



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων
Π.Μ.Σ. Ψηφιακές Επικοινωνίες και Δίκτυα

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία με Τίτλο:

Μελέτη Βαθμών Ελευθερίας σε Συστήματα
BS-MIMO και Υπολογισμός Σύνθετης
Αντίστασης Κεραιών ESPAR με Χρήση
Γενετικού Αλγορίθμου

ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ Δ. ΘΩΜΑΤΟΣ

Αριθμός Μητρώου: ME/10058

Επιβλέπων: Καθηγητής Αθανάσιος Γ. Κανάτας

Πειραιάς, Οκτώβριος 2012

Πανεπιστήμιο Πειραιώς

Πανεπιστήμιο Πειραιώς

Στους γονείς μου...

Πανεπιστήμιο Πειραιώς

Περίληψη

Η διπλωματική εργασία αυτή πραγματεύεται την μελέτη των συστημάτων MIMO τα οποία χρησιμοποιούν παρασιτικές κεραίες και είναι γνωστά στην βιβλιογραφία ως Beamspace MIMO ή BS-MIMO. Τα συστήματα αυτά αντί να χρησιμοποιούν πολλαπλά ενεργά κεραιοστοιχεία σε πομπό και δέκτη, χρησιμοποιούν στοιχειοκεραίες οι οποίες αποτελούνται από ένα ενεργό και πολλά παρασιτικά κεραιοστοιχεία. Η πιο γνωστή υλοποίηση τέτοιων στοιχειοκεραίων είναι οι κεραίες ESPAR. Οι κεραίες αυτές έχουν τη δυνατότητα διαμόρφωσης του διαγράμματος ακτινοβολίας τους (beamforming ability). Αυτό σημαίνει ότι μπορούν να δημιουργήσουν πολλά διαφορετικά διαγράμματα ακτινοβολίας, κάτι το οποίο επιτυγχάνεται με την ρύθμιση της συνεισφοράς των παρασιτικών στοιχείων στο συνολικά εκπεμπόμενο διάγραμμα ακτινοβολίας. Η χρήση ενός μόνο ενεργού κεραιοστοιχείου και αντίστοιχα μόνο μίας αλυσίδας RF, καθιστά αδύνατη τη χωρική διασπορά των σημάτων εκπομπής και τη χωρική δειγματοληψία των σημάτων λήψης. Για το λόγο αυτό, η μελέτη και η περιγραφή των συστημάτων αυτών γίνεται στο πεδίο των διαγραμμάτων ακτινοβολίας (beamspace domain - BS domain). Ακόμη, τα συστήματα αυτά δεν χρησιμοποιούν χωρική πολυπλεξία δεδομένων, όπως τα συμβατικά συστήματα MIMO, αλλά πολυπλέκουν τα δεδομένα στο πεδίο BS χρησιμοποιώντας ορθογώνια διαγράμματα ακτινοβολίας τα οποία ονομάζονται διαγράμματα βάσης (basis patterns).

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής θα μελετήσουμε τους βαθμούς ελευθερίας που μπορεί να προσφέρει ένα τέτοιο σύστημα, οι οποίοι ονομάζονται εναέριοι βαθμοί ελευθερίας (Aerial Degrees of Freedom - aDoFs). Κάθε εναέριος βαθμός ελευθερίας ισοδυναμεί με ένα διάγραμμα βάσης της κεραίας ESPAR. Μέχρι στιγμής ο υπολογισμός των διαγραμμάτων βάσης γίνεται λαμβάνοντας υπόψη μόνο το ακτινοβολούμενο πεδίο της κεραίας. Εμείς σε αυτή την εργασία θα παρουσιάσουμε μια τεχνική υπολογισμού δισδιάστατων διαγραμμάτων βάσης η οποία λαμβάνει επίσης υπόψη της την επίδραση του καναλιού. Η τεχνική αυτή παράγει προσαρμοστικά προς το κανάλι διαγράμματα βάσης, η χρήση των οποίων μεγιστοποιεί την χρήση του καναλιού, καθώς εκμεταλλεύεται με τον καλύτερο τρόπο τα χαρακτηριστικά του και τους πραγματικά διαθέσιμους βαθμούς ελευθερίας.

Για την αποτίμηση των αποτελεσμάτων της τεχνικής αυτής δεν θα βασιστούμε μόνο στα θεωρητικά αποτελέσματα που παράγονται, δηλαδή στα θεωρητικά προσαρμοστικά διαγράμματα βάσης. Αντίθετα, με δεδομένα τα επιθυμητά διαγράμματα βάσης θα υπολογίσουμε τα

πλησιέστερα εφικτά διαγράμματα που μπορεί να παράξει μια κεραία ESPAR. Για τον υπολογισμό των διαγραμμάτων αυτών, θα παρουσιάσουμε ένα γενετικό αλγόριθμο, ο οποίος για δεδομένο ένα επιθυμητό διάγραμμα ακτινοβολίας, υπολογίζει τις τιμές σύνθετης αντίστασης των κεραιοστοιχείων της κεραίας ESPAR, η χρήση των οποίων παράγει το πλησιέστερο εφικτό διάγραμμα ακτινοβολίας προς το επιθυμητό.

Στη συνέχεια, αφού παρουσιάσουμε και αναλύσουμε την απόδοση του αλγορίθμου αυτού, θα εξετάσουμε την πρακτική απόδοση που επιτυγχάνει η τεχνική υπολογισμού προσαρμοστικών διαγραμμάτων βάσης. Η χρήση του γενετικού αλγορίθμου, πέραν του ότι θα μας δώσει πρακτικά αποτελέσματα για την απόδοση της τεχνικής, θα πραγματοποιήσει και έναν έλεγχο εφικτότητας των διαγραμμάτων βάσης που παράγει η τεχνική υπολογισμού προσαρμοστικών διαγραμμάτων. Η απόδοση της προτεινόμενης τεχνικής θα συγκριθεί με την αντίστοιχη απόδοση που επιτυγχάνει η τεχνική υπολογισμού διαγραμμάτων βάσης που δεν λαμβάνει υπόψη το κανάλι. Τέλος, γίνεται μια συνοπτική αναφορά στα ερευνητικά αποτελέσματα της εργασίας και ακολουθούν κάποιες ενδεικτικές προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Abstract

The subject of this master thesis is the study of an alternative MIMO system that uses parasitic antennas and is known in the literature as BeamSpace MIMO (BS-MIMO). Instead of using multiple active antenna elements, as the traditional MIMO systems, BS-MIMO uses antenna arrays with only one active and multiple parasitic elements (which are often called parasitics). The most popular implementation of such arrays, are the ESPAR antennas, which offer significant beamforming abilities. This means that these antennas can provide a variety of different radiation patterns, which is feasible by adjusting the effective electromagnetic coupling of the parasitic elements. Furthermore, the spatial spreading and the spatial sampling, of the transmitted and received signals respectively, is not feasible due to the existence of only one active elements. Because of this, the functionality of the BS-MIMO systems is described in the beamspace (BS) domain rather than in the spatial domain. In addition, unlikely with the conventional MIMO that use spatial multiplexing, the BS-MIMO systems multiplex the transmitted signals in the BS domain by using orthogonal radiation patterns that are called basis patterns.

In the context of this thesis, we are going to study the degrees of freedom that can be supported by a BS-MIMO system, which are called Aerial Degrees of Freedom (aDoFs). Each aDoF corresponds to a basis pattern of the ESPAR antenna. The state of the art technique of the calculation of the available aDoFs takes only into account the radiated field of the antenna and decompose it to orthogonal functions which form the basis patterns. In this study, we are going to provide a novel technique for the calculation of the available aDoFs, which takes also into account the channel effect. The proposed technique, produces a set of adaptive basis patterns, the use of which maximizes system capacity by effectively exploiting the inherent radio channel properties.

In the evaluation of the proposed technique, we are not going to take into account just the theoretical results, i.e. the basis patterns produced by the technique. We are going to consider also the feasible radiated patterns that can be produced by an ESPAR antenna. In order to do so, we will present an algorithm that calculates the achieved radiation patterns of the antenna. More specifically, a genetic algorithm that calculates the feasible radiated pattern that is the closest to desired one, is going to be presented. In

this way, the performance of the proposed technique in practical cases will be evaluated and also a feasibility check of the adaptive radiation patterns will be performed.

Next, the simulation results of the genetic algorithm and of the basis pattern calculation technique will be illustrated and the performance of each method will be investigated. Finally, we conclude with the summary of the research results and the potential future work on the specific research field.

Πανεπιστήμιο Πειραιώς

Ευχαριστίες

Η εκπόνηση μιας διπλωματικής εργασίας είναι απαιτητική καθώς χρειάζεται πολλή μελέτη πάνω στο αντικείμενο, έρευνα στην ευρύτερη ερευνητική περιοχή και αρκετή υλοποίηση ώστε να προκύψει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Όλα αυτά γίνονται ακόμη πιο δύσκολα όταν η διπλωματική εργασία πραγματεύεται ένα ερευνητικό πεδίο που είναι ακόμη σε πρόωρο στάδιο. Τότε, προκύπτουν συνεχώς νέα δεδομένα, νέες παράμετροι, νέα προβλήματα τα οποία δυσκολεύουν ακόμη περισσότερο την προσπάθειά σου. Σε αυτές τις περιπτώσεις το μοναδικό πράγμα που σου δίνει ώθηση και κουράγιο να συνεχίσεις είναι η στήριξη που δέχεσαι από τα άτομα που σε περιβάλλουν.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα όλα αυτά τα άτομα που στάθηκαν στο πλευρό μου και με την στήριξη τους κατάφερα να ολοκληρώσω την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Πρώτα απ'όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή του Πανεπιστημίου Πειραιώς κύριο Αθανάσιο Κανάτα για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και για τις πολύτιμες συμβουλές και καθοδηγήσεις του σε όλο αυτό το διάστημα. Ιδιαίτερα, οι συζητήσεις μας σχετικά με τα ερευνητικά προβλήματα που παρουσιάστηκαν, ήταν καταλυτικές για την πορεία αυτής της εργασίας. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Διδάκτορα του Πανεπιστημίου Πειραιώς Βλάση Μπαρούση, για τις άμεσες απαντήσεις του σε θέματα που με απασχόλησαν καθώς και τις πολύ σημαντικές οδηγίες που μου έδωσε, όπως επίσης και για το γεγονός ότι αυτή η εργασία βασίστηκε στην έρευνα που πραγματοποίησε ο ίδιος στην διδακτορική του διατριβή.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τις πολύ καλές φίλες και συμφοιτήτριες μου Στέλλα Φασόη και Βιβέτα Πετροπούλου για την υποστήριξη, τις συζητήσεις μας και για τα όσα περάσαμε μαζί αυτά τα δύο χρόνια του μεταπτυχιακού αυτού. Ακόμη, τον πολύ καλό μου φίλο Κωνσταντίνο Βανδώρο, με τον οποίον είμαστε συμμαθητές από την πρώτη Γυμνασίου, επιλέξαμε να κάνουμε παρέα αυτό το μεταπτυχιακό και με τον οποίο μοιραζόμαστε την ίδια φιλοδοξία για το μέλλον μας. Ιδιαίτερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επίσης πολύ καλό μου φίλο και συμφοιτητή μου Παναγιώτη Βασιλείου για τα όσα έχουμε περάσει μαζί αυτά τα έξη χρόνια των προπτυχιακών και μεταπτυχιακών μας σπουδών. Η βοήθεια και η υποστήριξη που προσφέραμε ο ένας στον άλλον μας βοήθησαν στο να διευρύνουμε τους γνωστικούς μας ορίζοντες και να καταφέρουμε να ολοκληρώσουμε με επιτυχία όποια πρόκληση παρουσιαζόταν αυτά τα χρόνια.

Ένα ακόμη άτομο το οποίο θέλω να ευχαριστήσω πραγματικά για όλα όσα μου έχει προσφέρει όλα αυτά τα χρόνια είναι η κοπέλα μου Μαρία, στην οποία θέλω να ευχηθώ καλή πορεία με το μεταπτυχιακό της. Τέλος, ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ, θέλω να εκφράσω στην οικογένεια μου, η οποία μου προσέφερε αδιάκοπα όλα αυτά τα χρόνια τόσο υλικά εφόδια για να μπορέσω να πραγματοποιήσω τις σπουδές μου, όσο και ψυχικά εφόδια τα οποία παρόλο τις δυσκολίες που προέκυπταν με βοηθούσαν στο να μην το βάζω κάτω και να συνεχίζω προς το καλύτερο. Συγκεκριμένα θα ήθελα να ευχαριστήσω τις αδελφές μου Κατερίνα και Θάλεια και να τους ευχηθώ καλή σταδιοδρομία στις σπουδές τους, τον πατέρα μου Διονύση και την μητέρα μου Στάμω για όλα μου έχουν προσφέρει όλα αυτά τα χρόνια και για την στήριξη και την εμπιστοσύνη που έχουν σε εμένα.

Ευάγγελος Θωμάτος
Πειραιάς, 2012

Περιεχόμενα

Περίληψη	v
Abstract	vii
Ευχαριστίες	ix
Περιεχόμενα	xi
Κατάλογος Σχημάτων	xiii
Κατάλογος Πινάκων	xv
Συνομογραφίες	xvi
Σύμβολα	xvii
1 Εισαγωγή	1
1.1 Συστήματα MIMO	1
1.1.1 Εφαρμογή σε Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα 4 ^{ης} Γενιάς	1
1.1.2 Βασικά Μειονεκτήματα	2
1.1.3 Εναλλακτικές Τεχνικές	3
1.2 Στόχοι της Εργασίας	4
1.3 Δομή - Δημοσιεύσεις	6
2 Συστήματα BS-MIMO και Αναπαράσταση στο Πεδίο BS	9
2.1 Εισαγωγή	9
2.2 Αναπαράσταση Λειτουργίας MIMO στο πεδίο BS	10
2.2.1 Πίνακας Καναλιού MIMO	10
2.2.2 Εξίσωση Εισόδου-Εξόδου	13
2.3 Αρχή Λειτουργίας Συστημάτων BS-MIMO	14
2.3.1 Σχέση Εισόδου-Εξόδου Συστήματος BS-MIMO	16
2.3.2 Αρχή Λειτουργίας BS-MIMO Πομπού	17

2.3.3	Αρχή Λειτουργίας BS-MIMO Δέκτη	18
3	Υπολογισμός Διαγραμμάτων Βάσης και Εναέριων Βαθμών Ελευθερίας	21
3.1	Εισαγωγή	21
3.2	Διαγράμματα Βάσης Ανεξάρτητα του Καναλιού	23
3.2.1	Θεωρητική Προσέγγιση	23
3.2.2	Εφαρμογή σε Κυκλική Κεραία ESPAR 5 Στοιχείων	26
3.3	Προσαρμοστικά Διαγράμματα Βάσης	26
3.4	Σύγκριση Τεχνικών και Αποτίμηση Αποτελεσμάτων	31
4	Γενετικός Αλγόριθμος Υπολογισμού Σύνθετης Αντίστασης Κεραίων ESPAR	35
4.1	Εισαγωγή	35
4.2	Αρχή Λειτουργίας Κεραίων ESPAR	36
4.3	Ορισμός Προβλήματος Βελτιστοποίησης	39
4.4	Σχεδίαση Γενετικού Αλγορίθμου	40
4.4.1	Προεπεξεργασία Αρχικών Δεδομένων	41
4.4.2	Απαραίτητα Δεδομένα Εισόδου	43
4.4.3	Βασική Λειτουργία Γενετικού Αλγορίθμου	44
4.5	Παραδείγματα Εφαρμογής και Ενδεικτικά Αποτελέσματα	50
5	Αποτελέσματα Προσομοιώσεων	55
5.1	Επίδοση Γενετικού Αλγορίθμου	56
5.2	Επίδοση Τεχνικής Υπολογισμού Προσαρμοστικών Διαγραμμάτων Βάσης	61
6	Επίλογος	67
6.1	Συμπεράσματα	67
6.2	Αντικείμενα Μελλοντικής Έρευνας	68
	Βιβλιογραφία	71

Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Σύστημα MIMO με πολλαπλές κεραιές σε πομπό και δέκτη	2
1.2	Γραμμική κεραιά ESPAR με 5 κεραιοστοιχεία	4
2.1	Αναπαράσταση λειτουργίας ενός συστήματος MIMO στο πεδίο BS	12
2.2	Περιβάλλον διάδοσης με ομαδοποιημένους σχεδιαστές	13
2.3	Υλοποιήσεις κεραιών ESPAR με 5 στοιχεία	15
2.4	Εκπεμπόμενο διάγραμμα ακτινοβολίας ενός BS-MIMO πομπού σαν συνάρτηση των διαγραμμάτων βάσης του	18
2.5	Διαγράμματα βάσης ενός BS-MIMO δέκτη και διαχωρισμός της περιόδου συμβόλου σε υπο-περιόδους	19
3.1	Κυκλική κεραιά ESPAR με 5 στοιχεία και άξονες αναφοράς	22
3.2	Χώρος διαγραμμάτων ακτινοβολίας αποτελούμενος από 3 διαγράμματα βάσης.	25
3.3	Διαγράμματα βάσης ανεξάρτητα του καναλιού	27
3.4	Προσαρμοστικά διαγράμματα βάσης πομπού	30
3.5	Προσαρμοστικά διαγράμματα βάσης δέκτη	31
3.6	Εργοδική χωριτικότητα συστήματος BS-MIMO με χρήση διαφορετικών διαγραμμάτων βάσης	33
3.7	Εργοδική χωριτικότητα συστήματος SISO, BS-MIMO , 2×2 και 5×5 MIMO	33
4.1	Κεραιά ESPAR 5 στοιχείων με κυκλώματα ρυθμιζόμενης αντίστασης	37
4.2	Διαδικασία προεπεξεργασίας αρχικών δεδομένων	42
4.3	Διαδικασία βελτιστοποίησης γενετικού αλγορίθμου	46
4.4	Δυαδική αναπαράσταση χρωμοσώματος του γενετικού αλγορίθμου	47
4.5	Τελεστής διασταύρωσης	49
4.6	Τελεστής μετάλλαξης	49
4.7	Επιθυμητά και παραγόμενα διαγράμματα ακτινοβολίας του πομπού προσαρμοστικά προς το κανάλι	52
4.8	Επιθυμητά και παραγόμενα διαγράμματα ακτινοβολίας του δέκτη προσαρμοστικά προς το κανάλι	52

5.1	Επιθυμητά και παραγόμενα διαμορφωμένα διαγράμματα ακτινοβολίας ανεξάρτητα του καναλιού	58
5.2	Επιθυμητά και παραγόμενα διαμορφωμένα διαγράμματα ακτινοβολίας προσαρμοστικά προς το κανάλι	59
5.3	Συναρτήσεις CDF της συσχέτισης με χρήση μη προσαρμοστικών διαγραμμάτων βάσης και διαφορετικών σχημάτων διαμόρφωσης	60
5.4	Συναρτήσεις CDF της συσχέτισης με χρήση προσαρμοστικών διαγραμμάτων βάσης και διαφορετικών σχημάτων διαμόρφωσης	61
5.5	Επιθυμητά και παραγόμενα διαγράμματα ακτινοβολίας που προέκυψαν απο την τεχνική Gram-Schmidt	62
5.6	Επιθυμητά και παραγόμενα διαγράμματα ακτινοβολίας του πομπού προσαρμοστικά προς το κανάλι	64
5.7	Επιθυμητά και παραγόμενα διαγράμματα ακτινοβολίας του δέκτη προσαρμοστικά προς το κανάλι	65
5.8	Εργοδική χωρητικότητα που επιτυγχάνεται με τα θεωρητικά και πρακτικά διαγράμματα βάσης	65

Κατάλογος Πινάκων

4.1	Τιμές παραμέτρων κεραίας ESPAR	51
4.2	Τιμές παραμέτρων γενετικού αλγορίθμου	51
4.3	Βάρη (Ohm) των προσαρμοστικών διαγραμμάτων του πομπού	51
4.4	Βάρη (Ohm) των προσαρμοστικών διαγραμμάτων του δέκτη	53
5.1	Μέσες τιμές δεδομένων εξόδου του γενετικού αλγορίθμου για το πρώτο σενάριο	57
5.2	Μέσες τιμές δεδομένων εξόδου του γενετικού αλγορίθμου για το δεύτερο σενάριο	58
5.3	Βάρη (Ohm) κεραιστοιχειών για τα αρχικά διαγράμματα βάσης	63
5.4	Βάρη (Ohm) των προσαρμοστικών διαγραμμάτων του πομπού	63
5.5	Βάρη (Ohm) των προσαρμοστικών διαγραμμάτων του δέκτη	63

Συντομογραφίες

3G	Συστήματα επικοινωνιών 3 ^{ης} γενιάς
4G	Συστήματα επικοινωνιών 4 ^{ης} γενιάς
aDoF	Aerial Degree of Freedom
AoA	Angle of Arrival
AoD	Angle of Departure
BS	Beam Space
CDF	Cumulative Distribution Function
CSI	Channel State Information
DFT	Discrete Fourier Transform
ESPAR	Electronically Steerable Parasitic Antenna Radiators
ITU-R	International Telecommunication Union Radiocommunication
LTE-A	Long Term Evolution - Advanced
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MC	Mutual Coupling
SC	Spatial Correlation
RF	Radio Frequency
SVD	Singular Value Decomposition
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access

Σύμβολα

$\mathbf{a}_{\mathbf{T},\mathbf{R}}$	Διανύσματα Πολλαπλότητας Κεραιών Πομπού/Δέκτη
H	Πίνακας του Καναλιού
H_{bs}	Πίνακας του Καναλιού στο πεδίο BS
$\mathbf{B}_{\mathbf{T},\mathbf{R}}$	Πίνακες με Διαγράμματα Βάσης Πομπού/Δέκτη
\mathbf{X}^H	Αναστροφosuζυγης του Πίνακα \mathbf{X}
\mathbf{x}^T	Ανάστροφο του Διανύσματος \mathbf{x}
$\det(\cdot)$	Ορίζουσα
$\ \cdot\ _F$	Frobenius Νόρμα
$\log(\cdot)$	Λογάριθμος με βάση το 10
$Dec(\cdot)$	Συνάρτηση Μετατροπής Δυαδικού σε Δεκαδικό

Πανεπιστήμιο Πειραιώς

Κεφάλαιο 1

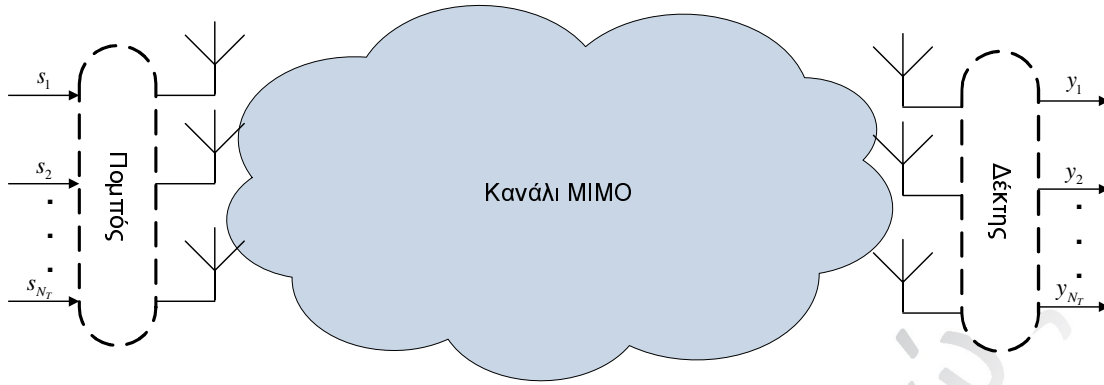
Εισαγωγή

1.1 Συστήματα MIMO

1.1.1 Εφαρμογή σε Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα 4^{ης} Γενιάς

Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για πολυμεσικές υπηρεσίες (multimedia services) καθώς και η αύξηση του όγκου των δεδομένων που μετακινούνται μέσω του διαδικτύου σε κινητές συσκευές, οδηγούν σε ολοένα και αυξανόμενες απαιτήσεις για συστήματα τηλεπικοινωνιών με μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης. Αυτός είναι και ένας από τους βασικούς λόγους που οδήγησαν στην υλοποίηση και στην λειτουργία των τηλεπικοινωνιακών δικτύων 4^{ης} γενιάς (4th Generation -4G). Τα δίκτυα αυτά, σύμφωνα με τις προτυποποιήσεις της ITU-R [1], επιδιώκουν να επιτύχουν πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης της τάξης του 1Gbps, υψηλά επίπεδα φασματικής απόδοσης που φτάνουν τα 15 bit/s/Hz στο downlink και 6.75 bit/s/Hz στο uplink, απαιτώντας όμως τη χρήση μεγάλου εύρους ζώνης το οποίο φτάνει τα 40MHz. Παρόλα αυτά, οι απαιτήσεις για μεγαλύτερο εύρος ζώνης κάνουν απαραίτητη τη χρήση αποδοτικών μεθόδων αποστολής δεδομένων οι οποίες να μπορούν να προσφέρουν ανοχή στα φαινόμενα διαλείψεων (fading) που επιφέρει η ασύρματη διάδοση. Η βασική μέθοδος αντιμετώπισης των στοχαστικών διαλείψεων είναι ο διαφορισμός (diversity), ο οποίος επιτυγχάνεται μέσω της αποστολής των σημάτων σε πολλαπλά ανεξάρτητα κανάλια. Για το λόγο αυτό, οι παραπάνω προτυποποιήσεις περιλαμβάνουν ως βασικό απαιτούμενο χαρακτηριστικό την χρήση της τεχνικής πολλαπλών εισόδων - πολλαπλών εξόδων (multiple input - multiple output MIMO) [2].

Έτσι, και οι δυο κυρίαρχες τεχνολογίες 4G, που είναι το 3GPP LTE-Advanced [3] και το WiMax 802.16m [4][5], έχουν θέσει ως προαπαιτούμενη τη χρήση της τεχνικής MIMO στα αντίστοιχα δίκτυα τους. Η τεχνική αυτή, είναι η πιο διαδεδομένη τεχνική αποστολής δεδομένων που επιτυγχάνει διαφορισμό στο χωρικό πεδίο (spatial diversity). Αυτό γίνεται μέσω της χρήσης πολλαπλών κεραιών σε πομπό και δέκτη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1. Με



Σχήμα 1.1: Σύστημα MIMO με πολλαπλές κεραίες σε πομπό και δέκτη

αυτό το τρόπο, επιτυγχάνεται η ανεξαρτητοποίηση των ροών μεταξύ των διαφορετικών κεραίων, και κατά συνέπεια η ριζική αύξηση της χωρητικότητας. Τα συστήματα MIMO έχουν την δυνατότητα να προσφέρουν μια πλειάδα από οφέλη όπως το κέρδος συστοιχίας (array gain) το κέρδος διαφορισμού (diversity gain), το κέρδος πολυπλεξίας (multiplexing gain) και τέλος δυνατότητες ακύρωσης των παρεμβολών (interference cancelation capabilities) [6].

1.1.2 Βασικά Μειονεκτήματα

Παρόλα τα πλεονεκτήματα που επιφέρει η χρήση των συστημάτων MIMO στην αύξηση της απόδοσης των τηλεπικοινωνιακών δικτύων, υπάρχουν και κάποια αρνητικά στοιχεία τα οποία γίνονται αντιληπτά κατά την υλοποίηση της συγκεκριμένης τεχνικής. Ακόμη περισσότερο, στις περιπτώσεις υλοποίησης συστημάτων MIMO σε κινητά τερματικά. Πιο συγκεκριμένα, η χρήση των συστημάτων MIMO απαιτεί υλοποιήσεις αρκετά μεγάλης πολυπλοκότητας και επιφέρει απαιτήσεις σχετικά με τις διαστάσεις των τερματικών συσκευών.

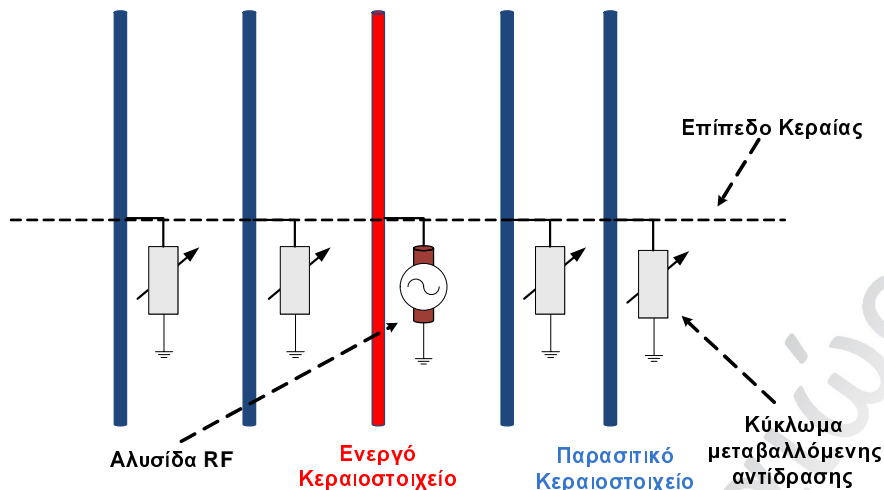
Στα συστήματα MIMO η χρήση πολλαπλών κεραίων συνδυάζεται με την χρήση πολλαπλών αλυσίδων RF. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, την χρήση πολλαπλών κυκλωματικών στοιχείων τα οποία απαιτούνται για την υλοποίηση μιας τέτοιας αλυσίδας RF, όπως για παράδειγμα ενισχυτές, γραμμές μεταφοράς, φίλτρα και ταλαντωτές. Άμεση συνέπεια των παραπάνω, αποτελεί η αύξηση της πολυπλοκότητας του υλικού (hardware) των συσκευών που έχουν την δυνατότητα να υποστηρίξουν τις τεχνικές MIMO. Κατά συνέπεια, η πολυπλοκότητα αυτή επηρεάζει και τα κινητά τερματικά τα οποία χρησιμοποιούνται σε ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο όπως για παράδειγμα το LTE [7]. Ακόμη, η αυξημένη πολυπλοκότητα είναι ένας από τους βασικούς παράγοντες οι οποίοι έχουν καθυστερήσει την ευρέως διαδεδομένη χρήση συστημάτων MIMO σε κινητά τερματικά. Βασικό παράδειγμα αποτελεί το γεγονός ότι παρόλο που η χρήση συστημάτων MIMO 4×4 έχει προτυποποιηθεί στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα 4^{ης} γενιάς LTE Advanced [3] και Mobile WiMAX (IEEE 802.16m) [4], μέχρι στιγμής υποστηρίζονται πρακτικά μόνο συστήματα 2×2 .

Ακόμη, η χρήση πολλαπλών κεραιών στους πομποδέκτες απαιτεί την τήρηση συγκεκριμένων αποστάσεων μεταξύ των κερασοτοιχείων. Ο συγκεκριμένος περιορισμός υφίσταται λόγω του ότι μη τήρηση των απαιτούμενων αποστάσεων θα έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ηλεκτρομαγνητικής σύζευξης (electromagnetic coupling) [8] μεταξύ των κεραιών ή συσχέτιση των λαμβανόμενων σημάτων. Όπως και ο προηγούμενος, έτσι και αυτός ο περιορισμός επιβραδύνει την εφαρμογή συστημάτων MIMO σε κινητά τετραγωνικά, όπου οι διαστάσεις είναι περιορισμένες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα, αποτελεί το γεγονός ότι μέχρι στιγμής δυνατότητα υποστήριξης συστημάτων MIMO έχουν συσκευές με αρκετά μεγάλη επιφάνεια όπως tablets και smartphones.

1.1.3 Εναλλακτικές Τεχνικές

Λόγω των βασικών μειονεκτημάτων που παρουσιάζουν τα συστήματα MIMO, ένα αρκετά ενδιαφέρον ερευνητικό πεδίο είναι αυτό της αναζήτησης εναλλακτικών μεθόδων οι οποίες να μπορούν να προσφέρουν παρόμοιας τάξης απόδοση αλλά και να παρακάμπτουν τα παραπάνω μειονεκτήματα. Πιο συγκεκριμένα, εμφανίζονται δύο βασικές κατηγορίες εναλλακτικών μεθόδων αντιμετώπισης των μειονεκτημάτων. Η πρώτη κατηγορία βασίζεται στο σκεπτικό της χρήσης ενός υποσυνόλου από τα διαθέσιμα κεραιοστοιχεία των πομποδεκτών με σκοπό τη μείωση πολυπλοκότητας. Τα επιλεγμένα κεραιοστοιχεία θα χρησιμοποιούνται για να μεταφέρουν τα λαμβανόμενα σήματα στις διαθέσιμες αλυσίδες RF των πομποδεκτών. Πιο αναλυτικά, το σύστημα MIMO που θα υλοποιεί την συγκεκριμένη μέθοδο, θα έχει στην διάθεση του ένα αριθμό στοιχειοκεραιών και έναν αντίστοιχο αριθμό αλυσίδων RF (μικρότερο από τα κεραιοστοιχεία). Κάθε φορά, οι αλυσίδες αυτές θα τροφοδοτούνται από τα σήματα που λαμβάνονται από τα ισάριθμα κεραιοστοιχεία τα οποία έχουν επιλεγεί μέσω της επεξεργασίας των αποκρίσεων κάθε στοιχείου [10] [11]. Μια επέκταση αυτής της μεθόδου, αφορά την τροφοδότηση κάθε αλυσίδας RF με τα σήματα ενός υποσυνόλου κεραιοστοιχείων, κάτι το οποίο οδηγεί στην δημιουργία υπο-στοιχειοκεραιών. Παρόλα αυτά, μια τέτοια υλοποίηση απαιτεί μεταγωγείς RF (RF switches) αλλά και σχεδίαση αλγορίθμων για την δυναμική προσαγωγή των κατάλληλων υπο-στοιχειοκεραιών και των κατάλληλων γραμμικών συνδυασμών των αποκρίσεων σε κάθε αλυσίδα RF [12] [13] [14].

Στη δεύτερη κατηγορία, ανήκουν τεχνικές που σκοπός τους δεν είναι η αντιμετώπιση της πολυπλοκότητας των κυκλωμάτων οδήγησης της στοιχειοκεραίας, αλλά η μείωση των διαστάσεων της. Αυτές οι τεχνικές επιχειρούν την πυκνή τοποθέτηση των κεραιοστοιχείων ώστε να επιτευχθεί μείωση της μέγιστης γραμμικής διάστασης της κεραίας. Όμως, άμεση συνέπεια της τοποθέτησης αυτής αποτελεί η δημιουργία ισχυρής σύζευξης (mutual coupling, MC) και χωρικής συσχέτισης (spatial correlation, SC) των σημάτων εκπομπής και λήψης. Για την αντιμετώπιση αυτών των φαινομένων χρησιμοποιούνται τεχνικές αποσύζευξης (decoupling techniques) [15] [16] και τεχνικές αποσυσχέτισης. Μια δημοφιλής τεχνική αποσυσχέτισης είναι η χρήση κεραιών διπλής πόλωσης (dual polarized antennas).



Σχήμα 1.2: Γραμμική κεραία ESPAR με 5 κεραιοστοιχεία

Οι κεραίες αυτές χρησιμοποιούν ομαδοποιημένα κεραιοστοιχεία ανά ζεύγη, όπου κάθε ζεύγος αποτελείται από δύο κεραιοστοιχεία διαφορετικού προσανατολισμού που τοποθετούνται στο ίδιο σημείο (co-located antennas). Με αυτό τον τρόπο, εξασφαλίζεται μηδενική χωρική συσχέτιση των σημάτων εκπομπής ή/και λήψης, θεωρώντας πάντα κατάλληλη απόσταση μεταξύ γειτονικών ζευγών κεραιοστοιχείων. Μία άλλη προσέγγιση που επιτρέπει την ελάττωση της απόστασης μεταξύ κεραιοστοιχείων, είναι μέσω κατάλληλης επιλογής των υλικών, της γεωμετρίας και της μεθόδου κατασκευής της στοιχειοκεραίας [17].

1.2 Στόχοι της Εργασίας

Σε αυτή την διπλωματική εργασία βασίζουμε τη μελέτη μας σε μία εναλλακτική τεχνική των συστημάτων MIMO ή οποία έχει ως στόχο την μείωση τόσο της πολυπλοκότητας όσο και των απαιτήσεων σε διαστάσεις. Η τεχνική αυτή βασίζεται στην χρήση παρασιτικών κεραίων και συγκεκριμένα στοιχειοκεραίων οι οποίες είναι γνωστές ως Electronically Steerable Parasitic Antenna Radiators (ESPARs). Σε αντίθεση με τις συμβατικές στοιχειοκεραίες που χρησιμοποιούνται στα συστήματα MIMO, οι κεραίες ESPAR διαθέτουν μόνο ένα ενεργό και πλήθος παρασιτικών κεραιοστοιχείων. Αυτό σημαίνει ότι απαιτούν την χρήση μόνο μιας αλυσίδας RF. Ακόμη, η αρχή λειτουργίας της βασίζεται στην ισχυρή σύζευξη που προκαλεί την επαγωγή ρεύματος στα παρασιτικά κεραιοστοιχεία, η οποία αναπτύσσεται λόγω της τροφοδότησης του ενεργού. Αυτό βέβαια απαιτεί τα κεραιοστοιχεία να βρίσκονται σε κοντινές αποστάσεις, σχηματίζοντας μια στοιχειοκεραία συμπαγούς μορφής. Ένα παράδειγμα τέτοιας κεραίας απεικονίζεται στο Σχήμα 1.2.

Σύμφωνα με την παραπάνω περιληπτική περιγραφή της λειτουργίας των κεραίων ESPAR, προκύπτει ότι οι κεραίες αυτές αντιμετωπίζουν και τα δύο βασικά προβλήματα των συστημάτων MIMO. Συγκεκριμένα, αντιμετωπίζουν τόσο το πρόβλημα της πολυπλοκότητας, αφού

χρησιμοποιούν μόνο μία αλυσίδα RF, όσο και το πρόβλημα των απαιτούμενων διαστάσεων καθώς η αρχή λειτουργίας τους απαιτεί την πυκνή διάταξη των κεραιοστοιχείων. Παρόλα αυτά, η ύπαρξη μόνο ενός ενεργού κεραιοστοιχείου απαγορεύει τη χωρική διασπορά των σημάτων εκπομπής ή τη χωρική δειγματοληψία των σημάτων στο δέκτη, όπως γίνεται στα συμβατικά συστήματα MIMO.

Η βασική δυνατότητα που παρέχουν οι παρασιτικές κεραιές είναι η διαμόρφωση διαγραμμάτων ακτινοβολίας (beamforming ability) μέσω κατάλληλης ρύθμισης των βαρών των παρασιτικών κεραιοστοιχείων. Συνεπώς, η εκπομπή πολλαπλών συμβόλων ταυτόχρονα μπορεί να επιτευχθεί με την πολυπλεξία των συμβόλων απευθείας στο ακτινοβολούμενο διάγραμμα εκπομπής. Όπως στην περίπτωση των συμβατικών συστημάτων MIMO, όπου κάθε σύμβολο εκπέμπεται μέσω διαφορετικού ενεργού κεραιοστοιχείου, έτσι στην περίπτωση των παρασιτικών κεραιών το κάθε σύμβολο αντιστοιχίζεται σε ένα διάγραμμα ακτινοβολίας το οποίο καλείται διάγραμμα βάσης (basis pattern). Κάθε διάγραμμα βάσης αποτελεί και έναν εναέριο βαθμό ελευθερίας (Aerial Degree of Freedom - aDoF). Συνεπώς, η πολυπλεξία των συμβόλων εκπομπής δε γίνεται στο πεδίο του χώρου, αλλά στο πεδίο των διαγραμμάτων ακτινοβολίας (Beamspace Domain - BS Domain). Η αρχιτεκτονική MIMO με μία αλυσίδα RF θα αναφέρεται ως Beamspace MIMO (BS-MIMO) ώστε να δίδεται έμφαση στην αρχή λειτουργίας της.

Βασιζόμενοι σε αυτή την αρχιτεκτονική, σκοπός μας σε αυτή την εργασία είναι να πραγματοποιήσουμε μια μελέτη σχετικά με τους βαθμούς ελευθερίας που μπορεί να παρέχει ένα τέτοιο σύστημα. Στην περίπτωση των κλασικών συστημάτων MIMO, ένας βαθμός ελευθερίας ισοδυναμεί με μία ανεξάρτητη ροή δεδομένων η οποία επιτυγχάνεται μεταξύ των κεραιών του πομπού και του δέκτη. Στην περίπτωση των συστημάτων BS-MIMO, οι πομποδέκτες δεν έχουν χωρική διακριτικότητα. Έτσι, σε αυτά τα συστήματα ένας βαθμός ελευθερίας ισοδυναμεί με ένα διάγραμμα βάσης των κεραιών του πομπού και του δέκτη. Μέχρι στιγμής, οι προσεγγίσεις που έχουν ακολουθηθεί στα [18] και [19], για τον υπολογισμό των διαθέσιμων βαθμών ελευθερίας σε συστήματα BS-MIMO, βασίζονται στη διάσπαση του πεδίου ακτινοβολίας της κεραιάς σε ορθογώνιες συνιστώσες. Για το λόγο αυτό, λαμβάνουν υπόψη τους μόνο τα χαρακτηριστικά της κεραιάς ESPAR που χρησιμοποιείται. Παρόλα αυτά, όπως και στα συστήματα MIMO, μια βασική παράμετρος που καθορίζει την απόδοση είναι η συνεισφορά του καναλιού κανάλι. Αυτή η παράμετρος, μέχρι στιγμής, δεν έχει ληφθεί υπόψη σε κάποια μελέτη για τον υπολογισμό των διαθέσιμων βαθμών ελευθερίας. Αυτός λοιπόν είναι ο ένας εκ των στόχων αυτής της εργασίας, να παρέχει δηλαδή μια μέθοδο υπολογισμού των βαθμών ελευθερίας ενός συστήματος BS-MIMO η οποία να λαμβάνει υπόψη της και την συνεισφορά του καναλιού.

Με δεδομένα τα αποτελέσματα από τις προηγούμενες μελέτες, γνωρίζουμε ότι η μέθοδος που πρόκειται να αναπτυχθεί θα υπολογίζει του βαθμούς ελευθερίας του συστήματος καθώς και τα διαγράμματα βάσης που αντιστοιχούν σε κάθε βαθμό. Για να μπορέσουμε να

τεκμηριώσουμε την πρακτική υπόσταση της μεθόδου που θα αναπτυχθεί, θα πρέπει να γίνει παράλληλα ένας έλεγχος εφικτότητας των παραγόμενων διαγραμμάτων. Αυτός ο έλεγχος θα έχει σκοπό να αποδείξει ότι τα αποτελέσματα της μεθόδου μας, δηλαδή τα διαγράμματα ακτινοβολίας, δεν είναι αβάσιμα αλλά είναι εφικτά να υποστηριχθούν από μια υλοποίηση κεραίας ESPAR. Ένας από τους πιο επιστημονικά έγκυρους και παράλληλα διαθέσιμος σε εμάς τρόπος υλοποίησης αυτής της μελέτης εφικτότητας, είναι οι προσομοιώσεις. Προσομοιώνοντας λοιπόν τα χαρακτηριστικά μιας κεραίας ESPAR είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε εάν αυτή η κεραία μπορεί να δημιουργήσει το επιθυμητό διάγραμμα ακτινοβολίας. Όμως, λόγω της φύσης του ελέγχου που καλούμαστε να πραγματοποιήσουμε, δεν μπορούμε να ανάγουμε την λύση του σε εφικτό και ανέφικτο. Με άλλα λόγια, η μη ταύτιση 100% του επιθυμητού διαγράμματος, που θα υπολογίσει η μέθοδος μας, με το αντίστοιχο διάγραμμα που μπορεί να υποστηρίξει η κεραία, δεν σημαίνει ότι το επιθυμητό διάγραμμα μπορεί να θεωρηθεί ανέφικτο. Έτσι, ανάγουμε τον έλεγχο εφικτότητας σε μια μελέτη για το ποιο είναι το πλησιέστερο στο επιθυμητό διάγραμμα που μπορεί να παράξει η κεραία. Αυτό βέβαια δεν σημαίνει ότι λύσεις με πολύ χαμηλή ταύτιση μπορούν να θεωρηθούν ως αποδεκτές.

Παρόλα αυτά, όπως προαναφέραμε, η διαμόρφωση των διαγραμμάτων ακτινοβολίας μια κεραίας ESPAR γίνεται ρυθμίζοντας κατάλληλα τις τιμές που έχουν τα βάρη των παρασιτικών κεραιοστοιχείων. Αυτό σημαίνει ότι για να πραγματοποιηθεί η μελέτη σχετικά με το ποιο διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας είναι το πλησιέστερο στο επιθυμητό, θα πρέπει πρώτα να γίνει μια έρευνα για το ποιες είναι οι τιμές των βαρών που αντιστοιχούν στο διάγραμμα αυτό. Έτσι λοιπόν, προκύπτει η ανάγκη δημιουργίας ενός συστήματος το οποίο θα υπολογίζει τις τιμές των βαρών που πρέπει να εφαρμοστούν στα στοιχεία της κεραίας ώστε αυτή να παράγει το πλησιέστερο προς το επιθυμητό, διάγραμμα ακτινοβολίας. Από την παραπάνω περιγραφή, προκύπτει ότι το πρόβλημα που καλούμαστε να λύσουμε είναι ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης στο οποίο μεταβλητή απόφασης είναι τα βάρη των παρασιτικών στοιχείων και αντικειμενική συνάρτηση είναι η ομοιότητα του παραγόμενου με το επιθυμητό διάγραμμα ακτινοβολίας. Για την επίλυση του προβλήματος αυτού επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε ένα γενετικό αλγόριθμο που να υπολογίζει τα βάρη, δηλαδή την σύνθετη αντίσταση των παρασιτικών στοιχείων της κεραίας. Η δημιουργία του αλγορίθμου αυτού αποτελεί τον έτερο στόχο αυτής της εργασίας.

1.3 Δομή - Δημοσιεύσεις

Η παρούσα εργασία ακολουθεί την εξής δομή:

Κεφάλαιο 2. Στο δεύτερο κεφάλαιο αυτής της εργασίας παρουσιάζεται η αναπαράσταση στο πεδίο των διαγραμμάτων ακτινοβολίας και η λειτουργία των συστημάτων BS-MIMO. Αρχικά δίνεται η αναπαράσταση της λειτουργίας ενός κλασικού συστήματος MIMO στο πεδίο BS και στην συνέχεια διατυπώνεται η σχέση εισόδου-εξόδου ενός συστήματος BS-MIMO

και αναλύεται η λειτουργία του πομπού και του δέκτη ενός τέτοιου συστήματος αντίστοιχα.

Κεφάλαιο 3. Στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται οι τεχνικές υπολογισμού των διαθέσιμων βαθμών ελευθερίας μιας κεραίας ESPAR. Αρχικά παρουσιάζεται η τεχνική υπολογισμού η οποία δεν λαμβάνει υπόψη της την συνεισφορά του καναλιού και η οποία παράγει διαγράμματα βάσης ανεξάρτητα του καναλιού. Στην συνέχεια παρουσιάζεται η τεχνική υπολογισμού διαγραμμάτων βάσης η οποία λαμβάνει υπόψη της το κανάλι και η οποία παράγει προσαρμοστικά διαγράμματα ακτινοβολίας.

Κεφάλαιο 4. Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται ο γενετικός αλγόριθμος υπολογισμού της σύνθετης αντίστασης των παρασιτικών κεραιοστοιχείων της κεραίας ESPAR. Αρχικά παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας των κεραίων ESPAR, στη συνέχεια δίνεται ο ορισμός του προβλήματος βελτιστοποίησης που καλείται να επιλύσει ο αλγόριθμος και τέλος παρουσιάζεται η λειτουργία του αλγορίθμου.

Κεφάλαιο 5. Στο πέμπτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν. Στο πρώτο μέρος του κεφαλαίου παρουσιάζονται αποτελέσματα σχετικά με την απόδοση του γενετικού αλγορίθμου. Στο δεύτερο μέρος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που είναι σχετικά με την απόδοση της τεχνικής υπολογισμού προσαρμοστικών διαγραμμάτων βάσης.

Κεφάλαιο 6. Στο έκτο κεφάλαιο αυτής της εργασίας συνοψίζονται τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν και παρουσιάζονται συνοπτικά τα συμπεράσματα που προέκυψαν σχετικά με την απόδοση της τεχνικής και του αλγορίθμου που αναπτύχθηκε. Επίσης γίνεται αναφορά σε μελλοντικές μελέτες που μπορούν να γίνουν πάνω στα συστήματα BS-MIMO .

Τέλος, στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας αυτής έχουν γίνει οι εξής δημοσιεύσεις σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά και συνέδρια:

Δημοσιεύσεις σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά

P. Vasileiou, K. Maliatsos, E. Thomatos and A. Kanatas, “Reconfigurable Orthonormal Basis Patterns Using ESPAR Antennas”, IEEE Communications Letters, vol. Submitted for Publication, 2012

Δημοσιεύσεις στα πρακτικά διεθνών επιστημονικών συνεδρίων

P. Vasileiou, E. Thomatos, K. Maliatsos and A. Kanatas, “Adaptive Basis Patterns Computation for ESPAR Antennas”, in Proceedings IEEE VTC 2013 , Submitted for Publication, 2012

E. Thomatos, P. Vasileiou and A. Kanatas, “ESPAR Loads Calculation using a Genetic Algorithm”, in Proceedings IEEE EUCAP 2013 , Submitted for Publication , 2012

Δημοσιεύσεις στην Ευρωπαϊκή Ερευνητική Δράση: “COoperation in Scie-

nce and Technology (COST) Action 2100: Cooperative Radio Communications for Green Smart Environments”

COST IC1004 Presentation on the 5th MC and Scientific Meeting in Bristol: P. Vasileiou, K. Maliatsos, E. Thomatos and A. Kanatas, “Reconfigurable Orthonormal Basis Patterns Using ESPAR Antennas”, TD(12)05013

Πανεπιστήμιο Πειραιώς

Κεφάλαιο 2

Συστήματα BS-MIMO και Αναπαράσταση στο Πεδίο BS

2.1 Εισαγωγή

Βασικό στόχο αυτής της εργασίας αποτελεί η μελέτη συστημάτων MIMO τα οποία είναι εφοδιασμένα με πομποδέκτες οι οποίοι διαθέτουν μόνο μια αλυσίδα RF και πλήθος παρασιτικών κεραιών. Τα συστήματα αυτά διαφέρουν σε αρκετά σημεία από τα κλασικά συστήματα MIMO, ή όπως θα τα αναφέρουμε στην συνέχεια τα συμβατικά συστήματα MIMO. Λόγω της χρήσης μόνο μιας αλυσίδας RF, τα συστήματα αυτά δεν έχουν την δυνατότητα να δειγματοληπτούν χωρικά τα σήματα τα οποία λαμβάνουν. Αυτό σημαίνει, ότι δεν μπορούν να εκπέμψουν και να λάβουν σήματα στο χωρικό πεδίο, δηλαδή να υποστηρίξουν χωρική πολυπλεξία, όπως τα κλασικά MIMO. Άμεση συνέπεια, αποτελεί το γεγονός ότι σε αντίθεση με τα συμβατικά συστήματα MIMO, η λειτουργία των συστημάτων αυτών δεν μπορεί να μελετηθεί πλήρως στο χωρικό πεδίο.

Παρόλα αυτά, η χρήση ενός ενεργού κεραιοστοιχείου σε συνδυασμό με τα παρασιτικά κεραιοστοιχεία, δίνει στα συστήματα αυτά την δυνατότητα να διαμορφώνουν εύκολα διαφορετικά διαγράμματα ακτινοβολίας. Με άλλα λόγια οι κεραιές αυτές έχουν την δυνατότητα να διαμορφώνουν το διάγραμμα ακτινοβολίας τους (beamforming ability). Μέσω της δυνατότητας αυτής, τα συγκεκριμένα συστήματα μπορούν να δειγματοληπτούν τα λαμβανόμενα σήματα με διαφορετικά διαγράμματα ακτινοβολίας καθώς και να εκπέμψουν σήματα με διαφορετικά διαγράμματα ακτινοβολίας. Έτσι, αντί να πετυχαίνουν χωρική πολυπλεξία, όπως τα συμβατικά συστήματα MIMO, πετυχαίνουν πολυπλεξία στο πεδίο των διαγραμμάτων ακτινοβολίας (Beamspace domain - BS domain). Συνεπώς, η λειτουργία των συστημάτων αυτών αναλύεται στο πεδίο BS και για αυτό το λόγο τα συστήματα αυτά ονομάζονται BS-MIMO.

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα οριστεί το πεδίο των διαγραμμάτων ακτινοβολίας και θα δοθεί μια ισοδύναμη αναπαράσταση της λειτουργίας των συμβατικών συστημάτων MIMO στο πεδίο αυτό. Στην αναπαράσταση αυτή, θα εκφραστεί ο πίνακας του καναλιού σαν συνάρτηση των

γεωμετρικών χαρακτηριστικών των στοιχειοκεραιών που χρησιμοποιούνται και θα οριστεί η σχέση εισόδου-εξόδου στο πεδίο των διαγραμμάτων ακτινοβολίας. Ακόμη, θα αναλυθεί η λειτουργία των συστημάτων BS-MIMO στο πεδίο BS. Πιο αναλυτικά θα περιγράψουμε την λειτουργία του πομπού και του δέκτη ενός τέτοιου συστήματος και θα δώσουμε την αντίστοιχη σχέση εισόδου-εξόδου.

2.2 Αναπαράσταση Λειτουργίας MIMO στο πεδίο BS

Η λειτουργία και η μοντελοποίηση των συστημάτων MIMO είναι ευρέως ορισμένη στο χωρικό πεδίο (spatial domain), στο οποίο και επιτυγχάνονται τα βασικά πλεονεκτήματα πολυπλεξίας και διαφορισμού των συστημάτων αυτών.

Παρά ταύτα, μια πολύ ενδιαφέρουσα, από φυσικής πλευράς, αναπαράσταση της λειτουργίας των συστημάτων MIMO, είναι αυτή στο πεδίο των διαγραμμάτων ακτινοβολίας (beam-space domain) [20] [21]. Λόγω του ότι η αρχή λειτουργίας των παρασιτικών κεραιών ESPAR έχει μοντελοποιηθεί στο πεδίο των διαγραμμάτων ακτινοβολίας, όπου εκεί επιτρέπεται ο καθορισμός σημαντικών παραμέτρων που σχετίζονται με την επίδοση της κεραίας, όπως για παράδειγμα η εκτίμηση των βαθμών ελευθερίας του διαγράμματος ακτινοβολίας, μια ισοδύναμη αναπαράσταση του πίνακα του καναλιού μεταξύ των δύο συστημάτων είναι απαραίτητη.

Για το λόγο αυτό, στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου θα δώσουμε τις εκφράσεις του πίνακα καναλιού MIMO και της συνάρτησης εισόδου-εξόδου στο πεδίο των διαγραμμάτων ακτινοβολίας.

2.2.1 Πίνακας Καναλιού MIMO

Η αναπαράσταση του πίνακα του καναλιού ενός συστήματος MIMO στο χωρικό πεδίο έχει την ακόλουθη μορφή:

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} h_{11} & \dots & h_{1N_T} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_R1} & \dots & h_{N_R N_T} \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

όπου το στοιχείο h_{ij} αναπαριστά το μιγαδικό κέρδος του καναλιού μεταξύ της j -οστής κεραίας εκπομπής και της i -οστής κεραίας λήψης, N_R είναι ο αριθμός των κεραιών του δέκτη και N_T ο αριθμός κεραιών του πομπού.

Σκοπός μας είναι να δώσουμε μια πιο γεωμετρική αναπαράσταση στον πίνακα της εξ. (2.1). Έτσι θα πρέπει στην αναπαράσταση αυτή να λάβουμε υπόψη μας τα γεωμετρικά

χαρακτηριστικά της κεραίας. Για λόγους απλότητας θεωρούμε την χρήση γραμμικών ομοιόμορφων στοιχειοκεραίων (Uniform Linear Arrays - ULAs) και στις δύο πλευρές του συστήματος MIMO, καθώς επίσης θεωρείται ότι κάθεμια από τις πολυδιαδρομικές συνιστώσες του καναλιού αλληλεπιδρά στη διαδρομή της από την κεραία εκπομπής προς την κεραία λήψης με ένα και μοναδικό σκεδαστή (single bounce scattering). Ο πίνακας καναλιού του συστήματος MIMO μπορεί πλέον να εκφραστεί γεωμετρικά ως [20]:

$$\mathbf{H} = \sum_{i=1}^Q g_i \mathbf{a}_R(\varphi_{R,i}) \mathbf{a}_T^H(\varphi_{T,i}) = \mathbf{A}_R \mathbf{H}_g \mathbf{A}_T^H \quad (2.2)$$

όπου Q είναι ο αριθμός των σκεδαστών που θεωρείται ότι υπάρχουν στο κανάλι και κατά συνέπεια και ο αριθμός των πολυδιαδρομικών συνιστωσών του καναλιού. Κάθε μία από τις πολυδιαδρομικές συνιστώσες του καναλιού έχει συγκεκριμένη γωνία αναχώρησης (Angle of Departure - AoD) $\varphi_{R,i}$ και συγκεκριμένη γωνία άφιξης (Angle of Arrival - AoA) $\varphi_{T,i}$, καθώς και μιγαδικό κέρδος g_i . Επιπλέον, $\mathbf{a}_{T/R}(\varphi)$ είναι το διάνυσμα πολλαπλότητας της κεραίας (array manifold vector) του πομπού/δέκτη. Το δεξί μέρος της εξ. (2.2), δίνει μια πιο συμπαγή αναπαράσταση του πίνακα του καναλιού, όπου \mathbf{H}_g είναι πίνακας που περιέχει τα μιγαδικά κέρδη των πολυδιαδρομικών συνιστωσών του καναλιού και $\mathbf{A}_{T/R}$ είναι πίνακας περιστροφής (steering matrix) του πομπού/δέκτη.

Πιο αναλυτικά, το διάνυσμα πολλαπλότητας της κεραίας $\mathbf{a}_{T/R}(\varphi)$ του πομπού/δέκτη αντιστοιχεί στο διάγραμμα ακτινοβολίας που είναι στραμμένο στην κατεύθυνση $\hat{\varphi}$ και έχει την εξής μορφή:

$$\mathbf{a}_{T,R}(\mathbf{k}) = \begin{bmatrix} e^{-j\mathbf{k}^T \cdot \mathbf{p}_0} & e^{-j\mathbf{k}^T \cdot \mathbf{p}_1} & \dots & e^{-j\mathbf{k}^T \cdot \mathbf{p}_{M-1}} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

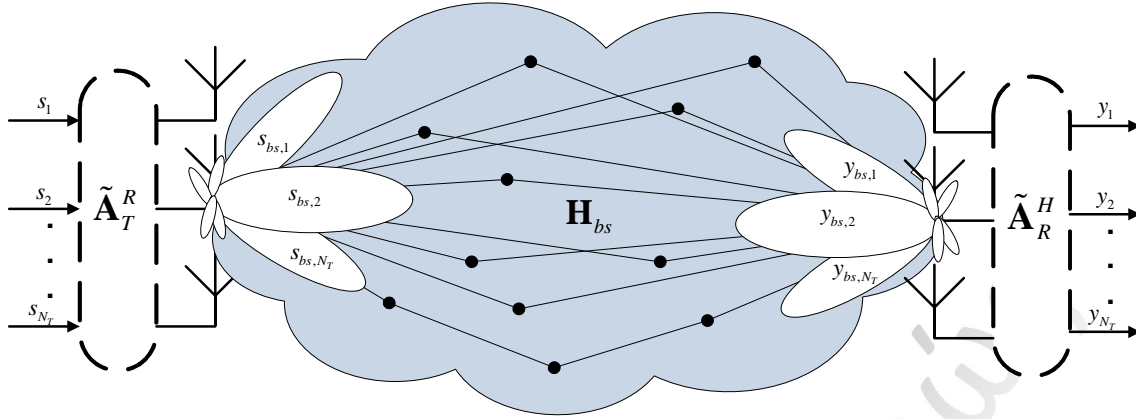
όπου $\mathbf{k} = \frac{2\pi}{\lambda} \hat{\varphi}$ και \mathbf{p}_n το διάνυσμα θέσης του κεραιοστοιχείου n .

Επίσης, \mathbf{H}_g είναι ένας διαγώνιος πίνακας με διάσταση $(Q \times Q)$ που στην διαγώνιο του περιέχει τα μιγαδικά κέρδη των πολυδιαδρομικών συνιστωσών του καναλιού και έχει την εξής μορφή:

$$\mathbf{H}_g = \begin{bmatrix} g_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & g_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g_Q \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Τέλος, ο πίνακας περιστροφής του πομπού/δέκτη $\mathbf{A}_{T/R}$ έχει διάσταση $(N_T \times Q)$ και περιέχει στις στήλες του τα διανύσματα πολλαπλότητας της κεραίας του πομπού/δέκτη που αντιστοιχούν στις κατευθύνσεις των σκεδαστών. Ο πίνακας αυτός έχει την μορφή:

$$\mathbf{A}_{T/R} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{T/R}(\varphi_{T/R,1}) & \mathbf{a}_{T/R}(\varphi_{T/R,2}) & \dots & \mathbf{a}_{T/R}(\varphi_{T/R,Q}) \end{bmatrix} \quad (2.5)$$



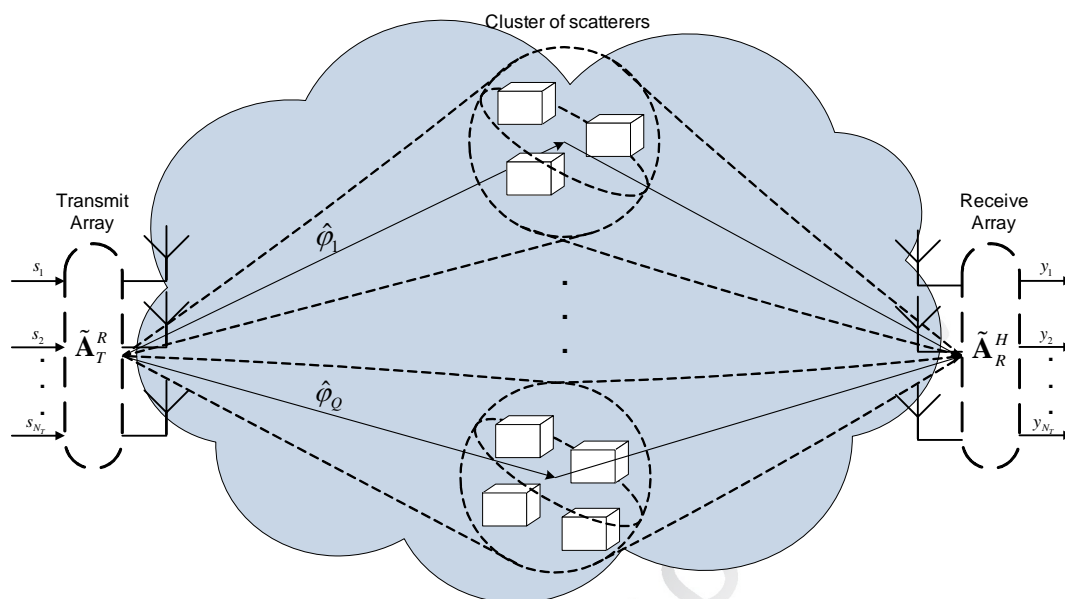
Σχήμα 2.1: Αναπαράσταση λειτουργίας ενός συστήματος MIMO στο πεδίο BS

Η αναπαράσταση του πίνακα του καναλιού που δόθηκε στην εξ. (2.2) μοντελοποιεί πλήρως την γεωμετρική αναπαράσταση των σκεδαστών του καναλιού. Παρόλα αυτά όμως, στην αναπαράσταση του πίνακα του καναλιού στο πεδίο των διαγραμμάτων ακτινοβολίας είναι απαραίτητο να εισάγουμε πληροφορία σχετικά με τα χαρακτηριστικά της συστοιχίας κεραιών που χρησιμοποιείται, όπως η διάσταση και η γεωμετρία, ώστε να λάβουμε υπόψη την επίδραση τους στο συνολικό πεδίο ακτινοβολίας της κεραίας. Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά του καναλιού και της συστοιχίας κεραιών που χρησιμοποιείται, η αναπαράσταση του πίνακα καναλιού ενός συστήματος MIMO στο πεδίο των διαγραμμάτων ακτινοβολίας είναι η εξής:

$$\mathbf{H}_{bs} = \tilde{\mathbf{A}}_R^H \mathbf{H} \tilde{\mathbf{A}}_T = \tilde{\mathbf{A}}_R^H \mathbf{A}_R \mathbf{H}_g \mathbf{A}_T^H \tilde{\mathbf{A}}_T \quad (2.6)$$

όπου $\tilde{\mathbf{A}}_{T/R}$ είναι πίνακας περιστροφής ο οποίος περιέχει στις στήλες του τους παράγοντες πολλαπλότητας της κεραίας του πομπού/δέκτη που αντιστοιχούν σε ένα σύνολο προκαθορισμένων γωνιακών κατευθύνσεων $\tilde{\varphi}$. Οι κατευθύνσεις αυτές, που σύμφωνα με το [20] ονομάζονται "εικονικές κατευθύνσεις", καθορίζονται μέσω ομοιόμορφης δειγματοληψίας όλων των δυνατών γωνιακών κατευθύνσεων με συγκεκριμένη περίοδο. Με τον τρόπο αυτό, εξασφαλίζεται η ορθογωνιότητα μεταξύ των διανυσμάτων πολλαπλότητας και κατά συνέπεια δημιουργείται ένα σύνολο ορθογώνιων διαγραμμάτων, δηλαδή μια ορθογώνια βάση. Για το λόγο αυτό, τα ορθογώνια αυτά διαγράμματα, που αποτελούν το συνολικό διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας, θα αναφέρονται ως διαγράμματα βάσης (basis patterns). Επομένως, οι πίνακες $\tilde{\mathbf{A}}_{T,R}$ είναι ορθομοναδιαίοι (αφού αποτελούνται από ορθογώνια διανύσματα) και μπορούν να θεωρηθούν ως πίνακες διακριτού μετασχηματισμού Fourier (Discrete Fourier Transform - DFT). Αυτό σημαίνει ότι ο μετασχηματισμός του πίνακα καναλιού από το χωρικό πεδίο στο πεδίο των διαγραμμάτων ακτινοβολίας εκφυλίζεται σε έναν απλό μετασχηματισμό Fourier .

Σύμφωνα με τα παραπάνω, ο πίνακας του καναλιού στο πεδίο των διαγραμμάτων ακτι-



Σχήμα 2.2: Περιβάλλον διάδοσης με ομαδοποιημένους σχεδαστές

νοβολίας, μπορεί να θεωρηθεί ότι περιλαμβάνει τα μιγαδικά κέρδη μεταξύ των ορθογώνιων διαγραμμάτων που αποτελούν το συνολικό εκπεμπόμενο διάγραμμα ακτινοβολίας του πομπού και των αντίστοιχων ορθογώνιων διαγραμμάτων του δέκτη. Έτσι, το στοιχείο h_{ij}^{bs} του πίνακα \mathbf{H}_{bs} εκφράζει την συνεισφορά όλων των πολυδιαδρομικών συνιστωσών που προσπίπτουν στο i -οστό και j -οστό ορθογώνιο διάγραμμα ακτινοβολίας πομπού και δέκτη αντίστοιχα. Δηλαδή των συνιστωσών των οποίων οι γωνίες άφιξης και αναχώρησης βρίσκονται εντός του j -οστού ορθογώνιου διαγράμματος του δέκτη και του i -οστού διαγράμματος του πομπού αντίστοιχα. Μια αναπαράσταση της έκφρασης του πίνακα καναλιού ενός συστήματος MIMO με πολλαπλές κεραίες σε πομπό και δέκτη, παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1 Στην περίπτωση που δεν υπάρχει πολυδιαδρομική συνιστώσα που να συνδέει το i -οστό και το j -οστό ορθογώνιο διάγραμμα ακτινοβολίας πομπού και δέκτη, τότε $h_{ij}^{bs} = 0$. Μία τέτοια περίπτωση είναι όταν οι σχεδαστές βρίσκονται ομαδοποιημένοι, δηλαδή σχηματίζουν ομάδες (clusters) σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις το περιβάλλον διάδοσης. Στο Σχήμα 2.2 απεικονίζεται μια τέτοια περίπτωση.

2.2.2 Εξίσωση Εισόδου-Εξόδου

Μέχρι στιγμής έχουμε περιγράψει πλήρως τον πίνακα καναλιού ενός συστήματος MIMO στο πεδίο των διαγραμμάτων ακτινοβολίας. Για να έχουμε μια πλήρη μοντελοποίηση, η έκφραση της σχέσης εισόδου-εξόδου ενός συστήματος MIMO στο πεδίο των διαγραμμάτων ακτινοβολίας θα πρέπει να διατυπωθεί. Σύμφωνα με την μελέτη που παρουσιάστηκε στο [22], η σχέση εισόδου-εξόδου στο πεδίο των διαγραμμάτων ακτινοβολίας προκύπτει από την

αντίστοιχη σχέση στο χωρικό πεδίο ως εξής:

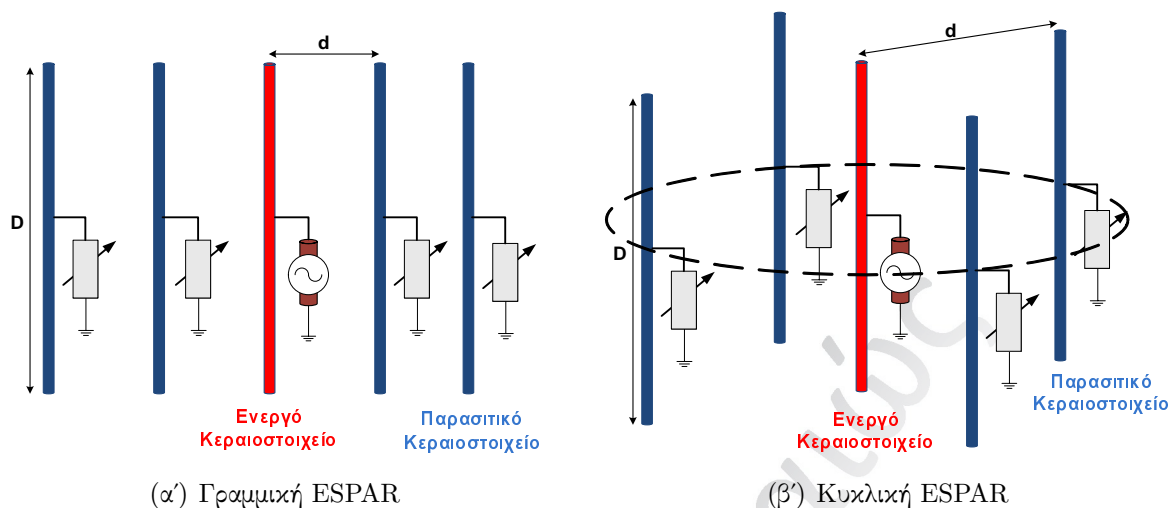
$$\begin{aligned}
 \mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n} &\Rightarrow \tilde{\mathbf{A}}_R^H \mathbf{y} = \tilde{\mathbf{A}}_R^H \mathbf{H}\mathbf{s} + \tilde{\mathbf{A}}_R^H \mathbf{n} \\
 &\Rightarrow \mathbf{y}_{bs} = \tilde{\mathbf{A}}_R^H \mathbf{A}_R \mathbf{H}_g \mathbf{A}_T^H \tilde{\mathbf{A}}_T \tilde{\mathbf{A}}_T^H \mathbf{s} + \mathbf{n}_{bs} \\
 &\Rightarrow \mathbf{y}_{bs} = \hat{\mathbf{A}}_R \mathbf{H}_g \hat{\mathbf{A}}_T^H \mathbf{s}_{bs} + \mathbf{n}_{bs}
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

όπου $\mathbf{s}_{bs} = \tilde{\mathbf{A}}_T^H \mathbf{s}$, είναι τα εκπεμπόμενα σήματα στο πεδίο των διαγραμμάτων ακτινοβολίας και αντίστοιχα $\mathbf{y}_{bs} = \tilde{\mathbf{A}}_R^H \mathbf{y}$ είναι τα λαμβανόμενα σήματα. Για το λόγο αυτό οι πίνακες $\tilde{\mathbf{A}}_{T/R}$ μπορεί να θεωρηθούν ως πίνακες μετασχηματισμού που συνδέουν τα σήματα του χωρικού πεδίου με τα αντίστοιχα του πεδίου των διαγραμμάτων ακτινοβολίας. Επιπλέον $\hat{\mathbf{A}}_R = \tilde{\mathbf{A}}_R^H \mathbf{A}_R$ και $\hat{\mathbf{A}}_T = \mathbf{A}_T^H \tilde{\mathbf{A}}_T$. Ο πίνακας $\hat{\mathbf{A}}_T$ περιέχει τις προβολές των διαγραμμάτων ακτινοβολίας του πομπού πάνω στις θέσεις των σχεδιαστών. Πιο αναλυτικά, οι στήλες του πίνακα αυτού περιέχουν τις αποκρίσεις των N_T ορθογώνιων διαγραμμάτων του πομπού στις κατευθύνσεις των σχεδιαστών. Αντίστοιχα το ίδιο ισχύει για τον πίνακα $\hat{\mathbf{A}}_R$ του δέκτη. Τέλος, το διάνυσμα θορύβου $\mathbf{n}_{bs} = \tilde{\mathbf{A}}_R^H \mathbf{n}$, έχει τις ίδιες στατιστικές ιδιότητες με το διάνυσμα \mathbf{n} .

2.3 Αρχή Λειτουργίας Συστημάτων BS-MIMO

Όπως έχει αναφερθεί και στην εισαγωγή αυτής της εργασίας, παρότι τα κλασικά συστήματα MIMO έχουν την δυνατότητα να προσφέρουν μια πλειάδα από πλεονεκτήματα, η αρχή λειτουργίας τους επιφέρει περιορισμούς οι οποίοι έχουν επιβραδύνει την εφαρμογή των συστημάτων αυτών σε κινητά τερματικά. Αντιθέτως, μια πρόσφατα ανεπτυγμένη μέθοδος, η οποία βασίζεται σε μια διαφορετική αρχή λειτουργίας από αυτήν του κλασικού MIMO, υποστηρίζεται ότι μπορεί να προσφέρει αντίστοιχα πλεονεκτήματα με ελάχιστους περιορισμούς. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται Beamspace MIMO (BS-MIMO) [22] [23] [24] και βασίζεται στο θεωρητικό πλαίσιο που αναπτύχθηκε στα [20] και [25]. Η τεχνική αυτή, υποστηρίζεται ότι υλοποιεί την λειτουργία ενός συστήματος MIMO χρησιμοποιώντας μία στοιχειοκεραία συμπαγούς (compact) μορφής και μόνο ένα ενεργό κεραιοστοιχείο. Επίσης, σε αυτή την προσέγγιση, αντί οι διαφορετικές ροές συμβόλων να εκπέμπονται από τα διαφορετικά κεραιοστοιχεία (όπως στην περίπτωση του κλασικού MIMO), τα σύμβολα προς αποστολή αποτυπώνονται στο πεδίο των διαγραμμάτων ακτινοβολίας της κεραίας και εκπέμπονται μέσω των διαφορετικών διαγραμμάτων βάσης.

Για την υλοποίηση της μεθόδου BS-MIMO, επικρατέστερη παρουσιάζεται να είναι η χρήση κεραιών γνωστών στη διεθνή βιβλιογραφία ως Electronically Steerable Parasitic Antenna Radiators (ESPARs). Σε αντίθεση με τις συμβατικές στοιχειοκεραίες που χρησιμοποιούνται στα συστήματα MIMO, οι κεραιές ESPAR διαθέτουν ένα ενεργό και πλήθος παρασιτικών κεραιοστοιχείων. Η αρχή λειτουργίας της βασίζεται στην ισχυρή σύζευξη που



Σχήμα 2.3: Υλοποιήσεις κεραιών ESPAR με 5 στοιχεία

προκαλεί την επαγωγή ρεύματος στα παρασιτικά κεραιοστοιχεία, η οποία αναπτύσσεται λόγω της τροφοδότησης του ενεργού. Αυτό βέβαια απαιτεί τα κεραιοστοιχεία να βρίσκονται σε κοντινές αποστάσεις, σχηματίζοντας μια στοιχειοκεραία συμπαγούς μορφής. Συνεπώς, το συνολικό διάγραμμα ακτινοβολίας που προκύπτει αποτελείται από την συνεισφορά τόσο της ακτινοβολίας του ενεργού κεραιοστοιχείου όσο και των παρασιτικών. Για το λόγο αυτό, το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας γίνεται να διαμορφωθεί κατά επιθυμητό τρόπο ελέγχοντας τη συνεισφορά του κάθε παρασιτικού κεραιοστοιχείου. Έτσι, για να επιτευχθεί ένα επιθυμητό διάγραμμα ακτινοβολίας θα πρέπει να ελέγχεται η σύζευξη μεταξύ των κεραιοστοιχείων, κάτι το οποίο τεχνητά υλοποιείται εφαρμόζοντας στη βάση κάθε παρασιτικού ένα απλό κύκλωμα ρυθμιζόμενης αντίδρασης (variable reactance) που καλείται varactor. Δύο παραδείγματα τέτοιας υλοποίησης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.3. Στην αρχή λειτουργίας των κεραιών ESPAR θα αναφερθούμε εντατικά στο επόμενο κεφάλαιο.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η σύζευξη μεταξύ των κεραιοστοιχείων πλέον δεν αποτελεί πρόβλημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί, αλλά είναι μια βασική απαίτηση για την λειτουργία της κεραίας. Επομένως, είναι προφανές ότι η χρήση τέτοιων κεραιών, επιτρέπει την δραστηκή μείωση τόσο των διαστάσεων όσο και της πολυπλοκότητας υλοποίησης αφού απαιτείται μόνο μία αλυσίδα RF. Επιπλέον, οι κεραιές αυτές παρέχουν δυνατότητες διαμόρφωσης του διαγράμματος ακτινοβολίας (beamforming abilities) καθώς και εναέριους βαθμούς ελευθερίας (aerial Degrees of Freedom - aDoF).

Στην συνέχεια αυτής της ενότητας θα παρουσιάσουμε την αρχή λειτουργίας ενός BS-MIMO πομποδέκτη που χρησιμοποιεί παρασιτικές κεραιές ESPAR. Λόγω του ότι μόνο ένα ενεργό κεραιοστοιχείο είναι διαθέσιμο, οι γνωστές τεχνικές χωρικής πολυπλεξίας των σημάτων εκπομπής και χωρικής δειγματοληψίας των σημάτων λήψης, δεν γίνεται να εφαρμοστούν. Επομένως, η μελέτη της λειτουργίας αυτής θα γίνει στο πεδίο των διαγραμμάτων ακτινοβολίας. Επίσης στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστεί η βασική λειτουργία αποστολής και

λήψης σημάτων από μία κεραία ESPAR επίσης εκφρασμένη στο πεδίο των διαγραμμάτων ακτινοβολίας.

2.3.1 Σχέση Εισόδου-Εξόδου Συστήματος BS-MIMO

Βασιζόμενοι στην αναπαράσταση της λειτουργίας των συμβατικών συστημάτων MIMO που παρουσιάστηκε στη προηγούμενη ενότητα, σε αυτή την υποενότητα θα παρουσιάσουμε την σχέση εισόδου-εξόδου ενός συστήματος BS-MIMO που είναι εφοδιασμένο με κεραίες ESPAR τόσο σε πομπό όσο και δέκτη. Κάνοντας χρήση των πινάκων $\hat{\mathbf{A}}_{T/R}$ στην εξ. (2.6), προκύπτει ότι ο πίνακας του καναλιού εκφρασμένος στο πεδίο των διαγραμμάτων ακτινοβολίας εκφράζεται σαν συνάρτηση των ορθομοναδιαίων διαγραμμάτων βάσης και των πολυδιαδρομικών συνιστωσών:

$$\mathbf{H}_{bs} = \hat{\mathbf{A}}_R \mathbf{H}_g \hat{\mathbf{A}}_T^H \quad (2.8)$$

Έτσι κάνοντας χρήση της εξ. 2.8 στην εξ. 2.7 προκύπτει ότι:

$$\mathbf{y}_{bs} = \mathbf{H}_{bs} \mathbf{s}_{bs} + \mathbf{n}_{bs} \quad (2.9)$$

Σύμφωνα με την μοντελοποίηση που παρουσιάσαμε στην προηγούμενη ενότητα, κάθε ορθομοναδιαίο διάγραμμα ακτινοβολίας πομπού και δέκτη αντιστοιχεί σε μία εικονική κατεύθυνση (στην οποία είναι προσανατολισμένος ο κύριος λοβός του). Η εξ. (2.8) μπορεί να θεωρηθεί ότι περιγράφει την εκπομπή και λήψη συμβόλων στο πεδίο των διαγραμμάτων ακτινοβολίας. Παρόλο που η εξίσωση αυτή είναι βασισμένη στην μοντελοποίηση ενός συμβατικού συστήματος MIMO, μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί ότι η εξ. (2.8) αποτελεί μία γενική έκφραση και μπορεί να ισχύει για κεραίες με διαφορετικές γεωμετρίες και αρχές λειτουργίας. Επομένως η συγκεκριμένη εξίσωση μπορεί κάλλιστα να μοντελοποιήσει την σχέση εισόδου-εξόδου στην περίπτωση που γίνεται χρήση παρασιτικών κεραιών ESPAR σε πομπό και δέκτη.

Σύμφωνα με τον ορισμό που δόθηκε στην εξ. (2.7), ο πίνακας $\hat{\mathbf{A}}_T^H$ περιέχει στις στήλες του τις αποκρίσεις των διαγραμμάτων βάσης στις φυσικές κατευθύνσεις των σχεδαστών. Κατά συνέπεια, ο πίνακας $\hat{\mathbf{A}}_T^H$ μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\hat{\mathbf{A}}_T^H = \mathbf{B}_T = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_{T,0} & \mathbf{b}_{T,1} & \dots & \mathbf{b}_{T,N_T-1} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

όπου $\mathbf{b}_{T,i}$ είναι το διάνυσμα με διάσταση $(Q \times 1)$, το οποίο περιέχει τα δείγματα που αντιστοιχούν στις κατευθύνσεις των σχεδαστών, του i -οστού διαγράμματος βάσης $B_{T,n}$, που είναι διαθέσιμο στον πομπό του συστήματος. Με τον ίδιο τρόπο ορίζεται και ο πίνακας \mathbf{B}_R , ο οποίος περιέχει τα δείγματα των διαγραμμάτων βάσης του δέκτη. Τελικά, ο πίνακας του καναλιού στο πεδίο των διαγραμμάτων ακτινοβολίας εκφράζεται ως :

$$\mathbf{H}_{bs} = \mathbf{B}_R^H \mathbf{H}_g \mathbf{B}_T \quad (2.11)$$

Στην εξ. (2.10), ο πίνακας του καναλιού εκφράζεται σαν συνάρτηση της γεωμετρίας του περιβάλλοντος σκέδασης και των ορθομοναδιαίων διαγραμμάτων βάσης του πομπού και του δέκτη. Επίσης, κάθε πολυδιαδρομική συνιστώσα i , που ενώνει τον πομπό μέσω του i -οστού σχεδαστή με τον δέκτη, σχηματίζει μια μοναδική AoD $\Omega_{T,i}$ και μια μοναδική AoA $\Omega_{R,i}$ με τους άξονες αναφοράς του πομπού και του δέκτη αντίστοιχα. Έτσι αν υποθέσουμε ότι υπάρχουν N_T aDoFs διαθέσιμοι στον πομπό (όπως φαίνεται και στην εξ. (2.9)), ο πίνακας \mathbf{B}_T θα έχει διάσταση $(Q \times N_T)$ και η κάθε στήλη του θα περιέχει τα δείγματα (δηλαδή την τιμή πλάτους και φάσης) του αντίστοιχου διαγράμματος βάσης προς όλες τις AoDs. Η ίδια ακριβώς υπόθεση ισχύει για τον πίνακα \mathbf{B}_R ο οποίος θα περιέχει τα δείγματα διαγράμματος βάσης προς όλες τις AoAs των πολυδιαδρομικών συνιστωσών. Έτσι η σχέση εισόδου-εξόδου (2.9) για ένα σύστημα BS-MIMO με κεραίες ESPAR σε πομπό και δέκτη μπορεί να εκφραστεί ως:

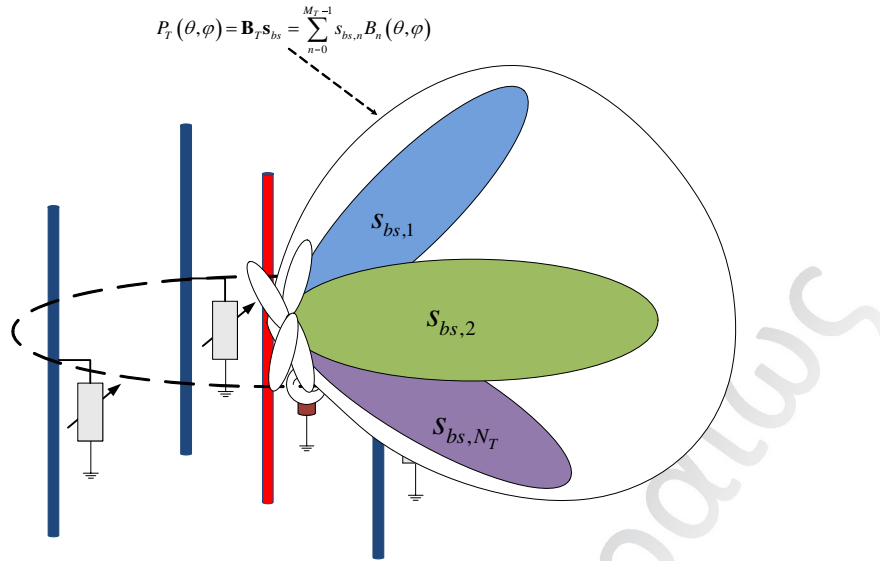
$$\mathbf{y}_{bs} = \mathbf{H}_{bs} \mathbf{s}_{bs} + \mathbf{n}_{bs} \Rightarrow \mathbf{y}_{bs} = \mathbf{B}_R^H \mathbf{H}_g \mathbf{B}_T \mathbf{s}_{bs} + \mathbf{n}_{bs} \quad (2.12)$$

2.3.2 Αρχή Λειτουργίας BS-MIMO Πομπού

Μέχρι στιγμής, δεν έχουμε χρησιμοποιήσει συγκεκριμένη γεωμετρία κεραίας στην μοντελοποίηση που έχουμε παρουσιάσει. Έτσι, μπορούμε και σε αυτό το σημείο να θεωρήσουμε ότι ο πομπός του συστήματος BS-MIMO χρησιμοποιεί μία κεραία ESPAR αυθαίρετης γεωμετρίας και αυθαίρετου πλήθους παρασιτικών κεραιοστοιχείων η οποία υποστηρίζει N_T aDoFs. Το συνολικά εκπεμπόμενο διάγραμμα ακτινοβολίας που προκύπτει από μια τέτοια κεραία έχει την εξής μορφή [19]

$$P_T(\theta, \varphi) = \mathbf{B}_T \mathbf{s}_{bs} = \sum_{n=0}^{N_T-1} s_{bs,n} B_n(\theta, \varphi) \quad (2.13)$$

Έτσι σύμφωνα με την εξ. (2.13), το διάγραμμα ακτινοβολίας που προκύπτει, εκφράζεται ως γραμμικός συνδυασμός των συμβόλων εκπομπής και των αντίστοιχων διαγραμμάτων βάσης. Στο Σχήμα 2.4 απεικονίζεται το εκπεμπόμενο διάγραμμα ακτινοβολίας του πομπού. Στη σχέση (2.13) γίνεται πλέον εμφανές πώς υλοποιείται η πολυπλεξία των εκπεμπόμενων συμβόλων σε ένα σύστημα BS-MIMO καθώς και ποια είναι η διαφορά με την αντίστοιχη πολυπλεξία των κλασικών MIMO συστημάτων. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι κάθε εκπεμπόμενο σύμβολο αντιστοιχίζεται σε μία συνάρτηση βάσης ή με άλλα λόγια διαμορφώνει μία συνάρτηση βάσης. Αυτή η διαδικασία καλείται διαμόρφωση διαγράμματος βάσης (pattern modulation), ενώ είναι γνωστή και ως εναέρια διαμόρφωση (aerial modulation) [26]. Μέσω αυτής της διαδικασίας επιτυγχάνεται η πολυπλεξία των εκπεμπόμενων συμβόλων στο πεδίο



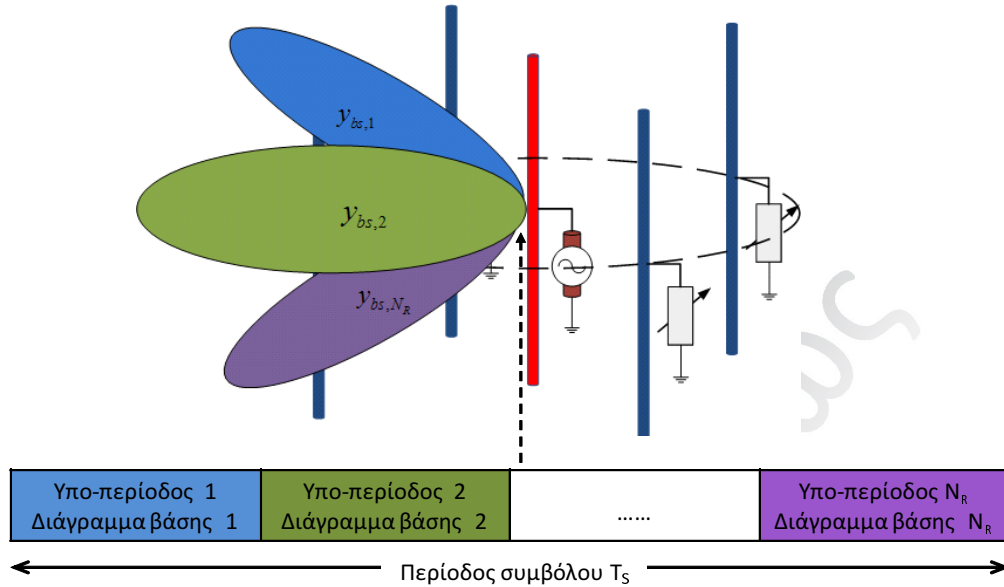
Σχήμα 2.4: Εκπεμπόμενο διάγραμμα ακτινοβολίας ενός BS-MIMO πομπού σαν συνάρτηση των διαγραμμάτων βάσης του

των διαγραμμάτων ακτινοβολίας. Ακόμη η πολυπλεξία αυτή είναι εντελώς διαφορετική από την αντίστοιχη των κλασικών MIMO συστημάτων, όπου εκεί κάθε εκπεμπόμενο σύμβολο αντιστοιχίζεται σε μια διαφορετική κεραία του πομπού πετυχαίνοντας χωρική πολυπλεξία. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί πως η συνολικά ακτινοβολούμενη ισχύς θα είναι μοναδιαία, δηλαδή $\|s_{bs}\|_F^2 = 1$.

Όπως θα δείξουμε και στις επόμενες ενότητες αυτού του κεφαλαίου, η χρήση ορθομοναδιαίων διαγραμμάτων βάσης από τον πομπό, αλλά και από τον δέκτη, μεγιστοποιεί την εργοδική χωρητικότητα του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με το [19], σε περιπτώσεις πλήρους σκέδασης και όταν ο πομπός δε διαθέτει κάποια γνώση του διαύλου, για να επιτευχθεί μεγιστοποίηση της εργοδικής χωρητικότητας συνίσταται η χρήση ορθομοναδιαίων διαγραμμάτων βάσης, τα οποία θα παρουσιαστούν την ενότητα 3.2. Παρόλα αυτά, στην ενότητα 3.3 θα παρουσιάσουμε μια μέθοδο υπολογισμού ορθομοναδιαίων διαγραμμάτων βάσης η οποία λαμβάνει υπόψη της τα χαρακτηριστικά του διαύλου. Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε στα πλαίσια της μελέτης αυτής και παράγει προσαρμοστικά διαγράμματα βάσης η χρήση των οποίων μεγιστοποιεί την εργοδική χωρητικότητα του συστήματος αφού εκμεταλλεύεται με τον καλύτερο τρόπο τους διαθέσιμους εναέριους βαθμούς ελευθερίας.

2.3.3 Αρχή Λειτουργίας BS-MIMO Δέκτη

Όπως έχουμε προαναφέρει, θεωρούμε ότι και οι δύο πλευρές ενός συστήματος BS-MIMO είναι εφοδιασμένες με κεραίες ESPAR οι οποίες έχουν μόνο ένα ενεργό κεραιοστοιχείο, δηλαδή μία αλυσίδα RF. Ακόμη, για την μετάδοση των εκπεμπόμενων συμβόλων, χρησιμοποιείται πολυπλεξία στο πεδίο των διαγραμμάτων ακτινοβολίας. Αυτό σημαίνει ότι η λει-



Σχήμα 2.5: Διαγράμματα βάσης ενός BS-MIMO δέκτη και διαχωρισμός της περιόδου συμβόλου σε υπο-περιόδους

τουργία του δέκτη ενός συστήματος BS-MIMO δεν μπορεί να εκτελείται με τον ίδιο τρόπο που εκτελείται η αντίστοιχη ενός κλασικού MIMO συστήματος. Δηλαδή, ο δέκτης δεν έχει την δυνατότητα να λαβαίνει ανεξάρτητες ροές δεδομένων από τις διαφορετικές κεραίες του και στην συνέχεια να εφαρμόζει γνωστές τεχνικές αποπολύπλεξης ώστε να ανακτήσει την αρχική πληροφορία. Αντίθετα, όπως επιβάλει η εξ. (2.12) η λήψη γίνεται στο πεδίο BS με χρήση όλων των διαγραμμάτων βάσης, σε μία περίοδο συμβόλου.

Για το λόγο αυτό, σύμφωνα με τα [20] και [18], ο δέκτης ενός συστήματος BS-MIMO θα πρέπει να μεταβάλλει το διάγραμμα ακτινοβολίας εντός μίας περιόδου συμβόλου χρησιμοποιώντας σειριακά όλα τα διαθέσιμα διαγράμματα βάσης. Επομένως, χρησιμοποιώντας μια τέτοια διαδικασία λήψης, η χρονική διάρκεια της περιόδου συμβόλου διαιρείται σε υπο-περιόδους (sub-slots) και σε κάθε υπο-περίοδο γίνεται δειγματοληψία του προσπίπτοντος πεδίου με διαφορετική συνάρτηση βάσης. Η διαδικασία αυτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.5. Κατά συνέπεια, αυτή η τεχνική λήψης μπορεί να θεωρηθεί σαν υπερδειγματοληψία, όπου στο τέλος της περιόδου συμβόλου ο δέκτης έχει χρησιμοποιήσει όλα τα διαθέσιμα διαγράμματα βάσης για να ανακτήσει το διάνυσμα y_{bs} . Το λαμβανόμενο σήμα κατά την i -οστή υπο-περίοδο μπορεί να εκφραστεί ως [18]:

$$y_{bs,i} = \mathbf{b}_{R,i}^H \mathbf{H}_g \mathbf{B}_T \mathbf{s}_{bs} + n_{bs,i} \quad (2.14)$$

Παρόλο που με αυτή τη μέθοδο επιτυγχάνεται η λήψη πολλαπλών σημάτων με χρήση μίας μόνο αλυσίδας RF, λόγω της υπερδειγματοληψίας που χρησιμοποιείται προκαλείται επιδείνωση του σηματοθορυβικού λόγου (SNR) σε σχέση με το συμβατικό σύστημα MIMO. Η

επιδείνωση αυτή είναι ίση με το πλήθος των υπο-περιόδων στις οποίες διαιρείται μια περίοδος συμβόλου, ή ισοδύναμα ίση με το πλήθος των διαθέσιμων διαγραμμάτων βάσης [19]. Αυτό προκύπτει λόγω του ότι η διάρκεια δειγματοληψίας του προσπίπτοντος σήματος με χρήση ενός διαγράμματος βάσης είναι μικρότερη σε σχέση με τη χρονική διάρκεια του συμβόλου. Συνεπώς ο σηματοθορυβικός λόγος που επιτυγχάνεται ισούται με [19]:

$$\gamma_{bs} = \gamma_{conv}/M_R \quad (2.15)$$

όπου γ_{bs} και γ_{conv} είναι ο σηματοθορυβικός λόγος του δέκτη ενός BS-MIMO συστήματος και ο αντίστοιχος ενός συμβατικού MIMO.

Μέχρι στιγμής, η αναπαράσταση στο πεδίο BS της λειτουργίας ενός συστήματος BS-MIMO το οποίο χρησιμοποιεί πομποδέκτες με μία αλυσίδα RF, έχει παρουσιαστεί. Πιο αναλυτικά, η σχέση εισόδου-εξόδου ενός τέτοιου συστήματος καθώς και η λειτουργία του πομπού και του δέκτη έχουν περιγραφεί αναλυτικά. Επίσης, από την παραπάνω ανάλυση προκύπτει ότι ένα από τα βασικότερα μεγέθη που καθορίζουν την απόδοση ενός τέτοιου συστήματος είναι οι διαθέσιμοι εναέριοι βαθμοί ελευθερίας. Παρόλα αυτά, μέχρι στιγμής κάνουμε μία απλή θεώρηση, βάσει της οποίας υποθέτουμε ότι ο αριθμός των aDoFs είναι ίσος με τον αριθμό των κεραιοστοιχείων του πομπού και του δέκτη, κάτι το οποίο δεν έχουμε τεκμηριώσει ακόμη. Για το λόγο αυτό, στο επόμενο κεφάλαιο αυτής της εργασίας θα ασχοληθούμε με τον υπολογισμό του μεγέθους αυτού και θα παρουσιάσουμε εναλλακτικές μεθόδους υπολογισμού του.

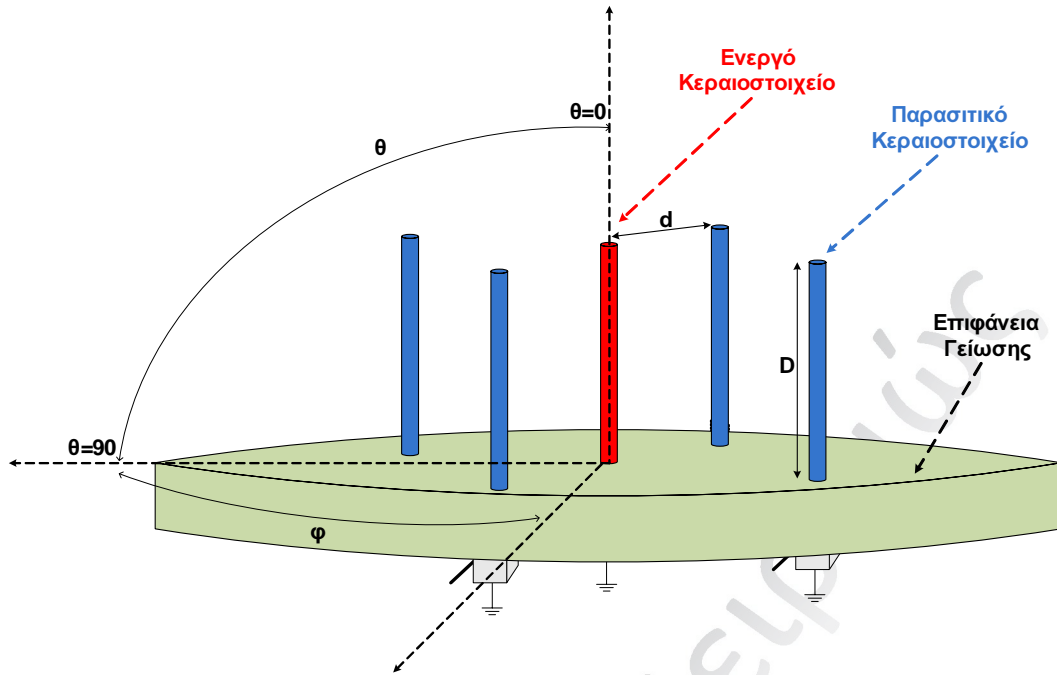
Κεφάλαιο 3

Υπολογισμός Διαγραμμάτων Βάσης και Εναέριων Βαθμών Ελευθερίας

3.1 Εισαγωγή

Η μελέτη των συστημάτων BS-MIMO, έχουμε δείξει ότι διαφέρει κατά πολύ από την αντίστοιχη των συμβατικών MIMO συστημάτων. Μία από αυτές τις διαφορές είναι ότι τα συστήματα αυτά, λόγω της χρήσης μόνο μιας αλυσίδας RF, δεν έχουν την δυνατότητα να παρέχουν χωρικούς βαθμούς ελευθερίας. Αντ' αυτού, παρέχουν εναέριους βαθμούς ελευθερίας (aDoFs), οι οποίοι προκύπτουν από τις δυνατότητες διαμόρφωσης διαγραμμάτων ακτινοβολίας που έχουν οι κεραιές ESPAR. Βάσει των όσων έχουμε παρουσιάσει στο Κεφάλαιο 2, το μέγεθος αυτό παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην απόδοση του συστήματος, αφού καθορίζει την τάξη MIMO του συστήματος. Αυτό προκύπτει καθώς ο αριθμός των συμβόλων που μπορούν να αποσταλούν ταυτόχρονα σε μια περίοδο συμβόλου είναι ίσος με τον αριθμό των aDoFs. Συνεπώς, ο υπολογισμός των διαθέσιμων aDoFs αποτελεί μια πολύ σημαντική διαδικασία και για το λόγο αυτό, θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στον τρόπο υπολογισμού του.

Ο αριθμός των aDoFs είναι άρρηκτα συνδεδεμένος με τον αριθμό των ορθοκανονικών συναρτήσεων στις οποίες το διάγραμμα ακτινοβολίας μιας κεραιάς ESPAR μπορεί να αναλυθεί. Οι συναρτήσεις αυτές ονομάζονται διαγράμματα βάσης (basis patterns). Κάθε διάγραμμα βάσης θα αποτελεί έναν ακτινοβολούμενο βαθμό ελευθερίας. Έτσι για να μπορέσουμε να παρέχουμε μια μεθοδολογία υπολογισμού των διαθέσιμων aDoFs, ή ισοδύναμα των διαθέσιμων διαγραμμάτων βάσης, η αναπαράσταση στο BS πεδίο είναι απαραίτητη. Αυτό προκύπτει από δύο βασικούς λόγους. Πρώτον, η αναπαράσταση στο BS πεδίο επιτρέπει τη διάσπαση (decomposition) του διαγράμματος ακτινοβολίας της ESPAR σε ορθοκανονικά διαγράμματα βάσης, ή διαφορετικά την αναπαράσταση του διαγράμματος ακτινοβολίας ως γραμμικού συνδυασμού των διαγραμμάτων βάσης. Και δεύτερον, διευκολύνει τη θεωρητική εκτίμηση του μέγιστου κατευθυντικού κέρδους της κεραιάς για κάθε κατεύθυνση, ως συνάρτηση των



Σχήμα 3.1: Κυκλική κεραία ESPAR με 5 στοιχεία και άξονες αναφοράς

γεωμετρικών χαρακτηριστικών της.

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται δύο τεχνικές υπολογισμού των διαθέσιμων ορθομοναδιαίων διαγραμμάτων βάσης και κατά συνέπεια των διαθέσιμων aDoFs του συστήματος. Οι τεχνικές αυτές βασίζονται σε διαφορετικές μεθόδους διάσπασης του διαγράμματος ακτινοβολίας σε ορθογώνιες συνιστώσες και επίσης χρησιμοποιούν διαφορετικές θεωρήσεις σχετικά με το αν πληροφορία σχετικά με το κανάλι είναι διαθέσιμη ή όχι. Πιο αναλυτικά, η πρώτη τεχνική είναι αυτή που παρουσιάστηκε στο [19] και βασίζεται στην τεχνική ορθοκανονικοποίησης Gram-Schmidt. Η τεχνική αυτή διασπά το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας ESPAR σε ορθογώνιες συνιστώσες λαμβάνοντας υπόψη μόνο τα χαρακτηριστικά της κεραίας και όχι την κατάσταση του καναλιού. Η δεύτερη τεχνική, η οποία και αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας, χρησιμοποιεί την μέθοδο διάσπασης ιδιόμορφων τιμών (Singular Value Decomposition - SVD) και θεωρεί γνωστό τον πίνακα του καναλιού. Έτσι η τεχνική αυτή, υπολογίζει την βάση του χώρου που παράγουν ο πίνακας του καναλιού και οι αποκρίσεις των διαγραμμάτων πομπού και δέκτη. Ως διαγράμματα βάσης στον πομπό και στον δέκτη χρησιμοποιούνται τα ιδιοδιανύσματα του πίνακα καναλιού. Τέλος, όπως θα αποδειχθεί και στην συνέχεια η παρουσία του καναλιού στο σύστημα αλλάζει ριζικά την αναμενόμενη απόδοση αλλά και τον αριθμό των διαθέσιμων aDoFs. Για το λόγο αυτό η μέθοδος που αναπτύξαμε, η οποία παράγει προσαρμοστικά ως προς το κανάλι διαγράμματα βάσης, αποδεικνύεται ότι μεγιστοποιεί την εργοδική χωρητικότητα του συστήματος αφού εκμεταλλεύεται με τον καλύτερο τρόπο τους διαθέσιμους εναέριους βαθμούς ελευθερίας.

Στην μοντελοποίηση των τεχνικών που θα ακολουθήσει, έχουμε υιοθετήσει δύο θεω-

ρήσεις οι οποίες μας βοηθούν στην απλούστερη παρουσίαση και μας δίνουν την δυνατότητα σύγκρισης των δυο τεχνικών. Αρχικά, λόγω του ότι τα περισσότερα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της απόδοσης των συστημάτων MIMO, λαμβάνουν υπόψη τους μόνο την μετάδοση στο επίπεδο του αζιμούθιου (azimuthal plane), έτσι και εδώ χρησιμοποιούμε αυτήν την θεώρηση. Αυτό σημαίνει ότι η ανάλυση των εξισώσεων που περιγράφουν την λειτουργία των τεχνικών, θα γίνει συναρτήσει της γωνίας του αζιμούθιου φ . Οπότε, και οι δύο τεχνικές που θα παρουσιαστούν παράγουν δισδιάστατα (2D) διαγράμματα βάσης. Και δεύτερον, και στις δύο τεχνικές θεωρούμε ότι πομπός και δέκτης είναι εφοδιασμένοι με κεραίες ESPAR της ίδια γεωμετρίας, βάσει της οποίας θα μοντελοποιήσουμε την λειτουργία της κάθε τεχνικής. Έχουμε επιλέξει να χρησιμοποιήσουμε επίπεδη κυκλική κεραία ESPAR με $N_R = N_T = N_{esp} = 5$ κεραιοστοιχεία (ένα ενεργό και 4 παρασιτικά) με απόσταση μεταξύ τους ίση με $\lambda/16$. Η γεωμετρία της κεραίας αναφοράς απεικονίζεται στο Σχήμα 3.1.

3.2 Διαγράμματα Βάσης Ανεξάρτητα του Καναλιού

Σύμφωνα με την τεχνική που παρουσιάστηκε στο [19], ο υπολογισμός των διαθέσιμων a-DoFs μπορεί να γίνει μέσω της διάσπασης του πεδίου ακτινοβολίας της ESPAR κεραίας σε ορθομοναδιαίες συναρτήσεις. Στην τεχνική αυτή, η διάσπαση γίνεται με την χρήση της μεθόδου Gram-Schmidt, η οποία δεδομένου ενός συνόλου κυματομορφών, που χρησιμοποιούνται για την μεταφορά πληροφορίας, παράγει τα διανύσματα βάσης που παράγουν το χώρο των κυματομορφών αυτών [27]. Στην περίπτωση μας ο χώρος αυτός, είναι ο χώρος των διαγραμμάτων ακτινοβολίας που παράγεται από μία κεραία ESPAR και τα διανύσματα βάσης είναι τα διαγράμματα βάσης της κεραίας. Ακόμη, το πεδίο των διαγραμμάτων ακτινοβολίας καθορίζεται απόλυτα από το εκπεμπόμενο διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας.

3.2.1 Θεωρητική Προσέγγιση

Επομένως, αρχικά θα πρέπει να καθοριστεί η έκφραση του εκπεμπόμενου πεδίου μιας κεραίας ESPAR. Ειδικότερα, το συνολικό πεδίο ακτινοβολίας μιας κεραίας ESPAR μπορεί να εκφραστεί ως [19]

$$\mathbf{P}(\varphi) = \mathbf{i}^T \mathbf{a}(\varphi) = \sum_{n=0}^{N_{esp}-1} i_n a_n(\varphi) \quad (3.1)$$

όπου \mathbf{i} είναι το διάνυσμα των ρευμάτων που επάγονται στα παρασιτικά κεραιοστοιχεία και $\mathbf{a}(\varphi) = [a_0(\varphi) \dots a_{N_{esp}-1}(\varphi)]^T$ είναι το διάνυσμα πολλαπλότητας της στοιχειοκεραίας (array manifold vector) που εμπεριέχει όλα τα χωρικά χαρακτηριστικά της.

Η συνάρτηση $P(\varphi)$ μπορεί να αναπαρασταθεί ως ένα διάνυσμα θέσης στο πεδίο των διαγραμμάτων ακτινοβολίας αν οι όροι $a_m(\varphi)$, $m = 0, \dots, N_{esp} - 1$ της εξ.(3.1) εκφραστούν ως γραμμικός συνδυασμός ορθογώνιων συναρτήσεων ή διαγραμμάτων βάσης. Για να το επιτύχουμε αυτό εφαρμόζουμε την μέθοδο Gram-Schmidt, σύμφωνα με την οποία για ένα σύνολο N_{esp} συναρτήσεων $a_m(\varphi)$, $m = 0, \dots, N_{esp} - 1$, μπορεί να οριστεί ένα σύνολο $N \leq N_{esp}$ ορθοκανονικών συναρτήσεων $B_n(\varphi)$, $n = 0, \dots, N - 1$, έτσι ώστε $a_m(\varphi) = \sum_{n=0}^N q_{mn} B_n(\varphi)$, $N \leq N_{esp}$. Τα διαγράμματα βάσης ορίζουν τον επιθυμητό χώρο σημάτων που εδώ ερμηνεύεται ως χώρος των διαγραμμάτων ακτινοβολίας. Κατά συνέπεια, η εξ. (3.1) μπορεί να ξαναγραφεί ως:

$$P(\varphi) = \sum_{m=0}^{N_{esp}-1} i_m \sum_{n=0}^{N-1} q_{mn} B_n(\varphi) \quad (3.2)$$

όπου ο συντελεστής q_{mn} εκφράζει την προβολή της συνάρτησης $a_m(\varphi)$ στην ορθογώνια συνάρτηση $B_n(\varphi)$ και υπολογίζεται ως εξής:

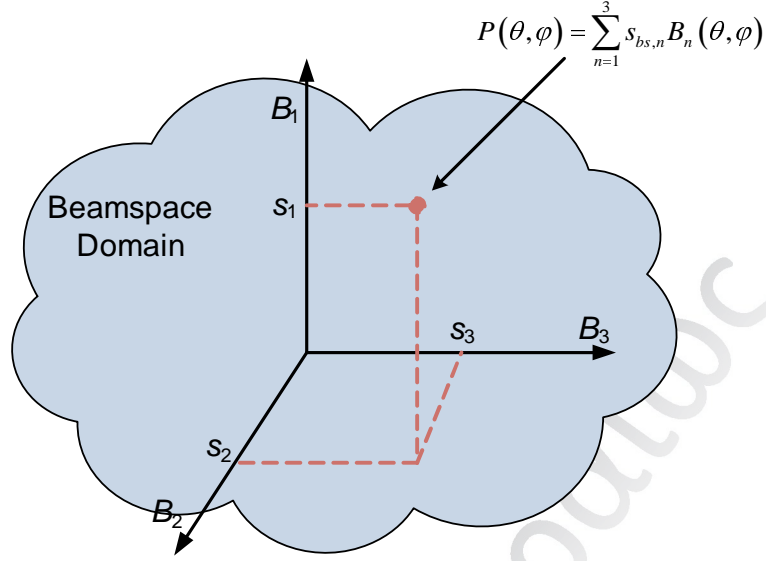
$$q_{mn} = \int_0^{2\pi} a_m(\varphi) B_n^*(\varphi) d\varphi \quad (3.3)$$

Όπως προαναφέραμε, η μέθοδος Gram-Schmidt ορίζει ένα σύνολο $N \leq N_{esp}$ ορθοκανονικών συναρτήσεων. Η περίπτωση $N = N_{esp}$ ισχύει όταν οι αρχικές συναρτήσεις $a_m(\varphi)$, $m = 0, \dots, N_{esp} - 1$, είναι γραμμικά ανεξάρτητες. Αυτό ισχύει στην περίπτωση επίπεδης παρασιτικής κεραίας αυθαίρετης γεωμετρίας, καθώς:

$$a_m(\varphi) = \begin{cases} 1 & m = 0 \\ \exp[jb_m \cos(\varphi - \varphi_m)] & m \neq 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

όπου φ_m είναι η γωνία του m -οστού κεραιοστοιχείου στο επίπεδο του αξιμούθιου ως προς τον άξονα αναφοράς της κεραίας, $b_m = 2\pi d_m$ και d_m είναι η κανονικοποιημένη ως προς το μήκος κύματος απόσταση του m -οστού κεραιοστοιχείου. Αυτό σημαίνει ότι η περίπτωση αυτή ισχύει και για την κεραία που θεωρούμε εμείς σε αυτή την μελέτη. Έτσι το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας ESPAR περιγράφεται πλέον ως:

$$\begin{aligned} P(\varphi) &= \sum_{m=0}^{N_{esp}-1} i_m \sum_{n=0}^{N_{esp}-1} q_{mn} B_n(\varphi) \\ &= \sum_{m=0}^{N_{esp}-1} \sum_{n=0}^{N_{esp}-1} i_m q_{mn} B_n(\varphi) \\ &= \sum_{n=0}^{N_{esp}-1} \mathbf{i}^T \mathbf{q}_n B_n(\varphi) \\ &= \sum_{n=0}^{N_{esp}-1} s_{bs,n} B_n(\varphi) \end{aligned} \quad (3.5)$$



Σχήμα 3.2: Χώρος διαγραμμάτων ακτινοβολίας αποτελούμενος από 3 διαγράμματα βάσης

Επομένως, καταλήγουμε στην σχέση (2.13) που είχαμε διατυπώσει στο προηγούμενο Κεφάλαιο. Στην εξ. (3.4) το $\mathbf{q}_n = [q_{0n} \dots q_{(N_{esp}-1)n}]^T$ είναι ένα διάνυσμα διαστάσεων $(N_{esp} \times 1)$ το οποίο περιέχει τις προβολές όλων των αρχικών συναρτήσεων $a_m(\varphi)$, $m = 0, \dots, N_{esp}-1$ στην ορθοκανονική συνάρτηση $B_n(\varphi)$. Επίσης, $s_{bs,n} = \mathbf{i}^T \mathbf{q}_n$ είναι το σύμβολο που αντιστοιχεί στον n -οστό διάγραμμα βάσης.

Ο αλγόριθμος Gram-Schmidt έχει την δυνατότητα να ξεκινήσει επιλέγοντας οποιαδήποτε από τις αρχικές συναρτήσεις $a_m(\varphi)$. Για κάθε διαφορετική επιλογή της αρχικής συνάρτησης, η μέθοδος αυτή παράγει και μια διαφορετική βάση. Έτσι, αν επιλεγεί πρώτη η συνάρτηση $a_0(\varphi)$, το πρώτο διάγραμμα βάσης θα είναι ίσο με $B_0(\varphi) = a_0(\varphi)/k_0$, ενώ τα υπόλοιπα θα προκύπτουν από την ακόλουθη σχέση:

$$B_n(\varphi) = \frac{1}{k_n} \left(a_n(\varphi) - \sum_{s=0}^{n-1} q_{n,s} B_s(\varphi) \right), \forall n = 1, \dots, N_{esp} - 1 \quad (3.6)$$

όπου $k_n = \sqrt{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi \left| a_n(\theta, \varphi) - \sum_{s=0}^{n-1} q_{n,s} B_s(\theta, \varphi) \right|^2 \sin \theta d\theta d\varphi}$, είναι οι συντελεστές κανονικοποίησης που εξασφαλίζουν μοναδιαία ισχύ στις συναρτήσεις βάσης. Τελικά οι ορθομοναδιαίες συναρτήσεις $B_n(\varphi)$, $n = 0, \dots, N_{esp} - 1$ αποτελούν τα διαγράμματα βάσης της κεραίας ESPAR, δηλαδή τους ακτινοβολούμενους βαθμούς ελευθερίας (aerial degrees of freedom - aDoFs) του διαγράμματος ακτινοβολίας της κεραίας.

Αυτό σημαίνει ότι το διάγραμμα ακτινοβολίας μιας κεραίας ESPAR μπορεί να παρασταθεί ως ένα σημείο ή ισοδύναμα ως ένα διάνυσμα θέσης (coordinate vector) σε ένα χώρο η βάση του οποίου αποτελείται από τα διαγράμματα βάσης της κεραίας. Ένα τέτοιο παράδειγμα χώρου τριών διαστάσεων απεικονίζεται στην Εικόνα 3.2.

3.2.2 Εφαρμογή σε Κυκλική Κεραία ESPAR 5 Στοιχείων

Σε αυτό το σημείο θα εφαρμόσουμε την τεχνική που περιγράψαμε στην κεραία αναφοράς, που όπως προαναφέραμε είναι μια κυκλική κεραία ESPAR 5 στοιχείων. Λόγω της γεωμετρίας της κεραίας προκύπτει ότι $b_m = b = 2\pi d$ όπου d είναι η ακτίνα της κεραίας κανονικοποιημένη προς το μήκος κύματος, ενώ $\varphi_m = (m - 1) 2\pi / (N_{esp} - 1)$, $m = 1, \dots, N_{esp} - 1$. Έτσι σύμφωνα με την εξ. (3.1), το διάγραμμα ακτινοβολίας που προκύπτει, λαμβάνοντας υπόψη τη γνωστή ταυτότητα Euler, είναι το εξής:

$$\begin{aligned}
 P(\varphi) &= i_0 + i_1 e^{jb \cos \varphi} + i_2 e^{jb \cos \varphi} + i_3 e^{-jb \cos \varphi} + i_4 e^{-jb \cos \varphi} = \\
 &= i_0 \underbrace{1}_{\tilde{a}_0(\varphi)} + j \underbrace{(i_1 - i_3) \sin(b \cos(\varphi))}_{\tilde{a}_1(\varphi)} + j \underbrace{(i_2 - i_4) \sin(b \sin(\varphi))}_{\tilde{a}_2(\varphi)} \\
 &+ \underbrace{(i_1 - i_3) \cos(b \cos(\varphi))}_{\tilde{a}_3(\varphi)} + \underbrace{(i_2 - i_4) \cos(b \sin(\varphi))}_{\tilde{a}_4(\varphi)}
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

Οι αντίστοιχες ορθομοναδιαίες συναρτήσεις βάσης που προκύπτουν για την συγκεκριμένη κεραία είναι οι εξής:

$$\begin{aligned}
 B_0(\varphi) &= \frac{1}{k_0} \\
 B_1(\varphi) &= \frac{1}{k_1} \sin(b \cos \varphi) \\
 B_2(\varphi) &= \frac{1}{k_2} \sin(b \sin \varphi) \\
 B_3(\varphi) &= \frac{1}{k_3} \left[\cos(b \cos \varphi) - \frac{q_{30}}{k_0} \right] \\
 B_4(\varphi) &= \frac{1}{k_4} \left[\cos(b \sin \varphi) - \frac{q_{40}}{k_0} - \frac{q_{43}}{k_3} \cos(b \cos \varphi) + \frac{q_{43} q_{30}}{k_0 k_3} \right]
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

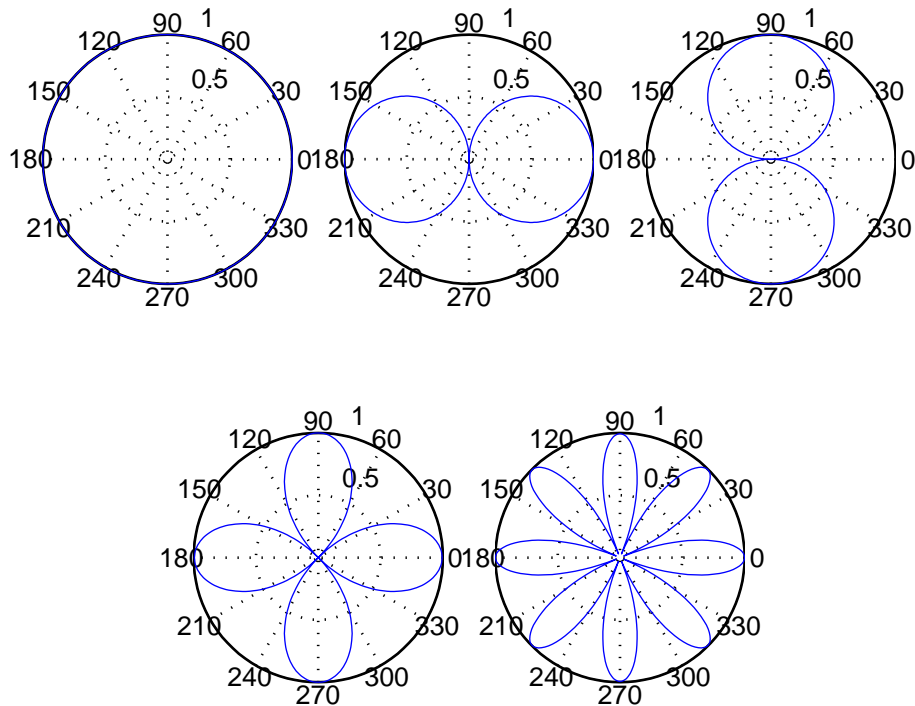
όπου q_{30}, q_{40} είναι η προβολή των όρων $\cos(b \cos \varphi)$ και $\cos(b \sin \varphi)$ αντίστοιχα στην συνάρτηση βάσης $B_0(\varphi)$, ενώ ο όρος q_{43} είναι η προβολή του όρου $\cos(b \sin \varphi)$ στην συνάρτηση βάσης $B_3(\varphi)$. Για τους όρους αυτούς ισχύει ότι:

$$\begin{aligned}
 q_{30} &= q_{40} = 2\pi I_0(jb)/k_0 \\
 q_{43} &= 2\pi I_0(j\sqrt{2b})/k_3 - q_{30}^2/k_3
 \end{aligned}$$

όπου $I_0(x)$ είναι η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel πρώτου είδους και μηδενικής τάξης. Τα 2D διαγράμματα βάσης που προκύπτουν από την τεχνική αυτή για την συγκεκριμένη κεραία, παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.3.

3.3 Προσαρμοστικά Διαγράμματα Βάσης

Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστεί και θα αναλυθεί η τεχνική που αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας και έχει ως στόχο τον υπολογισμό διαγραμμάτων βάσης για κεραίες ESPAR χρησιμοποιώντας την γνώση για την κατάσταση του καναλιού. Η μέθοδος



Σχήμα 3.3: Διαγράμματα βάσης ανεξάρτητα του καναλιού

αυτή παράγει ένα σύνολο προσαρμοστικών ως προς το κανάλι διαγραμμάτων βάσης, η χρήση των οποίων μεγιστοποιεί την χρήση του καναλιού.

Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί σαν αφετηρία την τεχνική που παρουσιάστηκε στην ενότητα 2.2. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιεί τα διαγράμματα βάσης που είναι ανεξάρτητα του καναλιού, τα οποία στο εξής θα ονομάζονται αρχικά διαγράμματα βάσης, ώστε να υπολογίζει το γινόμενο του πίνακα καναλιού με τις αποκρίσεις των κεραιών πομπού και δέκτη. Όπως προαναφέραμε, τα περισσότερα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της απόδοσης των συστημάτων MIMO, λαμβάνουν υπόψη τους μόνο την μετάδοση στο επίπεδο του αζιμουθίου (azimuthal plane). Για αυτό το λόγο, στην διατύπωση της τεχνικής υπολογισμού των διαγραμμάτων βάσης λαμβάνεται υπόψη μόνο το αζιμουθιακό επίπεδο διάδοσης. Ακόμη, η επιλογή αυτή βοηθά στο να μειωθεί η υπολογιστική πολυπλοκότητα της τεχνικής αυτής. Επίσης, εδώ γίνεται η υπόθεση ότι μέσω μιας διαδικασίας εκτίμησης, τόσο ο πομπός όσο και ο δέκτης έχουν πλήρη γνώση του πίνακα του καναλιού καθώς και των αρχικών διαγραμμάτων βάσης.

Ο πίνακας καναλιού \mathbf{H}_{bs} περιέχει πληροφορίες τόσο για τα μιγαδικά κέρδη του καναλιού όσο και για τα διαγράμματα βάσης τα οποία χρησιμοποιούνται. Σε αυτό το σημείο, υποθέτουμε ότι μια δειγματοληψία N -δειγμάτων πραγματοποιείται προς όλες τις γωνιακές κατευθύνσεις του αζιμουθιακού επιπέδου με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται διακριτικότητα $\Delta\varphi$. Οπότε, $N = 2\pi/\Delta\varphi$. Στην συνέχεια, οι πίνακες και τα διανύσματα με τα διαγράμματα

βάσης μοντελοποιούνται με βάση τη σχέση:

$$\left[\tilde{\mathbf{b}}_{T,i} \right]_n = b_{T,i}(n\Delta\varphi), \quad n = 1, \dots, N$$

Κάνοντας εφαρμογή της εικονικής απεικόνισης του καναλιού (virtual channel representation) σύμφωνα με το [20], ο εικονικός πίνακας καναλιού μπορεί πλέον να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας της ακόλουθη ισότητα:

$$\mathbf{H}_{bs} = \mathbf{B}_R^H \mathbf{H}_g \mathbf{B}_T = \tilde{\mathbf{B}}_R^H \mathbf{H}_v \tilde{\mathbf{B}}_T \Rightarrow \mathbf{H}_v = \tilde{\mathbf{B}}_R \mathbf{B}_R^H \mathbf{H}_g \mathbf{B}_T \tilde{\mathbf{B}}_T^H \quad (3.9)$$

Τα στοιχεία του πίνακα \mathbf{H}_v αναπαριστούν τα μιγαδικά κέρδη από τις προβολές των γωνιών άφιξης και αναχώρησης της q πολυδιαδρομικής συνιστώσας πάνω στις κατευθύνσεις που έχουν προκύψει από την επιλεγμένη δειγματοληψία. Κάθε στοιχείο του πίνακα αποτελεί και μια μέτρηση της σύζευξης μεταξύ των κατευθύνσεων που έχουν προκύψει. Δεδομένου του ότι ο πίνακας του καναλιού στο πεδίο των διαγραμμάτων ακτινοβολίας \mathbf{H}_{bs} θεωρείται γνωστός καθώς και του ότι τα διαγράμματα βάσης είναι ορθομοναδιαία οπότε δημιουργούν ορθομοναδιαίους (unitary) πίνακες $\tilde{\mathbf{B}}_{R/T}$, ο εικονικός πίνακας καναλιού μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$\mathbf{H}_v = \tilde{\mathbf{B}}_R \mathbf{H}_{bs} \tilde{\mathbf{B}}_T^H \quad (3.10)$$

Στην συνέχεια, ο πίνακας καναλιού ο οποίος είναι εκφρασμένος στο πεδίο των διαγραμμάτων ακτινοβολίας θα αναλυθεί εκτενέστερα. Για την ανάλυση αυτή, χρησιμοποιούμε την μέθοδο παραγοντοποίησης SVD (Singular Value Decomposition), με την χρήση της οποίας θα επιτύχουμε τον υπολογισμό ενός συνόλου ορθογώνιων συνιστωσών του πίνακα. Πιο αναλυτικά, ο πίνακας του καναλιού μπορεί να διασπαστεί ως εξής:

$$\mathbf{H}_{bs} = \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^H \quad (3.11)$$

Εδώ, ο $\mathbf{\Sigma} \in \mathbb{R}^{M_R \times M_T}$ είναι ένας διαγώνιος πίνακας και περιέχει σε φθίνουσα διάταξη τις $r = \min[M_T, M_R]$ μη μηδενικές ιδιόμορφες τιμές $(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r)$ του πίνακα \mathbf{H}_{bs} . Οι τιμές αυτές σχετίζονται με τις ιδιοτιμές $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_r)$ του πίνακα $\mathbf{H}_{bs} \mathbf{H}_{bs}^H$ (ή ισοδύναμα με του $\mathbf{H}_{bs}^H \mathbf{H}_{bs}$) μέσω της σχέσης $\sigma_i = \sqrt{\xi_i}$. Επίσης οι πίνακες $\mathbf{U} \in \mathbb{C}^{M_R \times M_R}$ και $\mathbf{V} \in \mathbb{C}^{M_T \times M_T}$ περιέχουν τα ιδιοδιανύσματα των πινάκων $\mathbf{H}_{bs} \mathbf{H}_{bs}^H$ και $\mathbf{H}_{bs}^H \mathbf{H}_{bs}$ αντίστοιχα. Η βασική παρατήρηση που πρέπει να γίνει σχετικά με την διαδικασία που περιγράφηκε είναι ότι ο βαθμός (rank) του πίνακα $\mathbf{\Sigma}$ είναι ίσος με τον αριθμό των aDoF και αντίστοιχα με τον αριθμό των αποτελεσματικών διαγραμμάτων βάσης τα (effective basis patterns) τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να επιτευχθεί παράλληλη και ασυσχέτιστη μετάδοση. Με την χρήση των εξισώσεων (2.12) και (3.11), μπορούμε να συμπεράνουμε ότι οι πίνακες \mathbf{U} και \mathbf{V} μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να προσαρμόσουν τα διαγράμματα βάσης ανάλογα με τον τρέχοντα πίνακα καναλιού. Πιο αναλυτικά, τα ιδιοδιανύσματα που βρίσκονται στις στήλες

του πίνακα \mathbf{U} μπορούν να προσαρμόσουν τα διαγράμματα βάσης του δέκτη και αντίστοιχα τα ιδιοδιανύσματα του πίνακα \mathbf{V}^H μπορούν να προσαρμόσουν τα διαγράμματα βάσης του πομπού. Έτσι, επιλέγοντας τα ισχυρότερα ιδιοδιανύσματα του πίνακα \mathbf{H}_{bs} , δηλαδή τα πρώτα $\text{rank}(\mathbf{\Sigma})$, τα οποία και μεγιστοποιούν την χρήση του καναλιού, τα χρησιμοποιούμε ώστε να αναδιαμορφώσουν τα αρχικά διαγράμματα βάσης σύμφωνα με τον ακόλουθο πολλαπλασιασμό πινάκων:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{B}}_R &= \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{b}}_{R,1} & \tilde{\mathbf{b}}_{R,2} & \dots & \tilde{\mathbf{b}}_{R,\text{rank}(\mathbf{\Sigma})} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1 & \mathbf{u}_2 & \dots & \mathbf{u}_{\text{rank}(\mathbf{\Sigma})} \end{bmatrix} \stackrel{\Delta}{=} \tilde{\mathbf{B}}_{R,\text{rank}(\mathbf{\Sigma})} \mathbf{U}_{\text{rank}(\mathbf{\Sigma})} \\ \hat{\mathbf{B}}_T &= \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{b}}_{T,1} & \tilde{\mathbf{b}}_{T,2} & \dots & \tilde{\mathbf{b}}_{T,\text{rank}(\mathbf{\Sigma})} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 & \mathbf{v}_2 & \dots & \mathbf{v}_{\text{rank}(\mathbf{\Sigma})} \end{bmatrix} \stackrel{\Delta}{=} \tilde{\mathbf{B}}_{T,\text{rank}(\mathbf{\Sigma})} \mathbf{V}_{\text{rank}(\mathbf{\Sigma})} \end{aligned} \quad (3.12)$$

όπου \mathbf{u}_i και \mathbf{v}_i είναι η i -οστή στήλη των πινάκων \mathbf{U} και \mathbf{V} αντίστοιχα. Στην προηγούμενη εξίσωση, η χρήση του δείκτη $\text{rank}(\mathbf{\Sigma})$ υποδηλώνει ότι ο πίνακας $\mathbf{X}_{\text{rank}(\mathbf{\Sigma})}$ περιέχει τις πρώτες $\text{rank}(\mathbf{\Sigma})$ στήλες του πίνακα \mathbf{x} . Τα διαγράμματα βάσης του πομπού και του δέκτη τα οποία προκύπτουν από την εξ. (3.12) διασφαλίζουν την μέγιστη δυνατή χρήση του καναλιού με πλήρη εκμετάλλευση των διαθέσιμων aDoFs.

Ο πίνακας καναλιού εκφρασμένος στο πεδίο των διαγραμμάτων ακτινοβολίας που προκύπτει είναι ο $\hat{\mathbf{H}}_{bs}$, είναι ορθογώνιος και αποτελείται από $\text{rank}(\mathbf{\Sigma})$ ασυσχέτιστα παράλληλα κανάλια. Αυτό αποδεικνύεται ως εξής:

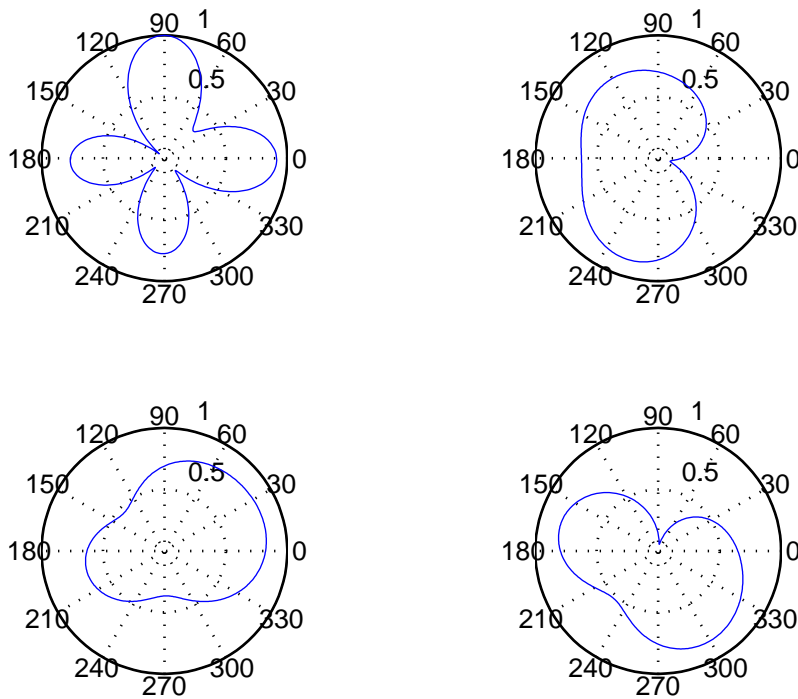
$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{H}}_{bs} &= \hat{\mathbf{B}}_R^H \mathbf{H}_v \hat{\mathbf{B}}_T = \hat{\mathbf{B}}_R^H \tilde{\mathbf{B}}_R \mathbf{H}_{bs} \tilde{\mathbf{B}}_T^H \hat{\mathbf{B}}_T = \hat{\mathbf{B}}_R^H \tilde{\mathbf{B}}_R \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^H \tilde{\mathbf{B}}_T^H \hat{\mathbf{B}}_T = \\ &= \hat{\mathbf{B}}_R^H \tilde{\mathbf{B}}_R \mathbf{U} \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & & 0 \\ & & \ddots & \sigma_{\text{rank}(\mathbf{\Sigma})} & 0 \\ \vdots & & & 0 & 0 & \ddots \\ 0 & \dots & & & \ddots & \ddots \end{bmatrix} \mathbf{V}^H \tilde{\mathbf{B}}_T^H \hat{\mathbf{B}}_T \quad (3.13) \\ &= \hat{\mathbf{B}}_R^H \tilde{\mathbf{B}}_R \mathbf{U}_{\text{rank}(\mathbf{\Sigma})} \mathbf{\Sigma}_{\text{rank}(\mathbf{\Sigma})} \mathbf{V}_{\text{rank}(\mathbf{\Sigma})}^H \tilde{\mathbf{B}}_T^H \hat{\mathbf{B}}_T \end{aligned}$$

Λόγω του ότι οι πίνακες $\hat{\mathbf{B}}_T$ και $\hat{\mathbf{B}}_R$ προκύπτουν από το γινόμενο ορθομοναδιαίων πινάκων, είναι και αυτοί ορθομοναδιαίοι. Έτσι, σύμφωνα με τον ορισμό τους στην σχέση (3.12) προκύπτει ότι:

$$\hat{\mathbf{B}}_R^H \tilde{\mathbf{B}}_R \mathbf{U}_{\text{rank}(\mathbf{\Sigma})} = \mathbf{V}_{\text{rank}(\mathbf{\Sigma})}^H \tilde{\mathbf{B}}_T^H \hat{\mathbf{B}}_T = \mathbf{I}_{\text{rank}(\mathbf{\Sigma})} \quad (3.14)$$

όπου \mathbf{I} είναι ο μοναδιαίος πίνακας. Παρατηρώντας τις εξισώσεις (3.13) και (3.14) είναι προφανές ότι $\hat{\mathbf{H}}_{bs} = \mathbf{\Sigma}_{\text{rank}(\mathbf{\Sigma})}$.

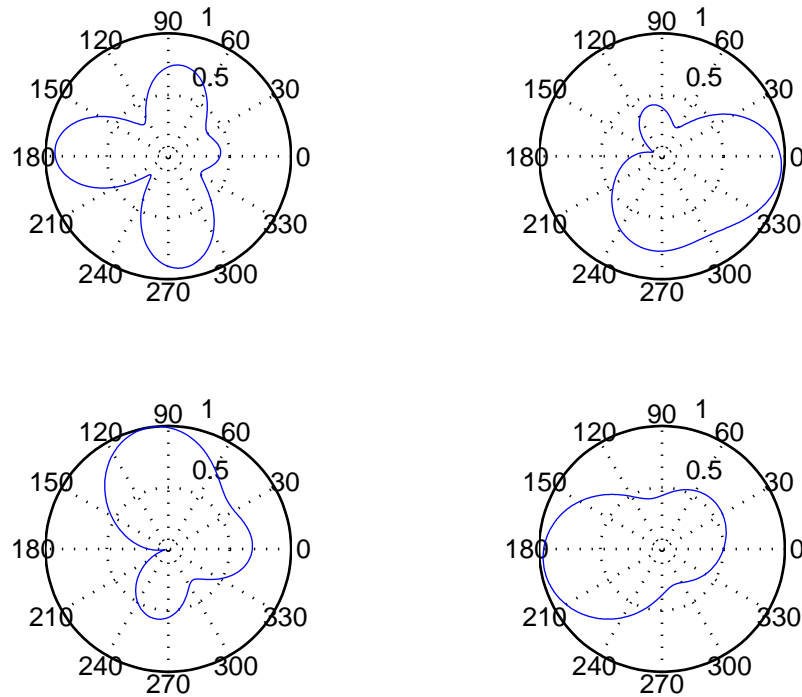
Στα συστήματα τηλεπικοινωνιών, η εκτίμηση του πίνακα καναλιού πραγματοποιείται στον δέκτη οπότε ο πομπός δεν έχει άμεση γνώση του καναλιού. Έτσι, η τεχνική που αναπτύχθη-



Σχήμα 3.4: Προσαρμοστικά διαγράμματα βάσης πομπού

κε, θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε ένα πρακτικό σύστημα με το να γίνεται ο υπολογισμός των προσαρμοστικών διαγραμμάτων βάσης στον δέκτη και κατόπιν ο πομπός να ενημερώνεται για αυτά μέσω ανάδρασης (feedback). Ωστόσο, δεν είναι απαραίτητο να αποσταλεί όλη η πληροφορία των διαγραμμάτων στον πομπό, δηλαδή ο πίνακας $\hat{\mathbf{B}}_T$. Αφού, μια πιο αποδοτική μέθοδος είναι να σταλούν με ανάδραση στον πομπό οι τιμές από τα βάρη των παρασιτικών στοιχείων της ESPAR κεραίας οι οποίες και παράγουν τα προσαρμοστικά διαγράμματα βάσης. Έτσι, όταν αυτά εφαρμοστούν, ο πομπός θα εκπέμπει δεδομένα χρησιμοποιώντας τα επιθήματα διαγράμματα βάσης [28]. Με την χρήση της τεχνικής αυτής επιτυγχάνεται μεγιστοποίηση της χωρητικότητας του συστήματος για δεδομένο κανάλι καθώς και αποπολύπλεξη των ροών με δεδομένα που λαμβάνονται.

Τέλος παραθέτουμε τα αποτελέσματα της τεχνικής αυτής στην εφαρμογή της σε ένα συγκεκριμένο παράδειγμα. Στο παράδειγμα αυτό, χρησιμοποιούμε την κεραία αναφοράς. Επίσης, για να έχουν πρακτική βάση τα αποτελέσματα μας, θεωρούμε περιβάλλον διάδοσης το οποίο μοντελοποιείται σύμφωνα με το μοντέλο WINNER [29]. Πιο συγκεκριμένα, θεωρούμε μοντέλο WINNER τύπου B2, δηλαδή για αστικό περιβάλλον με δυσμενείς συνθήκες διάδοσης. Τα προσαρμοστικά προς το κανάλι διαγράμματα βάσης του πομπού, που προκύπτουν από την παραπάνω τεχνική, παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.4 και τα αντίστοιχα του δέκτη στο Σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5: Προσαρμοστικά διαγράμματα βάσης δεκτη

3.4 Σύγκριση Τεχνικών και Αποτίμηση Αποτελεσμάτων

Οι μέθοδοι που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες υπολογίζουν και οι δύο τα διαγράμματα βάσης μίας κεραίας ESPAR και κατά συνέπεια τους διαθέσιμους aDoFs ενός συστήματος BS-MIMO. Ο υπολογισμός αυτός όμως πραγματοποιείται με διαφορετικές μεθόδους και βασίζεται σε διαφορετικές θεωρήσεις σχετικά με τα διαθέσιμα δεδομένα. Πιο αναλυτικά, η πρώτη τεχνική βασίζεται στη μέθοδο ορθοκανονικοποίησης Gram-Schmidt και λαμβάνει υπόψη της μόνο τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των κεραιών που χρησιμοποιούνται. Η δεύτερη τεχνική βασίζεται στην μέθοδο διάσπασης SVD και πέρα από τα γεωμετρικά της κεραίας λαμβάνει υπόψη της και την κατάσταση του καναλιού. Βασικό κίνητρο για την δημιουργία της δεύτερης τεχνικής αποτέλεσε το γεγονός ότι τα διαγράμματα βάσης που προκύπτουν από την πρώτη τεχνική δεν εξασφαλίζεται ότι θα είναι ορθογώνια σε περιπτώσεις εφαρμογής τους σε πραγματικά περιβάλλοντα διάδοσης. Αυτό σημαίνει ότι με την είσοδο την επίδρασης του καναλιού η ορθογωνιότητα αυτή μπορεί να μην υφίσταται πλέον.

Βάσει των διαγραμμάτων βάσης που παράγουν οι δύο τεχνικές, μπορεί κανείς να διακρίνει ότι όντως το κανάλι αλλάζει ριζικά τόσο την μορφή όσο και τον αριθμό των διαγραμμάτων αυτών. Είναι εμφανές ότι τα διαγράμματα των σχημάτων 3.4 και 3.5 έχουν εντελώς διαφορετική μορφή από τα αντίστοιχα στο σχήμα 3.3. Αυτό προκύπτει, καθώς τα διαγράμματα

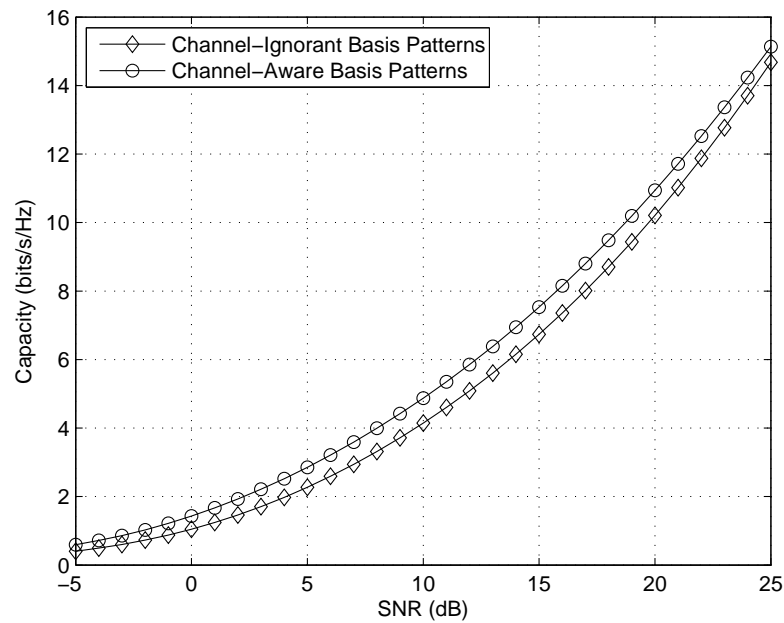
της δεύτερης τεχνικής έχουν την ικανότητα να προσαρμόζονται στις τρέχουσες συνθήκες διάδοσης και έτσι οι λοβοί των διαγραμμάτων αυτών στρέφονται προς τις κατευθύνσεις των σκεδαστών που υπάρχουν στο περιβάλλον. Παρόλα αυτά, το πιο ενδιαφέρον συμπέρασμα που προκύπτει από την παρατήρηση των διαγραμμάτων αυτών είναι ότι ενώ η πρώτη τεχνική καθορίζει ότι η συγκεκριμένη κεραία μπορεί να υποστηρίξει 5 aDoFs και κατά συνέπεια να παράξει 5 ορθογώνια διαγράμματα βάσης, η δεύτερη τεχνική υπολογίζει ότι η συγκεκριμένη κεραία στις τρέχουσες συνθήκες διάδοσης, μπορεί να υποστηρίξει 4 aDoFs αντίστοιχα. Αυτό προκύπτει λόγω του ότι οι τρέχουσες συνθήκες διάδοσης θα επηρεάσουν τουλάχιστον μία από τις ανεξάρτητες ροές που μπορούν να υποστηριχθούν και κατά συνέπεια θα υποβαθμίσουν την απόδοση του συστήματος κατά ένα βαθμό ελευθερίας.

Για να έχουμε μια πληρέστερη εικόνα σχετικά με την βελτίωση της απόδοσης που καταφέρει να πετύχει η δεύτερη τεχνική έναντι της πρώτης, δεν αρκεί η σύγκριση των διαγραμμάτων που προκύπτουν. Αντίθετα, χρειάζεται η σύγκριση ενός μεγέθους το οποίο να αφορά ένα ικανοποιητικό αριθμό παρατηρήσεων. Ένα τέτοιο μέγεθος είναι η εργοδική χωρητικότητα που επιτυγχάνεται με την χρήση των παραπάνω τεχνικών. Η εργοδική χωρητικότητα του συστήματος υπολογίζεται με βάση την ακόλουθη σχέση [20]:

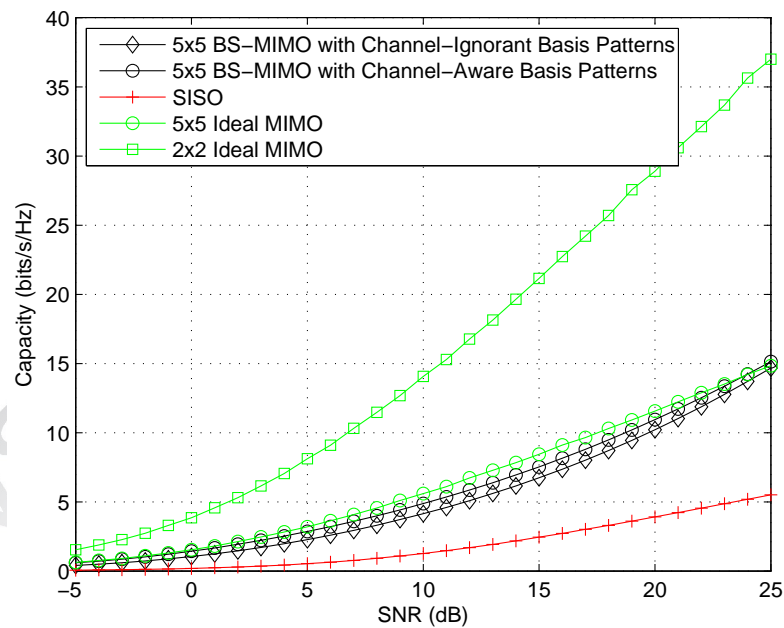
$$C = \log_2 \det \left(\mathbf{I}_{M_T} + \frac{\gamma_{bs}}{N_{eff}} \bar{\mathbf{H}}_{bs} \bar{\mathbf{H}}_{bs}^H \right) \quad (3.15)$$

όπου $\det(\cdot)$ είναι η ορίζουσα, \mathbf{I} είναι ο μοναδιαίος πίνακας, γ_{bs} είναι ο συνολικός σηματοθορυβικός λόγος (Signal to Noise Ratio -SNR) [18], N_{eff} είναι ο αριθμός των αποδοτικών διαγραμμάτων βάσης, δηλαδή ο αριθμός των aDoFs, και $\bar{\mathbf{H}}_{bs}$ είναι ο κατάλληλα κανονικοποιημένος πίνακας καναλιού στο πεδίο BS, όπου $\bar{\mathbf{H}}_{bs} = \mathbf{H}_{bs} / \sqrt{\|\mathbf{H}_{bs}\|_F}$ ($\|\cdot\|_F$ είναι η Frobenius νόρμα).

Έτσι, η εργοδική χωρητικότητα του συστήματος BS-MIMO, που επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας τα αρχικά διαγράμματα ακτινοβολίας (channel-irrelevant basis patterns) και τα αντίστοιχα προσαρμοστικά προς το κανάλι (channel-aware basis patterns) απεικονίζεται στο Σχήμα 3.6. Για να έχουμε ικανοποιητικό δείγμα, η εργοδική χωρητικότητα υπολογίστηκε λαμβάνοντας υπόψη 500 δείγματα καναλιού WINNER τύπου B2, δηλαδή θεωρήσαμε μικρο-κυψελικό σύστημα σε αστικό περιβάλλον με δυσμενείς συνθήκες διάδοσης. Όπως είναι εμφανές, με τη χρήση προσαρμοστικών διαγραμμάτων βάσης επιτυγχάνεται μεγαλύτερη εργοδική χωρητικότητα σε σχέση με τα αρχικά διαγράμματα βάσης λόγω του ότι γίνεται πιο αποδοτική χρησιμοποίηση των διαθέσιμων aDoFs. Έτσι, επιτυγχάνεται ένα κέρδος της τάξης του 1.5 με 2.5dB στην εργοδική χωρητικότητα, με το μέγιστο κέρδος να επιτυγχάνεται σε χαμηλές τιμές του SNR. Στο Σχήμα 3.7, απεικονίζεται επίσης η απόδοση ενός SISO, ενός 5×5 MIMO και ενός 2×2 MIMO. Όπως είναι εμφανές, η απόδοση του συστήματος 5×5 BS-MIMO υπερνικά κατά πολύ την αντίστοιχη του SISO όμως είναι πολύ πιο χαμηλή από την αντίστοιχη του 5×5 MIMO. Παρόλα αυτά, απόδοση του συστήματος BS-MIMO



Σχήμα 3.6: Εργοδική χωριτικότητα συστήματος BS-MIMO με χρήση διαφορετικών διαγραμμάτων βάσης



Σχήμα 3.7: Εργοδική χωριτικότητα συστήματος SISO, BS-MIMO, 2×2 και 5×5 MIMO

που μελετάμε, βρίσκεται πολύ κοντά με την απόδοση του 2×2 MIMO συστήματος. Να υπενθυμίσουμε ότι το ένα σύστημα διαθέτει μόνο μία αλυσίδα RF στους πομποδέκτες του ενώ το άλλο δύο.

Σε αυτό το σημείο, ολοκληρώνεται το πρώτο μέρος αυτής της εργασίας, στο οποίο παρουσιάστηκε το πεδίο των διαγραμμάτων ακτινοβολίας, μελετήθηκε η λειτουργία των συστημάτων BS-MIMO και καθορίστηκε ο τρόπος υπολογισμού των διαγραμμάτων βάσης και των aDoFs που ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να προσφέρει. Επίσης, παρουσιάστηκε και αναλύθηκε η τεχνική υπολογισμού προσαρμοστικών προς το κανάλι διαγραμμάτων βάσης η οποία αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας. Παρόλα αυτά, μέχρι στιγμής στην μελέτη σχετικά με την απόδοση της τεχνικής που αναπτύχθηκε, βασιζόμαστε μόνο στα θεωρητικά διαγράμματα βάσης τα οποία υπολογίζονται από την τεχνική αυτή. Αυτό όμως δεν είναι επαρκές, καθώς δεν γίνεται ακόμη καμία μελέτη σχετικά με την απόδοση των διαγραμμάτων βάσης τα οποία μπορούν να παραχθούν πρακτικά από μια κεραία ESPAR. Έτσι πέρα από τα θεωρητικά, θα πρέπει να μελετήσουμε και την απόδοση που επιτυγχάνουν τα πρακτικά διαγράμματα ακτινοβολίας της κεραίας. Για το λόγο αυτό, αναπτύχθηκε και παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο, ένας αλγόριθμος ο οποίος βάσει του επιθυμητού διαγράμματος ακτινοβολίας, υπολογίζει τις τιμές σύνθετης αντίστασης που θα πρέπει να εφαρμοστούν στα παρασιτικά κεραιοστοιχεία ώστε να παραχθεί το πλησιέστερο στο επιθυμητό, εφικτό διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας ESPAR.

Κεφάλαιο 4

Γενετικός Αλγόριθμος Υπολογισμού Σύνθετης Αντίστασης Κεραιών **ESPAR**

4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζουμε έναν γενετικό αλγόριθμο ο οποίος αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας και έχει ως στόχο να υπολογίζει τα βάρη των παρασιτικών κεραιοστοιχείων μιας κεραιάς ESPAR η οποία χρησιμοποιείται σε ένα σύστημα BS-MIMO. Πιο αναλυτικά, ο αλγόριθμος αυτός υπολογίζει τα κατάλληλα βάρη που θα πρέπει να εφαρμοστούν στα παρασιτικά κεραιοστοιχεία μιας κεραιάς ESPAR, ώστε να επιτευχθεί η ακτινοβολία ενός επιθυμητού διαγράμματος ακτινοβολίας από την κεραιά.

Ο σκοπός της δημιουργίας αυτού του αλγορίθμου είναι να παράγει μία μελέτη εφικτότητας σχετικά με το επιθυμητό διάγραμμα ακτινοβολίας που δέχεται σαν είσοδο. Με άλλα λόγια, ο αλγόριθμος αυτός έχει σαν στόχο να υπολογίσει το διάγραμμα ακτινοβολίας, που μπορεί να σχηματιστεί από μια κεραιά με συγκεκριμένη γεωμετρία, το οποίο είναι το πλησιέστερο δυνατό στο επιθυμητό διάγραμμα που δέχεται σαν είσοδο. Αυτό σημαίνει ότι πρακτικά το ζητούμενο είναι η επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης. Στο πρόβλημα αυτό, η μεταβλητή απόφασης είναι τα βάρη των παρασιτικών κεραιοστοιχείων τα οποία παράγουν ένα συγκεκριμένο διάγραμμα ακτινοβολίας ενώ η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος είναι η βελτιστοποίηση της συσχέτισης μεταξύ του παραγόμενου και του επιθυμητού διαγράμματος ακτινοβολίας. Οπότε, ο αλγόριθμος ψάχνει να βρει την βέλτιστη λύση στο συγκεκριμένο πρόβλημα η οποία θα είναι ένα σύνολο από βάρη το οποίο όταν εφαρμοστεί στα κεραιοστοιχεία θα μας δίνει το πλησιέστερο στο επιθυμητό, εφικτό διάγραμμα ακτινοβολίας που μπορεί να παράγει η κεραιά.

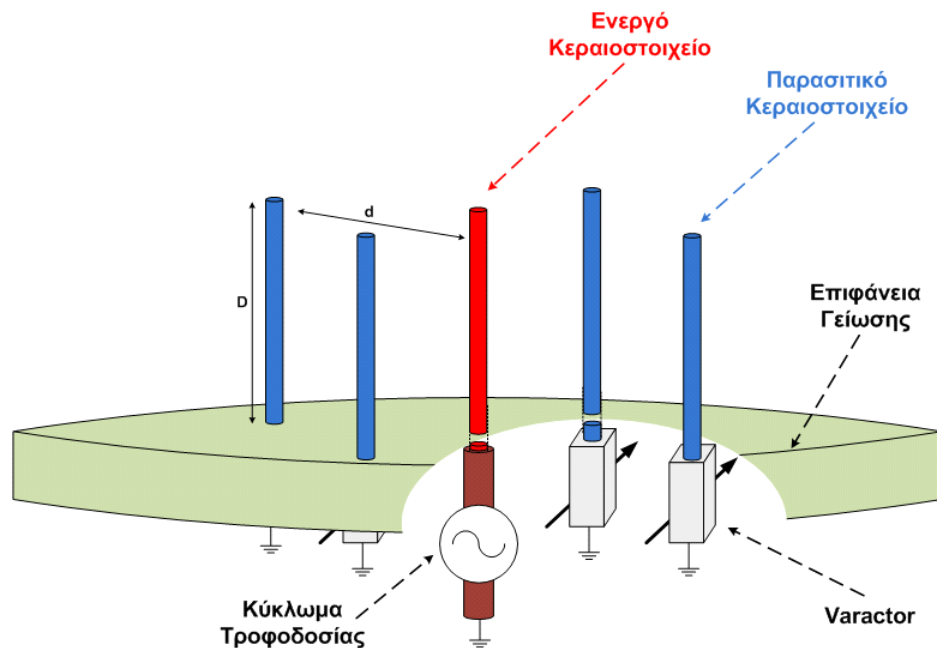
Τέλος, ο αλγόριθμος αυτός έχει σχεδιαστεί με το σκεπτικό να μην υπάρχει περιορισμός στα διαγράμματα που μπορεί να λάβει σαν είσοδο. Αυτό σημαίνει ότι έχει την δυνατό-

τητα να υπολογίσει τόσο διαγράμματα βάσης τα οποία ενδέχεται να έχουν προκύψει από τις τεχνικές που παρουσιάσαμε στο Κεφάλαιο 3, όσο και διαμορφωμένα διαγράμματα ακτινοβολίας τα οποία προκύπτουν ως γραμμικός συνδυασμός των διαγραμμάτων βάσης με τα εκπεμπόμενα σύμβολα της κεραίας. Παρόλα αυτά, βασικό κίνητρο για την δημιουργία του αλγορίθμου αυτού είναι η σύγκριση των εφικτά ακτινοβολούμενων προσαρμοστικών προς το κανάλι διαγραμμάτων βάσης που παράγονται από την τεχνική που αναπτύξαμε με τα αντίστοιχα διαγράμματα της τεχνικής που δεν λαμβάνει υπόψη την παρουσία του καναλιού. Τα αποτελέσματα αυτά θα τεκμηριώσουν τόσο το αν είναι εφικτά τα διαγράμματα που υπολογίζει η τεχνική που αναπτύξαμε αλλά και το κατά πόσο βελτιώνεται η απόδοση ενός συστήματος BS-MIMO το οποίο χρησιμοποιεί προσαρμοστικά διαγράμματα έναντι της χρήσης μη προσαρμοστικών.

Στην συνέχεια αυτού του κεφαλαίου, θα παρουσιαστεί η αρχή λειτουργίας των κεραιών ESPAR ώστε να διατυπωθεί η σχέση που συνδέει τα βάρη των παρασιτικών κεραιοστοιχείων με το εκπεμπόμενο διάγραμμα ακτινοβολίας. Ακόμη, θα παρουσιαστεί το πρόβλημα βελτιστοποίησης που καλείται να επιλύσει ο γενετικός αλγόριθμος που αναπτύχθηκε. Στη συνέχεια θα αναλυθούν τα δεδομένα εισόδου και εξόδου καθώς και η λειτουργία του αλγορίθμου η οποία και διαχωρίζεται σε επιμέρους φάσης. Τέλος, θα παρουσιαστούν κάποια ενδεικτικά αποτελέσματα εφαρμογής του αλγορίθμου σε διαγράμματα βάσης κεραιών ESPAR.

4.2 Αρχή Λειτουργίας Κεραιών ESPAR

Οι παρασιτικές κεραιές ESPAR αποτελούνται από ένα ενεργό κεραιοστοιχείο το οποίο και τροφοδοτείται από μια πηγή τάσης (αλυσίδα RF) και περιβάλλεται από πλήθος μη τροφοδοτούμενων κεραιοστοιχείων που καλούνται παρασιτικά (parasitics), τα οποία τοποθετούνται συνήθως σε γραμμική ή κυκλική διάταξη. Ένα παράδειγμα κυκλικής παρασιτικής κεραίας απεικονίζεται στο Σχήμα 4.1. Η τοποθέτηση των παρασιτικών στοιχείων σε μικρή απόσταση από το ενεργό, προκαλεί την επαγωγή ισχυρών ρευμάτων στα παρασιτικά εξαιτίας της τροφοδότησης του ενεργού κεραιοστοιχείου και της ισχυρής σύζευξης που αναπτύσσεται. Κατά συνέπεια, το συνολικά ακτινοβολούμενο πεδίο που προκύπτει είναι αποτέλεσμα της συνεισφοράς της ακτινοβολίας του ενεργού κεραιοστοιχείου λόγω τροφοδότησης του και των παρασιτικών λόγω της επαγωγής ρεύματος σε αυτά. Για να επιτευχθεί διαμόρφωση του επιθυμητού διαγράμματος ακτινοβολίας, θα πρέπει να ελεγχθεί η συνεισφορά του κάθε παρασιτικού κεραιοστοιχείου στο συνολικά ακτινοβολούμενο πεδίο. Η συνεισφορά του κάθε παρασιτικού εξασφαλίζεται μέσω ενός κυκλώματος ρυθμιζόμενης αντίδρασης που είναι συνδεδεμένο στην βάση κάθε παρασιτικού κεραιοστοιχείου όπως δείχνει το Σχήμα 4.1. Η ρυθμιζόμενη αντίδραση (variable reactance) υλοποιείται εύκολα με χρήση ειδικών διόδων σε ανάστροφη πόλωση που καλούνται varactors και στο εξής θα αποκαλείται απλά βάρος (weight).



Σχήμα 4.1: Κεραία ESPAR 5 στοιχείων με κυκλώματα ρυθμιζόμενης αντίστασης

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η αρχή λειτουργίας των κεραιών ESPAR διαφέρει κατά πολύ από την αντίστοιχη των συμβατικών στοιχειοκεραιών που χρησιμοποιούνται στα συστήματα MIMO, όπου όλα τα κεραιοστοιχεία είναι ενεργά και τροφοδοτούνται μέσω μίας ξεχωριστής αλυσίδας RF. Στα συμβατικά συστήματα MIMO είναι επιθυμητή η διατήρηση μίας ελάχιστης απόστασης μεταξύ των κεραιοστοιχείων ώστε να ελαχιστοποιείται η μεταξύ τους σύζευξη και να διατηρείται η γραμμική ανεξαρτησία των σημάτων που λαμβάνει κάθε κεραία. Αντίθετα, η λειτουργία των παρασιτικών κεραιών απαιτεί την ύπαρξη ισχυρής σύζευξης μεταξύ όλων των κεραιοστοιχείων, ώστε να είναι εφικτή στη συνέχεια η διαμόρφωση του επιθυμητού διαγράμματος ακτινοβολίας μέσω της ρύθμισης των τιμών των βαρών. Για το λόγο αυτό, οι χωρικές απαιτήσεις των κεραιών ESPAR είναι πολύ λιγότερες από τις αντίστοιχες των συμβατικών στοιχειοκεραιών κάτι το οποίο αποτελεί βασικό πλεονέκτημα. Ένα ακόμη πλεονέκτημα των κεραιών ESPAR, είναι ότι απαιτούν την χρήση μόνο μιας αλυσίδας RF κάτι το οποίο μειώνει δραματικά την πολυπλοκότητα υλοποίησής τους.

Όπως αναφέραμε αρχικά, η τροφοδότηση του ενεργού κεραιοστοιχείου προκαλεί την επαγωγή ρεύματος στα παρασιτικά. Η ένταση του επαγόμενου ρεύματος εξαρτάται από την γεωμετρία της κεραίας (θέση των κεραιοστοιχείων και αποστάσεις μεταξύ τους), τα βάρη των παρασιτικών κεραιοστοιχείων και το εκπεμπόμενο σήμα πληροφορίας. Συνεπώς το ρεύμα που διαρρέει τα κεραιοστοιχεία της ESPAR δίνεται ως εξής [30]:

$$\mathbf{i} = v_s(\mathbf{Z} + \mathbf{X})^{-1}\mathbf{v} \quad (4.1)$$

όπου \mathbf{Z} είναι ο μιγαδικός πίνακας σύζευξης μεταξύ των στοιχείων με διάσταση $(N_{esp} \times N_{esp})$ ο οποίος εξαρτάται από την γεωμετρία της κεραίας, $\mathbf{X} = \text{diag} \left[R_a \quad jx_1 \quad \dots \quad jx_{N_{esp}-1} \right]$ είναι διαγώνιος πίνακας διαστάσεων $(N_{esp} \times N_{esp})$ που περιέχει την αντίσταση ακτινοβολίας του ενεργού κεραιοστοιχείου R_a , η οποία θεωρείται σταθερή και τα βάρη (loads) των παρασιτικών κεραιοστοιχείων. Ακόμη v_s είναι το μιγαδικό σήμα διέγερσης του ενεργού κεραιοστοιχείου και $\mathbf{v} = \left[1 \quad 0 \quad \dots \quad 0 \right]$ είναι ένα διάνυσμα διαστάσεων $(N_{esp} \times 1)$ που χρησιμοποιείται ως διάνυσμα επιλογής. Πιο αναλυτικά ο πίνακας \mathbf{Z} εκφράζεται ως:

$$\mathbf{Z} = \begin{pmatrix} z_{00} & z_{01} & \cdots & z_{0N_{esp}-1} \\ z_{10} & z_{11} & \cdots & z_{1N_{esp}-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{N_{esp}-10} & z_{N_{esp}-11} & \cdots & z_{N_{esp}-1N_{esp}-1} \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

όπου το στοιχείο $Z_{ij} = R_{ij} + jX_{ij}$ εκφράζει την αμοιβαία σύζευξη μεταξύ των κεραιοστοιχείων i και j , η οποία υπολογίζεται ως [8]:

$$\begin{aligned} R_{ij} &= 30 \left[2C_i \left(\frac{2\pi d_{ij}}{\lambda} \right) - C_i \left(\frac{2\pi}{\lambda} \left(\sqrt{\tilde{d}_{ij}^2 + D^2 + D} \right) \right) - C_i \left(\frac{2\pi}{\lambda} \left(\sqrt{\tilde{d}_{ij}^2 + D^2 + D} \right) \right) \right] \\ X_{ij} &= -30 \left[2S_i \left(\frac{2\pi d_{ij}}{\lambda} \right) - S_i \left(\frac{2\pi}{\lambda} \left(\sqrt{\tilde{d}_{ij}^2 + D^2 + D} \right) \right) - S_i \left(\frac{2\pi}{\lambda} \left(\sqrt{\tilde{d}_{ij}^2 + D^2 + D} \right) \right) \right] \end{aligned} \quad (4.3)$$

όπου D είναι το μήκος του κάθε κεραιοστοιχείου κανονικοποιημένο ως προς το μήκος κύματος, ενώ \tilde{d}_{ij} είναι η κανονικοποιημένη απόσταση μεταξύ των κεραιοστοιχείων i και j , ενώ

$$\begin{aligned} S_i(x) &= \int_0^x \frac{\sin t}{t} dt = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n x^{2n+1}}{(2n+1)!(2n+1)} \\ C_i(x) &= - \int_x^{\infty} \frac{\cos t}{t} dt = C_{eu} + \ln(x) - C_{in}(x) \end{aligned} \quad (4.4)$$

όπου $C_{eu} = 0.5772157$ σταθερά του Euler και επίσης

$$C_{in}(x) = \int_0^x \frac{1-\cos t}{t} dt = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1} x^{2n}}{(2n)!(2n)}$$

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται κυκλική κεραία ESPAR με 5 στοιχεία, όπως αυτή που θεωρούμε σαν κεραία αναφοράς σε αυτή την εργασία, λόγω της γεωμετρικής της συμμετρίας, αλλά και βάσει του θεωρήματος της αμοιβαιότητας ισχύει ότι:

$$\begin{aligned}
Z_{01} &= Z_{02} = Z_{03} = Z_{04} \\
Z_{12} &= Z_{23} = Z_{34} = Z_{41} \\
Z_{13} &= Z_{42} \\
Z_{ij} &= Z_{ji}
\end{aligned} \tag{4.5}$$

Συνεπώς, βάσει της εξ. (4.1) παρατηρούμε ότι πράγματι εξαιτίας των ρυθμιζόμενων βαρών στα παρασιτικά κεραιοστοιχεία, η τεχνητή σύζευξη μεταξύ τους εκφράζεται πλέον μέσω του πίνακα $(\mathbf{Z} + \mathbf{X})$, ο οποίος καθορίζει τα επαγόμενα ρεύματα. Επιπλέον, το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας ESPAR εξαρτάται από τα ρεύματα που διαρρέουν τα κεραιοστοιχεία και από την γεωμετρία της κεραίας. Πιο αναλυτικά, η συνεισφορά της ακτινοβολίας όλων των κεραιοστοιχείων και ο παράγοντας πολλαπλότητας της κεραίας (array manifold vector) $\mathbf{a}(\varphi)$ καθορίζουν το συνολικά ακτινοβολούμενο διάγραμμα της κεραίας [30]. Έτσι, για δεδομένες τιμές στα βάρη των παρασιτικών στοιχείων, δηλαδή για συγκεκριμένο πίνακα \mathbf{X} , το ακτινοβολούμενο πεδίο της κεραίας εκφράζεται ως:

$$P_{rad}(\varphi) = \mathbf{i}^T \mathbf{a}(\varphi) \tag{4.6}$$

4.3 Ορισμός Προβλήματος Βελτιστοποίησης

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή αυτού του κεφαλαίου, ο γενετικός αλγόριθμος που αναπτύχθηκε έχει σαν στόχο να υπολογίσει τα βάρη των παρασιτικών κεραιοστοιχείων, τα οποία εάν εφαρμοστούν σε μια κεραία ESPAR με συγκεκριμένη γεωμετρία, θα δώσουν το βέλτιστο διάγραμμα ακτινοβολίας. Με τον όρο βέλτιστο, στην συγκεκριμένη περίπτωση υποδηλώνουμε εκείνο το διάγραμμα ακτινοβολίας το οποίο είναι εφικτό να σχηματιστεί από την συγκεκριμένη κεραία και είναι το πλησιέστερο στο επιθυμητό. Συνεπώς, από τα παραπάνω διακρίνεται η ανάγκη επίλυσης ενός προβλήματος βελτιστοποίησης.

Στο συγκεκριμένο πρόβλημα βελτιστοποίησης διακρίνουμε μία μεταβλητή απόφασης, μία αντικειμενική συνάρτηση, και ένα βασικό περιορισμό. Πιο αναλυτικά, η μεταβλητή απόφασης την οποία και θα πρέπει να υπολογίζει ο αλγόριθμος είναι τα βάρη των παρασιτικών κεραιοστοιχείων $x_i, i = 1, \dots, N_{esp}$, και κατά συνέπεια ο πίνακας \mathbf{X} . Το πεδίο ορισμού της μεταβλητής αυτής είναι το πεδίο τιμών αντίδρασης που μπορεί να υποστηριχθεί από τα κυκλώματα ελέγχου της μεταβαλλόμενης αντίδρασης που είναι προσαρμοσμένα στα παρασιτικά κεραιοστοιχεία. Λόγω της υλοποίησης των κυκλωμάτων ελέγχου, το πεδίο αυτό δεν είναι συνεχές, κάτι που σημαίνει ότι τα βάρη των παρασιτικών δεν γίνεται να πάρουν οποιαδήποτε τιμή μέσα σε αυτό το πεδίο. Αντίθετα το πεδίο αυτό είναι διακριτό και διαιρείται με συγκεκριμένη διακριτικότητα σε στάθμες αντίδρασης. Η διακριτικότητα καθορίζεται από τις τιμές αντίδρασης που μπορούν να υποστηρίξουν τα κυκλώματα ελέγχου μεταβαλλόμενης αντίδρασης της κεραίας.

Όπως σε κάθε πρόβλημα βελτιστοποίησης, έτσι και σε αυτό, μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους είναι η αντικειμενική συνάρτηση. Βάσει των όσων έχουμε αναφέρει, το ζητούμενο είναι ο αλγόριθμος να υπολογίσει τα βάρη της κεραίας τα οποία δίνουν το πλησιέστερο δυνατό διάγραμμα ακτινοβολίας στο αντίστοιχο επιθυμητό. Αυτό σημαίνει ότι η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος μας θα πρέπει να αντιστοιχεί σε ένα μέτρο σύγκρισης της ομοιότητας του παραγόμενου και του επιθυμητού διαγράμματος ακτινοβολίας. Για το λόγο αυτό επιλέξαμε την συσχέτιση μεταξύ του παραγόμενου και του επιθυμητού διαγράμματος ακτινοβολίας ως ένα αποδοτικό μέτρο σύγκρισης της ομοιότητας των δύο διαγραμμάτων. Συνεπώς, αν θεωρήσουμε ότι $P_{des}(\varphi)$ είναι το επιθυμητό διάγραμμα ακτινοβολίας, τότε η αντικειμενική συνάρτηση είναι η εξής:

$$Objective = \max \left(\left| \int_0^{2\pi} P_{rad}(\varphi) P_{des}^*(\varphi) d\varphi \right| \right) \quad (4.7)$$

Τέλος, σύμφωνα με την περιγραφή του προβλήματος βελτιστοποίησης που δώσαμε στην αρχή αυτής της ενότητας προκύπτει ένας βασικός περιορισμός. Σύμφωνα με αυτόν, το διάγραμμα ακτινοβολίας που θα προκύψει από τον αλγόριθμο θα πρέπει να είναι εφικτό να παραχθεί από την συγκεκριμένη κεραία. Για να είναι ένα διάγραμμα ακτινοβολίας εφικτό να παραχθεί, θα πρέπει η συγκεκριμένη γεωμετρία κεραίας που χρησιμοποιείται να υποστηρίζει τέτοια διαγράμματα, δηλαδή να έχει διακριτικότητα σε όλες τις κατευθύνσεις στις οποίες ορίζεται το διάγραμμα αυτό. Και επίσης το διάγραμμα αυτό να προκύπτει για βάρη τα οποία να μπορούν να υποστηριχθούν από τα παρασιτικά κεραιοστοιχεία. Παρόλα αυτά, σύμφωνα με την εξ. (4.6) το γεγονός ότι το παραγόμενο διάγραμμα ακτινοβολίας προκύπτει συναρτησί των διανυσμάτων πολλαπλότητας της κεραίας εξασφαλίζει ότι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό του και συνεπώς η κεραία έχει διακριτικότητα σε όλες της κατευθύνσεις του. Ακόμη, σύμφωνα με τα όσα προαναφέραμε σχετικά με το πεδίο ορισμού και την διακριτικότητα στην αντίδραση των παρασιτικών, εξασφαλίζουν ότι το διάγραμμα που θα προκύψει θα παράγεται για τιμές αντίδρασης οι οποίες υποστηρίζονται από τα κυκλώματα ελέγχου μεταβαλλόμενης αντίδρασης της κεραίας. Επομένως, ο τρόπος υπολογισμού του διαγράμματος ακτινοβολίας και το πεδίο ορισμού των τιμών της μιγαδικής αντίδρασης εξασφαλίζουν την εφικτότητα του παραγόμενου διαγράμματος ακτινοβολίας.

4.4 Σχεδίαση Γενετικού Αλγορίθμου

Όπως έχει αναφερθεί, ο αλγόριθμος αυτός έχει σχεδιαστεί με το σκεπτικό να μην υπάρχει περιορισμός στα διαγράμματα που μπορεί να λάβει σαν είσοδο. Αυτό σημαίνει ότι έχει την δυνατότητα να υπολογίσει τόσο διαγράμματα βάσης τα οποία ενδέχεται να έχουν προκύψει από τις τεχνικές που παρουσιάσαμε στο Κεφάλαιο 3, όσο και διαμορφωμένα διαγράμματα ακτινοβολίας τα οποία προκύπτουν ως γραμμικός συνδυασμός των διαγραμμάτων βάσης με

τα εκπεμπόμενα σύμβολα πληροφορίας. Παρόλα αυτά, η ανάλυση του αλγορίθμου που θα ακολουθήσει βασίζεται στην δεύτερη περίπτωση, όπου επιθυμούμε να υπολογίσουμε διαμορφωμένα διαγράμματα ακτινοβολίας.

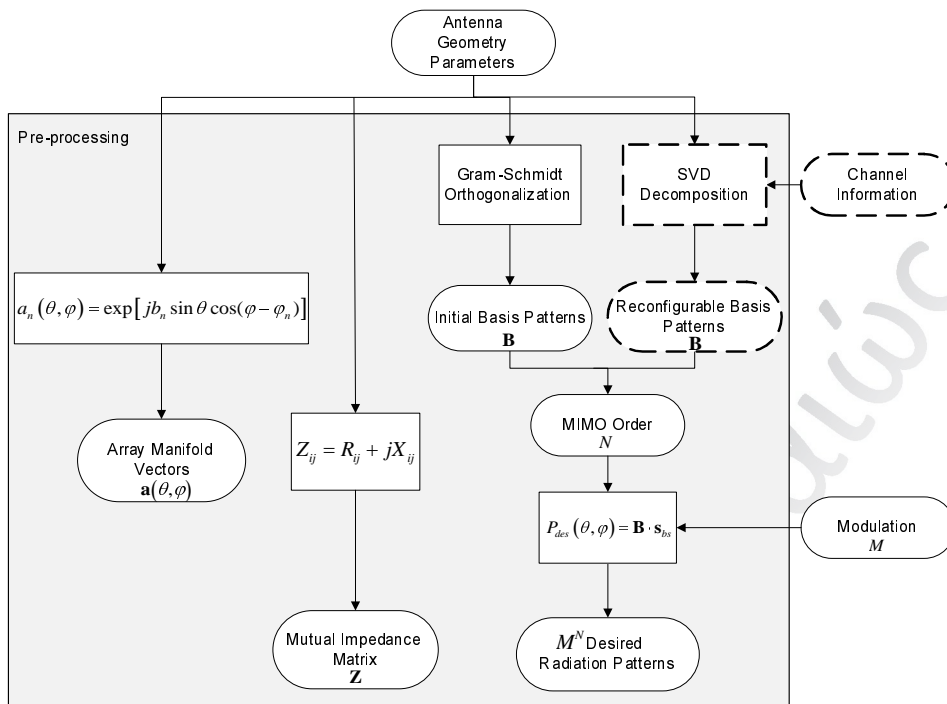
Για το λόγο αυτό, στην παρακάτω ανάλυση, ο αλγόριθμος παρουσιάζεται σαν να αποτελεί μέρος ενός συστήματος που υπολογίζει τόσο τα επιθυμητά όσο και τα παραγόμενα διαγράμματα ακτινοβολίας. Το σύστημα αυτό αποτελείται από δύο βασικές διαδικασίες, την προεπεξεργασία των αρχικών δεδομένων και τον γενετικό αλγόριθμο. Πιο αναλυτικά, η προεπεξεργασία έχει σαν στόχο τον υπολογισμό των απαραίτητων δεδομένων εισόδου του γενετικού αλγορίθμου, μέρος των οποίων είναι και τα επιθυμητά διαγράμματα ακτινοβολίας. Έτσι, στη διαδικασία αυτή υπολογίζονται τα διαγράμματα βάσης (με χρήση της αντίστοιχης τεχνικής του Κεφαλαίου 3) και στην συνέχεια για δεδομένη τάξη διαμόρφωσης (που θα χρησιμοποιηθεί για τα σήματα πληροφορίας) υπολογίζονται τα επιθυμητά διαγράμματα ακτινοβολίας τα οποία και θα δοθούν σαν είσοδος στον γενετικό αλγόριθμο. Αφού όλα τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου υπολογιστούν στην διαδικασία προεπεξεργασίας, τότε ο γενετικός αλγόριθμος εκτελείται με σκοπό να υπολογίζει τα παραγόμενα διαγράμματα ακτινοβολίας της κεραίας.

Τέλος, θα πρέπει να επισημανθεί ότι στην περίπτωση που θέλουμε να υπολογίζουμε τα παραγόμενα διαγράμματα βάσης της κεραίας και όχι τα διαμορφωμένα διαγράμματα, η μόνη αλλαγή που πραγματοποιείται στο σύστημα είναι στην διαδικασία της προεπεξεργασίας. Σε αυτή την περίπτωση, αντί μετά τον υπολογισμό των διαγραμμάτων βάσης να υπολογιστούν τα διαμορφωμένα διαγράμματα, η διαδικασία προεπεξεργασίας τερματίζεται και επιστρέφει στον γενετικό αλγόριθμο τα υπολογισμένα διαγράμματα βάσης. Επίσης, σε αυτή την περίπτωση δεν είναι απαραίτητη η γνώση του σχήματος διαμόρφωσης που θα χρησιμοποιηθεί.

4.4.1 Προεπεξεργασία Αρχικών Δεδομένων

Αρχικά, όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε και στην Εικόνα 4.2, θεωρούμε διαθέσιμη πληροφορία σχετικά με την γεωμετρία της κεραίας (δηλαδή αριθμό και μήκος κεραιοστοιχείων που διαθέτει η κεραία και αποστάσεις μεταξύ των στοιχείων), την διαμόρφωση που χρησιμοποιείται και επιλεκτικά (ανάλογα με την θεώρηση που γίνεται) πληροφορία σχετικά με την κατάσταση του καναλιού (Channel State Information - CSI). Είναι προφανές, ότι από αυτή την αρχική πληροφορία μέχρι τον υπολογισμό του εκπεμπόμενου διαγράμματος ακτινοβολίας υπάρχει ένα μεγάλο χάσμα. Για να γεφυρωθεί αυτό το χάσμα και για να υπολογιστούν τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου για τον γενετικό αλγόριθμο, απαιτείται η προεπεξεργασία των αρχικών δεδομένων. Η διαδικασία αυτή παρουσιάζεται αναλυτικά στο Σχήμα 4.2.

Τα βασικά δεδομένα εισόδου που χρειάζεται ο γενετικός αλγόριθμος είναι ο πίνακας αμοιβαίας σύζευξης, τα διανύσματα πολλαπλότητας της κεραίας και τα επιθυμητά διαγράμματα ακτινοβολίας. Επομένως, σε αυτή τη διαδικασία προεπεξεργασίας των αρχικών δεδομένων, θα πρέπει να υπολογιστούν όλα τα παραπάνω δεδομένα. Πρώτα από όλα θα πρέπει να υπο-



Σχήμα 4.2: Διαδικασία προεπεξεργασίας αρχικών δεδομένων

λογιστεί ο πίνακας αμοιβαίας σύζευξης \mathbf{Z} , ο οποίος ορίζεται στην εξ. (4.2). Για να γίνει αυτό θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε τις γεωμετρικές παραμέτρους τις κεραίας ώστε να υπολογίσουμε τα στοιχεία του Z_{ij} . Ο υπολογισμός αυτός γίνεται βάσει των εξ. (4.3) και (4.4).

Στην συνέχεια, χρησιμοποιώντας και πάλι τις γεωμετρικές παραμέτρους υπολογίζουμε τα διανύσματα πολλαπλότητας (array manifold vectors) της κεραίας ESPAR. Πιο αναλυτικά, το διάνυσμα πολλαπλότητας στην κατεύθυνση $\hat{\varphi}$ εκφράζεται ως:

$$\mathbf{a}(\varphi) = [\alpha_0(\varphi) \dots \alpha_{N_{esp}-1}(\varphi)]^T \quad (4.8)$$

όπου

$$a_n(\varphi) = \begin{cases} 1 & n = 0 \\ \exp[jb_n \cos(\varphi - \varphi_n)] & n \neq 0 \end{cases}$$

όπου φ_n είναι η γωνία του n -οστού κεραιοστοιχείου στο επίπεδο του αζιμούθιου ως προς τον άξονα αναφοράς της κεραίας, $b_n = 2\pi d_n$ και d_n είναι η κανονικοποιημένη ως προς το μήκος κύματος απόσταση του n -οστού κεραιοστοιχείου.

Σε αυτό το σημείο, έχουμε υπολογίσει όλα τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου εκτός από τα επιθυμητά διαγράμματα ακτινοβολίας. Για να τα υπολογίσουμε θα πρέπει πρώτα να γνωρίζουμε τα διαθέσιμα διαγράμματα βάσης της συγκεκριμένης κεραίας. Στην συνέχεια, πρέπει να υπολογίσουμε όλους τους δυνατούς γραμμικούς συνδυασμούς των διαγραμμάτων βάσης

με τα σύμβολα του σηματοστερισμού (symbol constellation) του σχήματος διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται. Στα πλαίσια αυτής της μελέτης θεωρούμε δύο εναλλακτικές περιπτώσεις για τον υπολογισμό των διαγραμμάτων βάσης οι οποίες βασίζονται στην ύπαρξη ή μη διαθέσιμης πληροφορίας για το κανάλι. Στην πρώτη περίπτωση, θεωρούμε ότι δεν υπάρχει διαθέσιμη πληροφορία σχετικά με την κατάσταση του καναλιού. Οπότε ο υπολογισμός των διαθέσιμων διαγραμμάτων βάσης γίνεται μέσω της διάσπασης του διαγράμματος ακτινοβολίας της κεραίας σε ορθοκανονικές συναρτήσεις. Δηλαδή, εφαρμόζεται η τεχνική που παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.2. Στη δεύτερη περίπτωση, θεωρούμε ότι υπάρχει διαθέσιμη πληροφορία σχετικά με την κατάσταση του καναλιού, δηλαδή θεωρούμε γνωστό τον πίνακα του καναλιού. Συνεπώς, σε αυτή την περίπτωση τα διαγράμματα βάσης υπολογίζονται βάσει της διάσπασης του πίνακα του καναλιού, με την χρήση της μεθόδου SVD. Δηλαδή, χρησιμοποιούμε την τεχνική που αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας και η οποία παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.2. Βάσει των διαθέσιμων διαγραμμάτων βάσης, καθορίζεται και η τάξη του συστήματος MIMO που θα χρησιμοποιηθεί, καθώς όπως έχουμε προαναφέρει ο αριθμός των διαγραμμάτων βάσης είναι ίσος με τους διαθέσιμους aDoFs και κατά συνέπεια με τον αριθμό των συμβόλων που μπορούν να εκπεμφθούν ταυτόχρονα σε μία περίοδο συμβόλου.

Επομένως, δεδομένων των διαθέσιμων διαγραμμάτων βάσης, θα πρέπει να υπολογιστούν οι συνδυασμοί τους με τα σύμβολα του σηματοστερισμού της διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται. Αν υποθέσουμε ότι ο αριθμός των διαγραμμάτων βάσης, δηλαδή η τάξη MIMO του συστήματος μας είναι N και η τάξη διαμόρφωσης είναι ίση με M , τότε ο αριθμός όλων των δυνατών συνδυασμών που προκύπτουν, είναι ίσος με M^N . Επομένως, υπάρχουν M^N επιθυμητά διαγράμματα ακτινοβολίας τα οποία υπολογίζονται ως εξής:

$$P_{des}(\varphi) = \mathbf{B} \cdot \mathbf{s}_{bs} = \sum_{n=0}^{N_{esp}-1} s_{bs,n} B_n(\varphi) \quad (4.9)$$

όπου $B_n(\varphi)$ είναι το n -οστό διάγραμμα βάσης της κεραίας και $s_{bs,n}$ είναι το εκπεμπόμενο σήμα πληροφορίας στο πεδίο BS το οποίο αντιστοιχεί στο n -οστό διάγραμμα βάσης.

4.4.2 Απαραίτητα Δεδομένα Εισόδου

Ο γενετικός αλγόριθμος που αναπτύχθηκε, για να μπορέσει να υπολογίζει τα παραγόμενα διαγράμματα ακτινοβολίας μιας κεραίας ESPAR χρειάζεται τα κατάλληλα δεδομένα εισόδου. Όπως αναφέραμε και στην προηγούμενη υποενότητα, η προεπεξεργασία που γίνεται έχει ως στόχο την γεφύρωση του χάσματος μεταξύ των αρχικών δεδομένων και των απαραίτητων δεδομένων εισόδου του αλγορίθμου. Αυτό σημαίνει ότι τα περισσότερα από τα δεδομένα εισόδου του γενετικού αλγορίθμου είναι τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την προεπεξεργασία που περιγράψαμε παραπάνω. Επιγραμματικά, τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου του

αλγορίθμου είναι τα ακόλουθα:

- Αριθμός Κεραιοστοιχείων
- Πίνακας Αμοιβαίας Σύζευξης
- Διαγράμματα Πολλαπλότητας της Κεραίας
- Επιθυμητά Διαγράμματα Ακτινοβολίας
- Πεδίο Τιμών Μεταβαλλόμενης Αντίδρασης
- Διακριτικότητα Μεταβαλλόμενης Αντίδρασης

Όπως είναι εμφανές, οι πρώτες τέσσερις μεταβλητές είναι ήδη γνωστές από την προεπεξεργασία των αρχικών δεδομένων, οπότε δεν θα αναλυθούν περαιτέρω. Το Πεδίο Τιμών Μεταβαλλόμενης Αντίδρασης καθορίζει το εύρος των τιμών αντίδρασης που μπορεί να υποστηριχθεί από τα κυκλώματα ελέγχου της μεταβαλλόμενης αντίδρασης που είναι προσαρμοσμένα στα παρασιτικά κεραιοστοιχεία. Με άλλα λόγια, αυτό είναι το πεδίο ορισμού για τα βάρη των παρασιτικών στοιχείων μέσα στο οποίο ο αλγόριθμος θα αναζητήσει την βέλτιστη λύση. Σε αυτή τη μελέτη, θεωρούμε ότι το πεδίο αυτό είναι ίσο με $[-X_{lim}, X_{lim}]$, όπου X_{lim} είναι η μέγιστη τιμή αντίδρασης που υποστηρίζεται από τα κυκλώματα ελέγχου των παρασιτικών κεραιοστοιχείων. Λόγω της υλοποίησης των κυκλωμάτων ελέγχου, το πεδίο αυτό δεν είναι συνεχές, κάτι που σημαίνει ότι τα βάρη των παρασιτικών δεν γίνεται να πάρουν οποιαδήποτε τιμή μέσα σε αυτό το πεδίο. Αντίθετα το πεδίο αυτό είναι διακριτό και διαιρείται σε στάθμες αντίδρασης. Οι στάθμες αυτές καθορίζονται από την Διακριτικότητα Μεταβαλλόμενης Αντίδρασης η οποία εκφράζεται μέσω της μεταβλητή X_{step} . Η Διακριτικότητα Μεταβαλλόμενης Αντίδρασης καθορίζεται από τις τιμές αντίδρασης που μπορούν να υποστηρίξουν τα κυκλώματα ελέγχου μεταβαλλόμενης αντίδρασης της κεραίας και επιπλέον μπορεί να θεωρηθεί ως η ελάχιστη μονάδα κβαντοποίησης του Πεδίου Τιμών Μεταβαλλόμενης Αντίδρασης.

Οι δύο τελευταίες μεταβλητές καθορίζουν τον αριθμό από στάθμες αντίδρασης X_{levels} , τις οποίες υποστηρίζουν τα κυκλώματα ελέγχου των παρασιτικών κεραιοστοιχείων:

$$X_{levels} = \frac{|X_{lim} - (-X_{lim})|}{X_{step}} \quad (4.10)$$

4.4.3 Βασική Λειτουργία Γενετικού Αλγορίθμου

Σε αυτό το σημείο, αφού καθορίσαμε όλα τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου, μπορούμε πλέον να αναλύσουμε την βασική λειτουργία του γενετικού αλγορίθμου (Genetic Algorithm - GA) που αναπτύχθηκε. Η βασική λειτουργία που ακολουθεί ο αλγόριθμος μπορεί να διαχωριστεί σε επιμέρους φάσης, οι οποίες και συνθέτουν την διαδικασία βελτιστοποίησης

μέσω της οποίας θα υπολογιστεί η βέλτιστη εφικτή λύση ¹. Οι φάσεις αυτές αποτελούν τις βασικές φάσεις λειτουργίας κάθε γενετικού αλγορίθμου και είναι οι εξής: Φάση Αρχικοποίησης, Φάση Αποτίμησης, Φάση Αναπαραγωγής και Φάση Τερματισμού. Η συνολική διαδικασία εκτέλεσης καθώς και οι φάσεις στις οποίες χωρίζεται ο γενετικός αλγόριθμος, παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.3. Στην συνέχεια αυτής της υποενότητας παρουσιάζουμε και αναλύουμε την κάθε μια από αυτές τις φάσεις ξεχωριστά.

Όπως έχουμε επισημάνει, ο GA δέχεται σαν είσοδο ένα σύνολο από επιθυμητά διαγράμματα βάσης και υπολογίζει το βέλτιστο εφικτό διάγραμμα ακτινοβολίας για το καθένα από αυτά. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η ίδια για κάθε επιθυμητό διάγραμμα ακτινοβολίας. Έτσι, για λόγους απλότητας στην συνέχεια θα παρουσιάσουμε και θα αναλύσουμε την διαδικασία που ακολουθείται για τον υπολογισμό μόνο ενός διαγράμματος ακτινοβολίας.

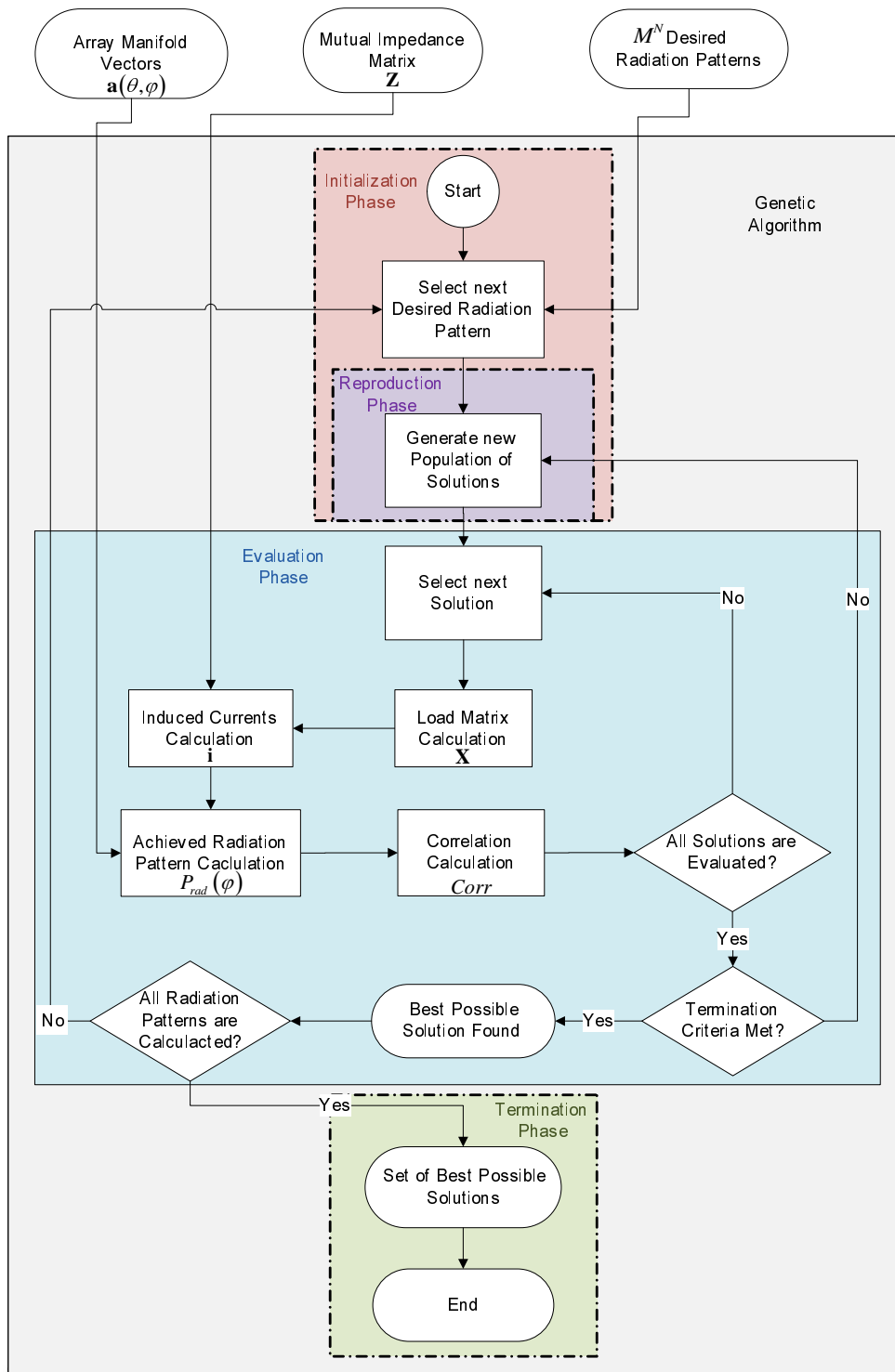
4.4.3.1 Φάση Αρχικοποίησης

Η φάση της αρχικοποίησης είναι η πρώτη που εκτελείται κατά την εκκίνηση του αλγορίθμου. Σε αυτή την φάση, ο GA αναπαράγει ένα σύνολο από τυχαίες λύσεις οι οποίες και αποτελούν τον αρχικό πληθυσμό λύσεων. Κάθε πιθανή λύση του προβλήματος μας, είναι ένα διάνυσμα με διάσταση $(1 \times N_{esp} - 1)$ το οποίο περιέχει τις τιμές από τα βάρη των παρασιτικών κεραιοστοιχείων. Αυτό σημαίνει ότι το βάρος κάθε παρασιτικού κεραιοστοιχείου είναι το βασικό στοιχείο που συνθέτει μία πιθανή λύση και ονομάζεται γονίδιο (gene) στην θεωρία των γενετικών αλγορίθμων [31]. Ο GA που αναπτύχθηκε χρησιμοποιεί δυαδική (binary) κωδικοποίηση για την αναπαράσταση και μοντελοποίηση των δυνατών λύσεων. Αυτό σημαίνει ότι κάθε βάρος θα πρέπει να μοντελοποιηθεί σαν ένα δυαδικό διάνυσμα. Για να μοντελοποιηθεί επαρκώς κάθε τιμή βάρους (δηλαδή κάθε πιθανή στάθμη αντίδρασης), θα πρέπει το μήκος κάθε γονιδίου (δηλαδή ο αριθμός των βιτς από τα οποία θα αποτελείται) να είναι ίσο με $n = \log_2(X_{levels})$.

Επιπλέον, κάθε πιθανή λύση του προβλήματος, δηλαδή κάθε χρωμόσωμα (chromosome) όπως ονομάζεται στην θεωρία των γενετικών αλγορίθμων [31], θα πρέπει να μοντελοποιηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να αναπαριστά τα βάρη όλων των παρασιτικών κεραιοστοιχείων. Για να έχουμε μια επαρκή μοντελοποίηση, κάθε χρωμόσωμα θα πρέπει να περιέχει $(N_{esp} - 1)$ γονίδια, όσα δηλαδή και τα παρασιτικά στοιχεία της κεραίας. Συνεπώς, το απαιτούμενο μέγεθος για κάθε χρωμόσωμα είναι ίσο με $n \cdot (N_{esp} - 1)$. Η δομή του χρωμοσώματος αναπαριστάται στην Εικόνα 4.4.

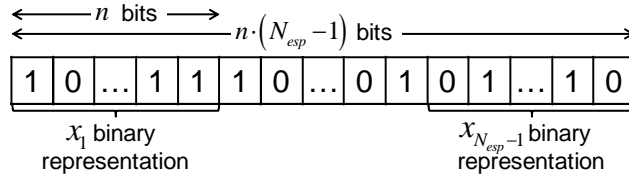
Όπως έχει ήδη διατυπωθεί, ο GA για να εκκινήσει την διαδικασία βελτιστοποίησης παράγει ένα σύνολο τυχαίων λύσεων οι οποίες σχηματίζουν τον αρχικό πληθυσμό. Οι λύσεις αυτές αναπαράγονται δημιουργώντας δυαδικά διανύσματα με τυχαίες τιμές. Η χρήση της

¹Οι γενετικοί αλγόριθμοι ανήκουν στην κατηγορία των ευριστικών αλγορίθμων και υπολογίζουν υποβέλτιστες λύσεις. Για το λόγο αυτό, όταν αναφέρουμε τον όρο βέλτιστη λύση, αναφερόμαστε στην καλύτερη δυνατή λύση που βρήκε ο αλγόριθμος



Σχήμα 4.3: Διαδικασία βελτιστοποίησης γενετικού αλγορίθμου

συγκεκριμένης μοντελοποίησης εξασφαλίζει ότι οι τυχαίες λύσεις που υπολογίζονται αντιστοιχούν σε βάρη τα οποία είναι εντός του Πεδίου Τιμών Μεταβαλλόμενης Αντίδρασης και διατηρούν την δεδομένη Διακριτικότητα Μεταβαλλόμενης Αντίδρασης.



Σχήμα 4.4: Δυαδική αναπαράσταση χρωμοσώματος του γενετικού αλγορίθμου

4.4.3.2 Φάση Αποτίμησης Λύσεων

Μετά την αρχικοποίηση, σειρά έχει η Φάση Αποτίμησης των Λύσεων που αποτελούν τον τρέχοντα πληθυσμό. Στην φάση αυτή, οι λύσεις του τρέχοντος πληθυσμού θα αποτιμηθούν σύμφωνα με το πόσο κοντά είναι στην επιθυμητή λύση. Όμως σε αυτό το σημείο οι λύσεις που έχουν παραχθεί από τον GA έχουν την μορφή χρωμοσωμάτων ενώ η επιθυμητή λύση είναι ένα διάγραμμα ακτινοβολίας. Αυτό σημαίνει ότι η παρούσα μορφή των λύσεων δεν επιτρέπει την σύγκρισή τους με την επιθυμητή. Συνεπώς, θα πρέπει να γίνει ένας μετασχηματισμός των χρωμοσωμάτων σε διαγράμματα ακτινοβολίας. Για λόγους απλότητας θα περιγράψουμε την διαδικασία μετασχηματισμού και αποτίμησης μόνο ενός χρωμοσώματος. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η ίδια και για τα υπόλοιπα.

Αρχικά, θα πρέπει να γίνει αποκωδικοποίηση του επιλεγμένου χρωμοσώματος, έτσι ώστε το δυαδικό διάνυσμα να μετατραπεί σε ένα διάνυσμα με τιμές αντίδρασης που θα αντιστοιχούν στα παρασιτικά κεραιοστοιχεία. Για να γίνει αυτό θα πρέπει να αποκωδικοποιηθεί κάθε γονίδιο του χρωμοσώματος ξεχωριστά σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο:

$$x_i = \frac{-X_{\text{lim}} + (\text{Dec}(x_{i,br}) \cdot 2) + X_{\text{lim}}}{2^{n-1}}, 1 \leq i \leq N_{\text{esp}} - 1 \quad (4.11)$$

όπου x_i είναι το βάρος του i -οστού παρασιτικού κεραιοστοιχείου, $\text{Dec}(\cdot)$ είναι μια συνάρτηση μετατροπής δυαδικών τιμών σε δεκαδικές και $x_{i,br}$ είναι η δυαδική αναπαράσταση του i -οστού βάρους ή ισοδύναμα το i -οστό γονίδιο.

Στην συνέχεια, με δεδομένα τα βάρη όλων των παρασιτικών κεραιοστοιχείων x_i υπολογίζουμε τον πίνακα με τα βάρη της κεραίας ESPAR \mathbf{X} . Ο υπολογισμός του αποτελεί μια τετριμμένη διαδικασία αφού τα βάρη των παρασιτικών και η αντίσταση του ενεργού κεραιοστοιχείου θα πρέπει να τοποθετηθούν στην διαγώνιο του πίνακα. Επίσης, από την στιγμή που ο πίνακας αμοιβαίας σύζευξης \mathbf{Z} είναι γνωστός, μπορούμε να υπολογίσουμε το διάνυσμα με τα επαγόμενα ρεύματα \mathbf{i} σύμφωνα με την εξ. (4.1)

Με δεδομένο το διάνυσμα των επαγόμενων ρευμάτων \mathbf{i} και τα διανύσματα πολλαπλότητας της κεραίας $\mathbf{a}(\varphi)$ μπορούμε να υπολογίσουμε το διάγραμμα ακτινοβολίας που αντιστοιχεί στην λύση που εξετάζουμε. Έτσι χρησιμοποιώντας μια ισοδύναμη σχέση με την εξ. (4.6), μπορούμε να υπολογίσουμε το παραγόμενο διάγραμμα ακτινοβολίας σύμφωνα με την σχέση

[19]

$$P_{rad}(\varphi) = \mathbf{i}^T \mathbf{a}(\varphi) = \sum_{n=0}^{N_{esp}-1} i_n a_n(\varphi) \quad (4.12)$$

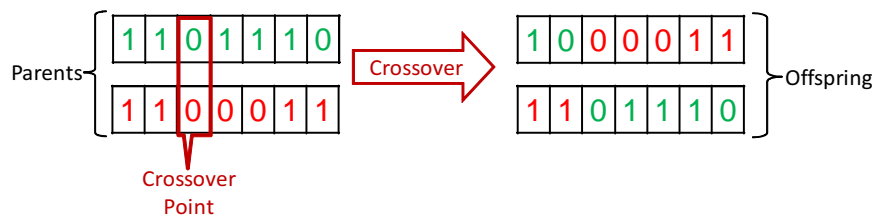
Το επιθυμητό και το παραγόμενο διάγραμμα ακτινοβολίας βρίσκονται πλέον στην ίδια μορφή, οπότε έχουμε την δυνατότητα να τα συγκρίνουμε. Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 4.3, η αντικειμενική συνάρτηση που θα χρησιμοποιηθεί για να αποτιμήσει την ομοιότητα μεταξύ των δύο διαγραμμάτων είναι ή συνάρτηση συσχέτισης. Ο αντικειμενικός στόχος, αυτού του προβλήματος βελτιστοποίησης όπως εκφράζεται μέσω της εξ. (4.7), είναι η μεγιστοποίηση της συσχέτισης των δύο διαγραμμάτων. Παρόλα αυτά, λόγω της φύσης του, κάθε γενετικός αλγόριθμος έχει σαν στόχο την ελαχιστοποίηση μιας συνάρτησης προσαρμογής (fitness function) [31]. Για το λόγο αυτό, στον συγκεκριμένο GA, ως συνάρτηση προσαρμογής ορίστηκε η αντίστροφη αντικειμενική συνάρτηση, δηλαδή η συνάρτηση προσαρμογής εκφράζεται ως:

$$Fitness = \frac{1}{Objective} = \frac{1}{\left| \int_0^{2\pi} P_{rad}(\varphi) P_{des}^*(\varphi) d\varphi \right|} \quad (4.13)$$

Μόλις γίνει η αποτίμηση όλων των λύσεων του τρέχοντος πληθυσμού, οι λύσεις ταξινομούνται ανάλογα με την συσχέτιση τους με την επιθυμητή λύση. Έτσι γίνεται εμφανές ποια είναι η καλύτερη λύση και ποια είναι η μέγιστη συσχέτιση που έχει υπολογιστεί μέχρι στιγμής.

4.4.3.3 Φάση Αναπαραγωγής

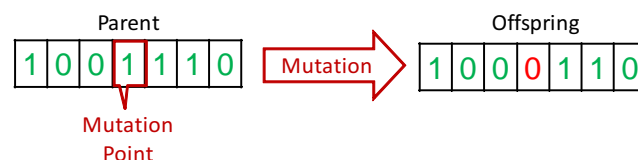
Μετά την αποτίμηση των λύσεων του τρέχοντος πληθυσμού, γίνεται έλεγχος για το αν πληρούνται τα κριτήρια τερματισμού του αλγορίθμου. Στα κριτήρια αυτά θα αναφερθούμε στην συνέχεια. Στην περίπτωση που τα κριτήρια αυτά δεν πληρούνται, τότε εκτελείται η Φάση Αναπαραγωγής του νέου πληθυσμού λύσεων. Σε αυτή τη φάση, ο GA αναπαράγει νέες λύσεις με σκοπό να βρεθεί η βέλτιστη. Ο νέος πληθυσμός δημιουργείται από τους απογόνους (offspring) των χρωμοσωμάτων του προηγούμενου πληθυσμού. Για να αναπαραχθούν οι απόγονοι θα πρέπει πρώτα να επιλεγθούν τα χρωμοσώματα γονείς από τα οποία θα προκύψουν οι απόγονοι. Ένα χρωμόσωμα καλείται γονιός όταν έχει επιλεγθεί, με συγκεκριμένη μέθοδο, να περάσει τροποποιήσεις για να σχηματίσει απογόνους [32]. Η μέθοδος επιλογής που χρησιμοποιείται στον GA που αναπτύχθηκε είναι ο τροχός ρουλέτας (roulette wheel selection) [31]. Η μέθοδος αυτή ανήκει στις μεθόδους αναλογικής αναπαραγωγής (proportionate reproduction) καθώς επιλέγει τα χρωμοσώματα-γονείς ανάλογα με την τιμή προσαρμογής τους (fitness value) [33]. Πιο συγκεκριμένα, σε κάθε χρωμόσωμα αντιστοιχίζεται μια πιθανότητα επιλογής η οποία αντικατοπτρίζει την αναλογία της τιμής προσαρμογής



Σχήμα 4.5: Τελεστής διασταύρωσης

του συγκεκριμένου χρωμοσώματος προς τις αντίστοιχες τιμές προσαρμογής των υπόλοιπων χρωμοσωμάτων του πληθυσμού [34]. Έτσι επιλέγεται ο κατάλληλος αριθμός γονιών σύμφωνα με τις πιθανότητες επιλογής τους.

Στην συνέχεια, τα επιλεγμένα χρωμοσώματα δημιουργούν απογόνους μέσω της χρήσης συγκεκριμένων γενετικών τελεστών. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, έχουμε επιλέξει την χρήση των τελεστών διασταύρωσης (crossover) και μετάλλαξης (mutation). Ο τελεστής διασταύρωσης εφαρμόζεται σε δύο χρωμοσώματα-γονείς και παράγει έναν ή δύο (ανάλογα με την υλοποίηση) απογόνους, επιλέγοντας τυχαία ένα σημείο στο διάνυσμα των δυο χρωμοσωμάτων και αντικαθιστώντας το τμήμα που έπεται του σημείου αυτού στο πρώτο χρωμόσωμα με το αντίστοιχο τμήμα του δεύτερου και αντίστροφα [34]. Ένα παράδειγμα απεικονίζεται στην Εικόνα 4.5. Η διασταύρωση αποτελεί έναν τυχαίο τελεστή καθώς εφαρμόζεται σε τυχαία σημεία στα διανύσματα των χρωμοσωμάτων με συγκεκριμένη πιθανότητα διασταύρωσης (crossover probability). Η μετάλλαξη, εφαρμόζεται σε ένα χρωμόσωμα-γονέα και δημιουργεί έναν απόγονο μεταλλάσσοντας τυχαία την τιμή των bits του. Δηλαδή, μετατρέπει το 0 σε ένα και το αντίστροφο. Αυτός είναι επίσης ένας τυχαίος τελεστής αφού εφαρμόζεται σε τυχαίες θέσεις του χρωμοσώματος με συγκεκριμένη πιθανότητα (mutation probability) [32]. Ένα παράδειγμα εφαρμογής αυτού του τελεστή παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.6.



Σχήμα 4.6: Τελεστής μετάλλαξης

Η φάση αυτή τερματίζεται όταν ένας νέος πληθυσμός από χρωμοσώματα έχει δημιουργηθεί. Δηλαδή, έχει υπολογιστεί μια νέα γενιά (generation) λύσεων. Στην συνέχεια,

εκτελείται και πάλι η φάση της αποτίμησης. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου βρεθεί η βέλτιστη λύση και ενεργοποιηθεί η φάση τερματισμού του αλγορίθμου.

4.4.3.4 Φάση Τερματισμού

Κάθε φορά που τερματίζεται η φάση αποτίμησης των λύσεων που έχουν υπολογιστεί, γίνεται έλεγχος για το αν πληρούνται τα κριτήρια τερματισμού του αλγορίθμου. Στην συγκεκριμένη περίπτωση έχουμε ορίσει τρία κριτήρια τερματισμού. Σύμφωνα με το πρώτο κριτήριο, ο αλγόριθμος επιτρέπεται να υπολογίσει ένα συγκεκριμένο αριθμό γενεών από λύσεις. Έτσι, όταν μετά από τον έλεγχο των κριτηρίων αποδειχθεί ότι ο αριθμός της τρέχουσας γενιάς είναι ο μέγιστος επιτρεπτός, τότε ο αλγόριθμος τερματίζεται και επιστρέφει σαν βέλτιστη λύση την καλύτερη που έχει υπολογίσει μέχρι στιγμής.

Το δεύτερο κριτήριο τερματισμού, αφορά την εύρεση της λύσης με την ολικά βέλτιστη τιμή προσαρμογής που μπορεί να επιτευχθεί. Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, όταν υπολογιστεί η λύση εκείνη όπου η τιμή προσαρμογής της είναι ίση με την βέλτιστη δυνατή (όπου στην περίπτωση είναι η μονάδα, αφού η συνάρτηση προσαρμογής είναι το αντίστροφο της συσχέτισης και η μέγιστη συσχέτιση είναι ίση με 1), τότε ο αλγόριθμος τερματίζεται και επιστρέφει την βέλτιστη λύση. Τέλος, το τρίτο κριτήριο που χρησιμοποιείται είναι αυτό του μέγιστου επιτρεπτού αριθμού γενεών με σταθερή μέγιστη τιμή προσαρμογής. Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, όταν για ένα συγκεκριμένο αριθμό γενεών δεν βρίσκεται καλύτερη λύση, δηλαδή η βέλτιστη τιμή προσαρμογής που έχει βρεθεί παραμένει σταθερή, τότε ο αλγόριθμος τερματίζεται και επιστρέφει την καλύτερη μέχρι στιγμής λύση που έχει υπολογίσει.

4.4.3.5 Δεδομένα Εξόδου

Όταν ένα από τα κριτήρια τερματισμού του αλγορίθμου γίνει αληθές, τότε ο GA τερματίζει την λειτουργία του και επιστρέφει την βέλτιστη λύση που μπόρεσε να βρει. Τα δεδομένα εξόδου που επιστρέφει ο αλγόριθμος είναι σχετικά με την βέλτιστη λύση που κατάφερε να υπολογίσει. Πιο αναλυτικά ο αλγόριθμος επιστρέφει, το διάγραμμα ακτινοβολίας που αντιστοιχεί στην βέλτιστη λύση, την συσχέτιση του με το επιθυμητό διάγραμμα ακτινοβολίας και τα βάρη των παρασιτικών κεραιοστοιχείων. Επιπλέον, δεδομένα σχετικά με την απόδοση του αλγορίθμου είναι διαθέσιμα μετά τον τερματισμό του, όπως ο αριθμός των γενεών που υπολογίστηκαν και ο χρόνος που απαιτήθηκε για τον υπολογισμό αυτό.

4.5 Παραδείγματα Εφαρμογής και Ενδεικτικά Αποτελέσματα

Σε αυτή την ενότητα θα παραθέσουμε κάποια ενδεικτικά αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου που περιγράψαμε παραπάνω. Όπως έχουμε προαναφέρει, δεν υπάρχει περιορισμός

Πίνακας 4.1: Τιμές παραμέτρων κεραίας ESPAR

Παράμετρος	Τιμή
Αριθμός Κεραιοστοιχείων N_{esp}	5
Απόσταση μεταξύ των στοιχείων	$\lambda/16$
Αντίσταση ενεργού στοιχείου R_a	50 Ohm
Μέγιστη τιμή αντίδρασης X_{lim}	$300i$ Ohm
Διακριτικότητα αντίδρασης X_{step}	0.293 Ohm

Πίνακας 4.2: Τιμές παραμέτρων γενετικού αλγορίθμου

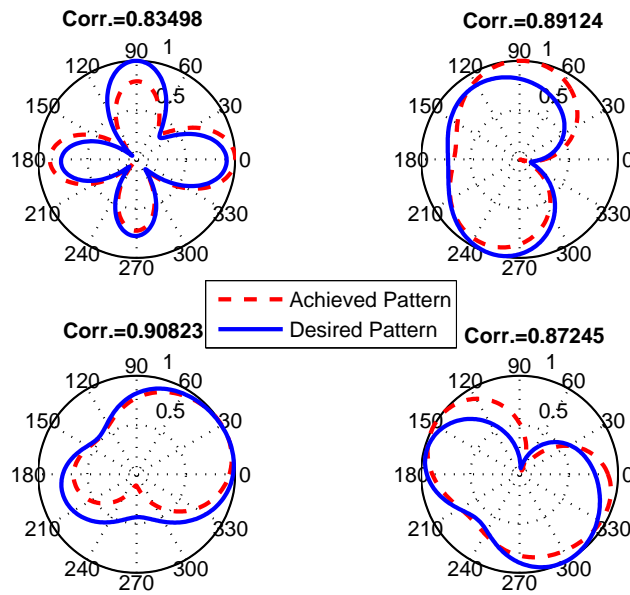
Παράμετρος	Τιμή
Πιθανότητα διασταύρωσης	0.7
Πιθανότητα μετάλλαξης	0.1
Μέγεθος χρωμοσώματος	44 bits
Μέγεθος πληθυσμού	1200
Μέγιστος αριθμός γενεών	1000
Γενιές με σταθερή τιμή προσαρμογής	30

στα επιθυμητά διαγράμματα ακτινοβολίας που δέχεται ο αλγόριθμος. Έτσι, σε αυτή την ενότητα επιλέγουμε να παρουσιάσουμε κάποιες εφαρμογές του αλγορίθμου σε διαγράμματα βάσης. Στο επόμενο κεφάλαιο, θα παρουσιαστούν περισσότερες εφαρμογές του αλγορίθμου, οι οποίες περιλαμβάνουν και διαμορφωμένα διαγράμματα ακτινοβολίας.

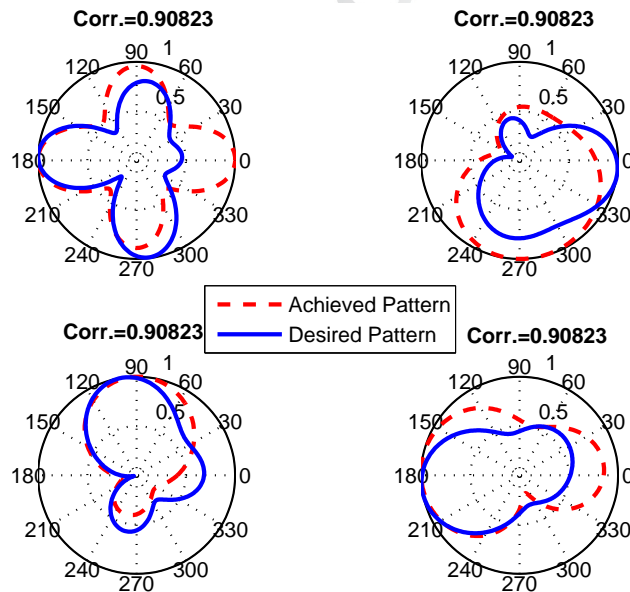
Αναλυτικά αποτελέσματα σχετικά με την απόδοση του αλγορίθμου θα παρουσιαστούν στο Κεφάλαιο 5. Εδώ θα παρουσιαστούν κάποιες ενδεικτικές περιπτώσεις εφαρμογής του αλγορίθμου. Πιο συγκεκριμένα θα εφαρμόσουμε τον αλγόριθμο στα διαγράμματα βάσης που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 3.3 και συγκεκριμένα στα σχήματα 3.4 και 3.5. Για κάθε ένα από τα παραπάνω σετ διαγραμμάτων ακτινοβολίας, θα παρουσιάσουμε το αντίστοιχο σετ με τα παραγόμενα διαγράμματα του αλγορίθμου, καθώς και τα βάρη που αντιστοιχούν στα

Πίνακας 4.3: Βάρη (Ohm) των προσαρμοστικών διαγραμμάτων του πομπού

Στοιχείο	Διάγραμμα 1	Διάγραμμα 2	Διάγραμμα 3	Διάγραμμα 4
1-Ενεργό	$50 + 0i$	$50 + 0i$	$50 + 0i$	$50 + 0i$
2	$0 - 10.69i$	$0 - 27.99i$	$0 - 274.49i$	$0 - 66.97i$
3	$0 - 209.7i$	$0 - 33.26i$	$0 + 17.73i$	$0 + 190.9i$
4	$0 - 254.8i$	$0 + 11.57i$	$0 - 28.87i$	$0 - 91.89i$
5	$0 - 10.4i$	$0 + 28.28i$	$0 - 40.88i$	$0 - 36.19i$



Σχήμα 4.7: Επιθυμητά και παραγόμενα διαγράμματα ακτινοβολίας του πομπού προσαρμοστικά προς το κανάλι



Σχήμα 4.8: Επιθυμητά και παραγόμενα διαγράμματα ακτινοβολίας του δέκτη προσαρμοστικά προς το κανάλι

παρασιτικά κεραιοστοιχεία.

Τα ενδεικτικά αποτελέσματα που θα παρουσιάσουμε σε αυτή την ενότητα, έχουν προκύψει για συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων του γενετικού αλγορίθμου και των παραμέτρων

Πίνακας 4.4: Βάρη (Ohm) των προσαρμοστικών διαγραμμάτων του δέκτη

Στοιχείο	Διάγραμμα 1	Διάγραμμα 2	Διάγραμμα 3	Διάγραμμα 4
1-Ενεργό	$50 + 0i$	$50 + 0i$	$50 + 0i$	$50 + 0i$
2	$0 - 11.577i$	$0 - 139.08i$	$0 + 263.06i$	$0 + 240.49i$
3	$0 - 89.83879i$	$0 - 93.94i$	$0 - 35.61i$	$-24.76i$
4	$0 - 114.46i$	$0 - 31.5i$	$0 - 44.99i$	$0 + 12.45i$
5	$0 - 9.233i$	$0 - 40.59i$	$0 + 5.715i$	$0 - 38.25i$

της κεραίας ESPAR που θεωρούμε. Οι τιμές των παραμέτρων της κεραίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1, ενώ αντίστοιχα οι τιμές των παραμέτρων του γενετικού αλγορίθμου παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2. Οι ίδιες τιμές θα θεωρηθούν και για τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του επόμενου κεφαλαίου.

Στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζονται τα επιθυμητά και τα παραγόμενα προσαρμοστικά διαγράμματα βάσης του πομπού, ενώ στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζονται τα βάρη των παρασιτικών κεραιοστοιχείων που αντιστοιχούν σε κάθε διάγραμμα βάσης. Αντίστοιχα αποτελέσματα για τα διαγράμματα βάσης του δέκτη παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.8 και στον Πίνακα 4.4.

Πανεπιστήμιο Πειραιώς

Κεφάλαιο 5

Αποτελέσματα Προσομοιώσεων

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν και είχαν σαν στόχο την αποτίμηση των τεχνικών που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας. Πιο αναλυτικά, οι προσομοιώσεις αυτές έγιναν έτσι ώστε να αποτιμηθεί η βελτίωση της επίδοσης ενός συστήματος BS-MIMO το οποίο χρησιμοποιεί προσαρμοστικά διαγράμματα βάσης τα οποία υπολογίζονται μέσω της τεχνικής που αναπτύχθηκε. Η αποτίμηση αυτή, βασίζεται τόσο στα θεωρητικά διαγράμματα βάσης που δίνει η μέθοδος αλλά και στα διαγράμματα βάσης τα οποία μπορούν πρακτικά να εκπέμψει μια κεραία ESPAR. Ακόμη, αρκετές προσομοιώσεις έγιναν με σκοπό την αποτίμηση του γενετικού αλγορίθμου που αναπτύχθηκε και μέσω του οποίου μπορούμε να έχουμε μια πολύ καλή προσέγγιση τόσο για τα εφικτά ακτινοβολούμενα διαγράμματα, όσο και για τα διαμορφωμένα διαγράμματα της κεραίας.

Έτσι, το κεφάλαιο αυτό χωρίζεται σε δύο βασικές ενότητες. Στην πρώτη, παρουσιάζονται αποτελέσματα προσομοιώσεων τα οποία πραγματοποιήθηκαν με σκοπό τον καθορισμό της επίδοσης του γενετικού αλγορίθμου που αναπτύχθηκε. Στη συγκεκριμένη ενότητα θα μελετηθεί η ικανότητα του αλγορίθμου να υπολογίζει τα παραγόμενα διαγράμματα όταν δέχεται σαν είσοδο διαμορφωμένα διαγράμματα ακτινοβολίας. Συγκεκριμένα, θα παρουσιαστούν τόσο αποτελέσματα με συγκρίσεις επιθυμητών και παραγόμενων διαγραμμάτων ακτινοβολίας, όσο και γραφικές παραστάσεις που αφορούν την επίδοση του αλγορίθμου σε διαφορετικές διαμορφώσεις. Στην δεύτερη ενότητα, παρουσιάζονται αποτελέσματα που αφορούν την επίδοση των προσαρμοστικών διαγραμμάτων βάσης σε αντίθεση με τα διαγράμματα που είναι ανεξάρτητα του καναλιού. Αναλυτικότερα, με δεδομένα τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το γενετικό αλγόριθμο, για τα εκπεμπόμενα διαγράμματα βάσης της κεραίας, συγκρίνεται η επίδοση που επιτυγχάνεται σε ένα σύστημα BS-MIMO στις περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται προσαρμοστικά και μη προσαρμοστικά διαγράμματα βάσης.

Σε όλα τα αποτελέσματα που θα ακολουθήσουν θεωρούμε τη χρήση της κεραίας αναφοράς αυτής της εργασίας η οποία είναι μια επίπεδη κυκλική κεραία ESPAR με $N_R = N_T = N_{esp} = 5$ κεραιοστοιχεία (ένα ενεργό και 4 παρασιτικά) με απόσταση μεταξύ τους

ιση με $\lambda/16$. Ακόμη, χρησιμοποιούμε δείγματα καναλιών του μοντέλου WINNER τύπου B2. Οι αναλυτικές τιμές των παραμέτρων της κεραίας καθώς και του γενετικού αλγορίθμου παραμένουν οι ίδιες με εκείνες που παρουσιάστηκαν στους πίνακες 4.1 και 4.2.

5.1 Επίδοση Γενετικού Αλγορίθμου

Βασικό μέτρο επίδοσης του γενετικού αλγορίθμου που αναπτύχθηκε αποτελεί η συσχέτιση μεταξύ του επιθυμητού και του παραγόμενου διαγράμματος ακτινοβολίας. Για το λόγο αυτό, όλες οι προσομοιώσεις και τα αποτελέσματα που αφορούν την επίδοση του αλγορίθμου έχουν σαν επίκεντρο την αποτίμηση της συσχέτισης. Ανάλογα με την περίπτωση μελέτης (case study) ο αλγόριθμος πρέπει να μπορεί να υπολογίσει είτε διαγράμματα βάσης είτε διαμορφωμένα διαγράμματα. Η πρώτη περίπτωση δεν θα μας απασχολήσει εδώ, καθώς είναι το αντικείμενο μελέτης της επόμενης ενότητας. Αυτό σημαίνει ότι η παρούσα ενότητα πραγματεύεται περιπτώσεις υπολογισμού διαμορφωμένων διαγραμμάτων.

Για το λόγο αυτό, θα γίνει εφαρμογή του συστήματος υπολογισμού επιθυμητών και παραγόμενων διαμορφωμένων διαγραμμάτων που παρουσιάστηκε στην ενότητα 4.4. Έτσι, έχουμε την δυνατότητα να σχεδιάσουμε και να εκτελέσουμε αρκετά σενάρια, χρησιμοποιώντας τόσο διαφορετικά διαγράμματα βάσης όσο και διαφορετικά σχήματα διαμόρφωσης. Για να μπορέσουμε να έχουμε μια ένα προς ένα αντιστοίχιση μεταξύ των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν, έχουμε επιλέξει ίδια τάξη MIMO σε όλα τα σενάρια που θα εκτελέσουμε. Συγκεκριμένα, θεωρούμε τάξη MIMO ίση με $N = 3$ στις περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται μη προσαρμοστικά διαγράμματα βάσης και έχουμε επιλέξει να χρησιμοποιήσουμε δείγματα καναλιών τα οποία παρέχουν τρεις βαθμούς ελευθερίας στο σύστημα στις περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται προσαρμοστικά διαγράμματα βάσης.

Αρχικά, γίνεται σύγκριση των επιθυμητών και των παραγόμενων διαγραμμάτων ακτινοβολίας τα οποία προκύπτουν από συγκεκριμένα σενάρια. Το σενάριο, τα αποτελέσματα του οποίου έχουν επιλεγεί να παρουσιαστούν πρώτα, αφορά την περίπτωση στην οποία χρησιμοποιούνται μη προσαρμοστικά διαγράμματα ακτινοβολίας, τα οποία υπολογίζονται βάσει της τεχνικής που παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.2, και διαμόρφωση BPSK. Στο Σχήμα 5.1 απεικονίζονται τα επιθυμητά διαμορφωμένα διαγράμματα (desired patterns) τα οποία αποτελούν όλους τους δυνατούς συνδυασμούς μεταξύ διαγραμμάτων βάσης και των συμβόλων του σχήματος διαμόρφωσης. Στο ίδιο σχήμα, παρουσιάζονται τα αντίστοιχα εφικτά διαγράμματα ακτινοβολίας (achieved patterns) που υπολογίστηκαν από τον γενετικό αλγόριθμο. Στο πάνω μέρος κάθε διαγράμματος απεικονίζεται η αντίστοιχη συσχέτιση που έχει επιτευχθεί μεταξύ του επιθυμητού και του παραγόμενου διαγράμματος. Κάποια στατιστικά στοιχεία που προκύπτουν από τα δεδομένα εξόδου του αλγορίθμου, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1. Πιο συγκεκριμένα, η συσχέτιση είναι η μέση συσχέτιση που επιτεύχθηκε, ο αριθμός γενεών είναι ο μέσος αριθμός γενεών που δημιούργησε ο αλγόριθμος μέχρι να βρει την τελική λύση

Πίνακας 5.1: Μέσες τιμές δεδομένων εξόδου του γενετικού αλγορίθμου για το πρώτο σενάριο

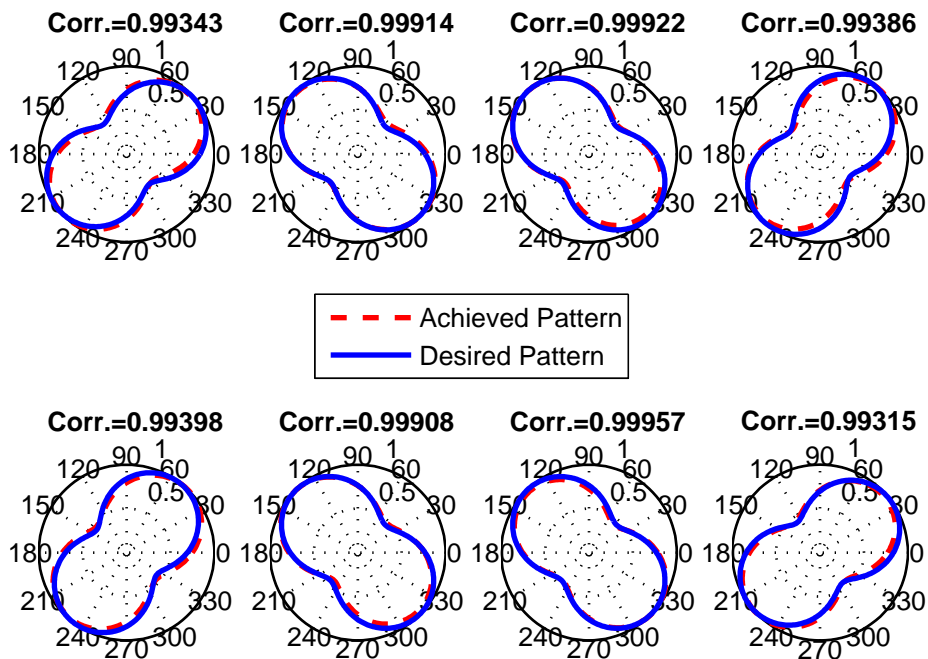
Παράμετρος	Τιμή
Συσχέτιση	0.9961
Αριθμός Γενεών	134
Χρόνος (min)	1.9

και τέλος ο χρόνος είναι ο μέσος χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου μέχρι τον υπολογισμό κάθε λύσης.

Το ίδιο σενάριο αλλά αυτή τη φορά με διαφορετικά διαγράμματα βάσης ερευνάται στη συνέχεια. Πιο συγκεκριμένα στο σενάριο αυτό θεωρούμε και πάλι διαμόρφωση BPSK αλλά χρησιμοποιούμε προσαρμοστικά διαγράμματα βάσης τα οποία υπολογίζονται με την τεχνική που παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.3. Τα διαγράμματα βάσης που χρησιμοποιούνται σε αυτή την περίπτωση έχουν προκύψει χρησιμοποιώντας ένα δείγμα καναλιού το οποίο μπορεί να υποστηρίξει τρεις βαθμούς ελευθερίας. Στο Σχήμα 5.2 παρουσιάζονται όλα τα διαμορφωμένα επιθυμητά διαγράμματα ακτινοβολίας καθώς και τα αντίστοιχα παραγόμενα. Ακόμη στον Πίνακα 5.2 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες στατιστικές τιμές αυτού του σεναρίου.

Όπως είναι εμφανές, τα παραγόμενα διαγράμματα στο πρώτο σενάριο είναι πολύ καλύτερα από τα αντίστοιχα στο δεύτερο κάτι που αντικατοπτρίζει και η μέση τιμή της συσχέτισης. Ακόμη, παρατηρώντας τις αντίστοιχες μέσες τιμές των γενεών και του χρόνου, γίνεται αντιληπτό ότι ο υπολογισμός των διαγραμμάτων του δεύτερου σεναρίου είναι πιο δύσκολος (χρειάζεται περισσότερος χρόνος και περισσότερες γενιές). Αυτό όμως είναι λογικό, αν λάβουμε υπόψη ότι τα διαγράμματα βάσης που χρησιμοποιούνται στο δεύτερο σενάριο είναι προσαρμοσμένα στις τρέχουσες συνθήκες του περιβάλλοντος διάδοσης. Αντίθετα, τα διαγράμματα βάσης του πρώτου σεναρίου έχουν πιο ομοιόμορφο σχήμα και επίσης, τα διαμορφωμένα διαγράμματα ακτινοβολίας αποτελούν απλά μετατοπίσεις του ίδιου διαγράμματος σε διαφορετικές γωνίες. Αυτό διευκολύνει τον υπολογισμό εφικτών διαγραμμάτων που να είναι πλησιέστερα στα επιθυμητά. Επιπροσθέτως, παρατηρούμε ότι τα διαγράμματα του δεύτερου σεναρίου έχουν λοβούς με μικρότερα εύρη ημίσειας ισχύος (3dB beamwidth) από τους αντίστοιχους των πρώτων διαγραμμάτων κάτι που κάνει το σχηματισμό τους από μια κεραία ESPAR ακόμη δυσκολότερο.

Παρότι δεν είναι στα πλαίσια αυτής της εργασίας, μια ακόμη σημαντική παρατήρηση, αποτελεί ότι ο χρόνος υπολογισμού των διαμορφωμένων διαγραμμάτων και στις δυο περιπτώσεις είναι αρκετά μεγάλος. Αυτό σημαίνει ότι σε πραγματικά συστήματα δεν μπορεί να υλοποιηθεί μια τέτοια μέθοδος κατά τη λειτουργία του συστήματος (on-line) καθώς το χρονικό διάστημα υπολογισμού είναι απαγορευτικό. Παρόλα αυτά, αξίζει να σημειωθεί ότι ο χρόνος αυτός είναι χρόνος προσομοίωσης σε υπολογιστή, κάτι το οποίο σημαίνει ότι σε αντίστοιχη



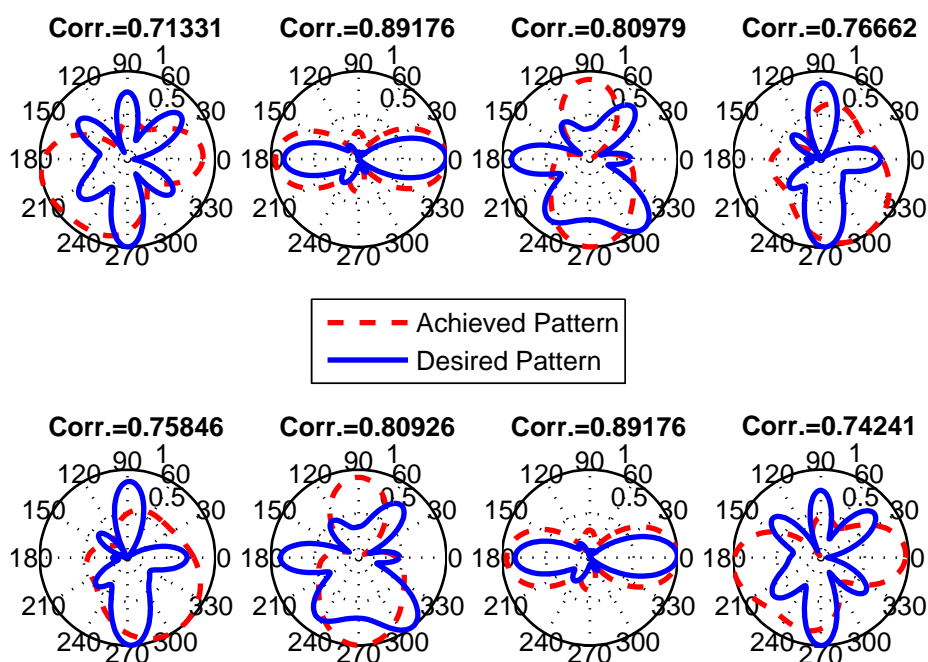
Σχήμα 5.1: Επιθυμητά και παραγόμενα διαμορφωμένα διαγράμματα ακτινοβολίας ανεξάρτητα του καναλιού

Πίνακας 5.2: Μέσες τιμές δεδομένων εξόδου του γενετικού αλγορίθμου για το δεύτερο σενάριο

Παράμετρος	Τιμή
Συσχέτιση	0.7559
Αριθμός Γενεών	171
Χρόνος (min)	2.3

υλοποίηση της τεχνικής αυτής ο χρόνος αυτός μπορεί να είναι πολύ μικρότερος. Όμως και πάλι ίσως να μην είναι αποδοτική μια τέτοια on-line υλοποίηση. Σε αυτή την περίπτωση μπορεί να γίνει χρήση πινάκων αναφοράς (look-up tables) οι οποίοι θα περιέχουν τα βάρη των παρασιτικών που αντιστοιχούν στο εκάστοτε διαμορφωμένο διάγραμμα ακτινοβολίας. Οι πίνακες αυτοί θα έχουν προ-υπολογιστεί για συγκεκριμένη τάξη διαμόρφωσης και συγκεκριμένα κανάλια αναφοράς. Οπότε κάθε φορά που θα απαιτείται η αποστολή δεδομένων με συγκεκριμένο διάγραμμα ακτινοβολίας θα γίνεται μία αντιστοίχιση στις τιμές του πίνακα και θα εφαρμόζονται τα απαραίτητα βάρη στα παρασιτικά κεραιστοιχεία.

Τα παραπάνω σενάρια μας έδωσαν πολύ σημαντικά αποτελέσματα για την επίδοση του αλγορίθμου σχετικά με τον υπολογισμό διαμορφωμένων διαγραμμάτων τα οποία βασίζονται σε προσαρμοστικά και μη διαγράμματα βάσης. Παρόλα αυτά, δεν είναι αρκετά για να εξάγουν συμπεράσματα σχετικά με την επίδοση του αλγορίθμου σε πιο σύνθετες περιπτώσεις εφαρμογής. Και αυτό γιατί ο αριθμός των αποτελεσμάτων είναι περιορισμένος. Για να έχουμε μια

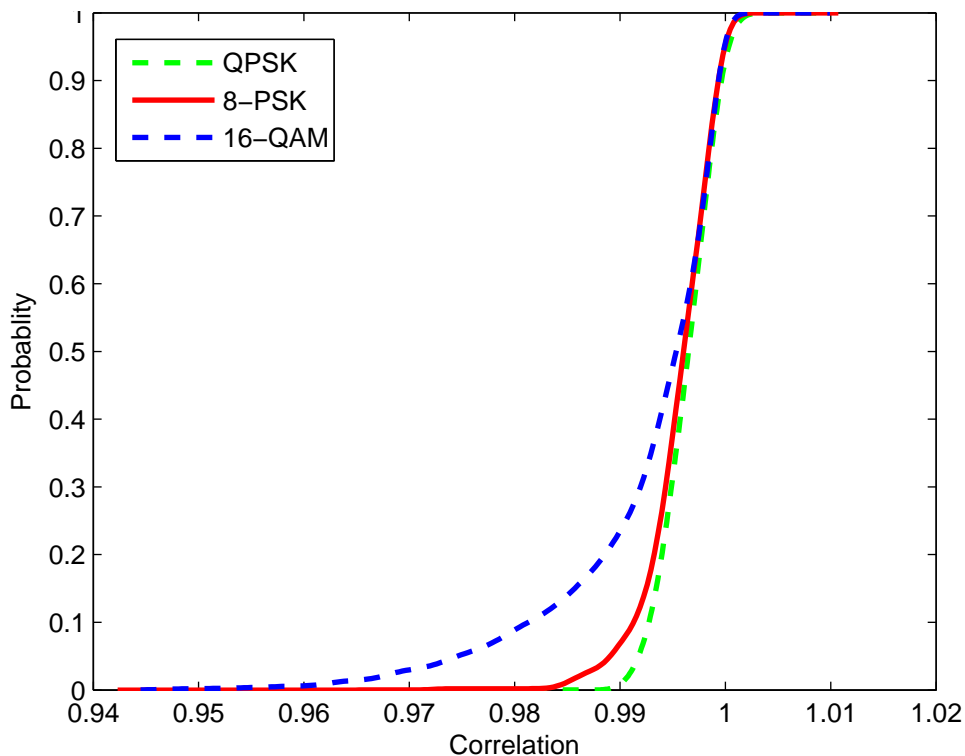


Σχήμα 5.2: Επιθυμητά και παραγόμενα διαμορφωμένα διαγράμματα ακτινοβολίας προσαρμοστικά προς το κανάλι

πλήρη εικόνα σχετικά με την επίδοση του αλγορίθμου θα πρέπει να ερευνήσουμε σενάρια πιο σύνθετα και πιο πολύπλοκα. Παρόλα αυτά, στα επόμενα σενάρια δεν είναι εφικτή η σύγκριση των αποτελεσμάτων του αλγορίθμου μέσω της απεικόνισης τους όπως έγινε παραπάνω, καθώς το πλήθος των διαγραμμάτων το απαγορεύει. Για το λόγο αυτό, θα βασιστούμε σε στατιστικές μετρήσεις των αποτελεσμάτων. Για να έχουμε μια καλή προσέγγιση σχετικά με το βασικό μέτρο επίδοσης που είναι η συσχέτιση, επιλέξαμε να υπολογίσουμε την αθροιστική συνάρτηση κατανομής (cumulative distribution function -CDF) της συσχέτισης που επιτυγχάνεται στα διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης.

Στα σενάρια που θα ερευνήσουμε στη συνέχεια θεωρούμε τη χρήση προσαρμοστικών και μη διαγραμμάτων βάσης σε συνδυασμό με διαφορετικά σχήματα διαμόρφωσης. Πιο αναλυτικά, για κάθε συνδυασμό διαγραμμάτων βάσης και διαμόρφωσης θα υπολογίσουμε όλα τα διαμορφωμένα διαγράμματα βάσης που παράγονται από τον γενετικό αλγόριθμο. Κατόπιν, θα υπολογίσουμε την συνάρτηση CDF της συσχέτισης που επιτυγχάνεται. Τα σχήματα διαμόρφωσης τα οποία θα χρησιμοποιήσουμε είναι QPSK, 8-PSK και 16-QAM.

Στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις των συναρτήσεων CDF οι οποίες αντιστοιχούν στα σενάρια όπου χρησιμοποιούμε μη προσαρμοστικά διαγράμματα βάσης σε συνδυασμό με τα διαθέσιμα σχήματα διαμόρφωσης. Όπως είναι εμφανές οι μεσαίες τιμές της συσχέτισης που πετυχαίνει ο αλγόριθμος (τιμή συσχέτισης $\leq 50\%$) για όλες τις διαμορφώσεις είναι πολύ υψηλές (≈ 0.995) όπως και στο πρώτο σενάριο που εξετάσαμε, κάτι το οποίο σημαίνει ότι η επίδοση του αλγορίθμου παραμένει σταθερή ανεξάρτητα του σχήματος

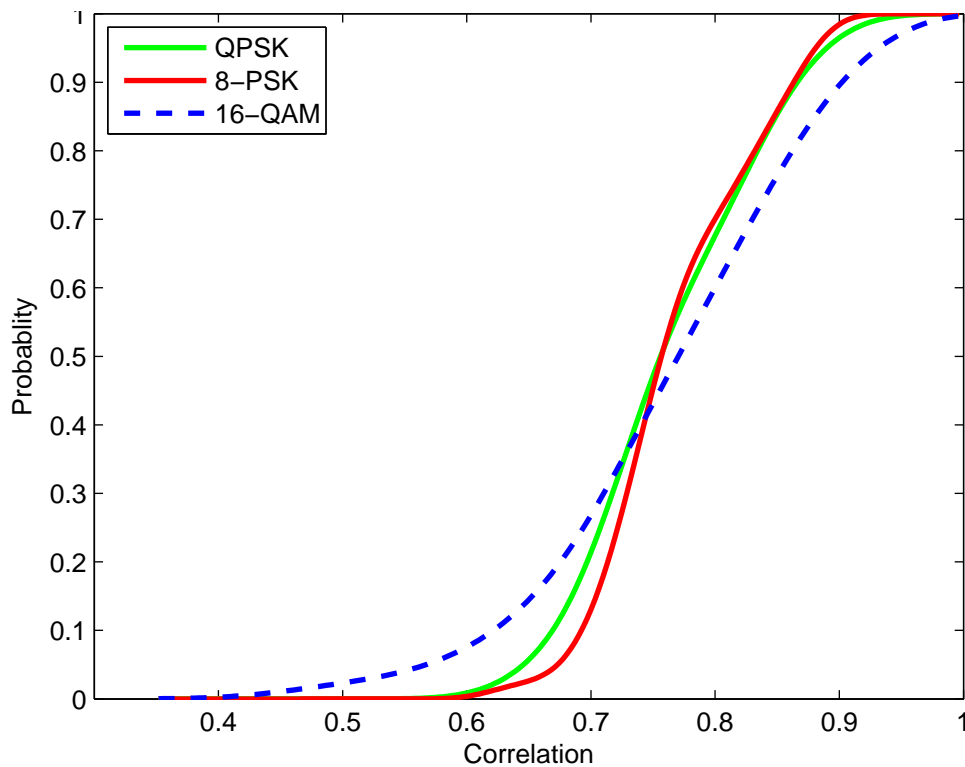


Σχήμα 5.3: Συναρτήσεις CDF της συσχέτισης με χρήση μη προσαρμοστικών διαγραμμάτων βάσης και διαφορετικών σχημάτων διαμόρφωσης

διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται. Η μόνη καμπύλη που διαφέρει ελάχιστα είναι αυτή της 16-QAM η οποία είναι και η διαμόρφωση μεγαλύτερης τάξης η οποία παράγει τα πιο σύνθετα διαμορφωμένα διαγράμματα.

Στο Σχήμα 5.4, παρουσιάζονται οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις της συσχέτισης όταν όμως χρησιμοποιούνται προσαρμοστικά διαγράμματα βάσης στο σύστημα. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι και σε αυτή την περίπτωση οι μεσαίες τιμές της συσχέτισης είναι αρκετά κοντά με τις τιμές που προέκυψαν στο δεύτερο σενάριο. Αυτό μας επιβεβαιώνει την σταθερή επίδοση του αλγορίθμου σε διαφορετικά σχήματα διαμόρφωσης.

Σε αυτό το σημείο, ολοκληρώνεται η μελέτη των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου. Ένα βασικό συμπέρασμα που προκύπτει από την παραπάνω μελέτη είναι ότι ο συγκεκριμένος αλγόριθμος αποτελεί ένα πολύ καλό εργαλείο που υπολογίζει προσεγγιστικά τα διαγράμματα ακτινοβολίας που μπορεί να παράγει μια κεραία ESPAR. Το γεγονός αυτό, μας επιτρέπει να βασιστούμε στα αποτελέσματα του αλγορίθμου ώστε να εξάγουμε πληροφορία σχετικά με την επίδοση που επιτυγχάνει η τεχνική υπολογισμού προσαρμοστικών προς το κανάλι διαγραμμάτων, η οποία αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας.

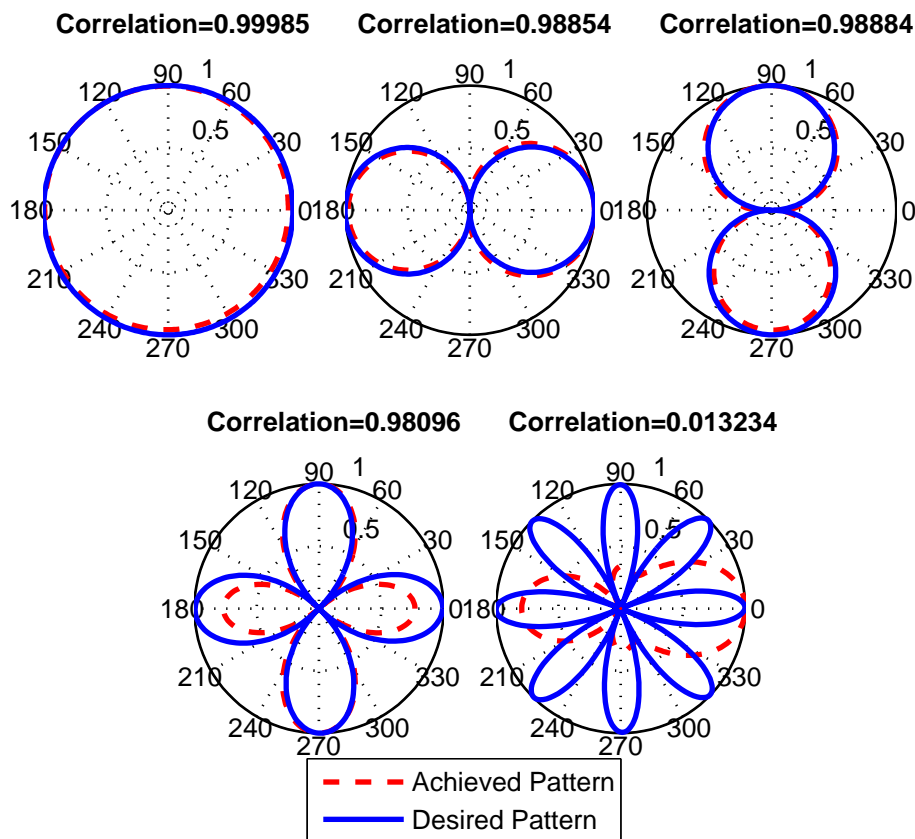


Σχήμα 5.4: Συναρτήσεις CDF της συσχέτισης με χρήση προσαρμοστικών διαγραμμάτων βάσης και διαφορετικών σχημάτων διαμόρφωσης

5.2 Επίδοση Τεχνικής Υπολογισμού Προσαρμοστικών Διαγραμμάτων Βάσης

Η τεχνική υπολογισμού διαγραμμάτων βάσης που αναπτύχθηκε λαμβάνει υπόψη την τρέχουσα κατάσταση του καναλιού και έχει σαν στόχο να βελτιώσει την επίδοση ενός συστήματος BS-MIMO το οποίο χρησιμοποιεί διαγράμματα βάσης ανεξάρτητα του καναλιού. Σύμφωνα με την αρχική σύγκριση των αποτελεσμάτων των δυο τεχνικών, που πραγματοποιήθηκε στην ενότητα 3.4, προέκυψε ότι τόσο το πλήθος αλλά και η μορφή των διαγραμμάτων που παράγουν οι δύο τεχνικές είναι διαφορετικά. Και αυτό γιατί η πρώτη τεχνική λαμβάνει υπόψη της την επίδραση του καναλιού η οποία επηρεάζει τους διαθέσιμους βαθμούς ελευθερίας αλλά και το σχήμα των διαγραμμάτων βάσης. Ακόμη προέκυψε ότι η χρήση προσαρμοστικών διαγραμμάτων βάσης βελτιώνει αισθητά την επίδοση του συστήματος. Παρόλα αυτά, τα παραπάνω έχουν προκύψει από τα θεωρητικά διαγράμματα βάσης που παράγουν οι δυο τεχνικές και έτσι δεν μπορούν να θεωρηθούν σαν επαρκώς τεκμηριωμένα αποτελέσματα.

Για το λόγο αυτό, σε αυτή την ενότητα θα συγκρίνουμε και πάλι την επίδοση των δύο τεχνικών, αυτή τη φορά όμως λαμβάνοντας υπόψη τα αντίστοιχα εφικτά διαγράμματα βάσης που προκύπτουν από τον γενετικό αλγόριθμο. Για να γίνει η σύγκριση αυτή, θα πρέπει αρχικά να υπολογιστούν τα διαγράμματα βάσης τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για



Σχήμα 5.5: Επιθυμητά και παραγόμενα διαγράμματα ακτινοβολίας που προέκυψαν από την τεχνική Gram-Schmidt

την αποτίμηση της επίδοσης του συστήματος. Τα διαγράμματα βάσης που είναι ανεξάρτητα του καναλιού (αρχικά διαγράμματα βάσης) παραμένουν τα ίδια με αυτά που ορίστηκαν στην υποενότητα 3.2.2, αφού και σε αυτή τη περίπτωση θεωρούμε ότι γίνεται χρήση της κεραίας αναφοράς. Τα θεωρητικά και τα εφικτά διαγράμματα βάσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.5 ενώ οι αντίστοιχες τιμές για τα βάρη των στοιχείων της κεραίας που υπολόγισε ο γενετικός αλγόριθμος παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3. Τα αντίστοιχα προσαρμοστικά διαγράμματα βάσης, που προκύπτουν και πάλι χρησιμοποιώντας δείγματα καναλιού που ακολουθούν το μοντέλο WINNER B2, απεικονίζονται στα σχήματα 5.6 και 5.7 ενώ τα βάρη των στοιχείων της κεραίας του πομπού και του δέκτη παρουσιάζονται αντίστοιχα στους πίνακες 5.4 και 5.5.

Χρησιμοποιώντας τα διαγράμματα βάσης που παρουσιάζονται παραπάνω, υπολογίσαμε την πρακτική επίδοση ενός συστήματος BS-MIMO το οποίο χρησιμοποιεί προσαρμοστικά και μη διαγράμματα βάσης. Όπως και στην ενότητα 3.4, ως μέτρο επίδοσης του συστήματος χρησιμοποιείται η εργοδική χωρητικότητα. Έτσι, στο Σχήμα 5.8 παρουσιάζεται η εργοδική χωρητικότητα που επιτυγχάνεται όταν χρησιμοποιούνται τα θεωρητικά διαγράμματα βάσης που υπολογίζονται από τις δύο τεχνικές αλλά και η χωρητικότητα που επιτυγχάνεται όταν εφαρμόζονται τα αντίστοιχα εφικτά διαγράμματα βάσης που υπολογίστηκαν από τον γενετικό

Πίνακας 5.3: Βάρη (Ohm) κεραιστοιχείων για τα αρχικά διαγράμματα βάσης

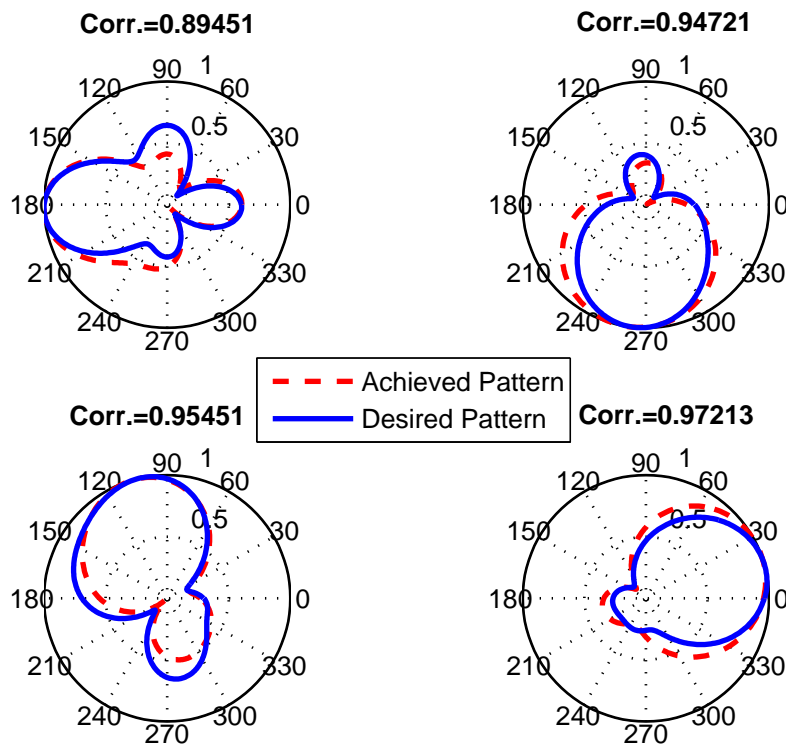
Στοιχείο	Διάγρ. 1	Διάγρ. 2	Διάγρ. 3	Διάγρ. 4	Διάγρ. 5
1-Ενεργό	$50 + 0i$	$50 + 0i$	$50 + 0i$	$50 + 0i$	$50 + 0i$
2	$0 + 162.53i$	$0 + 300i$	$0 + 6i$	$0 - 106.8i$	$0 - 0.146i$
3	$0 + 147.8i$	$0 + 12.16i$	$0 + 151i$	$0 - 9.23i$	$0 + 23i$
4	$0 + 147.8i$	$0 + 13.3i$	$0 - 9.52i$	$0 - 9.23i$	$0 + 23i$
5	$0 + 178$	$0 - 18.9i$	$0 + 5.13i$	$0 - 106.8i$	$0 + 2.19i$

Πίνακας 5.4: Βάρη (Ohm) των προσαρμοστικών διαγραμμάτων του πομπού

Στοιχείο	Διάγραμμα 1	Διάγραμμα 2	Διάγραμμα 3	Διάγραμμα 4
1-Ενεργό	$50 + 0i$	$50 + 0i$	$50 + 0i$	$50 + 0i$
2	$0 - 7.18i$	$0 + 0.146i$	$0 + 75.18i$	$0 - 10.11i$
3	$0 - 268.05i$	$0 - 46.75i$	$0 + 0.146i$	$0 + 30.92i$
4	$0 - 223.79i$	$0 - 82.51i$	$0 - 7.474i$	$0 + 7.181i$
5	$0 - 11.87i$	$0 + 19.78i$	$0 + 30.04i$	$0 + 4.836i$

Πίνακας 5.5: Βάρη (Ohm) των προσαρμοστικών διαγραμμάτων του δέκτη

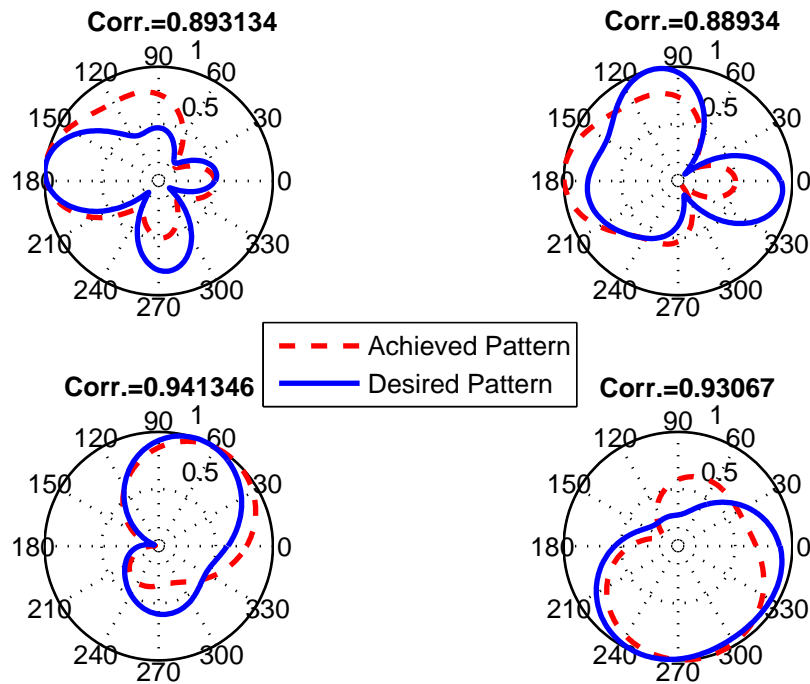
Στοιχείο	Διάγραμμα 1	Διάγραμμα 2	Διάγραμμα 3	Διάγραμμα 4
1-Ενεργό	$50 + 0i$	$50 + 0i$	$50 + 0i$	$50 + 0i$
2	$0 + 281.53i$	$0 - 12.75i$	$0 - 43.23i$	$0 - 62.57i$
3	$0 - 7.474i$	$0 - 45.28i$	$0 - 65.80i$	$0 - 40.59i$
4	$0 + 0.146i$	$0 - 49.09i$	$0 - 38.54i$	$0 - 93.64i$
5	$0 - 300i$	$0 + 0.146i$	$0 - 75.18i$	$0 - 30.33i$



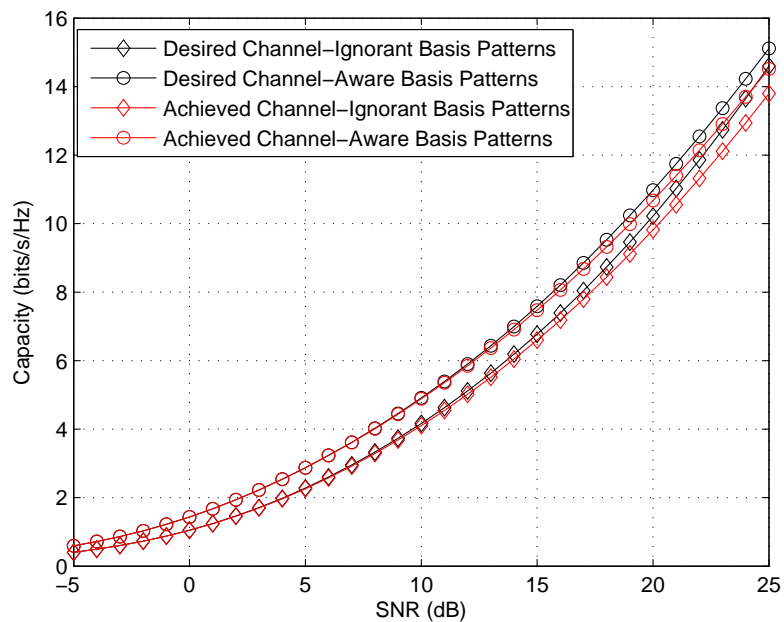
Σχήμα 5.6: Επιθυμητά και παραγόμενα διαγράμματα ακτινοβολίας του πομπού προσαρμοστικά προς το κανάλι

αλγόριθμο.

Όπως είναι εμφανές, η χρήση των εφικτών προσαρμοστικών διαγραμμάτων (achieved channel-aware basis patterns) επιφέρει αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος αντίστοιχη εκείνης που προκύπτει από τα θεωρητικά αποτελέσματα. Πιο αναλυτικά, με την χρήση των προσαρμοστικών διαγραμμάτων επιτυγχάνεται ένα κέρδος της τάξης του 1.5 με 2.5dB στην εργοδική χωρητικότητα, με το μέγιστο κέρδος να επιτυγχάνεται σε χαμηλές τιμές του SNR. Αυτό που αξίζει να παρατηρηθεί είναι ότι μέχρι τα 13dB SNR οι θεωρητικές και οι πρακτικές καμπύλες ταυτίζονται σχεδόν απόλυτα. Από εκεί και πέρα οι πρακτικές καμπύλες παρουσιάζουν μία μείωση, σε σχέση με τις θεωρητικές, η οποία είναι απόρροια της απόκλισης που υπάρχει μεταξύ των πρακτικών και των θεωρητικών διαγραμμάτων βάσης. Η τελευταία σημαντική παρατήρηση, έγκειται στο γεγονός ότι παρόλο που τα προσαρμοστικά διαγράμματα βάσης έχουν μεγαλύτερη απόκλιση από τα αντίστοιχα μη προσαρμοστικά, όπως είναι εμφανές από τα σχήματα 5.1, 5.6 και 5.7, η επίδοση που επιτυγχάνεται από τα πρώτα παραμένει μεγαλύτερη από την αντίστοιχη επίδοση που επιτυγχάνουν τα δεύτερα. Με άλλα λόγια, η απώλεια που επέρχεται λόγω της απόκλισης των επιθυμητών και των πρακτικών διαγραμμάτων, είναι μικρότερη από τα κέρδος που επιτυγχάνεται με την χρήση προσαρμοστικών διαγραμμάτων βάσης.



Σχήμα 5.7: Επιθυμητά και παραγόμενα διαγράμματα ακτινοβολίας του δέκτη προσαρμοστικά προς το κανάλι



Σχήμα 5.8: Εργοδική χωρητικότητα που επιτυγχάνεται με τα θεωρητικά και πρακτικά διαγράμματα βάσης

Πανεπιστήμιο Πειραιώς

Κεφάλαιο 6

Επίλογος

6.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία θεωρεί μια εναλλακτική τεχνική MIMO, η οποία βασίζεται στην χρήση παρασιτικών κεραιών. Αυτό σημαίνει ότι σε αντίθεση με τα συμβατικά συστήματα MIMO, η τεχνική αυτή δεν χρησιμοποιεί πολλαπλά ενεργά κεραιοστοιχεία αλλά στοιχειοκεραίες οι οποίες διαθέτουν μόνο ένα ενεργό και πολλαπλά παρασιτικά κεραιοστοιχεία. Λόγω του ότι η λειτουργία της βασίζεται στην ικανότητα που έχουν οι παρασιτικές κεραιές να διαμορφώνουν το διάγραμμα ακτινοβολίας τους, η τεχνική αυτή ονομάζεται Beamspace MIMO ή BS-MIMO. Ακόμη στην εργασία αυτή θεωρήσαμε τη χρήση κεραιών ESPAR στους πομποδέκτες του συστήματος. Επιπλέον, λόγω της ύπαρξης μόνο ενός ενεργού κεραιοστοιχείου, η χωρική διασπορά των σημάτων εκπομπής και η χωρική δειγματοληψία των λαμβανόμενων σημάτων είναι αδύνατη. Έτσι, η λειτουργία των συστημάτων αυτών δεν γίνεται να περιγραφεί στο χωρικό πεδίο όπως η αντίστοιχη των συμβατικών συστημάτων MIMO. Αντίθετα η λειτουργία τους περιγράφεται στο πεδίο των διαγραμμάτων ακτινοβολίας (beamspace domain - BS domain).

Στην εργασία αυτή, παρουσιάσαμε μια ισοδύναμη αναπαράσταση στο πεδίο BS, την αρχή λειτουργίας των συστημάτων BS-MIMO και την αντίστοιχη των συμβατικών συστημάτων MIMO. Ακόμη παρουσιάστηκε η λειτουργία του πομπού και του δέκτη ενός συστήματος BS-MIMO. Από την περιγραφή της λειτουργίας του πομπού προκύπτει ότι η αποστολή των δεδομένων σε ένα τέτοιο σύστημα επιτυγχάνεται μέσω της πολυπλεξίας στο πεδίο BS, καθώς κάθε εκπεμπόμενο σύμβολο αντιστοιχίζεται σε ένα ορθογώνιο διάγραμμα ακτινοβολίας το οποίο καλείται διάγραμμα βάσης. Στην συνέχεια παρουσιάστηκαν δύο εναλλακτικές τεχνικές υπολογισμού αυτών των διαγραμμάτων βάσης. Η πρώτη, υπολογίζει τα διαγράμματα βάσης αναλύοντας το πεδίο ακτινοβολίας της κεραιάς σε ορθογώνιες συνιστώσες. Παρόλα αυτά η συγκεκριμένη τεχνική δεν λαμβάνει υπόψη της την επίδραση του καναλιού. Η δεύτερη τεχνική, η οποία αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας, θεωρεί γνωστή την κατάσταση του καναλιού και υπολογίζει προσαρμοστικά διαγράμματα βάσης χρησιμοποιώντας

την μέθοδο SVD. Η σύγκριση των θεωρητικών αποτελεσμάτων των δυο τεχνικών έδειξε ότι η δεύτερη μέθοδος υπερτερεί της πρώτης σε όρους εργοδικής χωρητικότητας. Αυτό προκύπτει καθώς τα προσαρμοστικά διαγράμματα βάσης εκμεταλλεύονται με τον καλύτερο τρόπο τους διαθέσιμους βαθμούς ελευθερίας και τα χαρακτηριστικά του καναλιού.

Για την επαρκή τεκμηρίωση των παραπάνω αποτελεσμάτων χρησιμοποιήσαμε πέρα από τα θεωρητικά και τα πρακτικά διαγράμματα βάσης που προκύπτουν από τις παραπάνω τεχνικές. Για τον υπολογισμό τους αναπτύξαμε ένα γενετικό αλγόριθμο ο οποίος υπολογίζει τα διαγράμματα ακτινοβολίας που μπορεί να παράξει μια κεραία ESPAR. Πιο αναλυτικά ο συγκεκριμένος αλγόριθμος δέχεται σαν είσοδο το επιθυμητό διάγραμμα ακτινοβολίας και παράγει το πλησιέστερο εφικτό διάγραμμα που μπορεί να εκπέμψει η κεραία. Η απόδοση του συγκεκριμένου αλγορίθμου εκτιμήθηκε χρησιμοποιώντας καταγράφοντας την συσχέτιση που πετυχαίνει για διαφορετικά σενάρια εφαρμογής. Αυτό που διαπιστώθηκε είναι ότι τα προσαρμοστικά διαγράμματα βάσης είναι δυσκολότερο να παραχθούν από την κεραία σε σχέση με τα μη προσαρμοστικά διαγράμματα της πρώτης τεχνικής. Επίσης, έγινε η διαπίστωση ότι η απόδοση του αλγορίθμου παραμένει σταθερή, κάτι το οποίο μας έδωσε την δυνατότητα να θεωρήσουμε τον συγκεκριμένο αλγόριθμο φερέγγυο εργαλείο για την εκτίμηση της πρακτικής απόδοσης της τεχνικής που αναπτύξαμε.

Στην συνέχεια, εφαρμόσαμε στον γενετικό αλγόριθμο τα αποτελέσματα των δύο τεχνικών υπολογισμού διαγραμμάτων βάσης. Με δεδομένα τα εφικτά διαγράμματα υπολογίσαμε την απόδοση των δύο τεχνικών και τη συγκρίναμε με την αντίστοιχη θεωρητική. Αυτό που προέκυψε, είναι ότι η τεχνική υπολογισμού προσαρμοστικών διαγραμμάτων βάσης υπερτερεί και πάλι, καθώς η πρακτική απόδοση και των δύο τεχνικών συμβάδιζε σχεδόν απόλυτα με την αντίστοιχη θεωρητική απόδοση. Το σημαντικότερο συμπέρασμα που προέκυψε από την παραπάνω μελέτη, είναι ότι παρόλο που η συσχέτιση των θεωρητικών και των πρακτικών προσαρμοστικών διαγραμμάτων βάσης ήταν μικρότερη της αντίστοιχης των μη προσαρμοστικών διαγραμμάτων, η απόκλιση την απόδοσης και των δύο τεχνικών ήταν της ίδιας τάξης. Με άλλα λόγια, η απώλεια που επέρχεται λόγω της απόκλισης των επιθυμητών και των πρακτικών διαγραμμάτων, είναι μικρότερη από τα κέρδος που επιτυγχάνεται με την χρήση προσαρμοστικών διαγραμμάτων βάσης.

6.2 Αντικείμενα Μελλοντικής Έρευνας

Λόγω του ότι τα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα έχουν θέσει ως βασική τους προϋπόθεση την χρήση συστημάτων MIMO και επειδή η υλοποίηση των συστημάτων αυτών σε κινητά τερματικά παρουσιάζει κάποια σοβαρά ζητήματα, το ερευνητικό πεδίο της μελέτης εναλλακτικών τεχνικών είναι πρόσφορο. Ιδιαίτερα η μελέτη των συστημάτων BS-MIMO, τα οποία αποτελούν μια πολύ καλή εναλλακτική υλοποίηση, αποτελεί ένα ερευνητικό αντικείμενο το οποίο παρουσιάζει αυξημένο ενδιαφέρον. Παρόλα αυτά, η μελέτη του συγκεκριμένου

αντικειμένου βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο κάτι το οποίο αφήνει περιθώρια έρευνας σε αρκετά επίπεδα.

Το ερευνητικό αντικείμενο της παρούσας εργασίας βασίστηκε κυρίως στον υπολογισμό των διαθέσιμων βαθμών ελευθερίας των συστημάτων αυτών και στον υπολογισμό της σύνθετης αντίστασης των κεραιών ESPAR με σκοπό την επίτευξη συγκεκριμένων διαγραμμάτων ακτινοβολίας. Πάνω στο πρώτο σκέλος, μελλοντικές ερευνητικές δραστηριότητες θα μπορούσαν να ασχοληθούν με πιο πρακτικά ζητήματα εφαρμογής της τεχνικής που παρουσιάσαμε. Για παράδειγμα, ένα τέτοιο ζήτημα είναι η μελέτη της ανάδρασης που απαιτείται ώστε να ενημερωθεί ο πομπός του συστήματος για τα προσαρμοστικά διαγράμματα βάσης που θα πρέπει να εφαρμόσει, δεδομένου του ότι τα διαγράμματα αυτά υπολογίζονται στο δέκτη του συστήματος. Ακόμη ένα πρακτικό ζήτημα υλοποίησης, είναι ο υπολογισμός των διαμορφωμένων διαγραμμάτων ακτινοβολίας που θα πρέπει να εφαρμοστούν στο σύστημα σε κάθε περίοδο συμβόλου. Αυτό μέχρι στιγμής θεωρείται ότι γίνεται on-line, όμως κάτι τέτοιο ίσως να μην είναι εφικτό. Έτσι θα πρέπει να γίνει μια μελέτη που να αφορά ενδεχόμενες λύσεις, μία από τις οποίες μπορεί να είναι οι πίνακες αναφοράς (look-up tables). Τέλος, όσον αφορά το δεύτερο σκέλος της παρούσας εργασίας, μελλοντικές ερευνητικές δραστηριότητες θα μπορούσαν να ασχοληθούν με την προσομοίωση κεραιών ESPAR οι οποίες να διαθέτουν διακριτικότητα και στο επίπεδο της ανύψωσης (elevation plane) και αντίστοιχα τον υπολογισμό τρισδιάστατων (3D) διαγραμμάτων.

Πανεπιστήμιο Πειραιώς

Βιβλιογραφία

- [1] ITU-R, “Imt-advanced,” *website: www.itu.int/ITU-R/go/rsg5-imt-advanced*, june 2008.
- [2] O. Oestges and B. Clerckx, *MIMO Wireless Communications, from Real-World to Space-Time Code Design*. Elsevier, First Edition, 2007.
- [3] H. Holma and A. Toskala, *LTE for UMTS: Evolution to LTE-Advanced*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK, 2011.
- [4] I. C. Society, the IEEE Microwave Theory, and T. Society, “Ieee std 802.16m, ieee standard for local and metropolitan area networks, part 16: Air interface for broadband wireless access systems, amendment 3: Advanced air interface,” IEEE, Tech. Rep., 2011.
- [5] J. G. Andrews, A. Ghosh, and R. Muhamed, *Fundamentals of WiMAX: Understanding Broadband Wireless Networking*. Prentice-Hall, 2007.
- [6] H. Bolcskei, D. Gesbert, C. Papadias, and van der Veen A.-J., *Space-Time Wireless Systems, From Array Processing to MIMO Communications*. Cambridge University Press, New York, 2006.
- [7] B. Furht and S. A. Ahson, *3GPP LTE Handbook: 3GPP LTE Radio and Cellular Technology*. CRC Press, 2009.
- [8] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design 3rd Edition*. John Willey & Sons, 2005.
- [9] A. Paulraj, R. Nabar, and D. Gore, *Introduction to Space-Time Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2003.
- [10] I. Berenguer, X. Wang, and V. Krishnamurthy, “Adaptive mimo antenna selection via discrete stochastic optimization,” *Signal Processing, IEEE Transactions on*, vol. 53, no. 11, pp. 4315 – 4329, nov. 2005.
- [11] A. Dua, K. Medepalli, and A. Paulraj, “Receive antenna selection in mimo systems using convex optimization,” *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 5, no. 9, pp. 2353–2357, september 2006.
- [12] P. Karamalis, N. Skentos, and A. Kanatas, “Adaptive antenna subarray formation for mimo systems,” *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 5, no. 11, pp. 2977–2982, november 2006.

- [13] P. Theofilakos and A. Kanatas, “Capacity performance of adaptive receive antenna subarray formation for mimo systems,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2007, 2007.
- [14] —, “Maximising capacity of mimo systems with receive antenna subarray formation,” *Electronics Letters*, vol. 44, no. 20, pp. 1204–1205, 25 2008.
- [15] H. T. Hui, “A practical approach to compensate for the mutual coupling effect in an adaptive dipole array,” *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 52, no. 5, pp. 1262 – 1269, may 2004.
- [16] J. Wallace and M. Jensen, “Mutual coupling in mimo wireless systems: a rigorous network theory analysis,” *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 3, no. 4, pp. 1317 – 1325, july 2004.
- [17] J. Villanen, P. Suvikunnas, C. Icheln, J. Ollikainen, and P. Vainikainen, “Performance analysis and design aspects of mobile-terminal multiantenna configurations,” *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 57, no. 3, pp. 1664–1674, may 2008.
- [18] V. Barousis, A. Kanatas, and A. Kalis, “Beamspace-domain analysis of single-rf front-end mimo systems,” *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 60, no. 3, pp. 1195–1199, march 2011.
- [19] V. Barousis and A. Kanatas, “Aerial degrees of freedom of parasitic arrays for single rf front-end mimo transceivers,” *Progress In Electromagnetics Research B*, vol. 35, pp. 287–306, 2011.
- [20] A. Sayeed, “Deconstructing multiantenna fading channels,” *Signal Processing, IEEE Transactions on*, vol. 50, no. 10, pp. 2563 – 2579, oct 2002.
- [21] D. Tse and P. Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communication*. Cambridge University Press, 2005.
- [22] A. Kalis, A. Kanatas, and C. Papadias, “A novel approach to mimo transmission using a single rf front end,” *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 26, no. 6, pp. 972–980, august 2008.
- [23] A. Kalis, A. Kanatas, M. Carras, and A. Constantinides, “On the performance of mimo systems in the wavevector domain,” in *IST Mobile & Wireless Comm Summit, Mykonos, Greece*, June 2006.
- [24] A. Kalis and C. Papadias, “An espar antenna for beamspace-mimo systems using psk modulation schemes,” in *Communications, 2007. ICC '07. IEEE International Conference on*, june 2007, pp. 5348 –5353.
- [25] J. Liberti and T. Rappaport, “A geometrically based model for line-of-sight multipath radio channels,” in *Vehicular Technology Conference, 1996. 'Mobile Technology for the Human Race'.*, *IEEE 46th*, vol. 2, apr-1 may 1996, pp. 844 –848 vol.2.

-
- [26] O. Alrabadi, A. Kalis, C. Papadias, and R. Prasad, “Aerial modulation for high order psk transmission schemes,” in *Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace Electronic Systems Technology, 2009. Wireless VITAE 2009. 1st International Conference on*, may 2009, pp. 823–826.
- [27] J. G. Proakis, *Digital Communications, Fourth Edition*. McGraw-Hill international edition, 2000.
- [28] V. Barousis, A. Kanatas, A. Kalis, and C. Papadias, “A stochastic beamforming algorithm for espar antennas,” *Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE*, vol. 7, pp. 745–748, 2008.
- [29] L. Hentild, P. Kyfsti, M. Kdske, M. Narandzic, and M. Alatosava, “Matlab implementation of the winner phase ii channel model ver1.1.” [Online]. Available: https://www.ist-winner.org/phase_2_model.htm
- [30] C. Sun, A. Hirata, T. Ohira, and N. Karmakar, “Fast beamforming of electronically steerable parasitic array radiator antennas: theory and experiment,” *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 52, no. 7, pp. 1819–1832, july 2004.
- [31] K. A. De Jong, “An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems,” *Doctoral dissertation, University of Michigan*, 1975.
- [32] A. E. Eiben and J. E. Smith, *Introduction to Evolutionary Computing*. Springer, Natural Computing Series 1st edition, 2003.
- [33] D. E. Goldberg and K. Deb, “A comparative analysis of selection schemes used in genetic algorithms,” *Foundations of Genetic Algorithms, Morgan Kaufmann*, pp. 69–93, 1991.
- [34] D. Fogel, “An introduction to simulated evolutionary optimization,” *Neural Networks, IEEE Transactions on*, vol. 5, no. 1, pp. 3–14, jan 1994.