



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Ανάπτυξη Κατανεμημένης Πλατφόρμας Βελτιστοποίησης
Σμήνους Σωματιδίων και Εφαρμογή σε Προβλήματα
Σύνθεσης Στοιχειοκεραιών**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Κωνσταντίνος Α. Παπαδόπουλος

Αθήνα, Οκτώβριος 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Ανάπτυξη Κατανεμημένης Πλατφόρμας Βελτιστοποίησης
Σμήνους Σωματιδίων και Εφαρμογή σε Προβλήματα
Σύνθεσης Στοιχειοκεραιών**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Κωνσταντίνος Α. Παπαδόπουλος

Συμβουλευτική Επιτροπή : Δήμητρα-Θεοδώρα Ι. Κακλαμάνη

Ιάκωβος Στ. Βενιέρης

Νικόλαος Κ. Ουζούνογλου

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 31^η Οκτωβρίου 2011.

.....
Δ.-Θ. Κακλαμάνη
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....
Ι. Βενιέρης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ν. Ουζούνογλου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Α.-Γ. Σταφυλοπάτης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γ. Φικιώρης
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Χ. Καψάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Α. Κανάτας
Αν. Καθηγητής Παν. Πειραιώς

Αθήνα, Οκτώβριος 2011

.....

Κωνσταντίνος Α. Παπαδόπουλος

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

Copyright © Κωνσταντίνος Α. Παπαδόπουλος 2011.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Οι στοιχειοκεραίες αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι των σύγχρονων κεραιοσυστημάτων και ασύρματων τηλεπικοινωνιακών δικτύων καθώς μπορούν να επιτύχουν μοναδικά χαρακτηριστικά ραδιοκάλυψης τομέων ή συγκεκριμένων διευθύνσεων ενίσχυσης σήματος και απόρριψης των παρεμβολών. Η διαδικασία σύνθεσης των στοιχειοκεραίων συνίσταται στον προσδιορισμό της θέσης καθώς και των σχετικών φάσεων και πλατών των εφαρμοζόμενων διεγέρσεων στα στοιχεία τους, προκειμένου να επιτυγχάνονται τα επιθυμητά χαρακτηριστικά ακτινοβολήσης. Το πρόβλημα σύνθεσης των στοιχειοκεραίων έχει αποτελέσει και συνεχίζει να αποτελεί μια πολύ ενεργή περιοχή ερευνητικής δραστηριότητας. Το αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι η συστηματική αντιμετώπιση των προβλημάτων σύνθεσης στοιχειοκεραίων με τη βοήθεια του αλγόριθμου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων και η χρήση κατανεμημένων υπολογιστικών τεχνικών για την αντιμετώπιση του υψηλού υπολογιστικού κόστους, λόγω του μεγάλου αριθμού επαναλαμβανόμενων ηλεκτρομαγνητικών προσομοιώσεων των υποψηφίων σχεδιάσεων που απαιτούνται μέχρι να συγκλίνει ο αλγόριθμος.

Αρχικά εξετάζεται η μέθοδος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων σε αλγοριθμικό επίπεδο και συμπεραίνεται ότι η αποτίμηση των υποψηφίων παραμετρικών σχεδιάσεων μπορεί να θεωρηθεί ως η μοναδιαία πράξη υπολογισμού, κατά την ασύγχρονη εκτέλεση της. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά της κατανεμημένης πλατφόρμας βελτιστοποίησης, η οποία υλοποιείται βάσει του παραδείγματος των κινητών πρακτόρων καθώς αυτό διευκολύνει σημαντικά την χρήση των απομακρυσμένων υπολογιστικών πόρων και δεν απαιτεί την τροποποίηση των ήδη διαθέσιμων υπολογιστικών ηλεκτρομαγνητικών πυρήνων και προγραμμάτων προσομοίωσης.

Ακολούθως, αναπτύσσεται η μεθοδολογία ανάλυσης των στοιχειοκεραίων δίνοντας έμφαση στις διαθέσιμες προσεγγιστικές εκφράσεις για την αποτίμηση των φαινομένων αμοιβαίας σύζευξης μεταξύ των γραμμικών ακτινοβολητών. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά μιας γενικευμένης βιβλιοθήκης προσομοίωσης στοιχειοκεραίων που ενσωματώνει τις παραπάνω εκφράσεις και η οποία δύναται να συμπληρωθεί από υπολογιστικές ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους ανάλυσης πλήρους κύματος, όπως η μέθοδος των ροπών. Ακολούθως διατυπώνεται το γενικευμένο πρόβλημα της σύνθεσης και αντιπαρατίθενται δύο παραδείγματα σύνθεσης στοιχειοκεραίων σταθερής και μεταβλητής γεωμετρίας. Αποδεικνύεται ότι οι κλασσικές μέθοδοι βελτιστοποίησης δεν μπορούν να αντιμετωπίσουν επαρκώς προβλήματα σύνθεσης που συμπεριλαμβάνουν στην περιγραφή τους τα φαινόμενα σύζευξης μεταξύ των ακτινοβολητών καθώς μεταβάλλεται η σχετική τους τοποθέτηση. Στη συνέχεια, συνθέτονται επιτυχώς, ορίζοντας κατά περίπτωση κατάλληλες συναρτήσεις αποτιμήσεων και χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης, τρεις διαφορετικές διαμορφώσεις στοιχειοκεραίων, με εφαρμογές στα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών: 1) στοιχειοκεραία μεταγωγής λοβών η οποία επιτυγχάνει την κάλυψη αλληλουχίας τομέων, βελτιστοποιώντας ταυτόχρονα τη θέση και τη διέγερση των στοιχείων της, 2) επίπεδη ομοιόμορφη κυκλική στοιχειοκεραία η οποία επιτρέπει τη στροφή του κυρίως λοβού ακτινοβολίας στην κατεύθυνση του επιθυμητού χρήστη ενώ παράλληλα επιβάλλει βαθείς μηδενισμούς σε κατευθύνσεις παρεμβολών, βελτιστοποιώντας τη διέγερση των στοιχείων της και 3) μιας

γραμμικής ανομοιόμορφης στοιχειοκεραίας σταθμού βάσης που το διάγραμμα ακτινοβολίας συμμορφώνεται με την ορισμένη μάσκα ακτινοβολίας, βελτιστοποιώντας την χωρική κατανομή των στοιχείων της και τις φάσεις των εφαρμοζόμενων διεγέρσεων. Τέλος αποτιμάται η ευελιξία και η αποδοτικότητα της κατανεμημένης πλατφόρμας βελτιστοποίησης που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διατριβής. Χρησιμοποιώντας την εφαρμογή της κεραίας μεταγωγής λοβών εξετάζονται δύο διαφορετικά σενάρια κλιμάκωσης, οριζόμενα ως προς το μέγεθος του πληθυσμού των υποψήφιων λύσεων και ως προς τον αριθμό των συμμετεχόντων υπολογιστικών κόμβων. Αποδεικνύεται ότι μεγιστοποιούνται τα οφέλη από τη χρήση της κατανεμημένης πλατφόρμας, όταν το υπολογιστικό κόστος προσομοίωσης των αποτιμώμενων σχεδιάσεων είναι μεγάλο και όταν τα σωματίδια κατανέμονται πιο ομοιόμορφα σε μεγαλύτερο αριθμό κόμβων.

Τέλος, εξετάζεται ένα πρωτότυπο πρόβλημα σύνθεσης μιας γραμμικής ανομοιόμορφης φασικής στοιχειοκεραίας μεταβλητής γεωμετρίας. Απαιτείται ταυτόχρονα η καταπίεση των πλευρικών λοβών του διαγράμματος ακτινοβολίας κατά τη σάρωσή της και η μεγιστοποίηση της χωρικής διαφορισμότητας των στοιχείων της, ενώ επιβάλλονται επιπρόσθετοι περιορισμοί ως προς την αποδοτικότητά της. Καθώς οι αναφερόμενοι στόχοι είναι μερικώς αντικρουόμενοι χρησιμοποιείται η πολυκριτηριακή επέκταση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης. Επίσης, η ανάλυση των χαρακτηριστικών ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας πραγματοποιείται με τη μέθοδο των ροπών προκειμένου να υπολογιστούν με ακρίβεια τα φαινόμενα σύζευξης. Αποδεικνύεται ότι η συσχέτιση των τάσεων στους αποσυζευγμένους κλάδους του κυκλώματος λήψης της μπορεί να αντισταθμιστεί μόνο μερικώς από την ανομοιόμορφη τοποθέτηση των στοιχείων της που επιβάλλει ο στόχος της μεγιστοποίησης της καταπίεσης των πλευρικών λοβών.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων, Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση, Προσομοίωση, Μέθοδος των ροπών, Στοιχειοκεραία, Σύνθεση Στοιχειοκεραιών, Κατανεμημένα συστήματα, Κινητοί πράκτορες, Διάγραμμα ακτινοβολίας.

Abstract

Antenna arrays are a key part of the modern antenna systems and wireless telecommunications networks, since they can achieve unique radio coverage characteristics over areas or specific directions of signal amplification and rejection of interferences. Antenna array synthesis aims at determining the position and relative excitations applied to their constituting elements in order to achieve the desired radiation characteristics. Antenna array synthesis has been and still continues to be a very active research topic. The objective of this thesis is on one hand to systematically address the antenna array synthesis problem using the particle swarm optimization algorithm and on the other hand to successfully apply distributed computing techniques to alleviate the high computational cost incurred by the large number of recurring candidate designs' electromagnetic simulations, before the algorithm finally converges.

Initially, the PSO algorithm is reviewed and is concluded that candidate parametric designs' evaluations can be considered as the unit computation operation, when the algorithm is asynchronously executed. Next, the architectural features of the distributed optimization platform are presented; the platform's implementation is based on the mobile agents paradigm that greatly facilitates the access to remote computational resources while its application does not require the modification of already available computational kernels and electromagnetic simulation programs.

Followingly, the methodology on antenna arrays analysis is developed focusing on the available approximate expressions for the evaluation of mutual coupling effects between the linear radiators. Next the architectural features of a generalized antenna array simulation library that incorporates the above expressions are presented, which may be supplemented by computational electromagnetic full-wave analysis methods, such as the method of moments. Then, the generalized synthesis problem is formulated and two examples of antenna array synthesis of fixed and variable geometry are presented in contrast. It is hence shown that classical optimization methods cannot adequately address problems of synthesis that include in their description the coupling effect between radiators while their relative placement is changed.

Next, three different configurations of antenna arrays were synthesized, with applications in wireless networks: 1) a switched-beam antenna array which achieves the radio coverage of sequential sectors, by optimizing the position and excitation of its radiators, 2) a planar uniform circular beamforming array which steers the main lobe to the direction of the desired user while imposing deep nulls to interference directions, by optimizing its elements excitations and 3) a non-uniform linear base station array that its radiation pattern complies to a prescribed radiation mask, by optimizing the spatial distribution of its elements and the phases of the applied excitations. Followingly, the flexibility and the performance of the distributed optimization platform developed is evaluated. While optimizing a switched-beam antenna array using the platform, two different escalation scenarios are examined, across the population size of the candidate solutions and the number of participating computing nodes. It is found that the distributed platform gains in terms of computational time are maximized, when the computational cost for simulating

individual parametric designs is large and when the particles are distributed more evenly across a large number of computational nodes.

Finally, a non-uniform linear phased antenna synthesis problem is considered. The synthesis problem dictates the maximization of the radiation pattern sidelobes suppression while the array is scanned and the maximization of the spatial diversity of its radiators, while imposing additional restrictions on its overall efficiency. Since these two goals are partially contradictory the multiobjective particle swarm optimization algorithm is employed. Additionally, the method of moments is used to analyze the antenna array radiation due to its ability to accurately calculate the coupling phenomena. It is concluded that there is a trade-off between the correlation of the voltages induced at the uncoupled branches of the receiver and the achieved suppression of the sidelobes that indirectly imposes the non-uniform placement of the array elements.

KEYWORDS: Particle swarm optimization, Multiobjective optimization, Simulation, Method of moments, Antenna arrays, Antenna array synthesis, Distributed systems, Mobile agents, Radiation pattern.

Η παρούσα διατριβή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Μικροκυμάτων και Οπτικών Ινών της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου.

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στην επιβλέπουσα καθηγήτριά μου, Δήμητρα Κακλαμάνη, για τις κατευθύνσεις, την καθοδήγηση και τη συνεισφορά της καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης αυτού του πραγματικά δύσκολου έργου, καθώς και για την εμπιστοσύνη, που επέδειξε στο πρόσωπό μου.

Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον διευθυντή του εργαστηρίου και καθηγητή μου, Νικόλαο Ουζούνγλου για τις πολύτιμες ιδέες και συμβουλές, τις οποίες παρείχε σε πολλά προβλήματα, που συνάντησα. Ευχαριστίες οφείλω επίσης και στον καθηγητή Ιάκωβο Βενιέρη, του οποίου οι προτάσεις κατεύθυναν την έρευνά μου σε ενδιαφέροντα επιστημονικά πεδία.

Στους φίλους μου και συνεργάτες μου: το Βαγγέλη Αγγελόπουλο, τη Χρύσα Παπαγιάννη, τον Παναγιώτη Γκώνη, το Θοδωρή Αθανηλέα, το Δημήτρη Λυμπερόπουλο, το Χρήστο Μπίνιαρη, το Γιάννη Φουκαράκη, τη Δήμητρα Ζαρμπούτη, το Γιάννη Στειακογιαννάκη, το Δημήτρη Τσιλιμαντό, την Αθηνά Οικονόμου, τη Ξένια Παπαδομιχελάκη, το Στρατή Θήριο, την Ειρήνη Καρανάσιου, τον Μάνθο Μπίμπα, το Γιώργο Μιχαήλ, τον Νικό Αθανασόπουλο, τον Πέτρο Τσενέ, το Γιώργο Στρατάκο, τον Νίκο Τσίτσα, το Βαγγέλη Κοσμάτο, τον Νίκο Τσελικά, τη Σοφία Καπελάκη, το Χρήστο Παππά, τον Νίκο Δέλλα, το Γιώργο Λιουδάκη, το Γιώργο Λαμπρινάκο, την Μαρία Χριστοπούλου που προσέφεραν πολύτιμη βοήθεια και ηθική συμπαράσταση σε καίριες στιγμές, οφείλω θερμές ευχαριστίες.

Τέλος, θα ήθελα να ολοκληρώσω τις αναφορές στους ανθρώπους, που με στήριξαν, ευχαριστώντας τους γονείς μου και τον αδερφό μου για την αδιάλειπτη ψυχολογική συμπαράστασή τους.

Κωνσταντίνος Α. Παπαδόπουλος

Περιεχόμενα

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΓΕΝΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ.....	27
2	ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	31
2.1	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ.....	32
2.1.1	Ολική βελτιστοποίηση.....	32
2.1.2	Τοπική βελτιστοποίηση	33
2.1.3	Ορισμός περιορισμών	33
2.1.4	Θεώρημα των «μη δωρεάν γευμάτων»	34
2.2	ΠΟΛΥΔΙΑΣΤΑΤΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	35
2.3	ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ	36
2.4	ΚΛΑΣΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	37
2.4.1	Μέθοδος κατάβασης κλίσεων.....	37
2.4.2	Μέθοδος συζυγών κλίσεων.....	38
2.4.3	Προβλήματα σύγκλισης.....	40
2.5	ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	41
2.6	ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ	42
2.7	ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ.....	44
2.7.1	Πληθυσμός και κωδικοποίηση των λύσεων.....	45
2.7.2	Αλγόριθμος.....	46
2.7.3	Εξελικτικοί τελεστές.....	48
2.7.4	Προβλήματα πρόωρης σύγκλισης.....	49
2.8	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΜΗΝΟΥΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	50
2.8.1	Εξισώσεις ενημέρωσης θέσης και ταχύτητας	50
2.8.2	Απόλυτες οριακές συνθήκες	51
2.8.3	Κοινωνική συμπεριφορά	52
2.8.4	Σύνοψη αλγόριθμου.....	53
2.9	ΠΑΡΑΛΛΑΓΕΣ ΣΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΜΗΝΟΥΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ.....	54

2.9.1	Βελτιώσεις στη συμπεριφορά σύγκλισης.....	54
2.9.2	Βελτιώσεις για αποτροπή της ομογενοποίησης του πληθυσμού	55
2.10	ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΜΗΝΟΥΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	56
2.10.1	Κυριαρχία κατά Pareto.....	57
2.10.2	Εξωτερικό αρχείο και προσαρμοστικό πλέγμα	58
2.10.3	Ενημέρωση της θέσεως και της ταχύτητας των σωματιδίων	59
2.11	ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΜΕΤΑΞΥ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΜΗΝΟΥΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ .	61
2.12	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΣΚΕΔΑΣΗΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΠΗΓΩΝ.....	61
2.12.1	Βελτιστοποίηση της θέσης των βοηθητικών πηγών	62
2.12.2	Ορισμός αντικειμενικής συνάρτησης.....	63
2.12.3	Βελτιστοποιώντας την ακτίνα	64
2.12.4	Βελτιστοποιώντας την γωνιακή κατανομή.....	65
2.12.5	Βελτιστοποιώντας τη χωρική κατανομή.....	66
2.12.6	Συμπεράσματα	68
3	ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΗ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΜΗΝΟΥΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	69
3.1	ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	70
3.2	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΙΣΧΝΗΣ ΚΑΙ ΙΣΧΥΡΗΣ ΣΥΖΕΥΞΗΣ	70
3.3	ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΕΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΕΣ ΙΣΧΥΡΗΣ ΣΥΖΕΥΞΗΣ	71
3.3.1	Παράλληλες Ιδεατές Μηχανές – PVM.....	71
3.3.2	Διεπαφή Ανταλλαγής Μηνυμάτων – MPI.....	73
3.4	ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΕΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΕΣ ΙΣΧΝΗΣ ΣΥΖΕΥΞΗΣ.....	73
3.4.1	Συστήματα επικοινωνίας μεταξύ ομότιμων δικτυακών κόμβων	73
3.4.2	Συστήματα βασισμένα στον ορισμό κατανεμημένων χώρων	74
3.4.3	Συστήματα προσανατολισμένα στην παροχή υπηρεσιών	75
3.4.4	Συστήματα πολλαπλών πρακτόρων	76
3.5	ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΗ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	79
3.5.1	Κατανεμημένες παραμετρικές ηλεκτρομαγνητικές προσομοιώσεις	81
3.5.2	Το παράδειγμα των κινητών πρακτόρων	83

3.5.3	Σύγχρονη και ασύγχρονη βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων.....	83
3.5.4	Περιγραφή της πλατφόρμας κινητών πρακτόρων	87
3.5.5	Οι οντότητες πρακτόρων	89
3.5.6	Πράκτορας συντονισμού	91
3.5.7	Πράκτορες σωματιδίων.....	93
3.6	ΧΡΗΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	94
3.6.1	Ορισμός διεπαφών με τους υπολογιστικούς κώδικες	95
3.6.2	Παραμετροποίηση της πλατφόρμας	96
3.6.3	Σύνοψη των δυνατοτήτων χρήσης της πλατφόρμας βελτιστοποίησης	97
4	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΩΝ.....	99
4.1	ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΩΝ	100
4.1.1	Ηλεκτρομαγνητική ανάλυση.....	101
4.1.2	Ιδεατές στοιχειοκεραίες	103
4.1.3	Αμοιβαία σύζευξη.....	104
4.1.4	Ανάλυση στοιχειοκεραιών γραμμικών ακτινοβολητών	108
4.1.5	Γεωμετρία στοιχειοκεραιών και παράγοντας διάταξης	124
4.1.6	Υπολογιστική βιβλιοθήκη ανάλυσης στοιχειοκεραιών	127
4.2	ΣΥΝΘΕΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΩΝ.....	129
4.2.1	Σχεδίαση στοιχειοκεραιών ως πρόβλημα βελτιστοποίησης.....	130
4.2.2	Διατύπωση προβλήματος σύνθεσης στοιχειοκεραιών	130
4.2.3	Σύνθεση στοιχειοκεραιών με τη βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων.....	132
4.3	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑΣ	133
4.3.1	Παρουσίαση υποσυστήματος οριζόντιας καθοδήγησης αεροπλάνου κατά τη προσγείωση	135
4.3.2	Διατύπωση του προβλήματος σύνθεσης	136
4.3.3	Βελτιστοποίηση με μεθόδους βασισμένες στην παράγωγο	138
4.3.4	Στοχαστική βελτιστοποίηση	140
4.3.5	Συμπεράσματα	142

4.4	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΕΠΙΠΕΔΗΣ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑΣ	142
4.4.1	Θεωρητική ανάλυση	143
4.4.2	Συναρτήσεις καταλληλότητας	143
4.4.3	Αποτελέσματα	145
4.4.4	Συμπεράσματα	151
4.5	ΣΥΝΘΕΣΗ ΕΠΙΠΕΔΗΣ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑΣ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ ΛΟΒΩΝ	152
4.5.1	Σύνοψη του προβλήματος σύνθεσης	153
4.5.2	Συναρτήσεις καταλληλότητας	154
4.5.3	Αποτελέσματα	155
4.5.4	Συμπεράσματα	164
4.6	ΣΥΝΘΕΣΗ ΕΥΦΟΥΣ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑΣ	165
4.6.1	Περιγραφή του προβλήματος σύνθεσης.....	166
4.6.2	Αντικειμενική συνάρτηση.....	168
4.6.3	Αποτελέσματα	169
4.6.4	Συμπεράσματα	174
4.7	ΣΥΝΘΕΣΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑΣ ΣΤΑΘΜΟΥ ΒΑΣΗΣ	175
4.7.1	Περιγραφή του προβλήματος σύνθεσης.....	175
4.7.2	Συνάρτηση καταλληλότητας.....	176
4.7.3	Αποτελέσματα	177
4.7.4	Συμπεράσματα	181
4.8	ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	181
4.8.1	Διαμόρφωση της πλατφόρμας κατανεμημένης βελτιστοποίησης.....	182
4.8.2	Αποτελέσματα αποδοτικότητας.....	185
4.8.3	Συμπεράσματα	188
5	ΣΥΝΘΕΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΩΝ ΜΕ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΜΗΝΟΥΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	191
5.1	ΙΣΟΔΥΝΑΜΑ ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΩΜΑΤΑ	193
5.1.1	Κυκλωματικά ισοδύναμα.....	193

5.1.2	Κατανεμημένες δικτυακές παράμετροι.....	195
5.1.3	Δικτύωματα προσαρμογής.....	198
5.1.4	Ανάλυση δικτυωμάτων προσαρμογής με τον κανόνα του Mason.....	200
5.2	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑΣ ΜΕ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ	202
5.2.1	Ανακλάσεις στο ισοδύναμο μικροκυματικό πολύθυρο.....	203
5.2.2	Παράγοντας προσαρμογής.....	204
5.2.3	Δικτύωματα για τη μεγιστοποίηση της ακτινοβολούμενης ενέργειας	206
5.3	ΔΙΑΦΟΡΙΣΙΜΟΤΗΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΚΕΡΑΙΩΝ.....	211
5.3.1	Συνθέτες διαφορισιμότητας.....	212
5.3.2	Μοντελοποίηση χωρικής διαφορισιμότητας	214
5.3.3	Συντελεστές συσχέτισης διδιάστατου Rayleigh καναλιού.....	215
5.3.4	Επίδραση των φαινομένων σύζευξης στη διαφορισιμότητα.....	217
5.3.5	Συσχέτιση των λαμβανόμενων σημάτων στο δέκτη.....	218
5.4	ΣΥΝΘΕΣΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΦΑΣΙΚΗΣ ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΑΣ ΕΠΙΒΑΛΛΟΝΤΑΣ ΠΑΡ'ΑΛΛΗΛΑ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ	219
5.4.1	Ανάλυση της φασικής στοιχειοκεραίας δίπολων.....	220
5.4.2	Δικτύωμα τροφοδοσίας και προσαρμογή της στοιχειοκεραίας.....	221
5.4.3	Αποδοτικότητα ανοιγμένης επιφάνειας της στοιχειοκεραίας	222
5.4.4	Πολυκριτηριακός αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων	222
5.4.5	Η βελτιστοποιημένη στοιχειοκεραία.....	222
5.4.6	Βελτιστοποιημένες χωρικές διαμορφώσεις της φασικής στοιχειοκεραίας	224
5.4.7	Ανάλυση ευαισθησίας σε μεταβολές της φάσεως τροφοδοσίας	228
5.4.8	Συμπεράσματα	230
6	ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΘΕΜΑΤΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΈΡΕΥΝΑΣ.....	233
6.1	ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑΣ	233
6.2	ΘΕΜΑΤΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΈΡΕΥΝΑΣ.....	237
7	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	239
8	ΠΑΡ'ΑΡΤΗΜΑ	251

8.1	ΛΙΣΤΑ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΩΝ.....	251
8.1.1	Επιστημονικά Περιοδικά	251
8.1.2	Διεθνή συνέδρια.....	251
8.2	ΧΡΗΣΗ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ	252
8.2.1	Εγκατάσταση της πλατφόρμας.....	252
8.2.2	Ορισμός της κλάσης προβλήματος.....	254
8.2.3	Ομαδοποίηση των κλάσεων του προβλήματος.....	256
8.2.4	Παραμετροποίηση.....	257
8.2.5	Επίκληση της πλατφόρμας από τη γραμμή εντολών.....	261
8.2.6	Ανάπτυξη διασυνδέσεων με εξωτερικές εφαρμογές.....	262

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1.	Θέσεις τοπικών και ολικών ελαχίστων συνάρτησης f	32
Εικόνα 2.	Γραφική εξέλιξη της μεθόδου κατάβασης κλίσεων.....	38
Εικόνα 3.	Μπλοκ διάγραμμα εκτέλεσης των γενετικών αλγορίθμων.....	46
Εικόνα 4.	Διαγράμματα τοπολογιών α) αστέρα β) δακτυλιδιού γ) Von Neumann.....	53
Εικόνα 5.	Μέτωπο Pareto σε πρόβλημα δύο κριτηρίων.....	58
Εικόνα 6.	Σύμμορφη τοποθέτηση των βοηθητικών πηγών AS.	62
Εικόνα 7.	Βέλτιστη ακτίνα σύμμορφης τοποθέτησης των AS.	65
Εικόνα 8.	Τοποθέτηση των AS, αφού απαιτήθηκε η ομοιόμορφη γωνιακή κατανομή τους.	65
Εικόνα 9.	Σφάλμα οριακών συνθηκών για προσπίπτων κύμα από $\varphi = 90^\circ$ (ανομοιόμορφη ακτίνα ρ).	66
Εικόνα 10.	Ελεύθερη τοποθέτηση των AS.....	67
Εικόνα 11.	Σφάλμα οριακών συνθηκών για προσπίπτων κύμα από $\varphi = 90^\circ$ (ελεύθερη τοποθέτηση).....	67
Εικόνα 12.	Αρχιτεκτονική του συστήματος PVM.....	71
Εικόνα 13.	Κατανεμημένο σύστημα βασισμένο σε χώρους.....	74

Εικόνα 14. Ευφυείς πράκτορες.....	78
Εικόνα 15. Σειριακή εκτέλεση του αλγορίθμου PSO.....	84
Εικόνα 16. Παράλληλος υπολογισμός των τιμών καταλληλότητας στον αλγόριθμο PSO.....	86
Εικόνα 17. Υπολογιστικό μοντέλο ενός πράκτορα, όπως ορίζεται στην πλατφόρμα JADE. ..	87
Εικόνα 18. UML διάγραμμα με τις κλάσεις και τις συμπεριφορές των πρακτόρων.	90
Εικόνα 19. Κύκλος ζωής του CoordinatorAgent.	91
Εικόνα 20. Κύκλος ζωής των ParticleAgent.	93
Εικόνα 21. Στοιχειοκεραία αποτελούμενη από N ρευματικές κατανομές.....	101
Εικόνα 22. Προσεγγίσεις κατά τον υπολογισμό του μακρινού πεδίου.....	102
Εικόνα 23. Αμοιβαία σύζευξη ακτινοβολητών.	105
Εικόνα 24. Ισοδύναμο κύκλωμα στοιχειοκεραίας αποτελούμενης από δύο ακτινοβολητές.	106
Εικόνα 25. Υπολογισμός ενεργού διαγράμματος του n -ιστού ακτινοβολητή	108
Εικόνα 26. Ακτινοβολούμενα πεδία από γραμμικές κεραίες.....	109
Εικόνα 27. Μοντέλο τροφοδοσίας γραμμικού ακτινοβολητή απειροστού διάκενου.	115
Εικόνα 28. Διακριτοποίηση λεπτού κυλινδρικού αγωγού	117
Εικόνα 29. Τμηματικές συναρτήσεις βάσης α) παλμική και β) τριγωνική	117
Εικόνα 30. Σύγκλιση της τιμής της αγωγιμότητας δίπολου για παλμικές και τριγωνικές συναρτήσεις βάσης	120
Εικόνα 31. Σύγκλιση της τιμής της επιδεκτικότητας δίπολου για παλμικές και τριγωνικές συναρτήσεις βάσης	121
Εικόνα 32. Σύγκλιση της τιμής της αγωγιμότητας δίπολου για διαφορετικές ακτίνες.....	121
Εικόνα 33. Σύγκλιση της τιμής της επιδεκτικότητας δίπολου για διαφορετικές ακτίνες. ...	122
Εικόνα 34. Η αντίσταση εισόδου δίπολων για διαφορετικά μήκη τους.....	122
Εικόνα 35. Η αντίδραση εισόδου δίπολων για διαφορετικά μήκη τους.....	123
Εικόνα 36. Αμοιβαία αντίσταση δίπολων για διαφορετικές μεταξύ τους αποστάσεις.	123
Εικόνα 37. Γεωμετρία επίπεδης στοιχειοκεραίας	124
Εικόνα 38. Γραμμική στοιχειοκεραία προσανατολισμένη στον x άξονα.	125

Εικόνα 39. Επίπεδη στοιχειοκεραία με τους ακτινοβολητές τοποθετημένους σε θέσεις κανονικού τετραγωνικού πλέγματος.	127
Εικόνα 40. Σχηματική αναπαράσταση της οργάνωσης των κλάσεων και των διεπαφών που χρησιμοποιήθηκαν για τον ορισμό της δομής των προσομοιωμένων στοιχειοκεραιών.....	127
Εικόνα 41. Μάσκα σχεδίασης για τον κύριο και τους πλευρικούς λοβούς.	131
Εικόνα 42. Η λειτουργία του υποσυστήματος ILS Localizer	134
Εικόνα 43. Η διαμόρφωση του υποσυστήματος ILS 389 LOC της Thales.....	135
Εικόνα 44. Παράγοντας διάταξης υποσυστήματος ILS Localizer κατά τη λειτουργία BL+dir.	136
Εικόνα 45. Γεωμετρία κεραίας τετραγωνικού βρόγχου.	137
Εικόνα 46. Αρχικός παράγοντας διάταξης και διάγραμμα από σύνθεση με LSQE.	138
Εικόνα 47. Παράγοντας διάταξης για το διάγραμμα BL+dir που προέκυψε χρησιμοποιώντας CG.	139
Εικόνα 48. Συνολική απόκλιση από σημεία αναφοράς (σύγκλιση PSO).....	140
Εικόνα 49. Παράγοντας διάταξης ILS που λήφθηκε για το σύνολο των ακρότατων (σύνθεση με PSO).	141
Εικόνα 50. Παράγοντας διάταξης ILS που λήφθηκε για τα σημεία μεγίστων (σύνθεση με PSO).	141
Εικόνα 51. Σύγκλιση των μεθόδων PSO και GA για τη συνάρτηση καταλληλότητας FF1....	146
Εικόνα 52. Κανονικοποιημένοι παράγοντες διάταξης για τη συνάρτηση καταλληλότητας FF1.	147
Εικόνα 53. Γεωμετρία λαμβανόμενων στοιχειοκεραιών για τη συνάρτηση καταλληλότητας FF1.	148
Εικόνα 54. Σύγκλιση των μεθόδων PSO και GA για τη συνάρτηση καταλληλότητας FF2....	149
Εικόνα 55. Διαγράμματα ακτινοβολίας για τη συνάρτηση καταλληλότητας FF2.....	150
Εικόνα 56. Γεωμετρία στοιχειοκεραιών για τη συνάρτηση καταλληλότητας FF2.	150
Εικόνα 57. Στοιχειοκεραίες που ενσωματώνουν διαφορετικά επίπεδα ευφυΐας.....	152
Εικόνα 58. Σύγκλιση της μεθόδου σύνθεσης της στοιχειοκεραίας στρεφόμενου λοβού (FF2).	156
Εικόνα 59. Ληφθέντα βελτιστοποιημένα διαγράμματα από τη διαδικασία σύνθεσης (FF2).	157

Εικόνα 60. Διαγράμματα κέρδους της στοιχειοκεραίας στρεφόμενων λοβών.	157
Εικόνα 61. Βέλτιστη γεωμετρία στοιχειοκεραίας για τις δύο κατευθύνσεις εκπομπής (FF2).	158
Εικόνα 62. Σύγκλιση της μεθόδου σύνθεσης της στοιχειοκεραίας στρεφόμενου λοβού (FF1).	159
Εικόνα 63. Κανονικοποιημένοι παράγοντες διάταξης AF για τη συνάρτηση καταλληλότητας FF1.	160
Εικόνα 64. Παράγοντες διάταξης για τη συνάρτηση καταλληλότητας FF1.	161
Εικόνα 65. Ληφθείσα γεωμετρία στοιχειοκεραίας για τη συνάρτηση καταλληλότητας FF1.	161
Εικόνα 66. Ληφθείσα γεωμετρία στοιχειοκεραίας για τη συνάρτηση καταλληλότητας FF1.	163
Εικόνα 67. Κανονικοποιημένοι παράγοντες διάταξης για τη συνάρτηση καταλληλότητας FF1.	163
Εικόνα 68. Σύγκριση κεραίας στρεφόμενων λοβών και προσαρμοστικής κεραίας.....	166
Εικόνα 69. Γεωμετρική δομή επίπεδης ομοιόμορφης κυκλικής στοιχειοκεραίας (PUCA). .	167
Εικόνα 70. Κανονικοποιημένες τιμές καταλληλότητας για την επίπεδη κυκλική στοιχειοκεραία.	170
Εικόνα 71. Διαγράμματα ακτινοβολίας των βελτιστοποιημένων επίπεδων κυκλικών στοιχειοκεραίων.....	170
Εικόνα 72. Διαγράμματα με μέγιστα στις SOI και με μηδενισμούς στις SNOI κατευθύνσεις.	171
Εικόνα 73. Παράμετροι τροφοδοσίας των εσωτερικών στοιχείων της στοιχειοκεραίας (PSO).	172
Εικόνα 74. Παράμετροι τροφοδοσίας των εξωτερικών στοιχείων της στοιχειοκεραίας (PSO).	173
Εικόνα 75. Παράμετροι τροφοδοσίας των εσωτερικών στοιχείων της στοιχειοκεραίας (GA).	173
Εικόνα 76. Παράμετροι τροφοδοσίας των εξωτερικών στοιχείων της στοιχειοκεραίας (GA).	174
Εικόνα 77. Μη ομογενής γραμμική στοιχειοκεραίας αποτελούμενη από 16 $\lambda/2$ δίπολα...	175
Εικόνα 78. Σύγκλιση των αλγορίθμων PSO και GA για τη σύνθεση της γραμμικής στοιχειοκεραίας.	177

Εικόνα 79. Διαγράμματα ακτινοβολίας των βελτιστοποιημένων ανομοιογενών γραμμικών κεραίων.	178
Εικόνα 80. Σχετική τοποθέτηση των ακτινοβολητών για τις δύο βέλτιστες σχεδιάσεις (GA & PSO)	179
Εικόνα 81. Σχετική θέση των στοιχείων – φάσεις τροφοδοσίας της γραμμικής στοιχειοκεραίας (GA).	180
Εικόνα 82. Σχετική θέση των στοιχείων – φάσεις τροφοδοσίας της γραμμικής στοιχειοκεραίας (PSO).....	180
Εικόνα 83. Αποκλιμάκωση της διάρκειας της βελτιστοποίησης, συναρτήσει του αριθμού των κόμβων.	187
Εικόνα 84. Κλιμάκωση της διάρκειας της βελτιστοποίησης συναρτήσει του μεγέθους του πληθυσμού.....	188
Εικόνα 85. Ισχύς που προσπίπτει στους τερματισμούς της κεραίας και ακτινοβολούμενη ισχύς	193
Εικόνα 86. Ισοδύναμα μικροκυματικά κυκλώματα των κεραίων εκπομπής και λήψης.....	194
Εικόνα 87. Φορτίο τροφοδοτούμενο από γραμμή μεταφοράς	195
Εικόνα 88. Ισοδύναμοι γράφοι για το κύκλωμα τροφοδοσίας και του φορτίου του	196
Εικόνα 89. Ισορροπημένη γραμμή μεταφοράς – προσαρμοσμένη γραμμή μεταφοράς	199
Εικόνα 90. Δημιουργία επίπεδης γραμμής όταν η αντίσταση εξόδου της γεννήτριας είναι ήδη προσαρμοσμένη στη γραμμή μεταφοράς.....	199
Εικόνα 91. Ισοδύναμο μικροκυματικό κύκλωμα προσαρμογής φορτίου με 2-θυρο δίκτυο	200
Εικόνα 92. Γραφική αναπαράσταση ενός δίθυρου	200
Εικόνα 93. Μπλοκ διάγραμμα αναπαράστασης στοιχειοκεραίας N στοιχείων.....	202
Εικόνα 94. Μοντελοποίηση δικτυώματος τροφοδοσίας στοιχειοκεραίας.	207
Εικόνα 95. Η προσαρμογή ως μέρος του φορτίου είτε ως συστατικό του δικτυώματος τροφοδοσίας.	208
Εικόνα 96. Ισοδύναμες περιγραφές δικτυώματος τροφοδοσίας αποσυζευγμένων εξόδων με ανάλυση του στελέχους προσαρμογής (αριστερά) και χωρίς (δεξιά).....	209
Εικόνα 97. Μοντέλο διαφορίσιμων καναλιών.	212
Εικόνα 98. Διαφορές στα μήκη των μονοπατιών για δύο χωρικά διαχωρισμένες κεραίες.	214
Εικόνα 99. Συμμετρική και ανομοιόμορφη στοιχειοκεραία αποτελούμενη από $\lambda/2$ δίπολα	223

Εικόνα 100. Το τελικό μέτωπο Pareto, ενδεικτικό της αντιστάθμισης μεταξύ των τιμών συσχέτισης και του ύψους των πλευρικών λοβών, όταν το διάγραμμα έχει στραφεί 60° ..	224
Εικόνα 101. Κανονικοποιημένο διάγραμμα ακτινοβολίας των στοιχειοκεραιών A και A' ..	225
Εικόνα 102. Κανονικοποιημένο διάγραμμα ακτινοβολίας των στοιχειοκεραιών E και E' ...	226
Εικόνα 103. Καταπίεση των πλευρικών λοβών για τις επιλεγμένες σχεδιάσεις.....	227
Εικόνα 104. Αποτίμηση του παράγοντα προσαρμογής q για διαφορετικές γωνίες σάρωσης των φασικών στοιχειοκεραιών	227
Εικόνα 105. Ανάλυση ευαισθησία του επιπέδου των πλευρικών λοβών για μέγιστο μέγεθος λάθους φάσης ίσο με 5%	228
Εικόνα 106. Καμπύλες από προσομιώσεις για φασικές αποκλίσεις 1% έως 5% , η εκτιμώμενη καμπύλη για φασική απόκλιση 10% και οι αντίστοιχες μέσες τιμές των πλευρικών λοβών.....	230

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Ψευδοκώδικας για τους εξελικτικούς αλγόριθμους.....	43
Πίνακας 2. Σύνοψη της σειριακής εκτέλεση του γενετικού αλγορίθμου.	48
Πίνακας 3. Ψευδοκώδικας για τη σειριακή εκτέλεση του αλγορίθμου PSO	53
Πίνακας 4. Ψευδοκώδικας για τη σειριακή εκτέλεση του αλγορίθμου MOPSO	60
Πίνακας 5. Ψευδοκώδικας για την παράλληλη εκτέλεση του αλγορίθμου PSO	85
Πίνακας 6. Ψευδοκώδικας περιγραφής της λειτουργικότητας του CoordinatorAgent	92
Πίνακας 7. Ψευδοκώδικας περιγραφής της λειτουργικότητας του ParticleAgent	94
Πίνακας 8. Παράδειγμα αρχείου ιδιοτήτων της πλατφόρμας βελτιστοποίησης.....	96
Πίνακας 9. Παράδειγμα XML αρχείου διαμόρφωσης της πλατφόρμας βελτιστοποίησης....	97
Πίνακας 10. Τροφοδοτούμενη ισχύς στα στοιχεία της στοιχειοκεραίας (ILS BL+dir)	136
Πίνακας 11. Διαφορά % των υπολογιζόμενων πλατών τροφοδοσιών από τις τιμές αναφοράς.....	140
Πίνακας 12. Κατευθυντικότητα των διαγραμμάτων για τις υπολογισμένες τροφοδοσίες.....	147
Πίνακας 13. Γεωμετρία και παράμετροι τροφοδοσίας στοιχειοκεραίας (GA, FF1).....	148
Πίνακας 14. Γεωμετρία και παράμετροι τροφοδοσίας στοιχειοκεραίας (PSO, FF1)...	148

Πίνακας 15. Κατευθυντικότητα των διαγραμμάτων για τις υπολογισμένες τροφοδοσίες.....	149
Πίνακας 16. Γεωμετρία και παράμετροι τροφοδοσίας στοιχειοκεραίας (GA, FF2).....	151
Πίνακας 17. Γεωμετρία και παράμετροι τροφοδοσίας στοιχειοκεραίας (PSO, FF2) ...	151
Πίνακας 18. Κατευθυντικότητα των διαγραμμάτων για τις υπολογισμένες τροφοδοσίες.....	158
Πίνακας 19. Γεωμετρία στοιχειοκεραίας (PSO, FF2)	158
Πίνακας 20. Παράμετροι τροφοδοσίας στοιχειοκεραίας για τα διαφορετικά διαγράμματα (FF2).....	158
Πίνακας 21. Χαρακτηριστικά των παραγόντων διάταξης για τις υπολογισμένες τροφοδοσίες.....	160
Πίνακας 22. Γεωμετρία στοιχειοκεραίας (FF1).....	162
Πίνακας 23. Παράμετροι τροφοδοσίας στοιχειοκεραίας μεταγωγής λοβών (FF1).....	162
Πίνακας 24. Κατευθυντικότητα των διαγραμμάτων για τις υπολογισμένες τροφοδοσίες.....	162
Πίνακας 25. Γεωμετρία στοιχειοκεραίας (PSO, FF1)	163
Πίνακας 26. Χαρακτηριστικά των παραγόντων διάταξης για τις υπολογισμένες τροφοδοσίες.....	164
Πίνακας 27. Χαρακτηριστικά των διαγραμμάτων για τις υπολογισμένες τροφοδοσίες.	164
Πίνακας 28. Παράμετροι τροφοδοσίας στοιχειοκεραίας για τα διαφορετικά διαγράμματα (FF1).....	164
Πίνακας 29. Χαρακτηριστικά των διαγραμμάτων για τις υπολογισμένες τροφοδοσίες.	171
Πίνακας 30. Παράμετροι τροφοδοσίας του εσωτερικού δακτυλιδιού της στοιχειοκεραίας (PSO)	172
Πίνακας 31. Παράμετροι τροφοδοσίας του εξωτερικού δακτυλιδιού της στοιχειοκεραίας (PSO)	172
Πίνακας 32. Παράμετροι τροφοδοσίας του εσωτερικού δακτυλιδιού της στοιχειοκεραίας (GA)	173
Πίνακας 33. Παράμετροι τροφοδοσίας του εξωτερικού δακτυλιδιού της στοιχειοκεραίας (GA)	174

Πίνακας 34. Παράμετροι βελτιστοποιημένης ανομοιογενούς γραμμικής στοιχειοκεραίας (GA)	179
Πίνακας 35. Παράμετροι βελτιστοποιημένης ανομοιογενούς γραμμικής στοιχειοκεραίας (PSO)	179
Πίνακας 36. Ορισμός της συνάρτησης καταλληλότητας για την κεραία μεταγωγής λοβών	183
Πίνακας 37. Δομή του αρχείου ιδιοτήτων.....	184
Πίνακας 38. Δομή του XML αρχείου διαμόρφωσης.....	185
Πίνακας 39. Επιτυγχανόμενοι συνολικοί χρόνοι εκτέλεσης και επιτάχυνσης της πλατφόρμας	185
Πίνακας 40. Εκτιμώμενο ποσοστό κώδικα που εκτελείται παράλληλα από την πλατφόρμα	186
Πίνακας 41. Συνολικά διαθέσιμη ισχύς και πραγματική ισχύς στα στοιχεία της στοιχειοκεραίας	205
Πίνακας 42. Μεταφερόμενη ισχύς στο κεραιοσύστημα ως προς τη διαθέσιμη και την ενεργή ισχύ	225
Πίνακας 43. Τιμές παραγόντων παρεμβολής για διαφορετικά σενάρια φασικών λαθών..	229
Πίνακας 44. Πρόβλεψη για τις παραμέτρους προσαρμογής και απόκλιση τους από τις τιμές που λήφθηκαν μετά από προσομοίωση με οριζόμενη τιμή λάθους φάσης ίσης με 10%. ..	229

1 Εισαγωγή – Γενική Επισκόπηση

Η ραγδαία ανάπτυξη της αναπαράστασης του φυσικού επιπέδου των συστημάτων παροχής ασύρματης πρόσβασης στο διαδίκτυο (WiFi, WiMAX), των ασύρματων δικτύων 3^{ης} και 4^{ης} γενιάς και παροχής ευρυζωνικότητας σε κυψελωτά δίκτυα (UMTS, Mobile WiMAX), έχει ως αποτέλεσμα την εναπόθεση ολοένα και μεγαλύτερης βαρύτητας στο σχεδιασμό κεραιών μικρού κόστους που παράλληλα πρέπει να ικανοποιούν διαφορετικά πρότυπα και προδιαγραφές. Οι πιο σημαντικές από τις προδιαγραφές που καλούνται συνήθως να υλοποιήσουν είναι η ευρυζωνική ή σε πολλαπλές ζώνες λειτουργία (multiband, wideband), η δυνατότητα μορφοποίησης και στροφής του διαγράμματος ακτινοβολίας (beamforming), η εκμετάλλευση των φαινομένων διαφορισιμότητας (diversity antennas), ενώ παράλληλα πρέπει να ικανοποιούνται οι φυσικοί (packaging) ή άλλοι περιορισμοί που προκύπτουν κατά την ολοκλήρωση τους στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα ή συσκευές.

Με δεδομένη την ύπαρξη εκτενούς βιβλιογραφίας και ερευνητικών εργασιών για πληθώρα πρωτότυπων κεραιών και αντίστοιχων εφαρμογών, η δουλειά ενός σχεδιαστή κεραιών καταρχήν συνίσταται στην κατάρτιση κατάλληλης μοντελοποίησης, στην παραμετροποίηση της σύμφωνα με τις απαιτήσεις της δεδομένης τηλεπικοινωνιακής εφαρμογής ή συστήματος και στην επαλήθευση της σχεδίασης με τη βοήθεια εξειδικευμένων ηλεκτρομαγνητικών πυρήνων που βασίζονται στην ανάλυση πλήρους κύματος ή σε υβριδικές μεθόδους. Καθότι οι δυνατότητες επεξεργασίας που προσφέρουν οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές αυξάνονται γεωμετρικά (νόμος του Moore), η χρήση εξειδικευμένων βιβλιοθηκών λογισμικού ή γενικευμένων προγραμμάτων ηλεκτρομαγνητικής υπολογιστικής (Computational Electromagnetic) προσομοίωσης καθίσταται εφικτή, διασφαλίζοντας σε σημαντικό βαθμό τη καλή συμφωνία της πειραματικής ή/και μετρήσιμης συμπεριφοράς των σχεδιάσεων με τις οριζόμενες προδιαγραφές.

Προκειμένου οι μηχανικοί να βελτιστοποιήσουν την απόδοση των σχεδιάσεων τους, διεξάγουν επαναληπτικές προσομοιώσεις έτσι ώστε να προσδιορίσουν ξεχωριστά τις βέλτιστες τιμές κάθε παραμέτρου της μοντελοποίησης που έχουν ορίσει. Όμως οι παραμετρικές προσομοιώσεις είναι αποτελεσματικές μόνο εφόσον είναι εγγυημένη η ορθογωνικότητα των παραμέτρων των κεραιών/κεραιοσυστήματος ως προς τους ορισμένους στόχους. Αναπόφευκτα, η μη κατάλληλη επιλογή τιμών για το σύνολο των παραμέτρων σχεδίασης μπορεί να οδηγήσει σε πολλές επαναλήψεις της άνωθεν διαδικασίας έως ότου προκύψει το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Οι συχνά χρησιμοποιούμενες παραμετρικές μεθοδολογίες βελτιστοποίησης πλέον αντικαθίστανται συστηματικά από τεχνικές βελτιστοποίησης αιχμής. Μεταξύ των διάφορων στοχαστικών ευρετικών αλγορίθμων, οι γενετικοί αλγόριθμοι (Genetic Algorithms - GA) και η βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων (Particle Swarm Optimization - PSO) έχουν προσελκύσει ιδιαίτερη τη προσοχή της ηλεκτρομαγνητικής επιστημονικής κοινότητας, αλλά πλέον και της βιομηχανίας. Αυτοί οι βασισμένοι σε πληθυσμό εξελικτικοί αλγόριθμοι οφείλουν τη δημοτικότητα τους στο γεγονός ότι μπορούν να βελτιστοποιούν ταυτόχρονα το σύνολο των παραμέτρων, εφόσον έχει οριστεί κατάλληλη αντικειμενική συνάρτηση που αποτιμά την καταλληλότητα των υποψήφιων σχεδιάσεων. Επίσης ενσωματώνουν αποτελεσματικούς μηχανισμούς αποφυγής των τοπικών ακρότατων καθιστώντας τους έτσι

κατάλληλους να βελτιστοποιούν μη παραγωγίσιμες συναρτήσεις καταλληλότητας σε σύνθετους και ιδιόμορφους χώρους έρευνας. Ένα σημαντικό μειονέκτημα όμως των άνωθεν περιγραφόμενων ευρετικών μεθόδων είναι ο απαραίτητος μεγάλος αριθμός επαναλήψεων μέχρι να συγκλίνουν σε μια βέλτιστη λύση. Αυτή η κλιμάκωση μεταφράζεται ευθέως σε επαυξημένο υπολογιστικό κόστος και χρόνο κατά τη σχεδίαση, ειδικότερα δε αν οι επαναληπτικές προσομοιώσεις έχουν ιδιαίτερα αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστικούς πόρους οπότε η εφαρμογή των παραπάνω μεθόδων καθίσταται πρακτικά απαγορευτική.

Τέλος, για την σχεδίαση κεραιών που καλούνται παράλληλα να ικανοποιούν διαφορετικά πρότυπα/προδιαγραφές ακτινοβολήσης καθώς και επιπρόσθετους περιορισμούς για να είναι δυνατή η ολοκλήρωση τους σε κεραιοσυστήματα/συστήματα τηλεπικοινωνιών, καθίσταται απαραίτητος ο ορισμός πολλαπλών έστω και μερικώς αντικρουόμενων κριτηρίων. Σε αυτή την περίπτωση είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί μία εκ των τεχνικών πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, οι οποίες βρίσκουν ένα σύνολο λύσεων που ικανοποιούν τις σχεδιαστικές απαιτήσεις και περιορισμούς σε διαφορετικό βαθμό. Στη συνέχεια, είναι δυνατή η επιλογή εκείνης της λύσης που εξυπηρετεί καλύτερα τη δεδομένη εφαρμογή τηλεπικοινωνιών από το σύνολο των διαθέσιμων λύσεων (trade-off analysis). Από τη σχετική βιβλιογραφία είναι γνωστές οι πολυκριτηριακές επεκτάσεις των γενετικών αλγόριθμων και της βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων που βασίζονται στη έννοια των μη επικρατούσων λύσεων (non-dominated solutions).

Τα σύγχρονα συστήματα ασύρματων επικοινωνιών συνήθως ολοκληρώνουν κατάλληλα διαμορφωμένες στοιχειοκεραίες, οι οποίες αποτελούνται από πολλαπλούς όμοιους ακτινοβολητές, γεγονός που τους προσδίδει ευρωστία στην αντιμετώπιση των διαλείψεων των εκπεμπόμενων σημάτων λόγω των φαινομένων πολυδιαδρομικής διάδοσης καθώς και των παρεμβολών. Οι στοιχειοκεραίες, σε αντιδιαστολή με τη χρήση μιας και μοναδικής κεραίας, έχουν τη δυνατότητα να επιτυγχάνουν στενούς λοβούς ακτινοβολήσης, καταπιεσμένους πλευρικούς λοβούς, υψηλές τιμές κατευθυντικότητας ή/και τοποθέτηση των μηδενισμών του διαγράμματος ακτινοβολίας τους σε επιθυμητές κατευθύνσεις. Η επίτευξη ή όχι των παραπάνω χαρακτηριστικών ακτινοβολήσης εξαρτάται από το είδος των χρησιμοποιούμενων ακτινοβολητών, τον αριθμό τους καθώς και τις σχετικές φάσεις και τα πλάτη των εφαρμοζόμενων διεγέρσεων στα στοιχεία τους.

Η διαδικασία σύνθεσης των στοιχειοκεραιών συνίσταται στον προσδιορισμό κατάλληλων τιμών των παραπάνω παραμέτρων προκειμένου να ικανοποιούνται τα χαρακτηριστικά μιας δεδομένης εφαρμογής. Το πρόβλημα σύνθεσης των στοιχειοκεραιών έχει αποτελέσει και συνεχίζει να αποτελεί μια πολύ ενεργή περιοχή ερευνητικής δραστηριότητας. Οι κλασσικές μέθοδοι σύνθεσης που αναφέρονται στην βιβλιογραφία αφορούν στην πλειοψηφία τους τη σύνθεση διαγραμμάτων για ιδεατές ομοιόμορφες στοιχειοκεραίες, με συνηθέστερα προσδιοριζόμενα χαρακτηριστικά ακτινοβολήσης τους τη κατευθυντικότητα, το άνοιγμα του κεντρικού λοβού και την καταπίεση των πλευρικών λοβών που επιτυγχάνουν. Η χρήση τους λοιπόν δεν επιτρέπει συνήθως την παράλληλη ικανοποίηση επιπρόσθετων χαρακτηριστικών όπως την δυνατότητα στροφής του κεντρικού λοβού ή την τοποθέτηση μηδενισμών σε επιθυμητές κατευθύνσεις, ούτε επιτρέπουν τον συνυπολογισμό των φαινομένων ίδιας και αμοιβαίας σύζευξης μεταξύ των στοιχείων τους ή την εκτίμηση της απόκλισης του ολικού διαγράμματος ακτινοβολίας από τον παράγοντα διάταξης τους.

Εφόσον θεωρηθεί επιπρόσθετα ότι αντικείμενο της διαδικασίας σύνθεσης αποτελεί η εύρεση της βέλτιστης χωρικής κατανομής των ακτινοβολητών για ανομοιόμορφες στοιχειοκεραίες, λαμβάνοντας υπόψη το είδος τους καθώς και το φαινόμενο της μεταξύ τους ηλεκτρομαγνητικής σύζευξης, η πολυπλοκότητα αυξάνεται σημαντικά. Είναι αναγκαία λοιπόν η αναδιατύπωση της διαδικασίας σύνθεσης ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, με αριθμό παραμέτρων ευθέως ανάλογο του πλήθους των ακτινοβολητών της στοιχειοκεραίας, εκφράζοντας με συνάφεια τα επιθυμητά χαρακτηριστικά ακτινοβόλησης και τους περιορισμούς στην συνάρτηση αποτίμησης. Αν επιπλέον ζητούμενο της σύνθεσης αποτελεί η ικανοποίηση μερικώς αντικρουόμενων στόχων, όπως αυτοί προκύπτουν κατά την ολοκλήρωσή τους σε ολοκληρωμένα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, τότε κρίνεται απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί μία τεχνική πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης που θα επιτρέπει τον προσδιορισμό ενός συνόλου μη επικρατουσών λύσεων.

Αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής αποτελεί αφενός η εφαρμογή μεθόδων σύνθεσης στοιχειοκεραιών χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων, για την αντιμετώπιση της εγγενούς πολυπλοκότητας των εν λόγω πολυπαραμετρικών προβλημάτων, και αφετέρου η ανάπτυξη μιας κατανεμημένης πλατφόρμας βελτιστοποίησης, βασισμένης στο προγραμματιστικό παράδειγμα των κινητών πρακτόρων (mobile agents), προκειμένου να είναι δυνατή η άρση της προκύπτουσας υπολογιστικής κλιμάκωσης λόγω της χρήσης αυτών των μεθόδων.

Συγκεκριμένα, στο δεύτερο κεφάλαιο επιχειρείται η αναλυτική βιβλιογραφική παρουσίαση των μεθόδων βελτιστοποίησης και δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην περιγραφή των στοχαστικών μεθόδων και ειδικότερα του αλγορίθμου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων καθώς και της πολυκριτηριακής του επέκτασης. Αναπτύσσεται κριτική ανάλυση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους καθώς και των πιθανών πλεονεκτημάτων τους ή μειονεκτημάτων τους κατά την αντιμετώπιση προβλημάτων ηλεκτρομαγνητικής σχεδίασης. Τέλος παρουσιάζεται, ως παράδειγμα εφαρμογής, το πρόβλημα εύρεσης βέλτιστων παραμέτρων για την εφαρμογή της υπολογιστικής ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου των βοηθητικών πηγών κατά την επίλυση ενός δισδιάστατου προβλήματος σκέδασης.

Στο τρίτο κεφάλαιο πραγματοποιείται συνοπτική αναφορά των μεθόδων κατανομής των υπολογιστικών διεργασιών με έμφαση στις διαδικτυακές κατανεμημένες πλατφόρμες, οι οποίες παρουσιάζουν εγγενή πλεονεκτήματα συγκρινόμενες με τις πλατφόρμες παραλληλοποίησης ισχυρής σύζευξης (tightly coupled platforms). Στη συνέχεια η μελέτη επικεντρώνεται στην τεχνολογία των κινητών πρακτόρων (mobile agents) στην οποία εστιάζει και η παρούσα διατριβή. Ακολούθως, παρουσιάζονται οι δυνατότητες παραλληλοποίησης της μεθόδου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων σε αλγοριθμικό επίπεδο όπου είναι δυνατόν να θεωρηθεί η αποτίμηση των υποψήφιων παραμετρικών σχεδιάσεων ως η μοναδιαία πράξη υπολογισμού, άρα και η εκτέλεση της αντίστοιχης υπολογιστικής προσομοίωσης. Τέλος, παρουσιάζονται τα αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά της προτεινόμενης κατανεμημένης πλατφόρμας βελτιστοποίησης, που υλοποιήθηκε με τη βοήθεια της πλατφόρμας κινητών πρακτόρων JADE™, για την επίλυση ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων γενικότερα και ειδικότερα προβλημάτων σύνθεσης στοιχειοκεραιών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο επιχειρείται αρχικά η γενικευμένη διατύπωση ενός προβλήματος σύνθεσης στοιχειοκεραιών, αφού πρώτα παρουσιαστούν συνοπτικά κάποια από τα ειδικότερα χαρακτηριστικά των μεθόδων που ήδη απαντώνται στη βιβλιογραφία. Στη συνέχεια παρατίθενται δύο παραδείγματα σύνθεσης στοιχειοκεραιών σταθερής και μεταβλητής γεωμετρίας αντίστοιχα, προκειμένου να δειχθεί ότι οι κλασσικές μέθοδοι βελτιστοποίησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν όταν είναι δυνατή η ανάπτυξη απλοποιημένων παραμετρικών μοντελοποιήσεων, αλλά γενικότερα δεν επαρκούν για τη σύνθεση στοιχειοκεραιών μεταβλητής γεωμετρίας. Ακολούθως, βελτιστοποιούνται τρία διαφορετικά είδη στοιχειοκεραιών με εφαρμογές στις κινητές επικοινωνίες και στα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών. Αρχικά, εξετάζεται μια μέθοδος σύνθεσης στοιχειοκεραιών μεταγωγής λοβών, βασισμένη στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων. Στη συνέχεια περιγράφεται μια μέθοδος προσδιορισμού των διεγέρσεων των στοιχείων μιας επίπεδης ομοιόμορφης κυκλικής στοιχειοκεραίας, η οποία επιτρέπει τη στροφή του κυρίως λοβού στην κατεύθυνση του επιθυμητού χρήστη ενώ παράλληλα επιβάλλει βαθείς μηδενισμούς σε κατευθύνσεις παρεμβολών. Ακολούθως παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που λήφθηκαν κατά τη σύνθεση μιας γραμμικής στοιχειοκεραίας σταθμού βάσης με τη βοήθεια στοχαστικών αλγορίθμων, προκειμένου να προσδιοριστεί η ανομοιόμορφη κατανομή των στοιχείων της καθώς και οι φάσεις τροφοδοσίας τους. Τέλος, προκειμένου να εκτιμηθεί η ευελιξία και η αποδοτικότητα της κατανεμημένης πλατφόρμας βελτιστοποίησης που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, μελετάται η εφαρμογή της κατά τη βελτιστοποίηση μιας κεραίας μεταγωγής λοβών. Μετά από την εξέταση δύο διαφορετικών σεναρίων κλιμάκωσης, οριζόμενα ως προς το μέγεθος του πληθυσμού των υποψήφιας λύσεων και ως προς τον αριθμό των συμμετεχόντων υπολογιστικών κόμβων, αποδεικνύεται ότι μεγιστοποιούνται τα υπολογιστικά οφέλη όταν το υπολογιστικό κόστος προσομοίωσης των αποτιμώμενων σχεδιάσεων είναι μεγάλο και όταν τα σωματίδια κατανέμονται πιο ομοιόμορφα σε μεγαλύτερο αριθμό κόμβων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αρχικά επιχειρείται η συνοπτική παρουσίαση των ισοδύναμων αναπαραστάσεων μιας στοιχειοκεραίας και του δικτύου τροφοδοσίας/λήψης της ως μικροκυματικά πολύθυρα. Ακολούθως παρουσιάζονται οι βασικότεροι μηχανισμοί για την επίτευξη διαφορισμότητας στα συστήματα ασύρματων επικοινωνιών και διατυπώνονται αναλυτικές εκφράσεις περιγραφής της χωρικής διαφορισμότητας γραμμικών ακτινοβολητών. Τέλος, διατυπώνεται ένα πρωτότυπο πρόβλημα σύνθεσης μιας γραμμικής ανομοιόμορφης φασικής στοιχειοκεραίας μεταβλητής γεωμετρίας όπου απαιτείται ταυτόχρονα η καταπίεση των πλευρικών λοβών του διαγράμματος ακτινοβολίας της και η μεγιστοποίηση της χωρικής διαφορισμότητας των στοιχείων της, ενώ επιβάλλονται επιπρόσθετοι περιορισμοί ως προς την αποδοτικότητά της. Καθώς οι αναφερόμενοι στόχοι είναι μερικώς αντικρουόμενοι χρησιμοποιείται η πολυκριτηριακή επέκταση του αλγορίθμου PSO.

Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση των τρεχουσών ερευνητικών επιδιώξεων που δεν έχουν ωριμάσει ικανώς για να μπορούν να συμπεριληφθούν στο τελικό κείμενο της διατριβής και παράλληλα δίνονται κατευθύνσεις για μελλοντικά ερευνητικά πεδία ενασχόλησης.

2 Στοχαστικές Τεχνικές Βελτιστοποίησης

Ένα από τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι σχεδιαστές κεραιών είναι η εύρεση βέλτιστων λύσεων για σύνθετες ηλεκτρομαγνητικές σχεδιάσεις διατάξεων. Οι δυνατότητες επεξεργασίας που προσφέρουν οι σύγχρονοι ηλεκτρονικοί υπολογιστές, λόγω της σταθερά αυξανόμενης διαθέσιμης υπολογιστικής ισχύος (νόμος του Moore), έχουν τροφοδοτήσει τη σχετική έρευνα. Οι συχνά χρησιμοποιούμενες μεθόδολογίες σχεδίασης *ωμής δύναμης* (brute force) πλέον αντικαθίστανται συστηματικά από *τεχνικές βελτιστοποίησης* αιχμής. Η δυνατότητα της χρησιμοποίησης αποτελεσματικών και με μεγάλη ακρίβεια αριθμητικών μεθόδων για το χαρακτηρισμό της σχετικής ποιότητας μιας ΗΜ σχεδίασης έχει ωθήσει τους μηχανικούς στη χρήση *στοχαστικών εξελικτικών μεθόδων βελτιστοποίησης*. Οι εξελικτικές τεχνικές έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία στην ανάπτυξη πολύπλοκων εφαρμογών για το σχεδιασμό ηλεκτρομαγνητικών διατάξεων ολοένα και αυξανόμενης πολυπλοκότητας. Το πρόσφατο ενδιαφέρον που παρουσιάζεται ως προς τις εξελικτικές μεθόδους βελτιστοποίησης στην πραγματικότητα δεν είναι μοναδικό στον τομέα του ηλεκτρομαγνητισμού, αλλά τέτοιες τεχνικές έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία σε προβλήματα ερευνητικών περιοχών συναφών με την εφαρμοσμένη μηχανική, τα οικονομικά και την τεχνητή νοημοσύνη.

Μεταξύ των διάφορων εξελικτικών τεχνικών, οι *γενετικοί αλγόριθμοι* (Genetic Algorithms - GA) και η *βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων* (Particle Swarm Optimization - PSO) έχουν προσελκύσει ιδιαίτερη προσοχή. Αυτοί οι αλγόριθμοι οφείλουν τη δημοτικότητα τους εντός της ηλεκτρομαγνητικής κοινότητας ως εργαλεία σχεδιασμού και επίλυσης προβλημάτων λόγω της ευελιξίας και της δυνατότητάς τους να βελτιστοποιούν *μη παραγωγίσιμες συναρτήσεις* καταλληλότητας σε σύνθετους και ιδιόμορφους χώρους έρευνας. Σχεδιαστικά προβλήματα που συγκεντρώνουν ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον, ως προς την δυνατότητα εφαρμογής στοχαστικών αλγόριθμων βελτιστοποίησης για την αντιμετώπισή τους, είναι η σχεδίαση μικροταινιακών κεραιών, κεραιών πολλαπλής ζώνης (multiband) ή ευρείας ζώνης (wideband), η σύνθεση απορροφητικών υλικών ραντάρ για RCS εφαρμογές, η σύνθεση στοιχειοκεραιών, η σύνθεση κεραιών με ανακλαστήρες, η σχεδίαση ηλεκτρομαγνητικών δομών (EBG) και άλλα. Τέτοιου είδους προβλήματα απαιτούν την εύρεση των κατάλληλων γεωμετρικών παραμέτρων (διαστάσεις), παραμέτρων τροφοδοσίας και απαιτούν την έκφραση των περιορισμών με πληρότητα ώστε η προκύπτουσα λύση να ικανοποιεί τις αρχικές προδιαγραφές. Η παρούσα διατριβή περιγράφει μεθόδους βελτιστοποίησης *στοιχειοκεραιών* χρησιμοποιώντας των *αλγόριθμο βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων*.

Στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου παρουσιάζονται αναλυτικά διάφορες μέθοδοι βελτιστοποίησης, με ιδιαίτερη έμφαση στις *στοχαστικές μεθόδους βελτιστοποίησης* και ειδικότερα στη *βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων*. Αναπτύσσεται κριτική ανάλυση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους καθώς και των πιθανών πλεονεκτημάτων τους ή μειονεκτημάτων τους κατά την αντιμετώπιση προβλημάτων ηλεκτρομαγνητικής σχεδίασης. Τέλος παρουσιάζεται, ως παράδειγμα, το πρόβλημα εύρεσης κατάλληλων παραμέτρων για την εφαρμογή της υπολογιστικής ΗΜ μεθόδου των βοηθητικών πηγών (Method of Auxiliary Sources - MAS) κατά την επίλυση ενός δισδιάστατου προβλήματος σκέδασης.

2.1 Βελτιστοποίηση

Ο στόχος της βελτιστοποίησης είναι να ευρεθούν οι τιμές ενός συνόλου παραμέτρων που μεγιστοποιούν ή ελαχιστοποιούν κατάλληλα ορισμένες αντικειμενικές συναρτήσεις, οι οποίες υπόκεινται σε συγκεκριμένους περιορισμούς [1]. Εφικτή λύση καλείται μια επιλογή τιμών για το σύνολο των παραμέτρων που ικανοποιούν όλους τους περιορισμούς. Οι εφικτές λύσεις με τιμή αντικειμενικής συνάρτησης η οποία είναι εξίσου ή περισσότερο καλή από τις τιμές οποιωνδήποτε άλλων εφικτών λύσεων καλούνται βέλτιστες λύσεις. Οι τεχνικές βελτιστοποίησης έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία σε προβλήματα ερευνητικών περιοχών συναφών με την εφαρμοσμένη μηχανική, τα οικονομικά και την τεχνητή νοημοσύνη. Η έρευνα στον τομέα της βελτιστοποίησης είναι πολύ ενεργή και νέες μέθοδοι βελτιστοποίησης αναπτύσσονται τακτικά [2].

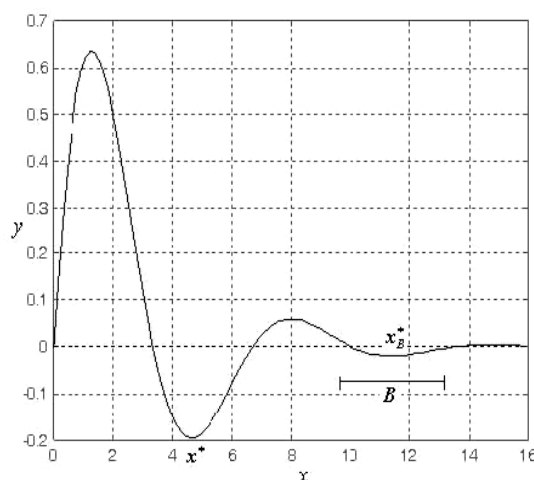
Η βελτιστοποίηση εμπεριέχει και τα προβλήματα μεγιστοποίησης και ελαχιστοποίησης. Οποιοδήποτε πρόβλημα μεγιστοποίησης μπορεί να μετατραπεί σε ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης με τη λήψη της αρνητικής της αντικειμενικής συνάρτησης τιμής και αντίστροφα. Ως εκ τούτου, οι όροι βελτιστοποίηση, μεγιστοποίηση και ελαχιστοποίηση χρησιμοποιούνται με την ίδια έννοια σε αυτήν την διατριβή.

2.1.1 Ολική βελτιστοποίηση

Ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης μπορεί να διατυπωθεί ως εξής [3]:

$$\begin{aligned} & \text{Έστω συνάρτηση } f : S \rightarrow \mathfrak{R} \text{ όπου } S \in \mathfrak{R}^{N_d} \\ & \text{και } N_d \text{ είναι η διάσταση του χώρου έρευνας } S. \\ & \text{Να βρεθεί } \mathbf{x} \in S \text{ έτσι ώστε } f(\mathbf{x}^*) \leq f(\mathbf{x}) \text{ για } \forall \mathbf{x} \in S. \end{aligned} \quad (1)$$

Η μεταβλητή \mathbf{x}^* καλείται το ολικό ελάχιστο (ή απλά ελάχιστο) της συνάρτησης f και η τιμή $f(\mathbf{x}^*)$ καλείται η συνολικά ελάχιστη τιμή (ή απλά το ελάχιστο) της f . Αυτό δείχνεται παραστατικά στην Εικόνα 1 όπου \mathbf{x}^* είναι ένα ολικό ελάχιστο της f . Η διαδικασία εύρεσης της συνολικά βέλτιστης λύσης είναι γνωστή ως ολική (global) βελτιστοποίηση [4]. Ένας αληθινά ολικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης θα βρει το \mathbf{x}^* ανεξάρτητα από την επιλεγμένο σημείο αφετηρίας $\mathbf{x}_0 \in S$.



Εικόνα 1. Θέσεις τοπικών και ολικών ελαχίστων συνάρτησης f .

Τα προβλήματα ολικής βελτιστοποίησης είναι γενικά πολύ δύσκολα και ταξινομούνται στην κατηγορία προβλημάτων του μη γραμμικού προγραμματισμού (NLP) [4]. Μερικά παραδείγματα προβλημάτων ολικής βελτιστοποίησης είναι τα ακόλουθα:

- *Συνδυαστικά προβλήματα*: όπου μια γραμμική ή μη γραμμική συνάρτηση ορίζεται σε ένα πεπερασμένο αλλά πολύ μεγάλο σύνολο λύσεων, όπως για παράδειγμα προβλήματα δικτύων και χρονοπρογραμματισμού τους [3].
- *Γενικευμένα προβλήματα χωρίς περιορισμούς*: όπου μια μη γραμμική συνάρτηση ορίζεται σε σύνολο πραγματικών τιμών χωρίς περιορισμούς.
- *Γενικευμένα προβλήματα με περιορισμούς*: όπου μια μη γραμμική συνάρτηση ορίζεται σε ένα περιορισμένο (constrained) σύνολο πραγματικών τιμών.

Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι (Evolutionary Algorithms - EAs) έχουν εφαρμοστεί επιτυχώς στα ανωτέρω προβλήματα για την εύρεση των κατά προσέγγιση λύσεων [4]. Περισσότερες λεπτομέρειες για την ολική βελτιστοποίηση μπορούν να βρεθούν στα Pardalos et al. [3], Floudas και Pardalos [5] και Horst et al. [6].

2.1.2 Τοπική βελτιστοποίηση

Στην Εικόνα 1 ως \mathbf{x}_B^* καλείται το τοπικό (local) ελάχιστο της περιοχής B επειδή η $f(\mathbf{x}_B^*)$ είναι η μικρότερη τιμή που λαμβάνει η συνάρτηση f μέσα σε μια τοπική γειτονιά B . Από μαθηματικής απόψεως η μεταβλητή \mathbf{x}_B^* είναι ένα τοπικό ελάχιστο της περιοχής B εφόσον

$$f(\mathbf{x}_B^*) \leq f(\mathbf{x}) \text{ για } \forall \mathbf{x} \in B, \text{ όπου } B \in S. \quad (2)$$

Επιπλέον κάθε ολικό ελάχιστο είναι και τοπικό ελάχιστο, αλλά ένα τοπικό ελάχιστο δεν είναι απαραίτητα και ολικό ελάχιστο.

Γενικά μια μέθοδος τοπική βελτιστοποίησης είναι εγγυημένο ότι θα βρει το τοπικό ελάχιστο \mathbf{x}_B^* της περιοχής B εάν επιλεγθεί κατάλληλο σημείο αφετηρίας $\mathbf{x}_0 \in B$. Ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης που συγκλίνει σε ένα τοπικό ελάχιστο, ανεξάρτητα από την επιλεγμένη αφετηρία $\mathbf{x}_0 \in S$, καλείται ολικό συγκλίνον αλγόριθμος [6]. Αναφέρονται πολλοί τοπικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης στη βιβλιογραφία. Για περισσότερες λεπτομέρειες ο αναγνώστης παραπέμπεται στους Aarts και Lenstra [7] και Korte και Vygen [8].

2.1.3 Ορισμός περιορισμών

Στα περισσότερα προβλήματα βελτιστοποίησης ορίζονται επιπρόσθετοι *περιορισμοί* οι οποίοι υπαγορεύονται από τη φύση του μοντελοποιημένου συστήματος και περιγράφονται με μαθηματικές ανισότητες ή ισότητες. Αυτοί οι περιορισμοί θα πρέπει να ικανοποιούνται από τις ευρισκόμενες λύσεις προκειμένου το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης να θεωρείται εφικτό.

$$\begin{aligned} g_i(\mathbf{x}) &\leq 0, & i = 1, \dots, m \\ h_i(\mathbf{x}) &= 0, & i = 1, \dots, p \end{aligned} \quad (3)$$

Η ικανοποίηση των επιβαλλόμενων περιορισμών έχει ως αποτέλεσμα των περιορισμό των εφικτών λύσεων σε ένα υποσύνολο του n -διάστατου πεδίου ορισμού. Σε κάθε περίπτωση ο αριθμός των περιορισμών ισότητας θα πρέπει να είναι μικρότερος από τον αριθμό των παραμέτρων βελτιστοποίησης, διαφορετικά το πρόβλημα χαρακτηρίζεται ως υπέρ-περιορισμένο, καθώς δεν μπορεί να βρεθεί λύση η οποία να ικανοποιεί ταυτόχρονα όλους τους περιορισμούς [9].

Οι περιορισμοί μπορούν να χαρακτηρισθούν βάσει του αν επιβάλλονται ή όχι απευθείας στις παραμέτρους βελτιστοποίησης:

- *Ρητοί περιορισμοί:* όταν παρατίθεται η αλγεβρική τους έκφραση όπως για παράδειγμα τα όρια διακύμανσης των παραμέτρων.
- *Πεπλεγμένοι περιορισμοί:* όταν είναι απαραίτητος ο αλγόριθμος για τον υπολογισμό των τιμών των συναρτήσεων g_i και h_i .

Η εισαγωγή περιορισμών αυξάνει τη δυσκολία του προβλήματος βελτιστοποίησης και κοινή πρακτική για την αντιμετώπιση προβλημάτων αυτού του τύπου είναι η μεταβολή του προβλήματος σε πρόβλημα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς είτε η χρήση συναρτήσεων ποινής. Ο ορισμός συναρτήσεων ποινής ενδέχεται να παραμορφώσει των χώρο λύσεων όπως αυτός ορίζεται από την υπό βελτιστοποίηση συνάρτηση f , οπότε σε αυτή την περίπτωση είναι προσφορότερη η προσαρμογή των συναρτήσεων ποινής στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του χρησιμοποιούμενου αλγόριθμου βελτιστοποίησης [10].

2.1.4 Θεώρημα των «μη δωρεάν γευμάτων»

Μια από τις πιο ενδιαφέρουσες εξελίξεις στη θεωρία βελτιστοποίησης ήταν η έκδοση του θεωρήματος των «μη δωρεάν γευμάτων» (No Free Lunch Theorem - NFL) από τους Wolpert και Macready [11]. Αυτό το θεώρημα αναφέρει ότι η απόδοση όλων των αλγορίθμων βελτιστοποίησης είναι ισοδύναμη όταν δοκιμαστούν στο σύνολο όλων των δυνατών συναρτήσεων.

Οι συνέπειες αυτού του θεωρήματος είναι πολύ σημαντικές επειδή υπονοεί ότι δεν μπορεί να σχεδιαστεί αλγόριθμος ο οποίος θα είναι πιο αποδοτικός από μια απλή γραμμική απαρίθμηση του χώρου λύσεων ή ακόμα και από ένα αλγόριθμο καθαρά τυχαίας έρευνας (random search). Το θεώρημα βέβαια ορίζεται μόνο για πεπερασμένους χώρους έρευνας και είναι άγνωστο κατά πόσον μπορεί να επεκταθεί σε μη πεπερασμένους χώρους. Φυσικά, όλες οι υλοποιήσεις των σχετικών αλγορίθμων σε υπολογιστές εκτελούνται σε φραγμένους χώρους έρευνας, επομένως το αναφερόμενο θεώρημα έχει ισχύ και καλύπτει το σύνολο των αλγορίθμων βελτιστοποίησης.

Παρόλο που το θεώρημα αναφέρει ότι όλοι οι αλγόριθμοι λειτουργούν το ίδιο καλά εφαρμοζόμενοι στο σύνολο όλων των πιθανών διαφορετικών προβλημάτων, αυτό φυσικά δεν ισχύει και για κάθε υποσύνολο αυτού του συνόλου. Πολλές από αυτές τις συναρτήσεις και τα προβλήματα βελτιστοποίησης φαίνονται να μην έχουν συνεπυγμένη περιγραφή και αυτό φαινομενικά τους προσδίδει χαρακτηριστικά τυχαιότητας. Όμως οι περισσότερες συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται στην πράξη παρουσιάζουν κάποιου είδους δομή και συνήθως έχουν συμπαγή περιγραφή. Αυτού του είδους οι επισημάνσεις οδήγησαν σε πιο

εξειδικευμένες διατυπώσεις του θεωρήματος NFL [12], οι οποίες καταδεικνύουν ότι ισχύει για πολύ μικρότερο αριθμό συναρτησιακών υποσυνόλων από αυτόν που αρχικά εκτιμήθηκε.

Μια πιο δημιουργική προσέγγιση στο θέμα είναι να γίνει χαρακτηρισμός και καταγραφή των κλάσεων συναρτήσεων που δεν υπάγονται στην ισχύ του θεωρήματος NFL. Ο Christensen και άλλοι [13] πρότειναν τον ορισμό του κατά πόσον μια συνάρτηση είναι «βελτιστοποιήσιμη» όπως και τον ορισμό ενός γενικού αλγόριθμου ο οποίος θα αποδίδει καλύτερα από τον αλγόριθμο τυχαίας έρευνας σε αυτό το σύνολο «ερευνησίμων» συναρτήσεων.

Σε αυτή τη διατριβή θα ακολουθηθεί η δεύτερη προσέγγιση η οποία υποστηρίζει ότι είναι δυνατός ο ορισμός και χρήση ενός τέτοιου αλγορίθμου με αυξημένα χαρακτηριστικά απόδοσης σε σχέση με τους υπόλοιπους αλγορίθμους για τα εξεταζόμενα ηλεκτρομαγνητικά προβλήματα. Δεν είναι τυχαίο το γεγονός ότι μεταξύ των διάφορων τεχνικών βελτιστοποίησης, οι *γενετικοί αλγόριθμοι* (Genetic Algorithms - GA) και ο *αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων* (Particle Swarm Optimization - PSO) έχουν προσελκύσει την ιδιαίτερη προσοχή της ηλεκτρομαγνητικής κοινότητας ως εργαλεία σχεδιασμού και επίλυσης προβλημάτων. Αυτό οφείλεται κυρίως στην ευελιξία τους και τη δυνατότητά τους να βελτιστοποιούν *μη παραγωγίσιμες συναρτήσεις* καταλληλότητας σε σύνθετους και ιδιόμορφους χώρους έρευνας.

2.2 Πολυδιάστατα Προβλήματα Βελτιστοποίησης

Το μέγεθος ενός παραμετρικού χώρου πραγματικών τιμών δεν μπορεί να υπολογιστεί καθότι είναι άπειρο. Ακόμη και μια φραγμένη ενιαία διάσταση με σημεία τέλους στο μηδέν και στο ένα εμπεριέχει ένα άπειρο αριθμό σημείων. Έτσι μια αυστηρή εξέταση θα κατέληγε στο ότι η βελτιστοποίηση των προβλημάτων πραγματικών τιμών πρέπει να είναι αδύνατη. Αυτό φυσικά δεν συμβαίνει επειδή τα *τοπία καταλληλότητας* (fitness landscapes) πραγματικών τιμών, όπως και για άλλους τύπους τιμών (διακριτών κτλ.), σχεδόν πάντα εμπεριέχουν κάποια μορφή διατάξεως των σημείων τους.

Πολλές από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για να βελτιστοποιήσουν τα συνεχή προβλήματα είναι παρόμοιες με εκείνες που χρησιμοποιούνται για τα δυαδικά και συνδυαστικά προβλήματα. Η απόσταση, συμπεριλαμβανομένων και των μεγεθών των βημάτων, δεν είναι η απόσταση Hamming όπως ορίζεται για δυαδικές τιμές, αλλά (συνήθως) η Ευκλείδεια απόσταση. Εάν ένα σημείο **A** σε ένα *n*-διάστατο χώρο καθορίζεται από τις συντεταγμένες $(\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_n)$, και ένα άλλο **B** έχει τις συντεταγμένες $(\beta_1, \beta_2 \dots \beta_n)$, τότε η απόσταση μεταξύ των δύο σημείων υπολογίζεται ως:

$$D_{AB} = \sqrt{\sum (\alpha_i - \beta_i)^2} \quad (4)$$

Η απόσταση είναι η τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγωνικών διαφορών μεταξύ των συνιστωσών των συντεταγμένων. Σε μια διάσταση, η τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος της τετραγωνισμένης διαφοράς είναι ακριβώς η ίδια η διαφορά, η οποία διαφαίνεται άμεσα ως ένα λογικό μέτρο της απόστασης. Σε δύο διαστάσεις, εκφράζεται από το γνωστό Πυθαγόρειο θεώρημα, δηλαδή το μήκος της υποτείνουσας ενός τριγώνου,

και σε περισσότερες διαστάσεις αυτή η σύλληψη είναι γνωστή ως η τετραγωνική ρίζα ενός αθροίσματος τετραγώνων.

Έστω ότι αντιμετωπίζεται ένα τυχαίο πρόβλημα, όπου δεν υπάρχει καμία συστηματική σχέση μεταξύ των σημείων στο χώρο των παραμέτρων και των σημείων στην επιφάνεια καταλληλότητας, οπότε η απόσταση δύο σημείων δεν αποτελεί χρήσιμη πληροφορία για την εύρεση ενός βέλτιστου. Στην πραγματικότητα, δεν θα υπήρχε κανένας συντομότερος δρόμος για την έρευνα ενός βέλτιστου σε ένα τυχαίο τοπίο, καθότι οποιαδήποτε υπόθεση θα ήταν τόσο καλή όσο κάθε άλλη. Στο άλλο άκρο, εάν αντιμετωπιζόταν ένα πρόβλημα με ομαλό τοπίο καταλληλότητας και ένα ενιαίο ολικό βέλτιστο, εύλογα μπορεί να υποθεθεί ότι τα σημεία που είναι κοντά το ένα στο άλλο θα έχουν χωρικά συσχετισμένες τιμές καταλληλότητας. Η μετακίνηση προς μια κατεύθυνση που βελτίωσε την τιμή καταλληλότητας στο προηγούμενο βήμα κατά πάσα πιθανότητα θα τη βελτιώσει και στο τρέχον βήμα.

Αυτή η παρατήρηση μπορεί να φαίνεται αρχικά τετριμμένη, αλλά δείχνει μια σημαντική ιδιότητα των πολυδιάστατων τοπίων συναρτήσεων καταλληλότητας, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί από ένα αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Αυτή η ιδιότητα καλείται μερικές φορές «*συσχετισμός τοπίων*»: η απόσταση μεταξύ δύο σημείων σε ένα πολυδιάστατο χώρο έρευνας φαίνεται να συσχετίζεται με τη διαφορά στις τιμές καταλληλότητάς τους [14]. Αυτή η ιδιότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά την αναζήτηση ενός βέλτιστου σημείου σε ένα συνεχές χώρο όπου το τοπίο δεν είναι τυχαίο. Εάν ένας αλγόριθμος μπορεί να βρει ένα «καλό» σημείο, π.χ. ένα σημείο με καλή τιμή καταλληλότητας, κατόπιν έχει μια ένδειξη για την ύπαρξη ενός ακόμα καλύτερου σημείου στην γειτονιά του. Συνήθως ένα αλγόριθμος είναι αποδοτικό να ψάξει στην περιοχή για άλλα καλά σημεία, προκειμένου να εξασφαλίζεται η αποτελεσματικότητά του.

2.3 Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση

Σε πολλές πρακτικές εφαρμογές, είναι συνήθως επιθυμητή η στάθμιση της σχετικής σημασίας περισσότερων του ενός παραγόντων, καθιστώντας απαραίτητη τη χρήση τεχνικών *πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης*. Έστω ότι οι προτεινόμενες λύσεις για ένα τέτοιο πρόβλημα περιλαμβάνουν στην περιγραφή τους διαφορετικούς παράγοντες, οι οποίοι αποτιμώνται χρησιμοποιώντας κατά αντιστοιχία N αντικειμενικές συναρτήσεις $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_N(\mathbf{x})]^T$, όπου το διάνυσμα \mathbf{x} αναπαριστά τις σχεδιαστικές παραμέτρους κάθε λύσης. Επιπρόσθετα δύναται να ορισθεί ένα σύνολο περιορισμών κωδικοποιημένων ως σχέσεις ανισοτήτων, ολοκληρώνοντας τη γενικευμένη διατύπωση ενός πολυκριτηριακού προβλήματος βελτιστοποίησης:

$$\begin{aligned} & \text{Βελτιστοποίηση της ανυσματικής συνάρτησης } \mathbf{f} : S \rightarrow \mathfrak{R}^N \text{ με } S \in \mathfrak{R}^{N_d} \\ & \text{όπου } N_d \text{ η διάσταση του χώρου έρευνας } S \text{ και } N \text{ της συνάρτησης } \mathbf{f} \quad (5) \\ & \text{υποκειμένη σε περιορισμούς } g_i(\mathbf{x}) \leq 0, \quad i = 1, \dots, m \end{aligned}$$

όπου S είναι το πεδίο ορισμού των σχεδιαστικών παραμέτρων και $g_i(\mathbf{x})$ οι ισότητες ή/και ανισότητες που εκφράζουν τους περιορισμούς.

Τα περισσότερα πραγματικά προβλήματα αφορούν την ταυτόχρονη βελτιστοποίηση αλληλοεξαρτώμενων και συχνά μερικώς αντικρουόμενων στόχων, συνεπώς η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση οδηγεί στο προσδιορισμό ενός συνόλου λύσεων που ικανοποιούν σε διαφορετικό βαθμό τους καθορισμένους στόχους. Συνεπώς, η λύση στο άνωθεν πρόβλημα βελτιστοποίησης δεν είναι μια και μοναδική αλλά λαμβάνεται με τη μορφή ενός συνόλου σημείων *Pareto* [15]. Ένα σημείο μ^* στο χώρο των λύσεων θεωρείται ως *Pareto βέλτιστο* εάν δεν υπάρχει άλλη εφικτή λύση μ έτσι ώστε $\mu_i \leq \mu_i^*$ για όλα τα κριτήρια $i \in \{1, 2, \dots, M\}$ και $\mu_i < \mu_i^*$ για ένα τουλάχιστον κριτήριο.

Αποτελεί ευθύνη του χρήστη των πολυκριτηριακών τεχνικών βελτιστοποίησης να αναλύσει τα ληφθέντα αποτελέσματα και να επιλέξει εκείνα τα οποία συμβιβάζουν με συγκεκριμένο τρόπο τις επιδόσεις τους για διαφορετικά κριτήρια. Βεβαίως η αποτίμηση των κριτηρίων με κοινή μονάδα μέτρησης στη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων δεν είναι δυνατή, δυσκολεύοντας τον καθορισμό ενιαίας στρατηγικής για την κλιμάκωση και σύγκριση των επιμέρους αποτιμήσεων [16].

Μια συχνά χρησιμοποιούμενη εναλλακτική μέθοδος είναι να ληφθεί το ζυγισμένο άθροισμα των συναρτήσεων καταλληλότητας έτσι ώστε το πολυκριτηριακό πρόβλημα να μετατραπεί σε πρόβλημα βελτιστοποίησης ενός και μοναδικού στόχου f :

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^K w_i f_i(\mathbf{x}) \quad (6)$$

Ο προσδιορισμός της στάθμησης των επιμέρους παραγόντων απαιτεί τη κατανόηση της σχετικής τους σημαντικότητας. Επίσης η εφαρμογή αυτής της μεθόδου με επιτυχία απαιτεί την εκτεταμένη προσαρμογή των παραγόντων σταθμίσεως w_i , ειδικότερα όσον αφορά προβλήματα όπου οι στόχοι δεν συσχετίζονται εμφανώς και δεν αποτιμώνται με τον ίδιο τρόπο.

2.4 Κλασικοί Αλγόριθμοι Βελτιστοποίησης

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται οι κλασικοί επαναληπτικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης που βασίζονται στην πληροφορία της παραγώγου για να εκτιμήσουν τη θέση των τοπικών ακρότατων. Η πληροφορία παραγώγου είναι ένα είδος πολυδιάστατης κλίσης της επιφάνειας της αντικειμενικής συνάρτησης η οποία αντιστοιχίζει ένα επιλεγμένο σύνολο παραμέτρων (υποψήφια λύση) σε βαθμωτές τιμές καταλληλότητας. Στη συνέχεια προσδιορίζονται τα ειδικά χαρακτηριστικά των μεθόδων αυτών και εκτιμώνται οι δυνατότητες τους ως προς την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης που παρουσιάζουν ιδιόμορφες επιφάνειες καταλληλότητας.

2.4.1 Μέθοδος κατάβασης κλίσεων

Η μέθοδος κατάβασης κλίσεων (gradient descent) [17] είναι ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης ο οποίος προσεγγίζει ένα τοπικό ελάχιστο μιας συνάρτησης πραγματοποιώντας βήματα ανάλογα με την αρνητική τιμή της κλίσης της στο εξεταζόμενο σημείο. Η μέθοδος κατάβασης κλίσεων είναι γνωστή και ως μέθοδος της πιο απότομης κατάβασης (steepest descent).

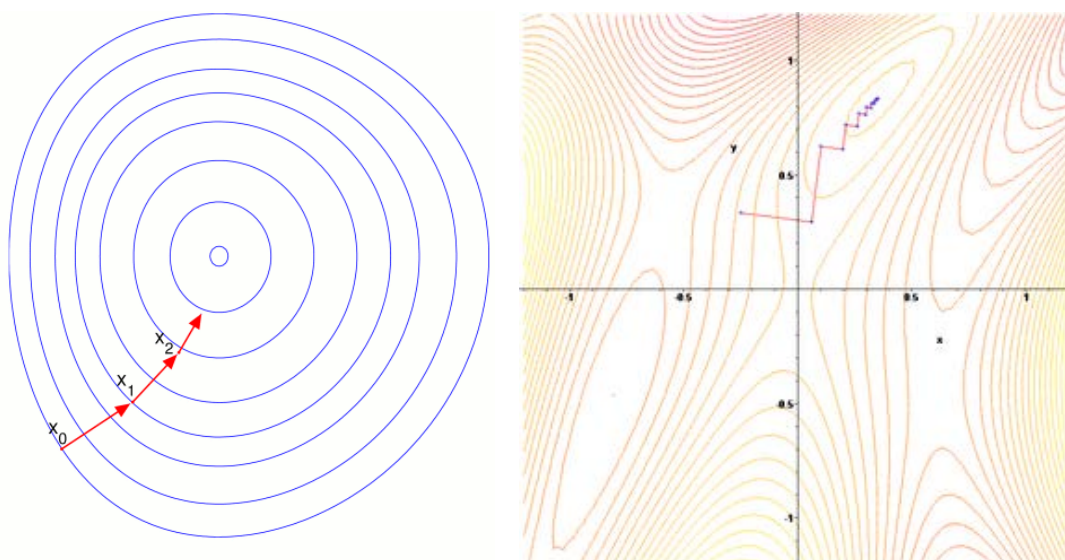
Η περιγραφή που ακολουθεί βασίζεται στη δυαδική της μέθοδο ανάβασης κλίσεων για τον προσδιορισμό των μεγίστων. Αυτή η μέθοδος βασίζεται στην παρατήρηση ότι αν μια πραγματική συνάρτηση $f(\mathbf{x})$ ορίζεται και είναι διαφορίσιμη στη γειτονιά ενός σημείου \mathbf{a} , τότε η $f(\mathbf{x})$ αυξάνει πιο γρήγορα εάν ακολουθηθεί η πορεία από το σημείο \mathbf{a} προς την κατεύθυνση της κλίσης της f στο σημείο \mathbf{a} , $\nabla f(\mathbf{x})$. Συνεπάγεται ότι αν

$$\mathbf{b} = \mathbf{a} + \gamma \cdot \nabla f(\mathbf{x}) \quad (7)$$

για γ αρκούντως μικρό, τότε $f(\mathbf{a}) < f(\mathbf{b})$. Αυτή η ιδιότητα επιτρέπει τον ορισμό ενός σημείου εκκίνησης $f(\mathbf{x}_0)$ και κατάλληλης σειράς σημείων $\mathbf{x}_0, \mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots$ έτσι ώστε να ικανοποιείται η επαναληπτική σχέση

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{x}_n + \gamma_n \cdot \nabla f(\mathbf{x}_n), \quad n \geq 0 \quad (8)$$

Συνεπακόλουθα ισχύει ότι $f(\mathbf{x}_0) \leq f(\mathbf{x}_1) \leq f(\mathbf{x}_2) \leq \dots$, οπότε η σειρά (\mathbf{x}_n) φαίνεται να συγκλίνει στο επιθυμητό τοπικό μέγιστο. Σημειώνεται ότι είναι δυνατή η μεταβολή της τιμής του γ σε κάθε επανάληψη. Η περιγραφόμενη διαδικασία μπορεί να εξηγηθεί καλύτερα με τη βοήθεια της Εικόνας 2.



Εικόνα 2. Γραφική εξέλιξη της μεθόδου κατάβασης κλίσεων.

Στο παρόν παράδειγμα η f είναι ορισμένη στο επίπεδο και η γραφική της παράσταση έχει τη μορφή ενός λόφου. Οι ισοδυναμικές καμπύλες φαίνονται με μπλε και αναπαριστούν τις περιοχές της συνάρτησης f που παρουσιάζουν ταυτόσημες αριθμητικές τιμές. Το κόκκινο βέλος υποδεικνύει την κατεύθυνση της παραγώγου και είναι πάντα κάθετο στις ισοδυναμικές γραμμές. Καθίσταται φανερό ότι η διαδικασία ανάβασης κλίσεων οδηγεί επαναληπτικά στην κορυφή του λόφου (τοπικό μέγιστο).

2.4.2 Μέθοδος συζυγών κλίσεων

Η μέθοδος των συζυγών κλίσεων (conjugant gradient) [18] είναι ένας αλγόριθμος για την αριθμητική επίλυση συστημάτων γραμμικών εξισώσεων ιδιαίζουσας μορφής, δηλαδή εκείνων των οποίων η μήτρα είναι συμμετρική και θετικά ορισμένη. Η μέθοδος συζυγών κλίσεων είναι μια επαναληπτική μέθοδος και μπορεί να εφαρμοστεί στα αραιά συστήματα

που είναι πάρα πολύ μεγάλα για να αντιμετωπιστούν με τις άμεσες μεθόδους επίλυσης όπως η αποσύνθεση Cholesky. Τέτοια συστήματα προκύπτουν τακτικά κατά την αριθμητική επίλυση των μερικών διαφορικών εξισώσεων. Η μέθοδος συζυγών κλίσεων μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης που δεν υπόκεινται σε περιορισμούς.

Έστω ότι πρέπει να επιλυθεί το ακόλουθο σύστημα γραμμικών εξισώσεων:

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad (9)$$

όπου ο $N \times N$ πίνακας A είναι συμμετρικός (π.χ. $\mathbf{A}^T = \mathbf{A}$) και θετικά ορισμένος ($\mathbf{x}^T \mathbf{Ax} > 0$ για όλα τα μη μηδενικά διανύσματα $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$) και πραγματικός. Η λύση του συστήματος αναπαρίσταται με το σύμβολο \mathbf{x}^* .

2.4.2.1 Απευθείας εφαρμογή της μεθόδου συζυγών κλίσεων

Γενικά δύο μη μηδενικά διανύσματα \mathbf{u} και \mathbf{v} ορίζονται ως συζυγή (σε σχέση με τον πίνακα \mathbf{A}) εάν $\mathbf{u}^T \mathbf{Au} = 0$. Εφόσον ο πίνακας \mathbf{A} είναι θετικά ορισμένος, η αριστερή μεριά της εξίσωσης ορίζει ένα εσωτερικό γινόμενο της μορφής $\langle \mathbf{u}, \mathbf{v} \rangle_{\mathbf{A}} = \mathbf{u}^T \mathbf{Av}$. Επομένως δύο διανύσματα είναι συζυγή εφόσον είναι ορθογώνια ως προς το αναφερόμενο εσωτερικό γινόμενο.

Έστω ότι $\{\mathbf{p}_k\}$ είναι μια αλληλουχία από αμοιβαία συζυγείς διευθύνσεις. Σε αυτή την περίπτωση τα \mathbf{p}_k διανύσματα διαμορφώνουν μια βάση του χώρου \mathbb{R}^n , έτσι ώστε να μπορεί να επεκταθεί η λύση \mathbf{x}^* του συστήματος $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$ σε αυτή τη βάση ως $\mathbf{x}^* = a_1 \mathbf{p}_1 + a_2 \mathbf{p}_2 + \dots + a_n \mathbf{p}_n$. Σε αυτή τη περίπτωση οι συντελεστές δίνονται από τη σχέση:

$$a_k = \frac{\mathbf{p}_k^T \mathbf{b}}{\mathbf{p}_k^T \mathbf{A} \mathbf{p}_k} \quad (10)$$

Σύμφωνα με τα προηγούμενα μπορεί να ευρεθεί μια σειρά N συζυγών διευθύνσεων και στη συνέχεια να υπολογιστούν απευθείας οι συντελεστές a_k προκειμένου να επιλυθεί το σύστημα εξισώσεων $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$.

2.4.2.2 Επαναληπτική εφαρμογή της μεθόδου συζυγών κλίσεων

Εάν επιλεγθούν προσεκτικά τα συζυγή διανύσματα \mathbf{p}_k τότε δεν είναι απαραίτητο να αποτελούν συνολικά μια καλή προσέγγιση της λύσεως \mathbf{x}^* , επομένως σε αυτή τη περίπτωση η μέθοδος συζυγών κλίσεων μπορεί να αντιμετωπιστεί ως επαναληπτική. Αυτή η θεώρηση επιτρέπει την επίλυση συστημάτων όπου η διάσταση τους N είναι τόσο μεγάλη ώστε εφαρμογή της απευθείας μεθόδου να απαιτεί απαγορευτικό υπολογιστικό χρόνο για την επίλυση του.

Η αρχική υπόθεση για την τιμή του διανύσματος λύσης \mathbf{x}^* συμβολίζεται με \mathbf{x}_0 . Μπορεί να υποτεθεί χωρίς απώλεια της γενικότητας της μεθόδου ότι $\mathbf{x}_0 = 0$ (αλλιώς μπορεί να θεωρηθεί ότι $\mathbf{Az} = \mathbf{b} - \mathbf{Ax}_0$). Πρέπει να σημειωθεί ότι η λύση \mathbf{x}^* είναι και το μοναδικό ολικό ελάχιστο της τετραγωνικής συνάρτησης

$$f(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{Ax} - \mathbf{b}^T \mathbf{x}, \quad \forall \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n \quad (11)$$

Αυτή η έκφραση υπονοεί ότι το 1^ο διάνυσμα βάσης \mathbf{p}_1 θα είναι ίσο με την παράγωγο της συνάρτησης f στο σημείο $\mathbf{x}=\mathbf{x}_0$, η οποία ισούται με $-\mathbf{b}$. Τα υπόλοιπα διανύσματα της ορισμένης βάσης θα είναι όλα συζυγή στη παράγωγο, γεγονός από το οποίο προέρχεται και το όνομα συζυγών κλίσεων για τη μέθοδο.

Έστω ότι $\mathbf{r}_k = \mathbf{b} - \mathbf{A}\mathbf{x}_k$ είναι το υπόλοιπο, κατά το k -οστό βήμα. Πρέπει να σημειωθεί ότι το \mathbf{r}_k είναι η κλίση της f στο σημείο $\mathbf{x} = \mathbf{x}_k$, οπότε η μέθοδος θα μετακινηθεί προς τη διεύθυνση \mathbf{r}_k . Πρέπει να τονιστεί ξανά ότι οι διευθύνσεις των \mathbf{p}_1 είναι συζυγείς μεταξύ τους, έτσι ώστε να ακολουθείται κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου η κλίση \mathbf{r}_k η οποία υπόκειται στον περιορισμό της κλίσης. Οι παραπάνω παρατηρήσεις οδηγούν στην επαναληπτική έκφραση:

$$\mathbf{p}_{k+1} = \mathbf{r}_k - \frac{\mathbf{p}_k^T \mathbf{A} \mathbf{r}_k}{\mathbf{p}_k^T \mathbf{A} \mathbf{p}_k} \mathbf{p}_k \quad (12)$$

Η παραπάνω έκφραση επιτρέπει τη διατύπωση του αλγορίθμου συζυγών κλίσεων σε επαναληπτική μορφή, ο οποίος τερματίζει εφόσον το υπόλοιπο \mathbf{r}_k λάβει μικρότερη από την ορισμένη από το χρήστη τιμή (κριτήριο σύγκλισης).

2.4.3 Προβλήματα σύγκλισης

Η σύγκριση της τιμής καταλληλότητας δύο ή περισσότερων σημείων καθώς και η εξέταση του πρόσημου της διαφοράς τους μας δίνουν πληροφορίες για την παράγωγο και ταυτόχρονα υποδεικνύει μια πιθανή κατεύθυνση προς ένα βέλτιστο σημείο. Αυτή η πληροφορία αξιοποιείται για να γίνουν εικασίες ως προς το επόμενο σημείο που θα εξετάσει ο αλγόριθμος. Η πληροφορία παραγώγου είναι ένα είδος *πολυδιάστατης κλίσης*. Ένα πρόγραμμα υπολογιστών που μπορεί να ανιχνεύσει την παράγωγο μιας συνάρτησης καταλληλότητας είναι σε θέση να κινηθεί σε κατεύθυνση που οδηγεί προς ένα σημείο ακροτάτου. Αυτή η γνώση μπορεί να είναι χρήσιμη εάν η παράγωγος δείχνει την κλίση μιας αιχμής που είναι αρκούντως καλή, εν τούτοις σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να είναι μόνο η κλίση ενός «χαμηλού λόφου» της επιφάνειας καταλληλότητας. Κατά συνέπεια ένας αλγόριθμος που στηρίζεται μόνο στις πληροφορίες παραγώγου μπορεί να εγκλωβιστεί σε σημεία του χώρου έρευνας γύρω από μια μέτρια λύση (τοπικό ακρότατο).

Επιπλέον είναι φανερό ότι δεν είναι δυνατόν σε κάθε περίπτωση να είναι (αριθμητικά) υπολογίσιμη η παράγωγος σε κάθε σημείο του χώρου έρευνας, π.χ. λόγω παρουσιαζομένων ασυνεχειών. Συνοπτικά οι αδυναμίες που παρουσιάζουν οι μέθοδοι βελτιστοποίησης που στηρίζονται στον υπολογισμό της παραγώγου:

- Η σύγκλιση τους εξαρτάται από την επιλογή κατάλληλου αρχικού σημείου.
- Η μεταβολή της αλγοριθμικής παραμέτρου του βήματος μπορεί να επιδράσει αρνητικά στην ταχύτητα σύγκλισης και στην ακρίβεια τους.
- Δύναται να εγκλωβιστούν σε σημεία γύρω από μια μέτρια (μη βέλτιστη) λύση. Είναι εγγυημένες να συγκλίνουν σε τοπικά και όχι ολικά ακρότατα.
- Δεν είναι δυνατόν σε όλες τις περιπτώσεις να είναι (αριθμητικά) υπολογίσιμη η παράγωγος σε κάθε σημείο του χώρου έρευνας, π.χ. λόγω των ασυνεχειών.

2.5 Στοχαστικοί Αλγόριθμοι Βελτιστοποίησης

Λαμβάνοντας υπόψη τις δυσκολίες που μπορεί να προκύψουν σε πολλά πραγματικά προβλήματα και την έμφυτη αβεβαιότητα στις πληροφορίες που μπορούν να είναι διαθέσιμες για την εκτέλεση της διαδικασίας της βελτιστοποίησης, οι μέθοδοι *στοχαστικής βελτιστοποίησης* διαδραματίζουν ολοένα αυξανόμενο ρόλο.

Μια μέθοδος βελτιστοποίησης χαρακτηρίζεται ως *στοχαστική* όταν ικανοποιεί τουλάχιστον μία από τις ακόλουθες προϋποθέσεις [19]:

- Υπάρχει *τυχαίος θόρυβος* στις μετρήσεις του κριτηρίου προς βελτιστοποίηση και / ή στις συσχετιζόμενες πληροφορίες (όπως για παράδειγμα στο διάνυσμα κλίσης του κριτηρίου για ένα «ομαλό πρόβλημα»)
- Πραγματοποιείται μια *τυχαία επιλογή* στην κατεύθυνση έρευνας καθώς ο αλγόριθμος επαναλαμβάνεται για να προσεγγίσει μια λύση

Οι παραπάνω δύο ιδιότητες έρχονται σε αντίθεση με τους κλασικούς ντετερμινιστικούς ευρετικούς αλγορίθμους, όπου ισχύει η υπόθεση ότι υπάρχουν διαθέσιμες οι πλήρεις πληροφορίες για την αντικειμενική συνάρτηση (και για την κλίση της, όταν αυτό είναι απαραίτητο) και ότι επιπρόσθετα αυτή η πληροφορία χρησιμοποιείται για τον ντετερμινιστικό προσδιορισμό μιας κατεύθυνσης έρευνας σε κάθε βήμα του αλγορίθμου. Σε πολλά προβλήματα βελτιστοποίησης που προκύπτουν στην πράξη, αυτή η πληροφορία δεν είναι διαθέσιμη, γεγονός που υποδεικνύει ότι η χρήση ντετερμινιστικών αλγορίθμων δεν αποτελεί την κατάλληλη επιλογή.

Σύμφωνα με την δεύτερη ιδιότητα μπορεί μερικές φορές να ενδείκνυται η *εισαγωγή τυχειότητας* κατά τη διάρκεια της έρευνας, ως μέσου που επιτρέπει την επιτάχυνση της σύγκλισης και καθιστά τον αλγόριθμο λιγότερο ευαίσθητο στα λάθη μοντελοποίησης. Επιπρόσθετα η υπεισέρχουσα τυχειότητα μπορεί να προσδώσει στον αλγόριθμο την κατάλληλη «ώθηση» για να απομακρυνθεί από τοπικά βέλτιστες λύσεις, όταν αποσκοπεί στην εύρεση του ολικού βέλτιστου σημείου.

Οι στοχαστικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης χρησιμοποιούνται για να βρουν λύσεις κοντά στις βέλτιστες σε δύσκολα NP-πλήρη προβλήματα (Non-deterministic Polynomial time – NP complete) μέσα σε πολυωνυμικό (και όχι εκθετικό) χρόνο αναζήτησης. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί υποθέτοντας ότι οι βέλτιστες λύσεις είναι η μια κοντά στην άλλη στο διάστημα αναζήτησης. Αυτή η υπόθεση ισχύει για τα περισσότερα πραγματικά προβλήματα ολικής βελτιστοποίησης [19]. Δεδομένου ότι ο στόχος ενός στοχαστικού αλγορίθμου είναι να βρεθεί μια κοντινή στη βέλτιστη λύση, οι στοχαστικοί αλγόριθμοι μπορεί να αποτύχουν να βρουν την ολικά βέλτιστη λύση. Αξίζει βέβαια να σημειωθεί ότι ενώ ένας ακριβής αλγόριθμος παράγει μια λύση μόνο αφού έχουν ολοκληρωθεί οι επαναλήψεις του, ένας στοχαστικός αλγόριθμος μπορεί να τερματιστεί οποιαδήποτε στιγμή κατά τη διάρκεια της εκτέλεσής του και να αποδώσει την βέλτιστη λύση που έχει ευρεθεί μέχρι στιγμής.

Οι στοχαστικοί αλγόριθμοι αναζήτησης έχουν διάφορα πλεονεκτήματα έναντι άλλων αλγορίθμων:

- Οι στοχαστικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης είναι γενικά εύκολα εφαρμόσιμοι.
- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά σε ένα περιβάλλον πολυεπεξεργαστών.
- Δεν απαιτούν η αντικειμενική συνάρτηση να είναι συνεχής.
- Δύναται γενικά να ανακαλύψουν τις βέλτιστες ή κοντινές στις βέλτιστες λύσεις.
- Είναι κατάλληλοι για διακριτά και συνδυαστικά προβλήματα.

Τρεις σημαντικοί στοχαστικοί αλγόριθμοι είναι ο αλγόριθμος αναρρίχησης λόφου (Hill-Climbing) [20], ο αλγόριθμος προσομοιωμένης απόπτωσης (simulated annealing) [21] και ο αλγόριθμος έρευνας με ταμπού (tabu search) [22]:

- *Στον αλγόριθμο αναρρίχησης λόφου*, μια πιθανή λύση επιλέγεται τυχαία. Ο αλγόριθμος ψάχνει έπειτα τη γειτονιά της τρέχουσας λύσης για μια καλύτερη λύση. Εάν μια καλύτερη λύση ευρεθεί τίθεται ως νέα πιθανή λύση. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου δεν μπορεί να επιτευχθεί περαιτέρω βελτίωση.
- *Ο αλγόριθμος προσομοιωμένης απόπτωσης* είναι παρόμοιος με τον αλγόριθμο αναρρίχησης λόφου υπό την έννοια ότι μια πιθανή λύση επίσης επιλέγεται τυχαία. Μια μικρή τιμή προστίθεται έπειτα στην τρέχουσα λύση για να παραγάγει μια νέα λύση. Εάν η νέα λύση είναι καλύτερη από την αρχική ο αλγόριθμος κινείται προς τη νέα θέση. Διαφορετικά, η λύση θα κινηθεί προς μια νέα θέση με ολοένα και ελαττωμένη πιθανότητα καθώς εξελίσσεται η εκτέλεση του αλγορίθμου.
- *Η αναζήτηση ταμπού* είναι ένας ευρετικός αλγόριθμος αναζήτησης όπου μια μνήμη καταλόγων ταμπού των προηγουμένως επισκεπτόμενων λύσεων διατηρείται, προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Ο κατάλογος ταμπού χρησιμοποιείται για «να καθοδηγεί τη μετακίνηση από μια λύση στην επόμενη αποφεύγοντας την ανακύκλωση των εξεταζόμενων λύσεων», συνεπώς δύναται να αποφύγει τη παγίδευση σε ένα τοπικό βέλτιστο. Η αναζήτηση ταμπού αρχίζει με μια τυχαία επιλεγμένη λύση. Ένα σύνολο λύσεων δοκιμής παράγεται μέσω των κινήσεων από τη θέση της τρέχουσας λύσης. Η καλύτερη λύση δοκιμής τίθεται ως τρέχουσα λύση εάν δεν είναι στον κατάλογο ταμπού, ή εάν είναι ήδη στον κατάλογο ταμπού, εφόσον ικανοποιεί ένα κριτήριο «έμπνευσης» (aspiration criterion). Μια λύση δοκιμής ικανοποιεί ένα κριτήριο «έμπνευσης», εάν είναι στον κατάλογο ταμπού, και είναι η καλύτερη λύση που βρίσκεται μέχρι τώρα. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου ικανοποιηθεί ένα κριτήριο τερματισμού.

2.6 Εξελικτικοί Αλγόριθμοι

Οι *εξελικτικοί αλγόριθμοι* (Evolutionary Algorithms - EAs) είναι γενικής χρήσης στοχαστικοί μέθοδοι αναζήτησης που μιμούνται τους μηχανισμούς της φυσικής επιλογής και εξέλιξης που απαντώνται στο βιολογικό κόσμο. Οι EA διαφέρουν από άλλες μεθόδους βελτιστοποίησης, όπως η μέθοδος αναρρίχησης λόφων και η προσομοιωμένη απόπτωση,

επειδή διατηρούν ένα πληθυσμό αντιπροσωπευτικό των πιθανών (ή υποψήφιων) λύσεων για ένα πρόβλημα, και όχι μια και μόνο λύση [23].

Γενικά, όλοι οι εξελικτικοί αλγόριθμοι λειτουργούν ως εξής: ένας πληθυσμός ατόμων αρχικοποιείται όπου κάθε άτομο αντιπροσωπεύει μια πιθανή λύση στο πρόβλημα. Η ποιότητα κάθε λύσης αξιολογείται χρησιμοποιώντας μια κατάλληλα ορισμένη αντικειμενική συνάρτηση. Μια διαδικασία επιλογής εφαρμόζεται κατά τη διάρκεια κάθε επανάληψης του εξελικτικού αλγόριθμου προκειμένου να διαμορφωθεί ένας νέος πληθυσμός. Η διαδικασία επιλογής είναι προκατειλημμένη υπέρ των καταλληλότερων ατόμων για να εξασφαλισθεί ότι θα αποτελούν μέρος του νέου πληθυσμού. Τα άτομα μεταλλάσσονται χρησιμοποιώντας έναν μοναδιαίο μετασχηματισμό (μετάλλαξη) και έναν υψηλότερου επιπέδου μετασχηματισμό (διασταύρωση). Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να συγκλίνει ο αλγόριθμος. Η καλύτερη λύση που αναμένεται να βρεθεί είναι μια κοντινή στη βέλτιστη λύση. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζεται ψευδοκώδικας χαρακτηριστικός της λειτουργίας των εξελικτικών αλγορίθμων.

Αρχικοποίηση του πληθυσμού
Υπολογισμός της τιμής καταλληλότητας για κάθε άτομο του πληθυσμού
Επανάληψη
Διαδικασία επιλογής προκειμένου να σχηματιστεί ένας νέος πληθυσμός
Αλλαγή των ατόμων του πληθυσμού χρησιμοποιώντας τους εξελικτικούς τελεστές
Υπολογισμός της τιμής καταλληλότητας για κάθε άτομο του πληθυσμού
Μέχρι να ικανοποιηθεί κάποιο κριτήριο σύγκλισης

Πίνακας 1. Ψευδοκώδικας για τους εξελικτικούς αλγόριθμους

Οι μοναδιαίοι και υψηλότερου επιπέδου μετασχηματισμοί καλούνται εξελικτικοί τελεστές [24]. Οι δύο πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι εξελικτικοί τελεστές είναι:

- Η *μετάλλαξη (mutation)* τροποποιεί ένα άτομο εισάγοντας μια μικρή τυχαία αλλαγή, αναστρέφοντας τη τιμή ενός δυαδικού ψηφίου στην περίπτωση των δυαδικών αναπαραστάσεων, είτε προσθέτοντας ένα μικρό αριθμό επιλεγμένων τιμών στην περίπτωση των αναπαραστάσεων κινητής υποδιαστολής. Διαμέσου της μετάλλαξης εισάγεται ποικιλομορφία στον πληθυσμό προκειμένου να αποφευχθεί η παγίδευση του αλγορίθμου σε ένα τοπικό βέλτιστο.
- Η *διασταύρωση (ή επανασυνδυασμός – crossover)*, όπου τα μέρη δύο (ή περισσότερων) ατόμων συνδυάζονται για να παραγάγουν τα νέα μέλη του πληθυσμού. Ο κύριος στόχος της διασταύρωσης είναι να ερευνηθούν νέες περιοχές στο χώρο έρευνας, βελτιώνοντας έτσι την συμπεριφορά σύγκλισης του αλγορίθμου.

Οι ερευνητές ανά τον κόσμο αναζητούσαν μέσα από την μελέτη των εξελικτικών συστημάτων, τον τρόπο με τον οποίο η διαδικασία της εξέλιξης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν εργαλείο βελτιστοποίησης διάφορων προβλημάτων. Τις βάσεις για την ανάπτυξη των εξελικτικών τεχνικών βελτιστοποίησης έθεσαν την δεκαετία του '60 ο Rechenberg με την ανάπτυξη μίας ομάδας τεχνικών βελτιστοποίησης με το όνομα στρατηγικές εξέλιξης, ο Fogel

με την θεμελίωση του εξελικτικού και γενετικού προγραμματισμού και τέλος ο John Holland με τις μελέτες που πραγματοποίησε σε εξελικτικές μεθόδους βελτιστοποίησης, σηματοδοτώντας την έναρξη της μελέτης των γενετικών αλγόριθμων. Συνοψίζοντας οι σημαντικότερες κατηγορίες των εξελικτικών τεχνικών είναι:

- *Ο Γενετικός Προγραμματισμός (GP)* [25] που χρησιμοποιείται στην αναζήτηση του καταλληλότερου προγράμματος για την επίλυση ενός συγκεκριμένου προβλήματος. Τα άτομα αναπαρίστανται ως δέντρα και ο αλγόριθμος εστιάζει στην αξιολόγηση του γονότυπου.
- *Ο Εξελικτικός Προγραμματισμός (EP)* [26] που χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο στη βελτιστοποίηση συνεχών συναρτήσεων πραγματικών τιμών. Ο EP χρησιμοποιεί τους τελεστές επιλογής και μετάλλαξης αλλά όχι και τον τελεστή διασταύρωσης.
- *Οι Εξελικτικές Στρατηγικές (ES)* [27] που χρησιμοποιούνται επίσης στη βελτιστοποίηση συνεχών συναρτήσεων πραγματικών τιμών. Οι ES χρησιμοποιούν τους χειριστές επιλογής, μετάλλαξης και διασταύρωσης. Οι ES βελτιστοποιούν παράλληλα με τον πληθυσμό και τη ίδια τη διαδικασία εύρεσης, μέσω της εξέλιξης των παραμέτρων που ορίζουν την εφαρμοζόμενη στρατηγική. Ως εκ τούτου, οι ES βασίζονται στην διαδικασία εξέλιξης της εξέλιξης.
- *Γενετικοί αλγόριθμοι (GA)* [28] οι οποίοι χρησιμοποιούνται για να βελτιστοποιήσουν γενικευμένα συνδυαστικά προβλήματα και όχι μόνο. Οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι αλγόριθμοι εξελικτικών τεχνικών και έχουν χρησιμοποιηθεί για λόγους σύγκρισης σε αυτήν την διατριβή. Εστιάζουν στη γενετική εξέλιξη που χρησιμοποιεί και τη μετάλλαξη και τη διασταύρωση γονιδίων, αν και στην αρχική τους υλοποίηση χρησιμοποιούσαν μόνο τη διασταύρωση.

Λόγω της βασισμένης στον πληθυσμό φύσης του, οι εξελικτικοί αλγόριθμοι μπορούν να αποφύγουν τη παγίδευση σε ένα τοπικό βέλτιστο και συνεπώς συχνά βρίσκουν τις ολικά βέλτιστες λύσεις. Κατά συνέπεια, μπορούν να αντιμετωπισθούν ως ολικοί (global) αλγόριθμοι βελτιστοποίησης. Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι έχουν εφαρμοστεί επιτυχώς σε μια ευρεία ποικιλία προβλημάτων βελτιστοποίησης, όπως για παράδειγμα την επεξεργασία εικόνας, αναγνώριση προτύπων, σχεδιασμός, προβλήματα εφαρμοσμένης μηχανικής, σχεδίαση ηλεκτρομαγνητικών διατάξεων κτλ.

2.7 Γενετικοί Αλγόριθμοι

Ο David E. Goldberg συνέχισε το έργο του δασκάλου του John Holland πάνω στους εξελικτικούς αλγορίθμους έρευνας, για να προτείνει μια νέα κλάση αλγορίθμων, βασισμένων στους μηχανισμούς της φυσικής επιλογής και της γενετικής, τους *Γενετικούς Αλγόριθμους* [28]. Οι γενετικοί αλγόριθμοι προσομοιώνουν βιολογικές εξελικτικές διεργασίες οι οποίες έχουν την αποδεδειγμένη ικανότητα να καθιστούν έναν οργανισμό πιο καλά προσαρμοσμένο στο περιβάλλον του. Όταν εφαρμόζονται για την εύρεση βέλτιστων λύσεων σε πολυδιάστατα προβλήματα, ορίζεται ένας αρχικός πληθυσμός αντιπροσωπευτικός ενός μικρού υποσυνόλου των δυνατών λύσεων, ο οποίος υποβάλλεται σε μια εξελικτική διαδικασία διάρκειας ικανού αριθμού γενεών, υποκείμενη στους κανόνες Ανάπτυξη Κατανεμημένης Πλατφόρμας Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων και Εφαρμογή σε Προβλήματα Σύνθεσης Στοιχειοκεραιών

της επιβίωσης των ισχυρότερων ατόμων και της τυχαίας μεταξύ τους ανταλλαγής πληροφορίας μέσω των διασταυρώσεων.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι, ήδη από τις αρχές της δεκαετία του '90, έχουν γίνει ιδιαίτερα δημοφιλείς στην επιστημονική κοινότητα, λόγω της εξαιρετικής ευρωστίας που παρουσιάζουν για μία πληθώρα πρακτικών εφαρμογών που εκτείνονται σε πολλούς τομείς ερευνητικής δραστηριότητας. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία στη μηχανική και στον κόσμο των επιχειρήσεων καθώς έχουν χρησιμοποιηθεί σε προβλήματα ομαδοποίησης (clustering), προγραμματισμού (scheduling), βελτιστοποίησης (optimization) κ.α.

2.7.1 Πληθυσμός και κωδικοποίηση των λύσεων

Ο πληθυσμός στους γενετικούς αλγόριθμους αποτελείται από μία σειρά ατόμων που αντιπροσωπεύουν πιθανές λύσεις στο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Στις αρχικές τους υλοποιήσεις οι γενετικοί αλγόριθμοι κωδικοποιούσαν τις υποψήφιες λύσεις δυαδικά, καθιστώντας την αναπαράσταση μεταβλητών διαφορετικού τύπου (πραγματικών, ακέραιων, λογικών) ευέλικτη. Έχει αποδειχθεί με στατιστικές μεθόδους και τη θεωρία σχημάτων¹ ότι οι γενετικοί αλγόριθμοι που βασίζονται στη δυαδική κωδικοποίηση συγκλίνουν σε βέλτιστες λύσεις [28]. Εναλλακτικά της δυαδικής κωδικοποίησης δύναται να χρησιμοποιηθεί η κωδικοποίηση Gray για συνεχείς μεταβλητές, προκειμένου να ελαχιστοποιείται η απόσταση Hamming μεταξύ ατόμων με παρόμοια χαρακτηριστικά. Επίσης, έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως από τους ερευνητές η κωδικοποίηση πραγματικών αριθμών, και για αρκετές κλάσεις προβλημάτων έχει αποδειχθεί ότι είναι πιο αποτελεσματική από τη δυαδική ή Gray κωδικοποίηση [29].

Χρησιμοποιώντας τους αναλογούντες όρους από τη βιολογία, η κωδικοποιημένη αναπαράσταση μίας παραμέτρου βελτιστοποίησης ονομάζεται *γονίδιο*, ενώ αντίστοιχα το *χρωμόσωμα* είναι το σύνολο των γονιδίων που αναπαριστούν τις παραμέτρους του προβλήματος βελτιστοποίησης. Τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα του ατόμου μπορούν να εμφανιστούν με διάφορες μορφές στο γονιδιώμα του και οι διαφορετικές καταστάσεις των αντιστοιχούντων γονιδίων αποκαλούνται *τιμές χαρακτηριστικού γνωρίσματος*. Στη βιολογία, η συνολική δομή του γονιδιώματος ενός ατόμου ονομάζεται *γονότυπος*, ενώ *φαινότυπος* είναι το σύνολο των «ορατών» χαρακτηριστικών του και της συμπεριφοράς του που καθορίζονται από τις κωδικοποιημένες γενετικές πληροφορίες. Συνεπώς, στο πλαίσιο εφαρμογής των γενετικών αλγορίθμων, ο γονότυπος αντιπροσωπεύει την επιλεγμένη κωδικοποίηση και θέση στο χρωμόσωμα των αντίστοιχων γονιδίων ενώ ο φαινότυπος είναι το αποκωδικοποιημένο περιεχόμενο ενός συγκεκριμένου χρωμοσώματος που χρησιμοποιείται κατά την αποτίμηση της καταλληλότητας του.

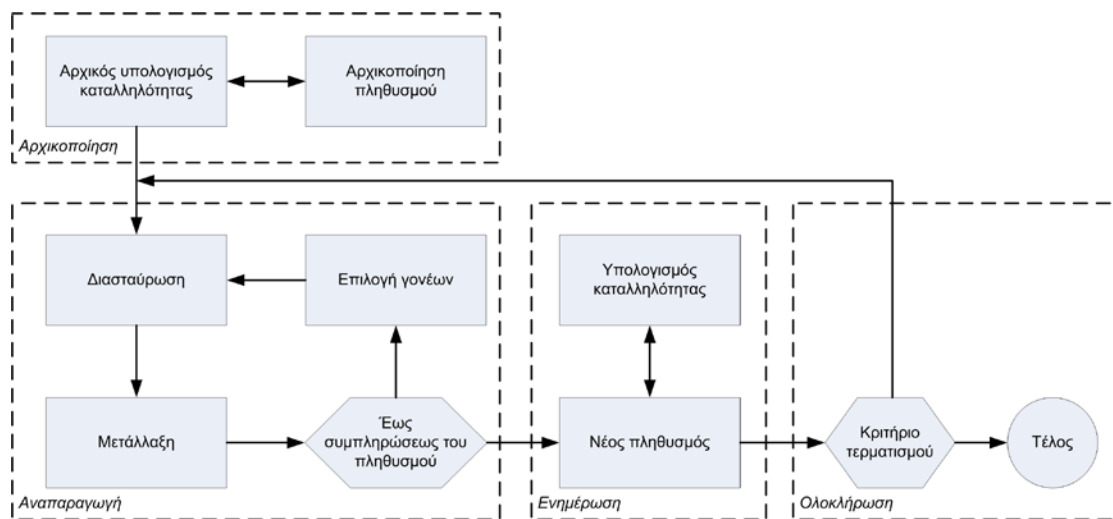
Ο πληθυσμός, ως μια «πισίνα» χρωμοσωμάτων, σε κάθε δεδομένη στιγμή αποτελεί μια «φωτογραφία» της προόδου του αλγορίθμου κατά τη διαδικασία ανευρέσεως μιας βέλτιστης λύσης. Οι επαναλήψεις του γενετικού αλγορίθμου ονομάζονται *γενεές* και έχουν τη μορφή αναπαραγωγής του πληθυσμού με την εφαρμογή των βασικών γενετικών

¹ Ως σχήμα αναφέρεται ένα υποσύνολο συμβολοσειρών (χρωμοσωμάτων) που παρουσιάζουν ομοιότητες σε ορισμένες θέσεις της κάθε συμβολοσειράς.

τελεστών της διασταύρωσης και της μετάλλαξης. Σύμφωνα με τους νόμους της γενετικής, τα καλύτερα χρωμοσώματα αναμένεται να αναπαράγουν το γενετικό τους υλικό περισσότερες φορές, πετυχαίνοντας έτσι μία γενικότερη “έλξη” του πληθυσμού προς το ολικό βέλτιστο. Τα ακριβή αλγοριθμικά βήματα που ακολουθούνται κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης περιγράφονται στην ακόλουθη ενότητα.

2.7.2 Αλγόριθμος

Όταν ο γενετικός αλγόριθμος εφαρμόζεται για την εύρεση βέλτιστων λύσεων σε πολυδιάστατα προβλήματα, ορίζεται ένας αρχικός πληθυσμός αντιπροσωπευτικός ενός μικρού υποσυνόλου των δυνατών λύσεων, ο οποίος υποβάλλεται σε εξελικτική διαδικασία διάρκειας ικανού αριθμού γενεών μέχρις ότου ευρεθεί μια βέλτιστη λύση η οποία θα ικανοποιεί κάποιο προκαθορισμένο κριτήριο τερματισμού.



Εικόνα 3. Μπλοκ διάγραμμα εκτέλεσης των γενετικών αλγορίθμων.

Οι τρεις διακριτές φάσεις στις οποίες μπορεί να χωρισθεί η εκτέλεση ενός γενετικού αλγορίθμου είναι οι ακόλουθες:

1. Αρχικοποίηση πληθυσμού
2. Κύκλοι αναπαραγωγής και ενημέρωση του πληθυσμού
3. Τερματισμός και αποκωδικοποίηση λύσεων

Κατά την αρχικοποίηση δημιουργούνται καινούργια άτομα, επιλέγοντας τυχαίες τιμές για τις παραμέτρους βελτιστοποίησης χωρίς να παραβιάζονται τα προκαθορισμένα όρια του χώρου έρευνας, μέχρις ότου επιτευχθεί το επιθυμητό μέγεθος πληθυσμού. Η τυχαιότητα της επιλογής καθώς και ο καθορισμός ενός ικανοποιητικού μεγέθους πληθυσμού για τη δεδομένη διαστατικότητα του προβλήματος, εξασφαλίζει ότι ο αρχικός πληθυσμός κατανέμεται καλά στον παραμετρικό χώρο των λύσεων.

Το πρώτο στάδιο ενός κύκλου αναπαραγωγής συνίσταται στην επιλογή των ατόμων της εκάστοτε γενιάς για την εφαρμογή του τελεστή της διασταύρωσης. Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος είναι η *επιλογή ρουλέτας* όπου άτομα υψηλής καταλληλότητας έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να συμμετέχουν στην δημιουργία του επόμενου πληθυσμού από τα λιγότερο κατάλληλα άτομα. Το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι ενώ στα

πρώτα στάδια της βελτιστοποίησης κυριαρχούν τα πιο «ισχυρά» άτομα, στα τελευταία παρουσιάζεται στασιμότητα στη διαδικασία, εξαιτίας της ομογενοποίησης του πληθυσμού.

Συχνά επίσης χρησιμοποιείται η *επιλογή με τουρνουά* σύμφωνα με τη οποία N τυχαία άτομα ξεχωρίζονται από τον πληθυσμό, αποτιμάται η καταλληλότητα τους και ορίζεται το χρωμόσωμα που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη σχετική τιμή ως επίλεκτο. Τα υπόλοιπα μέλη της ομάδας επιστρέφουν στον αρχικό πληθυσμό και η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου να συμπληρωθεί το μέγεθος του πληθυσμού. Αφού συμπληρωθεί η ομάδα, τα μέλη της ταξινομούνται βάσει της καταλληλότητάς τους και ως γονέας επιλέγεται το άτομο με την υψηλότερη σχετική τιμή. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί επιλογή με επανατοποθέτηση του γονέα στη *δεξαμενή ζευγαρώματος*, ώστε τα άτομα να παίζουν περισσότερες από μία φορές το ρόλο του γονέα. Στην περίπτωση κατά την οποία η ομάδα αποτελείται από δύο άτομα η διαδικασία ονομάζεται *δυναδική επιλογή τουρνουά*.

Μέσω της διαδικασίας επιλογής δημιουργείται η *δεξαμενή ζευγαρώματος* από όπου προέρχονται τα νέα μέλη του πληθυσμού. Τα ζεύγη χρωμοσωμάτων, που επιλέγονται για αναπαραγωγή και αποθηκεύονται στη δεξαμενή ζευγαρώματος ονομάζονται *γονείς*. Το αποτέλεσμα της αναπαραγωγής των γονικών χρωμοσωμάτων αφού εφαρμοστούν οι δύο κύριοι γενετικοί τελεστές της διασταύρωσης και της μετάλλαξης είναι τα *παιδιά*. Η διασταύρωση περιλαμβάνει δημιουργία νέων συνδυασμών των γονιδιωμάτων τους, ενώ η μετάλλαξη αποτελεί των αμιγώς τυχαίο παράγοντα στην γενετική εξέλιξη, αλλάζοντας κατά τυχαίο τρόπο τα παραγόμενα χρωμοσώματα. Η ακριβής υλοποίηση των παραπάνω τελεστών βάσει των επιλεγμένης κωδικοποίησης των γονιδίων (δυναδική, κινητής υποδιαστολής) και του επιλεγμένου γονότυπου, συζητείται στην ακόλουθη ενότητα.

Συνέπεια των παραπάνω περιγραφόμενων μηχανισμών είναι τα άτομα της εκάστοτε γενιάς με τα καλύτερα γενετικά χαρακτηριστικά, να αναπαράγονται και να συνθέτουν την επόμενη γενιά. Σε μερικές περιπτώσεις είναι σκόπιμο να ενισχυθεί η προαναφερθείσα τάση εισάγοντας την έννοια του *ελιτισμού* σύμφωνα με την οποία ένα προκαθορισμένο ποσοστό των καταλληλότερων ατόμων της κάθε γενιάς επιβιώνουν αυτούσια στην επόμενη [30]. Ο ελιτισμός συνεπώς εγγυάται την μονοτονική αύξηση της καλύτερης τιμής της συνάρτησης καταλληλότητας ανά γενιά.

Κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης με τη χρήση γενετικών αλγόριθμων, είναι πιθανή η συγκέντρωση του πληθυσμού σε συγκεκριμένες περιοχές του πεδίου αναζήτησης (θύλακες), γεγονός που ενέχει τον κίνδυνο της πρώιμης σύγκλισης σε σημείο τοπικού ακρότατου. Το φαινόμενο είναι δυνατόν να αποφευχθεί μέσω της εφαρμογής της *διαδικασίας διαμοιρασμού καταλληλότητας*, πριν την επιλογή των γονέων [29]. Η καταλληλότητα του κάθε ατόμου κανονικοποιείται χρησιμοποιώντας την τιμή του αντίστοιχου μετρητή θυλάκων, οριζόμενου βάσει της πυκνότητας του πληθυσμού στη γειτονιά του και κατάλληλα ορισμένης συνάρτησης διαμοιρασμού καταλληλότητας.

Αρχικοποίηση πληθυσμού

Βρόγχος

Υπολογισμός αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε μέλος του πληθυσμού (POP)

$\Theta = \emptyset$; Θ = Επιλογή ατόμων που θα επιβιώσουν;

POP = διασταύρωση(Θ);

POP = μετάλλαξη(POP);

Μέχρι ικανοποίησης κριτηρίου τερματισμού

Πίνακας 2. Σύνοψη της σειριακής εκτέλεση του γενετικού αλγορίθμου.

Η διαδικασία ολοκληρώνεται όταν ικανοποιηθεί κριτήριο τερματισμού, όπως η συμπλήρωση ενός επιθυμητού αριθμού γενεών είτε η ανίχνευση της μη περαιτέρω βελτίωσης της ευρισκόμενης λύσεως για ένα προκαθορισμένο αριθμό γενεών. Σύμφωνα με τα παραπάνω και σε εξειδίκευση των περιγραφόμενων στον Πίνακα 1, τα αλγοριθμικά βήματα του γενετικού αλγόριθμου συνοψίζονται ως ψευδοκώδικας στον Πίνακα 2.

2.7.3 Εξελικτικοί τελεστές

Ο τελεστής της διασταύρωσης χρησιμοποιείται για την εξέλιξη του πληθυσμού κάθε γενιάς, όπου άτομα υψηλής καταλληλότητας έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να συμμετέχουν στην δημιουργία του επόμενου πληθυσμού από τα λιγότερο κατάλληλα άτομα. Οι πιο γνωστές μέθοδοι διασταύρωσης που χρησιμοποιούνται στην πράξη, είναι η *διασταύρωση πολλαπλών σημείων* όπου το γενετικό υλικό των γονέων συνδυάζεται σε n σημεία του χρωμοσώματος, η *αριθμητική διασταύρωση* όπου πραγματοποιείται γραμμικός συνδυασμός των γονιδίων των δύο γονέων και η *ομοιόμορφη διασταύρωση* όπου τα γονίδια από κάθε γονέα αντιγράφονται στους δύο απογόνους με ίση πιθανότητα. Το επιλεγμένο είδος κωδικοποίησης των γονιδίων που απαρτίζουν τα χρωμοσώματα καθορίζει το είδος του τελεστή διασταύρωσης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανανέωση του πληθυσμού· έτσι για την περίπτωση της δυαδικής κωδικοποίησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί η διασταύρωση πολλαπλών σημείων ενώ στη κωδικοποίηση κινητής υποδιαστολής η αριθμητική διασταύρωση.

Στα δυαδικά χρωμοσώματα, η διασταύρωση πολλαπλών σημείων μεταξύ δύο ατόμων X_1 και X_2 , λαμβάνει χώρα με τον εξής τρόπο:

- Επιλέγονται τυχαία n θέσεις στη δυαδική ακολουθία, οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν ως σημεία τομής. Οι τομές αυτές χωρίζουν τα χρωμοσώματα σε $n+1$ τμήματα. Σε αυτή τη διαδικασία, τα σημεία συνένωσης των γονιδίων δεν έχουν καμία σημασία.
- Παράγεται ένα νέο χρωμόσωμα X_{12} , παραθέτοντας εναλλάξ το πρώτο τμήμα του X_1 , το δεύτερο του X_2 , το τρίτο του X_1 και ούτω καθεξής μέχρι το τέλος. Με όμοιο τρόπο, παράγεται ένα ακόμη χρωμόσωμα X_{21} , από τα μη-χρησιμοποιημένα τμήματα που δεν έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί (πρώτο X_2 , δεύτερο X_1 , τρίτο X_2 , ...).

Κατά την εφαρμογή της αριθμητικής διασταύρωσης για κωδικοποιημένα με αριθμούς κινητής υποδιαστολής χρωμοσώματα πραγματοποιείται με μίξη των αντίστοιχων γονιδίων των X_1, X_2 μέσω του τυχαίου συντελεστή $\alpha \in [0, 1]$:

$$\begin{aligned} g_i^{X_{12}} &= a g_i^{X_1} + (1-a) g_i^{X_2} \\ g_i^{X_{21}} &= a g_i^{X_2} + (1-a) g_i^{X_1} \end{aligned} \quad (13)$$

Πρακτικά, οι ακραίες τιμές της παραμέτρου a επιβάλλονται συχνά εξωτερικά για την αποφυγή ανεπιθύμητης ομοιογένειας του πληθυσμού και πρόωρης σύγκλισης.

Όπως και στη φύση, η μετάλλαξη είναι ένας τρόπος εισαγωγής γενετικού υλικού που δεν υπάρχει ήδη στον πληθυσμό. Είναι ένας μηχανισμός που επιτρέπει μεγαλύτερη εξάπλωση των χρωμοσωμάτων σε τμήματα του χώρου λύσεων, τα οποία δεν αντιπροσωπεύονται στο γενετικό υλικό της τρέχουσας γενιάς. Το κυρίως όφελος από τη εφαρμογή της μετάλλαξης είναι η εισαγωγή ποικιλομορφίας σε ένα ομογενοποιημένο πληθυσμό, προκειμένου να αποτρέπεται η παγίδευση του αλγορίθμου σε σημεία τοπικών ελαχίστων, ειδικότερα κατά την ολοκλήρωση της εξελικτικής διαδικασίας.

Έχουν δημιουργηθεί πολλές μέθοδοι μετάλλαξης, από τις οποίες οι πιο γνωστές είναι η *ομοιόμορφη μετάλλαξη* όπου μία συνιστώσα του χρωμοσώματος (γονίδιο) αντικαθίσταται από μία τυχαία τιμή στο πεδίο ορισμού, *οριακή μετάλλαξη* όπου μία συνιστώσα του χρωμοσώματος αντικαθίσταται από ένα από τα δύο άκρα του πεδίου ορισμού και *ανομοιόμορφη μετάλλαξη* η οποία εξαρτάται από τον τρέχοντα αριθμό της γενιάς και τον μέγιστο αριθμό γενιών. Η υλοποίηση της μετάλλαξης εξαρτάται από το είδος της κωδικοποίησης των χρωμοσωμάτων· στα δυαδικά χρωμοσώματα επιλέγεται τυχαία ένα δυαδικό ψηφίο και αναστρέφεται ενώ στα πραγματικά γονίδια προστίθεται μία τυχαία μεταβλητή στην υπάρχουσα τιμή.

Καθότι ο τελεστής της διασταύρωσης αποτελεί και τον κυρίως μηχανισμό εξέλιξης ενός πληθυσμού στους γενετικούς αλγορίθμους, εφαρμόζεται με μεγάλη πιθανότητα p_{cross} της τάξεως 60-90%. Ο τελεστής μετάλλαξης επιφέρει τυχαίες τροποποιήσεις σε πολύ μικρό ποσοστό των γενετικών χαρακτηριστικών και πραγματοποιείται με μικρή πιθανότητα p_{mut} που κυμαίνεται 0.01-1% στις περισσότερες των περιπτώσεων, εξαιρουμένων της βελτιστοποίησης προβλημάτων με αναπαράσταση κινητής υποδιαστολής όπου μπορεί να κυμανθεί και μέχρι του 5% [31]. Μια ευρέως χρησιμοποιούμενη στρατηγική είναι ο αρχικός ορισμός υψηλής πιθανότητας μετάλλαξης η οποία ελαττώνεται με τη πάροδο των γενεών.

2.7.4 Προβλήματα πρόωρης σύγκλισης

Οι γενετικοί αλγόριθμοι πάσχουν από προβλήματα *πρόωρης σύγκλισης* σε μη βέλτιστες λύσεις (στασιμότητα), τα οποία εμφανίζονται όταν μερικά φτωχά άτομα προσελκύουν τον πληθυσμό, αποτρέποντας την περαιτέρω εξερεύνηση του διαστήματος αναζήτησης [32]. Μια από τις αιτίες αυτού του προβλήματος είναι ότι ένα πολύ κατάλληλο χρωμόσωμα είναι γενικά βέβαιο να επιλεχτεί για το ζευγάρι, και δεδομένου ότι ο απόγονος μοιάζει με τους γονείς τους, τα χρωμοσώματα γίνονται παρόμοια (δηλαδή ο πληθυσμός χάνει την ποικιλομορφία του). Ως εκ τούτου, ο πληθυσμός δύναται να συγκλίνει συχνά πριν φθάσει στην ολικά βέλτιστη λύση, με συνέπεια την πρόωρη σύγκλιση. Η πρόωρη σύγκλιση μπορεί να αποτραπεί από:

- *Τη χρησιμοποίηση υποσυνόλων του πληθυσμού*: Ο πληθυσμός των χρωμοσωμάτων διαιρείται σε χωριστά υποσύνολα. Κάθε υποσύνολο πληθυσμού εξελίσσεται

ανεξάρτητα από τα άλλα υποσύνολα για έναν καθορισμένο από τον χρήστη αριθμό γενεών. Κατόπιν, διάφορα χρωμοσώματα ανταλλάσσονται μεταξύ των υποσυνόλων. Αυτή η διαδικασία βοηθά στην αύξηση της ποικιλομορφίας του πληθυσμού και έτσι παρεμποδίζεται η πρόωρη σύγκλιση του αλγορίθμου.

- *Την επαναρχικοποίηση μερικών χρωμοσωμάτων:* Μερικά χρωμοσώματα αρχικοποιούνται ξανά ανά τακτά χρονικά διαστήματα προκειμένου να προσθέσουν ποικιλομορφία στον πληθυσμό.
- *Την αύξηση της πιθανότητας μετάλλαξης:* Όπως έχει ήδη συζητηθεί, ο τελεστή μετάλλαξης βοηθά τον αλγόριθμο να ερευνησει νέες περιοχές στο χώρο έρευνας και αυξάνει την ποικιλομορφία του πληθυσμού.

Γενικά, οποιοσδήποτε μηχανισμός που μπορεί να αυξήσει την ποικιλομορφία του πληθυσμού μπορεί να βοηθήσει στην αποτροπή των φαινομένων πρόωρης σύγκλισης. Είναι χρήσιμο να αναφερθεί ότι τα προβλήματα πρόωρης σύγκλισης των γενετικών αλγορίθμων είναι χαρακτηριστικά για όλους τους στοχαστικούς αλγορίθμους βελτιστοποίησης που βασίζονται σε πληθυσμό.

2.8 Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων

Η βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων (Particle Swarm Optimization – PSO) είναι ένας στοχαστικός αλγόριθμος βασισμένος σε πληθυσμό (όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι) ο οποίος χρησιμοποιεί ένα σύνολο δυνατών λύσεων για το πρόβλημα βελτιστοποίησης [33]. Κάθε πιθανή λύση ονομάζεται σωματίδιο και το σύνολο των δυνατών λύσεων σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου αποτελεί το σμήνος (swarm). Ο PSO είναι ένας πολυδιάστατος στοχαστικός αλγόριθμος ο οποίος δεν απαιτείται να προσεγγίσει τις παραγώγους της συνάρτησης καταλληλότητας (fitness function). Ο πρωταρχικός πληθυσμός συνήθως αρχικοποιείται χρησιμοποιώντας μια γεννήτρια ψευδοτυχαίων αριθμών προκειμένου να επιτευχθεί μια ομοιόμορφη κατανομή των σωματιδίων στον ορισμένο από τον χρήστη χώρο έρευνας. Στη συνέχεια τα σωματίδια κινούνται μέσα στο n -διάστατο χώρο λύσεων του προβλήματος, υποκείμενα σε ντετερμινιστικούς και στοχαστικούς κανόνες ενημέρωσης των θέσεων τους, οι οποίες στις συνέχεια αξιολογούνται με τη βοήθεια κατάλληλα ορισμένης αντικειμενικής συνάρτησης.

Το κάθε σωματίδιο γνωρίζει την καλύτερη θέση που έχει βρει μέχρι στιγμής, η οποία ονομάζεται τοπικό βέλτιστο (local best) και επίσης έχει υπόψη του την καλύτερη βέλτιστη θέση που έχει βρεθεί από κάποιο άλλο σωματίδιο του σμήνους, ονομαζόμενη και ως ολικό βέλτιστο (global best). Όταν καθορίζεται ως γειτονία το σύνολο του σμήνους, τότε λέγεται ότι χρησιμοποιείται η ολική (global) έκδοση του αλγορίθμου. Συνεπακόλουθα τα σωματίδια του σμήνους έλκονται στοχαστικά προς τις δικές τους προηγούμενες βέλτιστες θέσεις και τις προηγούμενες βέλτιστες θέσεις των γειτόνων τους.

2.8.1 Εξισώσεις ενημέρωσης θέσης και ταχύτητας

Έστω ότι $k \in \mathcal{N}$ είναι ο αριθμός των γενιών, $n_p \in \mathcal{N}$ δείχνει τον αριθμό των σωματιδίων σε κάθε γενιά, $x_i(k) \in \mathbb{R}^{n_c}$ δείχνει το $i^{\text{οστό}}$ σωματίδιο της $k^{\text{οστής}}$ γενιάς, $v_i(k) \in \mathbb{R}^{n_c}$ δείχνει την ταχύτητά τους, οι μεταβλητές $c_1, c_2 \in \mathbb{R}_+$ συμβολίζουν την ατομικότητα και την κοινωνικότητα των σωματιδίων και οι $p_1(k), p_2(k) \in U(0, 1)$ αποτελούν ομοιόμορφες

κατανομές τυχαίων αριθμών μεταξύ 0 και 1. Σύμφωνα με την αρχική έκδοση του αλγορίθμου PSO [34] οι εξισώσεις ενημέρωσης της θέσης και ταχύτητας των σωματιδίων, για κάθε $i \in \{1, \dots, n_p\}$ και για όλα τα $k \in \mathbb{N}$, ορίζονται ως εξής:

Ενημέρωση ταχύτητας

$$v_i(k+1) = v_i(k) + c_1 \rho_1 (p_{l,i}(k) - x_i(k)) + c_2 \rho_2 (p_{g,i}(k) - x_i(k)) \quad (14)$$

Περιορισμός διανύσματος ταχύτητας

$$v_i(k+1) = \text{sign}(v_i(k+1)) \min \{|v_i(k+1)|, v_{\max}\}, i \in \{1, \dots, n_c\} \quad (15)$$

Ενημέρωση θέσης

$$x_i(k+1) = x_i(k) + v_i(k+1) \quad (16)$$

Επομένως $p_{l,i}(k)$ είναι η προσωπική καλύτερη θέση του $i^{\text{οστού}}$ σωματιδίου η οποία παρουσιάζει την χαμηλότερη τιμή συνάρτησης κόστους ανά γενιά, και $p_{g,i}(k)$ είναι η βέλτιστη συνολικά λύση στη γειτονιά του που έχει βρεθεί μέχρι στιγμής. Οι γειτονίες (εφόσον δεν αναφέρονται στο σύνολο του σμήνους), μπορούν να οριστούν με διάφορους τρόπους βάσει της τοπολογίας. Ένας συχνά χρησιμοποιούμενος τύπος είναι οι κυκλικές γειτονίες στις οποίες τα σωματίδια είναι σε διάταξη κύκλου και μπορούν να ανταλλάξουν πληροφορίες με τους γείτονες στα δεξιά και αριστερά τους, σύμφωνα βέβαια με το ορισμό μέγεθος των γειτονιών. Τέτοιου είδους τοπικές γειτονίες χρησιμοποιούνται για να αποφεύγεται η παγίδευση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης σε θέσεις τοπικών ελάχιστων αλλά επιφέρουν το κόστος της πιο αργής ταχύτητας σύγκλισης του αλγορίθμου.

Ο όρος $c_1 \rho_1 (p_{l,i}(k) - x_i(k))$ που συσχετίζει την ίδια εμπειρία ενός σωματιδίου με την τρέχουσα θέση του είναι ζυγισμένος με τη σταθερά c_1 η οποία αποκαλείται ατομικότητα (cognitive acceleration). Ο όρος $c_2 \rho_2 (p_{g,i}(k) - x_i(k))$ συσχετίζεται με τις «κοινωνικές» αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σωματιδίων που ανήκουν στη ίδια γειτονιά και το σταθερό βάρος c_2 ονομάζεται κοινωνικότητα (social acceleration). Στην αρχική έκδοση του PSO [34], συνήθως χρησιμοποιούνται τιμές $c_1 = c_2 = 2.0$ για τις παραπάνω παραμέτρους.

Η παράμετρος περιορισμού της ταχύτητας (velocity clamping parameter) v_{\max} στη σχέση (15) ορίζεται ως ένα άνω όριο το οποίο είναι εφαρμοστέο σε όλες τις χωρικές συνιστώσες του διανύσματος ταχύτητας. Η χρήση της αναφερόμενης παραμέτρου είναι απαραίτητη προκειμένου να βελτιωθούν τα χαρακτηριστικά σύγκλισης του αλγορίθμου και να περιοριστούν οι ευρισκόμενες λύσεις μέσα στα όρια του ορισμένου χώρου έρευνας. Συνήθως αυτή η τιμή επιλέγεται ως το μισό της μεγαλύτερης διάστασης του χώρου έρευνας ($\max\{Dimension_d\}/2$, όπου d ο δείκτης για κάθε διάσταση).

2.8.2 Απόλυτες οριακές συνθήκες

Πρέπει να σημειωθεί ότι ένας πιο ακριβής και αποτελεσματικός τρόπος περιορισμού των σωματιδίων στο χώρο έρευνας, επιτυγχάνεται με τη χρήση των απόλυτων οριακών συνθηκών (hard boundary conditions) [35], στη θέση της εξίσωσης (15), όπως για παράδειγμα οι ανακλαστικές και απορροφητικές οριακές συνθήκες (reflective, absorbing

boundary conditions - RBC, ABC). Αυτές οι συνθήκες δεν εφαρμόζουν τη μέθοδο περιορισμού της ταχύτητας αλλά αντιστρέφουν (RBC) ή μηδενίζουν (ABC) το διάνυσμα ταχύτητας αντίστοιχα. Στα περισσότερα προβλήματα βελτιστοποίησης η χρήση της ανακλαστικής συνθήκης οδηγεί στη βελτίωση της συμπεριφοράς σύγκλισης του αλγορίθμου.

2.8.3 Κοινωνική συμπεριφορά

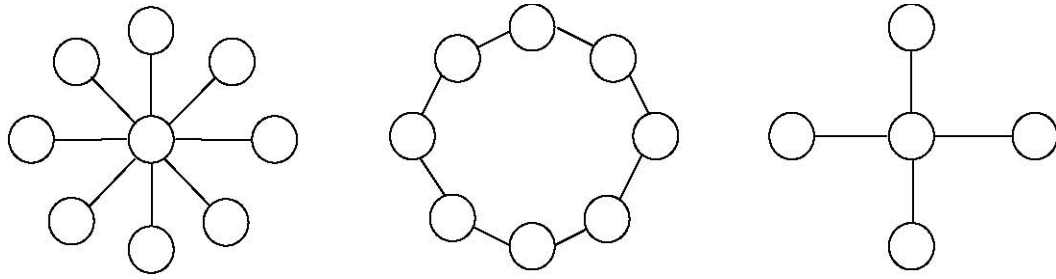
Η ανθρώπινη κοινωνική αλληλεπίδραση εμφανίζεται στα πλαίσια μιας ομάδας ή μιας κοινωνικής δομής, που απεικονίζεται συχνά από τους κοινωνιολόγους ως δίκτυο συνδέσεων μεταξύ των ατόμων. Η έρευνα από τη δεκαετία του '40 έχει δείξει ότι η επικοινωνία μέσα σε μια ομάδα, και τελικά η απόδοση της ομάδας, επηρεάζονται από τη δομή του κοινωνικού δικτύου. Η έρευνα πάνω στη μέθοδο βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων έχει στηριχθεί στον ορισμό απλοποιημένων κοινωνικών δομών. Αν και άλλες κοινωνικές δομές είναι δυνατές, ειδικότερα έχουν μελετηθεί η αλληλεπίδραση των ατόμων με τους άμεσους παρακείμενους γείτονες τους καθώς και η αλληλεπίδραση όλων των ατόμων με το άτομο που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη απόδοση στον πληθυσμό. Έχει αποδειχθεί ότι τα *απομονωμένα άτομα* του πληθυσμού αποδίδουν πολύ χειρότερα σε σχέση με τα υπόλοιπα, καθότι η λειτουργία του αλγορίθμου βασίζεται στις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σωματιδίων.

2.8.3.1 Μοντέλα *gbest* και *lbest*

Τα σμήνη σωματιδίων ιστορικά έχουν μελετηθεί αναφορικά με δύο γενικούς τύπους γειτονιών, αποκαλούμενων *ολικά καλύτερες* και *τοπικά καλύτερες* (*gbest* και *lbest*, βάσει του ορισμού όλου του πληθυσμού ως γειτονιάς ή όχι αντίστοιχα). Στη *gbest* γειτονιά κάθε άτομο προσελκύεται στην καλύτερη λύση που βρίσκεται από οποιοδήποτε μέλος του πληθυσμού. Αυτή η δομή είναι συνεπώς ισοδύναμη με ένα πλήρως συνδεδεμένο κοινωνικό δίκτυο όπου κάθε άτομο είναι σε θέση να συγκρίνει τις αποδόσεις του με κάθε άλλο μέλος του πληθυσμού, συνακόλουθα μιμούμενο το καλύτερο. Στο *lbest* δίκτυο κάθε άτομο επηρεάζεται από την καλύτερη απόδοση των άμεσων *K* γειτόνων για ένα τοπολογικά συνδεδεμένο πληθυσμό – π.χ. όταν ανήκουν σε ένα κανονικό δακτυλιωτό πλέγμα. Μια κοινή *lbest* περίπτωση λαμβάνεται για $K = 2$ όπου το άτομο επηρεάζεται μόνο από τους άμεσα παρακείμενους γείτονές του.

2.8.3.2 Ορισμός γειτονιών

Έχουν ερευνηθεί διάφορες τοπολογίες γειτονιάς [36, 37]. Δύο συχνά χρησιμοποιούμενες τοπολογίες γειτονιάς είναι η τοπολογία αστέρα (ή ρόδας) και οι τοπολογίες δακτυλιδίων (ή κυκλική). Στην τοπολογία αστέρα ένα σωματίδιο επιλέγεται ως κεντρικό, το οποίο συνδέεται με όλα τα άλλα μέλη του σμήνους. Εντούτοις, όλα τα άλλα σωματίδια συνδέονται μόνο με το κεντρικό. Στην τοπολογία δακτυλιδίων, τα σωματίδια τακτοποιούνται σε ένα δακτυλίδι. Κάθε σωματίδιο έχει κάποιο αριθμό άλλων μελών του σμήνους στα δεξιά και αριστερά του, τα οποία αποτελούν και τη γειτονιά του. Πρόσφατα προτάθηκε από τους Kennedy και Mendes [37] ένα νέο μοντέλο PSO στο οποίο χρησιμοποιείται η Von Neumann τοπολογία. Σύμφωνα με την Von Neumann τοπολογία, οι κοινωνικές συνδέσεις υλοποιούνται διαμέσου ενός 2-διάστατου δικτυωτού πλέγματος, όπου κάθε σωματίδιο συνδέεται με τέσσερα γειτονικά του (άνω, κάτω, δεξί και αριστερό σωματίδιο). Το ακόλουθο σχήμα αναπαριστά τις διαφορετικές δυνατές τοπολογίες.



Εικόνα 4. Διαγράμματα τοπολογιών α) αστέρα β) δακτυλιδιού γ) Von Neumann.

Η επιλογή τοπολογίας της γειτονιάς επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη διάδοση της καλύτερης λύσης που βρίσκεται από το σμήνος. Χρησιμοποιώντας το gbest μοντέλο η διάδοση είναι πολύ γρήγορη (δηλ. όλα τα σωματίδια στο σμήνος θα επηρεαστούν από την καλύτερη λύση που βρέθηκε στην επανάληψη t στην αμέσως επόμενη επανάληψη $t+1$). Αυτή η γρήγορη διάδοση μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα πρόωρης σύγκλισης. Πρέπει βέβαια να σημειωθεί ότι η χρησιμοποίηση των τοπολογιών δακτυλιδιών και Von Neumann επιβραδύνει το ρυθμό σύγκλισης επειδή η εκάστοτε καλύτερη λύση πρέπει να διαδοθεί μέσω διάφορων γειτονιών προκειμένου να έχει επιπτώσεις σε όλα τα σωματίδια του σμήνου. Αυτή η αργή διάδοση επιτρέπει στα σωματίδια να ερευνήσουν περισσότερες περιοχές στο διάστημα αναζήτησης και έτσι μειώνεται η πιθανότητα πρόωρης σύγκλισης.

2.8.4 Σύνοψη αλγόριθμου

Η μέθοδος PSO μπορεί να αναλυθεί σε απλά αλγοριθμικά βήματα με τη βοήθεια του ακόλουθου ψευδοκώδικα (Πίνακας 3), όπου ο δείκτης d αναφέρεται στις συνιστώσες των διανυσμάτων ταχύτητας και θέσης:

<p>Βρόγχος</p> <p>Για $i = 1$ μέχρι το μέγεθος του πληθυσμού</p> <p> εάν $G(\mathbf{x}_i) > G(\mathbf{p}_i)$ τότε κάνε //G() υπολογίζει καταλληλότητα</p> <p> Για $d = 1$ μέχρι τη μέγιστη διάσταση</p> <p> $p_{id} = x_{id}$ //p_{id} καλύτερη θέση μέχρι στιγμής</p> <p> επόμενο d</p> <p> $g = i$ // τυχαίο</p> <p> για $j =$ δείκτες γειτονικών σωματιδίων</p> <p> εάν $G(\mathbf{p}_i) > G(\mathbf{p}_j)$ τότε $g = j$ //g δείκτης-βέλτιστο σωματίδιο γειτονιάς</p> <p> επόμενο j</p> <p> Για $d = 1$ μέχρι τη μέγιστη διάσταση</p> <p> $v_{id}(t) = v_{id}(t-1) + \varphi_1(p_{id} - x_{id}(t-1)) + \varphi_2(p_{gd} - x_{id}(t-1))$</p> <p> $v_{id} \in (-V_{\max}, V_{\max})$</p> <p> $x_{id}(t) = x_{id}(t-1) + v_{id}(t)$</p> <p> επόμενο d</p> <p>επόμενο i</p> <p>Μέχρι την ικανοποίηση του κριτηρίου τερματισμού</p>	
--	--

Πίνακας 3. Ψευδοκώδικας για τη σειριακή εκτέλεση του αλγορίθμου PSO

2.9 Παραλλαγές στη Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων

Κατά αναλογία με τους γενετικούς αλγορίθμους, η μέθοδος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων είναι δυνατόν να συγκλίνει πρόωρα, γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στην προσέλευση των υπόλοιπων σωματιδίων του πληθυσμού σε θέση ενός μέλους που έχει προσεγγίσει μια τοπικά βέλτιστη λύση. Σε αυτά τα πλαίσια είναι δυνατόν, λόγω της στοχαστικών χαρακτηριστικών των εξισώσεων ενημέρωσης θέσης και ταχύτητας, να αναλυθεί η συμπεριφορά ενός σμήνους ως ένα χαοτικό σύστημα που παρουσιάζει σημαντική ευαισθησία ως προς τις αρχικές συνθήκες [38]. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι ότι οι εξισώσεις που διέπουν την συμπεριφορά του σμήνους μπορούν να τροποποιηθούν κατάλληλα ώστε να βελτιωθεί η συμπεριφορά σύγκλισης του αλγορίθμου, είτε να συμπληρωθούν από μηχανισμούς που θα αποτρέπουν την ομογενοποίηση του πληθυσμού.

2.9.1 Βελτιώσεις στη συμπεριφορά σύγκλισης

2.9.1.1 Ζυγισμένος όρος αδράνειας

Η υλοποίηση του αλγορίθμου PSO με τη χρήση όρου παράγοντα αδράνειας (Inertia Weight – IW) επιτρέπει την σταδιακή ελάττωση της επήρειας της αδράνειας καθώς ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης προσεγγίζει το μέγιστο αριθμό επιτρεπόμενων γενιών [38]. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την εισαγωγή του ζυγισμένου όρου αδράνειας ο οποίος ελαττώνεται γραμμικά κατά την εξέλιξη των γενεών, σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$a(k) = w_1 + \frac{k}{MaxGenerations} * (w_2 - w_1) \quad (17)$$

Η ταχύτητα λόγω αδρανείας, κανονικοποιείται από το ζυγισμένο συντελεστή αδρανείας, στην εξίσωση ενημέρωσης της ταχύτητας:

$$v_i(k+1) = a(k)v_i(k) + c_1\rho_1(p_{i,i}(k) - x_i(k)) + c_2\rho_2(p_{g,i}(k) - x_i(k)) \quad (18)$$

Αυτός ο μηχανισμός είναι ευθέως ανάλογος με το φαινόμενο «μείωσης της θερμοκρασίας» των στοχαστικών αλγορίθμων ανόπτησης (stochastic annealing algorithms). Τα χαρακτηριστικά σύγκλισης της παραλλαγής IW παρουσιάζονται βελτιστοποιημένα σε σχέση με τον κλασικό αλγόριθμο PSO, εξαιτίας της σταδιακής μείωσης της ταχύτητας αδρανείας. Κατά την χρήση του IW PSO συνήθως ορίζονται τιμές $c_1 = c_2 = 2.0$ για την ατομικότητα και την κοινωνικότητα των σωματιδίων αντιστοίχως.

2.9.1.2 Χρήση παραμέτρου περιορισμού της εξίσωσης ταχύτητας

Λόγοι απόδοσης του αλγορίθμου οδήγησαν στη ανάπτυξη μιας παραλλαγής, βασισμένης στον ορισμό κατάλληλου παράγοντα περιορισμού (Constriction Coefficient – CC) της εξίσωσης ανανέωσης θέσης των σωματιδίων. Αυτή η μέθοδος προτάθηκε από τους Clerc και Kennedy [39] και σύμφωνα με την υλοποίηση τύπου 1'' η εξίσωση ανανέωσης της ταχύτητα των σωματιδίων εκφράζεται ως

$$v_i(k+1) = \chi(\kappa, \varphi) \left(v_i(k) + c_1\rho_1(p_{i,i}(k) - x_i(k)) + c_2\rho_2(p_{g,i}(k) - x_i(k)) \right) \quad (19)$$

Η μεταβλητή $\chi(\kappa, \varphi)$ ονομάζεται παράμετρος περιορισμού και ορίζεται ως

$$\chi(\kappa, \varphi) = \begin{cases} \frac{2\kappa}{\left|2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}\right|}, & \text{εαν } \varphi > 4, \\ \kappa, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (20)$$

όπου οι παράμετροι $\varphi = c_1 + c_2$ και $\kappa \in (0, 1]$ ελέγχουν πόσο γρήγορα ο πληθυσμός του σμήνους μπορεί να συγκλίνει και οριακά να εκφυλλιστεί, συμπίπτοντας έτσι σε ένα σημείου του χώρου έρευνας. Στην περίπτωση που $\kappa = 1$, ο χώρος λύσεων ερευνάται εξαντλητικά, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την πιο αργή σύγκλιση του αλγορίθμου. Η εξίσωση (19) μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ή χωρίς τον ορισμό παραμέτρου περιορισμού της ταχύτητας. Εάν χρησιμοποιηθεί τέτοια παράμετρος, τότε οι Clerc και Kennedy προτείνουν τη χρήση τιμής $\varphi = 4.1$, αλλιώς ορίζουν το $\varphi = 4$. Σε καθεμία από τις δύο περιπτώσεις λαμβάνουν ίση τιμή $c_1 = c_2 = \varphi/2$. Οι Kennedy και Eberhart αναφέρουν ότι η χρήση περιορισμού της ταχύτητας σε συνδυασμό με τη παράμετρο περιορισμού, επιδεικνύει πιο γρήγορη σύγκλιση για ορισμένα τυποποιημένα προβλήματα δοκιμής, συγκρινόμενη με τη χρήση της παραλλαγής ζυγισμένης αδράνειας, αλλά σε αυτή την περίπτωση ο αλγόριθμος τείνει να παγιδευτεί σε θέσεις τοπικών ελαχίστων [33].

2.9.2 Βελτιώσεις για αποτροπή της ομογενοποίησης του πληθυσμού

2.9.2.1 Ορισμός λόγου καταλληλότητας προς απόσταση

Ο Veeramachaneni και άλλοι πρότειναν τη εισαγωγή ενός τρίτου όρου συσχετιζόμενου με τη συμπεριφορά σύγκλισης του σμήνους σε μη βέλτιστα σημεία ελαχίστων του χώρου έρευνας της αντικειμενικής συνάρτησης [40]. Η απόφαση τους για εισαγωγή ενός επιπλέον όρου βασίστηκε στις ακόλουθες παρατηρήσεις:

- Είναι πιο πιθανόν ένας οργανισμός να επηρεαστεί από άλλους στην γειτονιά του. Μεταξύ των γειτόνων του, αυτοί που γνώρισαν μεγαλύτερη επιτυχία (εξαιρουμένου του ίδιου) είναι πιο πιθανόν να επηρεάσουν τη συμπεριφορά του.
- Η εισαγωγή επιπρόσθετων δυνάμεων έλξης από πολλαπλά σωματίδια μπορεί αθροιστικά να μην έχει αποτέλεσμα (αλληλοεξουδετερώνονται), καθιστώντας έτσι την όλη διαδικασία μη πρακτική, ειδικά αν ληφθεί υπόψη η υπολογιστική επιβάρυνση του αλγορίθμου.
- Δύο κριτήρια θα πρέπει να ικανοποιούνται ταυτόχρονα όταν θα πρέπει να επιλεγεί ένα μοναδικό σωματίδιο για την ανανέωση του διανύσματος θέσης ενός δεδομένου σωματιδίου:
 1. Θα πρέπει να είναι χωρικά κοντά στο σωματίδιο για το οποίο υπολογίζεται η νέα ταχύτητα (εντοπιότητα).
 2. Θα πρέπει ήδη να έχει επισκεφθεί μια θέση του χώρου έρευνας που να παρουσιάζει μεγαλύτερη τιμή καταλληλότητας.

Επομένως θεμελιώθηκε ένα κριτήριο λόγου καταλληλότητας προς απόσταση (Fitness Distance Ratio - FDR), το οποίο επιτρέπει τη βέλτιστη επιλογή ενός υποψηφίου σωματιδίου όταν ανανεώνεται το d -οστό στοιχείο του διανύσματος ταχύτητας του i -οστού σωματιδίου:

$$FDR(i, j, d) = \frac{Fitness(P_j) - Fitness(X_i)}{|P_{jd} - X_{id}|} \quad (21)$$

όπου το σύμβολο $|\dots|$ ορίζει την απόλυτη τιμή ενός απλού μετρικού απόστασης για την d -οστή συντεταγμένη θέσης μεταξύ του i -οστού σωματιδίου και του j -οστού υποψηφίου σωματιδίου. Αυτό το κριτήριο λαμβάνει υπόψη του την χωρική εντοπιότητα του εν λόγω σωματιδίου σε σχέση με άλλα σωματίδια και τις αντίστοιχες τιμές καταλληλότητας τους.

Συνεπακόλουθα ορίζεται ένας τρίτος παράγοντας έλξης στη σχέση ανανέωσης της ταχύτητας, προς εκείνο το σωματίδιο που παράγει την υψηλότερη τιμή FDR, για την εξεταζόμενη συνιστώσα του διανύσματος θέσης:

$$v_i(k+1) = \alpha v_i(k) + c_1 \rho_1 (p_{l,i}(k) - x_i(k)) + c_2 \rho_2 (p_{g,i}(k) - x_i(k)) + c_3 \rho_3 (p_{fdr,i}(k) - x_i(k)) \quad (22)$$

Σε αυτή τη περίπτωση εισάγεται επιπλέον ένας όρος ζυγισμένης αδράνειας ο οποίος εφαρμόζεται όπως προβλέπεται από τη σχέση (18). Η παράμετρος c_3 ορίζει την σχετική σημαντικότητα του κριτηρίου FDR στη συνάρτηση ανανέωσης της ταχύτητας. Ο ορισμός μοναδιαίων τιμών για τα $c_1 = c_2 = 1.0$ και τιμής $c_3 = 2.0$ έχει ευρεθεί να οδηγεί σε βέλτιστα αποτελέσματα για διάφορα προβλήματα βελτιστοποίησης.

2.9.2.2 Ορισμός αυτοργανώμενης κρισιμότητας

Προκειμένου να αυξηθεί η ποικιλομορφία των πληθυσμών για να αποτρέψουν την εμφάνιση προβλημάτων πρόωρης σύγκλισης, οι Lønberg και Krink επέκτειναν τον αλγόριθμο PSO εισαγάγοντας την έννοια της *αυτοργανώμενης κρισιμότητας* (SelfOrganizing Criticality - SOC) [41]. Η αυτοργανώμενη κρισιμότητα εκτιμά κατά πόσο βρίσκονται κοντά τα σωματίδια μεταξύ τους και χρησιμοποιείται για να τον επαναπροσδιορισμό της θέσης τους, προκειμένου έτσι να αυξηθεί η ποικιλομορφία του σμήνους. Ένα σωματίδιο με υψηλή τιμή κρισιμότητας διασκορπίζει την εν λόγω τιμή αυξάνοντας την κρισιμότητα ενός προκαθορισμένου από τον χρήστη αριθμού γειτονικών του σωματιδίων CL κατά 1. Μετέπειτα το σωματίδιο ελαττώνει αντίστοιχα την δικιά του κρισιμότητα κατά CL και επαναπροσδιορίζεται η θέση του. Δύο μέθοδοι επαναπροσδιορισμού θέσης μελετήθηκαν: η πρώτη επαναρχικοποιεί το σωματίδιο που παρουσιάζει υψηλή τιμή κρισιμότητας, ενώ η δεύτερη το ωθεί λίγο μακρύτερα στο διάστημα έρευνας. Σύμφωνα με τους Lønberg και Krink, η πρώτη προσέγγιση παράγει καλύτερα αποτελέσματα όταν εφαρμόζονται σε συναρτήσεις δοκιμής.

2.10 Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων

Ο Coello και άλλοι έχουν αναπτύξει μια επέκταση του αλγορίθμου σμήνους σωματιδίων, η οποία επιτρέπει τη ταυτόχρονη βελτιστοποίηση πολλαπλών στόχων (Multi-Objective PSO / MOPSO), χωρίς να είναι απαραίτητη η χρήση κάποιου σχήματος ζυγισμένης άθροισης των αντίστοιχων τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων [42]. Η *πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων* διευκολύνει την εύρεση ενός συνόλου λύσεων οι οποίες δεν κυριαρχούν κατά απόλυτο τρόπο η μια στην άλλη και είναι αντιπροσωπευτικές της μερικής ικανοποίησης των στόχων, σε διαφορετικό βαθμό η καθεμία. Η MOPSO

βασίζεται σε αντίστοιχες τεχνικές οι οποίες έχουν αναπτυχθεί σε πολυκριτηριακούς γενετικούς αλγορίθμους όπως ο NSGA-II [43]. Κατά αυτόν τον τρόπο κληρονομεί χαρακτηριστικά τους όπως οι έννοιες των βέλτιστων κατά Pareto σημείων και του ελιτισμού δηλαδή της διατήρησης ενός αντιπροσωπευτικού συνόλου λύσεων με τη χρήση ενός εξωτερικού αρχείου πεπερασμένου μεγέθους. Παράλληλα για την αποτροπή της ομογενοποίησης του πληθυσμού, η MOPSO επικουρείται από τον τελεστή μετάλλαξης. Στη συνέχεια δίνεται λεπτομερής περιγραφή της έννοιας της κατά Pareto κυριαρχίας και πως αυτή χρησιμοποιείται κατά την διάταξη των βέλτιστων λύσεων για το σχηματισμό του μετώπου Pareto.

2.10.1 Κυριαρχία κατά Pareto

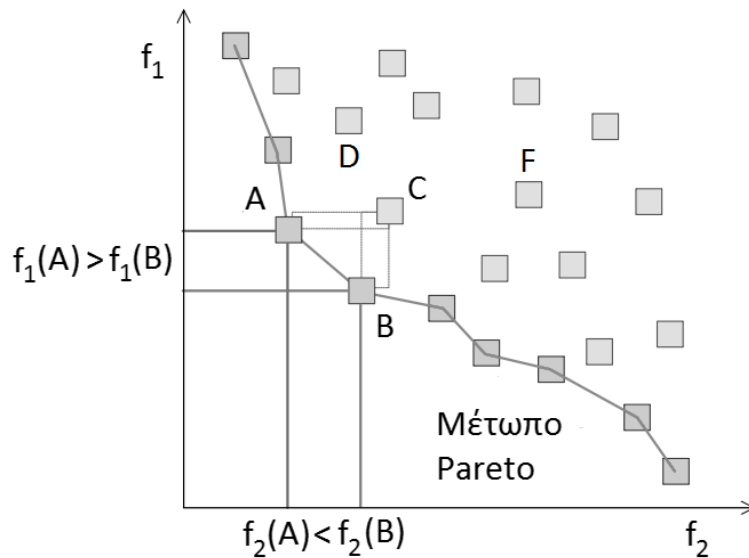
Σε προβλήματα βελτιστοποίησης πολλαπλών κριτηρίων χρησιμοποιείται η έννοια της μερικής διάταξης, για την ιεράρχηση των ευρισκόμενων λύσεων. Συνεπώς για ένα ζεύγος διανυσμάτων απόφασης \mathbf{x} και \mathbf{y} ορίζονται οι μεταξύ τους σχέσεις κυριαρχίας ως ακολούθως:

- *Ισότητα ($\mathbf{x}=\mathbf{y}$):* Όταν τα διανύσματα απόφασης $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ και $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T$ παρουσιάζουν ίσες αποτιμήσεις για όλα τα κριτήρια βελτιστοποίησης.
- *Ισχυρή κυριαρχία ($\mathbf{x}<\mathbf{y}$):* Μεταξύ δύο εφικτών λύσεων \mathbf{x} , \mathbf{y} , το διάνυσμα απόφασης \mathbf{x} κυριαρχεί ισχυρώς στο \mathbf{y} εάν το \mathbf{x} δεν είναι «χειρότερο» από το \mathbf{y} σε σχέση με κάθε επιμέρους κριτήριο βελτιστοποίησης και το διάνυσμα \mathbf{x} βελτιώνει τουλάχιστον έναν επιμέρους στόχο σε σχέση με το \mathbf{y} .
- *Ασθενής κυριαρχία ($\mathbf{x}\leq\mathbf{y}$):* Μεταξύ δύο εφικτών λύσεων \mathbf{x} , \mathbf{y} , το διάνυσμα απόφασης \mathbf{x} κυριαρχεί ασθενώς στο \mathbf{y} εάν το \mathbf{x} δεν είναι «χειρότερο» από το \mathbf{y} σε σχέση με κάθε επιμέρους κριτήριο βελτιστοποίησης.
- *Αδιαφορία:* Σε κάθε άλλη περίπτωση.

Η έννοια της κυριαρχίας επιτρέπει τον ορισμό των βέλτιστων λύσεων σε προβλήματα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης κατά τρόπο αντίστοιχο των προβλημάτων μίας και μοναδικής αντικειμενικής συναρτήσεως. Κατά αυτόν τον τρόπο εισάγεται η έννοια των βέλτιστων ή κυρίαρχων κατά Pareto εφικτών λύσεων στη διαδικασία της βελτιστοποίησης, οι οποίες σχηματίζουν ένα μέτωπο Pareto:

- Μία εφικτή λύση \mathbf{x}^* είναι βέλτιστη κατά Pareto αν και μόνο αν δεν υπάρχει λύση \mathbf{x} η οποία να κυριαρχεί επί αυτής.
- Το σύνολο των βέλτιστων κατά Pareto λύσεων P^* ενός πολυκριτηριακού προβλήματος βελτιστοποίησης απαρτίζεται από τις κυρίαρχες λύσεις.
- Η απεικόνιση των βέλτιστων κατά Pareto λύσεων PF^* στο πεδίο λύσεων F , ονομάζεται μέτωπο Pareto ή κυρίαρχο.

Για προβλήματα δύο κριτηρίων το μέτωπο Pareto απεικονίζεται ως μία καμπύλη αντιστάθμισης στο διδιάστατο χώρο αποτιμήσεων, όπως στην Εικόνα 5.



Εικόνα 5. Μέτωπο Pareto σε πρόβλημα δύο κριτηρίων.

Παρατηρούμε ότι το σημείο **C** δεν ανήκει στην καμπύλη γιατί επικυριαρχείται από τα σημεία **A** και **B**. Τα σημεία **A** και **B** κυριαρχούν ασθενώς το ένα επί του άλλου, για αυτό συμμετέχουν και τα δύο στο μέτωπο Pareto. Το σημείο **C** κυριαρχεί επί του σημείου **F** και ασθενώς επί του σημείου **D**.

Γενικά, δεν είναι δυνατός ο προσδιορισμός μιας αναλυτικής έκφρασης για την καμπύλη ή επιφάνεια που θα περιέχει τα βέλτιστα κατά Pareto σημεία. Όταν το πεδίο αναζήτησης είναι συνεχές αρκεί ο εντοπισμός ενός μέρους του συνόλου των βέλτιστων κατά Pareto λύσεων για να προσεγγιστεί η μορφή του πραγματικού μετώπου.

2.10.2 Εξωτερικό αρχείο και προσαρμοστικό πλέγμα

Το εξωτερικό αρχείο χρησιμοποιείται για την αποθήκευση των μη-επικυριαρχούμενων λύσεων οι οποίες ευρίσκονται κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης. Αποτελείται από τον *ελεγκτή του εξωτερικού αρχείου* και ένα *προσαρμοστικό πλέγμα*. Ο ελεγκτής βασίζει την απόφαση του για πρόσθεση ή όχι μιας καινούργιας λύσης στο εξωτερικό αρχείο στους ακόλουθους απλούς κανόνες:

1. Εάν το εξωτερικό αρχείο δεν έχει εγγραφές, τότε προστίθεται αυτόματα η καινούργια λύση.
2. Εάν η καινούργια λύση επικυριαρχείται από μια λύση που είναι ήδη αποθηκευμένη στο αρχείο απορρίπτεται.
3. Εάν δεν επικυριαρχείται από καμία προϋπάρχουσα λύση τότε αποθηκεύεται στο αρχείο και αφαιρούνται εκείνες οι λύσεις του αρχείου που κυριαρχούνται από την καινούργια λύση.
4. Εφόσον το εξωτερικό αρχείο έχει φθάσει στο μέγιστο επιτρεπτό του μέγεθος, εφαρμόζεται ο αλγόριθμος του προσαρμοστικού πλέγματος που περιγράφεται στην συνέχεια.

Πρέπει να σημειωθεί ότι επιπρόσθετα των περιγραφόμενων κανόνων δίνεται από τον ελεγκτή προτεραιότητα στην αποθήκευση των εφικτών λύσεων σε σχέση με τις μη εφικτές, λαμβάνοντας σε κάθε περίπτωση και την αποτίμηση της παραβίασης των σχετικών περιορισμών, εφόσον βέβαια αυτοί έχουν ορισθεί. Κατά αυτόν τον τρόπο ο αλγόριθμος δεν αποκλείει ρητά την αποθήκευση μη εφικτών λύσεων στο εξωτερικό αρχείο.

Η χρήση ενός προσαρμοστικού πλέγματος, αναλόγου με αυτό που προτάθηκε στον αλγόριθμο PAES, αποσκοπεί στην αντιπροσωπευτικότερη κατανομή των ευρισκόμενων λύσεων στο μέτωπο Pareto [44]. Το πεδίο λύσεων διαχωρίζεται σε υπερκύβους, ίσης διάστασης με τον αριθμό των εφαρμοζόμενων κριτηρίων, τα όρια των οποίων καθορίζονται από τις τρέχουσες οριακές τιμές των κριτηρίων και των αποθηκευμένων λύσεων στο αρχείο. Εάν προστεθεί μια καινούργια λύση εκτός των ορίων του πλέγματος, τότε αυτό αναπροσαρμόζεται έτσι ώστε να τη συμπεριλαμβάνει, βάσει των καινούργιων τιμών εύρους d_r των αντιστοιχών κριτηρίων d . Σε αυτή την περίπτωση, επαναπροσδιορίζεται η θέση των λύσεων στο αναπροσαρμοσμένο πλέγμα, καθώς έχει μεταβληθεί το πλάτος των υπερκύβων που το αποτελούν, βάσει του λόγου d_r/r με r να είναι ο αριθμός των επιπέδων υποδιαίρεσης. Στην περίπτωση που το αρχείο τείνει να υπερβεί τη μέγιστη ορισμένη χωρητικότητά του, η νέα λύση εισάγεται εφόσον βρίσκεται σε υπερκύβο με το μικρότερο αριθμό σωματιδίων, ενώ αντίστοιχα διαγράφεται μία λύση από τον υπερκύβο με τον μεγαλύτερο αριθμό σωματιδίων.

2.10.3 Ενημέρωση της θέσεως και της ταχύτητας των σωματιδίων

Ο πολυκριτηριακός αλγόριθμος βελτιστοποίησης MOPSO βασίζεται στην εκδοχή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων με ζυγισμένο όρο αδράνειας. Η εξίσωση ενημέρωσης της ταχύτητας των σωματιδίων τροποποιείται κατάλληλα, έτσι ώστε να επιλέγεται οδηγός ανά μέλος του πληθυσμού με πιθανοκρατικό τρόπο. Αναλυτικότερα, σε κάθε υπερκύβο με s_i σωματίδια ανατίθεται μία τιμή καταλληλότητας $f(i) = \alpha/s_i$, όπου α είναι πραγματικός αριθμός μεγαλύτερος της μονάδας.

Η συγκεκριμένη διαδικασία προσομοιάζει τον διαμοιρασμό καταλληλότητας, καθώς προσδίδεται μειωμένη πιθανότητα στους υπερκύβους με μεγάλη πυκνότητα πληθυσμού για την επιλογή οδηγού από τον τοπικό τους πληθυσμό. Για κάθε επιμέρους σωματίδιο, εφαρμόζεται *επιλογή ρουλέτας* με πιθανότητα $prob_i$ για εκλογή του υπερκύβου i από τον οποίο επιλέγεται τυχαία ο οδηγός του σμήνους.

$$prob_i = \frac{f(i)}{\sum_H f(i)} \quad (23)$$

Η χρήση ενός πιθανοκρατικού μοντέλου για την επιλογή των οδηγών που χρησιμοποιούνται για την ενημέρωση της ταχύτητας και της θέσεως των σωματιδίων έχει ως άμεσο αποτέλεσμα τη πιο ομογενή κατανομή των κυρίαρχων λύσεων στο μέτωπο Pareto. Κατά αυτή την έννοια η διασπορά του πληθυσμού κατά τη διάρκεια της διαδικασίας βελτιστοποίησης εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από την επιλογή κατάλληλου αριθμού επιπέδων υποδιαίρεσης του πλέγματος.

Στην προσπάθεια περιορισμού της απόκλισης του ευρισκόμενου μετώπου Pareto από το πραγματικό μέτωπο που χαρακτηρίζει το πρόβλημα βελτιστοποίησης, εφαρμόζεται ένας επιπρόσθετος τελεστής μετάλλαξης για την καλύτερη διερεύνηση του χώρου έρευνας. Για το σκοπό αυτό ο τελεστής μετάλλαξης στην αρχή της διαδικασίας βελτιστοποίησης εφαρμόζεται στο μεγαλύτερο ποσοστό των σωματιδίων, και καλύπτει όλο το πεδίο ορισμού των παραμέτρων ελέγχου. Στη συνέχεια τόσο το ποσοστό των σωματιδίων που μεταλλάσσονται όσο και το εύρος τιμών των μεταβλητών ελαττώνονται μη γραμμικά. Με αυτό τον τρόπο η επίδραση του τελεστή μετάλλαξης μειώνεται με τον αριθμό των γενεών, επιδεικνύοντας μεγάλη διερευνητική ικανότητα στα πρώτα στάδια του αλγορίθμου όπου συνήθως θεωρείται απαραίτητο.

Συνοψίζοντας, τα αλγοριθμικά βήματα της μεθόδου MOPSO περιλαμβάνουν την αρχικοποίηση του πληθυσμού με τυχαίο τρόπο, της εξέλιξής του βάσει των εξισώσεων ενημέρωσης θέσεως και ταχύτητας της PSO με επικουρική εφαρμογή του τελεστή μετάλλαξης, και τη χρήση ενός γεωγραφικά κατανομημένου εξωτερικού αρχείου για την αποθήκευση των επικρατουσών λύσεων και τη βέλτιστη κατανομή τους σε ένα Pareto μέτωπο (Πίνακας 4).

Για $i = 1$ μέχρι το μέγεθος του πληθυσμού

Αρχικοποίηση ($\mathbf{x}_i, \mathbf{u}_i, \mathbf{p}_i$)

Ενημέρωση εξωτερικού αρχείου μη κυριαρχούμενων λύσεων $\mathbf{REP}(\mathbf{x}_i)$

Εάν \mathbf{x}_i εκτός ορίων πλέγματος $\mathbf{REP}(\mathbf{x}_i)$

Ενημέρωση γεωγραφικού πλέγματος \mathbf{REP}

Βρόγχος

Για $i = 1$ μέχρι το μέγεθος του πληθυσμού

$h =$ επιλογή ρουλέτας (\mathbf{REP})

Για $d = 1$ μέχρι τη μέγιστη διάσταση

$$v_{id}(t) = v_{id}(t-1) + c_1 \rho_1 (p_{id} - x_{id}(t-1)) + c_2 \rho_2 (REP[h]_d - x_{id}(t-1))$$

$$x_{id}(t) = x_{id}(t-1) + v_{id}(t)$$

$$\text{εάν } x_{id}(t) \notin (x_{d \min}, x_{d \max}) \text{ τότε } v_{id}(t) = -v_{id}(t)$$

$$\text{εάν } x_{id}(t) > x_{d \max} \text{ τότε } x_{id}(t) = x_{d \max}$$

$$\text{εάν } x_{id}(t) < x_{d \min} \text{ τότε } x_{id}(t) = x_{d \min}$$

επόμενο d

μετάλλαξη (\mathbf{x}_i)

επόμενο i

Για $i = 1$ μέχρι το μέγεθος του πληθυσμού

$$\text{εάν } \mathbf{x}_i(t) \prec \mathbf{p}_i \text{ τότε } \mathbf{p}_i(t) = \mathbf{x}_i(t)$$

Ενημέρωση εξωτερικού αρχείου μη κυριαρχούμενων λύσεων $\mathbf{REP}(\mathbf{x}_i)$

Εάν \mathbf{x}_i εκτός ορίων πλέγματος $\mathbf{REP}(\mathbf{x}_i)$

Ενημέρωση γεωγραφικού πλέγματος \mathbf{REP}

επόμενο i

$t = t+1$

Μέχρι την ικανοποίηση του κριτηρίου τερματισμού

Πίνακας 4. Ψευδοκώδικας για τη σειριακή εκτέλεση του αλγορίθμου MOPSO

2.11 Διαφορές μεταξύ Γενετικών και Αλγορίθμου Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων

Από τη πρώτη στιγμή που προτάθηκε η βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων έχει επηρεαστεί από έννοιες των εξελικτικών αλγορίθμων. Η χρήση ενός πληθυσμού για την αναπαράσταση των λύσεων που εξετάζονται από τον αλγόριθμο προέρχεται από τους γενετικούς αλγορίθμους, και οι βασικές εξισώσεις ενημέρωσης της θέσης και της ταχύτητας των σωματιδίων έχουν κάποια κοινά γνωρίσματα με τους εξελικτικούς τελεστές. Δύναται βέβαια να εντοπισθούν κάποιες βασικές διαφορές μεταξύ τους:

- Παρόλο που ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων διατηρεί την ιδεολογική απλότητα των γενετικών αλγορίθμων, ο εξελικτικός του μηχανισμός δεν δημιουργεί καινούργια μέλη στον πληθυσμό, αλλά όλα τα σωματίδια επιβιώνουν από γενιά σε γενιά.
- Ενώ στον αλγόριθμο PSO τα σωματίδια είναι ανάλογα των χρωμοσωμάτων των γενετικών αλγορίθμων, εξελίσσονται μόνο διαμέσου της κοινωνικής τους συμπεριφοράς.
- Η αυτό-οργάνωση που είναι έμφυτη στην κοινωνική συμπεριφορά των σωματιδίων είναι εξίσου σημαντική με την φυσική επιλογή, όπως αυτή προβλέπεται στη διαδικασία εξέλιξης του πληθυσμού στους γενετικούς αλγορίθμους.
- Οι ταχύτητες των σωματιδίων προσαρμόζονται, ενώ οι θέσεις των ατόμων του πληθυσμού στους γενετικούς αλγορίθμους τροποποιούνται με τη χρήση συγκεκριμένων τελεστών.
- Ο αλγόριθμος PSO συγκρινόμενος με τους γενετικούς αλγορίθμους έχει λιγότερο πολύπλοκους τελεστές και μικρότερο αριθμό παραμέτρων.
- Συνεπώς, ο αλγόριθμος PSO είναι πιο εύκολος στην υλοποίηση και στην εφαρμογή του σε σχεδιαστικά προβλήματα συνεχών και διακριτών μεταβλητών, συγκρινόμενος με τους γενετικούς αλγορίθμους.

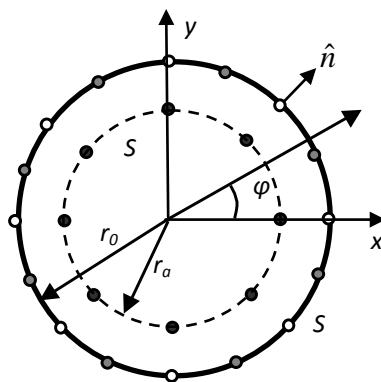
2.12 Εφαρμογή σε Πρόβλημα Σκέδασης με τη Μέθοδο των Βοηθητικών Πηγών

Τα πρακτικά προβλήματα εφαρμογών της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας σε πολλές περιπτώσεις δεν περιορίζονται στα προβλήματα σχεδίασης αλλά μπορούν να περιλαμβάνουν ειδικές εφαρμογές, όπως η κατασκευή ισοδύναμου μαθηματικού μοντέλου μέσω κάποιας υπολογιστικής μεθόδου. Η αναζήτηση καλύτερου τρόπου αντιστοίχισης της φυσικής διάταξης με το χρησιμοποιούμενο ισοδύναμό της πολλές φορές καταλήγει σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, από το οποίο εξάγονται κατάλληλες τιμές ορισμού των παραμέτρων της μεθόδου, οι οποίες εγγυώνται την καλύτερη συμπεριφορά της κατά την επίλυση της διάταξης. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί η επιλογή της θέσης των βοηθητικών πηγών κατά την εφαρμογή της μεθόδου των βοηθητικών πηγών (Method of Auxiliary Sources – MAS) [45], που παρουσιάζεται ακολούθως.

2.12.1 Βελτιστοποίηση της θέσης των βοηθητικών πηγών

Η παρούσα ενότητα αξιολογεί τη ικανότητα του αλγόριθμου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων στην εύρεση δόκιμων τιμών των παραμέτρων της μεθόδου των βοηθητικών πηγών, όταν αυτή εφαρμόζεται στο πρόβλημα υπολογισμού της διστατικής σκέδασης από έναν τέλεια ηλεκτρικά αγώγιμο κύλινδρο απείρου μήκους [46]. Η μέθοδος των βοηθητικών πηγών υπαγορεύει ότι το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο οπουδήποτε στο χώρο μπορεί να ανασυνθεθεί από την ακτινοβολία ενός συνόλου στοιχειωδών βοηθητικών πηγών μετατοπισμένων ως προς τα φυσικά όρια του κυλίνδρου. Είναι γνωστό ότι η ταχύτητα σύγκλισης και η ακρίβεια της MAS εξαρτάται από τη χωρική κατανομή των βοηθητικών πηγών. Η προτεινόμενη μέθοδος συνδυάζει τον PSO αλγόριθμο με τη μέθοδο των βοηθητικών πηγών και μπορεί να εκτιμήσει αυτόματα τη θέση των βοηθητικών πηγών, επιβάλλοντας παράλληλα την ικανοποίηση των οριακών συνθηκών στην φυσική επιφάνεια, χρησιμοποιώντας μια κατάλληλα ορισμένη αντικειμενική συνάρτηση.

Στο υπό μελέτη πρόβλημα, η γεωμετρία του σκεδαστή αποτελείται από ένα τέλεια αγώγιμο (Perfect electric conductor – PEC) κυλινδρικό αγωγό απείρου μήκους που βρίσκεται στον ελεύθερο χώρο, ο οποίος χαρακτηρίζεται από τιμή σύνθετης αντίστασης η_0 . Στην Εικόνα 6 παρουσιάζεται η οριζόντια τομή του κυλίνδρου, σύμφωνα με το ορισμένο σύστημα συντεταγμένων. Η ακτίνα του κυλίνδρου είναι r_0 , ενώ η επιφάνειά του αντιπροσωπεύεται από το σύμβολο S και το \hat{n} είναι το κάθετο διάνυσμα σε αυτήν. Έστω ότι ο κύλινδρος βυθίζεται σε ένα εγκάρσιο αρμονικό επίπεδο HM κύμα (TM), με γωνιακή συχνότητα ω και κυματάριθμο $k_0 = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$. Το προσπίπτον ηλεκτρικό πεδίο $\vec{E}^{inc}(x,y) = \hat{z} \cdot \vec{E}_z^{inc}(x,y)$ είναι ανεξάρτητο από τη χωρική κατεύθυνση z και δεν διαδίδεται μέσω του τέλεια αγώγιμου σώματος. Η εφαρμογή της μεθόδου αποσκοπεί στον προσδιορισμό του σκεδαζόμενου πεδίου \vec{E}^{sc} από τον κύλινδρο καθώς και τον υπολογισμό του συνολικού κοντινού HM πεδίου \vec{E} . Το διστατικό πρόβλημα σκέδασης αντιμετωπίζεται με την επιβολή κατάλληλης οριακής συνθήκης στην επιφάνεια του κυλίνδρου, η οποία ορίζεται από την σχέση $\hat{n} \times \vec{E}^{sc} = -\hat{n} \times \vec{E}^{inc}$. Η ακριβής ιδιοσυνάρτηση λύσης έχει προσεγγισθεί αναλυτικά (σε μορφή σειράς) για αυτήν την απλή γεωμετρία σκεδαστή [47] και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αξιολογήσει την ακρίβεια της HM υπολογιστικής μεθόδου των βοηθητικών πηγών (MAS).



Εικόνα 6. Σύμμορφη τοποθέτηση των βοηθητικών πηγών AS.

Μια βασική υπόθεση της μεθόδου MAS είναι ότι το σκεδαζόμενο πεδίο μπορεί να προσεγγιστεί από το παραγόμενο πεδίο ενός συνόλου N νηματοειδών ρευματοφόρων αγωγών απείρου μήκους, παράλληλων στον άξονα z , με άγνωστες μιγαδικές τροφοδοσίες, οι οποίοι τοποθετούνται στο εσωτερικό του τέλεια αγωγίμου σκεδαστή και αντιμετωπίζονται ως πηγές που ακτινοβολούν στον ελεύθερο χώρο. Στη γενικότερη περίπτωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοσδήποτε τύπος βοηθητικών πηγών (Auxiliary Sources – AS) εφόσον η ακτινοβολία τους είναι σύμφωνη με τις εξισώσεις του Maxwell. Για την επίλυση διδιάστατων προβλημάτων συνήθως χρησιμοποιούνται νηματοειδείς πηγές ρεύματος απείρου μήκους, των οποίων η ακτινοβολία εκφράζεται βάσει των συναρτήσεων Hankel, όπου $\bar{E}_i(r) = -(k\eta/4) \cdot I_i H_0^{(2)}(k|r-r_i|) \cdot \hat{z}$ για την i -οστή πηγή.

Η τοποθέτηση και ο αριθμός των επιλεγμένων βοηθητικών πηγών έχουν μεγάλη επίπτωση στην σύγκλιση της μεθόδου αλλά και στην ακρίβεια των ληφθέντων αποτελεσμάτων. Έχει αποδειχθεί ότι η μελέτη σκεδαστών μεγάλων ηλεκτρικών διαστάσεων απαιτεί τη χρήση περισσότερων βοηθητικών πηγών συγκριτικά με τους σκεδαστές μικρότερων διαστάσεων. Η τοποθέτηση των βοηθητικών πηγών επιχειρείται συνήθως εμπειρικά, έτσι ώστε να τοποθετούνται σύμμορφα ως προς την επιφάνεια του φυσικού ορίου και παράλληλα να ικανοποιούν τις αρχές καυστικότητας. Στην περίπτωση ενός κυλινδρικού PEC σκεδαστή, η συμμόρφωση επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση των βοηθητικών πηγών σε κυκλική επιφάνεια S_σ ακτίνας r_σ , όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 6. Το σκεδαζόμενο ηλεκτρικό πεδίο σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου εξωτερικού του σκεδαστή, μπορεί να υπολογιστεί ως το σταθμισμένο άθροισμα της ακτινοβολίας της κάθε βοηθητικής πηγής. Η επιβολή των οριακών συνθηκών στην επιφάνεια του κυλίνδρου χρησιμοποιείται για να υπολογιστούν οι μιγαδικές τιμές των ρευμάτων των βοηθητικών πηγών (βάρη) για τη δεδομένη τοποθέτησή τους στο χώρο, προκειμένου να εκτιμηθεί με ακρίβεια το συνολικό εξωτερικό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Αυτό πραγματοποιείται με την επίλυση ενός γραμμικού συστήματος $N \times N$ εξισώσεων, το οποίο λαμβάνεται όταν επιβάλλεται η ικανοποίηση των οριακών συνθηκών σε N βοηθητικά σημεία ελέγχου (Collocation Points – CP), ομογενώς καταναμημένα στην επιφάνεια του κυλινδρικού σκεδαστή.

2.12.2 Ορισμός αντικειμενικής συνάρτησης

Η ακρίβεια της υπολογισμένης λύσης μπορεί να αξιολογηθεί βάσει των προκυπτόντων τιμών ηλεκτρικού πεδίου σε ενδιάμεσα των CPs σημεία, καθότι αυτές δύναται να αποκλίνουν από τις προβλεπόμενες από τις οριακές συνθήκες τιμές. Αυτό συνήθως εκφράζεται μέσω του μέτρου απόκλισης από τις οριακές συνθήκες (boundary condition error metric), κανονικοποιημένο ως προς τη μέγιστη τιμή του προσπίπτοντος πεδίου:

$$\Delta E_{BC}(\varphi) = \frac{|\hat{n} \times (\bar{E}^{sc} + \bar{E}^{inc})|}{\max \{|\bar{E}^{inc}|\}} \quad (24)$$

Το λάθος οριακής επιφάνειας (BC error) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον ορισμό μιας αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία στη συνέχεια αποτιμάται κατά την εφαρμογή ενός πολυδιάστατου στοχαστικού αλγόριθμου, όπως του αλγόριθμου PSO, προκειμένου να υπολογιστούν βέλτιστες τιμές για τις παραμέτρους της μεθόδου, όπως π.χ. η βέλτιστη τοποθέτηση των βοηθητικών πηγών.

Ο αριθμός των βοηθητικών πηγών επιλέγεται από το χρήστη του συστήματος εμπειρικά, βάσει των ηλεκτρικών διαστάσεων και τη μορφή του σκεδαστή, και κατά συνέπεια θεωρείται σταθερός και δεν βελτιστοποιείται από την προτεινόμενη τεχνική. Η θέση των βοηθητικών πηγών AS εκφράζεται βάσει των πολικών (ρ, ϑ) συντεταγμένων τους στο διάλυμα λύσης. Η τοποθέτηση των βοηθητικών πηγών μπορεί να επιλεγεί να είναι μη σύμμορφη ή σύμμορφη ως προς την οριακή επιφάνεια, οπότε στη δεύτερη περίπτωση η ακτίνα $\rho=r_o$ είναι σταθερή όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 6 για την κυλινδρική περίπτωση. Επομένως στη γενικότερη περίπτωση, όταν χρησιμοποιούνται N βοηθητικές πηγές, η προτεινόμενη τεχνική καλείται να βελτιστοποιήσει συνολικά $2N$ παραμέτρους. Η συγκεκριμένη θεώρηση του προβλήματος σκέδασης παρουσιάζει υψηλή διαστατικότητα (dimensionality) και απαιτεί τη χρήση στοχαστικών μεθόδων βασισμένων στον ορισμό πληθυσμού, όπως ο αλγόριθμος PSO. Η θέση των βοηθητικών πηγών περιορίζεται χωρικά μέσα στη γεωμετρία του κυλίνδρου, επιβάλλοντας τους περιορισμούς $r \in (0, r_o)$ και $\vartheta \in [0, 360^\circ)$ στις πολικές συντεταγμένες τους. Αντικείμενο της βελτιστοποίησης θα μπορούσαν θεωρητικά να αποτελέσουν και τα μιγαδικά πλάτη των βοηθητικών πηγών, όμως πρακτικά αυτό θα είχε ως συνέπεια την έκρηξη της διαστατικότητας του προβλήματος και επίσης θα ήταν ως ένα βαθμό περιττό, καθώς τα πλάτη τους υπολογίζονται εγγενώς κατά την εφαρμογή των οριακών συνθηκών στα σημεία δοκιμής.

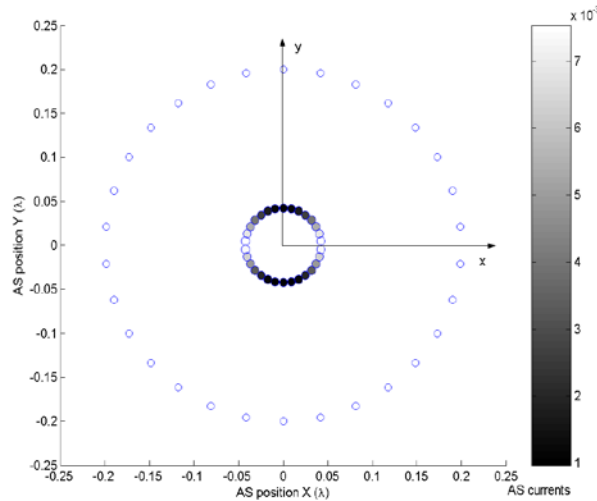
Η αντικειμενική συνάρτηση f_{obj} ελαχιστοποιεί το υπολογιζόμενο λάθος οριακών συνθηκών σε σημεία ενδιάμεσα των σημείων δοκιμής CP πάνω στην επιφάνεια του κυλινδρικού σκεδαστή, καθώς αυτά παρουσιάζουν και τις υψηλότερες τιμές απόκλισης [47]:

$$f_{obj} = \max_{\varphi} \{ \Delta E_{BC}(\varphi) \} \quad (25)$$

Η γωνία φ αναπαριστά τη γωνιακή κατανομή των ενδιαμέσων σημείων ελέγχου στην κυλινδρική επιφάνεια. Η ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης αποτελεί ένα κλασικό πρόβλημα βελτιστοποίησης minmax που μπορεί να επιλυθεί από τον αλγόριθμο PSO, όπως παρουσιάζεται από την κ. Λάσκαρη και άλλους [48]. Χρησιμοποιήθηκε η παραλλαγή του αλγορίθμου PSO με συντελεστή περιορισμού της ταχύτητας [39], καθώς αποδείχτηκε πιο αποτελεσματική για το συγκεκριμένο πρόβλημα.

2.12.3 Βελτιστοποιώντας την ακτίνα

Αρχικά εξετάζεται η περίπτωση όπου οι πηγές τοποθετούνται πάνω σε εσωτερική βοηθητική κυκλική επιφάνεια S_o ακολουθώντας μια ομοιόμορφη γωνιακή κατανομή (Εικόνα 7). Ο αλγόριθμος PSO χρησιμοποιείται για την εύρεση της βέλτιστης ακτίνας ρ που ελαχιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση. Αυτό η εκφυλισμένη έκφραση του προβλήματος αξιολογείται για την περίπτωση 30 βοηθητικών πηγών που τοποθετούνται μέσα σε ένα PEC κυλινδρικό σκεδαστή ακτίνας $\rho=0.2\lambda$, όπου λ είναι το μήκος κύματος του προσπίπτοντος ηλεκτρομαγνητικού κύματος ρυθμού TM. Ο αλγόριθμος σύγκλινε σε ελάχιστη τιμή απόκλισης λάθους ίση με $E_{bench}=6.81613E-15$, όταν η ακτίνα της βοηθητικής επιφάνειας έλαβε τη τιμή $r_o=0.2127*r=0.042538\lambda$. Η παρουσιαζόμενη τιμή λάθους είναι αρκετά μικρή και θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια ως τιμή αναφοράς για τα ακόλουθα δοκιμές για πολυδιάστατα προβλήματα βελτιστοποίησης.

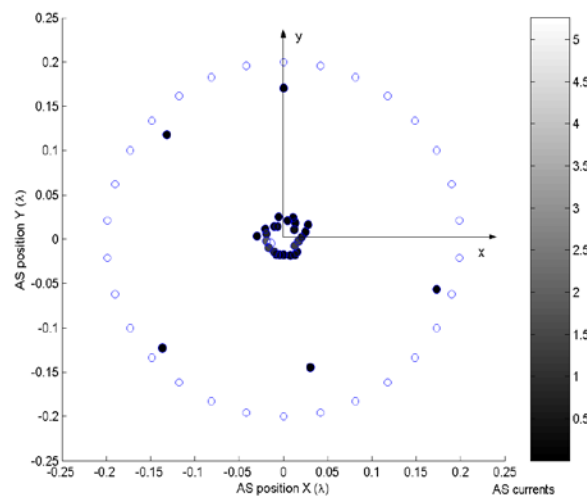


Εικόνα 7. Βέλτιστη ακτίνα σύμμορφης τοποθέτησης των AS.

Εφαρμόστηκε η παραλλαγή του αλγορίθμου PSO με παράγοντα περιορισμού της εξίσωσης ταχύτητας (Constriction Coefficient). Για αυτόν το σκοπό ορίστηκε πληθυσμός αποτελούμενος από 9 σωματίδια ο οποίος εξελίχθηκε για 40 γενεές. Οι άλλες παράμετροι του αλγορίθμου ήταν ο ορισμός γειτονιάς δακτυλιδιού μεγέθους 3, ατομικότητας $c_1=2.8$, κοινωνικότητας $c_2=1.3$ και παράμετρος συστολής $\kappa=1.0$. Τα ευρισκόμενα βάρη των μεμονωμένων βοηθητικών πηγών απεικονίζονται στην Εικόνα 7, όταν προσπίπτει στον κύλινδρο επίπεδο ηλεκτρομαγνητικό κύμα διαδιδόμενο παράλληλα στον άξονα y .

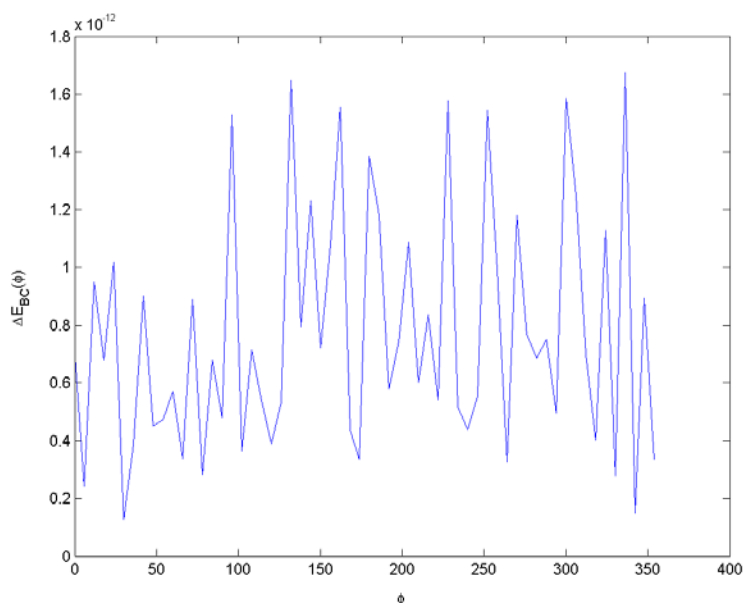
2.12.4 Βελτιστοποιώντας την γωνιακή κατανομή

Στην ακόλουθη δοκιμή διατηρείται η απαίτηση για ομοιόμορφη γωνιακή κατανομή των βοηθητικών πηγών, οπότε ο αλγόριθμος PSO καλείται να βρει βέλτιστες τιμές για τις ακτίνες των διανυσμάτων θέσης τους. Αυτό οδηγεί στη διατύπωση ενός N -διάστατου προβλήματος ελαχιστοποίησης με μια αρκετά «ανώμαλη» επιφάνεια λάθους, λόγω της παρουσίας του τελεστή μεγίστου (max) στην αντικειμενική συνάρτηση. Η απαίτηση για ομοιόμορφη γωνιακή κατανομή των AS θεωρείται σημαντικός παράγοντας σταθερότητας του συστήματος, εφόσον οι παράμετροι δεν λαμβάνουν ακραίες τιμές.



Εικόνα 8. Τοποθέτηση των AS, αφού απαιτήθηκε η ομοιόμορφη γωνιακή κατανομή τους.

Οι παράμετροι του ΗΜ προβλήματος είναι παρόμοιες με την περίπτωση της προηγούμενης δοκιμής ($N = 30$, $r = 0.2\lambda$, ΗΜ κύμα διαδιδόμενο στον άξονα y). Οι θέσεις και τα βάρη των βοηθητικών πηγών που λαμβάνονται για τη βέλτιστη λύση απεικονίζονται στο (Εικόνα 8). Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για να ληφθούν τα αποτελέσματα ήταν όμοιοι με την προηγούμενη περίπτωση, με την εξαίρεση ορισμού μεγαλύτερου πληθυσμού 48 σωματιδίων ο οποίος εξελίχθηκε για 150 γενεές, και μεγαλύτερων γειτονιών μεγέθους 8. Ο αλγόριθμος συνέκλινε σε ελάχιστη τιμή λάθους οριακής επιφάνειας ίση με $1.6755E-12$. Η παρουσιαζόμενη τιμή λάθους είναι μεγαλύτερη από τη περίπτωση της σύμμορφης τοποθέτησης, όπως ήταν άλλωστε αναμενόμενο.



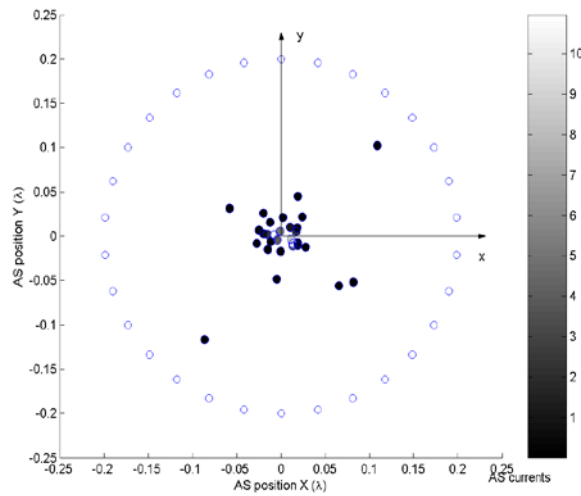
Εικόνα 9. Σφάλμα οριακών συνθηκών για προσπίπτων κύμα από $\varphi = 90^\circ$ (ανομοιόμορφη ακτίνα ρ).

Το διάγραμμα διασποράς των βοηθητικών σημείων και των βοηθητικών πηγών επιδεικνύει τη τάση των AS να συγκεντρωθούν γύρω από το κέντρο του κυλινδρικού σκεδαστή περίπου με κυκλικό τρόπο, με εξαίρεση ελάχιστων σημείων. Η μη ομοιόμορφη κατανομή των πηγών μπορεί να αποδοθεί στην υψηλή διαστατικότητα του προβλήματος και την στοχαστική φύση του αλγορίθμου. Αυτά τα αποτελέσματα συμβάλουν στην μη ομαλή μεταβολή του κανονικοποιημένου λάθους οριακών συνθηκών στα ενδιάμεσα των CP σημεία, όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 9.

2.12.5 Βελτιστοποιώντας τη χωρική κατανομή

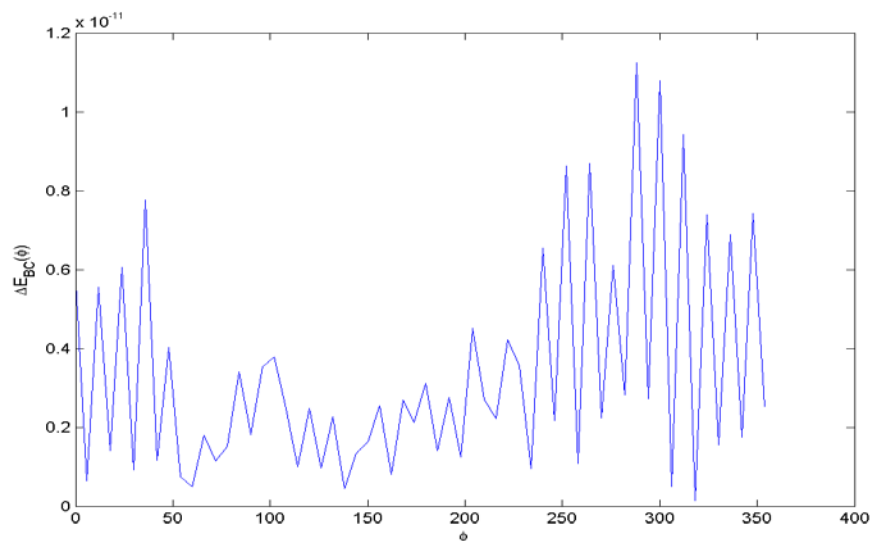
Τέλος, εφαρμόζεται η μέθοδος των βοηθητικών πηγών θεωρώντας ότι η θέση τους καθορίζεται ελεύθερα, με μοναδικό περιορισμό την μέγιστη απόσταση από το κέντρο του κυλίνδρου, που δεν μπορεί σε κάθε περίπτωση να υπερβαίνει την ακτίνα του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον διπλασιασμό της διαστατικότητας του χώρου λύσεων σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση, καθιστώντας τη σύγκλιση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης δυσκολότερη. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του προβλήματος είναι τα ίδια με την προηγούμενη περίπτωση ($N = 30$, $r = 0.2\lambda$, ΗΜ κύμα διαδιδόμενο στον άξονα y) όπως και οι παράμετροι του αλγορίθμου βελτιστοποίησης. Σε αντίθεση με τις προηγούμενες δοκιμές δεν ενσωματώθηκε στη διατύπωση του προβλήματος καμία εμπειρική γνώση ως προς την

τοποθέτηση των βοηθητικών πηγών AS. Τα αποτελέσματα που λήφθηκαν μετά τη διαδικασία βελτιστοποίησης με τον αλγόριθμο PSO, δηλαδή η τοποθέτηση και τα βάρη των βοηθητικών πηγών, απεικονίζονται στην Εικόνα 10.



Εικόνα 10. Ελεύθερη τοποθέτηση των AS.

Τα παρουσιαζόμενα αποτελέσματα αντιστοιχούν τελικά σε τιμή μέγιστου σφάλματος οριακών συνθηκών ίση με $1.12603E-11$. Παρόλο που η τιμή του σφάλματος είναι πολύ μικρή και σίγουρα κρίνεται ικανοποιητική για την επίλυση του προβλήματος, δεν μπορεί να συγκριθεί με την υπολογιζόμενη τιμή από τη βελτιστοποιημένη σύμμορφη τοποθέτηση των βοηθητικών πηγών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο αλγόριθμος έχει παγιδευτεί σε τοπικό ελάχιστο του πολυδιάστατου χώρου αποτιμήσεων, από το οποίο δεν μπορεί να ξεφύγει λόγω του συγκριτικά περιορισμένου μεγέθους του πληθυσμού. Η Εικόνα 11 επιδεικνύει την επίδραση που είχε η μη σύμμορφη τοποθέτηση των βοηθητικών πηγών στο σφάλμα οριακής επιφάνειας, καθότι ένα ποσοστό τους προσεγγίζει την οριακή επιφάνεια.



Εικόνα 11. Σφάλμα οριακών συνθηκών για προσπίπτων κύμα από $\varphi = 90^\circ$ (ελεύθερη τοποθέτηση).

2.12.6 Συμπεράσματα

Η προηγηθείσα μελέτη αποδεικνύει ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν στοχαστικές μέθοδοι βελτιστοποίησης για την εκτίμηση των καταλληλότερων τιμών παραμέτρων της υπολογιστικής μεθόδου που χρησιμοποιείται για την ανάλυση μιας ηλεκτρομαγνητικής διάταξης. Σκοπός της διαδικασίας βελτιστοποίησης είναι η βελτίωση της ακρίβειας των λαμβανομένων αποτελεσμάτων που απορρέουν από την εφαρμογή της επιλεγμένης υπολογιστικής μεθόδου. Σε κάθε περίπτωση λαμβάνονται βέλτιστα αποτελέσματα, όταν είναι δυνατή η ενσωμάτωση στη διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης της συσσωρευμένη εμπειρικής γνώσης των χρηστών των υπολογιστικών μεθόδων ή/και λαμβάνεται πρόνοια για τα ειδικά χαρακτηριστικά που μπορεί να παρουσιάζουν οι μελετώμενες ΗΜ διατάξεις. Καθώς όμως δεν είναι πάντα διαθέσιμη εκ των προτέρων η κωδικοποιημένη εμπειρία των σχεδιαστών ή δεν είναι άμεσα εφαρμόσιμη στις μελετώμενες διατάξεις, οι μέθοδοι βελτιστοποίησης συνεχίζουν να αποτελούν ένα πολύτιμο εργαλείο για την εκτίμηση των παραμέτρων μοντελοποίησής τους.

3 Κατανεμημένη Πλατφόρμα Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων

Ένα από τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι κατασκευαστές κεραιών είναι η εύρεση βέλτιστων σχεδιάσεων για σύνθετες ηλεκτρομαγνητικές διατάξεις και παράλληλης ικανοποίησής των περιορισμών που προκύπτουν από τη διαδικασία ενσωμάτωση τους σε ολοκληρωμένα συστήματα τηλεπικοινωνιών. Είναι πλέον διαδεδομένη η χρήση εξειδικευμένων προγραμμάτων ΗΜ προσομοίωσης υψηλής ακρίβειας, προκειμένου να εξασφαλίζεται ότι η πειραματική και μετρίσιμη συμπεριφορά των αναπτυσσόμενων σχεδιαστικών πρωτοτύπων δεν αποκλίνει από τους ορισμένους στόχους.

Οι απαιτήσεις για παραγωγή αποτελεσμάτων υψηλής ακρίβειας κλιμακώνονται ανάλογα με την πολυπλοκότητα της σχεδίασης και την εφαρμοζόμενη υπολογιστική μέθοδο ανάλυσης. Αυτή η κλιμάκωση μεταφράζεται ευθέως σε επαυξημένο υπολογιστικό κόστος και χρόνο κατά τη φάση της προσομοίωσης. Αν και οι δυνατότητες επεξεργασίας που προσφέρουν οι σύγχρονοι ηλεκτρονικοί υπολογιστές εξελίσσονται ραγδαία, λόγω της σταθερά αυξανόμενης διαθέσιμης υπολογιστικής ισχύος (νόμος του Moore), πολλές φορές δεν επαρκούν για την ικανοποίηση των κλιμακούμενων απαιτήσεων σε υπολογιστικό χρόνο.

Επιπρόσθετα πρέπει να σημειωθεί ότι η διαδικασία της σχεδίασης είναι από τη φύση της επαναληπτική και σε μεγάλο βαθμό η διάρκεια της εξαρτάται από την εμπειρία του σχεδιαστή. Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναδείχτηκε η χρησιμότητα των στοχαστικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης ως εργαλείων υποβοήθησης του σχεδιαστή προκειμένου να καταλήξει στην επιλογή κατάλληλων σχεδιαστικών παραμέτρων. Όμως και σε αυτή την περίπτωση το πρόβλημα του συνεπαγόμενου υψηλού υπολογιστικού κόστους παραμένει αναλλοίωτο.

Μια πιθανή λύση στο αναφερόμενο πρόβλημα αποτελεί η κατανεμημένη (παράλληλη) εκτέλεση μεγάλων υπολογιστικά προβλημάτων. Το κυριότερο πλεονέκτημα της κατανεμημένης επεξεργασίας είναι ο διαμοιρασμός των διαθέσιμων υπολογιστικών πόρων και η συνεπακόλουθη μείωση του συνολικά απαιτούμενου υπολογιστικού χρόνου. Το κέρδος σε υπολογιστική ισχύ δεν είναι ευθέως ανάλογο με τον αριθμό των συμμετεχόντων υπολογιστικών κόμβων καθώς υπεισέρχονται χρονικές καθυστερήσεις οφειλόμενες στις απαραίτητες διαδικασίες συγχρονισμού, επικοινωνίας κι ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ των παράλληλων διεργασιών που είναι ανάλογες με τον αλγόριθμο παραλληλοποίησης και το είδος του προβλήματος.

Στις ακόλουθες παραγράφους επιχειρείται συνοπτική αναφορά των μεθόδων κατανομής των υπολογιστικών διεργασιών με έμφαση στις διαδικτυακές κατανεμημένες πλατφόρμες, οι οποίες παρουσιάζουν εγγενή πλεονεκτήματα συγκρινόμενες με τις κλασσικές πλατφόρμες παραλληλοποίησης *ισχυρής σύζευξης* (tightly coupled platforms). Ακολούθως η μελέτη επικεντρώνεται στην τεχνολογία των *κινητών πρακτόρων* (mobile agents) στην οποία βασίζεται η ανάπτυξη μιας κατανεμημένης πλατφόρμας βελτιστοποίησης. Τέλος παρουσιάζονται οι δυνατότητες παραλληλοποίησης της μεθόδου βελτιστοποίησης σμήνους

σωματιδίων σε αλγοριθμικό επίπεδο καθώς και τα αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά της προτεινόμενης κατανεμημένης πλατφόρμας για επίλυση ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων.

3.1 Κατανεμημένα συστήματα

Οι κατανεμημένες υπολογιστικές εφαρμογές αποτελούνται από επιμέρους οντότητες (ισχυρά ή μη συζευγμένες) οι οποίες αφού αρχικοποιηθούν, επικοινωνούν μεταξύ τους και εκτελούνται σε διαφορετικούς δικτυακούς κόμβους, με σκοπό την επίλυση ενός συνολικότερου προβλήματος [49]. Για να είναι δυνατή η υλοποίηση των μηχανισμών επικοινωνίας θα πρέπει οι επιμέρους οντότητες να είναι δομημένες σύμφωνα με ένα προκαθορισμένο προγραμματιστικό μοντέλο. Συνήθως μεταξύ των κατανεμημένων κομματιών μια δικτυακής εφαρμογής διαμεσολαβεί μια πλατφόρμα υψηλότερου επιπέδου για την υλοποίηση ενός κοινού προγραμματιστικού μοντέλου καθώς και των μηχανισμών επικοινωνίας και διασφάλισης της διαφανούς πρόσβασης του κάθε κόμβου στους συνολικούς υπολογιστικούς πόρους του δικτύου. Η εν λόγω πλατφόρμα καλείται *μεσισμικό* και με τη βοήθεια της μπορούν να υλοποιηθούν κατανεμημένες πλατφόρμες περίπλοκης λειτουργικότητας.

Τα λογισμικά μεσισμικού για υλοποίηση κατανεμημένων συστημάτων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν αναλόγως με τους υποστηριζόμενους μηχανισμούς επικοινωνίας μεταξύ των δικτυακών κόμβων. Όταν γίνεται αναφορά σε *διαδικτυακές κατανεμημένες πλατφόρμες* συνήθως νοείται η χρησιμοποίηση ενός συστήματος κατανομής του υπολογιστικού φόρτου με *ισχνά συζευγμένες διεργασίες* (loosely coupled), σε αντίθεση με κλασσικές τεχνολογίες παραλληλοποίησης που βασίζονται σε *ισχυρά συζευγμένες διεργασίες* (tightly coupled). Αυτή η διάκριση είναι σημαντική επειδή έχει άμεση επίπτωση στις δυνατότητες για κλιμάκωση του αριθμού των συμμετεχόντων δικτυακών κόμβων, στην υποστήριξη εξελιγμένων μηχανισμών ευρωστίας καθώς και στη δυνατότητα δόμησης μιας πιο αρθρωτής και ευέλικτης υπολογιστικής πλατφόρμας. Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά αρχιτεκτονικές και τεχνολογίες κατανεμημένων συστημάτων που εμπίπτουν στη μια ή στην άλλη γενική κατηγορία.

3.2 Συστήματα ισχνής και ισχυρής σύζευξης

Ένα σύστημα διεργασιών στο οποίο όλες οι αλληλοεπιδράσεις επιτελούνται αποκλειστικά μόνο μέσω ανταλλαγής μηνυμάτων ονομάζεται σύστημα *ισχνής σύζευξης* (loosely coupled) [50]. Αυτά τα συστήματα παρουσιάζονται ελκυστικά από τη σκοπιά των προγραμματιστών. Σχεδιάζονται αποσυνθέτοντας ένα σύνολο απαιτήσεων σε *διαχωρίσιμες έννοιες* (separable concerns) [51] η καθεμία από τις οποίες μπορεί να υλοποιηθεί αντιστοιχώντας την σε μια διεργασία. Η λειτουργία του συστήματος μπορεί να γίνει πιο κατανοητή με την επαλήθευση συγκεκριμένων ιδιοτήτων της σειράς των μηνυμάτων που ανταλλάσσονται μεταξύ των διεργασιών που το αποτελούν. Ένα κύριο χαρακτηριστικό των συστημάτων ισχνής σύζευξης είναι η παρεχόμενη εγγύηση ότι ένα μήνυμα που έχει σταλεί δεν μπορεί να ανακληθεί. Συνεπώς μια διεργασία μπορεί να συνεχίσει με τους υπολογισμούς της όταν λαμβάνει ένα μήνυμα, καλυπτόμενη από την εγγύηση ότι κανένα μελλοντικό μήνυμα που δύναται να λάβει, δεν θα απαιτεί να ανακαλέσει τους προηγούμενους υπολογισμούς της.

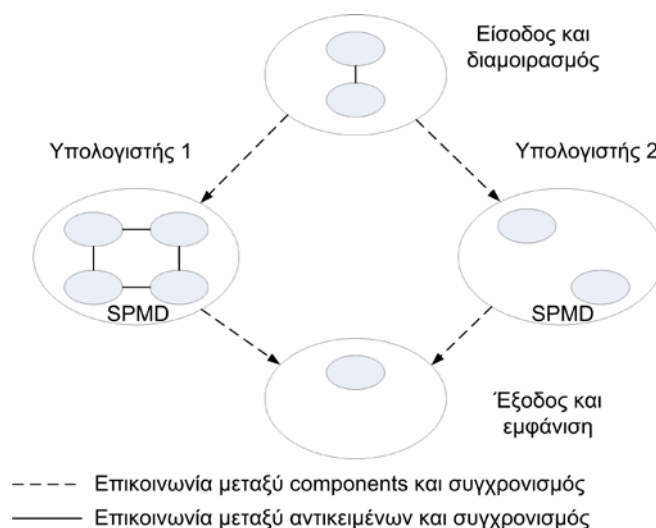
Οι διεργασίες οι οποίες επικοινωνούν διαμέσου διαμοιρασμένων μεταβλητών, όπου μια τέτοια μεταβλητή μπορεί να διαβαστεί και να γραφεί από έναν οποιοδήποτε αριθμό

συγγενών διεργασιών, συχνά αποκαλούνται ως *ισχυρά συζευγμένες* (tightly coupled). Σε αντίθεση με τα συστήματα ισχνής σύζευξης, η σχεδίαση συστημάτων ισχυρής σύζευξης απαιτεί συνήθως την σε βάθος ανάλυση τους. Καθότι οι ταχύτητες των διεργασιών που το συνθέτουν είναι πεπερασμένες και δεδομένες, χωρίς να είναι απολύτως διαγεγραμμένα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά τους, καθίσταται απαραίτητο να αναλυθούν όλες οι δυνατές σειρές εκτέλεσής τους, ανεξάρτητα από το γεγονός ότι κάποιες από αυτές μπορεί να εγυηθούν ότι δεν θα προκαλέσουν *καταστάσεις ανταγωνισμού* (race conditions) μεταξύ τους. Συνήθως απαιτείται η χρήση ειδικών πρωτοκόλλων συγχρονισμού τα οποία ορίζουν μηχανισμούς αποκλειστικής πρόσβασης στις διαμοιρασμένες μεταβλητές. Υπάρχουν βέβαια περιπτώσεις όπου οι διαμοιρασμένες μεταβλητές προσφέρουν κομψές και περιεκτικές λύσεις, π.χ. η αποστολή ενός μηνύματος μεταξύ πολλών παραληπτών μπορεί να υλοποιηθεί με την αποθήκευση του μηνύματος σε μια καθολική (global) μεταβλητή η οποία είναι αναγνώσιμη από όλες τις διεργασίες.

3.3 Κατανεμημένες πλατφόρμες ισχυρής σύζευξης

3.3.1 Παράλληλες Ιδεατές Μηχανές – PVM

Το πρότυπο υπολογισμού Παράλληλων Ιδεατών Μηχανών (PVM – Parallel Virtual Machines) [52] είναι βασισμένο στην έννοια ότι μια εφαρμογή αποτελείται από διάφορες επιμέρους εργασίες η καθεμία από τις οποίες διεκπεραιώνει ένα μέρος του υπολογιστικού φόρτου της εφαρμογής. Μια εφαρμογή δύναται να παραλληλοποιηθεί βάσει των λειτουργιών της, δηλαδή κάθε διεργασία να εκτελεί μια διαφορετική λειτουργία. Η διαδικασία αυτή συχνά αποκαλείται *παραλληλισμός σε επίπεδο διεργασιών*. Μια πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος κατανεμημένης εκτέλεσης μιας εφαρμογής είναι ο παραλληλισμός της σε επίπεδο δεδομένων. Σε αυτήν την μέθοδο όλοι οι εργασίες είναι ίδιες, αλλά καθεμία από αυτές γνωρίζει μόνο και εκτελείται για ένα μικρό υποσύνολο των δεδομένων. Αυτό το μοντέλο εκτέλεσης αναφέρεται επίσης ως πρότυπο *SPMD (Single Process Multiple Data)*. Η πλατφόρμα PVM υποστηρίζει και τους δύο τύπους επεξεργασίας ή μίγμα αυτών των μεθόδων. Ανάλογα με τις επιτελούμενες λειτουργίες τους οι εργασίες μπορούν να εκτελεστούν παράλληλα και μπορεί να χρειαστούν να συγχρονίσουν ή να ανταλλάξουν δεδομένα.



Εικόνα 12. Αρχιτεκτονική του συστήματος PVM

Το σύστημα PVM αποτελείται από δύο μέρη. Το πρώτο μέρος είναι ένα δαίμονας, (*pvmd3*), ο οποίος είναι ενσωματωμένος σε όλους τους υπολογιστές που αποτελούν την εικονική μηχανή (ένα παράδειγμα δαίμονα είναι το πρόγραμμα ταχυδρομείου που τρέχει στο υπόβαθρο και χειρίζεται όλο το εισερχόμενο και εξερχόμενο ηλεκτρονικό ταχυδρομείο σε έναν υπολογιστή). Έτσι δίνεται η δυνατότητα σε πολλαπλούς χρήστες να διαμορφώσουν επικαλυπτόμενες εικονικές μηχανές και να εκτελούν ταυτόχρονα διάφορες εφαρμογές στο σύστημα PVM.

Το δεύτερο μέρος του συστήματος είναι η βιβλιοθήκη ορισμού των διεπαφών PVM. Περιέχει όλες τις βασικές υλοποιήσεις των βασικών λειτουργιών οι οποίες είναι απαραίτητες για τη συνεργασία των διαδικασιών μιας εφαρμογής. Αυτή η βιβλιοθήκη περιέχει τις ρουτίνες για τη διαβίβαση μηνυμάτων, δημιουργία διαδικασιών, τον συντονισμό τους καθώς και για την τροποποίηση της εικονικής μηχανής.

Εν συντομία, οι αρχές στις οποίες είναι βασισμένο το PVM περιλαμβάνουν τα εξής:

- *Διαμορφωμένη από το χρήστη «λίμνης» μηχανημάτων:* Οι υπολογιστικές εργασίες της εφαρμογής εκτελούνται σε ένα σύνολο μηχανών που επιλέγονται από το χρήστη για τη δεδομένη εκτέλεση του προγράμματος PVM. Μπορούν να συμμετέχουν στην πλατφόρμα μηχανήματα με μία ή περισσότερες μονάδες επεξεργασίας (συμπεριλαμβανομένων των υπολογιστών διαμοιρασμένης και κατανεμημένης μνήμης). Το σύνολο των διαθέσιμων υπολογιστικών πόρων μπορεί να αλλάξει δυναμικά με την προσθήκη και τη διαγραφή μηχανημάτων κατά τη διάρκεια της λειτουργίας (σημαντικό χαρακτηριστικό για επίτευξη αδιάκοπης λειτουργίας).
- *Διαφανής πρόσβαση στο υλικό:* Οι εφαρμογές είτε μπορούν να δουν το περιβάλλον του υλικού ως μια συλλογή των εικονικών στοιχείων επεξεργασίας χωρίς να διαχωρίζουν τα μηχανήματα ως προς τις δυνατότητές τους, είτε μπορούν να επιλέξουν να εκμεταλλευτούν τις ικανότητες συγκεκριμένων μηχανημάτων προσδιορίζοντας τη θέση εκτέλεσης υπολογιστικών διεργασιών σε υπολογιστές που κρίνονται πιο κατάλληλοι.
- *Υπολογισμοί βασισμένες σε διαδικασίες (processes):* Η βασική μονάδα παραλληλισμού σε ένα PVM σύστημα είναι οι διεργασίες, ένα ανεξάρτητο σειριακό νήμα (thread) ελέγχου που εναλλάσσεται μεταξύ των λειτουργιών επικοινωνίας και υπολογισμών. Δεν είναι υποχρεωτική η αντιστοίχιση μιας διαδικασίας ανά επεξεργαστή, οπότε είναι δυνατή η εκτέλεση πολλαπλών διαδικασιών σε έναν και μόνο επεξεργαστή.
- *Καλά ορισμένο μοντέλο ανταλλαγής μηνυμάτων:* Οι συλλογές των υπολογιστικών εργασιών, κάθε μια από τις οποίες εκτελεί και ένα μέρος των εργασιών μιας εφαρμογής, συνεργάζονται ανταλλάσσοντας καλά ορισμένα μηνύματα. Το μέγεθος μηνυμάτων περιορίζεται μόνο από το ποσό της διαθέσιμης μνήμης.
- *Υποστήριξη εκτελέσεως σε ετερογενή περιβάλλοντα:* Το σύστημα PVM υποστηρίζει ετερογενή περιβάλλοντα μηχανών, δικτύων και εφαρμογών. Επιπρόσθετα το PVM επιτρέπει την αποστολή μηνυμάτων που περιέχουν περισσότερους από ένα τύπους δεδομένων μεταξύ μηχανημάτων που χρησιμοποιούν διαφορετικούς τύπους.

- *Υποστήριξη πολυεπεξεργαστών*: Το PVM χρησιμοποιεί τις εγγενείς στους πολυεπεξεργαστές δυνατότητες ανταλλαγής μηνυμάτων προκειμένου να εκμεταλλευθεί τις δυνατότητες του διαθέσιμου υλικού. Οι κατασκευαστές παρέχουν συχνά βελτιστοποιημένες εκδόσεις των βιβλιοθηκών PVM για τα συστήματά τους, οι οποίες διατηρούν την ικανότητά τους να επικοινωνούν με τις «δημόσιες» και «ανοικτές» υλοποιήσεις του PVM.

3.3.2 Διεπαφή Ανταλλαγής Μηνυμάτων – MPI

Μια από τις πιο γνωστές μορφές κατανεμημένης επεξεργασίας είναι ο προγραμματισμός με τη διεπαφή ανταλλαγής μηνυμάτων (Message Passing Interface – MPI) [53]. Το MPI αποτελεί στην ουσία μια τυποποίηση βιβλιοθηκών με τις οποίες είναι δυνατή η δημιουργία εφαρμογών παράλληλης επεξεργασίας που επικοινωνούν μέσω της ανταλλαγής μηνυμάτων. Τα μηνύματα είναι πακέτα από δεδομένα με κατάλληλη ετικέτα, που φανερώνει την πληροφορία που περιέχει. Με τη χρήση τέτοιων μηνυμάτων γίνεται δυνατός ο συγχρονισμός των διεργασιών και επομένως και η επικοινωνία τους. Ο συγχρονισμός επιτυγχάνεται καθώς η λήψη του μηνύματος μπορεί να γίνει μόνο μετά την αποστολή του.

Στο προγραμματιστικό μοντέλο του MPI, οι υπολογισμοί αποτελούνται από μια ή περισσότερες διεργασίες, οι οποίες επικοινωνούν μεταξύ τους με την ανταλλαγή μηνυμάτων μέσω της κλήσης ρουτινών. Στις περισσότερες υλοποιήσεις του MPI, ο αριθμός των διεργασιών είναι προκαθορισμένος και εκτελείται μια διεργασία σε κάθε επεξεργαστή. Αυτές όμως μπορούν να ανήκουν σε διαφορετικά προγράμματα και γι' αυτό το λόγο το MPI χαρακτηρίζεται ως πολλαπλών προγραμμάτων και δεδομένων (multiple program multiple data – MPMD) σε αντίθεση με το PVM, που υλοποιεί το μοντέλο ενός προγράμματος και πολλαπλών δεδομένων (single program multiple data – SPMD).

3.4 Κατανεμημένες πλατφόρμες ισχύος σύζευξης

3.4.1 Συστήματα επικοινωνίας μεταξύ ομότιμων δικτυακών κόμβων

Τα δίκτυα υπολογιστών για *επικοινωνία μεταξύ ομότιμων δικτυακών κόμβων* (P2P - peer to peer networks) [54] πρωτίστως βασίζονται στην υπολογιστική ισχύ και το εύρος ζώνης του συνόλου των συμμετεχόντων στο δίκτυο παρά στη συγκέντρωση αυτών των χαρακτηριστικών σε έναν σχετικά μικρό αριθμό κεντρικών διακομιστών. Ένα P2P δίκτυο δεν δομείται βάση των εννοιών των πελατών (clients) ή των κεντρικών υπολογιστών (servers), αλλά ορίζει *όρους ισότητας* για κάθε κόμβο του δικτύου, σύμφωνα με τους οποίους όλοι δύναται να επικοινωνήσουν απευθείας μεταξύ τους υλοποιώντας ταυτόχρονα τους προαναφερόμενους ρόλους.

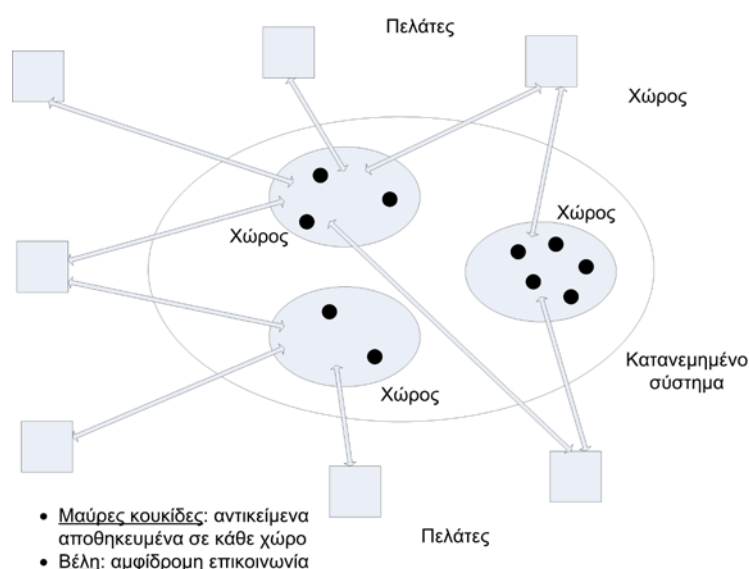
Η τεχνολογία JXTA™ [55] είναι μια πλατφόρμα ανοικτού λογισμικού για *υλοποίηση του μοντέλου επικοινωνίας σε ένα P2P περιβάλλον*, η οποία προτάθηκε το 2001 από την εταιρία Sun. Αυτή η πλατφόρμα ορίζεται ως ένα σύνολο πρωτοκόλλων βασισμένων σε XML, που επιτρέπουν σε κάθε δικτυακή συσκευή να ανταλλάσει μηνύματα και να συνεργάζεται με άλλες συσκευές, ανεξάρτητα από την ορισμένη τοπολογία δικτύου. Η τεχνολογία JXTA αποτελεί την ωριμότερη διαθέσιμη μέχρι στιγμής P2P πλατφόρμα και έχει ως σκοπό να επιτρέψει σε ένα ευρύ φάσμα συσκευών (προσωπικούς υπολογιστές, κεντρικούς

υπολογιστές, κινητά τηλέφωνα κτλ.) να χρησιμοποιούν ένα αποκεντρωμένο μοντέλο επικοινωνίας.

Τέτοιου είδους δίκτυα και πλατφόρμες χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλές εφαρμογές όπως η διαμοίραση αρχείων με πολυμεσικό ή όχι περιεχόμενο και δεδομένων πραγματικού χρόνου (π.χ. κυκλοφορία IP τηλεφωνίας). Το ευέλικτο μοντέλο επικοινωνίας τους, επιτρέπει την *δόμηση κατανεμημένων υπολογιστικών συστημάτων ισχνης σύζευξης*.

3.4.2 Συστήματα βασισμένα στον ορισμό κατανεμημένων χώρων

Τα συμβατικά εργαλεία δόμησης κατανεμημένων συστημάτων βασίζονται στην ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ των διεργασιών (ασύγχρονη επικοινωνία) ή στην κλήση μεθόδων σε απομακρυσμένα αντικείμενα (σύγχρονη επικοινωνία). Ο ορισμός ενός *δημόσιου κατανεμημένου χώρου* αποτελεί επέκταση του ασύγχρονου μοντέλου επικοινωνίας σύμφωνα με τον οποίο δύο διεργασίες δεν ανταλλάσσουν απευθείας μηνύματα και στην πραγματικότητα αγνοούν την ύπαρξή τους εκατέρωθεν.



Εικόνα 13. Κατανεμημένο σύστημα βασισμένο σε χώρους

Η επικοινωνία καθίσταται δυνατή μεταξύ διαφορετικών διαδικασιών με την τοποθέτηση και ανάληψη των μηνυμάτων από έναν ορισμένο κοινόχρηστο χώρο (Εικόνα 13). Τα μηνύματα είναι δυνατόν να διαφοροποιούνται ως προς το περιεχόμενό τους (π.χ. κείμενα XML, αντικείμενα ή ό,τι άλλο μπορεί να επιτρέψει ο κοινός χώρος). Καθότι πολλαπλές διεργασίες επικοινωνούν μέσω του ίδιου χώρου, είναι δυνατόν να κατασκευαστούν κατανεμημένα συστήματα εξαιρετικά ισχνης σύζευξης, τα οποία θα παρουσιάζουν χαρακτηριστική ευελιξία στη σχεδίαση και λειτουργία τους.

Η υλοποίηση κοινόχρηστων χώρων για τη δόμηση κατανεμημένων συστημάτων αρχικά περιγράφηκε το 1982 στα πλαίσια της γλώσσας προγραμματισμού *Linda*. Η κυριότερη αρχή τέτοιων χώρων είναι ότι διεργασίες που εκτελούνται σε διαφορετικά υπολογιστικά περιβάλλοντα μπορούν να έχουν πρόσβαση σε ένα είδος κατανεμημένης μνήμης η οποία περιέχει τα σχετικά με τις εφαρμογές δεδομένα (*tuples* – μορφή λίστας δεδομένων ανομοιόμορφου τύπου). Η πιο σημαντική υλοποίηση αυτής της ιδέας μπορεί να απαντηθεί

στην προσφερόμενη από την εταιρία Sun τεχνολογία των JavaSpaces™ [56]. Το κυριότερο πλεονέκτημα των *JavaSpaces* είναι η συσχέτιση τους με το πρότυπο Jini™, που υλοποιεί μια ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική *προσανατολισμένη στις υπηρεσίες για δυναμικά περιβάλλοντα*.

Το πρότυπο Jini™ [57] ορίζει μια δικτυακή αρχιτεκτονική για την κατασκευή κατανεμημένων συστημάτων όπου η *κλίμακα, η ευελιξία και η πολυπλοκότητα* των αλληλεπιδράσεων ανάμεσα στα δίκτυα είναι εξαιρετικά σημαντικές και δεν μπορούν να ξεταστούν ικανοποιητικά από τις υπάρχουσες τεχνολογίες. Η τεχνολογία Jini παρέχει μια ευέλικτη υποδομή για την προσφορά υπηρεσιών σε ένα δίκτυο και για δημιουργία αυθόρμητων αλληλεπιδράσεων μεταξύ των πελατών που χρησιμοποιούν αυτές τις υπηρεσίες, *ανεξάρτητα από τις υλοποιήσεις τους σε επίπεδο υλικού ή λογισμικού*.

3.4.3 Συστήματα προσανατολισμένα στην παροχή υπηρεσιών

Ο όρος «*αρχιτεκτονική προσανατολισμένη στις υπηρεσίες*» (Service Oriented Architecture - SOA) [58] εκφράζει εκείνη την θεώρηση σχεδίασης λογισμικού, η οποία απαιτεί τη σύνθεση ισχνά συζευγμένων υπηρεσιών για την ικανοποίηση των προδιαγραφών που μπορεί να τεθούν από μια ολοκληρωμένη διαδικασία και τους χρήστες της. Σε ένα περιβάλλον SOA οι πόροι του δικτύου παρέχονται ως ανεξάρτητες υπηρεσίες, διαφανώς προσπελάσιμες, ανεξάρτητα από τις πλατφόρμες λογισμικού που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίησή τους. Διάφορες πλατφόρμες έχουν αναπτυχθεί για την υλοποίηση τέτοιων συστημάτων με βασικότερη την κατηγορία των *υπηρεσιών ιστού* (web services).

Μια *υπηρεσία ιστού* [59] είναι ένα σύστημα λογισμικού σχεδιασμένο να υποστηρίζει τη αλληλεπίδραση μηχανών πάνω από ένα δίκτυο. Η τεχνολογία των υπηρεσιών ιστού περιγράφει την υπηρεσία, και όχι τον τρόπο με τον οποίο αυτή πρέπει να υλοποιηθεί, οπότε καθίσταται δυνατή η υλοποίηση των υπηρεσιών σε διαφορετικά περιβάλλοντα (π.χ. διαφορετική γλώσσα προγραμματισμού ή/και διαφορετικό λειτουργικό σύστημα).

Οι προδιαγραφές που προσδιορίζουν τις υπηρεσίες ιστού ορίζονται σκόπιμα με αρθρωτό τρόπο και κατά συνέπεια δεν υπάρχει κανένα έγγραφο που να καθορίζει επακριβώς τη λειτουργικότητά τους. Αντιθέτως ορίζονται μερικές προδιαγραφές κεντρικών λειτουργιών που συμπληρώνονται από άλλες, αναλόγως με το τι υπαγορεύουν οι απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής και η τεχνολογία υλοποίησής της:

- *Απλό πρωτόκολλο πρόσβασης σε αντικείμενα* (Simple Object Access Protocol – SOAP) [60]: Ένα επεκτάσιμο πρωτόκολλο ενθυλάκωσης μηνυμάτων βασισμένο σε XML, ανεξάρτητο από το μηχανισμό μεταφοράς που χρησιμοποιείται (π.χ. HTTP, SMTP κτλ.). Αποτελεί το βασικό μέσο αλληλεπίδρασης και επικοινωνίας των συστημάτων με την υπηρεσία ιστού.
- *Γλώσσα περιγραφής υπηρεσιών ιστού* (Web Services Description Language – WSDL) [61]: Γλώσσα περιγραφής των διεπαφών των υπηρεσιών καθώς και των πληροφοριών εξάρτησης τους από συγκεκριμένα πρωτόκολλα. Η γλώσσα WSDL βασίζεται σε XML και επιτρέπει τον χωρισμό της περιγραφής της αφηρημένης λειτουργίας που προσφέρεται από μια υπηρεσία από τις συγκεκριμένες λεπτομέρειες υλοποίησης και διαθεσιμότητας της.

- *Προδιαγραφές καθολικής περιγραφής, ανακάλυψης και ολοκλήρωσης των υπηρεσιών (Universal Description, Discovery and Integration - UDDI)* [62]: Περιλαμβάνει ένα σύνολο προδιαγραφών για καταναμημένα μητρώα πληροφοριών υπηρεσιών ιστού τα οποία διευκολύνουν την ανακάλυψη και τη χρησιμοποίησή τους.
- *Πλατφόρμα πόρων υπηρεσιών ιστού (Web Services Resource Framework – WSRF)*: Η πλατφόρμα WSRF συμπεριλαμβάνει προδιαγραφές που επιτρέπουν τη μοντελοποίηση μιας υπηρεσίας με τη μορφή πόρων (π.χ. πληροφορίες κατάστασης), ώστε να είναι δυνατή η ανάκλησή της κατάστασης της ανάμεσα σε δύο διαδοχικές κλήσεις της.

3.4.4 Συστήματα πολλαπλών πρακτόρων

Η βασική ιδέα των Συστημάτων Πολλαπλών Πρακτόρων (Multi Agent Systems – MAS) [63] είναι ότι μικρότερες, αυτόνομες οντότητες – οι πράκτορες – μπορούν να αλληλεπιδράσουν μεταξύ τους έτσι ώστε να οδηγήσουν στη λύση ενός πιο σύνθετου και πολύπλοκου προβλήματος.

Η αυτονομία των πρακτόρων έγκειται στο γεγονός ότι μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους ή με τον χρήστη και να μεταναστεύσουν σε απομακρυσμένους κόμβους προκειμένου να εκτελέσουν την εργασία που έχουν αναλάβει. Ο κάθε πράκτορας έχει τη δυνατότητα να αναστείλει τη λειτουργία του, να μεταφέρει τον κώδικα, την κατάσταση εκτέλεσης και τα δεδομένα του καθώς και να μεταφερθεί σε κάποιον άλλο κόμβο για να συνεχίσει τη λειτουργία του.

Η τεχνολογία των πρακτόρων ξεκινάει στις αρχές της δεκαετίας του 1990 με την εμφάνιση τεχνολογιών οι οποίες διαχωρίζονται σε δυο βασικές κατηγορίες:

- *Κινητοί πράκτορες*: Οι κινητοί πράκτορες μπορούν αυτόνομα να μεταναστεύσουν από έναν εξυπηρετητή σε κάποιον άλλο κατά τη διάρκεια της εκτέλεσής τους [64]
- *Ευφυείς πράκτορες*: Είναι πράκτορες που παρουσιάζουν κάποια μορφή τεχνητής νοημοσύνης, οι οποίοι υποστηρίζουν και δρουν εκ μέρους του χρήστη για την εκτέλεση επαναληπτικών διαδικασιών. Βασικό χαρακτηριστικό των ευφυών πρακτόρων είναι η προσαρμοστικότητά τους και η δυνατότητα μάθησης από το περιβάλλον τους [65].

Ακολούθως παρουσιάζονται συνοπτικά τα βασικά χαρακτηριστικά των πρακτόρων σχετικά με τη δομή τους, την ικανότητα τους για μετανάστευση, τα μοντέλα επικοινωνίας τους καθώς και του περιβάλλοντος εκτέλεσής τους.

(i) Δομή Πρακτόρων

Οι πράκτορες αποτελούνται από τον κώδικα, τα δεδομένα και την κατάσταση τους:

- *τον κώδικα*: Η υλοποίηση ενός μέρους αλγορίθμου που υλοποιεί μια διαδικασία (process).
- *τα δεδομένα*: Τα δεδομένα που θα αποτελέσουν το αντικείμενο επεξεργασίας
- *την κατάσταση εκτέλεσής τους*: αποτελείται από τις ιδιότητες, οι οποίες περιγράφουν τις απαιτήσεις και την ιστορία τους στην υποδομή. Αυτό

περιλαμβάνει στοιχεία όπως ένα μοναδικό προσδιοριστή, τον ιδιοκτήτη του πράκτορα ως μια διεύθυνση για τα ενδιάμεσα αποτελέσματα, μηνύματα λάθους για τη σωστή συμπεριφορά ενός πράκτορα, τον τόπο και χρόνο προέλευσης και το ιστορικό των μετακινήσεών του.

Αυτές οι πληροφορίες μπορούν να προσαρμοστούν σύμφωνα με την προέλευση ή το σκοπό του εκάστοτε πράκτορα. Το πλεονέκτημα αυτού του σχήματος είναι ότι κανένας εξυπηρετητής δεν χρειάζεται τις πλήρεις πληροφορίες για όλους τους πιθανούς προορισμούς των κινητών πρακτόρων.

(ii) Μηχανισμοί κινητικότητας

Η μεταφορά της κατάστασης εκτέλεσης επιτρέπει σε έναν πράκτορα να συνεχίσει την εργασία του αμέσως μόλις μεταναστεύσει προς έναν άλλο εξυπηρετητή, από το σημείο όπου είχε σταματήσει πριν τη μετανάστευση. Ορίζονται δυο μορφές μετανάστευσης [66] αναλόγως με το αν μεταφέρεται ο σωρός εκτέλεσής τους ή όχι:

- *Ασθενής μετανάστευση*: οι κινητοί πράκτορες αποθηκεύουν τις απαραίτητες πληροφορίες κατάστασης σε μεταβλητές μελών της κλάσης, που επιτρέπουν σε μια μέθοδο που καθορίζεται ως σημείο εισόδου να εξετάσει αυτές τις μεταβλητές και να προχωρήσει ανάλογα με την κατάσταση στην οποία βρίσκονται οι υπολογισμοί.
- *Ισχυρή μετανάστευση*: η μεταφορά του σωρού εκτέλεσης επιτρέπει στην υποδομή να επαναστιγμιωτυπήσει τον πράκτορα από το σημείο που είχε σταματήσει την εκτέλεση προτού κληθεί η μέθοδος μετακίνησης στον προηγούμενο εξυπηρετητή.

(iii) Μηχανισμοί ευφυΐας

Η σημαντικότερη, πιθανώς, ιδιότητα, που ξεχωρίζει αυτό το είδος των πρακτόρων από άλλες κατηγορίες υπολογιστικών διεργασιών, είναι η δυνατότητά τους να συνεργάζονται με κάποιον τρόπο με άλλους πράκτορες, είτε προκειμένου να προχωρήσουν στην εκτέλεση μιας δραστηριότητας, που τους έχει ανατεθεί, είτε προκειμένου να βοηθήσουν (με συνεργατικό – collaborative – τρόπο) κάποιους άλλους πράκτορες να επιτελέσουν αντίστοιχα μια εργασία. Η ευφυΐα των πρακτόρων υποστηρίζεται από *τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης* και εκφράζεται διαμέσου των υποστηριζόμενων μοντέλων επικοινωνίας που περιγράφονται στην επόμενη παράγραφο.

(iv) Μοντέλα επικοινωνίας και οντολογίες

Οι πράκτορες επικοινωνούν μεταξύ τους χρησιμοποιώντας τη γλώσσα *επικοινωνίας πρακτόρων* (ACL - Agent Communication Language). Η ACL είναι μία υψηλού επιπέδου διερμηνευόμενη γλώσσα προγραμματισμού με αυστηρό συντακτικό, σημασιολογία και περιεχόμενο. Παρόλα αυτά, πρέπει να τονιστεί ότι, στην επικοινωνία μεταξύ των πρακτόρων, η ACL είναι μόνο μία από τις τρεις συνιστώσες που εμπλέκονται (Εικόνα 14). Οι άλλες δύο είναι η *γλώσσα περιεχομένου* (content language) και η *οντολογία* (ontology).



Εικόνα 14. Ευφυείς πράκτορες

Επομένως, η επικοινωνία ανάμεσα στους πράκτορες και το μοντέλο συνεργασίας τους [67] είναι ένα από τα κυριότερα ζητήματα αναφορικά με τη λειτουργία τους.

(v) Χαρακτηριστικά Πλατφόρμας

Το *Περιβάλλον Εκτέλεσης Κινητών Πρακτόρων (Mobile Agent Execution Environment)* έχει σχεδιασθεί έτσι ώστε να επιτρέπει την υλοποίηση μεθόδων απομακρυσμένου προγραμματισμού (remote programming). Η βασική ιδέα ήταν ότι μικρά κομμάτια κώδικα μεταφέρονται εκεί που βρίσκονται μεγάλες ποσότητες δεδομένων, μειώνοντας έτσι τον φόρτο του δικτύου.

Η υποδομή μιας πλατφόρμας κινητών πρακτόρων παρέχει την υποστήριξη υπηρεσιών κινητικότητας και επικοινωνίας κατά τον χρόνο εκτέλεσης. Θα πρέπει να είναι δυνατή η μετανάστευση ενός πράκτορα από ένα διακομιστή σε ένα άλλο ώστε να μπορεί να έχει πρόσβαση σε δεδομένα και πληροφορίες τις οποίες να μεταφέρει πίσω στην αρχική του θέση.

Αναγκαίο χαρακτηριστικό κάθε πλατφόρμας πρακτόρων είναι η ύπαρξη μιας υπηρεσίας καταλόγου για την εύρεση της θέσης ενός αντικειμένου. Οποιαδήποτε λογική υπηρεσία καταλόγου για τους κινητούς πράκτορες πρέπει να χρησιμοποιεί αποδοτικούς μηχανισμούς για την παρακολούθηση των πρακτόρων ώστε να ανακτάται η τρέχουσα θέση τους.

(vi) Προγραμματιστικό περιβάλλον

Τα τελευταία χρόνια η Java έχει αποδειχτεί ως η πλέον κατάλληλη γλώσσα για την ανάπτυξη συστημάτων πολλαπλών πρακτόρων εξαιτίας:

- *της πολυνηματικής επεξεργασίας:* Προσφέρεται η δυνατότητα για παράλληλη επεξεργασία βάσει της εγγενούς υποστήριξης δημιουργίας και παρακολούθησης νημάτων εκτέλεσης.
- *της σειριοποίησης αντικειμένων:* Υποστηρίζει την τεχνολογία κινητού κώδικα μέσω των δυνατοτήτων της για σειριοποίηση αντικειμένων (object serialization), η οποία επιτρέπει το δυναμικό φόρτωμα κώδικα κατά τη διάρκεια εκτέλεσης ενός προγράμματος
- *των δικτυακών διεπαφών που προσφέρει:* Υλοποιεί πλήρως τα βασικά και όχι μόνο πρωτόκολλα επικοινωνίας του διαδικτύου.

Η συντριπτική πλειοψηφία των υπαρχόντων συστημάτων κινητών πρακτόρων είναι υλοποιημένα σε Java, αλλά υπάρχουν υλοποιήσεις και σε άλλες γλώσσες προγραμματισμού.

(vii) Πλεονεκτήματα

Αναφορικά με τους κινητούς πράκτορες, αναφέρονται συνήθως τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- *Ασύγχρονη και αυτόνομη εκτέλεση διεργασιών.* Μετά από την είσοδο ενός πράκτορα σε ένα καταναμημένο υπολογιστικό σύστημα, ο χρήστης μπορεί να εκτελέσει άλλες δραστηριότητες, χωρίς να απαιτείται να αλληλεπιδρά με τον πράκτορα αυτό.
- *Μείωση της δικτυακής κυκλοφορίας και της απαιτούμενης υπολογιστικής ισχύος στη μεριά του πελάτη.* Οι ανταλλαγές δεδομένων πολύ μεγάλου όγκου γίνονται τοπικά από τους κόμβους που περιέχουν αυτήν την πληροφορία και οι υπολογιστές στη μεριά του εξυπηρετητή μπορούν να επικεντρωθούν στην εκτέλεση σχετικά απλών λειτουργιών.
- *Αυξημένη ευρωστία.* Η μείωση της εξάρτησης μιας καταναμημένης εφαρμογής από τη διαθεσιμότητα του δικτύου επιτυγχάνεται επειδή ο κώδικας του πελάτη βρίσκεται στον ίδιο κόμβο με αυτόν του εξυπηρετητή και η επικοινωνία είναι τοπική.
- *Αυτοματοποίηση της επεξεργασίας καταναμημένων υπολογισμών.* Οι πράκτορες έχουν ενσωματωμένα δρομολόγια, τα οποία καθορίζουν, τι είδους δραστηριότητες πρέπει να εκτελέσουν και σε ποιους κόμβους, με αποτέλεσμα να μην απαιτείται συνεχής αλληλεπίδραση με το χρήστη.
- *Αποκεντρωμένη και κατά τόπους επεξεργασία (έλεγχος και διαχείριση).* Η κλινοποίηση των πρακτόρων επιτρέπει την (αυτοματοποιημένη) κατανομή των υπολογιστικών συνιστωσών προγραμμάτων, που ήταν προηγουμένως συγκεντρωτικά.
- *Ευελιξία.* Η κατ' απαίτηση διανομή λογισμικού ή παροχή υπηρεσιών γίνεται εφικτή, καθώς κινητοί πράκτορες μπορούν να «κατεβούν» στιγμιαία σε οποιοδήποτε κόμβο πελάτη ή εξυπηρετητή.

3.5 Καταναμημένη πλατφόρμα βελτιστοποίησης

Η εξέλιξη της αναπαράστασης του φυσικού στρώματος των σύγχρονων συστημάτων ασύρματης πρόσβασης στο ίντερνετ Wi-Fi (IEEE 802.11b), των τεχνολογιών κινητών επικοινωνιών 2.5G / 3G και των ευρυζωνικών κυψελωτών δικτύων έχει αυξήσει δραματικά τη ζήτηση για πρωτότυπες σχεδιάσεις κεραιών. Αυτές οι σχεδιάσεις χαμηλού κόστους πρέπει να εξασφαλίζουν τη διαλειτουργικότητα μεταξύ πολλαπλών προτύπων, τα οποία διαφοροποιούνται ως προς τις απαιτήσεις τους για επίτευξη συγκεκριμένων τιμών κέρδους, ευρυζωνικότητας, μορφοποίησης των λοβών ακτινοβολίας (beam-forming) και στροφής των κυρίως λοβών (beam steering) ή και λειτουργίας τους σε πολλαπλές ζώνες συχνοτήτων. Παράλληλα θα πρέπει να ικανοποιούν τους δεδομένους φυσικούς περιορισμούς (π.χ. μέγεθος) που επιβάλλονται προκειμένου να είναι δυνατή η ολοκλήρωση τους στα συστήματα επικοινωνιών. Η διαδικασία των προσομοιώσεων, ως αναπόσπαστο μέρος μιας συστηματικής προσέγγισης στη διαδικασία ανάπτυξης των κεραιών, προϋποθέτει τη χρήση εξειδικευμένων υπολογιστικών πυρήνων μεθόδων ηλεκτρομαγνητισμού από τους τηλεπικοινωνιακούς μηχανικούς, προκειμένου να προσεγγίσουν με ακρίβεια το υποκείμενο φυσικό πρόβλημα και να εκτιμήσουν τη συμπεριφορά των υπό ανάπτυξη σχεδιάσεων.

Οι προσομοιώσεις συνήθως συνεπάγονται τη χρήση τεχνικών ΗΜ ανάλυσης πλήρους κύματος ή υβριδικών μεθόδων, προκειμένου να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις ακρίβειας. Σε αυτή τη περίπτωση το συνεπαγόμενο υπολογιστικό κόστος εξαρτάται άμεσα από τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο υπολογιστικού ηλεκτρομαγνητισμού (π.χ. μέθοδος ροπών, πεπερασμένων στοιχείων κτλ.) και την ακρίβεια της μοντελοποίησης (πλεγματοποίηση χαμηλής ή υψηλής διακριτικότητας) [68]. Ο ορισμός επιπρόσθετων φυσικών και σχεδιαστικών ιδιοτήτων ή περιορισμών σχετιζόμενων με τη χρήση διηλεκτρικών υλικών, την διαμόρφωση των θυρών τροφοδοσίας ή/και τον ορισμό συγκεκριμένων ρυθμών διεγέρσεώς τους, δύναται να επιδράσει δυσμενώς στην ακρίβεια των λαμβανομένων αποτελεσμάτων καθώς και στον απαιτούμενο συνολικό χρόνο αριθμητικής επίλυσης της διάταξης.

Οι σχεδιαστές διεξάγουν επαναληπτικές προσομοιώσεις, προκειμένου να βελτιστοποιούν τα χαρακτηριστικά επίδοσης των κεραιών που αναπτύσσουν, διαδικασία που συνεπάγεται την εύρεση βέλτιστων τιμών για όλες τις παραμέτρους που προβλέπει η μοντελοποίηση τους. Οι παραμετρικές προσομοιώσεις είναι αποδοτικές μόνο εφόσον είναι εγγυημένη η ορθογωνικότητα μεταξύ των οριζόμενων παραμέτρων της κεραίας, σε σχέση πάντα με τους σχεδιαστικούς στόχους. Όταν επιχειρείται η ταυτόχρονη βελτιστοποίηση όλων των παραμέτρων σχεδίασης, συνήθως δεν είναι δυνατόν να συσχετισθεί άμεσα η επίδραση της μεταβολής των τιμών τους στην απόδοση της κεραίας ή να προσεγγισθεί με τη βοήθεια κάποιου αναλυτικού μοντέλου. Η λύση στα προκύπτοντα πολυπαραμετρικά προβλήματα βελτιστοποίησης είναι η χρήση εξελικτικών αλγορίθμων όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι και η βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων [34]. Έχει δειχτεί σε προηγούμενες μελέτες ότι και οι δύο αλγόριθμοι είναι αποτελεσματικοί στην αντιμετώπιση μια σειράς σχεδιαστικών προκλήσεων σχετιζόμενων με τη βελτιστοποίηση διαφόρων ηλεκτρομαγνητικών διατάξεων.

Ένας σημαντικός παράγοντας για την εφαρμογή των μεθόδων επαναληπτικής ανάλυσης είναι η ελάττωση του σημαντικού υπολογιστικού χρόνου που συνήθως δεσμεύεται από τη χρήση εξειδικευμένων ΗΜ επιλυτών. Συνακόλουθα απαιτείται η χρήση κάποιας κατανεμημένης υπολογιστικής πλατφόρμας. Έχουν προταθεί στο παρελθόν μια πληθώρα τεχνικών και μεσισμικών για την αποδοτική χρήση των διαθέσιμων κατανεμημένων υπολογιστικών πόρων κατά την επίλυση ΗΜ μοντέλων, π.χ. βασιζόμενες στη Διεπαφή Ανταλλαγής Μηνυμάτων (MPI) [69], στο παράδειγμα των Παράλληλων Ιδεατών Μηχανών (PVM) [70] και στη χρήση Υπολογιστικών Πλεγμάτων (Computational Grids) [71]. Η βελτιστοποίηση κεραιών με τη βοήθεια της μεθόδου PSO έχει ταυτοποιηθεί ως ένα πρόβλημα μεγάλης υπολογιστικής έντασης το οποίο μπορεί να ωφεληθεί από τις δυνατότητες για παράλληλη ή κατανεμημένη εκτέλεση. Έχουν ήδη προταθεί στη βιβλιογραφία μια σειρά προσεγγίσεων για την ανάπτυξη μια παράλληλης/κατανεμημένης παραλλαγής του αλγορίθμου [72, 73, 74]. Οι τεχνικές αυτές συνήθως επιβάλλουν σημαντικά εμπόδια «εισόδου» στους ερευνητές, είτε απαιτώντας από τους χρήστες τους να αφιερώσουν σημαντικό χρόνο για την εκμάθηση και χρήση πολύπλοκων προγραμματιστικών διεπαφών (Application Programming interfaces – API), είτε επειδή συνήθως δεν έχουν πρόσβαση σε υπολογιστικούς πόρους οργανωμένους σε συστάδες υπολογιστών (clusters) ή σε υπολογιστικά πλέγματα (grids).

Ακολούθως, περιγράφεται μια προωθημένη τεχνική για την άρση των άνωθεν περιγραφόμενων εμποδίων, επιτρέποντας παράλληλα τη χρήση του παραδείγματος των κινητών πρακτόρων (Mobile Agents) και των τεχνικών του αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού (Object Oriented Programming – OOP) [75]. Καταρχήν, ο αντικειμενοστραφής προγραμματισμός σαν τεχνική απαιτεί την αποσύνθεση του εξεταζόμενου προβλήματος σε υποπροβλήματα τα οποία δύναται να επιλυθούν ξεχωριστά, μέσα σε ένα πιο περιεκτικό πλαίσιο. Τα χαρακτηριστικά του αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού επιτρέπουν την παραγωγή επαναχρησιμοποιήσιμων οντοτήτων κώδικα, οι οποίες μπορούν να είναι προσβάσιμες από διαφορετικές εφαρμογές, απαιτώντας συνήθως ελάχιστες τροποποιήσεις, και συνεπώς βελτιώνοντας την δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης τους και ελαττώνοντας το κόστος υποστήριξής τους.

Το παράδειγμα των κινητών πρακτόρων συνεπάγεται την κινητικότητα μιας ολοκληρωμένης υπολογιστικής οντότητας, μαζί με τον κώδικα της, την κατάσταση εκτέλεσής της καθώς και των πόρων/δεδομένων που είναι απαραίτητα για την εκτέλεση μιας συγκεκριμένης εργασίας. Οι κινητοί πράκτορες επεκτείνουν τον ορισμό του κώδικα με κινητικότητα [66], αποτελώντας έτσι μια ευέλικτη και δυναμική δομή η οποία μπορεί να περιφέρεται σε απομακρυσμένους κόμβους και να αλληλεπιδρά τοπικά μαζί τους. Το παράδειγμα των κινητών πρακτόρων έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε σειρά ΗΜ εφαρμογών, προκειμένου να διευκολύνει την επίλυση πολύπλοκων ή και μεγάλης κλίμακας προβλημάτων, επιτρέποντας την κατανεμημένη εκτέλεσή τους [76, 77].

Στη συνέχεια περιγράφεται αναλυτικά μια κατανεμημένη πλατφόρμα βελτιστοποίησης βασισμένη στον αλγόριθμο PSO, η οποία και παρουσιάζεται ως επιτυχημένο παράδειγμα αξιοποίησης του παραλληλισμού στο επίπεδο των δεδομένων (data level parallelism) [75]. Στα πλαίσια αυτά εξετάζονται διάφορες παράμετροι αποδοτικότητας, όπως οι δυνατότητες κλιμάκωσης της κατανεμημένης πλατφόρμας βελτιστοποίησης. Σκοπός της ανάλυσης είναι να αναδειχθούν συνολικά τα πλεονεκτήματα της προτεινόμενης τεχνικής, η οποία επιτρέπει την ισχνή σύζευξη (loose coupling) των βιβλιοθηκών υπολογιστικού ηλεκτρομαγνητισμού με τους κατανεμημένους υπολογιστικούς πόρους, καταδεικνύοντας με αυτό τον τρόπο την ευκολία χρήσης της, την επεκτασιμότητα της καθώς και τη δυνατότητα κλιμάκωσης της απόδοσής της με τη χρήση επιπρόσθετων υπολογιστικών πόρων.

3.5.1 Κατανεμημένες παραμετρικές ηλεκτρομαγνητικές προσομοιώσεις

Η προσομοίωση των κεραιών μπορεί να διευκολυνθεί με τη χρήση μιας κατανεμημένης πλατφόρμας η οποία έχει τη δυνατότητα να δεσμεύει τους διαθέσιμους υπολογιστικούς πόρους στους δικτυακούς κόμβους, επιτρέποντας κατά αυτόν τον τρόπο τον διαμοιρασμό μνήμης, υπολογιστικού χρόνου ή και των δύο. Το σχήμα διαμοιρασμού των πόρων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα τέτοιο σενάριο είναι άμεση συνάρτηση του τύπου της παραλληλοποίησης που χρησιμοποιείται από τις ΗΜ προσομοιώσεις. Εάν διαφορετικοί υπολογισμοί πρέπει να εκτελεστούν στα ίδια πρωτογενή δεδομένα τότε η πιο ενδεδειγμένη λύση είναι η αξιοποίηση των δυνατοτήτων παραλληλοποίησης στο επίπεδο των εργασιών (task parallelism). Αντιθέτως, καταλληλότερη επιλογή αποτελεί η αξιοποίηση του παραλληλισμού στο επίπεδο των δεδομένων, εφόσον οι ίδιοι υπολογισμοί εκτελούνται σε διαφορετικά σύνολα δεδομένων.

Η διαφορετικότητα των δύο περιγραφόμενων προσεγγίσεων μπορεί να δειχτεί καλύτερα χρησιμοποιώντας το παράδειγμα των παραμετρικών προσομοιώσεων. Ο παραλληλισμός στο επίπεδο των εργασιών θα απαιτούσε σε αυτή την περίπτωση την αποσύνθεση των εργασιών που εκτελεί ο κώδικας προσομοιώσεων, προκειμένου να είναι δυνατός ο σχηματισμός αλληλοεξαρτώμενων υπολογιστικών εργασιών. Αντίθετα, η παραλληλοποίηση στο επίπεδο των δεδομένων θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τον διαμελισμό του πεδίου υπολογισμών, διασφαλίζοντας τον συγχρονισμό των δεδομένων μεταξύ των υποπεριοχών, απαιτώντας παράλληλα την ικανοποίηση κατάλληλα ορισμένων οριακών συνθηκών [76]. Και οι δύο προσεγγίσεις θα έχουν ως αποτέλεσμα την επιτάχυνση των μεμονωμένων προσομοιώσεων αλλά με το ακόλουθο κόστος: θα χρειαζόνταν εκτεταμένες αλλαγές στον υπάρχοντα υπολογιστικό πυρήνα προκειμένου να υλοποιηθούν οι απαραίτητοι μηχανισμοί συγχρονισμού (π.χ. μπάρες συγχρονισμού), καθώς επίσης και οι δύο τεχνικές θα παρουσίαζαν επιπλέον κόστος επικοινωνιών για την επίτευξη του παραλληλισμού, είτε σε χαμηλότερο είτε σε υψηλότερο επίπεδο, κατά μήκος των δεδομένων και των εργασιών. Το κόστος της επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων είναι φραγμένο μόνο στην περίπτωση που παραμένει σταθερή και αμετάβλητη η δικτυακή τοπολογία διασύνδεσή τους, όπως π.χ. όταν οι υπολογιστικοί κόμβοι είναι οργανωμένοι σε μια συστοιχία, όπου δεν υπάρχουν σημαντικές καθυστερήσεις (latency) στην ανταλλαγή των πακέτων δεδομένων. Από την άλλη, η διενέργεια προσομοιώσεων σε ένα υπολογιστικό πλέγμα δεν εγγυάται τον ακριβή χρόνο εκτέλεσης των σχετικών εργασιών, εξαιτίας της χρήσης ομορτυνιστικών αλγορίθμων για τον προγραμματισμό και τον διαμοιρασμό των εργασιών [78].

Μια εναλλακτική θεώρηση των παραμετρικών εκτελέσεων είναι δυνατή, εφόσον κάθε προσομοίωση οριστεί ως η βασική μονάδα υπολογισμών. Σύμφωνα με αυτή τη προσέγγιση υψηλότερου επιπέδου, μια παραμετρική μελέτη ή διαδικασία βελτιστοποίησης μπορεί να εκτελεσθεί επιτρέποντας την προσομοίωση κάθε διάταξης με διαφορετικό σετ παραμέτρων και σε διαφορετικούς υπολογιστικούς κόμβους. Σε ένα τέτοιο σενάριο τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αποθηκεύονται κεντρικά, και εφόσον ή όλη διαδικασία αφορά την εκτέλεση ενός αλγορίθμου βελτιστοποίησης, σε κάθε βήμα δημιουργούνται καινούργια σετ παραμέτρων τα οποία και ανακατανέμονται στους υπολογιστικούς κόμβους. Σε αυτή τη περίπτωση ο συνολικός αριθμός των επαναληπτικών προσομοιώσεων εξαρτάται άμεσα από το είδος του χρησιμοποιημένου αλγορίθμου βελτιστοποίησης και από την πολυπλοκότητα του εξεταζόμενου προβλήματος, όπως αυτό ορίζεται από τη συνάρτηση καταλληλότητας. Συνοψίζοντας, ο χώρος ορισμού των παραμέτρων χωρίζεται σε υποσύνολα και η κάθε παραμετρική εκτέλεση μπορεί να θεωρηθεί ως ένα άμεσα παραλληλοποιήσιμο μέρος² (embarrassingly parallel), όπου απαιτείται πολύ περιορισμένη επικοινωνία για τον συγχρονισμό μεταξύ των διαδικασιών αποτίμησης της καταλληλότητας.

² Ως άμεσα παραλληλοποιήσιμοι ορίζονται οι υπολογισμοί που μπορούν να χωριστούν σε ένα αριθμό ανεξάρτητων εργασιών, η καθεμία από τις οποίες μπορεί να εκτελεστεί σε διαφορετικούς επεξεργαστές.

3.5.2 Το παράδειγμα των κινητών πρακτόρων

Ένας κινητός πράκτορας δεν περιορίζεται στο σύστημα στο οποίο δημιουργήθηκε και άρχισε ο κύκλος ζωής του, αλλά έχει τη δυνατότητα να μεταφέρει τον εαυτό του μεταξύ διαφορετικών δικτυακών κόμβων, από τους οποίους μπορεί να αλληλεπιδρά τοπικά ή απομακρυσμένα με άλλους πράκτορες, προκειμένου να ολοκληρώσει την εργασία που του έχει ανατεθεί. Η γλώσσα προγραμματισμού JavaTM εγγενώς υποστηρίζει τις διαδικασίες που είναι απαραίτητες για την υλοποίηση της κινητικότητας κώδικα, όπως η σειριοποίηση των αντικειμένων και η διαδικτυακή επικοινωνία. Επιπρόσθετα, η ιδεατή μηχανή της Java (Java Virtual Machine – JVM) είναι ουδέτερη ως προς το υλικό εκτέλεσης του κώδικα, επομένως τα προγράμματα που είναι γραμμένα σε Java δύναται να εκτελούνται σε ετερογενείς διαμορφώσεις υλικού, χωρίς να απαιτείται κάποια επιπρόσθετη παρέμβαση από τους προγραμματιστές. Όμως απαιτείται να υπάρχουν διαθέσιμοι συμπληρωματικοί μηχανισμοί, προκειμένου να είναι δυνατή η δημιουργία και η παρακολούθηση των πρακτόρων και η χρήση διαφανών καναλιών επικοινωνίας μεταξύ των δικτυακών κόμβων, ανεξάρτητα με το που είναι εγκαταστημένοι, καθώς και μηχανισμοί για τη διασφάλιση της ασφάλειας της πλατφόρμας. Λόγω των εγγενώς χαρακτηριστικών της Java, έχουν αναπτυχθεί πολλές πλατφόρμες πρακτόρων σε αυτή τη γλώσσα προγραμματισμού. Ο Φουκαράκης και άλλοι παρουσίασαν μια πλατφόρμα πρακτόρων η οποία συνδυάζει τις υπηρεσίες ιστού (web services) με το παράδειγμα των κινητών πρακτόρων, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση προβλημάτων υπολογιστικού HM [79]. Αντίστοιχα, ο Κωσταρίδης και άλλοι είχαν αναπτύξει παλιότερα μια ολοκληρωμένη ιστοκεντρική πλατφόρμα παραμετρικής μοντελοποίησης και κατανεμημένης προσομοίωσης κεραιών [80].

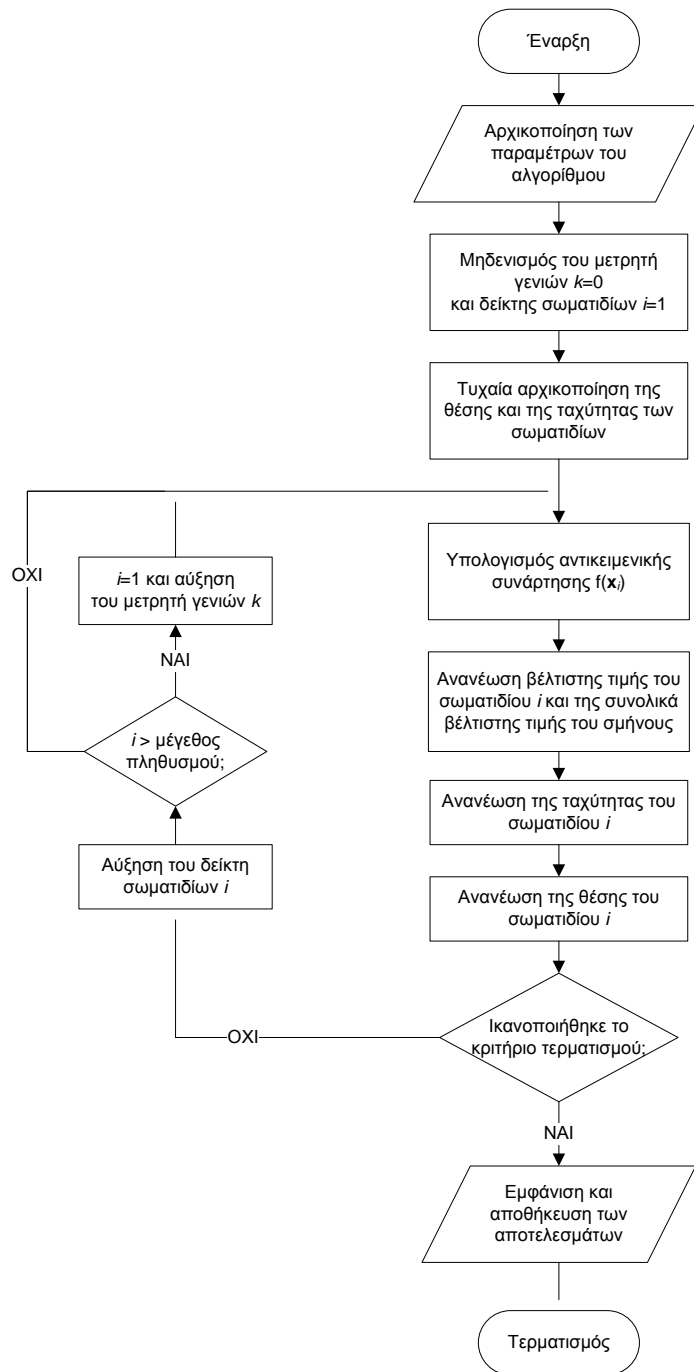
Η υλοποίηση της κατανεμημένης πλατφόρμας βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων, που παρουσιάζεται στη συνέχεια, βασίστηκε στην πλατφόρμα κινητών πρακτόρων JADE [81]. Η υλοποίηση αξιοποιεί το παράδειγμα των κινητών πρακτόρων και παρουσιάζει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα, συγκρινόμενη με άλλες υλοποιήσεις:

- Ευκολία παράταξης: η πλατφόρμα πρακτόρων μπορεί να εκτελεσθεί σε οποιοδήποτε ηλεκτρονικό υπολογιστή ή αρχιτεκτονική υλικού για την οποία είναι διαθέσιμη η αντίστοιχη υλοποίηση της ιδεατής μηχανής Java.
- Ευκολία ανάπτυξης: η πλατφόρμα κινητών πρακτόρων επιτρέπει την ανάπτυξη χαλαρά συζευγμένων αρθρωμάτων λογισμικού (modules) χωρίς να είναι απαραίτητη η τροποποίηση του αρχικού κώδικα HM προσομοίωσης και επίσης προσφέρει τους μηχανισμούς για τη μεταξύ τους επικοινωνία.
- Εκτέλεση σε ετερογενή δίκτυα: οι συμμετέχοντες υπολογιστικοί κόμβοι μπορούν να είναι οργανωμένοι σε μια οποιαδήποτε δικτυακή τοπολογία, εφόσον το υποκείμενο φυσικό δίκτυο υποστηρίζει την ανταλλαγή πακέτων δεδομένων.

3.5.3 Σύγχρονη και ασύγχρονη βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων

Ο αλγόριθμος PSO είναι από τη φύση του επαναληπτικός. Όπως έχει ήδη περιγραφεί, σε κάθε επανάληψη υπολογίζεται η τιμή καταλληλότητας και συγκρίνεται με το αντίστοιχα προσωπικό βέλτιστο του υπό εξέταση σωματιδίου καθώς και το ολικό βέλτιστο του σμήνους. Η ταχύτητα του κάθε σωματιδίου ανανεώνεται σύμφωνα με τα αποτελέσματα αυτών των συγκρίσεων. Μια πιο προσεκτική ματιά στην εξέλιξη του αλγορίθμου καθιστά Ανάπτυξη Κατανεμημένης Πλατφόρμας Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων και Εφαρμογή σε Προβλήματα Σύνθεσης Στοιχειοκεραιών

προφανές ότι η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται για το σύνολο του σμήνους σε κάθε γενιά, καθιστώντας έτσι τον αλγόριθμο κατάλληλο για παραλληλοποίηση (Εικόνα 15).



Εικόνα 15. Σειριακή εκτέλεση του αλγορίθμου PSO.

Σύμφωνα με τη προηγούμενη ανάλυση, οι υλοποιήσεις του αλγορίθμου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν αναλόγως με το πότε λαμβάνουν χώρα οι ανανεώσεις ταχύτητας και θέσης των σωματιδίων:

1. στον σύγχρονο PSO το αποτέλεσμα της αποτίμησης καταλληλότητας του κάθε σωματιδίου επικοινωνεί στα υπόλοιπα γειτνιάζοντα σωματίδια του σμήνους προκειμένου να είναι δυνατή η ανανέωση της ταχύτητάς τους (Πίνακας 3),

2. στον ασύγχρονο PSO δεν υπάρχει καμιά σχέση μεταξύ των σωματιδίων όσο διαρκεί η τρέχουσα γενιά, αλλά οι τελεστές ανανέωσης ταχύτητας και θέσης εκτελούνται μαζικά για όλα τα σωματίδια, κατά το πέρασμα της γενιάς (Πίνακας 5).

```
Βρόγχος

// Κατανεμημένος υπολογισμός της καταλληλότητας των σωματιδίων
Για  $i = 1$  μέχρι το μέγεθος του πληθυσμού
     $f_i \leftarrow G(\mathbf{x}_i)$  // η  $G()$  υπολογίζει την καταλληλότητα
Επόμενο  $i$ 

// Δικλείδα ασφαλείας – διασφάλιση ότι οι υπολογισμοί έχουν ολοκληρωθεί
Μπάρα συγχρονισμού

...

Εύρεση καταλληλότερου σωματιδίου στη γειτονιά

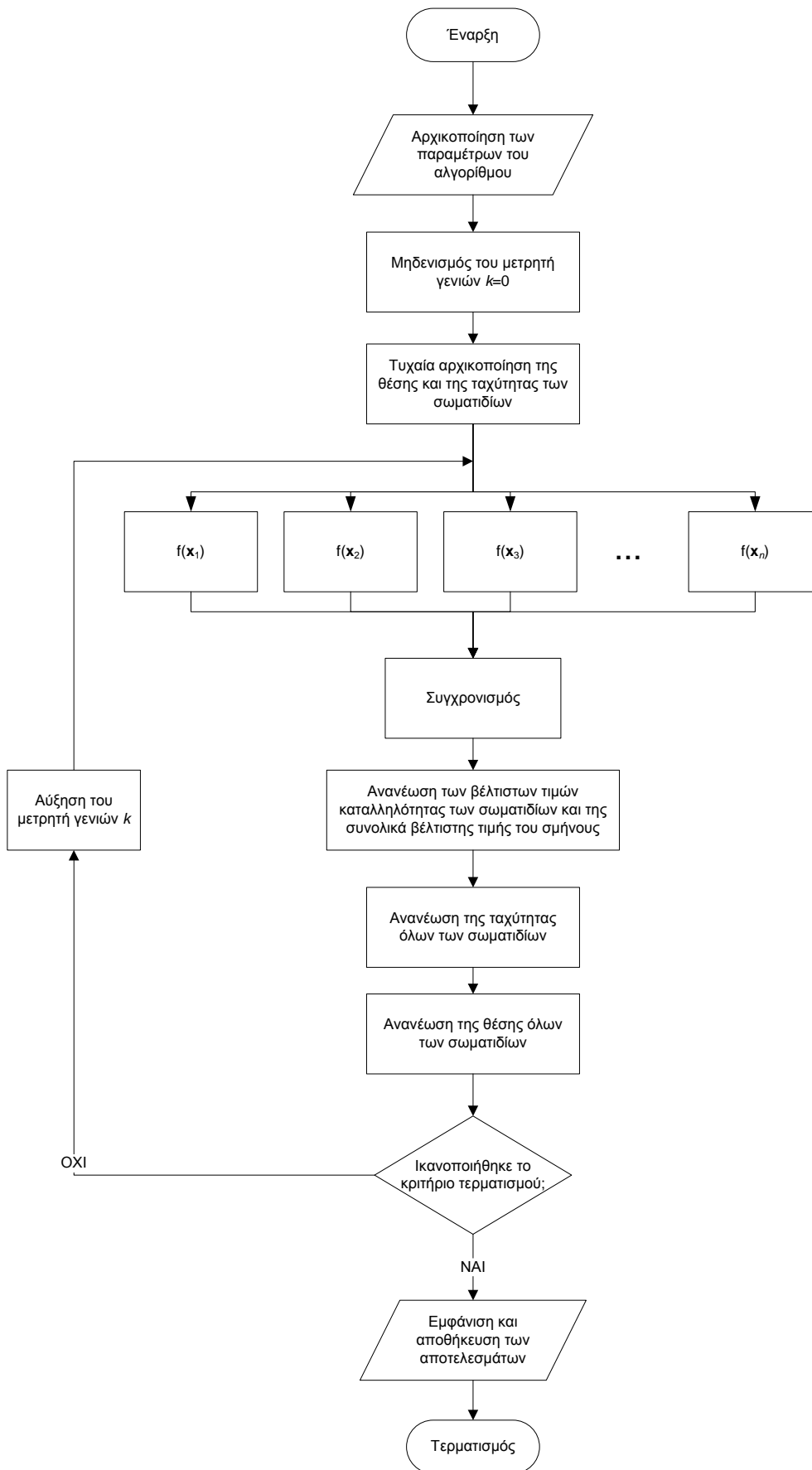
...

Ανανέωση ταχύτητας και θέσης για κάθε σωματίδιο

Μέχρι την ικανοποίηση του κριτηρίου τερματισμού
```

Πίνακας 5. Ψευδοκώδικας για την παράλληλη εκτέλεση του αλγορίθμου PSO

Επομένως, ο αλγόριθμος μπορεί να χωριστεί σε ένα άμεσα παραλληλοποιήσιμο μέρος, κατά τη διάρκεια του οποίου πραγματοποιούνται ασύγχρονοι οι υπολογισμοί καταλληλότητας των σωματιδίων, και σε ένα δεύτερο μέρος όπου λαμβάνει σύγχρονα πλέον χώρα η ανανέωση της ταχύτητας και της θέσης τους, το οποίο και εκτελείται μια φορά σε κάθε γενιά. Ο παραπάνω διαχωρισμός είναι συμβατός με το πρότυπο παραλληλοποίησης που βασίζεται στην έννοια των διαχωρίσιμων αλληλεξαρτήσεων (separable dependencies). Κατά αυτόν τον τρόπο είναι δυνατός ο περαιτέρω διαχωρισμός των πρώτου αλγοριθμικού μέρους σε ένα σύνολο ανεξάρτητων διεργασιών, ενώ το δεύτερο μέρος απαιτεί την ικανοποίηση μια σειράς αλληλοεξαρτώμενων αλγοριθμικών βημάτων και επιμέρους εργασιών. Λαμβάνοντας κανείς υπόψη του ότι ο κύριος όγκος των υπολογισμών λαμβάνει χώρα κατά την αποτίμηση των λύσεων που αναπαριστούνται από τα σωματίδια, είναι δυνατόν να αναπτύξει μια κατανεμημένη παραλλαγή του αλγορίθμου, βασιζόμενος στην ιδέα ότι οι υπολογισμοί καταλληλότητας μπορούν να πραγματοποιηθούν παράλληλα (Εικόνα 16). Σε ένα τέτοιο σενάριο, η επιτυγχανόμενη επιτάχυνση της διαδικασίας βελτιστοποίησης συνολικά, οριοθετείται από τις προβλέψεις του νόμου του Amdahl [82].

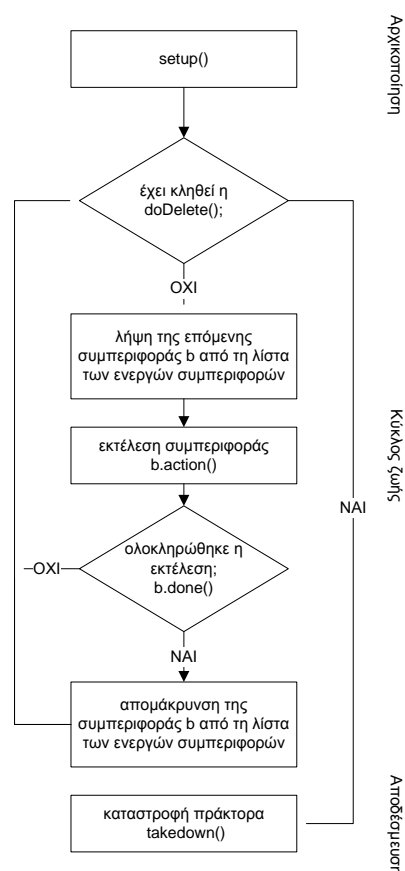


Εικόνα 16. Παράλληλος υπολογισμός των τιμών καταλληλότητας στον αλγόριθμο PSO

3.5.4 Περιγραφή της πλατφόρμας κινητών πρακτόρων

Η βιβλιοθήκη JADE™ (Java Agent DEvelopment Framework) είναι μια ολοκληρωμένη πλατφόρμα κινητών πρακτόρων, η οποία έχει υλοποιηθεί εξ' ολοκλήρου στη γλώσσα προγραμματισμού Java. Επιτρέπει την υλοποίηση συστημάτων πολλαπλών πρακτόρων χρησιμοποιώντας μεσισμικό ανταλλαγής μηνυμάτων, βασιζόμενο στις προδιαγραφές FIPA που μοντελοποιούν τις διεργασίες επικοινωνίας και συνεργασίας μεταξύ των ευφυϊών πρακτόρων [83]. Η πλατφόρμα πρακτόρων JADE μπορεί να αναπτυχθεί κατά μήκος πολλαπλών δικτυακών κόμβων (ακόμα και αν είναι ανομοιογενείς ως προς το εγκατεστημένο λειτουργικό σύστημα και το υποκείμενο υλικό) και να ελεγχθεί διαμέσου ενός ολοκληρωμένου γραφικού περιβάλλοντος (GUI).

Το πραγματικό περιβάλλον εκτέλεσης ενός πράκτορα στην πλατφόρμα JADE είναι ο κάδος πρακτόρων (Agent Container). Η πλατφόρμα επιτρέπει τη δημιουργία πολλαπλών κάδων, στον κόμβο όπου αρχικοποιείται αλλά και στους απομακρυσμένους δικτυακούς κόμβους που συμμετέχουν στη διαμόρφωση της. Η διαμόρφωση είναι δυναμική, καθώς είναι δυνατή η μετακίνηση των πρακτόρων από τον ένα κάδο σε έναν άλλο, οποιαδήποτε χρονική στιγμή μετά από την αρχικοποίηση της πλατφόρμας, εφόσον αυτό κριθεί απαραίτητο από τον διαχειριστή της. Η διαχείριση, η επικοινωνία και η παρακολούθηση των πρακτόρων που έχουν δημιουργηθεί επιτελείται από το σύστημα διαχείρισης πρακτόρων (Agent Management System – AMS), ενώ η υπηρεσία καταλόγου (Directory Facilitator – DF), καταγράφει σε ένα μητρώο τις προσφερόμενες υπηρεσίες από τους πράκτορες.



Εικόνα 17. Υπολογιστικό μοντέλο ενός πράκτορα, όπως ορίζεται στην πλατφόρμα JADE.

Το υπολογιστικό μοντέλο εκτέλεσης ενός πράκτορα (Εικόνα 17), έχει ως κεντρικό χαρακτηριστικό του την εκτέλεση πολλαπλών εργασιών, επονομαζόμενες και ως συμπεριφορές (behaviors) στην ορολογία της πλατφόρμας JADE. Ο ορισμός των συμπεριφορών, οριοθετεί την λειτουργικότητα των πρακτόρων, στο επίπεδο των υπηρεσιών που δύνανται να προσφέρουν και των πιθανών τους αποκρίσεων σε μηνύματα που μπορεί να λάβουν κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους.

Η εκτέλεση ενός πράκτορα ξεκινάει με την κλήση της μεθόδου `setup()`, στην οποία ο προγραμματιστής υλοποιεί τις απαραίτητες προεργασίες και συνθέτει το «χαρακτήρα» του νέου πράκτορα μέσω των συμπεριφορών. Ο ορισμός των συμπεριφορών γίνεται διαμέσου κατάλληλα ορισμένων αντικειμένων που επεκτείνουν την βασική κλάση `jade.core.Behaviour`. Η λίστα των ενεργών συμπεριφορών, που διατηρεί κάθε πράκτορας, συμπληρώνεται με κλήση της μεθόδου `addBehaviour()` της κλάσης `Agent`.

Η εκτέλεση των συμπεριφορών πραγματοποιείται αυτόματα και με διαφανή για τον προγραμματιστή τρόπο από έναν εσωτερικό δρομολογητή (υλοποιημένο στην ιδεατή κλάση `jade.core.Agent`), καλώντας τη μέθοδο `action()` της επόμενης διαθέσιμης συμπεριφοράς στη λίστα των ενεργών συμπεριφορών. Η μέθοδος `done()` σηματοδοτεί την ολοκλήρωση ή μη της τρέχουσας συμπεριφοράς και συνεπώς την αφαίρεση της ή όχι από τη λίστα των ενεργών συμπεριφορών. Η κυκλική εκτέλεση των ενεργών συμπεριφορών του πράκτορα συνεχίζεται μέχρι να εξαντληθεί η σχετική λίστα, οπότε και ο πράκτορας καθίσταται ανενεργός. Τέλος, ο πράκτορας αφαιρείται από την πλατφόρμα, εφόσον λάβει σχετικό μήνυμα από τον AMS, εκτελώντας την προκαθορισμένη μέθοδο `takedown()`.

Τα μηνύματα που ανταλλάσσονται μεταξύ των πρακτόρων συμμορφώνονται με την πρότυπη γλώσσα ανταλλαγής μηνυμάτων (Agent Communication Language – ACL), ενώ η μεταφορά και παράδοσή τους βασίζεται στο μηχανισμό απομακρυσμένων κλήσεων σε μεθόδους αντικειμένων της Java (Remote Method Invocation – RMI, διαμέσου του δικτυακού πρωτοκόλλου IIOP). Η δομή του μηνύματος ορίζεται από την FIPA-ACL προδιαγραφή. Κάθε μήνυμα περιλαμβάνει μια σειρά από πεδία, όπως για παράδειγμα τον αποστολέα, τη λίστα των παραληπτών, το σκοπό της επικοινωνίας (π.χ. `REQUEST` ή `INFORM`) και το περιεχόμενο (content), το οποίο περιέχει την πληροφορία της επικοινωνίας. Η πραγματική θέση των παραληπτών και ο τρόπος μεταφοράς των μηνυμάτων είναι τελείως διαφανής στον προγραμματιστή, αφού το σύστημα διαχείρισης των πρακτόρων (AMS) αναλαμβάνει την αυτόματη διεκπεραίωση των σχετικών διαδικασιών. Από την άλλη πλευρά, η λήψη του μηνύματος απαιτεί πρόσβαση του πράκτορα στην ιδιωτική ουρά μηνυμάτων του. Ο τρόπος προσπέλασης της ουράς μηνυμάτων δεν είναι μοναδικός, αλλά πρακτικά χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες μέθοδοι:

- Σύγχρονα (μέθοδος `blockingReceive()`) ή ασύγχρονα (μέθοδος `receive()`). Η σύγχρονη μέθοδος προκαλεί την αναστολή όλων των συμπεριφορών του πράκτορα, μέχρι την εμφάνιση του ζητούμενου μηνύματος. Αντίθετα για την ασύγχρονη κλήση δύναται να οριστεί ένας μέγιστος χρόνος για τη λήψη του μηνύματος. Σε κάθε περίπτωση, αν δεν υπάρχει διαθέσιμο μήνυμα ή λήξει η χρονική προθεσμία, επιστρέφεται ως αποτέλεσμα ένα κενό μήνυμα.

- Και οι δύο μέθοδοι λήψης μηνυμάτων από την ουρά δύναται να εμπλουτισθούν με δυνατότητες φιλτραρίσματος των ληφθέντων μηνυμάτων (matching), προκειμένου να είναι δυνατή η αναζήτηση μηνυμάτων με συγκεκριμένο περιεχόμενο.

Η πλατφόρμα JADE επιτρέπει την μεταφορά αντικειμένων που υλοποιούν τη διεπαφή `java.io.Serializable`, οπότε ουσιαστικά δεν επιβάλλει περιορισμό στο είδος της πληροφορίας που συνοδεύει τους πράκτορες. Η κινητικότητα του κώδικα καθίσταται εφικτή διαμέσου των μηχανισμών σειριοποίησης (Serialization) και δημιουργίας ειδώλων αντικειμένων (Reflection) της γλώσσας προγραμματισμού Java. Τέλος είναι δυνατή η ενθυλάκωση των συνοδευτικών κλάσεων σε πρότυπα πακέτα της γλώσσας Java (JARs).

Η πλατφόρμα υποστηρίζει την ασθενή μορφή μετανάστευσης των πρακτόρων, οπότε μετά την ολοκλήρωση της μετακίνησης του πράκτορα σε έναν άλλο δικτυακό κόμβο, η εκτέλεση του ξεκινάει από την αρχή. Ο προγραμματιστής είναι υπεύθυνος για τον χειρισμό των διαδικασιών σειριοποίησης και αποσειριοποίησης του πράκτορα κατά τη μετακίνησή του. Για αυτό το σκοπό, έχει προβλεφθεί η δυνατότητα εμπλουτισμού των μεθόδων `beforeMove()` και `afterMove()` από τον προγραμματιστή, οι οποίες εκτελούνται ακριβώς πριν από τη διαδικασία μετανάστευσης και μετά το πέρας της. Η έναρξη της διαδικασίας μετανάστευσης σηματοδοτείται από την κλήση της μεθόδου `doMove()`. Αντίστοιχοι μηχανισμοί έχουν προβλεφθεί και για τη διαδικασία κλωνοποίησης, με την ειδοποιό διαφορά ότι σε αυτή την περίπτωση δημιουργείται ένα πιστό αντίγραφο του πράκτορα στον ίδιο κόμβο.

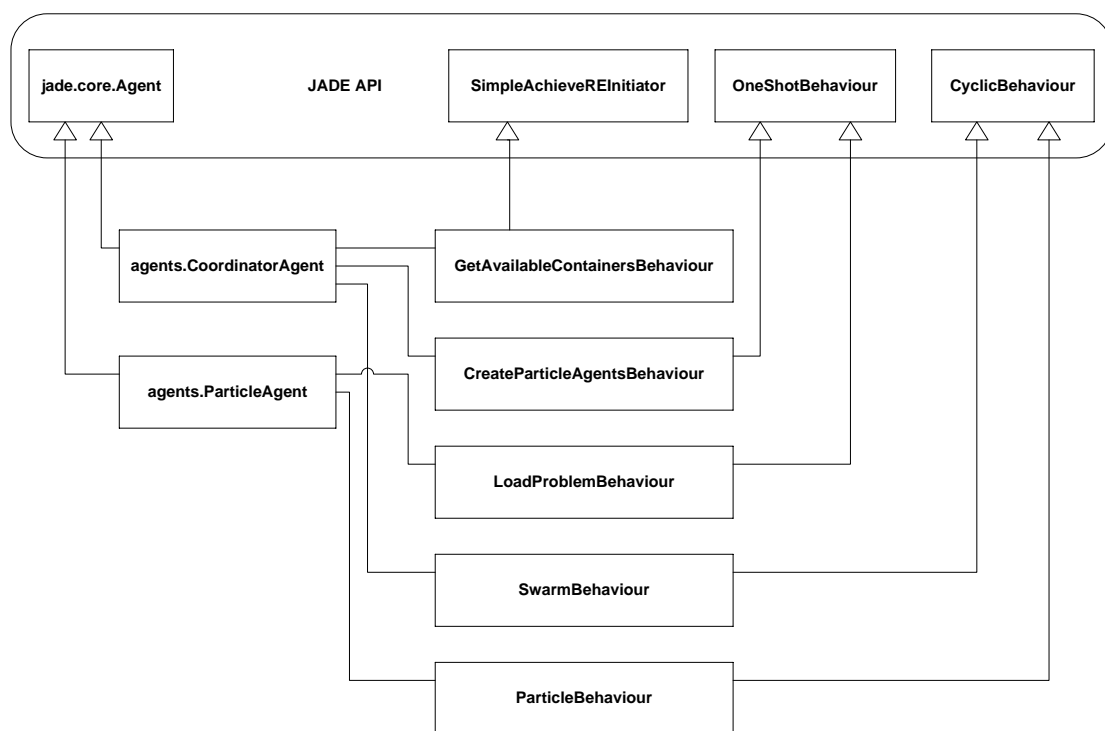
3.5.5 Οι οντότητες πρακτόρων

Για την ανάπτυξη της κατανεμημένης πλατφόρμας βελτιστοποίησης, αξιοποιήθηκε το πρότυπο του αφέντη-εργατή (master-worker). Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, η εκτέλεση του αλγορίθμου πραγματοποιείται από δύο τύπους οντοτήτων. Καταρχήν, υπάρχει μόνο μια κύρια διεργασία η οποία είναι συνολικά υπεύθυνη για τη δημιουργία των διεργασιών των εργατών, για τη συλλογή των αποτελεσμάτων από τους εργάτες και για τον έλεγχο της ροής εκτέλεσης του αλγορίθμου βελτιστοποίησης, επιβλέποντας παράλληλα την εφαρμογή των περιορισμών συγχρονισμού. Η κάθε διεργασία εργάτη επαναληπτικά υπολογίζει την καταλληλότητα κάθε παραμετρικής σχεδίασης, όπως αυτή κωδικοποιείται από τη θέση των σωματιδίων και επιστρέφει το αποτέλεσμα των υπολογισμών στη διεργασία του αφέντη. Το προτεινόμενο μοντέλο υπολογισμών διαφοροποιείται από τη σειριακή έκδοση του αλγορίθμου PSO, όπου ο υπολογισμός της τιμής καταλληλότητας και η ανανέωση της θέσης του κάθε σωματιδίου λαμβάνει χώρα συγχρόνως, αντί να πραγματοποιούνται άπαξ σε κάθε γενιά για όλα τα μέλη του σμήνους σωματιδίων. Στη βιβλιογραφία δεν έχουν παρουσιαστεί στοιχεία που να υποδεικνύουν ότι η παραπάνω διαφορά έχει κάποια πρακτική επίπτωση στη συμπεριφορά ή την ταχύτητα σύγκλισης του αλγορίθμου PSO.

Η παράλληλη πλατφόρμα ενθυλακώνει ουσιαστικά μια πρότυπη υλοποίηση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων, η οποία επιτρέπει την κατανεμημένη αποτίμηση της καταλληλότητας των σωματιδίων στη διάρκεια των διαδοχικών γενεών. Η ενθυλάκωση του αλγορίθμου επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας τις υπηρεσίες που προσφέρει η βιβλιοθήκη κινητών πρακτόρων JADE. Οι δύο άνωθεν περιγραφόμενες κατηγορίες διεργασιών υλοποιούνται με τη βοήθεια ενός στατικού πράκτορα

CoordinatorAgent, με τα χαρακτηριστικά της διεργασίας-αφέντη που ήδη αναφέρθηκαν, ενώ οι διεργασίες-εργάτες από τους κινητούς πράκτορες ParticleAgent, οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα μετανάστευσης σε απομακρυσμένους δικτυακούς κόμβους, για να επιτελέσουν τον υπολογισμό καταλληλότητας που τους έχει ανατεθεί.

Όλες οι λειτουργίες της πλατφόρμας βελτιστοποίησης υλοποιούνται από τις δύο κλάσεις πρακτόρων, οι οποίες επεκτείνουν την αφαιρετική κλάση ορισμού πρακτόρων jade.core.Agent. Ο κύκλος ζωής τους καθορίζεται βάσει των διαθέσιμων υλοποιήσεων των διαθέσιμων κλάσεων συμπεριφοράς στην βιβλιοθήκη του JADE. Συγκεκριμένα, η συμπεριφορά GetAvailableContainersBehaviour() επεκτείνει την κλάση jade.proto.SimpleAchieveREInitiator (η οποία υλοποιεί το REQUEST πρωτόκολλο αλληλεπίδρασης της FIPA) και χρησιμοποιεί την οντολογία FIPA_SLO για την επικοινωνία με το σύστημα διαχείρισης των πρακτόρων (AMS). Οι υπόλοιπες συμπεριφορές επεκτείνουν τις κλάσεις jade.core.behaviours.OneShotBehaviour και jade.core.behaviours.CyclicBehaviour (Εικόνα 18). Η πρώτη μοντελοποιεί μια ατομική συμπεριφορά η οποία εκτελείται ακριβώς μια φορά, ενώ η δεύτερη μια συμπεριφορά που εκτελείται επαναληπτικά καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής του πράκτορα, δηλαδή πρακτικά δεν αφαιρείται ποτέ από τη λίστα των ενεργών συμπεριφορών του.



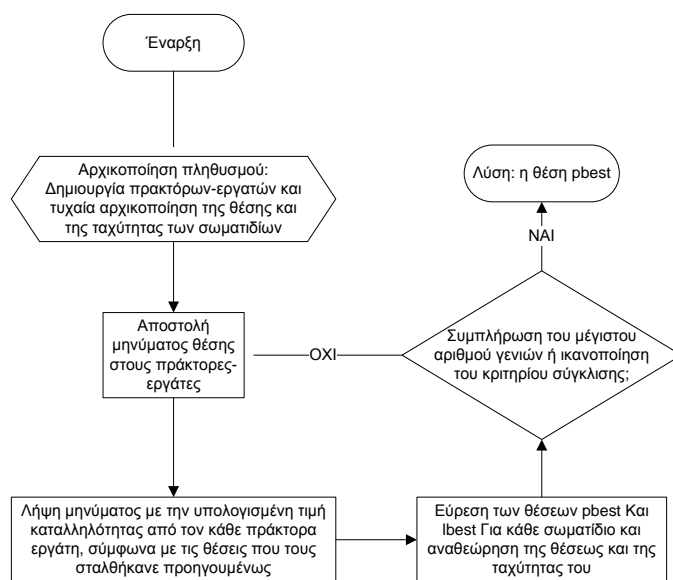
Εικόνα 18. UML διάγραμμα με τις κλάσεις και τις συμπεριφορές των πρακτόρων.

Σημαντικός παράγοντας στην αποδοτικότητα της υλοποίησης της κατακευματισμένης πλατφόρμας βελτιστοποίησης, είναι το κόστος επικοινωνίας μεταξύ των πρακτόρων. Για αυτό το σκοπό λήφθηκε πρόνοια προκειμένου τα περιεχόμενα των μηνυμάτων να περιοριστούν στο ελάχιστο δυνατόν, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το συνεπαγόμενο επιπλέον κόστος (overhead) επικοινωνίας μεταξύ των πρακτόρων. Αν η πλατφόρμα

αναπτύσσεται σε υπολογιστικούς κόμβους που παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές ως προς την διαθέσιμη υπολογιστική ισχύ τους τότε η απόδοση της περιορίζεται από το χρόνο της πιο αργής απάντησης, γεγονός που μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη χρήση καταλλήλων τεχνικών διαμερισμού φόρτου (load balancing).

3.5.6 Πράκτορας συντονισμού

Ο πράκτορας-συντονιστής (CoordinatorAgent) είναι υπεύθυνος για την αρχικοποίηση και την γενική εποπτεία εκτέλεσης του αλγορίθμου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων. Ειδικότερα οι εργασίες που επιτελεί είναι i) η αρχικοποίηση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης, ii) η δημιουργία των πρακτόρων-εργατών, iii) η δημιουργία και η αποστολή των μηνυμάτων θέσης στους πράκτορες εργάτες, iv) η συλλογή των υπολογισμένων τιμών καταλληλότητας κάθε σωματιδίου v) ο υπολογισμός των προσωπικών βέλτιστων θέσεων (pbest) και της βέλτιστης θέσης στη γειτονιά (lbest) του κάθε σωματιδίου, vi) η ανανέωση της ταχύτητας και της θέσης των σωματιδίων (Εικόνα 19).



Εικόνα 19. Κύκλος ζωής του CoordinatorAgent.

Αναλυτικότερα, ο CoordinatorAgent επιτελεί τις εξής ενέργειες:

1. *αρχικοποίηση προβλήματος*: διαβάζονται οι παράμετροι του αλγορίθμου (π.χ. η κοινωνικότητα και η ατομικότητα) από αρχεία διαμόρφωσης (configuration files).
2. *δημιουργία των πρακτόρων-εργατών*: Δημιουργείται ένας αριθμός από πράκτορες σωματιδίων ίσος με το μέγεθος του ορισμένου πληθυσμού του αλγορίθμου. Ο κάθε πράκτορας-σωματίδιο υλοποιεί μια διαφορετική υποψήφια λύση του υπό βελτιστοποίηση προβλήματος και οι μεταβλητές θέσης και ταχύτητας στο χώρο έρευνας λαμβάνει τυχαίες τιμές (CreateParticleAgentsBehaviour). Στη συνέχεια διανέμονται ομοιόμορφα στους διαθέσιμους κάδους πρακτόρων, οι οποίοι έχουν δημιουργηθεί στους απομακρυσμένους κόμβους (GetAvailableContainersBehaviour).
3. *αποστολή μηνυμάτων θέσης*: εφόσον έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία μετανάστευσης όλων των πρακτόρων εργατών, ο πράκτορας αφέντης στέλνει ένα μήνυμα σκανδαλισμού (triggering) σε κάθε ένα από αυτούς, το οποίο εμπεριέχει τις

συντεταγμένες του σημείου του χώρου λύσεων για τις οποίες θα υπολογιστεί η τιμή καταλληλότητας. Όταν ολοκληρωθεί ο μέγιστος αριθμός γενιών ή ικανοποιηθεί το κριτήριο σύγκλισης του αλγορίθμου, χρησιμοποιείται ο ίδιος μηχανισμός για να σταλεί το μήνυμα τερματισμού των πρακτόρων εργατών (SwarmBehaviour).

4. *συλλογή τιμών καταλληλότητας σωματιδίων*: μετά την αποστολή των μηνυμάτων θέσης, ο πράκτορας αφέντης πρέπει να περιμένει να απαντήσουν όλοι οι πράκτορες εργάτες με ένα μήνυμα το οποίο θα περιέχει την τιμή καταλληλότητας που υπολόγισε ο καθένας τους. Αυτό στην πραγματικότητα αποτελεί τη μοναδική απαίτηση για συγχρονισμό που πρέπει να ικανοποιηθεί για τη διασφάλιση της συνεπής και ορθής εκτέλεσης του αλγορίθμου (SwarmBehaviour).
5. *υπολογισμός βέλτιστων θέσεων των σωματιδίων*: όταν θα έχει λάβει όλες τις απαντήσεις από τους αντίστοιχους πράκτορες εργάτες για μια συγκεκριμένη γενιά, ο πράκτορας αφέντης έχει διαθέσιμες όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για να βρει το καινούργιο προσωπικό βέλτιστο για κάθε σωματίδιο, όπως και το ολικό βέλτιστο του σμήνους ή το βέλτιστο της γειτονιάς για κάθε γειτονιά σωματιδίων (SwarmBehaviour).
6. *ανανέωση της θέσης και της ταχύτητας των σωματιδίων*: όταν βρεθούν τα προσωπικά βέλτιστα και τα ολικά ή τοπικά βέλτιστα, ο πράκτορας αφέντης ανανεώνει τις θέσεις και τις ταχύτητες των σωματιδίων σύμφωνα με τις προβλεπόμενες σχέσεις. Οι ανανεωμένες θέσεις στη συνέχεια αποστέλλονται στους πράκτορες εργάτες προκειμένου να υπολογίσουν τις καινούργιες τιμές καταλληλότητας για την επόμενη γενιά (SwarmBehaviour).

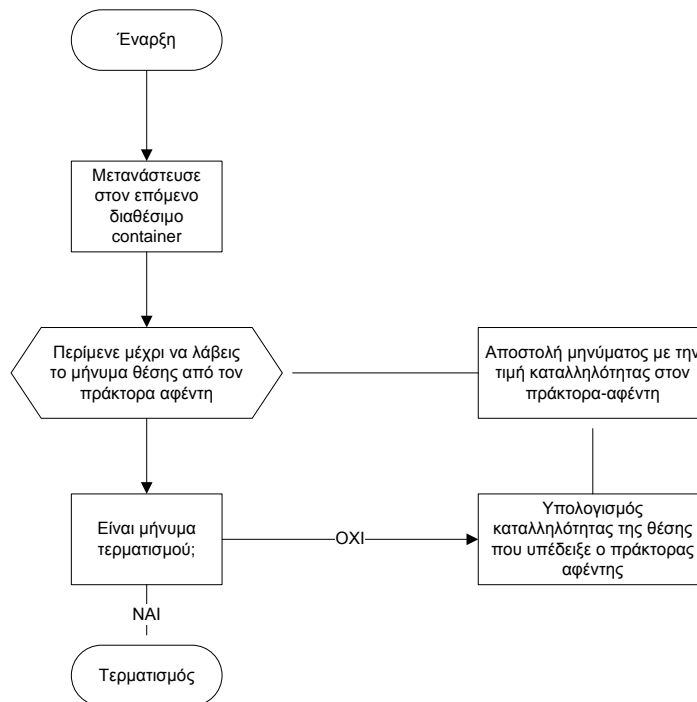
Τέλος, στον Πίνακα 6 συνοψίζονται οι ενέργειες που επιτελεί ο `CoordinatorAgent` κατά την αρχικοποίησή του.

```
public class CoordinatorAgent extends jade.core.Agent
{
    protected void setup()
    {
        read parameters and input data
        add behavior for getting available Agent Containers (using a library provided
            protocol for interacting with the AMS)
        add behavior for creating ParticleAgents (passing to them the address of the Agent
            Container where they will migrate)
        add behavior for performing the parallel PSO steps (assign fitness calculations to
            ParticleAgents, receive fitness values,
            update positions and velocities and apply
            synchronization requirements)
    }
}
```

Πίνακας 6. Ψευδοκώδικας περιγραφής της λειτουργικότητας του `CoordinatorAgent`

3.5.7 Πράκτορες σωματιδίων

Ο κάθε πράκτορας-εργάτης (ParticleAgent) είναι υπεύθυνος για υπολογισμό των τιμών καταλληλότητας των σωματιδίων που αποτελούν τον πληθυσμό του αλγορίθμου βελτιστοποίησης. Ειδικότερα οι εργασίες που εκτελούν είναι i) αρχικοποίηση του προβλήματος προς βελτιστοποίηση και μετανάστευση στον επόμενο διαθέσιμο «κάδο» πρακτόρων, ii) λήψη του μηνύματος θέσης από τον πράκτορα-συντονιστή που αναπαριστά μια υποψήφια λύση στο χώρο έρευνας, iii) υπολογισμός της αντίστοιχης τιμής αποτίμησης και αποστολή του αποτελέσματος στον πράκτορα-συντονιστή (Εικόνα 20).



Εικόνα 20. Κύκλος ζωής των ParticleAgent.

Αναλυτικότερα, τα αλγοριθμικά βήματα του ParticleAgent έχουν τους εξής στόχους:

1. *Αρχικοποίηση και μετανάστευση του πράκτορα:* Κατά τη δημιουργία καθενός από τους πράκτορες-εργάτες από τον πράκτορα-συντονιστή, επιτελούνται οι εξής λειτουργίες: α) απόδοση διεύθυνσης «δοχείου» υποδοχής (container address) από τον συντονιστή, β) μετανάστευση στην επόμενη διαθέσιμη θέση, όπου θα εκτελέσει τοπικά τη δουλειά που του έχει ανατεθεί, γ) αρχικοποίηση της κλάσεως του προβλήματος προς βελτιστοποίηση (LoadProblemBehaviour).
2. *Αναμονή για μήνυμα θέσης:* Αφού ολοκληρώσει τη διαδικασία μετανάστευσης σε ένα απομακρυσμένο κόμβο, ο πράκτορας-εργάτης αδρανοποιείται μέχρι να λάβει ένα μήνυμα θέσης (συντεταγμένες του χώρου έρευνας) από τον πράκτορα-αφέντη. Όταν ληφθεί αυτό το μήνυμα, σκανδαλίζεται ο πράκτορας-εργάτης προκειμένου να προχωρήσει στον υπολογισμό της αντίστοιχης τιμής καταλληλότητας (ParticleBehaviour). Κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης ενδέχεται να ληφθεί ειδικό μήνυμα που να υποδεικνύει ότι συμπληρώθηκε ο μέγιστος αριθμός

γενιών ή ότι ικανοποιήθηκε το κριτήριο σύγκλισης, οπότε και τερματίζεται ο πράκτορας εργάτης.

3. *Υπολογισμός της τιμής καταλληλότητας και αποστολή απάντησης:* Όταν ληφθεί μήνυμα συντεταγμένων από τον πράκτορα εργάτη, υπολογίζεται η αντίστοιχη τιμή καταλληλότητας και προωθείται ως απάντηση στον πράκτορα-συντονιστή. Ο πράκτορας εργάτης αδρανοποιείται εκ' νέου μέχρι να λάβει ένα νέο μήνυμα (`ParticleBehaviour`).

Τέλος, στον Πίνακα 7 συνοψίζονται οι ενέργειες που επιτελεί ο `ParticleAgent` κατά την αρχικοποίησή του στον κεντρικό κόμβο και αφού έχει μόλις μεταναστεύσει σε έναν απομακρυσμένο κόμβο.

```
public class ParticleAgent extends jade.core.Agent
{
    protected void setup()
    {
        migrate to the remote Agent Container indicated by the CoordinatorAgent
    }

    protected void afterMove()
    {
        load problem classes (using the Java Reflection API)
        add behavior for performing fitness calculations (receive assignment from
            CoordinatorAgent, calculate fitness and
            return the computed fitness value)
    }
}
```

Πίνακας 7. Ψευδοκώδικας περιγραφής της λειτουργικότητας του `ParticleAgent`

3.6 Χρήση και Παραμετροποίηση της Πλατφόρμας Βελτιστοποίησης

Η κατανεμημένη πλατφόρμα βελτιστοποίησης μπορεί να αναπτυχθεί σε δικτυακούς υπολογιστές ανεξαρτήτως του αν συμμετέχουν στο ίδιο τοπικό δίκτυο ή όχι. Ο μοναδικός περιορισμός είναι οι κόμβοι να έχουν λάβει στατικές διευθύνσεις του πρωτόκολλου διαδικτύου (static IP address) και επιπρόσθετα, εφόσον βρίσκονται πίσω από ένα τείχος προστασίας (firewall), αυτό θα πρέπει να έχει διαμορφωθεί έτσι ώστε να επιτρέπει την δικτυακή κίνηση διαμέσου των δικτυακών πορτών (ports) που χρησιμοποιεί η πλατφόρμα JADE και η βιβλιοθήκη απομακρυσμένων κλήσεων της Java (Remote Method Invocation – RMI). Το μόνο λογισμικό που απαιτείται να είναι προεγκαταστημένο στον κεντρικό κόμβο και στους κόμβους των εργατών είναι το περιβάλλον εκτέλεσης της Java (Java Runtime Environment – JRE), εκδόσεως 1.4 ή νεώτερης, ανεξαρτήτως του υποκείμενου λειτουργικού συστήματος. Μια σημαντική εξαίρεση προκύπτει όταν είναι απαραίτητη η κλήση υπολογιστικών βιβλιοθηκών μεταφρασμένων σε εκτελέσιμο κώδικα μηχανής (native code),

οπότε αυτές απαιτείται να είναι συμβατές με τη δυαδική μορφή (binary format) που υποστηρίζεται από το λειτουργικό σύστημα των κόμβων και την αρχιτεκτονική υλικού τους.

Τα αρθρώματα της πλατφόρμας (platform modules) συνίστανται από την κυρίως λογική κατανεμημένης βελτιστοποίησης της πλατφόρμας και τα πακέτα διανομής JAR της βιβλιοθήκης JADE. Η διαδικασία ανάπτυξης της πλατφόρμας στους συμμετέχοντες κόμβους είναι κατά κανόνα απλή. Ο κεντρικός κόμβος χρειάζεται και τα δύο προαναφερόμενα αρθρώματα ενώ στους απομακρυσμένους κόμβους αρκεί να είναι διαθέσιμες μόνο οι βιβλιοθήκες JAR της JADE πλατφόρμας. Η διαδικασία ανάπτυξης στους κόμβους μπορεί να περιγραφεί χρησιμοποιώντας κατάλληλα αρχεία σεναρίων (scripts) που αυτοματοποιούν τη δημιουργία των φακέλων (directories), των χώρων εργασίας (workspaces) καθώς και τον ορισμό των προαπαιτούμενων μεταβλητών περιβάλλοντος του λειτουργικού (environmental variables), όπως για παράδειγμα τον ορισμό της μεταβλητής CLASSPATH. Εναλλακτικά, δύναται να χρησιμοποιηθούν οι μηχανισμοί του μητρώου καταγραφής απομακρυσμένων αντικειμένων (Remote Object Registry) της Java, που επιτρέπουν την έκθεση των απαραίτητων αντικειμένων διαμέσου ενός εξυπηρετητή ιστού (web server), από όπου στη συνέχεια είναι δυνατή η αυτόματη λήψη των πιο πρόσφατων εκδόσεων τους, χρησιμοποιώντας το μηχανισμό απομακρυσμένων κλήσεων (RMI). Τέλος, οι κλάσεις ορισμού του προβλήματος προς βελτιστοποίηση καθώς και η σύνοδος βιβλιοθήκη υπολογιστικού ηλεκτρομαγνητισμού συσκευάζονται σε διαφορετικά αρχεία JAR προκειμένου να είναι εφικτή η ανάπτυξη της πλατφόρμας στους δικτυακούς κόμβους. Περισσότερες πληροφορίες για τις άνωθεν διαδικασίες δίδονται στο παράρτημα.

3.6.1 Ορισμός διεπαφών με τους υπολογιστικούς κώδικες

Προκειμένου να είναι δυνατή η ολοκλήρωση της πλατφόρμας κατανεμημένης βελτιστοποίησης με εξωτερικές υπολογιστικές βιβλιοθήκες ή προγράμματα, είναι απαραίτητος ο ορισμός και χρήση πρότυπων διεπαφών επικοινωνίας. Η πλατφόρμα δύναται να διασυνδεθεί με μια εξωτερική εκτελέσιμη εφαρμογή, διαμέσου της ροής εισόδου της (standard input stream), χρησιμοποιώντας κατάλληλες μεθόδους της βιβλιοθήκης Java για τη κλήση τοπικά εκτελέσιμου κώδικα (Java Native Interface – JNI). Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί η μέθοδος `Runtime.getRuntime().exec()`, η οποία δημιουργεί μια διεργασία εκτέλεσης της εξωτερικής εφαρμογής βάσει των οριζόμενων παραμέτρων εισόδου από τον προγραμματιστή. Ακόμα και αν το εξωτερικό πρόγραμμα δεν υποστηρίζει τον ορισμό των παραμέτρων εισόδου του διαμέσου της γραμμής εντολών (command line) ή χρησιμοποιώντας εξωτερικό αρχείο, είναι εφικτή η ανάπτυξη κατάλληλων αρθρωμάτων για την υλοποίηση της διεπαφής με την πλατφόρμα βελτιστοποίησης. Για αυτό το σκοπό είναι διαθέσιμες και μπορούν να χρησιμοποιηθούν πληθώρα βιβλιοθηκών ανοικτού κώδικα (π.χ. χρησιμοποιώντας βιβλιοθήκες που υλοποιούν την προδιαγραφή JSR 223 περί των μηχανισμών υποστήριξης γλωσσών σεναρίων από τη γλώσσα Java). Τέλος, είναι δυνατή η διασύνδεση των δυναμικών υπολογιστικών βιβλιοθηκών χρησιμοποιώντας τη βιβλιοθήκη JNI, για την αντιστοίχιση των συναρτήσεων που εκθέτουν, εφόσον βέβαια είναι διαθέσιμη η περιγραφή τους και δίδονται επαρκείς πληροφορίες για τον τρόπο κλήσης τους. Συμπερασματικά, η ισχυρή σύζευξη των εφαρμογών υπολογιστικού ηλεκτρομαγνητισμού με τη βιβλιοθήκη βελτιστοποίησης, είναι εγγενώς απλή και απαιτεί μικρές αλλαγές στον υπάρχοντα μεταφρασμένο κώδικα που εμπεριέχουν, επιτρέποντας κατά αυτό τον τρόπο την ανεξάρτητη μεταξύ τους ανάπτυξη.

3.6.2 Παραμετροποίηση της πλατφόρμας

Η παραμετροποίηση της πλατφόρμας λαμβάνει χώρα κατά την αρχικοποίηση της και περιγράφεται με τη βοήθεια προτύπων αρχείων ιδιοτήτων (property files) και XML αρχείων διαμόρφωσης (configuration files), τα οποία θα πρέπει να δημιουργηθούν στο φάκελο εκτέλεσης εργασιών του κεντρικού κόμβου. Κατά την διάρκεια της αρχικοποίησης διαβάζονται από το αρχείο ιδιοτήτων οι τιμές των παραμέτρων, όπως το όνομα του JAR αρχείου που ενθυλακώνει τον κώδικα περιγραφής του προβλήματος, το όνομα της κλάσης του προβλήματος, τη μέγιστη επιτρεπτή διάρκεια της διαδικασίας βελτιστοποίησης εκφρασμένη σε γενιές, και τέλος το όνομα του XML αρχείου διαμόρφωσης της πλατφόρμας που εμπεριέχει τις τιμές των παραμέτρων του αλγορίθμου βελτιστοποίησης (Πίνακας 8)

```
problem = problem.OptimizationProblem
parameters = parameters.xml
jar = OptimizationProblem.jar
generations = 200
```

Πίνακας 8. Παράδειγμα αρχείου ιδιοτήτων της πλατφόρμας βελτιστοποίησης

Επιλέχθηκε η μορφή XML για την οργάνωση και αποθήκευση της πληροφορίας διαμόρφωσης της πλατφόρμας, γιατί με αυτό τον τρόπο καθίσταται αναγνώσιμη από τους χρήστες της και επιπλέον επειδή δομούνται οι παράμετροι με τρόπο που επιτρέπει την αυτόματη δημιουργία αντικειμένων διαμόρφωσης χρησιμοποιώντας τον μηχανισμό αποσειριοποίησης της Java. Επιπροσθέτως του κλασσικού αλγορίθμου βελτιστοποίησης, η πλατφόρμα υλοποιεί καλά ορισμένες και συχνά απαντώμενες στη σχετική βιβλιογραφία παραλλαγές, που εισαγάγουν τον παράγοντα αδρανείας [38], τον παράγοντα περιορισμού [39] και τον συνυπολογισμό της μετρικής συνάρτησης που αποτιμά τον λόγο της απόστασης των λύσεων προς την καταλληλότητα τους [40]. Συνεπώς στο XML αρχείο διαμόρφωσης είναι δυνατός ο ορισμός της παραλλαγής του αλγορίθμου PSO που θα χρησιμοποιηθεί καθώς και συμπληρωματικές παράμετροι όπως οι τιμές ατομικότητας και κοινωνικότητας, το μέγεθος του πληθυσμού και το μέγεθος της γειτονιάς δακτυλιδιού (Πίνακας 9).

```
<parameters>
  <type>inertia</type>
  <pop_size>200</pop_size>
  <phi1>2.0</phi1>
  <phi2>2.0</phi2>
  <params>
    <entry>
      <string>w2</string>
      <double>0.9</double>
    </entry>
    <entry>
      <string>w1</string>
      <double>0.4</double>
    </entry>
  </params>
</parameters>
```



```
<entry>
  <string>k</string>
  <double>1.0</double>
</entry>
<entry>
  <string>hood_size</string>
  <int>200</int>
</entry>
<entry>
  <string>v_max</string>
  <double>0.1</double>
</entry>
</params>
</parameters>
```

Πίνακας 9. Παράδειγμα XML αρχείου διαμόρφωσης της πλατφόρμας βελτιστοποίησης

3.6.3 Σύνοψη των δυνατοτήτων χρήσης της πλατφόρμας βελτιστοποίησης

Η πλατφόρμα κατανεμημένης βελτιστοποίησης συνδυάζει αφενός την ευελιξία ανάπτυξης σε απομακρυσμένους υπολογιστικούς κόμβους, καθότι οι περιορισμοί που θέτει ως προς το περιβάλλον εκτέλεσης της αφορούν κυρίως την προεγκατάστατη της ιδεατής μηχανής Java και του μεσισμικού JADE, και αφετέρου την ευκολία ολοκλήρωσης της με διαθέσιμες βιβλιοθήκες ή εφαρμογές υπολογιστικού ηλεκτρομαγνητισμού, καθώς δεν απαιτεί την τροποποίηση τους, αλλά απλώς την ανάπτυξη κατάλληλου στρώματος διεπαφών, χρησιμοποιώντας προτυποποιημένους μηχανισμούς της γλώσσας Java. Μάλιστα, στο Παράρτημα της παρούσας διατριβής παρουσιάζονται σε μεγαλύτερη λεπτομέρεια οι δυνατότητες διαχείρισης, εγκατάστασης και παραμετροποίησης της πλατφόρμας.

Στο επόμενο κεφάλαιο θα δειχθεί η αποδοτικότητα της κατανεμημένης πλατφόρμας ως προς την επιτυγχανόμενη επιτάχυνση της διαδικασίας βελτιστοποίησης πρακτικών σχεδιάσεων στοιχειοκεραιών, βάσει του επιλεγμένου υπολογιστικού μοντέλου, σύμφωνα με το οποίο η εκτίμηση της ποιότητας κάθε σχεδίασης αποτελεί και το βασικό άτομο υπολογισμού.

4 Βελτιστοποίηση Στοιχειοκεραιών

Ένα από τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι μηχανικοί κεραιών είναι η εύρεση βέλτιστων σχεδιάσεων για στοιχειοκεραίες, που παράλληλα θα ικανοποιούν τους προκύπτοντες περιορισμούς κατά τη διαδικασία ενσωμάτωση τους σε ολοκληρωμένα συστήματα τηλεπικοινωνιών. Η σύνθεση των στοιχειοκεραιών παραδοσιακά έγκειται στην εύρεση κατάλληλων τιμών διέγερσης για κάθε στοιχείο τους, προκειμένου να είναι δυνατόν να εκπέμψουν σύμφωνα με τα προδιαγεγραμμένα διαγράμματα ακτινοβολίας, όπως αυτά προκύπτουν από τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των τηλεπικοινωνιακών εφαρμογών που καλούνται να εξυπηρετήσουν.

Στη βιβλιογραφία αναφέρονται μια πλειάδα από μεθοδολογίες σχεδίασης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ικανοποίηση των προδιαγεγραμμένων χαρακτηριστικών των διαγραμμάτων ακτινοβολίας. Όμως η συντριπτική πλειοψηφία αυτών των μεθόδων αφορά τη σύνθεση διαγραμμάτων για *ιδεατές ομοιόμορφες γραμμικές στοιχειοκεραίες*, με ειδικότερα προσδιοριζόμενα χαρακτηριστικά το κέρδος τους, το άνοιγμα του κεντρικού λοβού και την καταπίεση των πλευρικών λοβών που επιτυγχάνουν [84]. Η χρήση τους λοιπόν δεν επιτρέπει την ικανοποίηση επιπρόσθετων χαρακτηριστικών όπως τη στροφή του κεντρικού λοβού ή την τοποθέτηση μηδενισμών σε επιθυμητές κατευθύνσεις ούτε επιτρέπουν τον συνυπολογισμό των φαινομένων ίδιας και αμοιβαίας σύζευξης μεταξύ των στοιχείων τους ή την εκτίμηση της απόκλισης του ολικού διαγράμματος ακτινοβολίας από τον παράγοντα διάταξης τους.

Αν επιπρόσθετα θεωρηθεί ότι αντικείμενο της διαδικασίας σύνθεσης αποτελεί η εύρεση της βέλτιστης χωρικής κατανομής των ακτινοβολητών για ανομοιόμορφες στοιχειοκεραίες, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη την μεταξύ τους ηλεκτρομαγνητική σύζευξη, η πολυπλοκότητα αυξάνεται σημαντικά. Για αυτά τα προβλήματα είναι αναγκαία η επαναδιατύπωση της διαδικασίας σύνθεσης ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με αριθμό παραμέτρων ευθέως ανάλογο του πλήθους των ακτινοβολητών της στοιχειοκεραίας. Στα πλαίσια αυτά απαιτείται ο ορισμός κατάλληλης *αντικειμενικής συνάρτησης*, που θα διασφαλίζει την πλήρη ικανοποίηση των σχεδιαστικών στόχων, και θα αξιολογεί τις υποψήφιες λύσεις ως προς το *μέτρο της απόκλισης* τους από αυτούς τους στόχους.

Η αυξημένη πολυπλοκότητα των εν λόγω σχεδιαστικών προβλημάτων απαιτεί τη χρήση *στοχαστικών ευρετικών μεθόδων* όπως ο *αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων* [85]. Ο υπολογισμός των χρησιμοποιούμενων αντικειμενικών κριτηρίων γίνεται συνήθως αριθμητικά με τη βοήθεια γνωστών αναλυτικών μεθόδων εύρεσης του παράγοντα διάταξης της στοιχειοκεραίας. Όμως η ικανοποίηση συστημικών χαρακτηριστικών, όπως η εύρεση του συνολικού διαγράμματος ακτινοβολίας και η εκτίμηση των αμοιβαίων και ιδίων αντιστάσεων σύζευξης, συνεπάγεται και αυξημένο υπολογιστικό κόστος. Η χρήση της κατανεμημένης πλατφόρμας βελτιστοποίησης, που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, κρίνεται επιβεβλημένη για την επίλυση σύνθετων προβλημάτων σχεδίασης [75].

Στις ακόλουθες ενότητες επιχειρείται η *γενικευμένη διατύπωση ενός προβλήματος σύνθεσης*, αφού πρώτα παρουσιαστούν συνοπτικά κάποια από τα ειδικότερα

χαρακτηριστικά των μεθόδων που ήδη απαντώνται στη βιβλιογραφία για την ανάλυση αλλά και σύνθεση τους. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η γενική ταξινόμηση των προβλημάτων σύνθεσης στοιχειοκεραιών σε προβλήματα σταθερής και μεταβλητής γεωμετρίας. Στο πλαίσιο αυτό παρουσιάζεται αρχικά ερευνητική εργασία που αφορά τη σύγκριση διαφορετικών μεθόδων βελτιστοποίησης, στοχαστικών και μη, για την σύνθεση των διαγραμμάτων ακτινοβολίας που εκπέμπει η γραμμική στοιχειοκεραία ενός βοηθητικού συστήματος καθοδήγησης, κατά την προσγείωση ενός αεροπλάνου [86]. Στη συνέχεια μελετάται μια στοιχειοκεραία επίπεδης μεταβλητής γεωμετρίας αποτελούμενης από δίπολα, με σκοπό την ταυτόχρονη εύρεση της βέλτιστης τοποθέτησης και διέγερσης των στοιχείων της, έτσι ώστε να συμμορφώνεται με τα προκαθορισμένα χαρακτηριστικά ακτινοβόλησης [87]. Τα δύο παραδείγματα παρατίθενται για να διαφανεί ότι οι κλασικές μέθοδοι βελτιστοποίησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση παραμετρικών μοντελοποιήσεων κεραιών που προσεγγίζονται με απλοποιημένες αναλυτικές εκφράσεις, αλλά γενικότερα δεν επαρκούν για τη σύνθεση στοιχειοκεραιών μεταβλητής γεωμετρίας.

Στη συνέχεια εξετάζονται σχεδιάσεις στοιχειοκεραιών που βρίσκουνε εφαρμογή στις τηλεπικοινωνίες και ειδικότερα στις κινητές επικοινωνίες και στα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών. Η ευρεία χρήση τους οφείλεται στην ικανότητα τους να διαμορφώνουν συγκεκριμένους τομείς/κατευθύνσεις κάλυψης ενώ ταυτόχρονα μπορούν να επιβάλλουν μηδενισμούς στο διάγραμμα ακτινοβολίας τους, ελαττώνοντας έτσι την επίδραση των φαινομένων πολυοδικής διάδοσης καθώς και των παρεμβολών [88]. Στα πλαίσια αυτά αρχικά εξετάζεται μια μέθοδος σχεδίασης στοιχειοκεραιών μεταγωγής λοβών, βασισμένη στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων [89]. Ακολούθως περιγράφεται μια μέθοδος προσδιορισμού των διεγέρσεων των στοιχείων μιας επίπεδης ομοιόμορφης κυκλικής στοιχειοκεραίας, η οποία επιτρέπει τη στροφή του κυρίως λοβού στην κατεύθυνση ενός χρήστη ενώ παράλληλα επιβάλλει βαθείς μηδενισμούς σε κατευθύνσεις παρεμβολών [90]. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που λήφθηκαν κατά τη σύνθεση μιας γραμμικής στοιχειοκεραίας σταθμού βάσης με τη βοήθεια στοχαστικών αλγορίθμων, προκειμένου να προσδιοριστεί η ανομοιόμορφη κατανομή των στοιχείων της καθώς και οι φάσεις τροφοδοσίας τους. Τέλος, και αυτή η μέθοδος βασίζεται στη χρήση στοχαστικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης.

Προκειμένου να εκτιμηθεί η ευελιξία και η αποδοτικότητα της κατανεμημένης πλατφόρμας βελτιστοποίησης που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, μελετάται η εφαρμογή της κατά τη βελτιστοποίηση μιας κεραιάς μεταγωγής λοβών [75]. Στα πλαίσια αυτά δίδονται αναλυτικά δύο σενάρια κλιμάκωσης, όπου το πρώτο προβλέπει την κλιμάκωση του αριθμού των σωματιδίων που απαρτίζουν τον πληθυσμό της μεθόδου PSO, ενώ το δεύτερο την κλιμάκωση του αριθμού των υπολογιστικών κόμβων που συμμετέχουν στην κατανεμημένη πλατφόρμα. Αποδεικνύεται ότι μεγιστοποιούνται τα υπολογιστικά οφέλη όταν το υπολογιστικό κόστος προσομοίωσης των αποτιμώμενων σχεδιάσεων είναι μεγάλο και όταν τα σωματίδια κατανέμονται πιο ομοιόμορφα σε μεγαλύτερο αριθμό υπολογιστικών κόμβων.

4.1 Ανάλυση των Στοιχειοκεραιών

Η ανάλυση των χαρακτηριστικών ακτινοβολίας μιας στοιχειοκεραίας είναι δυνατή, εφόσον ικανοποιούνται μια σειρά από προϋποθέσεις σχετικά με τα χαρακτηριστικά τους [84]:

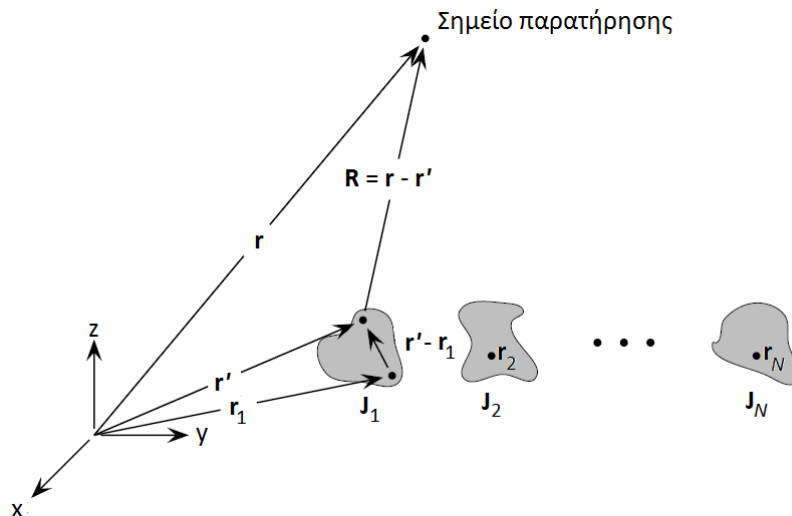
Ανάπτυξη Κατανεμημένης Πλατφόρμας Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων και Εφαρμογή σε Προβλήματα Σύνθεσης Στοιχειοκεραιών

1. Να είναι γνωστή η χωρική διαμόρφωση των κεραιών της στοιχειοκεραίας.
2. Να μπορεί να περιγραφεί αναλυτικά ο παράγοντας διαμόρφωσης για τις δεδομένες γεωμετρίες και φάσεις των στοιχείων
3. Να είναι καλά ορισμένες οι μιγαδικές διεγέρσεις (πλάτη και φάσεις).
4. Να είναι διαθέσιμη η αναλυτική/αριθμητική περιγραφή της ακτινοβολίας των κεραιών που συνθέτουν την στοιχειοκεραία.
5. Να είναι δυνατός ο υπολογισμός των αμοιβαίων και επαγωγικών αντιστάσεων των ακτινοβολητών.

Εφόσον ικανοποιούνται οι παραπάνω συνθήκες, είναι δυνατόν να αποτιμηθεί το συνολικό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο σε ένα δεδομένο σημείο του χώρου, ως το διανυσματικό άθροισμα του ακτινοβολουμένου πεδίου από το κάθε στοιχείο της στοιχειοκεραίας.

4.1.1 Ηλεκτρομαγνητική ανάλυση

Όταν επιβάλλονται κατάλληλα ορισμένες οριακές συνθήκες στις ρευματικές κατανομές επί της επιφάνειας των ακτινοβολητών μιας στοιχειοκεραίας, είναι δυνατόν να προσδιορισθεί το συνολικό ακτινοβολουμένο πεδίο. Έστω ότι οι ρευματικές κατανομές $\mathbf{J}_1, \mathbf{J}_2, \dots, \mathbf{J}_N$ των ακτινοβολητών είναι γνωστές και η θέση τους στον χώρο προσδιορισμένη (Εικόνα 21).



Εικόνα 21. Στοιχειοκεραία αποτελούμενη από N ρευματικές κατανομές.

Οι ρευματικές κατανομές αναπαρίστανται από $\mathbf{J}_n(\mathbf{r}')$, όπου n είναι ο δείκτης των αντιστοίχων ακτινοβολητών. Το συνολικό ακτινοβολουμένο ηλεκτρικό πεδίο $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ μπορεί να υπολογισθεί χρησιμοποιώντας την έννοια των καθυστερημένων μαγνητικών δυναμικών $\mathbf{A}(\mathbf{r})$ και την αρχή της υπέρθεσης των πεδίων [91] ως ακολούθως

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \int_{v'} \sum_{n=1}^N \mu \mathbf{J}_n(\mathbf{r}') \frac{e^{-jk_0 R}}{4\pi R} dv' \quad (26)$$

όπου \mathbf{r} είναι το διάνυσμα από το κέντρο του συστήματος συντεταγμένων προς ένα σημείο παρατήρησης, \mathbf{r}' είναι το διάνυσμα από το κέντρο του συστήματος συντεταγμένων προς ένα σημείο ενός εκ των ακτινοβολητών και $R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$ το μέτρο της διαφοράς τους.

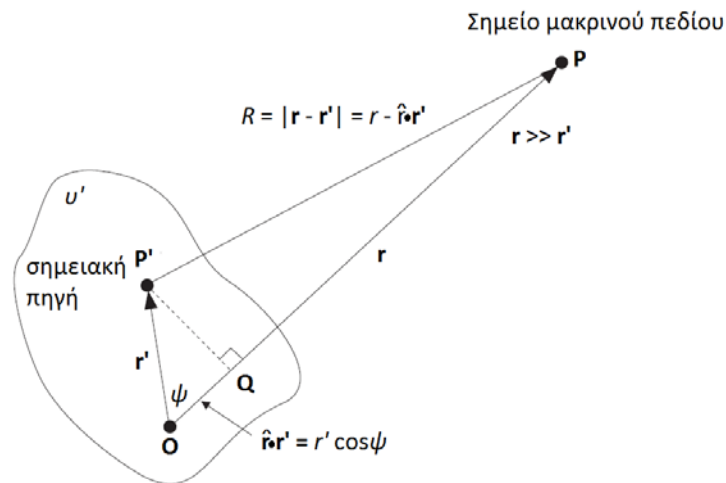
Εφαρμόζοντα τη συνθήκη του Lorenz, δύναται να υπολογισθεί το συνολικό ηλεκτρικό πεδίο $\mathbf{E}(\mathbf{r})$, σε σημεία του χώρου εκτός των ακτινοβολητών, ως το διανυσματικό άθροισμα των ακτινοβολουμένων πεδίων που προκλήθηκαν από τις επιμέρους ρευματικές κατανομές στην επιφάνεια των στοιχείων της στοιχειοκεραίας:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{1}{j\omega\mu\epsilon} [\nabla \times \nabla \times \mathbf{A}(\mathbf{r})] = -j\omega \left[\mathbf{A}(\mathbf{r}) + \frac{1}{k^2} \nabla (\nabla \cdot \mathbf{A}(\mathbf{r})) \right] \quad (27)$$

Αντικαθιστώντας τη σχέση (26) στην έκφραση του ηλεκτρικού πεδίου και εφαρμόζοντας την αρχή της υπέρθεσης των πεδίων λαμβάνεται η ακόλουθη σχέση:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(\mathbf{r}) &= \frac{1}{j\omega\epsilon} \nabla \times \nabla \times \int_{v'} \sum_{n=1}^N \mathbf{J}_n(\mathbf{r}') \frac{e^{-jk_0 R}}{4\pi R} dv' \\ &= \sum_{n=1}^N \left(\frac{1}{j\omega\epsilon} \nabla \times \nabla \times \int_{v'} \mathbf{J}_n(\mathbf{r}') \frac{e^{-jk_0 R}}{4\pi R} dv' \right) \end{aligned} \quad (28)$$

Προκειμένου να απλοποιηθεί ο υπολογισμός του ακτινοβολουμένου ηλεκτρικού πεδίου $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ σε απομακρυσμένο σημείο παρατήρησης ($R \gg r$), δύναται να τροποποιηθεί κατάλληλα η σχέση (28), χρησιμοποιώντας κατάλληλες γεωμετρικές προσεγγίσεις (Εικόνα 22).



Εικόνα 22. Προσεγγίσεις κατά τον υπολογισμό του μακρινού πεδίου.

Αν \mathbf{r} είναι το διάνυσμα θέσης του μακρινού σημείου παρατήρησης P και \mathbf{r}' η θέση μιας σημειακής πηγής P' , είναι δυνατόν να απλοποιηθεί η έκφραση της απόστασης $R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$ χρησιμοποιώντας τα αναπτύγματα Taylor. Πράγματι, θεωρώντας ότι $r \gg r'$ και χρησιμοποιώντας το ανάπτυγμα $(1 + x)^{1/2} = 1 + x/2 - x^2/8 + \dots$, η έκφραση της απόστασης R απλοποιείται σε:

$$R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'| = r \sqrt{1 - 2 \frac{r'}{r} \cos \psi + \left(\frac{r'}{r}\right)^2} \approx r \left(1 - \frac{r'}{r} \cos \psi + \frac{1}{2} \left(\frac{r'}{r}\right)^2 \sin^2 \psi\right) \quad (29)$$

Αγνοώντας τους όρους δεύτερης τάξεως, η απόσταση R μεταξύ του δεδομένου σημείου της κατανομής και του μακρινού σημείου ακτινοβολίας δίδεται από την προσεγγιστική έκφραση $R = r - r' \cos \psi = r - \mathbf{r}' \cdot \hat{\mathbf{r}}$. Λαμβάνοντας λοιπόν την άνωθεν προσεγγιστική έκφραση για τον φασιθέτη και την απλοποίηση $R \approx r$ για τον όρο πλάτους, η σχέση (28) που περιγράφει το συνολικό ηλεκτρικού πεδίο $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ επαναδιατυπώνεται ως ακολούθως:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \sum_{n=1}^N \left(\frac{1}{j\omega\epsilon} \frac{e^{-jk_0 r}}{4\pi r} \hat{\mathbf{r}} \times \hat{\mathbf{r}} \times \int_{V'} \mathbf{J}_n(\mathbf{r}') e^{-jk_0 \hat{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{r}'} dV' \right) \quad (30)$$

Το διάγραμμα ακτινοβολίας ορίζεται ως η μεταβολή των ακτινοβολούμενων πεδίων σε μια σφαίρα σταθερής ακτίνας r και με κέντρο το σύστημα συντεταγμένων της κεραίας. Τότε το μη κανονικοποιημένο διάγραμμα ακτινοβολίας μπορεί να εκφραστεί ως:

$$F(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N \hat{\mathbf{r}} \times \hat{\mathbf{r}} \times \int_{V'} \mathbf{J}_n(\mathbf{r}') e^{-jk_0 \hat{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{r}'} dV' \quad (31)$$

Τα φαινόμενα ηλεκτρομαγνητικής σύζευξης μεταξύ των ακτινοβολητών που απαρτίζουν τη στοιχειοκεραία εκφράζονται στις σχέσεις περιγραφής των ακτινοβολούμενων πεδίων διαμέσου των ρευματικών κατανομών $\mathbf{J}_n(\mathbf{r}')$. Λόγω της αμοιβαίας επαγωγής οι ρευματικές κατανομές των στοιχείων διαφοροποιούνται από τις κατανομές που θα λαμβάνονταν αν ήταν απομονωμένα. Για τον ακριβή προσδιορισμό των ρευματικών κατανομών είναι απαραίτητη η χρήση κατάλληλων υπολογιστικών τεχνικών ηλεκτρομαγνητισμού [92] είτε κατάλληλων αναλυτικών προσεγγιστικών εκφράσεων.

4.1.2 Ιδεατές στοιχειοκεραίες

Η θεωρία των *ιδεατών στοιχειοκεραιών* επιτρέπει την ανάλυση τους χωρίς να είναι απαραίτητη η ακριβής επίλυση των ηλεκτρομαγνητικών μοντέλων, εφόσον έχει εκτιμηθεί ότι η επίδραση του φαινομένου σύζευξης μεταξύ των ακτινοβολητών είναι αμελητέα:

1. Οι ρευματικές κατανομές των στοιχείων στο περιβάλλον της στοιχειοκεραίας ταυτίζονται με τις κατανομές απομονωμένων στοιχείων.
2. Τα ρεύματα και οι αντιστοιχούντες τάσεις στους ακροδέκτες των στοιχείων συνδέονται με τις αντιστάσεις εισόδου τους όταν αυτά είναι απομονωμένα.
3. Θεωρείται ότι η μορφή των ρευματικών κατανομών παραμένει αμετάβλητη καθώς μεταβάλλονται οι επιβαλλόμενες διεγέρσεις στη στοιχειοκεραία, π.χ. για την στροφή του κυρίως λοβού του διαγράμματος ακτινοβολίας.

Έστω ότι είναι δυνατόν οι ρευματικές κατανομές των στοιχείων σε απομόνωση να εκφραστούν βάσει των προκλητών κανονικοποιημένων ρευματικών κατανομών \mathbf{j}^{iso}

$$\mathbf{J}_n^{iso}(\mathbf{r}') = I_n \mathbf{j}_n^{iso}(\mathbf{r}') \quad (32)$$

όπου I_n είναι τα μιγαδικά ρεύματα διέγερσης. Αντικαθιστώντας την παραπάνω έκφραση στην (31), λαμβάνεται η ακόλουθη απλούστερη διατύπωση:

$$F(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N \left(\hat{\mathbf{r}} \times \hat{\mathbf{r}} \times \int_{V'} \mathbf{j}_n^{iso}(\mathbf{r}') e^{-jk_0 \hat{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{r}'} dV' \right) I_n \quad (33)$$

Όταν τα διαγράμματα ακτινοβολίας που παράγονται από τις κανονικοποιημένες ρευματικές κατανομές αναφέρονται στους ακροδέκτες όπου και προσδιορίζονται και τα ρεύματα διεγέρσεως, τότε η άνωθεν σχέση τροποποιείται αναλόγως

$$F(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N \left(\hat{\mathbf{r}} \times \hat{\mathbf{r}} \times \int_{V'} \mathbf{j}_n^{iso}(\mathbf{r}') e^{-jk_0 \hat{\mathbf{r}} \cdot (\mathbf{r}' - \mathbf{r}_n)} dV' \right) I_n e^{jk_0 \hat{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{r}_n} \quad (34)$$

όπου \mathbf{r}_n είναι το διάνυσμα θέσης του ακροδέκτη της κεραίας n . Ο παράγοντας μέσα στις παρενθέσεις αντιπροσωπεύει το *διάγραμμα ακτινοβολίας ενός απομονωμένου στοιχείου*. Αν αυτό αναπαρασταθεί από το σύμβολο g τότε η παραπάνω σχέση γράφεται

$$F(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N g(\theta, \phi) I_n e^{jk_0 \hat{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{r}_n} \quad (35)$$

Αν επιπρόσθετα υποθεθεί ότι οι ακτινοβολητές της στοιχειοκεραίας είναι όμοιοι και ότι η σύζευξη μεταξύ τους είναι αμελητέα, τότε η παραπάνω σχέση επαναδιατυπώνεται χρησιμοποιώντας ως κοινό παράγοντα το κοινό μοναδιαίο διάγραμμα ακτινοβολίας:

$$F(\theta, \phi) = g(\theta, \phi) \sum_{n=1}^N I_n e^{jk_0 \hat{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{r}_n} \quad (36)$$

Ο συντελεστής αθροίσματος στην άνωθεν σχέση αντιπροσωπεύει τον παράγοντα διάταξης της στοιχειοκεραίας

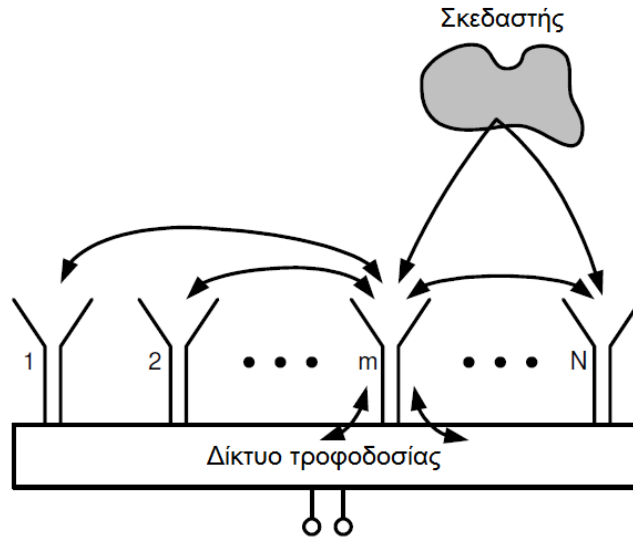
$$AF(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N I_n e^{jk_0 \hat{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{r}_n} \quad (37)$$

Επομένως, το διάγραμμα ακτινοβολίας μιας ιδανικής στοιχειοκεραίας αποτελούμενης από όμοιους ακτινοβολητές, μπορεί να υπολογισθεί πολλαπλασιάζοντας τον παράγοντα διάταξής της με το διάγραμμα ακτινοβολίας ενός απομονωμένου στοιχείου της [84].

$$F(\theta, \phi) = AF(\theta, \phi) g(\theta, \phi) \quad (38)$$

4.1.3 Αμοιβαία σύζευξη

Το φαινόμενο της αμοιβαίας σύζευξης μεταξύ των ακτινοβολητών μιας στοιχειοκεραίας, δύναται να επηρεάσει σε σημαντικό βαθμό το συνολικό διάγραμμα ακτινοβολίας της, καθώς και την αντίσταση εισόδου των στοιχείων της. Οι κυριότεροι μηχανισμοί που συμβάλουν στην ενίσχυση του φαινομένου και των επιπτώσεών του είναι η απευθείας ηλεκτρομαγνητική σύζευξη μεταξύ των ακτινοβολητών, η έμμεση επίδραση σκεδαστών ευρισκόμενων στο περιβάλλον της στοιχειοκεραίας, και τέλος η σύζευξη διαμέσου του δικτυώματος τροφοδοσίας του κεραιοσυστήματος (Εικόνα 23).



Εικόνα 23. Αμοιβαία σύζευξη ακτινοβολητών.

Η κοινή συνισταμένη στα αποτελέσματα του φαινομένου της σύζευξης, ανεξαρτήτως του ποίος από τους άνωθεν περιγραφόμενους μηχανισμούς κυριαρχεί, είναι η μεταβολή των ρευματικών κατανομών στην ενεργή επιφάνεια των ακτινοβολητών. Ειδικότερα δε τα φαινόμενα σύζευξης και μη βέλτιστης προσαρμογής του δικτύου τροφοδοσίας του κεραιοσυστήματος, περιπλέκει την εκτίμηση της επίδρασης των σχετικών φαινομένων. Η μεταβολή των ρευματικών κατανομών μπορεί να μελετηθεί, θεωρώντας τις θύρες τροφοδοσίας μιας στοιχειοκεραίας ως θύρες ενός ισοδύναμου μικροκυματικού πολύθυρου, και υπολογίζοντας ενεργά διαγράμματα ακτινοβολίας για κάθε ακτινοβολητή ξεχωριστά, τα οποία μεταβάλλονται όταν μεταβληθεί και η τροφοδοσία του συστήματος.

4.1.3.1 Ενεργές αντιστάσεις εισόδου

Λόγω του φαινομένου της αμοιβαίας επαγωγής μεταξύ των ακτινοβολητών της στοιχειοκεραίας, το διάνυσμα των ρευμάτων τροφοδοσίας της υπολογίζεται από τις τάσεις διεγέρσεως στους N ακροδέκτες των στοιχείων τους, σύμφωνα με τη ακόλουθη σχέση,

$$\mathbf{V}_t = \sum_{i=0}^{N-1} V_i = \sum_{i=0, j=0}^{N-1} Z_{ij} I_i = \mathbf{Z}_{tt} \mathbf{I}_t \quad (39)$$

όπου \mathbf{V}_t αναπαριστά το άθροισμα τάσεων διεγέρσεως και το μητρώο \mathbf{Z}_{tt} τις επαγωγικές αντιστάσεις μεταξύ των επιμέρους ακτινοβολητών [84].

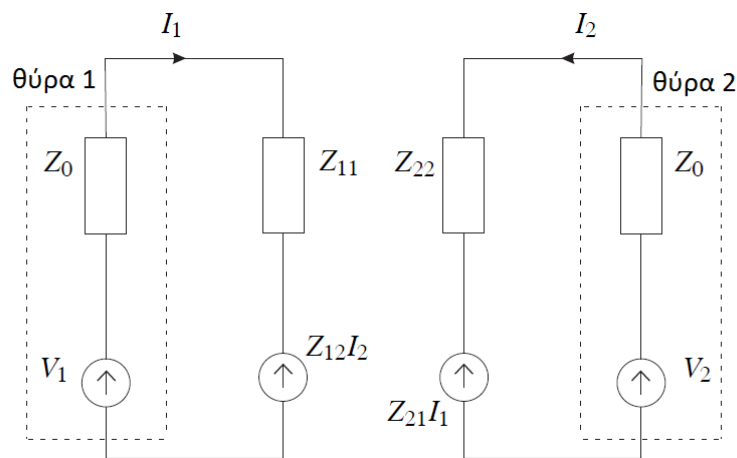
Ο πίνακας των επαγωγικών αντιστάσεων αποτελείται από αυτεπαγωγικές $Z_{ij|i=j}$ και αμοιβαίες επαγωγικές $Z_{ij|i \neq j}$ αντιστάσεις που αντιστοιχούν στους N όμοιους ακτινοβολητές της στοιχειοκεραίας. Εξ' ορισμού, είναι και συμμετρικός, δηλαδή ισχύει $Z_{ij} = Z_{ji}$ για κάθε i, j .

$$\mathbf{Z}_{tt} = \begin{bmatrix} Z_{11} & \cdots & Z_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{N1} & \cdots & Z_{NN} \end{bmatrix} \quad (40)$$

Οι τιμές του μητρώου \mathbf{Z}_{tt} υπολογίζονται, θεωρώντας ότι ένα στοιχείο της στοιχειοκεραίας διεγείρεται από πηγή ρεύματος 1A και μετρώντας τις τάσεις που αναπτύσσονται στους ανοικτοκυκλωμένους ακροδέκτες των υπολοίπων στοιχείων. Οι τιμές των στοιχείων της κύριας διαγωνίου του μητρώου αμοιβαίων επαγωγών διαφέρουν στη γενική περίπτωση από την αντίσταση εισόδου των απομονωμένων στοιχείων, εξαιτίας της ενδεχόμενης παρουσίας άλλων στοιχείων που μπορούν να προκαλέσουν την διασπορά του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Τα στοιχεία εκτός της κύριας διαγωνίου του μητρώου αμοιβαίων αντιστάσεων περιγράφουν τις επαγόμενες τάσεις στους υπόλοιπους ακτινοβολητές από το ρεύμα διέγερσης σε ένα εκ των στοιχείων της στοιχειοκεραίας:

$$Z_{ij} = \frac{V_{ij,OC}}{I_j}, \text{ για } i \neq j \quad (41)$$

Η σημασία του μητρώου αμοιβαίων επαγωγών μπορεί να δειχθεί με τη βοήθεια ενός παραδείγματος δύο ομοίων κεραιών, οι οποίες είναι ισχυρώς ηλεκτρομαγνητικά συζευγμένες, και τροφοδοτούνται από πηγές τάσεως, ίσης εσωτερικής αντιστάσεως Z_0 . Στο ισοδύναμο μικροκυματικό κύκλωμα που εμφανίζεται στην Εικόνα 24, το φαινόμενο της αμοιβαίας επαγωγής έχει μοντελοποιηθεί με τη βοήθεια των εξαρτημένων πηγών τάσεως με τιμές $Z_{12}I_2$ για το κύκλωμα της πρώτης κεραιάς και $Z_{21}I_1$ για το κύκλωμα της δεύτερης. Σε αυτή τη περίπτωση σχηματίζεται ένα 2x2 σύστημα γραμμικών εξισώσεων, το οποίο αποτελεί ειδική περίπτωση της σχέσεως (39).



Εικόνα 24. Ισοδύναμο κύκλωμα στοιχειοκεραίας αποτελούμενης από δύο ακτινοβολητές.

Ο λόγος τάσεως προς ρεύματος που εισέρχεται στους ακροδέκτες κάθε κεραιάς θα είναι ίσος με ένα από τα στοιχεία της διαγωνίου του μητρώου αμοιβαίων επαγωγών \mathbf{Z}_{tt} , μόνο εφόσον η άλλη θύρα του δίθυρου κυκλώματος είναι ανοικτοκυκλωμένη και δεν διαρρέεται από ρεύμα. Αν τα ρεύματα οδήγησης και στις δύο θύρες είναι μη μηδενικά, τότε ο λόγος τάσεως - ρεύματος για καθεμία από τις θύρες θα είναι συνάρτηση των στοιχείων του πίνακα αμοιβαίων επαγωγών καθώς και των ρευμάτων που διαρρέουν τις υπόλοιπες θύρες. Αυτός ο λόγος καλείται αντίσταση οδήγησης ή ενεργή αντίσταση. Για το δίθυρο κύκλωμα που παρουσιάστηκε, οι ενεργές αντιστάσεις δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\begin{aligned}
Z_{act,1} &= \frac{V_1}{I_1} = Z_{11} + Z_{12} \frac{I_2}{I_1} \\
Z_{act,2} &= \frac{V_2}{I_2} = Z_{22} + Z_{21} \frac{I_1}{I_2}
\end{aligned} \tag{42}$$

Οι παραπάνω σχέσεις γενικεύονται για μια στοιχειοκεραία αποτελούμενη από N στοιχεία, και η ενεργή αντίσταση για το i στοιχείο υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$Z_{act,i} = \frac{V_i}{I_i} = \frac{1}{I_i} \sum_{j=1}^N Z_{ij} I_j \tag{43}$$

4.1.3.2 Ενεργά διαγράμματα ακτινοβολίας

Τα φαινόμενα σύζευξης σε απλές δομές κεραιών, όπως μια στοιχειοκεραία αποτελούμενη από δίπολα, περιγράφονται επαρκώς από το μητρώο αμοιβαίων επαγωγών. Στην περίπτωση όμως που αποτελείται από σύνθετους ακτινοβολητές ή/και στο κοντινό ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον της υπάρχουν επιφάνειες σκέδασης, όπως για παράδειγμα όταν στηρίζεται σε σύνθετες πλατφόρμες που προκαλούν φαινόμενα σκίασης και παραμόρφωσης των διαγραμμάτων ακτινοβολίας, δεν επαρκεί ένα τόσο απλοποιημένο μοντέλο για την περιγραφή των σχετικών φαινομένων.

Η μέθοδος των ενεργών διαγραμμάτων συνιστά ένα ισχυρό εργαλείο για τον υπολογισμό του συνολικού διαγράμματος ακτινοβολίας μιας πλήρως διεγερμένης στοιχειοκεραίας, συμπεριλαμβανομένων των φαινομένων αμοιβαίας σύζευξης, από το σύνολο των διαγραμμάτων των επιμέρους ακτινοβολητών της [93]. Σύμφωνα με αυτή τη μεθοδολογία το κάθε ενεργό διάγραμμα ακτινοβολίας υπολογίζεται αναλυτικά από τη ακόλουθη σχέση,

$$g_{n,act}(\theta, \phi) = \frac{1}{j\omega\epsilon} \hat{\mathbf{r}} \times \hat{\mathbf{r}} \times \int_V \mathbf{j}_{n,act}(\mathbf{r}') e^{jk_0 \hat{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{r}'} dV' \Big|_{V_n^s=1, V_j^s=0 \text{ για όλα τα } j \neq n} \tag{44}$$

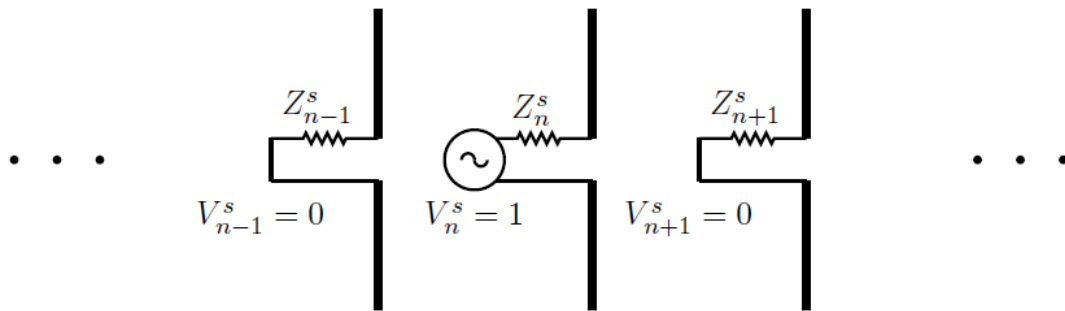
όπου $\mathbf{j}_{n,act}$ είναι οι ενεργές ρευματικές κατανομές σε όλους τους ακτινοβολητές της στοιχειοκεραίας, όταν το στοιχείο n διεγείρεται από μοναδιαία πηγή τάσης, και $g_{n,act}$ είναι το ενεργό κέρδος του κάθε στοιχείου. Για τον υπολογισμό των ρευμάτων που επάγονται στους υπόλοιπους ακτινοβολητές, θεωρείται ότι είναι τερματισμένοι στην χαρακτηριστική αντίσταση Z_0 του δικτύου τροφοδοσίας της.

Από τον παραπάνω ορισμό καθίσταται σαφές ότι για τον πλήρη χαρακτηρισμό μιας στοιχειοκεραίας N ακτινοβολητών είναι απαραίτητος ο υπολογισμός αντίστοιχου αριθμού ενεργών διαγραμμάτων $\mathbf{g}_{n,act}$. Το ολικό διάγραμμα ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας αποτελεί γραμμική υπέρθεση των ενεργών διαγραμμάτων με συντελεστές τις τάσεις τροφοδοσίας στους ακροδέκτες των στοιχείων της.

$$F(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N g_{n,act}(\theta, \phi) V_n^s \tag{45}$$

Η προηγηθείσα ανάλυση έρχεται σε αντίθεση με τον κανόνα πολλαπλασιασμού των διαγραμμάτων ακτινοβολίας, ο οποίος προϋποθέτει ότι η συμπεριφορά της

στοιχειοκεραίας είναι ιδανική και αγνοεί την ηλεκτρομαγνητική σύζευξη μεταξύ των στοιχείων της. Συνακόλουθα, εκτός από τον πίνακα αμοιβαίων επαγωγών \mathbf{Z}_{tt} είναι επιπρόσθετη απαραίτητη η γνώση των ενεργών διαγραμμάτων ακτινοβολίας, προκειμένου να είναι δυνατή η πλήρης περιγραφή της ηλεκτρομαγνητικής συμπεριφοράς της στοιχειοκεραίας. Ο υπολογισμός των επιμέρους διαγραμμάτων συνεπάγεται την κλιμάκωση των απαιτήσεων σε υπολογιστικούς πόρους και χρησιμοποιούμενη μνήμη, αναλόγως του μεγέθους της στοιχειοκεραίας.



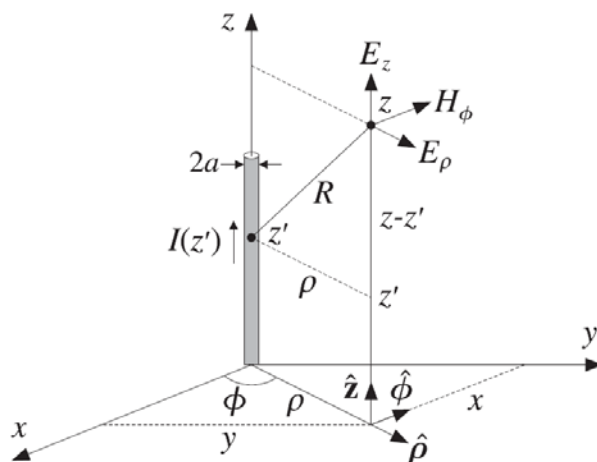
Εικόνα 25. Υπολογισμός ενεργού διαγράμματος του n -ιστού ακτινοβολητή

Τα διαγράμματα ακτινοβολίας που υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (44) και (45), παραμένουν ακριβή εφόσον χρησιμοποιούνται οι αντιστάσεις εξόδου του δικτύου τροφοδοσίας της στοιχειοκεραίας. Έτσι, αν θεωρηθεί ότι τα στοιχεία τροφοδοτούνται ξεχωριστά από διαφορετικούς πηγές, τότε η σωστή τιμή αντιστάσεως εξόδου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τους υπολογισμούς, είναι η εσωτερική αντίσταση τους (Εικόνα 25). Αυτές οι τιμές παραμένουν σταθερές καθώς μεταβάλλονται οι σχετικές φάσεις των παρεχόμενων κυμάτων τάσης από κάθε πομπό, προκειμένου να επιτευχθεί η στροφή του διαγράμματος ακτινοβολίας τους κεραιοσυστήματος.

Εάν αντίθετα το κύκλωμα τροφοδοσίας είναι κοινό για όλους τους ακτινοβολητές, όπως στην περίπτωση δικτυωμάτων τροφοδοσίας διαίρεσης ισχύος, τότε οι τιμές των ισοδύναμων αντιστάσεων Thevenin των πηγών μεταβάλλονται καθώς μεταβάλλεται και η γωνία στροφής του διαγράμματος. Σε αυτή τη περίπτωση θα πρέπει τα ενεργά διαγράμματα ακτινοβολίας να υπολογίζονται εκ νέου, για κάθε διαφορετική γωνία στροφής του κυρίως λοβού ακτινοβολίας.

4.1.4 Ανάλυση στοιχειοκεραιών γραμμικών ακτινοβολητών

Θεωρούμε την ειδική περίπτωση όπου οι ακτινοβολητές που απαρτίζουν μια στοιχειοκεραία ορίζονται ως λεπτά σωληνοειδή σύρματα. Αν το υλικό κατασκευής του κάθε ακτινοβολητή είναι τέλεια αγωγίμο, τότε οι ρευματικές κατανομές που αναπτύσσονται κατά τη διέγερση του περιορίζονται στην επιφάνεια του. Στην Εικόνα 26 απεικονίζεται η γεωμετρία ενός γραμμικού ακτινοβολητή πεπερασμένου μήκους και προσανατολισμένου στο z -άξονα, ο οποίος διαρρέεται από ρεύμα $I(z')$.



Εικόνα 26. Ακτινοβλούμενα πεδία από γραμμικές κεραίες

Αν θεωρηθεί ότι η ακτίνα του σύρματος είναι πολύ μικρότερη από το μήκος του, είναι εύλογο να υποτεθεί ότι η πυκνότητα της ρευματικής κατανομής $\mathbf{J}(\mathbf{r}')$ θα έχει την κατεύθυνση του άξονα z και δεν θα έχει εφαπτομενικές συνιστώσες:

$$\mathbf{J}(\mathbf{r}') = \hat{\mathbf{z}}I(z')\delta(x')\delta(y') \quad (46)$$

Στη γενικότερη περίπτωση που η ακτίνα a του ακτινοβολητή είναι πεπερασμένη, οι ρευματικές κατανομές που δημιουργούνται περιορίζονται στην επιφάνεια του ακτινοβολητή σε ακτινική απόσταση $\rho = a$, και η αναλυτική της έκφραση διαμορφώνεται ως

$$\mathbf{J}(\mathbf{r}') = \hat{\mathbf{z}}I(z')\delta(\rho' - a)\frac{1}{2\pi a} \quad (47)$$

Και στις δύο προαναφερόμενες περιπτώσεις, ολοκληρώνοντας την ρευματική κατανομή στον όγκο του ακτινοβολητή λαμβάνεται

$$\int \mathbf{J}(x', y', z')dx'dy' = \int \mathbf{J}(\rho, \phi, z)\rho'd\rho'd\phi' = \hat{\mathbf{z}}I(z') \quad (48)$$

Χρησιμοποιώντας την παραπάνω ιδιότητα για τον υπολογισμό του ανυσματικού μαγνητικού δυναμικού $\mathbf{A}(\mathbf{r})$ και επιπρόσθετα λαμβάνοντας υπόψη ότι η ολοκλήρωση κατά μήκος του άξονα z υπολογίζεται στο πεπερασμένο μήκος L του ακτινοβολητή, λαμβάνεται η ακόλουθη σχέση

$$A_z(\rho, z) = \frac{\mu}{4\pi} \int_L I(z') \frac{e^{-jk_0 R}}{R} dz', \quad R = \sqrt{\rho^2 - (z - z')^2} \quad (49)$$

Αντικαθιστώντας στην έκφραση συσχέτισης του μαγνητικού δυναμικού \mathbf{A} με το ακτινοβλούμενο ηλεκτρικό πεδίο \mathbf{E} , όπως αυτή προκύπτει από την εφαρμογή της συνθήκης του Lorenz [91], προκύπτουν δύο εκφράσεις για την ακτινική συνιστώσα και την συνιστώσα του στον άξονα z :

$$j\omega\epsilon\mu E_z = \partial_z (\nabla \cdot \mathbf{A}) + k^2 A_z = (\partial_z^2 + k^2) A_z$$

$$j\omega\epsilon\mu E_\rho = \partial_\rho (\nabla \cdot \mathbf{A}) = \partial_\rho \partial_z A_z$$

Από τη σχέση ορισμού του ανυσματικού μαγνητικού δυναμικού \mathbf{A} δύναται να υπολογισθεί το μαγνητικό πεδίο του ακτινοβολητή,

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} = (\hat{\rho}\partial_\rho + \hat{z}\partial_z) \times (\hat{z}A_z) = (\hat{\rho} \times \hat{z}) \partial_\rho A_z = -\hat{\phi} \partial_\rho A_z$$

οπότε αποδεικνύεται τελικά ότι έχει μοναδική συνιστώσα στον άξονα ϕ των κυλινδρικών συντεταγμένων. Όλες οι μη μηδενικές συνιστώσες των ακτινοβολουμένων πεδίων από γραμμικό ακτινοβολητή δύναται τελικά να εκφραστούν βάσει του καθυστερημένου δυναμικού A_z .

$$j\omega\epsilon\mu E_z = (\partial_z^2 + k^2) A_z$$

$$j\omega\epsilon\mu E_\rho = \partial_\rho \partial_z A_z$$

$$\mu H_\phi = -\partial_\rho A_z$$
(50)

Χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμένο δυναμικό $V(z, \rho) = 2jcA_z(z, \rho)$ η σχέση του εφαπτομενικού στον ακτινοβολητή πεδίου E_z γράφεται εναλλακτικά ως

$$(\partial_z^2 + k^2)V(z, \rho) = -2kE_z(z, \rho)$$

$$V(z, \rho) = \frac{j\eta}{2\pi} \int_L I(z') G(z - z') dz'$$

$$G(z - z') = \frac{e^{-jk_0 R}}{R}, \quad R = \sqrt{\rho^2 - (z - z')^2}$$
(51)

Έστω ότι ο γραμμικός ακτινοβολητής τροφοδοτείται από πηγή τάσεως V η οποία δημιουργεί ηλεκτρικό πεδίο σταθερής εντάσεως E^{inc} σε διάκενο απειροστού μήκους δ . Επειδή το συνολικό ηλεκτρικό πεδίο στην επιφάνεια του ακτινοβολητή πρέπει να μηδενίζεται, ισχύει η οριακή συνθήκη $E_z(z) = -E^{inc} = V/\delta(z)$, οπότε η έκφραση των δυναμικών βάσει των σχέσεων (51) επαναδιατυπώνεται ως

$$(\partial_z^2 + k^2)V(z, \rho) = 2kV\delta(z)$$
(52)

4.1.4.1 Αρμονική προσέγγιση των ρευματικών κατανομών

Μια συχνά χρησιμοποιούμενη προσέγγιση στην περίπτωση των γραμμικών ακτινοβολητών, με πηγή τροφοδοσίας στο κέντρο τους (σημείο $z = 0$), είναι ότι οι ρευματικές κατανομές που αναπτύσσονται στην επιφάνεια τους προκειμένου να μηδενίζεται το εφαπτομενικό ηλεκτρικό πεδίο E_z , είναι αρμονικές

$$I(z) = I_m \sin(k(h - |z|)), \quad \text{όπου } I_m = I_0 / \sin kh$$
(53)

όπου η τιμή I_0 αντιπροσωπεύει την τιμή του ρεύματος στο κέντρο τους και h το ύψος τους οριζόμενο ως το μισό του μήκους τους L . Είναι δυνατόν να προσεγγιστεί απευθείας το

ακτινοβολούμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, χωρίς να γίνει χρήση των οριζόμενων δυναμικών. Αντικαθιστώντας τη σχέση (49) στην έκφραση του ηλεκτρικού πεδίου E_z , λαμβάνουμε

$$j\omega\epsilon\mu E_z(z, \rho) = \frac{\mu}{4\pi} \int_{-h}^h I(z') (\partial_z^2 + k^2) G(z - z', \rho) dz' \quad (54)$$

όπου η συνάρτηση Green ορίζεται ως $G(z - z') = e^{jkR}/R$ και R η απεικονιζόμενη ακτίνα στην Εικόνα 26. Χρησιμοποιώντας τον κανόνα παραγωγίσης σύνθετων συναρτήσεων και το γεγονός ότι η αρμονική ρευματική κατανομή ικανοποιεί τον ορισμό των πεδιακών δυναμικών σε συμφωνία με τις εξισώσεις του Helmholtz, λαμβάνεται η ακόλουθη ισοδύναμη σχέση για την έκφραση του ηλεκτρικού πεδίου E_z

$$j\omega\epsilon\mu E_z(z, \rho) = \frac{\mu}{4\pi} \int_{-h}^h \partial_{z'} [I(z') \partial_{z'} G(z - z', \rho) + G(z - z', \rho) \partial_{z'} I(z')] dz' \quad (55)$$

Το πρώτο μέλος του πυρήνα ολοκλήρωσης είναι μηδενικό καθώς σε κάθε περίπτωση το ρεύμα μηδενίζεται στα άκρα της κεραίας. Ο υπολογισμός του δεύτερου μέλους απαιτεί την μερική ολοκλήρωση στα διαστήματα $[0, h]$ και $[-h, 0]$ όπου οι παράγωγοι του ρεύματος I στη θέσεις $z = 0$ και h υπολογίζονται ως $I'(0\pm) = \mp kI_m \cos kh$ και $I'(h\pm) = \mp kI_m$:

$$E_z(z, \rho) = -\frac{j\eta I_m}{4\pi} [G(z - h, \rho) + G(z + h, \rho) - 2 \cos kh G(z, \rho)] \quad (56)$$

Η παραπάνω έκφραση του ηλεκτρικού πεδίου, αντικαθιστώντας την συνάρτηση Green λαμβάνει τη μορφή:

$$E_z(z, \rho) = -\frac{j\eta I_m}{4\pi} \left[\frac{e^{-jkrR_1}}{R_1} + \frac{e^{-jkrR_2}}{R_2} - 2 \cos kh \frac{e^{-jkrR_0}}{R_0} \right] \quad (57)$$

$$R_0 = \sqrt{\rho^2 + z^2}, \quad R_1 = \sqrt{\rho^2 + (z - h)^2}, \quad R_2 = \sqrt{\rho^2 + (z + h)^2}$$

Παρομοίως, αντικαθιστώντας τη σχέση (57) στον νόμο του Ampere $\partial_\rho(\rho H_\phi) = j\omega\epsilon\rho E_z$ και ολοκληρώνοντας, αποδεικνύεται ότι το μαγνητικό πεδίο H_ϕ υπολογίζεται από τη σχέση

$$H_\phi(z, \rho) = \frac{jI_m}{4\pi\rho} \left[e^{-jkrR_1} + e^{-jkrR_2} - 2 \cos kh e^{-jkrR_0} \right] \quad (58)$$

Τέλος, αντικαθιστώντας τη σχέση (58) στην έκφραση του νόμου του Faraday $j\omega E_\rho = -\partial_z H_\phi$, λαμβάνεται η τελική έκφραση του ακτινικού ηλεκτρικού πεδίου H_ρ :

$$E_\rho(z, \rho) = -\frac{j\eta I_m}{4\pi\rho} \left[\frac{z - h}{R_1} e^{-jkrR_1} + \frac{z + h}{R_2} e^{-jkrR_2} - 2 \cos kh \frac{z}{R_0} e^{-jkrR_0} \right] \quad (59)$$

4.1.4.2 Ολοκληρωματικές εξισώσεις Pocklington και Hallen

Η πραγματική κατανομή ρεύματος κατά μήκος ενός του δίπολου δεν είναι ακριβώς ημιτονοειδής. Προκειμένου να προσεγγισθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια, μπορεί καταρχήν να θεωρηθεί ότι στην επιφάνεια του αγωγού ισχύει η οριακή συνθήκη

$$E_z + E_z^{inc} = 0 \quad (60)$$

όπου E^{inc} είναι το προσπίπτων ηλεκτρικό πεδίο από πηγή διέγερσης τοποθετημένη στο διάκενο τροφοδοσίας του ακτινοβολητή. Εφαρμόζοντας αυτή τη συνθήκη στη σχέση (55), που συνδέει απευθείας το ρεύμα που διατρέχει ένα γραμμικό ακτινοβολητή με τη συνιστώσα του ακτινοβολούμενου ηλεκτρικού πεδίου \mathbf{E} στον άξονα z , λαμβάνεται η έκφραση

$$\int_{-L/2}^{L/2} I(z') \left[(\partial_{z'}^2 + k^2) \frac{e^{-jk_0 R}}{4\pi R} \right] dz' = -j\omega\epsilon E_z^{inc} (\rho = a), \quad R = \sqrt{\rho^2 - (z - z')^2} \quad (61)$$

Η προκύπτουσα σχέση αναφέρεται και ως *ολοκληρωματική εξίσωση του Pocklington* και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογιστικό προσδιορισμό της ακριβούς ρευματικής κατανομής κατά μήκος ενός γραμμικού ακτινοβολητή [94].

Ανάλογη ολοκληρωματική σχέση μπορεί να ληφθεί από την εφαρμογή της εξίσωσης του Helmholtz για το μαγνητικό δυναμικό A_z (50) σε σημείο ευρισκόμενο στην επιφάνεια του ακτινοβολητή ($\rho = a$), που ταυτόχρονα είναι απομακρυσμένο από την πηγή τροφοδοσίας:

$$\partial_z^2 A_z + k^2 A_z = 0 \quad (62)$$

Σε αυτή την εξίσωση το δυναμικό A_z αντιπροσωπεύει το συνολικό πεδίο συμπεριλαμβανόμενου και του πεδίου της πηγής τροφοδοσίας. Η λύση της προκύπτουσας ομογενούς διαφορικής εξίσωσης, λαμβανομένης υπόψη και της συμμετρίας του προβλήματος γύρω από το σημείο $z = 0$, είναι της μορφής:

$$A_z(z) = -j\sqrt{\mu\epsilon} \left[C \cos(kz) + D \sin(k|z|) \right] \quad (63)$$

Αντικαθιστώντας την παραπάνω λύση στην αρμονική έκφραση της συνθήκης του Lorenz λαμβάνεται η τελική μορφή του αρμονικά μεταβαλλόμενου δυναμικού A_z :

$$\partial_z A_z = \begin{cases} -j\sqrt{\mu\epsilon} \left[-C \cos(kz) + D \sin(k|z|) \right], & z > 0 \\ -j\sqrt{\mu\epsilon} \left[-C \cos(kz) - D \sin(k|z|) \right], & z < 0 \end{cases} \quad (64)$$

Θεωρούμε ότι μια αρμονική τάση V_i εφαρμόζεται στο σημείο $z = 0$ κατά μήκος ενός απειροστού διάκενου τροφοδοσίας. Εξαιτίας της υπάρξεως της πηγής τροφοδοσίας, το ηλεκτρικό δυναμικό φ θα πρέπει να μεταβάλλεται κατά V γύρω από το σημείο $z = 0$, οπότε με τη βοήθεια της σχέσης (64) ευρίσκεται ότι η σταθερά D ισούται με $V/2$.

Αντικαθιστώντας τη σχέση (49), που συνδέει το ανυσματικό δυναμικό \mathbf{A} με τα αναπτυσσόμενα ρεύματα κατά μήκος του δίπολου, στη λύση (63) της ομογενούς διαφορικής εξισώσεως, λαμβάνεται η τελική έκφραση των *ολοκληρωματικών εξισώσεων του Hallen*:

$$\int_{-L/2}^{L/2} I(z') \frac{e^{-jk_0 R}}{4\pi R} dz' = -\frac{j}{\eta} \left[C \cos(kz) + \frac{V}{2} \sin(k|z|) \right] \quad (65)$$

Χρησιμοποιώντας εναλλακτικά το μετασχηματισμένο δυναμικό $V(z, \rho)$ για την έκφραση των εξισώσεων των παραπάνω ολοκληρωτικών εξισώσεων, σύμφωνα με τις σχέσεις (51) και (52), λαμβάνεται οι ακόλουθες ισοδύναμες εκφράσεις

$$V(z, \rho) = C \cos(kz) + V \sin(k|z|) = \frac{j\eta}{2\pi} \int_{-L/2}^{L/2} G(z-z') I(z') dz' \quad (66)$$

όπου $G(z-z')$ συμβολίζει τη συνάρτηση Green και $I(z')$ την αναπτυσσόμενη ρευματική κατανομή στον ακτινοβολητή.

Οι ολοκληρωματικές εξισώσεις του Pocklington και Hallen αποτελούν τη βάση για την κατάστρωση της επιλύσεως στοιχειοκεραιών, αποτελούμενων από γραμμικούς ακτινοβολητές, με τη μέθοδο των ροπών [94].

4.1.4.3 Επίλυση με τη μέθοδο της επαγόμενης ηλεκτρεγερτικής δύναμης

Η μέθοδος της επαγόμενης ηλεκτρεγερτικής δύναμης (IEMF - Induced Electromotive Force) είναι μια κλασική μέθοδος για τον υπολογισμό του μητρώου αμοιβαίων επαγωγών Z_{ij} μιας στοιχειοκεραίας αποτελούμενης από γραμμικούς ακτινοβολητές, όπου επάγονται αρμονικές κατανομές ρεύματος [95]. Παρόλο που η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε στοιχειοκεραίες, τα στοιχεία των οποίων είναι γραμμικά και τοποθετημένα είτε συγγραμμικά είτε παράλληλα, το κύριο πλεονέκτημα της είναι ότι οδηγεί σε λύσεις κλειστής μορφής, οι οποίες μπορούν να παρέχουν επαρκή δεδομένα για τις ανάγκες ενός προβλήματος σχεδίασης.

Η αναλυτική μορφή της μεθόδου επιτρέπει τον προσδιορισμό των τιμών ίδιας και αμοιβαίας επαγωγής, ως συνάρτηση της διαμέτρου των γραμμικών ακτινοβολητών που απαρτίζουν την στοιχειοκεραία καθώς και των μεταξύ τους αποστάσεων, εφόσον όλοι οι ακτινοβολητές είναι γραμμικές κεραίες παράλληλα προσανατολισμένες προς τον άξονα z και οι κατανομές ρεύματος που αναπτύσσονται κατά μήκος τους θεωρηθεί ότι είναι ημιτονοειδής [84]. Αν ικανοποιούνται οι παραπάνω προϋποθέσεις, οι τιμές του μητρώου αμοιβαίων επαγωγών μπορούν να υπολογισθούν βάσει του πεδίου ακτινοβολίας τους $F(z)$

$$Z_{ij} = -\frac{1}{I_j I_i} \int_{-L/2}^{L/2} E_{ij}(z) I_i(z) dz = \frac{jn}{4\pi \sin^2(kL/2)} \int_{-L/2}^{L/2} F(z) dz \quad (67)$$

το οποίο ορίζεται από τη σχέση

$$F(z) = \left[\frac{e^{-jkR_1}}{R_1} + \frac{e^{-jkR_2}}{R_2} - 2 \cos\left(k \frac{L}{2}\right) \frac{e^{-jkR_0}}{R_0} \right] \sin\left(k\left(\frac{L}{2} - |z|\right)\right) \quad (68)$$

όπου οι αποστάσεις R_0 , R_1 και R_2 ορίζονται ανάλογα με το αν υπολογίζεται η ίδια ή η αμοιβαία επαγωγή τους, το μήκος L ισούται με το μήκος των γραμμικών ακτινοβολητών, k είναι ο κυματάρριθμος και η η ηλεκτρική αντίσταση του αέρα.

Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται οι άνωθεν σχέσεις για την εκτίμηση της ίδιας επαγωγής των ακτινοβολητών, η σχέση (67) υπολογίζεται με $I_j = I_i$ και η σχέση (68) με αποστάσεις R_0 , R_1 και R_2 οριζόμενες ως ακολούθως

$$R_1 = \sqrt{a^2 + \left(\frac{L}{2} - z\right)^2} \quad R_2 = \sqrt{a^2 + \left(\frac{L}{2} + z\right)^2} \quad R_0 = \sqrt{a^2 + z^2} \quad (69)$$

όπου a είναι η διάμετρος του κάθε γραμμικού ακτινοβολητή.

Κατά αντιστοιχία όταν υπολογίζεται η αμοιβαία επαγωγή μεταξύ δύο ακτινοβολητών, η σχέση (68) χρησιμοποιείται με τις ακόλουθες τιμές αποστάσεων R_0, R_1 και R_2

$$R_1 = \sqrt{d^2 + \left(\frac{L}{2} - z\right)^2} \quad R_2 = \sqrt{d^2 + \left(\frac{L}{2} + z\right)^2} \quad R_0 = \sqrt{d^2 + z^2} \quad (70)$$

όπου d είναι η απόσταση μεταξύ των ακτινοβολητών, θεωρώντας επιπρόσθετα ότι τα κέντρα τους βρίσκονται στο ίδιο xy .

Η εκθετική συνάρτηση ολοκλήρωσης για τον υπολογισμό των ιδίων και αμοιβαίων αντιστάσεων είναι δυνατόν να προσεγγιστεί από ζυγισμένα αθροίσματα των αντίστοιχων ολοκληρωμάτων ημιτόνου και συνημίτονου. Έτσι για δίπολα ίδιου μήκους και προσανατολισμού που είναι παράλληλα διαταγμένα, λαμβάνονται οι ακόλουθες προσεγγιστικές εκφράσεις για την ίδια και αμοιβαία επαγωγή τους [95]:

$$Z_{ij} = R_{ij} + jX_{ij} = \frac{\eta}{2\pi} \frac{A(u) + jB(u)}{\sin^2(kh)} \quad (71)$$

$$u = \begin{cases} \alpha, & i = j \\ d, & i \neq j \end{cases}$$

όπου

$$A = C_{in}(kl_+) + C_{in}(kl_-) - 2C_{in}(ku) + \frac{1}{2} \cos(kl) [2C_{in}(kl_+) - C_{in}(kL_+) + 2C_{in}(kl_-) - C_{in}(kL_-) - 2C_{in}(ku)] \quad (72)$$

$$+ \frac{1}{2} \sin(kl) [2S_i(kl_-) - S_i(kL_-) + S_i(kL_+) - 2S_i(kl_+)]$$

και

$$B = S_i(kl_+) + S_i(kl_-) - 2S_i(ku) + \frac{1}{2} \cos(kl) [2S_i(kl_+) - S_i(kL_+) + 2S_i(kl_-) - S_i(kL_-) - 2S_i(ku)] \quad (73)$$

$$+ \frac{1}{2} \sin(kl) \left[2C_{in}(kl_+) - C_{in}(kL_+) + C_{in}(kL_-) - 2C_{in}(kl_-) + 2 \ln \left(\frac{uL_+}{l_+^2} \right) \right]$$

και οι αποστάσεις l_+, l_-, L_+, L_- και h δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις

$$l_{\pm} = \sqrt{u^2 + h^2} \pm h \quad L_{\pm} = \sqrt{u^2 + 4h^2} \pm 2h \quad h = \frac{L}{2} \quad (74)$$

και d είναι η οριζόντια απόσταση μεταξύ των m και n δίπολων, a η διάμετρος των δίπολων, h ισούται με το μισό μήκος των δίπολων, $k=2\pi/\lambda$ είναι ο κυματάριθμος. Τα ολοκληρώματα που αναγράφονται στην παραπάνω σχέση είναι το ολοκλήρωμα του συνημίτονου C_{in} και του ημίτονου S_i .

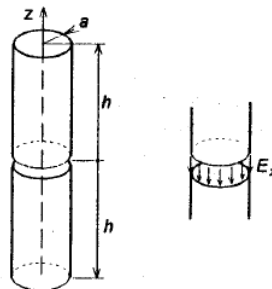
$$C_{in}(x) = \int_0^x \frac{1 - \cos t}{t} dt \quad S_i(x) = \int_0^x \frac{\sin t}{t} dt \quad (75)$$

Ο ακριβής υπολογισμός των παραπάνω απλούστερων ολοκληρωμάτων επιτυγχάνεται με τη βοήθεια δοκιμασμένων αριθμητικών προσεγγίσεων [96].

4.1.4.4 Επίλυση με την μέθοδο των ροπών

Εφόσον δεν είναι δυνατόν να προσδιορισθούν αναλυτικά ή με ικανοποιητική ακρίβεια οι αναπτυσσόμενες ρευματικές κατανομές στους ακτινοβολητές που απαρτίζουν την στοιχειοκεραία, είναι δυνατή εναλλακτικά η χρήση τεχνικών πλήρους κύματος, όπως η μέθοδος των ροπών [94].

Έστω λοιπόν ότι μια στοιχειοκεραία αποτελείται από K γραμμικούς κυλινδρικούς ακτινοβολητές ίδιας ακτίνας a , οι οποίοι είναι ηλεκτρομαγνητικά συζευγμένοι μεταξύ τους και παράλληλα προσανατολισμένοι προς τον άξονα z . Επιπρόσθετα θεωρείται ότι ο κάθε ακτινοβολητής p τροφοδοτείται από πηγή τάσεως V_p ευρισκόμενη σε διάκενο απειροστού μήκους δ που εκτείνεται γύρω από το σημείο $z=0$ (Εικόνα 27).



Εικόνα 27. Μοντέλο τροφοδοσίας γραμμικού ακτινοβολητή απειροστού διάκενου.

Επαναδιατυπώνοντας τη σχέση (52) περιγραφής των μετασχηματισμένων δυναμικών, προκειμένου να συμπεριλαμβάνει τα φαινόμενα επαγωγής μεταξύ γειτονικών ακτινοβολητών, λαμβάνεται η ακόλουθη σχέση

$$(\partial_z^2 + k^2)V_p(z) = 2kV_p\delta(z), \quad p = 1, 2, \dots, K \quad (76)$$

όπου V_p είναι η εφαρμοζόμενη στο διάκενο τάση οδήγησης και $V_p(z)$ είναι το άθροισμα των μετασχηματισμένων μαγνητικών δυναμικών που προέρχονται από τα αναπτυσσόμενα ρεύματα στο σύνολο των ακτινοβολητών.

$$V_p(z) = \sum_{q=0}^K V_{pq}(z) = \frac{j\eta}{2\pi} \int_{-h_q}^{h_q} G_{pq}(z-z')I_q(z')dz' \quad (77)$$

Στην άνωθεν σχέση, ως h_q αναφέρεται το ύψος του ακτινοβολητή q , οριζόμενο ως το μισό του μήκους του l_q . Το σύμβολο G_{pq} αναπαριστά κατάλληλες εκφράσεις των συναρτήσεων Green, υπολογιζόμενες βάσει των αποστάσεων d_{pq} στο οριζόντιο επίπεδο μεταξύ των ακτινοβολητών για την περίπτωση της αμοιβαίας επαγωγής ($p \neq q$)

$$G_{pq}(z-z') = \frac{e^{-jk_0 R}}{R}, \quad R = \sqrt{(z-z')^2 + d_{pq}^2} \quad (78)$$

είτε βάσει της ακτίνας α_p του ακτινοβολητή στην περίπτωση της ίδιας επαγωγής ($p=q$)

$$G_{pp}(z-z') = \frac{2}{\pi} \int_0^{2\pi} \frac{e^{-jk_0 R}}{R} d\theta, \quad R = \sqrt{(z-z')^2 + 4\alpha_p^2 \cos^2 \theta} \quad (79)$$

Η χρήση του δεύτερου πυρήνα ολοκλήρωσης, ο οποίος αναφέρεται συνήθως και ως *ακριβής πυρήνας*, ενδείκνυται για τον υπολογισμό των ιδίων δυναμικών των ακτινοβολητών, καθότι εξαλείφει τις ιδιομορφίες κατά την ολοκλήρωση που προβλέπεται από τη σχέση (77) και επειδή παρέχει ακριβέστερη περιγραφή της οριζόμενης απόστασης R από το κέντρο τους σε σημεία της επιφάνειάς τους.

Γενικεύοντας επί της αναλύσεως που αναπτύχθηκε σε προηγούμενη ενότητα περί της μορφής των λύσεων των ολοκληρωματικών εξισώσεων (66), είναι δυνατόν να διατυπωθεί το σύστημα ολοκληρωματικών εξισώσεων του *Hallen*:

$$\frac{j\eta}{2\pi} \sum_{q=0}^K \int_{-h_q}^{h_q} G_{pq}(z-z') I_q(z') dz' = C_p \cos(kz) + V_p \sin(k|z|) \quad (80)$$

Οι K διαφορετικές σταθερές C_p στις εξισώσεις δύναται να αποτιμηθούν επιβάλλοντας την ικανοποίηση της οριακής συνθήκης $I_p(h_p)=0$ στα άκρα των ακτινοβολητών.

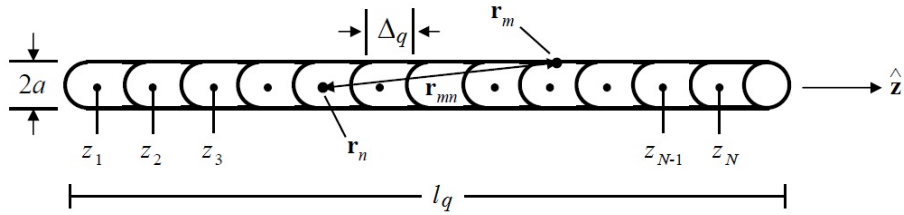
Προκειμένου να είναι δυνατή η επίλυση των ολοκληρωματικών εξισώσεων (80) για την εύρεση των άγνωστων ρευματικών κατανομών $I_p(z)$ στους ακτινοβολητές, είναι απαραίτητο να ορισθούν κατάλληλες συναρτήσεις βάσης επί των οποίων θα ανοιχθούν οι προκλητές ρευματικές κατανομές κατά μήκος των ακτινοβολητών. Σύμφωνα με τη μέθοδο των ροπών η ρευματική κατανομή στον ακτινοβολητή q αναλύεται ως ακολούθως

$$I_q(z') = \sum_{m=-M}^M I_q(z_m) B_q(z'-z_m), \quad q=1, \dots, K \quad (81)$$

όπου $B_q(z'-z_m)$ είναι κατάλληλα επιλεγμένες συναρτήσεις βάσης και $I_q(z_m)$ οι ρευματικοί συντελεστές σε καθένα από τα $N = 2M+1$ τμήματα στα οποία έχει διακριτοποιηθεί ο ακτινοβολητής. Συγκεκριμένα το z_m αναπαριστά ένα σύνολο σημείων $N = 2M+1$ κατά μήκος του ακτινοβολητή, τα οποία ισαπέχουν μεταξύ τους κατά Δ_q (Εικόνα 28), έτσι ώστε να ισχύει

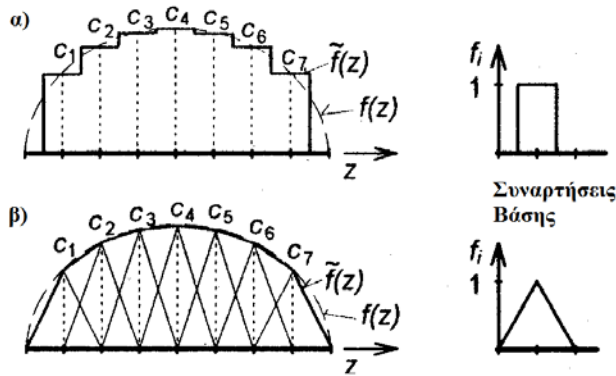
$$z_m = m\Delta_q \quad -M \leq m \leq M \quad \Delta_q = \frac{2h_q}{2M+1} = \frac{l_q}{N} \quad (82)$$

όπου m είναι ο δείκτης των συμμετρικών τμημάτων στο q δίπολο και h_q είναι το ύψος του.



Εικόνα 28. Διακριτοποίηση λεπτού κυλινδρικού αγωγού

Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες τμηματικές συναρτήσεις βάσης είναι οι παλμικές, οι τριγωνικές και οι ημιτονοειδής (Εικόνα 29).



Εικόνα 29. Τμηματικές συναρτήσεις βάσης α) παλμική και β) τριγωνική

Για να είναι δυνατή η χρήση των τριγωνικών τμηματικών συναρτήσεων βάσης, πρέπει να ορισθεί ένα διαφορετικό, συγκρινόμενο με τον υπολογισμό που προβλέπεται από τη σχέση (82), βήμα διακριτοποίησης ίσο με $\Delta_q = h_q/M$.

Χρησιμοποιώντας το περιγραφόμενο σχήμα διακριτοποίησης και αντικαθιστώντας την ανάλυση των ρευματικών κατανομών σε συναρτήσεις βάσεις (81), επαναδιατυπώνεται το σύστημα των ολοκληρωματικών εξισώσεων του Hallen ως εξής:

$$\frac{j\eta}{2\pi} \sum_{q=0}^K \sum_{m=-M}^M I_q(z_m) \int_{-h_q}^{h_q} G_{pq}(z_n - z') B_q(z' - z_m) dz' = C_p \cos(kz_n) + V_p \sin(k|z_n|) \quad (83)$$

Η αριθμητική λύση του προκύπτοντος συστήματος ολοκληρωματικών εξισώσεων μπορεί να βασιστεί στις διατυπώσεις που προτείνει ο Ορφανίδης [97]. Σύμφωνα με τα παραπάνω είναι δυνατός ο ορισμός ενός μητρώου εμπεδήσεων, όπου τα στοιχεία του θα υπολογίζονται σύμφωνα με τη σχέση

$$Z_{pq}(n, m) = \frac{j\eta}{2\pi} \int_{-h_q}^{h_q} G_{pq}(z_n - z') B_q(z' - z_m) dz' \quad (84)$$

όπου Z_{pq} είναι το μητρώο αμοιβαίων επαγωγών, το οποίο λαμβάνεται από τον προσεγγιστικό πυρήνα της συνάρτησης Green για $p \neq q$ και τον ακριβή πυρήνα για $p = q$, με τον τελευταίο να εξαρτάται επιπλέον από τη διάμετρο a των ακτινοβολητών,

Αναλόγως της χρησιμοποιούμενης τμηματικής συναρτήσεως βάσεως, η σχέση (84) εξειδικεύεται ως εξής

$$Z_{pq}(n, m) = \frac{j\eta}{2\pi} \int_{-\Delta_q}^{\Delta_q} G_{pq}(z_n - z_m - z) dz \quad (85)$$

για την παλμική συνάρτηση βάσης και ως

$$Z_{pq}(n, m) = \frac{j\eta}{2\pi} \int_{-\Delta_q}^{\Delta_q} \left(1 - \frac{|z|}{\Delta_q}\right) G_{pq}(z_n - z_m - z) dz \quad (86)$$

για την τριγωνική συνάρτηση βάσης.

Αντικαθιστώντας την έκφραση του μητρώου εμπεδήσεων Z_{pq} στο σύστημα των ολοκληρωματικών εξισώσεων και ορίζοντας $I_q(m) = I_q(z_m)$, λαμβάνεται η ακόλουθη έκφραση

$$\sum_{q=0}^K \sum_{m=-M}^M Z_{pq}(n, m) I_q(m) = C_p \cos kz_n + V_p \sin k|z_n| \Leftrightarrow \sum_{q=0}^K Z_{pq} \mathbf{I}_q = C_p \mathbf{c}_p + V_p \mathbf{s}_p \quad (87)$$

όπου ορίζονται διανύσματα $\mathbf{I}_q = [I_q(M), \dots, I_q(0), \dots, I_q(M)]^T$, $\mathbf{c}_p = [\cos kz_M, \dots, \cos kz_0, \dots, \cos kz_M]^T$ και $\mathbf{s}_p = [\sin kz_M, \dots, \sin kz_0, \dots, \sin kz_M]^T$, διαστάσεων $N \times 1$.

Λόγω της συμμετρικής δειγματοληψίας γύρω από το σημείο $z = 0$, ο τετραγωνικός πίνακας Z_{pq} δεν μεταβάλλεται με την αναστροφή, δηλαδή ισχύει η ιδιότητα $Z_{pq}(m, n) = Z_{pq}(-m, -n)$. Ένα σύστημα εξισώσεων που ικανοποιεί την παραπάνω ιδιότητα, μπορεί να αναδιπλωθεί εφαρμόζοντας κατάλληλο μετασχηματισμό

$$\begin{bmatrix} A^R & \mathbf{a}^R & B^R \\ \mathbf{a}^{TR} & a_0 & \mathbf{a}^T \\ B & \mathbf{a} & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_1^R \\ I_0 \\ \mathbf{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1^R \\ v_0 \\ \mathbf{v}_1 \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} a_0 & 2\mathbf{a}^T \\ \mathbf{a} & A + BJ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ \mathbf{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 \\ \mathbf{v}_1 \end{bmatrix} \quad (88)$$

όπου ο τελεστής αναστροφής $J = I^T$ είναι ο ανάστροφος του μοναδιαίου πίνακα, οπότε ο ανάστροφος πίνακας του A υπολογίζεται ως $A^R = JA$, ενώ το ανάστροφο διάνυσμα \mathbf{B} ως $\mathbf{B}^R = J\mathbf{B}$.

Εφαρμόζοντας των άνωθεν μετασχηματισμό στο σύστημα των εξισώσεων (87), τα διανύσματα ορισμού του συστήματος αναδιπλώνονται σε $\mathbf{I}_q = [I_q(0), \dots, I_q(M)]^T$, $\mathbf{c}_p = [\cos kz_0, \dots, \cos kz_M]^T$ και $\mathbf{s}_p = [\sin kz_0, \dots, \sin kz_M]^T$, με διάσταση της τάξεως $(M+1) \times 1$. Αποτέλεσμα του μετασχηματισμού είναι ότι ο κάθε υποπίνακας Z_{pq} διαστάσεως $N \times N$ να αναδιπλωθεί σε πίνακα μεγέθους $(M+1) \times (M+1)$ καθώς και να εκφρασθεί το σύστημα εξισώσεων (87) ως ακολούθως:

$$Z\mathbf{I} = C\mathbf{c} + V\mathbf{s} \quad (89)$$

Καθ' αυτόν τον τρόπο το συνολικό μετασχηματισμένο σύστημα, όταν η στοιχειοκεραία αποτελείται από $K=3$ ακτινοβολητές, γράφεται ισοδύναμα στην μπλοκ μορφή του ως:

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_1 \\ \mathbf{I}_2 \\ \mathbf{I}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 I & 0 & 0 \\ 0 & C_2 I & 0 \\ 0 & 0 & C_3 I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{c}_1 \\ \mathbf{c}_2 \\ \mathbf{c}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_1 I & 0 & 0 \\ 0 & V_2 I & 0 \\ 0 & 0 & V_3 I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{s}_1 \\ \mathbf{s}_2 \\ \mathbf{s}_3 \end{bmatrix}$$

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, για να είναι δυνατή η επίλυση του προκύπτοντος γραμμικού συστήματος (89), είναι απαραίτητο να υπολογισθούν οι τιμές του διανύσματος \mathbf{c} . Η οριακή συνθήκη που προβλέπει τον μηδενισμό των ρευμάτων στα άκρα των δίπολων μπορεί να διατυπωθεί ως $\mathbf{u}^T \mathbf{I}_p = 0$, όπου $\mathbf{u} = [0, 0, \dots, 1]^T$. Αποδεικνύεται ότι οι οριακές συνθήκες ικανοποιούνται εγγενώς, αν ορισθούν κατάλληλοι πίνακες προβολής P_p για καθένα από τους ακτινοβολητές:

$$P_p = I - \frac{\mathbf{c}_p \mathbf{u}_p^T}{\mathbf{c}_p^T \mathbf{u}_p}, \quad \text{όπου } \mathbf{u}_p = Z_{pp}^{-1} \mathbf{u} \quad (90)$$

Οι πίνακες προβολής εφαρμόζονται για τον μετασχηματισμό των αναδιπλωμένων υποπινάκων Z_{pq} και διανυσμάτων \mathbf{s}_p σύμφωνα με τις σχέσεις

$$\tilde{Z}_{pq} = \begin{cases} Z_{pp}, & q = p \\ P_p Z_{pq}, & q \neq p \end{cases} \quad (91)$$

$$\tilde{\mathbf{s}}_p = P_p \mathbf{s}_p$$

Εφόσον εφαρμοσθούν οι περιγραφόμενες προβολές, το σύστημα (89) λαμβάνει την ακόλουθη τελική μορφή

$$\sum_{q=0}^K \tilde{Z}_{pq} \mathbf{I}_q = V_p \tilde{\mathbf{s}}_p \Leftrightarrow \tilde{Z} \mathbf{I} = V \tilde{\mathbf{s}} \quad (92)$$

Επιλύοντας το σύστημα των ολοκληρωματικών εξισώσεων προσδιορίζονται οι ακριβείς ρευματικές κατανομές \mathbf{I}_q κατά μήκος καθενός εκ των ακτινοβολητών. Αφού υπολογισθούν για δεδομένες διεγέρσεις των ακτινοβολητών, είναι δυνατόν να προσεγγισθεί το πλάτος του διανύσματος ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας χρησιμοποιώντας τη σχέση

$$F_z(\theta, \phi) = \sum_{m=-M}^M \sum_{p=1}^K I_p(m) e^{jk_z m \Delta_i} e^{jk_x x_p + jk_y y_p} \Delta_i \left[\frac{\sin(k_z \Delta_p / 2)}{k_z \Delta_p / 2} \right]^b \quad (93)$$

όπου τα x_p και y_p συμβολίζουν τις συντεταγμένες των κέντρων των δίπολων στο οριζόντιο επίπεδο, Δ_p είναι το μήκος των τμημάτων στα οποία έχει χωρισθεί ο κάθε γραμμικός ακτινοβολητής, και $(k_x, k_y, k_z) = (k \sin \theta \cos \phi, k \sin \theta \sin \phi, k \cos \theta)$ είναι η έκφραση του κυματάριθμου k σε σφαιρικές συντεταγμένες. Η παράμετρος b λαμβάνει την τιμή 1 όταν για του υπολογισμού έχει χρησιμοποιηθεί σταθερή τμηματική συνάρτηση βάσης και την τιμή 2 για τριγωνική συνάρτηση βάσης.

Το κανονικοποιημένο ως προς μια σταθερή τιμή διάγραμμα κέρδους της στοιχειοκεραίας υπολογίζεται απευθείας από τη προηγούμενη σχέση ως ακολούθως:

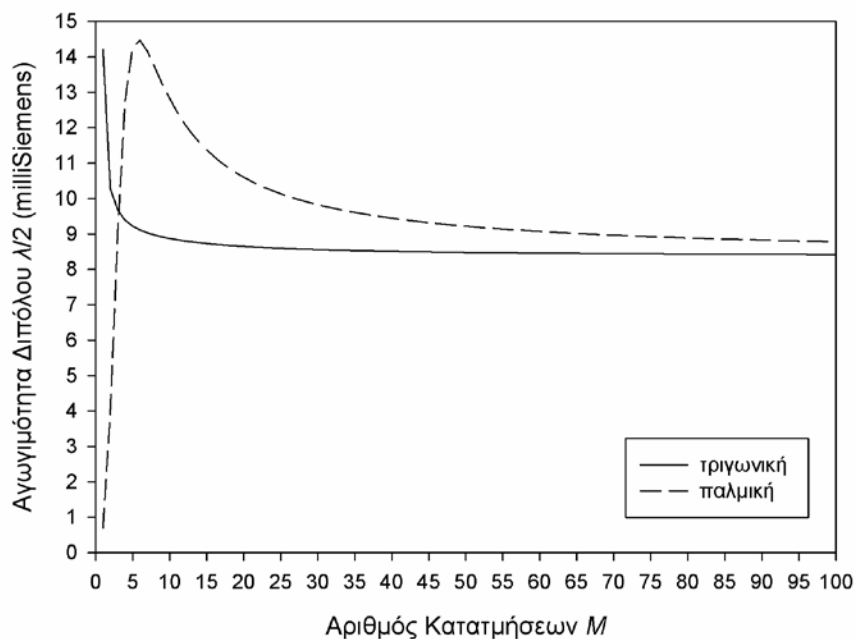
$$g(\theta, \phi) = |\sin \theta F_z(\theta, \phi)|^2 \quad (94)$$

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η σχέση (39) συσχετίζει τα ρεύματα $I_j(0)$ στις θύρες εισόδου των ακτινοβολητών της στοιχειοκεραίας με τις αντίστοιχες τάσεις οδήγησης V_i . Το μητρώο αμοιβαίων επαγωγών Z_{tt} αποτελείται από ίδιες $Z_{ij|i=j}$ και αμοιβαίες $Z_{ij|i \neq j}$ αντιστάσεις, οι οποίες δύναται να υπολογισθούν από κατάλληλες διαμερίσεις του συστήματος των ολοκληρωτικών εξισώσεων για το στοιχείο i και τα στοιχεία i και j αντιστοίχως, και επιλύοντας τα προκύπτοντα συστήματα θεωρώντας μοναδιαία διέγερση στην θύρα εισόδου i . Η περιγραφόμενη σχηματοποίηση της επίλυσης επιτρέπει την επαναχρησιμοποίηση των ήδη υπολογισμένων στοιχείων των αντίστοιχων υποπινάκων.

4.1.4.5 Σύγκλιση της μεθόδου των ροπών

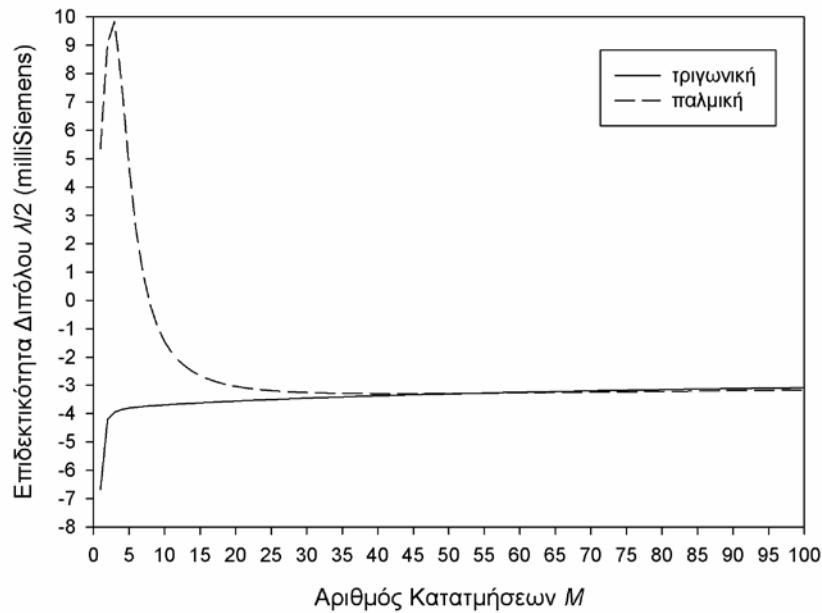
Η συμπεριφορά σύγκλισης της μεθόδου των ροπών εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τις χρησιμοποιούμενες συναρτήσεις βάσης, τον αριθμό των οριζόμενων διαμερίσεων και τέλος από τον αν για τους σχετικούς υπολογισμούς χρησιμοποιείται ένας ακριβής ή προσεγγιστικός υπολογιστικός πυρήνας. Όταν ειδικά η μέθοδος των ροπών χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των ρευματικών κατανομών σε γραμμικούς ακτινοβολητές και δίπολα, τα προκύπτοντα αποτελέσματα εξαρτώνται από το μήκος τους και την ακτίνα τους.

Θεωρητικά, αναμένεται ότι όσο πιο πολύπλοκες και «περιγραφικές» είναι οι χρησιμοποιούμενες συναρτήσεις βάσης για την προσέγγιση των αναπτυσσόμενων ρευματικών κατανομών επί της επιφάνειας των ακτινοβολητών, τόσο μικρότερος είναι και ο αναγκαίος αριθμός διαμερίσεων που χρειάζεται να ορισθεί. Προκειμένου να επιβεβαιωθεί πειραματικά η παραπάνω υπόθεση, παρουσιάζεται η σύγκλιση της μεθόδου των ροπών κατά τον υπολογισμό της αγωγιμότητας και της επιδεκτικότητας ενός δίπολου $\lambda/2$ με ακτίνα $a = 0.005\lambda$, χρησιμοποιώντας αντίστοιχα παλμικές και τριγωνικές συναρτήσεις βάσης.



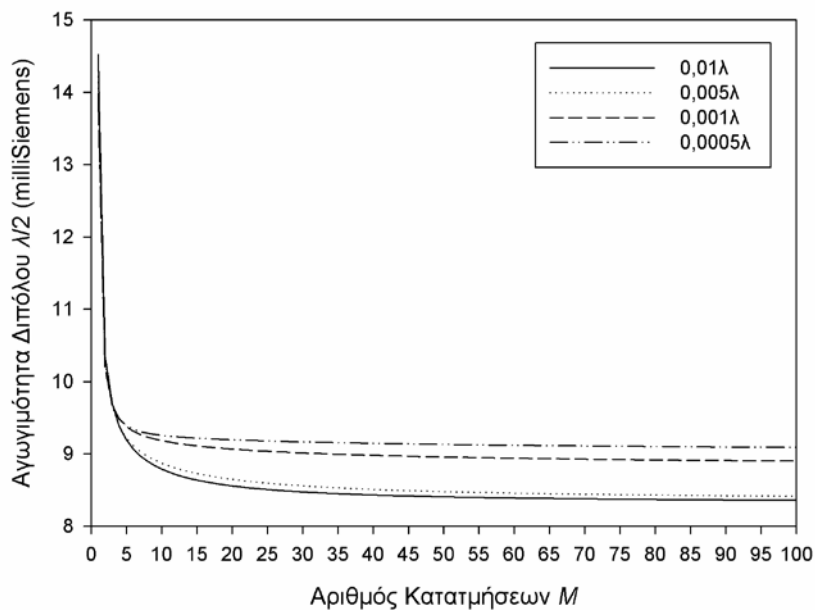
Εικόνα 30. Σύγκλιση της τιμής της αγωγιμότητας δίπολου για παλμικές και τριγωνικές συναρτήσεις βάσης.

Παρατηρείται ότι όταν χρησιμοποιούνται τριγωνικές συναρτήσεις βάσης, η υπολογιζόμενη αγωγιμότητα και επιδεκτικότητα του διπόλου συγκλίνουν σαφώς ταχύτερα σε σταθερές τιμές από όταν χρησιμοποιούνται παλμικές συναρτήσεις βάσης (Εικόνες 30 και 31).



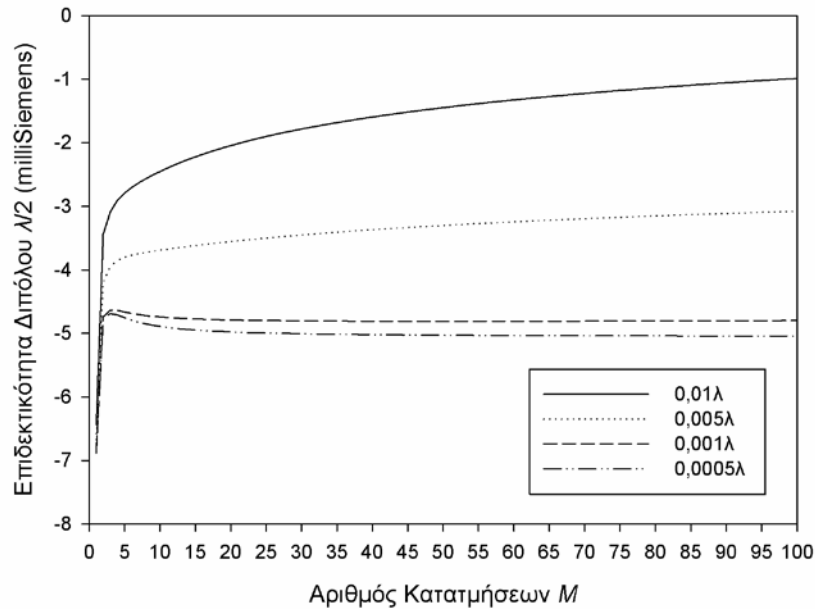
Εικόνα 31. Σύγκλιση της τιμής της επιδεκτικότητας δίπολου για παλμικές και τριγωνικές συναρτήσεις βάσης.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η συμπεριφορά σύγκλισης της μεθόδου ως προς την αγωγιμότητα και την επιδεκτικότητα ενός διπόλου $\lambda/2$, για διαφορετικές ακτίνες διπόλων $a = 0.0005\lambda, 0.001\lambda, 0.005\lambda, 0.05\lambda$ και 0.01λ .



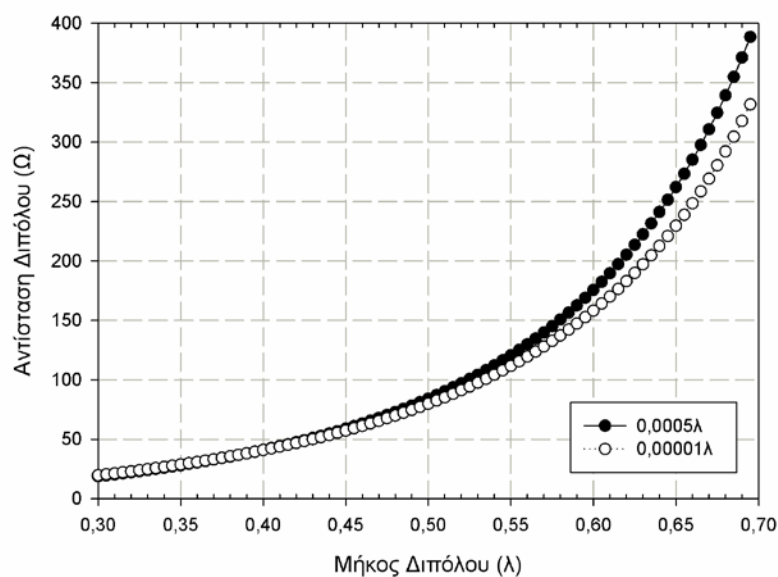
Εικόνα 32. Σύγκλιση της τιμής της αγωγιμότητας δίπολου για διαφορετικές ακτίνες.

Παρατηρείται ότι οι υπολογιζόμενες τιμές για οριζόμενες μικρές ακτίνες διπόλων ($<10^{-3}\lambda$) συγκλινουν πολύ ταχύτερα από ότι για μεγαλύτερες (Εικόνες 32 και 33). Ειδικότερα, μεγαλύτερες αποκλίσεις στη ταχύτητα σύγκλισης παρουσιάζονται κατά τον υπολογισμό της επιδεικτικότητας των διπόλων, όπως ήταν άλλωστε αναμενόμενο.



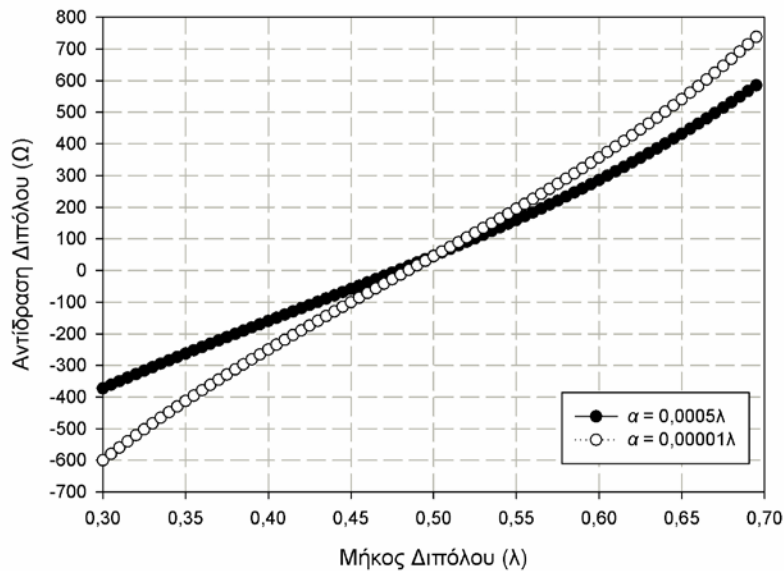
Εικόνα 33. Σύγκλιση της τιμής της επιδεικτικότητας δίπολου για διαφορετικές ακτίνες.

Από την παραπάνω ανάλυση, αποδεικνύεται ότι όταν τα δίπολα ικανοποιούν επαρκώς την προσέγγιση του «λεπτού σύρματος», τότε παρουσιάζουν και παρόμοια συμπεριφορά σύγκλισης. Για να δειχθεί η πολύ ισχυρότερη εξάρτηση των αποτελεσμάτων ως προς το μήκος των δίπολων, πραγματοποιήθηκαν πειράματα με κυμαινόμενα μήκη στο διάστημα $0.3\lambda \leq l \leq 0.7\lambda$, ενώ παράλληλα ορίστηκε ικανός αριθμός διαμερίσεων ($M = 100$).



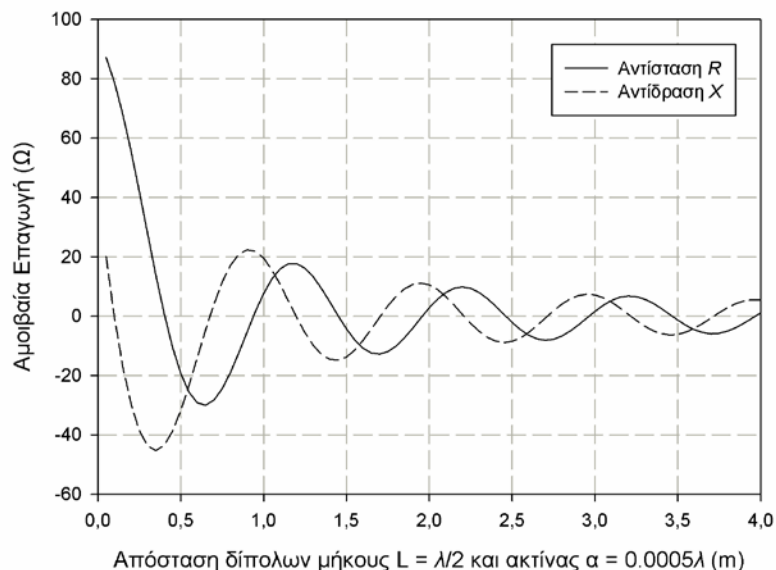
Εικόνα 34. Η αντίσταση εισόδου δίπολων για διαφορετικά μήκη τους.

Τα παρουσιαζόμενα αποτελέσματα (Εικόνες 34 και 35), λήφθηκαν για ακτίνες δίπολων $a = 0.0005\lambda$ και 0.001λ , χρησιμοποιώντας ακριβείς υπολογιστικούς πυρήνες και τριγωνικές συναρτήσεις βάσεως. Τα υπολογιζόμενα μήκη συντονισμού, όπου η αντίδραση των διπόλων μηδενίζεται, κυμαίνονται στο διάστημα $0.48\lambda-0.49\lambda$, αναλόγως της ακτίνας τους.



Εικόνα 35. Η αντίδραση εισόδου δίπολων για διαφορετικά μήκη τους.

Τέλος, παρουσιάζεται η εκτίμηση της αμοιβαίας επαγωγής μεταξύ παράλληλων δίπολων $\lambda/2$, ως συνάρτηση της μεταξύ τους απόστασης (για διαμέριση $M = 100$ και τριγωνικές συναρτήσεις βάσεως).

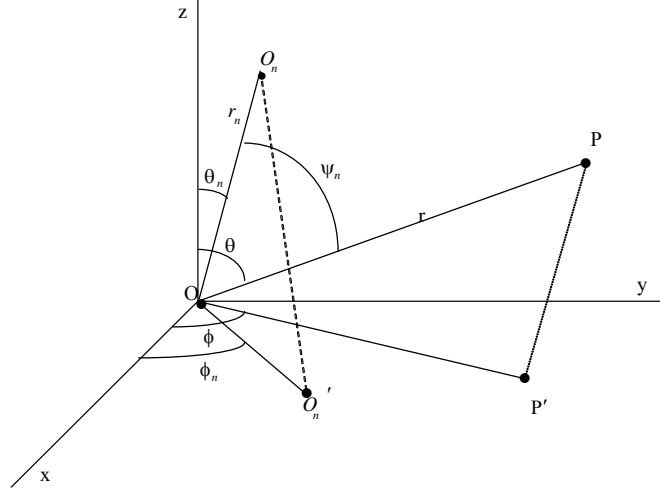


Εικόνα 36. Αμοιβαία αντίσταση δίπολων για διαφορετικές μεταξύ τους αποστάσεις.

Επιπροσθέτως, πρέπει να σημειωθεί ότι οι λαμβανόμενες τιμές σύνθετης αμοιβαίας αντίστασης και αντίδρασης μεταβάλλεται σημαντικά για διαφορετικές τιμές μηκών τους.

4.1.5 Γεωμετρία στοιχειοκεραίων και παράγοντας διάταξης

Στη γενικότερη περίπτωση, μπορούμε να θεωρήσουμε μια τρισδιάστατη στοιχειοκεραία αποτελούμενη από N όμοιες κεραίες τοποθετημένες σε θέσεις $r_0, r_1 \dots r_N$ και με συντελεστές ρεύματος $c_0, c_1 \dots c_N$ όπου $c_N = I_N/I_0$ και I_0 είναι η διέγερση του πρώτου στοιχείου.



Εικόνα 37. Γεωμετρία επίπεδης στοιχειοκεραίας

Σύμφωνα με το Εικόνα 37, όπου O_n είναι η θέση ενός εκ των ακτινοβολητών και P είναι το σημείο παρατήρησης, ο παράγοντας διαμόρφωσης μιας στοιχειοκεραίας N ακτινοβολητών που υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (37), εξειδικεύεται ως ακολούθως, εκφραζόμενη σε σφαιρικές συντεταγμένες

$$AF(\theta, \phi) = \sum_{n=0}^{N-1} c_n e^{jkr_n \cos \psi_n} \quad (95)$$

όπου ψ_n είναι η γωνία μεταξύ του στοιχείου ακτινοβολητή και του σημείου παρατήρησης.

Αντίστοιχα η σχέση (38), που περιγράφει τον κανόνα πολλαπλασιασμού των διαγραμμάτων, μπορεί να θεωρηθεί ως μια εξίσωση περιγραφής ενός γραμμικού συστήματος, όπου ο παράγοντας διαμόρφωσης $AF(\vartheta, \varphi)$ περιγράφει μια συνάρτηση μεταφοράς. Οι προκύπτουσες συναρτήσεις έντασης ακτινοβολίας $U_{tot}(\vartheta, \varphi)$ και κέρδους της στοιχειοκεραίας $G_{tot}(\vartheta, \varphi)$ μπορούν να εκφραστούν παρομοίως ως

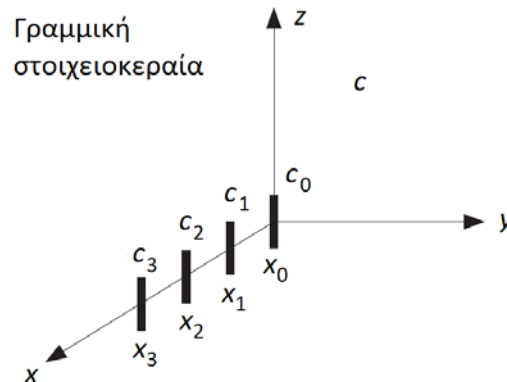
$$\begin{aligned} U_{tot}(\theta, \phi) &= |AF(\theta, \phi)|^2 U(\theta, \phi) \\ G_{tot}(\theta, \phi) &= |AF(\theta, \phi)|^2 G(\theta, \phi) \end{aligned} \quad (96)$$

όπου $U(\vartheta, \varphi)$ και $G(\vartheta, \varphi)$ αναπαριστούν την ένταση ακτινοβολίας και το κέρδος καθενός εκ των ομοίων ακτινοβολητών που συνθέτουν τη στοιχειοκεραία.

4.1.5.1 Γραμμική στοιχειοκεραία

Ακολούθως θεωρούμε τη περίπτωση μιας γραμμικής στοιχειοκεραίας, όπου τα στοιχεία της είναι τοποθετημένα κατά μήκος του άξονα x σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους (Εικόνα 38). Σε

αυτή τη περίπτωση μπορεί να ορισθούν οι θέσεις των N ακτινοβολητών ως ένα διάνυσμα $\mathbf{x}=[0, d, 2d, \dots, (N-1)d]^T$, όπου d είναι η σταθερή απόσταση μεταξύ των ακτινοβολητών..



Εικόνα 38. Γραμμική στοιχειοκεραία προσανατολισμένη στον x άξονα.

Ο παράγοντας διάταξης όπως περιγράφηκε στη γενικότερη περίπτωση μέσω της σχέσης (95), εξειδικεύεται ως ακολούθως για τις γραμμικές στοιχειοκεραίες

$$AF(\theta, \phi) = \sum_{n=0}^{N-1} c_n e^{jk_x x_n} = \sum_{n=0}^{N-1} c_n e^{j k x_n \sin \theta \cos \phi} \quad (97)$$

βάσει του ορισμού των σφαιρικών συντεταγμένων $k_x = k \sin \theta \cos \phi$. Εφόσον η απόσταση μεταξύ των ακτινοβολητών d είναι σταθερή, τότε η παραπάνω σχέση απλοποιείται σε

$$AF(\theta, \phi) = \sum_{n=0}^{N-1} c_n e^{j n k d \sin \theta \cos \phi} \quad (98)$$

Αν ορισθεί ο ψηφιακός κυματάριθμος ψ ως το όρισμα στο συντελεστή αθροίσματος του παράγοντα διαμόρφωσης, τότε ισοδύναμα γράφεται ως

$$AF(\psi) = \sum_{n=0}^{N-1} c_n e^{j \psi n} \quad (99)$$

Όταν η στοιχειοκεραία εκτείνεται κατά μήκος των αξόνων y ή z , ο ψηφιακός κυματάριθμος ψ ορίζεται αντίστοιχα βάσει των σφαιρικών συντεταγμένων

$$\begin{aligned} \psi &= k_x d = k d \sin \theta \cos \phi && (\text{άξονας } x) \\ \psi &= k_y d = k d \sin \theta \sin \phi && (\text{άξονας } y) \\ \psi &= k_z d = k d \cos \theta && (\text{άξονας } z) \end{aligned} \quad (100)$$

Σχετικά με την απεικόνιση των πραγματικών γωνιών θ και ϕ στο χώρο των ψηφιακών κυματάριθμων ψ , πρέπει να σημειωθεί ότι το διάστημα μεταβολής του είναι $-kd \leq \psi \leq kd$ (ορατή περιοχή), ενώ ο παράγοντας διαμόρφωσης $AF(\psi)$ είναι περιοδικός, στο διάστημα

$-\pi \leq \psi \leq \pi$. Όταν για την απόσταση d μεταξύ των στοιχείων της ομοιόμορφης γραμμικής στοιχειοκεραίας είναι τέτοια ώστε $kd > \pi$ οι τιμές που λαμβάνει ο παράγοντας διαμόρφωσης

επαναλαμβάνονται στην ορατή περιοχή. Αυτό έχει ως συνέπεια το σχηματισμό *κροσσωτών λοβών* (grating lobes), οι οποίοι είναι κύριοι λοβοί ακτινοβολίας στραμμένοι σε διαφορετικές διευθύνσεις από την επιθυμητή. Σε αυτή την περίπτωση ο αριθμός των εμφανιζόμενων κροσσωτών λοβών είναι ίσος με τον αριθμό των οριζόμενων *διαστημάτων δειγματοληψίας κατά Nyquist* που «χωράνε» στην ορατή περιοχή, δηλαδή ίσος με $kd/\pi = 2d/\lambda$. Μια πιο αυστηρή συνθήκη που εξασφαλίζει ότι δεν επαναλαμβάνεται καθόλου το διάστημα δειγματοληψίας Nyquist στην ορατή περιοχή είναι η απόσταση d μεταξύ των ομοιόμορφα κατανεμημένων ακτινοβολητών να είναι μικρότερη ή ίση του $\lambda/2$.

Τέλος, έστω ότι ο παράγοντας διάταξης υλοποιεί το *μετασχηματισμό Fourier* στο *διακριτοποιημένο χώρο* (discrete-space Fourier transform – DSFT) των αναπτυσσόμενων ρευματικών κατατομών στους ακτινοβολητές που απαρτίζουν τη στοιχειοκεραία, κατά αντιστοιχία με τον *μετασχηματισμό Fourier* στο *διακριτοποιημένο χρόνο* (discrete-time Fourier transform – DTFT). Σε αυτή τη περίπτωση, δύναται να ορισθεί ο γνωστός από τη θεωρία επεξεργασίας ψηφιακών σημάτων *μετασχηματισμός z* καθώς και ο αντίστροφός του (IDSFT), χρησιμοποιώντας την ενδιάμεση μεταβλητή $z = e^{j\psi}$:

$$AF(z) = \sum_{n=0}^{N-1} c_n z^n \quad (101)$$

$$c_n = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} AF(z) e^{-j\psi n} d\psi$$

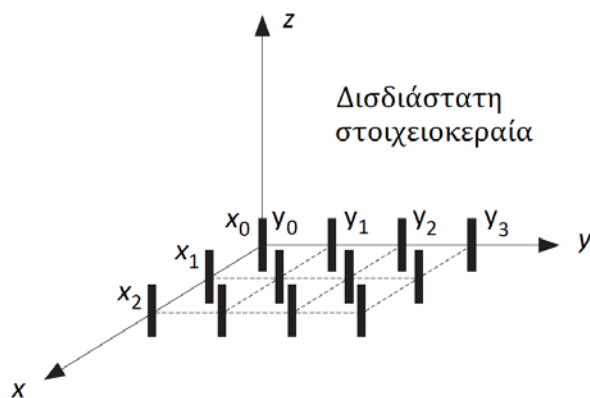
Σε αυτή τη θεώρηση βασίζεται και η πλειοψηφία των *κλασικών μεθόδων σύνθεσης στοιχειοκεραίων*, καθότι αν είναι γνωστά τα επιθυμητά χαρακτηριστικά του παράγοντα διαμόρφωσης, είναι δυνατόν να υπολογισθούν οι εφαρμοζόμενες διεγέρσεις c_n , χρησιμοποιώντας τον αντίστροφο μετασχηματισμό IDSFT.

4.1.5.2 Επίπεδη στοιχειοκεραία

Ακολουθως θεωρούμε τη περίπτωση μιας *επίπεδης στοιχειοκεραίας*, όπου τα στοιχεία της είναι τοποθετημένα σε τυχαίες θέσεις στο επίπεδο xy . Ο παράγοντας διάταξης $AF(\vartheta, \varphi)$ που περιγράφεται στη γενικότερη περίπτωση από τη σχέση (99), λαμβάνει την ακόλουθη απλούστερη έκφραση:

$$AF(\theta, \phi) = \sum_{n=0}^{N-1} c_n e^{jk r_n \sin \theta \cos(\phi - \phi_n)} \quad (102)$$

Έστω ότι οι ακτινοβολητές της επίπεδης στοιχειοκεραίας είναι τοποθετημένοι σε θέσεις ομοιόμορφου κανονικοποιημένου τετραγωνικού πλέγματος, οπότε θα ισχύει για τα διανύσματα θέσης των ακτινοβολητών $\mathbf{x}=[0, d, 2d, \dots, Nd]^T$ και $\mathbf{y}=[0, d, 2d, \dots, Md]^T$, όπου d είναι η διάσταση των τετραγωνικών κυψέλων του απαρτίζουν το πλέγμα, N ο αριθμός των ακτινοβολητών στον άξονα x και M στον άξονα y (Εικόνα 39).



Εικόνα 39. Επίπεδη στοιχειοκεραία με τους ακτινοβολητές τοποθετημένους σε θέσεις κανονικού τετραγωνικού πλέγματος.

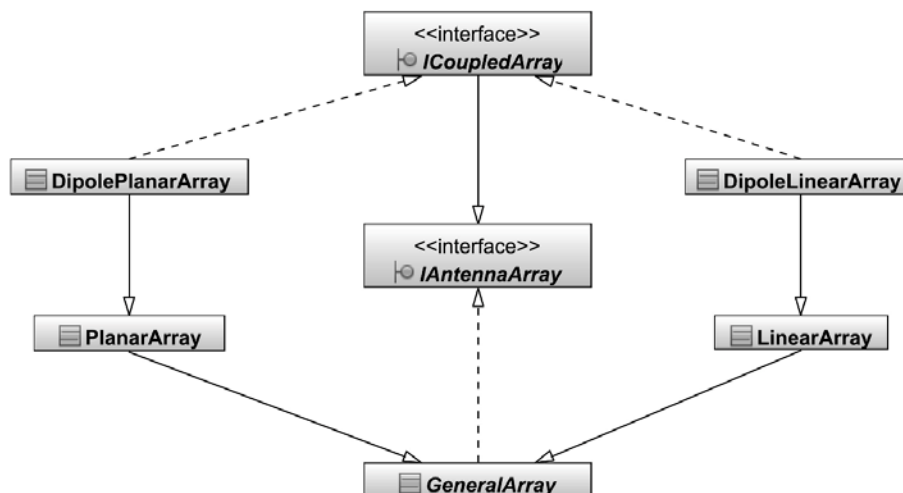
Αν επιπλέον η σταθερή απόσταση μεταξύ των ακτινοβολητών είναι $d = \lambda/2$, ο παράγοντας διάταξης $AF(\theta, \phi)$ μπορεί να γραφεί ως:

$$AF(\theta, \phi) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} c_{nm} e^{j \left[\frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta ((n-1) \cos \phi + (m-1) \sin \phi) \right]} \quad (103)$$

Μια συχνά χρησιμοποιούμενη γεωμετρία επίπεδης στοιχειοκεραίας βασίζεται στον ορισμό ενός κανονικοποιημένου εξαγωνικού πλέγματος, καθώς αυτή η διαμόρφωση έχει αποδειχθεί ότι χρειάζεται μόλις το 86,6% των στοιχείων συγκρινόμενη με τη περίπτωση του τετραγωνικού πλέγματος, για να επιτύχει το ίδιο γωνιακό εύρος στροφής του διαγράμματος ακτινοβολίας, χωρίς να εμφανίζονται κροσσωτοί λοβοί [98].

4.1.6 Υπολογιστική βιβλιοθήκη ανάλυσης στοιχειοκεραίων

Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, υλοποιήθηκε μια αντικειμενοστραφής υπολογιστική βιβλιοθήκη στη γλώσσα προγραμματισμού Java™ για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών ακτινοβολίας διαφόρων δομών στοιχειοκεραίων [84]. Η δόμηση των κυριότερων αντικειμένων και διεπαφών της βιβλιοθήκης απεικονίζεται στην Εικόνα 40.



Εικόνα 40. Σχηματική αναπαράσταση της οργάνωσης των κλάσεων και των διεπαφών που χρησιμοποιήθηκαν για τον ορισμό της δομής των προσομοιωμένων στοιχειοκεραίων.

Η ανάπτυξη της βιβλιοθήκης βασίστηκε στους μηχανισμούς της κληρονομικότητας (inheritance) και του πολυμορφισμού (polymorphism) των αντικειμενοστραφών γλωσσών προγραμματισμού (object oriented programming – OOP), προκειμένου να είναι δυνατός ο βέλτιστος διαμερισμός του αρχικού υπολογιστικού προβλήματος [99]:

- 1) *Ακτινοβολητές*: Ο υπολογιστικός κώδικας για τον προσδιορισμό της εντάσεως ακτινοβολίας διπόλων, μήκους L συγκρίσιμο με το μήκος κύματος λ της συχνότητας λειτουργίας της στοιχειοκεραίας, υλοποιήθηκε για να υποστηρίξει την ανάλυση και τη σύνθεση των στοιχειοκεραίων υπό μελέτη. Όλα τα υποστηριζόμενα από τη βιβλιοθήκη είδη ακτινοβολητών, έχουν ορισθεί ως αντικείμενα που υλοποιούν την λειτουργικότητα που προδιαγράφεται από τη διεπαφή IRadiator. Επιπρόσθετα για τον ορισμό ακτινοβολητών όπου υπάρχουν αναλυτικές προσεγγιστικές εκφράσεις για τον προσδιορισμό των μεταξύ τους φαινομένων επαγωγής, χρησιμοποιείται η διεπαφή ICoupledRadiator.
- 2) *Στοιχειοκεραία*: Η βιβλιοθήκη υλοποιεί τους υπολογισμούς του παράγοντα διαμόρφωσης των στοιχειοκεραίων, οι οποίοι βασίζονται στη γενικότερη θεώρηση ότι η μελετώμενη γεωμετρική διάταξη είναι τρισδιάστατη και ότι αποτελείται από όμοιους ακτινοβολητές. Οι υπολογισμοί της συνολικής εντάσεως ακτινοβολίας συσχετίζουν το παράγοντα διάταξης με την ακτινοβολία των επιμέρους στοιχείων. Η αντίστοιχη λειτουργικότητα ενσωματώνεται σε κλάσεις που αναπαριστούν τη δόμηση των στοιχειοκεραίων και που υλοποιούν τις προβλεπόμενες από τη διεπαφή IAntennaArray μεθόδους.
- 3) *Γεωμετρία*: Στη βιβλιοθήκη, οι διαφορετικές γεωμετρικές στοιχειοκεραίων αναπαρίστανται ως διαφορετικές κλάσεις, η υλοποίηση των οποίων είναι σύμφωνη με τα προβλεπόμενα από τη διεπαφή IGeometry. Η περιγραφή των προβλημάτων σύνθεσης και βελτιστοποίησης στοιχειοκεραίων που μελετώνται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας ορίζονται βάσει των περιγραφών της γραμμικής και της επίπεδης γεωμετρίας.
- 4) *Φαινόμενα επαγωγής*: Η βιβλιοθήκη υλοποιεί τον υπολογισμό μητρώων αμοιβαίας επαγωγής, για τον προσδιορισμό των φαινομένων ίδιας και αμοιβαίας επαγωγής μεταξύ των ακτινοβολητών που απαρτίζουν τη στοιχειοκεραία. Η πραγματοποίηση των σχετικών υπολογισμών είναι δυνατή για εκείνα τα είδη ακτινοβολητών όπου υπάρχουν αναλυτικές προσεγγιστικές εκφράσεις περιγραφής των επαγόμενων ρευμάτων στην επιφάνειά τους, όταν εφαρμόζονται τάσεις διέγερσης στις θύρες εισόδου τους. Η συγκεκριμένη υλοποίηση για στοιχειοκεραίες αποτελούμενες από δίπολα ενσωματώνεται στη λειτουργικότητα της κλάσης DipolePlanarArray, η οποία ορίζεται βάσει των συμβάσεων που υπαγορεύονται από τη διεπαφή ICoupledArray.

Η διάθρωση της υπολογιστικής βιβλιοθήκης είναι ευέλικτη, αφού βασίζεται στον ορισμό γενικευμένων διεπαφών για τον ορισμό της γεωμετρίας και του είδους των ακτινοβολητών. Ως εκ τούτου, η επέκταση της προσφερόμενης λειτουργικότητας από τη βιβλιοθήκη είναι δυνατή π.χ. διαμέσου του εμπλουτισμού της με επιπρόσθετες κατηγορίες ακτινοβολητών, χωρίς να είναι απαραίτητο να αλλάξουν οι υπόλοιπες κλάσεις που την απαρτίζουν.

4.2 Σύνθεση Στοιχειοκεραιών

Η σύνθεση στοιχειοκεραιών αποτελεί ουσιαστικά ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης. Η διαδικασία της σύνθεσης αποσκοπεί στην εύρεση κατάλληλης διαμόρφωσης της στοιχειοκεραίας, έτσι ώστε να συντίθεται διάγραμμα ακτινοβολίας που δεν αποκλίνει σημαντικά από τα επιθυμητά χαρακτηριστικά, όπως αυτά περιγράφονται διαμέσου μιας κατάλληλα ορισμένης *αντικειμενικής συνάρτησης*. Η σύνθεση διαγραμμάτων μακρινής ακτινοβολίας μπορεί να επιτευχθεί με δύο βασικούς τρόπους:

1. Μεταβάλλοντας τις επιβαλλόμενες διεγέρσεις στις κεραίες της στοιχειοκεραίας, ακολουθώντας έτσι τη μέθοδο σταθερής γεωμετρικής δομής.
2. Ακολουθώντας μια μέθοδο μεταβλητής δομής ή σταθερών διεγέρσεων κατά την οποία το επιθυμητό διάγραμμα ακτινοβολίας λαμβάνεται μεταβάλλοντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της στοιχειοκεραίας [100].

Είναι επίσης δυνατόν να κατηγοριοποιηθούν οι μέθοδοι βάσει των επιδιωκόμενων προδιαγραφών του μακρινού πεδίου. Εάν η φάση και το πλάτος του διαγράμματος ακτινοβολίας είναι καθορισμένες, τότε το πρόβλημα χαρακτηρίζεται ως *σύνθεσης πεδίου* (field synthesis), ενώ όταν είναι καθορισμένο μόνο το πλάτος ως *σύνθεσης ισχύος* (power synthesis). Η πληροφορία φάσης του μακρινού διαγράμματος ακτινοβολίας δεν επηρεάζει τη ποιότητα του συστήματος, αλλά επειδή μπορεί να είναι επιθυμητή η γνώση της μορφής του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, πρέπει να ληφθεί υπόψη προκειμένου να είναι δυνατός ο υπολογισμός του. Αυτό βέβαια αποτελεί έναν επιπλέον περιορισμό, ο οποίος μπορεί να δυσκολέψει την εύρεση μιας ικανοποιητικής λύσης, οπότε σε αυτές τις περιπτώσεις μπορεί να θεωρηθεί η φάση του μακρινού πεδίου ως σταθερά μεταβαλλόμενη (φασική διαφορά περίπου ίση με π ακτίνια μεταξύ των λοβών).

Η σύνθεση ισχύος είναι πιο πολύπλοκη από τη σύνθεση πεδίου αλλά συνάμα και *πιο σημαντική όσον αφορά την επίλυση πρακτικών προβλημάτων*. Στην πραγματικότητα, για τις τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές και τα ραντάρ μόνο το πλάτος του διαγράμματος είναι σημαντικό, επομένως η επιλογή της φάσης μπορεί να γίνει από τον σχεδιαστή. Όμως τα προβλήματα σύνθεσης πεδίων απαντώνται πιο συχνά στη σχετική βιβλιογραφία εξαιτίας της μεγαλύτερης απλότητάς τους, καθώς στην περίπτωση σύνθεσης μιας στοιχειοκεραίας σταθερής δομής προκύπτει ένα γραμμικό πρόβλημα το οποίο μπορεί να διατυπωθεί γενικά ως ένα *τετραγωνικό (quadratic) πρόβλημα βελτιστοποίησης* ορισμένο στο Hilbert χώρο συναρτήσεων [101]. Αντίθετα τα προβλήματα σύνθεσης ισχύος μπορούν να επιλυθούν μόνο σε συγκεκριμένες ή εξιδανικευμένες περιπτώσεις. Συνήθως διατυπώνονται ως *μη γραμμικά προβλήματα βελτιστοποίησης* με ένα πεπερασμένο αλλά και παράλληλα μεγάλο αριθμό παραμέτρων, τα οποία δύναται να επιλυθούν με τη χρήση *κλασσικών μεθόδων αριθμητικής βελτιστοποίησης* (Κεφάλαιο 2).

Το ολοκληρωμένο πρόβλημα της σύνθεσης αποτελείται από δύο βασικές πλευρές. Αρχικά, με δεδομένα τα επιθυμητά χαρακτηριστικά του διαγράμματος ακτινοβολίας, ζητείται να υπολογιστούν τα πλάτη και οι φάσεις των διεγέρσεων για κάθε στοιχείο της στοιχειοκεραίας. Αυτή η διαδικασία είναι γνωστή ως *κλασσική σύνθεση* των διαγραμμάτων ακτινοβολίας. Τέτοιου είδους προβλήματα έχουν αντιμετωπιστεί με τη βοήθεια μεθόδων

σύνθεσης όπως των *Schelkunoff* [102], *Dolf-Chebyshev* [103], *Taylor* [104], και *Fourier* [105]. Μια σειρά από παραλλαγές βασισμένες σε αυτές τις κλασσικές μεθόδους έχουν παρουσιαστεί με απώτερο σκοπό το προσδιορισμό οποιασδήποτε μορφής διαγραμμάτων, από τις οποίες μπορεί κανείς να ξεχωρίσει τη μέθοδο του *Orchard* [106]. Παρόλο που αυτές οι μέθοδοι σύνθεσης επιλύουν σημαντικά προβλήματα, αντιμετωπίζουν ένα μέρος του συνολικότερου προβλήματος και δεν είναι πάντα επαρκείς.

Η δεύτερη πλευρά του προβλήματος σχετίζεται με τη σχεδίαση κεραιών υποκειμένων σε άλλου τύπου περιορισμών, οι οποίοι διαφέρουν από αυτούς που εφαρμόζονται αποκλειστικά στα διαγράμματα ακτινοβολίας. Παραδείγματα τέτοιων περιορισμών αποτελούν η συμβατότητα της σχεδίασης με ένα δεδομένο δικτύωμα τροφοδοσίας, το εύρος διακύμανσης των ρευμάτων διέγερσης I_{max}/I_{min} προκειμένου να περιορίζονται τα φαινόμενα αμοιβαίας επαγωγής, η διασφάλιση της λειτουργίας της κεραίας σε συγκεκριμένες περιοχές συχνοτήτων και το συνολικό μέγεθος της στοιχειοκεραίας.

4.2.1 Σχεδίαση στοιχειοκεραιών ως πρόβλημα βελτιστοποίησης

Όταν το επιθυμητό διάγραμμα ακτινοβολίας μπορεί να έχει μια οποιαδήποτε μορφή, είναι αναγκαία η χρησιμοποίηση μη γραμμικών μεθόδων βελτιστοποίησης οι οποίες αποσκοπούν στην ελαχιστοποίηση μιας κατάλληλης συνάρτησης βελτιστοποίησης (κόστους / λάθους). Αυτή η συνάρτηση κόστους συμπεριλαμβάνει όλες τις ενδιαφέρουσες παραμέτρους της κεραίας και ελαχιστοποιείται όταν οι τιμές αυτών των παραμέτρων προσεγγίζουν τις επιθυμητές τιμές. Όμως αυτές οι τεχνικές έχουν εφαρμοστεί μόνο σε πολύ απλές στοιχειοκεραίες ή/και κρίνεται αναγκαία η κατάλληλη επιλογή των σημείων εκκίνησης για αυτές τις μεθόδους, καθότι ελλοχεύει ο κίνδυνος να παγιδευτούν σε σημεία τοπικού ελάχιστου. Σε αυτή την περίπτωση η επιλογή του σημείου εκκίνησης πρέπει να βασίζεται στα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου προς επίλυση προβλήματος, και φυσικά προϋποθέτει την εκ των προτέρων γνώση της μορφής των δυνατών λύσεων.

Η αναλυτική διατύπωση μιας αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία θα αποτιμά τις υποψήφιες λύσεις ως προς την ικανοποίηση των προκαθορισμένων σχεδιαστικών κριτηρίων, αποτελεί το ουσιαστικότερο βήμα της διαδικασίας σύνθεσης. Στη συνέχεια παρουσιάζεται μια γενικευμένη διατύπωση του προβλήματος σύνθεσης διαγραμμάτων.

4.2.2 Διατύπωση προβλήματος σύνθεσης στοιχειοκεραιών

Ο ορισμός συγκεκριμένων κριτηρίων σχεδίασης για μια στοιχειοκεραία είναι πάντα συνάρτηση της εφαρμογής για την οποία προορίζεται. Ένα πρόβλημα σύνθεσης μπορεί να απαιτεί την εύρεση κατάλληλων διεγέρσεων της στοιχειοκεραίας έτσι ώστε να ικανοποιούνται περιορισμοί στο διάγραμμα ακτινοβολίας όπως η στροφή κεντρικού λοβού και η ύπαρξη μηδενισμών σε καθορισμένες κατευθύνσεις, ανομοιόμορφα ορισμένα επίπεδα ή/και συγκεκριμένη κλίση των πλευρικών λοβών. Στη γενική περίπτωση αυτό το πρόβλημα είναι πολύ δύσκολο να επιλυθεί με τη βοήθεια των κλασσικών μεθόδων σύνθεσης, επομένως το πρόβλημα σύνθεσης μπορεί να διατυπωθεί ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης υποκειμένο σε συγκεκριμένους περιορισμούς.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται μια γενική περιγραφή υπολογισμού του παράγοντα διάταξης και των παράγωγων μεγεθών. Η γενική διατύπωση του προβλήματος παρέχει μια καλή περιγραφή των διαδικασιών ανάλυσης και σύνθεσης, αν και βέλτιστα αποτελέσματα

Ανάπτυξη Κατανεμημένης Πλατφόρμας Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων και Εφαρμογή σε Προβλήματα Σύνθεσης Στοιχειοκεραιών

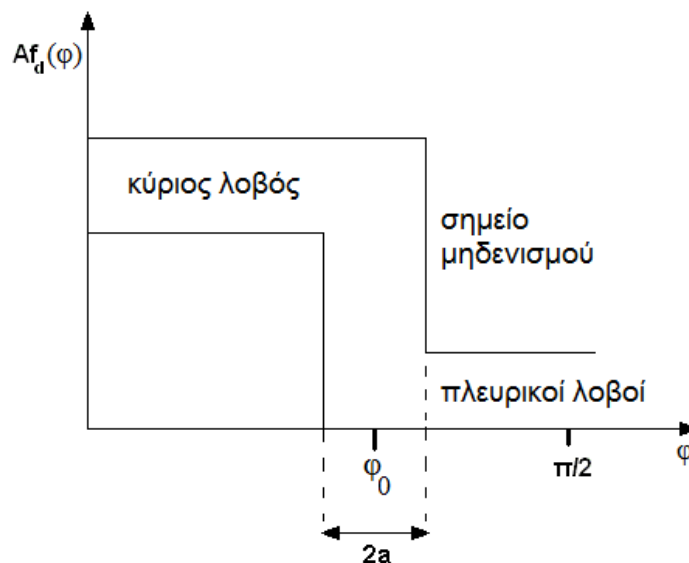
μπορούν να ληφθούν όταν συνυπολογιστούν τα ειδικά χαρακτηριστικά του (είδος ακτινοβολιών, χαρακτηρίστηκα σύζευξής τους, κτλ.) του υπό εξέταση συστήματος.

Έστω μια γραμμική στοιχειοκεραία N στοιχείων τα οποία ισαπέχουν (σταθερή απόσταση d), οπότε ο παράγοντας διάταξης της $AF(\vartheta, \varphi)$ υπολογίζεται αναλυτικά σύμφωνα με τη σχέση (98). Το πρόβλημα σύνθεσης αποσκοπεί στον προσδιορισμό των μιγαδικών συντελεστών διέγερσης c_n , έτσι ώστε η αναλυτική έκφραση του παράγοντα διάταξης AF να λαμβάνει τιμές που προσεγγίζουν τις Q δειγματοληπτούμενες τιμές ενός επιθυμητού παράγοντα διάταξης $AF_d(\varphi)$, για ορισμένη γωνία ανύψωσης ϑ_0 .

Για αυτό το σκοπό ορίζεται κατάλληλο κριτήριο λάθους όπου υπολογίζεται το ζυγισμένο άθροισμα των αποκλίσεων, προκειμένου να υπάρχει η δυνατότητα αντιστοίχισης διαφορετικής βαρύτητας σε κάθε σημείο του επιθυμητού διαγράμματος. Σε αυτή τη περίπτωση είναι δυνατή η διατύπωση του ακόλουθου προβλήματος ελαχιστοποίησης

$$\min \sum_{j=1}^Q W \left| AF_d - \sum_{n=0}^{N-1} c_n e^{jnk d \sin \theta_0 \cos \phi_j} \right| \quad (104)$$

όπου $W(\varphi_j)$ είναι οι παράγοντες που προσδιορίζουν τα σχετικά βάρη κάθε γωνιακής θέσης φ_j . Στην απλούστερη περίπτωση αυτά τα βάρη λαμβάνουν μοναδιαίες τιμές.



Εικόνα 41. Μάσκα σχεδίασης για τον κύριο και τους πλευρικούς λοβούς.

Οι περιορισμοί ορίζονται ως μια συνάρτηση με κλάδους για την περιγραφή των επιμέρους ζωνών ενδιαφέροντος του διαγράμματος, όπως τους πλευρικούς λοβούς, τις θέσεις των μηδενισμών και τον κεντρικό λοβό. Επομένως είναι δυνατή η διατύπωση μιας σειράς απλών ανισώσεων για κάθε περιοχή ενδιαφέροντος:

$$\begin{aligned} AF(\varphi_j) &< SLL \text{ αν το } \varphi_j \text{ βρίσκεται σε πλευρικό λοβό} \\ AF(\varphi_j) &< \zeta \text{ αν το } \varphi_j \text{ είναι θέση μηδενικού} \\ AF_d(\varphi_j) - \varepsilon &< AF(\varphi_j) < AF_d(\varphi_j) + \varepsilon \text{ αν το } \varphi_j \text{ είναι στον κυρίως λοβό} \end{aligned} \quad (105)$$

Το ε καθορίζει την επιθυμητή ακρίβεια στη γειτονιά του κεντρικού λοβού. Αυτό το σύνολο περιορισμών μπορεί να εκφραστεί βάσει των αντίστοιχων πεδίων ορισμού: ζώνη κεντρικού λοβού $0 < \varphi < \varphi_0 - \alpha$, πλευρικοί λοβοί και ελάχιστα $\varphi_0 + \alpha < \varphi < \pi/2$.

Η παρουσιαζόμενη ανάλυση συνιστά πρόβλημα μη γραμμικής βελτιστοποίηση του οποίου ο χώρος λύσεων οριοθετείται από τις επιτρεπόμενες τιμές πλάτους c_n και φάσης φ_n των διεγέρσεων:

$$\begin{aligned} c_n &= \{c_n \in R_+^N; \quad n = 0, 1, \dots, N-1\} \\ \varphi_n &= \{\varphi_n \in R_+^N / 0 \leq \varphi_n \leq 2\pi; \quad n = 0, 1, \dots, N-1\} \end{aligned} \quad (106)$$

Δύο διαφορετικές στρατηγικές μπορούν να ακολουθηθούν προκειμένου να συνυπολογιστούν οι περιορισμοί: *μεταμόρφωση του χώρου λύσεων* των παραμέτρων σχεδίασης χωρίς να τροποποιηθεί η συνάρτηση κόστους ή *τροποποίηση της συνάρτησης κόστους* με την εισαγωγή *όρων τιμωρίας* (penalty functions).

4.2.3 Σύνθεση στοιχειοκεραίων με τη βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων

Οι στοχαστικές τεχνικές βελτιστοποίησης έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία σε προβλήματα σύνθεσης στοιχειοκεραίων ολοένα και αυξανόμενης πολυπλοκότητας. Ο Y. L. Abdel-Magid και άλλοι αναφέρουν μια τεχνική σύνθεσης διαγραμμάτων, η οποία βασίζεται στην ακριβή τοποθέτηση των σημείων μηδενισμού, χρησιμοποιώντας την μέθοδο έρευνας με ταμπού [107]. Οι A. Trastoy και F. Ares προτείνουν μια μέθοδο σύνθεσης βασισμένη στην τεχνική προσομοιωμένης ανόπτησης, με έλεγχο της θέσης μηδενισμού και παράλληλης ελαχιστοποίησης του επιπέδου των πλευρικών λοβών [108]. Ο D. H. Werner και άλλοι αναφέρουν μια τεχνική σύνθεσης γραμμικών και επιπέδων στοιχειοκεραίων τμηματικής (fractal) διάστασης, η οποία επιτρέπει τη λειτουργία της σε πολλαπλές μπάντες συχνοτήτων [109]. Η τεχνική βασίζεται σε μια γενικευμένη μορφή της σύνθεσης Fourier προκειμένου να διασφαλίζεται η πολυζωνική λειτουργία της.

Μεταξύ των διάφορων στοχαστικών τεχνικών, οι *γενετικοί αλγόριθμοι* (Genetic Algorithms - GA) και η *βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων* (Particle Swarm Optimization - PSO) έχουν προσελκύσει ιδιαίτερη προσοχή [31]. Ο D. W. Boeringer και άλλοι προτείνουν μια μέθοδο μεγιστοποίησης της αποτελεσματικότητας του ανοίγματος (aperture) σύμμορφων στοιχειοκεραίων σε κοίλες επιφάνειες, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων και μια τροποποιημένη μορφή των πολυωνύμων Bernstein [110]. Χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι ότι βελτιστοποιεί τους παράγοντες του πολυωνύμου Bernstein, το οποίο χρησιμοποιείται για αναπαράσταση της ρευματικής κατανομής κατά μήκος της στοιχειοκεραίας. Οι D. Gies και Y. Rahmat-Samii προτείνουν μια τεχνική σύνθεσης διαγραμμάτων για στοιχειοκεραίες που υποστηρίζει πολλαπλές δέσμες υπερκατευθυντικής (pencil) και επίπεδης (flat) μορφής [111]. Χαρακτηριστικό της μεθόδου που ακολουθείται είναι η εφαρμογή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων για τον απευθείας προσδιορισμό των ρευματικών κατανομών καθώς και για το προσδιορισμό των συντελεστών που λαμβάνονται μέσω της εφαρμογής της μεθόδου σύνθεσης Woodward-Lawson.

Σε όλα τα προαναφερθέντα παραδείγματα, καταλυτικό ρόλο διαδραματίζει η επιλογή αντιπροσωπευτικής αντικειμενικής συνάρτησης για το κάθε εξεταζόμενο πρόβλημα, ανεξάρτητα από τη χρησιμοποιούμενη τεχνική βελτιστοποίησης. Για την ικανοποίηση των σχεδιαστικών στόχων που αφορούν τη μορφή των διαγραμμάτων ακτινοβολίας, χρησιμοποιούνται αντικειμενικές συναρτήσεις βασισμένες σε σχεδιαστικές μάσκες. Συνήθως πρέπει να εντοπίζονται χαρακτηριστικά του υπό σύνθεση διαγράμματος (π.χ. άνοιγμα και κέρδος κεντρικών λοβών, καταπίεση πλευρικών λοβών κτλ.) και να συγκρίνονται με τις επιθυμητές τιμές που ορίζουν οι μάσκες [111]. Σε αυτές τις περιπτώσεις οι αντικειμενικές συναρτήσεις αποτελούνται από το ζυγισμένο άθροισμα των αποκλίσεων των διαφόρων χαρακτηριστικών από τις επιθυμητές τιμές. Πολλές φορές δεν βελτιστοποιούνται οι ρευματικές κατανομές των στοιχείων της στοιχειοκεραίας, αλλά ευρίσκονται οι τιμές συντελεστών πολυνομιακών ή άλλων εκφράσεων βασισμένων σε κλασσικές μεθόδους σύνθεσης [110, 111]. Τέλος, όταν η βελτιστοποίηση αφορά γεωμετρικά ή άλλα χαρακτηριστικά των ακτινοβολητών της στοιχειοκεραίας [109], αναπτύσσονται μεθοδολογίες σχεδίασης οι οποίες μπορεί να λαμβάνουν ή όχι υπόψη φαινόμενα, όπως την αμοιβαία σύζευξη μεταξύ των ακτινοβολητών [112].

Στη συνέχεια περιγράφονται ειδικές εφαρμογές των στοχαστικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης σε προβλήματα σύνθεσης στοιχειοκεραιών. Η πλειοψηφία των παρουσιαζόμενων εφαρμογών αφορούν στοιχειοκεραίες μεταβλητής γεωμετρίας, γεγονός που συμβάλλει τελικά στον ορισμό πολύπλοκων χώρων έρευνας. Στην πρώτη ενότητα παρουσιάζονται μέθοδοι σύνθεσης διαγραμμάτων για γραμμικές και επίπεδες στοιχειοκεραίες, ενώ στη δεύτερη μελετώνται στοιχειοκεραίες που βρίσκουν ειδικότερες εφαρμογές στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα.

4.3 Παράδειγμα Σύνθεσης Γραμμικής Στοιχειοκεραίας

Χρησιμοποιώντας τις διατυπώσεις του γενικευμένου προβλήματος σύνθεσης στοιχειοκεραιών που αναπτύχθηκε σε προηγούμενη ενότητα, θα επιχειρηθεί η προσέγγιση των συντελεστών διέγερσης μιας γραμμικής στοιχειοκεραίας ενός υποβοηθητικού συστήματος καθοδήγησης για την αεροπλοΐα. Συγκεκριμένα, θα μελετηθεί μία εκ των επίγειων κεραιών του σημαντικότερου συστήματος ραδιοτηλεμετρίας υποβοηθούμενης προσέγγισης ενός αεροπλάνου στο διάδρομο προσγείωσης ενός αεροδρομίου (Instrument Landing System – ILS).

Το σύστημα ILS, χρησιμοποιώντας έναν συνδυασμό ραδιοσημάτων, παρέχει ακριβείς οδηγίες στους πιλότους κατά τους ελιγμούς προσγείωσης, για την οριζόντια αλλά και τη κάθετη απόκλιση του αεροπλάνου σε σχέση με τον διάδρομο προσγείωσης, μέσω κατάλληλων ενδείξεων των ευρισκόμενων στο πιλοτήριο οργάνων (Εικόνα 42). Κατά αυτό τον τρόπο διασφαλίζεται η ασφαλής προσέγγιση και προσγείωση του αεροπλάνου, ακόμα και σε συνθήκες χαμηλής ορατότητας λόγω ομίχλης, έντονης βροχόπτωσης ή άλλων μετεωρολογικών φαινομένων.



Εικόνα 42. Η λειτουργία του υποσυστήματος ILS Localizer

Το σύστημα ILS αποτελείται από:

- Ένα σταθμό εδάφους με τα εξής υποσυστήματα κεραιών:
 - Στοιχειοκεραία οριζόντιας καθοδήγησης του αεροπλάνου σε σχέση με τον άξονα του διαδρόμου προσγείωσης (ILS Localizer).
 - Στοιχειοκεραία καθοδήγησης του αεροπλάνου σχετικά με την κλίση του ως προς το έδαφος (ILS Glider).
- Κεραιοσύστημα, εγκαταστημένο στην άτρακτο του αεροπλάνου, για την λήψη των αντίστοιχων σημάτων καθοδήγησης.

Το βασικότερο πρόβλημα που μπορεί να ανακύψει κατά τη λειτουργία του συστήματος ILS, είναι τα φαινόμενα πολυδικής διάδοσης και οι ανεπιθύμητες παρενέργειες τους στην ακριβή εκτίμηση της θέσης του αεροσκάφους κατά τη φάση της προσγείωσης, λόγω της υψηλής ευαισθησίας του συστήματος στα λαμβανόμενα σήματα [113]. Τέτοια φαινόμενα οφείλονται σε ανακλάσεις ή διαθλάσεις από τον περιβάλλοντα χώρο (κτίρια αεροδρομίου, αεροπλάνο που τροχοδρομεί σε διπλανό διάδρομο) των σημάτων που εκπέμπονται προς το αεροπλάνο που προσγειώνεται.

Σε αυτό το πλαίσιο, ιδιαίτερη προσπάθεια έχει γίνει για την ακριβή μέτρηση και τη προσομοίωση του ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος των αεροδρομίων (μελέτη ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών – EMC) προκειμένου να εκτιμηθεί η δυνατότητα εφαρμογής των κανονισμών και απαιτήσεων ασφάλειας. Τα εργαλεία προσομοίωσης που συνήθως υιοθετούνται απαιτούν γνώση της ακριβούς διαμόρφωσης των πηγών ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Δυστυχώς, συχνά κρίσιμες τεχνικές λεπτομέρειες των υποσυστημάτων δεν αποκαλύπτονται από τους κατασκευαστές, καθιστώντας αυτήν την προσέγγιση δύσκολα πραγματοποιήσιμη.

Στην ακόλουθη μελέτη, η κεραία οριζόντιας καθοδήγησης (Localizer) του ILS μπορεί να μοντελοποιηθεί ως γραμμική στοιχειοκεραία με καθορισμένη διαμόρφωση και λειτουργικά χαρακτηριστικά όπως ο τύπος των κεραιών, η μεταξύ τους απόσταση, τα ρεύματα διέγερσης τους με προκαθορισμένη και σταθερή φάση, τα οποία συμπληρώνονται από τα

επιθυμητά χαρακτηριστικά των διαγραμμάτων ακτινοβολίας. Αντικείμενο των προτεινόμενων μεθόδων είναι ο προσδιορισμός του πλάτους των ρευμάτων διεγέρσεως των επιμέρους ακτινοβολητών που απαρτίζουν τη στοιχειοκεραία.

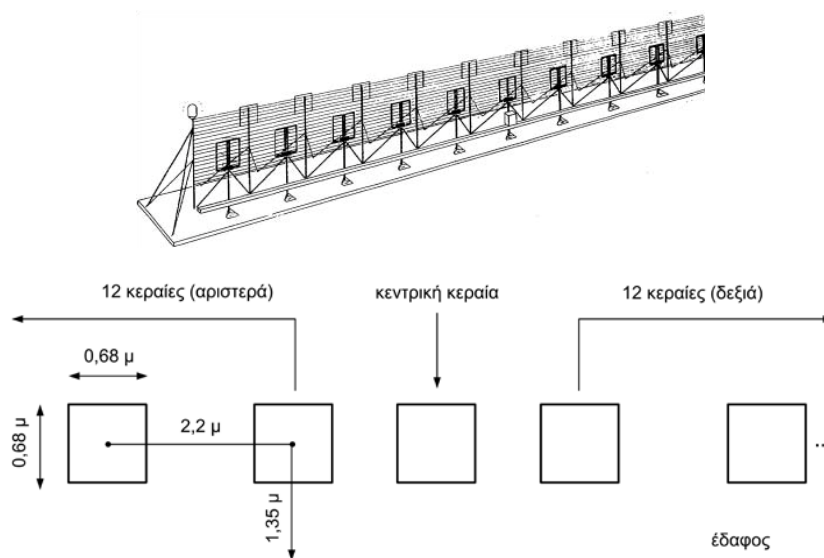
Επομένως, το πρόβλημα που περιγράφεται ακολούθως είναι ουσιαστικά ένα πρόβλημα σύνθεσης ισχύος για στοιχειοκεραίες. Αυτού του είδους τα προβλήματα δεν δύναται να αντιμετωπιστούν με τη βοήθεια κλασικών μεθόδων σύνθεσης κεραιών όπως η Woodward-Lawson, Dolf-Chebyshev [103], Taylor [104], Fourier [97] και η μέθοδος στροφής των σημείων μηδενισμού του Shelkunoff [102].

Στη σχετική επιστημονική βιβλιογραφία απαντώνται διάφορες μεθοδολογίες σχεδίασης για το πρόβλημα σύνθεσης των διαγραμμάτων ισχύος μιας στοιχειοκεραίας. Μερικές από τις λύσεις που έχουν εξεταστεί κατά καιρούς χρησιμοποιούν τους γενετικούς αλγορίθμους (GAs) και τη προσομοιωμένη απόκτηση (SA). Στην παρούσα ενότητα η βελτιστοποίηση του διαγράμματος ακτινοβολίας πραγματοποιείται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων (LSQE), τη μέθοδο συζευγμένης κλίσης (CG) και τη βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων (PSO). Οι προτεινόμενες μέθοδοι υλοποιούν μια νέα προσέγγιση στην απευθείας επιβολή των περιορισμών στα διαγράμματα ακτινοβολίας προκειμένου να επιτυγχάνονται επιθυμητά χαρακτηριστικά των διαγραμμάτων ακτινοβολίας.

4.3.1 Παρουσίαση υποσυστήματος οριζόντιας καθοδήγησης αεροπλάνου κατά τη προσγείωση

Οι παρουσιαζόμενες μέθοδοι βελτιστοποίησης εφαρμόζονται προκειμένου να προσεγγιστούν τα χαρακτηριστικά των διαγραμμάτων ακτινοβολίας του ILS 389 LOC που κατασκευάζεται από την εταιρεία ThalesTM. Το σύστημα χρησιμοποιεί συμμετρικά τοποθετημένες κεραιές (συμπεριλαμβανομένης μιας κεντρικής), οι οποίες μπορούν να προσεγγιστούν από κεραιές τετραγωνικού βρόγχου (Εικόνα 43).

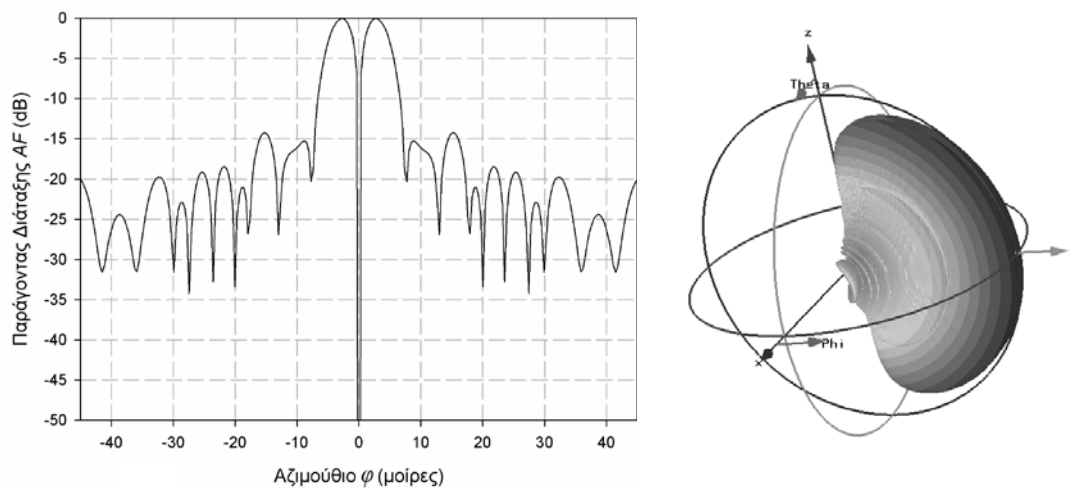
Τα κατευθυντικά και τα μη κατευθυντικά διαγράμματα ακτινοβολίας, που αντιστοιχούν σε διαφορετικές επιχειρησιακές λειτουργίες του ILS, προϋποθέτουν διαφορά φάσης 0° ή 180° μεταξύ των ανεξάρτητων τροφοδοσιών των συμμετρικά τοποθετημένων κεραιών.



Εικόνα 43. Η διαμόρφωση του υποσυστήματος ILS 389 LOC της Thales.

Στη παρούσα μελέτη ήταν γνωστές εκ των προτέρων οι έγκυρες τιμές τροφοδοσίας. Αυτές χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας των προτεινόμενων μεθοδολογιών βελτιστοποίησης [86]. Η εξέταση ενός καλά προσδιορισμένου συστήματος δεν βλάπτει τη γενικότητα της μελέτης καθότι τα υποσυστήματα ILS LOC αποτελούνται από στοιχεία/ακτινοβολητές που παρουσιάζουν παρόμοια χαρακτηριστικά ομοιοκατευθυντικής ακτινοβολίας ($\sin^n \phi$) μακρινού πεδίου.

Ο κρισιμότερος τρόπος λειτουργίας του υποσυστήματος ILS LOC είναι κατά την εκπομπή του διαγράμματος διαφοράς (BL+dir), με τη βοήθεια του οποίου εκτιμάται η οριζόντια απόκλιση του αεροσκάφους σχετικά με τον άξονα συμμετρίας του διαδρόμου προσγείωσης. Ο παράγοντας διάταξης της στοιχειοκεραίας του υποσυστήματος ILS 389 Localizer της Thales απεικονίζεται στην Εικόνα 44. Το ακόλουθο διάγραμμα χρησιμοποιείται στη συνέχεια ως περίπτωση δοκιμής για τους αλγορίθμους βελτιστοποίησης.



Εικόνα 44. Παράγοντας διάταξης υποσυστήματος ILS Localizer κατά τη λειτουργία BL+dir.

Για την εκπομπή του διαγράμματος διαφοράς, ήταν γνωστές οι παρεχόμενες ισχύς από το δικτύωμα τροφοδοσίας σε κάθε ακτινοβολητή της στοιχειοκεραίας (Πίνακας 10) το στοιχείο 0 είναι το κεντρικό). Σε αυτή την περίπτωση, η διαφορά φάσης στη τροφοδοσία μεταξύ των συμμετρικά τοποθετημένων στοιχείων ορίζεται να είναι 180° (φάση τροφοδοσίας 90° για τα στοιχεία από τη μία πλευρά, -90° για τα υπόλοιπα).

Στοιχείο	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ισχύς (db)	-	-15,6	-6,1	-3	-1,1	0	0	-1,1	-3,4	-6,5	-10,4	-13,2	-19

Πίνακας 10. Τροφοδοτούμενη ισχύς στα στοιχεία της στοιχειοκεραίας (ILS BL+dir)

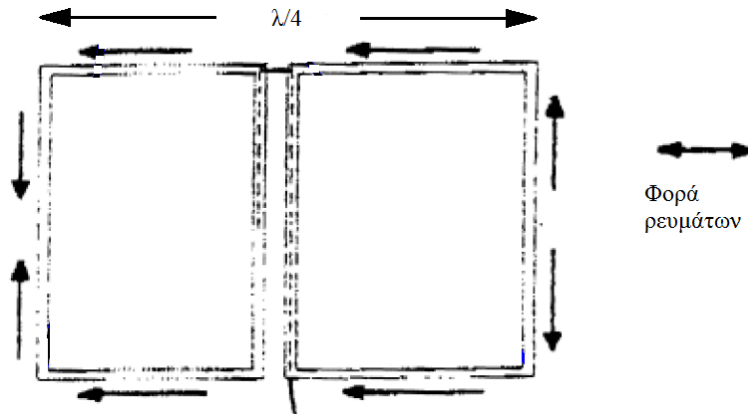
4.3.2 Διατύπωση του προβλήματος σύνθεσης

Οι ιδιότητες του διαγράμματος ακτινοβολίας της κεραίας ILS localizer απαιτούν ένα συμμετρικό σχήμα τροφοδοσίας των στοιχείων. Αυτό μπορεί καλύτερα να περιγραφεί μέσω της αναλυτικής διατύπωσης του παράγοντα διάταξης της στοιχειοκεραίας (AF)

$$AF(\theta, \phi, \alpha) = \alpha_0 + \sum_{n=1}^N a_n e^{j\frac{2n-1}{2}u(\theta, \phi)} + \sum_{n=1}^N a_n e^{-j\frac{2n-1}{2}u(\theta, \phi)} \quad (107)$$

όπου η πρόοδος της φάσης για κάθε στοιχείο περιγράφεται από το σύμβολο $u(\theta, \phi)$. Η ακόλουθη αναλυτική έκφραση, προκύπτει θεωρώντας ότι ο κεντρικός ακτινοβολητής της στοιχειοκεραίας δεν τροφοδοτείται ($\alpha_0=0$), κατά την εκπομπή του κατευθυντικού διαγράμματος διαφορών (BL+directive).

$$AF(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N a_n \sin\left(\frac{2n-1}{2} u(\theta, \phi)\right) \quad (108)$$



Εικόνα 45. Γεωμετρία κεραίας τετραγωνικού βρόγχου.

Στην Εικόνα 45 απεικονίζεται η διαμόρφωση των κεραιών βρόγχου που απαρτίζουν τη στοιχειοκεραία. Είναι δυνατόν να μη ληφθούν υπόψη κατά την ανάλυση τα κάθετα σύρματα της κεραίας, καθότι τα ρεύματα που τα διαρρέουν αλληλοαναιρούνται. Συνακόλουθα τα πάνω και τα κάτω σύρματα δύναται να μοντελοποιηθούν ως δίπολα $\lambda/4$, με το διάκενο τροφοδοσίας τοποθετημένο στη μέση τους. Θεωρώντας ότι τα δίπολα αυτά είναι παράλληλα προς το έδαφος και ευρισκόμενα σε ύψος $3\lambda/8$ και $5\lambda/8$ αντίστοιχα, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί η ακόλουθη αναλυτική σχέση για την εύρεση της εντάσεως του ηλεκτρικού πεδίου του κάθε δίπολου [91]:

$$E_{dipole} = \frac{\cos(\pi l \cos \phi \cos \alpha)}{\sqrt{1 - \cos^2 \phi \cos^2 \alpha}} \sin(2\pi \sin \alpha) \quad (109)$$

Στην παραπάνω σχέση το h συμβολίζει το ηλεκτρικό ύψος τοποθέτησης των δίπολων πάνω από το έδαφος, το l το ηλεκτρικό μήκος των δίπολων, το ϕ την αζιμουθιακή γωνία και το α τη γωνία ανύψωσης από το έδαφος. Το ευρισκόμενο πίσω από την στοιχειοκεραία πλέγμα έχει ευρεθεί ότι δεν επηρεάζει σημαντικά το εμπρόσθιο διάγραμμα ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας. Το συνολικό διάγραμμα ακτινοβολίας δύναται να υπολογισθεί βάσει του παράγοντα διάταξης που υπολογίστηκε στη σχέση (108) με τον κανόνα πολλαπλασιασμού διαγραμμάτων, εφόσον τα φαινόμενα επαγωγή μεταξύ των ακτινοβολητών της στοιχειοκεραίας θεωρηθούν αμελητέα (μεταξύ τους απόσταση $d=0.8\lambda$).

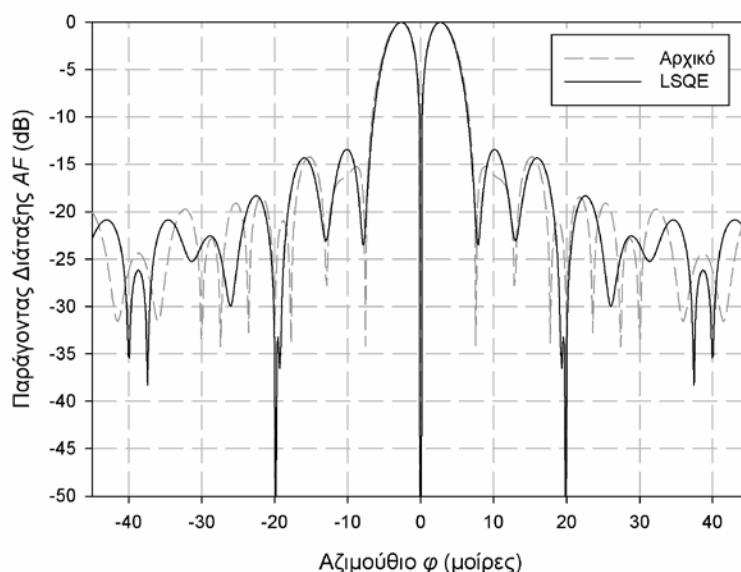
Για τη διατύπωση του προβλήματος σύνθεσης, αρχικά πραγματοποιείται η υπόθεση ότι τα πλάτη των ρευμάτων τροφοδοσίας ακολουθούν ημιτονική κατανομή κατά μήκος του ανοίγματος της στοιχειοκεραίας, ως αρχικό σημείο της διαδικασίας βελτιστοποίησης (η επιλογή καταλλήλων αρχικών τιμών επαυξάνει τη πιθανότητα σύγκλισης των

χρησιμοποιούμενων αλγορίθμων). Στη συνέχεια δημιουργείται μια λίστα περιορισμών, μέσω της ανίχνευσης της θέσης των πλευρικών λοβών και των σημείων μηδενισμού του διαγράμματος ακτινοβολίας. Επιπρόσθετα λήφθηκαν υπόψη οι τιμές του παράγοντα διάταξης στη γωνία 45° καθώς και το άνοιγμα των κεντρικών λοβών (σημεία ημίσειας ισχύος, -3 dB). Η απόκλιση των τιμών για αυτή τη λίστα σημείων αποτέλεσε και το κριτήριο σύγκρισης του αρχικού και του διαγράμματος που προέκυψε από τη διαδικασία σύνθεσης.

4.3.3 Βελτιστοποίηση με μεθόδους βασισμένες στην παράγωγο

Οι μέθοδοι βελτιστοποίησης που βασίζονται στον υπολογισμό της παραγώγου μιας κατάλληλης μετρικής συνάρτησης, προϋποθέτουν την εκ των προτέρων γνώση της αναλυτικής μορφής του συστήματος προς βελτιστοποίηση. Η αναλυτική έκφραση με βάση τα πλάτη (πραγματικές τιμές) τροφοδοσίας των στοιχείων καθιστά δυνατή την χρησιμοποίηση απλούστερων μεθόδων όπως η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων (Least Square Error - LSQE) για την απευθείας επίλυση του συστήματος ισοτήτων, που προκύπτει από την απαίτηση ικανοποίησης των επιβαλλόμενων στα διαγράμματα περιορισμών (όταν αυτοί εκφράζονται στη βάση του κανονικοποιημένου κέρδους). Η μέθοδος συζυγών κλίσεων (Conjugent Gradient - CG) αποδεικνύεται επίσης ικανή να επιλύσει το ίδιο σύστημα περιορισμών (ανισοτήτων στη γενικότερη περίπτωση), αυτή τη φορά εκφρασμένου ως προς τις λογαριθμικές τιμές των διαγραμμάτων κέρδους της στοιχειοκεραίας.

Αρχικά, λήφθηκαν αποτελέσματα βασισμένα στη χρήση περιορισμών επί του κανονικοποιημένου διαγράμματος κέρδους και στο σχηματισμό ενός γραμμικού συστήματος εξισώσεων. Συνακολούθως επιβλήθηκε η ταυτοποίηση (point matching) των τιμών των διαγραμμάτων επί της λίστας σημείων που περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα, προκειμένου να περιγραφεί ένα σύστημα εξισώσεων το οποίο προκύπτει από το κανονικοποιημένο διάγραμμα κέρδους. Η γραμμικότητα του συστήματος διατηρήθηκε εξαιτίας της αναλυτικής έκφρασης (108) του παράγοντα διάταξης και της μη λογαριθμικής φύσης των τιμών των διαγραμμάτων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 46.



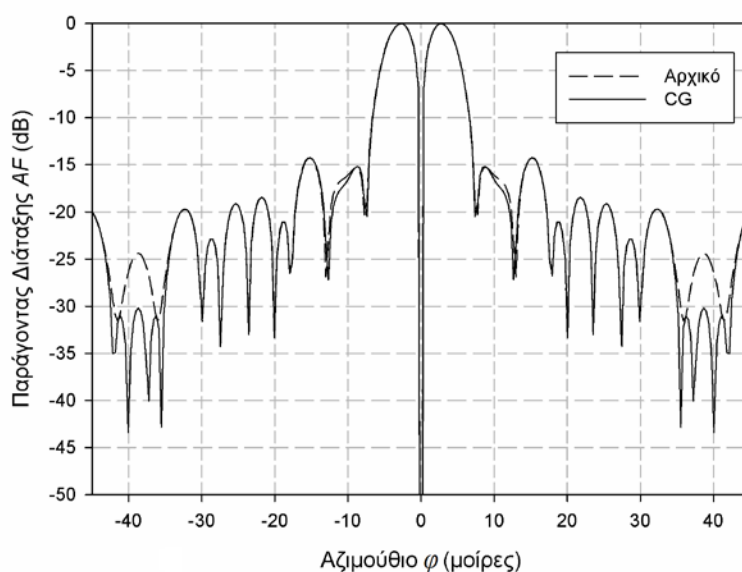
Εικόνα 46. Αρχικός παράγοντας διάταξης και διάγραμμα από σύνθεση με LSQE.

Η βελτιστοποίηση του κανονικοποιημένου διαγράμματος έδειξε ότι το διάγραμμα σύνθεσης διατηρεί τα βασικά χαρακτηριστικά του πρωτότυπου διαγράμματος. Επίσης διατηρήθηκε η μορφή των κυρίως λοβών (ειδικά ως προς το άνοιγμά τους) ενώ παράλληλα είναι άμεσα συγκρίσιμες και οι τιμές καταπίεσης των πλευρικών λοβών (suppression of sidelobes – SSL).

Η ίδια ιδέα εφαρμόστηκε και για την εύρεση μιας ικανοποιητικής λύσης για ένα μη γραμμικό σύστημα (εφαρμογή των περιορισμών πάνω σε λογαριθμικά διαγράμματα). Στην περίπτωση της επιβολής περιορισμών πάνω σε λογαριθμικά διαγράμματα κέρδους χρησιμοποιήθηκαν μη γραμμικές μέθοδοι έρευνας. Η λίστα των σημείων προσαρμόστηκε ώστε να περιλαμβάνει μόνο τα σημεία μεγίστων και τα σημεία ορισμού του ανοίγματος των κεντρικών λοβών (σημεία 3 dB) καθώς και ένα σημείο στα άκρα του διαγράμματος (45°). Οι περιορισμοί εκφράστηκαν αναλυτικά ως ένα σύστημα ανισοτήτων.

Η μέθοδος CG βασίζεται στον καθορισμό της διεύθυνσης πιο απότομης καθόδου της υπό εξέταση συνάρτησης. Αυτή η θεώρηση δύναται να οδηγήσει στη παγίδευση του αλγορίθμου σε θέσεις τοπικών ελαχίστων, εκτός αν δοθεί στον επιλυτή ένα καλό σημείο εκκίνησης (ημιτονική ρευματική κατανομή κατά μήκος του ανοίγματος της στοιχειοκεραίας). Το κριτήριο τερματισμού του χρησιμοποιούμενου επιλυτή CG χρησιμοποιεί μηχανισμό επανεκκίνησης ως προς τη διεύθυνση μεγαλύτερης κλίσης, ο οποίος αποδεικνύεται χρήσιμος όταν η εξίσωση περιγραφής του προβλήματος παρουσιάζει ασυνέχειες ή πολύ ομαλές περιοχές.

Η διαδικασία βελτιστοποίησης οδήγησε στην εύρεση ικανοποιητικών παραμέτρων τροφοδοσίας των στοιχείων της στοιχειοκεραίας. Συνοπτικά θα μπορούσε να αναφερθεί ότι η σύνθεση, χρησιμοποιώντας την μέθοδο CG, οδήγησε σε αποτελέσματα τα οποία σχεδόν ταυτίζονται με τις γνωστές εκ των προτέρων βέλτιστες τιμές ρευμάτων (Πίνακας 11), τα οποία αποκλίνουν ελάχιστα από τον παράγοντα διάταξης αναφοράς (Εικόνα 47).



Εικόνα 47. Παράγοντας διάταξης για το διάγραμμα BL+dir που προέκυψε χρησιμοποιώντας CG.

Στοιχείο	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Διαφ. (%)	1,28	-0,35	-0,16	-0,89	-0,58	-0,53	0,35	0,69	1,29	0,31	-0,22	-1,33

Πίνακας 11. Διαφορά % των υπολογιζόμενων πλατών τροφοδοσιών από τις τιμές αναφοράς.

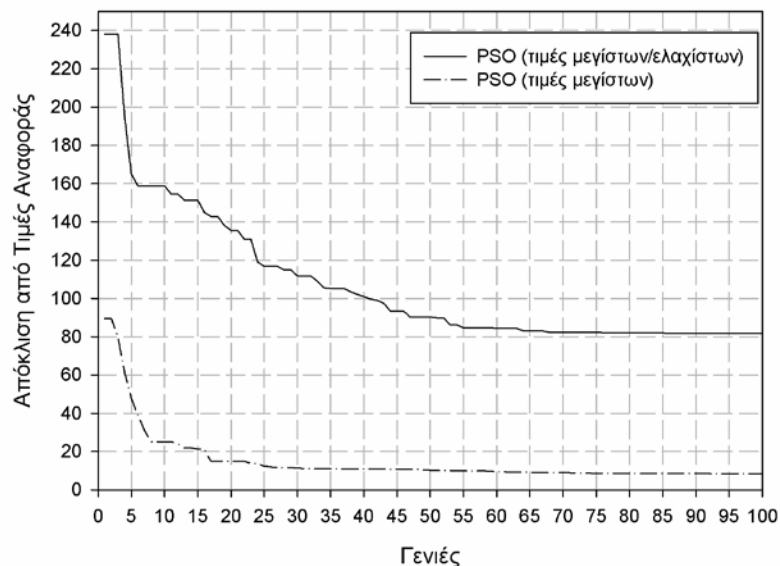
Η βελτιστοποίηση του κανονικοποιημένου διαγράμματος έδειξε ότι το διάγραμμα σύνθεσης ταυτίζεται με το αρχικό διάγραμμα μέχρι τις 35°. Διαφοροποιείται στους αναπτυσσομένους πλευρικούς λοβούς σε μεγαλύτερες γωνίες αλλά ελάχιστα και ως προς το σχήμα του πρώτου πλευρικού λοβού.

4.3.4 Στοχαστική βελτιστοποίηση

Για τη χρήση ενός πολυδιάστατου στοχαστικού αλγορίθμου βελτιστοποίησης, προκειμένου να επιλυθεί το πρόβλημα σύνθεσης διαγράμματος ισχύος που περιγράφηκε στις προηγούμενες ενότητες, είναι απαραίτητο να οριστεί κατάλληλη αντικειμενική συνάρτηση. Για αυτό το σκοπό, επιλέχθηκε μια συνάρτηση η οποία ελαχιστοποιεί την απόκλιση του διαγράμματος σύνθεσης από το αρχικό, κατά ανάλογο τρόπο με τη περίπτωση εφαρμογής της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων (η οποία συγκλίνει σφαιρικά):

$$f_{obj} = \sum_{i=1}^N |AF_{dB}^{orig}(\phi_i) - AF_{dB}^{synth}(\phi_i)| \quad (110)$$

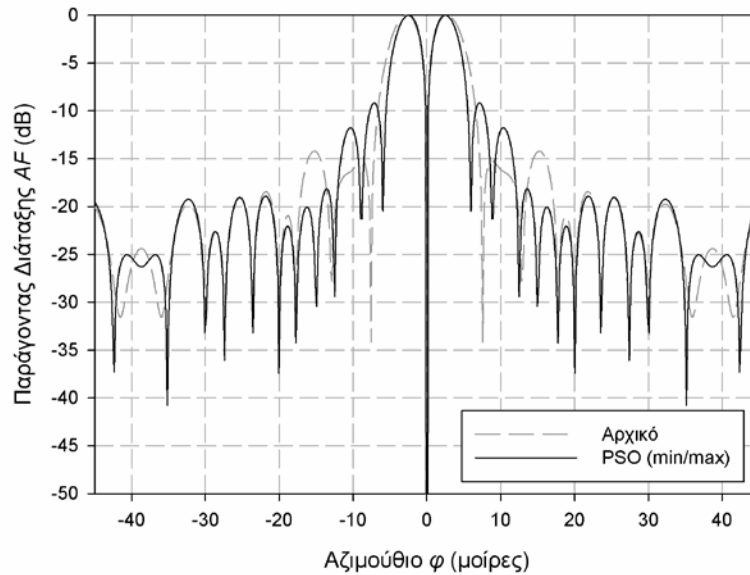
Για τον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης ορίστηκαν δύο διακριτά σενάρια. Στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν όλα τα σημεία καμπυλότητας του διαγράμματος ενώ στη δεύτερη χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα μέγιστα. Και στις δύο περιπτώσεις τα σημεία των 45° και τα σημεία 3 dB των κεντρικών λοβών συμπεριληφθήκαν στους υπολογισμούς.



Εικόνα 48. Συνολική απόκλιση από σημεία αναφοράς (σύγκλιση PSO).

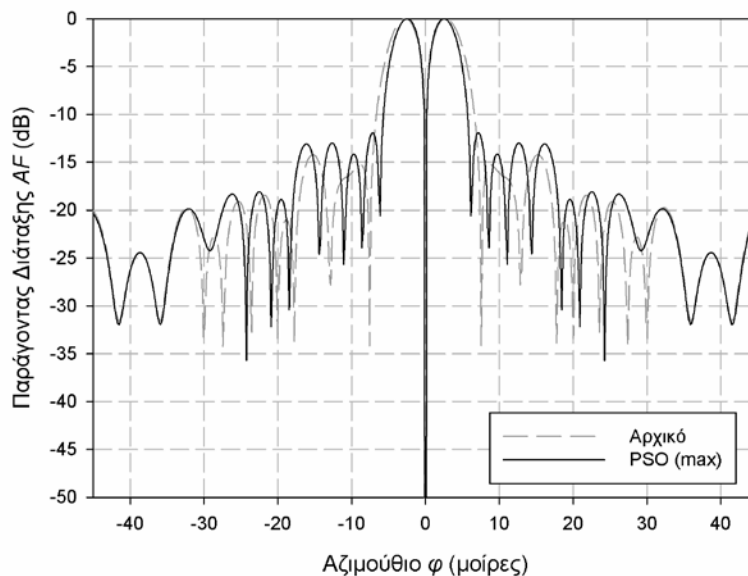
Η βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων, με χρήση παραμέτρου περιορισμού της ταχύτητάς τους ίση με $\chi=0,73$, εφαρμόστηκε για την επίλυση του προβλήματος σύνθεσης. Οι παράμετροι ατομικότητας και κοινωνικότητας έλαβαν τις τιμές 2.1 και 2 αντίστοιχα. Ο πληθυσμός, που αποτελείτο από 48 σωματίδια, εξελίχθηκε για 100 γενιές (Εικόνα 48). Για

τις αλληλοεπιδράσεις των μελών του πληθυσμού ορίστηκε τοπική γειτονιά δακτυλιδιού αποτελούμενη μεγέθους 3 (επικοινωνία σωματιδίων ευρισκόμενα δεξιά/αριστερά).



Εικόνα 49. Παράγοντας διάταξης ILS που λήφθηκε για το σύνολο των ακρότατων (σύνθεση με PSO).

Στη πρώτη περίπτωση παράχθηκαν αποτελέσματα στα οποία υπερτονίστηκε η χρήση των σημείων μηδενισμού των πλευρικών λοβών, ειδικά για τις γωνίες μεταξύ 20° και 30° μοιρών. Ο ορισμός ισόποσης βαρύτητας για τα σημεία που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης είχε ως αποτέλεσμα την μερική αστοχία στην επίτευξη ικανοποιητικής καταπίεσης των πρώτων πλευρικών λοβών (Εικόνα 49).



Εικόνα 50. Παράγοντας διάταξης ILS που λήφθηκε για τα σημεία μεγίστων (σύνθεση με PSO).

Η διαδικασία σύνθεσης με χρήση μόνο των μέγιστων είχε ως αποτέλεσμα την λήψη διαγραμμάτων, τα οποία επιτυγχάνουν τιμές καταπίεσης των πλευρικών λοβών κοντά στις επιθυμητές (Εικόνα 50). Και στις δύο περιπτώσεις παρατηρήθηκε απόκλιση ως προς την επιθυμητή μορφή των κυρίως λοβών, γεγονός που αποδίδεται στην σφαιρικότητα της αντικειμενικής συνάρτησης αλλά και στην ισομερή ζύγιση των σημείων ελέγχου.

4.3.5 Συμπεράσματα

Η παρούσα ενότητα παρουσίασε συνοπτικά εναλλακτικές μεθόδους βελτιστοποίησης οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε προβλήματα σύνθεσης ισχύος για στοιχειοκεραίες. Οι ειδικότερες προδιαγραφές τροφοδότησης του συστήματος ILS Loc. είχαν ως συνέπεια την αναλυτική διατύπωση του παράγοντα διαμόρφωσης του με τέτοιο τρόπο που να επιτρέπει την χρήση απλούστερων μεθόδων βελτιστοποίησης, όπως η μέθοδος ελαχιστοποίησης των τετραγωνικών σφαλμάτων (LSQE). Η εφαρμογή της μεθόδου LSQE παρήγαγε αποδεκτά αποτελέσματα αλλά δεν παρουσιάζει την απαραίτητη γενικότητα για αντιμετώπιση ευρύτερων προβλημάτων. Τα καλύτερα αποτελέσματα λήφθηκαν χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της συζυγούς κλίσης (CG), γεγονός που εν μέρει αποδίδεται στην επιλογή κατάλληλου σημείου εκκίνησης. Η εφαρμογή του αλγόριθμου βελτιστοποίησης νέφους σωματιδίων ανέδειξε τη δυνατότητα αντιμετώπισης γενικευμένων προβλημάτων σύνθεσης διαγραμμάτων ισχύος. Η ευελιξία της μεθόδου βρίσκεται στη δυνατότητά της να αποφύγει την παγίδευση σε θέσεις τοπικών ελαχίστων. Τα λαμβανόμενα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η εφαρμογή της μπορεί να είναι επιτυχής σε προβλήματα σύνθεσης στοιχειοκεραίων, εφόσον ορίζονται κατάλληλες αντικειμενικές συναρτήσεις.

4.4 Παράδειγμα Σύνθεσης Επίπεδης Στοιχειοκεραίας

Η σύνθεση διαγραμμάτων ακτινοβολίας μπορεί επίσης να επιτευχθεί μεταβάλλοντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των στοιχειοκεραίων [100]. Βασιζόμενοι σε προηγούμενες διατυπώσεις για την εύρεση ικανοποιητικών συντελεστών διέγερσης των ακτινοβολητών που τις απαρτίζουν, επιχειρείται στη συνέχεια η ταυτόχρονη βελτιστοποίηση και της θέσεως τους. Η μεταβολή της γεωμετρίας της στοιχειοκεραίας έχει ως άμεση επίπτωση την διαφοροποίηση των φαινομένων αμοιβαίας σύζευξης μεταξύ των ακτινοβολητών, του συνολικού διαγράμματος ακτινοβολίας της, αλλά και του συνολικού κέρδους που τελικά αυτή επιτυγχάνει.

Η μελετώμενη σχεδίαση είναι μια επίπεδη στοιχειοκεραία αποτελούμενη από ένα προκαθορισμένο αριθμό δίπολων, κάθετα προσανατολισμένων ως προς το οριζόντιο επίπεδο x - y . Η διάμετρός τους είναι υποπολλαπλάσιο του μήκους κύματος και συνεπώς μπορούν να προσεγγιστούν ως λεπτά σύρματα (thin-wire approximation). Το προσδοκώμενο αποτέλεσμα είναι η σύνθεση διαγράμματος ακτινοβολίας όπου ο κεντρικός λοβός θα είναι στραμμένος στην επιθυμητή κατεύθυνση και θα έχει συγκεκριμένο άνοιγμα. Παράλληλα θα πρέπει να βελτιστοποιηθεί το επιτυγχανόμενο κέρδος καθώς και το επίπεδο των πλευρικών λοβών. Το παρόν πρόβλημα αποτελεί υποπερίπτωση των προβλημάτων διαμόρφωσης δέσμης (beam forming) για στοιχειοκεραίες [114].

Σε αντίθεση με την εφαρμογή σύνθεσης διαγραμμάτων που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, προσφορότερη για το παρόν πρόβλημα είναι η χρήση στοχαστικών μεθόδων βελτιστοποίησης. Η ταυτόχρονη βελτιστοποίηση της θέσης και των διεγέρσεων των ακτινοβολητών έχει ως συνέπεια τη διαμόρφωση πολύπλοκων τοπίων καταλληλότητας (fitness landscape) προς διερεύνηση από τους χρησιμοποιούμενους μεταερευνητικούς αλγόριθμους [19]. Το κυριότερο πλεονέκτημα των στοχαστικών μεθόδων βελτιστοποίησης είναι ότι ενσωματώνουν μηχανισμούς για την αποτροπή της παγίδευσης τους σε σημεία τοπικών ελαχίστων, αλλά και η δυνατότητά τους να βρίσκουν σχεδόν βέλτιστες λύσεις σε πολυωνυμικό χρόνο για τέτοιου είδους προβλήματα.

Σε αυτά τα πλαίσια, χρησιμοποιούνται δύο αντιπροσωπευτικοί στοχαστικοί, βασισμένοι σε πληθυσμό, αλγόριθμοι: ο γενετικός αλγόριθμος (GA) και ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (PSO). Η αποτελεσματικότητα τους συγκρίνεται ως προς τις λαμβανόμενες βέλτιστες λύσεις αλλά και την ταχύτητά σύγκλισης τους.

4.4.1 Θεωρητική ανάλυση

Για τους σκοπούς της παρούσας μελέτης θα αξιοποιηθεί η γενικευμένη διατύπωση του παράγοντα διάταξης μιας τρισδιάστατης στοιχειοκεραίας (Εικόνα 37). Συγκεκριμένα, ο υπολογισμός του παράγοντα διάταξης AF εξειδικεύεται βάσει της σχέσεως (95), ως ακολούθως

$$AF(\theta, \phi) = \sum_{m=0}^{N-1} c_m \exp(jkr_m \cos \psi_m) \quad (111)$$

όπου ψ_m είναι η γωνία μεταξύ της κατεύθυνσης παρατήρησης (σημείο P) και του διανύσματος θέσης του αντίστοιχου ακτινοβολητή m (σημείο O_m) και k ο κυματάριθμος που αντιστοιχεί στην επιλεγμένη συχνότητα λειτουργίας του κεραιοσυστήματος. Η συνολική ένταση ακτινοβολίας αλλά και το κέρδος της στοιχειοκεραίας μπορεί να υπολογισθεί χρησιμοποιώντας τον κανόνα πολλαπλασιασμού διαγραμμάτων, όπως αυτός περιγράφεται από τις σχέσεις (96).

Η ένταση ακτινοβολίας U_0 ενός δίπολου τροφοδοτούμενου στο κέντρο του και μήκους L (συγκρίσιμου με το μήκος κύματος), μπορεί να προσεγγισθεί αναλυτικά ως ακολούθως

$$U_0(\theta) = \frac{nI_m^2}{8\pi^2} \left(\frac{\cos\left(k\frac{L}{2}\cos\theta\right) - \cos\left(k\frac{L}{2}\right)}{\sin\theta} \right)^2 \quad (112)$$

όπου I_m είναι το μέγιστο ρεύμα που το διαρρέει και η η ηλεκτρική αντίσταση του αέρα.

Επιπρόσθετα, τα φαινόμενα αμοιβαίας επαγωγής μεταξύ των παράλληλα τοποθετημένων γραμμικών ακτινοβολητών μπορούν να προσεγγισθούν αναλυτικά με τη χρήση της μεθόδου της επαγόμενης ηλεκτρεγερτικής δύναμης (IEMF – Induced Electromotive Force [95]) και ειδικότερα των σχέσεων (67) και (68). Παράμετροι των δίπολων που χρησιμοποιούνται στους οικείους υπολογισμούς είναι το μήκος τους L , η διάμετρος τους a αλλά και η μεταξύ τους απόσταση d .

Ο υπολογιζόμενος πίνακας των επαγωγικών αντιστάσεων \mathbf{Z} αποτελείται από αυτεπαγωγικές $Z_{mn|m=n}$ και αμοιβαίες επαγωγικές $Z_{mn|m \neq n}$ αντιστάσεις. Η συσχέτιση μεταξύ των εφαρμοζόμενων τάσεων \mathbf{V}_i (διεγέρσεις) και των ρευμάτων \mathbf{I}_i που διαρρέουν τελικά τους γραμμικούς ακτινοβολητές υπολογίζεται από τη σχέση (39), εφόσον βέβαια η στοιχειοκεραία περιγραφεί ισοδύναμα ως ένα μικροκυματικό πολύθυρο.

4.4.2 Συναρτήσεις καταλληλότητας

Προκειμένου να χρησιμοποιηθούν στοχαστικοί μέθοδοι βελτιστοποίησης, πρέπει πρώτα να καθοριστεί μια κατάλληλη συνάρτηση καταλληλότητας (Fitness Function - FF) που να Ανάπτυξη Κατανεμημένης Πλατφόρμας Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων και Εφαρμογή σε Προβλήματα Σύνθεσης Στοιχειοκεραιών

αποτιμά το κατά πόσον μια δεδομένη λύση ικανοποιεί τις ορισμένες παραμέτρους σχεδίασης. Τα επιθυμητά χαρακτηριστικά του διαγράμματος ακτινοβολίας τα οποία χρησιμοποιούνται για τον ορισμό ενός κατάλληλου κριτηρίου λάθους (απόκλισης) είναι η γωνία στροφής του διαγράμματος, το επίπεδο των πλευρικών λοβών και το άνοιγμα του κεντρικού λοβού. Για το παρόν πρόβλημα σχεδίασης, ορίστηκαν δύο διαφορετικές συναρτήσεις καταλληλότητας βασισμένες σε αυτά τα κριτήρια, οι οποίες λαμβάνουν υπόψη τους τα φαινόμενα επαγωγής μεταξύ των ακτινοβολητών που απαρτίζουν τη στοιχειοκεραία (βελτιστοποιώντας τις εφαρμοζόμενες τάσεις και όχι απευθείας τα ρεύματα διέγερσης).

Για τον υπολογισμό της πρώτης συνάρτησης καταλληλότητας (FF1) χρησιμοποιούνται οι εξής τρεις, περιγραφικοί του επιθυμητού παράγοντα διάταξης της στοιχειοκεραίας, παράμετροι: η γωνία στροφής του κεντρικού λοβού (Main Lobe – ML), το άνοιγμα του (Half Power Lobe – HPW) καθώς και το επίπεδο των πλευρικών λοβών του (Sidelobe Level – SL) [115]. Το διάγραμμα ακτινοβολίας δειγματοληπτείται σε γωνίες εξωτερικές του κεντρικού λοβού. Για κάθε δείγμα που παραβιάζει το επιθυμητό επίπεδο πλευρικών λοβών προστίθεται ανάλογη τιμή στην αθροιστική συνάρτηση ποινών της εξεταζόμενης λύσεως. Κατά ανάλογο τρόπο αθροίζονται επιπρόσθετες ποινές, όταν το διάγραμμα από σύνθεση δεν είναι αρκούντως κατευθυντικό και το άνοιγμα του κυρίως λοβού (στα σημεία ημίσειας ισχύος) ευρίσκεται να είναι διαφορετικό από την οριζόμενη τιμή, ως ακολούθως:

$$p = \left| \frac{AF(\theta, \phi)_{ml} - AF(\theta, \phi)}{AF(\theta, \phi)_{ml}} \right|^2 + \left| \frac{AF(\theta, \phi)_{hpw} - AF(\theta, \phi)}{AF(\theta, \phi)_{hpw}} \right|^2 + \frac{1}{Q} \sum_{k=1}^M \left| \frac{AF(\theta, \phi)_{sl} - AF(\theta, \phi)_k}{AF(\theta, \phi)_{sl}} \right|^2 \quad (113)$$

Στην άνωθεν σχέση ως Q ορίζεται ο αριθμός των λαμβανόμενων δειγμάτων που αντιστοιχούν σε γωνίες εξωτερικές του κεντρικού λοβού και M ο αριθμός των σημείων του διαγράμματος ακτινοβολίας, των οποίων η τιμή υπερβαίνει το επιθυμητό επίπεδο πλευρικών λοβών. Επισημαίνεται ότι οι τιμές του διαγράμματος ακτινοβολίας που χρησιμοποιούνται για τους αντίστοιχους υπολογισμούς, είναι κανονικοποιημένες. Η τελική τιμή της συναρτήσεως καταλληλότητας προκύπτει από κανονικοποίηση της αθροιστικής ποινής p , σύμφωνα με τη σχέση:

$$f_p = \frac{1}{1 + \sqrt{p}} \quad (114)$$

Για τη βελτιστοποίηση του συνολικού διαγράμματος ακτινοβολίας, χρησιμοποιώντας τη δεύτερη συνάρτηση καταλληλότητας (FF2), ορίστηκαν πέντε διαφορετικοί παράμετροι σχεδίασης: η γωνία στροφής του κυρίως λοβού, το ελάχιστο επιθυμητό κέρδος, η καταπίεση των πλευρικών λοβών, το άνοιγμα του κεντρικού λοβού (όπως ορίζεται για τα σημεία ημίσειας ισχύος) και το άνοιγμα του στο επίπεδο των πλευρικών λοβών [87]:

$$\begin{aligned}
f_1 &= \left| \theta_{\max}^{design} - \theta_{\max}^{synth} \right| \\
f_2 &= \max \left\{ G^{synth} - G^{design}, 0 \right\} \\
f_3 &= \max \left\{ ssl^{design} - ssl^{synth}, 0 \right\} \\
f_4 &= \max \left\{ bw_{3dB}^{synth} - hpw_{3dB}^{design}, 0 \right\} \\
f_5 &= \max \left\{ bw_{ssl}^{synth} - hpw_{ssl}^{design}, 0 \right\}
\end{aligned} \tag{115}$$

Στις άνωθεν σχέσεις το f_1 είναι η απόκλιση της γωνίας του κεντρικού λοβού από την επιθυμητή γωνία οδήγησης, το f_2 η διαφορά του ελάχιστου κέρδους σχεδίασης από το κέρδος του διαγράμματος ακτινοβολίας από σύνθεση, το f_3 η διαφορά του επιθυμητού SSL από το αντίστοιχο κριτήριο σχεδίασης, το f_4 η διαφορά του συντεθειμένου εύρους δέσμης από αυτό που απαιτήθηκε και τελικά το f_5 η διαφορά του ανοίγματος της κεραίας στο επίπεδο SSL από το διευκρινισμένο κατώτατο όριο. Επισημαίνεται ότι οι αποκλίσεις κέρδους καθώς και τα επίπεδα καταπίεσης των πλευρικών λοβών εκφράζονται σε dB, ενώ οι αποκλίσεις από την επιθυμητή κατεύθυνση του κεντρικού λοβού καθώς και των οριζόμενων ανοιγμάτων του είναι εκφρασμένα σε μοίρες.

Οι όροι ποινής ομαδοποιούνται ως ακολούθως: η πρώτη ομάδα περιλαμβάνει όλα τα σχετικά με την στροφή των λοβών και τη διαμόρφωση του διαγράμματος κριτήρια ενώ η δεύτερη ομάδα ελέγχει το κέρδος της στοιχειοκεραίας και το επίπεδο των πλευρικών λοβών. Οι δύο ομάδες ποινών ζυγίζονται δυαδικά χρησιμοποιώντας έναν κατάλληλα ορισμένο συντελεστή β , ως ακολούθως:

$$p = \beta(f_1 + f_4 + f_5) + (1 - \beta)(f_2 + f_3) \tag{116}$$

Η παράμετρος β διαδραματίζει πολύ μεγάλο ρόλο στη συμπεριφορά σύγκλισης του αλγόριθμου βελτιστοποίησης, καθότι καθορίζει τη σχετική σημασία των επιμέρους ποινών. Έχει ευρεθεί ότι μικρές τιμές παραμέτρου (π.χ. 0,1) έχουν ως αποτέλεσμα τη ταχύτερη σύγκλιση του αλγόριθμου, εφόσον έτσι δίνεται προτεραιότητα στην επίτευξη των επιθυμητών κερδών και των προδιαγραφών καταπίεσης των πλευρικών λοβών. Η τελική τιμή της συναρτήσεως καταλληλότητας προκύπτει από κανονικοποίηση της αθροιστικής ποινής p σύμφωνα με τη σχέση (114), δηλαδή παρομοίως με την συνάρτηση καταλληλότητας FF1.

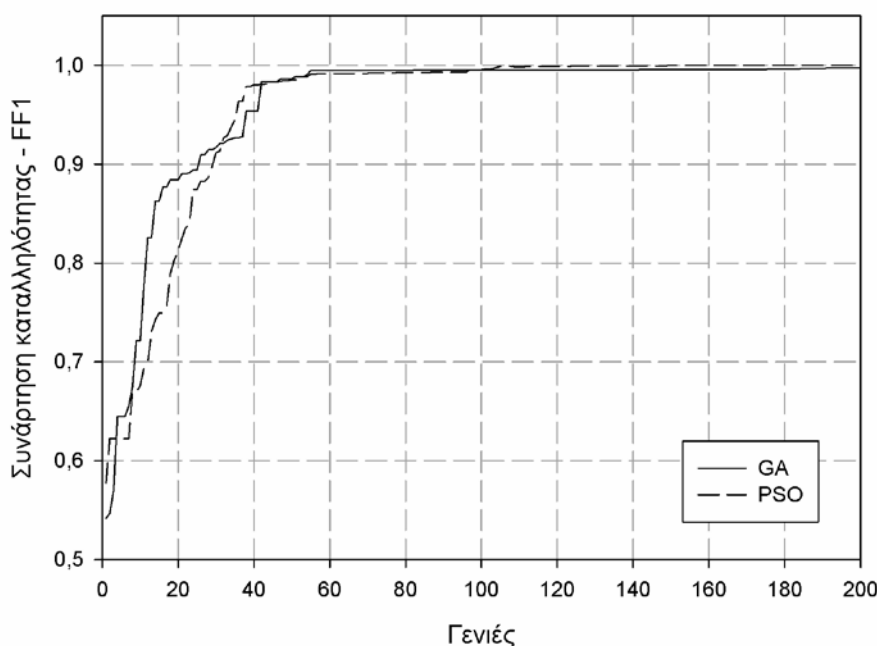
4.4.3 Αποτελέσματα

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από την χρήση των δύο συναρτήσεων καταλληλότητας (FF1 & FF2) για τη βελτιστοποίηση μιας στοιχειοκεραίας επίπεδης γεωμετρίας, αποτελούμενης από τέσσερα δίπολα ημκύματος. Απαιτήθηκε ο προσδιορισμός των χωρικών και των παραμέτρων τροφοδοσίας της να έχουν ως αποτέλεσμα την ακτινοβολήση οριζόντιου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου με μέγιστο πλάτος στην κατεύθυνση των 0° . Επίσης ορίστηκε ότι το άνοιγμα του κυρίως λοβού δεν πρέπει να ξεπερνάει τις 60° καθώς και η τιμή καταπίεσης των πλευρικών λοβών να είναι ίση ή καλύτερη από την τιμή 6db. Επιπρόσθετα κριτήρια που τέθηκαν κατά την εφαρμογή της

συναρτήσεως καταλληλότητας FF2 ήταν ελάχιστο κέρδος 8dB και μέγιστο άνοιγμα του κυρίως λοβού στο επίπεδο καταπίεσης των πλευρικών λοβών, ίσο με 90°. Σε αυτή τη περίπτωση, ο συντελεστής συμπληρωματικής στάθμησης β , μεταξύ των δύο ομάδων κριτηρίων της συνάρτησης FF2, τέθηκε ίσος με 0,1.

Ακολουθεί η αναλυτική σύγκριση μεταξύ της απόδοσης του αλγορίθμου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων και του γενετικού αλγορίθμου που χρησιμοποιήθηκαν για το παρόν πρόβλημα. Για αυτό το σκοπό ορίστηκε ίσος πληθυσμός αποτελούμενος από 64 μέλη και για τους δύο αλγόριθμους, ο οποίος εξελίχθηκε για ένα μέγιστο αριθμό επαναλήψεων ίσο με 200 γενιές. Για τη βελτιστοποίηση με τον αλγόριθμο σμήνους σωματιδίων ορίστηκε ότι η τιμή του ζυγισμένου όρου αδρανείας περιορίζεται προοδευτικά, με την εξέλιξη το γενιών, από τη αρχική τιμή 0,9 στην τελική 0,4 [39]. Η μέγιστη μεταβολή του διανύσματος ταχύτητας u_{max} ανά συνιστώσα του ορίστηκε να είναι ίση με 0,1. Κατά την εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της ρουλέτας για την διαδικασία της επιλογής μεταξύ των μελών του πληθυσμού. Επίσης ορίστηκε πιθανότητα διασταύρωσης (ενός σημείου) p_c ίση με 0.95 και πιθανότητα ομοιόμορφης μετάλλαξης p_m ίση με 0.05.

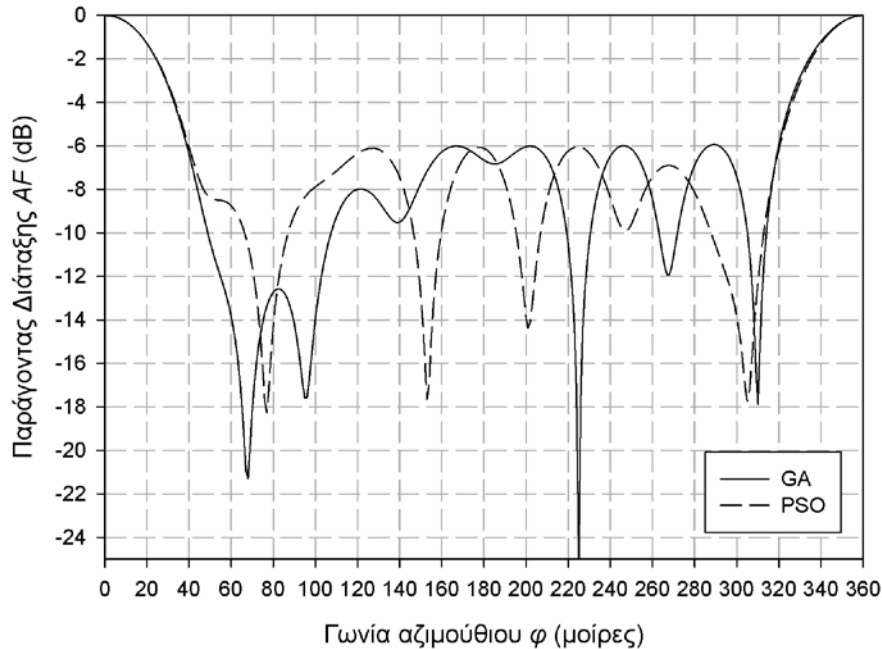
Στην Εικόνα 51 απεικονίζεται η συμπεριφορά σύγκλισης των δύο στοχαστικών αλγορίθμων (GA και PSO) κατά τη βελτιστοποίηση του παράγοντα διάταξης AF της στοιχειοκεραίας βάσει των κριτηρίων που ήδη έχουν περιγραφεί και της συνάρτησης καταλληλότητας FF1.



Εικόνα 51. Σύγκλιση των μεθόδων PSO και GA για τη συνάρτηση καταλληλότητας FF1.

Παρατηρείται ότι οι δύο αλγόριθμοι παρουσιάζουν συγκρίσιμα χαρακτηριστικά σύγκλισης. Η διαδικασία βελτιστοποίησης με τον γενετικό αλγόριθμο αρχικά εμφανίζεται να συγκλίνει ελαφρώς πιο γρήγορα σε μια βέλτιστη λύση, συγκρινόμενη με τη μέθοδο βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων, εικόνα όμως που ανατρέπεται στη συνέχεια κατά την περαιτέρω εξέλιξη των γενεών. Ειδικότερα η εφαρμογή του αλγορίθμου PSO καταλήγει στην εύρεση βέλτιστης λύσεως (δηλ. μοναδιαίας καταλληλότητας – στη γενιά 161), ενώ ο γενετικός Ανάπτυξη Καταναμημένης Πλατφόρμας Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων και Εφαρμογή σε Προβλήματα Σύνθεσης Στοιχειοκεραιών

αλγόριθμος συγκλίνει σε λύση που αποτιμάται με τιμή πολύ κοντά στη μονάδα ($FF1 = 0,9972$). Συνακόλουθα, οι λαμβανόμενοι παράγοντες διάταξης AF επιβεβαιώνουν ότι οι αντίστοιχοι κύριοι λοβοί ακτινοβολίας έχουν στραφεί στην επιθυμητή γωνία ($\varphi_{max}=0^\circ$) και ότι παρουσιάζουν παρόμοια χαρακτηριστικά ως προς το άνοιγμά τους καθώς και ως προς την επιτυγχανόμενη καταπίεση των πλευρικών λοβών (Εικόνα 52).



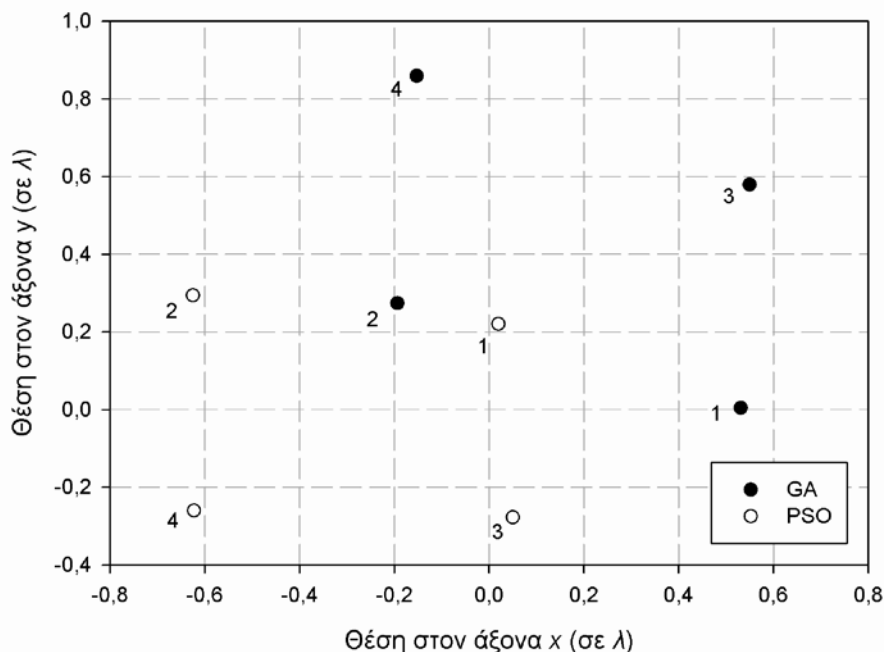
Εικόνα 52. Κανονικοποιημένοι παράγοντες διάταξης για τη συνάρτηση καταλληλότητας $FF1$.

Η ελαφρώς μικρότερη τιμή καταλληλότητας της ληφθείσας λύσεως μετά από τη χρήση του GA , οφείλεται στην επιτυγχανόμενη καταπίεση των πλευρικών λοβών SSL , η οποία αποκλίνει από την τιμή στόχου των 6 dB (Πίνακας 12).

Παράγοντας Διάταξης ($FF1$)	Φ_{max}	Φ_-	Φ_+	$\Delta\Phi_{3dB}$	SSL	Καταλληλότητα
GA	0°	30°	30°	60°	5.94 dB	0,9972
PSO	0°	31°	29°	60°	6.05 dB	1,0

Πίνακας 12. Κατευθυντικότητα των διαγραμμάτων για τις υπολογισμένες τροφοδοσίες.

Η χωρική διαμόρφωση των βελτιστοποιημένων στοιχειοκεραιών παρουσιάζεται επίσης παρόμοια, προσεγγίζοντας αυτήν ενός παραλληλόγραμμου. Οι συντεταγμένες των ακτινοβολητών που τις απαρτίζουν κωδικοποιήθηκαν σε πολικές συντεταγμένες στα περιγραφικά διανύσματα λύσης (ζεύγη ακτίνας σε ηλεκτρικά μήκη και αζιμουθίου σε ακτίνια), με τον επιπρόσθετο περιορισμό ότι η ακτίνα του διανύσματος θέσης δεν υπερέβαινε το μήκος ενός κύματος. Η τελική θέση των ακτινοβολητών παρουσιάζεται έτσι ακριβώς όπως αποκωδικοποιήθηκε από τα διανύσματα λύσεων (Εικόνα 53).



Εικόνα 53. Γεωμετρία λαμβανόμενων στοιχειοκεραίων για τη συνάρτηση καταλληλότητας FF1.

Επίσης, για τη κωδικοποίηση των διανυσμάτων λύσεων είχε ορισθεί ότι οι εφαρμοζόμενες διεγέρσεις στους ακροδέκτες των ακτινοβολητών δεν μπορούν να υπερβαίνουν την τιμή τάσεως 1V. Οι τελικοί παράμετροι τροφοδοσίας και χωρικής διαμόρφωσης των ακτινοβολητών που απαρτίζουν τις βελτιστοποιημένες στοιχειοκεραίες, συνοψίζονται στους ακόλουθους πίνακες (13 και 14):

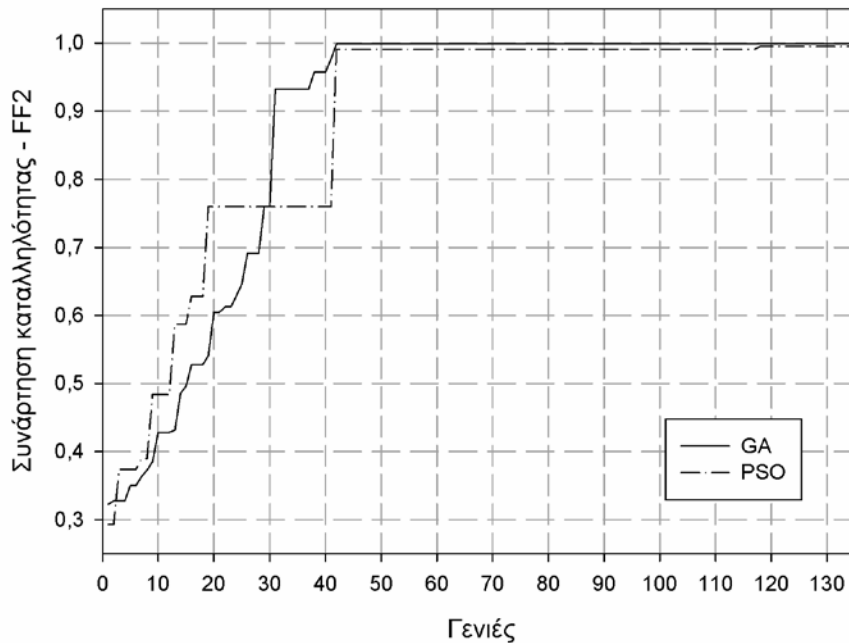
	1	2	3	4
x_i	0,531λ	-0,193λ	0,549λ	-0,153λ
y_i	0,005λ	0,274λ	0,58λ	0,859λ
$ V_i $	0,777 V	0,047 V	1,0 V	0,111 V
$\arg\{V_i\}$	234,71°	189,74°	212,03°	68,02°

Πίνακας 13. Γεωμετρία και παράμετροι τροφοδοσίας στοιχειοκεραίας (GA, FF1)

	1	2	3	4
x_i	0,02λ	-0,623λ	0,05λ	-0,625λ
y_i	0,221λ	-0,259λ	-0,277λ	0,295λ
$ V_i $	0,609 V	0,49 V	1,0 V	0,177 V
$\arg\{V_i\}$	88,1°	10,31°	93,09°	9,86°

Πίνακας 14. Γεωμετρία και παράμετροι τροφοδοσίας στοιχειοκεραίας (PSO, FF1)

Στην Εικόνα 54 απεικονίζεται η συμπεριφορά σύγκλισης των δύο στοχαστικών αλγορίθμων κατά τη βελτιστοποίηση του διαγράμματος ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας, βάσει των κριτηρίων που ήδη έχουν περιγραφεί και με επιπρόσθετες απαιτήσεις την επίτευξη κέρδους τουλάχιστον 8dB και μέγιστου ανοίγματος κυρίως λοβού, στο επίπεδο καταπίεσης των πλευρικών λοβών, να μην υπερβαίνει τις 90° (συνάρτηση καταλληλότητας FF2).



Εικόνα 54. Σύγκλιση των μεθόδων PSO και GA για τη συνάρτηση καταλληλότητας FF2.

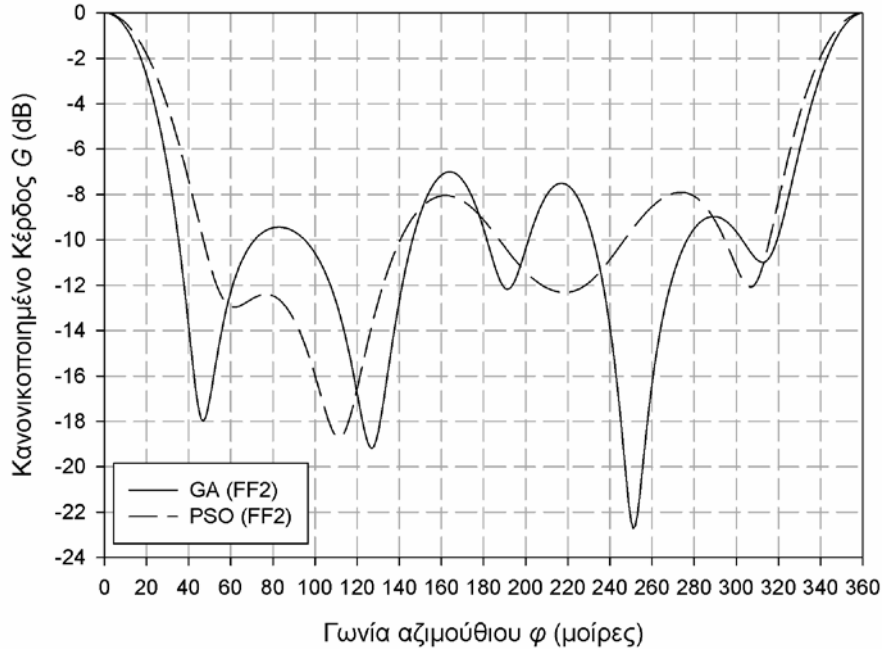
Παρατηρείται ότι οι δύο αλγόριθμοι παρουσιάζουν συγκρίσιμα χαρακτηριστικά σύγκλισης, αλλά οι λαμβανόμενες λύσεις διαφέρουν σημαντικά ως προς τη γεωμετρική τοποθέτηση των επιμέρους ακτινοβολητών. Αυτή η διαφοροποίηση μπορεί να αποδοθεί στους λιγότερο περιοριστικούς όρους που έχουν τεθεί σε σχέση με το προηγούμενο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Παραδείγματος χάριν, για την προκείμενη μελέτη απαιτείται καταπίεση πλευρικών λοβών ίση με 6 dB αλλά αναφορικά πλέον με το ολικό διάγραμμα ακτινοβολίας. Η ισοδύναμη συνθήκη εκφρασμένη σε σχέση με τον παράγοντα διάταξης AF είναι 3dB, λόγω της μορφής των σχέσεων (96), συνεπώς στην πράξη είναι και λιγότερο περιοριστική. Επομένως, τα λαμβανόμενα αποτελέσματα δεν είναι άμεσα συγκρίσιμα με τα αποτελέσματα που λήφθηκαν προηγουμένως.

Η σημαντική διαφοροποίηση των λαμβανόμενων λύσεων αντανακλάται αντίστοιχα και στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των τελικών διαγραμμάτων ακτινοβολίας (Πίνακας 15).

Διάγραμμα (FF2)	Φ_{max}	G	SSL	$\Delta\Phi_{3dB}$	$\Delta\Phi_{SSL}$	Καταλληλότητα
GA	0°	9.32 dB	7 dB	42°	51°	0,9989
PSO	0°	9.0 dB	7.91 dB	64°	81°	0,9949

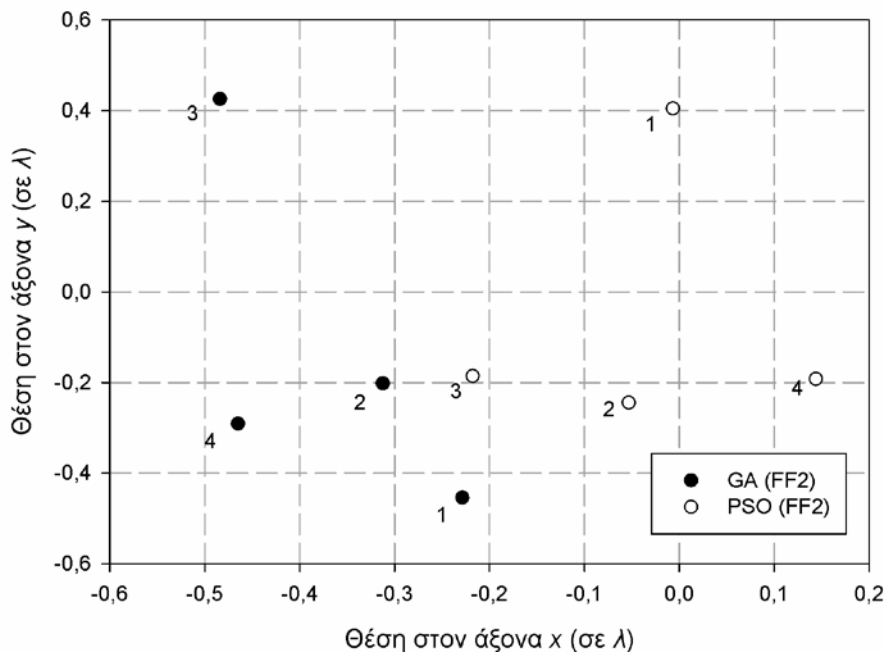
Πίνακας 15. Κατευθυντικότητα των διαγραμμάτων για τις υπολογισμένες τροφοδοσίες.

Ενώ λοιπόν τα λαμβανόμενα διαγράμματα ακτινοβολίας των στοιχειοκεραιών είναι στραμμένα στην επιθυμητή κατεύθυνση ($\varphi_{\max}=0^\circ$), τα χαρακτηριστικά τους ως προς το άνοιγμά τους καθώς και την καταπίεση των πλευρικών λοβών διαφοροποιούνται, λόγω και των διαφορετικών επιτυγχανόμενων τιμών κέρδους (Εικόνα 55).



Εικόνα 55. Διαγράμματα ακτινοβολίας για τη συνάρτηση καταλληλότητας FF2.

Η χωρική διαμόρφωση των βελτιστοποιημένων στοιχειοκεραιών, η οποία διαφοροποιείται σημαντικά, παρουσιάζεται στην Εικόνα 56.



Εικόνα 56. Γεωμετρία στοιχειοκεραιών για τη συνάρτηση καταλληλότητας FF2.

Όπως και προηγουμένως, είχε ορισθεί ότι οι εφαρμοζόμενες διεγέρσεις στους ακροδέκτες των ακτινοβολητών δεν μπορούν να υπερβαίνουν την τιμή τάσεως 1V. Οι τελικοί παράμετροι τροφοδοσίας και χωρικής διαμόρφωσης των βελτιστοποιημένων στοιχειοκεραιών, συνοψίζονται στους ακόλουθους πίνακες:

	1	2	3	4
x_i	-0,229λ	-0,312λ	-0,484λ	-0,465λ
y_i	-0,454λ	-0,202λ	0,426λ	-0,291λ
$ V_i $	1,0 V	0,78 V	0,82 V	0,46 V
$\arg\{V_i\}$	74,26°	114,02°	184°	249,31°

Πίνακας 16. Γεωμετρία και παράμετροι τροφοδοσίας στοιχειοκεραίας (GA, FF2)

	1	2	3	4
x_i	-0,007λ	-0,053λ	-0,218λ	0,144λ
y_i	0,405λ	-0,244λ	-0,186λ	-0,192λ
$ V_i $	0,61 V	0,64 V	0,21 V	1,0 V
$\arg\{V_i\}$	105,81°	124,51°	190,06°	58,5°

Πίνακας 17. Γεωμετρία και παράμετροι τροφοδοσίας στοιχειοκεραίας (PSO, FF2)

4.4.4 Συμπεράσματα

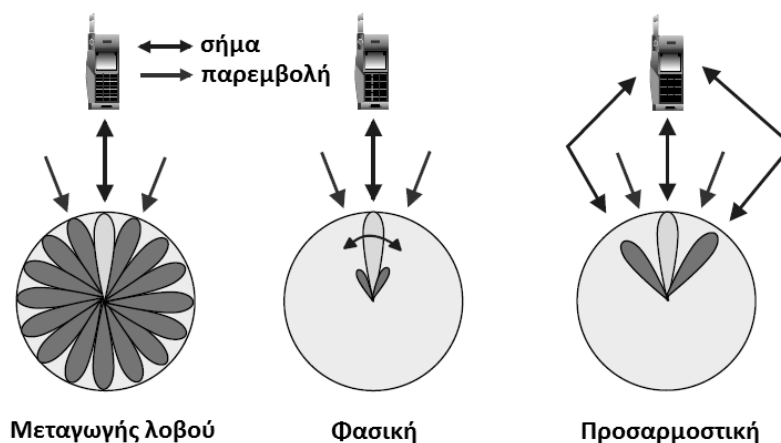
Η παρούσα ενότητα παρουσίασε συνοπτικά εναλλακτικές μεθόδους βελτιστοποίησης, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε προβλήματα σύνθεσης στοιχειοκεραιών δίπολων επίπεδης γεωμετρίας. Τα κυριότερα συμπεράσματα που εξάγονται από τη χρήση των δύο περιγραφόμενων αντικειμενικών συναρτήσεων για το πρόβλημα της σύνθεσης, είναι:

- Η συνάρτηση FF1 επιτρέπει την πιο «ομαλή» προσέγγιση βέλτιστων σχεδιάσεων συγκρινόμενη με τη συνάρτηση FF2, καθότι ο ορισμός της βασίζεται στον υπολογισμό απόλυτων διαφορών από τα επιθυμητά χαρακτηριστικά του διαγράμματος ακτινοβολίας, σε αντιδιαστολή με τον ορισμό επιπρόσθετων συναρτήσεων κατωφλίου στη δεύτερη περίπτωση.
- Η ταυτόχρονη βελτιστοποίηση της θέσης των ακτινοβολητών και των παραμέτρων τροφοδότησης τους έχει ως συνέπεια την εύρεση σημαντικά διαφοροποιημένων γεωμετριών, ειδικότερα κατά τη χρήση της συναρτήσεως FF2. Όπως θα δειχθεί σε ακόλουθη ενότητα, η ταυτόχρονη βελτιστοποίηση πολλαπλών διαγραμμάτων ακτινοβολίας, περιορίζει το άνωθεν περιγραφόμενο φαινόμενο.
- Η συνάρτηση καταλληλότητας FF2 είναι καταλληλότερη για τη βελτιστοποίηση στοιχειοκεραιών αποτελούμενων από ακτινοβολητές που δεν είναι γραμμικά πολωμένοι, καθότι υπολογίζεται βάσει του ολικού διαγράμματος ακτινοβολίας.

- Η υλοποίηση των βελτιστοποιημένων τροφοδοσιών με τη χρήση κατάλληλου δικτύματος τροφοδοσίας είναι πολύπλοκη και δαπανηρή.
- Σε κάθε περίπτωση και οι δύο αλγόριθμοι αποδείχτηκαν ικανοί να βρουν λύσεις κοντά στις βέλτιστες, όπως αυτές αποτιμούνται βάσει των επιτυγχανόμενων χαρακτηριστικών ακτινοβολίας των βελτιστοποιημένων στοιχειοκεραίων.

4.5 Σύνθεση Επίπεδης Στοιχειοκεραίας Μεταγωγής Λοβών

Οι στοιχειοκεραίες μεταγωγής λοβού (Switched-Beam Arrays) είναι συνήθως κατευθυντικές κεραίες οι οποίες χρησιμοποιούνται στους σταθμούς βάσης κινητών επικοινωνιών και επεκτείνουν την ιδέα του διαχωρισμού σε τομείς κάλυψης των κυψελωτών δικτύων, καθότι κάθε τομέας δύναται να διαχωρισθεί περαιτέρω σε μικρότερους τομείς. Η κύρια λειτουργία που υλοποιούν είναι η δυνατότητα *διαμεταγωγής μεταξύ στοιχείων ή ενεργών λοβών ακτινοβολίας* προκειμένου να βελτιώνεται η ισχύς λήψης, καθώς ο χρήστης μετακινείται μέσα σε μια κυψέλη [116]. Για αυτό τον σκοπό, οι έξοδοι των στοιχείων της στοιχειοκεραίας δειγματοληπτούνται περιοδικά για να προσδιορισθεί σε ποια αντιστοιχεί η βέλτιστη δέσμη λήψης (Εικόνα 57).



Εικόνα 57. Στοιχειοκεραίες που ενσωματώνουν διαφορετικά επίπεδα ευφυΐας

Αυτού του είδους των κεραιοσυστημάτων είναι πιο εύκολο να υλοποιηθούν για την κάλυψη δικτύων με υφιστάμενη σταθερή δομή και συνήθως προσφέρουν υψηλότερο κέρδος συγκρινόμενα με άλλες ευφυΐες [117]. Σύμφωνα μάλιστα με μελέτες, η χρήση στοιχειοκεραίων μεταγωγής λοβών μπορούν να αυξήσουν την έκταση ραδιοκάλυψης ενός σταθμού βάσης σημαντικά, σε σχέση με τη συμβατική υποδιαίρεση σε κυψέλες [118]. Το κυριότερο μειονέκτημα των κεραιών μεταγωγής λοβών είναι ότι αν υπάρχει ένας δεύτερος χρήστης που παρεμβάλλει από θέση παραπλήσια της κατεύθυνσης του ενεργού λοβού, μπορεί η παρεμβολή να υπερिσχύσει του σήματος του επιθυμητού χρήστη. Αυτός είναι και ο λόγος που λειτουργούν καλύτερα σε συνθήκες που χαρακτηρίζονται από χαμηλά επίπεδα παρεμβολής. Η μειωμένη πολυπλοκότητα και το συγκριτικά μικρό κόστος υλοποίησής τους, έχουν καθιστήσει τα κεραιοσυστήματα στρεφόμενων λοβών ιδιαίτερα δημοφιλή.

Η παρούσα ενότητα παρουσιάζει μια μέθοδο για το βέλτιστο σχεδιασμό επίπεδων στοιχειοκεραίων μεταγωγής λοβού (switched-beam antennas), η οποία βασίζεται στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (PSO). Οι προαναφερόμενες στοιχειοκεραίες δύνανται να θεωρηθούν ως ένα υποσύνολο των έξυπνων κεραιών οι οποίες χρησιμοποιούνται για την αύξηση της χωρητικότητας ενός κυψελοειδούς συστήματος. Το πρόβλημα σύνθεσης που εξετάζεται είναι η εύρεση της χωρικής διαμόρφωσης και των ρευμάτων τροφοδοσίας των στοιχείων μιας στοιχειοκεραίας, έτσι ώστε να ικανοποιούνται μια σειρά από επιβαλλόμενους σχεδιαστικούς περιορισμούς στα πολλαπλά διαγράμματα ακτινοβολίας. Η προτεινόμενη μεθοδολογία είναι αρκούντως ευέλικτη προκειμένου να επιτρέπει την ενσωμάτωση επιπρόσθετων παραγόντων, όπως ο συνυπολογισμός των αμοιβαίων και ιδίων επαγωγικών αντιστάσεων είτε η εφαρμογή επιπλέον περιορισμών σχετιζόμενων με το δίκτυο τροφοδοσίας της στοιχειοκεραίας.

4.5.1 Σύνοψη του προβλήματος σύνθεσης

Το παρόν σχεδιαστικό πρόβλημα επεκτείνει τη μέθοδο σύνθεσης στοιχειοκεραίων επίπεδης γεωμετρικής διάταξης που παρουσιάστηκε σε προηγούμενη ενότητα, επιτρέποντας την ταυτόχρονη βελτιστοποίηση πολλαπλών διαγραμμάτων ακτινοβολίας. Προϋπόθεση για την επιτυχή εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου είναι τα οριζόμενα διαγράμματα ακτινοβολίας να είναι στραμμένα σε διαφορετικές κατευθύνσεις και να παρουσιάζουν μικρό βαθμό αλληλοεπικάλυψης. Αυτή η προϋπόθεση ικανοποιείται αυτόματα στην περίπτωση που ως αντικείμενο βελτιστοποίησης τελούν κεραιές μεταγωγής λοβού, καθότι σε αυτή τη περίπτωση ο αντικειμενικός στόχος της σχεδίασης είναι η επίτευξη επαρκούς οριζόντιας χωρικής κάλυψης σε τομείς ή σε σειρά τομέων (Εικόνα 57).

Αν θεωρηθεί ότι τα επιθυμητά διαγράμματα είναι N και ο αριθμός των ακτινοβολητών που αποτελούν τη στοιχειοκεραία είναι K , τότε πρέπει η διαδικασία της σύνθεσης να έχει ως αποτέλεσμα τον καθορισμό $2K(N+1)$ ανεξάρτητων παραμέτρων. Αναλυτικότερα, θα πρέπει να εκτιμηθούν επιτυχώς οι συντεταγμένες θέσης του κάθε ακτινοβολητή στο $x-y$ επίπεδο (2 βαθμοί ελευθερίας) καθώς και το πλάτος και η φάση τροφοδοσίας των επιμέρους ακτινοβολητών για καθένα από τα N επιθυμητά διαγράμματα ($2N$ βαθμοί ελευθερίας).

Η περιγραφή της διάταξης της υπό βελτιστοποίηση στοιχειοκεραίας βασίζεται καταρχήν στην θέωση μιας τρισδιάστατης δομής (Εικόνα 37) αλλά με τις εξειδικεύσεις που προβλέπει η σχέση (111) για τον υπολογισμό του παράγοντα διάταξης. Προκειμένου να είναι δυνατός ο υπολογισμός των διαγραμμάτων ακτινοβολίας με αναλυτικές μεθόδους, θεωρείται επιπρόσθετα ότι η στοιχειοκεραία αποτελείται από δίπολα ημικύματος καθέτως τοποθετημένα ως προς το οριζόντιο επίπεδο (παράλληλα στον άξονα z), χωρίς βλάβη στη γενικότητα της μεθόδου. Συνακόλουθα η ένταση της ακτινοβολίας του κάθε ακτινοβολητή δύνανται να προσεγγισθεί από τη σχέση (112) ενώ το διάγραμμα ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας από τις σχέσεις (96). Τέλος τα φαινόμενα αμοιβαίας επαγωγής μεταξύ των παράλληλα τοποθετημένων γραμμικών ακτινοβολητών προσεγγίζονται αναλυτικά με τη βοήθεια της μεθόδου της επαγόμενης ηλεκτρεγερτικής δύναμης (IEMF – Induced Electromotive Force [95]) και ειδικότερα των σχέσεων (67) και (68).

4.5.2 Συναρτήσεις καταλληλότητας

Για την περιγραφή των επιθυμητών χαρακτηριστικών των πολλαπλών διαγραμμάτων της στοιχειοκεραίας μεταγωγής λοβών, είναι απαραίτητο να οριστούν κατάλληλες συναρτήσεις καταλληλότητας. Όπως και στην περίπτωση της σύνθεσης στοιχειοκεραίας επίπεδης γεωμετρίας, τα χαρακτηριστικά αυτά προσδιορίζονται βάσει της γωνίας στροφής των κυρίως λοβών ακτινοβολίας, του ανοίγματος τους, της καταπίεσης των πλευρικών λοβών, τα οποία δύναται υπό προϋποθέσεις να συμπληρωθούν από επιπρόσθετα χαρακτηριστικά όπως το κέρδος της στοιχειοκεραίας. Βάσει αυτών των κριτηρίων ορίζονται δύο κατάλληλες μετρικές συναρτήσεις για την αποτίμηση της συνολικής απόκλισης από τις τιμές-στόχους. Τέλος οι υπολογιζόμενες αθροιστικές τιμές απόκλισης κανονικοποιούνται στο διάστημα $[0,1]$ προκειμένου να αποτελέσουν και μέτρο της καταλληλότητας της κάθε λύσης.

Αναλυτικότερα, η 1η συνάρτηση καταλληλότητας (FF1) επεκτείνει τον ορισμό που είχε δοθεί σε προηγούμενη ενότητα, έτσι ώστε να καθίσταται δυνατή η ταυτόχρονη βελτιστοποίηση πολλαπλών διαγραμμάτων. Οι τιμές ποινής υπολογίζονται για το καθένα από τα N επιθυμητά διαγράμματα ακτινοβολίας και για το κάθε οριζόμενο χαρακτηριστικό, σύμφωνα με τις σχέσεις (113) που έχουν ήδη περιγραφεί. Ειδικότερα για την αποτίμηση της καταλληλότητας κάθε βελτιστοποιημένου παράγοντα διάταξης συνυπολογίζονται οι ακόλουθοι παράμετροι:

- η γωνία στροφής του κεντρικού λοβού,
- το άνοιγμα του κεντρικού λοβού και
- το επίπεδο των πλευρικών λοβών.

Στη συνέχεια υπολογίζεται η μέση τιμή των αποκλίσεων ανά διάγραμμα (δείκτης n), σύμφωνα με τη σχέση:

$$m_p = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N p_n \quad (117)$$

Τέλος, κανονικοποιείται η υπολογιζόμενη μέση τιμή των αποκλίσεων, σύμφωνα με τη σχέση:

$$f = \frac{1}{1 + \sqrt{m_p}} \quad (118)$$

Η 2η συνάρτηση καταλληλότητας (FF2) επίσης επεκτείνει τον ορισμό που είχε δοθεί σε προηγούμενη ενότητα. Οι τιμές ποινής υπολογίζονται για το καθένα από τα n επιθυμητά διαγράμματα ακτινοβολίας και για το κάθε υπό εξέταση χαρακτηριστικό, σύμφωνα με τις σχέσεις (115). Ειδικότερα για την αποτίμηση της καταλληλότητας κάθε βελτιστοποιημένου διαγράμματος ακτινοβολίας συνυπολογίζονται οι ακόλουθοι παράμετροι:

- η γωνία στροφής του κεντρικού λοβού (ϑ_{\max}),
- το κέρδος της στοιχειοκεραίας (G),

- το άνοιγμα του κεντρικού λοβού (BW_{3dB}),
- το άνοιγμα του στο επίπεδο των πλευρικών λοβών (BW_{SSL}) και
- η καταπίεση των πλευρικών λοβών (SSL).

Οι παρατηρούμενες αποκλίσεις από τις τιμές-στόχους ομαδοποιούνται σε δύο ομάδες, σύμφωνα με τη σχέση (116). Στη συνέχεια, τα επιμέρους αθροίσματα ζυγίζονται δυαδικά, χρησιμοποιώντας κατάλληλα ορισμένο συντελεστή β , και αθροίζονται προκειμένου να υπολογισθεί η συνολική απόκλιση p ανά διάγραμμα. Κατάλληλος ορισμός της παραμέτρου β επιτρέπει την ταχεία σύγκλιση, δίνοντας προτεραιότητα στην επίτευξη των επιθυμητών κερδών και των προδιαγραφών καταπίεσης των πλευρικών λοβών. Στη συνέχεια υπολογίζεται η μέση τιμή των αποκλίσεων ανά διάγραμμα m_{p0} , όπως προηγουμένως, και σύμφωνα με τη σχέση (117).

Επιπρόσθετα, υπολογίζεται η τυπική απόκλιση σ_{gain} των επιτυγχανόμενων κερδών των επιμέρους βελτιστοποιημένων διαγραμμάτων ακτινοβολίας, σύμφωνα με τη σχέση

$$\sigma_{gain} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (G_n - \mu_{gain})^2} \quad (119)$$

$$\mu_{gain} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N G_n$$

όπου σ_{gain} αναπαριστά την μεταβλητότητα στις τιμές κέρδους τους G_n . Ο παραπάνω υπολογισμός εξασφαλίζει ότι οι τιμές κέρδους των επιμέρους διαγραμμάτων ακτινοβολίας θα είναι συγκρίσιμες. Συνακόλουθα, η διαφορά της υπολογιζόμενης τυπικής απόκλισης των κερδών από την επιθυμητή προστίθεται στη μέση τιμή των αποκλίσεων ανά διάγραμμα m_{p0} , εφόσον βεβαίως η υπολογιζόμενη τιμή υπερβαίνει την επιθυμητή.

$$m_p = m_{p0} + \max \{ \sigma_{gain}^{synth} - \sigma_{gain}^{design}, 0 \} \quad (120)$$

Τέλος, η υπολογιζόμενη αθροιστική τιμή m_p κανονικοποιείται, σύμφωνα με τη σχέση (118), προκειμένου να αποτιμηθεί η τιμή καταλληλότητας f της εξεταζόμενης σχεδίασης.

Και στις δύο περιπτώσεις είναι απαραίτητο να σημειωθεί ότι οι προαπαιτούμενοι υπολογισμοί των χαρακτηριστικών ακτινοβολίας βασίζονται στη βελτιστοποίηση των εφαρμοζόμενων τάσεων στους ακροδέκτες των δίπολων, λαμβάνοντας υπόψη τα μεταξύ τους φαινόμενα επαγωγής.

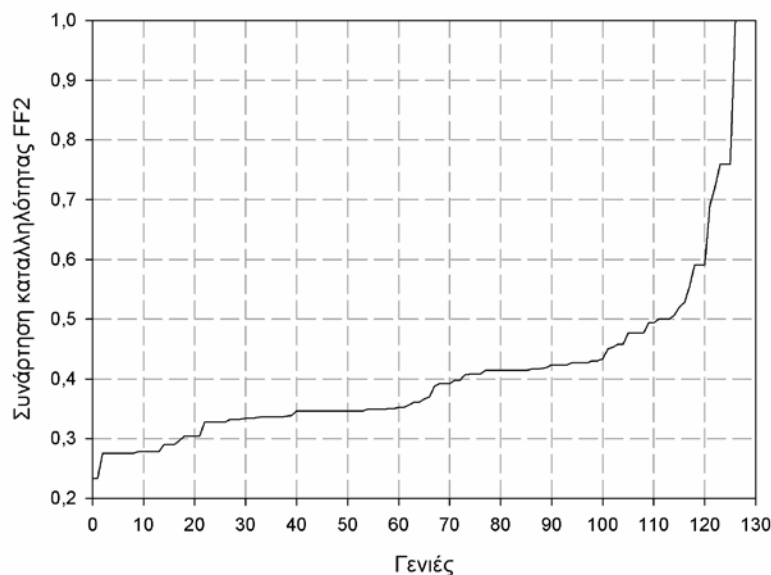
4.5.3 Αποτελέσματα

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την χρήση των δύο άνωθεν περιγραφόμενων συναρτήσεων καταλληλότητας για τη βελτιστοποίηση δύο διαφορετικών δομών στοιχειοκεραίων στρεφόμενων λοβών. Στην πρώτη περίπτωση βελτιστοποιήθηκε μια στοιχειοκεραία αποτελούμενη από τέσσερα δίπολα ημικύματος, χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση καταλληλότητας FF2, προκειμένου να καθίσταται δυνατή η ακτινοβολία οριζόντιου ΗΜ πεδίου σε δύο διαφορετικές κύριες κατευθύνσεις (0° και 90° αντίστοιχα). Στο δεύτερο υπό εξέταση πρόβλημα βελτιστοποιήθηκε μια στοιχειοκεραία Ανάπτυξη Καταμεμημένης Πλατφόρμας Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων και Εφαρμογή σε Προβλήματα Σύνθεσης Στοιχειοκεραίων

αποτελούμενη από πέντε δίπολα $\lambda/2$, χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση καταλληλότητας FF1, προκειμένου να είναι δυνατός ο σχηματισμός τεσσάρων διαφορετικών κυρίως λοβών ακτινοβολίας (στις κατευθύνσεις των 0° , 90° , 180° και 270° αντίστοιχα).

Για το πρώτο εξεταζόμενο πρόβλημα απαιτήθηκε η διαδικασία σύνθεσης της στοιχειοκεραίας να έχει ως αποτέλεσμα την εύρεση κατάλληλων τιμών για τις παραμέτρους θέσης και τροφοδοσίας των στοιχείων της, έτσι ώστε τα βελτιστοποιημένα διαγράμματα να συμμορφώνονται με χαρακτηριστικά-στόχους όπως μέγιστο άνοιγμα του κεντρικού λοβού 80° μοίρες (BW_{3dB}) και ελάχιστη τιμή καταπίεσης των πλευρικών λοβών (SSL) ίση με 6dB. Επιπρόσθετοι περιορισμοί που επιβλήθηκαν ήταν η επίτευξη ελάχιστου κέρδους ίσο με 6dB, μέγιστης απόκλιση των τιμών κέρδους των στραμμένων λοβών ίση με 1dB και μέγιστο άνοιγμα του κεντρικού λοβού στο επίπεδο καταπίεσης των πλευρικών λοβών ίσο με 120° μοίρες. Σε αυτή τη περίπτωση, ο συντελεστής συμπληρωματικής στάθμησης β , μεταξύ των δύο ομάδων κριτηρίων της συνάρτησης FF2, τέθηκε ίσος με 0,1.

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε παραλλαγή του αλγόριθμου βελτιστοποίησης σωματιδίων όπου συνυπολογίζεται ο λόγος τιμής καταλληλότητας προς την απόσταση μεταξύ των υποψήφιων λύσεων (Fitness Distance Ratio – FDR) [40]. Συγκεκριμένα οι παράμετροι ατομικότητας c_1 και κοινωνικότητας c_2 τέθηκαν ίσοι με την μονάδα και η παράμετρος για το κριτήριο FDR c_3 έλαβε την τιμή δύο. Επίσης ορίστηκε πληθυσμός αποτελούμενος από 120 μέλη, ο οποίος εξελίχθηκε για 200 γενεές. Ο ζυγισμένος όρος αδρανείας ορίστηκε να λαμβάνει αρχικά την τιμή 0,9 και να μειώνεται προοδευτικά κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης, έως ότου λάβει την τελική τιμή 0,4. Επιπρόσθετα χρησιμοποιήθηκαν ανακλαστικές οριακές συνθήκες (Reflective Boundary Conditions - RBC) για τον περιορισμό των λύσεων μέσα στο χώρο έρευνας [35]. Τέλος ορίστηκε η μέγιστη επιτρεπόμενη μεταβολή ανά συνιστώσα του διανύσματος ταχύτητας v_{max} ίση με 0,05.

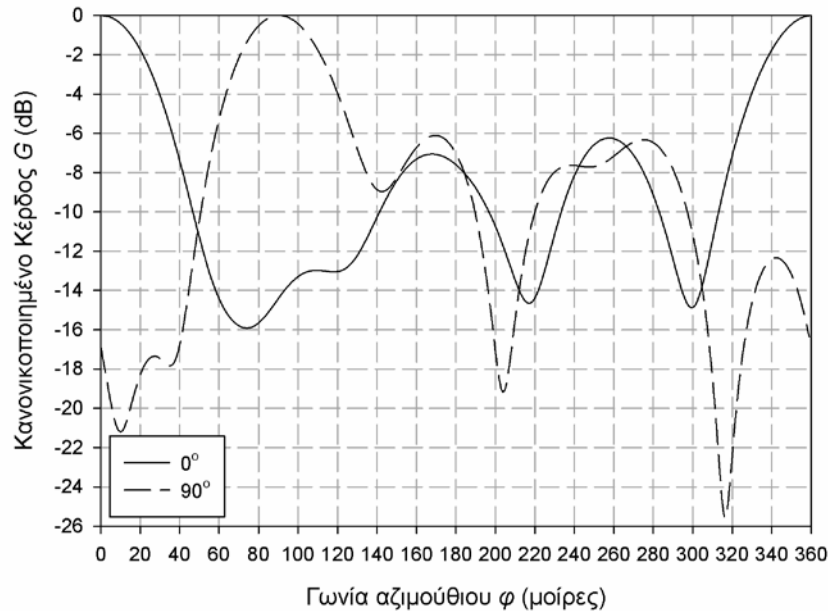


Εικόνα 58. Σύγκλιση της μεθόδου σύνθεσης της στοιχειοκεραίας στρεφόμενου λοβού (FF2).

Στην Εικόνα 58 απεικονίζεται η συμπεριφορά σύγκλισης του αλγόριθμου κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης, βάσει των κριτηρίων που περιγράφηκαν παραπάνω

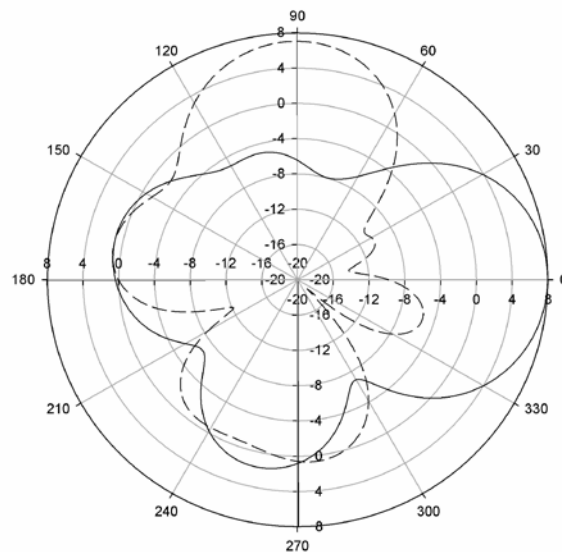
Ανάπτυξη Κατανεμημένης Πλατφόρμας Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων και Εφαρμογή σε Προβλήματα Σύνθεσης Στοιχειοκεραίων

(συνάρτηση καταλληλότητας FF2). Η διαδικασία βελτιστοποίησης εμφανίζεται να συγκλίνει απότομα μετά την 100^η γενιά για να καταλήξει στην εύρεση βέλτιστης λύσεως (μοναδιαίας καταλληλότητας) στην 127^η γενιά, οπότε και τερματίζεται αυτόματα. Συνακόλουθα, τα ληφθέντα αποτελέσματα για τα κανονικοποιημένα διαγράμματα κέρδους (στις 0° και 90° αντίστοιχα) επιβεβαιώνουν ότι οι αντίστοιχοι κύριοι λοβοί ακτινοβολίας έχουν στραφεί στις επιθυμητές γωνίες και ότι παρουσιάζουν παρόμοια ποιοτικά χαρακτηριστικά (Εικόνα 59).



Εικόνα 59. Ληφθέντα βελτιστοποιημένα διαγράμματα από τη διαδικασία σύνθεσης (FF2).

Η μοναδιαία τιμή καταλληλότητας συνεπάγεται ότι τα βελτιστοποιημένα διαγράμματα ικανοποιούν όλους τους επιμέρους περιορισμούς (Πίνακας 18, Εικόνα 60). Το διάγραμμα που είναι στραμμένο στη κατεύθυνση των 0° παρουσιάζει μεγαλύτερο κέρδος και καταπίεση των πλευρικών λοβών συγκρινόμενο με το διάγραμμα των 90°. Αντιθέτως, ο αντίστοιχος κεντρικός λοβός έχει μεγαλύτερο άνοιγμα από τον κεντρικό λοβό στις 90°.

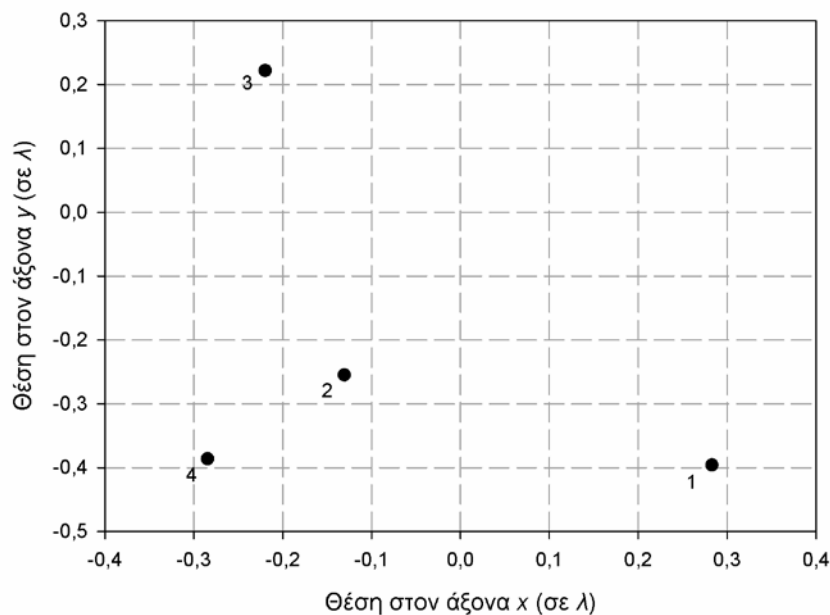


Εικόνα 60. Διαγράμματα κέρδους της στοιχειοκεραίας στρεφόμενων λοβών.

Διάγραμμα (FF2)	G	SSL	$\Delta\phi_{3dB}$	$\Delta\phi_{SSL}$	σ_{gain}	Καταλληλότητα
0°	7,933 dB	6,269 dB	53°	74°	0.116	1.0
90°	7,014 dB	6,105 dB	51°	71°		

Πίνακας 18. Κατευθυντικότητα των διαγραμμάτων για τις υπολογισμένες τροφοδοσίες.

Η μορφή των στραμμένων λοβών ακτινοβολίας δεν είναι απολύτως συμμετρική όπως ήταν αναμενόμενο, γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στην τελική τοποθέτηση των ακτινοβολητών, η οποία παρουσιάζεται στην Εικόνα 61. Οι συντεταγμένες των ακτινοβολητών που τις απαρτίζουν κωδικοποιήθηκαν με τη μορφή πολικών συντεταγμένων, με τον επιπρόσθετο περιορισμό ότι το μήκος του διανύσματος θέσης δεν υπερβαίνει το μήκος ενός κύματος. Η θέση των ακτινοβολητών παρουσιάζεται έτσι ακριβώς όπως αποκωδικοποιήθηκε από την αναπαράσταση της βέλτιστης λύσης (Πίνακας 19).



Εικόνα 61. Βέλτιστη γεωμετρία στοιχειοκεραίας για τις δύο κατευθύνσεις εκπομπής (FF2).

	1	2	3	4
x_i	0,283λ	-0,131λ	-0,22λ	-0,285λ
y_i	-0,396λ	-0,255λ	0,222λ	-0,386λ

Πίνακας 19. Γεωμετρία στοιχειοκεραίας (PSO, FF2)

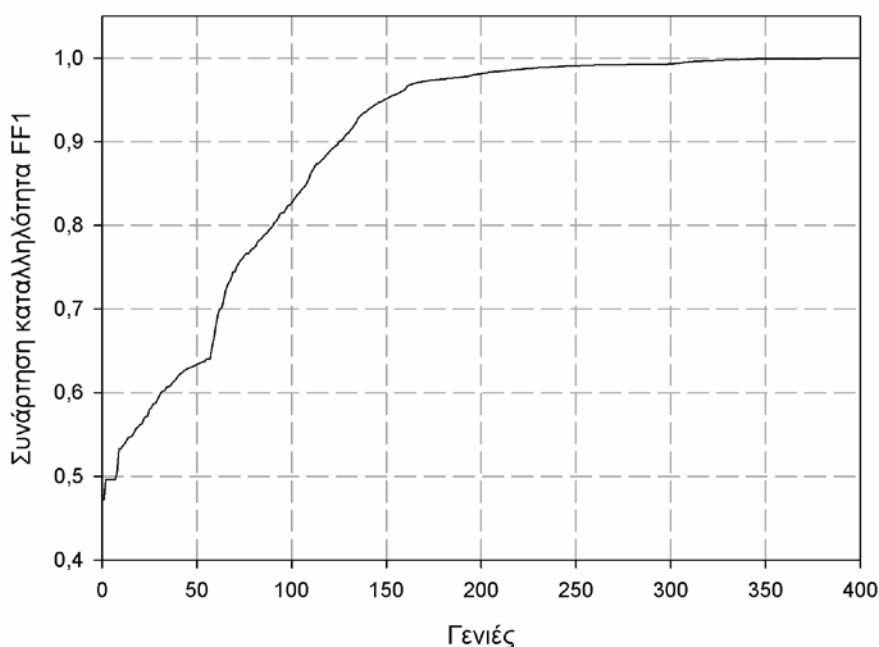
Η περιγραφόμενη μέθοδος βελτιστοποιεί απευθείας τις εφαρμοζόμενες τάσεις στους ακροδέκτες των δίπολων (Πίνακας 20). Η κωδικοποίηση των τάσεων στο διάνυσμα λύσης ορίστηκε έτσι ώστε οι εφαρμοζόμενες διεγέρσεις στους ακροδέκτες των ακτινοβολητών να μην μπορούν να υπερβούν την τιμή τάσεως 1V.

Διάγραμμα	Τροφοδοσία	1	2	3	4
0°	$ V_i $	0,691 V	1 V	0,31 V	0,31 V
	$\arg\{V_i\}$	340,22°	123,14°	143,78°	239,69°
90°	$ V_i $	0,405 V	1 V	0,573 V	0,187 V
	$\arg\{V_i\}$	300,7°	235,05°	63,56°	331,63°

Πίνακας 20. Παράμετροι τροφοδοσίας στοιχειοκεραίας για τα διαφορετικά διαγράμματα (FF2)

Για το δεύτερο πρόβλημα απαιτήθηκε η διαδικασία σύνθεσης της στοιχειοκεραίας να έχει ως αποτέλεσμα την εύρεση κατάλληλων τιμών για τις παραμέτρους θέσης και τροφοδοσίας των στοιχείων της, έτσι ώστε οι βελτιστοποιημένοι παράγοντες διάταξης AF να συμμορφώνονται με χαρακτηριστικά-στόχους όπως το μέγιστο άνοιγμα του κεντρικού λοβού 80° (BW_{3dB}) και η ελάχιστη τιμή καταπίεσης των πλευρικών λοβών (SSL) ίση με 6dB. Όπως έχει ήδη περιγραφεί, οι τιμές του παράγοντα διάταξης εξαρτώνται από τα ρεύματα διεγέρσεως των ακτινοβολητών της στοιχειοκεραίας, όπως διαφαίνεται και από τη σχέση (37). Η περιγραφόμενη μέθοδος βελτιστοποιεί απευθείας τις εφαρμοζόμενες τάσεις στους ακροδέκτες των δίπολων για το παρόν πρόβλημα.

Για τη σύνθεση της στοιχειοκεραίας στρεφόμενων λοβών χρησιμοποιήθηκε η παραλλαγή FDR (Fitness Distance Ratio) του αλγόριθμου βελτιστοποίησης σωματιδίων [40]. Συγκεκριμένα, οι παράμετροι ατομικότητας c_1 και κοινωνικότητας c_2 τέθηκαν ίσοι με 1,0 και η παράμετρος για τον παράγοντα αποτίμησης της καταλληλότητας των λύσεων προς την μεταξύ τους απόσταση c_3 έλαβε την τιμή 2,0. Ο πληθυσμός, μεγέθους 120 μελών, εξελίχθηκε για ένα μέγιστο αριθμό γενιών ίσο με 400. Ο όρος αδρανείας ορίστηκε να λαμβάνει αρχικά την τιμή 0,7 και να μειώνεται προοδευτικά κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης έως και τη λήξη της, όπου θα πρέπει να έχει λάβει και την τελική τιμή 0,4. Επιπρόσθετα χρησιμοποιήθηκαν οι ανακλαστικές οριακές συνθήκες (Reflective Boundary Conditions - RBC) για τον περιορισμό των λύσεων μέσα στο χώρο έρευνας [35]. Τέλος, η επιτρεπόμενη μεταβολή ανά συνιστώσα του διανύσματος ταχύτητας v_{max} ορίστηκε να μην υπερβαίνει την τιμή 0,1. Η μικρή τιμή της παραμέτρου v_{max} εξασφαλίζει την ομαλότερη προσέγγιση των βέλτιστων λύσεων καθώς συμπληρώνεται ο μέγιστος αριθμός γενεών.

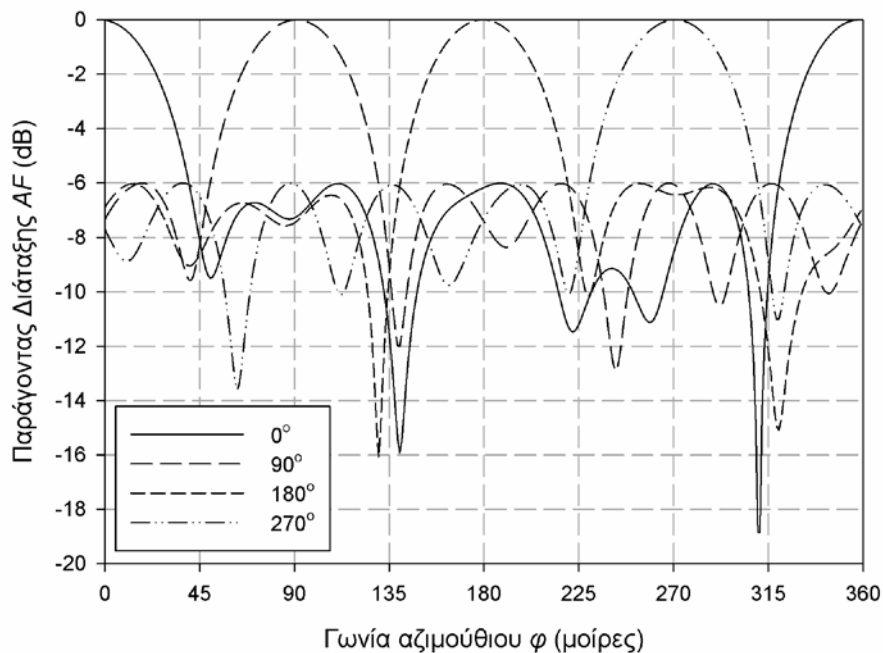


Εικόνα 62. Σύγκλιση της μεθόδου σύνθεσης της στοιχειοκεραίας στρεφόμενου λοβού (FF1).

Η διαδικασία βελτιστοποίησης εμφανίζεται να συγκλίνει ομαλά μέχρι και το πέρας της (Εικόνα 62). Παρατηρείται ότι μετά την 150^η γενιά οι βέλτιστες λύσεις κάθε γενιάς

αποτιμούνται με τιμή καταλληλότητας 0,95 ή καλύτερη, γεγονός που συνεπάγεται ότι οι υποψήφιες σχεδιάσεις έχουν ως αποτέλεσμα την ακτινοβολία πεδίων που δεν αποκλίνουν σημαντικά από τις τιμές-στόχους. Οι κυριότερες αλλαγές στις τιμές των παραμέτρων σχεδίασης αφορούν περισσότερο την τάση και τη φάση τροφοδοσίας των στοιχείων της στοιχειοκεραίας και λιγότερο τη σχετική τους τοποθέτηση στο οριζόντιο επίπεδο (x-y). Η ομαλή προσέγγιση των βέλτιστων λύσεων οφείλεται στην μικρή τιμή του παράγοντα περιορισμού της ταχύτητας των σωματιδίων ($u_{\max} = 0,1$) και στον προοδευτικό περιορισμό του παράγοντα αδραειάς (στην γενιά 150 λαμβάνει την τιμή $w = 0,5875$).

Οι βελτιστοποιημένοι παράγοντες διάταξης AF που αντιστοιχούν στη βέλτιστη λύση, επιβεβαιώνουν ότι οι αντίστοιχοι κύριοι λοβοί ακτινοβολίας (στις 0° , 90° , 180° , 270° αντίστοιχα) έχουν στραφεί στις επιθυμητές γωνίες και ότι παρουσιάζουν ποιοτικά χαρακτηριστικά τα οποία δεν παραβιάζουν τους περιορισμούς σχεδίασης (Εικόνα 63).

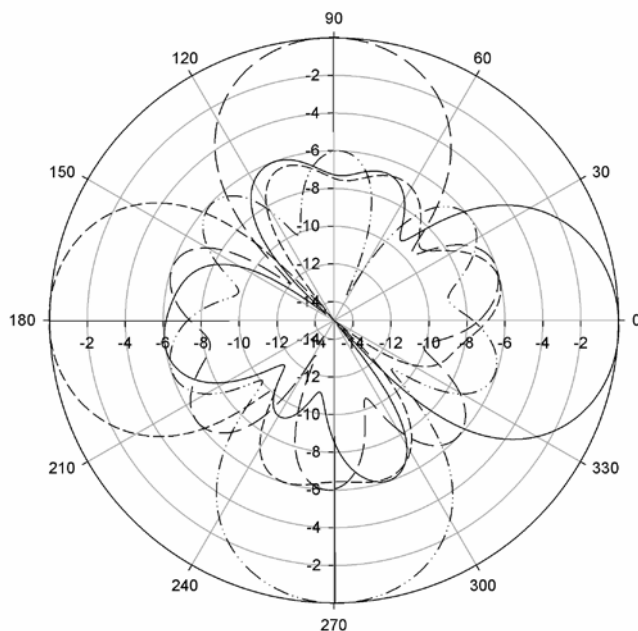


Εικόνα 63. Κανονικοποιημένοι παράγοντες διάταξης AF για τη συνάρτηση καταλληλότητας FF1.

Συγκεκριμένα, οι κύριοι λοβοί είναι απολύτως συμμετρικοί και παρουσιάζουν άνοιγμα της τάξεως $\Delta\Phi_{3dB} = 30^\circ$. Επίσης οι πλευρικοί λοβοί δεν ξεπερνούν το όριο των -6dB που είχε τεθεί ως ένας εκ των περιορισμών σχεδίασης. Ο Πίνακας 21 συνοψίζει τα χαρακτηριστικά των παραγόντων διάταξης, ενώ στην Εικόνα 64 απεικονίζονται με μεγαλύτερη σαφήνεια οι κατευθύνσεις μεγιστοποίησης της ΗΜ ακτινοβολίας.

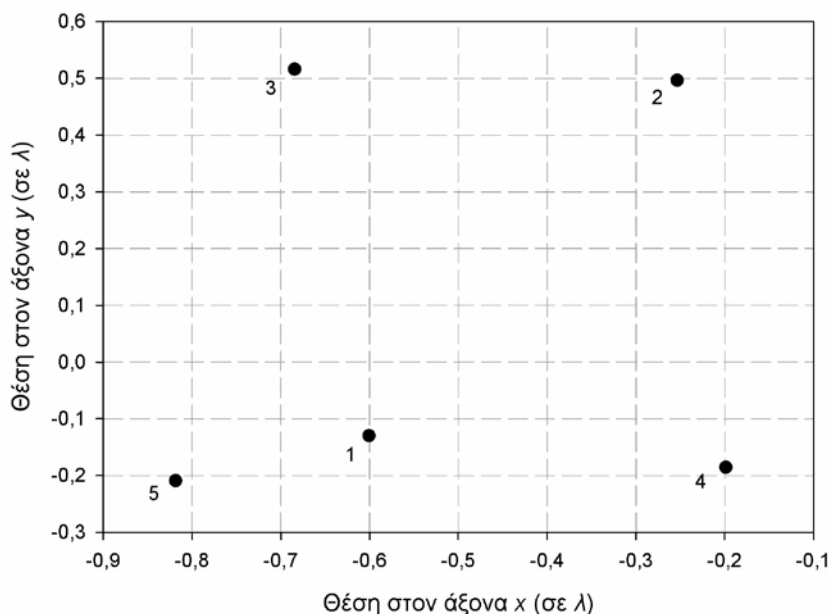
Παράγοντας Διάταξης	Φ_-	Φ_+	$\Delta\Phi_{3dB}$	SSL	Καταλληλότητα
$0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$	30°	30°	60°	6.0 dB	1,0

Πίνακας 21. Χαρακτηριστικά των παραγόντων διάταξης για τις υπολογισμένες τροφοδοσίες.



Εικόνα 64. Παράγοντες διάταξης για τη συνάρτηση καταλληλότητας FF1.

Οι παράγοντες διάταξης δεν παρουσιάζουν την ίδια κατανομή πλευρικών λοβών, γεγονός που αντικατοπτρίζεται από την μη απολύτως συμμετρική τοποθέτηση των ακτινοβολητών (Εικόνα 65). Η βελτιστοποιημένη γεωμετρική δομή είναι «χιαστί», δηλαδή οι κατευθύνσεις μεγιστοποίησης της ακτινοβολίας των λοβών τείνουν να διχοτομήσουν τις γωνίες που σχηματίζονται μεταξύ των ακτινοβολητών (θεωρώντας ως «κεντρικό» το δίπολο 1).



Εικόνα 65. Ληφθείσα γεωμετρία στοιχειοκεραίας για τη συνάρτηση καταλληλότητας FF1.

Οι συντεταγμένες των ακτινοβολητών που απαρτίζουν τη στοιχειοκεραία κωδικοποιήθηκαν με τη μορφή πολικών συντεταγμένων (βασικός περιορισμός της κωδικοποίησης είναι ότι το μήκος του διανύσματος θέσης δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερο από 1λ). Οι ακριβείς θέσεις των ακτινοβολητών παρουσιάζονται στον Πίνακα 22.

	1	2	3	4	5
x_i	-0,6006λ	-0,2535λ	-0,6844λ	-0,1988λ	-0,8184λ
y_i	-0,1295λ	0,4965λ	0,516λ	-0,1853λ	-0,2088λ

Πίνακας 22. Γεωμετρία στοιχειοκεραίας (FF1)

Όπως αναλύθηκε στην εισαγωγή της παρούσας μελέτης, οι βαθμοί ελευθερίας (σύνολο σχεδιαστικών παραμέτρων) της διαδικασίας βελτιστοποίησης είναι ίσος με 50 (για 5 ακτινοβολητές και 4 διαγράμματα ακτινοβολίας). Ο σχετικά μεγάλος αριθμός τους έχει ως συνέπεια την δυνατότητα εύρεσης σημαντικά διαφοροποιημένων βέλτιστων σχεδιάσεων. Η μη απολύτως συμμετρική τοποθέτηση των ακτινοβολητών της παρουσιαζόμενης σχεδίασης, αντισταθμίζεται από την επιλογή κατάλληλων παραμέτρων τροφοδότησης (Πίνακας 23), που έχουν ως αποτέλεσμα την διαμόρφωση παραγόντων διάταξης που δεν αποκλίνουν από τους σχεδιαστικούς περιορισμούς. Λόγω μάλιστα της βελτιστοποίησης των εφαρμοζόμενων τάσεων στους ακροδέκτες των ακτινοβολητών, συνυπολογίζονται και τα φαινόμενα αμοιβαίας επαγωγής κατά τη διαμόρφωση της τελικής λύσης.

Διάγραμμα	Τροφοδοσία	1	2	3	4	5
0°	$ V_i $	1 V	0,829 V	0,21 V	0,874 V	0,35 V
	$\arg\{V_i\}$	-84,31°	153,12°	-55,91°	112,95°	0,09°
90°	$ V_i $	1 V	0,886 V	0,918 V	0,456 V	0,457 V
	$\arg\{V_i\}$	78,92°	-125,73°	-132,13°	145,32°	126,59°
180°	$ V_i $	0,683 V	0,205 V	1 V	0,509 V	0,963 V
	$\arg\{V_i\}$	0,01°	60,84°	-95,84°	92,41°	-157,53°
270°	$ V_i $	0,999 V	0,6 V	0,426 V	1 V	0,931 V
	$\arg\{V_i\}$	178,76°	107,67°	97,83°	-119,87°	-117,87°

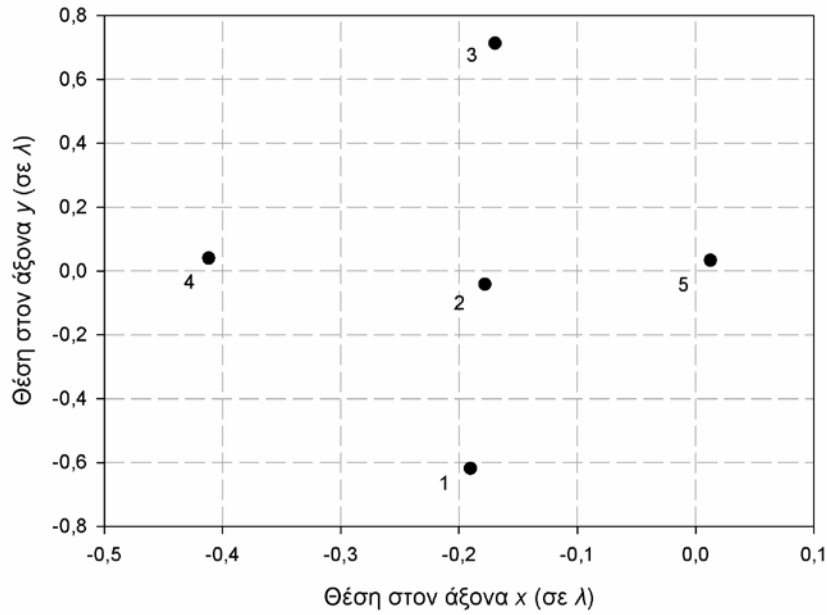
Πίνακας 23. Παράμετροι τροφοδοσίας στοιχειοκεραίας μεταγωγής λοβών (FF1)

Η σχεδιαστική απαίτηση για το επίπεδο καταπίεσης των πλευρικών λοβών είναι ισοδύναμη με τιμή καταπίεσης 12 dB αναφορικά με τα τελικά διαγράμματα ακτινοβολίας, λόγω της μορφής των σχέσεων (96). Επίσης, η ομοιότητα των βελτιστοποιημένων λοβών ακτινοβολίας και των επιπέδων καταπίεσης των πλευρικών λοβών, έχει ως αποτέλεσμα τα λαμβανόμενα διαγράμματα ακτινοβολίας να παρουσιάζουν συγκρίσιμες τιμές κέρδους (Πίνακας 24).

Διάγραμμα	G	SSL	$\Delta\Phi_{3dB}$	$\Delta\Phi_{SSL}$
0°	10,84 dB	12.0 dB	45°	80°
90°	10,38 dB			
180°	10,42 dB			
270°	10,28 dB			

Πίνακας 24. Κατευθυντικότητα των διαγραμμάτων για τις υπολογισμένες τροφοδοσίες.

Προκειμένου να δειχθεί ότι ο αλγόριθμος δύναται να βρει εναλλακτικές γεωμετρικές διατάξεις των ακτινοβολητών της στοιχειοκεραίας, στη συνέχεια παρουσιάζεται μια σχεδίαση που υπολείπεται της θεωρητικής βέλτιστης (τιμή καταλληλότητας 0,877), η οποία λήφθηκε κατά τη διάρκεια των δοκιμών της μεθόδου (Εικόνα 66 και Πίνακας 25).

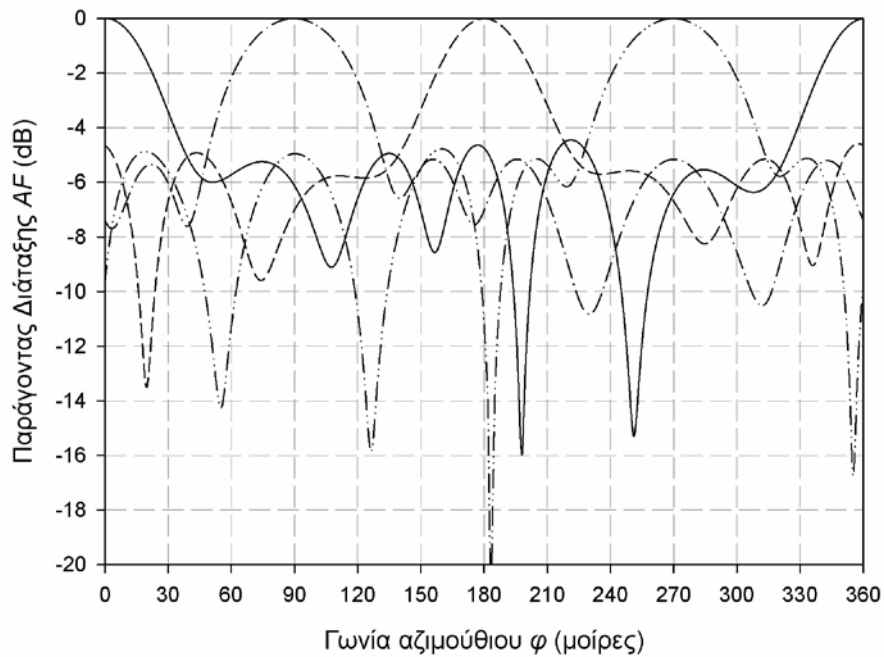


Εικόνα 66. Ληφθείσα γεωμετρία στοιχειοκεραίας για τη συνάρτηση καταλληλότητας FF1.

	1	2	3	4	5
x_i	-0,19λ	-0,178λ	-0,17λ	-0,412λ	0,013λ
y_i	-0,618	-0,042λ	0,714λ	0,04λ	0,033λ

Πίνακας 25. Γεωμετρία στοιχειοκεραίας (PSO, FF1)

Σε αντίθεση με την βέλτιστη λύση που παρουσιάστηκε παραπάνω, η γεωμετρική δομή είναι «σταυρωτή», δηλαδή οι κατευθύνσεις μεγιστοποίησης των λοβών τείνουν να συμπέσουν με τις κατευθύνσεις που ορίζονται από τους ακτινοβολητές σε σχέση με έναν ακτινοβολητή οριζόμενο ως «κεντρικό» (ως τέτοιος δύναται να θεωρηθεί το δίπολο 2).



Εικόνα 67. Κανονικοποιημένοι παράγοντες διάταξης για τη συνάρτηση καταλληλότητας FF1.

Η απεικόνιση των βελτιστοποιημένων παραγόντων διάταξης AF, επιβεβαιώνει ότι οι κύριοι λοβοί ακτινοβολίας έχουν στραφεί στις επιθυμητές γωνίες αλλά δεν παρουσιάζουν το ίδιο άνοιγμα (Εικόνα 67). Επίσης παρατηρείται ότι τα επίπεδα καταπίεσης των πλευρικών λοβών των διαγραμμάτων υπολείπονται του σχεδιαστικού στόχου των 6 dB (Πίνακας 26).

Παράγοντας Διάταξης	Φ_-	Φ_+	$\Delta\Phi_{3dB}$	SSL	Καταλληλότητα
0°	26°	29°	55°	4,447 dB	0,877
90°	35°	35°	70°	5,153 dB	
180°	29°	30°	59°	4,61 dB	
270°	36°	35°	71°	4,775 dB	

Πίνακας 26. Χαρακτηριστικά των παραγόντων διάταξης για τις υπολογισμένες τροφοδοσίες.

Η διαφοροποίηση των κεντρικών λοβών αλλά και του επιπέδου καταπίεσης των πλευρικών λοβών έχει ως αποτέλεσμα και τη διαφοροποίηση των τελικών τιμών κέρδους (Πίνακας 28).

Διάγραμμα	G	SSL	$\Delta\Phi_{3dB}$	$\Delta\Phi_{SSL}$
0°	11,24 dB	8,89 dB	37°	69°
90°	5,56 dB	10,31 dB	51°	84°
180°	10,24 dB	9,18 dB	39°	76°
270°	5,29 dB	9,55 dB	51°	85°

Πίνακας 27. Χαρακτηριστικά των διαγραμμάτων για τις υπολογισμένες τροφοδοσίες.

Τέλος, για λόγους πληρότητας παρουσιάζονται οι βελτιστοποιημένες τιμές των εφαρμοζόμενων τάσεων και φασιθετών στους ακροδέκτες των δίπολων (Πίνακας 28).

Διάγραμμα	Τροφοδοσία	1	2	3	4	5
0°	$ V_i $	0,295 V	0,449 V	0,258 V	0,233 V	1,0 V
	$\arg\{V_i\}$	119,37°	86,67°	139,84°	-130,38°	61,01°
90°	$ V_i $	0,069 V	1,0 V	0,693 V	0,882 V	0,861 V
	$\arg\{V_i\}$	69,39°	28,78°	-88,06°	146,76°	149,87°
180°	$ V_i $	0,249 V	0,793 V	0,34 V	1,0 V	0,285 V
	$\arg\{V_i\}$	99,84°	125,1°	158,54°	49,42°	-134,63°
270°	$ V_i $	0,529 V	1,0 V	0,138 V	0,199 V	0,208 V
	$\arg\{V_i\}$	147,17°	-32,6°	-107,35°	55,4°	52,47°

Πίνακας 28. Παράμετροι τροφοδοσίας στοιχειοκεραίας για τα διαφορετικά διαγράμματα (FF1)

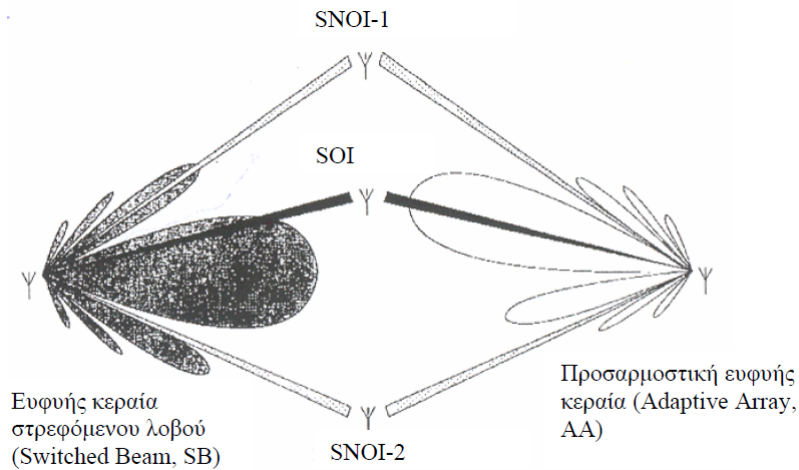
4.5.4 Συμπεράσματα

Η παρούσα ενότητα παρουσίασε τα αποτελέσματα που λήφθηκαν κατά τη βελτιστοποίηση δύο διαφορετικών σχεδιάσεων στοιχειοκεραιών μεταγωγής λοβών. Η πρώτη κεραία απαιτήθηκε να προσφέρει κάλυψη στις δύο κύριες κατευθύνσεις των 0° και 90°, ενώ η δεύτερη να καλύψει συνολικά το οριζόντιο επίπεδο, επιτρέποντας κατά τη λειτουργία της τη μεταγωγή μεταξύ 4 διαφορετικών διαγραμμάτων. Και στις δύο περιπτώσεις οι στοιχειοκεραίες απαρτίζονται από δίπολα ημικύματος, ενώ η διαδικασία βελτιστοποίησης αποσκοπεί στην εκτίμηση της χωρικής τους κατανομής και στον προσδιορισμό των εφαρμοζόμενων τάσεων διεγέρσεως στους ακροδέκτες τους. Τα κυριότερα συμπεράσματα που εξάγονται από τη σχετική μελέτη είναι:

- Ο αλγόριθμος PSO ενδείκνυται για τη βελτιστοποίηση πολυπαραμετρικών σχεδιάσεων, εφόσον οι απαιτήσεις είναι συνεκτικές και αλληλοσυμπληρούμενες. Αυτή η προϋπόθεση ικανοποιείται ενδογενώς από τη επιδιωκόμενη λειτουργικότητα των κεραιών μεταγωγής λοβού, καθώς τα διαγράμματα ακτινοβολίας πρέπει να παρουσιάζουν μικρό βαθμό αλληλοεπικάλυψης.
- Η ικανοποίηση της παραπάνω συνθήκης επιτρέπει την εύρεση κατάλληλων χωρικών κατανομών των διπόλων από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης.
- Για καθεμία από τις εξεταζόμενες σχεδιάσεις ορίστηκαν συναρτήσεις καταλληλότητας που διαφοροποιούνται ως προς τον αριθμό και τον τρόπο ικανοποίησης των επιβαλλόμενων κριτηρίων (π.χ. με χρήση τιμών κατωφλίων ή όχι). Κατά συνέπεια διαπιστώθηκαν διαφοροποιήσεις ως προς την συμπεριφορά σύγκλισης τους (π.χ. ο ορισμός κατωφλίων μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα είτε την επιτάχυνση της σύγκλισης της μεθόδου είτε τη παγίδευση της σε υποβέλτιστα σημεία του χώρου έρευνας).
- Άμεση απόρροια των παραπάνω είναι ότι ενώ η μια συνάρτηση (FF2) επιτρέπει την απευθείας βελτιστοποίηση του συνολικού διαγράμματος ακτινοβολίας, δεν ενδείκνυται για τη ταυτόχρονη βελτιστοποίηση μεγάλου αριθμού διαγραμμάτων, σε αντίθεση με τη άλλη συνάρτηση (FF1) που βελτιστοποιεί τους σχετιζόμενους παράγοντες διάταξης.
- Η ταυτόχρονη βελτιστοποίηση της τροφοδοσίας των ακτινοβολητών δύναται να οδηγήσει στην εύρεση σημαντικά διαφοροποιημένων γεωμετρικών διαμορφώσεων, καθώς αυτοί οι δυο παράγοντες λειτουργούν συμπληρωματικά.
- Η αποτίμηση των φαινομένων επαγωγής μεταξύ των δίπολων θα μπορούσε δυνητικά να συνδυαστεί με την εφαρμογή κατάλληλα εκφρασμένων περιορισμών στο δίκτυο τροφοδοσίας της στοιχειοκεραίας προκειμένου να διασφαλισθεί η αποδοτικότητα τους.

4.6 Σύνθεση Ευφυούς Κυκλικής Στοιχειοκεραίας

Οι *ευφυείς προσαρμοστικές κεραιές* (adaptive arrays – smart antennas) προσφέρουν μια σημαντικά καλύτερη λύση για την ελαχιστοποίηση των παρεμβολών και την αύξηση της χωρητικότητας των συστημάτων ασύρματων επικοινωνιών, συγκρινόμενες με τα κεραιοσυστήματα μεταγωγής λοβών (Εικόνα 68). Οι δυνατότητες προσαρμογής του διαγράμματος ακτινοβολίας είναι ανάλογες της χρησιμοποιούμενης τεχνικής για την *μορφοποίηση του διαγράμματος και του κυρίως λοβού ακτινοβολίας* (beamforming) [114, 116]. Όπως και στην περίπτωση των φασικών κεραιών [98], το διάγραμμα ακτινοβολίας διαμορφώνεται ψηφιακά, με τον κύριο λοβό να δημιουργείται στην κατεύθυνση του πιο ισχυρού σήματος (Signal of Interest - SOI). Επιπρόσθετα, δημιουργούνται δευτερεύοντες λοβοί στις κατευθύνσεις των συσχετισμένων σημάτων που οφείλονται στο φαινόμενο των πολλαπλών διαδρομών, καθώς και μηδενισμοί στις κατευθύνσεις των παρεμβολών (Signal of No Interest - SNOI) [119].



Εικόνα 68. Σύγκριση κεραίας στρεφόμενων λοβών και προσαρμοστικής κεραίας.

Αυτό επιτυγχάνεται με τη διαρκή βελτιστοποίηση των πλατών και των φάσεων των βαρών των στοιχείων της στοιχειοκεραίας τα οποία ρυθμίζονται ηλεκτρονικά, επιτρέποντας έτσι τη δυναμική προσαρμογή τους στο ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον [120]. Συνήθως χρησιμοποιούνται ειδικά ψηφιακά φίλτρα για αυτό τον σκοπό, τα βάρη των οποίων μεταβάλλονται δυναμικά προκειμένου να ελαχιστοποιείται το ελάχιστο μέσο τετραγωνικό λάθος (Minimum Mean Square Error) που υπολογίζεται βάσει της διαφοράς του επιθυμητού διαγράμματος από το πραγματικό. Για τον υπολογισμό των βαρών χρησιμοποιείται συνήθως είτε ο αλγόριθμος της πιο απότομης κατάβασης (Steepest Descent) είτε ο προσαρμοστικός αλγόριθμος των ελαχίστων μέσων τετραγωνικών τιμών (LMS – Least Mean Squares) [114]. Η πολυπλοκότητα των χρησιμοποιούμενων αλγορίθμων ψηφιακής επεξεργασίας αποτελεί και το κυριότερο μειονέκτημα των προσαρμοστικών έξυπνων κεραίων.

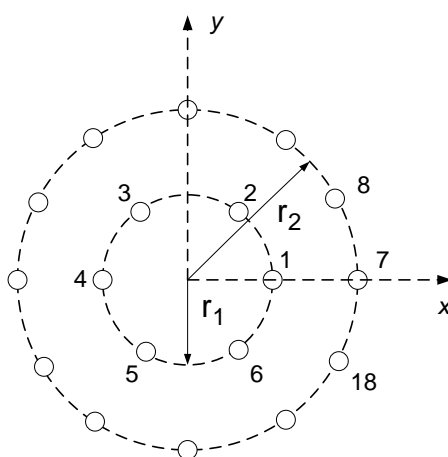
Στην παρούσα ενότητα μελετάται μια επίπεδη ομοιόμορφη κυκλική στοιχειοκεραία (Planar Uniform Circular Array – PUCA) αποτελούμενη από 18 δίπολα ημικύματος. Συγκεκριμένα το πρόβλημα σύνθεσης για την εν λόγω στοιχειοκεραία συνίσταται στην εύρεση των τιμών τάσης και φάσης της τροφοδοσίας που πρέπει να εφαρμοστεί στους ακροδέκτες των στοιχείων της, προκειμένου να είναι δυνατή η στροφή του κεντρικού λοβού ακτινοβολίας σε κατεύθυνση σημάτων ενδιαφέροντος και την δημιουργία βαθιών μηδενισμών σε κατευθύνσεις σημάτων χωρίς ενδιαφέρον. Για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων της στοιχειοκεραίας χρησιμοποιήθηκαν ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (PSO) και ο γενετικός αλγόριθμος (GA). Η αποτελεσματικότητα των δύο μεθόδων συγκρίνεται βάσει της ικανότητας ευρέσεως κατάλληλων τιμών για τις παραμέτρους τροφοδοσίας των στοιχείων της, έτσι ώστε το παραγόμενο διάγραμμα ακτινοβολίας να στρέφεται στην επιθυμητή κατεύθυνση και ταυτόχρονα η στοιχειοκεραία να απορρίπτει τις παρεμβολές. Επίσης συγκρίνεται η συμπεριφορά σύγκλισης των δύο μεθόδων.

4.6.1 Περιγραφή του προβλήματος σύνθεσης

Η γεωμετρία στοιχειοκεραίας που χρησιμοποιείται συνήθως σε συνδυασμό με τους αλγόριθμους διαμόρφωσης δέσμης ακτινοβολίας είναι η ομοιόμορφη γραμμική. Μια γραμμική στοιχειοκεραία παρουσιάζει εξαιρετική κατευθυντικότητα και δύναται να

σχηματίσει τους στενότερους δυνατούς λοβούς σε δεδομένη κατεύθυνση, αλλά δεν μπορεί να λειτουργήσει το ίδιο αποτελεσματικά σε όλες τις υπόλοιπες κατευθύνσεις. Επομένως, για την επίλυση των περισσότερων πρακτικών προβλημάτων, η χρήση κυκλικών στοιχειοκεραίων παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα όπως το γεγονός ότι τα κατευθυντικά διαγράμματα που έχουν προκύψει από σύνθεση δύναται να στραφούν ηλεκτρονικά σε οποιαδήποτε κατεύθυνση, χωρίς να μεταβάλλεται σημαντικά η μορφή του κυρίως λοβού ακτινοβολίας [121]. Επιπρόσθετα, για την αποτίμηση της απόδοσης πρακτικών στοιχειοκεραίων είναι απαραίτητο να συμπεριληφθούν στους σχετικούς υπολογισμούς τα φαινόμενα αμοιβαίας επαγωγής μεταξύ των ακτινοβολητών, ειδικότερα δε κατά την εφαρμογή αλγορίθμων μορφοποίησης και στροφής των κυρίως λοβών [122].

Το παρόν πρόβλημα συνίσταται στη σύνθεση μιας επίπεδης ομοιόμορφης κυκλικής στοιχειοκεραίας (PUCA), η οποία αποτελείται από 18 ακτινοβολητές. Η γεωμετρία της στοιχειοκεραίας είναι σταθερή και αποτελείται από δύο ομόκεντρους κύκλους κατά μήκος των οποίων τοποθετούνται δίπολα ημικύματος. Το εσωτερικό δακτυλίδι έχει ακτίνα $r_1 = (3/2\pi) \lambda$ και αποτελείται από 6 στοιχεία ενώ το εξωτερικό δακτυλίδι έχει ακτίνα $r_2 = (6/2\pi) \lambda$ και αποτελείται από 12 στοιχεία (Εικόνα 69). Τα δίπολα είναι τοποθετημένα κάθετα στο οριζόντιο επίπεδο $x-y$ και όλοι οι κυλινδρικοί ακτινοβολητές έχουν ακτίνα ίση με $a = 0.003369\lambda$ (εκφρασμένη σε ηλεκτρικά μήκη).



Εικόνα 69. Γεωμετρική δομή επίπεδης ομοιόμορφης κυκλικής στοιχειοκεραίας (PUCA).

Για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών της κυκλικής στοιχειοκεραίας, η ένταση της ακτινοβολίας του κάθε δίπολου προσεγγίζεται αναλυτικά από τη σχέση (112) και το συνολικό διάγραμμα ακτινοβολίας από τις σχέσεις (96). Τα φαινόμενα αμοιβαίας επαγωγής μεταξύ των παράλληλων δίπολων αποτιμώνται με τη βοήθεια της μεθόδου της επαγόμενης ηλεκτρεγερτικής δύναμης [95] και ειδικότερα των σχέσεων (67) και (68).

Τα επιθυμητά χαρακτηριστικά ακτινοβολίας της κυκλικής στοιχειοκεραίας είναι η δυνατότητα στροφής του κυρίως λοβού ακτινοβολίας στην επιθυμητή κατεύθυνση και παράλληλα η επίτευξη των βαθύτερων δυνατών μηδενισμών σε συμπληρωματικές κατευθύνσεις έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι παρεμβολές. Συγκεκριμένα, ως παράδειγμα των δυνατοτήτων διαμόρφωσης δέσμης της περιγραφείσας στοιχειοκεραίας, μελετάται ένα σενάριο όπου ο κύριος λοβός ακτινοβολίας στρέφεται στην κατεύθυνση ενός

επιθυμητού χρήστη ενώ ταυτοχρόνως άλλοι χρήστες παρεμβάλλουν από διαφορετικές αζιμουθιακές κατευθύνσεις. Σε αυτή την περίπτωση επιλέγονται ως παράμετροι υπό βελτιστοποίηση το πλάτος και η φάση διέγερσης των στοιχείων της στοιχειοκεραίας.

Στη συνέχεια ορίζεται η συνάρτηση καταλληλότητας η οποία, κατά τη διάρκεια της εξέλιξης της διαδικασίας βελτιστοποίησης, θα μπορέσει να βρει ικανοποιητικές τιμές παραμέτρων προκειμένου να συμμορφώνονται με τις άνωθεν περιγραφόμενες απαιτήσεις για τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας της κυκλικής στοιχειοκεραίας.

4.6.2 Αντικειμενική συνάρτηση

Προκειμένου να αποτιμηθεί με ακρίβεια η ικανότητα κάθε υποψήφιας σχεδίασης να επιτυγχάνει υψηλή κατευθυντικότητα στην κατεύθυνση ενδιαφέροντος (SOI) και βαθιούς μηδενισμούς στις κατευθύνσεις παρεμβολών (SNOI), πρέπει να οριστούν ξεχωριστές μετρικές συναρτήσεις, οι οποίες στην συνέχεια συνδυάζονται για τον υπολογισμό της συνολικής αποτίμησης. Συγκεκριμένα, ορίζονται δύο διαφορετικές συναρτήσεις:

- μια συνάρτηση f_{SOI} που λαμβάνει τιμές ανάλογες με την κατευθυντικότητα των κυρίως λοβών ακτινοβολίας στις επιθυμητές κατευθύνσεις ενδιαφέροντος
- και μια συνάρτηση f_{SNOI} που αποτιμά το βάθος των επιτυγχανόμενων μηδενισμών του διαγράμματος ακτινοβολίας στις προκαθορισμένες κατευθύνσεις μηδενισμών.

Η αναλυτική έκφραση των παραπάνω συναρτήσεων δίνεται από τις ακόλουθες σχέσεις

$$\begin{aligned} f_{SOI} &= \sum_{i=1}^N a_i G(\varphi_i) \\ f_{SNOI} &= \sum_{j=1}^M b_j G(\varphi_j) \end{aligned} \quad (121)$$

όπου οι τιμές κέρδους είναι εκφρασμένες σε dB, οι αζιμουθιακές γωνίες φ_i είναι οι κατευθύνσεις των κυρίως λοβών (στην γενικότερη περίπτωση N διαφορετικές γωνίες) και οι γωνίες φ_j είναι οι κατευθύνσεις των επιθυμητών μηδενισμών (M γωνίες μηδενισμών). Επιπλέον, ορίζεται κατάλληλος συντελεστής βαρύτητας a_i για τη ζύγιση των τιμών του διαγράμματος ακτινοβολίας στις SOI κατευθύνσεις και ανάλογος συντελεστής βαρύτητας b_j για τη ζύγιση των τιμών στις κατευθύνσεις των SNOI.

Στον ορισμό κάθε αλγορίθμου διαμόρφωσης δέσμης μεγαλύτερη προτεραιότητα δίδεται στις κατευθύνσεις των ενδιαφερόντων χρηστών και μικρότερη βαρύτητα στην απόρριψη των παρεμβολών από άλλες κατευθύνσεις. Επίσης οι κατευθύνσεις παρεμβολών είναι περισσότερες από ότι οι επιθυμητές κατευθύνσεις στην πλειοψηφία των σεναρίων που προκύπτουν στην πράξη. Τα δύο προαναφερόμενα γεγονότα οδηγούν στην επιλογή μεγάλων τιμών για τους συντελεστές βαρύτητας a_i και μικρότερων για τους συντελεστές b_j .

Σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση, αναμένεται ότι η εφαρμογή κατάλληλων βελτιστοποιημένων διεγέρσεων στους ακροδέκτες των διπόλων που απαρτίζουν την κυκλική στοιχειοκεραία θα έχει ως αποτέλεσμα μεγάλη αθροιστικά θετική τιμή για τη

συνάρτηση f_{SOI} και μεγάλη αρνητική τιμή για τη συνάρτηση f_{SNOI} . Είναι εύλογο να οριστεί μία αντικειμενική συνάρτηση f_{obj} βάσει της διαφοράς των δύο παραπάνω συναρτήσεων,

$$f_{obj} = f_{SOI} - f_{SNOI} = \sum_{i=1}^N a_i G(\varphi_i) - \sum_{j=1}^M b_j G(\varphi_j) \quad (122)$$

η οποία μεγιστοποιείται όταν η στοιχειοκεραία επιτυγχάνει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά ακτινοβόλησης, δίνοντας προτεραιότητα στην επίτευξη της στροφής των κυρίως λοβών στις SOI κατευθύνσεις. Το πεδίο αποτίμησης της αντικειμενικής συνάρτησης δεν είναι φραγμένο, καθώς ακατάλληλες υποψήφιες σχεδιάσεις δύνανται να αποτιμηθούν αρνητικά.

Για την επίλυση του περιγραφόμενου προβλήματος σύνθεσης στοιχειοκεραίας ορίστηκαν κατάλληλες παράμετροι για τους χρησιμοποιούμενους στοχαστικούς αλγόριθμους βελτιστοποίησης. Συγκεκριμένα, εφαρμόστηκε η παραλλαγή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων η οποία βασίζεται στον ορισμό παράγοντα περιορισμού (constriction coefficient), με παραμέτρους ατομικότητας $c_1=2,1$, κοινωνικότητας $c_2=2,0$, εξαντλητικής έρευνας του χώρου λύσεων $k=1,0$ καθώς και τιμή περιορισμού της ταχύτητας των σωματιδίων ίση με $v_{max}=0,4$. Αντίστοιχα, χρησιμοποιήθηκε ένας γενετικός αλγόριθμος για την εξέλιξη του πληθυσμού, στον οποίο εφαρμόζεται ο εξελικτικός τελεστής της διασταύρωσης με πιθανότητα $p_c=0,35$ και ο τελεστής της μετάλλαξης με πιθανότητα $p_m=0,0833$. Τέλος, οι δύο αλγόριθμοι χρησιμοποιήθηκαν για την εξέλιξη πληθυσμού αποτελούμενου από 120 άτομα για 300 γενεές.

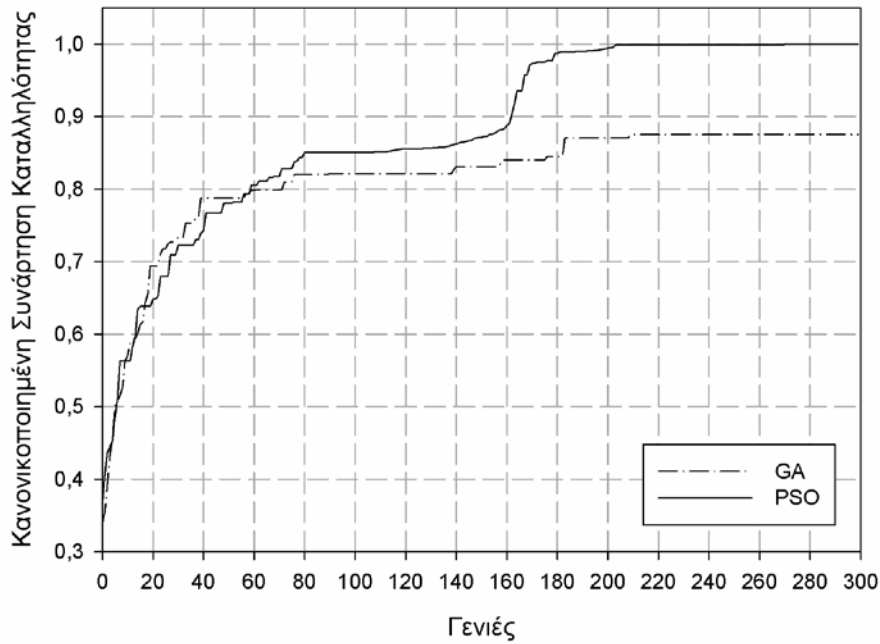
4.6.3 Αποτελέσματα

Για το εξεταζόμενο πρόβλημα διαμόρφωσης δέσμης απαιτήθηκε τα βελτιστοποιημένα διαγράμματα ακτινοβολίας να ικανοποιούν τα ακόλουθα κριτήρια:

- ο κύριος λοβός ακτινοβολίας να είναι στραμμένος στη διεύθυνση των 180° (SOI),
- να επιτυγχάνονται οι βαθύτεροι δυνατών μηδενισμοί του διαγράμματος ακτινοβολίας στις κατευθύνσεις των 60° και 240° (SNOI).

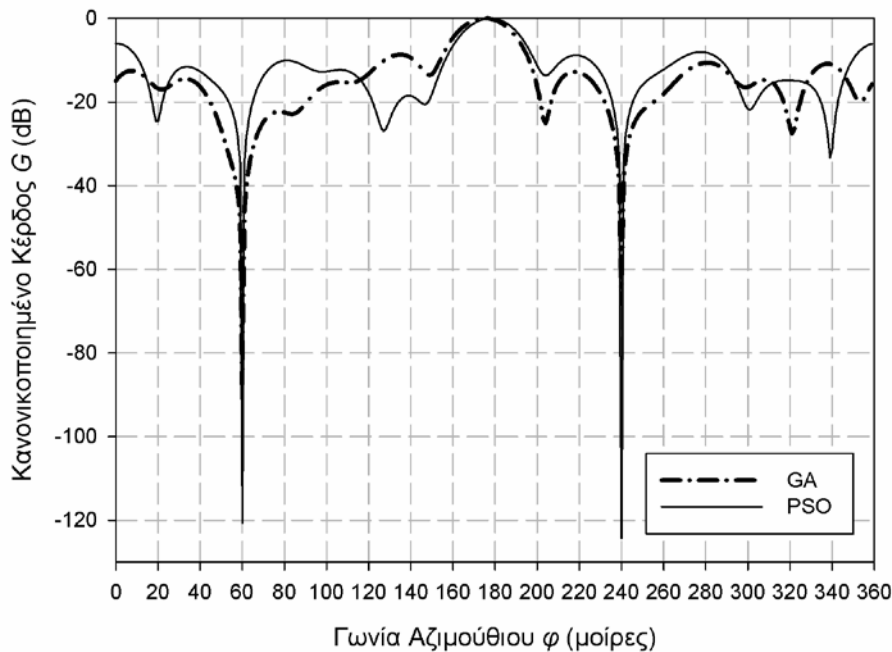
Στην παρούσα ανάλυση, τα βάρη των σχέσεων (121) έλαβαν αντίστοιχα τις τιμές $\mathbf{a} = [20]^\top$ και $\mathbf{b} = [1, 1]^\top$, προκειμένου να δοθεί μεγαλύτερη προτεραιότητα στην μεγιστοποίηση της εκπεμπόμενης ισχύος προς την κατεύθυνση του επιθυμητού χρήστη, ενώ ταυτόχρονα θα ελαχιστοποιείται η ισχύς προς τις κατευθύνσεις των παρεμβολών.

Όπως έχει ήδη συζητηθεί, οι τιμές που λαμβάνει η αντικειμενική συνάρτηση δεν είναι φραγμένες, άρα δεν μπορεί να εφαρμοστεί κάποια συνάρτηση για το μετασχηματισμό τους σε διάστημα καταλληλότητας $[0, 1]$, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Για λόγους απεικόνισης, η μέγιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που λήφθηκε μετά την εφαρμογή των δύο αλγορίθμων βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκε για να κανονικοποιήσει τα αποτελέσματα που φαίνονται στην Εικόνα 70.



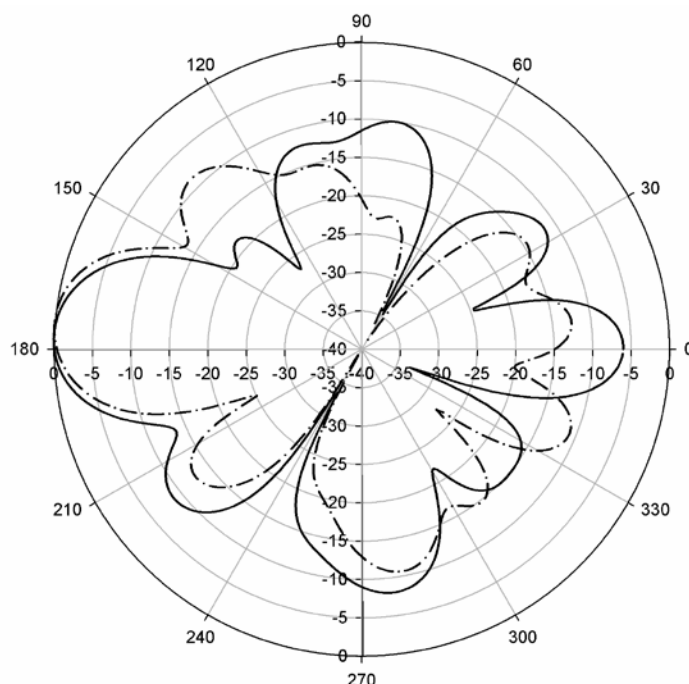
Εικόνα 70. Κανονικοποιημένες τιμές καταλληλότητας για την επίπεδη κυκλική στοιχειοκεραία.

Και οι δύο αλγόριθμοι συγκλίνουν ομαλά σε σχεδιάσεις, οι οποίες αποτιμούνται με τις τιμές 442,428 και 387,347 αντίστοιχα, από τη μη κανονικοποιημένη αντικειμενική συνάρτηση. Η διαφορά στην απόδοση των δύο αλγορίθμων αποδίδεται κατά κύριο λόγο στη χρήση του παράγοντα περιορισμού της ταχύτητας για τον αλγόριθμο PSO, σε αντιδιαστολή με τον γενετικό αλγόριθμο, για τον οποίο δε δύναται να οριστεί ανάλογος μηχανισμός.



Εικόνα 71. Διαγράμματα ακτινοβολίας των βελτιστοποιημένων επίπεδων κυκλικών στοιχειοκεραίων.

Η απεικόνιση των δύο βελτιστοποιημένων διαγραμμάτων ακτινοβολίας (Εικόνες 71 και 72), επιβεβαιώνει ότι ο κύριος λοβός ακτινοβολίας έχει στραφεί στην επιθυμητή γωνία των 180° και ότι οι μηδενισμοί έχουν τοποθετηθεί επιτυχώς στις κατευθύνσεις παρεμβολής των 60° και 240° . Οι διαφορές στις τιμές καταλληλότητας των δύο σχεδιάσεων μπορούν να αποδοθούν στις διαφοροποιήσεις ως προς την επιτυγχανόμενη κατευθυντικότητα των δύο διαγραμμάτων αλλά και στο διαφορετικό βάθος των μηδενισμών στις κατευθύνσεις παρεμβολών.



Εικόνα 72. Διαγράμματα με μέγιστα στις SOI και με μηδενισμούς στις SNOI κατευθύνσεις.

Επίσης, στον Πίνακα 29 αναγράφεται το επίπεδο καταπίεσης των δύο πλευρικών λοβών, αν και το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό δεν αποτέλεσε αντικείμενο της βελτιστοποίησης.

Διάγραμμα	D	SSL	Null ₆₀	Null ₂₄₀
GA	12,07 dB	8,66 dB	-87,51 dB	-68,22 dB
PSO	10,22 dB	6,05 dB	-120,6 dB	-124,3 dB

Πίνακας 29. Χαρακτηριστικά των διαγραμμάτων για τις υπολογισμένες τροφοδοσίες.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι παράμετροι της έξυπνης κεραιάς που βελτιστοποιούνται είναι οι εφαρμοζόμενες τάσεις στους ακροδέκτες των ακτινοβολητών καθώς και οι φασιθέτες τους. Αναφορικά με τη κωδικοποίηση των διεγέρσεων στο διάλυμα λύσης ισχύει:

- Η εφαρμοζόμενη τάση λαμβάνει τιμές στο διάστημα [1V, 3V]
- Η φάση των εφαρμοζόμενων τάσεων λαμβάνει τιμές στο διάστημα $[-180^\circ, 180^\circ]$.

Σε κάθε περίπτωση, στους σχετικούς υπολογισμούς λαμβάνονται υπόψη τα φαινόμενα σύζευξης μεταξύ των ακτινοβολητών, τα οποία και αποτιμούνται στην αρχή της διαδικασίας

βελτιστοποίησης, καθότι η γεωμετρική δομή της επίπεδης ομοιόμορφης κυκλικής στοιχειοκεραίας δεν μεταβάλλεται. Είναι εύκολο να παρατηρηθεί ότι η ζητούμενη κατεύθυνση στροφής του κυρίως λοβού ακτινοβολίας των 180° συμπίπτει με τον προσανατολισμό των στοιχείων 13 και 4 (εμπρόσθια) και των 1 και 7 (οπίσθια στοιχεία). Ανάλογη αντιστοίχιση μπορεί να γίνει και για τις κατευθύνσεις των επιθυμητών μηδενισμών, οπότε η κατεύθυνση των 60° συμπίπτει γεωμετρικά με τα στοιχεία 2 και 9 (εμπρόσθια) και τα στοιχεία 5 και 15 (οπίσθια στοιχεία). Το ακριβώς αντίστροφο ισχύει για τον μηδενισμό στην κατεύθυνση των 240° . Στη συνέχεια, καταγράφονται αναλυτικά οι εφαρμοζόμενες διεγέρσεις στους ακτινοβολητές της βελτιστοποιημένης στοιχειοκεραίας που προέκυψε από τον αλγόριθμο PSO στους Πίνακες 30 και 31.

	1	2	3	4	5	6
$ V_i $	2,044 V	1,223 V	2,812 V	2,174 V	2,701 V	2,775 V
$\arg\{V_i\}$	$139,95^\circ$	$86,17^\circ$	$-164,22^\circ$	$-173,84^\circ$	-102°	$93,93^\circ$

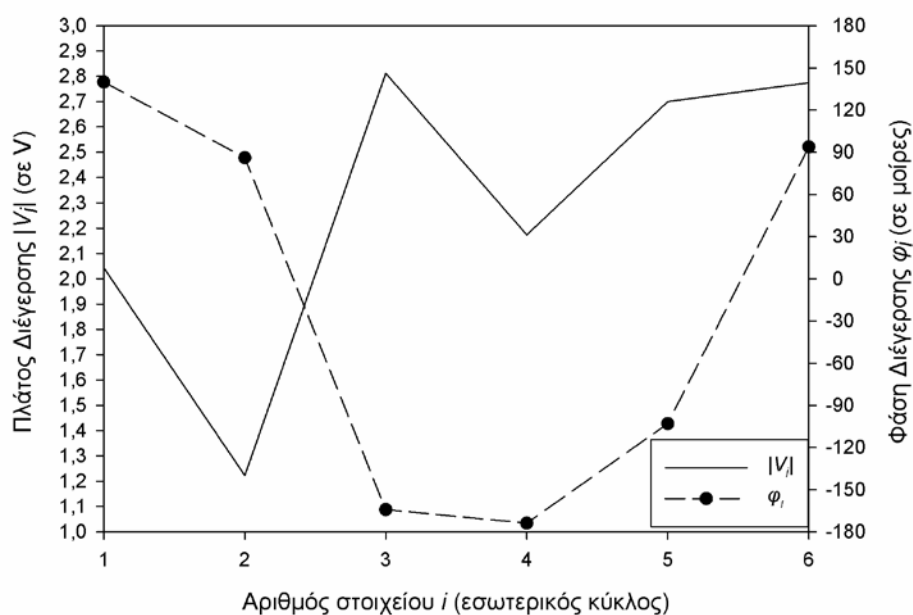
Πίνακας 30. Παράμετροι τροφοδοσίας του εσωτερικού δακτυλιδιού της στοιχειοκεραίας (PSO)

	7	8	9	10	11	12
$ V_i $	2,156 V	1,138 V	1,818 V	2,405 V	2,82 V	2,126 V
$\arg\{V_i\}$	$-25,85^\circ$	$162,29^\circ$	$131,37^\circ$	-50°	$151,16^\circ$	$6,89^\circ$

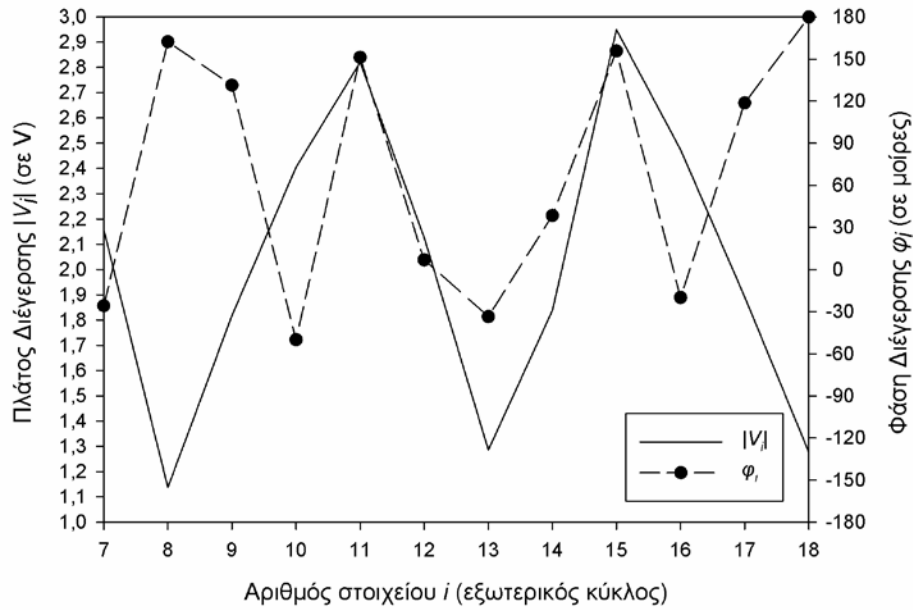
	13	14	15	16	17	18
$ V_i $	1,287 V	1,839 V	2,95 V	2,474 V	1,892 V	1,276 V
$\arg\{V_i\}$	$-33,53^\circ$	$38,55^\circ$	$155,64^\circ$	$-19,91^\circ$	$118,68^\circ$	180°

Πίνακας 31. Παράμετροι τροφοδοσίας του εξωτερικού δακτυλιδιού της στοιχειοκεραίας (PSO)

Παρομοίως, στις Εικόνες 73 και 74 απεικονίζεται η χωρική κατανομή των διεγέρσεων καθώς και οι αντίστοιχες μεταβολές στους φασιθέτες τους.



Εικόνα 73. Παράμετροι τροφοδοσίας των εσωτερικών στοιχείων της στοιχειοκεραίας (PSO).

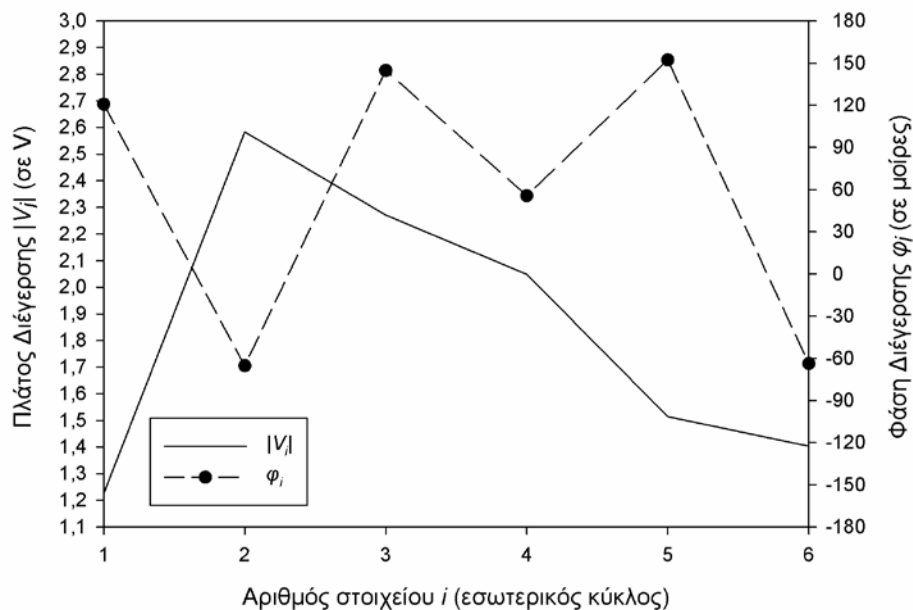


Εικόνα 74. Παράμετροι τροφοδοσίας των εξωτερικών στοιχείων της στοιχειοκεραίας (PSO).

Οι εφαρμοζόμενες διεγέρσεις στους ακτινοβολητές της βελτιστοποιημένη στοιχειοκεραίας που προέκυψε από τον αλγόριθμο GA καταγράφονται στους Πίνακες 32 και 33 ενώ στις Εικόνες 75 και 76 απεικονίζεται η χωρική κατανομή τους καθώς και οι αντίστοιχες μεταβολές στους φασιθέτες τους.

	1	2	3	4	5	6
$ V_i $	1,227 V	2,583 V	2,271 V	2,048 V	1,514 V	1,403 V
$\arg\{V_i\}$	120,75°	-65,29°	144,68°	55,59°	152,2°	-63,79°

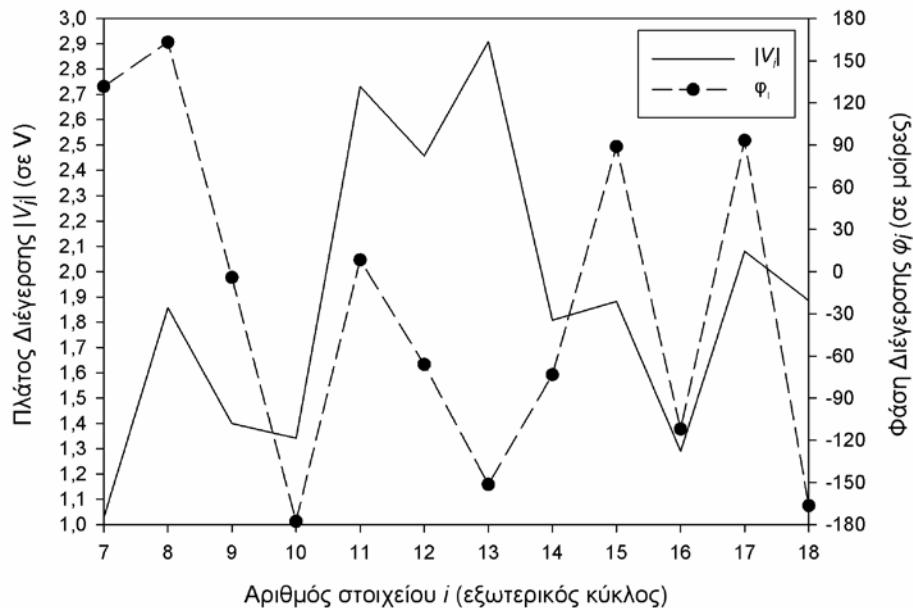
Πίνακας 32. Παράμετροι τροφοδοσίας του εσωτερικού δακτυλιδιού της στοιχειοκεραίας (GA)



Εικόνα 75. Παράμετροι τροφοδοσίας των εσωτερικών στοιχείων της στοιχειοκεραίας (GA).

	7	8	9	10	11	12
$ V_i $	1,028 V	1,857 V	1,4 V	1,342 V	2,731 V	2,458 V
$\arg\{V_i\}$	131,73°	163,31°	-4,12°	-177,62°	8,35°	-65,95°
	13	14	15	16	17	18
$ V_i $	2,909 V	1,808 V	1,882 V	1,29 V	2,08 V	1,886 V
$\arg\{V_i\}$	-151,4°	-73,34°	88,97°	-111,98°	93,4°	-166,42°

Πίνακας 33. Παράμετροι τροφοδοσίας του εξωτερικού δακτυλιδιού της στοιχειοκεραίας (GA)



Εικόνα 76. Παράμετροι τροφοδοσίας των εξωτερικών στοιχείων της στοιχειοκεραίας (GA).

4.6.4 Συμπεράσματα

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα που λήφθηκαν μετά από τη βελτιστοποίηση μιας επίπεδης ομοιόμορφης κυκλικής στοιχειοκεραίας. Κύριο πλεονέκτημα της μελετώμενης στοιχειοκεραίας είναι ότι δεν έχει ακραία στοιχεία, οπότε τα διαγράμματα ακτινοβολίας δύναται να στραφούν κατά βούληση σε οποιαδήποτε κατεύθυνση χωρίς να αλλοιώνεται σημαντικά η μορφή τους. Στόχοι της διαδικασίας βελτιστοποίησης αποτέλεσαν η επίτευξη βαθέων μηδενισμών σε προκαθορισμένες κατευθύνσεις παρεμβολών (SNOI) ενώ ο κυρίως λοβός ακτινοβολίας έχει στραφεί στην επιθυμητή κατεύθυνση (SOI). Συνοπτικά τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν από την εφαρμογή του γενετικού αλγόριθμου (GA) και της βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (PSO) είναι:

- Η οριζόμενη αντικειμενική συνάρτηση, παρόλο που δεν είναι φραγμένη, επέτρεψε τη μεγιστοποίηση της διαφοράς μεταξύ του επιτυγχανόμενου κέρδους της στοιχειοκεραίας και του βάθους των μηδενισμών.
- Οι δύο αλγόριθμοι βελτιστοποίησης παρουσίασαν παρόμοια ποιοτικά χαρακτηριστικά σύγκλισης. Η μέθοδος PSO επέτυχε σημαντικά βαθύτερους μηδενισμούς στις προδιαγεγραμμένες κατευθύνσεις για τον ίδιο αριθμό επαναλήψεων, άρα και με συγκρίσιμο κόστος σε υπολογιστικό χρόνο.

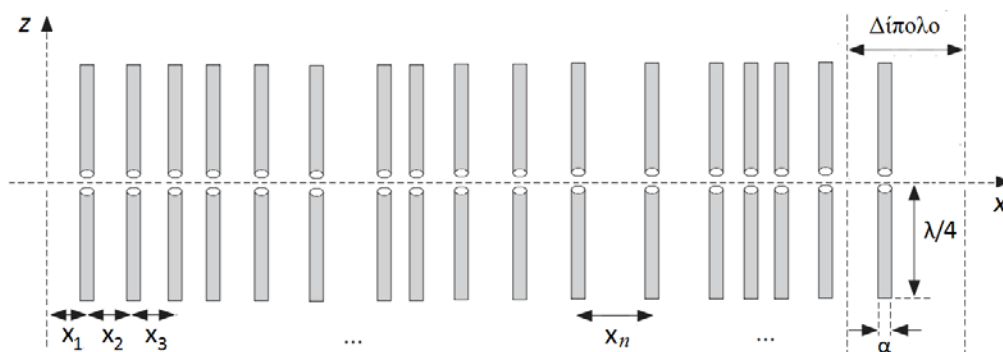
- Αν και δεν είναι εύκολο να ερμηνευθούν άμεσα οι ευρισκόμενες τιμές διεγέρσεων, μπορεί να παρατηρηθεί ότι η εφαρμογή της PSO κατέληξε στην εύρεση ομαλότερα μεταβαλλόμενων κατανομών κατά μήκος των δύο δακτυλιδιών.
- Η υπολογιστική πολυπλοκότητα των δύο στοχαστικών μεθόδων είναι σημαντική, καθιστώντας μάλλον απαγορευτική τη χρήση τους σε πραγματικό χρόνο. Παρόλα αυτά υπάρχει ήδη σημαντικό ενδιαφέρον για την υλοποίηση του αλγόριθμου βελτιστοποίησης PSO σε FPGAs (Field-Programmable Gate Array) [123], ακόμα και για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος μορφοποίησης διαγραμμάτων ακτινοβολίας σε πραγματικό χρόνο [124].

4.7 Σύνθεση Γραμμικής Στοιχειοκεραίας Σταθμού Βάσης

Στην παρούσα μελέτη μελετάται μια γραμμική στοιχειοκεραία για μία εφαρμογή σταθμού βάσης, αποτελούμενη από 16 ανομοιόμορφα χωρικά κατανεμημένους ακτινοβολητές (Non-Uniform Linear Array – NULA). Σκοπός του παρουσιαζόμενου προβλήματος σύνθεσης είναι ο προσδιορισμός των αποστάσεων μεταξύ των ακτινοβολητών καθώς και της φάσεως τροφοδοσίας τους, προκειμένου να ληφθεί διάγραμμα ακτινοβολίας το οποίο θα συμμορφώνεται με μια κατάλληλα ορισμένη μάσκα ακτινοβολίας. Για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων της στοιχειοκεραίας χρησιμοποιήθηκαν ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (PSO) και ο γενετικός αλγόριθμος (GA). Η αποτελεσματικότητα των δύο μεθόδων συγκρίνεται στη συνέχεια βάσει της ποιότητας των βελτιστοποιημένων σχεδιάσεων, όπως αυτή αποτιμάται από μια κατάλληλα ορισμένη αντικειμενική συνάρτηση, και βάσει της συμπεριφορά σύγκλισής τους [90].

4.7.1 Περιγραφή του προβλήματος σύνθεσης

Τα επιθυμητά χαρακτηριστικά ακτινοβολήσης της στοιχειοκεραίας είναι η επίτευξη ενός ελάχιστου επιπέδου καταπίεσης των πλευρικών λοβών για το συνολικό διάγραμμα ακτινοβολίας και η εξασφάλιση του μηδενισμού του διαγράμματος σε συγκεκριμένο εύρος αζιμουθιακών γωνιών, προκειμένου να ελαχιστοποιούνται οι παρεμβολές στο σταθμό βάσης. Προκειμένου να είναι δυνατή η εύκολη και οικονομική κατασκευή της στοιχειοκεραίας, οι παράμετροι που επιλέχθηκαν προς βελτιστοποίηση είναι οι σχετικές αποστάσεις μεταξύ των ακτινοβολητών και η σχετική φάση διεγέρσεως τους. Τέλος, θεωρήθηκε ότι η στοιχειοκεραία απαρτίζεται από κάθετα τοποθετημένα $\lambda/2$ δίπολα ακτίνας $\alpha=0.003369\lambda$. Η γεωμετρία της στοιχειοκεραίας απεικονίζεται στην Εικόνα 77.



Εικόνα 77. Μη ομογενής γραμμική στοιχειοκεραία αποτελούμενη από 16 $\lambda/2$ δίπολα.

Η ένταση της ακτινοβολίας του κάθε δίπολου προσεγγίζεται αναλυτικά από τη σχέση (112) και το διάγραμμα ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας από τις σχέσεις (96). Τέλος τα φαινόμενα αμοιβαίας επαγωγής μεταξύ των παράλληλα τοποθετημένων γραμμικών ακτινοβολητών προσεγγίζονται αναλυτικά με τη βοήθεια της μεθόδου της επαγόμενης ηλεκτρεγερτικής δύναμης (IEMF – Induced Electromotive Force [95]) και ειδικότερα των σχέσεων (67) και (68).

Στη συνέχεια ορίζεται η συνάρτηση καταλληλότητας η οποία, κατά τη διάρκεια της εξέλιξης της διαδικασίας βελτιστοποίησης, θα εξασφαλίζει ότι τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας των υποψηφίων σχεδιάσεων δεν θα αποκλίνουν σημαντικά από τα επιθυμητά.

4.7.2 Συνάρτηση καταλληλότητας

Προκειμένου να αποτιμηθεί με ακρίβεια η απόκλιση κάθε υποψήφιας σχεδίασης από την προδιαγεγραμμένη συμπεριφορά, πρέπει να οριστούν κατάλληλες συναρτήσεις ποινής (penalty functions), οι οποίες στην συνέχεια αθροίζονται για τον υπολογισμό της συνολικής ποινής. Συγκεκριμένα, ορίζονται τρεις διαφορετικές συναρτήσεις ποινής:

- μια συνάρτηση f_{beam} που λαμβάνει τιμές ανάλογες με την απόκλιση της κατευθύνσεως του κυρίως λοβού ακτινοβολίας από την επιθυμητή κατεύθυνση,
- μια συνάρτηση f_{lobes} που αποτιμά την συμμόρφωση των πλευρικών λοβών ακτινοβολίας ως προς την προκαθορισμένη τιμή καταπίεσης τους,
- και τέλος μιας συνάρτησης f_{nulls} που αποτιμά την απόκλιση του βάθους των επιτυγχανόμενων μηδενισμών του διαγράμματος ακτινοβολίας για ένα ορισμένο εύρος αζιμουθιακών γωνιών.

Η αναλυτική έκφραση των παραπάνω περιορισμών/συναρτήσεων ποινών δίνεται από τις σχέσεις (123), οι οποίες υπολογίζονται βάσει της προκαθορισμένης μάσκας ακτινοβολίας

$$\begin{aligned} f_{beam} &= |\varphi_{SOI} - \varphi_{max, synth}| \\ f_{lobes} &= \sum_i \max \{ G_{synth}(\varphi_i) - G_{mask}(\varphi_i), 0 \} \\ f_{nulls} &= \frac{1}{N} \sum_k \max \{ G_{synth}(\varphi_k) - G_{mask}(\varphi_k), 0 \} \end{aligned} \quad (123)$$

όπου οι γωνίες είναι εκφρασμένες σε μοίρες και οι τιμές κανονικοποιημένου κέρδους μετρώνται σε dB. Ο δείκτης i καταμετρά το σύνολο των γωνιακών θέσεων των πλευρικών λοβών για τα προκύπτοντα βελτιστοποιημένα διαγράμματα ακτινοβολίας και ο δείκτης k τις N διαφορετικές διαδοχικές γωνιακές θέσεις όπου το διάγραμμα θα πρέπει να επιτυγχάνει το προκαθορισμένο βάθος μηδενισμού. Τέλος οι τιμές που λαμβάνουν οι συναρτήσεις ποινής αθροίζονται για τον υπολογισμό της συνολικής απόκλισης p , η οποία και κανονικοποιείται σύμφωνα με τη σχέση (114) προκειμένου να εκφραστεί με όρους καταλληλότητας (πεδίο αποτίμησης $[0, 1]$).

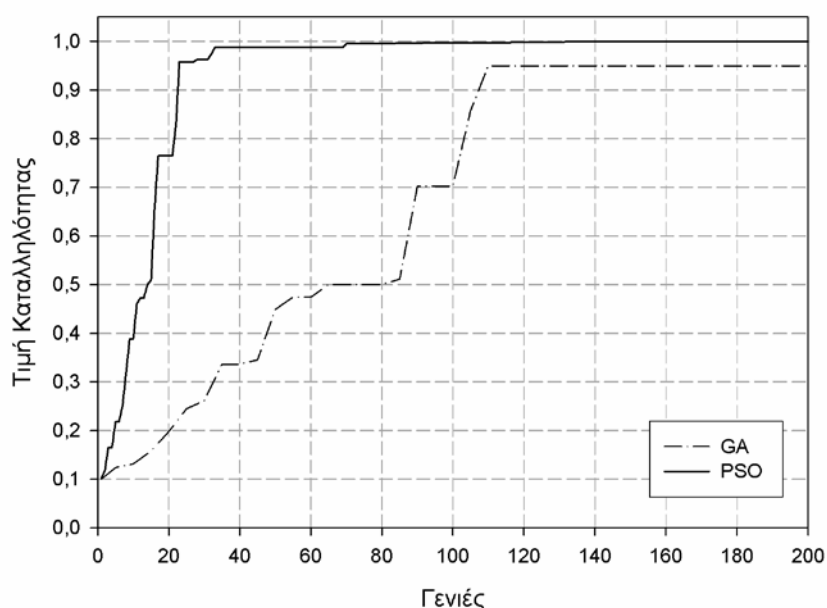
Για την επίλυση του περιγραφόμενου προβλήματος σύνθεσης στοιχειοκεραίας ορίστηκαν κατάλληλες παράμετροι για τους χρησιμοποιούμενους στοχαστικούς αλγόριθμους

βελτιστοποίησης. Συγκεκριμένα, εφαρμόστηκε η παραλλαγή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων η οποία βασίζεται στον ορισμό κατάλληλου παράγοντα περιορισμού (constriction coefficient), με παραμέτρους ατομικότητας $c_1=2,1$, κοινωνικότητας $c_2=2,0$, εξαντλητικής έρευνας του χώρου λύσεων $k=1,0$ καθώς και τιμή περιορισμού της ταχύτητας των σωματιδίων ίση με $v_{max}=0,2$. Αντίστοιχα, χρησιμοποιήθηκε ένας γενετικός αλγόριθμος για την εξέλιξη του πληθυσμού, στον οποίο εφαρμόζεται ο εξελικτικός τελεστής της διασταύρωσης με πιθανότητα $p_c=0,5$ και ο τελεστής της μετάλλαξης με πιθανότητα $p_m=0,2$. Προκειμένου να εξασφαλιστεί η διατήρηση της γενετικής πληροφορίας των ατόμων που παρουσιάζουν και τη μεγαλύτερη τιμή καταλληλότητας, χρησιμοποιήθηκε ο μηχανισμός του ελιτισμού σε ποσοστό 8,33% του πληθυσμού (για τα 10 βέλτιστα μέλη του). Κατά την εφαρμογή και των δύο αλγορίθμων, ορίστηκε πληθυσμός αποτελούμενος από 120 άτομα, τα οποία εξελίχθηκαν για 200 γενεές.

4.7.3 Αποτελέσματα

Για το εξεταζόμενο πρόβλημα σύνθεσης της γραμμικής στοιχειοκεραίας, απαιτήθηκε τα βελτιστοποιημένα διαγράμματα ακτινοβολίας να ικανοποιούν τα ακόλουθα κριτήρια:

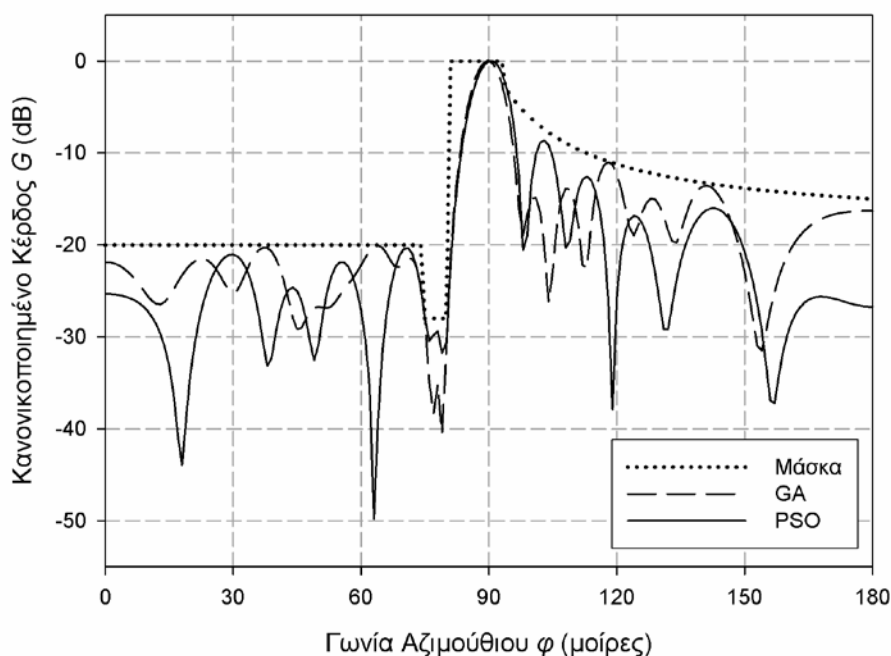
- ο κύριος λοβός ακτινοβολίας να είναι στραμμένος στη διεύθυνση των 90° ,
- οι πλευρικοί λοβοί να είναι καταπιεσμένοι κατά 20 dB για αζιμουθιακές γωνίες μικρότερες των 75° ,
- για γωνίες μεγαλύτερες των 90° το ύψος τους να συμμορφώνεται με κατάλληλα ορισμένη πολυωνυμική μάσκα η οποία μειώνεται εκθετικά, με ελάχιστη τιμή καταπίεσης ίση με 15 dB,
- μηδενισμός του διαγράμματος ελάχιστου βάθους 28 dB, για τις αζιμουθιακές γωνίες μεταξύ των 75° και 80° .



Εικόνα 78. Σύγκλιση των αλγορίθμων PSO και GA για τη σύνθεση της γραμμικής στοιχειοκεραίας.

Η διαδικασία βελτιστοποίησης εμφανίζεται να συγκλίνει ομαλά μέχρι και το πέρας της και για τις δύο περιπτώσεις (Εικόνα 78). Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων συγκλίνει πολύ πιο γρήγορα από τον γενετικό αλγόριθμο. Η διαφορά στην απόδοση των δύο αλγορίθμων αποδίδεται κατά κύριο λόγο στη χρήση του παράγοντα περιορισμού της ταχύτητας για τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων, σε αντιδιαστολή με τον γενετικό αλγόριθμο για τον οποίο δε δύναται να οριστεί ανάλογος μηχανισμός. Οι τιμές καταλληλότητας των σχεδιάσεων που λήφθηκαν στο πέρας της διαδικασίας βελτιστοποίησης είναι αντίστοιχα 0,999 και 0,95.

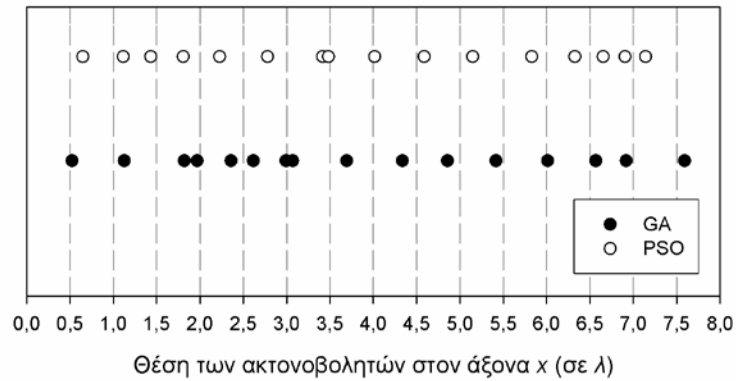
Η απεικόνιση των δύο βελτιστοποιημένων διαγραμμάτων ακτινοβολίας, επιβεβαιώνει ότι ο κύριος λοβός ακτινοβολίας έχει στραφεί στην επιθυμητή γωνία (στις 90°) και ότι δεν παραβιάζονται οι επιβαλλόμενοι περιορισμοί για το ύψος των πλευρικών λοβών καθώς και για τον επιθυμητό μηδενισμό στο προκαθορισμένο εύρος κατευθύνσεων (Εικόνα 79).



Εικόνα 79. Διαγράμματα ακτινοβολίας των βελτιστοποιημένων ανομοιογενών γραμμικών κεραιών.

Ποιοτικά τα δύο διαγράμματα διαφοροποιούνται ως προς το ύψος των επιμέρους πλευρικών λοβών καθώς και ως προς το βάθος/εύρος του μηδενισμού. Οι σχεδιάσεις διαφοροποιούνται σημαντικά και ως προς τις αντιστοιχούντες βελτιστοποιημένες χωρικές κατανομές των διπόλων κατά μήκος της γραμμικής στοιχειοκεραίας.

Παρόλο που για την βελτιστοποίηση αμφότερων των λύσεων συνυπολογίστηκαν τα φαινόμενα σύζευξης μεταξύ των ακτινοβολητών, και οι δύο αλγόριθμοι είχαν ως κοινή συνισταμένη την τοποθέτηση κάποιων διπόλων σε πολύ κοντινές αποστάσεις, προκειμένου να ικανοποιηθούν οι επιβαλλόμενοι περιορισμοί στα διαγράμματα ακτινοβολίας (Εικόνα 80).



Εικόνα 80. Σχετική τοποθέτηση των ακτινοβολητών για τις δύο βέλτιστες σχεδιάσεις (GA & PSO) .

Συγκεκριμένα η σχεδίαση που λήφθηκε από την εφαρμογή της PSO έχει ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό «ζεύγους» διπόλων (στοιχεία 7&8) ενώ η βελτιστοποιημένη σχεδίαση που προέκυψε από τον GA σχημάτισε αντίστοιχα δύο ζεύγη (στοιχεία 3&4 και 7&8).

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι παράμετροι της στοιχειοκεραίας που βελτιστοποιούνται είναι οι μεταξύ των ακτινοβολητών αποστάσεις καθώς και οι φάσεις τροφοδοσίας τους (οι τελικές τιμές αναφέρονται στους Πίνακες 34 και 35). Αναφορικά με τη κωδικοποίηση των παραμέτρων στο διάνυσμα λύσης ισχύει:

- Η φάση των εφαρμοζόμενων τάσεων στους ακροδέκτες των ακτινοβολητών λαμβάνει τιμές στο διάστημα $[-180^\circ, 180^\circ]$.
- Η μέγιστη επιτρεπτή απόσταση μεταξύ των ακτινοβολητών είναι 1 μήκος κύματος.

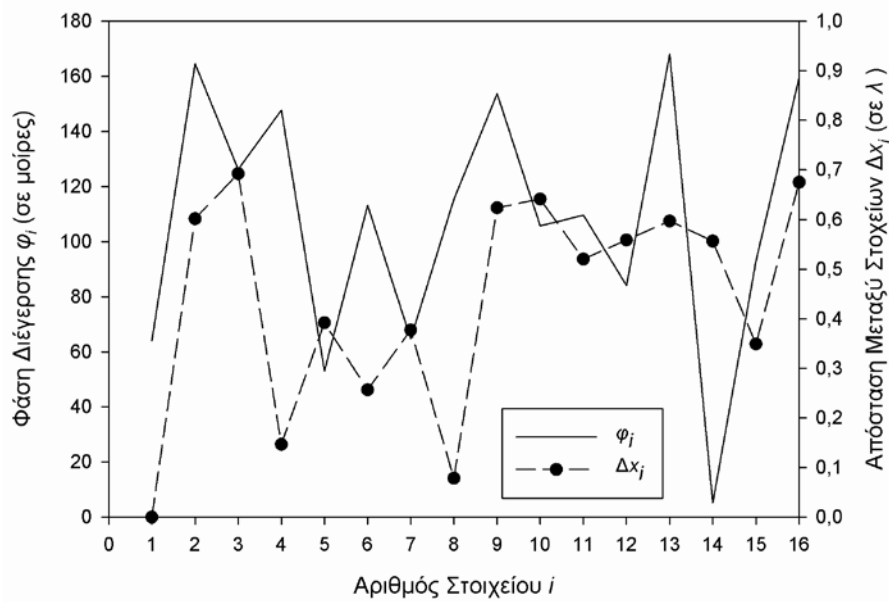
	1	2	3	4	5	6	7	8
x_i	0,525λ	1,127λ	1,819λ	1,966λ	2,358λ	2,614λ	2,991λ	3,07λ
Δx_i	0λ	0,602λ	0,693λ	0,147λ	0,392λ	0,257λ	0,377λ	0,078λ
φ_i	63,98°	164,57°	126,25°	147,72°	53,09°	113,13°	64,69°	115,4°
	9	10	11	12	13	14	15	16
x_i	3,693λ	4,335λ	4,855λ	5,414λ	6,011λ	6,568λ	6,917λ	7,592λ
Δx_i	0,624λ	0,642λ	0,52λ	0,559λ	0,597λ	0,556λ	0,349λ	0,675λ
φ_i	153,67°	105,7°	109,62°	84,07°	168,04°	5,19°	92,93°	159,64°

Πίνακας 34. Παράμετροι βελτιστοποιημένης ανομοιογενούς γραμμικής στοιχειοκεραίας (GA)

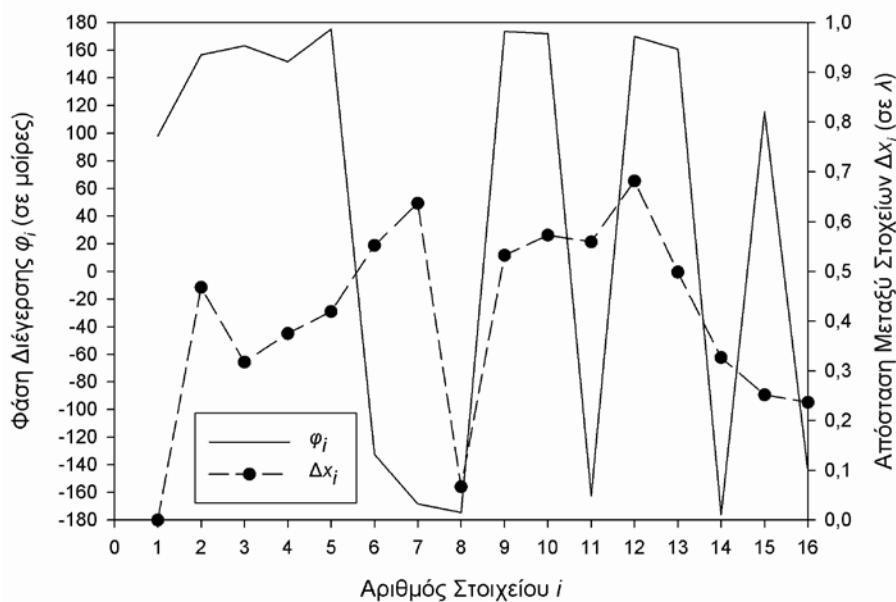
	1	2	3	4	5	6	7	8
x_i	0,647λ	1,115λ	1,432λ	1,807λ	2,226λ	2,779λ	3,416λ	3,482λ
Δx_i	0λ	0,468λ	0,318λ	0,375λ	0,419λ	0,552λ	0,637λ	0,067λ
φ_i	97,98°	156,66°	163,2°	151,67°	175,3°	-132,46°	-168,37°	-174,51°
	9	10	11	12	13	14	15	16
x_i	4,014λ	4,587λ	5,146λ	5,827λ	6,325λ	6,652λ	6,903λ	7,14λ
Δx_i	0,532λ	0,573λ	0,559λ	0,682λ	0,498λ	0,327λ	0,252λ	0,237λ
φ_i	173,63°	171,87°	-162,39°	170,01°	160,72°	-176,03°	115,55°	-145,09°

Πίνακας 35. Παράμετροι βελτιστοποιημένης ανομοιογενούς γραμμικής στοιχειοκεραίας (PSO)

Οι βαθμοί ελευθερίας της διαδικασίας βελτιστοποίησης είναι 32 (2 για κάθε ακτινοβολητή). Ο σχετικά μεγάλος αριθμός τους έχει ως συνέπεια την δυνατότητα εύρεσης σημαντικά διαφοροποιημένων σχεδιάσεων. Οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των γεωμετρικών διατάξεων των βελτιστοποιημένων στοιχειοκεραίων αντισταθμίζονται από την κατάλληλη επιλογή των φασιστητών των εφαρμοζόμενων τάσεων στους ακροδέκτες των δίπολων, και έχουν ως αποτέλεσμα την διαμόρφωση διαγραμμάτων ακτινοβολίας που δεν αποκλίνουν από τους σχεδιαστικούς περιορισμούς (Εικόνες 81 και 82). Σε κάθε περίπτωση, για τη διαμόρφωση της τελικής γεωμετρικής δομής συνυπολογίζονται τα φαινόμενα σύζευξης μεταξύ των ακτινοβολητών, εφόσον η τάση διέγερσης των ακτινοβολητών παραμένει σταθερή και ίση με 1V, ενώ δύναται να μεταβληθεί μόνο η φάση της τροφοδοσίας.



Εικόνα 81. Σχετική θέση των στοιχείων – φάσεις τροφοδοσίας της γραμμικής στοιχειοκεραίας (GA).



Εικόνα 82. Σχετική θέση των στοιχείων – φάσεις τροφοδοσίας της γραμμικής στοιχειοκεραίας (PSO).

Τέλος, μπορεί να παρατηρηθεί ότι για τη βελτιστοποιημένη στοιχειοκεραία από χρήση του γενετικού αλγορίθμου, τα στοιχεία με δείκτες 9 και 10 λειτουργούν ως κεντρικά. Αντίθετα, στη στοιχειοκεραία που προέκυψε από χρήση του αλγόριθμου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων, το στοιχείο 9 τοποθετείται κεντρικά στο συνολικό άνοιγμα της κεραίας. Προκειμένου λοιπόν να επιτευχθεί ο απαιτούμενος βαθύς μηδενισμός του διαγράμματος στις αζιμουθιακές γωνίες μεταξύ 75° και 85° , η εφαρμογή των στοχαστικών αλγορίθμων έχει ως συνέπεια την ελαχιστοποίηση της απόστασης μεταξύ των στοιχείων 7 και 8.

4.7.4 Συμπεράσματα

Στην παρούσα ενότητα συγκρίθηκε η αποτελεσματικότητα του αλγόριθμου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων και των γενετικών αλγορίθμων κατά τη σύνθεση μιας ανομοιόμορφης γραμμικής στοιχειοκεραίας. Σκοπός της διαδικασίας βελτιστοποίησης είναι ο προσδιορισμός των αποστάσεων μεταξύ των ακτινοβολητών καθώς και της φάσεως τροφοδοσίας τους, προκειμένου να ληφθεί διάγραμμα ακτινοβολίας το οποίο θα συμμορφώνεται με μια κατάλληλα ορισμένη μάσκα ακτινοβολίας. Τα αποτελέσματα που λήφθηκαν συνοψίζονται ως ακολούθως:

- Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων συνέκλινε πολύ πιο γρήγορα από τον γενετικό αλγόριθμο, καθώς ο δεύτερος δεν διαθέτει μηχανισμό ανάλογο του ορισμού παράγοντα περιορισμού της ταχύτητας.
- Και οι δύο αλγόριθμοι είχαν ως κοινή συνισταμένη την τοποθέτηση διπόλων σε πολύ κοντινές αποστάσεις σχηματίζοντας ένα «ζεύγος», προκειμένου να επιτευχθεί ο βαθύς μηδενισμός του διαγράμματος ακτινοβολίας στις προδιαγραφόμενες γωνίες, χωρίς να παραβιαστεί το ανώτατο επιτρεπτό ύψος των πλευρικών λοβών.
- Στη βελτιστοποιημένη χωρική κατανομή που προέκυψε μετά από την εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου μπορούν να θεωρηθούν ως κεντρικά στο άνοιγμα της στοιχειοκεραίας δύο συμμετρικά τοποθετημένα στοιχεία. Αντιθέτως υπάρχει μόνο ένα κεντρικό στοιχείο στη σχεδίαση που προέκυψε μετά από εφαρμογή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης PSO.
- Οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των γεωμετρικών διατάξεων των βελτιστοποιημένων στοιχειοκεραίων αντισταθμίζονται από την κατάλληλη επιλογή των φασιθετών των εφαρμολζόμενων τάσεων στους ακροδέκτες των δίπολων.

4.8 Απόδοση της κατανεμημένης πλατφόρμας βελτιστοποίησης

Προκειμένου να εκτιμηθεί η ευελιξία και η αποδοτικότητα της κατανεμημένης πλατφόρμας, μελετάται η εφαρμογή της κατά τη βελτιστοποίηση της σχεδίασης μιας κεραίας μεταγωγής λοβών, όπως αυτή παρουσιάστηκε σε προηγούμενη ενότητα. Ως προς το πρώτο σκέλος δίδονται στοιχεία για τον ορισμό της προβλήματος καθώς και την μορφή των αρχείων διαμόρφωσης, που ορίζουν μεταξύ άλλων και τις παραμέτρους του αλγόριθμου βελτιστοποίησης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αποτελέσματα για την μετρούμενη υπολογιστική αποδοτικότητα της πλατφόρμας, που λήφθηκαν κατά την εκτέλεση των ακόλουθων δύο σεναρίων:

1. Κλιμάκωση του αριθμού των διαθέσιμων δικτυακών υπολογιστικών κόμβων.
2. Κλιμάκωση του μεγέθους πληθυσμού του αλγόριθμου βελτιστοποίησης.

Τα ληφθέντα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι η χρήση ενός αποκεντρωμένου υπολογιστικού μοντέλου, σύμφωνα με το οποίο η εκτίμηση της ποιότητας κάθε σχεδίασης αποτελεί και το βασικό άτομο υπολογισμού, είναι κατάλληλο για την επιτάχυνση της διαδικασίας βελτιστοποίησης χρησιμοποιώντας κατανεμημένους πόρους [75]. Διευκρινίζεται ότι προκειμένου να μεγιστοποιείται το όφελος σε υπολογιστικό χρόνο από τη χρήση της κατανεμημένης πλατφόρμας πρέπει οι υπολογισμοί που παραλληλοποιούνται να ενέχουν σημαντικά μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος από το αντίστοιχο κόστος του αλγόριθμου βελτιστοποίησης.

4.8.1 Διαμόρφωση της πλατφόρμας κατανεμημένης βελτιστοποίησης

Το οριζόμενο πρόβλημα βελτιστοποίησης αφορά τη σχεδίαση μιας κεραίας μεταγωγής λοβών, αποτελούμενης από 5 δίπολα ημικύματος η οποία δύναται να εκπέμψει 4 διαφορετικά διαγράμματα ακτινοβολίας, των οποίων οι κυρίως λοβοί είναι στραμμένοι στις επιθυμητές κατευθύνσεις των 0° , 90° , 180° και 270° , χωρίς το άνοιγμα τους να υπερβαίνει τις 80° . Επιπρόσθετα απαιτείται ότι οι σχηματιζόμενοι πλευρικοί λοβοί των αντίστοιχων παραγόντων διάταξης της στοιχειοκεραίας, να είναι καταπιεσμένοι κατά 6db τουλάχιστον.

Η κλάση `ArrayProblem` ορίζει τις προδιαγραφές της κεραίας μεταγωγής λοβού και την αντιστοίχιση των υποψήφιων σχεδιάσεων σε τιμές καταλληλότητας. Το δεύτερο επιτυγχάνεται υλοποιώντας τη διεπαφή `ProblemInterface` και συγκεκριμένα την αφηρημένη συνάρτηση `double fitness(double[] solution)`, η οποία καλείται από προκειμένου να υπολογιστούν οι αντίστοιχες τιμές καταλληλότητας (Πίνακας 36).

```
public class ArrayProblem extends Problem {
    public ArrayProblem() {
        // ορισμός των προδιαγραφών της σχεδίασης
        setupProblem();

        // ορισμός του χώρου λύσεων
        defineOptimizationConstraints();
    }

    public double fitness(double[] solution) {

        double penalty = 0.0;
        for (int k=0; k<diagramsNumber; k++) {

            // αποκωδικοποίηση των παραμέτρων σχεδίασης από το διάνυσμα λύσης
            ArrayParameters parameters = decodeParameters(solution);

            // εκ' νέου υπολογισμός της στοιχειοκεραίας
            array.compute(parameters)

            // υπολογισμός των N παραμέτρων ποινής
            double[] p = new double[N];
            f[1] = array.penalty1();
        }
    }
}
```

```

...
f[N] = array.penaltyN();

// ζυγισμένη άθροιση των ποινών
double f = 0.0;
for (int i=0; i<N; i++)
    penalty += w[i]*f[i];
}

// υπολογισμός της τιμής καταλληλότητας
return 1.0 / (1.0 + Math.sqrt(penalty));
}
}

```

Πίνακας 36. Ορισμός της συνάρτησης καταλληλότητας για την κεραία μεταγωγής λοβών

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η συνάρτηση καταλληλότητας υπολογίζει τα χαρακτηριστικά ακτινοβολήσης της κεραίας για μια συγκεκριμένη χωρική διαμόρφωση και συνόλου διεγέρσεων των στοιχείων της στοιχειοκεραίας, και για καθένα από τα εκπεμπόμενα διαγράμματα. Στη συνέχεια υπολογίζονται οι αποκλίσεις των χαρακτηριστικών των λαμβανόμενων διαγραμμάτων από τις προαναφερθείσες προδιαγραφές, αθροίζονται και τέλος κανονικοποιούνται για να μπορούν να εκφραστούν ως τιμή καταλληλότητας. Οι κλάσεις ορισμού του προβλήματος και οι κλάσεις της βιβλιοθήκης προσομοίωσης κεραιών που παρουσιάστηκε σε προηγούμενη ενότητα, ενθυλακώνονται σε ξεχωριστά πακέτα JAR της Java, προκειμένου να είναι δυνατή η ανάπτυξη τους σε όλους τους συμμετέχοντες υπολογιστικούς κόμβους.

Για τη σύνθεση της στοιχειοκεραίας στρεφόμενων λοβών χρησιμοποιήθηκε η παραλλαγή του αλγόριθμου βελτιστοποίησης σωματιδίων με χρήση του παράγοντα αδρανείας (IW) με ορισμό σφαιρικής γειτονιάς για τα σωματίδια που απαρτίζουν τον πληθυσμό [38]. Για την εξέταση της κλιμάκωσης της απόδοσης της πλατφόρμας απαιτήθηκε η επαναληπτική βελτιστοποίηση της εξεταζόμενης σχεδίασης, με μεταβλητά μεγέθη πληθυσμού που κυμάνθηκαν από 125 έως 200 σωματίδια. Επιλέχθηκε η χρήση της παραλλαγής με χρήση παράγοντα αδρανείας σε αντιδιαστολή με τη μέθοδο υπολογισμού του λόγου καταλληλότητας προς απόσταση (Fitness Distance Ratio – FDR) [40], που ορίστηκε κατά την επίλυση του προβλήματος αναφοράς σε προηγούμενη ενότητα, για τους εξής λόγους:

- Τα οριζόμενα μεγέθη πληθυσμού είναι σημαντικά μεγαλύτερα, συγκρινόμενα με το μέγεθος πληθυσμού που είχε οριστεί κατά την βελτιστοποίηση της ίδιας σχεδίασης με τη μέθοδο FDR, υπερκεράζοντας έτσι τη διαφορά στην αποτελεσματικότητα των δύο μεθόδων κατά την επίλυση του εξεταζόμενου προβλήματος.
- Η χρήση της μεθόδου FDR σε συνδυασμό με τη χρήση σφαιρική γειτονιάς απαιτεί τον επαναληπτικό υπολογισμό των λόγων καταλληλότητας όλων των σωματιδίων προς την μεταξύ τους απόστασης, γεγονός που συνεπάγεται την σημαντική αύξηση του υπολογιστικού κόστους του ίδιου του αλγορίθμου σε σχέση με την διαδικασία της κατανεμημένης αποτίμησης των τιμών καταλληλότητάς τους, για μεγάλα μεγέθη πληθυσμού.

Για κάθε σενάριο απολογισμού της αποδοτικότητας της πλατφόρμας βελτιστοποίησης, λαμβάνονται στη συνέχεια οι συνολικοί χρόνοι εκτελέσεων της διαδικασίας, προβλέποντας ένα κλιμακούμενο αριθμό αποτιμήσεων των τιμών καταλληλότητας, έχοντας ορίσει πρώτα ως μέγιστο επιτρεπτό χρόνο εξέλιξης του πληθυσμού τις 400 γενιές.

Η παραμετροποίηση της πλατφόρμας λαμβάνει χώρα κατά την αρχικοποίηση της και περιγράφεται καταρχήν με τη βοήθεια κατάλληλα ορισμένου αρχείου ιδιοτήτων, που παραπέμπει στο αρχείο JAR ορισμού των κλάσεων περιγραφής του προβλήματος και σε ένα επιπρόσθετο XML αρχείου διαμόρφωσης (configuration file). Το αρχείο ιδιοτήτων εμπεριέχει το όνομα του JAR αρχείου που ενθυλακώνει τον κώδικα περιγραφής του προβλήματος, το όνομα της κλάσης του προβλήματος, τη μέγιστη επιτρεπτή διάρκεια της διαδικασίας βελτιστοποίησης εκφρασμένη σε γενιές, και τέλος το όνομα του αρχείου διαμόρφωσης (Πίνακας 37).

```
problem = problem.ArrayProblem
parameters = parametersArray.xml
jar = ArrayProblem.jar
generations = 400
```

Πίνακας 37. Δομή του αρχείου ιδιοτήτων

Οι παράμετροι ατομικότητας c_1 και κοινωνικότητας c_2 τέθηκαν ίσοι με 2,0, όπως έχει προταθεί στην μελέτη [38]. Ο όρος αδρανείας ορίστηκε να λαμβάνει αρχικά την τιμή 0,9 και να μειώνεται προοδευτικά κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης έως και τη λήξη της, όπου θα πρέπει να έχει λάβει και την τελική τιμή 0,4. Επιπρόσθετα χρησιμοποιήθηκαν οι ανακλαστικές οριακές συνθήκες (Reflective Boundary Conditions - RBC) για τον περιορισμό των λύσεων μέσα στο χώρο έρευνας [35]. Τέλος, η επιτρεπόμενη μεταβολή ανά συνιστώσα του διανύσματος ταχύτητας v_{max} ορίστηκε να μην υπερβαίνει την τιμή 0,1. Η μικρή τιμή της παράμετρος v_{max} εξασφαλίζει την ομαλότερη προσέγγιση των βέλτιστων λύσεων καθώς συμπληρώνεται ο μέγιστος αριθμός γενεών. Οι παραπάνω παράμετροι εκφράζονται στο ακόλουθο XML αρχείο διαμόρφωσης, όπου επιπρόσθετα έχει επιλεγθεί να χρησιμοποιηθεί ένας πληθυσμός αποτελούμενος από 200 σωματίδια (Πίνακας 38).

```
<parameters>
  <type>inertia</type>
  <pop__size>200</pop__size>
  <phi1>2.0</phi1>
  <phi2>2.0</phi2>
  <params>
    <entry>
      <string>w2</string>
      <double>0.9</double>
    </entry>
    <entry>
      <string>w1</string>
      <double>0.4</double>
    </entry>
    <entry>
      <string>k</string>
      <double>1.0</double>
    </entry>
  </params>
</parameters>
```



```

        </entry>

        <entry>
            <string>hood_size</string>
            <int>200</int>
        </entry>
        <entry>
            <string>v_max</string>
            <double>0.1</double>
        </entry>
    </params>
</parameters>

```

Πίνακας 38. Δομή του XML αρχείου διαμόρφωσης

Σε κάθε περίπτωση, τα αρχεία ιδιοτήτων και διαμόρφωσης δημιουργούνται στο φάκελο εκτέλεσης εργασιών του κεντρικού κόμβου κατά την αρχικοποίηση της πλατφόρμας.

4.8.2 Αποτελέσματα αποδοτικότητας

Οι παράμετροι του προβλήματος σύνθεσης που υποβλήθηκε στην κατανεμημένη πλατφόρμα προς βελτιστοποίηση είναι η σχετική τοποθέτηση των δίπολων στο επίπεδο $x-y$, καθώς και οι τροφοδοσίες τους που έχουν ως αποτέλεσμα την ακτινοβολήση των πεδίων που έχουν ήδη προδιαγραφεί. Σε κάθε περίπτωση, δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας ενότητας η σύγκριση των ποιοτικών χαρακτηριστικών των σχεδιάσεων, που προκύψανε από τις πολλαπλές επαναλήψεις της διαδικασίας βελτιστοποίησης, καθώς έχουν ήδη αναπτυχθεί επαρκώς τα σχετικά αποτελέσματα σε προηγούμενη ενότητα.

Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η αποτίμηση της αποδοτικότητας της κατανεμημένης πλατφόρμας βελτιστοποίησης θεωρώντας ως σημείο αναφοράς τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από την σειριακή εκτέλεση του αλγόριθμου βελτιστοποίησης, θέτοντας βέβαια σε όλες τις περιπτώσεις ως κριτήριο τερματισμού της διαδικασίας εξέλιξης του πληθυσμού την συμπλήρωση 400 γενιών. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, διερευνήθηκαν δύο κύρια σενάρια, εκ το οποίων το πρώτο προβλέπει την κλιμάκωση του αριθμού των σωματιδίων που απαρτίζουν τον πληθυσμό άρα και του συνολικού αριθμού αποτιμήσεων καταλληλότητας, ενώ το δεύτερο την κλιμάκωση του αριθμού των υπολογιστικών κόμβων που συμμετέχουν στην πλατφόρμα. Για την εκτέλεση αυτών των δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν 4 προσωπικοί υπολογιστές με ταυτόσημη διάθρωση υλικού (Pentium IV 2.8 GHz CPUs, 1 GB RAM), διασυνδεδεμένοι στο ίδιο τοπικό 100Mbps Ethernet δίκτυο. Στον Πίνακα 39 συνοψίζονται οι συνολικοί χρόνοι εκτέλεσης καθώς και η επιτάχυνση σε σύγκριση με την σειριακή εκτέλεση, για τη βελτιστοποίηση της κεραίας μεταγωγής λοβών.

Πληθυσμός	Χρόνος (sec)				Επιτάχυνση			
	125	150	175	200	125	150	175	200
Σειριακή εκτέλεση	569,966	682,252	818,563	879,836	1,000			
2 Κόμβοι	422,866	491,417	584,529	633,146	1,348	1,388	1,400	1,390
3 Κόμβοι	276,745	332,772	398,555	428,243	2,060	2,050	2,054	2,055
4 Κόμβοι	228,693	256,132	313,578	329,360	2,492	2,664	2,610	2,671

Πίνακας 39. Επιτυγχανόμενοι συνολικοί χρόνοι εκτέλεσης και επιτάχυνσης της πλατφόρμας

Καταρχήν, δύναται να παρατηρηθεί ότι το μελετώμενο πρόβλημα σύνθεσης δεν είναι πολύ δαπανηρό υπολογιστικά, καθότι η σειριακή εκτέλεση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης για το μέγιστο οριζόμενο μέγεθος πληθυσμού (200 σωματίδια X 400 γενιές = 80000 αποτιμήσεις καταλληλότητας) διάρκεσε συνολικά περίπου 15 λεπτά. Επειδή η μέση διάρκεια κάθε προσομοίωσης και αποτίμησης μιας σχεδίασης είναι πολύ μικρή, η συνολική επιτυγχανόμενη επιτάχυνση από την κατανεμημένη πλατφόρμα φαίνεται να επηρεάζεται κυρίως από το κόστος επικοινωνίας μεταξύ των πρακτόρων και την ακριβή διαμόρφωση των υπολογιστικών κόμβων.

Με τη βοήθεια του νόμου του Amdahl είναι δυνατόν να εκτιμηθεί το ποσοστό του χρόνου κατανεμημένης εκτέλεσης προς τη συνολική διάρκεια της βελτιστοποίησης P_{est} σύμφωνα με τη ακόλουθη σχέση

$$P_{est} = \frac{1/SU - 1}{1/NP - 1} \quad (124)$$

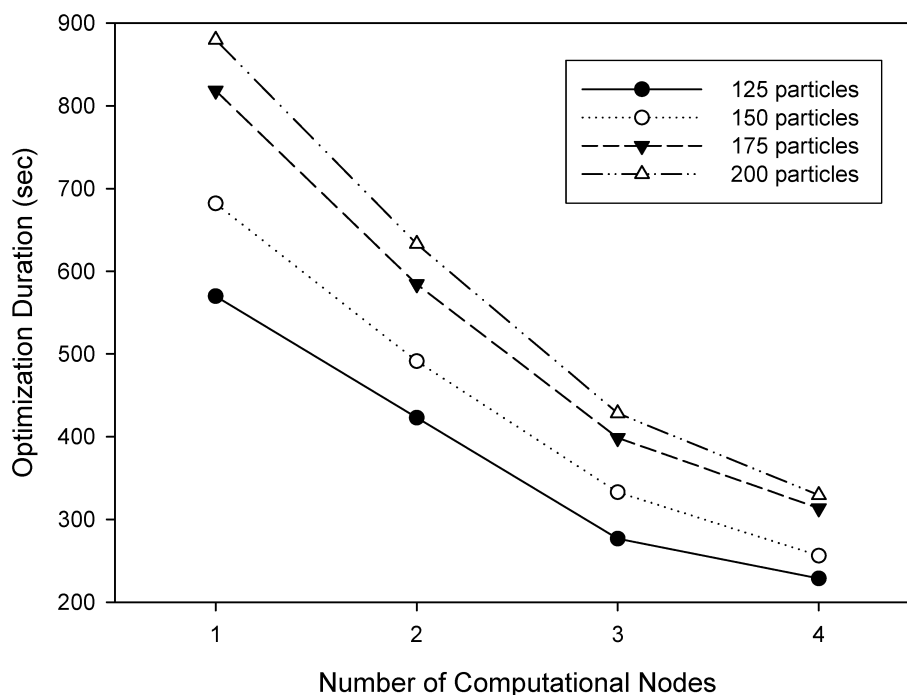
όπου το SU είναι η μετρούμενη επιτάχυνση και NP ο αριθμός των υπολογιστικών μονάδων/κόμβων που συμμετείχαν στην πλατφόρμα βελτιστοποίησης [82]. Τα τελικά αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 40, καθώς και οι υπολογιζόμενοι μέσοι όροι για διαφορετικά μεγέθη πληθυσμών.

	Εκτιμώμενο ποσοστό κώδικα που εκτελείται παράλληλα				
Πληθυσμός	125	150	175	200	Μέσος όρος
2 Κόμβοι	51,63%	55,91%	57,14%	56,12%	55%
3 Κόμβοι	77,18%	76,83%	76,97%	77,01%	77%
4 Κόμβοι	79,83%	83,28%	82,25%	83,41%	82%

Πίνακας 40. Εκτιμώμενο ποσοστό κώδικα που εκτελείται παράλληλα από την πλατφόρμα

Παρατηρείται ότι όσο αυξάνονται οι κόμβοι, επιμερίζεται το κόστος επικοινωνίας, καθότι διαμοιράζονται πιο ομοιόμορφα οι πράκτορες-σωματίδια στους κόμβους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την προσέγγιση μιας οριακής τιμής κόστους για τους κατανεμημένους υπολογισμούς καταλληλότητας, καθώς ελαττώνεται προοδευτικά η επίδραση του κόστους επικοινωνίας. Αυτή η οριακή τιμή βρέθηκε μετά από παρεμβολή να είναι ίση με το 86% της συνολικής διάρκειας της βελτιστοποίησης. Αυτό το ποσοστό μεταφράζεται με τη βοήθεια του νόμου του Amdahl, σε οριακή τιμή επιτάχυνσης ίσης με 7,15 για μεγάλο αριθμό κόμβων. Πρακτικά εκτιμάται ότι ο βέλτιστος λόγος επιτάχυνσης προς τους χρησιμοποιούμενους υπολογιστικούς πόρους επιτυγχάνεται όταν στη πλατφόρμα συμμετέχουν 10 υπολογιστικοί κόμβοι, επιταχύνοντας τη διαδικασία βελτιστοποίησης κατά ένα παράγοντα ίσο με 7. Υπό αυτό το υποθετικό σενάριο η συνολική διάρκεια της βελτιστοποίησης αναμένεται να διαρκέσει περίπου 2 λεπτά για το μελετώμενο πρόβλημα.

Στην Εικόνα 83 παρουσιάζεται η διάρκεια της διαδικασίας βελτιστοποίησης για κλιμακούμενο αριθμό υπολογιστικών κόμβων.

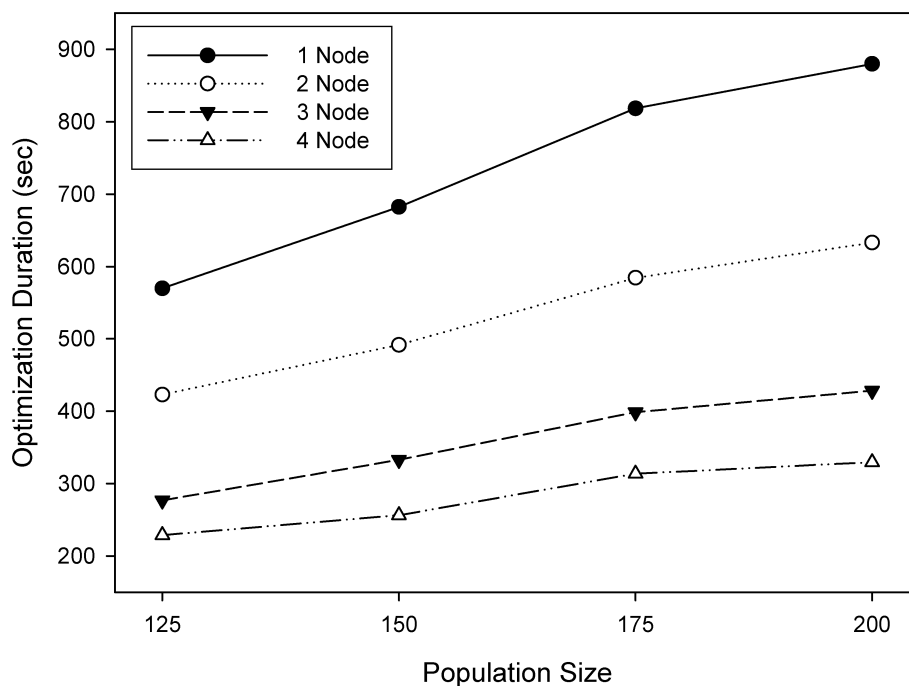


Εικόνα 83. Αποκλιμάκωση της διάρκειας της βελτιστοποίησης, συναρτήσει του αριθμού των κόμβων.

Καταρχήν μπορεί να παρατηρηθεί ότι η συμπεριφορά της πλατφόρμας ως προς την επιτυγχάνομενη απόδοση για αυξανόμενο αριθμό κόμβων είναι ποιοτικά συγκρίσιμη, ανεξάρτητα από τα οριζόμενα μεγέθη πληθυσμού. Η κύρια διαφορά εντοπίζεται στο γεγονός ότι όταν αυξάνεται σημαντικά ο αριθμός των κόμβων και ο οριζόμενος πληθυσμός είναι μεγάλος, τότε και οι λαμβανόμενες τιμές επιτάχυνσης είναι συγκριτικά μεγαλύτερες σε σχέση με τις περιπτώσεις όπου είχε οριστεί μικρότερος πληθυσμός.

Αυτό το φαινόμενο οφείλεται αφενός στην αναλογική αύξηση του συνολικού υπολογιστικού φορτίου και αφετέρου στην πιο ομοιόμορφη κατανομή των σωματιδίων-εργατών σε μεγαλύτερο αριθμό υπολογιστικών κόμβων, γεγονός που έχει ως συνέπεια και τον καλύτερο καταμερισμό του κόστους επικοινωνίας τους με το σωματίδιο που συντονίζει την όλη διαδικασία βελτιστοποίησης. Αντιθέτως όταν οι οριζόμενοι πληθυσμοί είναι μικρότεροι, η επιβάρυνση που επιφέρει το κόστος ανταλλαγής μηνυμάτων γίνεται συγκριτικά μεγαλύτερη ως προς το συνολικό υπολογιστικό φορτίο, γεγονός που έχει ως άμεση συνέπεια την ελάττωση των πιθανών οφελών από τον καλύτερο καταμερισμό των σωματιδίων στους υπολογιστικούς κόμβους.

Τέλος στη Εικόνα 84 παρουσιάζεται η διάρκεια της διαδικασίας βελτιστοποίησης για κλιμακούμενα μεγέθη πληθυσμών, η οποία επιβεβαιώνει τα συμπεράσματα της προηγηθείσας ανάλυσης.



Εικόνα 84. Κλιμάκωση της διάρκειας της βελτιστοποίησης συναρτήσει του μεγέθους του πληθυσμού.

Είναι χρήσιμο να σημειωθεί ότι ο καταμερισμός των σωματιδίων σε περισσότερους κόμβους και για δεδομένα σταθερά μεγέθη πληθυσμού δεν επιφέρει σημαντικές διαφοροποιήσεις στην ποιότητα των λαμβανομένων λύσεων, σε αντίθεση με τα σενάρια όπου προβλέπεται η μεταβολή του μεγέθους του πληθυσμού. Επομένως το σχήμα κατανομής που χρησιμοποιείται κατά τον υπολογισμό των τιμών καταλληλότητας δεν επιφέρει αλγοριθμικές αλλαγές και διατηρεί αμετάβλητα τα χαρακτηριστικά σύγκλισης του αλγορίθμου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων.

4.8.3 Συμπεράσματα

Η παρούσα ενότητα ανάδειξε τα κύρια πλεονεκτήματα που απορρέουν από τη χρήση της περιγραφόμενης κατανεμημένης πλατφόρμας βελτιστοποίησης για τη σχεδίαση σύνθετων ηλεκτρομαγνητικών διατάξεων. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε το παράδειγμα σχεδίασης μιας στοιχειοκεραίας μεταγωγής λοβών, για ναδειχθεί καταρχήν η ευελιξία που παρέχεται στον σχεδιαστή κατά τον ορισμό του συνδεδεμένου προβλήματος βελτιστοποίησης, χρησιμοποιώντας τις δυνατότητες διαμόρφωσης και παραμετροποίησης της πλατφόρμας. Στη συνέχεια παρουσιάστηκαν αποτελέσματα ως προς την μετρούμενη υπολογιστική αποδοτικότητα της πλατφόρμας, που λήφθηκαν κατά την εκτέλεση των δύο ακόλουθων σεναρίων: α) κλιμάκωσης του μεγέθους του πληθυσμού και β) κλιμάκωσης του αριθμού των υπολογιστικών κόμβων. Παρόλο που το υπολογιστικό κόστος προσομοίωσης και αποτίμησης της καταλληλότητας κάθε υποψήφιας σχεδίασης βρέθηκε να μην είναι σημαντικό, η μετρούμενη αποδοτικότητα της πλατφόρμας για τα προαναφερθέντα σενάρια κλιμάκωσης επιβεβαίωσαν τη πρακτική χρησιμότητα της πλατφόρμας. Μετά την περαιτέρω ανάλυση των ληφθέντων αποτελεσμάτων διαφάνηκε ο σημαντικός ρόλος του κόστους επικοινωνίας μεταξύ των οντοτήτων των πρακτόρων, όταν ο οριζόμενος πληθυσμός τους είναι μεγάλος, καθώς και τα θετικά αποτελέσματα που μπορεί να έχει ο καταμερισμός τους σε μεγαλύτερο αριθμό υπολογιστικών κόμβων.

Σε κάθε περίπτωση βρέθηκε ότι η επιταχυνόμενη επιτάχυνση οριοθετείται από τις προβλέψεις του νόμου του Amdahl. Συμπερασματικά, αναμένεται να μεγιστοποιούνται τα υπολογιστικά οφέλη από τη χρήση της κατανεμημένης πλατφόρμας βελτιστοποίησης, όταν το υπολογιστικό κόστος προσομοίωσης των αποτιμώμενων σχεδιάσεων είναι μεγάλο και όταν τα σωματίδια κατανέμονται πιο ομοιόμορφα σε μεγαλύτερο αριθμό υπολογιστικών κόμβων.

5 Σύνθεση Στοιχειοκεραιών με Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων

Οι μηχανικοί κεραιών καλούνται συχνά να σχεδιάσουν πρότυπες κεραιές με απαιτήσεις οι οποίες αφενός πρέπει να ευθυγραμμίζονται με τις προδιαγραφές ακτινοβολήσης όπως αυτές προκύπτουν από τις ανάγκες της υπηρεσίας που καλούνται να υλοποιήσουν, και αφετέρου να ικανοποιούν τους επιβαλλόμενους περιορισμούς που σχετίζονται με την ολοκλήρωση τους στα αντίστοιχα τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Τα σύγχρονα συστήματα ασύρματων επικοινωνιών συνήθως ολοκληρώνουν κατάλληλα διαμορφωμένες στοιχειοκεραίες, οι οποίες τους προσδίδουν δυνατότητες *δυναμικής μορφοποίησης και στροφής των λοβών ακτινοβολήσης τους* (beam forming) [118] είτε παρουσιάζουν σημαντικό κέρδος διαφορισμότητας³ (diversity gain) [125].

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναφέρθηκαν συνοπτικά τα πλεονεκτήματα των ευφυϊών κεραιών, οι οποίες βασίζονται στις τεχνικές διαμόρφωσης δέσμης ακτινοβολίας για να ελαχιστοποιήσουν τις επιδράσεις της πολυδοικής διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και των παρεμβολών, βελτιώνοντας έτσι το σηματοθορυβικό λόγο των σημάτων [103]. Αντίθετα, η λειτουργία των κεραιών *χωρικής διαφορισμότητας* (space diversity) βρίσκει συνήθως εφαρμογή σε ηλεκτρομαγνητικά περιβάλλοντα όπου δεν υπάρχει απευθείας οπτική επαφή μεταξύ των κεραιών εκπομπής και λήψης όπως οι αστικοί ή οι εσωτερικοί χώροι. Σε αυτά τα περιβάλλοντα τα ανακλώμενα κύματα μπορούν να υποστούν σημαντικές μεταβολές στη φάση τους, χρονοκαθυστερήσεις, εξασθενήσεις και παραμορφώσεις και είναι πιθανόν η συμβολή τους στην ενεργό επιφάνεια της κεραιάς λήψης να είναι καταστρεπτική. Οι *κεραίες διαφορισμότητας* (diversity antennas) εκμεταλλεύονται τις πολλαπλές κεραιές λήψης που διαθέτουν για να λάβουν διαφορετικές εκδόσεις του ίδιου εκπεμπόμενου σήματος. Αν η χωρική διαφοροποίηση των κεραιών είναι επαρκής τότε μπορεί να θεωρηθεί ότι η πιθανότητα να υποστούν ταυτοχρόνως βαθιές διαλείψεις τα λαμβανόμενα σήματα είναι πολύ μικρή [126]. Σε αυτό ακριβώς το γεγονός βασίζεται η δυνατότητα των κεραιών διαφορισμότητας για δημιουργία ποιοτικών και αξιόπιστων ραδιοζεύξεων. Παρόλο που η άνωθεν περιγραφή αφορά τα σχήματα διαφορίσιμης λήψης, έχει αποδειχθεί ότι και τα σχήματα διαφορίσιμης εκπομπής παρουσιάζουν ανάλογα πλεονεκτήματα. Είναι επίσης δυνατή η διαμόρφωση ενός ραδιοσυστήματος που προβλέπει ταυτοχρόνως τη λειτουργία πολλαπλών κεραιών μετάδοσης και λήψης, προκειμένου να μεγιστοποιούνται τα κέρδη διαφορισμότητας.

Συνοψίζοντας, οι διάφοροι μέθοδοι λειτουργίας των στοιχειοκεραιών μπορούν γενικά να διαχωριστούν σε δύο κύριες κατηγορίες i) ευφυείς κεραιές οι οποίες λειτουργούν προσαρμοστικά [116] και ii) κεραιές διαφορισμότητας (diversity antennas) οι οποίες είναι εκ φύσεως «στατικές» [127]. Και στις δύο περιπτώσεις σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η ικανοποίηση των περιορισμών που σχετίζονται με το δικτύωμα τροφοδοσίας τους (source

³ Στις ασύρματες επικοινωνίες, ως κέρδος διαφορισμότητας αναφέρεται η αύξηση του λόγου σήματος προς τις παρεμβολές από τη χρήση ενός σχήματος διαφορισμότητας ή εναλλακτικά κατά πόσον είναι δυνατή η απομείωση της ισχύος εκπομπής της κεραιάς διαφορισμότητας χωρίς απώλειες στην αποδοτικότητα του συστήματος επικοινωνιών.

network) του συστήματος πολλαπλών κεραιών καθώς και με το εμπρόσθιο κύκλωμα λήψης του (receiver front-end).

Στην πρώτη περίπτωση, εάν θεωρηθεί ότι οι χρησιμοποιούμενοι ακτινοβολητές δεν ελαχιστοποιούν τα φαινόμενα σκέδασης (MSA – Minimum Scattering Antennas)⁴ είτε είναι τοποθετημένοι σε πολύ κοντινές αποστάσεις, τότε η μεταξύ τους ηλεκτρομαγνητική σύζευξη διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση των ενεργών διαγραμμάτων τους αλλά και του συνολικού διαγράμματος ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας [128]. Υπό αυτές τις συνθήκες η χαρακτηριστική αντίσταση και το διάγραμμα ακτινοβολίας του κάθε στοιχείου της στοιχειοκεραίας επηρεάζονται από την παρουσία των άλλων ακτινοβολητών, την σχετική τους τοποθέτηση και τις διεγέρσεις τροφοδοσίας τους. Έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές αντιστάθμισης των φαινομένων αμοιβαίας επαγωγής, ορίζοντας κατάλληλες συνθήκες προσαρμογής (matching conditions) της στοιχειοκεραίας στο δικτύωμα τροφοδοσίας της ή/και στα φορτία οδήγησης της [129], [130], [131].

Στη δεύτερη περίπτωση η αξιοποίηση της διαφορισμότητας του κεραιοσυστήματος απαιτεί την όσο δυνατή μεγαλύτερη αποσυσχέτιση των εκπεμπόμενων και των λαμβανόμενων σημάτων. Μια σειρά από μελέτες έχουν αναδείξει την επίδραση των φαινομένων αμοιβαίας σύζευξης στο διάγραμμα ακτινοβολίας των κεραιών διαφορισμότητας και τη συνακόλουθη αύξηση της συσχέτισης των λαμβανόμενων ή εκπεμπόμενων σημάτων [132]. Δυστυχώς, δεν είναι πάντοτε δυνατή η ελάττωση της επίδρασης των φαινομένων σύζευξης, όπως π.χ. όταν πολλαπλές κεραιές ολοκληρώνονται σε μικρές φορητές τερματικές συσκευές. Ακόμα όμως και σε αυτές τις περιπτώσεις είναι δυνατόν να αντισταθμιστούν τα φαινόμενα υψηλής συσχέτισης των σημάτων και χαμηλής αποδοτικότητας ενός κεραιοσυστήματος, χρησιμοποιώντας είτε κατάλληλα προσαρμοσμένα φορτία είτε ένα αποσυσζευγμένο δικτύωμα προσαρμογής [133]. Παρά ταύτα, για τις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές αυτά τα φαινόμενα μπορούν να σταθμιστούν μόνο μερικώς.

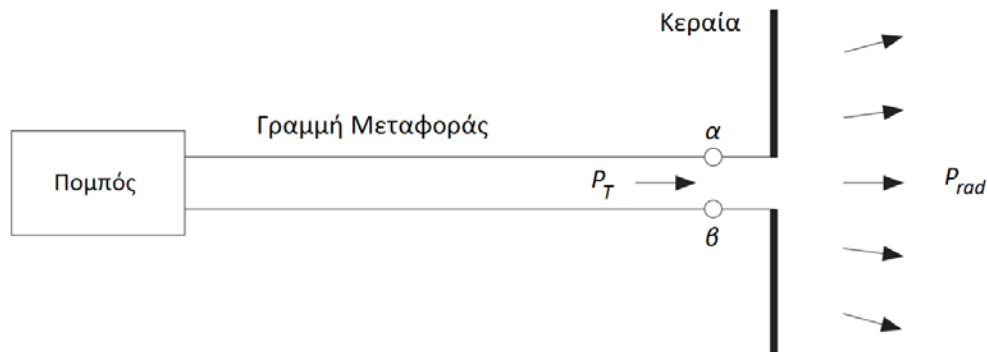
Με δεδομένη τη σημαντική επίδραση των φαινομένων σύζευξης στην αποδοτικότητα ενός συστήματος πολλαπλών κεραιών, όταν αυτό λειτουργεί με οποιαδήποτε από τους δύο προαναφερθέντες τρόπους, επιχειρείται καταρχήν η περιγραφή του ως ένα κατανοημένο μικροκυματικό δικτύωμα, με τη βοήθεια των χαρακτηριστικών παραμέτρων διασποράς του (*S*-παραμέτροι). Στην συνέχεια δίδονται οι αναλυτικές εκφράσεις υπολογισμού της συνολικής αποδοτικότητας μιας κεραιάς πολλαπλών ακτινοβολητών και περιγράφονται οι γενικότεροι μέθοδοι προσαρμογής της στο δικτύωμα τροφοδοσίας της ή/και στο εμπρόσθιο κύκλωμα λήψης της. Επιπρόσθετα, αναλύονται οι γενικότερες εκφράσεις προσδιορισμού της συσχέτισης μεταξύ των ακτινοβολητών, οι οποίες στη συνέχεια εξειδικεύονται για τις επαγόμενες τάσεις στους ακροδέκτες δίπολων ακτινοβολητών. Στην συνέχεια, χρησιμοποιώντας το μικροκυματικό μοντέλο των δικτυωμάτων προσαρμογής, υπολογίζονται οι αντίστοιχες τιμές συσχέτισης των τελικών σημάτων που εμφανίζονται στις θύρες εισόδου ενός δέκτη.

⁴ Μια κεραιά ελάχιστης σκέδασης δεν διαταράσσει τα ακτινοβολούμενα πεδία από άλλες κεραιές που βρίσκονται σε κοντινές αποστάσεις. Ένα βραχύ δίπολο συνδεδεμένο με φορτίο ανοικτοκυκλώματος μπορεί να θεωρηθεί ως MSA (Minimum Scattering Antenna).

Τέλος, παρουσιάζεται μια πρακτική εφαρμογή βελτιστοποίησης της χωρικής κατανομής των ακτινοβολητών μιας ανομοιόμορφης γραμμικής στοιχειοκεραίας, με όρους ελαχιστοποίησης της συσχέτισης των τάσεων στους αποσυζευγμένους κλάδους του κυκλώματος λήψης της, ενώ ταυτόχρονα λαμβάνεται ειδική πρόνοια για τη βελτιστοποίηση του στρεφόμενου διαγράμματος ακτινοβολίας της κατά την εκπομπή. Κατά αυτόν τον τρόπο επιχειρείται ναδειχθεί ότι οι επιβαλλόμενοι περιορισμοί αποδοτικότητας, ως προς το σκέλος της ελαχιστοποίησης των ανακλάσεων στις θύρες της στοιχειοκεραίας αλλά και ως προς την μεγιστοποίηση της διαφορισιμότητας των στοιχείων της, μπορούν να αντισταθμιστούν μερικώς μόνο. Για αυτό το λόγο η χρησιμοποιούμενη μέθοδος βελτιστοποίησης είναι πολυκριτηριακή και επεκτείνει τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων που παρουσιάστηκε αναλυτικά στα προηγούμενα κεφάλαια. Τέλος οι υπολογισμοί της συμπεριφοράς ακτινοβολίας του κεραιοσυστήματος πραγματοποιούνται με τη βοήθεια της μεθόδου των ροπών.

5.1 Ισοδύναμα μικροκυματικά δικτύωματα

Θεωρούμε μια κεραία εκπομπής η οποία οδηγείται από τα εξειδικευμένα ηλεκτρονικά κυκλώματα ενός πομπού. Το κύκλωμα του πομπού, κατά ελάχιστον, αποτελείται από μια γεννήτρια τάσεως, η οποία τροφοδοτεί την κεραία εκπομπής διαμέσου μιας γραμμής μεταφοράς, όπως φαίνεται στην Εικόνα 85. Στη γενική περίπτωση η γεννήτρια τροφοδοσίας χαρακτηρίζεται από μια εσωτερική σύνθετη αντίσταση και η αντίσταση εισόδου της κεραίας ισοδυναμεί με ένα σύνθετο μιγαδικό φορτίο, καθοριζόμενο από την τεχνολογία κατασκευής της κεραίας, τη γεωμετρία της καθώς και την συχνότητα λειτουργίας της [84].



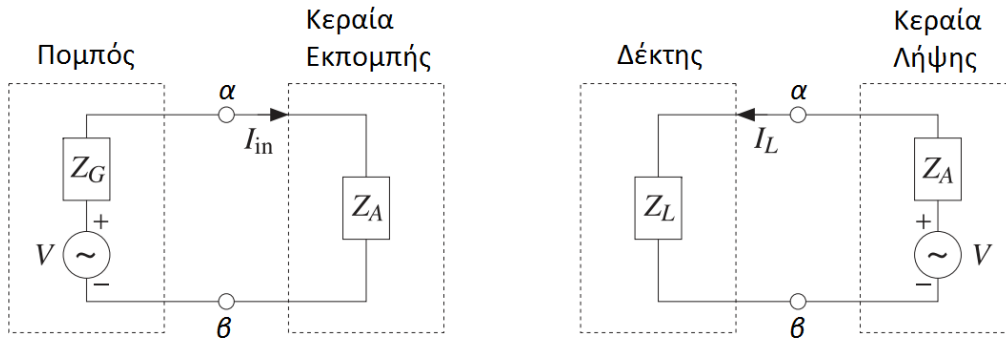
Εικόνα 85. Ισχύς που προσπίπτει στους τερματισμούς της κεραίας και ακτινοβολούμενη ισχύς

Κατά αναλογία, ένας δέκτης ο οποίος είναι συνδεδεμένος με τους ακροδέκτες μιας κεραίας λήψης, θα φαίνεται από τη πλευρά της κεραίας ως ένα σύνθετο μιγαδικό φορτίο. Σε κάθε περίπτωση είναι δυνατόν να μοντελοποιηθούν η γεννήτρια και η γραμμή μεταφοράς προς το φορτίο με τη χρήση ισοδύναμων μικροκυματικών κυκλωμάτων, απλοποιώντας καθ' αυτόν τον τρόπο την ανάλυση των χαρακτηριστικών του κεραιοσυστήματος.

5.1.1 Κυκλωματικά ισοδύναμα

Τα ισοδύναμα κυκλώματα των κεραιών σε εκπομπή και λήψη φαίνονται στην Εικόνα 86, όπου και στις δύο περιπτώσεις η τάση V αντιστοιχεί στην ισοδύναμη τάση Thevenin και η Z_G στην αντίσταση Thevenin, εφόσον η γεννήτρια έχει μεταφερθεί προς το φορτίο [97]. Κατά τη λειτουργία της λήψης η εσωτερική αντίσταση του δέκτη λαμβάνει τη θέση του φορτίου

στο ισοδύναμο κύκλωμα λήψης που αποτελεί τη δυαδική έκφραση του ισοδύναμου κυκλώματος εκπομπής.



Εικόνα 86. Ισοδύναμα μικροκυματικά κυκλώματα των κεραιών εκπομπής και λήψης

Αναλυτικότερα, στο ισοδύναμο κύκλωμα εκπομπής, η κεραία αναπαρίσταται από την σύνθετη μιγαδική αντίσταση φορτίου Z_A , αποτελούμενη από το ωμικό και το άεργο φορτίο $Z_A = R_A + jX_A$. Το άεργο φορτίο αντιπροσωπεύει την αποθηκευμένη ενέργεια στο κοντινό πεδίο της κεραιάς, ενώ το ωμικό αντιπροσωπεύει το άθροισμα της ενέργειας που τελικά ακτινοβολείται και της ενέργειας θερμικών απωλειών στα κύκλωμα της κεραιάς στο μέσο διάδοσης που περιβάλλει την κεραία.

Η γεννήτρια έχει τη δικιά της εσωτερική σύνθετη αντίσταση $Z_G = R_G + jX_G$. Το ρεύμα εισόδου στους ακροδέκτες της κεραιάς δίνεται από τη σχέση $I_{in} = V/(Z_G + Z_A)$, και μας επιτρέπει κατά επέκταση να υπολογίσουμε την ολική παραγόμενη από τη γεννήτρια ισχύ P_{tot} , την ισχύ που τελικά φθάνει στους ακροδέκτες της κεραιάς P_L και τέλος την ισχύ P_G που αναλίσκεται στην εσωτερική αντίσταση της γεννήτριας.

$$\begin{aligned}
 P_{tot} &= \frac{1}{2} \operatorname{Re} \{ V I_{in}^* \} = \frac{1}{2} \frac{|V|^2 (R_G + R_A)}{|Z_G + Z_A|^2} \\
 P_L &= \frac{1}{2} |I_{in}|^2 R_A = \frac{1}{2} \frac{|V|^2 R_A}{|Z_G + Z_A|^2} \\
 P_G &= \frac{1}{2} |I_{in}|^2 R_G = \frac{1}{2} \frac{|V|^2 R_G}{|Z_G + Z_A|^2}
 \end{aligned} \tag{125}$$

Ένα μέρος της ισχύος που φθάνει στους ακροδέκτες της κεραιάς P_L ακτινοβολείται P_{rad} ενώ ένα άλλο μέρος P_{loss} μετατρέπεται σε θερμότητα λόγω των ωμικών απωλειών του κυκλώματος της κεραιάς. Η ακτινοβολούμενη ισχύς και η ισχύς απωλειών μπορούν να υπολογισθούν βάσει των ισοδύναμων αντιστάσεων R_{rad} και R_{loss} , όπου η αντίσταση R_{rad} αναφέρεται και ως αντίσταση ακτινοβολίας.

$$P_L = \frac{1}{2} |I_{in}|^2 R_A = \frac{1}{2} |I_{in}|^2 (R_{rad} + R_{loss}) = P_{rad} + P_{loss} \tag{126}$$

Σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση, δύναται να υπολογισθεί ο συντελεστής αποδοτικότητας ε_r για την κεραία, ο οποίος είναι αντιπροσωπευτικός της ικανότητας της να ακτινοβολήσει την προσπίπτουσα στους ακροδέκτες της ενέργεια, ως ακολούθως

$$\varepsilon_r = \frac{P_{rad}}{P_L} = \frac{R_{rad}}{R_A} = \frac{R_{rad}}{R_{rad} + R_{loss}} \quad (127)$$

Προκειμένου να μεγιστοποιείται η ενέργεια η οποία φθάνει στους ακροδέκτες της κεραίας από τη γεννήτρια, πρέπει να ικανοποιείται η συνθήκη συζυγούς προσαρμογής της εσωτερικής αντίστασης της πηγής Z_G στην αντίσταση εισόδου της κεραίας Z_A :

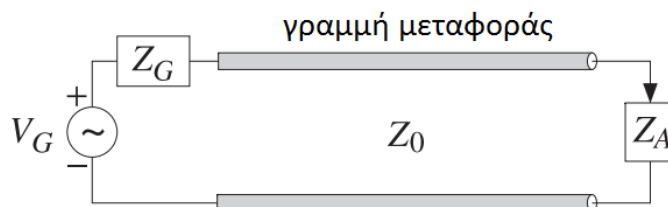
$$Z_A = Z_G^* \Leftrightarrow R_A = R_G \text{ και } X_A = -X_G \quad (128)$$

Σε αυτή τη περίπτωση μεγιστοποιείται η μεταφερόμενη ισχύ από τη γεννήτρια στο φορτίο, η οποία υπολογιζόμενη σύμφωνα με τις σχέσεις (125) ισούται με την ημίσεια ισχύ της ολικά παρεχόμενης ισχύος από τη γεννήτρια:

$$P_{L,max} = \frac{1}{4} \frac{|V|^2}{R_G} = \frac{1}{2} P_{tot} \quad (129)$$

5.1.2 Κατανεμημένες δικτυακές παράμετροι

Θεωρούμε τη γενική περίπτωση που μια κεραία τροφοδοτείται απευθείας από μια πηγή τάσεως, διαμέσου μιας γραμμής μεταφοράς μήκους l και χαρακτηριστικής εμπέδησης Z_0 , όπως απεικονίζεται στην ακόλουθη εικόνα.

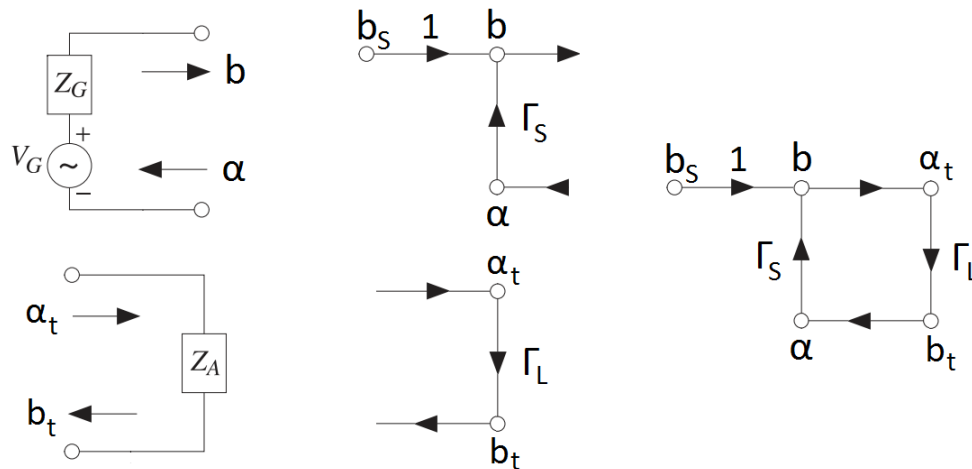


Εικόνα 87. Φορτίο τροφοδοτούμενο από γραμμή μεταφοράς

Η διαφοροποίηση της παραπάνω απεικόνισης σε σχέση με το ισοδύναμο κύκλωμα εκπομπής είναι ότι περιλαμβάνει στην περιγραφή της το κατανεμημένο μικροκυματικό στοιχείο της γραμμής μεταφοράς. Η γραμμή μεταφοράς χαρακτηρίζεται από ένα μητρώο διάδοσης, το οποίο δύναται να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της τάσης και της έντασης σε οποιοδήποτε σημείο της, όταν τελεί υπό διέγερση [134]. Γενικότερα, τα κατανεμημένα μικροκυματικά στοιχεία αναπαριστώνται ως δίθυρα κυκλώματα τα οποία χαρακτηρίζονται από τα μητρώα των S -παραμέτρων τους. Οι S -παραμέτροι συσχετίζουν τα ανακλώμενα κύματα τάσης στις θύρες ενός μικροκυματικού στοιχείου με τα προσπίπτοντα κύματα.

Η ανάλυση των κατανεμημένων μικροκυματικών κυκλωμάτων διευκολύνεται σημαντικά χρησιμοποιώντας κατάλληλα ορισμένα διαγράμματα ροής, τα οποία αναλύονται με τη βοήθεια του κανόνα του Mason [135]. Συγκεκριμένα είναι δυνατόν να αντικατασταθεί το

κύκλωμα της πηγής και του φορτίου με γράφους, οι οποίοι περιγράφουν τις αλληλοεξαρτήσεις των διαδιδόμενων και ανακλώμενων κυμάτων τάσεως.



Εικόνα 88. Ισοδύναμοι γράφοι για το κύκλωμα τροφοδοσίας και του φορτίου του

Το κύμα τάσης b_s από το δίκτυο τροφοδοσίας μπορεί να οριστεί βάσει της τάσεως τροφοδοσίας V_G , κανονικοποιημένης ως προς τη χαρακτηριστική εμπέδηση της γραμμής μεταφοράς Z_0 , και της αντίστασης εξόδου Z_G της γεννήτριας:

$$b_s = \frac{V_G \sqrt{Z_0}}{Z_G + Z_0} \quad (130)$$

Οι συντελεστές ανάκλασης στην πλευρά της πηγής (γεννήτρια τροφοδοσίας) Γ_S και στην πλευρά των ακροδεκτών του φορτίου (κεραία εκπομπής) Γ_L , δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις

$$\Gamma_L = \frac{Z_A - Z_0}{Z_A + Z_0} \quad (131)$$

$$\Gamma_S = \frac{Z_G - Z_0}{Z_G + Z_0}$$

όπου Z_0 είναι η χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής μεταφοράς που τροφοδοτεί την κεραία.

Με βάση των ορισμό των συντελεστών ανάκλασης, και τον γράφο που απεικονίζεται στη Εικόνα 88, δύναται να υπολογισθεί το προσπίπτων κύμα τάσης α_i στους ακροδέκτες της κεραίας, ως ακολούθως:

$$\alpha_i = (1 - \Gamma_S \Gamma_L)^{-1} b_s \quad (132)$$

Η συνολική τάση V_L που αναπτύσσεται στους ακροδέκτες της κεραίας είναι η υπέρθεση του προσπίπτοντος κύματος τάσης α_i και του ανακλώμενου b_t στους ακροδέκτες της κεραίας, ως ακολούθως:

$$\begin{aligned}
V_L &= \sqrt{Z_0} (\alpha_t + b_t) \\
&= \sqrt{Z_0} (1 + \Gamma_L) \alpha_t \\
&= \sqrt{Z_0} (1 + \Gamma_L) (1 - \Gamma_S \Gamma_L)^{-1} b_s \\
&= \frac{Z_A}{Z_A + Z_G} V_G
\end{aligned} \tag{133}$$

Αντίστοιχα, το ρεύμα I_L που διαρρέει τους ακροδέκτες της κεραίας, είναι ίσο με

$$\begin{aligned}
I_L &= (\sqrt{Z_0})^{-1} (\alpha_t - b_t) \\
&= (\sqrt{Z_0})^{-1} (1 - \Gamma_L) \alpha_t \\
&= (\sqrt{Z_0})^{-1} (1 - \Gamma_L) (1 - \Gamma_S \Gamma_L)^{-1} b_s
\end{aligned} \tag{134}$$

Η προσπίπτουσα ισχύς στους ακροδέκτες της κεραίας P_t καθώς και η ολική ισχύς η οποία είναι διαθέσιμη από τη γεννήτρια μπορούν να υπολογισθούν συναρτήσει του κύματος τάσεως b_s , από το κύκλωμα τροφοδοσίας της κεραίας

$$\begin{aligned}
P_t &= |\alpha_t|^2 - |b_t|^2 = |\alpha_t|^2 (1 - |\Gamma_L|^2) = |b_s|^2 \frac{1 - |\Gamma_L|^2}{|1 - \Gamma_S \Gamma_L|^2} \\
P_{tot} &= |\alpha_t|^2 = |b_s|^2 \frac{1}{|1 - \Gamma_S \Gamma_L|^2}
\end{aligned} \tag{135}$$

Κατά αντιστοιχία με τα ισοδύναμα μικροκυματικά κυκλώματα, που ήδη παρουσιάστηκαν, μπορεί να υπολογισθεί η ισχύς που καταναλώνεται τελικά στην ισοδύναμη αντίσταση της κεραία P_L

$$P_L = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \{V_L I_L^*\} = \frac{1}{2} \cos \theta_0 (|\alpha_t|^2 - |b_t|^2) = \frac{1}{2} \cos \theta_0 P_t \tag{136}$$

η οποία ισούται με το ήμισυ της ισχύος P_t που προσπίπτει στους ακροδέκτες της, εφόσον η γραμμή μεταφοράς που παρεμβάλλεται είναι ιδανική και χωρίς απώλειες. Η γωνία θ_0 αναπαριστά το όρισμα της μιγαδικής αντίστασης Z_0 μιας γραμμής μεταφοράς με απώλειες.

Από τις παραπάνω σχέσεις είναι δυνατόν να ορισθεί η ισχύς που φθάνει στους ακροδέκτες της κεραίας βάση των σχέσεων (130) και (131)

$$\begin{aligned}
P_t &= \frac{1}{4} \frac{|Z_A + Z_0|^2 - |Z_A - Z_0|^2}{|Z_0| |Z_G + Z_A|^2} |V_G|^2 \\
&= \frac{R_A R_0 + X_A X_0}{|Z_0| |Z_G + Z_A|^2} |V_G|^2 \\
&= \frac{|Z_A|}{|Z_G + Z_A|^2} |V_G|^2 \cos(\theta_A - \theta_0)
\end{aligned} \tag{137}$$

όπου οι γωνίες ϑ_A και ϑ_0 είναι τα όρισματα των μιγαδικών αντιστάσεων Z_A και Z_0 αντίστοιχα.

Όταν η εσωτερική αντίσταση της πηγής Z_G είναι ίση με την χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής μεταφοράς Z_0 , τότε το προσπίπτων κύμα τάσης α_t στους ακροδέκτες της κεραίας γίνεται ίσο με το κύμα τάσεως b_s από τη πηγή τροφοδοσίας

$$\alpha_t = b_s, \text{ εφόσον } Z_G = Z_0 \quad (138)$$

και η συνολική τάση V_L στους ακροδέκτες της κεραίας γίνεται ίση με

$$\begin{aligned} V_L &= \sqrt{Z_0} (\alpha_t + b_t) \\ &= \sqrt{Z_0} (1 + \Gamma_L) \alpha_t \\ &= \sqrt{Z_0} (1 + \Gamma_L) b_s \\ &= \frac{1}{2} (1 + \Gamma_L) V_G \\ &= \frac{Z_A}{Z_A + Z_0} V_G \end{aligned} \quad (139)$$

και η ισχύς που φθάνει στους ακροδέκτες του φορτίου, χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (135) και (137), αντίστοιχα υπολογίζεται σε

$$P_t = |b_s|^2 \frac{1 - |\Gamma_L|^2}{|1 - \Gamma_L|^2} = \frac{|Z_A|}{|Z_0 + Z_A|^2} |V_G|^2 \cos \theta_A \quad (140)$$

όπου η γωνία ϑ_A είναι το όρισμα της μιγαδικής αντίστασης Z_A .

Στην ειδική περίπτωση που η εσωτερική αντίσταση εξόδου Z_G της γεννήτριας και η αντίσταση εισόδου Z_A της κεραίας είναι προσαρμοσμένες στη γραμμή μεταφοράς που παρεμβάλλεται με χαρακτηριστική αντίσταση Z_0 , τότε μεγιστοποιείται η μεταφερόμενη ισχύς και γίνεται ίση με το μισό της μέγιστης ισχύος που δύναται να παρέχει η γεννήτρια:

$$P_t = \frac{1}{4|Z_0|} |V_G|^2 \quad (141)$$

5.1.3 Δικτυώματα προσαρμογής

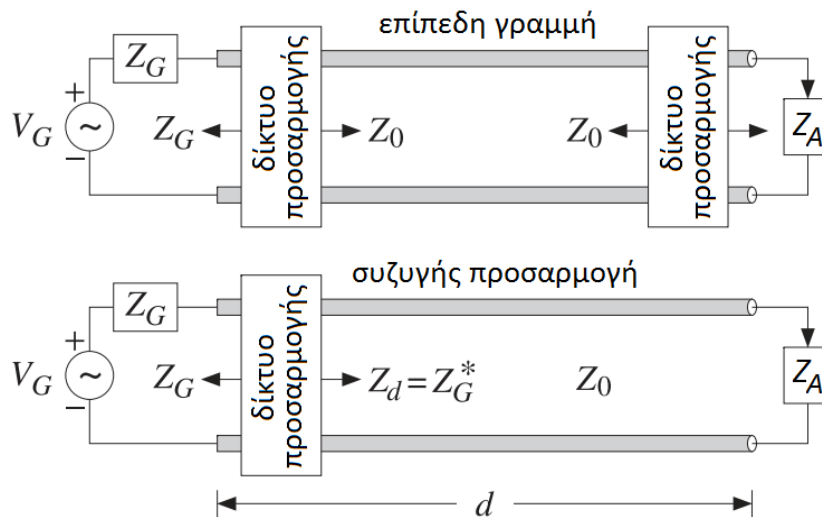
Σύμφωνα με τα ισοδύναμα μικροκυματικά κυκλώματα που παρουσιάστηκαν στη προηγούμενη ενότητα, η συνθήκη που μεγιστοποιεί την μεταφερόμενη ενέργεια από την πηγή στη τροφοδοτούμενη κεραία, μεγιστοποιώντας συνακόλουθα και την ακτινοβολούμενη ενέργεια από τη κεραία, είναι αυτή της συζυγούς προσαρμογής

$$Z_{th} = Z_A^* \quad (142)$$

όπου Z_{th} αναπαριστά την ισοδύναμη κατά Thevenin πηγή τροφοδοσίας συμπεριλαμβανόμενης της γραμμής μεταφοράς [97]. Πράγματι όταν ικανοποιείται η άνωθεν συνθήκη, η συνολική μιγαδική αντίδραση του ισοδύναμου μικροκυματικού

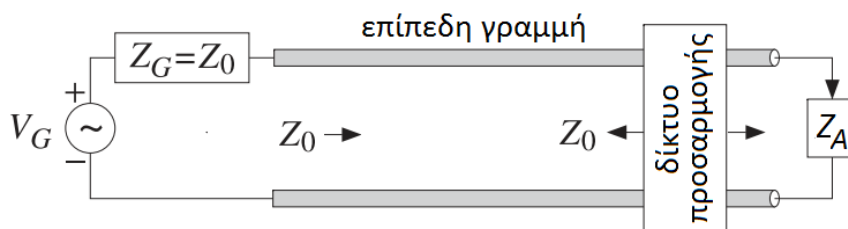
κυκλώματος μηδενίζεται. Σε αυτή τη περίπτωση, η μισή από την παραγόμενη ενέργεια καταναλώνεται στην αντίσταση Z_{th} και η άλλη μισή φθάνει στους ακροδέκτες της κεραίας.

Η έννοια της συζυγούς προσαρμογής δεν ταυτίζεται με την προσαρμογή για αποτροπή των ανακλάσεων. Η δεύτερη αναφέρεται στην προσαρμογή της σύνθετης μιγαδικής αντίστασης του φορτίου στην χαρακτηριστική αντίσταση μιας γραμμής μεταφοράς έτσι ώστε να μην υπάρχουν ανακλάσεις όταν αυτό τροφοδοτείται διαμέσου μιας γραμμής μεταφοράς. Είναι δυνατόν να επιτευχθεί με τη δημιουργία μιας επίπεδης γραμμής.



Εικόνα 89. Ισορροπημένη γραμμή μεταφοράς – προσαρμοσμένη γραμμή μεταφοράς

Κατά τη δημιουργία μιας επίπεδης γραμμής η ισοδύναμη κατά Thevenin αντίσταση της γεννήτριας αλλά και η αντίσταση του φορτίου προσαρμόζονται στην χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής μεταφοράς που παρεμβάλλεται. Συνήθως, η αντίσταση εξόδου της γεννήτριας είναι ήδη προσαρμοσμένη στη γραμμή μεταφοράς, οπότε απαιτείται μόνο η προσαρμογή του φορτίου.



Εικόνα 90. Δημιουργία επίπεδης γραμμής όταν η αντίσταση εξόδου της γεννήτριας είναι ήδη προσαρμοσμένη στη γραμμή μεταφοράς

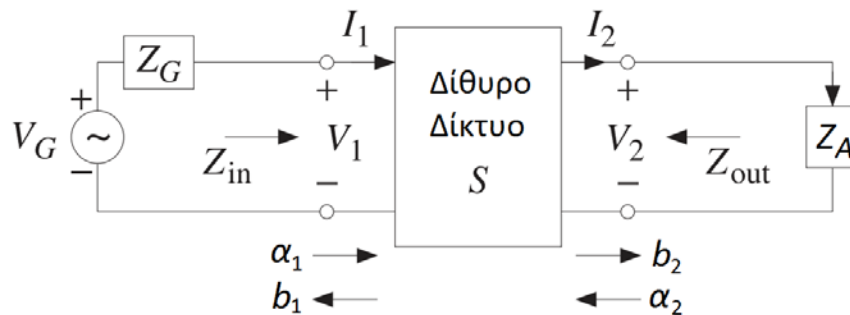
Κατά τη περίπτωση της συζυγούς προσαρμογής το φορτίο συνδέεται στη γραμμή μεταφοράς, χωρίς να παρεμβάλλεται κάποιο κύκλωμα προσαρμογής, και η γεννήτρια είναι συζυγώς προσαρμοσμένη στην αντίσταση εισόδου της γραμμής. Επειδή, όπως ήδη αναφέρθηκε η προσαρμογή διατηρείται για οποιοδήποτε σημείο της γραμμής μεταφοράς, το κύκλωμα προσαρμογής μπορεί να προστεθεί σε οποιοδήποτε σημείο κατά μήκος της, και όχι απαραίτητα στην είσοδό της. Προφανώς αυτό το είδος προσαρμογής θα λειτουργήσει ικανοποιητικά σε ένα στενό εύρος συχνοτήτων γύρω από τη συχνότητα σχεδίασης, καθώς η Ανάπτυξη Κατανομημένης Πλατφόρμας Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων και Εφαρμογή σε Προβλήματα Σύνθεσης Στοιχειοκεραίων 199/265

ισοδύναμη αντίσταση Z_d εξαρτάται από την τιμή του φορτίου αλλά και από την απόκριση της γραμμής σε διαφορετικές συχνότητες.

Μερικές πολύ συνήθειες μέθοδοι προσαρμογής φορτίων είναι τα L και Π δικτυώματα για την επίτευξη συζυγούς προσαρμογής και η χρήση παράλληλων ή σε σειρά στελεχών (ανοικτοκυκλωμένων είτε βραχυκυκλωμένων) προκειμένου να δημιουργηθεί μια επίπεδη γραμμή. Επίσης στη πράξη πολύ συχνά χρησιμοποιούνται οι μετασχηματιστές μπαλονιού (balun) τα οποία επιπροσθέτως επιτρέπουν την μετατροπή σημάτων τα οποία είναι ισορροπημένα ως προς τη γείωση του κυκλώματος (διαφορικά σήματα) σε μη ισορροπημένα, καθιστώντας δυνατή τη οδήγηση φορτίων τα οποία δεν έχουν αναφορά ως προς το έδαφος [136].

5.1.4 Ανάλυση δικτυωμάτων προσαρμογής με τον κανόνα του Mason

Έστω ότι παρεμβάλλεται ένα δίθυρο κύκλωμα προσαρμογής μεταξύ της γεννήτριας και του φορτίου. Τα παρουσιαζόμενα κυκλώματα προσαρμογής μοντελοποιούνται ως δίθυρα.

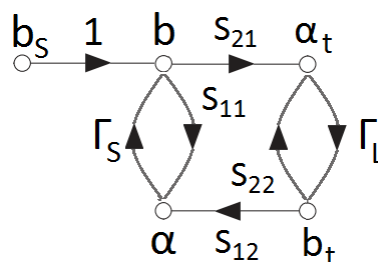


Εικόνα 91. Ισοδύναμο μικροκυματικό κύκλωμα προσαρμογής φορτίου με 2-θυρο δίκτυο

Ένα δίθυρο στη γενικότερη περίπτωση χαρακτηρίζεται από ένα 2×2 μητρώο S-παραμέτρων και τη χαρακτηριστική τιμή διακρίνουσας Δ :

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix}, \quad \Delta = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21} \quad (143)$$

Η αναπαράσταση του δίθυρου με γράφους, επιτρέπει τον υπολογισμό των προσπιπτόντων κυμάτων τάσης σε διαφορετικά σημεία του μικροκυματικού κυκλώματος χρησιμοποιώντας τους κανόνες του Mason.



Εικόνα 92. Γραφική αναπαράσταση ενός δίθυρου

Η μέθοδος συνίσταται στον εντοπισμό των βρόγχων 1^{ης}, 2^{ης}, 3^{ης} τάξεως κτλ., οι οποίοι ορίζονται βάσει των αντίστοιχης τάξεως γινομένων από ανεξάρτητους και χωρίς κοινούς κόμβους βρόγχους. Ο ισοδύναμος γράφος που αντιστοιχεί στο μοντέλο του γενικευμένου δίθυρου, μας επιτρέπει να προσδιορίσουμε τους ακόλουθους βρόγχους:

- 1^{ης} τάξεως: $S_{11}\Gamma_S, S_{22}\Gamma_L, S_{21}\Gamma_L S_{12}\Gamma_S$
- 2^{ης} τάξεως: $S_{11}\Gamma_S S_{22}\Gamma_L$

Η μόνη ανεξάρτητη μεταβλητή είναι το κύμα τάσης b_S που παράγεται από τη πηγή. Ο κανόνας του Mason ορίζει ότι ο λόγος T μεταξύ ενός εξαρτημένου μεγέθους προς ένα ανεξάρτητο, δίνεται από τη σχέση

$$T = \frac{P_1 \left[1 - \Sigma L(1)^{(1)} + \Sigma L(2)^{(1)} - \dots \right] + P_2 \left[1 - \Sigma L(1)^{(2)} + \dots \right]}{1 - \Sigma L(1) + \Sigma L(2) - \Sigma L(3) + \dots} \quad (144)$$

όπου οι μεταβλητές $\Sigma L(1)$, $\Sigma L(2)$ και $\Sigma L(3)$ αναπαριστούν τους ανεξάρτητους βρόγχους των αντιστοιχών τάξεων στο γράφο, οι μεταβλητές P_1 , P_2 τις διαφορετικές διαδρομές που ενώνουν ένα εξαρτημένο σημείο με ένα ανεξάρτητο και οι μεταβλητές $\Sigma L(1)^{(1)}$, $\Sigma L(2)^{(1)}$ τους βρόγχους 1^{ης} και 2^{ης} τάξης οι οποίοι δεν έχουν κανένα κοινό σημείο με τη διαδρομή P_1 και αντίστοιχα για τις υπόλοιπες διαδρομές [135].

Εφαρμόζοντας τη σχέση (144), λαμβάνοντας υπόψη τους βρόγχους 1^{ης} και 2^{ης} τάξεως που βρέθηκαν για το ισοδύναμο γράφο του δίθυρου, αποδεικνύεται ότι το προσπίπτον κύμα τάσης α_t στους ακροδέκτες του φορτίου δίνεται από τη σχέση

$$\alpha_t = \frac{S_{21}}{1 - S_{11}\Gamma_S - S_{22}\Gamma_L - S_{21}S_{12}\Gamma_L\Gamma_S + S_{11}\Gamma_S S_{22}\Gamma_L} b_S \quad (145)$$

Είναι δυνατόν να υπολογισθεί αντίστοιχα η συνολική τάση στους ακροδέκτες του φορτίου

$$\begin{aligned} V_L &= \sqrt{Z_0} (\alpha_t + b_t) \\ &= \sqrt{Z_0} (1 + \Gamma_L) \alpha_t \\ &= \frac{\sqrt{Z_0} (1 + \Gamma_L) S_{21}}{1 - S_{11}\Gamma_S - S_{22}\Gamma_L - S_{21}S_{12}\Gamma_L\Gamma_S + S_{11}\Gamma_S S_{22}\Gamma_L} b_S \\ &= \frac{2Z_0 Z_A S_{21}}{A} V_G \end{aligned} \quad (146)$$

όπου

$$\begin{aligned} A &= (Z_0^2 + Z_G Z_A) (1 + \Delta) + (Z_0^2 - Z_G Z_A) (S_{22} + S_{11}) + \\ &+ Z_0 (Z_G + Z_A) (1 - \Delta) + Z_0 (Z_G - Z_A) (S_{22} - S_{11}) \end{aligned} \quad (147)$$

Στην περίπτωση που η εσωτερική αντίσταση της πηγής Z_G είναι πραγματική και ίση με την χαρακτηριστική αντίσταση Z_0 γραμμής μεταφοράς που δεν παρουσιάζει απώλειες, τότε το

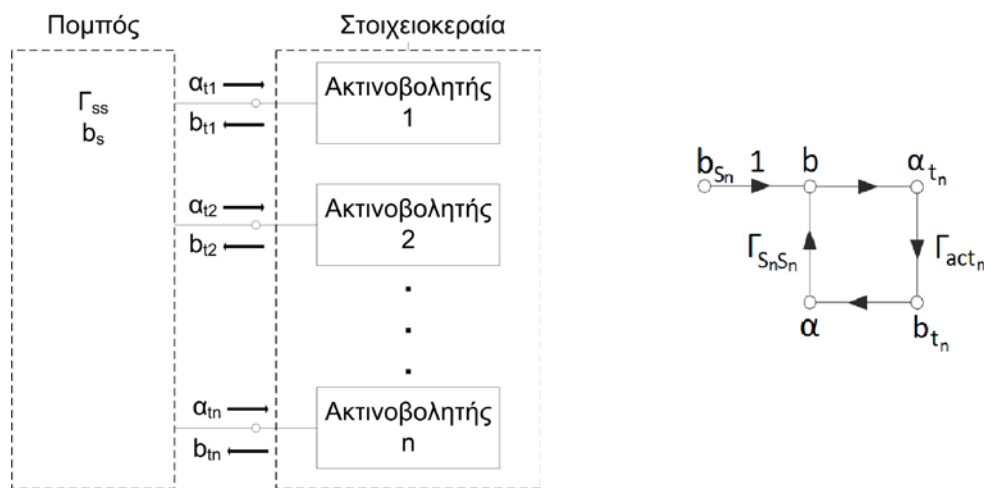
προσπίπτων κύμα τάσης στους ακροδέκτες του φορτίου, καθώς και η αντίστοιχη συνολική τάση, δίνονται από τις σχέσεις

$$\alpha_t = \frac{S_{21}}{1 - S_{22}\Gamma_L} b_s$$

$$V_L = \frac{Z_A S_{21}}{Z_0(1 + S_{22}) + Z_A(1 - S_{22})} V_G$$
(148)

5.2 Μοντελοποίηση Στοιχειοκεραίας με Παραμέτρους Διασποράς

Θεωρούμε μια στοιχειοκεραία η οποία απαρτίζεται από N ακτινοβολητές. Στη γενικότερη περίπτωση, η στοιχειοκεραία μπορεί να περιγραφεί βάσει του μητρώου παραμέτρων διασποράς \mathbf{S}_{tt} που χαρακτηρίζουν το ισοδύναμο N -θυρό μικροκυματικό κύκλωμα, κατά αντιστοιχία με το μητρώο \mathbf{Z} παραμέτρων που έχουν περιγραφεί σε προηγούμενα κεφάλαια.



Εικόνα 93. Μπλοκ διάγραμμα αναπαράστασης στοιχειοκεραίας N στοιχείων

Θεωρώντας ότι η μόνη εξάρτηση των τιμών του πίνακα διασποράς είναι ως προς τη συχνότητα που έχει επιλεχθεί για την ανάλυση της στοιχειοκεραίας, τότε αυτός περιγράφεται από ένα $N \times N$ μητρώο:

$$\mathbf{S}_{tt} = \begin{bmatrix} S_{t_1 t_1} & \cdots & S_{t_1 t_N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{t_N t_1} & \cdots & S_{t_N t_N} \end{bmatrix}$$
(149)

Ο πίνακας των S -παραμέτρων συσχετίζεται με τον πίνακα αμοιβαίων επαγωγών \mathbf{Z}_{tt} ως εξής

$$\mathbf{S}_{tt} = \left(\sqrt{\mathbf{R}_0} \right)^{-1} \left(\mathbf{Z}_{tt} - \mathbf{Z}_0^\dagger \right) \left(\mathbf{Z}_{tt} + \mathbf{Z}_0 \right)^{-1} \left(\sqrt{\mathbf{R}_0} \right)$$
(150)

όπου \mathbf{Z}_0 και $\sqrt{\mathbf{R}_0}$ είναι διαγώνιοι πίνακες των οποίων τα στοιχεία της διαγώνιου δίνονται από την σύνθετη αντίσταση αναφοράς Z_{0_n} και $2\sqrt{\text{Re}\{Z_{0_n}\}}$ αντίστοιχα, και ο τελεστής \dagger συμβολίζει τον ανάστροφο ερμιτιανό πίνακα.

5.2.1 Ανακλάσεις στο ισοδύναμο μικροκυματικό πολύθυρο

Το τελικό διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας συσχετίζεται άμεσα με την ενέργεια που τελικά φθάνει στους ακροδέκτες των ακτινοβολητών της στοιχειοκεραίας. Για να περιγράψουμε το δίκτυο τροφοδοσίας της, θεωρούμε ένα γενικευμένο μητρώο Γ_{ss} παραμέτρων σκέδασης

$$\mathbf{\Gamma}_{ss} = \begin{bmatrix} \Gamma_{s_1 s_1} & \cdots & \Gamma_{s_1 s_N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \Gamma_{s_N s_1} & \cdots & \Gamma_{s_N s_N} \end{bmatrix} \quad (151)$$

καθώς και ανεξάρτητα διαδιδόμενα κύματα διέγερσης \mathbf{b}_s από τις πηγές τροφοδοσίας:

$$\mathbf{b}_s = \begin{bmatrix} b_{s_1} \\ \vdots \\ b_{s_n} \end{bmatrix} \quad (152)$$

Η περιγραφή του δικτύου τροφοδοσίας με τη βοήθεια των S -παραμέτρων Γ_{ss} και των κυμάτων διέγερσης \mathbf{b}_s είναι αρκούντως γενική έτσι ώστε να μπορεί να περιγράψει οποιαδήποτε μορφή του δικτύου, π.χ. ένα πλήρες δικτύωμα τροφοδοσίας κεραιών εκπομπής, ένα σειριακό δικτύωμα τροφοδοσίας, ανεξάρτητους πομπούς για την τροφοδοσία μιας φασικής στοιχειοκεραίας κτλ [130].

Σύμφωνα με την Εικόνα 93, τα προσπίπτοντα κύματα τάσης \mathbf{a}_t στους ακροδέκτες των στοιχείων της στοιχειοκεραίας δίνονται από τη σχέση:

$$\mathbf{a}_t = \mathbf{\Gamma}_{ss} \mathbf{b}_t + \mathbf{b}_s \quad (153)$$

όπου \mathbf{b}_t είναι τα ανακλώμενα κύματα στα τερματικά σημεία της στοιχειοκεραίας, τα οποία μπορούν να υπολογισθούν με τη βοήθεια των S -παραμέτρων της:

$$\mathbf{b}_t = \mathbf{S}_{tt} \mathbf{a}_t \quad (154)$$

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (153) και (154) μπορεί να ευρεθεί σχέση η οποία να συσχετίζει απευθείας τα προσπίπτοντα κύματα στα τερματικά σημεία της στοιχειοκεραίας \mathbf{a}_t με τα ανεξάρτητα κύματα διέγερσης από τη πηγή τροφοδοσίας \mathbf{b}_s :

$$\mathbf{a}_t = (\mathbf{I} - \mathbf{\Gamma}_{ss} \mathbf{S}_{tt})^{-1} \mathbf{b}_s \quad (155)$$

Από την παραπάνω ανάλυση καθίσταται φανερό ότι τα προσπίπτοντα κύματα στους ακτινοβολητές της στοιχειοκεραίας εξαρτώνται τόσο από τη διαμόρφωση του δικτύου τροφοδοσίας της όσο και από την αμοιβαία επαγωγή μεταξύ των στοιχείων της.

Τα ανακλώμενα κύματα τάσης στις εισόδους του ισοδύναμου N -θύρου κυκλώματος με τη βοήθεια των σχέσεων (154) και (155) μπορούν να υπολογιστούν αναλυτικά ως ακολούθως

$$\mathbf{b}_t = \mathbf{S}_{tt} (\mathbf{I} - \mathbf{\Gamma}_{ss} \mathbf{S}_{tt})^{-1} \mathbf{b}_s \quad (156)$$

Οι ενεργοί συντελεστές ανάκλασης σε κάθε θύρα της στοιχειοκεραίας υπολογίζεται ως ακολούθως

$$\Gamma_{act,m} = \frac{1}{\alpha_m} \sum_{n=1}^N S_{nm} b_n \quad (157)$$

εφόσον ληφθεί υπόψη ότι τα ρεύματα \mathbf{I}_t και οι τάσεις \mathbf{V}_t που αναπτύσσονται στις θύρες εισόδου της, διέπονται από τις ακόλουθες σχέσεις

$$\begin{aligned} V_n &= \sqrt{Z_{0n}} (\alpha_n + b_n) = \sqrt{Z_{0n}} \alpha_n (1 + \Gamma_{act,m}) \\ I_n &= (\sqrt{Z_{0n}})^{-1} (\alpha_n - b_n) = (\sqrt{Z_{0n}})^{-1} \alpha_n (1 - \Gamma_{act,m}) \end{aligned} \quad (158)$$

όπου $\mathbf{a} = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n]^T$ και $\mathbf{b} = [b_1, b_2, \dots, b_n]^T$ είναι αντίστοιχα τα προσπίπτοντα κύματα τάσης από και τα ανακλώμενα κύματα προς το κύκλωμα τροφοδοσίας και $[S_{nm}]$ το μητρώο περιγραφής των φαινομένων σκέδασης στις θύρες της στοιχειοκεραίας, οι ιδιότητες του οποίου περιγράφονται αναλυτικά σε ακόλουθη ενότητα.

Άμεση απόρροια της προηγηθείσας ανάλυσης είναι ότι ενδεχόμενη μεταβολή της διέγερσης της στοιχειοκεραίας μπορεί να προκαλέσει μεταβολή της προσαρμογής των στοιχείων της στο κύκλωμα τροφοδοσίας. Πράγματι, σε αρκούντως μεγάλες στοιχειοκεραίες με στρεφόμενο κύριο λοβό ακτινοβολίας, έχει παρατηρηθεί το φαινόμενο «τύφλωσης» σε ορισμένες κατευθύνσεις [137]. Καθώς αυξάνεται προοδευτικά η μετατόπιση φάσης κατά μήκος της στοιχειοκεραίας προκειμένου να στραφεί ο λοβός ακτινοβολίας σε κατεύθυνση διαφορετική από την κύρια, μπορεί να υπάρξει γωνία στροφής τέτοια που να μεγιστοποιεί το μέτρο των ενεργών συντελεστών ανάκλασης, με αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση της εισερχόμενης στην στοιχειοκεραία ισχύος, άρα κατά συνέπεια την σημαντική ελάττωση της ακτινοβολούμενης ισχύος.

5.2.2 Παράγοντας προσαρμογής

Η συνολική παρεχόμενη ισχύς από το δίκτυο τροφοδοσίας στη στοιχειοκεραία μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση

$$P_{in} = \mathbf{a}_t^\dagger \mathbf{a}_t + \mathbf{b}_t^\dagger \mathbf{b}_t \quad (159)$$

όπου \mathbf{a}_t και \mathbf{b}_t είναι τα προσπίπτοντα και τα ανακλώμενα κύματα στην είσοδο των στοιχείων της στοιχειοκεραίας και το σύμβολο-σταυρός αναπαριστά τον ερμιτιανό πίνακα. Η παραπάνω σχέση μπορεί να ξαναγραφεί με τη βοήθεια της εξίσωσης (154) ως

$$P_{in} = \mathbf{a}_t^\dagger (\mathbf{I} - \mathbf{S}_{tt} \mathbf{S}_{tt}^\dagger) \mathbf{a}_t \quad (160)$$

Αντικαθιστώντας τη σχέση (155) στην άνωθεν σχέση λαμβάνεται η ισοδύναμη έκφραση:

$$P_{in} = \mathbf{b}_s^\dagger \left[(\mathbf{I} - \Gamma_{ss} \mathbf{S}_{tt})^{-1} \right]^\dagger \left[\mathbf{I} - \mathbf{S}_{tt} \mathbf{S}_{tt}^\dagger \right] \left[\mathbf{I} - \Gamma_{ss} \mathbf{S}_{tt} \right]^{-1} \mathbf{b}_s \quad (161)$$

Η μέγιστη διαθέσιμη ισχύς από το δίκτυο τροφοδοσίας ισούται με τη ισχύ που θα παρεχόταν στους ακτινοβολητές της στοιχειοκεραίας, αν τα φορτία τους ήταν Ανάπτυξη Κατανεμημένης Πλατφόρμας Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων και Εφαρμογή σε Προβλήματα Σύνθεσης Στοιχειοκεραιών

προσαρμοσμένα στο δίκτυο τροφοδοσίας. Η ισοδύναμη θεώρηση στην περίπτωση ενός μοναδικού ακτινοβολητή, είναι η αντίσταση εισόδου του να είναι συζυγής της αντίστασης εξόδου της πηγής τροφοδοσίας προκειμένου να μεγιστοποιείται η παρεχόμενη ισχύς στο φορτίο. Η αντίστοιχη υπόθεση εκφρασμένη για της στοιχειοκεραίες, απαιτεί το μητρώο που περιγράφει το δίκτυο τροφοδοσίας τους να είναι ίσο με τον ανάστροφο ερμιτιανό πίνακα περιγραφής του τροφοδοτούμενου δικτύου, δηλαδή

$$P_{av} = P_{in}, \text{ όταν } \mathbf{S}_{tt} = \mathbf{\Gamma}_{ss}^\dagger \quad (162)$$

οπότε σε αυτή τη περίπτωση η υπολογιζόμενη ισχύς ισοδυναμεί με τη διαθέσιμη από το δίκτυο τροφοδοσίας ισχύ, για τα δεδομένα φορτία. Από τη σχέση (161) και λαμβάνοντας υπόψη την αντικατάσταση που ορίζεται στη σχέση (162), η διαθέσιμη από το δίκτυο τροφοδοσίας ισχύς υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$\begin{aligned} P_{av} &= \mathbf{b}_s^\dagger \left[\left(\mathbf{I} - \mathbf{\Gamma}_{ss} \mathbf{\Gamma}_{ss}^\dagger \right)^{-1} \right]^\dagger \left[\mathbf{I} - \mathbf{\Gamma}_{ss} \mathbf{\Gamma}_{ss}^\dagger \right] \left[\mathbf{I} - \mathbf{\Gamma}_{ss} \mathbf{\Gamma}_{ss}^\dagger \right]^{-1} \mathbf{b}_s \\ &= \mathbf{b}_s^\dagger \left[\mathbf{I} - \mathbf{\Gamma}_{ss} \mathbf{\Gamma}_{ss}^\dagger \right]^{-1} \mathbf{b}_s \end{aligned} \quad (163)$$

Η προηγηθείσα σχέση, λυμένη ως προς τα προσπίπτοντα κύματα α_t με τη βοήθεια της (155), γράφεται:

$$P_{av} = \alpha_t^\dagger \left[\mathbf{I} - \mathbf{\Gamma}_{ss} \mathbf{S}_{tt} \right]^\dagger \left[\mathbf{I} - \mathbf{\Gamma}_{ss} \mathbf{\Gamma}_{ss}^\dagger \right]^{-1} \left[\mathbf{I} - \mathbf{\Gamma}_{ss} \mathbf{S}_{tt} \right] \alpha_t \quad (164)$$

Η συνολική ισχύς που εισέρχεται στο δικτύωμα τροφοδοσίας της στοιχειοκεραίας είναι:

$$P_s = \mathbf{b}_t^\dagger \mathbf{b}_t = \alpha_t^\dagger \left(\mathbf{I} - \mathbf{\Gamma}_{ss} \mathbf{S}_{tt} \right)^\dagger \left(\mathbf{I} - \mathbf{\Gamma}_{ss} \mathbf{S}_{tt} \right) \alpha_t \quad (165)$$

Οι σχέσεις υπολογισμού των διαφόρων μορφών ισχύος συνοψίζονται στον Πίνακα 43.

Ισχύς	Προσπίπτοντα κύματα α_t	Κύματα διέγερσης \mathbf{b}_s
P_{in}	$\alpha_t^\dagger \left[\mathbf{I} - \mathbf{S}_{tt} \mathbf{S}_{tt}^\dagger \right] \alpha_t$	$\mathbf{b}_s^\dagger \left[\left(\mathbf{I} - \mathbf{\Gamma}_{ss} \mathbf{S}_{tt} \right)^{-1} \right]^\dagger \left[\mathbf{I} - \mathbf{S}_{tt} \mathbf{S}_{tt}^\dagger \right] \left[\mathbf{I} - \mathbf{\Gamma}_{ss} \mathbf{S}_{tt} \right]^{-1} \mathbf{b}_s$
P_{av}	$\alpha_t^\dagger \left[\mathbf{I} - \mathbf{\Gamma}_{ss} \mathbf{S}_{tt} \right]^\dagger \left[\mathbf{I} - \mathbf{\Gamma}_{ss} \mathbf{\Gamma}_{ss}^\dagger \right]^{-1} \left[\mathbf{I} - \mathbf{\Gamma}_{ss} \mathbf{S}_{tt} \right] \alpha_t$	$\mathbf{b}_s^\dagger \left[\mathbf{I} - \mathbf{\Gamma}_{ss} \mathbf{\Gamma}_{ss}^\dagger \right]^{-1} \mathbf{b}_s$
P_s	$\alpha_t^\dagger \left(\mathbf{I} - \mathbf{\Gamma}_{ss} \mathbf{S}_{tt} \right)^\dagger \left(\mathbf{I} - \mathbf{\Gamma}_{ss} \mathbf{S}_{tt} \right) \alpha_t$	$\mathbf{b}_s^\dagger \mathbf{b}_s$

Πίνακας 41. Συνολικά διαθέσιμη ισχύς και πραγματική ισχύς στα στοιχεία της στοιχειοκεραίας

Σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση είναι δυνατός ο ορισμός ενός παράγοντα προσαρμογής g του συνολικού φορτίου της στοιχειοκεραίας στο δικτύωμα τροφοδοσίας της καθώς και του πραγματοποιούμενου ποσοστού μεταφοράς ισχύος p προς αυτό:

$$\begin{aligned}
q &= \frac{P_{in}}{P_{av}} \\
&= \frac{\mathbf{a}_t^\dagger [\mathbf{I} - \mathbf{S}_{tt} \mathbf{S}_{tt}^\dagger] \mathbf{a}_t}{\mathbf{a}_t^\dagger [\mathbf{I} - \mathbf{\Gamma}_{ss} \mathbf{S}_{tt}]^\dagger [\mathbf{I} - \mathbf{\Gamma}_{ss} \mathbf{\Gamma}_{ss}^\dagger]^{-1} [\mathbf{I} - \mathbf{\Gamma}_{ss} \mathbf{S}_{tt}] \mathbf{a}_t} \\
&= \frac{\mathbf{b}_s^\dagger [(\mathbf{I} - \mathbf{\Gamma}_{ss} \mathbf{S}_{tt})^{-1}]^\dagger [\mathbf{I} - \mathbf{S}_{tt} \mathbf{S}_{tt}^\dagger] [\mathbf{I} - \mathbf{\Gamma}_{ss} \mathbf{S}_{tt}]^{-1} \mathbf{b}_s}{\mathbf{b}_s^\dagger [\mathbf{I} - \mathbf{\Gamma}_{ss} \mathbf{\Gamma}_{ss}^\dagger]^{-1} \mathbf{b}_s}
\end{aligned} \tag{166}$$

$$\begin{aligned}
p &= \frac{P_{in}}{P_s} \\
&= \frac{\mathbf{a}_t^\dagger [\mathbf{I} - \mathbf{S}_{tt} \mathbf{S}_{tt}^\dagger] \mathbf{a}_t}{\mathbf{a}_t^\dagger (\mathbf{I} - \mathbf{\Gamma}_{ss} \mathbf{S}_{tt})^\dagger (\mathbf{I} - \mathbf{\Gamma}_{ss} \mathbf{S}_{tt}) \mathbf{a}_t} \\
&= \frac{\mathbf{b}_s^\dagger [(\mathbf{I} - \mathbf{\Gamma}_{ss} \mathbf{S}_{tt})^{-1}]^\dagger [\mathbf{I} - \mathbf{S}_{tt} \mathbf{S}_{tt}^\dagger] [\mathbf{I} - \mathbf{\Gamma}_{ss} \mathbf{S}_{tt}]^{-1} \mathbf{b}_s}{\mathbf{b}_s^\dagger \mathbf{b}_s}
\end{aligned} \tag{167}$$

5.2.3 Δικτύωματα για τη μεγιστοποίηση της ακτινοβολούμενης ενέργειας

Για να είναι δυνατός ο υπολογισμός της τιμής του κέρδους της στοιχειοκεραίας, θα πρέπει πρώτα να έχουν υπολογισθεί οι ενεργοί συντελεστές ανάκλασης στις θύρες εισόδου της. Το κέρδος G και η κατευθυντικότητα D είναι συνολικές τιμές, υπολογιζόμενες επί της εντάσεως ακτινοβολίας U και την ισχύ εισόδου P_{in} και ισχύ ακτινοβολίας P_{rad} αντίστοιχα. Ο λόγος ϵ_r της ισχύος που τελικά ακτινοβολείται P_{rad} προς την προσπίπτουσα ισχύ P_{in} έχει ήδη ορισθεί στη σχέση (127). Αν είναι επιπρόσθετα επιθυμητό να προσδιορισθεί το πραγματοποιούμενο κέρδος της (realized gain), το οποίο εξαρτάται από το λόγο της εντάσεως ακτινοβολίας της σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση προς την συνολικά διαθέσιμη ισχύ από το δίκτυο τροφοδοσίας της, πρέπει επιπλέον να έχει προσδιορισθεί και ο παράγοντας προσαρμογής της στοιχειοκεραίας q , για τις εφαρμοζόμενες διεγέρσεις. Το πραγματοποιούμενο κέρδος μιας κεραίας G_R δύναται να συσχετιστεί με το κέρδος της G χρησιμοποιώντας τον παράγοντα προσαρμογής q στο δίκτυωμα τροφοδοσίας της [138].

$$G_R = qG \tag{168}$$

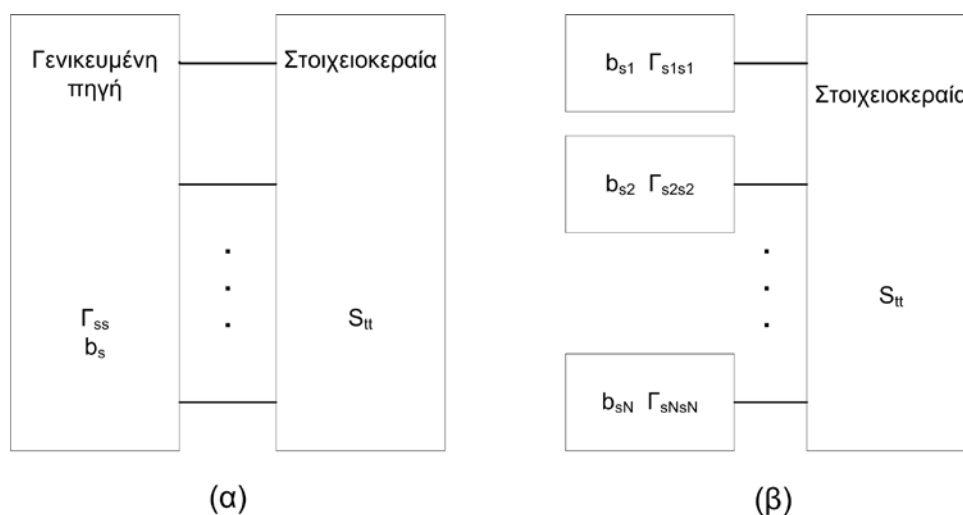
Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση, προκειμένου να μεγιστοποιείται η συνολική ακτινοβολούμενη ισχύς για δεδομένη και σταθερή συνολικά διαθέσιμη ισχύ από το δίκτυο τροφοδοσίας της, ο παράγοντας προσαρμογής της κεραίας q πρέπει να προσεγγίζει την μονάδα. Όταν η κεραία αποτελείται από ένα και μοναδικό ακτινοβολητή, ο οποίος δεν υπόκειται σε φαινόμενα σύζευξης και φαινόμενα σκίασης από παράπλευρα στοιχεία-σκεδαστές, είναι δυνατός ο αναλυτικός προσδιορισμός κατάλληλου κυκλώματος προσαρμογής που θα μεγιστοποιεί τη μεταφερόμενη άρα κατά συνέπεια και την ακτινοβολούμενη ισχύ της κεραίας.

Η παραπάνω διαδικασία δεν είναι όσο απλή στην περίπτωση των στοιχειοκεραιών, καθότι οι ενεργές αντιστάσεις εισόδου της εξαρτώνται άμεσα από τα φαινόμενα σύζευξης μεταξύ

των στοιχείων της καθώς και από τις εφαρμοζόμενες διεγέρσεις. Η προσαρμογή των ακτινοβολητών στο δικτύωμα τροφοδοσίας τους είναι ιδιαίτερα σημαντική στις περιπτώσεις που η ισχύς εκπομπής είναι μεγάλη, καθότι αν σημαντικό ποσοστό της ισχύος τροφοδοσίας ανακλάται προς το δίκτυο τροφοδοσίας της, μπορεί να προκαλέσει βλάβη στα κυκλωματικά στοιχεία που το απαρτίζουν.

Είναι απαραίτητο, σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση, να προσδιορισθεί η μορφή των μητρώων συντελεστών ανάκλασης Γ_{ss} του δικτύου τροφοδοσίας στις ενεργές αντιστάσεις εισόδου των θυρών της στοιχειοκεραίας. Ο συντελεστής προσαρμογής της στοιχειοκεραίας εξαρτάται, σύμφωνα με τη σχέση (166), από τα προσπίπτοντα κύματα τάσεως από την πηγή \mathbf{b}_s . Προκειμένου να επιτυγχάνεται η μεγιστοποίησή του, μπορούν να θεωρηθούν δύο γενικότεροι τρόποι προσαρμογής των αντιστάσεων εισόδου της στοιχειοκεραίας στις αντιστάσεις εξόδου του δικτύωματος τροφοδοσίας, αναλόγως της αρχιτεκτονικής του:

- Δίκτυο τροφοδοσίας με συζευγμένες στη γενικότερη περίπτωση εξόδους προς τα τροφοδοτούμενα στοιχεία (Εικόνα 94α).
- Ανεξάρτητα δίκτυα τροφοδοσίας με ξεχωριστές πηγές και αποσυζευγμένα κυκλώματα εξόδου προς τα τροφοδοτούμενα στοιχεία (Εικόνα 94β).



Εικόνα 94. Μοντελοποίηση δικτύωματος τροφοδοσίας στοιχειοκεραίας.

5.2.3.1 Γενικευμένο μοντέλο τροφοδοσίας

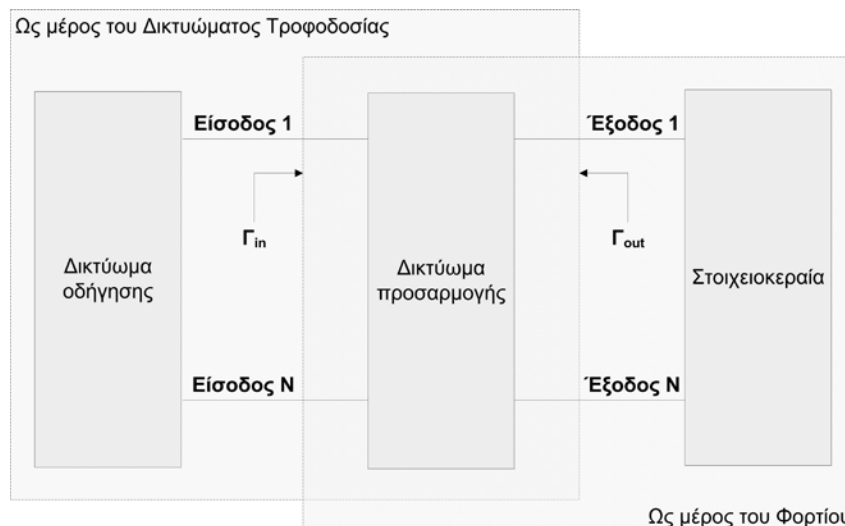
Το γενικευμένο μοντέλο τροφοδοσίας περιγράφεται από ένα μητρώο παραμέτρων σκέδασης Γ_{ss} και ένα διάνυσμα προσπίπτοντων κυμάτων τάσης \mathbf{b}_s προερχόμενα από το δίκτυωμα τροφοδοσίας. Η αναπαράσταση ενός οποιοδήποτε δικτύωματος τροφοδοσίας βάσει των παραπάνω παραμέτρων καθίσταται δυνατή, αναπτύσσοντας τα κατά Thevenin ισοδύναμα κυκλώματα, τα οποία στη γενικότερη περίπτωση μοντελοποιούν τις αλληλοεξαρτήσεις μεταξύ των θυρών εξόδων του. Συνακόλουθα είναι δυνατή η εξαγωγή ενός $N \times N$ μητρώου Γ_{ss} , του οποίου τα στοιχεία εκτός της κυρίας διαγωνίου περιγράφουν τη σύζευξη μεταξύ των θυρών εξόδου, ενώ τα στοιχεία της κυρίας διαγωνίου αντιστοιχούν στις ισοδύναμες αντιστάσεις εξόδου του. Σε κάθε περίπτωση αυτή η γενικευμένη αναπαράσταση μπορεί να προσδιορισθεί περαιτέρω, αναλόγως της επιλεγμένης μεθοδολογίας υλοποίησης των δικτυωμάτων τροφοδοσίας, είτε τα κυκλωματικά στοιχεία τους αποτελούνται από ενεργά είτε από παθητικά ηλεκτρονικά στοιχεία.

Σύμφωνα με την παραπάνω μοντελοποίηση είναι δυνατός ο ορισμός ενός μητρώου σκέδασης του δικτύου τροφοδοσίας το οποίο θα μεγιστοποιεί την μεταφερόμενη ισχύ στις εισόδους της στοιχειοκεραίας, για όλες τις δυνατές εφαρμοζόμενες διεγέρσεις. Ισοδύναμα η συνθήκη αυτή μπορεί να εκφραστεί αναλυτικά βάσει του συντελεστή προσαρμογής q , ο οποίος προσδιορίζεται αναλυτικά από την σχέση (166), όπου απαιτείται να είναι ίσος με την μονάδα ($q=1$) για οποιαδήποτε σύνολο παρεχόμενων διεγέρσεων \mathbf{b}_s από το δικτύωμα τροφοδοσίας. Μια λύση η οποία οδηγεί στην ικανοποίηση της προαναφερόμενης συνθήκης είναι το γενικευμένο μητρώο σκέδασης του δικτύωματος τροφοδοσίας Γ_{ss} να ισούται με τον ερμιτιανό μητρώο σκεδάσεων της στοιχειοκεραίας ως πολύθυρου:

$$\Gamma_{ss} = \mathbf{S}_{tt}^\dagger \quad (169)$$

Η παραπάνω συνεπαγωγή επιβεβαιώνεται με ευκολία αντικαθιστώντας την τιμή του μητρώου Γ_{ss} που ορίζεται από την παραπάνω σχέση στη σχέση υπολογισμού της προσαρμογής της στοιχειοκεραίας. Σε αυτή τη περίπτωση, το πραγματοποιούμενο κέρδος G_R της στοιχειοκεραίας θα είναι ίσο με το κέρδος της G για κάθε δυνατή παρεχόμενη διέγερση \mathbf{b}_s . Βεβαίως πρέπει να τονισθεί ότι η σύνθεση ενός δικτύωματος τροφοδοσίας ερμιτιανά προσαρμοσμένου στο μητρώο σκέδασης μιας δεδομένης στοιχειοκεραίας, δεν είναι πάντοτε σχεδιαστικά εφικτή.

Σημειώνεται ότι αν προηγείται βαθμίδα προσαρμογής των θυρών εισόδου της στοιχειοκεραίας στη χαρακτηριστική αντίσταση των γραμμών μεταφοράς του δικτύωματος τροφοδοσίας της, η περιγραφή της είναι δυνατόν είτε να συμπεριληφθεί στη μοντελοποίηση της κεραίας ως τροφοδοτούμενο φορτίο, είτε να συνυπολογισθεί στο γενικευμένο μητρώο σκέδασης του δικτύωματος προσαρμογής (Εικόνα 95).



Εικόνα 95. Η προσαρμογή ως μέρος του φορτίου είτε ως συστατικό του δικτύωματος τροφοδοσίας.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η ανάλυση μιας ειδικότερης περίπτωσης προσαρμογής, ανάλογης της συζυγούς προσαρμογής, όπως αυτή εφαρμόζεται για μια απομονωμένη κεραία. Σε αυτή την περίπτωση έχει προτιμηθεί η ανάλυση των δικτυωμάτων προσαρμογής στις ενεργές αντιστάσεις εισόδου της στοιχειοκεραίας να είναι ενσωματωμένη στη γενικευμένη περιγραφή του προηγθέντος δικτύωματος προσαρμογής.

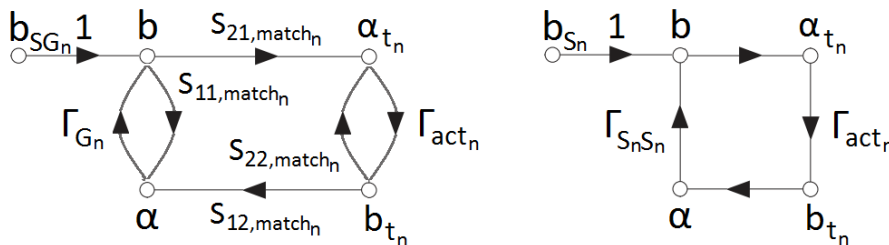
5.2.3.2 Ανεξάρτητα - αποσυζευγμένα δίκτυα τροφοδοσίας

Έστω ότι χρησιμοποιούνται ανεξάρτητα δίκτυα τροφοδοσίας με ξεχωριστές πηγές και αποσυζευγμένα κυκλώματα εξόδου για την τροφοδοσία της στοιχειοκεραίας. Σε αυτή τη περίπτωση οι αντιστάσεις εξόδου των πομπών πρέπει να προσαρμοστούν στις ενεργές αντιστάσεις εισόδου του κάθε ακτινοβολητή της στοιχειοκεραίας που τροφοδοτούν. Κατά συνέπεια το προκύπτων μητρώο παραμέτρων σκέδασης του δικτύωματος τροφοδοσίας Γ_{ss} είναι ένας διαγώνιος πίνακας, όπου τα στοιχεία της κυρίας διαγωνίου ισούνται με τη συζυγή τιμή των αντιστοιχούντων συντελεστών ανάκλασης στις εισόδους της στοιχειοκεραίας, όπως αυτοί υπολογίζονται αναλυτικά από τη σχέση (169).

$$\Gamma_{S_n S_n} = \Gamma_{act_n}^* \quad (170)$$

Αυτό το είδος προσαρμογής αποκαλείται συζυγή προσαρμογή και επιτρέπει τη μεγιστοποίηση της μεταφερόμενης ενέργειας από το δικτύωμα τροφοδοσίας στους ακτινοβολητές της στοιχειοκεραίας, για δεδομένες συνθήκες διέγερσης τους. Σε αντίθεση με τη ερμιτιανή προσαρμογή, η συζυγής έχει ως αποτέλεσμα τη μεγιστοποίηση του παράγοντα προσαρμογής g της στοιχειοκεραίας μόνο για τις δεδομένες διεγέρσεις για τις οποίες σχεδιάστηκαν τα δικτύωμα προσαρμογής.

Κατά την ανάλυση του δικτύωματος τροφοδοσίας είναι δυνατόν να συμπεριληφθούν οι παράμετροι των 2-θυρων δικτυωμάτων προσαρμογής στις εισόδους της στοιχειοκεραίας. Για αυτό το σκοπό ορίζεται ένα επιπρόσθετο μοντέλο ροής σημάτων για κάθε κλάδο του δικτύωματος προσαρμογής, το οποίο απεικονίζεται ακολούθως (Εικόνα 96).



Εικόνα 96. Ισοδύναμες περιγραφές δικτύωματος τροφοδοσίας αποσυζευγμένων εξόδων με ανάλυση του στελέχους προσαρμογής (αριστερά) και χωρίς (δεξιά).

Τα δύο προηγηθέντα μοντέλα, απεικονίζουν τα διαγράμματα ροής σημάτων για το κύκλωμα τροφοδοσίας του κάθε ακτινοβολητή, όταν παρεμβάλλεται ένα στέλεχος προσαρμογής χαρακτηριζόμενο από το 2X2 μητρώο παραμέτρων σκέδασης S_{match} , και το διάγραμμα ροής σημάτων του κατά Thevenin ισοδύναμου κυκλώματος.

Είναι δυνατόν να θεωρηθεί, χωρίς βλάβη στη γενικότητα της ακόλουθης ανάλυσης, ότι η πηγή τροφοδοσίας V_G είναι προσαρμοσμένη στη χαρακτηριστική αντίσταση Z_0 της χρησιμοποιούμενης γραμμής μεταφοράς,

$$\Gamma_{S_n S_n} = \Gamma_{out_n} = S_{22match} - \frac{S_{12match} S_{21match} \Gamma_G}{1 - S_{11match} \Gamma_G} \quad (171)$$

εάν $\Gamma_G = 0$ τότε $\Gamma_{S_n S_n} = S_{22match}$

ώστε ο ισodύναμος συντελεστής ανάκλασης στην έξοδο του δικτυώματος συζυγούς προσαρμογής Γ_{out} να ισούται με τον συντελεστή S_{22} . Σε αυτή την περίπτωση μπορούν να υπολογισθούν αναλυτικά, βάσει των συντελεστών του μητρώου ανάκλασης του κάθε στελέχους προσαρμογής, η τάση V_G του δικτυώματος τροφοδοσίας βάσει του ισodύναμου κύματος τάσεως b_{SG} και του επιθυμητού προσπίπτοντος κύματος τάσης α_i στους ακροδέκτες της στοιχειοκεραίας.

$$\begin{aligned} V_{G_n} &= 2\sqrt{Z_0}b_{SG_n} \\ b_{SG_n} &= \frac{1 - S_{22,match_n}\Gamma_{act_n}}{S_{21,match_n}}\alpha_{t_n} \end{aligned} \quad (172)$$

Σύμφωνα με αυτή τη θεώρηση, οι σχέσεις υπολογισμού (160) και (163) της συνολικής ισχύος που προσπίπτει στους ακροδέκτες της στοιχειοκεραίας P_L και της συνολικής διαθέσιμης ισχύος από το δικτύωμα τροφοδοσίας της P_{av} αντίστοιχα, μπορούν να ξαναγραφούν βάσει των ανεξάρτητων τάσεων τροφοδοσίας V_G και των συντελεστών των δικτυωμάτων προσαρμογής.

$$\begin{aligned} P_L &= \sum_{n=1}^N P_{L_n} = \sum_{n=1}^N \frac{|V_{G_n}|^2}{8Z_0} \frac{|S_{21,match_n}|^2}{|1 - S_{22,match_n}\Gamma_{act_n}|} \left(1 - |\Gamma_{act_n}|^2\right) \\ P_{av} &= \sum_{n=1}^N P_{av_n} = \sum_{n=1}^N \frac{|V_{G_n}|^2}{8Z_0} \frac{|S_{21,match_n}|^2}{1 - |S_{22,match_n}|^2} \end{aligned} \quad (173)$$

Επειδή το μητρώο των παραμέτρων σκέδασης του δικτύου τροφοδοσίας είναι διαγώνιο, η σχέση υπολογισμού των κυμάτων τάσεως b_s (155) μπορεί να επαναδιατυπωθεί βάσει της ισodύναμης κατά Thevenin τάσεως V_{th} .

$$\begin{aligned} V_{th_n} &= \frac{2\sqrt{Z_0}}{1 - \Gamma_{S_n S_n}} b_{S_n} \\ b_{S_n} &= \Gamma_{S_n S_n} \sum_{m=1}^M S_{t_n t_m} \alpha_{t_m} \end{aligned} \quad (174)$$

Αντίστοιχα, η συνολική ισχύς που προσπίπτει στους ακροδέκτες της στοιχειοκεραίας P_L και η συνολικά διαθέσιμη ισχύς από το δικτύωμα τροφοδοσίας της P_{av} , μπορούν να εκφραστούν βάσει της ισodύναμης κατά Thevenin τάσεως V_{th} .

$$\begin{aligned} P_L &= \sum_{n=1}^N P_{L_n} = \sum_{n=1}^N \frac{|V_{th_n}|^2}{8Z_0} \frac{|1 - \Gamma_{S_n S_n}|^2}{|1 - \Gamma_{S_n S_n}\Gamma_{act_n}|} \left(1 - |\Gamma_{act_n}|^2\right) \\ P_{av} &= \sum_{n=1}^N P_{av_n} = \sum_{n=1}^N \frac{|V_{th_n}|^2}{8Z_0} \frac{|1 - \Gamma_{S_n S_n}|^2}{1 - |\Gamma_{S_n S_n}|^2} \end{aligned} \quad (175)$$

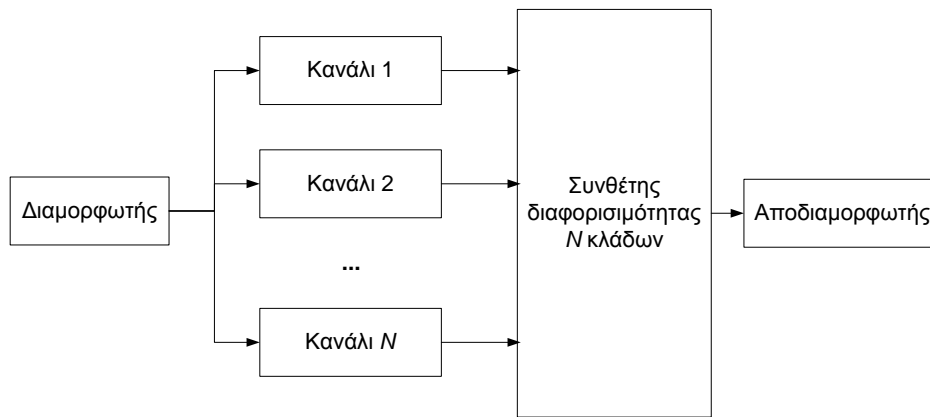
5.3 Διαφορισιμότητα Συστήματος Πολλαπλών Κεραίων

Τα φαινόμενα πολυοδικής διάδοσης δύναται να έχουν σοβαρές επιπτώσεις στην ποιότητα υπηρεσιών που εξυπηρετούνται από ένα ραδιοκανάλι κινητών επικοινωνιών. Η χρήση *τεχνικών διαφορισιμότητας* (diversity techniques) στα κεραιοσυστήματα μπορούν σε ένα βαθμό να αντισταθμίσουν αυτές τις επιπτώσεις [126].

Η χρήση ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος διαφορισιμότητας επιτυγχάνει βέλτιστα αποτελέσματα όταν λαμβάνεται υπόψη ο ακριβός μηχανισμός και η γεωμετρία των φαινομένων διασποράς που έχουν ως συνέπεια την εμφάνιση των διαλείψεων λόγω της πολυοδικής διάδοσης. Οι κύριοι μέθοδοι επίτευξης διαφορισιμότητας σε ένα κεραιοσύστημα είναι:

1. *Χωρική*: Ο πιο εύκολος τρόπος για την εκμετάλλευση της διαφορισιμότητας ενός κεραιοσυστήματος είναι αυτό να απαρτίζεται από πολλαπλές επαρκώς χωρικά διαχωρισμένες κεραιές έτσι ώστε να δημιουργούνται ανεξάρτητες οδοί διάδοσης με διαλείψεις χωρίς να αποτελεί προϋπόθεση η αύξηση τη ισχύος εκπομπής ή του διαθέσιμου εύρους ζώνης και να είναι διαθέσιμες στο δέκτη περισσότερες από μια εκδόσεις του μεταδιδόμενου σήματος.
2. *Πόλωσης*: Οι διαθλάσεις και οι περιθλάσεις ενός κάθετα πολωμένου σήματος κατά μήκος του μονοπατιού διάδοσής του δύναται να έχει ως αποτέλεσμα την εκπόλωση του και την εμφάνιση σημαντικής, από άποψη ισχύος, οριζόντια πολωμένης συνιστώσας του στον δέκτη. Η αξιοποίηση του περιγραφόμενου φαινομένου είναι δυνατή εγκαθιστώντας δύο διαφορετικά πολωμένες κεραιές σε κάθε κλάδο του δέκτη. Ενδεικνύται όταν οι κεραιές πρέπει να ολοκληρωθούν σε κεραιοσύστημα περιορισμένων διαστάσεων.
3. *Χρόνου*: Είναι δυνατόν να επιτευχθεί διαφορισιμότητα για μια και μόνο κεραία εκπέμποντας διαδοχικά το ίδιο σήμα πολλές φορές, λαμβάνοντας υπόψη τις αποστάσεις μεταξύ των κεραιών του συστήματος λήψεως. Βέβαια, η επανεκπομπή της πληροφορίας έχει ως συνέπεια την ελάττωση της συνολικής χωρητικότητας και εισαγάγει καθυστερήσεις στη μετάδοση. Παρά ταύτα αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται για τη βελτίωση της αποδοτικότητας των χρησιμοποιούμενων τεχνικών κωδικοποίησης/διαμόρφωσης μερικώς επικαλυπτόμενων σημάτων, δημιουργώντας έτσι καλύτερες προϋποθέσεις για τη διόρθωση λαθών.
4. *Συχνότητας*: Στα ευρυζωνικά κανάλια, δύο συνιστώσες οι οποίες απέχουν συχνοτικά περισσότερο από το συναφές εύρος ζώνης υπόκεινται σε ασυσχέτιστες διαλείψεις, προσφέροντας έτσι άλλη μια δυνατότητα για την επίτευξη διαφορισιμότητας. Αυτή η αρχή χρησιμοποιείται στην υλοποίηση συγκεκριμένων μορφών εξισορροπιστών.

Η κεντρική ιδέα στην χρήση τεχνικών διαφορισιμότητας είναι ότι περισσότερες από μια εκδόσεις του μεταδιδόμενου σήματος είναι διαθέσιμες στον δέκτη, οι οποίες λαμβάνονται από διαφορετικά κανάλια (Εικόνα 97). Κάθε απεικονιζόμενο κανάλι συνεπικουρούμενο από τη μονάδα λήψης καλείται *κλάδος* (branch). Οι έξοδοι των καναλιών υπόκεινται σε επεξεργασία και κατανέμονται στον αποδιαμορφωτή, χρησιμοποιώντας έναν κατάλληλο *συνθέτη διαφορισιμότητας* (diversity combiner).



Εικόνα 97. Μοντέλο διαφορισιμων καναλιών.

Σκοπός είναι τα λαμβανόμενα σήματα να είναι ασυσχέτιστα μεταξύ τους, έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι πιθανότητες μιας ταυτόχρονης βαθιάς διάλειψης τους. Χάριν παραδείγματος ας υποθεθεί ότι η πιθανότητα για απάλειψη της επικοινωνίας λόγω μιας βαθιάς διάλειψης σε ένα από τα κανάλια είναι p και ότι αυτή η πιθανότητα είναι ανεξάρτητη για όλα τα N κανάλια. Σε αυτή την περίπτωση η πιθανότητα ταυτόχρονης απώλειας των επικοινωνιών σε όλα τα κανάλια είναι p^N .

5.3.1 Συνθέτες διαφορισιμότητας

Οι κύριες τεχνικές συνδυασμού των πολλαπλών λαμβανόμενων σημάτων για να εξαχθεί ένα βελτιωμένο σήμα σε κεραιούστημα με διαφορισιμότητα στη λήψη είναι [139]:

- Όταν τα σήματα *συνδυάζονται επιλεκτικά* (Selection Combining – SC) ο συνθέτης διαφορισιμότητας επιλέγει εκείνο τον κλάδο ο οποίος τη δεδομένη χρονική στιγμή εμφανίζει τον υψηλότερο σηματοθορυβικό λόγο (Signal to Noise Ratio – SNR).
- Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας συνθέτης διαφορισιμότητας με *μεταγωγή στον επόμενο διαθέσιμο κλάδο* όταν ο σηματοθορυβικός λόγος στον ενεργό κλάδο *υπολείπεται μιας προκαθορισμένης τιμής κατωφλίου*. Μπορούν να οριστούν πολλά διαφορετικά κριτήρια για την επιλογή του επόμενου κλάδου [140], αλλά συνήθως αυτή γίνεται τυχαία, όπως προβλέπει η τεχνική *μεταγωγής και συνέχισης της σύνδεσης* (Switch and Stay Combining – SSC). Η αποδοτική λειτουργία ενός τέτοιου σχήματος προϋποθέτει αφενός την προσεκτική επιλογή του SNR κατωφλίου σε σχέση με τη μέση διαθέσιμη ισχύ σήματος ανά κλάδο και αφετέρου τον ορισμό κατάλληλου μηχανισμού περιορισμού της συχνότητας των μεταγωγών.
- Η χρήση ενός *συνθέτη μεγιστοποίησης του σηματοθορυβικού λόγου* (Maximum Ration Combining – MRC) επιτρέπει την ζύγιση των κλάδων χαμηλού SNR με βάρη $w_i = a_i^*/P_N$. Σε αυτή την περίπτωση οι τιμές των βαρών εξισορροπούν τις συγκριτικές μεταβολές της ισχύος θορύβου P_N μεταξύ των κλάδων, αν και στη πράξη αυτές οι τιμές είναι συνήθως παραπλήσιες. Αποδεικνύεται ότι ο στιγμιαίος σηματοθορυβικός λόγος του σήματος στην έξοδο ενός συνθέτη MRC είναι ίσος με το άθροισμα των επιμέρους σηματοθορυβικών λόγων κάθε κλάδου.

- Η χρήση ενός *συνθέτης εξισορρόπησης κέρδους* (Equal-Gain Combining – EGC) εξασφαλίζει ότι τα σήματα σε κάθε κλάδο προστίθενται αφού το καθένα πολλαπλασιαστεί με τιμή βάρους $w_i = e^{-j\theta_i}$, όπου θ_i είναι η φάση του καναλιού που αντιστοιχεί σε κάθε κλάδο i . Το αποτέλεσμα είναι τα λαμβανόμενα σήματα να έχουν μηδενική φάση και να μην προστίθενται καταστρεπτικά στην έξοδο του συνθέτη.

Δύο κριτήρια είναι απαραίτητα για να μπορεί να επιτύχει ένα κεραιοσύστημα σημαντικό κέρδος διαφορισιμότητας [141]:

1. Τα φαινόμενα διαλείψεων πρέπει να μην συσχετίζονται σημαντικά μεταξύ των κλάδων.
2. Η μέση διαθέσιμη ισχύς από κάθε κλάδο θα πρέπει να είναι συγκρίσιμη με τη διαθέσιμη ισχύς από τους άλλους κλάδους.

Εάν η συσχέτιση μεταξύ των κλάδων είναι μεγάλη, τότε αυξάνονται σημαντικά οι πιθανότητες ταυτόχρονων βαθιών διαλείψεων. Αν οι κλάδοι είναι ασυσχέτιστοι αλλά διαφέρουν σημαντικά οι διαθέσιμες ισχύεις στο κάθε κλάδο, τότε το λαμβανόμενο σήμα στον πιο αδύναμο κλάδο μπορεί να μην είναι αξιοποιήσιμο παρόλο που μπορεί να υπόκειται σε μικρότερες διαλείψεις συγκρινόμενο με τα σήματα των άλλων κλάδων.

Έστω ότι δύο κλάδοι μπορούν να αναπαρασταθούν από δύο πολλαπλασιαστικά σήματα a_1 και a_2 στενού εύρους ζώνης, τότε η συσχέτιση μεταξύ των δύο κλάδων μπορεί να χαρακτηριστεί βάσει του συντελεστή συσχέτισης ρ_{12}

$$\rho_{12} = \frac{E[(a_1 - \mu_1)(a_2 - \mu_2)]}{\sigma_1 \sigma_2} \quad (176)$$

όπου E είναι η στατιστικά αναμενόμενη τιμή τους. Εάν και τα δύο κανάλια θεωρηθεί ότι έχουν μηδενική μέση τιμή (όπως συμβαίνει π.χ. για τα Rayleigh κανάλια), η παραπάνω έκφραση απλοποιείται σε

$$\rho_{12} = \frac{E[a_1 a_2^*]}{\sigma_1 \sigma_2} \quad (177)$$

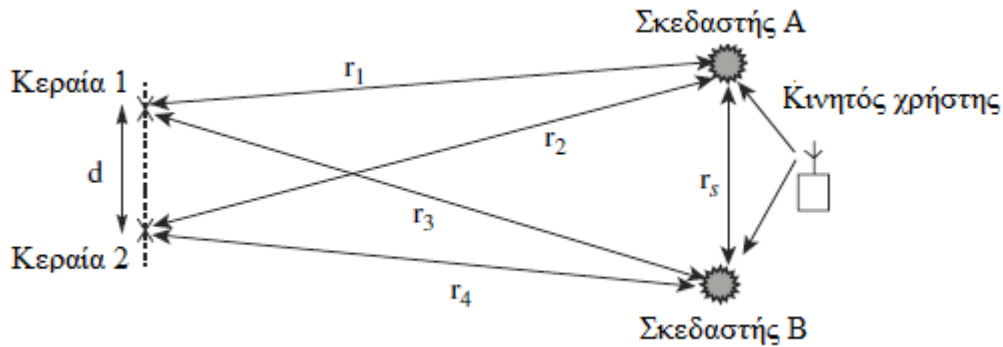
Συνακόλουθα, η μέση ισχύς P_i ανά κλάδο μπορεί να οριστεί ως

$$P_i = \frac{E[|a_i|^2]}{2} \quad (178)$$

Προκειμένου να είναι δυνατή η σχεδίαση ενός αποδοτικού συστήματος διαφορισιμότητας, θα πρέπει τα κανάλια να παρουσιάζουν μικρή συσχέτιση μεταξύ τους και υψηλές τιμές μέσης διαθέσιμης ισχύος ανά κλάδο.

5.3.2 Μοντελοποίηση χωρικής διαφορισιμότητας

Ο πιο εύκολος τρόπος για την επίτευξη επαρκούς διαφορισιμότητας σε ένα κεραιοσύστημα είναι αυτό να απαρτίζεται από δύο τουλάχιστον κεραίες (χωρική διαφορισιμότητα). Η Εικόνα 98 δείχνει δυο κεραίες, οι οποίες απέχουν μεταξύ τους απόσταση d και λαμβάνουν ανακλώμενα σήματα από τους σκεδαστές A και B.



Εικόνα 98. Διαφορές στα μήκη των μονοπατιών για δύο χωρικά διαχωρισμένες κεραίες.

Η φασική διαφορά μεταξύ των λαμβανομένων σημάτων είναι ανάλογη των διαφορών στο μήκων των μονοπατιών από τους σκεδαστές προς καθεμία από τις κεραίες, δηλαδή (r_1-r_3) και (r_2-r_4) . Η εκπομπή σημάτων από διαφορετικές θέσεις έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική διαφοροποίηση της φάσης τους όταν αυτά φτάνουν στο δέκτη. Η άθροιση μεγάλων φασικών διαφορών λόγω των διαφορετικών προελεύσεων των σημάτων έχουν ως αποτέλεσμα τη μικρή συσχέτιση τους στις δύο κεραίες λήψης. Επομένως αναμένουμε να μειώνεται η συσχέτιση των κεραιών όσο αυξάνονται οι αποστάσεις r_s και d .

Αν θεωρηθεί ότι η απόσταση του κεραιοσυστήματος από τους σκεδαστές κατά πολύ μεγαλύτερη από την απόσταση d μεταξύ των κεραιών που το απαρτίζουν, τότε μπορεί να θεωρηθεί ότι και οι δύο κεραίες βλέπουν το σκεδαστή υπό τη ίδια γωνία. Σε αυτή τη περίπτωση η φασική διαφορά μεταξύ των προσπιπτόμενων πεδίων στις κεραίες είναι ανάλογη της γωνίας θ υπό τη οποία το κεραιοσύστημα «βλέπει» τον σκεδαστή:

$$\phi = -kd \sin \theta \quad (179)$$

Τότε τα προσπίπτοντα πεδία στις δύο κεραίες, όπως αυτά προκύπτουν από το σκεδαστή μπορούν να γραφούν ως

$$a_1 = r \quad \text{και} \quad a_2 = r e^{j\phi} \quad (180)$$

Εάν υπάρχει μεγάλος αριθμός σκεδαστών, τότε τα λαμβανόμενα σήματα προκύπτουν από τη συμβολή των συνεισφορών από κάθε σκεδαστή είναι

$$a_1 = \sum_{i=1}^{n_s} r_i \quad \text{και} \quad a_2 = \sum_{i=1}^{n_s} r_i e^{j\phi_i} \quad (181)$$

όπου r_i είναι τα πλάτη των σημάτων από κάθε σκεδαστή. Επομένως η συσχέτιση μεταξύ των σημάτων a_1 και a_2 λαμβάνει τη μορφή

$$\rho_{12} = E \sum_{i=1}^{n_s} e^{-j\phi_i} = E \sum_{i=1}^{n_s} e^{-jkd \sin \theta_i} \quad (182)$$

Έως τώρα έχει υποθεθεί ότι τα πλάτη των ανακλώμενων σημάτων είναι ασυσχέτιστα μεταξύ τους. Αν επιπρόσθετα θεωρηθεί ότι οι γωνίες ϑ ακολουθούν μια κανονική κατανομή $p(\vartheta)$, καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός των αναμενόμενων τιμών [126], οπότε η έκφραση του συντελεστή συσχέτισης μεταξύ των κεραιών λαμβάνει την εξής μορφή:

$$\rho_{12}(d) = \int_0^{2\pi} p(\theta) e^{jkd \sin \theta} d\theta \quad (183)$$

Η παραπάνω σχέση δύναται να χρησιμοποιηθεί για τη περιγραφή πληθώρας διαφορετικών σεναρίων εφόσον μπορούν να ορισθούν κατάλληλες κανονικές κατανομές $p(\vartheta)$ για τις προκύπτουσες φασικές διαφορές. Ουσιαστικά περιγράφει τον χωρικό μετασχηματισμό Fourier μεταξύ των μεγεθών $p(\vartheta)$ και $\rho(d)$ οπότε τα πλάτη των δύο αυτών συναρτήσεων είναι αντίστροφος ανάλογα. Συνακόλουθα μια γωνιακή κατανομή μικρού εύρους θα είχε ως αποτέλεσμα την μικρή ελαχιστοποίηση των τιμών συσχέτισης για αυξανόμενη απόσταση d μεταξύ των ακτινοβολητών, γεγονός που βεβαίως περιορίζει και την χρησιμότητα των τεχνικών χωρικής διαφορισμότητας. Αντιθέτως, ένα ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον με πολλούς σκεδαστές κατανεμημένους σε ευρύ φάσμα γωνιών γύρω από το κεραιοσύστημα θα είχε ως αποτέλεσμα την επίτευξη ικανοποιητικής χωρικής διαχωρισμότητας, ακόμα και για σχετικά μικρές αποστάσεις d μεταξύ των κεραιών.

5.3.3 Συντελεστές συσχέτισης διδιάστατου Rayleigh καναλιού

Για δέκτη ευρισκόμενο σε περιβάλλον πλούσιο σε σκεδαστές, ας ορίσουμε ως $\rho(d)$ τη συνάρτηση συσχέτισης μεταξύ των κάθετα πολωμένων ηλεκτρικών πεδίων E_z , τα οποία μετρούνται σε δύο διαφορετικά σημεία ευρισκόμενα στο ίδιο επίπεδο z και που απέχουν μεταξύ τους απόσταση d . Για τον υπολογισμό της συναρτήσεως συσχέτισης θα υποθέσουμε την ύπαρξη ενός διδιάστατου Rayleigh καναλιού όπου τα προσπίπτοντα ηλεκτρομαγνητικά E_z κύματα σε δύο διαφορετικές κεραιές του δέκτη χαρακτηρίζονται από την ίδια ισχύ και ότι διαδίδονται στο οριζόντιο επίπεδο που εμπεριέχει τις θέσεις των κεραιών [142], οπότε

$$E_z(\mathbf{r}) = \int_0^{2\pi} F(\theta) e^{-j\mathbf{k}\mathbf{r}} d\theta \quad (184)$$

όπου \mathbf{k} είναι το οριζόντιο διάνυσμα διάδοσης του επιπέδου κύματος, ϑ είναι η γωνία αζιμούθιου του διανύσματος \mathbf{k} , $F(\vartheta)$ είναι το μιγαδικό φάσμα του επιπέδου κύματος E_z , και \mathbf{r} είναι το διάνυσμα ακτίνας της οριζόντιας θέσης της στοιχειοκεραίας. Η παραπάνω εξίσωση αντιστοιχεί σε μια πραγμάτωση του E_z . Ένα ορισμένο μιγαδικό φάσμα $F(\vartheta)$ αντιστοιχεί σε κάθε πραγμάτωση, και σύμφωνα με τις παραπάνω υποθέσεις έχει τα χαρακτηριστικά μιας τυχαίας μιγαδικής συναρτήσεως. Έστω ότι ως $F_r(\vartheta)$ ορίζεται η αναπαράσταση του πραγματικού μέρους και ως $F_i(\vartheta)$ η αναπαράσταση του μιγαδικού. Τότε για κάθε γωνία αζιμούθιου ισχύει

$$\langle F(\theta) \rangle = \langle F_r(\theta) \rangle = \langle F_i(\theta) \rangle = 0 \quad (185)$$

Επειδή έχει υποθεθεί ότι τα δύο κύματα που φθάνουν από τις κατευθύνσεις ϑ_1 και ϑ_2 είναι ασυσχέτιστα μεταξύ τους και ότι έχουν την ίδια ισχύ, τότε έχουμε

$$\langle F_r(\theta_1)F_r(\theta_2) \rangle = \langle F_i(\theta_1)F_i(\theta_2) \rangle = C\delta(\theta_1 - \theta_2) \quad (186)$$

όπου δ αναπαριστά μια κατανομή Dirac και η σταθερά C είναι ανεξάρτητη από τη γωνία αζιμούθιου. Επίσης θεωρείται ότι το πραγματικό και το μιγαδικό μέρος του $F(\vartheta)$ θεωρούνται ασυσχέτιστα

$$\langle F_r(\theta_1)F_i(\theta_2) \rangle = 0 \quad (187)$$

Σύμφωνα με τις παραπάνω παραδοχές η συσχέτιση των κάθετα πολωμένων ηλεκτρικών πεδίων δύναται να υπολογισθεί από την ακόλουθη σχέση:

$$\begin{aligned} \langle |E_z(\mathbf{r})|^2 \rangle &= \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \langle F(\theta_1)\overline{F(\theta_2)} \rangle e^{-j(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2)\mathbf{r}} d\theta_1 d\theta_2 \\ &= \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} 2C\delta(\theta_1 - \theta_2) e^{-j(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2)\mathbf{r}} d\theta_1 d\theta_2 \\ &= 4\pi C \end{aligned} \quad (188)$$

Επειδή αυτή η ποσότητα πρέπει να είναι ανεξάρτητη της θέσεως των κεραιών τότε υποχρεωτικά ισχύει

$$C = \frac{\langle |E_z|^2 \rangle}{4\pi} \quad \text{οπότε} \quad \langle F(\theta_1)\overline{F(\theta_2)} \rangle = \frac{\langle |E_z|^2 \rangle}{4\pi} \delta(\theta_1 - \theta_2) \quad (189)$$

Επομένως, η συνάρτηση συσχέτισης μεταξύ δύο κάθετα πολωμένων πεδίων E_z μετρούμενων στις γωνίες ϑ_1 και ϑ_2 [143], λαμβάνει τη ακόλουθη μορφή

$$\begin{aligned} \langle E_z(\mathbf{r}_1)\overline{E_z(\mathbf{r}_2)} \rangle &= \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \langle F(\theta_1)\overline{F(\theta_2)} \rangle d\theta_1 d\theta_2 \\ &= \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\langle |E_z|^2 \rangle}{2\pi} \delta(\theta_1 - \theta_2) e^{-j(\mathbf{k}_1\mathbf{r}_1 - \mathbf{k}_2\mathbf{r}_2)} d\theta_1 d\theta_2 \\ &= \frac{\langle |E_z|^2 \rangle}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{-j\mathbf{k}(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)} d\theta \end{aligned} \quad (190)$$

Έχουμε $\mathbf{k} = \cos\vartheta\mathbf{e}_x + \sin\vartheta\mathbf{e}_y$. Μπορούμε να επιλέξουμε το \mathbf{e}_x έτσι ώστε $\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 = \mathbf{e}_x$, χωρίς βλάβη στη γενικότητα της διατύπωσης, οπότε λαμβάνουμε

$$\begin{aligned}
\rho(d) &= \frac{\langle |E_z|^2 \rangle}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{-jkd \cos \theta} d\theta \\
&= \frac{\langle |E_z|^2 \rangle}{2\pi} \int_0^\pi \cos(kd \cos \theta) d\theta \\
&= \frac{\langle |E_z|^2 \rangle}{2\pi} J_0(kd)
\end{aligned} \tag{191}$$

όπου J_0 η συνάρτηση Bessel πρώτου είδους και μηδενικής τάξεως, η οποία υπολογίζεται αναλυτικά [144], ως ακολούθως

$$J_0(z) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \cos(z \sin \theta) d\theta = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \cos(z \cos \theta) d\theta \tag{192}$$

Αυτό το αποτέλεσμα είναι σύμφωνο με τα πειραματικά αποτελέσματα που έχουν παρουσιαστεί από τον Wallace και άλλους [145].

5.3.4 Επίδραση των φαινομένων σύζευξης στη διαφορισμότητα

Η βελτίωση που επιτυγχάνεται με τη χρήση των τεχνικών διαφορισμότητας δύναται να μεταφραστεί σε αύξηση της συνολικής διαθέσιμης χωρητικότητας ενός συστήματος ασυρμάτων επικοινωνιών και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη συσχέτιση των υποκείμενων σε διαλείψεις καναλιών όσο και από την αποδοτικότητα ακτινοβολίας των επιμέρους κεραιοσυστημάτων [146], [147], [148]. Υπό προϋποθέσεις, οι δύο προαναφερθέντες παράγοντες δύναται να συνδυαστούν για την επίτευξη υψηλών τιμών κέρδους διαφορισμότητας (diversity gain) [149].

Τα φαινόμενα υψηλής συσχέτισης των σημάτων και χαμηλής αποδοτικότητας ακτινοβολίας μιας στοιχειοκεραίας, λόγω των φαινομένων επαγωγής μεταξύ των ακτινοβολητών που την απαρτίζουν, δύναται επίσης να αντισταθμιστούν χρησιμοποιώντας κατάλληλα φορτία προσαρμογής (είτε αποσυζευγμένα δικτυώματα συζυγούς προσαρμογής) για δεδομένο ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον [133]. Από την άλλη, η ερμιτιανή προσαρμογή της στοιχειοκεραίας είναι δυνατόν να έχει ως αποτέλεσμα ασυσχέτιστα σήματα εξόδου και την επίτευξη της 100% αποδοτικότητας για οποιαδήποτε τιμή διαχωριστικής απόστασης των κεραιών [150], [151], [152].

Συγκεκριμένα, η αποδοτικότητα της διαφορισμότητας εξαρτάται άμεσα από την ελάχιστη απόσταση αποσυσχέτισης των κεραιών [153]. Η τιμή της απόστασης από-συσχέτισης επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από τα φαινόμενα αμοιβαίας επαγωγής. Μετρήσεις που έχουν διενεργηθεί στο παρελθόν δείχνουν ότι ακόμα και αν δύο δίπολα είναι τοποθετημένα πολύ κοντά, υπό προϋποθέσεις τα σήματα που αποδίδουν μπορεί να είναι σε μεγάλο βαθμό ασυσχέτιστα [154], [155], σε αντίθεση με προηγούμενες μελέτες σε μη συζευγμένα δίπολα που υποδείκνυαν ότι είναι απαραίτητος ο ορισμός μιας ελάχιστης απόστασης διαχωρισμού της τάξεως των 0,5 μηκών κύματος.

5.3.5 Συσχέτιση των λαμβανόμενων σημάτων στο δέκτη

Για ένα κεραιοσύστημα διαφορίσιμης λήψης είναι δυνατόν να αναπτυχθεί αναλυτική έκφραση που να συνδέει τις αναπτυσσόμενες τάσεις ανοικτοκύκλωσης $\mathbf{V}_{\text{ant}0}$, όταν οι τερματικοί ακροδέκτες του δεν οδηγούν κάποια φορτία, με τις τάσεις \mathbf{V}_{ant} που αναπτύσσονται στους ακροδέκτες του δέκτη [142], ως ακολούθως:

$$\mathbf{V}_{\text{ant}} = \mathbf{Z}_S (\mathbf{Z}_S + \mathbf{Z}_{\text{tt}})^{-1} \mathbf{V}_{\text{ant}0} \quad (193)$$

Στην παραπάνω εξίσωση, το σύμβολο \mathbf{Z}_{tt} αναπαριστά το μητρώο αμοιβαίων επαγωγών της στοιχειοκεραίας, ενώ το \mathbf{Z}_{ss} το μητρώο αντιστάσεων εισόδου στους ακροδέκτες του δέκτη του ισοδύναμου πολύθυρου.

Μια σημαντική παράμετρος εκτίμησης της χωρικής διαφορικής απόδοσης ενός κεραιοσυστήματος είναι το μητρώο συμμεταβλητότητας που χαρακτηρίζει τις αναπτυσσόμενες τάσεις κατά τη λειτουργία της λήψης, για διαφορετικές γωνίες προσπιπτόνων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Η σύνδεση μεταξύ του μητρώου συμμεταβλητότητας για τις τάσεις ανοικτοκύκλωσης και του αντίστοιχου μητρώου για τις αναπτυσσόμενες τάσεις στην πλευρά του δέκτη, δίνεται από τη σχέση

$$\langle \mathbf{V}_{\text{ant}} \mathbf{V}_{\text{ant}}^* \rangle = \mathbf{Z}_S (\mathbf{Z}_S + \mathbf{Z}_{\text{tt}})^{-1} \langle \mathbf{V}_{\text{ant}0} \mathbf{V}_{\text{ant}0}^* \rangle [(\mathbf{Z}_S + \mathbf{Z}_{\text{tt}})^{-1}]^* \mathbf{Z}_S^* \quad (194)$$

Για τον υπολογισμό της άνωθεν σχέσης δύναται να θεωρηθεί ότι η συμμεταβλητότητα των τάσεων ανοικτοκύκλωσης είναι ανάλογη της συμμεταβλητότητας του πεδίου E_z γραμμικά πολωμένων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ιδίου πλάτους και προσπιπτόνων στη στοιχειοκεραία υπό γωνία ανύψωσης $\vartheta_0 = \pi/2$, θεωρώντας διδιάστατο μοντέλο διάδοσης Rayleigh καναλιών,

$$\langle V_{\text{ant}0i} \overline{V_{\text{ant}0j}} \rangle = \langle |E_z|^2 \rangle H_{\text{eff}i} \overline{H_{\text{eff}j}} J_0(kd_{ij}) \quad (195)$$

όπου H_{eff} είναι το ενεργό ύψος των γραμμικών ακτινοβολητών που απαρτίζουν τη στοιχειοκεραία, d_{ij} η μεταξύ τους αποστάσεις και J_0 είναι η συνάρτηση Bessel πρώτου είδους και μηδενικής τάξης.

Τέλος, οι συντελεστές συσχέτισης μεταξύ των στοιχείων του κεραιοσυστήματος, δίνονται από την ακόλουθη σχέση

$$r_{ij0} = \frac{\langle V_{\text{ant}0i} \overline{V_{\text{ant}0j}} \rangle}{\sqrt{\langle |V_{\text{ant}0i}|^2 \rangle \langle |V_{\text{ant}0j}|^2 \rangle}} \quad (196)$$

και συνυπολογίζοντας την επίδραση του ισοδύναμου κυκλώματος του δέκτη

$$r_{ij} = \frac{\langle V_{\text{anti}} \overline{V_{\text{antj}}} \rangle}{\sqrt{\langle |V_{\text{anti}}|^2 \rangle \langle |V_{\text{antj}}|^2 \rangle}} \quad (197)$$

5.4 Σύνθεση γραμμικής φασικής στοιχειοκεραίας επιβάλλοντας παράλληλα περιορισμούς στην αποδοτικότητά της

Ένα από τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι μηχανικοί κεραιών είναι η σχεδίαση πρότυπων κεραιών οι οποίες μπορούν ταυτόχρονα να ικανοποιούν τις απαιτήσεις ακτινοβολήσης αλλά και ολοκλήρωσης, όπως αυτές τίθενται κατά την ανάπτυξη ενός συστήματος τηλεπικοινωνιών. Όταν συμπεριλαμβάνονται πολλαπλοί ακτινοβολητές στο κεραιοσύστημα, προκειμένου να αποκτήσει τη δυνατότητα για δυναμική μορφοποίηση και στροφή των κυρίως λοβών ακτινοβολήσης καθώς και για την προσαύξηση του χωρικού κέρδους διαφορισμότητας που επιτυγχάνουν, πρέπει επιπρόσθετα να ικανοποιούνται περιορισμοί που αφορούν το δίκτυο τροφοδοσίας του και τα στοιχεία που απαρτίζουν το εμπρόσθιο κύκλωμα λήψης του.

Η χρήση μοντέρνων τεχνικών βελτιστοποίησης έχει συνδράμει αποφασιστικά στην αντιμετώπιση της ενδογενούς πολυπλοκότητας των διαδικασιών σχεδίασης και ολοκλήρωσης. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (Particle Swarm Optimization – PSO) είναι μια μέθοδος εμπνευσμένη από τη φύση που προσομοιάζει τα πρότυπα συμπεριφοράς των μελισσών σε αναζήτηση τροφής [33]. Ο αλγόριθμος PSO έχει αναφερθεί ότι εκτίμησε επιτυχώς τις βέλτιστες τιμές παραμέτρων για μια σειρά προβλημάτων σχεδίασης κεραιών και σύνθεσης στοιχειοκεραίων, όπως της σύνθεσης διαγραμμάτων φασικών στοιχειοκεραίων, της προσαρμογής των συντελεστών φασικών κεραιών για την εξάλειψη των παρεμβολών, τον εκλεπτυσμό των πλατών τροφοδοσίας σύμμορφων κεραιών και τη σχεδίαση κεραιών νησίδας [156] [157] [110] [158]. Ο αλγόριθμος PSO επεκτάθηκε προκειμένου να δύναται να βελτιστοποιεί ταυτόχρονα πολλαπλούς στόχους (Multi-Objective PSO – MOPSO), χωρίς να είναι απαραίτητος ο υπολογισμός του ζυγισμένου αθροίσματος των επιμέρους τιμών καταλληλότητας [42]. Ο αλγόριθμος MOPSO έχει χρησιμοποιηθεί για την επίλυση σχεδιαστικών προβλημάτων κεραιών τα οποία απαιτούν την ταυτόχρονη ικανοποίηση μερικών αντικρουόμενων στόχων, όπως ο σχηματισμός στενών λοβών ακτινοβολήσης γραμμικών στοιχειοκεραίων και παράλληλα καταστολής του επιπέδου των πλευρικών λοβών τους στο διάγραμμα ακτινοβολίας [159], είτε τη βελτιστοποίηση των απωλειών επιστροφής ευρυζωνικών μονόπολων καθώς και του συντελεστή ποιότητας τους [160].

Μια σειρά μελετών έχουν αναδείξει τα φαινόμενα μη ικανοποιητικής προσαρμογής κατά τον σάρωση των φασικών στοιχειοκεραίων καθώς και πώς αυτά μπορούν να ελαχιστοποιηθούν περιορίζοντας το εύρος των τιμών που μπορεί να λάβει η αντίσταση οδήγησης του κάθε ακτινοβολητή [161], είτε έχουν προδιαγράψει εκείνες τις συνθήκες υπό τις οποίες είναι δυνατή η χρήση του φαινομένου της αμοιβαίας επαγωγής για τη βελτίωση του συνολικού κέρδους μιας στοιχειοκεραίας [137]. Μια άλλη σημαντική επίπτωση των φαινομένων αμοιβαίας επαγωγής είναι επί της επίδοσης της διαφορισμότητας των στοιχειοκεραίων. Οι Wallace και Jensen έχουν αναπτύξει μια αυστηρή μεθοδολογία ανάλυσης μικροκυματικών δικτυωμάτων για τον προσδιορισμό των τιμών συσχέτισης μεταξύ ακτινοβολητών τοποθετημένων πολύ κοντά [162], ενώ οι Broyde και Clavelier έχουν προτείνει μια μέθοδο σχεδίασης των εμπρόσθιων κυκλωμάτων λήψης, η οποία αξιοποιεί τα φαινόμενα σύζευξης για την βελτίωση της αποδοτικότητας διαφορισμότητας των κεραιοσυστημάτων [142].

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται μια μέθοδος βελτιστοποίησης της χωρικής διαμόρφωσης των στοιχείων μιας συμμετρικής γραμμικής στοιχειοκεραίας αποτελούμενης από $\lambda/2$ δίπολα, έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι τιμές των συντελεστών συσχέτισης των τάσεων που αναπτύσσονται στους διαφορετικούς κλάδους του δικτύωματος λήψης της και ταυτόχρονα να μεγιστοποιείται η καταστολή των πλευρικών λοβών, όταν το διάγραμμα ακτινοβολίας της είναι στραμμένο στην μέγιστη επιτρεπτή γωνία σάρωσης της. Η στοιχειοκεραία θεωρείται συζυγώς προσαρμοσμένη στο δίκτυο τροφοδοσίας της όταν το διάγραμμα που εκπέμπει δεν είναι στραμμένο, και επιπρόσθετα τίθενται περιορισμοί ως προς τις μέγιστες επιτρεπτές τιμές του συντελεστή μη προσαρμογής της κατά τη διάρκεια της σάρωσής της. Τα λαμβανόμενα αποτελέσματα δείχνουν ότι υπάρχει ένα όριο στο πόσο κοντά μπορούν να τοποθετηθούν οι ομοιόμορφα τροφοδοτούμενοι ακτινοβολητές που απαρτίζουν την στοιχειοκεραία, προκειμένου να κατασταλούν πιο αποτελεσματικά οι πλευρικοί λοβοί της, χωρίς να έχει αυτό ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη υψηλών τιμών συσχέτισης μεταξύ τους. Η παρούσα μελέτη είναι η πρώτη που επιχειρεί την ταυτόχρονη βελτιστοποίηση του διαγράμματος ακτινοβολίας και της χωρικής αποδοτικότητας μιας στοιχειοκεραίας, λαμβάνοντας επιπρόσθετα υπόψη τη διαμόρφωση του δικτύωματος λήψης της.

5.4.1 Ανάλυση της φασικής στοιχειοκεραίας δίπολων

Έστω ότι οι δίπολοι ακτινοβολητές που είναι προσανατολισμένοι στον άξονα z και απαρτίζουν τη στοιχειοκεραία τροφοδοτούνται στο κέντρο τους από γεννήτριες τάσεως V_i και οι επαγόμενες κατανομές ρεύματος στην επιφάνεια τους από τη τροφοδοσία και τα φαινόμενα αμοιβαίας σύζευξης μεταξύ τους σημειώνονται ως $I_j(z)$, όπου j είναι ο δείκτης του κάθε ακτινοβολητή. Σύμφωνα με τα παραπάνω διαμόρφωση είναι δυνατή η χρήση των ολοκληρωτικών εξισώσεων του Hallen-Rocklington για το προσδιορισμό της συσχέτισης μεταξύ των ηλεκτρικών πεδίων E_z και των ανυσματικών δυναμικών V_{ij} [94].

Ο Ορφανίδης έχει περιγράψει την αναλυτική κατάστρωση που επιτρέπει την αριθμητική επίλυση του προκύπτοντος συστήματος ολοκληρωματικών εξισώσεων [97]. Ειδικότερα, το διακριτοποιημένο σύστημα εξισώσεων του Hallen δύναται να επαναδιατυπωθεί ως ακολούθως

$$\sum_{j=1}^K \sum_{m=-M}^M Z_{ij}(n, m) I_j(m) = C_i \cos(kz_n) + V_i \sin(k|z_n|) \quad (198)$$

όπου Z_{ij} είναι οι τιμές της μιγαδικής αντίστασης που λήφθηκαν χρησιμοποιώντας τον προσεγγιστικό πυρήνα της συνάρτησης του Green όταν $i \neq j$ και τον ακριβή πυρήνα για $i=j$, ο υπολογισμός του οποίου εξαρτάται από τη διάμετρο a των ακτινοβολητών. Εφαρμόζοντας την οριακή συνθήκη για μηδενισμό του ρεύματος στις άκρες κάθε δίπολου αποτιμούνται οι σταθερές C_i και το $z_m = m\Delta_j$ αναπαριστά τη διακριτοποίηση κάθε ακτινοβολητή σε $2M+1$ τμήματα. Κατά τον υπολογισμό του συστήματος ολοκληρωματικών εξισώσεων οι αναπτυσσόμενες κατανομές ρεύματος προσεγγίζονται με τριγωνικές συναρτήσεις βάσεως και θεωρείται ότι είναι συμμετρικές περί του σημείου $z=0$.

5.4.2 Δικτύωμα τροφοδοσίας και προσαρμογή της στοιχειοκεραίας

Εάν θεωρηθεί η στοιχειοκεραία ως ένα πολύθυρο μικροκυματικό δικτύωμα, τότε τα ανακλώμενα κύματα τάσεως \mathbf{b}_t της δύναται να υπολογισθούν από τα προσπίπτοντα κύματα \mathbf{a}_t στις θύρες εισόδου της, χρησιμοποιώντας τη σχέση $\mathbf{b}_t = \mathbf{S}_{tt} \mathbf{a}_t$. Οι S -παράμετροι που χαρακτηρίζουν τη στοιχειοκεραία μπορούν να υπολογισθούν από το μητρώο των Z παραμέτρων όπως αυτό προκύπτει από την εφαρμογή της μεθόδου των ροπών, θεωρώντας μοναδιαίες διεγέρσεις στις θύρες της, και σε συμφωνία με τη σχέση (150) που παρουσιάστηκε σε προηγούμενη ενότητα.

Η στοιχειοκεραία τροφοδοτείται από ένα δικτύωμα χαρακτηριζόμενο από το Γ_{ss} μητρώο S -παραμέτρων, το οποίο στη γενικότερη περίπτωση δεν είναι διαγώνιο για συζευγμένους κλάδους τροφοδοσίας. Είναι δυνατόν να συσχετισθεί το άνυσμα των διαδιδόμενων κυμάτων τάσεως \mathbf{b}_s από τις πηγές τροφοδοσίας με τα προσπίπτουσα κύματα στους ακροδέκτες της στοιχειοκεραίας \mathbf{a}_t σύμφωνα με τη σχέση (155), όπως αυτή προέκυψε από τους αντίστοιχους γράφους ροής των σημάτων.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση θεωρείται ότι οι κλάδοι του δικτύου τροφοδοσίας είναι ανεξάρτητοι, άρα και το μητρώο Γ_{ss} είναι διαγώνιο (Εικόνα 94β). Επίσης οι θύρες της κεραίας έχουν προσαρμοστεί συζυγώς στο κλάδους του δικτύου τροφοδοσίας της, ήτοι οι τιμές της κυρίας διαγωνίου του μητρώου Γ_{ss} ισούνται με τις υπολογιζόμενες ενεργές ανακλάσεις Γ_{act}^* (Εικόνα 96). Οι ενεργοί συντελεστές ανάκλασης Γ_{act} αποτιμήθηκαν αφού εφαρμόστηκαν κατάλληλες διεγέρσεις στη γραμμική στοιχειοκεραία (ομοιόμορφη διέγερση), έτσι ώστε ο κυρίως λοβός ακτινοβολίας της να μην υποστεί στροφή⁵.

Ο παράγοντας προσαρμογής g της στοιχειοκεραίας υπολογίζεται ως ο λόγος της παρεχόμενης ισχύος στη στοιχειοκεραία P_{in} προς τη συνολικά διαθέσιμη ισχύ από το δίκτυο τροφοδοσίας της P_{av} , δηλαδή σύμφωνα με τη σχέση (166) που έχει ήδη αναφερθεί.

Επίσης, θεωρείται ότι η γραμμική ανομοιόμορφη στοιχειοκεραία βρίσκεται στο ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον ενός διδιάστατου Rayleigh καναλιού, όπου τα προσπίπτοντα ηλεκτρομαγνητικά E_z κύματα σε δύο διαφορετικές κεραίες του δέκτη χαρακτηρίζονται από την ίδια ισχύ και διαδίδονται στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο που εμπεριέχει τις θέσεις των κεραιών. Σε αυτή την περίπτωση, όπως υποδεικνύει η σχέση (191), οι υπολογιζόμενοι συντελεστές συσχέτισης μεταξύ των ακτινοβολητών της στοιχειοκεραίας λαμβάνουν τιμές ανάλογες της αποτίμησης της συνάρτησης Bessel πρώτου είδους και μηδενικής τάξεως για τις μεταξύ τους αποστάσεις.

Τέλος, υπολογίζεται το μητρώο συσχέτισης των τάσεων που αναπτύσσονται στο εμπρόσθιο κύκλωμα του δέκτη, σύμφωνα με τις προβλέψεις της σχέσεως (197). Για τους αναφερόμενους υπολογισμούς χρησιμοποιείται το ήδη χαρακτηρισμένο δικτύωμα Γ_{ss} .

⁵ Η μεγιστοποίηση της μεταφερόμενης ισχύος στη στοιχειοκεραία, ανεξαρτήτως των εφαρμοζόμενων διεργάσεων, προϋποθέτει την ερμιτιανή προσαρμογή της στο δικτύωμα τροφοδοσίας της. Τέτοια δικτυώματα υλοποιούνται δύσκολα στη πράξη, όπως δείχνει π.χ. η μελέτη από το Weber και άλλους [164].

5.4.3 Αποδοτικότητα ανοιγμένης επιφάνειας της στοιχειοκεραίας

Για τις στοιχειοκεραίες είναι πολύ σημαντικό να μεγιστοποιείται η απορροφώμενη ενέργεια από προσπίπτοντα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ανά μονάδα εμβαδού της φυσικής επιφάνειας τους. Η ενεργός περιοχή ενός κεραιοσυστήματος είναι ανάλογη με το κέρδος της, και ορίζεται ως ακολούθως

$$A_{eff} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G \quad (199)$$

Η αποδοτικότητα του ανοίγματος μιας στοιχειοκεραίας (aperture efficiency) μπορεί να ορισθεί ως ο λόγος της ενεργής επιφάνειας της προς τη φυσική επιφάνεια που καταλαμβάνει.

$$\varepsilon_{app} = \frac{A_{eff}}{A_{phys}} \quad (200)$$

Στα πλαίσια της παρουσιαζόμενης εφαρμογής ο ορισμός κατάλληλου περιορισμού ως προς την αποδοτικότητα ανοίγματος των υπό βελτιστοποίηση ανομοιόμορφων στοιχειοκεραιών διασφαλίζει ότι επιτυγχάνουν συγκρίσιμες τιμές κέρδους με τις ομοιόμορφες στοιχειοκεραίες αντίστοιχου ανοίγματος.

5.4.4 Πολυκριτηριακός αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων

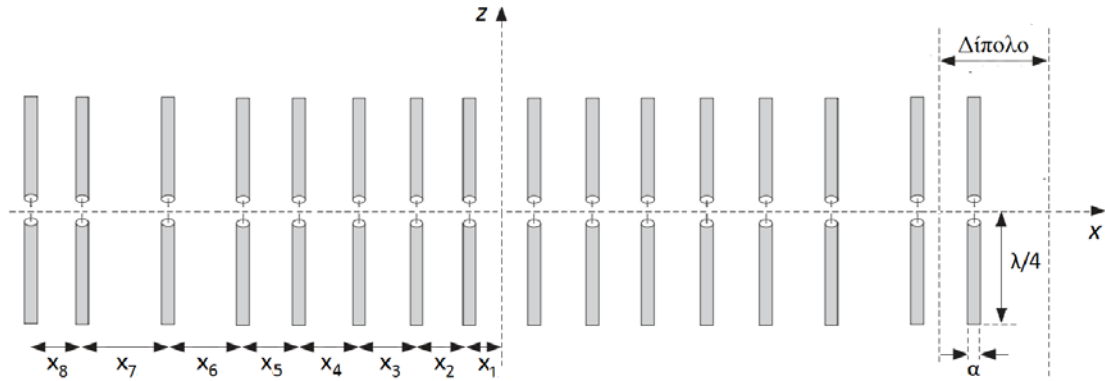
Ως στόχοι της διαδικασίας βελτιστοποίησης τέθηκαν αφενός η ελαχιστοποίηση της μέγιστης τιμής του συντελεστή συσχέτισης των τάσεων που αναπτύσσονται στους διαφορετικούς κλάδους του δικτύωματος λήψης και αφετέρου η μεγιστοποίηση της καταστολής των πλευρικών λοβών της κατά την εκπομπή, όταν ο κυρίως λοβός του διαγράμματος ακτινοβολίας είναι στραμμένος στην οριζόμενη μέγιστη γωνία στροφής του. Επειδή ορίζονται δύο μερικώς αντικρουόμενοι στόχοι, χρησιμοποιήθηκε η πολυκριτηριακή επέκταση του αλγόριθμου PSO (Multi-Objective PSO) για τη σύνθεση της γεωμετρικής δομής της ανομοιόμορφης γραμμικής φασικής στοιχειοκεραίας [42]. Αυτή η επιλογή παρουσιάζει το σημαντικό πλεονέκτημα ότι ο αλγόριθμος αποθηκεύει ένα σύνολο μη επικρατουσών λύσεων, ενώ δεν προϋποθέτει τον υπολογισμό του ζυγισμένου αθροίσματος των αποτιμήσεων για τους επιμέρους στόχους. Επίσης επιτρέπει εμμέσως την ικανοποίηση των επιβαλλόμενων περιορισμών καθώς δίνει προτεραιότητα στην αποθήκευση των εφικτών λύσεων στο αρχείο των μη-επικρατουσών κατά Pareto λύσεων.

Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε η παραλλαγή περιορισμού της ταχύτητας (SMPSO) του αλγορίθμου MOPSO, η οποία επιπρόσθετα ορίζει κατάλληλο παράγοντα περιορισμού της ταχύτητας των σωματιδίων που αντιπροσωπεύουν τις υποψήφιες λύσεις [163]. Επιπρόσθετα αυτή η παραλλαγή επιτρέπει την αντιπροσωπευτικότερη κατανομή των λύσεων στο σχηματιζόμενο μέτωπο Pareto καθώς επιτρέπει την μετάλλαξη των σωματιδίων με πιθανότητα p_m και βάσει πολυωνυμικής κατανομής πιθανοτήτων, η μορφή της οποίας ελέγχεται από το δείκτη κατανομής η_m [15].

5.4.5 Η βελτιστοποιημένη στοιχειοκεραία

Βελτιστοποιείται η χωρική διαμόρφωση μιας συμμετρικής ανομοιόμορφης γραμμικής φασικής κεραίας η οποία αποτελείται από 16 κάθετα δίπολα ημικύματος με ακτίνα Ανάπτυξη Κατανομημένης Πλατφόρμας Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων και Εφαρμογή σε Προβλήματα Σύνθεσης Στοιχειοκεραιών

0,0005λ. Οι υποψήφιες δομές αναπαρίστανται από ένα άνωσμα λύσεων x , το οποίο κωδικοποιεί τη σχετική τοποθέτηση των ακτινοβολητών της στοιχειοκεραίας (Εικόνα 99).



Εικόνα 99. Συμμετρική και ανομοιόμορφη στοιχειοκεραία αποτελούμενη από $\lambda/2$ δίπολα

Κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης επιτρέπεται στον αλγόριθμο MOPSO η τοποθέτηση των ακτινοβολητών σε αποστάσεις μεταξύ τους που δεν μπορούν να ξεπεράσουν το ένα μήκος κύματος. Για τον υπολογισμό του διαγράμματος ακτινοβολίας και των φαινομένων επαγωγής των υποψήφιων σχεδιάσεων, τα δίπολα διακριτοποιούνται σε 15 τμήματα και χρησιμοποιούνται τριγωνικές συναρτήσεις βάσης για την προσέγγιση των ρευματικών κατανομών στην επιφάνεια τους με τη βοήθεια της μεθόδου των ροπών (MoM).

Ορίζονται δύο διαφορετικές συναρτήσεις καταλληλότητας: η συνάρτηση $f_{sidelobe}$ αποτιμά την απομείωση του επιπέδου των πλευρικών λοβών SL, ενώ η συνάρτηση $f_{correlation}$ λαμβάνει τιμή ίση με τη μέγιστη τιμή του συντελεστή συσχέτισης r_{ij} μεταξύ των διαδοόμενων τάσεων στην πλευρά του δέκτη. Οι συναρτήσεις καταλληλότητας αποτιμούνται βάσει του υπολογιζόμενου διαγράμματος ακτινοβολίας στη μέγιστη επιτροπή γωνία στροφής του θ_0 και της συζυγούς προσαρμογής όπως αυτή υπολογίσθηκε για μη στραμμένο διάγραμμα ακτινοβολίας. Η αναλυτική τους έκφραση προσδιορίζεται από τις ακόλουθες σχέσεις

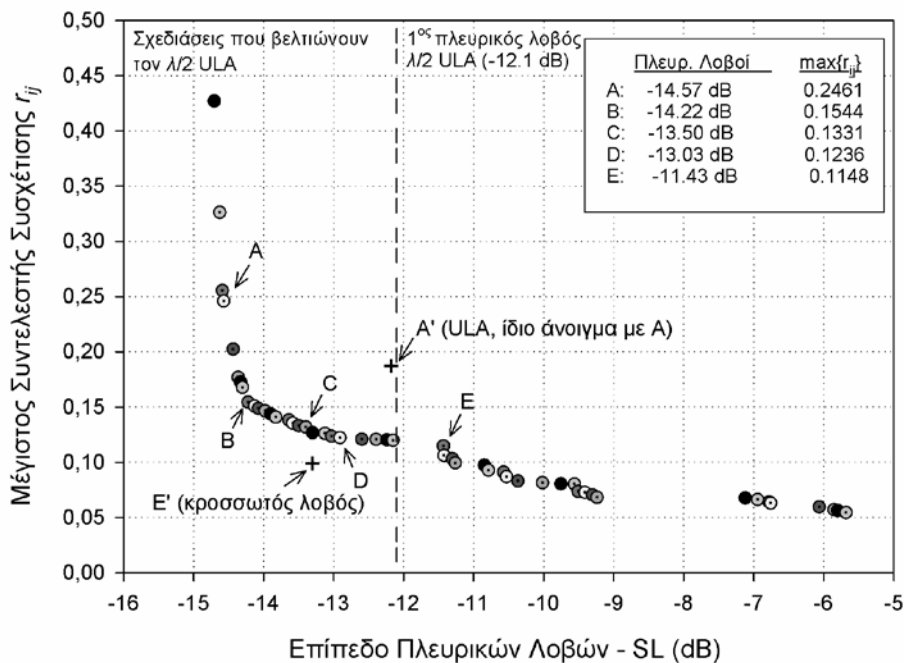
$$\begin{aligned} f_{sidelobe} &= SL_{\theta_0} \\ f_{correlation} &= \max [r_{ij}]_{i \neq j} \end{aligned} \quad (201)$$

Επιπρόσθετα, κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης επιβάλλεται ο περιορισμός ότι η αποδοτικότητα των υποψήφιων σχεδιάσεων πρέπει να υπερκεράσει την αποδοτικότητα μιας γραμμικής ομοιόμορφης στοιχειοκεραία (ULA) με απόσταση μεταξύ των στοιχείων της ίση με $0,5\lambda$, η λαμβανόμενη μέγιστη τιμή του συντελεστή συσχέτισης r_{ij} να μην ξεπερνάει τη τιμή $0,6$ και τέλος ο συνολικός παράγοντας προσαρμογής $q(\theta)$ να ίσος ή καλύτερος της τιμής $0,5$ για το σύνολο των γωνιών σάρωσης της φασικής στοιχειοκεραίας $[0, \theta_0=60^\circ]$:

$$\begin{aligned} g_{aperture} &= \mathcal{E}_{aperture} - \mathcal{E}_{aperture, d_0=\lambda} \geq 0 \\ g_{correlation} &= \max [r_{ij}]_{i \neq j} \leq 0.6 \\ g_{matching} &= \min [q(\theta)]_{\theta=0}^{\theta_0} \geq 0.5 \end{aligned} \quad (202)$$

5.4.6 Βελτιστοποιημένες χωρικές διαμορφώσεις της φασικής στοιχειοκεραίας

Για τη βελτιστοποίηση χρησιμοποιήθηκαν οι παράμετροι που έχουν προτείνει ο Nebro και άλλοι [163]. Συγκεκριμένα η ατομικότητα c_1 και η κοινωνικότητα c_2 λάβανε τιμές από το διάστημα 1,5 μέχρι 2,5 ενώ το μέγεθος του πληθυσμού και του αρχείου λύσεων τέθηκε ίσο με 50. Η πιθανότητα μετάλλαξης p_m επιλέχθηκε ως η αντίστροφη τιμή της διαστατικότητας του προβλήματος και ο δείκτης κατανομής η_m τέθηκε ίσος με 60 προκειμένου να βελτιώσει τη δυνατότητα έρευνας του αλγορίθμου. Προκειμένου να προσεγγισθεί όσο δυνατόν καλύτερα το πραγματικό μέτωπο Pareto η διαδικασία βελτιστοποίησης επαναλήφθηκε 10 φορές και τα ληφθέντα αποτελέσματα συνδυάστηκαν για το σχηματισμό ενός κοινού μετώπου αποτελούμενου από τις 50 κυρίαρχες λύσεις. Επίσης επιτράπηκε η εξέλιξη του αλγορίθμου βελτιστοποίησης για 200 γενεές και κατά μέσο όρο λαμβάνονταν 45 λύσεις από κάθε επανάληψή του.



Εικόνα 100. Το τελικό μέτωπο Pareto, ενδεικτικό της αντιστάθμισης μεταξύ των τιμών συσχέτισης και του ύψους των πλευρικών λοβών, όταν το διάγραμμα έχει στραφεί 60°

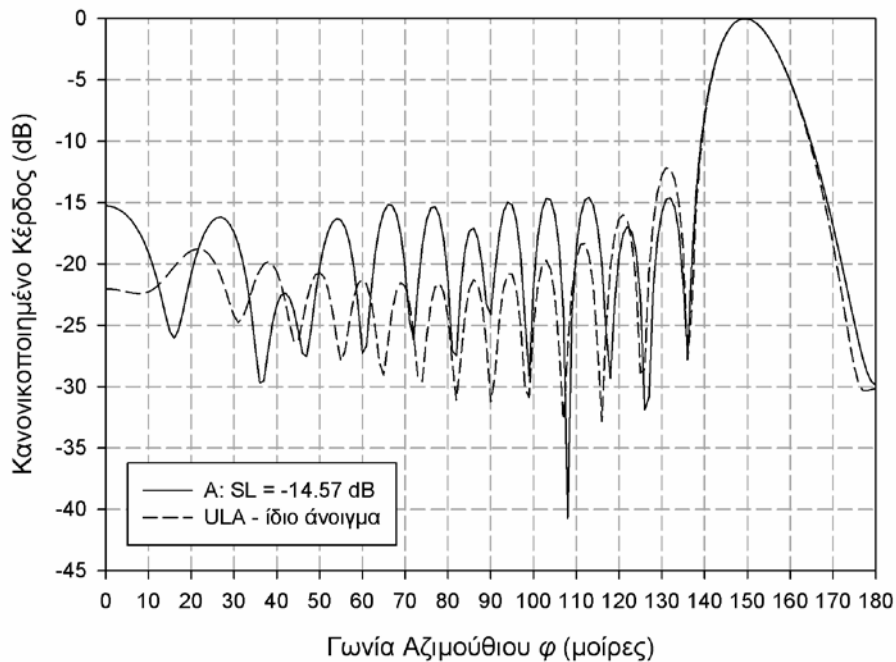
Η κάθε μη επικρατούσα λύση αναπαριστά και μια διαφορετική διαμόρφωση της στοιχειοκεραίας και μπορεί να ερμηνευθεί ως μια βέλτιστη σχεδίαση: κάθε μεταβολή της τοποθέτησης των δίπολων η οποία χαρακτηρίζεται από την ίδια μέγιστη τιμή συσχέτισης δεν μπορεί ταυτόχρονα να παρουσιάζει πιο καταπιεσμένους πλευρικούς λοβούς.

Οι ληφθείσες σχεδιάσεις μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε αυτές που παρουσιάζουν χαμηλότερο επίπεδο πλευρικών λοβών από μια ομοιόμορφη στοιχειοκεραία $\lambda/2$ δίπολων τα οποία ισαπέχουν κατά $\lambda/2$ και σε αυτές με υψηλότερους λοβούς. Αυτό καθίσταται φανερό στην Εικόνα 100 όπου 26 λύσεις παρουσιάζουν πιο καταπιεσμένους λοβούς από την ομοιόμορφη στοιχειοκεραία. Το συγκεκριμένο υποσύνολο των λύσεων εκτείνεται σε διάστημα που αντιστοιχεί σε μέγιστες τιμές συσχέτισης από 0,12 έως 0,43 και μεγίστων πλευρικών λοβών από -12,2 dB έως -14,7 dB. Στον Πίνακα 42 παρουσιάζονται πέντε επιλεγμένες λύσεις από το μέτωπο Pareto.

	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	$\max\{r_{ij}\}$
A	0,225	0,618	1,011	1,433	1,822	2,346	2,939	3,291	0,2461
B	0,213	0,667	1,14	1,574	2,034	2,591	3,167	3,525	0,1544
C	0,239	0,695	1,173	1,644	2,179	2,545	3,126	3,63	0,1331
D	0,248	0,724	1,225	1,716	2,227	2,624	3,195	3,719	0,1236
E	0,248	1,242	1,755	2,232	3,164	3,692	4,208	4,701	0,1158

Πίνακας 42. Μεταφερόμενη ισχύς στο κεραιοσύστημα ως προς τη διαθέσιμη και την ενεργή ισχύ

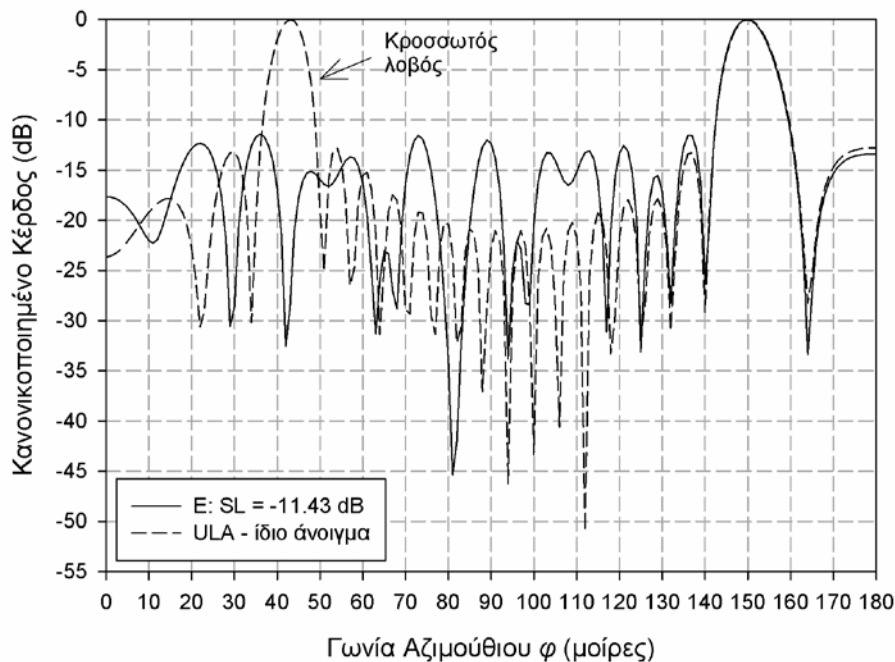
Στην Εικόνα 101 συγκρίνεται το κανονικοποιημένο διάγραμμα ακτινοβολίας της υποψήφιας σχεδίασης στοιχειοκεραίας A με το διάγραμμα ενός ULA A' η οποία παρουσιάζει το ίδιο άνοιγμα. Η μη ομοιόμορφη στοιχειοκεραία A καταφέρνει να ελαττώσει το επίπεδο των πλευρικών λοβών συγκρινόμενη με τη ομοιόμορφη A' ενώ και στις δύο περιπτώσεις το άνοιγμα του κεντρικού λοβού είναι σχεδόν ίσο, καθότι οι δύο στοιχειοκεραίες έχουν το ίδιο συνολικό άνοιγμα 6,58λ. Εάν ο αλγόριθμος είχε επιτρέψει την τοποθέτηση των διπόλων σε κοντινότερες θέσεις τότε θα ήταν δυνατόν να ληφθούν ακόμα μεγαλύτερες τιμές καταπίεσης των πλευρικών λοβών αλλά σε βάρος της χωρικής διαφορισμότητας.



Εικόνα 101. Κανονικοποιημένο διάγραμμα ακτινοβολίας των στοιχειοκεραίων A και A'

Η μέγιστη γωνία στροφής του διαγράμματος ακτινοβολίας της ομοιόμορφης γραμμικής φασικής στοιχειοκεραίας των οποίων τα στοιχεία ισαπέχουν κατά d_0 , προκειμένου να μην σχηματίζονται κροσσωτοί λοβοί, είναι $\theta_0 = \sin^{-1}(\lambda/d_0 - 1)$. Μία γραμμική στοιχειοκεραία E' με το ίδιο διευρυμένο άνοιγμα των 9,64λ με την υποψήφια σχεδίαση E , έχει μέγιστη αναλυτικά προσδιοριζόμενη επιτρεπτή γωνία στροφής του διαγράμματος της ίση με $36,6^\circ$. Επομένως η αντιστοιχούσα σχεδίαση E' αναπαριστάται ως ένα εξωτερικό σημείο ως προς τις λύσεις που περικλείονται από το σχηματιζόμενο μέτωπο Pareto. Συγκεκριμένα η θέση της στην Εικόνα 100 προσδιορίζεται από το ύψος του πρώτου πλευρικού λοβού της.

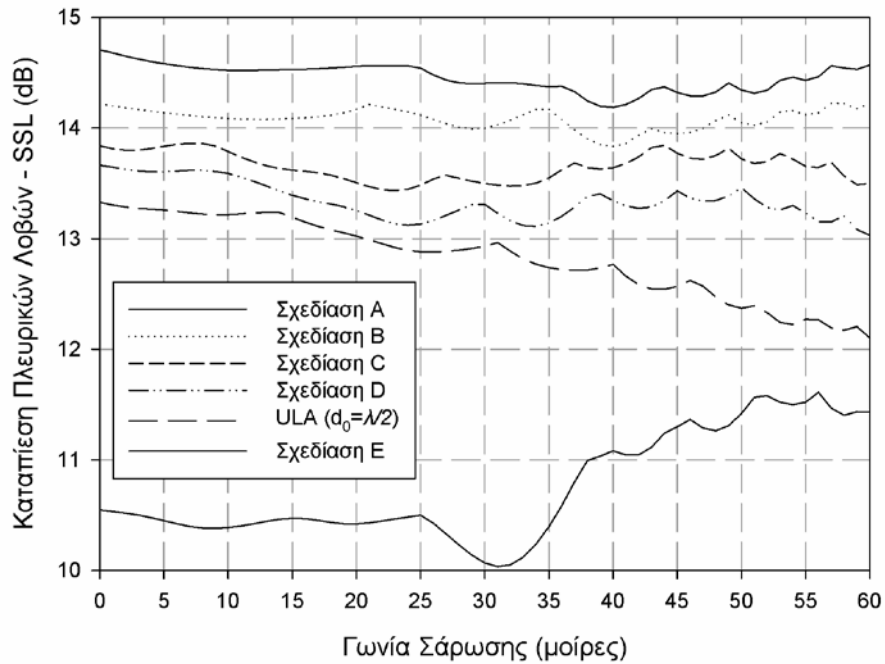
Το στραμμένο κατά $\pm 60^\circ$ διάγραμμα ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας E' σκιάζεται από τη δημιουργία ενός κροσσωτού λοβού, σε αντίθεση με το διάγραμμα της μη ομοιόμορφης σχεδίασης E η οποία παρουσιάζει καταπίεση των πλευρικών λοβών κατά 11,43dB, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 102. Σημειώνεται ότι και στις δύο περιπτώσεις το άνοιγμα του κυρίως λοβού είναι ίσο καθότι οι δύο στοιχειοκεραίες έχουν το ίδιο φυσικό άνοιγμα. Επομένως, μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι οι λαμβανόμενες σχεδιάσεις μη ομοιόμορφων στοιχειοκεραίων με συνολικό άνοιγμα μεγαλύτερο από το άνοιγμα μιας ομοιόμορφης στοιχειοκεραίας ($d_0 = \lambda/2$), παρουσιάζουν ανάλογα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας με τις γραμμικές απεριοδικές στοιχειοκεραίες των οποίων τα στοιχεία έχουν «αραιωθεί» (linear thinned aperiodic arrays) [161].



Εικόνα 102. Κανονικοποιημένο διάγραμμα ακτινοβολίας των στοιχειοκεραίων E και E'

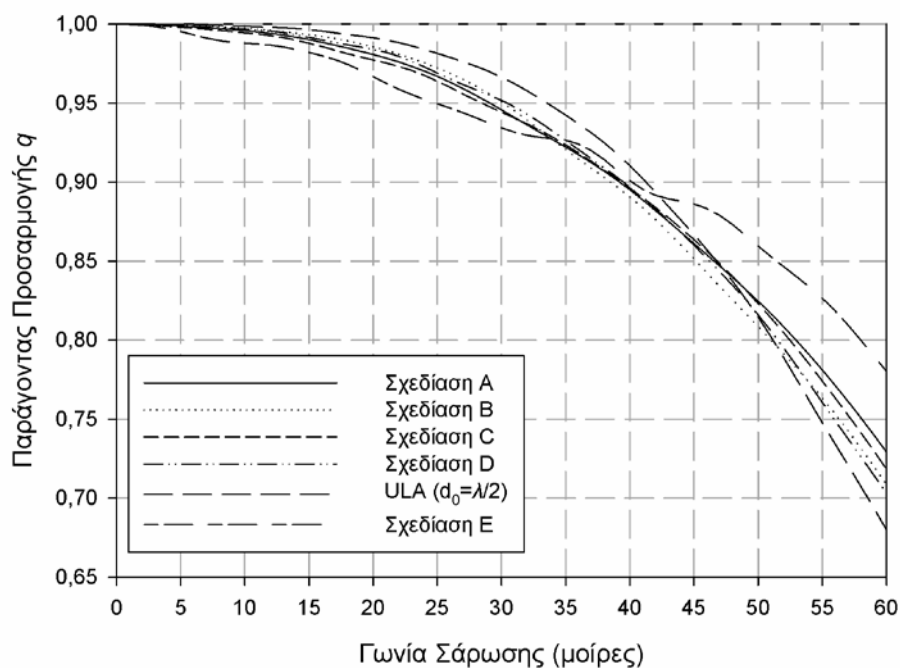
Τα διαγράμματα ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας βελτιστοποιήθηκαν για τη μέγιστη επιτρεπτή γωνία σάρωσης τους προκειμένου να εξασφαλισθεί ότι η απόδοση τους είναι διατηρήσιμη σε όλες τις ενδιαμέσες γωνίες στροφής του κυρίως λοβού. Πραγματοποιήθηκαν επιπρόσθετες προσομοιώσεις προκειμένου να εκτιμηθεί η διακύμανση του ύψους των πλευρικών λοβών καθώς σαρώνονται οι υποψήφιες σχεδιάσεις και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 103. Όλες οι σχεδιάσεις πλην της στοιχειοκεραίας E , παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά από μια γραμμική ομοιόμορφη στοιχειοκεραία τα στοιχεία της οποίας ισαπέχουν κατά $\lambda/2$. Μάλιστα όσον αφορά τις σχεδιάσεις A και B αυτές παρουσιάζουν παρόμοια καταπίεση των πλευρικών λοβών για μη στραμμένα και για στραμμένα διαγράμματα ακτινοβολίας στη μέγιστη επιτρεπτή γωνία των 60° , ενώ οι σχεδιάσεις C και D καταπιέζουν πιο αποτελεσματικά τους πλευρικούς λοβούς των διαγραμμάτων ακτινοβολίας τους όταν ο κύριος λοβός δεν έχει στραφεί. Οι παρατηρούμενες διακυμάνσεις οφείλονται σε σημαντικό βαθμό στην ομοιόμορφη τοποθέτηση των δίπολων της στοιχειοκεραίας. Παρά ταύτα, είναι απαραίτητη η επιβολή

της προαναφερθείσας συνθήκης προκειμένου να είναι δυνατή η στροφή του κύριου λοβού ακτινοβολίας και στις δύο κατευθύνσεις.



Εικόνα 103. Καταπίεση των πλευρικών λοβών για τις επιλεγμένες σχεδιάσεις

Τέλος, αποτιμάται η απόδοση των δικτυωμάτων προσαρμογής χρησιμοποιώντας τον παράγοντα προσαρμογής q , καθώς οι υποψήφιες σχεδιάσεις υπόκεινται σε σάρωση και τα ληφθέντα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 104.

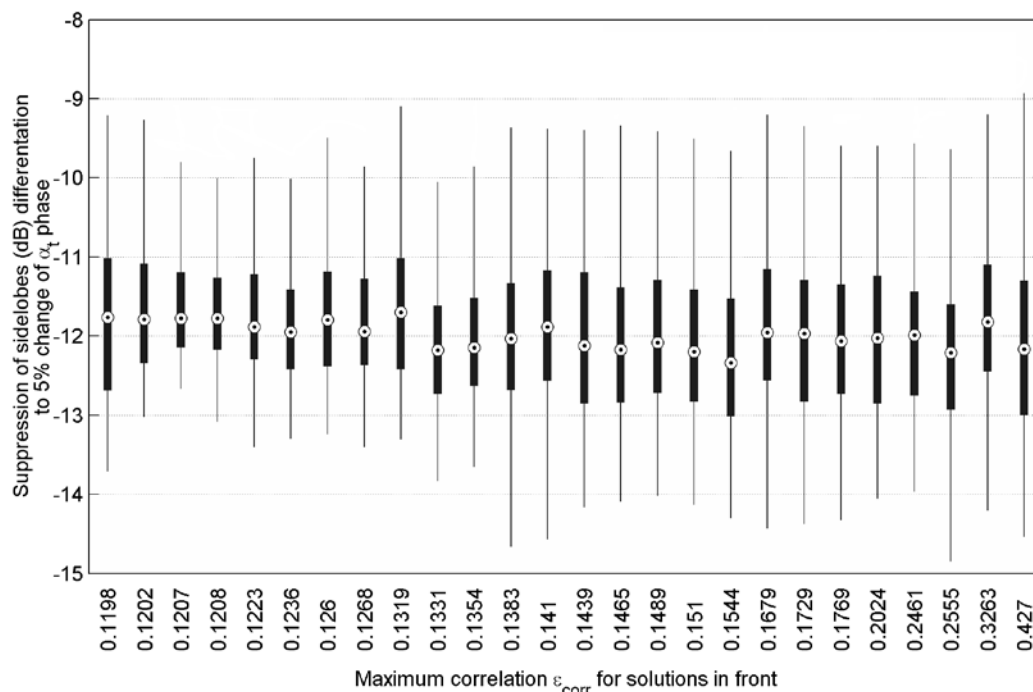


Εικόνα 104. Αποτίμηση του παράγοντα προσαρμογής q για διαφορετικές γωνίες σάρωσης των φασικών στοιχειοκεραίων

Συμπερασματικά, τα λαμβανόμενα αποτελέσματα για τις επιλεγμένες υποψήφιες σχεδιάσεις επιβεβαιώνουν ότι δεν παραβιάζεται ο περιορισμός που τέθηκε περί της ελάχιστης επιτρεπτής τιμής του παράγοντα προσαρμογής q ίσης με 0,5. Επίσης είναι δυνατόν να παρατηρηθεί ότι η ομοιόμορφη γραμμική στοιχειοκεραία ($d_0=\lambda/2$) παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές μη προσαρμογής για μεγάλες γωνίες στροφής του κεντρικού λοβού ακτινοβολίας συγκρινόμενη με τις μη ομοιόμορφες σχεδιάσεις που λήφθηκαν από τη διαδικασία βελτιστοποίησης.

5.4.7 Ανάλυση ευαισθησίας σε μεταβολές της φάσεως τροφοδοσίας

Τα σύγχρονα φασικά κεραιοσυστήματα χρησιμοποιούν ψηφιακούς ολισθητές φάσης οι οποίοι παρουσιάζουν πεπερασμένη διακριτικότητα καθοριζόμενη από τον αριθμό των δυαδικών ψηφίων που χρησιμοποιούν για να κωδικοποιήσουν την πληροφορία φάσης. Επίσης είναι δυνατόν να υπάρχουν αποκλίσεις από την θεωρητική συμπεριφορά των φασικών κεραιοσυστημάτων λόγω φαινομένων μη γραμμικότητας των ολισθητών φάσης και λόγω της ποιότητας σχεδίασης των δικτυωμάτων τροφοδοσίας τους (τα οποία εισαγάγουν συγκεκριμένη χρονοκαυστέρηση). Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που λήφθηκαν για μεταβλητές μέγιστες τιμές λάθους στη φάση ίσες με 1%, 2%, ..., 5%, το οποίο λάθος στη φάση θεωρείται ότι εισαγάγετε στα προσπίπτοντα στις θύρες τις στοιχειοκεραίας κύματα τάσεως, ως ένα επιπλέον κριτήριο το οποίο δύναται να υποβοηθήσει τη διαδικασία σχεδίασης των μελετώμενων δομών. Για αυτό το σκοπό διενεργήθηκε μια σειρά από προσομιώσεις Monte-Carlo με οριζόμενο μέγεθος στατιστικών δειγμάτων ίσο με 200. Στην Εικόνα 105 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που λήφθηκαν ως προς τη μεταβολή του ύψους των πλευρικών λοβών για την περιοχή λύσεων του μετώπου Pareto με συγκριτικά, ως προς την ομοιόμορφη στοιχειοκεραία αναφοράς ($d_0=\lambda/2$), χαμηλότερους πλευρικούς λοβούς και για μέγιστο λάθος στη φάση ίσο με 5%.



Εικόνα 105. Ανάλυση ευαισθησία του επιπέδου των πλευρικών λοβών για μέγιστο μέγεθος λάθους φάσης ίσο με 5%

Οι υπολογιζόμενες διαφοροποιήσεις στο ύψος των πλευρικών λοβών ακολουθούν κανονικές κατανομές και η απεικονιζόμενη έκταση τους είναι αντιπροσωπευτική των ποσοστών 25% και 75%, ενώ τα σημεία αναπαριστούν τις αντίστοιχες μέσες τιμές τους. Όπως δύναται να παρατηρηθεί κάποιες υποψήφιας σχεδιάσεις στοιχειοκεραιών είναι λιγότερο επιρρεπής σε μεταβολές της φάσης τροφοδότησης τους, γεγονός που τις καθιστά καταλληλότερες για να χρησιμοποιηθούν κατά την υλοποίηση συστημάτων που προδιαγράφουν μεγαλύτερες ανοχές στην επιτρεπτή διακύμανση των τάσεων τροφοδοσίας.

Προκειμένου να εκτιμηθεί ένα άνω όριο στην αποδοτικότητα των υποψήφιας σχεδιάσεων μοντελοποιήθηκε μια παραμετρική εκθετική καμπύλη η οποία συσχετίζει τη κατανομή των μέσων τιμών ύψους των πλευρικών λοβών με τις μέγιστες τιμές του συντελεστή συσχέτισης, για διαφορετικά μεγέθη φασικών αποκλίσεων

$$SL_{median}(i) = a + be^{-k\varepsilon_{corr}(i)} \quad (203)$$

Οι παράμετροι παρεμβολής a , b και k που υπολογίστηκαν βάσει των αποτελεσμάτων που λήφθηκαν από τις προσομοιώσεις Monte-Carlo για το οριζόμενο διάστημα μέγιστων αποκλίσεων στη φάση 1%, ..., 5% καθώς και οι αντίστοιχες τετραγωνικές ρίζες των μέσων τετραγωνικών τιμών λάθους (RMSE) συνοψίζονται στον Πίνακα 43.

	1%	2%	3%	4%	5%	Μέσες διαφορές
a	-14,5066	-14,0071	-13,4785	-12,9575	-12,365	0,5354
b	33,82325	35,73119	38,41301	39,87928	41,75212	1,9822
k	24,02707	25,75117	27,80245	29,36056	31,2666	1,8099
RMSE	0.4324	0.4176	0.3915	0.3927	0.3922	-

Πίνακας 43. Τιμές παραγόντων παρεμβολής για διαφορετικά σενάρια φασικών λαθών.

Είναι δυνατή η ανάπτυξη ενός εκτιμητή βασισμένου στις μέσες διαφορές των παραμέτρων παρεμβολής, όπως αυτές υπολογίστηκαν από τις προσομοιώσεις

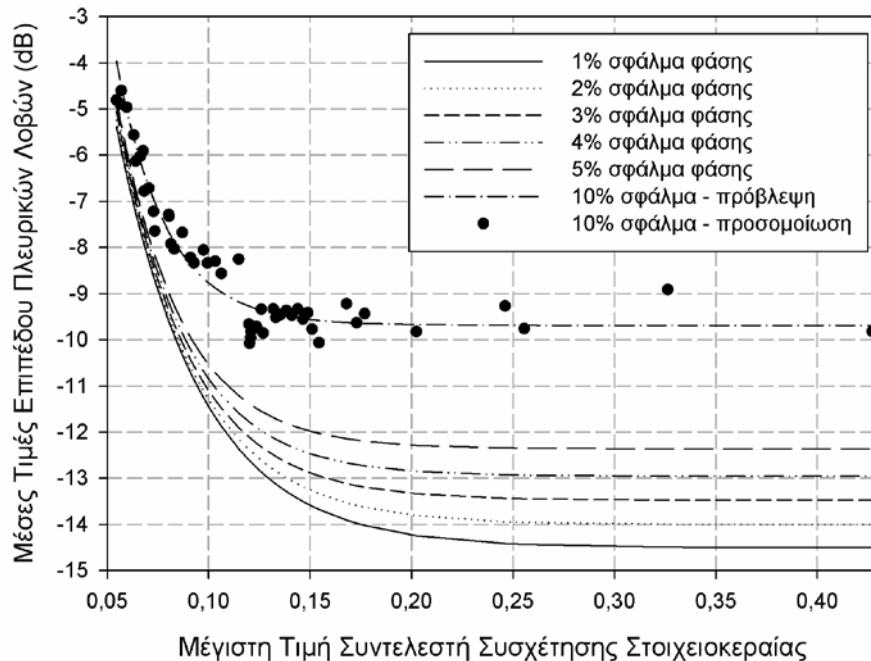
$$\hat{p}(e) = p(1) + \frac{1}{N}(e-1) \sum_{n=2}^N (p(n) - p(n-1)) \quad (204)$$

όπου ο δείκτης n αναπαριστά το ποσοστιαίο (%) λάθος στη φάσεις που ορίστηκε για τις $N = 5$ διαδοχικές προσομοιώσεις και $p(e)$ είναι η αναμενόμενη τιμή για τις παραμέτρους παρεμβολής a , b ή k και για φασικό λάθος ίσο με $e\%$. Προκειμένου να προσδιοριστεί η ακρίβεια της παραπάνω αναλυτικής έκφρασης συγκρίνονται οι τιμές των παραμέτρων που προβλέφθηκαν με τις υπολογιζόμενες παραμέτρους βάσει ενός σεναρίου προσομοίωσης 10% λάθους στις τιμές φάσεις και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 44.

	a	b	k	RMSE
Πρόβλεψη	-9.688	51.663	40.316	0.3964
Υπολογισμός	-9.726	38.289	36.077	0.3790
Διαφορά	0.4%	34.9%	11.8%	4.6%

Πίνακας 44. Πρόβλεψη για τις παραμέτρους προσαρμογής και απόκλιση τους από τις τιμές που λήφθηκαν μετά από προσομοίωση με οριζόμενη τιμή λάθους φάσης ίσης με 10%.

Στην Εικόνα 106 απεικονίζονται οι καμπύλες μέσης τιμής του ύψους των πλευρικών λοβών που υπολογίσθηκαν για τα σενάρια λάθους στις φάσεις 1% έως 5%, η καμπύλη για φασικά λάθη 10% που υπολογίσθηκε από το εκτιμητή, και οι αντίστοιχες μέσες τιμές του ύψους των πλευρικών λοβών που υπολογίσθηκαν από απευθείας προσομοίωση του ίδιου σεναρίου. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η λαμβανόμενη πρόβλεψη δεν αποκλίνει σημαντικά από τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από την προσομοίωση, στη βάση των υπολογιζόμενων μέσων τετραγωνικών τιμών λάθους (RMSE).



Εικόνα 106. Καμπύλες από προσομοιώσεις για φασικές αποκλίσεις 1% έως 5% , η εκτιμώμενη καμπύλη για φασική απόκλιση 10% και οι αντίστοιχες μέσες τιμές των πλευρικών λοβών.

Επομένως, αποδεικνύεται ότι ο εκτιμητής που παρουσιάστηκε παραπάνω είναι πολύ χρήσιμος για την οριοθέτηση της απόδοσης των περιγραφόμενων φασικών κεραιών, οι οποίες υπόκεινται στους περιορισμούς των μεγίστων τιμών συσχέτισης των στοιχείων τους, χωρίς να είναι απαραίτητη η επανάληψη των χρονοβόρων προσομοιώσεων Monte-Carlo. Μάλιστα τα όρια απόδοσης τα οποία παρουσιάστηκαν παραπάνω αποδεικνύουν ότι τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας των βελτιστοποιημένων κεραιών δείχνουν σημαντική ανοχή σε διαφοροποιήσεις των φάσεων που αναμένονται σε ρεαλιστικές υλοποιήσεις ($\pm 5\%$).

5.4.8 Συμπεράσματα

Η παρουσιαζόμενη μέθοδος βελτιστοποιεί τη χωρική διαμόρφωση μιας γραμμικής φασικής στοιχειοκεραίας με στόχο την ελαχιστοποίηση της συσχέτισης των αναπτυσσόμενων τιμών τάσης στο εμπρόσθιο κύκλωμα λήψης της και τον ταυτόχρονο περιορισμό του ύψους των πλευρικών λοβών του διαγράμματος ακτινοβολίας της, ενώ ο κυρίως λοβός ακτινοβολίας της είναι στραμμένος στην μέγιστη οριζόμενη γωνία σάρωσης της. Παράλληλα εφαρμόζονται περιορισμοί ως προς τη προσαρμογή της στοιχειοκεραίας στο δικτύωμα τροφοδότησής της προκειμένου να ελαχιστοποιείται η ανακλώμενη ισχύς στις θύρες της και

ως προς τη αποδοτικότητα της φυσικής της επιφάνειας προκειμένου να επιτυγχάνει συγκρίσιμες τιμές κέρδους με τις ομοιόμορφες στοιχειοκεραίες αντίστοιχου ανοίγματος.

Η καινοτομία της μεθόδου έγκειται στο γεγονός ότι βελτιστοποιεί ταυτόχρονα το διάγραμμα ακτινοβολίας της στοιχειοκεραίας αλλά και την αποδοτικότητά της με όρους διαφορισιμότητας. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου στην σύνθεση μιας συμμετρικής στοιχειοκεραίας αποτελούμενης από δίπολα ημικύματος η οποία βρίσκεται σε ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον διδιάστατων Rayleigh καναλιών, προέκυψαν αποτελέσματα που υποδεικνύουν σαφώς ότι μπορούν να αντισταθμιστούν μόνο εν μέρει οι προκύπτουσες αποστάσεις μεταξύ των ακτινοβολητών ως προς τις επιθυμητές τιμές συσχέτισης τους. Επίσης δείχθηκε ότι τα χαρακτηριστικά ακτινοβολήσης των χωρικά βελτιστοποιημένων διαμορφώσεων των στοιχειοκεραίων επιδεικνύουν ανοχή σε μεταβολές της φάσης τροφοδότησης που ρεαλιστικά αναμένονται κατά την υλοποίησή τους.

6 Σύνοψη και Θέματα Μελλοντικής Έρευνας

6.1 Σύνοψη και Συμπεράσματα της Ερευνητικής Δραστηριότητας

Η διαδικασία σύνθεσης των στοιχειοκεραιών συνίσταται στον προσδιορισμό της θέσης καθώς και των σχετικών φάσεων και πλατών των εφαρμοζόμενων διεγέρσεων στα στοιχεία τους, προκειμένου να επιτυγχάνονται τα επιθυμητά χαρακτηριστικά ακτινοβολήσης. Αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι η συστηματική αντιμετώπιση των προβλημάτων σύνθεσης στοιχειοκεραιών με τη βοήθεια του αλγόριθμου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων και η χρήση κατανεμημένων υπολογιστικών τεχνικών για την αντιμετώπιση του υψηλού υπολογιστικού κόστους, λόγω του μεγάλου αριθμού επαναλαμβανόμενων ηλεκτρομαγνητικών προσομοιώσεων των υποψηφίων σχεδιάσεων που απαιτούνται μέχρι να συγκλίνει ο αλγόριθμος. Στη συνέχεια επιχειρείται η συνοπτική παρουσίαση της αναπτυχθείσας ερευνητικής δραστηριότητας στους δύο βασικούς άξονες :

i) Διαμοίραση του υπολογιστικού κόστους χρησιμοποιώντας την κατανεμημένη πλατφόρμα βελτιστοποίησης

Οι στοχαστικές τεχνικές βελτιστοποίησης απαιτούν μεγάλο αριθμό προσομοιώσεων, για την αποτίμηση της καταλληλότητας των υποψηφίων σχεδιάσεων, προτού συγκλίνουν. Αυτή η κλιμάκωση μεταφράζεται ευθέως σε επαυξημένο υπολογιστικό κόστος και χρόνο κατά τη σχεδίαση.

Αρχικά εξετάστηκε η μέθοδος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων σε αλγοριθμικό επίπεδο και ορίστηκε η αποτίμηση των παραμετρικών σχεδιάσεων ως η μοναδιαία πράξη υπολογισμού. Αυτή η βασική θεώρηση επιτρέπει την παραλληλοποίηση της εκτέλεσης του αλγορίθμου PSO στο επίπεδο των δεδομένων (data parallelism), καθώς κάθε σωματίδιο που αποτιμάται κατά την εξέλιξη του αλγορίθμου αναπαριστά και ένα διαφορετικό σύνολο τιμών για τις παραμέτρους σχεδίασης. Επίσης, κατά αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται σε μεγάλο βαθμό η αποσύζευξη του κώδικα που υλοποιεί τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης από τον υπολογιστικό κώδικα προσομοίωσης που εκτελείται κατά την αποτίμηση των σχεδιάσεων, γεγονός που απλοποιεί κατά πολύ τη διασύνδεση τους και ελαχιστοποιεί το κόστος επικοινωνίας τους, εφόσον οι αποτιμήσεις εκτελούνται απομακρυσμένα.

Στη συνέχεια υλοποιήθηκε η κατανεμημένη πλατφόρμα βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων χρησιμοποιώντας το υπολογιστικό παράδειγμα των κινητών πρακτόρων. Για την υλοποίηση της πλατφόρμας χρησιμοποιήθηκε το ολοκληρωμένο πλαίσιο ανάπτυξης πρακτόρων JADETM, το οποίο διευκόλυνε σε μεγάλο βαθμό την αναπαράσταση των σωματιδίων του σμήνους ως ξεχωριστές οντότητες λογισμικού, ικανές να μεταναστεύουν σε απομακρυσμένους υπολογιστικούς κόμβους. Τα βασικότερα πλεονεκτήματα που προσφέρει η συγκεκριμένη προσέγγιση είναι η ευκολία ανάπτυξης της πλατφόρμας σε πολλαπλούς δικτυακούς κόμβους καθώς και η ελαχιστοποίηση του κόστους επικοινωνίας μεταξύ των πρακτόρων σωματιδίων και του πράκτορα συντονιστή, που ενσωματώνει τη λογική του αλγορίθμου βελτιστοποίησης. Μάλιστα, κατά την πρακτική εφαρμογή της κατανεμημένης πλατφόρμας για τη σύνθεση μιας κεραίας μεταγωγής λοβών, αποδείχτηκε ότι η κλιμάκωση της απόδοσής της δεν εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από το κόστος

Ανάπτυξη Κατανεμημένης Πλατφόρμας Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων και Εφαρμογή σε Προβλήματα Σύνθεσης Στοιχειοκεραιών

ανταλλαγής μηνυμάτων. Αντιθέτως, οι κυρίαρχοι παράγοντες ήταν το υπολογιστικό κόστος των προσομοιώσεων και το κατά πόσον είναι ομοιόμορφη η κατανομή των σωματιδίων μεταξύ των κόμβων.

Αναμένεται λοιπόν ότι όταν η εκτέλεση των επαναληπτικών ηλεκτρομαγνητικών προσομοιώσεων ενέχει σημαντικό υπολογιστικό κόστος συγκριτικά με το κόστος της παραλληλοποίησης (ανταλλαγή μηνυμάτων και συγχρονισμός), η κατανεμημένη πλατφόρμα θα προσφέρει ακόμα σημαντικότερα κέρδη ως προς το συνολικό χρόνο της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Επιπρόσθετα η υλοποίηση κατάλληλων αλγορίθμων καταμερισμού του φόρτου εργασίας (load balancing), αναλόγως της δηλωθείσας ή ευρισκόμενης υπολογιστικής ισχύος των απομακρυσμένων κόμβων, θα έχει ως αποτέλεσμα την ακόμα μεγαλύτερη επιτάχυνση της διαδικασίας κατανεμημένης βελτιστοποίησης.

Συμπερασματικά, η πρωτοτυπία της ακολουθούμενης προσέγγισης έγκειται στο συνδυασμό:

- 1) της βασικής θεώρησης των πολυπαραμετρικών προσομοιώσεων ως μοναδιαίας πράξης υπολογισμού, η οποία επιτρέπει τη μεγιστοποίηση των προσδοκώμενων υπολογιστικών οφελών χωρίς να αλλοιώνονται τα βασικά χαρακτηριστικά επίδοσης του αλγόριθμου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων, όπως αυτά έχουν αναλυθεί/οριοθετηθεί στη σχετική βιβλιογραφία
- 2) με την υλοποίηση βάσει του παραδείγματος των κινητών πρακτόρων που επιφέρει προστιθέμενη αξία ως προς την επιτυγχανόμενη ευελιξία και προσαρμοστικότητα της πλατφόρμας στο υλικό (hardware) των απομακρυσμένων κόμβων και στη δικτυακή τοπολογία που αυτοί είναι οργανωμένοι, χωρίς παράλληλα να επιβάλλει περιορισμούς στους τελικούς χρήστες της πλατφόρμας, απαιτώντας από την πλευρά τους την εκμάθηση και χρήση σύνθετων προγραμματιστικών διεπαφών εφαρμογής (application programming interfaces – APIs).

Συμπληρωματικά αξίζει να αναφερθεί ότι οι παραπάνω προϋποθέσεις υφίστανται στο ακέραιο για τους χρήστες υπολογιστικών πλεγμάτων (computational grids) ή συστοιχιών (clusters) υπολογιστών, εφόσον έχουν βεβαίως εξαρχής πρόσβαση σε αυτές τις κατά τεκμήριο δαπανηρές υπολογιστικές υποδομές.

ii) Μοντελοποίηση και σύνθεση στοιχειοκεραιών χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων

Οι στοχαστικοί αλγόριθμοι βελτιστοποιούν ταυτόχρονα το σύνολο των παραμέτρων μιας σχεδίασης και ενσωματώνουν αποτελεσματικούς μηχανισμούς αποφυγής των τοπικών ακρότατων, ακόμα και αν οι χώροι έρευνας είναι μη παραγωγίσσιμοι ή ιδιόμορφοι.

Αρχικά αναπτύχθηκε μιας γενικευμένη βιβλιοθήκη ανάλυσης στοιχειοκεραιών που ενσωματώνει προσεγγιστικές εκφράσεις για την αποτίμηση των φαινομένων αμοιβαίας σύζευξης μεταξύ γραμμικών ακτινοβολητών. Παράλληλα αναπτύχθηκε μια υπολογιστική βιβλιοθήκη προσομοίωσης στοιχειοκεραιών αποτελούμενες από γραμμικούς ακτινοβολητές, βασισμένη στη μέθοδο των ροπών.

Στη συνέχεια συντέθηκαν επιτυχώς, χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων, τρεις ειδικότερες διαμορφώσεις στοιχειοκεραιών με εφαρμογές στις ασύρματες επικοινωνίες. Οι βελτιστοποιημένες τιμές διέγερσης των στοιχειοκεραιών υπολογίστηκαν λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των φαινομένων αμοιβαίας επαγωγής μεταξύ των ακτινοβολητών που τις απαρτίζουν:

1) στοιχειοκεραία μεταγωγής λοβών η οποία επιτυγχάνει την κάλυψη αλληλουχίας τομέων, βελτιστοποιώντας ταυτόχρονα τη θέση και τη διέγερση των στοιχείων της:

Ιδιαίτερη σημασία έχει ο ορισμός κατάλληλης αντικειμενικής συνάρτησης προκειμένου να είναι δυνατός ο προσδιορισμός της βέλτιστης χωρικής διαμόρφωσης της στοιχειοκεραίας. Για αυτό το σκοπό, στις συναρτήσεις καταλληλότητας κωδικοποιήθηκε η απαίτηση για ομοιόμορφη κάλυψη του χώρου με τα μερικώς επικαλυπτόμενα διαγράμματα ακτινοβολίας. Οι δύο συναρτήσεις διαφοροποιήθηκαν ως προς τον αριθμό, το είδος αλλά και την βαρύτητα που αποδόθηκε στα επιμέρους επιβαλλόμενα κριτήρια, καθώς η πρώτη αποτιμούσε χαρακτηριστικά του συνολικού διαγράμματος ακτινοβολίας ενώ η δεύτερη του παράγοντα διάταξης. Τα ληφθέντα αποτελέσματα μετά από διαδοχικές διαδικασίες βελτιστοποίησης καταδεικνύουν ότι η δεύτερη αντικειμενική συνάρτηση είναι καταλληλότερη για τη βελτιστοποίηση μεγάλου αριθμού διαγραμμάτων για την ομοιόμορφη κάλυψη των οριζόμενων τομέων.

2) επίπεδη ομοιόμορφη κυκλική στοιχειοκεραία η οποία επιτρέπει τη στροφή του κυρίως λοβού ακτινοβολίας στην κατεύθυνση του επιθυμητού χρήστη ενώ παράλληλα επιβάλλει βαθείς μηδενισμούς σε κατευθύνσεις παρεμβολών, βελτιστοποιώντας τη διέγερση των στοιχείων της:

Στην προκειμένη περίπτωση συγκρίθηκε η αποδοτικότητα του αλγόριθμου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων με τους γενετικούς αλγόριθμους. Ενώ και οι δύο αλγόριθμοι παρουσίασαν παρόμοια χαρακτηριστικά σύγκλισης, ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων επέτυχε σημαντικά βαθύτερους μηδενισμούς στις προδιαγεγραμμένες κατευθύνσεις. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι δεν είναι δυνατή η χρήση των δύο στοχαστικών αλγορίθμων σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου όπως η παρουσιαζόμενη, αν και ήδη εξετάζεται σε ερευνητικό επίπεδο η υλοποίηση τους σε FPGAs (Field-Programmable Gate Array).

3) μιας γραμμικής ανομοιόμορφης στοιχειοκεραίας σταθμού βάσης που το διάγραμμα ακτινοβολίας συμμορφώνεται με την ορισμένη μάσκα ακτινοβολίας, βελτιστοποιώντας την χωρική κατανομή των στοιχείων της και τις φάσεις των εφαρμοζόμενων διεγέρσεων.

Η ικανοποίηση των επιβαλλόμενων περιορισμών είχε ως αποτέλεσμα να τοποθετηθούν σε πολύ κοντινές αποστάσεις κάποια εκ των δίπολων, σύμφωνα με τις βελτιστοποιημένες χωρικές διαμορφώσεις της ανομοιόμορφης στοιχειοκεραίας. Επίσης ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων συνέκλινε πολύ πιο γρήγορα από τον γενετικό αλγόριθμο, γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στο ότι ο γενετικός αλγόριθμος δεν υλοποιεί τελεστή ανάλογο του παράγοντα περιορισμού της ταχύτητας.

Τέλος, εξετάστηκε ένα πρωτότυπο πρόβλημα σύνθεσης μιας γραμμικής ανομοιόμορφης φασικής στοιχειοκεραίας μεταβλητής γεωμετρίας. Απαιτήθηκε η καταπίεση των πλευρικών λοβών του διαγράμματος ακτινοβολίας κατά τη σάρωσή της και η μεγιστοποίηση της χωρικής διαφορισιμότητας των στοιχείων της, ενώ επιβλήθηκαν επιπρόσθετοι περιορισμοί ως προς την αποδοτικότητά της. Οι οριζόμενοι στόχοι είναι μερικώς αντικρουόμενοι και για αυτό χρησιμοποιήθηκε η πολυκριτηριακή επέκταση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης. Επίσης, η ανάλυση των χαρακτηριστικών ακτινοβολήσης της στοιχειοκεραίας πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο των ροπών, προκειμένου να υπολογιστούν με ακρίβεια τα φαινόμενα σύζευξης.

Η διαδικασία βελτιστοποίησης παρήγαγε ένα σύνολο μη επικρατουσών λύσεων, οι οποίες ικανοποιούν τους στόχους που τέθηκαν σε διαφορετικό βαθμό. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η συσχέτιση των τάσεων στους αποσυζευγμένους κλάδους του κυκλώματος λήψης της στοιχειοκεραίας μπορεί να αντισταθμιστεί μόνο μερικώς από την ανομοιόμορφη τοποθέτηση των ακτινοβολητών, καθώς αυτή εμμέσως επιβάλλεται από το μεγιστοποίησης της καταπίεσης των πλευρικών λοβών.

Όλες οι άνωθεν περιγραφόμενες μέθοδοι, βασιζόμενες στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων, δύναται να χρησιμοποιηθούν για τη σύνθεση στοιχειοκεραίων που καλούνται να ικανοποιήσουν τις προδιαγραφές αλλά και τους περιορισμούς που επιβάλλουν οι σύγχρονες ασύρματες τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές. Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να γίνει η διάκριση μεταξύ των τεχνικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο κατά τη σχεδίαση των στοιχειοκεραίων (π.χ. όταν παράλληλα βελτιστοποιείται και η δομή τους) με αυτές που υπό προϋποθέσεις θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε πραγματικό χρόνο για τη δυναμική προσαρμογή της ακτινοβολήσης τους, αναλόγως των μεταβαλλόμενων συνθηκών στο ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον τους. Κοινή όμως συνισταμένη των παρουσιαζόμενων τεχνικών παρέμεινε ο συνυπολογισμός της επίδρασης των φαινομένων σύζευξης, μεταξύ των στοιχείων που απαρτίζουν τις στοιχειοκεραίες, στην επίτευξη των προδιαγραφών κάλυψης ή/και απόρριψης των παρεμβολών. Αυτή ακριβώς η επίδραση συνήθως δεν συμπεριλαμβάνεται στις σχετικές μελέτες για σύνθεση στοιχειοκεραίων με τη βοήθεια των στοχαστικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης, θεωρώντας σε μεγάλο βαθμό ιδανική την απόκρισή τους.

Επιπρόσθετα παρουσιάστηκαν εκτενώς τα χαρακτηριστικά προσαρμογής των κεραιών στο δικτύωμα τροφοδοσίας τους και στους διαφορετικούς κλάδους του εμπρόσθιου κυκλώματος λήψης τους. Αυτό αποτέλεσε και τη θεωρητική βάση για τον ορισμό επιπρόσθετων μερικώς αντικρουόμενων στόχων κατά τη βελτιστοποίηση τους, όπως η δυνατότητα σύνθεσης των διαγραμμάτων τους κατά την λειτουργία εκπομπής τους και η δυνατότητα εκμετάλλευσης των φαινομένων διαφορισιμότητας κατά τη λήψη τους. Σημειώνεται ότι σχετικά πρόσφατα άρχιζαν να χρησιμοποιούνται στοχαστικές τεχνικές πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης για τη σχεδίαση κεραιών/στοιχειοκεραίων προκειμένου να ολοκληρώνονται επιτυχώς σε κεραιοσυστήματα, ικανοποιώντας παράλληλα διαφορετικές λειτουργικές προδιαγραφές και περιορισμούς.

6.2 Θέματα Μελλοντικής Έρευνας

Τα αποτελέσματα της διατριβής σε πολλά σημεία εγείρουν νέες προοπτικές αναζήτησης λύσεων και βελτιώσεων των μέχρι τώρα επιστημονικών ευρημάτων. Οι κατά τον συγγραφέα πλέον ενδιαφέροντες τομείς περαιτέρω ενασχόλησης περιγράφονται στις ακόλουθες παραγράφους.

Αξιοποίηση των αλγορίθμων βελτιστοποίησης για τη σχεδίαση καθέτως ολοκληρωμένων κεραιοσυστημάτων

Η ερευνητική εργασία που αναπτύχθηκε στο πέμπτο κεφάλαιο δύναται να αξιοποιηθεί σε κατευθύνσεις συναφείς της σχεδίασης καθέτως ολοκληρωμένων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Τα σύγχρονα συστήματα ασύρματων επικοινωνιών συνήθως ολοκληρώνουν κατάλληλα διαμορφωμένες στοιχειοκεραίες, οι οποίες τους προσδίδουν δυνατότητες δυναμικής μορφοποίησης και στροφής των λοβών ακτινοβολήσης τους (beam forming) είτε παρουσιάζουν σημαντικό κέρδος διαφορισμότητας (diversity gain). Ενδεικτικά αναφέρεται η δυνατότητα βελτιστοποίησης εν παραλλήλω των παραμέτρων του εμπρόσθιου κυκλώματος του δέκτη σε ένα MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) κεραιοσύστημα, προκειμένου να μεγιστοποιείται η αποδοτικότητά του.

Επέκταση της λειτουργικότητας της πλατφόρμας κατανεμημένης βελτιστοποίησης

Καταρχήν, θα ήταν ενδιαφέρουσα ερευνητικά η υλοποίηση της δυαδικής παραλλαγής του αλγορίθμου βελτιστοποίησης, προκειμένου να διευκολύνεται η σύνθεση στοιχειοκεραίων που επιτρέπουν την επιλεκτική αδρανοποίηση κάποιων στοιχείων τους (thinned arrays).

Επίσης έχει προταθεί στο παρελθόν μια παραλλαγή του αλγορίθμου PSO που επιτρέπει αφενός την δυναμική αναπροσαρμογή του μεγέθους του πληθυσμού κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης και αφετέρου ενθαρρύνει την ομαδοποίηση του σε νησίδες. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά μπορούν να αποτελέσουν δυνητικά τη βάση για την ανάπτυξη μιας πιο αποκεντρωμένης και πιο αποδοτικής υλοποίησης της κατανεμημένης πλατφόρμας.

Τέλος, η πλατφόρμα βελτιστοποίησης κατανέμει ομοιόμορφα τους πράκτορες στους απομακρυσμένους κόμβους, θεωρώντας ότι αυτοί είναι ομότιμοι ως προς τους υπολογιστικούς πόρους που διαθέτουν. Δύναται να υλοποιηθούν αλγόριθμοι καταμερισμού του φόρτου εργασίας (load balancing), αναλόγως της δηλωθείσας ή ευρισκόμενης υπολογιστικής ισχύος από μετρητικά προγράμματα (benchmarks).

7 Βιβλιογραφία

- [1] R. Rardin, *Optimization in operations research*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1998.
- [2] J. Chinneck, “Practical optimization: a gentle introduction,” *Electronic document*: <http://www.sce.carleton.ca/faculty/chinneck/po.html>, 2004.
- [3] P. Pardalos, A. Migdalas, and R. Burkard, *Combinatorial and global optimization*. World Scientific Publishing, 2002.
- [4] P. Gray, W. Hart, L. Painton, C. Phillips, M. Trahan, and J. Wagner, “A survey of global optimization methods,” *Sandia National Laboratories, Albuquerque, USA* <http://www.cs.sandia.gov/opt/survey>, 1997.
- [5] C. Floudas and P. Pardalos, *Recent advances in global optimization*. Princeton University Press, New Jersey, 1992.
- [6] R. Horst, P. Pardalos, and N. Thoai, *Introduction to global optimization*. Springer Netherlands, 2000.
- [7] E. Aarts and J. Lenstra, *Local search in combinatorial optimization*. Princeton University Press, 2003.
- [8] B. Korte and J. Vygen, *Combinatorial optimization: theory and algorithms*. Springer Verlag, 2008.
- [9] T. Petit, J. Régin, and C. Bessière, “Specific filtering algorithms for over-constrained problems,” in *Principles and Practice of Constraint Programming – CP 2001*, ser. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin / Heidelberg, 2001, vol. 2239, pp. 451–463.
- [10] K. Deb, “An efficient constraint handling method for genetic algorithms,” *Computer methods in applied mechanics and engineering*, vol. 186, no. 2-4, pp. 311–338, 2000.
- [11] D. H. Wolpert and W. G. Macready, “No free lunch theorems for optimization,” *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 1, no. 1, pp. 67–82, 1997.
- [12] C. Schumacher, M. Vose, and L. Whitley, “The no free lunch and problem description length,” in *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO 2001)*, 2001, pp. 565–570.
- [13] S. Christensen and F. Oppacher, “What can we learn from no free lunch? A first attempt to characterize the concept of a searchable function,” in *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*, 2001, pp. 1219–1226.
- [14] S. Kauffman, *At home in the universe: The search for laws of self-organization and complexity*. Oxford University Press, USA, 1995.
- [15] K. Deb, *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*. Wiley, 2001.

- [16] C. Coello, G. Lamont, and D. Van Veldhuizen, *Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems*. Springer-Verlag, 2007.
- [17] M. Avriel, *Nonlinear programming: analysis and methods*. Dover publications, 2003.
- [18] J. Shewchuk, "An Introduction to the Conjugate Gradient Method Without the Agonizing Pain," Pittsburgh, PA, USA, Tech. Rep., 1994.
- [19] J. Spall, *Introduction to stochastic search and optimization: estimation, simulation, and control*. John Wiley and Sons, 2003.
- [20] Z. Michalewicz and D. Fogel, *How to solve it: modern heuristics*. Springer-Verlag, New York, 2004.
- [21] P. Laarhoven, P. van Laarhoven, and E. Aarts, *Simulated annealing: theory and applications*. Springer, 1987.
- [22] F. Glover, "Tabu search, Part II," *ORSA journal on Computing*, vol. 2, no. 1, pp. 4–32, 1990.
- [23] A. Engelbrecht, *Computational intelligence: an introduction*. Wiley, 2007.
- [24] Z. Michalewicz, *Genetic algorithms + data structures = Evolutional Programs*. Springer, 1996.
- [25] J. Koza, *Genetic programming: on the programming of computers by means of natural selection*. The MIT press, 1992.
- [26] L. Fogel, "Evolutionary Programming in Perspective: The Top-Down View," in *Computational Intelligence: Imitating Life*. IEEE Press, Piscataway, New Jersey, 1994.
- [27] T. Back, "Self-adaptation in genetic algorithms," in *Proceedings of the First European Conference on Artificial Life*, 1992, pp. 263–271.
- [28] D. Goldberg, *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Addison-wesley, 1989.
- [29] D. Goldberg and K. Deb, "A comparative analysis of selection schemes used in genetic algorithms," *Foundations of genetic algorithms*, vol. 1, pp. 69–93, 1991.
- [30] K. De Jong, "An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems," Ph.D. dissertation, The University of Michigan, 1975.
- [31] Y. Rahmat-Samii and E. Michielssen, *Electromagnetic optimization by genetic algorithms*. John Wiley & Sons, 1999.
- [32] E. Bonabeau, M. Dorigo, and G. Theraulaz, *From natural to artificial swarm intelligence*. Oxford University Press, 1999.
- [33] J. Kennedy, "Swarm intelligence," in *Handbook of Nature-Inspired and Innovative Computing*. Springer US, 2006, pp. 187–219.

- [34] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*, vol. 4, 1995, pp. 1942–1948.
- [35] S. Mikki and A. Kishk, "Improved particle swarm optimization technique using hard boundary conditions," *Microwave and optical technology letters*, vol. 46, no. 5, pp. 422–426, 2005.
- [36] J. Kennedy, "Small worlds and mega-minds: effects of neighborhood topology on particle swarm performance," in *Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation (CEC '99)*, vol. 3, 1999, pp. 1931–1938.
- [37] J. Kennedy and R. Mendes, "Population structure and particle swarm performance," in *Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation (CEC '02)*, vol. 2, 2002, pp. 1671–1676.
- [38] M. Clerc and J. Kennedy, "The particle swarm - explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 1, pp. 58–73, 2002.
- [39] R. C. Eberhart and Y. Shi, "Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization," in *Proceedings of the 2000 Congress on Evolutionary Computation (CEC '00)*, 2000, pp. 84–88.
- [40] K. Veeramachaneni, T. Peram, C. Mohan, and L. Osadciw, "Optimization using particle swarms with near neighbor interactions," in *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO 2003)*, 2003, pp. 110–121.
- [41] T. Krink and M. Løvbjerg, "The lifecycle model: Combining particle swarm optimisation, genetic algorithms and hillclimbers," in *Parallel Problem Solving from Nature – PPSN VII*, ser. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin / Heidelberg, 2002, vol. 2439, pp. 621–630.
- [42] C. A. C. Coello, G. T. Pulido, and M. S. Lechuga, "Handling multiple objectives with particle swarm optimization," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 8, no. 3, pp. 256–279, 2004.
- [43] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 2, pp. 182–197, 2002.
- [44] J. Knowles and D. Corne, "Approximating the nondominated front using the pareto archived evolution strategy," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 8, no. 2, pp. 149–172, 2000.
- [45] K. A. Papadopoulos, D. G. Lymperopoulos, and D. I. Kaklamani, "A combined Method of Auxiliary Sources / Particle Swarm Optimization (MAS / PSO) technique in computational electromagnetics," in *CDROM Proceedings of the 1st International Conference From Scientific Computing to Computational Engineering (IC-SCCE '04)*, Athens, Greece, Sep. 2004.

- [46] Y. Leviatan and A. Boag, "Analysis of electromagnetic scattering from dielectric cylinders using a multifilament current model," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 35, no. 10, pp. 1119–1127, 1987.
- [47] N. Tsitsas, E. Alivizatos, D. Kaklamani, and H. Anastassiou, "Optimization of the method of auxiliary sources (MAS) for oblique incidence scattering by an infinite dielectric cylinder," *Electrical Engineering (Archiv fur Elektrotechnik)*, vol. 89, no. 5, pp. 353–361, 2007.
- [48] E. Laskari, K. Parsopoulos, and M. Vrahatis, "Particle swarm optimization for minimax problems," in *Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation (CEC'02)*, vol. 2. IEEE, 2002, pp. 1576–1581.
- [49] N. Lynch, *Distributed algorithms*. Morgan Kaufmann, 1996.
- [50] J. Misra, "Loosely-coupled processes," *Future Generation Computer Systems*, vol. 8, no. 4, pp. 269–286, 1992.
- [51] M. Alford, "Attacking requirements complexity using a separation of concerns," in *Proceedings of the First International Conference on Requirements Engineering*. IEEE, 1994, pp. 2–5.
- [52] A. Al Geist, J. Dongarra, W. Jiang, R. Manchek, and V. Sunderam, *PVM: Parallel Virtual Machine – a users' guide and tutorial for network parallel computing*. The MIT Press, 1994.
- [53] L. Clarke, I. Glendinning, and R. Hempel, "The MPI message passing interface standard," in *Programming environments for massively parallel distributed systems: working conference of the IFIP WG10. 3, April 25-29, 1994*, 1994, p. 213.
- [54] R. Steinmetz and K. Wehrle, editors. *Peer-to-Peer Systems and Applications*, volume 3485 of *Lecture Notes in Computer Science*. Springer Berlin / Heidelberg, 2005.
- [55] B. Traversat, M. Abdelaziz, M. Duigou, J. Hugly, E. Pouyoul, and B. Yeager, "Project JXTA Virtual Network," *Sun Microsystems*, October.
- [56] J. Waldo *et al.*, "Javaspaces specification 1.0," *Sun Microsystems*, 1998.
- [57] J. Waldo, "The Jini architecture for network-centric computing," *Communications of the ACM*, vol. 42, no. 7, pp. 76–82, 1999.
- [58] S. Jones, "Toward an acceptable definition of service," *IEEE software*, vol. 22, no. 3, pp. 87–93, 2005.
- [59] D. Booth, H. Haas, F. McCabe, E. Newcomer, M. Champion, C. Ferris, and D. Orchard, "Web services architecture," *W3C Working Draft*, 2004.
- [60] M. Gudgin, M. Hadley, N. Mendelsohn, J. Moreau, H. Nielsen, A. Karmarkar, and Y. Lafon, "SOAP Version 1.2," *W3C Working Draft*, 2001.

- [61] R. Chinnici, J. Moreau, A. Ryman, and S. Weerawarana, "Web services description language (WSDL) version 2.0 part 1: Core language," *W3C working draft*, 2004.
- [62] U. Org, "UDDI technical white paper," *White Paper*, 2000.
- [63] N. Jennings, "An agent-based approach for building complex software systems," *Communications of the ACM*, vol. 44, no. 4, pp. 35–41, 2001.
- [64] J. Bradshaw, M. Greaves, H. Holmback, T. Karygiannis, W. Jansen, B. Silverman, N. Suri, and A. Wong, "Agents for the masses," *IEEE Intelligent Systems and their Applications*, vol. 14, no. 2, pp. 53–63, 2002.
- [65] M. Wooldridge and N. Jennings, "Intelligent agents: Theory and practice," *The knowledge engineering review*, vol. 10, no. 02, pp. 115–152, 1995.
- [66] A. Fuggetta, G. Picco, and G. Vigna, "Understanding code mobility," *IEEE Transactions on Software Engineering*, vol. 24, no. 5, pp. 342–361, 2002.
- [67] N. Jennings, P. Faratin, A. Lomuscio, S. Parsons, M. Wooldridge, and C. Sierra, "Automated negotiation: prospects, methods and challenges," *Group Decision and Negotiation*, vol. 10, no. 2, pp. 199–215, 2001.
- [68] A. Peterson, S. Ray, and R. Mittra, "Computational methods for electromagnetics," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 40, no. 2, 1998.
- [69] C. Guiffaut and K. Mahdjoubi, "A parallel FDTD algorithm using the MPI library," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 43, no. 2, pp. 94–103, 2001.
- [70] V. Varadarajan and R. Mittra, "Finite-difference time-domain (FDTD) analysis using distributed computing," *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, vol. 4, no. 5, pp. 144–145, 1994.
- [71] A. Esposito and L. Tarricone, "Grid computing for electromagnetics: a beginner's guide with applications," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 45, no. 2, pp. 91–100, 2003.
- [72] J. Schutte, J. Reinbolt, B. Fregly, R. Haftka, and A. George, "Parallel global optimization with the particle swarm algorithm," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 61, no. 13, pp. 2296–2315, 2004.
- [73] B. Li and K. Wada, "Parallelizing particle swarm optimization," in *Proceedings of the 2005 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing (PACRIM '05)*. IEEE, 2005, pp. 288–291.
- [74] M. Belal and T. El-Ghazawi, "Parallel models for particle swarm optimizers," *International Journal of Intelligent Computing and Information Sciences*, vol. 4, no. 1, pp. 100–111, 2004.

- [75] K. A. Papadopoulos, T. E. Athanaileas, and D. I. Kaklamani, "Using Java Mobile Agents and PSO for Implementing a Distributed Antenna-Optimization Platform [EM Programmer's Notebook]," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 51, no. 5, pp. 128–136, 2009.
- [76] C. Biniaris, A. Kostaridis, D. Kaklamani, and I. Venieris, "Implementing distributed FDTD codes with Java mobile agents," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 44, no. 6, pp. 115–119, 2002.
- [77] D. Lympelopoulou, N. Tsitsas, and D. Kaklamani, "A distributed intelligent agent platform for genetic optimization in CEM: Applications in a quasi-point matching method," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 3, pp. 619–628, 2007.
- [78] V. Hamscher, U. Schwiegelshohn, A. Streit, and R. Yahyapour, "Evaluation of Job-Scheduling Strategies for Grid Computing," in *Grid Computing — GRID 2000*, ser. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin / Heidelberg, 2000, vol. 1971, pp. 191–202.
- [79] I. Foukarakis, A. Kostaridis, C. Biniaris, D. Kaklamani, and I. Venieris, "Webmages: An agent platform based on web services," *Computer communications*, vol. 30, no. 3, pp. 538–545, 2007.
- [80] A. Kostaridis, C. Biniaris, I. Foukarakis, D. Kaklamani, and I. Venieris, "A Web-based distributed computing framework for antenna array modeling," *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, no. 10, pp. 81–87, 2004.
- [81] F. Bellifemine, G. Caire, and D. Greenwood, *Developing multi-agent systems with JADE*. Wiley, 2007.
- [82] G. Amdahl, "Validity of the single processor approach to achieving large scale computing capabilities," in *Proceedings of the April 18-20, 1967, spring joint computer conference*, ser. AFIPS '67 (Spring). ACM, New York, 1967, pp. 483–485.
- [83] S. Poslad and P. Charlton, "Standardizing agent interoperability: The FIPA approach," *Multi-Agent Systems and Applications*, pp. 98–117, 2006.
- [84] C. Balanis, *Antenna theory*. Wiley New York, 1997.
- [85] M. Clerc, *Particle swarm optimization*. ISTE Publishing Company, London, 2006.
- [86] K. A. Papadopoulos, D. I. Kaklamani, and I. S. Venieris, "Optimizing ILS Localizer Guidance Patterns," in *Proceedings of the International Symposium on INnovations in Intelligent SyStems and Applications (INISTA '05)*, Istanbul, Turkey, Jun. 2005, pp. 15–18.
- [87] K. A. Papadopoulos, C. A. Papagianni, D. I. Kaklamani, and I. S. Venieris, "Analysis and comparison of population-based stochastic optimization algorithms in the design of beam antenna arrays," in *Proceedings of the International Symposium on INnovations in Intelligent SyStems and Applications (INISTA '07)*, Istanbul, Turkey, Jun. 2007, pp. 293–297.
- [88] T. Rappaport, *Wireless communications*. Prentice Hall PTR New Jersey, 2002.

- [89] K. A. Papadopoulos, C. A. Papagianni, I. E. Foukarakis, D. I. Kaklamani, and I. S. Venieris, "Optimal design of switched beam antenna arrays using Particle Swarm Optimization," in *Proceedings of the First European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2006)*, Nice, France, Nov. 2006, pp. 1–6.
- [90] K. Papadopoulos, C. Papagianni, C. Papas, D. Kaklamani, and I. Venieris, "Beam array optimization for smart antenna systems using stochastic algorithms," in *Proceedings of the 3rd European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2009)*, Berlin, Germany, 2009, pp. 1345–1349.
- [91] J. Kraus, *Antennas*. McGraw-Hill Education, 1988.
- [92] D. Davidson, *Computational electromagnetics for RF and microwave engineering*. Cambridge University Press, 2010.
- [93] H. Rogier and D. De Zutter, "Beamforming strategies for compact arrays in mobile terminals using the exact active element pattern method," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 35, no. 3, pp. 201–203, 2002.
- [94] R. Harrington, *Field computation by moment methods*. Wiley-IEEE Press, 1993.
- [95] H. King, "Mutual impedance of unequal length antennas in echelon," *IRE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 5, no. 3, pp. 306–313, 1957.
- [96] W. Press, W. Vetterling, S. Teukolsky, and B. Flannery, *Numerical recipes in C++: the art of scientific computing*. Cambridge University Press, New York, 2001.
- [97] S. Orfanidis, "Electromagnetic waves and antennas," *Rutgers University*, 2004.
- [98] R. Hansen, *Phased array antennas*. Wiley-Interscience, 2009.
- [99] D. Lympelopoulou, D. Logothetis, P. Atlamazoglou, and D. Kaklamani, "Using object-oriented and literate-programming techniques for the development of a computational electromagnetics library," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 47, no. 3, pp. 31–38, 2005.
- [100] Y. Lo and S. Lee, *Antenna Handbook: theory, applications, and design*. Van Nostrand Reinhold Company, 1988.
- [101] H. Lebet and S. Boyd, "Antenna array pattern synthesis via convex optimization," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 45, no. 3, pp. 526–532, 1997.
- [102] S. Schelkunoff, "A mathematical theory of linear arrays," *Bell System Technical Journal*, vol. 22, no. 1, pp. 80–107, 1943.
- [103] C. L. Dolph, "A Current Distribution for Broadside Arrays Which Optimizes the Relationship between Beam Width and Side-Lobe Level," *Proceedings of the IRE*, vol. 34, no. 6, pp. 335–348, 1946.

- [104] T. Taylor, "Design of line-source antennas for narrow beamwidth and low sidelobes," *IRE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 3, no. 1, pp. 16–28, 1955.
- [105] W. Keizer, "Fast low-sidelobe synthesis for large planar array antennas utilizing successive fast Fourier transforms of the array factor," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 3, pp. 715–722, 2007.
- [106] H. J. Orchard, R. S. Elliott, and G. J. Stern, "Optimising the synthesis of shaped beam antenna patterns," *IEE Proceedings-H Microwaves Antennas and Propagation*, vol. 132, no. 1, pp. 63–68, 1985.
- [107] Y. L. Abdel-Magid and M. M. Dawoud, "Accurate null steering in linear arrays using tabu search," in *Proceedings of the Tenth International Conference on Antennas and Propagation (Conf. Publ. No. 436)*, vol. 1, 1997, pp. 365–369.
- [108] A. Trastoy and F. Ares, "Linear array pattern synthesis with minimum sidelobe level and null control," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 16, no. 5, pp. 322–325, 1997.
- [109] D. H. Werner, M. A. Gingrich, and P. L. Werner, "A self-similar fractal radiation pattern synthesis technique for reconfigurable multiband arrays," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 51, no. 7, pp. 1486–1498, 2003.
- [110] D. W. Boeringer and D. H. Werner, "Efficiency-Constrained Particle Swarm Optimization of a Modified Bernstein Polynomial for Conformal Array Excitation Amplitude Synthesis," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 53, no. 8, pp. 2662–2673, 2005.
- [111] D. Gies and Y. Rahmat-Samii, "Particle swarm optimization for reconfigurable phase-differentiated array design," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 38, no. 3, pp. 168–175, 2003.
- [112] Z. Zaharis, E. Vafiadis, and J. Sahalos, "Antenna Array Synthesis by Combining the Measured Element Patterns and the Orthogonal Method," *Proceedings of the XXVIIth General Assembly of the International Union of Radio Science*, 2002, paper 1006 (electronic format).
- [113] G. Chin, "Instrument Landing System Scattering," Transportation Systems Center Cambridge MA, Tech. Rep., 1972.
- [114] L. Godara, "Application of antenna arrays to mobile communications. II. Beam-forming and direction-of-arrival considerations," *Proceedings of the IEEE*, vol. 85, no. 8, pp. 1195–1245, 2002.
- [115] S. Mitilineos, C. Papagianni, G. Verikaki, and C. Capsalis, "Design of switched beam planar arrays using the method of genetic algorithms," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 46, pp. 105–126, 2004.

- [116] S. Bellofiore, C. Balanis, J. Foutz, and A. Spanias, "Smart-antenna systems for mobile communication networks. Part 1. Overview and antenna design," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 44, no. 3, pp. 145 – 154, Jun. 2002.
- [117] M. Ho, G. Stuber, and M. Austin, "Performance of switched-beam smart antennas for cellular radio systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 47, no. 1, pp. 10–19, 1998.
- [118] M. Chryssomallis, "Smart antennas," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 42, no. 3, pp. 129–136, 2000.
- [119] M. Mouhamadou, P. Vaudon, and M. Rammal, "Smart antenna array patterns synthesis: Null steering and multi-user beamforming by phase control," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 60, pp. 95–106, 2006.
- [120] J. Winters, "Smart antennas for wireless systems," *IEEE Personal Communications*, vol. 5, no. 1, pp. 23–27, 1998.
- [121] P. Ioannides and C. Balanis, "Uniform circular arrays for smart antennas," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 47, no. 4, pp. 192–206, 2006.
- [122] K. Dandekar, H. Ling, and G. Xu, "Experimental study of mutual coupling compensation in smart antenna applications," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 1, no. 3, pp. 480–487, 2002.
- [123] P. Palangpour, G. Venayagamoorthy, and S. Smith, "Particle Swarm Optimization: A Hardware Implementation," in *Proceedings of the 2009 International Conference on Computer Design*, Las Vegas, 2009, pp. 134–139.
- [124] G. Kókai, M. Böhner, T. Christ, and H. Frühauf, "Parallel Dynamic Parameter Adaption of Adaptive Array Antennas Based on Nature Inspired Optimisation," *Journal of Computers*, vol. 2, no. 3, pp. 64–76, 2007.
- [125] B. Andersen, "Antenna arrays in mobile communications: gain, diversity, and channel capacity," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 42, no. 2, pp. 12–16, 2000.
- [126] S. Saunders and A. Aragón-Zavala, *Antennas and propagation for wireless communication systems*. Wiley, 2007.
- [127] G. Foschini and M. Gans, "On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas," *Wireless personal communications*, vol. 6, no. 3, pp. 311–335, 1998.
- [128] W. Kahn, "Element efficiency: a unifying concept for array antennas," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 49, no. 4, pp. 48–56, 2007.
- [129] H. Hui, "Decoupling methods for the mutual coupling effect in antenna arrays: a review," *Recent Patents on Engineering*, vol. 1, no. 2, pp. 187–193, 2007.

- [130] K. Takamizawa, "Analysis of highly coupled wideband antenna arrays using scattering parameter network models," Ph.D. dissertation, 2002.
- [131] Y. Komiya, K. Umebayashi, Y. Kamiya, K. Hirasawa, and Y. Suzuki, "Study on a matching condition considering the mutual coupling for the multi-terminal dipole antenna," in *Proceedings of the European Microwave Conference (EuMC 2009)*, Oct. 2009, pp. 1519–1522.
- [132] T. Svantesson and A. Ranheim, "Mutual coupling effects on the capacity of multielement antenna systems," in *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP'01)*, vol. 4. IEEE, 2001, pp. 2485–2488.
- [133] J. Andersen and B. Lau, "On closely coupled dipoles in a random field," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 5, no. 1, pp. 73–75, 2006.
- [134] D. Pozar, *Microwave engineering*. Wiley-India, 2009.
- [135] A. Agilent, "154-s-parameter design," *Agilent Technologies*.
- [136] J. Kraus and K. Carver, *Electromagnetics*. McGraw-Hill New York, 1984.
- [137] Y. Zhu, Y. Xie, Z. Lei, and T. Dang, "A novel method of mutual coupling matching for array antenna design," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 21, no. 8, pp. 1013–1024, 2007.
- [138] "IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas," *IEEE Std 145-1993*, 1993.
- [139] A. Goldsmith, *Wireless communications*. Cambridge University Press, 2005.
- [140] M. Blanco and K. Zdunek, "Performance and optimization of switched diversity systems for the detection of signals with rayleigh fading," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 27, no. 12, pp. 1887–1895, 1979.
- [141] J. Bach Andersen, "Antenna arrays in mobile communications: gain, diversity, and channel capacity," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 42, no. 2, pp. 12–16, 2000.
- [142] F. Broyde and E. Clavelier, "Wireless Corner - Taking Advantage of Mutual Coupling in Radio-Communication Systems Using a Multi-Port Antenna Array," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 49, no. 4, pp. 208–220, 2007.
- [143] P. De Doncker, "Spatial correlation functions for fields in threedimensional rayleigh channels," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 40, pp. 55–69, 2003.
- [144] M. Abramowitz and I. Stegun, *Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical tables*. Dover publications, 1964.
- [145] J. Wallace, M. Jensen, A. Swindlehurst, and B. Jeffs, "Experimental characterization of the MIMO wireless channel: data acquisition and analysis," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 2, no. 2, pp. 335 – 343, Mar. 2003.

- [146] D. Gesbert, M. Shafi, D. Shiu, P. Smith, and A. Naguib, "From theory to practice: an overview of MIMO space-time coded wireless systems," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 21, no. 3, pp. 281–302, 2003.
- [147] K. Rosengren and P. Kildal, "Radiation efficiency, correlation, diversity gain and capacity of a six-monopole antenna array for a mimo system: theory, simulation and measurement in reverberation chamber," *IEE Proceedings - Microwaves, Antennas and Propagation*, vol. 152, no. 1, pp. 7 – 16, Feb. 2005.
- [148] P. Kildal and K. Rosengren, "Correlation and capacity of MIMO systems and mutual coupling, radiation efficiency, and diversity gain of their antennas: simulations and measurements in a reverberation chamber," *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, no. 12, pp. 104–112, 2004.
- [149] P. Kildal, K. Rosengren, J. Byun, and J. Lee, "Definition of effective diversity gain and how to measure it in a reverberation chamber," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 34, no. 1, pp. 56–59, 2002.
- [150] J. Wallace and M. Jensen, "Mutual coupling in MIMO wireless systems: A rigorous network theory analysis," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 3, no. 4, pp. 1317–1325, 2004.
- [151] B. Lau, S. Ow, G. Kristensson, and A. Molisch, "Capacity analysis for compact MIMO systems," in *Proceedings of the 2005 IEEE 61st Vehicular Technology Conference (VTC 2005)*, vol. 1, 2005, pp. 165–170.
- [152] B. Lau, J. Andersen, G. Kristensson, and A. Molisch, "Impact of matching network on bandwidth of compact antenna arrays," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 54, no. 11, pp. 3225–3238, 2006.
- [153] R. Vaughan, "Spaced directive antennas for mobile communications by the Fourier transform method," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 48, no. 7, pp. 1025–1032, 2000.
- [154] J. Parsons, *The mobile radio propagation channel*, 1st ed. Wiley, New York, 2000.
- [155] A. Khaleghi, A. Azoulay, and J. Bolomey, "Diversity techniques with dipole antennas in indoor multipath propagation," in *Proceedings of the IEEE 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2005)*, vol. 1, 2005, pp. 669–673.
- [156] W. Li, X. Shi, and Y. Hei, "An improved particle swarm optimization algorithm for pattern synthesis of phased arrays," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 82, pp. 319–332, 2008.
- [157] M. Donelli, R. Azaro, F. De Natale, and A. Massa, "An innovative computational approach based on a particle swarm strategy for adaptive phased-arrays control," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 54, no. 3, pp. 888–898, 2006.

- [158] N. Jin and Y. Rahmat-Samii, "Parallel particle swarm optimization and finite-difference time-domain (PSO/FDTD) algorithm for multiband and wide-band patch antenna designs," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 53, no. 11, pp. 3459–3468, 2005.
- [159] —, "Advances in Particle Swarm Optimization for Antenna Designs: Real-Number, Binary, Single-Objective and Multiobjective Implementations," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 3, pp. 556–567, 2007.
- [160] S. Chamaani, M. Abrishamian, and S. Mirtaheri, "Multi-objective optimization of UWB monopole antenna," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 8, pp. 83–94, 2009.
- [161] M. G. Bray, D. H. Werner, D. W. Boeringer, and D. W. Machuga, "Optimization of thinned aperiodic linear phased arrays using genetic algorithms to reduce grating lobes during scanning," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 50, no. 12, pp. 1732–1742, 2002.
- [162] J. W. Wallace and M. A. Jensen, "Termination-dependent diversity performance of coupled antennas: network theory analysis," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 52, no. 1, pp. 98–105, 2004.
- [163] A. J. Nebro, J. J. Durillo, J. Garcia-Nieto, C. A. Coello Coello, F. Luna, and E. Alba, "SMPSO: A new PSO-based metaheuristic for multi-objective optimization," in *Proceedings of the IEEE Symposium on Computational intelligence in Multi-Criteria Decision-Making (MCDM '09)*, 2009, pp. 66–73.
- [164] J. Weber, C. Volmer, K. Blau, R. Stephan, and M. A. Hein, "Miniaturized antenna arrays using decoupling networks with realistic elements," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 54, no. 6, pp. 2733–2740, 2006.

8 Παράρτημα

8.1 Λίστα Δημοσιεύσεων

8.1.1 Επιστημονικά Περιοδικά

1. **K. A. Papadopoulos**, T. E. Athanaileas and D. I. Kaklamani, "Using Java Mobile Agents and PSO for Implementing a Distributed Antenna-Optimization Platform," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol.51, No. 5, pp. 128 – 136, Oct. 2009.
2. C. Papagianni, **K. A. Papadopoulos**, C. Pappas, N. D. Tselikas, D. I. Kaklamani, I. S. Venieris, "Communication network design using particle swarm optimization, " *Analele Universitatii de Vest din Timisoara*, Vol. XLVII, No. 2, pp. 65 – 95, 2009.
3. **K. A. Papadopoulos**, C. A. Papagianni, P. K. Gkonis, I. S. Venieris, and D. I. Kaklamani, "Particle swarm optimization of antenna arrays with efficiency constraints," *Progress In Electromagnetics Research M*, Vol. 17, pp. 237 – 251, 2011.

8.1.2 Διεθνή συνέδρια

1. **K. A. Papadopoulos**, D. G. Lympieropoulos and D. I. Kaklamani, "A Combined Method of Auxiliary Sources / Particle Swarm Optimization (MAS / PSO) Technique in Computational Electromagnetics", in CDROM Proc. of *the 1st International Conference "From Scientific Computing to Computational Engineering" (IC-SCCE '04)*, Athens, Greece, 8–10 Sept. 2004.
2. **K. A. Papadopoulos**, D. I. Kaklamani and I. S. Venieris, "Optimizing ILS Localizer Guidance Patterns", in Proc. of *the International Symposium on INnovations in Intelligent SysTems and Applications (INISTA '05)*, Istanbul, Turkey, Jun. 2005, pp. 15–18.
3. **K. A. Papadopoulos**, C. A. Papagianni, I. E. Foukarakis, D. I. Kaklamani and I. S. Venieris, "Optimal Design of Switched Beam Antenna Arrays Using Particle Swarm Optimization", in CDROM Proc. of *the 1st European Conference on Antennas and Propagation 2006 (EuCAP 2006)*, Nice, France, 6–10 Nov. 2006, pp. 1–6.
4. **K. A. Papadopoulos**, C. A. Papagianni, D. I. Kaklamani, I. S. Venieris, "Analysis and comparison of population-based stochastic optimization algorithms in the design of beam antenna arrays", in Proc. of *the International Symposium on INnovations in Intelligent SysTems and Applications (INISTA '07)*, Istanbul, Turkey, 20-23 Jun. 2007, pp. 293–297.
5. T. Athanaileas, **K. Papadopoulos** and D. Kaklamani, "A Multi-Agent Distributed Platform for Particle Swarm Optimization", in Proc. of *the International Symposium on*

INnovations in Intelligent SysTems and Applications (INISTA '07), Istanbul, Turkey, 20-23 June 2007, pp. 190–194.

6. C. Papagianni, **K. Papadopoulos**, C. Pappas, N. Tselikas and I. Venieris, "Communication Network Design Using Particle Swarm Optimization", in *Proc. of the International Multiconference on Computer Science and Information Technology*, Wisla, Poland, 20-22 Oct. 2008, pp. 915–920.
7. **K. A. Papadopoulos**, C. A. Papagianni, C. A. Papas, D. I. Kaklamani, I. S. Venieris, "Beam Array Optimization for Smart Antenna Systems Using Stochastic Algorithms", in *Proc. of the 3rd European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP '09)*, Berlin, Germany, 23-27 March 2009, pp. 1345–1349.

8.2 Χρήση Κατανεμημένης Πλατφόρμας

Αυτή η ενότητα αναλύει τη διαδικασία ανάπτυξης που πρέπει να ακολουθηθεί, προκειμένου να καθοριστεί ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης για την παράλληλη πλατφόρμα βελτιστοποίησης PSO. Σε αυτό το πλαίσιο παρουσιάζονται λεπτομερειακά οι γενικές απαιτήσεις διασύνδεσης με την πλατφόρμα και η δομή των αρχείων διαμόρφωσης. Κατόπιν περιγράφεται η διαδικασία διαρρύθμισης και αρχικοποίησης της πλατφόρμας στους απομακρυσμένους κόμβους, και επιπλέον δίνονται οι λεπτομέρειες επίκλησής της από το κέλυφος της γραμμής εντολών.

Εν συντομία τα βήματα που απαιτούνται για τον καθορισμό, την ανάπτυξη και την εκτέλεση μιας εργασίας βελτιστοποίησης είναι:

1. Υλοποίηση μιας κλάσης προβλήματος (Problem) η οποία θα καθορίζει το διάστημα αναζήτησης και την συνάρτηση καταλληλότητας.
2. Συσχευασία των απαραίτητων κλάσεων σε αρχεία τύπου JAR.
3. Δημιουργία των αρχείων διαμόρφωσης που ελέγχουν την πλατφόρμα και τις ιδιότητες του αλγόριθμου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων.
4. Επίκληση της πλατφόρμας από τη γραμμή εντολών.

8.2.1 Εγκατάσταση της πλατφόρμας

Η πλατφόρμα μπορεί να εγκατασταθεί σε δικτυακούς υπολογιστές οι οποίοι δεν είναι απαραίτητο να ευρίσκονται στο ίδιο τοπικό δίκτυο. Σε περίπτωση που τοποθετηθούν σε διαφορετικά LANs είναι ενδεδειγμένο να έχουν λάβει στατικές διευθύνσεις IP και να μην ευρίσκονται πίσω από firewalls. Οι firewalls μπορούν να διαμορφωθούν κατάλληλα ώστε να επιτρέπουν την εισερχόμενη και εξερχόμενη κυκλοφορία στις τυποποιημένες πόρτες που χρησιμοποιούνται από τη πλατφόρμα JADE και το API του Java RMI (απομακρυσμένη επίκληση μεθόδου).

Οι ελάχιστες απαιτήσεις λογισμικού είναι:

1. *Κύριος κόμβος*: JRE (περιβάλλον εκτέλεσης της Java) ή JDK (περιβάλλον ανάπτυξης της Java, τυποποιημένη έκδοση) εάν η ανάπτυξη θα γίνει στον υπολογιστή - οικοδεσπότη. Η χρησιμοποιούμενη έκδοση πρέπει να είναι ίση ή ανώτερη της v1.4.

2. *Κόμβοι εργατών*: JRE (περιβάλλον εκτέλεσης της Java). Η χρησιμοποιούμενη έκδοση πρέπει να είναι τουλάχιστον η v1.4.

Σχετικά με την επιλογή του κυρίου και των κόμβων εργατών, είναι προτιμότερο να παρουσιάζουν όσο το δυνατόν πιο όμοια χαρακτηριστικά από την άποψη του υλικού, καθώς προς το παρόν δεν έχει υλοποιηθεί στη πλατφόρμα κάποιο σύστημα δυναμικού καταμερισμού του υπολογιστικού φόρτου.

Οι κόμβοι μπορούν να διαφοροποιούνται ως προς τα χρησιμοποιούμενα λειτουργικά συστήματα (Windows, Unix, κτλ.) εφόσον βέβαια έχουν εγκαταστημένη μια υλοποίηση ιδεατής μηχανής Java (JVM - Java Virtual Machine). Εξάιρεση σε αυτόν τον κανόνα αποτελεί η περίπτωση όπου απαιτείται η κλήση τοπικών (*native*) βιβλιοθηκών ή εκτελέσιμων για την εκτέλεση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Σε αυτή την περίπτωση ο τοπικός κώδικας πρέπει να είναι συμβατός με τις προδιαγραφές δυαδικής δόμησης των εκτελέσιμων (*binary executable format*) του κάθε κόμβου.

Η πλατφόρμα αποτελείται από τα ακόλουθα τρία πακέτα σε διαμόρφωση JAR:

1. *ParallelOptimization.jar*: Η παράλληλη πλατφόρμα βελτιστοποίησης PSO σε μορφή πακέτου JAR.
2. *jade-full-3.3.jar*: Αρχείο JAR που ομαδοποιεί όλα τα αρχεία .jar της πλατφόρμας JADE και τα οποία μπορεί να προμηθευτεί ο χρήστης από τον ανάλογο δικτυακό τόπο (<http://jade.tilab.com/>).
3. *xstream-1.1.3.jar*: Το αρχείο JAR της βιβλιοθήκης XStream η οποία μπορεί επίσης να ληφθεί από την ανάλογη ιστοσελίδα (<http://xstream.codehaus.org/>).

Η διαδικασία εγκατάστασης των εν λόγω πακέτων είναι πολύ απλή. Ο κύριος κόμβος απαιτεί την ύπαρξη όλων των προαναφερόμενων αρχείων, ενώ η λειτουργία των κόμβων – εργατών προϋποθέτει την εγκατάσταση μόνο του αρχείου JAR της πλατφόρμας

Τα απαιτούμενα βήματα εγκατάστασης στον κυρίως κόμβο είναι:

1. Δημιουργία ενός κυρίως φακέλου, ο οποίος θα αναφέρεται ακολούθως ως ο *φάκελος εργασίας*.
2. Αντιγραφή όλων των αρχείων JAR στον εν λόγω φάκελο.
3. *Προαιρετικά* δηλώνονται τα αρχεία JAR (συνοδευόμενα από τη πλήρη διαδρομή τους στο σύστημα αρχείων) στην μεταβλητή περιβάλλοντος CLASSPATH.

Τα απαιτούμενα βήματα εγκατάστασης στους κόμβους - εργάτες είναι:

1. Δημιουργία ενός φακέλου βιβλιοθηκών.
2. Αντιγραφή τους αρχείου jade-full-3.3.jar στον εν λόγω φάκελο.
3. *Προαιρετικά* δηλώνεται το αρχείο jade-full-3.3.jar στην μεταβλητή περιβάλλοντος CLASSPATH.

Η δήλωση των αρχείων JAR στη μεταβλητή περιβάλλοντος CLASSPATH δεν είναι απαραίτητη για τη λειτουργία της πλατφόρμας αλλά απλοποιεί την επίκλησή της από τη γραμμή εντολών.

8.2.2 Ορισμός της κλάσης προβλήματος

Ο καθορισμός ενός προβλήματος βελτιστοποίησης απαιτεί τον ορισμό μιας τυποποιημένης κλάσης Java, η οποία στο εξής θα αναφέρεται ως κλάση *CustomProblem*. Οι υπολογισμοί που απαιτούνται από τον ορισμό του προβλήματος μπορούν να υλοποιηθούν εξολοκλήρου στην Java είτε η κλάση *CustomProblem* μπορεί να χρησιμοποιήσει τυποποιημένες μεθόδους του JNI για τη διασύνδεση με εξωτερικά εκτελέσιμα αρχεία ή βιβλιοθήκες.

Από την πλευρά του προγραμματιστή, είναι χρήσιμο να παρουσιαστεί η δομή του πακέτου *problem* (το οποίο παρέχεται στη διανομή της πλατφόρμας) και εμπεριέχει όλα τα αρχεία που είναι απαραίτητα για τον ορισμό ενός ειδικού προβλήματος βελτιστοποίησης:

1. Η διεπαφή *ProblemInterface* ορίζει ένα σύνολο μεθόδων οι οποίες δίνουν τιμές στα αποδεκτά όρια των τιμών των παραμέτρων βελτιστοποίησης καθώς και τη μορφή της υπογραφής της μεθόδου καταλληλότητας. Ο πυρήνας PSO χρησιμοποιεί τα ειδικά για το οριζόμενο πρόβλημα χαρακτηριστικά (όρια παραμέτρων και ορισμό FF) κατά τη διάρκεια της διαδικασίας βελτιστοποίησης.
2. Η αφηρημένη κλάση *Problem* υλοποιεί το *ProblemInterface* και παρέχει τυποποιημένους ορισμούς για τις συναρτήσεις που θέτουν και επιστρέφουν τα όρια βελτιστοποίησης. Η μέθοδος δηλώνεται ως *abstract* καθώς δεν παρέχει μια στάνταρ υλοποίηση της FF.
3. Η αφηρημένη κλάση *ExecProblem* επεκτείνει την κλάση *Problem*, παρέχοντας μεθόδους για διασύνδεση με εξωτερικά εκτελέσιμα αρχεία. Οι παράμετροι βελτιστοποίησης του προβλήματος κωδικοποιούνται ως συμβολοσειρές και παρέχονται στα εξωτερικά προβλήματα ως παράμετροι της γραμμής εντολών.

Οι αναφερόμενες κλάσεις αποτελούν τη βάση για τον ορισμό μιας κλάσης *CustomProblem* η οποία θα πρέπει να παρέχει ένα καλά ορισμένο πρόβλημα (αναφορικά με τα όρια βελτιστοποίησης και την FF) η οποία θα είναι σύμφωνη με τις προδιαγραφές της διεπαφής *ProblemInterface*.

```
ProblemInterface.java
Package problem;

public interface ProblemInterface {

    public int getDim();

    public double[] getMins();

    public double[] getMaxs();

    public void setConstraints(double[] mins, double[] maxs);

    // abstract fitness method to be implemented in custom problem class

    public abstract double fitness(double x[]);

}
```

Κώδικας 1. Ορισμός της διεπαφής *Problem*

Ο ορισμός ενός ειδικού προβλήματος μπορεί να πραγματοποιηθεί σύμφωνα με τα παρακάτω βήματα:

1. Ορισμός μιας κλάσης *CustomProblem* η οποία επεκτείνει την αφηρημένη κλάση *Problem*. Επιπλέον πρέπει να οριστεί ένα μοναδικό στατικό πεδίο *serialVersionUID*, το οποίο θα επιτρέπει τη χρήση των μηχανισμών μεταφοράς που υλοποιεί η πλατφόρμα JADE.
2. Ορισμός των ορίων των παραμέτρων βελτιστοποίησης, στην μέθοδο-κατασκευαστή της κλάσης *CustomProblem()*, χρησιμοποιώντας τις μεθόδους που ορίζονται από τη διεπαφή *ProblemInterface*. Ο αριθμός και τα όρια των παραμέτρων βελτιστοποίησης ορίζονται απευθείας με την κλήση της μεθόδου *setConstraints()*, σύμφωνα με τους πίνακες *mins[]* και *maxs[]*.
3. Υλοποίηση της συνάρτησης καταλληλότητας στο σώμα της μεθόδου *fitness()*.
4. Προαιρετικά διασύνδεση με εξωτερικές βιβλιοθήκες ή εκτελέσιμα διαμέσου του JNI API. Μπορούν να επεκταθούν τυποποιημένες κλάσεις ενθυλάκωσης (standard wrapper classes) όπως η αφηρημένη κλάση *ExecProblem*.

Κατά την αρχικοποίηση των ορίων βελτιστοποίησης, πρέπει να ληφθεί ειδική μέριμνα ώστε να είναι συμβατά με τα χαρακτηριστικά του προβλήματος και τον κώδικα υπολογισμού της FF. Η κωδικοποίηση των παραμέτρων πρέπει να υλοποιηθεί προγραμματιστικά (π.χ. εύρος, σειρά κτλ.)

Το πιο κρίσιμο μέρος κατά τον ορισμό του προβλήματος είναι η κατασκευή μιας συνάρτησης καταλληλότητας η οποία θα εναρμονίζεται και θα περιγράφει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο του στόχους της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Η πλατφόρμα εξ' ορισμού προσπαθεί να μεγιστοποιήσει τις τιμές καταλληλότητας που επιστρέφονται από τη μέθοδο *fitness()*, και θα τερματίσει όταν ευρεθεί μια τιμή καταλληλότητας ίση με μηδέν. Πρακτικά απαιτείται ο μετασχηματισμός των τιμών καταλληλότητας σε κατάλληλες αρνητικές τιμές οι οποίες θα προσεγγίζουν το μηδέν καθώς η μέθοδος συγκλίνει στην ικανοποίηση των στόχων βελτιστοποίησης.

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζεται μια πρότυπη υλοποίηση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης, που ελαχιστοποιεί τη γνωστή συνάρτηση δοκιμής *Rosenbrock*:

RosenbrockProblem.class

```
public class RosenbrockProblem extends Problem implements Serializable {  
    private static final long serialVersionUID = 7807399315134673748L;  
    public RosenbrockProblem() {  
        super();  
        // setting dimensionality and values of constraints  
        int dim = 10;  
        double[] mins = new double[dim];  
        double[] maxs = new double[dim];  
        for (int d=0; d<dim; d++) { mins[d] = -2048.0; maxs[d] = 2047.0; }  
        setConstraints(mins, maxs);  
    }  
    public double fitness(double[] x) {  
        double sum = 0.0;  
        for (int i=0; i<x.length-1; i++)  
            sum += 100.0*(x[i+1]-x[i])*(x[i+1]-x[i])+(x[i]-1)*(x[i]-1);  
        // returning fitness values bounded in  $(-\infty, 0]$   
        return -sum;  
    }  
}
```

Κώδικας 2. Ορισμός της συνάρτησης δοκιμής Rosenbrock ως πρόβλημα βελτιστοποίησης

Περισσότερες πληροφορίες για τη διασύνδεση με εξωτερικές εφαρμογές παρέχονται στην ενότητα 5.6.

8.2.3 Ομαδοποίηση των κλάσεων του προβλήματος

Οι κλάσεις του προβλήματος θα πρέπει να ομαδοποιούνται σε ένα JAR αρχείο, προκειμένου να είναι δυνατή η μεταφορά τους στους απομακρυσμένους κόμβους. Τυποποιημένα αρχεία JAR μπορούν να παραχθούν με τη χρήση της εντολής jar του Java SDK.

Το jar αρχείο θα πρέπει κατά ελάχιστο να περιέχει:

1. Τις κλάσεις που ορίζουν το πρόβλημα βελτιστοποίησης.
2. Επιπλέον κλάσεις που θα πρέπει να συμπεριληφθούν, όπως βοηθητικές κλάσεις και βιβλιοθήκες.

3. Η ανάπτυξη στους απομακρυσμένους κόμβους μπορεί να συμπεριλαμβάνει διαμεριζόμενες βιβλιοθήκες (.dll, .so) ή εκτελέσιμα αρχεία (.exe, κτλ.)

Η ανάπτυξη στους απομακρυσμένους κόμβους πραγματοποιείται διαφανώς από την πλατφόρμα χρησιμοποιώντας τις *ιδιότητες κινητικότητας* του πρακτόρων Jade. Ένα *προσωπικό αντίγραφο* μεταφέρεται σε κάθε κόμβο – εργάτη το οποίο μοιράζεται από όλους τους πράκτορες που ευρίσκονται στον απομακρυσμένο ενθυλακωτή (container). Το αρχείο JAR διαβάζεται από το *φάκελο εργασίας του κόμβου – αφέντη* και μετέπειτα σειροποιείται και μεταδίδεται στο *φάκελο εργασίας του κάθε κόμβου εργάτη*.

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι απαιτούμενες υπολογιστικές βιβλιοθήκες μπορούν να έχουν αναπτυχθεί εκ των προτέρων στους απομακρυσμένους κόμβους (εφόσον έχουν δηλωθεί στις μεταβλητές περιβάλλοντος PATH, CLASSPATH). Αυτό το σενάριο παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι απαιτείται μικρότερος συγκριτικά χρόνος για την αρχικοποίηση της πλατφόρμας.

8.2.4 Παραμετροποίηση

Οι πληροφορίες διαμόρφωσης που απαιτούνται για την αρχικοποίηση και την ανάπτυξη της πλατφόρμας, περιγράφονται σε τυποποιημένα Java property και XML αρχεία τα οποία ευρίσκονται στο *φάκελο εργασίας* του κυρίως κόμβου:

1. Το αρχείο ιδιοτήτων “properties.txt” περιέχει τα βασικά στοιχεία διαμόρφωσης της πλατφόρμας και παρέχει αναφορά για το αρχείο διαμόρφωσης του σμήνους.
2. Οι παράμετροι του σμήνους περιγράφονται σε κατάλληλα δομημένο XML αρχείο διαμόρφωσης.

Κατά τη διάρκεια της αρχικοποίησης της πλατφόρμας βελτιστοποίησης διαβάζεται το αρχείο “properties.txt” από το *φάκελο εργασίας*. Αυτό το αρχείο *δεν πρέπει να μετανομαστεί*, καθότι τότε η πλατφόρμα θα αδυνατεί να το εντοπίσει. Στο αρχείο ιδιοτήτων αποθηκεύεται ένας αριθμός από πεδία τα οποία επιτρέπουν τον προσδιορισμό του αρχείου JAR του προβλήματος, το όνομα της κλάσης του προβλήματος, το συμπληρωματικό αρχείο με τις παραμέτρους του σμήνους καθώς και τον αριθμό των μέγιστων επιτρεπτών κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης γενεών. Ο Πίνακας 1 παρουσιάζει συνοπτικά τα αναφερόμενα πεδία:

Ορισμός Προβλήματος	Τιμές	Περιγραφή
<i>problem</i>	ArrayProblem	Όνομα της κλάσης προβλήματος
<i>parameters</i>	parametersArray.xml	Αρχείο παραμέτρων του σμήνους
<i>jar</i>	ArrayProblem.jar	Όνομα και διαδρομή του αρχείου JAR

Πίνακας 1. Λεπτομέρειες για τα πεδία ιδιοτήτων του αρχείου ιδιοτήτων

Η ανάπτυξη μιας επέκτασης της πλατφόρμας που θα επέτρεπε την αυτόματη κωδικοποίηση και αποκωδικοποίηση των παραμέτρων βελτιστοποίησης θα απαιτούσε τον ορισμό ενός επιπλέον πεδίου το οποίο θα έδειχνε σε ένα επιπλέον αρχείο διαμόρφωσης (σχετικό πλέον με το πρόβλημα). Ακολούθως παρέχεται ένα παράδειγμα αρχείου ιδιοτήτων της πλατφόρμας:

properties.txt
<pre>#Tue Dec 20 11:58:45 EET 2005 problem = problem.ArrayProblem parameters = parametersArray.xml jar = ArrayProblem.jar generations = 300</pre>

Κώδικας 3. Η δομή του αρχείου ιδιοτήτων “properties.txt”

Το αρχείο ιδιοτήτων περιέχει μια αναφορά στο XML αρχείο διαμόρφωσης του σμήνους, το οποίο παρέχει τις παραμέτρους βελτιστοποίησης. Η διαμόρφωση του αρχείου σε XML επιλέχθηκε για δύο κυρίως λόγους:

- Παρέχει δόμηση και επιτρέπει τον ορισμό φωλιασμένων πεδίων, χαρακτηριστικό που δεν υποστηρίζεται από τα τυποποιημένα αρχεία ιδιοτήτων Java (επίπεδα δομημένα).
- Η χρήση της βιβλιοθήκης XStream επιτρέπει την αυτόματη δέσμευση και κατασκευή του αντικειμένου *SwarmParameters* το οποίο χρησιμοποιείται για την αρχικοποίηση του πυρήνα βελτιστοποίησης. Στις μεταβλητές-μέλη της κλάσεως *SwarmParameters* δίνονται τιμές οι οποίες βασίζονται στα στοιχεία του XML αρχείου διαμόρφωσης.

Οι παράμετροι της PSO που αποθηκεύονται στο αρχείο διαμόρφωσης είναι:

1. Η παραλλαγή PSO που χρησιμοποιείται κατά τη βελτιστοποίηση.
2. Το μέγεθος του πληθυσμού του σμήνους
3. Τις παραμέτρους *κοινωνικότητας* και *ατομικότητας*.
4. Επιπλέον παράμετροι, ειδικών για τη χρησιμοποιούμενη παραλλαγή, όπως ο παράγοντας εξερεύνησης K για την CC, τα βάρη αδράνειας $W1$ & $W2$ για τις IW και FDR, το μέγεθος της κυκλικής γειτονιάς η οποία χρησιμοποιείται και την παράμετρο περιορισμού της ταχύτητας $Vmax$.

Ο Πίνακας 2 παρέχει μια συνοπτική αναφορά των αποδεκτών XML πεδίων:

Παράμετροι	Τιμές	Περιγραφή
<i>type</i>		Τύπος της παραλλαγής PSO
	0	Απλή PSO
	1	Βάρος αδράνειας (IW)
	2	Παράγοντα περιορισμού (CC)
	3	Λόγου καταλληλότητας – απόστασης (FDR)
<i>pop_size</i>	Συνήθως 3 ή 4 x διαστατικότητα του προβλήματος	Μέγεθος του πληθυσμού του σμήνους
<i>phi1</i>	Στο διάστημα [0..1]	Ατομικότητα
<i>phi2</i>	Στο διάστημα [0..1]	Κοινωνικότητα
<i>w2</i>	0.9 για IW / 0.7 για FDR	Αρχική τιμή αδράνειας – IW, FDR
<i>w1</i>	0.4 για IW και FDR	Τελική τιμή αδράνειας – IW, FDR
<i>k</i>	Στο διάστημα [0..1]	Παράγοντας εξερεύνησης, συνήθως = 1 για ολοκληρωμένη εξερεύνηση του χώρου λύσεων-CC
<i>hood_size</i>	$hood_size \leq pop_size$	Μέγεθος γειτονιάς, πρέπει να είναι μικρότερη (κυκλική γειτονιά) ή ίση με το μέγεθος του πληθυσμού (ολική γειτονιά)
<i>v_max</i>	Συνήθως 0.5 * $\max\{\text{μέγεθος διαστάσεων του χώρου έρευνας}\}$	Περιορισμός στην ταχύτητα – μέγιστη τιμή ταχύτητας – μπορεί να απενεργοποιηθεί χρησιμοποιώντας μια μεγάλη τιμή

Πίνακας 2. Περιγραφή των XML πεδίων του αρχείου παραμέτρων

Ο παρατηρητικός αναγνώστης θα μπορούσε να σχολιάσει ότι δεν υπάρχει κάποιο πεδίο για τον ορισμό της παραμέτρου *phi3*, η οποία είναι απαραίτητη κατά την εκτέλεση της παραλλαγής FDR. Προς το παρόν δίνεται αυτόματα η τιμή 2.0, καθότι αυτή η τιμή παρουσιάζεται στην βιβλιογραφία να παρέχει τα βέλτιστα αποτελέσματα. Για λόγους αναφοράς, παρουσιάζεται η δομή ενός XML αρχείου διαμόρφωσης (parametersArray.xml):

parametersArray.xml

```
<parameters>
  <type>1</type>
  <pop__size>64</pop__size>
  <phi1>2.0</phi1>
  <phi2>2.0</phi2>
  <params>
    <entry>
      <string>w2</string>
      <double>0.9</double>
    </entry>
    <entry>
      <string>w1</string>
      <double>0.4</double>
    </entry>
    <entry>
      <string>k</string>
      <double>1.0</double>
    </entry>
    <entry>
      <string>hood_size</string>
      <int>64</int>
    </entry>
    <entry>
      <string>v_max</string>
      <double>0.5</double>
    </entry>
  </params>
</parameters>
```

Κώδικας 4. Η δομή ενός XML αρχείου διαμόρφωσης

8.2.5 Επίκληση της πλατφόρμας από τη γραμμή εντολών

Η αρχικοποίηση της πλατφόρμας μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη εκτέλεση των ακόλουθων απλών ενεργειών:

1. Αρχικοποίηση του κύριου ενθυλακωτή (container) Jade καθώς και του *CoordinatorAgent* στον κύριο κόμβο.
2. Η απομακρυσμένοι ενθυλακωτές πρέπει να αρχικοποιηθούν χειροκίνητα σε κάθε κόμβο εργάτη.
3. Μετά την καταχώρηση των απομακρυσμένων ενθυλακωτών στον κυρίως ο χρήστης θα πρέπει να ειδοποιήσει το πρόγραμμα προκειμένου να αρχίσει η διαδικασία βελτιστοποίησης

Οι εντολές για τις αντίστοιχες ενέργειες εισάγονται στη γραμμή εντολών (command line), όπως αυτές περιγράφονται στον πίνακα 3:

1) Αρχικοποίηση του κυρίως πράκτορα
<pre>cmd> java -server -classpath ParallelOptimization.jar;xstream-1.1.3.jar;jade-full-3.3.jar jade.Boot platformName:distr.CoordinatorAgent()</pre>
Προαιρ.) Αρχικοποίηση του κυρίως πράκτορα χρησιμοποιώντας το GUI του Jade
<pre>cmd> java -server -classpath ParallelOptimization.jar;xstream-1.1.3.jar;jade-full-3.3.jar jade.Boot -gui</pre> <p>Αρχικοποίηση του Coordinator agent εισαγάγοντας το όνομα της κλάσης του: <code>distr.CoordinatorAgent()</code></p>
2) Αρχικοποίηση των ενθυλακωτών
<pre>cmd> java -classpath jade-full-3.3.jar jade.Boot -container -host MasterNode</pre> <p>Αρχικοποίηση των απομακρυσμένων ενθυλακωτών στους κατανεμημένους κόμβους. Οι νέοι ενθυλακωτές εγγράφονται στην πλατφόρμα πριν την έναρξη της διαδικασίας βελτιστοποίησης.</p>

Πίνακας 3. Επίκληση της πλατφόρμας από τη γραμμή εντολών

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι τυποποιημένες εντολές του Jade χρησιμοποιούνται για την επίκληση της πλατφόρμας. Ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στα τεχνικά εγχειρίδια του Jade για περισσότερες πληροφορίες. Εντούτοις είναι χρήσιμο να τονιστούν τα ακόλουθα:

1. Η αρχικοποίηση του κυρίως πράκτορα (εντολή 1) πραγματοποιείται μετά την ανάγνωση του αρχείου διαμόρφωσης και την αρχικοποίηση των Particle Agents. Όλες οι κλάσεις η οποίες χρειάζονται για την αρχικοποίηση της πλατφόρμας πρέπει να μπορούν να ληφθούν από τα προσδιορισμένα αρχεία JAR (δεν απαιτείται ο ορισμός των διαδρομών του συστήματος αρχείων εάν αυτές έχουν οριστεί στη μεταβλητή περιβάλλοντος CLASSPATH).

2. Το *platformName* θα πρέπει να έχει οριστεί ως μια μοναδική συμβολοσειρά (π.χ. "OptPlatform") η οποία θα διαφοροποιεί την τρέχουσα πλατφόρμα Jade από άλλες αρχικοποιημένες πλατφόρμες οι οποίες μπορεί να είναι ενεργές στο δίκτυο.
3. Ο κυρίως ενθυλακωτής και ο πράκτορας – αφέντης μπορούν εναλλακτικά να αρχικοποιηθούν διαμέσου του γραφικού περιβάλλοντος του JADE (εντολή *1προαιρ.*). Οι παράμετροι που θα οριστούν στους διαλόγους κατά την αρχικοποίηση του πράκτορα είναι ανάλογες με τις παραμέτρους που ορίζονται στη γραμμή εντολών (εντολή *1*).
4. Οι απομακρυσμένοι ενθυλακωτές μπορούν να αρχικοποιηθούν εφόσον θα έχει αρχικοποιηθεί ο κυρίως ενθυλακωτής (εντολή *2*). Ο χρήστης ειδοποιείται όταν ένας ενθυλακωτής έχει καταγραφεί στην πλατφόρμα.
5. Η παράμετρος *host* πρέπει να έχει το όνομα ή τη διεύθυνση IP του κυρίως κόμβου.
6. Όταν δοθεί η εντολή για συνέχεια από το χρήστη, εκτελείται η διαδικασία εκτέλεσης έως ότου συμπληρωθεί ο μέγιστος αριθμός επιτρεπτών γενεών ή ανακαλυφθεί μια λύση που επέστρεψε μηδενική τιμή. Η κατάσταση της διαδικασίας βελτιστοποίησης αναφέρεται στην κονσόλα εκτέλεσης του κυρίως κόμβου.
7. Ο αριθμός των κόμβων – εργατών που συμμετέχουν στην πλατφόρμα δεν μπορεί να διαφοροποιηθεί κατά την εκτέλεση της διαδικασίας βελτιστοποίησης.
8. Δεν παρέχεται μηχανισμός αυτόματου διαμοιρασμού του υπολογιστικού φόρτου μεταξύ των υπολογιστικών κόμβων. Προτείνεται οι υπολογιστικοί κόμβοι να παρέχουν συγκρίσιμα χαρακτηριστικά σε υλικό.

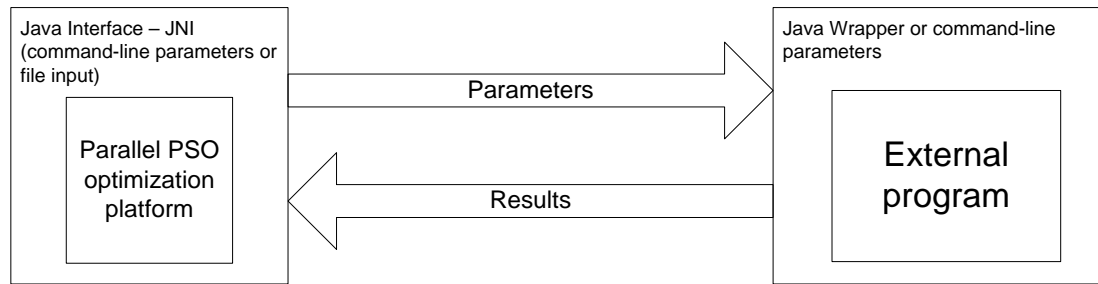
Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία βελτιστοποίησης ο χρήστης ενημερώνεται με τα τελικά αποτελέσματα. Δυστυχώς προς το παρόν δεν υποστηρίζεται από την πλατφόρμα κάποιος μηχανισμός καταγραφής των στατιστικών εκτέλεσης των κύκλων βελτιστοποίησης, αλλά προβλέπεται να υλοποιηθεί σε μελλοντικές εκδόσεις της πλατφόρμας.

8.2.6 Ανάπτυξη διασυνδέσεων με εξωτερικές εφαρμογές

Αυτή η ενότητα περιγράφει συνοπτικά τη *δυνατότητες διασύνδεσης* της παράλληλης πλατφόρμας βελτιστοποίησης καθώς και τις δυνατότητες για ανάπτυξη *προγραμματιστικών επεκτάσεων*. Καταρχήν παρουσιάζεται ένα γενικευμένο προγραμματιστικό μοντέλο και στη συνέχεια αναπτύσσονται πιθανά σενάρια διασύνδεσης καθώς και προτάσεις για την υλοποίησή τους.

8.2.6.1 Γενικευμένη αρχιτεκτονική

Ένα κρίσιμο κομμάτι της διαδικασίας ολοκλήρωσης της παράλληλης PSO πλατφόρμας με ένα μια εξωτερική βιβλιοθήκη ή πρόγραμμα είναι ο ορισμός *κατάλληλων διεπαφών επικοινωνίας*. Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται μια προεπισκόπηση της απαιτούμενης διαδικασίας ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ του πυρήνα βελτιστοποίησης και ενός εξωτερικού προγράμματος:



Εικόνα 3. Διασύνδεση της παράλληλης πλατφόρμας βελτιστοποίησης PSO με ένα εξωτερικό πρόγραμμα

Από την οπτική γωνία της εξωτερικής εφαρμογής, μπορούν να οριστούν άμεσα κάποια από τα δεδομένα εισόδου και εξόδου:

1. *Είσοδος:* Οι απαραίτητες παράμετροι για τον υπολογισμό των αποτελεσμάτων
2. *Έξοδος:* Τα αποτελέσματα των υπολογισμών που πραγματοποιούνται από την εξωτερική εφαρμογή και τα οποία θα λάβουν τιμές καταλληλότητας από την μέθοδο της FF.

Η παρουσιαζόμενη αρχιτεκτονική παρουσιάζει δύο κύρια πλεονεκτήματα: η ισχνή σύζευξη των δύο λογισμικών επιτρέπει να ακολουθούν ανεξάρτητους κύκλους ανάπτυξης και επικαιροποίησής τους, και επιπλέον έχει το πλεονέκτημα της εξ' ορισμού απλότητας σε επίπεδο σύλληψης και ανάπτυξης.

Σε αυτή την περίπτωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα σχετικά απλός μηχανισμός για την ανταλλαγή πληροφοριών. Η είσοδος/έξοδος μεταξύ του εξωτερικού εκτελέσιμου / βιβλιοθήκης και του λογισμικού παράλληλης βελτιστοποίησης μπορεί να υλοποιηθεί με τη χρήση τυποποιημένων ρουτίνων όπως το Java Native Interface (JNI).

8.2.6.2 Σενάρια υλοποίησης της διασύνδεσης

Αυτή η ενότητα δεν αποσκοπεί στην εξαντλητική παρουσίαση όλων των δυνατών σενάριων διασύνδεσης, τα οποία σε μεγάλο βαθμό εξαρτώνται από την αρχιτεκτονική του εξωτερικού προγράμματος, αλλά επιχειρεί να τα κατηγοριοποιήσει και να προτείνει κάποιες υποψήφιες λύσεις για τη υλοποίησή τους.

Τα σενάρια διασύνδεσης πρέπει να κατηγοριοποιηθούν βάσει του τύπου του εξωτερικού προγράμματος ή βιβλιοθήκης που χρησιμοποιούνται για τους απαραίτητους υπολογισμούς:

1. Προγράμματα που επιτρέπουν την εισαγωγή των παραμέτρων από τη γραμμή εντολών.
2. Προγράμματα τα οποία παρέχουν μηχανισμούς για ανάπτυξη scripts ή υλοποιήσεις τυποποιημένων διεπαφών διαλειτουργικότητας (π.χ. Python scripting, ActiveX / COM automation κτλ.)
3. Τοπικές (native) βιβλιοθήκες (.dll, .so κτλ.) οι οποίες παρέχουν το προγραμματιστικό τους μοντέλο (API).

Για την 1^η περίπτωση έχει ήδη υλοποιηθεί στην βιβλιοθήκη ο μηχανισμός επικοινωνίας και παρουσιάζεται στην ακόλουθη ενότητα (χρησιμοποιώντας το JNI API).

Για την 2^η περίπτωση απαιτείται η ανάπτυξη ενός εξειδικευμένου ενδιάμεσου προγράμματος το οποίο θα επιτρέπει την επικοινωνία με την scripting / automation μηχανή της εξωτερικής εφαρμογής. Ευτυχώς υπάρχουν πολλές βιβλιοθήκες ανοικτού κώδικα οι οποίες υλοποιούν την απαιτούμενη λειτουργικότητα γεφύρωσης. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί η χρήση του Java Plug-in API το οποίο επιτρέπει τον μετασχηματισμό τυποποιημένων αντικειμένων JavaBeans σε αντικείμενα ActiveX (χρησιμοποιώντας τον κώδικα γεφύρωσης του ActiveX).

Η 3^η περίπτωση παρουσιάζει μεγαλύτερο βαθμό πολυπλοκότητας σε σχέση με την 1^η περίπτωση. Το προγραμματιστικό μοντέλο διασύνδεσης που χρησιμοποιείται και στις δυο περιπτώσεις είναι το JNI, αλλά η 3^η περίπτωση απαιτεί την ανάπτυξη ειδικών αντιστοιχίσεων (των υπογραφών των χρησιμοποιούμενων συναρτήσεων) μεταξύ του πυρήνα βελτιστοποίησης σε Java και της εξωτερικής βιβλιοθήκης.

Σε όλες τις περιπτώσεις πρέπει να υλοποιηθούν Java κλάσεις ενθυλάκωσης (wrapper classes) οι οποίες και θα παρέχουν την απαιτούμενη αντιστοίχιση. Οι μέθοδοι που θα οριστούν στις εν λόγω κλάσεις θα μπορούν να καλεστούν από τη μέθοδο FF της κλάσεως *CustomProblem*.

Μια πρότυπη υλοποίηση μιας Java κλάσεως ενθυλάκωσης που επιτρέπει την επικοινωνία με εξωτερική εφαρμογή διαμέσου της γραμμής εντολών εμπεριέχεται στην παράλληλη πλατφόρμα βελτιστοποίησης (*ProblemExec*) και παρουσιάζεται στην συνέχεια:


```

package problem;

import java.io.BufferedReader;
import java.io.IOException;
import java.io.InputStreamReader;
import java.io.PrintWriter;

public abstract class ExecProblem extends Problem {
    private static int BufferSize = 1024;
    private String cmd;

    public ExecProblem() { super(); }

    public void setCmd(String cmd) { this.cmd = cmd; }

    public String getCmd() { return this.cmd; }

    protected String compute(String input) throws IOException, InterruptedException {
        // creating process

        Process p = Runtime.getRuntime().exec(cmd);

        BufferedReader fin = new BufferedReader(new InputStreamReader(p.getInputStream()));

        PrintWriter fout = new PrintWriter(p.getOutputStream());

        // printing output params

        fout.write(input);

        fout.flush();

        fout.close();

        p.waitFor();

        // getting results

        char[] buf = new char[BufferSize];

        fin.read(buf);

        fin.close();

        String cmd_out = new String(buf);

        return cmd_out;
    }
}

```

Κώδικας 5. Ορισμός της κλάσης ProblemExec