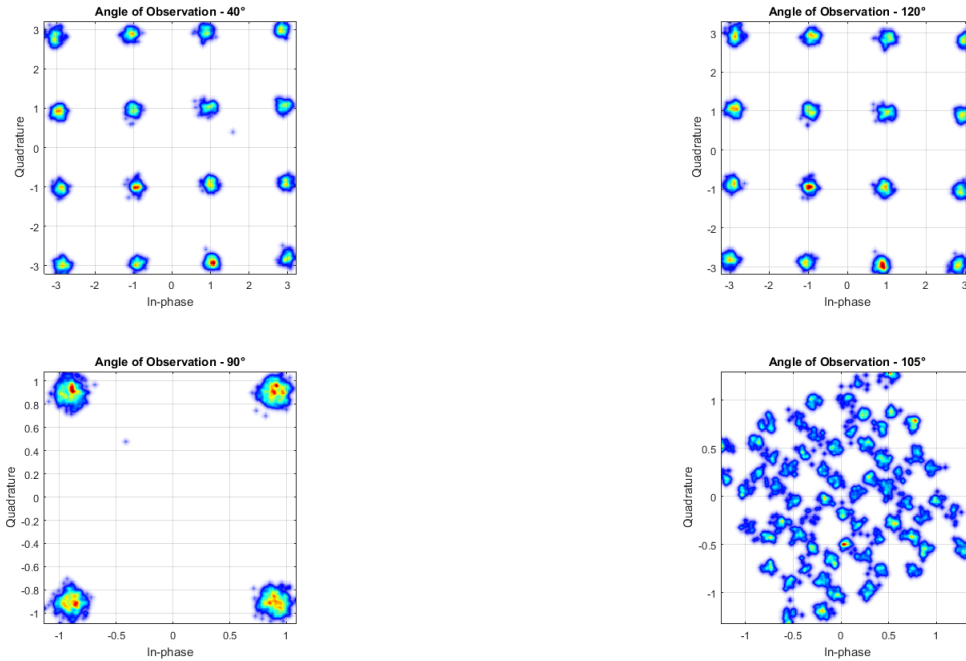
Η πρώτη περίπτωση που μελετήθηκε παρουσιάζεται στον πίνακα 4.1.

Τα διαγράμματα αστερισμού στο δέκτη, για τις επιθυμητές γωνίες αλλά και για μία ενδιάμεση γωνία (105°) παρουσιάζονται στο σχήμα 4.5

Παρατηρούμε ότι τα σχήματα αστερισμού είναι πολύ ικανοποιητικά, καθώς ο λόγος εσφαλ-

Πίνακας 4.1: Πρώτη Περίπτωση Blass Matrix - Υβριδική Λειτουργία Πολλαπλής Πολυεκπομπής. Μετάδοση με ρυθμό συμβόλων 1 GBaud, με παράγοντα εξάπλωσης 1 και κεντρική συχνότητα λειτουργίας $f = 15GHz$, για $N=8$ στοιχεία - Σχήμα 4.5

Σήμα	Πολυεκπομπή	Σχήμα Διαμόρφωσης	Γωνίες (°)	Διέγερση	SNR (dB)
1	Ναι	16-QAM	40, 120	Ομοιόμορφη	28
2	Όχι	QPSK	90	Ομοιόμορφη	28



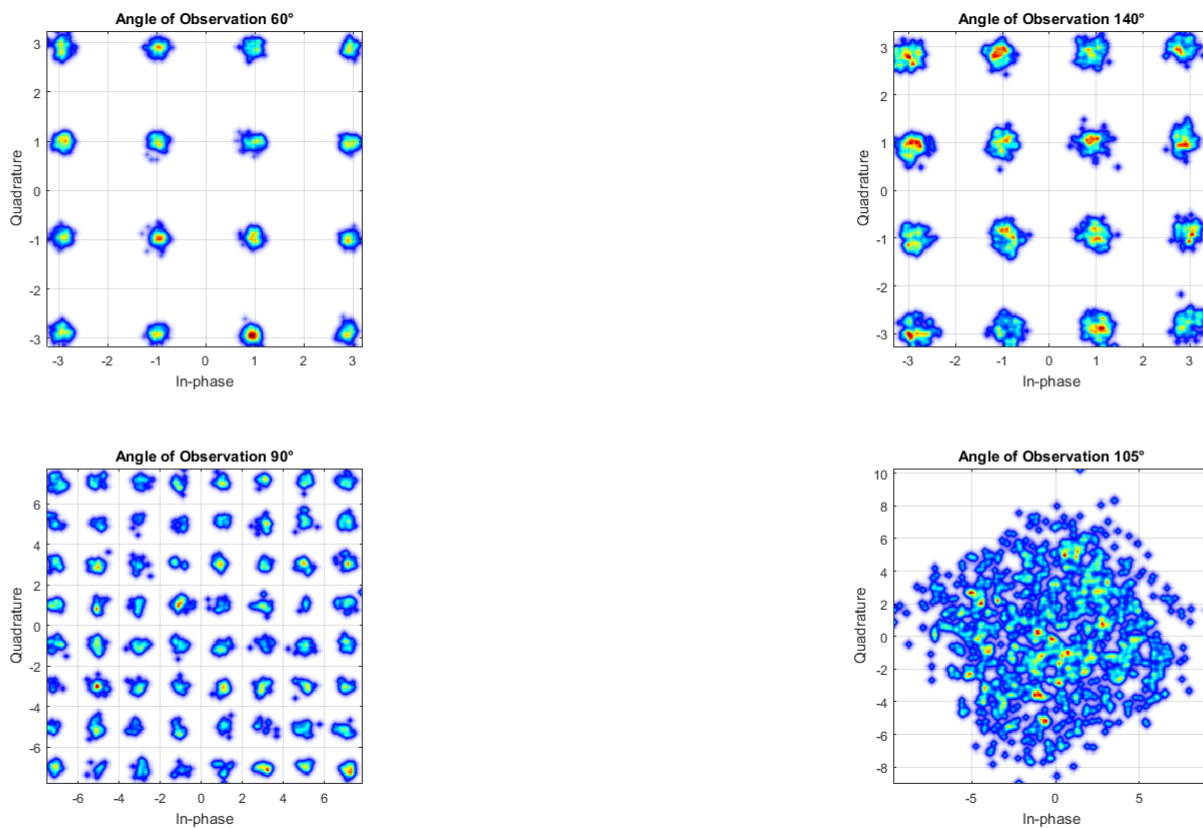
Σχήμα 4.5: Διαγράμματα Αστερισμού για Γωνίες 40° (πάνω αριστερά), 120° (πάνω δεξιά), 90° (κάτω αριστερά) και 105° (κάτω δεξιά).

μένων ψηφίων παραμένει χαμηλότερος από 10^{-12} .

Πίνακας 4.2: Δεύτερη Περίπτωση Blass Matrix - Υβριδική Λειτουργία Πολλαπλής Πολυεκπομπής. Μετάδοση με ρυθμό συμβόλων 1 GBaud, με παράγοντα εξάπλωσης 1 και κεντρική συχνότητα λειτουργίας $f = 15GHz$, για $N=8$ στοιχεία - Σχήμα 4.7

Σήμα	Πολυεκπομπή	Σχήμα Διαμόρφωσης	Γωνίες (°)	Διέγερση	SNR (dB)
1	Ναι	16-QAM	60, 140	Γκαουσιανή	28
2	Όχι	64-QAM	90	Ομοιόμορφη	28

Αυξάνοντας την τάξη σχήματος διαμόρφωσης από QPSK σε 64-QAM, με σκοπό την καλύτερη φασματική χρησιμοποίηση, τα διαγράμματα αστερισμού παραμένουν πολύ ικανοποιητικά και το BER παραμένει στην τάξη του 10^{-6} ακόμα και στη χειρότερη περίπτωση. Η



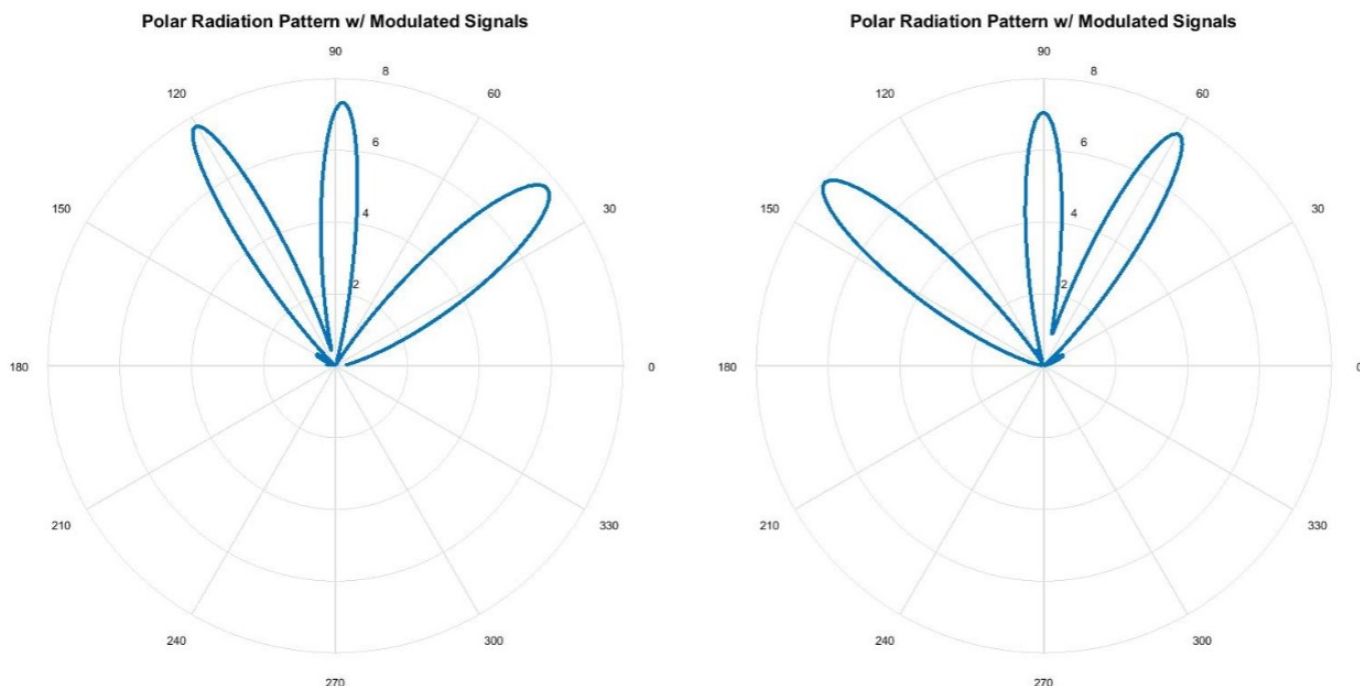
Σχήμα 4.6: Διαγράμματα Αστερισμού για Γωνίες 60° (πάνω αριστερά), 140° (πάνω δεξιά), 90° (κάτω αριστερά) και 105° (κάτω δεξιά).

αποδοτική χρησιμοποίηση του φάσματος είναι ιδιαίτερα σημαντική στην συγκεκριμένη διάταξη του Blass Matrix, λόγω του φαινομένου του beamsquint που συζητήθηκε προηγουμένως και θα αναλυθεί στη συνέχεια.

Μελέτη του Φαινομένου Beamsquint σε Περιπτώσεις Πολυεκπομπής

Όπως αναλύθηκε παραπάνω, το φαινόμενο του beamsquint οφείλεται στο γεγονός ότι διαφορετικές φασματικές συνιστώσες του προς μετάδοση σήματος, λαμβάνουν διαφορετικές στροφές φάσης. Έτσι, γίνεται αντιληπτό ότι, όσο πιο μεγάλο είναι το εύρος ζώνης του σήματος που στέλνεται, τόσο μεγαλύτερη επίπτωση θα έχει αυτό στην ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος. Σχηματική απεικόνιση των παραπάνω φαίνεται στα σχήματα 4.8α', 4.8β', 4.9α' και 4.9β'.

Στα σχήματα απεικονίζεται η περίπτωση πολυεκπομπής ενός σήματος σε τρεις διαφορετικές γωνίες. Οι γωνίες αυτές είναι οι 45° , 90° και 135° . Στην πρώτη περίπτωση μεταδίδεται ένα σήμα διαμόρφωσης 16 – QAM με εύρος ζώνης μετάδοσης 1 GBaud γύρω από την κεντρική συχνότητα των 15 GHz με παράγοντα εξάπλωσης 1, ενώ στη δεύτερη περίπτωση αυξάνεται



Σχήμα 4.7: Διαγράμματα Ακτινοβολίας για τις Παραπάνω Περιπτώσεις - Δεξιά Πρώτη Περίπτωση - Αριστερά Δεύτερη Περίπτωση.

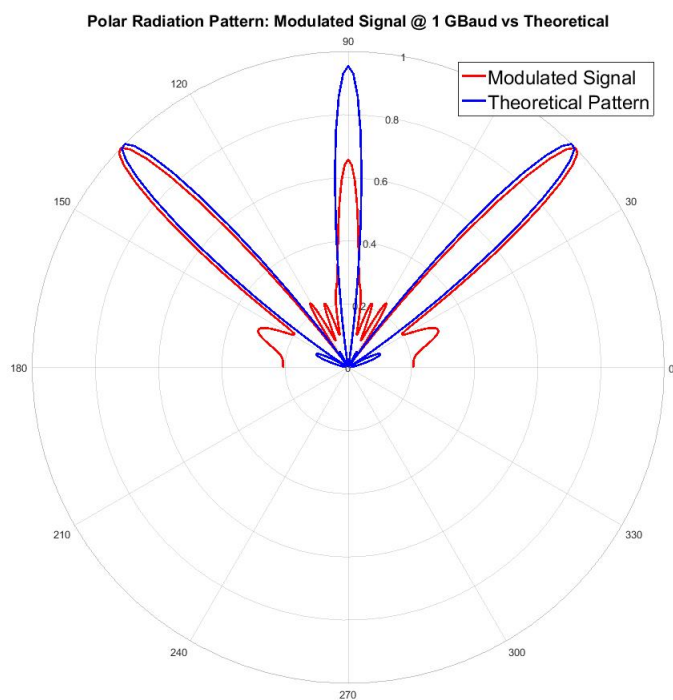
το εύρος ζώνης στα 15 GBaud, διατηρώντας τις υπόλοιπες μεταβλητές αμέτοχες. Παρατηρούμε ότι στην πρώτη περίπτωση το σήμα είναι αρκετά ικανοποιητικό καθώς η απόκλιση που εμφανίζεται λόγω beamsquint, όπως φαίνεται καλύτερα στο σχήμα 4.9α' είναι αμελητέα.

Αυτό που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι στην περίπτωση μετάδοσης στις 90°, δεν εμφανίζεται καμία επίπτωση σε περίπτωση αύξησης του εύρους ζώνης. Αυτό είναι αναμενόμενο και εξηγείται από την εξίσωση 2.32, καθώς το συνημίτονο της επιθυμητής γωνίας μηδενίζεται, και άρα δεν εμφανίζεται απόκλιση στη γωνία καθώς ο όρος $\frac{f_0}{f}$ μηδενίζεται λόγω του συνημιτόνου και άρα το μέγιστο ακτινοβολίας επιτυγχάνεται για την κατάλληλη γωνία. Έτσι, μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι, το φαινόμενο του beamsquint είναι πιο έντονο όσο

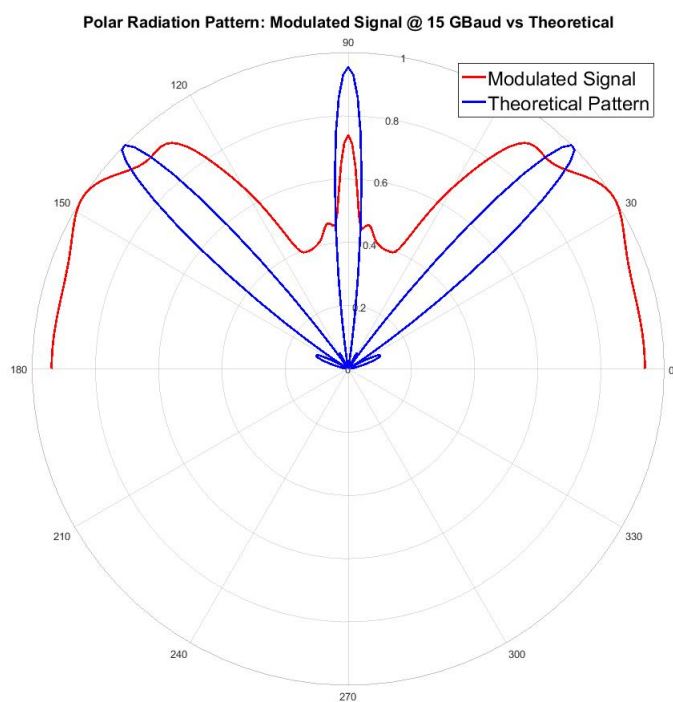
- αυξάνει ο όρος $\frac{\Delta f}{f_c}$ όπου Δf το εύρος ζώνης του σήματος και f_c η συχνότητα λειτουργίας, και
- αυξάνει ο όρος $\cos \gamma_0$ όπου γ_0 η γωνία επιθυμητής μετάδοσης, άρα όσο απομακρυνόμαστε από τις 90° και πλησιάζουμε στα όρια [0°, 180°].

Στη δεύτερη περίπτωση όμως, η επίδραση του beamsquint είναι πολύ πιο έντονη καθιστώντας το σήμα απαγορευτικό για μετάδοση. Προφανώς η περίπτωση των 15 GBaud είναι μία ακραία περίπτωση και χρησιμοποιείται στη συγκεκριμένη περίπτωση για το proof of concept.

Τέλος, για να ποσοτικοποιηθούν τα παραπάνω, θα γίνει μελέτη της υποβάθμισης της ποιότητας του σήματος, ως προς τον λόγο $\frac{\Delta f}{f_c}$. Θα εξεταστούν δύο διαφορετικές περιπτώσεις,

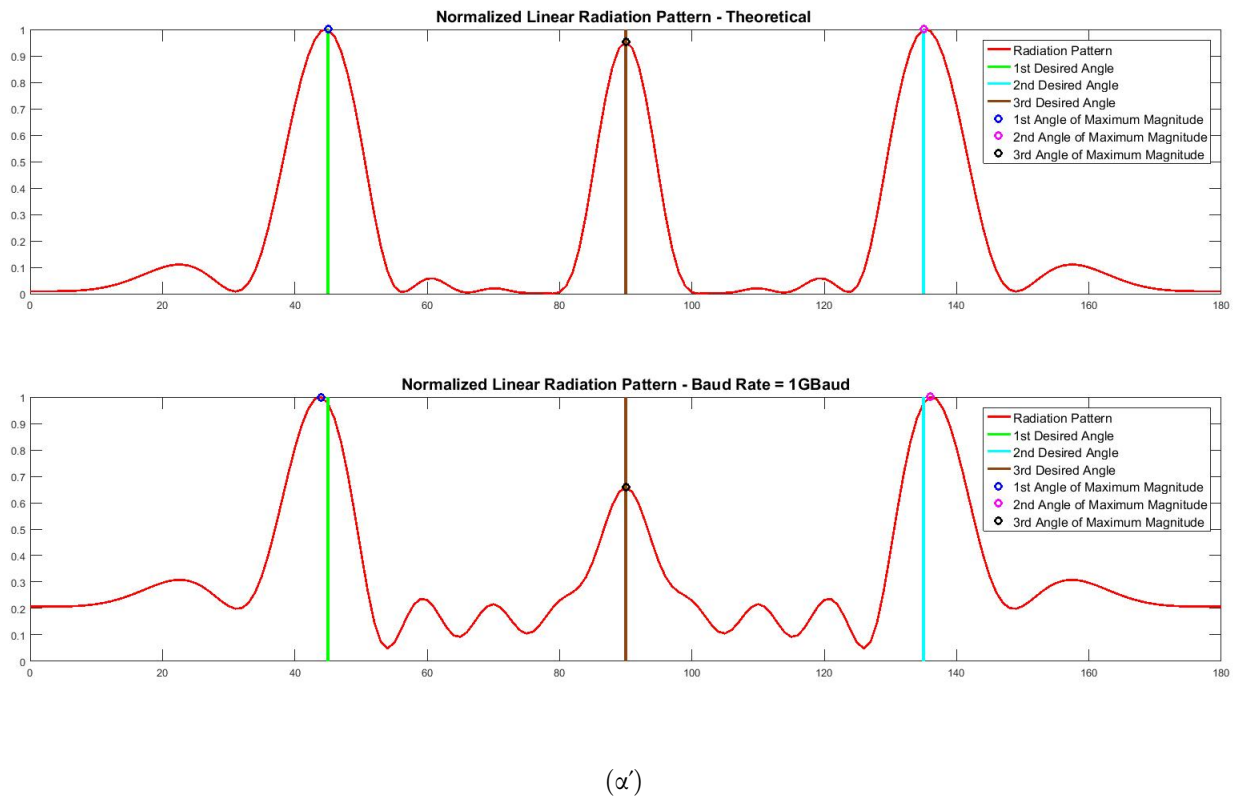


(α')

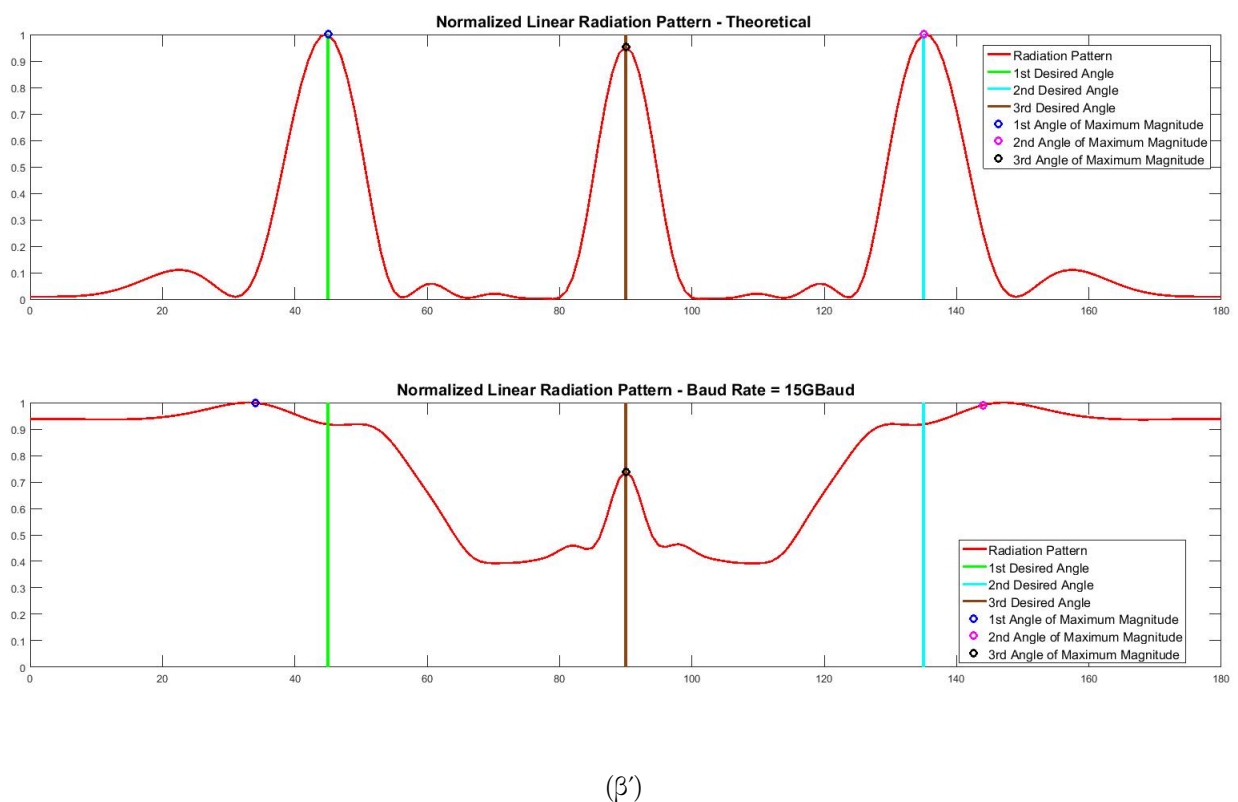


(β')

Σχήμα 4.8: Πολικό Διάγραμμα Ακτινοβολίας - Θεωρητικό Διάγραμμα (μπλε χρώμα) - Εκπεμπόμενο Διάγραμμα (κόκκινο χρώμα): (α') Εύρος ζώνης 1 GBaud (β') Εύρος ζώνης 15 GBaud

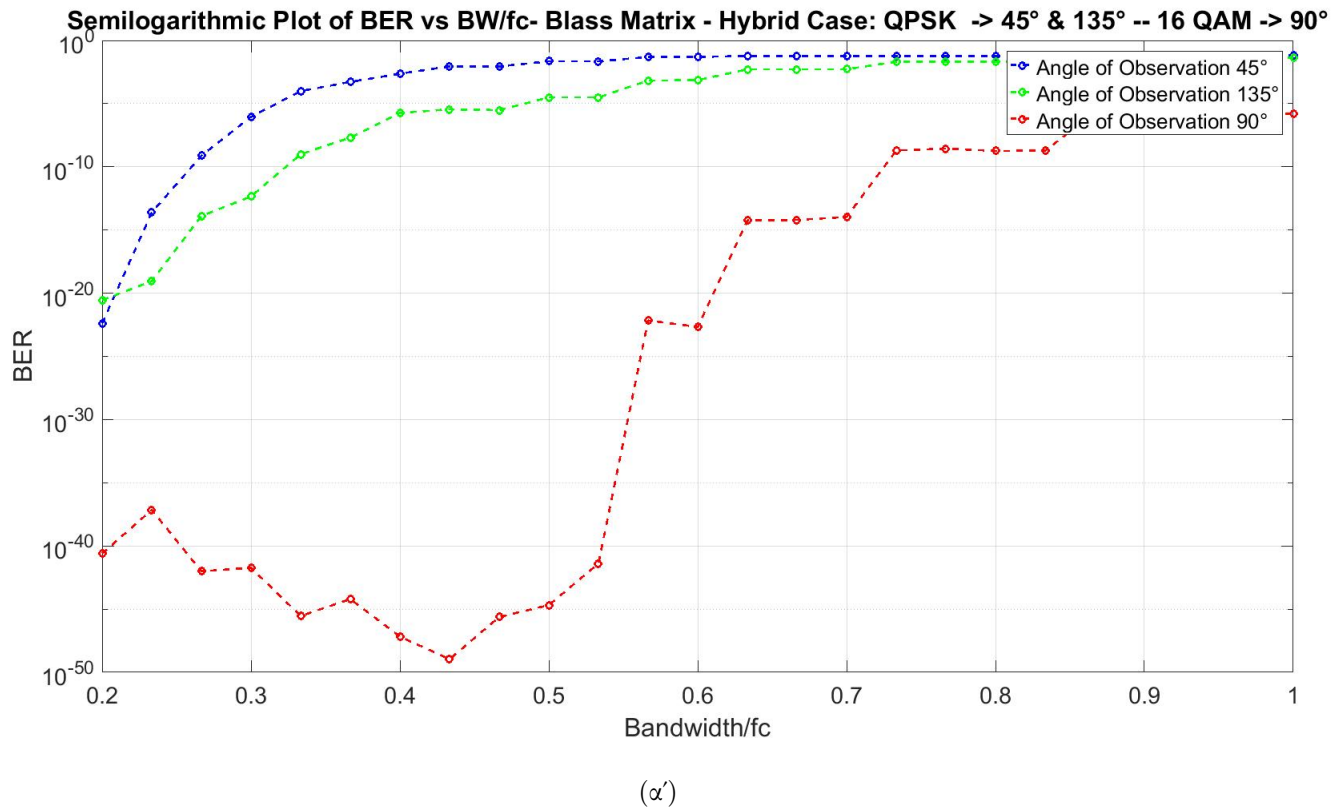


(α')

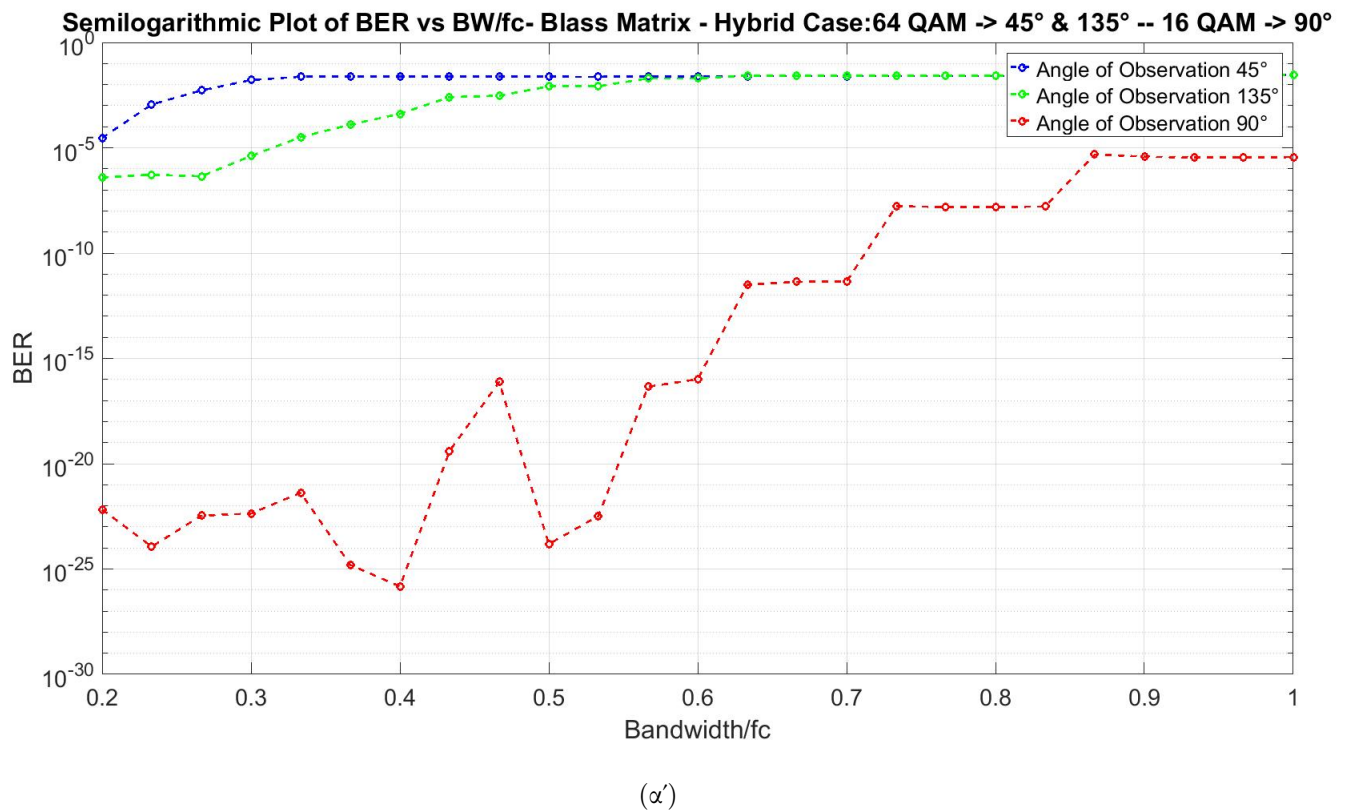


(β')

Σχήμα 4.9: Γραμμικά Διάγραμματα Ακτινοβολίας - Blass Matrix - Θεωρητικό Διάγραμμα και Εκπεμπόμενο Διάγραμμα - Οι γραμμές δείχνουν τις επιθυμητές γωνίες μετάδοσης και οι κύκλοι τις αντίστοιχες γωνίες μέγιστης ακτινοβολίας: (α') Εύρος ζώνης 1 GBaud (β') Εύρος ζώνης 15 GBaud



Σχήμα 4.10



Σχήμα 4.11: BER ως προς το Λόγο Εύρους Ζώνης - Φέρουσας Συχνότητας $\frac{\Delta f}{f_c}$ για Υβριδική Μετάδοση Δύο Περιπτώσεων (α') QPSK στις γωνίες 45° και 135° και 16-QAM στις 90° (β') 64-QAM στις γωνίες 45° και 135° και 16-QAM στις 90°

για χαμηλά και για υψηλά σχήματα διαμόρφωσης αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, στην πρώτη περίπτωση θα εξεταστεί μετάδοση QPSK στις γωνίες 45° και 135° , και 16-QAM στις 90° , ενώ στη δεύτερη θα εξεταστεί μετάδοση 64-QAM στις γωνίες 45° και 135° , και 16-QAM στις 90° . Η μετρική απόδοσης θα είναι το BER στο δέκτη σε κάθε περίπτωση, αυξάνοντας σταδιακά το εύρος ζώνης προς τη φέρουσα μικροκυματική συχνότητα. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται σχηματικά στα σχήματα 4.10α', 4.11α'.

Όπως συζητήθηκε υπάρχει εμφανής υποβάθμιση του σήματος όσο ο λόγος $\frac{\Delta f}{f_c}$ αυξάνει. Φαίνεται επίσης η ατρωσία του σήματος που μεταδίδεται στις 90° σε κάθε περίπτωση που επηρεάζεται κατά τι λιγότερο από τους υπόλοιπους λοβούς. Η ποιότητα του συγκεκριμένου σήματος επηρεάζεται κυρίως από λόγους παρεμβολής από τους άλλους λοβούς όσο αυξάνεται ο λόγος, και λιγότερο από το φαινόμενο του beamsquint. Ακόμα και στη χειρότερη περίπτωση όμως η μετάδοση του σήματος είναι εφικτή στις 90° , αφού το BER δεν ξεπερνάει το 10^{-5} . Η μετάδοση του σήματος στις άλλες γωνίες επηρεάζεται πολύ περισσότερο όπως ήταν αναμενόμενο και, από ένα σημείο και μετά, το σήμα καθίσταται απαγορευτικό για μεγάλα εύρη ζώνης. Παρόλα αυτά, στην πρώτη περίπτωση το σήμα μεταδίδεται ικανοποιητικά για λόγο $\frac{\Delta f}{f_c} = 0.25 - 0.3$, το οποίο ισοδυναμεί με ~ 4 GBaud όταν έχουμε φέρουσα στα 15GHz όπως εδώ. Στη δεύτερη περίπτωση ο λόγος αυτός είναι πιο χάρμηλα, αλλά η φασματική χρησιμοποίηση της δεύτερης περίπτωσης είναι σημαντικά υψηλότερη. Υπάρχει λοιπόν αυτό το tradeoff μεταξύ beamsquint και φασματικής χρησιμοποίησης.

4.3.2 Αποτελέσματα και Παρατηρήσεις - Διάταξη με TTD στοιχεία

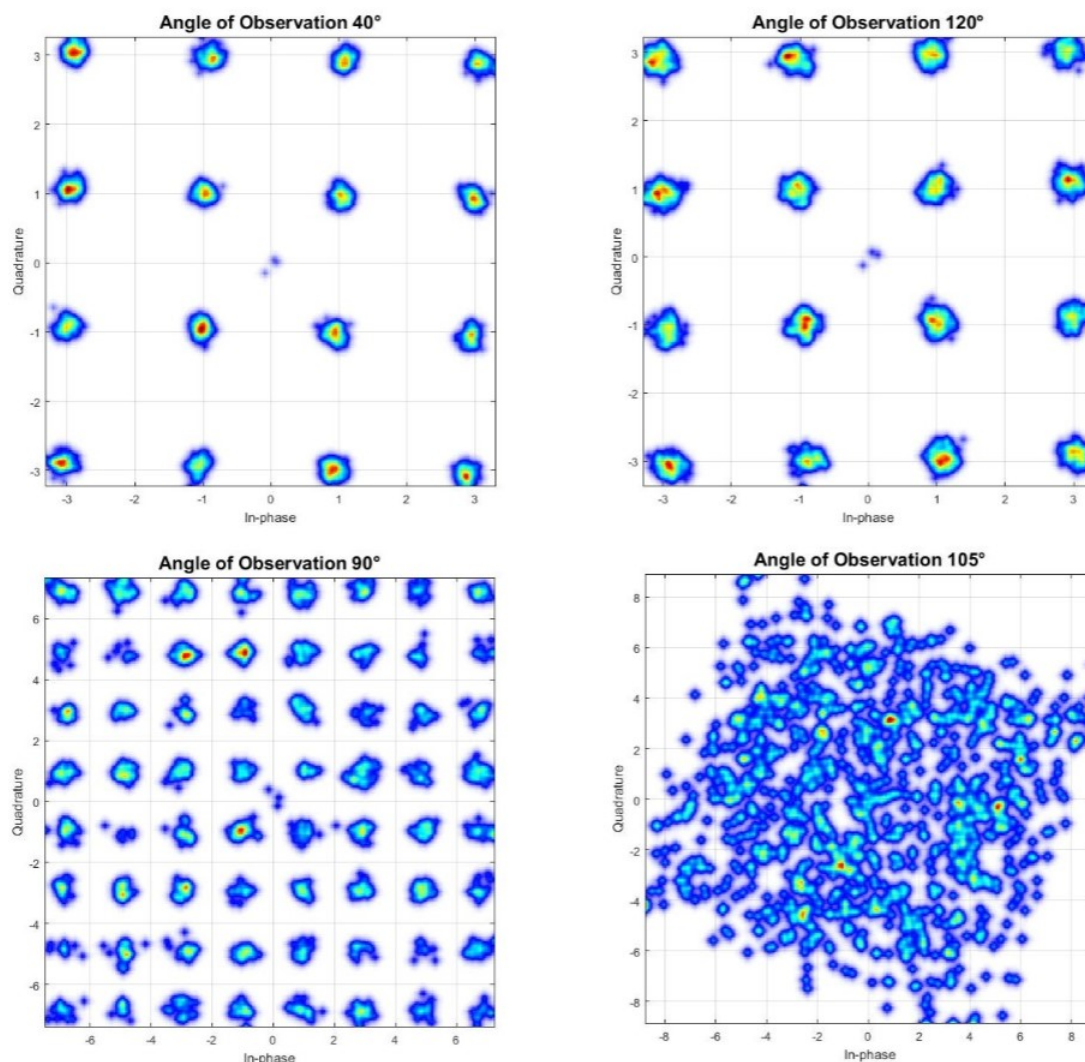
Στη συγκεκριμένη παράγραφο θα μελετηθεί προσομοιωτικά η διάταξη OBFN με TTD στοιχεία ως προς τις δυνατότητες που προσφέρει σε εφαρμογές σχηματοποίησης δέσμης, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση σε εφαρμογές πολυεκπομπής.

Αρχικά προσομοιώνονται οι παρακάτω καταστάσεις υβριδικής πολλαπλής πολυεκπομπής, που περιγράφονται στους Πίνακες 4.3, 4.4:

Πίνακας 4.3: Πρώτη Περίπτωση TTD Matrix - Υβριδική Λειτουργία Πολλαπλής Πολυεκπομπής. Μετάδοση με ρυθμό συμβόλων 1 GBaud, με παράγοντα εξάπλωσης 1 και κεντρική συχνότητα λειτουργίας $f = 15\text{GHz}$, για $N=8$ στοιχεία - Σχήμα 4.12

Σήμα	Πολυεκπομπή	Σχήμα Διαμόρφωσης	Γωνίες ($^\circ$)	Διέγερση	SNR (dB)
1	Ναι	16-QAM	40, 120	Ομοιόμορφη	28
2	Όχι	64-QAM	90	Ομοιόμορφη	28

Σε κάθε περίπτωση τα διαγράμματα αστερισμού είναι πολύ καθαρά και το BER παραμένει κάτω από 10^{-5} για τις περιπτώσεις της διαμόρφωσης 64-QAM και κάτω από 10^{-7} στις περιπτώσεις 16-QAM. Σε κάθε γωνία επιθυμητής παρατήρησης η πληροφορία μεταδίδεται αχέραιη, ενώ στις ενδιάμεσες γωνίες στο σήμα επικρατεί ο θόρυβος, καθιστώντας ανέφικτη την αποκωδικοποίηση της πληροφορίας και κατ'επέκταση της υποκλοπής της. Ακόμα και στην περίπτωση των 40° και 140° , που πλησιάζουν στα όρια της στοιχειοκεραίας, η ποιότητα του λαμβανόμενου



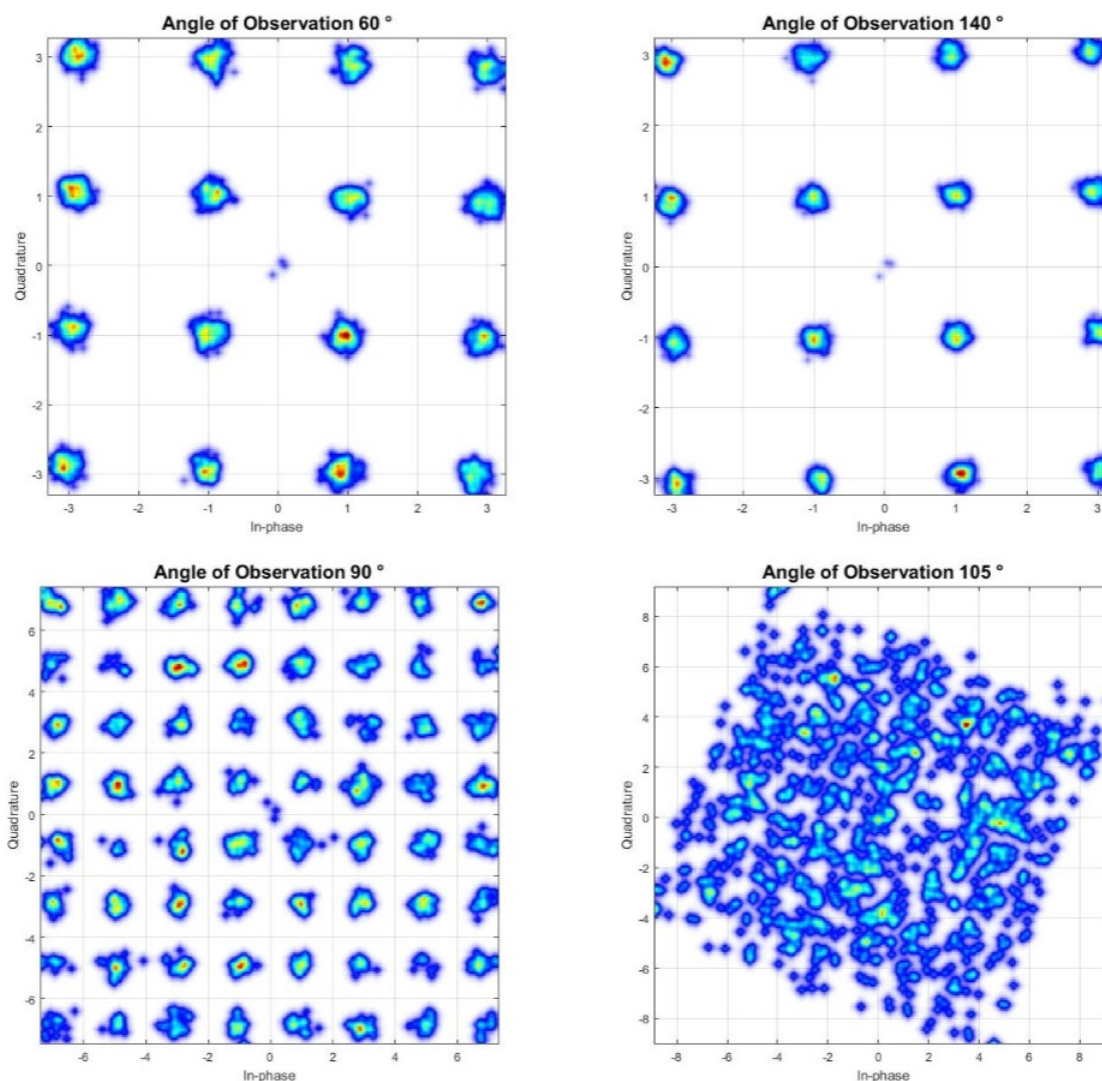
Σχήμα 4.12: Διαγράμματα Αστερισμού Πίνακα 1 - Γωνίες: 40° (πάνω αριστερά), 120° (πάνω δεξιά), 90° (κάτω αριστερά) και 105° (κάτω δεξιά).

Πίνακας 4.4: Δεύτερη Περίπτωση TTD Matrix - Υβριδική Λειτουργία Πολλαπλής Πολυεκπομπής. Μετάδοση με ρυθμό συμβόλων 1 GBaud, με παράγοντα εξάπλωσης 1 και κεντρική συχνότητα λειτουργίας $f = 15GHz$, για $N=8$ στοιχεία - Σχήμα 4.13

Σήμα	Πολυεκπομπή	Σχήμα Διαμόρφωσης	Γωνίες (°)	Διέγερση	SNR (dB)
1	Ναι	16-QAM	60, 140	Ομοιόμορφη	28
2	Όχι	64-QAM	90	Ομοιόμορφη	28

σήματος είναι πάρα πολύ καλή.

Στη συνέχεια, θεωρώντας μια γραμμική στοιχειοκεραία $N=8$ στοιχείων, έγινε προσομοίωση για την αξιολόγηση του συστήματος ως προς τη δημιουργία διαφορετικών λοβών ακτινοβολίας. Θεωρώντας τέσσερις διαφορετικές επιθυμητές διευθύνσεις ακτινοβολίας, μελετάται η επίπτωση της δημιουργίας ενός επιπλέον λοβού στους ήδη υπάρχοντες, ξεκινώντας από έναν

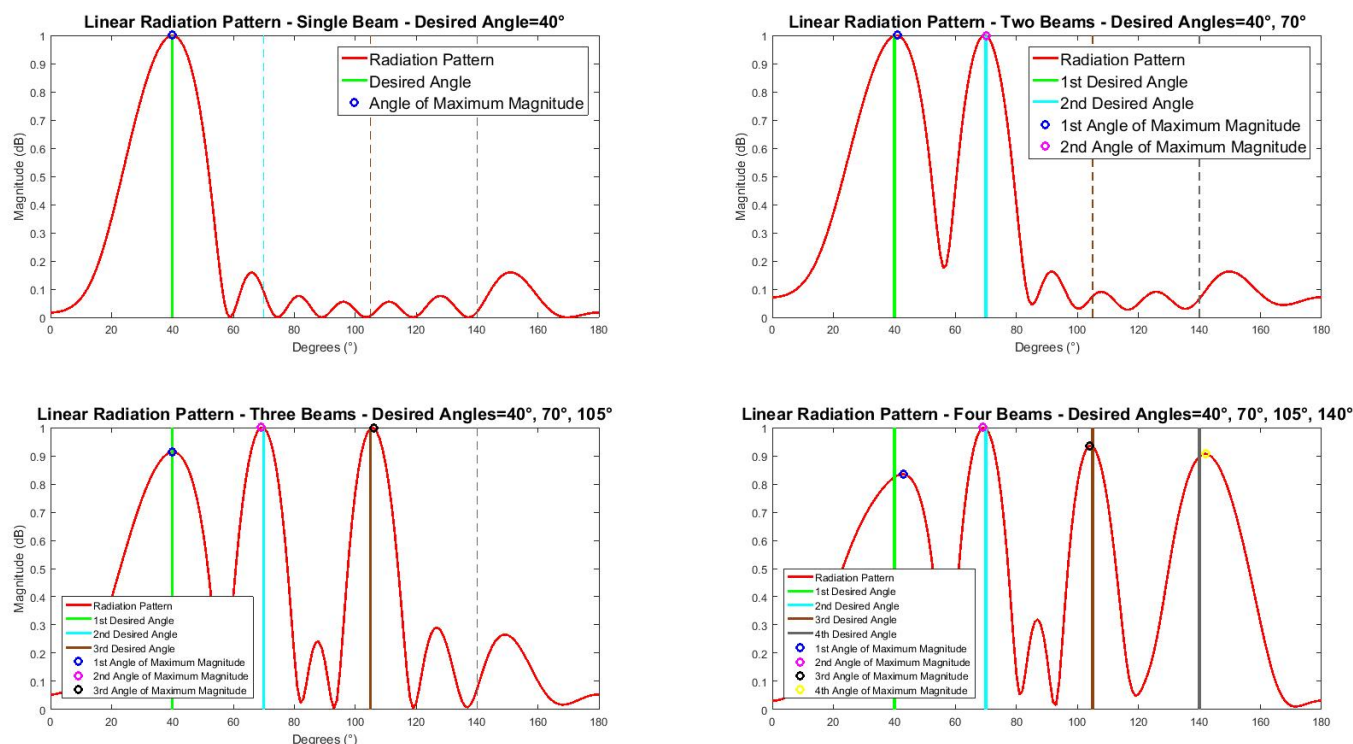


Σχήμα 4.13: Διαγράμματα Αστερισμού Πίνακα 1 - Γωνίες: 60° (πάνω αριστερά), 140° (πάνω δεξιά), 90° (κάτω αριστερά) και 105° (κάτω δεξιά).

και καταλήγοντας στις τέσσερις διαφορετικές γωνίες. Η σχηματική απεικόνιση της προσομοίωσης παρουσιάζεται στο σχήμα 4.14.

Όπως φαίνεται και από το σχήμα, το σύστημα παράγει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα ακόμα και στην περίπτωση τεσσάρων διαφορετικών λοβών με το ίδιο σήμα πληροφορίας. Η όποια απόκλιση εμφανίζεται οφείλεται στο φαινόμενο που περιγράφηκε στην εισαγωγή του υποκεφαλαίου 4.3. Τα αντίστοιχα διαγράμματα αστερισμού για μετάδοση σήματος 16-QAM, όπως αυτά λαμβάνονται στο δέκτη για τις τέσσερις γωνίες απεικονίζονται στο σχήμα 4.15.

Σε κάθε περίπτωση τα διαγράμματα αστερισμού είναι πολύ καθαρά, επιτρέποντας την μετάδοση πρακτικά χωρίς κανένα λανθασμένο σύμβολο, αφού το Bit Error Ratio παραμένει σε κάθε περίπτωση κάτω των 10^{-13} . Η μικρή στροφή του διαγράμματος που παρατηρείται στις γωνίες 70° και 140° οφείλεται στην μικρή απόκλιση που εμφανίζεται στα διαγράμματα ακτινοβολίας, όμως δεν επηρεάζει ουσιαστικά την ποιότητα του σήματος, ειδικότερα στην πε-



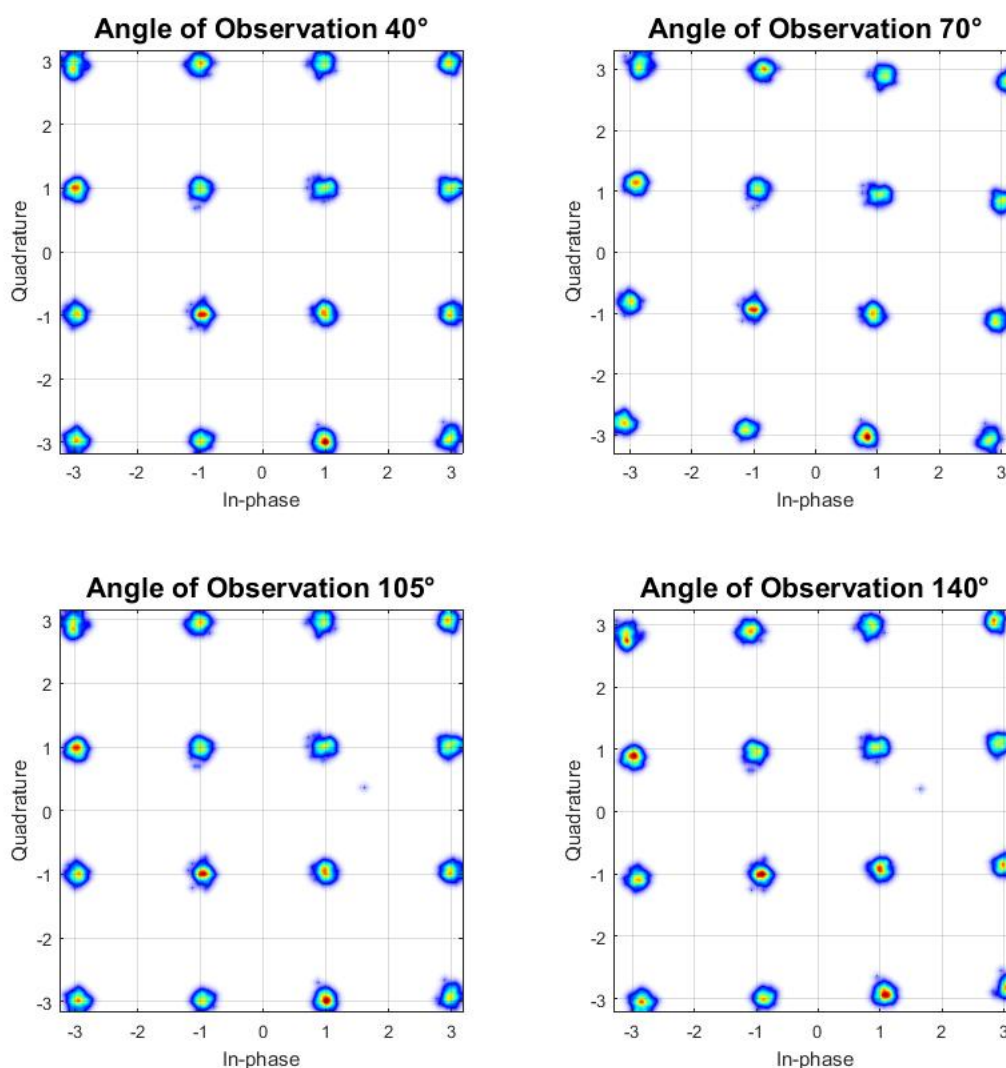
Σχήμα 4.14: Γραμμικό Διάγραμμα Ακτινοβολίας - TTD - Σταδιακή Αύξηση των Μεταδιδόμενων Διευθύνσεων

ρίπτωση διαμορφώσεων τάξης 16-QAM. Στην περίπτωση που η τάξη διαμόρφωσης αυξανόταν, και η απόσταση μεταξύ των διαφορετικών συμβόλων στο διάγραμμα αστερισμού μειωνόταν, η στροφή αυτή θα επηρέαζε κατά τι περισσότερο την ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος, χωρίς όμως να αποτελεί ουσιαστικό πρόβλημα, καθώς λύνεται εύκολα χρήση τεχνικών ψηφιακής επεξεργασίας σήματος στον δέκτη.

Στη συνέχεια θα μελετηθεί κατά πόσο επηρεάζεται η απόδοση της μετάδοσης σε μία δέσμη από την ύπαρξη άλλων δεσμών ίδιας πληροφορίας (multicast) αλλά και διαφορετικής (hybrid). Η μελέτη αυτή θα γίνει και στο Κεφάλαιο 5 πειραματικά.

Συγκεκριμένα, αρχικά μελετήθηκε για γωνία παρατήρησης 60° , με σχήμα διαμόρφωσης 16-QAM και συνολικό αριθμό στοιχείων κεραίας $N=4$, η περίπτωση που υπάρχει στην ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος σε σχέση με τη λειτουργία μονοεκπομπής, για την ίδια γωνία παρατήρησης, στις παρακάτω περιπτώσεις:

1. Πολυεκπομπή στη γωνία 120° - Δημιουργία ενός επιπλέον λοβού ίδιας πληροφορίας
2. Πολυεκπομπή στις γωνίες 90° και 120° - Δημιουργία δύο επιπλέον λοβών ίδιας πληροφορίας
3. Υβριδική εκπομπή στις γωνίες 90° και 120° - Δημιουργία δύο επιπλέον λοβών - Πολυεκπομπή για τις γωνίες 60° και 120° (16-QAM), Μονοεκπομπή για τη γωνία 90° (64-QAM)



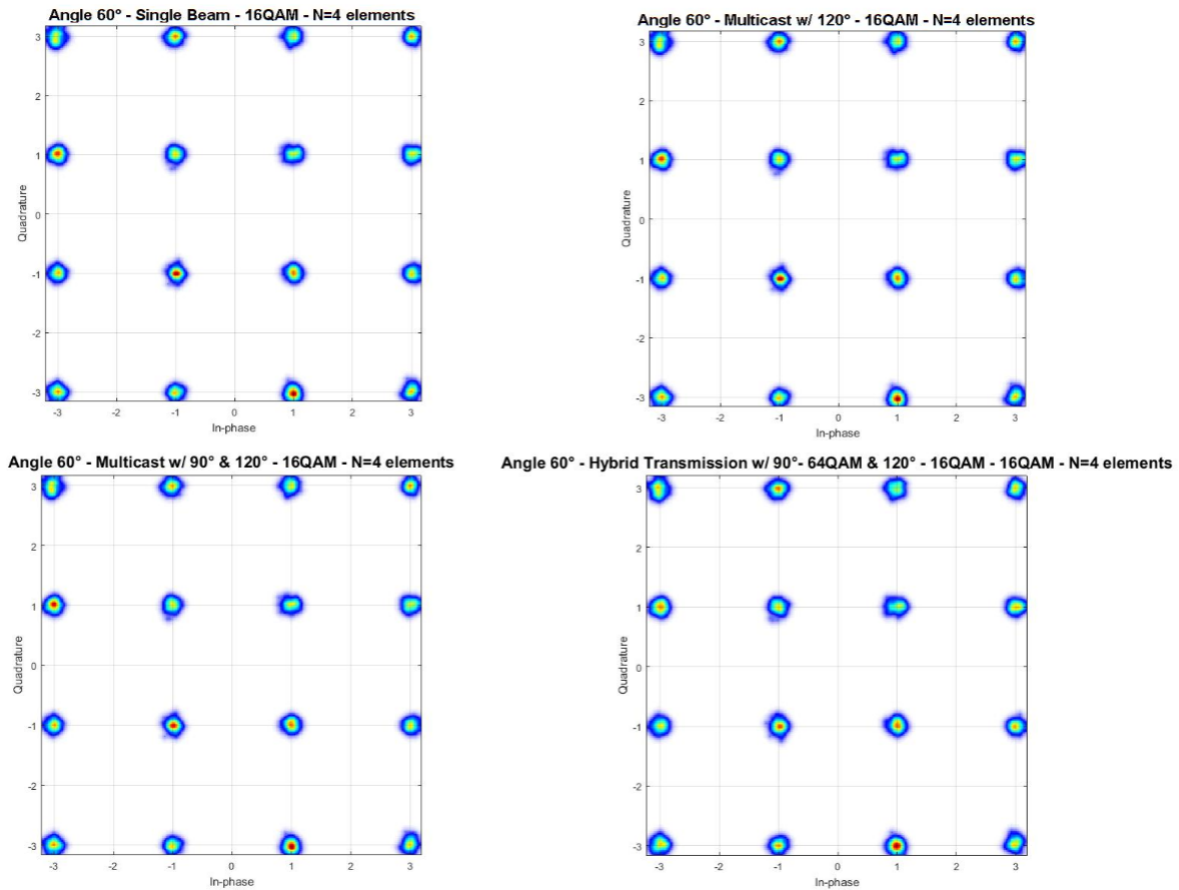
Σχήμα 4.15: Διαγράμματα Αστερισμού Σήματος 16-QAM για τις 4 Γωνίες: 40° (πάνω αριστερά), 70° (πάνω δεξιά), 105° (κάτω αριστερά) και 140° (κάτω δεξιά)

Τα λαμβανόμενα διαγράμματα αστερισμού σε κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις απεικονίζονται στο σχήμα 4.16.

Τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε σε κάθε περίπτωση είναι παραπάνω από ικανοποιητικά, και επιτρέπουν τη μετάδοση άνευ σφαλμάτων. Ενδεικτικά οι τιμές του BER παραμένουν της τάξης του 10^{-10} σε κάθε περίπτωση.

Στη συνέχεια ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία για γωνία παρατήρησης αυτή τη φορά στις 40° , πλησιάζοντας δηλαδή πιο κοντά στα όρια των δυνατοτήτων της κεραίας, για τις παρακάτω περιπτώσεις:

1. Πολυεκπομπή στη γωνία 140° - Δημιουργία ενός επιπλέον λοβού ίδιας πληροφορίας

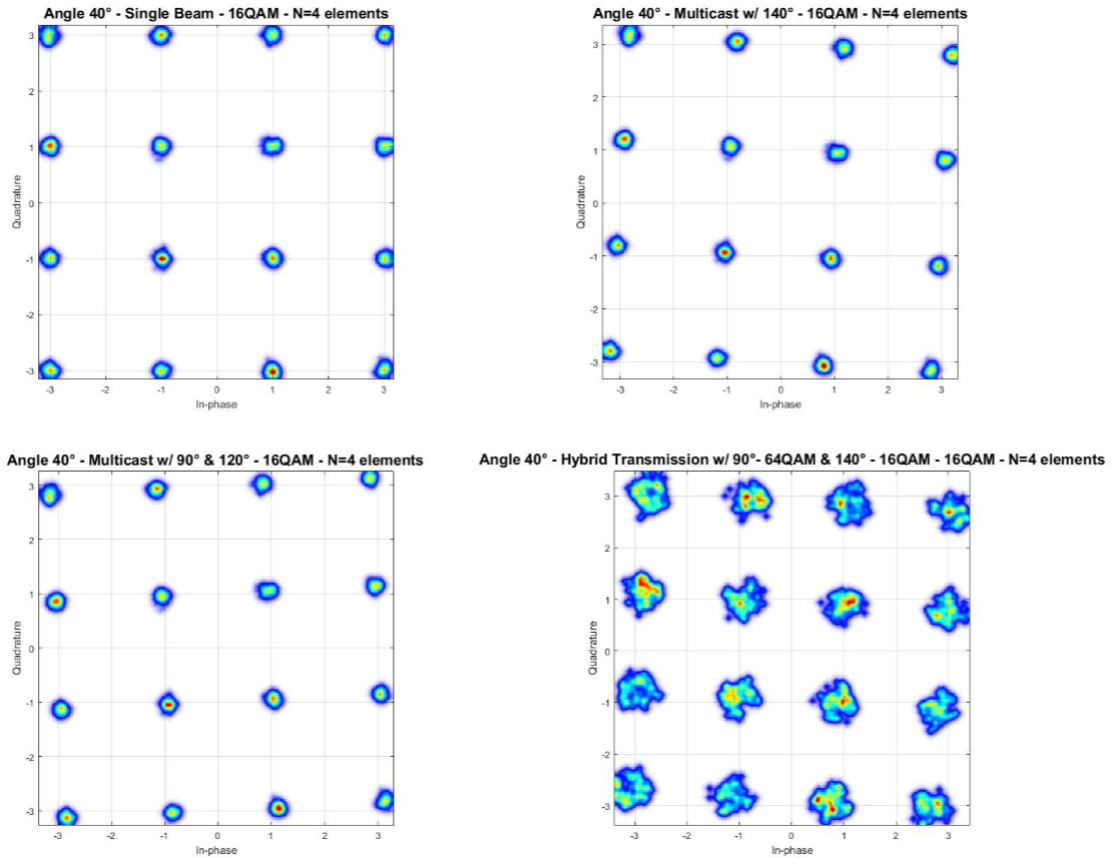


Σχήμα 4.16: Διαγράμματα Αστερισμού Σήματος 16-QAM για Γωνία Παρατήρησης 60° : Μονοεκπομπή (πάνω αριστερά), Πολυεκπομπή Δύο Λοβών (πάνω δεξιά), Πολυεκπομπή Τριών Λοβών (κάτω αριστερά) και Υβριδική Εκπομπή Τριών Λοβών (κάτω δεξιά)

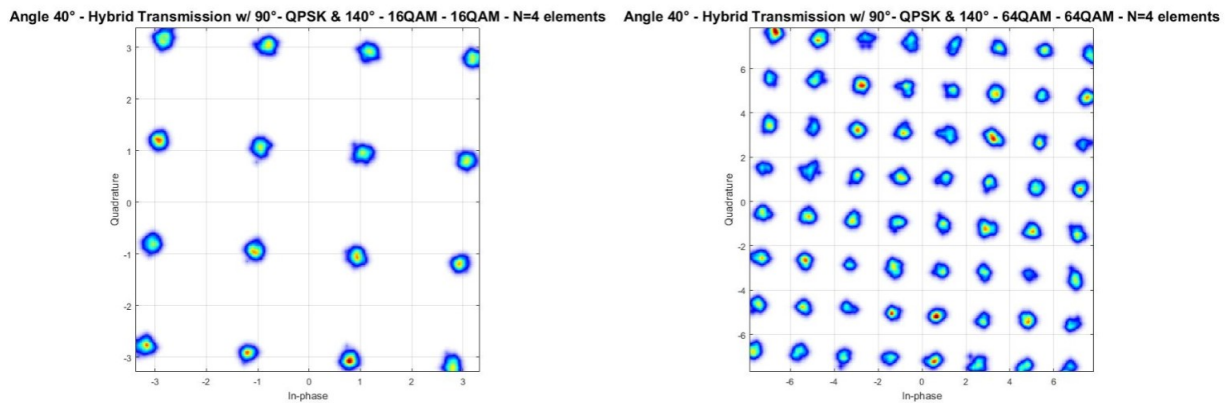
2. Πολυεκπομπή στις γωνίες 90° και 140° - Δημιουργία δύο επιπλέον λοβών ίδιας πληροφορίας
3. Υβριδική εκπομπή στις γωνίες 90° και 140° - Δημιουργία δύο επιπλέον λοβών - Πολυεκπομπή για τις γωνίες 60° και 120° (16-QAM), Μονοεκπομπή για τη γωνία 90° (64-QAM)

Τα διαγράμματα αστερισμού στο δέκτη απεικονίζονται στο σχήμα 4.17.

Παρατηρούμε ότι στις περιπτώσεις πολυεκπομπής, τα διαγράμματα αστερισμού, αν και παρουσιάζουν μία μικρή στροφή λόγω του φαινομένου της απόκλισης γωνίας που συζητήθηκε, παραμένουν ικανοποιητικά, με λόγο εσφαλμένων ψηφίων που δεν ξεπερνάει τα 10^{-8} . Στην περίπτωση της υβριδικής εκπομπής όμως τα διαγράμματα παρουσιάζουν αυξημένο θόρυβο, αυξάνοντας το BER στην τάξη του 10^{-5} . Αυτό συμβαίνει λόγω του σήματος που μεταδίδεται στις 90° και παρεμβάλλεται στη συγκεκριμένη διεύθυνση παρατήρησης. Αν μειώσουμε την τάξη διαμόρφωσης του σήματος που μεταδίδεται στις 90° από 64-QAM σε QPSK, κρατώντας σταθερά τα υπόλοιπα στοιχεία λαμβάνουμε τα αποτελέσματα του σχήματος 4.18



Σχήμα 4.17: Διαγράμματα Αστερισμού Σήματος 16-QAM για Γωνία Παρατήρησης 40° : Μονοεκπομπή (πάνω αριστερά), Πολυεκπομπή Δύο Λοβών (πάνω δεξιά), Πολυεκπομπή Τριών Λοβών (κάτω αριστερά) και Υβριδική Εκπομπή Τριών Λοβών (κάτω δεξιά)

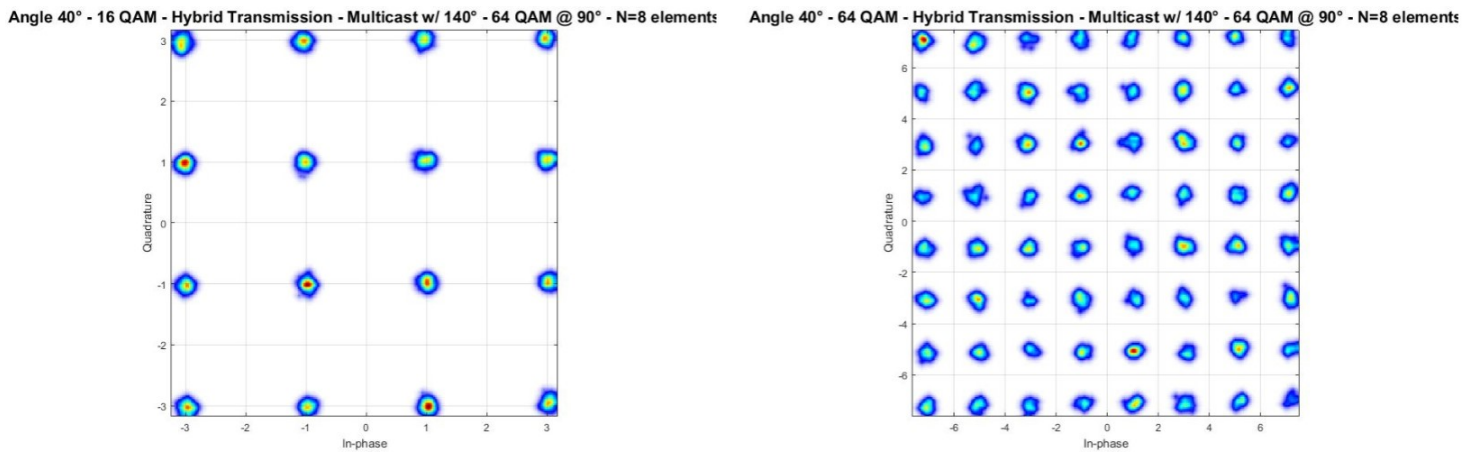


Σχήμα 4.18: Διαγράμματα Αστερισμού Σήματος για Γωνία Παρατήρησης 40° : 16-QAM (αριστερά), 64-QAM (δεξιά)

Παρατηρούμε ότι μειώνοντας την τάξη του σήματος που μεταδίδεται στις 90° , η μετάδοση του σήματος 16-QAM καθίσταται κατάati βελτιωμένη, και επιτρέπεται και η μετάδοση σήματος

υψηλότερης τάξης, όπως φαίνεται στο δεξί σχήμα του 4.18, με BER μικρότερο από 10^{-4} στην περίπτωση του 64-QAM και 10^{-9} στην περίπτωση του 16-QAM.

Αν τώρα αυξηθούν τα στοιχεία τις κεραίες από 4 σε 8, και χρησιμοποιώντας τεχνικές καταπίεσης πλευρικών λοβών όπως αυτές περιγράφηκαν παραπάνω (συγκεκριμένα εδώ χρησιμοποιήθηκε διέγερση Chebyshev για κάθε γωνία μετάδοσης ξεχωριστά, με λόγο πλευρικών 60 dB), είναι εφικτή η μετάδοση σήματος 64-QAM στις 90° και πολυεκπομπής στις 40° και στις 140° σήματος 16-QAM όπως περιγράφηκε παραπάνω, αλλά ακόμα και 64-QAM άνευ σφαλμάτων, με αντίστοιχους λόγους εσφαλμένων ψηφίων 10^{-43} και 10^{-9} . Σχηματική απεικόνιση των παραπάνω παρουσιάζεται στο σχήμα 4.19.



Σχήμα 4.19: Διαγράμματα Αστερισμού Σήματος για Γωνία Παρατήρησης 40° για $N=8$ στοιχεία με Διέγερση Chebyshev: 16-QAM (αριστερά), 64-QAM (δεξιά) - Μετάδοση Άνευ Σφαλμάτων σε Κάθε Περίπτωση

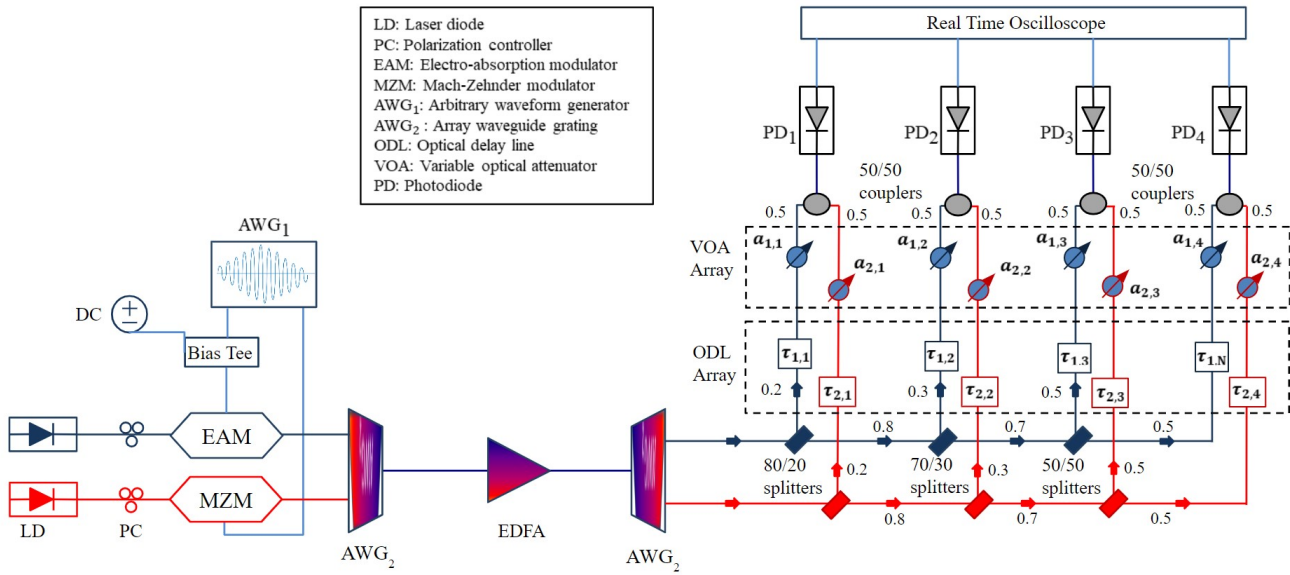
Κεφάλαιο 5

Πειραματική ανάλυση

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα γίνει περιγραφή της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε στο Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών, για την υλοποίηση του Οπτικού Δικτύου Σχηματοποίησης Δέσμης με στοιχεία Πραγματικής Καθυστέρησης που συζητήθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια. Η διάταξη αυτή υλοποιήθηκε στο εργαστήριο κατά την εκπόνηση του Ευρωπαϊκού Προγράμματος Έρευνας ICT-HAMLET, και αποτελεί την bulk μορφή ενός 2×4 TTD OBFN με δυνατότητες για υποστήριξη δύο σημάτων πληροφορίας, και δημιουργία τεσσάρων οπτικών μονοπατιών μέχρι και τη φωτοδίοδο όπου ανιχνεύονται πριν την υποθετική τροφοδότησή τους στα στοιχεία μιας γραμμικής στοιχειοκεραίας τεσσάρων στοιχείων. Θα γίνει αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της διάταξης με μετρικές επίδοσης το Bit Error Ratio των λαμβανόμενων σημάτων και τη σωστή σχηματοποίηση του διαγράμματος ακτινοβολίας, συγκρίνοντας σε κάθε περίπτωση τα εν λόγω αποτελέσματα με τα αντίστοιχα που προέκυψαν στην προσομοιωτική μελέτη του προηγούμενου Κεφαλαίου.

5.1 Περιγραφή της Πειραματικής Διάταξης

Η σχηματική απεικόνιση της διάταξης που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στο σχήμα 5.1.



Σχήμα 5.1: Σχηματική Απεικόνιση της Πειραματικής Διάταξης

Στην απεικονιζόμενη διάταξη, οι οπτικές πηγές δημιουργούν δύο οπτικά φέροντα, τα οποία μετά από δύο αντίστοιχους ρυθμιστές πόλωσης, καταλήγουν σε δύο οπτικούς διαμορφωτές, έναν διαμορφωτή ηλεκτροαπορόφησης (Electro-absorption Modulator, EAM) και έναν Mach-Zehnder (Mach-Zehnder Modulator, MZM) σε μήκη κύματος $\lambda_{EAM} = 1556.55nm$ και $\lambda_{MZM} = 15568.15nm$ αντίστοιχα. Οι διαμορφωτές πολώνονται στο σωστό σημείο μέσω κατάλληλα ρυθμισμένων τροφοδοτικών DC, και λαμβάνουν το αντίστοιχο RF σήμα μέσω μιας γεννήτριας αυθαίρετων κυματομορφών (Arbitrary Waveform Generator, AWG) που απεικονίζεται με AWG_1 στο σχήμα. Η κατάλληλη πόλωση των διαμορφωτών έγκειται στην πόλωσή τους στο κέντρο της γραμμικής περιοχής της συνάρτησης μεταφοράς τους, με γνώμονες την επίτευξη του μεγαλύτερου δυνατού λόγου σβέσης στην έξοδο του διαμορφωτή και της χαμηλότερης δυνατής παραμόρφωσης του σήματος λόγω μη γραμμικοτήτων.

Τα οπτικά διαμορφωμένα πλέον σήματα συντίθενται μέσω ενός Array Waveguide Grating, ο οποίος λειτουργεί σαν ένας παθητικός πολυπλέκτης, επιλεκτικός ως προς τα μήκη κύματος εισόδων και εξόδου με προκαθορισμένο τρόπο. Η ίδια διάταξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σαν αποπολυπλέκτης, όπως και γίνεται μετά την ενίσχυση του συντεθειμένου σήματος που υλοποιείται χρήση ενός ενισχυτή ερβίου (Erbium-Doped Fiber Amplifier). Το κάθε σήμα που προκύπτει μετά την αποπολυπλεξία τροφοδοτείται στα αντίστοιχα μονοπάτια όπως και στην προσομοίωση που μελετήθηκε μέσω οπτικών διαχωριστών ισχύος με την ιδιαιτερότητα ότι, λόγω μη διαθεσιμότητας διαχωριστών με τον κατάλληλο λόγο διαχωρισμού, χρησιμοποιήθηκαν οι διαθέσιμοι διαχωριστές που φάνινονται στο σχήμα 5.1, με σκοπό τον όσο το δυνατόν καλύτερο ισομοιασμό της ισχύος στα τέσσερα μονοπάτια.

Σε κάθε μονοπάτι υπάρχει μία ρυθμιζόμενη ως προς την καθυστέρηση που εισάγει, οπτική

γραμμή καθυστέρησης και ένας εξασθενητής ισχύος, με σκοπό τον έλεγχο της φάσης και του πλάτους των σημάτων πριν τις φωτοδιόδους, όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4. Για την εισαγωγή της κατάλληλης καθυστέρησης και άρα στροφής φάσης από τα ODLs χρησιμοποιούνται μότερες οι οποίοι ελέγχουν τα ODLs. Οι μότερες αυτοί με τη σειρά τους ελέγχονται από ένα raspberry pi στο οποίο έχει υλοποιηθεί ένα Graphical User Interface (GUI) σε περιβάλλον Python το οποίο παίρνει ως είσοδο την επιθυμητή γωνία στόχευσης, υπολογίζει τις κατάλληλες καθυστερήσεις που πρέπει να εισηχθούν σε κάθε ODL και τις εισάγει από τους αντίστοιχους μότερες που τις κινούν. Τα ρυθμισμένα πλέον σήματα συντίθενται μέσω ενός οπτικού coupler και στη συνέχεια ανιχνεύονται από τις N φωτοδιόδους.

Τα ηλεκτρικά σήματα στην έξοδο των φωτοδιδών εισάγονται σε έναν Real Time Oscilloscope (RTO) ο οποίος αποθηκεύει και απεικονίζει σε πραγματικό χρόνο τα δεδομένα που εισάγονται στις εισόδους του, δίνοντας παράλληλα συγκεκριμένες επιλογές για την επεξεργασία του σήματος σε πραγματικό χρόνο. Τέτοιες τεχνικές επεξεργασίας που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διεκπεραίωση του πειράματος είναι η εισαγωγή βαθυπερατού φίλτρου, η παρεμβολή (interpolation), η απεικόνιση του μετασχηματισμού Fourier σε πραγματικό χρόνο κ.α. Τέλος, ο RTO επικοινωνεί με έναν υπολογιστή που ανήκει στο ίδιο IP υποδίκτυο μέσω ενός ακόμα GUI που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον MATLAB, το οποίο παίρνει ως είσοδο παραμέτρους σχετικές με την αποθήκευση των αρχείων τοπικά στον RTO.

5.2 Διαδικασία Πειράματος

Η διαδικασία του πειράματος είχε ως αφετηρία την εύρεση των πλέων αποδοτικών τιμών σε ότι αφορά τις παραμέτρους των διατάξεων που χρησιμοποιήθηκαν με γνώμονα την βελτίωση της συνολικής αποδοτικότητας του συστήματος. Έτσι, μετά από την περάτωση των κατάλληλων διερευνητικών διαδικασιών, οι βέλτιστες τιμές προέκυψαν ως εξής:

- Εκπεμπόμενη Οπτική Ισχύς από τα laser 10 dBm και για τα δύο.
- Πόλωση του Mach Zehnder: 6 Volts (Καλύτερο trade-off μεταξύ καταπίεσης μη γραμμικοτήτων και πόλωση στη μέση της γραμμικής περιοχής)
- Πόλωση EAM: -1.4 Volts
- Ρεύμα Ενισχυτή Ερβίου 1800 mA
- Εκπεμπόμενα Σήματα:
 1. Παλμοί Ανοψωμένων Συνημιτόνων με παράγοντα εξάπλωσης 1
 2. Φέρουσα Μικροκυματική Συχνότητα: 15 GHz
 3. Ρυθμός Συμβόλων: 1 GBaud
 4. Πλάτος Σημάτων: 500 mV_{pp}
- Λαμβανόμενα Σήματα στον RTO:

1. $80 \times 10^9 \frac{\text{Δείγματα}}{s}$
 2. Παρεμβολή: 4 δείγματα τύπου $\frac{\sin x}{x}$
 3. Έφαρμογή Βαθυπερατού Φίλτρου Συχνότητας Αποκοπής: 20 GHz
- Πόλωση Φωτοδιόδων: 5 Volts (προκαθορισμένο)
 - Πόλωση των Motors: 12 Volts (προκαθορισμένο)

Σε κάθε περίπτωση από αυτές που μελετήθηκαν και θα αναλυθούν παρακάτω, η διαδικασία εκκινούσε με την προσομοίωση σε περιβάλλον MATLAB της εκάστοτε δοκιμής για την εύρεση των κατάλληλων πλατών, καθώς αυτό είναι και το μόνο κομμάτι του πειράματος που γίνεται χειροκίνητα. Αφού τα πλάτη (ή καλύτερα η αναλογία πλατών) ρυθμίζονται σωστά, η υπόλοιπη διαδικασία έγγειται στην εισαγωγή μέσω του GUI στο raspberry pi των επιθυμητών γωνιών και τη καταγραφή των αποτελεσμάτων στον RTO. Τα αποτελέσματα αυτά επεξεργάζονται στο MATLAB, όπου αρχικά δημιουργείται το αντίστοιχο διάγραμμα ακτινοβολίας, όπως αυτό προκύπτει από τα τέσσερα λαμβανόμενα σήματα, και στην συνέχεια, το σήμα που αντιστοιχεί στη γωνία παρατήρησης περνά μια τυπική αλυσίδα ψηφιακής επεξεργασίας σήματος, πριν γίνει η τελική αξιολόγηση του συστήματος, ως προς την ποιότητα του εκάστοτε διαγράμματος αστερισμού στο δέκτη και του λόγου εσφαλμένων ψηφίων που προκύπτει σε κάθε περίπτωση.

5.3 Πειραματικά Αποτελέσματα

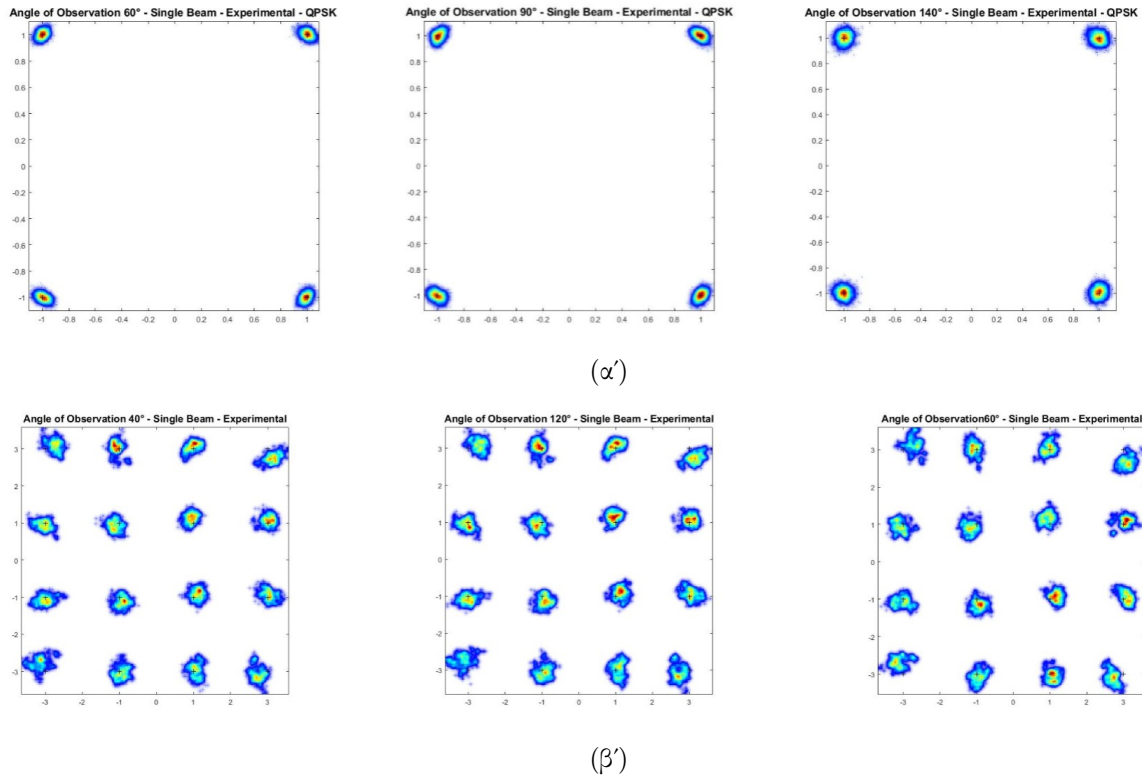
5.3.1 Μονοεκπομπή

Αρχικά, δοκιμάστηκε το σύστημα σε περιπτώσεις μονοεκπομπής. Η διέγερση των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε στην προκειμένη περίπτωση είναι ομοιόμορφη, δηλαδή τα πλάτη των σημάτων ήταν ίσα για τα τέσσερα κανάλια. Τα αποτελέσματα όπως αυτά προέκυψαν βάσει της διαδικασίας που περιγράφηκε προηγουμένως αποτυπώνονται στον πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1: Πειραματικό Case: 1 - Μονοεκπομπή. Bit Error Ratio ως προς τις διάφορες γωνίες για δύο διάφορα σχήματα διαμόρφωσης - Λαμβανόμενη Οπτική Ισχύς στην Είσοδο του Δικτύου Σχηματοποίησης Δέσμης: -1dBm για κάθε κανάλι

Διαμ. Γωνίες	40°	60°	90°	120°	140°
16-QAM	$1.39 \cdot 10^{-7}$	$9.97 \cdot 10^{-7}$	$2.99 \cdot 10^{-6}$	$3.53 \cdot 10^{-7}$	$9.63 \cdot 10^{-8}$
QPSK	$2.92 \cdot 10^{-291}$	$1.03 \cdot 10^{-201}$	$6.862.92 \cdot 10^{-179}$	$1.34 \cdot 10^{-193}$	$1.22 \cdot 10^{-197}$

Ενδεικτικά, κάποια διαγράμματα αστερισμού απεικονίζονται στα σχήματα 5.2α' και 5.2β'. Όπως φαίνεται τόσο από τα σχήματα, όσο και από τις τιμές του BER η μετάδοση είναι πολύ ικανοποιητική όταν έχουμε διαμόρφωση 16-QAM, ενώ όταν έχουμε QPSK η μετάδοση δεν παρουσιάζει κανένα λάνθασμένο ψηφίο και τα διαγράμματα αστερισμού είναι ιδανικά.



Σχήμα 5.2: Πειραματικά Διαγράμματα Αστερισμού - 1 λοβός: (α') QPSK (β') 16-QAM

5.3.2 Πολυεκπομπή

Δύο Λοβοί

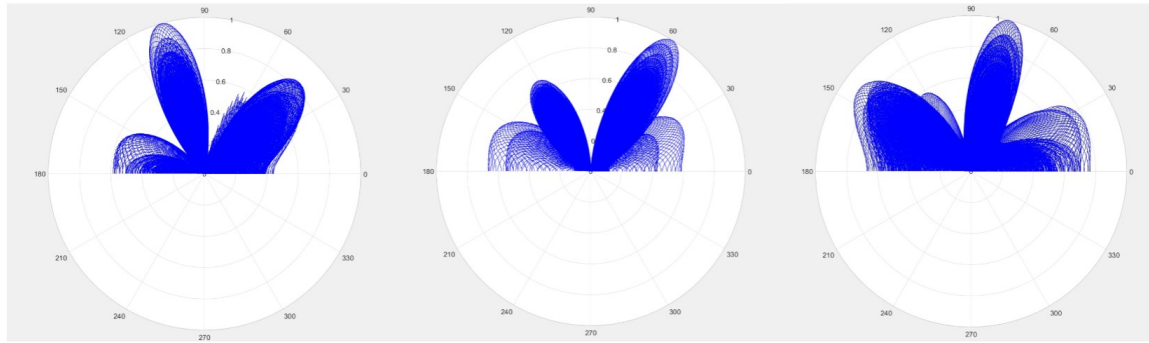
Στο συγκεκριμένο κομμάτι εξετάστηκε η δυνατότητα του συστήματος για πολυεκπομπή σε δύο διαφορετικές κατευθύνσεις. Τα ζευγάρια που εξετάστηκαν είναι: $[60^\circ, 120^\circ]$, $[40^\circ, 105^\circ]$, $[75^\circ, 140^\circ]$. Οι βέλτιστες διεγέρσεις, όπως αυτές προέκυψαν από την προσομοίωση, φαίνονται στον πίνακα 5.2

Πίνακας 5.2: Πειραματικό Case: 2 - Πολυεκπομπή Δύο Λοβών - Βέλτιστες Διεγέρσεις σε Κάθε Ζευγάρι Γωνιών - Τελική Αναλογία Πλατών μετά τη Σύνθεση των Επιμέρους Διεγέρσεων

Ζευγάρι Γωνιών	Διέγερση 1 ^{ης} Γωνίας	Διέγερση 2 ^{ης} Γωνίας	Αναλογίες Πλατών
$[40^\circ, 105^\circ]$	Γκαουσιανή 1.5	Γκαουσιανή 1.5	$[1, 0, 1, 0]$
$[60^\circ, 120^\circ]$	Ομοιόμορφη	Ομοιόμορφη	$[1, 0, 1, 0]$
$[75^\circ, 140^\circ]$	Γκαουσιανή 1.5	Γκαουσιανή 1.5	$[0.37, 0.04, 1, 0.04]$

Τα διαγράμματα ακτινοβολίας, όπως αυτά προέκυψαν σε πραγματικό χρόνο από τον RTO για τα τρία ζεύγη γωνιών παρατίθενται στο σχήμα 5.3.

Τα τρία αυτά ζευγάρια εξετάστηκαν ως προς τη δυνατότητά τους να μεταδώσουν σήματα QPSK και 16-QAM. Το λαμβανόμενο BER σε κάθε περίπτωση, και κάποια διαγράμματα



Σχήμα 5.3: Πειραματικά Διαγράμματα Ακτινοβολίας - Πολυεκπομπή - 2 Λοβοί - $[40^\circ, 105^\circ]$ Αριστερά - $[60^\circ, 120^\circ]$ Κέντρο - $[75^\circ, 140^\circ]$ Δεξιά

αστερισμού εμφανίζονται στον πίνακα 5.3 και στα σχήματα 5.4α', 5.4β' αντίστοιχα.

Πίνακας 5.3: Πειραματικό Case: 2 - Πολυεκπομπή Δύο Λοβών. Bit Error Ratio ως προς τα διάφορα ζεύγη γωνιών για δύο διάφορα σχήματα διαμόρφωσης - Λαμβανόμενη Οπτική Ισχύς στην Είσοδο του Δικτύου Σχηματοποίησης Δέσμης: -1dBm για κάθε κανάλι

Διαμ. Γωνίες	40°	105°	60°	120°	75°	140°
16-QAM	$1.06 \cdot 10^{-6}$	$1.01 \cdot 10^{-6}$	$2.14 \cdot 10^{-6}$	$2.14 \cdot 10^{-6}$	$2.4 \cdot 10^{-7}$	$3.51 \cdot 10^{-8}$
QPSK	$3 \cdot 10^{-143}$	$1.01 \cdot 10^{-145}$	$3.48 \cdot 10^{-150}$	$1.5 \cdot 10^{-107}$	$2.67 \cdot 10^{-133}$	$2.7 \cdot 10^{-132}$

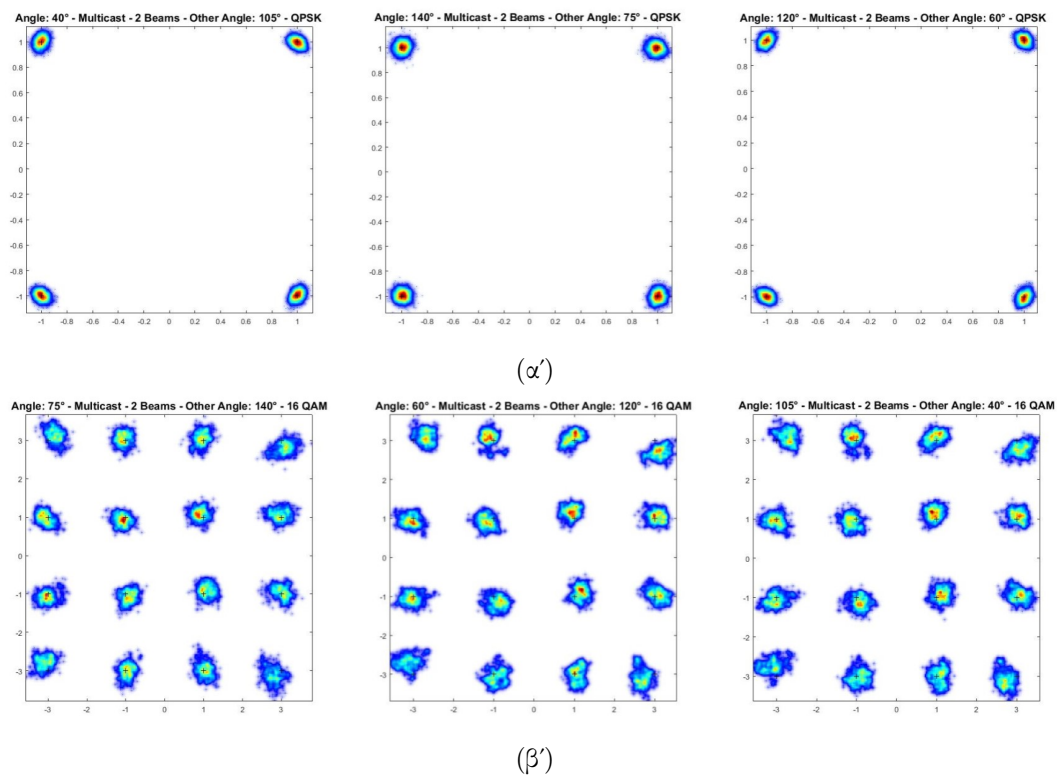
Παρατηρούμε ότι και στη συγκεκριμένη περίπτωση η μετάδοση είναι άκρως επιτυχημένη για QPSK, και δεν παρουσιάζεται κανένα λανθασμένο ψηφίο, ενώ στην περίπτωση του 16-QAM, ο λόγος εσφαλμένων ψηφίων είναι πολύ χαμηλός, ενώ παρουσιάζεται κάποια μικρή στρόφη στα σύμβολα που απέχουν το περισσότερο από το κέντρο των αξόνων. Αυτό οφείλεται πιθανότατα σε κάποια μη γραμμικά φαινόμενα που υπεισέρχονται στο σύστημα, τα οποία διεγείρονται πιο πολύ από αυτά τα σύμβολα, μιας και αυτά τα σύμβολα απαιτούν μεγαλύτερη ενέργεια.

Τρεις Λοβοί

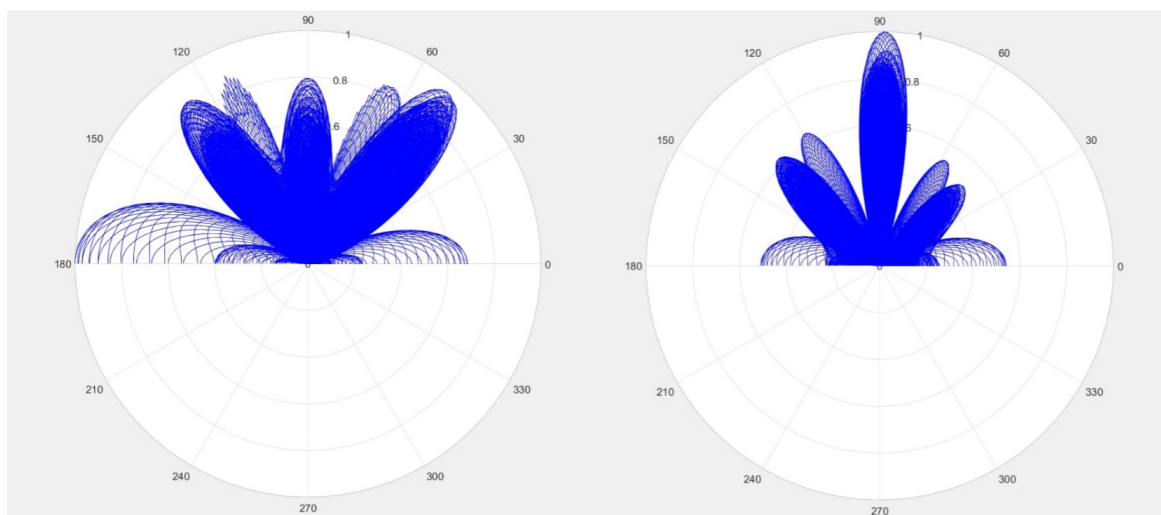
Αντίστοιχα με προηγουμένως, εδώ θα μελετηθεί η απόδοση του συστήματος για τη διαμόρφωση τριών λοβών ακτινοβολίας. Για λόγους έκτασης, θα μελετηθεί μόνο η μετάδοση 16-QAM, η οποία είναι και η πιο απαιτητική. Στον πίνακα 5.4 αποτυπώνονται οι βέλτιστες διεγέρσεις, όπως αυτές προέκυψαν προσομοιωτικά. Στο σχήμα 5.5 απεικονίζονται τα διαγράμματα ακτινοβολίας, όπως αυτά προέκυψαν σε πραγματικό χρόνο κατά τη διάρκεια διεξαγωγής του πειράματος.

Ο πίνακας 5.5 αποτυπώνει αντίστοιχα τα BER που μετρήθηκαν σε κάθε περίπτωση. Σημειώνεται ότι για να ικανοποιηθούν οι ενεργειακές ανάγκες του συστήματος, το πλάτος του ηλεκτρικού σήματος από τον AWG αυξήθηκε στα 700mV_{pp} . Τα αντίστοιχα διαγράμματα αστερισμού φαίνονται στο σχήμα 5.6.

Όπως φαίνεται, ακόμα και για τη δημιουργία τριών λοβών ακτινοβολίας, η μετάδοση είναι



Σχήμα 5.4: Πειραματικά Διαγράμματα Αστερισμού - Πολυεκπομπή - 2 λοβοί: (α') QPSK (β') 16-QAM



Σχήμα 5.5: Πειραματικά Διαγράμματα Ακτινοβολίας - Πολυεκπομπή - 3 Λοβοί - [60°, 90°, 120°] Αριστερά - [40°, 90°, 140°] Δεξιά

Πίνακας 5.4: Πειραματικό Case: 3 - Πολυεκπομπή Τριών Λοβών - Βέλτιστες Διεγέρσεις σε Κάθε Τριάδα Γωνιών - Τελική Αναλογία Πλατών μετά τη Σύνθεση των Επιμέρους Διεγέρσεων

Τριάδα Γωνιών	Διέγερση 1 ^η	Διέγερση 2 ^η	Διέγερση 3 ^η	Αναλογίες Πλατών
[60°, 90°, 120°]	Ομοιόμορφη	Ομοιόμορφη	Ομοιόμορφη	[1, 0.33, 0.33, 0.33]
[40°, 90°, 140°]	Γκαουσιανή 1.5	Ομοιόμορφη	Γκαουσιανή 1.5	[1, 0.2, 0.51, 0.66]

Πίνακας 5.5: Πειραματικό Case: 3 - Πολυεκπομπή Τριών Λοβών. Bit Error Ratio ως προς τις διάφορες Τριάδες γωνιών - Λαμβανόμενη Οπτική Ισχύς στην Είσοδο του Δικτύου Σχηματοποίησης Δέσμης: +1dBm για κάθε κανάλι

Διαμ. Γωνίες	60°	90°	120°	40°	90°	140°
16-QAM	$2.69 \cdot 10^{-6}$	$3.1 \cdot 10^{-6}$	$2.39 \cdot 10^{-6}$	$9.6 \cdot 10^{-6}$	$1.02 \cdot 10^{-7}$	$1.17 \cdot 10^{-8}$

πολύ ικανοποιητική ακόμα και για μετάδοση 16-QAM καθώς το BER παραμένει στην τάξη του 10^{-6} . Αυτό που παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον είναι το γεγονός ότι, παρά το γεγονός ότι ο λοβός δεν είναι μέγιστος στην επιθυμητή γωνία στόχευσης, η πληροφορία δεν επηρεάζεται από αυτό. αυτό πρακτικά σημαίνει ότι, αν και το διάγραμμα ακτινοβολίας κάνει μέγιστο για διαφορετική γωνία, η πληροφορία δεν αλλάζει διεύθυνση καθώς δεν υπάρχει beamsquint σε αυτήν την περίπτωση. Πρόκειται δηλαδή για εγγενή περιορισμό από τη στιγμή που έχουμε μόνο 4 στοιχεία, χωρίς αυτό όμως να υποβαθμίζει σημαντικά τη ζεύξη.

5.3.3 Πολλαπλή Εκπομπή

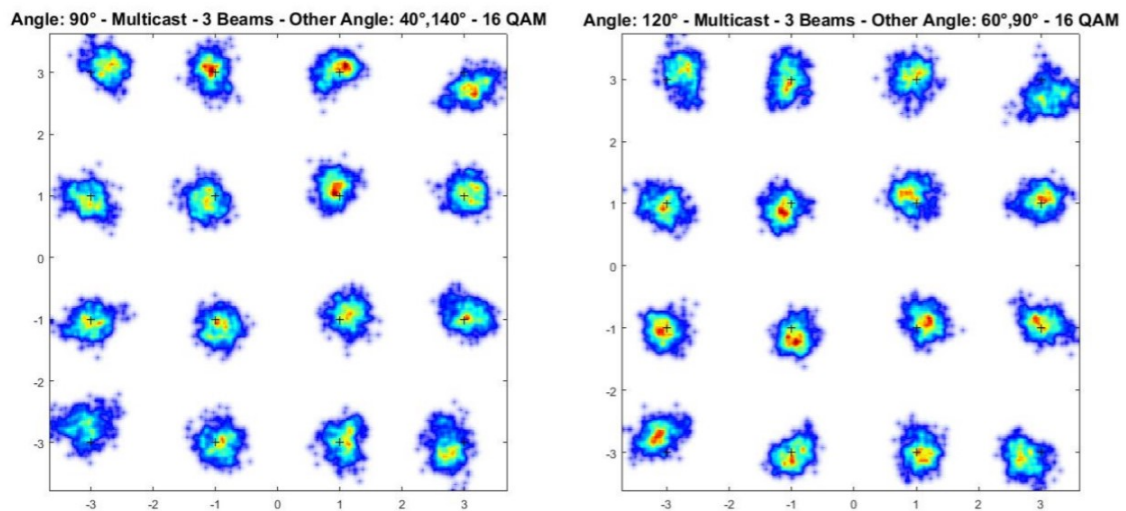
Εδώ θα αναλυθεί η απόδοση του συστήματος σε περίπτωση πολλαπλής εκπομπής, δηλαδή αποστολή διαφορετικής πληροφορίας, με την ίδια στοιχειοκεραία σε συγκεκριμένη διεύθυνση η κάθε μία. Τα ζευγάρια που θα αναλυθούν είναι τα [60°, 120°] και [75°, 120°]. Σε κάθε περίπτωση η διεγέρση και για τις δύο γωνίες είναι Γκαουσιανή με τυπική απόκλιση $\sigma = 1.5$, με σκοπό την καταπίεση των πλευρικών λοβών και την εξάλειψη των πιθανών παρεμβολών. Μέσω του διαμορφωτή ηλεκτροαπορρόφησης αποστέλλεται σήμα QPSK πλάτους 700 mV_{pp} στις 60° και στις 75° αντίστοιχα για κάθε περίπτωση, ενώ στις 120° στέλνεται μέσω του MZM σήμα διαμόρφωσης 16-QAM πλάτους 600 mV_{pp} και στις δύο περιπτώσεις.

Τα διαγράμματα ακτινοβολίας πάλι σε πραγματικό χρόνο παρουσιάζονται στο σχήμα 5.7.

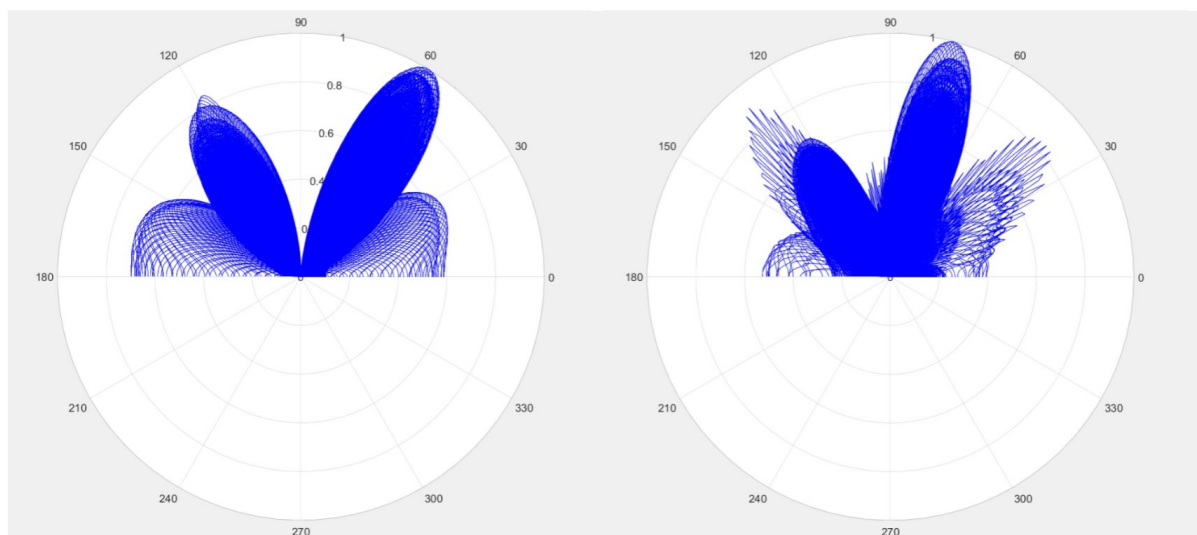
Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5.6) σημειώνονται οι τιμές του BER των λαμβανόμενων σημάτων στον δέκτη, όπως αυτές μετρήθηκαν σε κάθε μία από τις εν λόγω περιπτώσεις, ενώ στα σχήματα 5.8α', 5.8β' απεικονίζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα αστερισμού.

Στην πρώτη περίπτωση, για το ζευγάρι [60°, 120°] τα διαγράμματα αστερισμού είναι αρκετά ξεκάθαρα, ενώ, ιδιαίτερα στο διάγραμμα με γωνία παρατήρησης τις 120° είναι εμφανής η παρεμβολή του ενός σήματος στο άλλο, χωρίς όμως αυτό να επηρεάζει την ποιότητα του σήματος σημαντικά, αφού το BER είναι ικανοποιητικά χαμηλός. Αντίστοιχα για τις 60° το διάγραμμα αστερισμού είναι αρκετά καθαρό καθιστώντας τη συνολική μετάδοση εφικτή.

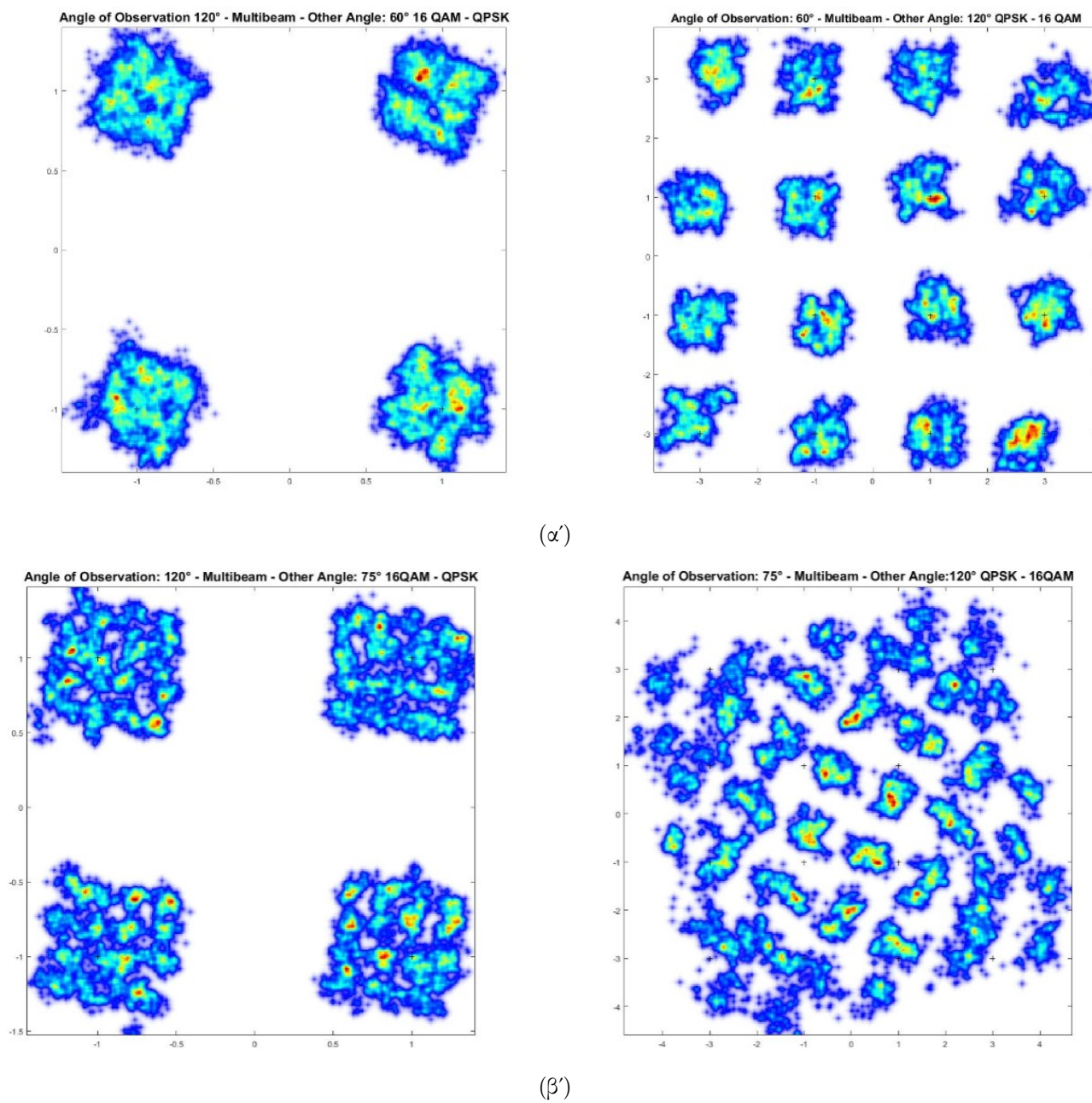
Στη δεύτερη περίπτωση που οι λοβοί έρχονται πιο κοντά μεταξύ τους, η μετάδοση καθίστα-



Σχήμα 5.6: Πειραματικά Διαγράμματα Αστερισμού - Πολυεκπομπή - 3 Λοβοί



Σχήμα 5.7: Πειραματικά Διαγράμματα Ακτινοβολίας - Πολλαπλή Εκπομπή - 2 Λοβοί - [60°, 120°] Αριστερά - [75°, 120°] Δεξιά



Σχήμα 5.8: Πειραματικά Διαγράμματα Αστερισμού - Πολλαπλή Εκπομπή : (α') 60° 16-QAM και 120° QPSK (β') 75° 16-QAM και 120° QPSK

Πίνακας 5.6: Πειραματικό Case: 4 - Πολλαπλή Εκπομπή. Bit Error Ratio ως προς τα διάφορα ζεύγη γωνιών - Λαμβανόμενη Οπτική Ισχύς στην Είσοδο του Δικτύου Σχηματοποίησης Δέσμης: 0dBm για κάθε κανάλι

Διαμ. Γωνίες	60°	120°	75°	120°
16-QAM	$4.02 \cdot 10^{-4}$	×	$3.35 \cdot 10^{-2}$	×
QPSK	×	$9.54 \cdot 10^{-9}$	×	$5.82 \cdot 10^{-9}$

ται ανέφικτη για τη διεύθυνση των 75°, το διάγραμμα αστερισμού είναι αρκετά θορυβώδες, γεγονός που ισχύει και για τις 120°, αλλά λόγω της απόστασης που έχουν τα σημεία εγγενώς στο QPSK, ο λόγος εσφαλμένων ψηφίων δεν αυξάνεται πολύ.

5.3.4 Επίπτωση σε Συγκεκριμένο Λοβό Λόγω Ύπαρξης Επιπλέον Λοβών

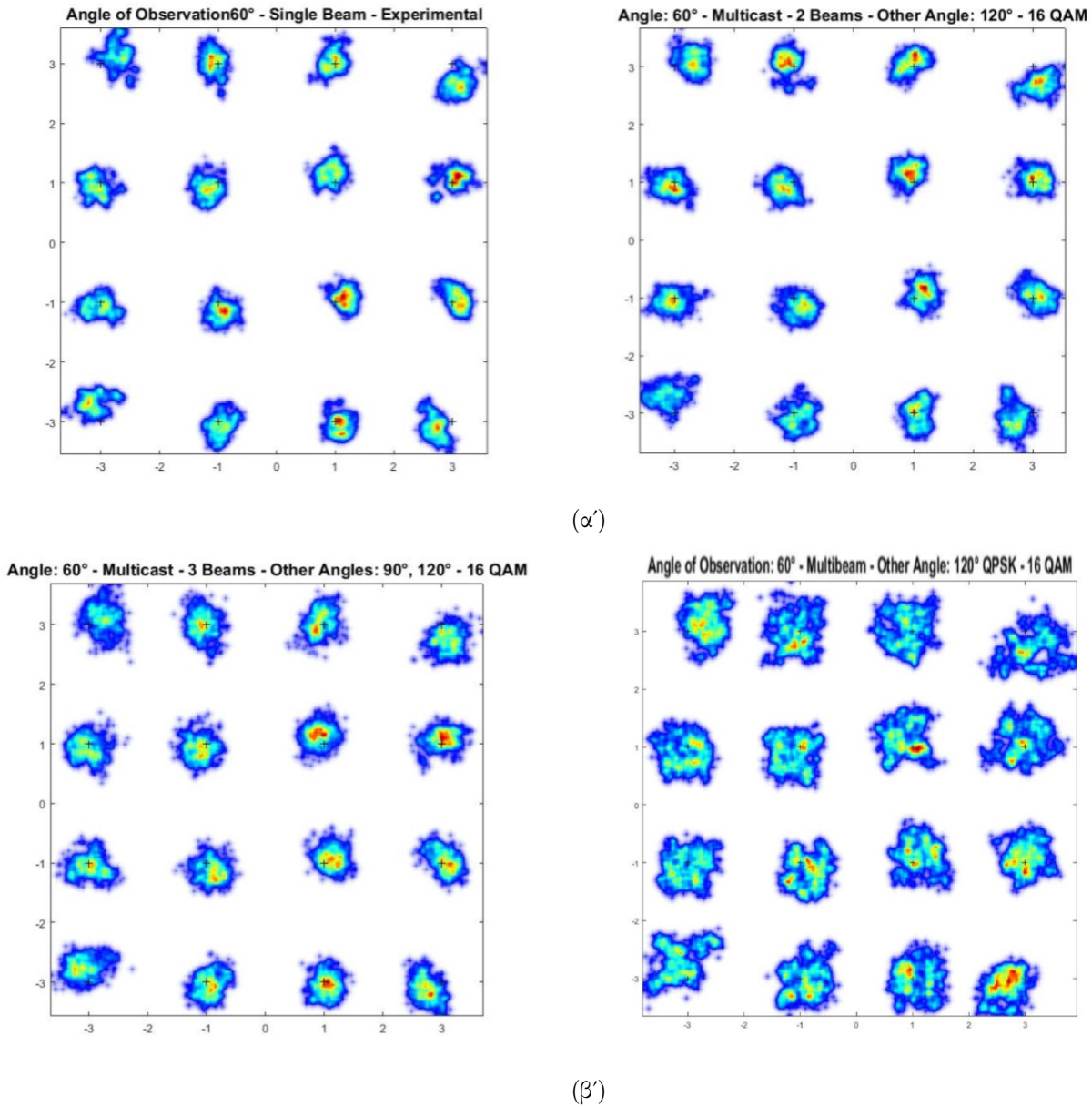
Όπως και στο Κεφάλαιο 4, θα μελετηθεί η πρακτική επίπτωση που υπάρχει στη μετάδοση ενός σήματος σε μία συγκεκριμένη γωνία, όταν υπάρχουν επιπλέον λοβοί που κουβαλάνε την ίδια (multicast) ή διαφορετική (multibeam) πληροφορία. Συγκεκριμένα, θα αναλυθεί ως προς το Bit Error Ratio του λαμβανόμενου σήματος στην περίπτωση μονοεκπομπής στη γωνία 60° για σήμα διαμόρφωσης 16-QAM, η επίπτωση που προκαλούν οι παρακάτω περιπτώσεις:

1. Πολυεκπομπή στη γωνία 120° - Δημιουργία ενός επιπλέον λοβού ίδιας πληροφορίας
2. Πολυεκπομπή στις γωνίες 90° και 120° - Δημιουργία δύο επιπλέον λοβών ίδιας πληροφορίας
3. Πολλαπλή εκπομπή στη γωνία 120° - Δημιουργία ενός επιπλέον λοβού - Μονοεκπομπή για τη γωνία 60° (16-QAM), Μονοεκπομπή για τη γωνία 120° (QPSK)

Τα λαμβανόμενα BER στο δέκτη αποτυπώνονται στον πίνακα 5.7 ενώ τα αντίστοιχα διαγράμματα αστερισμού για τις 4 περιπτώσεις που αναφέρθηκαν (συμπεριλαμβανομένου και του διαγράμματος για περίπτωση μονοεκπομπής που θα λειτουργήσει ως σημείο αναφοράς) απεικονίζονται στα σχήματα 5.9α', 5.9β'.

Πίνακας 5.7: Πειραματικό Case: 5 - Μελέτη Επίπτωσης ως προς το BER της Ύπαρξης Επιπλέον Λοβών σε Έναν Λοβό Αναφοράς - (ORP - Optical Received Power)

Περίπτωση	Πολυεκπομπή	Πολλαπλή Εκπομπή	Συνολικοί Λοβοί	ORP (dBm)	BER
0 (αναφορά)	Όχι	Όχι	1	-1	$9.97 \cdot 10^{-7}$
1	Ναι	Όχι	2	0	$2.14 \cdot 10^{-6}$
2	Ναι	Όχι	3	1	$2.39 \cdot 10^{-6}$
3	Όχι	Ναι	2	-1	$4.02 \cdot 10^{-4}$



Σχήμα 5.9: Σύγκριση Διαγραμμάτων Αστερισμού με Γωνία Παρατήρησης στις 60° Σήματος 16-QAM για τις Περιπτώσεις: (α') Μονοεκπομπής (αριστερά) και Πολυεκπομπής σε Δύο Γωνίες (δεξιά) (β') Πολυεκπομπής σε Τρεις Γωνίες (αριστερά) και Πολλαπλής Εκπομπής (δεξιά)

Το σύστημα παρέχει άρτια μετάδοση σε όλες τις περιπτώσεις πολυεκπομπής και ο λοβός αναφοράς στις 60° δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από την ύπαρξη περαιτέρω λοβών ίδιας πληροφορίας. Το διάγραμμα αστερισμού στον δέκτη μένει πολύ καθαρό σε όλες τις περιπτώσεις, και ο λόγος εσφαλμένων ψηφίων παραμένει στη χειρότερη περίπτωση στην τάξη του 10^{-6} .

Στην περίπτωση της πολλαπλής εκπομπής η ποιότητα του σήματος μειώνεται αισθητά, το διάγραμμα αστερισμού γίνεται πιο θορυβώδες, και τα σύμβολα εντοπίζονται σε μεγαλύτερη ακτίνα γύρω από τα ιδανικά σημεία. Παρόλα αυτά, τα σημεία αυτά είναι καλά διαχωρισμένα μεταξύ τους, και η μετάδοση καθίσταται εφικτή με λόγο εσφαλμένων ψηφίων στην τάξη του 10^{-4} .

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα & Προοπτικές

6.1 Σύνοψη και συμπεράσματα

Χρησιμοποιώντας θεωρητική ανάλυση και προσομοιωτική μελέτη έγινε σύγκριση δύο διαφορετικών διατάξεων οπτικών δικτύων σχηματοποίησης δέσμης. Συζητήθηκαν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που παρουσιάζει η κάθε μία, με γνώμονα πάντα την ενσωμάτωσή τους στα επερχόμενα 5G δίκτυα. Παρουσιάστηκαν εκτενή προσομοιωτικά αποτελέσματα σε κάθε μία περίπτωση από τις δύο, επιβεβαιώνοντας τη δυνατότητα που παρέχουν και οι δύο διατάξεις για μετάδοση διαμορφωμένων σημάτων με μεγάλη αξιοπιστία, καθώς ο λόγος εσφαλμένων ψηφίων παρέμεινε σε όλες τις προσομοιωτικές μελέτες σε πολύ ικανοποιητικά επίπεδα. Μελετήθηκε η επίδραση του φαινομένου beamsquint που παρουσιάζει ο Blass Matrix σε εφαρμογές πολυεκπομπής και ποσοτικοποιήθηκε η επίπτωση που αυτό εισάγει σε μία τηλεπικοινωνιακή ζεύξη.

Σε ότι αφορά τη διάταξη οπτικού δικτύου σχηματοποίησης δέσμης με TTD στοιχεία, επιβεβαιώθηκε και πειραματικά στο Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών η αρχή λειτουργίας της, με πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα δεδομένου του διαθέσιμου εξοπλισμού. Η θεωρία συνάντησε την πράξη σε όλες τις μελέτες που διεκπεραιώθηκαν υπό το πρίσμα της πειραματικής διαδικασίας, κάνοντας με αυτόν τον τρόπο ένα καινοτόμο βήμα στις φωτονικές επικοινωνίες και στον τομέα των Microwave Photonics. Προσομοιώνοντας μία κεραία τεσσάρων στοιχείων επιβεβαιώθηκε η δυνατότητα για δημιουργία μέχρι και τριών λοβών ακτινοβολίας, με BER χαμηλότερο από 10^{-5} σε κάθε περίπτωση, ακόμα και για διαμόρφωση 16-QAM. Πρόκειται για την πρώτη φορά, μέχρι την ημερομηνία που εκπονήθηκε η παρούσα διπλωματική εργασία, που αποδεικνύεται πειραματικά η δυνατότητα οπτικών διατάξεων σχηματοποίησης δέσμης να χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές πολυεκπομπής. Το γεγονός αυτό έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην αποδοχή της δουλειάς που έγινε από το συνέδριο ICTON 2020, όπου και κλήθηκε να παρουσιαστεί το συγκεκριμένο αντικείμενο έρευνας από το Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών.

6.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Έχοντας πλέον αποδείξει την αρχή λειτουργία και το proof of concept της συγκεκριμένης διάταξης που μελετήθηκε πειραματικά σε εφαρμογές πολυεκπομπής, επόμενο βήμα θα αποτελούσε η ολοκλήρωση της παραπάνω πειραματικής διάταξης που πραγματοποιήθηκε με bulk στοιχεία, με σκοπό την εμπορικοποίησή της, και την ενσωμάτωσή της στα δίκτυα 5G αλλά και στις επόμενες γενιές δικτύων (Beyond 5G).

Βιβλιογραφία

- [1] Constantine A. Balanis. *Antenna Theory Analysis And Design, Fourth Edition*. Wiley, 2016.
- [2] Stéphane Blanc et al. “Optical Multibeamforming network based on WDM and dispersion fiber in receive mode”. In: *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on* 54 (Feb. 2006), pp. 402–411. DOI: 10.1109/TMTT.2005.860499.
- [3] Federico Boccardi et al. “Five Disruptive Technology Directions for 5G”. In: *Communications Magazine, IEEE* 52 (Dec. 2013). DOI: 10.1109/MCOM.2014.6736746.
- [4] Er kai Chen, Meixia Tao, and Ya-Feng Liu. “Joint Base Station Clustering and Beamforming for Non-Orthogonal Multicast and Unicast Transmission with Backhaul Constraints”. In: *IEEE Transactions on Wireless Communications* PP (Dec. 2017). DOI: 10.1109/TWC.2018.2858223.
- [5] Miguel Drummond et al. “Dimensioning of a multibeam coherent photonic beamformer fed by a phased array antenna”. In: *Optics Express* 26 (Mar. 2018), p. 6158. DOI: 10.1364/OE.26.006158.
- [6] Vanessa Duarte, Miguel Drummond, and Rogério Nogueira. “Photonic True-Time-Delay Beamformer for a Phased Array Antenna Receiver based on Self-Heterodyne Detection”. In: *Journal of Lightwave Technology* PP (Oct. 2016), pp. 1–1. DOI: 10.1109/JLT.2016.2620146.
- [7] Sergio Granieri, M. Jaeger, and Azad Siahmakoun. “Multiple-beam fiber-optic beamformer with binary array of delay lines”. In: *Lightwave Technology, Journal of* 21 (Jan. 2004), pp. 3262–3272. DOI: 10.1109/JLT.2003.821733.
- [8] Georges Kaddoum et al. “On Using Gaussian Excitation Amplitudes to Improve the Antenna Array Radiation Characteristics”. In: Dec. 2014. DOI: 10.1109/APACE.2014.7043760.
- [9] Eleftherios Karipidis, N.D. Sidiropoulos, and Zhi-Quan Luo. “Quality of Service and Max-Min Fair Transmit Beamforming to Multiple Cochannel Multicast Groups”. In: *Signal Processing, IEEE Transactions on* 56 (Apr. 2008), pp. 1268–1279. DOI: 10.1109/TSP.2007.909010.

- [10] David Lecompte and Frédéric Gabin. “Evolved Multimedia Broadcast/Multicast Service (eMBMS) in LTE-Advanced: Overview and Rel-11 Enhancements”. In: *Communications Magazine, IEEE* 50 (Nov. 2012), pp. 68–74. DOI: 10.1109/MCOM.2012.6353684.
- [11] Wookbong Lee et al. “A New Beamforming Design for Multicast Systems”. In: *Vehicular Technology, IEEE Transactions on* 62 (Oct. 2013), pp. 4093–4097. DOI: 10.1109/TVT.2012.2236583.
- [12] Robert J. Mailloux. *Phased Array Antenna Handbook, Second Edition*. Artech House Inc., 2005.
- [13] Omar Mehanna, N.D. Sidiropoulos, and G.B. Giannakis. “Joint Multicast Beamforming and Antenna Selection”. In: *Signal Processing, IEEE Transactions on* 61 (May 2013), pp. 2660–2674. DOI: 10.1109/TSP.2013.2252167.
- [14] Arjan Meijerink et al. “Novel Ring Resonator-Based Integrated Photonic Beamformer for Broadband Phased Array Receive Antennas—Part I: Design and Performance Analysis”. In: *Lightwave Technology, Journal of* 28 (Feb. 2010), pp. 3–18. DOI: 10.1109/JLT.2009.2029705.
- [15] “Multicasting over Emerging 5G Networks: Challenges and Perspectives”. In: *IEEE Network* 31.2 (Mar. 2017), pp. 80–89. ISSN: 0890-8044. DOI: 10.1109/MNET.2017.1600067NM.
- [16] Elias Mylonas. “Σχεδίαση Οπτικής Διάταξης για Σχηματοποίηση Δέσμης σε Ασύρματα Δίκτυα Πέμπτης Γενεάς 5G.” MA thesis. National Technical University of Athens, School of Electrical and Computer Engineering, 2018.
- [17] Harish Subbaraman, Maggie Chen, and Ray Chen. “Photonic Crystal Fiber-Based True-Time-Delay Beamformer for Multiple RF Beam Transmission and Reception of an X-Band Phased-Array Antenna”. In: *Lightwave Technology, Journal of* 26 (Sept. 2008), pp. 2803–2809. DOI: 10.1109/JLT.2008.925596.
- [18] Meixia Tao et al. “Content-Centric Sparse Multicast Beamforming for Cache-Enabled Cloud RAN”. In: *IEEE Transactions on Wireless Communications* 15 (Dec. 2015). DOI: 10.1109/TWC.2016.2578922.
- [19] Christos Tsokos et al. “Analysis of a Multi-Beam Optical Beamforming Network Based on Blass Matrix Architecture”. In: *Journal of Lightwave Technology* PP (May 2018), pp. 1–1. DOI: 10.1109/JLT.2018.2841861.
- [20] Christos Tsokos et al. “Optical Beamforming Network for Multi-Beam Operation With Continuous Angle Selection”. In: *IEEE Photonics Technology Letters* PP (Dec. 2018), pp. 1–1. DOI: 10.1109/LPT.2018.2889411.
- [21] B. Vidal, M.A. Piqueras, and Javier Marti. “Multibeam photonic beamformer based on optical filters”. In: *Electronics Letters* 42 (Feb. 2006), pp. 980–981. DOI: 10.1049/el:20061369.

-
- [22] Lior Yaron et al. “Photonic Beamformer Receiver With Multiple Beam Capabilities”. In: *Photonics Technology Letters, IEEE* 22 (Jan. 2011), pp. 1723–1725. DOI: 10.1109/LPT.2010.2083646.

