



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων
ΠΜΣ: Ψηφιακές Επικοινωνίες & Δίκτυα

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

**Ανάπτυξη Γενετικού Αλγορίθμου
για Παρασιτικές Στοιχειοκεραίες
Πολλαπλών Ενεργών & Παρασιτικών Στοιχείων**

Επιμέλεια

ΣΤΑΥΡΟΥΛΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

Επιβλέπων: Καθηγητής Αθανάσιος Κανάτας

Πειραιάς
Ιούλιος 2013

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

Ευχαριστίες

Για την περάτωση της διπλωματικής μου εργασίας, και πέραν της προσωπικής προσπάθειας που κατεβλήθη καθ' όλη τη διάρκεια της ακόλουθης μελέτης, βασικό ρόλο στη διαμόρφωση της τελικής εργασίας διαδραμάτισαν διάφοροι συνεργάτες, οι οποίοι με την προσφορά και τη βοήθειά τους διευκόλυναν και υποστήριξαν σημαντικά το έργο μου.

Αρχικά, αναγνωρίζοντας την πολύτιμη συμβολή του για τη διεκπεραίωση αυτής της εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Αθανάσιο Κανάτα για την υποστήριξη, τη συμπαράσταση, το χρόνο και την προσωπική γνώση που μου προσέφερε για την κατανόηση του αντικειμένου της διπλωματικής εργασίας και το ευχάριστο κλίμα συνεργασίας κάτω από το οποίο αυτή πραγματοποιήθηκε.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη διδακτορική φοιτήτρια κ. Παρασκευή Δασκαλάκη, τόσο για την υποστήριξη σε ψυχολογικό και εργαστηριακό επίπεδο, όσο και για τις συμβουλές που μου προσέφερε στην αντιμετώπιση διαφόρων δυσκολιών και προβλημάτων που κλήθηκα να αντιμετωπίσω κατά την περάτωση της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους δικούς μου ανθρώπους, οικογένεια και φίλους που στάθηκαν αρωγοί και συμπαραστάτες στην προσπάθεια μου να ολοκληρώσω με επιτυχία τον συγκεκριμένο κύκλο σπουδών μου.

Περίληψη

Η χρήση πολλαπλών κεραιών, τόσο σε πομπό όσο και σε δέκτη (MIMO), λόγω των σημαντικών κερδών που προσφέρουν, έχουν αναγνωριστεί σαν μια βέλτιστη λύση στο σχεδιασμό συστημάτων ασύρματων δικτύων. Όμως, με τη χρήση MIMO στα ασύρματα συστήματα αυξάνεται η απαίτηση για χώρο και ενέργεια καθώς και σε πολυπλοκότητα.

Ως λύση των παραπάνω προβλημάτων υλοποιήθηκε η τεχνική beamspace MIMO και προταθήκαν οι παρασιτικές κεραίες ESPAR (Electrically Steerable Parasitic Array Radiator). Η παρασιτική κεραία ESPAR είναι μονής αλυσίδας RF τροφοδοσίας στοιχειοκεραία, η οποία αποτελείται από ένα ενεργό στοιχείο και πολλαπλά παρασιτικά στοιχεία τα οποία τερματίζουν είτε με ένα κύκλωμα το οποίο διαθέτει διακόπτη είτε από μεταβλητές αντιδράσεις.

Οι παρασιτικές κεραίες μπορούν να μειώσουν δραστικά τις αλυσίδες RF που εισάγουν τα ενεργά στοιχεία και έχουν εξαιρετική ικανότητα καθοδήγησης ακτίνας και μηδενισμού των παρεμβολών. Από την άλλη πλευρά, για να καταφέρουμε 360 μοιρών αζιμουθιακό μηδενισμό των παρεμβολών και διαμόρφωση διαγράμματος ακτινοβολίας χρειαζόμαστε να μεγαλώσουμε τον αριθμό των παρασιτικών στοιχείων. Με την αύξηση, όμως, των στοιχείων αυξάνεται η πολυπλοκότητα και η απαίτηση σε ενέργεια.

Για να μειωθεί ο αριθμός των στοιχείων αλλά και να διατηρηθεί η ικανότητα διαμόρφωσης διαγράμματος ακτινοβολίας και μηδενισμού στις παρασιτικές κεραίες προταθήκαν παρασιτικές κεραίες με πολλαπλά στοιχεία τροφοδοσίας. Μια τέτοια κεραία είναι η MuPAR (Multiport Parasitic Array Radiator). Μια στοιχειοκεραία MuPAR αποτελείται από κ-IFA στοιχειοκεραίες.

Σε μια στοιχειοκεραία IFA υπάρχουν δυο ακτινοβολητές-στοιχεία οι όποιοι είναι κάθετοι στο επίπεδο της γείωσης. Ο ένας ονομάζεται a και στην περίπτωση που είναι ενεργό το στοιχείο τερματίζεται με μια πηγή τροφοδοσίας και στην περίπτωση που αναφερόμαστε σε παρασιτικό στοιχείο τερματίζεται με μια μεταβλητή αντίδραση. Ο δεύτερος ακτινοβολητής ονομάζεται b και είναι βραχυκυκλωμένος.

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία επιχειρήσαμε να αναπτύξουμε ένα γενετικό αλγόριθμο που να μας παρέχει βέλτιστες τιμές για τα πλάτη και τις φάσεις των ενεργών στοιχείων και τις βέλτιστες τιμές των φορτίων των μεταβλητών αντιδράσεων των παρασιτικών στοιχείων της στοιχειοκεραίας MuPAR στοχεύοντας στην βέλτιστη διαμόρφωση του διαγράμματος ακτινοβολίας της κεραίας.

Abstract

The usage of multiple antennas, both at transmitters and receivers (MIMO), has been identified as an optimal solution to the system design of wireless networks, mostly due to their major benefits and advantages. In contrast, the usage of MIMO in wireless systems can also increase the requirements for space, power and complexity. Therefore, as a solution to the above problems, the beamspace MIMO technique and the parasitic antennas ESPAR (Electrically Steerable Parasitic Array Radiator) were implemented.

The parasitic antenna array ESPAR, is a single-feed-port array antenna, composed both of one active element and multiple parasitic elements, terminated by switched lumped circuits or variable reactors. The parasitic array can drastically decrease the number of expensive radio-frequency (RF) chains integrated with active elements. It has been proven that the number of parasitic elements must be increased for realizing full 360 azimuthal beam and null forming.

On the other hand, whether the number of antenna elements increases the complexity and the demand for power will be increased too. Therefore, parasitic array antennas with multiple feed ports have been proposed in order to decrease the number of antenna elements by keeping the beam and null forming capability. This type of antenna is called MuPAR (Multiport Parasitic Array Radiator).

A MuPAR antenna consists of K-IFA antennas in which a single IFA antenna can be regarded as two infinitesimal radiators, which are vertical to the ground plane. The first radiator is the element denoted by “a”, which is connected to a feed circuit in case of the active element or of a parasitic element when connected to a variable reactor. The second radiator is the element denoted by “b”, which is the short pin of the IFA.

The main purpose of our thesis was to develop a genetic algorithm that can provide optimized values for our parameters such as the amplitude and the phase of active elements and the loads of variable reactances in case of parasitic elements of a MuPAR antenna aiming in an optimized formulation of MuPAR antenna radiation pattern.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Περίληψη	4
Abstract.....	5
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στα MIMO συστήματα.....	12
1.1 Εισαγωγή.....	12
1.3 Μοντέλα συστημάτων πολλαπλών κεραιών	16
1.4 Κέρδος MIMO συστημάτων	17
1.4.1 Κέρδος συστοιχίας.....	17
1.4.2 Κέρδος χωρικού διαφορισμού	17
1.4.3 Κέρδος χωρικής πολυπλεξίας.....	18
1.4.4 Μείωση παρεμβολών	18
1.5 Μειονεκτήματα MIMO.....	19
1.6 Χωρητικότητα MIMO συστημάτων	20
1.7 Δομή της Διπλωματικής.....	22
Κεφάλαιο 2: Beamspace-MIMO και Παρασιτικές Κεραίες.....	24
2.1 Beamspace-MIMO Μοντέλο	24
2.2 Παρασιτικές Κεραίες	26
2.2.1 ESPAR.....	27
2.2.1.1 Εισαγωγή.....	27
2.2.1.2 Δομή ESPAR κεραίας.....	28
2.2.1.3 Σημασία της αντίδρασης(Reactance).....	29
2.2.1.4 Ακτινοβολούμενοι Βαθμοί Ελευθερίας Παρασιτικών Κεραίων(A.D.O.F.).....	32
2.2.1.5 Ορθοκανονικοποίηση Gram-schmidt και εφαρμογή του σε κεραίες ESPAR	33
2.2.1.6 Προσαρμοστικά Διαγράμματα Βάσης	38
2.2.1.7 Λειτουργία Πομπού και Δέκτη ESPAR Κεραίας	39

Κεφάλαιο 3: Γενετικοί Αλγόριθμοι.....	42
3.1 Εισαγωγή.....	42
3.2 Επισκόπηση Γενετικών Αλγορίθμων.....	42
3.2.1 Πλεονεκτήματα Γενετικών Αλγορίθμων	43
3.2.2 Θέματα κωδικοποίησης και επιλογής μεταβλητών	44
3.3 Συστατικά Στοιχεία Γενετικών Αλγορίθμων.....	46
3.3.1 Επιλογή	47
3.3.2 Διασταύρωση.....	51
3.3.3 Μετάλλαξη	53
3.3.4 Αντικατάσταση.....	54
3.3.5 Κριτήρια τερματισμού	55
Κεφάλαιο 4: Μελέτη Παρασιτικής Στοιχειοκεραίας MUPAR.....	56
4.1 Δομή λειτουργίας IFA και PIFA στοιχειοκεραίων.....	56
4.1.1 Στοιχειοκεραία IFA	58
4.1.2 Στοιχειοκεραία PIFA	61
4.2 Μελέτη παρασιτικής στοιχειοκεραίας MuPAR	63
4.2.1 Αρχή λειτουργίας MuPAR στοιχειοκεραίας	64
4.2.1.1 Περιγραφή δομής MuPAR στοιχειοκεραίας	65
4.2.1.2 Μοντελοποίηση λειτουργίας MuPAR στοιχειοκεραίας.....	66
4.2.2 Περιγραφή δομής Γενετικού αλγορίθμου	70
4.2.2.1 Ανάλυση Γενετικού αλγορίθμου	70
4.2.3 Προσομοίωση Γενετικού αλγορίθμου σε MuPAR στοιχειοκεραία.....	76
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα	89
5.1 Συμπεράσματα.....	89
5.2 Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη	90
References.....	92

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Κεφάλαιο 1

- 1.1 Απεικόνιση ενός MIMO συστήματος (σελ.14)
- 1.2 Πειραματικό 2x2 σύστημα MIMO (σελ. 15)
- 1.3 Μοντέλα πολλαπλών κεραιών (σελ.16)
- 1.4 Διάγραμμα συσχετισμού κερδών (σελ.19)

Κεφάλαιο 2

- 2.1 Κυκλική ESPAR με 4 παρασιτικά στοιχεία (σελ. 28)
- 2.2 Κύκλωμα varactor ενός παρασιτικού στοιχείου (σελ. 30)
- 2.3 3D patterns κυκλικής ESPAR στοιχειοκεραίας με 5 στοιχεία (σελ. 37)
- 2.4 BS-MIMO αρχιτεκτονική (σελ.41)

Κεφάλαιο 3

- 3.1 Διάγραμμα ροής γενετικού αλγορίθμου (σελ. 47)
- 3.2 Επιλογή ρουλέτας (σελ. 49)
- 3.3 Διασταύρωση ενός σημείου (σελ. 52)

Κεφάλαιο 4

- 4.1 Κεραίες PLA, IFA ,PIFA (σελ. 58)
- 4.2 Ισοδύναμο κύκλωμα στοιχειοκεραίας IFA (σελ. 60)
- 4.3 Στοιχειοκεραία PIFA (σελ. 61)
- 4.4 Στοιχειοκεραία MuPAR σε πλάγια όψη και σε κάτοψη (σελ.65)
- 4.5 Ενεργή και παρασιτική στοιχειοκεραία IFA (σελ. 66)
- 4.6 Διάγραμμα δομής αλγορίθμου (σελ. 71)
- 4.7 Χρωμόσωμα παραδείγματος αλγορίθμου (σελ. 73)
- 4.8 Στοιχειοκεραία MuPAR (σελ. 76)
- 4.9 Πλέγμα 15x15 (σελ. 77)
- 4.10 Επιθυμητό διάγραμμα ακτινοβολίας (σελ. 81)

- 4.11 Αποτελέσματα γραφικών παραστάσεων. (σελ. 81)
- 4.12 Αποτελέσματα μεταβλητών που επιθυμούμε από το matlab (σελ. 82)
- 4.13 Γραφική απεικόνιση επιθυμητού και παραγόμενου διαγράμματος ακτινοβολίας (σελ. 82)
- 4.14 Γραφική απεικόνιση επιθυμητού και παραγόμενου διαγράμματος ακτινοβολίας για hpsk (σελ. 83)
- 4.15 Γραφική απεικόνιση επιθυμητού και παραγόμενου διαγράμματος ακτινοβολίας για qpsk (σελ. 84)
- 4.16 Γραφική απεικόνιση επιθυμητού και παραγόμενου διαγράμματος ακτινοβολίας για 16-psk (σελ. 84)
- 4.17 Γραφική απεικόνιση επιθυμητού και παραγόμενου διαγράμματος ακτινοβολίας για 16-qam (σελ.85)
- 4.18 Γραφικές απεικονίσεις επιθυμητού και παραγόμενου διαγράμματος ακτινοβολίας για διαφορετικές διαμορφώσεις(σελ.88)

Κεφάλαιο 5

- 5.1 Δομή στοιχειοκεραίας MuPAR CST (σελ.91)
- 5.2 Πλάγια όψη MuPAR CST (σελ. 91)

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

- 4.1 Χαρακτηριστικά στοιχειοκεραίας (σελ. 76)
- 4.2 Πίνακας των αποστάσεων των στοιχείων μεταξύ τους (σελ. 78)
- 4.3 Χαρακτηριστικά γενετικού αλγορίθμου (σελ. 79)
- 4.4 Δεδομένα μεταβλητών (σελ. 79)
- 4.5 Χαρακτηριστικά στοιχεία αναζήτησης μεταβλητών (σελ. 80)
- 4.6 Πολλαπλές εκτελέσεις αλγορίθμου με διαφορετικούς πίνακες εμπέδησης (σελ. 86-87)

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στα MIMO συστήματα

1.1 Εισαγωγή

Τις τελευταίες 2 δεκαετίες, η εξέλιξη της τεχνολογίας των κινητών επικοινωνιών παρουσιάζει άνοδο γεωμετρικής προόδου, από την πρώτη γενιά (1G) αναλογικής μόνο φωνής επικοινωνία μετέβηκε σε δεύτερης γενιάς (2G) ψηφιακής φωνής επικοινωνία και σχετικά γρήγορα μετέβει στην τεχνολογία 3G για να φτάσει στην σημερινή τέταρτης γενιάς (4G) τεχνολογία. Οι 2G τεχνολογίες έγιναν γνώστες ανά το κόσμο συμπεριλαμβάνοντας το GSM (Global System for Mobile Communications) στην Ευρώπη, IS-136 στην Αμερική και PDC(Personal Digital Communications) στην Ιαπωνία. Η τρίτης γενιά τεχνολογία κινητών επικοινωνιών (3G) όχι μόνο δεν προσέφερε υπηρεσίες ψηφιακής φωνής αλλά επιπρόσθετα προσέφερε βίντεο τηλεφωνία, πρόσβαση στο διαδίκτυο και υπηρεσίες download βίντεο ή τραγουδιών. Η 4G τεχνολογία που βρισκόμαστε τώρα προσφέρει ακόμα καλύτερες ταχύτητες πρόσβασης στο διαδίκτυο αλλά και υψηλής ποιότητας βίντεο κατά απαίτηση και υπηρεσίες κατά απαίτηση ήχου και συγκεκριμένων εφαρμογών.

Ξεχωριστά από την τεχνολογία των κινητών επικοινωνιών, η τεχνολογία του ασύρματου δικτύου τοπικής πρόσβασης (WLAN) έκανε και αυτή με τη σειρά της την καινοτομία με την προσθήκη του WiFi. Το WiFi είναι ουσιαστικά ένα σύνολο προτύπων συμβατότητας για την WLAN τεχνολογία βασισμένα στις προδιαγραφές του 802.11. Το οποίο επιτρέπει την πρόσβαση στο διαδίκτυο κάποιου ασύρματου υπολογιστή, laptop, η έξυπνου κινητού μέσω ενός ασύρματου σημείου πρόσβασης με σχετικά υψηλή ταχύτητα. Εξέλιξη αυτής της τεχνολογίας είναι το WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) η οποία σχεδιάστηκε για τα μητροπολιτικά δίκτυα (MAN) βασισμένη στις προδιαγραφές του 802.16. Στοχεύει στην παροχή υψηλής ταχύτητας σύνδεση στο διαδίκτυο παρόλο των μεγάλων αποστάσεων που βρίσκονται οι χρήστες.

Και η τεχνολογία 4G αλλά και η τεχνολογία WiMAX απαιτούν υψηλή ταχύτητα δεδομένων αλλά και μεγάλη κάλυψη για να παρέχουν υψηλής ποιότητας υπηρεσίες σε όλους τους χρήστες. Για να το πετύχουν αυτό, η τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας έπρεπε να στραφεί στην εκμετάλλευση των ράδιο-καναλιών. Η επιστήμη των επικοινωνιών αναφέρει ότι η χωρητικότητα των καναλιών ή η

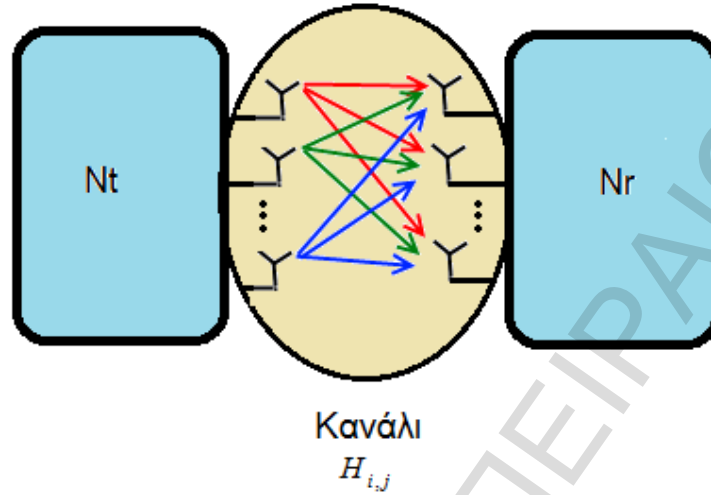
μετάδοση δεδομένων περιορίζεται από το εύρος ζώνης και την ισχύ μετάδοσης. Ένα γνωστό άνω όριο που περιορίζει την μέγιστη επιτρεπτή μετάδοση δεδομένων για ιδανικά ,συχνотικά περιορισμένα, λευκού θορύβου κανάλια (AWGN) είναι το κριτήριο του Shannon. Έχοντας επιτρεπτό εύρος ζώνης W , και σηματοθορυβικό λόγο SNR ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων είναι:

$$C = W \log_2(1 + SNR) \quad (1.1)$$

Από την εξίσωση 1.1 ο ρυθμός μετάδοσης μπορεί μόνο να αυξηθεί αυξάνοντας το εύρος ζώνης ή την ισχύ μετάδοσης. Όμως είναι πολύ κοστοβόρο να αυξήσουμε το φάσμα συχνοτήτων που χρησιμοποιείται. Επίσης δεν μπορούμε να αυξήσουμε μοναχά την ισχύ μετάδοσης χωρίς να αυξηθεί και το φαινόμενο των παρεμβολών.

Μόλις λίγα χρόνια πριν αυτά τα όρια ξεπεράστηκαν με την είσοδο της έννοιας της χωρικής πολυπλεξίας στις ασύρματες κεραίες επικοινωνίας. Με την τοποθέτηση διατάξεων στοιχείων κεραιών (στοιχειοκεραίες) τόσο στο δέκτη αλλά όσο και στο πομπό, η χωρητικότητα του καναλιού του συστήματος μπορεί να αυξηθεί γραμμικά ,σε ιδανικές συνθήκες, με τον αριθμό των κεραιών .Το σύστημα με πολλαπλές κεραίες και στα δυο άκρα ονομάζεται MIMO (multiple input multiple output) σύστημα. Για τη χωρητικότητα των καναλιών που υπόκεινται σε διάλεια πολλοπλών κεραιών και στα δυο άκρα (πομπό και δέκτη) αναφέρθηκε πρώτος ο Winters το 1987. Παρόλα αυτά οι δυνατότητες αυτών των συστημάτων εκτιμηθήκαν περίπου 10 χρόνια μετά όπου ξανά-ανακαλύφθηκαν από τον Foschini αλλά και από τον Telatar. Από τότε τα MIMO έχουν μπει υπό το μικροσκόπιο πολλών ερευνητών και μέχρι και σήμερα συνεχώς ανακαλύπτονται νέα πράγματα. Όπως για παράδειγμα, το 2001 είχαμε το πρώτο εμπορικό MIMO σύστημα από την Iospan Wireless Inc. Στη συνέχεια λόγω και της προτίμησης που είχε δεχτεί από τους ερευνητές ανακαλύφθηκαν βελτιωμένες τεχνικές για MIMO όπου αυτές οδήγησαν με την σειρά τους σε βελτιώσεις στην επιτυχημένη μετάδοση πληροφορίας, στην κάλυψη ενός δικτύου και στην χρήση του φάσματος συχνοτήτων. Πλέον μπορούμε να αναφερόμαστε σε ad-hoc MIMO, σε συνεργατικά MIMO συστήματα , σε εφαρμογές MIMO σε δίκτυα αισθητήρων, σε MIMO συστήματα σε δίκτυα δορυφόρων και γιατί όχι στο μέλλον σε όλους τους τομείς της ζωής[33].

1.2 Μοντελοποίηση MIMO συστήματος



Σχήμα 1.1

Απεικόνιση ενός MIMO συστήματος με N_t στοιχεία στο πομπό και N_R στοιχεία στο δέκτη.

Έστω ένα σύστημα στοιχειοκεραίων όπου έχει N_t στοιχεία στο πομπό και N_R στοιχεία στο δέκτη. Η απόκριση του καναλιού μεταξύ του j -οστού στοιχείου του πομπού και του i -οστού στοιχείου του δέκτη συμβολίζεται με $h_{i,j}(r,t)$. Έτσι ένα κανάλι MIMO μπορεί να περιγραφεί από ένα πίνακα H έτσι ώστε:

$$H(r,t) = \begin{bmatrix} h_{1,1}(r,t) & h_{1,2}(r,t) & \dots & h_{1,N_T}(r,t) \\ h_{2,1}(r,t) & h_{2,2}(r,t) & \dots & h_{2,N_T}(r,t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_R,1}(r,t) & h_{N_R,2}(r,t) & \dots & h_{N_R,N_T}(r,t) \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

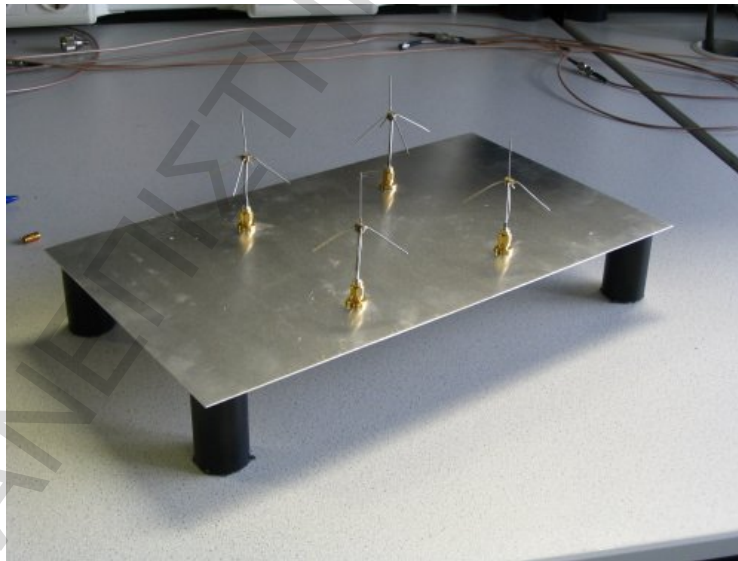
Τα στοιχεία του πίνακα H είναι μιγαδικοί αριθμοί οι οποίοι σχετίζονται με την εξασθένιση και μετατόπιση φάσης του ασύρματου καναλιού τα όποια εισάγονται στο σήμα που καταφθάνει στο δέκτη με καθυστέρηση r . Τότε η σχέση εισόδου-εξόδου ενός MIMO συστήματος μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$y(t) = H(r,t) \otimes s(t) + n(t) \quad (1.3)$$

$\begin{matrix} N_r \times 1 & N_r \times N_t & N_t \times 1 & N_r \times 1 \end{matrix}$

Στην σχέση (1.3) το \otimes αναφέρεται στην πράξη της συνέλιξης, $s(t)$ αναφέρεται στα μεταδιδόμενα σήματα και $n(t)$ αναφέρεται σε προσθετικό θόρυβο που οφείλεται στις παρεμβολές καθώς και από τις αλυσίδες RF.

Εφόσον το διάνυσμα $s(t)$ των εκπεμπόμενων σημάτων πολλαπλασιάζεται με τον πίνακα του καναλιού, είναι λογικό ότι ο αριθμός των ανεξάρτητων ροών δεδομένων που μπορεί να υποστηρίξει το σύστημα είναι το πολύ ίσος με την τάξη του πίνακα $H(r,t)$. Γενικότερα, οι ιδιότητες του πίνακα $H(r,t)$ όπως η κατανομή των ιδιοτιμών του, προσδιορίζουν τη δυναμική της επίδοσης των συστημάτων MIMO. Οι ιδιότητες αυτές επηρεάζονται άμεσα από άλλους παράγοντες, όπως: το μέγεθος της διάταξης των κεραιών, το διάγραμμα ακτινοβολίας, την πόλωση, την αμοιβαία σύζευξη, την προσαρμογή σύνθετων αντιστάσεων των κεραιών, καθώς και τα χαρακτηριστικά διάδοσης του καναλιού. Άρα, ένας κακός σχεδιασμός των στοιχείων του συστήματος ή μία εσφαλμένη εκτίμηση του καναλιού διάδοσης, μπορούν να οδηγήσουν σε δραματική μείωση της επίδοσης του συστήματος.



Σχήμα 1.2

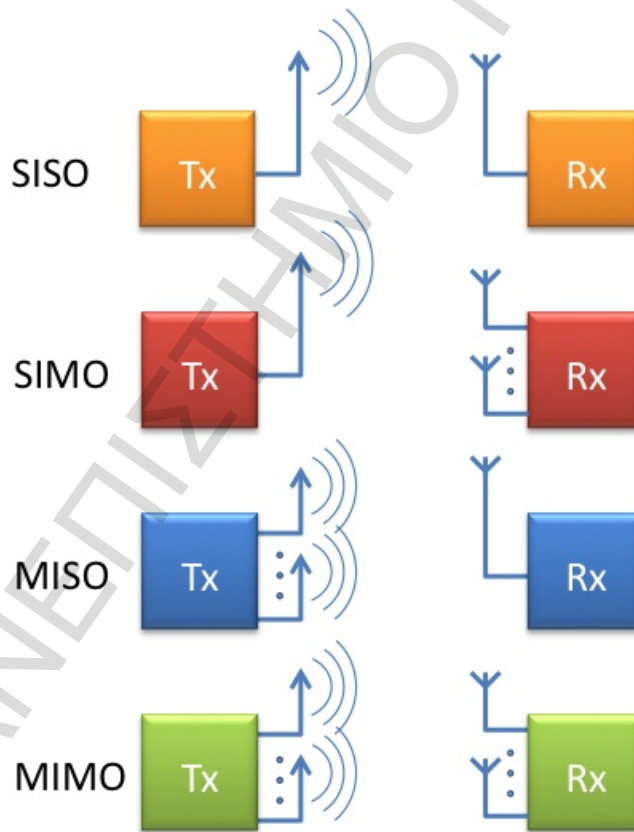
*Σε αυτό το σχήμα βλέπουμε ένα πειραματικό 2x2 σύστημα MIMO από το πανεπιστήμιο
TWENTE.[30]*

1.3 Μοντέλα συστημάτων πολλαπλών κεραιών

Ανάλογα με το πλήθος διαθέσιμων κεραιών στο σύστημα σε πομπό και δέκτη υπάρχουν τα εξής μοντέλα:

- SISO: Σύστημα όπου ο πομπός και δέκτης έχει μόνο μια κεραία.
- SIMO: Σύστημα όπου ο πομπός έχει μια κεραία ενώ δέκτης έχει πολλαπλές κεραιές.
- MISO: Σύστημα όπου ο πομπός έχει πολλαπλές κεραιές ενώ ο δέκτης έχει μια κεραία.
- MIMO: Σύστημα όπου και ο πομπός και ο δέκτης έχουν πολλαπλές κεραιές.

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζονται γραφικά τα μοντέλα MIMO συστημάτων.



Σχήμα 1.3

Μοντέλα πολλαπλών κεραιών, όπου Tx είναι ο πομπός και όπου Rx είναι ο δέκτης.[29]

1.4 Κέρδος MIMO συστημάτων

Παρακάτω αναφέρονται σε συντομία τα κέρδη που προσφέρονται αν χρησιμοποιήσουμε MIMO σύστημα.

1.4.1 Κέρδος συστοιχίας

Το κέρδος συστοιχίας (Array Gain) ,αναφέρεται στην αύξηση του σηματοθορυβικού λόγου (SNR) στο δέκτη ή στο πομπό ή και στα δυο λόγω συμφασικού συνδυασμού των μεταδιδόμενων σημάτων. Βέβαια το κέρδος συστοιχίας σε πομπό και δέκτη, απαιτεί και γνώση του καναλιού σε πομπό και δέκτη και γνώση του αριθμού των κεραιών που βρίσκονται σε πομπό και δέκτη. Ένα γενικό παράδειγμα είναι η περίπτωση συστήματος MISO όπου ο δέκτης λαμβάνει N_r σήματα με διαφορετικά πλάτη και φάσης και αυτά συνδυάζονται μετατρέποντας τα σε συμφασικά και έτσι το τελικό σήμα να ενισχύεται σημαντικά[2].

1.4.2 Κέρδος χωρικού διαφορισμού

Σαν κέρδος χωρικού διαφορισμού (Diversity Gain) θα μπορούσαμε να αναφέρουμε τον αριθμό των ανεξάρτητων διαδρομών μέσω των οποίων φτάνουν στο δέκτη πολλαπλά αντίγραφα του ίδιου σήματος πληροφορίας. Γενικότερα, η ισχύς του σήματος σε ένα ασύρματο κανάλι αυξομειώνεται τυχαία, ανάλογα με τις διαλείψεις που εμφανίζονται στο διαρκώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον. Η διαφορισιμότητα βασίζεται στη μετάδοση του σήματος σε πολλαπλές ανεξάρτητες διαδρομές ,ως προς τις διαλείψεις. Ποιοτικά θα μπορούσαμε να αναφέρουμε ότι το κέρδος χωρικού διαφορισμού περιγράφει την βελτίωση της συμπεριφοράς του συστήματος έναντι των βαθιών διαλείψεων του διαύλου ,ύστερα από κατάλληλη επεξεργασία των σημάτων. Από τα παραπάνω είναι εμφανής η εξάρτηση του διαφορικού κέρδους από το είδος του διαύλου. Όσο πλουσιότερος είναι σε σκεδαστές ο δίαυλος τόσο περισσότερο ανεξαρτητοποιούνται μεταξύ τους οι διαδρομές. Σε ένα αστικό περιβάλλον είναι ευκολότερη η επίτευξη υψηλού διαφορικού κέρδους, σε σύγκριση με ένα ανοικτό, όπου απουσιάζουν οι σκεδαστές και το διαφορικό κέρδος ουσιαστικά μηδενίζεται. Έτσι ,σε ένα περιβάλλον πλούσιο σε σκεδαστές, η χρήση

MIMO έχει ως στόχο την επίτευξη χωρικού διαφορικού κέρδους ενώ σε ένα ανοικτό περιβάλλον ελεύθερων σκεδαστών, την επίτευξη κέρδους συστοιχίας.

Ο τύπος που μπορεί να δίνει το διαφορικό κέρδος θα μπορούσε να είναι :

$$G_d \leq N_r * N_t , \quad (1.4)$$

Όπου N_r, N_t =αριθμός κεραιών στο δέκτη και στο πομπό αντίστοιχα αναφορικά με την σχέση (1.4)[2].

1.4.3 Κέρδος χωρικής πολυπλεξίας

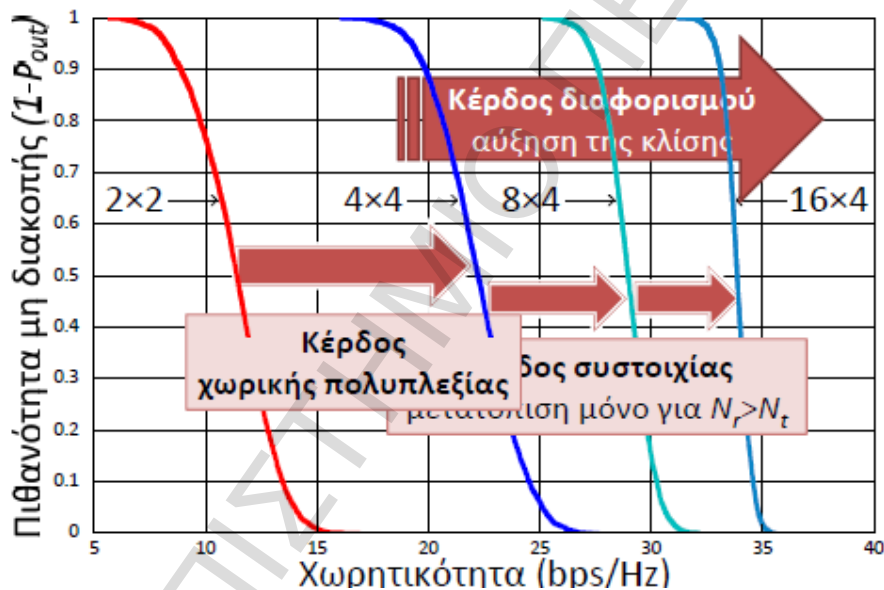
Σαν κέρδος χωρικής πολυπλεξίας (spatial multiplexing gain) αναφέρουμε τη γραμμική αύξηση της χωρητικότητας ως προς: $\text{rank}(H) < \min(N_r, N_t)$ (1.5), χωρίς παράλληλη αύξηση της ισχύος ή του εύρους ζώνης. Πιο ειδικά, για να επιτύχουμε το κέρδος χωρικής πολυπλεξίας εκμεταλλευόμαστε την έμφυτη ορθογωνιότητα, που εισάγει ο ραδιοδίαυλος λόγω της έντονης σκέδασης των κυμάτων, που μεταφέρουν το σήμα πληροφορίας από τις κεραιές πομπού στις κεραιές του δέκτη. Πρακτικά για να επιτευχθεί αύξηση της χωρητικότητας, απαιτείται οι κεραιές και του πομπού και του δέκτη να είναι σε επαρκή απόσταση μεταξύ τους, ώστε η πολυδιαδρομική διάδοση να οδηγεί σε ανεξαρτησία των σημάτων. Κάτω από ευνοϊκές συνθήκες διάδοσης, όπου έχουμε πολλαπλούς σκεδαστές, ο δέκτης ξεχωρίζει τις διαφορετικές ροές δεδομένων και έτσι έχουμε γραμμική αύξηση στη χωρητικότητα[2].

1.4.4 Μείωση παρεμβολών

Εφόσον ο δίαυλος είναι κοινός (περιβάλλον) στα ασύρματα συστήματα είναι αναπόφευκτο το γεγονός της εμφάνισης του προβλήματος των παρεμβολών. Πιο ειδικά, παρόλο που κάθε σύστημα χρησιμοποιεί δικιά του μπάντα συχνοτήτων είναι αρκετά πιθανή η εμφάνιση ομοδιαυλικής παρεμβολής στο σύστημα ή σε γειτονικό λόγω της συχνής επαναχρησιμοποίησης των συχνοτήτων. Βασικός μηχανισμός για την μείωση της παρεμβολής είναι η μείωση της εκπεμπόμενης ενέργειας που στέλνεται στους ομοδιαυλικούς χρήστες ξεχωρίζοντας έτσι το επιθυμητό σήμα. Τα MIMO συστήματα επίσης κατάφεραν ακόμα να αποσυσχετίσουν το ωφέλιμο σήμα από τα υπόλοιπα, καθώς κατάφεραν να ακυρώσουν τα μη-επιθυμητά σήματα εκπέμποντας μηδενισμούς στην κατεύθυνση τους και κατάφεραν να στρέψουν τα

διαγράμματα ακτινοβολίας στην κατεύθυνση των επιθυμητών σημάτων. Απαραίτητη προϋπόθεση όμως για τα παραπάνω είναι η γνώση του διαύλου.

Τέλος είναι φυσιολογικό, να μην μπορούμε να εκμεταλλευτούμε όλα τα πλεονεκτήματα ταυτόχρονα των τεχνικών που υπάρχουν λόγω των αλληλοσυγκρουόμενων αναγκών όσο αφορά τους βαθμούς ελευθερίας ή του αριθμού των κεραιών. Ο βαθμός αυτών των συγκρούσεων που μπορεί να επιλυθεί, εξαρτάται κατά πολύ και από το σχήμα επεξεργασίας του σήματος αλλά και από την σχεδίαση του δέκτη[2]. Παρακάτω ακολουθεί γραφική απεικόνιση των κερδών και πως αυτά σχετίζονται με την χωρητικότητα και την πιθανότητα μη διακοπής για διαφορετικές δομές MIMO συστημάτων.



Σχήμα 1.4

Διάγραμμα συσχέτισμού κερδών[3]

Στη παραπάνω εικόνα έχουμε ένα αθροιστικό διάγραμμα που δείχνει πως μεταβάλλονται οι τιμές των κερδών MIMO συστημάτων με βάση των διαφορετικών δόμων MIMO σε σχέση με την χωρητικότητα και την πιθανότητα μη διακοπής[3].

1.5 Μειονεκτήματα MIMO

Μπορεί το μεγάλο πλήθος των κεραιών να συνείσφερε στην βελτίωση της επίδοσης των ασύρματων συστημάτων όμως πάντα θα υπάρχει το λεγόμενο “trade-

off” μεταξύ βέλτιστης επίδοσης και πολυπλοκότητας αλλά και κόστους. Παρακάτω παραθέτουμε μερικά μειονεκτήματα της τεχνολογίας MIMO. [1]

α) Πολυπλοκότητα Υλικού

Η επιπλέον χρήση κεραιών επιβαρύνει αρνητικά με επιπρόσθετα RF chains την κεραία. Επίσης κάθε κεραία χρειάζεται μια αρκετά ισχυρή υπολογιστικά μονάδα επεξεργασίας σήματος για να ανταπεξέλθει στις τεχνικές των MIMO συστημάτων.

β) Πολυπλοκότητα λογισμικού

Οι περισσότεροι αλγόριθμοι επεξεργασίας σήματος είναι υπολογιστικά εξοντωτικοί για τους πόρους του συστήματος.

γ) Προβλήματα κατανάλωσης ενέργειας

Λόγω των πολλών κεραιών είναι φυσιολογικό να καταναλώνεται σχετικά γρήγορα η μπαταρία ιδιαίτερα σε κινητές συσκευές. Επίσης έχει παρατηρηθεί σε πειραματικές διατάξεις υπερθέρμανση.

δ) Προβλήματα σχετικά με τις κεραιές

Πρόβλημα όσο αφορά την απόσταση των κεραιών λόγω του φαινομένου “electromagnetic mutual coupling “(ιδιαίτερα σε κινητές συσκευές). Επιπρόσθετα πολλές φορές παρουσιάζονται προβλήματα παρεμβολής στις κεραιές και συσχέτισης του σήματος.

1.6 Χωρητικότητα MIMO συστημάτων

Για τον υπολογισμό της χωρητικότητας[3] θα πρέπει να αναλύσουμε το διανυσματικό δίαυλο σε παράλληλους ανεξάρτητους βαθμωτούς υποδιαύλους. Κάθε γραμμικός μετασχηματισμός μπορεί να αναπαρασταθεί ως η σύνθεση 3 λειτουργιών: μιας περιστροφής, μιας αλλαγής πλάτους και μιας ακόμη περιστροφής.

Έστω ότι για ένα σύστημα MIMO (N_t, N_r) ο πίνακας διαύλου H είναι γνωστός και για τον πομπό αλλά και για τον δέκτη. Άρα μπορεί να αναλυθεί με χρήση ιδιόμορφων τιμών (SVD) ως εξής:

$$H = U * \Sigma * V^H \quad (1.6)$$

όπου ο πίνακας U είναι $N_r \times N_r$ ορθομοναδιαίος και ο πίνακας V είναι $N_i \times N_i$ αντίστοιχα και ο πίνακας Σ είναι διαγώνιος και περιέχει διατεταγμένες σε φθίνουσα σειρά τις ιδιόμορφες τιμές του H .

$$H = U * \Sigma * V^H = U \begin{pmatrix} \Sigma_0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} V^H \quad (1.7)$$

Ο πίνακας U περιέχει τα αριστερά ιδιόμορφα διανύσματα του H και άρα τα ιδιοδιανύσματα του $H^* H^H$. Ο πίνακας V περιέχει τα δεξιά ιδιόμορφα διανύσματα του H και άρα τα ιδιοδιανύσματα του $H^H * H$.

Παρατηρούμε ότι:

$$H^* H^H = U \Sigma V^H V \Sigma^T U^H = U \Sigma \Sigma^T U^H = U \begin{pmatrix} \Sigma_0^2 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} U^H \quad (1.8)$$

$$H^H * H = V \Sigma^T U^H U \Sigma V^H = V \Sigma^T \Sigma V^H = V \begin{pmatrix} \Sigma_0^2 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} V^H \quad (1.9)$$

Άρα, η ιδιόμορφη τιμή σ_i δίνεται από την τετραγωνική ρίζα της i -οστής μεγαλύτερης ιδιοτιμής του $H^* H^H$ ή του $H^H * H$ δηλαδή $\sigma_i = \sqrt{\lambda_i}$ (1.10).

Οι μη μηδενικές ιδιόμορφες τιμές είναι R^H στο πλήθος, όπου R^H είναι η τάξη του πίνακα H . Όμως η τάξη του πίνακα δεν μπορεί να υπερβαίνει το πλήθος των γραμμών ή των στηλών του. Υπάρχει μια περίπτωση να ισχύει η ισότητα όταν είναι πλήρους τάξης, που αυτό σημαίνει ότι έχουμε διάυλο με πολλούς σκεδαστές. Δεδομένων των παραπάνω ο πίνακας H μπορεί να γραφεί ως το άθροισμα R^H πινάκων τάξης 1.

$$H = \sum_{i=1}^{R^H} \sigma_i u_i v_i^H \quad (1.11)$$

$$\text{Ορίζουμε τα διανύσματα } \tilde{x} = V^H x, \tilde{y} = U^H y, \tilde{w} = U^H x \quad (1.12)$$

Άρα η εξίσωση του συστήματος γίνεται:

$$\tilde{y} = U^H y = U^H H x + U^H w = U^H U \Sigma V^H x + \tilde{w} = \Sigma \tilde{x} + \tilde{w} \quad (1.13)$$

Αφού ο διάυλος είναι γνωστός σε πομπό και δέκτη μπορούμε να εκπέμψουμε (πολυπλέξουμε) ανεξάρτητες ροές δεδομένων στις κατευθύνσεις των

ιδιοδιανυσμάτων του H^*H^H , δηλαδή στο σύστημα συντεταγμένων που ορίζεται στον πίνακα V.

Χρησιμοποιώντας την ανάλυση του MIMO διαύλου σε παράλληλους διαύλους εκφράζουμε την χωρητικότητα του MIMO συστήματος ως άθροισμα των χωρητικοτήτων των επιμέρους διαύλων ως εξής:

$$C = B \cdot \sum_{i=1}^{R^H} \log_2 \left(1 + \frac{\lambda_i \cdot P_i}{\sigma_w^2} \right) = B \cdot \log_2 \prod_{i=1}^{R^H} \left(1 + \frac{\lambda_i \cdot P_i}{\sigma_w^2} \right) \quad (1.14)$$

Οι μη μηδενικές ιδιοτιμές των H^*H^H ή του $H^H * H$ είναι ίδιες και οι χωρητικότητες των διαύλων με πίνακες H και H^H είναι ίδιες. Οι ιδιοτιμές είναι τα κέρδη ισχύος των επιμέρους διαύλων. Είναι σαφές ότι αυξανόμενης της τάξης του R^H του πίνακα H, αυξάνεται η χωρητικότητα. Αυτή η αύξηση αποδίδεται και ως κέρδος χωρικής πολυπλεξίας που αναφέραμε σε προηγούμενη ενότητα. Έχει αποδειχτεί επίσης ότι μεταξύ των διαύλων με το ίδιο κέρδος ισχύος μεγαλύτερη χωρητικότητα έχει ο δίαυλος που οι ιδιοτιμές του είναι ίσες. Πολλές φορές χρησιμοποιείται το CN (condition number) ως μέτρο της ισότητας των ιδιοτιμών[3]. Σημειώνουμε ότι όσο πιο κοντά είναι στο 1 τόσο μεγαλύτερη χωρητικότητα έχουμε.

$$CN = \frac{\max(\lambda_i)}{\min(\lambda_i)} \quad (1.15)$$

1.7 Δομή της Διπλωματικής

Στη συνέχεια της η διπλωματική δομείται ως εξής:

Κεφάλαιο 2: Αναλύεται εκτενώς η λειτουργία των συστημάτων BS-MIMO. Παρουσιάζεται επίσης η λειτουργία της παρασιτικής κεραίας ESPAR και επεξηγείτε η σημασία της αντίδρασης για τις παρασιτικές στοιχειοκεραίες. Στη συνέχεια δείχνεται ο τρόπος υπολογισμού διαγραμμάτων βάσης της κεραίας και αναλύονται τα προσαρμοστικά διαγράμματα βάσης.

Κεφάλαιο 3: Περιγράφεται εκτενώς η λειτουργία των γενετικών αλγορίθμων. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφεται η σημασία της σωστής κωδικοποίησης των μεταβλητών και αναλύονται εκτενώς τα βήματα της επιλογής, διασταύρωσης, μετάλλαξης και αντικατάστασης και τέλος παρουσιάζονται κάποια κριτήρια τερματισμού των γενετικών αλγορίθμων.

Κεφάλαιο 4: : Επικεντρώνεται στη μελέτη της παρασιτικής κεραίας MuPAR. Αρχικά αναφέρεται στην δομή λειτουργίας των κεραιών IFA και PIFA. Στην συνέχεια αναλύεται το μαθηματικό μοντέλο που διέπει το σύστημα και τέλος περιγράφεται η ανάπτυξη του γενετικού αλγορίθμου για την παρασιτική κεραία MuPAR και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Κεφάλαιο 5: Αναφέρεται στα συμπεράσματα μας και προτείνονται θέματα για μελλοντικές έρευνες για την υπό μελέτη παρασιτική κεραία.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

Κεφάλαιο 2: Beamspace-MIMO και Παρασιτικές Κεραίες

Το παρόν κεφάλαιο γίνεται αναλυτική παρουσίαση των παρασιτικών κεραιών ESPAR και της λειτουργίας τους στο πεδίο διαγραμμάτων ακτινοβολίας. Το κεφάλαιο αυτό θα αποτελέσει έναυσμα για την συνέχεια της μελέτης μας στις παρασιτικές κεραίες.

2.1 Beamspace-MIMO Μοντέλο

Για να αξιολογηθεί η επίδοση των MIMO συστημάτων στο πεδίο του beamspace[11] χρειάζεται ένα παραμετροποιημένο σύστημα το οποίο λαμβάνει υπόψη του στην επίδοση του και τους σκεδαστές στο περιβάλλον. Σε αυτό το μοντέλο, κάθε μονοπάτι i , που ενώνει νοητά μια περιοχή του πομπού με μια περιοχή του δέκτη (για την ακρίβεια μια κεραία του πομπού με μια κεραία του δέκτη), έχει μια μοναδική γωνία αναχώρησης (AoD) $\theta_{T,i}$ και μια μοναδική γωνία άφιξης (AoA) $\theta_{R,i}$, και ένα κέρδος μονοπατιού b_i . Εάν K τέτοια μονοπάτια υπάρχουν, και θεωρώντας $a_R(\theta_{R,i})$ και $a_T(\theta_{T,i})$ τα διανύσματα στροφής (steering vectors) που συμπεριλαμβάνονται στον πίνακα μετάδοσης και λήψης τότε η απόκριση του καναλιού δίνεται από το τύπο:

$$H = \sum_{i=1}^K b_i a_R(\theta_{R,i}) a_T^H(\theta_{T,i}) = A_R(\hat{\Theta}_R) H_b A_T^H(\hat{\Theta}_T) \quad (2.1)$$

Όπου, $\hat{\Theta}_R, \hat{\Theta}_T$ είναι τα διανύσματα κατεύθυνσης των AoA και AoD αντίστοιχα, τα $A_R(\hat{\Theta}_R) A_T^H(\hat{\Theta}_T)$ είναι $M_{R,T} \times K$ πίνακες στροφής (steering matrices) λήψης και μετάδοσης, και H_b είναι ένα διαγώνιος $K \times K$ πίνακας του οποίου οι εγγραφές είναι το μιγαδικό κέρδος κάθε μονοπατιού.

Με αυτό τον τρόπο όμως οδηγούμαστε σε μια απεικόνιση η οποία δεν είναι γραμμική όσο αφορά την περιοχή της κατεύθυνσης των διανυσμάτων. Για να υπερκεραστεί αυτό το εμπόδιο χρησιμοποιήθηκε η έννοια της ιδεατής κατεύθυνσης (virtual direction) των διανυσμάτων του μοντέλου του καναλιού. Πιο ειδικά, οι ιδεατές κατευθύνσεις [11],[14] ορίζονται από την ομοιόμορφη δειγματοληψία της

κύριας περιόδου του κανονικοποιημένου κατευθυντικού συνημιτόνου: $\phi = 2\pi d \cos \theta$. Σημειώνουμε ότι όπου d είναι η απόσταση των στοιχείων της κεραίας μεταξύ τους κανονικοποιημένη ως προς το μήκος κύματος και θ οι προκαθορισμένες γωνίες του array manifold vector και του δέκτη αλλά και του πομπού. Ο τρόπος που παράγονται αυτές οι ιδεατές κατευθύνσεις εξασφαλίζει την ορθογωνιότητα των manifold vectors πομπού και δέκτη και έτσι ορίζουν μια ορθοκανονική βάση διαγραμμάτων ακτινοβολίας, τα οποία εν συνεχεία τα ονομάζουμε διαγράμματα βάσης (base patterns). Άρα, ο τύπος (2.1) γίνεται:

$$H = \sum_{i=-M_{R/2}}^{M_{R/2}} \sum_{j=-M_{T/2}}^{M_{T/2}} H_v(i, j) a_R(\tilde{\theta}_{R,i}) a_T^H(\tilde{\theta}_{T,j}) = \tilde{A}_R H_v \tilde{A}_T^H \quad (2.2)$$

Όπου $\tilde{\theta}_{R,i}, \tilde{\theta}_{T,j}$ είναι οι ιδεατές κατευθύνσεις που ομοιόμορφα δειγματοληπτούν το χωρικό κανάλι, H_v είναι η απεικόνιση του ιδεατού καναλιού του οποίου οι εγγραφές $H_v(i, j)$ αναπαριστούν την σύζευξη μεταξύ των εικονικών γωνιών άφιξης και αναχώρησης, και $\tilde{A}_R, \tilde{A}_T^H$ είναι οι πίνακες στροφής (steering matrices) των ιδεατών κατευθύνσεων. Εάν \tilde{A}_R, \tilde{A}_T είναι μοναδιαίοι, ο ιδεατός πίνακας του καναλιού μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$H_v = \tilde{A}_R^H A_R(\hat{\Theta}_R) H_b \tilde{A}_T^H(\hat{\Theta}_T) A_T = \hat{A}_R H_b \hat{A}_T^H \quad (2.3)$$

Όπου $\hat{A}_R = \tilde{A}_R^H A_R(\hat{\Theta}_R)$ και $\hat{A}_T = \tilde{A}_T^H A_T(\hat{\Theta}_T)$ είναι οι προβολές των σταθερών διαγραμμάτων ακτινοβολίας δέκτη και πομπού αντίστοιχα, προς την κατεύθυνση των σκεδαστών. Δεδομένου ότι ο πομπός αντιστοιχίζει τα σύμβολα στις ιδεατές γωνίες του πίνακα μετάδοσης ενώ ο δέκτης επεξεργάζεται τα δεδομένα και έστω ότι έχουμε μια κεραία ULA για ευκολία παρατήρησης, τότε το διάνυσμα σήματος που λαμβάνουμε σε διάστημα μιας περιόδου συμβόλου χρησιμοποιώντας τις ιδεατές κατευθύνσεις μπορεί να αναπαρασταθεί ως εξής:

$$y = Hx + n = \tilde{A}_R H_v \tilde{A}_T^H x + n = \tilde{A}_R \hat{A}_R H_b \hat{A}_T^H \tilde{A}_T^H x + n \quad (2.4)$$

Τότε, έστω ένα σύστημα όπου ο πομπός στέλνει διάφορες ροές συμβόλων προς τις ιδεατές γωνίες του καναλιού και ο δέκτης πραγματοποιεί χωρική δειγματοληψία στο πεδίο ακτινοβολίας. Άρα η είσοδος του συστήματος δίνεται από: $x_{bs} = \tilde{A}_T^H x$ (2.5),

όπου \hat{A}_T^H πίνακας διάστασης $(K \times M_T)$ που περιέχει, M_T στήλες διανύσματα, μήκους K . Τα διανύσματα αυτά περιλαμβάνουν πληροφορίες για τους σκεδαστές, καθώς και πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά των κεραιών πομπού και δέκτη. Ο πίνακας αυτός μπορεί να θεωρηθεί ως πίνακας μετασχηματισμού, που συσχετίζει τα σήματα στο πεδίο του χώρου με τα σήματα στο πεδίο των διαγραμμάτων ακτινοβολίας.

$$\hat{A}_T^H = \Phi_T = [\Phi_{T,1}(\hat{\Theta}_T), \Phi_{T,2}(\hat{\Theta}_T), \dots, \Phi_{T,M_T}(\hat{\Theta}_T)] \quad (2.6)$$

Η τελική μορφή του συστήματος γίνεται:

$$y = A_R(\hat{\Theta}_R)H_b\Phi_T x_{bs} + n = \tilde{H}_v x_{bs} + n \quad (2.7)$$

Όπου το $\Phi_T x_{bs}$ αντιστοιχεί στα διαγράμματα ακτινοβολίας που δημιουργούνται από το πομπό σε κάθε περίοδο συμβόλου, και τα στοιχεία του πίνακα \tilde{H}_v αναπαριστούν την σύζευξη μεταξύ των εικονικών γωνιών άφιξης και αναχώρησης.

Το κέρδος αυτής της προσέγγισης είναι ότι το σύνολο των διαγραμμάτων ακτινοβολίας που χρειάζεται να υλοποιηθούν μπορεί να παραχθεί με μια μόνο αλυσίδα RF MIMO σύστημα. Γεγονός που δίνει έναυσμα στην μελέτη παρασιτικών κεραιών τύπου ESPAR (Electronically Steerable Passive Array Radiator).

2.2 Παρασιτικές Κεραίες

Οι παρασιτικές στοιχειοκεραίες[7] αντιπροσωπεύουν μια τεχνολογία που επιτυγχάνει υψηλό κέρδος ακτινοβολίας κεραίας. Μια παρασιτική στοιχειοκεραία αποτελείται από ένα ή περισσότερα παρασιτικά στοιχεία τοποθετημένα παράλληλα ή και κυκλικά το ένα στο άλλο στο ίδιο επίπεδο LOS. Τα παρασιτικά στοιχεία τροφοδοτούνται επαγωγικά από την ακτινοβόλουσα ενέργεια η οποία προέρχεται από το τροφοδοτούμενο στοιχείο που συνδέεται στο πομπό (ενεργό). Όταν το παρασιτικό στοιχείο τοποθετείται έτσι ώστε να ακτινοβολεί μακριά από το ενεργό στοιχείο τότε ονομάζεται director ενώ όταν τοποθετείται έτσι ώστε να ακτινοβολεί προς την μεριά του ενεργού ονομάζεται reflector. Το κατευθυντικό διάγραμμα ακτινοβολίας είναι αποτέλεσμα των λειτουργιών των παρασιτικών στοιχείων και εξαρτάται από δυο παράγοντες. Ο πρώτος παράγοντας είναι ο «συντονισμός» στην συχνότητα λειτουργίας (συχνότητα μέγιστης μεταφοράς ενέργειας) και εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος των παρασιτικών στοιχείων. Ο δεύτερος παράγοντας είναι η απόσταση των παρασιτικών στοιχείων από τα ενεργά στοιχεία. Σε ένα μικρότερο

βαθμό εξαρτάται επίσης η κατευθυντικότητα του διαγράμματος ακτινοβολίας και από την διάμετρο του παρασιτικού στοιχείου, αφού η διάμετρος επηρεάζει το συντονισμό.

Αναφορικά με τη λειτουργία της παρασιτικής κεραίας γνωρίζουμε ότι όταν ένα παρασιτικό στοιχείο τοποθετείται εντός ενός μήκους κύματος από το ενεργό, τότε θα επανακτινοβολήσει την ενέργεια που συνέλαβε. Η ακτινοβόλωση ενέργεια από το ενεργό στοιχείο προκαλεί την δημιουργία τάσης στο παρασιτικό στοιχείο οπότε με την σειρά της δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο. Το μαγνητικό πεδίο επεκτείνεται και στη περιοχή του ενεργού στοιχείου επάγοντας τάση σε αυτό. Το πλάτος και η φάση της τάσης που επάγονται εξαρτιούνται από το μέγεθος των παρασιτικών στοιχείων και την απόσταση τους.

2.2.1 ESPAR

2.2.1.1 Εισαγωγή

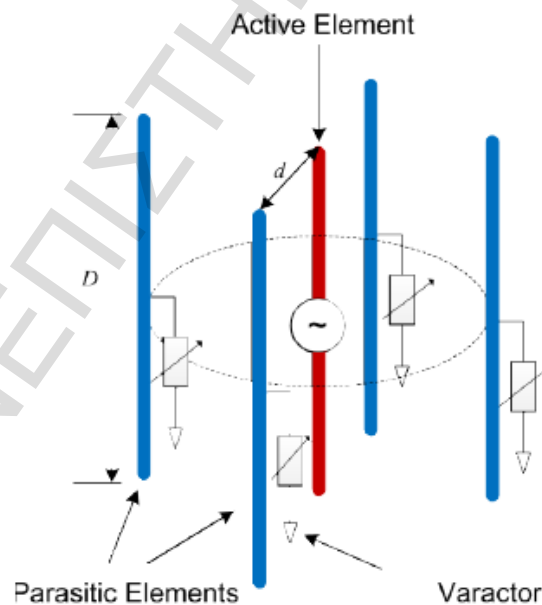
Σε προηγούμενη ενότητα έγινε περιγραφή των συστημάτων MIMO στο πεδίο των διαγραμμάτων ακτινοβολίας. Είναι προφανές ότι η προηγούμενη ενότητα θα οδηγήσει τον αναγνώστη στην σύγκριση συστημάτων που χρησιμοποιούν beamspace domain και συστήματα με spatial domain. Η ύπαρξη του beamspace domain προσφέρει πάρα πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με την κλασική μοντελοποίηση στο χώρο (spatial domain). Το πιο βασικό πλεονέκτημα είναι το γεγονός ότι στην μοντελοποίηση με spatial domain απαιτείται λεπτομερή γνώση των κεραίο-συστημάτων πομπού και δέκτη ενώ σε αντίθεση με την μοντελοποίηση σε beamspace domain, η μοναδική πληροφορία που χρειάζεται είναι η γνώση των εκπεμπόμενων διαγραμμάτων ακτινοβολίας, τα οποία απορρέουν από τα χαρακτηριστικά των κεραιών. Ένα ακόμα πλεονέκτημα που εξυπηρετεί την μοντελοποίηση MIMO συστημάτων μόνης αλυσίδας ραδιοσυχνοτήτων (RF).

Ο κύριος αντιπρόσωπος συστημάτων μόνης αλυσίδας RF είναι οι κεραίες ESPAR (Electronically Steerable Passive Array Radiator). Οι κεραίες ESPAR παρέχουν δυνατότητα beamforming αλλά και adaptive beamforming [4]-[6](αναλόγως το σύστημα και το κανάλι) παρέχοντας πολλαπλούς λοβούς τόσο σε δέκτη όσο και σε πομπό με την χρήση μοναχά μιας αλυσίδας RF δηλαδή μοναχά ενός ενεργού στοιχείου και αρκετών παρασιτικών. Κύρια πλεονεκτήματα τους είναι το χαμηλό

κόστος, η μειωμένη πολυπλοκότητα αλλά και η μειωμένη κατανάλωση ενέργειας γεγονός που ώθησε πολλές εταιρίες κινητής τηλεφωνίας στην μελέτη και υλοποίηση αυτών των συστημάτων.

2.2.1.2 Δομή ESPAR κεραίας

Οι κεραίες ESPAR[4]-[16],[22],[23] υλοποιούνται με τη χρήση ενός ενεργού κεραιοστοιχείου και ενός μεγάλου αριθμού παρασιτικών στοιχείων τοποθετημένα κυκλικά γύρω από το ενεργό στοιχείο και σε κοντινή απόσταση. Τα παρασιτικά στοιχεία χαρακτηρίζονται από τις μεταβλητές αντιδράσεις τους (varactors), όπου ελέγχουν το μιγαδικό τμήμα του πίνακα εισόδου εμπέδησης (input impedance) των παρασιτικών στοιχείων. Η σύζευξη που δημιουργείται συνεπάγεται την επαγωγή ρεύματος στα παρασιτικά στοιχεία λόγω του ενεργού και με κατάλληλη ρύθμιση του κυκλώματος ρυθμιζόμενης μεταβλητής αντίδρασης (varactor) που υπάρχει στα παρασιτικά στοιχεία είναι δυνατή η δημιουργία των επιθυμητών διαγραμμάτων ακτινοβολίας. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε μια κεραία ESPAR, με κόκκινο απεικονίζεται το ενεργό στοιχείο και με μπλε τα παρασιτικά που είναι 4 στον αριθμό. Επίσης φαίνεται και στο σχήμα και ο varactor κάθε παρασιτικού στοιχείου.



Σχήμα 2.1

Μια τοπική κυκλική ESPAR με 4 παρασιτικά στοιχεία[23]

Για το δεδομένο παράδειγμα ESPAR κεραίας ισχύει[12] ότι το διάγραμμα ακτινοβολίας: $A(\theta) = i^T s(\theta)$ (2.8), όπου $s(\theta)$ είναι το διάνυσμα στροφής (steering vector) και το i το μιγαδικό κανονικοποιημένο διάνυσμα του ρεύματος των στοιχείων της κεραίας, με $i = (Y^{-1} + X)^{-1}u$ (2.9)

Όπου Y είναι ο πίνακας του οποίου κάθε εγγραφή y_{ij} αντιπροσωπεύει την αμοιβαία σύνθετη αγωγιμότητα μεταξύ του i -οστού και του j -οστού παρασιτικού στοιχείου και X είναι ο πίνακας μεταβλητής αντίδρασης που προσαρμόζει το διάγραμμα ακτινοβολίας της ESPAR κεραίας. Το Y για ESPAR 5 στοιχείων θα είναι της μορφής:

$$Y = \begin{pmatrix} y_{00} & y_{10} & y_{10} & y_{10} & y_{10} \\ y_{10} & y_{11} & y_{21} & y_{31} & y_{21} \\ y_{10} & y_{31} & y_{21} & y_{11} & y_{21} \\ y_{10} & y_{31} & y_{21} & y_{11} & y_{21} \\ y_{10} & y_{21} & y_{31} & y_{21} & y_{11} \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

Οι εγγραφές y_{ij} βγαίνουν και από την γεωμετρία της κεραίας λόγω συμμετρίας. Όμοια ο διαγώνιος πίνακας X του παραπάνω παραδείγματος θα δίνεται από:

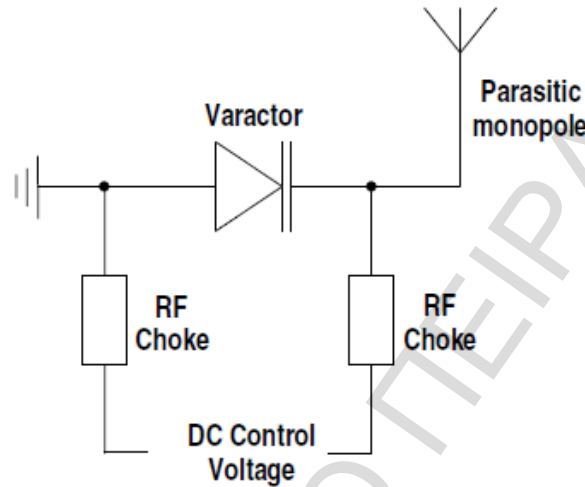
$$X = \begin{pmatrix} R_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & jx_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & jx_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & jx_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & jx_4 \end{pmatrix} \quad (2.11),$$

και το u του τύπου (2.9) δίνεται από τον τύπο: $u = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ (2.12)

2.2.1.3 Σημασία της αντίδρασης(Reactance)

Η χρησιμοποίηση των μεταβλητών αντιδράσεων (varactor) στις κεραίες ESPAR είχε δημιουργήσει αρκετές απορίες για την πρακτικότητα τους. Αρχικά είναι σημαντικό να κατανοηθεί οι ικανότητες τους στην μετάδοση. Η αρμονική παραμόρφωση θεωρητικά θα μπορούσε να μειώσει την εν δυνάμει ισχύ μετάδοσης,

καθώς τα στοιχεία της κεραίας τυπικά παρουσιάζουν συντονισμό σε υψηλότερης τάξης λειτουργικότητα έχοντας σαν αποτέλεσμα «φασματική μόλυνση». Στη συνέχεια, το εύρος λειτουργίας των μεταβλητών αντιδράσεων μπορεί να περιορίσει τις ικανότητες προσαρμογής στο εκάστοτε κανάλι.



Σχήμα 2.2

Η παραπάνω εικόνα δείχνει ένα κλασσικό κύκλωμα ελέγχου varactor ενός παρασιτικού στοιχείου.[31]

Οι μεταβλητές αντιδράσεις δεν έχουν απαραίτητα σχεδιαστεί για εφαρμογές υψηλής ισχύος. Στη κατάσταση μετάδοσης η κεραία μπορεί να οδηγήσει τις μεταβλητές αυτές αντιδράσεις σε μη γραμμική λειτουργικότητα παράγοντας έτσι αρμονική παραμόρφωση. Χωρίς την χρήση φίλτρων μεταξύ αντιδράσεων και μέσου μετάδοσης να αντισταθμίσουν το γεγονός αυτό είναι πολύ πιθανό να έχουμε «φασματική μόλυνση». Για αυτό το λόγο έχουν βρεθεί αρκετές λύσεις για το φαινόμενο αυτό, με την πιο διαδεδομένη να είναι η διαμοίραση της ισχύος σε πολλαπλές μεταβλητές αντιδράσεις.

Γενικότερα είναι σημαντικό να κατανοηθεί η σχέση που υπάρχει μεταξύ αντίδρασης και κεραίας. Έχοντας κατανοήσει πως επηρεάζουν τα φορτία των μεταβλητών αντιδράσεων τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της κεραίας θα οδηγήσει στην περαιτέρω κατανόηση της συχνοτικής ευαισθησίας της κεραίας και σε μια αποδοτική μέθοδο βελτιστοποίησης των τιμών των μεταβλητών αντιδράσεων. Σε

φυσικό επίπεδο στην βάση των παρασιτικών μονόπολων είναι οι γραμμές μεταφοράς συνδεδεμένες με τα εντοπισμένα γειωμένα φορτία $Z_L = R_L + jX_L$.

Τα σήματα που επάγονται στα παρασιτικά στοιχεία οδηγούνται από την γραμμή μεταφοράς και ανακλώνται με μια μετατόπιση φάσης. Η συνολική μετατόπιση φάσης κατευθείαν επηρεάζει το φορτίο ρεύματος του μονόπολου και προσδιορίζεται από το φορτίο μεταβλητής αντίδρασης Z_L , της γραμμής μεταφοράς χαρακτηριστική εμπέδηση (Z_0) και το μήκος της γραμμής μεταφοράς (transmission line). Ο

συντελεστής ανάκλασης Γ της γραμμής μετάδοσης δίνεται από $\Gamma = \Gamma_r + j\Gamma_i = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$ (2.13) Ο παραπάνω τύπος αν κανονικοποιηθεί ως προς Z_0 και δε

ληφθούν υπόψη απώλειες στη γραμμή μετάδοσης τότε μπορεί να βοηθήσει στον υπολογισμό του γωνιακού συντελεστή της ανάκλασης $\Gamma_\phi = \arctan \frac{\Gamma_i}{\Gamma_r} = \arctan \frac{2x_L}{x_L^2 - 1}$

(2.14).

Όπου x_L είναι το φορτίο της αντίδρασης κανονικοποιημένο ως προς την χαρακτηριστική εμπέδηση της γραμμής μεταφοράς. Όσο το απόλυτο του x_L αυξάνεται τόσο το Γ_ϕ μειώνεται. Γιαντό για μεγάλες τιμές του $|x_L|$ θα δημιουργηθούν μικρές διαφορές στην φάση και αυτό σημαίνει μη σημαντικές αλλαγές στο διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας.

Παρόλο που η συχνοτική απόκριση της κεραίας είναι συνήθως συνάρτηση της δομής, με τον έλεγχο της συχνοτικά εξαρτημένης αντίδρασης το εκπεμπόμενο διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας και το matching της κεραίας μπορεί να διαφέρει κατά πολύ σε συγκεκριμένες μπάντες συχνότητας. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να παρατηρηθεί σε μεγάλη έκταση για μικρά φορτία αντιδράσεων όπου μεγάλες αλλαγές στο X_L παράγουν μεγάλες αλλαγές στο Γ_ϕ .

Μια δεύτερη συνέπεια της σχέσης 2.14 έχει να κάνει με την βελτιστοποίηση της αντίδρασης. Για την πραγματοποίηση του επιθυμητού διαγράμματος ακτινοβολίας με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά (συγκεκριμένους λοβούς σε συγκεκριμένες μοίρες αλλά και μηδενισμούς), τα φορτία των αντιδράσεων πρέπει να βελτιστοποιηθούν. Γιαντό η σχέση που έχει το Γ_ϕ με την αντίδραση μας καθορίζει και το τύπο της διαδικασίας βελτιστοποίησης.

Είναι προφανές ότι μια γραμμική ανάλυση της αντίδρασης για μεγάλες τιμές του X_L θα είναι μη αναγκαίο εμπόδιο για την βελτιστοποίηση. Μεγαλύτερα βήματα στην διαδικασία βελτιστοποίησης μπορεί να έχουν ουσιαστικό κέρδος για μικρές τιμές του X_L όπου οι αλλαγές στο Γ_ϕ έχουν σημασία. Επιπρόσθετα ένα θεωρητικό εύρος τιμών κυμαίνεται από $(-\infty j\Omega, +\infty j\Omega)$ έτσι ένα κλασικό ψάξιμο δεν θα απέκλειε όλες τις πιθανότητες. Τότε η αντίδραση θα μπορούσε να υπολογιστεί συνυπολογίζοντας την τιμή του:

$$X_L = \frac{\sin \Gamma_\phi}{1 - \cos \Gamma_\phi} Z_0 \quad (2.15)$$

Έτσι ένα περατό σεί τιμών φορτίων της αντίδρασης μπορεί να επιλεγεί που να αντιπροσωπεύει σημαντικές αλλαγές στα χαρακτηριστικά της κεραίας[31].

2.2.1.4 Ακτινοβολούμενοι Βαθμοί Ελευθερίας Παρασιτικών Κεραίων(A.D.O.F.)

Είναι αρκετά σημαντικό για τα συστήματα MIMO ο καθορισμός των βαθμών ελευθερίας του συστήματος, δηλαδή ο καθορισμός των παράλληλων ροών πληροφορίας που μεταδίδονται. Εύκολα κανείς μπορεί να διακρίνει τους βαθμούς ελευθερίας μιας συμβατικής στοιχειοκεραίας που ισούται με τον αριθμό των στοιχειοκεραίων της, όμως κάτι τέτοιο δεν ισχύει στα MIMO συστήματα. Όπως είναι λογικό οι βαθμοί ελευθερίας για ένα MIMO σύστημα περιορίζονται από τα εξής πράγματα α)γεωμετρία κεραίας πομπού β)γεωμετρία κεραίας δέκτη και γ)το περιβάλλον λειτουργίας-κανάλι. Για παράδειγμα, όταν υπάρχει ένα περιβάλλον πλούσιο σε σκεδαστές αυτό προσδίδει πλεονέκτημα στην πολλαπλότητα των παράλληλων ροών μετάδοσης σε αντίθεση με την ύπαρξη ενός ισχυρού line of sight (LOS) όπου περιορίζει στους βαθμούς ελευθερίας. Σε αυτό το σημείο δημιουργείται και μια σχέση trade-off μεταξύ του πλήθους ωφέλιμων κεραιών σε πομπό και δέκτη και του πλήθους των ανεξάρτητων παράλληλων ροών μετάδοσης, σχέση που έχει άμεσο αντίκτυπο σε κόστος υλοποίησης αλλά και σε ωφέλιμη χωρητικότητα συστήματος.

Όσο αφορά τώρα τις παρασιτικές κεραίες τα πράγματα είναι λίγο διαφορετικά, πλέον οι βαθμοί ελευθερίας στο χώρο μετατρέπονται σε διαθέσιμους βαθμούς ελευθερίας σε επίπεδο διαγραμμάτων ακτινοβολίας και είναι άμεσα συσχετισμένοι

με τα χαρακτηριστικά της παρασιτικής κεραίας. Με την έννοια χαρακτηριστικά κεραίας αναφερόμαστε σε γεωμετρία στοιχειοκεραίας, πλήθος ενεργών και παρασιτικών στοιχείων αλλά και στις αποστάσεις των κεραιοστοιχείων. Για να βρεθούν οι βαθμοί ελευθερίας θα πρέπει να βρεθεί το πλήθος των διαγραμμάτων ακτινοβολίας που απαρτίζουν μια βάση του χώρου. Καθώς ο χώρος διαγραμμάτων ακτινοβολίας μπορεί να περιγραφεί ως γραμμικός συνδυασμός διαγραμμάτων ακτινοβολίας που είναι ορθογώνια μεταξύ τους. Άρα είναι λογικό ότι όσο μεγαλύτερες είναι οι διαστάσεις του χώρου που αναφερόμαστε τόσο περισσότερους διαθέσιμους βαθμούς ελευθερίας έχουμε καθώς για το δεδομένο χώρο έχουμε και περισσότερα διαγράμματα ακτινοβολίας. Όμοια και στα συστήματα παρασιτικών κεραιών όπως και στα συστήματα MIMO οι βαθμοί ελευθερίας που υπολογίζονται είναι ένα άνω όριο των βαθμών ελευθερίας που παρέχονται λόγω της επίδρασης του καναλιού και επίσης λόγω της επίδρασης της αμοιβαίας επαγωγής που δημιουργείται λόγω κοντινής απόστασης ενεργού στοιχείου με τα παρασιτικά και όλα αυτά έχουν αποτέλεσμα την μείωση των βαθμών ελευθερίας. Στην βιβλιογραφία [10],[13],[14] αναφέρονται τέτοιες τεχνικές που υπολογίζουν τους διαθέσιμους βαθμούς ελευθερίας και τα αποτελεσματικά διαγράμματα ακτινοβολίας συνυπολογίζοντας ή όχι το κανάλι[14].

2.2.1.5 Ορθοκανονικοποίηση Gram-schmidt και εφαρμογή του σε κεραίες ESPAR

Η χρήση της μεθόδου Gram-schmidt γίνεται κυρίως στην γραμμική άλγεβρα και στην αριθμητική ανάλυση για να ορθοκανονικοποιηθεί ένα σετ διανυσμάτων που παράγουν ένα χώρο, συνήθως τον ευκλείδειο και να υπολογιστεί η διάσταση του. Επίσης χρησιμοποιείται η μέθοδος αυτή σε μεγάλο βαθμό και στις ψηφιακές επικοινωνίες για την εύρεση σημάτων βάσης που παράγουν ένα χώρο σημάτων. Στόχος είναι να αποσυνθεθεί το πεδίο ακτινοβολίας και δεχόμενοι ένα σετ από M ανεξάρτητες γραμμικές συναρτήσεις να δημιουργηθεί ένα σετ $N \leq M$ ορθοκανονικές συναρτήσεις οι οποίες παράγουν ένα N -διάστατο χώρο. Πιθανόν πολλαπλές λύσεις που μπορεί να προκύψουν από διαφορετικές αρχές στο χώρο είναι ισοδύναμες και αρκετά πιθανόν να είναι αντεστραμμένες εκδόσεις αυτών που ήδη έχουν περιγραφεί και υπολογιστεί.

Το πεδίο ακτινοβολίας μιας γενικής-τυχαίας κεραίας ESPAR δίνεται από την εξίσωση:

$$P(\theta, \phi) = i^T a(\theta, \phi) = \sum_{m=0}^{M-1} i_m a_m(\theta, \phi) \quad (2.16)$$

Όπου το i είναι το διάνυσμα των ρευμάτων όπως έχει ήδη προηγουμένως αναφερθεί και $a(\theta, \phi) = [a_0(\theta, \phi) \dots a_{M-1}(\theta, \phi)]^T$ είναι το διάνυσμα στροφής της στοιχειοκεραίας ESPAR προς την κατεύθυνση (θ, ϕ) . Για την αναπαράσταση στο πεδίο των διαγραμμάτων ακτινοβολίας οι συναρτήσεις $a_m(\theta, \phi)$ με $m=0..M-1$, εκφράζονται ως γραμμικός συνδυασμός των ορθοκανονικών συναρτήσεων που πλέον είναι τα διαγράμματα βάσης $\Phi_n(\theta, \phi)$ που παράγουν το χώρο διάστασης N . Οι συναρτήσεις $a_m(\theta, \phi)$ δίνονται από τον τύπο:

$$a_m(\theta, \phi) = \sum_{n=0}^{N-1} q_{mn} \Phi_n(\theta, \phi) \quad (2.17)$$

Άρα πλέον το πεδίο της ESPAR στο πεδίο διαγραμμάτων ακτινοβολίας γίνεται ως εξής:

$$P(\theta, \phi) = \sum_{m=0}^{M-1} i_m \sum_{n=0}^{N-1} q_{mn} \Phi_n(\theta, \phi), \quad N \leq M \quad (2.18)$$

Όπου το $q_{mn} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi a_m(\theta, \phi) \Phi_n^*(\theta, \phi) \sin\theta d\theta d\phi$ αναπαριστά την προβολή του $a_m(\theta, \phi)$ στο διάγραμμα ακτινοβολίας $\Phi_n(\theta, \phi)$. Για μια τυχαία γεωμετρία επίπεδης κεραίας ESPAR το διάνυσμα στροφής δίνεται

$$a_m(\theta, \phi) = \begin{cases} 1 & m=0 \\ \exp[jb_m \sin\theta \cos(\phi - \phi_m)] & m \neq 0 \end{cases} \quad (2.19)$$

Όπου το ϕ_m αναπαριστά την γωνία του m -οστού παρασιτικού στοιχείου στο αζιμουθιακό επίπεδο ως προς τον άξονα αναφοράς, $b_m = 2\pi d_m$ και d_m είναι η απόσταση ως προς το μήκος κύματος. Παρατηρώντας από την (2.19) για $b_m \neq 0$ όλες οι συναρτήσεις $a_m(\theta, \phi)$ είναι γραμμικά ανεξάρτητες το οποίο συνεπάγεται ότι $N=M$. Αυτό θεωρητικά σημαίνει ότι οι βαθμοί ελευθερίας θα ισούνται με το πλήθος των στοιχείων της κεραίας ESPAR. Δεδομένου των παραπάνω, το πεδίο ακτινοβολίας τώρα μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$P(\theta, \phi) = \sum_{m=0}^{M-1} i_m \sum_{n=0}^{N-1} q_{mn} \Phi_n(\theta, \phi) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{M-1} i_m q_{mn} \Phi_n(\theta, \phi)$$

$$= \sum_{n=0}^{M-1} i^T q_n \Phi_n(\theta, \phi) = \sum_{n=0}^{M-1} s_{bs,n} \Phi_n(\theta, \phi) \quad (2.20)$$

Όπου $q_n = [q_{0n} \dots q_{(M-1)n}]^T$ είναι ένα διάνυσμα ($M \times 1$) με τις προβολές όλων των συναρτήσεων $a_m(\theta, \phi)$, $m=0, \dots, M-1$ στο $\Phi_n(\theta, \phi)$. Όπως φαίνεται από την σχέση (2.16) σε συνδυασμό με την σχέση (2.20) το n -οστό διάγραμμα βάσης πολλαπλασιάζεται με το σύμβολο $s_{bs,n} = i^T q_n$ και το $s_{bs} = [s_{bs,0} \dots s_{bs,M-1}]^T$ ορίζει ένα διάνυσμα συντεταγμένων στο πεδίο των διαγραμμάτων ακτινοβολίας το οποίο αντιστοιχεί σε ένα εκπεμπόμενο διάγραμμα ακτινοβολίας.

Η διαδικασία Gram-Schmidt μπορεί να αρχίσει από οποιαδήποτε συνάρτηση $a_m(\theta, \phi)$. Ορίζεται ως αρχική συνάρτηση η $a_0(\theta, \phi)$ και τότε το πρώτο διάγραμμα βάσης θα είναι το $\Phi_0(\theta, \phi) = a_0(\theta, \phi) / k_0$ (2.21).

Ενώ τα υπόλοιπα θα προκύψουν από την αφαίρεση της προβολής των επόμενων συναρτήσεων προς τις συναρτήσεις που έχουν οριστεί μέχρι στιγμής στην ορθοκανονική βάση. Άρα θα ισχύει ότι:

$$\Phi_n(\theta, \phi) = \frac{1}{k_n} \left(a_n(\theta, \phi) - \sum_{s=0}^{n-1} q_{n,s} \Phi_s(\theta, \phi) \right) \quad (2.22)$$

$$\text{Με } k_n = \sqrt{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi \left| a_n(\theta, \phi) - \sum_{s=0}^{n-1} q_{n,s} \Phi_s(\theta, \phi) \right|^2 \sin \theta d\theta d\phi}, \quad n=1 \dots M-1. \quad (2.23)$$

Όπως φαίνεται καθαρά από την σχέση (2.22) τα διαγράμματα βάσης είναι κανονικοποιημένα με μοναδιαία ισχύ. Είναι εμφανές πλέον ότι για μια τυχαία παρασιτική κεραία ESPAR με τυχαίο πλήθος παρασιτικών στοιχείων, τα διαγράμματα ακτινοβολίας που αποτελούν την βάση, μπορούν να υπολογιστούν αριθμητικά με χρήση της επαναληπτικής εξίσωσης (2.22)[13]-[14].

Κυκλική 5 στοιχείων ESPAR κεραία

Αν εφαρμοστεί τώρα η μέθοδος σε μια κυκλική 5 στοιχείων ESPAR κεραία, λόγω της κυκλικής στοιχειοθέτησης των παρασιτικών στοιχείων θα ισχύει ότι $b_m = b = 2\pi d$ όπου το d είναι η ακτίνα της κεραίας κανονικοποιημένη σε μήκος κύματος. Το ϕ_m θα δίνεται από το τύπο $\phi_m = \frac{(m-1)2\pi}{M-1}$, $m=1, \dots, M-1$. Η συγκεκριμένη

κεραία έχει επιλεγεί καθώς είναι η πιο απλή τοπολογία που μπορεί να προσφέρει

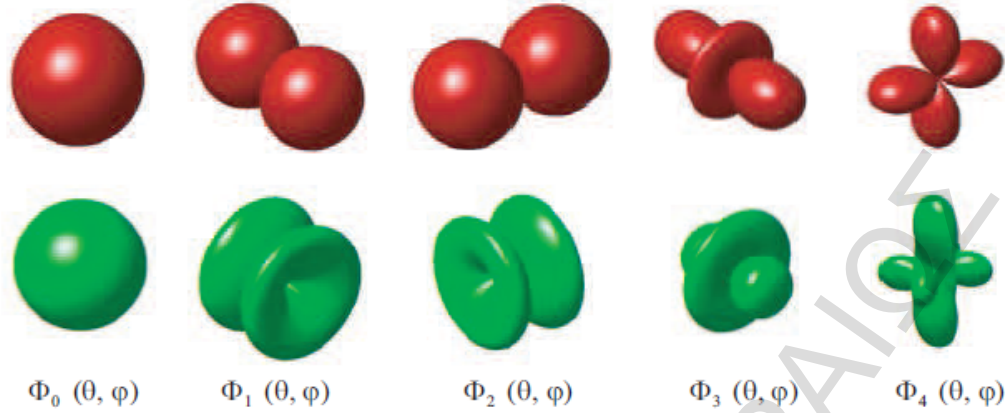
διαγράμματα ακτινοβολίας σε όλο το εύρος 360° και κατά συνέπεια αυξημένες δυνατότητες προσανατολισμού του διαγράμματος ακτινοβολίας. Άρα αναλυτικά το εκπεμπόμενο διάγραμμα ακτινοβολίας θα δίνεται ως εξής[14]:

$$\begin{aligned}
 P(\theta, \phi) &= i_0 + i_1 \exp(jb \sin \theta \cos \phi) + i_2 \exp(jb \sin \theta \cos \phi) + \\
 &\quad + i_3 \exp(-jb \sin \theta \cos \phi) + i_4 \exp(-jb \sin \theta \cos \phi) \\
 &= i_0 \underbrace{1}_{\bar{a}_0(\theta, \phi)} + j(i_1 - i_3) \underbrace{\sin(b \sin \theta \cos \phi)}_{\bar{a}_1(\theta, \phi)} + j(i_2 - i_4) \underbrace{\sin(b \sin \theta \sin \phi)}_{\bar{a}_2(\theta, \phi)} \\
 &\quad + (i_1 + i_3) \underbrace{\cos(b \sin \theta \cos \phi)}_{\bar{a}_3(\theta, \phi)} + (i_2 + i_4) \underbrace{\cos(b \sin \theta \sin \phi)}_{\bar{a}_4(\theta, \phi)} \quad (2.24)
 \end{aligned}$$

Έγινε χρήση της ταυτότητας του euler για να απλοποιηθεί η διαδικασία εξαγωγής των αναλυτικών εκφράσεων. Επομένως, κατά την διαδικασία της ορθοκανονικοποίησης, χρησιμοποιούνται ως συναρτήσεις τα $\bar{a}_i(\theta, \phi)$ και όχι τα μιγαδικά εκθετικά του διανύσματος προσανατολισμού της κεραίας, τα όποια είναι ισοδύναμα μεταξύ τους. Αφού, εφαρμοστεί η διαδικασία της ορθοκανονικοποίησης Gram-Schmidt έχει σαν αποτέλεσμα το εξής σέτ βάσεων:[13]

$$\begin{aligned}
 \Phi_0(\phi) &= 1/k_0 \\
 \Phi_1(\phi) &= \sin(b \cos(\phi))/k_1 \\
 \Phi_2(\phi) &= \sin(b \sin(\phi))/k_2 \\
 \Phi_3(\phi) &= [\cos(b \cos(\phi)) - A]/k_3 \\
 \Phi_4(\phi) &= [\cos(b \sin(\phi)) - A]/k_4 - B[\cos(b \cos(\phi)) - A]/k_4
 \end{aligned} \quad (2.25)$$

Όπου $A = 2\pi I_0(jb)/k_0^2$, $B = 2\pi I_0(j\sqrt{2}b)/k_3^2 - k_0^2 A^2/k_3^2$ και I_0 είναι η μηδενικής τάξης τροποποιημένη συνάρτηση Bessel πρώτου βαθμού.



Σχήμα 2.3

Τα 3D patterns μιας κυκλικής ESPAR κεραίας με 5 στοιχεία (Τα κόκκινα patterns είναι για $d=1/16$ ενώ τα πράσινα είναι για $d=1/2$)[14].

Μετά την εφαρμογή της μεθόδου Gram-Schmidt, παρατηρούμε ότι οι βαθμοί ελευθερίας στο πεδίο των διαγραμμάτων ακτινοβολίας είναι ίσοι με το πλήθος των στοιχείων των κεραίων. Όμως αυτοί δεν είναι και οι ενεργοί-αποδοτικοί βαθμοί ελευθερίας καθώς με αυτή τη μέθοδο δεν συνυπολογίστηκε το πραγματικό κανάλι. Επίσης είναι βασικό να συνυπολογιστεί και η ηλεκτρομαγνητική σύζευξη των διπλανών στοιχείων όπου για την οποία απαιτείται η γνώση του $Z_{mn} = R_{mn} + jX_{mn}$ η οποία προκύπτει από τις εξής 2 συναρτήσεις [14]

$$R_{mn} = 30[2C_i(2\pi) - C_i(2\pi(\sqrt{\tilde{d}_{mn}^2 + D^2} + D)) - C_i(2\pi(\sqrt{\tilde{d}_{mn}^2 + D^2} - D))] \quad (2.26)$$

$$X_{mn} = -30[2S_i(2\pi) - S_i(2\pi(\sqrt{\tilde{d}_{mn}^2 + D^2} + D)) - S_i(2\pi(\sqrt{\tilde{d}_{mn}^2 + D^2} - D))] \quad (2.27),$$

όπου \tilde{d}_{mn} η απόσταση του m και n στοιχείου της ESPAR, και $S_i(x) = \int_0^x \frac{\sin t}{t} dt$ αλλά και

$$C_i(x) = -\int_x^\infty \frac{\cos t}{t} dt$$

Τα παραπάνω έχουν σαν συνέπεια οι ενεργοί βαθμοί ελευθερίας που ουσιαστικά συμβάλουν στο εκπεμπόμενο διάγραμμα ακτινοβολίας να είναι μικρότεροι ή ίσοι των θεωρητικών βαθμών ελευθερίας που υπολογίστηκαν.

2.2.1.6 Προσαρμοστικά Διαγράμματα Βάσης

Στην προηγούμενη ενότητα αναλύθηκε η διαδικασία ορθοκανονικοποίησης Gram-Schmidt όπου είναι μέχρι και σήμερα αξιόλογη μέθοδος αποσύνθεσης του πεδίου διαγράμματος ακτινοβολίας. Το μειονέκτημα της παραπάνω μεθόδου βρίσκεται στο γεγονός ότι βασίζεται μόνο στην γεωμετρία του πομπού και δέκτη και αγνοεί την ύπαρξη του καναλιού-διαύλου. Στην παρούσα ενότητα θα αναλυθεί μια δυναμική τεχνική βασισμένη στην μέθοδο SVD η οποία όχι μόνο υπολογίζει αποδοτικά διαγράμματα ακτινοβολίας αλλά και παρέχει πληροφορίες για το πλήθος των ενεργών-αποδοτικών βαθμών ελευθερίας. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι έχει εφαρμοστεί και έχει μελετηθεί σε ESPAR κεραίες. Η διαδικασία αυτή λαμβάνει χώρα στο δέκτη όπου είναι γνωστός ο πίνακας καναλιού στο πεδίο διαγραμμάτων ακτινοβολίας, ενώ ταυτόχρονα είναι γνωστά και στον πομπό και στο δέκτη τα αρχικά διαγράμματα βάσης τα οποία έχουν παραχθεί αγνοώντας το κανάλι με την μέθοδο Gram Schmidt.

Αφού έχουν υπολογιστεί τα ορθογώνια διαγράμματα βάσης $\Phi_{R,T}$ με την μέθοδο του Gram Schmidt, το κανάλι αναλύεται σε ένα σετ ορθογώνιων βάσεων με την γνωστή μέθοδο SVD, $H_{bs} = U\Sigma V^H$ (κάθε πίνακας έχει περιγραφεί αναλυτικά στην ενότητα 1.6 όπως και η διαδικασία SVD). Το κύριο αποτέλεσμα της περιγραφόμενης διαδικασίας είναι ότι η τάξη του πίνακα Σ είναι ίση με τον αριθμό των αποδοτικών βαθμών ελευθερίας και ακόλουθα του αριθμού των βασικών διαγραμμάτων από τα οποία μπορεί να χρησιμοποιηθούν για παράλληλη και ανεξάρτητη μετάδοση. Έμφαση πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι η διαδικασία SVD στο H_{bs} δεν υπολογίζει τα προσαρμοσμένα διαγράμματα και διαφέρει κατά πολύ η διαδικασία από τα συμβατικά MIMO συστήματα. Στα συστήματα BS-MIMO τα ιδιόμορφα διανύσματα χρησιμοποιούνται για την διαμόρφωση των αρχικών διαγραμμάτων σε αντίθεση με τα συμβατικά συστήματα όπου εφαρμόζονται κατευθείαν στις κεραίες. Της πρώτης τάξης τα κύρια ιδιοδιανύσματα του πίνακα H_{bs} , τα οποία μεγιστοποιούν την χωρητικότητα του καναλιού, χρησιμοποιούνται για να αναμορφώσουν τα αρχικά διαγράμματα βάσης σύμφωνα με το ακόλουθο γινόμενο πινάκων:

$$\begin{aligned}\hat{\Phi}_R &= [\tilde{\phi}_{R,1} \dots \tilde{\phi}_{R,M}] [u_1 \dots u_{rank(\Sigma)}] = \tilde{\Phi}_R U_{rank(\Sigma)} \\ \hat{\Phi}_T &= [\tilde{\phi}_{T,1} \dots \tilde{\phi}_{T,M}] [v_1 \dots v_{rank(\Sigma)}] = \tilde{\Phi}_T V_{rank(\Sigma)}\end{aligned}\quad (2.26),$$

όπου το u_i, v_i είναι η i -οστή στήλη των πινάκων U και V .

Εάν δεν είχε εφαρμοστεί η μέθοδος Gram-Schmidt για να υπολογιστούν τα αρχικά διαγράμματα (τα οποία είναι ανεξάρτητα καναλιού), τότε τα διαμορφούμενα νέα διαγράμματα(τα οποία έχουν επίγνωση καναλιού) δεν θα είναι ορθοκανονικά. Αυτό με τη σειρά του θα είχε ως αποτέλεσμα τη μη απόπλεξη των παράλληλων ροών και άρα την υποχρησιμοποίηση της χωρητικότητας του συστήματος. Για παράδειγμα σε ένα περιβάλλον πλούσιο με σκεδαστές και ομοιόμορφη κατανομή πολυδιαδρομικών συνιστωσών στο αζιμούθιο η χωρική συσχέτιση στο πεδίο ακτινοβολίας δίνεται από το τύπο $R_{bs} = E(H_{bs}^H H_{bs}) = I_M$, παρέχοντας έτσι ενισχυμένες ικανότητες πολυπλεξίας ροής.

Ο καινούργιος πίνακας \hat{H}_{bs} στο πεδίο beamspace ,που έχει προκύψει, είναι ορθογώνιος και αποτελείται από τάξης του Σ ασυσχέτιστα παράλληλα κανάλια:

$$\begin{aligned}\hat{H}_{bs} &= \hat{\Phi}_R^H H_u \hat{\Phi}_T = \hat{\Phi}_R^H \tilde{\Phi}_R H_{bs} \tilde{\Phi}_T^H \hat{\Phi}_T = \\ &= \hat{\Phi}_R^H \tilde{\Phi}_R U \{diag(\sigma_1, \dots, \sigma_{rank(\Sigma)}, 0 \dots 0)\} V^H \tilde{\Phi}_T^H \hat{\Phi}_T\end{aligned}\quad (2.27)$$

Λόγω του γεγονότος ότι οι πίνακες $\hat{\Phi}_T$ και $\hat{\Phi}_R$ είναι παράγωγα ορθομοναδιαίων πινάκων, τότε είναι λογικό να είναι και αυτοί ορθομοναδιαίοι πίνακες. Τότε από τα παραπάνω βγαίνει το συμπέρασμα ότι $\hat{H}_{bs} = \Sigma_{rank(\Sigma)}$.

Η μέθοδος αυτή εφόσον έχει εφαρμοστεί στο δέκτη πρέπει να σταλθούν τα προσαρμοστικά πλέον διαγράμματα ακτινοβολίας στο πομπό. Η αναδιάταξη των διαγραμμάτων βάσης με προσαρμοστικό τρόπο στις συνθήκες του καναλιού, οδηγεί σε ένα πίνακα καναλιού ο οποίος μεγιστοποιεί την χωρητικότητα του συστήματος και ταυτόχρονα αποπλέκει τις εισερχόμενες ροές δεδομένων. Αντί να στέλνεται ολόκληρος ο πίνακας των νέων διαγραμμάτων στο πομπό έχει αποδειχθεί ότι είναι αποδοτικότερο να στέλνεται ο πίνακας των τιμών των μεταβλητών αντιδράσεων με τις οποίες τερματίζουν τα παρασιτικά στοιχεία της ESPAR κεραίας[10],[15].

2.2.1.7 Λειτουργία Πομπού και Δέκτη ESPAR Κεραίας

Στη συνέχεια θα περιγραφεί η λειτουργία[13],[9] του πομπού και δέκτη ενός συστήματος που έχει κεραίες ESPAR και στα δυο άκρα δηλαδή και σαν πομπό και σαν δέκτη.

Λειτουργία πομπού

Γνωρίζοντας τα διαγράμματα βάσης καθώς και τα σύμβολα που είναι προς αποστολή τότε είναι εφικτή η παράλληλη μετάδοση των συμβόλων μέσω γραμμικού συνδυασμού των διαγραμμάτων βάσης με βάρη που αντιστοιχούν στα εκπεμπόμενα σύμβολα. Τα διαγράμματα εφόσον είναι ορθογώνια μεταξύ τους τότε και ο γραμμικός συνδυασμός αυτών θα εξασφαλίζει την ορθογωνιότητα στη μετάδοση των συμβόλων. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι ο αριθμός των συμβόλων που μεταδίδονται παράλληλα περιορίζεται σημαντικά από τον αριθμό των αποδοτικών-ενεργών βαθμών ελευθερίας της κεραίας (N_{eff}). Αν διαχωριστούν οι συντελεστές του διαγράμματος βάσης σε πλάτος και φάση τότε αυτό μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$P_t(\phi) = \sum_{n=0}^{N_{eff}-1} |w_n| \exp(j|w_n) \Phi_n(\phi) \quad (2.28)$$

Με βάση τα παραπάνω το τελικό διάγραμμα ακτινοβολίας είναι άμεσα εξαρτημένο από τα διαθέσιμα διαγράμματα βάσης, καθώς και από τα σύμβολα βασικής ζώνης τα οποία συνδιαμορφώνουν το τελικό σχήμα του. Η διαδικασία αυτή όπου κάθε εκπεμπόμενο σύμβολο διαμορφώνει και διαφορετικό διάγραμμα ακτινοβολίας ονομάζεται αντιστοίχιση βάσης διαγράμματος (pattern modulation) ή εναέρια διαμόρφωση (aerial modulation) [23].

Τέλος όταν ο πομπός δεν έχει γνώση του καναλιού το $|w_n| = \frac{1}{\sqrt{N_{eff}}}$, $n = 0, \dots, N_{eff} - 1$ και η σχέση 2.28 γίνεται:

$$P_t(\phi) = \frac{1}{\sqrt{N_{eff}}} \sum_{n=0}^{N_{eff}-1} x_n \Phi_n(\phi) \quad (2.29),$$

όπου το x_n είναι το σύμβολο το οποίο μοντελοποιεί το διάγραμμα βάσης $\Phi_n(\phi)$.

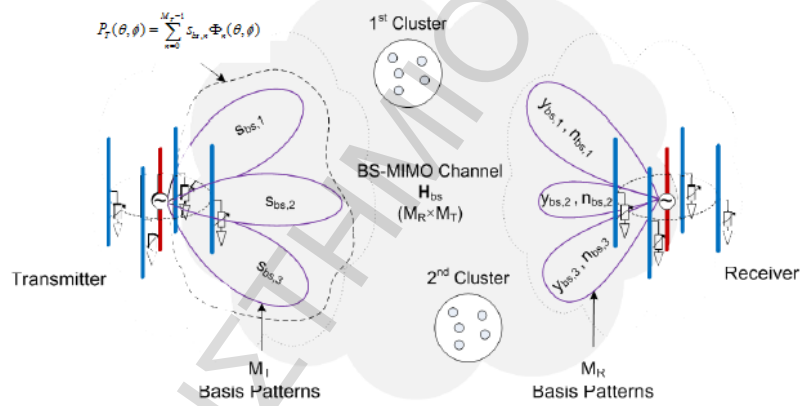
Λειτουργία δέκτη

Όσο αφορά τον δέκτη, εφόσον έχουμε ένα ενεργό στοιχείο δεν είναι εφικτή η δειγματοληψία σε πεδίο χώρου. Αντί αυτού τα δείγματα πρέπει να συλλεχθούν σε επίπεδο beamspace. Για να γίνει αυτό εφικτό θα πρέπει να έχουμε σειριακή εναλλαγή των διαγραμμάτων βάσεων που είναι αποδοτικά-ενεργά, και στη συνέχεια να ληφθούν N_{eff} δείγματα μέσα σε μια περίοδο σύμβολου. Για αυτό το λόγο η περίοδος σύμβολου χωρίζεται σε N_{eff} προσωρινά χρονικά υποδιαστήματα (subslots) όσα είναι και τα διαγράμματα βάσης του δέκτη, σε κάθε ένα subslot αντιστοιχίζεται

διαφορετικό διάγραμμα βάσης και σε αυτά λαμβάνονται δείγματα με σειριακή εναλλαγή. Στο i -οστό slot η απόκριση του καναλιού μπορεί να δοθεί ως εξής:

$$h_{bs}^{(i)} = \iint P_{r,i}^H(\phi_r) H_a(\phi_r, \phi_t) P_t(\phi_t) d\phi_r d\phi_t \quad (2.30)$$

Όπου $P_{r,i}(\phi_r) = \Phi_{r,i}(\phi_r)$ και $H_a(\phi_r, \phi_t)$ το κέρδος μιγαδικού καναλιού μεταξύ μεταδιδόμενης και λαμβανόμενης γωνίας. Να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη λειτουργικότητα είναι αρκετά αποδοτική καθώς λαμβάνει πολλαπλά σήματα με χρήση μόνο μιας αλυσίδας ραδιοσυχνότητας. Παρόλα αυτά, πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι λόγω του oversampling που κάνουμε μέσα στη διάρκεια ενός συμβόλου προκαλείται μια σχετική μείωση στο SNR (σηματοθορυβικός λόγος) που σε γενικές γραμμές είναι αποδεκτή. Παρακάτω ακολουθεί μια εικόνα με ένα δέκτη και ένα πομπό ESPAR.



Σχήμα 2.4

BS MIMO αρχιτεκτονική για ESPAR στοιχειοκεραίες[23]

Κεφάλαιο 3: Γενετικοί Αλγόριθμοι

3.1 Εισαγωγή

Ο Γενετικός αλγόριθμος (G.A.) εφευρέθηκε από τον John Holland στην δεκαετία του 1960, κατασκευάστηκε από τον ίδιο και από την ομάδα του στο πανεπιστήμιο του Michigan. Σε αντίθεση με τις στρατηγικές εξέλιξης και με το προγραμματισμό που βασίζεται στην εξέλιξη του είδους, ο αρχικός στόχος του Holland δεν ήταν να σχεδιάσει αλγορίθμους που να επιλύουν συγκεκριμένα προβλήματα, αλλά να μελετήσει το φαινόμενο της προσαρμογής όπως αυτό συμβαίνει στην φύση και να κατασκευάσει μεθόδους οι οποίες περιέχουν μηχανισμούς παρόμοιους με αυτούς της φυσικής προσαρμογής αλλά για εφαρμογές υπολογιστικών συστημάτων.

Το 1975 το βιβλίο του Holland «Adaptation in Natural and Artificial Systems» παρουσίασε εντελώς αφαιρετικά τον γενετικό αλγόριθμο και του έδωσε μια καθαρά θεωρητική χροιά. Η εισαγωγή του Holland της έννοιας του πληθυσμού στον γενετικό αλγόριθμο σε συνδυασμό με τις μεθόδους της διασταύρωσης, επιλογής και μετάλλαξης ήταν κάτι το εντελώς καινοτόμο. Αρχικά το βιβλίο του Rechenberg στρατηγικές εξελίξεις ξεκινούσε με ένα πληθυσμό 2 ατόμων ένα γονιό και ένα απόγονο, όπου ο απόγονος ήταν μια μεταλλαγμένη εκδοχή του γονιού.

Παρομοίως, στο βιβλίο των Fogel, Owens και Walsh «evolution programming» χρησιμοποιήθηκε μόνο σαν τεχνική διαφοροποίησης τιμών του πληθυσμού την μετάλλαξη. Ο Holland ουσιαστικά ήταν ο μόνος που έβαλε υπολογιστική-πρακτική έννοια στον τότε θεωρητικής φύσεως γενετικό αλγόριθμο. Στα τελευταία χρόνια έχουν γίνει παγκοσμίως αρκετές μελέτες και αλληλεπιδράσεις στην έννοια του γενετικού αλγορίθμου από ερευνητές που σπουδάζουν θέματα όπως εξελικτική μηχανική και άλλες τεχνικές βελτιστοποίησης και όλοι αναφέρονται στο γενετικό αλγόριθμο αλλά πλέον με έννοια αρκετά διαφοροποιημένη από τις αρχικές βλέψεις του Holland[19].

3.2 Επισκόπηση Γενετικών Αλγορίθμων

Ο γενετικός αλγόριθμος [17]-[20] είναι μια τεχνική βελτιστοποίησης και αναζήτησης που βασίζεται στους κανόνες της γενετικής και της φυσικής επιλογής. Επιτρέπει σε ένα πληθυσμό αρκετών ατόμων να εξελιχτούν κάτω από συγκεκριμένες

συνθήκες ώστε να μεγιστοποιήσουν (ή να ελαχιστοποιήσουν) την συνάρτηση βελτιστοποίησης (συνάρτηση φόρμας ή την συνάρτηση κόστους αντίστοιχα). Μέσα στους γενετικούς αλγορίθμους έχουμε αναφορές σε άτομα ή γενότυπους που συμπληρώνουν ένα πληθυσμό. Αρκετές φορές αυτά τα άτομα ονομάζονται χρωμοσώματα, τα οποία αποτελούνται από διάφορα στοιχεία που ονομάζονται γονίδια. Τα γονίδια που επηρεάζουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και βρίσκονται σε συγκεκριμένες θέσεις μέσα στο χρωμόσωμα ονομάζονται τόποι. Οι διαφορετικές καταστάσεις που μπορεί να πάρει ένα γονίδιο ονομάζονται αλληλόμορφα και το αποκωδικοποιημένο περιεχόμενο ενός συγκεκριμένου χρωμοσώματος ονομάζεται φαινότυπος.

3.2.1 Πλεονεκτήματα Γενετικών Αλγορίθμων

Γίνεται παράθεση κάποιων πλεονεκτημάτων των γενετικών αλγορίθμων:

- Βελτιστοποιούν το ίδιο αποτελεσματικά και με συνεχόμενες αλλά και με διακριτές μεταβλητές.
- Δεν χρειάζονται παραγωγή επιπλέον πληροφορίας και ταυτόχρονα ψάχνουν σε ένα μεγάλο εύρος δειγμάτων της επιφάνειας κόστους για βέλτιστη λύση.
- Τα καταφέρνουν εξίσου αποτελεσματικά με μεγάλο αριθμό μεταβλητών.
- Είναι πολύ καλά δομημένοι για παράλληλο υπολογισμό.
- Παρέχουν μια λίστα βέλτιστων μεταβλητών και όχι μόνο μια λύση.
- Μπορεί να κωδικοποιήσουν τις μεταβλητές και μπορούν εύκολα να ξεφεύγουν από τοπικά ελάχιστα ακόμα και όταν το πεδίο λύσεων είναι αρκετά πολύπλοκο.

Βέβαια οι γενετικοί αλγόριθμοι δεν είναι και η βέλτιστη λύση για όλων των ειδών τα προβλήματα. Για παράδειγμα, οι παραδοσιακοί μέθοδοι κατευθύνονται κυρίως στο να βρουν γρήγορα μια λύση για μια καλά δομημένη κυρτή/κοίλη συνάρτηση των λίγων μεταβλητών, τέτοιες περιπτώσεις οι υπολογιστικά δυνατές μέθοδοι ξεπερνούν σε επιδόσεις τους γενετικούς καθώς βρίσκουν γρήγορα βέλτιστη λύση ενώ οι γενετικοί θα καθυστερήσουν αρκετά με το υπολογισμό των κοστών του αρχικού πληθυσμού. Έτσι για αρκετά προβλήματα που δεν είναι αρκετά δύσκολα (και με

λίγες μεταβλητές) οι γενετικοί αλγόριθμοι θα καθυστερήσουν αρκετά σε σχέση με κάποια άλλη μέθοδο. Ο μεγάλος πληθυσμός των λύσεων κάτω από τον οποίο λειτουργούν οι γενετικοί είναι η δύναμη τους αλλά και η αδυναμία τους όταν έχουμε να κάνουμε με θέματα ταχύτητας αλλά και υπολογιστικής δύναμης (λόγω του ότι θα πρέπει να υπολογίζουν για κάθε μια λύση το κόστος της). Τα πράγματα αλλάζουν όταν υπάρχει επιλογή για παράλληλο υπολογιστικό σύστημα καθώς σε αυτή την περίπτωση μπορεί κάθε επεξεργαστής να υπολογίζει το κόστος κάθε λύσης προσφέροντας σημαντική ταχύτητα στο γεγονός να βρεθεί τελική λύση [17],[18].

3.2.2 Θέματα κωδικοποίησης και επιλογής μεταβλητών

Οι Γενετικοί αλγόριθμοι ξεκινούν, όπως κάθε διαδικασία βελτιστοποίησης ορίζοντας μεταβλητές βελτιστοποίησης, συνάρτηση βελτιστοποίησης (φόρμας ή κόστους) και το κόστος. Για ευκολία αναφοράς πλέον ανεξαρτήτως τη θεματολογία του προβλήματος (μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση) τη συνάρτηση βελτιστοποίησης θα την ονομάζουμε συνάρτηση κόστους.

Μια συνάρτηση κόστους παράγει ένα αποτέλεσμα από ένα σετ μεταβλητών εισόδου (ένα χρωμόσωμα). Η συνάρτηση αυτή μπορεί να έχει οποιαδήποτε μορφή από μια μαθηματική συνάρτηση μέχρι και ένα πείραμα με σκοπό να μοντελοποιήσει με κάποιο επιθυμητό τρόπο το αποτέλεσμα τοποθετώντας κατάλληλες τιμές σαν τιμές εισόδου και παρέχοντας λύση. Η κωδικοποίηση της λύσης ενός προβλήματος σε ένα χρωμόσωμα είναι ένα βασικό ζήτημα στους γενετικούς αλγορίθμους. Η καλύτερη κωδικοποίηση κατά τον Holland είναι η δυαδική, όμως με την δυαδική κωδικοποίηση έχουμε αρκετά μειονεκτήματα λόγω του φαινομένου Hamming Cliffs. Για παράδειγμα το ζευγάρι 0111111111 1000000000 ανήκει σε γειτονικά σημεία στο φαινότυπο (σημεία με ελάχιστη ευκλείδεια απόσταση) αλλά έχουν την μέγιστη δυνατή Hamming απόσταση στο γενότυπο. Για να λυθεί το πρόβλημα αυτό πρέπει όλα τα bit να αλλάζουν ταυτόχρονα. Η πιθανότητα να συμβεί μετάλλαξη και διασταύρωση στο ίδιο σημείο είναι μικρή και με αυτό το τρόπο η δυαδική κωδικοποίηση αποφεύγει την διατήρηση της τοπικής λύσης στον φαινότυπο.

Στην συνέχεια παρατίθενται μέθοδοι κωδικοποίησης ανάλογα με το τι σύμβολα χρησιμοποιήθηκαν στα αλληλόμορφα του γονιδίου:

- Δυαδική κωδικοποίηση
- Κωδικοποίηση με πραγματικούς αριθμούς

- Κωδικοποίηση με μετάθεση ακεραίου
- Κωδικοποίηση γενικής δομής δεδομένων

Η κωδικοποίηση με πραγματικούς αριθμούς έχει ευρέως αποδεδειχθεί ότι έχει καλύτερα αποτελέσματα σε προβλήματα βελτιστοποίησης με περιορισμούς ακόμα και από την κωδικοποίηση με δυαδικούς. Η κωδικοποίηση με μετάθεση ακεραίου έχει τα καλύτερα αποτελέσματα όταν έχουμε συνδυαστικό πρόβλημα βελτιστοποίησης αφού από την φύση του ένα συνδυαστικό πρόβλημα πραγματεύεται την αναζήτηση της βέλτιστης μετάθεσης ή του βέλτιστου συνδυασμού. Για ακόμα πιο πολύπλοκα πραγματικού κόσμου προβλήματα συνίσταται μια δομή δεδομένων που να ταιριάζει και με την φιλοσοφία του προβλήματος. Σε αυτή την περίπτωση ένα γονίδιο μπορεί να κωδικοποιηθεί σε μια μ-αδική διαστάσεων δομή δεδομένων.

Επιπρόσθετα πρέπει να σημειωθεί ότι οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν να κάνουν με 2 χώρους το χώρο κωδικοποίησης αλλά και το χώρο των λύσεων, με αλλά λόγια το χώρο των γονότυπων αλλά και το χώρο των φαινότυπων. Η φυσική επιλογή είναι ο δεσμός των χρωμοσωμάτων και της επίδοσης των λύσεων. Η αντιστοίχιση από το χώρο του γονότυπου στο χώρο του φαινότυπου έχει σημαντική επίπτωση στην επίδοση των γενετικών. Σε αυτό το σημείο υπάρχουν 2 προβλήματα, το πρόβλημα της μη εφικτής λύσης (infeasibility) και το πρόβλημα της μη επιτρεπτής λύσης (illegality). Το πρώτο πρόβλημα αναφέρεται σε λύσεις που έχουν αποκωδικοποιηθεί από χρωμοσώματα και είναι εκτός πεδίου εφικτών-ζητούμενων λύσεων του δοθέντος προβλήματος, ενώ το δεύτερο πρόβλημα αναφέρεται σε χρωμοσώματα τα οποία δεν αντιστοιχούν καν σε λύσεις του δοθέντος προβλήματος.

Το infeasibility των χρωμοσωμάτων έχει να κάνει με την φύση των περιορισμών του προβλήματος. Μπορούμε να φανταστούμε ως μια γειτονιά εφικτών-αποδεκτών λύσεων σαν ένα σύστημα ισοτήτων ή ανισοτήτων, όπου για τις περιπτώσεις του παραπάνω προβλήματος να υπάρχει μια ενέργεια ποινής και να χειρίζεται infeasible χρωμοσώματα. Όπου η ενέργεια αυτή θα χειρίζεται την αναζήτηση των γενετικών και από τις δυο γειτονιές (feasible και infeasible) καθώς στα όρια ανάμεσα των δυο θα βρίσκεται και η βέλτιστη λύση.

Το illegality των χρωμοσωμάτων σχετίζεται με την φύση των τεχνικών κωδικοποίησης. Ιδιαίτερα στην φάση της διασταύρωσης και λόγω της τεχνικής

κωδικοποίησης που χρησιμοποιήθηκε, υπάρχει πιθανότητα να υπάρξει κάποιος απόγονος που να μην είναι αποδεκτός, λόγω του ότι το χρωμόσωμα δεν μπορεί να αποκωδικοποιηθεί σε λύση. Οι τεχνικές που υπάρχουν για την λύση του προβλήματος ονομάζονται τεχνικές επιδιόρθωσης και επιδιορθώνουν το εκάστοτε χρωμόσωμα, για παράδειγμα ο χειριστής PMX[17]-[18].

3.3 Συστατικά Στοιχεία Γενετικών Αλγορίθμων

Οι γενετικοί αλγόριθμοι ξεκινούν ορίζοντας ένα χρωμόσωμα σαν ένα πίνακα από μεταβλητές που είναι προς βελτιστοποίηση. Εάν το χρωμόσωμα έχει N μεταβλητές που ορίζονται ως p_1, \dots, p_N , τότε το χρωμόσωμα δίνεται ως εξής :

$$chromosome = [p_1, \dots, p_N] \quad (3.1)$$

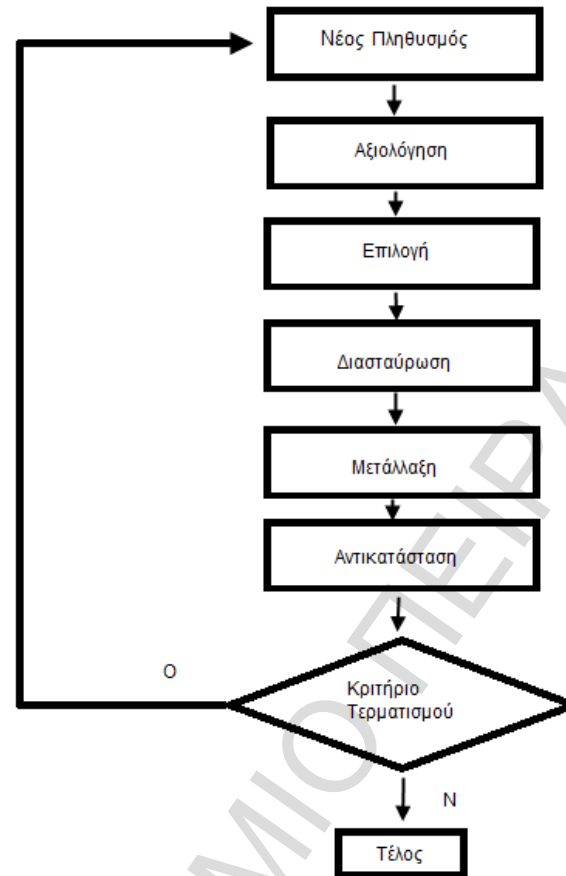
Κάθε χρωμόσωμα έχει ένα κόστος το οποίο υπολογίζεται εφαρμόζοντας μια συνάρτηση κόστους f στις μεταβλητές του χρωμοσώματος.

$$cost = f(chromosome) \quad (3.2)$$

Ο συνολικός αριθμός των χρωμοσωμάτων αποτελεί τον λεγόμενο πληθυσμό. Έχουμε τυχαία και παράλληλη αναζήτηση βέλτιστης λύσης και ο πληθυσμός (population) βελτιώνεται μέσω κάποιων βημάτων-τελεστών που είναι οι εξής:

- Επιλογή (selection)
- Διασταύρωση (crossover)
- Μετάλλαξη (mutation)
- Αντικατάσταση (replacement)

Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να βρεθεί βέλτιστη λύση ή να ικανοποιηθούν κάποιοι περιορισμοί τερματισμού. Παρακάτω ακολουθεί ένα σχήμα όπου δείχνει σε μορφή διαγράμματος τα βήματα των γενετικών αλγορίθμων.



Σχήμα 3.1

Διάγραμμα ροής γενετικού αλγορίθμου

3.3.1 Επιλογή

Μετά την κωδικοποίηση των μεταβλητών και τον υπολογισμό του αρχικού κόστους του πληθυσμού υπάρχει μια ακόμα απόφαση να παρθεί. Η απόφαση είναι σχετική με ποιά χρωμοσώματα θα επιλέγουν για διασταύρωση. Ο σκοπός της επιλογής των χρωμοσωμάτων έχει να κάνει με την επιλογή των βέλτιστων απογόνων και συνάμα την βελτιστοποίηση της συνάρτησης κόστους. Στην βιβλιογραφία [17]-[21] υπάρχουν πάρα πολύ μέθοδοι επιλογής έγινε επιλογή και γίνεται παράθεση των πιο σημαντικών.

Επιλογή Boltzmann

Η μέθοδος επιλογής boltzmann μοιάζει αρκετά στη μέθοδο simulated annealing. Δηλαδή υπάρχει η έννοια της θερμοκρασίας η οποία ελεγχόμενα πέφτει (με βάση

κάποιο χρονοδιάγραμμα) και αλλάζει το τρόπο επιλογής χρωμοσωμάτων. Η θερμοκρασία στην αρχή πέφτει πιο γρήγορα και αυτό ερμηνεύεται ότι η επιλογή των χρωμοσωμάτων γίνεται σχετικά τυχαία (όλα τα χρωμοσώματα έχουν ίδια πιθανότητα να επιλεγούν). Όσο πέφτει σταδιακά η θερμοκρασία αρχίζει και η επιλογή των χρωμοσωμάτων να είναι πιο επιλεκτική και βασίζεται κυρίως στα χρωμοσώματα που έχουν βέλτιστες τιμές. Μόλις φτάσει στο 0 (η και νωρίτερα εφόσον έχει συγκλίνει σχετικά γρήγορα στο βέλτιστο) έχουν επιλεγεί τα βέλτιστα χρωμοσώματα και ο βέλτιστος πληθυσμός έχει σχηματιστεί με βάση φυσικά την συνάρτηση βελτιστοποίησης. Όσο αφορά το τρόπο με τον οποίο μειώνεται η θερμοκρασία υπάρχουν αρκετές μέθοδοι εναλλαγές του τρόπου του boltzmann όπως για παράδειγμα η γεωμετρική πρόοδος. Παρακάτω γίνεται παράθεση της συνάρτησης επιλογής boltzmann:

$$\expVal(i,t) = \frac{e^{f(i)/T}}{\langle e^{f(i)/T} \rangle_t} \quad (3.3)$$

Όπου T είναι η θερμοκρασία, $\langle \rangle_t$ συμβολίζει την μέση τιμή του πληθυσμού εκείνη την χρονική στιγμή, i ένας μετρητής χρωμοσωμάτων.

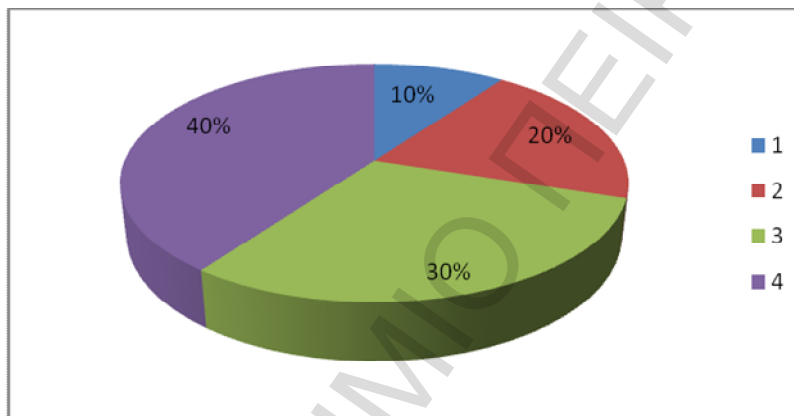
Επιλογή Ρουλέτας

Η επιλογή ρουλέτας είναι ένας από τους πιο απλούστερους τρόπους επιλογής. Σε αυτή τη μέθοδο όλα τα χρωμοσώματα στον πληθυσμό τοποθετούνται στην ρουλέτα με βάση την τιμή κόστους τους. Σε κάθε χρωμοσώμα ανατίθεται ένα τμήμα της ρουλέτας. Το μέγεθος του τμήματος της ρουλέτας που ανατίθεται είναι ανάλογο της τιμής του κόστους του χρωμοσώματος, όσο μικρότερο κόστος έχει τόσο μεγαλύτερο μέγεθος το τμήμα κατέχει στη ρουλέτα. Η εικονική ρουλέτα γυρνά και όποιο τμήμα επιλέγει το αντίστοιχο χρωμοσώμα επιλέγεται. Αυτό γίνεται μέχρι να επιλέγουν οι γονείς. Όπως είναι λογικό τα χρωμοσώματα με μικρότερη τιμή κόστους θα έχουν μεγαλύτερο τμήμα στην ρουλέτα και άρα μεγαλύτερη πιθανότητα να επιλεγούν. Το γεγονός αυτό ενέχει και κινδύνους καθώς δεν εγγυάται η μέθοδος ότι τα βέλτιστα χρωμοσώματα θα επιλεγούν. Ένα ακόμη μειονέκτημα έγκειται στο γεγονός ότι όταν οι διαφορές στις πιθανότητες είναι μεγάλες δεν είναι δίκαιη τεχνική. Η πιθανότητα της επιλογής ενός χρωμοσώματος δίνεται από:

$$P_{RW} = \frac{FRW_j}{\sum_{j=1}^N FRW_j} \quad (3.4)$$

όπου έστω $FRW_{i,j} = \frac{\sum_{j=1}^N FRW_j}{N}$ η συνάρτηση κόστους της ι-οστής γενιάς του j χρωμοσώματος, το j παίρνει τιμές από 1 έως N.

Στη συνέχεια ακολουθεί ένα παράδειγμα επιλογής ρουλέτας:



Σχήμα 3.2
Επιλογή ρουλέτας

Πιθανότητα επιλογής χρωμοσώματος 1 είναι 1/10

Πιθανότητα επιλογής χρωμοσώματος 2 είναι 2/10

Πιθανότητα επιλογής χρωμοσώματος 3 είναι 3/10

Πιθανότητα επιλογής χρωμοσώματος 4 είναι 4/10

Επιλογή θέσης

Η επιλογή θέσης είναι παρόμοια με την επιλογή ρουλέτας. Αρχικά ταξινομεί το πληθυσμό των χρωμοσωμάτων με βάση την τιμή κόστους και στην συνέχεια τα κατατάσσει με βάση την θέση. Σε κάθε χρωμόσωμα ανατίθεται μια πιθανότητα επιλογής με βάση την θέση. Η επιλογή με βάση την θέση αποτρέπει την γρήγορη σύγκλιση και ξεπερνά το πρόβλημα της κλιμάκωσης (λίμνασμα επιλογής) αλλά από την άλλη είναι υπολογιστικά πολύπλοκη λόγω του παραπάνω βήματος της

ταξινόμησης. Αφού υπολογιστεί το άθροισμα των θέσεων τότε η πιθανότητα επιλογής των χρωμοσωμάτων υπολογίζεται ως εξής:

$$rsum_i = \sum_{j=1}^N r_{i,j} , \quad (3.5)$$

όπου i είναι το χρωμόσωμα και j οι γενεές και η πιθανότητα δίνεται από

$$P_{rank,i} = \frac{r_{i,j}}{rsum_i} \quad (3.6)$$

Επιλογή Tournament

Η μέθοδος αυτή λειτουργεί ως εξής: Επιλέγονται τυχαία δυο ή τρία υποψήφια χρωμοσώματα για τη θέση του γονιού και επιλέγεται αυτό με τη καλύτερη συνάρτηση βελτιστοποίησης (με το χαμηλότερο κόστος). Όμοια αυτό γίνεται και για τον άλλο γονέα. Έχει σχεδόν τα ίδια αποτελέσματα με την επιλογή ρουλέτας με βάση την τάξη (βάρος) του χρωμοσώματος. Επιπρόσθετα λειτουργεί καλύτερα η μέθοδος σε μεγάλο πληθυσμό καθώς αποφεύγει την ταξινόμηση η οποία είναι αρκετά χρονικά κοστοβόρα .

Επιλογή σταθερής κατάστασης

Στην επιλογή σταθερής κατάστασης μόνο λίγα χρωμοσώματα αλλάζουν κάθε γενιά. Πιο συγκεκριμένα, συνήθως ένας αριθμός των N αποδοτικά χειροτέρων χρωμοσωμάτων δεν μεταφέρονται στην επόμενη γενιά και αντικαθίστανται από N χρωμοσώματα που μόλις δημιουργήθηκαν από διασταύρωση και είναι θεωρητικά πιο αποδοτικά. Αυτή τη μέθοδο χρησιμοποιούν κυρίως συστήματα που συνεχώς μαθαίνουν νέα δεδομένα. Η επιλογή γίνεται από ένα πληθυσμό αποδοτικών χρωμοσωμάτων αφού κυρίως τα μη αποδοτικά χρωμοσώματα αντικαθίστανται και όσο αφορά την επιλογή γονέα επιλέγεται ένα χρωμόσωμα με βάση το κόστος του.

Τυχαία επιλογή

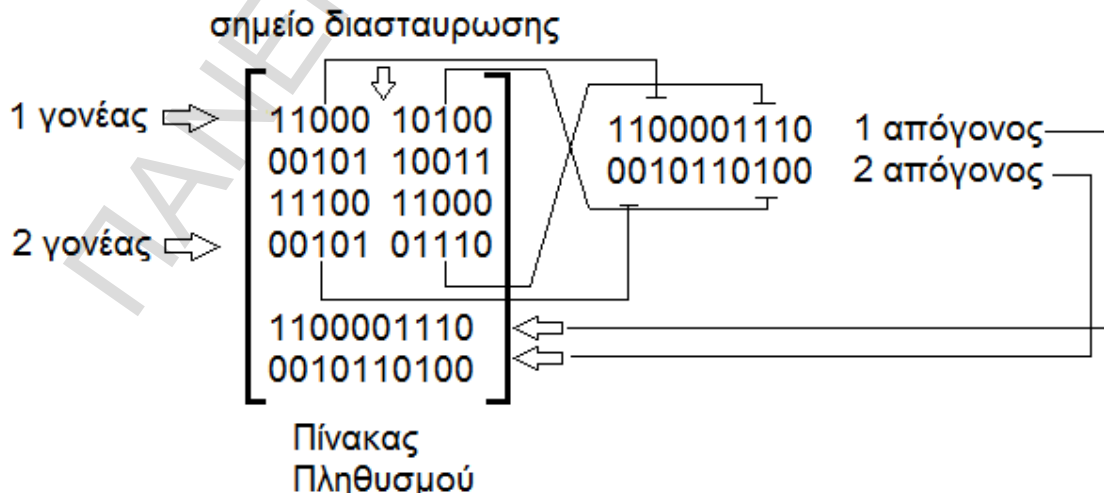
Η μέθοδος αυτή είναι η πιο απλή και η πιο εύκολα υλοποιήσιμη. Όπως έχουν τοποθετηθεί τα χρωμοσώματα στην λίστα τα ζυγά γίνονται κάθε φορά ο ένας γονέας και τα μονά ο άλλος γονέας που χρειάζονται για την διασταύρωση. Παρόμοια μέθοδος είναι η ομοιόμορφα τυχαία όπου στην τύχη επιλέγονται και οι δυο γονείς με

βάση ενός γεννήτορα ομοιόμορφων τιμών όπου κάθε τιμή είναι και η γραμμή του χρωμοσώματος στο πίνακα του πληθυσμού.

Τέλος είναι αρκετά σημαντικό να αναφερθεί η έννοια του ελιτισμού. Ο ελιτισμός αναφέρεται στην επιλογή των καλύτερων χρωμοσωμάτων όσο αφορά το κόστος και στην μετάθεση τους στην επόμενη γενιά του πληθυσμού. Πιο ειδικά, συνήθως όταν εφαρμόζεται ελιτισμός τα χρωμοσώματα διατάσσονται στον πληθυσμό με φθίνουσα σειρά με βάση το αποτέλεσμα της συνάρτησης βελτιστοποίησης και ένας αριθμός βέλτιστων χρωμοσωμάτων μεταφέρεται στην επομένη γενιά χωρίς περαιτέρω επεξεργασία (πχ. μετάλλαξη). Έχει αποδειχθεί ότι όταν εφαρμόζεται ελιτισμός στους γενετικούς αλγορίθμους η απόδοση των γενετικών βελτιώνεται σημαντικά και όσο αφορά το χρόνο εκτέλεσης αλλά και όσο το αποτέλεσμα.

3.3.2 Διασταύρωση

Είναι η διαδικασία κατά την οποία παράγονται οι απόγονοι. Ένας απόγονος είναι ουσιαστικά ένα χρωμόσωμα που διαθέτει τμήματα bit (πληροφορίας) και από τους δυο γονείς. Ο πιο απλός τρόπος διασταύρωσης (crossover) είναι ενός σημείου. Κατά το οποίο επιλέγεται τυχαία η όχι ένα σημείο σε κάθε γονέα και μοιράζονται τα bit αριστερά και δεξιά του σημείου σε διαφορετικό παιδί-απόγονο. Σε κάθε γενιά έχουμε ένα σταθερό αριθμό διασταυρώσεων που έχει να κάνει και με το εάν υπάρχει ή όχι ελιτισμός. Παρακάτω παρατίθενται μια εικόνα η οποία δείχνει πως ακριβώς γίνεται η διασταύρωση ενός σημείου μεταξύ δυο γονέων (parents) και παράγονται 2 απόγονοι (offsprings).



Σχήμα 3.3

Διασταύρωση ενός σημείου

Εκτός από τη διασταύρωση ενός σημείου έχουμε και πιο πολύπλοκες τεχνικές όπως διασταύρωση δυο σημείων, διασταύρωση δυο σημείων αλλά ανάμεσα σε τρεις γονείς και η ομοιόμορφη διασταύρωση[17]. Ενδεικτικά, στην πρώτη περίπτωση το χρωμόσωμα γονέας χωρίζεται σε τρία μέρη και από αυτά τα μέρη 2 θα μεταφερθούν στον ένα απόγονο και το άλλο στον άλλο. Συνήθως το μεσαίο τμήμα πάει στο πρώτο απόγονο και τα δυο ακριανά πηγαίνουν στο δεύτερο κτλ.

Στη δεύτερη περίπτωση είναι το ίδιο με την πρώτη περίπτωση μόνο που τώρα έχουμε σε κάθε διασταύρωση τρεις γονείς και επιλέγεται ένα τμήμα ή και δυο από το καθένα για να μπει στον κάθε απόγονο. Με αυτό τον τρόπο η πληροφορία σκορπίζεται σε περισσότερους πιθανούς αποδοτικούς απογόνους.

Στη τρίτη περίπτωση έχουμε την ομοιόμορφη διασταύρωση όπου σε κάθε bit γίνεται επιλογή αν θα περάσει ή όχι και σε πιο απόγονο. Πιο ειδικά, κατασκευάζεται μια μάσκα, η οποία είναι ένα διάνυσμα που έχει το ίδιο μέγεθος με τους γονείς και διαθέτει τυχαία μηδενικά και άσσους. Όταν για παράδειγμα στη θέση N της μάσκας υπάρχει μηδέν τότε το νιοστό bit του πρώτου γονέα παίρνει στη N θέση του πρώτου παιδιού και το νιοστό bit του δεύτερου γονέα παίρνει στην νιοστή θέση του δεύτερου παιδιού. Ενώ όταν έχουμε άσσο στην νιοστή θέση τότε το νιοστό bit του πρώτου γονέα πηγαίνει στη νιοστή θέση του δεύτερου απόγονου και το νιοστό bit του δεύτερου γονέα πάει στη νιοστή θέση του πρώτου απόγονου.

Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι πέρα από τις τεχνικές διασταύρωσης σε δυαδικούς-διακριτούς γενετικούς αλγόριθμους υπάρχουν και οι τεχνικές που αναφέρονται και σε συνεχόμενους γενετικούς αλγόριθμους. Οι απόγονοι συνήθως βγαίνουν με βάση κάποιων εξισώσεων όπως[17] :

$$offspring_1 = parent_1 - b(parent_1 - parent_2)$$

$$offspring_2 = parent_2 - b(parent_1 - parent_2), 0 < b < 1 \quad (3.7),$$

ή κάποιων πιο πολύπλοκων όπως:

Έστω q ένας τυχαίος αριθμός τότε:

$$parent_1 = [m_1, m_2, \dots, m_q, \dots, m_N]$$

$$parent_2 = [f_1, f_2, \dots, f_q, \dots, f_N]$$

$$b_q = m_q - \beta[m_q - f_q]$$
$$g_q = f_q + \beta[m_q - f_q]'$$

με β από 0 έως 1, τότε οι απόγονοι θα είναι:

$$offspring_1 = [m_1, m_2, \dots, b_q, \dots, f_N]$$
$$offspring_2 = [f_1, f_2, \dots, g_q, \dots, M_N] \quad (3.8)$$

3.3.3 Μετάλλαξη

Είναι η διαδικασία κατά την οποία μεταλλάσσεται ένα ή περισσότερα γονίδια από ένα χρωμόσωμα. Πιο ειδικά, είναι η διαδικασία κατά την οποία με βάση μια πιθανότητα, η οποία μπορεί είτε να είναι σταθερή είτε να αλλάζει με βάση κάποια κριτήρια, αλλάζουν κάποια bit ,στην περίπτωση δυαδικών γενετικών, στο χρωμόσωμα από 0 σε 1 και αντίστροφα. Από την άλλη μεριά όταν γίνεται αναφορά για μη δυαδικούς γενετικούς αλγόριθμους η διαδικασία της μετάλλαξης δεν αλλάζει και πολύ. Σε αυτή την περίπτωση δεν θίγεται η αλλαγή bit αλλά η αλλαγή μεταβλητών. Πιο συγκεκριμένα, ανάλογα με την πιθανότητα μετάλλαξης και τον πληθυσμό της γενιάς γίνεται υπολογισμός του αριθμού των μεταβλητών που θα αλλάξουν και έπειτα γίνεται αλλαγή στις τιμές αυτών των μεταβλητών με τρόπο καθορισμένο με βάση το σύστημα ή και τυχαία.

Με την διαδικασία της μετάλλαξης αποφεύγεται η γρήγορη σύγκλιση των γενετικών σε μια λύση και κάνει τους γενετικούς αλγόριθμους να αποδίδουν βέλτιστα. Οι θέσεις των bit που θα υποστούν μετάλλαξη είναι συνήθως τυχαίες και όσο γίνεται αύξηση του αριθμού των bit που θα υποστούν μετάλλαξη τόσο αναγκάζεται ο αλγόριθμος να ψάξει λύσεις εκτός της συγκεκριμένης περιοχής που βρίσκεται εκείνη τη στιγμή. Για αυτό το λόγο είναι ένας βασικός τρόπος για να ξεφύγουν οι γενετικοί από τοπικά ελάχιστα (ή μέγιστα). Βεβαία αποφεύγεται η χρησιμοποίηση της διαδικασίας της μετάλλαξης σε χρωμοσώματα τα οποία είναι αποδοτικά καθώς με πιθανή αλλαγή κάποιων bit να αχρηστευθεί κάποια βέλτιστη λύση.

Τέλος, υπάρχουν διαφορετικές τεχνικές διαχείρισης των μεταλλαγμένων χρωμοσωμάτων. Ενδεικτικά κάποιες από τις πιο σημαντικές είναι η καταστρεπτική μετάλλαξη κατά την οποία οι μεταλλαγμένοι απόγονοι κρατιούνται ανεξαρτήτως εάν

βελτιώνονται ή όχι και η εποικοδομητική μετάλλαξη κατά την οποία οι απόγονοι κρατιούνται σε περίπτωση μόνο αν βελτιώνεται σε σχέση με την συνάρτηση κόστους[17],[19].

3.3.4 Αντικατάσταση

Σε αυτή τη διαδικασία ουσιαστικά τελειώνει μια “περίοδος” του αλγορίθμου, εφόσον έχουν εφαρμοστεί όλες οι διαδικασίες της επιλογής, διασταύρωσης και μετάλλαξης, καθορίζεται σε αυτή τη διαδικασία πως τα χρωμοσώματα από την k γενιά των γονέων επιλέγονται να αντικατασταθούν από τους απογόνους της γενιάς $k+1$ στην $k+1$ γενιά. Ενδεικτικά υπάρχουν οι εξής τεχνικές αντικατάστασης:

➤ **Αντικατάσταση όλων**

Σε αυτή την περίπτωση όλα τα χρωμοσώματα της γενιάς k αντικαθίστανται από τους απογόνους της γενιάς $k+1$.

➤ **Αντικατάσταση των χειρότερων**

Σε αυτή την τεχνική μόνο τα χρωμοσώματα με χειρότερη απόδοση αντικαθίστανται από νέα.

➤ **Αντικατάσταση των γονέων μόνο**

Σε αυτή την τεχνική η νέα γενιά δεν θα έχει μέσα χρωμοσώματα γονείς της προηγούμενης γενιάς.

➤ **Τυχαία αντικατάσταση**

Σε αυτή την περίπτωση αντικαθίστανται ένας τυχαίος αριθμός χρωμοσωμάτων και η νέα γενιά διαθέτει αρκετά από τα παλιά χρωμοσώματα.

➤ **Αντικατάσταση των παρόμοιων**

Σε αυτή την τεχνική αντικαθίστανται τα χρωμοσώματα που παρουσιάζουν παρόμοια απόδοση όσο αφορά το κόστος και έτσι κάθε λύση έχει σημαντική διαφορά από την προηγούμενη.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να ξανά αναφερθεί μια τεχνική όπως και προαναφέρθηκε στην ενότητα της επιλογής που είναι ο ελιτισμός. Ο ελιτισμός αναφέρεται στην επιλογή των καλύτερων χρωμοσωμάτων όσο αφορά το κόστος και στην μετάθεση τους στην επόμενη γενιά του πληθυσμού.

3.3.5 Κριτήρια τερματισμού

Σε αυτή την ενότητα θα γίνει συνοπτική αναφορά για κάποια συνήθη κριτήρια τερματισμού των γενετικών αλγορίθμων. Όπως είναι λογικό τα κριτήρια εξαρτώνται πάρα πολύ και από τη φύση του φαινομένου που γίνεται η μελέτη αλλά και από το σύστημα που γίνεται διαχείριση. Ενδεικτικά τα πιο σύνηθες κριτήρια είναι[18]:

- Συμπλήρωση ενός αριθμού προκαθορισμένων γενεών.
- Εκπλήρωση ενός προκαθορισμένου χρόνου εκτέλεσης.
- Όταν παρατηρηθεί μικρή απόκλιση μεταξύ της επίδοσης των ατόμων του πληθυσμού.
- Όταν συμβεί λίμνασμα (stagnation) λύσεων από γενιά σε γενιά.
- Όταν βρεθεί κόστος χαμηλότερο και από το αποδεκτά ελάχιστο.
- Όταν συμπληρωθεί ένας προκαθορισμένος αριθμός αξιολόγησης λύσεων.

Κεφάλαιο 4: Μελέτη Παρασιτικής Στοιχειοκεραίας MUPAR

Η επανάσταση στους τομείς των τηλεπικοινωνιών και των κινητών επικοινωνιών παρατηρήθηκε στις αρχές της δεκαετίας του ενενήντα με την έλευση της τεχνολογίας της μικροηλεκτρονικής. Με την επανάσταση αυτή, οι συσκευές κινητών επικοινωνιών έγιναν ελαφρότερες, μικρότερες σε μέγεθος και χρειάζονταν λιγότερη ενέργεια για να λειτουργήσουν. Σε συνδυασμό και με την γνώση των ερευνητών για την θεωρία του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου ανάδειξαν το στοιχείο της κεραίας ως το πιο βασικό για την βελτιστοποίηση των κινητών συσκευών. Η κεραία είναι ένας ηλεκτρομαγνητικός μετατροπέας που στη λειτουργία μετάδοσης μετατρέπει ένα καθοδηγούμενο κύμα διαμέσου της γραμμής μεταφοράς σε ένα εκπεμπόμενο κύμα στον ελεύθερο χώρο. Ενώ στη λειτουργία της λήψης μετατρέπει το ελεύθερου χώρου κύμα σε ένα καθοδηγούμενο κύμα. Ένας καλός σχεδιασμός μιας κεραίας μπορεί να οδηγήσει σε μείωση των απαιτήσεων ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος και στην βελτίωση της απόδοσης του.

Στο κεφάλαιο αυτό αρχικά θα γίνει περιγραφή της δομής λειτουργίας των στοιχειοκεραίων IFA και PIFA καθώς η παρασιτική κεραία που θα μελετήσουμε αποτελείται από IFA στοιχειοκεραίες. Στη συνέχεια θα αναφερθούμε στα θεωρητικά της δομής λειτουργίας της στοιχειοκεραίας MuPAR[25] παρουσιάζοντας την αρχή λειτουργίας της με μαθηματικές εκφράσεις. Επιπρόσθετα θα σχεδιάσουμε την κεραία αυτή με τη βοήθεια του matlab μεταφέροντας την λειτουργία MIMO του συστήματος στο πεδίο διαγραμμάτων όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2 και θα εφαρμόσουμε γενετικό αλγόριθμο για να πάρουμε βέλτιστες τιμές όσο αφορά τα ενεργά και τα παρασιτικά στοιχεία της στοιχειοκεραίας. Τέλος, με βάση μιας M-άδικης διαμόρφωσης που θα επιλέξουμε θα παράγουμε ένα αριθμό επιθυμητών διαγραμμάτων ακτινοβολίας και θα συγκρίνουμε τα παραγόμενα διαγράμματα ακτινοβολίας με τα διαγράμματα ακτινοβολίας που υπολόγισε για εμάς ο αλγόριθμος που υλοποιήσαμε.

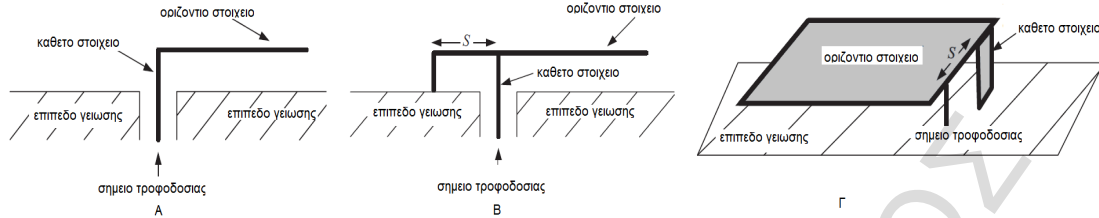
4.1 Δομή λειτουργίας IFA και PIFA στοιχειοκεραίων

Οι πρώτες κεραίες οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στις κινητές επικοινωνίες ήταν τα κλασικά μονόπολα. Ήταν εύκολα στην σχεδίαση, σχετικά ελαφριές κεραίες και είχαν όμοιο-κατευθυντικά διαγράμματα ακτινοβολίας στο αζιμούθιο. Αυτές οι κεραίες

όμως γρήγορα αντικαταστάθηκαν από τις κεραίες ILA (Inverted L Antenna) καθώς το μέγεθος των συσκευών που χρησιμοποιούταν στις επικοινωνίες μειώνονταν. Οι κεραίες ILA είναι και αυτά μονόπολα μονής τροφοδότησης τα οποία έχουν στο πάνω μέρος τους ένα οριζόντιο βραχίονα (wire) ο οποίος λειτουργεί σαν φορτίο χωρητικότητας (capacitive load) μετατρέποντας έτσι την κεραία εύκολη στη σχεδίαση.

Το πλεονέκτημα της κεραίας ILA είναι ότι εκπέμπει και στις δυο πολώσεις λόγω του οριζόντιου βραχίονα, όμως όσο αφορά την εμπέδηση εισόδου είναι παρόμοιο με του κλασικού μονόπολου. Στη συνέχεια για να νικηθεί το εμπόδιο της απώλειας λόγω της μη προσαρμογής της γραμμής μεταφοράς που εισήγαγε η κεραία ILA οι ερευνητές δημιούργησαν την στοιχειοκεραία IFA (Inverted F Antenna), όπου στην ουσία πρόσθεσαν ένα ακόμη inverted L τμήμα στην κεραία ILA δημιουργώντας έτσι ένα F. Το επιπλέον τμήμα που προστέθηκε ουσιαστικά δίνει την επιλογή συντονισμού και έτσι μεγιστοποιεί τις δυνατότητες της κεραίας IFA σε σχέση με τη κεραία ILA. Παρόλο αυτή την προσθήκη για την καταπολέμηση της απώλειας μη προσαρμογής της γραμμής μεταφοράς το συχνοτικό εύρος της στοιχειοκεραίας IFA είναι αρκετά μικρό. Για να λυθεί το πρόβλημα του μικρού συχνοτικού εύρους οι ερευνητές μετέτρεψαν το οριζόντιο βραχίονα από μορφή κυλίνδρου σε μορφή πλάκας και έτσι δημιούργησαν την στοιχειοκεραία PIFA (Planar Inverted F Antenna). Η κεραία PIFA είναι μια στοιχειοκεραία με αυτό-επιλογή της συχνότητας μέγιστης μεταφοράς ενέργειας και καθαρής εμπέδησης αντίστασης στην συχνότητα λειτουργίας. Το γεγονός αυτό την κάνει σαν μια καλή επιλογή για τις κινητές επικοινωνίες καθώς δεν χρειάζεται συζυγές κύκλωμα μεταξύ του φορτίου και της κεραίας για να μειωθεί το κόστος και οι απώλειες. Όπως είναι λογικό, δεν υπάρχει μοναδική βέλτιστη γεωμετρία για καμία κεραία από αυτές που αναφέρθηκαν πιο πάνω, μπορούν όμως να υπάρξουν εναλλαγές στο ύψος του ακτινοβολητή, στο μήκος του οριζοντίου στοιχείου, στις αποστάσεις και στη θέση των στοιχείων κτλ. και όλα αυτά έχουν να κάνουν με την εφαρμογή που χρησιμοποιείται η κεραία. Το γεγονός αυτό κάνει την στοιχειοκεραία PIFA ως μια βέλτιστη υποψήφια λύση για συστήματα κινητών επικοινωνιών[27].

Παρακάτω παρατίθεται ένα σχήμα και με τις 3 κεραίες που αναφέρθηκαν ILA IFA PIFA.



Σχήμα 4.1

Στο A σχήμα απεικονίζεται μια κεραία IIA. Στο B σχήμα απεικονίζεται μια στοιχειοκεραία IFA.

Στο σχήμα Γ σχήμα απεικονίζεται μια στοιχειοκεραία PIFA.[27]

4.1.1 Στοιχειοκεραία IFA

Όπως προαναφέρθηκε και προηγουμένως, η στοιχειοκεραία IFA είναι μια παραλλαγή των απλών κεραιών μετάδοσης ή των μονόπολων κεραιών με την προσθήκη όμως μιας μετατόπισης πηγής παρέχοντας με αυτό τον τρόπο μια προσαρμογή στην εμπέδηση εισόδου. Η γεωμετρία της κεραίας απεικονίζεται ως ένα γυρτό γράμμα F ώστε να κοιτάζει το επίπεδο γείωσης. Αποτελείται από ένα στοιχείο που είναι πάνω από το επίπεδο γείωσης και είναι συνδεδεμένο με ένα μηχανισμό παροχής τροφοδοσίας και ένα στοιχείο (κύλινδρος-βραχίονας) που είναι γειωμένο. Το πάνω τμήμα της κεραίας (βραχίονας) έχει διπλωθεί ώστε να είναι παράλληλο με το επίπεδο της γείωσης και έτσι να έχει μικρότερη διάσταση η κεραία. Το παράλληλο τμήμα δημιουργεί χωρητικότητα στην εμπέδηση της εισόδου της κεραίας η οποία αντισταθμίζεται με το τμήμα της κεραίας που συνδεδεμένο με το επίπεδο της γείωσης.

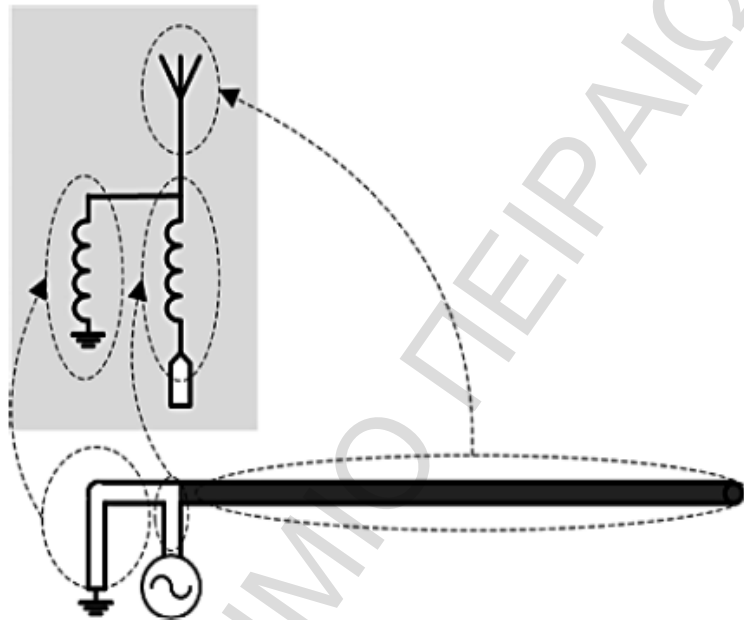
Το επίπεδο της γείωσης παίζει σημαντικό ρόλο στην λειτουργία της κεραίας. Για παράδειγμα στην περίπτωση της printed-IFA η διέγερση των ρευμάτων στην κεραία προκαλεί διέγερση και στα ρεύματα του επιπέδου γείωσης. Ηλεκτρομαγνητικό πεδίο σχηματίζεται λόγω της αλληλεπίδρασης της στοιχειοκεραίας IFA και του επιπέδου γείωσης. Η λειτουργία της κεραίας ως τέλειος ακτινοβολητής είναι αποδοτική όταν το επίπεδο γείωσης είναι άπειρο ή πολύ μεγαλύτερο από τις διαστάσεις της κεραίας. Επίσης είναι εμφανές ότι το στοιχείο που είναι γειωμένο λειτουργεί σαν ένας παράλληλος επαγωγέας και η επαγωγή του γειωμένου στοιχείου καθορίζεται από το μέγεθος του. Όσο η απόσταση μεταξύ του στοιχείου τροφοδοσίας και του στοιχείου

που είναι γειωμένο μικραίνει, η κατανεμημένη επαγωγική αντίδραση μικραίνει και έτσι το παράλληλο στοιχείο αυτό εισάγει μια συγκεκριμένη δυναμική στο σύστημα. Επίσης όσο η απόσταση μεταξύ του βραχίονα και του γειωμένου πεδίου της IFA στοιχειοκεραίας μικραίνει τόσο πρέπει να τοποθετηθούν πιο κοντά το παράλληλο ,στο στοιχείο τροφοδοσίας, γειωμένο στοιχείο με το στοιχείο της τροφοδοσίας έτσι ώστε να εξομαλυνθούν οι πιθανές αλλαγές στην εμπέδηση.

Αναφορικά με την σχεδίαση της στοιχειοκεραίας IFA είναι γνωστό ότι ο συνδυασμός κεραίας και γείωσης έχει συμπεριφορά σαν ένα ασύμμετρο δίπολο, οι διαφορές στην κατανομή του φορτίου στα δυο άκρα έχουν σαν αποτέλεσμα την παραμόρφωση στο διάγραμμα ακτινοβολίας. Η απόσταση του στοιχείου τροφοδοσίας και του σημείου γείωσης όπως αναφέρθηκε προηγουμένως είναι σημαντική ,μια σύνηθες απόσταση είναι $\lambda/4$. Το συχνοτικό εύρος ζώνης της στοιχειοκεραίας IFA αυξάνει με την αύξηση του πάχους της κεραίας. Στην περίπτωση που γίνεται αναφορά σε printed-IFA το μήκος του επιπέδου γείωσης σε PCB (Printed Circuit Board) είναι συνήθως σχεδόν ένα τέταρτο του μήκος κύματος λειτουργίας ($\lambda/4$). Στην περίπτωση που το μήκος του επιπέδου γείωσης ξεπερνά τα $\lambda/4$, τότε στο διάγραμμα ακτινοβολίας θα παρουσιαστούν πολλαπλοί μέγιστοι λοβοί ακτινοβολίας γεγονός όπου συνήθως έχει αρνητικές συνέπειες για την μετάδοση. Από την άλλη πλευρά, αν το μήκος του επιπέδου γείωσης είναι σημαντικά μικρότερο από τα $\lambda/4$, τότε ο συντονισμός είναι αρκετά δύσκολος και η απόδοση του συστήματος της στοιχειοκεραίας πέφτει σημαντικά. Όσο αφορά την βέλτιστη τοποθέτηση των στοιχείων της στοιχειοκεραίας IFA για να επιτευχθούν ομοιό-κατευθυντικά μακρινού πεδίου διαγράμματα και 50Ω εμπέδηση έχει αποδεχτεί ότι πρέπει να είναι κοντά στα όρια του PCB.

Η όμοιοκατευθυντική ικανότητα της στοιχειοκεραίας IFA λαμβάνει υπόψη της τις στάνταρ τιμές ισχύος εξόδου και ευαισθησίας του δέκτη και αυτό έχει αποτέλεσμα η απόδοση της να είναι αρκετά καλή και για περιβάλλοντα εσωτερικού χώρου. Συνήθως η πολικότητα της κεραίας είναι ελλειπτική παρά γραμμική καθώς σπάνια ο αξονικός λόγος φτάνει τα 20 dB. Το παραπάνω γεγονός έχει σαν αποτέλεσμα η κεραία να έχει την ικανότητα να λαμβάνει εξίσου και κάθετα και οριζόντια πολωμένα ηλεκτρομαγνητικά κύματα τα οποία μπορούν να προβούν αρκετά ωφέλιμα για περιβάλλοντα εσωτερικού χώρου όπου το φαινόμενο της αποπόλωσης και της επιλογής πόλωσης των κυμάτων είναι βασικά ζητήματα. Παρόλο που τα

περισσότερα ασύρματα συστήματα είναι συνήθως κάθετα πολωμένα έχει αποδειχθεί ότι χρησιμοποιώντας οριζόντια πολωμένες κεραίες και στο πομπό και στο δέκτη έχει σαν αποτέλεσμα 10dB περισσότερη ισχύ στο μέσο συγκρινόμενη με οριζόντια πόλωση και στο πομπό και στο δέκτη. Στη συνέχεια ακολουθεί το ισοδύναμο κύκλωμα μιας στοιχειοκεραίας IFA.



Σχήμα 4.2

Ισοδύναμο κύκλωμα στοιχειοκεραίας IFA[32]

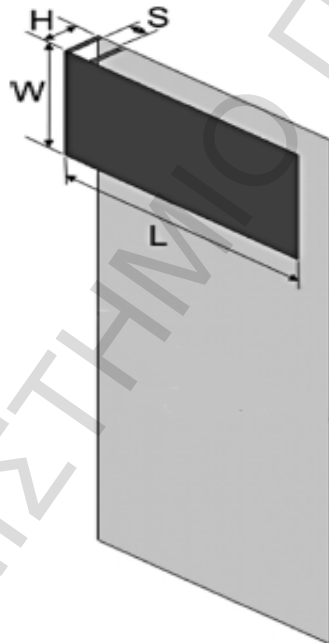
Στο παραπάνω σχήμα διαφαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα της στοιχειοκεραίας IFA. Σε αντίθεση με την ILA στην IFA το ενεργό στοιχείο που ουσιαστικά καθορίζει την συχνότητα μέγιστης μεταφοράς ενέργειας είναι μόνο το μαυρισμένο τμήμα. Παρατηρούμε επίσης ότι το ισοδύναμο κύκλωμα είναι παράλληλα 2 πηνία και αυτά σε σειρά με το στοιχείο της κεραίας.

Τέλος μια στοιχειοκεραία IFA δεν προσφέρει αρκετές ελευθερίες όσο αφορά τον σχεδιασμό της και συνήθως χρησιμοποιείται για εφαρμογές μονής συχνοτικής μπάντας όπως GPS και WIFI. Με την κεραία ILA έχει ουσιαστικά ελάχιστες διαφορές. Μια κεραία L χρειάζεται μικρότερο επίπεδο γείωσης καθώς έχει μόνο ένα σημείο επαφής με το στοιχείο τροφοδοσίας. Το σημαντικό μειονέκτημα της κεραίας ILA είναι οι απώλειες που είναι λόγο της μη προσαρμοσμένης γραμμής τροφοδοσίας με αποτέλεσμα η αποδοτικότητα της να υστερεί κατά δεκάδες dB από την στοιχειοκεραία IFA. Εάν υπάρχει αρκετός χώρος στο επίπεδο γείωσης καθώς

χρειάζονται 2 σημεία επαφής ένα για γείωση και ένα για τροφοδοσία η στοιχειοκεραία IFA είναι μια βέλτιστη επιλογή καθώς επίσης μειώνει και το κόστος που θα χρειαζόταν μια κεραία IFA για την προσθήκη επιπλέον προσαρμογέα στη γραμμή τροφοδοσίας[24],[28],[32].

4.1.2 Στοιχειοκεραία PIFA

Όπως προαναφέρθηκε, η στοιχειοκεραία PIFA είναι σχεδόν ίδια στη δομή της με την στοιχειοκεραία IFA αλλά με τη βασική διαφορά ότι το παράλληλο στοιχείο ως προς το επίπεδο γείωσης είναι πλέον σε μορφή πλάκας. Παρακάτω γίνεται παράθεση σε πλάγια όψη μιας στοιχειοκεραίας PIFA.



Σχήμα 4.3

Στοιχειοκεραία PIFA[32]

Μπορεί κανείς να παρατηρήσει από το σχήμα ότι το H είναι η απόσταση μεταξύ του επιπέδου γείωσης και της ακτινοβολούσας πλάκας. Το γεγονός αυτό την κάνει μια πάρα πολύ σημαντική παράμετρο στην σχεδίαση της στοιχειοκεραίας PIFA καθώς επηρεάζει σημαντικά την απόδοσή της. Βέβαια η παράμετρος H έχει να κάνει και με το πάχος της συσκευής που αναφέρεται και την εφαρμογή, καθώς πολλές φορές έχουμε περιορισμούς σε αυτά. Επιπρόσθετα αν πραγματοποιηθεί ρύθμιση των

παραμέτρων $W+L$ η συχνότητα λειτουργίας μπορεί να συντονιστεί στην επιθυμητή. Θεωρητικά όσο αυξάνεται το L έχουμε σαν συνέπεια μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Πρακτικά αν μειωθεί το μέγεθος της κεραίας θα έχει συνέπεια στην εμπέδηση της κεραίας των τερματικών καθώς έτσι η ακτινοβολούσα αντίδραση γίνεται άεργη. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να λυθεί με τροποποίηση του φορτίου χωρητικότητας του παράλληλου στοιχείου. Πιο ειδικά, το ύψος της κεραίας που μπορεί να θυσιαστεί μπορεί να αντικατασταθεί από ισοδύναμο κύκλωμα ώστε να βελτιωθεί και η εμπέδηση και η αποτελεσματικότητα της κεραίας. Επίσης σημαντική παράμετρος της σχεδίασης της PIFA στοιχειοκεραίας είναι η παράμετρος S η οποία έχει να κάνει κυρίως με το συντονισμό στην συχνότητα μέγιστης μεταφοράς ενέργειας αλλά και καλής προσαρμογής της γραμμής τροφοδοσίας. Μπορεί είτε να χρησιμοποιηθεί πιο ευρύς κύλινδρος-έλασμα με μεγαλύτερο S είτε πιο στενός κύλινδρος-έλασμα με μικρότερο S , και τα δυο έχουν το ίδιο αποτέλεσμα όσο αφορά τη προσαρμογή στην γραμμή εισόδου. Μεγάλο S είναι καλύτερο για την κατασκευή της κεραίας καθώς έχει μεγαλύτερη αντοχή στην ηλεκτρική μεταβολή της κεραίας. Από την άλλη πλευρά και από μηχανικής άποψης το στενότερο έλασμα προσφέρεται για την ευελιξία.

Το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας, ουσιαστικά είναι η σχετική κατανομή της ακτινοβολούσας ενέργειας σαν συνάρτηση της κατεύθυνσης στο χώρο. Πιο ειδικά, όπως σε κάθε κεραία, η ακτινοβολία επηρεάζεται από την πολικότητα ,την φάση ,κατανομή ρεύματος και από την πυκνότητα ροής ισχύος. Σχετικά με την κατανομή ρεύματος η στοιχειοκεραία PIFA έχει μεγάλες ροές ρεύματος στην κάτω επιφάνεια του επίπεδου στοιχείου και της γείωσης σε σύγκριση με την επιφάνεια του στοιχείου. Το γεγονός αυτό κάνει την κεραία σαν μια βέλτιστη επιλογή αναφορικά με την επίδραση εξωτερικών στοιχείων που επηρεάζουν την λειτουργία της κεραίας. Επίσης η μέγιστη μεταφορά ρεύματος γίνεται κοντά στο γειωμένο στοιχείο και μειώνεται όσο απομακρυνόμαστε από αυτό. Από την άλλη πλευρά, τα κύματα της επιφάνειας της γείωσης μπορούν να παράξουν παρεμβολές ή ασυνέχειες στο διάγραμμα ακτινοβολίας χαλώντας έτσι το επιθυμητό διάγραμμα ακτινοβολίας ή ακόμα χειρότερα δημιουργώντας απώλειες ισχύος. Η λύση στο πρόβλημα αυτό είναι η επιλογή του αέρα σαν διηλεκτρικό υλικό[24]. Επιπρόσθετα αρκετά σημαντικό για την λειτουργία της κεραίας είναι η προσαρμογή της εμπέδησης στην είσοδο της

κεραίας. Άρα η απόσταση μεταξύ πηγής τροφοδοσίας και γειωμένου στοιχείου πρέπει να βελτιστοποιηθεί και εδώ όπως ακριβώς και στην στοιχειοκεραία IFA.

Το εύρος ζώνης των στοιχειοκεραίων PIFA είναι σχετικά περιορισμένο. Παρόλα αυτά μπορεί να γίνει επέκταση του εύρους ζώνης με διάφορες τεχνικές. Στην βιβλιογραφία αναφέρονται κάποιοι σχεδιασμοί στοιχειοκεραίων PIFA που αναφέρονται σε αρκετές συχνοτικές μπάντες [34]-[36]. Μια σύνηθες τακτική είναι η επιλογή αέρα σαν διηλεκτρικό, επίσης μια άλλη τεχνική είναι η εκ-νέου προσαρμογή της απόστασης του στοιχείου τροφοδοσίας με το στοιχείο που είναι στη γείωση, ακόμα μια τεχνική είναι η αλλαγή μεγέθους του επιπέδου γείωσης καθώς έτσι τροποποιείται και το εύρος ζώνης της κεραίας. Τέλος μια αρκετά αποδοτική τεχνική για την αύξηση του εύρους ζώνης είναι η προσθήκη παρασιτικών στοιχείων [32].

Τα πλεονεκτήματα της στοιχειοκεραίας PIFA είναι ότι έχει χαμηλής ισχύος μετάδοση ακτινοβολίας ελαχιστοποιώντας έτσι την απορρόφηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ως προς ένα χρήστη (SAR) και αυτό με τη σειρά του είναι σημαντικό γεγονός για τις εφαρμογές κινητών. Επίσης αρκετά σημαντικό πλεονέκτημα είναι το γεγονός ότι λειτουργεί εξίσου καλά και σε οριζόντια και σε κάθετη πόλωση παρέχοντας σημαντικά κέρδη. Το γεγονός αυτό είναι αρκετά σημαντικό για τις ασύρματες επικοινωνίες καθώς λόγω του περιβάλλοντος και των ανακλάσεων λόγω κάποιων σκεδαστών η κατεύθυνση του κύματος δεν είναι σταθερή[24],[32].

4.2 Μελέτη παρασιτικής στοιχειοκεραίας MuPAR

Οι παρασιτικές στοιχειοκεραίες πρόκειται να είναι βασικό στοιχείο στα ασύρματα συστήματα επικοινωνίας της επόμενης γενιάς. Μια τέτοια κεραία ,μονής τροφοδοσίας στοιχειοκεραία (single feed port array) η οποία αποτελείται από ένα ενεργό στοιχείο και πολλαπλά παρασιτικά στοιχεία τα οποία τερματίζουν είτε με ένα κύκλωμα το οποίο διαθέτει διακόπτη είτε από μεταβλητές αντιδράσεις είναι η κεραία ESPAR. Οι παρασιτικές στοιχειοκεραίες μπορούν να μειώσουν δραστικά τις αλυσίδες RF που εισάγουν τα ενεργά στοιχεία και να έχουν εξαιρετική ικανότητα καθοδήγησης ακτίνας (beam steering) και μηδενισμού των παρεμβολών (null forming). Από την άλλη πλευρά όμως για να επιτευχθεί 360 μοιρών (σε όλο το αζιμούθιο δηλαδή) μηδενισμός των παρεμβολών και διαμόρφωση διαγράμματος ακτινοβολίας είναι αναγκαίο να αυξηθεί ο αριθμός των παρασιτικών στοιχείων .Το

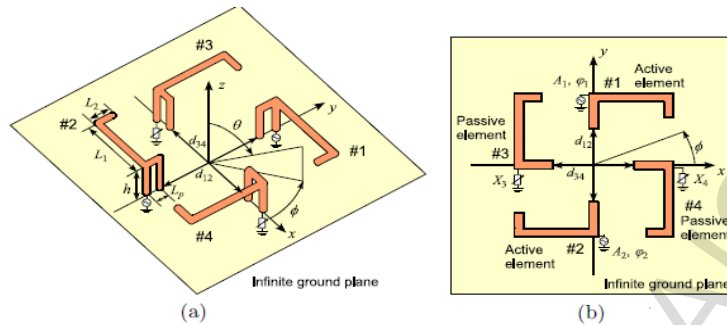
γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι οι μεταβλητές αντιδράσεις των παρασιτικών στοιχείων δεν παρέχουν μεγάλη ελευθερία στο σχηματισμό μηδενισμών και κατευθυντικότητα δέσμης σε επιθυμητό σημείο σε σύγκριση με τα ενεργά στοιχεία των κεραιών πολλαπλής τροφοδοσίας.

Για να μειωθεί ο αριθμός των στοιχείων αλλά και να διατηρηθεί η ικανότητα διαμόρφωσης διαγράμματος ακτινοβολίας και μηδενισμού στις παρασιτικές κεραιές προταθήκαν παρασιτικές κεραιές με πολλαπλά στοιχεία τροφοδοσίας. Μια τέτοια στοιχειοκεραία είναι η MuPAR (Multiport Parasitic Array Radiator)[25]-[26]. Η πιο σταθερή δομή MuPAR στοιχειοκεραίας αποτελείται από 2 ενεργά στοιχεία και 2 παρασιτικά και κάθε στοιχείο της κεραιάς υλοποιείται μέσω μιας στοιχειοκεραίας IFA (Inverted F Antenna). Παρόλο που οι ικανότητες της στοιχειοκεραίας σχετικά με το μηδενισμό παρεμβολών και την διαμόρφωση διαγράμματος ακτινοβολίας είναι αξιομνημόνευτες, από ένα αριθμό στοιχείων και πάνω η σταθερότητα της στοιχειοκεραίας δεν έχει μελετηθεί. Επίσης οι κλασικές κεραιές πολλαπλής τροφοδοσίας μπορούν να σχηματίσουν κύριο λοβό-ακτίνα με την μέθοδο βέλτιστων συντελεστών διέγερσης (optimum excitation coefficients) η οποία καθορίζεται από αναλυτικές λύσεις επειδή οι συντελεστές διέγερσης εκφράζονται αυστηρά σε μορφή Hermitian. Στην περίπτωση των στοιχειοκεραιών ESPAR για τη διαμόρφωση διαγράμματος ακτινοβολίας και μηδενισμών χρησιμοποιούνται μη γραμμικές μέθοδοι εφόσον οι τιμές των αντιδράσεων συμπεριλαμβάνονται στο πίνακα αμοιβαίας σύζευξης. Οι παραπάνω τεχνικές που αναφέρθηκαν εισάγουν μεγάλη υπολογιστική πολυπλοκότητα στην στοιχειοκεραία MuPAR[25]. Γιατί το λόγο επιχειρήσαμε να βρούμε τις βέλτιστες τιμές για τα ενεργά και παρασιτικά στοιχεία με την βοήθεια γενετικού αλγορίθμου προσπαθώντας να μειώσουμε όσο το δυνατόν την πολυπλοκότητα του συστήματος στοχεύοντας στην βέλτιστη διαμόρφωση διαγράμματος ακτινοβολίας του συστήματος μας.

4.2.1 Αρχή λειτουργίας MuPAR στοιχειοκεραίας

Σε αυτή την ενότητα θα περιγράψουμε την στοιχειοκεραία και θα δώσουμε το μαθηματικό μοντέλο της λειτουργίας της.

4.2.1.1 Περιγραφή δομής MuPAR στοιχειοκεραίας



Σχήμα 4.4

Στοιχειοκεραία MuPAR σε πλάγια όψη και σε κάτοψη[26]

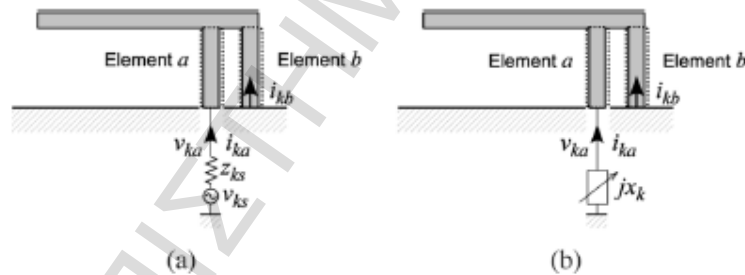
Στη παραπάνω εικόνα βλέπουμε μια μοντελοποίηση μιας στοιχειοκεραίας MuPAR με 4 στοιχεία IFA. Η εικόνα α είναι από πλάγια λήψη ενώ η β εικόνα είναι από κάτοψη. Τα ενεργά στοιχεία είναι το 1 και 2 και τα παρασιτικά είναι τα 3 και 4 τα οποία είναι τοποθετημένα πάνω στους άξονες x και y και απέχουν απόσταση d_{12} και d_{34} με $d_{12} = d_{34}$. Το παράλληλο τμήμα (ως προς το επίπεδο γείωσης) κάθε στοιχειοκεραίας IFA έχει διπλωθεί έτσι ώστε να χωράνε και οι τέσσερις κεραίες στο παρουσιαζόμενο τετράγωνο. Για χάρη απλότητας το επίπεδο γείωσης θεωρείται άπειρο. Τα δυο ενεργά στοιχεία διεγείρονται με πλάτη A_1 και A_2 και φάσεις PHE_1 και PHE_2 ενώ τα παρασιτικά στοιχεία συνδέονται με μεταβλητές αντιδράσεις φορτίου x_3 και x_4 . Οι τιμές στα x_3, x_4 έχουν άμεσο αντίκτυπο στην λειτουργία της κεραίας και σε συνδυασμό με τους συντελεστές διέγερσης των ενεργών στοιχείων καθορίζουν την ικανότητα διαμόρφωσης διαγράμματος ακτινοβολίας και μηδενισμού των παρεμβολών της MuPAR στοιχειοκεραίας[25].

Για παράδειγμα αν θεωρηθούν οι τιμές των x_3, x_4 ίδιες και τα ενεργά στοιχεία διεγείρονται με διαφορά φάσης 90 μοιρών τότε η στοιχειοκεραία σχηματίζει δέσμη ακτινών στην κατεύθυνση +90 μοιρών και -90 μοιρών λειτουργώντας σαν μια end-fire στοιχειοκεραία. Από την άλλη πλευρά αν θεωρηθεί ότι το ένα παρασιτικό στοιχείο έχει $\chi < 0$ άρα λειτουργεί ως χωρητικό (capacitive) και το άλλο έχει $\chi > 0$ άρα λειτουργεί ως επαγωγικό (inductive) και τα ενεργά στοιχεία είναι σε φάση τότε η στοιχειοκεραία αποδίδει δέσμη ακτίνων στις 0 μοίρες και στις 180 μοίρες

λειτουργώντας σαν κεραία Yagi-Uda. Από τα παραπάνω μπορεί κάνεις εύκολα να συμπεράνει ότι η επιλογή των $A_1, A_2, PHE_1, PHE_2, x_3, x_4$ είναι υψίστης σημασίας για την απόδοση της στοιχειοκεραίας[26].

4.2.1.2 Μοντελοποίηση λειτουργίας MuPAR στοιχειοκεραίας

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η υπό μελέτη στοιχειοκεραία MuPAR αποτελείται από 4 IFA στοιχειοκεραίες. Είναι γνωστό ότι οι IFA στοιχειοκεραίες εκπέμπουν κάθετα πολωμένα κύματα καθώς τα οριζόντια κύματα ακυρώνονται κυρίως του επίπεδου της γείωσης. Θεωρητικά σε μια στοιχειοκεραία IFA υπάρχουν δυο ακτινοβολητές-στοιχεία οι οποίοι είναι κάθετοι στο επίπεδο της γείωσης. Ο ένας ονομάζεται *a* και στην περίπτωση που είναι ενεργό το στοιχείο τερματίζεται με μια πηγή τροφοδοσίας και στην περίπτωση που αναφερόμαστε σε παρασιτικό στοιχείο τερματίζεται με μια μεταβλητή αντίδραση. Ο δεύτερος ακτινοβολητής ονομάζεται *b* και είναι βραχυκυκλωμένος. Παρακάτω ακολουθεί ένα σχήμα που δείχνει αυτές τις κατηγορίες IFA.



Σχήμα 4.5

*(a) μια IFA που στο *a* στοιχείο της συνδέεται μια πηγή τροφοδοσίας άρα μιλάμε για ενεργό στοιχείο, (b) μια IFA που στο στοιχείο *a* της ενώνεται μια μεταβλητή αντίδραση άρα αναφερόμαστε σε παρασιτικό στοιχείο.[25]*

Αν έστω θεωρηθεί μια στοιχειοκεραία MuPAR με *k*-IFA στοιχεία-κεραίες τότε τα ρεύματα από τα στοιχεία *b* μπορούν να τεθούν ως:

$$i_b = [i_{1b}, i_{2b}, \dots, i_{kb}]^T \quad (4.1)$$

Και τα ρεύματα από τα στοιχεία *a* μπορούν να τεθούν ως εξής:

$$i_a = [i_{1a}, i_{2a}, \dots, i_{ka}]^T \quad (4.2)$$

Έστω ότι η αμοιβαία σύζευξη μεταξύ των στοιχείων της IFA κεραίας περιγράφεται στον πίνακα σύνθετης εμπέδησης Z . Τότε το ρεύμα που διαρρέει ολόκληρη την κεραία τίθεται ως:

$$i = Z^{-1}u \quad (4.3),$$

όπου το ρεύμα i και η τάση u δίδονται ως:

$$\begin{aligned} i &= [i_{1a}, i_{2a}, \dots, i_{Ka}, i_{1b}, i_{2b}, \dots, i_{Kb}]^T \\ u &= [u_{1a}, u_{2a}, \dots, u_{Ka}, u_{1b}, u_{2b}, \dots, u_{Kb}]^T \end{aligned} \quad (4.4)$$

Επιπρόσθετα, αφού υπάρχουν K στοιχειοκεραίες IFA θα υπάρχουν $2K$ στοιχεία ρεύματος και τάσης δεδομένου ότι κάθε κεραία έχει 2 στοιχεία a και b . Τότε ο πίνακας σύνθετης εμπέδησης Z θα είναι μεγέθους 2×2 και θα είναι της μορφής:

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} \\ Z_{ba} & Z_{bb} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

όπου κάθε στοιχείο του πίνακα Z είναι ένας $K \times K$ υπο-πίνακας που εκφράζει την αμοιβαία σύζευξη όλων των στοιχείων μεταξύ τους των στοιχειοκεραιών IFA.

Όπως έγινε αναφορά και προηγουμένως τα στοιχεία a των ενεργών κεραιών τερματίζονται με μια πηγή τροφοδοσίας άρα θα έχουν μια εσωτερική εμπέδηση εισόδου z_{ks} για $(k=1, 2, \dots, L, L < K)$. Τα στοιχεία a των παρασιτικών που τερματίζονται με μεταβλητές αντιδράσεις θα τεθούν ως εξής: $x_k (k=L+1, L+2, \dots, K)$

Όσο αφορά την μοντελοποίηση των τάσεων που εφαρμόζονται στο σύστημα μας. Για τα στοιχεία a έστω:

$$\text{Τα ενεργά θα έχουν: } u_{ka} = u_{ks} - z_{ks} i_{ka} \quad (k=1, 2, \dots, L) \quad (4.6)$$

$$\text{Τα παρασιτικά θα έχουν: } u_{ka} = -jx_k i_{ka} \quad (k=L+1, L+2, \dots, K) \quad (4.7)$$

Όπου στην (4.6) το u_{ks} θα είναι η τάση της πηγής που έγινε εισαγωγή.

$$\text{Για τα στοιχεία } b \text{ θα ισχύει ότι } u_{kb} = 0 \quad (k=1, 2, \dots, L, L+1, L+2, \dots, K) \quad (4.8)$$

καθώς τα στοιχεία b είναι όλα βραχυκυκλωμένα με το επίπεδο γείωσης.

Αν πραγματοποιηθεί αντικατάσταση των εξισώσεων (4.6), (4.7), (4.8) στην (4.3) τότε θα έχουμε:

$$i = \left(\begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} \\ Z_{ba} & Z_{bb} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_s + X_{\text{var}} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} u_{sf} \\ 0 \end{bmatrix} = \tilde{Y}u_s \quad (4.9)$$

Όπου

$$\begin{aligned} u_s &= [u_{sf}^T, 0^T]^T \\ u_{sf} &= [u_{1s}, u_{2s}, \dots, u_{Ls}, 0, \dots, 0]^T \\ Z_s &= \text{diag}[z_{1s}, z_{2s}, \dots, z_{Ls}, 0, \dots, 0] \\ X_{\text{var}} &= \text{diag}[0, \dots, 0, jx^T] \\ x &= [x_{L+1}, x_{L+2}, \dots, x_K]^T \end{aligned} \quad (4.10)$$

Οι διαστάσεις των u_s και u_{sf} είναι $2K \times 1$ και $K \times 1$ αντίστοιχα. Οι διαστάσεις του πίνακα εσωτερικής εμπέδησης εισόδου Z_s είναι $K \times K$ όπως και οι διαστάσεις του πίνακα μεταβλητών αντιδράσεων X_{var} ενώ το μέγεθος του πίνακα x είναι $K-L$ με ($K \leq L$).

Αν γίνουν πράξεις στην σχέση (4.9) τότε θα υπάρξουν σαν αποτέλεσμα κάποιες εξισώσεις που είναι πιο εύκολα χρησιμοποιήσιμες από αυτή στην (4.9) όσο αφορά τα ρεύματα.

Κάνοντας πράξεις στην σχέση (4.9) ισχύει

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} \frac{Z_{bb}}{Z_{aa}Z_{bb} - Z_{ab}Z_{ba}} & \frac{-Z_{ba}}{Z_{aa}Z_{bb} - Z_{ab}Z_{ba}} \\ \frac{-Z_{ba}}{Z_{aa}Z_{bb} - Z_{ab}Z_{ba}} & \frac{Z_{aa}}{Z_{aa}Z_{bb} - Z_{ab}Z_{ba}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_s + X_{\text{var}} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} u_{sf} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Τότε αν απομονωθεί το i_a και παραλειφθεί αρχικά ο πίνακας $\begin{bmatrix} Z_s + X_{\text{var}} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ καθαρά για λόγους ευκολίας πράξεων ισχύει ότι:

$$i_a = \frac{Z_{bb}}{Z_{aa}Z_{bb} - Z_{ab}Z_{ba}} u_{sf} = \left(\frac{Z_{aa}Z_{bb} - Z_{ab}Z_{ba}}{Z_{bb}} \right)^{-1} u_{sf} = \left(Z_{aa} - \frac{Z_{ab}Z_{ba}}{Z_{bb}} \right)^{-1} u_{sf}$$

$$= \left(Z_{aa} - Z_{ab} \underbrace{Z_{bb}^{-1} Z_{ba}}_{F_{ba}} \right)^{-1} u_{sf} = \left(\underbrace{Z_{aa} - Z_{ab} F_{ba}}_{\tilde{Z}_{aa}} \right)^{-1} u_{sf} \quad (4.12)$$

Αν προστεθούν τώρα και τα στοιχεία του πίνακα $\begin{bmatrix} Z_s + X_{\text{var}} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ στην (4.12) τότε:

$$i_a = (\tilde{Z}_{aa} + Z_s + X_{\text{var}})^{-1} u_{sf} \quad (4.13)$$

Όμοια για το i_b ισχύει:

$$\begin{aligned} i_b &= \frac{-Z_{ba}}{Z_{aa} Z_{bb} - Z_{ab} Z_{ba}} u_{sf} = \left(\frac{Z_{aa} Z_{bb} - Z_{ab} Z_{ba}}{-Z_{ba}} \right)^{-1} u_{sf} = - \left(\frac{Z_{aa} Z_{bb} - Z_{ab} Z_{ba}}{Z_{ba}} \right)^{-1} u_{sf} \left(\frac{Z_{ba} Z_{bb}}{Z_{ba} Z_{bb}} \right) \\ &= - \left(\frac{Z_{aa} Z_{bb} - Z_{ab} Z_{ba}}{Z_{bb}} \right)^{-1} \left(\frac{Z_{ba} Z_{bb}}{Z_{ba} Z_{ba}} \right)^{-1} u_{sf} = - \underbrace{\left(\frac{Z_{aa} Z_{bb} - Z_{ab} Z_{ba}}{Z_{bb}} \right)^{-1}}_{i_a} \left(\frac{Z_{bb}}{Z_{ba}} \right)^{-1} \\ &= -i_a \frac{Z_{ba}}{Z_{bb}} = -i_a \underbrace{Z_{bb}^{-1} Z_{ba}}_{F_{ba}} = -i_a F_{ba} \end{aligned} \quad (4.14)$$

Άρα το i_b δίνεται από $i_b = -i_a F_{ba}$

Περά από τις εξισώσεις για τα ρεύματα είναι γνωστή και η εξίσωση κέρδους κατευθυντικότητας της στοιχειοκεραίας MuPAR. Αυτή δίνεται[25]:

$$G_a(\theta, \phi) = \frac{\pi Z_0 (h \sin \theta)^2 |D(\theta, \phi)|^2}{\lambda^2 P_{in}} \quad (4.15),$$

όπου $D(\theta, \phi) = a^T(\theta, \phi) \cdot i$, $P_{in} = R\{i^H u\}$ και $a(\theta, \phi) = e^{jk_0 r}$ όπου το a είναι το διάνυσμα στροφής της στοιχειοκεραίας στην θέση r και στην κατεύθυνση δέσμης (θ, ϕ) . Το μέγεθος του διανύσματος στροφής είναι $2K$ καθώς αναφερόμαστε και στο στοιχείο a και στο στοιχείο b κάθε κεραίας. Επίσης όπου Z_0 είναι η εμπέδηση ελευθέρου χώρου.

Αν προστεθεί και η επιρροή της εσωτερικής εμπέδησης εισόδου $z_{k,in}$ στην πηγή τροφοδοσίας και ο συντελεστής ανάκλασης Γ_k τότε το κέρδος κατευθυντικότητας γίνεται:

$$\text{Για } \Gamma_k = \frac{z_{k,in} - z_{ks}}{z_{k,in} + z_{ks}}, \quad z_{k,in} = \frac{u_{ks}}{i_{ka}} - z_{ks}$$

$$G_r(\theta, \phi) = \frac{\pi Z_0 (h \sin \theta)^2 |D(\theta, \phi)|^2}{\lambda^2 P_{in,r}} \quad (4.16),$$

$$\text{με } P_{in,r} = \sum_{k=1}^L \frac{1}{1 - |\Gamma_k|^2} |u_{ka}|^2 R\left\{\frac{1}{z_{k,in}}\right\} \quad (4.17)$$

Τέλος, οι απώλειες μη προσαρμογής της πηγής τροφοδοσίας μπορεί να μοντελοποιηθούν ως εξής: $W_r = \frac{P_{in,r}}{P_{in}}$ (4.18).[25]

4.2.2 Περιγραφή δομής Γενετικού αλγορίθμου

Παρακάτω θα αναλυθεί ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε στην στοιχειοκεραία MuPAR για να παρθούν βέλτιστες τιμές των ενεργών και παρασιτικών στοιχείων ώστε να επιτευχθεί μέγιστη συσχέτιση παραγόμενου διαγράμματος ακτινοβολίας με του επιθυμητού, ο οποίος είναι βασισμένος στον αλγόριθμο [23].

4.2.2.1 Ανάλυση Γενετικού αλγορίθμου

Παρακάτω παραθέτονται τα βήματα του αλγορίθμου που χρησιμοποιήθηκε:

- ❖ Βήμα 1 Υπολογισμός steering matrix
- ❖ Βήμα 2 Υπολογισμός πίνακα εμπέδησης Z
- ❖ Βήμα 3 Υπολογισμός επιθυμητών διαγραμμάτων ακτινοβολίας
- ❖ Βήμα 4 Έναρξη γενετικού αλγορίθμου με αρχικοποίηση
- ❖ Βήμα 5 Αξιολόγηση πρώτης γενιάς
- ❖ Βήμα 5.1 Μετατροπή χρωμοσωμάτων από δυαδικό σε δεκαδικό σύστημα
- ❖ Βήμα 5.2 Υπολογισμός παραγόμενου διαγράμματος ακτινοβολίας
- ❖ Βήμα 5.3 Υπολογισμός συνάρτησης φόρμας (fitness)
- ❖ Βήμα 6 Έλεγχος κριτηρίων τερματισμού
- ❖ Βήμα 7 Εφαρμογή βημάτων της επιλογής, διασταύρωσης, μετάλλαξης και αντικατάστασης στην νέα γενιά
- ❖ Βήμα 8 Αξιολόγηση βέλτιστης λύσης νέας γενιάς
- ❖ Βήμα 8.1 Μετατροπή χρωμοσωμάτων από δυαδικό σε δεκαδικό σύστημα
- ❖ Βήμα 8.2 Υπολογισμός παραγόμενου διαγράμματος ακτινοβολίας
- ❖ Βήμα 8.3 Υπολογισμός συνάρτησης φόρμας (fitness)
- ❖ Βήμα 9 Έλεγχος κριτηρίων τερματισμού
- ❖ Βήμα 10 Αν επαληθευτεί κάποιο από τα κριτήρια τότε τερματισμός διαφορετικά επανάληψη βήματος 7

Σχήμα 4.6

Διάγραμμα δομής αλγορίθμου

Αρχικά, από τη γεωμετρία της κεραίας υπολογίζουμε το steering vector της κεραίας. Αυτό θα είναι της μορφής $a(\theta, \phi) = [a_{1a}(\theta, \phi), a_{1b}(\theta, \phi), \dots, a_{ka}(\theta, \phi), a_{kb}(\theta, \phi)]^T$ (4.18), όπου κάθε στοιχείο του steering vector θα είναι της μορφής $e^{jk_0 r}$ και για το α στοιχείο και το β στοιχείο των K-IFA στοιχειοκεραίων που υπολογίστηκε στην θέση r και με κατεύθυνση δέσμης ακτίνας (θ, ϕ) . Το μέγεθος του steering vector θα είναι $2K \times 1$, καθώς κάθε κεραία έχει 2 στοιχεία a, b . Δεδομένο της μορφής του steering vector της στοιχειοκεραίας υπολογίζουμε στο steering matrix της στοιχειοκεραίας. Στην συνέχεια όσο αφορά τον πίνακα εμπέδησης Z της σχέσης (4.5), υπολογίστηκε με την χρήση τυχαίων τιμών. Λεπτομέρειες θα αναφερθούν στην ενότητα της προσομοίωσης. Στη συνέχεια θα πρέπει να υπολογιστούν τα επιθυμητά διαγράμματα ακτινοβολίας. Αυτά θα υπολογιστούν με την βοήθεια της μεθόδου QR decomposition, όπου αρχικά θα υπολογιστούν τα ορθογώνια διαγράμματα βάσης της MuPAR κεραίας, και έπειτα όλοι οι δυνατοί γραμμικοί συνδυασμοί των διαγραμμάτων αυτών με βάρη τα σήματα από το εκάστοτε σχήμα διαμόρφωσης που έχει επιλεγεί. Αν βρεθούν N διαγράμματα βάσης και με τάξη διαμόρφωσης M τότε

θα υπάρχουν M^N πιθανά διαγράμματα ακτινοβολίας. Έτσι τα επιθυμητά διαγράμματα ακτινοβολίας υπολογίζονται ως εξής:

$$P_{des}(\theta, \phi) = \Phi(\theta, \phi) \cdot s_{bs} = \sum_n \Phi_n(\theta, \phi) s_{bs,n} \quad (4.19),$$

όπου το Φ_n το n-οστό διάγραμμα βάσης του πομπού και $s_{bs,n}$ το μεταδιδόμενο σήμα πληροφορίας που απεικονίζεται στο n-οστό διάγραμμα βάσης στο beamspace πεδίο.

Στη συνέχεια θα περιγράψουμε τη δομή λειτουργίας του γενετικού αλγορίθμου. Σαν είσοδο ο γενετικός αλγόριθμος χρειάζεται τον αριθμό των ενεργών στοιχείων, τον αριθμό των παρασιτικών στοιχείων, τον πίνακα εμπέδησης Z , τον πίνακα στροφής (steering matrix), τα επιθυμητά διαγράμματα ακτινοβολίας (P_{des}), το πεδίο τιμών των φορτίων των μεταβλητών αντιδράσεων (X_i), το πεδίο τιμών των διεγερμένων πλατών των ενεργών στοιχείων (A_i), το πεδίο τιμών των διεγερμένων φάσεων των ενεργών στοιχείων (PHE_i), και την διακριτική ικανότητα των φορτίων μεταβλητής αντίστασης των παρασιτικών, των διεγερμένων πλατών και των διεγερμένων φάσεων των ενεργών στοιχείων.

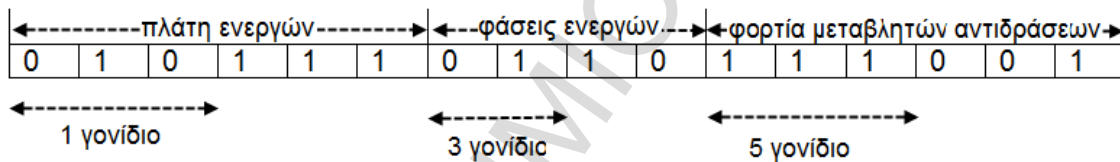
Όταν όλες οι είσοδοι είναι διαθέσιμες η διαδικασία της βελτιστοποίησης του γενετικού αλγορίθμου ξεκινά. Ο γενετικός αλγόριθμος υλοποιείται με δυαδική κωδικοποίηση και ξεκινά με ένα βήμα αρχικοποίησης όπου παράγει ένα τυχαίο αριθμό λύσεων-χρωμοσωμάτων που αποτελεί την πρώτη γενιά πληθυσμού του γενετικού αλγορίθμου. Κάθε χρωμόσωμα είναι ουσιαστικά ένα διάνυσμα ($1 \times N_{Mupar}$), όπου

$$N_{Mupar} = N_{Act}(N_{bits,A} + N_{bits,PHE}) + N_{par}N_{bits,X} \quad (4.20),$$

με N_{Act} τον αριθμό των ενεργών στοιχείων της στοιχειοκεραίας, $N_{bits,A}$ το αριθμό των bits για την κωδικοποίηση του διεγερμένου πλάτους, $N_{bits,PHE}$ το αριθμό των bits για την κωδικοποίηση της διεγερμένης φάσης, N_{par} τον αριθμό των παρασιτικών στοιχείων της στοιχειοκεραίας και $N_{bits,X}$ τον αριθμό των bits για την κωδικοποίηση του φορτίου μεταβλητών αντιδράσεων.

Το παραπάνω διάνυσμα περιέχει τα φορτία των μεταβλητών αντιδράσεων των παρασιτικών στοιχείων, τις τιμές των διεγερμένων πλατών και τις τιμές των διεγερμένων φάσεων των ενεργών στοιχείων. Κάθε μια τιμή από τις παραπάνω είναι ένα γονίδιο του χρωμοσώματος της λύσης. Αν για παράδειγμα έχουμε μια

στοιχειοκεραία MuPAR με 2 ενεργά και 2 παρασιτικά τότε θα έχουμε 2 τιμές φορτίων των μεταβλητών αντιδράσεων των παρασιτικών και 2 τιμές πλατών και 2 τιμές φάσεων των ενεργών στοιχείων, σύνολο 6 γονίδια σε ένα χρωμόσωμα. Παραπάνω αναφέραμε την διακριτική ικανότητα των φορτίων μεταβλητής αντίστασης των παρασιτικών, των διεγερμένων πλατών και των διεγερμένων φάσεων των ενεργών στοιχείων. Πιο ειδικά, η διακριτική ικανότητα των μεταβλητών αναφέρεται αρχικά στο βηματισμό της αναζήτησης της βέλτιστης τιμής των παραπάνω τιμών στο πεδίο τιμών αλλά και στον αριθμό των bit που χρειάζονται για την κωδικοποίηση κάθε τιμής με μια πιθανότητα λάθους. Έστω ότι αναφερόμαστε στο παραπάνω παράδειγμα της στοιχειοκεραίας MuPAR τότε αν τυχαία θέσουμε ότι τα πλάτη και οι φάσεις των ενεργών κωδικοποιούνται με 3 και 2 bit αντίστοιχα και ότι τα φορτία των μεταβλητών αντιδράσεων κωδικοποιούνται με 3 bit τότε το χρωμόσωμα της λύσης θα ήταν της μορφής:



Σχήμα 4.7

Χρωμόσωμα παραδείγματος

Στο βήμα της αξιολόγησης, το χρωμόσωμα λύση αξιολογείται αν καταφέρνει με τις παρούσες τιμές του να φτάσει στην επιθυμητή λύση. Για να γίνει όμως η αξιολόγηση θα πρέπει να γίνει μετατροπή των δυαδικών τιμών σε δεκαδικές ώστε να υπολογιστεί το διάγραμμα ακτινοβολίας και να συγκριθεί με το επιθυμητό. Για αυτό το λόγο θα χρειαστούν κάποιες βοηθητικές εξισώσεις για να αποκωδικοποιήσουν κάθε γονίδιο του χρωμοσώματος. Έχουμε 3 ειδών γονίδια και άρα θα χρειαστούμε 3 διαφορετικές εξισώσεις. Άρα έχουμε:

➤ Για τα πλάτη των ενεργών στοιχείων:

$$Alpha_i = \frac{Alpha_{lim1} + bin2dec(gene_{i,A}) \cdot Alpha_{lim2}}{2^{N_{bits,A}} - 1} \quad 1 \leq i \leq N_{Act} \quad (4.21),$$

όπου $Alpha_{lim1}, Alpha_{lim2}$ είναι τα άνω και κάτω όρια του πεδίου τιμών για τα πλάτη των ενεργών στοιχείων, $bin2dec(.)$ είναι μια συνάρτηση μετατροπής δυαδικού σε δεκαδικού (matlab) και $gene_{i,A}$ είναι το i -οστό γονίδιο που αναφέρεται στα πλάτη των ενεργών στοιχείων.

➤ Για τις φάσεις των ενεργών στοιχείων:

$$PHE_j = \frac{PHE_{lim1} + bin2dec(gene_{j,PHE}) \cdot PHE_{lim2}}{2^{N_{bis,PHE}} - 1} \quad 1 \leq j \leq N_{Act} \quad (4.22)$$

Με PHE_{lim1}, PHE_{lim2} τα άνω και κάτω όρια του πεδίου τιμών για τις φάσεις των ενεργών στοιχείων και $gene_{j,PHE}$ είναι το j -οστό γονίδιο που αναφέρεται στις φάσεις των ενεργών στοιχείων.

➤ Για τα φορτία των παρασιτικών:

$$X_k = X_{lim1} + \frac{(bin2dec(gene_{k,X}) \cdot 2 \cdot X_{lim2})}{2^{N_{bis,X}} - 1} \quad 1 \leq k \leq N_{par},$$

όπου X_{lim1}, X_{lim2} είναι τα άνω και κάτω όρια του πεδίου τιμών για φορτία των μεταβλητών αντιδράσεων των παρασιτικών στοιχείων και $gene_{k,X}$ είναι το k -οστό γονίδιο που αναφέρεται στα φορτία των μεταβλητών αντιδράσεων των παρασιτικών στοιχείων.

Στη συνέχεια, αφού θα έχουμε υπολογίσει τις παραπάνω τιμές και σε συνδυασμό με το πίνακα εμπέδησης Z θα μπορούμε να υπολογίσουμε τις τιμές του ρεύματος της σχέσης (4.9):

$$i = \left(\begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} \\ Z_{ba} & Z_{bb} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_s + X_{var} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} u_{sf} \\ 0 \end{bmatrix}$$

Επιπρόσθετα, με δεδομένο το steering matrix της κεραίας $S(\theta, \phi)$ από την γεωμετρία της κεραίας θα μπορέσουμε να υπολογίσουμε το παραγόμενο διάγραμμα ακτινοβολίας ως εξής:

$$P_{rad}(\theta, \phi) = \sum_n i_n S(\theta, \phi)_n \quad (4.23), \text{ το οποίο κανονικοποιείται ως: } P_{rad} = \frac{P_{rad}}{\int_0^{2\pi} |P_{rad}|^2} \quad (4.24),$$

όπου το i_n είναι το ρεύμα της σχέσης (4.9).

Όσο αφορά τώρα την συνάρτηση βελτιστοποίησης (ή φόρμας αφού αναφερόμαστε σε πρόβλημα μεγιστοποίησης), χρησιμοποιούμε την έννοια της συσχέτισης (correlation) καθώς έτσι μπορούμε να συγκρίνουμε αποδοτικότερα τα παραγόμενα διαγράμματα ακτινοβολίας με τα επιθυμητά διαγράμματα ακτινοβολίας. Τότε θα ισχύει:

$$Fitness = \max\left(\int_0^{2\pi} P_{rad}(\theta, \phi) P_{des}(\theta, \phi) d\theta d\phi\right) \quad (4.25)$$

Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία της αξιολόγησης της αρχικής λύσης τότε εφαρμόζονται τα βήματα της επιλογής, της διασταύρωσης και της μετάλλαξης και της αντικατάστασης όπως σε κάθε γενετικό αλγόριθμο για την δημιουργία νέου πληθυσμού. Στην επιλογή εφαρμόζεται η τεχνική της επιλογής ρουλέτας όπου σε κάθε χρωμόσωμα ανατίθεται μια πιθανότητα να επιλεγεί με βάση το αποτέλεσμα της συνάρτησης βελτιστοποίησης (φόρμας). Στην διασταύρωση επιλέγεται η τεχνική του ενός σημείου ανάμεσα σε 2 γονείς και στην μετάλλαξη επιλέγεται η αλλαγή κάποιων bit από μηδέν σε ένα και αντίστροφα με βάση κάποια πιθανότητα. Μόλις τελειώσουν τα βήματα αυτά θα έχουμε ένα νέο πληθυσμό και θα αξιολογήσουμε τα χρωμοσώματα για να βρεθεί η βέλτιστη λύση.

Όμοια μετά θα έχουμε επανάληψη όλων αυτών των διαδικασιών μέχρι να εκπληρωθούν τα κριτήρια τερματισμού και έτσι φτάνουμε στο τελευταίο βήμα του γενετικού αλγόριθμου. Στον παρόν αλγόριθμο χρησιμοποιήθηκαν 3 κριτήρια τερματισμού. Το πρώτο κριτήριο αναφέρεται σε ένα μέγιστο αριθμό γενεών που υπολογίζονται από τον γενετικό αλγόριθμο, όταν αυτός ο αριθμός ξεπεραστεί τότε σαν βέλτιστη λύση επιστρέφει ο αλγόριθμος την μέχρι εκείνη τη στιγμή λύση. Το δεύτερο κριτήριο αναφέρεται στην μέγιστη τιμή της συσχέτισης όταν η συνάρτηση βελτιστοποίησης επιστρέψει αυτήν την τιμή τότε σταματά η εκτέλεση του αλγορίθμου και επιστρέφει την τιμή αυτή σαν βέλτιστη λύση.

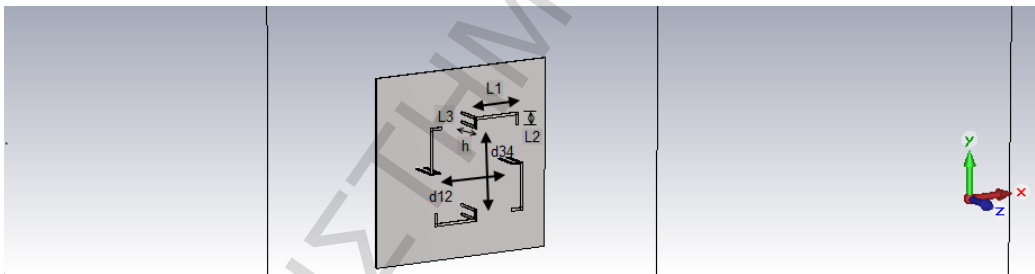
Τέλος το τελευταίο κριτήριο τερματισμού είναι όταν συμβεί λίκνασμα λύσεων για ένα προκαθορισμένο αριθμό γενεών όπου σε αυτήν την περίπτωση όσο ανεβαίνει ο αριθμός των γενεών με την ίδια λύση ανεβαίνει και η πιθανότητα μετάλλαξης και

φτάνει τον αριθμό του 85% πιθανότητας να συμβεί μετάλλαξη, ώστε να ξεφύγει από αυτή την λύση στην περίπτωση που έχει βρεθεί τοπικό μέγιστο. Η συνάρτηση αύξησης της πιθανότητας μετάλλαξης δίνεται από: $P_M = 0.85 - e^{-0.1 \cdot k} \cdot (0.85 - P_M)$ (4.26), όπου P_M είναι η πιθανότητα μετάλλαξης και k είναι ο μετρητής των γενεών με την ίδια λύση. Η εξίσωση αυτή είναι επαναληπτική καθώς η τιμή της πιθανότητας αλλάζει όσο οι γενεές αυξάνονται.

Τέλος να αναφέρουμε ότι έχουμε εφαρμογή της τεχνικής του ελιτισμού δηλαδή κρατάμε ένα αριθμό βέλτιστων χρωμοσωμάτων και τα μεταφέρουμε στην επομένη γενιά.

4.2.3 Προσομοίωση Γενετικού αλγορίθμου σε MuPAR στοιχειοκεραία

Σε αυτή την ενότητα θα περιγραφεί η προσομοίωση του γενετικού αλγορίθμου στην στοιχειοκεραία MuPAR. Αρχικά θα γίνει αναφορά στις διαστάσεις της στοιχειοκεραίας που προσομοιώθηκε.



Σχήμα 4.8
Στοιχειοκεραία MuPAR

L_1	0.1452λ
L_2	$0,04\lambda$
L_3	$0,0202\lambda$
h	$0,09\lambda$
f	2.45GHz
$d_{12} = d_{34}$	0.25λ

Πίνακας 4.1

Χαρακτηριστικά στοιχειοκεραίας

Στο παραπάνω πίνακα (πίνακας 4.1) βλέπουμε τις τιμές των χαρακτηριστικών μεγεθών τις στοιχειοκεραίας MuPAR καθώς και τις αποστάσεις που έχουν οι στοιχειοκεραίες IFA μεταξύ τους. Να σημειωθεί ότι και οι 4 IFA έχουν ακριβώς τα ίδια χαρακτηριστικά. Επίσης, οι διαστάσεις της στοιχειοκεραίας που απεικονίζονται στον παραπάνω πίνακα είναι βέλτιστες και τις έχουμε πάρει από το [25].

Για να μπορέσουμε να μοντελοποιήσουμε την στοιχειοκεραία MuPAR με τη βοήθεια του matlab θεωρήσαμε ένα πλέγμα 15x15 όπου τοποθετήσαμε τα στοιχεία κάθε στοιχειοκεραίας IFA, άρα συνολικά 8 στοιχεία, καθώς μια στοιχειοκεραία IFA έχει 2 στοιχεία (a,b) και συνολικά έχουμε 4 IFA στην στοιχειοκεραία MuPAR.

0	0	0	0	0	0	0	0	-1 ³	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	-1 ⁴	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-1 ⁸	-1 ⁷	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-1 ² -1 ¹
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	-1 ⁵	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	-1 ⁶	0	0	0	0	0	0

Σχήμα 4.9

Πλέγμα 15x15

Στο σχήμα 4.9 παρατηρούμε την μορφή του πλέγματος που χρησιμοποιήθηκε, με 1 είναι τοποθετημένα τα στοιχεία των κεραιών IFA και με 1 είναι το κέντρο του πλέγματος. Επίσης με πράσινο χρώμα είναι αριθμημένα τα στοιχεία για ευκολία παρατήρησης των αποστάσεων του πίνακα D.

Στη συνέχεια υπολογίσαμε την απόσταση D των στοιχείων μεταξύ τους καθώς θα την χρειαστούμε για να υπολογίσουμε το steering matrix της MuPAR κεραιάς. Με δεδομένο το λ ($\lambda = \frac{c}{f}$) και την ελάχιστη απόσταση των στοιχείων μεταξύ τους (L_3) και τις αποστάσεις $d_{12} = d_{34}$ των στοιχειοκεραιών IFA, η απόσταση των στοιχείων δίνεται από τον πίνακα:

D <8x8 double>								
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0.0025	0.0247	0.0230	0.0230	0.0247	0.0325	0.0350
2	0.0025	0	0.0230	0.0212	0.0212	0.0230	0.0300	0.0325
3	0.0247	0.0230	0	0.0025	0.0325	0.0350	0.0230	0.0247
4	0.0230	0.0212	0.0025	0	0.0300	0.0325	0.0212	0.0230
5	0.0230	0.0212	0.0325	0.0300	0	0.0025	0.0212	0.0230
6	0.0247	0.0230	0.0350	0.0325	0.0025	0	0.0230	0.0247
7	0.0325	0.0300	0.0230	0.0212	0.0212	0.0230	0	0.0025
8	0.0350	0.0325	0.0247	0.0230	0.0230	0.0247	0.0025	0

Πίνακας 4.2

Πίνακας των αποστάσεων των στοιχείων μεταξύ τους

Στη συνέχεια, μπορούμε να υπολογίσουμε το steering matrix της MuPAR κεραιάς όπου κάθε στοιχείο του πίνακα θα είναι της μορφής:

$$S(\theta, \varphi) = e^{2\pi j D(i,j) \cos(\varphi - \varphi_0)} \quad (4.26), \text{ όπου το } D(i,j) \text{ είναι η απόσταση του εκάστοτε}$$

στοιχείου που μας ενδιαφέρει και δίνεται από τον παραπάνω πίνακα, φ είναι η γωνία που ελέγχει το αζιμούθιο και φ_0 είναι η γωνία σε σχέση με το reference point. Το μέγεθος του πίνακα θα είναι 360x8. Έπειτα ο πίνακας της εμπέδησης υπολογίστηκε με την βοήθεια της εντολής rand (matlab) που παράγει τυχαίες τιμές με βάση κάποιου seed. Στη συνέχεια μοντελοποιήθηκε κατάλληλα για να έρθει στην μορφή R-Ij ή στην μορφή R+Ij. Όπου R είναι πραγματικός και I είναι μιγαδικός αριθμός. Επιπρόσθετα για ευκολία υλοποίησης οι εσωτερικές εμπεδήσεις των ενεργών στοιχείων των IFA z_{1s}, z_{2s} θεωρήθηκαν μηδέν. Έπειτα θα αναφέρουμε κάποιες

λεπτομέρειες εκτέλεσης του γενετικού αλγορίθμου και θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για ένα συγκεκριμένο σενάριο.

Πιθανότητα διασταύρωσης	0.7
Πιθανότητα μετάλλαξης	0.1
Μέγεθος πληθυσμού	1200
Μέγιστος αριθμός stable γενεών	30
Μέγιστος αριθμός γενεών	1000
Αριθμός elite χρωμοσωμάτων	5

Πίνακας 4.3

Χαρακτηριστικά γενετικού αλγορίθμου

Στο παραπάνω πίνακα βλέπουμε κάποια χαρακτηριστικά στοιχεία του γενετικού αλγορίθμου όπως μέγιστος αριθμός γενεών, μέγεθος πληθυσμού, αριθμός ελίτ χρωμοσωμάτων, πιθανότητα μετάλλαξης (η οποία είναι η αρχική τιμή και αλλάζει καθώς έχουμε λίμνασμα λύσεων) και πιθανότητα διασταύρωσης. Πιο ειδικά, όσο αφορά την πιθανότητα διασταύρωσης ο πληθυσμός μετά από την αξιολόγηση ταξινομείται κατά φθίνουσα σειρά με βάση την τιμή correlation κάθε χρωμοσώματος από την οποία τα 5 καλύτερα μεταφέρονται στην επόμενη γενιά αυτούσια (χωρίς να υποστούν μετάλλαξη), το 30% των καλύτερων (με βάση την τιμή της συνάρτησης fitness) δεν δέχεται διασταύρωση και το υπόλοιπο 70% θα υποστεί διασταύρωση. Η μετάλλαξη αφορά όλο το πληθυσμό των χρωμοσωμάτων (εκτός των ελίτ) αλλά με αρχική πιθανότητα πραγματοποίησης 10%.

Όρια φορτίων μεταβλητών αντιδράσεων	[-300,300]Ohm
Όρια πλατών ενεργών στοιχείων	[0.01,1]Volt
Όρια φάσεων ενεργών στοιχείων	[0,360]degrees
Αριθμός παρασιτικών στοιχείων	2
Αριθμός ενεργών στοιχείων	2

Πίνακας 4.4

Δεδομένα μεταβλητών

Στον παραπάνω πίνακα βλέπουμε τα όρια των μεταβλητών που μας ενδιαφέρουν και τους αριθμούς των ενεργών και παρασιτικών στοιχείων της στοιχειοκεραίας MuPAR που γίνεται η μελέτη.

Μήκος χρωμοσώματος	52
bits κωδικοποίησης φορτίου μεταβλητής αντίδρασης	10
bits κωδικοποίησης πλάτους	9
bits κωδικοποίησης φάσης	7
Βήμα αναζήτησης φορτίου μεταβλητής αντίδρασης	0.5865 Ohm
Βήμα αναζήτησης πλάτους	0.0079 Volt
Βήμα αναζήτησης φάσης	0.7045 degrees

Πίνακας 4.5

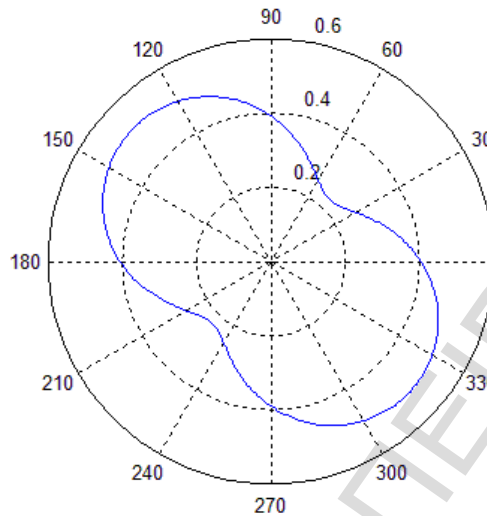
Χαρακτηριστικά στοιχεία αναζήτησης μεταβλητών

Στο παραπάνω πίνακα βλέπουμε το μήκος χρωμοσώματος που υπολογίζεται από την εξίσωση (4.20) με τη βοήθεια των τιμών του πίνακα 4.4 και τις τιμές του παραπάνω πίνακα. Επίσης παρουσιάζεται το βήμα αναζήτησης των μεταβλητών που μας ενδιαφέρουν και τα bits κωδικοποίησης τους. Παρακάτω παραθέτονται κάποιες συναρτήσεις που μας βοήθησαν στο υπολογισμό των παραπάνω τιμών:

$$\begin{aligned}
 N_{bits,X} &= \log_2 \left[\frac{2X_{\max \lim} + 1}{X_{step}} \right] \\
 N_{bits,A} &= \log_2 \left[\frac{A_{\max \lim} + 1}{A_{step}} \right] \\
 N_{bits,\phi} &= \log_2 \left[\frac{PHE_{\max \lim} + 1}{PHE_{step}} \right]
 \end{aligned} \tag{4.27}$$

Στη συνέχεια θα πάρουμε ένα σενάριο και θα το τρέξουμε για να παρουσιάσουμε την σύγκλιση του αλγορίθμου και στην συνέχεια θα παρέχουμε αποτελέσματα και για άλλα σενάρια. Έστω ότι έχουμε 8-psk διαμόρφωση τότε υπολογίζουμε το

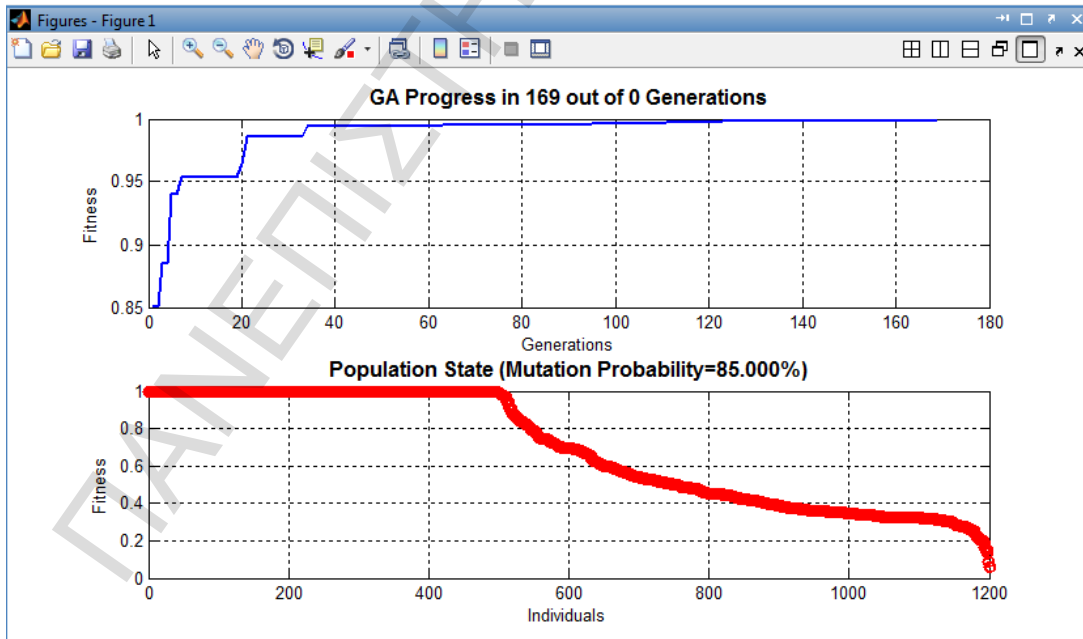
επιθυμητό διάγραμμα ακτινοβολίας με την εξίσωση (4.19) και το πρώτο διάγραμμα θα είναι της μορφής:



Σχήμα 4.10

Επιθυμητό διάγραμμα ακτινοβολίας

Έπειτα μας έβγαλε σαν αποτέλεσμα :



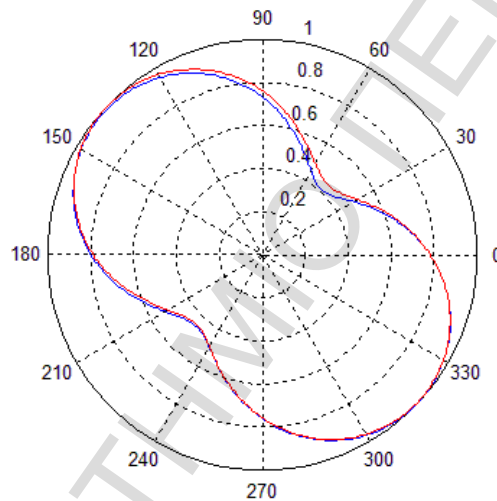
Σχήμα 4.11

Αποτελέσματα γραφικών παραστάσεων.

```
Command Window
Pattern: 1
Correlation Achieved: 0.999
Results X:
0+136.9501i          0+233.7243i Ohm
Results A:
0.96858      0.94496 Volt
Results PHE:
130.3327      278.9824 deg
Generations: 169.000
Time Elapsed: 416.334>>
```

Σχήμα 4.12

Αποτελέσματα μεταβλητών που επιθυμούμε από το matlab.



Σχήμα 4.13

Γραφική απεικόνιση επιθυμητού και παραγόμενου διαγράμματος ακτινοβολίας, με κόκκινο χρώμα είναι το επιθυμητό και με μπλε το παραγόμενο.

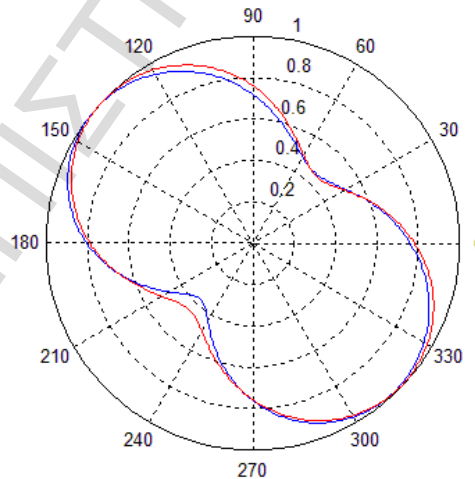
Όπως βλέπουμε από τα παραπάνω σχήματα ο αλγόριθμος λειτουργεί παρά πολύ αποδοτικά και παρατηρούμε ότι σχεδόν συμπίπτει η γραφική απεικόνιση του επιθυμητού με το παραγόμενο διάγραμμα. Πιο ειδικά, στο σχήμα 4.11, βλέπουμε στο πάνω τμήμα μια γραφική παράσταση της συνάρτησης fitness συναρτήσεως των γενεών και βλέπουμε ότι η γραφική παράσταση ανεβαίνει αρκετά και σταματά σε σημείο σχεδόν στο 1 (μέγιστη δυνατή συσχέτιση), στο κάτω τμήμα παρατηρούμε μια γραφική παράσταση της συνάρτησης fitness συναρτήσεως των χρωμοσωμάτων και παρατηρούμε τις αξιολογήσεις κάθε χρωμοσώματος και πως αυτά κυμαίνονται με τα

αποτελέσματα της συνάρτησης fitness. Παρατηρούμε επίσης και τον ελιτισμό στα πρώτα χρωμοσώματα που έχουν παρά πολύ καλό αποτέλεσμα συνάρτησης fitness. Στο σχήμα 4.12, παρατηρούμε τα αποτελέσματα της βέλτιστης λύσης όσο αφορά τις τιμές των μεταβλητών αντιδράσεων των παρασιτικών και τις τιμές των πλατών και των φάσεων των ενεργών επίσης παρατηρούμε το αποτέλεσμα της συνάρτησης fitness όπου σε αυτό το σενάριο είναι στο 99,9% και τον χρόνο που έκανε ο αλγόριθμος για να υπολογίσει αυτήν τη λύση.

Επιπρόσθετα, φαίνονται και οι γενεές που χρειάστηκε ο αλγόριθμος για να καταλήξει στην βέλτιστη λύση. Στο σχήμα 4.13, παρατηρούμε στην ίδια γραφική απεικόνιση του παραγόμενου διαγράμματος ακτινοβολίας που είναι με μπλε χρώμα και του επιθυμητού διαγράμματος ακτινοβολίας που είναι με κόκκινο χρώμα όπως είναι λογικό από την στιγμή που το correlation (συσχέτιση) είναι στο 99,9% οι δυο γραφικές παραστάσεις σχεδόν συμπίπτουν.

Στη συνέχεια θα εκτελέσουμε τον αλγόριθμο και για άλλες διαμορφώσεις και θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα για το πρώτο διάγραμμα κάθε φορά. Με μπλε χρώμα κάθε φορά θα είναι το παραγόμενο και με κόκκινο χρώμα θα είναι το επιθυμητό διάγραμμα ακτινοβολίας.

Για bpsk διαμόρφωση έχουμε:

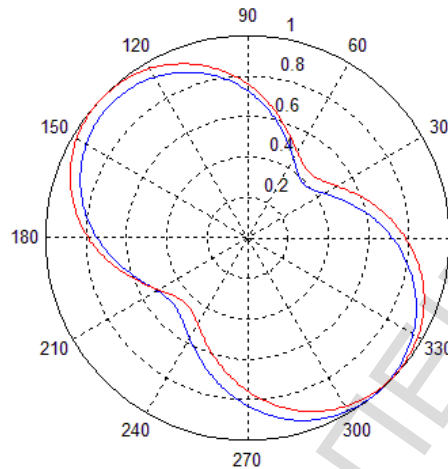


Σχήμα 4.14

Γραφική απεικόνιση επιθυμητού και παραγόμενου διαγράμματος ακτινοβολίας για bpsk

Όπου είχε σαν αποτέλεσμα συσχέτισης επιθυμητού με παραγόμενου διαγράμματος ακτινοβολίας (fitness function) 99,7%

Για qpsk διαμόρφωση έχουμε:

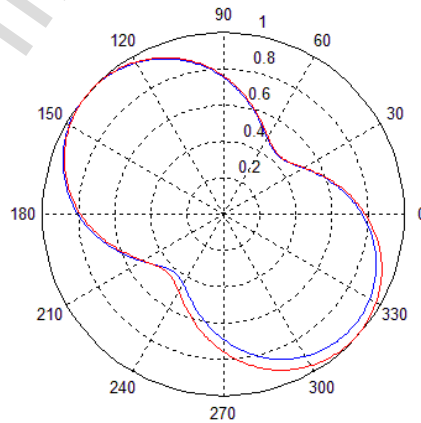


Σχήμα 4.15

Γραφική απεικόνιση επιθυμητού και παραγόμενου διαγράμματος ακτινοβολίας για qpsk

Όπου είχε σαν αποτέλεσμα συσχέτισης επιθυμητού με παραγόμενου διαγράμματος ακτινοβολίας (fitness function) 99,2%

Για 16-psk διαμόρφωση έχουμε:

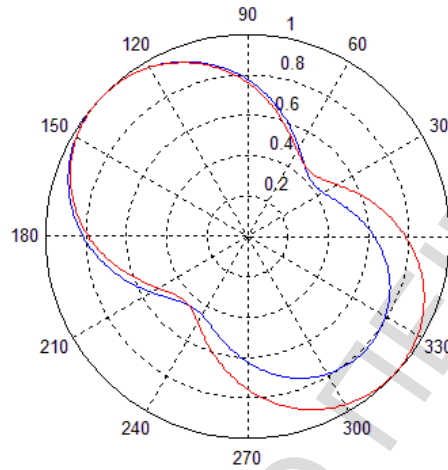


Σχήμα 4.16

Γραφική απεικόνιση επιθυμητού και παραγόμενου διαγράμματος ακτινοβολίας για 16-psk

Όπου είχε σαν αποτέλεσμα συσχέτισης επιθυμητού με παραγόμενου διαγράμματος ακτινοβολίας (fitness function) 99,9%

Για 16-qam μοντελοποίηση έχουμε:



Σχήμα 4.17

Γραφική απεικόνιση επιθυμητού και παραγόμενου διαγράμματος ακτινοβολίας για 16-qam

Όπου είχε σαν αποτέλεσμα συσχέτισης επιθυμητού με παραγόμενου διαγράμματος ακτινοβολίας (fitness function) 99,2%

Από τα 4 παραπάνω σχήματα είναι εμφανές ότι ο αλγόριθμος αποδίδει εξαιρετικά και σε διαφορετικές μοντελοποιήσεις. Στη συνέχεια, για μια συγκεκριμένη διαμόρφωση (8-psk) θα παράγουμε τα αποτελέσματα συσχέτισης της fitness για 100 εκτελέσεις του αλγορίθμου με διαφορετικούς πίνακες εμπέδησης κάθε φορά, για να αποδείξουμε ότι παρόλο την τυχαιότητα των τιμών στον πίνακα εμπέδησης ο αλγόριθμος συγκλίνει σε πάρα πολύ καλό ποσοστό συσχέτισης.

*Ανάπτυξη Γενετικού Αλγορίθμου για Παρασιτικές Στοιχειοκεραίες
Πολλαπλών Ενεργών και Παρασιτικών Στοιχείων*

1)	Correlation Achieved: 0.875	51)	Correlation Achieved: 0.980
2)	Correlation Achieved: 0.997	52)	Correlation Achieved: 0.999
3)	Correlation Achieved: 0.999	53)	Correlation Achieved: 0.991
4)	Correlation Achieved: 0.951	54)	Correlation Achieved: 0.949
5)	Correlation Achieved: 0.974	55)	Correlation Achieved: 0.994
6)	Correlation Achieved: 0.873	56)	Correlation Achieved: 0.998
7)	Correlation Achieved: 0.999	57)	Correlation Achieved: 0.969
8)	Correlation Achieved: 0.991	58)	Correlation Achieved: 0.999
9)	Correlation Achieved: 0.981	59)	Correlation Achieved: 0.996
10)	Correlation Achieved: 0.999	60)	Correlation Achieved: 0.996
11)	Correlation Achieved: 0.980	61)	Correlation Achieved: 0.966
12)	Correlation Achieved: 0.986	62)	Correlation Achieved: 0.998
13)	Correlation Achieved: 0.979	63)	Correlation Achieved: 0.999
14)	Correlation Achieved: 0.981	64)	Correlation Achieved: 0.999
15)	Correlation Achieved: 0.960	65)	Correlation Achieved: 0.995
16)	Correlation Achieved: 0.993	66)	Correlation Achieved: 0.842
17)	Correlation Achieved: 0.999	67)	Correlation Achieved: 0.996
18)	Correlation Achieved: 0.963	68)	Correlation Achieved: 0.951
19)	Correlation Achieved: 0.953	69)	Correlation Achieved: 0.999
20)	Correlation Achieved: 0.872	70)	Correlation Achieved: 0.999
21)	Correlation Achieved: 0.999	71)	Correlation Achieved: 0.979
22)	Correlation Achieved: 0.994	72)	Correlation Achieved: 0.999
23)	Correlation Achieved: 0.930	73)	Correlation Achieved: 0.993
24)	Correlation Achieved: 0.999	74)	Correlation Achieved: 0.987
25)	Correlation Achieved: 0.927	75)	Correlation Achieved: 0.992
26)	Correlation Achieved: 0.996	76)	Correlation Achieved: 0.745
27)	Correlation Achieved: 0.999	77)	Correlation Achieved: 0.999
28)	Correlation Achieved: 0.999	78)	Correlation Achieved: 0.994
29)	Correlation Achieved: 0.926	79)	Correlation Achieved: 0.975
30)	Correlation Achieved: 0.995	80)	Correlation Achieved: 0.952
31)	Correlation Achieved: 0.971	81)	Correlation Achieved: 0.981
32)	Correlation Achieved: 0.963	82)	Correlation Achieved: 0.996
33)	Correlation Achieved: 0.999	83)	Correlation Achieved: 0.967
34)	Correlation Achieved: 0.963	84)	Correlation Achieved: 0.877

*Ανάπτυξη Γενετικού Αλγορίθμου για Παρασιτικές Στοιχειοκεραίες
Πολλαπλών Ενεργών και Παρασιτικών Στοιχείων*

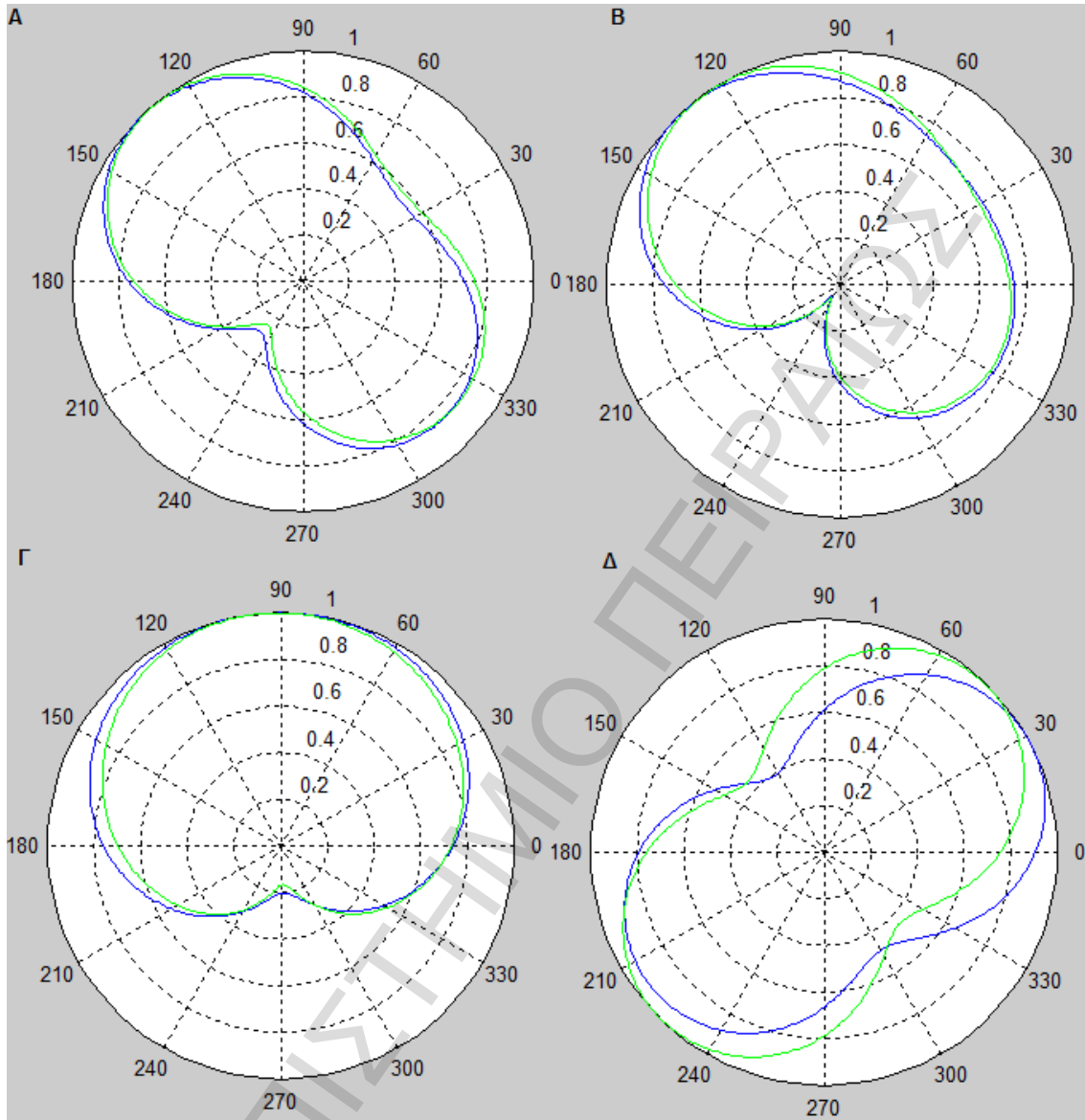
35)	Correlation Achieved: 0.871	85)	Correlation Achieved: 0.999
36)	Correlation Achieved: 0.999	86)	Correlation Achieved: 0.953
37)	Correlation Achieved: 0.999	87)	Correlation Achieved: 0.991
38)	Correlation Achieved: 0.997	88)	Correlation Achieved: 0.992
39)	Correlation Achieved: 0.821	89)	Correlation Achieved: 0.904
40)	Correlation Achieved: 0.875	90)	Correlation Achieved: 0.996
41)	Correlation Achieved: 0.999	91)	Correlation Achieved: 0.999
42)	Correlation Achieved: 0.986	92)	Correlation Achieved: 0.969
43)	Correlation Achieved: 0.995	93)	Correlation Achieved: 0.972
44)	Correlation Achieved: 0.999	94)	Correlation Achieved: 0.961
45)	Correlation Achieved: 0.995	95)	Correlation Achieved: 0.995
46)	Correlation Achieved: 0.971	96)	Correlation Achieved: 0.999
47)	Correlation Achieved: 0.992	97)	Correlation Achieved: 0.994
48)	Correlation Achieved: 0.953	98)	Correlation Achieved: 0.840
49)	Correlation Achieved: 0.998	99)	Correlation Achieved: 0.960
50)	Correlation Achieved: 0.989	100)	Correlation Achieved: 0.999

Πίνακας 4.6

Πολλαπλές εκτελέσεις αλγορίθμου με διαφορετικούς πίνακες εμπέδησης

Αποδεικνύεται από το παραπάνω πίνακα, παρόλο την τυχαιότητα των τιμών στο πίνακα εμπέδησης Z, ότι τα αποτελέσματα του αλγορίθμου συγκλίνουν σε πολύ καλό βαθμό συσχέτισης δεικνύοντας ότι ο γενετικός αλγόριθμος λειτουργεί αποδοτικά. Από την άλλη πλευρά είναι αποδεκτό λόγω της τυχαιότητας των τιμών του πίνακα εμπέδησης ελάχιστες τιμές συσχέτισης να μην είναι καλές.

Τέλος παραθέτουμε ένα σχήμα που έχει μαζί διαφορετικές μοντελοποιήσεις για το δεύτερο διάγραμμα γραφικές απεικονίσεις επιθυμητού και παραγόμενου διαγράμματος ακτινοβολίας. Με πράσινο χρώμα έχουμε τα επιθυμητά διαγράμματα ακτινοβολίας και με μπλε τα παραγόμενα διαγράμματα ακτινοβολίας.



Σχήμα 4.18

Γραφικές απεικονίσεις επιθυμητού και παραγόμενου διαγράμματος ακτινοβολίας για διαφορετικές διαμορφώσεις

Στο Α σχήμα έχουμε 16psk διαμόρφωση και έχουμε correlation 99,9%. Στο Β σχήμα έχουμε 8psk και έχουμε correlation 99,9%. Στο σχήμα Γ έχουμε qpsk και έχουμε correlation 99,9% και στο σχήμα Δ έχουμε bpsk και έχουμε correlation 98,7%.

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα

5.1 Συμπεράσματα

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής αναλύθηκαν αρχικά τα συστήματα MIMO. Πιο ειδικά, αναλύθηκαν τα κέρδη χρήσης αυτών καθώς και τα μειονεκτήματα τους και υπολογίστηκε η χωρητικότητα ενός MIMO συστήματος. Ακολούθως, αναλύθηκαν εκτενώς οι δυνατότητες των συστημάτων που εφαρμόζουν τεχνικές BS-MIMO και οι δυνατότητες των παρασιτικών στοιχειοκεραίων ESPAR.

Πιο συγκεκριμένα έγινε περιγραφή των συστημάτων MIMO στο πεδίο των διαγραμμάτων ακτινοβολίας, παρουσιάστηκε η βασική τεχνική υπολογισμού των διαγραμμάτων ακτινοβολίας και μια βέλτιστη τεχνική υπολογισμού προσαρμοστικών διαγραμμάτων ακτινοβολίας όπου επεκτείνει την πρώτη. Έγινε ανάλυση της έννοιας των ακτινοβολουμένων βαθμών ελευθερίας, παρουσιάστηκε η σημασία της μεταβλητής αντίδρασης στις παρασιτικές στοιχειοκεραίες και περιγράφηκε η λειτουργία του πομπού και δέκτη των στοιχειοκεραίων ESPAR.

Στη συνέχεια, παρουσιάστηκαν οι δυνατότητες των γενετικών αλγορίθμων. Πιο ειδικά ,αναλύθηκαν εκτενώς τα συστατικά στοιχεία-βήματα των γενετικών αλγορίθμων και παρουσιάστηκαν τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τους. Επιπρόσθετα σε νέο κεφάλαιο αναλύθηκε η λειτουργία των κεραιών IFA και PIFA και παρουσιάστηκε εκτενώς η υπό μελέτη παρασιτική στοιχειοκεραία MuPAR. Ακολούθως, παρουσιάστηκε το βασικό κομμάτι και η κύρια συμβολή αυτής της διπλωματικής όπου είναι η ανάπτυξη ενός γενετικού αλγορίθμου για παρασιτικές στοιχειοκεραίες με περισσότερα του ενός ενεργά και παρασιτικά στοιχεία.

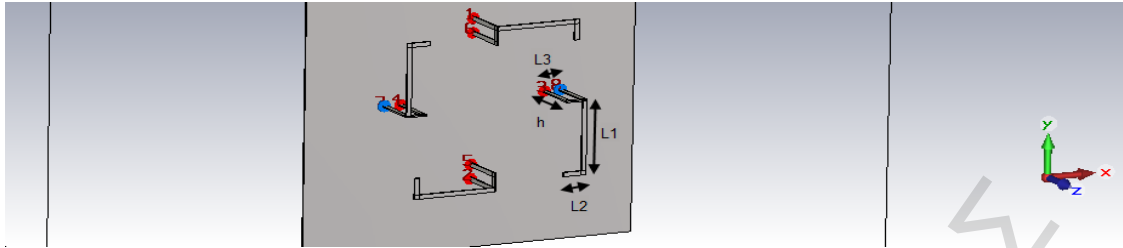
Εμβαθύνοντας στα παραπάνω το πρόβλημα βελτιστοποίησης που λύνει ο γενετικός αλγόριθμος είναι ο υπολογισμός των βέλτιστων φορτίων μεταβλητών αντιδράσεων των παρασιτικών στοιχείων και ο υπολογισμός των βέλτιστων πλατών και φάσεων των ενεργών στοιχείων έτσι ώστε να υπάρχει, όσο το δυνατόν, ομοιότητα για ένα προκαθορισμένο αριθμό επιθυμητών διαγραμμάτων ακτινοβολίας με τα παραγόμενα διαγράμματα ακτινοβολίας που απορρέουν από τις βέλτιστες τιμές που υπολογίστηκαν. Η συνάρτηση fitness(φόρμας) που χρησιμοποιήθηκε είναι η συσχέτιση (correlation) των παραγόμενων με τα επιθυμητά διαγράμματα ακτινοβολίας.

Στη συνέχεια, ο γενετικός αλγόριθμος εφαρμόστηκε στην παρασιτική στοιχειοκεραία MuPAR και παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Πιο συγκεκριμένα αποδείχτηκε διαμέσου αρκετών μετρήσεων ότι το αποτέλεσμα του γενετικού αλγορίθμου συγκλίνει σε ένα πάρα πολύ καλό ποσοστό συσχέτισης και έτσι ο προτεινόμενος αλγόριθμος είναι αρκετά αποδοτικός.

5.2 Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη

Ένα ζήτημα που προκύπτει και χρίζει περαιτέρω έρευνας, είναι η επιλογή κεραιοστοιχείων σε μια κεραία πολλαπλών ενεργών και πολλαπλών παρασιτικών στοιχείων. Δηλαδή με δεδομένο ενός επιθυμητού διαγράμματος ακτινοβολίας να επιλέγονται τα στοιχεία (ενεργά και παρασιτικά) από τα συνολικά, αυτά που πετυχαίνουν την βέλτιστη συσχέτιση επιθυμητού και παραγόμενου διαγράμματος ακτινοβολίας. Η κεραία αυτή μπορεί να είναι τύπου MuPAR με μια διαφορετική γεωμετρία ή μια πειραματική κεραία ESPAR με παραπάνω του ενός ενεργά στοιχεία. Η πολυπλοκότητα αυτής της μελέτης ενδέχεται να είναι μεγάλη λόγω του εκ-νέου υπολογισμού των συναρτήσεων λειτουργίας της κεραίας με την προσθήκη παραπάνω του ενός ενεργού στοιχείου ιδιαίτερα στην περίπτωση της πειραματικής ESPAR.

Τέλος, ένα επιπλέον ζήτημα που προκύπτει είναι η υλοποίηση της MuPAR κεραίας στο CST microwave studio πρόγραμμα. Επιχειρήσαμε να προσομοιώσουμε τη MuPAR στοιχειοκεραία στο πρόγραμμα CST ώστε να πάρουμε τις βέλτιστες τιμές του πίνακα εμπέδησης Z, όμως λόγω κάποιου προβλήματος με την παραμετροποίηση του συστήματος της κεραίας ο πίνακας εμπέδησης που μας παρείχε το πρόγραμμα είχε σαν αποτέλεσμα χαμηλό ποσοστό συσχέτισης παραγόμενου με επιθυμητού διαγράμματος ακτινοβολίας. Άρα θα ήταν σκόπιμο η ενδελεχής μελέτη του παραπάνω προγράμματος ώστε να μας παρέχει ένα βέλτιστο πίνακα ώστε να βελτιστοποιηθεί ακόμη περισσότερο το αποτέλεσμα της συσχέτισης επιθυμητού με παραγόμενου διαγράμματος ακτινοβολίας. Παρακάτω παρατίθενται 2 εικόνες από την προσπάθεια μας με το εργαλείο CST microwave studio.



Σχήμα 5.1
Δομή στοιχειοκεραίας MuPAR



Σχήμα 5.2
Πλάγια όψη MuPAR

Σε αυτό το σχήμα βλέπουμε σε κάθετη πλάγια όψη την στοιχειοκεραία MuPAR η κόκκινη επιφάνεια είναι το διηλεκτρικό.

References

- [1] Matthaiou M. (2011), “MIMO Systems in Wireless Networks”, Signal Processing Group, Chalmers University of Technology
- [2] Paulraj A. R. Gore N. (2003), “Introduction to Space-Time Wireless Communications”, Cambridge University
- [3] Κανάτας Α, Σημειώσεις από το μάθημα “Σχεδιασμός Ασύρματων Δικτύων”, Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων, Πανεπιστήμιο Πειραιά
- [4] Igusa K., Cheng J., Ohira T., “A Stepwise Recursive Search Algorithm for Adaptive Control of the Electronically Steerable Parasitic Array Radiator Antenna, ATR Adaptive Communications Research Laboratories, Japan
- [5] Cheng J., Kamiyaand Y., Ohira T., “Adaptive Beamforming of Espar Antenna Using Sequential Pertubation”, ATR Adaptive Communications Research Laboratories, Japan
- [6] Gyoda K., Ohira T., “Design of Electronically Steerable Passive Array Radiator (ESPAR) Antennas”,ATR Adaptive Communications Research Laboratories, Japan
- [7] Harrington R. (1978), “Reactively Controlled Directive Arrays”, IEEE Transactions On Antennas And Propagation, vol. AP-26, no. 3
- [8] Scott N., Leonard-Taylor M., Vaughan R. (1999), “Diversity Gain from a Single-Port Adaptive Antenna Using Switched Parasitic Elements”, IEEE Transactions On Antennas And Propagation, vol. 47, no. 6
- [9] Barousis V., Kanatas A., Skentos N., Kalis A. (2010), “Pattern Diversity for Single RF User Terminals in Multiuser Environments”, IEEE Communications Letters, vol. 14, no. 2
- [10] Vasileiou P., Maliatsos K., Thomatos E., Kanatas A., “Reconfigurable Orthonormal Basis Patterns Using ESPAR Antennas”

- [11] Kalis A., Kanatas A., Papadias C. (2008), “A Novel Approach to MIMO Transmission Using a Single RF Front End”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 26, no. 6
- [12] Barousis V., Kanatas A., Kalis A., Papadias C. (2008), “A Stochastic Beamforming Algorithm for ESPAR Antennas”, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 7
- [13] Barousis V., Kanatas A., Kalis A. (2011), “Beamspace-Domain Analysis of Single-RF Front-End MIMO Systems”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 3.
- [14] Barousis V., Kanatas A. (2011), “Aerial Degrees of Freedom of Parasitic Arrays for Single RF Front-End MIMO Transceivers”, *Progress In Electromagnetics Research B*, vol. 35
- [15] Barousis V., Kanatas A., Kalis A., Perruisseau-Carrier J. (2012), “Reconfigurable parasitic antennas for compact mobile terminals in multiuser wireless systems”, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*
- [16] Vaughan R. (1999), “Switched Parasitic Elements for Antenna Diversity”, *IEEE Transactions On Antennas And Propagation*, vol. 47, no. 2
- [17] Haupt R., Haupt s. (2004), “Practical Genetic Algorithms”, Wiley
- [18] Haupt R., Werne D. (2007), “Genetic Algorithms in Electromagnetics”, Wiley
- [19] Mitchell M. (1999), “An introduction to genetic algorithms”, MIT Press
- [20] Gen M., Cheng R. (2000), “Genetic Algorithms & Engineering Optimization”, John Wiley & Sons, Inc.
- [21] Kumar R., Jyotishree (2012), “Blending Roulette Wheel Selection & Rank Selection in Genetic Algorithms”, *International Journal of Machine Learning and Computing*, Vol. 2, No. 4
- [22] Mitilineos S., Mougias K., Thomopoulos S. (2009), “Design and Optimization of ESPAR Antennas via Impedance Measurements and a Genetic Algorithm”, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 51, no.2

- [23] Thomatos E., Vasileiou P, Kanatas A., Department of Digital Systems, University of Piraeus, Greece, “A Genetic Algorithm Applied to BS-MIMO Single-RF Front-End Reconfigurable Transceivers”
- [24] Reference as read at the website: www.qsl.net/va3iul/Antenna/PIFA/PIFA_Planar_Inverted_F_Antenna.pdf
- [25] Ohira M., Miura A., Taromaru M., Ueba M. (2012), “Efficient Gain Optimization Techniques for Azimuth Beam/Null Steering of Inverted-F Multiport Parasitic Array Radiator (MuPAR) Antenna”, IEEE Transactions On Antennas And Propagation, vol. 60, no. 3
- [26] Ohira M., Miura A., Ueba M, Taromaru M., Ohira T., “Varactor-Loaded Inverted-F Multiport Parasitic Array Radiator Antenna”, ATR Wave Engineering Laboratories, Japan
- [27] Geyi W., Rao Q., Ali S., Wang D. (2008), “Handset Antenna Design: Practise and Theory”, Progress In Electromagnetics Research
- [28] Reference as read at the website: <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-7697-21043/>
- [29] Reference as read at the website: <http://embedded-computing.com/article-id/?3973>
- [30] Reference as read at the website: www.sas.el.utwente.nl/openresearch/wireless
- [31] Reference as read at the website: www120.secure.griffith.edu.au/rch/file/f315afdf-830a-91eb-abdf-b1df868d1ecc/1/05Chapter6.pdf
- [32] Zhang Z. (2011), “Antenna design for mobile devices”, John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, Singapore
- [33] Chiap Chiau C. (2006), “Study of the Diversity Antenna Array for the MIMO Wireless Communication Systems”
- [34] AbuTarboush H., Nilavalanl R., Budimir D., Al-Raweshidy H. (2009), “Compact Planar Inverted-F Antenna (PIFA) for WiMAX Application”, IEEE
- [35] Pinho P., Pereira R., “Optimisation of a PIFA Antenna Using Genetic Algorithms” , Instituto de Telecomunicações - Universidade de Aveiro

[36] Boyle K., Steeneken P. (2007), “A Five-Band Reconfigurable PIFA for Mobile Phones, IEEE Transactions On Antennas And Propagation ,vol. 55, no. 11

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ