



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ  
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ**

**Τεχνικές Διαχείρισης Ραδιοπόρων  
σε Ασύρματα Συστήματα Πολλαπλής Πρόσβασης  
OFDMA**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Φωτιάδης Παναγιώτης

**Επιβλέπων:** Φ. Κωνσταντίνου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2008

Φωτιάδης Παναγιώτης  
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Φωτιάδης Παναγιώτης, 2008  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης. Η αναφορά του ονομάτος του συγγραφέα θα αποτελούσε για αυτόν μια χαρά. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

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

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου Φ. Κωνσταντίνου για τη δυνατότητα που μου έδωσε να εκπονήσω την παρούσα διπλωματική εργασία σε έναν ενδιαφέροντα τομέα των τηλεπικοινωνιών. Επίσης, ευχαριστώ τον υποψήφιο διδάκτορες κ. Α. Γκότση για την πολύτιμη βοήθεια του τόσο κατά τη διάρκεια υλοποίησης των προσομοιώσεων, όσο και για τις πολύτιμες παρατηρήσεις του κατά τη συγγραφή της διπλωματικής εργασίας. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την στήριξη τους σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Φωτιάδης Παναγιώτης  
Ιούλιος 2008



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	Εισαγωγή .....	11
1.1	Το αντικείμενο της Εργασίας.....	11
1.2	Δομή της αναφοράς.....	12
2	Συστήματα Ασύρματης Πρόσβασης OFDMA .....	13
2.1	Συστήματα σταθερών και κινητών επικοινωνιών νέας γενιάς.....	13
2.1.1	Τεχνολογία WiMAX.....	13
2.1.2	Τεχνολογία 3G κυψελωτών συστημάτων .....	14
2.1.3	Wi-Fi Συστήματα.....	15
2.2	Η τεχνική OFDM στο φυσικό στρώμα μετάδοσης .....	16
2.2.1	Οι θεμελιώδεις αρχές της τεχνικής OFDM.....	16
2.2.2	Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της τεχνικής OFDM.....	18
2.3	Ο ευρυζωνικός κινητός ασύρματος διάυλος .....	18
2.3.1	Γενικά για την διάδοση σήματος .....	19
2.3.2	Απώλειες διάδοσης (path loss) .....	20
2.3.3	Σκίαση (shadowing).....	21
2.3.4	Πολυδρομική διαδρομή (multipath) .....	21
2.4	Πολυπλεξία OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) ..	22
2.4.1	Οι θεμελιώδεις αρχές του OFDMA .....	22
2.4.2	Πλεονεκτήματα/Μειονεκτήματα OFDMA .....	23
3	Ανάθεση Ραδιοπόρων σε συστήματα OFDMA.....	25
3.1	Μοντελοποίηση Προβλήματος .....	25
3.2	Το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης της μεταδιδόμενης ισχύος (Margin Adaptive).....	26
3.3	Το πρόβλημα της μεγιστοποίησης του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων (Rate Adaptive).....	27
3.4	Προβλήματα Δικαιοσύνης .....	28
3.4.1	Min – Max Πρόβλημα .....	28
3.4.2	Αναλογική δικαιοσύνη με βάση τον ρυθμό μετάδοσης κάθε χρήστη (Proportional Rate Constraints) .....	29
3.4.3	Αναλογική δικαιοσύνη - Μεγιστοποίηση του νεπέριου λογάριθμου του συνολικού ρυθμού μετάδοσης των χρηστών (Proportional Fairness) .....	31
3.5	Επίλυση Προβλημάτων Ανάθεσης Ραδιοπόρων για συστήματα OFDMA...	34
4	Τεχνικές Ανάθεσης Ραδιοπόρων με χρήση greedy αλγορίθμων .....	35
4.1	3-step Pietrzyk.....	35
4.1.1	Ορισμός του αριθμού υποφέροντων ανά χρήστη .....	35

4.1.2	Αποκλειστική ανάθεση υποφώνων στους χρήστες .....	37
4.1.3	Bit loading/Υπολογισμός της ισχύος ανά υποφώνον .....	39
4.1.4	Παρατηρήσεις – Συμπεράσματα .....	41
4.2	Αλγόριθμος Kivanc .....	41
4.2.1	Αλγόριθμος RCG .....	42
4.2.2	Αλγόριθμος ACG .....	43
4.2.3	Αλγοριθμική πολυπλοκότητα .....	44
4.3	Προσομοίωση .....	45
4.4	Γενικά συμπεράσματα .....	61
5	Εξελικτικές Τεχνικές Βελτιστοποίησης – Γενετικοί Αλγόριθμοι .....	63
5.1	Ιστορική Αναφορά και Γενικές Πληροφορίες .....	63
5.2	Ορισμός των δειγμάτων του αρχικού πληθυσμού που θα συμμετάσχουν στην αναπαραγωγή (Reproduction – Selection Operator) .....	64
5.2.1	Επιλογή μέσω διεξαγωγής τουρνουά .....	64
5.2.2	Αναλογική Επιλογή (proportional selection) .....	65
5.3	Αναπαραγωγή – Γενετική Διασταύρωση .....	66
5.4	Μετάλλαξη .....	67
5.5	Βασικές διαφορές μεταξύ των γενετικών αλγορίθμων και των κλασσικών μεθόδων βελτιστοποίησης .....	69
5.6	Ισοροπία μεταξύ των γενετικών τελεστών .....	70
6	Τεχνικές Ανάθεσης Ραδιοπόρων με χρήση Γενετικών Αλγορίθμων .....	73
6.1	Περιγραφή του Προβλήματος - Πιθανές Κωδικοποίησης των Παραμέτρων .....	73
6.2	Υλοποίηση Γενετικού Αλγορίθμου .....	75
6.3	Προσομοίωση .....	79
6.4	Γενικά συμπεράσματα .....	90
7	Συμπεράσματα - Προτάσεις για μελλοντική Έρευνα .....	91
7.1	Γενικά συμπεράσματα .....	91
7.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα .....	92
	Παράρτημα Α .....	93

## **ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ**

<b>Εικόνα 2.1:</b> WiMAX εφαρμογές σταθερών επικοινωνιών.....	14
<b>Εικόνα 2.2:</b> Σχηματική παρουσίαση παράλληλης μετάδοσης χρησιμοποιώντας $N = 4$ υποφέροντα για εύρος ζώνης $BW$ .....	17
<b>Εικόνα 2.3:</b> Αναπαράσταση διάρκειας OFDM συμβόλου .....	17
<b>Εικόνα 2.4:</b> NLOS και LOS μετάδοση σε αστικό ασύρματο σύστημα.....	19
<b>Εικόνα 2.5:</b> Επίδραση διασυμβολικών παρεμβολών: (a) χαμηλός ρυθμός δεδομένων που δεν επηρεάζεται από διασυμβολικές παρεμβόλες (b) χαμηλός ρυθμός δεδομένων που δεν επηρεάζεται αισθητά από διασυμβολικές παρεμβόλες (c) υψηλός ρυθμός δεδομένων που επηρεάζεται αισθητά από τις διασυμβολικές παρεμβόλες .....	20
<b>Εικόνα 2.6:</b> OFDM ραδιοπόροι: OFDM σύμβολα $s = 1, \dots, S$ και υποφέροντα $n = 1, \dots, N$ .....	22
<b>Εικόνα 2.7:</b> OFDMA μετάδοση κάτω ζεύξης αναθέτοντας σε διαφορετικούς χρήστες διαφορετικά υποφέροντα .....	23
<b>Εικόνα 2.8:</b> Multi-user OFDM block διάγραμμα .....	24
<b>Εικόνα 3.1:</b> Παρουσίαση του συστήματος.....	25
<b>Εικόνα 3.2:</b> Απόδοση δικαιοσύνης μέσω των αλγορίθμων 3.1 (max-min) και 3.3.....	33
<b>Εικόνα 3.3:</b> Απόδοση συστήματος μέσω των αλγορίθμων 3.1 (max-min) και 3.3 .....	33
<b>Εικόνα 4.1:</b> Παράδειγμα εκτέλεσης RCG αλγόριθμου .....	43
<b>Εικόνα 4.2:</b> Αλγοριθμική πολυπλοκότητα .....	44
<b>Εικόνα 4.3:</b> Κέρδη διαύλου για την χρονοθυρίδα 450.....	45
<b>Εικόνα 4.4:</b> Κέρδη διαύλου για την χρονοθυρίδα 450.....	47
<b>Εικόνα 4.5:</b> Κέρδη διαύλου για την χρονοθυρίδα 840.....	48
<b>Εικόνα 4.6:</b> Κέρδος διαύλου για το υποφέρον 39.....	49
<b>Εικόνα 4.7:</b> Κέρδος διαύλου για το υποφέρον 66.....	50
<b>Εικόνα 4.8:</b> Κέρδος διαύλου για το υποφέρον 119.....	50
<b>Εικόνα 4.9:</b> Κέρδος διαύλου για το υποφέρον 168.....	51
<b>Εικόνα 4.10:</b> Κέρδος διαύλου για το υποφέρον 120.....	52
<b>Εικόνα 4.11:</b> Μέση ισχύς εκπομπής σε dBw .....	55
<b>Εικόνα 4.12:</b> Μέση ισχύς εκπομπής σε Watt.....	55
<b>Εικόνα 4.13:</b> Μέση ισχύς εκπομπής σε dBw για σύστημα μιας κυψέλης στην οποία οι χρήστες κινούνται .....	56
<b>Εικόνα 4.14:</b> Μέση ισχύς εκπομπής σε Watt για σύστημα μιας κυψέλης στην οποία οι χρήστες κινούνται .....	57
<b>Εικόνα 4.15:</b> Μέση ισχύς εκπομπής σε dBw για σύστημα μιας κυψέλης ακτίνας $R = 2000m$ .....	58
<b>Εικόνα 4.16:</b> Μέση ισχύς εκπομπής σε kW για σύστημα μιας κυψέλης ακτίνας $R = 2000m$ .....	58

<b>Εικόνα 4.17:</b> Μέση ισχύς εκπομπής σε $W$ για σύστημα μιας κυψέλης ακτίνας $R = 1500m$ στην περίπτωση όπου ο χειρότερης χρήστης ζητά τον μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης.....	60
<b>Εικόνα 4.18:</b> Φαινόμενο διαφορικότητας πολλαπλών χρηστών ( <i>multiuser diversity</i> ).....	61
<b>Εικόνα 5.1:</b> Παράδειγμα διεξαγωγής τουρνουά σε πρόβλημα ελαχιστοποίησης.....	65
<b>Εικόνα 5.2:</b> Επιλογή γονέων με το μηχανισμό της ρουλέτας.....	66
<b>Εικόνα 5.3:</b> Παράδειγμα μετάλλαξης χρωμοσώματος.....	67
<b>Εικόνα 5.4:</b> Διάγραμμα ροής των βασικών αρχών λειτουργίας ενός γενετικού αλγορίθμου .....	68
<b>Εικόνα 5.5:</b> Παράδειγμα κωδικοποίησης των παραμέτρων σε πρόβλημα ελαχιστοποίησης του όγκου ενός κυλίνδρου.....	69
<b>Εικόνα 6.1:</b> Παράδειγμα αναπαράστασης της ανάθεσης ενός υποφέροντος σε χρήστη.....	74
<b>Εικόνα 6.2:</b> Βελτιωμένη κωδικοποίηση ανάθεσης υποφέροντων σε χρήστες.....	74
<b>Εικόνα 6.3:</b> Μη δυαδική κωδικοποίηση ανάθεσης υποφέροντων σε χρήστες .....	74
<b>Εικόνα 6.4:</b> Φαινόμενο μετάλλαξης σε μη δυαδική κωδικοποίηση ανάθεσης υποφέροντων σε χρήστες .....	77
<b>Εικόνα 6.5:</b> Σχηματική αναπαράσταση διαχείρισης ραδιοπόρων κάνοντας χρήση γενετικών αλγορίθμων.....	79
<b>Εικόνα 6.6:</b> Βελτίωση της ελάχιστης μεταδιδόμενης ισχύος για αριθμό 300 γενιών ....	81
<b>Εικόνα 6.7:</b> Βελτίωση της ελάχιστης μεταδιδόμενης ισχύος για αριθμό 500 γενιών ....	81
<b>Εικόνα 6.8:</b> Βελτίωση της ελάχιστης μεταδιδόμενης ισχύος για αριθμό 800 γενιών ....	82
<b>Εικόνα 6.9:</b> Μέση μεταδιδόμενη ισχύς 50 διαφορετικών χρονοθυρίδων .....	84
<b>Εικόνα 6.10:</b> Η μέση τελική μεταδιδόμενη ισχύς συναρτήσει του μεγέθους του πληθυσμού .....	88
<b>Εικόνα 6.11:</b> Γραφική παρουσίαση των αποτελέσματα τελικής ελάχιστης εκπεμπόμενης ισχύος συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης και του αριθμού των γενιών .....	89



## **ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ**

<i>Πίνακας 2.1: Σύγκριση WiMAX με άλλες ευρυζωνικές ασύρματες επικοινωνίες.....</i>	<i>16</i>
<i>Πίνακας 4.1: Υπολογισμός υποφέροντων ανά χρήστη για συνολικό φορτίο 5 Mbps....</i>	<i>46</i>
<i>Πίνακας 4.2: Υπολογισμός υποφέροντων ανά χρήστη για συνολικό φορτίο 10 Mbps..</i>	<i>46</i>
<i>Πίνακας 4.3: Αποκλειστική ανάθεση υποφέροντων στους χρήστες μέσω του αλγορίθμου 4.3 .....</i>	<i>53</i>
<i>Πίνακας 4.4: Αποκλειστική ανάθεση υποφέροντων στους χρήστες μέσω του αλγορίθμου 4.4 .....</i>	<i>53</i>
<i>Πίνακας 4.5: Ζήτηση χρηστών για το σενάριο της χειρότερης περίπτωσης.....</i>	<i>59</i>
<i>Πίνακας 4.6: Μέση συνολική μεταδιδόμενη ισχύς για το σενάριο της χειρότερης περίπτωσης.....</i>	<i>59</i>
<i>Πίνακας 4.7: Ορισμός του αριθμού υποφέροντων ανά χρήστη στην περίπτωση μεγάλης ζήτησης από τον χειρότερο χρήστη .....</i>	<i>60</i>
<i>Πίνακας 6.1: Μέση εκπεμπόμενη ισχύς αρχικού και τελικού πληθυσμού (Γενιά 800)</i>	<i>83</i>
<i>Πίνακας 6.2: Αποτελέσματα μέσης ελάχιστης εκπεμπόμενης ισχύος.....</i>	<i>84</i>
<i>Πίνακας 6.3: Ορισμός του αριθμού υποφέροντων ανα χρήστη για της χρονοθυρίδες 20 και 50 .....</i>	<i>85</i>
<i>Πίνακας 6.4: Ορισμός του αριθμού υποφέροντων ανα χρήστη για της χρονοθυρίδες 20 και 50 μέσω του γενετικού αλγορίθμου.....</i>	<i>86</i>
<i>Πίνακας 6.5: Αποτελέσματα τελικής ελάχιστης εκπεμπόμενης ισχύος για σταθερό ρυθμό μετάδοσης και χρονοθυρίδα.....</i>	<i>87</i>
<i>Πίνακας 6.6: Αποτελέσματα τελικής ελάχιστης εκπεμπόμενης ισχύος συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης και του αριθμού των γενιών .....</i>	<i>89</i>



# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Το αντικείμενο της Εργασίας

Όπως κάθε τεχνολογική καινοτομία, έτσι και τα σύγχρονα ευρυζωνικά ασύρματα συστήματα πολλαπλής πρόσβασης δεν μπορούν να σχεδιαστούν χωρίς να ληφθούν υπόψη τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος στο οποίο θα λειτουργήσουν καθώς και την ποιότητα υπηρεσιών που θα μπορούν να προσφέρουν στους χρήστες. Μερικά από τα βασικά χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει ένα τέτοιο σύστημα είναι:

- Υψηλούς ρυθμούς δεδομένων και δυνατότητα υποστήριξης διαφόρων σεναρίων κίνησης (Υψηλή ποιότητα υπηρεσιών)
- Ικανότητα εξυπηρέτησης ενός μεγάλου αριθμού χρηστών
- Αποτελεσματική χρήση των πόρων του συστήματος. Αυτό συνεπάγεται την ικανότητα του συστήματος να ικανοποιεί τις απαιτήσεις των χρηστών κάνοντας καλύτερη χρήση των ήδη διαθέσιμων πόρων.
- Χαμηλή κατανάλωση και εκπομπή ισχύος
- Δυνατότητας επικοινωνίας σε χρήστες που βρίσκονται εν κινήσει (*nomadicity/mobility*)
- Σωστή αντιμετώπιση των διακαναλικών παρεμβολών

Μία από τις πιο υποσχόμενες τεχνικές πρόσβασης είναι η OFDMA (*orthogonal frequency division multiple access*). Το OFDMA βασίζεται στην OFDM πολυπλεξία. Πρόκειται για ένα πρότυπο μετάδοσης το οποίο χωρίζει το διαθέσιμο εύρος ζώνης σε  $N$  υποφέροντα στενού εύρους ζώνης. Για να αποφευχθούν οι επιλεκτικές διαλείψεις ως προς την συχνότητα, το εύρος ζώνης κάθε υποφέροντος επιλέγεται να είναι αρκετά μικρότερο από το εύρος ζώνης συνοχής του καναλιού. Με αυτό τον τρόπο η μετάδοση γίνεται ανθεκτική απέναντι στο πολυδιαδρομικό περιβάλλον ενώ αυξάνει και η φασματική απόδοση.

Το βασικό χαρακτηριστικό του OFDMA είναι το γεγονός ότι σε ένα χρήστη μπορούν να ανατεθούν περισσότερα από ένα υποφέροντα. Σκοπός της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη και υλοποίηση τεχνικών διαχείρισης ραδιοπόρων ενός OFDMA συστήματος. Το βασικό πλεονέκτημα του OFDMA που εκμεταλλεύονται και αυτές οι τεχνικές είναι το γεγονός ότι ένα υποφέρον κακής ποιότητας για ένα χρήστη μπορεί να είναι καλής ποιότητας για έναν άλλο και επομένως να ανατεθεί κατάλληλα. Ουσιαστικά, στην παρούσα διπλωματική έγινε μια προσπάθεια επίλυσης του *margin adaptive* προβλήματος (ελαχιστοποίηση της

μεταδιδόμενης ισχύος) αρχικά εφαρμόζοντας κάποιες γνωστές τεχνικές διαχείρισης ραδιοπόρων και στη συνέχεια υλοποιώντας γενετικούς αλγορίθμους. Τελικός στόχος ήταν η προσέγγιση ή ακόμα και ο εντοπισμός εκείνης της ανάθεσης υποφέροντων στους χρήστες που θα προκαλέσει την ελάχιστη εκπομπή ισχύος. Τόσο στην περίπτωση των τεχνικών διαχείρισης ραδιοπόρων όσο και στην περίπτωση των γενετικών αλγορίθμων αποδείχθηκε ότι η επίλυση του προβλήματος είναι λιγότερο επίπονη από εκείνη που απαιτείται κάνοντας χρήση των κλασικών τεχνικών βελτιστοποίησης. Πρόκειται για ένα πρόβλημα με πολλές παραμέτρους και ακόμα περισσότερα σύνολα λύσεων με αποτέλεσμα να κρίνεται απαραίτητη η χρησιμοποίηση εναλλακτικών τεχνικών επίλυσης. Τόσο οι αλγόριθμοι διαχείρισης ραδιοπόρων όσο και οι γενετικοί αλγόριθμοι αποτελούν κατάλληλα εργαλεία για την συγκεκριμένη δουλειά.

## 1.2 Δομή της αναφοράς

Το κεφάλαιο 1 αποτελεί την εισαγωγή της πτυχιακής εργασίας. Αναφέρεται στο αντικείμενο της διπλωματικής, δηλαδή τόσο στον σκοπό της όσο και των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν για την επίτευξή του

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται αναφορά στα ασύρματα συστήματα πολλαπλής πρόσβασης, τα οποία διαχωρίζονται σε σταθερά και κινητά συστήματα επικοινωνιών. Γίνεται ιστορική αναφορά στην εξέλιξη του *WiMAX*, ενώ στη συνέχεια περιγράφονται και άλλα συστήματα όπως τα *3G* και *Wi-Fi*. Τέλος, παρουσιάζονται θεωρητικά στοιχεία τόσο για τα *OFDM* και *OFDMA* όσο και τον ασύρματο ευρυζωνικό δίαυλο.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται οι μαθηματικές εκφράσεις του *margin* και *rate adaptive* προβλήματος. Επιπλέον, γίνεται εκτενής αναφορά στους αλγόριθμους δικαισύνης καθώς επίσης γίνεται και η μοντελοποίηση του συστήματος το οποίο θα προσομοιώσουμε.

Στο κεφάλαιο 4 γίνεται εκτενής στους *greedy* αλγόριθμους διαχείρισης ραδιοπόρων (*Pietryzk, Kivanc*). Επεξηγούνται πλήρως όλα τα βήματα των τεχνικών ενώ στο τέλος εκτελούνται διάφορα σενάρια για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων.

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία της θεωρίας των γενετικών αλγορίθμων. Περιγράφονται τα στάδια της επιλογής, της γενετικής διασταύρωσης, της μετάλλαξης, οι δυαδικοί γενετικοί αλγόριθμοι καθώς και όλες οι παράμετροι που μπορούν να επηρεάσουν την σωστή λειτουργία τους.

Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται ο τρόπος σκέψης για την επιλογή του τρόπου υλοποίησης του γενετικού αλγορίθμου. Επιλέγεται η μορφή κωδικοποίησης των δεδομένων και στην συνέχεια εκτελούνται διάφορα σενάρια προσομοίωσης. Τέλος, εξάγονται γενικά συμπεράσματα για την απόδοση των γενετικών αλγορίθμων.

Στο κεφάλαιο 7 γίνεται μια συνολική εκτίμηση των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα πτυχιακή εργασία. Επιπλέον, προτείνονται ανοιχτά πεδία για μελλοντική έρευνα.

Τέλος, στο παράρτημα Α γίνεται παρουσίαση του *Hungarian* αλγόριθμου.

## 2 Συστήματα Ασύρματης Πρόσβασης OFDMA

### 2.1 Συστήματα σταθερών και κινητών επικοινωνιών νέας γενιάς

Τα ευρυζωνικά ασύρματα συστήματα διακρίνονται σε 2 κατηγορίες: στα σταθερά ευρυζωνικά ασύρματα συστήματα και στα αντίστοιχα κινητά συστήματα επικοινωνιών. Η πρώτη κατηγορία προσφέρει υπηρεσίες παρόμοιες με εκείνες των ενσύρματων σταθερών ευρυζωνικών συστημάτων και αποτελεί μια ανταγωνιστική εναλλακτική λύση του DSL και των καλωδιακών modem. Από την άλλη μεριά, η κατηγορία της κινητής ευρυζωνικότητας προσφέρει μεγάλη ευχέρεια υπηρεσιών στους χρήστες. Προσφέρει τη δυνατότητα σύνδεσης στο εκάστοτε δίκτυο από διαφορετικές περιοχές μέσω τοπικών σταθμών βάσης καθώς και τη διατήρηση της σύνδεσης όταν ο χρήστης βρίσκεται σε κίνηση. Σύγχρονες τεχνολογίες όπως το WiMAX (**worldwide interoperability for microwave access**), το 3G και το Wi-Fi είναι σχεδιασμένα να προσφέρουν υπηρεσίες τόσο για σταθερές όσο και για κινητές ευρυζωνικές εφαρμογές.

#### 2.1.1 Τεχνολογία WiMAX

Η WiMAX τεχνολογία έχει εξελιχθεί μέσα από 4 στάδια: (1) *ασύρματα συστήματα στενής ζώνης τοπικού βρόγχου* (2) *πρώτης γενιάς ευρυζωνικά συστήματα οπτικής επαφής (LOS)* (3) *δεύτερης γενιάς ευρυζωνικά συστήματα χωρίς οπτική επαφή (NLOS)* (4) *standards-based ευρυζωνικά ασύρματα συστήματα*.

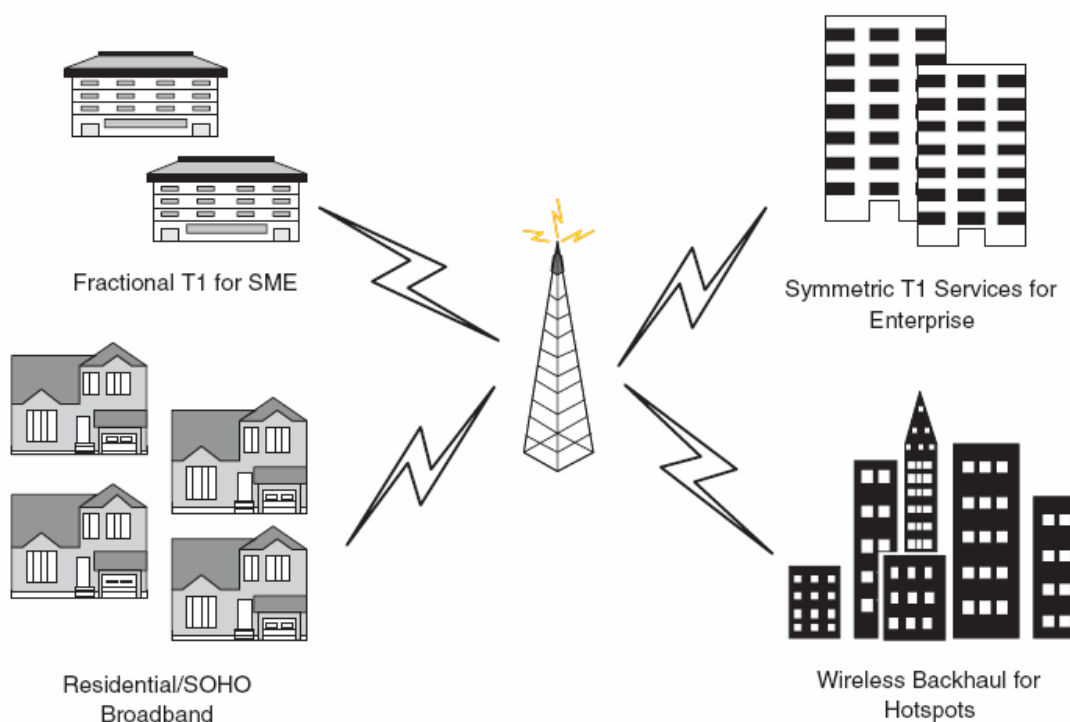
Η κατηγορία (1) αναπτύχθηκε όταν παρουσιάστηκε η ανάγκη ανάπτυξης ενός εναλλακτικού ασύρματου συστήματος τηλεφωνίας φωνής. Αυτά τα συστήματα ονομάστηκαν ασύρματα τοπικού βρόγχου (**wireless local-loop**) και παρουσίασαν μεγάλη επιτυχία σε αναπτυσσόμενες χώρες όπως την Κίνα, την Ινδία, την Ινδονησία, την Βραζιλία και την Ρωσία όπου η υψηλή ζήτηση των χωρών αυτών σε βασικές τηλεφωνικές ανάγκες δεν μπορούσε να ικανοποιηθεί από την υπάρχουσα τεχνολογική υποδομή. Ύστερα από την εμπορευματοποίηση του Internet το 1993, αρκετές μικρές εταιρείες ασχολήθηκαν με την ασύρματη παροχή υπηρεσιών Internet. Τα συστήματα αυτά εκπέμπαν στις ζώνες των 900MHz και των 2.4GHz και προσέφεραν ταχύτητες της τάξης των μερικών Kbps.

Η κατηγορία (2) αναπτύχθηκε όταν πια είχαν αυξηθεί σε μεγάλο βαθμό οι απαιτήσεις για υψηλές ταχύτητες Internet. Συστήματα όπως τα LMDS (*local multipoint distribution systems*) και MMDS (*multichannel multipoint distribution services*), στα τέλη της δεκαετίας του '90, ήταν σε θέση να προσφέρουν ταχύτητες αρκετών εκατοντάδων Mbps στη ζώνη των 24GHz και 39GHz τα μεν LMDS και στη ζώνη των 2.5GHz τα αντίστοιχα MMDS. Πρόκειται ουσιαστικά για την πρώτη γενιά σταθερών ευρυζωνικών ασύρματων επικοινωνιών οι οποίες υποστήριζαν LOS (line of sight) κάλυψη 35 μιλίων. Συνεπώς, οι χρήστες αυτών των συστημάτων έπρεπε να είχαν εγκαταστήσει τις κεραιές σε τέτοιο ύψος έτσι ώστε να υπάρχει οπτική επαφή με τον σταθμό εκπομπής.

Η κατηγορία (3) ξεπερνά το πρόβλημα της οπτικής επαφής μεταξύ πομπού και χρηστών. Αυτό επιτυγχάνεται χάρη στη χρήση κυψελωτών συστημάτων καθώς και την ανάπτυξη τεχνικών επεξεργασίας σήματος με αποτέλεσμα την μεγαλύτερη αξιοπιστία και απόδοση των ζεύξεων σε συνθήκες πολυδιαδρομικού περιβάλλοντος. Οι 2 βασικότερες τεχνικές επίλυσης του NLOS προβλήματος που προτάθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν επιτυχώς ήταν η OFDM (*orthogonal frequency division multiplexing*) και η CDMA (*code division multiple access*).

Όσον αφορά την κατηγορία (4), το 1998 το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (*IEEE*) δημιούργησε την ομάδα *802.16* με σκοπό την ανάπτυξη ενός προτύπου για ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα (*wireless-MAN*). Το *IEEE 802.16* εγκρίθηκε το Δεκέμβρη του 2001 και το εγκεκριμένο πρότυπο, *wireless-SC*, όριζε μονοφέρουσες τεχνικές διαμόρφωσης για το φυσικό στρώμα μετάδοσης και TDM πολυπλεξία στο MAC επίπεδο. Τα επόμενα χρόνια ακολούθησαν και άλλα πρότυπα όπως τα *wireless-Sca*, *wireless-OFDM*, *wireless-OFDMA* και *wireless-HUMAN*. Έτσι, το *IEEE 802.16* αποτέλεσε μια οικογένεια προτύπων, που συχνά αναφέρεται και ως WiMAX, που ορίζει τα MAC και PHY επίπεδα για ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα. Γενικά, τα πρότυπα *802.16* περιγράφουν ποικίλες περιπτώσεις λειτουργίας συστημάτων συγκαταλέγοντας ειδικές παρατηρήσεις για NLOS και LOS περιβάλλοντα.

Κλείνοντας, όσον αφορά τις εμπορικές εφαρμόγες του WiMAX θα πρέπει να τονίσουμε τα εξής παρακάτω σημεία. Η πλειοψηφία των WiMAX εφαρμογών για σταθερά ασύρματα δίκτυα έχουν να κάνουν με ζεύξεις μεταξύ κτιρίων όπως βιομηχανικών κέντρων και αστικών οικοδημάτων. Η πλήρης όμως αξιοποίηση του WiMAX επιτυγχάνεται μέσω των ασύρματων κινητών συστημάτων όπου δίνεται η δυνατότητα στους χρήστες να απολαμβάνουν ευρυζωνικές υπηρεσίες ανεξαρτήτου τοποθεσίας και κίνησης.



2.1: WiMAX εφαρμογές σταθερών επικοινωνιών

### 2.1.2 Τεχνολογία 3G κυψελωτών συστημάτων

Οι εταιρίες κινητής τηλεφωνίας αναβαθμίζουν τα δίκτυα τους σε 3G τεχνολογία με σκοπό την παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών στους συνδρομητές τους. Τα *UMTS* (*universal mobile telephone system*) και *HSDPA* (*high speed downlink packet access*) συστήματα αποτελούν ένα μέρος της 3G εξέλιξης. Γενικά, η 3G τεχνολογία προσφέρει ταχύτητες της τάξης μεταξύ μερικών Kbps και Mbps. Το *HSDPA*

προσφέρει μέγιστο ρυθμό μετάδοσης της τάξης των 14.4Mbps χρησιμοποιώντας κανάλι 5 MHz. Βέβαια, η πραγματοποίηση τέτοιων ταχυτήτων απαιτεί την χρήση και των 15 κωδικών, γεγονός που είναι αδύνατον να εφαρμοστεί στα κινητά τερματικά. Χρησιμοποιώντας 5 με 10 κωδικούς, το *HSDPA* προσφέρει μέγιστες ταχύτητες μετάδοσης της τάξης των 3.6 Mbps και 7.2 Mbps αντίστοιχα. Οι τυπικές μέσες ταχύτητες που μπορούν να αποκτήσουν οι χρήστες είναι του εύρους των 250 Kbps με 750 Kbps. Επιπλέον, το *HSDPA* μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε συστήματα κάτω ζεύξης με αποτέλεσμα η μέγιστη ταχύτητα μετάδοσης για την άνω ζεύξη να είναι λιγότερη από 384 Kbps με τις συνηθέστερες τιμές να κυμαίνονται μεταξύ των 40Kbps και 100Kbps. Το *HSUPA* (*high-speed uplink packet access*) αποτελεί μια έκδοση άνω ζεύξης, το οποίο υποστηρίζει μέγιστες ταχύτητες έως και 5.8Mbps και ανήκει στις τυποποιήσεις του *3GPP*. Τα *HSDPA* και *HSUPA* αναφέρονται μαζί ως *HSPA* (*high-speed packet access*).

Ένα άλλο πρότυπο που έχει τη δυνατότητα παροχής υψηλών ταχυτήτων μετάδοσης είναι το *1x EV-DO*. Το *1x EV-DO* παρέχει μέγιστο ρυθμό μετάδοσης κάτω ζεύξης της τάξης των 2.4 Mbps σε κανάλι των 1.25MHz. Γενικά, εκτός των υψηλών ταχυτήτων που παρέχουν τα *3G* συστήματα, είναι σε θέση να προσφέρουν και αρκετές *multimedia* υπηρεσίες. Π.χ. το *1x EV-DO* παρέχει τηλεφωνία φωνής και εικόνας μέσω IP.

Η νέα γενιά των *3G* τυποποιήσεων είναι το *3GPP*. Ο στόχος αυτής της μακροπρόθεσμης εξέλιξης είναι η υποστήριξη ταχυτήτων της τάξης των 100 Mbps στην κάτω ζεύξη και 50 Mbps στη άνω με την μέση φασματική απόδοση να είναι 3 με 4 φορές καλύτερη από την αντίστοιχη του *HSPA*. Για να επιτευχθούν τόσο οι υψηλές ταχύτητες όσο και η φασματική αποδοτικότητα θα πρέπει στο φυσικό στρώμα μετάδοσης να εφαρμοστούν τεχνικές *OFDM/OFDMA* ή *MIMO*, όπως αντίστοιχα συμβαίνει και στο *WiMAX*.

### 2.1.3 Wi-Fi Συστήματα

Το *Wi-Fi* ανήκει στην οικογένεια προτύπων *IEEE 802.11* και αποτελεί μια τεχνολογία τοπικού δικτύου η οποία είναι σχεδιασμένη να παρέχει ευρυζωνική ενδοκτιριακή κάλυψη. Τα τελευταία χρόνια, σε πόλλα αστικά κέντρα έχουν εγκατασταθεί *Wi-Fi* συστήματα με σκοπό την παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών. Η κάλυψη αυτών των συστημάτων είναι *1000 ft* από το σημείο πρόσβασης. Συνεπώς, οι μητροπολιτικές εγκαταστάσεις *Wi-Fi* συστημάτων απαιτούν την πυκνή τοποθέτηση σημείων πρόσβασης γεγονός το οποίο αποτελεί και ένα από τα μειονεκτήματα της συγκεκριμένης τεχνολογίας.

Γενικά, το *Wi-Fi* παρέχει μεγαλύτερες ταχύτητες μετάδοσης από το *3G* εξαιτίας του μεγαλύτερου εύρους ζώνης που χρησιμοποιεί (20 MHz). Βέβαια, το λιγότερο αποδοτικό πρωτόκολο, *CSMA* (*carrier sense multiple access*), που χρησιμοποιεί το *Wi-Fi* καθώς και οι τυχόν παρεμβολές λόγω του περιβάλλοντος μειώνουν την απόδοση της *Wi-Fi* τεχνολογίας. Επιπλέον, δεν είναι σχεδιασμένα να παρέχουν υπηρεσίες σε χρήστες που βρίσκονται εν κινήσει. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των *Wi-Fi* συστημάτων έναντι των *3G* και *WiMAX* είναι η ταυτόχρονη παροχή υπηρεσιών σε ένα μεγάλο αριθμό τερματικών. Σήμερα, η τεράστια πλειοψηφία των φορητών υπολογιστών υποστηρίζει *Wi-Fi* εφαρμογές όπως και κινητά τηλέφωνα, κάμερες κλπ. Όπως και με το *3G*, η έκδοση της *IEEE 802.11n* τυποποίησης επιχειρεί την βελτίωση της γενικότερης απόδοσης του *Wi-Fi* και συγκεκριμένα στοχεύει τόσο στην αύξηση των ταχυτήτων μετάδοσης όσο και στην βελτίωση της κάλυψης των σημείων πρόσβασης [2].

Parameter	Fixed WiMAX	Mobile WiMAX	HSPA	1x EV-DO Rev A	Wi-Fi
Standards	IEEE 802.16-2004	IEEE 802.16e-2005	3GPP Release 6	3GPP2	IEEE 802.11a/g/n
Peak down link data rate	9.4Mbps in 3.5MHz with 3:1 DL-to-UL ratio TDD; 6.1Mbps with 1:1	46Mbps <sup>a</sup> with 3:1 DL- to-UL ratio TDD; 32Mbps with 1:1	14.4Mbps using all 15 codes; 7.2Mbps with 10 codes	3.1Mbps; Rev. B will support 4.9Mbps	54 Mbps <sup>b</sup> shared using 802.11a/g; more than 100Mbps peak layer 2 throughput using 802.11n
Peak uplink data rate	3.3Mbps in 3.5MHz using 3:1 DL-to-UL ratio; 6.5Mbps with 1:1	7Mbps in 10MHz using 3:1 DL-to-UL ratio; 4Mbps using 1:1	1.4Mbps initially; 5.8Mbps later	1.8Mbps	
Bandwidth	3.5MHz and 7MHz in 3.5GHz band; 10MHz in 5.8GHz band	3.5MHz, 7MHz, 5MHz, 10MHz, and 8.75MHz initially	5MHz	1.25MHz	20MHz for 802.11a/g; 20/40MHz for 802.11n
Modulation	QPSK, 16 QAM, 64 QAM	QPSK, 16 QAM, 64 QAM	QPSK, 16 QAM	QPSK, 8 PSK, 16 QAM	BPSK, QPSK, 16 QAM, 64 QAM
Multiplexing	TDM	TDM/OFDMA	TDM/CDMA	TDM/CDMA	CSMA
Duplexing	TDD, FDD	TDD initially	FDD	FDD	TDD
Frequency	3.5GHz and 5.8GHz initially	2.3GHz, 2.5GHz, and 3.5GHz initially	800/900/1,800/1,900/2,100MHz	800/900/1,800/1,900MHz	2.4GHz, 5GHz
Coverage (typical)	3–5 miles	< 2 miles	1–3 miles	1–3 miles	< 100 ft indoors; < 1000 ft outdoors
Mobility	Not applicable	Mid	High	High	Low

2.1: Σύγκριση WiMAX με άλλες ευρυζωνικές ασύρματες επικοινωνίες

## 2.2 Η τεχνική OFDM στο φυσικό στρώμα μετάδοσης

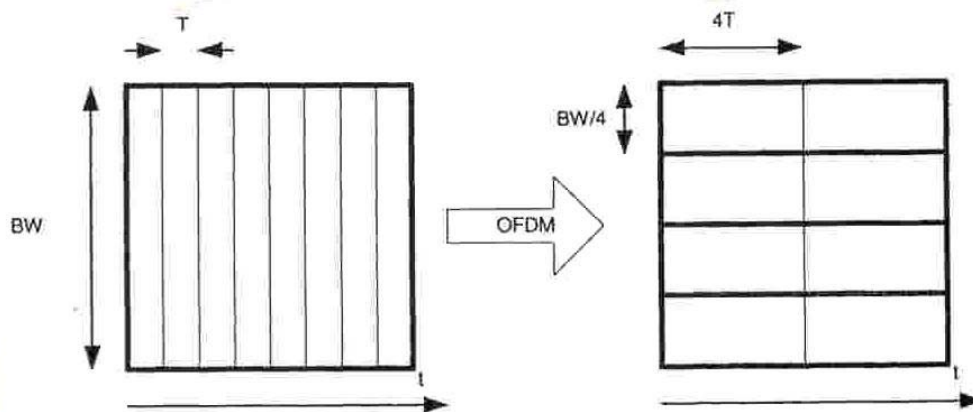
Το φυσικό στρώμα μετάδοσης του WiMAX στηρίζεται στην τεχνική OFDM (**orthogonal frequency division multiplexing**). Πρόκειται για ένα πλάνο μετάδοσης με επιλογή υψηλών ρυθμών μετάδοσης δεδομένων, βίντεο και multimedia εφαρμογών το οποίο χρησιμοποιείται σε πληθώρα σύγχρονων εμπορικών ευρυζωνικών συστημάτων (DSL, Wi-Fi, DVB-H, MediaFLO). Γενικά, το OFDM είναι μια κομψή και αποτελεσματική τεχνική, ιδανική για μετάδοση υψηλών ταχυτήτων σε NLOS (non-line of sight) ζεύξεις και πολυδιαδρομικό περιβάλλον.

### 2.2.1 Οι θεμελιώδεις αρχές της τεχνικής OFDM

Το OFDM ανηκεί στην οικογένεια τεχνικών μετάδοσης της πολυφέρουσας διαμόρφωσης (**multicarrier modulation**) η οποία βασίζεται στην ιδέα διαμελισμού ενός υψηλού ρυθμού μετάδοσης σε πολλούς παράλληλους, χαμηλότερης ταχύτητας καθένας από τους οποίους μεταφέρεται σε ξεχωριστό φέρον (υποφέρον). Γενικά, η μελέτη των πολυφέροντων συστημάτων άρχισε την δεκαετία του '60 με σκοπό την



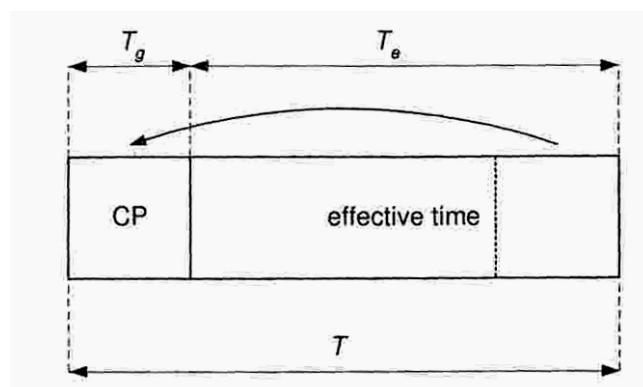
λειτουργία τους σε στρατιωτικές εφαρμογές. Η πολυφέρουσα διαμόρφωση εξαλείφει ή ελαχιστοποιεί τις διασυμβολικές παρεμβολές αυξάνοντας την διάρκεια συμβόλου κάθε παράλληλου ρυθμού μετάδοσης με αποτέλεσμα την μείωση της επίδρασης του πολυδιαδρομικού περιβάλλοντος. Πρακτικά, ένας υψηλός ρυθμός bit  $R$  χωρίζεται σε  $N$  παράλληλους ρυθμούς ταχύτητας  $R/N$  ο καθένας. Αν και τα  $N$  υποφέροντα επικαλύπτονται, προσφέρουν υψηλή φασματική αποτελεσματικότητα λόγω της ορθογωνιότητας που τα χαρακτηρίζει [1]. Σχηματικά έχουμε:



**Εικόνα 2.2:** Σχηματική παρουσίαση παράλληλης μετάδοσης χρησιμοποιώντας  $N = 4$  υποφέροντα για εύρος ζώνης  $BW$

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε και στην εικόνα 2.1, η παράλληλη διάδοση δεδομένων αυξάνει τη διάρκεια συμβόλου με αποτέλεσμα τη μείωση της επίδρασης του πολυδιαδρομικού περιβάλλοντος.

Η απόσταση μεταξύ 2 γειτονικών υποφερόντων,  $\Delta f$ , δίνεται από την σχέση  $\Delta f = 1/T_e$ , όπου  $T_e = T - T_g$  ο ωφέλιμος χρόνος της διάρκειας συμβόλου του υποφερόντος. Προφανώς, με  $N$  υποφέροντα το συνολικό εύρος ζώνης του συστήματος εκφράζεται ως  $BW = N \cdot \Delta f$ .



**Εικόνα 2.3:** Αναπαράσταση διάρκειας OFDM συμβόλου

Η τεχνική της OFDM διαμόρφωσης συχνά πραγματοποιείται με την χρήση του αντίστροφου διακριτού μετασχηματισμού Fourier (IDFT). Αυτό κάνει εξαιρετικά εύκολη την υλοποίηση OFDM πομπών και δεκτών μέσω του ταχύ αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier (IFFT). Αντίστοιχα, η OFDM αποδιαμόρφωση πραγματοποιείται με την χρήση του διακριτού μετασχηματισμού Fourier (DFT) και η

υλοποίηση μέσω του ταχύ μετασχηματισμού Fourier (FFT). Η τάξη του ταχύ μετασχηματισμού Fourier που θα χρησιμοποιηθεί στο σχεδιασμό του OFDM συστήματος θα πρέπει να επιλεγεί προσεκτικά έτσι ώστε να διατηρηθεί η ισορροπία μεταξύ της προστασίας από το πολυδιαδρομικό περιβάλλον, διαλείψεις Doppler και την πολυπλοκότητα/κόστος του συστήματος. Για ένα δεδομένο εύρος ζώνης, η επιλογή μεγάλης τάξης FFT έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της απόστασης  $\Delta f$  μεταξύ των υποφέροντων καθώς και την αύξηση της διάρκειας συμβόλου. Συνεπώς, με αυτή την τεχνική παρέχεται στο σύστημα μεγαλύτερη προστασία από τις επιδράσεις των πολυδιαδρομικών διαλείψεων αν και ταυτόχρονα η μείωση του  $\Delta f$  κάνει το σύστημα ευαίσθητο στις παρεμβολές μεταξύ των υποφέροντων εξαιτίας των διαλείψεων Doppler που εμφανίζονται στις κινητές εφαρμογές [2].

### 2.2.2 Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της τεχνικής OFDM

Το OFDM, ως τεχνολογία μετάδοσης, παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα. Παρακάτω παρατείθονται μερικά από τα πιο σημαντικά:

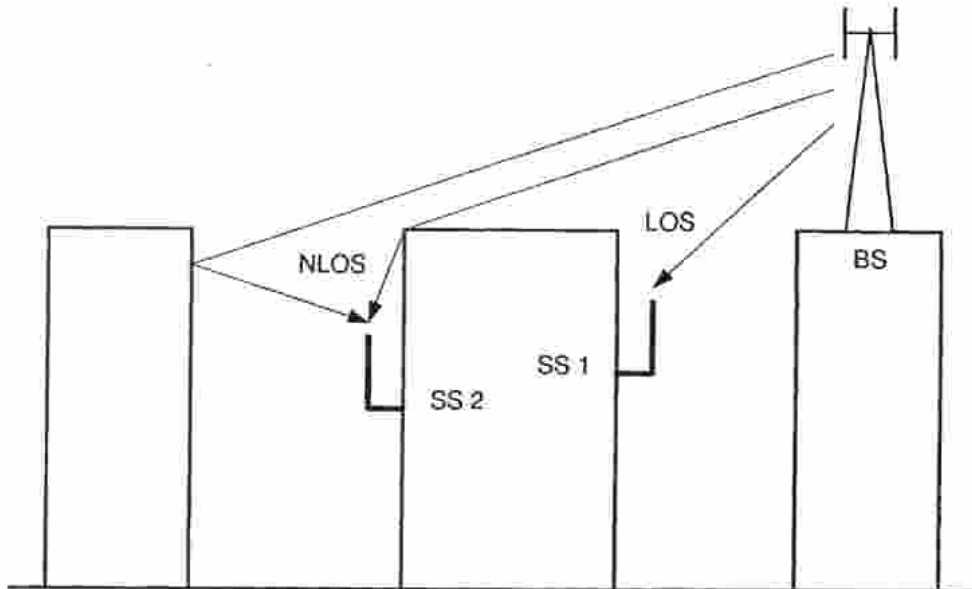
- Το OFDM είναι ανθεκτικό στην πολυδιαδρομική μετάδοση λόγω της αυξημένης διάρκειας των OFDM συμβόλων κάθε υποφέροντος.
- Η υλοποίησή του στο ψηφιακό πεδίο είναι εύκολη μέσω της χρήσης (I)FFT ολοκληρωμένων.
- Ο διαμελισμός του εύρους ζώνης σε υποφέροντα προσφέρει νέες δυνατότητες για το επίπεδο υπηρεσιών και τη διαχείριση ραδιοπόρων μιας και είναι εφικτή η ικανοποίηση των απαιτήσεων των χρηστών με τον ελάχιστο δυνατό αριθμό πόρων.
- Λόγω της ορθογωνιότητας των υποφέροντων, δεν υπάρχουν παρεμβολές μεταξύ τους παρά το γεγονός ότι επικαλύπτονται.

Ένα σημαντικό μειονέκτημα της OFDM τεχνολογίας είναι το πρόβλημα του λόγου της μέγιστης ισχύος προς την μέση (peak-to-average-power ratio). Το OFDM σήμα αποτελείται από  $N$  ανεξάρτητα διαμορφωμένα σήματα τα οποία, όταν προστίθενται με την ίδια φάση, έχουν ως αποτέλεσμα την δημιουργία ισχύος εξόδου  $N$  φορές μεγαλύτερη από τη μέση. Αυτές οι διακυμάνσεις του σήματος ισχύος αποτελούν σημαντικό πρόβλημα στον σχεδιασμό τόσο των RF ενισχυτών όσο και των AD/DA μετατροπών [1].

### 2.3 Ο ευρυζωνικός κινητός ασύρματος διάυλος

Η επικοινωνία μέσω ενός ραδιοδιαύλου θα πρέπει να θεωρηθεί μια αρκετά ενδιαφέρουσα διαδικασία. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το μεταδιδόμενο σήμα υπόκειται σε διάφορα φυσικά φαινόμενα όπως την ανάκλαση, την περίθλαση και την διάχυση. Προφανώς, τα εμπόδια μεταξύ του πομπού και του δέκτη (κτίρια ή δάση σε εξωτερικό περιβάλλον, τοίχοι ή έπιπλα σε εσωτερικό χώρο) είναι υπεύθυνα για την εμφάνιση των παραπάνω φαινομένων. Η παρουσία των ενδιάμεσων αντικειμένων έχουν ως αποτέλεσμα την άφιξη του σήματος στο δέκτη πολλαπλές φορές, λόγω των πολλαπλών διαδρομών που ακολούθησε το σήμα. Στην πράξη, το λαμβανόμενο σήμα

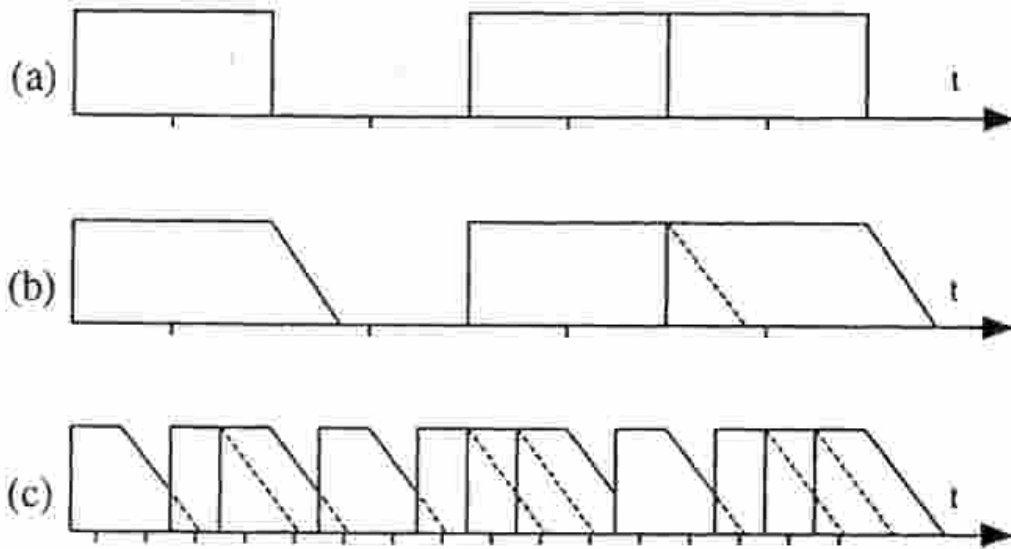
μπορεί να είναι σημαντικά διαφορετικό από το εκπεμπόμενο, ιδιαίτερα σε σενάρια ζεύξεων που δεν βρίσκονται στην ίδια οπτική ευθεία (NLOS- non line of sight). Σε τέτοιες περιπτώσεις απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην σωστή αποκωδικοποίηση του λαμβανόμενου σήματος.



Εικόνα 2.4: NLOS και LOS μετάδοση σε αστικό ασύρματο σύστημα

### 2.3.1 Γενικά για την διάδοση σήματος

Σε φέρουσες συχνότητες πάνω από 1 GHz (είναι συνήθεις συχνότητες στην πλειοψηφία των σύγχρονων ασύρματων συστημάτων) η σκίαση και η ανάκλαση αποτελούν κυρίαρχα φαινόμενα. Το λαμβανόμενο σήμα στο δέκτη αποτελεί μια υπέρθεση αντίγραφων του εκπεμπόμενου σήματος, καθένα από τα οποία έχει διαφορετικό πλάτος, φάση και χρόνο άφιξης. Το παραπάνω φαινόμενο ονομάζεται πολυδιαδρομική διάδοση και προκαλεί διασπορά του λαμβανόμενου σήματος στο πεδίο του χρόνου και επιλεκτικότητα συχνοτήτων στο πεδίο της συχνότητας. Σε περιπτώσεις υψηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, η χρονική διασπορά προκαλεί υπερκάλυψη των μεταδιδόμενων παλμών με αποτέλεσμα την ύπαρξη διασυμβολικής παρεμβολής (ISI-intersymbol interference).



**Εικόνα 2.5:** Επίδραση διασυμβολικών παρεμβολών: (a) χαμηλός ρυθμός δεδομένων που δεν επηρεάζεται από διασυμβολικές παρεμβόλες (b) χαμηλός ρυθμός δεδομένων που δεν επηρεάζεται αισθητά από διασυμβολικές παρεμβόλες (c) υψηλός ρυθμός δεδομένων που επηρεάζεται αισθητά από τις διασυμβολικές παρεμβόλες

Συνοψίζοντας, είναι φανερή η ύπαρξη των παρακάτω ανεξάρτητων φαινομένων στο μοντέλο του ασύρματου ραδιοδιαύλου :

- εξασθένιση σήματος (path loss)
- σκίαση (shadowing)
- πολυδιαδρομική διαδρομή (multipath)
- παρεμβολές (interference)

Κάθε ένα από τα φαινόμενα έχει διαφορετική φυσική προέλευση και πρέπει να μελετώνται όλα κατά τη σχεδίαση αλλά και κατά την αξιολόγηση της επίδοσης των κυβελωτών συστημάτων.

### 2.3.2 Απώλειες διάδοσης (path loss)

Τόσο οι απώλειες διάδοσης όσο και η σκίαση αποτελούν φαινόμενα μεγάλης κλίμακας (large-scale effects). Είναι υπεύθυνα για τις διακυμάνσεις της λαμβανόμενης ισχύος σήματος που καταγράφεται στο δέκτη. Οι απώλειες διάδοσης εξαρτώνται απόλυτα από την απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη και εκφράζουν την μέση εξασθένιση του σήματος. Το επόμενο απλό μοντέλο συχνά χρησιμοποιείται για να μοντελοποιήσει το φαινόμενο των απωλειών διάδοσης:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10a \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right), \quad (2.1)$$

όπου  $d_0$  είναι η απόσταση αναφοράς,  $d$  είναι η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη και  $a$  ο συντελεστής εξασθένισης. Συχνά, ως απόσταση αναφοράς θεωρείται  $d_0 = 1m$ . Επομένως, οι απώλειες διάδοσης εκφράζονται μέσω της σχέσης:

$$PL(\lambda, d_0 = 1\text{m}) = 10\log\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right)^2 \quad (2.2)$$

### 2.3.3 Σκίαση (shadowing)

Στις παραπάνω εξισώσεις δεν λαμβάνεται υπόψη τόσο η μορφολογία του εδάφους όσο και τα τυχόν εμπόδια που υπάρχουν στο χώρο διάδοσης. Η λαμβανόμενη ισχύς είναι στην πραγματικότητα μια τυχαία μεταβλητή που εξαρτάται από τον αριθμό και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των σκεδαστών που συμμετέχουν στη διάδοση. Συνεπώς, οι τιμές της λαμβανόμενης ισχύος μπορεί να είναι εντελώς διαφορετικές από τη μέση τιμή που προβλέπει η παραπάνω εξίσωση. Η σκίαση μπορεί να μοντελοποιηθεί από μια Gaussian τυχαία μεταβλητή,  $X_{shadow}$ , μηδενικής μέσης τιμής και διακύμανσης  $\sigma_{shadow}$ . Συνεπώς, μια σωστότερα αριθμητική αποτύπωση των απωλειών διάδοσης είναι:

$$L_{prop}(d) = PL(d) + X_{shadow} \quad (\text{σε dB}) \quad (2.3)$$

Στην πράξη, ικανοποιητικές τιμές της σκίασης είναι  $\sigma_{shadow} = 8 \text{ dB}$ .

### 2.3.4 Πολυδρομική διαδρομή (multipath)

Η πολυδρομική διάδοση είναι και το πιο βασικό χαρακτηριστικό της διάδοσης στο ραδιοδίαυλο των συστημάτων κινητών επικοινωνιών. Προκαλεί τυχαίες μεταβολές στο πλάτος του λαμβανόμενου σήματος (**flat fading**), αλλά και διασυμβολική παρεμβολή (**intersymbol interference**) ή διαλείψεις επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα (**frequency selective fading**).

Ένα κριτήριο για την επιλεκτικότητα του ραδιοδιαύλου ως προς την συχνότητα είναι το **εύρος ζώνης συνοχής (coherence bandwidth)** το οποίο εκφράζεται ως:

$$B_{coh} = \frac{1}{\xi \cdot T_{rms}} \quad (2.4)$$

Το εύρος ζώνης συνοχής είναι το εύρος συχνοτήτων στο οποίο η απόκριση του ραδιοκαναλιού μπορεί να θεωρηθεί σταθερή. Με άλλα λόγια, εκφράζει την περίοδο μεταβολής της απόκρισης του ραδιοδιαύλου. Αν το εύρος ζώνης του εκπεμπόμενου σήματος είναι μεγαλύτερο από το  $B_{coh}$  ο δίαυλος θεωρείται επιλεκτικός ως προς την συχνότητα. Διαφορετικά, το κανάλι θεωρείται επίπεδο (**flat fading**).

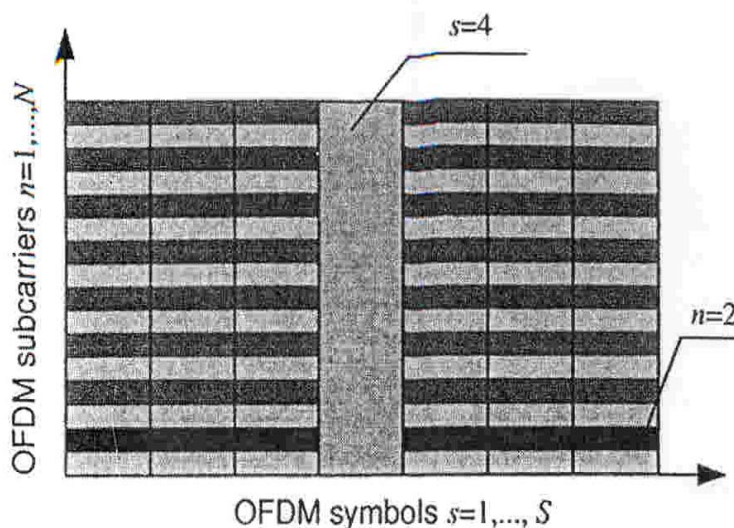
Στο πεδίο του χρόνου, η χρονική διασπορά των πολυδρομικών συνιστωσών οδηγεί σε διασυμβολική παρεμβολή (ISI) όταν η μέγιστη διαφορά στην καθυστέρηση των συνιστωσών είναι μεγαλύτερη από ένα τμήμα της διάρκειας ενός bit. Η διασυμβολική παρεμβολή προκαλεί υψηλούς ρυθμούς σφαλμάτων **BER** που δεν μειώνονται με την αύξηση της ισχύος, λόγω της ταυτόχρονης αύξησης της ισχύος της παρεμβολής. Άμεση συνέπεια της ISI είναι η χρήση χαμηλών ρυθμών μετάδοσης ώστε η χρονική διασπορά να είναι μικρότερη της διάρκειας του bit [1, 2, 3].

## 2.4 Πολυπλεξία OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)

Το OFDM είναι μια στρατηγική διαμόρφωσης που δημιουργεί πολλούς ανεξάρτητους ρυθμούς δεδομένων οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν από διαφορετικούς χρήστες και δεν αποτελεί μια τεχνική πολλαπλής πρόσβασης. Τα προηγούμενα OFDM συστήματα, όπως το DSL, 802.11a/g, και οι πρώτες εκδόσεις του 802.16/WiMAX, χρησιμοποιούν **single-user OFDM**, δηλαδή όλα τα υποφέροντα χρησιμοποιούνται από ένα χρήστη σε μια στιγμή. Το WiMAX (802.16e-2005) έχει μια διαφορετική προσέγγιση γνωστή και ως OFDMA (orthogonal frequency division multiple access), όπου οι χρήστες μοιράζονται υποφέροντα και χρονοθυρίδες.

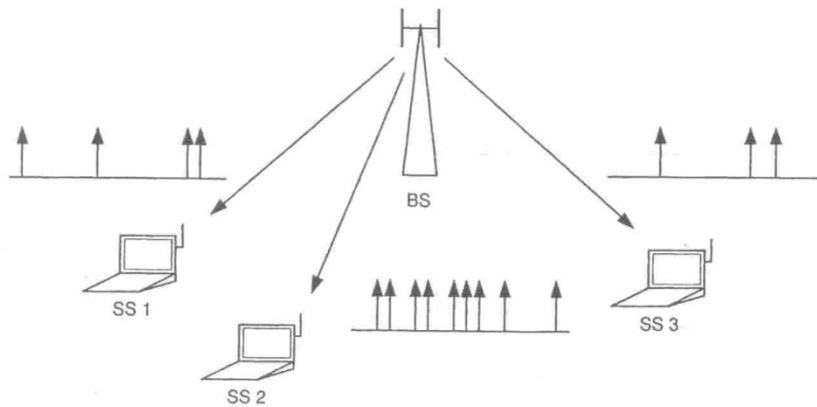
### 2.4.1 Οι θεμελιώδεις αρχές του OFDMA

Βασική αρχή του OFDMA είναι ο διαχωρισμός του χρόνου και της συχνότητας σε OFDM σύμβολα και OFDM υποφέροντα αντίστοιχα. Σχηματικά φαίνεται παρακάτω:



**Εικόνα 2.6:** OFDM ραδιοπόροι: OFDM σύμβολα  $s = 1, \dots, S$  και υποφέροντα  $n = 1, \dots, N$

Το καθένα από τα OFDM σύμβολα ή υποφέροντα μπορεί να ανατεθεί σε διαφορετικούς χρήστες. Επιπλέον, διαφορετικός αριθμός συμβόλων και υποφέροντων μπορεί να ανατεθεί στους χρήστες με αποτέλεσμα και διαφορετικά επίπεδα διαμόρφωσης (αριθμός bit ανά σύμβολο διαμόρφωσης). Με αυτό τον τρόπο, μπορούν να επιτευχθούν ποικίλα επίπεδα ποιότητας υπηρεσιών. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η ανάθεση των υποφέροντων στους χρήστες σε ασύρματο σύστημα κάτω ζεύξης:



**Εικόνα 2.7:** OFDMA μετάδοση κάτω ζεύξης αναθέτοντας σε διαφορετικούς χρήστες διαφορετικά υποφέροντα

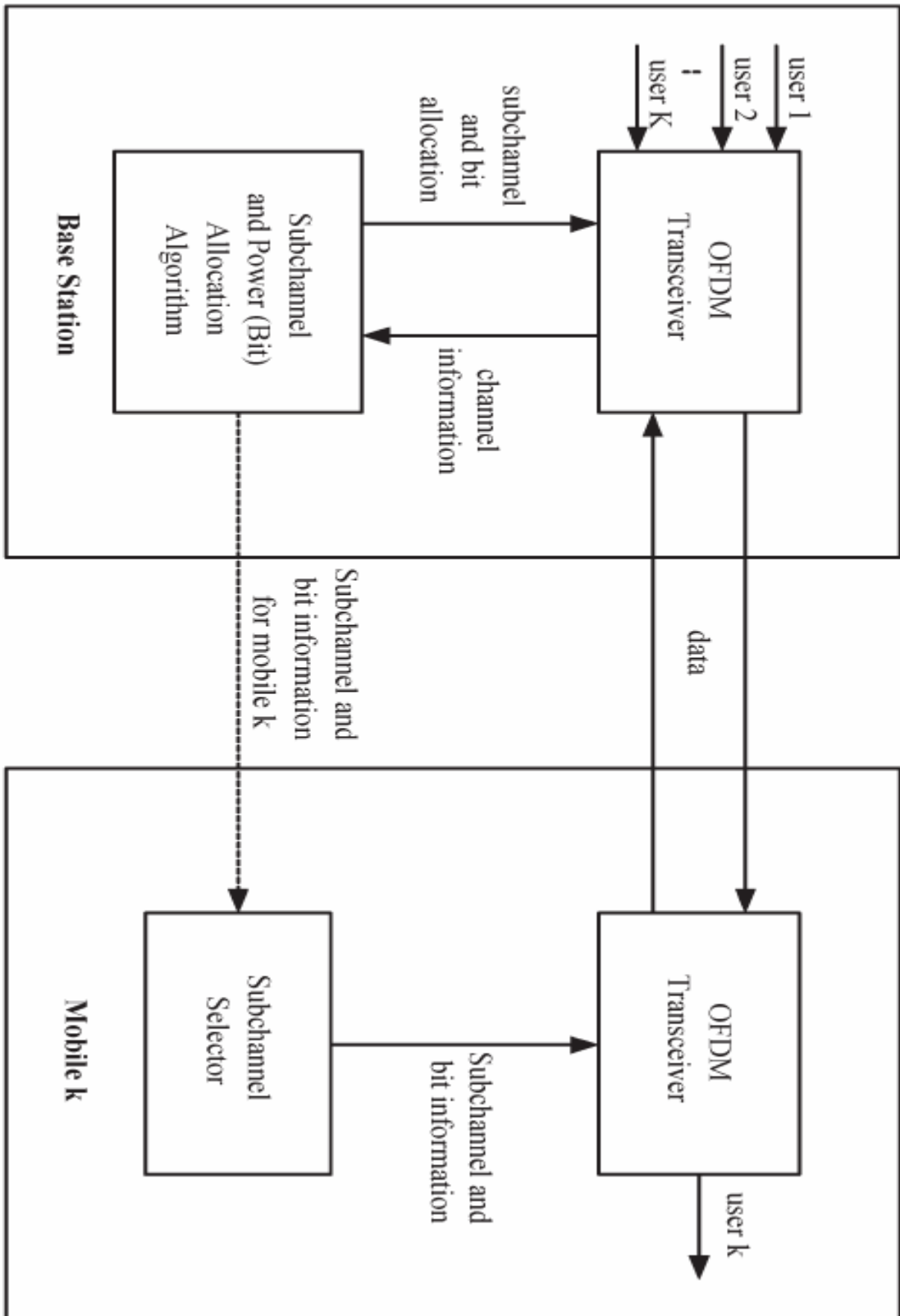
Όπως φαίνεται από το παραπάνω σχήμα, σε κάθε χρήστη έχει ανατεθεί ένας αριθμός υποφώντων ανάλογα με τις συνθήκες και την κίνηση του ραδιοδιαύλου. **Ποιό υποφών ανατείνεται σε ποίό χρήστη καθορίζεται από την σωστή διαχείριση των ραδιοπόρων.**

#### 2.4.2 Πλεονεκτήματα/Μειονεκτήματα OFDMA

Το OFDMA κληρονομεί όλα τα υπέρ και τα κατά του OFDM όπως αυτά αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Επιπλέον, τα νέα πλεονεκτήματα του OFDMA είναι:

- Προσφέρει πολυχρηστική ποικιλία (**multiuser diversity**) : Ένα υποφών χαμηλής ποιότητας για ένα χρήστη μπορεί να μην είναι για τους άλλους χρήστες και επομένως θα πρέπει να διαχειρισθεί κατάλληλα.
- Προσφέρει ευελιξία : Τα υποφέροντα μοιράζονται στους χρήστες με βάση την ισχύ και μπορούν να εφαρμοστούν διαφορετικά επίπεδα διαμόρφωσης ανά υποφών.
- PAPR : Μειώνει τον λόγο της μέγιστης ισχύος προς την μέση (peak-to-average-power ratio), φαινόμενο που αποτελεί συχνό πρόβλημα στο OFDM. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για την εκπομπή του σήματος απαιτείται ένα μέρος (μερικά υποφέροντα) και όχι ολόκληρο το εύρος ζώνης της ζεύξης.

Το βασικό μειονέκτημα του OFDMA είναι οι διακαναλικές παρεμβολές, οι οποίες είναι αναπόφευκτες στο πολυχρηστικό περιβάλλον. Συνεπώς απαιτείται η αναζήτηση τεχνικών για την κατάλληλη διαχείριση των ραδιοπόρων με σκοπό την ελαχιστοποίηση της επίδρασης μεταξύ των χρηστών. **Στα πλαίσια του OFDMA, η διαχείριση ραδιοπόρων απαιτεί την σωστή ανάθεση υποφώντων στους χρήστες, κατάλληλο bit loading στα υποφέροντα και έλεγχο της ισχύος ανά υποφών [1].**



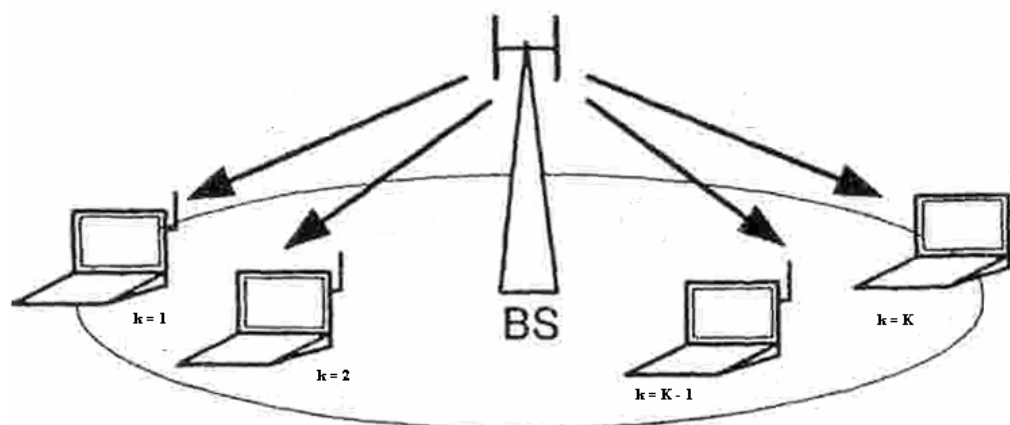
Εικόνα 2.8: Multi-user OFDM block διάγραμμα



## 3 Ανάθεση Ραδιοπόρων σε συστήματα OFDMA

### 3.1 Μοντελοποίηση Προβλήματος

Θεωρούμε το παρακάτω σύστημα κάτω ζεύξης:



Εικόνα 3.1: Παρουσίαση του συστήματος

Θεωρούμε  $K$  χρήστες και έναν σταθμό εκπομπής σε μία κυψέλη ακτίνας  $R$  (meters). Το εύρος ζώνης της ζεύξης  $BW$  χωρίζεται σε  $N$  OFDM υποφέροντα με αποτέλεσμα να ισχύει  $BW = N \cdot \Delta f$ . Το πλάτος του  $\Delta f$  πρέπει να ορισθεί ανάλογα έτσι ώστε να είναι μικρότερο από το εύρος ζώνης συνοχής για να αποφευχθούν διαλείψεις επιλεκτικές ως προς την συχνότητα. Με αυτό τον τρόπο ένας **frequency selective** διάυλος εύρους ζώνης  $BW$  μετατρέπεται σε  $N$  **flat fading** OFDM υποφέροντα. Το κέρδος κάθε υποφέροντος για κάθε χρήστη είναι  $\mathbf{G} = [G_{k,n}]$  λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες διάδοσης, την σκίαση και τις τυχόν διαλείψεις. Επιπλέον, οι χρήστες βρίσκονται ακίνητοι, συνεπώς το φαινόμενο Doppler δεν λαμβάνεται υπόψη.

Η διαδικασία που θα ακολουθηθεί είναι:

- Υπολογισμός των υποφέροντων που θα ανατεθούν σε κάθε χρήστη
- Προσδιορισμός ποιων συγκεκριμένων υποφέροντων θα πάρει ο κάθε χρήστης
- Bit Loading κάθε υποφέροντος
- Υπολογισμός της ισχύος του κάθε υποφέροντος

Συνεπώς, θα πρέπει να ορισθεί ένας πίνακας ανάθεσης υποφέροντων στους χρήστες  $\mathbf{C} = [C_{k,n}]$ , ο οποίος θα παίρνει τιμές 0 ή 1. Επειδή στο συγκεκριμένο σύστημα έχουμε αποκλειστική ανάθεση υποφέροντων στους χρήστες, μόνο ένας χρήστης μπορεί να πάρει ένα υποφέρον. Στην συνέχεια, ορίζεται ο bit loading πίνακας  $\mathbf{B} = [b_{k,n}]$  ανάλογα με την διαμόρφωση που θα επιλέξουμε. Για τον έλεγχο

της ισχύος για κάθε υποφέρων ορίζουμε τον πίνακα ισχύος  $\mathbf{P} = [ P_{k,n} ]$  για τον οποίο θα ισχύει ο περιορισμός  $\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N P_{k,n} \leq P_{\max}$ .

Η μέση ισχύς  $P_{k,n}$  του υποφέροντος  $n$  για τον χρήστη  $k$  θεωρώντας τετραγωνικό QAM αστερισμό δίνεται από την σχέση :

$$P_{k,n} = \frac{d_{k,n}^2 (M_{k,n} - 1)}{6}, \quad (3.1)$$

όπου  $d_{k,n}$  η απόσταση μεταξύ των σημείων του αστερισμού QAM. Η πιθανότητα λάθους συμβόλου  $Pe_{k,n}$  για QAM δίνεται από την σχέση:

$$Pe_{k,n} = 4 \cdot Q\left(\frac{d_{k,n}}{2\sigma}\right), \quad (3.2)$$

όπου  $\sigma^2$  η ισχύς θορύβου.

Συνδυάζοντας τις (3.1),(3.2) και λαμβάνοντας υπόψη ότι ισχύει  $b_{k,n} = \log_2(M_{k,n})$  προκύπτει ότι η ισχύς του χρήστη  $k$  για το υποφέρων  $n$  δίνεται από την σχέση :

$$P_{k,n} = \frac{2^{b_{k,n}} - 1}{T_{k,n}}, \quad (3.3)$$

όπου  $T_{k,n}$  είναι το κανονικοποιημένο κέρδος καναλιού, το οποίο ορίζεται :

$$T_{k,n} = \frac{G_{k,n}}{\sigma^2 \Gamma_{k,n}}, \quad (3.4)$$

ενώ το  $\Gamma$  αποτελεί το SNR gap, το οποίο ορίζεται ως:

$$\Gamma_{k,n} = \frac{1}{3} [Q^{-1}\left(\frac{Pe_{k,n}}{4}\right)]^2 \quad (3.5)$$

Τέλος, για δεδομένη ισχύ εκπομπής  $P_{k,n}$ , κέρδος καναλιού  $G_{k,n}$  και ισχύ θορύβου  $\sigma^2$ , τα bit που πρέπει να φορτωθούν σε κάθε υποφέρων  $n$  δίνονται από την σχέση :

$$b_{k,n} = \log_2 \left( 1 + \frac{P_{k,n}}{\Gamma_{k,n}} \right) \quad (3.6)$$

όπου ο σηματοθορυβικός λόγος δίνεται από την σχέση:

$$\gamma_{k,n} = \frac{P_{k,n} G_{k,n}}{\sigma^2} \quad (3.7)$$

### 3.2 Το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης της μεταδιδόμενης ισχύος (Margin Adaptive)

Ένα τυπικό πρόβλημα διαχείρισης ραδιοπόρων ενός OFDMA συστήματος κάτω ζεύξης είναι η ελαχιστοποίηση της συνολικής ισχύος εκπομπής για χρήστες στους οποίους προσφέρεται ένας σταθερός ρυθμός δεδομένων  $\alpha R_k$  (**CBR system – constant bit rate**). Θεωρώντας  $K$  χρήστες και  $N$  υποφέροντα, το παραπάνω πρόβλημα μπορεί να εκφραστεί από την σχέση:

$$\min \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N C_{k,n} P_{k,n} \quad (3.8)$$

ενώ συγχρόνως θα πρέπει να ισχύουν οι περιορισμοί:

$$R_k \leq oR_k = \sum_{n=1}^N C_{k,n} b_{k,n}, \quad k = 1, \dots, K \quad (3.9)$$

$$P_{\max} \geq P_{\text{total}} = \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N C_{k,n} P_{k,n} \quad (3.10)$$

$$\sum_{k=1}^K C_{k,n} \leq 1, \quad n = 1, \dots, N \quad (3.11)$$

Ο περιορισμός (3.9) εκφράζει τις απαιτήσεις του κάθε χρήστη σε ρυθμό δεδομένων,  $R_k$ , σε σχέση με τα bit που του προσφέρει το σύστημα,  $oR_k$  ενώ η σχέση (3.10) εκφράζει τον περιορισμό για την μέγιστη επιτρεπτή τιμή της ισχύος εκπομπής. Τέλος ο περιορισμός (3.11) δηλώνει ότι το καθένα από τα υποφέροντα μπορεί να ανατεθεί το πολύ σε ένα χρήστη της κυψέλης [1].

### 3.3 Το πρόβλημα της μεγιστοποίησης του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων (Rate Adaptive)

Στην περίπτωση του VBR (Variable Bit Rate) συστήματος, ο σκοπός είναι η μεγιστοποίηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων του συστήματος χρησιμοποιώντας όλη τη διαθέσιμη ισχύ, υπό την προϋπόθεση όμως να ικανοποιούνται οι ελάχιστες απαιτήσεις των χρηστών. Το VBR πρόβλημα διαχείρισης ραδιοπόρων μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\max \sum_{k=1}^K C_{k,n} \leq 1 \quad (3.12)$$

και υπόκειται στους περιορισμούς:

$$R_k \leq oR_k = \sum_{n=1}^N C_{k,n} b_{k,n}, \quad k = 1, \dots, K \quad (3.13)$$

$$P_{\max} \geq P_{\text{total}} = \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N C_{k,n} P_{k,n} \quad (3.14)$$

$$\sum_{k=1}^K C_{k,n} \leq 1, \quad n=1, \dots, N \quad (3.15)$$

Το νόημα των περιορισμών είναι το ίδιο με το νόημα των αντίστοιχων της περίπτωσης του CBR προβλήματος.

Όσα αναφέρονται παραπάνω, αποτελούν τον ορισμό του προβλήματος της μεγιστοποίησης του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων εκφράζοντας συγχρόνως και τους

απαραίτητους περιορισμούς του προβλήματος. Δυστυχώς όμως, οι παράπανω περιορισμοί δεν λαμβάνουν υπόψη και το θέμα της δικαιοσύνης ανάμεσα στους χρήστες. Όταν οι διαφορές στις απώλειες διάδοσης ανάμεσα στους χρήστες είναι μεγάλες, είναι πιθανό οι χρήστες με τα μεγαλύτερα κέρδη διαύλου να μοιραστούν την πλειοψηφία των ραδιοπόρων. Αντίθετα, οι χρήστες με τα χαμηλότερα κέρδη διαύλου είναι πιθανό να μην δεχθούν κανένα δεδομένο λόγω της κακής ποιότητας του καναλιού τους. Στην επόμενη παράγραφο θα αναφερθούμε εκτενέστερα και στην περίπτωση δικαιοσύνης ανάμεσα στους χρήστες αφού θα παρουσιάσουμε πιο συγκεκριμένα προβλήματα καθώς και τις επιμέρους λύσεις τους [1].

### 3.4 Προβλήματα Δικαιοσύνης

Στις παραπάνω παραγράφους έγινε η παρουσίαση των 2 κλασικότερων προβλημάτων ανάθεσης ραδιοπόρων για δυναμικά OFDMA συστήματα. Τόσο όμως στην περίπτωση του margin adaptive όσο και του rate adaptive προβλήματος, η μαθηματική μοντελοποίηση που παρουσιάσαμε προηγουμένως δεν λαμβάνει υπόψη την «απόδοση» δικαιοσύνης ανάμεσα στους χρήστες. Σε αυτή την παράγραφο, θα παρουσιάσουμε κάποια προβλήματα στα οποία η επίλυση τους επιδιώκει την ισότητα ανάμεσα στους χρήστες με υψηλό και χαμηλό κέρδος διαύλου.

#### 3.4.1 Min – Max Πρόβλημα

Στο [6] οι Rhee and Cioffi μελέτησαν το min-max πρόβλημα στο οποίο μέσω της μεγιστοποίησης του ρυθμού μετάδοσης του χρήστη με το χειρότερο κανάλι επιτυγχάνεται περίπου το ίδιο επίπεδο υπηρεσιών για όλους τους χρήστες. Το μειονέκτημα της λύσης αυτής είναι το γεγονός ότι παρέχει στους χρήστες του συστήματος μέγιστη δικαιοσύνη. Στη πράξη, είναι συνηθέστερη η ύπαρξη χρηστών με διαφορετικές απαιτήσεις σε ταχύτητα πράγμα που συνεπάγεται και διαφορετικές απαιτήσεις ανάμεσα στους χρήστες για το επίπεδο υπηρεσιών που επιζητούν.

Η μαθηματική έκφραση του παραπάνω προβλήματος βελτιστοποίησης είναι:

$$\max_{P_{k,n}, s_k} \min_k \sum_{n \in s_k} \frac{B}{N} \log_2 \left( 1 + \frac{P_{k,n} G_{k,n}^2}{N_o \frac{B}{N}} \right) \quad (3.16)$$

υπό τον περιορισμό: 
$$\sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K P_{k,n} \leq P_{\max} , \quad (3.17)$$

όπου  $P_{k,n}$  η ισχύς του χρήστη  $k$  για το υποφέρον  $n$ ,  $G_{k,n}$  το κέρδος καναλιού του χρήστη  $k$  για το υποφέρον  $n$ ,  $s_k$  ο αριθμός των υποφερόντων που έχουν ανατεθεί σε κάθε χρήστη και  $N_o$  η ισχύς του λευκού προσθετικού θορύβου. Σκοπός του προβλήματος είναι η εύρεση του βέλτιστου  $s_k$  και  $P_{k,n}$  έτσι ώστε να μεγιστοποιήσουμε την ελάχιστη χωρητικότητα χρήστη. Για την βέλτιστη λύση του προβλήματος, ίσα ποσά ισχύος ( $\frac{P_{\max}}{N}$ ) μοιράζονται στα υποφέροντα τα οποία διαμοιράζονται στους χρήστες με βάση τον παρακάτω αλγόριθμο:

**Αλγόριθμος 3.1:** Αλγόριθμος αποκλειστικής ανάθεσης υποφέροντων για την επίλυση του min-max προβλήματος (μεγιστοποίηση της απόδοσης του χρήστη με το χειρότερο κανάλι).

1. Initialization  
 set  $R_k = 0$  for all  $k = 1:K$ ,  $A = \{1, 2, 3, \dots, N\}$
2. **for**  $k = 1$  to  $K$   
**begin**  
 (a) find  $n$  satisfying  $|G_{k,n}| \geq |G_{k,j}|$  for all  $j \in A$   
 (b) update  $R_k$  and  $A$  with the  $n$  from (a) :  
 $R_k = C(h_{k,n})$   
 $A = A - \{n\}$   
**end**
3. **while**  $A \neq \emptyset$   
**begin**  
 (a) find  $k$  satisfying  $R_k \leq R_i$  for all  $i$ ,  $0 \leq i \leq K$   
 (b) for the found  $k$ , find  $n$  satisfying  $|G_{k,n}| \geq |G_{k,j}|$  for all  $j \in A$   
 (c) update  $R_k$  and  $A$  with the  $k$  and  $n$  :  
 $R_k = R_k + C(h_{k,n})$   
 $A = A - \{n\}$   
**end**

Προφανώς η πολυπλοκότητα του παραπάνω αλγορίθμου είναι αμελητέα σε σύγκριση με την μαθηματική επίλυση του προβλήματος όπως αυτό ορίστηκε παραπάνω μιας και απαιτείται γνώση κλασικών μεθόδων βελτιστοποίησης (π.χ. πολλαπλασιαστές Lagrange) των οποίων η επίλυση είναι αρκετά κουραστική.

### 3.4.2 Αναλογική δικαιοσύνη με βάση τον ρυθμό μετάδοσης κάθε χρήστη (Proportional Rate Constraints)

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζουμε ένα νέο πρόβλημα βελτιστοποίησης, το οποίο έχει στόχο την εξισορρόπηση ανάμεσα στην απόδοση του συστήματος και την δικαιοσύνη ανάμεσα στους χρήστες. Στόχος είναι η βελτιστοποίηση της συνολικής χωρητικότητας του συστήματος έχοντας θέσει ταυτόχρονα κάποιους μη γραμμικούς περιορισμούς λόγω της αναλογικής δικαιοσύνης με βάση τον ρυθμό μετάδοσης για κάθε χρήστη. Διατυπώνοντας το πρόβλημα με αυτό τον τρόπο, μπορούμε να επιτύχουμε υψηλή χωρητικότητα στους χρήστες (ακόμα και σε αυτούς με χαμηλό κέρδος διαύλου) με χαμηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα. Η μαθηματική έκφραση του προβλήματος είναι:

$$\max_{P_{k,n}, C_{k,n}} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \frac{C_{k,n}}{N} \log_2 \left( 1 + \frac{P_{k,n} C_{k,n}^2}{N_0 N} \right) \quad (3.18)$$

με τους παρακάτω περιορισμούς:

$$\sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K P_{k,n} \leq P_{total} \quad (3.19)$$

$$P_{k,n} \geq 0 \text{ για όλα ζεύγη } k,n \quad (3.20)$$

$$C_{k,n} \in \{0, 1\} \quad (3.21)$$

$$R_1 : R_2 : \dots : R_K = \gamma_1 : \gamma_2 : \dots : \gamma_K \quad (3.22)$$

Ο τελευταίος περιορισμός έχει να κάνει με την αναλογική δικαιοσύνη με βάση τους ρυθμούς μετάδοσης. Συγκεκριμένα, ορίζεται ένας επιπλέον δείκτης δικαιοσύνης

$$F = \frac{(\sum_{k=1}^K \gamma_k)^2}{K \sum_{k=1}^K \gamma_k^2} \quad (3.23)$$

με μέγιστη τιμή το 1 στην περίπτωση της μέγιστης δικαιοσύνης στην οποία η χρήστες λαμβάνουν με τον ίδιο ρυθμό bits. Όταν όλα τα  $\gamma_i$  είναι ίσα, η σχέση (3.23) παίρνει την μορφή του min-max προβλήματος μια και η μεγιστοποίηση της συνολικής χωρητικότητας διατηρώντας ίσους ρυθμούς μετάδοσης στους χρήστες συνεπάγεται τελικά μεγιστοποίηση της χωρητικότητας του χρήστη με το χειρότερο κανάλι.

Η επίλυση του προβλήματος απαιτεί αρχικά την αποκλειστική ανάθεση υποφέροντων στους χρήστες μέσω του παρακάτω αλγόριθμου όπου  $H_{k,n} = (G_{k,n}^2 / N_0(B/N))$  είναι ο σηματοθορυβικός λόγος του κάθε υποφέροντος και  $\Omega_k$  το σύνολο των υποφέροντων που έχουν ανατεθεί στον χρήστη  $k$ .

**Αλγόριθμος 3.2:** Αλγόριθμος αποκλειστικής ανάθεσης υποφέροντων για την επίλυση του proportional rate fairness προβλήματος.

### 1) Initialization

a) Set  $R_k = 0$ ,  $\Omega_k = \square$  for  $k = 1, 2, \dots, K$  and  $A = \{1, 2, \dots, N\}$ .

### 2) For $k = 1$ to $K$ ,

a) find  $n$  satisfying  $|H_{k,n}| \geq |H_{k,j}|$  for all  $j \in A$ ;  
b) let  $\Omega_k = \Omega_k \cup \{n\}$ ,  $A = A - \{n\}$  and update  $R_k$

### 3) While $A \neq \square$ ,

a) find  $k$  satisfying  $R_k/\gamma_k \leq R_i/\gamma_i$  for all  $i$ ,  $1 \leq i \leq K$ ;  
b) for the found  $k$ , find  $n$  satisfying  $|H_{k,n}| \geq |H_{k,j}|$  for all  $j \in A$ ;  
c) for the found  $k$  and  $n$ , let  $\Omega_k = \Omega_k \cup \{n\}$ ,  $A = A - \{n\}$  and update  $R_k$

Η λογική του παραπάνω αλγορίθμου είναι η ανάθεση σε κάθε χρήστη των υποφέροντων με τον μεγαλύτερο σηματοθορυβικό λόγο. Σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου ο χρήστης με την χαμηλότερη αναλογική χωρητικότητα επιλέγει το υποφέρον που θα του ανατεθεί. Το επόμενο στάδιο της επίλυσης του συγκεκριμένου προβλήματος έχει να κάνει με την ανάθεση της ισχύος στους χρήστες. Αρχικά μέσω κλασικών μεθόδων βελτιστοποίησης γίνεται ο συνολικός υπολογισμός της ισχύος ανά χρήστη. Απαιτείται δηλαδή η βελτιστοποίηση της παρακάτω συνάρτησης:

$$\begin{aligned}
L = & \sum_{k=1}^K \sum_{n \in \Omega_k} \frac{1}{N} \log_2(1 + P_{k,n} H_{k,n}) + \lambda_1 (\sum_{k=1}^K \sum_{n \in \Omega_k} P_{k,n} - P_{total}) + \\
& + \sum_{k=2}^K \lambda_k [\sum_{n \in \Omega_k} \frac{1}{N} \log_2(1 + P_{k,n} H_{k,n}) - \\
& - \frac{\gamma_k}{\gamma_2} \sum_{k=2}^K \sum_{n \in \Omega_k} \frac{1}{N} \log_2(1 + P_{k,n} H_{k,n})] \quad (3.24)
\end{aligned}$$

όπου  $\lambda_k$  οι πολλαπλασιαστές Lagrange.

Η συνολική ισχύς που ανατείθεται ανά χρήστη προκύπτει από την παρακάτω σχέση:

$$P_{k,total} = N_k \cdot P_{k,1} + \sum_{n=2}^{N_k} \frac{H_{k,n} - H_{k,1}}{H_{k,n} H_{k,1}} \quad (3.25)$$

Έφσον έγινε ο υπολογισμός της συνολικής ισχύος ανά χρήστη, το τελικό στάδιο της επίλυσης του προβλήματος απαιτεί μια ανακατανομή των  $P_{k,total}$  ανάμεσα στους χρήστες, η οποία επιτυγχάνεται μέσω τη επαναληπτικής αριθμητικής μεθόδου Newton–Raphson. Για την αρχικοποίηση της εκτέλεσης της μεθόδου Newton–Raphson θεωρούμε το διάνυσμα  $\mathbf{P} = [P_{1,tot} \ P_{2,tot} \ \dots \ P_{K,tot}]^T$  [7].

### 3.4.3 Αναλογική δικαιοσύνη - Μεγιστοποίηση του νεπέριου λογάριθμου του συνολικού ρυθμού μετάδοσης των χρηστών (Proportional Fairness)

Στο [] διατυπώνεται ένα άλλο πρόβλημα αναλογικής δικαιοσύνης στο οποίο στόχος είναι η μεγιστοποίηση του νεπέριου λογάριθμου του συνολικού ρυθμού μετάδοσης των χρηστών για OFDMA συστήματα με περιορισμό τόσο στην συνολική ισχύ εκπομπής και στον ρυθμό μετάδοσης ανά χρήστη. Αν η χωρητικότητα του χρήστη  $k$  για το υποφέρων  $n$  κανονικοποιείται μέσω της σχέσης:

$$\Gamma_{k,n} = \ln(1 + P_{k,n} g_{k,n}) \quad (3.26)$$

τότε ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης του κάθε χρήστη θα είναι:

$$R_k = \sum_{n=1}^N C_{k,n} \ln(1 + P_{k,n} g_{k,n}) \quad (3.27)$$

όπου  $g_{k,n}$  ο σηματοθορυβικός λόγος του χρήστη  $k$  για το υποφέρων  $n$ . Η μαθηματική έκφραση του παραπάνω προβλήματος είναι:

$$\max_{C_{k,n}, P_{k,n}} \sum_{k=1}^K \ln R_k \quad (3.28)$$

με τους παρακάτω περιορισμούς:

$$\sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K P_{k,n} \leq P_{total} \quad (3.29)$$

$$P_{k,n} \geq 0 \text{ για όλα ζεύγη } k, n \quad (3.30)$$

$$C_{k,n} \in \{0, 1\} \quad (3.31)$$

$$R_k \geq R_k^{\min} \quad (3.32)$$

Για την επίλυση του προβλήματος προτείνεται ο παρακάτω αλγόριθμος του οποίου συγκεκριμένα σημεία αποδεικνύονται κάνοντας χρήση των κλασσικών μεθόδων βελτιστοποίησης όπως τους πολλαπλασιαστές Lagrange.

*Αλγόριθμος 3.3: Αλγόριθμος αποκλειστικής ανάθεσης υποφέροντων και υπολογισμού της ισχύος για την επίλυση του proportional fairness προβλήματος.*

**1. Initialize:**  $S_k = \emptyset$ ,  $R_k = 0$ ,  $\lambda_k = 0 \quad \forall k$ .

**2. Step 1:**  $\forall$  user  $k$  from highest to lowest average SNR do

**While** (  $R_k < R_k^{\min}$  ) **do**

$$\begin{aligned} n^* &= \arg \max_n r_{k,n} \\ C_{k,n^*} &= 1, \quad S_k = S_k \cup \{n^*\} \\ R_k &= R_k + r_{k,n^*} \\ \lambda_k &= \lambda_k + \frac{P_{\text{total}}}{N} + \frac{1}{2R_{k,n^*}} \end{aligned}$$

**end while**

**3. Step 2:**  $\forall$  available subcarrier  $n = 1$  to  $N$  do

$$\begin{aligned} k^* &= \arg \max_k \frac{r_{k,n}}{R_k + r_{k,n}} \\ C_{k^*,n} &= 1, \quad S_{k^*} = S_{k^*} \cup \{n\} \\ R_{k^*} &= R_{k^*} + r_{k^*,n} \end{aligned}$$

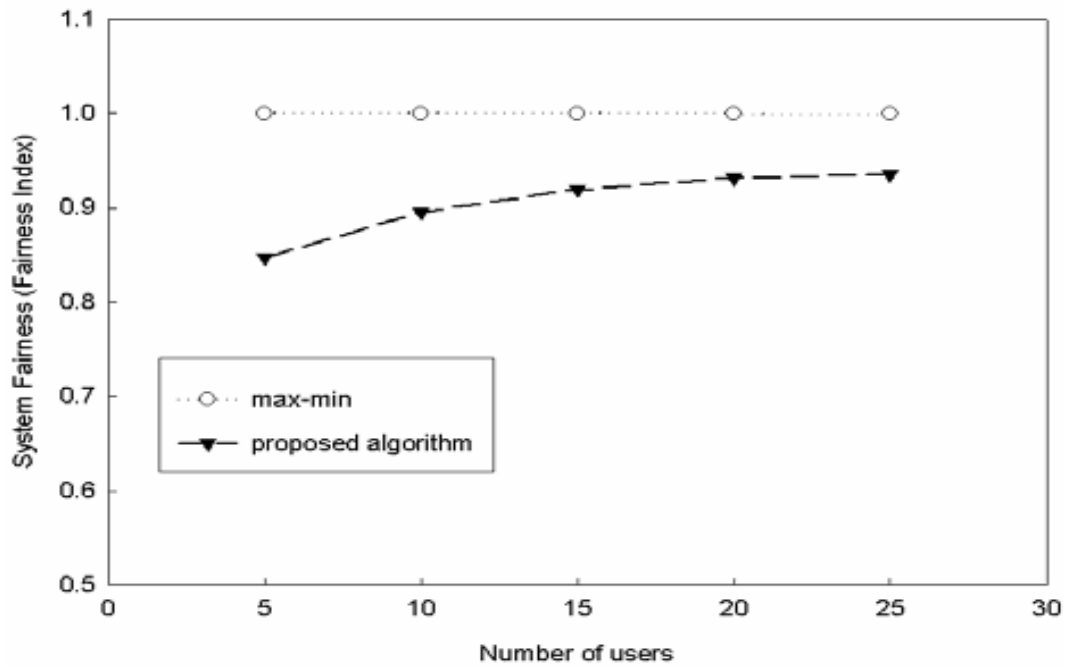
$$\lambda_{k^*} = \lambda_{k^*} + \frac{P_{\text{total}}}{N} + \frac{1}{2R_{k^*,n}}$$

**4. Power allocation:**  $\forall$  subcarrier  $n = 1$  to  $N$ :

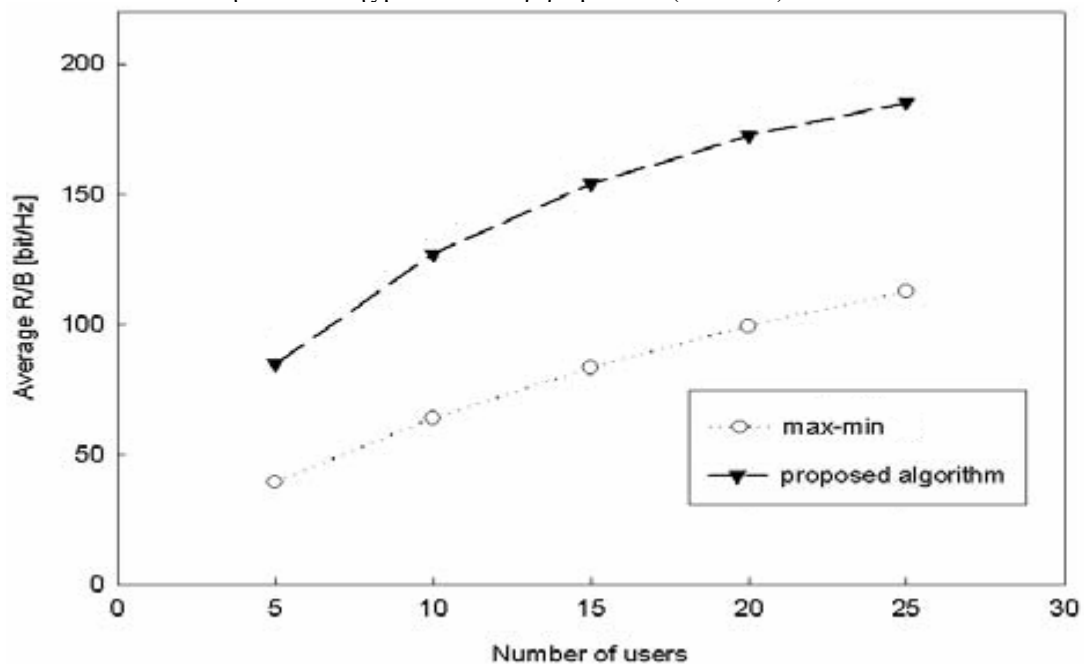
$$\text{if } C_{k,n} = 1, \text{ then } P_{k,n} = \left[ \frac{\lambda_k}{|S_k|} - \frac{1}{2R_{k,n}} \right]^+$$

όπου  $\lambda_k = \frac{1}{2R_k}$  και  $\lambda$  ο πολλαπλασιαστής Lagrange ενώ  $[x]^+ = \max\{x, 0\}$ .





Εικόνα 3.2: Απόδοση δικαιοσύνης μέσω των αλγορίθμων 3.1 (max-min) και 3.3



Εικόνα 3.3: Απόδοση συστήματος μέσω των αλγορίθμων 3.1 (max-min) και 3.3

Η εικόνα 3.2 δείχνει τη δικαιοσύνη του συστήματος συναρτήσει του αριθμού των χρηστών. Στην περίπτωση του min-max αλγορίθμου επιτυγχάνεται μέγιστη δικαιοσύνη μιας και ο δείκτης δικαιοσύνης ισούται με 1. Αντίθετα, ο αλγόριθμος 3.3 είναι πιο "χαλαρός" μιας και ο δείκτης δικαιοσύνης παίρνει μικρότερες τιμές. Αυτό όμως που θα πρέπει να επισημάνουμε είναι η αύξηση της δικαιοσύνης του συστήματος όταν αυτό υπερφορτώνεται από χρήστες.

Η εικόνα 3.3 δείχνει την απόδοση του συστήματος συναρτήσει του αριθμού των χρηστών. Προφανώς, η μέγιστη δικαιοσύνη μειώνει αισθητά την συνολική απόδοση του συστήματος μιας και όλοι οι χρήστες περιορίζονται από την απόδοση του χρήστη με το χειρότερο κανάλι. Γι'αυτό το λόγο, προτιμάται ο αλγόριθμος διαχείρισης

ραδιοπόρων να ‘‘απονέμει’’ αναλογική δικαιοσύνη μιας και οι απώλειες της απόδοσης του συστήματος είναι μικρές [8, 9].

### 3.5 Επίλυση Προβλημάτων Ανάθεσης Ραδιοπόρων για συστήματα OFDMA

Προτού προχωρήσουμε στην παρουσίαση διαφόρων τεχνικών και αλγορίθμων επίλυσης των προβλημάτων ανάθεσης ραδιοπόρων που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες, παρουσιάζουμε μία σύνοψη των αντιμετωπίσεων που εμφανίζονται στην σχετική βιβλιογραφία. Από μαθηματική σκοπιά τα προβλήματα ανάθεσης ραδιοπόρων δεν είναι τίποτα άλλο από προβλήματα βελτιστοποίησης (engineering optimization problems), όπως φαίνεται καθαρά από τις σχετικές προτυποποιήσεις/διατυπώσεις. Η συνάρτηση κόστους (cost/objective function) της εκάστοτε διατύπωσης αντιστοιχεί στη συνολική μεταδιδόμενη ισχύ ή στον αθροιστικό ρυθμός μετάδοσης όλων των εξυπηρετούμενων χρηστών, ενώ οι ελάχιστοι απαιτούμενοι ρυθμοί μετάδοσης για κάθε χρήστη, τα ελάχιστα επίπεδα BER, η συνολική διαθέσιμη ισχύς του σταθμού βάσης και οι διάφοροι δείκτες δικαιοσύνης συνιστούν μία ή περισσότερες περιοριστικές συναρτήσεις (constraint functions). Οι διατυπώσεις margin και rate adaptive εμπεριέχουν πολύ μεγάλο πλήθος μεταβλητών προς βελτιστοποίηση ακέραιας ή δυαδικής μορφής (integer/binary design variables) καθώς και μη γραμμικές συναρτήσεις κόστους/περιορισμών, και επομένως ανήκουν στην κατηγορία μη γραμμικών ακέραιων προβλημάτων ευρείας κλίμακας (**large scale non-linear integer optimization problems**), τα οποία είναι εξαιρετικά επίπονα να επιλυθούν. Στην αγορά υπάρχουν λογισμικά τα οποία αντιμετωπίζουν τέτοιου είδους προβλήματα, ωστόσο η απόπειρα επίλυσης σε πραγματικό χρόνο (λίγων msec) συνήθως αποτυγχάνει. Μία εναλλακτική λύση που απαντάται στη βιβλιογραφία είναι η εφαρμογή συγκεκριμένων μετασχηματισμών στις αρχικές μαθηματικές διατυπώσεις για τη μετατροπή σε πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού (**linear programming**) που είναι σαφώς ευκολότερο να επιλυθεί. Και στην περίπτωση αυτή όμως, οι χρόνοι εκτέλεσης μπορεί να είναι απαγορευτικοί.

Για τους παραπάνω λόγους η αναζήτηση των βέλτιστων λύσεων εγκαταλείφθηκε σχετικά νωρίς, και η έρευνα στράφηκε στην εύρεση προσεγγιστικών υποβέλτιστων τρόπων επίλυσης, οι οποίες θα μπορούσαν να εκτελεστούν σε πραγματικό χρόνο και ταυτόχρονα η ποιότητα των τελικών λύσεων θα είναι αρκετά υψηλή. Αναφέρουμε συνοπτικά τις κυριότερες μεθόδους: (α) Ευριστικές επαναληπτικές τεχνικές τύπου **greedy**, οι οποίες εξαρτώνται από τη φύση του εκάστοτε προβλήματος και βασίζονται σε ‘‘διαισθητικές’’ παρατηρήσεις της συνολικής συμπεριφοράς της λύσης (β) Μέθοδοι στηριζόμενες στην ‘‘χαλάρωση’’ του πεδίου ορισμού των σχεδιαστικών μεταβλητών (**continuous relaxation**) με αποτέλεσμα να είναι πλέον δυνατή η εφαρμογή των κλασικών μεθόδων μη γραμμικού προγραμματισμού (**non-linear programming**, gradient/hessian – based algorithms), (γ) στη χαλάρωση των συναρτήσεων περιορισμού (**Lagrangian Relaxation**), και στην συνεπακόλουθη εφαρμογή μεθόδων convex optimization, (δ) Μεταευριστικές τεχνικές, όπως οι **εξελικτικοί μηχανισμοί** (γενετικοί αλγόριθμοι, ...). Οι μέθοδοι αυτές αν και έχουν το μεγάλο πλεονέκτημα ότι παρέχουν επιβεβαιωμένα την ολική βέλτιστη λύση, παρουσιάζουν αρκετά μεγάλους χρόνους επίλυσης.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας ασχοληθήκαμε με μεθόδους που υπάγονται στις κατηγορίες (α) και (δ), μέρος των οποίων υλοποιήσαμε στο προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab, και εξετάσαμε την απόδοσή τους μέσω στοχαστικών Monte-Carlo προσομοιώσεων.

## 4 Τεχνικές Ανάθεσης Ραδιοπόρων με χρήση greedy αλγορίθμων

### 4.1 3-step Pietrzyk

Ο αλγόριθμος που προτείνει ο Slawomir Pietrzyk στο [1] αποτελείται από τα παρακάτω 3 στάδια:

- Ορισμός του αριθμού υποφέροντων ανά χρήστη
- Αποκλειστική ανάθεση υποφέροντων στους χρήστες
- Bit loading/Υπολογισμός της ισχύος ανά υποφέρον

#### 4.1.1 Ορισμός του αριθμού υποφέροντων ανά χρήστη

Σε αυτό το στάδιο γίνεται ο υπολογισμός του μεγέθους των ραδιοπόρων που θα ανατεθούν σε κάθε χρήστη. Για CBR συστήματα, μας απασχολεί μόνο ο καθορισμός του αριθμού των υποφέροντων,  $s_k$ , που θα ανατεθεί σε κάθε χρήστη. Για τον σκοπό αυτό υπάρχουν οι εξής 2 επιλογές για να εργαστούμε:

##### Επιλογή 1

Έστω  $M$  η τάξη διαμόρφωσης για κάθε υποφέρον. Τότε ο αριθμός των υποφέροντων που θα πάρει ο κάθε χρήστης θα είναι ανάλογος της ταχύτητας μετάδοσης που θα απαιτεί ο καθένας από τους χρήστες:

$$s_k = [ T_e R_k / \log_2 M ] \quad (4.1)$$

όπου  $T_e$  η διάρκεια του OFDM συμβόλου. Το πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι η απλότητα αν και υπάρχει ένα σημαντικό πρόβλημα. Ένας χρήστης που βρίσκεται μακριά από τον σταθμό εκπομπής (στην άκρη της κυψέλης) για να αποκτήσει την ταχύτητα μετάδοσης που ζητάει θα ήταν προτιμότερο από το σύστημα διαχείρισης να του ανατεθούν περισσότερα υποφέροντα και όχι να αλλάξει η διαμόρφωση  $M$ . Αυτή η προσέγγιση του προβλήματος δεν επιτρέπει την υλοποίηση αυτού του σεναρίου αφού ο αριθμός των υποφέροντων εξάρταται από τον ρυθμό  $R_k$  που ζητάει ο χρήστης.

##### Επιλογή 2

Σύμφωνα με αυτή την προσέγγιση, σε κάθε χρήστη ορίζεται ένας ελάχιστος αριθμός υποφέροντων ο οποίος είναι ικανός να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις του κάθε χρήστη. Θεωρώντας ότι σε κάθε υποφέρον μπορούν να φορτωθούν  $b_{max}$  bits ανά σύμβολο, ο ελάχιστος αριθμός υποφέροντων προκύπτει από την σχέση:

$$s_k = [ T_e R_k / b_{max} ] \quad (4.2)$$

Στην συνέχεια, ο αλγόριθμος διαμοιράζει τα υπομείναντα υποφέροντα στους χρήστες με βάση την ελάχιστη συνολική ισχύ μετάδοσης, δηλαδή κάθε φορά ο χρήστης με την μικρότερη συνολική ισχύ μετάδοσης παίρνει ένα υποφέρον. Η μέση συνολική ισχύς μετάδοσης δίνεται από την σχέση:

$$\bar{P}_k(s_k) = s_k (2^{T_e R_k / b_k} - 1) / \bar{T}_k \quad (4.3)$$

όπου  $\bar{T}_k$  η το μέσο κανονικοποιημένο κέρδος του ραδιοδιαύλου για τον χρήστη k, το οποίο ορίζεται από την σχέση:

$$\bar{T}_k = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N T_{k,n}, \quad k = 1, \dots, K \quad (4.4)$$

Ολοκληρωμένος ο αλγόριθμός υπολογισμού των υποφερόντων ανά χρήστη παρουσιάζεται παρακάτω:

**Αλγόριθμος 4.1:** Υπολογισμός του αριθμού υποφερόντων ανά χρήστη για CBR OFDMA σύστημα μιας κυψέλης με αποκλειστική ανάθεση υποφερόντων στους χρήστες.

**input:**  $\bar{P}_k, R_k, T_e, b_{\max}, k = 1, \dots, K$

**output:**  $s_k$

```

1 begin
2   |  $s_k = [ T_e R_k / b_{\max} ] ; k = 1, \dots, K$ 
3   | while  $\sum_{k=1}^K s_k < N$  do
4   |   | for k = 1 to K do
5   |   |   |  $\Delta P_k = \bar{P}_k(s_k) - \bar{P}_k(s_k + 1)$ 
6   |   |   |  $w = \arg \max_k \Delta P_k$ 
7   |   |   |  $s_w = s_w + 1$ 
8   |   |   |  $\bar{P}_w = \bar{P}_w + \Delta P_w$ 
9   |   |
9 end
```

Η φιλοσοφία του αλγορίθμου 4.1 για VBR συστήματα είναι: Το ποσό ισχύος που έχει ανατεθεί στους χρήστες πρέπει να είναι ανάλογο με τον αριθμό των υποφερόντων που έχουν ήδη μοιραστεί, έτσι ώστε να ισχύει η σχέση:

$$P_a \leq \frac{N_a}{N} P_{\max} \quad (4.5)$$

όπου  $P_a = \sum_k P_k$  και  $N_a = \sum_k s_k$ .

Ολοκληρωμένος ο αλγόριθμός υπολογισμού των υποφερόντων ανά χρήστη για VBR συστήματα παρουσιάζεται στην επόμενη σελίδα:

**Αλγόριθμος 4.2:** Υπολογισμός του αριθμού υποφώντων ανά χρήστη για VBR OFDMA σύστημα μιας κυψέλης με αποκλειστική ανάθεση υποφώντων στους χρήστες.

**input:**  $\bar{P}_k, R_k, T_e, P_{max}, k = 1, \dots, K$

**output:**  $s_k$

```

1 begin
2   |  $s_k = 1 ; k = 1, \dots, K$ 
3   | while  $P_\alpha > \frac{N_\alpha}{N} P_{max}$  do
4     |   | for  $k = 1$  to  $K$  do
5       |   |   |  $\Delta P_k = \bar{P}_k(s_k) - \bar{P}_k(s_k + 1)$ 
6       |   |   |  $w = \arg \max_k \Delta P_k$ 
7       |   |   |  $s_w = s_w + 1$ 
8       |   |   |  $\bar{P}_w = \bar{P}_w + \Delta P_w$ 
9       |   |   | calculate  $P_\alpha, N_\alpha$ 
10  end

```

Ο αλγόριθμος 4.2 τελειώνει όταν  $P_\alpha = \frac{N_\alpha}{N} P_{max}$ . Ορίζοντας  $P_n = \frac{P_\alpha}{N_\alpha}$  την ισχύ που ήδη έχει ανατεθεί ανά υποφών συμπεραίνουμε ότι ο αλγόριθμος τελειώνει όταν  $P_n = \frac{P_{max}}{N}$ . Η κατάλληλη διαχείριση των πόρων του συστήματος έτσι ώστε να επιτευχθούν κοινά επίπεδα ισχύος για όλα τα υποφώντα αποτελεί μία από τις βασικές στρατηγικές του VBR προβλήματος.

#### 4.1.2 Αποκλειστική ανάθεση υποφώντων στους χρήστες

Έχοντας ορίσει τον αριθμό των υποφώντων που θα πάρει ο κάθε χρήστης  $s_k$ ,  $k = 1, \dots, K$  πρέπει να καθορίσουμε ποια συγκεκριμένα υποφώντα θα ανατεθούν στον καθένα. Για τον σκοπό αυτό υπάρχουν οι εξής 2 επιλογές:

##### Επιλογή 1

Οι χρήστες, ο ένας μετά τον άλλο, επιλέγουν τα υποφώντα με τα μεγαλύτερα κανονικοποιημένα κέρδη διαύλου  $T_{k,m}$ . Ο αντίστοιχος αλγόριθμος 4.3 περιγράφεται στην επόμενη σελίδα.

Χαρακτηριστικό του αλγορίθμου 4.3 είναι ότι δεν απαιτείται η γνώση των bit ανά υποφών για να υπολογιστεί η συνάρτηση κόστους (στην περίπτωση των CBR συστημάτων η συνάρτησης κόστους είναι η ισχύς εκπομπής). Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος βασίζεται στην ιδέα ότι όσο καλύτερο είναι το κανάλι, τόσο μικρότερη θα είναι η εκπεμπόμενη ισχύς. Συνεπώς, σε αυτό το στάδιο του 3-step Pietrzyk δεν απαιτείται bit loading των υποφώντων.

**Αλγόριθμος 4.3:** Αρχική ανάθεση υποφώντων για OFDMA σύστημα μιας κυψέλης με αποκλειστική ανάθεση υποφώντων στους χρήστες.

**input:**  $s_k, [T_{k,n}]$ ,  $k = 1, \dots, K$ ;  $n = 1, \dots, N$   
**output:**  $C_{k,n}$

```
1 begin
2   |  $C_{k,n} = 0$  ;  $k = 1, \dots, K$ ;  $n = 1, \dots, N$ 
3   | while  $\sum_{k=1}^K s_k > 0$  do
4   |   | for  $k = 1$  to  $K$  do
5   |   |   |  $m = \arg \max_n \in \{\text{not assigned}\} T_{k,n}$ 
6   |   |   |  $C_{k,m} = 1$ 
7   |   |   |  $s_k = s_k - 1$ 
8 end
```

### Επιλογή 2

Ο αλγόριθμος 4.3 αποτελεί την αρχική ανάθεση υποφώντων στους χρήστες μιας και η συνολική ισχύς, που προκύπτει με βάση την συγκεκριμένη διαχείριση υποφώντων, οδηγεί σε τιμές συνολικής ισχύος υψηλότερες από τις βέλτιστες. Ο παραπάνω αλγόριθμος μπορεί να βελτιωθεί με επαναλαμβανόμενες αμοιβαίες ανταλλαγές υποφώντων μεταξύ των χρηστών. Σε κάθε επανάληψη, ένα ζευγάρι χρηστών ανταλλάσσει ένα υποφών που του έχει ήδη ανατεθεί με σκοπό την μείωση της συνολικής ισχύος. Η επιλογή του ζεύγους χρηστών γίνεται μέσω μιας συνάρτησης κόστους  $\Delta P$ . Η συνάρτησης κόστους  $\Delta P$  ορίζεται ως το άθροισμα των παραγόντων μείωσης ισχύος  $P_{i,j}$  και  $P_{j,i}$ , όπου  $P_{i,j}$  είναι η μέγιστη μείωση ισχύος (για τα υποφώντα που έχουν ανατεθεί στον χρήστη  $i$ ) αν ένα υποφών του χρήστη  $i$  δοθεί στον χρήστη  $j$ . Τα υποφώντα που αντιστοιχούν στα  $P_{i,j}$  και  $P_{j,i}$  ορίζονται ως  $n_{i,j}$  και  $n_{j,i}$ . Κάθε φορά η ανταλλαγή υποφώντων γίνεται μεταξύ των χρηστών στους οποίους αντιστοιχεί το μέγιστο θετικό  $\Delta P$ . Οι επαναλήψεις τελειώνουν όταν όλοι οι παράγοντες μείωσης ισχύος είναι αρνητικοί και συνεπώς είναι αδύνατη η περαιτέρω μείωση της ισχύος [5].

Η παραπάνω διαδικασία περιγράφεται από τον αλγόριθμο 4.4 ο οποίος παρατείνεται στην επόμενη σελίδα. Βασικό χαρακτηριστικό του 4.4 είναι ότι ως είσοδο δέχεται τον μοναδιαίο πίνακα  $C_{k,n}$  και δίνει ως αποτέλεσμα έναν βελτιωμένο πίνακα ανάθεσης  $C_{k,n}$ . Συνεπώς η εκτέλεση του αλγορίθμου 4.4 προαπαιτεί την υλοποίηση και του 4.3.

**Αλγόριθμος 4.4:** Αμοιβαία ανταλλαγή υποφέρωντων μεταξύ των χρηστών για OFDMA σύστημα μιας κυψέλης με αποκλειστική ανάθεση υποφέρωντων στους χρήστες.

**input:** initial [  $C_{k,n}$  ], [  $P_{k,n}$  ],  $k = 1, \dots, K$  ;  $n = 1, \dots, N$

**output:** improved [  $C_{k,n}$  ]

```

1 begin
2   repeat
3     for each pair of users (i, j) ∈ {1, ..., K}
4       calculate power reduction vector:  $\delta p_{i,j}(n) = P_{i,n} - P_{j,n}$ 
5        $P_{i,j} = \max(\delta p_{i,j})$ 
6        $n_{i,j} = \arg \max_n (\delta p_{i,j})$ 
7       calculate power reduction vector:  $\delta p_{j,i}(n) = P_{j,n} - P_{i,n}$ 
8        $P_{j,i} = \max(\delta p_{j,i})$ 
9        $n_{j,i} = \arg \max_n (\delta p_{j,i})$ 
10      calculate  $\Delta P = P_{i,j} + P_{j,i}$ 
11       $(\bar{i}, \bar{j}, \bar{n}_{i,j}, \bar{n}_{j,i}) = \arg \max_{k,n} (\Delta P)$ 
12      if max  $\Delta P > 0$  then
13        { apply swapping in [  $C_{k,n}$  ] }
14         $(\bar{n}_{i,j}) \rightarrow \bar{j}$ 
15         $(\bar{n}_{j,i}) \rightarrow \bar{i}$ 
16        update power allocation
17      until  $\Delta P > 0$ 
18 end

```

### Επιλογή 3

Το πρόβλημα της ανάθεσης υποφέρωντων στους χρήστες γνωρίζοντας τον αριθμό  $s_k$ , που θα πάρει ο καθένας, είναι ένα κλασικό πρόβλημα ανάθεσης του οποίου η βέλτιστη λύση μπορεί να υπολογιστεί μέσω του αλγορίθμου Hungarian. Η ανάλυση του αλγορίθμου καθώς και η λύση του προβλήματος παρατείνεται στο αντίστοιχο παράρτημα στο τέλος του βιβλίου.

#### 4.1.3 Bit loading/Υπολογισμός της ισχύος ανά υποφέρον

Το τρίτο βήμα του αλγορίθμου Pietrzyk αποτελεί το bit loading και τον υπολογισμό της ισχύος ανά υποφέρον. Ο σκοπός, σε ένα CBR σύστημα, είναι η ελαχιστοποίηση της συνολικής εκπεμπόμενης ισχύος με ταυτόχρονη ικανοποίηση των απαιτήσεων των χρηστών σε ταχύτητα ενώ σε ένα VBR σύστημα είναι η μεγιστοποίηση της ταχύτητας του έχοντας δεδομένη κάποια διαθέσιμη ισχύ. Υπάρχουν 2 επιλογές για το στάδιο του bit loading και του υπολογισμού της ισχύος ανά υποφέρον.

### Επιλογή 1

Αρχικά στα υποφέροντα κάθε χρήστη μοιράζονται  $b_{k,n}$  bit σύμφωνα με τη σχέση:

$$b_{k,n} = [ T_e R_k / s_k ] \quad (4.7)$$

Υστερα, τα bit ανά χρήστη ανταλλάσσονται μεταξύ των υποφέρωντων σύμφωνα με τον αλγόριθμο 4.5 έτσι ώστε να επιτευχθεί η μείωση της συνολικής ισχύος.

*Αλγόριθμος 4.5: Bit loading swapping ενός OFDMA συστήματος μιας κοπέλης με αποκλειστική ανάθεση υποφέρωντων στους χρήστες.*

```

input: initial [  $b_{k,n}$  ], [  $P_{k,n}$  ],  $k = 1, \dots, K$  ;  $n = 1, \dots, N$ 
output: improved [  $b_{k,n}$  ], [  $P_{k,n}^{min}$  ]

1 begin
2 |   for  $k = 1$  to  $K$  do
3 |     |  $\Delta P_{k,n}^+ = (2^{b_{k,n}+1} - 1) / T_{k,n} + (2^{b_{k,n}} - 1) / T_{k,n}$  ;
4 |     |  $(k,n) \in \{ (k,n) | C_{k,n} = 1 \}$ 
5 |     |  $\Delta P_{k,n}^- = (2^{b_{k,n}} - 1) / T_{k,n} + (2^{b_{k,n}-1} - 1) / T_{k,n}$  ;
6 |     |  $(k,n) \in \{ (k,n) | C_{k,n} = 1 \}$ 
7 |     | {subcarrier where we prospectively add a bit: }
8 |     |  $n_1 = \arg \max_n \Delta P_{k,n}^+$ 
9 |     | {subcarrier where we prospectively add a bit: }
10 |    |  $n_2 = \arg \max_n \Delta P_{k,n}^-$ 
11 |    | if  $\Delta P_{k,n}^+ < \Delta P_{k,n}^-$  then
12 |    | | {swap a bit between  $n_1$  and  $n_2$  : }
13 |    | |  $b_{k,n_1} = b_{k,n_1} + 1$ 
14 |    | |  $b_{k,n_2} = b_{k,n_2} - 1$ 
15 |    | update power allocation [  $P_{k,n}^{min}$  ]
16 end

```

### Επιλογή 2

Με αυτή την επιλογή, το bit loading γίνεται με βάση την αρχή ότι το υποφέρον με την μικρότερη ισχύ παίρνει ένα bit. Συχνά, στη πράξη, ο αριθμός των bit ανά σύμβολο έχει έναν περιορισμό και σχετίζεται με το διαθέσιμο αστερισμό της διαμόρφωσης. Συνεπώς, οι αλγόριθμοι 4.5 και 4.6 θα πρέπει να συνοδεύονται και από έναν απαραίτητο έλεγχο του αριθμού των bits ανά σύμβολο. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι ο αλγόριθμος 4.6 που ακολουθεί στην επόμενη σελίδα ανήκει στην κατηγορία των **greedy** (άπληστοι) αλγορίθμων.



**Αλγόριθμος 4.6:** Greedy bit loading ενός OFDMA συστήματος μιας κυψέλης με αποκλειστική ανάθεση υποφέροντων στους χρήστες.

**input:**  $R_k, [P_{k,n}]$ ,  $k = 1, \dots, K$

**output:**  $b_{k,n}, [P_{k,n}^{min}]$

```

1 begin
2   |  $b_{k,n} = 0$  ;  $k = 1, \dots, K$ ;  $n = 1, \dots, N$ 
3   | for  $k = 1$  to  $K$  do
4     | | while  $oR_k \leq R_k$  do
5       | | |  $\Delta P_{k,n} = (2^{b_{k,n}+1} - 1) / T_{k,n} + (2^{b_{k,n}} - 1) / T_{k,n}$ 
6       | | |  $m = \arg \max_n \in \{\text{user } k\} \Delta P_{k,n}$ 
7       | | |  $b_{k,m} = b_{k,m} + 1$ 
8       | | |  $P_{k,m} = P_{k,m} + \Delta P_{k,m}$ 
9       | | |  $oR_k = oR_k + b_{k,m} / T_e$ 
10      | |  $\underline{\quad}$  update power allocation [ $P_{k,n}^{min}$ ]
11 end

```

#### 4.1.4 Παρατηρήσεις – Συμπεράσματα

Σε αυτή την παράγραφο θα αναφέρθουν τα κριτηρία επιλογής του αλγορίθμου που θα χρησιμοποιηθεί σε κάθε στάδιο. Για το στάδιο του υπολογισμού των υποφέροντων ανά χρήστη ο πιο κατάλληλος αλγόριθμος είναι ο 4.1 (επιλογή 2) μιας και οι απαιτήσεις των χρηστών σε ταχύτητα ικανοποιούνται με το λιγότερο δυνατό αριθμό υποφέροντων και υπάρχει δυνατότητα μείωσης της μεταδιδόμενης ισχύος. Για το στάδιο της αποκλειστικής ανάθεσης υποφέροντων στους χρήστες απαιτείται τόσο ο αλγόριθμος 4.3 όσο και ο αλγόριθμος 4.4. Η αρχική ανάθεση πραγματοποιείται μέσω του 4.3 (επιλογή 1) ενώ ο αλγόριθμος 4.4 (επιλογή 2) βελτιώνει την αρχική ανάθεση των υποφέροντων με σκοπό τη μείωση της συνολικής ισχύος. Τέλος, για το στάδιο του bit loading και του υπολογισμού της ισχύος ανά υποφέρον προτιμάται ο 4.6 (επιλογή 2) ο οποίος είναι κατάλληλος για διαμορφώσεις του τύπου 4-QAM, 16-QAM και 64-QAM (γενικότερα για μικρό αριθμό δυνατών διαμορφώσεων). Αντίθετα, ο αλγόριθμος 4.5 έχει το μειονέκτημα ότι για μικρά επίπεδα διαμόρφωσης έχει μεγάλη πιθανότητα εμφάνισης σφαλμάτων.

## 4.2 Αλγόριθμος Kivanc

Στο [4] ο Didem Kivanc προτείνει 2 άλλους αλγόριθμους διαχείρισης ραδιοπόρων οι οποίοι, αν και δεν είναι απαραίτητα οι βέλτιστοι, εγγυώνται ένα ικανοποιητικό επίπεδο υπηρεσιών για κάθε χρήστη. Με βάση τα χαρακτηριστικά του καναλιού και τις απαιτήσεις των χρηστών σε ρυθμό μετάδοσης βρίσκουν μια λύση που προσεγγίζει την βέλτιστη. Όπως και στον 3-step Pietrzyk, το πρόβλημα πρέπει να διασπαστεί σε μικρότερες επιμέρους εργασίες:

- 1) Διαχείριση ραδιοπόρων: Υπολογισμός του αριθμού των υποφέροντων που θα πάρει ο κάθε χρήστης με βάση τα χαρακτηριστικά του καναλιού και τις απαιτήσεις του σε ρυθμό μετάδοσης.

- 2) *Ανάθεση υποφέροντων*: Επιλογή συγκεκριμένων υποφέροντων που θα πάρει ο κάθε χρήστης.

Για το πρώτο υποπρόβλημα η λύση που προτείνει ο Didem Kivanc (αλγόριθμος **BABS**) είναι παρόμοια με την λύση του Pietrzyk και επομένως δεν είναι ανάγκη να αναφερθούμε περαιτέρω σε αυτό (στην προηγούμενη παράγραφο αναλύεται εκτενέστερα). Αντίθετα, για την συγκεκριμένη ανάθεση των υποφέροντων προτείνονται 2 νέοι αλγόριθμοι. Ο RCG (**rate-craving greedy**) αλγόριθμος αρχικά υπολογίζει την ταχύτητα μετάδοσης του κάθε χρήστη για κάθε υποφέρον, κάνει μια αρχική ανάθεση, και με βάση αυτό τον υπολογισμό προχωρά στη μεγιστοποίηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης του συστήματος δίνοντας υποφέροντα στους χρήστες που δεν κατάφεραν να αποκτήσουν τον αριθμό που τους προβλέπεται από το σύστημα διαχείρισης. Ο ACG (**amplitude-craving greedy**) αποτελεί μια παραλλαγή του RCG η οποία προσφέρει ικανοποιητική απόδοση με μειωμένη υπολογιστική πολυπλοκότητα.

#### 4.2.1 Αλγόριθμος RCG

Πρόκειται για έναν αλγόριθμο μεγαλύτερης υπολογιστικής πολυπλοκότητας από τον ACG, ο οποίος γενικά λύνει το πρόβλημα βέλτιστης διαδρομής γράφου με  $K$  κόμβους. Έστω  $r_k$  ο ρυθμός μετάδοσης του χρήστη  $k$  για το υποφέρον  $n$ . Η φιλοσοφία του RCG είναι η εξής:

- Αρχικά, το υποφέρον  $n$  ανατίθεται στον χρήστη με το μέγιστο  $r_k(n)$ . Σε αυτό το στάδιο δεν υπάρχει περιορισμός στα υποφέροντα που μπορεί να πάρει ο κάθε χρήστης.
- Σε όσους χρήστες  $k$  ανατέθηκαν περισσότερα υποφέροντα από αυτά που ορίζει το στάδιο διαχείρισης ραδιοπόρων, ο χρήστης  $k$  οφείλει να δώσει το παραπάνω υποφέρον  $n$  στον χρήστη  $l$  με βάση το εξής κριτήριο:

$$l^* = \arg \min_{0 \leq n \leq N-1} \min_{0 \leq n \leq N-1} -r_k(n) + r_l(n)$$

$$n^* = \arg \min_{0 \leq n \leq N-1} -r_k(n) + r_{l^*}(n)$$

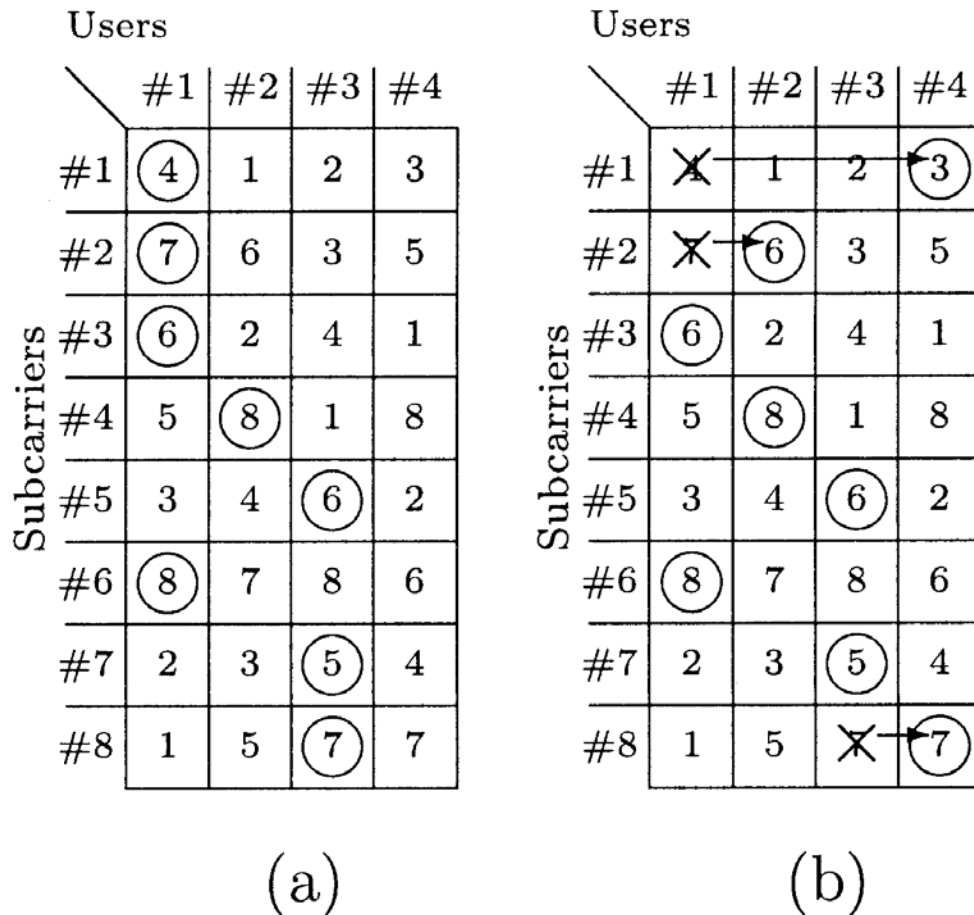
*Αλγόριθμος 4.7: Kivanc's RCG algorithm*

```

for each subcarrier  $N = 0 : N-1$  do
   $k^* = \arg \max_k r_k(n)$  ,  $k = 0, \dots, K-1$ 
   $C_{k^*n} = 1$ 
end
for all users  $k$  such that  $\sum C_k > s_k$  do
   $l^* = \arg \min_{0 \leq n \leq N-1} \min_{0 \leq n \leq N-1} -r_k(n) + r_l(n)$ 
   $n^* = \arg \min_{0 \leq n \leq N-1} -r_k(n) + r_{l^*}(n)$ 
   $C_{k,n^*} = 0, C_{l^*,n^*} = 1$ 
end

```

Ένα παράδειγμα εκτέλεσης του RCG παρουσιάζεται στην εικόνα 4.1 όπου έχουμε 8 υποφέροντα και 4 χρήστες καθένας από τους οποίους απαιτεί 2 υποφέροντα. Οι στήλες αντιστοιχούν στους χρήστες και οι σειρές στα υποφέροντα. Τέλος, οι αριθμοί μέσα στα κουτάκια αποτελούν την ταχύτητα μετάδοσης του χρήστη  $k$  για το υποφέρον  $n$ .



Εικόνα 4.1: Παράδειγμα εκτέλεσης αλγορίθμου RCG

#### 4.2.2 Αλγόριθμος ACG

Ο ACG προέκυψε από την προσπάθεια ανεύρεσης ενός αποτελεσματικού αλγορίθμου χαμηλής πολυπλοκότητας. Η βασική φιλοσοφία του ACG είναι ότι για κάθε υποφέρον  $n$ , ο χρήστης με το μεγαλύτερο κανονικοποιημένο κέρδος καναλιού,  $H_k(n)$ , παίρνει το υποφέρον. Τα βασικά σημεία του ACG είναι:

- Σε κάθε χρήστη μπορούν να ανατεθούν έως  $s_k$  υποφέροντα. Αν ένας χρήστης έχει συμπληρώσει τον αριθμό των υποφερόντων που του αναλογούν, δεν μπορεί να ζητήσει περισσότερα.
- Η κανονικοποίηση του καναλιού προσφέρει δικαιοσύνη ανάμεσα στους χρήστες, αφού διαφορετικά οι χρήστες χαμηλής ισχύος δεν θα είναι σε θέση να διεκδικήσουν υποφέροντα.

- Ο αλγόριθμος χαρακτηρίζεται από τυχαιότητα αφού η προσπέλαση των υποφέροντων γίνεται με τυχαία σειρά για να αποφευχθούν οι επιδράσεις μεταξύ γειτονικών υποφέροντων.

*Αλγόριθμος 4.8: Kivanc's ACG algorithm*

**Ensure:**  $s_k$  is the number of subcarriers allocated to each user for  $k = 0, \dots, K-1$   
**for** each subcarrier  $n = 0: N-1$ , **do**

$$k^* = \arg \max_{0 \leq k \leq K-1} |G_k(n)|^2$$

**while**  $\sum C_{k^*} = s_{k^*}$  **do**

$$|G_{k^*}(n)|^2 = 0$$

$$k^* = \arg \max |G_k(n)|^2$$

**end**

$$C_{k^*,n} = 1$$

**end**

#### 4.2.3 Αλγοριθμική πολυπλοκότητα

Σε αυτή την παράγραφο, εξετάζουμε την απόδοση των παραπάνω αλγορίθμων στην χειρότερη περίπτωση εκφράζοντάς στην ως συνάρτηση των  $K$  χρηστών και των  $N$  υποφέροντων.

**Αλγόριθμος BABS:** Ο αλγόριθμος BABS απαιτεί  $N$  επαναλήψεις και σε κάθε επανάληψη εκτελούνται  $K$  υπολογισμοί και  $K$  συγκρίσεις. Συνεπώς, η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου είναι  $o(KN)$ .

**Αλγόριθμος RCG:** Το αρχικό βήμα του RCG απαιτεί  $KN$  υπολογισμούς για να υπολογιστούν οι ρυθμοί δεδομένων  $r_k(n)$  καθώς και εκτελούνται  $KN$  συγκρίσεις. Η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου στο δεύτερο στάδιο, στο οποίο πραγματοποιείται η ανάθεση των υποφέροντων, είναι  $o(KN+N\log N)$ . Στην πράξη, ο αριθμός των υποφέροντων που θα πρέπει να ανατεθούν ξανά στους χρήστες είναι πολύ λιγότερος από  $N$ .

**Αλγόριθμος ACG:** Ο αλγόριθμος ACG απαιτεί  $N$  επαναλήψεις αλλά μόνο  $2K$  συγκρίσεις σε κάθε επανάληψη. Επομένως, η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου είναι  $o(KN)$ .

Method	Order of operations
BABS	$\mathcal{O}(KN)$
ACG	$\mathcal{O}(KN)$
RCG	$\mathcal{O}(KN + N\log N)$

**Εικόνα 4.2:** Αλγοριθμική πολυπλοκότητα

### 4.3 Προσομοίωση

Η αξιολόγηση των παραπάνω αλγορίθμων απαιτεί την προσομοίωση κάποιων σεναρίων έτσι ώστε να είμαστε σε θέση να βγάλουμε ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με την αποδοτικότητά τους. Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία θα ασχοληθεί μόνο με την επίλυση του *margin adaptive* προβλήματος, η οποία έχει στόχο την ελαχιστοποίηση της μεταδιδόμενης ισχύος. Παρακάτω ακολουθούν διαδοχικές εκτελέσεις των αλγορίθμων που προτείνουν οι Kivanc και Pietryzk στα [ ] και [ ] έτσι ώστε να γίνει σύγκριση της αποδοτικότητάς τους.

Η εικόνα 3.1 αποτελεί το σύστημα OFDMA κάτω ζεύξης που θα εξετάσουμε. Θεωρούμε  $K = 10$  χρήστες ο καθένας από τους οποίους θα ζητάει έναν ρυθμό μετάδοσης δεδομένων  $R_k$ . Η μέγιστη χωρητικότητα του συστήματος δίνεται από την σχέση:

$$R_{total}^{max} = N \cdot \frac{b_{max}}{T_e}, \quad (4.8)$$

όπου  $N = 250$  ο αριθμός των υποφέροντων,  $b_{max} = 8$  ο μέγιστος αριθμός bits ανά υποφέρον και  $T_e = 0,0001$  sec η διάρκεια των OFDM συμβόλων. Διαιρούμε τον χρόνο σε  $N_{frame} = 1000$  χρονοθυρίδες διάρκειας  $T_{frame} = 5$  msec η καθεμία με την βασική προϋπόθεση την ύπαρξη *flat fading* ραδιοδιαύλου σε κάθε χρονοθυρίδα. Συνεπώς, ο συνολικός χρόνος προσομοίωσης είναι 5 sec. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, εξετάζουμε CBR (**constant-bit-rate**) πρόβλημα, επομένως καθ' όλη την διάρκεια της προσομοίωσης οι χρήστες απαιτούν σταθερό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Από την εξίσωση (4. ) προκύπτει ότι η μέγιστη χωρητικότητα του εξεταζόμενου συστήματος είναι τα **20 Mbps**. Προφανώς, ο αριθμός των OFDM συμβόλων ανά OFDMA θυρίδα θα είναι  $N_{SYMBOL} = T_{frame} / T_e = 50$ . Συγκεντρωτικά, τα βασικά χαρακτηριστικά του συστήματος είναι:

Ακτίνα κυψέλης:	$R = 1500$ m
Αριθμός χρηστών:	$K = 10$ χρήστες
Αριθμός υποφέροντων:	$N = 250$
Μέγιστη χωρητικότητα:	$R_{max} = 20$ Mbps
Ισχύς θορύβου:	$N_{noise} = 3,9811$ W/Hz
Εύρος ζώνης:	$BW = 10$ KHz
Διάρκεια OFDM συμβόλου:	$T_e = 0,0001$ sec
Αριθμός χρονοθυρίδων:	$N_{frame} = 1000$ χρονοθυρίδες
Διάρκεια χρονοθυρίδας:	$T_{frame} = 5$ msec
Μέγιστος αριθμός bit/υποφέρον:	$b_{max} = 8$
Επιτρεπτή πιθανότητα λάθους:	$P_e = 10^{-6}$
SNR Gap χρήση:	$\Gamma = 8,4213$

Όσον αφορά το κανάλι, θεωρούμε την σκίαση αμελητέα και τους χρήστες ακίνητους. Συνεπώς, για τον υπολογισμό του καναλιού  $G_{k,n}$  θεωρούμε αμελητέες και τις διαλείψεις λόγω του φαινομένου Doppler. Βασικό χαρακτηριστικό του καναλιού στο οποίο θα εκτελέσουμε την παρακάτω προσομοίωση είναι το γεγονός ότι δεν

παρουσιάζει μεγάλες αλλαγές από χρονοθυρίδα σε χρονοθυρίδα. Πρακτικά, αφού οι χρήστες είναι ακινήτοι το περιβάλλον γύρω τους δεν θα μεταβάλλεται και επομένως οι απώλειες διάδοσης δεν θα αλλάζουν αισθητά από χρονοθυρίδα σε χρονοθυρίδα.

Εκτέλεση αλγόριθμου 4.1:

Πρόκειται για τον αλγόριθμο **BABS** που πρώτος πρότεινε ο Kivanc και στη συνέχεια υιοθέτησε και ο Pietryzk. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ανάθεσης υποφέροντων στους χρήστες για μερικές τυχαίες χρονικές θυρίδες. Κάθε χρήστης απαιτεί ρυθμό μετάδοσης 0,5Mbps. Συνεπώς, το συνολικό φορτίο είναι 5Mbps.

	Χρήστες									
Χρονοθυρίδα	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5	32	19	15	30	33	23	24	11	34	29
180	32	19	15	30	33	23	24	11	34	29
326	32	19	15	30	33	23	24	11	34	29
450	32	19	15	30	33	23	24	11	34	29
574	32	19	15	30	33	23	24	11	34	29
710	32	19	15	30	33	23	24	11	34	29

**Πίνακας 4.1:** Υπολογισμός υποφέροντων ανά χρήστη για συνολικό φορτίο 5 Mbps

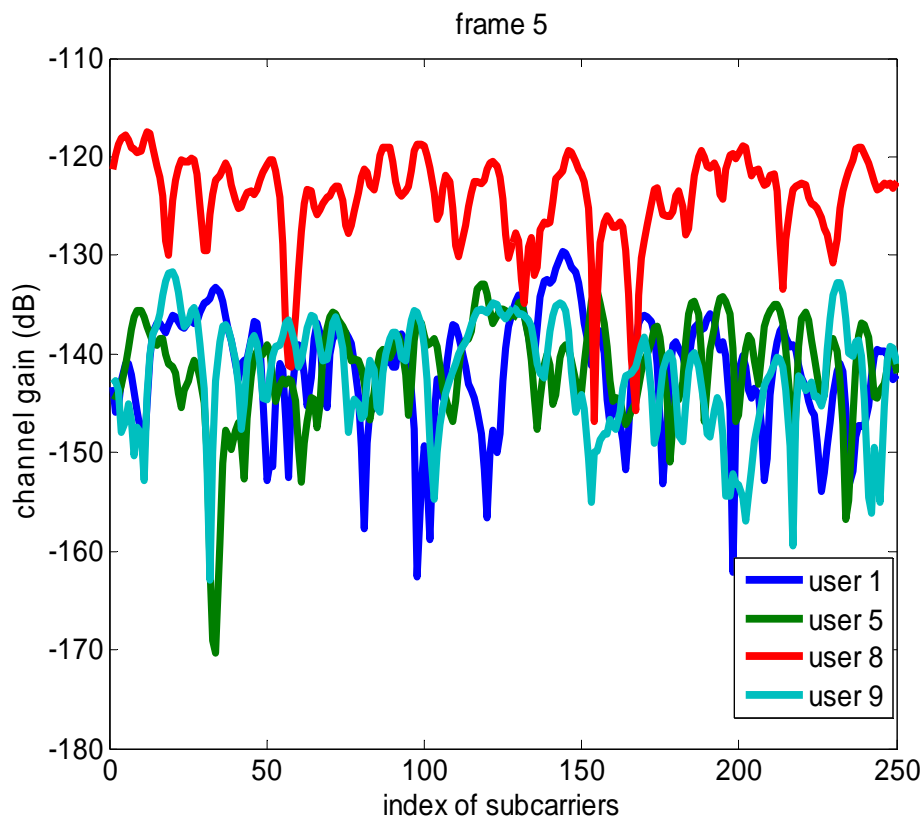
Πράγματι, το κύριο χαρακτηριστικό της αποκλειστικής ανάθεσης των υποφέροντων στους χρήστες είναι το γεγονός ότι ο αριθμός των υποφέροντων ανά χρήστη δεν μεταβάλλεται από χρονοθυρίδα σε χρονοθυρίδα. Το συμπέρασμα αυτό άλλωστε αναμενόταν από την μορφή του καναλιού όπως αυτή παρουσιάστηκε παραπάνω. Εάν αυξήσουμε το συνολικό φορτίο από 5 σε 10 Mbps έχουμε για τις ίδιες χρονοθυρίδες:

	Χρήστες									
Χρονοθυρίδα	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5	30	21	18	29	31	24	24	14	31	28
180	30	21	18	29	31	24	24	14	31	28
326	30	21	18	29	31	24	24	14	31	28
450	30	21	18	29	31	24	24	14	31	28
574	30	21	18	29	31	24	24	14	31	28
710	30	21	18	29	31	24	24	14	31	28

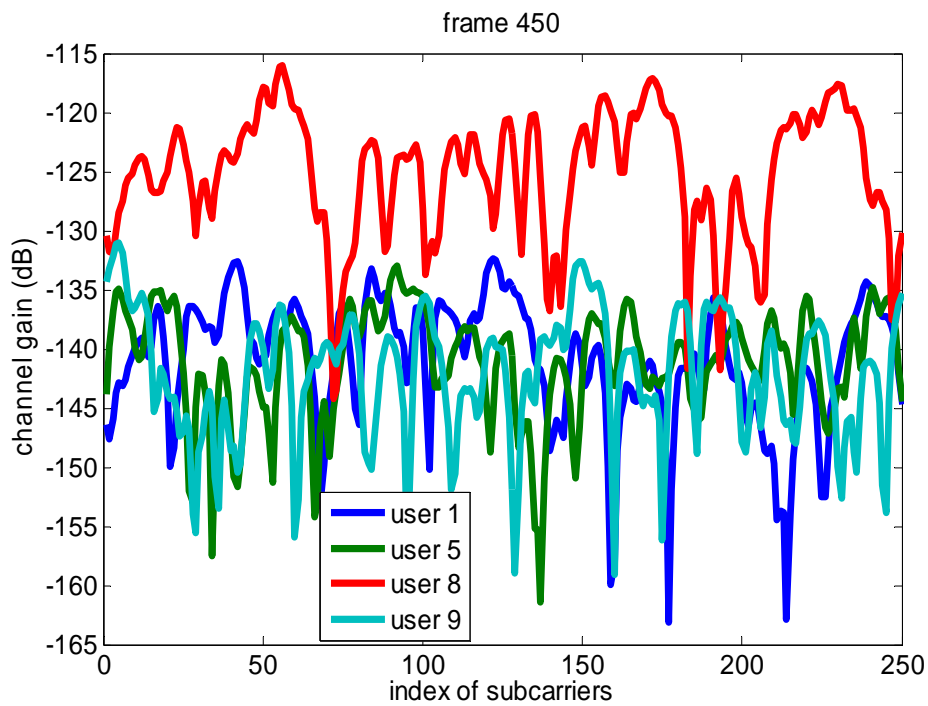
**Πίνακας 4.2:** Υπολογισμός υποφέροντων ανά χρήστη για συνολικό φορτίο 10 Mbps

Παρατηρούμε ότι ο αριθμός των υποφέροντων που ανατείθονται σε κάθε χρήστη είναι περίπου ο ίδιος με την περίπτωση των 5 Mbps αν και τώρα ο κάθε χρήστης απαιτεί διπλάσια ταχύτητα. Συνεπώς, μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι στον συγκεκριμένο αλγόριθμο διαχείρισης ραδιοπόρων το κριτήριο για την ανάθεση των υποφέροντων στους χρήστες είναι κατά κύριο λόγο η ποιότητα του καναλιού τους και κατά δεύτερο οι απαιτήσεις τους σε ρυθμό μετάδοσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι χρήστες με τα χειρότερα κέρδη διαύλου πήραν τα περισσότερα υποφέροντα.

Από τις παρακάτω εικόνες φαίνεται από ο χρήστης 8 έχει πολύ καλύτερο κανάλι από εκείνα των χρηστών 1,5 και 9.



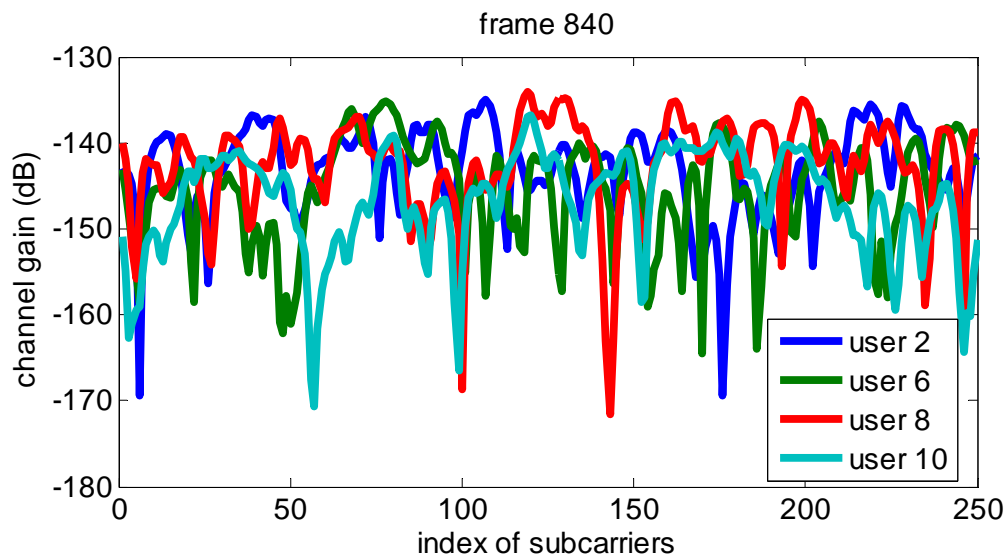
Εικόνα 4.3: Κέρδη διαύλου για την χρονοθυρίδα 5



Εικόνα 4.3: Κέρδη διαύλου για την χρονοθυρίδα 450

Το επόμενο βήμα για την υλοποίηση των RRM (*radio-resource management*) αλγορίθμων είναι η υλοποίηση του πίνακα ανάθεσης υποφέροντων  $C_{k,n}$ . Για την υλοποίηση του, η υπάρχουσα βιβλιογραφία μας δίνει αρκετές επιλογές όπως τους αλγορίθμους 4.3, 4.4, 4.7, 4.8. Πρόκειται ουσιαστικά για το πιο σημαντικό βήμα της διαδικασίας διαχείρισης ραδιοπόρων μιας και η μεθοδολογία της ανάθεσης των υποφέροντων που ακολουθεί ο κάθε αλγόριθμος είναι αυτή που θα δώσει και τη λύση του *margin adaptive* προβλήματος. Διαφορετική ανάθεση υποφέροντων στους χρήστες δίνει και διαφορετικά αποτελέσματα ισχύος εκπομπής με αποτέλεσμα εμείς να αναζητούμε την βέλτιστη διαχείριση του συστήματος με σκοπό την ελάχιστη μεταδιδόμενη ισχύ. Συνεπώς, τα αποτελέσματα των παραπάνω αλγορίθμων έχουν σημασία μετά το στάδιο του *bit-loading* όπου και γίνεται ο υπολογισμός της εκπεμπόμενης ισχύος. Βέβαια, μέσω των επόμενων παραδειγμάτων μπορούμε να εξάγουμε αξιόλογα συμπεράσματα για την λειτουργία τους.

Για ποικιλία αποτελεσμάτων, θεωρούμε κυψέλη ακτίνας  $R = 2000\text{ m}$ . Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του συστήματος παραμένουν ίδια με εκείνα που παρουσιάστηκαν στην αρχή της παραγράφου. Προφανώς, το στάδιο του ορισμού του αριθμού των υποφέροντων δεν θα παρουσιαστεί μιας και αναφερθήκαμε εκτενέστερα προηγούμενως. Βέβαια, η εκτέλεση της αποκλειστικής ανάθεσης των υποφέροντων στους χρήστες προαπαιτεί τον ορισμό των υποφέροντων ανά χρήστη. Αν και για την δεδομένη προσομοίωση έχουμε θεωρήσει 10 χρήστες, για την καλύτερη παρουσίαση των αποτελεσμάτων θα μελετήσουμε την λειτουργία των αλγορίθμων για 4 χρήστες για μια δεδομένη χρονοθυρίδα. Η μορφή του καναλιού για τους χρήστες 2,6,8,10 είναι:



Εικόνα 4.4: Κέρδη διαύλου για την χρονοθυρίδα 840

Από την εκτέλεση του αλγορίθμου 4.1 πήραμε τα αποτελέσματα:

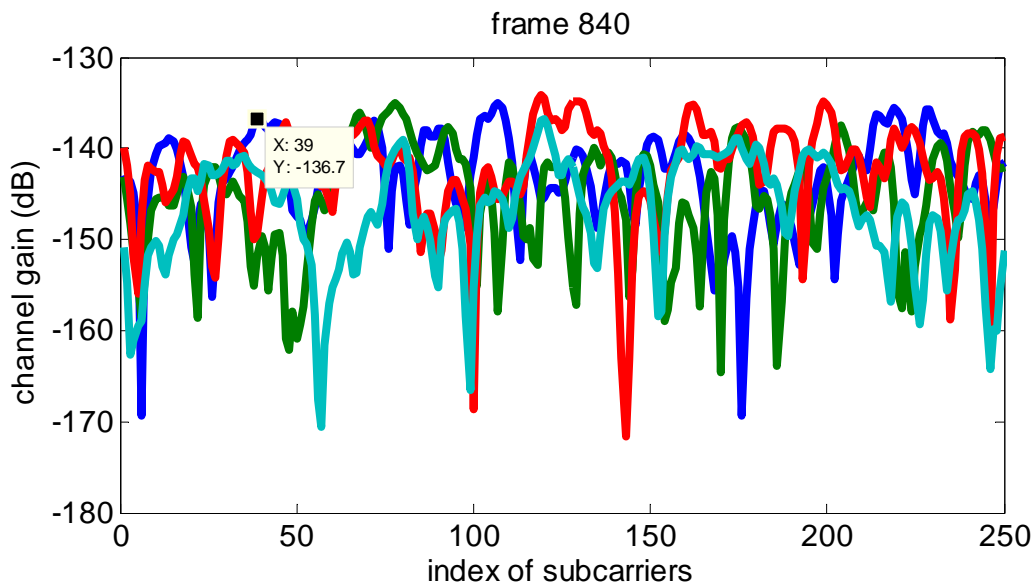
	Χρήστες									
Χρονοθυρίδα	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
840	26	23	24	23	29	25	25	22	24	29



Κάθε χρήστης απαιτεί ρυθμό μετάδοσης 0,5Mbps. Συνεπώς, το συνολικό φορτίο είναι 5Mbps.

Εκτέλεση αλγορίθμου 4.3:

Αρχικά εκτελούμε τον αλγόριθμο 4.3. Η φιλοσοφία του αλγορίθμου είναι ότι κάθε χρήστης με την σειρά του παίρνει τα υποφέροντα στα οποία παρουσιάζει τα μέγιστα κέρδη διαύλου. Π.χ. για το υποφέρων 39 ο χρήστης 2 έχει το μέγιστο κέρδος καναλιού  $G_{2,39} = -136.7 \text{ dB}$  όπως βλέπουμε και από το ανάλογο διάγραμμα.



**Εικόνα 4.5:** Κέρδος διαύλου για το υποφέρων 39

Πράγματι το υποφέρων 39 ανατέθηκε στον χρήστη 2 μιας και 39<sup>η</sup> σειρά του πίνακα ανάθεσης  $C_{k,n}$  είναι:

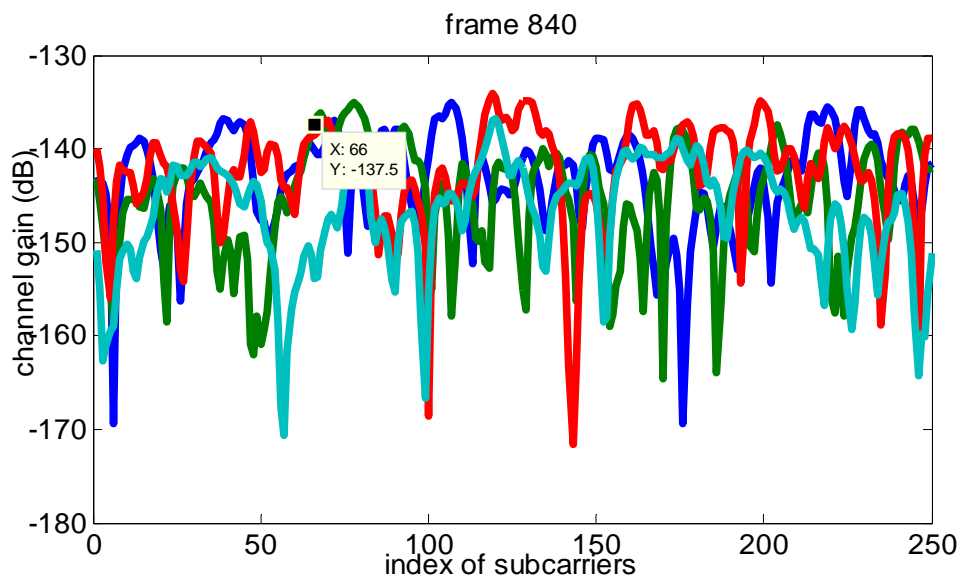
$$C_{39} = [ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 ]$$

Την ίδια λογική μπορούμε να ακολουθήσουμε και στα επόμενα παραδείγματα. Π.χ. για το υποφέρων 66 ο χρήστης 6 έχει το μέγιστο κέρδος καναλιού  $G_{6,66} = -137.5 \text{ dB}$ . Και πάλι η 66<sup>η</sup> σειρά του πίνακα ανάθεσης  $C_{k,n}$  είναι:

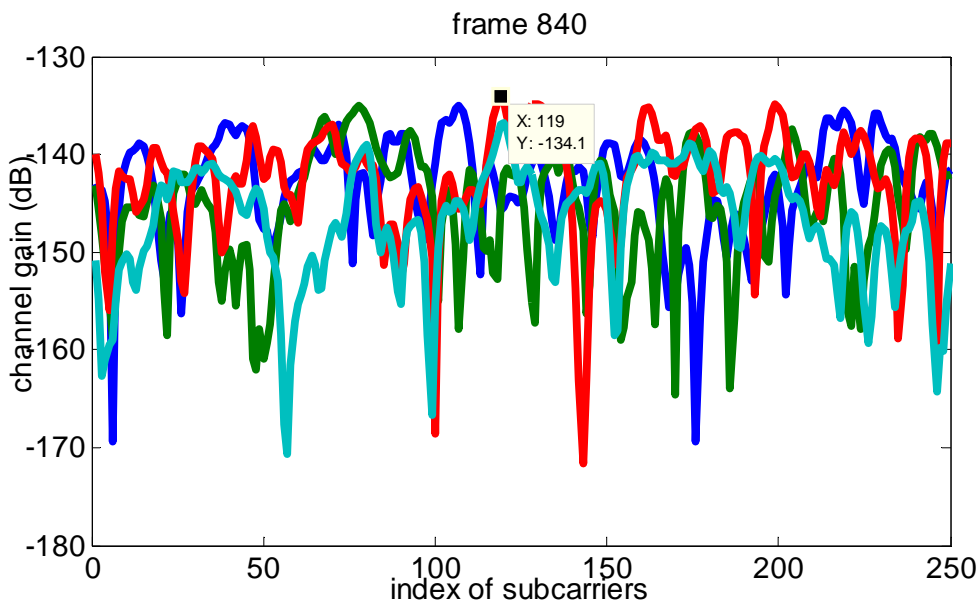
$$C_{66} = [ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 ]$$

Για το υποφέρων 119 ο χρήστης 8 έχει το μέγιστο κέρδος καναλιού  $G_{8,119} = -134.1 \text{ dB}$ . Προφανώς, το συγκεκριμένο υποφέρων ανατίθεται στον χρήστη 8 όπως βλέπουμε και από την αντίστοιχη σειρά του πίνακα ανάθεσης:

$$C_{119} = [ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 ]$$



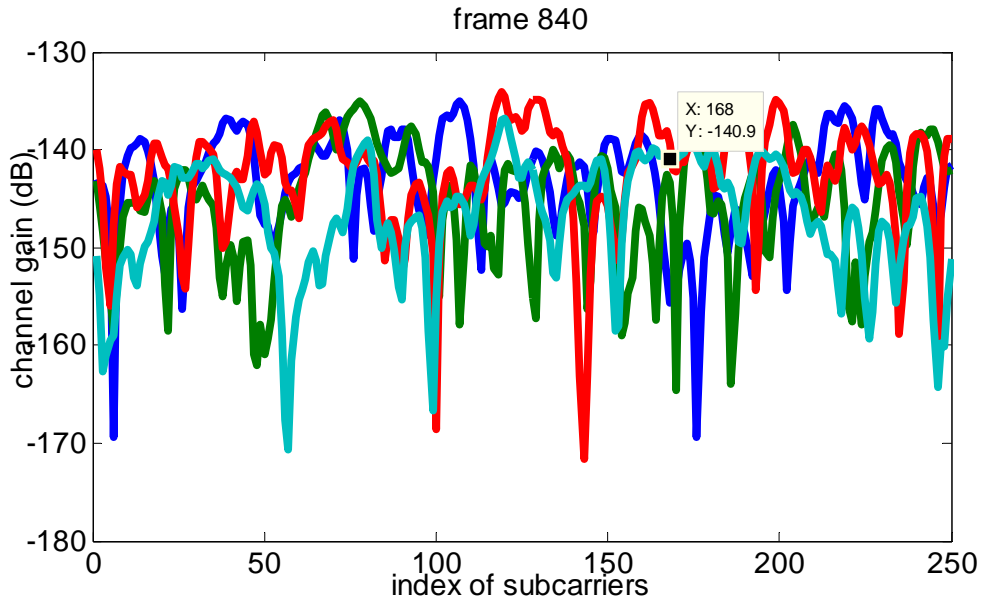
Εικόνα 4.6: Κέρδος διαύλου για το υποφέρων 66



Εικόνα 4.7: Κέρδος διαύλου για το υποφέρων 119

Όμοια, για το υποφέρων 168 το μέγιστο κέρδος είναι  $G_{8,168} = G_{10,168} = -140.8 \text{ dB}$ . Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει το γεγονός ότι τόσο ο χρήστης 8 (ο καλύτερος χρήστης) όσο και ο χρήστης 10 (ο χειρότερος χρήστης) παρουσιάζουν το ίδιο κέρδος. Το υποφέρων, όμως, δίνεται στον χρήστη 10 μιας και ο χρήστης 8 έχει περισσότερες επιλογές ανάθεσης λόγω της καλύτερης ποιότητας του καναλιού του με αποτέλεσμα τη δυνατότητα επιλογής κάποιου μετέπειτα υποφέροντος.

$$C_{168} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]$$

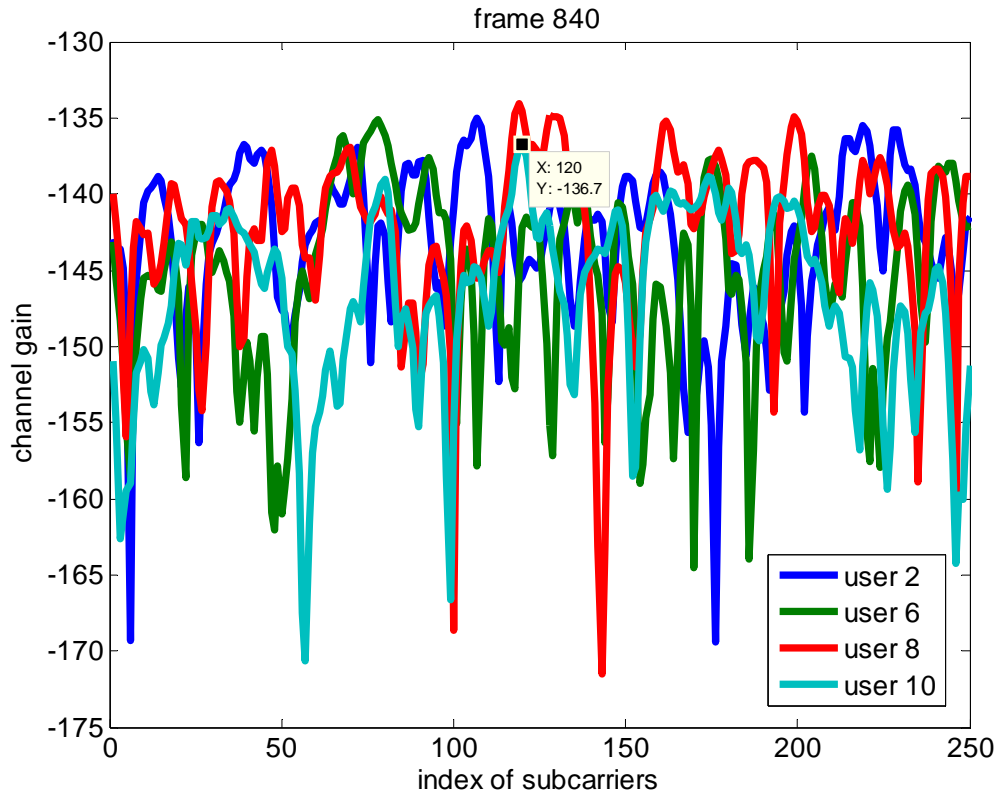


Εικόνα 4.8: Κέρδος διαύλου για το υποφέρων 168

Τα παραπάνω παραδείγματα επεξηγούν ικανοποιητικά την λειτουργία του αλγορίθμου 4.3. Βέβαια, υπάρχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην περίπτωση του χρήστη με το χειρότερο κανάλι (χρήστης 10). Αν παρατηρήσουμε προσεκτικά, το κανάλι του χρήστη 10 είναι με διαφορά το χειρότερο στο εύρος υποφέροντων 55 – 60. Αν ελέγξουμε τον πίνακα ανάθεσης  $C_{k,n}$  θα δούμε ότι τα υποφέροντα 58,59,60,61 έχουν ανατεθεί στον χρήστη 10. Δηλαδή ο αλγόριθμος 4.3 ανέθεσε τα χειρότερα υποφέροντα στον χειρότερο χρήστη αφού όλοι οι υπόλοιποι χρήστες είχαν καλύτερες επιλογές ανάθεσης! Το συγκεκριμένο μειονέκτημα προσπαθεί να εξισορροπήσει ο αλγόριθμος 4.1 με το να αναθέσει περισσότερα υποφέροντα στον χρήστη με το χειρότερο κανάλι. Π.χ. στο συγκεκριμένο παράδειγμα ο χρήστης 8 (καλύτερος) πήρε 22 υποφέροντα ενώ ο χρήστης 10 (χειρότερος) πήρε 29. Ο βασικός λόγος της παραπάνω συμπεριφοράς του αλγορίθμου είναι το γεγονός της έλλειψης δικαιοσύνης μεταξύ των χρηστών.

#### Εκτέλεση αλγορίθμου 4.8:

Εκτελούμε τον αλγόριθμο 4.8 (Kivanc's ACG). Η βασική φιλοσοφία του συγκεκριμένου αλγορίθμου είναι η εξής: Κανονικοποιούμε το κανάλι, αρχικά ο κάθε χρήστης παίρνει το υποφέρων με το μέγιστο κέρδος και στην συνέχεια για διαδοχικά τυχαία υποφέροντα γίνεται ανάθεση στους χρήστες με τα μεγαλύτερη κέρδη. Προφανώς, αν ο χρήστης  $k$  έχει συμπληρώσει τον αριθμό υποφέροντων που του ορίζει ο αλγόριθμος 4.1 και στο  $n$  υποφέρων παρουσιάζει μέγιστο κέρδος διαύλου, η ανάθεση δεν θα γίνει σε αυτόν αλλά στον αμέσως καλύτερο. Για καλύτερα συμπεράσματα θα μελετήσουμε την χρονοθυρίδα 840, όπως και προηγουμένως. Επειδή, η λογική του «καλύτερου στον καλύτερο» επικρατεί και σε αυτόν τον αλγόριθμο, σε λιγότερο βέβαια βαθμό από ότι στον αλγόριθμο 4.3, στα υποφέροντα που παρουσιάσαμε παραπάνω η αποκλειστική ανάθεση στους χρήστες παραμένει η ίδια μιας και είναι οι χρήστες με τα καλύτερα κέρση διαύλου για τα δεδομένα υποφέροντα. Ένα ενδιαφέρον στοιχείο που έχει σημασία να αναφέρουμε είναι το εξής:



**Εικόνα 4.9:** Κέρδος διαύλου για το υποφέρων 120

Το *υπόφερων 120* μέσω της ανάθεσης του αλγορίθμου 4.3 είχε δοθεί στον χρήστη 8.

$$C_{120} = [ 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 ]$$

Η αναγκαιότητα της παρουσίασης του συγκεκριμένου παραδείγματος έχει να κάνει με το γεγονός ότι πρόκειται για το καλύτερο υποφέρων του χρήστη 10 (χειρότερος χρήστης) και το οποίο τελικά δεν ανατείνεται σε εκείνον αλλά στον χρήστη 8, ο οποίος άλλωστε είναι και ο χρήστης με το καλύτερο κανάλι στο σύστημα που εξετάζουμε. Βλέπουμε δηλαδή την παντελή έλλειψη δικαιοσύνης ανάμεσα στους χρήστες. Το αποτέλεσμα της ανάθεσης για το *υπόφερων 120* μέσω του αλγορίθμου 4.8 είναι:

$$C_{120}^{4.8} = [ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 ]$$

Τελικά, ο χρήστης 10 δεν χάνει το υποφέρων με το μέγιστο κέρδος διαύλου χάρη στη στοιχειώδη απονομή δικαιοσύνης που προκύπτει μέσω της κανονικοποίησης του καναλιού. Με αυτό τον τρόπο, ο χειρότερος χρήστης δεν χάνει τουλάχιστον τα καλύτερά του υποφέροντα, γεγονός που έχει σημασία και στον υπολογισμό της συνολικής ισχύς εκπομπής που απαιτείται για την ικανοποίηση των απαιτήσεων των χρηστών.

#### Εκτέλεση αλγορίθμου 4.4:

Ο αλγόριθμος 4.4 αποτελεί μια βελτίωση της ανάθεσης υποφέροντων που προκύπτει από τον αλγόριθμο 4.3. Ο παραπάνω αλγόριθμος μπορεί να βελτιωθεί με επαναλαμβανόμενες αμοιβαίες ανταλλαγές υποφέροντων μεταξύ των χρηστών. Σε κάθε επανάληψη, ένα ζευγάρι χρηστών ανταλλάσσει ένα υποφέρον που του έχει ήδη ανατεθεί με σκοπό την μείωση της συνολικής ισχύος. Η επιλογή του ζεύγους χρηστών γίνεται μέσω μιας συνάρτησης κόστους  $\Delta P$ . Η λειτουργία του αλγορίθμου 4.4 έχει εξηγηθεί εκτενέστερα άλλωστε σε προηγούμενη παράγραφο. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικές από τις αμοιβαίες ανταλλαγές υποφέροντων ανάμεσα στους. Η ουσιαστική σημασία του βελτιωμένου πίνακα ανάθεσης θα αξιολογηθεί στο στάδιο του bit-loading όπου και θα γίνει ο υπολογισμός της ισχύος εκπομπής. Παρ' όλα αυτά μερικά από τα αποτελέσματα της εκτέλεσης του αλγορίθμου 4.4 είναι:

	Χρήστες									
Υποφέροντα	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
45	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
110	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
194	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
114	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
165	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
84	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
200	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**Πίνακας 4.3:** Αποκλειστική ανάθεση υποφέροντων στους χρήστες μέσω του αλγορίθμου 4.3

	Χρήστες									
Υποφέροντα	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
45	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
110	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
58	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
194	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
114	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
165	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
84	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

**Πίνακας 4.4:** Αποκλειστική ανάθεση υποφέροντων στους χρήστες μέσω του αλγορίθμου 4.4

Λόγω της δυσκολίας ως προς την απεικόνιση των αποτελεσμάτων παρουσιάσαμε παραπάνω μερικές από τις αλλαγές ανάθεσης υποφέροντων. Συνολικά, κατά την εκτέλεση του βελτιωμένου αλγορίθμου ανάθεσης υποφέροντων, για την χρονοθυρίδα 840, πραγματοποιήθηκαν 54 αμοιβαίες ανταλλαγές υποφέροντων. Το αντίκτυπο του

βελτιωμένου πίνακα  $C_{k,n}^{improved}$  θα φανεί στον υπολογισμό της συνολικής μεταδιδόμενης ισχύος.

Εκτέλεση αλγόριθμου 4.6:

Η ολοκλήρωση ενός RRM αλγορίθμου απαιτεί την εκτέλεση του bit-loading σταδίου. Συγκεκριμένα, η εκτέλεση του αλγόριθμου 4.6 ορίζει τον αριθμό των bits ανα υποφέρων καθώς και την συνολική ισχύ εκπομπής. Στην συνέχεια θα εκτελεστεί ο αλγόριθμος 4.6 για τους πίνακες ανάθεσης  $C_{k,n}$ ,  $C_{k,n}^{improved}$  και  $C_{k,n}^{Kivans}$ . Για την καλύτερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων καθώς και για να τονίσουμε την σημασία του καναλιού θα παρουσιάσουμε παρακάτω έναν αλγόριθμο οποίος αναθέτει τυχαία υποφέροντα στους χρήστες σε αναλογία με το ρυθμό μετάδοσης που απαιτεί ο κάθε χρήστης.

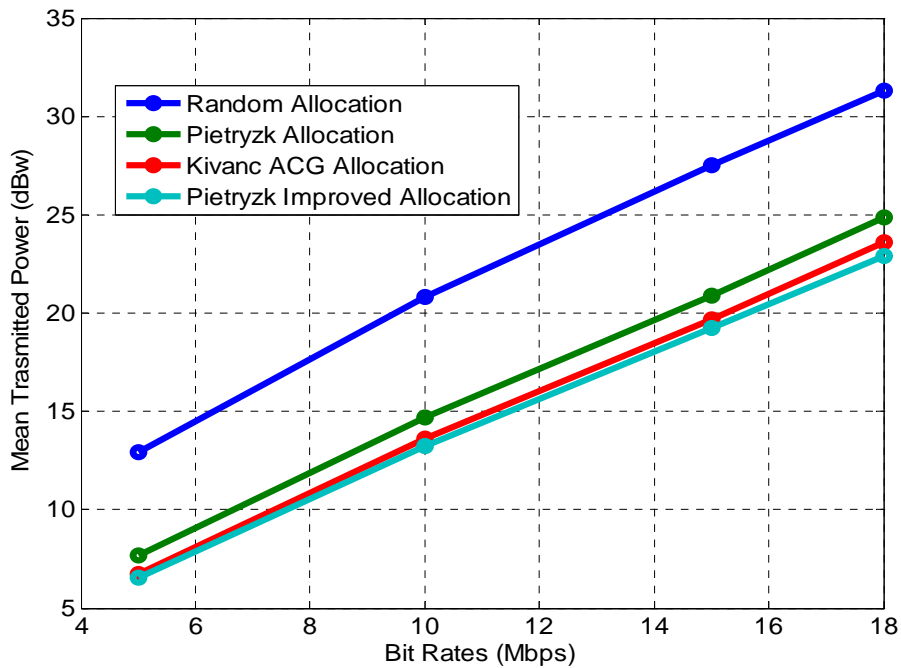
**Αλγόριθμος 4.9:** Αλγόριθμος τυχαίου ορισμού και ανάθεσης υποφέροντων στους χρήστες (η ποιότητα του καναλιού δεν λαμβάνεται υπόψη)

```

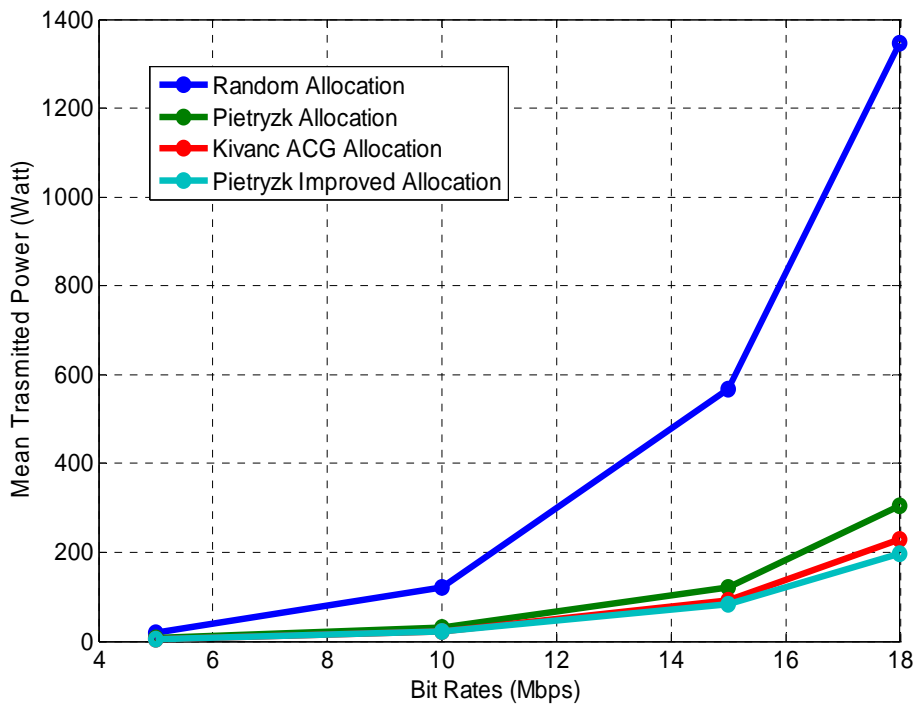
1 begin
2   |  $s_k = \lfloor \frac{R_k}{\sum_{k=1}^K R_k} N \rfloor$  ;  $k = 1, \dots, K$ 
3   |  $C_{k,n}^{Bad\_Allocation} = 0$  ;  $k = 1, \dots, K$ ;  $n = 1, \dots, N$ 
4   | for  $k = 1$  to  $K$  do
5   |   | while  $\sum_{k=1}^K s_k > 0$  do
6   |     |   |  $m = \text{random subcarrier}$ 
7   |     |   |  $C_{k,m}^{Bad\_Allocation} = 1$ 
8   |     |   |  $s_k = s_k - 1$ 
9   |   |

```

Το πρώτο σενάριο που εκτελέστηκε έχει να κάνει με σύστημα 10 χρηστών οι οποίοι είναι ακίνητοι σε κυψέλη ακτίνας  $R = 1500m$ . Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του συστήματος παραμένουν αμετάβλητα. Συγκεκριμένα για κάθε αλγόριθμο εκτελέστηκαν 4 διαφορετικές προσομοιώσεις στις οποίες το συνολικό φορτίο (ρυθμός μετάδοσης bits) που απαιτούσαν οι χρήστες ήταν 5, 10, 15 και 18 Mbps. Αν και η μέγιστη χωρητικότητα του συστήματος είναι τα 20 Mbps, αποφύγαμε την εκτέλεση της συγκεκριμένης προσομοίωσης για αποφυγή προβλημάτων. Τα παρακάτω αποτελέσματα αποτελούν την μέση τιμή της μεταδιδόμενης ισχύος για 1000χρονοθυρίδες διάρκειας 0,005sec η καθεμία.



Εικόνα 4.10: Μέση ισχύς εκπομπής σε dBw

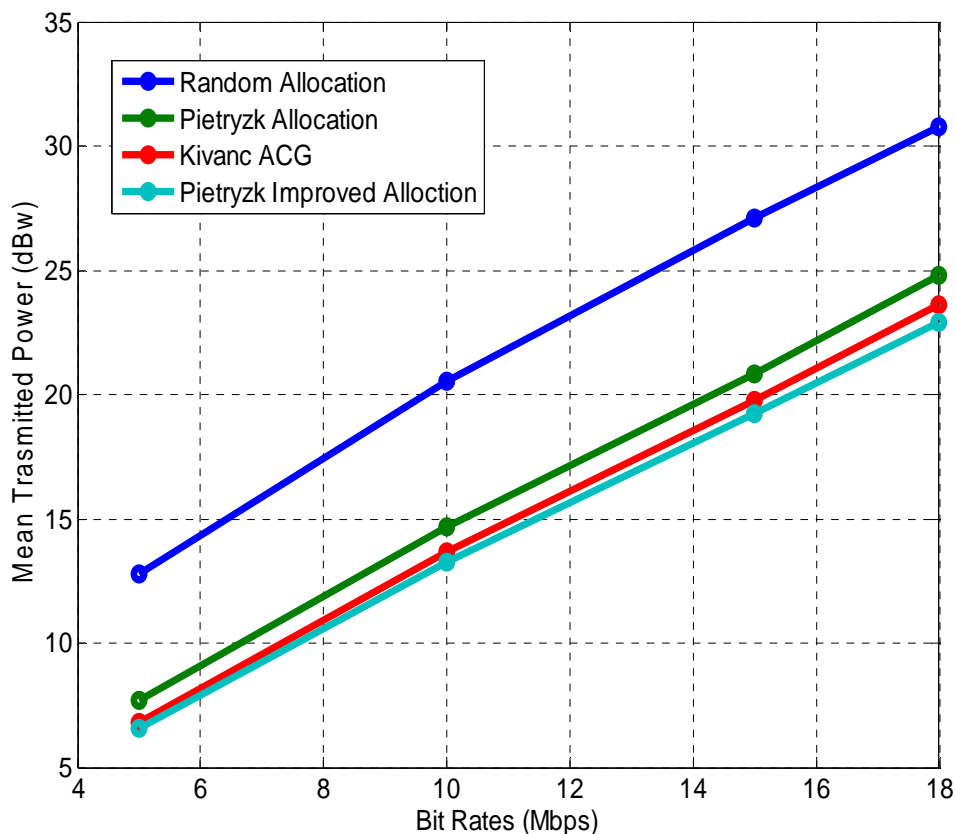


Εικόνα 4.11: Μέση ισχύς εκπομπής σε Watt

Οι παραπάνω γραφικές παραστάσεις καταδεικνύουν την αναγκαιότητα της σωστής διαχείρισης των ραδιοπόρων του συστήματος. Βλέπουμε ότι η στρατηγική ανάθεσης των υποφέροντων στους χρήστες ορίζει και την συνολική απαιτούμενη ισχύ εκπομπής από τον σταθμό βάσης. Προφανώς, στην περίπτωση της τυχαίας ανάθεσης οι τιμές της ισχύος είναι τραγικά μεγαλύτερες σε σύγκριση με τους αλγορίθμους που

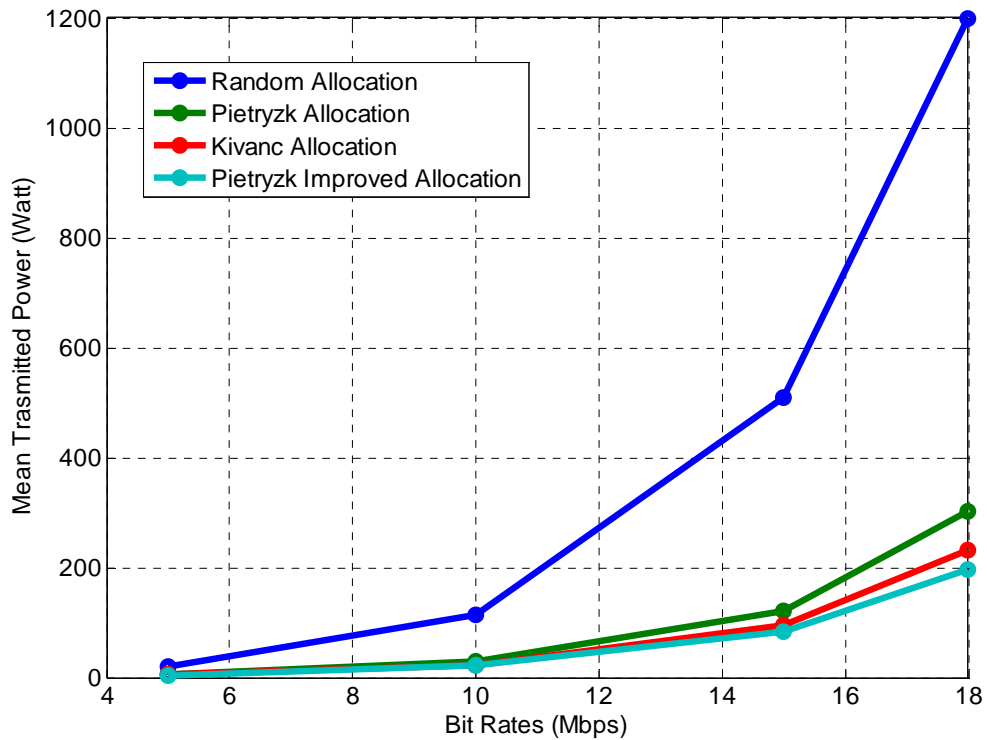
προτείνουν οι Pietryzk και Kivanc αφού η ποιότητα του καναλιού είναι ο σημαντικότερος παράγοντας για την κατάλληλη διαχείριση των ραδιοπόρων. Στα 18Mbps η διαφορά ισχύος μεταξύ του αλγορίθμου 4.9 και 4.4 είναι  $P_{random} - P_{improved} = 1346,0 - 195,5 = 1150,5 \text{ Watt}$  ή  $30,6 \text{ dBw}$ . Ένα γενικό συμπέρασμα που θα μπορούσαμε να κάνουμε είναι ότι από τα διαγράμματα φαίνεται ότι οι αλγόριθμοι 4.4 και 4.8 είναι πιο αποδοτικοί.

Στη συνέχεια, διατηρούμε την ακτίνα της κυψέλης σταθερή αλλά τώρα θεωρούμε ότι οι χρήστες κινούνται μέσα στη κυψέλη. Επομένως, το κανάλι θα μεταβληθεί λόγω του φαινομένου Doppler. Παρόλα αυτά, από τις παρακάτω γραφικές παραστάσεις παρατηρούμε ότι η συνολική μέση ισχύς εκπομπής δεν μεταβάλλεται αισθητά. Αυτή η συμπεριφορά είναι εντελώς τυχαία μιας και οι χρήστες μπορεί να κινούνται κοντά στην κεραία εκπομπής με αποτέλεσμα την μείωση των απωλειών διάδοσης. Γενικά, για πιο ικανοποιητικά συμπεράσματα ίσως θα πρέπει να γίνει μεγαλύτερος αριθμός προσομοιώσεων για μεγαλύτερες χρονικές διάρκειες έτσι ώστε να είναι δυνατή η καλύτερη στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Θα πρέπει όμως και πάλι να επισημάνουμε την βέλτιστη λειτουργία του αλγορίθμου 4.4 σε σχέση με τους υπόλοιπους.



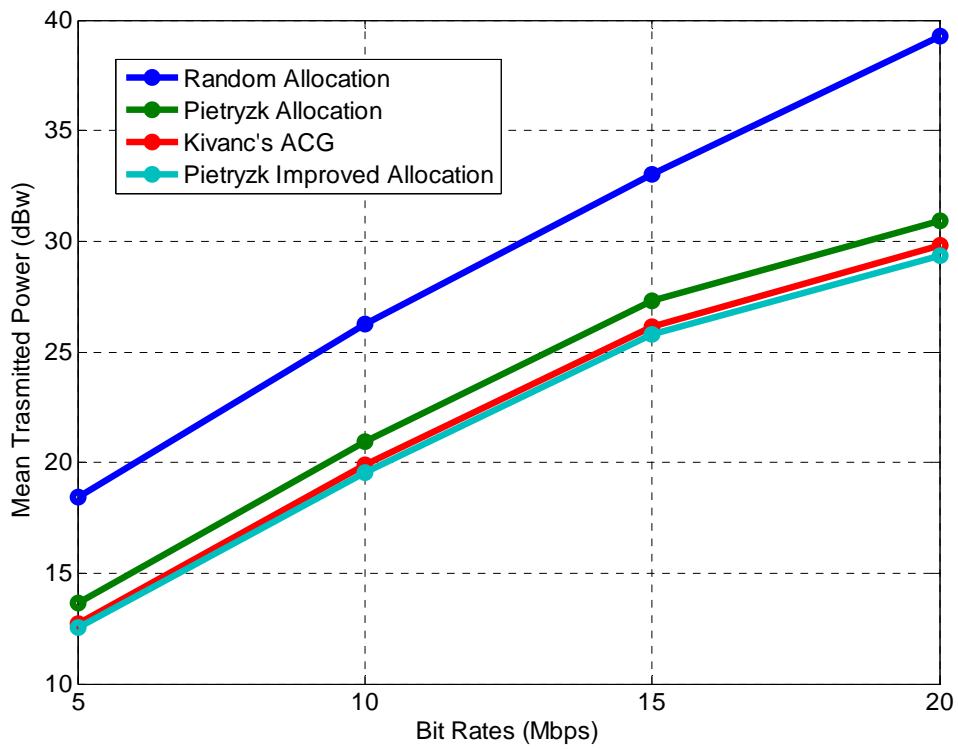
**Εικόνα 4.12:** Μέση ισχύς εκπομπής σε dBw για σύστημα μιας κυψέλης στην οποία οι χρήστες κινούνται



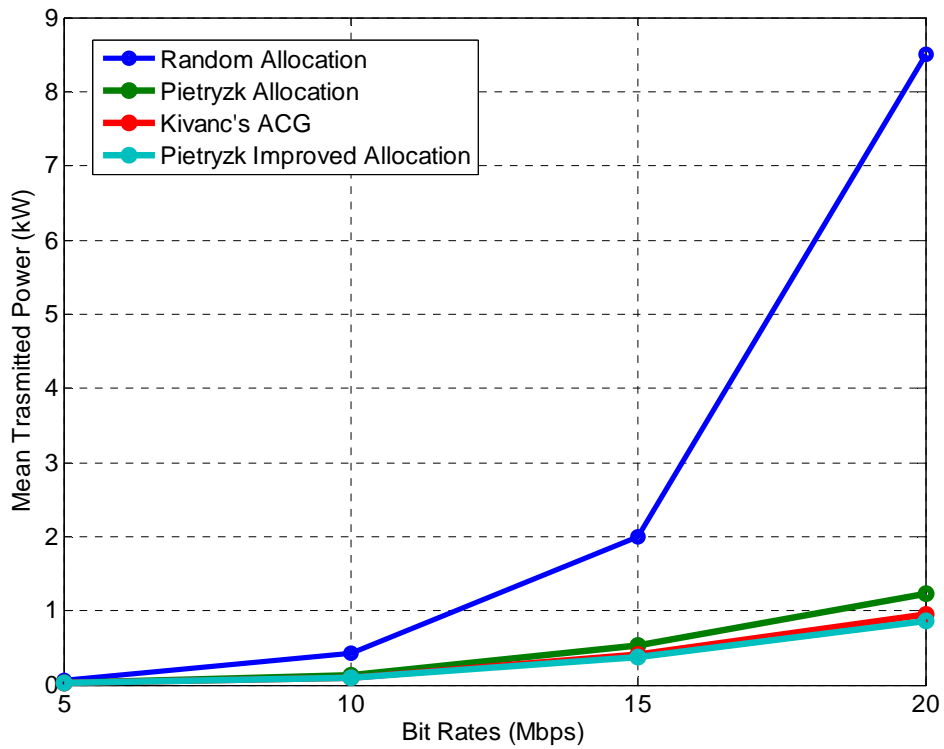


**Εικόνα 4.13:** Μέση ισχύς εκπομπής σε Watt για σύστημα μιας κυψέλης στην οποία οι χρήστες κινούνται

Στην συνέχεια, αυξάνουμε την ακτίνα της κυψέλης στα  $R = 2000m$ . Θεωρούμε ότι οι χρήστες είναι πρακτικά ακίνητοι και πραγματοποιούμε τις παρακάτω προσομοιώσεις για 5, 10, 15, 18 Mbps. Θα πρέπει να επισημάνουμε ότι με την αύξηση της ακτίνας της κυψέλης ουσιαστικά αυξάνουμε και τις απώλειες λόγω διάδοσης. Το αντίκτυπο της αλλαγής του καναλιού θα πρέπει να είναι εμφανές και στον υπολογισμό της συνολικής ισχύος εκπομπής. Αυτό βέβαια εξαρτάται και από την θέση των χρηστών στο εσωτερικό της κυψέλης μιας και αν βρίσκονται κοντά στον σταθμό βάσης η ποιότητα του καναλιού τους θα είναι αρκετά υψηλή λόγω των μειωμένων απωλειών διάδοσης. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του σεναρίου που μόλις περιγράψαμε παρατείνονται στην επόμενη σελίδα.



Εικόνα 4.14: Μέση ισχύς εκπομπής σε dBw για σύστημα μιας κυψέλης ακτίνας  $R = 2000m$



Εικόνα 4.15: Μέση ισχύς εκπομπής σε kW για σύστημα μιας κυψέλης ακτίνας  $R = 2000m$

Η αύξηση της συνολικής μέσης ισχύος είναι χαρακτηριστική. Παρατηρούμε ότι σε κάθε αλγόριθμο υπάρχει αύξηση της τάξεως των 5 με 10 dBw. Γι'αυτό το λόγο, απαιτείται η σωστή διαχείριση των διαθέσιμων ραδιοπόρων του συστήματος για να αποφευχθεί η σπατάλη ισχύος. Για άλλη μια φορά, θα πρέπει να επισημανθεί η σταθερότητα της συμπεριφοράς των αλγορίθμων μιας και σε όλες τις προσομοιώσεις που έχουν εκτελεστεί, η σειρά αποδόσης δεν έχει αλλάξει.

Ένα ενδιαφέρον σενάριο που θα μπορούσαμε να μελετήσουμε είναι εκείνο της χειρότερης περίπτωσης στο οποίο ο χρήστης με το χειρότερο κέρδος διαύλου απαιτεί και τον υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης. Προφανώς, θα αναμένουμε αύξηση στη συνολική μέση μεταδιδόμενη ισχύ. Για την παρακάτω προσομοίωση θεωρούμε το κανάλι με ακτίνα κυψέλης  $R = 1500m$ , οι χρήστες είναι πρακτικά ακίνητοι και ο χρήστης με το χειρότερο κανάλι είναι ο χρήστης 9.

	Χρήστες										Total Bit Rate(Mbps)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Bit Rates(Mbps)	0,3	0,4	0,2	0,5	0,5	0,5	0,5	0,3	1,5	0,3	5
	0,5	0,8	0,8	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	3	1	10
	1,1	1,2	1,2	1,2	0,8	1,5	1,2	1,3	4,5	1	15
	1,5	1,4	1,7	1,5	1,1	1,3	1,2	1,4	5,5	1,4	18

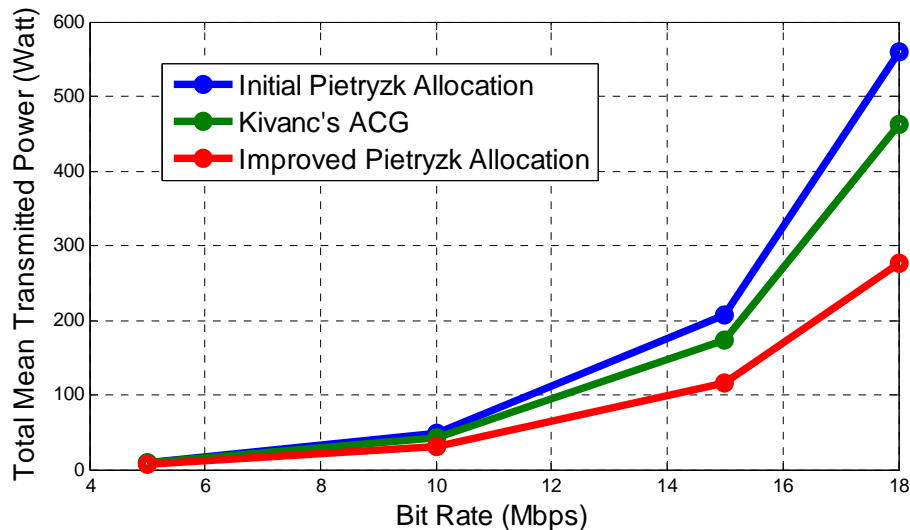
**Πίνακα 4.5:** Ζήτηση χρηστών για το σενάριο της χειρότερης περίπτωσης

Η μέση συνολική μεταδιδόμενη ισχύς για τον παραπάνω πίνακα ζήτησης είναι:

Bit Rate(Mbps)	Initial Pietryzk Allocation	Improved Pietryzk Allocation	ACG
5	9,5322 (Watt)	7,2662	8,3174
10	48,0674	30,1092	42,1408
15	207,2189	115,5211	173,2689
18	558,4749	275,3002	462,3076

**Πίνακας 4.6:** Μεση συνολική μεταδιδόμενη ισχύς για το σενάριο της χειρότερης περίπτωσης

Όπως φαίνεται τόσο από την εικόνα 4.18 όσο και από τον πίνακα 4.6 οι τιμές της ισχύος, για το σενάριο της χειρότερης περίπτωσης, αυξάνονται σε πάρα πολύ μεγάλο βαθμό.



**Εικόνα 4.16:** Μέση ισχύς εκπομπής σε  $W$  για σύστημα μιας κυπέλης ακτίνας  $R = 1500m$  στην περίπτωση όπου ο χειρότερος χρήστης ζητά τον μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης

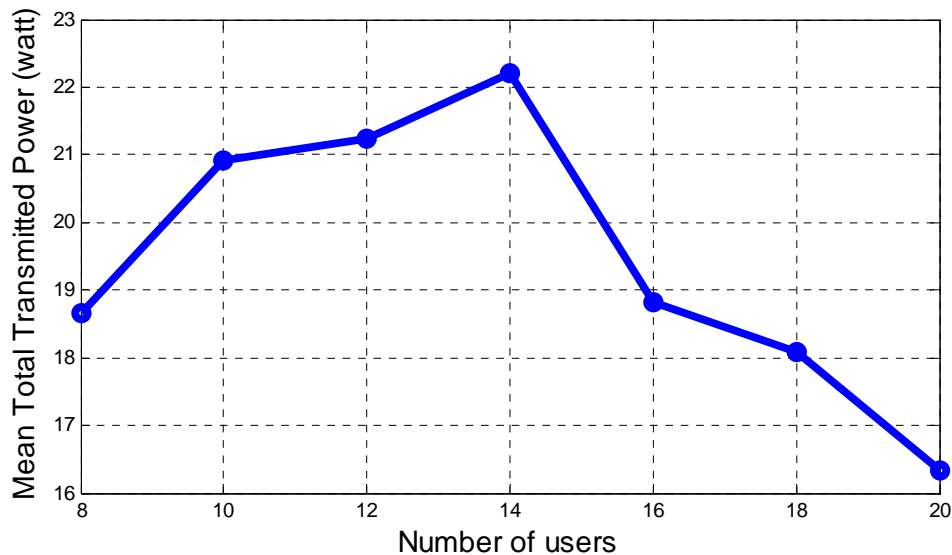
Μια ενδιαφέρουσα παρατήρηση που θα μπορούσαμε να κάνουμε είναι το γεγονός ότι σε αντίθεση με όλες τις υπόλοιπες προσομοιώσεις, σε αυτή την περίπτωση οι αλγόριθμοι 4.4 και 4.8 δεν συμβαδίζουν. Μπορεί να μειώνουν και οι δύο την ισχύ, αλλά ο βελτιωμένος αλγόριθμος ανάθεσης του *Pietryzk* συμπεριφέρεται πολύ καλύτερα. **Χαρακτηριστικά, για  $R = 18Mbps$  ο αλγόριθμος ACG πετυχαίνει μείωση ισχύος κατά 17,2% ενώ ο βελτιωμένος αλγόριθμος του *Pietryzk* πετυχαίνει αντίστοιχα μείωση ισχύος κατά 50,7%.**

Οι τόσο μεγάλες τιμές της μεταδιδόμενη ισχύς είναι απολύτως λογικές αν αναλογιστούμε το γεγονός ότι ο ορισμός του αριθμού των υποφέροντων ανα χρήστη αποτελεί συνάρτηση τόσο του ρυθμού μετάδοσης όσο και της ποιότητας του καναλιού του χρήστη. Χρήστης με κακό κανάλι και μεγάλη ζήτηση σε ταχύτητα μετάδοσης συνεπάγεται και μεγάλο αριθμό υποφέροντων να έχουν ανατεθεί σε αυτόν. Επομένως για να μπορέσει το σύστημα να καλύψει τις υψηλές απαιτήσεις του χρήστη με το χειρότερο κανάλι απαιτεί πολύ μεγαλύτερη εκπομπή ισχύος. Πράγματι, όσον αφορά την ανάθεση των υποφέροντων, ο αλγόριθμος *BABS* για το συγκεκριμένο σενάριο μας έδωσε:

user	number of subcarriers
1	17
2	14
3	6
4	27
5	30
6	21
7	22
8	6
9	91
10	16

**Πίνακας 4.7:** Ορισμός του αριθμού υποφέροντων ανά χρήστη στην περίπτωση μεγάλης ζήτησης από τον χειρότερο χρήστη

Ένα τελευταίο ενδιαφέρον σενάριο που εκτελέστηκε είναι η επίδραση του αριθμού των χρηστών στην συνολική μεταδιδόμενη ισχύς διατηρώντας σταθερό τον αριθμό των χρηστών. Στην παρακάτω προσομοίωση διατηρήσαμε σταθερό φορτίο  $R = 10 \text{ Mbps}$  και μεταβάλλαμε τον αριθμό των χρηστών από 8 σε 20 με βήμα αύξησης 2. Η ανάθεση έγινε μέσω του αλγόριθμου 4.4 ενώ η αντίστοιχη γραφικά παράσταση είναι η παρακάτω:



Εικόνα 4.17: Φαινόμενο διαφορικότητας πολλαπλών χρηστών (multiuser diversity)

Από την εικόνα 4.18 παρατηρούμε ότι από ένα αριθμό χρηστών και μετά η ισχύς εκπομπής μειώνεται παρά το γεγονός ότι αυξάνει ο αριθμός των χρηστών. Το συγκεκριμένο φαινόμενο χαρακτηρίζεται ως ένα είδος διαφορικότητας μεταξύ των χρηστών και αποτελεί ένα από τα βασικά πλεονέκτηματα των OFDMA συστημάτων πολλαπλής πρόσβασης. Η αύξηση του αριθμού των χρηστών αυξάνει και την πιθανότητα η θέση του χρήστη εντός της κυψέλης να είναι κοντά στον σταθμό εκπομπής και επομένως οι μικρότερες απώλειες διάδοσης συνεπάγονται και λιγότερη εκπεμπόμενη ισχύ. Επιπλέον, η μείωση της ισχύος οφείλεται και στο γεγονός ότι αφού αυξάνουν οι χρήστες, αυξάνει και η πιθανότητα ένα υποφέρον που δεν είναι καλό στον ένα χρήστη να είναι καλό σε κάποιον άλλο. Έτσι, με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η καλύτερη ανάθεση των υποφερόντων στους χρήστες.

#### 4.4 Γενικά συμπεράσματα

Τα γενικά συμπεράσματα που θα μπορούσαμε να κάνουμε με βάση τις παραπάνω προσομοιώσεις είναι τα εξής:

- Η σωστή διαχείριση των ραδιοπόρων ενός συστήματος είναι μια αναγκαία διαδικασία μιας και βελτιώνει αισθητά την μέση συνολική μεταδιδόμενη ισχύ.
- Ο αλγόριθμος 4.4 του Pietryzk αποτελεί τον καλύτερο αλγόριθμο ανάθεσης ραδιοπόρων μιας και πετυχαίνει την μεγαλύτερη μείωση της μεταδιδόμενης ισχύος

- Ο ACG του Kivanc λειτουργεί ικανοποιητικά μιας και δίνει τιμές λίγο μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του αλγόριθμου 4.4. Η μόνη περίπτωση στην οποία η τιμή του ACG διαφέρει αισθητά και είναι μεγαλύτερη είναι από εκείνη του 4.4 είναι στη περίπτωση του χειρότερου σεναρίου όπου ο χρήστης με το χειρότερο κανάλι ζητάει τον μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων.
- Ο αλγόριθμος 4.3 δεν μπορεί να αποτελέσει τίποτα παραπάνω από μια αρχική προσέγγιση της βέλτιστης διαχείρισης. Μάλιστα αυτή η προσέγγιση δεν συνεπάγεται ότι είναι πάντα καλή μιας και σε πολλές περιπτώσεις η βελτίωση που επιφέρει ο αλγόριθμος 4.4 είναι πολύ μεγαλύτερη.
- Ο αλγόριθμος ορισμού του αριθμού των υποφέροντων ανά χρήστη προσπαθεί να καλύψει το μειονέκτημα του κακού καναλιού ενός χρήστη με την ανάθεση σε εκείνον του μεγαλύτερο αριθμού υποφέροντων.
- Η διαφορικότητα πολλαπλών χρηστών αποτελεί ένα σημαντικό πλεονέκτημα των OFDMA συστημάτων μιας και η αύξηση των χρηστών από ένα σημείο και μετά δεν συνεπάγεται και αύξηση της ισχύος.

## 5 Εξελικτικές Τεχνικές Βελτιστοποίησης – Γενετικοί Αλγόριθμοι

### 5.1 Ιστορική Αναφορά και Γενικές Πληροφορίες

Οι γενετικοί αλγόριθμοι αποτελούν μια τεχνική βελτιστοποίησης η οποία μιμείται τις βασικές αρχές της φυσικής εξέλιξης. Πρόκειται για ένα χρήσιμο και πρακτικό εργαλείο μέλετης σε διάφορα επιστημονικά πεδία (οικονομικά, φυσικές επιστήμες) με αποτέλεσμα την ευρεία χρήση τους την τελευταία δεκαετία. Μερικοί από τους λόγους της επιτυχίας των εξελικτικών αλγορίθμων είναι τόσο η εύκολη υλοποίηση τους όσο και η ευρεία προσαρμοστικότητα τους στα διάφορα προβλήματα.

Η ιδέα των γενετικών αλγορίθμων προτάθηκε αρχικά από τον John Holland του Πανεπιστημίου του Michigan, ο οποίος μαζί με τους σπουδαστές του βοήθησαν σημαντικά στην εξέλιξη της συγκεκριμένης ιδέας. Σήμερα υπάρχουν αρκετά ενδιαφέροντα συγγράμματα πάνω στο συγκεκριμένο τομέα, τα οποία επεξηγούν και προεκτείνουν την χρησιμότητα των γενετικών αλγορίθμων (Goldberg, 1989; Gen and Cheng, 1997; Holland, 1975; Michalewicz, 1992; Mitchell, 1996; Vose, 1999). Μία πλήρως επεξηγηματική περιγραφή τόσο των γενετικών αλγορίθμων όσο και γενικότερα των εξελικτικών μεθόδων υπάρχει στο “Handbook on Evolutionary Computation” (Back, 1997) καθώς και στα παρακάτω 3 συγγράμματα: “*Evolutionary Computation Journal, MIT Press*”, “*Transactions on Evolutionary Computations, IEEE*”, “*Genetic Programming and Evolvable Machines, Kluwer Academic Publishers*”.

Για να καταλάβουμε την υλοποίηση των γενετικών αλγορίθμων θα πρέπει να αναλογιστούμε το γεγονός ότι λαμβάνουν υπόψη τις βασικές αρχές της φυσικής εξέλιξης. Με βάση τη παραπάνω επισήμανση, η μέθοδος που πρέπει να ακολουθηθεί είναι η σωστή απεικόνιση των παρακάτω σταδίων ανάλογα με το πρόβλημα που πρέπει να επιλύσουμε:

- Ορισμός του αριθμού του πληθυσμού που θα συμμετάσχουν στο στάδιο της αναπαραγωγής
- Ορισμός των δειγμάτων του αρχικού πληθυσμού που θα συμμετάσχουν στην αναπαραγωγή
- Αναπαραγωγή – Γενετική Διασταύρωση (Crossover)
- Μετάλλαξη

Όσον αφορά το στάδιο του ορισμού του αριθμού του αρχικού πληθυσμού πρόκειται για μια διαδικασία η οποία δεν χρίζει ιδιαίτερης αναφοράς. Το πλήθος των αρχικών δειγμάτων μπορεί να ορισθεί τυχαία αρκεί να αποτελούν υπαρκτές λύσεις του προβλήματος που θέλουμε να επιλύσουμε. Προφανώς, δεν μας απασχολεί αν αποτελούν τις βέλτιστες λύσεις μιας και η εκτέλεση του γενετικού αλγορίθμου θα εξαλείψει τις κακές λύσεις και θα βελτιώσει τις ήδη υπάρχουσες έτσι ώστε ύστερα

απο ένα συγκεκριμένο αριθμό επαναλήψεων να μας οδηγήσει στη βέλτιστη λύση. Στατιστικά, η επιλογή του αρχικού πληθυσμού επηρεάζει τον αριθμό των επαναλήψεων που θα χρειαστεί για την παραγωγή της βέλτιστης γενιάς μιας και μικρός αρχικός πληθυσμός συνήθως συνεπάγεται και περιορισμένη ποικιλία και επιλεκτικότητα λύσεων. Αρκετά σημαντικά στάδια είναι τα επόμενα, τα οποία χρίζουν και ιδιαίτερης αναφοράς λόγω των επιλογών υλοποίησης που μας προσφέρονται.

## **5.2 Ορισμός των δειγμάτων του αρχικού πληθυσμού που θα συμμετάσχουν στην αναπαραγωγή (Reproduction – Selection Operator)**

Ο βασικός στόχος του συγκεκριμένου σταδίου είναι η δημιουργία αντίγραφων των καλών λύσεων καθώς και η εξόντωση των αντίστοιχων κακών του πληθυσμού διατηρώντας το μέγεθος του πληθυσμού σταθερό, έτσι ώστε κατά το στάδιο της αναπαραγωγής να συμμετάσχουν οι όσο δυνατόν καλύτερες λύσεις. Τα παραπάνω επιτυγχάνονται μέσω των παρακάτω διαδικασιών:

- Εντοπισμός των καλύτερων λύσεων του πληθυσμού
- Αντιγραφή των συγκεκριμένων λύσεων στο σύνολο αναπαραγωγής (mating pool)
- Εξόντωση των κακών λύσεων έτσι ώστε στην αναπαραγωγή να συμμετέχουν μόνο οι ρέπλικες των καλών λύσεων

Για την υλοποίηση των παραπάνω εργασιών υπάρχουν αρκετές επιλογές εργασίας. Μερικές από τις πιο κοινές μεθόδους είναι η επιλογή μέσω *διεξαγωγής τουρνουά* (*tournament selection*) καθώς και η μέθοδος της *αναλογικής επιλογής* (*proportionate selection*).

### **5.2.1 Επιλογή μέσω διεξαγωγής τουρνουά**

Η συγκεκριμένη μέθοδος απαιτεί την τυχαία δημιουργία ζευγαριών ανάμεσα στις λύσεις του πληθυσμού τα οποία διαγωνίζονται και ανάλογα το πρόβλημα που θέλουμε να επιλύσουμε μια από τις 2 λύσεις προκρίνεται στο σύνολο των λύσεων που θα συμμετάσχουν στην αναπαραγωγή. Προφανώς, ένας πληθυσμός 20 λύσεων θα μας δώσει 10 δείγματα στο σύνολο αναπαραγωγής. Όμως, όπως αναφέραμε προηγουμένως, το μέγεθος του συνόλου αναπαραγωγής πρέπει να είναι ίδιο με το μέγεθος του πληθυσμού. Επομένως, η διαδικασία θα πρέπει να επαναληφθεί με την δημιουργία άλλων 10 τυχαίων ζευγαριών από τον αρχικό πληθυσμό έτσι ώστε το μέγεθος του συνόλου αναπαραγωγής να είναι ίσο με τον αρχικό πληθυσμό. Συνεπώς, κάθε λύση θα πρέπει να συμμετάσχει σε 2 τουρνουά. Το πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ότι η καλύτερη λύση του αρχικού πληθυσμού θα έχει 2 ρέπλικες στο σύνολο αναπαραγωγής ενώ η χειρότερη θα αποκλειστεί και στα 2 τουρνουά. Με αυτό τον τρόπο ικανοποιούνται τα όσα αναφέρονται παραπάνω για τις

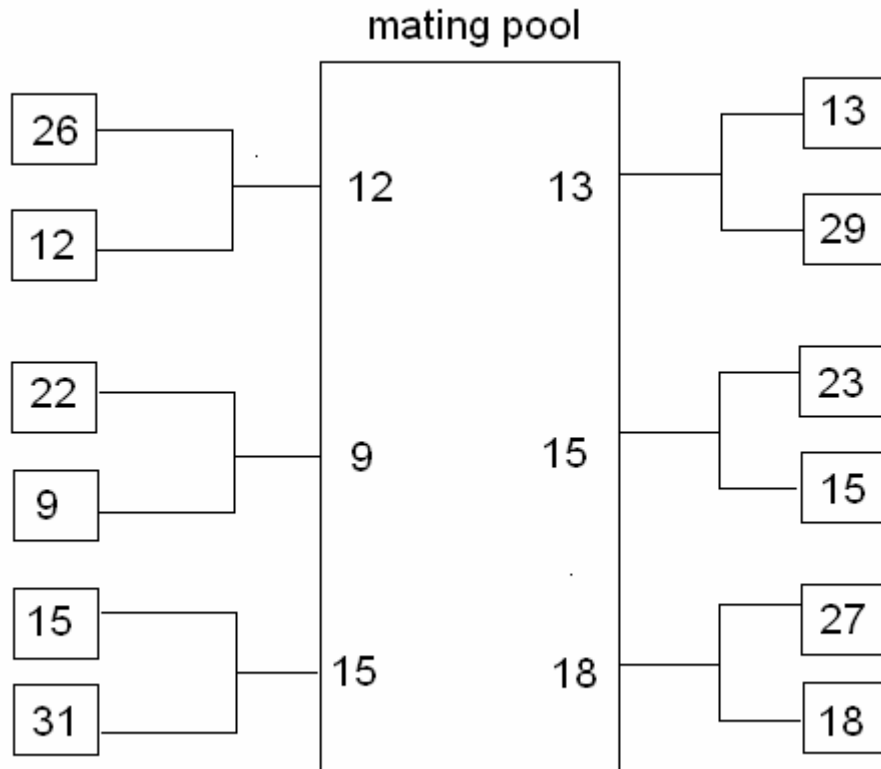


ιδιότητες που πρέπει να διαθέτει το συγκεκριμένο βήμα της υλοποίησης των γενετικών αλγορίθμων.

Έστω ότι έχουμε τον παρακάτω πληθυσμό λύσεων:

$$N = \{ 26, 12, 22, 9, 31, 29, 15, 13, 15, 18, 27, 23 \}$$

και πρόκειται για ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης. Τότε ένα παράδειγμα διεξαγωγής τουρνουά θα μπορούσε να ήταν το επόμενο:



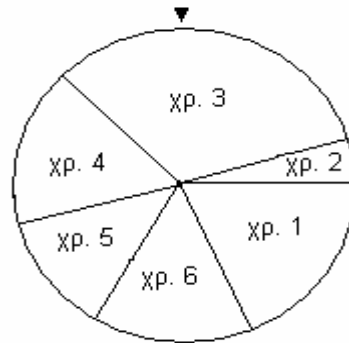
Εικόνα 5.1: Παράδειγμα διεξαγωγής τουρνουά σε πρόβλημα ελαχιστοποίησης

### 5.2.2 Αναλογική Επιλογή (proportional selection)

Έστω  $f(x)$  η συνάρτηση προς βελτιστοποίηση. Στη θεωρία των εξελικτικών αλγορίθμων η συνάρτηση  $f(x)$  ονομάζεται "συνάρτηση προσαρμογής" (*fitness function*) και η κάθε τιμή της αντανακλά το πόσο "καλό" είναι ένα χρωμόσωμα για τη λύση του προβλήματος. Μέσω της εξελικτικής διαδικασίας, τα καλύτερα χρωμοσώματα αναμένεται να παραγάγουν μεγαλύτερο αριθμό απογόνων και επομένως έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα επιβίωσης στις ακόλουθες γενιές, απομιμούμενα το φυσικό μηχανισμό της επιβίωσης του ισχυρότερου – καλύτερου (*survival of the fittest*). Πρακτικά, η υλοποίηση του παραπάνω μηχανισμού εκτελείται ως εξής: Έστω  $f_i$  η τιμή προσαρμογής του χρωμοσώματος  $i$  και  $f_{\text{average}}$  η αντίστοιχη μέση τιμή για πληθυσμό  $N$  χρωμοσωμάτων. Τότε, κάθε χρωμόσωμα έχει  $f_i / f_{\text{average}}$  αντίγραφα στο σύνολο αναπαραγωγής.

Παρόμοια επιλογή γονέων γίνεται και μέσω του μηχανισμού της ρουλέτας. Σε αυτή τη περίπτωση, ο τροχός χωρίζεται σε  $N$  μέρη, των οποίων τα εμβαδά βρίσκονται

σε αναλογία με τα μεγέθη  $N \cdot f_i / f_{\text{average}}$ . Συνεπώς, ο τροχός θα πρέπει να γυρίσει  $N$  φορές επιλέγοντας κάθε φορά (για το σύνολο αναπαραγωγής) το χρωμόσωμα στο οποίο θα δείχνει ο δείκτης, όταν ο τροχός σταματήσει. Προφανώς, με αυτό τον τρόπο οι καλές λύσεις έχουν αυξημένες πιθανότητες εμφάνισης στο σύνολο των γονέων που θα αναπαραχθούν για την δημιουργία καλύτερων χρωμοσωμάτων.



Εικόνα 5.2: Επιλογή γονέων με το μηχανισμό της ρουλέτας

### 5.3 Αναπαραγωγή – Γενετική Διασταύρωση

Είναι προφανές ότι το στάδιο της επιλογής δεν είναι ικανό να παράγει νέα χρωμοσώματα στο πληθυσμό. Αντιθέτως, δημιουργεί αντίγραφα των καλών λύσεων του πληθυσμού, τα οποία θα συμμετάσχουν και στην αναπαραγωγή. Οι τελεστές της γενετικής διασταύρωσης και της μετάλλαξης ευθύνονται για τη δημιουργία των νέων λύσεων. Όπως και στο στάδιο της επιλογής, έτσι και στο αντίστοιχο της διασταύρωσης είναι δυνατή η υλοποίησή του με ποικίλους τρόπους. Βέβαια, η βασική λογική παραμένει ίδια σε όλες τις περιπτώσεις. Δύο χρωμοσώματα επιλέγονται τυχαία από το σύνολο αναπαραγωγής και ανταλλάσσουν αμοιβαία ένα ποσοστό των επιμέρους στοιχείων τους. Το μέγεθος της διασταύρωσης που θα πραγματοποιηθεί εξαρτάται από τη θέση διασταύρωσης (*crossing site*), η οποία καθορίζεται τυχαία σε κάθε επιλογή 2 χρωμοσωμάτων.

Για την καλύτερη κατανόηση της υλοποίησης του σταδίου της γενετικής διασταύρωσης, ιδανικό παράδειγμα αποτελεί η παρακάτω παρουσίαση της εκτέλεσης του συγκεκριμένου γενετικού τελεστή για δυαδικούς γενετικούς αλγόριθμους (*binary genetic algorithms*). Βασικό χαρακτηριστικό των δυαδικών γενετικών αλγορίθμων είναι η έκφραση των λύσεων – χρωμοσωμάτων σε ακολουθίες από 0 και 1. Έστω ότι έχουμε το παρακάτω ζευγάρι γονέων:

	Θέση 3	
0 1 0		0 0 0 1 0 1 0
0 1 1		1 0 0 0 1 1 0

Η κάθετη γραμμή μετά το τρίτο ψηφίο των ακολουθιών ορίζει τη θέση διασταύρωσης. Συνεπώς, στο συγκεκριμένο παράδειγμα, οι 2 γονείς θα ανταλλάξουν αμοιβαία όλα

τα ψηφία από τη θέση 3 και μετά. Οι δύο νέες λύσεις που θα παραχθούν είναι οι παρακάτω:

$$\begin{array}{c}
 \text{Θέση 3} \\
 | \\
 0\ 1\ 0\ | \ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0 \\
 | \\
 0\ 1\ 1\ | \ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0 \\
 |
 \end{array}$$

Οι απόγονοι δεν είναι απαραίτητα αναγκαίο να είναι καλύτερες λύσεις από τους γονείς τους. Πρόκειται για μια τυχαία διαδικασία, μιας και η δημιουργία των απογόνων εξαρτάται από τον τύπο διασταύρωσης ο οποίος δεν επιλέγεται με κάποιο συγκεκριμένο τρόπο. Όμως, ακόμα και η παραγωγή χειρότερων λύσεων δεν αποτελεί κάποιο τραγικό πρόβλημα μιας και στο επόμενο τουρνουά, αυτές θα είναι οι βασικές υποψήφιος για αποκλεισμό και επομένως θα απέχουν από την επόμενη αναπαραγωγική διαδικασία. Βέβαια, θα πρέπει να αναλογιστούμε και το γεγονός ότι οι λύσεις που συμμετέχουν στην αναπαραγωγή έχουν προκριθεί από τη διαδικασία του τουρνουά και επομένως αποτελούν καλές λύσεις. Γενικά, **ισχύει ότι από καλούς γονείς είναι πιθανότερο να παραχθούν καλοί απόγονοι μιας και υπάρχουν περισσότεροι καλοί συνδυασμοί ανάμεσα στα ψηφία των γονέων.**

Συνήθως, για να διατηρήσουμε την ύπαρξη μερικών καλών χρωμοσωμάτων και στις επόμενες γενιές, δεν συμμετέχουν όλες οι λύσεις στο στάδιο της γενετικής διασταύρωσης. Ορίζεται μια πιθανότητα διασταύρωσης,  $p_c$  και συνεπώς το  $100p_c\%$  συμμετέχει στο συγκεκριμένο στάδιο ενώ το υπόλοιπο  $100(1 - p_c)\%$  αντιγράφεται αναλλοίωτο στην επόμενη γενιά.

## 5.4 Μετάλλαξη

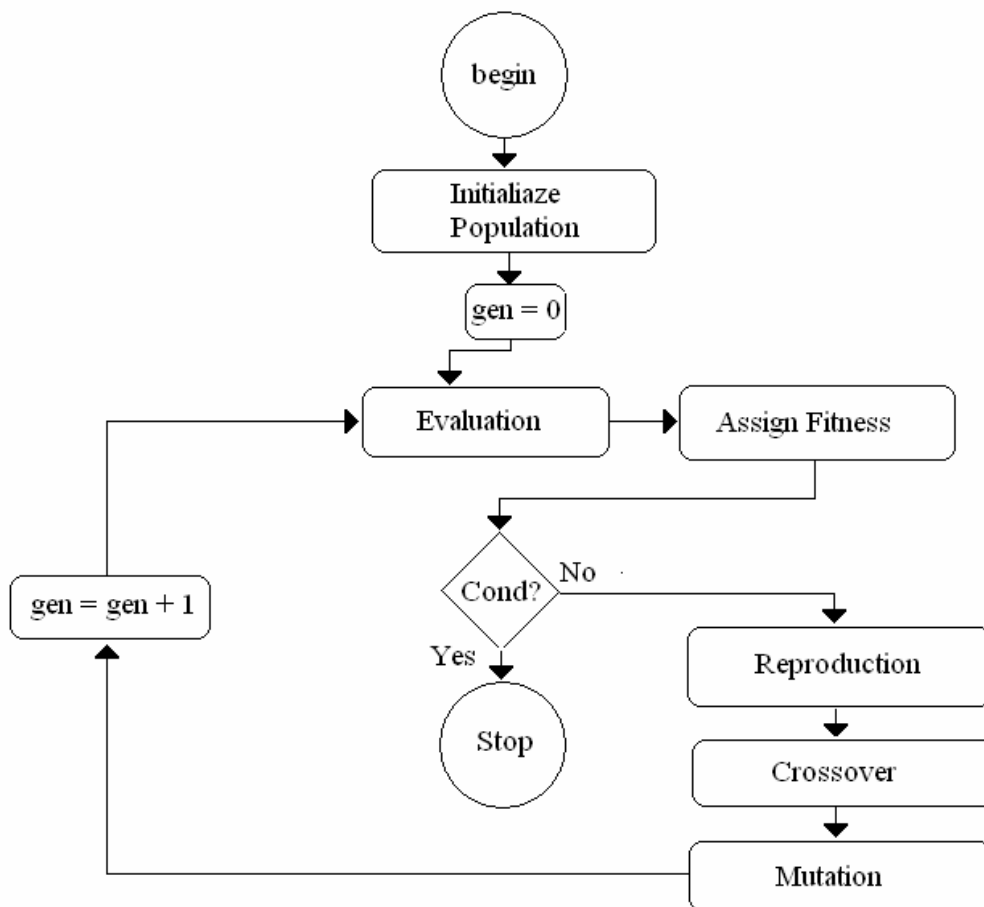
Κατά το στάδιο της μετάλλαξης έχουμε μια τυχαία αλλαγή σε κάποιο στοιχείο του χρωμοσώματος – λύσης. Χαρακτηριστικά, στην περίπτωση των δυαδικών γενετικών αλγορίθμων γίνεται αλλαγή ενός 1 σε 0, ή και το αντίστροφο, με μια πιθανότητα μετάλλαξης  $p_m$ . Η ύπαρξη του σταδίου της μετάλλαξης διατηρεί την ποικιλία του πληθυσμού μιας και είναι δυνατή η δημιουργία νέων λύσεων, οι οποίες δεν προκύπτουν από τις αμοιβαίες ανταλλαγές που πραγματοποιούνται κατά τη διαδικασία της γενετικής διασταύρωσης μεταξύ των χρωμοσωμάτων. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγεται ο κορεσμός των λύσεων και δίνεται η δυνατότητα νέων συνδυασμών οι οποίοι πιθανόν να μπορούν να οδηγήσουν σε καλύτερους απογόνους.

$$0\ 1\ 0\ \boxed{1}\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0 \quad \longrightarrow \quad 0\ 1\ 0\ \boxed{0}\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0$$

**Εικόνα 5.3:** Παράδειγμα μετάλλαξης χρωμοσώματος

Για την μείωση της υπολογιστικής πολυπλοκότητας της μετάλλαξης, ο *Goldberg* (1989) πρότεινε ένα ειδικό μετρητή για την επόμενη θέση μετάλλαξης σε ένα χρωμόσωμα (*mutation clock operator*). Έστω  $x$  η θέση ενός bit που υπέστη μετάλλαξη. Τότε, το επόμενο σημείο μετάλλαξης θα καθορίζεται μέσω μιας εκθετικής κατανομής με μέση τιμή  $\mu = 1 / p_m$ . Γενικά, η διαδικασία είναι απλή. Αρχικά, επιλέγεται ένας τυχαίος αριθμός  $r \in [0,1]$  και στη συνέχεια η επόμενη θέση μετάλλαξης προκύπτει ύστερα από  $n = -p_m \ln(1 - r)$  bits.

Συνοψίζοντας, τα 3 στάδια ενός γενετικού αλγόριθμου είναι αρκετά απλά. Ο τελεστής της επιλογής είναι υπεύθυνος για τη επιλογή καλών συμβολοακολουθιών ενώ ο τελεστής της διασταύρωσης συνδυάζει 2 χρωμοσώματα με την ελπίδα παραγωγής καλύτερων λύσεων. Τέλος, ο τελεστής της μετάλλαξης αλλάζει τοπικά ένα χρωμόσωμα θέλοντας να διατηρήσει την ποικιλία του πληθυσμού. Θα πρέπει να επισημάνουμε το γεγονός ότι η επιλογή, η γενετική διασταύρωση και η μετάλλαξη δεν αποτελούν ντετερμινιστικές διαδικασίες. Συνεπώς, όσα αναφέρονται παραπάνω δεν είναι σίγουρο ότι θα συμβούν. Καλές λύσεις είναι **πιθανόν** να παράγουν καλούς απόγονους αλλά αυτό δεν συμβαίνει πάντα. Παρόλα αυτά όμως, οι γενετικοί αλγόριθμοι εξασφαλίζουν την εξόντωση μιας κακής λύσης στην επόμενη γενιά και αντίστοιχα την αντιγραφή των καλών χρωμοσωμάτων στις μετέπειτα γενιές.

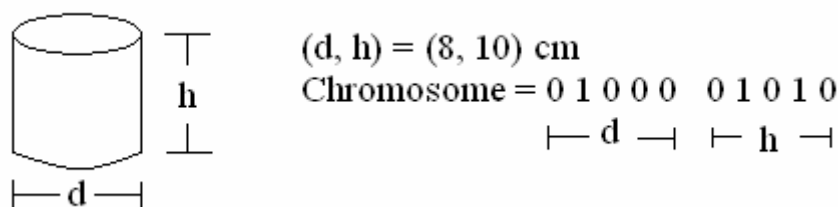


Εικόνα 5.4: Διάγραμμα ροής των βασικών αρχών λειτουργίας ενός γενετικού αλγορίθμου

## 5.5 Βασικές διαφορές μεταξύ των γενετικών αλγορίθμων και των κλασσικών μεθόδων βελτιστοποίησης

Από όσα αναφέρθηκαν παραπάνω είναι προφανές ότι οι γενετικοί αλγόριθμοι διαφέρουν αισθητά από τις κλασσικές μεθόδους βελτιστοποίησης. Στη συνέχεια παρατείνονται εκτενέστερα οι βασικότερες διαφορές μεταξύ των συγκεκριμένων τεχνικών βελτιστοποίησης.

Οι δυαδικοί γενετικοί αλγόριθμοι λειτουργούν με κωδικοποιημένες μεταβλητές και όχι με τις πραγματικές μεταβλητές του προβλήματος. Ανάλογα με την επιλεγόμενη έκφραση των μεταβλητών, το πρόβλημα μετατίθεται στο διακριτό χώρο αν και η συνάρτηση προς βελτιστοποίηση είναι συνεχής. Γενικά, οι γενετικοί αλγόριθμοι μπορούν να λειτουργήσουν αποτελεσματικά τόσο στο διακριτό όσο και στο συνεχή χώρο. Ένα από τα πιο σημαντικά μειονεκτήματα των εξελικτικών αλγορίθμων είναι το γεγονός ότι η σωστή προσέγγιση και λύση του προβλήματος απαιτεί και την κατάλληλη κωδικοποίηση των μεταβλητών.



**Εικόνα 5.5:** Παράδειγμα κωδικοποίησης των παραμέτρων σε πρόβλημα ελαχιστοποίησης του όγκου ενός κυλίνδρου. Τα πρώτα 5 bit αντιπροσωπεύουν το ύψος του κυλίνδρου και τα άλλα 5 τη διάμετρο της βάσης.

Η πιο χαρακτηριστική διαφορά μεταξύ των γενετικών αλγορίθμων και των κλασσικών μεθόδων βελτιστοποίησης είναι ο αριθμός των λύσεων που εξεργάζονται οι συγκεκριμένες τεχνικές. Χαρακτηριστικά, στην πρώτη περίπτωση έχουμε την ταυτόχρονη επεξεργασία ενός πληθυσμού λύσεων ενώ στη δεύτερη μόνο μια λύση. Λόγω αυτής της ιδιότητας των γενετικών αλγορίθμων καθώς και την συνεχή ενημέρωση του πληθυσμού με τις νέες καλύτερες λύσεις, η τελική λύση που προκύπτει μπορεί να είναι μια *ολική λύση* (*ολικό μέγιστο / ελάχιστο – global solution*). Επιπλέον, στην περίπτωση όπου στόχος είναι η βελτιστοποίηση 2 ή περισσότερων μεταβλητών (*multi-objective optimization*) η δυνατότητα της ταυτόχρονης επεξεργασίας των δεδομένων καθώς και η παραγωγή συνόλων λύσεων καθιστά τους εξελικτικούς αλγορίθμους ένα χρήσιμο εργαλείο.

Σε όσα έχουμε περιγράψει παραπάνω, τίποτα δεν έχει αναφερθεί στην ‘‘ανεξαρτησία’’ που παρουσιάζουν οι γενετικοί αλγόριθμοι ως προς την λειτουργία τους. Ο συγκεκριμένος χαρακτηρισμός υποδεικνύει το γεγονός ότι η εκτέλεση του αλγορίθμου δεν απαιτεί περαιτέρω βοηθητικές πληροφορίες πέρα από την *συνάρτηση προσαρμογής* (*fitness function*). Αντίθετα, σε πολλές περιπτώσεις κλασσικών μεθόδων βελτιστοποίησης είναι αναγκαία η εισαγωγή βοηθητικών πληροφοριών και περιορισμών στο πρόβλημα έτσι ώστε να έχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα. Π.χ. σε μερικές τεχνικές η συνάρτηση προς βελτιστοποίηση πρέπει να θεωρηθεί ότι έχει μία κορυφή / ελάχιστο (*unimodal*). Οι γενετικοί αλγόριθμοι δεν εισάγουν τέτοιου είδους περιορισμούς.

Μια ακόμα διαφορά είναι το γεγονός ότι η λειτουργία των γενετικών αλγορίθμων διέπεται από τους κανόνες των πιθανοτήτων. Με μια πρόχειρη ματιά, το παραπάνω χαρακτηριστικό των εξελικτικών αλγορίθμων δεν χρίζει ιδιαίτερης σημασίας. Βέβαια, κάνοντας μερικούς προσεκτικούς συλλογισμούς μπορούμε να καταλήξουμε σε μερικά ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Το βασικό πρόβλημα των κλασικών τεχνικών βελτιστοποίησης είναι το ό,τι χρησιμοποιούν δεδομένους κανόνες μετάβασης από μία λύση σε άλλη. Συνεπώς, αφού η "μοίρα" τους είναι προκαθορισμένη μπορούν να έχουν εφαρμογή σε πολύ συγκεκριμένα ερευνητικά πεδία αποκλείοντας πληθώρα προβλημάτων βελτιστοποίησης. Αντίθετα, οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούν πιθανοκρατικούς κανόνες μετάβασης από μία λύση σε κάποια άλλη καθώς και τυχαίο αρχικό πληθυσμό. Τα δύο παραπάνω χαρακτηριστικά επιτρέπουν την εφαρμογή τους σε ευρεία ποικιλία προβλημάτων καθώς και την επιδιόρθωση λαθών που οδηγούν σε λάθος κατεύθυνση τις λύσεις.

Επιπλέον, θα πρέπει να αναφέρουμε την εύκολη και αποτελεσματική χρήση των γενετικών αλγορίθμων σε παράλληλα συστήματα που απαιτούν και ταυτόχρονους υπολογισμούς. Στην αρχή του κεφαλαίου αναφερθήκαμε στην επιλογή μέσω της διεξαγωγής *τουρνουά* όπου δύο λύσεις επιλέγονται τυχαία και η καλύτερη προκρίνεται στο σύνολο αναπαραγωγής. Σε αυτό το στάδιο απαιτούνται δύο υπολογισμοί τη φορά για κάθε ζευγάρι. Το ίδιο ισχύει ανά ζευγάρι και για τη διασταύρωση ενώ η μετάλλαξη απαιτεί μία αλλαγή ανά χρωμόσωμα. Βλέπουμε δηλαδή ότι οι γενετικοί αλγόριθμοι χαρακτηρίζονται από σχετικά χαμηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα γεγονός που τους καθιστά χρήσιμα εργαλεία σε προβλήματα που απαιτούν παράλληλη επεξεργασία.

Κάτι πολύ σημαντικό που θα πρέπει να επισημανθεί είναι το ό,τι κάθε καλή τεχνική βελτιστοποίησης πρέπει να διέπεται από μια προσπάθεια διατήρησης της ισορροπίας μεταξύ της έρευνας και της επεξεργασίας των δεδομένων. Αν οι λύσεις επεξεργάζονται υπερβολικά, η σύγκλιση των λύσεων στην τελικά βέλτιστη γίνεται πρόωρα με αποτέλεσμα ο αλγόριθμος να χάνει εξαιρετικά γρήγορα την επιλεκτικότητα και ποικιλία λύσεων. Προφανώς, σε αυτή την περίπτωση τα αποτελέσματα θα πρέπει να θεωρηθούν εσφαλμένα. Από την άλλη μεριά, η υπερβολική πίεση ως προς την εύρεση νέων λύσεων μπορεί να οδηγήσει σε άσκοπες εκτελέσεις του αλγορίθμου δίχως να προκύπτει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Συνεπώς, η διάρκεια ολοκλήρωσης του αλγορίθμου γίνεται τεράστια και ουσιαστικά μπορεί να χαρακτηριστεί ως τυχαία. Οι κλασικές μέθοδοι βελτιστοποίησης έχουν δεδομένες βαθμίδες έρευνας και επεξεργασίας. Αντίθετα, στους γενετικούς αλγόριθμους ο βαθμός έρευνας και επεξεργασίας μπορεί να ελεγχθεί μέσω των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν τα διάφορα γενετικά στάδια. Συμπερασματικά, θα μπορούσαμε να παρουσιάσουμε τους γενετικούς αλγόριθμους ως μια ιδανική πλατφόρμα πάνω στην οποία μπορούμε να πραγματοποιήσουμε ευέλικτες έρευνες. Στην επόμενη παράγραφο γίνεται εκτενέστερη αναφορά στο ζήτημα της εξισορρόπησης του βαθμού της έρευνας και της επεξεργασίας των δεδομένων.

## **5.6 Ισοροπία μεταξύ των γενετικών τελεστών**

Εκτός από το κατάλληλο μέγεθος του πληθυσμού, ένα πολύ σημαντικό ζήτημα είναι η εξισορρόπηση μεταξύ της επεξεργασίας των λύσεων (στάδιο επιλογής) και της έρευνας για καινούργιες που προκύπτουν από τα στάδια της διασταύρωσης και της μετάλλαξης. Αν ο τελεστής της επιλογής δίνει σε υπερβολικό βαθμό έμφαση στη καλύτερη λύση επιλέγοντας πολλά αντίγραφα της, ο πληθυσμός χάνει την

ποικιλομορφία του πολύ γρήγορα. Για να επιστρέψει η ποικιλία των λύσεων, η επίδραση των τελεστών διασταύρωσης και μετάλλαξης πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη έτσι ώστε να εισάγουν νέες λύσεις στον πληθυσμό που θα διαφέρουν αισθητά από τους προγόνους τους. Σε αντίθετη περίπτωση, το σύστημα θα συγκλίνει σύντομα σε μια λύση η οποία προφανώς δεν θα είναι η βέλτιστη. Αν και υπάρχει μια ποιοτική αίσθηση για την εξισσορόπηση αυτών των 2 χαρακτηριστικών, ο υπολογισμός μιας ποσοτικής σχέσης που να τα συνδέει είναι εξαιρετικά δύσκολος.

Ο Goldberg (1993) κατάφερε να εξισσοροπήσει την επίδραση των παραπάνω παραγόντων υπολογίζοντας τους χαρακτηριστικούς χρόνους του τελεστή επιλογής και διασταύρωσης. Χαρακτηριστικά, σε νωρίτερη έρευνα του (Goldberg and Deb, 1991), όρισε και υπολόγισε τον χρόνο ανάκτησης  $t_s$  του τελεστή της επιλογής. Ο χρόνος ανάκτησης ορίστηκε ως ο αριθμός των γενιών που απαιτούνται για την κατάληψη όλων, εκτός από μία, των θέσεων του πληθυσμού από την καλύτερη λύση με την προϋπόθεση ότι εκτελούμε μόνο το στάδιο της επιλογής. Αυτό το μέγεθος παρέχει πληροφορίες για της ταχύτητα με την οποία το στάδιο της επιλογής τονίζει την βέλτιστη λύση. Έχει παρατηρηθεί ότι η επιλογή μέσω τουρνουά έχει μεγαλύτερο χρόνο ανάκτησης από τον αντίστοιχο του τελεστή της αναλογικής επιλογής. Για το στάδιο της διασταύρωσης έχει οριστεί ο χρόνος μίξης (*mixing time*), ο οποίος αναφέρεται στον αριθμό των γενεών που απαιτούνται από τον τελεστή της διασταύρωσης να βρει την βέλτιστη λύση. Ο χρόνος αυτός δίνει πληροφορίες σχετικά με το πόσο χρόνο θα πρέπει να αναμένουμε από τον γενετικό αλγόριθμο μέχρι να γίνουν οι κατάλληλες διασταυρώσεις μεταξύ των χρωμοσωμάτων και παραχθούν οι βέλτιστες λύσεις [10].

Οι Deb και Agrawal (1999) πραγματοποίησαν μια σειρά πειραμάτων χρησιμοποιώντας γενετικούς αλγόριθμους με διαφορετικούς παραμέτρους σε διάφορα προβλήματα βελτιστοποίησης. Τα αποτελέσματα της παραπάνω έρευνας είναι αρκετά σημαντικά και θα μπορούσαμε να τα συνοψίσουμε παρακάτω ως εξής:

1. Για απλά προβλήματα, ένας γενετικός αλγόριθμος με δεδομένο τελεστή διασταύρωσης και μετάλλαξης μπορεί να λειτουργήσει ικανοποιητικά. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι ανάλογα με τη περίπτωση προβλήματος απαιτείται και διαφορετικό μέγεθος πληθυσμού. Για γενετικό αλγόριθμο με  $p_m \neq 0$ , ο αριθμός του πληθυσμού δεν χρειάζεται να είναι μεγάλο. Βέβαια, μικρό μέγεθος πληθυσμού απαιτεί μεγάλο αριθμό επαναλήψεων (γενεών) έτσι ώστε να κατευθυνθεί ο πληθυσμός προς την βέλτιστη λύση. Αντίθετα, για γενετικό αλγόριθμο με  $p_m = 0$ , το μέγεθος του πληθυσμού πρέπει να είναι αρκετά μεγαλύτερο έτσι ώστε ο μεγάλος αριθμός των λύσεων να αντισταθμίζει την απουσία μετάλλαξης με σκοπό την διατήρηση της ποικιλομορφίας του πληθυσμού. Σε αυτή την περίπτωση, ο αριθμός των επαναλήψεων του γενετικού αλγόριθμου μειώνεται αισθητά.
2. Για δύσκολα προβλήματα βελτιστοποίησης, οι γενετικοί αλγόριθμοι με  $p_m \neq 0$  συχνά δεν καταλήγουν σε βέλτιστες λύσεις. Αντίθετα, γενετικοί αλγόριθμοι με  $p_m = 0$  μπορούν πιο εύκολα να καταλήξουν σε βέλτιστη λύση με την προϋπόθεση της σωστής επιλογής του αρχικού πληθυσμού.





## 6 Τεχνικές Ανάθεσης Ραδιοπόρων με χρήση Γενετικών Αλγορίθμων

### 6.1 Περιγραφή του Προβλήματος - Πιθανές Κωδικοποίησης των Παραμέτρων

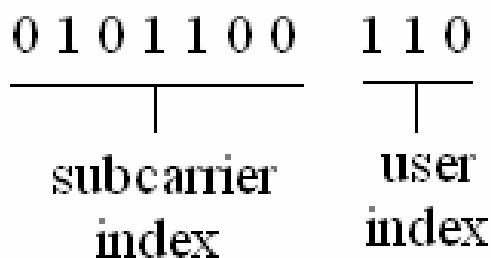
Το πρόβλημα ανάθεσης ραδιοπόρων σε διάφορους χρήστες διαθέτει πάρα πολλούς διαφορετικούς συνδυασμούς με αποτέλεσμα ο χώρος των λύσεων να γίνεται πολύ μεγάλος και η δυνατότητα εύρεσης της βέλτιστης λύσης πολύ δύσκολη. Οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι πολύ πιο κατάλληλοι σε αυτές τις περιπτώσεις, όπου το σύνολο των λύσεων είναι τεράστιο και μια λύση κοντά στην βέλτιστη είναι αρκετή. Στον γενετικό αλγόριθμο ανατείνεται το έργο της αναζήτησης των καλύτερων λύσεων κάνοντας χρήση μιας δεδομένης *συνάρτησης προσαρμογής (fitness function)*. Ορίζεται ένας αρχικός πληθυσμός, ο οποίος αξιολογείται σε κάθε επανάληψη με βάση τη *συνάρτηση προσαρμογής*. Στην συνέχεια, μια νέα γενιά παράγεται μέσω της πιθανοκρατικής επιλογής των καλύτερων λύσεων του πληθυσμού. Γενιά με γενιά οι λύσεις βελτιώνονται καταλήγοντας σε μια καλή προσέγγιση της βέλτιστης λύσης.

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, ένα βασικό στοιχείο για τη σωστή συμπεριφορά και λειτουργία των γενετικών αλγορίθμων είναι η σωστή κωδικοποίηση και αναπαράσταση των δεδομένων. Αρχικά θα πρέπει να αναλογιστούμε τι θέλουμε να πετύχουμε. Στην συγκεκριμένη αναφορά θα ασχοληθούμε με την επίλυση του *margin adaptive* προβλήματος κάνοντας χρήση γενετικών αλγορίθμων. Ουσιαστικά, ο τελικός στόχος είναι η δόμηση ενός γενετικού αλγορίθμου, ο οποίος θα δίνει ως αποτέλεσμα εκείνη την ανάθεση υποφέροντων στους χρήστες για την οποία θα επιτυγχάνεται η ελάχιστη μεταδιδόμενη ισχύς. Προφανώς, οι περιορισμοί που ισχύουν στην μαθηματική έκφραση του προβλήματος, όπως αυτή εκφράστηκε στην *παράγραφο 3.2*, θα πρέπει να ισχύουν και στην νέα υλοποίηση. Δηλαδή, η ανάθεση των υποφέροντων είναι αποκλειστική (ένα υποφέρον μπορεί να το πάρει μόνο χρήστης) καθώς και ότι η μεταδιδόμενη ισχύς έχει ένα πεπερασμένο ανώτερο όριο  $P_{max}$ .

Στο εισαγωγικό κεφάλαιο των γενετικών αλγορίθμων γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στους δυαδικούς γενετικούς αλγορίθμους, οι οποίοι αποτελούν μια από τις πιο συχνές κατηγορίες γενετικών αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται σε διάφορα προβλήματα. Στην συγκεκριμένη περίπτωση πόσο εύκολη και εύχρηστη είναι η δυαδική απεικόνιση των παραμέτρων του προβλήματος ανάθεσης ραδιοπόρων; Προφανώς, μια σωστή κωδικοποίηση θα πρέπει να περιέχει πληροφορία τόσο για το υποφέρον όσο και τον χρήστη στο οποίο θα έχει ανατεθεί. Μια πιθανή δυαδική απεικόνιση σε αυτή την περίπτωση θα είναι η παρακάτω:

Θεωρούμε OFDMA σύστημα κάτω ζεύξης με αριθμό χρηστών  $K = 8$  και αριθμό υποφέροντων  $N = 128$ . Αν π.χ. το υποφέρον 45 ανατέθηκε στον χρήστη 6, θα μπορούσαμε να κωδικοποιήσουμε την συγκεκριμένη πληροφορία ως εξής:

(Σημείωση: Προφανώς στον χρήστη 1 αντιστοιχεί η ακολουθία 000)



**Εικόνα 6.1:** Παράδειγμα αναπαράστασης της ανάθεσης ενός υποφέροντος σε χρήστη

Αν και η παραπάνω κωδικοποίηση των δεδομένων φαίνεται βολική και εύκολη, θα πρέπει να αναλογιστούμε τι θεωρείται μια πιθανή λύση του προβλήματος. Η *εικόνα 6.1* ουσιαστικά αντιπροσωπεύει την κωδικοποίηση μιας σειράς του πίνακα ανάθεσης  $C_{k,n}$ . Μια πιθανή λύση του προβλήματος αποτελεί ολόκληρη η ανάθεση των υποφέροντων, δηλαδή ο πίνακας  $C_{k,n}$ . Επομένως, με αυτή τη λογική στο συγκεκριμένο παράδειγμα ένα χρωμόσωμα θα πρέπει να αποτελείται από 128 υποακολουθίες των 10 bits. Συνεπώς το κάθε χρωμόσωμα θα πρέπει να έχει μήκος 1280 bits με αποτέλεσμα να πρέπει να βρούμε πιο απλό τρόπο απεικόνισης των δεδομένων του προβλήματος.

Ένας έξυπνος τρόπος [11, 12] για να μειώσουμε το μήκος του χρωμοσώματος είναι η ταξινομημένη παράθεση των υποφέροντων κατά μήκος του χρωμοσώματος. Με αυτό τον τρόπο χρειάζονται μόνο 3 bits για την κωδικοποίηση της ανάθεσης ενός υποφέροντος σε χρήστη, τα οποία θα αντιπροσωπεύουν τον αύξων αριθμό του χρήστη και η θέση τον αύξων αριθμό του υποφέροντος. Χαρακτηριστικά:

1 0 1	0 0 1	1 1 1	-----	0 0 0
subcarrier 1	subcarrier 2	subcarrier 3	-----	subcarrier N

**Εικόνα 6.2:** Βελτιωμένη κωδικοποίηση ανάθεσης υποφέροντων σε χρήστες

Από την *εικόνα 6.2* βλέπουμε ότι το πρώτο υποφέρον ανατέθηκε στον χρήστη 6, το δεύτερο στον χρήστη 2, το τρίτο στον χρήστη 7 και αντίστοιχα το N στον χρήστη 1. Με αυτό τον τρόπο είναι εμφανές ότι το μήκος του χρωμοσώματος μειώνεται αισθητά. Χαρακτηριστικά για  $N = 128$  προκύπτει μήκος χρωμοσώματος 384 bits.

Οι παραπάνω προτάσεις έχουν να κάνουν με δυαδικούς γενετικούς αλγορίθμους, όπου και στα δύο παραδείγματα δεν μπορούμε να επιτύχουμε αντιστοίχιση του μήκους του χρωμοσώματος με τον αριθμό των υποφέροντων γεγονός που θα διευκόλυνε σημαντικά την απεικόνιση του προβλήματος. Αν ξεφύγουμε από την λογική των δυαδικών γενετικών αλγορίθμων το παραπάνω εγχείρημα είναι εφικτό μέσω της παρακάτω κωδικοποίησης:

6	2	7	-----	1
subcarrier 1	subcarrier 2	subcarrier 3	-----	subcarrier N

**Εικόνα 6.3:** Μη δυαδική κωδικοποίηση ανάθεσης υποφέροντων σε χρήστες

Με τον συγκεκριμένο τρόπο κωδικοποίησης της πληροφορίας το μήκος του χρωμοσώματος είναι  $N$ , όσα δηλαδή και τα διαθέσιμα υποφέροντα του συστήματος. Ουσιαστικά κάθε χρωμόσωμα αποτελεί έναν πίνακα διαστάσεων  $1 \times N$  και κατ' επέκταση αν  $N_{pop}$  το μέγεθος του πληθυσμού των λύσεων, ο πληθυσμός κάθε γενιάς θα απεικονίζεται μέσω ενός πίνακα διαστάσεων  $N_{pop} \times N$ . Στην παρούσα πτυχιακή εργασία επιλέχθηκε ο παραπάνω τρόπος κωδικοποίησης.

## 6.2 Υλοποίηση Γενετικού Αλγορίθμου

Είπαμε ότι μέσω της μη δυαδικής αναπαράστασης της ανάθεσης των υποφερόντων στους χρήστες κάθε πιθανή λύση είναι ένας πίνακας διαστάσεων  $1 \times N$  και επομένως ο πληθυσμός κάθε γενιάς είναι ένας πίνακας διαστάσεων  $N_{pop} \times N$ .

$$\begin{bmatrix} k_{1,1} & \dots & k_{1,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{N_{pop},1} & \dots & k_{N_{pop},N} \end{bmatrix}$$

Όπου  $k_{i,j} = \{1, 2, 3, \dots, K\}$

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης που πρέπει να επιλύσουμε κάνοντας χρήση των γενετικών αλγορίθμων είναι το εξής:

$$\min \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N C_{k,n} P_{k,n}$$

και τα βήματα της διαδικασίας που θα ακολουθηθεί είναι αυτά που χαρακτηρίζουν μια τυπική εκτέλεση γενετικού αλγορίθμου:

- Δημιουργία  $N_{pop}$  χρωμοσωμάτων τα οποία θα αποτελούν τον πληθυσμό κάθε γενιάς. Έστω  $X_{pop}$  ο πίνακας που περιγράφει ολόκληρο τον πληθυσμό.
- Η επιλογή των χρωμοσωμάτων που θα συμμετέχουν κάθε φορά στο σύνολο αναπαραγωγής θα γίνεται με βάση την συνολική μεταδιδόμενη ισχύ που προκύπτει για κάθε ανάθεση – λύση. Προφανώς, μικρότερη τιμή μεταδιδόμενης ισχύος συνεπάγεται και μεγαλύτερη πιθανότητα του χρωμοσώματος να έχει αντίγραφο στο σύνολο αναπαραγωγής.
- Παραγωγή του νέου πληθυσμού μέσω του σταδίου της διασταύρωσης και της μετάλλαξης.
- Επανάληψη των 2 παραπάνω σταδίων έως ότου το σύστημα να συγκλίνει.

Το πρώτο βήμα που απαιτείται είναι ο ορισμός των  $N_{prop}$  λύσεων που θα απαρτίζουν τον αρχικό πληθυσμό. Ο ορισμός των αρχικών χρωμοσωμάτων μπορεί να είναι είτε τυχαίος είτε όχι. Βέβαια θα πρέπει να εξασφαλίσουμε το γεγονός ότι οι λύσεις είναι πραγματοποιήσιμες για κάποιο δεδομένο ρυθμό μετάδοσης ανά χρήστη. Γι' αυτό το λόγο, μόνο για την αρχική γενιά θα πρέπει να εκτελέσουμε τον αλγόριθμο BABS (αλγόριθμος 4.1) έτσι ώστε να ορίσουμε τον αριθμό των υποφέροντων που θα πάρει ο κάθε χρήστης με βάση τον ρυθμό μετάδοσης που απαιτεί. Ύστερα, εκτελώντας οποιοδήποτε από τους αλγορίθμους 4.3, 4.4, 4.8, 4.9 μπορούμε να πάρουμε διάφορες λύσεις. Ο αλγόριθμος 4.9 αντιστοιχεί σε τυχαία ανάθεση, ενώ οι υπόλοιποι δίνουν καλές λύσεις. Από αυτούς τους 3, οι δύο του Pietryzk δίνουν δεδομένη λύση για δεδομένους ρυθμούς μετάδοσης ανά χρήστη. Αντίθετα, ο αλγόριθμος 4.8 (Kivanc's ACG) μπορεί να δώσει πληθώρα καλών λύσεων μιας και η φιλοσοφία του εμπεριέχει τυχειότητα. Επομένως, για την καλύτερη συμπεριφορά του γενετικού αλγορίθμου, ο αρχικός πληθυσμός μπορεί να αποτελεί ένα κράμα τυχαίων και καλών λύσεων. Προφανώς, με αυτό τον τρόπο αρχικοποιούμε το πρόβλημα θέτωντας κάποιες καλές βάσεις για την συνέχεια. Στην περίπτωση όπου ο αρχικός πληθυσμός είναι τυχαίος, ο αριθμός των γενιών που θα πρέπει να περάσει έως ότου το σύστημα συγκλίνει θα είναι αρκετά μεγάλος.

Έστω ότι έχουμε ορίσει τα χρωμοσώματα που θα απαρτίζουν τον αρχικό πληθυσμό. Το επόμενο βήμα είναι το στάδιο της φυσικής επιλογής. Για την συγκεκριμένη υλοποίηση επιλέξαμε τη μέθοδο του τουρνουά. Για κάθε μία από τις  $N_{pop}$  αναθέσεις υποφέροντων υπολογίστηκε η μέση συνολική μεταδιδόμενη ισχύς μέσω του greedy αλγορίθμου 4.6 ο οποίος, πέρα από την ισχύ, δίνει και ως έξοδο το bit loading ανά υποφέρον. Ο τρόπος διεξαγωγής του τουρνουά μεταξύ των λύσεων εκτελείται κανονικά, όπως περιγράφηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Όσον αφορά το στάδιο της γενετικής διασταύρωσης, το μόνο άξιο αναφοράς είναι το γεγονός ότι έχουμε δυναμικό σημείο διασταύρωσης. Αυτό σημαίνει ότι για κάθε ζευγάρι που διασταυρώνεται, το σημείο διασταύρωσης επιλέγεται τυχαία εκείνη τη στιγμή. Οι γενετικοί αλγόριθμοι πρέπει να λειτουργούν με πιθανοκρατικούς κανόνες και για κανένα λόγο δεν πρέπει να αλλοιωθεί αυτό το χαρακτηριστικό τους.

Ο τελεστής της μετάλλαξης αλλάζει σε μια τυχαία θέση τον χρήστη που έχει πάρει το συγκεκριμένο υποφέρον. Π.χ. :

Έστω το παρακάτω τμήμα ενός χρωμοσώματος και για  $N = 37$  το σημείο μετάλλαξης:

**ΠΡΙΝ ΤΗ ΜΕΤΑΛΛΑΞΗ:**

-----	2	7	1	-----
-----	subcarrier 35	subcarrier 36	subcarrier 37	-----

## ΜΕΤΑ ΤΗ ΜΕΤΑΛΛΑΞΗ:

-----	2	7	4	-----
-----	subcarrier 35	subcarrier 36	subcarrier 37	-----

Εικόνα 6.4: Φαινόμενο μετάλλαξης σε μη δυαδική κωδικοποίηση ανάθεσης υποφέρωντων σε χρήστες

Από την παραπάνω εικόνα παρατηρούμε ότι στο υποφέρον 37, το χρωμόσωμα υπέστη μετάλλαξη και το υποφέρον μετατέθηκε από τον χρήστη 1 στον χρήστη 4. Προφανώς, μετά τα στάδια της διασταύρωσης και της μετάλλαξης, ο αριθμός των υποφέρωντων ανά χρήστη, που ορίζεται μέσω του αλγορίθμου BABS δεν θα ισχύει. Αυτό όμως δεν αποτελεί πρόβλημα μιας και ο *greedy* του *Pietryzk* εξασφαλίζει τον υπολογισμό της ισχύος και του bit loading ανα *OFDM* σύμβολο ανά υποφέρον.

Από την παραπάνω διαδικασία θα προκύψουν  $N_{prop}$  νέες λύσεις, οι οποίες θα ενημερώσουν τον αρχικό πληθυσμό και ο πίνακας  $X_{prop}$  θα αποτελείται από τις νέες λύσεις. Επομένως, στο τέλος κάθε γενιάς οι απόγονοι θα αντιγράφονται στο σύνολο του πληθυσμού αντικαθιστώντας τους προγόνους τους.

Ένας από τους βασικούς λόγους επιλογής της συγκεκριμένης υλοποίησης είναι το γεγονός ότι μας επιτρέπει να χρησιμοποιήσουμε πληροφορίες από ήδη έτοιμους αλγορίθμους (*Pietryzk*, *Kivanc*) έχοντας κάνει βέβαια τις απαραίτητες τροποποιήσεις. Οι μοναδικοί αλγόριθμοι που φτιάχτηκαν από μηδενική βάση και ήταν απαραίτητοι για την υλοποίηση του γενετικού αλγορίθμου ήταν οι εξής:

- Η παραγωγή τυχαίων χρωμοσωμάτων, όπου η ανάθεση των υποφέρωντων γίνεται χωρίς να ληφθεί υπόψη η ποιότητα του καναλιού
- Η εξαγωγή του πίνακα ανάθεσης  $C_{k,n}$  από τα στοιχεία του κάθε χρωμοσώματος. Πρόκειται για έναν απαραίτητο αλγόριθμο μιας και ο *greedy* αλγόριθμος του *Pietryzk* απαιτεί ως είσοδο τον πίνακα αποκλειστικής ανάθεσης των υπόφερωντων στους χρήστες.

Στις επόμενες σελίδες παρουσιάζονται οι παραπάνω αλγόριθμοι καθώς και ένα συνολικό διάγραμμα που περιγράφει την σειρά λειτουργίας των γενετικών αλγορίθμων.

*Αλγόριθμος 6.1: Αλγόριθμος δημιουργίας  $N_{pop}$  τυχαίων λύσεων.*

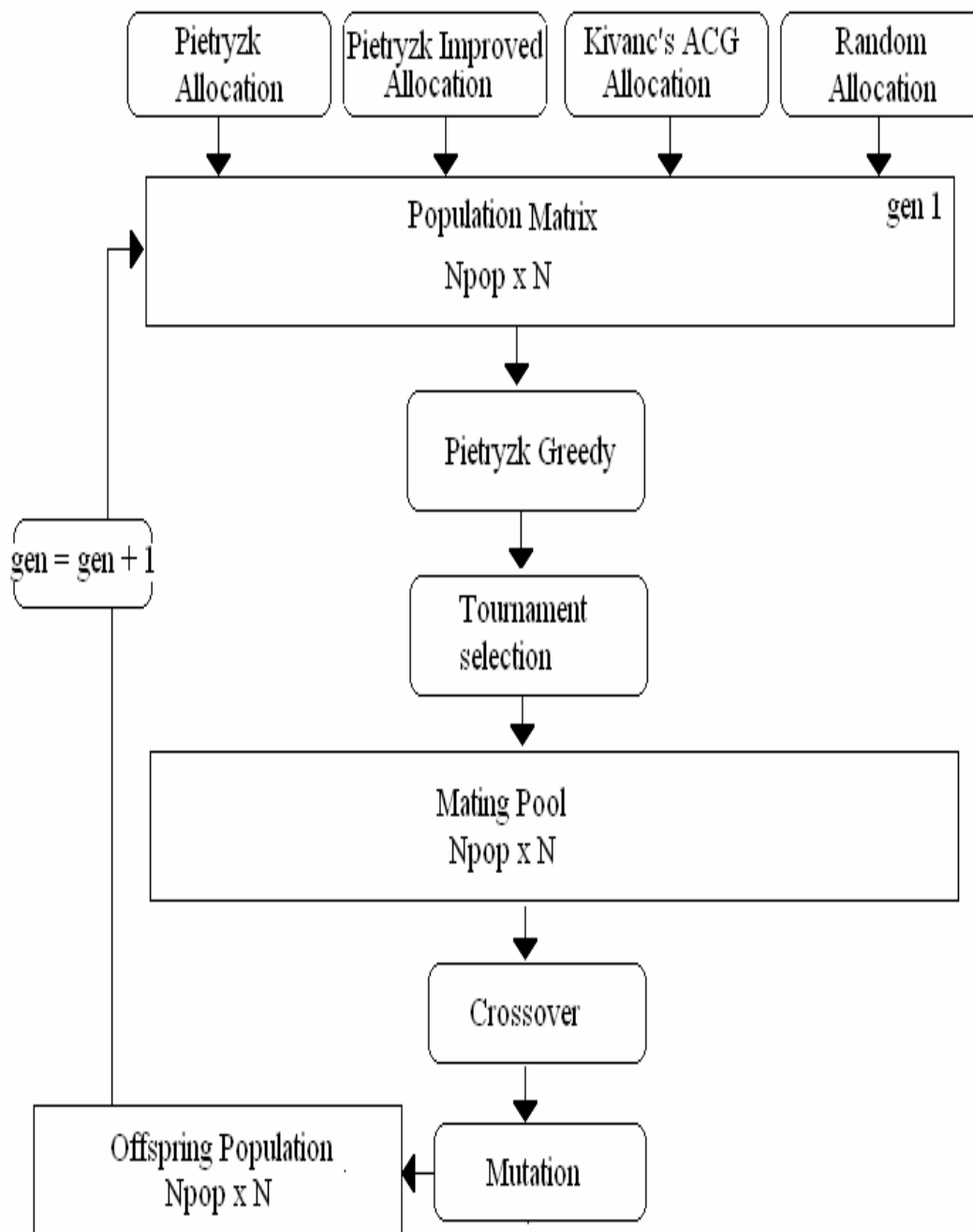
```
for i = 1 to  $N_{pop}$  do  
  N = initial number of available subcarriers  
  while N > 0 do  
    u = random user {1, 2, ..., K}  
    if sum(chromo = u) < BABS(u) then  
      chromo(N) = u;  
    else  
      N = N + 1;  
    end  
    N = N - 1;  
  end  
end
```

Μέσω του 6.1 επιτυγχάνουμε τυχαίες λύσεις, οι οποίες υπακούουν στο αριθμό υποφέροντων ανά χρήστη που ορίζει ο αλγόριθμος BABS. Προφανώς, με τον συμβολισμό  $BABS(u)$  εννοούμε τον αριθμό των υποφέροντων που πρέπει να πάρει ο χρήστης  $u$  σύμφωνα με τον αλγόριθμο διαχείρισης ραδιοπόρων BABS.

*Αλγόριθμος 6.2: Αλγόριθμος εξαγωγής του πίνακα ανάθεσης  $C_{k,n}$  από τα στοιχεία του κάθε χρωμοσώματος .*

```
for i = 1 to  $N_{pop}$  do  
  for ni = 1 to N do  
    C(ni,  $X_{pop}(i, ni)$ , i) = 1;  
  end  
end
```

Όπως εύκολα μπορούμε να παρατηρήσουμε από τον παραπάνω κώδικα, ο πίνακας ανάθεσης  $C$  είναι τρισδιάστατος. Παρόμοια διάσταση είχε ο  $C$  και κατά την υλοποίηση των αλγορίθμων διαχείρισης ραδιοπόρων. Μόνο που σε εκείνες τις περιπτώσεις η τρίτη διάσταση αντιπροσώπευε την χρονοθυρίδα στην οποία βρισκόταν η προσομοίωση. Αντίθετα, στην υλοποίηση των γενετικών αλγορίθμων η τρίτη διάσταση του πίνακα ανάθεσης αντιπροσωπεύει το σύνολο των χρωμοσωμάτων και όχι τις χρονοθυρίδες μιας και η κάθε εκτέλεση του γενετικού(μέχρι τη γενιά σύγκλισης) αναφέρεται σε δεδομένη χρονοθυρίδα. Οι προσομοιώσεις που ακολουθούν στην επόμενη παράγραφο αναφέρονται σε συγκεκριμένους ρυθμούς μετάδοσης ανα χρήστη και συγκεκριμένες χρονοθυρίδες συνολική μεταδιδόμενη ισχύς εκφράζεται ως ο μέσος όρος των χρονοθυρίδων στις οποίες εκτελέστηκε ο γενετικός αλγόριθμος.



Εικόνα6.5:Σχηματική αναπαράσταση διαχείρισης ραδιοπόρων κάνοντας χρήση γενετικών αλγορίθμων

### 6.3 Προσομοίωση

Θεωρούμε μονοκυβελωτό OFDMA σύστημα κάτω ζεύξης και  $K$  χρήστες οι οποίοι βρίσκονται σε τυχαίες αποστάσεις γύρω από την βάση εκπομπής. Σκοπός των παρακάτω προσομοιώσεων είναι η αξιολόγηση της ικανότητας των γενετικών αλγορίθμων να επεξεργάζονται προβλήματα διαχείρισης ραδιοπόρων. Συγκεκριμένα σε αυτή την πτυχιακή εργασία θα γίνει προσπάθεια επίλυσης του *margin adaptive* προβλήματος, δηλαδή για σταθερούς ρυθμούς μετάδοσης ανά χρήστη να επιτύχουμε ελαχιστοποίηση της μεταδιδόμενης ισχύος.

Συγκεντρωτικά, τα χαρακτηριστικά του OFDMA συστήματος είναι τα παρακάτω:

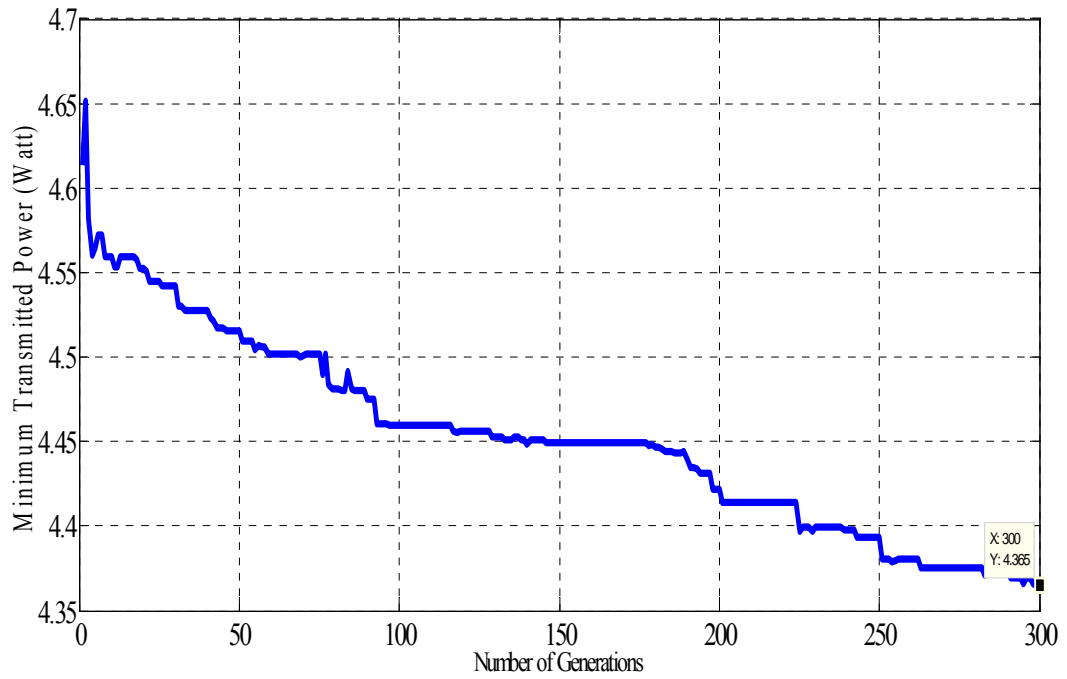
Ακτίνα κυψέλης:	$R = 1500 \text{ m}$
Αριθμός χρηστών:	$K = 10 \text{ χρήστες}$
Αριθμός υποφέροντων:	$N = 250$
Μέγιστη χωρητικότητα:	$R_{max} = 20 \text{ Mbps}$
Ισχύς θορύβου:	$N_{noise} = 3,9811 \text{ W/Hz}$
Εύρος ζώνης:	$BW = 10 \text{ KHz}$
Διάρκεια OFDM συμβόλου:	$T_e = 0,0001 \text{ sec}$
Αριθμός χρονοθυρίδων:	$N_{frame} = 1000 \text{ χρονοθυρίδες}$
Διάρκεια χρονοθυρίδας:	$T_{frame} = 5 \text{ msec}$
Μέγιστος αριθμός bit/υποφέρον:	$b_{max} = 8$
Επιτρεπτή πιθανότητα λάθους:	$P_e = 10^{-6}$
SNR Gap χρήστη:	$\Gamma = 8,4213$

Όσον αφορά το κομμάτι των γενετικών αλγορίθμων, τα χαρακτηριστικά της προσομοίωσης είναι τα παρακάτω:

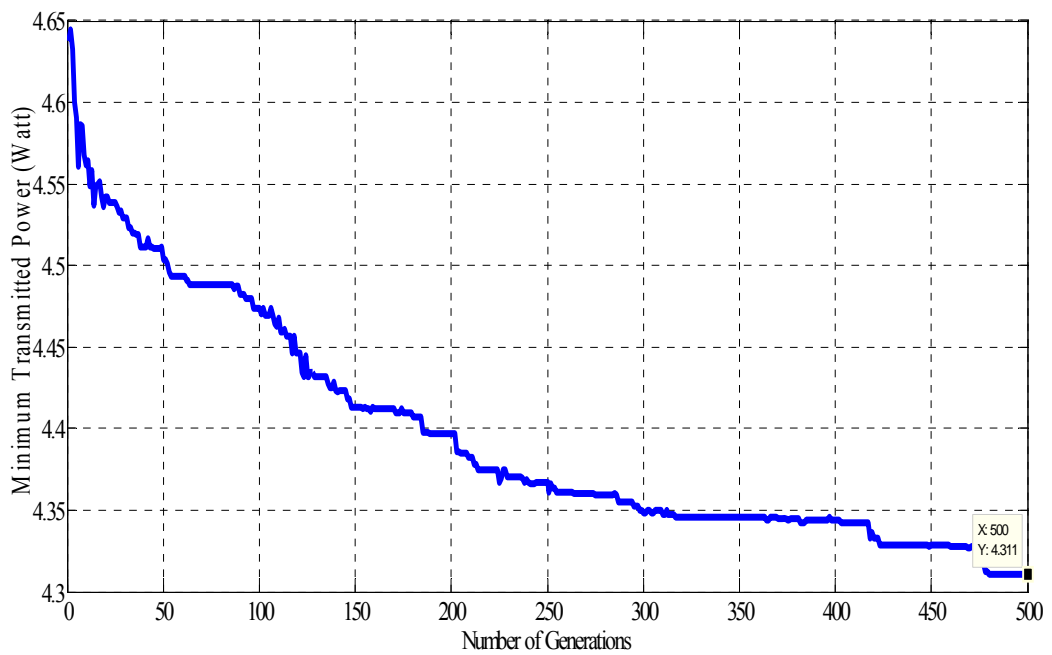
Μέγεθος Πληθυσμού:	$N_{pop} = 20 \text{ χρωμοσώματα}$
Αριθμός Επαναλήψεων:	$Gen = 300 \text{ γενιές λύσεων}$
Πιθανότητα Διασταύρωσης:	$P_c = 100\%$
Πιθανότητα Μετάλλαξης:	$P_m = 0.3$

Ο σκόπος της προσομοίωσης του παρακάτω σεναρίου είναι ο έλεγχος της σύγκλισης του γενετικού αλγορίθμου. Θεωρούμε ότι καθένας από τους 10 χρήστες ζητά 0,5 Mbps στην χρονοθυρίδα 20. Για τη σωστή αξιολόγηση των προσομοιώσεων χρησιμοποιούμε τα ίδια κανάλια με αυτά που χρησιμοποιήσαμε και κατά την προσομοίωση των αλγόριθμων διαχείρισης ραδιοπόρων των *Kivanc* και *Pietryzk*. Ο γενετικός αλγόριθμος εκτελέστηκε 3 φορές για 300, 500 και 800 γενιές αντίστοιχα. Για την καλύτερη παρουσίαση των αποτελεσμάτων, αποφασίστηκε η εμφάνιση στα διαγράμματα μόνο της καλύτερης λύσης ανά γενιά μιας και λόγω του τεράστιου όγκου πληροφορίας καμία άλλη απεικόνιση των αποτελεσμάτων δεν βολεύει τόσο όσο η συγκεκριμένη. Όσον αφορά το κανάλι, θεωρούμε ότι οι χρήστες είναι ακίνητοι γύρω από την βάση εκπομπής. Τέλος, ο αρχικός πληθυσμός αποτελείται από 2 λύσεις του *Pietryzk* (αλγόριθμοι 4.3 και 4.4), δέκα λύσεις του *Kivanc* (ACG Allocation) και οι υπόλοιπες οχτώ αποτελούν τυχαίες αναθέσεις υποφέροντων στους χρήστες.

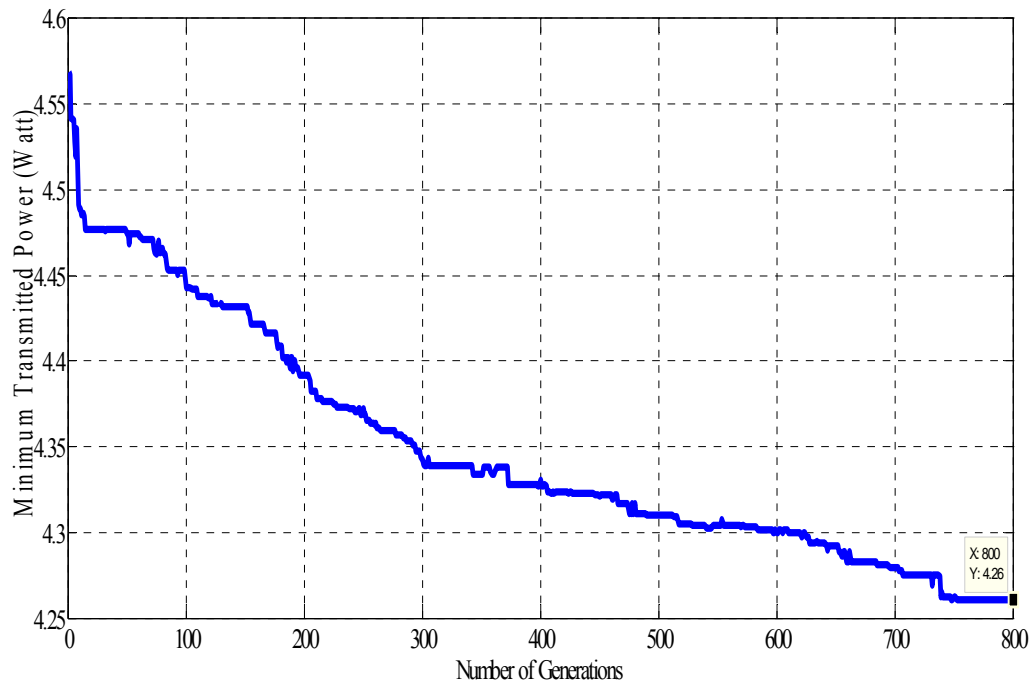




**Εικόνα 6.6:** Βελτίωση της ελάχιστης μεταδιδόμενης ισχύος για αριθμό 300 γενιών



**Εικόνα 6.7:** Βελτίωση της ελάχιστης μεταδιδόμενης ισχύος για αριθμό 500 γενιών



**Εικόνα 6.8:** Βελτίωση της ελάχιστης μεταδιδόμενης ισχύος για αριθμό 800 γενιών

Από την πρώτη γραφική παράσταση παρατηρούμε ότι έχουμε μείωση της ελάχιστης μεταδιδόμενης ισχύος από 4,614W (ελάχιστη ισχύς πρώτης γενιάς) σε 4,365W (ελάχιστη μεταδιδόμενη ισχύς 300οστής γενιάς). Δηλαδή πετυχαίνουμε 0,249W μείωση της εκπεμπόμενης ισχύος. Αντίθετα αυξάνοντας τις επαναλήψεις του γενετικού αλγόριθμου σε 500, επιτυγχάνουμε περαιτέρω μείωση της ισχύος κατά 0,054W αφού  $P_{500} = 4,311W$ . Αντίστοιχα, για 800 γενιές λύσεων έχουμε  $P_{800} = 4.278W$  και επομένως περαιτέρω μείωση της ισχύος κατά 0,033W. Από το παραπάνω παράδειγμα είναι προφανές ότι από έναν αριθμό γενιών και μετά η βελτίωση που μπορεί να επιφέρει ο γενετικός αλγόριθμος μειώνεται αισθητά. Συνεπώς, για αρκετές γενιές η ελάχιστη μεταδιδόμενη ισχύς παραμένει αμετάβλητη όπως για παράδειγμα στην εικόνα 6.7 όπου έχουμε σταθερή ισχύ για περίπου 50 γενιές (γενιά 425 – γενιά 475). Αναμφίβολα, η συγκεκριμένη συμπεριφορά του γενετικού αλγορίθμου δηλώνει σύγκλιση.

Πέρα από την μεταβολή της ελάχιστης μεταδιδόμενης ισχύος, αρκετό ενδιαφέρον παρουσιάζει και η παρουσίαση του τελικού διανύσματος ισχύος. Αυτό το διάνυσμα περιέχει τις τιμές της ισχύος εκπομπής και για τα 20 διαφορετικά χρωμοσώματα. Στην συνέχεια παρουσιάζουμε τον αρχικό πίνακα ισχύος και αυτόν που παράχθηκε ύστερα από 800 γενιές. Χαρακτηριστικό του τελικού διανύσματος ισχύος είναι το γεγονός ότι και οι 20 λύσεις διαφέρουν ελάχιστα μεταξύ πράγμα που άλλωστε αποδεικνύει και την σύγκλιση του γενετικού αλγόριθμου. Μάλιστα, αν είχαμε την δυνατότητα παράθεσης και του πίνακα με τον τελικό πληθυσμό θα διαπιστώναμε ότι και οι αντίστοιχες αναθέσεις των υποφέροντων στους χρήστες διαφέρουν σε υπερβολικά μικρό βαθμό με αποτέλεσμα και τις μικρές μεταβολές της ισχύος ανάμεσα στις διάφορες λύσεις.

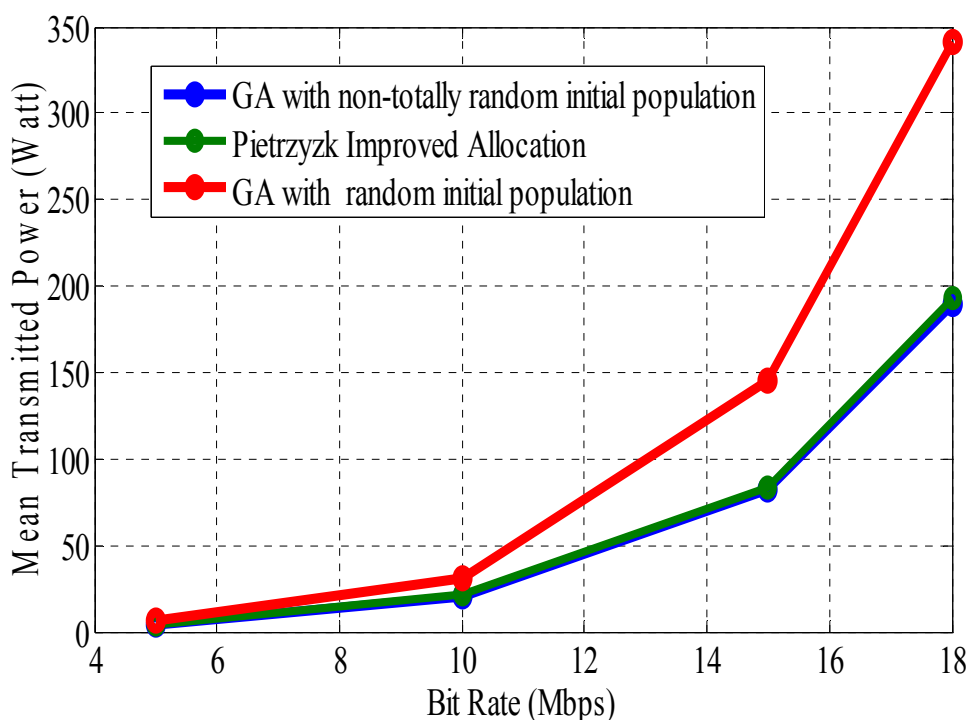
(Ο πίνακας  $X_{pop}$  είναι αδύνατον να παρουσιαστεί στην πτυχιακή εργασία λόγω του μεγάλου μεγέθους του.)

	Αρχική Γενιά	Τελική Γενιά (800)
Χρωμ. 1	6,5878	4,2824
Χρωμ. 2	4,7641	4,2950
Χρωμ. 3	4,6380	4,2931
Χρωμ. 4	4,6397	4,2789
Χρωμ. 5	4,6899	4,2789
Χρωμ. 6	4,6799	4,2948
Χρωμ. 7	4,6181	4,2800
Χρωμ. 8	4,6083	4,2948
Χρωμ. 9	4,6979	4,2800
Χρωμ. 10	4,4961	4,2842
Χρωμ. 11	4,6008	4,3008
Χρωμ. 12	4,6156	4,2948
Χρωμ. 13	13,1342	4,2800
Χρωμ. 14	11,9305	4,2931
Χρωμ. 15	11,5941	4,2800
Χρωμ. 16	12,3029	4,2800
Χρωμ. 17	11,5935	4,3132
Χρωμ. 18	13,0069	4,2926
Χρωμ. 19	13,4817	4,2800
Χρωμ. 20	11,5941	4,2780

6.1: Μέση εκπεμπόμενη ισχύς αρχικού και τελικού πληθυσμού (Γενιά 800)

Μια ενδιαφέρουσα παρατήρηση που μπορούμε να κάνουμε σχετικά με την σύγκλιση του γενετικού αλγορίθμου είναι το γεγονός ότι η σύγκλιση εξαρτάται από την πιθανότητα διασταύρωσης και μετάλλαξης. Πιθανότατα, αν μειώναμε την πιθανότητα διασταύρωσης και μετάλλαξης, το φαινόμενο της σύγκλισης να φαινόταν ακόμα καλύτερα στα αποτελέσματα. Η ισορροπία μεταξύ της εισαγωγής νέων λύσεων στο πληθυσμό και της εκμετάλλευσης των ήδη υπάρχουσων είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας, όπως άλλωστε είχαμε εκτενέστερα αναφερθεί στο συγκεκριμένο θέμα και στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Σκοπός της επόμενης προσομοίωσης είναι η σύγκριση μεταξύ των γενετικών αλγορίθμων και των κλασσικών αλγορίθμων διαχείρισης ραδιοπόρων. Συγκεκριμένα, στο τέλος του πρώτου μέρους της πτυχιακής εργασίας καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι ο καλύτερος αλγόριθμος διαχείρισης ραδιοπόρων είναι ο 4.4 (*Pietryzk's Improved Allocation*). Σε αυτό το δεύτερο κομμάτι της εργασίας, θα συγκρίνουμε την απόδοση του 4.4 με 2 γενετικούς αλγορίθμους. Στην πρώτη περίπτωση ο γενετικός αλγόριθμος διαθέτει τυχαίο αρχικό πληθυσμό, ενώ στη δεύτερη ο αρχικός πληθυσμός αποτελεί ένα κράμα τόσο τυχαίων όσο και καλών λύσεων που έχουν προκύψει από τις κλασσικές τεχνικές ανάθεσης ραδιοπόρων. Για συνολικό φορτίο μετάδοσης 5, 10, 15, 18 Mbps (όλοι οι χρήστες ζητούν τον ίδιο ρυθμό μετάδοσης) εκτελέσαμε τους 2 παραπάνω γενετικού αλγορίθμους για 50 ίδιες χρονοθυρίδες. Η τιμή ισχύος που αντιστοιχεί σε κάθε συνολικό φορτίο μετάδοσης εκφράζει τον μέσο όρο των αποτελεσμάτων για τις 50 χρονοθυρίδες.



Εικόνα 6.9: Μέση μεταδιδόμενη ισχύς 50 διαφορετικών χρονοθυρίδων

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι ο γενετικός αλγόριθμος με τον όχι τυχαίο αρχικό πληθυσμό βελτιώνει την ανάθεση των υποφώντων σε σύγκριση με τον αλγόριθμο του *Pietrzyk*, αν και η βελτίωση είναι αρκετά μικρή. Άλλωστε, η βελτίωση που αναμενόταν δεν μπορεί να είναι και πολύ μεγαλύτερη μιας και το αποτέλεσμα της βελτιωμένης ανάθεσης υποφώντων του *Pietrzyk* δίνει αποτέλεσμα πολύ κοντά στο θεωρητικά βέλτιστο και επομένως δεν υπάρχουν τεράστια περιθώρια βελτίωσης. Σε γεικά πλαίσια, ο γενετικός αλγόριθμος με τον “προσεγμένο” αρχικό πληθυσμό συμπεριφέρεται ικανοποιητικά. Για την καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρατίθενται παρακάτω και σε μορφή πίνακα.

	GA Improved	Pietrzyk Improved Allocation	GA random population
Rate(Mbps)	Mean Transmitted Power (Watt)	Mean Transmitted Power (Watt)	Mean Transmitted Power (Watt)
5	4,2871	4,5110	6,7509
10	20,4754	21,1281	31,2679
15	82,4589	83,5018	144,6785
18	189,3692	192,7009	340,9500

6.2: Αποτελέσματα μέσης ελάχιστης εκπεμπόμενης ισχύος

Από τον πίνακα 6.2 μπορούμε να υπολογίσουμε το ποσοστό μείωσης της ισχύος σε σύγκριση με τον βελτιωμένο αλγόριθμο του Pietryzk.

$$R = 5 \text{ Mbps: } (4,2871 - 4,5110) / 4,5110 = - 0,049 \text{ ή } 4,9\%$$

$$R = 10 \text{ Mbps: } (20,4754 - 21,1281) / 21,1281 = - 0,03 \text{ ή } 3\%$$

$$R = 15 \text{ Mbps: } (82,4589 - 83,5018) / 83,5018 = - 0,012 \text{ ή } 1,2\%$$

$$R = 18 \text{ Mbps: } (189,3692 - 192,7009) / 192,7009 = - 0,017 \text{ ή } 1,7\%$$

Προφανώς, ο γενετικός αλγόριθμος με τον τυχαίο πληθυσμό χρειάζεται πολύ μεγάλο αριθμό επαναλήψεων για να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όλες οι αρχικές λύσεις αποτελούν κακές λύσεις συνεπώς η καλή λειτουργία του απαιτεί την έντονη άσκηση πίεση για την εύρεση νέων χρωμοσωμάτων με την ελπίδα ότι οι καινούργιες λύσεις θα είναι καλύτερες. Η εισαγωγή νέων λύσεων στο πληθυσμό συνεπάγεται την αύξηση της πιθανότητας μετάλλαξης. Εν κατακλείδι, για μία ακόμη φορά είναι εμφανής η σημασία της εξισσορόπησης της αλληλεπίδρασης μεταξύ των διάφορων γενετικών σταδίων.

Πώς όμως εκφράζεται αυτή η μείωση της ισχύος ως προς την ανάθεση των υποφέροντων στους χρήστες; Αρκετό ενδιαφέρον θα είχε το να εξετάσουμε τις διαφορές μεταξύ της ανάθεσης που προκύπτει μέσω των κλασσικών αλγορίθμων διαχείρισης ραδιοπόρων και της αντίστοιχης που προκύπτει μέσω της υλοποίησης του γενετικού αλγορίθμου.

Εκτελέσαμε τον *BABS* τις *χρονοθυρίδες* 20 και 50 θεωρώντας συνολικό φορτίο μετάδοσης 5Mbps (ο κάθε χρήστης απαιτεί 0,5 Mbps). Για τον ορισμό του αριθμού των υποφέροντων ανά χρήστη, ο *BABS* λαμβάνει υπ'όψιν του την ποιότητα του καναλιού κάθε χρήστη. Στο παρόν κανάλι οι αλλαγές είναι πολύ μικρές μιας και οι χρήστες θεωρούνται πρακτικά ακίνητοι. Επομένως και για τις δύο χρονοθυρίδες έχουμε τον ίδιο αριθμό υποφέρον ανά χρήστη.

ALGORITHM BABS	
user	#subcarriers
1	32
2	19
3	15
4	30
5	33
6	23
7	24
8	11
9	34
10	29

**6.3:** Ορισμός του αριθμού υποφέροντων ανα χρήστη για τις χρονοθυρίδες 20 και 50

Τα αποτελέσματα του ορισμού του αριθμού υποφέροντων ανά χρήστη που προκύπτουν μέσω του γενετικού αλγορίθμου για τις δύο χρονοθυρίδες είναι:

	frame 20	frame 50
user	# subcarriers	# subcarriers
1	32	27
2	22	18
3	16	20
4	27	28
5	33	36
6	27	22
7	26	24
8	13	14
9	26	26
10	28	35

**6.4:** Ορισμός του αριθμού υποφέροντων ανα χρήστη για της χρονοθυρίδες 20 και 50 μέσω του γενετικού αλγορίθμου

Λόγω των πιθανοκρατικών κανόνων με τους οποίους λειτουργούν οι γενετικοί αλγόριθμοι, η μη σταθερή ανάθεση ραδιοπόρων ανά χρονοθυρίδα είναι απολύτως αναμενόμενη. Πέρα όμως από τον αριθμό υποφέροντων, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η αναζήτηση των υποφέροντων που ανατέθηκαν στους χρήστες. Τις παρακάτω πληροφορίες μπορούμε να τις εξάγουμε από τους αντίστοιχους πίνακες ανάθεσης  $C_{k,n}$ . Χαρακτηριστικά θα εξετάσουμε την περίπτωση του *χρήστη 9* (*χειρότερος χρήστης*), ο οποίος μέσω του *BABS* παίρνει περισσότερα υποφέροντα. Το σύνολο των υποφέροντων που ανατέθηκαν στον χρήστη 9 για την *χρονοθυρίδα 20* μέσω των *αλγορίθμων 4.4* και *4.8* είναι:

$$U_{Pietryzk} = \{4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 16, 17, 18, 19, 20, 56, 63, 64, 65, 66, 72, 73, 74, 151, 155, 198, 199, 203, 204, 205, 206, 210, 211\}$$

$$U_{ACG} = \{12, 13, 17, 18, 19, 20, 32, 49, 58, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 91, 94, 100, 148, 169, 198, 202, 205, 206, 207, 208, 209, 214, 222\}$$

Η αντίστοιχη ανάθεση που προκύπτει μέσω του γενετικού αλγορίθμου είναι η παρακάτω:

$$U_{genetic} = \{10, 12, 13, 14, 17, 18, 19, 20, 64, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209\}$$

Αν κοιτάξουμε προσεκτικά τα τρία σύνολα, θα παρατηρήσουμε ότι **όλα** τα στοιχεία του  $U_{genetic}$  ανήκουν είτε και στο  $U_{Pietryzk}$ , είτε στο  $U_{ACG}$  είτε και στα δύο. Θα πρέπει να επισημάνουμε το γεγονός ότι οι λύσεις (για τον *χρήστη 9*)  $U_{Pietryzk}$  και  $U_{ACG}$  αποτελούσαν και χρωμοσώματα του αρχικού πληθυσμού. Επομένως, τα καλύτερα

επιμέρους στοιχεία των χρωμοσωμάτων διατηρήθηκαν παρά το πέρασμα των γενιών με αποτέλεσμα η τελική λύση να αποτελεί ένα κράμα των ήδη ικανοποιητικών λύσεων. Γι' αυτό το λόγο, ο αριθμός των υποφώντων που ανατέθηκαν στον χρήστη 9 είναι λιγότερα από τον αριθμό που προβλέπει ο αλγόριθμος *BABS*. Ακριβώς τα ίδια ισχύουν και στην **χρονοθυρίδα 50** όπως μπορούμε να δούμε και παρακάτω:

$$U_{Pietryzk} = \{21, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 91, 100, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 240, 241\}$$

$$U_{ACG} = \{12, 13, 18, 19, 20, 63, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 91, 92, 109, 118, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 136, 166, 182, 184, 194, 208, 218, 222\}$$

Η αντίστοιχη ανάθεση που προκύπτει μέσω του γενετικού αλγόριθμου είναι η παρακάτω:

$$U_{genetic} = \{17, 18, 19, 20, 21, 65, 66, 74, 75, 76, 77, 79, 80, 81, 82, 83, 91, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 184, 208, 209\}$$

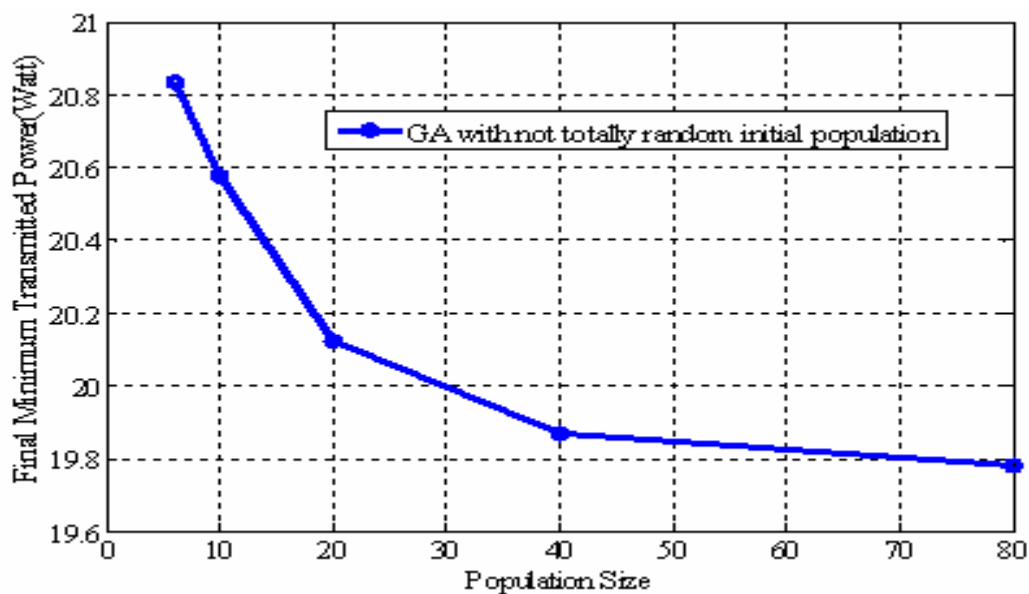
Σε αυτή την περίπτωση, **μόνο δύο** (υποφώντα 17 και 209) από τα 26 υποφώντα του συνόλου  $U_{genetic}$  δεν ανήκουν σε κάποια από τα σύνολα  $U_{Pietryzk}$  και  $U_{ACG}$ . Θα πρέπει βέβαια να αναλογιστούμε και το ότι η *ACG* ανάθεση διαθέτει τυχαιότητα όπως και το γεγονός ότι στον αρχικό πληθυσμό υπήρχαν αρκετές λύσεις που βασίζονταν στον *ACG*. Επομένως, είναι πιθανόν τα υποφώντα 17 και 209 να έχουν ανατεθεί στον χρήστη 9 σε κάποια από τα αρχικά *ACG* χρωμοσώματα.

Το επόμενο σενάριο προσομοίωσης έχει ως στόχο την ανάδειξη της σημασίας του μεγέθους του πληθυσμού. Γι' αυτό το λόγο, διατηρήσαμε σταθερό το φορτίο μετάδοσης και μεταβάλαμε το μέγεθος του πληθυσμού. Συγκεκριμένα, θεωρούμε φορτίο μετάδοσης  $R = 10Mbps$  και εκτελούμε 5 προσομοιώσεις με μέγεθος πληθυσμού 6, 10, 20, 40 και 80 λύσεις αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα του σεναρίου είναι καταγεγραμμένα στον **πίνακα 6.3**. Ο αριθμός των γενιών διατηρήθηκε σταθερός και ίσος με 300.

Population size	Minimum Transmitted Power(Watt)
6	20,8346
10	20,5798
20	20,1263
40	19,8713
80	19,7810

**6.5:** Αποτελέσματα τελικής ελάχιστης εκπεμπόμενης ισχύος για σταθερό ρυθμό μετάδοσης και χρονοθυρίδα

Από τον **πίνακα 6.3** είναι εμφανής η σύγκλιση της τελικής ελάχιστης μεταδιδόμενης ισχύος, όπως άλλωστε φαίνεται και μέσω της αντίστοιχης γραφικής παράστασης.



**Εικόνα 6.10:** Η μέση τελική μεταδιδόμενη ισχύς συναρτήσει του μεγέθους του πληθυσμού

Είναι λογικό να ισχύει αντίστροφη σχέση μεταξύ της ελάχιστης μεταδιδόμενης ισχύος και του μεγέθους του πληθυσμού. Όσο πιο μικρός ο πληθυσμός τόσο πιο λίγοι οι δυνατοί συνδυασμοί ανάμεσα στα χρωμοσώματα. Ακόμα και αν αυξηθεί η πιθανότητα μετάλλαξης (παράγοντας εισαγωγής νέων λύσεων στο σύστημα), το γεγονός ότι το πλήθος των λύσεων είναι μικρό περιορίζει την ποικιλία των λύσεων με αποτέλεσμα το σύστημα να συγκλίνει σε τιμές μεγαλύτερες από τις βέλτιστες. Επομένως, για σταθερή πιθανότητα μετάλλαξης και αριθμό γενιών, η μόνη περίπτωση βελτίωσης του αποτελέσματος του γενετικού αλγόριθμου είναι μέσω της αύξησης του πληθυσμού γιατί με αυτό τον τρόπο προσδίδεται ποικιλομορφία στο σύστημα και ενισχύεται ο πιθανοκρατικός χαρακτήρας του αλγόριθμου.

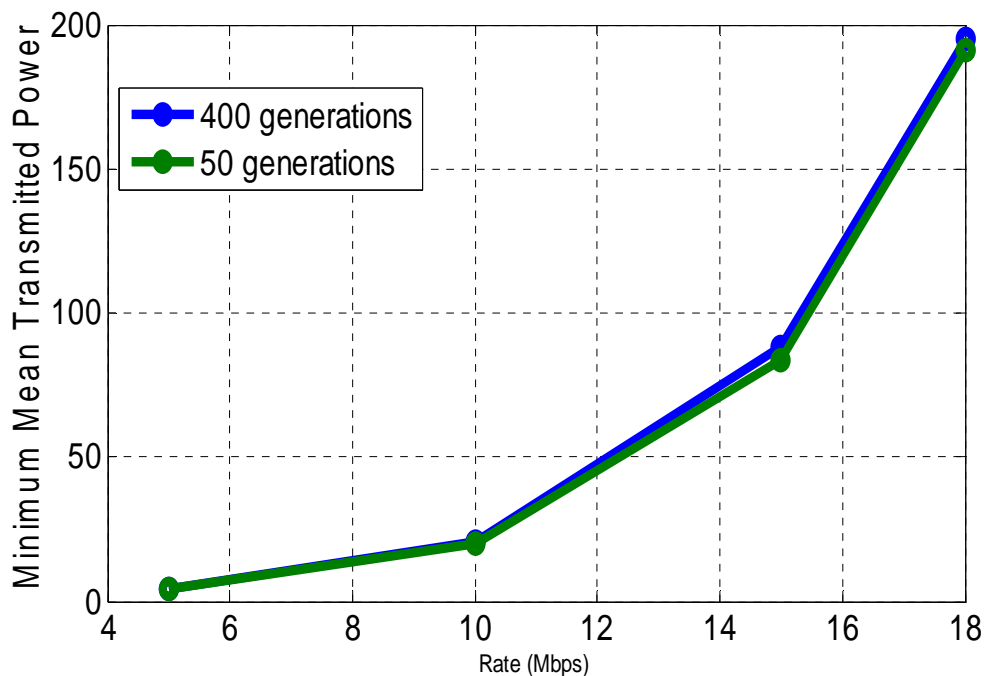
Το τελευταίο σενάριο προσομοίωσης που εκτελέστηκε είναι ο έλεγχος της σύγκλισης των λύσεων με βάση την αύξηση των επαναλήψεων του γενετικού αλγόριθμου. Συγκεκριμένα, μελετήσαμε τη συμπεριφορά του συστήματος για 4 διαφορετικά φορτία μετάδοσης (5, 10, 15, 18 Mbps) αυξάνοντας κάθε φορά το πλήθος των παραγόμενων γενιών. Η παρακάτω προσομοίωση εκτέλεστηκε για συνολικό αριθμό γενεών 50, 100, 200, 300, 400. Ο πίνακας των ελαχίστων τελικών τιμών ισχύος καθώς και η αντίστοιχη γραφική παρουσίαση τους ακολουθούν στην συνέχεια.



Rate(Mbps)	Number of Generations				
	50	100	200	300	400
5	4,5256(Watt)	4,3465	4,2029	4,0710	4,0713
10	20,9260	20,4936	20,3226	20,1201	20,0787
15	88,3251	86,7486	84,9192	83,5766	83,3022
18	194,8274	194,6418	192,8638	191,1495	191,1218

6.6: Αποτελέσματα τελικής ελάχιστης εκπεμπόμενης ισχύος συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης και του αριθμού των γενιών

Προφανώς, επειδή οι τιμές είναι σχετικά κοντά και η γραφική απεικόνισή τους δεν θα είναι ευδιάκριτη στη παρακάτω γραφική παράσταση θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα για τις 50 και 400 γενιές.



Εικόνα 6.11: Γραφική παρουσίαση των αποτελέσματα τελικής ελάχιστης εκπεμπόμενης ισχύος συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης και του αριθμού των γενιών

Από τα παραπάνω είναι εμφανής η σύγκλιση του γενετικού αλγορίθμου μιας και όσο αυξάνει ο αριθμός των γενιών τόσο λιγότερο βελτιώνεται η ελάχιστη τιμή της μεταδιδόμενης ισχύος.

## 6.4 Γενικά συμπεράσματα

Τα γενικά συμπεράσματα που θα μπορούσαμε να κάνουμε με βάση τις παραπάνω προσομοιώσεις στους γενετικούς αλγορίθμους είναι τα παρακάτω:

- Η υλοποίηση γενετικών αλγορίθμων εφαρμόζεται ικανοποιητικά στα προβλήματα διαχείρισης ραδιοπόρων. Το γεγονός ότι πρόκειται για ένα πρόβλημα με ευρύ πεδίο λύσεων στο οποίο είναι δύσκολος ο εντοπισμός της πραγματικά βέλτιστης λύσης καθιστά τους γενετικούς αλγορίθμους ένα χρήσιμο εργαλείο για την ικανοποιητική προσέγγιση της.
- Η σύγκλιση των αποτελεσμάτων συνεπάγεται και την σωστή λειτουργία ενός γενετικού αλγόριθμου. Με αυτό τον τρόπο αποδεικνύεται το γεγονός ότι η αναζήτηση της λύσης γίνεται σωστά και όχι μέσω μιας τυχαίας διαδικασίας αν και η τυχαιότητα αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό των γενετικών αλγορίθμων.
- Η κατάλληλη κωδικοποίηση του προβλήματος έτσι ώστε να είναι δυνατή η λύση του μέσω ενός γενετικού αλγόριθμου παίζει τεράστιο ρόλο για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Το γεγονός ότι η τεράστια πλειοψηφία των γενετικών αλγορίθμων εργάζεται στο διακριτό χώρο ανεξάρτητα αν το πρόβλημα είναι διακριτό ή συνεχές κρύβει πολλούς κινδύνους και η υλοποίηση πρέπει να επιλεγεί κατάλληλα.
- Υπάρχει μια λεπτή ισορροπία μεταξύ των παραμέτρων (*μέγεθος πληθυσμού, διασταύρωση, μετάλλαξη*) ενός γενετικού αλγόριθμου. Ο πιθανοκρατικός χαρακτήρας τους μπορεί να επηρεαστεί άμεσα αν δεν βρεθεί η κατάλληλη ισορροπία οδηγώντας σε εσφαλμένα αποτελέσματα.
- Η επίλυση του προβλήματος της ελαχιστοποίησης της μεταδιδόμενης ισχύος είναι προφανώς λιγότερα επίπονη σε σχέση με τις κλασσικές μεθόδους βελτιστοποίησης.
- Χρησιμοποιώντας ως βάση τα αποτελέσματα των τεχνικών διαχείρισης ραδιοπόρων καταφέραμε να εξελίξουμε τις υπάρχουσες λύσεις τελικά να πλησιάσουμε καλύτερα την πραγματικά βέλτιστη τιμή. Στην περίπτωση του γενετικού αλγόριθμου με τυχαίο αρχικό πληθυσμό, τα αποτελέσματα ήταν πολύ μακριά από τη βέλτιστη λύση και η προσέγγιση της απαιτούσε τεράστιο αριθμό επαναλήψεων του αλγορίθμου έτσι ώστε να φτάσει στα επιθυμητά αποτελέσματα.

## 7 Συμπεράσματα - Προτάσεις για μελλοντική Έρευνα

### 7.1 Γενικά συμπεράσματα

Η συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία είχε ως βασικό σκοπό την επίλυση του margin adaptive προβλήματος, δηλαδή την ελαχιστοποίηση της μεταδιδόμενης ισχύος σε OFDMA μονοκυψελωτό σύστημα. Για την επίλυση του χρησιμοποιήθηκαν τόσο ήδη γνωστές τεχνικές διαχείρισης ραδιοπόρων όσο και πειραματικές προσπάθειες διάχειρισης μέσω της χρησιμοποίησης γενετικών αλγορίθμων. Τα γενικά συμπεράσματα που θα μπορούσαμε να κάνουμε είναι τα εξής:

- Μια αρκετά αποτελεσματική τεχνική διαχείρισης ραδιοπόρων είναι ο αλγόριθμος 4.4 (**Improved Allocation**) που προτείνει ο Pietryzk. Σε όλα τα σενάρια που προσομοιώθηκαν, ο συγκεκριμένος αλγόριθμος έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα μειώνοντας σημαντικά την μέση μεταδιδόμενη ισχύ
- Η δυναμική διαχείριση ραδιοπόρων υπερτερεί αισθητά της αντίστοιχης τυχαίας και σταθερής μιας και λαμβάνει υπόψη το περιβάλλον μέσα στο οποίο γίνεται η μετάδοση με αποτέλεσμα κάθε χρονική στιγμή να μπορεί να κάνει και την απαιτούμενη ανάθεση υποφέροντων στους χρήστες.
- Η ικανότητα των γενετικών αλγορίθμων να καταλήγουν σε ολικό ακρότατο, στην περίπτωση μας ελάχιστο, αποδείχθηκε μέσω των αντίστοιχων προσομοιώσεων μιας και από τα αποτελέσματα προέκυψαν μικρότερες τιμές ισχύος σε σύγκριση με εκείνα των αλγορίθμων του πρώτου μέρους της διπλωματικής.
- Ένα μειονέκτημα των είναι οι πολύ μεγάλοι χρόνοι επίλυσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η περίπτωση του γενετικού αλγόριθμου με τον τυχαίο αρχικό πληθυσμό, όπου τα αποτελέσματα απέχουν αισθητά από την βέλτιστη τιμή. Το πρόβλημα επιλύθηκε μέσω της "πίεσης" που ασκήθηκε στον αρχικό πληθυσμό βάζοντας ήδη καλές αναθέσεις υοφέροντων που πήραμε από το πρώτο μέρος της πτυχιακής εργασίας. Ο γενετικός αλγόριθμος με αρχικό πληθυσμο που αποτελούσε κράμα καλών και τυχαίων λύσεων λειτούργησε ικανοποιητικά μιας και δόθηκε, από την αρχή, στον αλγόριθμο μια σωστή κατεύθυνση για το βέλτιστο πεδίο λύσεων.
- Η σωστή διαχείριση των ραδιοπόρων του συστήματος είναι μία αναγκαία διαδικασία μιας και εκτός της μείωσης της επεμπόμενης ισχύος μπορούμε να πετύχουμε μεγιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης, μείωση των παρεμβολών και γενικότερα αύξηση της φασματικής απόδοσης του συστήματος.

## 7.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Εν γένει, το αντικείμενο της βέλτιστης ανάθεσης των ραδιοπόρων για συστήματα ευρυζωνικής πρόσβασης νέας γενιάς συνιστά έναν από τους πλέον ενεργούς ερευνητικούς τομείς στο χώρο των ασύρματων τηλεπικοινωνιών. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας καλύψαμε ένα μικρό μέρος του αντικειμένου, καθώς επικεντρωθήκαμε στη μελέτη προβλημάτων ελαχιστοποίησης της ισχύος για μονοκυψελωτά συστήματα που βασίζονται στην τεχνολογία OFDMA θεωρώντας ότι ο σταθμός βάσης και οι κινητοί δέκτες διαθέτουν ένα κεραιοσύστημα. Αναφέρουμε συνοπτικά πιθανές επεκτάσεις ή και νέες κατευθύνσεις στον ενδιαφέροντα αυτόν τομέα. Φυσικά η λίστα που ακολουθεί δεν είναι εξαντλητική.

- Αξιολόγηση τεχνικών μεγιστοποίησης του αθροιστικού ρυθμού διέλευσης δεδομένων για συστήματα SISO-OFDMA με ή χωρίς απαιτήσεις ως προς τη δικαιοσύνη απόδοσης των πόρων.
- Εφαρμογή εναλλακτικών μεθόδων επίλυσης των προβλημάτων βελτιστοποίησης, όπως μέσω της θεωρίας convex optimization
- Εφαρμογή εναλλακτικών μεταευσιστικών μεθόδων επίλυσης, όπως η Particle Swarm, Ant Colony, ....
- Επέκταση των τεχνικών ανάθεσης ραδιοπόρων για πολυκυψελωτά συστήματα (multicell OFDMA), για τα οποία πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η παρεμβολή
- Συνδυασμός της τεχνολογίας OFDMA με τεχνικές πολλαπλών κεραιοσυστημάτων στον πομπό ή/και στους δέκτες (MIMO/MISO-OFDMA) και μελέτη τεχνικών ανάθεσης ραδιοπόρων για μονοκυψελωτά ή πολυκυψελωτά συστήματα. Η μελέτη αυτή παρουσιάζει ιδιαίτερες προκλήσεις λόγω της νέας χωρικής διάστασης που εισάγεται στο ήδη πολυδιάστατο πρόβλημα.
- Αλληλεπίδραση των τεχνικών ανάθεσης ραδιοπόρων με λειτουργίες ανωτέρων στρωμάτων της στοίβας OSI, όπως η διαχείριση των ουρών αναμονής και ο χρονοπρογραμματισμός της τηλεπικοινωνιακής κίνησης

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Στο παρόν παράρτημα παρουσιάζεται η βασική ιδέα του λεγόμενου **Hungarian** αλγορίθμου, ο οποίος είναι γνωστός για το γεγονός ότι παρέχει βέλτιστη λύση για το πρόβλημα της ανάθεσης. Το πρόβλημα της ανάθεσης μπορεί να εξηγηθεί με το παρακάτω πραγματικό πρόβλημα:

Έστω ένα σύνολο εργατών  $u = 1, \dots, N$  και ένα σύνολο εργασιών  $n = 1, \dots, N$ . Το κόστος του κάθε εργάτη  $u$  που εκτελεί την εργασία  $n$  είναι το αντίστοιχο στοιχείο του πίνακα  $Q_{u,n}$ . Σε κάθε εργάτη μπορεί να ανατεθεί μόνο μια εργασία ενώ και κάθε εργασία μπορεί να ανατεθεί σε έναν μόνο εργάτη. Στόχος του συγκεκριμένου προβλήματος είναι η εύρεση εκείνης της ανάθεσης εργασιών στους εργάτες έτσι ώστε το συνολικό κόστος να είναι ελάχιστο. Η μαθηματική έκφραση του προβλήματος είναι:

$$\min \sum_{u=1}^N \sum_{n=1}^N C_{u,n} Q_{u,n} \quad (\text{A.1})$$

ύπο τους παρακάτω περιορισμούς:

$$\sum_{u=1}^N C_{u,n} = 1 ; n = 1, \dots, N \quad (\text{A.2})$$

$$\sum_{n=1}^N C_{u,n} = 1 ; u = 1, \dots, N \quad (\text{A.3})$$

$$C_{u,n} \in \{0, 1\} \quad (\text{A.4})$$

όπου  $C_{u,n} = 1$  δείχνει την ανάθεση της εργασίας  $n$  στον εργάτη  $u$ .

Την λειτουργία του αλγορίθμου την επεξηγεί το παρακάτω παράδειγμα. Θεωρούμε τον πίνακα κόστους:

$$Q_{u,n} = \begin{bmatrix} 8 & 10 & 7 \\ 10 & 11 & 8 \\ 5 & 6 & 7 \end{bmatrix}$$

Ο **Hungarian** αλγόριθμος λειτουργεί ως εξής: Αρχικά εντοπίζει σε κάθε σειρά το μικρότερο στοιχείο. Για το συγκεκριμένο παράδειγμα έχουμε  $x_1 = 7$ ,  $x_2 = 8$  και  $x_3 = 5$ , τα οποία στην συνέχεια αφαιρούνται από τις αντίστοιχες σειρές που ανήκουν. Επομένως, προκύπτει ο πίνακας  $Q_{u,n} (1)$ .

$$Q_{u,n} (1) = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 0 \\ 2 & 3 & 0 \\ 0 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

Για τον πίνακα  $Q_{u,n} (1)$  κάνουμε την ίδια διαδικασία μόνο που αυτή τη φορά χρησιμοποιούμε τις στήλες αντί τις σειρές. Επομένως,  $y_1 = 0$ ,  $y_2 = 1$  και  $y_3 = 0$ . Αφαιρόντας τα παραπάνω στοιχεία από τις αντίστοιχες στήλες που ανήκουν έχουμε τον πίνακα  $Q_{u,n} (2)$ .

$$Q_{u,n}(2) = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 0 \\ 2 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

Το δεύτερο μέρος του αλγορίθμου είναι γνωστό ως *μηδενική κάλυψη (zero cover)*. Ορίζουμε ως γραμμές τις στήλες και τις σειρές οι οποίες είναι ικανές να καλύψουν τα μηδενικά του πίνακα  $Q_{u,n}(2)$ . Στο συγκεκριμένο παράδειγμα έχουμε 4 γραμμές:

$$line_1 = [1 \ 2 \ 0], \quad line_2 = [2 \ 2 \ 0]$$

$$line_3 = [1 \ 2 \ 0]^T, \quad line_4 = [2 \ 2 \ 0]^T$$

Ορίζουμε ως  $\lambda_{\min}$  τον ελάχιστο αριθμό γραμμών που χρειάζεται για να καλύψουμε τα μηδενικά του  $Q_{u,n}(2)$ . Στην συγκεκριμένη περίπτωση απαιτείται μια γραμμή(στήλη) για την κάλυψη των μηδενικών της στήλης 3 και μία γραμμή(σειρά) για την κάλυψη των μηδενικών της σειράς 3. Επομένως,  $\lambda_{\min} = 2$ . Αν το  $\lambda_{\min}$  ισούται με την διάσταση του τετραγωνικού πίνακα  $Q_{u,n}$  (στην συγκεκριμένη περίπτωση  $N = 3$ ) ο αλγόριθμος τερματίζει. Διαφορετικά η διαδικασία περνά στο τρίτο βήμα.

Κατά το τρίτο βήμα γίνεται χαρακτηρισμός των μη μηδενικών στοιχείων του  $Q_{u,n}(2)$ . Αν ένα μη μηδενικό στοιχείο δεν μπορεί να καλυφθεί με μηδέν από κάποια από τις γραμμές που ορίστηκαν στο προηγούμενο βήμα, τότε το στοιχείο χαρακτηρίζεται ως *μη – επικαλυπτόμενο(uncovered)*. Επομένως, στο παράδειγμά μας, τα στοιχεία αυτά είναι τα (1, 1), (1, 2), (2, 1), (2, 2). Αντίστοιχα, τα μη μηδενικά στοιχεία που μπορεί να καλυφθούν από μηδέν από δύο γραμμές χαρακτηρίζονται ως *διπλά επικαλυπτόμενα(doublecovered)*. Το στοιχείο (3,3) ανήκει σε αυτήν την κατηγορία. Στην συνέχεια ορίζουμε ως  $z$  το ελάχιστο στοιχείο των μη επικαλυπτόμενων στοιχείων. Επομένως στο συγκεκριμένο παράδειγμα  $z = 1$ . Το στοιχείο αυτό αφαιρείται από κάθε μη επικαλυπτόμενο στοιχείο. Συνεπώς:

$$Q_{u,n} = Q_{u,n} - z, \text{ if } (u,n) \in \text{uncovered} \quad (\text{A.5})$$

Αντίστοιχα, για τα διπλά επικαλυπτόμενα στοιχεία ισχύει:

$$Q_{u,n} = Q_{u,n} + z, \text{ if } (u,n) \in \text{doublecovered} \quad (\text{A.6})$$

Με αυτό τον τρόπο παράγεται ο πίνακας  $Q_{u,n}(3)$ . Στην συνέχεια γίνεται ο έλεγχος του  $\lambda_{\min}$  και αν ισούται με την διάσταση του τετραγωνικού πίνακα  $Q_{u,n}$  η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Ο πίνακας που παράχθηκε στο παράδειγμα είναι ο:

$$Q_{u,n}(3) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{bmatrix}, \text{ για τον οποίο ισχύει } \lambda_{\min} = N = 3.$$

Η λύση του προβλήματος είναι ουσιαστικά η παραγωγή του πίνακα ανάθεσης  $C_{u,n}$ . Τα στοιχεία του πίνακα ανάθεσης που τελικά θα ισούνται με 1 είναι αυτά που ισούνται με μηδέν στον τελικό πίνακα  $Q_{u,n}(N)$ . Από τον πίνακα  $Q_{u,n}(3)$  προκύπτει ότι ένας σίγουρος άσπος είναι το στοιχείο (2, 3). Βέβαια από τον ορισμό του

προβλήματος προκύπτει ότι στην τρίτη στήλη δεν θα πρέπει να υπάρχει άλλο 1. Επομένως, για τον εργάτη 1 η μόνη πιθανή εργασία που μπορεί να του ανατεθεί είναι η εργασία 1. Αντίστοιχα, στον εργάτη 3 θα ανατεθεί η εργασία 2. Ο τελικός πίνακας ανάθεσης είναι ο:

$$C_{u,n} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Συνεπώς το βέλτιστο συνολικό κόστος της ανάθεσης των εργασιών θα είναι:

$$\sum_{u=1}^N \sum_{n=1}^N C_{u,n} Q_{u,n} = 8 + 8 + 6 = 22$$

*Αλγόριθμος A.1: Hungarian αλγόριθμος*

**input** :  $[Q_{u,n}]$

**output** :  $[C_{u,n}]$

**begin**

**for**  $u = 1$  **to**  $N$  **do**

$x_u = \min(\text{row}_u)$

$\text{row}_u = Q_{u,n} - x_u$

update  $Q_{u,n}$  with  $\text{row}_u$

**end**

**for**  $n = 1$  **to**  $N$  **do**

$y_n = \min(\text{col}_n)$

$\text{col}_n = Q_{u,n} - y_n$

update  $Q_{u,n}$  with  $\text{col}_n$

**end**

do zero cover : determine  $\lambda_{\min}$ , *uncovered*, *doublecovered*

**while**  $\lambda_{\min} < N$

$z = \min(Q_{u,n})$ ,  $(u,n) \in \text{uncovered}$

$Q_{u,n} = Q_{u,n} - z$ , *if*  $(u,n) \in \text{uncovered}$

$Q_{u,n} = Q_{u,n} + z$ , *if*  $(u,n) \in \text{doublecovered}$

Determine  $\lambda_{\min}$ , *uncovered*, *doublecovered*

**end**

find *all zero* assignment in  $[Q_{u,n}]$  and indicate it with 1-s in the assignment matrix  $[C_{u,n}]$

**end**





## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] Slawomir Pietryzk, “*OFDMA for Broadband Wireless Access*”, Mobile Communications series.
- [2] Jeffrey G. Andrews, Arunabha Ghosh, Rias Muhamed, “*Fundamentals of WiMAX*”, Prentice Hall, February 2007.
- [3] Φ. Κωνσταντίνου, “*Κινητές Τηλεπικοινωνίες*”
- [4] Didem Kivanc, Guoqing Li, Hui Liu, “*Computationally Efficient Bandwidth Allocation and Power Control for OFDMA*”, IEEE Transactions on Wireless Communications.
- [5] Cheong Yui Wong, C. Y. Tsui, Roger S. Cheng, K. B. Letaief, “*A real – time Subcarrier Allocation Scheme for Multiple Access Downlink OFDM Transmission* ” The Hong Kong University of Science & Technology
- [6] Wonjong Rhee and John M. Cioffi, “*Increase in Capacity of Multiuser OFDM System using Dynamic Subcarrier Allocation*”
- [7] Zukang Shen, Jeffrey G. Andrews, Brian L. Evans, “*Adaptive Resource Allocation in Multiuser OFDM Systems with Proportional Rate Constraints*”, November 2005.
- [8] Megumi Kaneko, Petar Popovski, and Joachim Dahl, “*Proportional Fairness in Multi – Carrier System: Upper Bound and Approximation Algorithms*”, June 2006.
- [9] Tien-Dzung Nguyen and Youngnam Han, “*A Proportional Fairness Algorithm with QoS Provision in Downlink OFDMA Systems* ”, November 2006.
- [10] Kalyanmoy Deb, “*Multi – Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*”, Εκδόσεις Willey.
- [11] Yenumula B. Reddy, Nandigam Gajendar, “*Evolutionary Approach for Efficient Resource Allocation in Multi-User OFDM Systems*”, August 2007.
- [12] Wuyang Zhou, “*Resource Allocation for OFDMA System Based On Genetic Algorithms*”, University of Science and Technology of China.