



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Βελτιστοποίηση μικροχυματικής διάταξης
υπερθερμίας με χρήση γενετικών αλγορίθμων
και κινητών αντιπροσώπων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Φραγκίσκου Π. Ρούσσου

Επιβλέπων

Δήμητρα Κακλαμάνη
Επ. Καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2003



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Βελτιστοποίηση μικροκυματικής διάταξης
υπερθερμίας με χρήση γενετικών αλγορίθμων
και κινητών αντιπροσώπων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Φραγκίσκου Π. Ρούσσου

Επιβλέπων

Δήμητρα Κακλαμάνη
Επ. Καθηγήτρια ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 16^η Ιουλίου 2003

Δήμητρα Κακλαμάνη
Επ. Καθηγήτρια ΕΜΠ

Νικόλαος Ουζούνογλου
Καθηγητής ΕΜΠ

Ιάκωβος Βενιέρης
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2003

Φραγκίσκος Π. Ρούσσος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός
και Μηχανικός Υπολογιστών ΕΜΠ

© 2003 - All rights reserved

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	19
2	Μικροκυματική διάταξη υπερθερμίας	21
2.1	Εισαγωγή	21
2.2	Ιδιότητες του μονομένου διπόλου	23
2.3	Υπολογισμός του ηλεκτρικού πεδίου	27
2.4	Μοντελοποίηση της διάταξης	30
3	Γενετικοί Αλγόριθμοι	31
3.1	Εισαγωγή	31
3.2	Τοπική και ολική βελτιστοποίηση	32
3.3	Ορολογία των Γενετικών Αλγορίθμων	33
3.4	Λειτουργία των Γενετικών Αλγορίθμων	34
3.4.1	Ο Απλός Γενετικός Αλγόριθμος	35
3.4.2	Γονίδια, Χρωμοσώματα και κωδικοποίηση	36
3.4.3	Μέθοδοι επιλογής	37
3.4.4	Τελεστές των Γενετικών Αλγορίθμων	38
3.4.5	Συναρτήσεις καταλληλότητας	39
3.4.6	Βελτιώσεις στον Απλό Γενετικό Αλγόριθμο	40

3.5 Θεωρία και προχωρημένες τεχνικές	41
4 Κινητοί Αντιπρόσωποι	43
4.1 Εισαγωγή	43
4.2 Κινητοί Αντιπρόσωποι	43
4.3 Πλατφόρμα Grasshopper	44
4.3.1 Κατανεμημένο περιβάλλον αντιπροσώπων	45
4.3.2 Επικοινωνιακές ιδέες	48
4.3.3 Λόγοι που διαλέξαμε το Grasshopper	49
5 Ανάλυση και Λειτουργία Πλατφόρμας	51
5.1 Ανάλυση	51
5.1.1 Περιπτώσεις χρήσης	51
5.1.2 Αλληλεπίδραση οντοτήτων	52
5.1.3 Λεπτομέρειες συστήματος	52
5.2 Λειτουργία	56
6 Αρχιτεκτονική και υλοποίηση	63
6.1 Μιγαδικοί Αριθμοί	63
6.2 Γενετικός Αλγόριθμος	64
6.3 Γραφική διαπροσωπεία (GUI)	66
6.4 Πλατφόρμα Γενετικών Αλγορίθμων	66
6.5 Πρόβλημα υπερθερμίας	67
6.6 Πλατφόρμα Κινητών Αντιπροσώπων	67
7 Αριθμητικά αποτελέσματα	75

8 Επίλογος-Προτάσεις

81

A Ολοκλήρωση Gauss

85

Κατάλογος σχημάτων

2.1	Απλό μονομένο ασυμμετρικό δίπολο.	22
2.2	Παράδειγμα διπόλου σε καθετήρα.	23
2.3	Διάταξη για ενδοϊστική μικροκυματική υπερθερμία.	24
3.1	Βασικές μέθοδοι βελτιστοποίησης.	32
3.2	Ο Απλός Γενετικός Αλγόριθμος.	35
3.3	Κωδικοποίηση παραμέτρων σε χρωμόσωμα.	36
3.4	Συνδυασμός ενός σημείου.	39
3.5	Τελεστής μετάλλαξης.	39
4.1	Ιεραρχική δομή συστατικών του Grasshopper	45
4.2	Υποστήριξη πολλαπλών πρωτοκόλλων	49
4.3	Επικοινωνία με διαφάνεια τοποθεσίας	50
5.1	Λειτουργία σχήματος Αφέντη-Εργάτη.	58
5.2	Αρχική οθόνη πλατφόρμας.	59
5.3	Επιλογή προβλήματος.	60
5.4	Παράμετροι Γενετικού Αλγορίθμου.	61
5.5	Παράμετροι Προβλήματος.	62

6.1	UML διάγραμμα της κλάσης Complex.	69
6.2	UML διάγραμμα των κλάσεων του Γενετικού Αλγορίθμου.	70
6.3	UML διάγραμμα των κλάσεων της γραφικής διαπροσωπείας.	71
6.4	UML διάγραμμα της κλάσης GenAlgPlatform.	72
6.5	UML διάγραμμα της κλάσης GenAlgProblemAgent.	73
7.1	Πρόοδος του Γενετικού Αλγορίθμου (μέγιστη καταλληλότητα κάθε γενιάς).	76
7.2	Γενιά 1.	77
7.3	Γενιά 10.	78
7.4	Γενιά 25.	78

Κατάλογος πινάκων

7.1	Παράμετροι Προβλήματος.	79
7.2	Παράμετροι Γενετικού Αλγορίθμου.	80
A.1	Τιμές των x_i και w_i για $n = 24$.	86

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε την περίοδο Ιανουάριος 2003–Ιούλιος 2003 με αρκετό χόπο και προσωπική εργασία. Το θέμα προτάθηκε μετά από συζήτηση με την κα. Δήμητρα Κακλαμάνη, Επίκουρη Καθηγήτριας του ΕΜΠ, την οποία και ευχαριστώ για τη συνεργασία και την ανοχή της.

Επίσης ευχαριστώ τους συνεργάτες και φίλους που βοήθησαν στην ανάπτυξη του θέματος, οι οποίοι είναι ο Πρόδρομος Ατλαμάζογλου, ο Δημήτρης Λυμπερόπουλος, ο Χρήστος Μπίνιαρης, ο Αντώνης Κωσταρίδης και ο Ιωάννης Φουκαράκης, χωρίς τη βοήθεια των οποίων η εργασία αυτή θα ήταν φτωχότερη.

Τέλος ευχαριστώ τους γονείς και τους φίλους μου για την κατανόησή τους τη συγκεκριμένη περίοδο και την υποστήριξη που μου προσφέρανε.

Φραγκίσκος Ρούσσος

Περίληψη

Ο σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η υιοθέτηση των Κινητών Αντιπροσώπων (Mobile Agents) για την ταχύτερη επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης με Γενετικούς Αλγορίθμους (Genetic Algorithms). Το πρόβλημα που θα επιλυθεί είναι αυτό της παραμετρικής εξομοίωσης διατάξεων που προκαλούν ενδοϊστική υπερθερμία.

Αρχικά ο σκοπός ήταν η ανάπτυξη ενός συγκεκριμένου γενετικού αλγορίθμου που θα λύνει το πρόβλημά μας, αλλά στη συνέχεια αναπτύξαμε μια πλατφόρμα που επιλύει οποιοδήποτε πρόβλημα βελτιστοποίησης της δοθεί με τη χρήση γενετικών αλγορίθμων. Σαν παράδειγμα εκτέλεσης χρησιμοποιήσαμε το πρόβλημα της υπερθερμίας. Επίσης ξεκινήσαμε την προσαρμογή της πλατφόρμας, ώστε να γίνει χρήση των Κινητών Αντιπροσώπων. Τέλος μελετήσαμε διάφορες αρχιτεκτονικές για την ανάπτυξη μίας πλατφόρμας εξυπνότερων 'Γενετικών Αντιπροσώπων', δηλαδή μία εξελιγμένη μορφή των Κινητών Αντιπροσώπων που θα επικεντρώνονται στην επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης.

Λέξεις κλειδιά: Γενετικοί Αλγόριθμοι, Κινητοί Αντιπρόσωποι, Υπερθερμία, Java, Grasshopper.

Abstract

The purpose of this diploma thesis is the adoption of the Mobile Agents paradigm for the faster solution of an optimization problem, solved with Genetic Algorithms. The problem solved is the parametric simulation of interstitial antenna arrays that are used in microwave hyperthermia.

In the beginning our goal was to implement a particular genetic algorithm. that will solve our problem, but during our work we developed a platform which solves any optimization problem with the use of genetic algorithms. As a case study we used the hyperthermia problem. Moreover we started the adaptation of the platform, so that it implements the mobile agent paradigm. Finally we researched several architectures for the development of a smart 'Genetic Agents' platform, i.e. an improved version of the mobile agents that serve as optimization problem solvers.

Key words: Genetic Algorithms, Mobile Agents, Hyperthermia, Java, Grasshopper.

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Ο σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η υιοθέτηση των Κινητών Αντιπροσώπων (Mobile Agents) για την ταχύτερη επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης με Γενετικούς Αλγορίθμους (Genetic Algorithms). Το πρόβλημα που θα επιλυθεί είναι αυτό της παραμετρικής εξομοίωσης διατάξεων που προκαλούν ενδοϊστική υπερθερμία και η βελτιστοποίηση πραγματοποιείται με τη χρήση γενετικών αλγορίθμων. Η χρήση Κινητών Αντιπροσώπων αποτελεί μία πολλά υποσχόμενη τεχνική για την αποδοτική επίλυση προβλημάτων (χυρίως αριθμητικών), τα οποία απαιτούν τεράστιες ποσότητες υπολογιστικών πόρων. Ο συνδυασμός Κινητών Αντιπροσώπων και Γενετικών Αλγορίθμων ερευνάται αρκετά στις μέρες μας και αρκετά μέρη της παρούσας εργασίας προσανατολίζονται στον τομέα των 'Γενετικών Αντιπροσώπων' ('Genetic Agents'), ως μελλοντική τεχνική επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης.

Υπερθερμία είναι η χρήση θερμότητας για την καταστροφή κακοήθων ιστών και χρησιμοποιείται ως επικουρική μέθοδος στη θεραπεία του καρκίνου. Μία πολύ αποδοτική μέθοδος για την αύξηση της θερμοκρασίας ενός όγκου είναι η μικροκυματική ακτινοβόληση. Υψηλές τοπικές θερμοκρασίες για ένα ικανό χρονικό διάστημα έχουν διαπιστωθεί ότι καταστρέφουν τα καρκινογενή κύτταρα. Επειδή η θερμότητα είναι καταστρεπτική και για τα ιγιή κύτταρα που περιβάλλουν τον όγκο, οι θερμοκρασίες γύρω από αυτόν πρέπει να κρατηθούν σε σημαντικά χαμηλότερα επίπεδα. Ένας τρόπος για να ελέγξουμε την απόθεση της μικροκυματικής ενέργειας στους ανθρώπινους ιστούς, ώστε να κρατήσουμε τα γειτονικά κύτταρα σε ασφαλείς θερμοκρασίες, είναι η χρήση ενδοϊστικών κεραιών, οι οποίες εισάγονται απ'ευθείας στον όγκο. Αυτές οι κεραίες είναι μονομένα δίπολα, που εμφυτεύονται στον υπό θεραπεία ιστό μέσω καθετήρων, οι οποίοι βρίσκονται ήδη τοποθετημένοι για την εφαρμογή βραχυθερα-

πείας.

Στην εργασία μας χρησιμοποιούμε γενετικούς αλγορίθμους για τη βελτιστοποίηση των θερμικών σχημάτων που παράγονται από μία διάταξη, τα χαρακτηριστικά της οποίας αλλάζουν κάθε φορά (γεωμετρία διάταξης, αριθμός κεραιών, χαρακτηριστικά του ιστού του ασθενή), έτσι ώστε να πάρουμε το επιθυμητό θερμικό αποτέλεσμα. Αρχικά ο σκοπός ήταν η ανάπτυξη ενός συγκεκριμένου γενετικού αλγορίθμου που θα λύνει το πρόβλημά μας, αλλά στη συνέχεια εκμεταλλευτήκαμε τις ιδιότητες της γλώσσας προγραμματισμού Java και αναπτύξαμε μια πλατφόρμα που επιλύει οποιοδήποτε πρόβλημα βελτιστοποίησης της δοθεί με τη χρήση γενετικών αλγορίθμων. Σαν παράδειγμα εκτέλεσης χρησιμοποιήσαμε το πρόβλημα της υπερθερμίας. Τέλος ξεκινήσαμε την προσαρμογή της πλατφόρμας, ώστε να γίνει χρήση των Κινητών Αντιπροσώπων. Με αυτόν τον τρόπο η πλατφόρμα θα γίνει πολύ αποδοτικότερη σε πολύπλοκα και απαιτητικά προβλήματα. Δυστυχώς λόγω χρονικών περιορισμών και λόγω του ότι το θέμα σε αυτό το σημείο αποδείχτηκε αρκετά πολυπλοκότερο για να περατωθεί στα πλαίσια μίας διπλωματικής εργασίας, η τελική υλοποίηση σε κώδικα δεν είναι πλήρης. Προφανώς όμως έχει αναπτυχθεί η αρχιτεκτονική της πλατφόρμας (σε μια αρχική απλή μορφή) και γίνονται αναφορές για μελλοντικές υλοποιήσεις συνθετότερων αρχιτεκτονικών που θα εκμεταλλεύονται ακόμα περισσότερο την τεχνολογία των Κινητών Αντιπροσώπων, ώστε να προκύψει η ολοκληρωμένη υλοποίηση των Γενετικών Αντιπροσώπων.

Κεφάλαιο 2

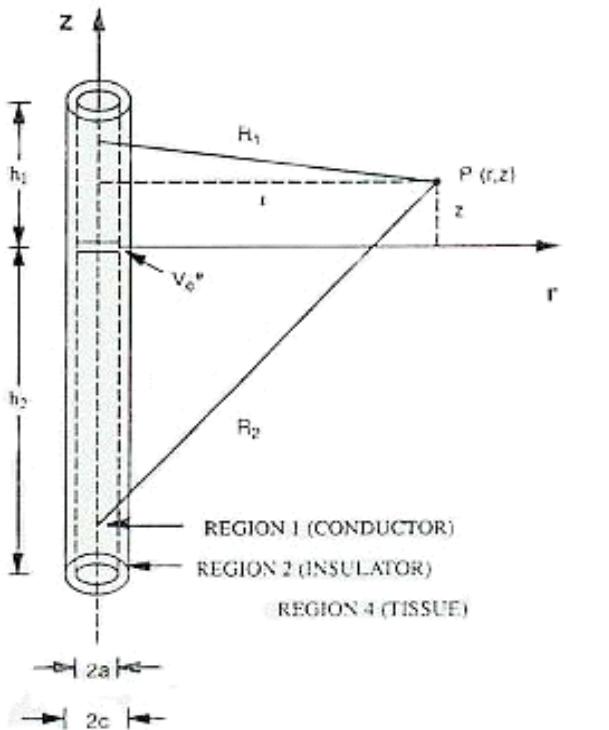
Μικροκυματική διάταξη υπερθερμίας

2.1 Εισαγωγή

Η μέθοδος της υπερθερμίας, όπως τονίστηκε και στην αρχική εισαγωγή, είναι μία επικουρική μέθοδος για την καταστροφή κακοήθων κυττάρων με τη χρήση θερμότητας και σε συνδυασμό με χημειοθεραπεία ή ακτινοθεραπεία χρησιμοποιείται για τη θεραπεία του καρκίνου. Ο στόχος της υπερθερμίας είναι η αύξηση της θερμοκρασίας μέσα στον όγκο του καρκινώματος πάνω από ένα ορισμένο θεραπευτικό όριο, που πιστέψεται ότι βρίσκεται στην περιοχή των $43 - 55^{\circ}\text{C}$, για μία επαρκή χρονική περίοδο, ώστε να προκληθεί μία απ'ευθείας κυτοτοξική επίδραση στα κύτταρα του όγκου. Συγχρόνως τα τριγύρω υγιή κύτταρα πρέπει να παραμείνουν σε θερμοκρασίες κάτω του παραπάνω επικίνδυνου ορίου. Για να επιτευχθεί το παραπάνω έχουν προταθεί πολλές διαφορετικές τεχνικές [1], [2].

Μία τεχνική που έχει λάβει αρκετή προσοχή από τον επιστημονικό κόσμο είναι η υπερθερμία με τη χρήση διάταξης ενδοϊστικών μικροκυματικών κεραιών [2]–[3]. Σε αυτή την τεχνική μονομένα δίπολα του τύπου της εικόνας 2.1 εισάγονται στο καρκίνωμα μέσω καθετήρων, που συνήθως βρίσκονται ήδη τοποθετημένοι για την εφαρμογή βραχυθεραπείας (βλ. εικόνα 2.2), στη μορφή διατάξεων που φαίνονται στην εικόνα 2.3.

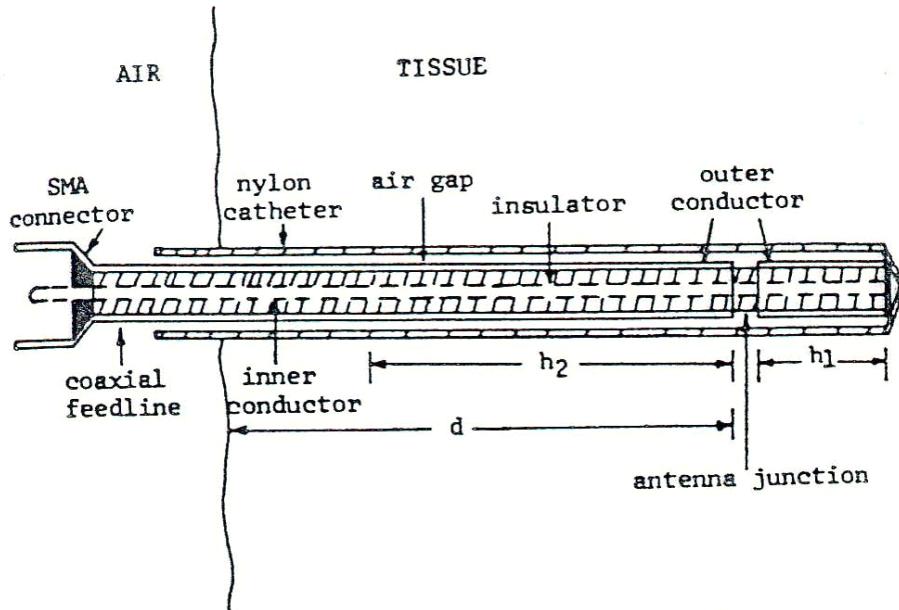
Το ηλεκτρικό πεδίο που παράγεται από τη διάταξη μέσα στον ιστό είναι ανάλογο με την ενέργεια που μεταδίδεται, η οποία με τη σειρά της είναι ανάλογη με την αύξηση της θερμοκρασίας στον όγκο. Το ηλεκτρικό πεδίο που παράγεται από μία μόνο



Σχήμα 2.1: Απλό μονομένο ασυμμετρικό δίπολο.

τέτοια κεραία μειώνεται πολύ γρήγορα με την ακτινική απόσταση, με αποτέλεσμα να έχει μια ανομοιόμορφη και πολύ μικρή θερμική επίδραση στο συνολικό όγκο. Η δημιουργία όμως μίας διάταξης τέτοιων κεραιών έχει ως αποτέλεσμα τα επιμέρους ηλεκτρικά πεδία κάθε κεραίας να υπερτίθενται και να δημιουργούν μία θερμική κατανομή στην περιοχή του όγκου. Ο έλεγχος αυτής της κατανομής αποτελεί τη βάση της θεραπείας που εξετάζουμε. Πολλές μελέτες έχουν γίνει για τη μορφή που πρέπει να έχει αυτή η κατανομή, αλλά οι περισσότερες τείνουν στο να τοποθετούν το μεγαλύτερο ποσοστό της ισχύος στην περιφέρεια του όγκου και όχι στο κέντρο.

Η ενέργεια που μεταδίδεται στον ιστό, και κατ'επέκταση η θερμότητα που παράγεται, είναι συνάρτηση πολλών παραμέτρων: των χαρακτηριστικών του ιστού, της γεωμετρίας και των διαστάσεων της διάταξης, της συχνότητας λειτουργίας των κεραιών της διάταξης καθώς και των ρευματικών φάσεων και των βαθών διείσδυσης αυτών. Οι καρκινικοί όγκοι στο σώμα ποικίλουν από τους επιφανειακούς μέχρι και τους βαθείς, με μεγέθη περίπου 2-10 cm. Συνεπώς το βάθος διείσδυσης των κε-



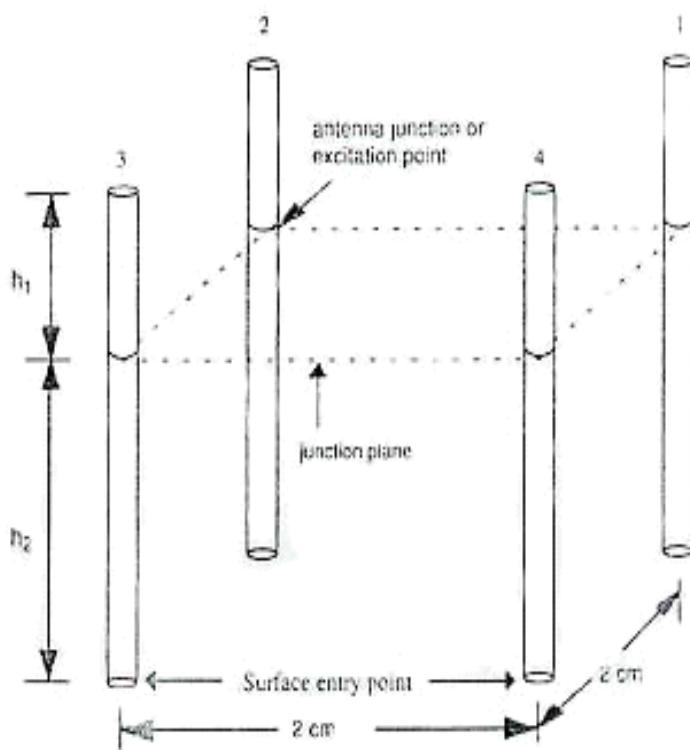
Σχήμα 2.2: Παράδειγμα διπόλου σε καθετήρα.

ραιών καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τη θέση και τη γεωμετρία του καρκινικού όγκου. Τα θερμικά αποτελέσματα στην ιδανική περίπτωση που όλες οι κεραίες έχουν το ίδιο βάθος διείσδυσης έχουν ερευνηθεί τόσο πειραματικά όσο και με τη χρήση υπολογιστικών μοντέλων. Παρόλα αυτά έχει αποδειχθεί κλινικά αδύνατη η χρήση της ιδανικής διάταξης εξ' αιτίας της φύσης των εύκαμπτων καθετήρων, που χρησιμοποιούνται για την άνεση των ασθενών, και των χαρακτηριστικών των ιστών κατά μήκος των διαδρομών των καθετήρων. Έτσι ο μη παραλληλισμός και τα διαφορετικά βάθη διείσδυσης έχουν γίνει σημαντικοί παράγοντες.

Οι επόμενες ενότητες εξετάζουν την εύρεση του ηλεκτρικού πεδίου στη διάταξη υπερθερμίας που βασίζεται σε προηγούμενες εργασίες του King *et al.* [4] και Zhang *et al.* [5].

2.2 Ιδιότητες του μονομένου διπόλου

Δύο μοντέλα έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία για την εξομοίωση της ακτινοβολίας των μονομένων διπόλων που χρησιμοποιούνται στην μικροκυματική υπερθερμία. Το πρώτο που εμφανίστηκε ήταν το μοντέλο του King *et al.* [4] το 1983. Σε αυτό, το διπόλο παρουσιάζοταν με δύο ισομήκη άκρα (συμμετρικό μοντέλο). Λίγα χρόνια



Σχήμα 2.3: Διάταξη για ενδοϊστική μικροκυματική υπερθερμία.

αργότερα ο Zhang *et al.* [5] πρότεινε ένα διαφορετικό (ασυμμετρικό) μοντέλο, στο οποίο τα μήκη από το σημείο τροφοδοσίας ήταν διαφορετικά, με αποτέλεσμα να μοιάζει περισσότερο στα πραγματικά χρησιμοποιούμενα δίπολα. Το μοντέλο του Zhang είναι βέβαια πιο σύνθετο από αυτό του King, αλλά δίνει ακριβέστερα αποτελέσματα σε σχέση με τα μετρούμενα στο ακτινικό επίπεδο. Στο κατακόρυφο επίπεδο και τα δύο μοντέλα δίνουν εξ'ίσου καλά αποτελέσματα. Φυσικά εμείς θα χρησιμοποιήσουμε το ασυμμετρικό μοντέλο για τους υπολογισμούς μας.

Μπορούμε να δούμε τη δομή ενός μονομένου ασυμμετρικού διπόλου στο σχήμα 1. Αποτελείται από δύο κεντρικούς αγωγούς (περιοχή 1) με μήκη h_1 και h_2 και ακτίνα a , επενδυμένοι με διηλεκτρικό κύλινδρο που αποτελείται από ένα ή περισσότερα (συνήθως δύο) στρώματα (περιοχές 2 και 3) με εξωτερικές ακτίνες b και c αντίστοιχα. Το δίπολο βρίσκεται σε άπειρα εκτεινόμενο περιβάλλον μέσο που εξομοιώνει τον ιστό (περιοχή 4). Υποθέτουμε ότι οι κεντρικοί αγωγοί είναι τέλειοι. Οι κυματοριθμοί των μονοτικών στρωμάτων και του περιβάλλοντος μέσου δίνονται από τις

σχέσεις:

$$k_2 = \omega \sqrt{(\mu_0 \epsilon_2)}$$

$$k_3 = \omega \sqrt{(\mu_0 \epsilon_3)}$$

$$k_4 = \omega \sqrt{(\mu_0 \tilde{\epsilon}_4)}$$

όπου: $\tilde{\epsilon}_4 = \epsilon_4 + j\sigma_4/\omega$. Υποθέτουμε επίσης ότι η χρονική εξάρτηση όλων των πεδίων είναι $e^{j\omega t}$.

Βασιζόμενοι στην κατανομή σε μέρος μίας ομοαξονικής γραμμής μεταφοράς χωρίς απώλειες και κατάλληλα τερματισμένης, η ρευματική κατανομή που υποθέτουμε για το δίπολο είναι η εξής:

$$I_1(z) = I_0 \frac{\sin k_L(h_1 - z)}{\sin k_L h_1} \quad 0 \leq z \leq h_1 \quad (2.1)$$

$$I_2(z) = I_0 \frac{\sin k_L(h_2 + z)}{\sin k_L h_2} \quad -h_2 \leq z \leq 0 \quad (2.2)$$

όπου

$$I_0 = \frac{V_0^e}{Z_A} \quad (2.3)$$

Οι παραπάνω εκφράσεις ισχύουν δεδομένων των παρακάτω συνθηκών:

$$|k_4/k_2|^2 \gg 1 \quad |k_4/k_2|^2 \gg 1 \quad (k_2 b)^2 \ll 1 \quad (k_3 c)^2 \ll 1 \quad (2.4)$$

Παρατηρούμε ότι οι εκφράσεις (2.1) και (2.2) ικανοποιούν τις οριακές συνθήκες για το δίπολο:

$$I_1(0) = I_2(0) \quad I_1(h_1) = 0 \quad I_2(-h_2) = 0 \quad (2.5)$$

Επίσης Z_A είναι η σύνθετη αντίσταση του διπόλου, η οποία μπορεί να προσεγγιστεί από τη σχέση [6]:

$$Z_A = \frac{Z_1 + Z_2}{2} \quad (2.6)$$

όπου Z_1 και Z_2 είναι οι σύνθετες αντίστασεις των δύο κεντρικά τροφοδοτούμενων συμμετρικών διπόλων με μήκη $2h_1$ και $2h_2$ αντίστοιχα. Οι σχέσεις τόσο για τα Z_1 και Z_2 (θα συμβολιστούν με Z_c) όσο και για τον κυματαριθμό k_L πρωτοεμφανίστηκαν στο [4] και δίνονται παρακάτω για ευκολία:

$$Z_c = \frac{\omega \mu_0 k_L}{2\pi k_2^2} [\ln(b/a) + n_{23}^2 \ln(c/b) + n_{24}^2 F] \quad (2.7)$$

$$k_L = k_2 \left[\frac{\ln(c/a)}{\ln(b/a) + n_{23}^2 \ln(c/b)} \right]^{1/2} \left[\frac{\ln(c/a) + F}{\ln(b/a) + n_{24}^2 F} \right]^{1/2} \quad (2.8)$$

όπου: $n_{23}^2 = k_2^2/k_3^2$, $n_{24}^2 = k_2^2/k_4^2$ και $F = H_0^{(1)}(k_4c)/k_4cH_1^{(1)}(k_4c)$. Οι παραπάνω εκφράσεις μπορούν να απλοποιηθούν με την εισαγωγή του ισοδύναμου κυματοριθμού k_{2e} και της ισοδύναμης επιτρεπτότητας ϵ_{2e} για το ισοδύναμο δίπολο με ένα διηλεκτρικό στρώμα ακτίνας c :

$$k_L = k_2 \left[\frac{\ln(c/a)}{\ln(b/a) + n_{23}^2 \ln(c/b)} \right]^{1/2} \quad (2.9)$$

$$\epsilon_{2e} = \epsilon_2 \left[\frac{\ln(c/a)}{\ln(b/a) + n_{23}^2 \ln(c/b)} \right] \quad (2.10)$$

οπότε οι σχέσεις (2.7) και (2.8) γράφονται:

$$Z_c = \frac{\omega\mu_0 k_L}{2\pi k_{2e}^2} [\ln(c/a) + n_{2e4}^2 F] \quad (2.11)$$

$$k_L = k_{2e} \left[\frac{\ln(c/a) + F}{\ln(c/a) + n_{24}^2 F} \right]^{1/2} \quad (2.12)$$

όπου: $n_{2e4}^2 = k_{2e}^2/k_4^2$.

Το φορτίο ανά μονάδα μήκους κατά μήκος της κεραίας υπολογίζεται από την εξισωση της συνέχειας ως εξής:

$$q_1(z) = \frac{-jdI_1(z)}{\omega dz} = \frac{jk_L I_0 \cos k_L(h_1 - z)}{\omega \sin k_L h_1}, \quad 0 \leq z \leq h_1 \quad (2.13)$$

$$q_2(z) = \frac{-jdI_2(z)}{\omega dz} = \frac{-jk_L I_0 \cos k_L(h_2 + z)}{\omega \sin k_L h_2}, \quad -h_2 \leq z \leq 0 \quad (2.14)$$

Οι κυλινδρικές συνιστώσες του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στην περιοχή του διηλεκτρικού στρώματος ($\alpha \leq r \leq c$) προσεγγίζονται από τις παρακάτω εκφράσεις:

$$H_{21\phi}(r, z) \doteq \frac{I_1(z)}{2\pi r} = \frac{I_0 \sin k_L(h_1 - z)}{2\pi r \sin k_L h_1}, \quad 0 \leq z \leq h_1 \quad (2.15)$$

$$H_{22\phi}(r, z) \doteq \frac{I_2(z)}{2\pi r} = \frac{I_0 \sin k_L(h_2 + z)}{2\pi r \sin k_L h_2}, \quad -h_2 \leq z \leq 0 \quad (2.16)$$

$$E_{21r}(r, z) \doteq \frac{q_1(z)}{2\pi\epsilon_{2e}r} = \frac{jk_L I_0 \cos k_L(h_1 - z)}{2\pi\epsilon_{2e}r\omega \sin k_L h_1}, \quad 0 \leq z \leq h_1 \quad (2.17)$$

$$E_{22r}(r, z) \doteq \frac{q_2(z)}{2\pi\epsilon_{2e}r} = \frac{-jk_L I_0 \cos k_L(h_2 + z)}{2\pi\epsilon_{2e}r\omega \sin k_L h_2}, \quad -h_2 \leq z \leq 0 \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned} E_{21z}(r, z) &\doteq \int_{\alpha}^r \left[\frac{\partial E_{21r}(r, z)}{\partial z} - j\omega\mu_0 H_{21\phi}(r, z) \right] dr \\ &= -\frac{j\omega\mu_0 I_0}{2\pi} \ln\left(\frac{r}{\alpha}\right) \left(1 - \frac{k_L^2}{k_{2e}^2}\right) \frac{\sin k_L(h_1 - z)}{\sin k_L h_1}, \quad 0 \leq z \leq h_1 \end{aligned} \quad (2.19)$$

$$\begin{aligned} E_{22z}(r, z) &\doteq \int_{\alpha}^r \left[\frac{\partial E_{22r}(r, z)}{\partial z} - j\omega\mu_0 H_{22}\phi(r, z) \right] dr \\ &= -\frac{j\omega\mu_0 I_0}{2\pi} \ln\left(\frac{r}{\alpha}\right) \left(1 - \frac{k_L^2}{k_{2e}^2}\right) \frac{\sin k_L(h_2 + z)}{\sin k_L h_2}, \quad -h_2 \leq z \leq 0 \end{aligned} \quad (2.20)$$

2.3 Υπολογισμός του ηλεκτρικού πεδίου

Το ηλεκτρικό πεδίο στο περιβάλλον μέσο προκύπτει από το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο στην επιφάνεια του διηλεκτρικού στρώματος με την ακόλουθη ολοκλήρωση:

$$\begin{aligned} E_4(r, z) &= \frac{1}{4\pi} \int_{-h_2}^{h_1} dz' \int_{-\pi}^{\pi} cd\phi' \left[j\omega\mu_0 H_{4\phi}(c, z') \Psi \alpha_{z'} \right. \\ &\quad \left. - E_{4z}(c, z') \alpha_{\phi'} \times \nabla' \Psi + E_{4r}(c, z') \nabla' \Psi \right] \end{aligned} \quad (2.21)$$

όπου:

$$\Psi = \frac{e^{jk_4 R}}{R} \quad (2.22)$$

και:

$$R = \left[(z - z')^2 + (r - r')^2 + 4rr' \sin^2 \frac{\phi'}{2} \right]^{1/2} \Big|_{r' = c} \quad (2.23)$$

Σημειώνουμε ότι οι συμβολές από τα δύο άκρα του διπόλου παραλείπονται στην (2.21). Οι μη-τονούμενες κυλινδρικές συντεταγμένες αναφέρονται στο σημείο παρατήρησης $P(r, \phi, z)$, ενώ οι τονούμενες (r', ϕ', z') είναι τα σημεία της πηγής. Ο τελεστής ∇' ορίζεται σε σχέση με τις τονούμενες συντεταγμένες ως εξής:

$$\nabla' = \alpha_{r'} \frac{\partial}{\partial r'} + \alpha_{\phi'} \frac{1}{r'} \frac{\partial}{\partial \phi'} + \alpha_{z'} \frac{\partial}{\partial z'}$$

Από τις (2.15)–(2.20) και εφαρμόζοντας τις παρακάτω οριακές συνθήκες για $r = c$ παίρνουμε τα απαραίτητα πεδία για την (2.21):

$$\begin{aligned} H_{4\phi}(c, z') &= H_{2\phi}(c, z') \\ E_{4r}(c, z') &= \frac{\epsilon_{2e}}{\tilde{\epsilon}_4} E_{2r}(c, z') \\ E_{4z}(c, z') &= E_{2z}(c, z') \end{aligned} \quad (2.24)$$

όπου:

$$\frac{\epsilon_{2e}}{\tilde{\epsilon}_4} = \frac{\omega^2 \mu_0 \epsilon_{2e}}{\omega^2 \mu_0 \tilde{\epsilon}_4} = \frac{k_{2e}^2}{k_4^2}$$

Λόγω της κυκλικής συμμετρίας όλα τα πεδία είναι ανεξάρτητα του ϕ . Συνεπώς το ϕ έχει τεθεί ίσο με το μηδέν στην (2.21).

Σύμφωνα με τα παραπάνω από την (2.21) παίρνουμε τις συνιστώσες του ηλεκτρικού πεδίου στο περιβάλλον μέσο:

$$\begin{aligned}
 E_{4z}(r, z) = & \frac{I_0}{4\pi^2 \sin k_L h_1} \left\{ j\omega\mu_0 \int_0^{h_1} \int_0^\pi \sin k_L(h_1 - z') \frac{e^{jk_4 R}}{R} d\phi' dz' \right. \\
 & + j\omega\mu_0 c \ln \left(\frac{c}{a} \right) \left(1 - \frac{k_L^2}{k_{2e}^2} \right) \int_0^{h_1} \int_0^\pi \sin k_L(h_1 - z') \\
 & \frac{e^{jk_4 R}}{R^2} \left(\frac{1}{R} - jk_4 \right) (c - r \cos \phi') d\phi' dz' \\
 & + \frac{jk_L}{\tilde{\epsilon}_4 \omega} \int_0^{h_1} \int_0^\pi (z - z') \cos k_L(h_1 - z') \\
 & \frac{e^{jk_4 R}}{R^2} \left(\frac{1}{R} - jk_4 \right) d\phi' dz' \Big\} \\
 & + \frac{I_0}{4\pi^2 \sin k_L h_2} \left\{ j\omega\mu_0 \int_{-h_2}^0 \int_0^\pi \sin k_L(h_2 + z') \frac{e^{jk_4 R}}{R} d\phi' dz' \right. \\
 & + j\omega\mu_0 c \ln \left(\frac{c}{a} \right) \left(1 - \frac{k_L^2}{k_{2e}^2} \right) \int_{-h_2}^0 \int_0^\pi \sin k_L(h_2 + z') \\
 & \frac{e^{jk_4 R}}{R^2} \left(\frac{1}{R} - jk_4 \right) (c - r \cos \phi') d\phi' dz' \\
 & - \frac{jk_L}{\tilde{\epsilon}_4 \omega} \int_{-h_2}^0 \int_0^\pi (z - z') \cos k_L(h_2 + z') \\
 & \frac{e^{jk_4 R}}{R^2} \left(\frac{1}{R} - jk_4 \right) d\phi' dz' \Big\} \tag{2.25}
 \end{aligned}$$

και

$$\begin{aligned}
 E_{4r}(r, z) = & \frac{I_0}{4\pi^2 \sin k_L h_1} \left\{ j\omega \mu_0 c \ln \left(\frac{c}{a} \right) \left(1 - \frac{k_L^2}{k_{2e}^2} \right) \right. \\
 & \int_0^{h_1} \int_0^\pi \sin k_L (h_1 - z') \frac{e^{jk_4 R}}{R^2} \left(\frac{1}{R} - jk_4 \right) \\
 & (z - z') \cos \phi' d\phi' dz' \\
 & - \frac{jk_L}{\epsilon_4 \omega} \int_0^{h_1} \int_0^\pi \cos k_L (h_1 - z') \frac{e^{jk_4 R}}{R^2} \\
 & \left(\frac{1}{R} - jk_4 \right) (c \cos \phi' - r) d\phi' dz' \Big\} \\
 & + \frac{I_0}{4\pi^2 \sin k_L h_2} \left\{ j\omega \mu_0 c \ln \left(\frac{c}{a} \right) \left(1 - \frac{k_L^2}{k_{2e}^2} \right) \right. \\
 & \int_{-h_2}^0 \int_0^\pi \sin k_L (h_2 + z') \frac{e^{jk_4 R}}{R^2} \left(\frac{1}{R} - jk_4 \right) \\
 & (z - z') \cos \phi' d\phi' dz' \\
 & - \frac{jk_L}{\epsilon_4 \omega} \int_{-h_2}^0 \int_0^\pi \cos k_L (h_2 + z') \frac{e^{jk_4 R}}{R^2} \\
 & \left. \left(\frac{1}{R} - jk_4 \right) (c \cos \phi' - r) d\phi' dz' \right\} \tag{2.26}
 \end{aligned}$$

Τα παραπάνω ολοκληρώματα δεν υπολογίζονται αναλυτικά, οπότε πρέπει να καταφύγουμε σε προσέγγισή τους με αριθμητική ολοκλήρωση. Η γενική μορφή των διπλών ολοκληρωμάτων είναι $\int_a^b \int_0^\pi f(\phi', z') d\phi' dz'$, όπου $f(\phi', z')$ είναι το πραγματικό ή φανταστικό μέρος μιας μιγαδικής συνάρτησης με πόλο στο $(\phi', z', r) = (0, z, c)$. Για τον υπολογισμό του εσωτερικού ολοκληρώματος (ως προς ϕ') χωρίζουμε το διάστημα σε πολλαπλά υποδιαστήματα και για κάθε ένα από αυτά χρησιμοποιούμε τη Γκαουσιανή ολοκλήρωση 24 σημείων (Παράρτημα A). Στη συνέχεια προχωρούμε στην ολοκλήρωση ως προς z' με την ίδια μέθοδο. Για να αποφύγουμε τα σφάλματα λόγω της απότομης κλίσης της υπο ολοκλήρωσης συνάρτησης ως προς z' χρησιμοποιούμε έναν προσαρμοστικό αλγόριθμο που υποδιαιρεί συνεχώς τα υποδιαστήματα στον άξονα z' μέχρι να ικανοποιηθεί κάποιο κριτήριο σύγκλισης. Στην πράξη η παραπάνω μέθοδος έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική για την ολοκλήρωση ιδιαίτερα απότομων συναρτήσεων.

2.4 Μοντελοποίηση της διάταξης

Οι διατάξεις των διπόλων είναι κατά κύριο λόγο χυκλικές και αποτελούνται από M όμοια και παράλληλα δίπολα, τα οποία τοποθετούνται κάθετα στο νοητό χυκλικό επίπεδο. Εαν αναπαραστήσουμε τις Καρτεσιανές συντεταγμένες των σημείων τροφοδοσίας του κάθε διπόλου με $(x_{0i}, y_{0i}, 0)$, με $i = 1, 2, \dots, M$, τότε οι συνολικές συνιστώσες του ηλεκτρικού πεδίου της διάταξης μπορούν να υπολογιστούν ως εξής:

$$E_x = \sum_{i=0}^M \frac{x - x_{0i}}{R_i} E_{ri} e^{j\theta_i} \quad (2.27)$$

$$E_y = \sum_{i=0}^M \frac{y - y_{0i}}{R_i} E_{ri} e^{j\theta_i} \quad (2.28)$$

$$E_z = \sum_{i=0}^M E_{zi} e^{j\theta_i} \quad (2.29)$$

όπου: θ_i είναι οι χρονικές φάσεις της τροφοδοσίας κάθε διπόλου και

$$R_i = \sqrt{(x - x_{0i})^2 + (y - y_{0i})^2}.$$

Το μέγεθος που συνδέει το ηλεκτρικό πεδίο και τη θερμότητα που απορροφάται από το περιβάλλον μέσο είναι ο ειδικός ρυθμός απορρόφησης (specific absorption rate ή SAR). Η αύξηση της θερμοκρασίας στο βιολογικό μέσο είναι ανάλογη του SAR, ο οποίος ορίζεται ως η ενέργεια που απορροφάται ανά μονάδα μάζας και μετράται σε W/kg. Ο SAR σχετίζεται με το ηλεκτρικό πεδίο με την ακόλουθη σχέση:

$$SAR = \frac{\sigma}{2\rho} |E|^2 = \frac{\sigma}{2\rho} (|E_x|^2 + |E_y|^2 + |E_z|^2) \quad (2.30)$$

όπου: σ είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα (S/m) και ρ η πυκνότητα (kg/m³) του μέσου. Ο υπολογισμός του SAR μας επιτρέπει την πρόβλεψη της κατανομής της θερμοκρασίας στον όγκο μέσω κατάλληλων θερμικών εξομοιώσεων.

Κεφάλαιο 3

Γενετικοί Αλγόριθμοι

3.1 Εισαγωγή

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι είναι ένας ερευνητικός κλάδος της εξελικτικής υπολογιστικής θεωρίας. Αποτελούν εύρωστες, στοχαστικές μεθόδους αναζήτησης, οι οποίες είναι μοντελοποιημένες πάνω στις αρχές της φυσικής επιλογής και εξέλιξης των ειδών που προτάθηκαν από το Δαρβίνο. Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι είναι πολύ αποτελεσματικοί βελτιστοποιητές για περίπλοκα και συνδυαστικά προβλήματα. Η ισχύς τους φαίνεται όταν ο στόχος μας είναι η εύρεση ενός ολικού μεγίστου (ή ελαχίστου) σε περίπλοκες συναρτήσεις πολλών μεταβλητών με σχεδόν βέλτιστο τρόπο. Πατέρας των Γενετικών Αλγορίθμων θεωρείται ο Holland [8], που τους πρότεινε για πρώτη φορά στα μέσα της δεκαετίας του 1960, αλλά σημαντική είναι και η συνεισφορά του μαθητή του Goldberg [9], που ανέπτυξε τις τεχνικές που είναι γνωστές σήμερα.

Στους Γενετικούς Αλγορίθμους μία ομάδα πιθανών λύσεων (αρχικά τυχαίων) εξελίσσεται προς μία ολική βέλτιστη λύση. Η εξέλιξη αυτή λαμβάνει χώρα ως αποτέλεσμα της πίεσης που ασκεί μία διαδικασία επιλογής (με τη χρήση μιας συνάρτησης-βάρους) και η εξερεύνηση γύρω από το χώρο της λύσης πραγματοποιείται με συνεχείς συνδυασμούς και μεταλλάξεις των εκάστοτε πιθανών λύσεων.

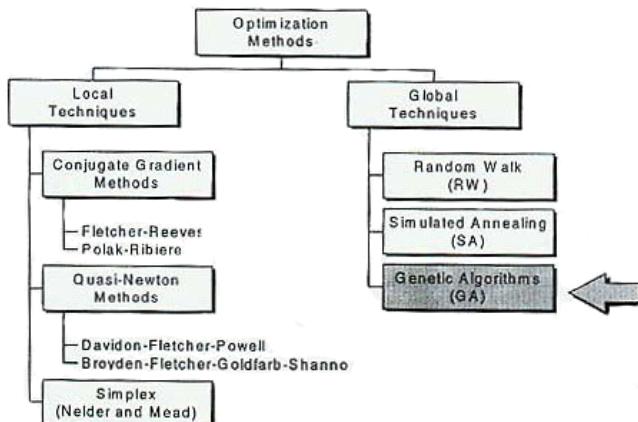
Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι, αν και σχετικά νέοι ως ιδέα, έχουν βρεί πολλές εφαρμογές σε πολλούς επιστημονικούς κλάδους (οικονομία, βιολογία, πληροφορική κλπ.). Την τελευταία, κυρίως, δεκαετία έχουν δε εισχωρήσει σε μεγάλο βαθμό στον τομέα του ηλεκτρομαγνητισμού. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε μερικές εφαρμογές: σύνθεση στοιχειοκεραιών και βελτιστοποίηση των διαγραμμάτων ακτινοβολίας τους, σχεδίαση ασύρματων δικτύων, κυματοδηγών και φακών καθώς και επίλυση προβλημάτων

αντίστροφης σκέδασης.

Στην ενότητα 3.2 συγκρίνονται οι τοπικές και οι ολικές μέθοδοι βελτιστοποίησης και εξηγούνται οι λόγοι για τους οποίους διαλέξαμε τους Γενετικούς Αλγορίθμους για το πρόβλημά μας. Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζεται σύντομα η θεωρία των Γενετικών Αλγορίθμων.

3.2 Τοπική και ολική βελτιστοποίηση

Πριν ασχοληθούμε με τους Γενετικούς Αλγορίθμους, είναι χρήσιμο να συγκρίνουμε τη συγκεκριμένη μέθοδο βελτιστοποίησης με τις χλασικότερες και να εξηγήσουμε τους λόγους για τους οποίους διαλέξαμε τους Γενετικούς Αλγορίθμους για το πρόβλημά μας. Στις τοπικές μεθόδους συμπεριλαμβάνονται οι μέθοδοι κλίσης, οι μέθοδοι Quasi-Newton κά. Στις γενικές εκτός από τους Γενετικούς Αλγορίθμους συμπεριλαμβάνονται η τυχαία αναζήτηση και η Simulated Annealing. Μερικές από αυτές φαίνονται στο σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1: Βασικές μέθοδοι βελτιστοποίησης.

Η διαφορά μεταξύ τοπικών και ολικών μεθόδων βελτιστοποίησης έγκειται στο ότι οι τοπικές μέθοδοι παράγουν αποτελέσματα που εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την επιλογή των αρχικών σημείων ή προβλέψεων, ενώ οι ολικές είναι ανεξάρτητες από αρχικές συνθήκες. Επιπλέον, οι τοπικές μέθοδοι τείνουν να σχετίζονται στενά με το χώρο της λύσης. Από τη μία αυτό επιτρέπει σε αυτές τις μεθόδους να εκμεταλλεύονται τα χαρακτηριστικά του χώρου της λύσης, με αποτέλεσμα να συγκλίνουν

σχετικά γρήγορα σε τοπικό μέγιστο. Από την άλλη η στενή σχέση επιφέρει περιορισμούς, όπως η διαφορισμούτητα και η συνέχεια της συνάρτησης, περιορισμοί που είναι δύσκολο ως αδύνατο να αντιμετωπιστούν στην πράξη.

Οι ολικές μέθοδοι είναι ανεξάρτητες από το χώρο λύσης και αντιμετωπίζουν ελάχιστους περιορισμούς. Αυτό σημαίνει ότι οι γενικές μέθοδοι είναι αποτελεσματικότερες με "κακούς" χώρους λύσεων, δηλαδή χώρους που έχουν ασυνέχειες, περιορισμένες παραμέτρους και πολλά τοπικά μέγιστα. Το αντίστοιχο μειονέκτημά τους είναι ότι σχεδόν ποτέ δεν εκμεταλλεύονται τα χαρακτηριστικά του χώρου της λύσης οπότε συγκλίνουν γενικά αργότερα από τις τοπικές μεθόδους.

Στα ηλεκτρομαγνητικά προβλήματα συνήθως ο ρυθμός σύγκλισης δεν είναι τόσο σημαντικός όσο η λύση η ίδια, δηλαδή μας ενδιαφέρει να βρούμε τη βέλτιστη λύση (το ολικό μέγιστο) και όχι να συγκλίνει η μέθοδος γρήγορα σε μια απλά 'καλή' λύση (τοπικό μέγιστο). Ένα τέτοιο πρόβλημα είναι και το πρόβλημα της υπερθερμίας που εξετάζουμε. Η χρήση μιας ολικής μεθόδου κρίνεται καλύτερη. Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι προτιμήθηκαν λόγω της πολύ καλής τους συμπεριφοράς στην αποφυγή των τοπικών ελαχίστων και της γρηγορότερης σύγκλισης σε σχέση με τις υπόλοιπες ολικές μεθόδους.

3.3 Ορολογία των Γενετικών Αλγορίθμων

Η ορολογία των Γενετικών Αλγορίθμων προέρχεται σε μεγάλο βαθμό από το φυσικό κόσμο. Παρακάτω παρατίθενται οι κυριότεροι όροι που χρησιμοποιούνται στην εργασία και χρειάζονται για την κατανόηση των παρακάτω κεφαλαίων:

- **Γονίδιο (Gene):** Όπως και στη βιολογία, το γονίδιο είναι ο βασικός δομικός λίθος των Γενετικών Αλγορίθμων. Γενικά τα γονίδια είναι κωδικοποιημένες αναπαραστάσεις των παραμέτρων βελτιστοποίησης. Η κωδικοποίηση των γονιδίων μπορεί να είναι δυαδική ή πραγματική.
- **Χρωμόσωμα (Chromosome):** Μία ακολουθία γονιδίων καλείται χρωμόσωμα. Το χρωμόσωμα αποκωδικοποιείται σε μία ομάδα παραμέτρων που αποτελούν μία δοκιμαστική λύση του προβλήματος.
- **Πληθυσμός (Population):** Μία ομάδα πιθανών λύσεων στη μορφή χρωμοσωμάτων καλείται πληθυσμός. Ο πληθυσμός είναι η πηγή από την οποία ο Γενετικός Αλγόριθμος προσπαθεί να βρεί τη βέλτιστη λύση.

- *Γενιά (Generation):* Τα συνεχή βήματα στη λειτουργία του Γενετικού Αλγορίθμου ονομάζονται γενιές. Αυτά τα βήματα συνίστανται από κατάλληλη εφαρμογή τελεστών (επιλογής, συνδυασμού και μετάλλαξης) στον εκάστοτε πληθυσμό μέχρι να παραχθεί ένας καινούριος, δηλαδή μία καινούρια γενιά, με καλύτερα χαρακτηριστικά από την προηγούμενη. Στην καινούρια γενιά τα 'καλύτερα' χρωμοσώματα της προηγούμενης γενιάς έχουν και τη μεγαλύτερη συμβολή, με αποτέλεσμα οι επόμενες γενιές να τείνουν προς τη βέλτιστη λύση. Η διαδικασία αυτή τερματίζεται όταν ικανοποιηθεί κάποιο επιθυμητό κριτήριο (προκαθορισμένος αριθμός γενεών ή κάποιο κατώφλι για το καλύτερο χρωμόσωμα).
- *Γονείς και Παιδιά (Parents and Children):* Σύμφωνα με τα παραπάνω ως γονείς ονομάζουμε τα μέλη της παρούσας γενιάς και ως παιδιά τα μέλη της επόμενης γενιάς.
- *Καταλληλότητα (Fitness):* Η συνάρτηση που καθορίζει το σκοπό της βελτιστοποίησης ονομάζεται συνάρτηση καταλληλότητας (fitness or objective function). Αυτή δίνει μία μονοδιάστατη τιμή για κάθε χρωμόσωμα, η οποία αντιπροσωπεύει το πόσο 'καλή' είναι η λύση. Η συνάρτηση καταλληλότητας είναι και ο συνδετικός κρίκος μεταξύ του φυσικού προβλήματος και της διαδικασίας βελτιστοποίησης.

3.4 Λειτουργία των Γενετικών Αλγορίθμων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η λειτουργία των Γενετικών Αλγορίθμων βασίζεται στην εξέλιξη μιας αρχικής ομάδας πιθανών λύσεων προς τη βέλτιστη λύση κάτω από την πίεση της συνάρτησης καταλληλότητας. Γενικά οι Γενετικοί Αλγόριθμοι οφείλουν να κάνουν τα εξής:

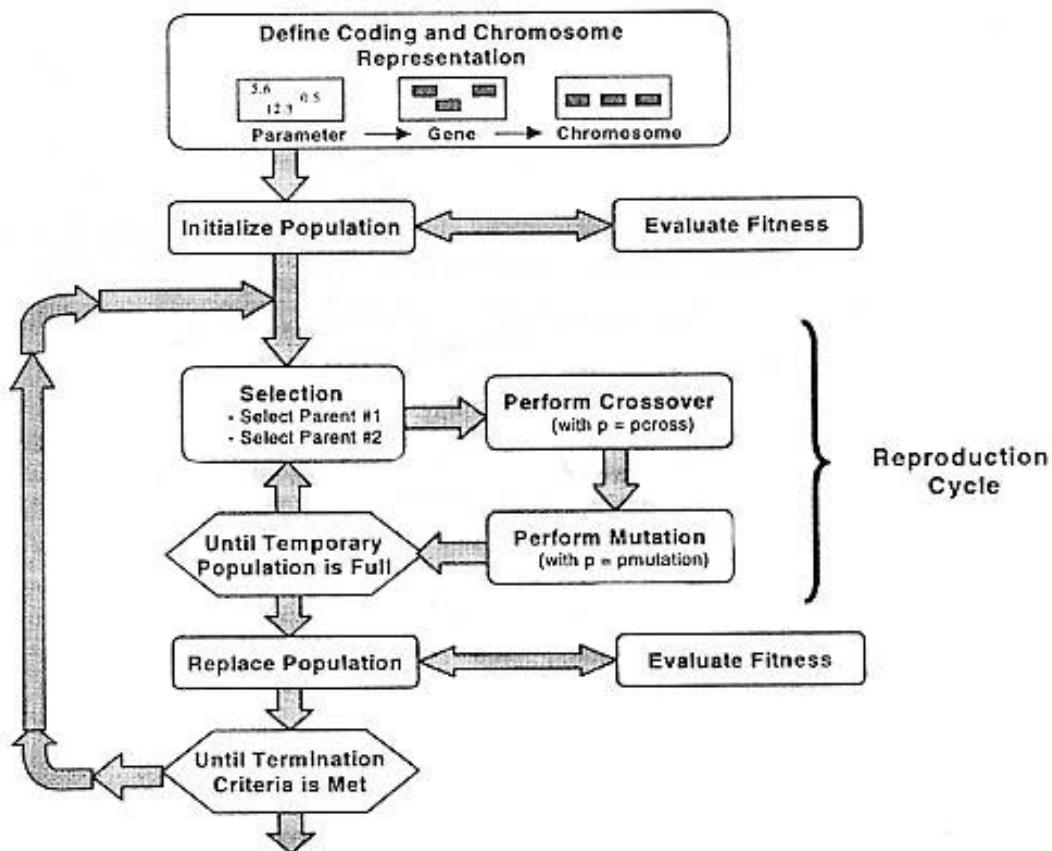
1. Να κωδικοποιούν τις παραμέτρους του προβλήματος σε γονίδια.
2. Να δημιουργούν τα χρωμοσώματα ως μία ακολουθία γονιδίων.
3. Να αρχικοποιούν έναν πληθυσμό με τυχαία χρωμοσώματα.
4. Να αποτιμούν και να αναθέτουν τις τιμές καταλληλότητας μέσω της αντίστοιχης συνάρτησης για κάθε χρωμόσωμα.
5. Να πετυχαίνουν αναπαραγωγή με την επιλογή των κατάλληλων χρωμοσωμάτων - γονέων μέσω του τελεστή της φυσικής επιλογής.

6. Να παράγουν την επόμενη γενιά μέσω των τελεστών του συνδυασμού και της μετάλλαξης.

Παραχάτω παρουσιάζονται ο Απλός Γενετικός Αλγόριθμος (Simple Genetic Algorithm - SGA) καθώς και οι λεπτομέρειες για τους διάφορους τελεστές και διεργασίες.

3.4.1 Ο Απλός Γενετικός Αλγόριθμος

Ο Απλός Γενετικός Αλγόριθμος, ο οποίος πρωτοπαρουσιάστηκε από τον Goldberg [9] και φαίνεται στο σχήμα 3.2, αποτελεί τη βασική υλοποίηση ενός βελτιστοποιητή που βασίζεται στην ιδέα των γενετικών αλγορίθμων. Διάφορες βελτιώσεις και προχωρημένοι τελεστές παρουσιάζονται σε επόμενα κεφάλαια.

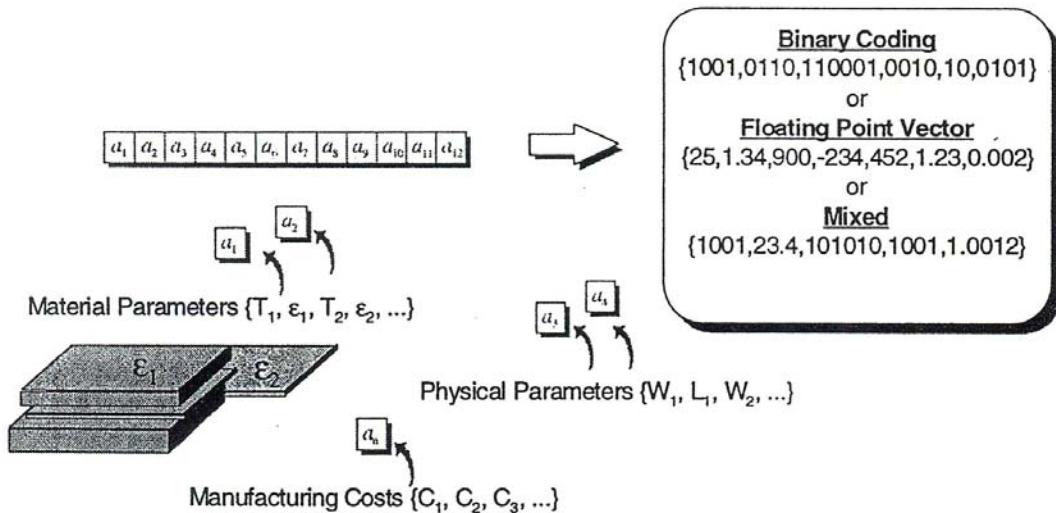


Σχήμα 3.2: Ο Απλός Γενετικός Αλγόριθμος.

Όπως βλέπουμε ο τυπικός Γενετικός Αλγόριθμος απαρτίζεται από τρείς φάσεις: την αρχικοποίηση, την αναπαραγωγή και την παραγωγή της νέας γενιάς. Στον SGA που παρουσιάζουμε εδώ, η νέα γενιά έχει το ίδιο μέγεθος πληθυσμού με την τωρινή. Αυτοί οι Γενετικοί Αλγόριθμοι ονομάζονται generational. Σε άλλες υλοποιήσεις η νέα γενιά μπορεί να είναι διαφορετικού μεγέθους ή να έχει επικαλυπτόμενο πληθυσμό (steady-state algorithms) με την τωρινή.

3.4.2 Γονίδια, Χρωμοσώματα και κωδικοποίηση

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι λειτουργούν με κωδικοποιημένες παραμέτρους αντί με τις ίδιες τις παραμέτρους. Η κωδικοποίηση είναι η απεικόνιση από το χώρο των παραμέτρων στο χώρο των χρωμοσωμάτων και μετατρέπει τις παραμέτρους (συνήθως πραγματικοί αριθμοί) σε μία ακολουθία πεπερασμένου μήκους. Κατ' αυτόν τον τρόπο ο Γενετικός Αλγόριθμος προχωρά ανεξάρτητα από το χώρο της λύσης. Η κωδικοποίηση είναι συνήθως δυαδική, αλλά μπορεί να είναι επίσης πραγματική ή μικτή. Το σχήμα 3.3 απεικονίζει τις παραπάνω ιδέες.



Σχήμα 3.3: Κωδικοποίηση παραμέτρων σε χρωμόσωμα.

Γενικά η κωδικοποίηση που χρησιμοποιείται πρέπει να έχει κάποια σχέση με το εκάστοτε πρόβλημα και να έχει το μικρότερο δυνατό αλφάριθμο. Πάντως η δυαδική κωδικοποίηση (ακολουθίες 0 και 1) παρόλο που συνήθως είναι ζένη ως προς το

πρόβλημα είναι η πιο συνηθισμένη λύση, επειδή υλοποιείται πολύ ευκολότερα από τις υπόλοιπες.

Η λειτουργία της συνάρτησης καταλληλότητας είναι η αποκωδικοποίηση κάθε χρωμοσώματος στις πραγματικές παραμέτρους του προβλήματος και η ανάθεση της τιμής καταλληλότητας για κάθε χρωμόσωμα. Μπορεί να φαίνεται περίεργη η χρήση της κωδικοποίησης, αλλά αυτή τελικά δίνει στους Γενετικούς Αλγορίθμους τη δύναμη και την απλότητά τους.

3.4.3 Μέθοδοι επιλογής

Η επιλογή εισάγει την επιρροή της καταλληλότητας στη βελτιστοποίηση ως μέτρο του πόσο 'καλή' είναι μια συγκεκριμένη λύση. Είναι λογικό η επιλογή των γονέων να μη βασίζεται αποκλειστικά στο καλύτερο χρωμόσωμα κάθε γενιάς, αφού αυτό μπορεί να απέχει από τη βέλτιστη λύση. Ακόμα και λιγότερο καλά χρωμοσώματα πρέπει να επιζούν στις επόμενες γενιές για να εξασφαλιστεί η μετάδοση της γενετικής πληροφορίας τους. Πάντως όλες οι μέθοδοι επιλογής εξασφαλίζουν ότι τα δυνατά χρωμοσώματα θα δώσουν περισσότερους απογόνους από τα πιο αδύναμα. Έχουν προταθεί και αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι επιλογής, που γενικά χωρίζονται σε στοχαστικές και ντετερμινιστικές. Παρακάτω αναπτύσσονται οι τρεις πιο διαδεδομένες, οι οποίες έχουν αποκτήσει και πολλές παραλλαγές:

- Αποδεκατισμός Πληθυσμού :** Η απλούστερη από τις μεθόδους εξομοιώνει το φυσικό νόμο της επιβίωσης του ισχυροτέρου. Σε αυτή ο πληθυσμός κατατάσσεται ανάλογα με τις τιμές καταλληλότητας των χρωμοσωμάτων του από τα ισχυρότερα στα πιο αδύναμα. Στη συνέχεια ένα ποσοστό αυτού του πληθυσμού με τα πιο αδύναμα χρωμοσώματα απομακρύνεται και τα υπόλοιπα χρησιμοποιούνται για να παραχθεί η επόμενη γενιά με τυχαίο ζευγάρωμα. Η στρατηγική αυτή κατατάσσεται στις ντετερμινιστικές, επειδή τα χρωμοσώματα που μένουν συγκρίνονται με ένα προκαθορισμένο όριο.

Το πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η απλότητά της, καθώς το μόνο που χρειάζεται είναι η επιλογή των καλύτερων χρωμοσωμάτων με βάση ένα προκαθορισμένο ποσοστό και στη συνέχεια το τυχαίο ζευγάρωμα. Το μειονέκτημά της έγκειται στο ότι η γενετική πληροφορία κάποιων αδύναμων χρωμοσωμάτων χάνεται για πάντα (εκτός από την επιστροφή του μέσω κάποιας μετάλλαξης). Αυτό συνήθως οδηγεί στο φαινόμενο της πρόωρης σύγκλισης, δηλαδή την απώλεια χαρακτηριστικών σε πρώιμο στάδιο στην εξέλιξη, με αποτέλεσμα τον πιθανό εγκλωβισμό σε κάποιο τοπικό μέγιστο.

- **Αναλογική Επιλογή :** Αποτελεί την πιο δημοφιλή τεχνική επιλογής και ανήκει στις στοχαστικές μεθόδους. Σε αυτή τα χρωμοσώματα προς ζευγάρωμα επιλέγονται με μια πιθανότητα p_{sel} που δίνεται από τη σχέση:

$$p_{sel} = \frac{f(\text{parent}_i)}{\sum_i f(\text{parent}_i)}$$

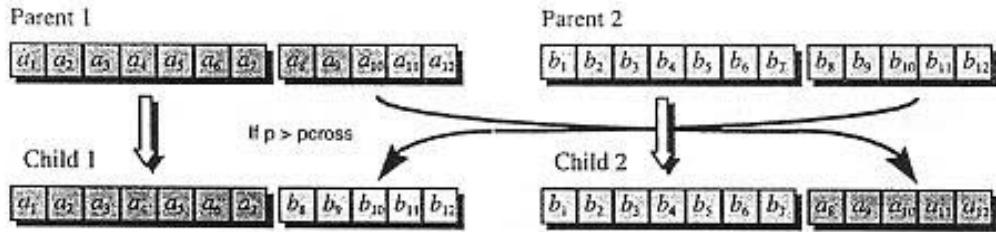
όπου: $f(\text{parent}_i)$ η καταλληλότητα του γονέα i . Η παραπάνω σχέση μας περιγράφει ότι χρωμοσώματα με υψηλή τιμή καταλληλότητας θα συμμετέχουν στην επόμενη γενιά περισσότερο από αυτά με χαμηλότερη. Σε αντιδιαστολή με τη μέθοδο αποδεκατισμού εδώ υπάρχει μία μικρή πιθανότητα τα αδύναμα χρωμοσώματα να εκπροσωπηθούν στις επόμενες γενιές, οπότε να μη χαθεί το γενετικό υλικό τους. Μπορεί κανείς να φανταστεί τη μέθοδο αυτή σαν το γύρισμα μιας ρουλέττας, στην οποία ο χώρος κάθε χρωμοσώματος είναι ανάλογος με την τιμή καταλληλότητάς του.

- **Επιλογή με Διαγωνισμό :** Η δεύτερη πιο δημοφιλής στρατηγική ανήκει πάλι στις στοχαστικές μεθόδους. Σε αυτή ένας υποπληθυσμός N χρωμοσωμάτων (συνήθως $N = 2$) διαλέγεται τυχαία από τον αρχικό πληθυσμό. Από αυτόν τον υποπληθυσμό τότε επιλέγεται το χρωμόσωμα με την υψηλότερη τιμή καταλληλότητας. Αυτό συνεχίζεται μέχρι την επιλογή όσων χρωμοσωμάτων χρειάζεται ο νέος πληθυσμός.

3.4.4 Τελεστές των Γενετικών Αλγορίθμων

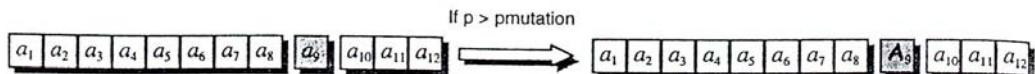
Όταν δύο χρωμοσώματα έχουν επιλεχθεί ως γονείς, ένα ζευγάρι απογόνων δημιουργείται με το συνδυασμό και την μετάλλαξη των πρώτων. Οι τελεστές του συνδυασμού και της μετάλλαξης χρησιμοποιούνται με πιθανότητες p_{cross} και p_{mut} αντίστοιχα.

Συνδυασμός (Crossover): Ο τελεστής αυτός παίρνει τους δύο γονείς και δημιουργεί δύο παιδιά. Πολλές παραλλαγές έχουν αναπτυχθεί, αλλά η απλούστερη είναι ο συνδυασμός ενός σημείου, που φαίνεται στο σχήμα 3.4 (για την περίπτωση της δυαδικής κωδικοποίησης). Εάν $p > p_{cross}$ επιλέγεται ένα τυχαίο σημείο στα χρωμοσώματα των γονέων. Το πρώτο κομμάτι του πρώτου γονέα τότε και το δεύτερο κομμάτι του δεύτερου γονέα δημιουργούν το πρώτο παιδί και αντίστροφα το δεύτερο. Εάν $p < p_{cross}$ τα δύο παιδιά είναι οι ίδιοι οι γονείς τους. Τυπικές τιμές για το p_{cross} είναι 0.6–0.8.



Σχήμα 3.4: Συνδυασμός ενός σημείου.

Μετάλλαξη (Mutation): Ο τελεστής της μετάλλαξης επιτρέπει την εξερεύνηση κομματιών του χώρου των λύσεων που δεν αντιπροσωπεύονται από το παρόν γενετικό υλικό ή που λόγω της κυριαρχίας ενός συγκεκριμένου χρωμοσώματος σε προχωρημένη γενιά δεν πρόκειται να πραγματοποιηθεί ποτέ. Στην περίπτωση της δυαδικής κωδικοποίησης, αν $p > p_{mut}$ τότε ένα στοιχείο του χρωμοσώματος επιλέγεται τυχαία και αλλάζει. Το bit που επιλέγεται παίρνει τη συμπληρωματική τιμή του (βλέπε σχήμα 3.5). Στην περίπτωση της πραγματικής κωδικοποίησης μία λύση είναι να προστίθεται στην επιλεγμένη παράμετρο μία τυχαία τιμή που να ανήκει σε γκαουσιανή κατανομή με κέντρο την παρούσα τιμή της παραμέτρου. Γενικά έχει προταθεί η μετάλλαξη να πραγματοποιείται με μικρή πιθανότητα (τυπικές τιμές για p_{mut} είναι 0.01–0.1). Η μετάλλαξη με μεγαλύτερη πιθανότητα συνήθως διαταράσσει τη σύγκλιση προς μια βέλτιστη λύση.



Σχήμα 3.5: Τελεστής μετάλλαξης.

3.4.5 Συναρτήσεις καταλληλότητας

Η συνάρτηση καταλληλότητας (fitness or objective function) χρησιμοποιείται για να συνδέσει το φυσικό πρόβλημα και το Γενετικό Αλγόριθμο. Οι περιορισμοί που τίθενται σε αυτή τη συνάρτηση είναι ότι πρέπει να επιστρέψει σαν αποτέλεσμα ένα θετικό αριθμό και αυτός πρέπει να είναι μεγαλύτερος όσο καταλληλότερη είναι η λύση. Έτσι επιλύονται τα προβλήματα που απαιτούν την εύρεση ενός μεγίστου. Για

προβλήματα που απαιτούν ελάχιστο αρκεί να ορίσουμε ως καταλληλότητα την εξής παράσταση:

$$\text{fitness} = \text{Max} - f(x[n])$$

όπου Max είναι ένας θετικός μεγαλύτερος από τη μεγαλύτερη προβλεπόμενη τιμή της $f(x[n])$.

3.4.6 Βελτιώσεις στον Απλό Γενετικό Αλγόριθμο

Πολλές βελτιώσεις έχουν αναπτυχθεί στον απλό Γενετικό Αλγόριθμο, αλλά οι κυριότερες είναι οι εξείς:

- **Ελιτισμός (Elitism):** Μία σημαντική αλλαγή είναι η απ'ευθείας μεταφορά του καλύτερου χρωμοσώματος της εκάστοτε γενιάς στην επόμενη. Αυτο έχει λαμβάνει ότι η επόμενη γενιά θα έχει ένα τουλάχιστο χρωμόσωμα με την καλύτερη καταλληλότητα της τωρινής γενιάς, σε περίπτωση που όλοι οι απόγονοι είναι χειρότεροι από αυτό. Συνήθως επιλέγουμε την αντικατάσταση του λιγότερου καλού χρωμοσώματος της νέας γενιάς με αυτό. Βέβαια ο ελιτισμός δεν είναι συνετό να χρησιμοποιείται όταν υπάρχουν υποψίες για πρόωρη σύγκλιση.
- **Κλιμάκωση καταλληλότητας (Fitness scaling):** Συνήθως η κλιμάκωση της καταλληλότητας χρησιμοποιείται για την καλή λειτουργία των μεθόδων επιλογής, κυρίως σε προχωρημένες γενιές, όπου οι τιμές της καταλληλότητας δεν απέχουν πολύ μεταξύ τους. Η βασική λειτουργία της κλιμάκωσης είναι να μεταβάλει τις τιμές καταλληλότητας λαμβάνοντας υπόψην τη μέση τιμή όλου του πληθυσμού. Εδώ εμφανίζεται ο διαχωρισμός στην ονοματολογία, όπου ως objective value ορίζεται το αποτέλεσμα της συνάρτησης καταλληλότητας και ως fitness value η τιμή αυτή μετά την κλιμάκωση.
Η γραμμική κλιμάκωση (linear scaling) είναι η πιο συχνή και ορίζεται ως η κλιμάκωση στην οποία η νέα τιμή της τιμής καταλληλότητας σε σχέση με την κανονική τιμή f δίνεται από τον τύπο

$$f' = a \cdot f + b$$

με a και b σταθερές που υπολογίζονται για κάθε γενιά ώστε το πεδίο τιμών $(f_{min}, f_{avg}, f_{max})$ να απεικονίζεται στο $(f'_{min}, f_{avg}, 2f_{avg})$. Επίσης περαιτέρω ρυθμίσεις γίνονται όταν $f'_{min} < 0$.

3.5 Θεωρία και προχωρημένες τεχνικές

Η θεωρία των Γενετικών Αλγορίθμων βασίζεται σε δύο αξιωματικές υποθέσεις:

- Τα παιδιά κληρονομούν ιδιότητες από τους γονείς τους
- Η επιβίωση βασίζεται στην καταλληλότητα του χρωμοσώματος, ώστε με την πάροδο του χρόνου να υπάρχει εξέλιξη στη γενετική σύνθεση των χρωμοσωμάτων.

Οι θολές αυτές ιδέες γίνονται πιο φορμαλισμένες με την ιδέα των σχημάτων (schemas). Ως σχήμα ορίζουμε τόσο την υποομάδα όλων των πιθανών χρωμοσωμάτων με ίδιες τιμές σε συγκεκριμένα σημεία όσο και το πρότυπο ομοιότητας που χρησιμοποιείται για να την περιγράψει. Για παράδειγμα στη διαδικασία κωδικοποίηση το αλφάριθμο που χρησιμοποιείται για την περιγραφή των σχημάτων είναι το $\{0, 1, *\}$, με το '*' να συμβολίζει την αδιάφορη κατάσταση. Έτσι τα χρωμοσώματα που περιγράφονται από το σχήμα $10*11$ είναι τα 10011 και 10111. Ως τάξη (order) σχήματος $o(H)$ ορίζουμε τον αριθμό των μη-αδιάφορων θέσεων. Ως ορίζον μήκος (defining length) σχήματος $\delta(H)$ ορίζουμε τη διαφορά μεταξύ της πρώτης και της τελευταίας μη-αδιάφορης θέσης. Στο σχήμα $H = *1*0*$ έχουμε $o(H) = 2$ και $\delta(H) = 2$. Τέλος ως καταλληλότητα (fitness) σχήματος $f(H)$ σε ένα πληθυσμό $P(t)$ (με t μετράμε τη γενιά) ορίζουμε τη μέση καταλληλότητα των αντιπροσώπων του πληθυσμού:

$$f(H) = \frac{\sum_{i, c_i \in P \cap H} f(c_i)}{m_P(H, t)}$$

όπου $m_P(H, t)$ είναι ο αριθμός των αντιπροσώπων του σχήματος H με μήκος L ($m_P(H, t) = 2^{L-o(H)}$).

Από τους παραπάνω ορισμούς έχει αποδειχθεί [9] ότι:

$$m_P(H, t+1) \geq m_P(H, t) \frac{f(H)}{f} \left[1 - p_{cross} \frac{\delta(H)}{L-1} - p_{mut} o(H) \right] \quad (3.1)$$

Η παραπάνω σχέση είναι γνωστή ως το Θεώρημα των Σχημάτων ή το θεμελιώδες θεώρημα των Γενετικών Αλγορίθμων. Στην πράξη σημαίνει ότι, απουσία του συνδυασμού και της μετάλλαξης, τα χρωμοσώματα με καταλληλότητα πάνω από τη μέση καταλληλότητα δίνουν αντιπροσώπους που αυξάνουν εκθετικά στις επόμενες γενιές. Κατ'επέκταση (εισάγοντας και τους δύο τελεστές) από τη θεώρημα εξάγεται ότι τα σχήματα χαμηλής τάξης και μικρών οριζόντων μηκών θα επιβιώσουν και θα

κυριαρχήσουν στις επόμενες γενιές. Αρα οι Γενετικοί Αλγόριθμοι αποδίδουν καλύτερα όταν σχήματα όπως τα παραπάνω έχουν την υψηλότερη καταλληλότητα. Το παραπάνω πόρισμα έχει μεγάλη σημασία στην έρευνα των Γενετικών Αλγορίθμων και στην εκμετάλλευσή του για την αύξηση της απόδοσης τους στην πράξη.

Απόρροια των παραπάνω είναι διάφορες μέθοδοι και προχωρημένοι τελεστές που έχουν αναπτυχθεί (schemes selection, crossover and mutation, niching, domain decomposition κά) [10], αλλά δεν αποτελούν μελέτη της παρούσης εργασίας.

Κεφάλαιο 4

Κινητοί Αντιπρόσωποι

4.1 Εισαγωγή

Η τεχνολογία των Κινητών Αντιπροσώπων (Mobile Agents) είναι σχετικά νέα στον τομέα των κατανεμημένων εφαρμογών. Παρόλο που δεν έχει πραγματοποιηθεί σημαντική θεωρητική έρευνα και θεμελίωση των αρχών των Κινητών Αντιπροσώπων, μπορούμε να ορίσουμε τους τελευταίους ως αυτόνομες οντότητες λογισμικού που μπορούν να μεταναστεύουν ανάμεσα σε φυσικές υπολογιστικές τοποθεσίες μέσω του δικτύου. Η ιδέα που διέπει τη χρήση τους είναι το ότι οι Κινητοί Αντιπρόσωποι εκμεταλλεύονται την τοπική επικοινωνία αντί την απομακρυσμένη αλληλεπίδραση, με αποτέλεσμα να εξικονομούν δικτυακούς πόρους.

Στη συνέχεια θα αναπτυχθούν οι κύριες έννοιες που αφορούν τόσο τους κινητούς αντιπροσώπους γενικά όσο και οι συγκεκριμένες ιδιότητες της πλατφόρμας αντιπροσώπων που χρησιμοποιήσαμε (Grasshopper).

4.2 Κινητοί Αντιπρόσωποι

Από τις ελάχιστες θεωρητικές εργασίες που βρήκαμε [11] καταλήξαμε ότι οι Κινητοί Αντιπρόσωποι οφείλουν να έχουν τις παρακάτω ιδιότητες:

- Να είναι αυτόνομοι, δηλαδή να πετυχαίνουν το σκοπό τους μόνοι τους.
- Να έχουν την ιδιότητα να κλωνοποιούνται και να μεταναστεύουν.

- Να έχουν τη δυνατότητα να επικοινωνούν με άλλους αντιπροσώπους.
- Να έχουν βαθμίδες εξέλιξης (evolution states) για να καταγράφουν την υπολογιστική πρόοδό τους.

Πιο πρακτικά οι Κινητοί Αντιπρόσωποι εμφανίζονται στις σύγχρονες εφαρμογές ως υπολογιστικά προγράμματα που δρουν αυτόνομα για λογαριασμό κάποιου ατόμου ή οργανισμού. Πριν προχωρήσουμε, πρέπει να διαχωρίσουμε τους Κινητούς Αντιπρόσωπους από τον 'παραδοσιακό κινητό κώδικα'. Η διαφορά τους μπορεί να περιγραφεί με τη χαρακτηριστική ιδιότητα των παραπάνω, δηλαδή την μετανάστευση (*migration*) και την απομακρυσμένη εκτέλεση (*remote execution*) αντίστοιχα. Η μετανάστευση σημαίνει ότι ένα πρόγραμμα μπορεί να αλλάξει την τοποθεσία εκτέλεσής του κατά τη διάρκεια αυτής και ακριβώς στο σημείο που είχε μείνει πριν τη μετανάστευση. Αντίθετα η απομακρυσμένη εκτέλεση σημαίνει ότι ένα πρόγραμμα στέλνεται σε μία τοποθεσία πριν την ενεργοποίησή του και μένει εκεί για το υπόλοιπο της ζωής του.

Γενικά οι Κινητοί Αντιπρόσωποι έχουν αναπτυχθεί για αντικατάσταση ή βελτίωση του παραδοσιακού μοντέλου client/server. Στην περίπτωση της αντικατάστασης έχουμε εντελώς αυτόνομες υπολογιστικές οντότητες που μεταναστεύουν σε οποιαδήποτε επιθυμητή περιοχή και εκτελώνται εκεί χρησιμοποιώντας τις τοπικές αλληλεπιδράσεις. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της δικτυακής κίνησης και την απεξάρτηση από τη διαθεσιμότητα του δικτύου, καθώς απαιτείται πλέον μόνο η μετακίνηση του αντιπροσώπου και όχι η συνεχής επικοινωνία. Στην περίπτωση της βελτίωσης του μοντέλου client/server, κάθε Κινητός Αντιπρόσωπος μπορεί να παίξει το ρόλο είτε του πελάτη είτε του εξυπηρετητή οποιαδήποτε στιγμή ή ο αντιπρόσωπος-πελάτης να μεταναστεύει στην τοποθεσία του αντιπροσώπου-εξυπηρετητή και να αλληλεπιδρούν τοπικά. Πάντως οι Κινητοί Αντιπρόσωποι σχεδιάζονται έτσι ώστε να διατηρείται και η δυνατότητα απομακρυσμένης αλληλεπίδρασης μεταξύ τους για να διατηρηθεί και η παραδοσιακή συμβατότητα. Ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής επιλέγεται η κατάλληλη λειτουργία των αντιπροσώπων που συμμετέχουν σε αυτή.

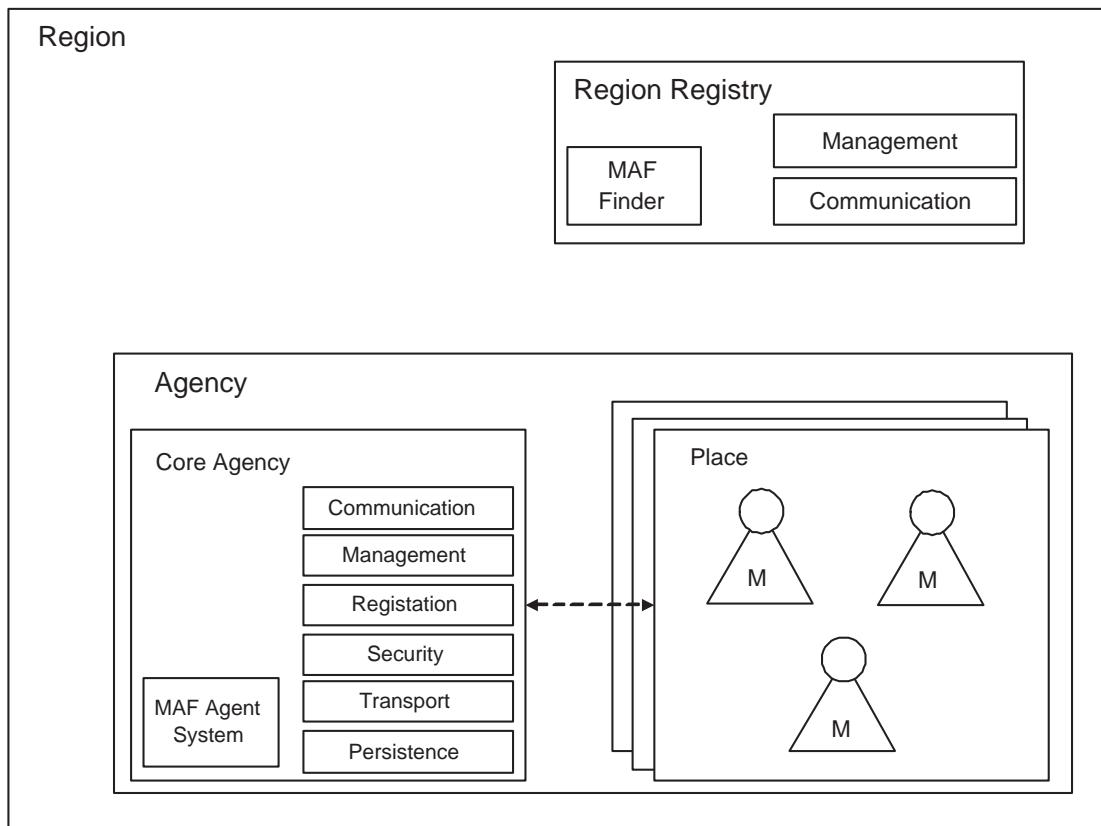
4.3 Πλατφόρμα Grasshopper

Η πλατφόρμα Grasshopper είναι μία πλατφόρμα Γενετικών Αλγορίθμων που έχει χτιστεί πάνω σε ένα κατανεμημένο επεξεργαστικό περιβάλλον, με αποτέλεσμα να ενσωματώνει τόσο το παραδοσιακό μοντέλο client/server όσο και την τεχνολογία

των Κινητών Αντιπροσώπων. Είναι γραμμένη στη γλώσσα JAVA και είναι συμβατή με το πρώτο standard για Κινητούς Αντιπροσώπους από τον οργανισμό Object Management Group (OMG), δηλαδή το Mobile Agent System Interoperability Facility (MASIF), το οποίο έχει συσταθεί για τη λειτουργία μεταξύ παρόμοιων πλατφορμών από διαφορετικούς κατασκευαστές. Η πλατφόρμα Grasshopper έχει κατασκευαστεί από τη γερμανική εταιρεία IKV++ GmbH.

4.3.1 Κατανεμημένο περιβάλλον αντιπροσώπων

Το κατανευμημένο περιβάλλον αντιπροσώπων του Grasshopper (Distributed Agent Environment-DAE) αποτελεί τη βάση της λειτουργίας του. Αυτό το περιβάλλον αποτελείται από περιοχές (*regions*), τόπους (*places*), αντιπροσωπείες (*agencies*) και διαφορετικούς τύπους αντιπροσώπων. Το σχήμα 4.1 παριστάνει αφηρημένα αυτές τις έννοιες, οι οποίες εξηγούνται παρακάτω.



Σχήμα 4.1: Ιεραρχική δομή συστατικών του Grasshopper

Αντιπρόσωποι

Υπάρχουν δύο είδη αντιπροσώπων στην πλατφόρμα Grasshopper: οι *σταθμευμένοι* (*stationary*) και οι *κινητοί* (*mobile*). Οι κινητοί μπορούν να μεταναστεύουν από μία τοποθεσία του φυσικού δικτύου σε άλλη ενώ οι σταθμευμένοι δεν έχουν αυτή την ιδιότητα. Και οι δύο τύποι ικανοποιούν τις υπόλοιπες ιδιότητες που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 4.2.

Κατά τη διάρκεια της ζωής τους οι αντιπρόσωποι μπορούν να βρίσκονται σε μία από τις παρακάτω διαφορετικές καταστάσεις.

- **Ενεργός (Active):** Ένας αντιπρόσωπος είναι ενεργός όταν διεκπεραιώνει την αποστολή του. Ένα ενεργός αντιπρόσωπος μπορεί να ανασταλεί ή να απενεργοποιηθεί.
- **Αναστελόμενος (Suspended):** Όταν ένας αντιπρόσωπος αναστέλλεται τότε η εκτέλεσή του διακόπτεται προσωρινά. Όσο βρίσκεται σε αυτήν την κατάσταση παραμένει ως αντικείμενο και μπορεί να συνεχίσει την εκτέλεσή του όταν ο ίδιος το θελήσει. Απλώς όσο είναι σε αναστολή δεν μπορεί να επικοινωνήσει με άλλα αντικείμενα.
- **Διωγμένος (Flushed):** Σε αυτή την κατάσταση ο αντιπρόσωπος δεν είναι ενεργός πλέον. Παρόλα αυτά όλες οι εσωτερικές πληροφορίες του αποθηκεύονται και με αυτές μπορεί να ενεργοποιηθεί ξανά ως νέο αντικείμενο. Επίσης διατηρεί την επικοινωνία του με τα άλλα αντικείμενα.

Αντιπροσωπείες

Η αντιπροσωπεία είναι το πραγματικό περιβάλλον που τρέχουν οι αντιπρόσωποι. Τουλάχιστον μία αντιπροσωπεία πρέπει να λειτουργεί σε κάθε υπολογιστή για να υποστηρίζει την εκτέλεση των αντιπροσώπων. Η αντιπροσωπεία αποτελείται από δύο μέρη: τον πυρήνα και ένα ή περισσότερα μέρη.

Ο πυρήνας (Core Agency) προσδίδει την ελάχιστη λειτουργικότητα που απαιτείται από την αντιπροσωπεία για να υποστηρίξει την εκτέλεση των αντιπροσώπων. Οι παρακάτω υπηρεσίες προσφέρονται από αυτόν:

- **Υπηρεσία επικοινωνίας (Communication Service):** Η υπηρεσία αυτή είναι υπεύθυνη για όλες τις απομακρυσμένες αλληλεπιδράσεις που λαμβάνουν

χώρα μεταξύ των κατανεμημένων συστατικών του Grasshopper, όπως διαφανής επικοινωνία μεταξύ αντιπροσώπων, μεταφορά αντιπροσώπων και τοπικότητα των αντιπροσώπων μέσω του καταλόγου της περιοχής.

- **Υπηρεσία καταχώρησης (Registration Service):** Κάθε αντιπρόσωπος πρέπει να γνωρίζει για όλους τους υπόλοιπους αντιπροσώπους που φιλοξενούνται και για όλες τις περιοχές που υπάρχουν, από τη μία για λόγους εξωτερικής διαχείρισης και από την άλλη για την αποστολή πληροφοριών για αυτά τα καταγεγραμμένα συστατικά. Η υπηρεσία καταχώρησης επιτυγχάνει ακριβώς αυτό σε συνεργασία με τον κατάλογο της περιοχής στην οποία βρίσκεται.
- **Υπηρεσία διαχείρησης (Management Service):** Αυτή η υπηρεσία προσφέρει έλεγχο των αντιπροσώπων και των μερών μίας αντιπροσωπείας από εξωτερικούς χρήστες.
- **Υπηρεσία μεταφοράς (Transport Service):** Η υπηρεσία αυτή πραγματοποιεί τη μετανάστευση των αντιπροσώπων από μία αντιπροσωπεία σε μία άλλη, χειριζόμενη την πραγματική μεταφορά μέσω του φυσικού στρώματος του επικοινωνιακού διαύλου.
- **Υπηρεσία ασφάλειας (Security Service):** Αυτή η υπηρεσία υποστηρίζει την προστασία των συστατικών του Grasshopper με τη χρήση αρκετών σύγχρονων πρωτοκόλλων (SSL, X.509 certificates, JDK security).
- **Υπηρεσία επιμονής (Persistence Service):** Η υπηρεσία αυτή επιτρέπει την αποθήκευση των αντιπροσώπων και των μερών, δηλαδή την αποθήκευση των εσωτερικών πληροφοριών τους, ώστε να είναι δυνατή η επανενεργοποίησή τους σε περιπτώσεις ανάγκης.

Το μέρος είναι μία λογική ομάδα λειτουργικότητας μέσα σε μια αντιπροσωπεία όπου μαζεύονται αντιπρόσωποι με παρεμφερή λειτουργία.

Περιοχές

Η ιδέα της περιοχής διευκολύνει τη διαχείρηση των κατανεμημένων συστατικών του Grasshopper στο δικτυακό περιβάλλον του. Οι αντιπροσωπείες και τα μέρη τους συσχετίζονται με μία συγκεκριμένη περιοχή με το να καταγράφονται στον κατάλογό της. Εάν ένας αντιπρόσωπος μετακινηθεί σε μία άλλη τοποθεσία πρέπει να καταγραφεί στον κατάλογο της περιοχής στην οποία ανήκει η συγκεκριμένη τοποθεσία.

Ο κατάλογος διατηρεί πληροφορίες για όλα τα συστατικά που σχετίζονται με τη συγκεκριμένη περιοχή. Όταν κάποιο νέο συστατικό δημιουργείται καταγράφεται αυτόματα στον κατάλογο της αντίστοιχης περιοχής. Ενώ οι αντιπροσωπείες και τα μέρη τους σχετίζονται με μία περιοχή για όλη τους τη ζωή, οι κινητοί αντιπρόσωποι μπορούν να μετακινηθούν μεταξύ αντιπροσωπειών της ίδιας ή διαφορετικής περιοχής. Με την επικοινωνία με τον κατάλογο της περιοχής, άλλες οντότητες (συμπεριλαμβανομένων των αντιπροσώπων και των ανθρώπινων χρηστών) μπορούν οποιαδήποτε στιγμή να εντοπίσουν όλα τα συστατικά που βρίσκονται σε μια περιοχή.

4.3.2 Επικοινωνιακές ιδέες

Οι ιδέες που θα αναπτυχθούν εφαρμόζονται στην Επικοινωνιακή Υπηρεσία κάθε πυρήνα αντιπροσωπείας, η οποία επιτρέπει διαφανείς αλληλεπιδράσεις μεταξύ αντιπροσώπων, αντιπροσωπειών και εξωτερικών οντοτήτων. Εκτός από την υπηρεσία, η πλατφόρμα Grasshopper υποστηρίζει και τις διαπροσωπείες CORBA για απομακρυσμένες αλληλεπιδράσεις.

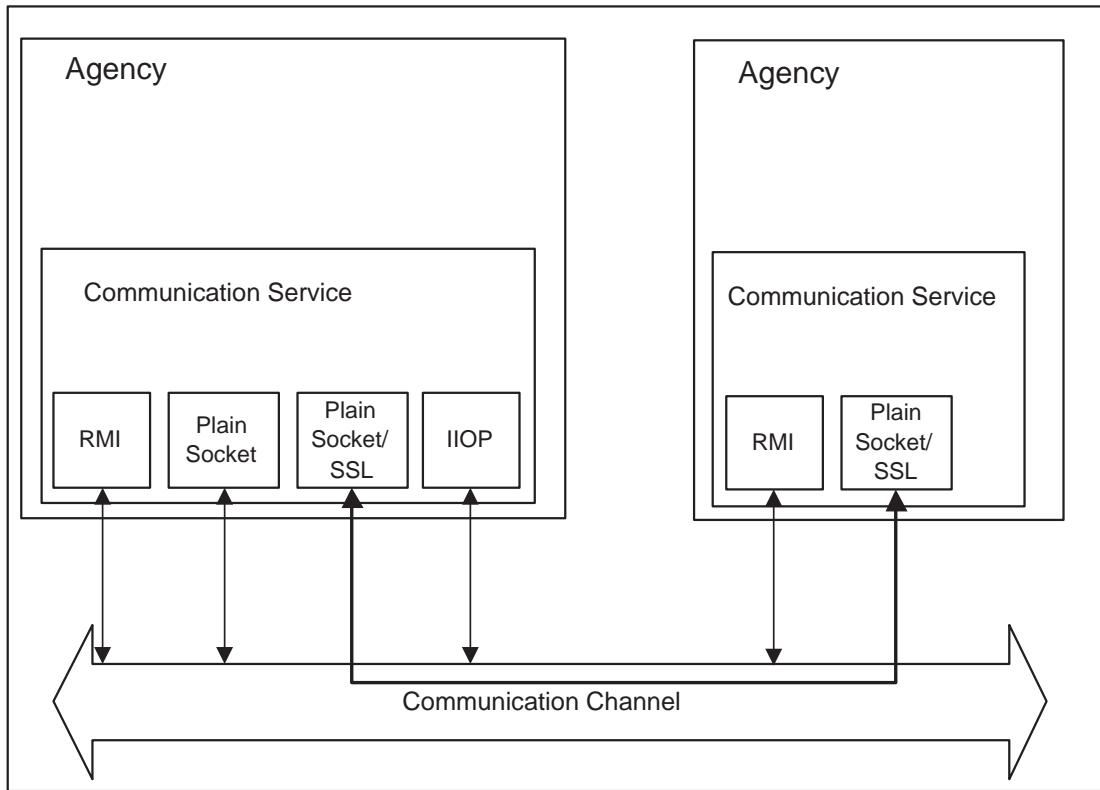
Υποστήριξη πολλαπλών πρωτοκόλλων

Οι απομακρυσμένες αλληλεπιδράσεις γίνονται με συγκεκριμένα πρωτόκολλα, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2. Η Επικοινωνιακή Υπηρεσία υποστηρίζει τα *Internet Inter-ORB Protocol (IIOP)*, *Java Remote Method Invocation (RMI)* και *plain socket connections*. Τα δύο τελευταία μπορούν να προστατευτούν με το *Secure Socket Layer (SSL)*.

Διαφάνεια τοποθεσίας

Όταν οι αντιπρόσωποι χρησιμοποιούν την Υπηρεσία Επικοινωνίας για να καλέσουν μεθόδους σε άλλους αντιπροσώπους, αυτό γίνεται με διαφάνεια τοποθεσίας, δηλαδή δε χρειάζεται να είναι γνωστή σε αυτούς η τοποθεσία του επιθυμητού επικοινωνιακού άκρου. Μέσα στον κώδικα του αντιπροσώπου, οι απομακρυσμένες κλήσεις μοιάζουν ακριβώς σαν κλήσεις τοπικών μεθόδων σε αντικείμενα που βρίσκονται στην ίδια εικονική μηχανή της Java (Java Virtual Machine).

Το παραπάνω επιτυγχάνεται με τα λεγόμενα αντικείμενα *proxy* που χρησιμοποιούνται άμεσα από έναν πελάτη. Το αντικείμενο proxy προωθεί την κλήση μέσω ORB



Σχήμα 4.2: Υποστήριξη πολλαπλών πρωτοκόλλων

στο απομακρυσμένο αντικείμενο (τον εξυπηρετητή). Το σχήμα 4.3 δείχνει με αφηρημένο τρόπο την παραπάνω ιδέα.

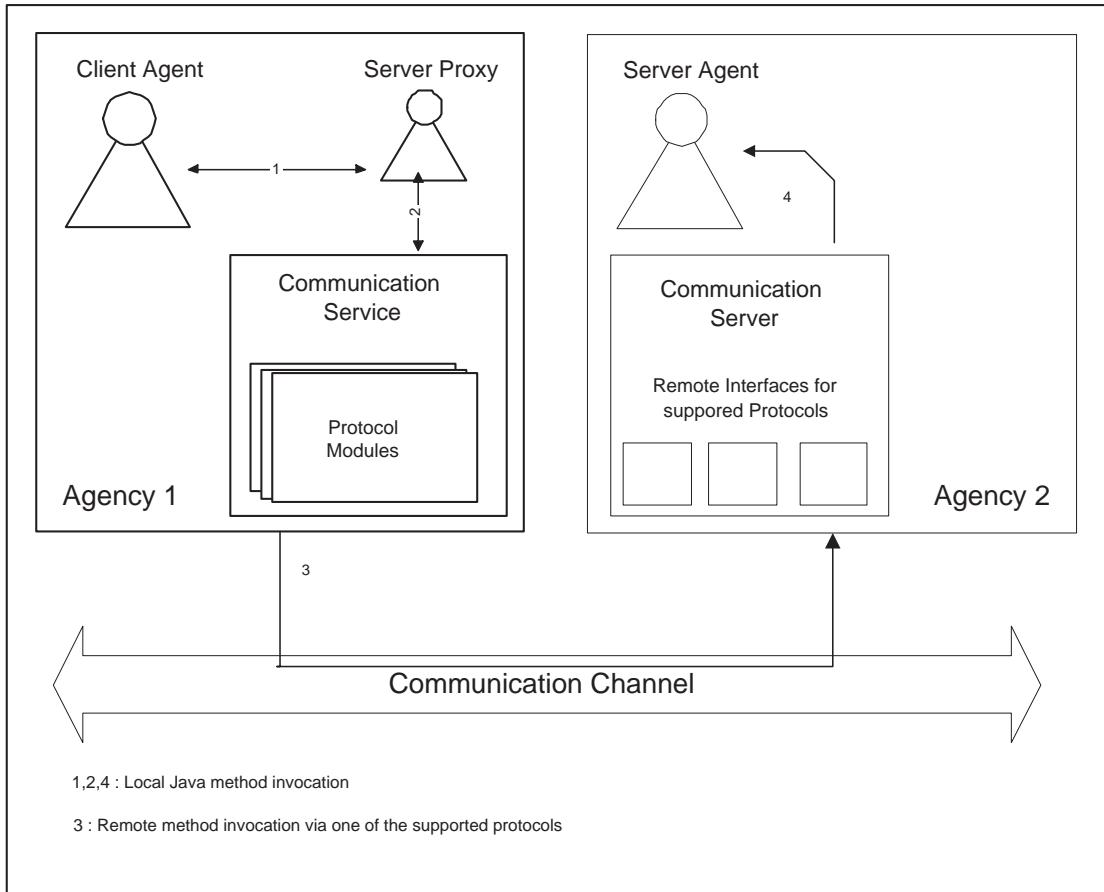
Η επικοινωνία μεταξύ των αντιπροσώπων γίνεται με τέσσερεις τρόπους: σύγχρονα, ασύγχρονα, δυναμικά και ομαδικά (multicast). Γενικά μία τοποθεσία στο Grasshopper δίνεται με έναν τρόπο παρόμοιο με το URL και έχει τη μορφή:

`<protocol>://<host>:<port>/<agency>/<place>`

όπου: protocol είναι το ακρωνύμιο του επιθυμητού πρωτοκόλλου, host είναι η IP διεύθυνση του προορισμού (τα υπόλοιπα είναι εμφανή).

4.3.3 Λόγοι που διαλέξαμε το Grasshopper

Οι λόγοι που επιλέξαμε τη συγκεκριμένη πλατφόρμα για την υλοποίηση των Κινητών Αντιπροσώπων είναι οι εξείς:



Σχήμα 4.3: Επικοινωνία με διαφάνεια τοποθεσίας

- Είναι ελεύθερο software που διατίθεται μέσω δικτύου.
- Είναι γραμμένο σε γλώσσα Java, ώστε να έχουμε τη δυνατότητα της ανάπτυξης μιας ολοκληρωμένης πλατφόρμας γενετικών αντιπροσώπων.
- Έχει όλα τα χαρακτηριστικά που χρειαζόμαστε για την υλοποίηση της πλατφόρμας μας και αποτελεί μια αρχετά γνωστή υλοποίηση αντιπροσώπων.

Κεφάλαιο 5

Ανάλυση και Λειτουργία Πλατφόρμας

Στο παρόν κεφάλαιο θα περιγράψουμε το σχεδιασμό της πλατφόρμας που αναπτύξαμε σε αφηρημένο επίπεδο και επίσης τις λειτουργίες της υλοποιημένης μορφής. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει ο αρχικός σκοπός ήταν ο προγραμματισμός ενός γενετικού αλγορίθμου που θα έλυνε το πρόβλημα της υπερθερμίας. Στη συνέχεια όμως αναπτύξαμε μία πλατφόρμα που επιλύει οποιοδήποτε πρόβλημα βελτιστοποίησης της δοθεί με τη χρήση γενετικών αλγορίθμων.

5.1 Ανάλυση

Ακολουθεί μία ανάλυση κατά τα πρότυπα της ανάπτυξης λογισμικού, δηλαδή με τις αντίστοιχες περιπτώσεις χρήσης, την αλληλεπίδραση των οντοτήτων του συστήματος και τις λεπτομέρειες του συστήματος.

5.1.1 Περιπτώσεις χρήσης

Αρχικά θα πρέπει να αναλύσουμε τις περιπτώσεις χρήσεις της πλατφόρμας μας ως stand-alone εφαρμογή. Αυτό δεν είναι και πολύ δύσκολο, επειδή προορίζεται σχεδόν αποκλειστικά σε όποιον θέλει να λύσει ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με τη χρήση γενετικών αλγορίθμων. Το πρόβλημα δεν είναι απαραίτητο να περιορίζεται σε

αριθμητικούς υπολογισμούς, αλλά ακολουθώντας πάντα τις αντίστοιχες διαπροσωπείες (interfaces) που θα περιγραφούν σε επόμενο κεφάλαιο είναι δυνατό να επιλυθεί οποιασδήποτε φύσης πρόβλημα.

5.1.2 Αλληλεπίδραση οντοτήτων

Σε πρώτη φάση ο χρήστης πρέπει να ακολουθήσει το interface που απαιτείται και να γράψει τον κώδικα για το πρόβλημα που θέλει να λύσει. Στη συνέχεια, αφού εισάγει το πρόβλημα στην πλατφόρμα, μπορεί να τη χρησιμοποιήσει μέσω της γραφικής διαπροσωπείας που παρέχεται, ώστε να επιλέξει ένα από τα διαθέσιμα προβλήματα που μπορεί να υπάρχουν, να ρυθμίσει τις παραμέτρους για το γενετικό αλγόριθμο και τελικά να εκκινήσει τη διαδικασία επίλυσης. Μετά από λίγο (ή περισσότερο) χρόνο θα πάρει τη λύση καθώς και ένα διάγραμμα που να δείχνει την πρόοδο κατά τη διάρκεια του αλγορίθμου.

5.1.3 Λεπτομέρειες συστήματος

Ο χρήστης πρέπει να ακολουθήσει δύο (ή τρία ανάλογα με το πρόβλημα) στάδια επιλογών προκειμένου να μπορέσει να εκκινήσει τη διαδικασία επίλυσης.

Πρώτα πρέπει να ρυθμίσει τις παραμέτρους που αφορούν τον τρόπο εκτέλεσης του αλγορίθμου. Αυτές είναι οι εξεις:

- **Κωδικοποίηση (Encoding):** Εδώ θα επιλέγεται το είδος της κωδικοποίησης των χρωμοσωμάτων. Οι πιθανές επιλογές είναι: δυαδική (binary), πραγματική (real) και μεικτή (mixed). Το είδος της κωδικοποίησης επηρεάζει τις λειτουργίες των τελεστών του συνδυασμού και της μετάλλαξης.
- **Μέθοδος επιλογής (Selection method):** Εδώ επιλέγεται η μέθοδος επιλογής. Οι πιθανές επιλογές είναι: αποδεκατισμός πληθυσμού (population decimation), αναλογική επιλογή (proportionate selection), επιλογή με διαγωνισμό (tournament selection) και οποιαδήποτε άλλη μέθοδος έχει υλοποιηθεί. Ανάλογα με το πρόβλημα ο χρήστης οφείλει να επιλέξει την κατάλληλη μέθοδο επιλογής, ώστε να μην παρατηρηθούν πιθανά προβλήματα (όπως πρόωρη σύγκλιση σε πρόβλημα με πολλά τοπικά μέγιστα).
- **Ποσοστό επικάλυψης πληθυσμών (Population overlap percentage):** Εδώ επιλέγεται το ποσοστό της παλαιάς γενιάς που θα επιλεγεί για ζευγάρωμα

σε steady-state γενετικούς αλγορίθμους. Η συγκεκριμένη παράμετρος παιζει ρόλο μόνο όταν για παράδειγμα η μέθοδος επιλογής είναι ο αποδεκατισμός πληθυσμού.

- **Μέγεθος πληθυσμού (Population size):** Εδώ επιλέγεται το αρχικό μέγεθος πληθυσμού. Σε generational γενετικούς αλγορίθμους το μέγεθος πληθυσμού θα μείνει ίδιο σε όλες τις γενιές ενώ αντίθετα ενδέχεται να αλλάζει από γενιά σε γενιά.
- **Πιθανότητα συνδυασμού (Crossover probability):** Εδώ επιλέγεται η παράμετρος p_{cross} .
- **Πιθανότητα μετάλλαξης (Mutation probability):** Εδώ επιλέγεται η παράμετρος p_{mut} .
- **Ελιτισμός (Elitism):** Εδώ επιλέγεται αν θα υπάρχει ελιτισμός ή όχι.

Στη συνέχεια ο χρήστης πρέπει να ρυθμίσει παραμέτρους που αφορούν το πρόβλημα στη γενική μορφή του. Αυτές είναι οι εξεις:

- **Το μήκος των παραμέτρων σε bits:** Εδώ επιλέγεται το μήκος κάθε παραμέτρου που κωδικοποιείται στο χρωμόσωμα σε bits (ισχύει μόνο για τη δυαδική κωδικοποίηση). Έστω ότι ορίζεται η τιμή της συγκεκριμένης παραμέτρου σε N και ότι έχουμε M παραμέτρους στο πρόβλημα, τότε το μήκος του χρωμοσώματος σε bits θα είναι $M \cdot N$. Πρέπει να σημειώσουμε ότι μεγάλα μήκη παραμέτρων σημαίνει πιο λεπτομερής εξερεύνηση του χώρου των λύσεων, αλλά πρέπει να συνοδεύονται και από ικανοποιητικούς σε μέγεθος πληθυσμούς για να επιτευχθεί αυτό.
- **Η μέθοδος σύγκλισης του αλγορίθμου για το συγκεκριμένο πρόβλημα:** Εδώ επιλέγεται ο τρόπος που θα τελειώσει ο αλγόριθμος. Πιθανές επιλογές είναι η σύγκλιση μετά από ένα συγκεκριμένο αριθμό γενεών ή όταν η συνάρτηση καταλληλότητας φτάσει ένα επιθυμητό σημείο.

Τέλος, μπορεί να απαιτούνται συγκεκριμένες τιμές παραμέτρων για το πρόβλημα που ο χρήστης δεν επιθυμεί να εξεταστούν από το γενετικό αλγόριθμο. Αυτές θα πρέπει να εισάγονται με τη μορφή αρχείου και ο χρήστης να επιλέγει από το GUI το διάβασμα αυτού του αρχείου πριν την έναρξη της επίλυσης.

Πάλι μέσω της γραφικής διαπροσωπείας ο χρήστης θα πρέπει να εκχινεί το γενετικό αλγόριθμο (αφού φυσικά έχουν ολοκληρωθεί με επιτυχία τα παραπάνω βήματα).

Έχοντας κρατήσει τις επιλογές του χρήστη, η πλατφόρμα τρέχει τον Απλό Γενετικό Αλγόριθμο (που έχει περιγραφεί στην ενότητα 3.4.1) με τις βελτιώσεις που έχουν αναφερθεί στην ενότητα 3.4.6. Σε κάθε γενιά παρουσιάζονται τα χρωμοσώματα με τις τιμές καταλληλότητάς τους (πριν και μετά το scaling), ενώ στο τέλος παρουσιάζονται στην οθόνη τόσο η λύση (οι τιμές δηλαδή των παραμέτρων) όσο και μία γραφική παράσταση με την πρόοδο του γενετικού αλγορίθμου (παρουσίαση της καλύτερης τιμής καταλληλότητας κάθε γενιάς).

Περιγραφή απλής υλοποίησης Κινητών Αντιπροσώπων

Ως τώρα περιγράψαμε την ανάλυση της πλατφόρμας ως stand-alone εφαρμογή χωρίς την εισαγωγή των Κινητών Αντιπροσώπων. Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας ενσωματώσαμε μία απλή αρχιτεκτονική με Κινητούς Αντιπροσώπους στην υπάρχουσα πλατφόρμα. Σε επόμενο κεφάλαιο περιγράφονται ιδέες για μία πιο προχωρημένη πλατφόρμα γενετικών αντιπροσώπων.

Στην απλή αρχιτεκτονική που αναπτύχθηκε αρχικά χρησιμοποιείται ένα γενικό σχήμα Αφέντη-Εργάτη (Master-Worker). Σε αυτό ο Αφέντης είναι ο αντιπρόσωπος που χρησιμοποιείται ως κεντρική οντότητα της εφαρμογής και είναι υπεύθυνος για τη δημιουργία των χρωμοσωμάτων, την κατάταξή τους και γενικότερα την ομαλή διεξαγωγή του γενετικού αλγορίθμου. Επίσης σε αυτόν ενσωματώνεται το GUI για την αλληλεπίδραση με το χρήστη και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Αντίθετα οι Εργάτες είναι, μάλλον 'χαζοί', Κινητοί Αντιπρόσωποι που απλώς στέλνονται από τον Αφέντη σε διάφορους απομακρυσμένους υπολογιστές, εκτελούν απλώς την αποκαθικοποίηση του χρωμοσώματος που τους έχει αναθέσει ο Αφέντης και επιστρέφουν την τιμή καταλληλότητας σε αυτόν.

Η λειτουργία του παραπάνω σχήματος είναι η εξής: ο Αφέντης αρχικοποιεί το γενετικό αλγόριθμο ανάλογα με τις επιλογές του χρήστη μέσω του GUI δημιουργώντας N τυχαία χρωμοσώματα (όπου N ο αρχικός πληθυσμός του αλγορίθμου). Στη συνέχεια μέσω των κατάλληλων μηχανισμών καταγράφει τα χαρακτηριστικά του δικτύου που είναι προσπελάσιμο από αυτόν και δημιουργεί μια λίστα από όλους τους υπολογιστές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση του προβλήματος (έστω ότι βρίσκεται M τέτοιους υπολογιστές). Εάν $N \leq M$ τότε δημιουργεί N Εργάτες και τους στέλνει σε N υπολογιστές. Εάν $N > M$ τότε δημιουργεί M Εργάτες και τους στέλνει σε M υπολογιστές. Στη συνέχεια στέλνει ένα χρωμόσωμα στον εργάτη κάθε υπολογιστή και περιμένει την επιστροφή των τιμών καταλληλότητας από όλους. Εάν $N > M$, μόλις λάβει το αποτέλεσμα από κάποιον υπολογιστή, στέλνει ξανά σε αυτόν το επόμενο χρωμόσωμα που δεν έχει σταλεί, μία διαδικασία που συνεχίζεται

μέχρι να σταλούν και τα N χρωμοσώματα. Όταν τελικά ο Αφέντης έχει όλα τα αποτελέσματα της γενιάς στη διάθεσή του κατατάσει τα χρωμοσώματα ανάλογα με την καταλληλότητά τους, εφαρμόζει την επιλογή για να βρει ποιά χρωμοσώματα θα ζευγαρώσουν και χρησιμοποιώντας τους τελεστές του συνδυασμού και της μετάλλαξης παράγει τη νέα γενιά. Τότε στέλνει πάλι τα χρωμοσώματα στους υπολογιστές με τον ίδιο τρόπο όπως προηγουμένως περιμένοντας τα αποτελέσματά τους. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι να ικανοποιηθεί το κριτήριο σύγκλισης που έχει επιλεχθεί από το χρήστη. Βέβαια όταν κατά τη διάρκεια του αλγορίθμου βρεθεί κάποιο χρωμόσωμα ίδιο με άλλο προηγούμενα υπολογισμένο τότε ο Αφέντης προφανώς δεν το στέλνει για επανυπολογισμό, αλλά παίρνει αμέσως την καταλληλότητά του από μια λίστα, στην οποία καταγράφει όλα τα υπολογιζόμενα χρωμοσώματα.

Περιγραφή Εργάτη προβλήματος υπερθερμίας

Έχοντας περιγράψει πλήρως την πλατφόρμα το μόνο που μένει είναι να περιγράψουμε τον αντιπρόσωπο που λύνει το πρόβλημα. Σε αυτή την περιγραφή εξετάζουμε ένα πολύ βασικό πρόβλημα: το πώς από τον υπολογισμό του SAR σε διάφορα σημεία του χώρου περνάμε στην εύρεση ενός πραγματικού αριθμού που αντικατοπτρίζει την καταλληλότητα του χρωμοσώματος, δηλαδή ποια είναι η μορφή της συνάρτησης καταλληλότητας.

Κατ’ αρχάς πρέπει να τονίσουμε ότι οι αριθμητικοί υπολογισμοί γίνονται όπως στη θεωρία χωρίς καμία παραλλαγή. Αυτό που κάνει ο Εργάτης είναι ο υπολογισμός του SAR σε ένα τρισδιάστατο πλέγμα σημείων στο χώρο του όγκου. Από αυτές τις πληροφορίες πρέπει να εξαχθεί η καταλληλότητα του χρωμοσώματος, το οποίο δίνει τιμή στις παραμέτρους: ύψη H_1 , H_2 και φάση τροφοδοσίας θ_i .

Ο τρόπος που σκεφτήκαμε για τη λύση του προβλήματος αυτού είναι η επεξεργασία της τρισδιάστατης μήτρας με τις τιμές του SAR με μία μήτρα βαρών. Επειδή ο πολλαπλασιασμός πινάκων είναι δυνατός μόνο σε δύο διαστάσεις, πολλαπλασιάζουμε όλες τις διδιάστατες μήτρες που αποτελούν την τρισδιάστατη μήτρα κατά μήκος μήας (έστω αυτής που αντικατοπτρίζει τον άξονα z) διάστασης με τη διδιάστατη μήτρα βαρών. Αν η αρχική μήτρα των SAR έχει διαστάσεις $NX \times NY \times NZ$ τότε η μήτρα βαρών πρέπει να έχει διαστάσεις $NY \times NX$. Οι ενδιάμεσες μήτρες που προκύπτουν από τους πολλαπλασιασμούς έχουν διαστάσεις $NX \times NX$. Σε αυτές υπολογίζουμε τις νόρμες (πρώτου βαθμού αφού όλα τα στοιχεία είναι θετικά) τους και τις προσθέτουμε για να βγάλουμε το τελικό αποτέλεσμα που είναι η καταλληλότητα του χρωμοσώματος. Τα βάρη της μήτρας βαρών είναι θετικοί αριθμοί που ακολουθούν

την επιθυμητή μορφή του θερμικού σχήματος, δηλαδή αν επιθυμούμε μεγαλύτερη θερμότητα στα άκρα θέτουμε μεγαλύτερα τα βάρη στην περιφέρεια της μήτρας.

Αφού αναφέραμε τον τρόπο δημιουργίας της συνάρτησης καταλληλότητας, ας δούμε πως λειτουργεί ο αντιπρόσωπος-Εργάτης. Αρχικά όταν δημιουργείται, διαβάζει το αρχείο παραμέτρων του προβλήματος, το οποίο δίνει τις παρακάτω πληροφορίες: το που θέλουμε να δοθεί έμφαση στο θερμικό σχηματισμό (περιφέρεια ή κέντρο), τη συχνότητα λειτουργίας της διάταξης, την ηλεκτρική επιτρεπτότητα και αγωγμάτητα και την πυκνότητα του περιβάλλοντος (όγκου), την επιθυμητή ακρίβεια για τη μέθοδο ολοκλήρωσης, τον αριθμό των υποδιαιρέσεων στη μέθοδο ολοκλήρωσης, τον αριθμό των κεραιών, τα όρια των παραμέτρων που θα εξετάσει ο γενετικός αλγόριθμος, την εσωτερική ακτίνα a_i των διπόλων, τον αριθμό των διηλεκτρικών στρωμάτων, την εξωτερική ακτίνα και την ηλεκτρική επιτρεπτότητα καθενός από αυτά για κάθε δίπολο, τον κυματαριθμό k_L και τη σύνθετη αντίσταση Z_c για κάθε δίπολο, τα σημεία τροφοδοσίας κάθε διπόλου σε καρτεσιανές συντεταγμένες και, τέλος, τον αριθμό των σημείων στους άξονες x , y και z ώστε να δημιουργηθεί το τρισδιάστατο πλέγμα των σημείων υπολογισμού του SAR, καθώς και τις συντεταγμένες τους στους τρεις άξονες.

Στη συνέχεια μεταναστεύει στην τοποθεσία που του ορίζει ο Αφέντης και περιμένει μέχρι να του σταλεί κάποιο χρωμόσωμα για επεξεργασία. Τότε αποκωδικοποιεί το χρωμόσωμα και δίνει τις αντίστοιχες τιμές στις εξεταζόμενες παραμέτρους. Στη συνέχεια πραγματοποιεί όλους τους παραπάνω υπολογισμούς για να εξάγει την τιμή της καταλληλότητας του χρωμοσώματος, την οποία και στέλνει στον Αφέντη. Μέχρι το τέλος της ζωής του παραμένει στην ίδια τοποθεσία, εκτός και εάν του σταλεί εντολή για μετανάστευση σε άλλη τοποθεσία από τον Αφέντη.

Η λειτουργία του σχήματος Αφέντη-Εργάτη που περιγράψαμε φαίνεται στο σχήμα 5.1.

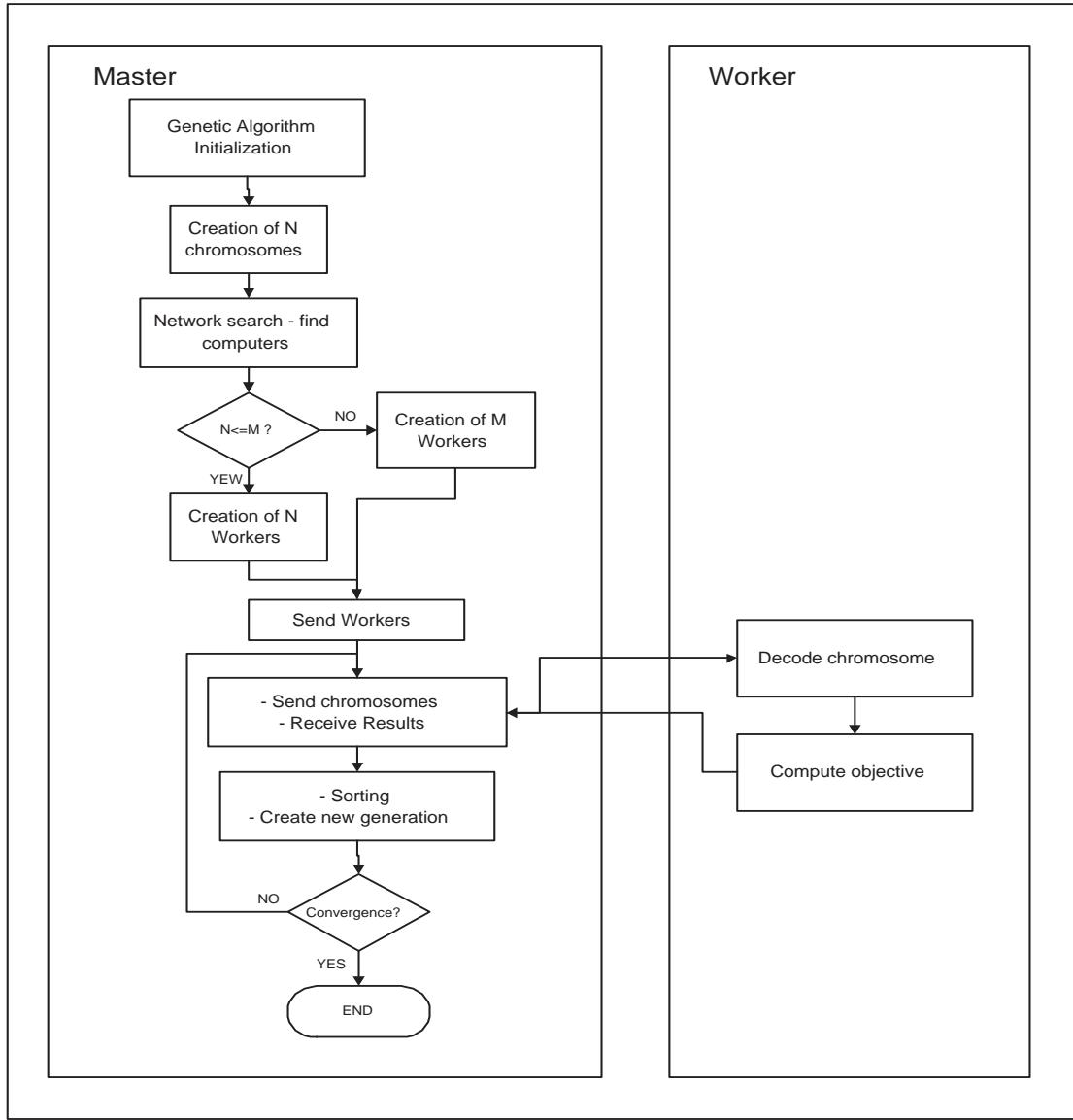
5.2 Λειτουργία

Η λειτουργία της πλατφόρμας μέσω της γραφικής διαπροσωπείας είναι αρκετά εύχολη. Η αρχική οθόνη είναι αυτή που φαίνεται στο σχήμα 5.2.

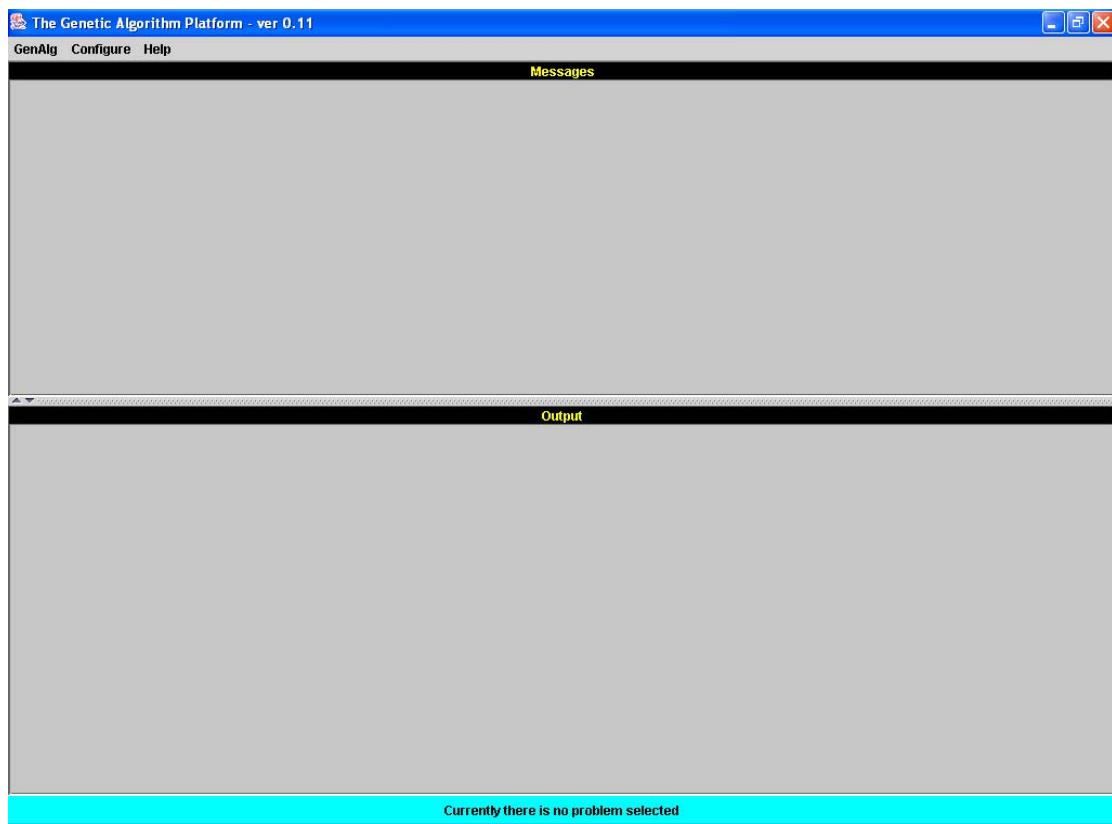
Στη συνέχεια ο χρήστης πρέπει να επιλέξει το πρόβλημα από την επιλογή *GenAlg → Select Problem*. Η οθόνη επιλογής, όπου ο χρήστης βλέπει τα έγκυρα προβλήματα και μια μικρή περιγραφή τους, φαίνεται στο σχήμα 5.3.

Μετά την επιλογή προβλήματος, ο χρήστης ρυθμίζει τις παραμέτρους του Γενετικού Αλγορίθμου και του προβλήματος με τις επιλογές *Configure*→*Gen. Algorithm Configuration* και *Configure*→*Parameters Configuration*. Οι οθόνες φαίνονται στα σχήματα 5.4 και 5.5 αντίστοιχα.

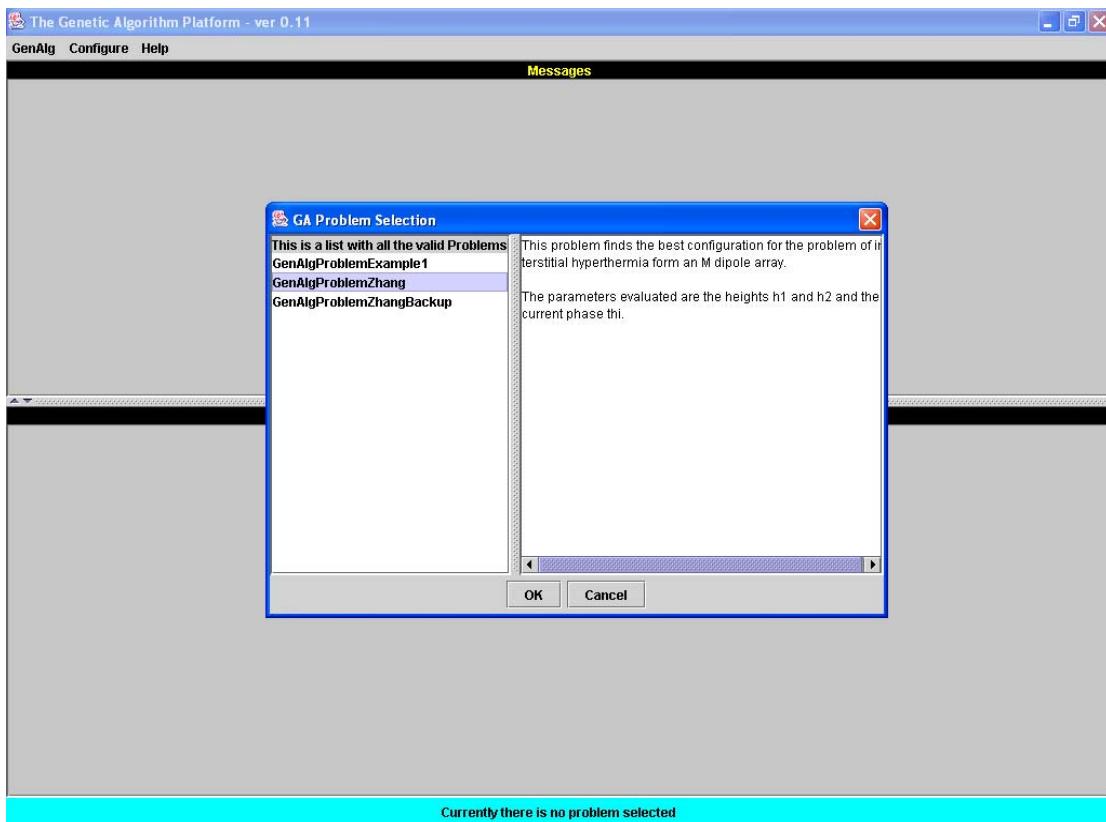
Εάν το πρόβλημα απαιτεί τη φόρτωση τιμών παραμέτρων από αρχείο, ο χρήστης πρέπει να πατήσει στην επιλογή *Configure*→*Load Values* και οι τιμές θα φορτωθούν. Μετά από όλα τα παραπάνω θα ενεργοποιηθούν οι επιλογές *GenAlg*→*Start* και *GenAlg*→*Stop*, με τις οποίες ξεκινά και τελειώνει ο αλγόριθμος. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο τέλος της εκτέλεσης.



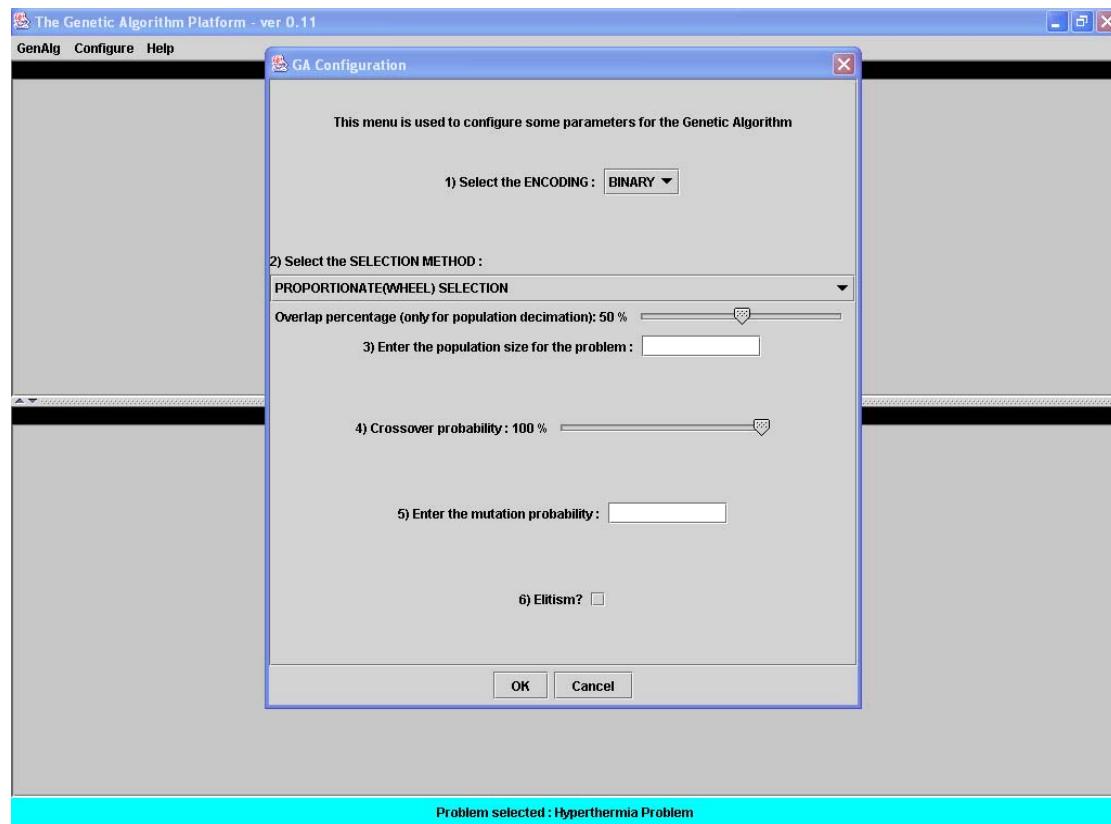
Σχήμα 5.1: Λειτουργία σχήματος Αφέντη-Εργάτη.



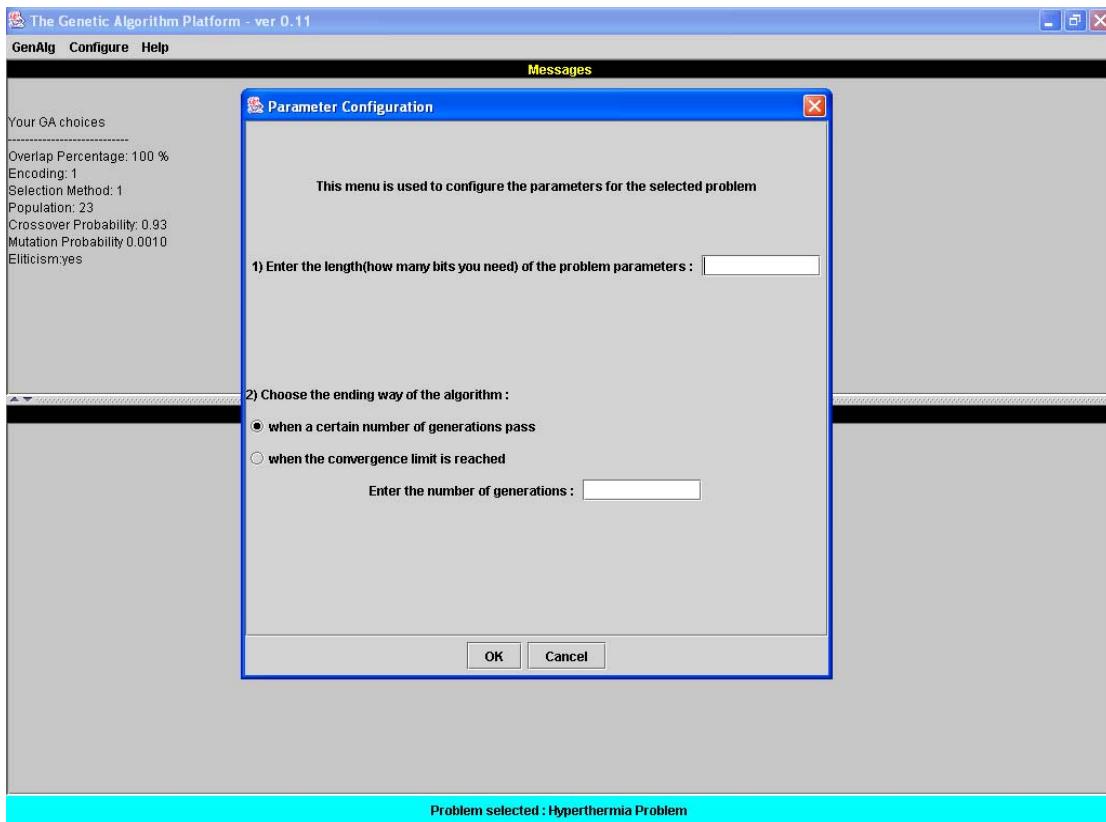
Σχήμα 5.2: Αρχική οθόνη πλατφόρμας.



Σχήμα 5.3: Επιλογή προβλήματος.



Σχήμα 5.4: Παράμετροι Γενετικού Αλγορίθμου.



Σχήμα 5.5: Παράμετροι Προβλήματος.

Κεφάλαιο 6

Αρχιτεκτονική και υλοποίηση

Για την υλοποίηση της πλατφόρμας χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προγραμματισμού Java, και πιο συγκεκριμένα η έκδοση 1.4. Η υλοποίηση του κομματιού των υπολογισμών του SAR βασίστηκε στο πρόγραμμα του Π. Ατλαμάζογλου [13] που είχε γίνει σε FORTRAN. Θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε αυτούσιο το παραπάνω εκτελέσιμο αρχείο, αλλά όταν ξεχινήσαμε την υλοποίηση της ιδέας της πλατφόρμας γενετικών αλγορίθμων, μεταφέραμε τους υπολογισμούς σε Java για να συμβαδίσουμε με το interface που απαιτείται για τη συγγραφή ενός προς επίλυση προβλήματος για την πλατφόρμα. Για τους Κινητούς Αντιπροσώπους, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, χρησιμοποιήσαμε τις κλάσεις της πλατφόρμας Grasshopper, οι οποίες έχουν γραφτεί επίσης σε Java.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται όλες οι κλάσεις που γράφτηκαν κατά τη δημιουργία της πλατφόρμας με τη χρήση UML καθώς και λεπτομέρειες για τις μεθόδους τους.

6.1 Μιγαδικοί Αριθμοί

Ένα σημαντικό εμπόδιο που αντιμετωπίσαμε ήταν η έλλειψη της Java για υποστήριξη μιγαδικών αριθμών. Για να το επιλύσουμε δημιουργήσαμε την κλάση **Complex**, που υποστηρίζει τη δημιουργία μιγαδικών και όλες τις απαραίτητες πράξεις. Το UML διάγραμμα φαίνεται στο σχήμα 6.1.

Τα δύο μέλη της κλάσης που παριστούν το πραγματικό και το φανταστικό μέρος του μιγαδικού είναι δηλωμένα ως `public`, ώστε να μπορούν να προσπελαστούν απ'ευθείας.

Αυτό έγινε για να υπάρχει η αίσθηση ότι η κλάση είναι κοντά στους ήδη υπάρχοντες built-in τύπους. Οι μέθοδοι των πράξεων και των συναρτήσεων είναι στατικές και επιστρέφουν ως αποτέλεσμα το reference σε νέο αντικείμενο μιγαδικού αριθμού, επειδή θέλουμε να διατηρούνται και τα αντικείμενα-ορίσματα. Υλοποιούνται οι πράξεις της πρόσθεσης (*add()*), αφαίρεσης (*sub()*), πολλαπλασιασμού (*mult()*), διαιρεσης (*div()*)-με ορίσματα μιγαδικούς ή μιγαδικό και πραγματικό-, εκθετικού (*exp()*), ημιτόνου (*sin()*), συνημιτόνου (*cos()*) και τετραγωνικής ρίζας (*sqr()*). Επίσης υπάρχουν μερικές βοηθητικές συναρτήσεις για εύκολη εύρεση του μέτρου (*amp()*), της φάσης (*arg()*), του συζυγούς (*conj()*), του αρνητικού (*neg()*) και του πολλαπλασιαζόμενου με j μιγαδικού (*multj()*). Τέλος υπάρχει και η συνάρτηση εκτύπωσης *println()* που επιστρέφει το μιγαδικό σε String.

6.2 Γενετικός Αλγόριθμος

Οι κλάσεις που αποτελούν τον κώδικα που επιλύει το Γενετικό Αλγόριθμο είναι τρεις: **Individual**, **GenAlgProblem** και **GenAlg**. Τα UML διαγράμματά τους και οι εξαρτήσεις τους φαίνονται στο σχήμα 6.2.

Η κλάση **Individual** αντιπροσωπεύει ένα μέλος του πληθυσμού μιας γενιάς. Τα μέλη της είναι: ένας πίνακας με boolean που παριστάνει το χρωμόσωμα, ένας πίνακας από double όπου αποθηκεύονται οι αποκωδικοποιημένες τιμές των παραμέτρων, ένας double που παριστάνει την έξοδο της συνάρτησης καταλληλότητας, ένας double που παριστάνει την καταλληλότητα μετά το scaling και ένα String που απεικονίζει το δυαδικό χρωμόσωμα. Ο κατασκευαστής (*Constructor*) της κλάσης παίρνει σαν όρισμα ένα αντικείμενο της κλάσης **GenAlgProblem** (στην abstract μορφή του) και αρχικοποιεί τα μεγέθη των πινάκων, το χρωμόσωμα με τυχαίο τρόπο και υπολογίζει τις τιμές καταλληλότητας μέσω των αντίστοιχων μεθόδων του **GenAlgProblem**. Η μέθοδος *toString()* επιστρέφει την αναπαράσταση του χρωμοσώματος σαν String με 0 και 1. Τέλος η μέθοδος *mutate()* αλλάζει ένα καθορισμένο bit του χρωμοσώματος (μέσω του δείκτη-όρισμα της μεθόδου) στο συζυγές του.

Η κλάση **GenAlgProblem** είναι abstract κλάση, δηλαδή δεν μπορεί να δημιουργηθεί αντικείμενο με κλάση **GenAlgProblem**. Αντιπροσωπεύει τη γενική ιδέα που πρέπει να διέπει κάθε πρόβλημα που θα λυθεί από την πλατφόρμα. Έχει ως μέλη τις παραμέτρους του Γενετικού Αλγορίθμου που θα εισαχθούν από τη γραφική διαπροσωπεία, οι οποίες είναι: το μέγεθος του πληθυσμού (*popSize*), ο αριθμός (*paramNum*) και το μήκος (*paramLength*) των παραμέτρων, η κωδικοποίηση (*encoding*), η μέθοδος επιλογής (*selection*) και το ποσοστό επικάλυψης των γενεών (*overlap*). Επίσης

υπάρχει ένα boolen μέλος (*needFile*) που δείχνει αν το πρόβλημα χρειάζεται παραμέτρους από αρχείο. Δεν υπάρχει κατασκευαστής, αφού έχουμε να κάνουμε με abstract κλάση. Οι δύο abstract μέθοδοι (ανυλοποίητες μέθοδοι) που καθιστούν την κλάση abstract είναι οι *decode()* και *objective()*, οι οποίες είναι υπεύθυνες για την αποκωδικοποίηση του χρωμοσώματος και την εύρεση της τιμής καταλληλότητας. Υπάρχουν τρεις στατικές μέθοδοι (*getClasses()*, *returnTitle()* και *returnBrief()*) που χρησιμοποιούνται στο GUI της πλατφόρμας. Επιπλέον συναντάμε τις μεθόδους *loadValues()* και *writeToFile()* που φορτώνουν τις παραμέτρους από αρχείο και γράφουν τα αποτελέσματα σε αρχείο αντίστοιχα. Τέλος συναντάμε βοηθητικές μεθόδους για να προσπελαύνουμε τα μέλη της κλάσης.

Η βασική ιδέα της πλατφόρμας βασίζεται στην κληρονομικότητα της παραπάνω κλάσης. Κάθε χρήστης που θέλει να λύσει ένα πρόβλημα στην πλατφόρμα μας, οφείλει να γράψει μια υποκλάση της GenAlgProblem και να υλοποιήσει τις δύο abstract μεθόδους, ώστε να πραγματοποιούν τους απαιτούμενους υπολογισμούς. Το interface, δηλαδή τα ορίσματα και το τι επιστρέφουν οι μέθοδοι αυτοί, πρέπει να παραμείνουν ίδια. Επιπλέον πρέπει στον κατασκευαστή της υποκλάσης να αρχικοποιήσει τα μέλη της, να ορίσει αν το πρόβλημα χρειάζεται αρχείο παραμέτρων ή όχι και να κάνει override τις μεθόδους που ασχολούνται με τα αρχεία, ώστε να συμπεριφέρονται όπως ο χρήστης θέλει. Η υποκλάση αυτή τότε θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί από την πλατφόρμα και να επιλυθεί το πρόβλημα.

Η κλάση GenAlg αποτελεί την καρδιά του Γενετικού Αλγορίθμου καθώς με αυτή γίνονται όλες οι ενέργειες προκειμένου να τρέξει ο αλγόριθμος με ένα συγκεκριμένο πρόβλημα. Έχει πολλά μέλη που χρησιμοποιούνται εσωτερικά για την καταγραφή στατιστικών και τη διευκόλυνση του αλγορίθμου, καθώς και μέλη που αντιγράφουν τις παραμέτρους του προβλήματος και του γενετικού αλγορίθμου για να κρατώνται τοπικά στην ίδια κλάση. Ο κατασκευαστής της κλάσης παίρνει σαν όρισμα ένα αντικείμενο υποκλάσης της GenAlgProblem και τις υπόλοιπες παραμέτρους που χρειάζεται, για να αρχικοποιήσει τον αλγόριθμο με τις παραμέτρους του συγκεκριμένου προβλήματος. Η μόνη public μέθοδος είναι η *GARun()*, η οποία είναι και αυτή που αντιπροσωπεύει τη λειτουργία του. Όλες οι υπόλοιπες μέθοδοι χρησιμοποιούνται ενδιάμεσα για την επίτευξη του σκοπού. Ο αρχικός πληθυσμός, που έχει δημιουργηθεί στον κατασκευαστή, κατατάσσεται (*sort()*) και στη συνέχεια από αυτόν δημιουργείται η νέα γενιά (*generation()*) που αντικαθιστά την παλιά. Η παραπάνω διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να ικανοποιηθεί το κριτήριο σύγκλισης. Μέσα στη μέθοδο που δημιουργεί τη νέα γενιά γίνονται οι επιλογές των ζευγαριών (με την κατάλληλη μέθοδο *selection*), ο συνδυασμός τους (*crossover()*) και ελέγχεται η μετάλλαξη.

6.3 Γραφική διαπροσωπεία (GUI)

Για τη δημιουργία της γραφικής διαπροσωπείας που παρουσιάστηκε στις εικόνες του προηγούμενου κεφαλαίου χρησιμοποιήσαμε τα πακέτα AWT και Swing της Java. Οι κλάσεις που χρειάστηκαν παρουσιάζονται στο σχήμα 6.3. Λεπτομέρειες για αυτές δεν αναφέρονται, επειδή είναι τετριμένες και μπορούν να βρεθούν σε οποιοδήποτε βιβλίο Java.

Το μόνο που έχει ενδιαφέρον είναι στην κλάση ProblemSelectionDialog, όπου χρησιμοποιούνται οι ιδιότητες reflection της Java (πακέτο `java.lang.reflect`). Προς το παρόν τα έγκυρα προβλήματα που δέχεται η πλατφόρμα πρέπει να έχουν σαν όνομα κλάσης GenAlgProblemxxxx, όπου xxxx:το όνομα που θέλουμε να δώσουμε. Όταν επιλέγουμε από τη λίστα με τα έγκυρα προβλήματα κάποιο όνομα, φαίνεται στα δεξιά μία σύντομη περιγραφή του προβλήματος (μέθοδος `returnBrief()` της κλάσης GenAlgProblem). Αυτό γίνεται με την κλήση της στατικής μεθόδου `returnBrief()` μόνο με το όνομά της, με την κλάση να φορτώνεται δυναμικά στο περιβάλλον, χρησιμοποιώντας τις μεθόδους `Class.forName()`, `Class.getMethod()` και `Method.invoke()` του πακέτου `java.lang.reflect`.

6.4 Πλατφόρμα Γενετικών Αλγορίθμων

Η κλάση GenAlgPlatform είναι η κλάση που ενώνει όλα τα προηγούμενα στοιχεία και συντονίζει το GUI και το Γενετικό Αλγόριθμο. Το UML διάγραμμά της και οι σχέσεις της με τις υπόλοιπες κλάσεις φαίνονται στο σχήμα 6.4.

Τα μέλη της είναι απλά references στα αντικείμενα των υπολοίπων κλάσεων και βοηθητικές μεταβλητές. Ο κατασκευαστής εκκινεί το GUI και ανάλογα με τις ενέργειες του χρήστη ο ανάλογος listener εκτελεί τις κατάλληλες εντολές. Ενδιαφέρον έχει η δημιουργία του τελικού αντικειμένου του προβλήματος (GenAlgProblemxxxx) από τις επιλογές του χρήστη. Μόλις οι επιλογές από τις δύο οθόνες επιλογών γίνουν έγκυρες, τότε οι παράμετροι του προβλήματος τοποθετούνται σε έναν πίνακα από Object. Στη συνέχεια επιστρέφεται η κατάλληλη κλάση του προβλήματος γνωρίζοντας μόνο το όνομά της (μέθοδος `Class.forName()`) και από αυτή παίρνουμε τη μέθοδο του κατασκευαστή (μέθοδος `Class.getConstructor()`). Τότε δημιουργείται το αντικείμενο του προβλήματος καλώντας τη μέθοδο του κατασκευαστή με παραμέτρους τον πίνακα αντικειμένων (μέθοδοι `Method.invoke()` και `Constructor.newInstance()`). Η κλάση GenAlgPlatform αρχεί να έχει ένα refer-

ence σε GenAlgProblem, καθώς οι ιδιότητες κληρονομικότητας το επιτρέπουν, με το οποίο μπορεί πλέον να καλεί τις μεθόδους του GenAlgProblemxxxx!

Με όλα τα παραπάνω έχουμε περιγράψει την πλατφόρμα ως stand-alone εφαρμογή. Ακολουθεί η περιγραφή της κλάσης του προβλήματος της υπερθερμίας καθώς και η αρχιτεκτονική της πλατφόρμας με τους Κινητούς Αντιπροσώπους.

6.5 Πρόβλημα υπερθερμίας

Για τις ανάγκες του προβλήματος της υπερθερμίας δημιουργήσαμε την κλάση **GenAlgProblemZhang** που είναι υποκλάση της GenAlgProblem. Σε αυτή προσθέσαμε μόνο βοηθητικές μεταβλητές για τους υπολογισμούς. Στον κατασκευαστή η τιμή της παραμέτρου *needFile* γίνεται true. Η μέθοδος *loadValues()* γίνεται override για να φορτώνονται οι τιμές των παραμέτρων του προβλήματος από αρχείο. Τέλος υλοποιούνται οι μέθοδοι *decode()* και *objective()* που αποκωδικοποιούν το χρωμόσωμα και υπολογίζουν τη συνάρτηση καταλληλότητας. Για τον υπολογισμό των ολοκληρωμάτων χρησιμοποιείται μία adaptive μέθοδος γκαουσιανής ολοκλήρωσης (Παράρτημα A), η *aucgsk()*. Σε αυτή τη μέθοδο το αρχικό διάστημα $[\alpha, \beta]$ χωρίζεται στα δύο και υπολογίζονται τα ολοκληρώματα των διαστημάτων $[\alpha, \beta]$, $[\alpha, \frac{\alpha+\beta}{2}]$ και $[\frac{\alpha+\beta}{2}, \beta]$. Αν η διαφορά του πρώτου από το άθροισμα των δύο τελευταίων δεν υπερβαίνει το προκαθορισμένο ποσοστό που έχει δώσει ο χρήστης στο αρχείο παραμέτρων τότε κρατάμε τη δεύτερη τιμή (ως πιο ακριβή), αλλιώς συνεχίζουμε τη διαδικασία και στα δύο υποδιαστήματα μέχρι κάποιο όριο βάθους.

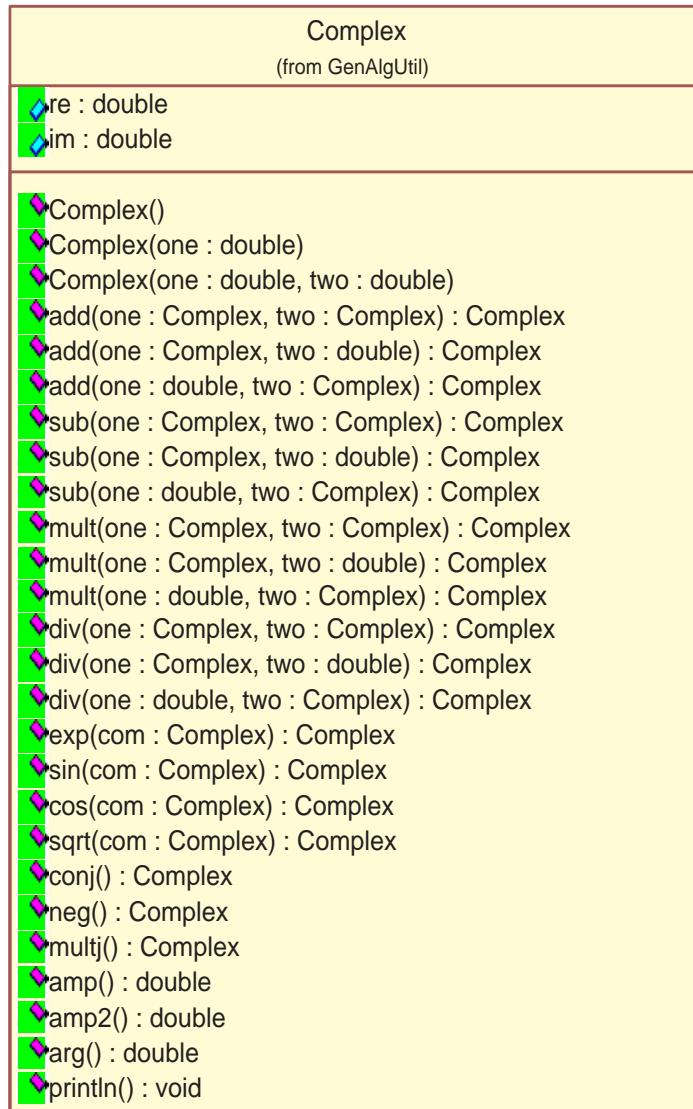
6.6 Πλατφόρμα Κινητών Αντιπροσώπων

Όλες οι κλάσεις που περιγράψαμε παραπάνω αποτελούν τη stand-alone μορφή της πλατφόρμας. Η υλοποίηση της απλής πλατφόρμας με Κινητούς Αντιπροσώπους που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 5.1.3 απαιτεί τη δημιουργία-τροποποίηση δύο κλάσεων.

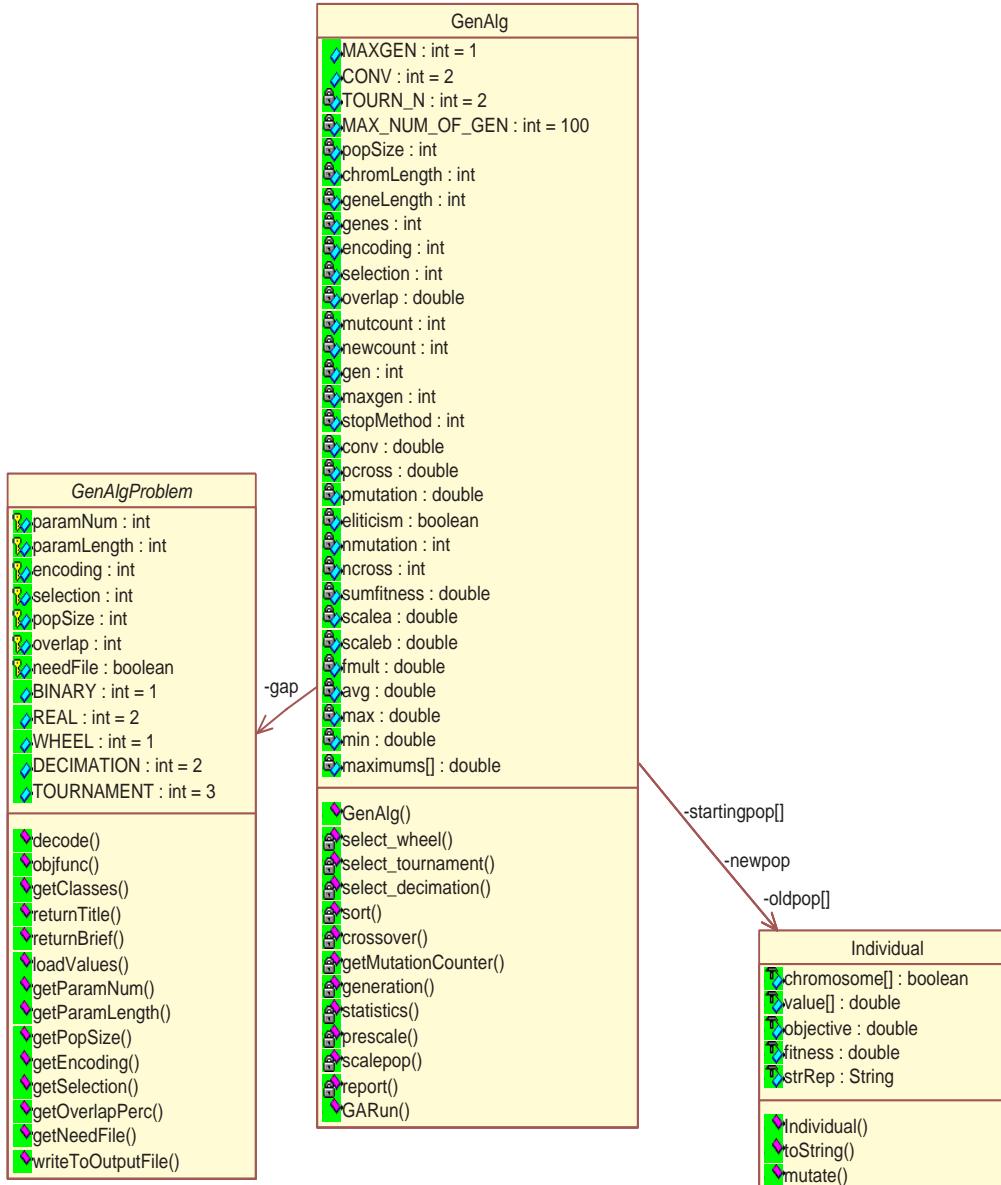
Η πρώτη κλάση πρέπει να είναι ο Κινητός Αντιπρόσωπος που επιλύει το πρόβλημα. Εάν ονομάσουμε την κλάση αυτή **GenAlgProblemAgent** σύμφωνα με την προηγούμενη ονοματολογία, αυτή θα πρέπει πάλι να είναι μια abstract κλάση που να έχει σαν υπερκλάση την MobileAgent, ώστε να κληρονομήσει τις ιδιότητες από το API της πλατφόρμας Grasshopper. Το UML διάγραμμά της φαίνεται στο σχήμα 6.5.

Η μέθοδος *init()* αρχικοποιεί τον Agent με τον πίνακα από Object, στον οποίο βρίσκονται οι παράμετροι του προβλήματος. Η μέθοδος *loadValues()* παραμένει η ίδια όπως στην απλή εκδοχή της κλάσης. Οι μέθοδοι *beforeMove()* και *afterMove()* απλώς ενημερώνουν το χρήστη για την επιτυχία της μετανάστευσης. Η μέθοδος *live()* είναι η βασική μέθοδος, όπου δημιουργείται ο proxy για την επικοινωνία με το Master Agent και στη συνέχεια το αντικείμενο περιμένει να λάβει το πρώτο χρωμόσωμα προς αποκωδικοποίηση και υπολογισμό καταλληλότητας. Τέλος η μέθοδος *sendResult()* στέλνει το αποτέλεσμα πίσω στον Master Agent.

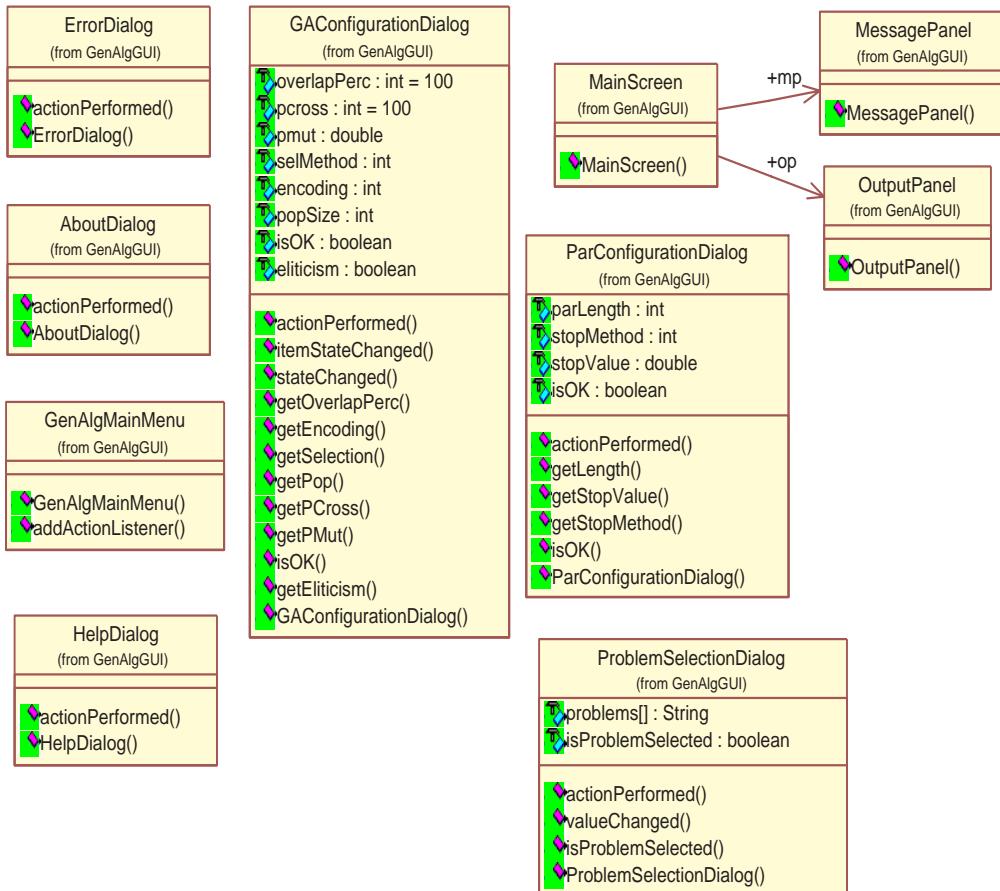
Η δεύτερη κλάση που απαιτείται είναι ο MasterAgent. Λόγω πίεσης χρόνου δεν καταφέραμε να υλοποιήσουμε πλήρως αυτή την κλάση, επειδή ήταν χρονοβόρα η προσαρμογή όλου του υπόλοιπου κώδικα. Πάντως μία από τις πιθανές λύσεις είναι να αντικατασταθεί η κλάση GenAlg που περιγράφηκε παραπάνω με μία που θα είναι υποκλάση της StationaryAgent από το API της Grasshopper. Αυτή στην *init()* μέθοδο θα πρέπει πάλι να παίρνει τα ορίσματά της μέσω ενός πίνακα Object και στη *live()*, αφού πάρει όλες τις πληροφορίες για τις agencies που μπορεί να επικοινωνήσει, να τρέξει μία τροποιοιημένη μέθοδο *GARun()*, στην οποία να λαμβάνεται υπόψη η δρομολόγηση των χρωμοσωμάτων στους GenAlgProblemAgents σύμφωνα με όσα αναπτύχθηκαν στην ενότητα 5.1.3.



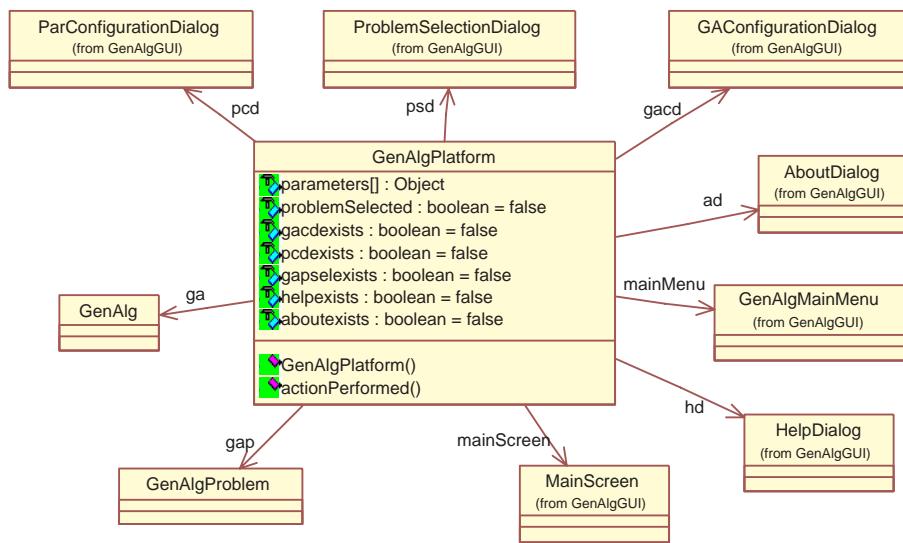
Σχήμα 6.1: UML διάγραμμα της κλάσης Complex.



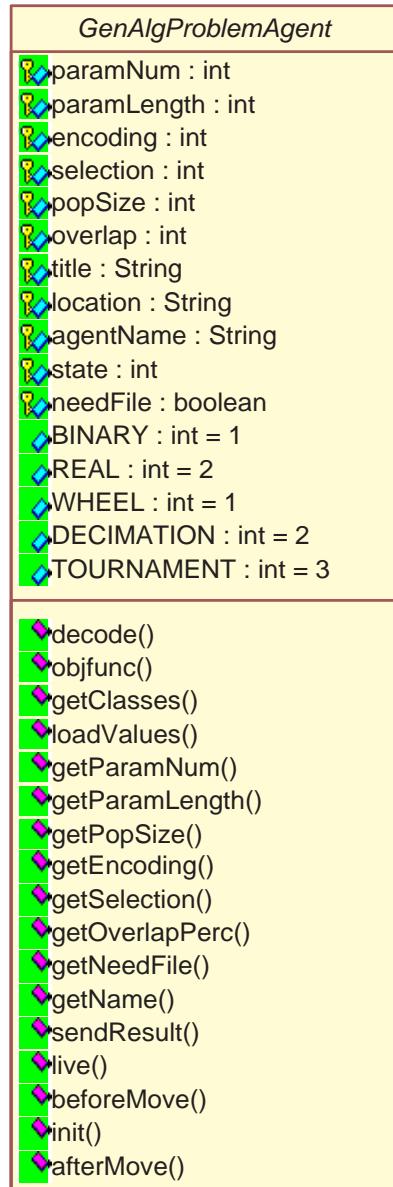
Σχήμα 6.2: UML διάγραμμα των κλάσεων του Γενετικού Αλγορίθμου.



Σχήμα 6.3: UML διάγραμμα των κλάσεων της γραφικής διαπροσωπείας.



Σχήμα 6.4: UML διάγραμμα της κλάσης GenAlgPlatform.



Σχήμα 6.5: UML διάγραμμα της κλάσης GenAlgProblemAgent.

Κεφάλαιο 7

Αριθμητικά αποτελέσματα

Έχοντας αναπτύξει την πλατφόρμα και το πρόβλημα της υπερθερμίας ήρθε η ώρα να κάνουμε μία εκτέλεση και να δούμε τα αποτελέσματα που βγαίνουν. Ο υπολογιστής που χρησιμοποιήσαμε ήταν ένας AMD Athlon XP 2000+ με 512 GB RAM.

Η διάταξη που εξομοιώσαμε αποτελείται από τέσσερα πανομοιότυπα δίπολα (εκτός από τα μήκη τους που εξετάζονται από τον αλγόριθμο) σε τετραγωνική $2cm \times 2cm$ γεωμετρία (όπως στο σχήμα 2.3). Οι καθετήρες, οι οποίοι λειτουργούν ως μόνωση για τα δίπολα, έχουν σχετική επιτρεπτότητα 2.55. Το διάκενο αέρα παίζει το ρόλο του πρώτου μονοτικού στρώματος και ο καθετήρας του δεύτερου. Ο περιβάλλον ιστός μοντελοποιείται ως μέσο με σχετική επιτρεπτότητα 51 στα $915MHz$ (συχνότητα λειτουργίας της διάταξης), αγωγιμότητα $1.28S/m$ και πυκνότητα $970Kg/m^3$. Πιο συγκεκριμένα οι παράμετροι του προβλήματος που λαμβάνονται από το αρχείο φαίνονται στον πίνακα 7.1.

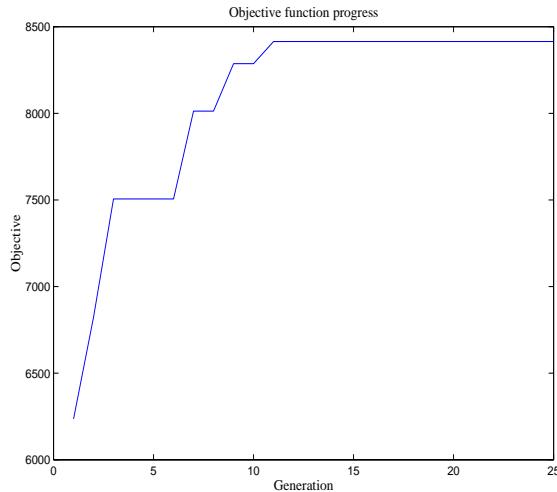
Οι παράμετροι που επιλέγουμε για το Γενετικό Αλγόριθμο φαίνονται στον πίνακα 7.2.

Αρχικά είχαμε επιλέξει ένα πλέγμα $9 \times 9 \times 9$ στοιχείων, πληθυσμό 50 χρωμοσωμάτων και 50 γενιές, αλλά μετά από 12 ώρες είχαν τελειώσει μόλις 3 γενιές. Λόγω πίεσης χρόνου για την καταγραφή αποτελεσμάτων μειώσαμε τις απαιτήσεις στα νούμερα που προαναφέρθηκαν, με αποτέλεσμα η επίλυση να διαρκέσει περίπου 16 ώρες. Σε παλαιότερη εργασία [13] με το πρόγραμμα σε FORTRAN η επίλυση ενός χρωμοσώματος με υπολογισμό σε περισσότερα σημεία (δεν είχε γίνει χρήση γενετικού αλγορίθμου) διαρκούσε σε έναν Pentium 3 1GHz 66 δευτερόλεπτα. Συνεπώς για 25 χρωμοσώματα ανά γενιά και 25 γενιές ο χρόνος που θα απαιτούταν θα ήταν περίπου 11.5 ώρες, προφανώς μικρότερος αν αναλογιστούμε και τη μειωμένη επεξεργαστική

δύναμη του υπολογιστή. Τα παραπάνω φανερώνουν μία βασική αδυναμία της Java, το ότι δηλαδή είναι πολύ αργότερη από τις κλασσικές γλώσσες για αριθμητικούς υπολογισμούς. Στο πρόβλημά μας αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην έλλειψη εγγενούς υποστήριξης μιγαδικών αριθμών (χάτι που υπάρχει στη FORTRAN). Οι εσωτερικοί μηχανισμοί προστασίας και ελέγχου της Java όσον αφορά τις κλάσεις και την επικοινωνία μεταξύ τους δυσχεραίνει κατά πολύ τις επιδόσεις της.

Με τη χρησιμοποίηση της πλατφόρμας των κινητών αντιπροσώπων γίνεται αμέσως προφανής η χρησιμότητά της. Σε ένα δίκτυο 10 υπολογιστών, ο χρόνος εκτέλεσης θα ήταν σχεδόν ο υποδεκαπλάσιος (αν υποθέσουμε 10 όμοιους υπολογιστές και θεωρήσουμε αμελητέες τις επιβαρύνσεις από τις μεταφορές μέσω δικτύου), αφού κάθε υπολογιστής θα επέλυε συγχρόνως με τους άλλους ένα χρωμόσωμα. Η συνεισφορά του κατανεμημένου προγραμματισμού είναι σημαντικότατη, αν αναλογιστούμε πιο πολύπλοκα και χρονοβόρα προβλήματα.

Τα αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου τώρα είναι αρκετά ενθαρρυντικά. Παρόλο που το μέγεθος του πληθυσμού είναι αρκετά μικρό (προτεινόμενες εμπειρικές τιμές είναι 100–200), παρατηρήσαμε σαφή βελτιστοποίηση στην καταλληλότητα του καλύτερου χρωμοσώματος κάθε γενιάς. Μία γραφική παράσταση της προόδου φαίνεται στο σχήμα 7.1.

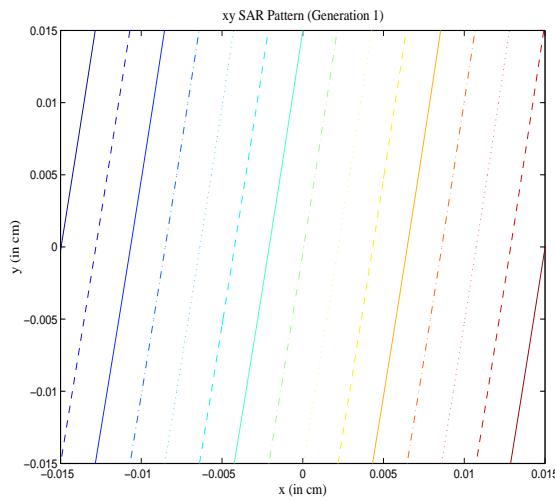


Σχήμα 7.1: Πρόοδος του Γενετικού Αλγορίθμου (μέγιστη καταλληλότητα κάθε γενιάς).

Από τις πρώτες γενιές παρατηρείται μία άνοδος της καλύτερης καταλληλότητας κάθε γενιάς. Η συνεχής άνοδος οφείλεται στην επιλογή του ελιτισμού. Από την άλλη η

έλλειψη προόδου από τη γενιά 11 και μετά οφείλεται τόσο στο μικρό μέγεθος πληθυσμού (πλέον τα καλά χρωμοσώματα κυριαρχούν) και την επιλογή του ελιτισμού (πάντα διατηρείται το καλύτερο στις επόμενες γενιές).

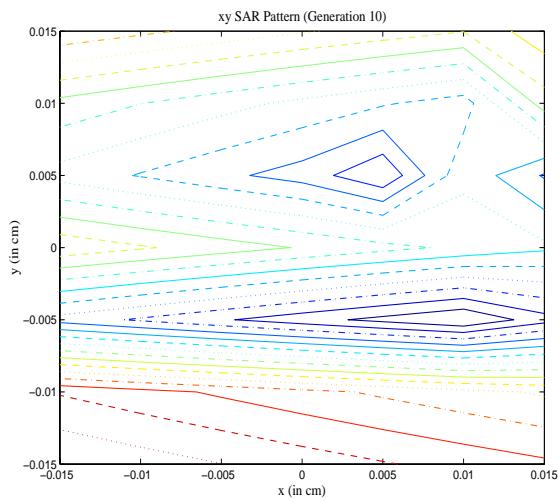
Για να δούμε και πιο οφθαλμοφανή αποτελέσματα μπορούμε να παραστήσουμε σε διαγράμματα την κατανομή του SAR στο χώρο που εξετάζουμε σε καίρια σημεία (επιλέξαμε τις γενιές 1, 10 και 25). Οι κατανομές φαίνονται στα σχήματα 7.2 – 7.4.



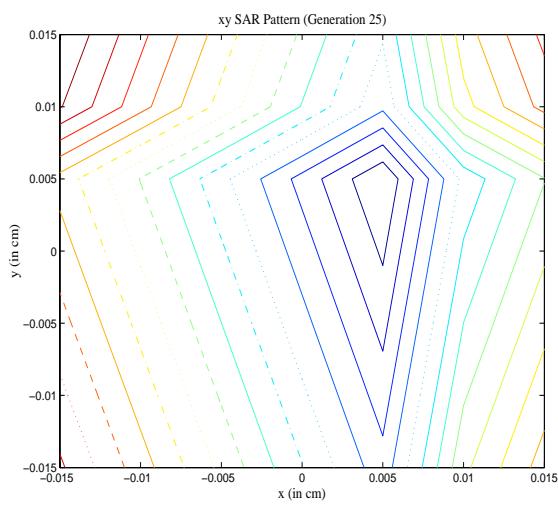
Σχήμα 7.2: Γενιά 1.

Παρατηρούμε ότι αρχικά η κατανομή του SAR δεν έχει κάποια ιδιαίτερη μορφή, αλλά με την εξέλιξη του αλγορίθμου βλέπουμε σαφή βελτίωση του SAR στην περιφέρεια του χώρου. Για την ιστορία οι τελικές τιμές των παραμέτρων για τη βέλτιστη λύση ήταν:

$$\begin{aligned} h_1[1] &= 0.0405 & h_1[2] &= 0.0312 & h_1[3] &= 0.0238 & h_1[4] &= 0.0395 \\ h_2[1] &= 0.0267 & h_2[2] &= 0.0267 & h_2[3] &= 0.0442 & h_2[4] &= 0.0185 \\ \theta_1 &= 101.5^\circ & \theta_2 &= 107.7^\circ & \theta_3 &= 114.4^\circ & \theta_4 &= 126.2^\circ \end{aligned}$$



$\Sigma\chi\eta\mu\alpha$ 7.3: Γενιά 10.



$\Sigma\chi\eta\mu\alpha$ 7.4: Γενιά 25.

Παράμετροι	Τιμή
Έμφαση στο θερμικό σχήμα	περιφέρεια
Συχνότητα λειτουργίας	$915 MHz$
Σχετική επιτρεπτότητα περιβάλλοντος	51
Αγωγιμότητα περιβάλλοντος	$1.28 S/m$
Πυκνότητα περιβάλλοντος	$970 Kg/m^3$
Ακρίβεια γκαουσιανής ολοκλήρωσης	1%
Αριθμός γκαουσιανών υποδιαιρέσεων	10
Αριθμός διπόλων	4
Κάτω και άνω όριο h_1	0.005, 0.05
Κάτω και άνω όριο h_2	0.005, 0.05
Κάτω και άνω όριο θ_i	$0^\circ, 180^\circ$
Δίπολο 1, 2, 3, 4	
Εσωτερική ακτίνα α	0.475 mm
Αριθμός διηλεκτρικών στρωμάτων	2
Εξωτερική ακτίνα πρώτου στρώματος	0.584 mm
Εξωτερική ακτίνα δεύτερου στρώματος	0.805 mm
Σχετική επιτρεπτότητα πρώτου στρώματος	1
Σχετική επιτρεπτότητα δεύτερου στρώματος	2.55
Κυματαριθμός	$53.37 - j11.48$
Σύνθετη αντίσταση εισόδου	$62.98 - j14.012$
Δίπολο 1	
(x_0, y_0)	(1.0, 1.0)
Δίπολο 2	
(x_0, y_0)	(1.0, -1.0)
Δίπολο 3	
(x_0, y_0)	(-1.0, 1.0)
Δίπολο 4	
(x_0, y_0)	(-1.0, -1.0)
Αριθμός σημείων στον άξονα x	7
Αριθμός σημείων στον άξονα y	7
Αριθμός σημείων στον άξονα z	3
Σημεία στον άξονα x	$[-0.015, 0.015]$
Σημεία στον άξονα y	$[-0.015, 0.015]$
Σημεία στον άξονα z	$[-0.01, 0.01]$

Πίνακας 7.1: Παράμετροι Προβλήματος.

Παράμετροι	Τιμή
Κωδικοποίηση	δυαδική
Μέθοδος επιλογής	Αναλογική
Μέγεθος πληθυσμού	25
Πιθανότητα συνδυασμού	90%
Πιθανότητα μετάλλαξης	1%
Ελιτισμός	ΝΑΙ
Μήκος παραμέτρων	10
Μέθοδος σύγκλισης	25 γενιές

Πίνακας 7.2: Παράμετροι Γενετικού Αλγορίθμου.

Κεφάλαιο 8

Επίλογος-Προτάσεις

Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι ο αρχικός μας σκοπός περατώθηκε σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό. Αναπτύξαμε μία πλατφόρμα ικανή να λύνει προβλήματα βελτιστοποίησης με τη χρήση γενετικών αλγορίθμων, γράψαμε τον κώδικα για το πρόβλημα της υπερθερμίας, τρέξαμε το πρόβλημα στην πλατφόρμα για να ελέγξουμε τα αποτελέσματα, αναπτύξαμε μία απλή αρχιτεκτονική για την εισαγωγή των Κινητών Αντιπροσώπων και προχωρήσαμε στη συγγραφή του κώδικα ενός μέρους της τελικής πλατφόρμας των (απλών σε πρώτη φάση) 'Γενετικών Αντιπροσώπων'.

Τα μειονεκτήματα της υλοποίησής μας εστιάζονται κυρίως στη μειωμένη απόδοση που παρουσιάζει η πλατφόρμα στο πρόβλημα της υπερθερμίας, κάτι που οφείλεται στα εξής: την έλλειψη υποστήριξης για μιγαδικούς αριθμούς από τη Java, με αποτέλεσμα οποιαδήποτε υλοποίησή τους να μην είναι εφάμιλλη σε ταχύτητα αυτές άλλων γλωσσών, τη γενικότερη μειωμένη ταχύτητα της Java ως γλώσσα, λόγω των αυξημένων μηχανισμών προστασίας που παρέχει, και τέλος πιθανές ατέλειες στην υλοποίηση του κώδικα (ποτέ το λογισμικό που γράφεται δεν είναι τέλειο!).

Βελτιώσεις που μπορούν να γίνουν στην υπάρχουσα πλατφόρμα Γενετικών Αντιπροσώπων (στην απλή της μορφή), και δεν πραγματοποιήθηκαν λόγω έλλειψης χρόνου, είναι:

- Η εισαγωγή των προβλημάτων να γίνεται με πιο κομψό τρόπο, για παράδειγμα μέσω .jar αρχείων, ώστε ο χρήστης να έχει μεγαλύτερη ελευθερία στη συγγραφή κώδικα.
- Επεκτάσεις στις επιλογές του Γενετικού Αλγορίθμου, όπως πραγματική ή μικτή κωδικοποίηση, νέες μέθοδοι επιλογής και εισαγωγή προχωρημένων τελεστών.

- Εξυπνότερος Master Agent, ώστε να παρατηρεί τις αλλαγές στο δίκτυο και να τις εκμεταλλεύεται δυναμικά κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου για να πετυχαίνει καλύτερη απόδοση.

Η αρχική ιδέα για υλοποίηση 'Γενετικών Αντιπροσώπων' είναι, όπως αποδείχθηκε, ένα αρκετά ενδιαφέρον αλλά και δύσκολο ερευνητικό θέμα, το οποίο είναι αδύνατο να εξεταστεί στα πλαίσια μίας διπλωματικής εργασίας. Πολλές σκέψεις αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια της προσπάθειας ανάπτυξης της πλατφόρμας Γενετικών Αντιπροσώπων, που ξεφεύγουν από την απλή υλοποίηση που παραθέσαμε. Μία πιο προχωρημένη πλατφόρμα παρουσιάζεται σύντομα παρακάτω.

Προχωρημένη πλατφόρμα Γενετικών Αντιπροσώπων

Σε αυτή την πλατφόρμα θα διατηρείται το σχήμα Master-Worker. Προσπαθήσαμε να σκεφτούμε κάποιο τρόπο λειτουργίας της πλατφόρμας χωρίς κεντρικό παρατηρητή, αλλά κανένας αποδοτικός τρόπος δε βρέθηκε (ίσως λόγω του ότι, όπως και στη φύση, πάντοτε χρειάζεται ένας κεντρικός οργανωτής—χωρίς να χρειαστεί να μπλέξουμε σε θεολογικές συζητήσεις). Ο Master Agent στην περίπτωσή μας δεν είναι στάσιμος, αλλά μπορεί να κινείται ανάμεσα στις διάφορες τοποθεσίες. Ο Worker Agent είναι πιο 'έξυπνος' από τον αντίστοιχο στην απλή πλατφόρμα, καθώς μεταναστεύει σε διάφορες περιπτώσεις στον κύκλο ζωής του και παίρνει και κάποιες αποφάσεις μόνος του. Μάλιστα υπάρχει και η ιδέα, αποσκοπώντας στην ωραιοποίηση της πλατφόρμας, να γίνεται διαχωρισμός σε αρσενικούς και θηλυκούς εργάτες (ο λόγος θα φανεί στη συνέχεια!). Σε γενικές γραμμές η πλατφόρμα θα λειτουργεί ως εξής:

1. Ο Master Agent εξερευνεί το υπάρχον δίκτυο, καταγράφει τις agencies, και εκτελεί κάποιο benchmarking στις τοποθεσίες αυτές για να διαπιστώσει την υπολογιστική τους ικανότητα.
2. Ο Master δημιουργεί N Εργάτες, μισούς αρσενικούς και μισούς θηλυκούς, με τυχαίο γενετικό υλικό και τους στέλνει σε M τοποθεσίες με κάποιον αλγόριθμο που να βρίσκει την καλύτερη κατανομή για βελτίωση της αποδοτικότητας.
3. Οι Εργάτες δουλεύουν στο πρόβλημα και το λύνουν. Αν συναντήσουν πρόβλημα μεταναστεύουν σε καταλληλότερες τοποθεσίες, αφού ειδοποιήσουν το Master.
4. Μόλις κάποιος Εργάτης τελειώνει στέλνει τα αποτελέσματα στο Master.
5. Ο Master βρίσκει κάποιο ταίρι (πάντα αντίθετου φύλου) για κάθε Εργάτη που τελειώνει και αμέσως τους στέλνει να ζευγαρώσουν σε κάποια τοποθεσία, ώστε

να παράξουν δύο απογόνους. Το ζευγάρωμα μπορεί να γίνει με πιθανότητα p_{cross} (πληροφορία που κρατάει πάντα το θηλυκό—όπως συνήθως και στη ζωή!) και στους απογόνους επιδρά η μετάλλαξη με πιθανότητα p_{mut} . Τα παιδιά δουλεύουν και αυτά αιμέσως στο πρόβλημα και στέλνουν τα αποτελέσματά τους στον Master.

6. Μόλις ο Master λάβει περίπου $1.5N$ αποτελέσματα, τα κατατάσει και στέλνει εντολή τερματισμού της ζωής τους στους $0.5N$ Εργάτες που είχαν τη μικρότερη καταλληλότητα. Θα πρέπει να γίνεται συνεχώς ένας έλεγχος για το ποσοστό αρσενικών-θηλυκών εργατών στο δίκτυο και να δίνεται εντολή για παραγωγή κατάλληλου φύλου απογόνων, ώστε το ποσοστό να μην ξεφεύγει πολύ από το 50-50%.
7. Ο Master συνεχίζει τις παραπάνω ενέργειες, που γίνονται παράλληλα, μέχρι να ικανοποιηθεί κάποιο κριτήριο σύγκλισης και να τερματιστεί ο αλγόριθμος. Κατά τη διάρκεια του αλγορίθμου θα υπάρχουν στο δίκτυο περίπου $1.5N - 2N$ Εργάτες.

Οι παραπάνω ιδέες προσεγγίζουν περισσότερο τους φυσικούς μηχανισμούς και η πλατφόρμα έχει το πλεονέκτημα ότι είναι απρόσβλητη από λογικούς κινδύνους (κατάρρευση κάποιας τοποθεσίας), αφού πάντα θα δημιουργούνται νέα παιδιά για να καλύπτεται ο πληθυσμός. Επίσης ο χώρος της λύσης εξερευνάται καλύτερα από τους περισσότερους αντιπροσώπους που δημιουργούνται συνεχώς και η λύση σίγουρα εξελίσσεται προς τη βέλτιστη τιμή της, αφού πάντα οι καλύτεροι επιβιώνουν. Τέλος η λύση αυτή δεν πέφτει στις παγίδες της πρόωρης σύγκλισης και τον εγκλωβισμό σε τοπικά μέγιστα, χάρη στους παραπάνω μηχανισμούς.

Σαν τελευταίες λέξεις μπορούμε να αναφέρουμε ότι το πρόβλημα των Γενετικών Αντιπροσώπων πράγματι αποτελεί ένα περίπλοκο αλλά και ελπιδοφόρο πεδίο έρευνας για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης.

Παράρτημα Α

Ολοκλήρωση Gauss

Η ολοκλήρωση Gauss αποτελεί μία γνωστή και πολυχρησιμοποιημένη μέθοδο αριθμητικής ολοκλήρωσης. Σε αυτή προσπαθούμε να υπολογίσουμε την αριθμητική τιμή ολοκληρωμάτων του τύπου

$$I = \int_a^b f(x) dx$$

χωρίς την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης $\frac{dy}{dx} = f(x)$.

Η φόρμουλα του Gauss για ολοκληρώματα στο διάστημα $[-1, 1]$ είναι η εξής:

$$\int_{-1}^1 f(x) dx = \sum_{i=1}^n w_i f(x_i) + R_n$$

όπου: τα x_i είναι το i -οστό μηδενικό του πολυωνύμου Legendre $P_n(x)$, τα βάρη w_i δίνονται από τη σχέση

$$w_i = \frac{2}{(1 - x_i^2) [P'_n(x_i)]^2}$$

και το υπόλοιπο R_n δίνεται από τη σχέση

$$R_n = \frac{2^{2n+1} (n!)^4}{(2n+1) [(2n)!]^3} f^{(2n)}(\xi) \quad (-1 < \xi < 1)$$

Για αιθαίρετα διαστήματα $[\alpha, \beta]$ η φόρμουλα μετατρέπεται στην παρακάτω μορφή

$$\int_{-1}^1 f(x) dx = \frac{b-a}{2} \sum_{i=1}^n w_i f(y_i) + R_n$$

με

$$y_i = \left(\frac{b-a}{2} \right) x_i + \left(\frac{b-a}{2} \right)$$

Τα x_i και τα w_i δίνονται από πίνακες ανάλογα με την τιμή του n . Στο πρόβλημα της υπερθερμίας χρησιμοποιούμε την ολοκλήρωση 24 σημείων, οπότε παραθέτουμε τον πίνακα με τις παραπάνω τιμές για $n = 24$ [7].

n=24	
$\pm x_i$	w_i
0.064056892862605626085	0.127938195346752156974
0.191118867473616309159	0.125837456346828296121
0.315042679696163374387	0.121670472927803391204
0.433793507626045138487	0.115505668053725601353
0.545421417388839535658	0.107444270115965634783
0.648093651936975569252	0.097618652104113888270
0.740124191578554364244	0.086190161531953275917
0.820001985973902921954	0.073346481411080305734
0.886415527004401034213	0.059298584915436780746
0.938274552002732758524	0.044277438817419806169
0.974728555971309498198	0.028531388628933663181
0.995187219997021360180	0.012341229799987199547

Πίνακας A.1: Τιμές των x_i και w_i για $n = 24$.

Βιβλιογραφία

- [1] J. W. Hand and J. R. James, *Physical Techniques in Clinical Hyperthermia* Letchworth, U.K.: Research Studies Press, 1986.
- [2] J. W. Strohbehn and E. B. Douple, "Hyperthermia and cancer therapy: A review of biomedical engineering contributions and challenges" *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. BME-31, 1984.
- [3] J. W. Strohbehn and J. A. Mechling, *Interstitial Techniques for Clinical Hyperthermia*, J. W. Hand and J. R. James, eds. Letchworth, U.K.: Research Studies Press, 1986.
- [4] R. W. P. King, B. S. Trembly and J. W. Strohbehn, "The Electromagnetic Field of an Insulated Antenna in a Conducting or Dielectric Medium" *IEEE Trans. Microwave Theory Technol.*, vol MTT-31 July 1983.
- [5] Y. Zhang, N. V. Dubal, R. Takemoto-Hambleton and W. T. Joines, "The Determination of the Electromagnetic Field and SAR Pattern of an Interstitial Applicator in a Dissipative Dielectric Medium." *IEEE Trans. Microwave Theory Technol.*, vol MTT-36 Oct. 1988.
- [6] H. Jasik, *Antenna Engineering Handbook* McGraw-Hill, New York, 1961.
- [7] M. Abramowitz and I. A. Stegun, *Handbook of Mathematical Functions*, Washington DC: National Bureau of Standards, 1964.
- [8] J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Pressm 1975.
- [9] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley, Reading MA., 1989.
- [10] Y. Rahmat-Samii and Eric Michielssen, *Electromagnetic Optimization by Genetic Algorithms*, John Wiley & Sons, 1999.

- [11] T. K. Shih, "Mobile Agent Evolution Computing" *Information Sciences*, vol 137, 2001.
- [12] *Grasshopper Basics and Concepts, version 2.2*, IKV++ GmbH, Berlin, Germany.
- [13] Π. Ατλαμάζογλου, "Προβολικές μέθοδοι επίλυσης βιοηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων", Αθήνα, Ιούνιος 1997.