



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών

Υπολογιστών

Τομέας Επικοινωνιών, Ηλεκτρονικής και Συστημάτων Πληροφορικής

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Τεχνικές δυναμικής ανάθεσης συχνοτήτων σε WLAN συστήματα

Λεωνίδα Σ. Γεωργόπουλου

Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού Υπολογιστών ΕΜΠ

Επιβλέπων καθηγητής: Μ. Θεολόγου

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2004

Περίληψη

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας παρουσιάζεται η προσαρμογή της μεθόδου βελτιστοποίησης simulated annealing στο πρόβλημα της δυναμικής ανάθεσης συχνοτήτων σε WLAN συστήματα. Ως δίκτυο αναφοράς χρησιμοποιείται το δίκτυο HIPERLAN/2, για το οποίο περιγράφονται οι βασικές λειτουργίες και υπηρεσίες τις οποίες προσφέρει.

Για την επίλυση του προβλήματος της επιλογής συχνότητας λειτουργίας υπάρχουν αρκετές τεχνικές βελτιστοποίησης οι οποίες θα αναφερθούν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Θα επικεντρωθούμε στη μέθοδο simulated annealing καταστρώνοντας το μαθηματικό μοντέλο, ενώ παράλληλα προσαρμόζουμε την εν λόγω τεχνική στις απαιτήσεις του συγκεκριμένου προβλήματος. Το σχήμα που προτείνεται παρέχει μια πλήρη και αποδοτική λύση για τη λειτουργία των WLAN δικτύων .

Μετά από την παρουσίαση των αποτελεσμάτων διαπιστώνουμε ότι η εφαρμογή της μεθόδου στην οποία στηριχθήκαμε αποτελεί ένα πολύτιμο εργαλείο στα χέρια του παρόχου του δικτύου WLAN (HIPERLAN/2 στην παρούσα εργασία). Επειδή μάλιστα τα αποτελέσματα της τεχνικής μας παρέχονται σε βάθος χρόνου υπάρχει η δυνατότητα εφαρμογής κάποιων ευριστικών αλγορίθμων που δίνουν πολύ γρήγορα αποτελέσματα, και εν συνεχεία η εφαρμογή του δικού μας αλγορίθμου ώστε τελικά να πετύχουμε βέλτιστη λύση.

Την εργασία αυτή αφιερώνω στους γονείς μου Σταύρο και Κωνσταντίνα και στις αδερφές μου Καλλιόπη και Ιωάννα.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερος τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Μιχάλη Θεολόγου, καθηγητή του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, ο οποίος καθοδήγησε την πορεία μου, προκειμένου να ολοκληρώσω την παρούσα διπλωματική εργασία.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον διδάκτορα μηχανικό Αντώνη Οικονόμου, ο οποίος ήταν υπεύθυνος για την παρακολούθηση της εξέλιξης της προσπάθειάς μου, για την βοήθεια που μου προσέφερε και την πολύ καλή συνεργασία την οποία είχαμε.

Τέλος, ευχαριστώ τα προσφιλή μου άτομα, που με ανέχτηκαν κατά τη διάρκεια της προσπάθειάς μου για την ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Περιεχόμενα

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	6
1.1	Τα ασύρματα συστήματα στη σύγχρονη πραγματικότητα	6
1.2	Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας	8
2.	ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΓΙΑ WLAN ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ HIPERLAN/2	10
2.1	Εισαγωγή	10
2.2	Η ανάγκη δυναμικής επιλογής συχνότητας (Dynamic Frequency Selection) για ασύρματα δίκτυα.....	10
2.3	Βασικά στοιχεία δυναμικής επιλογής συχνότητων όπως αυτά προβλέπονται από την ETSI.	11
2.3.1	Σχετικά με τις ονομαστικές φέρουσες συχνότητες.....	11
2.3.2	Μέθοδος μετρήσεων	12
2.4	Δυνατότητες επίλυσης του προβλήματος	15
2.5	Το δίκτυο HIPERLAN2.....	16
2.5.1	Παράμετροι για τη χρησιμοποίηση φάσματος.....	19
2.5.2	Λειτουργίες και υπηρεσίες του HIPERLAN2	21
2.5.3	Ασφάλεια στο HIPERLAN2.....	37
3.	SIMULATED ANNEALING.....	39
3.1	Υπόβαθρο.....	39
3.2	Βασικά στοιχεία	40
3.3	Παραδείγματα εφαρμογής του simulated annealing.....	42
3.3.1	Βέλτιστη ευθυγράμμιση των Laser chip και οπτικών ινών	42
3.3.2	Κατανομή και ακολουθία σταθμών επιθεώρησης	54
3.3.3	Οικονομική Ποσότητα-Μέγεθος Παραγωγής.....	64
3.4	Περίληψη	72
4.	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΓΙΑ ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΑΝΑΘΕΣΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ HIPERLAN2	73
4.1	Απαραίτητες πληροφορίες και παραδοχές.....	73
4.2	Μαθηματική διατύπωση του προβλήματος της ανάθεσης συχνότητων	75
4.3	Αλγόριθμος επίλυσης του προβλήματος ανάθεσης των συχνότητων, με βάση τη μέθοδο βελτιστοποίησης simulated annealing.....	77
4.3.1	Εισαγωγή	77
4.3.2	Υπόβαθρο.....	78
4.3.3	Αρχική ανάθεση συχνότητων	81
4.3.4	Περιγραφή του γενετικού μηχανισμού (generation mechanism) και κρυσταλλική δομή	82
4.3.5	Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	83
4.3.6	Σχολιασμός αποτελεσμάτων	97
4.4	Επίλογος.....	98
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	99
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	102

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Τα ασύρματα συστήματα στη σύγχρονη πραγματικότητα

Μία από τις πλέον σημαντικές εξελίξεις η οποία αφορά άμεσα τους διαχειριστές δικτύων είναι η εκμετάλλευση της υποδομής η οποία αναπτύσσεται σήμερα. Άμεση συνέπεια του γεγονότος αυτού αποτελεί το αυξημένο ενδιαφέρον από την πλευρά των χρηστών για ασύρματη πρόσβαση σε υπηρεσίες πολυμέσων και διαδικτύου. Η ποσότητα άλλωστε των πληροφοριών, η οποία είναι πλέον διαθέσιμη μέσω των δικτύων και κυρίως του διαδικτύου αυξάνεται με εκθετικούς ρυθμούς. Εξελιγμένες υπηρεσίες όπως marketing, διασκέδαση, διαφήμιση και εκπαίδευση από απόσταση αναμένεται να κορυφώσουν τη χρήση και τη διείδυση στο ευρύτερο κοινό. Είναι λοιπόν αναπόφευκτο οι διαχειριστές δικτύων να έρθουν αντιμέτωποι με την ανάγκη ικανοποίησης της διαρκώς αυξανόμενης ζήτησης για υπηρεσίες οι οποίες συνδυάζουν υψηλή ταχύτητα ασύρματης πρόσβασης στο διαδίκτυο, αλλά και δυνατότητες για νέες εφαρμογές πολυμέσων.

Οι παραπάνω μορφές επικοινωνίας θα πρέπει αργά ή γρήγορα να μπορούν να πραγματοποιηθούν δια μέσου των ασύρματων ζεύξεων. Σε συνδυασμό μάλιστα με την εκρηκτική αύξηση των συνδρομητών κινητής τηλεφωνίας και την διαρκώς αυξανόμενη εκ μέρους τους ζήτηση για ευέλικτη πρόσβαση σε διαφορετικές υπηρεσίες, διαπιστώνει κανείς την έντονη ανάγκη για έρευνα στην περιοχή των συστημάτων ασύρματης πρόσβασης.

Από την πλευρά της τεχνολογίας, οι κύριες εξελίξεις μπορούν να συνοψιστούν στις ακόλουθες περιοχές: Πρώτη, η μετάβαση από τη δεύτερη γενιά (2G), το γνωστό σε όλους GSM, προς την εποχή της επονομαζόμενης “2.5 γενιάς”, η οποία χρησιμοποιεί τις τεχνολογίες *General Packet Radio Service (GPRS)* και *Enhanced Data rates for GSM Evolution (EDGE)*. Δεύτερη, η ταυτόχρονη εξέλιξη προς την τρίτη γενιά (3G) κινητών τηλεπικοινωνιών, η οποία θα υλοποιηθεί μέσω της σταδιακής εισαγωγής του συστήματος *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS)*. Τρίτη, η έλευση του ψηφιακού συστήματος μετάδοσης *Digital Video Broadcasting (DVB)*.

Ένα τέταρτο σημείο αποτελεί η εισαγωγή συστημάτων τα οποία καλούνται *Broadband Radio Access Networks (BRANs)* ή *Wireless Local Area Networks*

(WLANs). Μια συγκεκριμένη κατηγορία των συστημάτων αυτών, η οποία λειτουργεί στη ζώνη συχνοτήτων των 5 GHz, υπόσχεται να παρέχει υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, για επικοινωνίες κοντινής απόστασης με περιορισμένη κινητικότητα χρηστών. Θα μπορούσε επομένως να αποτελέσει μια πολλά υποσχόμενη λύση για την κάλυψη οικιακών, εργασιακών, μαζικής μεταφοράς (π.χ. αεροδρόμια, τρένα κλπ.) και άλλων περιβαλλόντων τα οποία συχνά χαρακτηρίζονται και ως περιοχές αυξημένης ζήτησης (“*hot spots*”). Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται τα συστήματα IEEE 802.11a και 802.11h, το *High Performance Radio LAN type 2* (HIPERLAN/2), το οποίο έχει καθοριστεί από τον οργανισμό *European Telecommunications Standards Institute (ETSI)*, καθώς επίσης και το Ιαπωνικό *High Speed Wireless Access Network* (HiSWAN).

Επιπλέον εμφανίζεται ήδη μια τάση για από κοινού εκμετάλλευση των ετερογενών δικτύων πρόσβασης. Σκοπός βέβαια είναι η βελτίωση της παρεχόμενης ποιότητας υπηρεσίας, της πρόσβασης και της διαθεσιμότητας. Η τάση αυτή αναφέρεται συχνά και ως “κινητές επικοινωνίες μετά την τρίτη γενιά” ή “τέταρτη γενιά κινητών επικοινωνιών” (*wireless beyond 3G* και *4G* αντίστοιχα). Στα πλαίσια της 4^{ης} γενιάς, αναμένεται ότι η ασύρματη πραγματικότητα του κοντινού μέλλοντος θα επιτύχει την ενοποίηση (ανάμεσα σε άλλες) των τεχνολογιών UMTS και WLAN ενώ όσον αφορά το σταθερό δίκτυο κορμού θα είναι (σχεδόν αποκλειστικά) βασισμένο στην *IP αρχιτεκτονική*.

Με βάση τις αναμενόμενες εξελίξεις στον τομέα των κινητών τηλεπικοινωνιών, ένας πάροχος δικτύου θα μπορεί να βασίζεται σε διαφορετικές τεχνολογίες πρόσβασης για την επιτυχή κάλυψη της περιοχής εξυπηρέτησης. Αυτό ενδέχεται να σημαίνει ότι ο πάροχος είτε θα κατέχει άδειες για την εγκατάσταση και λειτουργία διαφορετικών συστημάτων ασύρματης πρόσβασης (*tight integration*) είτε θα συνεργάζεται με άλλους παρόχους που λειτουργούν εναλλακτικά δίκτυα (*loose integration*). Επιτυχής κάλυψη ισοδυναμεί με την προσφορά όσο το δυνατόν υψηλότερου επιπέδου ποιότητας υπηρεσίας κατά τρόπο όσο το δυνατόν αποδοτικό από οικονομικής άποψης.

Ο διαχειριστής ενός δικτύου θα έχει λοιπόν τη δυνατότητα να επιλέξει, σε μια συγκεκριμένη περιοχή εξυπηρέτησης και για μια δεδομένη χρονική περίοδο μέσα στην ημέρα, αντί της απόρριψης των χρηστών ή της υποβάθμισης των επιπέδων

ποιότητας υπηρεσίας, την κατεύθυνση αυτών σε μια εναλλακτική ασύρματη τεχνολογία. Η τεχνολογία αυτή μπορεί να ανήκει στον ίδιο ή σε κάποιον συμβεβλημένο πάροχο. Υπό αυτή την έννοια, οι χρήστες θα μπορούν να εξυπηρετηθούν μέσω των διαφορετικών ασύρματων τεχνολογιών, με βάση την υπόθεση ότι η επιλεγόμενη τεχνολογία είναι στην πραγματικότητα αδιάφορη για τον τελικό χρήστη, εφόσον ικανοποιούνται το κόστος και συγκεκριμένα κριτήρια ποιότητας υπηρεσίας. Τερματικά τα οποία υποστηρίζουν διαφορετικά δίκτυα λειτουργίας θα χρησιμοποιηθούν στην υλοποίηση της ιδέας της ετερογενούς ασύρματης πρόσβασης.

Στα πλαίσια λοιπόν της 4^{ης} γενιάς κινητών τηλεπικοινωνιών τα συστήματα UMTS και WLAN (ενδεχομένως και άλλα ασύρματα δίκτυα) μπορούν να θεωρηθούν ως μέρος μια ευρύτερης υποδομής μέσω της οποίας οι διαχειριστές των δικτύων θα είναι σε θέση να παρέχουν στους χρήστες εναλλακτικές λύσεις που αφορούν την αποδοτική (σε όρους κόστους και ποιότητας υπηρεσίας) ασύρματη πρόσβαση σε υπηρεσίες βασισμένες στο πρωτόκολλο *IP*. Συνεπώς αντί της απόρριψης κάποιου τηλεπικοινωνιακού φορτίου, θα υπάρχει η δυνατότητα εξυπηρέτησής του μέσω εναλλακτικών ασυρμάτων τεχνολογιών.

1.2 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας

Στα πλαίσια της εκπονούμενης διπλωματικής μελετάμε το πρόβλημα βέλτιστης ανάθεσης συχνοτήτων σε WLAN συστήματα. Αρχικά, στο κεφάλαιο 2, γίνεται παρουσίαση του προβλήματος και στη συνέχεια αναφέρονται τα βασικά στοιχεία της δυναμικής επιλογής συχνοτήτων όπως αυτά προδιαγράφονται από διεθνείς οργανισμούς. Στη συνέχεια περιγράφεται η δομή και η λειτουργία ενός δικτύου HIPERLAN/2, το οποίο θεωρείται ως δίκτυο πρότυπο για την συγκεκριμένη εργασία.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται αναλυτικά η τεχνική βελτιστοποίησης *simulated annealing*, και περιγράφεται αναλυτικά το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου στον οποίο στηρίζεται. Για καλύτερη και πληρέστερη κατανόηση, παρατίθενται 3 παραδείγματα εφαρμογής της μεθόδου, ενώ παράλληλα γίνεται παρουσίαση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων. Τα παραδείγματα αυτά αφορούν βασικά προβλήματα μηχανικών και η λύση τους παρουσιάζει ενδιαφέρον τόσο από τεχνική όσο και από οικονομική άποψη.

Στο τέταρτο και τελευταίο κεφάλαιο περιγράφεται ο αλγόριθμος που προτείνεται από τον συγγραφέα για το πρόβλημα της δυναμικής ανάθεσης συχνοτήτων. Ο αλγόριθμος αυτός στηρίζεται στη μέθοδο simulated annealing, ενώ γίνεται αναλυτική περιγραφή των βημάτων που ακολουθούνται σε συνδυασμό πάντα με τις απαραίτητες πληροφορίες και παραδοχές. Στη συνέχεια παρουσιάζονται εκτενώς τα αποτελέσματα της μεθόδου, ενώ ακολουθεί σχολιασμός και συμπεράσματα σχετικά με την αποδοτικότητα και τις δυνατότητες εφαρμογής του αλγορίθμου.

2. ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΓΙΑ WLAN ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ HIPERLAN/2

2.1 Εισαγωγή

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι να εξεταστεί η ανάγκη δυναμικής επιλογής συχνοτήτων και να δοθούν κάποια πληροφοριακά στοιχεία για το ασύρματο δίκτυο HIPERLAN/2. Αρχικά εξετάζεται η σημασία της δυναμικής επιλογής συχνοτήτων. Θα ακολουθήσει η προδιαγραφή της ETSI σχετικά με τη διαδικασία προσδιορισμού των συχνοτήτων. Τέλος παρουσιάζεται η μορφή του δικτύου HIPERLAN/2 καθώς και κάποιες βασικές γνώσεις για τη λειτουργία του.

2.2 Η ανάγκη δυναμικής επιλογής συχνότητας (Dynamic Frequency Selection) για ασύρματα δίκτυα.

Ορισμένα από τα ασύρματα δίκτυα, συμπεριλαμβανομένου και του HIPERLAN/2 λειτουργούν στην χωρίς άδεια ζώνη συχνοτήτων των 5 GHz. Είναι λοιπόν ανάγκη τα συστήματα αυτά να μοιραστούν το φάσμα με συστήματα ραντάρ, ορισμένα από τα οποία είναι κινούμενα. Μια από τις λειτουργίες που είναι απαραίτητη για να εξασφαλίσουμε την κοινή (χωρίς συντονισμό) χρήση του φάσματος μεταξύ των WLAN συστημάτων είναι η δυναμική προσαρμογή (επιλογή συχνότητας) στις εκάστοτε τοπικές συνθήκες παρεμβολών.

Από τα ασύρματα δίκτυα που λειτουργούν στην προαναφερθείσα ζώνη(των 5 GHz), το HIPERLAN2 υποστηρίζει την αυτόνομη επιλογή συχνότητας λειτουργίας. Από την οικογένεια των IEEE προτύπων 802.11, το πρώτο πρότυπο 802.11a δεν υποστηρίζει κάποια μέθοδο δυναμικής επιλογής της συχνότητας λειτουργίας. Για το λόγο αυτό το δίκτυο δεν μπορεί να εναρμονιστεί με την ευρωπαϊκή νομοθεσία, και επομένως καθίσταται ακατάλληλο για λειτουργία στις χώρες της ευρωπαϊκής ένωσης. Για να γίνει εφικτός ο εναρμονισμός με την ευρωπαϊκή νομοθεσία προτάθηκε το δίκτυο 802.11h, το οποία αποτελεί μια εξέλιξη του 802.11a. Το δίκτυο αυτό επεκτείνει τις δυνατότητες του προκάτοχού του με την εισαγωγή διαχειριστικών

δυνατοτήτων όπως είναι η δυναμική επιλογή συχνότητας και ο έλεγχος ισχύος εκπομπής.

2.3 Βασικά στοιχεία δυναμικής επιλογής συχνοτήτων όπως αυτά προβλέπονται από την ETSI.

Στην ενότητα αυτή θα γίνει μια προσπάθεια συνοπτικής περιγραφής των προδιαγραφών τις οποίες θα πρέπει να πληροί η διαδικασία δυναμικής επιλογής συχνοτήτων όπως αυτές προβλέπονται από την ETSI. Επιπλέον θα δοθούν και πληροφορίες σχετικά με τις συχνότητες οι οποίες είναι διαθέσιμες στην Ευρώπη για το σύστημα HIPERLAN2.

2.3.1 Σχετικά με τις ονομαστικές φέρουσες συχνότητες

Ο αριθμός των ονομαστικών φέρουσων συχνοτήτων για το σύστημα HIPERLAN2 είναι 19. Οι συχνότητες αυτές εκτείνονται σε δύο ζώνες συχνοτήτων : την "χαμηλή ή κατώτερη ζώνη συχνοτήτων", η οποία κυμαίνεται από 5.150 MHz έως 5.350 MHz και την "υψηλή ή ανώτερη ζώνη συχνοτήτων", η οποία κυμαίνεται από 5.470 MHz έως 5.725 MHz.

Το διάστημα το οποίο απέχουν μεταξύ τους οι ονομαστικές φέρουσες συχνότητες είναι 20 MHz. Κάθε ονομαστική φέρουσα συχνότητα (f_c) αντιστοιχεί στον γνωστό και ως αριθμό συχνότητας, $n_{carrier}$, ο οποίος δίνεται από την παρακάτω σχέση :

$$n_{carrier} = (f_c - 5000MHz) / 5MHz$$

Να αναφέρουμε επίσης ότι όλες οι μεταδόσεις γίνονται σε μια από τις ονομαστικές φέρουσες συχνότητες. Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται όλες οι ονομαστικές φέρουσες συχνότητες στην Ευρώπη.

Πίνακας 2.1

$n_{carrier}$	Ζώνη	Κεντρική συχνότητα(MHz)	Ανώτατη επιτρεπόμενη ισχύς εκπομπής (dBm)

	Συχνότητων		
36	Κατώτερη	5180	23
40	Κατώτερη	5200	23
44	Κατώτερη	5220	23
48	Κατώτερη	5240	23
52	Κατώτερη	5260	23
56	Κατώτερη	5280	23
60	Κατώτερη	5300	23
64	Κατώτερη	5320	23
100	Ανώτερη	5500	30
104	Ανώτερη	5520	30
108	Ανώτερη	5540	30
112	Ανώτερη	5560	30
116	Ανώτερη	5580	30
120	Ανώτερη	5600	30
124	Ανώτερη	5620	30
128	Ανώτερη	5640	30
132	Ανώτερη	5660	30
136	Ανώτερη	5680	30
140	Ανώτερη	5700	30

Για να λάβουμε απόφαση από το σχήμα επιλογής της συχνότητας εκπομπής για κάθε AP, παρουσιάζονται στην παρακάτω ενότητα κάποιες απαραίτητες διαδικασίες μετρήσεων, όπως αυτές προβλέπονται από τις προδιαγραφές της ETSI για το σύστημα HIPERLAN2.

2.3.2 Μέθοδος μετρήσεων

Από τις προδιαγραφές της ETSI για το ασύρματο δίκτυο HIPERLAN2 προβλέπεται ότι για να εξυπηρετηθούν οι διαδικασίες της επιλογής συχνότητας λειτουργίας, θα πρέπει τα AP και τα κινητά τερματικά (MT) να λαμβάνουν μετρήσεις τόσο στη συχνότητα λειτουργίας όσο και στις υπόλοιπες διαθέσιμες συχνότητες. Επιπλέον θα

υπάρχει ένας αλγόριθμος ο οποίος θα λαμβάνει τις μετρήσεις αυτές σαν είσοδο και στη συνέχεια θα καλείται να κάνει την επιλογή της συχνότητας εκπομπής και λήψης για κάθε AP.

Αρχικά όταν ένα AP τίθεται σε λειτουργία, λαμβάνει μετρήσεις για όλες τις συχνότητες τις οποίες πρόκειται να χρησιμοποιήσει. Επιπροσθέτως είναι πιθανόν από ένα AP να ζητηθεί σε κάποιο κινητό τερματικό να πάρει μετρήσεις και να τις μεταδώσει. Στην περίπτωση αυτή το MT θα εκτελέσει τις μετρήσεις και ύστερα θα παραδώσει τα αποτελέσματα στο AP. Εκτός όμως από την περίπτωση όπου έχουμε αίτηση προς κάποιο MT να πάρει μετρήσεις, είναι δυνατόν ένα MT να πάρει πρωτοβουλία ώστε να πραγματοποιήσει μετρήσεις και στη συνέχεια να ζητήσει να τις εκθέσει στο AP. Όταν το AP χρησιμοποιεί την ένδειξη AP_ABSENCE, αυτό σημαίνει ότι πραγματοποιεί κάποιες μετρήσεις και επομένως δεν είναι σε θέση να μεταδώσει δεδομένα. Οι τύποι μέτρησης για τα MT είναι τρεις :

1. Στιγμιαία μέτρηση : Για συγκεκριμένη συχνότητα και σε δεδομένο χρόνο, το MT θα προσπαθήσει να ανιχνεύσει το κανάλι BCH. Στην περίπτωση που αυτό εντοπιστεί θα αποκωδικοποιηθεί, και θα μετρηθεί η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος (Received Signal Strength,RSS).
2. Περιοδική μέτρηση : Για συγκεκριμένη συχνότητα και με αφετηρία μια δεδομένη χρονική στιγμή, το MT θα συλλέγει δείγματα RSS σε τακτά χρονικά διαστήματα (ίσα με 8 μs).
3. Πλήρης μέτρηση : Το είδος της μέτρησης αυτής αποτελεί ένα συνδυασμό των δύο παραπάνω. Σε δεδομένη συχνότητα και σε δεδομένο χρόνο αποκωδικοποιείται το κανάλι BCH, εκτελείται η μέτρηση του RSS για το BCH και συλλέγονται τα δείγματα RSS.

Όταν το AP μεταδώσει το μήνυμα RLC_CHANGE_FREQUENCY τότε έχει αποφασιστεί αλλαγή στη συχνότητα λειτουργίας, και το μήνυμα μεταδίδεται προτού πραγματοποιηθεί η αλλαγή αυτή. Το μήνυμα RLC_CHANGE_FREQUENCY θα μεταδοθεί περισσότερες από μία φορές πριν από την αλλαγή της συχνότητας στο κανάλι RBCH.

2.3.2.1 Δυναμική επιλογή συχνότητας

Από τη λήψη των μετρήσεων, και με δεδομένες τις τιμές ισχύος που λαμβάνονται για τις διάφορες πιθανές συχνότητες εκπομπής, φαίνεται ότι πρέπει να εφαρμοστεί ένα σχήμα δυναμικής επιλογής συχνότητας (DFS). Ο διαχειριστής του HIPERLAN2 καλείται να αποφασίσει για την υλοποίηση του παραπάνω σχήματος. Από τις προδιαγραφές της ETSI για το HIPERLAN2 προβλέπεται αποκεντρωμένη υλοποίηση του σχήματος επιλογής συχνοτήτων για κάθε AP. Αυτό σημαίνει ότι η απόφαση σε σχέση με τη συχνότητα λειτουργίας που θα χρησιμοποιηθεί θα μπορεί να λαμβάνεται αυτόνομα από κάθε AP χωρίς κανένα διαθέσιμο δεδομένο για την κατάσταση των υπόλοιπων κυψελών. Έτσι όπως παρουσιάστηκε, η απόφαση λαμβάνεται καθαρά σε επίπεδο ελέγχου.

Η υλοποίηση ενός αποκεντρωμένου DFS αλγορίθμου εξασφαλίζει αυτονομία των AP και δυνατότητα δυναμικής προσαρμογής τους στις απαιτήσεις του ασύρματου περιβάλλοντος. Παρ' όλα αυτά με τη λύση αυτή είναι πολύ πιθανόν το σύστημα να οδηγηθεί σε αστάθεια εξ' αιτίας των συνεχών αλλαγών των συχνοτήτων λειτουργίας. Επομένως δεν είναι ιδιαίτερα αποδοτική σε χρονικούς όρους. Επιπλέον αποκλείει την πιθανότητα να εφαρμοστεί κάποια ενιαία πολιτική διαχείρισης στο σύνολο του δικτύου, δεν παρέχει τη δυνατότητα εξασφάλισης στατιστικών εγγυήσεων απόδοσης και τελικά αναγκάζει τα AP να λειτουργούν σε ανταγωνιστικού όρους. Συνεπώς, η χωρίς έλεγχο και συντονισμό αλλαγή της συχνότητας λειτουργίας σε κάθε AP είναι πιθανόν να απαιτήσει μεγάλο χρόνο ώστε το σύστημα να καταλήξει σε ισορροπία.

Μια άλλη πιθανή προσέγγιση θα ήταν να υλοποιηθεί ένας κεντρικός DFS αλγόριθμος που θα υπολογίζει την καλύτερη και ταχύτερη ανάθεση των διαθέσιμων συχνοτήτων σε ένα σύνολο από AP. Κίνητρο για την υλοποίηση ενός τέτοιου αλγορίθμου αποτελεί η παροχή εγγυήσεων σχετικά με την απόδοση και την ποιότητα υπηρεσίας προς την ασύρματη υποδομή. Πλεονεκτήματα της κεντρικής αυτής της μεθόδου αποτελούν η σταθερότητα της λύσης καθώς επίσης και η ταχύτητα της λήψης της.

2.4 Δυνατότητες επίλυσης του προβλήματος

Το πρόβλημα της ανάθεσης συχνοτήτων αποτελεί ένα τυπικό πρόβλημα βελτιστοποίησης. Είναι ένα δύσκολο υπολογιστικά πρόβλημα, μη πολυωνυμικού χρόνου.

Παρ' όλα αυτά η λύση του προβλήματος θα πρέπει να βρεθεί σε ένα σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα. Υπάρχουν αρκετές δυνατές προσεγγίσεις για την επίλυση του προβλήματος της ανάθεσης συχνοτήτων σε κυβελωτά συστήματα. Οι πιο κλασσικές μέθοδοι είναι οι γενετικοί αλγόριθμοι, η αναζήτηση ταμπού, οι θεωρητικές μέθοδοι των γράφων και η μέθοδος simulated annealing. Όλες οι παραπάνω λύσεις είναι δοκιμασμένες λύσεις όσον αφορά την αντιμετώπιση δύσκολων προβλημάτων βελτιστοποίησης.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι διατηρούν συνεχώς ένα σύνολο πιθανών λύσεων του εκάστοτε προβλήματος, κάτι το οποίο μπορεί να θεωρηθεί αντίστοιχο με έναν πληθυσμό ατόμων. Κάθε λύση αναπαρίσταται από μια ακολουθία η οποία αποκαλείται χρωμόσωμα. Σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου, έχουμε αξιολόγηση των λύσεων με βάση την ποιότητά τους, ή υγεία όπως την αποκαλούμε. Με τον τρόπο αυτό θα επιλεγούν ορισμένες λύσεις, οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία ενός νέου πληθυσμού.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί και στο πρώτο κεφάλαιο η μέθοδος simulated annealing προσομοιώνει τη φυσική διεργασία κατά την οποία ένας κρύσταλλος ψύχεται από την υγρή στη στερεά κατάσταση. Προσεκτική και αργή ψύξη φέρνει τον κρύσταλλο στη στερεά μορφή. Σε αναλογία με τα παραπάνω ένας αλγόριθμος simulated annealing θεωρεί κάθε λύση του προβλήματος σαν κατάσταση, το κόστος της κάθε λύσης σαν ενέργεια της κατάστασης και τη βέλτιστη λύση σαν κατάσταση ελάχιστης ενέργειας. Σε κάθε φάση του αλγορίθμου δημιουργείται μια νέα λύση μεταβάλλοντας ελάχιστα την τρέχουσα βέλτιστη λύση. Αν η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που αντιστοιχεί στη νέα λύση είναι μικρότερη, η νέα λύση γίνεται η τρέχουσα βέλτιστη λύση. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να ικανοποιηθούν ορισμένα κριτήρια σύγκλισης.

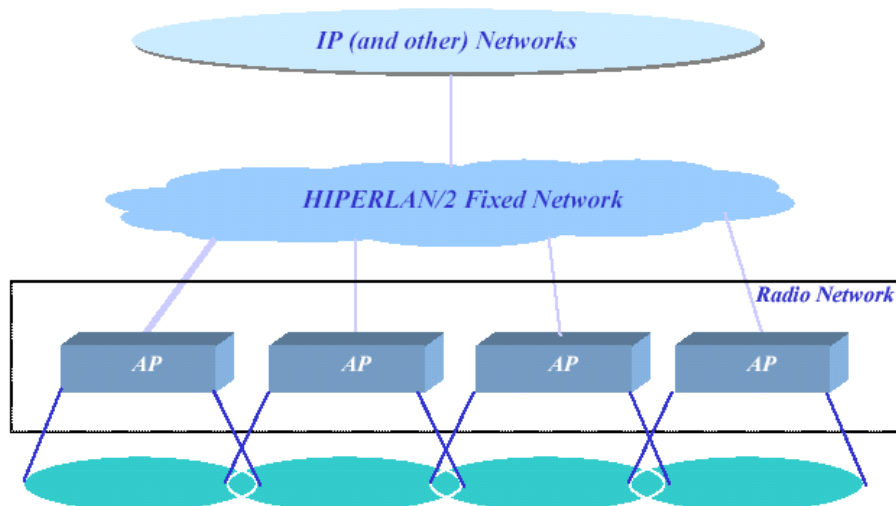
Με βάση τις παραπάνω μεθόδους επιτυγχάνουμε αποτελέσματα πολύ κοντά στα βέλτιστα, και για το λόγο αυτό θεωρούνται ενδεικνυόμενες λύσεις για αρχική ανάθεση συχνοτήτων κατά την εγκατάσταση ενός συστήματος τηλεπικοινωνιών. Θα πρέπει όμως να αναφέρουμε ότι ο χρόνος που απαιτείται ώστε να παραχθούν οι λύσεις καθιστά ορισμένες φορές τις μεθόδους αυτές όχι τόσο κατάλληλες για τη λήψη διαχειριστικών αποφάσεων κατά τη λειτουργία του συστήματος.

2.5 Το δίκτυο HIPERLAN2

Όπως γνωρίζουμε στις μέρες μας υπάρχει όλο και μεγαλύτερη ανάγκη για ασύρματες επικοινωνίες. Η απαίτηση για εφαρμογές όπως η ενοποίηση των μεταδόσεων φωνής, κινούμενης εικόνας και δεδομένων καθιστούν όλο και περισσότερο έντονη την απαίτηση για ασύρματα δίκτυα ευρείας ζώνης. Τα δίκτυα αυτά χρησιμοποιούνται τόσο σε εξουσιοδοτημένες όσο και σε χωρίς άδεια ζώνη συχνοτήτων. Ο ETSI (ευρωπαϊκός οργανισμός τηλεπικοινωνιακών προτύπων) δημιούργησε το πρόγραμμα BRAN, έτσι ώστε να αναπτύξει τα πρότυπα και τις προδιαγραφές για ευρυζωνικά ασύρματα δίκτυα πρόσβασης που καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών και προορίζονται να λειτουργήσουν σε διάφορες ζώνες συχνοτήτων.

Το ασύρματο δίκτυο HIPERLAN2 πρόκειται για ένα υψηλής ταχύτητας σύστημα ραδιοεπικοινωνίας το οποίο χρησιμοποιεί ονομαστικούς ρυθμούς μετάδοσης από 6 έως 54 Mbits. Επιπλέον συνδέει φορητές συσκευές με δίκτυα ευρείας ζώνης τα οποία είναι βασισμένα στην τεχνολογία IP, το ATM και άλλες τεχνολογίες.

Στο Σχήμα 2.1 απεικονίζεται η αρχιτεκτονική αναφοράς στη περίπτωση του κεντρικού τρόπου λειτουργίας. Ο τρόπος αυτός λειτουργίας χρησιμοποιείται ώστε να λειτουργήσει το HIPERLAN2 ως δίκτυο πρόσβασης μέσω ενός σταθερού σημείου πρόσβασης (Access Point, AP). Κάθε ένα από τα σημεία πρόσβασης χρησιμοποιείται για τον έλεγχο μιας κυψέλης. Επιπροσθέτως προσφέρει ασύρματη πρόσβαση στα MT (κινητά τερματικά) της κυψέλης, οπότε λειτουργεί ως διεπαφή μεταξύ του ασύρματου και του σταθερού δικτύου. Ένα σύστημα HIPERLAN2 θα περιλαμβάνει ένα σταθερό τμήμα δικτύου το οποίο επιτρέπει την αλληλεπίδραση με τα δίκτυα κορμού, όπως επίσης και την επικοινωνία μεταξύ των σημείων πρόσβασης.



Σχήμα 2.1 Αρχιτεκτονική του δικτύου HIPERLAN/2

Η στοίβα πρωτοκόλλου η οποία σχετίζεται με το HIPERLAN2 περιλαμβάνει τα εξής στρώματα:

- Φυσικό στρώμα (Physical Layer, PHY)
- Στρώμα ζεύξης δεδομένων (Data Link Control Layer, DLC)
- Στρώμα σύγκλισης (Convergence Layer, CL)

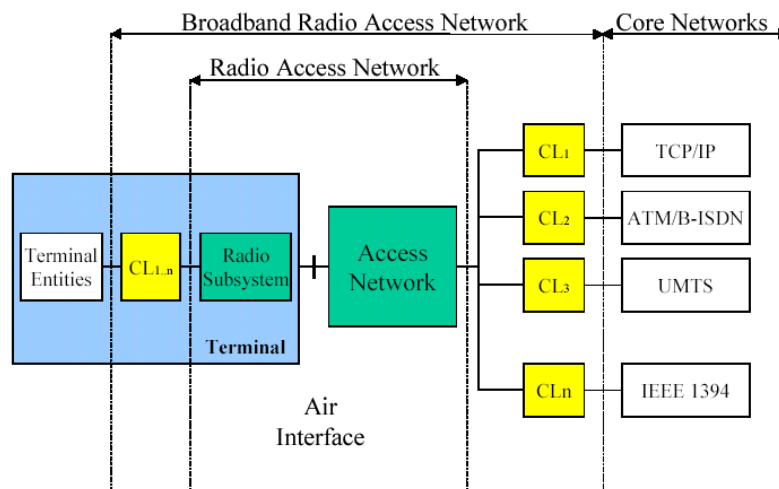
Τα δύο πρώτα στρώματα είναι ανεξάρτητα από τα δίκτυα κορμού, σε αντίθεση με το στρώμα σύγκλισης το οποίο είναι εξαρτώμενο. Τα δίκτυα κορμού μπορεί να χωριστούν στα εξής:

- Δίκτυα μεταγωγής πακέτου όπως είναι το Ethernet, δίκτυα IP, PPP καθώς και IEEE 1394 υπηρεσίες.
- Το UMTS δίκτυο, που έχει αναπτυχθεί από την ομάδα 3GPP της ETSI.
- Δίκτυα βασισμένα σε μεταγωγή κελιών όπως είναι το ATM, το οποίο έχει προτυποποιηθεί από το ATM Forum και την ITU.



Σχήμα 2.2 Στοιβά πρωτοκόλλου του HIPERLAN/2

Στο Σχήμα 2.3 απεικονίζεται το μοντέλο αναφοράς για το δίκτυο HIPERLAN2 το οποίο έχει αναπαραχθεί σύμφωνα με τις προδιαγραφές της ETSI.



Σχήμα 2.3 Μοντέλο αναφοράς για το δίκτυο HIPERLAN/2

Πέρα από τον κεντρικό τρόπο λειτουργίας, παρέχεται επιπλέον και η δυνατότητα για άμεση επικοινωνία μεταξύ των τερματικών. Ο συγκεκριμένος τρόπος λειτουργίας χρησιμοποιείται έτσι ώστε το HIPERLAN2 να λειτουργεί ως "ad hoc" δίκτυο χωρίς υποστήριξη για κυβελοειδή δικτυακή υποδομή. Στην περίπτωση αυτή παρέχεται υποστήριξη για το επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας με το σταθερό σημείο πρόσβασης

από έναν κεντρικό ελεγκτή (Central Controller), ο οποίος επιλέγεται δυναμικά μεταξύ των φορητών συσκευών.

Το HIPERLAN2 δύναται να υποστηρίξει διάφορες εφαρμογές πολυμέσων. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της παροχής των απαραίτητων μηχανισμών που εξασφαλίζουν την ποιότητα υπηρεσίας. Εξάλλου, μέσα στην περιοχή εξυπηρέτησης υποστηρίζεται περιορισμένη κινητικότητα χρηστών. Μελλοντικά ενδεχομένως να έχουμε υποστήριξη κινητικότητας σε ευρεία περιοχή. Τα σήματα HIPERLAN2 τέλος θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν στην ζώνη των 5 GHz.

2.5.1 Παράμετροι για τη χρησιμοποίηση φάσματος

Υπάρχουν κάποιες βασικές παράμετροι για τη χρησιμοποίηση φάσματος από τα συστήματα HIPERLAN2. Τα συστήματα αυτά προορίζονται να χρησιμοποιηθούν ως δίκτυα ιδιωτικής ή δημόσιας πρόσβασης, τα οποία λειτουργούν στο φάσμα των 5 GHz. Έχουν οριστεί συγκεκριμένες ζώνες στην Ευρώπη για τον τύπο αυτό συστημάτων.

2.5.1.1 Ζώνες συχνοτήτων

Οι προδιαγραφές του φυσικού στρώματος, καθορίζουν ότι το σύστημα HIPERLAN2 μπορεί να λειτουργεί σε όλες τις ζώνες συχνότητας γύρω από τα 5 GHz, στις οποίες βέβαια επιτρέπεται η λειτουργία.

Στον Πίνακα 2.2 παρουσιάζονται οι ζώνες συχνότητας και τα όρια ισχύος εκπομπής όπως αυτά ορίζονται από την απόφαση (99) του οργανισμού CERT ERC.

Πίνακας 2.2

Ζώνη Συχνοτήτων RF	Όριο Ισχύος	Σχόλια
5 150 MHz - 5 350 MHz	200 mW μέση ισχύς EIRP	Εσωτερική χρήση μόνο και υλοποίηση DFS και PC
5 470 MHz - 5 725 MHz	1 W μέση ισχύς EIRP	Εσωτερική και εξωτερική χρήση και υλοποίηση DFS και PC

Τα δίκτυα τύπου HIPERLAN2 θα πρέπει να είναι σε θέση να μοιραστούν το φάσμα με τα συστήματα ραντάρ, μερικά από τα οποία είναι κινούμενα. Η κοινή αυτή χρήση του φάσματος απαιτεί τη δυναμική προσαρμογή ή αλλιώς Δυναμική Επιλογή Συχνότητας (Dynamic Frequency Selection) στις τοπικές συνθήκες παρεμβολών. Η λειτουργία αυτή απαιτείται επιπλέον και για να διευκολύνει την εγκατάσταση των συστημάτων HIPERLAN χωρίς να είναι απαραίτητη η ανάγκη ύπαρξης ιδιαίτερου συντονισμού.

Περαιτέρω, τα δίκτυα HIPERLAN2 πρέπει να διασπείρουν της εκπομπές τους στα διαθέσιμα κανάλια συχνοτήτων. Το γεγονός αυτό μειώνει την πιθανότητα μια συγκέντρωση των εκπομπών HIPERLAN σε ένα συγκεκριμένο κανάλι να οδηγήσει σε συνολική παρεμβολή μεγαλύτερη από την επιτρεπόμενη. Η συγκεκριμένη απαίτηση αποτελεί μια στατιστική απαίτηση που πρέπει να ικανοποιείται σε μεγάλη κλίμακα, και όχι μόνο στην κλίμακα του συστήματος HIPERLAN.

Τα συστήματα HIPERLAN τέλος θα πρέπει να υλοποιούν σχήματα ελέγχου της ισχύος εκπομπής (Power Control, PC) στην άνω και κάτω ζεύξη και στην "ad hoc" σύνδεση έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι παρεμβολές που δημιουργούνται. Στόχος του Power Control είναι να μειωθεί η μέση παρεμβολή ευρείας κλίμακας τουλάχιστον κατά 3 dB σε σύγκριση με την παρεμβολή των συστημάτων τα οποία δεν εφαρμόζουν διαδικασίες ελέγχου της ισχύος μετάδοσης.

Τα μέσα που χρησιμοποιούνται για να εφαρμοστεί ο έλεγχος της ισχύος μετάδοσης περιλαμβάνουν ρύθμιση της ισχύος εκπομπής στη άνω ζεύξη σε ένα επίπεδο ικανοποιητικό ώστε να επιτύχουμε αξιόπιστη επικοινωνία μεταξύ δύο συσκευών HIPERLAN. Επιπλέον περιλαμβάνουν ρύθμιση της ισχύος εκπομπής στην κάτω ζεύξη σε ένα επίπεδο ικανοποιητικό έτσι ώστε να επιτευχθεί αξιόπιστη επικοινωνία μεταξύ του σημείου πρόσβασης και της πιο απομακρυσμένης από αυτό τερματικής συσκευής.

2.5.1.2 Συχνότητες λειτουργίας

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω στη ζώνη χαμηλότερης συχνότητας (από 5.150 έως 5.350 MHz), η πρώτη ονομαστική φέρουσα συχνότητα θα είναι 5.180 MHz και η τελευταία 5.320 MHz. Ομοίως για την ανώτερη ζώνη συχνοτήτων (από 5.470 έως

5.725 MHz), η πρώτη και η τελευταία ονομαστική φέρουσα συχνότητα θα είναι 5.500 MHz και 5.700 MHz αντίστοιχα. Η συγκεκριμένη κατανομή των ονομαστικών φερουσών συχνοτήτων ισχύει μόνο για την Ευρώπη.

Στην αρχή του κεφαλαίου αυτού είδαμε πως οι διαδοχικές ονομαστικές φέρουσες συχνότητες χωρίζονται κατά διαστήματα των 20 MHz. Η απόσταση λοιπόν των καναλιών HIPERLAN2 θα είναι 20 MHz. Όλες οι μεταδόσεις πραγματοποιούνται σε μία από τις ονομαστικές φέρουσες συχνότητες οι οποίες καταγράφονται στον Πίνακα 2.1.

2.5.1.3 Ανεπιθύμητες εκπομπές

Το σύστημα HIPERLAN2 καλείται να προσαρμοστεί στα επιτρεπτά επίπεδα ανεπιθύμητων εκπομπών εκτός φάσματος της συχνότητας λειτουργίας. Τα επίπεδα αυτά καθορίζονται στη σύσταση 70-03 CERT, και μετρούνται σε εύρος ζώνης του 1 MHz. Επιπροσθέτως, οι εκτός ζώνης εκπομπές κάτω από τα 5.150 MHz περιορίζονται σε λιγότερο από $-30\text{dBm}/100\text{kHz}$ ώστε να προστατευθούν τα μικροκυματικά συστήματα προσγειώσης (Microwave Landing Systems, MLS), τα οποία λειτουργούν κάτω από 5.150 MHz.

Πίνακας 2.3

Κατάσταση λειτουργίας	<1GHz	>1GHz
Συσκευή εκπομπής ενεργή	-36dBm	-30 dBm
Συσκευή εκπομπής ανενεργή	-57 dBm	-47 dBm

2.5.2 Λειτουργίες και υπηρεσίες του HIPERLAN2

Στην συγκεκριμένη ενότητα δίδεται μια συνοπτική παρουσίαση της στοίβας πρωτοκόλλου του δικτύου. Αρχικά λοιπόν αναφέρουμε ότι όσον αφορά το περιβάλλον μιας επιχείρησης, ένα δίκτυο HIPERLAN2 αποτελείται από διάφορα

σημεία πρόσβασης AP. Κάθε ένα από τα σημεία αυτά καλύπτει μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή, ενώ συνολικά όλα μαζί αποτελούν ένα ασύρματο δίκτυο πρόσβασης που σαν σκοπό έχει την πλήρη ή μερική κάλυψη μιας έκτασης σχεδόν οποιουδήποτε μεγέθους. Υπάρχει επιπλέον το ενδεχόμενο επικάλυψης μεταξύ των περιοχών εξυπηρέτησης απλοποιώντας επομένως την περιαγωγή των τερματικών μέσα στο ασύρματο δίκτυο πρόσβασης. Κάθε AP εξυπηρετεί διάφορα κινητά τερματικά που συνδέονται με αυτό. Όταν η ποιότητα μιας ασύρματης σύνδεσης βρίσκεται σε μη αποδεκτά επίπεδα, τότε κάποιο MT είναι δυνατόν να κινηθεί προς ένα διαφορετικό AP με την εκτέλεση μιας διαπομπής.

Όσον αφορά το οικιακό περιβάλλον, το δίκτυο HIPERLAN2 χρησιμοποιείται κυρίως ως "ad hoc" τοπικό LAN που μπορεί να τεθεί σε λειτουργία κατά τρόπο έτοιμο προς χρήση. Θα πρέπει να αναφερθεί πως το οικιακό σύστημα HIPERLAN2 μοιράζεται τα ίδια βασικά χαρακτηριστικά σε σχέση με το υλοποιημένο σε ευρεία κλίμακα HIPERLAN2 μετά τον καθορισμό της ακόλουθης ισοδυναμίας μεταξύ των δύο συστημάτων :

- Στην "ad hoc" υλοποίηση ένα υποδίκτυο είναι ισοδύναμο με μια κυσέλη στην κυψελοειδή διαμόρφωση δικτύων πρόσβασης.
- Ένας κεντρικός ελεγκτής (Central Controller) στην "ad hoc" υλοποίηση είναι ισοδύναμος με το σημείο πρόσβασης AP στην κυψελοειδή διαμόρφωση δικτύων πρόσβασης. Παρ' όλα αυτά οι φορητές συσκευές HIPERLAN2 πραγματοποιούν δυναμική επιλογή του κεντρικού ελεγκτή, ο οποίος μπορεί να μεταφερθεί σε διαφορετική φορητή συσκευή εφόσον ο παλαιός εγκαταλείψει το δίκτυο.
- Η υλοποίηση πολλαπλών δικτύων σε ένα σπίτι υλοποιείται μέσω της ύπαρξης πολλαπλών κεντρικών ελεγκτών οι οποίοι λειτουργούν σε διαφορετικές συχνότητες.

Στηριζόμενοι σε όσα έχουν αναφερθεί συμπεραίνουμε ότι το δίκτυο HIPERLAN2 υποστηρίζει δύο βασικούς τρόπους λειτουργίας.

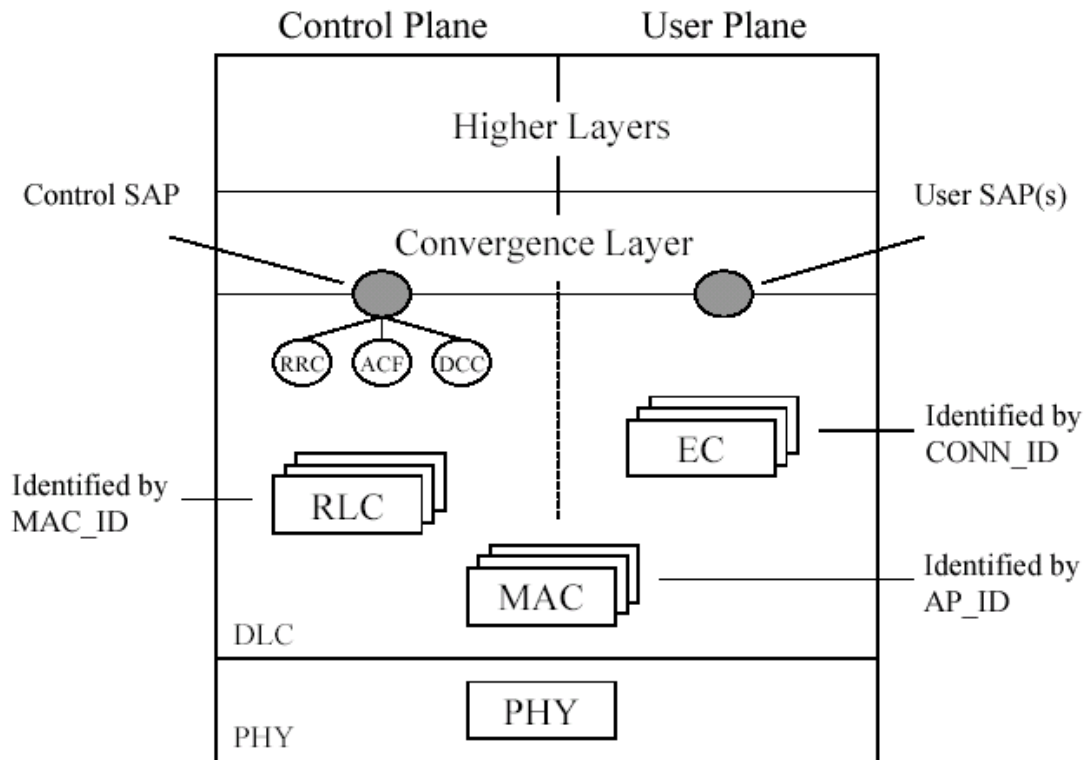
1. Κεντρικός τρόπος λειτουργίας : Σύμφωνα με τον τρόπο αυτό, ένα AP (σημείο πρόσβασης) συνδέεται με ένα δίκτυο κορμού, και εξυπηρετεί τα κινητά τερματικά που συνδέονται με αυτό. Όλη η κίνηση περνά μέσω του AP

ανεξάρτητα με το εάν η ανταλλαγή δεδομένων γίνεται μεταξύ ενός MT και ενός άλλου τερματικού που βρίσκεται αλλού στο δίκτυο κορμού ή μεταξύ τερματικών που ανήκουν στ ίδιο AP. Η βασική υπόθεση στην οποία στηρίζεται αυτός ο τρόπος λειτουργίας είναι ότι μεγάλο μέρος της κίνησης ανταλλάσσεται με τερματικά που βρίσκονται κάπου αλλού στο δίκτυο. Η υποστήριξη του κεντρικού τρόπου λειτουργίας θεωρείται υποχρεωτική τόσο από τα AP όσο και από τα κινητά τερματικά.

2. Άμεσος τρόπος λειτουργίας : Η πρόσβαση στο μέσο ρυθμίζεται όπως και προηγουμένως με έναν συγκεντρωτικό τρόπο από τον κεντρικό ελεγκτή. Παρ' αυτά η ανταλλαγή δεδομένων των χρηστών μέσω των τερματικών πραγματοποιείται χωρίς αυτά να περάσουν απαραίτητα από τον κεντρικό ελεγκτή. Τόσο στο οικιακό περιβάλλον, όσο και σε κάποιες άλλες εφαρμογές αναμένεται ότι ένα μεγάλο μέρος της κίνησης των χρηστών γίνεται μεταξύ των τερματικών που συνδέονται με τον ίδιο CC (Central Controller). Ο τρόπος αυτός λειτουργίας προορίζεται βασικά για χρήση μέσα στο οικιακό περιβάλλον. Συνεπώς η υποστήριξη του είναι υποχρεωτική για δίκτυα HIPERLAN2 που λειτουργούν στο περιβάλλον σπιτιού.

Ο κάθε κεντρικός ελεγκτής δύναται επίσης να συνδεθεί με ένα δίκτυο κορμού, δηλαδή μπορεί να λειτουργήσει και στον κεντρικό και στον άμεσο τρόπο λειτουργίας.

Στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζεται η βασική λίστα πρωτοκόλλου του HIPERLAN2 (από τη πλευρά AP) και οι λειτουργίες της. Το στρώμα σύγκλισης προσφέρει εξυπηρέτηση στα υψηλότερα στρώματα.



Σχήμα 2.4 Παρουσίαση της στοίβας πρωτοκόλλου για το HIPERLAN/2

Η βασική λειτουργία μεταφοράς δεδομένων με χρήση διαμόρφωσης OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) προσφέρεται από το φυσικό στρώμα (PHY).

Το στρώμα ελέγχου ζεύξης δεδομένων (DLC) περιλαμβάνει τη λειτουργία λαθών (Error Control, EC), τη λειτουργία ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (Medium Access Control, MAC) και τη λειτουργία ελέγχου της ασύρματης ζεύξης (Radio Link Control, RLC). Οι λειτουργίες του εν λόγω στρώματος διαιρούνται στις λειτουργίες μεταφοράς δεδομένων χρηστών (User Data Transport) και ελέγχου (Control). Αυτές απεικονίζονται κυρίως στη δεξιά και στην αριστερή πλευρά του Σχήματος 2.4 αντίστοιχα.

Όσον αφορά τη λειτουργία μεταφοράς δεδομένων χρηστών, αυτή τροφοδοτείται με τα πακέτα δεδομένων χρηστών από τα υψηλότερα στρώματα μέσω του σημείου πρόσβασης υπηρεσίας χρηστών (User Service Access Point, U-SAP). Το κομμάτι αυτό περιέχει τη λειτουργία ελέγχου λαθών EC που αναφέρθηκε, την οποία υλοποιεί ένα πρωτόκολλο Automatic Repeat Request (ARQ). Το πρωτόκολλο DLC στηρίζεται

σε λογική προσανατολισμένη σε σύνδεση (connection oriented), γεγονός το οποίο παρίσταται με πολλαπλά σημεία σύνδεσης στο U-SAP. Για κάθε σύνδεση DLC δημιουργείται ένα στιγμιότυπο της λειτουργίας ελέγχου λαθών. Στην περίπτωση όπου το πιο ψηλό στρώμα είναι προσανατολισμένο σε σύνδεση, υπάρχει η δυνατότητα δυναμικής δημιουργίας και απελευθέρωσης των συνδέσεων DLC. Στην αντίθετη περίπτωση όπου το υψηλότερο στρώμα είναι χωρίς σύνδεση, τότε πρέπει να εγκατασταθεί τουλάχιστον μια DLC σύνδεση, η οποία θα πρέπει να έχει όλα τα δεδομένα χρηστών.

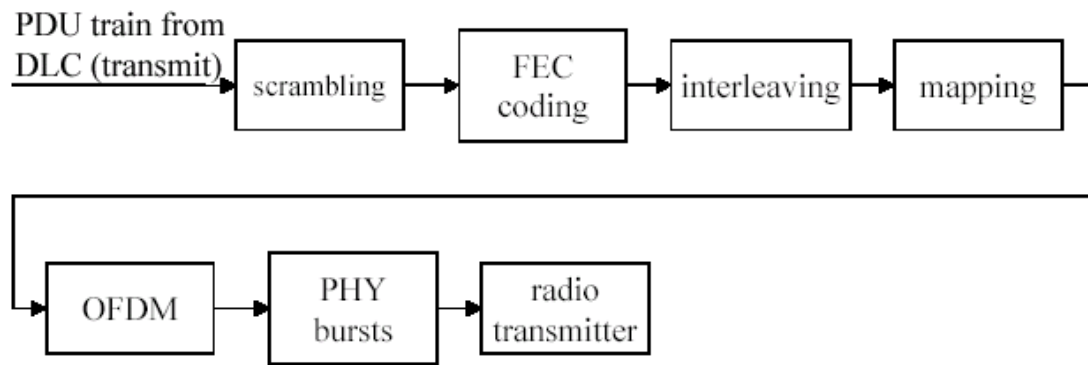
Το υπόστρωμα RLC το οποίο προσφέρει μια υπηρεσία μεταφοράς στον έλεγχο σύγκλισης DLC (DLC Connection Control, DCC), τη λειτουργία ελέγχου συσχέτισης (Association Control Function, ACF) και τον έλεγχο ασύρματων πόρων (Radio Resource Control, RRC) βρίσκεται στο αριστερό μέρος του σχήματος.

Τέλος το στρώμα σύγκλισης στην κορυφή είναι επίσης χωρισμένο σε ένα μέρος ελέγχου και σε ένα μέρος μεταφοράς δεδομένων. Το μέρος που σχετίζεται με τη μεταφορά δεδομένων παρέχει την προσαρμογή της μορφής των δεδομένων των χρηστών στη μορφή των μηνυμάτων του στρώματος DLC (DLC Service Data Units, SDU). Επίσης σε περίπτωση δικτύων (με εξαίρεση το ATM) υψηλότερου στρώματος, περιέχει μια λειτουργία κατάτμησης και επανασυρμολόγησης (Segmentation And Reassembly, SAR). Ακόμα θα πρέπει να αναφέρουμε ότι το μέρος ελέγχου δύναται να χρησιμοποιήσει τις λειτουργίες ελέγχου στο DLC, όταν π.χ. διαπραγματεύονται παράμετροι του στρώματος σύγκλισης κατά τη διάρκεια της πραγματοποίησης της σύνδεσης.

Ο χωρισμός μεταξύ υπηρεσιών και λειτουργιών του DLC και του CL επιτρέπει μια απλή και ευέλικτη προσέγγιση στην προδιαγραφή της ασύρματης διεπαφής για το HIPERLAN2.

2.5.2.1 Φυσικό στρώμα στο HIPERLAN/2

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η βασική διάρθρωση της αλυσίδας διάδοσης (Σχήμα 2.5)



Σχήμα 2.5 Διάρθρωση της αλυσίδας μετάδοσης

Στο HIPERLAN2 το φυσικό στρώμα προφέρει υπηρεσίες μεταφοράς δεδομένων στο DLC στρώμα. Για το λόγο αυτό, παρέχει τις λειτουργίες ώστε να αντιστοιχηθούν οι διαφορετικές ακολουθίες δεδομένων του στρώματος ζεύξης (DLC PDU) σε συγκεκριμένη μορφή, η οποία ονομάζεται "εκρήξεις φυσικού στρώματος" (PHY bursts), κατάλληλη για τη διαβίβαση και τη λήψη πληροφοριών χρηστών και διαχείρισης μεταξύ ενός AP και ενός MT στον κεντρικό τρόπο λειτουργίας ή μεταξύ δύο MT στον άμεσο τρόπο. Στην παραπάνω διαδικασία περιλαμβάνονται οι εξής λειτουργίες στον πομπό :

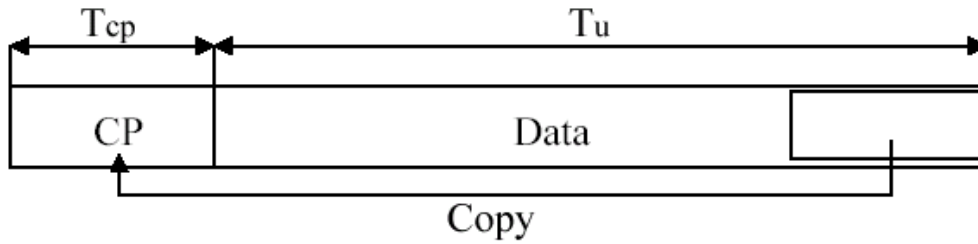
- Καθορισμός του ονομαστικού ρυθμού μετάδοσης με την επιλογή του κατάλληλου τρόπου διαμόρφωσης φυσικού στρώματος με χρήση του επονομαζόμενου μηχανισμού προσαρμογής της ζεύξης (link adaptation).
- Κωδικοποίηση των περιπλεγμένων ψηφίων, σε συμφωνία με τη διαδικασία FEC (Forward Error Connection).
- Περίπλεξη.
- Διεμπλοκή των κωδικοποιημένων ψηφίων στον πομπό με τη χρησιμοποίηση του κατάλληλου σχήματος διεμπλοκής για τον επιλεγμένο ονομαστικό ρυθμό μετάδοσης φυσικού στρώματος.
- Διαμόρφωση των υπομεταφορέων, μέσω της αντιστοίχισης των διεμπλεγμένων ψηφίων σε αστερισμούς διαμόρφωσης (modulation constellation points).
- Παραγωγή του σύνθετου σήματος βασικής ζώνης μέσω OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) διαμόρφωσης.

- Εκτέλεση της ασύρματης μετάδοσης με τη διαμόρφωση της φέρουσας ραδιοσυχνότητας με το σύνθετο βήμα βασικής ζώνης στον πομπό.
- Εισαγωγή πιλοτικών υπομεταφορέων, επισυνάπτοντας το κατάλληλο προοίμιο στην αντίστοιχη ακολουθία PDU στη συσκευή εκπομπής, και δημιουργία της "έκρηξης φυσικού στρώματος".

Επιπλέον γνωρίζουμε ότι το φυσικό στρώμα του HIPERLAN2 είναι βασισμένο σε ένα σχήμα OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Στον Πίνακα 2.4 παρέχονται οι αριθμητικές τιμές για τις βασικές παραμέτρους του χρησιμοποιούμενου σχήματος OFDM. Στο Σχήμα 2.6 παρουσιάζεται η μορφή των συμβόλων. Το CP (Cyclic Prefix) παριστάνει το κυκλικό πρόθεμα που ακολουθείται από ένα μέρος χρήσιμων δεδομένων.

Πίνακας 2.4

Παράμετρος	Τιμή
Ρυθμός δειγματοληψίας (sampling rate) $f_s=1/T$	20 MHz
Διάρκεια συμβόλου (symbol part duration) T_U	$64 * T = 3,2 \mu s$
Διάρκεια κυκλικού προθέματος (cyclic prefix duration) T_{CP}	$16 * T = 0,8 \mu s$ (υποχρεωτικό)
	$8 * T = 0,4 \mu s$ (προαιρετικό)
Συνολική διάρκεια συμβόλου (symbol interval) T_S	$80 * T = 4,0 \mu s$ $(T_U + T_{CP})$
	$72 * T = 3,6 \mu s$ $(T_U + T_{CP})$
Αριθμός υπομεταφορέων δεδομένων (data sub-carriers) N_{SD}	48
Αριθμός πιλοτικών υπομεταφορέων (pilot sub-carriers) N_{SP}	4
Συνολικός αριθμός υπομεταφορέων N_{ST}	52 ($N_{SD} + N_{SP}$)
Απόσταση μεταξύ των υπομεταφορέων Δ_f	0,3125 MHz ($1/T_U$)



Σχήμα 2.6 Παρουσίαση ενός συμβόλου OFDM με κυκλικό πρόθεμα

Επιπροσθέτως υιοθετούμε ένα πολυρυθμικό φυσικό στρώμα, στο οποίο η κατάλληλη διαμόρφωση επιλέγεται από ένα σχήμα προσαρμογής της ζεύξης. Αυτό γίνεται με σκοπό να βελτιωθεί η χωρητικότητα της ασύρματης ζεύξης, η οποία εξαρτάται από την απόσταση των κινητών τερματικών από το σημείο πρόσβασης και από τις διαφορετικές καταστάσεις παρεμβολών. Ο ρυθμός μετάδοσης κυμαίνεται από 6 έως 54 Mbits και μεταβάλλεται αφενός με τη χρήση διαφορετικών ρυθμών κωδικοποίησης και αφετέρου με την χρησιμοποίηση διαφόρων αλφαβήτων σημάτων για τη διαμόρφωση των υπομεταφορέων OFDM. Σαν υποχρεωτικά σχήματα διαμόρφωσης χρησιμοποιούνται οι διαμορφώσεις BPSK, QPSK και 16QAM, ενώ η διαμόρφωση 64QAM είναι προαιρετική τόσο για το AP όσο και για το MT. Στον Πίνακα 2.5 παρουσιάζονται οι διαμορφώσεις, οι υποστηριζόμενοι ονομαστικοί ρυθμοί μετάδοσης, όπως επίσης και ο ρυθμός κωδικοποίησης για καθέναν από αυτούς.

Πίνακας 2.5

Διαμόρφωση	Ρυθμός κωδικοποίησης (Coding rate)	Ονομαστικός ρυθμός μετάδοσης (Mbits/sec)
BPSK	1/2	6
BPSK	3/4	9
QPSK	1/2	12
QPSK	3/4	18
16QAM	9/16	27
16QAM	3/4	36
64QAM	3/4	54

2.5.2.2 Στρώμα ζεύξης δεδομένων

Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται οι λειτουργίες του στρώματος ζεύξης δεδομένων (DLC) για το σύστημα HIPERLAN2. Οι λειτουργίες αυτές διαιρούνται στις λειτουργίες ελέγχου της ζεύξης και στις λειτουργίες μεταφοράς δεδομένων.

2.5.2.2.1 Λειτουργίες Ελέγχου

Στην ενότητα αυτή προδιαγράφονται οι λειτουργίες του υποστρώματος ελέγχου της ασύρματης ζεύξης (Radio Link Control, RLC). Στις λειτουργίες αυτές περιλαμβάνονται οι λειτουργίες RRC (Radio Resource Control), ACF (Association Control Function) και DCF (DLC Control Function). Για κάθε κινητό τερματικό δημιουργείται ένα στιγμιότυπο του πρωτοκόλλου RLC.

2.5.2.2.1.1 Έλεγχος συσχέτισης

Για να μπορέσει ένα τερματικό να επικοινωνήσει με ένα AP θα πρέπει να δημιουργηθεί μια σύνδεση (συσχέτιση) μεταξύ τους. Οι λόγοι για τους οποίους συμβαίνει αυτό παρουσιάζονται παρακάτω :

- ❑ Το MAC πρωτόκολλο ελέγχεται κεντρικά από το AP, ανεξάρτητα από το εάν το τερματικό λειτουργεί στον άμεσο ή στον κεντρικό τρόπο.
- ❑ Το AP πρέπει πάντα να δημιουργήσει πόρους για κάθε κινητό τερματικό με το οποίο συνδέεται.

Στη συνέχεια φαίνονται οι στόχοι των λειτουργιών ελέγχου συσχέτισης (Association Control Function, ACF):

1. Συσχέτιση: Το αρχικό βήμα είναι η απόδοση μιας ταυτότητας MAC στο τερματικό, η οποία ακολουθείται από τη σχετική διαπραγμάτευση των δυνατοτήτων της σύνδεσης. Το κινητό τερματικό και το AP αποφασίζουν στο βήμα αυτό εάν θα πραγματοποιείται επαλήθευση ταυτότητας (authentication) και κρυπτογράφηση, ενώ παράλληλα καθορίζονται ποιοι μηχανισμοί επαλήθευσης ταυτότητας και κρυπτογράφησης θα χρησιμοποιηθούν αντίστοιχα.

2. Ανταλλαγή κλειδιών κρυπτογράφησης: Το βήμα αυτό είναι προαιρετικό και πραγματοποιείται μετά τη συσχέτιση. Βασίζεται στη διαδικασία ανταλλαγής κλειδιού Diffie-Hellmann. Οι κοινές και δημόσιες (public) τιμές της παραπάνω διαδικασίας χρησιμοποιούνται τόσο από το κινητό τερματικό όσο και από το AP έτσι ώστε να παραγάγουν και να ανανεώσουν το κλειδί συνόδου.
3. Επαλήθευση ταυτότητας : Και το βήμα αυτό είναι προαιρετικό και ακολουθεί την ανταλλαγή των κλειδιών κρυπτογράφησης. Η επαλήθευση ταυτότητας εκτελείται τόσο για τα AP όσο και για τα κινητά τερματικά (αμοιβαία επαλήθευση).
4. Αναγνωριστικό σήμα από το AP (beacon signaling): Στο σήμα αυτό περιλαμβάνονται πληροφορίες για τα βασικά γνωρίσματα και τις ιδιότητες του AP. Οι πληροφορίες αυτές μεταδίδονται σε κάθε πλαίσιο του στρώματος MAC. Η ACF λειτουργία παρέχει μερικές από τις τιμές που μεταδίδονται προς όλα τα τερματικά.
5. Ανανέωση του κλειδιού κρυπτογράφησης: Το χαρακτηριστικό αυτό είναι προαιρετικό και μπορεί να συμβεί περιοδικά από το AP.
6. Αποσυσχέτιση (disassociation): Ζητείται από το κινητό τερματικό.

2.5.2.2.1.2 Λειτουργία ελέγχου ασύρματων πόρων

Η λειτουργία ελέγχου ασύρματων πόρων ευθύνεται για την επιτήρηση και την αποδοτική χρήση των διαθέσιμων πόρων. Για την υποστήριξη της ανωτέρω λειτουργίας υποστηρίζονται οι παρακάτω λειτουργίες του RLC στρώματος:

- ο Δυναμική επιλογή συχνότητας (DFS): Το δίκτυο HIPERLAN2 δεν θα απαιτήσει τον προγραμματισμό συχνοτήτων αλλά θα λειτουργήσει κατά τρόπο έτοιμο προς χρήση. Η απόφαση για την επιλογή ενός καναλιού συχνότητας σε πρώτη φάση είναι βασισμένη στις μετρήσεις του ίδιου του AP (όταν δεν συνδέεται με κανένα κινητό τερματικό). Εφόσον έχουμε δυναμική επιλογή συχνότητας η κατάσταση μπορεί να μεταβληθεί και το AP να μεταπηδήσει σε διαφορετικό κανάλι συχνότητας. Παρ' όλα αυτά κάθε MT έχει συγκεκριμένη κατάσταση παρεμβολών. Συνεπώς κάποια κινητά τερματικά είναι δύσκολο να επικοινωνήσουν αποτελεσματικά με το AP. Συμπεραίνουμε λοιπόν πως η απόφαση σχετικά με το πότε πρέπει να

εκτελεστεί μια αλλαγή συχνότητας και με το ποια θα είναι η καινούργια συχνότητα που θα χρησιμοποιηθεί, βασίζεται στις μετρήσεις τόσο των AP όσο και των MT που βρίσκονται στην κυψέλη κάλυψης. Οι λειτουργίες του RLC στρώματος η οποίες υποστηρίζουν τη δυναμική επιλογή συχνοτήτων επιτρέπουν τα εξής:

- Μετρήσεις από τα AP και MT: Το κινητό τερματικό δύναται να πραγματοποιήσει μετρήσεις στο δικό του ή και σε διαφορετικό κανάλι συχνότητας. Οι μετρήσεις αυτές συνήθως ζητούνται από τα AP, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις λαμβάνουν χώρα από τα ίδια τα κινητά τερματικά.
 - Αλλαγή συχνότητας του AP και των συνδεδεμένων σε αυτό κινητών τερματικών.
 - Αναφορά ληφθέντων μετρήσεων από το MT στο AP.
- Διαδικασία απουσίας MT (MT absence function): Είναι δυνατόν το κινητό τερματικό να επιθυμεί να ανιχνεύσει την ύπαρξη διαφορετικού καναλιού συχνότητας. Σκοπός είναι να ανακαλυφθεί εάν θα εκτελέσει διαπομπή, και σε ποιο νέο AP θα μεταφερθεί. Η λειτουργία αυτή ενεργοποιείται από το κινητό τερματικό.
 - Έλεγχος κατάστασης MT (MT alive procedure): Το AP δύναται να ζητήσει αν θέλει από το MT αν είναι ενεργό ή όχι. Με τον τρόπο αυτό το AP προσπαθεί να διαπιστώσει εάν διατηρεί πόρους για κάποιο MT χωρίς να υπάρχει λόγος.
 - Λειτουργία εξοικονόμησης ισχύος (Power saving): Ο μεγαλύτερος αριθμός των κινητών τερματικών λειτουργεί με μπαταρία. Έτσι λοιπόν το HIPERLAN2 υποστηρίζει έναν όσο το δυνατόν αποδοτικό μηχανισμό ώστε να εξασφαλιστεί η συντήρηση ισχύος των μπαταριών. Στον μηχανισμό αυτό περιλαμβάνονται τα λεγόμενα "διαστήματα ύπνου". Μετά από τα διαστήματα αυτά το MT θα "ακούει" περιοδικά εάν το AP θέλει να ανταλλάξει δεδομένα. Στην περίπτωση όπου δεν υπάρχουν δεδομένα προς μετάδοση στην κάτω ζεύξη, το κινητό τερματικό παραμένει στην κατάσταση ύπνου χωρίς να επικοινωνεί με το AP στον κεντρικό τρόπο, ή με άλλο MT στον άμεσο τρόπο. Το ζήτημα που αφορά το μήκος των διαστημάτων ύπνου καθορίζεται μεταξύ του AP και του MT. Τόσο η ενεργοποίηση της λειτουργίας όσο και η επιλογή μήκους του διαστήματος ύπνου καθορίζονται από το AP.

- Λειτουργία διαπομπής (Handover): Σε πρώτη φάση η λειτουργία αυτή θα περιοριστεί στο επιχειρησιακό περιβάλλον και στη δημόσια υλοποίηση του συστήματος και επομένως δεν θα υποστηριχθεί στα οικιακά δίκτυα. Το πρωτόκολλο RRC αποφασίζει το πότε θα λάβει χώρα μια διαπομπή και υποστηρίζει την εκτέλεσή της.
- Λειτουργία ελέγχου ισχύος μετάδοσης: Στόχος της συγκεκριμένης λειτουργίας είναι η βελτίωση του λόγου σήματος προς παρεμβολές στις κυψέλες στις οποίες παρατηρείται αυξημένη κίνηση. Το MT και το AP υποστηρίζουν τα μέσα ώστε να προσαρμοστεί η ισχύς μετάδοσής τους στις τρέχουσες απαιτήσεις της ασύρματης ζεύξης.

2.5.2.2.1.3 Έλεγχος DLC σύνδεσης

Η λειτουργία ελέγχου DLC σύνδεσης (DLC Connection Control, DCC) επιτελείται για την εγκατάσταση και την απελευθέρωση των συνδέσεων. Σε περίπτωση όπου οποιοδήποτε είδος υποστήριξης ποιότητας υπηρεσίας QoS απαιτείται από ένα υψηλότερο στρώμα είναι απαραίτητο να παρασχεθούν οι αναγκαίες παράμετροι από τα ανώτερα στρώματα. Στη συνέχεια φαίνεται τι περιλαμβάνουν οι λειτουργίες DCC:

- a. Εγκατάσταση σύνδεσης DLC: Στη λειτουργία αυτή περιλαμβάνονται λειτουργίες εγκατάστασης της σύνδεσης για τον κεντρικό και τον άμεσο τρόπο λειτουργίας και τις πολλαπλές μεταδόσεις (multicast) που πραγματοποιούνται είτε από το MT είτε από το AP.
- b. Λειτουργία απελευθέρωσης σύνδεσης DLC: Περιλαμβάνει διαδικασίες απελευθέρωσης της σύνδεσης και μπορεί να ζητηθεί και από το AP άλλα και από το MT.
- c. Λειτουργία σύνδεσης και αποχώρησης από πολλαπλές μεταδόσεις : δίνει τη δυνατότητα σε ένα τερματικό να προσχωρήσει στις ήδη υπάρχουσες ομάδες πολλαπλής διανομής ή να αφήσει αυτήν στην οποία ήδη ανήκει.
- d. Τροποποίηση σύνδεσης DLC: Στη λειτουργία αυτήν επιτελείται τροποποίηση των παραμέτρων επικοινωνίας τόσο για τον κεντρικό και άμεσο τρόπο όσο και για τις πολλαπλές μεταδόσεις. Είναι δυνατόν να ζητηθεί από το AP ή από το MT, και τέλος η τροποποίηση αναφέρεται σε συγκεκριμένες παραμέτρους της σύνδεσης DLC.

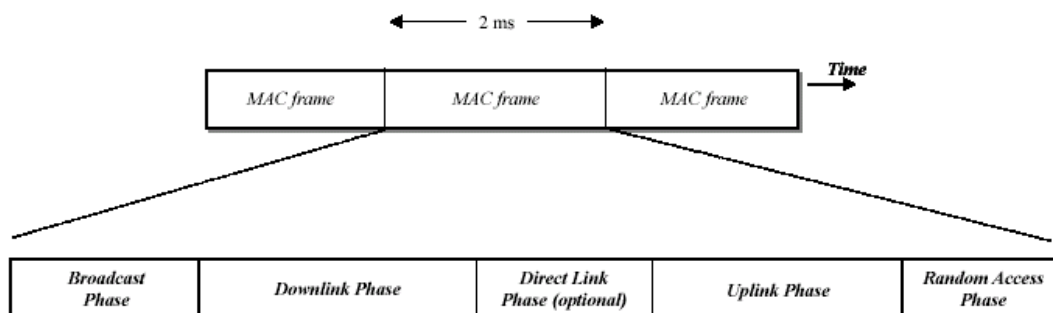
2.5.2.2.2 Λειτουργίες μεταφοράς δεδομένων

Σκοπός της ενότητας αυτής είναι η συνοπτική περιγραφή των λειτουργιών που αναφέρονται στη μεταφορά δεδομένων.

2.5.2.2.2.1 Σχήμα ελέγχου πρόσβασης στο μέσο

Ο έλεγχος της πρόσβασης στο μέσο (Medium Access Control) αποτελεί ένα κεντρικό ελεγχόμενο σχήμα πολυπλεξίας χρόνου (Time Division Multiple Access Time Division Duplex, TDMA TDD). Αυτό συνεπάγεται ότι το AP (σημείο πρόσβασης) ελέγχει όλες τις μεταδόσεις που λαμβάνουν χώρα. Αυτό σχετίζεται με τον άμεσο τρόπο λειτουργίας, την άνω και την κάτω ζεύξη.

Κάθε AP πρέπει να γνωρίζει αφενός την κατάσταση των καταχωρητών του, και αφετέρου την κατάσταση των καταχωρητών στα τερματικά έτσι ώστε να μπορεί να ελεγχθεί η ανάθεση των πόρων. Συνεπώς τα μηνύματα δέσμευσης πόρων προς τα AP που στέλνονται από τα MT πρέπει να περιλαμβάνουν την κατάσταση των καταχωρητών των τερματικών. Με βάση τον παραπάνω μηχανισμό, τα MT αιτούνται πόρους σε όρους χρονικής διάρκειας εκπομπής. Επιπροσθέτως υπάρχει το ενδεχόμενο διαπραγμάτευσης της ανάθεσης μιας σταθερής χωρητικότητας σε πολλαπλά διαδοχικά MAC πλαίσια.



Σχήμα 2.7 Βασική δομή του MAC πλαισίου

Κάθε AP πραγματοποιεί την ανάθεση των πόρων στηριζόμενο στις καταστάσεις των καταχωρητών ενώ σε περίπτωση που χρειαστεί λαμβάνει υπόψη και κριτήρια ποιότητας υπηρεσίας. Η προαναφερθείσα ανάθεση των πόρων γίνεται γνωστή μέσω των μηνυμάτων δέσμευσης πόρων (Resource Grant, RG). Στο Σχήμα 2.7

παρουσιάζεται η βασική δομή που εκπέμπεται στην ασύρματη διεπαφή από το MAC πρωτόκολλο. Το σχήμα αυτό αποτελείται από μια ακολουθία πλαισίων ίσου μήκους με διάρκεια 2ms. Οι φάσεις από τις οποίες αποτελείται κάθε MAC πλαίσιο είναι :

- Φάση ευρείας εκπομπής (broadcast): Στη φάση της ευρυεκπομπής μεταφέρονται τα κανάλια BCH (Broadcast Channel), FCH (Frame Channel) και ACH (Access feedback Channel). Το BCH παρέχει γενικές πληροφορίες για την κατάσταση της κυψέλης, μεταδίδεται στην κάτω ζεύξη και η διάρκεια του είναι σταθερή. Το FCH περιέχει πληροφορίες σχετικές με τη δομή του τρέχοντος πλαισίου, ενώ παράλληλα περιέχει την ακριβή θέση, τη χρήση και τον τύπο του περιεχομένου όλων των ακόλουθων εκπομπών. Επιπλέον το κανάλι FCH δεν έχει σταθερή διάρκεια, ενώ τα μηνύματα σ' αυτό καλούνται δεσμεύσεις των πόρων (Resource Grants, RG). Τέλος στο κανάλι ACH περιέχεται ενημέρωση προς τα τερματικά που χρησιμοποίησαν το RCH κανάλι στο προηγούμενο πλαίσιο, σχετικά με τα αποτελέσματα των προσπαθειών τους.
- Ζεύξη ανόδου (uplink): Κατά τη διάρκεια της φάσης αυτής μεταφέρονται δεδομένα ελέγχου καθώς επίσης και δεδομένα χρηστών από το MT στο AP. Τα κινητά τερματικά πρέπει να κάνουν αίτηση για δέσμευση χωρητικότητας σε ένα από τα επόμενα πλαίσια έτσι ώστε να εξασφαλισθούν οι πόροι οι οποίοι προσφέρονται από το AP.
- Ζεύξη καθόδου (downlink): Στην κάτω ζεύξη μεταφέρονται δεδομένα και πληροφορίες ελέγχου χρηστών, οι οποίες διαβιβάζονται από το AP προς τα MT. Επιπλέον είναι δυνατόν στη φάση αυτή να περιέχονται και πληροφορίες της ζεύξης ευρυεκπομπής που δεν ταιριάζουν στο σταθερό τμήμα BCH.
- Απευθείας ζεύξη (Direct Link, DiL): Στη διάρκεια της φάσης αυτής μεταφέρεται τηλεπικοινωνιακή κίνηση μεταξύ των κινητών τερματικών. Η συμμετοχή του AP δεν είναι άμεση. Παρ' όλα αυτά, όσον αφορά τα δεδομένα ελέγχου, έχουμε έμμεση ανάμειξη του AP μέσω της λήψης των αιτήσεων για δέσμευση πόρων RR από τα MT και της μετάδοσης των αναθέσεων των πόρων RG στο FCCH.
- Τυχαία πρόσβαση (Random Access, RA): Στη φάση αυτή μεταφέρεται ένας αριθμός καναλιών τυχαίας πρόσβασης RCH (Random Access

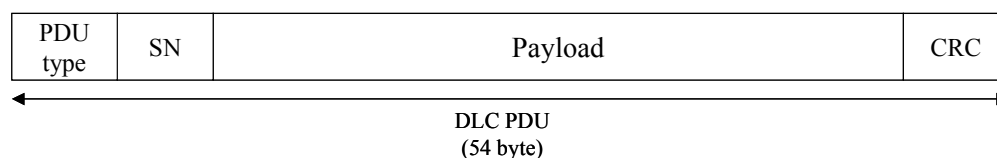
Channel). Η φάση αυτή χρησιμοποιείται για μετάδοση πληροφοριών ελέγχου από τα τερματικά εκείνα στα οποία δεν έχει διατεθεί χωρητικότητα κατά τη διάρκεια της ζεύξης ανόδου. Επιπλέον τα MT τα οποία δεν είναι συνδεδεμένα χρησιμοποιούν τα RCH κανάλια για την αρχική επαφή με ένα AP. Τέλος τη φάση αυτή χρησιμοποιούν και τερματικά τα οποία πραγματοποιούν διαπομπές για να μεταφέρουν τις συνδέσεις τους σε ένα νέο AP.

Στην περίπτωση όπου το AP έχει μια κεραία που εκπέμπει σε διαφορετικές κατευθύνσεις (sectored antenna) η δομή είναι λίγο διαφορετική. Η διαθέσιμη διάρκεια MAC πλαισίων διανέμεται σε όλους τους τομείς. Κάθε φάση επαναλαμβάνεται εγκαίρως, μία για κάθε τομέα. Η χρήση DiL με κατευθυντικές κεραίες δεν έχει ακόμα καθοριστεί.

Όσον αφορά τις φάσεις DL, DiL, και UL περιλαμβάνουν δύο τύπους μονάδων μεταφοράς δεδομένων PDUs : μικρής διάρκειας PDUs και μακράς διάρκειας PDUs. Οι μικρής διάρκειας μονάδες PDUs μεγέθους 9 bytes παράγονται από το DLC και περιέχουν μόνο δεδομένα ελέγχου. Ενδέχεται επίσης να περιέχουν αιτήσεις για δέσμευση πόρων στη ζεύξη ανόδου, μηνύματα απόρριψης ή πληροφορίες ελέγχου RLC και μηνύματα ARQ όπως είναι οι επιβεβαιώσεις (acknowledgments). Οι μονάδες μακράς διάρκειας έχουν μέγεθος 54 bytes και περιέχουν δεδομένα ελέγχου ή χρηστών όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.8. Η μονάδα DLC SDU έχει μήκος 45 bytes και περνά από ή προς το στρώμα ζεύξης δεδομένων μέσω του U-SAP. Ο διαθέσιμος χώρος που απομένει (4,5 bytes) χρησιμοποιείται από το DLC για πληροφορίες όπως είναι ο τύπος της PDU, ένας αριθμός ακολουθίας (Sequence Number, SN) και ένας κυκλικός έλεγχος πλεονασμού (Cyclic Redundancy Check, CRC). Ο κυκλικός αυτός έλεγχος πλεονασμού χρησιμοποιείται μαζί με τον αριθμό ακολουθίας από το υπόστρωμα ελέγχου λαθών και σκοπός του είναι η ανίχνευση των λαθών κατά τη διάρκεια της μετάδοσης.

Το κανάλι RCH χρησιμοποιεί το ίδιο μέγεθος με τις μικρής διάρκειας μονάδες PDUs (9 bytes). Μπορεί να μεταφέρει μηνύματα της λειτουργίας RLC, καθώς επίσης και αιτήματα δέσμευσης πόρων. Ο τρόπος προσπέλασης στο RCH στηρίζεται σε ένα πρωτόκολλο ALOHA με σχισμές. Η διαδικασία διακανονισμού της σύγκρουσης βασίζεται σε μια δυαδική διαδικασία υποχώρησης, η οποία ελέγχεται από τα κινητά

τερματικά. Ο αριθμός των σχισμών RCH που απαιτούνται ανά MAC πλαίσιο μπορεί να αποφασιστεί δυναμικά από το AP.



Σχήμα 2.8 Μορφή των PDU μακράς διάρκειας

2.5.2.2.2 Έλεγχος λαθών

Η λειτουργία ελέγχου λαθών βασίζεται σε ένα ARQ σχήμα (Automatic Repeat Request). Ο έλεγχος λαθών και η λειτουργία FEC (Forward Error Correction) παρά το γεγονός ότι είναι συμπληρωματικές λειτουργίες δεν συνεργάζονται.

Το σχήμα ARQ που προαναφέρθηκε βασίζεται σε ένα μηχανισμό επιλεκτικής επανάληψης. Η διαδικασία ανίχνευσης λαθών με τη βοήθεια του κυκλικού ελέγχου πλεονασμού CRC και του αριθμού ακολουθίας SN δύναται να εντοπίσει κάποιο σφάλμα. Τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη απαιτείται ένας ιδιαίτερα προσεκτικός χειρισμός των μεταδιδόμενων πλαισίων. Ο δέκτης λοιπόν οφείλει να ενημερώσει τον πομπό για τον αριθμό ακολουθίας κάτω από τον οποίο όλα τα μηνύματα έχουν παραληφθεί σωστά, καθώς επίσης και για το ποια από τα ληφθέντα μηνύματα δεν ήταν σωστά. Ο πομπός είναι δυνατόν να απορρίψει ορισμένα μηνύματα εάν για παράδειγμα έχουν ξεπεράσει τη μέγιστη διάρκεια ζωής τους.

2.5.2.3 Στρώμα σύγκλισης

Γενικά το στρώμα σύγκλισης προσαρμόζει το δίκτυο κορμού στο στρώμα ζεύξης δεδομένων του HIPERLAN2. Παρέχει όλες τις λειτουργίες οι οποίες απαιτούνται για την εγκατάσταση της σύνδεσης και την υποστήριξη της κινητικότητας στο δίκτυο κορμού. Για κάθε υποστηριζόμενο κεντρικό δίκτυο προδιαγράφεται ένα ειδικό στρώμα σύγκλισης. Επιπλέον διατίθεται υποστήριξη για δίκτυα μεταγωγής πακέτου όπως είναι το Ethernet, δίκτυα IP, το *ppp* και το IEEE 1394, καθώς επίσης και δίκτυα βασισμένα στο ATM και το UMTS.

Η αναγγελία των διαθέσιμων στρωμάτων σύγκλισης στο AP γίνεται μέσω ευρυεκπομπής. Κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης το κινητό τερματικό και το AP διαπραγματεύονται ένα από τα διαθέσιμα αυτά στρώματα. Σε συνδυασμό με τις λειτουργίες ποιότητας υπηρεσίας του HIPERLAN2 υπάρχει δυνατότητα υποστήριξης διαφόρων σχημάτων ποιότητας υπηρεσίας. Μεταξύ άλλων θα υποστηριχθεί ποιότητα υπηρεσίας σε IP με χρησιμοποίηση προτύπων όπως το RSVP, οι διαφοροποιημένες υπηρεσίες ή η δρομολόγηση με βάση την προτεραιότητα (σύμφωνα με το πρότυπο IEEE 802.1D).

Το στρώμα σύγκλισης που βασίζεται σε δίκτυα μεταγωγής πακέτων έχει σαν στόχο να ενσωματώσει το HIPERLAN2 σε υπάρχοντα βασισμένα σε πακέτα δίκτυα. Το στρώμα σύγκλισης πακέτου είναι δομημένο ιεραρχικά σε ένα κοινό μέρος και διάφορα υποστρώματα σύγκλισης συγκεκριμένων υπηρεσιών (service specific convergence sub-layers, SSCS). Αυτό γίνεται για να υποστηριχθούν διαφορετικές σύγχρονες άλλα και μελλοντικές τεχνολογίες οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν. Προκειμένου να προσαρμόσει τα πακέτα στο σταθερό μήκος των πακέτων του HIPERLAN2, το κοινό μέρος περιλαμβάνει κυρίως μια λειτουργία κατάρτισης και επανένωσης (Segmentation And Re-assembly, SAR).

Σε σχέση με το ATM το στρώμα σύγκλισης αποτελείται επίσης από ένα κοινό μέρος και διάφορα υποστρώματα. Η λειτουργία SAR δεν περιέχεται στο κοινό μέρος επειδή τα κελιά μετάδοσης του ATM ταιριάζουν κυρίως στο HIPERLAN2 DLC-SDU. Παρ' όλα αυτά μια συμπύεση της επιγραφής των κελιών του ATM θεωρείται απαραίτητη, μεταβιβάζοντας μόνο τα σημαντικότερα μέρη της.

2.5.3 Ασφάλεια στο HIPERLAN2

Σε κάθε σύστημα HIPERLAN2 υπάρχει σοβαρό ενδεχόμενο επίθεσης της οποίας σκοπός είναι η παρεμπόδιση της μετάδοσης ή η υποκλοπή των μεταδιδόμενων δεδομένων. Είναι λοιπόν απαραίτητες οι ισχυρές λειτουργίες ασφαλείας στο στρώμα ζεύξης δεδομένων για την αντιμετώπιση των παραπάνω κινδύνων. Οι λειτουργίες αυτές καθορίζονται φυσικά στην προδιαγραφή του συστήματος.

Οι μηχανισμοί ασφαλείας που τίθενται σε λειτουργία έχουν περιγραφεί παραπάνω. Το σχέδιο κρυπτογράφησης που έχει προεπιλεγεί βασίζεται σε ένα σχήμα

κρυπτογράφησης δεδομένων (Data Encryption Standard, DES) με κλειδί 56 bit. Προαιρετικά μπορεί να επιλεγεί τριπλό DES ή καθόλου κρυπτογράφηση. Για τη δημιουργία του κλειδιού κρυπτογράφησης χρησιμοποιείται η βασική διαδικασία ανταλλαγής Diffie-Hellman. Κατόπιν αιτήσεως του AP το κλειδί αυτό μπορεί να αλλάξει κατά τη διάρκεια της λειτουργίας. Το κινητό τερματικό και το AP εκτελούν μια αμοιβαία επικύρωση, βασισμένα είτε σε δημόσια είτε σε κοινά κλειδιά.

Είναι επιπλέον δυνατόν να υποστηριχθούν πρόσθετες λειτουργίες ασφαλείας υψηλότερων στρωμάτων, ανάλογα με το δίκτυο κορμού. Παρ' αυτά το γεγονός της ύπαρξης λειτουργιών ασφαλείας υψηλότερων στρωμάτων ενδέχεται να επιδράσει αρνητικά στη λειτουργία του στρώματος ζεύξης δεδομένων. Η αποτυχία αναγνώρισης του χρήστη σε ένα υψηλότερο στάδιο για παράδειγμα, μπορεί να αναγκάσει τις σχετικές συνδέσεις DLC να αποτύχουν.

3. SIMULATED ANNEALING

3.1 Υπόβαθρο

Ο Simulated Annealing αλγόριθμος παράχθηκε από στατιστικολόγους μηχανικούς. Ο Kickpatrick et al. [1983] πρότεινε έναν αλγόριθμο ο οποίος βασίζεται πάνω στην αναλογία μεταξύ της σκλήρυνσης των στερεών και του προβλήματος της λύσης συνδυαστικών προβλημάτων βελτιστοποίησης.

Η διαδικασία annealing αποτελεί τη φυσική διεργασία της έντονης θέρμανσης (heating up) ενός στερεού και κατόπιν της ψύξης του (cooling it down) ωστόσο αυτό κρυσταλλώνει. Τα άτομα μέσα στο υλικό έχουν υψηλές ενέργειες σε υψηλές θερμοκρασίες και επομένως έχουν περισσότερη ελευθερία. Ενώ η θερμοκρασία μειώνεται, μειώνονται παράλληλα και οι ατομικές ενέργειες. Ένας κρύσταλλος με ομαλή δομή επιτυγχάνεται στην κατάσταση όπου το σύστημα έχει ελάχιστη ενέργεια. Εάν η ψύξη γίνει πολύ γρήγορα, διαδικασία γνωστή και ως rapid quenching, εκτεταμένες ανωμαλίες παρατηρούνται στην κρυσταλλική δομή. Το σύστημα δεν φτάνει στην κατάσταση ελάχιστης ενέργειας και καταλήγει σε μια πολυκρυσταλλική δομή η οποία έχει υψηλότερη ενέργεια από την ελάχιστη.

Σε μια δεδομένη θερμοκρασία, η πιθανότητα κατανομής ενεργειών του συστήματος είναι καθορισμένη από την πιθανότητα Boltzmann :

$$P(E) \propto e^{[-E/(kT)]} \quad (3.1)$$

Όπου E η ενέργεια του συστήματος, k η σταθερά του Boltzmann, T είναι η θερμοκρασία και P(E) η πιθανότητα το σύστημα να βρίσκεται σε κατάσταση με ενέργεια E.

Σε υψηλές θερμοκρασίες, η P(E) συγκλίνει στο 1 για όλες τις καταστάσεις ενέργειας σύμφωνα με τη σχέση (3.1). Παρατηρούμε επίσης ότι υπάρχει μια μικρή πιθανότητα το σύστημα να έχει υψηλή ενέργεια σε χαμηλές θερμοκρασίες. Επομένως, η στατιστική κατανομή ενεργειών επιτρέπει στο σύστημα να αποδράσει από ένα τοπικό ελάχιστο ενέργειας.

3.2 Βασικά στοιχεία

Στην αναλογία μεταξύ ενός συνδυαστικού προβλήματος βελτιστοποίησης και της annealing διαδικασίας, οι καταστάσεις του στερεού αντιπροσωπεύουν εφικτές λύσεις του προβλήματος βελτιστοποίησης, οι ενέργειες των καταστάσεων αντιστοιχούν στις αξίες της αντικειμενικής συνάρτησης που υπολογίζεται γι' αυτές τις λύσεις, η ελάχιστη ενέργεια αντιστοιχεί στην βέλτιστη λύση του προβλήματος και η rapid quenching μπορεί να θεωρηθεί ως τοπική βελτιστοποίηση.

Ο αλγόριθμος αποτελείται από μία ακολουθία επαναλήψεων. Κάθε επανάληψη αποτελείται από τυχαία αλλαγή της τρέχουσας λύσης ώστε να δημιουργήσει μια νέα λύση μέσα στη γειτονιά της τρέχουσας λύσης. Η γειτονιά είναι ορισμένη από επιλογή του γενετικού μηχανισμού. Μια νέα λύση που δημιουργήθηκε αντιπροσωπεύει μια αλλαγή στη συνάρτηση κόστους που υπολογίστηκε για να αποφασιστεί το κατά πόσον η νέα παραγόμενη λύση μπορεί να γίνει αποδεκτή ως η τρέχουσα λύση. Εάν η αλλαγή στη συνάρτηση κόστους είναι αρνητική η νέα παραγόμενη λύση θεωρείται άμεσα σαν η τρέχουσα λύση. Εναλλακτικά, γίνεται δεκτή σύμφωνα με το Metropoli's criterion στηριζόμενο πάνω στην πιθανότητα του Boltzmann.

Σύμφωνα με το Metropoli's criterion, εάν η διαφορά μεταξύ της συνάρτησης κόστους της τρέχουσας και της νέας παραγόμενης λύσης είναι ίση ή μεγαλύτερη από 0, ένας τυχαίος αριθμός $\delta \in [0,1]$ γεννιέται από μία ομοιόμορφη κατανομή και εάν

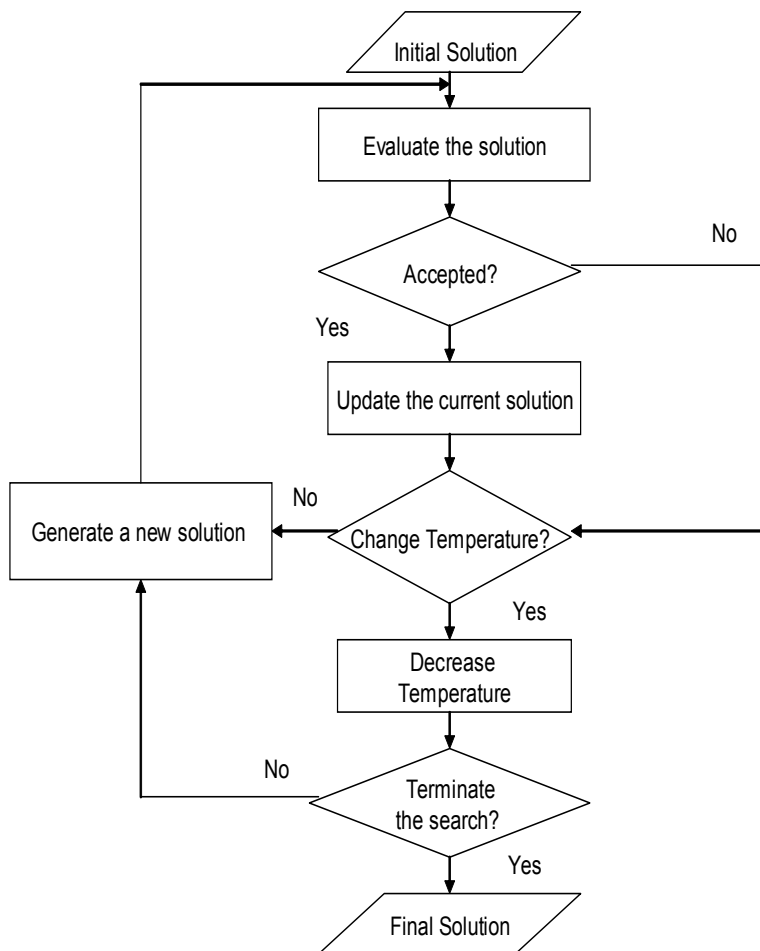
$$\delta \leq e^{(-\Delta E/T)} \quad (3.2),$$

τότε η νέα παραγόμενη λύση γίνεται αποδεκτή σαν η τρέχουσα λύση. Εάν όχι, τότε η τρέχουσα λύση παραμένει αμετάβλητη.

Το διάγραμμα ροής ενός standard simulated annealing αλγορίθμου παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1. Για να υλοποιήσουμε τον αλγόριθμο για ένα πρόβλημα υπάρχουν τέσσερις θεμελιώδεις επιλογές που πρέπει να γίνουν :

- a. Αναπαράσταση των λύσεων
- b. Καθορισμός της συνάρτησης κόστους
- c. Προσδιορισμός του γενετικού μηχανισμού για τους γείτονες
- d. Σχεδίαση της κρυσταλλικής δομής

Η αναπαράσταση των λύσεων και ο ορισμός της συνάρτησης κόστους γίνεται όπως για του γενετικούς αλγορίθμους. Αρκετοί γενετικοί μηχανισμοί θα μπορούσαν να αναπτυχθούν όπως για παράδειγμα οι μηχανισμοί mutation και inversion.



Σχήμα 3.1 Διάγραμμα ροής ενός **standard simulated annealing** αλγόριθμου

Σχεδιάζοντας την κρυσταλλική δομή για έναν simulated annealing αλγόριθμο, τέσσερις παράμετροι πρέπει να οριστούν: Μια αρχική θερμοκρασία, ένας update κανόνας για τη θερμοκρασία, ο αριθμός των επαναλήψεων που εκτελούνται σε κάθε βήμα, και ένα κριτήριο με το οποίο θα σταματάει το ψάξιμο.

3.3 Παραδείγματα εφαρμογής του *simulated annealing*

Αυτή η ενότητα περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιείται ο *simulated annealing* αλγόριθμος σε τρία διαφορετικά προβλήματα. Η πρώτη εφαρμογή είναι η οπτική ευθυγράμμιση των laser chip και οπτικών ινών ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες ισχύος. Η δεύτερη και η τρίτη εφαρμογή σχετίζονται με τη βέλτιστη κατανομή και ακολουθία σταθμών επιθεώρησης καθώς και με το βέλτιστο μέγεθος παραγωγής σε συστήματα κατασκευής πολλαπλών βαθμίδων.

3.3.1 Βέλτιστη ευθυγράμμιση των Laser chip και οπτικών ινών

Σ' αυτό το κομμάτι θα δούμε τη χρήση του *simulated annealing* αλγόριθμου για την καταλληλότερη ευθυγράμμιση των laser και οπτικών ινών, ώστε να ελαχιστοποιήσουμε την απώλεια ισχύος που λαμβάνει χώρα μέσω των συνδέσεων των οπτικών ινών. Μετά τις τεχνικές πληροφορίες που δίνονται και την επεξήγηση του πειράματος, περιγράφονται τροποποιήσεις που γίνονται στον *simulated annealing* αλγόριθμο και παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα. Για λόγους σύγκρισης, τα αποτελέσματα αυτά είναι τοποθετημένα έναντι αυτών που αποκομίζονται χρησιμοποιώντας ένα ασαφές σύστημα ελέγχου που εφαρμόζεται στο ίδιο πρόβλημα.

3.3.1.1 Υπόβαθρο

Είναι δύσκολο να μεταδώσεις πληροφορία σε μεγάλες αποστάσεις με μικρές απώλειες ενέργειας. Με τα κανονικά μέσα μετάδοσης, όπως ομοαξονικά καλώδια και χάλκινα (επιχαλκωμένα) σύρματα, υπάρχει μια μείωση ισχύος ανάλογη του μήκους του καλωδίου. Για να αυξηθεί η ισχύς που φτάνει στο τέλος της γραμμής μεταφοράς, ενέργεια έχει εισαχθεί δια μέσου επαναληπτών τοποθετημένων κατά μήκος της σύνδεσης. Στην περίπτωση της μεταφοράς οπτικών ινών, οι επαναλήπτες αυτοί μπορούν να τοποθετηθούν ξεχωριστά από αυτούς για άλλα μέσα μεταφοράς. Οι οπτικές ίνες μπορούν να μεταφέρουν διαμορφωμένο φως και επομένως η συνιστώσα μεταφοράς χρειάζεται να μεταλλάσσει τα ηλεκτρικά σήματα σε φως ενώ η συνιστώσα λήψης πρέπει να ολοκληρώσει την αντίστροφη διαδικασία. Το μήκος κύματος που χρησιμοποιείται είναι μεταξύ 1300 nm και 1500nm. Για να επιτευχθεί ένα τέτοιο μήκος κύματος, ένα laser chip χρησιμοποιείται για να παράγει φως με το απαιτούμενο μήκος κύματος. Όντας εκπεμπόμενο σε περιοχή 1-2 mm², η δέσμη φωτός πρέπει να

ενωθεί με έναν πυρήνα οπτικής ίνας του οποίου η διάμετρος είναι 9μm. Για να αυξηθεί η αποτελεσματικότητα του ζεύγους laser chip – οπτικής ίνας, ένα σύστημα φακού είναι απασχολημένο επίσης.

Για να μεταφέρουμε το φως κατά μήκος της οπτικής ίνας όσο μακρύτερα γίνεται, πρέπει να μεταφερθεί η μέγιστη ισχύς. Αυτό απαιτεί ότι η δέσμη φωτός πρέπει να εναρμονίζεται με τα χαρακτηριστικά της οπτικής ίνας, και συγκεκριμένα το laser chip και οι οπτική ίνα θα πρέπει να είναι ακριβώς ευθυγραμμισμένα. Η ευθυγράμμιση αυτή δεν μπορεί να γίνει αυτόματα από μια προσαρμογή ακριβείας, αφού τα laser chips και οι οπτικές ίνες έχουν διαφορετικές ιδιότητες. Η μεταφερόμενη ισχύς μειώνεται σημαντικά με μια αλλαγή στην ευθυγράμμιση λίγων μόνο microns. Επομένως, είναι απαραίτητο να προσαρμόσουμε την ευθυγράμμιση δυναμικά. Ένα άτομο-διαχειριστής μπορεί να φέρει σε πέρας αυτή τη δουλειά αλλά αυτό αποτελεί μια αργή διαδικασία. Θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ένα computer-controlled σύστημα, αλλά η διαδικασία είναι επίσης αργή εξ' αιτίας του μεγάλου αριθμού μετρήσεων που απαιτούνται για να πετύχουμε την κατάλληλη ευθυγράμμιση. Το ζήτημα είναι επίσης πολύπλοκο από το γεγονός ότι η ισχύς δεν ακολουθεί μία Gauss κατανομή και υπάρχουν τοπικά μέγιστα και θόρυβος. Ένας ικανός αλγόριθμος να βρει ένα ολικό μέγιστο του διαστήματος το οποίο εξετάζουμε απαιτείται ώστε να παραγάγουμε μια βέλτιστη ευθυγράμμιση σε έναν κατάλληλο χρόνο. Ο simulated annealing αλγόριθμος χρησιμοποιείται για το σκοπό αυτό.

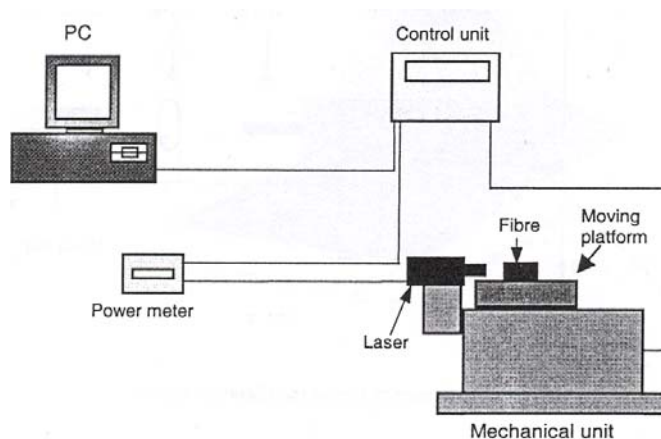
3.3.1.2 Πειραματική εγκατάσταση

Το πειραματικό σύστημα φαίνεται στο Σχήμα 3.2. Η μηχανική ενότητα αποτελείται από το laser chip και την οπτική ίνα αντίστοιχα. Η οπτική ίνα είναι στερεή ενώ το laser chip είναι στερεωμένο. Τρεις μηχανές ελέγχουν τα εκτοπίσματα, κάθε μία με βεληνικές 6 mm. Η ευθυγράμμιση επιτυγχάνεται σε τρεις διαστάσεις και η ποιότητα της ευθυγράμμισης αποφασίζεται δια μέσου μέτρησης της οπτικής ισχύος (optical power meter). Οι τρεις άξονες είναι προσανατολισμένοι όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3. Ο χ-άξονας αποκαλείται και ως εστιακός άξονας.

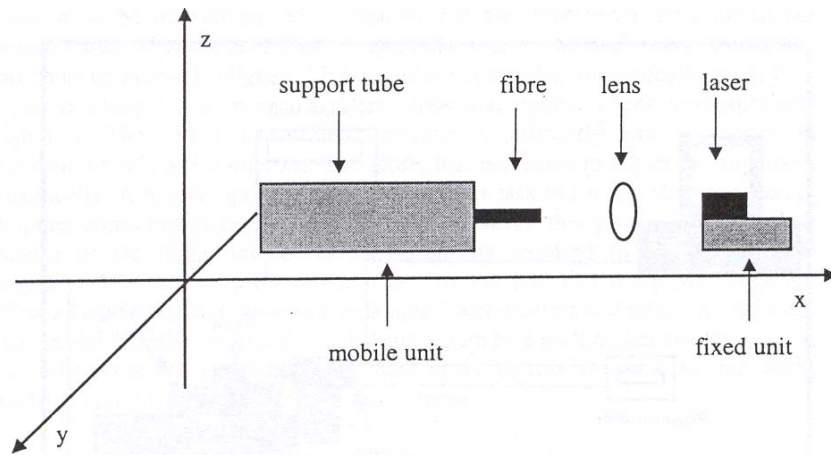
Για να ελέγξουμε τις μηχανές (motors) επιτελείται στο σύστημα ένα σύνολο από software λειτουργίες. Αυτές αποτελούν τα προγράμματα που διαβάζουν την ισχύ, βρίσκουν τα εκτοπίσματα σε τρεις διευθύνσεις και τρέχουν τις μηχανές για την

ευθυγράμμιση. Αφού διαβαστεί η ισχύς, ο simulated annealing αλγόριθμος χρησιμοποιείται για να βρει τα κατάλληλα εκτοπίσματα και οι μηχανές προορίζονται πλέον για τη βέλτιστη ευθυγράμμιση. Μία διαμόρφωση (λύση) παρουσιάζεται από μια θέση της οπτικής ίνας σε σχέση με το laser chip.

Αφού η βέλτιστη ευθυγράμμιση αντιπροσωπεύει το μέγιστο μεταφερόμενο φως, η αντικειμενική συνάρτηση που ελαχιστοποιείται κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης λαμβάνεται σαν το αρνητικό της μετρούμενης δύναμης (ισχύος) στο τέλος της οπτικής ίνας. Το cooling χρονοδιάγραμμα ακολουθεί ένα γεωμετρικό τύπο ενός ενημερωμένου κανόνα θερμοκρασίας. Η θερμοκρασία μειώνεται από ένα σταθερό παράγοντα μετά από έναν καθορισμένο αριθμό σχηματισμών. Ο γενετικός μηχανισμός ορίζει δύο διαφορετικές κινήσεις. Η μία από τις κινήσεις αποτελείται από διατάραξη όλων των διαστάσεων ταυτόχρονα ενώ η άλλη δημιουργεί διαταραχή σε μία μόνο διάσταση επιλεγμένη τυχαία. Μια διαταραχή δημιουργείται προσθέτοντας μια θετική ή αρνητική αξία στην τρέχουσα θέση. Εξ' αιτίας της ακρίβειας των μηχανών, η διαταραχή (κλονισμός τροχιάς) δεν μπορεί να είναι συνεχής και μικρότερη από 0,1 μm .



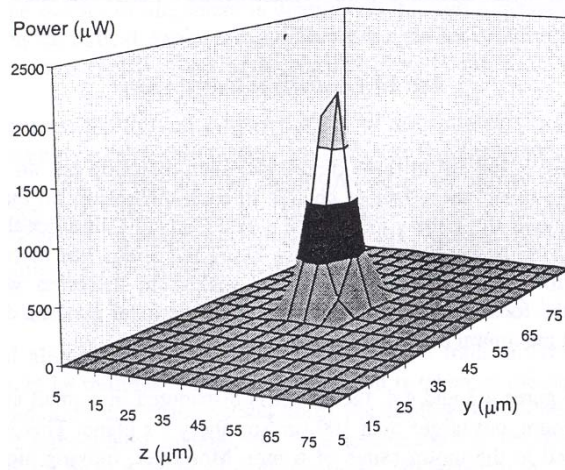
Σχήμα 3.2 Πειραματική εγκατάσταση



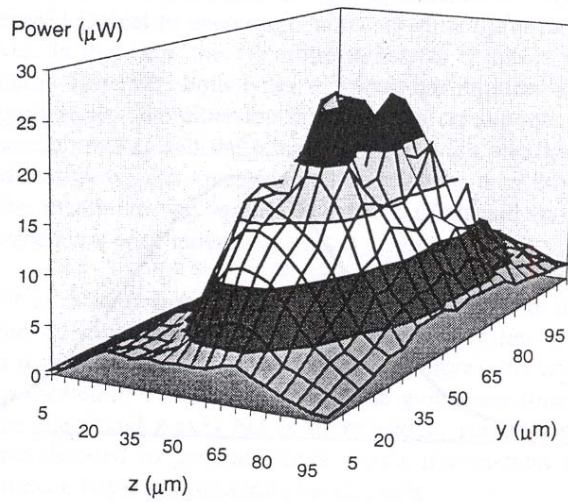
Σχήμα 3.3 Ορισμός των αξόνων του συστήματος ευθυγράμμισης

Ενώ η ίνα κινείται σε τρεις κατευθύνσεις, κάθε διεύθυνση έχει μια επιρροή πάνω στην ευθυγράμμιση. Παρόλα αυτά το αποτέλεσμα της αλλαγής σε κάθε διάσταση πάνω στην ευθυγράμμιση είναι διαφορετικό. Μια μετακίνηση κατά μήκος του ψ-άξονα ή του z-άξονα είναι υπεύθυνη μιας αξιοσημείωτης αλλαγής στο μέγεθος της ισχύος, δεδομένου ότι μια κίνηση κατά μήκος του χ-άξονα έχει μεγαλύτερη επιρροή στη συνεισφορά της ισχύος. Το ολικό μέγιστο αυξάνει όταν η ίνα πλησιάζει το εστιακό σημείο και την ίδια στιγμή το τοπικό μέγιστο μειώνεται και ένα ολικό μέγιστο παρατηρείται καθαρά.

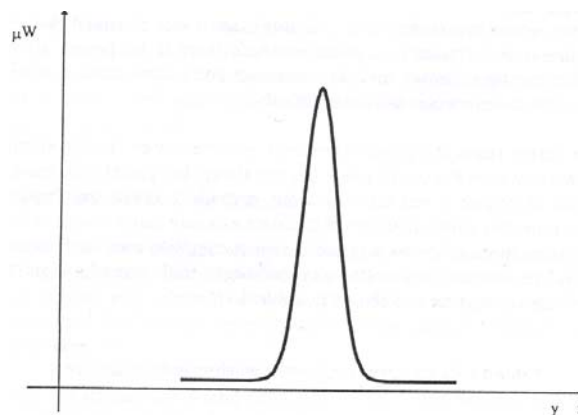
Όπως φαίνεται στα Σχήματα 3.4 και 3.5 η ισχύς είναι διανεμημένη σε μια μικρή περιοχή γύρω από το ολικό μέγιστο όχι μεγαλύτερη από $100 \mu\text{m}^2$ πάνω στο ψ-z επίπεδο. Αυτή είναι μια πολύ μικρή περιοχή συγκρινόμενη με το motor-range των 6mm. Επιπλέον, κινούμενοι κατά μήκος ενός από τους άξονες παρατηρούμε διαφορετική αλλαγή στην ισχύ από ότι αν κινηθούμε στους άλλους άξονες. Μια κίνηση παράλληλα στον ψ-άξονα ή στον z-άξονα επιφέρει μια απότομη μείωση ή αύξηση της δύναμης σε μια μικρή απόσταση (Σχήμα 3.6), δεδομένου ότι μια κίνηση παράλληλη στον χ-άξονα επιφέρει μια μικρότερη αλλαγή στην ισχύ (Σχήμα 3.7).



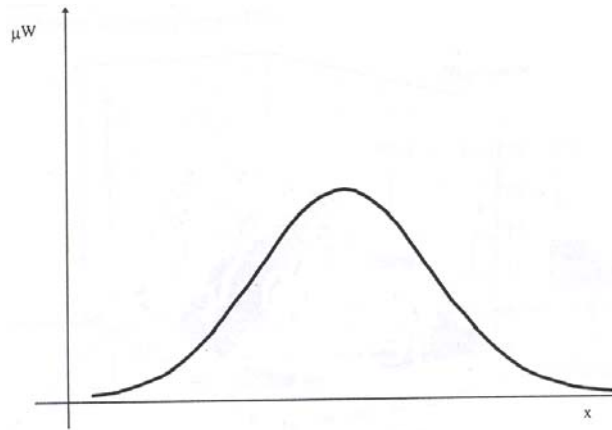
Σχήμα 3.4 Συνεισφορά της ισχύος κοντά στο εστιακό σημείο



Σχήμα 3.5 Συνεισφορά της ισχύος μακριά από το εστιακό σημείο



Σχήμα 3.6 Συνεισφορά της ισχύος κατά μήκος των αξόνων y-z



Σχήμα 3.7 Συνεισφορά της ισχύος κατά μήκος του άξονα x

3.3.1.3 Αρχικά αποτελέσματα

Στην αρχή των πειραμάτων, το ζητούμενο διάστημα δεν ήταν περιορισμένο και η αρχική λύση δημιουργήθηκε τυχαία. Στην περίπτωση αυτή παρατηρήθηκε ότι όταν η αρχική λύση επιλέγεται σε μία θέση όπου δεν υπάρχει ισχύς, είναι πολύ δύσκολο για τον αλγόριθμο να βρει το maximum σημείο αφού υπάρχει μια μεγάλη περιοχή όπου η αντικειμενική συνάρτηση έχει την ίδια τιμή.

Όταν το ψάξιμο ξεκινά σε σημείο όπου υπάρχει κάποια ισχύς, ο αλγόριθμος είναι ικανός να βρει ένα μέγιστο μέσα σ' ένα διάστημα αλλά όχι πάντα το ολικό μέγιστο. Κι αυτό γιατί ο αλγόριθμος τρέχει για λίγα δευτερόλεπτα για να πετύχει μια ευθυγράμμιση σε έναν πολύ μικρό χρόνο, αλλά εντός αυτής της περιόδου δεν μπορεί να αποτιμήσει αρκετές λύσεις εξ' αιτίας της σχετικά αργής ταχύτητας των μηχανών και δεν μπορεί να επιτύχει ακόμα και τοπική σύγκλιση αποτελεσματικά. Η σχέση μεταξύ του ολικού αριθμού προσπαθειών που επιτυγχάνονται και του ολικού χρόνου που κυλά κατά τη διάρκεια της ευθυγράμμισης φαίνεται στον Πίνακα 3.1

Πίνακας 3.1

Trials	40	50	100	245
Time	12s	15s	28s	65s

3.3.1.4 Τροποποίηση του γενετικού μηχανισμού

Μία μετακίνηση προς όλες τις διευθύνσεις διαρκεί τρεις φορές περισσότερο σε σχέση με την κίνηση σε μία μόνο διεύθυνση. Επομένως φαίνεται λογικό να κατευθυνθούμε στην κίνηση σε μία παρά σε τρεις διευθύνσεις. Στην περίπτωση αυτή ο αλγόριθμος δύναται να κάνει περισσότερες μετακινήσεις στη διάρκεια μιας απλής βελτιστοποίησης. Παρ' όλα αυτά και οι δύο τύποι μετακινήσεων απαιτούνται για να καταλήξουμε σε μία επιτυχημένη έρευνα. Ο αλγόριθμος λοιπόν ήταν τροποποιημένος έτσι ώστε, κατά μέσον όρο, 40% των κινήσεων ήταν τρισδιάστατες. Παρατηρήθηκε ότι τα αποτελέσματα ήταν καλύτερα από αυτά των αρχικών πειραμάτων. Το μέγιστο ήταν περισσότερο προσεγγίσιμο σε σχέση με πριν για τον ίδιο αριθμό επαναλήψεων.

Τα αποτελέσματα αυτά έδειξαν ότι ο αλγόριθμος είναι ικανός να βρει γρήγορα ένα καλό μέγιστο στο πεδίο που ορίστηκε από τους άξονες y και z, αλλά παρουσιάζει ένα πρόβλημα στη βελτιστοποίηση σε σχέση με τον άξονα x. Όπως εξηγήθηκε προηγουμένως αυτό συμβαίνει εξ' αιτίας του γεγονότος ότι η ισχύς είναι διανεμημένη σε μια μικρή περιοχή γύρω από το ολικό μέγιστο στο υπό μελέτη διάστημα που ορίζεται από τους άξονες y και z, αλλά είναι πλατύτερα εκτεταμένη κατά μήκος του άξονα x. Έτσι, αποφασίσαμε να δημιουργήσουμε μεγαλύτερο αριθμό x μετακινήσεων και να παράγουμε μεγαλύτερες διακυμάνσεις σ' αυτόν τον άξονα.

Μετά την τροποποίηση του γενετικού μηχανισμού, ο αλγόριθμος παρουσιάζει επίσης πρόβλημα στο να βρει τη βέλτιστη x θέση. Συγκεκριμένα ήταν δύσκολο να πετύχουμε υψηλότερες τιμές του x όταν το ψάξιμο άρχιζε από μία χαμηλή x θέση. Για να αντιμετωπίσουμε το πρόβλημα αυτό, αναγεννήσαμε περισσότερες θετικές διακυμάνσεις κατά τον x άξονα. Επαναλάβαμε τα πειράματα και πετύχαμε καλύτερα αποτελέσματα συγκρινόμενα με τα προηγούμενα. Παρ' όλα αυτά δεν εντοπίζαμε το ολικό μέγιστο για κάθε τρέξιμο. Ήταν φανερό ότι η επιλογή της αρχικής λύσης ήταν καθοριστική για την απόδοση του αλγορίθμου. Μία καλή αρχική λύση δεν θα πρέπει να έχει πολύ μικρή τιμή για την ισχύ και μία τιμή γύρω στα 0.2-0.3 μW φαίνεται να αποτελεί την ελάχιστη αποδεκτή ισχύ για την αρχική λύση.

3.3.1.5 Τροποποίηση της κρυσταλλικής δομής

Ο γενικός σκοπός είναι να παράγουμε μία βέλτιστη ευθυγράμμιση όσο το δυνατόν συντομότερα, γύρω στα 15-20 sec. Αυτό επιτρέπει στον αλγόριθμο να αποτιμήσει έναν αριθμό γύρω στις 70 με 80 προσπάθειες περιλαμβανόμενων όλων των λύσεων (αποδεκτών και μη αποδεκτών). Η κρυσταλλική δομή πρέπει να προσαρμόζεται ανάλογα, ενώ οι 70 προσπάθειες χωρίστηκαν στον αριθμό των βημάτων θερμοκρασίας όπου στην περίπτωση μας είναι 7.

Η διαδικασία annealing ξεκίνησε με μία θερμοκρασία 1, η οποία μειωνόταν κατά 10% μετά από κάθε δεκάδα προσπαθειών σε 7 βήματα. Με αυτή την κρυσταλλική δομή πετύχαμε καλά αποτελέσματα. Παρατηρήθηκε ότι κατά τη διάρκεια του πρώτου βήματος θερμοκρασίας, ο αλγόριθμος δέχεται καλές ή όχι λύσεις, ενώ δεν υπήρχαν σημαντικές αλλαγές στην ισχύ. Αυτό συμβαίνει διότι στην αρχή του ψαξίματος δεν υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να βρεθούμε σε κάποιο τοπικό ελάχιστο, αφού το τοπικό ελάχιστο βρίσκεται κοντά στο ολικό ελάχιστο το οποίο αρχικά είναι αρκετά απομακρυσμένο. Κοντά στο τέλος της έρευνας, ο κίνδυνος να βρεθούμε στην παγίδα τοπικού ελαχίστου είναι μεγάλος και επομένως είναι πιο σημαντικό να ανεχτούμε μία προσωρινή χειροτέρευση της λύσης ώστε να αποδράσουμε από την παγίδα αυτή. Συνεπώς τα δύο πρώτα βήματα δεν βελτιώνουν αισθητά την ευθυγράμμιση. Η ισχύς αρχίζει να αυξάνεται αξιοσημείωτα κατά τη διάρκεια του τρίτου βήματος. Η θερμοκρασία μπορεί να μειώνεται πολύ αργά, αλλά στην περίπτωση αυτή το ψάξιμο συνεχίζεται γύρω από το αρχικό σημείο και δεν κατευθύνεται σε ένα μέγιστο ως το τρίτο βήμα θερμοκρασίας.

Για να ξεπεράσουμε αυτό το μειονέκτημα, μία διπλή annealing διαδικασία εφαρμόστηκε. Η πρώτη σχεδιάστηκε ώστε να αυξήσουμε την ισχύ και να κινηθούμε όσο το δυνατόν πλησιέστερα στην περιοχή όπου βρίσκεται το μέγιστο. Η δεύτερη annealing διαδικασία άρχισε με μία υψηλότερη θερμοκρασία από μία μεγαλύτερη ισχύ που λάβαμε από την αρχική annealing διαδικασία.

Για το πρώτο annealing, πέντε βήματα θερμοκρασίας χρησιμοποιήθηκαν και δέκα προσπάθειες αποτιμήθηκαν για κάθε βήμα. Ο αλγόριθμος με το διπλό annealing σύγκλινε πιο συχνά από αυτόν με την απλή annealing διαδικασία. Παρατηρήθηκε ότι

η τιμή της ισχύος που βρέθηκε από την απλή annealing διαδικασία δεν απείχε πάρα πολύ από την τελική τιμή της ισχύος.

Όταν εφαρμόστηκε η διπλή annealing διαδικασία, ένα πρόβλημα ανήλθε εξ' αιτίας της έλλειψης ακρίβειας των μηχανών. Εάν η υψηλότερη τιμή ισχύος από το πρώτο annealing δεν είναι η τελευταία τιμή ισχύος που αποτιμάται, το δεύτερο annealing δεν ξεκινά με την επιθυμητή μέγιστη ισχύ, όταν οι μηχανές είναι γυρισμένες σε αυτή την υψηλότερη θέση ισχύος. Σαν παράδειγμα η πρότυπη ισχύς που διαβάζεται μπορεί να είναι 950 μW ενώ η ισχύς που διαβάζεται στην επιστροφή ενδεχομένως να είναι μόνο 640 μW .

3.3.1.6 Αρχικό σημείο

Όλα τα τρεξίματα που άρχισαν με ένα σταθερό αρχικό σημείο έγιναν με το χέρι. Το αρχικό σημείο είναι σημαντικό για την απόδοση και εξαρτάται από τον συγκεκριμένο πομπό laser. Για να βρούμε ένα καλό αρχικό σημείο αυτόματα όπου υπάρχει κάποια ισχύς, κάποιο είδος αρχικής ανάλυσης απαιτείται. Παρ' όλα αυτά η χρήση αυτής της διαδικασίας αυξάνει το χρόνο που χρειάζεται για να ολοκληρωθεί το ψάξιμο. Από πειράματα βλέπουμε ότι η αυτόματη αρχική διαδικασία σάρωσης που περιγράψαμε, απαιτεί 5 έως 100 δευτερόλεπτα, ενώ η annealing διαδικασία απαιτεί γύρω στα 30 δευτερόλεπτα για να φτάσει στο μέγιστο.

Η αρχική διαδικασία σάρωσης περιλαμβάνει σάρωση του υπό μελέτη διαστήματος με δύο διαφορετικούς τρόπους. Από μία αρχική κατάσταση μια σπειροειδής σάρωση εκτελείται. Η σπειροειδής αυτή σάρωση σταματά όταν βρεθεί μία τιμή ισχύος γίνει μεγαλύτερη από ένα κατώφλι ή όταν η διαδικασία σάρωσης βρίσκεται πολύ μακριά από το αρχικό σημείο. Εάν δεν βρεθεί μια ικανοποιητική τιμή ισχύος, η σάρωση εκτελείται σε πλατύτερο εύρος και με μικρότερα βήματα. Όταν η διαδικασία σταματήσει σε θέση όπου υπάρχει κάποια ισχύς, ο αλγόριθμος αρχίζει να βελτιστοποιεί τη θέση στις διαστάσεις y και z . Για τέσσερα βήματα ο αλγόριθμος ψάχνει για μία μεγαλύτερη τιμή ισχύος μέσω της κίνησης στους y και z άξονες. Τελικά η υπόλοιπη διαδικασία σάρωσης εκτελείται γύρω από το σημείο που δίνει την καλύτερη ισχύ ώστε να βρεθεί μια βελτιωμένη τιμή αν υπάρχει.

3.3.1.7 Τελικές τροποποιήσεις στον αλγόριθμο

Ύστερα από όλες τις παραπάνω τροποποιήσεις παρατηρήθηκε ότι το πρώτο annealing έχει ακόμα πρόβλημα στην εύρεση μιας καλής x θέσης. Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα υλοποιήθηκαν αρκετές τροποποιήσεις στον αλγόριθμο. Το 70% των διαταραχών έλαβαν χώρα για τον x άξονα και το 30% για τους y και z άξονες μαζί. Συγκρίνοντας με τον προηγούμενο γενετικό μηχανισμό, ο αλγόριθμος είναι υποχρεωμένος να αυξήσει τις τιμές x παρά να τις μειώσει. Όπως πριν το δεύτερο annealing είναι ικανό να βρει πιο ακριβείς λύσεις ενώ μικρές διαταραχές πραγματοποιούνται προς όλες τις κατευθύνσεις. Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκε το πλήρως αυτόματο σύστημα για την annealing διαδικασία. Από τα αποτελέσματα που πετύχαμε παρατηρήθηκε 20-25% λανθασμένη εκτίμηση ώστε να φτάσουμε τη μέγιστη ισχύ. Σε αυτές τις περιπτώσεις το ψάξιμο τελειώνει με μία αρκετά μεγάλη τιμή για το x και πέφταμε στην παγίδα του τοπικού μεγίστου. Η τιμή του x θα μπορούσε να αυξηθεί ώστε να φτάσουμε στο ολικό μέγιστο. Παρ' όλα αυτά η δέσμη φωτός δεν είναι παράλληλη με τον άξονα x . Επομένως οι $y - z$ συντεταγμένες του σημείου της μέγιστης ισχύος ποικίλλουν με διαφορετικά (y, z) επίπεδα σε διαφορετικές θέσεις κατά μήκος του x άξονα.

Ένας τρόπος να ξεπεράσουμε το πρόβλημα αυτό είναι να σαρώσουμε τον x άξονα και να συγκρίνουμε την καλύτερη τιμή ισχύος η οποία μπορεί να ληφθεί για κάθε θέση. Με άλλα λόγια, για κάθε x θέση ο αλγόριθμος έχει να βελτιστοποιήσει την ευθυγράμμιση σε σχέση με τους άξονες y και z . Ο αλγόριθμος μεταβάλλει τη θέση x και βελτιστοποιεί σύμφωνα με το συγκεκριμένο επίπεδο. Έτσι το πρώτο κομμάτι της βελτιστοποίησης οδηγεί το ψάξιμο κοντά σε μια περιοχή όπου υπάρχει το ολικό μέγιστο. Μετά την πρώτη βελτιστοποίηση εκτελείται άλλο annealing για την προσέγγιση του ολικού μεγίστου.

Μία δισδιάστατη βελτιστοποίηση εκτελείται ώστε να βρούμε ένα καλό ολικό μέγιστο σε σχέση με τους $y-z$ άξονες με έναν annealing αλγόριθμο μέσα στον οποίο η κρυσταλλική δομή περιλαμβάνει τρία βήματα θερμοκρασίας. Σε κάθε βήμα αποτιμώνται πέντε λύσεις. Ο αριθμός αυτός ήταν αρκετός ώστε να βρούμε ένα ικανοποιητικό ολικό μέγιστο. Ο χρόνος που απαιτήθηκε ώστε να ολοκληρωθεί η επίπεδη βελτιστοποίηση ήταν 4.5 δευτερόλεπτα.

Ο εστιακός άξονας μπορεί να σαρωθεί με δύο διαφορετικούς τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι η συνεχής σάρωση. Αυτή όμως η τεχνική δεν μπορεί να χαρακτηριστεί πολύ αποτελεσματική. Για παράδειγμα ξεκινώντας από $x = -100\mu\text{m}$ με διακύμανση έως $x = 200\mu\text{m}$ σαρώνουμε χρησιμοποιώντας ένα παράθυρο πλάτους $30\mu\text{m}$. Αυτή η διαδικασία σάρωσης θα είναι αποτελεσματική αλλά το υπό μελέτη διάστημα είναι περιορισμένο ενώ δαπανάται και χρόνος για τη συγκεκριμένη μέθοδο. Άλλη μέθοδος, προσαρμοσμένη εδώ, είναι να κινηθούμε σε μία διεύθυνση αυξάνοντας τις τιμές ισχύος. Όταν η ισχύς αρχίζει να μειώνεται η σάρωση ξεκινά ξανά από την υψηλότερη τιμή με ένα βήμα δέκα φορές μικρότερο σε σχέση με το προηγούμενο. Η σάρωση σταματά όταν η τιμή του βήματος φτάσει ένα κατώφλι.

Άλλη παράμετρος για τα πειράματα ήταν το ότι η ισχύς μερικές φορές έφτανε τα $2000\mu\text{W}$, που αποτελεί τη μέγιστη ισχύ που μπορεί να μετρήσει ο μετρητής ισχύος. Στην περίπτωση αυτή η βελτιστοποίηση σταματούσε άμεσα.

Πίνακας 3.2

Component Number	Initial scan time	First step time	Second step time	Total time	Annealing results	Fuzzy control time	Fuzzy control results
1	20	22	10	52	1103	49	980
2	25	49	11	85	1498	38	1472
3	29	54	3	86	1059	37	960
4	9	22	11	42	943	33	960
5	40	25	11	76	1816	45	1700
6	6	23	11	40	1415	23	1380
7	31	41	11	83	1235	57	1000
8	40	29	11	80	1137	46	1120
9	7	9	11	37	900	28	1000
10	8	19	8	35	980	29	980
11	6	6	0	12	2000	12	2000
12	23	23	11	57	1680	50	1680

13	15	36	9	60	1200	32	1080
14	12	5	0	17	2000	19	2000
15	8	12	0	30	2000	41	2000
16	5	2	0	7	2000	8	2000
17	24	32	12	68	1372	52	1230
18	17	29	8	54	1520	42	1390
19	9	16	11	36	1457	30	1460
20	10	30	11	51	1100	42	1100
21	8	34	6	48	1430	32	1200
22	38	53	11	102	1560	41	1100
23	9	10	0	19	2000	23	2000
24	22	13	0	35	2000	27	2000
25	18	34	11	63	1780	42	1800
26	6	11	0	17	2000	11	2000
27	6	7	0	13	2000	13	2000
28	9	23	11	43	1014	33	960
Average	16.8	24.3	7.1	48.1	1507	33.4	1484

3.3.1.8 Αποτελέσματα

Έχοντας όλες τις τροποποιήσεις του annealing αλγόριθμου, φθάνουμε πάντα στο ολικό μέγιστο όταν η δισδιάστατη βελτιστοποίηση πραγματοποιείται σωστά. Στον Πίνακα 3.2 φαίνονται τα αποτελέσματα που πετύχαμε χρησιμοποιώντας τον τροποποιημένο simulated annealing αλγόριθμο και, για σύγκριση, παρουσιάζεται ένα fuzzy σύστημα ελέγχου. Στον πίνακα ο χρόνος είναι σε δευτερόλεπτα και η ισχύς σε μW . Ο ολικός χρόνος του annealing περιλαμβάνει το χρόνο που εκτελείται η αρχική σάρωση, τη σάρωση του εστιακού άξονα (πρώτο βήμα) και τον χρόνο του τελικού annealing (δεύτερο βήμα).

Η τιμή της ισχύος του ολικού μεγίστου βρέθηκε από τον annealing αλγόριθμο ότι είναι μεγαλύτερη από την τιμή που επιτυγχάνεται με τον λογικό ελεγκτή fuzzy. Η διαφορά μεταξύ των τιμών ισχύος που παράχθηκαν χρησιμοποιώντας τις δύο αυτές

μεθόδους δεν είναι ποτέ μεγαλύτερη από 200μW. Όσον αφορά το μέσον όρο της ισχύος ο simulated annealing αλγόριθμος δείχνει οριακά καλύτερη απόδοση από τον λογικό ελεγκτή fuzzy. Παρ' όλα αυτά ο σπαταλούμενος χρόνος από τον simulated annealing αλγόριθμο είναι μεγαλύτερος από αυτόν του fuzzy λογικού ελεγκτή.

3.3.2 Κατανομή και ακολουθία σταθμών επιθεώρησης

Οι περισσότερες σύγχρονες διαδικασίες κατασκευής περιλαμβάνουν έναν αριθμό από στάδια ή στάσεις παραγωγής διευθετούμενες σε σειριακούς ή όχι σχηματισμούς. Δύο σημαντικά ζητήματα στην περιοχή έρευνας των πολλαπλών βαθμίδων κατασκευής αποτελούν ο σχεδιασμός των συστημάτων επιθεώρησης και ο σχεδιασμός των συστημάτων απογραφής της παραγωγής. Με τα συστήματα αυτά εξασφαλίσουμε ότι η ποιότητα του εξερχόμενου προϊόντος είναι σύμφωνη με τις προδιαγραφές ενώ παράλληλα διαχειριζόμαστε το βέλτιστο επίπεδο των μεγεθών σε κάθε στάδιο παραγωγής.

Τα συστήματα κατασκευής πολλαπλών βαθμίδων, όπου το ακατέργαστο υλικό μεταμορφώνεται σε ένα τελικό προϊόν δια μέσου μιας σειράς σταδίων παραγωγής, παρουσιάζουν ποικίλες περιπτώσεις επιθεώρησης. Η ποιότητα του εξερχόμενου προϊόντος εξαρτάται άμεσα από την ποιότητα του σε κάθε στάδιο παραγωγής. Η επιθεώρηση συνεχίζεται πριν και μετά από ένα στάδιο επεξεργασίας για να βεβαιωθούμε ότι μόνο καλής ποιότητας προϊόντα περνούν στο επόμενο στάδιο ή αφήνουν τη γραμμή παραγωγής. Υπάρχουν αρκετά σημαντικά ερωτήματα που χρειάζεται να παρατηρήσουμε:

- a) Τα σύνολα προϊόντων θα πρέπει να επιθεωρηθούν σε συγκεκριμένα στάδια παραγωγής;
- b) Εάν η απάντηση στο ερώτημα α) είναι θετική, 100% απαιτείται επιθεώρηση. Εάν είναι αρνητική, τότε ποιος είναι ο βέλτιστος αριθμός που πρέπει να επιθεωρηθεί κατά την επεξεργασία και ποιος θεωρείται παραδεκτός αριθμός ;
- c) Ποια είναι η καλύτερη διανομή και ακολουθία των στάσεων επιθεώρησης;

Υπάρχει ένα είδος ανταλλαγής στο να επιθεωρήσουμε πολλές ενότητες (που σημαίνει υψηλό κόστος επιθεώρησης και επιβραδύνει την ολική γραμμή παραγωγής) ή σχετικά λίγες (που μειώνει την αξιοπιστία των εξερχόμενων ενοτήτων). Αυτό συνεπάγεται δύο διαφορετικά προβλήματα βελτιστοποίησης, τη διανομή και την ακολουθία των λειτουργιών επιθεώρησης και το σχεδιασμό των πλάνων βέλτιστης αποδεκτής δειγματοληψίας επιθεώρησης. Στο εδάφιο αυτό παρουσιάζεται μια εφαρμογή του simulated annealing αλγόριθμου στο πρόβλημα της διανομής και της ακολουθίας των λειτουργιών που θα παρουσιαστούν.

3.3.2.1 Υπόβαθρο

Η επιθεώρηση αφορά μοιραζόμενες ενότητες προϊόντων και διαχωρίζει τις μονάδες που ικανοποιούν τις προδιαγραφές από αυτές που δεν τις ικανοποιούν ενώ εμποδίζει τις δεύτερες να φτάσουν στον εξωτερικό χρήστη.

Η παραπάνω δραστηριότητα μπορεί να προχωρήσει με πολλούς τρόπους: με ανθρώπους επιθεωρητές, αυτοματοποιημένα καθώς επίσης και υβριδικά (συνδυασμός των προηγούμενων δύο τρόπων). Η πρόσφατη βέβαια ανάπτυξη των τεχνολογικών μέσων οδηγεί σε έναν αυξημένο αριθμό υλοποίησης των αυτόματων συστημάτων. Λάθη και πιθανές ανακρίβειες στην επιθεώρηση οδήγησαν στην κατασκευή των παραπάνω συστημάτων.

Παρ' όλα αυτά υψηλότερα κόστη υλοποίησης και τεχνικές δυσκολίες συνοδεύουν τα αυτόματα συστήματα. Η επιλογή και η διανομή των στάσεων επιθεώρησης πρέπει να γίνει προσεκτικά διότι θα έχει σημαντική επίδραση όχι μόνο στην ποιότητα του προϊόντος αλλά και στο ολικό κόστος της διαδικασίας.

Η βέλτιστη διανομή και ακολουθία των σταθμών επιθεώρησης μελετάται στη συγκεκριμένη έρευνα. Η αντίληψη της βελτιστοποίησης στην συγκεκριμένη περίπτωση περιλαμβάνει παράγοντες όπως το κόστος επιθεώρησης, το κόστος του να επιτρέψουμε μία ελαττωματική ενότητα να εξέλθει και το κόστος της εσωτερικής αποτυχίας (απόρριψη και αναθεώρηση).

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως ένα σύστημα κατασκευής πολλαπλών βαθμίδων μπορεί να παρουσιαστεί σε σειριακούς ή όχι σχηματισμούς. Το Σχήμα 3.8 δείχνει δύο

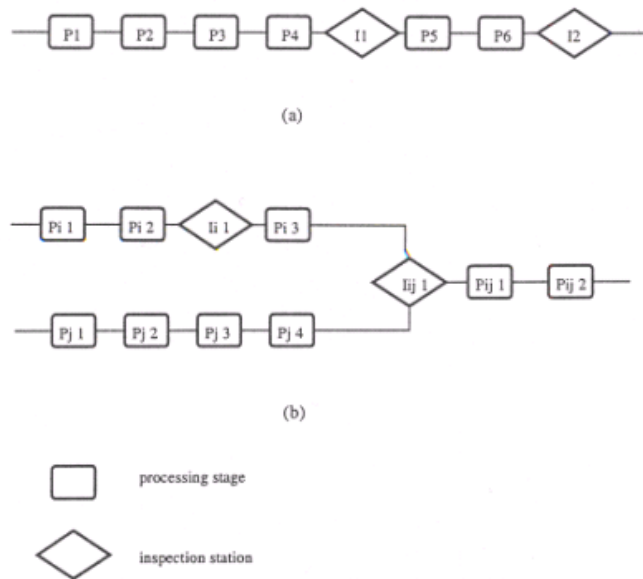
τύπους συστημάτων. Σε ένα σειριακό σύστημα, κάθε στάδιο επεξεργασίας εκτός από το πρώτο έχει ένα "πρόγονο" που προηγείται. Αντίστοιχα κάθε στάδιο εκτός από το τελευταίο συνδέεται με ένα στάδιο το οποίο ακολουθεί. Οι σταθμοί επιθεώρησης ίσως βρίσκονται μεταξύ των σταδίων επεξεργασίας. Σε ένα μη σειριακό σύστημα το προϊόν σε ένα τουλάχιστον στάδιο θα συνδέεται ή θα συναντιέται με προϊόντα από διαφορετικές γραμμές παραγωγής. Στην περίπτωση αυτή η βελτιστοποίηση της διανομής των σταθμών επιθεώρησης γίνεται πιο σύνθετη.

Στο συγκεκριμένο εδάφιο θα μελετήσουμε ένα σειριακό σύστημα όσον αφορά τη διανομή επιθεώρησης σταθμών με βάση τα παρακάτω κριτήρια:

1. Υπάρχουν αρκετά στάδια παραγωγής.
2. Ξεχωριστές ενότητες προϊόντων ενός απλού τύπου ρέουν σε μια σταθερή γραμμική ακολουθία από το ένα στάδιο στο επόμενο.
3. Τα προϊόντα ρέουν σε ομάδες μεγέθους ένα.
4. Κάθε στάδιο παραγωγής περιλαμβάνει μια απλή λειτουργία παραγωγής ακολουθούμενη από μηδέν, μία ή περισσότερες λειτουργίες επιθεώρησης σε μια σταθερή διαδοχή.
5. Κάθε λειτουργία παραγωγής ή επιθεώρησης επιφέρει μία σταθερή μονάδα κόστους επεξεργασίας.
6. Για κάθε λειτουργία επιθεώρησης υπάρχουν δύο είδη λαθών :
 - ταξινόμηση των μονάδων που ικανοποιούν τις προδιαγραφές ως μονάδες που δεν τις ικανοποιούν.
 - ταξινόμηση των μονάδων που δεν ικανοποιούν τις προδιαγραφές ως μονάδες που τις ικανοποιούν. Αυτά τα λάθη θα επηρεάσουν στο κόστος, την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία της ποιότητας των προσπαθειών για ασφάλεια.
7. Οι ταξινομημένες μονάδες προϊόντων ως μη ικανοποιητικές απομακρύνονται από την γραμμή παραγωγής και αποβάλλονται με δύο τρόπους : διαλύονται ή αναθεωρούνται.
8. Η μεταφορά ενός μη ικανοποιητικού προϊόντος στον πελάτη θα προκαλέσει ένα κόστος τιμωρίας.

Ο βέλτιστος σχεδιασμός των σταθμών επιθεώρησης μελετήθηκε γύρω στο 1960. Ο Raz [1986] αποτίμησε τα στοιχεία των προβλημάτων διανομής σταθμών επιθεώρησης

και τα μοντέλα του προτείνονται στη βιβλιογραφία. Η εργασία του περιλαμβάνει 17 μοντέλα ανεπτυγμένα από το 1964 έως το 1984 για σειριακά και μη σειριακά συστήματα παραγωγής. Τα περισσότερα από αυτά χρησιμοποιούν δυναμικές προγραμματιστικές τεχνικές. Ο Ballou και ο Pazer [1982; 1985] ανέπτυξαν ένα μοντέλο παραγωγής – επιθεώρησης το οποίο επιτρέπει λάθη επιθεώρησης σε ένα σειριακό σύστημα παραγωγής. Οι Peters και Williams χρησιμοποίησαν δυναμικό προγραμματισμό και άμεσες τεχνικές έρευνας. Το πρόβλημα με τον δυναμικό προγραμματισμό είναι ότι όταν ο αριθμός των σταδίων επεξεργασίας αυξάνει, η πολυπλοκότητα των υπολογισμών αυξάνει και αυτή δραματικά. Μία μη βέλτιστη λύση θα μπορούσε να γίνει αποδεκτή σαν βέλτιστη ενώ το πρόβλημα γίνεται μεγαλύτερο. Επιπλέον οι αποφάσεις για βελτιστοποίηση λαμβάνονται ξεχωριστά, στάδιο-στάδιο, ώστε να πετύχουμε τελικά βελτιστοποίηση σε ένα σύστημα πολλαπλών βαθμίδων.



Σχήμα 3.8 (α) Σειριακό σύστημα παραγωγής – Επιθεώρησης (β) Μη σειριακό σύστημα παραγωγής - επιθεώρησης

3.3.2.2 Συναρτήσεις μεταφοράς του μοντέλου

Το μοντέλο διανομής σταθμών επιθεώρησης είναι διατυπωμένο με τη λογική ελαχιστοποίησης του συνολικού κόστους ανά μονάδα προϊόντος. Το συνολικό κόστος περιλαμβάνει τη μονάδα κόστους επιθεώρησης και το κόστος των ελαττωματικών αντικειμένων. Υπάρχουν δύο είδη κόστους ελαττωματικών αντικειμένων. Το ένα αποτελεί την αναθεώρηση και την αναπλήρωση του κόστους προτού τα αντικείμενα αυτά απομακρυνθούν από την εταιρία. Το άλλο είναι το κόστος για κάθε ελαττωματική μονάδα που φτάνει στον καταναλωτή.

Το θέμα είναι να αποφασίσουμε ποιες λειτουργίες επιθεώρησης θα εκτελεστούν αμέσως μετά από κάθε στάδιο παραγωγής. Οι περιορισμοί στο πρόβλημα βελτιστοποίησης στηρίζονται σε ένα απαιτούμενο εξερχόμενο κλάσμα των ελαττωματικών μονάδων και του αριθμού των λειτουργιών επιθεώρησης.

Σε αυτή τη μελέτη θεωρούμε το μοντέλο παραγωγής – επιθεώρησης πολλαπλών βαθμίδων που αναπτύχθηκε από τον Raz και τον Kaspi [1991]. Το μοντέλο αποκαλείται μοντέλο συναρτήσεων μεταφοράς (Transfer Function Model (TFM)). Το TFM παρέχει ένα ενοποιημένο πλαίσιο εργασίας για την ανάλυση των συστημάτων πολλαπλών βαθμίδων με διαφορετικούς τύπους παραγωγής και λειτουργιών επιθεώρησης. Αυτό το μοντέλο διευκολύνει την υλοποίηση των υπολογισμών που απαιτούνται ώστε να βρούμε τη βέλτιστη λύση. Το TFM σε κάθε στάδιο, είτε παραγωγής είτε επιθεώρησης, περιγράφεται από δύο συναρτήσεις μεταφοράς : τη Συνάρτηση Μεταφοράς Κόστους (Cost Transfer Function) και τη Συνάρτηση Μεταφοράς Ποιότητας (Quality Transfer Function).

Η Συνάρτηση Μεταφοράς Κόστους (CTF) συσχετίζει την αθροιστική μονάδα κόστους πριν και μετά τη λειτουργία παραγωγής ή επιθεώρησης και δηλώνεται με C_i και C_o αντίστοιχα. Η συνάρτηση μεταφοράς ποιότητας (QTF) μιας λειτουργίας συσχετίζει τις πιθανότητες q_i και q_o όπου μία μονάδα είναι ελαττωματική πριν και μετά τη λειτουργία αντίστοιχα. Το TFM περιλαμβάνει τις ακόλουθες παραμέτρους:

δ : Ποσοστό των ελαττωματικών μονάδων που απορρίπτονται. Επομένως το κλάσμα των μονάδων που αναθεωρούνται θα είναι $(1-\delta)$.

θ : Πιθανότητα μια ελαττωματική μονάδα να θεωρηθεί σαν ικανοποιητική.

π : πιθανότητα μία ικανοποιητική μονάδα να θεωρηθεί ως ελαττωματική λόγω της ακατάλληλης λειτουργίας των λειτουργιών παραγωγής ή διόρθωσης.

ρ : πιθανότητα μία ελαττωματική μονάδα να παραμείνει ελαττωματική μετά τη λειτουργία επαναδιόρθωσης.

φ : πιθανότητα μια ικανοποιητική μονάδα να ταξινομηθεί ως ελαττωματική.

f : ποσοστό του αθροιστικού κόστους μιας απορριπτέας μονάδας το οποίο διατηρείται σαν μια διασωθείσα τιμή.

PC: κόστος μονάδας επεξεργασίας προστιθέμενο σε κάθε μονάδα.

RC: κόστος μονάδας αναθεώρησης.

Οι τελικές μορφές των συναρτήσεων μεταφοράς μετά τη συμπλήρωση των απλών λειτουργιών δίνονται από τους παρακάτω τύπους:

$$q_o = \frac{(C_i + PC) - j(C_i + PC)\delta[q_i(1-\theta) + (1-q_i)\phi] + RC(1-\delta)[q_i(1-\theta) + (1-q_i)\phi]}{1 - \delta[q_i(1-\theta) + (1-q_i)\phi]}$$

(3.3)

$$q_o = \frac{q_i\theta + (1-\delta)\{\rho[q_i(1-\theta)] + \pi(1-q_i)\phi\}}{1 - \delta[q_i(1-\theta) + (1-q_i)\phi]} \quad (3.4)$$

Αυτές οι ισότητες εφαρμόζονται ώστε να υπολογίσουμε τις CTF και QTF για έναν απλό σταθμό παραγωγής ή επιθεώρησης.

3.3.2.3 Περιγραφή προβλήματος

Παρατηρώντας ένα σύστημα κατασκευής πολλαπλών βαθμίδων, όπου μπορούν να τοποθετηθούν έως τρεις πιθανοί σταθμοί επιθεώρησης σε κάθε δέκα στάδια επεξεργασίας, από το στάδιο 0 έως το στάδιο 9. Το ακατέργαστο υλικό αποτελεί την είσοδο στο στάδιο 0 και το τελικό προϊόν αποτελεί την έξοδο από το στάδιο 9. Η

βέλτιστη τοποθέτηση θα βελτιστοποιήσει το συνολικό κόστος. Το συνολικό κόστος $C_{T[s]}$ ενός απλού σταδίου θα είναι:

$$C_{T[s]} = C_{o[s]} + q_{o[s]}PC_{[s+1]} \quad (3.5)$$

όπου $C_{T[s]}$ είναι το συνολικό κόστος στο στάδιο s και $PC_{[s+1]}$ είναι το κόστος παραγωγής στο επόμενο στάδιο ($s+1$) με το s να κυμαίνεται από 0 έως 9. Η τιμή του $C_{T[s]}$ εξαρτάται από τη διαμόρφωση της επιθεώρησης σε κάθε στάδιο.

Η έξοδος των CTF και QTF ενός σταδίου θα είναι είσοδος για το επόμενο. Επομένως τα $C_{o[s]}$ και $q_{o[s]}$ λαμβάνονται σαν $C_{i[s+1]}$ και $q_{i[s+1]}$ αντίστοιχα. Οι ισότητες 3.3 και 3.4 εφαρμόζονται ξανά για να βρούμε τα $C_{o[s+1]}$ και $q_{o[s+1]}$. Το συνολικό κόστος για το επόμενο στάδιο θα είναι:

$$C_{T[s+1]} = C_{o[s+1]} + q_{o[s+1]}PC_{[s+2]} \quad (3.6)$$

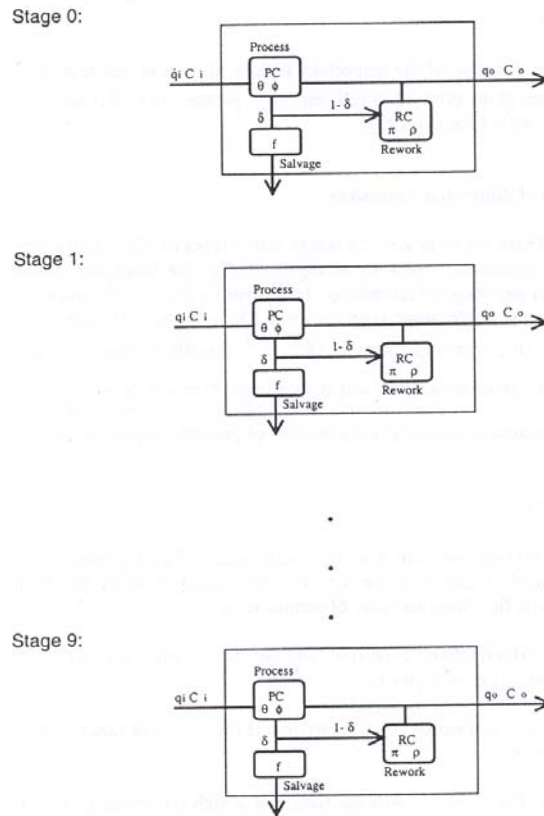
Όταν το προϊόν εξέλθει από το όλο σύστημα και φτάσει στον πελάτη ή στον εξωτερικό χρήστη, ένα κόστος ποινής συνεπάγεται για κάθε ελαττωματική μονάδα. Το κόστος ποινής για κάθε ελαττωματική μονάδα συμβολίζεται με PEN. Το CTF δηλώνεται από το $C_{T[p]}$:

$$C_{T[p]} = C_{o[9]} + q_{o[9]}PEN \quad (3.7)$$

Το συνολικό κόστος ανά μονάδα προϊόντος, C_T , για ολόκληρο το σύστημα θα είναι :

$$C_T = C_{T[9]} + C_{T[p]} \quad (3.8)$$

Όπου C_T είναι η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος διανομής και διαδοχής των σταθμών επιθεώρησης. Οι τιμές των παραμέτρων παραγωγής και επιθεώρησης που χρησιμοποιήθηκαν δόθηκαν από τον Hassan [1997].



Σχήμα 3.9 TFM για την ολική γραμμή παραγωγής

3.3.2.4 Εφαρμογή του simulated annealing

Αναπαράσταση: Υπάρχουν δέκα στάδια επεξεργασίας με τρεις τύπους σταθμών επιθεώρησης, I1, I2 και I3. Τα στάδια επεξεργασίας τοποθετούνται σειριακά. Οι σταθμοί επιθεώρησης μπορούν να διανεμηθούν σε κάθε στάδιο επεξεργασίας. Υπάρχουν 16 δυνατές διαμορφώσεις επιθεώρησης σε κάθε απλό στάδιο και ο συνολικός αριθμός σχηματισμών για όλα τα στάδια επεξεργασίας θα είναι 16^{10} (2^{10} πιθανές λύσεις). Κι αυτό γιατί υπάρχουν δέκα στάδια επεξεργασίας και σε κάθε στάδιο έχουμε $\sum_{i=0}^3 \frac{3!}{(3-i)!}$ ή 16 πιθανούς σχηματισμούς επιθεώρησης. Το πρόβλημα παρουσιάστηκε με ένα 40-bit δυαδικό string.

Διαμορφωμένος μηχανισμός: Η αντιστροφή και η μεταλλαγή (inversion and mutation) εφαρμόστηκαν σαν τελεστές διαμόρφωσης.

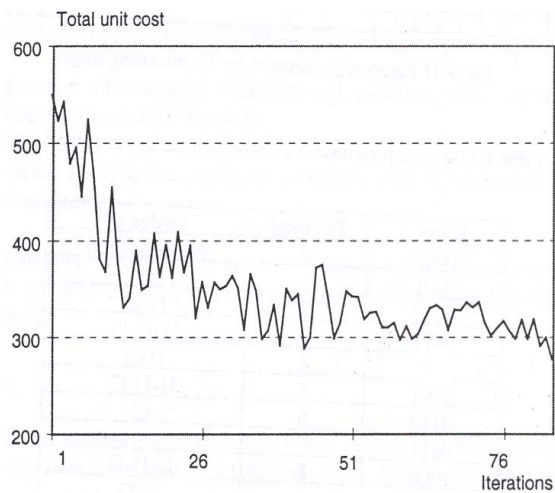
Συνάρτηση κόστους: Η συνάρτηση κόστους για αυτό το πρόβλημα είναι η αντικειμενική συνάρτηση που δόθηκε στην προηγούμενη ενότητα.

Κρυσταλλική δομή: Η annealing διαδικασία ξεκίνησε από υψηλή θερμοκρασία, $T = 600$ μονάδες και οι περισσότερες από τις κινήσεις ήταν αποδεκτές. Η κρυσταλλική δομή αναπαραστάθηκε ως $T_{i+1} = \lambda T_i$, όπου λ είναι η παράμετρος ρυθμού ψύξης η οποία βρέθηκε πειραματικά. Τρεις ρυθμοί ψύξης χρησιμοποιήθηκαν ($\lambda=0.9, 0.98, 0.99$). Με $\lambda=0.9$, η θερμοκρασία μειώθηκε γρήγορα. Με $\lambda=0.98$ ο ρυθμός ψύξης ήταν μέτριος, ενώ για $\lambda=0.99$ ο ρυθμός ψύξης ήταν πολύ αργός. Το αρχικό κριτήριο διακοπής τέθηκε όταν η τιμή του συνολικού κόστους φτάσει στο 265.38. Αυτή η τιμή αποτελεί το καλύτερο δυνατό κόστος που βρέθηκε για το ίδιο πρόβλημα με την εφαρμογή γενετικού αλγορίθμου.

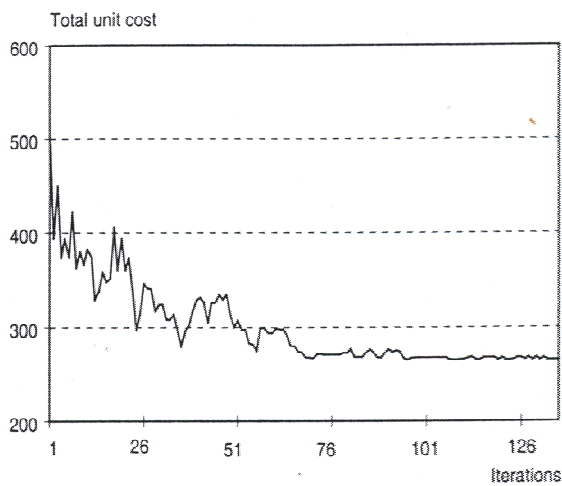
3.3.2.5 Πειραματισμοί και αποτελέσματα

Το Σχήμα 3.10 (α-γ) δείχνει τις καμπύλες βελτιστοποίησης για τρία πειράματα με διαφορετικές τιμές του λ . Στο πρώτο πείραμα η διαταραχή είναι πολύ σπάνια στην αρχή των επαναλήψεων. Ύστερα το κόστος μειώνεται γρήγορα σε ένα τοπικό βέλτιστο. Το πρόγραμμα σταμάτησε μετά από 12 ώρες. Το συνολικό κόστος μονάδας έφτασε την τιμή 275,40. Στο δεύτερο πείραμα φαίνεται μεγαλύτερη διαταραχή στην αρχή. Κατά τη διάρκεια του πρώτου τετάρτου της διαδικασίας βελτιστοποίησης υπήρχε βελτίωση αλλά το κόστος ήταν πολύ ευμετάβλητο. Η διαταραχή ήταν αναγκαία για να αποφύγουμε το τοπικό βέλτιστο. Τότε το κόστος σταθεροποιήθηκε. Όταν η θερμοκρασία ήταν χαμηλή, το συνολικό κόστος μονάδας άρχισε να μειώνεται έως ότου έφτασε το κριτήριο διακοπής, εκεί όπου επιτυγχάνεται η βέλτιστη λύση του προβλήματος. Ο αλγόριθμος τελείωσε σε 136 επαναλήψεις μετά από μία ώρα και τριάντα οκτώ λεπτά χρόνου υπολογισμού. Στο τρίτο πείραμα είχαμε αρκετά τυχαίες διαταραχές έως τα 3/4 του μέγιστου αριθμού επαναλήψεων (200 επαναλήψεις). Τότε το κόστος άρχισε να σταθεροποιείται. Παρ' όλα αυτά προτού πετύχουμε την τιμή κόστους διακοπής, ο αλγόριθμος έφτασε το μέγιστο αριθμό επαναλήψεων με τιμή συνολικού κόστους 274,06. Θα μπορούσε να αυξηθεί ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων, αλλά αυτό θα σήμαινε αύξηση του συνολικού κόστους.

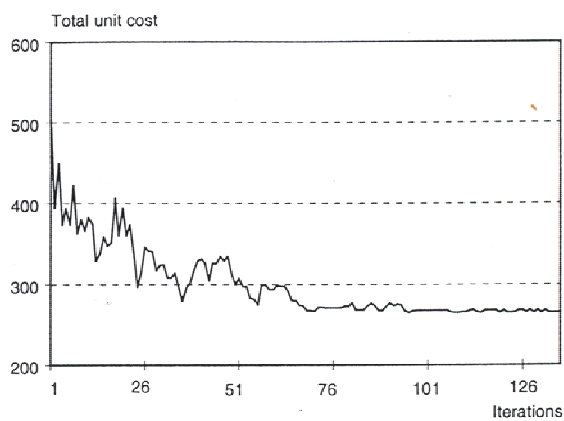
Το δεύτερο πείραμα διεξήχθη ξανά με εξασθενημένο κριτήριο διακοπής. Παρ' αυτά δεν παρατηρήθηκε βελτίωση μετά από ένα μεγάλο χρόνο υπολογισμών (12 ώρες). Ο τελικός σχηματισμός επιθεώρησης φαίνεται στον Πίνακα 3.3.



(α) Experiment 1



(β) Experiment 2



(γ) Experiment 3

Σχήμα 3.10 Καμπύλες βελτιστοποίησης για τη διανομή σταθμών επιθεώρησης

Πίνακας 3.3

Stage	Binary no			
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0

5	0	0	0	0
6	0	0	0	0
7	0	1	1	0
8	0	0	0	0
9	0	0	1	0

Ο Πίνακας 3.4 δείχνει τα καλύτερα αποτελέσματα που βρέθηκαν από τη διαδικασία SA και της διαδικασίας Branch και Bound για σύγκριση [Raz and Kaspi, 1991].

Τα αποτελέσματα του πειράματος πιστοποιούν ότι η αρχική θερμοκρασία και ο ρυθμός ψύξης αποφασίζουν για την ποιότητα των λύσεων. Αν η αρχική θερμοκρασία είναι αρκετά ψηλή και ο ρυθμός ψύξης είναι πολύ χαμηλός, ο σχηματισμός δεν μπορεί να πετύχει τη βέλτιστη λύση πριν φτάσουμε στο μέγιστο αριθμό επαναλήψεων. Αν ο ρυθμός ψύξης είναι αρκετά ψηλός, η διαδικασία θα έφτανε σε ένα τοπικό βέλτιστο. Παρατηρήθηκε επίσης ότι αυξάνοντας τον αριθμό των επαναλήψεων δεν είχαμε κάποιο αποτέλεσμα όσον αφορά την τελική λύση.

Πίνακας 3.4

Allocation and Sequencing	Simulated Annealing	Branch and Bound
Experiment 2	265.38	267.52

3.3.3 Οικονομική Ποσότητα-Μέγεθος Παραγωγής

Η ανάγκη να συναγωνιστού και επιτυχίας έχει οδηγήσει σε έναν αριθμό τεχνολογικών εξελίξεων στα συστήματα κατασκευής. Σ' αυτές τις εξελίξεις περιλαμβάνονται τα εύκαμπτα συστήματα κατασκευής (Flexible Manufacturing Systems (FMSs) και η βελτιστοποιημένη τεχνολογία παραγωγής (Optimized Production Technology (OPT)). Πρόσφατες επεκτάσεις αποτελούν οι Just-In-Time (JIT), η ολική ποιότητα διαχείρισης (Total quality management (TQM)) και η ολική

προληπτική συντήρηση (Total Preventative Maintenance (TPM)). Το κύριο μέλημα είναι να παράγουμε προϊόντα καλής ποιότητας και να βελτιώσουμε το κέρδος δια μέσου της μείωσης του κόστους, των μηδενικών ελλείψεων και τη μείωση του αριθμού των κύκλων κατασκευής. Ένα σχετιζόμενο ζήτημα είναι η επίτευξη μικρότερης ποσότητας-μεγέθους παραγωγής. Αυτό γίνεται εφικτό μόνο στην περίπτωση μείωσης του κόστους εγκατάστασης. Επίσης υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ του μεγέθους κάθε παρτίδας προϊόντων και του κόστους απογραφής στη δυναμική διαδικασία ελέγχου. Για παράδειγμα η μείωση του κόστους εγκατάστασης επιφέρει μια μείωση του κόστους απογραφής εξ' αιτίας της ποιότητας της δυναμικής διαδικασίας ελέγχου χρησιμοποιώντας μικρότερα batch-sizes για την επεξεργασία των αντικειμένων.

Η μελέτη γύρω από τις οικονομικές ποσότητες – μεγέθη στα συστήματα κατασκευής πολλαπλών βαθμίδων συγκρίνεται με άλλα προβλήματα βελτιστοποίησης. Ο Szendrovits [1975] παρουσίασε ένα μαθηματικό μοντέλο για να αποφασίσει το χρόνο κύκλου κατασκευής σε συνάρτηση της ποσότητας – μεγέθους σ' ένα σύστημα παραγωγής πολλαπλών βαθμίδων. Το μοντέλο αυτό θεωρεί ένα κόστος εξ' αιτίας της διαδικασίας παραγωγής και ορίζει μια σχέση μεταξύ του χρόνου υλοποίησης του προγράμματος και του χρόνου απογραφής. Ο Goyal [1978] επέκτεινε τη δουλειά αυτή βελτιστοποιώντας ταυτόχρονα και τις ποσότητες – μεγέθη και τον αριθμό των sub – batches. Αυτό αποτέλεσε μια σημαντική βελτίωση του κόστους απογραφής. Παρ' όλα αυτά και τα δύο μοντέλα χρησιμοποιούν ενιαίο μέγεθος παρτίδων (batch-size). Οι Imo και Das [1983] μελέτησαν τη δομή των batch-size για ποικίλα στάδια παραγωγής. Ο Porteus [1986] έδειξε ότι η μείωση του κόστους σχηματισμού και η ελάττωση των ποσοτήτων – μεγεθών μπορεί να ωφελήσει τα συστήματα παραγωγής βελτιώνοντας την ποιότητα ελέγχου. Το μοντέλο αυτό αναπτύχθηκε για να δείξει την άμεση σχέση μεταξύ της ποιότητας και των ποσοτήτων – μεγεθών. Το μοντέλο δείχνει ότι όταν παράγουμε μεγάλες ποσότητες, η διαδικασία μπορεί να τεθεί εκτός ελέγχου με βάση μια δοσμένη πιθανότητα. Έτσι χωρίς έλεγχο οι διαδικασίες που γίνονται παράγουν ελαττωματικές μονάδες έως το τέλος της παραγωγής. Στο σύστημα επιφέρεται ένα επιπλέον κόστος για αναθεώρηση καθώς και άλλες σχετικές λειτουργίες για κάθε ελαττωματική μονάδα που αυτό παράγει. Επομένως υπάρχει ένα κίνητρο να παράγουμε μικρότερες ποσότητες και να έχουμε μικρότερο ποσοστό ελαττωματικών μονάδων.

Παρ' όλα αυτά, υπάρχει ένα μοντέλο που εξηγεί τη σχέση μεταξύ της ποιότητας ελέγχου και της μείωσης κόστους σχηματισμού σε ένα σύστημα κατασκευής πολλαπλών βαθμίδων θεωρώντας δυναμική διαδικασία ποιότητας ελέγχου. Ο Gunasekaran [1995] μελέτησε αυτή τη σχέση και πρότεινε ένα μαθηματικό μοντέλο. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται στη συγκεκριμένη μελέτη.

3.3.3.1 Μοντέλο οικονομικής ποσότητας – μεγέθους παραγωγής.

Θεωρούμε ένα σύστημα παραγωγής το οποίο περιλαμβάνει έναν αριθμό από στάδια παραγωγής και προϊόντα. Το βασικό αντικείμενο είναι να βρούμε τη βέλτιστη ποσότητα – μέγεθος που θα ελαχιστοποιήσει το συνολικό κόστος κατασκευής. Όπως αναφέρθηκε το μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιείται είναι το μοντέλο του Gunasekaran. Το μοντέλο αυτό περιλαμβάνει έξι συναρτήσεις κόστους για κάθε μονάδα χρόνου :

1. Κόστος επένδυσης στο πρόγραμμα μείωσης του κόστους εγκατάστασης (σχηματισμού), C_1

$$C_1 = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N U_{ij} \quad (3.9)$$

όπου U_{ij} είναι το προεξοφλούμενο (discounted) κόστος επένδυσης ανά μονάδα χρόνου, i είναι ο αριθμός προϊόντος ($i = 1$ έως M) και j ($j = 1$ έως N) είναι ο αριθμός σταδίου στο οποίο βρισκόμαστε.

2. Κόστος σχηματισμού (εγκατάστασης). C_2

$$C_2 = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \left\{ \frac{D_i}{Q_{ij}} \right\} A_{ij} \quad (3.10)$$

όπου D_i αποτελεί τη ζήτηση για το προϊόν i (units/year), Q_{ij} είναι το μέγεθος επεξεργασίας για το προϊόν i στο στάδιο j (ελάχιστο όριο $d_{ij} \leq Q_{ij} \leq$ μέγιστο όριο u_{ij}) και A_{ij} είναι το κόστος ανά εγκατάσταση για το προϊόν i στο στάδιο j το οποίο δίνεται από την παρακάτω σχέση :

$$A_{ij} = \frac{K_{ij}}{U_{ij} e_{ij}^v} \quad (3.11)$$

όπου K_{ij} είναι μια θετική σταθερά (οριζόμενο σαν κόστος εγκατάστασης ανά εγκατάσταση όταν η ελαστικότητα επένδυσης στο πρόγραμμα μείωσης κόστους εγκατάστασης, e_{ij}^u είναι μηδέν).

3. Κόστος επένδυσης στο πρόγραμμα διαδικασίας μείωσης του ρυθμού κίνησης, C_3

$$C_3 = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N V_{ij} \quad (3.12)$$

όπου V_{ij} είναι το προεξοφλούμενο κόστος των μεθόδων βελτίωσης της διαδικασίας ελέγχου (\$/year).

4. Κόστος εξ' αιτίας της διαδικασίας ελέγχου, C_4

$$C_4 = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \left[\frac{D_{it_{ij}} a_{ij}}{\beta_{ij}} \right] y \quad (3.13)$$

όπου t_{ij} είναι ο χρόνος επεξεργασίας ανά μονάδα του προϊόντος i στο στάδιο j (years/unit), β_{ij} είναι ο μέσος αριθμός εξυπηρέτησης ώστε να φέρουμε τη διαδικασία σε κανονική κατάσταση λειτουργίας για το προϊόν i στο στάδιο j , και y αποτελεί το κόστος ανά μονάδα χρόνου ελέγχου των λειτουργιών επεξεργασίας. Τέλος a_{ij} είναι ο μέσος ρυθμός εξέλιξης της επεξεργασίας καθώς επεξεργαζόμαστε το προϊόν i στο στάδιο j και δίνεται από τη σχέση :

$$a_{ij} = \frac{L_{ij}}{V_{ij} e_{ij}^v} \quad (3.14)$$

όπου L_{ij} είναι μία θετική σταθερά (οριζόμενη ως ο ρυθμός διαδικασίας κίνησης όταν η ελαστικότητα του προγράμματος επένδυσης για τη διαδικασία μείωσης του ρυθμού κίνησης e_{ij}^v είναι μηδέν).

5. Κόστος απογραφής εξ' αιτίας της διαδικασίας ελέγχου και των λειτουργιών, C_5

$$C_5 = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [D_i T_{ij} G_{ij} \{ \frac{a_{ij}}{\beta_{ij} - a_{ij}} \}] H \quad (3.15)$$

όπου T_{ij} είναι ο χρόνος επεξεργασίας για ένα batch του προϊόντος i στο στάδιο j (years) και είναι ίσο με $T_{ij} = Q_{ij} t_{ij}$. Το G_{ij} είναι το μέσο κόστος ανά μονάδα προϊόντος i μεταξύ των σταδίων j και $j+1$ (\$/unit) και δίνεται από τη σχέση :

$$G_{ij} = \frac{C_{ij} + C_{i[j+1]}}{2} \quad (3.16)$$

όπου C_{ij} αποτελεί το κόστος προϊόντος i μετά την επεξεργασία στο στάδιο j (\$/unit) και H είναι το κόστος απογραφής ανά μονάδα επένδυσης και ανά περίοδο μονάδας χρόνου (\$/\$year).

6. Κόστος απογραφής εξ' αιτίας της ουράς των batches, C_6

$$C_6 = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [D_i C_{ij} \frac{\lambda_{ij}}{\lambda_{i[j+1]}(\lambda_{i[j+1]} - \lambda_{ij})}] H \quad (3.17)$$

όπου λ_{ij} είναι ο ρυθμός παραγωγής για το προϊόν i στο στάδιο j και ισχύει

$$\lambda_{ij} = \frac{x_{ij} S_j}{F_{ij}}.$$

Το x_{ij} παριστάνει την προσδιορισμένη προτεραιότητα κατά την

επεξεργασία του προϊόντος i στο στάδιο j , το F_{ij} είναι η μέση συμπλήρωση χρόνου για ένα batch του προϊόντος i στο στάδιο j (years) η οποία δίνεται από

$$F_{ij} = T_{ij} [\frac{\beta_{ij}}{\beta_{ij} - a_{ij}}],$$

ενώ S_j είναι ο αριθμός των μηχανών στο στάδιο j .

Το συνολικό κόστος C_{LT} θα είναι το άθροισμα όλων των παραπάνω από το C_1 έως το C_6 .

Το πρόβλημα της οικονομικής παραγωγής ποσότητας – μεγέθους μπορεί να διατυπωθεί ως ακολούθως : Υπάρχουν τρία στάδια παραγωγής, κάθε ένα από τα οποία κατασκευάζει τρία διαφορετικά προϊόντα. Σκοπός μας είναι να αποφασίσουμε για το βέλτιστο μέγεθος των batch, Q_{ij} , για τα βέλτιστα ετήσια κόστη επένδυσης της εγκατάστασης, U_{ij} , και για το βέλτιστο ετήσιο κόστος των βελτιώσεων της

διαδικασίας ελέγχου, V_{ij} . Έτσι θα μπορέσουμε να ελαχιστοποιήσουμε το συνολικό κόστος, CLT το οποίο αποτελεί και την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος.

Υποθέσεις:

- a) Η ζήτηση ανά μονάδα χρόνου προϊόντος είναι ντετερμινιστική και γνωστή.
- b) Το κόστος εγκατάστασης ανά εγκατάσταση είναι σταθερό και ανεξάρτητο της ακολουθίας εγκατάστασης και των batch sizes.
- c) Οι ταχύτητες επεξεργασίας ακολουθούν μια Poisson κατανομή και ο χρόνος επεξεργασίας που απαιτείται για κάθε ταχύτητα ακολουθεί μία εκθετική κατανομή με μέσους ρυθμούς ταχύτητας και εξυπηρέτησης αντίστοιχα. Ο μέσος ρυθμός εξυπηρέτησης β_{ij} είναι υψηλότερος από τη μέση ταχύτητα επεξεργασίας α_{ij} .
- d) Οι μηχανές έχουν πανομοιότυπες ικανότητες.
- e) Δεν υπάρχει τελικό προϊόν απογραφής μέχρι η επεξεργασία να ολοκληρωθεί έως το τελευταίο στάδιο.
- f) Δεν υπάρχουν βλάβες λειτουργίας των μηχανών.
- g) Το κόστος ανά μονάδα χρόνου εξυπηρέτησης που απαιτείται ώστε να φέρουμε τη διαδικασία σε κανονική κατάσταση είναι το ίδιο για όλα τα προϊόντα και για όλα τα στάδια επεξεργασίας.
- h) Η επένδυση για τα προγράμματα που περιλαμβάνουν τις διαδικασίες μείωσης ρυθμού κίνησης και κόστους εγκατάστασης, οδηγεί σε επιθυμητά αποτελέσματα.
- i) Η ελαστικότητα του κόστους επένδυσης στο κόστος εγκατάστασης είναι σταθερή και γνωστή.

3.3.3.2 Υλοποίηση της οικονομικής παραγωγής ποσότητας – μεγέθους

Το κύριο μέλημα μας είναι, όπως έχει προαναφερθεί, είναι να αποφασίσουμε για το βέλτιστο μέγεθος των batch, Q_{ij} , για την επένδυση, U_{ij} , και για το βέλτιστο ετήσιο κόστος των βελτιώσεων της διαδικασίας ελέγχου, V_{ij} , ώστε να ελαχιστοποιήσουμε το συνολικό κόστος κατασκευής. Για τον προσδιορισμό του προβλήματος απαιτείται να οριστούν 27 παράμετροι (9 για κάθε Q_{ij}, U_{ij} και V_{ij} , με $i=1$ έως 3 και $j=1$ έως 3).

Λεπτομέρειες υλοποίησης. Ένα δυαδικό string χρησιμοποιείται ώστε να αναπαραστήσουμε τις 27 παραμέτρους. Το Q_{ij} είναι ένας ακέραιος που κυμαίνεται από 100 έως 600 και αναπαρίσταται με 9 bits. Τα U_{ij} και V_{ij} είναι πραγματικές τιμές, κυμαίνονται από 150.00 έως 400.00 και αναπαρίστανται με 11 bits. Το συνολικό μέγεθος του διαστήματος λύσης για το πρόβλημα αυτό είναι 2^{279} αφού το συνολικό string είναι 279 bits ($9 \cdot (9 + 11 + 11)$). Η μεταλλαγή και η αντιστροφή (inversion and mutation) χρησιμοποιούνται σαν τεχνικές διαμόρφωσης για την παραγωγή νέων λύσεων.

Η αντικειμενική συνάρτηση E είναι η συνάρτηση κόστους C_{LT} όπως αυτή περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα. Οι παράμετροι ελέγχου, όπως για παράδειγμα η αρχική θερμοκρασία T και ο ρυθμός ψύξης λ , αποφασίστηκαν ξανά με εμπειρικό τρόπο.

Πειραματισμοί και αποτελέσματα. Τα πειράματα εκτελέστηκαν με τέσσερα διαφορετικά σύνολα παραμέτρων ελέγχου. Το πρώτο πείραμα διεξήχθη σε μία σχετικά υψηλή θερμοκρασία (10 units) ενώ διαλέξαμε και αργό ρυθμό ψύξης (0.98). Στο δεύτερο πείραμα θέσαμε την ίδια αρχική θερμοκρασία με ένα υψηλότερο ρυθμό ψύξης (0.95). Στο τρίτο πείραμα διαλέξαμε μία χαμηλή αρχική θερμοκρασία (1 unit) και έναν αργό ρυθμό ψύξης (0.98). Στο τέταρτο πείραμα, μία χαμηλή θερμοκρασία και ένας γρήγορος ρυθμός ψύξης (0.95) χρησιμοποιήθηκαν. Το κριτήριο διακοπής τέθηκε σαν $C_{LT}=7667$, όπου αποτελεί την ελάχιστη τιμή όταν στο ίδιο πρόβλημα εφαρμόστηκε ο γενετικός αλγόριθμος. Άλλο κριτήριο διακοπής είναι ο χρόνος υπολογισμού, όπου σαν μέγιστος χρόνος τέθηκαν οι 12 ώρες. Τέλος, ένα άλλο κριτήριο είναι ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων, που τέθηκε ίσος με 300.

Οι καμπύλες βελτιστοποίησης για κάθε πείραμα φαίνονται στο Σχήμα 3.11(a-d). Στο πείραμα 1 η τελική τιμή κόστους βρέθηκε ότι ήταν υψηλή ($C_{LT}=8047$). Η μεταβολή στο συνολικό κόστος ανά επανάληψη ήταν ακόμα μεγάλη όταν ο αλγόριθμος έφτασε το μέγιστο αριθμό επαναλήψεων. Η λύση απέιχε πολύ από τη βέλτιστη. Για το πείραμα 2, η πιθανότητα αποδοχής μειώνεται γρήγορα (γρήγορη ψύξη). Η βελτιστοποίηση τότε ήταν τοπική. Ο χρόνος υπολογισμού αυξάνεται από τη μία επανάληψη στην άλλη. Ο αλγόριθμος σταμάτησε στις 143 επαναλήψεις φτάνοντας στο μέγιστο χρόνο υπολογισμού. Το τελικό κόστος ήταν 7942.

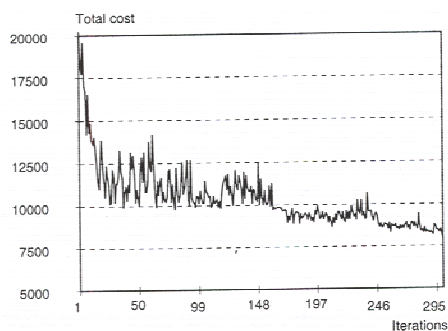
Στο πείραμα 3, μια χαμηλή αρχική θερμοκρασία χρησιμοποιήθηκε με έναν αργό ρυθμό ψύξης. Αναμενόταν λοιπόν ότι το πρόβλημα υψηλής διαταραχής και τοπικής βελτιστοποίησης που παρατηρήθηκε στα προηγούμενα πειράματα θα λύνονταν. Από τις καμπύλες βελτιστοποίησης, η βελτίωση της απόδοσης πιστοποιείται. Ο αλγόριθμος άρχισε με μία υψηλή διαταραχή, η οποία σταδιακά μειώθηκε έως ότου φτάσει σχεδόν στο μηδέν. Το ελάχιστο κόστος βρέθηκε ότι ήταν $C_{LT} = 7690$. Η διαδικασία σταμάτησε όταν φτάσαμε στο μέγιστο αριθμό επαναλήψεων.

Στο τέταρτο πείραμα, η βελτιστοποίηση σταμάτησε σε ένα τοπικό βέλτιστο. Το πείραμα σταμάτησε στην επανάληψη 196 μετά από 12 ώρες υπολογισμού. Το χαμηλότερο συνολικό κόστος βρέθηκε ότι ήταν $C_{LT}=7846$.

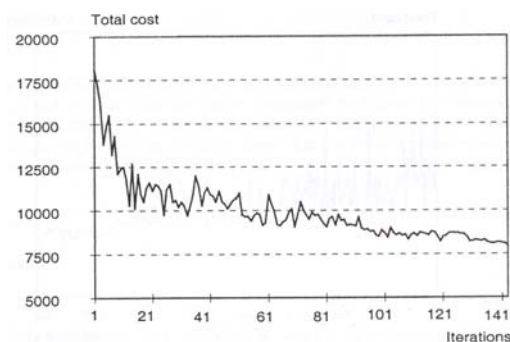
Η ακολουθία αυτή των πειραμάτων δείχνει το πόσο σημαντική είναι η σωστή επιλογή των παραμέτρων ελέγχου κατά την εφαρμογή του Simulated Annealing. Στο πείραμα 3, όπου χρησιμοποιήσαμε μία χαμηλή αρχική θερμοκρασία και χαμηλό ρυθμό ψύξης, πήραμε τα καλύτερα αποτελέσματα για το πρόβλημα. Ο Πίνακας 3.5 παρουσιάζει τα καλύτερα αποτελέσματα που βρέθηκαν για τον SA και, για σύγκριση, παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα της μεθόδου του Gunasekaran. [Gunasekaran et al. 1995].

Πίνακας 3.5

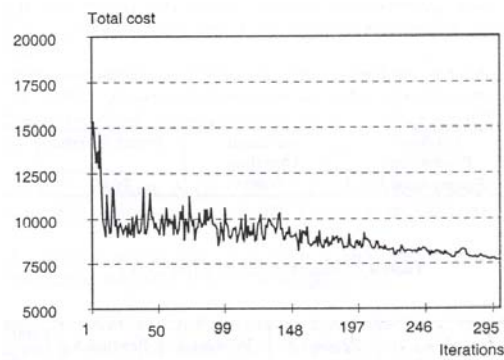
Lot-Size Production	Simulated annealing	Direct search
Πείραμα 3	7690	7947



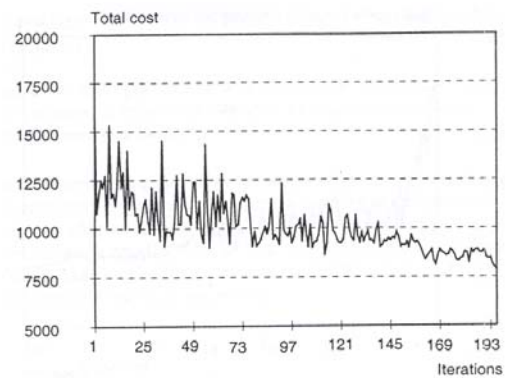
(a) Experiment 1



(b) Experiment 2



(c) Experiment 3



(d) Experiment 4

Σχήμα 3.11 Καμπύλες βελτιστοποίησης για το πρόβλημα ποσότητας – μεγέθους παραγωγής

3.4 Περίληψη

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράψαμε τρεις εφαρμογές της μεθόδου simulated annealing. Η πρώτη ήταν στο πρόβλημα βέλτιστης ευθυγράμμισης των Laser chip και οπτικών ινών. Η δεύτερη και η τρίτη εφαρμογή είχαν σχέση με τα προβλήματα κατανομής και ακολουθίας σταθμών επιθεώρησης και βέλτιστης παραγωγής ποσότητας – μεγέθους αντίστοιχα. Και στις τρεις περιπτώσεις τα αποτελέσματα που πετύχαμε συγκρίθηκαν με αποτελέσματα κάποιων περισσότερο συμβατικών μεθόδων βελτιστοποίησης.

4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΓΙΑ ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΑΝΑΘΕΣΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ HIPERLAN2

4.1 Απαραίτητες πληροφορίες και παραδοχές

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο τα συστήματα HIPERLAN2 χρησιμοποιούν ένα σχήμα δυναμικής επιλογής συχνότητας (DFS) αφού η ανάγκη κοινής χρήσης του φάσματος απαιτεί δυναμική προσαρμογή στις εκάστοτε τοπικές συνθήκες παρεμβολών. Το σχήμα δυναμικής επιλογής συχνότητας χρησιμοποιεί ως είσοδο μετρήσεις συγκεκριμένων μεγεθών του υπό διαχείριση δικτύου, ενώ οι παραδοχές και οι απαιτήσεις πάνω στις οποίες βασίζεται παρουσιάζονται παρακάτω:

- Το σύνολο των κυψελών (AP), για το οποίο πρέπει να οριστεί μια καινούργια κατανομή συχνοτήτων είναι V . Σε ορισμένες περιπτώσεις είναι δυνατόν να περιληφθούν όλες οι κυψέλες N ($V \subseteq N$) οι οποίες ανήκουν στο δίκτυο. Η θέση του κάθε AP ως προς κάποιο αυθαίρετο σύστημα συντεταγμένων θα είναι γνωστή.
- Το σύνολο των διαθέσιμων συχνοτήτων είναι F . Για να συμβολίσουμε καθεμία από τις διαθέσιμες συχνότητες χρησιμοποιούμε διαδοχικούς θετικούς ακέραιους $1,2,3,4,\dots,F$. Όπως γνωρίζουμε το σύνολο των διαθέσιμων συχνοτήτων είναι 19. Παρ' όλα αυτά το πιθανότερο είναι ότι δεν θα είναι διαθέσιμες όλες οι συχνότητες άλλα ένα υποσύνολο αυτών. Το γεγονός αυτό ενδέχεται να καθορίζεται από συγκεκριμένες συνθήκες στην περιοχή εξυπηρέτησης, όπως για παράδειγμα ο επιμερισμός των συχνοτήτων σε πολλούς διαχειριστές ή η δέσμευση ενός αριθμού συχνοτήτων για άλλα συστήματα όπως είναι τα ραντάρ.
- Για κάθε μία από τις κυψέλες v ($v \in V$) θα πρέπει να πραγματοποιήσουμε τον υπολογισμό παρεμβολών περιβάλλοντος (background interference) για κάθε συχνότητα f ($f \in F$), οι οποίες συμβολίζονται με $i_b(v,f)$. Οι παρεμβολές αυτές ενδέχεται να προκαλούνται από άλλα δίκτυα HIPERLAN2, από άλλα δίκτυα που λειτουργούν στην ίδια (χωρίς άδεια) ζώνη συχνοτήτων, ή τις κυψέλες του συνόλου $N-V$. Επιπροσθέτως έχουμε ανεξαρτησία των

παρεμβολών περιβάλλοντος από την επικείμενη ανάθεση συχνοτήτων στο σύνολο των κυψελών V .

- Κάθε κυψέλη v ($v \in V$) έχει καθορισμένες απαιτήσεις στη δεδομένη χρονική στιγμή στην οποία θα πραγματοποιηθεί η ανάθεση των συχνοτήτων. Οι απαιτήσεις αυτές μπορούν να εκφραστούν σε όρους εύρους ζώνης $b(v)$, ή της μέγιστης επιτρεπτής συνολικής παρεμβολής $i_{max}(v)$, ή του ελάχιστου λόγου σήματος προς παρεμβολές που απαιτείται $sir_{min}(v)$. Οι απαιτήσεις αυτές που προαναφέρθηκαν αναφέρονται στην τρέχουσα κατάσταση του δικτύου, ή, στα πλαίσια της λειτουργίας των ασύρματων δικτύων WLAN ως εναλλακτικών τεχνολογιών πρόσβασης, ενδέχεται να περιλαμβάνουν και τις αναμενόμενες απαιτήσεις όπως αυτές προβλέπονται στην ετερογενή περιοχή εξυπηρέτησης. Στην περίπτωση αυτή οι απαιτήσεις στην περιοχή εξυπηρέτησης θα προκύψουν σαν αποτέλεσμα άθροισης της αναμενόμενης και της τρέχουσας τηλεπικοινωνιακής κίνησης.

Πέρα από τις παρεμβολές περιβάλλοντος, υπάρχει μία συνάρτηση, $a_c(v_1, v_2, k)$ ($0 \leq k \leq |F|$), για κάθε ζευγάρι κυψελών (v_1, v_2) ($(v_1, v_2) \in V^2$), ή οποία παρέχει τις παρεμβολές που προκαλούνται στην κυψέλη v_1 από την κυψέλη v_2 σε περίπτωση που τους ανατεθούν συχνότητες με απόσταση k . Οι πλέον πιθανές τιμές στις οποίες θα περιοριστεί το k θα είναι το 0 και το 1. Οι τιμές αυτές όπως είναι λογικό θα αντιστοιχούν στις ομοδιαυλικές ή γειτονικού καναλιού παρεμβολές, οι οποίες προκαλούνται σε περίπτωση όπου οι κυψέλες v_1 και v_2 χρησιμοποιούν ίδιες ή γειτονικές συχνότητες αντίστοιχα.

Έστω ότι έχουμε ένα πραγματικό δίκτυο HIPERLAN2. Τότε οι παρεμβολές για κάθε συχνότητα f θα ταυτίζονται με το μετρούμενο σήμα RSS στη συχνότητα αυτή, όπως αυτό υπολογίζεται σύμφωνα με τη διαδικασία που προδιαγράφεται από την ETSI. Σε περίπτωση υλοποίησης του αλγορίθμου με χρήση λογισμικού, ο υπολογισμός των τιμών των παρεμβολών πραγματοποιείται θεωρώντας μια ισχύ εκπομπής αναφοράς, ένα πρότυπο διάδοσης καθώς επίσης και τη δομή της περιοχής εξυπηρέτησης. Στην υπό μελέτη περίπτωση ο αλγόριθμος Δυναμικής επιλογής συχνότητας (Dynamic Frequency Selection) θα υλοποιηθεί με τη βοήθεια λογισμικού.

Στις επόμενες ενότητες και σύμφωνα με όσα έχουν αναφερθεί μέχρι τώρα, θα δοθεί μια μαθηματική διατύπωση του προβλήματος της ανάθεσης των συχνοτήτων. Επιπλέον θα ακολουθήσει ο αλγόριθμος επίλυσης του εν λόγω προβλήματος στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

4.2 Μαθηματική διατύπωση του προβλήματος της ανάθεσης συχνοτήτων

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα τα οποία αφορούν τη λειτουργία και το σχεδιασμό των συστημάτων κινητών τηλεπικοινωνιών αποτελεί η ανάθεση συχνοτήτων στις κυψέλες (channel assignment problem). Το πρόβλημα αυτό μπορεί μαθηματικά να θεωρηθεί ως ένα καθαρά πρόβλημα βελτιστοποίησης με διακριτές λύσεις και κάποιους περιορισμούς (combinatorial optimization). Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 2.4, για την επίλυση του εν λόγω προβλήματος είναι δυνατόν να ακολουθήσουμε πολλές προσεγγίσεις και συνεπώς μεγάλος αριθμός μοντέλων μπορεί να βρεθεί στην βιβλιογραφία. Επομένως θα μπορούσε κανείς να θεωρήσει την ανάθεση συχνοτήτων σαν μια κλάση προβλημάτων και όχι σαν ένα απλό πρόβλημα.

Μια τυπική προσέγγιση η οποία χρησιμοποιείται στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής, αποτελεί η χρησιμοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης (objective function) η οποία απεικονίζει τα επίπεδα των παρεμβολών στο σύστημα. Η συνάρτηση αυτή καλείται να βελτιστοποιήσει σε ικανοποιητικό βαθμό το σχήμα επιλογής συχνοτήτων, και αποτελείται από ένα σταθμισμένο άθροισμα (weighted sum). Κάθε ένας όρος της συνάρτησης συντίθεται από τα εξής :

- Επίπεδο παρεμβολών σε κάθε κυψέλη, ως αποτέλεσμα της κατανομής συχνοτήτων.
- Έναν παράγοντα στάθμισης στον οποίο εκτίθεται η σημασία της κυψέλης, από την άποψη της τηλεπικοινωνιακής κίνησης που καλείται να αντιμετωπίσει η κυψέλη αυτή.

Σαν εναλλακτική λύση ο παράγοντας στάθμισης θα μπορούσε να εξαρτάται από οποιοδήποτε μέγεθος έχουμε σαν σκοπό να ελαχιστοποιήσουμε. Για να γίνει αυτό πιο κατανοητό αναφέρουμε σαν παράδειγμα την εγκατάσταση ενός δικτύου HIPERLAN2 σε μια γειτονική περιοχή με εγκαταστάσεις συστημάτων ραντάρ. Στην περίπτωση

αυτή ενδιαφερόμαστε για την ελαχιστοποίηση των παρεμβολών στα συστήματα αυτά, οπότε ο παράγοντας στάθμισης για κάθε κυψέλη θα μπορούσε να ληφθεί ίσος ή ανάλογος με την απόσταση των εγκαταστάσεων των ραντάρ από το σημείο πρόσβασης της κυψέλης. Ο τρόπος αυτός που περιγράψαμε παρέχει τη δυνατότητα σ' έναν διαχειριστή του ασύρματου δικτύου HIPERLAN2 να χρησιμοποιήσει ένα ευέλικτο σχήμα επιλογής συχνότητας, που προσαρμόζεται τόσο στις απαιτήσεις της περιοχής εξυπηρέτησης όσο και στις απαιτήσεις του ίδιου του διαχειριστή.

Το σχήμα επιλογής συχνοτήτων έχει σαν βασικό στόχο την εύρεση μιας κατανομής διαθέσιμων συχνοτήτων στα σημεία πρόσβασης των κυψελών AP $A_{CAP} = \{f_{AP}(v) | \forall v \in V\}$, όπου $f_{AP}(v) (f_{AP}(v) \in F)$ είναι η συχνότητα όπου έχουμε αναθέσει στην κυψέλη v . Ταυτόχρονα με την κατανομή των συχνοτήτων στόχος μας είναι και η ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης όπως αυτή ορίστηκε παραπάνω.

Οι συνολικές παρεμβολές οι οποίες γίνονται αισθητά αντιληπτές από την κυψέλη v για μία διαθέσιμη συχνότητα $f_{AP}(v)$ συμβολίζονται με $I_{CAP}(v, f_{AP}(v))$. Στις παρεμβολές αυτές συμπεριλαμβάνονται τόσο οι παρεμβολές περιβάλλοντος όσο και οι παρεμβολές από όλες τις άλλες περιοχές της περιοχής εξυπηρέτησης την οποία εξετάζουμε, όπως αυτές διαμορφώνονται μετά από την ανάθεση των συχνοτήτων. Η ολική μέγιστη ανεκτή παρεμβολή συμβολίζεται ως i_{max} . Οι εξισώσεις που παριστάνουν τη μαθηματική διατύπωση του προβλήματος ανάθεσης των συχνοτήτων παρουσιάζονται παρακάτω :

$$OF_{CAP}(A_{CAP}) = \sum_{v \in V} w(v) \cdot I_{CAP}(v, f_{AP}(v)) \quad (4.1)$$

$$I_{CAP}(v, f_{AP}(v)) = i_b(v, f_{AP}(v)) + \sum_{u \in V} a_c(v, u, |f_{AP}(v) - f_{AP}(u)|) \forall v \in V \quad (4.2)$$

$$I_{CAP}(v, f_{AP}(v)) \leq i_{max}(v) \quad \forall v \in V \quad (4.3)$$

Η σχέση (4.1) παριστάνει την αντικειμενική συνάρτηση η οποία υπολογίζει τις συνολικές παρεμβολές του συστήματος, και σκοπός μας είναι να την ελαχιστοποιήσουμε. Οι σχέσεις (4.2) και (4.3) αποτελούν τους περιορισμούς (συνθήκες) τους οποίους οφείλουμε να λάβουμε υπ' όψιν για την ορθή αντιμετώπιση

του προβλήματος. Οι συντελεστές $w(v)$ αντιπροσωπεύουν τους συντελεστές βαρύτητας και είναι ανάλογοι προς το προσφερόμενο φορτίο ανά κυψέλη. Ο τύπος σύμφωνα με τον οποίο συμβολίζονται τα $w(v)$ είναι :

$$w(v) = b(v) \left(\sum_{u \in V} b(u) \right)^{-1} \quad (4.4)$$

όπου με $b(v)$ συμβολίζουμε το εύρος ζώνης της κυψέλης v , ενώ ο συμβολισμός $w(v) = b(v) \left(\sum_{u \in V} b(u) \right)^{-1}$, παριστάνει το συνολικό διατιθέμενο εύρος ζώνης του συστήματος. Ανάλογα με τις απαιτήσεις του εκάστοτε διαχειριστή του δικτύου καθώς επίσης και τις επικρατούσες συνθήκες, υπάρχουν πολλές δυνατές προσεγγίσεις για τον καθορισμό των συντελεστών $w(v)$.

4.3 Αλγόριθμος επίλυσης του προβλήματος ανάθεσης των συχνοτήτων, με βάση τη μέθοδο βελτιστοποίησης *simulated annealing*

Ύστερα από την πλήρη περιγραφή του μαθηματικού μοντέλου για την επίλυση του προβλήματος της ανάθεσης των συχνοτήτων, στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η περιγραφή ενός ευριστικού αλγόριθμου στηριζόμενου στην μέθοδο *simulated annealing* (περισσότερα για τη μέθοδο στο κεφάλαιο 3). Ο αλγόριθμος αυτός θα υλοποιηθεί με τη βοήθεια λογισμικού, και σαν στόχο θα έχει την όσο καλύτερη αντιμετώπιση του προβλήματος βελτιστοποίησης το οποίο εξετάζουμε.

4.3.1 Εισαγωγή

Όταν γενικά καλούμαστε να αντιμετωπίσουμε κάποιο πρόβλημα βελτιστοποίησης, θεωρείται δεδομένο ότι θα πρέπει να λάβουμε υπ' όψιν μας αρκετές παραμέτρους. Αυτό θα μας βοηθήσει να αντιμετωπίσουμε το πρόβλημα, λαμβάνοντας ικανοποιητικά αποτελέσματα σε κάποια ανεκτά χρονικά όρια. Θα πρέπει λοιπόν να φροντίζει κανείς ώστε να υπάρχει δυνατότητα εφαρμογής της μελέτης του στην πραγματικότητα (καλά αποτελέσματα μέσα σε κάποια χρονικά όρια).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μια προσπάθεια προσαρμογής της μεθόδου SA (*simulated annealing*) ώστε να πετύχουμε μια όσο το δυνατόν καλύτερη

ανάθεση συχνοτήτων σε ασύρματο δίκτυο HIPERLAN2, ελαχιστοποιώντας παράλληλα και την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης (objective function, OF), η οποία παρουσιάστηκε προηγουμένως. Όπως θα δούμε και παρακάτω σημαντικό ρόλο στην γρήγορη σύγκλιση παίζει η επιλογή της αρχικής ανάθεσης την οποία και θα χρησιμοποιήσουμε σαν είσοδο (input). Επιπλέον μεγάλη σημασία έχει η επιλογή του γενετικού μηχανισμού με βάση τον οποίο παράγονται οι γειτονικές λύσεις (neighbors), καθώς επίσης και ο κανόνας μεταβολής της θερμοκρασίας (update rule).

Μεταβάλλοντας λίγο την κατανομή των συχνοτήτων με τον γενετικό μηχανισμό που θα δούμε παρακάτω προσπαθούμε να προσεγγίσουμε μέσα σε κάποιο συγκεκριμένο αριθμό επαναλήψεων την βέλτιστη λύση. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται πέρα από την περιγραφή των βασικών βημάτων του αλγορίθμου, τα αποτελέσματα για συγκεκριμένες δομές εξυπηρέτησης. Συγκεκριμένα θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για συστήματα τα οποία έχουν 36 κυψέλες, ενώ ο συντελεστής επαναχρησιμοποίησης συχνότητας K μπορεί να είναι ίσος με 8, 10, η 12.

4.3.2 Υπόβαθρο

Το πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής συχνοτήτων σε ασύρματα δίκτυα αποτελεί ένα πολυσυζητημένο θέμα στο ανάπτυξης τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Για να καταφέρει κάποιος να αντιμετωπίσει το πρόβλημα πρέπει να κατανοήσει σε ικανοποιητικό βαθμό τη δομή των κυψελωτών συστημάτων τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως στον ευρύτερο χώρο των επικοινωνιών σήμερα.

Τα κυψελωτά συστήματα μπορούν να θεωρηθούν, ως η παλαιότερη μορφή των ασύρματων προσωπικών επικοινωνιών. Πέραν των άλλων επιτρέπουν σε κάθε συνδρομητή να πραγματοποιεί και να δέχεται τηλεφωνικές κλήσεις μέσω του τηλεφωνικού δικτύου στα μέρη που παρέχεται κυψελωτή κάλυψη. Οι δυνατότητες περιαγωγής (roaming) επεκτείνουν την παροχή υπηρεσίας σε χρήστες οι οποίοι βρίσκονται σε περιοχές έξω από την "οικεία" περιοχή εξυπηρέτησης. Στα κυψελωτά συστήματα πρώτης γενιάς χρησιμοποιείται αναλογική διαμόρφωση συχνότητας για τη μετάδοση της φωνής και μεταλλαγή μετατόπισης συχνότητας (FSK) για την σηματοδότηση. Επιπροσθέτως διαφορετικές κλήσεις χρησιμοποιούν διαφορετικές συχνότητες (διαίρεση συχνότητας).

Το κύριο χαρακτηριστικό το οποίο διακρίνει τα κυψελωτά συστήματα από τα προγενέστερα ραδιοσυστήματα κινητών επικοινωνιών, αποτελεί η χρήση πολλών σταθμών βάσης με σχετικά μικρές ακτίνες κάλυψης που κυμαίνονται γύρω στα 10 χιλιόμετρα ή και λιγότερο. Πολλές κυψέλες είναι δυνατόν να κάνουν χρήση της ίδιας συχνότητας (ομοδιαυλικές κυψέλες). Η επαναχρησιμοποίηση αυτή των συχνοτήτων συνεπάγεται πολύ υψηλότερη πυκνότητα συνδρομητών ανά MHz φάσματος σε σχέση με τα προηγούμενα συστήματα. Επιπλέον μπορούμε να περιορίσουμε ακόμα τη χωρητικότητα του συστήματος αν περιορίσουμε το μέγεθος της κυψέλης σε ακτίνα της τάξεως του 0.5 km. Η προσέγγιση αυτή καθιστά δυνατή τη χρησιμοποίηση μικρών, φορητών συσκευών (κινητά τερματικά) οι οποίες λειτουργούν με μπαταρία και με χαμηλότερη ισχύ εκπεμπόμενης ραδιοσυχνότητας, σε αντίθεση με τις μεγάλες συσκευές αυτοκινήτου που χρησιμοποιούνταν στα παλαιότερα συστήματα. Να αναφέρουμε ακόμα ότι η πραγματοποίηση του φαινομένου της διαπομπής μας βοηθάει να επιτύχουμε συνεχή κάλυψη.

Η ανάπτυξη τεχνικών κωδικοποίησης της ομιλίας με χαμηλό ρυθμό μετάδοσης στις μέρες μας, καθώς επίσης και η συνεχής εξέλιξη της τεχνολογίας των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων έχουν συντελέσει στην πλήρη ψηφιακοποίηση των συστημάτων δεύτερης γενιάς. Η ψηφιακοποίηση αυτή εκτός από τις τεχνικές διαίρεσης συχνότητας (FDMA) υποστηρίζει και τεχνικές όπως οι TDMA και CDMA. Με την τεχνική διαίρεσης χρόνου (TDMA), κάθε ραδιοδιάυλος χωρίζεται σε πολλαπλές χρονοσχισμές, ενώ κάθε χρήστης καταλαμβάνει έναν συνδυασμό συχνότητας – χρονοσχισμής. Με τον τρόπο αυτό μόνο ένας κινητός χρήστης σε κάθε κυψέλη χρησιμοποιεί κάποια δοθείσα συχνότητα οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Η τεχνική CDMA, χρησιμοποιεί μια τεχνική εξάπλωσης άμεσης ακολουθίας (discrete sequence spreading). Μια συχνότητα χρησιμοποιείται ταυτόχρονα από πολλά κινητά τερματικά σε δοθείσα κυψέλη και τα σήματα διαχωρίζονται εξαπλώνοντάς τα με διαφορετικούς κώδικες. Ένα από τα πλεονεκτήματα των μεθόδων CDMA και TDMA αποτελεί ο καταμερισμός του λογισμικού και του υλικού του σταθμού βάσης σε πολλαπλούς χρήστες.

Τα ψηφιακά συστήματα έχουν τη δυνατότητα να υποστηρίξουν περισσότερους χρήστες ανά σταθμό βάσης και ανά MHz φάσματος, επιτρέποντας έτσι στους τηλεπικοινωνιακούς φορείς να παρέχουν πιο οικονομικά υπηρεσίες σε

πυκνοκατοικημένες περιοχές. Η χρήση των αρχιτεκτονικών TDMA και CDMA προσφέρουν επιπλέον πλεονεκτήματα όπως :

- Ευελιξία για μικτές επικοινωνίες φωνής και δεδομένων και για την υποστήριξη νέων υπηρεσιών.
- Φυσικότερη ολοκλήρωση με το ενσύρματο δίκτυο.
- Απόκρυψη για ασφάλεια των επικοινωνιών.
- Περιορισμένη πολυπλοκότητα του συστήματος.
- Περιορισμένη ισχύς μετάδοσης.
- Δυνατότητα για περαιτέρω αυξήσεις της χωρητικότητας, με την εισαγωγή κωδικοποιητών ομιλίας με περιορισμένους ρυθμούς μετάδοσης.

Στις μέρες μας λειτουργούν κυψελωτά συστήματα δεύτερης γενιάς που βασίζονται στη ψηφιακή μετάδοση.

Στην επικοινωνία μεταξύ δύο ακίνητων πομποδεκτών με σύνδεση σημείου προς σημείο, ο κύριος παράγοντας που επηρεάζει την ποιότητα της επικοινωνίας είναι ο θόρυβος που προέρχεται από τον άνθρωπο. Στην περίπτωση αυτή οι πομποδέκτες αποτελούν ένα επικοινωνιακό περιβάλλον, το οποίο περιορίζεται μόνο από τον θόρυβο. Στην περίπτωση όπου έχουμε κίνηση των δύο πομποδεκτών, η ποιότητα της επικοινωνίας επηρεάζεται και από τις διαλείψεις λόγω πολλαπλών διαδρομών. Οι απαιτήσεις εύρους ζώνης για τα διάφορα είδη διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται, είναι δυνατόν να περιοριστούν σε σχετικά χαμηλές τιμές, ανάλογα με την εκπεμπόμενη ισχύ ή το μήκος της επικοινωνιακής ζεύξης.

Έστω ότι έχουμε πολλούς πομποδέκτες σε κάποια περιοχή, οι οποίοι επικοινωνούν μεταξύ τους και μερικοί από αυτούς χρησιμοποιούν διαύλους της ίδιας συχνότητας, ενώ άλλοι χρησιμοποιούν διαύλους με παραπλήσιες συχνότητες. Τότε θα έχουμε ένα επικοινωνιακό περιβάλλον, όπου ο κύριος παράγοντας ο οποίος καθορίζει την ποιότητα της ζεύξης είναι οι παρεμβολές. Οι συνθήκες που περιγράφηκαν για περιβάλλον το οποίο περιορίζεται από θόρυβο ισχύουν κι εδώ με επιπρόσθετο στοιχείο τις παρεμβολές, λόγω ύπαρξης διαύλων της ίδιας ή παραπλήσιας συχνότητας σε μια ευρεία γεωγραφική περιοχή.

Οι παρεμβολές αποτελούν τον κυριότερο περιοριστικό παράγοντα που επηρεάζει την επίδοση των κυψελωτών συστημάτων κινητών επικοινωνιών. Υπάρχουν αρκετές πηγές παρεμβολών, όπως είναι ένα άλλο κινητό στην ίδια κυψέλη, μια κλήση που εξελίσσεται σε γειτονική κυψέλη, άλλοι σταθμοί βάσης που λειτουργούν στην ίδια ζώνη συχνοτήτων, ή οποιοδήποτε μη - κυψελωτό σύστημα που από αμέλεια εισάγει ενέργεια στην ζώνη συχνοτήτων του κυψελωτού συστήματος. Σε έναν διάλογο ομιλίας η παρεμβολή προκαλεί διαφωνία. Πιο συγκεκριμένα ο χρήστης ακούει κάποια άλλη συνομιλία στο βάθος, εξ' αιτίας κάποιας ανεπιθύμητης μετάδοσης. Όπως είναι φυσιολογικό στις αστικές περιοχές οι παρεμβολές είναι πιο σοβαρές, λόγω του μεγαλύτερης στάθμης θορύβου RF και του μεγάλου αριθμού σταθμών βάσης και κινητών. Οι παρεμβολές αυτές αποτελούν μεγάλο εμπόδιο στην αύξηση της χωρητικότητας και είναι η συνήθης αιτία απόρριψης κλήσεων. Τα δύο σημαντικότερα είδη παρεμβολών που προέρχονται από τα κυψελωτά συστήματα, είναι η ομοδιαυλική παρεμβολή και η παρεμβολή γειτονικών διαύλων.

Τα σήματα που παρεμβάλλουν παράγονται συχνά, όπως είδαμε, μέσα στα κυψελωτά συστήματα. Παρ' όλα αυτά είναι δύσκολο να ελεγχθούν στην πράξη, λόγω των τυχαίων φαινομένων διάδοσης. Εξαιρετικά δύσκολος είναι και ο έλεγχος των παρεμβολών που οφείλονται σε χρήστες εντός ζώνης, αφού οι ανταγωνιστές τοποθετούν συχνά τους σταθμούς βάσης σε παραπλήσιες θέσεις για να παρέχουν συγκριτικά παρόμοια κάλυψη στους χρήστες τους.

4.3.3 Αρχική ανάθεση συχνοτήτων

Η αρχική ανάθεση συχνοτήτων παίζει έναν πολύ σημαντικό ρόλο όσον αφορά τη σύγκλιση της μεθόδου simulated annealing όπως αναφέρθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο. Για να βγάλουμε κάποια επαρκή συμπεράσματα σε σχέση με την αποδοτικότητα του αλγορίθμου που εξετάζουμε λαμβάνουμε ως αρχική ανάθεση (input) την έξοδο ενός άλλου ευριστικού αλγορίθμου ο οποίος υλοποιήθηκε από τον διδάκτορα μηχανικό Αντώνη Οικονόμου στα πλαίσια της διδακτορικής του διατριβής.

Οι αναθέσεις αυτές παρουσιάζονται στο παράρτημα, περιλαμβάνουν διαφορετικό αριθμό διαθέσιμων συχνοτήτων (από 8 έως 12), ενώ για κάθε αριθμό των συχνοτήτων αυτών εξετάζουμε είτε την περίπτωση ομοιόμορφης κατανομής της κίνησης, είτε την περίπτωση κίνησης αυξημένης στο κέντρο του κυψελωτού συστήματος. Εάν ακόμη

δώσουμε μια τυχαία αρχική ανάθεση συχνοτήτων, φυσιολογικό είναι να παρατηρήσουμε μία απότομη βελτίωση της αντικειμενικής συνάρτησης. Κι αυτό γιατί στην περίπτωση αυτή η αρχική κατανομή των συχνοτήτων δεν στηρίζεται σε καμία κατανομή με λογικό επακόλουθο μια μεγάλη τιμή παρεμβολών η οποία κατά τη διάρκεια του αλγορίθμου μειώνεται διαρκώς μέχρι να σταθεροποιηθεί τελικά μετά από έναν πολύ μεγάλο αριθμό επαναλήψεων (μεγάλος χρόνος σύγκλισης).

4.3.4 Περιγραφή του γενετικού μηχανισμού (generation mechanism) και κρυσταλλική δομή

Στηριζόμενοι πάντα στη μέθοδο βελτιστοποίησης simulated annealing σκοπός μας είναι η δημιουργία "γειτονικών λύσεων" οι οποίες θα ικανοποιούν το Metropolis's κριτήριο, δηλαδή θα μεταβάλλουν ελάχιστα την κατάσταση του συστήματος μειώνοντας παράλληλα την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης η οποία θα παριστάνει την ενέργεια του συστήματος. Η εν λόγω υλοποίηση του γενετικού μηχανισμού στηρίζεται στα παρακάτω βήματα :

- Εφόσον έχουμε μία ανάθεση συχνοτήτων ως είσοδο και έχουμε υπολογίσει την αντικειμενική συνάρτηση για την ανάθεση αυτή, διαλέγουμε τυχαία μία από τις κυψέλες του συστήματός μας και διαβάζουμε την συχνότητα η οποία της έχει ανατεθεί.
- Στη συνέχεια κάνουμε swap τη συχνότητα της κυψέλης που επιλέξαμε με την συχνότητα της πρώτης κυψέλης του συστήματος και υπολογίζουμε την αντικειμενική συνάρτηση για τη νέα αυτή ανάθεση συχνοτήτων. Σε περίπτωση όπου η νέα αντικειμενική συνάρτηση δεν ικανοποιεί το Metropolis criterion τότε η προηγούμενη αντιστροφή συχνοτήτων ακυρώνεται και δοκιμάζουμε swap της συχνότητας της τυχαίας κυψέλης με τη συχνότητα της δεύτερης κυψέλης. Η διαδικασία ακολουθείται έως ότου μετά την εκτέλεση κάποιας αντιστροφής συχνοτήτων έχουμε βελτίωση της αντικειμενικής συνάρτησης με παράλληλη ικανοποίηση του κριτηρίου. Τότε χρησιμοποιούμε τη νέα ανάθεση ως τρέχουσα λύση, και επιλέγουμε στη συνέχεια μία τυχαία κυψέλη για την εκτέλεση της επόμενης επανάληψης.
- Στην περίπτωση όπου κατά τη διάρκεια μιας επανάληψης δεν έχουμε για κανένα swap ικανοποίηση του Metropolis criterion, συνεχίζουμε με την

εφαρμογή των παραπάνω βημάτων για μία άλλη τυχαία κυψέλη του συστήματός μας.

Ύστερα από ένα συγκεκριμένο αριθμό επαναλήψεων που χρησιμοποιείται ως κριτήριο διακοπής σταματά η παραγωγή νέων λύσεων και ως βελτιστοποιημένη λύση λαμβάνεται η τελευταία ανάθεση συχνοτήτων.

Όσον αφορά την κρυσταλλική δομή, αυτή μπορεί να διευθετηθεί σύμφωνα με τις απαιτήσεις του προβλήματος. Το κριτήριο του Metropolis (3.2) γίνεται όλο και περισσότερο αυστηρό σε περίπτωση γρήγορης ψύξης (γρήγορης μείωσης του T). Τέτοιες περιπτώσεις συναντάμε σε κανόνες ψύξης όπως π.χ $T=0.95T$. Αντίθετα σε περίπτωση όπου έχουμε κανόνες ψύξης όπως $T=0.99T$ ή $T=0.995T$ τότε έχουμε καλύτερη προσέγγιση της κρυσταλλικής δομής μετά από μεγάλο αριθμό επαναλήψεων. Κι αυτό γιατί όπως έχουμε αναφέρει στο πρώτο κεφάλαιο, σε περίπτωση όπου έχουμε γρήγορη μείωση του T , τότε σε αντιστοιχία με την θεωρία στην οποία στηρίζεται η μέθοδος simulated annealing πιθανότατα θα φτάσουμε σε κάποιο τοπικό ελάχιστο και δεν θα προσεγγίσουμε την κρυσταλλική δομή (rapid quenching).

Θα πρέπει βέβαια να αναφέρουμε πως μέσα σε παραδεκτά όρια χρόνου σκοπός ενός προγράμματος βελτιστοποίησης είναι να πλησιάσει όσο το δυνατόν περισσότερο μία λύση η οποία δεν θα διαφέρει πρακτικά από τη θεωρητικά βέλτιστη λύση. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούμε εξαιρετικά αργούς κανόνες ψύξης ώστε να προσεγγίσουμε μέσα σε κάποια παραδεκτά χρονικά όρια τη ζητούμενη ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής μας συνάρτησης στα πλαίσια των δυνατοτήτων του αλγορίθμου.

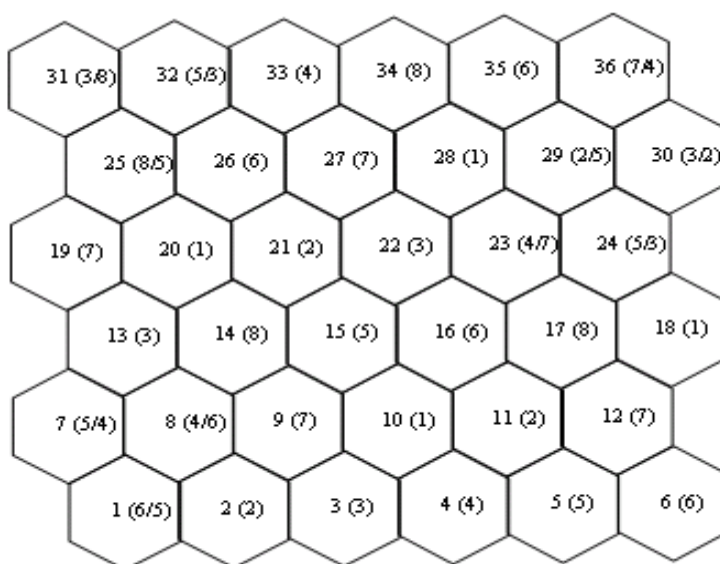
4.3.5 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζουμε σχηματικά, για διάφορες αρχικές αναθέσεις συχνοτήτων, τις αλλαγές που πραγματοποιούνται ύστερα από το τρέξιμο του αλγορίθμου που υλοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία. Στη συνέχεια με χρήση γραφικών παραστάσεων για κάθε περίπτωση παρατηρούμε την πορεία της αντικειμενικής συνάρτησης (objective function), καθώς και το ποσοστό βελτίωσης της τελικής της τιμής σε σχέση με την αρχική.

Επιπλέον θα δούμε ότι ύστερα από έναν αριθμό επαναλήψεων έχουμε σταθεροποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης, κάτι το οποίο σημαίνει ότι σύμφωνα με τις δυνατότητες του συγκεκριμένου αλγορίθμου έχουμε πετύχει τη βέλτιστη ανάθεση συχνοτήτων.

4.3.5.1 Πρώτο σενάριο αξιολόγησης

Σαν πρώτο σενάριο αξιολόγησης θεωρούμε το δίκτυο το οποίο απεικονίζεται στο Σχήμα 4.1. Στο σύστημα αυτό έχουμε 8 διαθέσιμες συχνότητες και ομοιόμορφη κατανομή όσον αφορά την κίνηση μεταξύ των κυψελών.

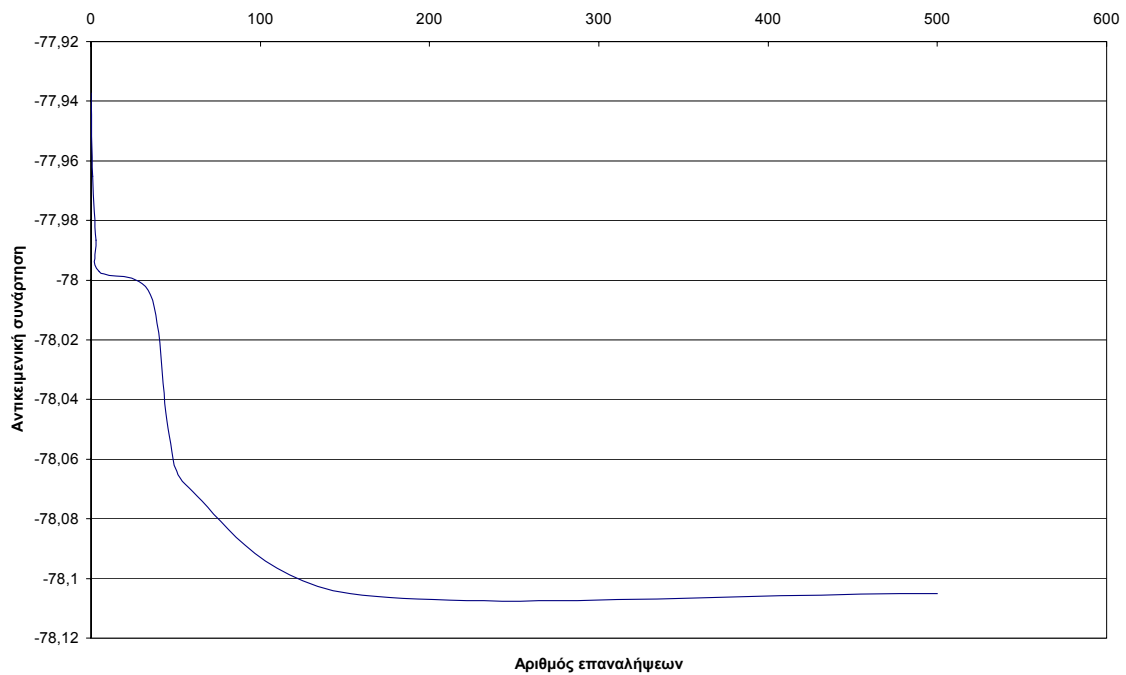


Σχήμα 4.1 Κατανομή με 8 διαθέσιμες συχνότητες και ομοιόμορφη κατανομή

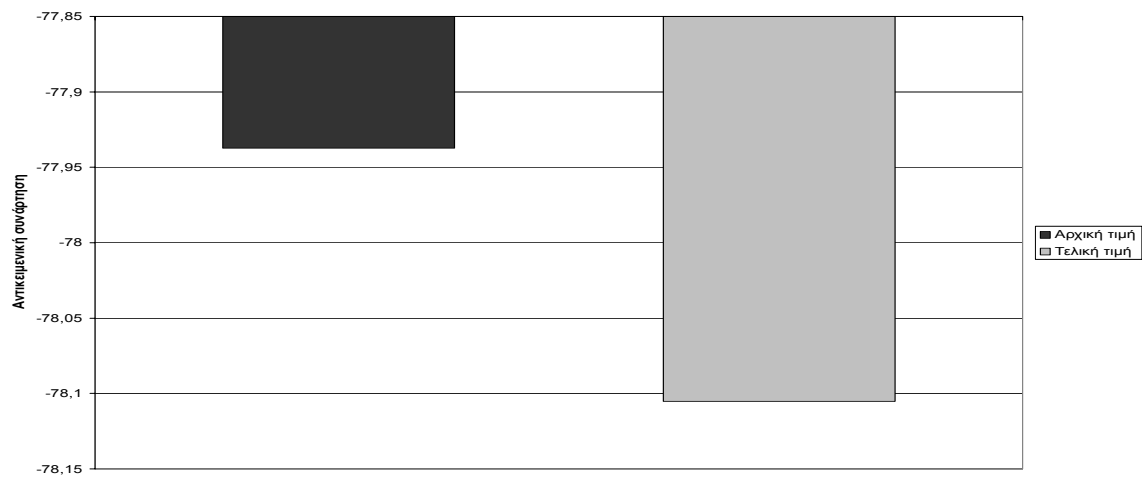
Επιπροσθέτως στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζουμε τόσο την αρχική, όσο και την τελική ανάθεση συχνοτήτων (input και output του προγράμματος). Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, το σχήμα επιλογής συχνοτήτων πραγματοποιεί επαναλήψεις για να παραγάγει μία κατανομή συχνοτήτων, η οποία οδηγεί προς την ελαχιστοποίηση της χρησιμοποιούμενης αντικειμενικής συνάρτησης.

Ο τερματισμός της διαδικασίας επιλογής συχνοτήτων θα συμβεί όταν εκτελεσθεί ο αριθμός των επαναλήψεων που έχει ορισθεί ως κριτήριο διακοπής. Για το συγκεκριμένο σενάριο έχουμε τρέξει το πρόγραμμα για 500 επαναλήψεις. Στη συνέχεια στα Σχήματα 4.2 και 4.3 παρουσιάζεται η μεταβολή της αντικειμενικής

συνάρτησης, συναρτήσει του αριθμού των επαναλήψεων, καθώς επίσης και η σύγκριση μεταξύ της αρχικής και της τελικής της τιμής.



Σχήμα 4.2 Μεταβολή της αντικειμενικής συνάρτησης συναρτήσει του αριθμού των επαναλήψεων για το πρώτο σενάριο



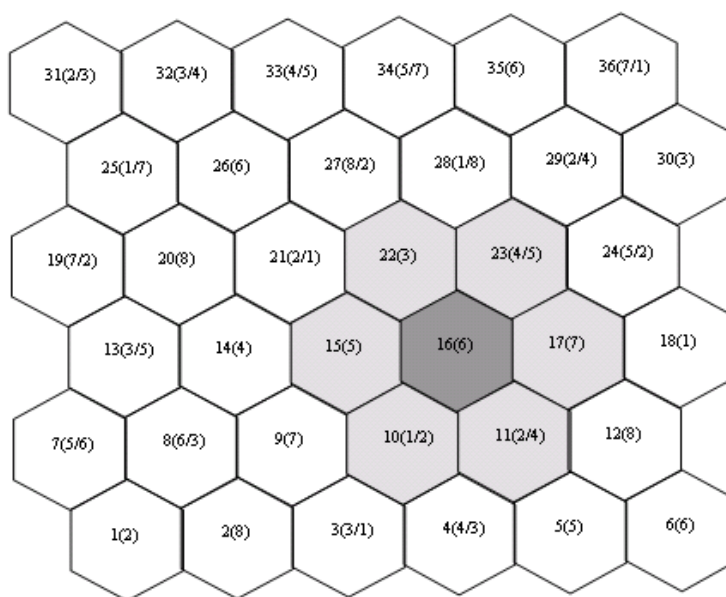
Σχήμα 4.3 Αρχική και τελική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για το πρώτο σενάριο

Παρατηρούμε ότι έχουμε ποσοστό μείωσης της αντικειμενικής συνάρτησης, υπολογιζόμενο πάντοτε συγκρίνοντας τις τιμές σε μονάδες ισχύος παρεμβολής, ίσο με 3,8%. Επιπλέον βλέπουμε μία σταθεροποίηση της τιμής της εν λόγω συνάρτησης

μετά τις 200 πρώτες επαναλήψεις, κάτι το οποίο σημαίνει ότι έχουμε πετύχει τη βέλτιστη ανάθεση σύμφωνα πάντα με τις δυνατότητες του αλγορίθμου που εφαρμόσαμε, ο οποίος στηρίζεται στη μέθοδο βελτιστοποίησης simulated annealing.

4.3.5.2 Δεύτερο σενάριο αξιολόγησης

Το δεύτερο σενάριο αξιολόγησης των προτεινόμενων από το σχήμα δυναμικής επιλογής συχνοτήτων λύσεων παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.4.

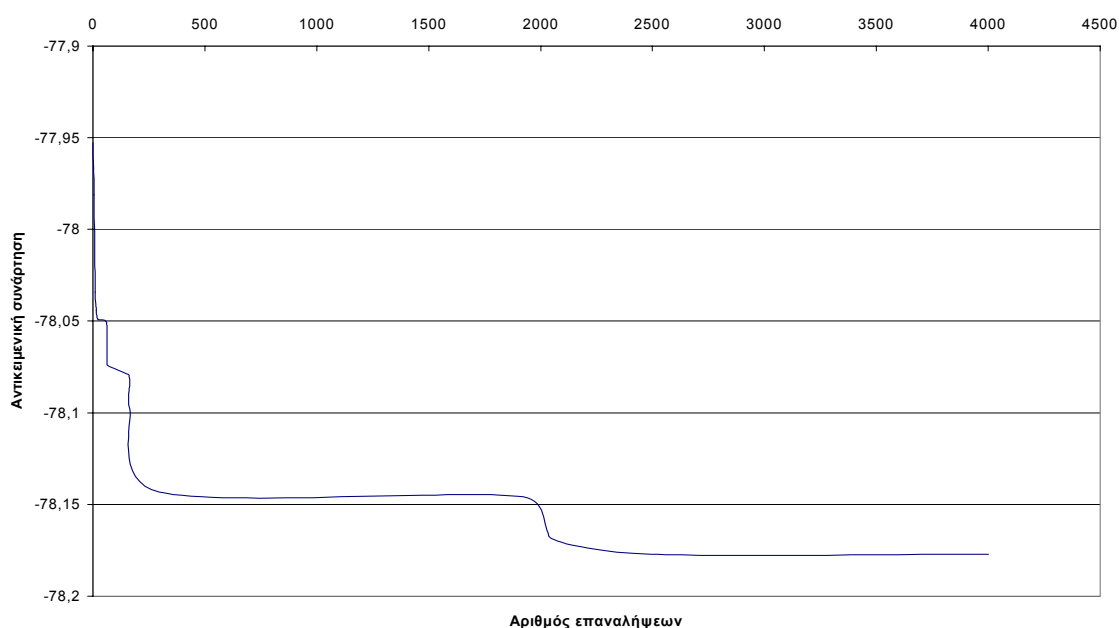


Σχήμα 4.4 Κατανομή με 8 διαθέσιμες συχνότητες και κεντρική κατανομή (αυξημένη κίνηση στο κέντρο του συστήματος)

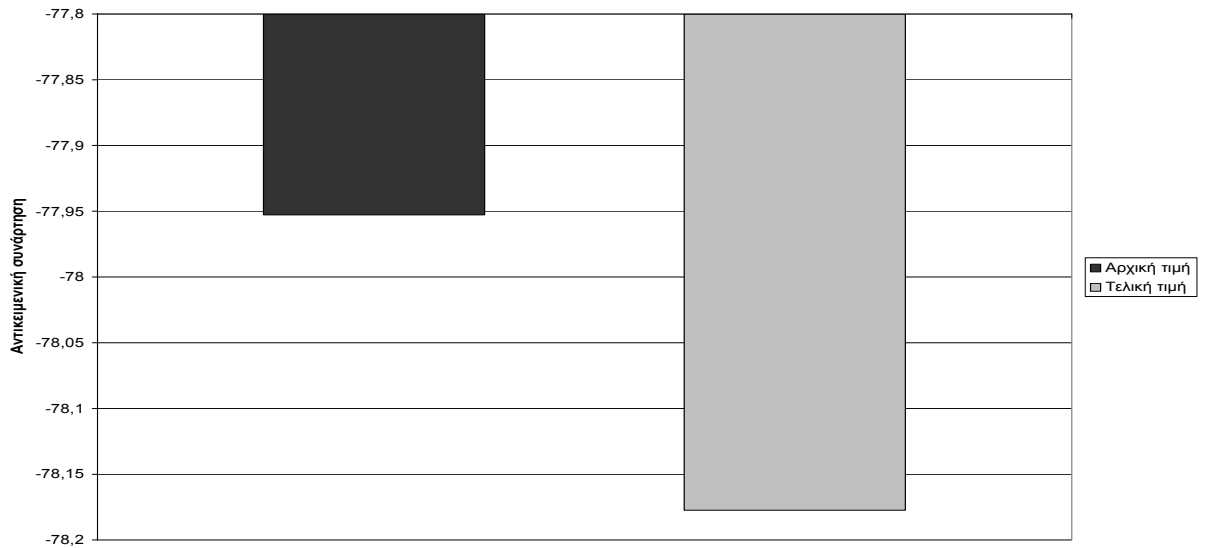
Η κίνηση θεωρείται αυξημένη στο κέντρο του δικτύου και μειώνεται προς την περιφέρεια του. Με έντονο χρώμα απεικονίζεται η κυψέλη 16, η οποία βρίσκεται στο κέντρο του δικτύου και παρουσιάζει την πιο αυξημένη κίνηση στο σύστημα. Οι γειτονικές με αυτήν κυψέλες (10, 11, 15, 17, 22, 23), οι οποίες έχουν λίγο πιο ανοιχτό χρώμα παρουσιάζουν ενδιάμεση κίνηση. Οι κυψέλες που απομένουν (άσπρο χρώμα) αποτελούν την περιφέρεια του δικτύου, και παρουσιάζουν χαμηλή κίνηση σε σχέση με τις υπόλοιπες κυψέλες. Η ισχύς εκπομπής (αναφοράς) λαμβάνει την ίδια τιμή για τα AP όλων των κυψελών. Όπως και στο πρώτο σενάριο ο αριθμός των διαθέσιμων συχνοτήτων είναι ίσος με 8.

Για το συγκεκριμένο σενάριο ο απαιτούμενος αριθμός επαναλήψεων ώστε να επιτύχουμε σύγκλιση φτάνει τις 4000. Από το Σχήμα 4.4 μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι οι συχνότητες που βρίσκονται στις κυψέλες αυξημένης κίνησης, επαναχρησιμοποιούνται σε περισσότερο απομακρυσμένες κυψέλες σε σχέση με την αρχική ανάθεση. Για παράδειγμα η κυψέλη 32 παύει να λειτουργεί στη συχνότητα 3 ενώ η συχνότητα αυτή ανατίθεται πλέον στην κυψέλη 31. Είναι ξεκάθαρο ότι η απόσταση μεταξύ των κυψελών 31 και 22 είναι μεγαλύτερη από την απόσταση μεταξύ των 32 και 22 (η κυψέλη 22 θεωρείται κυψέλη αυξημένης κίνησης και λειτουργεί και αυτή στη συχνότητα 3). Επομένως θα έχουμε μείωση της ομοδιαυλικής παρεμβολής από και προς την κυψέλη 22. Ομοίως η συχνότητα 6 μετατίθεται από την κυψέλη 8 στην 7. Συνεπώς έχουμε αύξηση της απόστασης των ομοδιαυλικών κυψελών της 16, δηλαδή μείωση της παρεμβολής(η κυψέλη 16 αποτελεί την κυψέλη με την πιο αυξημένη κίνηση).

Στα Σχήματα 4.5 και 4.6 παρατηρούμε γραφικά τη μεταβολή της αντικειμενικής συνάρτησης όπως και στο προηγούμενο σενάριο.



Σχήμα 4.5 Μεταβολή της αντικειμενικής συνάρτησης συναρτήσει του αριθμού των επαναλήψεων για το δεύτερο σενάριο

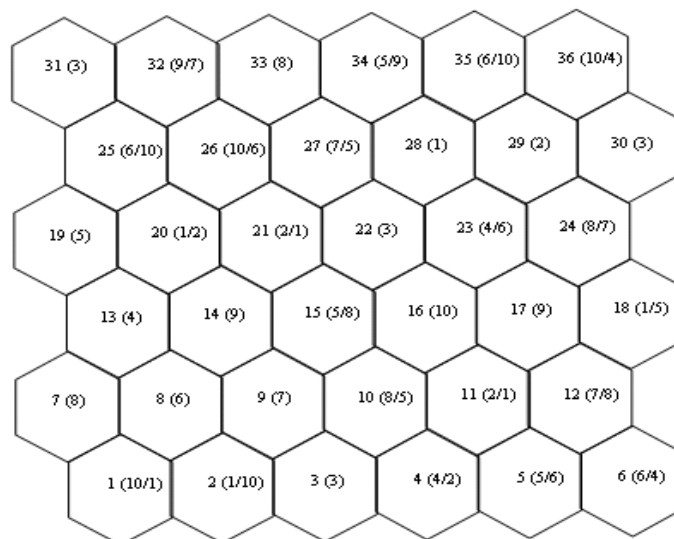


Σχήμα 4.6 Αρχική και τελική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για το δεύτερο σενάριο

Η μείωση της αντικειμενικής συνάρτησης φτάνει το 5,1% ενώ μετά τις 3000 επαναλήψεις παρατηρούμε σταθεροποίηση της.

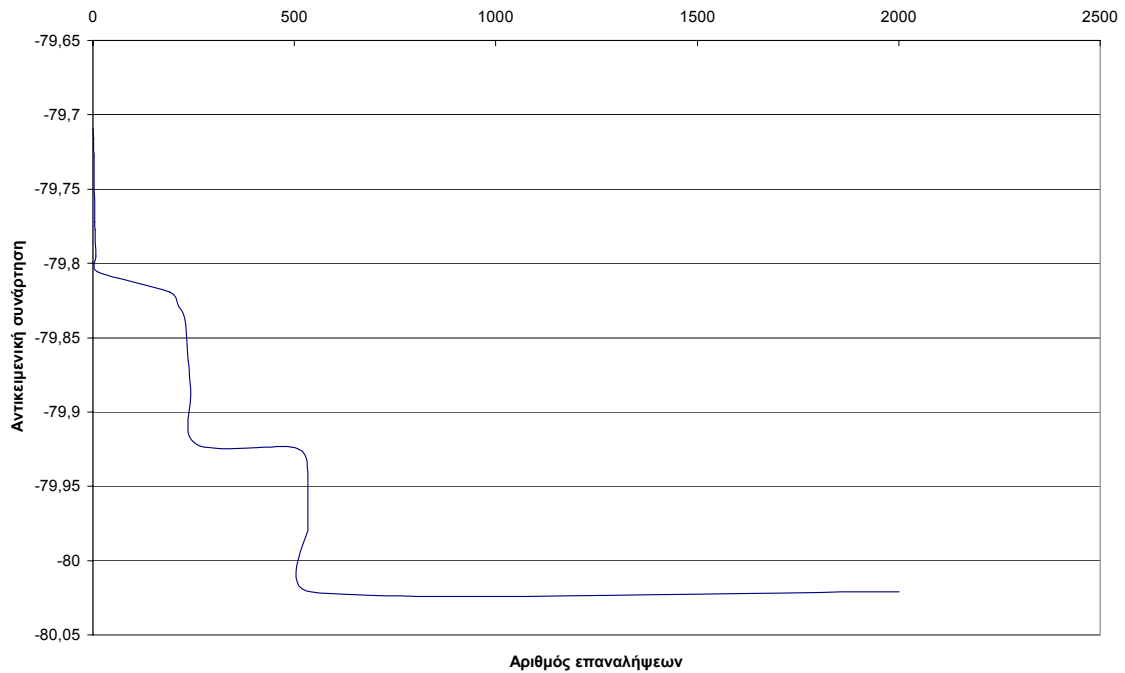
4.3.5.3 Τρίτο σενάριο αξιολόγησης

Όσον αφορά το τρίτο σενάριο αξιολόγησης, είναι παρόμοιο με το πρώτο σενάριο, αφού έχουμε ομοιόμορφη κατανομή, αλλά ο αριθμός των διαθέσιμων συχνотήτων είναι 10 αντί για 8.

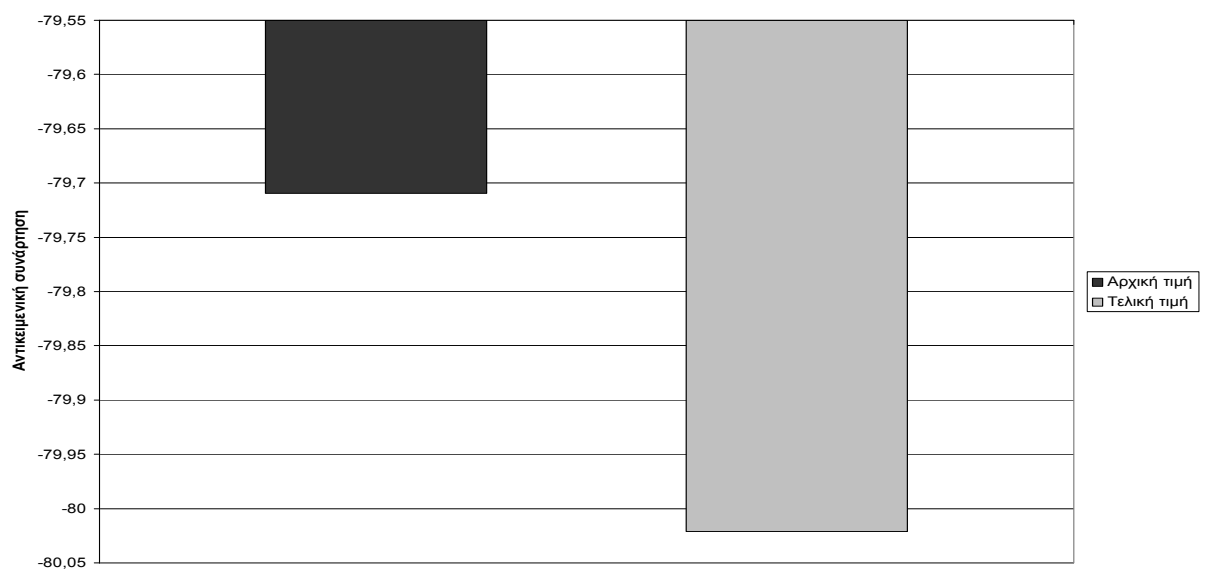


Σχήμα 4.7 Κατανομή με 10 διαθέσιμες συχνότητες και ομοιόμορφη κατανομή

Οδηγούμενοι προς τη σύγκλιση (η οποία ισοδυναμεί με σταθεροποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης) παρατηρούμε ότι ο ρυθμός αλλαγών των συχνοτήτων μειώνεται συνεχώς, κάτι το οποίο απεικονίζεται στις αμέσως επόμενες γραφικές απεικονίσεις.



Σχήμα 4.8 Μεταβολή της αντικειμενικής συνάρτησης συναρτήσει του αριθμού των επαναλήψεων για το τρίτο σενάριο

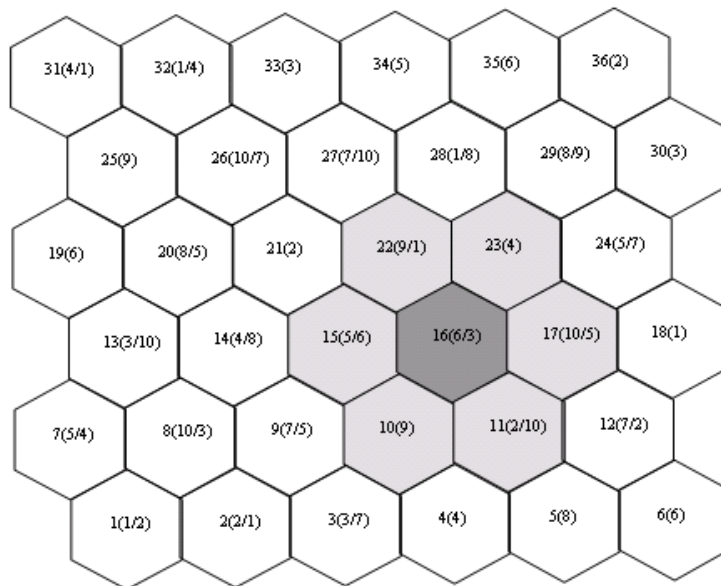


Σχήμα 4.9 Αρχική και τελική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για το τρίτο σενάριο

Στο συγκεκριμένο σενάριο επιτυγχάνουμε μείωση της αντικειμενικής συνάρτησης κατά 7%. Η μείωση αυτή συγκρινόμενη με τη μείωση του πρώτου σεναρίου (3,8%) όπου και εκεί είχαμε ομοιόμορφη κατανομή, παρατηρούμε ότι είναι μεγαλύτερη. Το γεγονός αυτό δικαιολογείται σε κάποιο βαθμό αφού έχουμε μεγαλύτερο αριθμό διαθέσιμων συχνοτήτων και επομένως μεγαλύτερη ευελιξία για μεταβολές των συχνοτήτων, έτσι ώστε να πετύχουμε βελτιωμένη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Αυτό όμως δεν είναι απόλυτο διότι το ποσοστό βελτίωσης της αντικειμενικής συνάρτησης, εκτός από τον αριθμό των διαθέσιμων συχνοτήτων εξαρτάται και από την αρχική ανάθεση η οποία όπως αναφέρθηκε προέρχεται από το τρέξιμο ενός άλλου ευριστικού αλγόριθμου βελτιστοποίησης.

4.3.5.4 Τέταρτο σενάριο αξιολόγησης

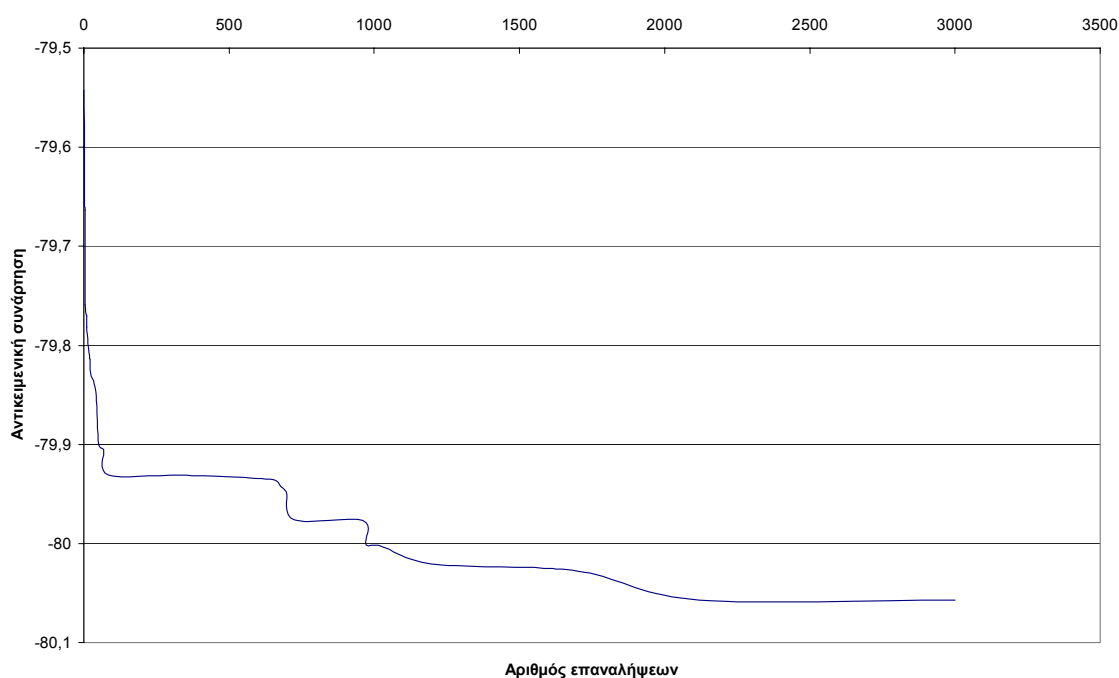
Το τέταρτο σενάριο αξιολόγησης αφορά μία κεντρική κατανομή συχνοτήτων με 10 διαθέσιμες συχνότητες αντί για 8 που είχαμε στο δεύτερο σενάριο. Εφόσον έχουμε μεγαλύτερο αριθμό συχνοτήτων και παρόμοια κατανομή, ενδεχομένως να έχουμε μεγαλύτερη μείωση της αντικειμενικής συνάρτησης σε σχέση με το δεύτερο σενάριο.



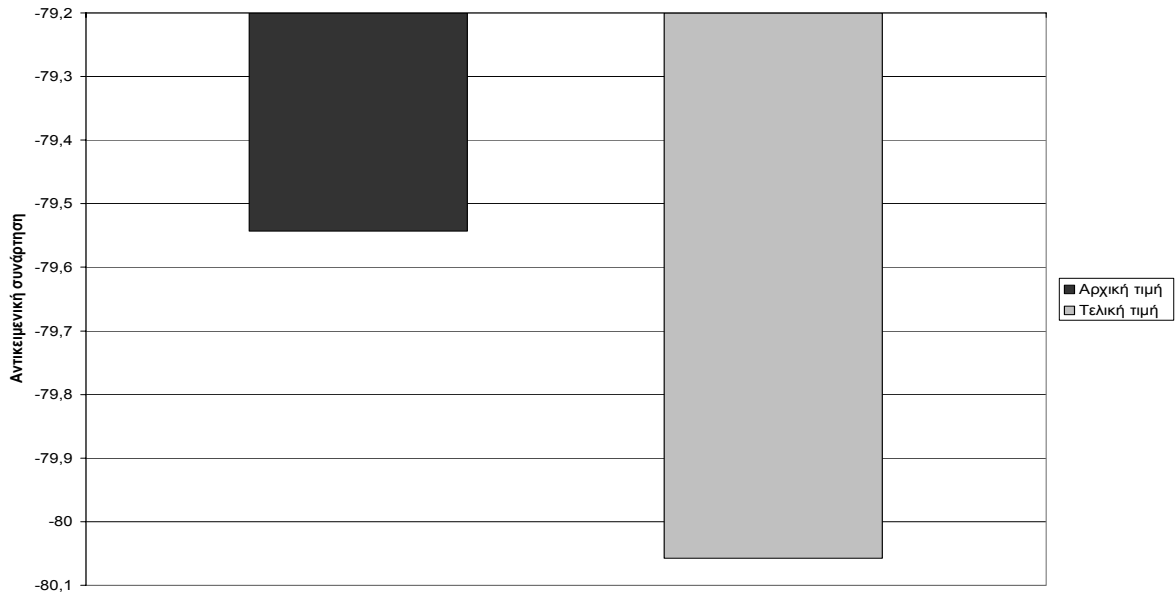
Σχήμα 4.10 Κατανομή με 10 διαθέσιμες συχνότητες και κεντρική κατανομή (αυξημένη κίνηση στο κέντρο του συστήματος)

Από το Σχήμα 4.10 μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου υπάρχουν πολλές αλλαγές στις συχνότητες τόσο των χρωματισμένων (έντονη κίνηση), όσο και των άσπρων (όχι ιδιαίτερη κίνηση) κυψελών. Παρατηρώντας με προσοχή τις μεταβολές αυτές μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η τελική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης θα παρουσιαστεί αρκετά μειωμένη σε σύγκριση με την αρχική.

Αναφερόμενοι σε ένα συγκεκριμένο παράδειγμα παρατηρούμε ότι στις κυψέλες 10 και 22 αρχικά έχει ανατεθεί η συχνότητα 9, ενώ αμφότερες παρουσιάζουν αυξημένη κίνηση. Μετά την εφαρμογή της μεθόδου simulated annealing η κυψέλη 22 μεταβάλλει τη συχνότητα της από 9 σε 1. Επομένως ομοδιαυλική με την 10 θα είναι πλέον η κυψέλη 29, στην οποία ανατέθηκε η συχνότητα 9. Παρατηρούμε ότι αφενός η απόσταση μεταξύ των κυψελών 10-29 είναι μεγαλύτερη από αυτή μεταξύ των 10-22 και αφετέρου η κυψέλη 29 δεν παρουσιάζει αυξημένη κίνηση σε αντίθεση με την 22. Με βάση λοιπόν τη νέα ανάθεση η παρεμβολή στην κυψέλη 10 και στις ομοδιαυλικές της θα είναι αισθητά μειωμένη.



Σχήμα 4.11 Μεταβολή της αντικειμενικής συνάρτησης συναρτήσει του αριθμού των επαναλήψεων για το τέταρτο σενάριο

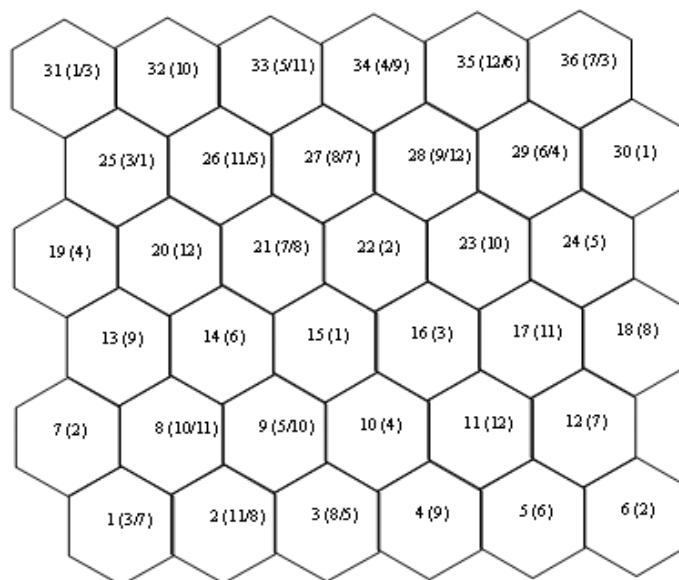


Σχήμα 4.12 Αρχική και τελική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για το τέταρτο σενάριο

Όσον αφορά τη μείωση της αντικειμενικής συνάρτησης μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι τελικά αυτή φτάνει το 11,2% , η οποία αποτελεί φυσικά μία πλήρως ικανοποιητική βελτίωση. Συγκρίνοντας τη μείωση της αντικειμενικής συνάρτησης (5,1%) στο δεύτερο σενάριο όπου είχαμε και εκεί κεντρική κατανομή, παρατηρούμε ότι στο παρόν σενάριο η μείωση αυτή είναι αισθητά μεγαλύτερη. Όπως αναφέραμε ένας λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό είναι η αύξηση του αριθμού των διαθέσιμων συχνοτήτων από 8 σε 10.

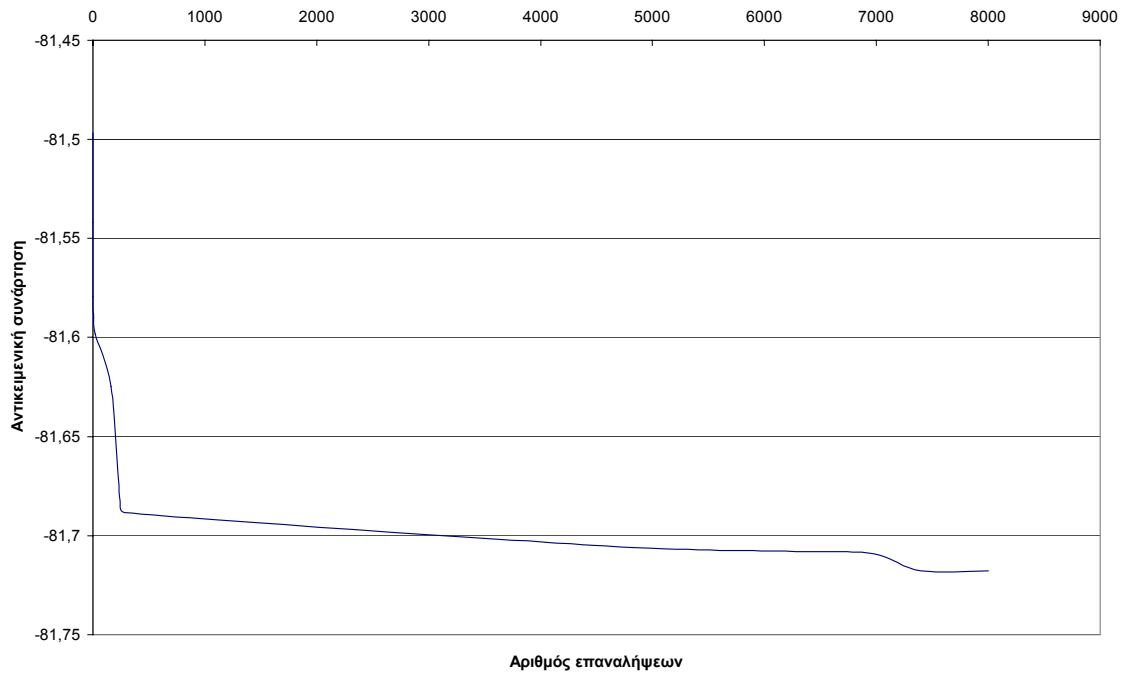
4.3.5.5 Πέμπτο σενάριο αξιολόγησης

Το πέμπτο σενάριο αξιολόγησης είναι παρόμοιο με το πρώτο και το τρίτο σενάριο με τη διαφορά ότι έχουμε 12 διαθέσιμες συχνότητες. Σχηματικά παρουσιάζουμε παρακάτω την αρχική και τελική ανάθεση στο ασύρματο δίκτυο των 36 κυψελών το οποίο εξετάζουμε (Σχήμα 4.13).

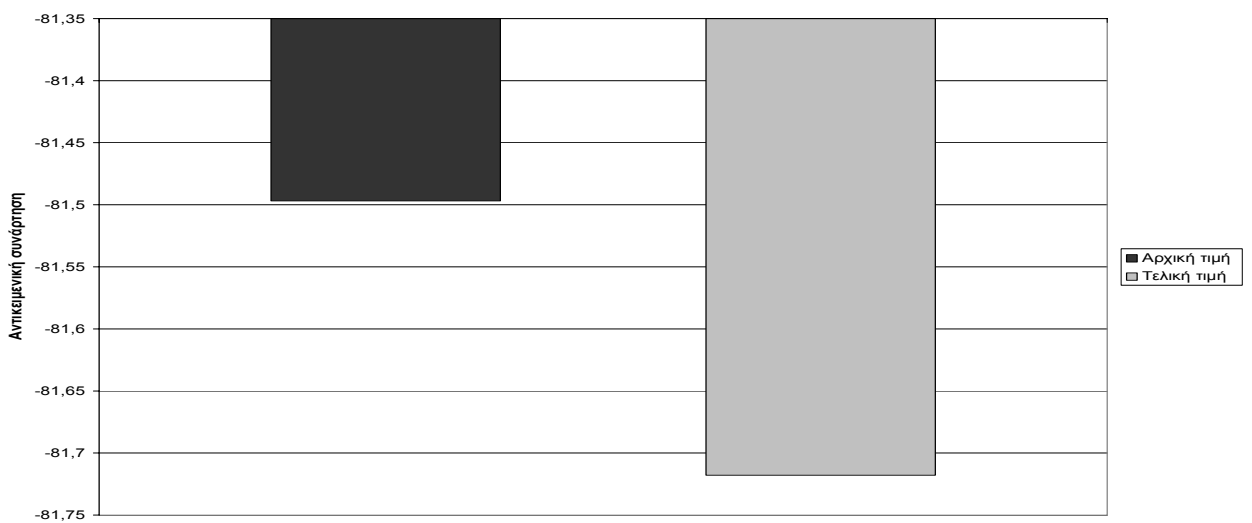


Σχήμα 4.13 Κατανομή με 12 διαθέσιμες συχνότητες και ομοιόμορφη κατανομή

Από το παραπάνω σχήμα με προσεκτική παρατήρηση φαίνεται να υπάρχει μία τάση απομάκρυνσης των ομοδιαυλικών κυψελών, γεγονός το οποίο αποδεικνύεται και από το παρακάτω γράφημα όπου φαίνεται η μείωση της αντικειμενικής συνάρτησης κατά τη διάρκεια εφαρμογής του αλγορίθμου.



Σχήμα 4.14 Μεταβολή της αντικειμενικής συνάρτησης συναρτήσει του αριθμού των επαναλήψεων για το πέμπτο σενάριο



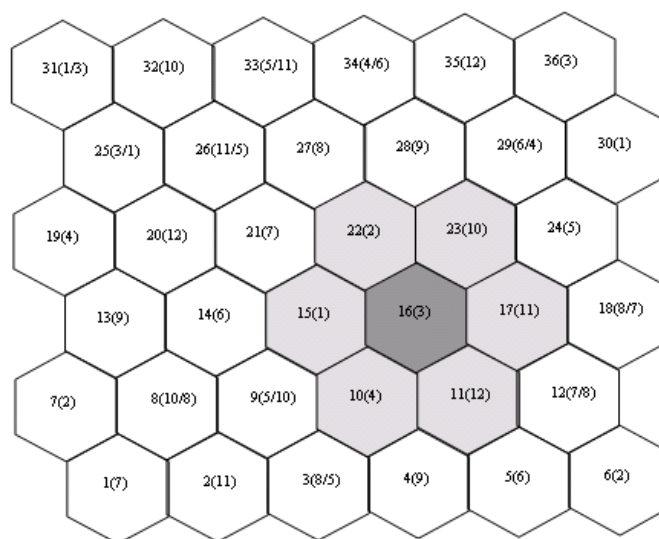
Σχήμα 4.15 Αρχική και τελική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για το πέμπτο σενάριο

Το ποσοστό μείωσης της αντικειμενικής συνάρτησης φτάνει το 5% για την αρχική ανάθεση των 12 διαθέσιμων συχνοτήτων η οποία μας δίνεται. Παρατηρούμε δηλαδή μεγαλύτερη μείωση της αντικειμενικής συνάρτησης σε σχέση με το πρώτο σενάριο και μικρότερη σε σχέση με το τρίτο (στα σενάρια αυτά είχαμε ομοιόμορφη

κατανομή). Το ποσοστό μεταβολής της εν λόγω συνάρτησης εξαρτάται σε κάθε περίπτωση από δύο παράγοντες: από τον αριθμό των διαθέσιμων συχνοτήτων και από το πόσο καλή αρχική ανάθεση έχουμε.

4.3.5.6 Έκτο σενάριο αξιολόγησης

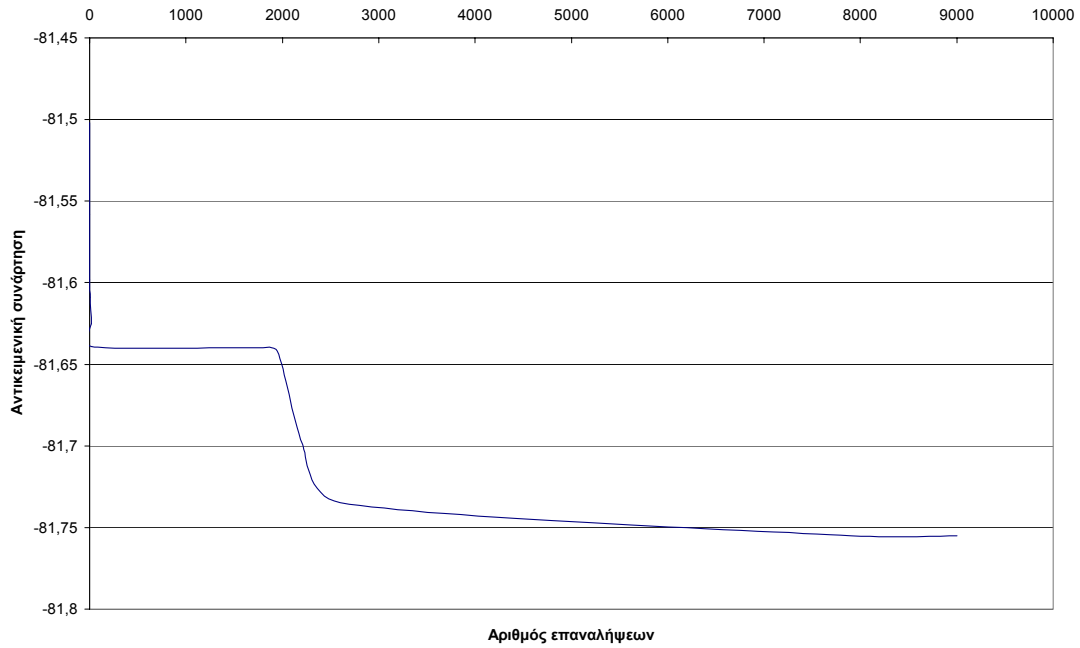
Στο έκτο και τελευταίο σενάριο το οποίο εξετάζουμε, έχουμε κεντρική κατανομή, όσον αφορά την κίνηση στις κυψέλες, και 12 διαθέσιμες συχνοτήτες όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.16



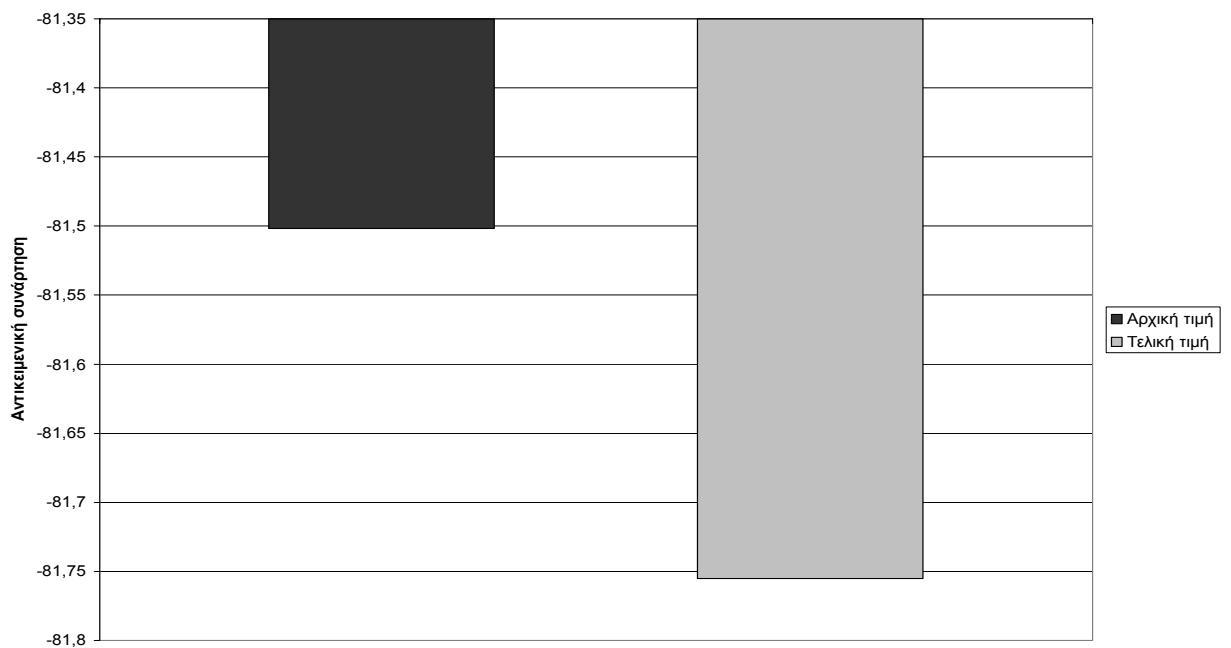
Σχήμα 4.16 Κατανομή με 12 διαθέσιμες συχνοτήτες και κεντρική κατανομή (αυξημένη κίνηση στο κέντρο του συστήματος)

Όπως και σε όλα τα προηγούμενα σενάρια, είναι και εδώ εμφανής η τάση απομάκρυνσης των ομοδιαυλικών κυψελών. Για παράδειγμα γίνεται ανταλλαγή συχνοτήτων στις κυψέλες 25 και 31 με αποτέλεσμα ομοδιαυλική της 16 να είναι η κυψέλη 31 που είναι σαφώς πιο απομακρυσμένη από την 25 (μετά το τρέξιμο του αλγορίθμου τόσο η κυψέλη 31 όσο και η 16 έχουν την ίδια συχνότητα 3).

Παρακάτω φαίνεται γραφικά η εξέλιξη της αντικειμενικής συνάρτησης, ενώ παρουσιάζουμε επιπλέον την αρχική και την τελική της τιμή όπως ακριβώς και στις υπόλοιπες περιπτώσεις.



Σχήμα 4.17 Μεταβολή της αντικειμενικής συνάρτησης συναρτήσει του αριθμού των επαναλήψεων για το έκτο σενάριο



Σχήμα 4.18 Αρχική και τελική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για το έκτο σενάριο

Συγκρίνοντας τις παραπάνω τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης (σε μονάδες ισχύος παρεμβολής), παρατηρούμε μείωση της τιμής της κατά 5,7%.

4.3.6 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Στις παραπάνω παραγράφους παρουσιάστηκαν κάποια ενδεικτικά σενάρια λειτουργίας του σχήματος δυναμικής επιλογής συχνοτήτων. Θεωρήθηκε ένα μικρής κλίμακας δίκτυο, στο οποίο είχαμε είτε ομοιόμορφη κίνηση είτε αυξημένη στο κέντρο και μειούμενη στην περιφέρεια. Η επιλογή των μικρών διαστάσεων του δικτύου διευκολύνει τις παρατηρήσεις μας αλλά και τη διαδικασία αξιολόγησης. Επιπροσθέτως βρίσκεται σε συμφωνία με τις τυπικές περιπτώσεις υλοποίησης δικτύων WLAN. Άλλωστε τα δίκτυα αυτά προορίζονται να λειτουργήσουν για την κάλυψη των αναγκών περιοχών περιορισμένης έκτασης.

Η διαδικασία αξιολόγησης που ακολουθήθηκε περιλαμβάνει το ποσοστό βελτίωσης της συνολικής παρεμβολής (αντικειμενική συνάρτηση) σε σχέση με την τιμή την οποία λάβαμε σαν αποτέλεσμα μιας γρήγορης μεθόδου βελτιστοποίησης η οποία υλοποιήθηκε από τον διδάκτορα μηχανικό Αντώνη Οικονόμου.

Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι η λύση που προκύπτει ως έξοδος της προτεινόμενης μεθόδου βελτιώνει την αντικειμενική συνάρτηση περίπου με 5 έως 10%. Καλά αποτελέσματα λαμβάνουμε σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα, ενώ σε βάθος χρόνου, η απόκλιση της λύσης μας από τη βέλτιστη είναι σχεδόν αμελητέα.

Συγκρίνοντας τα σενάρια που παρουσιάστηκαν μεταξύ τους, προκύπτει το συμπέρασμα ότι ο συνολικός αριθμός διαθέσιμων συχνοτήτων επηρεάζει σε κάποιο βαθμό την απόδοση του προτεινόμενου σχήματος. Μεγάλος αριθμός συχνοτήτων αντιστοιχεί σε μικρότερη (καλύτερη) τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Επιπλέον θα πρέπει να παρατηρήσουμε ότι η αρχική ανάθεση συχνοτήτων παίζει σημαντικό ρόλο στη σύγκλιση του αλγορίθμου επίλυσης. Όσο καλύτερη ανάθεση συχνοτήτων έχουμε τόσο γρηγορότερα θα συγκλίνει και ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης τον οποίο χρησιμοποιούμε. Αυτό άλλωστε θα έπρεπε να το περιμένουμε αφού σε όλες σχεδόν τις μεθόδους βελτιστοποίησης (Intelligent Optimization Techniques) η επιλογή του λεγόμενου αρχικού σημείου αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην επίτευξη γρήγορης σύγκλισης.

4.4 Επίλογος

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε μία μέθοδος δυναμικής επιλογής της συχνότητας λειτουργίας για συστήματα WLAN με δίκτυο αναφοράς το HIPERLAN2. Σκοπός μας είναι η λήψη μιας απόφασης για την επιλογή συχνοτήτων βασισμένη στις ανάγκες του παρόχου του δικτύου HIPERLAN2. Ο αλγόριθμος που υλοποιήθηκε στηρίζεται στη μέθοδο simulated annealing.

Αρχικά προτάθηκε μία μαθηματική διατύπωση του προβλήματος. Βασίζεται σε μια αντικειμενική συνάρτηση και σε (επιβαλλόμενους από το περιβάλλον) περιορισμούς. Η αντικειμενική συνάρτηση που προτείνεται αξιολογεί τις κυψέλες με βάση την τηλεπικοινωνιακή κίνηση που καλούνται να αντιμετωπίσουν. Έχει μοντελοποιηθεί όμως με τέτοιο τρόπο, ώστε να μπορεί εύκολα να συμπεριλάβει ή και να εξαρτηθεί αποκλειστικά από άλλα κριτήρια. Τελικά το πρόβλημα της ανάθεσης των συχνοτήτων ανάγεται στην ελαχιστοποίηση της τεθείσας αντικειμενικής συνάρτησης.

Ύστερα από τη διατύπωση του μαθηματικού προβλήματος ακολούθησε η περιγραφή των βημάτων τα οποία περιλαμβάνει ο simulated annealing αλγόριθμος και δεν είναι άλλα από την αρχική ανάθεση συχνοτήτων, τον ορισμό του γενετικού μηχανισμού λύσεων (generation mechanism), καθώς επίσης και τον κανόνα σύμφωνα με τον οποίο φτάνουμε σε κρυσταλλική δομή.

Ο αλγόριθμος επίλυσης αξιολογείται για διάφορα σενάρια που αφορούν το συνολικό αριθμό διαθέσιμων συχνοτήτων αλλά και το είδος κατανομής της κίνησης στο δίκτυο. Από την αξιολόγηση επιτυγχάνεται αρκετά καλή βελτίωση της λύσης η οποία παρέχεται από έναν άλλο αλγόριθμο βελτιστοποίησης ο οποίος ήδη προσεγγίζει σε ικανοποιητικό βαθμό τη θεωρητική βέλτιστη λύση. Όλα τα παραπάνω σε συνδυασμό και με το γεγονός ότι τα αποτελέσματα παράγονται σε σχετικά αποδεκτά χρονικά όρια καθιστούν ιδιαίτερα αποδοτική και αξιόπιστη τη λύση για λήψη αποφάσεων διαχείρισης σε πραγματικό χρόνο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

J. Khun-Jush, P. Schramm, G. Malmgren, J. Torsner, “HiperLAN2: Broadband wireless communications at 5 GHz”, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 40, No. 6, June 2002

ETSI Technical Report 101 683, “Broadband Radio Access Networks (BRAN); HIPERLAN Type 2; System Overview”

ETSI Technical Report 101 761-1, “Broadband Radio Access Networks (BRAN); HIPERLAN Type 2; Data Link Control (DLC) layer; Part 1: Basic Data Transport Functions”

ETSI Technical Report 101 761-2, “Broadband Radio Access Networks (BRAN); HIPERLAN Type 2; Data Link Control (DLC) layer; Part 2: Radio Link Control (RLC) sublayer”

ETSI Technical Report 101 475, “Broadband Radio Access Networks (BRAN); HIPERLAN Type 2; Physical (PHY) layer”

ISO/IEC DIS 8802-3: “Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific requirements - Part 3: Carrier sense multiple access with collision detection (CSMA/CD) access method and physical layer specifications”

CEPT/ERC Decision (99) 23: “ERC Decision of 29 November 1999 on the harmonised frequency bands to be designated for the introduction of High Performance Radio Local Area Networks (HIPERLANs)”

CEPT/ERC Recommendation 70-03: “Relating to the use of Short Range Devices (SRD)”

J. Peetz, A. Hettich, O. Klein, “HiperLAN/2 Ad Hoc Network Configuration by CC Selection”, *European Wireless (EW '00)*, Dresden, Germany, September 2000

ETSI Technical Report 101 683 “Broadband Radio Access Networks (BRAN); HIPERLAN Type 2; System Overview”; ETSI Technical Report 101 761-2 “Broadband Radio Access Networks (BRAN); HIPERLAN Type 2; Data Link Control (DLC) layer; Part 2: Radio Link Control (RLC) sublayer”

Demestichas, A.Oikonomou, G.Vivier, M.Theologou, “Management of Wireless Home Networking Technologies in the Context of Composite Radio Environments”, *ACM Mobile Computing and Communications Review*, Vol. 7, No. 2

W.K. Hale, “Frequency Assignment: Theory and applications”, *Proceedings of the IEEE* (1980), Vol. 68, pp. 1497-1514

R.Mathar, J.Mattfeld, "Channel Assignment in Cellular Radio Networks", *IEEE Transactions Vehicular Technology*, Vol. 42, No. 4, November 1993

K.Sivarajian, R.McEliece, J.Ketchum, “Channel assignment in cellular radio”, *IEEE VTC '89*, pp. 846 – 850

P.Demestichas, E.Tzifa, M.Theologou, M. Anagnostou, "Interference-oriented carrier assignment in wireless communications", *IEEE Communications Letters Journal*, Vol. 7, No. 1, 2003

E.Aarts, J.Korts, “Simulated annealing and the Boltzmann machines”, Wiley, New York, 1989

S.Kotrotsos, G.Kotsakis, P.Demestichas, E.Tzifa, V.Demesticha, M.Anagnostou, “Formulation and computationally efficient algorithms for an interference-oriented version of the frequency assignment problem”, *Wireless Personal Communications Journal*, Vol. 18, 2001, pp. 289-317

Z.Michalewicz, “Genetic algorithms + Data structures = Evolution programs”, Springer-Verlag, Berlin, 1995

F.Glover, M.Laguna, “Taboo search”, Kluwer Academic Publisher, Hingham, Massachusetts, 1998

T. Abe, K. Yozi, M. Sengoku, S. Tamura, S. Shinoda, “Graph theoretical considerations of channel offsets systems in a cellular mobile system”, *IEEE Transactions Vehicular Technology*, Vol. 40, May 1991

C.Papadimitriou, K.Steiglitz, “Combinatorial Optimisation: Algorithms and Complexity”, Prentice Hall, 1982

T.Cormen, C.Leiserson, R.Rivest, “Introduction to algorithms”, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1990

A. Merchant, B. Sengupta, “Assignment of cells to switches in PCS networks”, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol.3, No. 5, October 1995

Zoellner J.A., Beall C.A., “A Breakthrough in Spectrum Conserving Frequency Assignment Technology”, *IEEE Transactions Electromagnetic Compatibility*, Vol. 19, August 1977, pp. 313-319

Gamst A., Rave W., “On Frequency Assignment in Mobile Automatic Telephone Systems”, *GLOBECOM '82*, pp. 309-315

M. E. Θεολόγου, “Δίκτυα κινητών και προσωπικών επικοινωνιών”, Εκδόσεις ΕΜΠ

D.T. Pham and D. Karaboga “Intelligent Optimisation Techniques (Genetic Algorithms, Tabu Search, Simulated Annealing and Neural Networks)”

Barrere, M. (1997) “Simulated Annealing to Solve Optimisation Problems”, Internal Report, Intelligent Systems Research Laboratory, School of Engineering, Cardiff University, UK

Ballou, P.B. and Pazer, L.H. (1985) Process improvement versus enhanced inspection in optimized systems, *Int. J. of Production Research*, Vol 23, No.6, pp.1233-1245

Διδακτορική διατριβή Αντώνη Οικονόμου, “Τεχνικές διαχείρισης πόρων συστημάτων WLAN στο πλαίσιο περιβαλλόντων ασύρματων επικοινωνιών πέραν της τρίτης γενιάς”, ΕΜΠ, Ιούνιος 2004

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΚΩΔΙΚΑΣ ΣΕ C++

```
// stdafx.h : include file for standard system include files,
// or project specific include files that are used frequently, but
// are changed infrequently
//

#ifndef AFX_STDAFX_H__1EC4154E_1913_4455_AD30_E981116282B9__
INCLUDED_
#define AFX_STDAFX_H__1EC4154E_1913_4455_AD30_E981116282B9__
INCLUDED_

#if _MSC_VER > 1000
#pragma once
#endif // _MSC_VER > 1000

#define WIN32_LEAN_AND_MEAN           /* Exclude rarely-used stuff from
                                        Windows headers */

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>
#include <fstream.h>

// TODO: reference additional headers your program requires here

#define pi 3.1415926535
```

```

#define AP_NUM 36

#define no_of_frequencies 9

#define radius 28

class AP_data {
public:
    int AP_id;
    int R;
    int no_of_MTs;
    double ap_x;
    double ap_y;
    unsigned int freq;
};

class DFS_item {
public:
    int AP_id;
    unsigned int frequency;
    unsigned int best_freq;
    unsigned int current_freq;
    double I[no_of_frequencies];
    double throughput;
    double w;
    bool freq_found;
};

class Ext_Inter
{
public:
    double Create_I(double x,double y);
    double P_transm;

```

```
double y_pos;
double x_pos;
unsigned int freq;
Ext_Inter();
virtual ~Ext_Inter();

};

//{{AFX_INSERT_LOCATION}}
// Microsoft Visual C++ will insert additional declarations immediately before the
// previous line.

#endif
/* !defined(AFX_STDAFX_H__1EC4154E_1913_4455_AD30_E981116282B9__
INCLUDED_) */
```



```

// assignment.cpp : Defines the entry point for the console application.
//

#include "StdAfx.h"
#include <math.h>
#include <stdlib.h>
#include <time.h>

AP_data AP_DFS[AP_NUM];
DFS_item DFS_cell[AP_NUM];
FILE *fdfs, *fg;
int cell;
double total_thr=0;
int prior_list[AP_NUM];
double help_array[AP_NUM];
double help2_array[AP_NUM];
double max;
int cell_max;
int sort;
Ext_Inter Extern_Interf;
Ext_Inter Extern_Interf_2;

double pathLoss(double x1,double y1,double x2,double y2,double dist)
{
double d;
double Lp;

d=sqrt( (x1-x2)*(x1-x2)+(y1-y2)*(y1-y2) );
d=d-dist;
Lp=46.7+(20*log10(d)); // Lp in dB

return Lp;
}

```

```
Ext_Inter::Ext_Inter()
```

```
{
```

```
}
```

```
Ext_Inter::~~Ext_Inter()
```

```
{
```

```
}
```

```
double Ext_Inter::Create_I(double x, double y)
```

```
{
```

```
    double I=0.0;
```

```
    double pl;
```

```
    pl=pathLoss(x_pos,y_pos,x,y,0);
```

```
//    I=10*log10(P_transm)-pl;
```

```
    I=P_transm-pl;
```

```
    I=pow(10,I/10);
```

```
    return I;
```

```
}
```

```
double I_downlink(int ap_id, int try_freq)
```

```
{
```

```
    unsigned int freq;
```

```
    double I=0;
```

```
    double nI=0;
```

```
    double totI=0;
```

```
    double No=-95;
```

```
// BackGround Noise in dBm
```

```
    unsigned int mt;
```

```

double rad,radius2;
double ang;
double MT_x,MT_y,x0,y0;
float AP_Power_Tx[AP_NUM];
double distance;
FILE *ffeed1;
int ii;

I=0;

freq=try_freq+1;
radius2=30;

//fprintf(fdfs,"\nTrying frequency %d\n\n",freq);

x0=AP_DFS[ap_id].ap_x;
y0=AP_DFS[ap_id].ap_y;
//printf("APx: %.2f APy: %.2f\n",x0,y0);

    ffeed1=fopen("./input/feed.txt","r");
    for (ii=0;ii<AP_NUM;ii++){
        fscanf(ffeed1,"%f\n",&AP_Power_Tx[ii]);
    }
    fclose(ffeed1);

    ffeed1=fopen("./input/feed_no_ofMT.txt","r");
    for (ii=0;ii<AP_NUM;ii++){
        fscanf(ffeed1,"%d\n",&AP_DFS[ii].no_of_MTs);
    }
    fclose(ffeed1);

```

```

//printf("MTs for cell %d, are %d\n",ap_id,AP_DFS[ap_id].no_of_MTs);

for (mt=0;mt<AP_DFS[ap_id].no_of_MTs;mt++)
{
    //printf("MT:%d of %d\n",mt,AP_DFS[ap_id].no_of_MTs);

    do
    {
        rad=(double)(rand()*radius2*radius2)/RAND_MAX;
    }
    while (rad==0);

    rad=sqrt(rad);
    ang=(double)(rand()*2*pi)/RAND_MAX;
    //printf("Radius: %f Angle %f\n",rad,ang);
    MT_x=x0+sin(ang)*rad;
    MT_y=y0+cos(ang)*rad;
    //printf("Final Positions:%.3f%.3f\n",MT_x,MT_y);

    for (int a=0;a<AP_NUM;a++)
    {
        if ((AP_DFS[a].freq==freq)&&(a!=ap_id))
        //gia ta omodiaulika
        {
            /*printf("\nMT: %d -> Interfering AP %d, with CO-
            ORDS %f%f, event CO-ORDS %f%f POWER AP
            %f\n",mt,AP_DFS[a].AP_id,AP_DFS[a].ap_x,AP_DFS
            [ap_id].ap_y,MT_x,MT_y,AP_Power_Tx[ap_id]); */
            nI=AP_Power_Tx[a]-
            pathLoss(AP_DFS[a].ap_x,AP_DFS[a].ap_y,MT_x,MT
            _y,0);
        }
    }
}

```

```

        distance=sqrt( (AP_DFS[a].ap_x-
        x0)*(AP_DFS[a].ap_x-x0) + (AP_DFS[a].ap_y-
        y0)*(AP_DFS[a].ap_y-y0) );
//        if (distance<min_distance) nI=1000;
//        fprintf(fdfs,"creating Interference %f\n",nI);
        if (I!=0) I=10*log10( pow(10,nI/10)+pow(10,I/10) );
        else I=nI;
//        fprintf(fdfs,"TOTAL Interference %f.\n",I);
    }
}

//// Inserting External Interference

if (freq==Extern_Interf.freq) {
    //printf("Frequency is %d. Cell is %d.\n",freq,ap_id);
    nI=Extern_Interf.Create_I(MT_x,MT_y);
    nI=10*log10(nI);
    //printf("Ext Interference is %f. Int Interference is %f.\n",nI,I);
    I=10*log10( pow(10,nI/10) + pow(10,I/10) );
    //printf("Total Interference is %f.\n",I);
}

totI+=pow(10,I/10);
}

totI=totI/AP_DFS[ap_id].no_of_MTs;
totI=10*log10(totI);
//printf("M E A N TOTAL Interference %f.\n",totI);

if (totI!=0){
    //printf("Non zero return");
    /* printf( "LEO:%lf",10*log10( pow(10,(double)totI/(double)10)+
    pow(10,-95.0/10.0)) ); */
}

```

```

        return ( 10*log10( pow(10,(double)totI/10.0) +
        pow(10,(double)No/10.0) ) );
    } else return No;
    printf("\n\n");
}

```

```

/////    FIND WEIGHTS    //////////

```

```

void find_weights(void) {

int k;
fg=fopen("./input/demand_DL.txt","r");

    for (k=0;k<AP_NUM;k++)
    {
        fscanf(fg,"%lf\n",&DFS_cell[k].throughput);
    }

fclose(fg);

for (cell=0;cell<AP_NUM;cell++)
{
    total_thr+=DFS_cell[cell].throughput;
}

for (cell=0;cell<AP_NUM;cell++)

```

```

    {
        DFS_cell[cell].w=DFS_cell[cell].throughput/total_thr;
    /// cout << DFS_cell[cell].w << "\t" << dif(cell) << "\n";
    }

}

////////////////////// OBJECTIVE FUNCTION ////////////////////////

double O_F() {
    double cell_I;
    double tot_I=0;

    for (int a=0;a<AP_NUM;a++)
    {
        cell_I=I_downlink( a , (DFS_cell[a].frequency-1) );
        //printf("\nLINK: %lf\n",cell_I);
    // cell_I=pow(10,cell_I/10);
        tot_I+=cell_I*DFS_cell[a].w;
    }

    /*
    min=DFS_cell[AP_id].I[0];
    min_freq=0;

    for (i=1;i<no_of_frequencies;i++)
    {
        if (DFS_cell[AP_id].I[i]<min)
        {
            min=DFS_cell[AP_id].I[i];
            min_freq=i;
        }
    }
    */
}

```

```

        }
    }
    DFS_cell[AP_id].best_freq=min_freq+1;
    fprintf(fof,"Minimum frequency is %d\n",min_freq+1);

    if (AP_data[AP_id].freq!=DFS_cell[AP_id].best_freq)
    {
        fprintf(fof,"Changing frequency %d for AP %d to
        %d...\n",AP_data[AP_id].freq,AP_id,DFS_cell[AP_id].best_freq);
        AP_data[AP_id].freq=DFS_cell[AP_id].best_freq;
        change=1;
    }
*/

    return tot_I;
}

```

```

int main(int argc, char* argv[])
{

    int i;

    srand(time(NULL));
    FILE *fp;

    for (int ap=0;ap<AP_NUM;ap++)
        AP_DFS[ap].AP_id=ap;

```



```

////    AP POSITIONS    ////

fp=fopen("./input/cell_tla.txt","r");

for (i=0;i<AP_NUM;i++)
{
    fscanf(fp,"%lf %lf\n",&AP_DFS[i].ap_x,&AP_DFS[i].ap_y);
}

fclose(fp);

for (i=0;i<AP_NUM;i++)
{
    printf("%lf %lf\n",AP_DFS[i].ap_x,AP_DFS[i].ap_y);
}

////    FREQUENCY    ////

fp=fopen("./input/frequency_plan.txt","r");

for (i=0;i<AP_NUM;i++)
{
    int fr=0;
    fscanf(fp,"%d\n",&fr);
    AP_DFS[i].freq=fr;
    DFS_cell[i].frequency=fr;
}

fclose(fp);

```

```

///// FIND WEIGHTS  /////

find_weights();

///// OBJECTIVE FUNCTION  /////

//printf("Objective: %lf %lf\n",O_F(),O_F() );

/* GENERATION MECHANISM */

int results[36]; for (int t=0;t<36;t++) results[t]=NULL;
// double delta=(double)rand()/RAND_MAX;
double delta = 0.95;
int max_ iterations=100;
int iteration=0;
double minimumdiafora=0;
double minimum=0;
double startT=1.95;
double currentT=startT;
printf("%f",delta);
double eval1=O_F();
double eval2=0;

for(i=0;i<max_ iterations;i++){

    if (iteration==0) {

```

```

        eval1=O_F());
        printf("Arxikh OF:%lf",eval1);
    }

iteration++;

int cellnum=(int)rand()%36;
int testfreq=AP_DFS[cellnum].freq;
//printf("Testing cell:|%d| with freq:%d\n",cellnum+1,testfreq);
for (int j=0;j<36;j++) {
    if (j!=cellnum){
        int originalfreq=DFS_cell[j].frequency;
        DFS_cell[j].frequency=testfreq;           //swap
        AP_DFS[j].freq=testfreq;
        AP_DFS[cellnum].freq=originalfreq;
        DFS_cell[cellnum].frequency=originalfreq;
        eval2=O_F());                             //compute

        /*****/

        if ( (delta<=exp(-fabs(eval2-eval1)/currentT)) &&
            (eval2<eval1) &&(originalfreq!=testfreq)) { //siglisi
            double dif=eval2-eval1;
            printf("%d:",iteration);
            printf("\neval2:%lf eval1:%lf
dif:%lf\n",eval2,eval1,dif);
            printf("Allagi ths %d me thn
%d\n",j+1,cellnum+1);
            if (dif<minimumdiafora) {
                minimumdiafora=dif;
            }
            if (eval2<minimum){

```

```

        minimum=eval2;
        eval1=eval2;
        for (int z=0;z<36;z++)
            results[z]=AP_DFS[z].freq;
        }
        break;
    } else {
        DFS_cell[j].frequency=originalfreq; //restore
        AP_DFS[j].freq=originalfreq;
        AP_DFS[cellnum].freq=testfreq;
        DFS_cell[cellnum].frequency=testfreq;
    }
}

currentT-=0;
} //for

//printf("MINIMUM DIAFORA: %lf",minimumdiafora);
printf("\n\nMINIMUM: %lf\n",minimum);
for (int z=0;z<36;z++) printf("%d: %d\n",z+1,results[z]);

return 0;
}

```