



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝ.
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Διπλωματική εργασία

με θέμα

***Εφαρμογή Τεχνικών Υπολογιστικού Ηλεκτρομαγνητισμού
(Genetic Algorithms)
στη Σύνθεση Γραμμικών και Επίπεδων Στοιχειοκεραιών***

από τον **Κωνσταντίνο Γεωργακόπουλο.**

*Υπό την καθοδήγηση του **Ιωάννη Βαρδιάμπαση,**
Επίκουρου Καθηγητή Τ.Ε.Ι. Κρήτης &
Διδάσκοντος ΠΔ 407/80 Πολυτεχνείου Κρήτης.*

Επιβλέπων Καθηγητής: Πατεράκης Μιχάλης.

Επιτροπή Παρακολούθησης: **Βαρδιάμπασης Ιωάννης,** Πατεράκης Μιχάλης, Σιδηρόπουλος Νικόλαος.

Χανιά, Νοέμβριος 2003

Περίληψη

Οι στοιχειοκεραίες αποτελούν τη βασικότερη ίσως κατηγορία κεραιών, λόγω των πολλών εφαρμογών τους στην εξυπηρέτηση των τηλεπικοινωνιακών αναγκών. Το συμπέρασμα αυτό ενισχύεται από το γεγονός ότι 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 και στρέφεται προς οποιαδήποτε επιθυμητή κατεύθυνση, αλλάζοντας μόνο τη φάση τροφοδοσίας των στοιχείων. 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 η απαίτηση για άμεση και διαρκή παρακολούθηση της θέσης κινούμενων χρηστών κινητής τηλεφωνίας. Στην παρούσα εργασία το πρόβλημα λύνεται με την εφαρμογή των γενετικών αλγορίθμων, μιας σχετικά νέας μεθόδου αναζήτησης και βελτιστοποίησης. Η εφαρμογή τους επεκτείνεται και στις δύο κύριες κατηγορίες στοιχειοκεραιών, γραμμικές και επίπεδες, και εφαρμόζοντας τον βασικό γενετικό αλγόριθμο γίνεται αναζήτηση του κατάλληλου συνδυασμού φάσεων που θα αποδώσει την μέγιστη δυνατή ακτινοβολία στην εκάστοτε επιθυμητή κατεύθυνση.

Πρόλογος

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες στον καθηγητή κ. Ιωάννη Βαρδιάμπαση τόσο για την ευκαιρία που μου έδωσε να πραγματοποιήσω την εργασία μου στον τομέα τηλεπικοινωνιών που αποτελούσε επιθυμία μου, όσο και για την πολύτιμη βοήθεια του σε όλα τα στάδια προετοιμασίας της.

Θερμές ευχαριστίες στους καθηγητές κ. Μ. Πατεράκη και κ. Ν. Σιδηρόπουλο, για τον χρόνο που αφιέρωσαν στην ανάγνωση της εργασίας και για την παρουσία τους ως μέλη της εξεταστικής επιτροπής.

Ακόμα, ένα μεγάλο ευχαριστώ στον αδελφό μου Χρήστο για τις χρήσιμες υποδείξεις του στον πηγαίο κώδικα και στους συγγάτοικους μου Σάκη και Δημήτρη, καθώς και στην Άννα για την υπομονή και την συμπαράσταση τους σε όλη την διάρκεια της ενασχόλησης μου με την παρούσα εργασία.

Κ. Γεωργακόπουλος
Χανιά, Νοέμβριος 2003

Αφιερώνεται στους γονείς μου

Περιεχόμενα

Εισαγωγή	1
Κεφάλαιο 1	
Γενετικοί αλγόριθμοι	5
1.1 Εισαγωγή	5
1.2 Δομή και λειτουργία του γενετικού αλγόριθμου	5
1.3 Αντικειμενική συνάρτηση ή συνάρτηση προσαρμοστικότητας	11
1.4 Επιλογές παραμέτρων αλγορίθμου στις υπό εξέταση περιπτώσεις	11
Κεφάλαιο 2	
Γραμμικές στοιχειοκεραίες	13
2.1 Εισαγωγή	13
2.2 Στοιχειοκεραίες πολλών στοιχείων	13
2.3 Γραμμικές στοιχειοκεραίες	15
2.4 Εφαρμογή γενετικού αλγόριθμου στη σύνθεση γραμμικών στοιχειοκεραιών	21
Κεφάλαιο 3	
Επίπεδες στοιχειοκεραίες	38
3.1 Ομοιόμορφες επίπεδες στοιχειοκεραίες	38
3.2 Εφαρμογή γενετικού αλγόριθμου στη σύνθεση επίπεδων στοιχειοκεραιών	41
Συμπεράσματα – Μελλοντικές Επεκτάσεις	55
Βιβλιογραφία – Αναφορές	56

Εισαγωγή

Στοιχειοκεραίες

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 αντιμετωπισθούν οι απαιτήσεις αυτές είναι η χρήση στοιχειοκεραιών [1]-[6]. Οι στοιχειοκεραίες είναι διατάξεις που αποτελούνται από πολλούς όμοιους ακτινοβολητές με τον ίδιο προσανατολισμό που ακτινοβολούν ή λαμβάνουν ταυτόχρονα. Με κατάλληλη επιλογή της ρευματικής διέγερσης κάθε ακτινοβολητή επιτυγχάνονται βελτιωμένες ιδιότητες για τη στοιχειοκεραία σε σχέση με τις αντίστοιχες ενός απλού στοιχείου της. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα επιμέρους πεδία των ακτινοβολούντων στοιχείων συμβάλλουν στις επιθυμητές διευθύνσεις του χώρου και αλληλοαναιρούνται σε άλλες.

Το συνολικό πεδίο μιας στοιχειοκεραίας προσδιορίζεται με διανυσματική υπέρθεση 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 υπολοίπων στοιχείων. Η ισχύς της παραδοχής αυτής εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των στοιχείων. Οι στοιχειοκεραίες βρίσκουν ευρεία εφαρμογή γιατί παρέχουν τις εξής δυνατότητες :

- α) αύξηση της κατευθυντικότητας,
- β) σύνθεση επιθυμητών διαγραμμάτων ακτινοβολίας,
- γ) στροφή του διαγράμματος ακτινοβολίας με ηλεκτρονικό τρόπο.

Η μορφή του διαγράμματος ακτινοβολίας μιας στοιχειοκεραίας εξαρτάται από:

- α) τη γεωμετρία της στοιχειοκεραίας (γραμμική, κυκλική, επίπεδη κλπ.),
- β) τη συχνότητα λειτουργίας,
- γ) την απόσταση μεταξύ των στοιχείων ακτινοβολίας,
- δ) τη σχετική ρευματική διέγερση των στοιχείων ακτινοβολίας, και
- ε) το πλήθος των στοιχείων ακτινοβολίας

Συνεπώς οι στοιχειοκεραίες αποτελούν τη βασικότερη ίσως κατηγορία κεραιών, λόγω των πολλών εφαρμογών τους στην εξυπηρέτηση των τηλεπικοινωνιακών αναγκών [1]-[6]. Οι κεραίες αυτές εμφανίζονται κυρίως σε δύο τύπους, τις γραμμικές και τις

επίπεδες, ανάλογα με την γεωμετρική διάταξη των στοιχείων που τις αποτελούν. Γραμμικές χαρακτηρίζονται όταν τα κέντρα των στοιχείων βρίσκονται πάνω σε ευθεία γραμμή, ενώ επίπεδες χαρακτηρίζονται όταν τα κέντρα των στοιχείων βρίσκονται πάνω σε επίπεδη επιφάνεια. Επιπλέον, ανάλογα με την μορφή των συντελεστών διέγερσης των στοιχείων τους, οι στοιχειοκεραίες διακρίνονται σε ομοιόμορφες και ανομοιόμορφες.

Οι στοιχειοκεραίες παρέχουν στο σχεδιαστή τη δυνατότητα να συνθέσει πρακτικά οποιοδήποτε επιθυμητό διάγραμμα ακτινοβολίας σχεδόν ανεξάρτητα από τον τύπο των ακτινοβολούντων στοιχείων. Έτσι ακόμα και μια στοιχειοκεραία αποτελούμενη από σημειακές πηγές μπορεί να παράγει το διάγραμμα ακτινοβολίας οποιασδήποτε κεραίας και παράλληλα να επιτρέπει τη δυνατότητα διαρκούς περιστροφής του κύριου λοβού ακτινοβολίας [1]-[6]. Συγκεκριμένα η κύρια δέσμη ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας μπορεί να στρέφεται προς οποιαδήποτε επιθυμητή κατεύθυνση, αλλάζοντας μόνο τη φάση τροφοδοσίας των στοιχείων της στοιχειοκεραίας. 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 της ύπαρξης 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 λοιπόν αντιληπτό, είναι αναγκαίος ο ακριβής προσδιορισμός της φάσης κάθε στοιχείου της στοιχειοκεραίας, για την εκμετάλλευση των βέλτιστων κατευθυντικών της ιδιοτήτων.

Ωστόσο η σχέση που δίνει την ένταση ακτινοβολίας μιας στοιχειοκεραίας είναι μη γραμμική και έχει πλήθος όρων που μεταβάλλεται ανάλογα με το πλήθος των στοιχείων. Διάφορες αναλυτικές μέθοδοι βελτιστοποίησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη λύση του προβλήματος, όμως όλες τους εμφανίζουν συγκεκριμένα μειονεκτήματα [7]. Συγκεκριμένα, επειδή βασίζονται σε ντετερμινιστικούς κανόνες, αυτοπεριορίζονται από απαιτήσεις όπως η ακολουθιακή αναζήτηση σημείου προς σημείο, η συνέχεια της συνάρτησης μεταφοράς και η ύπαρξη της παραγώγου της [8]. Στην παρούσα εργασία το πρόβλημα λύνεται με την εφαρμογή των γενετικών αλγορίθμων, μιας σχετικά νέας μεθόδου αναζήτησης και βελτιστοποίησης.

Γενετικοί αλγόριθμοι

Οι γενετικοί αλγόριθμοι (genetic algorithms) [9], είναι στοχαστικές διαδικασίες αναζήτησης που μοντελοποιούν μηχανισμούς της γενετικής, όπως η φυσική επιλογή και η εξέλιξη. Συνδυάζουν την επιβίωση του ισχυρότερου μεταξύ των σχηματισμών σειρών

(strings) με μια δομημένη αλλά τυχαία ανταλλαγή πληροφοριών για τον σχηματισμό ενός αλγόριθμου αναζήτησης. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε σύνθετα συνδυαστικά προβλήματα, ενώ στα πλεονεκτήματα τους περιλαμβάνονται τόσο η υπολογιστική τους απλότητα όσο και η μη οριοθέτηση τους από περιοριστικούς κανόνες σχετικά με το πεδίο αναζήτησης. Αξίζει να αναφερθεί ότι οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε διάφορους τομείς της επιστήμης με ιδιαίτερα επιτυχή αποτελέσματα. Εξάλλου, η χρήση τους βρίσκει πολλές εφαρμογές στην εφαρμοσμένη ηλεκτρομαγνητική θεωρία, στη μικροκυματική τεχνολογία και στις ασύρματες επικοινωνίες [7]-[8], [10].

Αρκετοί ερευνητές, όπως ο D. Marcano [11]-[13], ο R. Haupt [8] και ο M. Shimizu [14], ασχολήθηκαν με τη σύνθεση στοιχειοκεραιών με χρήση γενετικών αλγορίθμων, αντιμετωπίζοντας το πρόβλημα με ποικίλους τρόπους. Συγκεκριμένα η διαφορετικότητα των τρόπων αντιμετώπισης έχει να κάνει κυρίως με την μορφή του γενετικού αλγορίθμου και την κωδικοποίηση των προς βελτιστοποίηση παραμέτρων. Ωστόσο, η διαθέσιμη διεθνής βιβλιογραφία αντιμετωπίζει κυρίως τις γραμμικές στοιχειοκεραίες και παραμελεί τη σύνθεση επιθυμητού διαγράμματος ακτινοβολίας με επίπεδες στοιχειοκεραίες [15]-[17]. Αυτό το κενό πιστεύουμε ότι καλύπτει η παρούσα εργασία, η οποία επεκτείνεται εκτός από τις γραμμικές και στις επίπεδες στοιχειοκεραίες, με εφαρμογή του βασικού γενετικού αλγορίθμου για την αναζήτηση του κατάλληλου συνδυασμού φάσεων που θα αποδώσει την μέγιστη δυνατή ακτινοβολία στην εκάστοτε επιθυμητή κατεύθυνση.

Περιεχόμενα

Το πρώτο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στους γενετικούς αλγορίθμους. Εκεί αναπτύσσονται συνοπτικά οι βασικές αρχές της λειτουργίας τους και γίνεται σύγκριση τους με τις παραδοσιακές μεθόδους αναζήτησης. Ακόμα αναλύονται οι κύριες διαδικασίες από τις οποίες αποτελούνται οι γενετικοί αλγόριθμοι και εξετάζονται οι επιλογές των παραμέτρων τους στα υπό εξέταση προβλήματα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο δίνεται το θεωρητικό υπόβαθρο 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 συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων τους. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η εφαρμογή του αλγορίθμου στην περίπτωση των ομοιόμορφων γραμμικών στοιχειοκεραιών. Αναλύεται η κωδικοποίηση

που επιλέχτηκε και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για διαφορετικό πλήθος στοιχείων και για διάφορες επιθυμητές γωνίες κύριας ακτινοβολίας.

Στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται η αντίστοιχη παρουσίαση για την περίπτωση των ομοιόμορφων επίπεδων στοιχειοκεραιών, σε ποικιλία συνδυασμών της διάταξης των στοιχείων που τις αποτελούν. Τέλος αναφέρονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν, καθώς και μελλοντικές επεκτάσεις που μπορούν να γίνουν σε παρεμφερή προβλήματα.

Κεφάλαιο 1^ο

Γενετικοί Αλγόριθμοι

1.1 Εισαγωγή

Οι γενετικοί αλγόριθμοι (GA's) μπορούν να θεωρηθούν ως γενικοί αριθμητικοί μέθοδοι εμπνευσμένοι από 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 σχηματισμών σειρών (strings) με μια δομημένη αλλά τυχαία ανταλλαγή πληροφοριών για τον σχηματισμό ενός αλγόριθμου αναζήτησης. Ο ανασυνδυασμός των γονιδίων, η μεταλλαγή τους και τελικά η αναπαραγωγή του πιο «προσαρμοσμένου» που αποτελούν λειτουργίες της φύσης μοντελοποιούνται με αποτέλεσμα την δημιουργία μιας ισχυρής υπολογιστικής τεχνικής. Στα πλεονεκτήματα αυτών των αλγορίθμων συγκαταλέγεται τόσο η υπολογιστική τους απλότητα όσο και η μη οριοθέτηση τους από περιοριστικούς κανόνες σχετικά με το πεδίο αναζήτησης. Οι βασικές διαφορές μεταξύ γενετικών αλγορίθμων και μιας συνηθισμένης αναζήτησης είναι οι εξής :

- Οι GA's δουλεύουν με μια κωδικοποίηση του συνόλου των παραμέτρων και όχι με αυτές καθαυτές τις παραμέτρους.
- Η αναζήτηση στους GA's γίνεται από ένα πληθυσμό σημείων και όχι από ένα απλό σημείο.
- Οι GA's χρησιμοποιούν πιθανοκρατικούς κανόνες μεταβολής και όχι ντετερμινιστικούς.

Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι κατά την διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας, οι γενετικοί αλγόριθμοι εφαρμόστηκαν σε προβλήματα διάφορων κλάδων της επιστήμης και η χρήση τους έγινε εκτεταμένη στον ηλεκτρομαγνητισμό

1.2 Δομή και λειτουργία του γενετικού αλγόριθμου

Στην πιο βασική τους μορφή, οι γενετικοί αλγόριθμοι λειτουργούν κυρίως ως μέθοδοι βελτιστοποίησης συναρτήσεων. Αρχίζουν με ένα πληθυσμό σειρών (strings) όπου αντιστοιχεί σε πιθανές λύσεις και με εφαρμογή την αρχή της επιβίωσης του ισχυρότερου

παρέχουν όλο και καλύτερες προσεγγίσεις σε μια λύση. Σε κάθε γενιά, δημιουργείται ένα νέο σύνολο σειρών σταθερού πλήθους χρησιμοποιώντας κυρίως τμήματα από τις ισχυρότερες σειρές της προηγούμενης γενιάς. Κάθε παράμετρος του προβλήματος κωδικοποιείται με την μορφή σειράς (string), η οποία ονομάζεται γονίδιο (gene) και ένα σύνολο από γονίδια είναι το χρωμόσωμα (chromosome), όπου αντιστοιχεί σε μια πιθανή λύση. Η παρουσίαση των χρωμοσωμάτων ποικίλει σύμφωνα με την φύση του προβλήματος, ωστόσο η πιο κλασική μέθοδος είναι η κωδικοποίηση σε bit του δυαδικού αλφάβητου (0,1) τόσο εξαιτίας της απλότητας της όσο και της εύκολης ανιχνευσιμότητας που παρέχει.

Ο γενετικός αλγόριθμος απαιτεί την ύπαρξη μιας συνάρτησης προσαρμοστικότητας (fitness) η οποία βαθμολογεί (βαθμός προσαρμοστικότητας) κάθε χρωμόσωμα στον εκάστοτε πληθυσμό. Για την λειτουργία αυτή γίνεται χρήση μιας αντικειμενικής συνάρτησης (objective function) που χαρακτηρίζει την απόδοση του χρωμοσώματος στο πεδίο του προβλήματος. Αναμένεται το χρωμόσωμα με την υψηλότερη συνάρτηση προσαρμοστικότητας να δημιουργήσει ένα μεγαλύτερο πλήθος γόνων κατά την αναπαραγωγή και έτσι να διαθέτει μεγαλύτερη πιθανότητα επιβίωσης στην γενιά που θα ακολουθήσει.

Ο GA συγκροτείται από συναρτήσεις οι οποίες παράγουν μια ακολουθία πληθυσμών των οποίων τα μέλη θα έχουν γενικά βελτιωμένες τιμές αντικειμενικής συνάρτησης. Δοσμένου ενός πληθυσμού η επανάληψη του GA αρχίζει με τον υπολογισμό των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε χρωμόσωμα και μετά εφαρμόζονται οι γενετικές λειτουργίες της επιλογής (selection), διασταύρωσης (crossover) και μεταλλαγής (mutation) για την παραγωγή της επόμενης γενιάς.

Επιλογή (Selection)

Για να ξεκινήσει αυτή η επανάληψη, ο γενετικός αλγόριθμος παράγει έναν τυχαίο αρχικό πληθυσμό και τον εισάγει στον κύριο βρόχο του GA ο οποίος επαναλαμβάνεται για κάθε διαδοχικό πληθυσμό. Η μετάβαση σε κάθε επόμενη γενιά ξεκινά με την επιλογή των «καλών» χρωμοσωμάτων βασιζόμενη στις τιμές των αντικειμενικών τους συναρτήσεων. Η λειτουργία της επιλογής λοιπόν παράγει έναν καινούργιο πληθυσμό όπου κατά μέσο όρο θα είναι καλύτερος από τον προηγούμενο.

Έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές για την υλοποίηση της επιλογής, στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε μια από τις πιο συνηθισμένες που ονομάζεται επιλογή με τον

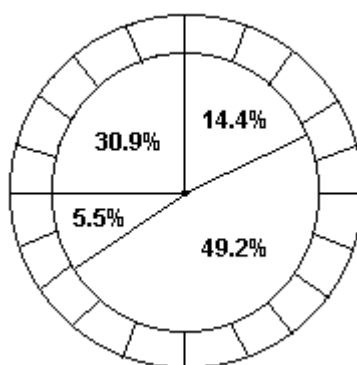
τροχό της τύχης (Roulette Wheel Selection). Στην τεχνική αυτή κάθε χρωμόσωμα του πληθυσμού αντιπροσωπεύεται με μια σχισμή στον τροχό της τύχης, το μέγεθος της οποίας εξαρτάται από το μέγεθος της τιμής προσαρμοστικότητας (fitness) του χρωμοσώματος. Για αναπαραγωγή των υποψηφίων χρωμοσωμάτων της επόμενης γενιάς αρκεί η περιστροφή του τροχού τόσες φορές όσες και ο απαιτούμενος αριθμός των χρωμοσωμάτων σε κάθε γενιά. Με τον τρόπο αυτό γίνεται φανερό ότι οι σειρές με μεγαλύτερο βαθμό προσαρμοστικότητας έχουν υψηλότερη πιθανότητα να έχουν απογόνους στην επόμενη γενιά. Όταν μια σειρά επιλεγεί για αναπαραγωγή τότε εισάγεται σε ένα σύνολο, στο οποίο εν συνεχεία επενεργούν οι λειτουργίες της διασταύρωσης και της μεταλλαγής με σκοπό την δημιουργία της επόμενης γενιάς. Αξίζει να σημειωθεί στο σημείο αυτό ότι η διαδικασία της επιλογής είναι υπεύθυνη για την σύγκλιση του αλγόριθμου και είναι η μόνη που εμπλέκει την έννοια της προσαρμοστικότητας.

Για παράδειγμα μπορούμε να θεωρήσουμε ένα πληθυσμό τεσσάρων μόνο χρωμοσωμάτων με τις αντίστοιχες τιμές προσαρμοστικότητας τους όπως φαίνονται στον παρακάτω πίνακα,

ΝΟΥΜΕΡΟ	ΧΡΩΜΟΣΩΜΑ	FITNESS	% ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΟΥ
1	01101	169	14,4
2	11000	576	49,2
3	01000	64	5,5
4	10011	361	30,9

Πίνακας 1.2.1

Ο αντίστοιχος τροχός της τύχης με βάρη που προκύπτει έχει την εξής μορφή:



Σχ.1.2.1 Τροχός τύχης με βάρη

Διασταύρωση (Crossover)

Μόλις ένα ζευγάρι χρωμοσωμάτων επιλεγεί ως ζευγάρι από γονείς, ένα ζευγάρι από παιδιά δημιουργείται με τον ανασυνδυασμό και την μετάλλαξη των γονιών χρησιμοποιώντας τις βασικές λειτουργίες του γενετικού αλγορίθμου, διασταύρωση και

μετάλλαξη. Οι λειτουργίες αυτές εφαρμόζονται με πιθανότητες p_{cross} και p_{mutation} , αντιστοίχως. Η συνάρτηση της διασταύρωσης δέχεται τους γονείς και παράγει δύο παιδιά, εάν ισχύει $p > p_{\text{cross}}$ μία τυχαία θέση στα χρωμοσώματα γονείς επιλέγεται. Το τμήμα του χρωμοσώματος που βρίσκεται πίσω από το επιλεγόμενο σημείο αντιγράφεται από τον γονέα 1 στο παιδί 1 και από τον γονέα 2 στο παιδί 2. Το τμήμα από το χρωμόσωμα του γονέα 1 ακολουθώντας το τυχαία επιλεγόμενο σημείο τοποθετείται στις αντίστοιχες θέσεις στο παιδί 2 και το αντίστροφο για το τμήμα που απομένει του χρωμοσώματος του γονέα 2. Εάν $p < p_{\text{cross}}$, ολόκληρο το χρωμόσωμα του γονέα 1 αντιγράφεται στο παιδί 1 και ομοίως για τον γονέα 2 και το παιδί 2. Η απόφαση λοιπόν αν θα λειτουργήσει η όχι διασταύρωση εμπλέκει την παραγωγή ενός τυχαίου αριθμού μεταξύ 0 και 1 και την σύγκριση του με την τιμή p_{cross} . Η επίδραση της διασταύρωσης συνεπώς εξυπηρετεί την ανατοποθέτηση των γονιδίων με στόχο την εξεύρεση όλο και καλύτερων συνδυασμών τους ως προς την τιμή της προσαρμοστικότητας τους. Η λειτουργία αυτή γίνεται πιο κατανοητή στο παρακάτω σχήμα.

Before Crossover

Crossover Point							
Parent 1				↓			
1	1	0	0	1	1	1	0
Parent 2							
1	0	0	1	0	1	0	0

After Crossover

Offspring 1							
1	1	0	0	1	1	0	0
Offspring 2							
1	0	0	1	0	1	1	0

Σχ.1.2.2 Παράδειγμα διασταύρωσης

Μεταλλαγή (Mutation)

Η μεταλλαγή είναι η τρίτη και τελευταία λειτουργία του γενετικού αλγορίθμου, ωστόσο έχει δευτερεύοντα ρόλο. Η χρήση της επιβάλλεται από το γεγονός ότι ακόμα και αν η αναπαραγωγή και η διασταύρωση ψάχνουν και ανασυνδυάζουν αποδοτικά τα υπάρχοντα στοιχεία, μερικές φορές είναι δυνατόν να «χάσουν» κάποια χρήσιμα γενετικά στοιχεία (μονάδες ή μηδενικά σε συγκεκριμένες θέσεις). Ακόμα προστατεύει από την πιθανότητα όλα τα χρωμοσώματα να αποκτήσουν την ίδια τιμή με το πέρασμα των γενιών. Στον γενετικό αλγόριθμο λοιπόν, η μεταλλαγή είναι η περιστασιακή και τυχαία αλλαγή της τιμής σε μια θέση του χρωμοσώματος, που πρακτικά σημαίνει την αλλαγή από 1 σε 0 και το αντίστροφο. Έχει αποδειχθεί εμπειρικά ότι η συχνότητα της μετάλλαξης για την επίτευξη καλών αποτελεσμάτων είναι της τάξης της μιας αλλαγής ανά χίλια bits, γεγονός που την καθιστά ως δευτερεύοντα μηχανισμό της προσαρμογής του γενετικού αλγορίθμου. Το σχήμα που ακολουθεί δείχνει τα προαναφερθέντα.

Before Mutation

Bit to be mutated							
↓							
Chromosome 1							
1	1	0	1	1	1	0	0

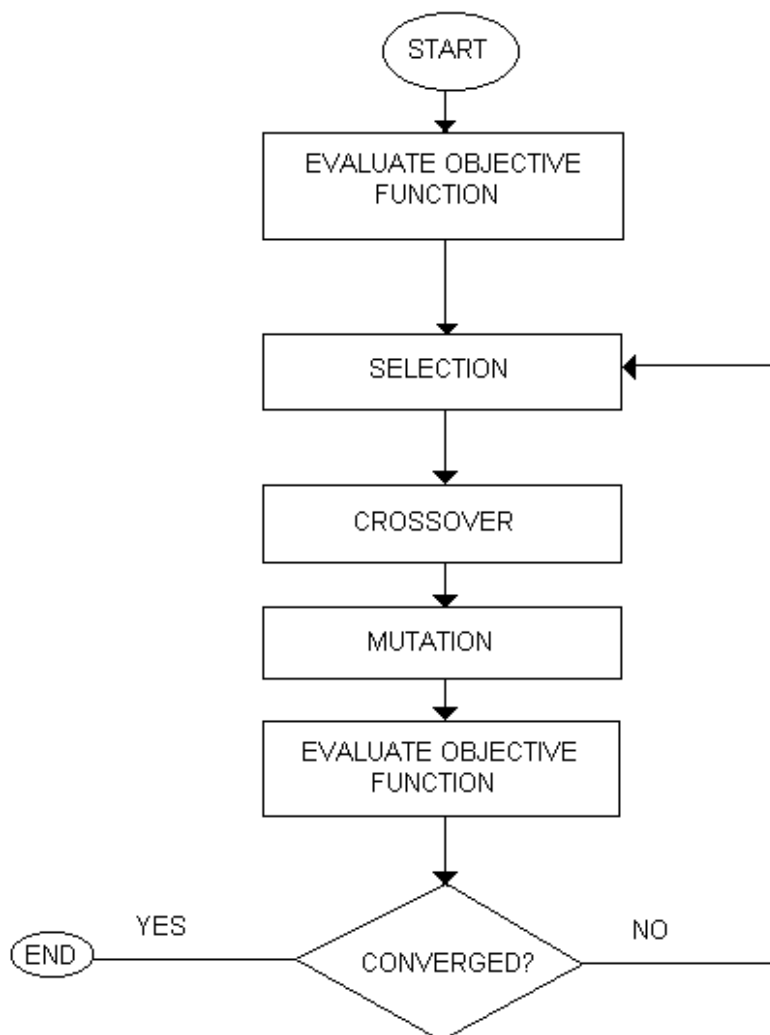
After Mutation

Chromosome 1							
1	1	0	0	1	1	0	0

Σχ.1.2.3 Παράδειγμα μεταλλαγής

Μετά την διασταύρωση και την μεταλλαγή, τα χρωμοσώματα αποκωδικοποιούνται, η αντικειμενική συνάρτηση αξιολογείται, σε κάθε χρωμόσωμα ανατίθεται μια τιμή προσαρμοστικότητας και τα πιο προσαρμόσιμα από αυτά επιλέγονται για ζευγάρωμα. Με τον τρόπο αυτό συνεχίζεται η διαδικασία μέσω των γενεών που ακολουθούν με την ελπίδα ότι ο νέος πληθυσμός θα περιέχει τουλάχιστον ένα χρωμόσωμα καλύτερο από όλα τα

χρωμοσώματα του παλαιότερου πληθυσμού. Το διάγραμμα ροής που ακολουθεί αποσαφηνίζει την λειτουργία του αλγορίθμου, καθώς και την σειρά των διαδικασιών από τις οποίες αποτελείται.



Σχ.1.2.4 Διάγραμμα ροής γενετικού αλγόριθμου

Στο σημείο αυτό αξίζει να γίνει μια ανακεφαλαίωση της ορολογίας που χρησιμοποιείται στους γενετικούς αλγορίθμους για πλήρη καθορισμό των εννοιών που αναφέρθηκαν μέχρι εδώ.

Γονίδιο (gene): Η κωδικοποιημένη προς βελτιστοποίηση παράμετρος.

Χρωμόσωμα : Η υπό δοκιμή λύση με την μορφή σειράς (string) που περιέχει τα γονίδια.

Γενιά : Ο επιτυχώς δημιουργημένος πληθυσμός μέσω των γενετικών διαδικασιών.

Πληθυσμός : Το σύνολο των υπό δοκιμή λύσεων.

Γονέας : Μέλος της τρέχουσας γενιάς.

Απόγονος (παιδί) : Μέλος της επόμενης γενιάς.

Προσαρμοστικότητα : Η τιμή που ανατίθεται σε κάθε μέλος και αντιπροσωπεύει το μέτρο καταλληλότητας της λύσης.

1.3 Αντικειμενική συνάρτηση ή συνάρτηση προσαρμοστικότητας

Η αντικειμενική συνάρτηση (fitness function) ή συνάρτηση προσαρμοστικότητας (objective function) χρησιμεύει στην ανάθεση μιας τιμής προσαρμοστικότητας σε κάθε χρωμόσωμα του πληθυσμού του γενετικού αλγορίθμου. Η συνάρτηση προσαρμοστικότητας αποτελεί την μοναδική σύνδεση μεταξύ του φυσικού προβλήματος που βελτιστοποιείται και του γενετικού αλγορίθμου. Οι μόνοι περιορισμοί σχετικά με την μορφή και το περιεχόμενο αυτής της συνάρτησης είναι αφ' ενός ότι η τιμή προσαρμοστικότητας έχει την έννοια της αναλογίας ως προς τον δείκτη καταλληλότητας μιας υπό δοκιμής λύσης και αφ' ετέρου πρέπει η τιμή αυτή να είναι θετική. Στην εφαρμογή που εξετάστηκε στην παρούσα εργασία η συνάρτηση προσαρμοστικότητας έχει την ακόλουθη μορφή

$$fitness = f(x[n]) / Max$$

Όπου $f(x[n])$ είναι η εκάστοτε συνάρτηση βελτιστοποίησης και Max η θετική μέγιστη τιμή της.

1.4 Επιλογές παραμέτρων αλγορίθμου στις υπό εξέταση περιπτώσεις

Κατά κοινή ομολογία οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν ημιτελή φύση ως προς την θεωρία που τους διέπει, για τον λόγο αυτό η γνώση σχετικά με την επιτυχή υλοποίηση τους προέρχεται κυρίως από την εμπειρία και τον πειραματισμό. Οι ερευνητές των GA's έχουν κατασταλάξει στο συμπέρασμα ότι η πιθανότητα της διασταύρωσης θα πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 0.6 και 0.9, ($0.6 \leq p_{cross} \leq 0.9$), ενώ η πιθανότητα της μετάλλαξης θα πρέπει να είναι πολύ μικρότερη και να κυμαίνεται μεταξύ 0.001 και 0.01, ($0.001 \leq p_{mut} \leq 0.01$). Εν αντιθέσει με τις δύο παραπάνω πιθανότητες, παράμετροι όπως το μέγεθος του πληθυσμού των χρωμοσωμάτων καθώς και το πλήθος των γενεών δεν έχουν αποσαφηνιστεί και οι τιμές τους διαμορφώνονται ανάλογα με την εκάστοτε περίπτωση.

Στις περιπτώσεις που εξετάζει η παρούσα εργασία αποδείχτηκε, ύστερα από εκτεταμένες δοκιμές του αλγορίθμου, ότι τα καλύτερα αποτελέσματα προκύπτουν για τις μέγιστες τιμές που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Συγκεκριμένα, η τιμές της πιθανότητας διασταύρωσης και της πιθανότητας μετάλλαξης ορίστηκαν στα 0.9 και 0.01 αντίστοιχα. Όσο αφορά τα μεγέθη του πληθυσμού και των γενεών έγινε φανερή η αδυναμία για ενιαίο ορισμό τους, δεδομένου ότι κάθε περίπτωση απαιτεί διαφορετικό πλήθος. Αναλυτικές τιμές όλων των παραμέτρων καθώς και των εξαγόμενων αποτελεσμάτων ακολουθούν στα επόμενα κεφάλαια.

Κεφάλαιο 2^ο

Γραμμικές Στοιχειοκεραίες

2.1 Εισαγωγή

Ένας τρόπος για να επιτύχουμε μεγαλύτερη κατευθυντικότητα είναι να χρησιμοποιηθεί μια διάταξη ή διατάξεις από ακτινοβολούντα στοιχεία σε γραμμικό ή σε ορθογώνιο σχηματισμό. Μια τέτοια διάταξη ακτινοβολούντων στοιχείων καλείται στοιχειοκεραία. Τα ακτινοβολούντα στοιχεία είναι συνήθως διπολικές κεραίες ημίσεος κύματος, χωρίς αυτό να αποκλείει άλλους τύπους κεραίων. Η εκλογή ενός τύπου στοιχείου για μια στοιχειοκεραία εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η επιδιωκόμενη πόλωση, τα προβλήματα μηχανικής αντοχής, τα προβλήματα τροφοδοσίας, κ.α.

Είναι προφανές ότι το ολικό διάγραμμα ακτινοβολίας της διατάξεως θα προκύψει από την υπέρθεση των επιμέρους συνεισφορών των πεδίων των στοιχείων. Δηλαδή η συνάρτηση κατευθυντικότητας της κεραίας θα είναι το αποτέλεσμα του φαινομένου της κυματικής παρεμβολής μεταξύ των ακτινοβολιών των διαφόρων στοιχείων της κεραίας. Συνεπώς είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί μια κεραία μεγάλης κατευθυντικότητας, εάν το εύρος και η φάση του ρεύματος που διαρρέει κάθε στοιχείο εκλεγούν έτσι ώστε το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο να μηδενισθεί, ή να ελαττωθεί, σε όλες τις άλλες κατευθύνσεις πλην των επιθυμητών. Τούτο είναι δυνατό να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας όμοια στοιχεία τα οποία έχουν τον ίδιο προσανατολισμό και σταθερή απόσταση μεταξύ τους. Το διάγραμμα ακτινοβολίας μιας τέτοιας στοιχειοκεραίας (antenna array) δύναται να προσδιοριστεί από το γινόμενο του παράγοντα της διατάξεως (array factor) της θεωρούμενης στοιχειοκεραίας επί τον παράγοντα του ακτινοβολούντος στοιχείου από τα οποία αποτελείται η στοιχειοκεραία. Βάσει της αρχής αυτής λύνεται και το πρόβλημα της σύνθεσης στοιχειοκεραίας επιζητούμενου διαγράμματος ακτινοβολίας.

2.2 Στοιχειοκεραίες πολλών στοιχείων

Με τον όρο στοιχειοκεραία εννοείται μια διάταξη ομοίων ακτινοβολητών που έχουν τον ίδιο προσανατολισμό και ακτινοβολούν ή λαμβάνουν ταυτόχρονα. Τα ρεύματα των στοιχείων ακτινοβολίας μιας στοιχειοκεραίας είναι δυνατό να διαφέρουν κατά το

μέτρο ή και τη φάση. Οι στοιχειοκεραίες διακρίνονται σε δυο ευρύτερες κατηγορίες, τις χωρικά ομοιόμορφες και τις χωρικά ανομοιόμορφες στοιχειοκεραίες.

Στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές χρησιμοποιούνται ομοιόμορφες στοιχειοκεραίες, για τις οποίες άλλωστε υπάρχει πλήθος μεθόδων ανάλυσης και σύνθεσης. Οι ανομοιόμορφες στοιχειοκεραίες παρέχουν στον σχεδιαστή περισσότερους βαθμούς ελευθερίας και συνεπώς, αξίζουν ιδιαίτερης προσοχής, αν και είναι σαφώς δυσκολότερη η θεωρητική αντιμετώπιση 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 . Όπως και στην περίπτωση της απλής στοιχειοκεραίας που ήδη εξετάστηκε, λαμβάνοντας υπόψη τις παραδοχές για τη μακρινή περιοχή των ακτινοβολητών, 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 $U(\theta, \varphi)$ η ένταση ακτινοβολίας των στοιχείων ακτινοβολίας και $S(\theta, \varphi)$ ο παράγοντας διάταξης της στοιχειοκεραίας. Ο παράγοντας διάταξης προσδιορίζεται συναρτήσει των συντεταγμένων θέσης των στοιχείων ακτινοβολίας. 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 ο κυματικός αριθμός του μέσου διάδοσης. Από την (2.2.3) φαίνεται ότι ο παράγοντας διάταξης και, επομένως, η ένταση ακτινοβολίας μιας στοιχειοκεραίας εξαρτώνται από τη συχνότητα λειτουργίας καθώς και από την 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 διέγερσης τους.

Σε πολλές περιπτώσεις, το στοιχείο ακτινοβολίας μιας στοιχειοκεραίας με παράγοντα διάταξης $S_2(\theta, \varphi)$ αποτελεί και το ίδιο άλλη στοιχειοκεραία με παράγοντα διάταξης $S_1(\theta, \varphi)$. Για τον προσδιορισμό της έντασης ακτινοβολίας μιας στοιχειοκεραίας που έχει ως στοιχεία ακτινοβολίας στοιχειοκεραίες εφαρμόζεται η αρχή του πολλαπλασιασμού των παραγόντων διάταξης, δηλαδή

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

όπου $S_1(\theta, \varphi)$ και $S_2(\theta, \varphi)$ οι επιμέρους παράγοντες διάταξης των ομαδοποιήσεων που προκύπτουν.

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 μέτρο του παράγοντα διάταξης ως συνάρτηση της συχνότητας, ανεξάρτητα από την επιλογή του κέντρου των συντεταγμένων. Έτσι επιλογή του κέντρου των συντεταγμένων είναι ελεύθερη με κριτήριο την ευκολία προσδιορισμού του παράγοντα διάταξης και την απλότητα της μαθηματικής έκφρασης του. Συνήθως επιλέγεται το γεωμετρικό κέντρο της στοιχειοκεραίας ή κάποιο χαρακτηριστικό σημείο της γεωμετρίας της.

Το κατευθυντικό κέρδος μιας στοιχειοκεραίας δίνεται από τη σχέση :

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

Προκειμένου περί στοιχειοκεραιών ορίζεται το γεωμετρικό κατευθυντικό κέρδος

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

Το οποίο εξαρτάται μόνο από τη διάταξη και τη σχετική διέγερση των στοιχείων και εκφράζει το πόσο επηρεάζεται η κατευθυντικότητα από τον παράγοντα διάταξης.

2.3 Γραμμικές στοιχειοκεραίες

Οι ομοιόμορφες γραμμικές στοιχειοκεραίες αποτελούν μια κατηγορία στοιχειοκεραιών με ιδιαίτερο πρακτικό ενδιαφέρον. Τα σημεία αναφοράς των στοιχείων

ακτινοβολίας 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_1 του στοιχείου $m = 1$. Το σημείο παρατήρησης P χαρακτηρίζεται από τις συντεταγμένες (r, θ, ϕ) σε σφαιρικό σύστημα συντεταγμένων με κέντρο το κέντρο της στοιχειοκεραίας O_1 . Αν γ η γωνία που σχηματίζουν στο χώρο η OP με τον άξονα της στοιχειοκεραίας ισχύουν

$$r_m = m d \quad (2.3.1)$$

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

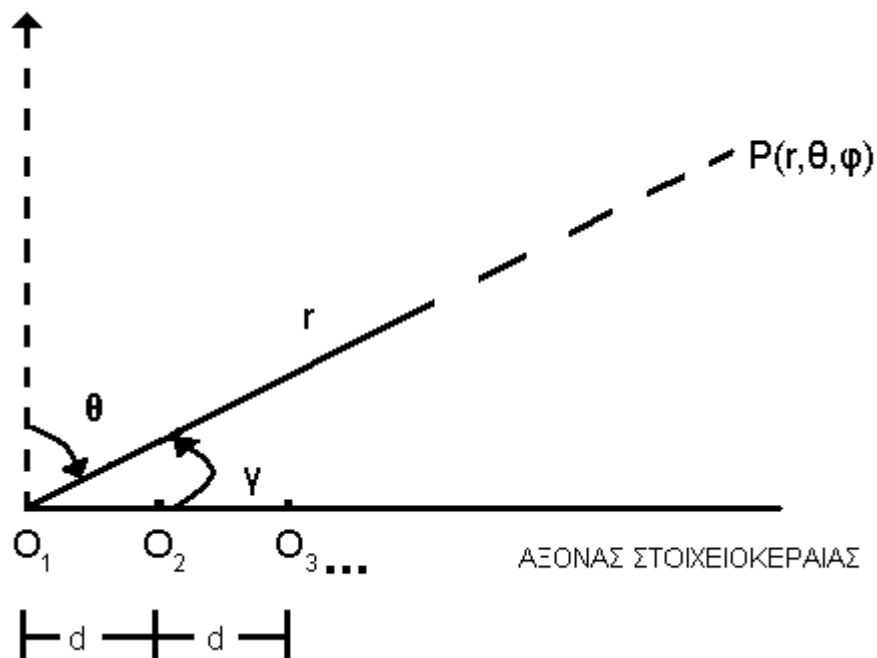
όπου $(m = 1, 2, \dots, M)$ και d η απόσταση στοιχείων που ονομάζεται βήμα της γραμμικής στοιχειοκεραίας. Επομένως η γενική σχέση υπολογισμού του παράγοντα διάταξης στην περίπτωση γραμμικής στοιχειοκεραίας γράφεται

$$S(\theta, \phi) = S(\gamma) = C_1 e^{jkd \cos \psi} + C_2 e^{j2kd \cos \psi} + \dots + C_M e^{jMkd \cos \psi} = \sum_{m=1}^M C_m e^{jmkd \cos \psi} \quad (2.3.3)$$

Συνήθως η διαφορά φάσεως μεταξύ διαδοχικών ρευμάτων (ή των C_m) είναι σταθερή και ίση, π.χ. με δ , ούτως ώστε

$$C_m = A_m e^{jm\delta} \quad (2.3.4)$$

Όπου $\psi = kdc \cos \gamma + \delta$, $z = e^{j\psi}$ και $k = 2\pi/\lambda$



Σχ.2.3.1 Γραμμική στοιχειοκεραία

Ομοιόμορφες γραμμικές στοιχειοκεραίες

Οι γραμμικές στοιχειοκεραίες χαρακτηρίζονται ως ομοιόμορφες όταν τα στοιχεία τους τροφοδοτούνται με ρεύμα του ίδιου εύρους, δηλαδή $A_m = A_1$ ($m=1,2,\dots,M$). Θέτοντας $A_m = 1$, η σχέση (2.3.3) παίρνει την μορφή :

$$S = \sum_{m=1}^M e^{jm(kd \cos \gamma + \delta)} = \sum_{m=1}^M e^{jm\psi} = \sum_{m=1}^M z^m \quad (2.3.5)$$

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να μελετηθεί η επίδραση των παραμέτρων kd (βήμα) και δ (σταθερά διαφορά φάσεως μεταξύ διαδοχικών ρευμάτων) πάνω στο διάγραμμα ακτινοβολίας της διάταξης $|S(\gamma)|$ το οποίο είναι πάντα κυκλικά συμμετρικό του άξονα της στοιχειοκεραίας.

Μετωπική ακτινοβολία

Σε πολλές εφαρμογές είναι επιθυμητή η μεγιστοποίηση της ακτινοβολίας ή της λήψης μιας στοιχειοκεραίας κατά διεύθυνση κάθετη προς τον άξονα της, δηλαδή υπό γωνία κλίσης $\gamma=90^\circ$. Η ακτινοβολία αυτή ονομάζεται μετωπική και η κεραία μετωπική ή ευρύπλευρη στοιχειοκεραία (broadside array) και για να επιτευχθεί πρέπει εκτός από την ένταση του στοιχείου ακτινοβολίας να μεγιστοποιείται και ο παράγοντας διάταξης κατά τη διεύθυνση $\gamma=0$. Η δεύτερη απαίτηση μπορεί να ικανοποιηθεί με κατάλληλη επιλογή της παραμέτρου δ . Συγκεκριμένα για

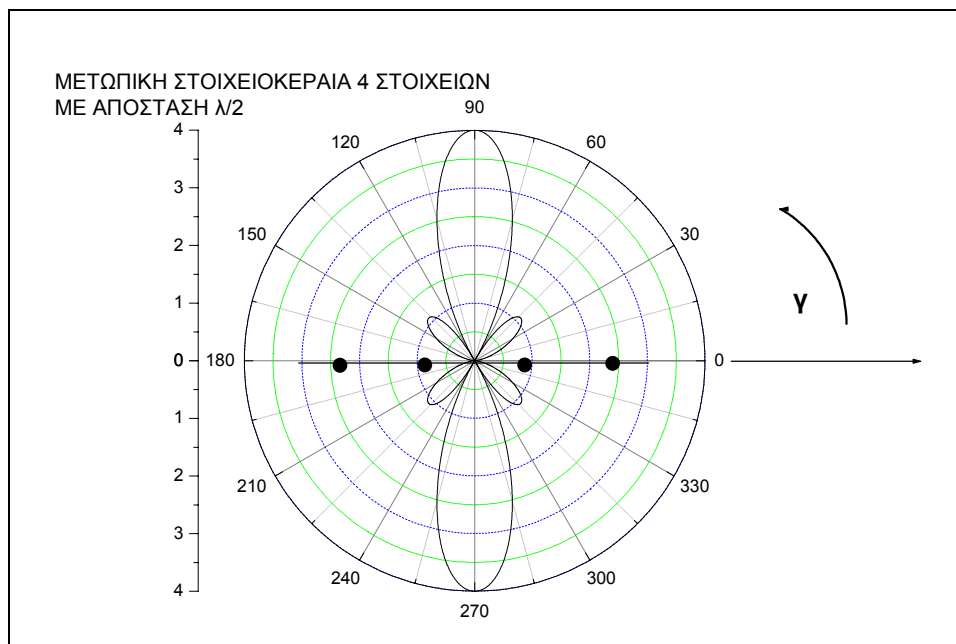
$$\delta = 0 \quad (2.3.6)$$

εξασφαλίζεται η μεγιστοποίηση του $|S(\gamma)|$ για $\gamma=90^\circ$. Η (2.3.6) αποτελεί συνθήκη μετωπικής ακτινοβολίας όχι μόνο ομοιόμορφων στοιχειοκεραιών αλλά και σε οποιαδήποτε περίπτωση γραμμικής στοιχειοκεραίας. Πρέπει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση όπου το βήμα d είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος λ ($d=q\lambda$, $q \in \mathbb{Z}$) και ταυτοχρόνως ισχύει η (2.3.6) η τιμή της μεταβλητής ψ προκύπτει

$$\psi = 2q\pi \cos \gamma \quad (2.3.7)$$

Επομένως, στην περίπτωση αυτή εμφανίζονται κύριοι λοβοί όχι μόνο κατά την μετωπική διεύθυνση $\gamma=90^\circ$, όπως εξασφαλίζει η ισχύς της (2.3.6), αλλά και κατά τις αξονικές διευθύνσεις $\gamma=0^\circ$ και $\gamma=180^\circ$. Για να αποφευχθεί η ύπαρξη των πρόσθετων αυτών κύριων λοβών που είναι ανεπιθύμητοι σε μετωπική στοιχειοκεραία, πρέπει εκτός από την (2.3.6) το βήμα της στοιχειοκεραίας να μην είναι πολλαπλάσιο του μήκους κύματος. Αυτό

επιτυγχάνεται με κατάλληλη επιλογή του εύρους της ορατής περιοχής ώστε να μην περιλαμβάνει τις τιμές $\psi = \pm 2\pi$.



Σχ.2.3.2 Παράγοντας διάταξης μετωπικής στοιχειοκεραίας

Αξονική ακτινοβολία

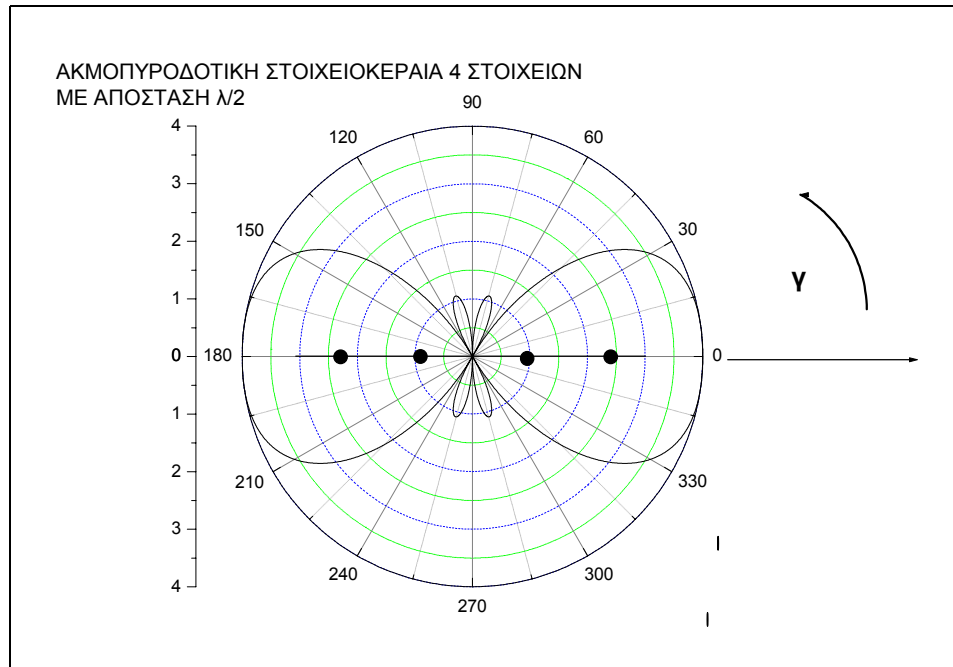
Μια άλλη κατηγορία ομοιόμορφων γραμμικών στοιχειοκεραιών που παρουσιάζει ιδιαίτερο πρακτικό ενδιαφέρον είναι οι αξονικές ή ακμοπυροδοτικές στοιχειοκεραίες, των οποίων ο παράγοντας διάταξης μεγιστοποιείται κατά τον άξονα τους, δηλαδή είτε κατά διεύθυνση $\gamma=0^\circ$, είτε κατά διεύθυνση $\gamma=180^\circ$.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

$$\delta = -kd \quad \text{οπότε} \quad \gamma_m = 0^\circ \quad (2.3.8)$$

$$\delta = kd \quad \text{οπότε} \quad \gamma_m = 180^\circ \quad (2.3.9)$$

Στην περίπτωση όπου το βήμα μιας αξονικής στοιχειοκεραίας είναι πολλαπλάσιο του μήκους κύματος ($d=q\lambda$, $q \in \mathbb{Z}$), παρατηρείται και έτερος κύριος λοβός κατά την διεύθυνση $\gamma=90^\circ$. Το φαινόμενο της συνήθως ανεπιθύμητης μετωπικής ακτινοβολίας μιας αξονικής

στοιχειοκεραίας αποφεύγεται με κατάλληλη ρύθμιση της σχέσης d και λ , ώστε $d \neq q\lambda$, $q \in \mathbb{Z}$.



Σχ.2.3.3 Παράγοντας διάταξης ακμοπυροδοτικής στοιχειοκεραίας

Στοιχειοκεραίες με ηλεκτρονικά στρεφόμενο διάγραμμα

Όπως γίνεται αντιληπτό υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ της διαφοράς φάσης δ και της κατεύθυνσης (κλίσεως) του μέγιστου λοβού. Σε αυτό το συμπέρασμα βασίζεται και η μέθοδος της ανίχνευσης φάσης (phase scanning), κατά την οποία η κατεύθυνση της κύριας δέσμης στοιχειοκεραίας μπορεί να μεταβάλλεται από την αξονική μέχρι την μετωπική ($0^\circ \leq \gamma_\mu \leq 90^\circ$ και $90^\circ \leq \gamma_\mu \leq 180^\circ$) παρακολουθώντας την μεταβολή της διαφοράς φάσεως δ . Συγκεκριμένα η γ_μ αντιστοιχεί σε $\psi_\mu = 0$, όπου προκύπτει :

$$\delta = -kd \cos \gamma_\mu \quad (2.3.10)$$

Συνεπώς, εάν με οποιοδήποτε τρόπο (π.χ. με phase shifter) καθίσταται δυνατή η χρονική μεταβολή των διαφορών φάσεων μεταξύ των ρευμάτων των στοιχείων η κατεύθυνση της κύριας δέσμης παρακολουθεί αυτή την μεταβολή και ανιχνεύει τον ουρανό γύρο από την στοιχειοκεραία, αποφεύγοντας έτσι την μηχανική περιστροφή.

Η αρχή αυτή χρησιμοποιείται σε διατάξεις radar επιτήρησης αεροδρομίων όπου η ανίχνευση του ουρανού επιβάλλεται να είναι αδιάκοπη και ταχύτατη.

Η διαφορά φάσης μεταξύ διαδοχικών ρευμάτων στις ομοιόμορφες γραμμικές στοιχειοκεραίες ορίζεται όπως αναφέρθηκε και πριν, από την σχέση:

$$C_m = A_1 e^{jm\delta}$$

Με τον παράγοντα της διάταξης να παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$S = \sum_{m=1}^M e^{jm(kd \cos \gamma + \delta)} = e^{j1(kd \cos \gamma + \delta)} + e^{j2(kd \cos \gamma + \delta)} + \dots + e^{jM(kd \cos \gamma + \delta)} \quad (2.3.11)$$

Ωστόσο μπορεί να θεωρηθεί, χωρίς να βλάπτεται η παραπάνω συνθήκη, ότι τα διαδοχικά ρεύματα των στοιχείων δίνονται από την σχέση:

$$C_m = A_1 e^{j\delta_m} \quad (2.3.12)$$

Η διαφοροποίηση αυτής της περίπτωσης είναι ότι η διαφορά φάσης δ δεν αντιμετωπίζεται πλέον ως σταθερή ποσότητα με τα πολλαπλάσια της να δίνουν την φάση του κάθε στοιχείου, αλλά κάθε στοιχείο έχει πλέον ξεχωριστή φάση για την οποία εξακολουθεί να ισχύει ότι και πριν. Ο παράγοντας διάταξης σε αυτή την περίπτωση θα είναι:

$$S = \sum_{m=1}^M e^{j(mkd \cos \gamma + \delta_m)} = e^{j(1kd \cos \gamma + \delta_1)} + e^{j(2kd \cos \gamma + \delta_2)} + \dots + e^{j(Mkd \cos \gamma + \delta_M)} \quad (2.3.13)$$

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 του διαγράμματος ακτινοβολίας.

Γεωμετρικό κατευθυντικό κέρδος

Στις γραμμικές στοιχειοκεραίες, λόγω συμμετρίας του παράγοντα διάταξης ως προς τον άξονα της στοιχειοκεραίας, ο οποίος συνήθως ταυτίζεται ή με τον άξονα x ή με τον άξονα y του συστήματος συντεταγμένων, ισχύει $\gamma = \theta$, ενώ το $S(\theta, \varphi)$ είναι ανεξάρτητο της γωνίας φ . Επομένως στην περίπτωση ομοιόμορφων γραμμικών στοιχειοκεραιών, η συνάρτηση $D_s(\theta, \varphi)$ είναι ουσιαστικά συνάρτηση της γωνίας κλίσης γ , δηλαδή

$$D_s(\gamma) = \frac{|S(\gamma)|^2}{I} \quad (2.3.14)$$

Όπου

$$I = \frac{1}{2} \int_0^\pi \left| \frac{\sin(M(kd \cos \gamma + \delta)/2)}{M \sin((kd \cos \gamma + d)/2)} \right|^2 \sin \gamma d\gamma \quad (2.3.15)$$

Μπορεί να αποδειχθεί ότι

$$\left| \frac{\sin(M\psi/2)}{\sin(\psi/2)} \right|^2 = M + 2 \sum_{m=1}^{M-1} (M-m) \cos(m\psi) \quad (2.3.16)$$

Λαμβάνοντας υπόψη την (2.3.16) και εναλλάσσοντας την εκτέλεση άθροισης και ολοκλήρωσης, η (2.3.15) δίνει ως αποτέλεσμα

$$I = \frac{1}{M} + \frac{2}{M^2} \sum_{m=1}^{M-1} \frac{M-m}{mkd} \sin(mkd) \cos(m\delta) \quad (2.3.17)$$

Με βάση τα παραπάνω είναι φανερό ότι όταν το βήμα μιας ομοιόμορφης γραμμικής στοιχειοκεραίας είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του $\lambda/2$ ($d = q(\lambda/2)$), οπότε $mkd = m\pi$, το ολοκλήρωμα I ανεξαρτήτως του δ είναι ίσο προς $1/M$. Επειδή στην περίπτωση αυτή η ορατή περιοχή είναι $2kd = q2\pi$, τουλάχιστον ένα μέγιστο του $D_s(\gamma)$ περιλαμβάνεται σε αυτήν και η γεωμετρική κατευθυντικότητα προκύπτει ίση προς M , δηλαδή ίση προς το πλήθος των στοιχείων της στοιχειοκεραίας.

2.4 Εφαρμογή γενετικού αλγόριθμου στη σύνθεση γραμμικών στοιχειοκεραιών

Κωδικοποίηση φάσεων και συνάρτηση προσαρμοστικότητας

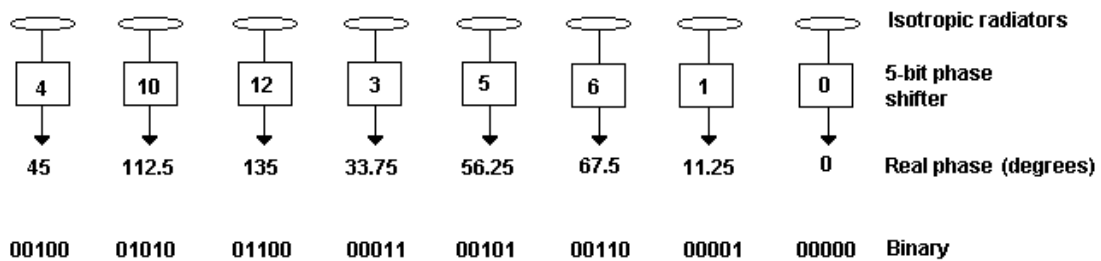
Στο σημείο αυτό θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της εφαρμογής των γενετικών αλγορίθμων για την περίπτωση των ομοιόμορφων γραμμικών στοιχειοκεραιών. Όπως αναλύθηκε και πριν το ζητούμενο είναι ο καθορισμός της φάσης κάθε στοιχείου ώστε σε δεδομένη κατεύθυνση να επιτευχθεί η μέγιστη ακτινοβολία της κεραίας. Ουσιαστικά λοιπόν ο γενετικός αλγόριθμος καλείται να αναζητήσει τις ακριβείς τιμές της φάσης για την βελτιστοποίηση του παράγοντα διάταξης της στοιχειοκεραίας ως προς την εκάστοτε επιθυμητή γωνία. Στο σημείο αυτό πρέπει σημειωθεί ότι η τιμή της απόστασης μεταξύ των στοιχείων δ , επιλέχθηκε στα $\lambda/2$ και σε συνδυασμό με το ότι $k = 2\pi/\lambda$ η σχέση (2.3.13) παίρνει την μορφή:

$$S = \sum_{m=1}^M e^{j(m\pi \cos \gamma + \delta_m)} = e^{j(\pi \cos \gamma + \delta_1)} + e^{j(2\pi \cos \gamma + \delta_2)} + \dots + e^{j(M\pi \cos \gamma + \delta_M)} \quad (2.4.1)$$

Θεωρώντας ότι ο άξονας της στοιχειοκεραίας βρίσκεται εντός του xy επιπέδου και ότι η συμπληρωματική γωνία της γ είναι η φ , τότε προφανώς $\gamma = 90^\circ - \theta$ και η σχέση (2.4.1) γίνεται:

$$S = \sum_{m=1}^M e^{j(m\pi \sin \theta + \delta_m)} = e^{j(\pi \sin \theta + \delta_1)} + e^{j(2\pi \sin \theta + \delta_2)} + \dots + e^{j(M\pi \sin \theta + \delta_M)} \quad (2.4.2)$$

Το χρωμόσωμα λοιπόν κωδικοποιεί τις τιμές των φάσεων κάθε στοιχείου, περιέχοντας έτσι τις προς βελτιστοποίηση παραμέτρους. Συγκεκριμένα επιλέχθηκε η φάση κάθε στοιχείου να ψηφιοποιηθεί στα 5 bits με το ένα bit να ισούται με 11.25° . Δηλαδή η κωδικοποιημένη φάση που αντιστοιχεί στο γονίδιο, μπορεί να πάρει 32 διακριτές ακέραιες τιμές από 0 έως 31 που οι τιμές αυτές αντιστοιχούν σε πραγματικές τιμές φάσης από 0° μέχρι 348.75° καλύπτοντας με αυτό τον τρόπο όλες τις πιθανές τιμές της φάσης. Ανάλογα με το πλήθος των στοιχείων κάθε στοιχειοκεραίας, συνεπώς και των διαφορετικών φάσεων που υπάρχουν καθορίζεται ο αριθμός των γονιδίων και κατ' επέκταση το μέγεθος του χρωμοσώματος. Για μια γραμμική στοιχειοκεραία 8 στοιχείων λοιπόν αντιστοιχεί χρωμόσωμα 40 bits με 8 γονίδια των 5 bits το καθένα. Το μοντέλο της κεραίας φαίνεται παρακάτω:



Σχ.2.4.1 Μοντέλο κεραίας 8 στοιχείων

Σε πρώτη φάση παράγεται ο αρχικός τυχαίος πληθυσμός χρωμοσωμάτων και μετά καθένα από αυτά αποκωδικοποιείται και μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης βαθμολογείται ως προς την προσαρμοστικότητα του (fitness). Η αντικειμενική συνάρτηση χρησιμοποιεί τη σχέση (2.4.2) η οποία αναθέτει τις επί μέρους αποκωδικοποιημένες φάσεις και συγκρίνει την τιμή που προκύπτει με την ιδανική μέγιστη τιμή. Εν συνεχεία η τιμή αυτή κανονικοποιείται από 0 μέχρι 1, με την μονάδα να αντιστοιχεί στην ιδανική

περίπτωση, με τον τρόπο αυτό αξιολογείται κάθε χρωμόσωμα αποκτώντας τον δείκτη προσαρμοστικότητας του και ο αλγόριθμος συνεχίζει την διαδικασία του.

Μέγιστη δυνατή τιμή του παράγοντα διάταξης στην επιθυμητή κατεύθυνση

Ο στόχος του γενετικού αλγόριθμου είναι διττός: τόσο να υπολογίσει της διαφορετικές τιμές της διαφοράς φάσης των ρευμάτων που τροφοδοτούν τα στοιχεία, ώστε η στοιχειοκεραία να ακτινοβολεί στην επιθυμητή διεύθυνση κάθε φορά, όσο και να προσεγγίσει για την επιθυμητή κατεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας την μέγιστη δυνατή τιμή του παράγοντα διάταξης. Σύμφωνα με την θεωρία των στοιχειοκεραιών, η μέγιστη δυνατή κανονικοποιημένη τιμή του μέτρου του παράγοντα διάταξης ισούται με το πλήθος των στοιχείων της στοιχειοκεραίας. Έτσι από εδώ και στο εξής όταν θα μιλάμε για “σύγκλιση” του αλγορίθμου, θα εννοούμε το κατά πόσο η υπολογιζόμενη (σύμφωνα με τις διαφορές φάσεις των ρευμάτων τροφοδοσίας των στοιχείων που υπολογίζει ο αλγόριθμος) κανονικοποιημένη τιμή του μέτρου του παράγοντα διάταξης (2.4.1) προσεγγίζει την μέγιστη δυνατή τιμή (π.χ. σύγκλιση 95% για στοιχειοκεραία 8 στοιχείων σημαίνει ότι στην κατεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας η κανονικοποιημένη τιμή του παράγοντα διάταξης έχει μέτρο $95\% \cdot 8 = 7.6$).

Εφαρμογή για γραμμική στοιχειοκεραία 4 στοιχείων

Η πρώτη περίπτωση που εξετάζεται αφορά μια ομοιόμορφη γραμμική στοιχειοκεραία 4 στοιχείων με απόσταση $\lambda/2$ μεταξύ τους. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του αλγορίθμου παρουσιάζονται για επιθυμητές γωνίες μέγιστης ακτινοβολίας 0° , 30° , 60° και 90° . Ο πίνακας που ακολουθεί περιλαμβάνει τις παραμέτρους που εισάγονται στον γενετικό αλγόριθμο.

Μέγεθος Πληθυσμού	100
Μήκος χρωμοσώματος σε bits	20
Αριθμός Γενεών	40

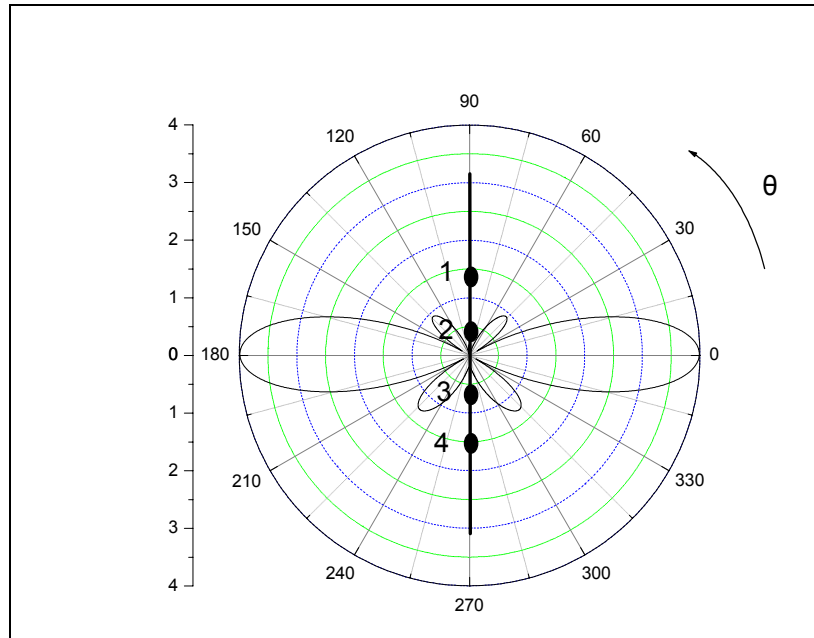
Πίνακας 2.4.1

Για γωνία 0°

Η σύγκλιση έφτασε την τιμή του 99% και οι προτεινόμενες από τον αλγόριθμο φάσεις των στοιχείων είναι:

$$\delta_1 = 22,5^\circ, \delta_2 = 33,75^\circ, \delta_3 = 22,5^\circ, \delta_4 = 22,5^\circ$$

Το διάγραμμα ως προς θ του παράγοντα διάταξης που προκύπτει για τις συγκεκριμένες φάσεις είναι το ακόλουθο:



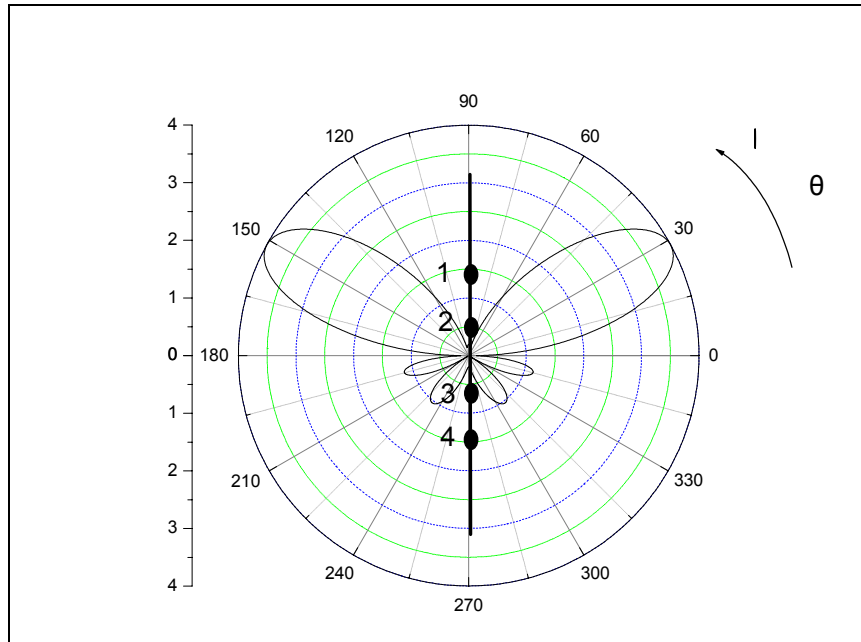
Σχ.2.4.2 Παράγοντας διάταξης στοιχειοκεραίας 4 στοιχείων για επιθυμητή γωνία ακτινοβολίας 0°

Για γωνία 30°

Η σύγκλιση έφτασε την τιμή του 99% και οι προτεινόμενες από τον αλγόριθμο φάσεις των στοιχείων είναι:

$$\delta_1 = 225^\circ, \delta_2 = 146,25^\circ, \delta_3 = 56,25^\circ, \delta_4 = 326,25^\circ$$

Το διάγραμμα ως προς θ του παράγοντα διάταξης που προκύπτει για τις συγκεκριμένες φάσεις είναι το ακόλουθο:



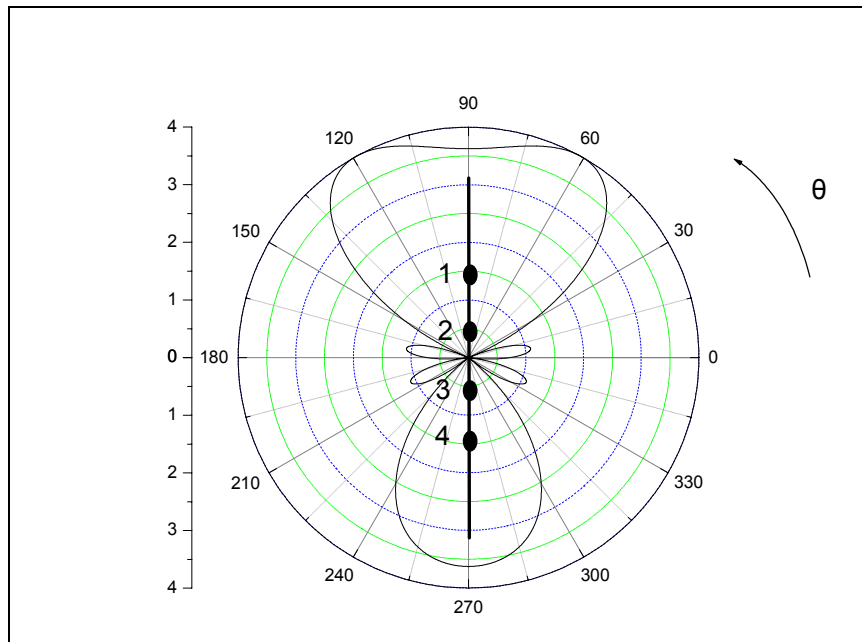
Σχ.2.4.3 Παράγοντας διάταξης στοιχειοκεραίας 4 στοιχείων για επιθυμητή γωνία ακτινοβολίας 30°

Για γωνία 60°

Η σύγκλιση έφτασε την τιμή του 99% και οι προτεινόμενες από τον αλγόριθμο φάσεις των στοιχείων είναι οι εξής:

$$\delta_1 = 225^\circ, \delta_2 = 146,25^\circ, \delta_3 = 56,25^\circ, \delta_4 = 326,25^\circ$$

Το διάγραμμα ως προς θ του παράγοντα διάταξης που προκύπτει για τις συγκεκριμένες φάσεις είναι το ακόλουθο:



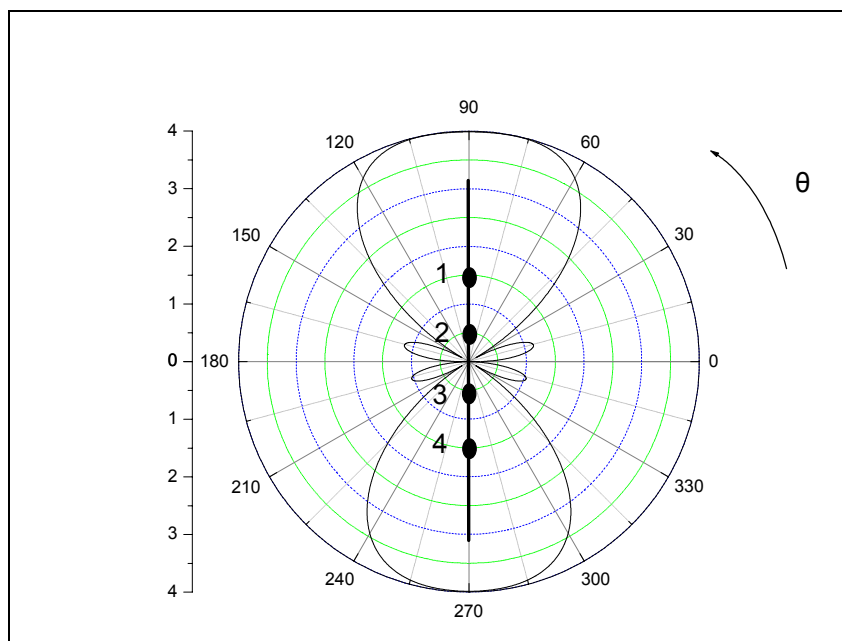
Σχ.2.4.4 Παράγοντας διάταξης στοιχειοκεραίας 4 στοιχείων για επιθυμητή γωνία ακτινοβολίας 60°

Για γωνία 90°

Η σύγκλιση έφτασε την τιμή του 99% και οι προτεινόμενες από τον αλγόριθμο φάσεις των στοιχείων είναι οι εξής:

$$\delta_1 = 258,75^\circ, \delta_2 = 90^\circ, \delta_3 = 270^\circ, \delta_4 = 90^\circ$$

Το διάγραμμα ως προς θ του παράγοντα διάταξης που προκύπτει για τις συγκεκριμένες φάσεις είναι το ακόλουθο:



Σχ.2.4.5 Παράγοντας διάταξης στοιχειοκεραίας 4 στοιχείων για επιθυμητή γωνία ακτινοβολίας 90°

Εφαρμογή για γραμμική στοιχειοκεραία 8 στοιχείων

Στην δεύτερη περίπτωση που εξετάζεται η ομοιόμορφη γραμμική στοιχειοκεραία αποτελείται από 8 στοιχεία με απόσταση πάλι $\lambda/2$ μεταξύ τους. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του αλγορίθμου παρουσιάζονται και εδώ για τις ίδιες γωνίες των 0° , 30° , 60° και 90° . Ο πίνακας που ακολουθεί περιλαμβάνει τις παραμέτρους που εισάγονται στον γενετικό αλγόριθμο.

Μέγεθος Πληθυσμού	100
Μήκος χρωμοσώματος σε bits	40
Αριθμός Γενεών	50

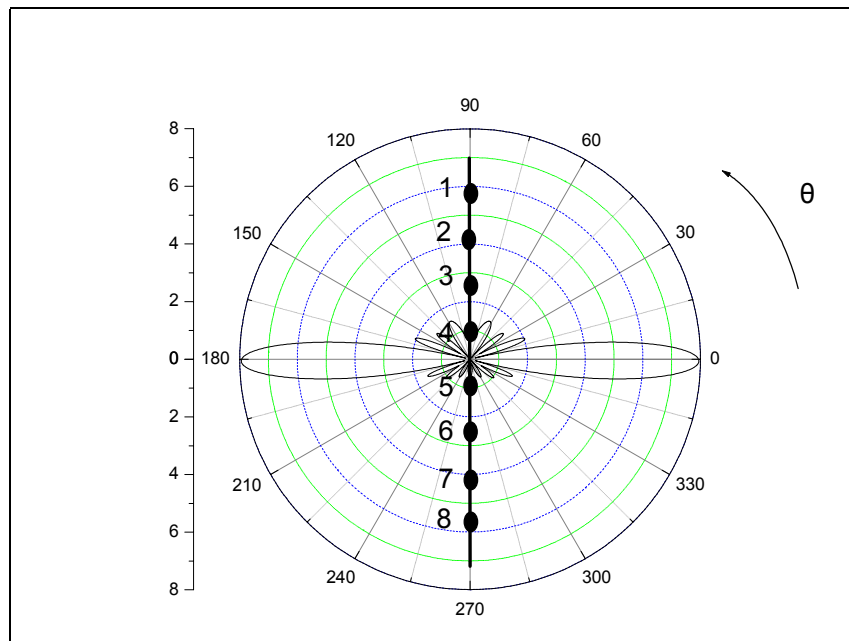
Πίνακας 2.4.2

Για γωνία 0°

Η σύγκλιση έφτασε την τιμή του 99% και οι προτεινόμενες από τον αλγόριθμο φάσεις των στοιχείων είναι οι εξής:

$$\delta_1 = 337,5^\circ, \delta_2 = 315^\circ, \delta_3 = 326,25^\circ, \delta_4 = 326,25^\circ, \delta_5 = 337,5^\circ, \delta_6 = 326,25^\circ, \\ \delta_7 = 337,5^\circ, \delta_8 = 337,5^\circ$$

Το διάγραμμα ως προς θ του παράγοντα διάταξης που προκύπτει για τις συγκεκριμένες φάσεις είναι το ακόλουθο:



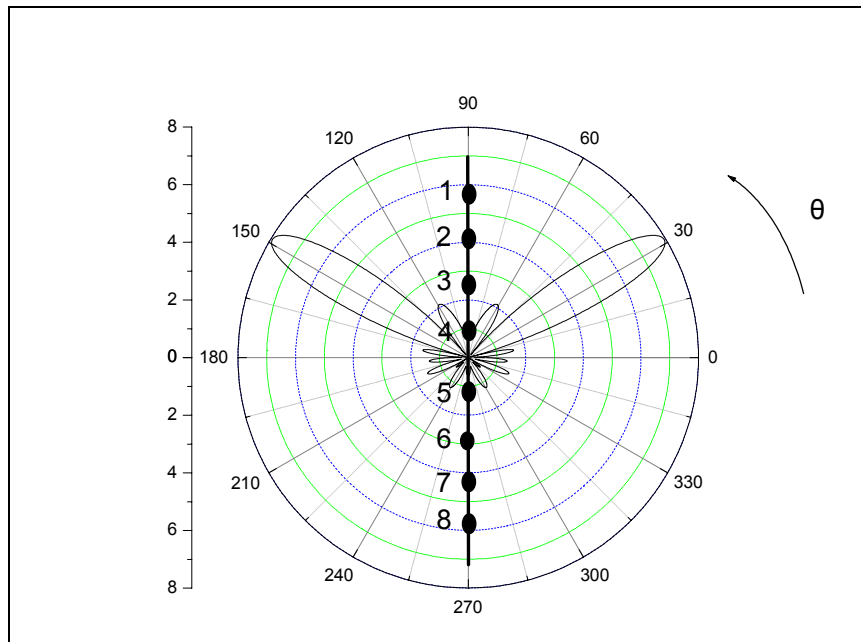
Σχ.2.4.6 Παράγοντας διάταξης στοιχειοκεραίας 8 στοιχείων για επιθυμητή γωνία ακτινοβολίας 0°

Για γωνία 30°

Η σύγκλιση έφτασε την τιμή του 98% και οι προτεινόμενες από τον αλγόριθμο φάσεις των στοιχείων είναι οι εξής:

$$\delta_1 = 270^\circ, \delta_2 = 180^\circ, \delta_3 = 78,75^\circ, \delta_4 = 348,75^\circ, \delta_5 = 247,5^\circ, \delta_6 = 180^\circ, \\ \delta_7 = 67,5^\circ, \delta_8 = 337,5^\circ$$

Το διάγραμμα ως προς θ του παράγοντα διάταξης που προκύπτει για τις συγκεκριμένες φάσεις είναι το ακόλουθο:



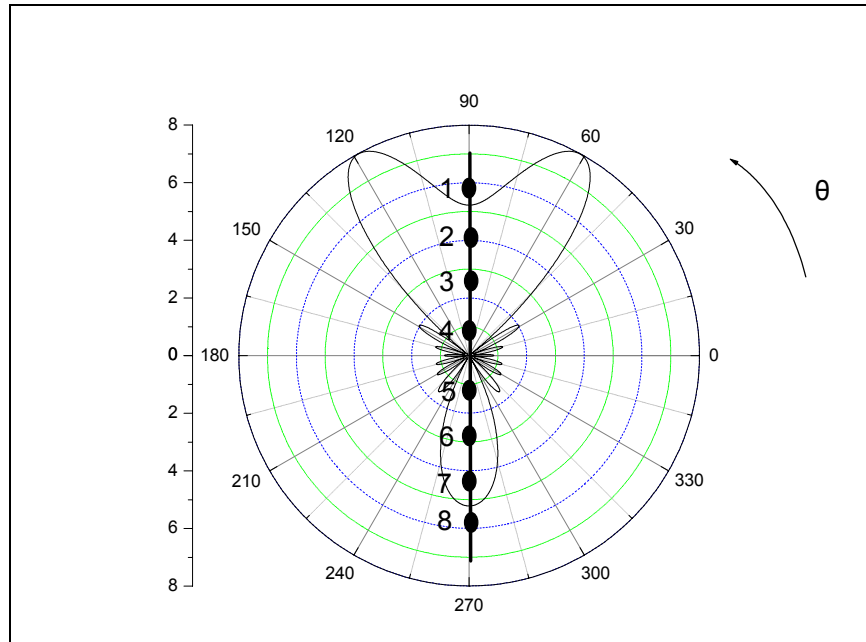
Σχ.2.4.7 Παράγοντας διάταξης στοιχειοκεραίας 8 στοιχείων για επιθυμητή γωνία ακτινοβολίας 30°

Για γωνία 60°

Η σύγκλιση έφτασε την τιμή του 99% και οι προτεινόμενες από τον αλγόριθμο φάσεις των στοιχείων είναι οι εξής:

$$\delta_1 = 191.25^\circ, \delta_2 = 33.75^\circ, \delta_3 = 274.5^\circ, \delta_4 = 78.75^\circ, \delta_5 = 281.25^\circ, \delta_6 = 123.75^\circ, \\ \delta_7 = 326.25^\circ, \delta_8 = 168.75^\circ$$

Το διάγραμμα ως προς θ του παράγοντα διάταξης που προκύπτει για τις συγκεκριμένες φάσεις είναι το ακόλουθο:



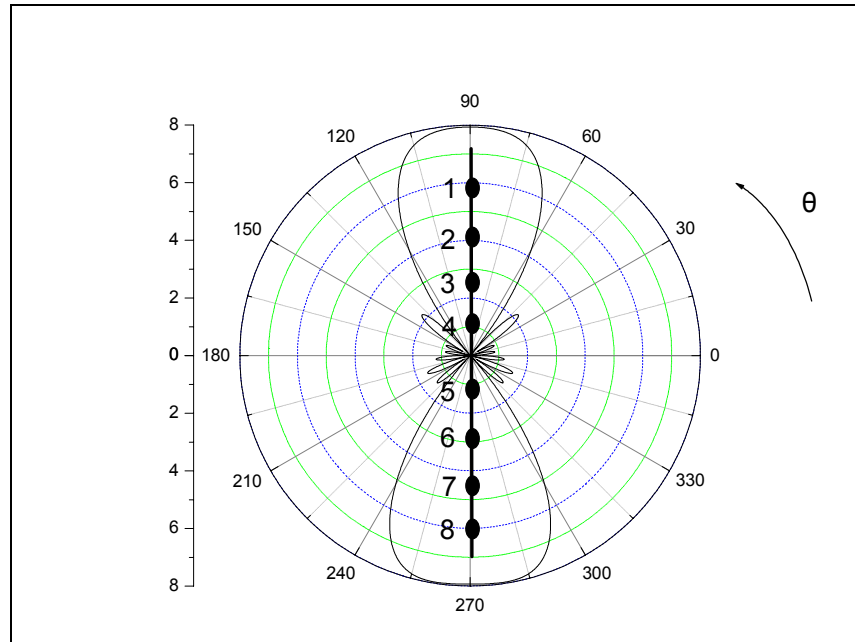
Σχ.2.4.8 Παράγοντας διάταξης στοιχειοκεραίας 8 στοιχείων για επιθυμητή γωνία ακτινοβολίας 60°

Για γωνία 90°

Η σύγκλιση έφτασε την τιμή του 99% και οι προτεινόμενες από τον αλγόριθμο φάσεις των στοιχείων είναι οι εξής:

$$\delta_1 = 326.25^\circ, \delta_2 = 146.25^\circ, \delta_3 = 337.5^\circ, \delta_4 = 146.25^\circ, \delta_5 = 315^\circ, \delta_6 = 135^\circ, \\ \delta_7 = 326.25^\circ, \delta_8 = 135^\circ$$

Το διάγραμμα ως προς θ του παράγοντα διάταξης που προκύπτει για τις συγκεκριμένες φάσεις είναι το ακόλουθο:



Σχ.2.4.9 Παράγοντας διάταξης στοιχειοκεραίας 8 στοιχείων για επιθυμητή γωνία ακτινοβολίας 90°

Εφαρμογή για γραμμική στοιχειοκεραία 16 στοιχείων

Εν συνεχεία εξετάζεται η περίπτωση όπου η ομοιόμορφη γραμμική στοιχειοκεραία αποτελείται από 16 στοιχεία με απόσταση και πάλι $\lambda/2$ μεταξύ τους. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του αλγορίθμου εξακολουθούν για τις ίδιες γωνίες των 0°, 30°, 60° και 90°. Ο πίνακας που ακολουθεί περιλαμβάνει τις παραμέτρους που εισάγονται στον γενετικό αλγόριθμο για αυτή την περίπτωση.

Μέγεθος Πληθυσμού	120
Μήκος χρωμοσώματος σε bits	80
Αριθμός Γενεών	100

Πίνακας 2.4.3

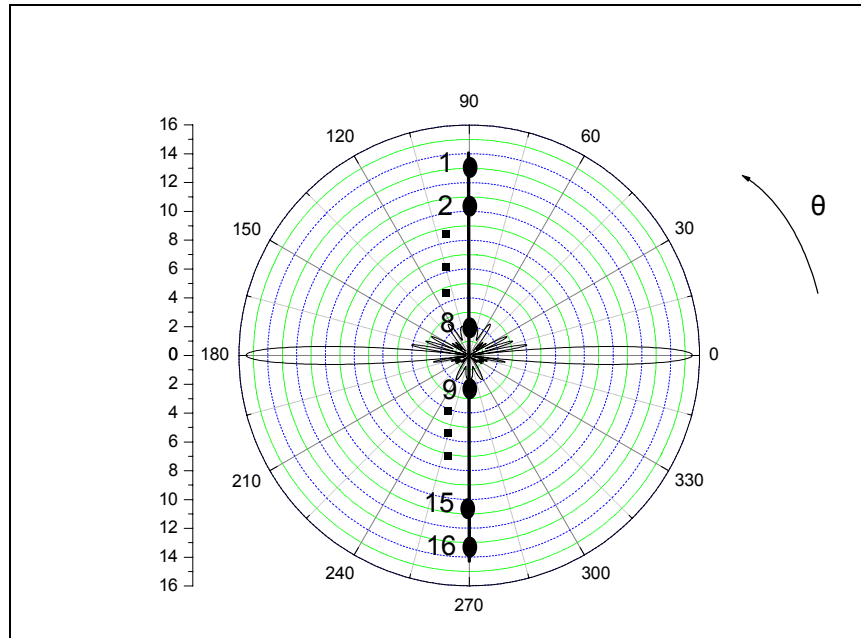
Για γωνία 0°

Η σύγκλιση έφτασε την τιμή του 97% και οι προτεινόμενες από τον αλγόριθμο φάσεις των στοιχείων είναι οι εξής:

$$\begin{aligned} \delta_1 &= 45^\circ, \quad \delta_2 = 11,25^\circ, \quad \delta_3 = 22,5^\circ, \quad \delta_4 = 348,75^\circ, \\ \delta_5 &= 45^\circ, \quad \delta_6 = 22,5^\circ, \quad \delta_7 = 22,5^\circ, \quad \delta_8 = 11,25^\circ, \\ \delta_9 &= 11,25^\circ, \quad \delta_{10} = 33,75^\circ, \quad \delta_{11} = 22,5^\circ, \quad \delta_{12} = 33,75^\circ, \end{aligned}$$

$$\delta_{13} = 22,5^\circ, \delta_{14} = 22,5^\circ, \delta_{15} = 33,75^\circ, \delta_{16} = 33,75^\circ$$

Το διάγραμμα ως προς θ του παράγοντα διάταξης που προκύπτει για τις συγκεκριμένες φάσεις είναι το ακόλουθο:



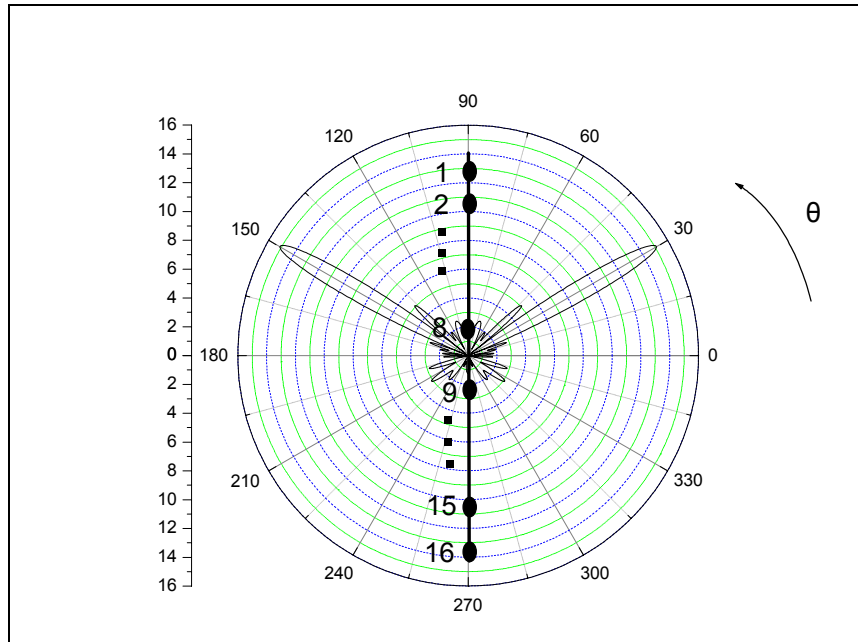
Σχ.2.4.10 Παράγοντας διάταξης στοιχειοκεραίας 16 στοιχείων για επιθυμητή γωνία ακτινοβολίας 0°

Για γωνία 30°

Η σύγκλιση έφτασε την τιμή του 96% και οι προτεινόμενες από τον αλγόριθμο φάσεις των στοιχείων είναι οι εξής:

$$\begin{aligned} \delta_1 &= 33,75^\circ, \delta_2 = 315^\circ, \delta_3 = 258,75^\circ, \delta_4 = 191,25^\circ, \\ \delta_5 &= 45^\circ, \delta_6 = 326,25^\circ, \delta_7 = 180^\circ, \delta_8 = 157,5^\circ, \\ \delta_9 &= 78,75^\circ, \delta_{10} = 303,75^\circ, \delta_{11} = 213,75^\circ, \delta_{12} = 157,5^\circ, \\ \delta_{13} &= 78,75^\circ, \delta_{14} = 326,25^\circ, \delta_{15} = 225^\circ, \delta_{16} = 123,75^\circ \end{aligned}$$

Το διάγραμμα ως προς θ του παράγοντα διάταξης που προκύπτει για τις συγκεκριμένες φάσεις είναι το ακόλουθο:



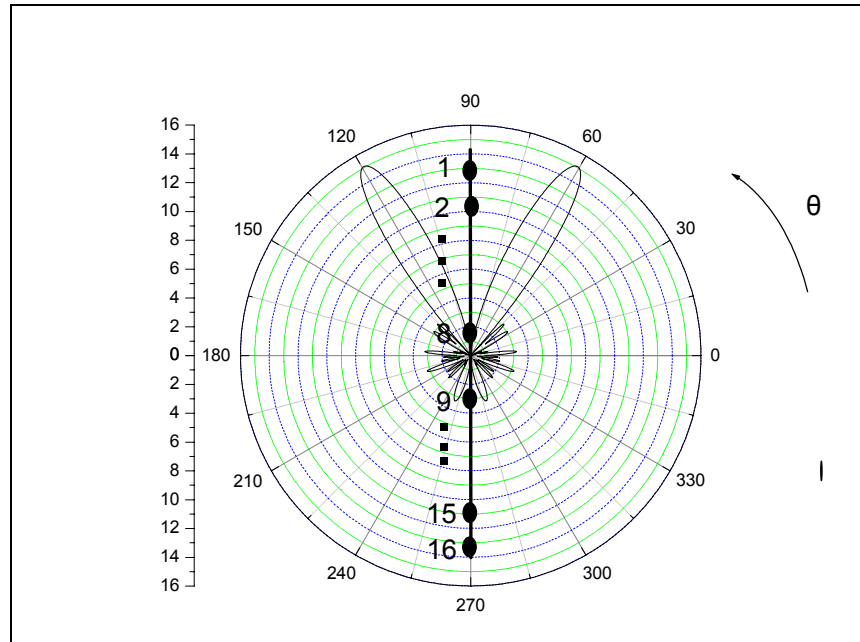
Σχ.2.4.11 Παράγοντας διάταξης στοιχειοκεραίας 16 στοιχείων για επιθυμητή γωνία ακτινοβολίας 30°

Για γωνία 60°

Η σύγκλιση έφτασε την τιμή του 94% και οι προτεινόμενες από τον αλγόριθμο φάσεις των στοιχείων είναι οι εξής:

$$\begin{aligned} \delta_1 &= 326,25^\circ, \quad \delta_2 = 90^\circ, \quad \delta_3 = 348,75^\circ, \quad \delta_4 = 180^\circ, \\ \delta_5 &= 22,5^\circ, \quad \delta_6 = 236,25^\circ, \quad \delta_7 = 45^\circ, \quad \delta_8 = 281,25^\circ, \\ \delta_9 &= 123,75^\circ, \quad \delta_{10} = 326,25^\circ, \quad \delta_{11} = 191,25^\circ, \quad \delta_{12} = 348,75^\circ, \\ \delta_{13} &= 191,25^\circ, \quad \delta_{14} = 56,25^\circ, \quad \delta_{15} = 247,5^\circ, \quad \delta_{16} = 123,75^\circ \end{aligned}$$

Το διάγραμμα ως προς θ του παράγοντα διάταξης που προκύπτει για τις συγκεκριμένες φάσεις είναι το ακόλουθο:



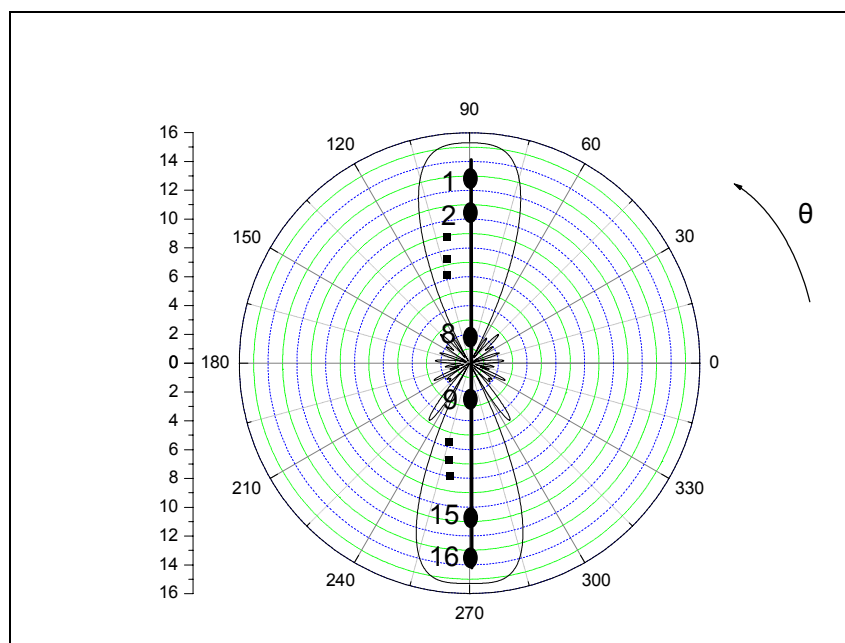
Σχ.2.4.12 Παράγοντας διάταξης στοιχειοκεραίας 16 στοιχείων για επιθυμητή γωνία ακτινοβολίας 60°

Για γωνία 90°

Η σύγκλιση έφτασε την τιμή του 95% και οι προτεινόμενες από τον αλγόριθμο φάσεις των στοιχείων είναι οι εξής:

$$\begin{aligned} \delta_1 &= 112,5^\circ, \quad \delta_2 = 292,5^\circ, \quad \delta_3 = 135^\circ, \quad \delta_4 = 292,5^\circ, \\ \delta_5 &= 101,25^\circ, \quad \delta_6 = 258,75^\circ, \quad \delta_7 = 90^\circ, \quad \delta_8 = 315^\circ, \\ \delta_9 &= 101,25^\circ, \quad \delta_{10} = 303,75^\circ, \quad \delta_{11} = 112,5^\circ, \quad \delta_{12} = 303,75^\circ, \\ \delta_{13} &= 90^\circ, \quad \delta_{14} = 315^\circ, \quad \delta_{15} = 101,25^\circ, \quad \delta_{16} = 270^\circ \end{aligned}$$

Το διάγραμμα ως προς θ του παράγοντα διάταξης που προκύπτει για τις συγκεκριμένες φάσεις είναι το ακόλουθο:



Σχ.2.4.13 Παράγοντας διάταξης στοιχειοκεραίας 16 στοιχείων για επιθυμητή γωνία ακτινοβολίας 90°

Εφαρμογή για γραμμική στοιχειοκεραία 32 στοιχείων

Εν συνεχεία εξετάζεται η περίπτωση όπου η ομοιόμορφη γραμμική στοιχειοκεραία αποτελείται από 32 στοιχεία με απόσταση και πάλι $\lambda/2$ μεταξύ τους. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του αλγορίθμου εξακολουθούν για τις ίδιες γωνίες των 0° , 30° , 60° και 90° . Ο πίνακας που ακολουθεί περιλαμβάνει τις παραμέτρους που εισάγονται στον γενετικό αλγόριθμο για αυτή την περίπτωση.

Μέγεθος Πληθυσμού	200
Μήκος χρωμοσώματος σε bits	160
Αριθμός Γενεών	160

Πίνακας 2.4.5

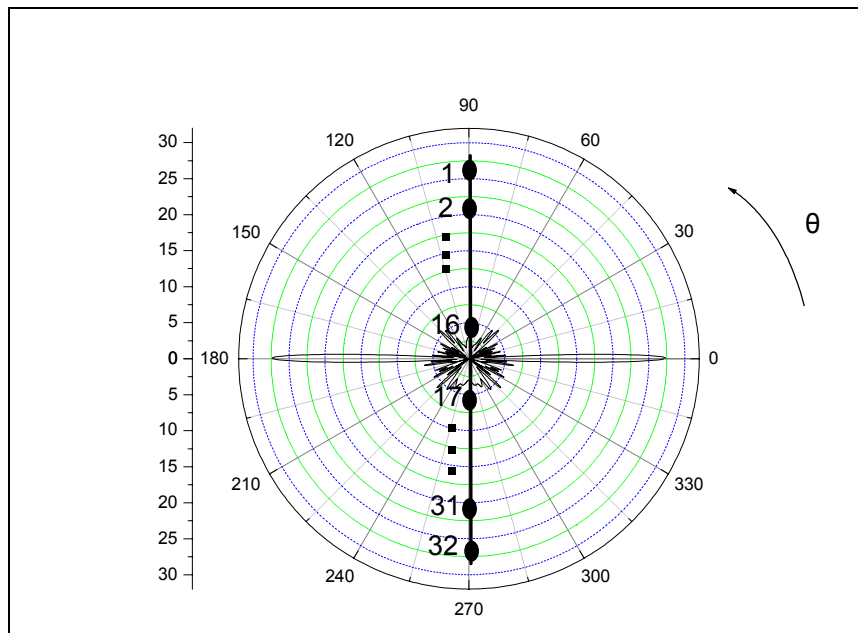
Για γωνία 0°

Η σύγκλιση έφτασε την τιμή του 85% και οι προτεινόμενες από τον αλγόριθμο φάσεις των στοιχείων είναι οι εξής:

$$\begin{aligned} \delta_1 &= 45^\circ, \quad \delta_2 = 90^\circ, \quad \delta_3 = 135^\circ, \quad \delta_4 = 67.5^\circ, \quad \delta_5 = 33.75^\circ, \quad \delta_6 = 45^\circ, \\ \delta_7 &= 45^\circ, \quad \delta_8 = 112.5^\circ, \quad \delta_9 = 67.5^\circ, \quad \delta_{10} = 0^\circ, \quad \delta_{11} = 67.5^\circ, \quad \delta_{12} = 56.25^\circ, \\ \delta_{13} &= 22.5^\circ, \quad \delta_{14} = 67.5^\circ, \quad \delta_{15} = 56.25^\circ, \quad \delta_{16} = 33.75^\circ, \quad \delta_{17} = 78.75^\circ, \quad \delta_{18} = 22.5^\circ, \end{aligned}$$

$$\delta_{19} = 56.25^\circ, \delta_{20} = 101.25^\circ, \delta_{21} = 33.75^\circ, \delta_{22} = 78.75^\circ, \delta_{23} = 0^\circ, \delta_{24} = 67.5^\circ, \\ \delta_{25} = 0^\circ, \delta_{26} = 56.25^\circ, \delta_{27} = 11.25^\circ, \delta_{28} = 33.75^\circ, \delta_{29} = 112.5^\circ, \delta_{30} = 56.25^\circ, \\ \delta_{31} = 45^\circ, \delta_{32} = 78.75^\circ$$

Το διάγραμμα ως προς θ του παράγοντα διάταξης που προκύπτει για τις συγκεκριμένες φάσεις είναι το ακόλουθο:



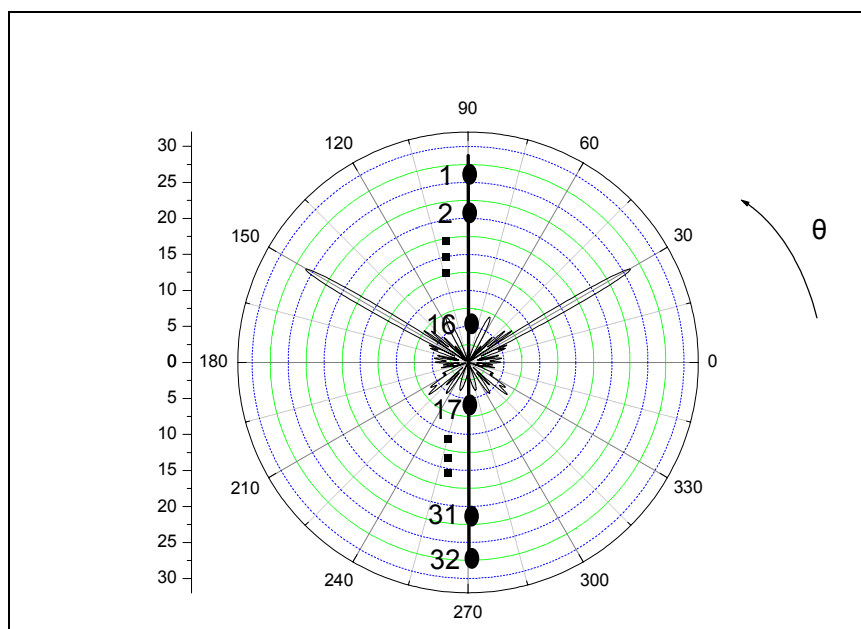
Σχ.2.4.14 Παράγοντας διάταξης στοιχειοκεραίας 32 στοιχείων για επιθυμητή γωνία ακτινοβολίας 0°

Για γωνία 30°

Η σύγκλιση έφτασε την τιμή του 86% και οι προτεινόμενες από τον αλγόριθμο φάσεις των στοιχείων είναι οι εξής:

$$\delta_1 = 45^\circ, \delta_2 = 315^\circ, \delta_3 = 225^\circ, \delta_4 = 123.75^\circ, \delta_5 = 67.5^\circ, \delta_6 = 270^\circ, \\ \delta_7 = 146.25^\circ, \delta_8 = 101.25^\circ, \delta_9 = 22.5^\circ, \delta_{10} = 348.75^\circ, \delta_{11} = 202.5^\circ, \delta_{12} = 78.75^\circ, \\ \delta_{13} = 56.25^\circ, \delta_{14} = 303.75^\circ, \delta_{15} = 281.25^\circ, \delta_{16} = 157.5^\circ, \delta_{17} = 33.75^\circ, \delta_{18} = 315^\circ, \\ \delta_{19} = 303.75^\circ, \delta_{20} = 146.25^\circ, \delta_{21} = 0^\circ, \delta_{22} = 326.25^\circ, \delta_{23} = 135^\circ, \delta_{24} = 157.5^\circ, \\ \delta_{25} = 22.5^\circ, \delta_{26} = 348.75^\circ, \delta_{27} = 168.75^\circ, \delta_{28} = 168.75^\circ, \delta_{29} = 22.5^\circ, \delta_{30} = 337.5^\circ, \\ \delta_{31} = 247.5^\circ, \delta_{32} = 101.25^\circ$$

Το διάγραμμα ως προς θ του παράγοντα διάταξης που προκύπτει για τις συγκεκριμένες φάσεις είναι το ακόλουθο:



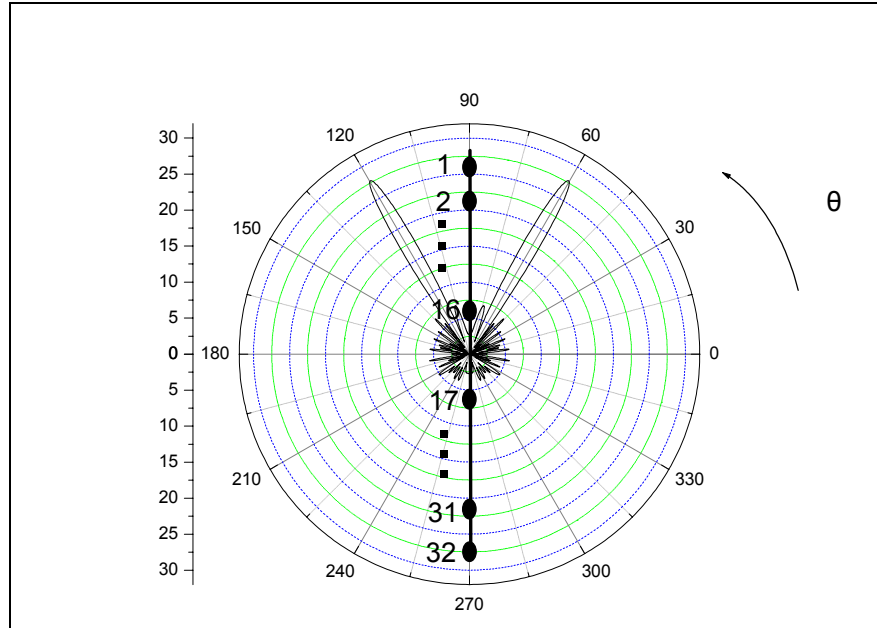
Σχ.2.4.15 Παράγοντας διάταξης στοιχειοκεραίας 32 στοιχείων για επιθυμητή γωνία ακτινοβολίας 30°

Για γωνία 60°

Η σύγκλιση έφτασε την τιμή του 86% και οι προτεινόμενες από τον αλγόριθμο φάσεις των στοιχείων είναι οι εξής:

$\delta_1 = 270^\circ$, $\delta_2 = 168.75^\circ$, $\delta_3 = 348.75^\circ$, $\delta_4 = 225^\circ$, $\delta_5 = 67.5^\circ$, $\delta_6 = 180^\circ$,
 $\delta_7 = 123.75^\circ$, $\delta_8 = 337.5^\circ$, $\delta_9 = 157.5^\circ$, $\delta_{10} = 337.5^\circ$, $\delta_{11} = 213.75^\circ$, $\delta_{12} = 56.25^\circ$,
 $\delta_{13} = 202.5^\circ$, $\delta_{14} = 22.5^\circ$, $\delta_{15} = 315^\circ$, $\delta_{16} = 112.5^\circ$, $\delta_{17} = 326.25^\circ$, $\delta_{18} = 213.75^\circ$,
 $\delta_{19} = 45^\circ$, $\delta_{20} = 213.75^\circ$, $\delta_{21} = 123.75^\circ$, $\delta_{22} = 236.25^\circ$, $\delta_{23} = 146.25^\circ$, $\delta_{24} = 337.5^\circ$,
 $\delta_{25} = 191.25^\circ$, $\delta_{26} = 0^\circ$, $\delta_{27} = 168.75^\circ$, $\delta_{28} = 33.75^\circ$, $\delta_{29} = 292.5^\circ$, $\delta_{30} = 90^\circ$,
 $\delta_{31} = 292.5^\circ$, $\delta_{32} = 146.25^\circ$

Το διάγραμμα ως προς θ του παράγοντα διάταξης που προκύπτει για τις συγκεκριμένες φάσεις είναι το ακόλουθο:



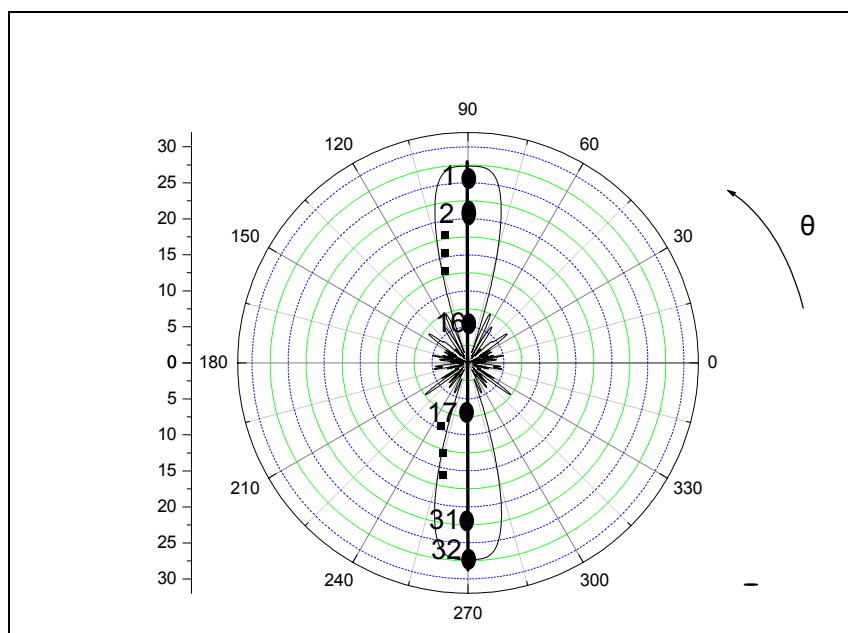
Σχ.2.4.16 Παράγοντας διάταξης στοιχειοκεραίας 32 στοιχείων για επιθυμητή γωνία ακτινοβολίας 60°

Για γωνία 90°

Η σύγκλιση έφτασε την τιμή του 85% και οι προτεινόμενες από τον αλγόριθμο φάσεις των στοιχείων είναι οι εξής:

$\delta_1 = 247.5^\circ$, $\delta_2 = 101.25^\circ$, $\delta_3 = 225^\circ$, $\delta_4 = 225^\circ$, $\delta_5 = 326.25^\circ$, $\delta_6 = 78.75^\circ$,
 $\delta_7 = 270^\circ$, $\delta_8 = 101.25^\circ$, $\delta_9 = 315^\circ$, $\delta_{10} = 112.5^\circ$, $\delta_{11} = 225^\circ$, $\delta_{12} = 45^\circ$,
 $\delta_{13} = 270^\circ$, $\delta_{14} = 90^\circ$, $\delta_{15} = 281.25^\circ$, $\delta_{16} = 67.5^\circ$, $\delta_{17} = 225^\circ$, $\delta_{18} = 90^\circ$,
 $\delta_{19} = 270^\circ$, $\delta_{20} = 146.25^\circ$, $\delta_{21} = 236.25^\circ$, $\delta_{22} = 56.25^\circ$, $\delta_{23} = 225^\circ$, $\delta_{24} = 78.75^\circ$,
 $\delta_{25} = 292.5^\circ$, $\delta_{26} = 56.25^\circ$, $\delta_{27} = 292.5^\circ$, $\delta_{28} = 78.75^\circ$, $\delta_{29} = 348.75^\circ$, $\delta_{30} = 112.5^\circ$,
 $\delta_{31} = 236.25^\circ$, $\delta_{32} = 90^\circ$

Το διάγραμμα ως προς θ του παράγοντα διάταξης που προκύπτει για τις συγκεκριμένες φάσεις είναι το ακόλουθο:



Σχ.2.4.17 Παράγοντας διάταξης στοιχειοκεραίας 32 στοιχείων για επιθυμητή γωνία ακτινοβολίας 90°

Παρατηρήσεις

Όπως γίνεται αντιληπτό από τα μέχρι τώρα εξαγόμενα αποτελέσματα, ο αλγόριθμος παρουσιάζει μια αρκετά σταθερή συμπεριφορά δεδομένου ότι τα επίπεδα σύγκλισης του είναι πολύ υψηλά. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση των 4 στοιχείων δίνει σχεδόν την βέλτιστη λύση σε όλες τις κατευθύνσεις, με τα μεγέθη των παραμέτρων να είναι σε χαμηλές τιμές, γεγονός που κάνει τον χρόνο τρεξίματος ιδιαίτερα γρήγορο. Τα χαρακτηριστικά αυτά διατηρούνται και στην περίπτωση των 8 στοιχείων, με εξαίρεση ίσως την μικρή αύξηση στον αριθμό των γενεών, η οποία όμως είναι αμελητέα. Στα 16 στοιχεία απαιτείται αύξηση τόσο του πληθυσμού όσο και των γενεών, αφού ο χώρος αναζήτησης έχει αυξηθεί σημαντικά και είναι της τάξης του 32^{16} . Η σύγκλιση ελαττώνεται λίγο σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις φτάνοντας στο 95% κατά μέσο όρο, αλλά παραμένει αρκετά υψηλή. Τέλος, στα 32 στοιχεία απαιτείται αξιοσημείωτη αύξηση πληθυσμού και γενεών, δεδομένου του πλέον αρκετά μεγάλου χώρου αναζήτησης, με αποτέλεσμα η σύγκλιση να πέφτει στο 86% και ο χρόνος επεξεργασίας να αυξάνεται αρκετά.

Κεφάλαιο 3

Επίπεδες στοιχειοκεραίες

3.1 Ομοιόμορφες επίπεδες στοιχειοκεραίες

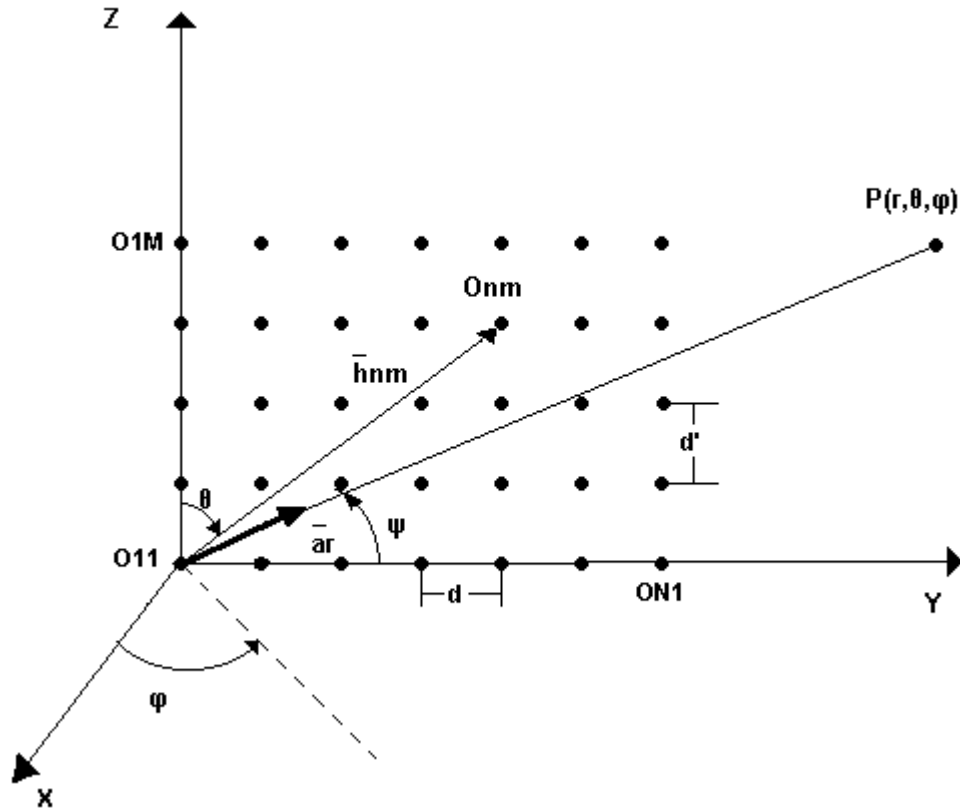
Προχωρώντας την ανάλυση των στοιχειοκεραιών, αναπτύσσεται σε αυτό το σημείο η περίπτωση Μ γραμμικών στοιχειοκεραιών, παράλληλων μεταξύ τους και σε σταθερή απόσταση d' . Κάθε γραμμική στοιχειοκεραία αποτελείται από Ν στοιχεία O_1, O_2, \dots, O_N , με σταθερή απόσταση d μεταξύ των διαδοχικών στοιχείων. Κάθε στοιχείο διεγείρεται με ρεύμα του ίδιου εύρους και σταθερής διαφοράς φάσης α και β ως προς το ρεύμα του προηγούμενου στοιχείου κατά την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση αντίστοιχα. Μια τέτοια διάταξη ονομάζεται ομοιόμορφη επίπεδη στοιχειοκεραία ή κεραία πετάσματος (two dimensional array or curtain array). Συνεπώς μια επίπεδη κεραία μπορεί να θεωρηθεί σαν μια γραμμική στοιχειοκεραία με άξονα κατά την διεύθυνση του άξονα z , της οποίας τα στοιχεία είναι γραμμικές στοιχειοκεραίες με άξονα κατά την διεύθυνση του άξονα y . Πρόκειται λοιπόν για μια γενίκευση του προβλήματος των στοιχειοκεραιών και είναι προφανές ότι ο παράγοντας της διάταξης της επίπεδης στοιχειοκεραίας θα είναι το γινόμενο του παράγοντα της διάταξης της οριζόντιας επί τον παράγοντα της διάταξης της κάθετης στοιχειοκεραίας.

Η διαφορά φάσεως του ρεύματος διεγέρσεως του στοιχείου nm ως προς το ρεύμα του στοιχείου αναφοράς το οποίο βρίσκεται στην αρχή των συντεταγμένων, εκφράζεται από την συνάρτηση $\exp\{j(n\alpha+m\beta)\}$. Η θέση του στοιχείου nm καθορίζεται από το διάνυσμα :

$$\bar{h}_{nm}$$

το οποίο έχει αρχή την αρχή των συντεταγμένων και τέλος την θέση του στοιχείου, δηλαδή

$$\bar{h}_{nm} = nd\bar{a}_y + md'\bar{a}_z$$



Σχ. 3.1.1 Επίπεδη στοιχειοκεραία

Η διεύθυνση του σημείου υπολογισμού του πεδίου, $P(r, \theta, \phi)$ καθορίζεται από το διάνυσμα:

$$\bar{a}_r$$

δηλαδή,

$$\bar{a}_r = \bar{a}_x \sin \theta \cos \phi + \bar{a}_y \sin \theta \sin \phi + \bar{a}_z \cos \theta \quad (3.1.1)$$

Εξάλλου από το εσωτερικό γινόμενο των διανυσμάτων αυτών προκύπτει

$$\bar{h}_{nm} \bar{a}_r = nd \sin \theta \sin \phi + md' \cos \theta$$

Είναι προφανές τώρα ότι η συνεισφορά στο συνολικό πεδίο ακτινοβολίας του στοιχείου nm, στο σημείο υπολογισμού $P(r, \theta, \phi)$ θα παρουσιάζει μια διαφορά φάσεως ως προς το μερικό πεδίο του στοιχείου αναφοράς, που οφείλεται αφ' ενός στην μετατόπιση του στοιχείου nm και συνεπώς στη διαφορά διαδρομής, αφ' ετέρου στην διαφορά φάσεως των ρευμάτων διεγέρσεως όπου εκφράζονται από τις αντίστοιχες συναρτήσεις

$$\exp(jk \bar{h}_{nm} \bar{a}_r)$$

$$\exp(jna + jm\beta)$$

Συνεπώς η συνολική διαφορά φάσεως του μερικού πεδίου ακτινοβολίας του στοιχείου nm στο σημείο P(r, θ, φ), ως προς το μερικό πεδίο του στοιχείου αναφοράς είναι

$$e^{jk\bar{h}_{nm}\bar{a}_r} e^{j(na+m\beta)} \quad (3.1.2)$$

Επομένως ο παράγοντας διάταξης της ομοιόμορφης επίπεδης στοιχειοκεραίας δίνεται από την σχέση

$$\bar{S} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M e^{jk\bar{h}_{nm}\bar{a}_r} e^{j(na+m\beta)} = \sum_{n=1}^N e^{jn(kd \sin \theta \sin \phi + a)} \sum_{m=1}^M e^{jm(kd' \cos \theta + \beta)} \quad (3.1.3)$$

Από την παραπάνω σχέση συμπεραίνεται ότι ο παράγοντας της διατάξεως της ομοιόμορφης επίπεδης στοιχειοκεραίας είναι το γινόμενο των παραγόντων των διατάξεων των δύο, «οριζοντίου» και «καθέτου», ομοιόμορφων γραμμικών στοιχειοκεραιών.

$$\bar{S} = \bar{S}_N \bar{S}_M \quad (3.1.4)$$

Όπου

$$\bar{S}_N = \sum_{n=1}^N e^{jn(kd \sin \theta \sin \phi + a)} \quad (3.1.5)$$

και

$$\bar{S}_M = \sum_{m=1}^M e^{jm(kd' \cos \theta + \beta)} \quad (3.1.6)$$

Στο σημείο αυτό μπορεί να γίνει η ίδια θεώρηση που αναπτύχθηκε και πριν για τις ομοιόμορφες γραμμικές στοιχειοκεραίες σε ότι αφορά την διαφορά φάσεως μεταξύ των στοιχείων. Συγκεκριμένα, κάθε στοιχείο μπορεί να έχει μία ξεχωριστή διαφορά φάσεως δ_{nm} όπου θα πρέπει να πληροί την συνθήκη των ομοιόμορφων επίπεδων στοιχειοκεραιών, ότι δηλαδή η διαφορά φάσης του είναι σταθερή ως προς την διαφορά φάσης του προηγούμενου στοιχείου τόσο κατά την οριζόντια όσο και κατά την κατακόρυφη διεύθυνση. Επομένως ο παράγοντας διάταξης της επίπεδης στοιχειοκεραίας μπορεί να πάρει την μορφή:

$$\bar{S} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M e^{jk\bar{h}_{nm}\bar{a}_r} e^{j\delta_{nm}} = \sum_{n=1}^N e^{j(nkd \sin \theta \sin \phi + \delta_n)} \sum_{m=1}^M e^{j(mkd' \cos \theta + \delta_m)} \quad (3.1.7)$$

Και σε αυτή την περίπτωση όπως και πριν, η διαφορά φάσης κάθε στοιχείου αντιμετωπίζεται μεμονωμένα με προφανή πλεονέκτημα την πιο άμεση μελέτη της

επίδρασης του στην κατεύθυνση του κύριου λοβού στο διάγραμμα του παράγοντα διάταξης.

Η σχεδίαση μιας επίπεδης στοιχειοκεραίας δίνει ισχυρές κατευθυντικές ιδιότητες, το δε διάγραμμα που παράγεται μπορεί να βρεθεί με κατάλληλο πολλαπλασιασμό των δύο διαγραμμάτων των γραμμικών στοιχειοκεραιών. Έτσι, το διάγραμμα πεδίου στο επίπεδο xy υπολογίζεται σαν η συστοιχία να αποτελείται από μια απλή γραμμική συστοιχία με μήκος N που συμπίπτει με τον άξονα y (στοιχειοκεραία y). Με την ίδια λογική, το διάγραμμα πεδίου στο επίπεδο xz υπολογίζεται σαν η συστοιχία να αποτελείται από μια απλή γραμμική συστοιχία με ύψος M που συμπίπτει με τον άξονα z (στοιχειοκεραία z). Αν η στοιχειοκεραία έχει και «βάθος» στην διεύθυνση x , τότε το διάγραμμα στο επίπεδο xy είναι το γινόμενο των διαγραμμάτων των στοιχειοκεραιών x και y , ενώ το διάγραμμα στο επίπεδο xz είναι το γινόμενο των διαγραμμάτων των στοιχειοκεραιών x και z .

Τέλος θα ήταν παράλειψη να μην αναφερθεί η πολύ σημαντική εφαρμογή της μεθόδου της ανίχνευσης φάσης (phase scanning) που εκτός των γραμμικών επεκτείνεται και στις επίπεδες στοιχειοκεραίες. Όπως γίνεται αντιληπτό με τον έλεγχο των φάσεων ο κύριος λοβός ακτινοβολίας στρέφεται κατά βούληση σαρώνοντας τον ουρανό προς την εκάστοτε επιθυμητή κατεύθυνση. Το γεγονός αυτό αναδεικνύει την ανάγκη για άμεση πρόσβαση και διαχείριση της διαφοράς φάσεως κάθε στοιχείου. Η ανάγκη αυτή ικανοποιείται πλήρως με την μεμονωμένη αντιμετώπιση των διαφορών φάσεων μέσω της προηγούμενης ανάλυσης. Αν λοιπόν επιτευχθεί ο προσδιορισμός της φάσης κάθε στοιχείου μετά ο συνδυασμός με την χρήση υψηλής απόδοσης ψηφιακών phase shifters, που παράγονται από την σύγχρονη τεχνολογία των MMIC (μονολιθικών μικροκυματικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων) καταστεί υλοποιήσιμη την μέθοδο της ανίχνευσης φάσης.

3.2 Εφαρμογή γενετικού αλγόριθμου στη σύνθεση επίπεδων στοιχειοκεραιών

Κωδικοποίηση φάσεων και συνάρτηση προσαρμοστικότητας

Στο σημείο αυτό θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της εφαρμογής των γενετικών αλγορίθμων για την περίπτωση των επίπεδων ομοιόμορφων στοιχειοκεραιών. Όμοια με τις γραμμικές το ζητούμενο και εδώ είναι ο προσδιορισμός των φάσεων με τις οποίες θα πρέπει να τροφοδοτηθούν τα στοιχεία, ώστε ο λοβός ακτινοβολίας να στραφεί

προς την επιθυμητή κάθε φορά διεύθυνση. Ανατρέχοντας πίσω στην θεωρία που διέπει τις επίπεδες στοιχειοκεραίες, παρατηρείται ότι η σχέση που δίνει τον παράγοντα της διάταξης είναι η εξής ,

$$\bar{S} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M e^{jk\bar{h}_{nm}\bar{a}_r} e^{j\delta_{nm}} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M e^{j(k\bar{h}_{nm}\bar{a}_r + \delta_{nm})} \quad (3.2.1)$$

με

$$\bar{h}_{nm}\bar{a}_r = nd \sin \theta \sin \phi + md' \cos \theta \quad (3.2.2)$$

Ακολουθώντας την ίδια επιλογή με πριν, ορίζουμε τις αποστάσεις των στοιχείων τόσο στην κατακόρυφη όσο και στην οριζόντια διεύθυνση στα $\lambda/2$, δηλαδή $d = d' = \lambda/2$. Έτσι η σχέση (3.2.1) γίνεται,

$$\bar{S} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M e^{j(2\pi/\lambda)\bar{h}_{nm}\bar{a}_r} e^{j\delta_{nm}} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M e^{j((2\pi/\lambda)\bar{h}_{nm}\bar{a}_r + \delta_{nm})} \quad (3.2.3)$$

με

$$\bar{h}_{nm}\bar{a}_r = n\lambda/2 \sin \theta \sin \phi + m\lambda/2 \cos \theta \quad (3.2.4)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση λοιπόν χρησιμοποιεί την σχέση (3.2.3) αναθέτοντας σε κάθε χρωμόσωμα την τιμή προσαρμοστικότητας του. Η κωδικοποίηση του χρωμοσώματος είναι όμοια με την περίπτωση των γραμμικών, δηλαδή 5 bits σε κάθε γονίδιο με το ένα bit να ισούται με 11.25° .

Τέλος αξίζει να επαναληφθεί ότι το διάγραμμα ακτινοβολίας έχει ισχυρές κατευθυντικές ιδιότητες δεδομένου ότι έχει τρισδιάστατη μορφή. Η δε παρουσίαση των πολικών διαγραμμάτων ακτινοβολίας που θα ακολουθήσει γίνεται σε τομές των τριών επιπέδων. Συγκεκριμένα, στο επίπεδο xy όπου προκύπτει για γωνία $\theta = \pi/2$, στο επίπεδο yz για γωνία $\phi = \pi/2$ και στο επίπεδο xz για γωνία $\phi = 0$.

Εφαρμογή για επίπεδη στοιχειοκεραία (N=4) x (M=4) στοιχείων

Η πρώτη περίπτωση που εξετάζεται είναι για ομοιόμορφη επίπεδη στοιχειοκεραία 16 στοιχείων σε διάταξη 4x4 με αποστάσεις $\lambda/2$ μεταξύ τους. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του αλγορίθμου παρουσιάζονται για επιθυμητές γωνίες μέγιστης ακτινοβολίας $\phi = 30^\circ$, $\theta = 30^\circ$. Ο πίνακας που ακολουθεί περιλαμβάνει τις παραμέτρους που εισάγονται στον γενετικό αλγόριθμο,

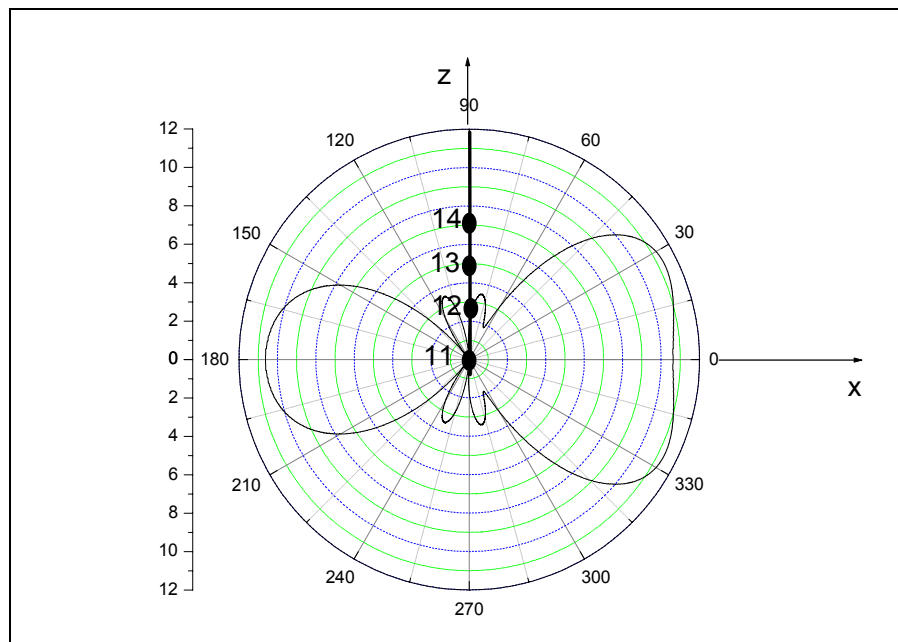
Μέγεθος πληθυσμού	120
Μήκος χρωμοσώματος σε bits	80
Αριθμός γενεών	100

Πίνακας 3.2.1

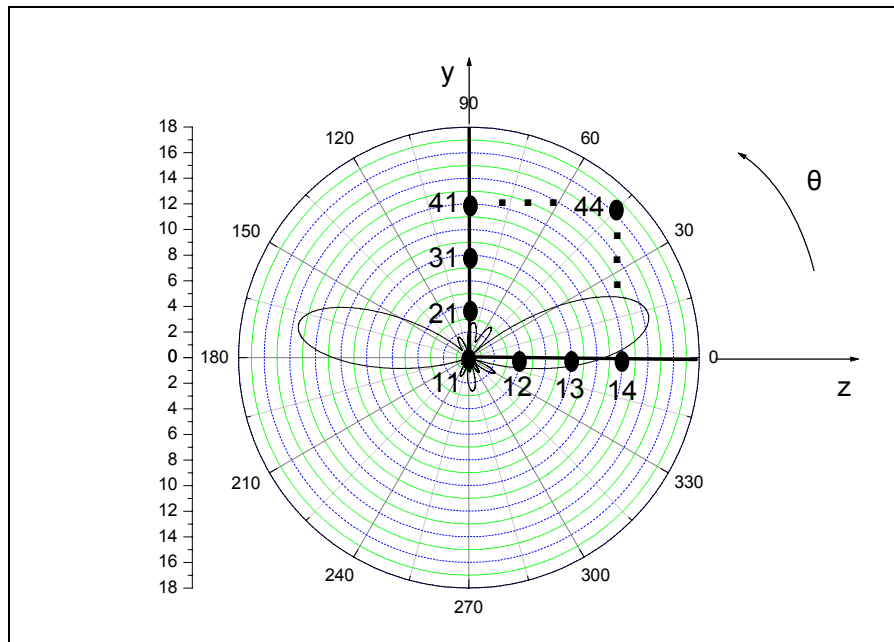
Η σύγκλιση του γενετικού αλγορίθμου έφτασε στη τιμή του 93% και οι προτεινόμενες από τον αλγόριθμο φάσεις των στοιχείων είναι οι εξής:

$$\begin{aligned}
 \delta_{11} &= 348.75^\circ, \delta_{12} = 292.5^\circ, \delta_{13} = 292.5^\circ, \delta_{14} = 213.75^\circ, \\
 \delta_{21} &= 180^\circ, \delta_{22} = 123.75^\circ, \delta_{23} = 90^\circ, \delta_{24} = 33.75^\circ, \\
 \delta_{31} &= 0^\circ, \delta_{32} = 315^\circ, \delta_{33} = 315^\circ, \delta_{34} = 247.5^\circ, \\
 \delta_{41} &= 236.25^\circ, \delta_{42} = 146.25^\circ, \delta_{43} = 146.25^\circ, \delta_{44} = 135^\circ
 \end{aligned}$$

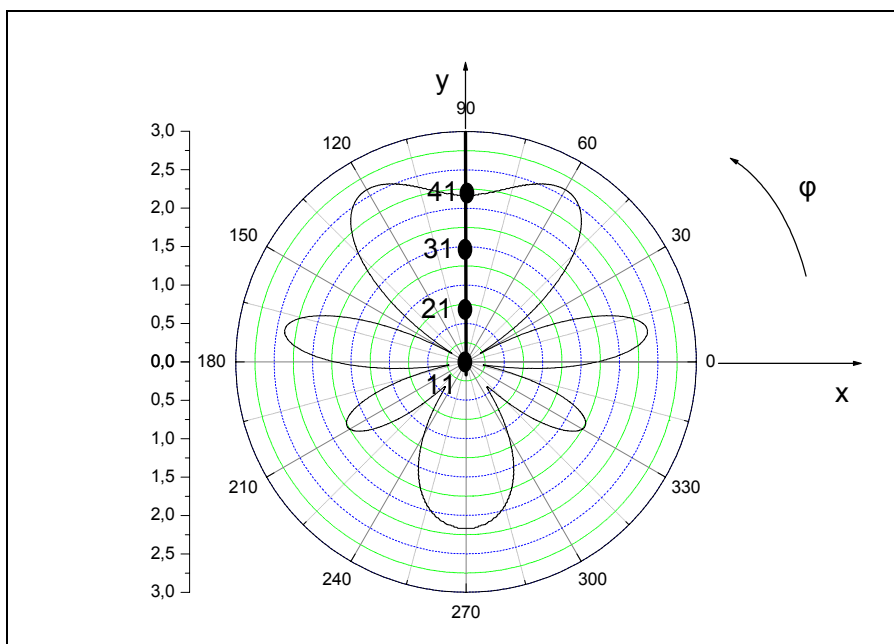
Τα διαγράμματα του παράγοντα διάταξης στα επίπεδα xz, yz, xy που προκύπτουν για τις συγκεκριμένες φάσεις είναι τα ακόλουθα:



Σχ.3.2.1 Παράγοντας διάταξης στοιχειοκεραίας 4x4 στοιχείων στο xz επίπεδο



Σχ.3.2.2 Παράγοντας διάταξης στοιχειοκεραίας 4x4 στοιχείων στο yz επίπεδο



Σχ.3.2.3 Παράγοντας διάταξης στοιχειοκεραίας 4x4 στοιχείων στο xy επίπεδο

Εφαρμογή για επίπεδη στοιχειοκεραία (N=4) x (M=6) στοιχείων

Στην δεύτερη περίπτωση η ομοιόμορφη επίπεδη στοιχειοκεραία αποτελείται από 24 στοιχεία σε διάταξη 4x6 με αποστάσεις πάλι $\lambda/2$ μεταξύ τους. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του αλγορίθμου παρουσιάζονται και εδώ για επιθυμητές γωνίες μέγιστης ακτινοβολίας $\varphi = 30^\circ$, $\theta = 30^\circ$. Ο πίνακας που ακολουθεί περιλαμβάνει τις παραμέτρους που εισάγονται στον γενετικό αλγόριθμο,

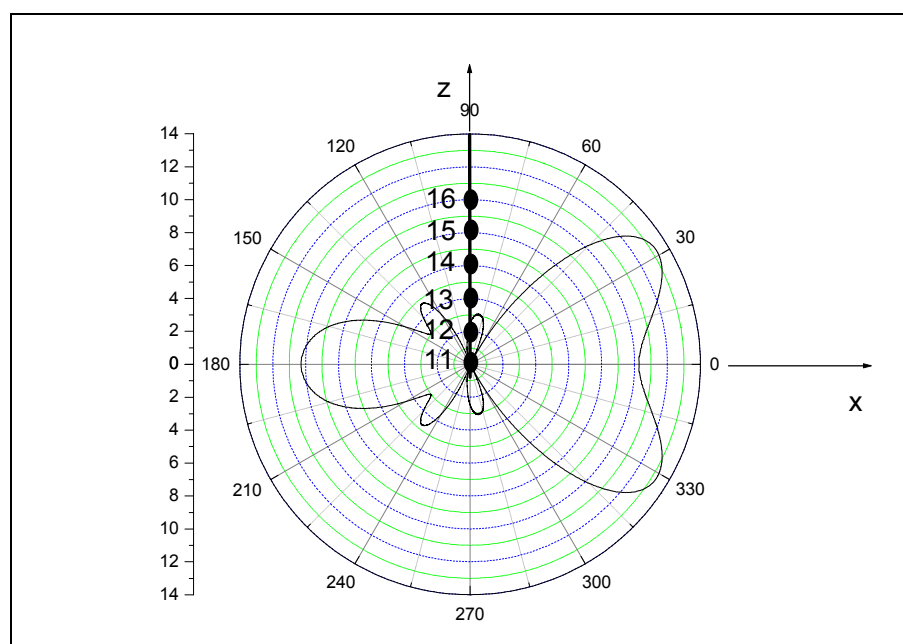
Μέγεθος πληθυσμού	200
Μήκος χρωμοσώματος σε bits	120
Αριθμός γενεών	100

Πίνακας 3.2.2

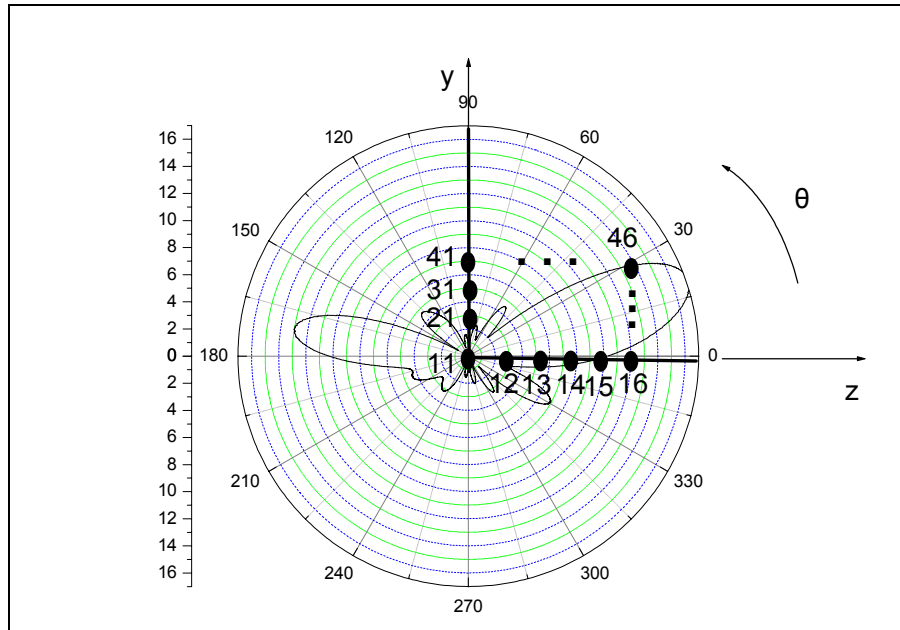
Η σύγκλιση του γενετικού αλγορίθμου έφτασε στη τιμή του 87% και οι προτεινόμενες από τον αλγόριθμο φάσεις των στοιχείων είναι οι εξής:

$$\begin{aligned} \delta_{11} &= 337,5^\circ, \delta_{12} = 180^\circ, \delta_{13} = 0^\circ, \delta_{14} = 202,5^\circ, \delta_{15} = 33,75^\circ, \delta_{16} = 315^\circ, \\ \delta_{21} &= 348,75^\circ, \delta_{22} = 101,25^\circ, \delta_{23} = 315^\circ, \delta_{24} = 225^\circ, \delta_{25} = 11,25^\circ, \delta_{26} = 236,25^\circ, \\ \delta_{31} &= 213,75^\circ, \delta_{32} = 56,25^\circ, \delta_{33} = 348,75^\circ, \delta_{34} = 191,25^\circ, \delta_{35} = 348,75^\circ, \delta_{36} = 157,5^\circ, \\ \delta_{41} &= 180^\circ, \delta_{42} = 22,5^\circ, \delta_{43} = 225^\circ, \delta_{44} = 78,75^\circ, \delta_{45} = 326,25^\circ, \delta_{46} = 157,5^\circ \end{aligned}$$

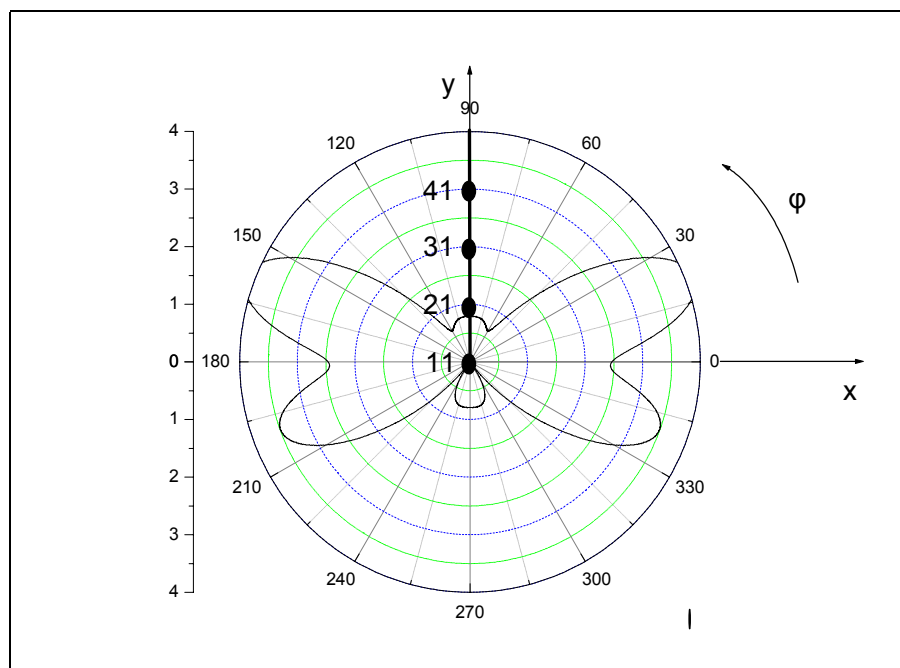
Τα διαγράμματα του παράγοντα διάταξης στα επίπεδα xz, yz, xy που προκύπτουν για τις συγκεκριμένες φάσεις είναι τα ακόλουθα



Σχ.3.2.4 Παράγοντας διάταξης στοιχειοκεραίας 4x6 στοιχείων στο xz επίπεδο



Σχ.3.2.5 Παράγοντας διάταξης στοιχειοκεραίας 4x6 στοιχείων στο yz επίπεδο



Σχ.3.2.6 Παράγοντας διάταξης στοιχειοκεραίας 4x6 στοιχείων στο xy επίπεδο

Εφαρμογή για επίπεδη στοιχειοκεραία (N=6) x (M=4) στοιχείων

Συνεχίζοντας την ανάλυση, εξετάζεται η περίπτωση της ομοιόμορφης επίπεδης στοιχειοκεραίας αποτελούμενη από 24 στοιχεία σε διάταξη 6x4 με αποστάσεις πάλι $\lambda/2$ μεταξύ τους. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του αλγορίθμου παρουσιάζονται και εδώ για επιθυμητές γωνίες μέγιστης ακτινοβολίας $\varphi = 30^\circ$, $\theta = 30^\circ$. Ο πίνακας που ακολουθεί περιλαμβάνει τις παραμέτρους που εισάγονται στον γενετικό αλγόριθμο,

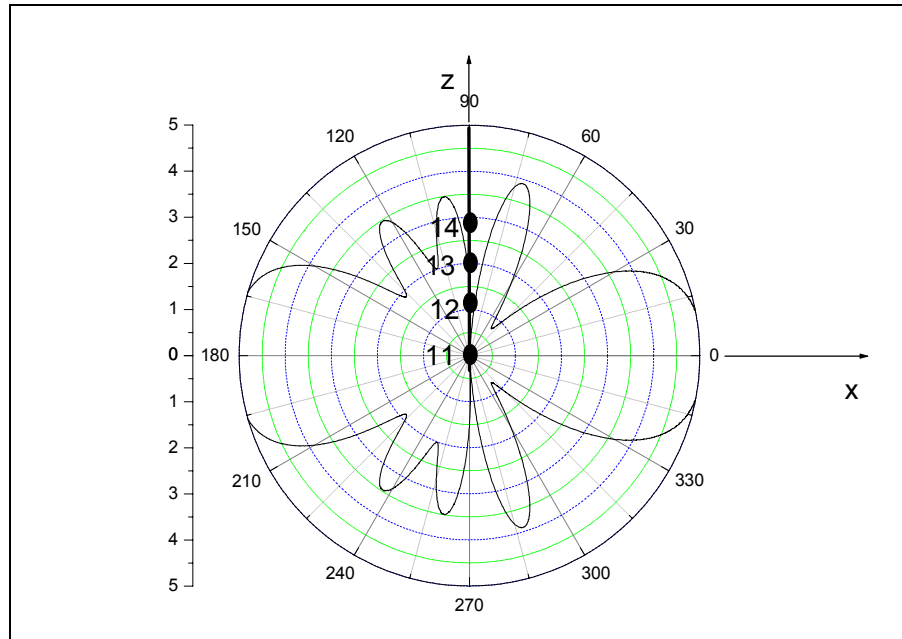
Μέγεθος πληθυσμού	200
Μήκος χρωμοσώματος σε bits	120
Αριθμός γενεών	100

Πίνακας 3.2.3

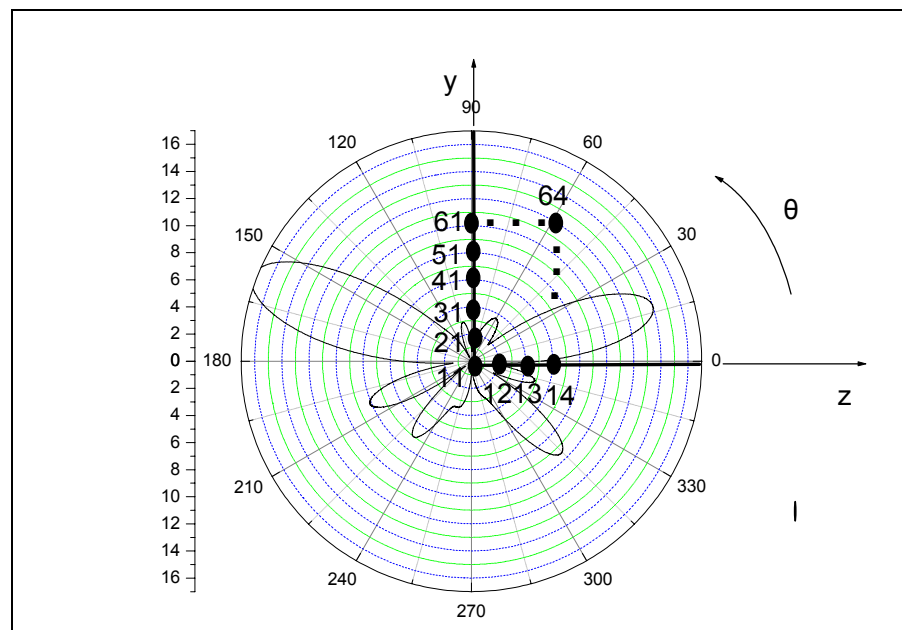
Η σύγκλιση του γενετικού αλγορίθμου έφτασε στη τιμή του 88% και οι προτεινόμενες από τον αλγόριθμο φάσεις των στοιχείων είναι οι εξής:

$$\begin{aligned} \delta_{11} &= 101.25^\circ, \delta_{12} = 303.75^\circ, \delta_{13} = 146.25^\circ, \delta_{14} = 337.5^\circ, \\ \delta_{21} &= 56.25^\circ, \delta_{22} = 191.25^\circ, \delta_{23} = 101.25^\circ, \delta_{24} = 11.25^\circ, \\ \delta_{31} &= 0^\circ, \delta_{32} = 202.5^\circ, \delta_{33} = 56.25^\circ, \delta_{34} = 236.25^\circ, \\ \delta_{41} &= 292.5^\circ, \delta_{42} = 157.5^\circ, \delta_{43} = 11.25^\circ, \delta_{44} = 202.5^\circ, \\ \delta_{51} &= 292.5^\circ, \delta_{52} = 101.25^\circ, \delta_{53} = 315^\circ, \delta_{54} = 123.75^\circ, \\ \delta_{61} &= 270^\circ, \delta_{62} = 56.25^\circ, \delta_{63} = 202.5^\circ, \delta_{64} = 123.75^\circ \end{aligned}$$

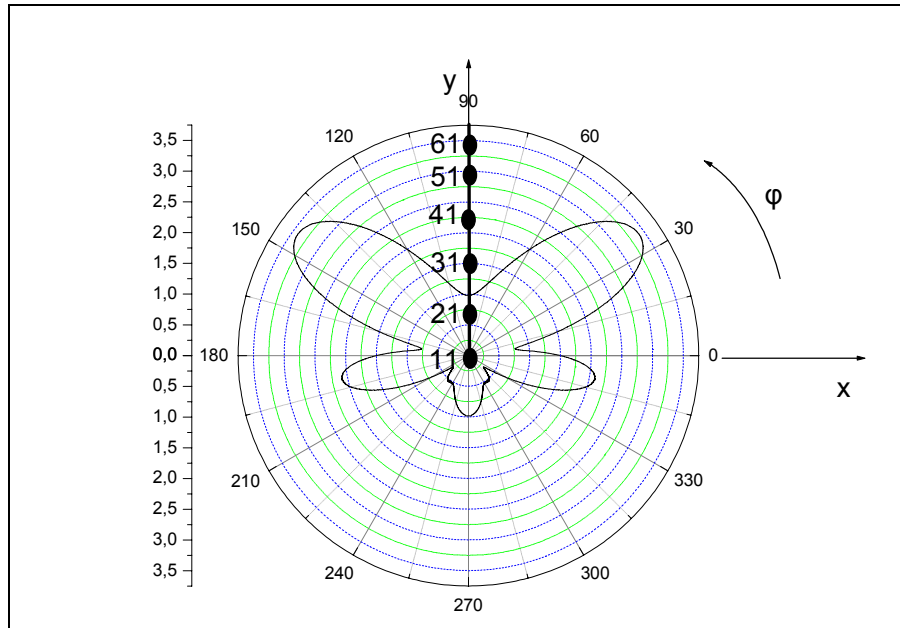
Τα διαγράμματα του παράγοντα διάταξης στα επίπεδα xz, yz, xy που προκύπτουν για τις συγκεκριμένες φάσεις είναι τα ακόλουθα



Σχ.3.2.7 Παράγοντας διάταξης στοιχειοκεραίας 6x4 στοιχείων στο xz επίπεδο



Σχ.3.2.8 Παράγοντας διάταξης στοιχειοκεραίας 6x4 στοιχείων στο yz επίπεδο



Σχ.3.2.9 Παράγοντας διάταξης στοιχειοκεραίας 6x4 στοιχείων στο xy επίπεδο

Εφαρμογή για επίπεδη στοιχειοκεραία (N=6) x (M=6) στοιχείων

Συνεχίζοντας την ανάλυση, εξετάζεται η περίπτωση της ομοιόμορφης επίπεδης στοιχειοκεραίας αποτελούμενη από 36 στοιχεία σε διάταξη 6x6 με αποστάσεις πάλι $\lambda/2$ μεταξύ τους. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του αλγορίθμου παρουσιάζονται και εδώ για επιθυμητές γωνίες μέγιστης ακτινοβολίας $\varphi = 30^\circ$, $\theta = 30^\circ$. Ο πίνακας που ακολουθεί περιλαμβάνει τις παραμέτρους που εισάγονται στον γενετικό αλγόριθμο,

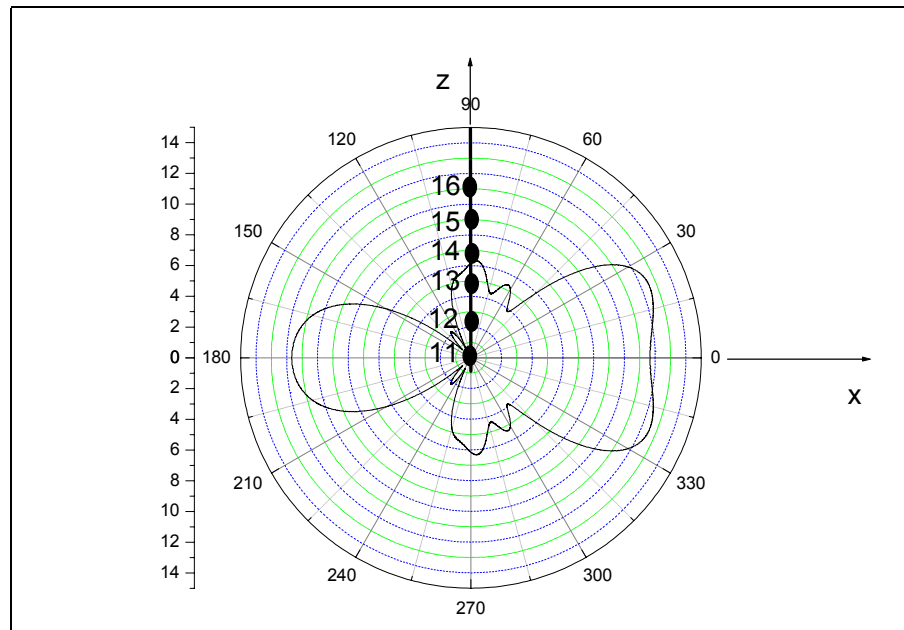
Μέγεθος πληθυσμού	300
Μήκος χρωμοσώματος σε bits	160
Αριθμός γενεών	100

Πίνακας 3.2.4

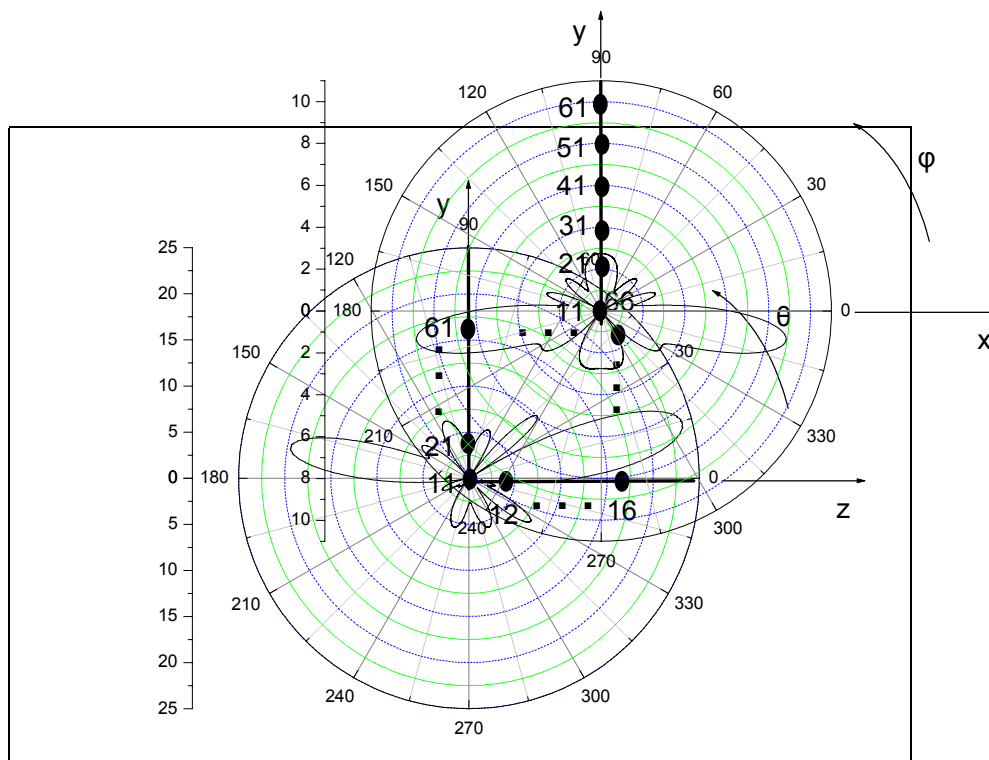
Η σύγκλιση του γενετικού αλγορίθμου έφτασε στη τιμή του 88% και οι προτεινόμενες από τον αλγόριθμο φάσεις των στοιχείων είναι οι εξής:

$$\begin{aligned}
&\delta_{11} = 146.25^\circ, \delta_{12} = 22.5^\circ, \delta_{13} = 225^\circ, \delta_{14} = 78.75^\circ, \delta_{15} = 247.5^\circ, \delta_{16} = 123.75^\circ, \\
&\delta_{21} = 135^\circ, \delta_{22} = 0^\circ, \delta_{23} = 202.5^\circ, \delta_{24} = 0^\circ, \delta_{25} = 202.5^\circ, \delta_{26} = 78.75^\circ, \\
&\delta_{31} = 101.25^\circ, \delta_{32} = 281.25^\circ, \delta_{33} = 135^\circ, \delta_{34} = 213.75^\circ, \delta_{35} = 146.25^\circ, \delta_{36} = 22.5^\circ, \\
&\delta_{41} = 112.5^\circ, \delta_{42} = 236.25^\circ, \delta_{43} = 146.25^\circ, \delta_{44} = 281.25^\circ, \delta_{45} = 168.75^\circ, \delta_{46} = 22.5^\circ, \\
&\delta_{51} = 315^\circ, \delta_{52} = 213.75^\circ, \delta_{53} = 123.75^\circ, \delta_{54} = 225^\circ, \delta_{55} = 135^\circ, \delta_{56} = 315^\circ, \\
&\delta_{61} = 247.5^\circ, \delta_{62} = 157.5^\circ, \delta_{63} = 348.75^\circ, \delta_{64} = 292.5^\circ, \delta_{65} = 67.5^\circ, \delta_{66} = 247.5^\circ
\end{aligned}$$

Τα διαγράμματα του παράγοντα διάταξης στα επίπεδα xz, yz, xy που προκύπτουν για τις συγκεκριμένες φάσεις είναι τα ακόλουθα



Σχ.3.2.10 Παράγοντας διάταξης στοιχειοκεραίας 6x6 στοιχείων στο xz επίπεδο



Σχ.3.2.11 Παράγοντας διάταξης στοιχειοκεραίας 6x6 στοιχείων στο yz επίπεδο

Σχ.3.2.12 Παράγοντας διάταξης στοιχειοκεραίας 6x6 στοιχείων στο xy επίπεδο

Εφαρμογή για επίπεδη στοιχειοκεραία (N=10) x (M=4) στοιχείων

Κλείνοντας τις εφαρμογές , εξετάζεται η περίπτωση της ομοιόμορφης επίπεδης στοιχειοκεραίας αποτελούμενη από 40 στοιχεία σε διάταξη 10x4 με αποστάσεις πάλι $\lambda/2$ μεταξύ τους. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του αλγορίθμου παρουσιάζονται και εδώ για επιθυμητές γωνίες μέγιστης ακτινοβολίας $\varphi = 30^\circ$, $\theta = 30^\circ$. Ο πίνακας που ακολουθεί περιλαμβάνει τις παραμέτρους που εισάγονται στον γενετικό αλγόριθμο,

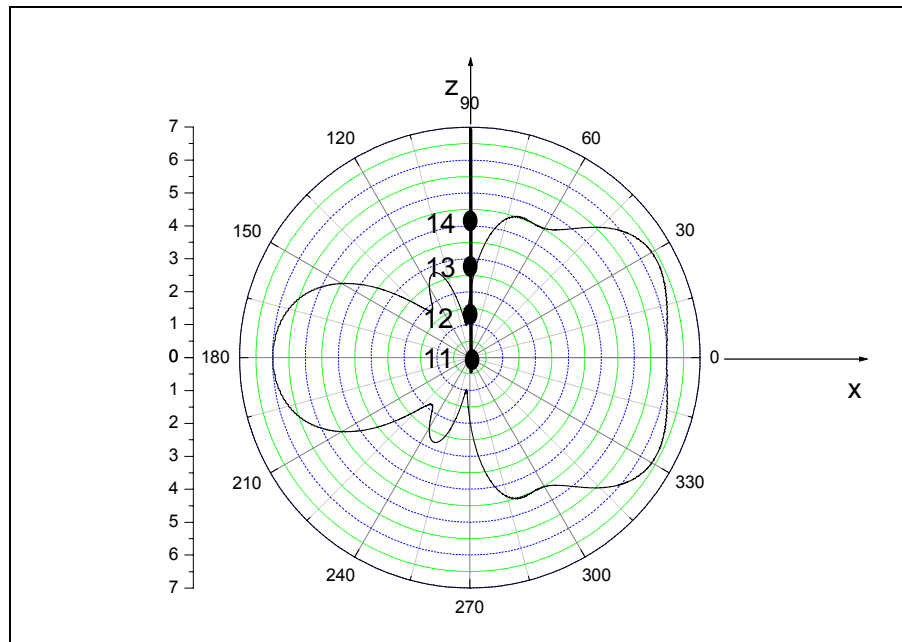
Μέγεθος πληθυσμού	300
Μήκος χρωμοσώματος σε bits	200
Αριθμός γενεών	100

Πίνακας 3.2.5

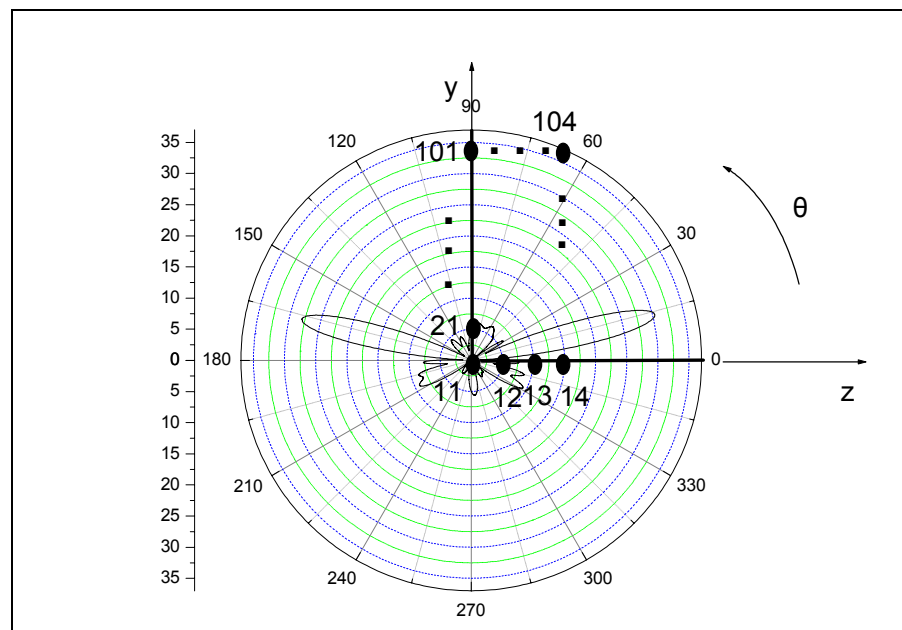
Η σύγκλιση του γενετικού αλγορίθμου έφτασε στη τιμή του 79% και οι προτεινόμενες από τον αλγόριθμο φάσεις των στοιχείων είναι οι εξής:

$$\begin{aligned} \delta_{11} &= 0^\circ & , & \delta_{12} = 202.5^\circ & , & \delta_{13} = 11.25^\circ & , & \delta_{14} = 213.75^\circ & , \\ \delta_{21} &= 337.5^\circ & , & \delta_{22} = 202.5^\circ & , & \delta_{23} = 33.75^\circ & , & \delta_{24} = 191.25^\circ & , \\ \delta_{31} &= 135^\circ & , & \delta_{32} = 146.25^\circ & , & \delta_{33} = 22.5^\circ & , & \delta_{34} = 168.75^\circ & , \\ \delta_{41} &= 213.75^\circ & , & \delta_{42} = 101.25^\circ & , & \delta_{43} = 213.75^\circ & , & \delta_{44} = 123.75^\circ & , \\ \delta_{51} &= 270^\circ & , & \delta_{52} = 56.25^\circ & , & \delta_{53} = 236.25^\circ & , & \delta_{54} = 67.5^\circ & , \\ \delta_{61} &= 202.5^\circ & , & \delta_{62} = 337.5^\circ & , & \delta_{63} = 157.5^\circ & , & \delta_{64} = 67.5^\circ & , \\ \delta_{71} &= 90^\circ & , & \delta_{72} = 292.5^\circ & , & \delta_{73} = 146.25^\circ & , & \delta_{74} = 0^\circ & , \\ \delta_{81} &= 45^\circ & , & \delta_{82} = 303.75^\circ & , & \delta_{83} = 157.5^\circ & , & \delta_{84} = 236.25^\circ & , \\ \delta_{91} &= 348.75^\circ & , & \delta_{92} = 236.25^\circ & , & \delta_{93} = 67.5^\circ & , & \delta_{94} = 326.25^\circ & , \\ \delta_{101} &= 303.75^\circ & , & \delta_{102} = 191.25^\circ & , & \delta_{103} = 0^\circ & , & \delta_{104} = 258.75^\circ \end{aligned}$$

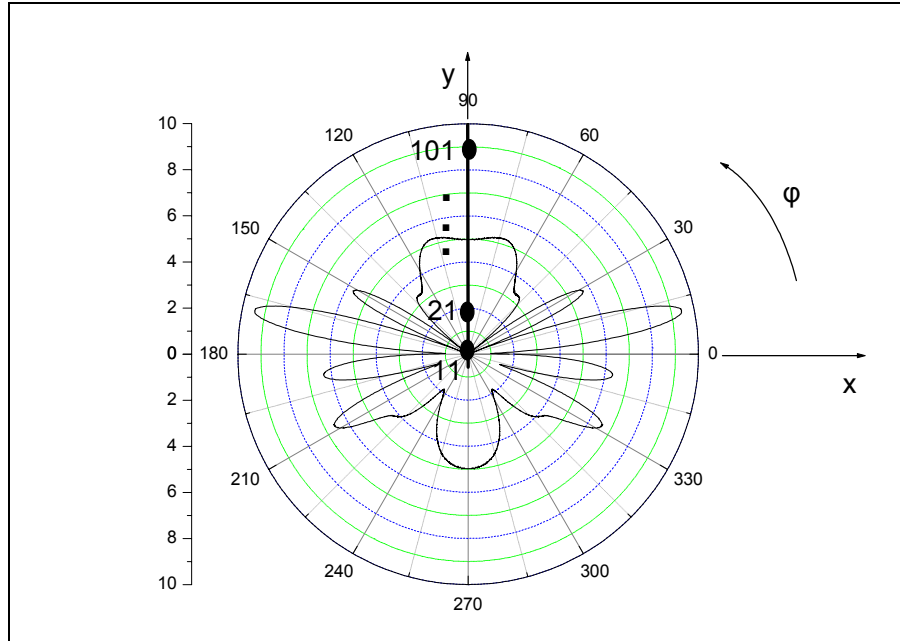
Τα διαγράμματα του παράγοντα διάταξης στα επίπεδα xz, yz, xy που προκύπτουν για τις συγκεκριμένες φάσεις είναι τα ακόλουθα



Σχ.3.2.13 Παράγοντας διάταξης στοιχειοκεραίας 10x4 στοιχείων στο xz επίπεδο



Σχ.3.2.14 Παράγοντας διάταξης στοιχειοκεραίας 10x6 στοιχείων στο yz επίπεδο



Σχ.3.2.15 Παράγοντας διάταξης στοιχειοκεραίας 10x4 στοιχείων στο xy επίπεδο

Παρατηρήσεις

Κλείνοντας την παρουσίαση της εφαρμογής του γενετικού αλγόριθμου σε επίπεδες ομοιόμορφες στοιχειοκεραίες θα πρέπει να επισημανθούν ορισμένα στοιχεία. Κατ' αρχήν τα εισαγόμενα μεγέθη τόσο του πληθυσμού όσο και των γενεών ακολουθούν αύξηση ανάλογη προς την αύξηση των στοιχείων. Το αποτέλεσμα αυτό είναι απόλυτα φυσιολογικό δεδομένου ότι ο χώρος αναζήτησης των υποψήφιων λύσεων αυξάνεται και αυτός εκθετικά, έτσι ο αλγόριθμος χρειάζεται να κάνει αναζήτηση σε μεγαλύτερο μέγεθος πληθυσμών. Ακόμα παρατηρείται ότι και η σύγκληση ακολουθεί την ίδια πορεία, αφού ξεκινώντας από υψηλά επίπεδα στις πρώτες περιπτώσεις στην πορεία μειώνεται αντιστρόφως ανάλογα με την αύξηση του πλήθους των στοιχείων.

Συμπεράσματα – Μελλοντικές Επεκτάσεις

Από την επισκόπηση των δεδομένων, αναδεικνύεται η σημασία της ιδιότητας των στοιχειοκεραιών να στρέφουν τον κύριο λοβό ακτινοβολίας τους μόνο με την μεταβολή της φάσης των στοιχείων τους. Με βάση το γεγονός αυτό, εφαρμόσαμε τους γενετικούς αλγορίθμους και εισάγοντας κάθε φορά την επιθυμητή κατεύθυνση του κύριου λοβού καταφέραμε να πάρουμε τις φάσεις των στοιχείων. Η εφαρμογή έγινε τόσο σε γραμμικές όσο και σε επίπεδες ομοιόμορφες στοιχειοκεραίες για διάφορες περιπτώσεις, που διαφοροποιούνται με το πλήθος και την διάταξη των στοιχείων που τις αποτελούν. Συμπερασματικά λοιπόν έχουμε ένα εργαλείο το οποίο παράγει με σχετική ακρίβεια την φάση που πρέπει να έχει το κάθε στοιχείο μιας στοιχειοκεραίας, ώστε να ακτινοβολεί στην κατεύθυνση που επιθυμούμε. Αξίζει τέλος να αναφερθεί ότι ενώ η περίπτωση των γραμμικών στοιχειοκεραιών έχει μελετηθεί αρκετά, αντίθετα οι βιβλιογραφικές αναφορές είναι ελάχιστες για την εφαρμογή γενετικών αλγορίθμων στη σύνθεση επιθυμητού διαγράμματος ακτινοβολίας με επίπεδες στοιχειοκεραίες.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι, θα μπορούσαν επίσης να χρησιμοποιηθούν στην περίπτωση των ανομοιόμορφων στοιχειοκεραιών. Οι κεραίες αυτές παρουσιάζουν διαφορετικά πλάτη σε ότι αφορά τους ρευματικούς τους συντελεστές, έτσι για την σύνθεση του επιθυμητού διαγράμματος ακτινοβολίας εκτός από την φάση χρειάζεται προσδιορισμός και του πλάτους των συντελεστών διέγερσης. Δεδομένης όμως της μεγάλης έκτασης που θα έχει ο χώρος αναζήτησης, ίσως χρειαστεί να εφαρμοστούν προχωρημένες τεχνικές γενετικών αλγορίθμων όπως η γνωστή στην βιβλιογραφία Pareto optimal GA's [7]. Επομένως, μια μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να γίνει προς αυτή την κατεύθυνση.

Βιβλιογραφία – Αναφορές

- [1] Ι. Γ. Φικιώρης, *Εισαγωγή εις την Θεωρίαν των Κεραιών και την Διάδοσιν Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων*, Ε.Μ.Π., Αθήνα 1987.
- [2] Ι. Ν. Σάχαλος, *Κεραίες*, Εκδ. Αϊβάζη-Ζουμπούλη, Θεσσαλονίκη 1986.
- [3] Σ. Σ. Κουρής, *Στοιχεία Θεωρίας Κεραιών και Διαδόσεως Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων*, Εκδ. Ζήτη, Θεσσαλονίκη 1994.
- [4] J. D. Kraus, *Κεραίες*, Εκδ. Α. Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 1988.
- [5] Ι. Ο. Βαρδιάμπασης, *Κεραίες και Διάδοση Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων*, Τ.Ε.Ι Κρήτης, Χανιά 2003.
- [6] Χ. Καψάλης και Π. Κωττής, *Κεραίες – Ασύρματες Ζεύξεις*, Εκδ. Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2003.
- [7] D. S. Weile and E. Michielssen, Genetic algorithm optimization applied to electromagnetics: A review, *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, vol. 45, pp. 343-353, 1997.
- [8] R. Haupt, An introduction to genetic algorithms for electromagnetics, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 37, no.2, pp. 7-15, 1995.
- [9] D. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley, 1989.
- [10] Yahya Rahmat-Samii and Eric Michielssen, *Electromagnetic Optimization by Genetic Algorithms*, John Wiley & Sons, 1999.

- [11] D. Marcano, M. Jimenez, and O. Chang, Synthesis of linear array using Schelkunoff's method and genetic algorithms, *IEEE AP-S Int. Symposium*, vol.1, pp. 814-817, Baltimore, 1996.
- [12] D. Marcano, Synthesis of Linear and Planar Antenna Arrays Using Genetic Algorithms, *IEEE Int. Symposium on Antennas and Propagation*, pp. 1688-1691, Montreal, 1997.
- [13] D. Marcano and Filinto Duran, Synthesis of Antenna Arrays Using Genetic Algorithms, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol.42, no.3, pp. 12-20, 2000.
- [14] M. Shimizu, Determining the excitation coefficients of an array using genetic algorithms, *IEEE AP-S Int.Symposium*, vol. 1, pp. 530-533, Seattle, 1994.
- [15] F. J. Ares-Pena, J. A. Rodriguez-Gonzalez, E. S. Villanueva-Lopez, S. R. Rengarajan, Genetic algorithms in the design and optimization of antenna array patterns, *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, vol. 47, no.3, pp.506-510, 1999.
- [16] K. Markus, L. Vaskelainen, Optimization of synthesised array excitations using array polynome complex root swapping and genetic algorithms, *IEE Proc. Microw. Antennas Propag.*, vol. 145, no.6, 1998.
- [17] P. K. Varlamos and C. N. Capsalis, Application of smart antenna concepts in situ measurements of radiated emissions, *Proceedings of 2nd International Workshop on Biological Effects Of Electromagnetic Fields*, no. 138, Rhodes, 7-11 October 2002.