



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**

***“Εφαρμογή Γενετικών Αλγορίθμων στη Σύνθεση  
Στοιχειοκεραιών”***

Διατριβή που υπεβλήθη για την μερική ικανοποίηση των απαιτήσεων για την  
απόκτηση Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

υπό

**Τζιουμάκη Νικόλαο**

**Χανιά, 2005**

© Copyright υπό **Τζιουμάκη Νικόλαο**  
Χανιά, 2005

Η διατριβή του Νικόλαου Τζιουμάκη εγκρίνεται

Κοσματοπούλος Ηλίας

Μυγδαλάς Αθανάσιος

Γεωργιάκης Πάυλος

# Περιεχόμενα

Ευχαριστίες .....	5
Βιογραφικό Σημείωμα .....	6
Περίληψη .....	8
Εισαγωγή .....	9
Κεφάλαιο 1 <sup>ο</sup> - Κεραίες .....	12
1.1 Ιστορική Αναδρομή .....	12
1.2 Ορισμός Κεραίας .....	13
1.3 Τύποι Κεραίων .....	14
1.3.1 Καλωδιακές Κεραίες (Wire Antennas) .....	14
1.3.2 Κεραίες Ανοίγματος (Aperture Antennas) .....	15
1.3.3 Κεραίες Μικροταινιών (Microstrip Antennas) .....	16
1.3.4 Κεραίες Ανακλαστήρα (Reflector Antennas) .....	17
1.3.5 Κεραίες Φακών (Lens Antennas) .....	19
1.3.6 Στοιχειοκεραίες (Antenna Arrays) .....	20
Κεφάλαιο 2 <sup>ο</sup> - Στοιχειοκεραίες .....	22
2.1 Εισαγωγή .....	22
2.2 Στοιχειοκεραίες Πολλών Στοιχείων .....	23
2.3 Γραμμικές Στοιχειοκεραίες .....	26
2.3.1 Γενικά .....	26
2.3.2 Γραμμικές Στοιχειοκεραίες με Ομοιόμορφη Διέγερση .....	29
2.3.3 Γραμμικές Στοιχειοκεραίες με Ανομοιόμορφη Διέγερση .....	36
Κεφάλαιο 3 <sup>ο</sup> – Γενετικοί Αλγόριθμοι .....	41
3.1 Ιστορική Αναδρομή .....	41
3.2 Ο Βασικός Γενετικός Αλγόριθμος .....	43
3.2.1 Περιγραφή της Μεθόδου .....	43
3.2.2 Επιλογή .....	46
3.2.3 Διασταύρωση .....	49
3.2.4 Μετάλλαξη .....	50
3.2.5 Κωδικοποίηση Μεταβλητών .....	50
3.2.6 Πιθανότητες Διασταύρωσης και Μετάλλαξης .....	51
3.3 Ο Βασικός Γενετικός Αλγόριθμος για Προβλήματα Πολλαπλής Βελτιστοποίησης .....	52
3.3.1 Ο Γενετικός Αλγόριθμος Πολλών Αντικειμενικών Συναρτήσεων .....	52
3.3.2 Αποτίμηση των Αντικειμενικών Συναρτήσεων .....	55
Κεφάλαιο 4 <sup>ο</sup> – Εφαρμογή Γενετικών Αλγορίθμων στη Σύνθεση Γραμμικών Στοιχειοκεραίων .....	58
4.1 Εισαγωγή .....	58
4.2 Εφαρμογή για Γραμμικές Στοιχειοκεραίες Διαφορετικού Αριθμού Στοιχείων .....	59
4.2.1 Γενικά .....	59



4.2.2 Εφαρμογή για Στοιχειοκεραία 4 στοιχείων .....	59
4.2.3 Εφαρμογή για Στοιχειοκεραία 8 στοιχείων .....	62
4.2.4 Εφαρμογή για Στοιχειοκεραία 16 στοιχείων .....	66
4.2.5 Εφαρμογή για Στοιχειοκεραία 32 στοιχείων .....	69
4.3 Εφαρμογή για Γραμμικές Στοιχειοκεραίες Διαφορετικού Βήματος .....	72
4.3.1 Γενικά.....	72
4.3.2 Εφαρμογή για Στοιχειοκεραία Βήματος $d=\lambda/4$ .....	72
4.3.3 Εφαρμογή για Στοιχειοκεραία Βήματος $d=\lambda/8$ .....	76
Κεφάλαιο 5 <sup>ο</sup> – Εφαρμογή Γενετικών Αλγορίθμων Πολλών Αντικειμενικών Συναρτήσεων στη Σύνθεση Γραμμικών Στοιχειοκεραίων .....	80
5.1 Εισαγωγή .....	80
5.2 Εφαρμογή για Μεγιστοποίηση του Παράγοντα Διάταξης σε Διάφορες Κατευθύνσεις .....	81
5.2.1 Γενικά.....	81
5.2.2 Εφαρμογή για Μεγιστοποίηση του Παράγοντα Διάταξης σε $\theta_1=45^\circ$ και $\theta_2=90^\circ$ .....	81
5.2.3 Εφαρμογή για Μεγιστοποίηση του Παράγοντα Διάταξης σε $\theta_1=45^\circ$ και $\theta_2=120^\circ$ .....	83
5.2.4 Εφαρμογή για Μεγιστοποίηση του Παράγοντα Διάταξης σε $\theta_1=0^\circ$ και $\theta_2=120^\circ$ .....	84
5.2.5 Εφαρμογή για Μεγιστοποίηση του Παράγοντα Διάταξης σε $\theta_1=0^\circ$ , $\theta_2=45^\circ$ και $\theta_3=90^\circ$ .....	85
5.2.6 Εφαρμογή για Μεγιστοποίηση του Παράγοντα Διάταξης σε $\theta_1=0^\circ$ , $\theta_2=45^\circ$ και $\theta_3=120^\circ$ .....	86
5.2.7 Εφαρμογή για Μεγιστοποίηση του Παράγοντα Διάταξης σε $\theta_1=45^\circ$ , $\theta_2=90^\circ$ και $\theta_3=120^\circ$ .....	87
5.3 Εφαρμογή για Μεγιστοποίηση και Ελαχιστοποίηση του Παράγοντα Διάταξης σε Διάφορες Κατευθύνσεις .....	88
5.3.1 Γενικά.....	88
5.3.2 Εφαρμογή για Μεγιστοποίηση του Παράγοντα Διάταξης σε $\theta_1=45^\circ$ , $\theta_2=90^\circ$ και Ελαχιστοποίηση σε $\theta_3=135^\circ$ .....	88
5.3.3 Εφαρμογή για Μεγιστοποίηση του Παράγοντα Διάταξης σε $\theta_1=45^\circ$ , $\theta_2=90^\circ$ , $\theta_3=120^\circ$ και Ελαχιστοποίηση σε $\theta_4=0^\circ$ .....	90
5.3.4 Εφαρμογή για Μεγιστοποίηση του Παράγοντα Διάταξης σε $\theta_1=0^\circ$ , $\theta_2=45^\circ$ , $\theta_3=120^\circ$ και Ελαχιστοποίηση σε $\theta_4=30^\circ$ και $\theta_5=150^\circ$ .....	91
5.3.5 Εφαρμογή για Μεγιστοποίηση του Παράγοντα Διάταξης σε $\theta_1=0^\circ$ , $\theta_2=45^\circ$ , $\theta_3=120^\circ$ και Ελαχιστοποίηση σε $\theta_4=30^\circ$ , $\theta_5=90^\circ$ και $\theta_6=150^\circ$ .....	93
Κεφάλαιο 6 <sup>ο</sup> – Συμπεράσματα – Μελλοντικές Επεκτάσεις .....	95
Βιβλιογραφία - Αναφορές.....	96
Παράρτημα .....	97

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον κύριο Ηλία Κοσματόπουλο, λέκτορα του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης, για το γεγονός ότι δέχθηκε να επιβλέψει τη συγκεκριμένη εργασία αλλά και για τις χρήσιμες υποδείξεις του για τη βελτίωση της.

Θερμές ευχαριστίες και στους καθηγητές του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης, Αθανάσιο Μυγδαλά και Παύλο Γεωργιλάκη, για το χρόνο που αφιέρωσαν στην ανάγνωση της εργασίας, αλλά και για το γεγονός ότι δέχτηκαν να αποτελέσουν μέλη της εξεταστικής επιτροπής.

Ωστόσο, θα ήταν απρέπεια εκ μέρους μου να μην ευχαριστήσω τον κύριο Ιωάννη Βαρδιάμπαση, Επίκουρο Καθηγητή Τ.Ε.Ι. Κρήτης & Διδάσκων ΠΔ 407/80 Πολυτεχνείου Κρήτης, για την πολύτιμη βοήθειά του και τις χρήσιμες υποδείξεις του, που κατέστησαν δυνατή την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου που με στήριξε ηθικά και οικονομικά όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

*Νικόλαος Τζιουμάκης*

Χανιά, Φεβρουάριος 2005

# Βιογραφικό Σημείωμα

Νικόλαος Η. Τζιουμάκης

---

## Προσωπικά Στοιχεία

---

<i>Ημερομηνία Γέννησης</i>	17 Απριλίου 1979
<i>Διεύθυνση</i>	Κωνσταντινουπόλεως 54Α 73136, Χανιά Τηλ.: 2821070653, Κινητό Τηλ.: 6976789262
<i>Email</i>	ntzioumakis@isc.tuc.gr

---

## Εκπαίδευση

---

<i>Οκτ 2003 – Μαρτ 2005</i>	Μεταπτυχιακό Δίπλωμα Ειδίκευσης στην Επιχειρησιακή Έρευνα Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης Βαθμός Μεταπτυχιακού Διπλώματος: 7.86 (Λίαν Καλώς) Μεταπτυχιακή Εργασία: “Εφαρμογή Γενετικών Αλγορίθμων στη Σύνθεση Στοιχειοκεραιών”
<i>Σεπ 1998 – Οκτ 2003</i>	Δίπλωμα Ηλεκτρονικού Μηχανικού & Μηχανικού Υπολογιστών, Πολυτεχνείο Κρήτης Βαθμός Πτυχίου: 7.75 (Λίαν Καλώς) Διπλωματική Εργασία: “Εφαρμογή Τεχνικών Υπολογιστικού Ηλεκτρομαγνητισμού (wavelets) στην Ανάλυση του Σήματος Ηχούς Ραντάρ από Αγώγιμους Στόχους Κυλινδρικής Διατομής”
<i>Σεπ 1994 – Ιουν 1997</i>	Απολυτήριο, 2 <sup>ο</sup> Γενικό Λύκειο Καστοριάς, Βαθμός: 19.4 (Άριστα)

---

## Γνώσεις

---

<i>Γλώσσες Προγραμματισμού</i>	C, C++, SQL
<i>Λειτουργικά Συστήματα</i>	MS WINDOWS, Linux
<i>Άλλα Προγράμματα</i>	MS Office, Matlab, MS SQL Server 2000, Decision Lab 2000

---

Επαγγελματική Εμπειρία

---

*Ιουλ 2002 – Αυγ 2002*

Πρακτική Εξάσκηση στη Δημόσια Οικονομική  
Υπηρεσία (Α Παράρτημα Χανίων)

---

Γλώσσες

---

*Αγγλικά*

First Certificate in English, Cambridge University, July  
1995  
Test of English as a Foreign Language (TOEFL), Score:  
227/300 (Computer-based), September 2004

---

Μη Επαγγελματικά Ενδιαφέροντα

---

Αθλητισμός (Ποδόσφαιρο, Γυμναστική)  
Κινηματογράφος  
Μουσική  
Διαδίκτυο

## Περίληψη

Οι στοιχειοκεραίες (antenna arrays) αποτελούν μία από τις βασικότερες κατηγορίες κεραιών, λόγω των πολλών εφαρμογών τους στην εξυπηρέτηση τηλεπικοινωνιακών αναγκών. Είναι διατάξεις που αποτελούνται από πολλούς όμοιους ακτινοβολητές με τον ίδιο προσανατολισμό, οι οποίοι εκπέμπουν ή λαμβάνουν ενέργεια ταυτόχρονα. Με κατάλληλη επιλογή της ρευματικής διέγερσης κάθε ακτινοβολητή επιτυγχάνονται βελτιωμένες ιδιότητες για τη στοιχειοκεραία σε σχέση με τις αντίστοιχες ιδιότητες ενός απλού στοιχείου της. Με άλλα λόγια, οι στοιχειοκεραίες παρέχουν στο σχεδιαστή τη δυνατότητα να συνθέσει πρακτικά οποιοδήποτε επιθυμητό διάγραμμα ακτινοβολίας και παράλληλα επιτρέπει τη διαρκή περιστροφή του κύριου λοβού ακτινοβολίας. Συγκεκριμένα, η κύρια δέσμη ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας μπορεί να περιστρέφεται προς οποιαδήποτε επιθυμητή κατεύθυνση (μέσω της μεγιστοποίησης του παράγοντα διάταξης της στοιχειοκεραίας στην κατεύθυνση αυτή), αλλάζοντας μόνο τη φάση τροφοδοσίας των στοιχείων της στοιχειοκεραίας. Ακόμη περισσότερο, κατάλληλη επιλογή των φάσεων των στοιχείων επιτρέπει την εμφάνιση κύριων λοβών ακτινοβολίας σε περισσότερες από μια επιθυμητές κατευθύνσεις, αλλά και την εξάλειψή τους σε άλλες για την αποφυγή παρεμβολών. Η ιδιότητα αυτή είναι γνωστή ως μέθοδος ανίχνευσης φάσης (phase scanning) και εφαρμόζεται τόσο σε εγκαταστάσεις ραντάρ όσο και σε συστήματα έξυπνων κεραιών, όπου υπάρχει απαίτηση για άμεση και διαρκή παρακολούθηση της θέσης κινούμενων χρηστών κινητής τηλεφωνίας. Το πρόβλημα λοιπόν εστιάζεται στην αναζήτηση των φάσεων τροφοδοσίας των στοιχείων που μεγιστοποιούν ή ελαχιστοποιούν τον παράγοντα διάταξης της στοιχειοκεραίας σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις. Στην παρούσα εργασία εφαρμόζονται οι γενετικοί αλγόριθμοι (genetic algorithms) και οι γενετικοί αλγόριθμοι πολλών αντικειμενικών συναρτήσεων (multi-objective genetic algorithms) για την επίλυση του προαναφερθέντος προβλήματος.

## Εισαγωγή

Το *IEEE Standard Definitions of Terms of Antennas* (IEEE Std 145 – 1983) ορίζει την κεραία ως ένα μέσο για την εκπομπή ή τη λήψη ραδιοκυμάτων. Υπάρχουν διάφοροι τύποι κεραιών που αποτελούν τη βάση των ασύρματων ζεύξεων στις μέρες μας, ξεκινώντας από τις καλωδιακές κεραίες, τις κεραίες ανοίγματος, τις κεραίες ανακλαστήρα και φτάνοντας μέχρι τις κεραίες φακών αλλά και σαφώς τις στοιχειοκεραίες (antenna arrays) που αφορούν τη συγκεκριμένη εργασία.

Σε πολλές πρακτικές εφαρμογές δεν είναι δυνατή η επίτευξη της επιθυμητής κατευθυντικότητας ή του επιθυμητού εύρους δέσμης με χρήση απλών κεραιών. Επίσης, σε αρκετές περιπτώσεις είναι επιθυμητή η στροφή του διαγράμματος ακτινοβολίας με ηλεκτρονικό τρόπο. Μια κατάλληλη μέθοδος για να αντιμετωπιστούν οι απαιτήσεις αυτές είναι ο σχηματισμός στοιχειοκεραιών. Οι στοιχειοκεραίες είναι διατάξεις που αποτελούνται από πολλούς όμοιους ακτινοβολητές που έχουν τον ίδιο προσανατολισμό και ακτινοβολούν ή λαμβάνουν ενέργεια συγχρόνως. Με κατάλληλη επιλογή της ρευματικής διέγερσης επιτυγχάνονται βελτιωμένες ιδιότητες για τη στοιχειοκεραία σε σχέση με τις αντίστοιχες ενός απλού στοιχείου της. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα επιμέρους πεδία των στοιχείων ακτινοβολίας συμβάλλουν στις επιθυμητές διευθύνσεις του χώρου, ενώ αλληλοαναιρούνται σε άλλες.

Οι στοιχειοκεραίες παρέχουν στο σχεδιαστή τη δυνατότητα να συνθέσει πρακτικά οποιοδήποτε επιθυμητό διάγραμμα ακτινοβολίας ανεξάρτητα από τον τύπο των ακτινοβολούντων στοιχείων. Ακόμα και μια στοιχειοκεραία αποτελούμενη από σημειακές πηγές, παρέχει τη δυνατότητα διαρκούς περιστροφής του κύριου λοβού ακτινοβολίας. Συγκεκριμένα, η κύρια δέσμη ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας μπορεί να περιστρέφεται προς οποιαδήποτε επιθυμητή κατεύθυνση (μέσω της μεγιστοποίησης του παράγοντα διάταξης της στοιχειοκεραίας στην κατεύθυνση αυτή), αλλάζοντας μόνο τη φάση τροφοδοσίας των στοιχείων της στοιχειοκεραίας. Ακόμη περισσότερο, κατάλληλη επιλογή των φάσεων των στοιχείων επιτρέπει την εμφάνιση κύριων λοβών ακτινοβολίας σε περισσότερες από μια επιθυμητές κατευθύνσεις, αλλά και την εξάλειψή τους σε άλλες για την αποφυγή παρεμβολών. Η ιδιότητα αυτή είναι γνωστή ως μέθοδος ανίχνευσης φάσης (phase scanning) και εφαρμόζεται τόσο σε εγκαταστάσεις ραντάρ, όπου υπάρχει η απαίτηση για αδιάκοπη

και ταχεία ανίχνευση πιθανών στόχων, όσο και σε συστήματα έξυπνων κεραιών, όπου υπάρχει η απαίτηση για άμεση και διαρκή παρακολούθηση της θέσης κινούμενων χρηστών κινητής τηλεφωνίας.

Όπως γίνεται αντιληπτό, είναι αναγκαίος ο προσδιορισμός της φάσης της ρευματικής διέγερσης κάθε στοιχείου της στοιχειοκεραίας για την εκμετάλλευση των κατευθυντικών της ιδιοτήτων. Πιο συγκεκριμένα, αναζητούνται οι φάσεις των στοιχείων που μεγιστοποιούν ή ελαχιστοποιούν τον παράγοντα διάταξης της στοιχειοκεραίας σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις. Στην παρούσα εργασία εφαρμόζονται οι γενετικοί αλγόριθμοι (genetic algorithms) και οι γενετικοί αλγόριθμοι πολλών αντικειμενικών συναρτήσεων (multi-objective genetic algorithms) για την επίλυση του προαναφερθέντος προβλήματος.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι μπορούν να θεωρηθούν ως γενικοί αριθμητικοί μέθοδοι, εμπνευσμένοι από τους μηχανισμούς της γενετικής όπως η φυσική επιλογή και η εξέλιξη, κατά τους οποίους τα ισχυρότερα άτομα είναι πιθανοί νικητές σε ένα ανταγωνιστικό περιβάλλον. Συνδυάζουν την επιβίωση του ισχυρότερου μεταξύ των χρωμοσωμάτων (πιθανών λύσεων) ενός πληθυσμού, με μια δομημένη, αλλά τυχαία, ανταλλαγή πληροφοριών για τον σχηματισμό ενός αλγορίθμου αναζήτησης. Ο ανασυνδυασμός των γονιδίων, η μεταλλαγή τους και τελικά η επικράτηση του πιο «προσαρμοσμένου», που αποτελούν λειτουργίες της φυσικής εξέλιξης, μοντελοποιούνται με αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας ισχυρής υπολογιστικής τεχνικής.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι πολλών αντικειμενικών συναρτήσεων (multi-objective genetic algorithms) διαφέρουν από τους απλούς γενετικούς αλγορίθμους στο ότι επιτυγχάνουν την βελτιστοποίηση περισσότερων της μίας αντικειμενικών συναρτήσεων. Επιπλέον, ο στόχος τους δεν είναι να καθορίσουν μία τελική λύση (κατά το δυνατόν βέλτιστη) του προβλήματος, αλλά να βρουν όλες τις μη κυριαρχούμενες λύσεις (non-dominated solutions) ενός προβλήματος πολλαπλής βελτιστοποίησης. Από τη στιγμή που είναι δύσκολο να επιλεγεί μία και μόνο λύση χωρίς την επίδραση του αποφασίζοντα (decision maker), η γενική προσέγγιση είναι το σύνολο των μη κυριαρχούμενων λύσεων να παρουσιάζονται στον αποφασίζοντα ο οποίος και επιλέγει αυτή που λύνει το πρόβλημά του.

Στην παρούσα εργασία αρχικά, και πιο συγκεκριμένα στο πρώτο κεφάλαιο, γίνεται μια γενική επισκόπηση των κεραιών και των διαφόρων κατηγοριών στις οποίες διακρίνονται.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο των στοιχειοκεραιών, και κυρίως των γραμμικών στοιχειοκεραιών, και οριοθετείται επακριβώς το πρόβλημα. Αναλύεται η δομή και η λειτουργία των γραμμικών στοιχειοκεραιών, εξάγονται οι ακριβείς εξισώσεις που τις χαρακτηρίζουν και σχολιάζεται η συμπεριφορά τους για διάφορες τιμές των παραμέτρων τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται εκτενώς οι γενετικοί αλγόριθμοι. Αναπτύσσονται οι κύριες διαδικασίες από τις οποίες αποτελούνται και εξετάζονται οι επιλογές των παραμέτρων για τα διάφορα προβλήματα. Επίσης, αναλύονται και οι γενετικοί αλγόριθμοι πολλών αντικειμενικών συναρτήσεων και οι διαφορές τους σε σύγκριση με τους απλούς γενετικούς αλγορίθμους.

Το τέταρτο και το πέμπτο κεφάλαιο αφορούν την εφαρμογή των γενετικών αλγορίθμων και των γενετικών αλγορίθμων πολλών αντικειμενικών συναρτήσεων αντίστοιχα, στη σύνθεση γραμμικών στοιχειοκεραιών. Εξετάζονται διάφορες περιπτώσεις ανάλογα με το πλήθος των στοιχείων μιας στοιχειοκεραίας, την απόσταση ανάμεσά τους, αλλά και τις επιθυμητές κατευθύνσεις ακτινοβολίας.

Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο αναφέρονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν καθώς και μελλοντικές επεκτάσεις που μπορούν να γίνουν σε παρόμοια προβλήματα.



# Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>

## Κεραίες

### 1.1 Ιστορική Αναδρομή

Η ιστορία των κεραιών ξεκινά αρκετά πίσω στο χρόνο από τον James Clerk Maxwell, ο οποίος ενοποίησε τη θεωρία του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού μέσω των ομώνυμων κλασικών εξισώσεων (εξισώσεις Maxwell), προβλέποντας με τον τρόπο αυτό την ηλεκτρομαγνητική φύση του φωτός. Η εργασία του δημοσιεύτηκε το 1873 και έδειξε επίσης ότι τόσο το φως όσο και τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται με κυματικές διαταραχές της ίδιας ταχύτητας. Λίγο αργότερα, και πιο συγκεκριμένα το 1886, ο καθηγητής Heinrich Rudolph Hertz υλοποίησε στο εργαστήριό του το πρώτο ασύρματο ηλεκτρομαγνητικό σύστημα. Η πρώτη όμως ουσιαστικά ασύρματη μετάδοση έγινε από τον Guglielmo Marconi, ο οποίος κατάφερε να στείλει σήματα σε μεγάλες αποστάσεις. Ήταν το 1901 όταν υλοποίησε την πρώτη υπερατλαντική μετάδοση από την Αγγλία στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής. Ουσιαστικά επρόκειτο για αποστολή τηλεγραφικών μηνυμάτων. Αντίθετα, η ασύρματη μετάδοση μηνυμάτων φωνής σε μεγάλες αποστάσεις συνδυάστηκε με την εφεύρεση των ενισχυτικών λυχνιών και των ταλαντωτών κατά τα χρόνια μεταξύ 1905 και 1915.

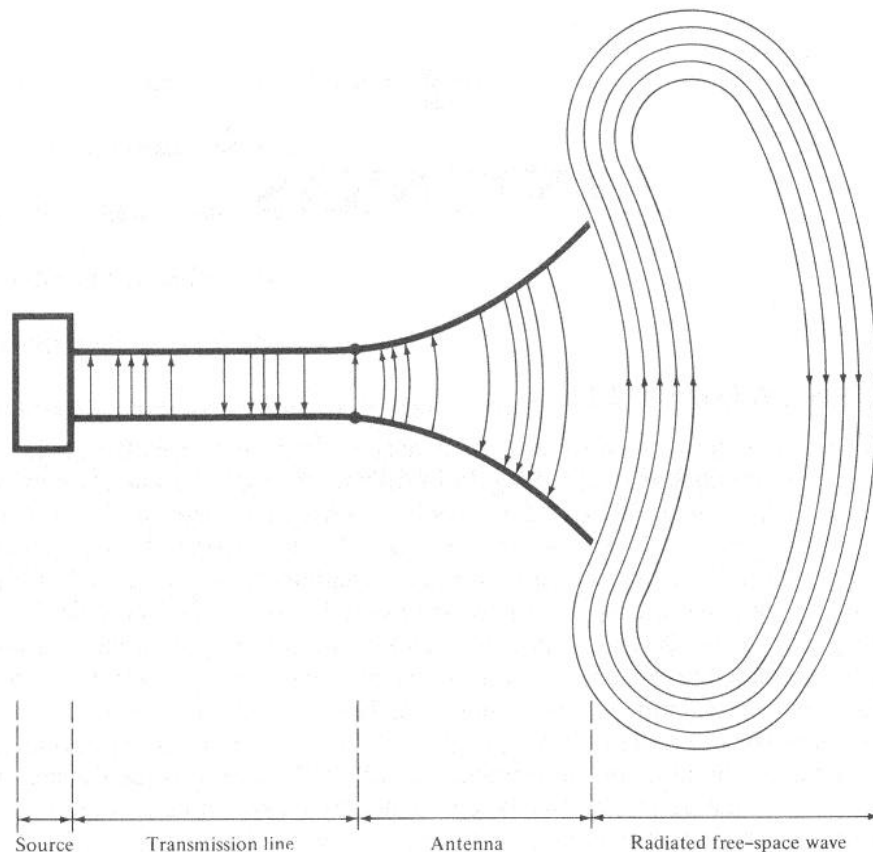
Από την εποχή του Marconi μέχρι το 1940 η τεχνολογία των κεραιών επικεντρώθηκε στην κατηγορία των κεραιών σύρματος και σε συχνότητες μέχρι UHF (Ultra High Frequencies), δηλαδή από 300 έως 3000 MHz. Από το 1940, ίσως και λόγω του 2<sup>ου</sup> Παγκοσμίου Πολέμου ξεκίνησε η χρησιμοποίηση και άλλων τύπων κεραιών όπως ανοιχτών κυματοδηγών, χοανοκεραιών, κεραιών με ανακλαστήρα κ.α. Ένας παράγοντας που συνέβαλε στη νέα αυτή εποχή για την ασύρματη μετάδοση ήταν η επινόηση των μικροκυματικών πηγών (όπως το κλείστρον και το μάγνητρον) με συχνότητες της τάξης του ενός GHz και άνω.

Τα επόμενα χρόνια και κυρίως από τις αρχές της δεκαετίας του '60, εισήχθησαν αριθμητικές μέθοδοι που επέτρεψαν την ανάλυση και τη σχεδίαση των συστημάτων κεραιών με μεγάλη ακρίβεια. Ενώ, στη συνέχεια η αλματώδης ανάπτυξη της ηλεκτρονικής και της πληροφορικής, σε συνδυασμό με την αντίστοιχη αύξηση

του όγκου της πληροφορίας που διακινείται παγκοσμίως, έχουν επιφέρει και αναμένεται να δώσουν ακόμη μεγαλύτερη ώθηση στην περιοχή των κεραιών και των ασύρματων ζεύξεων. Η ώθηση αυτή αναμένεται να είναι τόσο στην εισαγωγή νέων μεθόδων ανάλυσης σύνθετων κεραιών όσο και στην ανάπτυξη συστημάτων έξυπνων κεραιών.

## 1.2 Ορισμός Κεραίας

Το *IEEE Standard Definitions of Terms of Antennas* (IEEE Std 145 – 1983) ορίζει την κεραία ως ένα μέσο για την εκπομπή ή τη λήψη ραδιοκυμάτων. Με άλλα λόγια, η κεραία είναι η ενδιάμεση δομή ανάμεσα στον ελεύθερο χώρο και την οδηγούσα συσκευή, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



**Σχήμα 1.2.1** Η κεραία σε συσκευή εκπομπής ή λήψης ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας

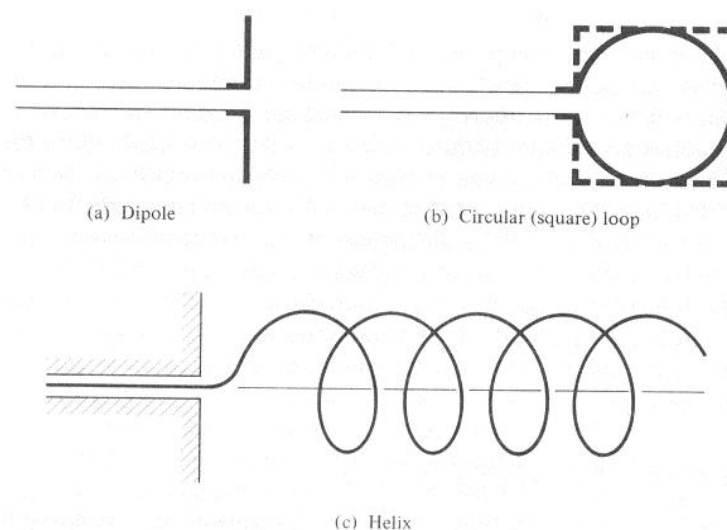
Η οδηγούσα συσκευή ή αλλιώς η γραμμή μεταφοράς μπορεί να πάρει τη μορφή μιας ομοαξονικής γραμμής ή ενός κοίλου σωλήνα (κυματοδηγός). Χρησιμοποιείται για τη μεταφορά ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας από την πηγή μετάδοσης στην κεραία ή αντίστροφα από την κεραία στο δέκτη. Στην πρώτη περίπτωση η κεραία καλείται κεραία εκπομπής ενώ στη δεύτερη κεραία λήψης. Η λειτουργία της κεραίας λήψης διαφέρει από τη λειτουργία της κεραίας εκπομπής, όμως η συμπεριφορά της πρώτης μπορεί να προσδιοριστεί από τις ιδιότητες ακτινοβολίας της δεύτερης.

### 1.3 Τύποι Κεραιών

Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφονται διάφοροι τύποι κεραιών που αποτελούν τη βάση των ασύρματων ζεύξεων στις μέρες μας, ξεκινώντας από τις καλωδιακές κεραίες και φτάνοντας στις στοιχειοκεραίες που αφορούν τη συγκεκριμένη εργασία.

#### 1.3.1 Καλωδιακές Κεραίες (Wire Antennas)

Οι καλωδιακές κεραίες είναι γνωστές σε όλους καθώς μπορεί κανείς να τις δει οπουδήποτε: σε αυτοκίνητα, πλοία, κτίρια, αεροσκάφη, κλπ. Υπάρχουν ποικίλα σχήματα καλωδιακών κεραιών όπως ένα ευθύ καλώδιο (δίπολο), ο βρόγχος και το ελικοειδές, τα οποία φαίνονται παρακάτω.

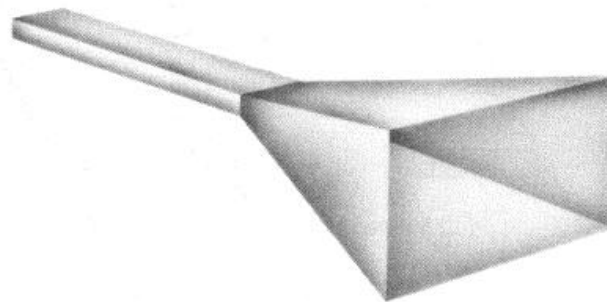


**Σχήμα 1.3.1** Τύποι καλωδιακών κεραιών

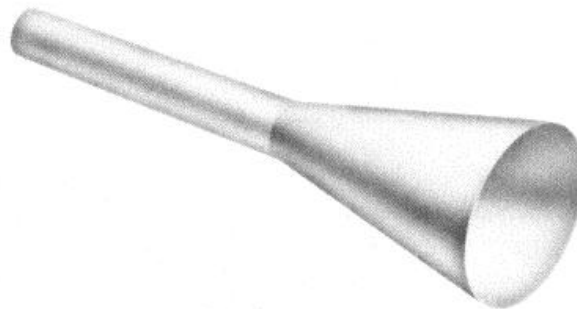
Οι βρογγοκεραίες δεν είναι απαραίτητο να είναι κυκλικές. Μπορεί να είναι ορθογώνιες, τετράγωνες ή ακόμα και ελλειψοειδής. Απλά, οι κυκλικοί βρόγχοι είναι απλούστεροι στην κατασκευή.

### 1.3.2 Κεραίες Ανοίγματος (Aperture Antennas)

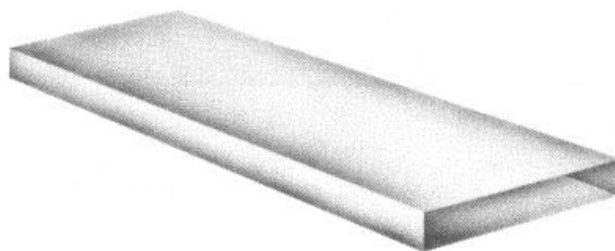
Οι κεραίες ανοίγματος έχουν γίνει περισσότερο γνωστές τα τελευταία χρόνια απ' ότι στο παρελθόν, λόγω της αυξημένης ζήτησης για περισσότερο σύνθετες μορφές κεραιών και τη χρήση μεγαλύτερων συχνοτήτων. Μερικές μορφές κεραιών ανοίγματος φαίνονται στα παρακάτω σχήματα.



(a) Pyramidal horn



(b) Conical horn



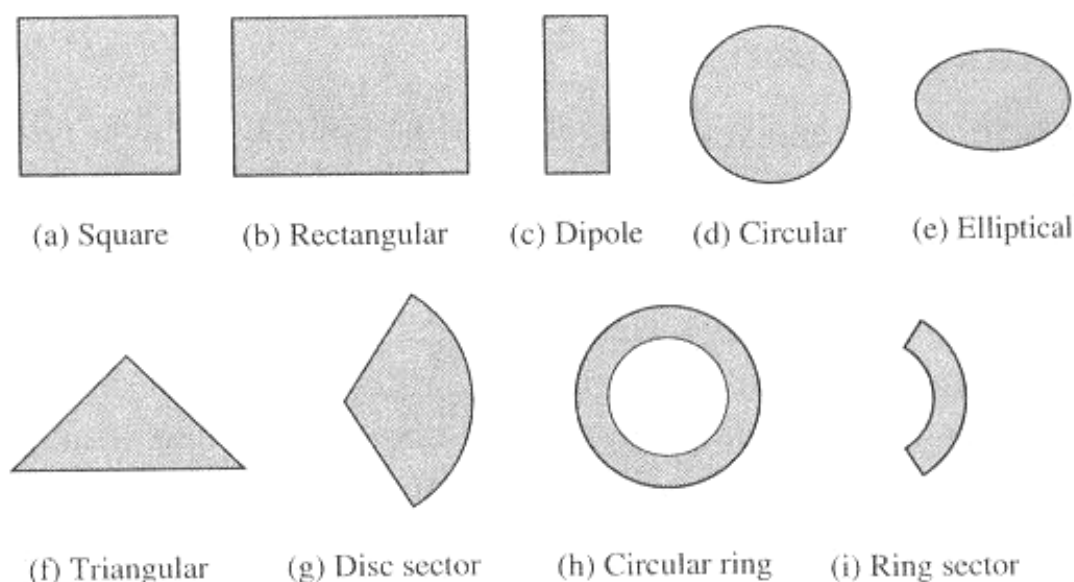
(c) Rectangular waveguide

**Σχήμα 1.3.2** Τύποι κεραιών ανοίγματος

Οι κεραίες αυτών των τύπων είναι πολύ χρήσιμες για αεροπορικές και διαστημικές εφαρμογές, καθώς μπορούν να τοποθετηθούν κατάλληλα στο κέλυφος αεροπλάνων και διαστημοπλοίων. Επιπρόσθετα, μπορούν να καλυφθούν από ένα διηλεκτρικό υλικό για να προστατευθούν από επικίνδυνες συνθήκες του περιβάλλοντος.

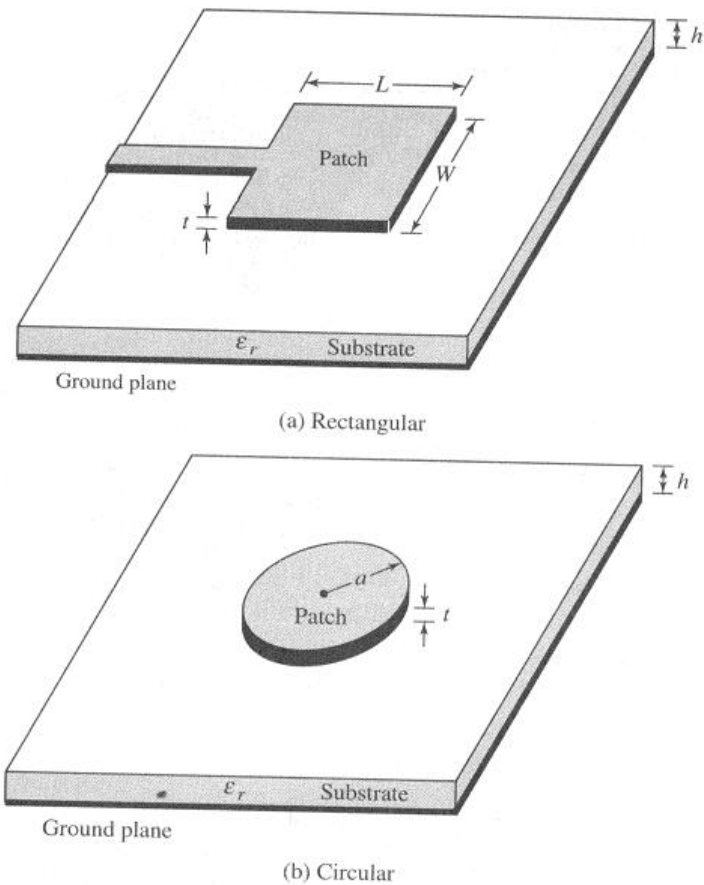
### 1.3.3 Κεραίες Μικροταινιών (Microstrip Antennas)

Οι κεραίες μικροταινιών έγιναν ιδιαίτερα δημοφιλής τη δεκαετία του '70 κυρίως για διαστημικές εφαρμογές. Σήμερα, χρησιμοποιούνται κυρίως για κυβερνητικές και εμπορικές εφαρμογές. Η μεταλλική ταινία μπορεί να πάρει πολλούς διαφορετικούς σχηματισμούς όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



**Σχήμα 1.3.3** Αντιπροσωπευτικοί σχηματισμοί μεταλλικών ταινιών

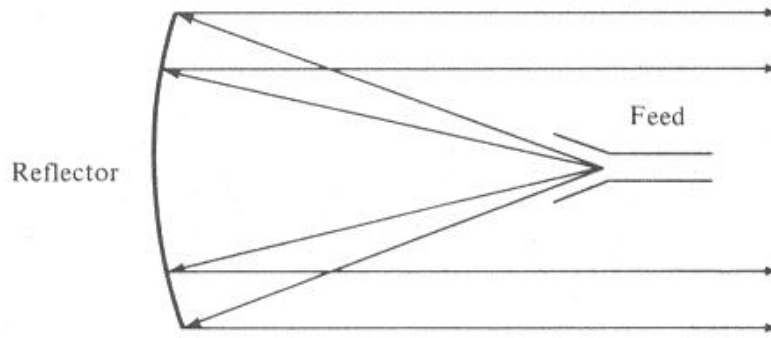
Ωστόσο, οι ορθογώνιες και κυκλικές ταινίες, όπως φαίνονται στο σχήμα 1.3.4, χρησιμοποιούνται περισσότερο λόγω της ευκολίας στην ανάλυση και την κατασκευή τους, αλλά και τα ελκυστικά χαρακτηριστικά ακτινοβολίας τους. Οι κεραίες αυτές μπορούν να τοποθετηθούν στην επιφάνεια υψηλής επίδοσης αεροσκαφών, διαστημοπλοίων, δορυφόρων, πυραύλων, αυτοκινήτων, ακόμα και κινητών τηλεφώνων.



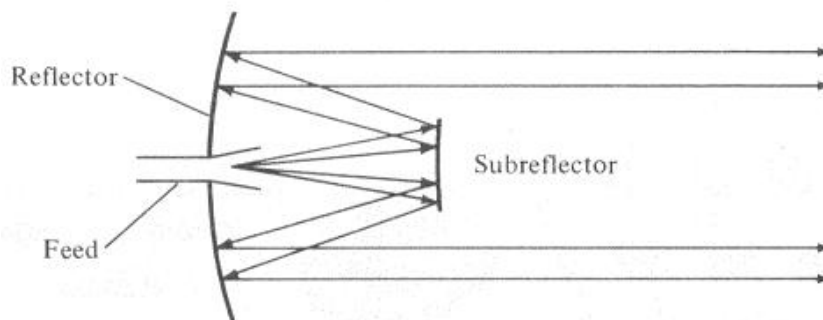
**Σχήμα 1.3.4** Ορθογώνιες και κυκλικές κεραίες μικροταινιών

#### 1.3.4 Κεραίες Ανακλαστήρα (Reflector Antennas)

Η ανάγκη για επικοινωνία σε μεγάλες αποστάσεις και πιο συγκεκριμένα για μετάδοση και λήψη σημάτων σε αποστάσεις εκατομμυρίων χιλιομέτρων οδήγησε σε σύνθετες μορφές κεραιών. Μια κοινή κεραία για τέτοιου είδους απαιτήσεις είναι ο παραβολικός ανακλαστήρας που φαίνεται στα παρακάτω σχήματα.



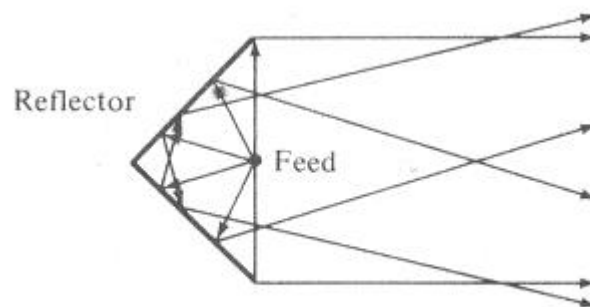
(a) Parabolic reflector with front feed



(b) Parabolic reflector with Cassegrain feed

**Σχήμα 1.3.5** Τύποι παραβολικού ανακλαστήρα

Οι κεραίες αυτές έχουν κατασκευασθεί με διαμέτρους μέχρι και 305 μέτρα. Οι τόσο μεγάλες διαστάσεις απαιτούνται για την επίτευξη υψηλού κέρδους, απαραίτητου για τη μετάδοση και λήψη σημάτων σε αποστάσεις εκατομμυρίων χιλιομέτρων. Ένας άλλος τύπος ανακλαστήρα είναι ο γωνιακός ανακλαστήρας, ο οποίος όμως δεν χρησιμοποιείται τόσο συχνά όσο ο παραβολικός.

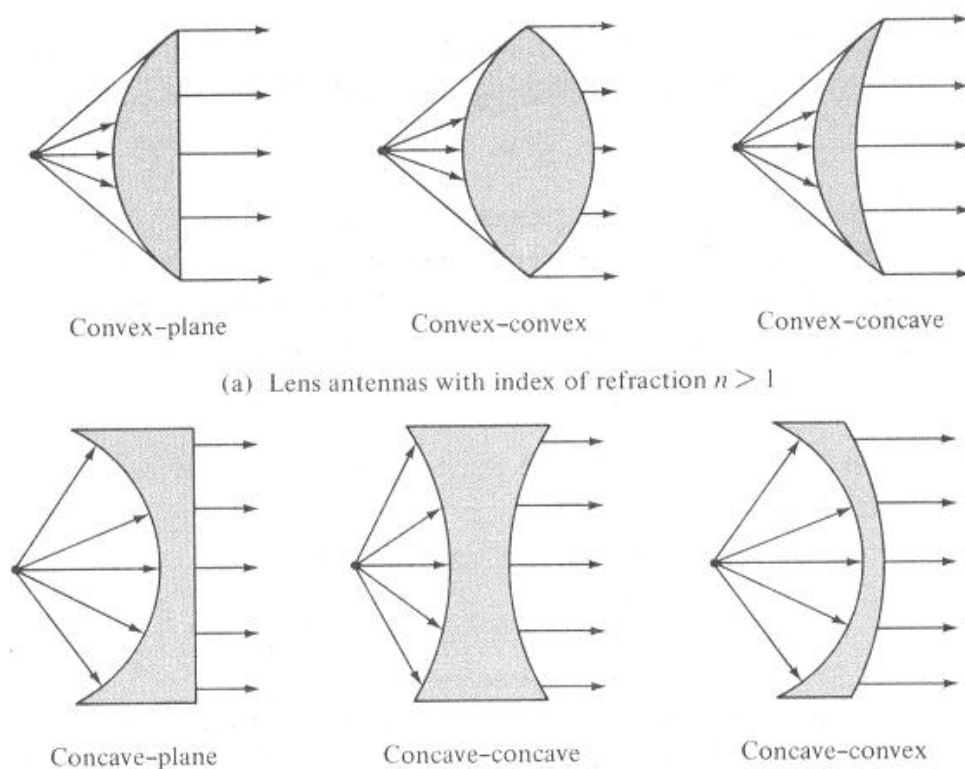


Corner reflector

**Σχήμα 1.3.6** Γωνιακός ανακλαστήρας

### 1.3.5 Κεραίες Φακών (Lens Antennas)

Οι φακοί συνήθως χρησιμοποιούνται για να ευθυγραμμιστεί η προσπίπτουσα ακτινοβολία και να εμποδιστεί η εξάπλωσή της σε ανεπιθύμητες κατευθύνσεις. Με τον κατάλληλο γεωμετρικό σχηματισμό αλλά και το κατάλληλο υλικό, οι φακοί μπορούν να μεταμορφώσουν διάφορες μορφές προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε επίπεδα κύματα. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις περισσότερες από τις εφαρμογές που χρησιμοποιούνται και οι παραβολικοί ανακλαστήρες, κυρίως σε υψηλές συχνότητες. Οι διαστάσεις τους και το βάρος τους γίνονται εξαιρετικά μεγάλα σε χαμηλές συχνότητες. Οι κεραίες φακών κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το υλικό με το οποίο έχουν κατασκευασθεί (όπου παίζει σημαντικό ρόλο ο δείκτης διάθλασης όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.3.7) ή ανάλογα με τη γεωμετρική τους μορφή. Μερικές μορφές φαίνονται στα παρακάτω σχήματα



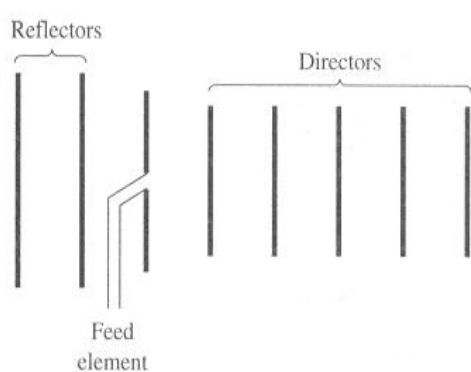
(b) Lens antennas with index of refraction  $n < 1$

**Σχήμα 1.3.7** Τύποι κεραιών φακών

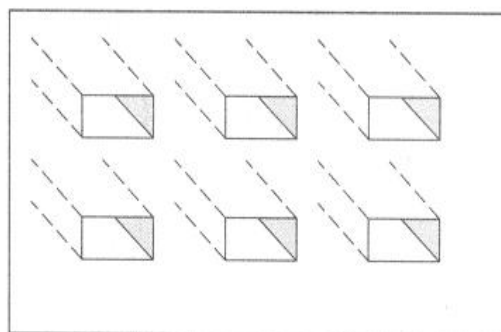


### 1.3.6 Στοιχειοκεραίες (Antenna Arrays)

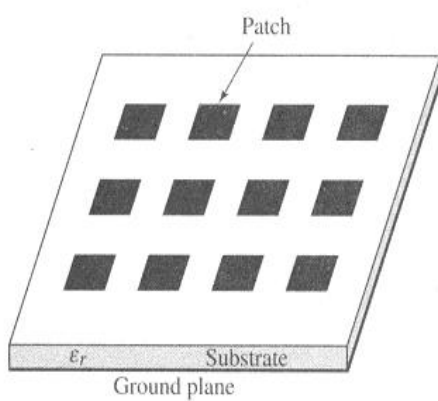
Μερικές εφαρμογές απαιτούν χαρακτηριστικά ακτινοβολίας τα οποία δεν μπορούν να επιτευχθούν από ένα μόνο στοιχείο. Ωστόσο, μπορεί μια σειρά ακτινοβολούντα στοιχεία σε ηλεκτρικό και γεωμετρικό διακανονισμό να αποδώσει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά ακτινοβολίας. Ο διακανονισμός αυτός των στοιχείων μπορεί να είναι τέτοιος ώστε να η ακτινοβολία να μεγιστοποιείται σε μια συγκεκριμένη διεύθυνση ή διευθύνσεις, να ελαχιστοποιείται σε άλλες, ή οτιδήποτε διαφορετικό είναι επιθυμητό. Τυπικά παραδείγματα στοιχειοκεραιών φαίνονται στα παρακάτω σχήματα.



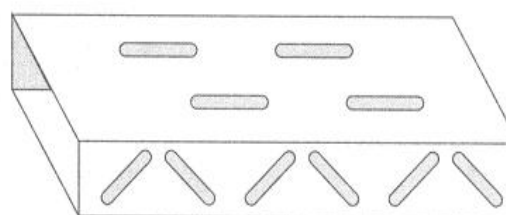
(a) Yagi-Uda array



(b) Aperture array



(c) Microstrip patch array



(d) Slotted-waveguide array

**Σχήμα 1.3.8** Τύποι στοιχειοκεραιών

Συνήθως ο όρος στοιχειοκεραία αναφέρεται σε κεραίες των σχημάτων a, b και c. Ωστόσο και η τοποθέτηση ακτινοβολητών σε μια συνεχόμενη δομή του σχήματος d θεωρείται στοιχειοκεραία.

Λεπτομερέστερη περιγραφή των στοιχειοκεραιών, που αφορούν και τη συγκεκριμένη εργασία, στο επόμενο κεφάλαιο.

## **Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>**

### **Στοιχειοκεραίες**

#### **2.1 Εισαγωγή**

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, σε πολλές πρακτικές εφαρμογές δεν είναι δυνατή η επίτευξη της επιθυμητής κατευθυντικότητας ή του επιθυμητού εύρους δέσμης με χρήση απλών κεραιών. Επίσης, σε αρκετές περιπτώσεις είναι επιθυμητή η στροφή του διαγράμματος ακτινοβολίας με ηλεκτρονικό τρόπο. Μια κατάλληλη μέθοδος για να αντιμετωπιστούν οι απαιτήσεις αυτές είναι ο σχηματισμός στοιχειοκεραιών. Οι στοιχειοκεραίες είναι διατάξεις που αποτελούνται από πολλούς όμοιους ακτινοβολητές που έχουν τον ίδιο προσανατολισμό και ακτινοβολούν ή λαμβάνουν ενέργεια συγχρόνως. Με κατάλληλη επιλογή της ρευματικής διέγερσης επιτυγχάνονται βελτιωμένες ιδιότητες για τη στοιχειοκεραία σε σχέση με τις αντίστοιχες ενός απλού στοιχείου της. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα επιμέρους πεδία των στοιχείων ακτινοβολίας συμβάλλουν στις επιθυμητές διευθύνσεις του χώρου, ενώ αλληλοαναιρούνται σε άλλες.

Το συνολικό μακρινό πεδίο μιας στοιχειοκεραίας προσδιορίζεται με διανυσματική άθροιση των επιμέρους πεδίων των ακτινοβολητών που την αποτελούν. Η διαδικασία αυτή προϋποθέτει ότι δεν υπάρχει σύζευξη μεταξύ των στοιχείων ακτινοβολίας, δηλαδή η ρευματική διέγερση κάθε στοιχείου δεν επηρεάζεται από την παρουσία των υπόλοιπων στοιχείων. Η ισχύς της παραδοχής αυτής εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των στοιχείων. Το διάγραμμα ακτινοβολίας μιας στοιχειοκεραίας δύναται να προσδιοριστεί από το γινόμενο του παράγοντα διάταξης (array factor) της θεωρούμενης στοιχειοκεραίας επί τον παράγοντα του ακτινοβολούντος στοιχείου από τα οποία αποτελείται η στοιχειοκεραία, όπως θα φανεί και στη συνέχεια. Βάσει της αρχής αυτής λύνεται και το πρόβλημα της σύνθεσης στοιχειοκεραίας επιζητούμενου διαγράμματος ακτινοβολίας. Η μορφή του διαγράμματος ακτινοβολίας μιας στοιχειοκεραίας εξαρτάται από τους εξής παράγοντες:

- γεωμετρία της στοιχειοκεραίας (γραμμική, επίπεδη, κυκλική, ...)
- συχνότητα λειτουργίας
- απόσταση μεταξύ των στοιχείων ακτινοβολίας
- σχετική ρευματική διέγερση των στοιχείων ακτινοβολίας
- πλήθος στοιχείων ακτινοβολίας

Οι στοιχειοκεραίες βρίσκουν ευρεία εφαρμογή γιατί παρέχουν τις εξής δυνατότητες:

- αύξηση της κατευθυντικότητας
- σύνθεση επιθυμητών διαγραμμάτων ακτινοβολίας
- στροφή του διαγράμματος ακτινοβολίας με ηλεκτρονικό τρόπο

## 2.2 Στοιχειοκεραίες Πολλών Στοιχείων

Όπως προαναφέρθηκε στοιχειοκεραία εννοείται μια διάταξη όμοιων ακτινοβολητών που έχουν τον ίδιο προσανατολισμό και ακτινοβολούν ή λαμβάνουν ταυτοχρόνως. Τα ρεύματα των στοιχείων ακτινοβολίας είναι δυνατό να διαφέρουν κατά τη φάση ή και το μέτρο. Οι στοιχειοκεραίες διακρίνονται σε δύο ευρύτερες κατηγορίες: τις χωρικά ομοιόμορφες και τις χωρικά ανομοιόμορφες στοιχειοκεραίες. Στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές χρησιμοποιούνται χωρικά ομοιόμορφες στοιχειοκεραίες, για τις οποίες άλλωστε υπάρχει πλήθος μεθόδων ανάλυσης και σύνθεσης. Οι χωρικά ανομοιόμορφες στοιχειοκεραίες παρέχουν στο σχεδιαστή περισσότερους βαθμούς ελευθερίας, αλλά είναι σαφώς δυσκολότερη η θεωρητική ανάλυσή τους.

Αν  $I_0$  είναι ο φασιθέτης του ρεύματος διέγερσης του στοιχείου της στοιχειοκεραίας που θεωρείται ως στοιχείο αναφοράς, το ρεύμα διέγερσης κάποιου στοιχείου μπορεί να εκφρασθεί υπό τη μορφή

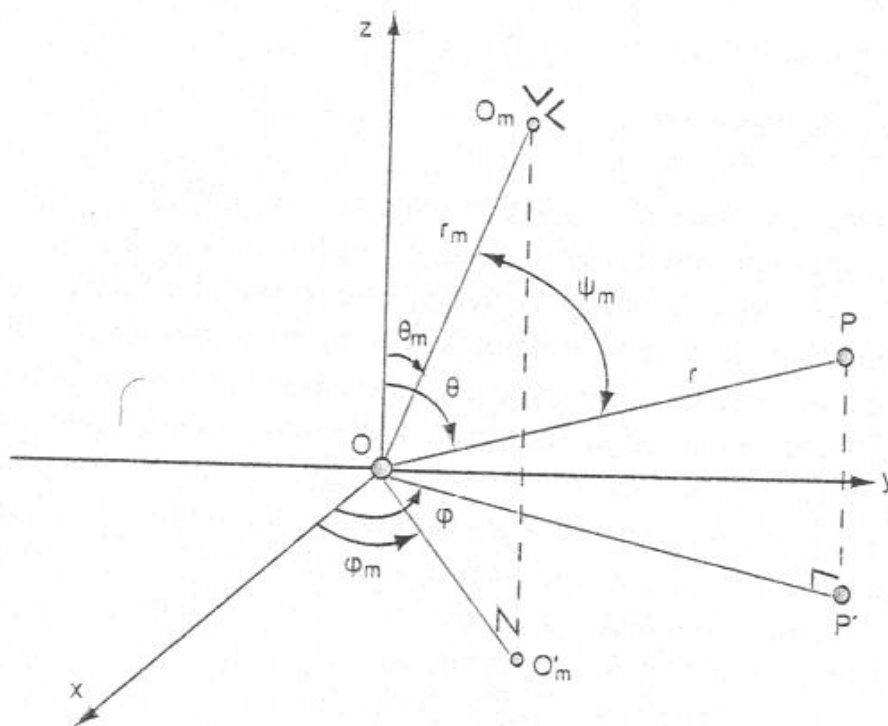
$$I_m = c_m I_0 \quad m = 1, 2, \dots, M - 1 \quad (2.2.1)$$

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

Η ένταση ακτινοβολίας μιας στοιχειοκεραίας  $U(\theta, \varphi)$  γράφεται

$$U(\theta, \varphi) = U_0(\theta, \varphi) |S(\theta, \varphi)|^2 \quad (2.2.2)$$

όπου  $U_0(\theta, \varphi)$  η ένταση ακτινοβολίας των όμοιων στοιχείων ακτινοβολίας και  $S(\theta, \varphi)$  ο παράγοντας διάταξης της στοιχειοκεραίας. Με τη βοήθεια του σχήματος 2.2.1 ο παράγοντας διάταξης προσδιορίζεται συναρτήσει των συντεταγμένων θέσης των στοιχείων ακτινοβολίας.



**Σχήμα 2.2.1** Γεωμετρία στοιχειοκεραίας

Είναι

$$S(\theta, \varphi) = \sum_{m=0}^{M-1} c_m \exp(jkr_m \cos \psi_m) \quad (2.2.3)$$

όπου

$$\cos \psi_m = \cos \theta_m \cos \theta + \sin \theta_m \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_m) \quad (2.2.4)$$

και  $k = 2\pi / \lambda$  ο κυματικός αριθμός του μέσου διάδοσης.

Από τη σχέση (2.2.3) φαίνεται ότι ο παράγοντας διάταξης, και επομένως η ένταση ακτινοβολίας μιας στοιχειοκεραίας, εξαρτώνται από τη συχνότητα λειτουργίας, τη γεωμετρική διάταξη, το πλήθος και τη σχετική διέγερση των στοιχείων. Ο παράγοντας διάταξης μιας στοιχειοκεραίας δεν εξαρτάται από το είδος των ακτινοβολητών που την αποτελούν και συνήθως προσδιορίζεται αντικαθιστώντας τα στοιχεία ακτινοβολίας με ισοτροπικούς ακτινοβολητές τοποθετημένους στα κέντρα διέγερσής τους.

Σε πολλές εφαρμογές, το στοιχείο ακτινοβολίας μιας στοιχειοκεραίας με παράγοντα διάταξης  $S_2(\theta, \varphi)$  αποτελεί και ίδιο μια άλλη στοιχειοκεραία με παράγοντα διάταξης  $S_1(\theta, \varphi)$ . Στην περίπτωση αυτή ο παράγοντας διάταξης προσδιορίζεται με βάση την αρχή του πολλαπλασιασμού των παραγόντων διάταξης. Δηλαδή, ο παράγοντας  $S(\theta, \varphi)$  θα δίνεται από τη σχέση

$$S(\theta, \varphi) = S_1(\theta, \varphi) S_2(\theta, \varphi) \quad (2.2.5)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι το μέτρο του παράγοντα διάταξης μιας στοιχειοκεραίας που πάντα αφορά τη μακρινή περιοχή, δεν μεταβάλλεται όταν υπάρξει πεπερασμένη μετατόπιση του κέντρου των συντεταγμένων. Επομένως, στοιχειοκεραία με συγκεκριμένο πλήθος, γεωμετρική διάταξη και σχετική διέγερση των στοιχείων της, έχει μοναδικό κατά μέτρο παράγοντα διάταξης ως συνάρτηση της συχνότητας, ανεξάρτητα από την επιλογή του κέντρου των συντεταγμένων. Η επιλογή του κέντρου των συντεταγμένων είναι ελεύθερη με κριτήριο την ευκολία

προσδιορισμού του παράγοντα διάταξης και την απλότητα της μαθηματικής έκφρασής του. Συνήθως, επιλέγεται το γεωμετρικό κέντρο της στοιχειοκεραίας ή κάποιο χαρακτηριστικό σημείο της γεωμετρίας της.

Το κατευθυντικό κέρδος μιας στοιχειοκεραίας δίνεται από τη σχέση

$$D_g(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{U_0(\theta, \varphi) |S(\theta, \varphi)|^2}{\oiint U_0(\theta, \varphi) |S(\theta, \varphi)|^2 d\Omega} \quad (2.2.6)$$

Προκειμένου περί στοιχειοκεραιών ορίζεται το γεωμετρικό κατευθυντικό κέρδος

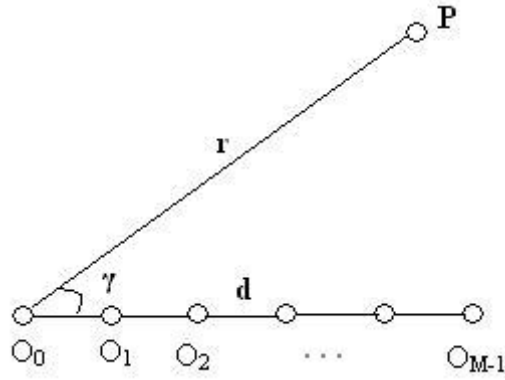
$$D_s(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{|S(\theta, \varphi)|^2}{\oiint |S(\theta, \varphi)|^2 d\Omega} \quad (2.2.7)$$

Η παραπάνω συνάρτηση που εκφράζει το γεωμετρικό κατευθυντικό κέρδος εξαρτάται μόνο από τη διάταξη και τη σχετική διέγερση των στοιχείων και εκφράζει το πόσο επηρεάζει την κατευθυντικότητα ο παράγοντας διάταξης.

## 2.3 Γραμμικές Στοιχειοκεραίες

### 2.3.1 Γενικά

Οι χωρικά ομοιόμορφες γραμμικές στοιχειοκεραίες αποτελούν μια κατηγορία στοιχειοκεραιών με ιδιαίτερα πρακτικό ενδιαφέρον. Τα σημεία αναφοράς των στοιχείων βρίσκονται επί ευθείας που ονομάζεται άξονας της στοιχειοκεραίας. Η εύρεση του παράγοντα διάταξης γίνεται με βάση το σχήμα 2.3.1, θεωρώντας ως κέντρο της στοιχειοκεραίας το κέντρο  $O_0$  του στοιχείου τάξης  $m = 0$ .



**Σχήμα 2.3.1** Γεωμετρία χωρικά ομοιόμορφης γραμμικής στοιχειοκεραίας

Το σημείο παρατήρησης P χαρακτηρίζεται από τις συντεταγμένες  $P(r, \theta, \varphi)$  σε σφαιρικό σύστημα συντεταγμένων με κέντρο το κέντρο της στοιχειοκεραίας  $O_0$ . Αν  $\gamma$  η γωνία που σχηματίζουν στο χώρο η OP με τον άξονα της στοιχειοκεραίας ισχύουν

$$r_m = md \quad (2.3.1)$$

και

$$\psi_m = \gamma \quad (2.3.2)$$

όπου  $m = 0, 1, 2, \dots, M-1$  και  $d$  η απόσταση δύο διαδοχικών στοιχείων που ονομάζεται *βήμα της γραμμικής στοιχειοκεραίας*.

Επομένως, η γενική σχέση υπολογισμού του παράγοντα διάταξης στην περίπτωση της γραμμικής στοιχειοκεραίας γράφεται

$$\begin{aligned} S(\gamma) &= c_0 + c_1 \exp(jkd \cos \gamma) + \dots + c_{M-1} \exp[j(M-1)kd \cos \gamma] \\ &= \sum_{m=0}^{M-1} c_m \exp(jmkd \cos \gamma) \end{aligned} \quad (2.3.3)$$

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



Η εξάρτηση του παράγοντα διάταξης από τις συντεταγμένες διεύθυνσης  $\theta$  και  $\varphi$  του σημείου παρατήρησης υποκρύπτεται στην εξάρτησή του από τη γωνία κλίσης  $\gamma$ . Όταν ο άξονας της στοιχειοκεραίας είναι ο άξονας  $x$  ή ο άξονας  $y$  του συστήματος συντεταγμένων, εύκολα προκύπτει ότι

$$\cos \gamma = \sin \theta \cos \varphi, \quad \text{για άξονα } x \quad (2.3.4)$$

$$\cos \gamma = \sin \theta \sin \varphi, \quad \text{για άξονα } y \quad (2.3.5)$$

Αντίθετα, όταν ο άξονας της στοιχειοκεραίας ταυτίζεται με τον άξονα  $z$

$$\cos \gamma = \cos \theta \quad (2.3.6)$$

διότι προφανώς ταυτίζεται η γωνία κλίσης  $\gamma$  από τον άξονα της στοιχειοκεραίας με τη γωνία  $\theta$ .

Σε πολλές περιπτώσεις η διαφορά φάσης μεταξύ των ρευμάτων τροφοδότησης δύο διαδοχικών στοιχείων ακτινοβολίας μπορεί να είναι σταθερή και ίση π.χ με  $\delta$ . Τότε

$$c_m = a_m \exp(jm\delta) \quad m = 0, 1, \dots, M-1 \quad (2.3.7)$$

όπου  $a_m$  θετικοί πραγματικοί αριθμοί.

Η σχέση (2.3.3) πλέον παίρνει την εξής μορφή

$$S(\gamma) = \sum_{m=0}^{M-1} a_m \exp[jm(kd \cos \gamma + \delta)] \quad (2.3.8)$$

Αν θεωρήσουμε τη βοηθητική μεταβλητή  $\psi$  όπου

$$\psi = kd \cos \gamma + \delta \quad (2.3.9)$$

η σχέση (2.3.8) παίρνει τη μορφή

$$S(\psi) = \sum_{m=0}^{M-1} a_m \exp(jm\psi) \quad (2.3.10)$$

Από ότι φαίνεται από τη σχέση (2.3.10) ο παράγοντας διάταξης μιας γραμμικής στοιχειοκεραίας είναι περιοδική συνάρτηση ως προς τη μεταβλητή  $\psi$  με περίοδο  $2\pi$ . Το διάγραμμα του παράγοντα διάταξης προσδιορίζεται, λόγω συμμετρίας του περί τον άξονα της στοιχειοκεραίας, στην καλούμενη *ορατή περιοχή* της μεταβλητής  $\psi$ , η οποία αντιστοιχεί στις τιμές της γωνίας  $\gamma$  μεταξύ 0 και  $\pi$ , δηλαδή στην περιοχή για την οποία

$$\delta - kd \leq \psi \leq \delta + kd \quad (2.3.11)$$

### 2.3.2 Γραμμικές Στοιχειοκεραίες με Ομοιόμορφη Διέγερση

Οι γραμμικές στοιχειοκεραίες έχουν ομοιόμορφη διέγερση όταν τα στοιχεία τους τροφοδοτούνται με ρεύμα του ίδιου εύρους, δηλαδή  $a_m = a_0$  ( $m = 0, 1, \dots, M-1$ ). Θέτοντας  $a_m = a_0 = 1$ , η σχέση (2.3.8) παίρνει τη μορφή

$$S(\gamma) = \sum_{m=0}^{M-1} \exp[jm(kd \cos \gamma + \delta)] \quad (2.3.12)$$

Στο σημείο αυτό, είναι απαραίτητο να μελετηθεί η επίδραση των παραμέτρων  $kd$  και  $\delta$  στο διάγραμμα του παράγοντα διάταξης.

### Μετωπική Ακτινοβολία

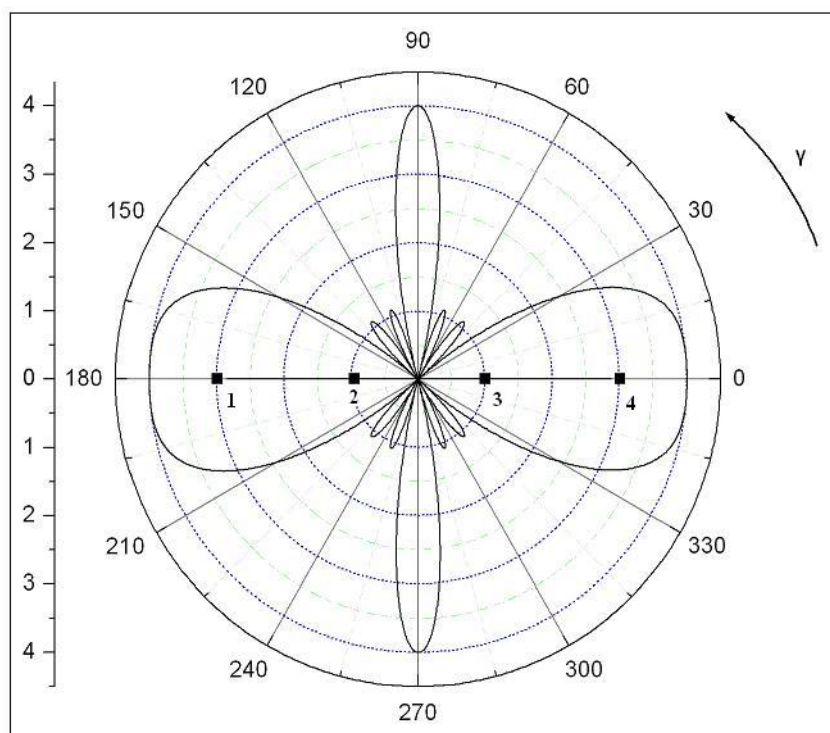
Σε πολλές εφαρμογές είναι επιθυμητή η μεγιστοποίηση της εκπομπής ή λήψης ακτινοβολίας μιας στοιχειοκεραίας κατά διεύθυνση κάθετη προς τον άξονά της, δηλαδή υπό γωνία κλίσης  $\gamma = 90^\circ$ . Η ακτινοβολία αυτή ονομάζεται μετωπική και η στοιχειοκεραία μετωπική ή ευρύπλευρη. Για να επιτευχθεί θα πρέπει, εκτός από την ένταση του στοιχείου ακτινοβολίας, να μεγιστοποιείται και ο παράγοντας διάταξης

κατά τη διεύθυνση  $\gamma = 90^\circ$ . Η δεύτερη αυτή απαίτηση μπορεί να ικανοποιηθεί με κατάλληλη επιλογή της παραμέτρου  $\delta$ . Συγκεκριμένα για

$$\delta = 0 \quad (2.3.13)$$

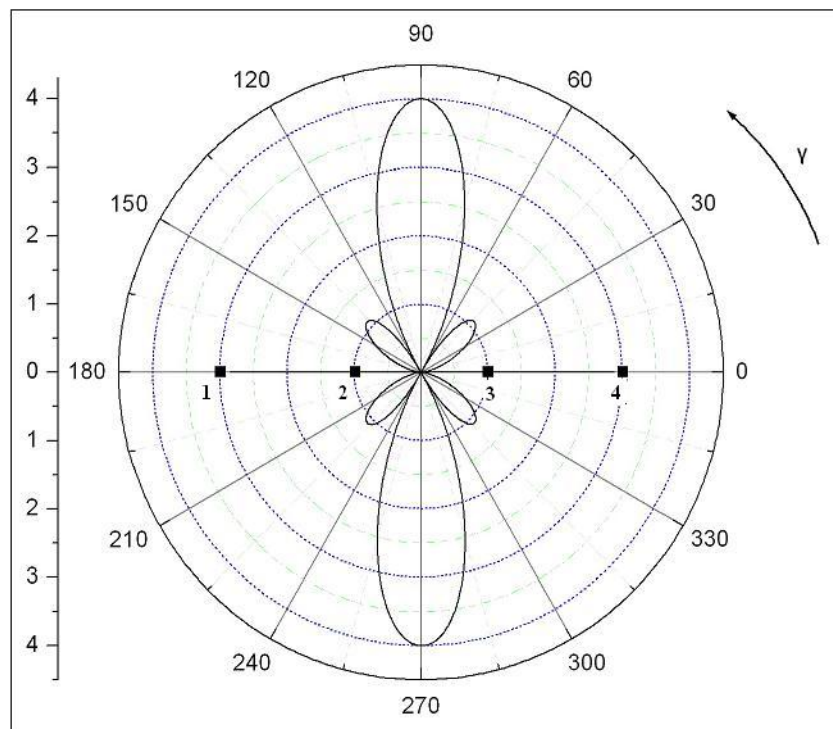
εξασφαλίζεται η μεγιστοποίηση του  $|S(\gamma)|$  για  $\gamma = 90^\circ$ . Η σχέση (2.3.13) αποτελεί συνθήκη μετωπικής ακτινοβολίας όχι μόνο ομοιόμορφων γραμμικών στοιχειοκεραιών αλλά και σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση γραμμικής στοιχειοκεραίας.

Πρέπει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση που το βήμα  $d$  είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος  $\lambda$  ( $d = q\lambda, q \in \mathbb{Z}$ ) και ταυτοχρόνως ισχύει η (2.3.13), εμφανίζονται κύριοι λοβοί όχι μόνο κατά τη μετωπική διεύθυνση  $\gamma = 90^\circ$ , αλλά και κατά τις αξονικές διευθύνσεις  $\gamma = 0^\circ$  και  $\gamma = 180^\circ$ . Αυτό φαίνεται στο πολικό διάγραμμα του παράγοντα διάταξης για στοιχειοκεραία τεσσάρων στοιχείων του σχήματος 2.3.2.



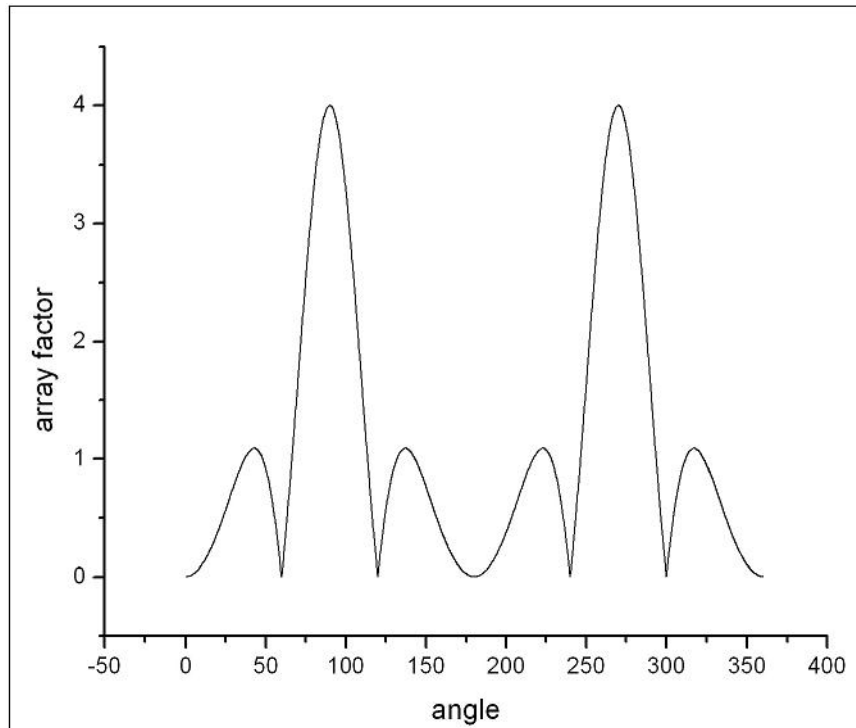
**Σχήμα 2.3.2** Παράγοντας διάταξης μετωπικής στοιχειοκεραίας 4 στοιχείων με  $d=\lambda$  και  $\delta=0$

Για να αποφευχθεί η ύπαρξη των πρόσθετων αυτών κύριων λοβών θα πρέπει, εκτός από την ισχύ της σχέσης (2.3.13), το βήμα της στοιχειοκεραίας να μην είναι πολλαπλάσιο του μήκους κύματος. Γενικά προτιμώνται τιμές για το  $kd$  όχι μεγαλύτερες του  $\pi$ , ώστε να αποφεύγονται οι ανεπιθύμητοι αυτοί πρόσθετοι λοβοί. Με άλλα λόγια, και δεδομένου ότι  $k=2\pi/\lambda$ , το βήμα της στοιχειοκεραίας δε θα πρέπει να υπερβαίνει το  $\lambda/2$ . Για  $d=\lambda/2$ , ο παράγοντας διάταξης της στοιχειοκεραίας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



**Σχήμα 2.3.3** Παράγοντας διάταξης μετωπικής στοιχειοκεραίας 4 στοιχείων με  $d=\lambda/2$  και  $\delta=0$

Τα παραπάνω διαγράμματα του παράγοντα διάταξης είναι τα πολικά διαγράμματα τα οποία προκύπτουν από το καρτεσιανό διάγραμμα με μία μέθοδο που περιγράφεται στο παράρτημα της παρούσης εργασίας. Αν ήθελε κανείς να δει το καρτεσιανό διάγραμμα για την περίπτωση για παράδειγμα της μετωπικής στοιχειοκεραίας 4 στοιχείων με  $d=\lambda/2$  και  $\delta=0$ , θα παρατηρούσε τα μέγιστα στις 90 και τις 270 μοίρες που αποτελούν τους κύριους λοβούς και τα τέσσερα τοπικά μέγιστα των τεσσάρων πλευρικών λοβών όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Να σημειωθεί ότι από δω και πέρα θα παρουσιάζονται μόνο τα πολικά διαγράμματα του παράγοντα διάταξης.



**Σχήμα 2.3.4** Καρτεσιανό διάγραμμα παράγοντα διάταξης μετωπικής στοιχειοκεραίας 4 στοιχείων με  $d=\lambda/2$  και  $\delta=0$

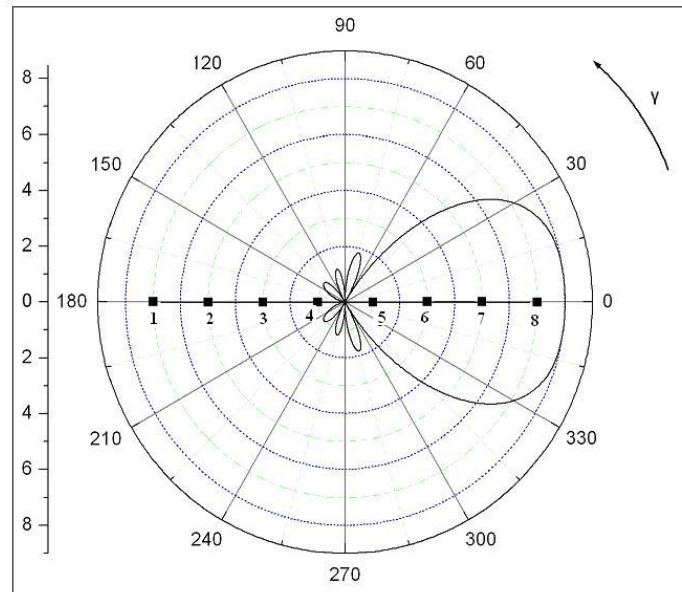
### Αξονική Ακτινοβολία

Μια άλλη κατηγορία ομοιόμορφων γραμμικών στοιχειοκεραιών που παρουσιάζει ιδιαίτερα πρακτικό ενδιαφέρον είναι οι αξονικές ή ακμοπυροδοτικές στοιχειοκεραίες, των οποίων ο παράγοντας διάταξης μεγιστοποιείται κατά τον άξονά τους, δηλαδή είτε κατά τη διεύθυνση  $\gamma = 0^\circ$  είτε κατά τη διεύθυνση  $\gamma = 180^\circ$ . Η αξονική ακτινοβολία επιτυγχάνεται όταν ικανοποιείται μια από τις συνθήκες

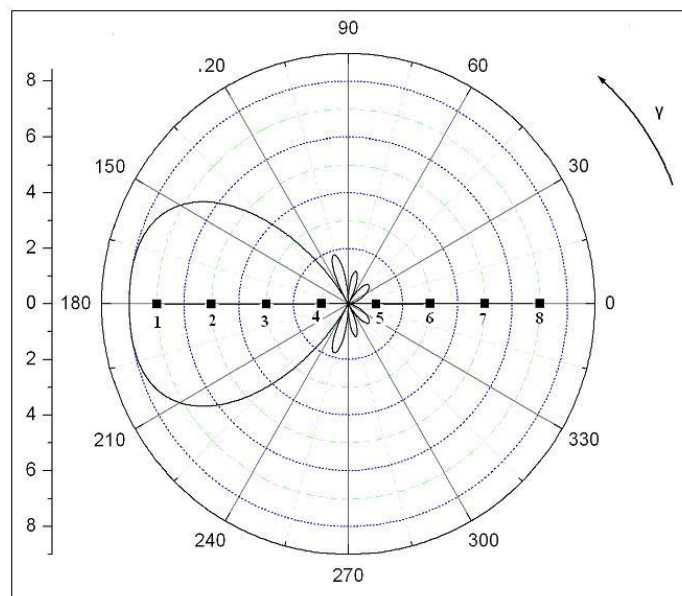
$$\begin{aligned} \delta &= -kd, \quad \text{οπότε} \quad \gamma = 0^\circ \\ \delta &= kd, \quad \text{οπότε} \quad \gamma = 180^\circ \end{aligned} \tag{2.3.14}$$

Για να υπάρχει ένας μόνο κύριος λοβός στο διάγραμμα του παράγοντα διάταξης της αξονικής στοιχειοκεραίας θα πρέπει  $d < \lambda/2$ . Όπως και στην περίπτωση της μετωπικής στοιχειοκεραίας, για βήμα στοιχειοκεραίας ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος  $\lambda$  ( $d = q\lambda, q \in \mathbb{Z}$ ), εμφανίζονται ανεπιθύμητοι κύριοι λοβοί, αυτή τη φορά

κατά τη μετωπική διεύθυνση  $\gamma = 90^\circ$ . Οι παράγοντες διάταξης για τις δύο περιπτώσεις που ικανοποιούν τις συνθήκες της σχέσης (2.3.14) φαίνονται στα παρακάτω σχήματα.



**Σχήμα 2.3.5** Παράγοντας διάταξης αξονικής στοιχειοκεραίας 8 στοιχείων με  $d=\lambda/4$  και  $\delta=-\pi/2$



**Σχήμα 2.3.6** Παράγοντας διάταξης αξονικής στοιχειοκεραίας 8 στοιχείων με  $d=\lambda/4$  και  $\delta=\pi/2$

Η κεραία αυτή είναι ενδιαφέρουσα λόγω της μονοκατευθυντικότητας που παρουσιάζει και της μη ακτινοβολίας προς τα όπισθεν.

### Στοιχειοκεραίες με Ηλεκτρονικά Στρεφόμενο Διάγραμμα

Όπως έχει γίνει φανερό από τα προηγούμενα, με κατάλληλη ρύθμιση των παραμέτρων  $kd$  και  $\delta$ , είναι δυνατός ο προσανατολισμός της μέγιστης ακτινοβολίας μιας γραμμικής στοιχειοκεραίας προς οποιαδήποτε διεύθυνση του χώρου (π.χ γωνία  $\gamma_0$ ) σε σχέση με τον άξονα της. Στο συμπέρασμα αυτό καταλήγει και η μέθοδος της ανίχνευσης φάσης (phase scanning), κατά την οποία η κατεύθυνση της κύριας δέσμης στοιχειοκεραίας μπορεί να μεταβάλλεται με βάση τη μεταβολή της διαφοράς φάσεως  $\delta$ . Οι παράμετροι  $kd$ ,  $\delta$  και  $\gamma_0$  συνδέονται με τη σχέση

$$kd \cos \gamma_0 + \delta = 0 \quad (2.3.15)$$

Συνεπώς, αν με οποιοδήποτε τρόπο (π.χ με phase shifter) καθίσταται δυνατή η χρονική μεταβολή των διαφόρων φάσεων μεταξύ των ρευμάτων των στοιχείων, η κατεύθυνση της κύριας δέσμης παρακολουθεί αυτή τη μεταβολή και ανιχνεύει τον ουρανό (ή και τη θάλασσα) γύρω από τη στοιχειοκεραία, αποφεύγοντας με τον τρόπο αυτό τη μηχανική περιστροφή. Η αρχή αυτή χρησιμοποιείται κυρίως σε διατάξεις radar επιτήρησης αεροδρομίων, όπου η ανίχνευση του ουρανού επιβάλλεται να είναι αδιάκοπη και ταχύτατη.

Ωστόσο, μπορεί να θεωρηθεί ότι η διαφορά φάσης μεταξύ διαδοχικών ρευμάτων στις ομοιόμορφες γραμμικές στοιχειοκεραίες που ορίζεται από τη σχέση (2.3.7) δεν αντιμετωπίζεται πλέον ως σταθερή ποσότητα, με τα πολλαπλάσιά της να δίνουν τη φάση κάθε στοιχείου, αλλά κάθε στοιχείο έχει πλέον ξεχωριστή φάση σύμφωνα με την παρακάτω σχέση

$$c_m = a_m \exp(j\delta_m) \quad m = 0, 1, \dots, M-1 \quad (2.3.16)$$

όπου για την περίπτωση γραμμικών στοιχειοκεραιών με ομοιόμορφη διέγερση έχει υποτεθεί προηγουμένως ότι  $a_m = a_0 = 1$  ( $m = 0, 1, \dots, M-1$ ). Η σχέση (2.3.12) του παράγοντα διάταξης πλέον παίρνει τη μορφή

$$S(\gamma) = \sum_{m=0}^{M-1} \exp[j(mkd \cos \gamma + \delta_m)] \quad (2.3.17)$$

Το συμπέρασμα που εξάγεται από την προηγούμενη ανάλυση είναι ότι οι ρευματικοί συντελεστές των στοιχείων αντιμετωπίζονται με μια πιο γενική θεώρηση. Το γεγονός αυτό, αναδεικνύει την ιδιαιτερότητα κάθε στοιχείου της στοιχειοκεραίας και έτσι μπορεί να μελετηθεί και να αναλυθεί καλύτερα η συμβολή του στην κλίση του κύριου λοβού, αλλά και όπως θα φανεί στη συνέχεια μπορεί να μελετηθεί και να αναλυθεί καλύτερα η συμβολή του στην κλίση σε συγκεκριμένες διευθύνσεις περισσότερων του ενός επιθυμητών κύριων λοβών ή την πλήρη εξάλειψή τους για την αποφυγή παρεμβολών.

Όπως θα φανεί στα επόμενα κεφάλαια, θα χρησιμοποιηθούν οι γενετικοί αλγόριθμοι για την εύρεση της φάσης κάθε στοιχείου με στόχο την επίτευξη μέγιστης ή ελάχιστης ακτινοβολίας σε δεδομένη κατεύθυνση ή κατευθύνσεις, μέσω της βελτιστοποίησης του παράγοντα διάταξης της στοιχειοκεραίας.

### Γεωμετρικό Κατευθυντικό Κέρδος

Στην περίπτωση ομοιόμορφων γραμμικών στοιχειοκεραιών, λόγω συμμετρίας του παράγοντα διάταξης με τον άξονα της στοιχειοκεραίας, ο οποίος πολλές φορές ταυτίζεται με τον άξονα  $x$  ή με τον άξονα  $y$ , η συνάρτηση του γεωμετρικού κατευθυντικού κέρδους  $D_s(\theta, \varphi)$  της σχέσης (2.2.7) γράφεται

$$D_s(\gamma) = \frac{|S(\gamma)|^2}{I} \quad (2.3.18)$$

όπου

$$I = \frac{1}{2} \int_0^\pi \left| \frac{\sin(M(kd \cos \gamma + \delta)/2)}{M \sin((kd \cos \gamma + \delta)/2)} \right|^2 \sin \gamma d\gamma \quad (2.3.19)$$



Μπορεί να αποδειχθεί ότι

$$\left| \frac{\sin(M\psi/2)}{\sin(\psi/2)} \right|^2 = M + 2 \sum_{m=1}^{M-1} (M-m) \cos(m\psi) \quad (2.3.20)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση (2.3.20) και εναλλάσσοντας την εκτέλεση της άθροισης και ολοκλήρωσης, η σχέση (2.3.19) γίνεται

$$I = \frac{1}{M} + \frac{2}{M^2} \sum_{m=1}^{M-1} \frac{N-m}{m k d} \sin(m k d) \cos(m \delta) \quad (2.3.21)$$

Με βάση τις σχέσεις (2.3.18) και (2.3.21) είναι φανερό ότι, όταν το βήμα μιας στοιχειοκεραίας είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του  $\lambda/2$  ( $d = q(\lambda/2)$ ,  $q \in \mathbb{Z}$ ), οπότε  $m k d = m q d$ , το ολοκλήρωμα  $I$  ανεξαρτήτως του  $\delta$  είναι ίσο με  $1/M$ . Επειδή στην περίπτωση αυτή η ορατή περιοχή είναι  $2 k d = 2 q d$ , τουλάχιστον ένα μέγιστο του  $|D_s(\gamma)|$  περιλαμβάνεται σε αυτήν, και η γεωμετρική κατευθυντικότητα (που αποτελεί και τη μέγιστη τιμή του παράγοντα διάταξης) προκύπτει ίση με  $M$ , δηλαδή ίση με το πλήθος των στοιχείων της στοιχειοκεραίας.

### 2.3.3 Γραμμικές Στοιχειοκεραίες με Ανομοιόμορφη Διέγερση

Στις ανομοιόμορφες στοιχειοκεραίες το πλάτος των ρευματικών συντελεστών δεν είναι το ίδιο για όλα τα στοιχεία όπως στις ομοιόμορφες στοιχειοκεραίες, αλλά διαφοροποιείται από στοιχείο σε στοιχείο. Η ελεγχόμενη μεταβολή των ρευματικών συντελεστών παρέχει τη δυνατότητα ελέγχου των χαρακτηριστικών των πλευρικών λοβών. Η ελάττωση της στάθμης των πλευρικών λοβών, που αποτελεί κύρια επιδίωξη κατά τη σχεδίαση των στοιχειοκεραιών, επιτυγχάνεται με βαθμιαία και κατάλληλα ελεγχόμενη ελάττωση του πλάτους των ρευματικών συντελεστών από το μέσο της στοιχειοκεραίας προς το άκρο της.

Μια στοιχειοκεραία χωρίς πλευρικούς λοβούς είναι η καλούμενη διωνυμική. Για να καθοριστούν τα πλάτη των ρευματικών συντελεστών προτάθηκε η χρήση των συντελεστών μιας διωνυμικής σειράς και πιο συγκεκριμένα προτάθηκε η συνάρτηση

$(1+x)^{m-1}$  να γραφεί σαν μία σειρά με τη χρήση της διωνυμικής επέκτασης. Η μορφή της συνάρτησης πλέον είναι

$$(1+x)^{m-1} = 1 + (m-1)x + \frac{(m-1)(m-2)}{2!}x^2 + \frac{(m-1)(m-2)(m-3)}{3!}x^3 + \dots \quad (2.3.22)$$

Οι θετικοί συντελεστές της σειράς για τις δέκα πρώτες τιμές του  $m$  φαίνονται παρακάτω

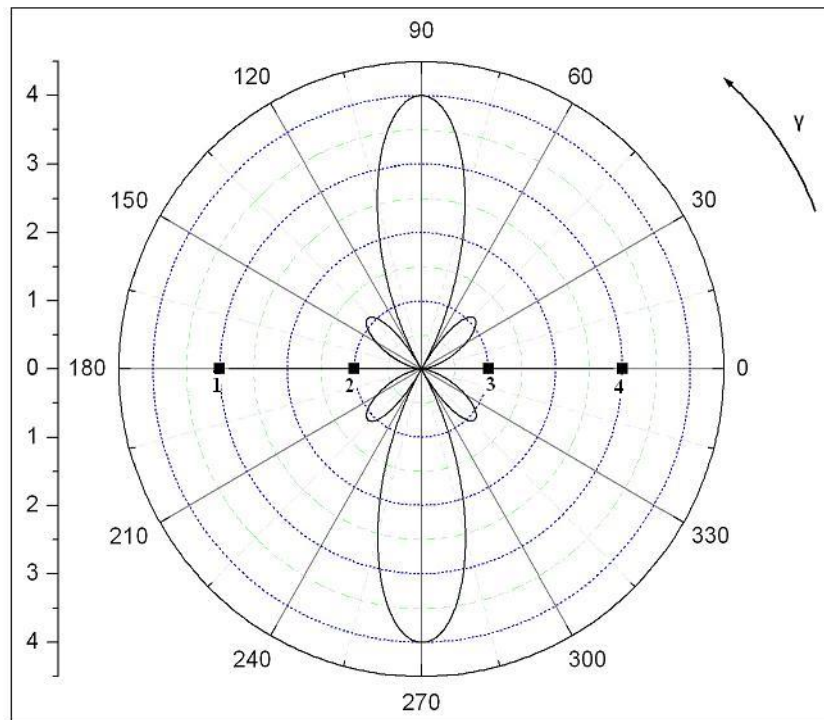
m=1						1													
m=2						1		1											
m=3					1		2		1										
m=4				1		3		3		1									
m=5			1		4		6		4	1									
m=6		1		5		10		10		5	1								
m=7		1		6		15		20		15		6	1						
m=8		1		7		21		35		35		21		7	1				
m=9		1		8		28		56		70		56		28		8	1		
m=10		1		9		36		84		126		126		84		36		9	1

### Σχήμα 2.3.7 Τρίγωνο Pascal

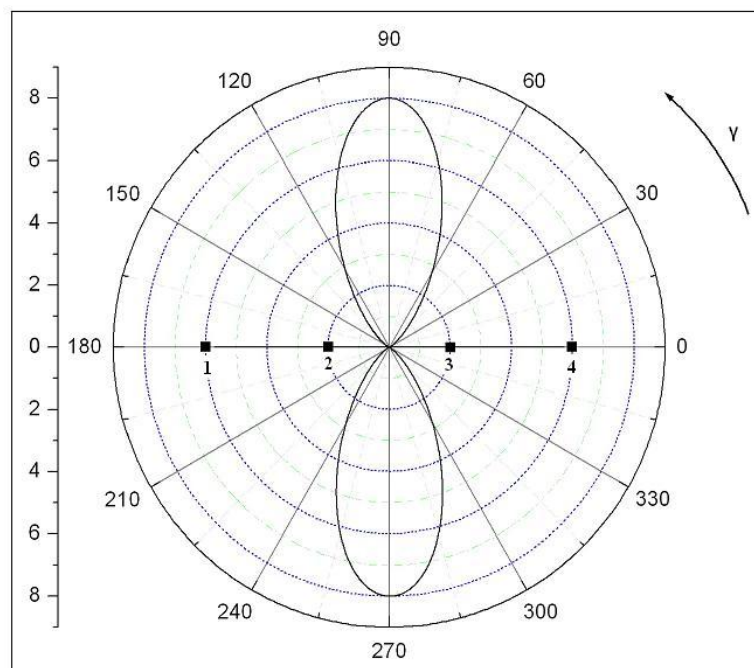
Οι συντελεστές αποτελούν το λεγόμενο τρίγωνο Pascal και αν θεωρηθεί ότι το  $m$  αντιστοιχεί στον αριθμό των στοιχείων της στοιχειοκεραίας, οι αντίστοιχοι συντελεστές αντιπροσωπεύουν τα πλάτη των ρευματικών συντελεστών των στοιχείων της στοιχειοκεραίας.

Στη συνέχεια φαίνονται τα διαγράμματα των παραγόντων διάταξης για μετωπική στοιχειοκεραία τεσσάρων στοιχείων για τις περιπτώσεις όπου τα πλάτη των ρευματικών συντελεστών είναι

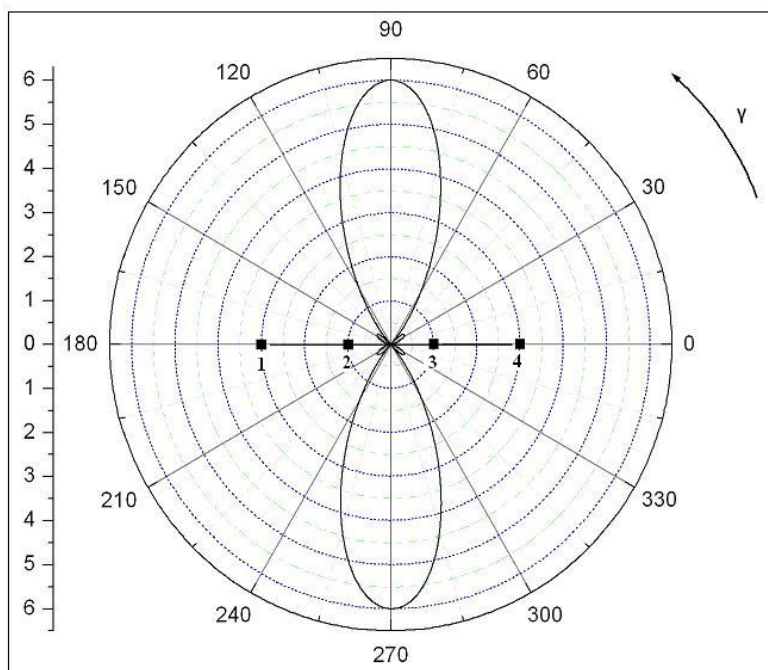
1.  $1 - 1 - 1 - 1$  (ομοιόμορφη διέγερση – Σχήμα 2.3.8)
2.  $1 - 3 - 3 - 1$  (διωνυμική – Σχήμα 2.3.9)
3.  $1 - 2 - 2 - 1$  (ενδιάμεση περίπτωση – Σχήμα 2.3.10)



**Σχήμα 2.3.8** Παράγοντας διάταξης ομοιόμορφης μετωπικής στοιχειοκεραίας 4 στοιχείων με  $d=\lambda/2$  και πλάτη ρευματικών συντελεστών 1 – 1 – 1 – 1



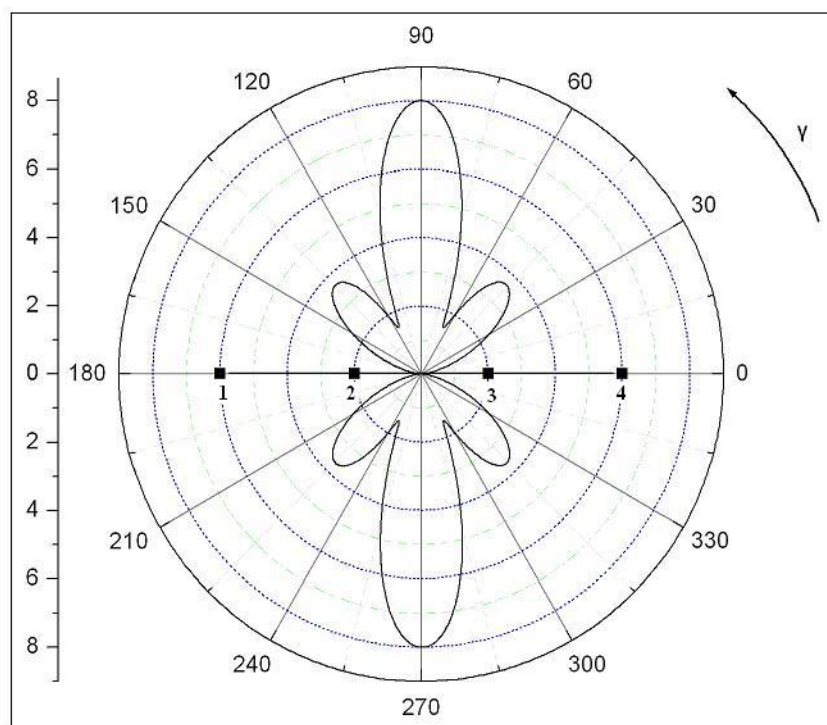
**Σχήμα 2.3.9** Παράγοντας διάταξης διωνυμικής μετωπικής στοιχειοκεραίας 4 στοιχείων με  $d=\lambda/2$  και πλάτη ρευματικών συντελεστών 1 – 3 – 3 – 1



**Σχήμα 2.3.10** Παράγοντας διάταξης ανομοιόμορφης μετωπικής στοιχειοκεραίας 4 στοιχείων με  $d=\lambda/2$  και πλάτη ρευματικών συντελεστών 1 – 2 – 2 – 1

Εύκολα μπορεί κανείς να παρατηρήσει πως στη διωνυμική στοιχειοκεραία απαλείφονται οι πλευρικοί λοβοί και αυξάνεται το εύρος δέσμης του κύριου λοβού. Το ίδιο συμβαίνει και στην ανομοιόμορφη στοιχειοκεραία με πλάτη ρευματικών συντελεστών 1 – 2 – 2 – 1, αλλά σε μικρότερο βαθμό.

Αντίθετα στην περίπτωση που δεν πραγματοποιείται ελάττωση του πλάτους των ρευματικών συντελεστών από το μέσο της στοιχειοκεραίας προς το άκρο της, αλλά τα πλάτη είναι ακανόνιστα, π.χ για στοιχειοκεραία τεσσάρων στοιχείων με πλάτη ρευματικών συντελεστών 3 – 2 – 1 – 2, τότε οι πλευρικοί λοβοί αυξάνονται σε σύγκριση με την ομοιόμορφη στοιχειοκεραία, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



**Σχήμα 2.3.11** Παράγοντας διάταξης ανομοιόμορφης μετωπικής στοιχειοκεραίας 4 στοιχείων με  $d=\lambda/2$  και πλάτη ρευματικών συντελεστών 3 – 2 – 1 – 2

## **Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>**

### **Γενετικοί Αλγόριθμοι**

#### **3.1 Ιστορική Αναδρομή**

Στις δεκαετίες του '50 και του '60 διάφοροι επιστήμονες υπολογιστών μελέτησαν, ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο, εξελικτικά συστήματα με τη σκέψη ότι η εξέλιξη θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως ένα εργαλείο βελτιστοποίησης σε τεχνολογικά προβλήματα. Η ιδέα πίσω από τα συστήματα αυτά ήταν η ανάπτυξη ενός πληθυσμού από υποψήφιες λύσεις σε ένα δεδομένο πρόβλημα, χρησιμοποιώντας τελεστές εμπνευσμένους από τη φυσική γενετική μεταβολή και τη φυσική επιλογή.

Κατά τα έτη 1965 και 1973 ο Rechenberg εισήγαγε “στρατηγικές εξέλιξης” ως μια μέθοδο βελτιστοποίησης πραγματικών παραμέτρων για κατασκευές όπως τα λεπτά μεταλλικά φύλλα των αεροπλάνων. Η ιδέα αυτή αναπτύχθηκε παραπέρα από τον Schwefel (1975, 1977).

Το πεδίο των στρατηγικών εξέλιξης έχει παραμείνει μια ενεργή περιοχή έρευνας, αναπτυσσόμενη ανεξάρτητα από το πεδίο των γενετικών αλγορίθμων (αν και πρόσφατα οι δύο επιστημονικές κοινότητες άρχισαν να αλληλεπιδρούν). Μια σύντομη ανασκόπηση των στρατηγικών εξέλιξης δόθηκε από τους Back, Hoffmeister και Schwefel (1991).

Το 1966 οι Fogel, Owens και Walsh ανέπτυξαν τον καλούμενο “εξελικτικό προγραμματισμό”, μια τεχνική στην οποία οι υποψήφιες λύσεις σε δεδομένα προβλήματα παραστάθηκαν ως μηχανές πεπερασμένων καταστάσεων, οι οποίες εξελίχθηκαν μεταλλάσσοντας (mutating) τυχαία τα διαγράμματα μετάπτωσης των καταστάσεών τους και επιλέγοντας το πλέον ταιριαστό (fittest). Μια κάπως γενικότερη διατύπωση του εξελικτικού προγραμματισμού παραμένει επίσης ζωντανή περιοχή έρευνας (Fogel και Atman, 1993). Από κοινού οι στρατηγικές εξέλιξης, ο εξελικτικός προγραμματισμός και οι γενετικοί αλγόριθμοι αποτελούν τη σπονδυλική στήλη του πεδίου του “εξελικτικού υπολογισμού”. Πολλοί άλλοι ερευνητές ανέπτυξαν κατά την περίοδο 1950-1970 αλγόριθμους βασισμένους στην εξέλιξη για βελτιστοποίηση συστημάτων και μάθηση μηχανής (Box 1957, Friedman 1959, Bledsoe 1961, Bremermann 1962, Reed, Toombs και Baricelli 1967). Επί πλέον, ένας

αριθμός εξελικτικών βιολόγων χρησιμοποίησαν τους υπολογιστές για να προσομοιώσουν την εξέλιξη για σκοπούς ελεγχόμενων βιολογικών πειραμάτων.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι επινοήθηκαν από τον John Holland τη δεκαετία του '60 και αναπτύχθηκαν από τον ίδιο και τους φοιτητές του τις δεκαετίες του '60 και του '70. Σε αντίθεση με τις στρατηγικές εξέλιξης και τον εξελικτικό προγραμματισμό, ο αρχικός στόχος του Holland δεν ήταν να κατασκευάσει αλγορίθμους που να λύνουν συγκεκριμένα προβλήματα, αλλά μάλλον να μελετήσει συστηματικά το φαινόμενο της προσαρμογής, όπως λαμβάνει χώρα στη φύση, και να αναπτύξει τρόπους με τους οποίους οι μηχανισμοί της φυσικής προσαρμογής θα μπορούσαν να εμφυτευτούν στα υπολογιστικά συστήματα. Ο Holland στο βιβλίο του "Adaptation in Natural and Artificial Systems", που δημοσίευσε το 1975, παρουσίασε το γενετικό αλγόριθμο ως μια αφαίρεση της βιολογικής εξέλιξης και έδωσε ένα θεωρητικό πλαίσιο προσαρμογής με γενετικούς αλγορίθμους.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι του Holland είναι μια μέθοδος μετακίνησης από έναν πληθυσμό χρωμοσωμάτων (λ.χ ακολουθίες από bits 0 και 1) σε ένα νέο πληθυσμό, χρησιμοποιώντας ένα είδος φυσικής επιλογής μαζί με τελεστές επιλογής (selection), διασταύρωσης (crossover), μετάλλαξης (mutation) και αντιστροφής (inversion), εμπνευσμένους από τη γενετική. Κάθε χρωμόσωμα (που ουσιαστικά αποτελεί μια πιθανή λύση ενός δεδομένου προβλήματος) αποτελείται από γονίδια (δηλαδή bits), και κάθε γονίδιο είναι ένα συγκεκριμένο αλληλόμορφο (allele) (λ.χ 0 ή 1). Ο τελεστής επιλογής διαλέγει τα χρωμοσώματα εκείνα του πληθυσμού στα οποία θα επιτραπεί να αναπαραχθούν, και κατά μέσο όρο τα χρωμοσώματα που προσαρμόζονται παράγουν περισσότερους απογόνους από τα λιγότερο προσαρμοσμένα. Η διασταύρωση ανταλλάσσει υπομέρη δύο χρωμοσωμάτων, μιμούμενη χονδρικά το βιολογικό επανασυνδυασμό μεταξύ δύο οργανισμών ενός απλού χρωμοσώματος. Η μετάλλαξη αλλάζει τυχαία τις τιμές των γονιδίων ορισμένων θέσεων σε ορισμένα χρωμοσώματα, και τέλος η αντιστροφή αντιστρέφει την τάξη μιας γειτνιάζουσας περιοχής του χρωμοσώματος, αναδιατάσσοντας με τον τρόπο αυτό τη σειρά με την οποία τοποθετούνται τα γονίδια.

Η εισαγωγή από τον Holland ενός βασισμένου στον πληθυσμό αλγορίθμου με επιλογή, διασταύρωση, μετάλλαξη και αντιστροφή ήταν μια μεγάλη καινοτομία. Οι στρατηγικές εξέλιξης του Rechenberg ξεκίνησαν με έναν πληθυσμό δύο ατόμων, ενός γονέα και ενός απογόνου, όπου ο απόγονος είναι μια μεταλλαγμένη παραλλαγή του γονέα. Πληθυσμοί πολλών ατόμων με διασταύρωση περιλήφθησαν αργότερα.

Αντίστοιχα, ο εξελικτικός προγραμματισμός του Walsh χρησιμοποιούσε μόνο μετάλλαξη για να προκαλέσει ποικιλία.

Επιπλέον, ο Holland ήταν αυτός ο οποίος προσπάθησε πρώτος να θέσει την υπολογιστική εξέλιξη σε μια σταθερή θεωρητική βάση (Holland 1975). Μέχρι πρόσφατα η θεωρητική αυτή θεμελίωση, βασιζόμενη στη θεωρία των σχημάτων (schemas), ήταν το θεμέλιο όλων των μεταγενέστερων θεωρητικών μελετών πάνω στους γενετικούς αλγορίθμους.

Κλείνοντας, είναι σημαντικό να τονιστεί πως μόλις τα τελευταία χρόνια υπήρξε ευρεία αλληλεπίδραση μεταξύ των ερευνητών οι οποίοι μελετούν τις μεθόδους του εξελικτικού υπολογισμού και έτσι τα σύνορα ανάμεσα στους γενετικούς αλγορίθμους, τις στρατηγικές εξέλιξης, τον εξελικτικό προγραμματισμό αλλά και άλλες εξελικτικές μεθοδολογίες έχουν εξαλειφθεί μέχρι κάποιο βαθμό. Σήμερα, ο όρος γενετικός αλγόριθμος χρησιμοποιείται για να περιγράψει κάτι αρκετά διαφορετικό από την αρχική ιδέα του Holland.

## **3.2 Ο Βασικός Γενετικός Αλγόριθμος**

Οι γενετικοί αλγόριθμοι προσπαθούν να επιλύσουν ένα πρόβλημα όχι με μαθηματικό αλλά με βιολογικό τρόπο, γεγονός που τους δίνει μεγάλη ενδογενή ευελιξία. Φτάνουν στη βέλτιστη (ή σχεδόν στη βέλτιστη) λύση ανεξάρτητα αν το πρόβλημα είναι γραμμικό ή μη γραμμικό, διακριτό ή συνεχούς χρόνου, πολλών ή λίγων ακρότατων, NP ή non-NP complete.

### **3.2.1 Περιγραφή της Μεθόδου**

Έστω λοιπόν ότι έχουμε το πρόβλημα της βελτιστοποίησης (μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση) μιας συνάρτησης μίας ή πολλών μεταβλητών. Το ζητούμενο είναι να βρεθεί ο κατάλληλος (ή καλύτερα ο βέλτιστος) συνδυασμός των τιμών των μεταβλητών της συνάρτησης ώστε να αποκτήσει τη βέλτιστη (μέγιστη ή ελάχιστη) τιμή της. Στους γενετικούς αλγορίθμους μια οποιαδήποτε υπονήφια λύση ονομάζεται χρωμόσωμα. Κάθε χρωμόσωμα αποτελείται από ένα σύνολο γονιδίων και κάθε γονίδιο αντιπροσωπεύει και μια μεταβλητή της συνάρτησης. Αυτό δε, μπορεί να παρασταθεί από μια ακολουθία δυαδικών ψηφίων (0 ή 1). Αν για παράδειγμα η

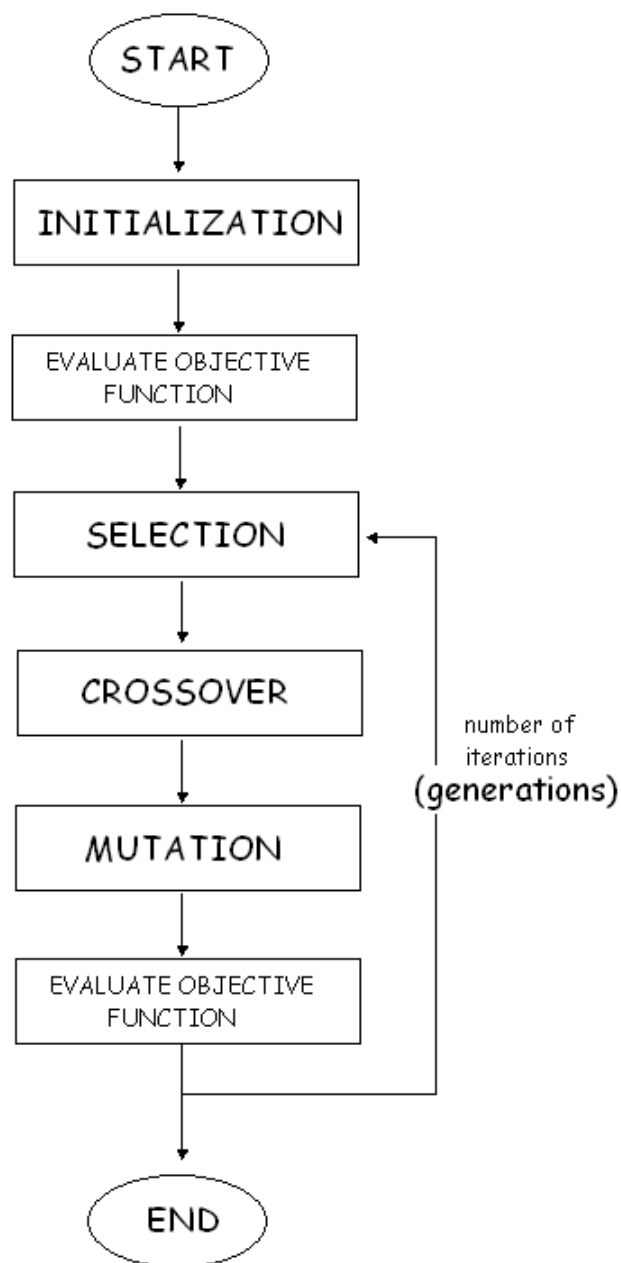


συνάρτηση είναι της μορφής  $f(x,y,z)$ , τότε κάθε πιθανή λύση αυτής (και επομένως και κάθε χρωμόσωμα) θα είναι της μορφής  $[x \ y \ z]$ , ή αν παρασταθεί με δυαδικά ψηφία θα είναι π.χ  $[0 \ 0 \ 1 \mid 1 \ 1 \ 1 \mid 1 \ 1 \ 0]$ . Στην προκειμένη περίπτωση το κάθε γονίδιο παρίσταται με τρία δυαδικά ψηφία, και βεβαίως θα μπορούσε να παρίσταται με οσαδήποτε.

Η συνάρτηση προς βελτιστοποίηση που αναφέρθηκε προηγουμένως καλείται αντικειμενική συνάρτηση (objective function). Ως αντικειμενική συνάρτηση, επομένως, ενός προβλήματος βελτιστοποίησης καλείται η συνάρτηση που αντιπροσωπεύει ένα πρόβλημα και η οποία είναι προς βελτιστοποίηση. Αυτή μπορεί ανάλογα με το πρόβλημα να εκφράζει οικονομικό κόστος, χρονικό κόστος, ποσότητα κάποιου μεγέθους κτλ. Επίσης, μπορεί να παίρνει θετικές και αρνητικές τιμές. Μέσω κάποιας αντιστοιχίας με την αντικειμενική συνάρτηση παράγεται η συνάρτηση προσαρμογής (fitness function). Η συνάρτηση προσαρμογής χρησιμοποιείται, όπως θα παρουσιαστεί στη συνέχεια, στη διαδικασία της επιλογής και παίρνει μόνο μη αρνητικές τιμές.

Επιστρέφοντας στα χρωμοσώματα, ένα σύνολο χρωμοσωμάτων συγκεκριμένου πλήθους καλείται γενεά. Ο γενετικός αλγόριθμος μετά από ένα σύνολο πράξεων παράγει καινούργιες γενεές, με την προοπτική τα καινούργια χρωμοσώματα να είναι καλύτερα (να δίνουν δηλαδή μεγαλύτερη βέλτιστη τιμή) από αυτά των παλαιότερων γενεών. Λαμβάνει χώρα δηλαδή μια διαδικασία παρόμοια με τη φυσική διαδικασία της “επιβίωσης του ισχυρότερου”.

Ειδικότερα, οι τρεις πράξεις (ή διαφορετικά τελεστές) του βασικού γενετικού αλγορίθμου είναι η επιλογή (selection), η διασταύρωση (crossover) και η μετάλλαξη (mutation), οι οποίες αναλύονται εκτενώς στις επόμενες παραγράφους. Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω, παρουσιάζεται ένα διάγραμμα μιας πλήρους εκτέλεσης του βασικού γενετικού αλγορίθμου.



**Σχήμα 3.2.1** Διάγραμμα εκτέλεσης γενετικού αλγορίθμου

Αρχικά, ο γενετικός αλγόριθμος παράγει ένα τυχαίο αριθμό λύσεων και στη συνέχεια γίνεται αποτίμηση των λύσεων αυτών με βάση την αντικειμενική συνάρτηση και τη συνάρτηση προσαρμογής. Στη συνέχεια ακολουθεί ένας βρόγχος επαναλήψεων (γενιές), στον οποίο πραγματοποιούνται οι βασικές λειτουργίες του γενετικού αλγορίθμου, δηλαδή η επιλογή (selection), η διασταύρωση (crossover) και η μετάλλαξη (mutation), αλλά επίσης γίνεται ξανά αποτίμηση της αντικειμενικής συνάρτησης, καθώς είναι απαραίτητη για τη διαδικασία επιλογής της επόμενης επανάληψης. Ο αριθμός των επαναλήψεων είτε είναι καθορισμένος από πριν είτε

εξαρτάται από μια συνθήκη τερματισμού, η οποία μόλις ικανοποιηθεί τερματίζει τον βρόγχο, αλλά ουσιαστικά ολοκληρώνει και τον αλγόριθμο.

### 3.2.2 Επιλογή

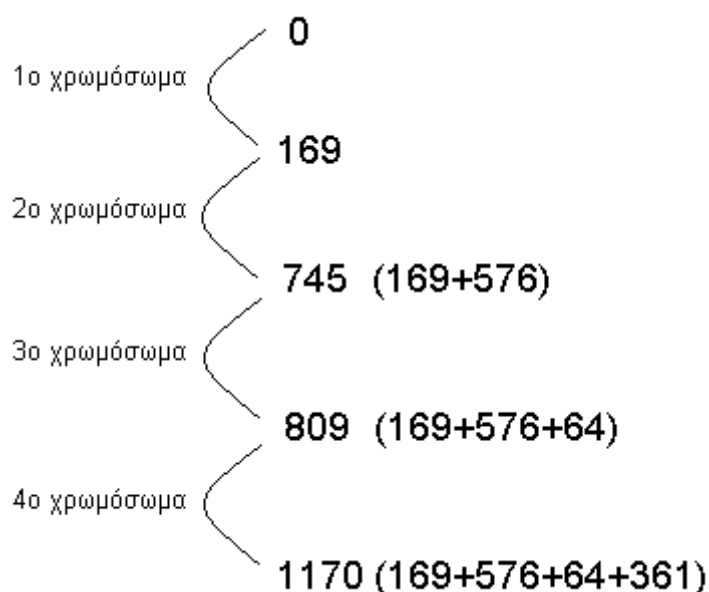
Ο τελεστής της επιλογής, το κριτήριο δηλαδή με βάση το οποίο κάποια χρωμοσώματα θα επιλεγθούν και κάποια θα απορριφθούν από τις επόμενες γενεές, αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα σημεία των γενετικών αλγορίθμων. Πολλοί είναι οι μηχανισμοί που έχουν προταθεί και χρησιμοποιηθεί για την πράξη της επιλογής. Όλοι αυτοί οι μηχανισμοί έχουν ένα κοινό: χρησιμοποιούν τη συνάρτηση προσαρμογής για να “κρίνουν” κατά πόσο ένα χρωμόσωμα είναι ικανό να επιβιώσει. Ένα χρωμόσωμα με μεγαλύτερη τιμή της συνάρτησης προσαρμογής έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να επιβιώσει σε σχέση με αυτό που έχει μικρότερη τιμή.

Ο πιο διαδεδομένος μηχανισμός επιλογής χρωμοσωμάτων είναι ο μηχανισμός του τροχού της ρουλέτας (Roulette Wheel Selection). Στην τεχνική αυτή κάθε χρωμόσωμα του πληθυσμού αντιπροσωπεύει μια σχισμή στον τροχό της τύχης, το μέγεθος της οποίας εξαρτάται από το μέγεθος της τιμής προσαρμοστικότητας του χρωμοσώματος. Για την επιλογή των υποψήφιων προς διασταύρωση χρωμοσωμάτων απαιτείται η περιστροφή του τροχού (ή διαφορετικά η γέννηση τυχαίων αριθμών) τόσες φορές όσες και ο αριθμός των χρωμοσωμάτων. Με άλλα λόγια, οι σειρές με μεγαλύτερο βαθμό προσαρμοστικότητας έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να επιλεγούν. Για παράδειγμα μπορούμε να θεωρήσουμε ένα πληθυσμό τεσσάρων χρωμοσωμάτων όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα (οι τιμές των fitness είναι τυχαίες).

ΧΡΩΜΟΣΩΜΑ	FITNESS ( $f_i$ )
0 1 1 0 0	169
1 1 1 1 1	576
0 0 0 0 0	64
1 0 1 0 1	361

**Πίνακας 3.2.1** Παράδειγμα λειτουργίας τροχού της τύχης

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως παράγονται τέσσερις τυχαίοι αριθμοί. Οι αριθμοί αυτοί θα πρέπει να είναι στο διάστημα από το μηδέν έως και το άθροισμα των τιμών προσαρμοστικότητας των χρωμοσωμάτων, δηλαδή έως το 1170 ( $169+576+64+361$ ). Αν ένας αριθμός βρίσκεται στο διάστημα  $[0,169]$  επιλέγεται το πρώτο χρωμόσωμα, αν βρίσκεται στο διάστημα  $(169,745(=169+576)]$  επιλέγεται το δεύτερο χρωμόσωμα, αν βρίσκεται στο διάστημα  $(745,809(=169+576+64)]$  επιλέγεται το τρίτο χρωμόσωμα, ενώ αν βρίσκεται στο διάστημα  $(809, 1170]$  επιλέγεται το τέταρτο χρωμόσωμα, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



**Σχήμα 3.2.2** Παράδειγμα λειτουργίας του τελεστή της επιλογής

Για παράδειγμα, έστω ότι οι τυχαίοι αριθμοί είναι οι 120, 455, 723 και 1001. Για τον αριθμό 120 θα επιλεγεί το πρώτο χρωμόσωμα (0 1 1 0 0), καθώς ο αριθμός αυτός βρίσκεται στο διάστημα  $[0,169]$ . Για τον αριθμό 455 θα επιλεγεί το δεύτερο χρωμόσωμα (1 1 1 1 1) καθώς ο αριθμός αυτός βρίσκεται στο διάστημα  $(169,745]$ . Για τον αριθμό 723 θα επιλεγεί το δεύτερο χρωμόσωμα (1 1 1 1 1) ξανά, καθώς ο αριθμός αυτός βρίσκεται στο διάστημα  $(169,745]$ . Ενώ για τον αριθμό 1001 θα επιλεγεί το τέταρτο χρωμόσωμα (1 0 1 0 1) καθώς ο αριθμός αυτός βρίσκεται στο διάστημα  $(809,1170]$ . Επιλέχθηκε, δηλαδή, το πρώτο χρωμόσωμα μία φορά, το δεύτερο δύο φορές, το τρίτο καμία φορά και το τέταρτο μία φορά.

Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς υπολογίζοντας τις πιθανότητες επιλογής των χρωμοσωμάτων με τη βοήθεια της σχέσης

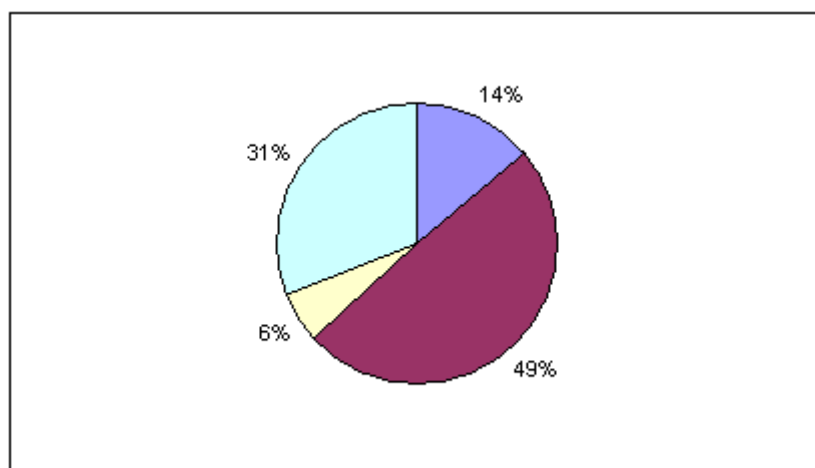
$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^N f_i}, \quad \text{για } N=4 \quad (3.2.1)$$

προκύπτουν οι παρακάτω πιθανότητες επιλογής:

ΧΡΩΜΟΣΩΜΑ	$p_i$
0 1 1 0 0	0.14
1 1 1 1 1	0.49
0 0 0 0 0	0.06
1 0 1 0 1	0.31

**Πίνακας 3.2.2** Πιθανότητες επιλογής χρωμοσωμάτων

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η γέννηση ενός τυχαίου αριθμού για την επιλογή ενός χρωμοσώματος μοιάζει με τη ρίψη της μπίλιας στη ρουλέτα. Όσο μεγαλύτερη επιφάνεια κατέχει ένα χρωμόσωμα στη ρουλέτα τόσο μεγαλύτερη πιθανότητα έχει για να επιλεγθεί και να δώσει απογόνους στην επόμενη γενιά. Το γεγονός αυτό φαίνεται καλύτερα στο παρακάτω σχήμα, που βασίζεται στις πιθανότητες επιλογής του προηγούμενου παραδείγματος.



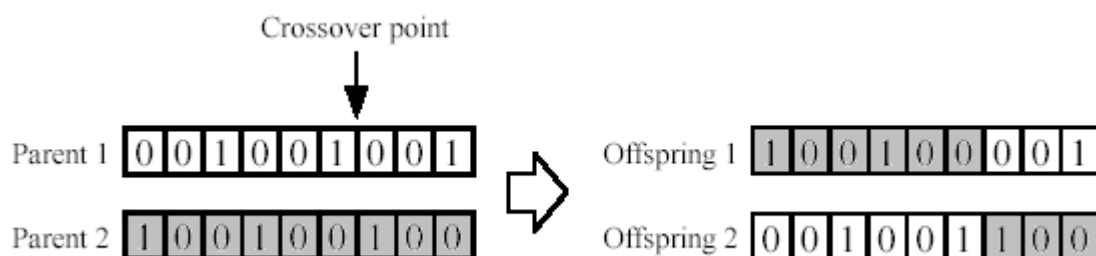
**Σχήμα 3.2.3** Κατανομή πιθανοτήτων επιλογής χρωμοσωμάτων

Αξίζει να γίνει αναφορά και στους υπόλοιπους μηχανισμούς επιλογής οι οποίοι έχουν προταθεί και χρησιμοποιηθεί σε διάφορα προβλήματα μέχρι σήμερα. Μια παραλλαγή της μεθόδου της ρουλέτας αποτελεί το ελιτιστικό μοντέλο (elitist model). Στο μοντέλο αυτό εφαρμόζεται η μέθοδος της ρουλέτας με τη διαφορά ότι διατηρείται ταυτόχρονα το καλύτερο χρωμόσωμα από την προηγούμενη γενιά. Το μοντέλο αυτό προτάθηκε από τον De Jong το 1975. Το 1985 ο Baker πρότεινε μια μέθοδο επιλογής γνωστή ως ταξινομημένο μοντέλο επιλογής (sorted selection model). Στη μέθοδο αυτή γίνεται αρχικά μια ταξινόμηση των χρωμοσωμάτων σύμφωνα με την τιμή της συνάρτησης προσαρμογής. Κατόπιν αντιστοιχίζεται αυθαίρετα στο καλύτερο χρωμόσωμα ο αριθμός συμμετοχής του στην επόμενη γενεά. Για τα υπόλοιπα χρωμοσώματα ο αριθμός συμμετοχής τους στην επόμενη γενεά προκύπτει γραμμικά.

Κλείνοντας, εκτός από τις παραπάνω μεθόδους υπάρχουν και αρκετές άλλες, οι οποίες όμως δεν χρίζουν αναφοράς στην παρούσα εργασία.

### 3.2.3 Διασταύρωση

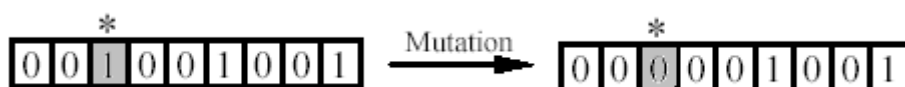
Ο τελεστής της διασταύρωσης λαμβάνει χώρα ανάμεσα σε δύο χρωμοσώματα. Η επιλογή των ζευγαριών, δηλαδή ποιο χρωμόσωμα θα διασταυρωθεί με ποιο, γίνεται τυχαία. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται περισσότερο για τη διασταύρωση είναι η διασταύρωση ενός σημείου. Με άλλα λόγια, επιλέγεται ένα τυχαίο σημείο εντός του χρωμοσώματος και γίνεται ανταλλαγή γονιδίων πέραν του σημείου αυτού. Η πράξη της διασταύρωσης γίνεται εύκολα αντιληπτή στο παρακάτω σχήμα όπου φαίνονται τόσο οι γονείς (parent1, parent2) όσο και οι απόγονοι (offspring1, offspring2).



**Σχήμα 3.2.4** Διασταύρωση ενός σημείου

### 3.2.4 Μετάλλαξη

Η μετάλλαξη είναι η τελευταία ουσιαστικά λειτουργία του γενετικού αλγορίθμου και έχει δευτερεύοντα ρόλο. Ξεκινά με την επιλογή (με τυχαίο τρόπο) ενός χρωμοσώματος από όλο τον πληθυσμό και αυτό που γίνεται είναι ουσιαστικά η αλλαγή της τιμής ενός γονιδίου (το οποίο επίσης έχει επιλεγεί με τυχαίο τρόπο). Για την περίπτωση των δυαδικών γονιδίων γίνεται αλλαγή της τιμής του επιλεγμένου γονιδίου από 0 σε 1 και αντιστρόφως, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.2.5 Μετάλλαξη

### 3.2.5 Κωδικοποίηση Μεταβλητών

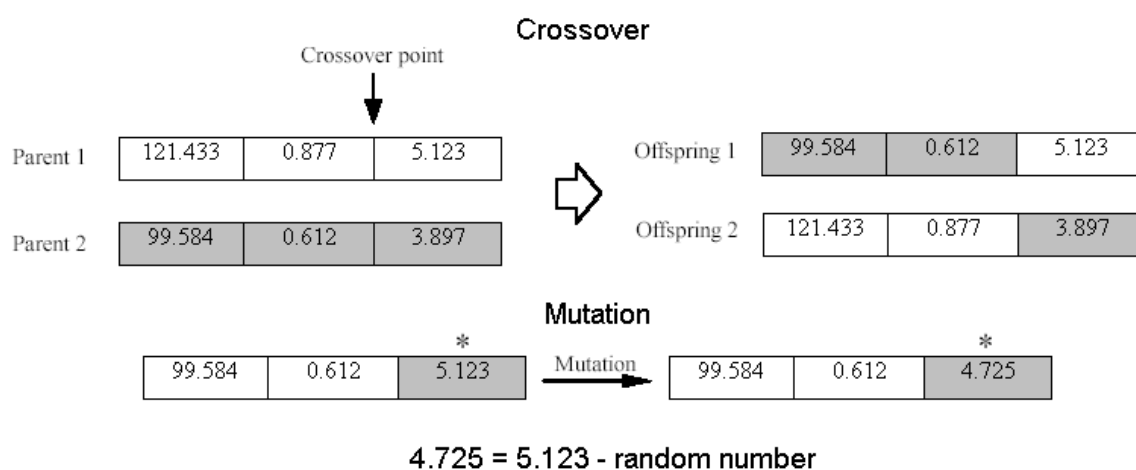
Η κωδικοποίηση των μεταβλητών της συνάρτησης βελτιστοποίησης, που αποτελούν το χρωμόσωμα, αποτελεί μια πολύ κρίσιμη απόφαση κατά τη μοντελοποίηση ενός προβλήματος που εφαρμόζονται οι γενετικοί αλγόριθμοι. Ο πιο διαδεδομένος τρόπος είναι, όπως παρουσιάστηκε προηγουμένως, με τη χρήση ακολουθιών δυαδικών ψηφίων. Μια μεταβλητή δηλαδή παρίσταται με ένα ή περισσότερα δυαδικά ψηφία. Ο τρόπος αυτός έχει χρησιμοποιηθεί με μεγάλη επιτυχία για ένα μεγάλο σύνολο προβλημάτων. Ωστόσο, παρουσιάζει ένα σημαντικό μειονέκτημα. Αν οι μεταβλητές του προβλήματος παίρνουν τιμές μέσα σε ένα αρκετά μεγάλο εύρος τότε χρειάζονται πολλά bits κωδικοποίησης. Τα πράγματα γίνονται δυσκολότερα όταν αυξάνεται ταυτόχρονα και ο αριθμός των μεταβλητών του προβλήματος. Τότε τα χρωμοσώματα που δημιουργούνται είναι μεγάλου μήκους και το διάστημα αναζήτησης (search space) του αλγορίθμου πολύ μεγάλο. Σε τέτοιες περιπτώσεις η απόδοση των γενετικών αλγορίθμων είναι πολύ χαμηλή. Επίσης, ένα σημαντικό πρόβλημα εμφανίζεται στις περιπτώσεις που το πρόβλημα αφορά πραγματικές μεταβλητές. Η κωδικοποίηση πραγματικών μεταβλητών είναι δύσκολη και οδηγεί σε ουσιαστική μείωση της ακρίβειας της μεθόδου.

Για τους παραπάνω λόγους, σε ένα ευρύ σύνολο προβλημάτων χρησιμοποιείται η αναπαράσταση των μεταβλητών με πραγματικούς αριθμούς.

Δηλαδή, το κάθε χρωμόσωμα είναι της μορφής  $[a_1 \ a_2 \ a_3 \ \dots]$ , όπου  $a_i$  είναι πραγματικοί αριθμοί που παίρνουν τιμές μέσα σε ένα συγκεκριμένο εύρος  $(\underline{a_i}, \overline{a_i})$ .

Το  $\underline{a_i}$  είναι το κάτω φράγμα και το  $\overline{a_i}$  το άνω φράγμα αυτού του εύρους.

Από τους τελεστές του γενετικού αλγορίθμου αυτός που υπόκειται σε τροποποίηση είναι ο τελεστής της μετάλλαξης. Στην περίπτωση λοιπόν της αναπαράστασης με πραγματικούς αριθμούς, το γονίδιο που επιλέγεται προς μετάλλαξη μεταβάλλει την τιμή του με την πρόσθεση ή την αφαίρεση ενός τυχαίου αριθμού με τέτοιο τρόπο, ώστε η τιμή του να διατηρείται στο επιθυμητό εύρος. Τόσο ο τελεστής της μετάλλαξης όσο και της διασταύρωσης, για την περίπτωση της αναπαράστασης με πραγματικούς αριθμούς, φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



**Σχήμα 3.2.6** Διασταύρωση και Μετάλλαξη για αναπαράσταση με πραγματικούς αριθμούς

### 3.2.6 Πιθανότητες Διασταύρωσης και Μετάλλαξης

Στο σημείο αυτό αξίζει να τονιστεί πως οι τελεστές διασταύρωσης και μετάλλαξης δεν λαμβάνουν χώρα πάντα, αλλά εξαρτώνται από τις πιθανότητες διασταύρωσης και μετάλλαξης. Τόσο στον τελεστή διασταύρωσης όσο και στον τελεστή μετάλλαξης επιλέγονται τυχαίοι αριθμοί στο διάστημα  $[0,1]$  και συγκρίνονται με μια καθορισμένη από πριν πιθανότητα διασταύρωσης και μετάλλαξης αντίστοιχα.



Πιο συγκεκριμένα, στον τελεστή διασταύρωσης για κάθε ζεύγος γονέων επιλέγεται ένας τυχαίος αριθμός. Αν ο αριθμός αυτός είναι μεγαλύτερος από την πιθανότητα διασταύρωσης ο τελεστής διασταύρωσης πραγματοποιείται, διαφορετικά οι απόγονοι είναι οι ίδιοι οι γονείς.

Στον τελεστή μετάλλαξης για κάθε χρωμόσωμα που έχει επιλεγεί να μεταλλαχθεί εκλέγεται ένας τυχαίος αριθμός. Αν ο αριθμός αυτός είναι μικρότερος από την πιθανότητα μετάλλαξης, η μετάλλαξη πραγματοποιείται, διαφορετικά το χρωμόσωμα παραμένει ως έχει.

Η επιλογή των πιθανοτήτων διασταύρωσης και μετάλλαξης διαφέρει από πρόβλημα σε πρόβλημα. Ωστόσο, στη βιβλιογραφία υπάρχουν ενδεικτικές τιμές οι οποίες συνήθως εξαρτώνται από τους πληθυσμούς:

- για μικρούς πληθυσμούς (10-50 χρωμοσώματα):  $p_c=90\%$  και  $p_m=1\%$
- για μεγάλους πληθυσμούς (>50 χρωμοσώματα):  $p_c=60\%$  και  $p_m=0.1\%$

### **3.3 Ο Βασικός Γενετικός Αλγόριθμος για Προβλήματα Πολλαπλής Βελτιστοποίησης**

Στην παράγραφο αυτή περιγράφεται μια επέκταση του βασικού γενετικού αλγόριθμου στην περίπτωση των προβλημάτων πολλαπλής βελτιστοποίησης (multi-objective optimization problems). Το βασικό σχήμα του γενετικού αλγορίθμου για προβλήματα πολλαπλής βελτιστοποίησης είναι παρόμοιο με αυτό για προβλήματα απλής βελτιστοποίησης, με διαφορές στη διαδικασία της αποτίμησης της αντικειμενικής συνάρτησης και κατ' επέκταση της συνάρτησης προσαρμογής.

#### **3.3.1 Ο Γενετικός Αλγόριθμος Πολλών Αντικειμενικών Συναρτήσεων**

Ο στόχος του γενετικού αλγόριθμου πολλών αντικειμενικών συναρτήσεων (multi-objective genetic algorithm) δεν είναι να καθορίσει μία τελική λύση (κατά το δυνατόν βέλτιστη) του προβλήματος, αλλά να βρει όλες τις μη κυριαρχούμενες λύσεις (non-dominated solutions) ενός προβλήματος πολλαπλής βελτιστοποίησης. Από τη στιγμή που είναι δύσκολο να επιλεγεί μία και μόνο λύση χωρίς την επίδραση του αποφασίζοντα (decision maker), η γενική προσέγγιση είναι το σύνολο των μη

κυριαρχούμενων λύσεων να παρουσιάζονται στον αποφασίζοντα, ο οποίος και επιλέγει αυτή που του ταιριάζει περισσότερο και λύνει το πρόβλημά του.

Έστω το πρόβλημα μεγιστοποίησης  $n$  αντικειμενικών συναρτήσεων

$$\text{Maximize } f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x) \quad (3.3.1)$$

όπου  $x$  το διάνυσμα που πρέπει να καθοριστεί, και  $f_1(\cdot), f_2(\cdot), \dots, f_n(\cdot)$  οι  $n$  αντικειμενικές συναρτήσεις που πρέπει να μεγιστοποιηθούν. Μια λύση  $x$  κυριαρχείται από κάποια άλλη λύση  $y$ , όταν η λύση  $y$  είναι καλύτερη της  $x$  σε όλες τις αντικειμενικές συναρτήσεις.

Η παραπάνω διατύπωση εκφράζεται με τις εξής ανισότητες

$$\forall i : f_i(x) \leq f_i(y) \quad \text{and} \quad \exists j : f_j(x) < f_j(y) \quad (3.3.2)$$

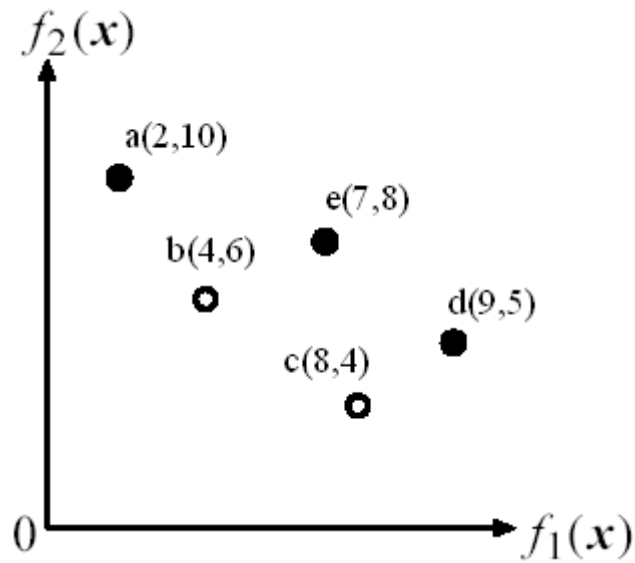
Για παράδειγμα, έστω το πρόβλημα μεγιστοποίησης δύο αντικειμενικών συναρτήσεων

$$\text{Maximize } f_1(x) \quad \text{and} \quad f_2(x) \quad (3.3.3)$$

Αν θεωρηθεί ότι οι τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων για έναν αριθμό πέντε πιθανών λύσεων είναι

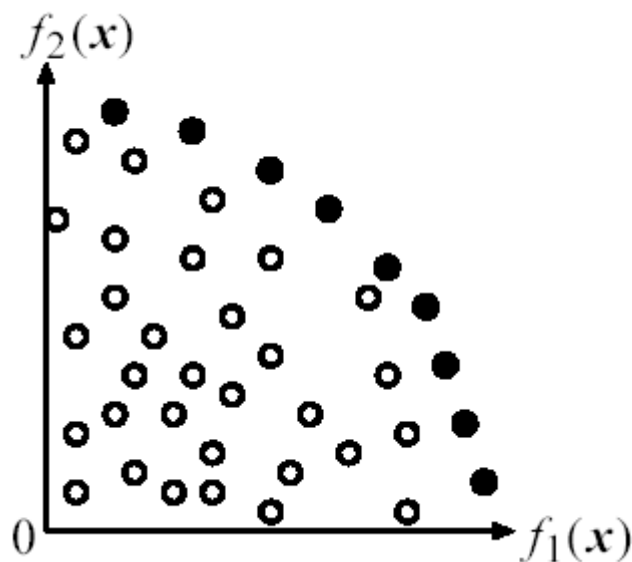
1. a:  $f_1(a) = 2, f_2(a) = 10$
2. b:  $f_1(b) = 4, f_2(b) = 6$
3. c:  $f_1(c) = 8, f_2(c) = 4$
4. d:  $f_1(d) = 9, f_2(d) = 5$
5. e:  $f_1(e) = 7, f_2(e) = 8$

Οι λύσεις που κυριαρχούνται είναι οι b και c, καθώς υπάρχει μία τουλάχιστον λύση για καθεμία που είναι καλύτερή της και στις δύο αντικειμενικές συναρτήσεις. Πιο συγκεκριμένα, η λύση b κυριαρχείται από την e, καθώς  $4 < 7$  και  $6 < 8$ . Όσον αφορά τη λύση c, κυριαρχείται από τη λύση d, καθώς  $8 < 9$  και  $4 < 5$ . Τα παραπάνω μπορούν να φανούν και στο παρακάτω σχήμα.



**Σχήμα 3.3.1** Παράδειγμα κυριαρχίας

Όπου οι ανοιχτοί κύκλοι εκφράζουν τις κυριαρχούμενες λύσεις και οι κλειστοί τις μη κυριαρχούμενες. Μια μορφή του παραπάνω παραδείγματος με μεγαλύτερο αριθμό λύσεων φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, όπου και πάλι οι ανοιχτοί κύκλοι εκφράζουν τις κυριαρχούμενες λύσεις και οι κλειστοί τις μη κυριαρχούμενες.



**Σχήμα 3.3.2** Κυριαρχούμενες (ανοιχτοί κύκλοι) και μη κυριαρχούμενες (κλειστοί κύκλοι) λύσεις

### 3.3.2 Αποτίμηση των Αντικειμενικών Συναρτήσεων

Όταν εφαρμόζονται οι γενετικοί αλγόριθμοι σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης  $n$  αντικειμενικών συναρτήσεων, πρέπει να αποτιμηθούν οι αντικειμενικές αυτές συναρτήσεις για κάθε χρωμόσωμα, δηλαδή για κάθε πιθανή λύση. Είναι αναγκαίος ο υπολογισμός μιας συνολικής αντικειμενικής συνάρτησης από την οποία θα προέλθει και η συνάρτηση προσαρμογής, που είναι απαραίτητη στην λειτουργία του τελεστή της επιλογής. Ένας τρόπος να μετασχηματιστούν οι  $n$  αντικειμενικές συναρτήσεις σε μια συνολική αντικειμενική συνάρτηση είναι να συνδυασθούν σε μια μία κλιμακωτή συνάρτηση όπως φαίνεται παρακάτω

$$f(x) = w_1 f_1(x) + w_2 f_2(x) + \dots + w_n f_n(x) \quad (3.3.4)$$

όπου  $f(x)$  η συνολική αντικειμενική συνάρτηση της πιθανής λύσης  $x$ , και  $w_1, \dots, w_n$  μη αρνητικά βάρη για τις  $n$  αντικειμενικές συναρτήσεις. Στην περίπτωση που κάποιες από τις αντικειμενικές συναρτήσεις είναι προς ελαχιστοποίηση, στη σχέση (3.3.4) το πρόσημο του γινομένου του βάρους με την αντίστοιχη αντικειμενική συνάρτηση είναι αρνητικό. Δηλαδή, αν το πρόβλημα αφορά ελαχιστοποίηση της συνάρτησης  $f_1(x)$  και μεγιστοποίηση των υπολοίπων συναρτήσεων, η συνολική αντικειμενική συνάρτηση θα ήταν της μορφής

$$f(x) = -w_1 f_1(x) + w_2 f_2(x) + \dots + w_n f_n(x) \quad (3.3.5)$$

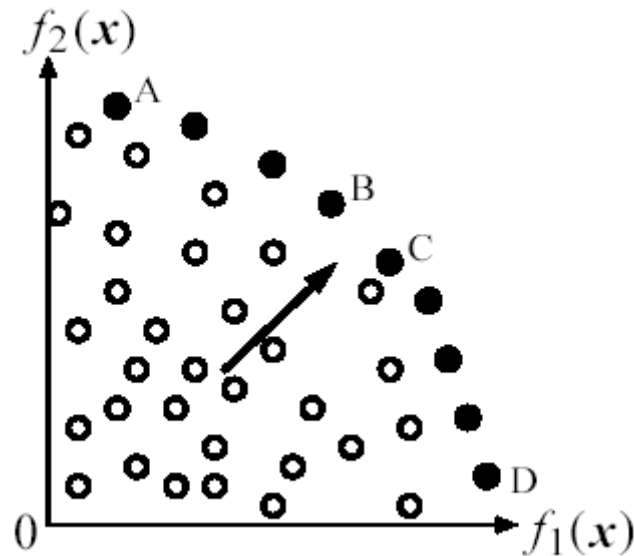
Επιστρέφοντας στα βάρη της κλιμακωτής συνάρτησης, θα πρέπει πέρα από μη αρνητικά το άθροισμά τους να είναι ίσο με τη μονάδα. Επομένως, συνολικά για τα βάρη θα πρέπει να ισχύει

$$w_i \geq 0 \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, n \quad (3.3.6)$$

$$w_1 + w_2 + \dots + w_n = 1 \quad (3.3.7)$$

Αν χρησιμοποιηθούν σταθερά βάρη, και πιο συγκεκριμένα  $w_1 = w_2 = 0.5$ , για την περίπτωση του προβλήματος μεγιστοποίησης δύο αντικειμενικών συναρτήσεων της

σχέσης (3.3.3), η κατεύθυνση αναζήτησης για τον τελεστή της επιλογής από το γενετικό αλγόριθμο είναι καθορισμένη όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

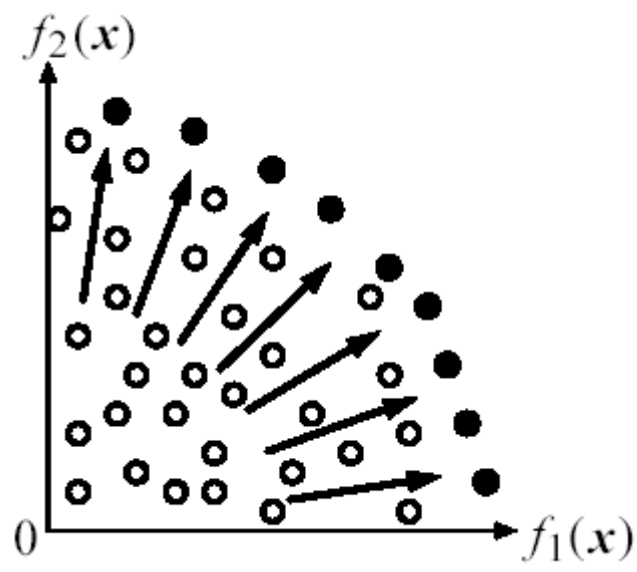


**Σχήμα 3.3.3** Η κατεύθυνση αναζήτησης για σταθερά βάρη  $w_1 = w_2 = 0.5$

Μπορεί εύκολα να διαπιστώσει κανείς ότι ο γενετικός αλγόριθμος μπορεί να βρει τις λύσεις B και C, αλλά είναι δύσκολο να βρει τις λύσεις A και D. Με άλλα λόγια, όταν η κατεύθυνση αναζήτησης είναι καθορισμένη δεν είναι εύκολο να επιτευχθεί μια ποικιλία μη κυριαρχούμενων λύσεων. Για να βρεθεί μια ποικιλία μη κυριαρχούμενων λύσεων απαιτούνται ποικίλες κατευθύνσεις αναζήτησης, το οποίο μπορεί να επιτευχθεί με τον καθορισμό τυχαίων βαρών. Οι τιμές των βαρών στην περίπτωση αυτή καθορίζονται ως ακολούθως

$$w_i = \text{random}_i / (\text{random}_1 + \dots + \text{random}_n), \quad i = 1, \dots, n \quad (3.3.8)$$

όπου  $\text{random}_1, \dots, \text{random}_n$  μη αρνητικοί τυχαίοι πραγματικοί αριθμοί. Στην περίπτωση αυτή, οι ποικίλες κατευθύνσεις αναζήτησης του γενετικού αλγορίθμου θα είναι όπως στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.3.4 Ποικίλες κατευθύνσεις αναζήτησης

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>

### Εφαρμογή Γενετικών Αλγορίθμων στη Σύνθεση Γραμμικών Στοιχειοκεραιών

#### 4.1 Εισαγωγή

Το ζητούμενο είναι, όπως αναφέρθηκε και στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, ο καθορισμός της φάσης κάθε στοιχείου ώστε σε δεδομένη κατεύθυνση να επιτευχθεί η μέγιστη ακτινοβολία της στοιχειοκεραίας. Ουσιαστικά λοιπόν ο γενετικός αλγόριθμος καλείται να αναζητήσει τις ακριβείς τιμές της φάσης κάθε στοιχείου της στοιχειοκεραίας για τη βελτιστοποίηση του παράγοντα διάταξής της ως προς την εκάστοτε επιθυμητή γωνία.

Η στοιχειοκεραία επιλέχθηκε να τοποθετηθεί στον άξονα z και με τη βοήθεια της σχέσης (2.3.6), η σχέση (2.3.17) γίνεται

$$S(\theta) = \sum_{m=0}^{M-1} \exp[j(mkd \cos \theta + \delta_m)] \quad (4.1.1)$$

Όσον αφορά το γενετικό αλγόριθμο, προφανώς η αντικειμενική συνάρτηση είναι το μέτρο του παράγοντα διάταξης της στοιχειοκεραίας, όπου  $\theta$  είναι η εκάστοτε επιθυμητή γωνία στροφής του κύριου λοβού ως προς τον άξονα της στοιχειοκεραίας, ενώ η συνάρτηση προσαρμογής επιλέχθηκε να είναι το πηλίκο της εκάστοτε αντικειμενικής συνάρτησης ως προς τη μέγιστη τιμή των αντικειμενικών συναρτήσεων του πληθυσμού. Οι τιμές των φάσεων, που αποτελούν τα γονίδια των χρωμοσωμάτων, δεν κωδικοποιήθηκαν, αλλά χρησιμοποιήθηκαν οι πραγματικές τιμές τους με πεδίο ορισμού από 0° έως 360°. Στο πλήθος των εκτελέσεων του γενετικού αλγορίθμου επιλέχθηκαν ως πιθανότητες διασταύρωσης και μετάλλαξης οι  $p_c=60\%$  και  $p_m=0.1\%$  αντίστοιχα, καθώς χρησιμοποιήθηκαν πληθυσμοί μεγαλύτεροι των 100 χρωμοσωμάτων, ενώ ο αλγόριθμος επιλέχθηκε να τερματίζει όταν η αντικειμενική συνάρτηση (παράγοντας διάταξης) φτάνει σε ένα μεγάλο ποσοστό της μέγιστης τιμής της (> 90-95%).

## 4.2 Εφαρμογή για Γραμμικές Στοιχειοκεραίες Διαφορετικού Αριθμού Στοιχείων

### 4.2.1 Γενικά

Η εφαρμογή του γενετικού αλγόριθμου γίνεται για στοιχειοκεραίες 4, 8, 16 και 32 στοιχείων για διάφορες επιθυμητές τιμές της γωνίας  $\theta$ . Θεωρείται πως η απόσταση  $d$  μεταξύ των στοιχείων είναι σταθερή και ίση με  $\lambda/2$ , και σε συνδυασμό με το γεγονός ότι  $k=2\pi/\lambda$ , η σχέση (4.1.1) γίνεται

$$S(\theta) = \sum_{m=0}^{M-1} \exp[j(m\pi \cos \theta + \delta_m)] \quad (4.2.1)$$

### 4.2.2 Εφαρμογή για Στοιχειοκεραία 4 στοιχείων

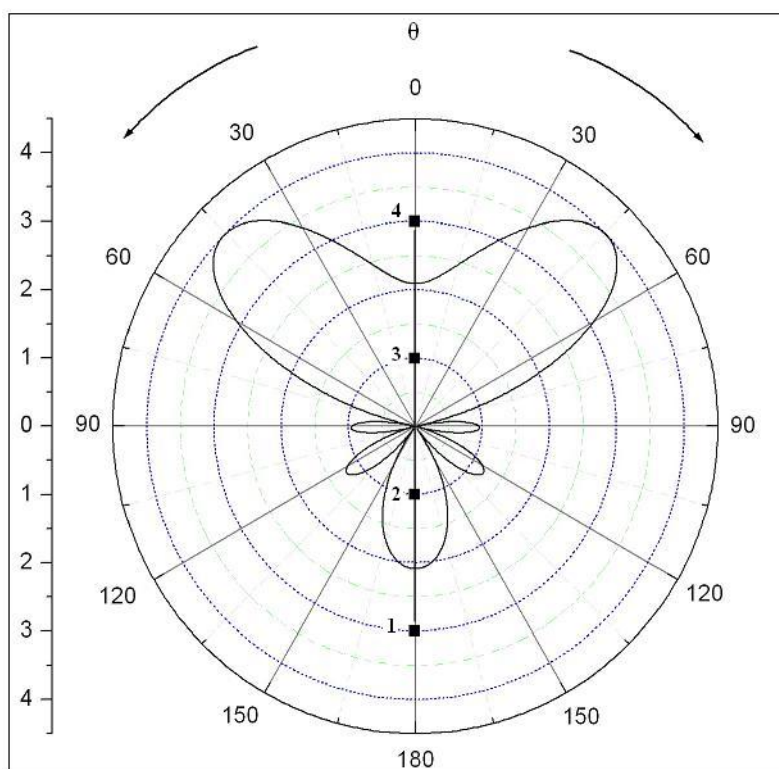
Ο γενετικός αλγόριθμος εφαρμόστηκε για γωνίες  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  και  $120^\circ$ . Για γωνία  $45^\circ$  οι προτεινόμενες από τον αλγόριθμο φάσεις των στοιχείων είναι

Στοιχείο	Φάση
1	$353.44^\circ$
2	$223.81^\circ$
3	$105.21^\circ$
4	$332.09^\circ$

**Πίνακας 4.2.1** Φάσεις γραμμικής στοιχειοκεραίας 4 στοιχείων με  $d=\lambda/2$  και  $\theta=45^\circ$

Η τιμή του παράγοντα διάταξης για τις τιμές αυτές των φάσεων είναι 3.993789. Φτάνει δηλαδή το 99.84% της μέγιστης τιμής του, καθώς όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.3.2 η γεωμετρική κατευθυντικότητα (που αποτελεί και τη μέγιστη τιμή του παράγοντα διάταξης) είναι ίση με το πλήθος των στοιχείων της στοιχειοκεραίας, δηλαδή στην προκειμένη περίπτωση 4. Το πολικό διάγραμμα ως προς  $\theta$  του παράγοντα διάταξης για τις συγκεκριμένες φάσεις φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.





**Σχήμα 4.2.1** Παράγοντας διάταξης γραμμικής στοιχειοκεραίας 4 στοιχείων με  $d=\lambda/2$  και επιθυμητή γωνία ακτινοβολίας  $\theta=45^\circ$

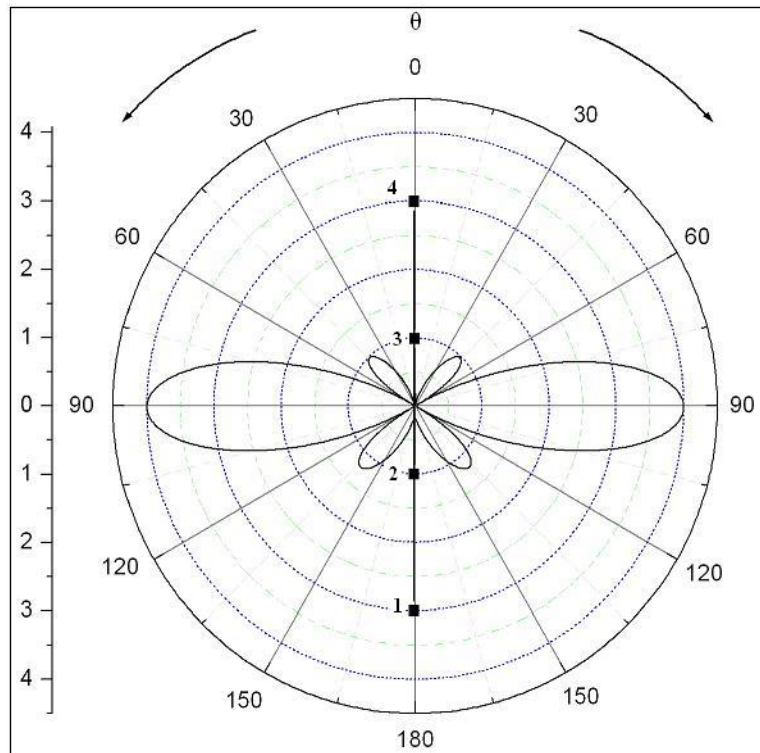
Με τη χρήση επομένως του γενετικού αλγορίθμου επιτεύχθηκε η στροφή του κύριου λοβού ακτινοβολίας προς την επιθυμητή κατεύθυνση αλλά και η μεγιστοποίηση της ακτινοβολίας προς την κατεύθυνση αυτή.

Για γωνία  $90^\circ$  οι προτεινόμενες από τον αλγόριθμο φάσεις των στοιχείων είναι

Στοιχείο	Φάση
1	$232.17^\circ$
2	$238.34^\circ$
3	$232.40^\circ$
4	$236.43^\circ$

**Πίνακας 4.2.2** Φάσεις γραμμικής στοιχειοκεραίας 4 στοιχείων με  $d=\lambda/2$  και  $\theta=90^\circ$

Η τιμή του παράγοντα διάταξης για τις τιμές αυτές των φάσεων είναι 3.995752. Φτάνει δηλαδή το 99.89% της μέγιστης τιμής του. Το πολικό διάγραμμα ως προς  $\theta$  του παράγοντα διάταξης για τις συγκεκριμένες φάσεις φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



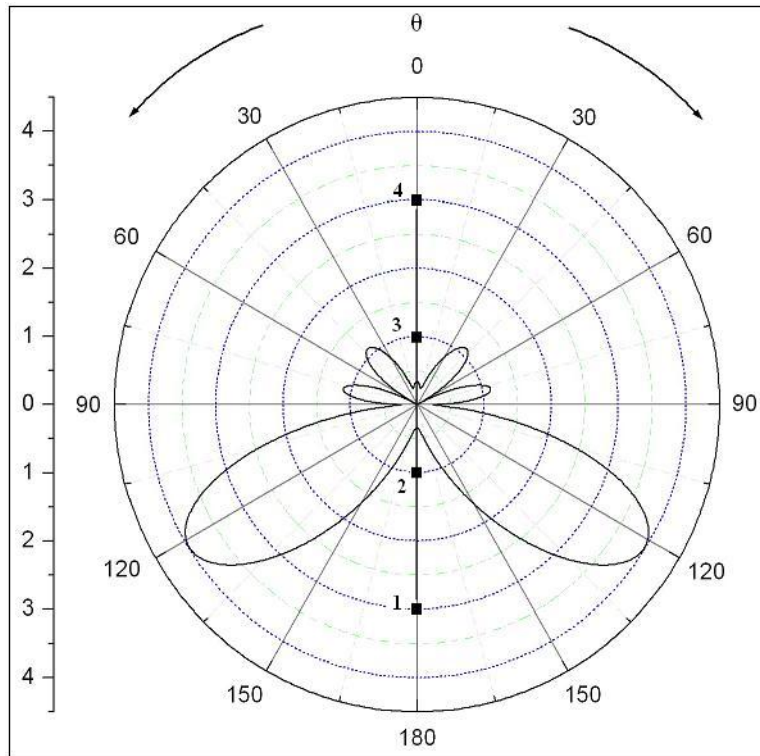
**Σχήμα 4.2.2** Παράγοντας διάταξης γραμμικής στοιχειοκεραίας 4 στοιχείων με  $d=\lambda/2$  και επιθυμητή γωνία ακτινοβολίας  $\theta=90^\circ$

Για γωνία  $120^\circ$  οι προτεινόμενες από τον αλγόριθμο φάσεις των στοιχείων είναι

Στοιχείο	Φάση
1	$141.68^\circ$
2	$226.41^\circ$
3	$321.82^\circ$
4	$65.89^\circ$

**Πίνακας 4.2.3** Φάσεις γραμμικής στοιχειοκεραίας 4 στοιχείων με  $d=\lambda/2$  και  $\theta=120^\circ$

Η τιμή του παράγοντα διάταξης για τις τιμές αυτές των φάσεων είναι 3.968264. Φτάνει δηλαδή το 99.21% της μέγιστης τιμής του. Το διάγραμμα του παράγοντα διάταξης φαίνεται παρακάτω.



**Σχήμα 4.2.3** Παράγοντας διάταξης γραμμικής στοιχειοκεραίας 4 στοιχείων με  $d=\lambda/2$  και επιθυμητή γωνία ακτινοβολίας  $\theta=120^\circ$

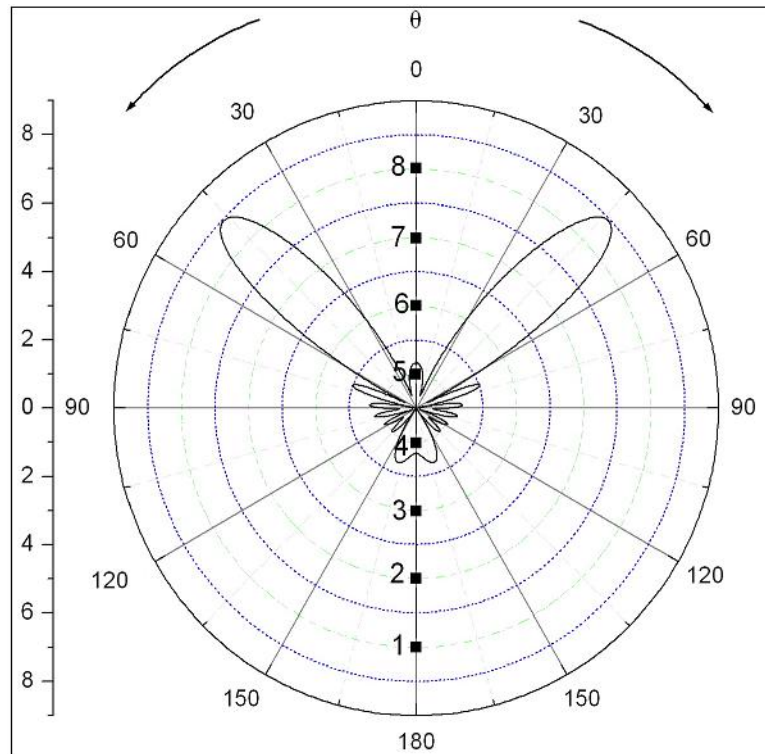
#### 4.2.3 Εφαρμογή για Στοιχειοκεραία 8 στοιχείων

Ο γενετικός αλγόριθμος εφαρμόστηκε για γωνίες  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  και  $120^\circ$ . Για γωνία  $45^\circ$  οι προτεινόμενες από τον αλγόριθμο φάσεις των στοιχείων είναι

Στοιχείο	Φάση
1	$249.44^\circ$
2	$144.79^\circ$
3	$7.26^\circ$
4	$255.88^\circ$
5	$129.77^\circ$
6	$353.48^\circ$
7	$233.24^\circ$
8	$105.74^\circ$

**Πίνακας 4.2.4** Φάσεις γραμμικής στοιχειοκεραίας 8 στοιχείων με  $d=\lambda/2$  και  $\theta=45^\circ$

Η τιμή του παράγοντα διάταξης για τις τιμές αυτές των φάσεων είναι 7.890613. Φτάνει δηλαδή το 98.63% της μέγιστης τιμής του. Το διάγραμμα του παράγοντα διάταξης είναι το ακόλουθο



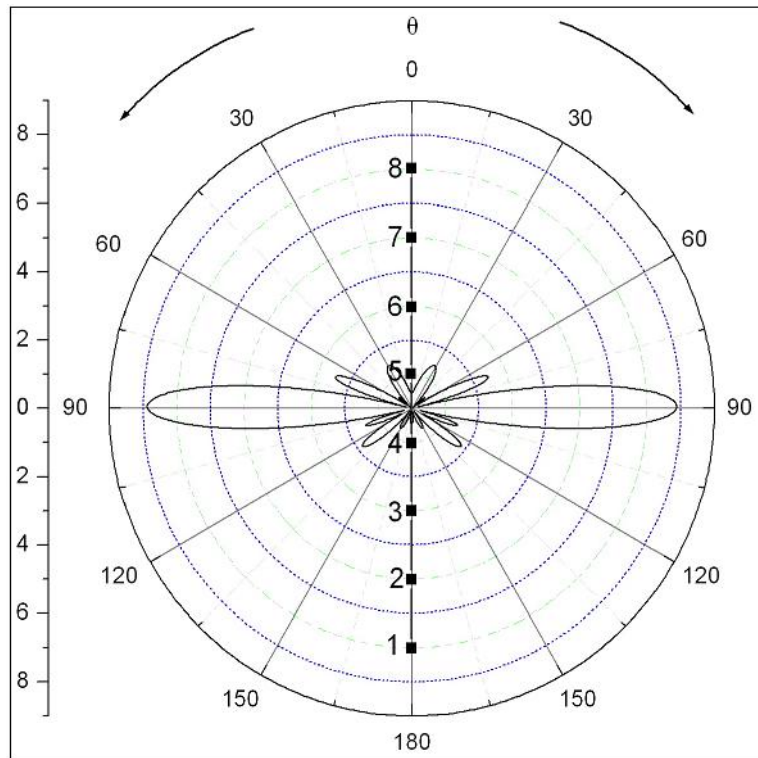
**Σχήμα 4.2.4** Παράγοντας διάταξης γραμμικής στοιχειοκεραίας 8 στοιχείων με  $d=\lambda/2$  και επιθυμητή γωνία ακτινοβολίας  $\theta=45^\circ$

Για γωνία  $90^\circ$  οι προτεινόμενες από τον αλγόριθμο φάσεις των στοιχείων είναι

Στοιχείο	Φάση
1	$34.21^\circ$
2	$32.74^\circ$
3	$22.40^\circ$
4	$16.78^\circ$
5	$51.48^\circ$
6	$28.84^\circ$
7	$16.95^\circ$
8	$21.14^\circ$

**Πίνακας 4.2.5** Φάσεις γραμμικής στοιχειοκεραίας 8 στοιχείων με  $d=\lambda/2$  και  $\theta=90^\circ$

Η τιμή του παράγοντα διάταξης για τις τιμές αυτές των φάσεων είναι 7.858187. Φτάνει δηλαδή το 98.23% της μέγιστης τιμής του. Το διάγραμμα του παράγοντα διάταξης είναι το ακόλουθο



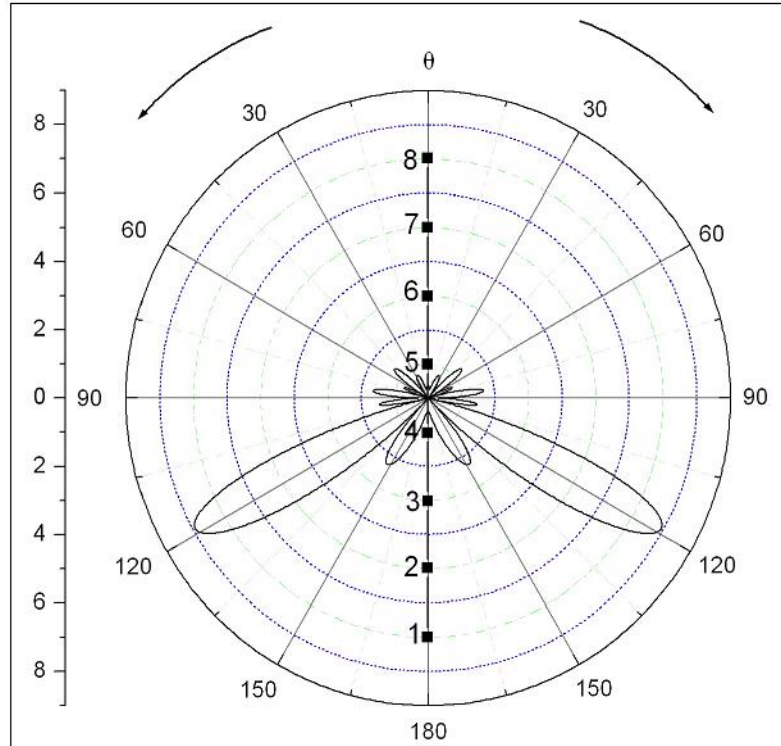
**Σχήμα 4.2.5** Παράγοντας διάταξης γραμμικής στοιχειοκεραίας 8 στοιχείων με  $d=\lambda/2$  και επιθυμητή γωνία ακτινοβολίας  $\theta=90^\circ$

Για γωνία  $120^\circ$  οι προτεινόμενες από τον αλγόριθμο φάσεις των στοιχείων είναι

Στοιχείο	Φάση
1	$63.63^\circ$
2	$156.35^\circ$
3	$248.51^\circ$
4	$338.78^\circ$
5	$39.65^\circ$
6	$139.57^\circ$
7	$235.29^\circ$
8	$314.76^\circ$

**Πίνακας 4.2.6** Φάσεις γραμμικής στοιχειοκεραίας 8 στοιχείων με  $d=\lambda/2$  και  $\theta=120^\circ$

Η τιμή του παράγοντα διάταξης για τις τιμές αυτές των φάσεων είναι 7.861775. Φτάνει δηλαδή το 98.27% της μέγιστης τιμής του. Το διάγραμμα του παράγοντα διάταξης είναι το ακόλουθο



**Σχήμα 4.2.6** Παράγοντας διάταξης γραμμικής στοιχειοκεραίας 8 στοιχείων με  $d=\lambda/2$  και επιθυμητή γωνία ακτινοβολίας  $\theta=120^\circ$



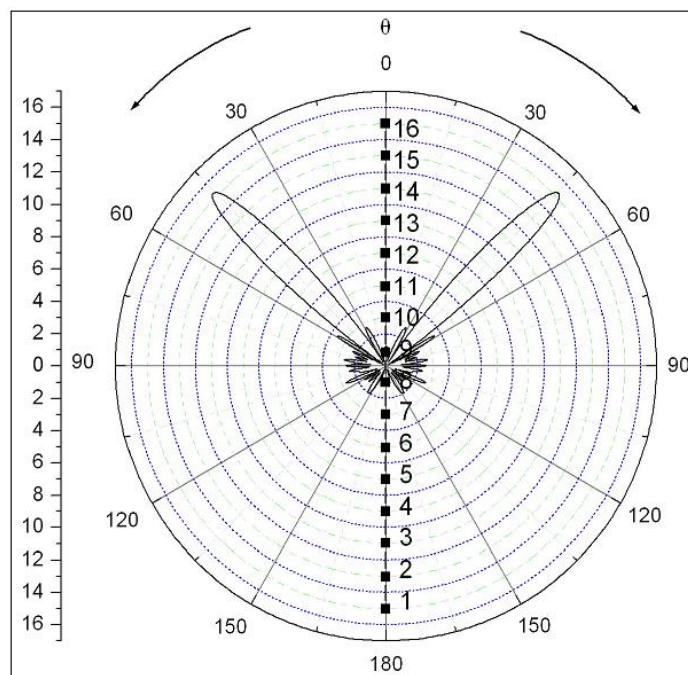
#### 4.2.4 Εφαρμογή για Στοιχειοκεραία 16 στοιχείων

Ο γενετικός αλγόριθμος εφαρμόστηκε για γωνίες  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  και  $120^\circ$ . Για γωνία  $45^\circ$  οι προτεινόμενες από τον αλγόριθμο φάσεις των στοιχείων είναι

Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση
1	$191.28^\circ$	9	$285.09^\circ$
2	$69.86^\circ$	10	$142.01^\circ$
3	$314.68^\circ$	11	$0.34^\circ$
4	$179.51^\circ$	12	$235.32^\circ$
5	$69.81^\circ$	13	$132.26^\circ$
6	$274.46^\circ$	14	$17.45^\circ$
7	$157.43^\circ$	15	$180.92^\circ$
8	$29.04^\circ$	16	$132.75^\circ$

**Πίνακας 4.2.7** Φάσεις γραμμικής στοιχειοκεραίας 16 στοιχείων με  $d=\lambda/2$  και  $\theta=45^\circ$

Η τιμή του παράγοντα διάταξης για τις τιμές αυτές των φάσεων είναι 15.203155. Φτάνει δηλαδή το 95.02% της μέγιστης τιμής του. Το διάγραμμα του παράγοντα διάταξης είναι το ακόλουθο



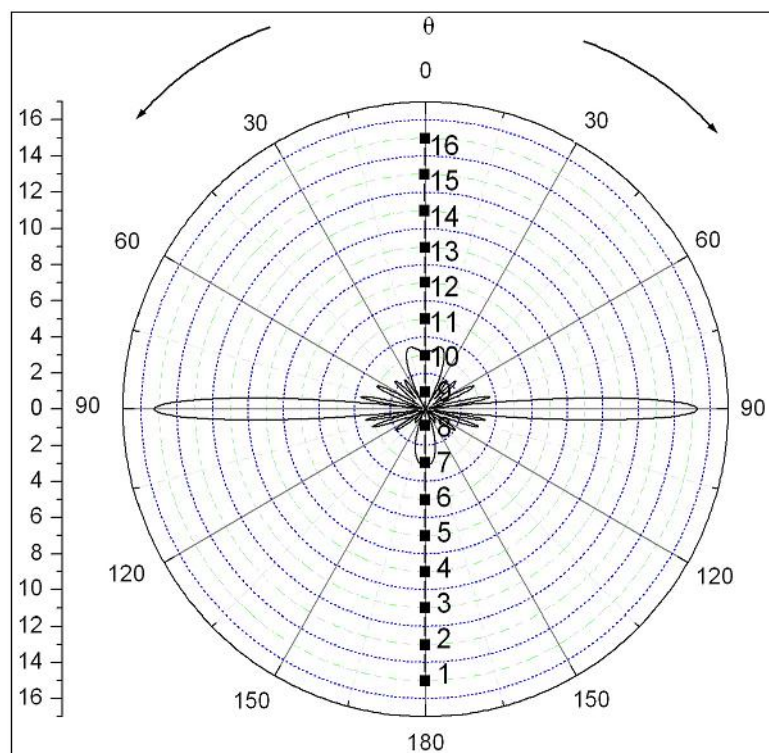
**Σχήμα 4.2.7** Παράγοντας διάταξης γραμμικής στοιχειοκεραίας 16 στοιχείων με  $d=\lambda/2$  και επιθυμητή γωνία ακτινοβολίας  $\theta=45^\circ$

Για γωνία  $90^\circ$  οι προτεινόμενες από τον αλγόριθμο φάσεις των στοιχείων είναι

Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση
1	$352.01^\circ$	9	$2.78^\circ$
2	$322.33^\circ$	10	$336.91^\circ$
3	$353.59^\circ$	11	$354.18^\circ$
4	$317.51^\circ$	12	$320.51^\circ$
5	$357.93^\circ$	13	$338.24^\circ$
6	$341.62^\circ$	14	$313.46^\circ$
7	$321.47^\circ$	15	$347.15^\circ$
8	$302.47^\circ$	16	$346.95^\circ$

**Πίνακας 4.2.8** Φάσεις γραμμικής στοιχειοκεραίας 16 στοιχείων με  $d=\lambda/2$  και  $\theta=90^\circ$

Η τιμή του παράγοντα διάταξης για τις τιμές αυτές των φάσεων είναι 15.253084. Φτάνει δηλαδή το 95.33% της μέγιστης τιμής του.



**Σχήμα 4.2.8** Παράγοντας διάταξης γραμμικής στοιχειοκεραίας 16 στοιχείων με  $d=\lambda/2$  και επιθυμητή γωνία ακτινοβολίας  $\theta=90^\circ$

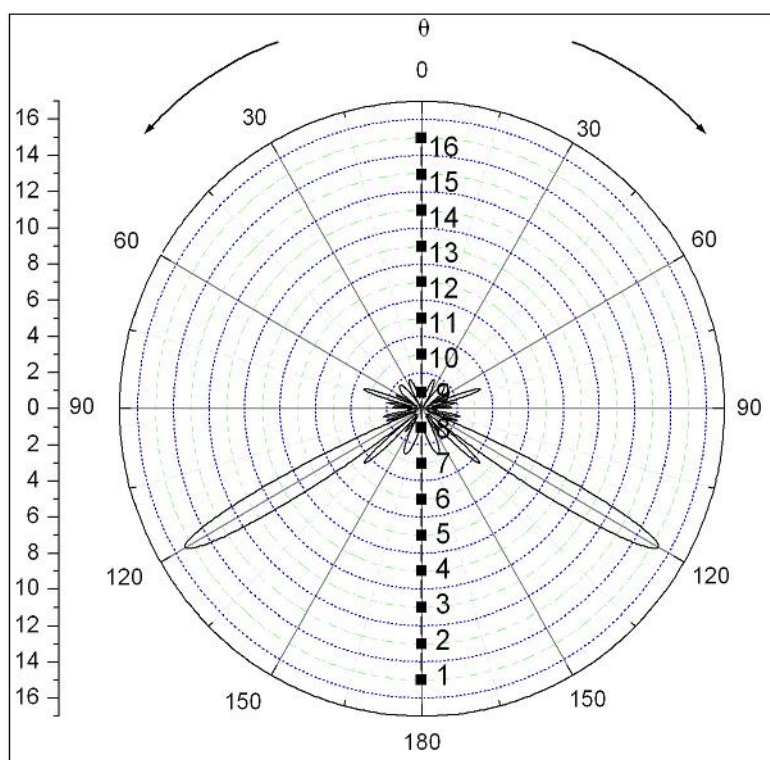


Για γωνία  $120^\circ$  οι προτεινόμενες από τον αλγόριθμο φάσεις των στοιχείων είναι

Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση
1	$45.97^\circ$	9	$154.20^\circ$
2	$142.20^\circ$	10	$226.26^\circ$
3	$271.70^\circ$	11	$326.73^\circ$
4	$322.27^\circ$	12	$79.15^\circ$
5	$72.39^\circ$	13	$125.11^\circ$
6	$159.42^\circ$	14	$263.32^\circ$
7	$257.49^\circ$	15	$323.17^\circ$
8	$351.71^\circ$	16	$154.20^\circ$

**Πίνακας 4.2.9** Φάσεις γραμμικής στοιχειοκεραίας 16 στοιχείων με  $d=\lambda/2$  και  $\theta=120^\circ$

Η τιμή του παράγοντα διάταξης για τις τιμές αυτές των φάσεων είναι 15.351437. Φτάνει δηλαδή το 95.95% της μέγιστης τιμής του.



**Σχήμα 4.2.9** Παράγοντας διάταξης γραμμικής στοιχειοκεραίας 16 στοιχείων με  $d=\lambda/2$  και επιθυμητή γωνία ακτινοβολίας  $\theta=120^\circ$

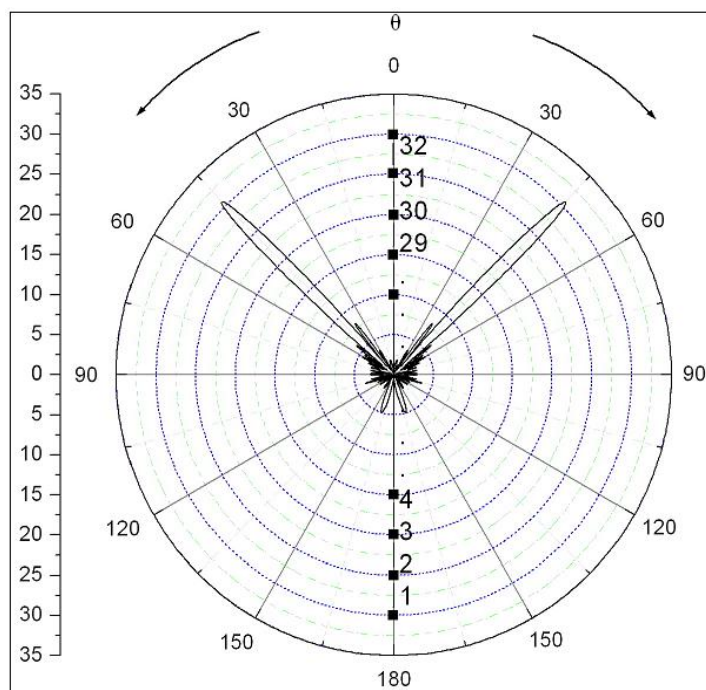
#### 4.2.5 Εφαρμογή για Στοιχειοκεραία 32 στοιχείων

Ο γενετικός αλγόριθμος εφαρμόστηκε για γωνίες  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  και  $120^\circ$ . Για γωνία  $45^\circ$  οι προτεινόμενες από τον αλγόριθμο φάσεις των στοιχείων είναι

Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση
1	$283.79^\circ$	9	$332.46^\circ$	17	$75.35^\circ$	25	$139.22^\circ$
2	$183.74^\circ$	10	$225.38^\circ$	18	$314.21^\circ$	26	$7.91^\circ$
3	$53.33^\circ$	11	$109.16^\circ$	19	$167.60^\circ$	27	$226.59^\circ$
4	$275.91^\circ$	12	$352.22^\circ$	20	$16.11^\circ$	28	$130.87^\circ$
5	$180.06^\circ$	13	$194.17^\circ$	21	$271.49^\circ$	29	$335.88^\circ$
6	$60.10^\circ$	14	$98.04^\circ$	22	$171.97^\circ$	30	$244.23^\circ$
7	$252.76^\circ$	15	$286.74^\circ$	23	$38.94^\circ$	31	$68.77^\circ$
8	$130.32^\circ$	16	$182.96^\circ$	24	$270.25^\circ$	32	$327.08^\circ$

**Πίνακας 4.2.10** Φάσεις γραμμικής στοιχειοκεραίας 32 στοιχείων με  $d=\lambda/2$  και  $\theta=45^\circ$

Η τιμή του παράγοντα διάταξης για τις τιμές αυτές των φάσεων είναι 30.542384. Φτάνει δηλαδή το 95.44% της μέγιστης τιμής του. Το διάγραμμα του παράγοντα διάταξης είναι το ακόλουθο



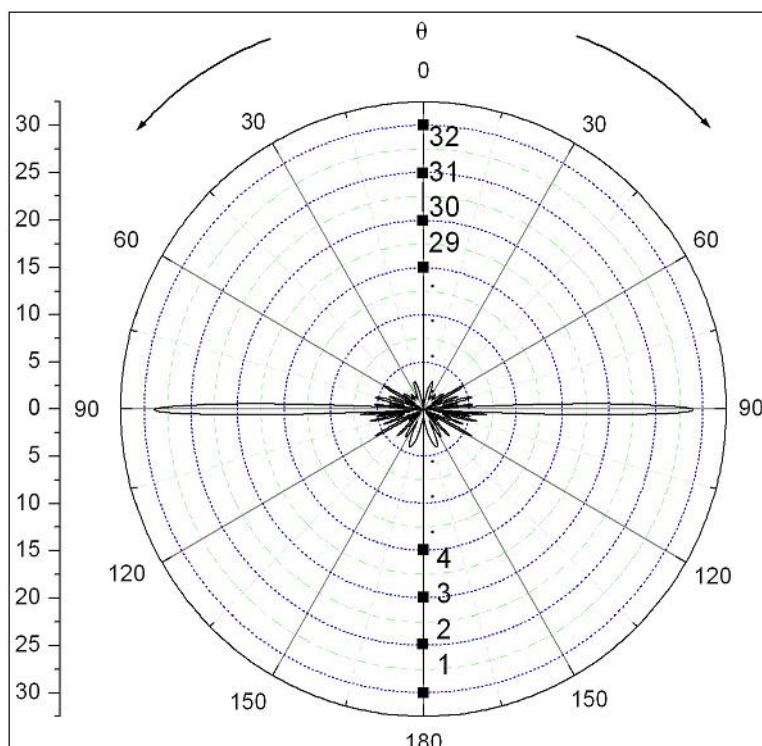
**Σχήμα 4.2.10** Παράγοντας διάταξης γραμμικής στοιχειοκεραίας 32 στοιχείων με  $d=\lambda/2$  και επιθυμητή γωνία ακτινοβολίας  $\theta=45^\circ$

Για γωνία  $90^\circ$  οι προτεινόμενες από τον αλγόριθμο φάσεις των στοιχείων είναι

Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση
1	$131.82^\circ$	9	$144.96^\circ$	17	$126.45^\circ$	25	$147.46^\circ$
2	$117.19^\circ$	10	$107.23^\circ$	18	$144.04^\circ$	26	$165.22^\circ$
3	$148.05^\circ$	11	$143.28^\circ$	19	$146.46^\circ$	27	$133.71^\circ$
4	$158.82^\circ$	12	$109.54^\circ$	20	$157.50^\circ$	28	$138.15^\circ$
5	$101.57^\circ$	13	$156.66^\circ$	21	$124.90^\circ$	29	$120.04^\circ$
6	$127.81^\circ$	14	$128.87^\circ$	22	$93.18^\circ$	30	$139.14^\circ$
7	$207.05^\circ$	15	$172.36^\circ$	23	$134.85^\circ$	31	$144.29^\circ$
8	$151.33^\circ$	16	$178.60^\circ$	24	$195.72^\circ$	32	$191.13^\circ$

**Πίνακας 4.2.11** Φάσεις γραμμικής στοιχειοκεραίας 32 στοιχείων με  $d=\lambda/2$  και  $\theta=90^\circ$

Η τιμή του παράγοντα διάταξης για τις τιμές αυτές των φάσεων είναι 28.860174. Φτάνει δηλαδή το 90.19% της μέγιστης τιμής του. Το διάγραμμα του παράγοντα διάταξης είναι το ακόλουθο



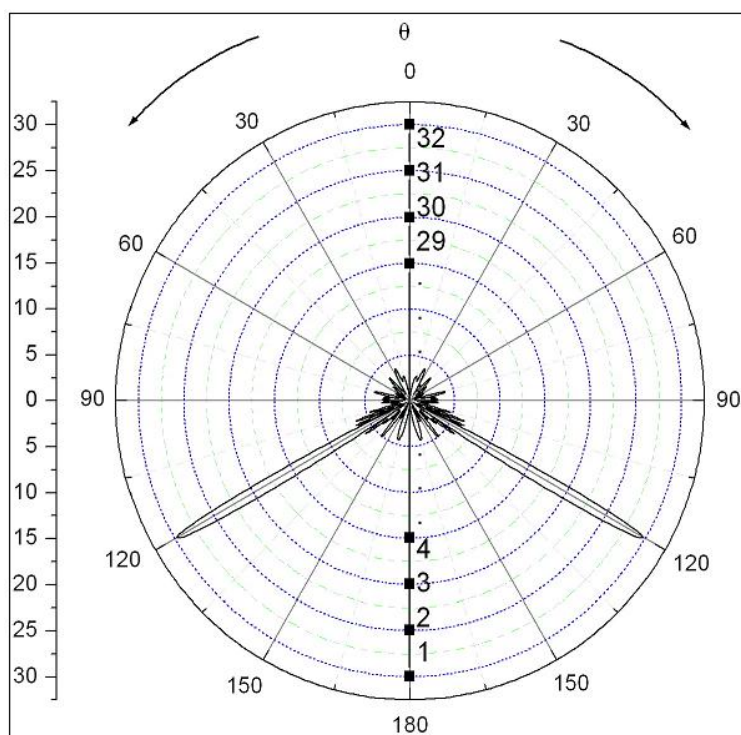
**Σχήμα 4.2.11** Παράγοντας διάταξης γραμμικής στοιχειοκεραίας 32 στοιχείων με  $d=\lambda/2$  και επιθυμητή γωνία ακτινοβολίας  $\theta=90^\circ$

Για γωνία  $120^\circ$  οι προτεινόμενες από τον αλγόριθμο φάσεις των στοιχείων είναι

Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση
1	$266.28^\circ$	9	$245.15^\circ$	17	$250.43^\circ$	25	$261.64^\circ$
2	$347.09^\circ$	10	$319.22^\circ$	18	$314.46^\circ$	26	$322.81^\circ$
3	$68.27^\circ$	11	$72.49^\circ$	19	$104.10^\circ$	27	$87.30^\circ$
4	$137.61^\circ$	12	$176.13^\circ$	20	$175.40^\circ$	28	$185.41^\circ$
5	$254.93^\circ$	13	$253.47^\circ$	21	$207.64^\circ$	29	$248.67^\circ$
6	$2.33^\circ$	14	$346.40^\circ$	22	$326.92^\circ$	30	$333.16^\circ$
7	$24.24^\circ$	15	$52.65^\circ$	23	$65.54^\circ$	31	$47.65^\circ$
8	$100.70^\circ$	16	$168.41^\circ$	24	$130.43^\circ$	32	$184.58^\circ$

**Πίνακας 4.2.12** Φάσεις γραμμικής στοιχειοκεραίας 32 στοιχείων με  $d=\lambda/2$  και  $\theta=120^\circ$

Η τιμή του παράγοντα διάταξης για τις τιμές αυτές των φάσεων είναι 29.778394. Φτάνει δηλαδή το 93.06% της μέγιστης τιμής του. Το διάγραμμα του παράγοντα διάταξης είναι το ακόλουθο



**Σχήμα 4.2.12** Παράγοντας διάταξης γραμμικής στοιχειοκεραίας 32 στοιχείων με  $d=\lambda/2$  και επιθυμητή γωνία ακτινοβολίας  $\theta=120^\circ$

Όπως μπορεί κανείς εύκολα να παρατηρήσει ο γενετικός αλγόριθμος καταφέρνει να δώσει τις φάσεις εκείνες για τις οποίες επιτυγχάνεται η μεγιστοποίηση του παράγοντα διάταξης σε επιθυμητή γωνία κλίσης και επομένως η στροφή του κύριου λοβού προς τη γωνία αυτή. Επίσης, από τα πολικά διαγράμματα μπορεί κανείς να παρατηρήσει πως όσο αυξάνεται ο αριθμός των στοιχείων μιας στοιχειοκεραίας τόσο μειώνεται το εύρος του κύριου λοβού και τόσο αυξάνεται το πλήθος των πλευρικών λοβών.

### 4.3 Εφαρμογή για Γραμμικές Στοιχειοκεραίες Διαφορετικού Βήματος

#### 4.3.1 Γενικά

Η εφαρμογή του γενετικού αλγόριθμου γίνεται για στοιχειοκεραίες 16 στοιχείων για διάφορες τιμές της γωνίας  $\theta$  και για βήμα στοιχειοκεραίας  $d=\lambda/4$  και  $d=\lambda/8$ . Η επιλογή τιμών του  $d$  μικρότερων του  $\lambda/2$  έγινε γιατί όπως αναφέρθηκε και στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο για τιμές μεγαλύτερες του  $\lambda/2$ , και κυρίως όταν αυτές είναι ακέραια πολλαπλάσια του μήκους κύματος, εμφανίζονται ανεπιθύμητοι κύριοι λοβοί στο διάγραμμα του παράγοντα διάταξης. Ο αλγόριθμος επιλέχθηκε να τερματίζει μετά από έναν ορισμένο αριθμό επαναλήψεων διότι ο στόχος στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι να παρατηρηθεί η συμπεριφορά του διαγράμματος του παράγοντα διάταξης για διαφορετικά βήματα και όχι η ικανότητα του αλγορίθμου να προσεγγίσει τη μέγιστη τιμή το οποίο έχει ήδη αποδειχθεί ότι επιτυγχάνεται.

#### 4.3.2 Εφαρμογή για Στοιχειοκεραία Βήματος $d=\lambda/4$

Εφόσον, η απόσταση  $d$  μεταξύ των στοιχείων είναι ίση με  $\lambda/4$ , και σε συνδυασμό με το γεγονός ότι  $k=2\pi/\lambda$ , η σχέση (4.1.1) γίνεται

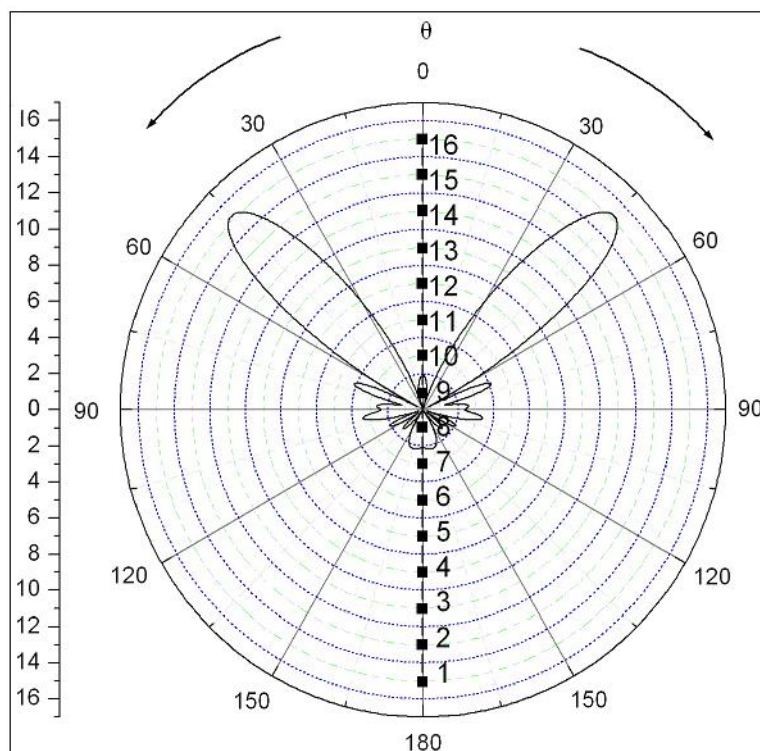
$$S(\theta) = \sum_{m=0}^{M-1} \exp\left[j\left(m\frac{\pi}{2}\cos\theta + \delta_m\right)\right] \quad (4.3.1)$$

Για γωνία  $45^\circ$  οι προτεινόμενες από τον αλγόριθμο φάσεις των στοιχείων είναι

Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση
1	$117.43^\circ$	9	$8.66^\circ$
2	$88.77^\circ$	10	$257.96^\circ$
3	$35.34^\circ$	11	$198.01^\circ$
4	$294.71^\circ$	12	$150.20^\circ$
5	$224.67^\circ$	13	$93.71^\circ$
6	$154.76^\circ$	14	$44.43^\circ$
7	$142.34^\circ$	15	$318.71^\circ$
8	$66.06^\circ$	16	$269.68^\circ$

**Πίνακας 4.3.1** Φάσεις γραμμικής στοιχειοκεραίας 16 στοιχείων με  $d=\lambda/4$  και  $\theta=45^\circ$

Η τιμή του παράγοντα διάταξης για τις τιμές αυτές των φάσεων είναι 15.210929. Το πολικό διάγραμμα ως προς  $\theta$  του παράγοντα διάταξης της στοιχειοκεραίας αυτής φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



**Σχήμα 4.3.1** Παράγοντας διάταξης γραμμικής στοιχειοκεραίας 16 στοιχείων με  $d=\lambda/4$  και επιθυμητή γωνία ακτινοβολίας  $\theta=45^\circ$

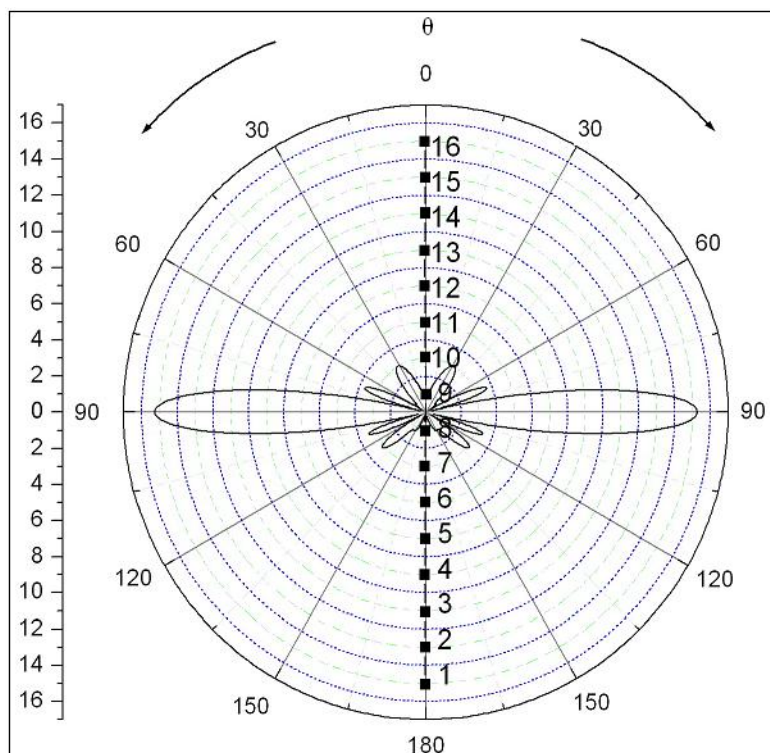


Για γωνία  $90^\circ$  οι προτεινόμενες από τον αλγόριθμο φάσεις των στοιχείων είναι

Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση
1	$352.01^\circ$	9	$2.78^\circ$
2	$322.33^\circ$	10	$336.91^\circ$
3	$353.59^\circ$	11	$354.18^\circ$
4	$317.51^\circ$	12	$320.51^\circ$
5	$357.93^\circ$	13	$338.24^\circ$
6	$341.62^\circ$	14	$313.46^\circ$
7	$321.47^\circ$	15	$347.15^\circ$
8	$302.47^\circ$	16	$346.95^\circ$

**Πίνακας 4.3.2** Φάσεις γραμμικής στοιχειοκεραίας 16 στοιχείων με  $d=\lambda/4$  και  $\theta=90^\circ$

Η τιμή του παράγοντα διάταξης για τις τιμές αυτές των φάσεων είναι 15.253084. Το πολικό διάγραμμα ως προς  $\theta$  του παράγοντα διάταξης της στοιχειοκεραίας αυτής φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



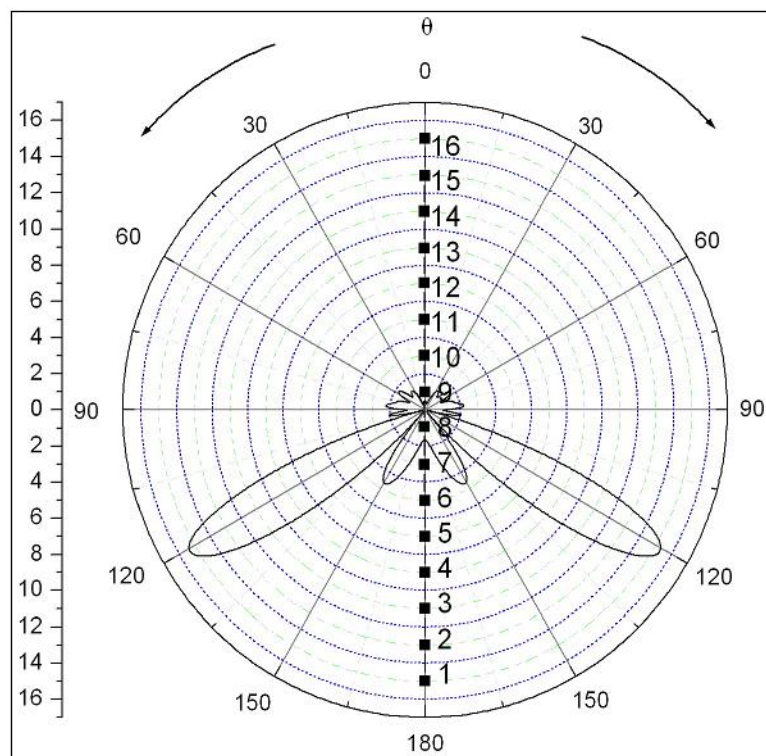
**Σχήμα 4.3.2** Παράγοντας διάταξης γραμμικής στοιχειοκεραίας 16 στοιχείων με  $d=\lambda/4$  και επιθυμητή γωνία ακτινοβολίας  $\theta=90^\circ$

Για γωνία  $120^\circ$  οι προτεινόμενες από τον αλγόριθμο φάσεις των στοιχείων είναι

Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση
1	$355.75^\circ$	9	$354.03^\circ$
2	$29.13^\circ$	10	$22.94^\circ$
3	$48.45^\circ$	11	$81.44^\circ$
4	$132.65^\circ$	12	$129.48^\circ$
5	$182.11^\circ$	13	$159.15^\circ$
6	$221.95^\circ$	14	$218.99^\circ$
7	$283.06^\circ$	15	$250.58^\circ$
8	$302.16^\circ$	16	$354.62^\circ$

**Πίνακας 4.3.3** Φάσεις γραμμικής στοιχειοκεραίας 16 στοιχείων με  $d=\lambda/4$  και  $\theta=120^\circ$

Η τιμή του παράγοντα διάταξης για τις τιμές αυτές των φάσεων είναι 15.325618. Το πολικό διάγραμμα του παράγοντα διάταξης της στοιχειοκεραίας αυτής φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



**Σχήμα 4.3.3** Παράγοντας διάταξης γραμμικής στοιχειοκεραίας 16 στοιχείων με  $d=\lambda/4$  και επιθυμητή γωνία ακτινοβολίας  $\theta=120^\circ$



### 4.3.3 Εφαρμογή για Στοιχειοκεραία Βήματος $d=\lambda/8$

Εφόσον, η απόσταση  $d$  μεταξύ των στοιχείων είναι ίση με  $\lambda/8$ , και σε συνδυασμό με το γεγονός ότι  $k=2\pi/\lambda$ , η σχέση (4.1.1) γίνεται

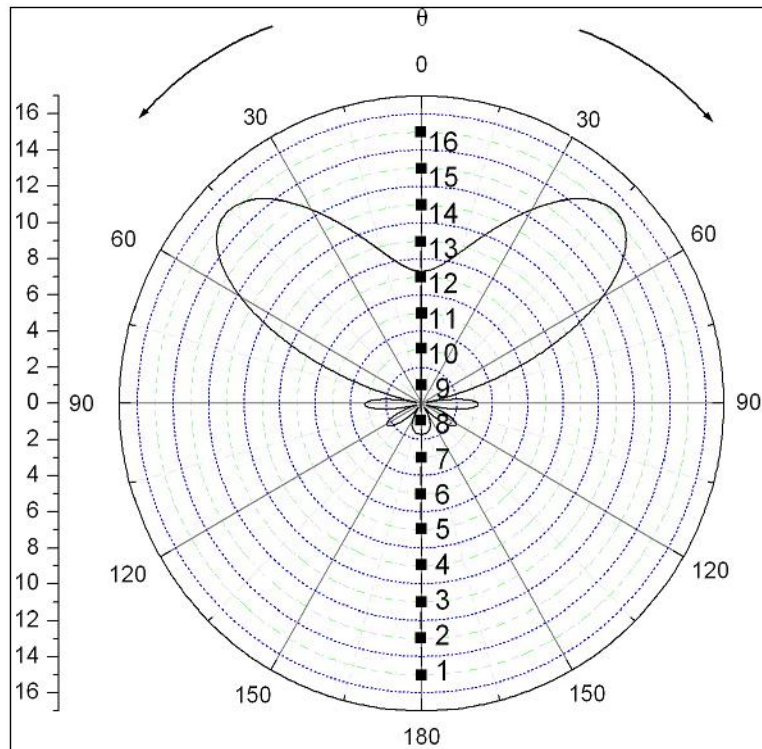
$$S(\theta) = \sum_{m=0}^{M-1} \exp[j(m\frac{\pi}{4} \cos \theta + \delta_m)] \quad (4.3.2)$$

Για γωνία  $45^\circ$  οι προτεινόμενες από τον αλγόριθμο φάσεις των στοιχείων είναι

Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση
1	$333.28^\circ$	9	$62.57^\circ$
2	$270.40^\circ$	10	$66.99^\circ$
3	$268.13^\circ$	11	$332.26^\circ$
4	$234.92^\circ$	12	$332.25^\circ$
5	$173.72^\circ$	13	$335.19^\circ$
6	$156.24^\circ$	14	$258.10^\circ$
7	$142.13^\circ$	15	$233.93^\circ$
8	$80.83^\circ$	16	$222.34^\circ$

**Πίνακας 4.3.4** Φάσεις γραμμικής στοιχειοκεραίας 16 στοιχείων με  $d=\lambda/8$  και  $\theta=45^\circ$

Η τιμή του παράγοντα διάταξης για τις τιμές αυτές των φάσεων είναι 15.211601. Το πολικό διάγραμμα του παράγοντα διάταξης της στοιχειοκεραίας αυτής φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



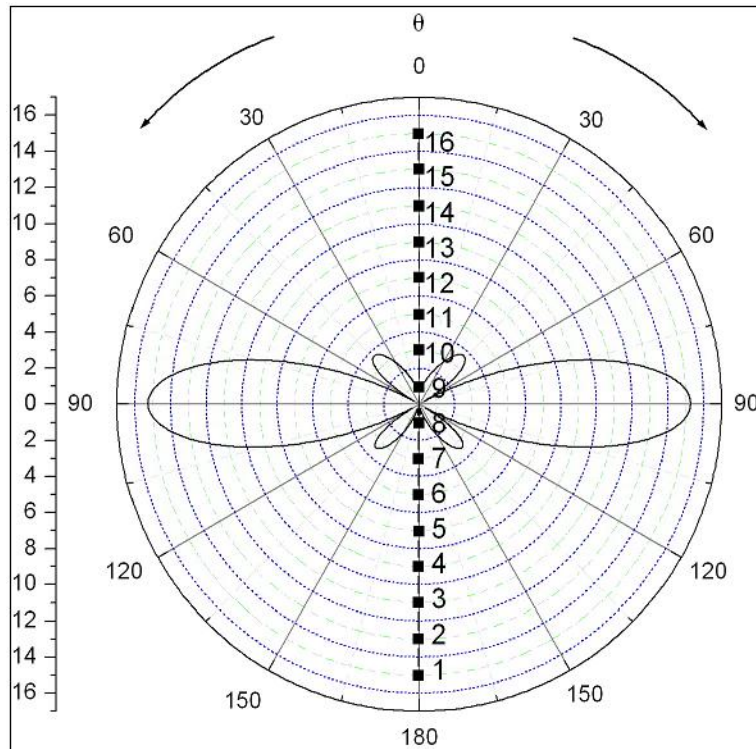
**Σχήμα 4.3.4** Παράγοντας διάταξης γραμμικής στοιχειοκεραίας 16 στοιχείων με  $d=\lambda/8$  και επιθυμητή γωνία ακτινοβολίας  $\theta=45^\circ$

Για γωνία  $90^\circ$  οι προτεινόμενες από τον αλγόριθμο φάσεις των στοιχείων είναι

Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση
1	$352.01^\circ$	9	$2.78^\circ$
2	$322.33^\circ$	10	$336.91^\circ$
3	$353.59^\circ$	11	$354.18^\circ$
4	$317.51^\circ$	12	$320.51^\circ$
5	$357.93^\circ$	13	$338.24^\circ$
6	$341.62^\circ$	14	$313.46^\circ$
7	$321.47^\circ$	15	$347.15^\circ$
8	$302.47^\circ$	16	$346.95^\circ$

**Πίνακας 4.3.5** Φάσεις γραμμικής στοιχειοκεραίας 16 στοιχείων με  $d=\lambda/8$  και  $\theta=90^\circ$

Η τιμή του παράγοντα διάταξης για τις τιμές αυτές των φάσεων είναι 15.253084. Το πολικό διάγραμμα του παράγοντα διάταξης της στοιχειοκεραίας αυτής φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



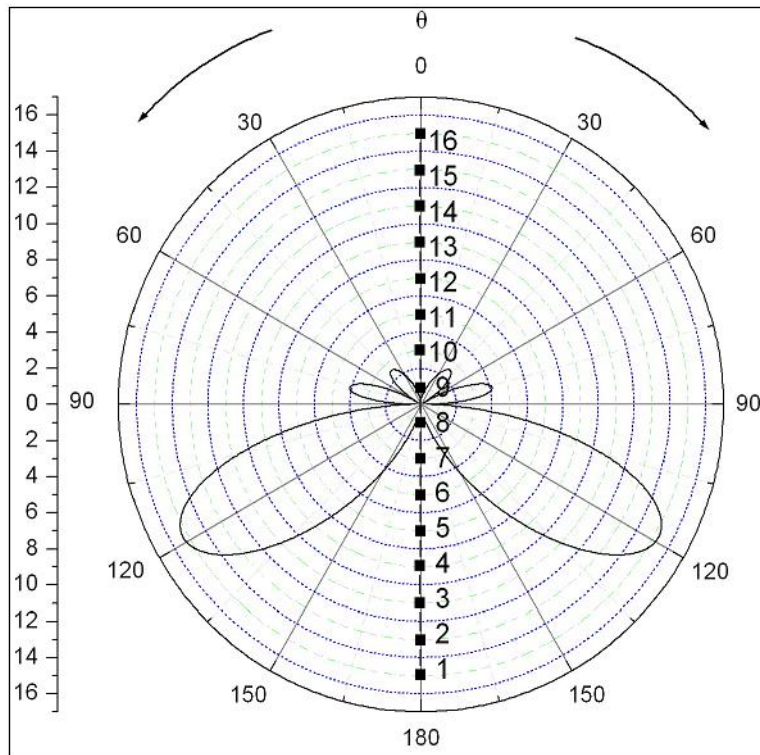
**Σχήμα 4.3.5** Παράγοντας διάταξης γραμμικής στοιχειοκεραίας 16 στοιχείων με  $d=\lambda/8$  και επιθυμητή γωνία ακτινοβολίας  $\theta=90^\circ$

Για γωνία  $120^\circ$  οι προτεινόμενες από τον αλγόριθμο φάσεις των στοιχείων είναι

Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση
1	$276.93^\circ$	9	$60.81^\circ$
2	$257.69^\circ$	10	$146.01^\circ$
3	$309.35^\circ$	11	$100.65^\circ$
4	$309.26^\circ$	12	$120.49^\circ$
5	$334.81^\circ$	13	$168.45^\circ$
6	$10.88^\circ$	14	$189.42^\circ$
7	$42.55^\circ$	15	$194.61^\circ$
8	$47.54^\circ$	16	$217.46^\circ$

**Πίνακας 4.3.6** Φάσεις γραμμικής στοιχειοκεραίας 16 στοιχείων με  $d=\lambda/8$  και  $\theta=120^\circ$

Η τιμή του παράγοντα διάταξης για τις τιμές αυτές των φάσεων είναι 15.227516. Το πολικό διάγραμμα του παράγοντα διάταξης της στοιχειοκεραίας αυτής φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



**Σχήμα 4.3.6** Παράγοντας διάταξης γραμμικής στοιχειοκεραίας 16 στοιχείων με  $d=\lambda/8$  και επιθυμητή γωνία ακτινοβολίας  $\theta=120^\circ$

Από τα πολικά διαγράμματα εύκολα μπορεί κανείς να παρατηρήσει πως όσο μειώνεται το βήμα  $d$  μιας στοιχειοκεραίας τόσο αυξάνεται το εύρος του κύριου λοβού και τόσο μειώνεται το πλήθος των πλευρικών λοβών.

## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>

### Εφαρμογή Γενετικών Αλγορίθμων Πολλών Αντικειμενικών Συναρτήσεων στη Σύνθεση Γραμμικών Στοιχειοκεραίων

#### 5.1 Εισαγωγή

Το ζητούμενο αυτή τη φορά είναι ο καθορισμός της φάσης κάθε στοιχείου ώστε σε δεδομένες κατευθύνσεις να επιτευχθεί μέγιστη ή ελάχιστη ακτινοβολία της στοιχειοκεραίας. Ουσιαστικά λοιπόν ο γενετικός αλγόριθμος καλείται να αναζητήσει τις ακριβείς τιμές της φάσης κάθε στοιχείου της στοιχειοκεραίας για τη βελτιστοποίηση (μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση) του παράγοντα διάταξής της ως προς τις εκάστοτε επιθυμητές γωνίες.

Η στοιχειοκεραία επιλέχθηκε να τοποθετηθεί και πάλι στον άξονα z και ο παράγοντας διάταξης δίνεται από τη σχέση (4.1.1) που αναφέρθηκε στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο. Σύμφωνα με τη σχέση αυτή ο παράγοντας διάταξης είναι

$$S(\theta) = \sum_{m=0}^{M-1} \exp[j(mkd \cos \theta + \delta_m)] \quad (5.1.1)$$

Όσον αφορά το γενετικό αλγόριθμο, οι αντικειμενικές συναρτήσεις είναι το μέτρο του παράγοντα διάταξης της στοιχειοκεραίας, όπου σε κάθε αντικειμενική συνάρτηση η γωνία  $\theta$  είναι η εκάστοτε επιθυμητή γωνία στην οποία επιδιώκεται μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση. Η συνάρτηση προσαρμογής επιλέχθηκε και πάλι να είναι το πηλίκο της εκάστοτε αντικειμενικής συνάρτησης ως προς τη μέγιστη τιμή των αντικειμενικών συναρτήσεων του πληθυσμού. Οι τιμές των φάσεων και αυτή τη φορά δεν κωδικοποιήθηκαν, αλλά χρησιμοποιήθηκαν οι πραγματικές τιμές τους με πεδίο ορισμού από  $0^\circ$  έως  $360^\circ$ . Στο πλήθος των εκτελέσεων του γενετικού αλγορίθμου επιλέχθηκαν ως πιθανότητες διασταύρωσης και μετάλλαξης οι  $p_c=60\%$  και  $p_m=0.1\%$  αντίστοιχα, καθώς χρησιμοποιήθηκαν πληθυσμοί μεγαλύτεροι των 100 χρωμοσωμάτων, ενώ ως κριτήριο τερματισμού επιλέχθηκε ένας μέγιστος αριθμός 500 επαναλήψεων.

## 5.2 Εφαρμογή για Μεγιστοποίηση του Παράγοντα Διάταξης σε Διάφορες Κατευθύνσεις

### 5.2.1 Γενικά

Η εφαρμογή του γενετικού αλγόριθμου γίνεται για στοιχειοκεραίες 32 στοιχείων για διάφορες επιθυμητές τιμές της γωνίας  $\theta$ . Θεωρείται πως η απόσταση  $d$  μεταξύ των στοιχείων είναι σταθερή και ίση με  $\lambda/2$ , και σε συνδυασμό με το γεγονός ότι  $k=2\pi/\lambda$ , η σχέση (5.1.1) γίνεται

$$S(\theta) = \sum_{m=0}^{M-1} \exp[j(m\pi \cos \theta + \delta_m)] \quad (5.2.1)$$

### 5.2.2 Εφαρμογή για Μεγιστοποίηση του Παράγοντα Διάταξης σε $\theta_1=45^\circ$ και $\theta_2=90^\circ$

Από την εκτέλεση του αλγορίθμου προέκυψαν 17 μη κυριαρχούμενες λύσεις. Οι τιμές των δύο αντικειμενικών συναρτήσεων (για μεγιστοποίηση σε γωνίες  $\theta_1=45^\circ$  και  $\theta_2=90^\circ$ ), και επομένως των παραγόντων διάταξης, για τις λύσεις αυτές είναι

Λύση	Τιμές Αντικειμενικών Συναρτήσεων	Λύση	Τιμές Αντικειμενικών Συναρτήσεων
1	$S_1=16.85$ και $S_2=19.04$	10	$S_1=14.46$ και $S_2=20.84$
2	$S_1=16.78$ και $S_2=19.16$	11	$S_1=15.32$ και $S_2=20.40$
3	$S_1=15.19$ και $S_2=20.58$	12	$S_1=17.57$ και $S_2=18.42$
4	$S_1=15.91$ και $S_2=20.00$	13	$S_1=17.60$ και $S_2=17.64$
5	$S_1=16.87$ και $S_2=19.03$	14	$S_1=17.59$ και $S_2=18.41$
6	$S_1=16.04$ και $S_2=19.81$	15	$S_1=14.47$ και $S_2=20.81$
7	$S_1=17.50$ και $S_2=18.55$	16	$S_1=14.57$ και $S_2=20.62$
8	$S_1=16.08$ και $S_2=19.33$	17	$S_1=16.07$ και $S_2=19.35$
9	$S_1=15.34$ και $S_2=20.05$		

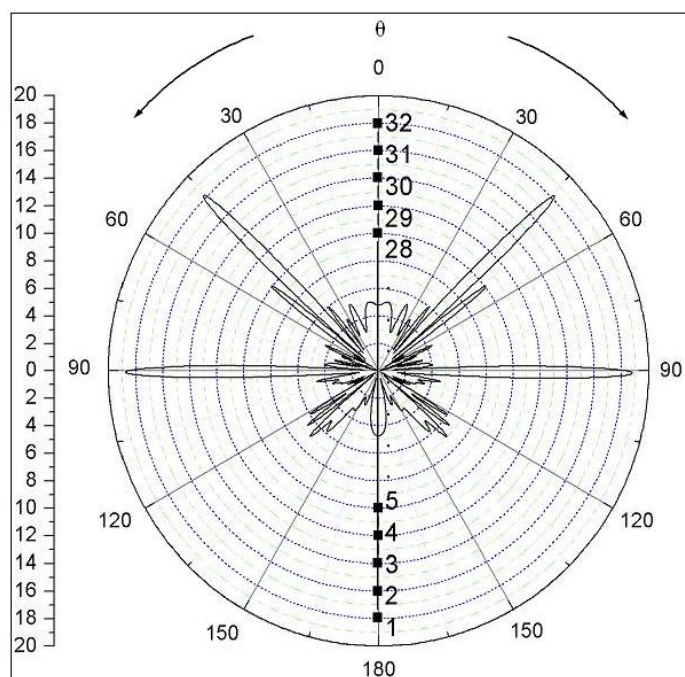
**Πίνακας 5.2.1** Τιμές αντικειμενικών συναρτήσεων για τις μη κυριαρχούμενες λύσεις

Από τις λύσεις αυτές έστω ότι ο αποφασίζοντας επιλέγει τη λύση 14 γιατί πετυχαίνει εξίσου μεγιστοποίηση και προς τις δύο κατευθύνσεις (Να σημειωθεί πως από εδώ και στο εξής θα παρουσιάζεται απευθείας η λύση που επέλεξε ο αποφασίζοντας). Οι φάσεις των στοιχείων στην περίπτωση αυτή είναι

Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση
1	235.40°	9	334.02°	17	209.82°	25	204.01°
2	217.38°	10	251.25°	18	314.21°	26	330.71°
3	50.66°	11	170.77°	19	194.13°	27	237.15°
4	226.80°	12	229.05°	20	295.75°	28	206.23°
5	185.02°	13	207.08°	21	271.49°	29	350.34°
6	303.59°	14	184.14°	22	185.82°	30	228.47°
7	235.29°	15	237.98°	23	320.81°	31	144.19°
8	219.92°	16	254.96°	24	254.92°	32	340.55°

**Πίνακας 5.2.2** Φάσεις γραμμικής στοιχειοκεραίας 32 στοιχείων με  $d=\lambda/2$  για μεγιστοποίηση του παράγοντα διάταξης σε  $\theta_1=45^\circ$  και  $\theta_2=90^\circ$

Το διάγραμμα ως προς  $\theta$  του παράγοντα διάταξης για τις παραπάνω φάσεις είναι



**Σχήμα 5.2.1** Παράγοντας διάταξης γραμμικής στοιχειοκεραίας 32 στοιχείων με  $d=\lambda/2$  για μεγιστοποίηση σε  $\theta_1=45^\circ$  και  $\theta_2=90^\circ$

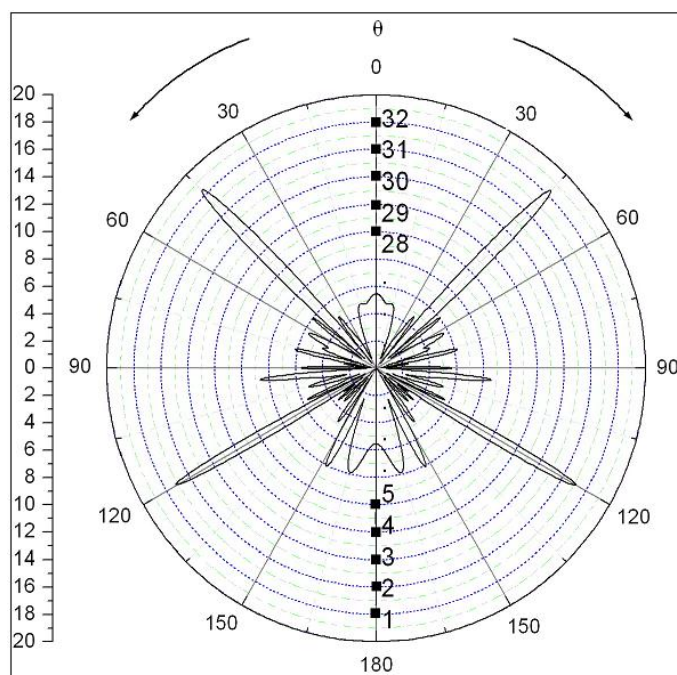


### 5.2.3 Εφαρμογή για Μεγιστοποίηση του Παράγοντα Διάταξης σε $\theta_1=45^\circ$ και $\theta_2=120^\circ$

Από την εκτέλεση του αλγορίθμου και την επιλογή του αποφασίζοντα προέκυψε η λύση για την οποία οι αντικειμενικές συναρτήσεις παίρνουν τις τιμές  $S_1=18.36$  και  $S_2=17.10$ . Οι φάσεις των στοιχείων και το διάγραμμα του παράγοντα διάταξης φαίνονται παρακάτω.

Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση
1	$332.57^\circ$	9	$352.67^\circ$	17	$63.26^\circ$	25	$126.27^\circ$
2	$98.46^\circ$	10	$283.96^\circ$	18	$62.93^\circ$	26	$7.64^\circ$
3	$182.28^\circ$	11	$166.68^\circ$	19	$144.42^\circ$	27	$169.24^\circ$
4	$247.93^\circ$	12	$265.78^\circ$	20	$260.85^\circ$	28	$221.85^\circ$
5	$179.74^\circ$	13	$255.42^\circ$	21	$265.56^\circ$	29	$358.15^\circ$
6	$66.34^\circ$	14	$55.91^\circ$	22	$130.30^\circ$	30	$236.18^\circ$
7	$204.22^\circ$	15	$351.11^\circ$	23	$126.05^\circ$	31	$108.19^\circ$
8	$199.58^\circ$	16	$236.73^\circ$	24	$268.92^\circ$	32	$263.83^\circ$

**Πίνακας 5.2.3** Φάσεις γραμμικής στοιχειοκεραίας 32 στοιχείων με  $d=\lambda/2$  για μεγιστοποίηση του παράγοντα διάταξης σε  $\theta_1=45^\circ$  και  $\theta_2=120^\circ$



**Σχήμα 5.2.2** Παράγοντας διάταξης γραμμικής στοιχειοκεραίας 32 στοιχείων με  $d=\lambda/2$  για μεγιστοποίηση σε  $\theta_1=45^\circ$  και  $\theta_2=120^\circ$

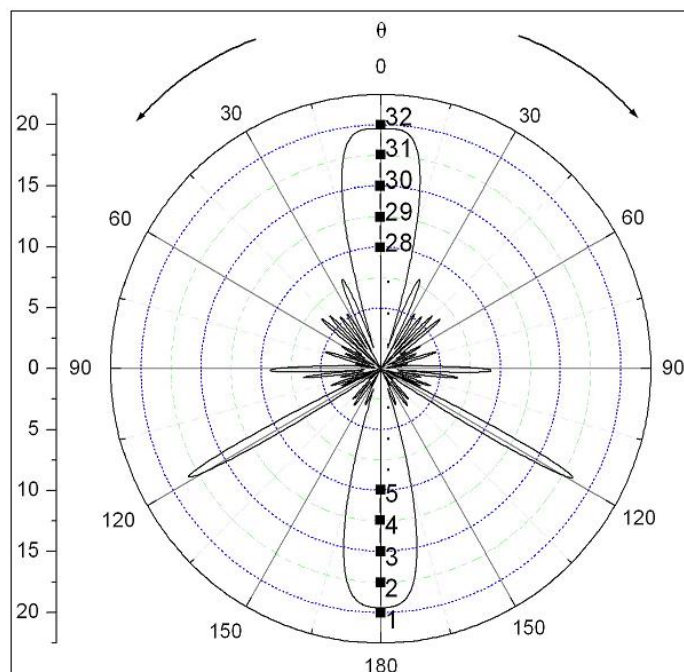


#### 5.2.4 Εφαρμογή για Μεγιστοποίηση του Παράγοντα Διάταξης σε $\theta_1=0^\circ$ και $\theta_2=120^\circ$

Από την εκτέλεση του αλγορίθμου και την επιλογή του αποφασίζοντα προέκυψε η λύση για την οποία οι αντικειμενικές συναρτήσεις παίρνουν τις τιμές  $S_1=19.52$  και  $S_2=17.24$ . Οι φάσεις των στοιχείων και το διάγραμμα του παράγοντα διάταξης φαίνονται παρακάτω.

Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση
1	65.78°	9	61.84°	17	41.06°	25	61.28°
2	202.89°	10	227.11°	18	145.69°	26	160.84°
3	69.59°	11	165.14°	19	144.42°	27	178.01°
4	291.15°	12	266.45°	20	260.85°	28	225.95°
5	84.81°	13	79.69°	21	81.72°	29	18.61°
6	159.02°	14	158.20°	22	130.30°	30	280.68°
7	128.06°	15	139.51°	23	126.05°	31	102.89°
8	270.20°	16	270.23°	24	248.34°	32	293.96°

**Πίνακας 5.2.4** Φάσεις γραμμικής στοιχειοκεραίας 32 στοιχείων με  $d=\lambda/2$  για μεγιστοποίηση του παράγοντα διάταξης σε  $\theta_1=0^\circ$  και  $\theta_2=120^\circ$



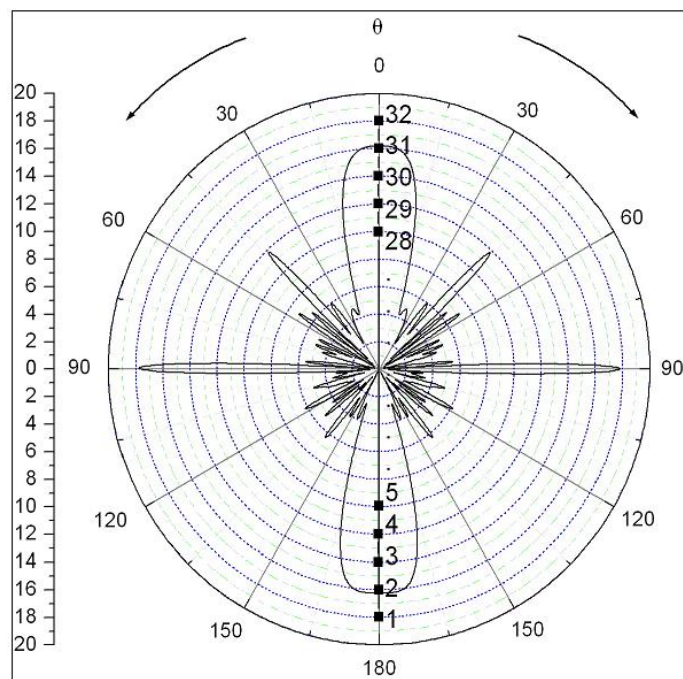
**Σχήμα 5.2.3** Παράγοντας διάταξης γραμμικής στοιχειοκεραίας 32 στοιχείων με  $d=\lambda/2$  για μεγιστοποίηση σε  $\theta_1=0^\circ$  και  $\theta_2=120^\circ$

### 5.2.5 Εφαρμογή για Μεγιστοποίηση του Παράγοντα Διάταξης σε $\theta_1=0^\circ$ , $\theta_2=45^\circ$ και $\theta_3=90^\circ$

Από την εκτέλεση του αλγορίθμου και την επιλογή του αποφασίζοντα προέκυψε η λύση για την οποία οι αντικειμενικές συναρτήσεις παίρνουν τις τιμές  $S_1=16.22$ ,  $S_2=10.93$  και  $S_3=17.71$ . Οι φάσεις των στοιχείων και το διάγραμμα του παράγοντα διάταξης φαίνονται παρακάτω.

Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση
1	238.31°	9	186.82°	17	193.02°	25	180.94°
2	253.80°	10	273.22°	18	288.92°	26	266.05°
3	107.59°	11	164.33°	19	210.16°	27	178.01°
4	274.21°	12	304.98°	20	296.35°	28	28.94°
5	177.51°	13	193.49°	21	165.78°	29	216.03°
6	314.45°	14	335.07°	22	240.16°	30	220.71°
7	223.61°	15	203.67°	23	229.23°	31	117.80°
8	209.77°	16	135.05°	24	263.76°	32	266.66°

**Πίνακας 5.2.5** Φάσεις γραμμικής στοιχειοκεραίας 32 στοιχείων με  $d=\lambda/2$  για μεγιστοποίηση του παράγοντα διάταξης σε  $\theta_1=0^\circ$ ,  $\theta_2=45^\circ$  και  $\theta_3=90^\circ$



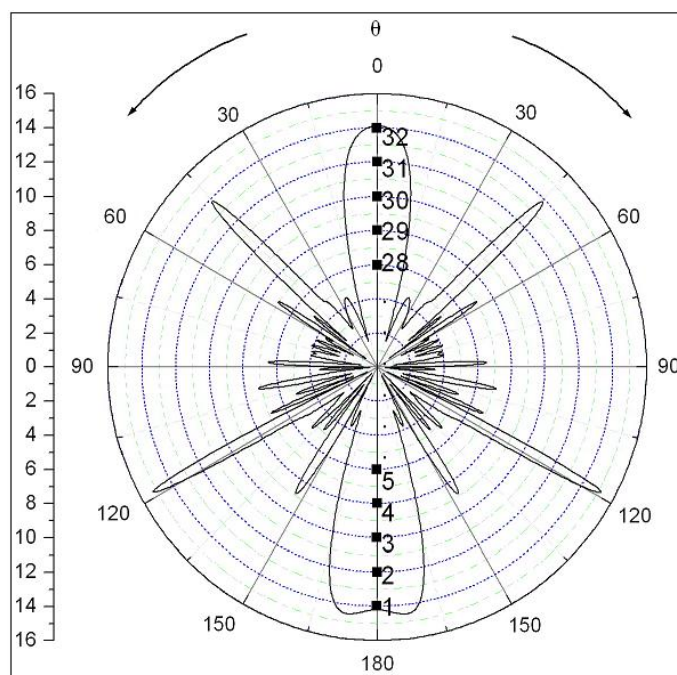
**Σχήμα 5.2.4** Παράγοντας διάταξης γραμμικής στοιχειοκεραίας 32 στοιχείων με  $d=\lambda/2$  για μεγιστοποίηση σε  $\theta_1=0^\circ$ ,  $\theta_2=45^\circ$  και  $\theta_3=90^\circ$

### 5.2.6 Εφαρμογή για Μεγιστοποίηση του Παράγοντα Διάταξης σε $\theta_1=0^\circ$ , $\theta_2=45^\circ$ και $\theta_3=120^\circ$

Από την εκτέλεση του αλγορίθμου και την επιλογή του αποφασίζοντα προέκυψε η λύση για την οποία οι αντικειμενικές συναρτήσεις παίρνουν τις τιμές  $S_1=14.41$ ,  $S_2=13.68$  και  $S_3=13.27$ . Οι φάσεις των στοιχείων και το διάγραμμα του παράγοντα διάταξης φαίνονται παρακάτω.

Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση
1	29.61°	9	61.84°	17	330.28°	25	15.18°
2	204.33°	10	27.04°	18	105.65°	26	145.57°
3	324.82°	11	228.98°	19	269.44°	27	301.90°
4	38.31°	12	210.19°	20	187.31°	28	215.26°
5	324.95°	13	331.02°	21	13.25°	29	356.87°
6	159.02°	14	164.38°	22	133.32°	30	60.04°
7	28.84°	15	1.35°	23	171.74°	31	203.65°
8	281.56°	16	281.87°	24	215.14°	32	168.46°

**Πίνακας 5.2.6** Φάσεις γραμμικής στοιχειοκεραίας 32 στοιχείων με  $d=\lambda/2$  για μεγιστοποίηση του παράγοντα διάταξης σε  $\theta_1=0^\circ$ ,  $\theta_2=45^\circ$  και  $\theta_3=120^\circ$



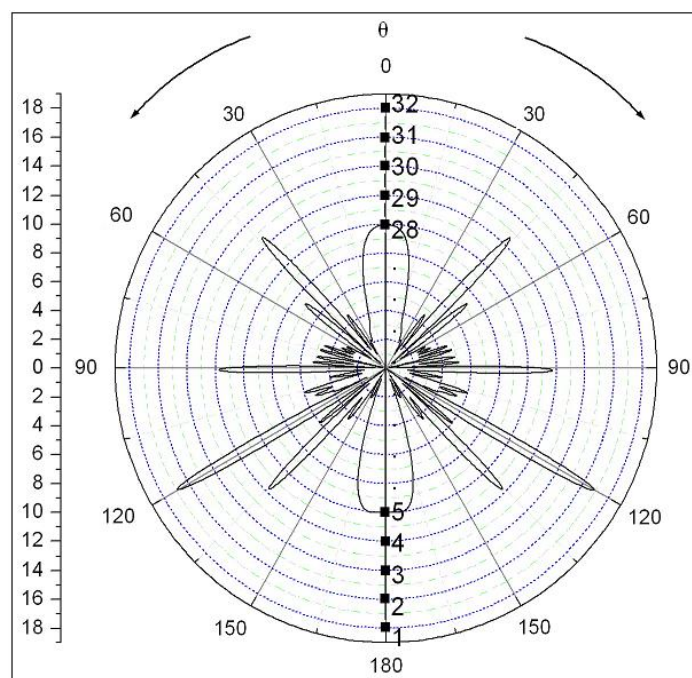
**Σχήμα 5.2.5** Παράγοντας διάταξης γραμμικής στοιχειοκεραίας 32 στοιχείων με  $d=\lambda/2$  για μεγιστοποίηση σε  $\theta_1=0^\circ$ ,  $\theta_2=45^\circ$  και  $\theta_3=120^\circ$

### 5.2.7 Εφαρμογή για Μεγιστοποίηση του Παράγοντα Διάταξης σε $\theta_1=45^\circ$ , $\theta_2=90^\circ$ και $\theta_3=120^\circ$

Από την εκτέλεση του αλγορίθμου και την επιλογή του αποφασίζοντα προέκυψε η λύση για την οποία οι αντικειμενικές συναρτήσεις παίρνουν τις τιμές  $S_1=11.66$ ,  $S_2=11.00$  και  $S_3=16.88$ . Οι φάσεις των στοιχείων και το διάγραμμα του παράγοντα διάταξης φαίνονται παρακάτω.

Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση
1	54.18°	9	352.67°	17	94.96°	25	126.27°
2	98.46°	10	359.33°	18	62.93°	26	7.64°
3	182.28°	11	163.58°	19	144.42°	27	169.24°
4	329.91°	12	341.60°	20	260.85°	28	189.11°
5	113.79°	13	35.32°	21	81.72°	29	39.65°
6	72.50°	14	135.06°	22	130.30°	30	152.98°
7	82.30°	15	131.59°	23	126.05°	31	127.65°
8	185.41°	16	225.51°	24	268.92°	32	329.18°

**Πίνακας 5.2.7** Φάσεις γραμμικής στοιχειοκεραίας 32 στοιχείων με  $d=\lambda/2$  για μεγιστοποίηση του παράγοντα διάταξης σε  $\theta_1=45^\circ$ ,  $\theta_2=90^\circ$  και  $\theta_3=120^\circ$



**Σχήμα 5.2.6** Παράγοντας διάταξης γραμμικής στοιχειοκεραίας 32 στοιχείων με  $d=\lambda/2$  για μεγιστοποίηση σε  $\theta_1=45^\circ$ ,  $\theta_2=90^\circ$  και  $\theta_3=120^\circ$

Εύκολα μπορεί να παρατηρήσει κανείς πως σε ορισμένες περιπτώσεις πέρα των επιθυμητών κύριων λοβών παρουσιάζονται και επιπλέον κύριοι λοβοί. Οι λοβοί αυτοί μπορεί να είναι ανεπιθύμητοι. Με άλλα λόγια, είναι πιθανό να προσδοκάται η μη εκπομπή ή λήψη ακτινοβολίας προς και από ορισμένες κατευθύνσεις. Οι λοβοί αυτοί μπορούν να απαλειφθούν με την ελαχιστοποίηση του παράγοντα διάταξης για τις κατευθύνσεις αυτές. Το γεγονός αυτό παρουσιάζεται στις επόμενες παραγράφους.

### **5.3 Εφαρμογή για Μεγιστοποίηση και Ελαχιστοποίηση του Παράγοντα Διάταξης σε Διάφορες Κατευθύνσεις**

#### **5.3.1 Γενικά**

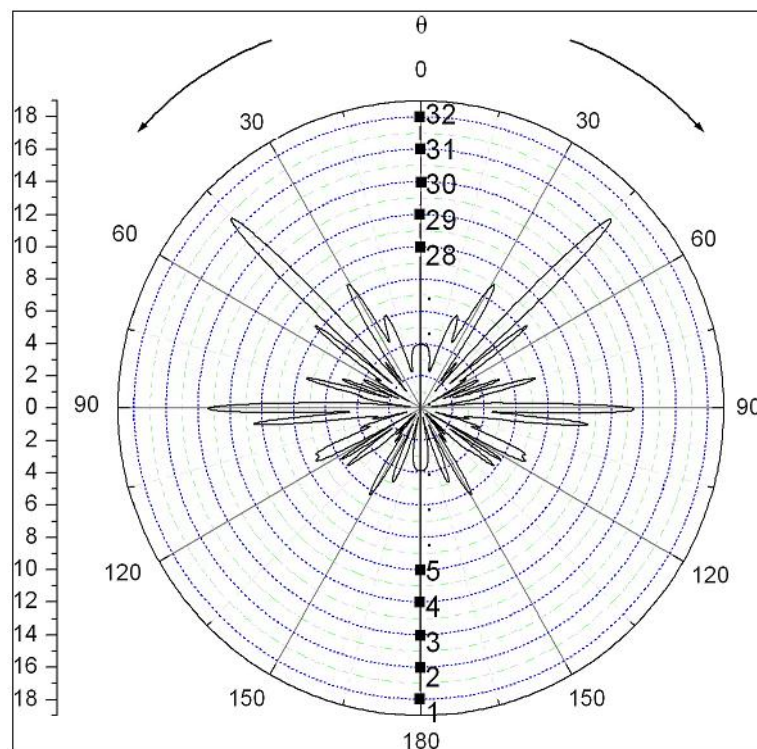
Η εφαρμογή του γενετικού αλγόριθμου γίνεται για στοιχειοκεραίες 32 στοιχείων για μεγιστοποίηση και ελαχιστοποίηση του παράγοντα διάταξης σε διάφορες επιθυμητές τιμές της γωνίας  $\theta$ . Θεωρείται πως η απόσταση  $d$  μεταξύ των στοιχείων είναι σταθερή και ίση με  $\lambda/2$ , και επομένως ο παράγοντας διάταξης δίνεται από τη σχέση (5.2.1).

#### **5.3.2 Εφαρμογή για Μεγιστοποίηση του Παράγοντα Διάταξης σε $\theta_1=45^\circ$ , $\theta_2=90^\circ$ και Ελαχιστοποίηση σε $\theta_3=135^\circ$**

Από την εκτέλεση του αλγορίθμου και την επιλογή του αποφασίζοντα προέκυψε η λύση για την οποία οι αντικειμενικές συναρτήσεις παίρνουν τις τιμές  $S_1=16.33$ ,  $S_2=13.28$  και  $S_3=0.61$ . Οι φάσεις των στοιχείων και το διάγραμμα του παράγοντα διάταξης φαίνονται παρακάτω.

Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση
1	194.66°	9	268.80°	17	141.95°	25	195.39°
2	226.27°	10	272.83°	18	219.76°	26	88.60°
3	107.59°	11	178.95°	19	210.97°	27	237.15°
4	285.59°	12	88.03°	20	143.35°	28	209.54°
5	177.51°	13	272.07°	21	148.39°	29	357.47°
6	314.45°	14	112.15°	22	185.82°	30	304.80°
7	254.41°	15	71.16°	23	278.63°	31	170.66°
8	195.60°	16	203.29°	24	276.97°	32	310.99°

**Πίνακας 5.3.1** Φάσεις γραμμικής στοιχειοκεραίας 32 στοιχείων με  $d=\lambda/2$ , για μεγιστοποίηση του παράγοντα διάταξης σε  $\theta_1=45^\circ$ ,  $\theta_2=90^\circ$  και ελαχιστοποίηση σε  $\theta_3=135^\circ$



**Σχήμα 5.3.1** Παράγοντας διάταξης γραμμικής στοιχειοκεραίας 32 στοιχείων με  $d=\lambda/2$ , για μεγιστοποίηση σε  $\theta_1=45^\circ$ ,  $\theta_2=90^\circ$  και ελαχιστοποίηση σε  $\theta_3=135^\circ$

Εύκολα μπορεί να παρατηρήσει κανείς πως ελαχιστοποιείται στο μέγιστο βαθμό ο λοβός σε γωνία  $135^\circ$  του σχήματος 5.2.1. Αυτό βέβαια, όπως άλλωστε αναμενόταν, επηρεάζει σε μικρό βαθμό τη μεγιστοποίηση στις άλλες δύο κατευθύνσεις.

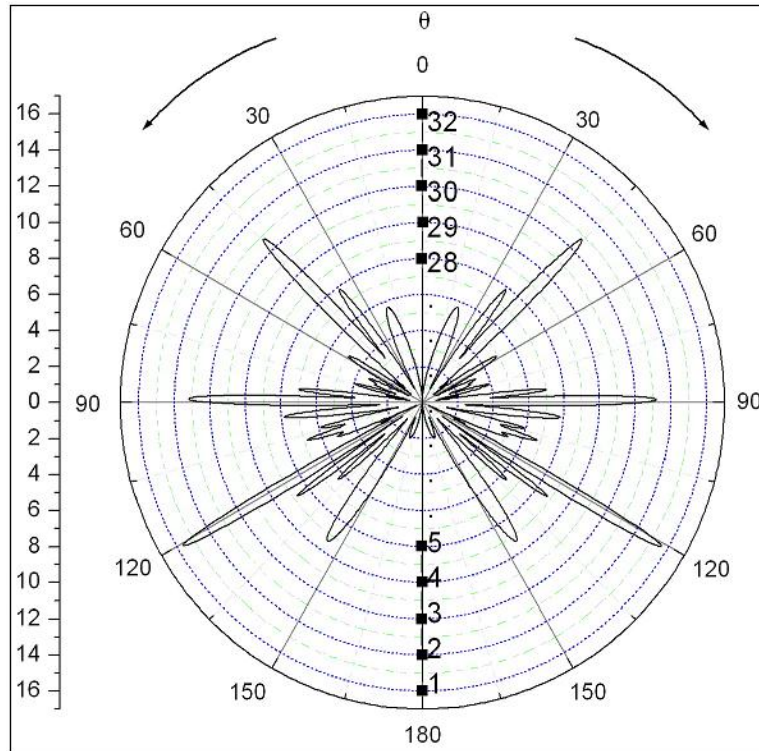


### 5.3.3 Εφαρμογή για Μεγιστοποίηση του Παράγοντα Διάταξης σε $\theta_1=45^\circ$ , $\theta_2=90^\circ$ , $\theta_3=120^\circ$ και Ελαχιστοποίηση σε $\theta_4=0^\circ$

Από την εκτέλεση του αλγορίθμου και την επιλογή του αποφασίζοντα προέκυψε η λύση για την οποία οι αντικειμενικές συναρτήσεις παίρνουν τις τιμές  $S_1=12.72$ ,  $S_2=12.26$ ,  $S_3=15.06$  και  $S_4=0.34$ . Οι φάσεις των στοιχείων και το διάγραμμα του παράγοντα διάταξης φαίνονται παρακάτω.

Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση
1	22.57°	9	39.74°	17	330.28°	25	15.50°
2	26.59°	10	10.40°	18	105.65°	26	84.00°
3	103.62°	11	163.58°	19	269.44°	27	313.17°
4	346.26°	12	341.60°	20	327.35°	28	265.28°
5	316.26°	13	255.95°	21	337.75°	29	39.65°
6	72.50°	14	184.95°	22	330.01°	30	152.98°
7	311.19°	15	310.08°	23	82.65°	31	218.13°
8	314.73°	16	281.87°	24	289.65°	32	323.72°

**Πίνακας 5.3.2** Φάσεις γραμμικής στοιχειοκεραίας 32 στοιχείων με  $d=\lambda/2$ , για μεγιστοποίηση του παράγοντα διάταξης σε  $\theta_1=45^\circ$ ,  $\theta_2=90^\circ$ ,  $\theta_3=120^\circ$  και ελαχιστοποίηση σε  $\theta_4=0^\circ$



**Σχήμα 5.3.2** Παράγοντας διάταξης γραμμικής στοιχειοκεραίας 32 στοιχείων με  $d=\lambda/2$ , για μεγιστοποίηση του σε  $\theta_1=45^\circ$ ,  $\theta_2=90^\circ$ ,  $\theta_3=120^\circ$  και ελαχιστοποίηση σε  $\theta_4=0^\circ$

Μπορεί και εδώ να παρατηρήσει κανείς την πλήρη εξάλειψη του λοβού στις  $0^\circ$  του σχήματος 5.2.6.

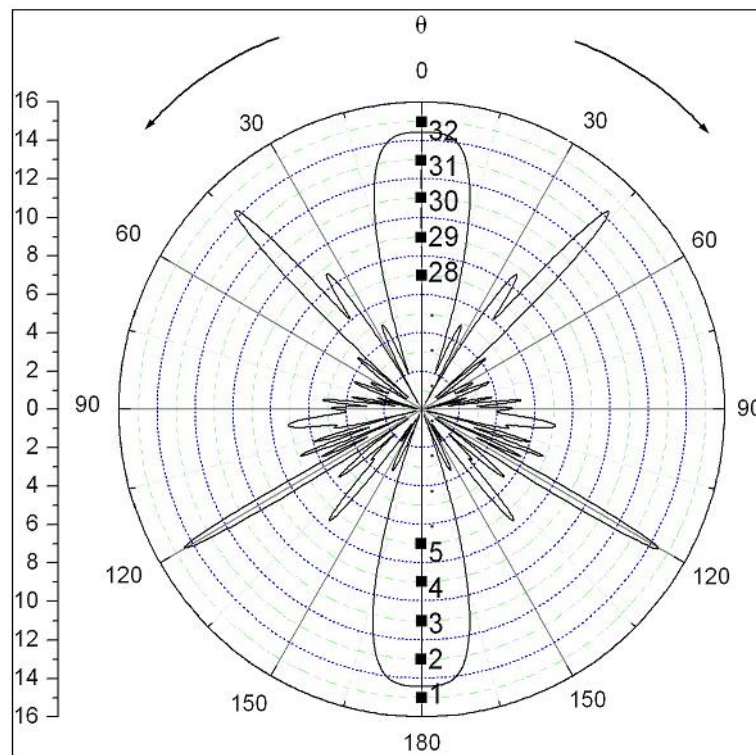
#### 5.3.4 Εφαρμογή για Μεγιστοποίηση του Παράγοντα Διάταξης σε $\theta_1=0^\circ$ , $\theta_2=45^\circ$ , $\theta_3=120^\circ$ και Ελαχιστοποίηση σε $\theta_4=30^\circ$ και $\theta_5=150^\circ$

Από την εκτέλεση του αλγορίθμου και την επιλογή του αποφασίζοντα προέκυψε η λύση για την οποία οι αντικειμενικές συναρτήσεις παίρνουν τις τιμές  $S_1=14.47$ ,  $S_2=13.25$ ,  $S_3=14.38$ ,  $S_4=0.52$  και  $S_5=0.53$ . Οι φάσεις των στοιχείων και το διάγραμμα του παράγοντα διάταξης φαίνονται παρακάτω.



Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση
1	86.60°	9	73.87°	17	41.06°	25	92.15°
2	187.72°	10	285.44°	18	233.24°	26	147.70°
3	324.82°	11	304.33°	19	301.20°	27	344.21°
4	38.31°	12	87.46°	20	66.85°	28	159.38°
5	345.27°	13	317.10°	21	6.06°	29	70.44°
6	159.02°	14	164.38°	22	206.93°	30	223.47°
7	18.42°	15	329.02°	23	14.62°	31	259.70°
8	237.04°	16	275.71°	24	79.84°	32	323.13°

**Πίνακας 5.3.3** Φάσεις γραμμικής στοιχειοκεραίας 32 στοιχείων με  $d=\lambda/2$ , για μεγιστοποίηση του παράγοντα διάταξης σε  $\theta_1=0^\circ$ ,  $\theta_2=45^\circ$ ,  $\theta_3=120^\circ$  και ελαχιστοποίηση σε  $\theta_4=30^\circ$  και  $\theta_5=150^\circ$



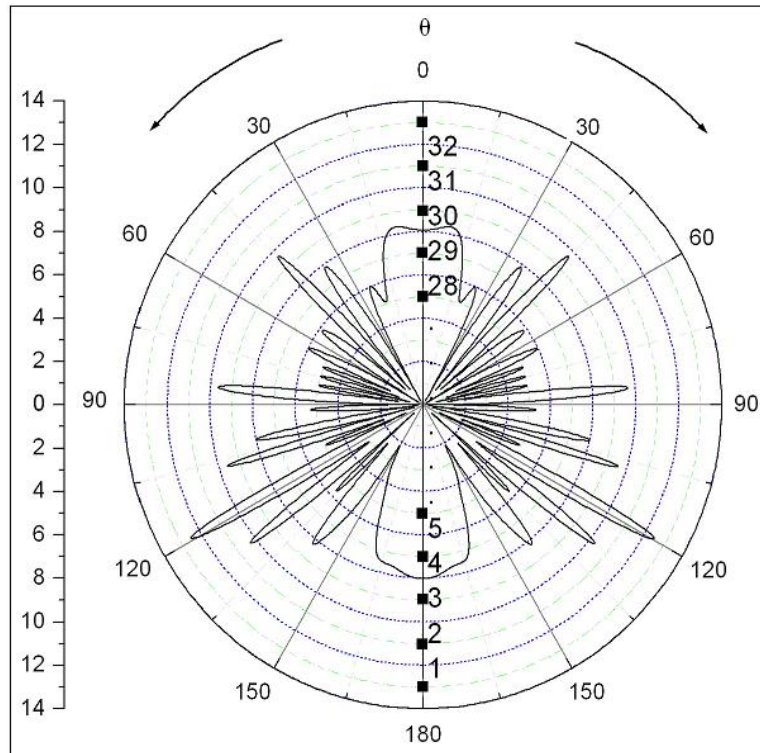
**Σχήμα 5.3.3** Παράγοντας διάταξης γραμμικής στοιχειοκεραίας 32 στοιχείων με  $d=\lambda/2$ , για μεγιστοποίηση σε  $\theta_1=0^\circ$ ,  $\theta_2=45^\circ$ ,  $\theta_3=120^\circ$  και ελαχιστοποίηση σε  $\theta_4=30^\circ$  και  $\theta_5=150^\circ$

### 5.3.5 Εφαρμογή για Μεγιστοποίηση του Παράγοντα Διάταξης σε $\theta_1=0^\circ$ , $\theta_2=45^\circ$ , $\theta_3=120^\circ$ και Ελαχιστοποίηση σε $\theta_4=30^\circ$ , $\theta_5=90^\circ$ και $\theta_6=150^\circ$

Από την εκτέλεση του αλγορίθμου και την επιλογή του αποφασίζοντα προέκυψε η λύση για την οποία οι αντικειμενικές συναρτήσεις παίρνουν τις τιμές  $S_1=8.05$ ,  $S_2=9.66$ ,  $S_3=12.26$ ,  $S_4=0.30$ ,  $S_5=0.70$  και  $S_6=2.18$ . Οι φάσεις των στοιχείων και το διάγραμμα του παράγοντα διάταξης φαίνονται παρακάτω.

Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση	Στοιχείο	Φάση
1	86.60°	9	73.87°	17	41.06°	25	92.15°
2	187.72°	10	285.44°	18	233.24°	26	147.70°
3	324.82°	11	304.33°	19	301.20°	27	344.21°
4	38.31°	12	87.46°	20	66.85°	28	159.38°
5	345.27°	13	317.10°	21	6.06°	29	70.44°
6	159.02°	14	164.38°	22	206.93°	30	223.47°
7	18.42°	15	329.02°	23	14.62°	31	259.70°
8	237.04°	16	275.71°	24	79.84°	32	323.13°

**Πίνακας 5.3.4** Φάσεις γραμμικής στοιχειοκεραίας 32 στοιχείων με  $d=\lambda/2$ , για μεγιστοποίηση του παράγοντα διάταξης σε  $\theta_1=0^\circ$ ,  $\theta_2=45^\circ$ ,  $\theta_3=120^\circ$  και ελαχιστοποίηση σε  $\theta_4=30^\circ$ ,  $\theta_5=90^\circ$  και  $\theta_6=150^\circ$



**Σχήμα 5.3.4** Παράγοντας διάταξης γραμμικής στοιχειοκεραίας 32 στοιχείων με  $d=\lambda/2$ , για μεγιστοποίηση σε  $\theta_1=0^\circ$ ,  $\theta_2=45^\circ$ ,  $\theta_3=120^\circ$  και ελαχιστοποίηση σε  $\theta_4=30^\circ$ ,  $\theta_5=90^\circ$  και  $\theta_6=150^\circ$

## Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>

### Συμπεράσματα – Μελλοντικές Επεκτάσεις

Στη συγκεκριμένη εργασία έγινε εφαρμογή των απλών γενετικών αλγορίθμων και των γενετικών αλγορίθμων πολλών αντικειμενικών συναρτήσεων στη σύνθεση γραμμικών στοιχειοκεραιών. Εφαρμόζοντας τις μεθόδους αυτές, εξάχθηκαν οι φάσεις της ρευματικής διέγερσης των στοιχείων γραμμικών στοιχειοκεραιών για την εμφάνιση επιθυμητής ακτινοβολίας ή την εξάλειψή της (μέσω της μεγιστοποίησης ή της ελαχιστοποίησης του παράγοντα διάταξης αντίστοιχα) σε διάφορες επιθυμητές κατευθύνσεις. Παρατηρήθηκε η συμπεριφορά των στοιχειοκεραιών ανάλογα με το πλήθος των στοιχείων, την απόσταση ανάμεσά τους, αλλά και τις επιθυμητές κατευθύνσεις ακτινοβολίας. Αξίζει να αναφερθεί πως ενώ η περίπτωση της περιστροφής του κύριου λοβού σε μία κατεύθυνση κάθε φορά έχει μελετηθεί αρκετά, δε συμβαίνει το ίδιο και για την εμφάνιση ή την εξάλειψη κύριων λοβών ακτινοβολίας σε περισσότερες από μια επιθυμητές κατευθύνσεις. Το γεγονός αυτό θεωρούμε πως καλύπτει η παρούσα εργασία.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι θα μπορούσαν να εφαρμοστούν και σε άλλες κατηγορίες στοιχειοκεραιών, είτε διαφορετικής γεωμετρικής διάταξης είτε διαφορετικής ρευματικής διέγερσης των στοιχείων. Με άλλα λόγια, μια μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να γίνει προς αυτή την κατεύθυνση.

## Βιβλιογραφία - Αναφορές

1. Beng-Kiong Yeo and Yilong Lu, "Array Failure Correction with a Genetic Algorithm", IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Vol. 47, No. 5, May 1999, pp.823-828
2. Constantine A. Balanis, "Antenna Theory: Analysis and Design", John Wiley & Sons, 1997
3. David E. Goldberg, "Genetics algorithms in Search, Optimization and Machine Learning", Addison - Wesley, 1989
4. Diogenes Marcano and Filinto Duran, "Synthesis of Antenna Arrays Using Genetic Algorithms", IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 42, No. 3, June 2000, pp.12-20
5. J. D. Kraus, "Κεραίες", Εκδ. Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 1988
6. Matthew A. Kupinski and Mark A. Anastasio, "Multiobjective Genetic Optimization of Diagnostic Classifiers with Implications for Generating Receiver Operating Characteristic Curves", IEEE Trans. on Medical Imaging, Vol. 18, No. 8, August 1999, pp.675-685
7. S. J. Orfanidis, "Electromagnetic Waves & Antennas", 2004
8. T. Murata, "Genetic Algorithms for Multi-objective Optimization", 1997
9. Α. Ποτηράκης, "Ανάπτυξη Λογισμικού Διαστασιολόγησης Υβριδικού Συστήματος Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας", Χανιά 2003
10. Κ. Γεωργακόπουλος, "Εφαρμογή Τεχνικών Υπολογιστικού Ηλεκτρομαγνητισμού (Genetic Algorithms) στη Σύνθεση Γραμμικών και Επίπεδων Στοιχειοκεραίων", Χανιά 2003
11. Σ. Σ. Κουρής, "Στοιχεία Θεωρίας και Διαδόσεως Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων", Εκδ. Ζήτη, Θεσσαλονίκη 1994
12. Χ. Καψάλης και Π. Κωπτής, "Κεραίες – Ασύρματες Ζεύξεις", Εκδ. Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2003

## Παράρτημα

### I. Σχεδίαση του Πολικού Διαγράμματος του Παράγοντα Διάταξης

Σύμφωνα με τη σχέση (2.3.8) ο παράγοντας διάταξης γραμμικής στοιχειοκεραίας είναι

$$S(\gamma) = \sum_{m=0}^{M-1} a_m \exp[jm(kd \cos \gamma + \delta)] \quad (\text{I.1})$$

Αν θεωρήσουμε τη βοηθητική μεταβλητή  $\psi$  όπου

$$\psi = kd \cos \gamma + \delta \quad (\text{I.2})$$

η σχέση (I.1) παίρνει τη μορφή

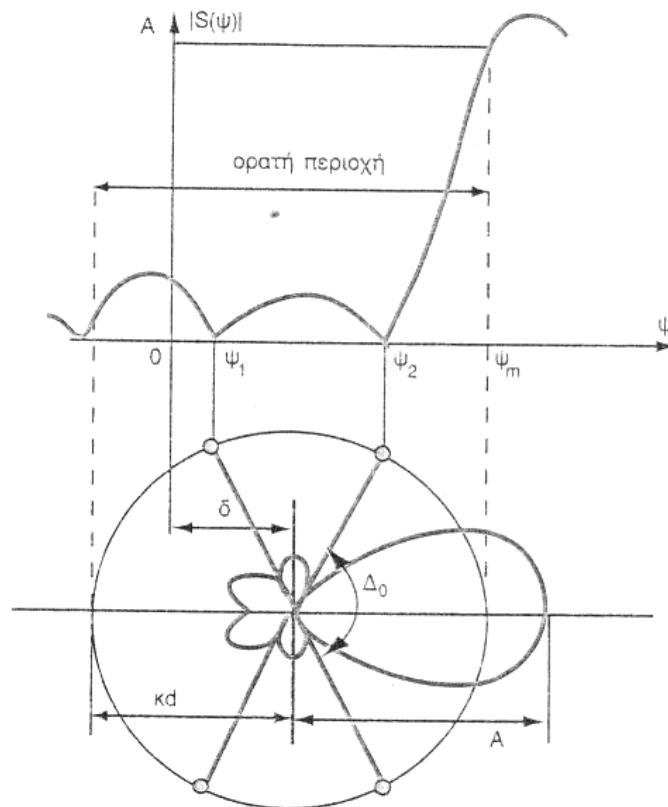
$$S(\psi) = \sum_{m=0}^{M-1} a_m \exp(jm\psi) \quad (\text{I.3})$$

Από ότι φαίνεται από τη σχέση (I.3) ο παράγοντας διάταξης μιας γραμμικής στοιχειοκεραίας είναι περιοδική συνάρτηση ως προς τη μεταβλητή  $\psi$  με περίοδο  $2\pi$ . Η συνάρτηση  $S(\psi)$  μπορεί να προσδιοριστεί είτε με αριθμητικό είτε με γραφικό τρόπο. Στη συνέχεια προσδιορίζεται με γραφικό τρόπο η πολική μορφή του παράγοντα διάταξης ως προς τη γωνία κλίσης  $\gamma$ . Η χάραξη του πολικού διαγράμματος  $|S(\gamma)|$  με γνωστή τη συνάρτηση  $S(\psi)$  βασίζεται στη σχέση (I.2). Το πολικό διάγραμμα είναι σε κάθε περίπτωση συμμετρικό περί τον άξονα της στοιχειοκεραίας. Για τη χάραξή του ακολουθούνται τα εξής βήματα:

1. Σχεδιάζεται το καρτεσιανό διάγραμμα  $|S(\psi)|$
2. Γράφεται κύκλος με ακτίνα  $kd$  και κέντρο μετατοπισμένο κατά  $\delta$  ως προς την ευθεία  $\psi=0$  του καρτεσιανού διαγράμματος  $|S(\psi)|$

3. Με τη βοήθεια του κύκλου αυτού γίνεται αντιστοίχιση των τιμών της βοηθητικής μεταβλητής  $\psi$  με τις τιμές της γωνίας  $\gamma$ . Συνήθως, αρκεί να γίνει αντιστοίχιση ορισμένων χαρακτηριστικών τιμών της γωνίας  $\psi$ . Προς τούτο, φέρονται οι ευθείες  $\psi=\psi_i$ , όπου  $i=1,2,\dots$ , οι χαρακτηριστικές αυτές τιμές (μηδενισμοί ή μέγιστα του  $|S(\psi)|$ ), που τέμνουν τον κύκλο σε αντίστοιχα σημεία. Ακολούθως, συνδέεται το κέντρο του κύκλου με τα σημεία τομής του με τις ευθείες  $\psi=\psi_i$  και προκύπτουν γραφικά οι γωνίες κλίσης  $\gamma_i$ ,  $i=1,2,\dots$ , που αντιστοιχούν στις χαρακτηριστικές τιμές  $\psi$
4. Κατά τις ακτινικές διευθύνσεις  $\gamma=\gamma_i$  καθορίζονται αποστάσεις από το κέντρο του κύκλου ίσες προς  $|S(\psi_i)|$
5. Συνδέονται με συνεχή γραμμή τα σημεία που προσδιορίστηκαν στο προηγούμενο βήμα και προκύπτει γραφικά το πολικό διάγραμμα  $|S(\gamma)|$

Η παραπάνω διαδικασία έχει ακολουθηθεί για τη χάραξη του πολικού διαγράμματος  $|S(\gamma)|$  του παρακάτω σχήματος και αντιστοιχεί σε στροφή ενός διανύσματος μήκους  $kd$  από τη γωνία  $\gamma=0$  μέχρι τη γωνία  $\gamma=\pi$ .



**Σχήμα 1.1** Γραφική χάραξη πολικού διαγράμματος

Η προβολή του σε άξονα κάθετο προς την ευθεία  $\psi=0$ , που ταυτίζεται με τον άξονα της στοιχειοκεραίας, έχει μήκος  $kd\cos\gamma$ . Η αντίστοιχη τιμή του  $\psi$  στο καρτεσιανό διάγραμμα  $|S(\psi)|$  είναι μετατοπισμένη κατά  $\delta$ . Λόγω της συμμετρίας του  $|S(\gamma)|$  περί τον άξονα της στοιχειοκεραίας αρκεί η μεταβολή της κλίσης στο εύρος

$$0 \leq \gamma \leq \pi \quad (I.4)$$

με αντίστοιχη μεταβολή του  $\psi$  στο εύρος

$$\delta - kd \leq \psi \leq \delta + kd \quad (I.5)$$

Το ανωτέρω διάστημα τιμών του  $\psi$  αντιστοιχεί σε πραγματικές τιμές της γωνίας κλίσης  $\gamma$  και ονομάζεται ορατή περιοχή του  $\psi$ , όπως αναφέρθηκε και στο 2ο Κεφάλαιο. Το εύρος της ορατής περιοχής καθορίζεται από το ηλεκτρικό βήμα  $kd$  της στοιχειοκεραίας, ενώ η θέση της από τη διαφορά φάσης  $\delta$ . Πρέπει να τονισθεί ότι οι τιμές του  $|S(\psi)|$  που βρίσκονται εκτός της ορατής περιοχής δεν επηρεάζουν τον παράγοντα διάταξης  $|S(\gamma)|$