



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

Απόδοση Ραδιοπórων του Ψηφιακού Μερίσματος σε Ασύρματα  
Δίκτυα

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Νικόλαος Χ. Καψάλης

Αθήνα, Ιούνιος 2015





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

Απόδοση Ραδιοπórων του Ψηφιακού Μερίσματος σε Ασύρματα  
Δίκτυα

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Νικόλαος Χ. Καψάλης

**Συμβουλευτική Επιτροπή:** Παναγιώτης Κωττής  
Ιωάννης Ψαρράς  
Γιώργος Φικιώρης

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την / /2015.

.....	.....	.....
Π. Κωττής	Ι. Ψαρράς	Γ. Φικιώρης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.
.....	.....	.....
Μ. Θεολόγου	Αθ. Παναγόπουλος	Σ. Παπαβασιλείου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Καθηγητής Ε.Μ.Π.
.....	.....	.....
	Ι. Τίγκελης	
	Καθηγητής Ε.Κ.Π.Α.	

.....  
Νικόλαος Χ. Καψάλης

Υποψήφιος Διδάκτωρ, Πτυχιούχος Τμήματος Πληροφορικής Ο.Π.Α.

Copyright © Νικόλαος Χ. Καψάλης, 2013.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

*Στους παλαιόφιλους...*



# Περιεχόμενα

Περίληψη.....	11
Abstract .....	13
Ευχαριστίες.....	15
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	17
1.1. Ασύρματη ευρυζωνικότητα .....	17
1.2. Εφαρμογές της Ασύρματης Ευρυζωνικότητας.....	20
1.3. Το Ψηφιακό Μέρισμα.....	22
1.4. Η απόδοση του UHF φάσματος .....	25
1.5. Αλλαγή χρήσης.....	27
1.6. Δημοπράτηση φάσματος.....	28
1.7. Εμπόριο φάσματος .....	30
1.8. Διοικητική τιμολόγηση παροχής κινήτρων.....	32
1.9. Τηλεοπτικά κενά διαστήματα (TV White Spaces) .....	34
1.10. Πρότυπο IEEE 802.22-2011 .....	36
1.10.1. Προδιαγραφές περιφερειακών δικτύων γνωστικού ασύρματου ελέγχου πρόσβασης στο μέσο και φυσικού επιπέδου .....	36
1.10.2. Πολιτικές και διαδικασίες για τη λειτουργία στις τηλεοπτικές μπάντες.....	37
1.11. Η αρχιτεκτονική και τα βασικά χαρακτηριστικά του συστήματος του προτύπου 802.22.....	37
1.11.1. Το φυσικό στρώμα του προτύπου IEEE 802.22.....	40
1.12. Το πρόβλημα απονομής συχνοτήτων.....	43
1.12.1. Μαθηματική διατύπωση του προβλήματος απονομής συχνοτήτων.....	44
1.12.2. Εφαρμογές του FAP .....	47
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΠΡΩΤΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ .....	51
2. ΟΙ ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ (GENETIC ALGORITHMS).....	55
2.1. Η θεωρία της εξέλιξης των ειδών.....	56
2.2. Βασικά χαρακτηριστικά ενός Γενετικού Αλγορίθμου .....	57
2.3. Η δομή ενός ΓΑ.....	59
2.4. Πλεονεκτήματα των Γενετικών Αλγορίθμων .....	60
2.5. Κύρια χαρακτηριστικά ενός Γενετικού Αλγορίθμου. ....	62
2.6. Βασικά στοιχεία ενός Γενετικού Αλγορίθμου .....	63
2.6.1. Κωδικοποίηση .....	63
2.6.2. Αντικειμενική Συνάρτηση.....	64

2.6.3. Γενετικές Διαδικασίες .....	64
2.6.4. Αναπαραγωγή .....	66
2.6.5. Μετάλλαξη .....	67
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΔΕΥΤΕΡΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ .....	68
3. ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΑΝΑΛΙΩΝ ΣΕ ΚΥΨΕΛΩΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΠΑΡΕΜΒΑΛΛΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΤΗΛΕΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΕΥΡΥΕΚΠΟΜΠΗΣ .....	71
3.1. Σχετιζόμενες ερευνητικές εργασίες .....	73
3.2. Απόδοση καναλιών σε κυψελωτά δίκτυα που υφίστανται εξωτερική παρεμβολή ....	74
3.2.1. Χρήσιμοι ορισμοί.....	77
3.2.2 Ενδοδικτυακή Παρεμβολή .....	78
3.2.3 Παρεμβολές από Γειτονικούς Τηλεοπτικούς Σταθμούς .....	79
3.3 Το βασισμένο σε γενετικούς αλγορίθμους επαναληπτικό σχήμα.....	80
3.3.1 Διατύπωση του προβλήματος απόδοσης καναλιών με βάση τους γενετικούς αλγορίθμους .....	80
3.3.2 Το προτεινόμενο επαναληπτικό σχήμα.....	81
3.3.3. Υλοποίηση του προτεινόμενου σχήματος γενετικών αλγορίθμων.....	83
3.3.4. Ζητήματα δικαιοσύνης κατά την απόδοση καναλιών .....	89
3.3.5. Αύξηση της φασματικής αξιοποίησης με ενσωμάτωση προσαρμοστικής διαμόρφωσης και κωδικοποίησης.....	90
3.4. Προσομοιώσεις και συζήτηση αποτελεσμάτων .....	92
3.4.1. Απόδοση πόρων εφαρμόζοντας προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση .....	97
3.4.2. Απόδοση καναλιών υπό ασυνήθιστες συνθήκες .....	100
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΤΡΙΤΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ .....	103
4. ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΑΝΑΛΙΩΝ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ .....	109
4.1. Κατάστρωση του προβλήματος απόδοσης καναλιών.....	112
4.2. Εφαρμογή του προτεινόμενου σχήματος.....	116
4.2.1. Εκκίνηση του προτεινόμενου σχήματος.....	117
4.2.2. Συμμόρφωση με τους ενδοδικτυακούς περιορισμούς .....	117
4.2.3. Τερματισμός της Διαδικασίας.....	118
4.3. Αποτελέσματα προσομοιώσεων .....	118
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΤΕΤΑΡΤΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ .....	128
5. ΑΠΟΔΟΣΗ ΡΑΔΙΟΠΟΡΩΝ ΣΕ ΚΥΨΕΛΩΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΠΟΥ ΥΠΟΣΤΗΡΙΖΟΥΝ ΠΟΛΛΑΠΛΕΣ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ.....	129
5.1. Διατύπωση του τριπλού προβλήματος απόδοσης ραδιοπόρων .....	131



5.2. Το προτεινόμενο σχήμα βασισμένο στους γενετικούς αλγορίθμους .....	139
5.3. Αποτελέσματα Προσομοιώσεων.....	143
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	155
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α. ΤΑ ΠΡΟΤΥΠΑ MPEG-2 ΚΑΙ MPEG-4.....	157
Α.1. Το πρότυπο MPEG-4.....	158
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β. ΠΟΛΥΣΥΧΝΟΤΙΚΑ (Multi – Frequency Networks - MFNs) ΚΑΙ ΜΟΝΟΣΥΧΝΟΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ (Single Frequency Networks - SFNs) .....	159
Β.1. Πολυσυχνοτικά Δίκτυα (Multi Frequency Networks - MFN) .....	159
Β.2. Μονοσυχνοτικά Δίκτυα (Single Frequency Networks - SFN) .....	160
Β.2.1. Αξιοποίηση φάσματος στα SFN Δίκτυα .....	161
Β.2.2. Αποδοτικότητα ισχύος στα SFN Δίκτυα .....	162
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ. ΤΗΛΕΟΠΤΙΚΑ ΚΕΝΑ ΔΙΑΣΤΗΜΑΤΑ (TV WHITE SPACES - TVWS) .....	163
Γ.1. Προστασία υπαρχουσών υπηρεσιών .....	163
Γ.1.1. Τεχνική ανίχνευσης φάσματος .....	164
Γ.1.2. Τεχνική με χρήση Βάσης Δεδομένων .....	164
Γ.1.3. Τεχνική με χρήση Σήματος Φάρου .....	165



## Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διατριβής αποτελεί η μελέτη, ανάλυση και βελτιστοποίηση απόδοσης ραδιοπόρων σε ασύρματα κυψελωτά δίκτυα που δραστηριοποιούνται εντός του φάσματος του Ψηφιακού Μερίσματος ή εντός των Τηλεοπτικών Κενών Διαστημάτων (TV White Spaces).

Η παρούσα διατριβή εξειδικεύεται στην ανάπτυξη νέων αλγορίθμων δυναμικής απόδοσης ραδιοπόρων σε ασύρματα κυψελωτά δίκτυα που υφίστανται παρεμβολές από υπάρχοντα δίκτυα ευρυεκπομπής τα οποία συλλειτουργούν εντός των συχνοτήτων του Ψηφιακού Μερίσματος. Ακόμη, αναλύεται και εξετάζεται η απόδοση ραδιοπόρων σε ασύρματα δίκτυα που υποστηρίζουν περισσότερες από μία υπηρεσίες και που λειτουργούν στα Τηλεοπτικά Κενά Διαστήματα.

Εξετάζονται τεχνικές για τη βελτίωση της απόδοσης ραδιοπόρων σε κυψελωτά δίκτυα μέσω των οποίων αφενός αντιμετωπίζονται οι πιθανές παρεμβολές μεταξύ των δικτύων και, αφ' ετέρου, μεγιστοποιείται η απόδοση του συστήματος σε όρους διέλευσης πληροφορίας (throughput).

Αρχικά περιγράφονται οι υπάρχουσες τεχνικές απόδοσης συχνοτήτων σε κυψελωτά δίκτυα και αναλύεται η σημαντικότητα των πόρων του Ψηφιακού Μερίσματος και οι διαφορετικές δυνατότητες απόδοσής του σε διαφορετικές χρήσεις. Επίσης παρουσιάζεται το Πρότυπο IEEE 802.22, που αφορά στη χρήση των Τηλεοπτικών Κενών Διαστημάτων. Κατόπιν παρουσιάζεται και αναλύεται το Πρόβλημα Κατανομής Συχνοτήτων (Frequency Assignment Problem - FAP).

Ακόμη, στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται βασικά στοιχεία και χαρακτηριστικά των Γενετικών Αλγορίθμων (ΓΑ). Οι ΓΑ αποτελούν μία ευρέως διαδεδομένη μεταεвриστική (metaheuristic) τεχνική βελτιστοποίησης.

Πέραν αυτού, στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται ένα σχήμα απόδοσης συχνοτήτων σε ασύρματα κυψελωτά δίκτυα που συλλειτουργούν με δίκτυα Ψηφιακής Τηλεόρασης εντός του Ψηφιακού Μερίσματος. Παρουσιάζεται και αναλύεται το σχήμα και μελετάται η ικανότητά του στην αντιμετώπιση παρεμβολών και στη μεγιστοποίηση της συνολικής διέλευσης πληροφορίας, ενώ παράλληλα αναλύεται και η ικανότητά του να επιτυγχάνει πολύ υψηλά επίπεδα συνολικής δικαιοσύνης ανάμεσα στους χρήστες των ασύρματων κυψελωτών δικτύων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται ένα σχήμα απόδοσης ραδιοπόρων σε περισσότερα του ενός δίκτυα τα οποία συλλειτουργούν εντός της ίδιας γεωγραφικής περιοχής και εντός της ίδιας φασματικής μπάντας. Οι δυνατότητες του σχήματος αυτού παρουσιάζονται και αναλύονται για δίκτυα που λειτουργούν στο δίκτυο αναφοράς της Φιλαδέλφειας (Philadelphia Benchmark Network - PBN).

Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο προτείνεται ένα σχήμα απόδοσης ραδιοπόρων το οποίο επιτυγχάνει την ταυτόχρονη απόδοση Σταθμών Βάσης, καναλιών μετάδοσης και επιπέδων ισχύος εκπομπής στα νομαδικά τερματικά ενός κυψελωτού δικτύου που ζητούν ετερογενείς υπηρεσίες. Η προτεινόμενη μέθοδος απόδοσης ραδιοπόρων υλοποιείται κάνοντας χρήση σχήματος βασισμένου στους γενετικούς αλγόριθμους και αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση του πλήθους χρηστών που δεν απολαμβάνουν ένα ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης εντός της κάλυψης του κυψελωτού δικτύου.

**Λέξεις Κλειδιά:** Δυναμική Απόδοση Ραδιοπόρων, Γενετικοί Αλγόριθμοι, Πρότυπο IEEE 802.22, Τηλεοπτικά Κενά Διαστήματα, Πρόβλημα Κατανομής Συχνοτήτων.

## Extended Abstract

The object of the present thesis is the study, analysis and optimization of channel assignment in wireless cellular networks that operate in the framework of the Digital Dividend or inside the TV White Spaces.

New algorithms of dynamic channel assignment to wireless cellular networks operating inside the Digital Dividend and interfered by broadcasters are presented in the present thesis. Furthermore, channel assignment to multi service networks operating in the framework of TV White Spaces is studied.

New techniques concerning the optimal channel assignment to cellular networks that mitigate possible interference are studied. Furthermore, these techniques maximize the overall system throughput.

Initially, existing channel assignment techniques and the different tools for the allocation of Digital Dividend to different uses are presented. Also the IEEE 802.22 Standard is presented and analyzed. Next, the Frequency Assignment Problem - FAP is discussed.

Furthermore, the Genetic Algorithm (GA) optimization technique is presented and analyzed. GAs form a very robust and well - known optimization technique.

In addition, a new dynamic channel allocation scheme to cellular networks that operate in the framework of the Digital Dividend and that are interfered by broadcasters is presented and discussed. The proposed scheme is able to mitigate interference while, at the same time, maximizing the overall system throughput. Furthermore, the proposed scheme achieves a fair treatment of the cellular network users.

A novel channel allocation scheme to multi - service networks operating in the same geographical area and inside the same frequency band is then presented and studied. This scheme is indicatively studied for multi - service networks operating in the Philadelphia Benchmark Network - PBN.

Finally, a multi-objective Resource Allocation (RA) scheme is proposed for cellular networks providing multiple services. The RA scheme allocates serving base stations, transmit power levels and radio channels to nomadic users requesting different services. In implementing the proposed RA scheme, a genetic algorithm approach is adopted to minimize the percentage of terminals that do not enjoy a minimum transmission rate level taking into account intersymbol, interservice and intraservice interference and the transmission conditions over the cellular network.

**Keywords:** Dynamic Channel Allocation, Genetic Algorithms, IEEE Standard 802.22, TV White Spaces, Frequency Assignment Problem.



## Ευχαριστίες

Η παρούσα διδακτορική διατριβή αποτελεί το αποτέλεσμα μίας πολυετούς προσπάθειας η οποία δε θα ήταν δυνατό να ολοκληρωθεί χωρίς την αμέριστη συνεισφορά και τη διαρκή στήριξη εξεχουσών προσωπικοτήτων τόσο σε επιστημονικό, αλλά και σε προσωπικό επίπεδο. Θα ήθελα, λοιπόν, σαν ελάχιστο ευχαριστώ να αναφερθώ σε αυτά τα άτομα.

Κατ' αρχάς, ιδιαίτερες ευχαριστίες και τεράστια ευγνωμοσύνη οφείλω στον επιβλέποντα καθηγητή μου, τον Καθηγητή κύριο Παναγιώτη Κωττή. Η τεράστια επιστημονική επάρκειά του, που δε χρειάζεται να αναλυθεί ιδιαίτερος, όπως επίσης η άπειρη υπομονή και επιμονή που επέδειξε καθ' όλα τα χρόνια που επέβλεπε την εκπόνηση της εργασίας αυτής με δίδαξε την αξία της επιμονής στη λεπτομέρεια. Καθ' όλα αυτά τα χρόνια, η παρουσία του ήταν αισθητή και η καθοδήγησή του ιδιαίτερος σημαντική. Προσωπικά θεωρώ πως το μεγαλύτερο μέρος αυτής της εργασίας οφείλεται σε αυτόν. Θα ήθελα, λοιπόν, να τον ευχαριστήσω ιδιαίτερος.

Θα ήταν, σίγουρα, παράλειψη να μην αναφερθώ στα άλλα δύο μέλη της τριμελούς επιτροπής μου, τον κύριο Γεώργιο Φικιώρη και τον κύριο Ιωάννη Ψαρρά, οι οποίοι συνεισέφεραν στην εκπόνηση της εργασίας αυτής με τις εύστοχες παρατηρήσεις τους.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συναδέλφους μου στο Εργαστήριο Ασυρμάτου και Επικοινωνίας Μεγάλων Αποστάσεων του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, με τους οποίους με συνδέει, πλέον, στενή φιλία. Θα ήθελα να τους ευχαριστήσω για την αμέριστη συμπαράστασή τους καθ' όλα αυτά τα χρόνια.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη συμπαράστασή τους καθ' όλα αυτά τα χρόνια και για την πίστη που επέδειξαν σε εμένα. Επιπροσθέτως, θέλω μέσα από τα βάθη της καρδιάς μου να ευχαριστήσω τους παλαιόφιλους, που δεν έχουν φύγει ποτέ από κοντά μου.





# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1. Ασύρματη ευρυζωνικότητα

Ο όρος «ασύρματη ευρυζωνικότητα» αναφέρεται στην τεχνολογία η οποία παρέχει ασύρματη δικτύωση υπολογιστών υψηλής ταχύτητας και ασύρματη πρόσβαση στο Διαδίκτυο (Internet). Ως ευρυζωνική σύνδεση χαρακτηρίζεται μία σύνδεση που καταλαμβάνει εύρος ζώνης μεγαλύτερο από 1MHz και υποστηρίζει ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων τουλάχιστον 4Mbps [1.1]. Ο όρος «ασύρματη ευρυζωνικότητα» περιλαμβάνει δύο ταχύτατα αναπτυσσόμενους τομείς των τηλεπικοινωνιών κατά τα τελευταία χρόνια. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν το Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Επικοινωνιών (Global System for Mobile Communications – GSM), που ανήκει στα ασύρματα συστήματα ευρείας ζώνης 2<sup>ης</sup> γενεάς, και το Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Τηλεπικοινωνιών (Universal Mobile Telecommunications System – UMTS), το οποίο ανήκει στα ασύρματα συστήματα ευρείας ζώνης 3<sup>ης</sup> γενεάς.

Τα ασύρματα ευρυζωνικά συστήματα δεύτερης γενεάς δεν απαιτούσαν την ύπαρξη απευθείας (LOS) σήματος. Επίσης, αύξησαν σημαντικά και τη χωρητικότητα σε σχέση με τα κυψελωτά συστήματα πρώτης γενεάς. Η αύξηση της χωρητικότητας επιτεύχθηκε με χρήση κυψελωτής (cellular) αρχιτεκτονικής και την εφαρμογή προηγμένων τεχνικών επεξεργασίας του σήματος προς βελτίωση της απόδοσης του ρυθμού μετάδοσης υπό συνθήκες πολυδιαδρομικής διάδοσης (multipath transmission). Το GSM αποτελεί μία ανοικτή, ψηφιακή κυψελωτή τεχνολογία που χρησιμοποιείται για μετάδοση φωνής και υπηρεσιών δεδομένων. Το GSM αναφέρεται επίσης και ως 2G καθώς αποτελεί τη δεύτερη γενεά της ψηφιακής κυψελωτής τεχνολογίας [1.2]. Ας σημειωθεί ότι στα μέσα του 2006 υπηρεσίες GSM χρησιμοποιούνταν από περισσότερους από 1.8 δις συνδρομητές σε περισσότερες από 210 χώρες. Τα συγκεκριμένα μεγέθη αποτελούσαν περίπου το 77% της παγκόσμιας αγοράς κινητής τηλεφωνίας.

Το UMTS είναι το σύστημα κινητών τηλεπικοινωνιών τρίτης γενεάς και συνυπήρξε με τις βελτιωμένες εκδόσεις του προτύπου GSM, δηλαδή το GPRS (General Packet Radio Service – Γενική Ραδιοϋπηρεσία Μετάδοσης Πακέτων) και το EDGE (Enhanced Data for GSM Evolution – Βελτιωμένα Δεδομένα για την Εξέλιξη του GSM), τουλάχιστον στις τελευταίες φάσεις ανάπτυξης των τελευταίων.

Η επιτυχία του συστήματος GSM βασίζεται στην αποτελεσματική χρήση του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Το GSM χρησιμοποιεί σχήματα Πολύπλεξης Διαίρεσης Συχνότητας (Frequency Division Multiplexing – FDM) και σχήματα Πολύπλεξης Διαίρεσης Χρόνου (Time Division Multiplexing – TDM) ώστε να επιτυγχάνει την ταυτόχρονη πραγματοποίηση πολλαπλών ζεύξεων επικοινωνιών. Η διαθέσιμη ζώνη συχνοτήτων διαιρείται σε κανάλια που αποδίδονται στους πομποδέκτες (Transceiver – TRXs) που είναι εγκατεστημένοι στους Σταθμούς Βάσης (Base Station – BS) του κυψελωτού δικτύου. Το πρόβλημα απόδοσης καναλιών στους πομποδέκτες είναι ευρύτερα γνωστό υπό διάφορες ονομασίες, συγκεκριμένα ως πρόβλημα Αυτόματης Απόδοσης Συχνοτήτων (Automatic Frequency Planning – AFP), Πρόβλημα Κατανομής Συχνοτήτων (Frequency Assignment Problem – FAP) ή και ως Πρόβλημα Απόδοσης Καναλιών (Channel Assignment Problem – CAP).

Ένας πάροχος τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών GSM μισθώνει μακροχρόνια μια φασματική ζώνη έχοντας έτσι ένα διαθέσιμο πλήθος καναλιών που πρέπει να είναι σε θέση να ικανοποιήσουν τη ζήτηση από χιλιάδες χρήστες. Για να επιτευχθεί η αποτελεσματική χρήση του διαθέσιμου ηλεκτρομαγνητικού φάσματος είναι αναγκαία η αναχρησιμοποίηση συχνότητας. Η επιτυχία της αναχρησιμοποίησης συχνότητας περιορίζεται λόγω πρόκλησης παρεμβολών που μειώνουν την Ποιότητα της Παρεχόμενης Υπηρεσίας (Quality of service – QoS) ορισμένων συνδρομητών σε μη ανεκτά επίπεδα. Επομένως, η αυτόματη αναχρησιμοποίηση συχνοτήτων σε πραγματικά δίκτυα GSM αποτελεί σημαντικό στόχο για τους παρόχους GSM δικτύων. Η σημασία των σχετικών μεθόδων δεν αφορά μόνο την αρχική ανάπτυξη του δικτύου αλλά, επίσης, και τις διαδοχικές επεκτάσεις ή/και αλλαγές (φασματικές και άλλες) του δικτύου. Οι αλλαγές αυτές μπορεί να είναι απαραίτητες είτε για την αντιμετώπιση απρόβλεπτων περιπτώσεων παρεμβολών, είτε για την αντιμετώπιση απρόβλεπτων περιστάσεων (π.χ. μία μη προβλεπόμενη αύξηση στη ζήτηση σε ορισμένες περιοχές του δικτύου). Επιπλέον, έχουν προταθεί αρκετές τεχνικές μείωσης παρεμβολών (π.χ. τεχνικές μεταπήδησης συχνότητας ή δυναμικού ελέγχου ισχύος) έχουν προταθεί για να αυξήσουν τη χωρητικότητα συγκεκριμένου δικτύου που χρησιμοποιεί δεδομένη ζώνη συχνοτήτων. Οι συγκεκριμένες τεχνικές χρησιμοποιούνται από τα ασύρματα κυψελωτά δίκτυα με στόχο να αξιοποιούνται για τη λύση προβλημάτων FAP καθώς επιτρέπουν να

αυξάνονται τόσο η QoS των συνδρομητών όσο και τα έσοδα των φορέων εκμετάλλευσης.

Το FAP πρόβλημα αποτελεί γενίκευση των προβλημάτων χρωματισμού γράφων [1.3], και άρα αποτελεί ένα πρόβλημα με δυσκολία μη – πολυωνυμικού χρόνου (Non Deterministic Polynomial Time – hard, NP – hard) πρόβλημα [1.4]. Ως εκ τούτου, η προσπάθεια εύρεσης ακριβών λύσεων σε πρακτικά προβλήματα FAP δεν αποτελεί αποτελεσματική επιλογή και οδηγεί στην αναζήτηση εναλλακτικών λύσεων. Στη σχετική βιβλιογραφία έχουν ήδη προταθεί διάφορες μέθοδοι, μεταξύ των οποίων οι μεταευριστικοί (metaheuristic) αλγόριθμοι που έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματικοί. Οι αλγόριθμοι αυτού του τύπου είναι στοχαστικού χαρακτήρα και αντικαθιστούν τη βεβαιότητα εύρεσης βέλτιστων λύσεων με τη διασφάλιση υποβελτιστων (sub-optimal) λύσεων σε πρακτικά αποδεκτό χρόνο. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τα εργαλεία βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούνται στην πράξη, καθώς είναι επιθυμητή η ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης εφαρμογής σχημάτων απόδοσης συχνοτήτων (καναλιών) από τους παρόχους κινητών υπηρεσιών.

Η συνεχής αύξηση της ζήτησης παραδοσιακών υπηρεσιών φωνής η διαρκώς μεγαλύτερη σημασία της κάλυψης των αναγκών των χρηστών λαμβάνοντας υπόψη τις προδιαγραφές QoS αλλά και η εισαγωγή νέων υπηρεσιών με αυξημένες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης δημιουργούν νέες προκλήσεις για τους παρόχους κινητών υπηρεσιών. Οι πάροχοι καλούνται να αναπτύξουν και να εφαρμόσουν κατάλληλες τεχνικές διαχείρισης ραδιοπόρων (Radio Resource Management – RRM) με στόχο να επιτύχουν την αποτελεσματική χρήση τους. Η πολιτική απόδοσης καναλιών αποτελεί ιδιαίτερα σημαντική τεχνική RRM μέσω της οποίας αξιοποιείται η χωρητικότητα των συστημάτων κινητών επικοινωνιών.

Οι αλγόριθμοι απόδοσης συχνοτήτων (καναλιών) αναλαμβάνουν την απόδοση και διαχείριση των διαθέσιμων καναλιών σε χρήστες και υπηρεσίες λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς QoS. Δύο συνήθεις μέθοδοι απόδοσης καναλιών είναι η σταθερή απόδοση καναλιών (Fixed Channel Allocation – FCA) και η δυναμική απόδοση καναλιών (Dynamic Channel Allocation – DCA). Τα σύγχρονα κυψελωτά δίκτυα χρησιμοποιούν την τεχνική FCA, σύμφωνα με την οποία τα διαθέσιμα κανάλια διαχωρίζονται σε ομάδες καναλιών ισάριθμες προς το πλήθος των κυψελών που απαρτίζουν μία συστάδα (cluster). Οι ομάδες καναλιών αυτές αποδίδονται σε κάθε

κυψέλη μόνιμα. Για να αντιμετωπισθεί η αναποτελεσματικότητα των σχημάτων FCA σε περιπτώσεις μεγάλης χωρικής διακύμανσης της τηλεπικοινωνιακής κίνησης, τα σχήματα DCA δεν αποδίδουν μόνιμα τα κανάλια σε κάποια κυψέλη, αλλά τα αποδίδουν δυναμικά, όταν νέες κλήσεις εισέρχονται στο σύστημα.

Οι αλγόριθμοι DCA διαχωρίζονται περαιτέρω σε σχήματα DCA προσαρμοζόμενα στην τηλεπικοινωνιακή κίνηση (Traffic Adaptation–DCA, TA–DCA) ή σε σχήματα DCA προσαρμοζόμενα στις παρεμβολές (Interference Adaptation–DCA, IA–DCA). Οι TA–DCA μηχανισμοί προσαρμόζονται στις διακυμάνσεις της τηλεπικοινωνιακής κίνησης, χαρακτηριστικό που τους επιτρέπει να αντιμετωπίζουν περιπτώσεις όπου σε συγκεκριμένες κυψέλες παρουσιάζεται απρόβλεπτη και μεγάλη αύξηση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Από την άλλη πλευρά, οι IA–DCA αλγόριθμοι χρησιμοποιούν μετρήσεις παρεμβολών πραγματικού χρόνου στην προσπάθεια να αποδώσουν σε μία νεοεισερχόμενη στο σύστημα κλήση το καταλληλότερο από πλευράς παρεμβολών διαθέσιμο κανάλι [1.5]. Τα IA–DCA σχήματα επιτυγχάνουν καλύτερες συστημικές επιδόσεις σε σύγκριση με τα σχήματα TA–DCA [1.6]. Πάντως, καιίτοι τα DCA σχήματα επιτυγχάνουν καλύτερες επιδόσεις σε σύγκριση με τα FCA [1.7], η χρήση τους χαρακτηρίζεται από αυξημένο υπολογιστικό κόστος και δυσκολίες εφαρμογής.

## **1.2. Εφαρμογές της Ασύρματης Ευρυζωνικότητας**

Το Internet έχει φθάσει να έχει περισσότερους από 1.5 δις χρήστες παγκοσμίως. Η αύξηση αυτή έχει οδηγήσει σε αντίστοιχη αύξηση της ζήτησης για διαδικτυακές υπηρεσίες υψηλών ταχυτήτων, με αποτέλεσμα την ανάγκη διεύρυνσης της ευρυζωνικότητας. Η γνωστότερη σήμερα τεχνολογία που αφορά τα δίκτυα ευρείας ζώνης είναι η τεχνολογία ψηφιακής συνδρομητικής γραμμής (Digital Subscriber Line – DSL) που παρέχει στους χρήστες ενσύρματη πρόσβαση στο Internet με υψηλές ταχύτητες χρησιμοποιώντας τις παραδοσιακές τηλεφωνικές γραμμές [1.8]. Σύμφωνα με έρευνες ο αριθμός συνδρομητών ευρείας ζώνης το 2014 ανερχόταν παγκοσμίως, σε περισσότερους από 2.5 δις συνδρομητές, καθιστώντας σαφή την ανάγκη ασυρμάτων λύσεων που θα προσφέρουν εναλλακτικές ευρυζωνικές δυνατότητες.

Αναμφίβολα, η ευρεία υλοποίηση ασύρματων ευρυζωνικών δικτύων θα οδηγήσει στην ανάπτυξη νέων δυνατοτήτων καθώς, επίσης, και στην εξέλιξη των ήδη υπαρχουσών.

Διακρίνονται δύο βασικές κατηγορίες ασυρμάτων ευρυζωνικών υπηρεσιών. Η πρώτη αποσκοπεί στην παροχή υπηρεσιών αντιστοίχων με αυτές των ενσύρματων ευρυζωνικών δικτύων, είναι γνωστή ως Σταθερή Ασύρματη Ευρυζωνικότητα (Fixed Wireless Broadband) και θεωρείται εναλλακτική της τεχνολογίας DSL. Η δεύτερη κατηγορία ευρυζωνικών υπηρεσιών, γνωστή ως Κινητή Ευρυζωνικότητα (Mobile Broadband), προσφέρει πρόσθετες δυνατότητες, όπως είναι η φορητότητα (portability), η δυνατότητα πρόσβασης στο Internet από διαφορετικές γεωγραφικές θέσεις μέσω διαφορετικών σταθμών βάσης (νομαδικότητα – nomadicity) και η κινητικότητα (mobility).

Η ασύρματη ευρυζωνικότητα εμφανίζει αλματώδη εξέλιξη τα τελευταία χρόνια και αρχίζει πλέον να είναι ανταγωνιστική των ενσύρματων ευρυζωνικών υπηρεσιών. Αυτό οφείλεται, αφενός, στο σημαντικό κόστος της εγκατάστασης δικτύων οπτικών ινών (fiber optic) και, αφετέρου, στη διατύπωση και υιοθέτηση κοινών προτύπων στη βιομηχανία παροχής ασύρματων ευρυζωνικών προϊόντων και υπηρεσιών. Σε αντίθεση προς τα ενσύρματα δίκτυα, τα ασύρματα προσφέρουν αυξημένη λειτουργικότητα που, κατά κύριο λόγο, αποδίδεται, στη μεγάλη μείωση του κόστους εγκατάστασης, αφού δεν απαιτείται σχεδόν καθόλου καλωδίωση. Τα θετικά χαρακτηριστικά που διαθέτουν τα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών προσφέρουν τη δυνατότητα ανάπτυξης δικτύων επικοινωνιών σε εκτεταμένες γεωγραφικές περιοχές με δυσμενή γεωγραφικά χαρακτηριστικά ή/και με μικρή πυκνότητα πληθυσμού. Επιπλέον, λόγω του χαμηλού κόστους εγκατάστασής τους, τα ασύρματα δίκτυα μπορούν με χαμηλό κόστος να εξυπηρετήσουν περιοχές με αραιή πυκνότητα πληθυσμού, για τις οποίες το κόστος εγκατάστασης ενσύρματων συστημάτων θα ήταν απαγορευτικό σε σχέση με τα αναμενόμενα οφέλη. Το γεγονός αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει σε αποκλεισμό αυτών των περιοχών από την παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών.

Επίσης, τα ασύρματα συστήματα δεν έχουν ανάγκη καλωδίωσης και προτιμώνται για το λόγο αυτό σε περιοχές όπου αυτή δεν είναι επιτρεπτή ή οικονομικά συμφέρουσα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα διατηρητέα κτίρια όπου οι εργασίες για την εγκατάσταση καλωδίωσης θα αλλοίωναν τα ιστορικά χαρακτηριστικά τους. Τέλος, ένα ακόμα πλεονέκτημα των ασύρματων συστημάτων αποτελεί η δυνατότητα ανάπτυξης προσωρινών (temporary) δικτύων επικοινωνιών, σε περιπτώσεις όπου προκύπτει η

ανάγκη για εγκατάσταση δικτύων επικοινωνιών που πρέπει να καλύψουν τις ανάγκες μιας ομάδας χρηστών για περιορισμένο χρονικό διάστημα.

Παγκοσμίως, οι εταιρείες κινητής τηλεφωνίας αναβαθμίζουν τα δίκτυά τους με στόχο τη δυνατότητα υποστήριξης τεχνολογίας 4<sup>ης</sup> γενεάς (4G) και κατ' επέκταση παροχής ευρυζωνικών υπηρεσιών στους συνδρομητές τους. Οι εταιρείες που χρησιμοποιούσαν το σύστημα GSM ενσωμάτωσαν τις τεχνολογίες UMTS και Υψηλής Ταχύτητας Πρόσβασης για Πακέτα Κάτω Ζεύξης (High Speed Downlink Packet Access – HSDPA) και πλέον ενσωματώνουν την τεχνολογία Μακροχρόνιας Εξέλιξης (Long Term Evolution - LTE). Αντίστοιχα, οι εταιρείες που χρησιμοποιούσαν την τεχνολογία CDMA ενσωμάτωσαν την 1x Evolution Data Optimized – 1x EV-DO. Σε διάφορες περιοχές της Ασίας, αρκετές εταιρείες προτιμούν την τεχνολογία χρονικής πολυπλεξής σύγχρονου CDMA (Time Division Synchronous CDMA, TD-SCDMA). Όλες οι προαναφερθείσες τεχνολογίες παρέχουν τη δυνατότητα υποστήριξης ταχυτήτων της τάξης αρκετών Mbps. Καθίσταται, λοιπόν, αναγκαία η συνεχής ανάπτυξη της παροχής ευρυζωνικών υπηρεσιών στους κινητούς χρήστες.

### **1.3. Το Ψηφιακό Μέρισμα**

Η ψηφιακή μετάβαση – δηλαδή η μετάβαση από την αναλογική στην ψηφιακή τηλεόραση – προσφέρει μία σημαντική ευκαιρία για την επανεξέταση της συνολικής χρήσης της ζώνης Υπερυψηλών Συχνοτήτων (Ultra High Frequency – UHF) του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος στα 470 – 862MHz. Η συγκεκριμένη ζώνη έχει αποδοθεί στην Ευρώπη για την εκπομπή επίγειας αναλογικής τηλεόρασης. Καθώς η ψηφιακή τεχνολογία επιτρέπει οι υπάρχουσες υπηρεσίες ευρυεκπομπής να εξυπηρετούνται αξιοποιώντας λιγότερο φάσμα, προσφέρεται η δυνατότητα χρήσης μέρους του UHF φάσματος για άλλες εφαρμογές. Το εξοικονομούμενο φάσμα είναι ευρύτερα γνωστό ως Ψηφιακό Μέρισμα (Digital Dividend) και αποκαλείται έτσι λόγω των οφελών που αναμένεται να προσφέρει στην κοινωνία είτε υπό τη μορφή της άμεσης οικονομικής εκμετάλλευσης είτε υπό τη μορφή εμμέσων οφελών συνδεδεμένων με την παροχή νέων υπηρεσιών σε αυτό το φάσμα [1.9].

Η ύπαρξη Ψηφιακού Μερισματος οφείλεται στη μείωση του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που απαιτείται για την επίγεια τηλεοπτική ευρυεκπομπή όταν αυτή

πραγματοποιείται με χρήση ψηφιακής τεχνολογίας [1.10]. Η μείωση αυτή οφείλεται στη δυνατότητα της ψηφιακής τεχνολογίας να εξυπηρετεί αισθητά μεγαλύτερο πλήθος τηλεοπτικών προγραμμάτων σε δεδομένο εύρος ζώνης σε σύγκριση με την αναλογική τεχνολογία. Σε αντίθεση με την αναλογική τεχνολογία, που απαιτεί εύρος ζώνης 8MHz για τη μετάδοση ενός τηλεοπτικού προγράμματος, περισσότερα τηλεοπτικά προγράμματα μπορούν να μεταδοθούν στο ίδιο εύρος αξιοποιώντας τη δυνατότητα πολύπλεξης που προσφέρει η ψηφιακή μετάδοση. Ένας πολυπλέκτης επίγειας τηλεόρασης μπορεί να περιλαμβάνει τέσσερα ή και περισσότερα κανάλια κανονικής ευκρίνειας (standard definition) ή ένα ή δύο κανάλια υψηλής ευκρίνειας (High Definition – HD). Ως εκ τούτου, χρησιμοποιώντας την ψηφιακή τεχνολογία για κάθε πομπό είναι απαραίτητο μικρότερο εύρος ζώνης για τη μετάδοση συγκεκριμένου πλήθους τηλεοπτικών καναλιών σε σύγκριση με τη χρήση αναλογικής τεχνολογίας.

Πέραν της εξοικονόμησης φάσματος, η ψηφιακή τεχνολογία μπορεί επίσης να αντιμετωπίσει υψηλότερα επίπεδα παρεμβολής σε σχέση με την αναλογική. Αυτό σημαίνει ότι είναι δυνατός ο μικρότερος γεωγραφικός διαχωρισμός ανάμεσα στις θέσεις εκπομπής που χρησιμοποιούν τα ίδια κανάλια. Είναι, επίσης, δυνατή η χρήση της ίδιας φέρουσας συχνότητας εκπομπής σε περισσότερες από μία θέσεις εντός δεδομένης περιοχής (τυπικά ακτίνας μέχρι 100km). Αυτοί οι παράγοντες συμβάλλουν στην περαιτέρω εξοικονόμηση του απαραίτητου φάσματος λόγω μετάδοσης υπηρεσιών τηλεόρασης σε ψηφιακή μορφή.

Κατά τα τελευταία οκτώ χρόνια το ενδιαφέρον για χρήση του Ψηφιακού Μερισματος προς υποστηρίξη διαφόρων τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών, κυρίως για κινητές ευρυζωνικές υπηρεσίες, έχει αυξηθεί σημαντικά. Η Ε.Ε. καταβάλλει ιδιαίτερη προσπάθεια για την εναρμόνιση των πολιτικών που υιοθετούν οι διάφορες ευρωπαϊκές χώρες ως προς το Ψηφιακό Μέρισμα με στόχο να αναπτυχθεί μία πανευρωπαϊκή αγορά που θα επιτρέψει την ελαχιστοποίηση του κόστους για την παροχή των σχετικών υπηρεσιών. Η πρόταση της Ε.Ε. για την εναρμόνιση της πολιτικής μεταξύ των κρατών – μελών αφορά την εκκαθάριση του τμήματος του φάσματος 790–862MHz και την απόδοσή του για τις ανάγκες του Ψηφιακού Μερισματος. Παράλληλα, προς το παρόν διερευνάται η απόδοση μεγαλύτερου τμήματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος για τις ανάγκες του Ψηφιακού Μερισματος και να αποδοθεί προς χρήση από άλλες υπηρεσίες.

Μεγάλο πλήθος μελετών έχουν παρουσιασθεί τα τελευταία χρόνια τόσο στη Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunications Union – ITU) όσο και σε διεθνές ερευνητικό επίπεδο, οι οποίες επιχειρούν να μεγιστοποιήσουν τα αναμενόμενα οφέλη από την αποτελεσματική χρήση του Ψηφιακού Μέρους. Στην Παγκόσμια Διάσκεψη Ραδιοεπικοινωνιών της ITU του 2007 (ITU World Radio Conference, WRC–07) αποφασίσθηκε η απόδοση της ζώνης 790–862MHz σε κινητές υπηρεσίες στην Ευρώπη και στην Αφρική μέχρι το 2015 το αργότερο. Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, η Ευρωπαϊκή Διάσκεψη Ταχυδρομείων και Τηλεπικοινωνιών (European Conference of Postal and Telecommunication Administrations – CEPT) αναπτύσσει λεπτομερή σχεδιασμό για να διευκολύνει την εισαγωγή κινητών υπηρεσιών στη φασματική ζώνη 790-862MHz. Η προσπάθεια της CEPT αφορά τεχνικές προϋποθέσεις για τις κινητές υπηρεσίες, διευθετήσεις καναλιών και θέματα διεθνών (διασυνοριακών) συντονισμών. Η πρόταση της CEPT για το διαχωρισμό των καναλιών εμφανίζεται στο Σχήμα 1.1.

791-796	796-801	801-806	806-811	811-816	816-821	821 - 832	832-837	837-842	842-847	847-852	852-857	857-862
<b>Downlink</b>						<b>Duplex gap</b>	<b>Uplink</b>					
30 MHz (6 blocks of 5 MHz)						11 MHz	30 MHz (6 blocks of 5 MHz)					

Σχήμα 1.1. Διαχωρισμός καναλιών στο φάσμα 790–862MHz, σύμφωνα με την πρόταση της CEPT.

Σύμφωνα με τη CEPT, το Ψηφιακό Μέρος διαχωρίζεται σε 6 μπλοκ των 5MHz τόσο στην κατερχόμενη ζεύξη (downlink) όσο και στην ανερχόμενη ζεύξη (uplink). Για το διαχωρισμό των δύο ζεύξεων η CEPT προτείνει την ύπαρξη ενός διπλού διακένου (duplex gap) των 11MHz, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1.1. Πριν από τις αποφάσεις της WRC–07 ζητήθηκε από τη CEPT να εξετάσει τη δυνατότητα απόδοσης ενός τμήματος του φάσματος για αμφίδρομες κινητές επικοινωνίες με σκοπό την περαιτέρω ανάπτυξη υπηρεσιών κινητών επικοινωνιών στην Ε.Ε. Ο διεθνής συντονισμός σε θέματα ηλεκτρομαγνητικού φάσματος αποτελεί σημαντικό ζήτημα στην προσπάθεια να διασφαλισθεί η ευρεία ανάπτυξη κινητών τελεματικών χαμηλού κόστους, καθώς το κόστος αυτό αποτελεί ένα σημαντικό κριτήριο για την επίτευξη οικονομικών κλίμακας.

Η CEPT αναφέρει ότι η προτεινόμενη υποζώνη συχνοτήτων για να υπάρξει ένα εναρμονισμένο Ψηφιακό Μέρος αποτελεί το ανώτερο μέρος της ζώνης UHF, και συγκεκριμένα τα κανάλια 61 έως και 69 (790 – 862MHz). Σε όλη την Ευρώπη,



βρίσκονται σε εξέλιξη σχέδια για τη μετάβαση της αναλογικής ευρυεκπομπής τηλεόρασης και ραδιοφώνου σε ψηφιακή μετάδοση. Καθώς η ημερομηνία για την πλήρη υιοθέτηση της Επόμειας Ψηφιακής Τηλεόρασης (Digital Terrestrial Television – DTT) πλησιάζει, σε αυτά τα σχέδια περιλαμβάνεται η μετάβαση των εναπομεινουσών αναλογικών ευρυεκπομπών σε ψηφιακή ευρυεκπομπή. Μετά την ψηφιακή μετάβαση, τμήμα του φάσματος που σήμερα χρησιμοποιείται εξ ολοκλήρου για αναλογική ευρυεκπομπή – θα καταστεί διαθέσιμο για εξυπηρέτηση πρόσθετων υπηρεσιών. Ο τρόπος με τον οποίο αυτό το φάσμα θα αξιοποιηθεί αποτελεί αντικείμενο οικονομοτεχνικών μελετών τόσο σε εθνικό όσο και σε ευρωπαϊκό επίπεδο. Πρέπει να σημειωθεί ότι η ευρυεκπομπή αποτελεί ιδιαίτερα σημαντική οικονομική δραστηριότητα στην Ευρώπη, με τεράστιο ετήσιο κύκλο εργασιών. Οι επιπτώσεις ενδεχόμενων αλλαγών στη διαχείριση του UHF φάσματος αναμένεται να επηρεάσουν δραστικά, όχι μόνο τον τομέα των υπηρεσιών ευρυεκπομπής, αλλά και συνολικά την κοινωνία. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι και η ζώνη των 700MHz (700 – 790MHz) έχει αποδοθεί σε κινητές υπηρεσίες, απόδοση που αναμένεται να ολοκληρωθεί μέσα στα επόμενα έτη.

#### **1.4. Η απόδοση του UHF φάσματος**

Το φάσμα των UHF που είχε αρχικά διατεθεί για την παροχή υπηρεσιών ευρυεκπομπής, εκτείνεται από τα 470 έως τα 862MHz - είναι κατάλληλο για ευρυεκπομπή αφού προσφέρει μεγάλη εμβέλεια και διείσδυση στο εσωτερικό κτιριακών κατασκευών. Καθώς η φασματική αυτή ζώνη είναι σχετικά περιορισμένη, είχε αποδοθεί σε περιορισμένο πλήθος καναλιών προς χρήση είτε από τους δημόσιους φορείς ευρυεκπομπής (Public Service Broadcasters – PSBs) ή από τα εμπορικά τηλεοπτικά δίκτυα. Η απόδοση καναλιών από την κατά περίπτωση αρμόδια αρχή έγινε στη βάση του κανόνα «πρώτης άφιξης – πρώτης εξυπηρέτησης». Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι πάροχοι όφειλαν να αποδίδουν κάποιο τέλος χρήσης του φάσματος χωρίς να είναι δυνατή η δημοπράτηση του φάσματος ή η δυνατότητα απόδοσης του φάσματος αυτού σε άλλες υπηρεσίες.

Η χρήση του UHF φάσματος από τους παρόχους υπηρεσιών ευρυεκπομπής συνεχίστηκε, ενώ παράλληλα άρχισε η ανάπτυξη καλωδιακών τηλεοπτικών δικτύων και δορυφορικών υπηρεσιών απευθείας ευρυεκπομπής. Η μεγάλη αύξηση στον αριθμό των τηλεοπτικών καναλιών οδήγησε στην αύξηση των πιθανών ενδιαφερομένων για το

συγκεκριμένο τμήμα του φάσματος. Εκτός αυτού, όμως, τα χαρακτηριστικά που καθιστούν αυτό το φάσμα κατάλληλο για υπηρεσίες ευρυεκπομπής το καθιστούν εξίσου κατάλληλο για άλλες τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές. Προέκυψε, λοιπόν, σημαντικό πεδίο ανταγωνισμού για το συγκεκριμένο τμήμα του φάσματος.

Κατά τη δημόσια συζήτηση σχετικά με τη χρήση του απελευθερωθέντος φάσματος, έχει εμφανισθεί η άποψη τεχνοοικονομικών παραγόντων υπέρ της προσέγγισης που βασίζεται στους κανόνες λειτουργίας της αγοράς. Η συγκεκριμένη άποψη υποστηρίζει ότι για να επιτευχθεί η αποτελεσματική χρήση του φάσματος είναι απαραίτητο να επιτραπεί σε όλους τους πιθανούς εκμισθωτές του να προτείνουν τις εφαρμογές τους, και οι διάφορες φασματικές ζώνες να αποδοθούν σε αυτούς που θα επιτύχουν τη μεγαλύτερη αξία χρήσης του. Η συγκεκριμένη προσέγγιση αφορά όλους τους εκμισθωτές αυτού του φάσματος, τόσο τους υπάρχοντες όσο και άλλους που επιθυμούν να χρησιμοποιήσουν αυτό το φάσμα.

Για να επιτραπεί στην αγορά να έχει αποφασιστικό ρόλο στον καθορισμό του τρόπου χρήσης του φάσματος απαιτείται η εισαγωγή κατάλληλων μηχανισμών. Στην κατεύθυνση αυτή υπάρχουν τέσσερις βασικοί τύποι διαδικασιών διαθέσιμων στους συμμετέχοντες στις δημοπρασίες:

- αλλαγή χρήσης (επίσης γνωστή και ως ουδετερότητα υπηρεσιών) – η δυνατότητα διαφορετικών τύπων υπηρεσιών και τεχνολογιών να ανταγωνισθούν για το ίδιο φάσμα.
- δημοπράτηση φάσματος – ένα εργαλείο βασισμένο στην τιμολόγηση για τον προσδιορισμό της πρωτεύουσας εκχώρησης του φάσματος (και αναδιανομής του, εφόσον επιτραπεί η αλλαγή χρήσης του).
- εμπόριο φάσματος – ένα εργαλείο βασισμένο στην τιμολόγηση που προσφέρει τη δυνατότητα επαναδιαμόρφωσης του καθεστώτος χρήσης του φάσματος στη δευτερογενή αγορά.
- διοικητική τιμολόγηση παροχής κινήτρων (Administrative Incentive Pricing – AIP) – ένα διοικητικό εργαλείο για την αποτελεσματική χρήση του φάσματος μέσω της επιβολής τελών στους συμμετέχοντες στις δημοπρασίες.

Πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχει σημαντική διαφορά ανάμεσα στην αλλαγή χρήσης, από τη μία πλευρά, και σε δημοπράτηση φάσματος, εμπόριο φάσματος και AIP, από

την άλλη. Η αλλαγή χρήσης δεν είναι ένας μηχανισμός αγοράς αλλά περισσότερο αποτελεί πολιτική απόφαση η οποία αφορά τον τύπο χρηστών στους οποίους επιτρέπεται να χρησιμοποιούν συγκεκριμένη φασματική ζώνη. Επίσης, διαμορφώνει το πλαίσιο μέσα στο οποίο οι άλλοι τρεις μηχανισμοί αγοράς λειτουργούν. Η δημοπράτηση φάσματος, το εμπόριο φάσματος και η ΑΙΡ αποτελούν μηχανισμούς για τη διευκόλυνση απόδοσης του φάσματος στις χρήσεις που θα παραγάγουν τη μεγαλύτερη αξία και/ή για τον εξαναγκασμό των αναποτελεσματικών χρηστών να εγκαταλείψουν τη χρήση του φάσματος. Στη συνέχεια, εξηγούνται οι μηχανισμοί αυτοί.

### **1.5. Αλλαγή χρήσης**

Ως Αλλαγή Χρήσης (ή ουδετερότητα υπηρεσιών, όπως είναι επίσης γνωστή) νοείται η δυνατότητα των κατόχων δικαιωμάτων χρήσης του φάσματος να αλλάξουν υπηρεσία ή/και τεχνολογία. Το συγκεκριμένο εργαλείο είναι σαφώς το περισσότερο ριζοσπαστικό στοιχείο της ατζέντας αναμόρφωσης της αγοράς. Στο πλαίσιο της πολιτικής ουδετερότητας υπηρεσιών και τεχνολογιών προσφέρεται η δυνατότητα ανάπτυξης οποιουδήποτε τύπου υπηρεσίας ή τεχνολογίας σε οποιαδήποτε φασματική ζώνη όπου επιτρέπεται η συγκεκριμένη αλλαγή χρήσης. Πρακτικά, ο τρόπος χρήσης του φάσματος περιορίζεται από τα χαρακτηριστικά μετάδοσης συγκεκριμένων φασματικών ζωνών και του τρόπου καθορισμού των δικαιωμάτων χρήσης με βάση την ανάγκη προστασίας από παρεμβολές.

Η αλλαγή χρήσης μπορεί να εφαρμοσθεί τόσο σε δικαιώματα χρήσης που απονέμονται για πρώτη φορά όσο και σε υπάρχοντα δικαιώματα, καίτοι η τελευταία περίπτωση είναι περισσότερο περιπλεγμένη καθώς απαιτούνται αλλαγές στις αρχικές άδειες χρήσης. Η παροχή άδειας σε διαφορετικές χρήσεις και χρήστες επηρεάζει σημαντικά τις επιπτώσεις των μηχανισμών δημοπράτησης φάσματος, εμπορίου φάσματος και ΑΙΡ. Για παράδειγμα, όσον αφορά τις δημοπρασίες, επιτρέπει τον ορισμό δικαιωμάτων χρήσης και κανόνων προσφοράς οι οποίοι μπορούν να επιτρέψουν σε διαφορετικές υπηρεσίες και τεχνολογίες να ανταγωνισθούν με ίσους όρους. Ως προς το εργαλείο του Εμπορίου, επιτρέπει την εισαγωγή νέων υπηρεσιών σε ορισμένες φασματικές ζώνες. Αυτό μπορεί να οδηγήσει στην αλλαγή του περιβάλλοντος παρεμβολών. Τέλος, όσον αφορά την ΑΙΡ, η αλλαγή χρήσης αυξάνει την εμβέλεια των διαφορετικών χρήσεων, χαρακτηριστικό το οποίο μπορεί να επιδράσει στο κόστος

ευκαιρίας που αφορά τη χρήση της ζώνης αυτής από τους χρήστες και άρα και στο αντίστοιχο επίπεδο τιμών.

## 1.6. Δημοπράτηση φάσματος

Δημοπράτηση φάσματος είναι η διαδικασία πώλησης συχνοτήτων μέσω της προσφοράς τους από την αρμόδια αρχή σε κάποια τιμή, αποδοχής προσφορών από τους υποψήφιους παρόχους, και, τέλος, πώλησής τους στον πλειοδότη. Συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται από τους διαχειριστές φάσματος για την πρωτεύουσα απόδοση των αδειών χρήσης φάσματος (ή ομάδων συχνοτήτων που μπορούν να συνδυασθούν για τη δημιουργία αδειών) σε ζώνες που δεν έχουν αποδοθεί μέχρι τότε ή έχουν ανακτηθεί από προηγούμενους χρήστες. Προσφάτως, οι δημοπρασίες έχουν αντικαταστήσει τους διοικητικούς μηχανισμούς - όπως είναι οι απευθείας αναθέσεις σε παρόχους ή οι διαγωνισμοί - ως επικρατούσα προσέγγιση στην Ευρώπη για την απόδοση φάσματος στις περιπτώσεις όπου υπάρχει σημαντική πιθανότητα για αυξημένη ζήτηση.

Οι δημοπρασίες προσφέρουν μία μέθοδο καθορισμού της τιμής πώλησης ενός αγαθού το οποίο έχει απροσδιόριστη ή ευμετάβλητη τιμή. Οι περισσότερες απονομές φάσματος σε πρωτεύουσες υπηρεσίες (π.χ. οι αποδόσεις φάσματος σε υπηρεσίες 3G) αφορούν περιορισμένο αριθμό αδειών για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα δέκα ετών ή λίγο περισσότερο. Σε αυτές τις περιπτώσεις, είναι αυξημένη η πιθανότητα να υπάρχει περιορισμένη πληροφόρηση για την αξία του φάσματος από προηγούμενες απονομές, γεγονός το οποίο καθιστά δύσκολο τον καθορισμό της τιμής ισορροπίας. Πρέπει, επίσης, να σημειωθεί ότι υπάρχουν είδη αδειών φάσματος (π.χ. δημιουργίας προγράμματος και ειδικών γεγονότων) τα οποία αποδίδουν μεγάλα έσοδα αλλά των οποίων η ζήτηση διαφοροποιείται με το χρόνο. Σε αυτές τις περιπτώσεις, είναι ευκολότερος ο καθορισμός τιμών ισορροπίας ενώ οι δημοπρασίες μπορούν να επιτρέψουν την εξομάλυνση της μεταβλητότητας στη ζήτηση.

Οι δημοπρασίες αποτελούν ένα πρόσφορο εργαλείο για τις αρμόδιες αρχές καθώς χρησιμοποιείται από την αναθέτουσα αρχή η τιμή για να προσδιορισθούν οι χρήστες για τους οποίους το φάσμα έχει τη μεγαλύτερη αξία, και άρα αυτοί που αναμένεται να προσφέρουν το υψηλότερο τιμήμα για την εκμετάλλευσή του. Ένα ακόμη στοιχείο που καθιστά τις δημοπρασίες πρόσφορο εργαλείο αποτελεί το ότι το αποτέλεσμα τους είναι απόλυτα καθαρό. Ακόμη, η διαδικασία είναι συνήθως ταχεία και εύκολο για τους

συμμετέχοντες να την παρακολουθήσουν και να συμμετάσχουν. Τέλος, αποφέρουν δημόσια έσοδα τα οποία αντανακλούν το κόστος ευκαιρίας της χρήσης ενός σπάνιου, δημόσιου πόρου.

Υπάρχει μεγάλη ποικιλία τύπων δημοπρασιών για την απόδοση ή μίσθωση φάσματος, όπως:

- Δημοπρασίες μιας φάσης με κλειστές προσφορές. Στις δημοπρασίες αυτές μέσω μιας άμεσης διαδικασίας αποδίδεται το φάσμα στον πλειοδότη.
- Ταυτόχρονες Δημοπρασίες Πολλαπλών Φάσεων (Simultaneous Multiple Round Auctions – SMRAs). Στις δημοπρασίες αυτές πολλαπλά τμήματα φάσματος πωλούνται ταυτόχρονα, ενώ οι τιμές τους αυξάνονται μέσω πολλαπλών φάσεων, μέχρι να καλυφθεί η ζήτηση.
- Συνδυαστικές Δημοπρασίες. Στις δημοπρασίες αυτές οι πλειοδότες μπορούν να καταθέτουν προτάσεις για πολλαπλά φασματικά τμήματα αντί να καταθέτουν ξεχωριστές προσφορές για κάθε τμήμα.

Η επιλογή της βέλτιστης μορφής δημοπρατήσης εξαρτάται από τον τύπο και το πλήθος των φασματικών τμημάτων που πρόκειται να δημοπρατηθούν καθώς και από τις πολιτικές προτεραιότητας που ακολουθεί ο διαχειριστής του φάσματος. Συνήθως, οι περισσότερες επιλογές αποδίδουν παραπλήσια αποτελέσματα. Είναι σημαντικό να διασφαλίζεται ένας εύρωστος σχεδιασμός, να διασφαλίζεται η ίση μεταχείριση ανάμεσα σε διαφορετικά είδη πλειοδοτών (π.χ. μεταξύ των υπαρχόντων και των υποψήφιων να εισέλθουν στην αγορά) και να ενθαρρύνονται όλοι οι ενδιαφερόμενοι να συμμετάσχουν. Εφόσον οι δημοπρασίες έχουν σχεδιασθεί ορθά, μπορεί να αποτελέσουν ένα ιδιαίτερα αποτελεσματικό εργαλείο για τον καθορισμό της τιμής διάθεσης του φάσματος. Πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχουν και οι ακόλουθοι κίνδυνοι:

- Ακόμη και αν ο σχεδιασμός της δημοπρασίας είναι καλός, πιθανά λάθη στον καθορισμό των υποκείμενων δικαιωμάτων χρήσης φάσματος μπορεί να προσφέρουν συγκριτικό πλεονέκτημα σε μία ομάδα διαγωνιζομένων σε σχέση με άλλες. Για παράδειγμα, στην περίπτωση κατά την οποία διαφορετικοί τύποι υπηρεσιών περιλαμβάνονται σε διαγωνισμό για το ίδιο φάσμα, ορισμένοι τύποι διαγωνιζομένων μπορεί να εκτίθενται σε μεγαλύτερη αβεβαιότητα όσον αφορά το περιβάλλον παρεμβολών μέσα στο οποίο θα λειτουργήσουν. Το γεγονός αυτό θα μπορούσε να

μειώσει την αποτίμηση του φάσματος και να μειώσει την απόδοση του τελικού αποτελέσματος καθώς μία πιθανώς μεγαλύτερης αξίας υπηρεσία δεν θα συμμετάσχει στη διαγωνιστική διαδικασία.

- Οι δημοπρασίες καθορίζουν την τρέχουσα τιμή διάθεσης του φάσματος. Αν, εντούτοις, προγραμματισθούν δημοπρασίες σε εποχή μεγάλης μεταβλητότητας της αγοράς (όπως συνέβη, π.χ. σε πολλές ευρωπαϊκές δημοπρασίες για την απόδοση υπηρεσιών 3G), είναι ενδεχόμενο εκ των υστέρων να διαπιστωθούν στρεβλώσεις.
- Η επιθυμία των διαγωνιζομένων να πληρώσουν μπορεί να μην αντανακλά την αξία που θα δημιουργηθεί από τη χρήση του φάσματος. Οι δημοπρασίες καθορίζουν τους νικητές καθαρά με βάση την επιθυμία τους να πληρώσουν. Όταν ένα μέρος της αξίας δεν μπορεί να μετατραπεί σε χρήμα το αποτέλεσμα μπορεί να μην είναι ικανοποιητικό για την αρμόδια αρχή σε όρους χρήματος.

Συμπερασματικά, οι δημοπρασίες αποτελούν χρήσιμο εργαλείο για την πρωτεύουσα απόδοση και, υπό φυσιολογικές συνθήκες, αποδίδουν καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τη χρήση διοικητικών εργαλείων. Εντούτοις, πρέπει να ληφθούν προσεκτικά υπόψη τόσο αυτή καθαυτή η διαδικασία όσο και τα προς μίσθωση δικαιώματα χρήσης. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στους τύπους χρήσης και στους χρήστες οι οποίοι αναμένεται να διαγωνισθούν για το φάσμα. Όσο μεγαλύτερη η ποικιλία αυτών τόσο μεγαλύτερη θα είναι η δυσκολία διαμόρφωσης ενιαίου πλαισίου στο οποίο όλοι οι πιθανοί ανταγωνιστές θα μπορούν να ανταγωνισθούν χωρίς κάποιος να έχει εκ των προτέρων πλεονέκτημα σε σχέση με τους ανταγωνιστές του. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ο διαχειριστής του φάσματος μπορεί να κληθεί να λάβει αποφάσεις για τον αποκλεισμό ορισμένων διαγωνιζομένων ή/και ορισμένων υπηρεσιών, με στόχο να αποφευχθεί η αβεβαιότητα σε σχέση με το περιβάλλον παρεμβολών ή για να προστατευθεί η κοινωνική αξία η οποία είναι συνυφασμένη με ορισμένες χρήσεις.

## **1.7. Εμπόριο φάσματος**

Υπό τον όρο εμπόριο φάσματος αναφέρεται η αλλαγή ιδιοκτησίας του φάσματος μέσω συναλλαγών στη δευτερεύουσα αγορά. Οι συνήθεις τύποι εμπορίου φάσματος είναι οι άμεσες πωλήσεις ή η μίσθωση (leasing). Το εμπόριο τέτοιου είδους εθνικών πόρων αποτελεί κοινό τόπο σε πολλούς τομείς της οικονομίας των χωρών – μελών της

Ε.Ε., αν και υπόκειται σε διαφορετικά επίπεδα ρύθμισης από τις διάφορες χώρες. Μία συνήθης αναλογία με το εμπόριο φάσματος αποτελεί η αγορά γης, όπου η ιδιωτική ιδιοκτησία είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη. Οι ιδιώτες κάτοχοι γης επιτρέπεται να αγοράζουν και να πωλούν γη.

Το de facto εμπόριο αδειών μέσω της πώλησης μητρικών ή θυγατρικών εταιρειών αποτελεί κοινή πρακτική για πολλά χρόνια. Στην πραγματικότητα, σε πολλές από τις δημοπρασίες 3G στην Ευρώπη, πολλές εταιρείες διαγωνίζονταν για τις άδειες αυτές μέσω θυγατρικών εταιρειών, με στόχο να διασφαλίσουν μελλοντική ευελιξία. Πέραν αυτού, ορισμένοι διαχειριστές φάσματος επέτρεπαν ένα άτυπο εμπόριο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η περίπτωση όπου δύο οργανισμοί εμφανίζονται στο διαχειριστή από κοινού (ο ένας επιστρέφοντας την άδεια και ο άλλος λαμβάνοντάς την). Στην περίπτωση αυτή, ο διαχειριστής δεν γνωρίζει κατά πόσον πραγματοποιήθηκε οικονομική συναλλαγή μεταξύ των οργανισμών αυτών.

Μετά τη θεσμοθέτηση της σχετικής οδηγίας – πλαισίου της Ευρωπαϊκής Επιτροπής το 2002, τα κράτη-μέλη της Ε.Ε. εισήγαγαν επίσημες διαδικασίες όσον αφορά το εμπόριο φάσματος. Στη συνέχεια, οι περισσότερες χώρες της Ε.Ε. έλαβαν μέτρα τα οποία επιτρέπουν την πλήρη μεταφορά σε νέους χρήστες των υπαρχουσών αδειών, μετά από έγκριση των ρυθμιστικών αρχών. Επίσης, ορισμένες χώρες επιτρέπουν την επαναδιαμόρφωση των αδειών, δηλαδή τη συνάθροιση ή το διαχωρισμό υπαρχουσών αδειών με βάση τη φασματική ζώνη, τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά ή το χρόνο πρόσβασης στο μέσο. Τυπικά, οι εμπορικές συναλλαγές υπόκεινται σε έγκριση από το διαχειριστή φάσματος, κυρίως σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν θέματα αθέμιτου ανταγωνισμού σε σχέση με την προτεινόμενη συναλλαγή. Σε ορισμένες φασματικές ζώνες, ορισμένες περιπτώσεις συναλλαγής μπορεί να γίνονται αυτόματα αποδεκτές.

Γενικά, οι εμπορικές συναλλαγές μπορεί να αποδειχθούν επωφελείς τόσο για τους χρήστες όσο και για την κοινωνία. Προσφέρουν ένα κίνητρο στους πωλητές να δώσουν το φάσμα σε αυτούς που εκτιμούν ότι μπορούν να το αξιοποιήσουν καλύτερα, γεγονός να μετατρέψει το φάσμα σε περιουσιακό στοιχείο που μπορεί να αποφέρει κέρδη. Πρέπει να σημειωθεί ότι καθώς σε κανένα μέρος δεν επιβάλλεται η πώληση φάσματος, εμπορικές συναλλαγές πραγματοποιούνται μόνον εφόσον οι αδειοδοτημένοι χρήστες επιθυμούν να πωλήσουν τα δικαιώματά τους. Επίσης, οι εμπορικές συναλλαγές έχουν μειώσει τις περιπτώσεις όπου οι διαχειριστές αναγκούν και επαναποδίδουν το

ηλεκτρομαγνητικό φάσμα στις περιπτώσεις όπου αυτό δεν χρησιμοποιείται αποτελεσματικά.

Οι περισσότερες ενστάσεις που αφορούν τις εμπορικές συναλλαγές στην πραγματικότητα αφορούν την ανησυχία των τρεχόντων χρηστών για ενδεχόμενη αλλαγή χρήσης. Οι εμπορικές συναλλαγές χωρίς αλλαγή χρήσης περιορίζονται σε συναλλαγές μεταξύ εταιρειών οι οποίες προσφέρουν παρόμοιες υπηρεσίες και χρησιμοποιούν παρόμοιες τεχνολογίες. Αυτό αναμένεται να μην έχει επιπτώσεις στο περιβάλλον παρεμβολών αλλά και να μην επηρεάσει την ποιότητα κάποιας υπηρεσίας. Αντιθέτως, εμπορικές συναλλαγές που επιτρέπουν την αλλαγή χρήσης μπορεί να έχουν σημαντικές επιπτώσεις. Η εισαγωγή νέων τεχνολογιών μπορεί να αλλάξει το περιβάλλον παρεμβολών μέσα στο οποίο δραστηριοποιούνται άλλες εταιρείες που δεν συμμετέχουν άμεσα στις εμπορικές συναλλαγές. Οι εμπορικές συναλλαγές, επίσης, μπορεί να οδηγήσουν σε χειροτέρευση της ποιότητας ορισμένων υπηρεσιών, γεγονός το οποίο μπορεί να είναι ανεπιθύμητο, όταν οι υπηρεσίες αυτές συνδέονται με σημαντικά κοινωνικά οφέλη.

Τέλος, επισημαίνεται ότι οι εμπορικές συναλλαγές χωρίς αλλαγή χρήσης αναμένεται να χρησιμοποιηθούν για το μεγαλύτερο μέρος του φάσματος. Οι μοναδικές εξαιρέσεις λογικά θα προέλθουν στις περιπτώσεις όπου το φάσμα θα αποδοθεί σε υπηρεσίες κοινής ωφέλειας, οι οποίες δεν μπορούν να εξυπηρετηθούν με διαφορετικό τρόπο. Αντιθέτως, οι εμπορικές συναλλαγές με αλλαγή χρήσης είναι αμφιλεγόμενες και απαιτείται ενδελεχής εξέταση τους σε πλήρεις ζώνες συχνοτήτων. Όπως και στην περίπτωση των δημοπρασιών, και στην περίπτωση θα υπάρξουν αυτή ζώνες συχνοτήτων όπου η αλλαγή χρήσης μπορεί να μην επιτρέπεται ή, τουλάχιστον πρέπει να περιορισθεί σημαντικά. Επιπλέον, σε όλες τις περιπτώσεις τα δικαιώματα χρήσης πρέπει να καθορίζονται με τρόπο ώστε να αποφεύγονται παρεμβολές σε τρέχοντες χρήστες.

## **1.8. Διοικητική τιμολόγηση παροχής κινήτρων**

Η Διοικητική Τιμολόγηση Παροχής Κινήτρων (Administrative Incentive Pricing) έχει προταθεί σε ορισμένες ευρωπαϊκές χώρες (π.χ. στην Αγγλία) για τους κατόχους αδειών στους οποίους το φάσμα είχε αποδοθεί δωρεάν με αντάλλαγμα την εκπλήρωση υποχρεώσεων δημόσιου ενδιαφέροντος. Αν η τιμή της AIP αντιπροσωπεύει το κόστος ευκαιρίας του φάσματος (δηλαδή την αξία που έχει για το μειοδότη), ο πλειοδότης θα



έχει κίνητρο για να απελευθερώσει ή να διαπραγματευθεί το τμήμα του φάσματος που ενδεχομένως υποχρησιμοποιεί.

Από ρυθμιστική σκοπιά, η AIP έχει σημαντικά πλεονεκτήματα. Η επιβολή τελών:

- παρέχει ισχυρά αντικίνητρα για την αναποτελεσματική κατοχή ηλεκτρομαγνητικού φάσματος
- αποφέρει τέλη χρήσης και αποδίδει σημαντικά έσοδα στις κυβερνήσεις
- δεν δημιουργεί την ανάγκη έκδοσης διοικητικών αποφάσεων για την ανάκτηση αδειών, καθώς δίδονται σημαντικά κίνητρα στους πλειοδότες για την επιστροφή ή την πώληση του υποχρησιμοποιούμενου φάσματος.

Πρέπει, βέβαια, να σημειωθεί ότι η AIP εμφανίζει ορισμένα γενικά προβλήματα. Καταρχήν, η τιμή του φάσματος πρέπει να καθορισθεί κεντρικά από τη διοίκηση. Καθώς οι αγορές φάσματος μπορεί να είναι μικρές ή ακόμη και ανύπαρχτες, είναι πιθανό να μην υπάρχουν διαθέσιμα εργαλεία αναφοράς (benchmarks) για τον καθορισμό της τιμής αγοράς του φάσματος. Πρέπει να σημειωθεί ότι έχουν εμφανισθεί πολλές μεθοδολογίες για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού, όπως, για παράδειγμα, η εκτίμηση της αξίας του υπό εξέταση φάσματος αν αυτό χρησιμοποιηθεί από άλλες υπηρεσίες, ή η εκτίμηση του κόστους μετακίνησης της υπάρχουσας υπηρεσίας σε εναλλακτική φασματική ζώνη. Εντούτοις, οι μεθοδολογίες αυτές χρησιμοποιούνται δύσκολα και χαρακτηρίζονται από μεγάλα περιθώρια σφάλματος. Εξάλλου, η αποτελεσματικότητα της AIP συχνά μειώνεται στην πράξη καθώς οι διαχειριστές θέτουν τα τέλη σε υψηλά επίπεδα, γεγονός που μπορεί να έχει αρνητική επίπτωση στη συνολική ζήτηση φάσματος.

Τέλος, το κατά πόσον το εργαλείο της AIP είναι απαραίτητο εφόσον υπάρχει αυτό του εμπορίου είναι συζητήσιμο. Γενικώς, η προσδοκία των πιθανών εσόδων από εμπορικές συναλλαγές αποδίδει εξίσου μεγάλο κίνητρο στους πλειοδότες με την AIP έτσι ώστε να πουλήσουν το υποχρησιμοποιούμενο φάσμα. Εκτός αυτού, η AIP δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην περίπτωση όπου έχουν ήδη πραγματοποιηθεί οι δημοπρασίες (τουλάχιστον για όσο διαρκεί η αρχική άδεια), καθώς οι πιθανοί πλειοδότες έχουν ήδη πληρώσει το κόστος ευκαιρίας του φάσματος.

Συμπερασματικά, η αποτελεσματικότητα της AIP φαίνεται περιορισμένη. Η AIP δεν είναι απαραίτητη αν πραγματοποιηθούν δημοπρασίες και, εφόσον υπάρχει πιθανότητα

συναλλαγών, δεν είναι απαραίτητη ακόμη και όταν δεν χρησιμοποιηθεί το εργαλείο της δημοπράτησης φάσματος.

### **1.9. Τηλεοπτικά κενά διαστήματα (TV White Spaces)**

Η ανάγκη για πρόσθετο φάσμα προς παροχή ασύρματων υπηρεσιών αυξάνεται συνεχώς. Η χρήση έξυπνων τηλεφώνων (smartphones) έχει εκτιναχθεί και καταδεικνύει ότι η κάλυψη της ζήτησης για ασύρματες ευρυζωνικές υπηρεσίες αποτελεί σημαντική πρόκληση. Ένα από τα βασικά ζητήματα που πρέπει να αντιμετωπισθούν αποτελεί η σπανιότητα του φάσματος προς κάλυψη των υπηρεσιών αυτών. Οι γνωστικές ραδιοεπικοινωνίες (Cognitive Radio – CR) αποτελούν μία πολλά υποσχόμενη νέα τεχνολογία για την καλύτερη αξιοποίηση του διαθέσιμου ραδιοφάσματος.

Τα τηλεοπτικά κενά διαστήματα (TV White Spaces – TVWS) αποτελούν τμήματα της τηλεοπτικής ζώνης που δεν χρησιμοποιείται από αδειοδοτημένες υπηρεσίες. Υπάρχουν πολλά τηλεοπτικά κανάλια στις ζώνες πολύ υψηλών συχνοτήτων (Very High Frequency – VHF) και υπερυψηλών συχνοτήτων (Ultra High Frequency – UHF), η χρησιμοποίηση των οποίων σε ορισμένες γεωγραφικές περιοχές δεν είναι ιδιαίτερα υψηλή. Ρυθμιστικοί οργανισμοί, όπως η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών (Federal Communication Commission – FCC) στις ΗΠΑ, αναπτύσσουν κανονισμούς για να επιτρέψουν σε ασύρματα δίκτυα να αποκτήσουν πρόσβαση στις αχρησιμοποίητες φασματικές ζώνες ενώ, παράλληλα, διασφαλίζουν ότι τα ασύρματα αυτά δίκτυα δεν θα προκαλούν επιβλαβείς παρεμβολές στις αδειοδοτημένες τηλεοπτικές υπηρεσίες [1.11].

Καθώς το φάσμα των TVWS, τόσο στην VHF όσο και στην UHF, βρίσκεται χαμηλότερα του 1GHz, αναμένεται να προσφέρει πολύ καλή διάδοση ραδιοσυχνοτήτων (Radio Frequency – RF) σε σχέση με τα ασύρματα συστήματα που έχουν ήδη αναπτυχθεί στις ζώνες Βιομηχανικών, Επιστημονικών και Ιατρικών (Industrial Scientific and Medical – ISM) εφαρμογών (13.553 έως 13.567 MHz, 26.957 έως 27.283 MHz, 40.660 έως 40.700 MHz, 2.400 έως 2.500 GHz, 5.725 έως 5.875 GHz και 24 έως 24.250 GHz). Αυτό θα επιτρέψει την περισσότερο αξιόπιστη, μικρότερου κόστους και μεγαλύτερης κάλυψης παροχή υπηρεσιών σε αγροτικές περιοχές όπως η έξυπνη μετακίνηση, διαχείριση εκτάκτων αναγκών και δημόσια ασφάλεια.

Η λειτουργία στα TVWS αφορά τις συσκευές που δεν προκαλούν επιβλαβείς παρεμβολές στις αδειοδοτημένες υπηρεσίες στις τηλεοπτικές μπάντες. Στις ζώνες TVWS προτείνεται να χρησιμοποιηθεί η CR τεχνολογία για να διασφαλίσει ότι οι TVWS συσκευές δεν προκαλούν επιβλαβείς παρεμβολές σε υπηρεσίες που δραστηριοποιούνται στα ήδη κατειλημμένα αδειοδοτημένα τηλεοπτικά κανάλια. Υπάρχει μεγάλη ποικιλία CR τεχνολογιών που διασφαλίζουν την προστασία αδειοδοτημένων υπηρεσιών. Η πρώτη CR τεχνολογία αξιοποιεί συνδυασμό δύο τεχνολογιών: γεωεντοπισμού (geo – location) και διαχείρισης βάσης δεδομένων υπάρχοντων συστημάτων. Ως γεωεντοπισμός ορίζεται η δυνατότητα μιας συσκευής TVWS να γνωρίζει το γεωγραφικό της μήκος και πλάτος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα μίας τεχνολογίας εντοπισμού αποτελεί το Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού (Global Positioning System – GPS). Ως βάση δεδομένων των TVWS ορίζεται η βάση δεδομένων όπου καταχωρίζονται πληροφορίες για όλες τις αδειοδοτημένες υπηρεσίες στις τηλεοπτικές ζώνες. Για παράδειγμα, στη βάση δεδομένων καταχωρίζεται η θέση ενός τηλεοπτικού σταθμού ευρυεκπομπής, η φασματική ζώνη (κανάλι) όπου αυτός λειτουργεί και η ισχύς εκπομπής του. Με βάση αυτές τις πληροφορίες, μπορεί να καθορισθεί η γεωγραφική περιοχή μέσα στην οποία τηλεοπτικοί δέκτες μπορούν να λάβουν το τηλεοπτικό σήμα κάποιου σταθμού TV. Επομένως, οι δέκτες αυτοί πρέπει να προστατεύονται από παρεμβολές. Αυτού του τύπου βάσεις δεδομένων προσφέρουν πληροφορίες στις TVWS συσκευές ως προς τα κανάλια που μπορεί να χρησιμοποιήσουν στην περιοχή λειτουργίας τους.

Η δεύτερη CR τεχνολογία, που χρησιμοποιείται για την προστασία των υπάρχοντων τηλεοπτικών συστημάτων και αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως ανίχνευση φάσματος (spectrum sensing), βασίζεται σε διαδικασία ενσωματωμένη στις TVWS συσκευές, η οποία πραγματοποιεί μετρήσεις του ραδιοφάσματος. Με βάση τις μετρήσεις αυτές, μία CR συσκευή μπορεί να προσδιορίσει ποιά κανάλια είναι κατειλημμένα από αδειοδοτημένα τηλεοπτικά συστήματα που πρέπει να προστατευθούν. Συνεπώς, προσδιορίζει και ποιά κανάλια είναι ελεύθερα και, επομένως, αποτελούν κενά διαστήματα.

Στην πρώτη περίπτωση CR συσκευών, η γνωστική λειτουργία μοιράζεται ανάμεσα στην TVWS συσκευή (γεωεντοπισμός) και σε μία εξωτερική οντότητα (τη βάση δεδομένων των TVWS). Αντιθέτως, στη δεύτερη περίπτωση CR συσκευών, η γνωστική

λειτουργία, δηλαδή αυτή της ανίχνευσης φάσματος, είναι πλήρως ενσωματωμένη στην TVWS συσκευή. Δεδομένου ότι η απελευθέρωση φάσματος από υπάρχουσες υπηρεσίες καθίσταται όλο και δυσκολότερος στόχος για τις ρυθμιστικές αρχές, είναι πολύ πιθανό ότι κάθε είδους γνωστικές τεχνολογίες θα χρησιμοποιηθούν εκτενώς στο μέλλον για να επιτρέψουν την αποδοτική χρήση του ραδιοφάσματος από νέα ασύρματα και υπάρχοντα συστήματα ευρυεκπομπής. Τα TVWS αποτελούν ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αντικειμένου της πιθανής ρυθμιστικής πολιτικής και δομής του μέλλοντος.

## **1.10. Πρότυπο IEEE 802.22-2011**

### ***1.10.1. Προδιαγραφές περιφερειακών δικτύων γνωστικού ασύρματου ελέγχου πρόσβασης στο μέσο και φυσικού επιπέδου***

Η ομάδα εργασίας IEEE 802.22 ξεκίνησε τις εργασίες της τον Οκτώβριο του 2004. Το πρώτο παραδοτέο της ομάδας IEEE 802.22 καθορίζει το στρώμα της Πρόσβασης στο Μέσο (Medium Access Control layer) και το φυσικό στρώμα (PHYSical Layer) ασύρματων περιφερειακών (Regional Area Networks – RAN) σημείου προς πολλαπλά σημεία (point – to – multipoint) δικτύων με σταθερά και κινητά τερματικά χρηστών. Η παροχή ασύρματων ευρυζωνικών υπηρεσιών σε αγροτικές περιοχές αποτελεί μία από τις σημαντικότερες περιπτώσεις χρήσης του φάσματος των TVWS. Οι τηλεοπτικές ζώνες (κανάλια), ιδιαίτερα στο ανώτερο μέρος της ζώνης VHF και στο κατώτερο μέρος της ζώνης UHF, εμφανίζουν ιδιαίτερα καλά χαρακτηριστικά διάδοσης, λογικά μεγέθη κεραιών και σχετικά χαμηλά επίπεδα παρεμβολής από ηλεκτρικές συσκευές [1.12]. Λαμβάνοντας υπόψη το κόστος παροχής ενσύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης σε μεγάλες γεωγραφικές περιοχές με χαμηλή πληθυσμιακή πυκνότητα, η ασύρματη προσέγγιση φαίνεται προτιμητέα. Επιπλέον, ένα σημαντικό πλεονέκτημα των αγροτικών περιοχών αποτελεί η αυξημένη διαθεσιμότητα κενών τηλεοπτικών καναλιών. Σε μητροπολιτικές περιοχές το μεγαλύτερο μέρος του τηλεοπτικού φάσματος είναι κατειλημμένο είτε από τηλεοπτικούς σταθμούς είτε από άλλες αδειοδοτημένες υπηρεσίες όπως είναι τα ασύρματα μικρόφωνα. Αντιθέτως, στις αγροτικές περιοχές η πιθανότητα ύπαρξης αχρησιμοποίητων καναλιών είναι σαφώς μεγαλύτερη.

### **1.10.2. Πολιτικές και διαδικασίες για τη λειτουργία στις τηλεοπτικές μπάντες**

Σύμφωνα με το πρότυπο IEEE 802.22, τα δίκτυα είναι κυψελωτού τύπου. Η ακτίνα μιας κυψέλης κυμαίνεται μεταξύ 10 και 30km, υποθέτοντας κατευθυντικές κεραίες. Η ζώνη συχνοτήτων λειτουργίας εκτείνεται ανάμεσα στα 54 και 862 MHz. Πολύπλεξη OFDM με μεγάλο κυκλικό πρόθεμα χρησιμοποιείται για να αντιμετωπισθούν καθυστερήσεις λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης (delay spread) μέχρι 37  $\mu$ s. Το φυσικό στρώμα του προτύπου 802.22 προδιαγράφει 2048 κανάλια για μεγιστοποίηση της χρησιμοποίησης του εύρους ζώνης. Ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων είναι 22.69Mb/s, ενώ ο ελάχιστος 4.54Mb/s.

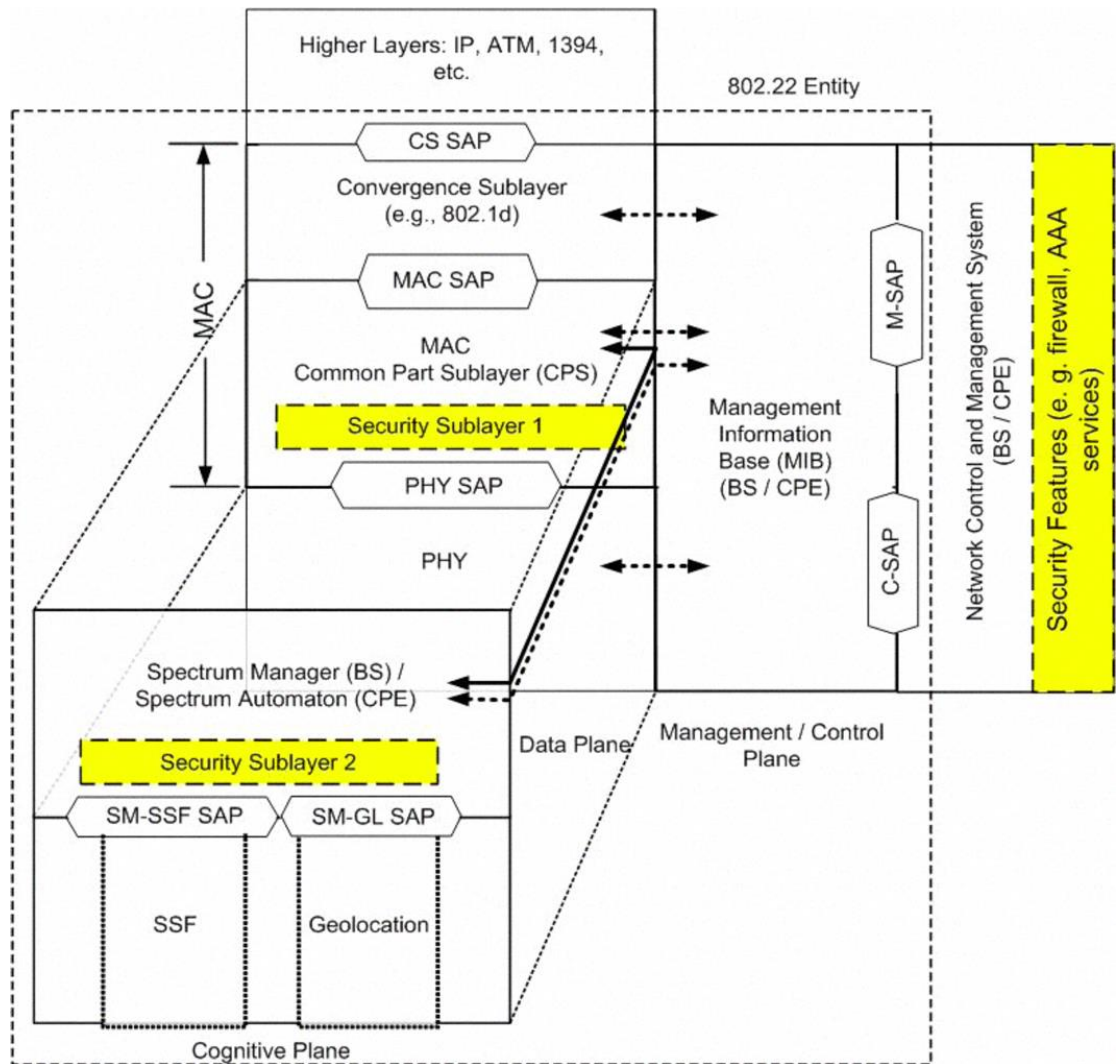
Οι σταθμοί βάσης σύμφωνα με το πρότυπο IEEE 802.22 έχουν την ικανότητα να υποστηρίζουν μέχρι και 512 τερματικά χρήστη (Customer Premises Equipment – CPE). Ο συνολικός αριθμός των χρηστών που μπορούν να υποστηριχθούν εξαρτάται από τις ανάγκες κάθε χρήστη σε εύρος ζώνης. Ένας Σταθμός Βάσης 802.22 μπορεί να εξυπηρετεί μέχρι 512 CPEs όταν οι ανάγκες σε εύρος ζώνης είναι μικρές. Εντούτοις, δεδομένου ότι ένα τηλεοπτικό κανάλι μπορεί να έχει εύρος μόνον 6, 7 ή 8MHz, καθώς, επίσης, και δεδομένου ότι η συγκόλληση καναλιών (channel bonding) δεν επιτρέπεται, ο διαχειριστής του δικτύου ενός ασύρματου παρόχου υπηρεσιών διαδικτύου (Wireless Internet Service Provider – WISP) πρέπει να καταλήξει στο πλήθος των χρηστών που μπορούν να υποστηριχθούν υπό την απαιτούμενη QoS σε δεδομένη γεωγραφική περιοχή.

### **1.11. Η αρχιτεκτονική και τα βασικά χαρακτηριστικά του συστήματος του προτύπου 802.22**

Στο Σχ. 1.2 απεικονίζεται η αρχιτεκτονική ενός Σταθμού Βάσης κατά το πρότυπο IEEE 802.22 [1.13]. Η αρχιτεκτονική των CPE είναι παρόμοια με αυτή του Σταθμού Βάσης εκτός του ότι δεν περιέχει τη βαθμίδα Διαχειριστή Φάσματος (Spectrum Manager – SM). Η παραδοσιακή αρχιτεκτονική αναφοράς περιλαμβάνει επίπεδα δεδομένων, ελέγχου και διαχείρισης. Το χαρακτηριστικό το οποίο καθιστά την αρχιτεκτονική του προτύπου IEEE 802.22 μοναδική είναι η προσθήκη του γνωστικού επιπέδου, που περιλαμβάνει γνωστικές λειτουργίες των συσκευών που λειτουργούν

σύμφωνα με το πρότυπο IEEE 802.22. Στο γνωστικό επίπεδο συμπεριλαμβάνεται και η λειτουργία ανίχνευσης φάσματος (Spectrum Sensing Function – SSF), η λειτουργία γεωεντοπισμού, η αυτοματοποίηση Διαχείρισης Φάσματος / Ανίχνευσης Φάσματος (Spectrum Manager / Spectrum Sensing Automaton – SM/SSA) και ένα Υποεπίπεδο Ασφαλείας (Security Sublayer) 2. Η SSF υλοποιεί τη λειτουργία ανίχνευσης φάσματος ενώ η λειτουργία GL παρέχει πληροφορίες εντοπισμού της συσκευής 802.22. Η σημαντικότερη οντότητα του γνωστικού επιπέδου είναι ο Διαχειριστής Φάσματος. Οι λειτουργίες του παρουσιάζονται στη συνέχεια:

- Πρόσβαση στις υπηρεσίες της Βάσης Δεδομένων.
- Προγραμματισμός περιόδων ηρεμίας (quiet periods) για την υλοποίηση της λειτουργίας SS.
- Καταχώριση και παρακολούθηση της θέσης των CPEs.
- Ενοποίηση των πληροφοριών περί του καταλόγου διαθέσιμων καναλιών – που εξαρτάται από τη θέση του CPE – από την υπάρχουσα Βάση Δεδομένων και την επίγνωση της κατάστασης του CPE, που κατέστη δυνατή ως αποτέλεσμα της λειτουργίας SS.
- Ταξινόμηση και επιλογή καναλιών, και διαχείριση του συνόλου των καναλιών.
- Επιβολή των πολιτικών του προτύπου IEEE 802.22.
- Λήψη αποφάσεων για την απόδοση καναλιών που αφορά ένα ή και περισσότερα CPEs ή σε ολόκληρη την κυψέλη.
- Συνύπαρξη με άλλα ασύρματα RAN.



Σχήμα 1.2. Αρχιτεκτονική Σταθμού Βάσης WRAN 802.22.

Ακόμα ένα μοναδικό χαρακτηριστικό του Προτύπου IEEE 802.22 είναι η προσθήκη ενός Υποεπιπέδου Ασφαλείας 2 στο γνωστικό επίπεδο, που χρησιμοποιείται για να προσφέρει στα συστήματα του προτύπου IEEE 802.22 προστασία από άρνηση παροχής υπηρεσίας (Denial of Service – DoS) από τους πρωτεύοντες χρήστες του φάσματος, όπως επίσης και από άλλους ευκαιριακούς χρήστες.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η αρχιτεκτονική των CPEs είναι παραπλήσια με αυτή των Σταθμών Βάσης, με βασική διαφορά το ότι το CPE δεν διαθέτει Διαχειριστή Φάσματος. Αντιθέτως, τα CPEs διαθέτουν αυτόματα Διαχείρισης Φάσματος (Spectrum Automata), που είναι υπεύθυνα για την εκτέλεση λειτουργιών ανίχνευσης φάσματος και γεωτοπισμού. Πρέπει να σημειωθεί ότι ενεργούν ανεξάρτητα εφόσον κανένα CPE δεν είναι καταγραμμένο σε κανένα Σταθμό Βάσης. Κάθε CPE διαθέτει δύο συνδέσεις. Η πρώτη χρησιμοποιείται για την επικοινωνία με τον Διαχειριστή

Φάσματος μέσω του επιπέδου δεδομένων (data plane), ενώ η δεύτερη παρέχει επικοινωνία με την τοπική διεπαφή μέσω μίας Βάσης Πληροφοριών Διαχείρισης (Management Information Base – MIB). Επίσης, η αρχιτεκτονική περιλαμβάνει μέρη, όπως είναι το Φυσικό Επίπεδο, το επίπεδο MAC, καθώς επίσης και διεπαφή με ανώτερα στρώματα μέσω ενός Υποστρώματος Σύγκλισης (Convergence Sublayer). Η διεπαφή με το σύστημα ελέγχου και διαχείρισης δικτύου (network control management system) παρέχεται μέσω των MIBs.

Το επίπεδο δεδομένων είναι υπεύθυνο για τη μεταφορά πληροφοριών που χρησιμοποιούνται ως είσοδος από τα ανώτερα στρώματα, όπως επίσης και πληροφοριών που σχετίζονται με τη διαχείριση και τον έλεγχο του CPE. Επιπλέον, περιλαμβάνει, το Φυσικό Στρώμα, το MAC στρώμα και το CS. Το στρώμα διαχείρισης / ελέγχου περιλαμβάνει την MIB, η οποία χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση του συστήματος και για την παρακολούθηση στατιστικών πληροφοριών.

#### ***1.11.1. Το φυσικό στρώμα του προτύπου IEEE 802.22***

Τα WRANs που ακολουθούν το πρότυπο IEEE 802.22 έχουν σχεδιασθεί για παροχή ευρυζωνικής πρόσβασης με ρυθμούς δεδομένων αντίστοιχους αυτών της ασύμμετρης DSL (Asymmetric DSL – ADSL). Τα βασικά χαρακτηριστικά του Φυσικού Στρώματος του Προτύπου 802.22 παρουσιάζονται στον Πίν. 1.1.



Πίνακας 1.1. Παράμετροι συστήματος φυσικού επιπέδου για τα WRAN

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ
Φασματικό Εύρος	54~862MHz
Εύρος Ζώνης Τηλεοπτικού Καναλιού	6, 7 ή 8MHz
Ρυθμός Δεδομένων	4.54 έως 22.69Mbps
Πολλαπλή Πρόσβαση	OFDMA
Μέγεθος FFT (συνολικός αριθμός υποφερουσών)	2048
Αριθμός Υποφερουσών Πιλότων (Pilot Subcarriers)	240
Αριθμός Υποφερουσών Φρουρών (Guard Subcarriers)	368
Εύρος Ζώνης Φέροντος Σήματος	5.6MHz, 6.5MHz ή 7.4MHz
Σχήμα Διαμόρφωσης	QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Εμπρόσθια Διόρθωση Σφαλμάτων (Forward Error Correction – FEC)	Δυαδική Συνελικτική Κωδικοποίηση (Υποχρεωτική)
	Συνελικτική Turbo Κωδικοποίηση
	Turbo Κωδικοποίηση Συντομευμένου Block (Shortened Block Turbo Code)
	Κώδικας Ισοτιμίας Χαμηλής Πυκνότητας (Low Density Parity Code – LDPC)
Αμφίδρομη Επικοινωνία	Αμφίδρομη Επικοινωνία με διαίρεση χρόνου (Time Division Duplex – TDD)
Μήκος Κυκλικού Προθέματος	1/4, 1/8, 1/16 ή 1/32 της διάρκειας του συμβόλου
Διάρκεια Πλαισίου	10 ms
Μέγεθος Υπερπλαισίου	16 Πλαίσια (Frames)
Υποστήριξη Πολλαπλών Κεραίων	Όχι

Το εύρος ζώνης των τηλεοπτικών καναλιών εξαρτάται από την αρμόδια αρχή όπου υπάγεται το σύστημα του προτύπου IEEE 802.22. Παγκοσμίως, γίνεται καταμερισμός του φάσματος που χρησιμοποιείται για ευρυεκπομπή τηλεόρασης σε κανάλια (channelization) εύρους 6MHz, 7MHz ή 8MHz. Ένα σύστημα του προτύπου IEEE 802.22 θα καταλαμβάνει πλήρως ένα μόνο τηλεοπτικό κανάλι. Στην περίπτωση των Ηνωμένων Πολιτειών, για παράδειγμα, κάθε τηλεοπτικό κανάλι έχει εύρος ζώνης 6MHz. Επομένως, το σύστημα του προτύπου IEEE 802.22 πρέπει να διαχωρίζει το φάσμα σε κανάλια εύρους 6MHz. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί OFDM πολύπλεξη τόσο για την ανερχόμενη ζεύξη (uplink) όσο και για την κατερχόμενη ζεύξη (downlink) όπως επίσης και πολλαπλή πρόσβαση OFDMA στην ανερχόμενη ζεύξη, όταν

περισσότερα από ένα CPEs εκπέμπουν προς τον ίδιο Σταθμό Βάσης την ίδια χρονική στιγμή.

Στο πρότυπο IEEE 802.22 ορίζονται 16 διαφορετικά επίπεδα λειτουργίας του Φυσικού Στρώματος, από τα οποία 12 μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μεταφορά δεδομένων. Τα επίπεδα 1 έως και 4 χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση σημάτων ελέγχου. Τα επίπεδα 5 έως και 16 χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά δεδομένων, η οποία επιτυγχάνεται μέσω του συνδυασμού 3 σχημάτων διαμόρφωσης και 4 ρυθμών κώδικα. Καθώς υπάρχουν τέσσερις διαφορετικές επιλογές FEC, το πρότυπο IEEE 802.22 παρέχει ευελιξία στην επιλογή ρυθμού δεδομένων με αποδεκτή πολυπλοκότητα, όπως επίσης και την απαιτούμενη ευρωστία υπό διαφορετικές συνθήκες μετάδοσης.

**Πίνακας 1.2. Επίπεδα λειτουργίας του Προτύπου IEEE 802.22**

Επίπεδο Λειτουργίας Φυσικού Επιπέδου	Σχήμα Διαμόρφωσης	Ρυθμός Κώδικα	Ρυθμός Δεδομένων (Mb/s)
1	BPSK	Χωρίς Κωδικοποίηση	–
2	QPSK	1/2	–
3	QPSK	1/2	–
4	QPSK	1/2	–
5	QPSK	1/2	4.54
6	QPSK	2/3	6.05
7	QPSK	3/4	6.81
8	QPSK	5/6	7.56
9	16-QAM	1/2	9.08
10	16-QAM	2/3	12.10
11	16-QAM	3/4	13.61
12	16-QAM	5/6	15.13
13	64-QAM	1/2	13.61
14	64-QAM	2/3	18.15
15	64-QAM	3/4	20.42
16	64-QAM	5/6	22.69

Όσον αφορά τις επιλογές FEC, η Δυαδική Συνελικτική Κωδικοποίηση (Binary Convolutional Code – BCC) είναι υποχρεωτική. Η υλοποίηση Συνελικτικής Turbo Κωδικοποίησης (Convolutional Turbo Code), Shortened Block Turbo Code ή LDPC είναι προαιρετική. Ο κύριος κωδικοποιητής (encoder) της BCC λειτουργεί με ρυθμό 1/2 με περιορισμένο μήκος (constrained length) 7.

## 1.12. Το πρόβλημα απονομής συχνοτήτων

Η βιβλιογραφία που αναφέρεται στο πρόβλημα απονομής συχνοτήτων (καναλιών) (FAP), αναπτύσσεται ταχέως τα τελευταία χρόνια λόγω της μεγάλης ανάπτυξης των ασύρματων δικτύων και των δορυφορικών επικοινωνιών. Εντούτοις, οι εφαρμογές απονομής συχνοτήτων έχουν δύο κοινά χαρακτηριστικά:

1. Σε μια ομάδα ασύρματων ζεύξεων (ή ένα σύνολο κεραιών) πρέπει να αποδοθούν συχνότητες ούτως ώστε να είναι δυνατή η μεταφορά δεδομένων ανάμεσα στους κόμβους του δικτύου. Οι συχνότητες αυτές πρέπει να επιλεγούν από συγκεκριμένο σύνολο το οποίο μπορεί να διαφέρει ανάμεσα στις διάφορες συνδέσεις.
2. Οι συχνότητες που αποδίδονται σε δύο ζεύξεις μπορεί να οδηγούν σε αμοιβαίες παρεμβολές, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει επιδείνωση της ποιότητας του σήματος λήψης σε κάθε ζεύξη. Για να μην υπάρχει παρεμβολή ανάμεσα σε δύο εκπομπές πρέπει να ικανοποιούνται δύο προϋποθέσεις:
  - a) Οι δύο φέρουσες συχνότητες να έχουν επαρκή φασματικό διαχωρισμό.
  - b) Οι ζεύξεις να έχουν επαρκή γεωγραφικό διαχωρισμό.

Προβλήματα FAP εμφανίσθηκαν για πρώτη φορά κατά τη δεκαετία του 1960 [1.14]. Η ανάπτυξη νέων, τότε, ασύρματων υπηρεσιών όπως ήταν η ανάπτυξη των πρώτων κυψελωτών δικτύων οδήγησε σε σπανιότητα συχνοτήτων. Οι συχνότητες αδειοδοτούνταν από τις κυβερνήσεις που χρέωναν για τη χρήση κάθε συχνότητας ξεχωριστά. Αυτό οδήγησε τους παρόχους στην εκπόνηση σχεδίων απονομής συχνοτήτων τα οποία έπρεπε, όχι μόνο να μην προκαλούν υψηλά επίπεδα παρεμβολών, αλλά και να οδηγούν στην ελαχιστοποίηση του κόστους αδειοδότησης. Καθώς τα σχέδια αυτά έπρεπε να επιλύουν το FAP, δηλαδή ένα NP – hard πρόβλημα, ήταν ιδιαίτερα δύσκολο να διατυπωθούν. Για τον καθορισμό των σχεδίων αυτών ξεκίνησε η χρήση θεωρίας γράφων και τεχνικών επιχειρησιακής έρευνας.

Μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1980, οι περισσότερες εργασίες για το πρόβλημα FAP χρησιμοποιούσαν ευριστικές (heuristic) μεθόδους σχετιζόμενες με το σχετικό πρόβλημα χρωματισμού γράφων (graph coloring problem) [1.15]. Η ανάπτυξη του

ψηφιακού κυψελωτού προτύπου GSM στα τέλη της δεκαετίας του 1980 προκάλεσε την αύξηση του ενδιαφέροντος για την απονομή συχνοτήτων. Μέχρι τότε, είχαν προταθεί μόνο FCA σχήματα. Σε αντίθεση με τα σχήματα FCA, τα σχήματα DCA αντιμετωπίζουν το πρόβλημα όταν η φασματική ζήτηση μεταβάλλεται δυναμικά με το χρόνο. Τα σχήματα Υβριδικής Απόδοσης Συχνοτήτων (Hybrid Channel Assignment – HCA) συνδυάζουν τις τεχνικές FCA και DCA: ένας αριθμός καναλιών αποδίδεται στατικά, ενώ ένα τμήμα του φάσματος απονέμεται δυναμικά.

### **1.12.1. Μαθηματική διατύπωση του προβλήματος απονομής συχνοτήτων**

Η διάθεση του Η/Μ φάσματος ρυθμίζεται τοπικά από τις εθνικές κυβερνήσεις, και σε διεθνές επίπεδο από την ITU. Οι διαχειριστές των ασύρματων υπηρεσιών αδειοδοτούνται για τη χρήση μιας ή περισσότερων φασματικών ζωνών σε συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές μίας χώρας. Η φασματική ζώνη  $[f_{\min}, f_{\max}]$  που είναι διαθέσιμη στους παρόχους ασύρματης επικοινωνίας διαχωρίζεται συνήθως σε ένα σύνολο καναλιών εύρους ζώνης  $\Delta$ . Για το λόγο αυτό, τα κανάλια συνήθως χαρακτηρίζονται με ένα αριθμό από 1 μέχρι  $N$ , όπου  $N = (f_{\max} - f_{\min}) / \Delta$ . Τα διαθέσιμα κανάλια ταυτοποιούνται ως μέλη του συνόλου  $F = \{C_1, C_2, \dots, C_N\}$ . Πρέπει να σημειωθεί ότι για συγκεκριμένη ζεύξη ή κεραία, είναι ενδεχόμενο να μην είναι διαθέσιμα όλα τα κανάλια του συνόλου  $F$ . Για παράδειγμα, αν μία ζεύξη είναι κοντά στα σύνορα μεταξύ δύο χωρών, οι κανόνες τμηματοποίησης του φάσματος ανάμεσα στις εμπλεκόμενες χώρες μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντική μείωση του διαθέσιμου πλήθους καναλιών με συνέπεια τα διαθέσιμα κανάλια να αποτελούν υποσύνολο του  $F$ .

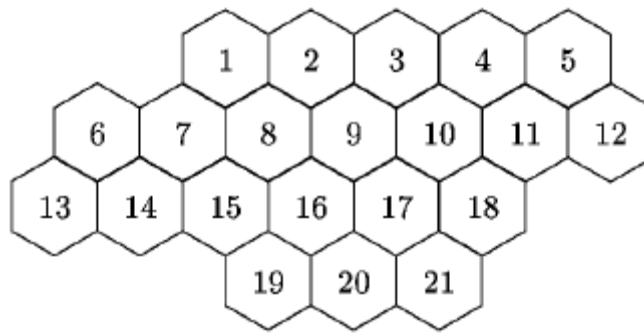
Η παρεμβολή των σημάτων ενσωματώνεται στο λόγο σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή (Signal to Noise and Interference Ratio – SNIR) στο δέκτη. Γενικώς, το επίπεδο παρεμβολής μειώνεται όσο αυξάνεται η απόσταση ανάμεσα στα κανάλια. Εντούτοις, πέραν της επιλογής της συχνότητας, ο SNIR στο δέκτη εξαρτάται και από την ισχύ του σήματος, τη διεύθυνση κατά την οποία μεταδίδεται, το περιβάλλον διάδοσης, καθώς επίσης και από τις καιρικές συνθήκες. Ως εκ τούτου, μία ακριβής εκτίμηση του SNIR λήψης είναι δύσκολη.

Στην κινητή τηλεφωνία και στην ευρυεκπομπή τηλεόρασης και ραδιοφώνου, οι δέκτες είναι διασπαρμένοι μέσα σε συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή. Η συνήθης προσέγγιση για τον προσδιορισμό της ισχύος λήψης στα σημεία μιας γεωγραφικής περιοχής είναι η ακόλουθη:

1. Ένα ορθογωνικό πλέγμα προκαθορισμένου (συνήθως μικρού) μεγέθους, το οποίο περιέχει σημεία δοκιμής (test points), άλλως γνωστά και ως εικονοψηφίδες (pixels), επιλέγονται με τέτοιο τρόπο ούτως ώστε να καλύπτουν την περιοχή.
2. Για κάθε σημείο δοκιμής, με χρήση κατάλληλου μοντέλου διάδοσης H/M
3. κυμάτων, προβλέπονται τα επίπεδα ισχύος των σημάτων λήψης από την κεραία που εξυπηρετεί την περιοχή, τυπικά αυτήν που προκαλεί το ισχυρότερο σήμα λήψης (καλύτερος εξυπηρετητής – best server), και από τους παρεμβάλλοντες σταθμούς. Σημεία δοκιμής που εξυπηρετούνται από την ίδια κεραία μπορούν να ομαδοποιηθούν και να σχηματίσουν μία περιοχή εξυπηρέτησης (service area) [1.16].
4. Για κάθε κύριο πομπό  $A$  και δεδομένο παρεμβάλλοντα πομπό  $B$ , υπολογίζεται η παρεμβολή που προκαλείται από τον πομπό  $B$  σε κάθε pixel της περιοχής εξυπηρέτησης του  $A$ .

Ο τρόπος με τον οποίο εκτιμάται η παρεμβολή εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή. Αναλυτικές περιγραφές μοντέλων διάδοσης για το πρόβλημα απονομής συχνοτήτων παρουσιάζονται στο [1.17].

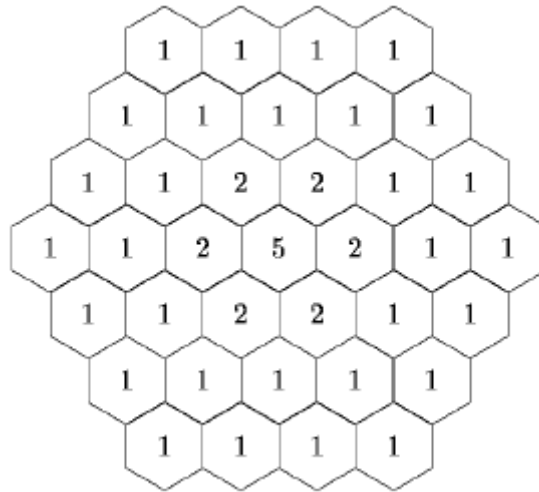
Το γνωστότερο παράδειγμα κυβελωτού εξαγωνικού δικτύου αποτελεί το δίκτυο της Φιλαδέλφειας, που απεικονίζεται στο Σχ. 1.3.



**Σχήμα 1.3.** Η δομή του δικτύου που χρησιμοποιείται στα παραδείγματα της Φιλαδέλφειας.

Στο πλέγμα εξαγωνικών κυψελών, η παρεμβολή μεταξύ κυψελών καθορίζεται από την απόσταση αναχρησιμοποίησης καναλιών (co – channel reuse distance)  $d$ . Με βάση την απόσταση αυτή θεωρείται ότι δεν υπάρχει παρεμβολή εφόσον τα κέντρα δύο κυψελών απέχουν μεταξύ τους απόσταση μεγαλύτερη ή ίση από  $d$ . Στην περίπτωση κατά την οποία η απόστασή δύο κυψελών είναι μικρότερη από  $d$ , δεν επιτρέπεται να αποδοθούν στις κυψέλες αυτές οι ίδιες συχνότητες.

Για τις διάφορες παραλλαγές του αρχικού παραδείγματος της Φιλαδέλφειας, ορίζονται διάφορες αποστάσεις αναχρησιμοποίησης καναλιών. Για παράδειγμα, οι τιμές  $d^0, \dots, d^5$  λαμβάνουν τις τιμές  $2\sqrt{3}, 3, 1, 1, 1, 0$ . Επομένως, τα ίδια κανάλια μπορούν να αποδοθούν σε κυψέλες που απέχουν απόσταση μεγαλύτερη ή ίση με  $2\sqrt{3}$ , ενώ τα κανάλια που αποδίδονται στην ίδια κυψέλη πρέπει να απέχουν το λιγότερο κατά 5. Οι τιμές που εμφανίζονται στο Σχ. 1.4 υποδηλώνουν την ελάχιστη φασματική απόσταση ανάμεσα στα κανάλια που αποδίδονται στις κυψέλες του δικτύου σε σχέση με το κανάλι που αποδίδεται στην κεντρική κυψέλη.



Σχήμα 1.4. Παράδειγμα αποστάσεων αναχρησιμοποίησης συχνοτήτων σε εξαγωνικά κυψελωτά δίκτυα. Οι τιμές υποδηλώνουν την ελάχιστη φασματική απόσταση ανάμεσα στα κανάλια που αποδίδονται στις κυψέλες του δικτύου σε σχέση με το κανάλι που αποδίδεται στην κεντρική κυψέλη.

Θεωρώντας δύο κυψέλες  $u$  και  $v$  ορίζεται η ελάχιστη φασματική απόσταση  $\delta(u,v)$  ανάμεσα στα κανάλια που αποδίδονται στις κυψέλες αυτές. Η φασματική αυτή απόσταση έχει άμεση σχέση με τη χωρική απόσταση ανάμεσα στις κυψέλες  $u$  και  $v$ . Στο παράδειγμα που απεικονίζεται στο Σχήμα 1.4, όταν η γεωγραφική απόσταση ανάμεσα σε δύο κυψέλες είναι 1, τότε  $\delta(u,v)=2$ , επομένως τα κανάλια που αποδίδονται σε γειτονικές κυψέλες προς την κεντρική πρέπει να απέχουν το λιγότερο κατά 2 από αυτά που αποδίδονται στην κεντρική. Στις κυψέλες που δεν εμφανίζονται στο Σχ. 1.4 θεωρείται ότι μπορεί να αποδοθεί το ίδιο κανάλι με αυτό της κεντρικής κυψέλης ( $\delta(u,v)=0$ ), καθώς η χωρική τους απόσταση θεωρείται αρκετή ώστε να μην προκαλούνται αμοιβαίες παρεμβολές.

### 1.12.2. Εφαρμογές του FAP

Το πρόβλημα απονομής συχνοτήτων εμφανίζεται σε πολλές περιπτώσεις ασύρματων εφαρμογών. Αυτό έχει οδηγήσει στη διατύπωση διαφορετικών μοντέλων και παραδειγμάτων. Ορισμένες περιπτώσεις με τις οποίες σχετίζεται το FAP είναι οι ακόλουθες:

**1. ΚΙΝΗΤΗ ΤΗΛΕΦΩΝΙΑ.** Μία κεραιά σταθμού βάσης (BS) αποτελεί το ένα άκρο μιας ζεύξης ενώ το άλλο είναι ένα κινητό τερματικό. Κάθε κεραιά καλύπτει συγκεκριμένη περιοχή (κυψέλη), όπου λαμβάνει και μεταδίδει σήματα από και προς τα κινητά τερματικά. Κάθε κεραιά μπορεί να εξυπηρετεί ταυτόχρονα αρκετά κινητά τερματικά. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση Πολλαπλής Πρόσβασης με Διαιρεση Χρόνου (Time Division Multiple Access – TDMA) κάθε διαθέσιμο κανάλι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξυπηρετήσει  $n$  διαφορετικά κινητά τερματικά. Περισσότερες κεραιές μπορούν επίσης να εγκαθίστανται στην ίδια θέση εκπομπής για να καλύπτουν περισσότερες γειτονικές περιοχές. Στα δίκτυα GSM, 8 κινητά τερματικά μπορούν να εξυπηρετούνται ταυτόχρονα με χρήση TDMA, ενώ μέχρι 12 πομποδέκτες (Transceivers - TRXs) μπορούν να εγκαθίστανται στην ίδια κεραιοκατασκευή [1.18]. Τα κανάλια που αποδίδονται σε κάθε κεραιά πρέπει να ικανοποιούν συγκεκριμένες απαιτήσεις που εξαρτώνται από (α) τη διαθεσιμότητα, κυρίως στα σύνορα κάθε χώρας, (β) τα επίπεδα παρεμβολής, (γ) τις τεχνολογικές απαιτήσεις και (δ) το μέγεθος της περιοχής στην οποία οποιαδήποτε παρεμβολή είναι απαράδεκτη. Ως εκ τούτου, μπορούν να καθορισθούν τέσσερις τύποι περιορισμών:

**1. Περιορισμός διαχωρισμού ίδιας κυψέλης.**

Τα κανάλια που αποδίδονται στην ίδια κυψέλη πρέπει να διαφέρουν τουλάχιστον κατά  $\delta(u,v)$  (συνήθως  $\delta(u,v)=3$ ).

**2. Περιορισμός διαχωρισμού γειτονικών κυψελών.**

Αν οι κυψέλες  $u$  και  $v$  είναι γειτονικές, τότε  $\delta(u,v)=2$ .

**3. Περιορισμός παρεμβολών.**

Εξαιτίας των παρεμβολών απαιτούνται περαιτέρω διαχωρισμοί ανάμεσα σε κυψέλες Σταθμών Βάσης που είναι εγκατεστημένοι σε διαφορετικές γεωγραφικές θέσεις. Συνήθως, τέτοια ζεύγη  $u$  και  $v$  πρέπει να χρησιμοποιούν διαφορετικά κανάλια, δηλαδή  $\delta(u,v)=1$ . Οι περιορισμοί που δεν επιτρέπουν δύο κυψέλες να χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι αποκαλούνται συχνά *περιορισμοί κοινού καναλιού* (*co – channel constraints*). Οι περιορισμοί που δεν επιτρέπουν να χρησιμοποιούνται τα κανάλια με απόσταση 1 αποκαλούνται *περιορισμοί γειτονικού καναλιού* (*adjacent channel constraints*).

**4. Περιορισμός διαχωρισμού μεταπομπής (handover).**



Καθώς το κινητό τερματικό κινείται από μία κυψέλη  $u$  σε μία γειτονική κυψέλη  $v$ , ο έλεγχός του πρέπει να μεταφερθεί από την  $u$  στην  $v$  (λειτουργία που ορίζεται ως μεταπομπή). Για να επιτευχθεί αυτό απαιτείται τα χρησιμοποιούμενα κανάλια από τις κυψέλες  $u$  και  $v$  για την εξυπηρέτηση του τερματικού να διαφέρουν τουλάχιστον κατά ένα. Πρέπει να σημειωθεί ότι στην πράξη η κατάσταση είναι περισσότερο περίπλοκη, καθώς το Κανάλι Ελέγχου Ευρειακής Ευρυκειομπής (Broadcast Control Channel – BCCH) χρειάζεται μεγαλύτερη προστασία. Για αυτό το λόγο, σε ορισμένες χώρες,  $\delta(u,v)=2$ . Στη βιβλιογραφία έχουν εμφανισθεί αρκετές περιπτώσεις του FAP. Τα πλέον χαρακτηριστικά σύνολα περιορισμών, καθώς επίσης και οι αντίστοιχες δομές των δικτύων παρουσιάζονται στη συνέχεια.

1. **Φιλαδέλφεια.** Το παράδειγμα του κυψελωτού δικτύου της περιοχής της Φιλαδέλφειας ήταν από τα πρώτα που μελετήθηκαν στη βιβλιογραφία [1.19]. Τα σύνολα των περιορισμών που αφορούν το συγκεκριμένο παράδειγμα αναφέρονται στις 21 εξαγωνικές κυψέλες ενός κυψελωτού τηλεφωνικού δικτύου στην περιοχή της Φιλαδέλφειας των ΗΠΑ, που απεικονίζεται στο Σχήμα 1.4. Κάθε κυψέλη χρειάζεται ένα ικανό πλήθος καναλιών για να λειτουργήσει αποδοτικά. Το πλήθος αυτό καθορίζει την πολυπλοκότητα κάθε κυψέλης.
2. **COST 259.** Στο πλαίσιο του προγράμματος COST (Ευρωπαϊκή Συνεργασία στο Επιστημονικό και Τεχνικό πεδίο – Cooperation europeenne dans le domaine de la recherche Scientifique et Technique – COST) 259 προτάθηκαν 32 συνδυασμοί περιορισμών FAP για δίκτυα GSM. Ο συνολικός αριθμός κυψελών στις οποίες πρέπει να αποδοθούν κανάλια εκτείνεται από 900 έως σχεδόν 4000. Μέχρι 75 κανάλια είναι διαθέσιμα για κάθε κυψέλη [1.20]
3. **CSELT.** Τα σύνολα περιορισμών του CSELT έχουν χρησιμοποιηθεί στο [1.21]. Αυτά τα σύνολα αποτελούνται από περιορισμούς για τα κοινά κανάλια και περιορισμούς γειτονικών καναλιών.
4. **CNET.** Στα παραδείγματα του γαλλικού Κέντρου Έρευνας Τηλεπικοινωνιών (CNET) ο αριθμός των κυψελών είναι μέχρι 300. Σε κάθε κυψέλη πρέπει να αποδοθούν μία ή δύο συχνότητες.

5. **Bell Mobility.** Στα παραδείγματα που παρέχονται από την Bell Mobility για δύο αστικές καναδικές περιοχές ο αριθμός των πομπών κυμαίνεται από περίπου 700 σε περισσότερους από 5000.

6. **ΡΑΔΙΟΦΩΝΟ ΚΑΙ ΤΗΛΕΟΡΑΣΗ.** Οι εφαρμογές που αφορούν στο ραδιόφωνο και στην τηλεόραση ομοιάζουν αρκετά με τα παραδείγματα κινητής τηλεφωνίας. Η βασική τους διαφορά έγκειται στις χρησιμοποιούμενες φασματικές αποστάσεις [1.22], [1.23].

7. **ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.** Η χρήση στρατιωτικών τηλεφώνων σε στρατιωτικές δοκιμές οδηγεί σε δυναμικά (χωροχρονικά) FAP που έχουν την ιδιαιτερότητα ότι κάθε ζεύξη αφορά δύο κινητούς πομποδέκτες. Ως εκ τούτου, σε κάθε ζεύξη δεδομένης της απόστασης των πομποδεκτών πρέπει να αποδίδονται δύο κανάλια. Κάθε κανάλι θα χρησιμοποιείται για διαφορετική κατεύθυνση επικοινωνίας. Επομένως, όλα τα κανάλια αποδίδονται ως ζεύγη δεδομένης της απόστασης ανάμεσα στα εμπλεκόμενα τερματικά. Στο πλαίσιο του προγράμματος EUCLID Συνδυαστικοί Αλγόριθμοι για Στρατιωτικές Εφαρμογές (Combinatorial Algorithms for Military Applications – CALMA) [1.24] χρησιμοποιήθηκε ένα σύνολο από 11 πραγματικά παραδείγματα. Το πρόβλημα FAP επεκτάθηκε και στους περιορισμούς λόγω πόλωσης. Σε κάθε ζεύξη, λοιπόν, πρέπει να επιλεγεί η διεύθυνση πόλωσης (οριζόντια ή κάθετη). Επομένως, η συνολική παρεμβολή εξαρτάται, εκτός από τα αποδιδόμενα κανάλια, και από την πόλωση που επιλέγεται.

8. **ΔΟΥΦΟΡΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ.** Στο [1.25] παρουσιάζεται ένα πρόβλημα FAP για δορυφορικές επικοινωνίες όπου τόσο οι πομποί όσο και οι δέκτες είναι τερματικά εδάφους που επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω ενός ή περισσότερων δορυφόρων. Κάθε σήμα εκπέμπεται πρώτα προς το δορυφόρο και κατόπιν εκπέμπεται προς το δέκτη. Τα κανάλια που χρησιμοποιούνται για τις δύο ζεύξεις διαχωρίζονται με φασματική απόσταση αρκετά μεγαλύτερη από το εύρος ζώνης των μεταδιδόμενων σημάτων. Σε κάθε πομπό απονέμεται ένα σύνολο συνεχόμενων καναλιών. Προς αποφυγή παρεμβολών κάθε συχνότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο μία φορά.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΠΡΩΤΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ**

- [1.1] "IEEE Recommended Practice for Local and Metropolitan Area Networks. Coexistence of Fixed Broadband Wireless Access Systems," IEEE Std 802.16.2-2004 (Revision of IEEE Std 802.16.2-2001), vol., no., pp.0\_1, 2004
- [1.2] Francisco Luna, Enrique Alba, Antonio J. Nebro, Salvador Pedraza, "Evolutionary algorithms for Real-World Instances of the Automatic Frequency Planning Problem in GSM Networks", *EVOLUTIONARY COMPUTATION IN COMBINATORIAL OPTIMIZATION*, Lecture Notes in Computer Science, 2007, Volume 4446/2007, 108-120.
- [1.3] Hale, W.K.: Frequency assignment: Theory and applications. Proceedings of the IEEE 68 (1980) 1497–1514
- [1.4] Michael R. Garey and David S. Johnson (1979), *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*. W.H. Freeman, ISBN 0-7167-1045-5.
- [1.5] F. Borgonovo, A. Capone, A. Molinaro, "The impact of signal strength measures on the efficiency of dynamic channel allocation techniques", Proc. of the IEEE ICC, pp. 1400-1404, Jun. 1998.
- [1.6] R. Verdone, A. Zanella, L. Zuliani, "Dynamic channel allocation schemes in mobile radio systems with frequency hopping", Proc. of the IEEE PIMRC, pp. 157-162, Oct. 2001.
- [1.7] Katzela and M. Naghshineh, "Channel Assignment Schemes for Cellular Mobile Telecommunication Systems: A Comprehensive Survey", *IEEE Personal Communications Magazine*, pp. 10-31, June 1996.
- [1.8] Κωνσταντινίδης Μιχαήλ, «Σχεδίαση ευφυούς κεραιάς τύπου CSPA (Circular Switch Parasitic Array) με παρασιτικά στοιχεία για λειτουργία στις συχνότητες του Wi-Fi με χρήση του λογισμικού πακέτου SuperNEC και βελτιστοποίησή της με τη βοήθεια των γενετικών αλγορίθμων», Διπλωματική Εργασία, Ιούλιος 2011.
- [1.9] Oliver & Ohlbaum Associates Ltd and DotEcon Ltd, "The Effects of a Market – Based Approach to Spectrum Management and the Impact on Digital Terrestrial Broadcasting".
- [1.10] Review of Digital Dividend Options in Greece. Report prepared for EETT. June 26th 2009.

- [1.11] CEPT Report 31, "Technical considerations regarding harmonisation options for the digital dividend in the European Union - Frequency (channelling) arrangements for the 790-862 MHz band", 30 October 2009.
- [1.12] Rashid A. Saeed and Stephen J. Shellhammer, "TV White Space Spectrum Technologies Regulations, Standards and Applications" CRC Press, ISBN: 978-1-4398-4879-1, 2012.
- [1.13] Stevenson, C.; Chouinard, G.; Zhongding Lei; Wendong Hu; Shellhammer, S.; Caldwell, W.;, "IEEE 802.22: The first cognitive radio wireless regional area network standard," *Communications Magazine, IEEE* , vol.47, no.1, pp.130-138, January 2009
- [1.14] Mody, A.N.; Reddy, R.; Kiernan, T.; Brown, T.X.;, "Security in cognitive radio networks: An example using the commercial IEEE 802.22 standard," *Military Communications Conference, 2009. MILCOM 2009. IEEE* , vol., no., pp.1-7, 18-21 Oct. 2009
- [1.15] B. H. Metzger, Spectrum management technique, Fall 1970, Presentation at 38th National ORSA meeting (Detroit, MI).
- [1.16] Karen I. Aardal, Stan P.M. van Hoesel, Arie M.C.A. Koster, Carlo Mannino, and Antonia Sassano, "Models and Solution Techniques for Frequency Assignment Problems", 4OR, volume 1, number 4, pages 261 - 317 (2003)
- [1.17] Luis M. Correia (ed.), Wireless flexible personalized communications - COST 259: European co-operation in mobile radio research, John Wiley & Sons Ltd., 2001, COST Action 259—Final Report.
- [1.18] A. Eisenblatter, Frequency assignment in GSM networks: Models, heuristics, and lower bounds, Ph.D. thesis, Technische Universitat Berlin, Berlin, Germany, 2001.
- [1.19] L. G. Anderson, A simulation study of some dynamic channel assignment algorithms in a high capacity mobile telecommunications system, *IEEE Transactions on Communications* 21 (1973), 1294–1301.
- [1.20] Luis M. Correia (ed.), Wireless flexible personalized communications - COST 259: European co-operation in mobile radio research, John Wiley & Sons Ltd., 2001, COST Action 259—Final Report.
- [1.21] M. Fischetti, C. Lepschy, G. Minerva, G. Romanin-Jacur, and E. Toto, Frequency assignment in mobile radio systems using branch-and-cut techniques, *European Journal of Operational Research* 123 (2000), 241–255.

- [1.22] RADIO instances, Radio-broadcasting frequency assignment instances, URL: <ftp://ftp.dis.uniroma1.it/PUB/OR/mannino/freq/inst/radio/>, 1998.
- [1.23] C. Mannino and A. Sassano, An enumerative algorithm for the frequency assignment problem, *Discrete Applied Mathematics* (2001), to appear, previously published as technical report 1096, Università di Roma La Sapienza.
- [1.24] EUCLID CALMA project, Publications and instances available at FTP Site: <ftp://ftp.win.tue.nl/pub/techreports/CALMA/>, 1995.
- [1.25] H. Thuve, Frequency planning as a set partitioning problem, *European Journal of Operational Research* 6 (1981), 29–37.
- [1.26] H. P. van Benthem, GRAPH generating radio link frequency assignment problems heuristically, Master's thesis, Delft University of Technology, 1995.
- [1.27] ROADEF Challenge 2001, URL: <http://www.prism.uvsq.fr/~vdc/ROADEF/CHALLENGES/2001/>, 2000.



## 2. ΟΙ ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ (GENETIC ALGORITHMS)

Τα τελευταία τριάντα χρόνια έχει παρατηρηθεί ένα συνεχώς αυξανόμενο ενδιαφέρον για ανάπτυξη μεθόδων επίλυσης προβλημάτων βασισμένων στις αρχές της Εξέλιξης και της Κληρονομικότητας. Τα μειονεκτήματα των κλασικών μεθόδων αναζήτησης και βελτιστοποίησης, καθώς και η συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη για παραγωγή λογισμικού (software) που να μπορεί να εκμεταλλεύεται αποδοτικά τις τεράστιες δυνατότητες του υλισμικού (hardware), ήταν η βασική αιτία που ώθησε τους επιστήμονες στην αναζήτηση αυτή. Αυτού του είδους οι μέθοδοι λειτουργούν διατηρώντας ένα πληθυσμό κωδικοποιημένων πιθανών λύσεων (ατόμων) και εφαρμόζοντας σε αυτόν διάφορες διαδικασίες επιλογής του καλύτερου ατόμου, καθώς και διάφορους γενετικούς τελεστές. Οι τελεστές αυτοί μιμούνται τον τρόπο με τον οποίο αναπαράγονται και μεταλλάσσονται τα χρωμοσώματα των κυττάρων των ζωντανών οργανισμών. Έτσι, περνώντας από γενεά σε γενεά, τα συστήματα αυτά δημιουργούν συνεχώς νέους πληθυσμούς πιθανών λύσεων χρησιμοποιώντας τόσο στοιχεία από την προηγούμενη γενεά όσο και νέα στοιχεία. Επανειλημμένες δοκιμές και πειράματα έχουν δείξει ότι μια φυσική αναπαράσταση των πιθανών λύσεων (αναπαράστασή τους σαν άτομα ενός πληθυσμού) δεδομένου προβλήματος, σε συνδυασμό με την εφαρμογή στην αναπαράσταση αυτή ομάδας κατάλληλων γενετικών τελεστών, αποτελεί πολύ χρήσιμο εργαλείο στην προσπάθεια προσέγγισης των πραγματικών λύσεων πολύ μεγάλης ποικιλίας προβλημάτων και εφαρμογών. Δηλαδή η προσέγγιση φυσικής αναπαράστασης αποτελεί αποτελεσματική προσέγγιση για την επίλυση προβλημάτων γενικότερα. Η πρώτη εμφάνιση των γενετικών αλγορίθμων χρονολογείται στις αρχές του 1950, όταν διάφοροι βιολόγοι επιστήμονες αποφάσισαν να χρησιμοποιήσουν υπολογιστές στην προσπάθειά τους να προσομοιώσουν πολύπλοκα βιολογικά συστήματα. Η συστηματική ανάπτυξη των γενετικών αλγορίθμων, όμως, που οδήγησε στη μορφή με την οποία είναι γνωστοί και σήμερα, πραγματοποιήθηκε στις αρχές του 1970 από τον John Holland και τους συνεργάτες του στο Πανεπιστήμιο του Michigan [2-1].

## 2.1. Η θεωρία της εξέλιξης των ειδών

Η θεωρία της Εξέλιξης των Ειδών (Evolution of Species) αναπτύχθηκε από τον Δαρβίνο στα μέσα του προπερασμένου αιώνα. Με την πάροδο ενός και πλέον αιώνων η θεωρία έχει γίνει αποδεκτή από το σύνολο των επιστημόνων, γιατί κατόρθωσε να πείσει και να δώσει ικανοποιητικές απαντήσεις σε θεμελιώδη ερωτήματα. Σκοπός της θεωρίας αυτής είναι να δώσει μια εξήγηση για το φαινόμενο της ζωής, την προέλευσή της και τις βασικές λειτουργίες της. Τα κυριότερα σημεία της, που σχετίζονται και ερμηνεύουν τον τρόπο λειτουργίας των γενετικών αλγορίθμων, είναι τα εξής:

1. Δεν υπάρχει αντικειμενική βάση διαχωρισμού των ζωντανών οργανισμών σε ανώτερους και κατώτερους. Σε κάθε βιολογικό είδος, μερικά άτομα αφήνουν περισσότερους απογόνους σε σύγκριση με τα υπόλοιπα και έτσι τα κληροδοτούμενα χαρακτηριστικά των αναπαραγωγικά επιτυχημένων ατόμων γίνονται περισσότερα στην επόμενη γενεά. Οι δυσκολίες, τα εμπόδια και οι αντιξοότητες που παρουσιάζονται κατά τη διάρκεια της ζωής των οργανισμών είναι οι παράγοντες που καθορίζουν ποιοι από αυτούς θα κατορθώσουν να επιβιώσουν και να πολλαπλασιασθούν. Με κάθε αλλαγή του περιβάλλοντος και των συνθηκών διαβίωσης, αλλάζουν και τα χαρακτηριστικά τους προσπαθώντας να προσαρμοσθούν κάθε φορά, με στόχο την εξασφάλιση της επιβίωσής τους.
2. Κάθε αλλαγή που συμβαίνει στα χαρακτηριστικά των ατόμων αποτελεί αλλαγή στα χρωμοσώματά τους (chromosomes). Τα χρωμοσώματα είναι πολύπλοκα μόρια τα οποία κωδικοποιούν τη δομή και τα χαρακτηριστικά των ατόμων. Τα χρωμοσώματα αποτελούνται από μικρότερα μέρη, γνωστά ως γονίδια (genes). Το σύνολο της γενετικής πληροφορίας που είναι κωδικοποιημένο στα γονίδια ονομάζεται γονότυπος (genotype). Η δημιουργία ενός νέου οργανισμού περιλαμβάνει την αποκωδικοποίηση των χρωμοσωμάτων. Το σύνολο των ορατών χαρακτηριστικών του και της συμπεριφοράς του ατόμου που καθορίζονται από τις πληροφορίες των γονιδίων, συνιστούν το φαινότυπο (phenotype).
3. Κυρίαρχες λειτουργίες του φαινομένου της εξέλιξης είναι η αναπαραγωγή (reproduction) και η μετάλλαξη (mutation). Κατά τη μετάλλαξη γίνεται με τυχαίο τρόπο η αλλαγή της δομής των χρωμοσωμάτων, συνήθως από λανθασμένη αντιγραφή βιολογικών μορίων ή από εξωγενείς παράγοντες, έχοντας ως άμεσο



αποτέλεσμα την αλλαγή σε κάποιο χαρακτηριστικό. Η μετάλλαξη μπορεί να αποβεί επωφελής για το άτομο, καθώς η αλλαγή που θα προκύψει μπορεί να του διευκολύνει την επιβίωση, γεγονός που με τη σειρά του μπορεί να οδηγήσει στην αναπαραγωγή του ατόμου.

4. Προϊόν της αναπαραγωγής είναι ένας νέος οργανισμός, τα χρωμοσώματα του οποίου αποτελούνται από γονίδια που προέρχονται κατά το ήμισυ πατέρα και κατά το έτερον ήμισυ από τη μητέρα. Έτσι, για κάθε χαρακτηριστικό, το νέο άτομο έχει πάρει γονίδια και από τους δύο γονείς. Μερικές φορές, τα δύο αυτά γονίδια συμφωνούν μεταξύ τους, όσον αφορά την τιμή που θα δώσουν στο χαρακτηριστικό, ενώ άλλες φορές δεν συμφωνούν. Στη δεύτερη περίπτωση, κυριαρχεί η τιμή ενός γονιδίου και αγνοείται η «τιμή» του άλλου, μολονότι το δεύτερο μπορεί να περάσει σε επόμενες γενιές. Το γονίδιο που τελικά καθορίζει το χαρακτηριστικό λέγεται κυρίαρχο ή επικρατές (dominant) και το άλλο υπολειπόμενο (recessive). Γονίδια που διεκδικούν την ίδια θέση σε ένα χρωμόσωμα (δηλαδή που είναι υπεύθυνα για το ίδιο χαρακτηριστικό), λέγονται αλληλόμορφα (alleles).

Όλος αυτός ο μηχανισμός της φυσικής επιλογής φάνηκε ιδιαίτερα ελκυστικός στον John Holland, πρωτοπόρο των γενετικών αλγορίθμων, στις αρχές της δεκαετίας του '70 [2-1]. Ο Holland φαντάστηκε ότι ορισμένες αρχές και λειτουργίες που εφαρμόζει η φύση στα συστήματά της θα μπορούσαν να έχουν αποτελέσματα, αν ενσωματώνονταν σε αλγόριθμους για υπολογιστές, ώστε να προκύψουν αποδοτικές τεχνικές επίλυσης δύσκολων προβλημάτων. Αποτέλεσμα αυτής της εργασίας του Holland ήταν οι γενετικοί αλγόριθμοι, μια νέα (τότε) εξελισσόμενη και πολλά υποσχόμενη τεχνική αναζήτησης και βελτιστοποίησης. Η βασική ιδέα πίσω από τους γενετικούς αλγόριθμους (ΓΑ) είναι η μίμηση των μηχανισμών της φύσης.

## **2.2. Βασικά χαρακτηριστικά ενός Γενετικού Αλγορίθμου**

Όπως ήδη αναφέρθηκε, οι ΓΑ χρησιμοποιούν ορολογία δανεισμένη από το χώρο της Γενετικής. Κατ' αναλογία με τα έμβια όντα, οι ΓΑ αναφέρονται σε άτομα μέσα σε έναν πληθυσμό. Σύμφωνα με την ορολογία των ΓΑ, αυτά τα άτομα καλούνται επίσης χρωμοσώματα. Τα χρωμοσώματα αποτελούνται από διάφορα στοιχεία που

ονομάζονται γονίδια. Κάθε γονίδιο επηρεάζει την κληρονομικότητα ενός ή περισσότερων χαρακτηριστικών. Τα γονίδια που επηρεάζουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά γνωρίσματα του ατόμου βρίσκονται σε συγκεκριμένες θέσεις του χρωμοσώματος που καλούνται τόποι (loci). Κάθε χαρακτηριστικό γνώρισμα του ατόμου έχει την δυνατότητα να εμφανιστεί με διάφορες μορφές, ανάλογα με την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το αντίστοιχο γονίδιο που το επηρεάζει. Οι διαφορετικές αυτές καταστάσεις που μπορεί να πάρει ένα γονίδιο, ονομάζονται αλληλόμορφα (τιμές χαρακτηριστικού γνωρίσματος). Κάθε γονότυπος (που στις περισσότερες περιπτώσεις είναι ένα μόνο χρωμόσωμα) αντιπροσωπεύει μια πιθανή λύση σε ένα πρόβλημα. Το μεταφρασμένο περιεχόμενο συγκεκριμένου χρωμοσώματος καλείται φαινότυπος και καθορίζεται από το χρήστη των ΓΑ, ανάλογα με το πρόβλημα που επιθυμεί να επιλύσει. Μια διαδικασία εξέλιξης που εφαρμόζεται επί ενός πληθυσμού χρωμοσωμάτων αντιστοιχεί σε εκτενή διερεύνηση ενός χώρου πιθανών λύσεων. Απαραίτητη προϋπόθεση για την επιτυχημένη έκβαση μίας τέτοιας διερεύνησης αποτελεί η εξισορρόπηση δύο διαδικασιών, της διατήρησης και περαιτέρω αξιοποίησης των καλύτερων λύσεων (exploitation versus exploration) με σκοπό την αναζήτηση μιας καλύτερης λύσεως ανάμεσά τους και της όσο το δυνατόν καλύτερης εξερεύνησης όλου του διαστήματος πιθανών λύσεων.

Κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας, το ενδιαφέρον για τις διαδικασίες βελτιστοποίησης έχει αυξηθεί τόσο πολύ, λόγω της ύπαρξης πολύπλοκων και με πολύ αυστηρούς περιορισμούς προβλημάτων, που μπορούν να λυθούν μόνο προσεγγιστικά. Οι ΓΑ αποσκοπούν στην επίλυση τέτοιου είδους προβλημάτων. Αν και ανήκουν στην κατηγορία των στοχαστικών αλγορίθμων, διαφέρουν σε πολύ μεγάλο βαθμό από τους αλγόριθμους που εφαρμόζουν τυχαίες μεθόδους αναζήτησης και βελτιστοποίησης, αφού είναι σε θέση να συνδυάζουν στοιχεία τόσο από άμεσες όσο και από στοχαστικές τεχνικές αναζήτησης. Ένα άλλο εξίσου σημαντικό χαρακτηριστικό τους είναι ότι διατηρούν ένα πληθυσμό πιθανών λύσεων τον οποίο επεξεργάζονται, σε αντίθεση με όλες τις άλλες μεθόδους αναζήτησης που επεξεργάζονται ένα μόνο σημείο του διαστήματος πιθανών λύσεων. Ένας ΓΑ πραγματοποιεί αναζήτηση προς πολλές κατευθύνσεις μέσω της διατήρησης ενός πληθυσμού πιθανών λύσεων και μέσω της καταγραφής και ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ αυτών των κατευθύνσεων.

Κατά την εκτέλεση ενός Γενετικού Αλγορίθμου, ο πληθυσμός των πιθανών λύσεων υφίσταται μια προσομοιωμένη γενετική εξέλιξη. Σε κάθε γενεά, οι σχετικά καλές λύσεις αναπαράγονται, ενώ οι σχετικά κακές αφαιρούνται. Ο διαχωρισμός και η αξιολόγηση των διαφόρων λύσεων γίνεται με τη χρήση μιας αντικειμενικής συνάρτησης ή συνάρτησης ικανότητας (objective ή fitness function), η οποία έχει το ρόλο του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο εξελίσσεται ο πληθυσμός. Στη βιβλιογραφία, η αντικειμενική συνάρτηση αναφέρεται και ως συνάρτηση αξιολόγησης ή συνάρτηση καταλληλότητας.

### 2.3. Η δομή ενός ΓΑ

Η δομή ενός απλού ΓΑ έχει σε γενικές γραμμές ως εξής:

Κατά τη διάρκεια της επαναληπτικής εκτέλεσης  $t$ , ο ΓΑ διατηρεί ένα πληθυσμό από  $N$  πιθανές λύσεις,  $P(t) = x'_1, \dots, x'_N$ . Κάθε λύση αξιολογείται για να προσδιορισθεί το μέτρο της καταλληλότητάς της. Αφού ολοκληρωθεί η αξιολόγηση όλων των στοιχείων του πληθυσμού, δημιουργείται ένας νέος πληθυσμός (επαναληπτική εκτέλεση  $t + 1$ ) που προκύπτει από την επιλογή των καταλληλότερων στοιχείων του πληθυσμού της προηγούμενης γενεάς. Μερικά μέλη από το νέο αυτό πληθυσμό υφίστανται μετατροπές με τη βοήθεια των διαδικασιών της μετάλλαξης (mutation) και της διασταύρωσης (crossover ή mating) σχηματίζοντας νέες πιθανές λύσεις. Η διασταύρωση συνδυάζει τα στοιχεία δύο χρωμοσωμάτων γονέων για να δημιουργήσει νέους απογόνους.

Η διασταύρωση εξυπηρετεί την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ διαφορετικών πιθανών λύσεων. Η διαδικασία της μετάλλαξης αλλάζει αυθαίρετα ένα ή περισσότερα γονίδια συγκεκριμένου χρωμοσώματος. Πραγματοποιείται με τυχαία αλλαγή γονιδίων με πιθανότητα ίση με το ρυθμό μετάλλαξης (mutation rate). Η μετάλλαξη εξυπηρετεί την εισαγωγή νέων πιθανών λύσεων στον πληθυσμό.

Με βάση τα προαναφερθέντα, ένας ΓΑ που χρησιμοποιείται για την επίλυση συγκεκριμένου προβλήματος πρέπει να αποτελείται από τα παρακάτω πέντε τμήματα:

1. Μια γενετική αναπαράσταση των πιθανών λύσεων του προβλήματος.
2. Ένα τρόπο δημιουργίας ενός αρχικού πληθυσμού των πιθανών λύσεων.

3. Μια αντικειμενική συνάρτηση αξιολόγησης που έχει το ρόλο του περιβάλλοντος, κατατάσσοντας τις λύσεις με βάση την καταλληλότητά τους, όπως αυτή εκφράζεται μέσω της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης.
4. Γενετικούς τελεστές που επιδρούν στη σύνθεση των παιδιών
5. Τιμές για τις διάφορες παραμέτρους που χρησιμοποιεί ο γενετικός αλγόριθμος (μέγεθος πληθυσμού, πιθανότητες εφαρμογής των γενετικών τελεστών, κ.λπ.).

#### 2.4. Πλεονεκτήματα των ΓΑ

Η χρήση των ΓΑ σε διάφορες εφαρμογές είναι ελκυστική για αρκετούς λόγους. Οι κυριότεροι είναι οι εξής :

- Μπορούν να λύσουν δύσκολα προβλήματα ταχέως και αξιόπιστα. Τόσο η θεωρία, όσο και η πράξη έχουν δείξει ότι προβλήματα που έχουν πολλές, δύσκολα προσδιοριζόμενες, λύσεις μπορούν να αντιμετωπισθούν καλύτερα από ΓΑ. Είναι αξιοσημείωτο ότι οι ΓΑ μπορούν να βρουν τα ακρότατα συναρτήσεων που παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις και καθιστούν ανεπαρκείς άλλες μεθόδους για την εύρεση των ακροτάτων τους.
- Μπορούν εύκολα να συνεργασθούν με υπάρχοντα μοντέλα και συστήματα. Οι ΓΑ προσφέρουν το σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης τους με τρόπο στα μοντέλα που χρησιμοποιούνται σήμερα, μη απαιτώντας την επανασχεδιάσή των μοντέλων αυτών. Επίσης, μπορούν εύκολα να συνεργαστούν με υπάρχον λογισμικό.
- Είναι εύκολα επεκτάσιμοι και εξελιξιμοί. Οι ΓΑ είναι ευεπίφοροι σε αλλαγές, επεκτάσεις και μετεξελίξεις, ανάλογα με τις ανάγκες ενός προβλήματος. Σε πολλές εφαρμογές έχουν αναφερθεί λειτουργίες των ΓΑ που δεν είναι ειλημμένες από τη φύση ή που έχουν υποστεί σημαντικές αλλαγές, πάντα προς όφελος της ταχύτητας επίλυσης των προβλημάτων. Παραλλαγές στο βασικό σχήμα ενός ΓΑ δεν είναι απλά ανεκτές αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις επιβάλλονται.
- Οι ΓΑ μπορούν να συμμετέχουν σε υβριδικές μορφές άλλων μεθόδων. Αν και η ταχύτητα επίλυσης των ΓΑ είναι μεγάλη, σε ειδικές περιπτώσεις προβλημάτων, όπου άλλες μέθοδοι ενδεχομένως έχουν πολύ υψηλή

αποδοτικότητα, υπάρχει η δυνατότητα χρησιμοποίησης υβριδικών σχημάτων ΓΑ με άλλη μέθοδο. Αυτό είναι αποτέλεσμα της μεγάλης ευελιξίας των ΓΑ

- Εφαρμόζονται σε πολύ περισσότερα πεδία από κάθε άλλη μέθοδο. Έτσι, ΓΑ μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην οικονομία, στη σχεδίαση μηχανών, στην επίλυση μαθηματικών εξισώσεων, στην εκπαίδευση Νευρωνικών Δικτύων και σε πολλούς άλλους τομείς.
- Δεν απαιτούν περιορισμούς στις συναρτήσεις που επεξεργάζονται. Ο κύριος λόγος που καθιστά τις παραδοσιακές μεθόδους δύσκαμπτες και ακατάλληλες για πολλά προβλήματα είναι η ύπαρξη περιορισμών, όπως ύπαρξη παραγώγων, η αναλυτική συνέχεια κλπ. Τέτοιου είδους περιορισμοί δεν είναι αναγκαίοι για την εφαρμογή των ΓΑ, χαρακτηριστικό που τους καθιστά κατάλληλους για μεγάλο φάσμα προβλημάτων.
- Δεν ενδιαφέρει η φύση του μεγέθους που καλείται να βελτιστοποιηθεί. Η μόνη «επικοινωνία» του ΓΑ με το μέγεθος αυτό είναι η αντικειμενική συνάρτηση. Αυτό εγγυάται την επιτυχία του ανεξάρτητα από τη σημασία του προβλήματος. Ασφαλώς, το γεγονός αυτό δε σημαίνει ότι δεν υπάρχουν άλυτα προβλήματα για τους ΓΑ. Όπου, όμως, δεν τα καταφέρνουν, η αιτία είναι η φύση του χώρου που ερευνούν και όχι το πληροφοριακό περιεχόμενο του προβλήματος.
- Είναι η μόνη μέθοδος που κάνει ταυτόχρονα εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης και εκμετάλλευση της ήδη επεξεργασμένης πληροφορίας. Ο συνδυασμός αυτός σπανίως συναντάται σε οποιαδήποτε άλλη μέθοδο. Με τις μεθόδους τυχαίας αναζήτησης γίνεται καλή εξερεύνηση του χώρου αλλά δεν γίνεται εκμετάλλευση της πληροφορίας. Αντίθετα, με την άμεση αναζήτηση στην αντικειμενική συνάρτηση (hillclimbing) γίνεται καλή εκμετάλλευση της πληροφορίας, αλλά όχι καλή εξερεύνηση. Συνήθως, τα δύο αυτά χαρακτηριστικά είναι αντικρουόμενα. Το επιθυμητό είναι να συνυπάρχουν και τα δύο προς όφελος της όλης διαδικασίας. Οι ΓΑ επιτυγχάνουν το βέλτιστο συνδυασμό εξερεύνησης και εκμετάλλευσης, χαρακτηριστικό που τους καθιστά ιδιαίτερα αποδοτικούς και ελκυστικούς.

## 2.5. Κύρια χαρακτηριστικά ενός Γενετικού Αλγορίθμου.

Οι ΓΑ πλεονεκτούν αισθητά στη λύση προβλημάτων αναζήτησης και βελτιστοποίησης σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους. Αυτό συμβαίνει διότι διαφέρουν θεμελιωδώς από αυτές. Σύμφωνα με τον D. Goldberg [1], τα κυριότερα νέα χαρακτηριστικά που τους διαφοροποιούν αλλά και τους προσδίδουν υπεροχή είναι τα εξής:

1. Οι ΓΑ επεξεργάζονται ένα σύνολο τιμών που μπορούν να λάβουν οι μεταβλητές και όχι με τις ίδιες τις μεταβλητές του προβλήματος:
2. Οι ΓΑ κάνουν αναζήτηση σε πολλά σημεία ταυτόχρονα και όχι μόνο σε ένα. Σε πολλές μεθόδους βελτιστοποίησης, η επεξεργασία γίνεται βήμα προς βήμα, μεταβαίνοντας προσεκτικά από σημείο σε σημείο του πεδίου ορισμού του προβλήματος. Η βήμα προς βήμα επεξεργασία ενέχει αρκετούς κινδύνους, ο κυριότερος από τους οποίους είναι να περιορισθεί η αναζήτηση σε περιοχή τοπικού ακρότατου που δεν είναι ολικό. Οι ΓΑ εξαλείφουν αυτόν τον κίνδυνο επεξεργαζόμενοι ταυτόχρονα ένα ευρύ σύνολο σημείων. Επιλογή ενός πληθυσμού που να καλύπτει αντιπροσωπευτικά ένα μεγάλο εύρος τιμών μπορούν να προκύψουν ικανοποιητικά αποτελέσματα.
3. Οι ΓΑ χρησιμοποιούν μόνο την αντικειμενική συνάρτηση και καμία πρόσθετη πληροφορία:  
Πολλές μέθοδοι βελτιστοποίησης απαιτούν αρκετές βοηθητικές πληροφορίες για τη συνάρτηση που επεξεργάζονται. Τέτοιου είδους πληροφορίες δεν προαπαιτούνται από τους ΓΑ, υπό την έννοια ότι αξιοποιούν μόνο την πληροφορία που περιέχεται στην αντικειμενική συνάρτηση. Αυτό προσδίδει μεγάλη ευελιξία, αν και από την άλλη πλευρά ανακύπτει το ερώτημα αν συμφέρει να αγνοούνται βοηθητικές πληροφορίες. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί μορφές ΓΑ που αξιοποιούν και τέτοιες πληροφορίες (Knowledge-Based Genetic Algorithms).
4. Οι ΓΑ χρησιμοποιούν στοχαστικούς κανόνες αναζήτησης και όχι ντετερμινιστικούς:  
Η χρήση στοχαστικών κανόνων αναζήτησης είναι κυρίαρχο γνώρισμα των ΓΑ, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι η όλη διαδικασία βελτιστοποίησης εξελίσσεται στην τύχη.

Τα τέσσερα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά συμβάλλουν αποφασιστικά ώστε οι ΓΑ να διαθέτουν την ιδιότητα της ευρωστίας, που συζητήθηκε και στην ενότητα 2.3.

## **2.6. Βασικά στοιχεία ενός Γενετικού Αλγορίθμου**

Ένας τυπικός ΓΑ περιλαμβάνει απλές λειτουργίες που όμως ενσωματώνουν μεγάλη ταχύτητα βελτιστοποίησης. Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία που πρέπει να διαθέτει ένας ΓΑ.

Αρχικά, ένας ΓΑ πρέπει να διαθέτει στοιχεία που τον συνδέουν με το πρόβλημα που επιλύει. Η κωδικοποίηση και η αντικειμενική συνάρτηση επιτελούν αυτό το σκοπό και είναι απαραίτητα συστατικά για ένα ΓΑ.

### **2.6.1. Κωδικοποίηση**

Η κωδικοποίηση αφορά ένα σύνολο πιθανών λύσεων του προβλήματος. Η αναπαράσταση των λύσεων πρέπει να γίνει κατά μαθηματικό τρόπο, που καθιστά δυνατή την επεξεργασία τους από τον υπολογιστή. Εξάλλου, κωδικοποίηση υπάρχει και στο φυσικό μοντέλο (χρωμοσώματα) και μάλιστα όλες οι αλλαγές που παρατηρούνται στους οργανισμούς γίνονται μέσω των κωδικοποιημένων χαρακτηριστικών των χρωμοσωμάτων. Κύριος στόχος της κωδικοποίησης είναι η ικανοποιητική περιγραφή των επιμέρους χαρακτηριστικών των λύσεων, με στόχο να διευκολύνονται οι επόμενες λειτουργίες του αλγορίθμου (κυρίως η επιλογή). Αποτέλεσμα της κωδικοποίησης πρέπει να είναι η αξιοποίηση ομοιοτήτων ανάμεσα στα άτομα με σκοπό την κατάλληλη εκμετάλλευσή τους, αφού οι ομοιότητες βοηθούν την κατεύθυνση του ψαξίματος.

Η απλούστερη είναι η κωδικοποίηση με δυαδικά ψηφία (bits) σύμφωνα με την οποία κάθε λύση περιγράφεται μέσω δυαδικής συμβολοσειράς (binary string) καθορισμένου μήκους. Πάντως, έχουν αναφερθεί ποικίλες μορφές κωδικοποιήσεων, εκάστη των οποίων εξαρτάται από το υπό εξέταση πρόβλημα. Καμία κωδικοποίηση δεν είναι αποτελεσματική για όλα τα προβλήματα, ενώ είναι πιθανό ένα πρόβλημα να επιδέχεται περισσότερες από μια κωδικοποιήσεις. Το βέβαιο είναι ότι η κωδικοποίηση αποτελεί κρίσιμο βήμα για την εφαρμογή ενός ΓΑ. Η καταλληλότητα της κωδικοποίησης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διαίσθηση και την πείρα του σχεδιαστή. Μάλιστα,

μερικές φορές, προφανείς τρόποι κωδικοποίησης δεν είναι αρκετά (ή και καθόλου) αποτελεσματικοί. Κατά συνέπεια, προκύπτει το κρίσιμο ερώτημα, ποιοί είναι οι παράγοντες που καθορίζουν το είδος της κωδικοποίησης που πρέπει να επιλεγεί για συγκεκριμένο πρόβλημα. Δεν υπάρχει απάντηση που να καλύπτει όλες τις περιπτώσεις. Μερικές γενικού τύπου κατευθύνσεις θα φανούν στην περαιτέρω ανάπτυξη του θέματος με τη βοήθεια παραδειγμάτων.

### **2.6.2. Αντικειμενική Συνάρτηση**

Το δεύτερο βασικό στοιχείο σύνδεσης ενός ΓΑ με το εκάστοτε προς επίλυση πρόβλημα είναι η αντικειμενική συνάρτηση. Αυτή λαμβάνει ως είσοδο μια αποκωδικοποιημένη συμβολοσειρά και επιστρέφει μια τιμή (συνήθως πραγματική), που είναι ανάλογη της καταλληλότητας της λύσεως του. Η τιμή αυτή αποτελεί και τον καθοριστικό παράγοντα επιβίωσης και πολλαπλασιασμού ή όχι του ατόμου. Ουσιαστικά, είναι η μόνη πληροφορία που δέχεται ο αλγόριθμος για το πρόβλημα που επιλύει. Είναι σημαντικό η συνάρτηση αυτή να είναι εύκολα υπολογίσιμη, ώστε να μην επιβραδύνει τη βελτιστοποίηση.

Με τον καθορισμό της κωδικοποίησης και της αντικειμενικής συνάρτησης, ορίζεται το πρόβλημα και ολοκληρώνεται το πρώτο στάδιο εφαρμογής ενός ΓΑ. Αξίζει να σημειωθεί η αυτονομία και ανεξαρτησία αυτού του σταδίου από τα επόμενα μέρη. Οι λειτουργίες που αναφέρονται στη συνέχεια δεν εξαρτώνται από τον τρόπο περιγραφής των ατόμων στο περιβάλλον και από τον τρόπο αξιολόγησης της καταλληλότητάς τους. Αυτό είναι σημαντικό χαρακτηριστικό, αφού επιτρέπει την επίλυση πολλών προβλημάτων με απλή αλλαγή της αντικειμενικής συνάρτησης, ίσως και της κωδικοποίησης. Ο ορισμός της κωδικοποίησης και της αντικειμενικής συνάρτησης είναι αναγκαίος σε κάθε ΓΑ, ανεξαρτήτως του προς επίλυση προβλήματος.

### **2.6.3. Γενετικές Διαδικασίες**

Στο επόμενο στάδιο περιλαμβάνονται διαδικασίες που ανήκουν στη φάση λειτουργίας του ΓΑ. Κατά το στάδιο αυτό παράγεται το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης. Η αλληλουχία διαδικασιών ενός ΓΑ αποτελείται από τις ακόλουθες φάσεις (βήματα):

#### **1. Έναρξη (Initialization)**



2. Αποκωδικοποίηση (Decoding)
3. Υπολογισμός καταλληλότητας ή αξιολόγηση (Fitness calculation ή Fitness evaluation)
4. Αναπαραγωγή (Reproduction)
  - I. Επιλογή (Selection)
  - II. Διασταύρωση (Crossing ή mating)
  - III. Μετάλλαξη (Mutation)
5. Επανάληψη από το βήμα (2) μέχρι να ικανοποιηθεί το κριτήριο τερματισμού του ΓΑ

Έναρξη είναι το βήμα στο οποίο ορίζεται ο αρχικός πληθυσμός, επί του οποίου πραγματοποιούνται οι λειτουργίες του ΓΑ. Ο πληθυσμός αυτός επιλέγεται με τυχαίο τρόπο ανάμεσα σε όλες τις δυνατές τιμές των μεταβλητών του προβλήματος, ενώ το μέγεθός του ορίζεται από το χρήστη του ΓΑ. Συνήθως, το μέγεθος αυτό εξαρτάται από τους υπολογιστικούς πόρους που ο χρήστης έχει στη διάθεσή του. Σε μερικές υλοποιήσεις, η επιλογή των αρχικών σημείων γίνεται με ευριστικές μεθόδους, προσφέροντας εξαρχής πλεονέκτημα στην αναζήτηση της βέλτιστης λύσεως.

Αφού προκύψει η πρώτη γενιά, ο ΓΑ εισέρχεται στο επαναληπτικό τμήμα του. Ο πληθυσμός πρέπει να αξιολογηθεί, δηλαδή να μετρηθεί η καταλληλότητα του κάθε ατόμου χωριστά. Για να πραγματοποιηθεί αυτό, πρέπει να γίνει αποκωδικοποίηση χαρακτηριστικών και, στη συνέχεια, ο υπολογισμός της απόδοσης των ατόμων. Σκοπός της λειτουργίας αξιολόγησης είναι να υπολογισθεί για κάθε άτομο του πληθυσμού η καταλληλότητά του για την επίλυση του προβλήματος. Συνεπώς, ο υπολογισμός της καταλληλότητας είναι θεμελιώδης λειτουργία για το ΓΑ. Η εφαρμογή του υπολογισμού είναι πολύ απλή (τουλάχιστον για απλά προβλήματα). Για κάθε συμβολοσειρά του τρέχοντος πληθυσμού, υπολογίζεται η απόδοσή της μέσω της ήδη γνωστής αντικειμενικής συνάρτησης. Σε περισσότερο σύνθετα προβλήματα, ο υπολογισμός ικανότητας μπορεί να ισοδυναμεί με την εκτέλεση μιας εργαστηριακής προσομοίωσης.

#### 2.6.4. Αναπαραγωγή

Στη συνέχεια, περιγράφεται η σημαντικότερη λειτουργία ενός ΓΑ, η αναπαραγωγή. Εδώ πραγματοποιείται ο κύριος όγκος της εργασίας του αλγορίθμου. Η δομή της αναπαραγωγικής διαδικασίας είναι σύνθετη και περιλαμβάνει τη διασταύρωση και τη μετάλλαξη. Πριν την αναπαραγωγή, εκτελείται η διαδικασία της επιλογής. Μέσω της επιλογής, εφαρμόζεται στο πλαίσιο εφαρμογής ενός ΓΑ, ο νόμος της επιβίωσης του ικανότερου προσδιορίζονται ποια άτομα από τον υπάρχοντα πληθυσμό θα λάβουν μέρος στην αναπαραγωγή και θα κληροδοτήσουν στην επόμενη γενεά μέρος ή το σύνολο των χαρακτηριστικών τους. Στόχος της λειτουργίας της επιλογής είναι να επιτυγχάνεται αύξηση των ικανότερων ατόμων ώστε τελικά, μετά από αναπαραγωγή αρκετών γενεών, αυτά να επικρατήσουν. Εφαρμογή ΓΑ χωρίς δυνατότητα επιλογής κατά την αναπαραγωγική του διαδικασία ισοδυναμεί με τυχαία διερεύνηση. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι υλοποίησης της επιλογής στο πλαίσιο εφαρμογής ενός ΓΑ. Δεδομένου, όμως, ότι στη βασική μορφή του αλγορίθμου το μέγεθος του πληθυσμού από γενεά σε γενεά δεν αλλάζει, κάθε τεχνική επιλογής, για να δικαιώνει τον προορισμό της, οφείλει να αποδίδει μεγαλύτερη πιθανότητα αναπαραγωγής σε άτομα που αξιολογούνται μέσα στο τεχνητό περιβάλλον ως τα ικανότερα. Ο τελεστής αναπαραγωγής μπορεί να εκφραστεί σε αλγοριθμική βάση, με πολλούς τρόπους.

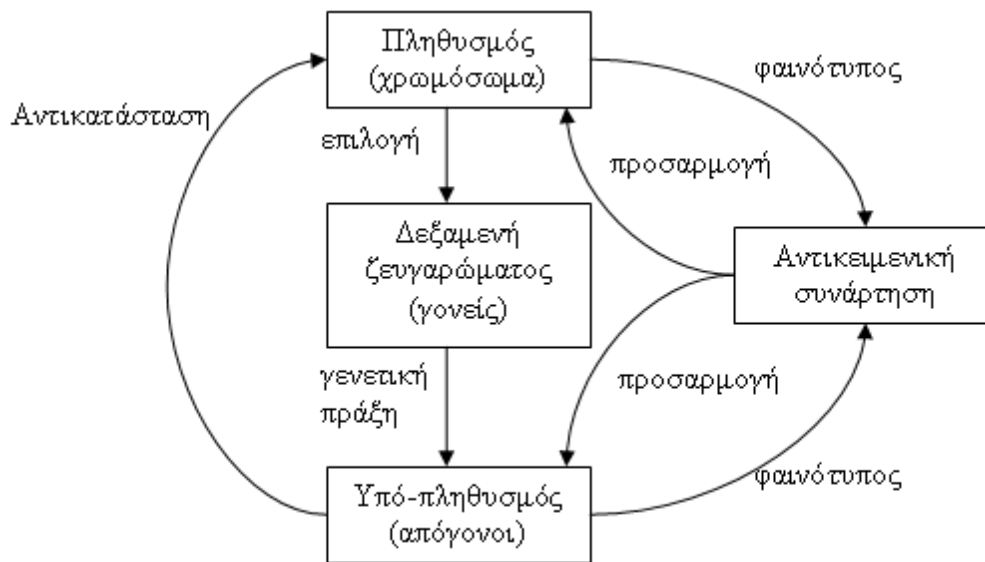
Ο προσωρινός πληθυσμός που προέκυψε από τη διαδικασία της επιλογής πρέπει να περάσει από τη διαδικασία αναπαραγωγής για να πραγματοποιηθεί ένα είδος γονιμοποίησης, όπως συμβαίνει και στη φύση. Η νέα, λοιπόν, ομάδα ατόμων που προέκυψε από την επιλογή σχηματίζει με τυχαίο τρόπο ομάδες των δύο. Το ποιος θα αναπαραχθεί με ποιον από τα άτομα του τρέχοντος πληθυσμού επηρεάζει την ταχύτητα σύγκλισης ενός ΓΑ. Μέχρι τώρα, αυτό αποτελεί αντικείμενο μελέτης, οπότε σε όλες τις εφαρμογές που αναφέρονται στη βιβλιογραφία η αναπαραγωγή γίνεται με τυχαίο τρόπο. Σε κάθε ομάδα, τα δύο άτομα που αναπαράγονται παίρνουν μέρος σε μια απλή λειτουργία ανταλλαγής γενετικού υλικού που ονομάζεται διασταύρωση. Η διασταύρωση αποτελεί απαραίτητη λειτουργία που συμβάλλει αποφασιστικά στην επίδοση ενός ΓΑ. Λόγω της σημασίας αυτής, έχει γίνει αρκετή έρευνα και έχουν επινοηθεί πολλοί τρόποι υλοποίησής της. Μερικοί τρόποι μπορούν να εφαρμοσθούν σε κάθε τύπο προβλήματος, ενώ άλλοι είναι καταλληλότεροι και εξειδικευμένοι για

ειδικές περιπτώσεις. Στόχος της διασταύρωσης είναι η νέα γενεά που θα προκύψει μετά την εφαρμογή της να περιλαμβάνει άτομα που θα διαφέρουν από τους γονείς τους και θα φέρουν συνδυασμό των καλύτερων χαρακτηριστικών τους. Ερευνητές που ασχολούνται χρόνια με τους ΓΑ υποστηρίζουν ότι, αν αφαιρεθεί η διασταύρωση από ένα ΓΑ, μειώνεται σημαντικά η απόδοσή του, αν και αυτή δεν είναι άποψη καθολικής αποδοχής [2-3]. Ενδεικτική της χρησιμότητας της διασταύρωσης είναι η ανακατεύθυνση της διερεύνησης σε ανεξερεύνητες περιοχές του χώρου αναζήτησης. Κατ' αυτόν τον τρόπο, διευρύνεται το πεδίο δράσης του αλγορίθμου και αυξάνουν οι πιθανότητες επιτυχίας του. Επίσης, τα νέα άτομα περιλαμβάνουν συνδυασμούς χαρακτηριστικών των γονέων τους και με αυτό τον τρόπο μπορούν να προκύψουν επιτυχημένοι συνδυασμοί υψηλής ικανότητας. Υπάρχει, βέβαια, το ενδεχόμενο η διασταύρωση να δώσει χειρότερους απογόνους, αλλά αυτοί δεν θα έχουν μεγάλη πιθανότητα πολλαπλασιασμού στους επόμενους αναπαραγωγικούς κύκλους, λόγω μικρής απόδοσης. Στην πράξη, η διασταύρωση χρησιμοποιείται με παραμετροποιημένη μορφή, δηλαδή πραγματοποιείται με πιθανότητα, γνωστή ως πιθανότητα διασταύρωσης (crossover probability), που καθορίζεται από το σχεδιαστή του ΓΑ. Συνήθως, αυτή η πιθανότητα ποικίλλει από πρόβλημα σε πρόβλημα, ενώ είναι δυνατό και να μεταβάλλεται κατά την εκτέλεση του ΓΑ. Επίσης, πρέπει να αναφερθεί ότι η τιμή της πιθανότητας αυτής επηρεάζει το χρόνο εκτέλεσης του ΓΑ, δηλαδή την ταχύτητα σύγκλισής του.

#### **2.6.5. Μετάλλαξη**

Τελευταία στον κύκλο αναπαραγωγικής διαδικασίας και, ίσως, λιγότερο σημαντική, αλλά πάντως χρήσιμη, είναι η μετάλλαξη. Είναι μια λειτουργία που όταν συμβαίνει αραιά στη φύση δρα βελτιωτικά για τους οργανισμούς και γενικά για την εξέλιξη της ζωής. Ανάλογος είναι ο ρόλος της και στα τεχνικά περιβάλλοντα. Η λειτουργία της είναι απλή αφού επενεργεί σε ένα μόνο άτομο κάθε φορά. Καθώς αντιγράφονται δυαδικά ψηφία από το γονέα στον απόγονο, επιλέγεται τυχαία με μικρή πιθανότητα, γνωστή ως πιθανότητα μετάλλαξης (mutation probability), ένα ψηφίο και αντιστρέφεται (από 0 σε 1 ή το αντίστροφο). Είναι πολύ σημαντικό η πιθανότητα να πραγματοποιηθεί η μετάλλαξη να είναι αρκετά μικρή (περίπου μία μετάλλαξη σε κάθε

χίλια ψηφία που αντιγράφονται), αφού στην αντίθετη περίπτωση ο ΓΑ εκφυλίζεται σε τυχαία διερεύνηση. Αν και υπάρχει κάποια σύγχυση για το ρόλο της μετάλλαξης, τόσο της φυσικής όσο και της τεχνητής, θεωρείται απαραίτητη γιατί λειτουργεί ως ασφαλιστική δικλείδα για τις περιπτώσεις κατά τις οποίες η επιλογή και η διασταύρωση, ενδεχομένως, χάσουν κάποιες πολύτιμες γενετικές πληροφορίες. Όταν συμβαίνει μετάλλαξη, επιφέρει ποικιλία στον πληθυσμό, ανακατευθύνει την αναζήτηση και εξασφαλίζει ότι κανένα σημείο του χώρου αναζήτησης δεν αποκλείεται από τη διαδικασία του φαξίματος. Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται μία επανάληψη ενός τυπικού ΓΑ.



Σχήμα 2.2. Μία επανάληψη ενός τυπικού αλγορίθμου.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΔΕΥΤΕΡΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [2-1] Holland J.H., *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, M.I.T. Press, 1975.
- [2-2] Goldberg D.E., *GENETIC ALGORITHMS in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison Wesley Publishing Company, Inc., 1989.
- [2-3] Michalewicz Z., *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, Springer-Verlag, 2nd ed., 1992.
- [2-4] Mitchel, Melanie, *An Introduction to Genetic Algorithms*, MIT Press, 1996.

- [2-5] Davis L., *Handbook of Genetic Algorithms*, Van Nostrand Reinhold, 1991.
- [2-6] Νικολόπουλος Χρήστος, *Τεχνολογίες και Εφαρμογές Ευφυών Κεραίων*, Διδακτορική Διατριβή, 2014.
- [2-7] Σπυρίδων Λυκοθανάσης, «Γενετικοί Αλγόριθμοι και Εφαρμογές», Πάτρα, 2001.



### **3. ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΑΝΑΛΙΩΝ ΣΕ ΚΥΨΕΛΩΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΠΑΡΕΜΒΑΛΛΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΤΗΛΕΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΕΥΡΥΕΚΠΙΟΜΠΗΣ**

Με βάση το πρότυπο της Υπηρεσίας Ευρυεκπομπής Επίγειας Ψηφιακής Τηλεόρασης (Digital Video Broadcasting – Terrestrial, DVB – T) [3.1], η ευρυεκπομπή ψηφιακής τηλεόρασης μπορεί να μεταδοθεί σε αισθητά μικρότερο εύρος ζώνης σε σχέση με την αναλογική ευρυεκπομπή. Ως εκ τούτου, μετά τη μετάβαση από την αναλογική στην ψηφιακή τηλεοπτική ευρυεκπομπή, ένα σημαντικό μέρος της ζώνης UHF, συγκεκριμένα το τμήμα 470 – 862 MHz, θα μπορεί να διατεθεί για νέες υπηρεσίες. Αυτό το τμήμα του UHF φάσματος, - γνωστό ως Ψηφιακό Μέρισμα – αναμένεται να παράσχει το πρόσθετο φάσμα που είναι απαραίτητο για την εξέλιξη από την παροχή παραδοσιακών κινητών υπηρεσιών φωνής σε παροχή κινητών τηλεπικοινωνιών που μπορούν να υποστηρίξουν πολυμεσιές εφαρμογές. Πέραν της ανάγκης για προσεκτική απόδοση του Ψηφιακού Μερισματος, και οι φασματικές ευκαιρίες (TVWS) που προκύπτουν από τα κενά διαστήματα που είναι διασπαρμένα σε όλο το UHF φάσμα πρέπει να αξιοποιηθούν πλήρως. Επομένως, προκύπτει μία ενδιαφέρουσα πρόκληση για τη μελέτη της συμβατότητας μεταξύ της DVB – T και άλλων υπηρεσιών [3.2]. Η ταυτόχρονη λειτουργία κυψελωτών και DVB – T δικτύων στη ζώνη 470 – 862 MHz φαίνεται εφικτή εφόσον εφαρμοσθούν κατάλληλες τεχνικές καταπολέμησης των παρεμβολών και βέλτιστου σχεδιασμού των δικτύων. Παράλληλα, σημαντική προσπάθεια βρίσκεται σε εξέλιξη σε πολλές χώρες για τη μεταφορά των υπηρεσιών DVB – T που λειτουργούν στο ανώτερο μέρος των 790 – 862 MHz της UHF ζώνης σε χαμηλότερες συχνότητες. Εφόσον σε κάποιες χώρες τα κανάλια αυτά δεν ελευθερωθούν πλήρως από υπηρεσίες DVB – T, τα δίκτυα DVB – T που θα απομείνουν αναμένεται να προκαλούν παρεμβολές σε Διεθνείς Κινητές Επικοινωνίες (International Mobile Telecommunications – IMT) που ενδεχομένως λειτουργούν στην απελευθερωμένη φασματική ζώνη 790 – 862 MHz σε γειτονικές χώρες.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται μία μέθοδος απόδοσης καναλιών σε κυψελωτά δίκτυα τα οποία πρόκειται να λειτουργήσουν στη φασματική ζώνη των 790 – 862 MHz ή σε φασματικά κενά (white spaces) διασπαρμένα σε όλο το UHF φάσμα. Η προτεινόμενη μέθοδος απόδοσης καναλιών λαμβάνει υπόψη τόσο τους περιορισμούς

εντός του δικτύου (intra-network constraints) όσο και τους περιορισμούς οι οποίοι επιβάλλονται εξωτερικά. Οι περιορισμοί αυτοί αφορούν κυρίως τις παρεμβολές που προκαλούνται από γειτονικούς σταθμούς ευρυεκπομπής ψηφιακής τηλεόρασης, οι οποίοι καλύπτουν και εξυπηρετούν ένα τμήμα της γεωγραφικής περιοχής που εξυπηρετείται ταυτοχρόνως και από το κυψελωτό δίκτυο. Αυτός ο τύπος παρεμβολής μπορεί να εμφανισθεί ακόμα και σε χώρες οι οποίες έχουν αποδώσει το Ψηφιακό Μέρισμα αποκλειστικά σε υπηρεσίες IMT, εξαιτίας επιβλαβών παρεμβολών από σταθμούς DVB – T του εξωτερικού που βρίσκονται κοντά στα σύνορά τους.

Ένα επαναληπτικό σχήμα βασισμένο σε Γενετικούς Αλγορίθμους χρησιμοποιείται για την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου, η οποία αποσκοπεί στη μεγιστοποίηση της συνολικής χρησιμοποίησης του φάσματος και στη διασφάλιση του ότι όλα τα κανάλια που χρησιμοποιούνται από το κυψελωτό δίκτυο δεν παρεμβάλλονται από γειτονικούς σταθμούς DVB – T. Καίτοι δεν αποτελεί άμεσο στόχο του προτεινόμενου σχήματος, ένα πολύ υψηλό επίπεδο δικαιοσύνης εμφανίζεται ως ευνοϊκή παρενέργεια του και αποδίδεται στο σημαντικά βελτιωμένο τρόπο απόδοσης καναλιών στις κυψέλες του δικτύου. Όπως είναι αναμενόμενο, τόσο η συνολική φασματική χρησιμοποίηση όσο και η δικαιοσύνη μειώνονται όταν το μέγεθος της παρεμβολής των σταθμών DVB – T αυξάνεται. Επιπλέον, σε έκτακτες περιπτώσεις όπου κάποια κυψέλη του δικτύου ζητεί περισσότερα κανάλια, η προτεινόμενη μέθοδος επιτυγχάνει τη βέλτιστη απόδοση καναλιών με κόστος μία μικρή μείωση της συνολικής δικαιοσύνης στο δίκτυο. Λόγω της μειωμένης υπολογιστικής περιπλοκότητας της μεθόδου, το προτεινόμενο σχήμα επιτυγχάνει την απόδοση των ζητούμενων καναλιών σε πολύ μικρό χρόνο.

Το προτεινόμενο σχήμα έχει τη δυνατότητα προσαρμογής ( $\alpha$ ) σε κάθε σχήμα αναχρησιμοποίησης συχνότητας και ( $\beta$ ) σε κάθε συνδυασμό εξωτερικής παρεμβολής η οποία ενδεχομένως επηρεάζει το προτεινόμενο σχήμα απόδοσης καναλιών. Αυτές οι δύο δυνατότητες χαρακτηρίζουν την καλή λειτουργία του προτεινόμενου σχήματος. Αλλαγή σε κάποιο χαρακτηριστικό του δικτύου ή στις συνθήκες μετάδοσης θα οδηγήσει το προτεινόμενο σχήμα στο να προσαρμοσθεί αντιστοίχως. Ακόμη, το προτεινόμενο σχήμα μπορεί να προγραμματισθεί να ανταποκρίνεται σε απρόβλεπτες αλλαγές του εκ των προτέρων καθορισμένου πλήθους καναλιών που ζητούνται από μία ή και περισσότερες κυψέλες όταν συμβεί ένα έκτακτο γεγονός. Πρέπει να σημειωθεί ότι περιορισμένος αριθμός νέων κλήσεων δεν επανενεργοποιεί το προτεινόμενο σχήμα



κατανομής καναλιών. Αυτές οι κλήσεις θα επηρεάσουν αναλόγως μόνο την προσφερόμενη ποιότητα υπηρεσίας. Το προτεινόμενο σχήμα γίνεται πλήρως δυναμικό αφού, πέραν της βασικής λειτουργίας του, προγραμματίζεται να διαχειρίζεται το ζητούμενο από τις κυψέλες πλήθος καναλιών κατά δυναμικά μεταβαλλόμενο τρόπο.

Η βελτιστοποίηση υλοποιήθηκε με χρήση των ΓΑ καθώς, καίτοι πιθανολογικοί στη βάση τους, οι ΓΑ συνδυάζουν τη στοχαστική και άμεση αναζήτηση της βέλτιστης λύσης, έχοντας αποδειχθεί περισσότερο αποτελεσματικοί από τις άμεσες μεθόδους αναζήτησης. Ένα ακόμα πλεονέκτημα των μεθόδων αναζήτησης που βασίζονται στους ΓΑ είναι το ότι επεξεργάζονται περισσότερους από ένα πληθυσμούς, δηλαδή περισσότερες από μία πιθανές λύσεις του εκάστοτε προβλήματος, ενώ άλλες μέθοδοι επεξεργάζονται μόνο μία πιθανή λύση.

### **3.1. Σχετιζόμενες ερευνητικές εργασίες**

Καθώς η ζήτηση για ασύρματη επικοινωνία αυξάνεται, το πρόβλημα της απόδοσης φάσματος καθίσταται ολοένα και σημαντικότερο. Επίσης, καθώς το διαθέσιμο εύρος ζώνης για κυψελωτές επικοινωνίες είναι περιορισμένο, είναι επιτακτική η αποτελεσματική απόδοση καναλιών. Στα κυψελωτά δίκτυα, η απόδοση καναλιών μπορεί να αντιμετωπισθεί ως διαδικασία δυναμικής βελτιστοποίησης μεγάλης κλίμακας, που πρέπει να υλοποιηθεί σε στοχαστικά περιβάλλοντα υπό συγκεκριμένους περιορισμούς QoS. Οι μέθοδοι απόδοσης καναλιών μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις βασικές κατηγορίες, ονομαστικά την σταθερή απόδοση καναλιών, όπου τα κανάλια αποδίδονται μόνιμα στις κυψέλες του κυψελωτού δικτύου, τη δυναμική απόδοση καναλιών, όπου τα κανάλια αποδίδονται δυναμικά στις κυψέλες με βάση τις απαιτήσεις κίνησης και, τέλος, την υβριδική απόδοση καναλιών, η οποία αποτελεί συνδυασμό των δύο προηγούμενων προσεγγίσεων. Συγκρινόμενη με την σταθερή απόδοση καναλιών, η δυναμική απόδοση καναλιών επιτυγχάνει καλύτερη επίδοση όσον αφορά τη διέλευση πληροφορίας (throughput) και την καθυστέρηση με αντιστάθμισμα την αυξημένη πολυπλοκότητα υλοποίησης.

Τα σχήματα δυναμικής απονομής καναλιών έχουν μελετηθεί επισταμένα τα τελευταία χρόνια στο πλαίσιο των κυψελωτών ασύρματων επικοινωνιών. Ένα περιεκτικό σύνολο από ενδεικτικές εργασίες που αντιμετωπίζουν το πρόβλημα απόδοσης καναλιών

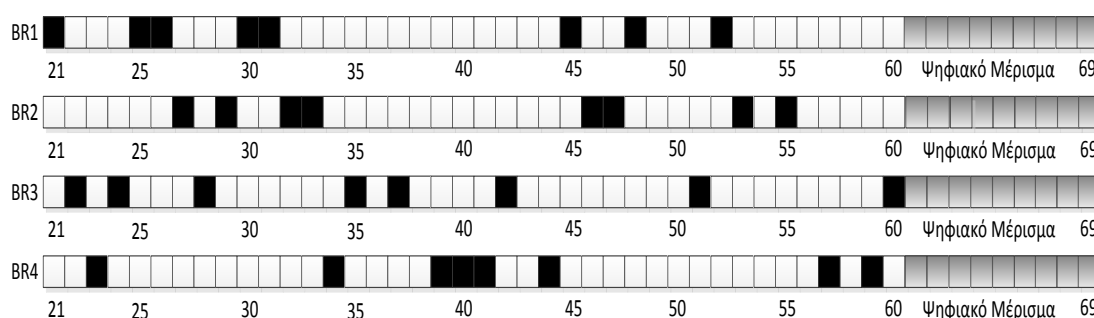
παρουσιάζεται στο [3.3]. Στο [1.2] εξελικτικοί αλγόριθμοι (Evolutionary Algorithms – EAs) χρησιμοποιούνται για την επίλυση του προβλήματος απόδοσης καναλιών σε δίκτυα GSM ρεαλιστικού μεγέθους. Στα [3.4] και [3.5] αντιμετωπίζεται το πρόβλημα απόδοσης καναλιών σε ασύρματα τοπικά δίκτυα (Wireless Local Area Networks – WLANs). Οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν χρησιμοποιηθεί για τη δυναμική απόδοση συχνοτήτων σε δίκτυα GSM [3.6] ή και για την απόδοση πόρων στο πλαίσιο της διαμόρφωσης OFDM στα [3.7] και [3.8]. Στο [3.9] παρουσιάζεται ένας αλγόριθμος απόδοσης συχνοτικών καναλιών βασισμένος στους γενετικούς αλγορίθμους για Ευρυζωνική Σταθερή Ασύρματη Πρόσβαση (Broadband Fixed Wireless Access – BFWA). Σχήματα που χρησιμοποιούν Γενετικούς Αλγορίθμους έχουν προταθεί για συστήματα TD – SCDMA στο [3.10] και για απόδοση καναλιών σε προβλήματα κινητού υπολογισμού (mobile computing), στο [3.11] ή γνωστικών επικοινωνιών. Καθώς διαθέτουν ορισμένα ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά που τους καθιστούν κατάλληλους για δυναμική απόδοση πόρων, οι γενετικοί αλγόριθμοι υιοθετούνται για την υλοποίηση της προτεινόμενης μεθόδου απόδοσης καναλιών.

### **3.2. Απόδοση καναλιών σε κυψελωτά δίκτυα που υφίστανται εξωτερική παρεμβολή**

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται μία μέθοδος απόδοσης καναλιών σε κυψελωτά δίκτυα τα οποία υπόκεινται σε παρεμβολές από εξωτερικές οντότητες εξαιτίας, κατά κύριο λόγο, γειτονικών σταθμών ευρυεκπομπής τηλεόρασης. Η προτεινόμενη μέθοδος μεγιστοποιεί τη χρησιμοποίηση του φάσματος λαμβάνοντας υπόψη: (α) τους ενδοδικτυακούς περιορισμούς όσον αφορά την αναχρησιμοποίηση συχνοτήτων, (β) τις εξωτερικές παρεμβολές, που συνήθως προκαλούνται εξαιτίας της ταυτόχρονης λειτουργίας του κυψελωτού δικτύου και γειτονικών συστημάτων ευρυεκπομπής και (γ) την κατανομή της τηλεπικοινωνιακής κίνησης των χρηστών του κυψελωτού δικτύου, στους οποίους πρέπει να αποδοθούν κανάλια για την εξυπηρέτησή τους.

Η ζώνη UHF (που εκτείνεται από τα 470 έως τα 862 MHz) αποτελείται από 49 κανάλια, έναστο των οποίων έχει 8 MHz εύρος ζώνης. Δηλαδή τα κανάλια αριθμούνται από το 21 έως το 69. Για τη διατύπωση του υπό μελέτη προβλήματος απόδοσης καναλιών, πρέπει να ληφθεί υπόψη η πιθανή απόδοση συχνοτήτων της UHF ζώνης σε

υπηρεσίες IMT και DVB – T τόσο σε εθνικό όσο και σε διεθνές επίπεδο. Στο Σχήμα 3.1 απεικονίζεται η απόδοση καναλιών σε τέσσερις υποθετικούς παρόχους ευρυεκπομπής DVB – T οι οποίοι λειτουργούν σε εθνικό επίπεδο και εκπέμπουν στην ίδια γεωγραφική περιοχή. Πέραν της κατάληψης των συχνοτήτων του Ψηφιακού Μέρισματος, στην προσπάθεια πλήρους αξιοποίησης του διαθέσιμου φάσματος, ένα κυψελωτό δίκτυο μπορεί και είναι επιθυμητό να λειτουργεί επίσης και στα TVWS. Για την υποθετική περίπτωση που απεικονίζεται στο Σχήμα 3.1, ένα κυψελωτό δίκτυο μπορεί να λειτουργεί και στα κανάλια 36, 38, 43, 49, 50, 54, 56 και 58.



**Σχήμα 3.1. Απόδοση των συχνοτήτων του Ψηφιακού Μέρισματος.**

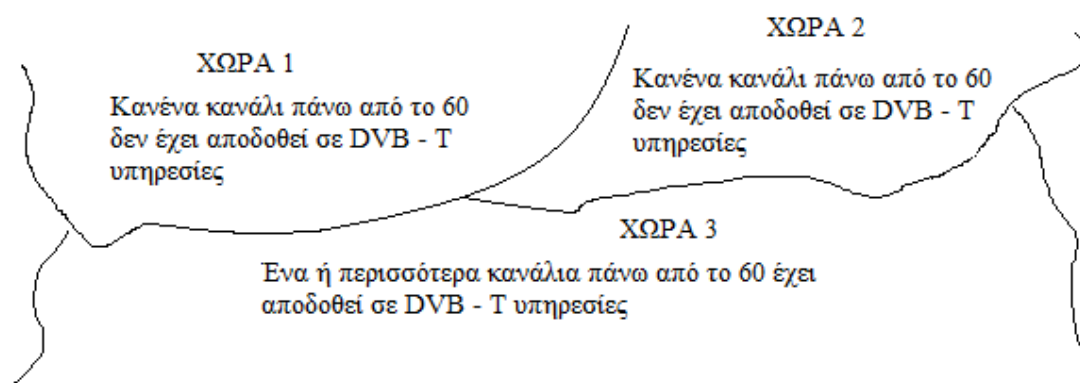
**Τέσσερις πάροχοι DVB – T οι οποίοι λειτουργούν στην ίδια γεωγραφική περιοχή εντός της ίδιας χώρας. Τα κανάλια τα οποία αποδίδονται σε έναστο εξ αυτών απεικονίζονται με μαύρο χρώμα.**

Στο Σχήμα 3.1 εμφανίζεται το υποσύνολο της ζώνης UHF. Εμφανίζονται, επίσης, με μαύρο χρώμα τα κανάλια που έχουν αποδοθεί στους τέσσερις παρόχους DVB – T (BR1, BR2, BR3 και BR4). Όπως φαίνεται από το Σχήμα 3.1, σε κάθε πάροχο DVB – T έχουν αποδοθεί 8 κανάλια των 8 MHz για να καλύψει τις ανάγκες του. Στην προκειμένη περίπτωση, λοιπόν, τα κανάλια 36, 38, 43, 49, 50, 54, 56 και 58 δεν χρησιμοποιούνται. Ως εκ τούτου, στη συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή αυτά τα κανάλια μπορούν να αποδοθούν σε τοπικό επίπεδο σε κάποιο άλλο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο, με σκοπό να επιτευχθεί μεγαλύτερη αξιοποίηση των φασματικών πόρων.

Σε διεθνές επίπεδο, στο Σχήμα 3.2 απεικονίζεται ένα υποθετικό σενάριο όπου οι χώρες 1 και 2 έχουν αποδώσει τα κανάλια 61 έως και 69 σε IMT υπηρεσίες, ενώ η χώρα 3 δεν έχει εικαθαρίσει αυτή τη φασματική ζώνη από υπηρεσίες DVB – T. Οι πάροχοι DVB – T στη χώρα 3, που λειτουργούν κοντά στα σύνορα της με τις χώρες 1 και 2 παρεμβάλλουν σε κυψελωτά δίκτυα υπηρεσιών IMT των χωρών 1 και 2 που λειτουργούν σε συχνοτήτες του Ψηφιακού Μέρισματος. Ως εκ τούτου, για να επιτευχθεί η μέγιστη

φασματική χρησιμοποίηση κατά το σχεδιασμό κυψελωτών δικτύων για υπηρεσίες IMT, πέραν του προφίλ αναχρησιμοποίησης συχνοτήτων το οποίο υιοθετείται και του διεθνούς συντονισμού που απαιτείται, πρέπει να ληφθούν υπόψη και ενδεχόμενες παρεμβολές από σταθμούς DVB – T του εξωτερικού που εκπέμπουν κοντά στα σύνορα των χωρών τους.

Για να αποφεύγονται παρεμβολές από το κυψελωτό δίκτυο προς γειτονικούς παρόχους ψηφιακής τηλεόρασης, το ηλεκτρικό πεδίο της κάτω ζεύξης του κυψελωτού δικτύου στα σύνορα του πρέπει να μην υπερβαίνει το κατώφλιο των 25 dBμV/m [3.12]. Ακόμη, για να διασφαλισθεί το ότι δεν παρεμβάλλονται γειτονικά κυψελωτά δίκτυα, το ηλεκτρικό πεδίο εκτός της περιοχής κάλυψης των παρόχων ψηφιακής τηλεόρασης πρέπει να είναι μικρότερο από κατώφλιο που έχει καθορισθεί στα 11.6 dBμV/m [3.12].



Σχήμα 3.2. Απόδοση των συχνοτήτων του Ψηφιακού Μερισματος σε τρεις γειτονικές χώρες.

Με βάση τις ανωτέρω υποθέσεις, οι τιμές του ηλεκτρικού πεδίου που είναι χαμηλότερες από τα προαναφερθέντα κατώφλια δεν λαμβάνονται υπόψη, καθώς δεν προκαλούν παρεμβολές. Σε πρακτικές εφαρμογές, για την εξάλειψη ενδοκυψελικών παρεμβολών (intercell interference), τα κανάλια που αποδίδονται σε κάθε κυψέλη ενός κυψελωτού δικτύου πρέπει να διαχωρίζονται από ένα ελάχιστο πλήθος καναλιών, έστω  $t$  κανάλια. Αυτό σημαίνει ότι αν το κανάλι  $i$  αποδίδεται για χρήση σε κάποια κυψέλη, τα κανάλια  $i-t, \dots, i+t$  δεν πρέπει να αποδοθούν στην κυψέλη αυτή.

Το πρόβλημα που αντιμετωπίζεται στη διατριβή είναι ο τρόπος με τον οποίο θα αποδοθούν τα διαθέσιμα κανάλια στις κυψέλες ενός κυψελωτού δικτύου, ώστε η συνολική φασματική χρησιμοποίηση να είναι βέλτιστη. Θεωρείται ότι ορισμένες κυψέλες υφίστανται παρεμβολή, δηλαδή ότι δεν μπορούν να χρησιμοποιήσουν ένα ή

περισσότερα κανάλια εξαιτίας εξωτερικής επιβλαβούς παρεμβολής, συνήθως από γειτονικούς παρόχους DVB – T. Η προτεινόμενη μέθοδος απόδοσης καναλιών αποδίδει κατά βέλτιστο τρόπο κανάλια στις κυψέλες που δεν υφίστανται παρεμβολή και, παράλληλα, επιτυγχάνει μία ιδιαίτερα δίκαιη μεταχείριση των κυψελών του δικτύου ως προς την απόδοση καναλιών. Αντί για λειτουργία σε δύο καταστάσεις (on–off), δηλαδή αντί να κατηγοριοποιούνται οι κυψέλες σε αυτές που είτε δεν υφίστανται είτε υφίστανται παρεμβολή, και την αντίστοιχη απόδοση καναλιών, μέσω της προτεινόμενης μεθόδου μπορούν να ενεργοποιηθούν περισσότεροι τρόποι λειτουργίας, αξιοποιώντας την αρχή της Προσαρμοστικής Κωδικοποίησης και Διαμόρφωσης (Adaptive Coding and Modulation – ACM) με στόχο την αύξηση της επίδοσης της προτεινόμενης μεθόδου.

### **3.2.1. Χρήσιμοι ορισμοί**

Για τη διατύπωση του υπό εξέταση προβλήματος απόδοσης συχνοτήτων (καναλιών), θεωρούνται τα ακόλουθα σύνολα:

*Κυψέλες*, το σύνολο των κυψελών οι οποίες αποτελούν ένα κυψελωτό δίκτυο.

*Κανάλια*, το σύνολο των καναλιών τα οποία μπορούν να αποδοθούν στις *Κυψέλες*.

*Ενδοδικτυακοί Περιορισμοί*, το σύνολο των περιορισμών που λαμβάνουν υπόψη τον τρόπο αναχρησιμοποίησης συχνοτήτων εντός του δικτύου.

*Εξωτερικοί Περιορισμοί*, το σύνολο των περιορισμών μέσω των οποίων λαμβάνονται υπόψη οι εξωτερικές παρεμβολές που προκαλούνται κατά κύριο λόγο από γειτονικούς σταθμούς DVB – T.

Τα ανωτέρω σύνολα περιορισμών καθορίζουν τους δύο τύπους παρεμβολής που λαμβάνονται υπόψη από το προτεινόμενο σχήμα, ονομαστικά την ενδοδικτυακή παρεμβολή (Intra-network Interference – II) και την παρεμβολή που προκαλείται από παρόχους DVB – T (Broadcasters Interference – BI).

*Απαιτήσεις*, το σύνολο που υποδηλώνει το πλήθος καναλιών που απαιτούνται κάθε στιγμή από κάθε κυψέλη. Τα στοιχεία του συνόλου *Απαιτήσεις*,  $r_n$ , καθορίζονται από το πλήθος των χρηστών που βρίσκονται εντός της κάλυψης κάθε κυψέλης και ζητούν

εξυπηρέτηση, όπως επίσης και από τις αντίστοιχες κλάσεις υπηρεσίας. Το πλήθος αυτό εξαρτάται από το μέγεθος των κυψελών, όπως αυτό καθορίζεται τόσο από την προβλεπόμενη κατανομή της τηλεπικοινωνιακής κίνησης εντός του κυψελωτού δικτύου όσο και από την εδαφική μορφολογία της περιοχής ανάπτυξης του κυψελωτού δικτύου. Καθώς ο αριθμός των χρηστών εντός ενός κελιού και ο αντίστοιχος τύπος ζητούμενων υπηρεσιών μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου, τα στοιχεία του συνόλου *Απαιτήσεις* μπορεί να μεταβάλλονται δυναμικά.

Στο παρόν κεφάλαιο θεωρείται ότι το πλήθος των καναλιών που διατίθενται για την εξυπηρέτηση των χρηστών είναι  $Q$ . Ως εκ τούτου, το σύνολο *Κανάλια* περιλαμβάνει  $Q$  στοιχεία. Αντιστοίχως, το κυψελωτό δίκτυο θεωρείται ότι αποτελείται από  $N$  κυψέλες. Η προτεινόμενη μέθοδος απόδοσης καναλιών αποδίδει τα  $Q$  στοιχεία του συνόλου *Κανάλια* στα  $N$  στοιχεία του *Κυψέλες*. Για να αντιμετωπίσει και τους δύο τύπους παρεμβολών, η μέθοδος λαμβάνει υπόψη τόσο τους *Ενδοδικτυακούς Περιορισμούς* όσο και τους *Εξωτερικούς Περιορισμούς*. Πέραν αυτού, το προτεινόμενο σχήμα ικανοποιεί τη ζήτηση των κινητών χρηστών αποδίδοντας σε κάθε κυψέλη ένα αριθμό καναλιών που είναι όσο το δυνατό πλησιέστερα στο αντίστοιχο στοιχείο του συνόλου *Απαιτήσεις*.

### 3.2.2 Ενδοδικτυακή Παρεμβολή

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, για την εξάλειψη ενδοκυψελικών παρεμβολών τα κανάλια που αποδίδονται σε κάθε κυψέλη ενός κυψελωτού δικτύου πρέπει να διαχωρίζονται από ένα ελάχιστο πλήθος καναλιών, έστω  $t$  κανάλια. Αυτό σημαίνει ότι αν το κανάλι  $i$  αποδίδεται για χρήση σε κάποια κυψέλη, τα κανάλια  $i-t, \dots, i+t$  δεν πρέπει να αποδοθούν στην κυψέλη αυτή.

Για να ληφθούν υπόψη οι ενδοδικτυακές παρεμβολές, ορίζεται ένας πίνακας ενδοδικτυακής συμβατότητας  $\mathbf{A}$  για να περιγράψει τον τρόπο με τον οποίο τα διαθέσιμα κανάλια αποδίδονται στις κυψέλες του κυψελωτού δικτύου χωρίς να προκαλούνται ενδοδικτυακές παρεμβολές. Τα στοιχεία του πίνακα  $\mathbf{A}$ ,  $a_{mn}$ , δηλώνουν τον ελάχιστο αριθμό καναλιών που πρέπει να διαχωρίζουν τις συχνότητες οι οποίες χρησιμοποιούνται στις κυψέλες  $m$  και  $n$ . Προφανώς  $a_{mn} = a_{nm}$ . Κατά την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου απόδοσης καναλιών πρέπει να ικανοποιούνται οι ακόλουθοι περιορισμοί:

(α) η ισχύς εκπομπής και η απόσταση ανάμεσα στους Σταθμούς Βάσης πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μην υπάρχει παρεμβολή μεταξύ μη χωρικά γειτονικών κυψελών

(β) οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται σε χωρικά γειτονικές κυψέλες πρέπει να διαχωρίζονται από ελάχιστο αριθμό καναλιών.

Γενικά, με τον κατάλληλο ορισμό των στοιχείων του **A**, κάθε προφίλ αναχρησιμοποίησης συχνοτήτων μπορεί να ενσωματωθεί στην παρούσα μέθοδο, λαμβάνοντας υπόψη τόσο αναλύσεις και προσομοιώσεις όσο και κατάλληλη επεξεργασία πραγματικών μετρήσεων. Το προφίλ αναχρησιμοποίησης συχνοτήτων ορίζεται ως  $f_u$  και λαμβάνει τιμές ίσες με το πλήθος γειτονικών κυψελών που δεν επιτρέπεται να χρησιμοποιήσουν το ίδιο κανάλι. Για παράδειγμα, αν  $f_u=1:4$ , τότε, για κάθε κυψέλη, οι τέσσερις γειτονικές της δεν επιτρέπεται να χρησιμοποιήσουν ίδια κανάλια με αυτά που χρησιμοποιεί αυτή.

### **3.2.3 Παρεμβολές από Γειτονικούς Τηλεοπτικούς Σταθμούς**

Για να ληφθούν υπόψη οι εξωτερικές παρεμβολές προς το υπό εξέταση κυψελωτό δίκτυο ορίζεται πίνακας **B** διαστάσεων  $(N \times Q)$ . Καθώς αυτός ο τύπος παρεμβολής οφείλεται κυρίως στη λειτουργία γειτονικών σταθμών τηλεόρασης που εκπέμπουν σε ένα ή περισσότερα κανάλια κοινά με το κυψελωτό δίκτυο, ο πίνακας **B** αντιπροσωπεύει την αντίστοιχη παρεμβολή και ορίζεται αντιστοίχως. Τα στοιχεία του **B**,  $b_{mi}$ , είναι ίσα με 1, αν η κυψέλη  $m$  δεν παρεμβάλλεται από κανένα τηλεοπτικό σταθμό στο κανάλι  $i$ , ή με 0, στην περίπτωση που η κυψέλη  $m$  παρεμβάλλεται στο κανάλι  $i$  από τουλάχιστον ένα τηλεοπτικό σταθμό. Γενικώς, κάθε πηγή εξωτερικής προς το κυψελωτό δίκτυο παρεμβολής μπορεί να ληφθεί υπόψη με κατάλληλο ορισμό των στοιχείων του **B**.

Σε πρακτικές εφαρμογές, οι πάροχοι κινητών υπηρεσιών καθορίζουν το προφίλ αναχρησιμοποίησης συχνοτήτων επεξεργαζόμενοι μετρήσεις παρεμβολών που έχουν ληφθεί στο περιβάλλον λειτουργίας των δικτύων τους. Η έκταση της παρεμβολής εξαιτίας της γεωγραφικής και φασματικής επικάλυψης των παρόχων τηλεόρασης που είναι γειτονικοί σε ένα κυψελωτό δίκτυο ποικίλλει ανάλογα και εξαρτάται τόσο από το πλήθος των παρεμβαλλόντων παρόχων όσο και από τις σχετικές καλύψεις. Αυτοί οι δύο παράγοντες καθορίζουν, αφενός, τις κυψέλες που παρεμβάλλονται και, αφετέρου, ποια κανάλια δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται από αυτές.

### 3.3 Το βασισμένο σε γενετικούς αλγορίθμους επαναληπτικό σχήμα

#### 3.3.1 Διατύπωση του προβλήματος απόδοσης καναλιών με βάση τους γενετικούς αλγορίθμους

Για την υλοποίηση του προτεινόμενου σχήματος απόδοσης καναλιών με στόχο τη βελτιστοποίηση της συνολικής φασματικής χρησιμοποίησης υιοθετήθηκε η προσέγγιση των γενετικών αλγορίθμων. Υπό αυτήν την προσέγγιση, τα κανάλια που αποδίδονται προς χρήση σε κάθε κυψέλη αποτελούν τα άτομα (individuals) του προτεινόμενου σχήματος γενετικών αλγορίθμων. Μία ομάδα ατόμων που δημιουργήθηκαν κατά τυχαίο τρόπο αποτελεί τον αρχικό πληθυσμό (την αρχική γενεά), δηλαδή την αρχική απόδοση καναλιών. Αντίστοιχα, οι ομάδες ατόμων που δημιουργούνται σε επόμενες γενιές, δηλαδή ο εξελισσόμενος πληθυσμός, αποτελούν τις ανανεωμένες εκδοχές του σχεδίου απόδοσης συχνότητων. Για το υπό εξέταση πρόβλημα απόδοσης καναλιών, η φασματική χρησιμοποίηση ποσοτικοποιείται μέσω μέτρου καταλληλότητας που σχετίζεται με το πλήθος των καναλιών που αποδίδονται ή σε κάποια κυψέλη - ατομική καταλληλότητα (fitness) της κυψέλης - ή σε ολόκληρο το κυψελωτό δίκτυο - συνολική καταλληλότητα του δικτύου. Επομένως, για την εφαρμογή του προτεινόμενου σχήματος πρέπει να ορισθούν τα ακόλουθα:

1. Μία γενετική περιγραφή των υποψηφίων λύσεων για το πρόβλημα.
2. Ο τρόπος δημιουργίας του αρχικού πληθυσμού ατόμων.
3. Το κατάλληλο μέτρο για την αποτίμηση της καταλληλότητας της λύσης σε κάθε βήμα του επαναληπτικού σχήματος.
4. Γενετικές διαδικασίες (επιλογή (selection), αναπαραγωγή (reproduction), διασταύρωση (crossover), μετάλλαξη (mutation)) που καθορίζουν τη δημιουργία απογόνων (ατόμων του εκάστοτε νέου πληθυσμού).
5. Κατάλληλες τιμές για τις εμπλεκόμενες παραμέτρους.

Αφού ξεκινήσει ως σύνολο από τυχαίως δημιουργημένα άτομα, ένας πληθυσμός – στη συγκεκριμένη εφαρμογή, ένα σχέδιο απόδοσης συχνότητων – εξελίσσεται. Σε κάθε επανάληψη, η καταλληλότητα των ατόμων τα οποία αποτελούν την τρέχουσα γενεά αξιολογείται για να μετρηθεί η ποιότητα της αντίστοιχης γενετικής περιγραφής.



Ακολουθώντας το βασιζόμενο στους γενετικούς αλγορίθμους προτεινόμενο σχήμα, τα πλέον κατάλληλα άτομα επιλέγονται και μετασχηματίζονται (επανασυνδυάζονται και πιθανώς μεταλλάσσονται, δηλαδή διαφοροποιούνται λίγο) με στόχο να ανανεώσουν τον πληθυσμό τον οποίο θα επεξεργασθεί το σχήμα στο επόμενο βήμα. Μετά από κάποιο πλήθος ανανεώσεων των γενεών, και εφόσον δεν παρατηρείται περαιτέρω βελτίωση στη συνολική καταλληλότητα της λύσης, το επαναληπτικό σχήμα θεωρείται ότι έχει συγκλίνει σε ένα βέλτιστο σχέδιο απόδοσης καναλιών.

Τα σύμβολα και οι οντότητες που χρησιμοποιούνται, όπως επίσης και οι αντίστοιχοι ορισμοί, παρουσιάζονται στον Πίν. 3.1.

**Πίνακας 3.1. Κατάλογος συμβόλων και οντοτήτων**

Χρησιμοποιούμενα Σύμβολα και Οντότητες	Ορισμός
Κυψέλη $n$ , $n=1,2,\dots,N$	Ο αριθμός ταυτότητας μιας κυψέλης σε ένα κυψελωτό δίκτυο.
Κανάλι $i$ , $i=1,2,\dots,Q$	Κανάλι που ανήκει στο διαθέσιμο τμήμα του φάσματος.
<b>A</b>	Ο πίνακας όπου ορίζονται οι ενδοδικτυακοί περιορισμοί.
<b>B</b>	Ο πίνακας όπου ορίζονται οι εξωτερικές παρεμβολές.
<b>G</b>	Ο πίνακας όπου απεικονίζεται η απόδοση καναλιών στις κυψέλες του δικτύου λαμβανομένων υπόψη μόνον των ενδοδικτυακών παρεμβολών.
<b>C</b>	Ο πίνακας όπου απεικονίζεται η απόδοση καναλιών στις κυψέλες του δικτύου που δεν υφίστανται παρεμβολή.
Πληθυσμός	$P$ σχέδια απόδοσης καναλιών που τροποποιούνται σε κάθε επανάληψη του προτεινόμενου σχήματος. Το μέλος του πληθυσμού με το μεγαλύτερο μέτρο καταλληλότητας αντιστοιχεί στη βέλτιστη απόδοση συχνοτήτων.
Νέα Γενεά	Μία νέα απόδοση συχνοτήτων.

### 3.3.2 Το προτεινόμενο επαναληπτικό σχήμα

Σε ένα δίκτυο που αποτελείται από  $N$  κυψέλες και χρησιμοποιεί  $Q$  κανάλια, ο προς βελτιστοποίηση κατάλογος κλήσεων (call list) είναι ένα διάνυσμα με  $N \cdot Q$  στοιχεία. Αντί να έχει ως στόχο τη βελτιστοποίηση ενός τέτοιου καταλόγου, το προτεινόμενο

σχήμα βελτιώνει σε κάθε επανάληψή του ένα πίνακα  $\mathbf{H}$  διαστάσεων  $(P \times Q)$ , που αντιπροσωπεύει τον εξελισσόμενο πληθυσμό. Οι  $P$  γραμμές του πίνακα  $\mathbf{H}$  αποτελούν τα μέλη του πληθυσμού και αντιπροσωπεύουν  $P$  υποψήφια σχήματα απόδοσης καναλιών. Το προτεινόμενο σχήμα επεξεργάζεται αυτά τα μέλη σε κάθε επανάληψη. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα στοιχεία του  $\mathbf{H}^{(k)}$ ,  $\mathbf{H}_{m,i}^{(k)}$ ,  $m=1,2,\dots,P$  και  $i=1,2,\dots,Q$ , λαμβάνουν την τιμή της κυψέλης  $v$  στην οποία το προτεινόμενο σχήμα προτίθεται να αποδώσει στο τερματικό  $m$  το κανάλι  $i$ . Επομένως,  $h_{m,i}^{(k)} = v$ ,  $v \in \{1,2,\dots,N\}$ . Το μέγεθος του πληθυσμού  $P$  αποτελεί κρίσιμη παράμετρο της μεθόδου καθώς, σε κάθε επανάληψη του προτεινόμενου σχήματος, το εργαλείο βελτιστοποίησης των Γενετικών Αλγορίθμων επεξεργάζεται ξεχωριστά τα  $P$  μέλη της εκάστοτε γενεάς (δηλαδή τις αντίστοιχες γραμμές του πίνακα  $\mathbf{H}^{(k)}$ ) με σκοπό να δημιουργήσει τον ανανεωμένο πίνακα  $\mathbf{H}^{(k+1)}$  και να διαμορφώσει τη νέα γενεά των υποψηφίων σχεδίων απόδοσης καναλιών.

Κάθε ανανεωμένη γενεά αποτελείται: (i) κατά 80% από απογόνους της προηγούμενης γενεάς που δημιουργούνται μέσω της διαδικασίας διασταύρωσης και (ii) κατά 20% από τυχαία επιλεγμένα στοιχεία του  $\mathbf{H}^{(k)}$  τα οποία έχουν υποστεί μετάλλαξη. Για να επιτευχθεί η διασταύρωση για την  $m$ -οστή γραμμή του πίνακα  $\mathbf{H}^{(k+1)}$ , επιλέγονται δύο τυχαίες γραμμές του πίνακα  $\mathbf{H}^{(k)}$ , έστω οι γραμμές  $s$  και  $n$ . Με βάση ένα τυχαίο αριθμό  $w$  που επιλέγεται ακολουθώντας την ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα  $(0,1)$ , τα στοιχεία της  $m$ -οστής γραμμής του  $\mathbf{H}^{(k+1)}$ ,  $\mathbf{h}_{m,i}^{(k+1)}$ ,  $m=1,2,\dots,P$ , προσδιορίζονται μέσω της σχέσης

$$\mathbf{h}_{m,i}^{(k+1)} = \mathbf{h}_{s,i}^{(k)}, i=1,2,\dots,Q \text{ αν } w < 0.5 \quad (3.1)$$

$$\mathbf{h}_{m,i}^{(k+1)} = \mathbf{h}_{n,i}^{(k)}, i=1,2,\dots,Q \text{ αν } w \geq 0.5$$

Το υπόλοιπο 20% των στοιχείων της  $m$ -οστής γραμμής του πίνακα  $\mathbf{H}^{(k+1)}$  προκύπτει ως αποτέλεσμα της μετάλλαξης που υλοποιείται μέσω πρόσθεσης στα υπόλοιπα στοιχεία της  $m$ -οστής γραμμής του πίνακα  $\mathbf{H}^{(k)}$  τυχαίων αριθμών που ακολουθούν την κανονική κατανομή. Επομένως, το συγκεκριμένο 20% των μελών του πληθυσμού των επομένων γενεών προσδιορίζεται ως το ακέραιο μέρος των στοιχείων

$$\mathbf{h}_{m,i}^{(k)} + x$$

$$\mathbf{h}_{m,i}^{(k+1)} = \mathbf{h}_{m,i}^{(k)} + x, \quad i=1,2,\dots,Q \quad (3.2)$$

όπου το  $x$  ακολουθεί την κανονική κατανομή με μέση τιμή μηδέν και τυπική απόκλιση ένα.

Μετά από μία τυχαία αρχική κατανομή καναλιών, το προφίλ αναχρησιμοποίησης συχνοτήτων επιβάλλεται από το προτεινόμενο σχήμα επιτρέποντας την απόδοση του καναλιού  $i$ ,  $i=1,2,\dots,Q$ , αποκλειστικά και μόνον στις κυψέλες του κυψελωτού δικτύου που ικανοποιούν τους *Ενδοδικτυακούς Περιορισμούς*, όπως αυτοί ορίζονται μέσω του πίνακα  $\mathbf{A}$ . Αυτή η απόδοση επιτυγχάνεται μέσω της κατάλληλης ενημέρωσης ενός πίνακα  $\mathbf{G}^{(k)}$  διαστάσεων  $(P \times N \times Q)$ . Οι τιμές των στοιχείων του πίνακα αυτού αρχικά τίθενται αρχικά ίσες με το 0, δηλαδή  $g_{m,n,i}^{(0)} = 0$ ,  $m=1,2,\dots,P$ ,  $n=1,2,\dots,N$  και  $i=1,2,\dots,Q$ . Στην  $k$ -οστή επανάληψη του προτεινόμενου σχήματος, η τιμή του στοιχείου  $g_{m,n,i}^{(k)}$  τίθεται ίση με το 1 εφόσον, σε συμμόρφωση με τους *Ενδοδικτυακούς Περιορισμούς*, το κανάλι  $i$  μπορεί να αποδοθεί στην κυψέλη  $n$  για κάθε  $m \in \{1,2,\dots,P\}$ . Σε αντίθετη περίπτωση, η τιμή του στοιχείου  $g_{m,n,i}^{(k)}$  τίθεται ίση με το μηδέν. Για παράδειγμα, εφόσον σύμφωνα με το προφίλ αναχρησιμοποίησης συχνοτήτων  $f_u$ , το κανάλι 3 μπορεί να αποδοθεί σε όλες τις κυψέλες που δεν παρεμβάλλονται στην κυψέλη 12, τότε  $g_{m,12,3}^{(k)} = 1$ , για κάθε  $m$ ,  $m=1,2,\dots,P$ .

Περαιτέρω, για να επιτευχθεί κατά την επανάληψη  $k$  συμμόρφωση με τους *Εξωτερικούς Περιορισμούς* χρησιμοποιείται ένας πίνακας  $\mathbf{C}^{(k)}$ , διαστάσεων  $(P \times N \times Q)$ . Για κάθε μέλος του υπό επεξεργασία πληθυσμού, το οποίο αντιπροσωπεύεται από την  $m$ -οστή γραμμή του πίνακα  $\mathbf{C}^{(k)}$ ,  $m=1,2,\dots,P$ , η τιμή του στοιχείου  $c_{m,n,i}^{(k)}$  τίθεται ίση με 1 εφόσον, λαμβανομένων υπόψη τόσο των *Ενδοδικτυακών Περιορισμών* όσο και των *Εξωτερικών Περιορισμών*, το κανάλι  $i$  μπορεί να αποδοθεί στην κυψέλη  $n$ . Σε αντίθετη περίπτωση, η τιμή του στοιχείου  $c_{m,n,i}^{(k)}$  τίθεται ίση με 0.

### 3.3.3. Υλοποίηση του προτεινόμενου σχήματος γενετικών αλγορίθμων

Ακολουθώντας το διάγραμμα ροής που απεικονίζεται στο Σχήμα 3.3, όπου απεικονίζεται ο αλγόριθμος λύσης του υπό εξέταση προβλήματος, το επαναληπτικό

σχήμα γενετικών αλγορίθμων υλοποιείται ως ακολούθως:

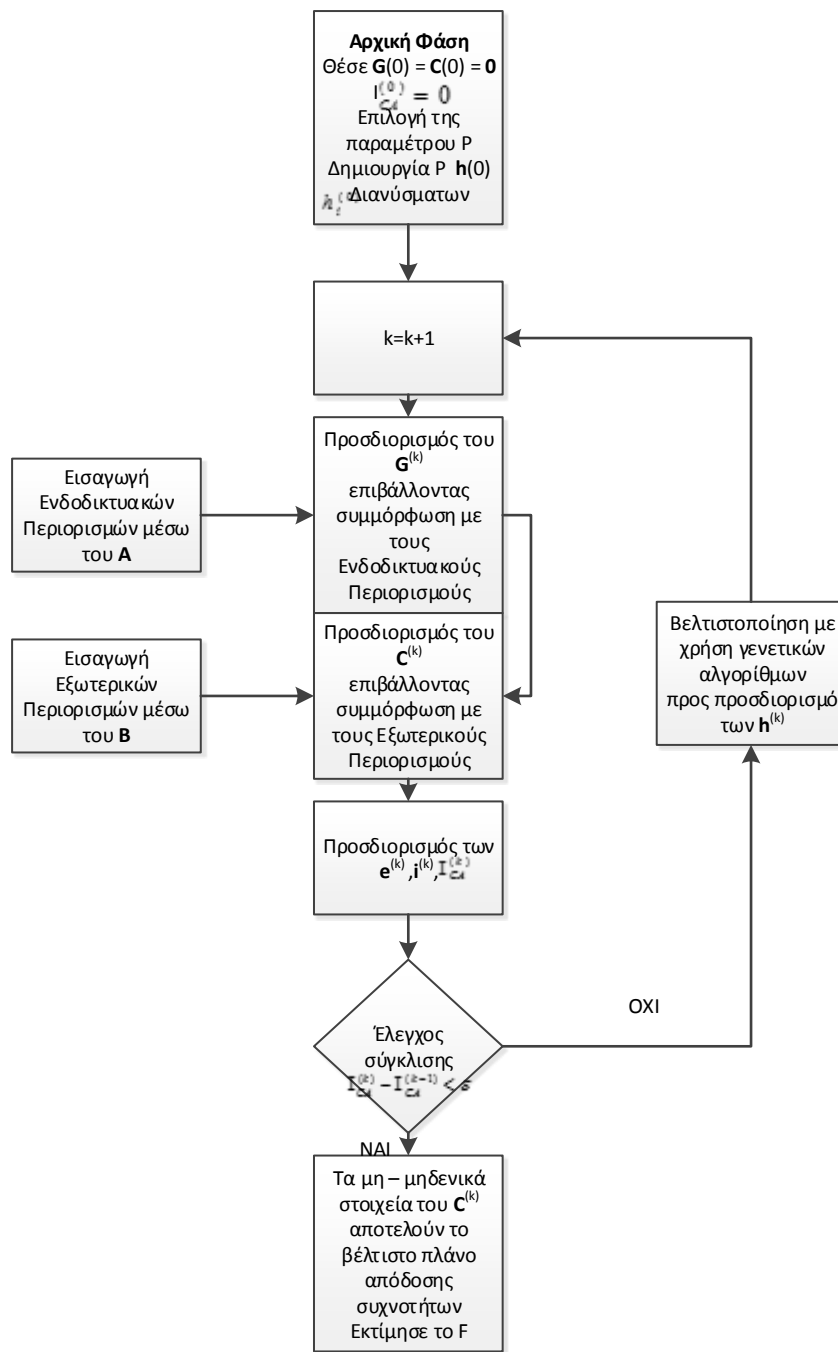
## 1. Εναρκτήρια Φάση

- i. Αποδίδονται αρχικές τιμές στους πίνακες  $\mathbf{G}$  και  $\mathbf{C}$ , θέτοντας  $\mathbf{G}^{(0)} = \mathbf{C}^{(0)} = \mathbf{0}$ , όπου  $\mathbf{0}$  ο μηδενικός πίνακας κατάλληλων διαστάσεων.
- ii. Αποδίδονται αρχικές τιμές στον πίνακα  $\mathbf{H}$  θέτοντας τις τιμές του  $\mathbf{h}_{m,j}^{(0)} = v$ , όπου  $m=1,2,\dots,P$  και  $i=1,2,\dots,Q$ . Η τυχαία μεταβλητή  $v$  λαμβάνει τυχαίες τιμές από το σύνολο των φυσικών αριθμών  $\{1,2,\dots,N\}$ , όπου  $N$  ο συνολικός αριθμός κυψελών που απαρτίζουν το κυψελωτό δίκτυο. Πρέπει να σημειωθεί ότι η μεταβλητή  $v$  ακολουθεί την ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα  $(1,N)$ .

## 2. Φάση Εκτέλεσης

### (i) Ενημέρωση του πίνακα $\mathbf{H}$

Το εργαλείο βελτιστοποίησης το οποίο παρουσιάστηκε στην Παράγραφο 3.3.2 επεξεργάζεται τις  $P$  γραμμές του πίνακα  $\mathbf{H}^{(k-1)}$  με στόχο να δημιουργήσει τις  $P$  γραμμές του πίνακα  $\mathbf{H}^{(k)}$ .



Σχήμα 3.3. Διάγραμμα Ροής του Προτεινόμενου Σχήματος Γενετικών Αλγορίθμων.

Το προτεινόμενο σχήμα αντί να επεξεργασθεί τον κατάλογο κλήσεων, σε κάθε επανάληψη  $k$ , επεξεργάζεται ένα πίνακα  $\mathbf{H}^{(k)}$  διαστάσεων  $(P \times Q)$ . Αυτό οδηγεί σε σημαντική μείωση της υπολογιστικής πολυπλοκότητας της λύσης του συγκεκριμένου προβλήματος, που, με τη σειρά της, οδηγεί σε σημαντική μείωση του υπολογιστικού χρόνου ο οποίος απαιτείται για την εφαρμογή του προτεινόμενου σχήματος σε πραγματικό χρόνο (real time). Δηλαδή, αντί να επιλύσει ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με  $P \cdot N \cdot Q$  μεταβλητές βελτιστοποίησης – όπου  $P'$  είναι το μέγεθος

του πληθυσμού που συνήθως χρησιμοποιείται στη βιβλιογραφία σε προβλήματα απόδοσης καναλιών όταν ακολουθείται η επεξεργασία του καταλόγου κλήσεων –, το προτεινόμενο επαναληπτικό σχήμα γενετικών αλγορίθμων προσδιορίζει τις τιμές μόνον  $P \cdot Q$  μεταβλητών βελτιστοποίησης.

(ii) Συμμόρφωση με τους *Ενδοδικτυακούς Περιορισμούς*

Για να εξασφαλίσει τη συμμόρφωση των  $P$  υποψηφίων σχεδίων απόδοσης καναλιών – που αντιπροσωπεύονται από τους αντίστοιχους υποπίνακες του πίνακα  $\mathbf{G}$  – με τους *Ενδοδικτυακούς Περιορισμούς*, το προτεινόμενο σχήμα επαναπροσδιορίζει τις τιμές των στοιχείων του πίνακα  $\mathbf{G}$  ελέγχοντας αν το κανάλι  $i$  μπορεί να αποδοθεί στην κυψέλη  $n$ . Ο έλεγχος αυτός επιτυγχάνεται μέσω της εξέτασης όλων των μελών του πληθυσμού της εκάστοτε γενεάς. Έτσι, λοιπόν, η συμμόρφωση με τον πίνακα συμβατότητας  $\mathbf{A}$  επιτυγχάνεται εκχωρώντας μοναδιαίες τιμές αποκλειστικά και μόνο στα στοιχεία του  $\mathbf{G}^{(k)}$  για τα οποία ισχύει

$$g_{m,n,i}^{(k)} = g_{m,q,j}^{(k)}, \quad \text{εάν } |i-j| \geq a_{nq}, \quad \text{όπου } q = h_{m,i}^{(k-1)} \text{ και } m=1,2,\dots,P, \quad n=1,2,\dots,N, \\ i, j=1,2,\dots,Q \quad (3.3)$$

Η ανωτέρω διαδικασία προσδιορίζει όλα τα στοιχεία του πίνακα  $\mathbf{G}^{(k)}$  στα οποία μπορούν να αποδοθούν μοναδιαίες τιμές, καθώς τα στοιχεία αυτά συμμορφώνονται με το προφίλ αναχρησιμοποίησης συχνοτήτων το οποίο επιβάλλεται από τους *Ενδοδικτυακούς Περιορισμούς*.

(iii) Συμμόρφωση με τους *Εξωτερικούς Περιορισμούς*

Οι περιορισμοί που επιβάλλονται λόγω εξωτερικών παρεμβολών λαμβάνονται υπόψη από το προτεινόμενο σχήμα μέσω της ανανέωσης των τιμών των στοιχείων του πίνακα  $\mathbf{C}^{(k)}$  με βάση τη σχέση

$$c_{m,n,i}^{(k)} = g_{m,n,i}^{(k)} \cdot b_{n,i}, \quad \text{όπου } m=1,2,\dots,P, \quad n=1,2,\dots,N \text{ και } i=1,2,\dots,Q \quad (3.4)$$

Η εξίσωση (3.4) χρησιμοποιείται από το προτεινόμενο σχήμα ούτως ώστε να επιτευχθεί η απόδοση μοναδιαίων τιμών αποκλειστικά και μόνο στα στοιχεία του πίνακα  $\mathbf{C}$  τα οποία, πέραν της ικανοποίησης των *Ενδοδικτυακών Περιορισμών*, ικανοποιούν και

τους *Εξωτερικούς Περιορισμούς*. Με εφαρμογή της εξίσωσης (3.4) σε όλες τις γραμμές του πίνακα  $\mathbf{H}$ , επιτυγχάνεται η ενημέρωση των  $P$  πιθανών λύσεων στο πρόβλημα απόδοσης καναλιών.

(iv) Εκτίμηση της συνολικής καταλληλότητας της λύσης – Έλεγχος σύγκλισης

Μετά την ολοκλήρωση κάθε επανάληψης, έχουν προσδιορισθεί  $P$  υποψήφια σχέδια απόδοσης καναλιών. Αυτά τα υποψήφια σχέδια αντιπροσωπεύονται από τους αντίστοιχους υποπίνακες του πίνακα  $\mathbf{C}^{(k)}$  που αντιστοιχούν στις  $P$  γραμμές του πίνακα  $\mathbf{H}^{(k)}$ . Λαμβάνοντας υπόψη το ότι οι παρεμβολές που προκαλούνται από σταθμούς υπηρεσιών DVB – T καθιστούν αδύνατη τη χρήση ορισμένων καναλιών στις κυψέλες που υφίστανται τις παρεμβολές, το προτεινόμενο σχήμα αναζητεί το βέλτιστο σχέδιο απόδοσης καναλιών. Αυτό είναι το σχέδιο απόδοσης καναλιών που αποδίδει σε κάθε κυψέλη του δικτύου πλήθος καναλιών, που είναι όσο το δυνατό πλησιέστερα στο πλήθος καναλιών  $r_n$  που έχει ζητήσει η κυψέλη. Το πλήθος των ζητούμενων καναλιών αντιπροσωπεύεται από το αντίστοιχο στοιχείο του συνόλου *Απαιτήσεις*. Ανεξάρτητα από την αντίστοιχη πραγματική ζήτηση καναλιών, οι κυψέλες που δεν υφίστανται παρεμβολή μπορούν να χρησιμοποιήσουν μέχρι  $r_{\max}$  κανάλια, ενώ οι κυψέλες που υφίστανται παρεμβολή μπορούν να χρησιμοποιήσουν λιγότερα από  $r_{\max}$ . Ο αριθμός καναλιών που μπορεί να χρησιμοποιήσει κάθε κυψέλη εξαρτάται από τον αριθμό καναλιών τα οποία δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν εξαιτίας των παρεμβολών από εξωτερικές οντότητες. Έτσι, εισάγεται ένας πίνακας  $\mathbf{E}^{(k)}$  διαστάσεων  $(P \times N)$  με στοιχεία

$$e_{m,n}^{(k)} = \sum_{i=1}^Q c_{m,n,i}^{(k)}, \quad m=1,2,\dots,P, \quad n=1,2,\dots,N \quad (3.5)$$

για να υποδηλώσει τον αριθμό των καναλιών τα οποία αποδίδονται σε κάθε κυψέλη για κάθε μέλος του πληθυσμού, δηλαδή για κάθε υποψήφιο σχέδιο απονομής καναλιών. Η  $m$  – οστή γραμμή του πίνακα  $\mathbf{E}^{(k)}$  υποδηλώνει το συνολικό αριθμό καναλιών που αποδίδονται στην κυψέλη  $n$ ,  $n=1,2,\dots,N$ , όταν επιλεγεί το σχέδιο απόδοσης καναλιών που αντιπροσωπεύεται από την  $m$  – οστή γραμμή του πίνακα  $\mathbf{H}^{(k)}$ . Λαμβάνοντας υπόψη ότι  $r_{\max} \geq r_n \geq e_n^{(k)}$  ο πίνακας καταλληλότητας των μελών του πληθυσμού  $\mathbf{I}^{(k)}$  με στοιχεία

$$i_{m,n}^{(k)} = [1 + (r_n - e_{m,n}^{(k)})]^{-1} \leq 1, \quad m=1,2,\dots,P, \quad n=1,2,\dots,N \quad (3.6)$$

ποσοτικοποιεί πόσο κοντά προς στον αριθμό των ζητούμενων καναλιών από μία κυψέλη είναι ο αριθμός καναλιών που της αποδίδονται. Οι γραμμές του πίνακα αυτού παρέχουν το μέτρο της ποιότητας της αντίστοιχης λύσης (σχεδίου απόδοσης καναλιών) που επιτυγχάνεται μέσω της επεξεργασίας των αντιστοιχων γραμμών του πίνακα  $\mathbf{H}^{(k)}$ . Μία κυψέλη είναι πλήρως αξιοποιήσιμη εφόσον  $i_{m,n}^{(k)}=1$ , δηλαδή εφόσον  $e_{m,n}^{(k)}=r_n$ . Αυτό σημαίνει ότι στην κυψέλη  $n$  παρέχεται η δυνατότητα να χρησιμοποιήσει όσα κανάλια έχει ζητήσει. Σε κάθε επανάληψη του προτεινόμενου σχήματος, προσδιορίζεται ένα διάνυσμα  $\mathbf{D}^{(k)}$  διαστάσεων  $(P \times 1)$  με στοιχεία

$$d_m^{(k)} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N i_{m,n}^{(k)}, \quad \text{όπου } m=1,2,\dots,P \quad (3.7)$$

Το διάνυσμα αυτό εισάγεται στο προτεινόμενο σχήμα για να υπολογισθεί και καταγραφεί η επίδοση κάθε σχεδίου απόδοσης καναλιών. Συγκεκριμένα, το ανωτέρω διάνυσμα προσδιορίζει την επίδοση του σχεδίου απόδοσης καναλιών που αντιστοιχεί στην  $m$ -οστή γραμμή του πίνακα  $\mathbf{H}^{(k)}$ , δηλαδή του αντίστοιχου υποψήφιου σχεδίου απόδοσης καναλιών. Τα στοιχεία  $d_m^{(k)}$ ,  $m=1,2,\dots,P$ , λαμβάνουν τη μέγιστη τιμή τους, που είναι ίση με 1 εφόσον, λαμβάνοντας υπόψη όλους τους περιορισμούς, όλες οι κυψέλες του δικτύου χρησιμοποιούν όσα κανάλια έχουν ζητήσει. Καθώς το προτεινόμενο σχήμα επεξεργάζεται διαδοχικά τους πίνακες  $\mathbf{G}^{(k)}$  και  $\mathbf{C}^{(k)}$ , η καταλληλότητα κάθε μέλους του πληθυσμού, δηλαδή υποψήφιου σχεδίου απόδοσης καναλιών, ελέγχεται μέσω της αντίστοιχης συνολικής καταλληλότητας  $d_m^{(k)}$ ,  $m=1,2,\dots,P$ , η οποία αντιστοιχεί στα  $P$  υποψήφια σχέδια απόδοσης καναλιών. Μετά από ένα αριθμό επαναλήψεων, ορισμένες από τις  $d_m$  τιμές ικανοποιούν την ακόλουθη σχέση:

$$d_m^{(K)} - d_m^{(K-1)} < \varepsilon \quad (3.8)$$

όπου το  $\varepsilon$  είναι ένας μικρός θετικός αριθμός. Ο ανωτέρω έλεγχος λαμβάνει χώρα για κάθε  $d_m$ ,  $m=1,2,\dots,P$ . Η γραμμή του πίνακα  $\mathbf{C}$  η οποία αντιστοιχεί στην υψηλότερη τιμή του  $d_m^{(K)}$ , έστω η  $M$ -οστή γραμμή, αποτελεί το βέλτιστο σχέδιο απόδοσης καναλιών.



### 3.3.4. Ζητήματα δικαιοσύνης κατά την απόδοση καναλιών

Ο δείκτης ισότιμης μεταχείρισης αποτελεί συνήθως ένα μέτρο που αφορά τους χρήστες ενός δικτύου. Ένα σχέδιο απόδοσης καναλιών είναι απόλυτα δίκαιο όταν όλοι οι χρήστες του δικτύου αντιμετωπίζονται ισότιμα. Λαμβάνοντας υπόψη ότι αυτό επιτυγχάνεται αποδίδοντας κανάλια στις κυψέλες από τις οποίες εξυπηρετούνται διάφοροι χρήστες κατά το δυνατόν δικαιότερα, το ζήτημα της ισότιμης μεταχείρισης διαφορετικών χρηστών αντιμετωπίζεται από τη διατριβή ως πρόβλημα ισότιμης μεταχείρισης κυψελών. Στο πλαίσιο αυτό, ορίζεται ο δείκτης ισότιμης μεταχείρισης μίας κυψέλης που αντιστοιχεί στο βέλτιστο σχέδιο απόδοσης καναλιών μέσω της ακόλουθης σχέσης: ([3.13], [3.14])

$$f_{M,n} = e_{M,n}^{(K)} / r_n, \text{ όπου } n = 1, 2, \dots, N \quad (3.9)$$

όπου  $K$  είναι ο αριθμός επαναλήψεων που απαιτούνται για τη σύγκλιση του προτεινόμενου σχήματος και το  $M$  υποδηλώνει τη γραμμή του πίνακα που αντιπροσωπεύει το βέλτιστο σχέδιο απόδοσης καναλιών.

Στη συνέχεια, χρησιμοποιείται ο δείκτης ισότιμης μεταχείρισης του Jain [3.15]

$$F = \frac{\left[ \sum_{m=1}^N f_{M,n} \right]^2}{\left[ N \cdot \sum_{n=1}^N f_{M,n}^2 \right]} \quad (3.10)$$

για να αποτιμήσει με ποιο μέσο βαθμό ισοτιμίας ένα σχέδιο απόδοσης καναλιών μεταχειρίζεται τις διάφορες κυψέλες του δικτύου. Όταν δεν υπάρχουν παρεμβολές από εξωτερικές οντότητες – οπότε σε κάθε κυψέλη αποδίδεται ακριβώς το ζητούμενο πλήθος καναλιών – δηλαδή όταν  $f_{M,n} = e_{M,n}^{(K)} / r_n = 1, n = 1, 2, \dots, N$ , το  $F$  είναι ίσο με 1. Αυτή η τιμή αντιστοιχεί σε ένα απολύτως δίκαιο σχέδιο απόδοσης καναλιών. Οι παρεμβολές από εξωτερικές οντότητες προκαλούν άνιση μεταχείριση των κυψελών που υφίστανται παρεμβολές καθώς αυτές στερούνται τη δυνατότητα χρησιμοποίησης όσων καναλιών έχουν ζητήσει προς εξυπηρέτηση των χρηστών που εξυπηρετούνται από αυτές. Επομένως, ο δείκτης ισότιμης μεταχείρισης των κυψελών που υφίστανται παρεμβολή γίνεται μικρότερος του 1, καθιστώντας το συνολικό δείκτη ισότιμης μεταχείρισης  $F$  μικρότερο του 1, ποσοτικοποιώντας, κατ' αυτόν τον τρόπο, την άνιση μεταχείριση των αντιστοίχων χρηστών που οφείλεται στη διαφορετική μεταχείριση των κυψελών του δικτύου που υφίστανται εξωτερικές παρεμβολές.

### *3.3.5. Αύξηση της φασματικής αξιοποίησης με ενσωμάτωση προσαρμοστικής διαμόρφωσης και κωδικοποίησης*

Με χρήση προσαρμοστικής διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (Adaptive Coding and Modulation – ACM), τα κυψελωτά δίκτυα της επόμενης γενεάς (3G και 4G) υποστηρίζουν πολλαπλούς τρόπους μετάδοσης προσαρμόζοντας δυναμικά τις παραμέτρους μετάδοσης στις συνθήκες διάδοσης [1.13] στην προσπάθεια να μεγιστοποιήσουν τη διέλευση πληροφορίας. Με κατάλληλη τροποποίηση του πίνακα **B**, η προτεινόμενη μέθοδος απόδοσης καναλιών έχει τη δυνατότητα να ενσωματώσει τη χρήση της προσαρμοστικής διαμόρφωσης και κωδικοποίησης. Ειδικότερα, αντί όπως αναλύθηκε στο εδάφιο 3.2.3, τα στοιχεία του πίνακα **B** να λαμβάνουν τιμές 1 ή 0 επιτρέπεται να λάβουν μία από  $M+1$  τιμές, όπου  $M$  είναι το πλήθος των επιπέδων λειτουργίας της προσαρμοστικής διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που υποστηρίζεται από το κυψελωτό δίκτυο. Τα  $M=12$  επίπεδα λειτουργίας που προτείνονται από το πρότυπο IEEE 802.22, τα αντίστοιχα σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης για διόρθωση λαθών (Forward Error Correction – FEC), οι φασματικές αποδόσεις και τα επίπεδα μετάβασης CNIR μεταξύ διαδοχικών επιπέδων ACM μετάδοσης παρουσιάζονται στον Πιν. 3.2 [3.16].

Πίνακας 3.2. Τρόποι ACM μετάδοσης για δίκτυα 802.22

Μέθοδος ACM	Σχήμα διαμόρφωσης	Ρυθμός κώδικα	Φασματική απόδοση (bps/Hz)	CNR αλλαγής επιπέδου ACM
0	Το κανάλι δεν χρησιμοποιείται λόγω ισχυρής παρεμβολής			
1	QPSK	1/2	0.624	4.3
2	QPSK	2/3	0.832	6.1
3	QPSK	3/4	0.936	7.1
4	QPSK	5/6	1.04	8.1
5	16QAM	1/2	1.248	10.2
6	16QAM	2/3	1.664	12.4
7	16QAM	3/4	1.872	13.5
8	16QAM	5/6	2.08	14.8
9	64QAM	1/2	1.872	15.6
10	64QAM	2/3	2.496	18.3
11	64QAM	3/4	2.808	19.7
12	64QAM	5/6	3.12	20.9

Σε πραγματικές εφαρμογές, τόσο η μορφολογία της περιοχής κάλυψης όσο και το μέγεθος της εξωτερικής παρεμβολής όπως αυτή μετρείται στο πεδίο, καθορίζουν την κατανομή των επιπέδων λειτουργίας της προσαρμοστικής διαμόρφωσης και κωδικοποίησης στις κυψέλες του δικτύου. Όταν εφαρμόζεται η ACM μέθοδος από το προτεινόμενο σχήμα, τα μεγέθη  $r_n$ ,  $e_{m,n}$  και  $r_{\max}$  τροποποιούνται ώστε να λάβουν διαφορετικό νόημα. Συγκεκριμένα, οι είσοδοι  $r_n$  αντιπροσωπεύουν την απαιτούμενη διέλευση πληροφορίας από την κυψέλη  $n$ , ενώ τα στοιχεία  $e_{m,n}$  αντιπροσωπεύουν την πραγματική διέλευση πληροφορίας που αποδίδεται στην κυψέλη αυτή από το σχέδιο απόδοσης καναλιών που αντιπροσωπεύει το μέλος του πληθυσμού  $m$ . Επιπλέον, στην περίπτωση της ACM λειτουργίας, η παράμετρος  $r_{\max}$  δηλώνει τη μέγιστη διέλευση

πληροφορίας που μπορεί να ζητήσει κάποια κυψέλη. Αν  $R$  είναι η μέγιστη συνολική διέλευση πληροφορίας, για κυψελωτά δίκτυα με κυψέλες ορθογωνίου σχήματος που αντιστοιχούν σε προφίλ αναχρησιμοποίησης συχνοτήτων  $f_u=1:4$ ,  $r_{\max}=R/4$ . Επομένως, μία κυψέλη θεωρείται πλήρως αξιοποιημένη, εφόσον η διέλευση πληροφορίας που μπορεί να απολαύσει είναι ίση με  $r_{\max}$ . Αντιστοίχως, ο δείκτης ισότιμης μεταχείρισης που ορίστηκε στο εδάφιο 3.3.4 λαμβάνει τη μορφή

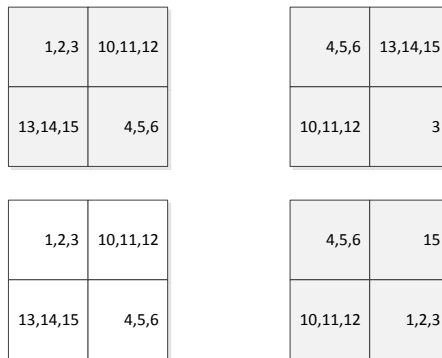
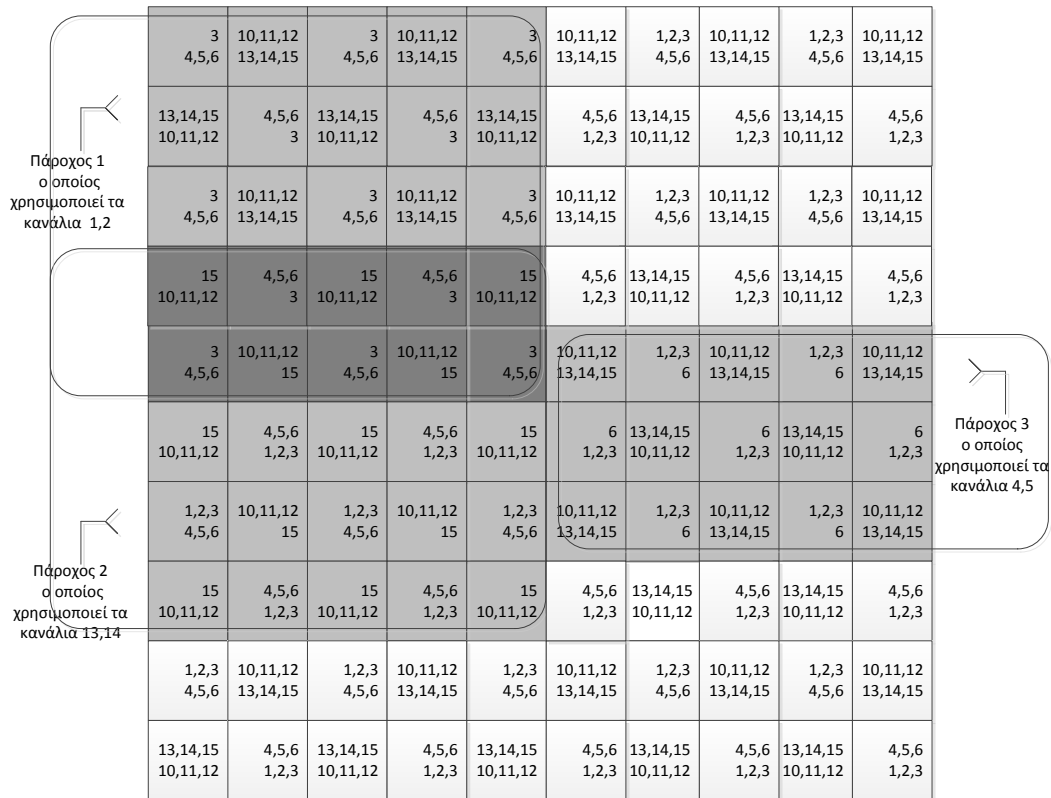
$$F = \left[ \sum_{m=1}^N r_{M,n} \right]^2 / \left[ N \cdot \sum_{n=1}^N r_{M,n}^2 \right] \quad (3.11)$$

ώστε αντί της απόδοσης καναλιών να αντανakλά την απόδοση διέλευσης πληροφορίας στις κυψέλες του δικτύου.

### 3.4. Προσομοιώσεις και συζήτηση αποτελεσμάτων

Στην πλειονότητα των προσομοιώσεων που ακολουθούν εξετάζεται ένα υποθετικό κυψελωτό δίκτυο που αποτελείται από κυψέλες ορθογωνίου σχήματος. Αρχικές προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για να εξετασθεί η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθόδου ως προς τη βέλτιστη απόδοση καναλιών παρουσία εξωτερικών παρεμβολών. Καίτοι, σε πρακτικές εφαρμογές, οι εξωτερικές παρεμβολές αναμένεται να επηρεάζουν δύο κανάλια το πολύ, στις προσομοιώσεις που ακολουθούν θεωρήθηκε ότι επηρεάζουν μέχρι και 3 κανάλια. Η θεώρηση αυτή έγινε στην κατεύθυνση να προσομοιωθούν εξαιρετικά δυσμενείς περιπτώσεις εξωτερικών παρεμβολών.

Αρχικά, για να αναδειχθεί ο τρόπος με τον οποίο η προτεινόμενη μέθοδος επιτυγχάνει να αποδώσει κανάλια με βέλτιστο τρόπο παρουσία εξωτερικών παρεμβολών, εξετάστηκε η περίπτωση όπου 3 πάροχοι υπηρεσιών DVB – T προκαλούν παρεμβολές σε υποθετικό κυψελωτό που αποτελείται από  $N=100$  κυψέλες για τις οποίες διατίθενται  $Q=12$  κανάλια. Η σχετική διαδικασία απόδοσης καναλιών παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4. Απόδοση καναλιών στις κυψέλες ενός κυψελωτού δικτύου που υφίσταται παρεμβολή από γειτονικούς παρόχους ψηφιακής τηλεόρασης.

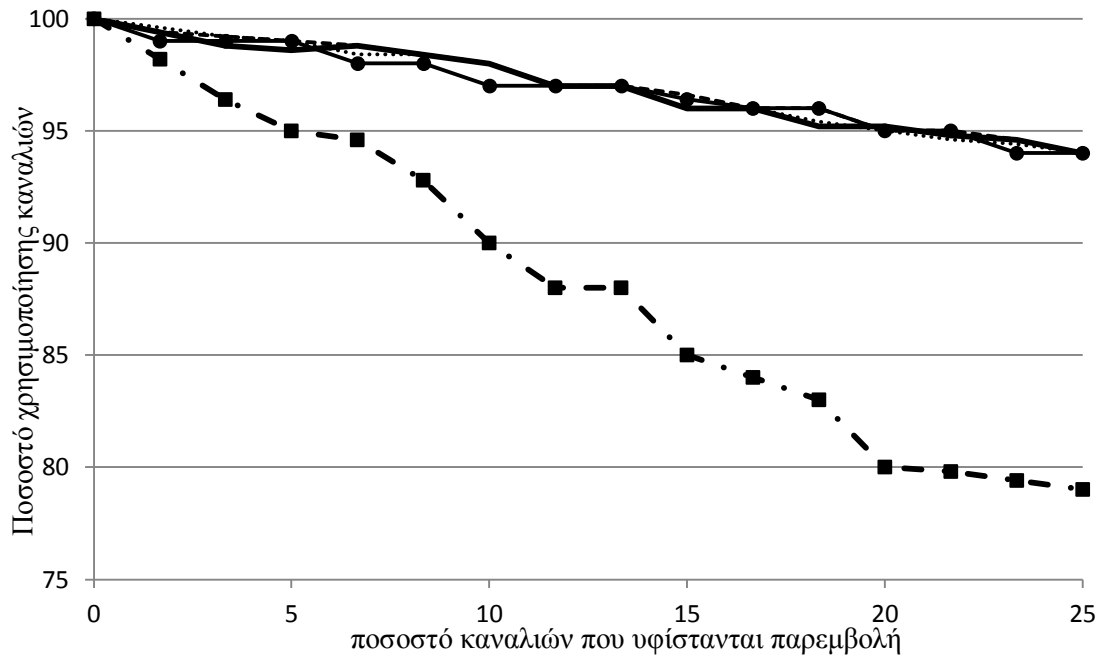
Άνω σειρά: Πριν την εφαρμογή του προτεινόμενου σχήματος γενετικών αλγορίθμων (όλα τα κανάλια που υφίστανται παρεμβολή από κάποιο γειτονικό πάροχο καθίστανται ανενεργά και δεν χρησιμοποιούνται από το κυψελωτό δίκτυο).

Κάτω σειρά: Μετά την εφαρμογή του προτεινόμενου σχήματος Γενετικών Αλγορίθμων.

Υποθέτοντας  $t=3$ , δηλαδή ότι τα κανάλια που αποδίδονται σε διαφορετικές κυψέλες πρέπει να απέχουν τουλάχιστον κατά 3, για να ικανοποιηθούν οι *Ενδοδικτυακοί Περιορισμοί* τα κανάλια 7, 8 και 9 δεν χρησιμοποιούνται από το κυψελωτό δίκτυο. Για λόγους σύγκρισης, παρουσιάζεται επίσης και η επιλογή της άμεσης απόδοσης καναλιών που πραγματοποιείται μη επιτρέποντας απλώς τη χρήση όλων των

καναλιών που υφίστανται παρεμβολή στις αντίστοιχες κυψέλες του δικτύου. Εύκολα παρατηρείται ότι το προφίλ αναχρησιμοποίησης καναλιών που εμφανίζεται στην άνω σειρά κάθε κυψέλης στο Σχήμα 3.4, που θα προέκυπτε με την επιλογή της άμεσης απόδοσης καναλιών, αναδιατάσσεται πλήρως όταν χρησιμοποιείται το προτεινόμενο σχήμα Γενετικών Αλγορίθμων αποδίδοντας το προφίλ αναχρησιμοποίησης συχνοτήτων που εμφανίζεται στην κάτω σειρά. Αντί απλώς να εξαιρεί από τη λειτουργία τα κανάλια 1 και 2 στις κυψέλες που υφίστανται παρεμβολή από τον Παρόχο 1 μόνο (η ανωτέρω αριστερά ελαφρά σκιασμένη περιοχή στο Σχήμα 3.4), ή τα κανάλια 1, 2, 13 και 14 στις κυψέλες που υφίστανται παρεμβολή και από τους δύο Παρόχους (εντονότερα σκιασμένη περιοχή στο Σχήμα 3.4), το προφίλ αναχρησιμοποίησης συχνοτήτων επαναδιευθετείται πλήρως στις περισσότερες ομάδες (clusters) τεσσάρων κυψελών του κυψελωτού δικτύου με στόχο τη μεγιστοποίηση της φασματικής χρησιμοποίησης. Στην πραγματικότητα, αν ακολουθηθεί η άμεση απόδοση καναλιών, από τα  $Q \cdot 100 \cdot (1/4) = 300$  κανάλια που είναι διαθέσιμα εξαιτίας του επιλεγμένου προφίλ αναχρησιμοποίησης συχνοτήτων, τα 51 πρέπει να μη χρησιμοποιηθούν λόγω παρεμβολών. Αυτό θα οδηγούσε σε φασματική χρησιμοποίηση της τάξης του 83%. Όμως, λόγω της βέλτιστης επαναδιευθέτησης της χρήσης των καναλιών από τις κυψέλες του δικτύου που επιτυγχάνεται από το προτεινόμενο σχήμα απόδοσης καναλιών, μόνον 28 από τα 300 διαθέσιμα κανάλια εξαιρούνται από τη χρήση από τις κυψέλες του δικτύου, γεγονός που οδηγεί σε φασματική χρησιμοποίηση της τάξης του 90.7%. Όπως προκύπτει και από πολλές προσομοιώσεις στις οποίες χρησιμοποιήθηκε το προτεινόμενο σχήμα, το πλήθος των καναλιών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν εξαρτάται αποκλειστικά από το συνολικό πλήθος των καναλιών που υφίστανται παρεμβολή. Επιπλέον, το μέγεθος της βελτιστοποίησης που επιτυγχάνεται με εφαρμογή του προτεινόμενου σχήματος αυξάνει όταν αυξάνεται το πλήθος των καναλιών που υφίστανται παρεμβολή.

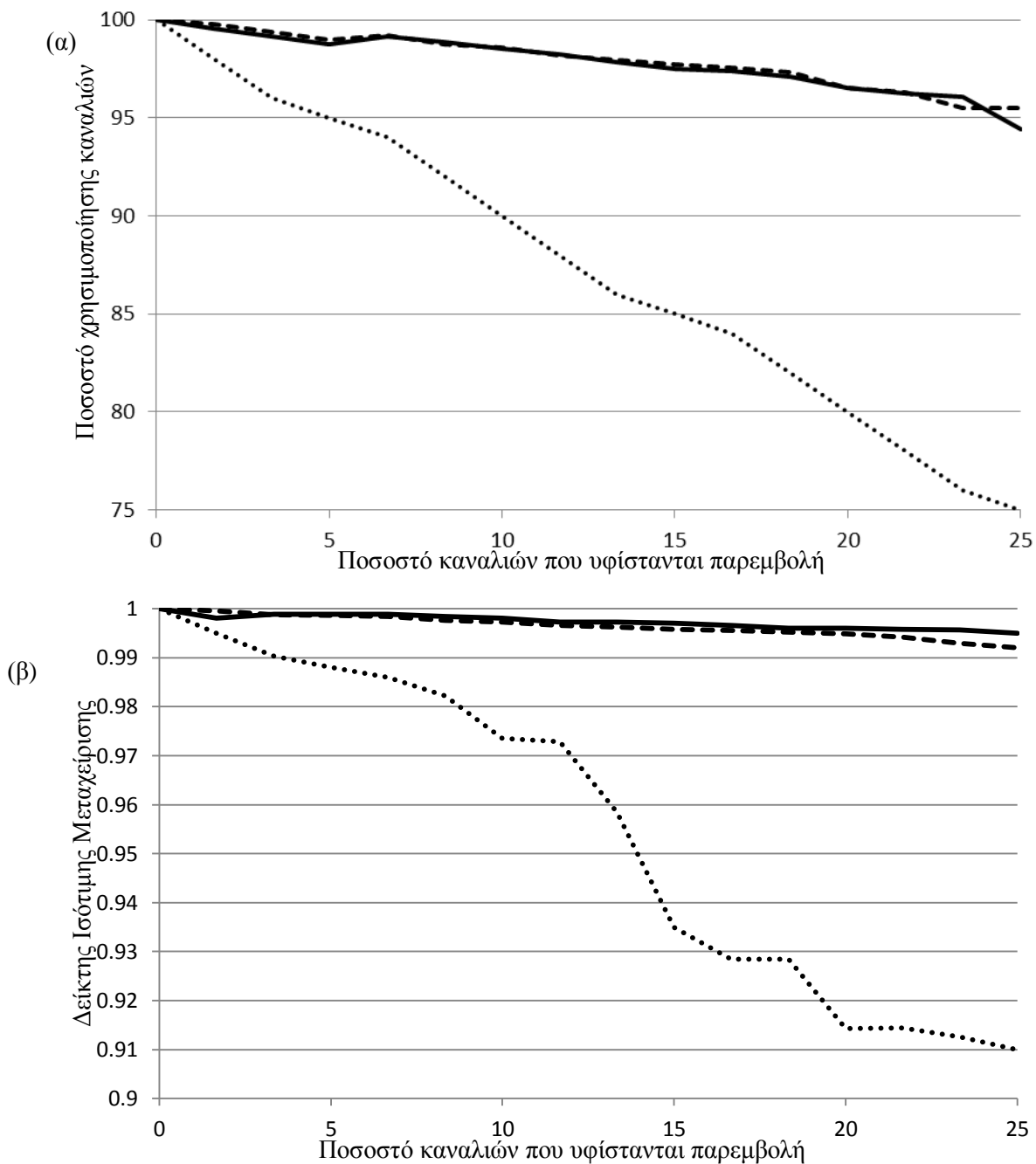
Για να επιδειχθεί ο τρόπος με τον οποίο το μέγεθος του πληθυσμού  $P$  επηρεάζει τη σύγκλιση του προτεινόμενου επαναληπτικού σχήματος γενετικών αλγορίθμων, το ποσοστό χρησιμοποίησης των καναλιών συναρτήσει των εξωτερικών παρεμβολών ενός κυψελωτού δικτύου απεικονίζεται στο Σχήμα 3.5. Η έκταση των παρεμβολών ποσοτικοποιείται ως ποσοστό των καναλιών που υφίστανται παρεμβολή.



Σχήμα 3.5. Μεταβολή της φασματικής χρησιμοποίησης συναρτήσει της εξωτερικής παρεμβολής εφαρμόζοντας το προτεινόμενο σχήμα γενετικών αλγορίθμων για διάφορα μεγέθη πληθυσμού (  $\blacksquare$   $P=5$ ,  $\bullet$   $P=10$ ,  $\blacksquare$   $P=20$ ,  $\cdots$   $P=30$ ,  $-\cdot-$   $P=40$  ). (κυψέλες ορθογωνίου σχήματος,  $N=100$ ,  $Q=28$ ).

Το ελάχιστο μέγεθος πληθυσμού που απαιτείται για τη σύγκλιση του προτεινόμενου σχήματος απόδοσης καναλιών εξαρτάται από την ένταση της εξωτερικής παρεμβολής και από το  $Q$ . Από το Σχήμα 3.5 προκύπτει ότι η ελάχιστη τιμή του  $P$  που απαιτείται για να επιτευχθεί σύγκλιση του σχήματος είναι  $P=10$ , καθώς η αύξηση του μεγέθους του πληθυσμού πέραν του  $P=10$  έχει αμελητέα επίδραση στο ποσοστό χρησιμοποίησης καναλιών μετά την επίτευξη σύγκλισης. Για να επιτευχθεί η βέλτιστη απόδοση καναλιών όταν για την υλοποίηση του προτεινόμενου σχήματος χρησιμοποιήθηκε ένας Η/Υ γραφείου (desktop PC) Intel Quad Core 2 που διαθέτει 4 GB RAM με λειτουργικό Microsoft Windows 7 χρειάστηκε 1s όταν  $P=10$ , ενώ χρειάστηκαν 7s όταν  $P=40$ . Για τις προσομοιώσεις που παρουσιάζονται στη συνέχεια θεωρήθηκε  $P=10$ .

Στα Σχήματα 3.6α και 3.6β απεικονίζεται η αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου σχήματος σε σχέση με την ένταση της εξωτερικής παρεμβολής με στόχο να διερευνηθεί πώς επηρεάζεται η απόδοση του προτεινόμενου σχήματος από το προφίλ αναχρησιμοποίησης συχνοτήτων που υποστηρίζεται από το κυψελωτό δίκτυο.



Σχήμα 3.6. Απόδοση καναλιών εφαρμόζοντας το προτεινόμενο σχήμα ΓΑ σε κυψελωτό δίκτυο (i) είτε με κυψέλες ορθογωνίου σχήματος (—) είτε με κυψέλες εξαγωνικού σχήματος (---) (ii) εφαρμόζοντας άμεση απόδοση καναλιών (.....) ( $N=100$  και  $Q=28$ ).

α. Ποσοστό απόδοσης καναλιών. β. Δείκτης ισότητας μεταχείρισης.

Για να γίνει δίκαιη σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών προφίλ αναχρησιμοποίησης συχνοτήτων θεωρούνται ένα κυψελωτό δίκτυο με κυψέλες ορθογωνίου σχήματος ( $f_u=1:4$ ) με  $N=100$  και  $Q=28$  και ένα κυψελωτό δίκτυο με κυψέλες εξαγωνικού σχήματος ( $f_u=1:7$ ), επίσης με  $N=100$  και  $Q=28$ . Από το Σχήμα 3.6α, όπου



απεικονίζεται το ποσοστό χρησιμοποίησης καναλιών ως προς το συνολικό πλήθος καναλιών σε όλες τις κυψέλες, είναι φανερό ότι το προτεινόμενο σχήμα αποφέρει σχεδόν ίδια αποτελέσματα και για τα δύο είδη κυψελών. Εφόσον διατίθενται 7 κανάλια σε κάθε κυψέλη για  $f_u=1:4$  όλες οι κυψέλες χρησιμοποιούν συνολικά 700 κανάλια. Επομένως, ποσοστό 100% αντιστοιχεί σε χρήση 700 καναλιών, 95% σε χρήση 665 κ.ο.κ. Επίσης, οι καμπύλες του Σχήματος 3.6α καταδεικνύουν ότι η εφαρμογή του προτεινόμενου σχήματος γενετικών αλγορίθμων οδηγεί σε μία αισθητά καλύτερη φασματική χρησιμοποίηση σε σχέση με την άμεση απόδοση καναλιών. Στο Σχ.3.6β απεικονίζεται ο συνολικός δείκτης ισότιμης μεταχείρισης ως συνάρτηση της έκτασης της εξωτερικής παρεμβολής για τα δύο σχήματα κυψελών που εξετάζονται. Η άμεση επιλογή απόδοσης καναλιών οδηγεί σε σχετικά χαμηλή τιμή του δείκτη αυτού. Αυτό οφείλεται στο ότι οι κυψέλες που υφίστανται παρεμβολή εξυπηρετούνται πολύ χειρότερα σε σχέση με αυτό που έχουν ζητήσει, δηλαδή οι λόγοι  $e_n/r_n$  στις κυψέλες αυτές λαμβάνουν τιμές μικρότερες από 1. Επιπλέον, η εφαρμογή του προτεινόμενου σχήματος οδηγεί σε ένα ιδιαίτερα υψηλό επίπεδο ισότιμης μεταχείρισης – ο δείκτης της οποίας είναι πολύ κοντά στο 1 – και στις δύο ενδεικτικές περιπτώσεις κυψελωτών δικτύων που εξετάζονται. Αυτό αποδίδεται στη θετική επίδραση που ασκεί η προτεινόμενη μέθοδος απόδοσης καναλιών η οποία, μέσω της κατάλληλης ανακατανομής των διαθέσιμων καναλιών, οδηγεί τους λόγους  $e_n/r_n$  στις κυψέλες που υφίστανται παρεμβολή σε τιμές πολύ κοντά στο 1.

#### **3.4.1. Απόδοση πόρων εφαρμόζοντας προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση**

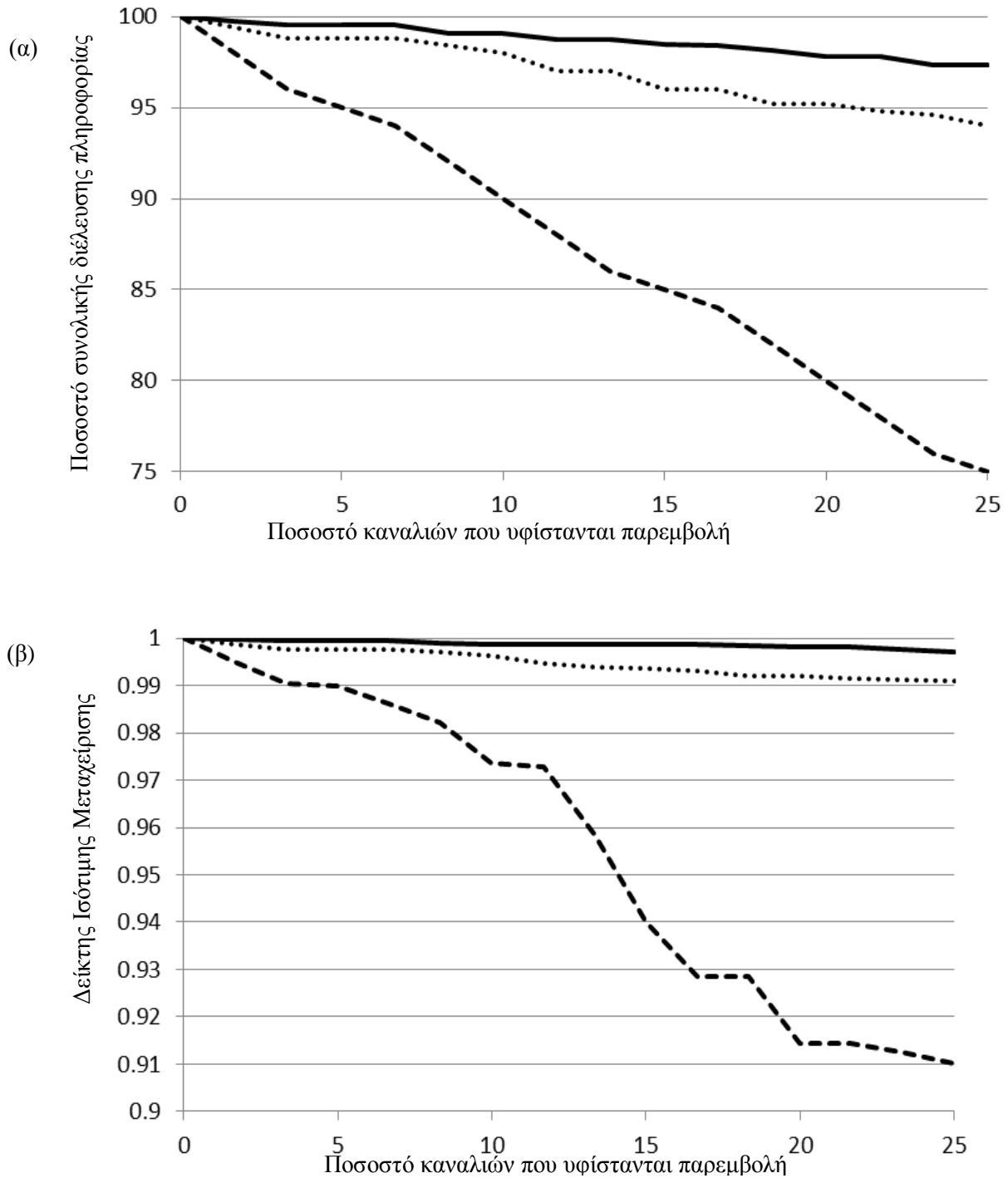
Για να αυξηθεί η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθόδου στη βέλτιστη αντιμετώπιση των εξωτερικών παρεμβολών, το προτεινόμενο σχήμα Γενετικών Αλγορίθμων τροποποιήθηκε ούτως ώστε να ενσωματώσει τη λειτουργία της προσαρμοστικής διαμόρφωσης και κωδικοποίησης. Στο πλαίσιο αυτό, τα στοιχεία του πίνακα  $\mathbf{B}$ ,  $b_{mi}$ , αντί δύο τιμών (0 ή 1) μπορούν να λάβουν μία από  $M+1$  τιμές,  $M>1$ . Η τιμή κάθε στοιχείου εξαρτάται από το επίπεδο SNIR που επικρατεί στην κυψέλη  $m$  στο κανάλι  $i$ . Υψηλές τιμές των στοιχείων  $b_{mi}$  αντιστοιχούν σε υψηλά επίπεδα SNIR στην κυψέλη  $m$  στο κανάλι  $i$  και επιτρέπουν τη χρήση ACM υψηλότερου επιπέδου, χαρακτηριστικό που οδηγεί σε υψηλότερα επίπεδα διέλευσης πληροφορίας στο κανάλι

*i.* Όταν χρησιμοποιείται η τεχνική ACM το προτεινόμενο σχήμα απόδοσης καναλιών μετατρέπεται σε σχήμα απόδοσης ραδιοπύργων όπου το κατάλληλο μέτρο για τη μέτρηση της φασματικής χρησιμοποίησης είναι η διέλευση πληροφορίας. Αντί να προσδιορίζεται το συνολικό πλήθος καναλιών που είναι διαθέσιμα με βάση το προφίλ αναχρησιμοποίησης συχνοτήτων που εφαρμόζεται – όπως έγινε και στην περίπτωση λειτουργίας δύο επιπέδων–, προσδιορίζεται η μέγιστη συνολική διέλευση πληροφορίας

$$R = N \cdot r_{\max} \cdot s_{\max} \cdot B_{ch} \quad (3.12)$$

όπου  $s_{\max}$  είναι η φασματική απόδοση (spectral efficiency) της υψηλότερης, δηλαδή της περισσότερο αποδοτικής φασματικά στάθμης ACM και ως  $B_{ch}$  ορίζεται το εύρος ζώνης των καναλιών. Αν υιοθετηθεί το προτεινόμενο από το πρότυπο IEEE 802.22 προφίλ των δώδεκα επιπέδων ACM – που παρουσιάζεται στον Πιν. 3.2 – για ένα κυψελωτό δίκτυο με κυψέλες εξαγωνικού σχήματος με  $N=100$  κυψέλες και  $Q=14$  κανάλια εύρους ζώνης 5 MHz,  $R=(100 \cdot (14/7) \cdot 3.12 \cdot 5 \times 10^6) = 3.12$  Gbps. Στα Σχήματα 3.7α και 3.7β απεικονίζονται το ποσοστό συνολικής διέλευσης πληροφορίας και ο συνολικός δείκτης ισότιμης μεταχείρισης ως συνάρτηση του ποσοστού των καναλιών που υφίστανται παρεμβολή για τις ακόλουθες περιπτώσεις:

- (i) εφαρμόζοντας την προτεινόμενη μέθοδο με προσέγγιση δύο επιπέδων (ON - OFF).
- (ii) εφαρμόζοντας την προτεινόμενη μέθοδο με ενσωμάτωση  $M+1$  επιπέδων λειτουργίας ACM.
- (iii) εφαρμόζοντας την άμεση απόδοση φασματικών πόρων, κατ' αναλογία της άμεσης απόδοσης καναλιών.



Σχήμα 3.7. Απόδοση φασματικών πόρων εφαρμόζοντας (i) την προτεινόμενη μέθοδο και χρησιμοποιώντας 12+1 επίπεδα ACM λειτουργίας όπως αυτά παρουσιάζονται στον Πιν. 3.2 (—), (ii) την προτεινόμενη μέθοδο χρησιμοποιώντας δύο επίπεδα λειτουργίας (.....) και την άμεση απόδοση φασματικών πόρων (---) για κυψελωτό δίκτυο με κυψέλες ορθογωνίου σχήματος όπου  $N=100$ ,  $Q=20$ .

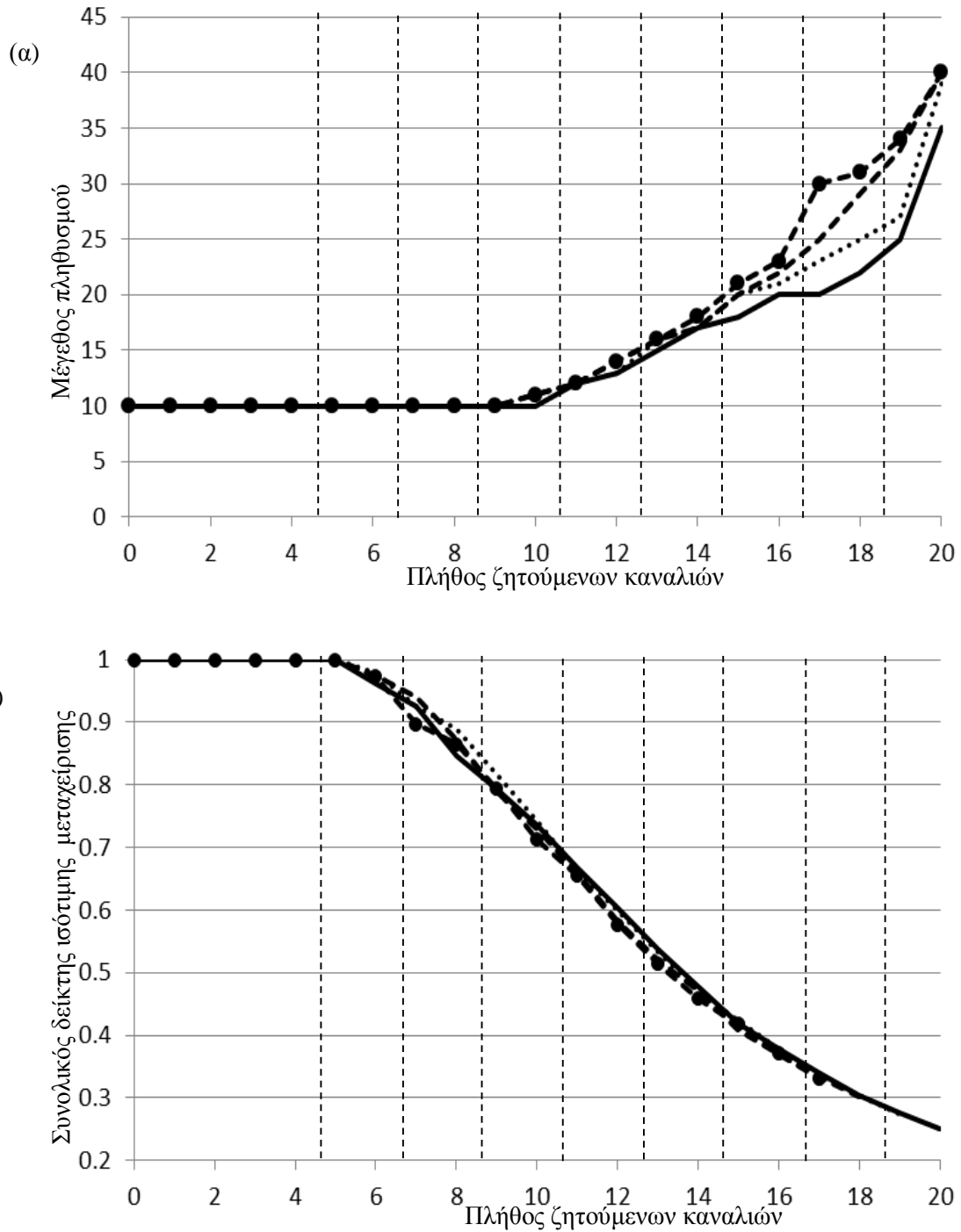
α. Ποσοστό συνολικής διέλευσης πληροφορίας.  
 β. Συνολικός δείκτης ισότητας μεταχείρισης.

Από τα αποτελέσματα που απεικονίζονται στα Σχήματα 3.7α και 3.7β είναι φανερό ότι οι δύο προσεγγίσεις της προτεινομένης μεθόδου αποδίδουν αισθητά καλύτερα σε σύγκριση με την άμεση απόδοση φασματικών πόρων τόσο ως προς τη συνολική διέλευση πληροφορίας του δικτύου όσο και ως προς το συνολικό δείκτη ισότιμης μεταχείρισης. Επιπλέον, φαίνεται επίσης ότι η αύξηση του πλήθους επιπέδων λειτουργίας του προτεινόμενου σχήματος από δύο επίπεδα λειτουργίας σε δεκατρία – μία επιλογή η οποία αυξάνει παράλληλα και την πολυπλοκότητα – επιφέρει σχετικά μικρή βελτίωση τόσο στη φασματική χρησιμοποίηση όσο και στη συνολική ισότιμη μεταχείριση. Αυτό αποτελεί ένδειξη ότι η υιοθέτηση ακόμη και δύο μόνο επιπέδων λειτουργίας οδηγεί σε απλή και αποδοτική από πλευράς κόστους υλοποίηση της προτεινόμενης μεθόδου.

#### **3.4.2. Απόδοση καναλιών υπό ασυνήθιστες συνθήκες**

Κάτω από ασυνήθιστες συνθήκες, μία κυψέλη του δικτύου, που θα αναφέρεται ακολούθως ως κυψέλη έκτακτης ανάγκης, μπορεί να αντιμετωπίσει σημαντική αύξηση του πλήθους των χρηστών που ζητούν εξυπηρέτηση. Αυτό μπορεί να συμβεί, για παράδειγμα, σε στάδια όταν διεξάγονται αγώνες. Είναι ενδεχόμενο πολλοί χρήστες σε κυψέλες έκτακτης ανάγκης ζήτησης να μην εξυπηρετούνται όταν η έκτακτη ανάγκη για κανάλια υπερβεί το μέγιστο πλήθος καναλιών που αποδίδονται υπό φυσιολογικές συνθήκες στην κυψέλη αυτή. Μία πιθανή λύση στο πρόβλημα αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω δυναμικού δανεισμού καναλιών από γειτονικές κυψέλες. Ο δανεισμός αυτός καθίσταται δυνατός με κατάλληλη προσαρμογή των στοιχείων του συνόλου *Απαιτήσεις*, δηλαδή των εισόδων  $r_n$  τόσο της κυψέλης επείγουσας ζήτησης όσο και των γειτονικών της, που καλούνται να προσφέρουν τα πρόσθετα κανάλια στην κυψέλη επείγουσας ζήτησης. Έτσι, η παράμετρος  $r_n$  της κυψέλης επείγουσας ζήτησης επιτρέπεται να λάβει τιμές μεγαλύτερες από  $r_{\max} = Q \cdot f_u$ . Σε εξαιρετικές περιπτώσεις στο  $r_n$  μπορεί να επιτραπεί να λάβει τιμή ίση με  $Q$ . Στην περίπτωση αυτή, οι γειτονικές κυψέλες μπορεί να μείνουν χωρίς καθόλου κανάλια, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε μία πολύ σοβαρή υποβάθμιση του δείκτη ίσης μεταχείρισης. Αν τουλάχιστον ένα κανάλι πρέπει να διατηρηθεί στις γειτονικές κυψέλες ώστε να διασφαλίζεται σε αυτές ένα ελάχιστο επίπεδο εξυπηρέτησης, η μέγιστη τιμή του  $r_n$  που επιτρέπεται να λάβει μία κυψέλη

επείγουσας ζήτησης στις δύο ενδεικτικές ομαδοποιήσεις κυψελών που εξετάζονται είναι  $Q=4$  (για κυψέλες ορθογωνίου σχήματος) ή  $Q=6$  (για κυψέλες εξαγωνικού σχήματος). Προσαρμοζόμενο στις δυναμικά μεταβαλλόμενες απαιτήσεις σε κανάλια του κυψελωτού δικτύου, το προτεινόμενο σχήμα απόδοσης καναλιών επιτυγχάνει ταυτόχρονα: (α) να ικανοποιήσει την αυξημένη ζήτηση η οποία δημιουργήθηκε σε μία κυψέλη επείγουσας ζήτησης και (β) να αποδώσει τα εναπομείναντα κανάλια με βέλτιστο τρόπο και ισότιμα στις γειτονικές κυψέλες. Τα χαρακτηριστικά αυτά καταδεικνύονται μέσω των αποτελεσμάτων που απεικονίζονται στα Σχήματα 3.8α και 3.8β και αφορούν την αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθόδου απόδοσης καναλιών υπό ασυνήθιστες συνθήκες σε ένα υποθετικό κυψελωτό δίκτυο με κυψέλες ορθογωνίου σχήματος με  $N=100$  και  $Q=20$ . Απουσία εξωτερικών παρεμβολών στην κυψέλη που πρέπει να εξυπηρετήσει έκτακτη κίνηση, το μέγιστο πλήθος καναλιών που μπορεί να αποδοθεί στην κυψέλη αυτή μπορεί να γίνει ίσο με  $Q$ . Στο Σχήμα 3.8α απεικονίζεται το μέγεθος πληθυσμού που είναι απαραίτητο για τη δυναμική εφαρμογή του προτεινόμενου σχήματος απόδοσης καναλιών σε έκτακτες καταστάσεις ως συνάρτηση του πλήθους πρόσθετων καναλιών που απαιτούνται από την κυψέλη επείγουσας ζήτησης. Από το Σχήμα 3.8α προκύπτει ότι ένα σημαντικά μεγαλύτερο μέγεθος πληθυσμού μπορεί να είναι απαραίτητο για τη δυναμική προσαρμογή του προτεινόμενου βασιζόμενου στους γενετικούς αλγορίθμους σχήματος όταν το πλήθος των πρόσθετων καναλιών υπερβαίνει το  $Q/2$  καθώς, στην περίπτωση αυτή, το πλήθος των πιθανών συνδυασμών μεταφοράς καναλιών ανάμεσα στα μέλη του πληθυσμού αυξάνεται σημαντικά, και, συνεπώς, οδηγεί σε αύξηση του απαιτούμενου χρόνου εκτέλεσης.



Σχήμα 3.8. Αποτελέσματα προσομοιώσεων που αφορούν την απόδοση καναλιών που ζητούνται από μία κυψέλη έκτακτης ανάγκης όταν το ποσοστό των καναλιών που υφίστανται παρεμβολή κυμαίνεται μεταξύ 0% (—), 4% (.....), 8% (---) μέχρι και 12% (-·-·-) για κυψελωτό δίκτυο με κυψέλες ορθογωνίου σχήματος ( $N=100$ ,  $Q=20$ ).

α. Απαιτούμενο μέγεθος πληθυσμού. β. Συνολικός δείκτης ισότιμης μεταχείρισης.

Συγκεκριμένα, ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται για την υλοποίηση του προτεινόμενου σχήματος απόδοσης καναλιών όταν υπάρχει αυξημένη ζήτηση καναλιών

από μία κυψέλη μπορεί να αυξηθεί μέχρι και περίπου 40% σε σύγκριση με τον υπολογιστικό χρόνο που είναι απαραίτητος υπό κανονικές συνθήκες ζήτησης καναλιών. Στην ακραία περίπτωση όπου το πλήθος των καναλιών που ζητείται από την κυψέλη επείγουσας ζήτησης είναι  $r_n = Q$ , ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται για την εφαρμογή του προτεινόμενου σχήματος ήταν περίπου 20s, ενώ στη συνηθισμένη περίπτωση, όταν  $r_n = Q/4$ , ο απαιτούμενος υπολογιστικός χρόνος ήταν 15s περίπου. Καιτοι το προτεινόμενο σχήμα απαιτεί μέγεθος πληθυσμού ίσο με 40 (έναντι 200), στην ακραία περίπτωση όπου όλα τα επιπλέον διαθέσιμα κανάλια αποδίδονται στην κυψέλη έκτακτης ανάγκης (δηλαδή 16 επιπλέον κανάλια), το προτεινόμενο σχήμα είναι δυνατό να αποδώσει μέχρι και 9 επιπλέον κανάλια με ένα μέγεθος πληθυσμού ίσο με 10 μέλη, ακόμα και στην περίπτωση όπου 12% των διαθέσιμων καναλιών υφίστανται παρεμβολή από παρόχους DVB – T. Στην περίπτωση αυτή, ο υπολογιστικός χρόνος που είναι απαραίτητος για την εφαρμογή του προτεινόμενου σχήματος είναι μικρότερος από 5s. Τα αποτελέσματα για τον αντίστοιχο συνολικό δείκτη ισότιμης μεταχείρισης του δικτύου απεικονίζονται στο Σχήμα 3.8β. Καθώς ο αριθμός των πρόσθετων καναλιών που ζητούνται από την κυψέλη επείγουσας ζήτησης αυξάνεται, στις γειτονικές κυψέλες το σχήμα αναλαμβάνει να αποδοθούν λιγότερα κανάλια σε σχέση με όσα είχαν ζητηθεί. Επομένως, ο συνολικός δείκτης ισότιμης μεταχείρισης επιδεινώνεται αρκετά εξαιτίας της σημαντικής υποβάθμισης του ατομικού δείκτη ισότιμης μεταχείρισης των κυψελών που είναι γειτονικές προς την κυψέλη επείγουσας ζήτησης.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΤΡΙΤΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ**

[3.1] ETSI EN, “Digital Video Broadcasting (DVB) Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television”, 2006.

[3.2] European Commission, Radio Spectrum Committee, "CEPT Report 21 - "Technical considerations regarding harmonisation options for the Digital Dividend - Compatibility issues between "cellular / low power transmitter" networks and "larger coverage / high power / tower" type of networks", March 2007.

[3.3] <http://fap.zib.de//>

- [3.4] A. Eisenblatter, H. -F. Geerdes and I. Siomina", "Integrated access point placement and channel assignment for Wireless LANs in an indoor office environment", "Proc. of the 8th IEEE Intl. Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia, June 2007
- [3.5] E. G. Villegas, R. V. Ferre and j. P. Aspas, "Implementation of a distributed dynamic channel assignment mechanism for IEEE 802.11 networks", Proceedings of PIMRC 2005, September 2005.
- [3.6] Pinagapany S., Kulkarni A.V., D.Y. Patil, "Solving channel allocation problem in cellular radio networks using genetic algorithm", 3rd International Conference on Communication Systems Software and Middleware and Workshops, 2008. COMSWARE 2008. Publication Date: 6-10 Jan. 2008
- [3.7] Reddy, Y.B.; Gajendar, N.; Taylor, Portia; Madden, Damian,, "Computationally Efficient Resource Allocation in OFDM Systems: Genetic Algorithm Approach," Information Technology, 2007. ITNG '07. Fourth International Conference on , vol., no., pp.36-41, 2-4 April 2007
- [3.8] Reddy, Y.B.; Phoha, V.V.;; "Genetic Algorithm Approach for Resource Allocation in Multi-User OFDM Systems," Communication Systems Software and Middleware, 2007. COMSWARE 2007. 2nd International Conference on , vol., no., pp.1-6, 7-12 Jan. 2007
- [3.9] Wong S. H., Wassell, I., "Dynamic channel allocation using a genetic algorithm for a TDD broadband fixed wireless access network", Conf. Wireless Opt. Commun., Banff, AB, Canada, Jul. 17-19,2002, pp. 521-526
- [3.10] Hongxiang Cai; Lianfen Huang; Zhibin Gao; Xiaonan Cui; , "Dynamic channel allocation based on genetic algorithm in TD-SCDMA system," Information Computing and Telecommunications (YC-ICT), 2010 IEEE Youth Conference on , vol., no., pp.423-426, 28-30 Nov. 2010
- [3.11] Patra, S.S.M.; Roy, K.; Banerjee, S.; Vidyarthi, D.P.; , "Improved genetic algorithm for channel allocation with channel borrowing in mobile computing," *Mobile Computing, IEEE Transactions on* , vol.5, no.7, pp. 884- 892, July 2006



- [3.12] European Commission, Radio Spectrum Committee, "CEPT Report 29 - Guideline on cross border coordination issues between mobile services in one country and broadcasting services in another country", June 2009
- [3.13] G. I. Tsiropoulos, D. G. Stratogiannis, J. D. Kanellopoulos and P. G. Cottis, "Probabilistic Framework and Performance Evaluation for Prioritized Call Admission Control in Next Generation Networks", *Computer Communications*, vol. 34, no. 9, pp. 1045-1054, (on line May 2010), June 2011.
- [3.14] D. G. Stratogiannis, G. I. Tsiropoulos, J. D. Kanellopoulos and P. G. Cottis, "A Probabilistic Approach for Fair-Efficient Call Admission Control in Wireless Multiservice Networks", *International Journal of Electronics*, vol. 97, no. 12, pp. 1405-1422, December 2010.
- [3.15] Jain R.K., Chiu D.M, Hawe, W. R., "A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer systems". Maynard, Massachusetts: Digital Equipment Corporation, 1984, Technical Report DEC-TR-301.
- [3.16] Apurva N. Mody, Gerald Chouinard, "IEEE 802.22 Wireless Regional Area Networks Enabling Rural Broadband Wireless Access Using Cognitive Radio Technology", June 2010.
- [3.17] Bhattacharjee, S.; Konar, A.; Nagar, A.K.; , "Channel Allocation for a Single Cell Cognitive Radio Network Using Genetic Algorithm," *Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing (IMIS), 2011 Fifth International Conference on* , vol., no., pp.258-264, June 30 2011-July 2 2011
- [3.18] Quintero A., and Pierre S., "On the Design of Large-Scale UMTS Mobile Networks Using Hybrid Genetic Algorithms", *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, Volume 57, Issue 4, 2007
- [3.19] Idoumghar L., Alabau M., and Schott R., "New hybrid genetic algorithms for the frequency assignment problem", *IEEE Trans. Broadcasting*, vol. 48, no. 1, Mar. 2002
- [3.20] Khanbary L.M.O., Vidyarthi D.P., "A GA-Based Effective Fault-Tolerant Model for Channel Allocation in Mobile Computing", *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, Volume 57, Issue 3, May 2008

- [3.21] Lima M.A.C., Araujo A.F.R., and Cesar, A.C., "Adaptive Genetic Algorithms for Dynamic Channel Assignment in Mobile Cellular Communication Systems", Vehicular Technology, IEEE Transactions on, Volume 56, Issue 5 , Sept. 2007
- [3.22] Xiannong Fu, Anu, G. Bourgeois, Pingzhi Fan, Yi Pan, "Using a genetic algorithm approach to solve the dynamic channel – assignment problem", International Journal of Mobile Communications, Volume 4 , Issue 3 (February 2006), Pages 333-353, 2006
- [3.23] Lhassane Idoumghar, Rene Schott, "Two Distributed Algorithms for the Frequency Assignment Problem in the Field of Radio Broadcasting", IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 55, No. 2, June 2009
- [3.24] Matthew J. Brauer , Mark T. Holder, Laurie A. Dries, Derrick J. Zwickl, Paul O. Lewis and David M. Hillis, "Genetic Algorithms and Parallel Processing in Maximum-Likelihood Phylogeny Inference", Molecular Biology and Evolution, 2002
- [3.25] Vose, Michael D., "The Simple Genetic Algorithm: Foundations and Theory", MIT Press, Cambridge, MA. 1999
- [3.26] Ken Murray, Dirk Pesch, Adaptive Wireless Systems Group Department of Electronic Engineering Cork Institute of Technology, Cork, Ireland, "Adaptive Radio Resource Management for GSM using Neural Networks and Genetic Algorithms"
- [3.27] Cha, Sung-Hyuk, Tappert, Charles C. "A Genetic Algorithm for Constructing Compact Binary Decision Trees", Journal of Pattern Recognition Research, 2009
- [3.28] Fogel, David B., "Evolutionary Computation: Toward a New Philosophy of Machine Intelligence", IEEE Press, Piscataway, NJ, third edition, 2006
- [3.29] Jiayuan Chen; Olafsson, S.; Xuanye Gu; , "A Biologically Inspired Dynamic Channel Allocation Technique in 802.11 WLANs with Multiple Access Points," Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2007. PIMRC 2007. IEEE 18th International Symposium on , vol., no., pp.1-5, 3-7 Sept. 2007
- [3.30] Zbigniew Michalewicz, "Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs", Springer - Verlag, third Edition, 1999.
- [3.31] Fraser Alex, Burnell Donald, "Computer Models in Genetics", McGraw-Hill, New York, 1970

[3.32] Mitchell Melanie, "An Introduction to Genetic Algorithms", MIT Press, Cambridge, MA, 1996.

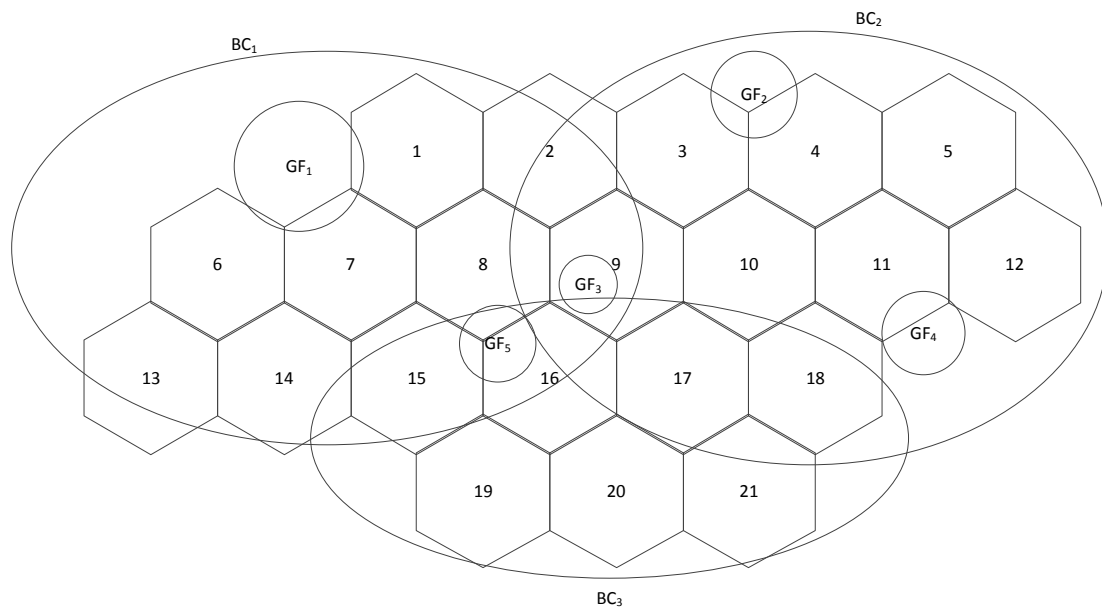


## 4. ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΑΝΑΛΙΩΝ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ

Το πρόβλημα απόδοσης καναλιών επιδεινώνεται όταν η ζώνη UHF δεν χρησιμοποιείται αποδοτικά. Πρόσφατα, νέες υπηρεσίες έχουν προταθεί στη συγκεκριμένη ζώνη στην οποία αφθονούν τρέχουσες παραδοσιακές υπηρεσίες. Στο πλαίσιο αυτό, μία σημαντική προσπάθεια έχει ξεκινήσει ώστε να επιτευχθεί η απελευθέρωση ενός τμήματος της UHF ζώνης από τις υπάρχουσες ασύρματες υπηρεσίες. Προς τούτο, η μετάβαση από την αναλογική στην ψηφιακή εκπομπή τηλεόρασης θα απελευθερώσει ένα σημαντικό τμήμα της ζώνης αυτής, που είναι γνωστό ως Ψηφιακό Μέρισμα [3.1]. Πέραν, όμως, του Ψηφιακού Μερισματος, οι ευκαιρίες αξιοποίησης του φάσματος που θα προκύψουν από την κατάλληλη χρήση των φασματικών κενών στη συγκεκριμένη φασματική περιοχή πρέπει να αξιοποιηθούν με βάση το πρότυπο IEEE 802.22 [1.13]. Πολλαπλές υπηρεσίες μπορούν να εξυπηρετηθούν σε τέτοιου είδους φασματικά κενά με στόχο την παροχή κινητών υπηρεσιών πολυμέσων (multimedia) σε πυκνοκατοικημένες περιοχές. Αναμένεται ότι κατάλληλες πολιτικές αξιοποίησης του φάσματος θα δημιουργήσουν ευκαιρίες για τεχνολογικά καινοτόμα και οικονομικά αποδοτική αξιοποίηση του υπάρχοντος φάσματος. Οι φασματικές πολιτικές αυτές πρέπει να ασκηθούν υιοθετώντας περισσότερο ευέλικτα μοντέλα απόδοσης καναλιών. Πέραν αυτού, όμως, αυτά τα μοντέλα πρέπει να είναι προσανατολισμένα και προς την εξυπηρέτηση μελλοντικών εφαρμογών [4.1]. Πρέπει να σημειωθεί ότι, καθώς οι αποκλειστικές πολιτικές απόδοσης φάσματος δεν είναι κατάλληλες για όλα τα πιθανά σενάρια, η μετάβαση από τις παραδοσιακές πολιτικές σε νέες, που μπορούν να αντιμετωπίσουν τη συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για φάσμα και να προσφέρουν δυναμική χρήση αυτού, καθίσταται επιτακτική. Επομένως, οι υπάρχουσες φασματικές πολιτικές πρέπει να ενισχυθούν με μοντέλα τα οποία ευνοούν τη συνύπαρξη πολλαπλών υπηρεσιών σε ετερογενή (heterogeneous) δίκτυα.

Το Πρότυπο IEEE 802.22 αποσκοπεί στην κατάλληλη απόδοση του φάσματος της UHF ζώνης σε πολλαπλές ασύρματες υπηρεσίες. Το πρώτο βήμα προς αξιοποίηση και εκμετάλλευση των φασματικών κενών είναι ο καθορισμός των UHF ζωνών σε συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή που θα απελευθερωθούν από τους παραδοσιακούς

παρόχους αναλογικής τηλεόρασης. Όταν η λειτουργία αυτή ολοκληρωθεί, οι ζώνες αυτές θα καταστούν διαθέσιμες για άλλες ασύρματες υπηρεσίες, εφόσον δεν προκαλούν επιβλαβείς παρεμβολές στους παρόχους Ψηφιακής Τηλεόρασης. Η υπάρχουσα δομή δικτύου των παρόχων Ψηφιακής Τηλεόρασης περιορίζει τις ευκαιρίες φασματικής εκμετάλλευσης οι οποίες ανακύπτουν σε περιοχές όπου οι πάροχοι αυτοί και οι πάροχοι κινητών υπηρεσιών συνυπάρχουν, είτε γεωγραφικά είτε και φασματικά. Το κυψελωτό δίκτυο αναφοράς της Φιλαδέλφειας όπου απεικονίζονται τα φασματικά κενά σε περιοχές όπου συνυπάρχουν πάροχοι υπηρεσιών Ψηφιακής Τηλεόρασης και κινητών υπηρεσιών απεικονίζεται στο Σχήμα 4.1.



**Σχήμα 4.1. Πάροχοι ευρυζωνικών υπηρεσιών στο κυψελωτό δίκτυο αναφοράς της Φιλαδέλφειας (Philadelphia Benchmark Network – PBN).**

Όταν η ενδεικτική γεωγραφική περιοχή είναι πυκνοκατοικημένη, το κυψελωτό δίκτυο απαιτεί την ύπαρξη πολλών σταθμών βάσης για να ικανοποιήσει την υψηλή ζήτηση ευρυζωνικών υπηρεσιών. Στην ενδεικτική περιοχή που απεικονίζεται στο Σχήμα 4.1, οι παραδοσιακοί πάροχοι Ψηφιακής Τηλεόρασης, που χρησιμοποιούν πομπούς εγκατεστημένους σε σημεία μεγάλου υψομέτρου, καλύπτουν τις περιοχές που σημειώνονται ως BC<sub>1</sub>, BC<sub>2</sub> και BC<sub>3</sub>. Επιπλέον, πέντε τοπικοί αναμεταδότες (gap fillers) – που λειτουργούν είτε σε μονοσυχνотικό δίκτυο (Single Frequency Network – SFN)

ή σε πολυσυχνοτικό δίκτυο (Multi Frequency Network – MFN) – παρέχουν επίσης υπηρεσίες Ψηφιακής Τηλεόρασης στις περιοχές που επισημαίνονται ως GF<sub>1</sub>, GF<sub>2</sub>, GF<sub>3</sub>, GF<sub>4</sub> και GF<sub>5</sub> στο Σχήμα 4.1. Με αναφορά στο Σχήμα 4.1, η διαθεσιμότητα των φασματικών κενών στις κυψέλες του κυψελωτού δικτύου εξαρτάται κυρίως από τις παρεμβολές στην κάτω ζεύξη του κυψελωτού δικτύου, που προκαλούνται από παρόχους ευρυζωνικού περιεχομένου που συνυπάρχουν στη συγκεκριμένη περιοχή. Ενδεικτικά, στην κυψέλη 9 τα διαθέσιμα φασματικά κενά μειώνονται δραστηνικά, ή ενδεχομένως και να μην υπάρχουν καν, εξαιτίας της ταυτόχρονης λειτουργίας των BC<sub>1</sub>, BC<sub>2</sub>, BC<sub>3</sub> και GF<sub>3</sub>. Από την άλλη πλευρά, στην περίπτωση όπου η Ψηφιακή Τηλεόραση και οι πάροχοι ευρυζωνικών κινητών υπηρεσιών εκπέμπουν από τα ίδια σημεία εκπομπής, μία κατάλληλη πολιτική απόδοσης φάσματος στις ταυτόχρονες πολλαπλές εκπομπές μπορεί να ενισχύσει σημαντικά τη συνολική φασματική αξιοποίηση.

Το παρόν κεφάλαιο ασχολείται με την απόδοση καναλιών σε παρόχους Ψηφιακής Τηλεόρασης και σε παρόχους πολλαπλών κινητών υπηρεσιών που λειτουργούν στην ζώνη UHF στην ίδια γεωγραφική περιοχή. Σε αντίθεση προς την εγκατάσταση πομπών Ψηφιακής Τηλεόρασης (π.χ. για να καλυφθούν οι περιοχές BC<sub>*i*</sub>, *i* = 1,2,...,3 στο Σχήμα 4.1) – σε κατάλληλες γεωγραφικές θέσεις σε σχετικά μεγάλο υψόμετρο – και διαφόρων τοπικών αναμεταδοτών (π.χ. για να καλυφθούν οι περιοχές GF<sub>*i*</sub>, *i* = 1,2,...,5 στο Σχήμα 4.1) – διασπαρμένων εντός της κοινής περιοχής εξυπηρέτησης –, στην παρούσα εργασία προτείνεται η συνύπαρξη των κεραιών εκπομπής των δύο προαναφερθέντων τύπων ευρυεκπομπής στις θέσεις εγκατάστασης των Σταθμών Βάσης των υπαρχόντων κυψελωτών δικτύων. Μέσω της συνύπαρξης πομπών παρόχων διαφορετικών ασύρματων κινητών υπηρεσιών και μέσω του ταυτόχρονου περιορισμού της κάλυψής τους σε κοινές κυψέλες, η διαμερισσιμότητα (granularity) της περιοχής κάλυψης αυξάνεται. Αυτό έχει ως συνέπεια να καθίσταται εφικτή η αποδοτική και διαχειρίσιμη αναχρησιμοποίηση συχνοτήτων. Το μειονέκτημα της συνεγκατάστασης περισσότερων πομπών για ευρυεκπομπή Ψηφιακής Τηλεόρασης είναι, σαφώς, πολύ μικρότερο σε σύγκριση με τα πλεονεκτήματα που παρέχει η προτεινόμενη μέθοδος. Για να επιτευχθεί η αποτελεσματική απόδοση των διαθέσιμων φασματικών πόρων, δηλαδή των καναλιών τα οποία θα αναφέρονται εφεξής απλώς ως κανάλια, σε πολλαπλές υπηρεσίες που θα λειτουργούν εντός της ίδιας γεωγραφικής περιοχής, επιλέχθηκε προσέγγιση βασισμένη στους Γενετικούς Αλγορίθμους και ελέγχθηκε ενδεικτικά στο πλαίσιο του γνωστού

Προβλήματος FAP που έχει ευρέως μελετηθεί στη βιβλιογραφία. Τα αποτελέσματα στα οποία κατέληξε η προτεινόμενη μέθοδος συμφωνούν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που αναφέρονται στη βιβλιογραφία [4.2], [4.3], [4.4].

#### **4.1. Κατάστρωση του προβλήματος απόδοσης καναλιών**

Το υπό εξέταση πρόβλημα μπορεί να διατυπωθεί κατά παρόμοιο τρόπο με το πρόβλημα FAP, το οποίο αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 1. Πολλές μέθοδοι έχουν προταθεί για να επιτύχουν αποτελεσματική απόδοση φάσματος [4.2], [4.3], [4.4]. Η συνήθης πρακτική είναι να αποδίδονται κανάλια στις κυψέλες του δικτύου και, ταυτόχρονα, να ικανοποιούνται συγκεκριμένοι ενδοκυψελικοί (intercell), διακυψελικοί (intracell) και διυπηρεσιακοί (intraservice) περιορισμοί. Οι διακυψελικοί περιορισμοί επιβάλλονται για να ορισθεί το επίπεδο επιτρεπόμενης παρεμβολής μεταξύ διαφορετικών κυψελών του δικτύου, ενώ οι ενδοκυψελικοί περιορισμοί επιβάλλονται για να περιορίσουν τα διαφορετικά κανάλια τα οποία έχουν αποδοθεί στην ίδια κυψέλη. Στο πλαίσιο της διατριβής, πέραν των ανωτέρω περιορισμών επιβάλλονται και διυπηρεσιακοί περιορισμοί με στόχο να προδιαγραφούν οι παρεμβολές μεταξύ καναλιών που αποδίδονται σε δίκτυα που υποστηρίζουν διαφορετικές υπηρεσίες. Η ελάχιστη απόσταση ανάμεσα σε δύο κυψέλες που επιτρέπεται να χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι – εφεξής αποκαλούμενη και ως περιστατικό (instance) – ορίζεται με βάση τους ενδοκυψελικούς περιορισμούς [3.3]. Διάφοροι τύποι περιστατικών έχουν εξετασθεί στη βιβλιογραφία [4.2], [4.3], [4.4] και έχουν προσδιορισθεί οι αντίστοιχες αποδόσεις καναλιών στις κυψέλες του PBN.

Οι διάφορες κατηγορίες υπηρεσίας (Service Classes – SC) που αντιμετωπίζονται από την παρούσα εργασία διαβαθμίζονται ως ακολούθως:

- Κατηγορία Υπηρεσίας 1 (S1). Περιλαμβάνει τις υπηρεσίες που απαιτούν υψηλή ποιότητα παρεχόμενης υπηρεσίας και υπόκειται από αυστηρούς ενδοδικτυακούς περιορισμούς.
- Κατηγορία Υπηρεσίας 2 (S2). Περιλαμβάνει τις υπηρεσίες μέσω των απαιτήσεων ποιότητας παρεχόμενης υπηρεσίας και 2 υπόκειται σε μέτριους ενδοδικτυακούς περιορισμούς.



- Κατηγορία Υπηρεσίας 3 (S3). Περιλαμβάνει τις υπηρεσίες που απαιτούν χαμηλή ποιότητα της παρεχόμενης υπηρεσίας και υπόκειται σε χαλαρούς ενδοδικτυακούς περιορισμούς.

Στη γενική περίπτωση, στους χρήστες που ανήκουν στην SC1 αποδίδεται σταθερός ρυθμός μετάδοσης. Όσον αφορά την SC2 αλλά κυρίως την SC3, ο αποδιδόμενος ρυθμός μετάδοσης μπορεί να ποικίλλει, εξαρτώμενος από τη χρήση ACM.

Για την ανάλυση του προτεινόμενου σχήματος θεωρήθηκε ένα κυψελωτό δίκτυο που αποτελείται από  $N$  κυψέλες. Γενικώς, αν με  $M$  συμβολίζεται το πλήθος των διαθέσιμων καναλιών και με  $K$  το πλήθος των Κατηγοριών Υπηρεσίας που υποστηρίζονται από τα διάφορα ασύρματα δίκτυα πολλαπλών υπηρεσιών, ορίζεται πίνακας  $\mathbf{B}$  διαστάσεων  $(M \times N \times K)$  για να προσδιορίσει ποιά κανάλια αποδίδονται σε κάθε κυψέλη και τις υπηρεσίες που υποστηρίζονται από τις κυψέλες αυτές. Επομένως, τα στοιχεία του πίνακα  $\mathbf{B}$ ,  $b_{m,n,k}$ ,  $m=1,2,\dots,M$ ,  $n=1,2,\dots,N$  και  $k=1,2,\dots,K$ , λαμβάνουν μοναδιαίες τιμές εφόσον το κανάλι  $m$  αποδίδεται στην κυψέλη  $n$  για να υποστηρίξει την υπηρεσία  $k$ . Άλλως,  $b_{m,n,k}=0$ . Επιπλέον, ορίζεται πίνακας ζήτησης  $\mathbf{D}$  διαστάσεων  $(N \times K)$  για να προσδιορίσει πόσα κανάλια απαιτούνται από την υπηρεσία  $k$  στην κυψέλη  $n$ . Τα στοιχεία του πίνακα  $\mathbf{D}$ ,  $d_{n,k}$ , λαμβάνουν τιμή ίση με το πλήθος των χρηστών εντός της κυψέλης  $n$  που είναι επιθυμητό να μπορούν να χρησιμοποιούν την υπηρεσία  $k$ .

Για να εξασφαλισθεί ότι διαφορετικές κυψέλες που ενδεχομένως χρησιμοποιούν κοινό κανάλι δεν προκαλούν παρεμβολές μεταξύ τους, εισάγεται ένα διάνυσμα με στοιχεία τις γεωγραφικές αποστάσεις μεταξύ των σταθμών βάσης που επιτρέπουν την αναχρησιμοποίηση του ίδιου καναλιού. Δύο κυψέλες μπορούν να λειτουργήσουν στο ίδιο κανάλι εφόσον η μεταξύ τους απόσταση, έστω  $r$ , είναι μεγαλύτερη από την οριακή απόσταση ίση με  $R$ . Ο ανωτέρω περιορισμός αναχρησιμοποίησης του ίδιου καναλιού μπορεί να γενικευθεί για να χαρακτηρίσει το κυψελωτό δίκτυο μέσω μιας σειράς αποστάσεων αναχρησιμοποίησης  $R^{(0)}, \dots, R^{(l)}$ . Η απόσταση  $R^{(0)}$  υποδηλώνει ότι δύο κυψέλες μπορούν να λειτουργήσουν στο ίδιο κανάλι, εφόσον η μεταξύ τους απόσταση  $r$  (δηλαδή η απόσταση των αντίστοιχων Σταθμών Βάσης) ικανοποιεί τη σχέση  $r > R^{(0)}$ . Από την άλλη πλευρά, η απόσταση  $R^{(1)}$  υποδηλώνει ότι, αν το κανάλι  $m$  αποδοθεί στην κυψέλη  $n$ , όλες οι κυψέλες που έχουν απόσταση μικρότερη από  $R^{(1)}$  από την κυψέλη  $n$

δεν μπορούν να λειτουργήσουν στα κανάλια  $m-1$ ,  $m$  και  $m+1$ . Αντιστοίχως, η απόσταση  $R^{(i)}$  υποδηλώνει ότι, αν το κανάλι  $m$  αποδοθεί στην κυψέλη  $n$ , όλες οι κυψέλες οι οποίες έχουν απόσταση μικρότερη από  $R^{(i)}$  από την κυψέλη  $n$  δεν μπορούν να λειτουργήσουν στα κανάλια  $m-i$ ,  $m-i-1, \dots, m+i$ .

Για να διασφαλισθεί ότι η απόδοση συγκεκριμένου καναλιού σε κάποια κυψέλη – που δηλώνεται από το αντίστοιχο στοιχείο του πίνακα  $\mathbf{B}$  – δεν δημιουργεί διακυβελική παρεμβολή, εισάγεται πίνακας συμβατότητας  $\mathbf{C}$  διαστάσεων  $(N \times N \times K \times K)$ , που εκφράζει από κοινού τους διακυβελικούς και διυπηρεσιακούς περιορισμούς. Οι περιορισμοί αυτοί επιβάλλονται για να διασφαλίσουν ότι καμία παρεμβολή δεν υφίσταται μεταξύ διαφορετικών υπηρεσιών που εξυπηρετούνται σε διαφορετικές κυψέλες. Τα στοιχεία του πίνακα  $\mathbf{C}$ ,  $c_{n,n',k,k'}$ , εκφράζουν τους περιορισμούς που επιβάλλονται από το σύνολο των αποστάσεων αναχρησιμοποίησης καναλιών  $R^{(i)}$  και δηλώνουν την ελάχιστη φασματική απόσταση ανάμεσα στα κανάλια που χρησιμοποιούνται στην κυψέλη  $n$  και εξυπηρετούν την υπηρεσία  $k$  από τα κανάλια που χρησιμοποιούνται στην κυψέλη  $n'$  και εξυπηρετούν την υπηρεσία  $k'$ . Για παράδειγμα, η ύπαρξη στοιχείου  $c_{mm1}=5$ ,  $n=1,2,\dots,N$ , δηλώνει ότι τα κανάλια που αποδίδονται σε οποιαδήποτε κυψέλη για την Κατηγορία Υπηρεσίας 1 πρέπει να απέχουν κατά τουλάχιστον 5 κανάλια μεταξύ τους. Δηλαδή, αν το κανάλι 1 αποδοθεί σε κάποια κυψέλη για την Κατηγορία Υπηρεσίας 1, τα κανάλια 2, 3, 4 και 5 δεν πρέπει να αποδοθούν στην ίδια κυψέλη. Αντιστοίχως, το στοιχείο  $c_{mm2}=1$ ,  $n=1,2,\dots,N$ , δηλώνει ότι τα κανάλια που αποδίδονται σε οποιαδήποτε κυψέλη για τις SC1 και SC2 πρέπει να διαχωρίζονται τουλάχιστον από 1 κανάλι, ενώ το στοιχείο  $c_{1321}=1$  δηλώνει ότι το ίδιο κανάλι μπορεί να αποδοθεί στην κυψέλη 1 για την SC 2 και στην κυψέλη 3 για την SC1.

Χρησιμοποιώντας τους πίνακες που έχουν εισαχθεί και επεξηγηθεί στα προηγούμενα, το υπό εξέταση πρόβλημα μεταπίπτει στην ελαχιστοποίηση του συνολικού αριθμού καναλιών που είναι απαραίτητα για να ικανοποιηθεί η συνολική ζήτηση για φάσμα με βάση τις προδιαγραφές QoS που έχουν προδιαγραφεί. Η αντικειμενική συνάρτηση που ζητείται να ελαχιστοποιηθεί είναι

$$F = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K |a_{n,k} - d_{n,k}|}{\sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K d_{n,k}} \quad (4.1)$$

όπου  $M$  είναι το πλήθος καναλιών που αποδίδεται σε εκάστη των κυψελών του δικτύου. Στην (4.1), το μέγεθος

$$a_{n,k} = \sum_{m=1}^M b_{m,n,k}, \quad n=1,2,\dots,N, \quad k=1,2,\dots,K \quad (4.2)$$

αντιπροσωπεύει το συνολικό πλήθος καναλιών που αποδίδονται στην κυψέλη  $n$  για την υπηρεσία  $k$  ενώ το άθροισμα  $\sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K d_{n,k}$  αντιπροσωπεύει τη συνολική ζήτηση σε κανάλια

λαμβάνοντας υπόψη όλες τις υπηρεσίες που εξυπηρετούνται εντός της περιοχής κάλυψης. Ως εκ τούτου, η μη μηδενική αντικειμενική συνάρτηση  $F$  αντιπροσωπεύει τη μη ικανοποιούμενη ζήτηση σε κανάλια κανονικοποιημένη ως προς τη συνολική ζήτηση για κανάλια.

Δεδομένου του πλήθους των διαθέσιμων καναλιών  $M$ , η αντικειμενική συνάρτηση λαμβάνει την τιμή 0 όταν αποδίδονται όσα κανάλια ζητούνται σε όλες τις κυψέλες για όλες τις υπηρεσίες που εξυπηρετούνται στις κυψέλες αυτές. Στην παρούσα διατριβή, ο αριθμός των διαθέσιμων καναλιών ορίζεται ως χωρητικότητα μεταφοράς (transport capacity)  $T$ . Όταν ο συνολικός αριθμός καναλιών που ζητούνται για όλες τις υπηρεσίες που εξυπηρετούνται στην κοινή περιοχή κάλυψης υπερβαίνει τη χωρητικότητα μεταφοράς – δηλαδή αν το  $M$  δεν μπορεί να αυξηθεί πέραν του  $T$  –, η  $F$  είναι πιθανό να μην μπορεί να λάβει την τιμή 0. Στην περίπτωση αυτή, η τελική μικρή μη αρνητική τιμή του  $F$  ποσοτικοποιεί την κανονικοποιημένη ζήτηση για κανάλια που δεν μπορεί να ικανοποιηθεί. Το σχέδιο απόδοσης καναλιών που ελαχιστοποιεί την ανωτέρω ορισθείσα αντικειμενική συνάρτηση λαμβάνοντας υπόψη τους ενδοδικτυακούς περιορισμούς αποτελεί ένα υπο - βέλτιστο σχέδιο απόδοσης καναλιών.

Η ελαχιστοποίηση της  $F$  διασφαλίζει το ότι επιτρέπεται σε όσο το δυνατό περισσότερες κυψέλες επιτρέπεται να χρησιμοποιήσουν όσα κανάλια ζήτησαν για να εξυπηρετήσουν όλες τις διαθέσιμες υπηρεσίες. Αντιστοίχως, αν δύο κανάλια αποδοθούν σε διαφορετικές κυψέλες για να εξυπηρετήσουν διαφορετικές υπηρεσίες, λαμβάνοντας υπόψη τα αντίστοιχα στοιχεία  $b_{p,i,k}$ ,  $b_{q,j,l}$ ,  $p \neq q$ ,  $i \neq j$  και  $k \neq l$ , τα κανάλια αυτά πρέπει να διαχωρίζονται από ένα ελάχιστο αριθμό καναλιών, όπως επιβάλλεται από το αντίστοιχο στοιχείο του  $\mathbf{C}$ , δηλαδή το  $c_{ijkl}$ . Κατ' αυτόν τον τρόπο, διασφαλίζεται ότι

ικανοποιούνται οι διακυψελικοί και διυπηρεσιακοί περιορισμοί. Ως εκ τούτου, για τα στοιχεία  $b_{p,i,k}$ ,  $b_{q,j,l}$ ,  $p \neq q$ ,  $i \neq j$  και  $k \neq l$  πρέπει να ισχύει η σχέση

$$b_{p,i,k} = b_{q,j,l} = 1 \text{ εάν } |p-q| \geq c_{ijkl}, p, q = 1, 2, \dots, M, i, j = 1, 2, \dots, N, k, l = 1, 2, \dots, K \quad (4.3)$$

Όπως υποστηρίζεται στο [3.3], το συγκεκριμένο πρόβλημα βελτιστοποίησης αποτελεί ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης NP δυσκολίας, σύμφωνα με το οποίο πρέπει να ικανοποιηθεί όσο το δυνατό καλύτερα η συνολική ζήτηση για υπηρεσίες, δεσμεύοντας το ελάχιστο πλήθος καναλιών. Επιπλέον, πρέπει να ικανοποιούνται και οι ενδοδικτυακοί περιορισμοί. Το προτεινόμενο σχήμα λαμβάνει υπόψη τους περιορισμούς αυτούς μέσω της απόδοσης μοναδιαίων τιμών στα κατάλληλα στοιχεία του πίνακα **B**, δηλαδή μέσω της απόδοσης καναλιών σε κάποια κυψέλη μόνον εφόσον ικανοποιούνται οι ενδοδικτυακοί περιορισμοί. Καινοτομία του προτεινόμενου αλγορίθμου αποτελεί το ότι, μέσω της απόδοσης καναλιών σε πολλαπλές υπηρεσίες και όχι μόνο σε μία, αυξάνει τη φασματική χρησιμοποίηση. Αυτό επιτυγχάνεται με συνεγκατάσταση των πομπών των διαφορετικών ασύρματων δικτύων σε κοινές θέσεις και χρήση των ίδιων κυψελών οπότε αυξάνεται η διαμερισσιμότητα του σχήματος απόδοσης καναλιών σε ένα σύστημα πολλαπλών υπηρεσιών.

## 4.2. Εφαρμογή του προτεινόμενου σχήματος

Για την επίλυση τέτοιου είδους προβλημάτων βελτιστοποίησης NP δυσκολίας [3.4], [3.5], [3.6], [3.7], [1.19] έχουν προταθεί μεταεωριστικοί (ή στοχαστικοί) αλγόριθμοι, όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι ή η προσομοιωμένη απόπτηση (Simulated Annealing). Για να επιτύχει αποτελεσματική απόδοση καναλιών σε ετερογενή ασύρματα δίκτυα που υποστηρίζουν πολλαπλές υπηρεσίες σε κοινή περιοχή κάλυψης, η διατριβή ακολουθεί μία προσέγγιση βασιζόμενη στους ΓΑ. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο Κεφάλαιο 4, οι στοχαστικοί αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται προς επίλυση προβλημάτων FAP επεξεργάζονται ένα κατάλογο κλήσεων. Αντί να βελτιστοποιεί ένα τέτοιο κατάλογο, το προτεινόμενο, βασιζόμενο στους Γενετικούς Αλγορίθμους, σχήμα βελτιστοποιεί τον πίνακα **B**. Σε κάθε εκτέλεση του προτεινόμενου σχήματος, ο πληθυσμός που αντιπροσωπεύει το εκάστοτε σχέδιο απόδοσης καθορίζεται μέσω **P** σε πλήθος πινάκων **B**. Η επιλογή της παραμέτρου **P** είναι καθοριστική καθώς, σε κάθε επανάληψη, το προτεινόμενο σχήμα επεξεργάζεται τα **P** μέλη του πληθυσμού για να ανανεώσει τις τιμές

των πινάκων  $\mathbf{B}$  για την επόμενη γενεά. Κατ' αυτό τον τρόπο, δημιουργείται ένας νέος πληθυσμός σχεδίων απόδοσης καναλιών στις κυψέλες του κυψελωτού δικτύου. Συμπερασματικά, μετά από ένα αριθμό ανανεώσεων των γενεών, το προτεινόμενο σχήμα συγκλίνει σε ένα υποβέλτιστο σχέδιο απόδοσης καναλιών, δηλαδή σε ένα σχέδιο απόδοσης καναλιών που είναι όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο βέλτιστο με κριτήριο την ποσοτικοποίηση που γίνεται μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης  $F$ . Αν είναι δυνατό να καταστεί η τελική τιμή της  $F$  ίση με το μηδέν, η αντίστοιχη λύση αποτελεί βέλτιστο σχέδιο απόδοσης καναλιών.

Εκκινώντας αρχικά με ένα τυχαίο σχέδιο απόδοσης καναλιών, οι ενδοδικτυακοί και διυηρεσιακοί περιορισμοί λαμβάνονται υπόψη μέσω της απόδοσης του καναλιού  $m$  για την εξυπηρέτηση της υπηρεσίας  $k$  σε όλες τις κυψέλες του κυψελωτού δικτύου εφόσον ικανοποιούν την (4.3). Αυτή η απόδοση καναλιών επιτυγχάνεται με κατάλληλη επεξεργασία και ενημέρωση του πίνακα  $\mathbf{B}$ , ο οποίος αρχικά τίθεται ίσος με το μηδενικό πίνακα. Για να επιβληθεί συμμόρφωση με τους ανωτέρω περιορισμούς σε κάθε επανάληψη, οι τιμές των στοιχείων του πίνακα  $\mathbf{B}$ ,  $b_{m,n,k}$ , τίθενται ίσες με ένα, εφόσον η κυψέλη  $n$  επιτρέπεται να χρησιμοποιήσει το κανάλι  $m$  προς εξυπηρέτηση της υπηρεσίας  $k$ . Σε διαφορετική περίπτωση, οι τιμές των στοιχείων  $b_{m,n,k}$  τίθενται ίσες με το μηδέν.

#### **4.2.1. Εκκίνηση του προτεινόμενου σχήματος**

Αρχικά, δημιουργείται ένας αρχικός πληθυσμός από  $P$  σε πλήθος πίνακες  $\mathbf{B}$  με μηδενικά στοιχεία, δηλαδή  $\mathbf{B}=\mathbf{0}$ .

#### **4.2.2. Συμμόρφωση με τους ενδοδικτυακούς περιορισμούς**

Ενημέρωση των στοιχείων του πίνακα  $\mathbf{B}$  ελέγχοντας μέσω της σχέσης (4.3) αν το κανάλι  $m$  μπορεί να αποδοθεί στην κυψέλη  $n$  προς εξυπηρέτηση της υπηρεσίας  $k$  για την εκάστοτε νέα γενεά, δηλαδή με βάση το εκάστοτε νέο σχέδιο απόδοσης καναλιών. Αυτός ο έλεγχος ολοκληρώνεται ελέγχοντας αν τα κανάλια που έχουν αποδοθεί στις κυψέλες του δικτύου διαχωρίζονται επαρκώς, δηλαδή από  $c_{ijk}$  κανάλια. Η ανωτέρω διαδικασία καθορίζει όλα τα στοιχεία των αναθεωρημένων εκδοχών του πίνακα  $\mathbf{B}$  τα οποία επιτρέπεται να λάβουν μοναδιαίες τιμές. Κατ' αυτό τον τρόπο, επιτυγχάνεται η συμμόρφωση με το προφίλ αναχρησιμοποίησης συχνότητας που επιβάλλεται από τους

ενδοδικτυακούς περιορισμούς. Μετά την ολοκλήρωση κάθε επανάληψης, είναι πιθανό σε κάποιες κυψέλες να μην έχει αποδοθεί κανένα κανάλι, ενώ σε άλλες να έχουν αποδοθεί περισσότερα κανάλια από όσα ζητήθηκαν.

#### 4.2.3. Τερματισμός της Διαδικασίας

Δεδομένου του  $M$ , πραγματοποιούνται επαναληπτικά αναθεωρήσεις του πίνακα  $\mathbf{B}$  μέχρι η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης  $F$  να μηδενισθεί ή να γίνει μικρότερη από ένα εκ των προτέρων καθορισμένο, αριετά χαμηλό, κατώφλιο  $F_0$ . Για όλους τους  $P$  σε πλήθος πίνακες  $\mathbf{B}$  που επεξεργάζεται το προτεινόμενο σχήμα σε κάθε επανάληψή του, υπολογίζονται οι αντίστοιχες τιμές του  $F$ . Ο πίνακας  $\mathbf{B}$  που αντιστοιχεί σε μηδενική τιμή του  $F$  ή στη χαμηλότερη τιμή του  $F$  ανάμεσα στις τιμές που είναι μικρότερες από το κατώφλιο  $F_0$ , αποτελεί τη λύση του προβλήματος και συνιστά το τελικό σχέδιο απόδοσης καναλιών. Όταν  $F=0$ , αποδίδονται όσα κανάλια έχουν ζητηθεί για κάθε Κατηγορία Υπηρεσιών που υποστηρίζεται από το δίκτυο αποδίδονται σε όλες τις κυψέλες του δικτύου στη γεωγραφική περιοχή που εξετάζεται. Στην περίπτωση αυτή, το τελικό σχέδιο απόδοσης καναλιών (δηλαδή, ο πίνακας  $\mathbf{B}$  που αντιστοιχεί στη μηδενική τιμή του  $F$ ) αποτελεί βέλτιστο σχέδιο απόδοσης καναλιών. Όταν  $0 < F < F_0$ , το τελικό σχέδιο απόδοσης καναλιών αποτελεί υποβέλτιστο σχέδιο απόδοσης καναλιών.

### 4.3. Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Το προτεινόμενο σχήμα δοκιμάστηκε στο πλαίσιο του γνωστού κυψελωτού δικτύου αναφοράς της Φιλαδέλφειας (Philadelphia Benchmark Network – PBN) [3.3] που απεικονίζεται στο Σχήμα 4.1, θεωρώντας δύο υπηρεσίες, συγκεκριμένα την  $S1$  και την  $S2$ , όπου η υπηρεσία  $S1$  απαιτεί ένα κανάλι και η υπηρεσία  $S2$  δύο κανάλια. Εφεξής, ο όρος απόσταση θα αναφέρεται σε απόσταση κανονικοποιημένη ως προς την κοινή ακτίνα των κυψελών του κυψελωτού δικτύου. Οι ενδοκυψελικοί περιορισμοί που αφορούν την υπηρεσία  $S1$  λαμβάνονται υπόψη θεωρώντας ότι οι ενδεικτικά επιλεγμένες από το [3.3] αποστάσεις  $R^{(i)}$ ,  $i=0,1,\dots,5$ , είναι ίσες με  $(\sqrt{7}, \sqrt{3}, 1, 1, 1, 0)$ , αντίστοιχα. Δηλώνοντας με  $r$  την απόσταση κάποιας κυψέλης από την κυψέλη  $n$ , το προφίλ αναχρησιμοποίησης συχνότητας που συνεπάγονται οι ανωτέρω τιμές του  $R^{(i)}$  καθορίζει ότι, αν το κανάλι  $m$  αποδοθεί στην κυψέλη  $n$ , όλες οι κυψέλες που απέχουν από αυτήν

απόσταση  $r \geq \sqrt{7}$  επιτρέπεται να χρησιμοποιήσουν το κανάλι  $m$ . Κατά παρόμοια λογική, οι κυψέλες με απόσταση  $r$  που ικανοποιεί τη σχέση  $\sqrt{3} \leq r \leq \sqrt{7}$  δεν επιτρέπεται να χρησιμοποιήσουν το κανάλι  $m$ , ενώ στις κυψέλες των οποίων η απόσταση  $r$  ικανοποιεί τη σχέση  $1 \leq r \leq \sqrt{3}$  δεν επιτρέπεται να αποδοθούν τα κανάλια  $m-1$ ,  $m$  και  $m+1$ . Τέλος, τα κανάλια  $m-5$  έως και  $m+5$  δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κυψέλη στην οποία έχει αποδοθεί το κανάλι  $m$ .

Ως υπηρεσία  $S2$  θεωρείται μία υπηρεσία DVB-T. Ο διακυψελικός περιορισμός που αφορά την  $S2$  καθορίζει ότι κάποιο κανάλι που έχει αποδοθεί στην κυψέλη  $i$  μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί και από οποιαδήποτε κυψέλη  $j$ , εφόσον η (κανονικοποιημένη) απόστασή της από την κυψέλη  $i$  υπερβαίνει την τιμή 1. Ο διυπηρεσιακός περιορισμός που αφορά τις υπηρεσίες  $S1$  και  $S2$  καθορίζει ότι, αν ένα κανάλι έχει αποδοθεί στην κυψέλη  $i$  για να εξυπηρετεί την υπηρεσία  $S1$ , τότε μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να εξυπηρετήσει την υπηρεσία  $S2$  σε όλες τις κυψέλες  $j$  που απέχουν από την κυψέλη  $i$  (κανονικοποιημένη) απόσταση που υπερβαίνει την τιμή 1.

Για να καθορισθεί το κατάλληλο μέγεθος του απαιτούμενου πληθυσμού, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις όπου το προτεινόμενο σχήμα πρέπει να εκχωρήσει κανάλια σε δύο υπηρεσίες με μεταβαλλόμενο το μέγεθος του πληθυσμού. Ο ενδεικτικός Πιν. 4.1 αναφέρει το ποσοστό των προσομοιώσεων όπου η αντικειμενική συνάρτηση λαμβάνει την τιμή 0 σε σχέση με το συνολικό αριθμό προσομοιώσεων, δηλαδή εφαρμογών του προτεινόμενου σχήματος υπό διάφορους διυπηρεσιακούς περιορισμούς.

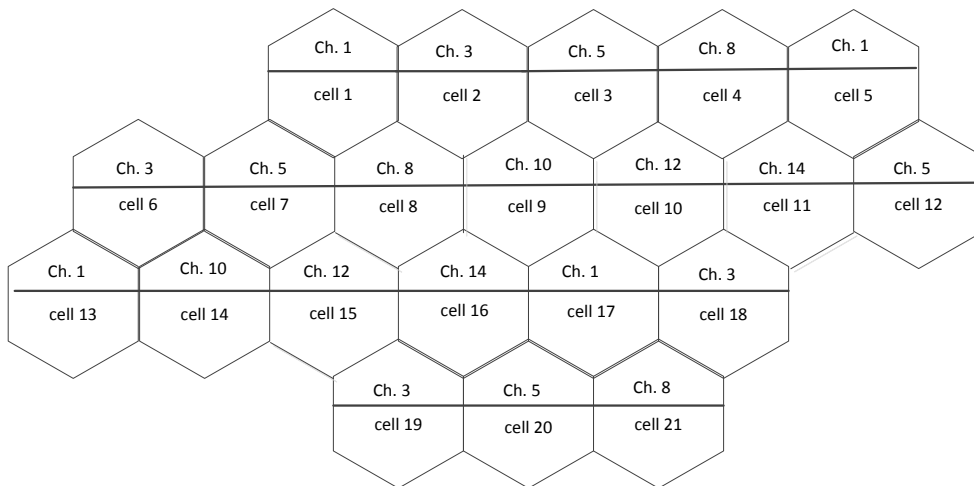
**Πίνακας 4.1.** Ποσοστό προσομοιώσεων στις οποίες η αντικειμενική συνάρτηση μηδενίζεται

Μέγεθος Πληθυσμού	Ποσοστό των Προσομοιώσεων όπου η F μηδενίζεται	
	Λειτουργία μίας υπηρεσίας	Λειτουργία δύο υπηρεσιών
100	20	17
150	50	45
200	80	72
250	περισσότερο από 95	περισσότερο από 95

Στον Πίν. 4.1, ισχύει  $M=200$  και  $M < T$ , ενώ ο πίνακας  $\mathbf{D}$  είναι πίνακας διαστάσεων  $(21 \times 1)$  με όλα τα στοιχεία του ίσα με 1, προκειμένου περί λειτουργίας μίας υπηρεσίας, ή διαστάσεων  $(21 \times 2)$  με όλα τα στοιχεία της πρώτης γραμμής ίσα με 1 και όλα τα στοιχεία της δεύτερης γραμμής του ίσα με 2, προκειμένου περί λειτουργίας δύο υπηρεσιών. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό από τον Πίν. 4.1, καθώς το μέγεθος του πληθυσμού  $P$  αυξάνεται από 100 σε 250, το ποσοστό των προσομοιώσεων, για τις οποίες η αντικειμενική συνάρτηση μηδενίζεται, κυμαίνεται από 17% μέχρι και περισσότερο από 95%. Αν οι περιορισμοί επί της  $F$  που οδηγούν σε τερματισμό του αλγορίθμου χαλαρώσουν- για παράδειγμα, αν η  $F$  πρέπει να καταστεί μικρότερη από  $F_0=0.05$  και όχι να μηδενισθεί - το απαιτούμενο για να επιτευχθεί σύγκλιση μέγεθος πληθυσμού καθίσταται σημαντικά μικρότερο, με αποτέλεσμα την επιτάχυνση της σύγκλισης του προτεινόμενου επαναληπτικού σχήματος απόδοσης καναλιών. Για τις υπόλοιπες προσομοιώσεις, το χρησιμοποιούμενο μέγεθος πληθυσμού είναι 250.

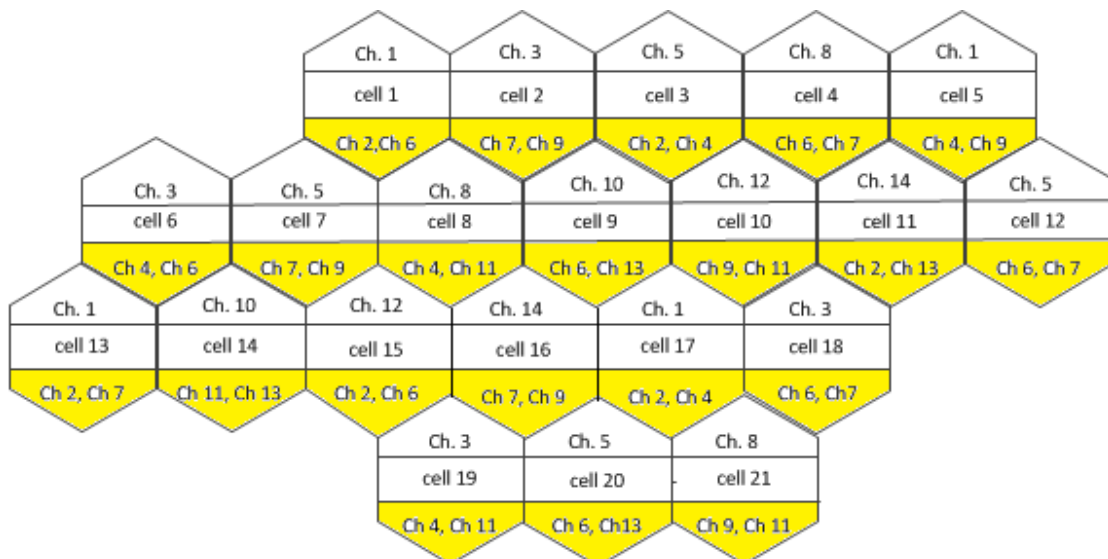
Για να ελεγχθεί η εγυρωτότητά του, το προτεινόμενο σχήμα χρησιμοποιήθηκε για να εκχωρήσει από ένα κανάλι στις 21 κυψέλες του PBN προς εξυπηρέτηση μόνο της υπηρεσίας  $S1$ . Στην περίπτωση αυτή, θεωρείται πως η χωρητικότητα μεταφοράς είναι ίση με  $T=14$  και ο πίνακας  $\mathbf{D}$  είναι ένας πίνακας διαστάσεων  $(21 \times 1)$  με όλα τα στοιχεία του ίσα με 1. Το προτεινόμενο σχήμα κατόρθωσε να ικανοποιήσει αυτή τη ζήτηση χρησιμοποιώντας συνολικά  $M=9$  κανάλια που αποδόθηκαν στο PBN όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.2. Στην περίπτωση αυτή δεν εξαντλείται η χωρητικότητα μεταφοράς (περισσεύουν κανάλια).





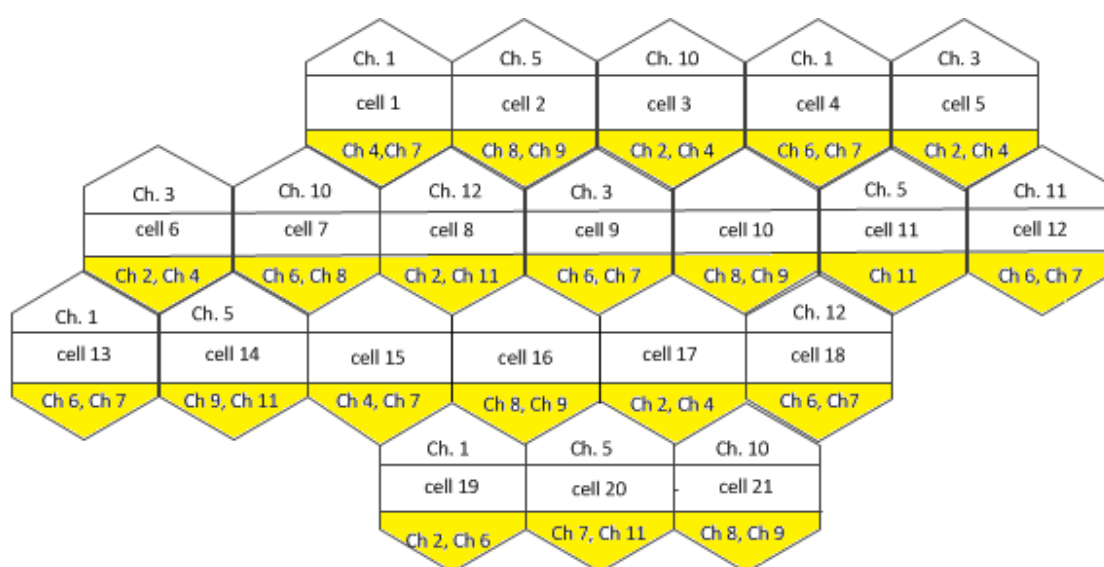
Σχήμα 4.2. Απόδοση καναλιών στο PBN για την εξυπηρέτηση της υπηρεσίας S1 που απαιτεί ένα κανάλι.

Επίσης, το προτεινόμενο σχήμα ελέγχθηκε ως προς την εξυπηρέτηση δύο υπηρεσιών, όπου η υπηρεσία S1 απαιτεί ένα κανάλι και η υπηρεσία S2 απαιτεί δύο κανάλια, δηλαδή ο πίνακας **D** είναι ένας πίνακας διαστάσεων  $(21 \times 2)$  του οποίου τα στοιχεία της πρώτης γραμμής είναι όλα ίσα με 1 ενώ τα στοιχεία της δεύτερης γραμμής είναι όλα ίσα με 2. Στην ενδεικτική αυτή περίπτωση, η συνολική ζήτηση ικανοποιείται χρησιμοποιώντας  $M=14$  κανάλια που αποδίδονται στο PBN όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3. Δηλαδή εξαντλείται η διαθέσιμη χωρητικότητα μεταφοράς.



Σχήμα 4.3. Απόδοση καναλιών στο PBN για την εξυπηρέτηση δύο υπηρεσιών, της S1 που απαιτεί ένα κανάλι και της S2 που απαιτεί δύο κανάλια. Τα αποδιδόμενα κανάλια σε κάθε κυψέλη για την S1 (S2) απεικονίζονται στο άνω (κάτω) τμήμα κάθε κυψέλης.

Όπως εύκολα φαίνεται από τα Σχήματα 4.2 και 4.3, το σχέδιο απόδοσης καναλιών που καθορίζεται σε κάθε περίπτωση ικανοποιεί τους ενδοδικτυακούς περιορισμούς και ικανοποιεί τη ζήτηση για κανάλια σε κάθε κυψέλη κάνοντας χρήση μόνο 9 και 14 καναλιών, αντίστοιχα. Όσον αφορά τη λειτουργία δύο υπηρεσιών που εξετάζεται στο Σχήμα 4.3, το σχέδιο απόδοσης καναλιών στην περίπτωση όπου η συνολική ζήτηση ( $M=14$ ) υπερβαίνει τη χωρητικότητα μεταφοράς του συστήματος ( $T=11$ ) απεικονίζεται στο Σχήμα 4.4.

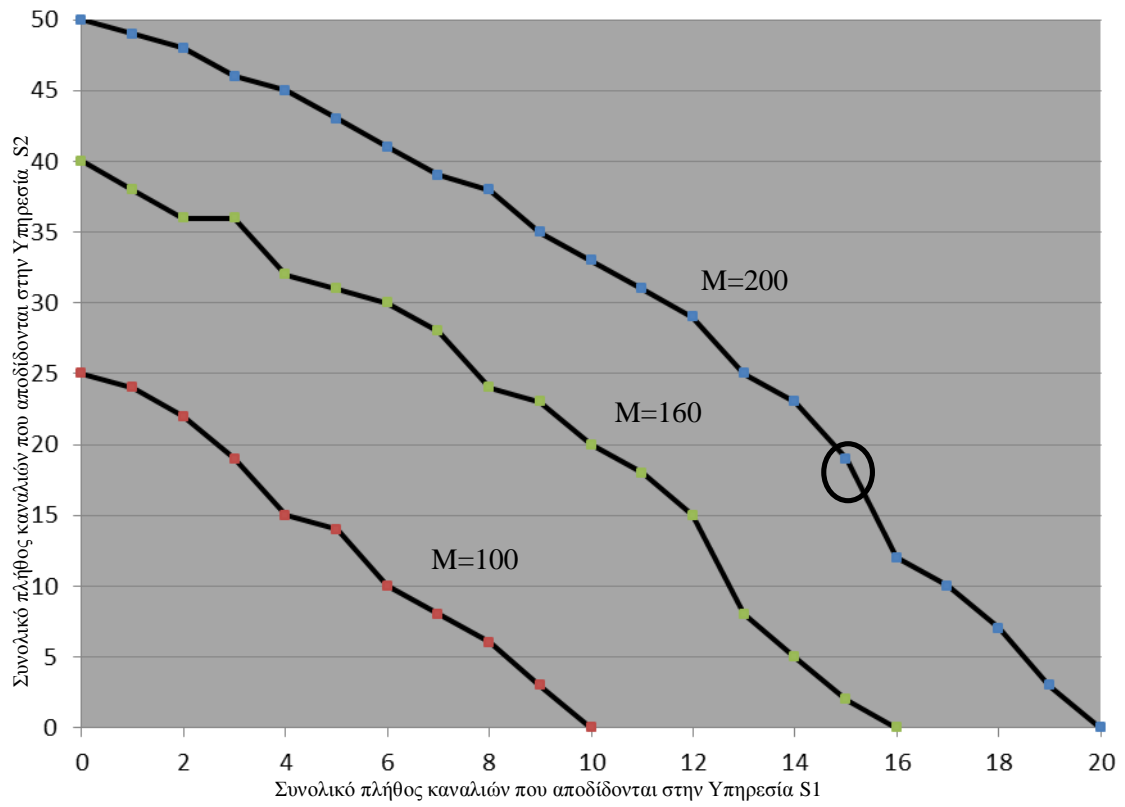


Σχήμα 4.4. Απόδοση καναλιών για την περίπτωση του Σχήματος 4.3. Σημαντική διαφορά αποτελεί το ότι το συνολικό πλήθος απαιτούμενων καναλιών ( $M$ ) που απαιτούνται υπερβαίνει το πλήθος των διαθέσιμων καναλιών ( $T$ ).

Όταν δεν είναι διαθέσιμο το ζητούμενο πλήθος καναλιών, η υπηρεσία  $S1$  δεν εξυπηρετείται σε ορισμένες κυψέλες. Συγκεκριμένα, κανένα κανάλι δεν αποδίδεται για την Υπηρεσία  $S1$  στις κυψέλες 10, 15, 16 και 17, ενώ μόνον ένα κανάλι αποδίδεται στην κυψέλη 11 για να εξυπηρετήσει την Υπηρεσία  $S2$  αντί για τα δύο κανάλια που απαιτούνται. Στην περίπτωση αυτή, ο αλγόριθμος τερματίζεται όταν  $F=0.079$  και όχι με το μηδενισμό της  $F$ .

Στη συνέχεια, το προτεινόμενο σχήμα χρησιμοποιήθηκε για το περιστατικό P6 του PBN [3.3]. Στην περίπτωση αυτή, οι κανονικοποιημένες αποστάσεις είναι  $(\sqrt{7}, \sqrt{3}, 1, 1, 1, 0)$  και σε όλες τις κυψέλες βρίσκονται κινητά τερματικά που ζητούν

υπηρεσίες που απαιτούν 20 κανάλια εκάστη. Το προτεινόμενο σχήμα κατόρθωσε να ικανοποιήσει τη ζήτηση στην περίπτωση κατά την οποία όλες οι κυψέλες χρειάζονται 20 κανάλια για την εξυπηρέτηση μόνον μιας υπηρεσίας (σε αυτήν την περίπτωση ο πίνακας **D** είναι ένας πίνακας διαστάσεων (21x1) με όλα τα στοιχεία ίσα με 20) χρησιμοποιώντας 200 κανάλια. Στη συνέχεια, το προτεινόμενο σχήμα χρησιμοποιήθηκε για να εξυπηρετήσει δύο υπηρεσίες, συγκεκριμένα τις υπηρεσίες S1 και S2 που παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.3 και 4.4, στις περιπτώσεις όπου  $M=200$  και  $M=100$ . Δεδομένου όταν  $M=200$  ότι είναι διαθέσιμα 200 κανάλια και θεωρώντας ότι η υπηρεσία S1 υπόκειται σε αυστηρότερες προδιαγραφές QoS – γεγονός που αντικατοπτρίζεται στους αυστηρότερους περιορισμούς στους οποίους υπόκειται και έχουν παρουσιασθεί στην αρχή αυτού του εδαφίου –, σε κάθε κυψέλη επιτρέπεται να χρησιμοποιήσει έως και 20 κανάλια για να εξυπηρετήσει μόνο την υπηρεσία S1. Αντιστοίχως, επειδή η υπηρεσία S2 υπόκειται σε λιγότερο αυστηρές απαιτήσεις QoS – γεγονός που αντικατοπτρίζεται στους λιγότερο αυστηρούς περιορισμούς στους οποίους υπόκειται –, σε κάθε κυψέλη επιτρέπεται να χρησιμοποιήσει μέχρι και 50 για να εξυπηρετήσει μόνο την υπηρεσία S2. Όταν μόνον 100 κανάλια είναι διαθέσιμα, σε κάθε κυψέλη δύνανται να αποδοθούν μέχρι και 10 κανάλια για την εξυπηρέτηση μόνο της υπηρεσίας S1 ή μέχρι 25 για την εξυπηρέτηση μόνο της S2. Το πλήθος των καναλιών που μπορούν να αποδοθούν ταυτοχρόνως και στις δύο υπηρεσίες όταν  $M=100$  και όταν  $M=200$  απεικονίζεται στο Σχήμα 4.5. Το σχέδιο απόδοσης καναλιών όπου το προτεινόμενο σχήμα αποδίδει 15 κανάλια για να εξυπηρετήσει την υπηρεσία S1 και 19 κανάλια για την εξυπηρέτηση της S2 σε εκάστη των 21 κυψελών του PBN παρουσιάζεται στον Πιν. 4.2 ( $M=200$ ).



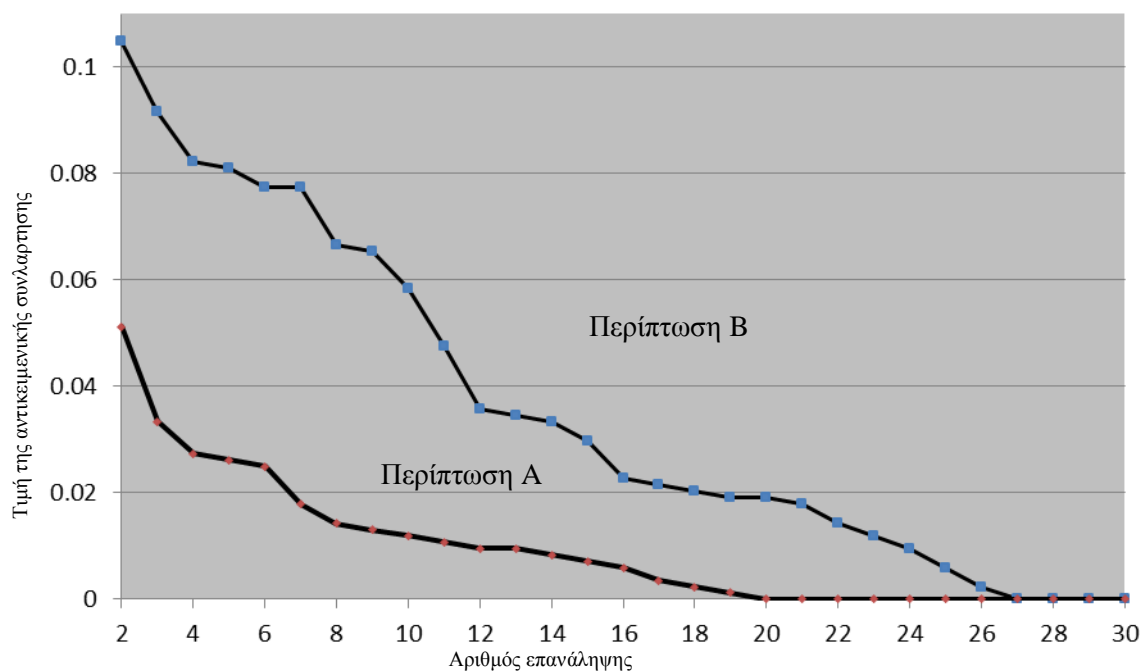
Σχήμα 4.5. Απόδοση καναλιών σε δύο υπηρεσίες για την περίπτωση P6 του PBN.

**Πίνακας 4.3. Αποδιδόμενα κανάλια στο κυψελωτό δίκτυο για τις Υπηρεσίες S1 και S2**

Κυψέλες/Κανάλια	Κανάλια που αποδίδονται στην Υπηρεσία 1	Κανάλια που αποδίδονται στην Υπηρεσία 2
Κυψέλη 1	1, 7, 12, 34, 39, 44, 59, 64, 70, 86, 91, 97, 102, 117, 134	13, 15, 17, 19, 21, 35, 37, 40, 48, 50, 52, 54, 60, 77, 92, 94, 98, 101, 106
Κυψέλη 2	4, 16, 47, 55, 61, 68, 89, 100, 105, 128, 136, 143, 151, 160, 167	87, 96, 108, 110, 121, 127, 132, 135, 142, 144, 146, 150, 152, 154, 156, 164, 166, 170, 182
Κυψέλη 3	2, 8, 14, 27, 41, 63, 72, 80, 95, 103, 133, 145, 153, 158, 171	13, 15, 17, 19, 21, 29, 31, 35, 37, 48, 50, 52, 54, 60, 71, 75, 79, 82, 84
Κυψέλη 4	18, 34, 51, 74, 85, 93, 99, 117, 122, 137, 147, 162, 169, 176, 181	65, 77, 87, 92, 94, 96, 98, 101, 106, 110, 113, 121, 123, 125, 127, 132, 144, 152, 154
Κυψέλη 5	1, 6, 11, 16, 30, 36, 42, 47, 58, 70, 81, 88, 97, 102, 109	13, 15, 17, 21, 29, 31, 37, 50, 54, 67, 69, 71, 13, 75, 79, 82, 84, 156, 164
Κυψέλη 6	3, 8, 16, 27, 32, 41, 47, 53, 63, 68, 74, 80, 85, 93, 99	13, 15, 17, 21, 29, 31, 37, 54, 65, 67, 69, 71, 73, 75, 79, 82, 84, 87, 94
Κυψέλη 7	5, 20, 30, 49, 57, 88, 95, 111, 120, 129, 138, 149, 155, 162, 171	23, 56, 62, 104, 113, 123, 125, 127, 130, 132, 135, 142, 144, 148, 150, 152, 154, 156, 159
Κυψέλη 8	9, 28, 42, 76, 81, 107, 114, 122, 131, 157, 169, 177, 183, 191, 196	25, 29, 31, 65, 67, 69, 71, 73, 75, 79, 82, 84, 161, 168, 172, 174, 185, 188, 190
Κυψέλη 9	22, 32, 38, 45, 53, 78, 83, 109, 119, 139, 163, 180, 186, 194, 200	23, 40, 56, 62, 94, 98, 101, 104, 106, 113, 116, 123, 125, 130, 148, 159, 193, 195, 197
Κυψέλη 10	5, 10, 20, 49, 57, 90, 111, 126, 149, 165, 173, 178, 184, 192, 198	25, 67, 69, 73, 108, 135, 150, 156, 161, 164, 166, 168, 170, 172, 174, 182, 185, 188, 190
Κυψέλη 11	3, 24, 44, 55, 61, 66, 76, 105, 114, 120, 128, 134, 140, 151, 157	19, 23, 35, 40, 48, 52, 56, 60, 62, 104, 116, 130, 146, 148, 159, 193, 195, 197, 199
Κυψέλη 12	8, 14, 22, 27, 32, 38, 53, 63, 72, 78, 83, 91, 100, 107, 112	25, 65, 77, 87, 92, 94, 96, 98, 101, 106, 108, 110, 113, 121, 123, 125, 127, 132, 144
Κυψέλη 13	1, 6, 12, 18, 24, 34, 45, 51, 58, 66, 76, 83, 89, 97, 102	19, 23, 25, 35, 40, 48, 52, 56, 60, 62, 92, 96, 98, 101, 104, 106, 108, 113, 116
Κυψέλη 14	10, 22, 38, 43, 55, 61, 72, 78, 105, 115, 124, 136, 143, 151, 158	50, 77, 110, 121, 146, 161, 164, 166, 168, 170, 172, 174, 182, 185, 188, 190, 193, 195, 197
Κυψέλη 15	2, 14, 26, 33, 46, 103, 118, 126, 133, 140, 145, 153, 165, 173, 181	15, 19, 21, 35, 37, 40, 48, 52, 60, 87, 92, 94, 96, 98, 101, 106, 108, 116, 179
Κυψέλη 16	6, 11, 18, 24, 36, 51, 58, 66, 74, 85, 93, 99, 112, 137, 147	13, 50, 54, 77, 110, 121, 127, 132, 135, 142, 144, 146, 152, 154, 156, 164, 166, 170, 182
Κυψέλη 17	1, 30, 43, 64, 70, 88, 97, 102, 115, 124, 129, 141, 155, 175, 189	17, 19, 29, 31, 35, 48, 52, 60, 65, 71, 75, 79, 82, 84, 87, 92, 96, 179, 199
Κυψέλη 18	7, 12, 26, 33, 39, 46, 59, 68, 86, 118, 131, 136, 143, 160, 167	13, 15, 21, 37, 50, 54, 77, 94, 98, 101, 106, 110, 113, 121, 123, 125, 127, 132, 142
Κυψέλη 19	8, 16, 39, 44, 63, 68, 80, 89, 128, 160, 167, 176, 184, 192, 198	17, 23, 25, 29, 31, 56, 62, 65, 67, 69, 71, 73, 75, 79, 82, 104, 113, 123
Κυψέλη 20	3, 27, 34, 41, 47, 55, 61, 72, 91, 105, 117, 151, 158, 171, 187	15, 21, 37, 40, 94, 98, 101, 106, 108, 116, 125, 130, 148, 150, 159, 168, 172, 174, 185
Κυψέλη 21	9, 14, 81, 95, 100, 107, 122, 133, 138, 145, 153, 162, 177, 183	23, 25, 56, 62, 67, 69, 73, 104, 135, 144, 146, 152, 154, 156, 161, 164, 166, 170, 182

Η σύγκλιση του βασισμένου στους γενετικούς αλγορίθμους προταθέντος σχήματος απόδοσης καναλιών ελέγχθηκε στην ενδεικτική περίπτωση όπου κανένα από τα τεμαχικά που ζητούν εξυπηρέτηση από τις κυψέλες του κυψελωτού δικτύου δεν ζητούν την Υπηρεσία S1 ενώ 10 κανάλια απαιτούνται για την εξυπηρέτηση της Υπηρεσίας S2 (περίπτωση A) ή στην περίπτωση όπου η Υπηρεσία S1 απαιτεί 1 κανάλι ενώ 5 κανάλια είναι απαραίτητα για την υπηρεσία S2 (περίπτωση B) (T=40). Οι τιμές της

αντικειμενικής συνάρτησης κατά την εφαρμογή του επαναληπτικού σχήματος εμφανίζονται στο Σχήμα 4.6, από όπου παρατηρείται ότι το προτεινόμενο σχήμα συγκλίνει στο βέλτιστο σχέδιο απόδοσης καναλιών μετά από 26 επαναλήψεις (περίπτωση A) ή μετά από 20 επαναλήψεις (περίπτωση B).



Σχήμα 4.6. Τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης πριν και μετά την επίτευξη σύγκλισης του προτεινόμενου σχήματος.

Ο χρόνος που απαιτείται για τη σύγκλιση προς ένα βέλτιστο ή υποβέλτιστο σχέδιο απόδοσης καναλιών εξαρτάται από το πλήθος καναλιών που απαιτούνται από κάθε υπηρεσία και από το πλήθος των κυψελών στις οποίες εφαρμόζεται το προτεινόμενο σχήμα. Αναφορικά με την περίπτωση που εξετάζεται στο Σχήμα 4.6, κάθε επανάληψη διαρκεί περίπου όσο η μισή διάρκεια πλαισίου (frame duration) (0.4615 ms) χρησιμοποιώντας ένα Desktop PC Intel Quad Core 2 με 4GB RAM. Ως εκ τούτου, η σύγκλιση προς το βέλτιστο σχέδιο απόδοσης καναλιών επιτυγχάνεται μετά από  $26 \times 0.4615 \text{ ms} \approx 12$  πλαίσια (περίπτωση A) ή σε  $20 \times 0.4615 \text{ ms} \approx 9$  πλαίσια (περίπτωση B). Αντιθέτως, για να προσδιορισθεί ένα υποβέλτιστο σχέδιο απόδοσης καναλιών που ικανοποιεί ένα ελαφρώς χαλαρότερο περιορισμό για το F, για παράδειγμα  $F < F_0 = 0.02$ , ο απαραίτητος αριθμός επαναλήψεων είναι κάπως μεγαλύτερος – 18 για την περίπτωση A και 7 για την περίπτωση B του Σχήματος 4.6. Καθώς τα συστήματα DVB-T δεν

μπορούν να αλλάζουν κανάλια σε αυτούς τους ρυθμούς, το προτεινόμενο σχήμα αρχικά πραγματοποιεί μία στατική απόδοση καναλιών στις κυψέλες των δικτύων πολλαπλών υπηρεσιών (multiservice networks) λαμβάνοντας υπόψη όσα συστήματα DVB-T που συνυπάρχουν στην περιοχή κάλυψης. Στη συνέχεια, εφόσον αυτό είναι απαραίτητο, η απόδοση προσαρμόζεται στη ζήτηση για κινητές ευρυζωνικές υπηρεσίες που αποδίδουν μόνο τα κανάλια που είναι απαραίτητα για την εξυπηρέτηση των κινητών υπηρεσιών. Σε κάθε περίπτωση, ο απαιτούμενος χρόνος σύγκλισης του προτεινόμενου σχήματος εξαρτάται από την αποδεκτή απόκλιση του σχεδίου απόδοσης καναλιών από το βέλτιστο, η οποία ποσοτικοποιείται μέσω υιοθέτησης μη μηδενικής τιμής του κατωφλίου  $F_0$ . Το τελευταίο είναι δηλαδή από το σχέδιο απόδοσης καναλιών σύμφωνα με το οποίο σε όλες τις κυψέλες επιτρέπεται να χρησιμοποιούν όσα κανάλια απαιτείται για να ικανοποιήσουν όλες τις υπηρεσίες.

Τελικώς, το προτεινόμενο σχήμα ελέγχθηκε όταν το πλήθος των κλάσεων Υπηρεσίας υπερβαίνει τις 2. Ενδεικτικά, το  $K$  τέθηκε ίσο με 3. Οι ενδοκυψελικοί και διακυψελικοί περιορισμοί που αφορούν τις κλάσεις SC1 και SC2 είναι οι ίδιοι με αυτούς που θεωρήθηκαν μέχρι στιγμής στις προσομοιώσεις. Η πρόσθετη κλάση υπηρεσιών SC3 υπόκειται σε ένα λιγότερο αυστηρό προφίλ αναχρησιμοποίησης συχνότητας, το οποίο επιτρέπει την ταυτόχρονη απόδοση ενός καναλιού σε όλες τις κυψέλες. Αναλόγως με τον τύπο υπηρεσίας που ζητούν, οι χρήστες ανήκουν σε ένα από τους τρεις ενδεικτικούς τύπους υπηρεσιών. Υπηρεσίες πολυμέσων που απαιτούν υψηλή QoS ανήκουν στην κατηγορία SC1, ενώ υπηρεσίες όπως η περιήγηση στο Διαδίκτυο (web browsing) ανήκουν στην κατηγορία SC3, καθώς μπορούν να αντεπεξέλθουν σε υψηλότερα επίπεδα παρεμβολής λόγω των αντίστοιχων χαμηλών απαιτήσεων QoS. Το συνολικό πλήθος καναλιών που αποδίδεται στους τρεις τύπους υπηρεσιών για τη συγκεκριμένη λειτουργία που εξετάζεται στο πλαίσιο του PBN για  $T=40$  κανάλια παρουσιάζεται στον Πιν. 4.4.

Πίνακας 4.4. Πλήθος αποδιδόμενων καναλιών στο κυψελωτό δίκτυο για τις Υπηρεσίες S1, S2 και S3

Συνολικό πλήθος καναλιών που αποδίδονται στην S1	Συνολικό πλήθος καναλιών που αποδίδονται στην S2	Συνολικό πλήθος καναλιών στην S3
4	0	1
3	3	4
2	6	2
2	4	10

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΤΕΤΑΡΤΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ**

[4.1] Federal Communications Commission, “Second Report and Order and Memorandum Opinion and Order in the Matter of Unlicensed Operation in the TV Broadcast Bands, Additional Spectrum for Unlicensed Devices Below 900 MHz and in the 3 GHz Band”, Docket Number 08-260, November 14, 2008.

[4.2] C. Valenzuela and S. Hurley and D. H. Smith, "A Permutation Based Genetic Algorithm for Minimum Span Frequency Assignment", Lecture Notes in Computer Science, 1498, 907-916, 1998.

[4.3] Beckmann, D.; Killat, U.;, "A new strategy for the application of genetic algorithms to the channel-assignment problem," Vehicular Technology, IEEE Transactions on , vol.48, no.4, pp.1261-1269, July 1999.

[4.4] S. Matsui and K. Tokoro, “Improving the Performance of a Genetic Algorithm for Minimum Span Frequency Assignment Problem with an Adaptive Mutation Rate and a New Initialization Method”, "Proc. of GECCO-2001 (Genetic and Evolutionary Computation Conference)", 1359–1366, July 2001.



## 5. ΑΠΟΔΟΣΗ ΡΑΔΙΟΠΟΡΩΝ ΣΕ ΚΥΨΕΛΩΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΠΟΥ ΥΠΟΣΤΗΡΙΖΟΥΝ ΠΟΛΛΑΠΛΕΣ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ

Κατά τα τελευταία χρόνια οι ασύρματες επικοινωνίες έχουν εμφανίσει εντυπωσιακή ανάπτυξη στην προσπάθεια να ικανοποιήσουν την τεράστια αύξηση του αριθμού των κινητών χρηστών που ζητούν τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες υψηλών ταχυτήτων. Συνεπώς, η αποτελεσματική αξιοποίηση του φάσματος είναι καθοριστική για τα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα επόμενης γενεάς που προορίζονται να παρέχουν υπηρεσίες πολυμέσων υψηλών ρυθμών μετάδοσης.

Οδηγούμενος από την ισχυρή ζήτηση για συνεχή ευρυζωνική συνδεσιμότητα, ο Τομέας Ραδιοεπικοινωνιών της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (ITU – R) έχει ολοκληρώσει τις διαδικασίες τυποποίησης για την τέταρτη γενεά ασύρματων συστημάτων επικοινωνίας (4<sup>th</sup> Generation mobile communication systems – 4G ). Ως εκ τούτου, μετά το 2010, μία πληθώρα αλγορίθμων απόδοσης ραδιοπόρων έχει εμφανισθεί στη βιβλιογραφία [5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5].

Για να επιτευχθεί συνεχής κάλυψη σε κυψελωτά δίκτυα, ένα ασύρματο τερματικό (Mobile Terminal – MT) πρέπει να είναι σε κάθε χρονική στιγμή συνδεδεμένο με ένα Σταθμό Βάσης (ΣΒ). Η συγκεκριμένη διαδικασία, που είναι γνωστή ως επιλογή σύνδεσης ή κυψέλης εξυπηρέτησης (serving link (cell) selection), έχει μελετηθεί ενδελεχώς στη διεθνή βιβλιογραφία [5.6, 5.7]. Σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, όπου πολλαπλοί ΣΒ ή σταθμοί αναμετάδοσης (Relay Stations – RSs) έχουν την ικανότητα να εξυπηρετήσουν ένα κινητό τερματικό, η κατάλληλη απόδοση ΣΒ ή σταθμών αναμετάδοσης με σκοπό να ελαχιστοποιηθούν οι παρεμβολές μεταξύ των κινητών τερματικών είναι αποφασιστικής σημασίας για τη βελτίωση της συνολικής ποιότητας υπηρεσίας που απολαμβάνουν οι κινητοί χρήστες. Στο πλαίσιο αυτό, έχουν προταθεί συγκεκριμένα κριτήρια που αφορούν το πρόβλημα επιλογής ΣΒ βασισμένα είτε στη μεγιστοποίηση της συνολικής διέλευσης πληροφορίας [5.8] είτε στη βελτιστοποίηση της ποιότητας υπηρεσίας που απολαμβάνουν ατομικά οι κινητοί χρήστες. Αφού ένα κινητό τερματικό αποδοθεί σε συγκεκριμένη κυψέλη εξυπηρέτησης, δηλαδή αφού το κινητό τερματικό συνδεθεί με συγκεκριμένο ΣΒ, και οι ραδιοπόροι – δηλαδή το εύρος ζώνης και η ισχύς εκπομπής – πρέπει, επίσης, να αποδοθούν αποτελεσματικά καθώς,

πέραν της σύνδεσης με κατάλληλο ΣΒ, η αποτελεσματική απόδοση ραδιοπόρων μπορεί επίσης να αυξησει τη συνολική φασματική απόδοση.

Στο πλαίσιο του παρόντος κεφαλαίου, προτείνεται ένα σχήμα απόδοσης ραδιοπόρων το οποίο επιτυγχάνει την ταυτόχρονη απόδοση ΣΒ, καναλιών μετάδοσης και επιπέδων ισχύος εκπομπής στα νομαδικά τερματικά (εφεξής τερματικά) ενός κυψελωτού δικτύου που ζητούν ετερογενείς υπηρεσίες. Η προτεινόμενη μέθοδος απόδοσης ραδιοπόρων υλοποιείται κάνοντας χρήση σχήματος βασισμένου στους γενετικούς αλγορίθμους και αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση του πλήθους χρηστών που δεν απολαμβάνουν ένα ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης εντός της κάλυψης του κυψελωτού δικτύου. Για να επιλυθεί το τριπλό αυτό πρόβλημα απόδοσης πόρων, πρέπει να ληφθούν υπόψη τόσο η τοπολογία του δικτύου όσο και οι συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον διάδοσης. Σε πρακτικές εφαρμογές, η συγκεκριμένη διαδικασία περιλαμβάνει επεξεργασία μετρήσεων που έχουν ληφθεί στο πεδίο. Η επεξεργασία των *in – situ* μετρήσεων αυτών γίνεται συνήθως με χρήση εξελιγμένων εργαλείων προσομοίωσης. Στο παρόν κεφάλαιο, γίνεται χρήση της δεύτερης έκδοσης της πλατφόρμας WINNER (Wireless World Initiative New Radio – WINNER II) με στόχο τη ρεαλιστική προσομοίωση κυψελωτών δικτύων, που προσφέρουν πολλαπλές υπηρεσίες σε χρήστες. Το προτεινόμενο σχήμα έχει τη δυνατότητα αποτελεσματικής απόδοσης ΣΒ, καναλιών μετάδοσης και επιπέδων ισχύος εκπομπής κατά τρόπο που να διασφαλίζει ότι όσο το δυνατόν περισσότεροι χρήστες απολαμβάνουν ένα ελάχιστο επίπεδο ρυθμού μετάδοσης.

Για να βελτιωθεί περαιτέρω η αξιοποίηση του διαθέσιμου φάσματος, το προτεινόμενο σχήμα επιτρέπει τη φασματική επικάλυψη κλήσεων (συνδέσεων) που εξυπηρετούν διαφορετικές υπηρεσίες, επιλογή που καθιστά ανεκτές κατά ελεγχόμενο τρόπο τις παρεμβολές μεταξύ υπηρεσιών. Στο πλαίσιο αυτό, για να επιτευχθούν επαρκείς λόγοι προστασίας (*protection ratios*) μεταξύ τερματικών που ζητούν διαφορετικές υπηρεσίες, το προτεινόμενο σχήμα επιβάλλει κατάλληλο διαχωρισμό των φερουσών συχνοτήτων που αποδίδονται από τον ίδιο ΣΒ σε διαφορετικά κινητά τερματικά και υπηρεσίες. Εξετάζονται διάφορα σενάρια που αφορούν τις συνθήκες διάδοσης και την τοπολογία του δικτύου εξετάζονται στο παρόν κεφάλαιο. Για να αποδώσει αποτελεσματικά τους ραδιοπόρους σε ένα χρήστη που ζητεί συγκεκριμένη υπηρεσία, το προτεινόμενο – βασισμένο στους γενετικούς αλγορίθμους – σχήμα

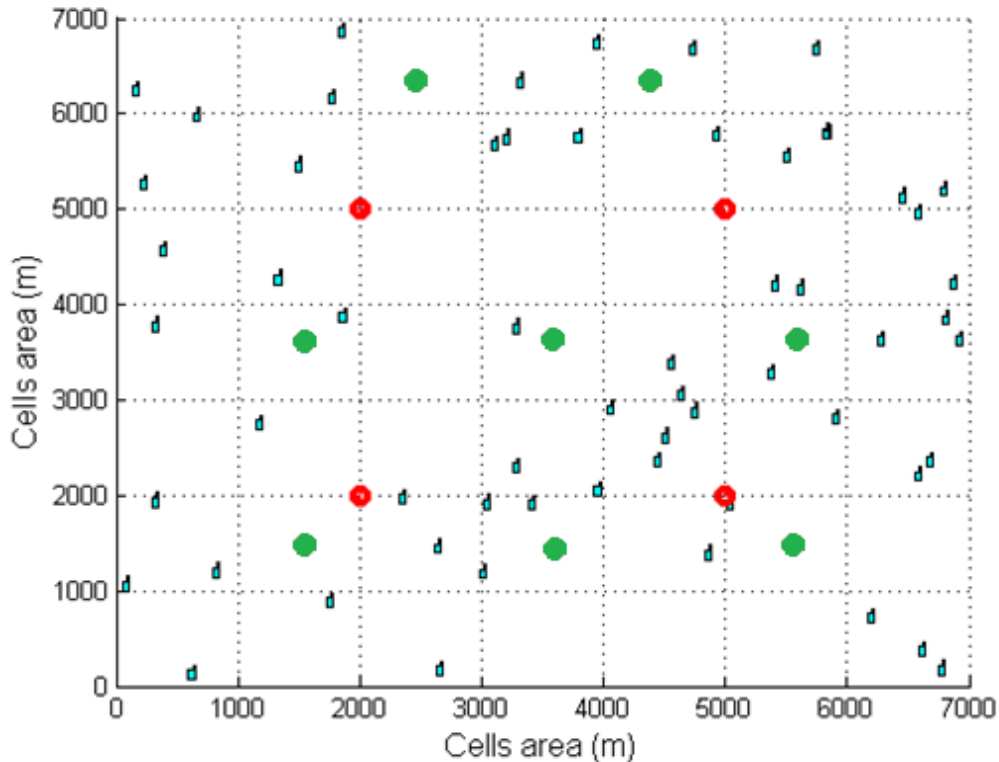
συνδέει το τερματικό με τον κατάλληλο ΣΒ και αποδίδει συγκεκριμένο κανάλι μετάδοσης και συγκεκριμένο επίπεδο ισχύος εκπομπής στη συγκεκριμένη ζεύξη μεταξύ ΣΒ και κινητού τερματικού.

Το παρόν κεφάλαιο οργανώνεται ως εξής: Στο εδάφιο 5.1 διατυπώνεται αναλυτικά το τριπλό πρόβλημα απόδοσης πόρων. Στο εδάφιο 5.2 αναλύεται το προτεινόμενο σχήμα. Στο εδάφιο 5.3 παρουσιάζονται και σχολιάζονται αποτελέσματα προσομοιώσεων με στόχο να αναδειχθεί η δυνατότητα του προτεινόμενου σχήματος απόδοσης πόρων στην προσπάθεια να μεγιστοποιηθεί ο ελάχιστος ρυθμός μετάδοσης που απολαμβάνουν οι χρήστες του κυψελωτού δικτύου. Τέλος, στο εδάφιο 5.4 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα του κεφαλαίου.

### 5.1. Διατύπωση του τριπλού προβλήματος απόδοσης ραδιοπόρων

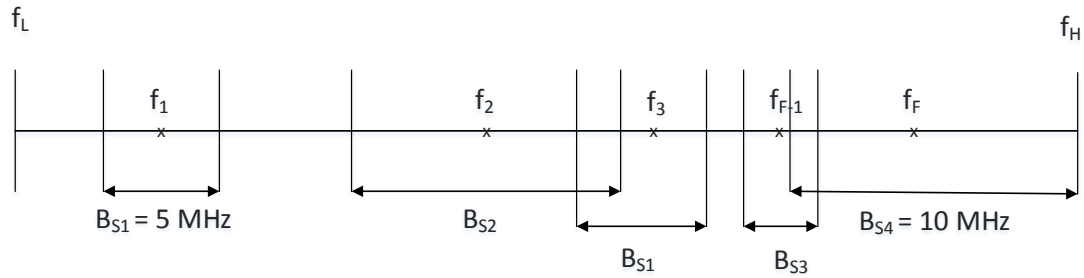
Ας θεωρηθεί κυψελωτό δίκτυο το οποίο αποτελείται από πολλαπλούς ΣΒ που προσφέρουν διάφορες ευρυζωνικές υπηρεσίες σε νομαδικούς χρήστες. Οι ΣΒ εκπέμπουν υπό κβαντισμένα επίπεδα ισχύος εκπομπής και διαθέτουν τη δυνατότητα να παρέχουν οποιαδήποτε από τις διαθέσιμες υπηρεσίες σε οποιοδήποτε νομαδικό χρήστη εντός της περιοχής κάλυψης του κυψελωτού δικτύου τους, κάνοντας χρήση οποιουδήποτε καναλιού εντός του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Στο πλαίσιο αυτό, όλες οι ασύρματες ζεύξεις μεταξύ οποιουδήποτε ζεύγους κινητού τερματικού – ΣΒ υπόκεινται σε αμοιβαίες παρεμβολές.

Ας θεωρηθεί το ενδεικτικό κυψελωτό δίκτυο που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.1 και αποτελείται από  $N$  Σταθμούς Βάσης  $B_n$ ,  $n=1,2,\dots,N$ , και  $M$  τυχαία τοποθετημένα νομαδικά τερματικά  $T_m$ ,  $m=1,2,\dots,M$ . Τα τελευταία διαθέτουν τη δυνατότητα να ζητήσουν οποιαδήποτε υπηρεσία από τις συνολικά  $S$  διαθέσιμες υπηρεσίες,  $G_s$ ,  $s=1,2,\dots,S$ , που χρειάζονται προς εξυπηρέτησή τους εύρος ζώνης  $B_s$ ,  $s=1,2,\dots,S$ , αντίστοιχα. Ένα ενδεικτικό κυψελωτό δίκτυο που αποτελείται από 4 σταθμούς βάσης και 60 τυχαία – που ακολουθούν την κατανομή Poisson δύο διαστάσεων - διεσπαρμένα εντός της περιοχής κάλυψης τερματικά απεικονίζεται στο Σχήμα 5.1.



Σχήμα 5.1. Υποθετικό κυψελωτό δίκτυο αποτελούμενο από 4 (χρωματισμένους με κόκκινο χρώμα) ή 8 (χρωματισμένους με πράσινο χρώμα) σταθμούς βάσης και 60 νομαδικούς χρήστες.

Μία ενδεικτική κατανομή καναλιών στη διαθέσιμη ζώνη συχνοτήτων απεικονίζεται στο Σχήμα 5.2 - όπου  $F_L$  και  $F_H$  είναι τα άκρα της ζώνης συχνοτήτων που έχει διατεθεί στο κυψελωτό δίκτυο - από όπου φαίνεται ότι για να επιτευχθεί βέλτιστη αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης, το προτεινόμενο σχήμα επιτρέπει ένα ανεκτό επίπεδο φασματικής επικάλυψης μεταξύ καναλιών, επιλογή που οδηγεί σε αμοιβαίες παρεμβολές μεταξύ φασματικά επικαλυπτόμενων ενεργών ζεύξεων. Δηλαδή η βελτιωμένη αξιοποίηση του διαθέσιμου φάσματος πραγματοποιείται με κόστος την ελεγχόμενη χειροτέρευση της Ποιότητας Υπηρεσίας. Αυτό οφείλεται στο ότι η αύξηση της φασματικής επικάλυψης οδηγεί σε αύξηση των αμοιβαίων παρεμβολών, γεγονός που με τη σειρά του οδηγεί σε μείωση του συνολικού SNIR, γεγονός το οποίο επηρεάζει δυσμενώς την Ποιότητα Υπηρεσίας. Πρέπει να σημειωθεί πως κάθε φέρουσα συχνότητα συνδέεται με συγκεκριμένο εύρος ζώνης, δηλαδή υπάρχει μία ένα - προς - ένα αντιστοιχία μεταξύ φερουσών συχνοτήτων και καναλιών.



Σχήμα 5.2. Ενδεικτική απόδοση  $\mathbf{F}$  καναλιών στη ζώνη συχνοτήτων  $\mathbf{F}_L$  μέχρι  $\mathbf{F}_H$ .

Λόγω της φασματικής επικάλυψης προκύπτει αμοιβαία παρεμβολή μεταξύ  $(\mathbf{f}_2, \mathbf{B}_{S2})$  και  $(\mathbf{f}_3, \mathbf{B}_{S1})$  και μεταξύ  $(\mathbf{f}_{F-1}, \mathbf{B}_{S3})$  και  $(\mathbf{f}_F, \mathbf{B}_{S4})$ .

Όταν κάποιο τερματικό ζητήσει την υπηρεσία  $G_s$  εντός της περιοχής κάλυψης του κυψελωτού δικτύου, η κεντρική οντότητα που είναι υπεύθυνη για την υλοποίηση του προτεινόμενου σχήματος πραγματοποιεί την τριπλή απόδοση πόρων. Συγκεκριμένα, καθορίζει το  $\Sigma\mathbf{B}$  που θα εξυπηρετήσει το τερματικό, αποδίδει συγκεκριμένη φέρουσα συχνότητα και εύρος ζώνης στη ζεύξη μεταξύ του  $\Sigma\mathbf{B}$  εξυπηρέτησης και του τερματικού και καθορίζει το επίπεδο ισχύος εκπομπής του  $\Sigma\mathbf{B}$ . Από το σύνολο των  $\Sigma\mathbf{B}$  που καλύπτουν (είναι σε θέση να εξυπηρετήσουν) ένα τερματικό, το προτεινόμενο σχήμα επιλέγει αυτόν ο οποίος, εκπέμποντας υπό συγκεκριμένο επίπεδο ισχύος εκπομπής και σε συγκεκριμένο κανάλι μετάδοσης, εξυπηρετεί το τερματικό ελαχιστοποιώντας το πλήθος των τερματικών που δεν απολαμβάνουν τον ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης που απαιτείται για την εξυπηρέτηση της ζητηθείσας υπηρεσίας. Για τα τερματικά που ζητούν εξυπηρέτηση από το κυψελωτό δίκτυο, το προτεινόμενο σχήμα επεξεργάζεται τους ακόλουθους πίνακες:

1.  $\mathbf{X}$ , που είναι πίνακας διαστάσεων  $(N \times M \times S)$ , τα στοιχεία του οποίου,  $x_{n,m,s}$ , αντιπροσωπεύουν το Σταθμό Βάσης  $B_n$  που αναλαμβάνει να παράσχει την υπηρεσία  $G_s$  στο τερματικό  $T_m$ .

2.  $\mathbf{P}$ , που είναι πίνακας διαστάσεων  $(N \times M \times S)$ , τα στοιχεία του οποίου,  $p_{n,m,s}$ , αντιπροσωπεύουν την ισχύ εκπομπής που εκπέμπεται από το Σταθμό Βάσης  $B_n$  για να παράσχει την υπηρεσία  $G_s$  στο τερματικό  $T_m$ .
3.  $\mathbf{F}$ , που είναι πίνακας διαστάσεων  $(N \times M \times S)$ , τα στοιχεία του οποίου,  $f_{n,m,s}$ , αντιπροσωπεύουν τη φέρουσα συχνότητα που αποδίδεται στο Σταθμό Βάσης  $B_n$  ούτως ώστε να παράσχει την υπηρεσία  $G_s$  στο τερματικό  $T_m$ . Εξαιτίας της ένα – προς – ένα αντιστοιχίας μεταξύ των διαθέσιμων καναλιών και των φερουσών συχνοτήτων, τα στοιχεία του  $\mathbf{F}$  επίσης αντιπροσωπεύουν τα κανάλια που αποδίδονται στις ζεύξεις μεταξύ του σταθμού βάσης  $B_n$  και του τερματικού  $T_m$ . Οι φέρουσες συχνότητες πρέπει να ικανοποιούν τη σχέση

$$F_L + B_s / 2 \leq f_{n,m,s} \leq F_H - B_s / 2, \text{ για κάθε } n, m \text{ και } s \quad (5.1)$$

Για να ληφθεί υπόψη το φαινόμενο της πολυδιαδρομικής διάδοσης (multipath propagation), τα σήματα που λαμβάνονται από τα κινητά τερματικά εκφράζονται ως υπερθέσεις  $L$  πολυδιαδρομικών συνιστωσών. Το κέρδος διαύλου κατά τις διαδρομές  $l$ ,  $l=1,2,\dots,L$ , που αφορούν τη ζεύξη  $B_n - T_m$  συμβολίζεται ως  $g_{n,m,l}(f_{n,m,s})$ . Η συμπεριφορά της πολυδιαδρομικής συνιστώσας που φθάνει στο τερματικό μέσω της διαδρομής  $l$  εξαρτάται από την αντίστοιχη καθυστέρηση διάδοσης (propagation delay)  $t_l$ . Οι πολυδιαδρομικές συνιστώσες που καθυστερούν λιγότερο από τη διασπορά καθυστέρησης (delay spread)  $D_s$  θεωρείται ότι συμβάλλουν στην ενέργεια συμβόλου, ενώ αυτές που καθυστερούν περισσότερο από  $D_s$  θεωρείται ότι προκαλούν παρεμβολή σε γειτονικά σύμβολα (intersymbol interference). Το προτεινόμενο σχήμα αποδίδει ένα ΣΒ εξυπηρέτησης και ραδιοπόρους (κανάλια μετάδοσης και ισχείς εκπομπής) σε κάθε τερματικό που ζητεί συγκεκριμένη ευρυζωνική υπηρεσία από το κυψελωτό δίκτυο. Συγκεκριμένα, το προτεινόμενο σχήμα επιλέγει ποιος ΣΒ είναι κατάλληλος για να εξυπηρετήσει το κινητό τερματικό και, ταυτόχρονα, καθορίζει τη φέρουσα συχνότητα  $f_{n,m,s}$  και το επίπεδο ισχύος εκπομπής  $p_{n,m,s}$  για τη ζεύξη μεταξύ του ΣΒ και του τερματικού με κριτήριο τη μεγιστοποίηση του πλήθους των τερματικών που απολαμβάνουν ένα ελάχιστο επίπεδο Ποιότητας Υπηρεσίας.

Η ποιότητα μιας ζεύξης μεταξύ ενός ΣΒ  $B_n$  και ενός τερματικού  $T_m$  χαρακτηρίζεται από το ρυθμό μετάδοσης  $R(n, m, s)$  που επιτυγχάνεται στο πλαίσιο της εξυπηρέτησης της υπηρεσίας  $G_s$ . Για να απλοποιηθεί η ανάλυση που ακολουθεί, ο ρυθμός μετάδοσης  $R_{n,m,s}$  λαμβάνεται ίσος με τη χωρητικότητα της ζεύξης και υπολογίζεται από τη σχέση

$$R_{n,m,s} = B_s \cdot \log_2[1 + \gamma_{n,m}(f_{n,m,s})] \quad (5.2)$$

όπου

$$\gamma_{n,m}(f_{n,m,s}) = A_{n,m}(f_{n,m,s}) / [N_0 + I_{n,m,s}^{(1)} + I_{n,m,s}^{(2)} + I_{n,m,s}^{(3)}] \quad (5.3)$$

ο λόγος σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή (Signal to Noise and Interference Ratio – SNIR) στην είσοδο του αποκωδικοποιητή του κινητού τερματικού  $T_m$  και

$$A_{n,m}(f_{n,m,s}) = \sum_{l, t_l < D_s} p_{n,m,s} \cdot g_{n,m,l}(f_{n,m,s}) \quad (5.4)$$

η ισχύς του συμβόλου λήψης. Η τελευταία συμπεριλαμβάνει την ισχύ όλων των πολυδιαδρομικών συνιστωσών που φθάνουν στο δέκτη με καθυστέρηση μικρότερη από τη διασπορά καθυστέρησης που χαρακτηρίζει το περιβάλλον διάδοσης στην περιοχή κάλυψης του κυψελωτού δικτύου.

Επιπλέον, τα μεγέθη  $I_{n,m,s}^{(i)}$ ,  $i=1,2,3$ , αντιπροσωπεύουν τα διάφορα είδη παρεμβολών που επηρεάζουν τη ζεύξη  $B_n - T_m$ , ενώ το μέγεθος  $N_0$  αντιπροσωπεύει τη στάθμη του θορύβου. Τα ανωτέρω μεγέθη προσδιορίζονται στην είσοδο του αποκωδικοποιητή του δέκτη του τερματικού.

Συγκεκριμένα, μέσω του μεγέθους  $I_{n,m,s}^{(1)}$  λαμβάνεται υπόψη η διασυμβολική παρεμβολή που προκαλείται από τις πολυδιαδρομικές συνιστώσες μιας ζεύξης που φθάνουν στο δέκτη με καθυστέρηση μεγαλύτερη από τη διασπορά καθυστέρησης που χαρακτηρίζει το περιβάλλον διάδοσης στην περιοχή κάλυψης του κυψελωτού δικτύου. Θεωρώντας πως μόνο τα γειτονικά σύμβολα προκαλούν ενδοσυμβολική παρεμβολή μεταξύ τους,

$$I_{n,m,s}^{(1)} = \sum_{l, t_l > D_s} p_{n,m,s} \cdot g_{n,m,l}(f_{n,m,s}) \quad (5.5)$$

Στις εξισώσεις (5.4) και (5.5), τα  $\sum_{l, t_l < D_s}$  και  $\sum_{l, t_l > D_s}$  υποδηλώνουν τα αθροίσματα των τιμών του  $l$  τα οποία αντιστοιχούν σε  $t_l < D_s$  ή  $t_l > D_s$ , αντιστοίχως. Πέραν της διασυμβολικής παρεμβολής, πρέπει να προσμετρώνται επιβαρυντικά και οι

παρεμβολές που προκαλούνται από όλες τις ενεργές ζεύξεις εφόσον επικαλύπτονται φασματικά (μερικώς ή ολικώς) με τη ζεύξη  $B_n-T_m$ . Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, αυτό το είδος παρεμβολής αντιμετωπίζεται λαμβάνοντας υπόψη: (i) την υπηρεσία  $G_s$  την οποία ζητεί το τερματικό  $T_m$  και (ii) τη φασματική απόσταση μεταξύ ζεύξεων που εξυπηρετούν διαφορετικά τερματικά. Παρεμβολές που προκαλούνται εξαιτίας ζεύξεων που εξυπηρετούν διαφορετικές υπηρεσίες, δηλαδή παρεμβολές μεταξύ διαφορετικών υπηρεσιών (inter-service interference) μπορεί να προκαλούνται σε διάφορες περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα μεταξύ Υπηρεσιών Ευρυεκπομπής Επίγειας Ψηφιακής Τηλεόρασης και Υπηρεσιών LTE (Long Term Evolution). Για να αντιμετωπισθούν οι παρεμβολές μεταξύ διαφορετικών υπηρεσιών, τα κανάλια που αποδίδονται σε διαφορετικές υπηρεσίες διαχωρίζονται από επαρκή φασματική απόσταση (frequency offset) ώστε να εξασφαλίζεται αποδεκτό επίπεδο αμοιβαίων παρεμβολών.

Εκτός από τις παρεμβολές μεταξύ διαφορετικών υπηρεσιών, το προτεινόμενο σχήμα λαμβάνει υπόψη και τις παρεμβολές που προκαλούνται εξαιτίας της ταυτόχρονης λειτουργίας ζεύξεων που εξυπηρετούν την ίδια υπηρεσία, δηλαδή τις ενδο-υπηρεσιακές παρεμβολές (intra-service interference). Τα κανάλια που αποδίδονται από τους ΣΒ σε τερματικά που εξυπηρετούν την ίδια υπηρεσία διαχωρίζονται με επαρκείς φασματικές αποστάσεις. Στο πλαίσιο της απόδοσης κατάλληλων λόγων προστασίας (protection ratio) ώστε να επιτευχθεί συμμόρφωση προς τις απαιτήσεις που αφορούν είτε τις δια-υπηρεσιακές είτε τις ενδο-υπηρεσιακές παρεμβολές, εισάγεται η συνάρτηση  $w(f_{n,m,s} - f_{n,m',s'})$ , οι τιμές της οποίας εξαρτώνται από τις φέρουσες συχνότητες που αποδίδονται από το ΣΒ  $B_n$  σε διαφορετικά τερματικά. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, για την προσομοίωση των δια-υπηρεσιακών και ενδο-υπηρεσιακών παρεμβολών, χρησιμοποιούνται ενδεικτικές τιμές της συνάρτησης  $w(f_{n,m,s} - f_{n,m',s'})$  (οι ενδεικτικές τιμές αυτές έχουν ληφθεί από το [5.12]) .

Η συνάρτηση  $w$  αντανακλά τη σχέση μεταξύ της φασματικής απόστασης φερουσών συχνοτήτων και της αμοιβαίας παρεμβολής που προκαλείται. Συγκεκριμένα, θεωρείται ότι:



$$\begin{aligned}
0 \leq x < 0 & & w(x) = 1 \\
0 \leq |x| \leq 3 & & w(x) = 0.2 \\
3 \leq |x| \leq 10 & & w(x) = 0.1 \\
10 \leq |x| \leq 20 & & w(x) = 0.01 \\
20 < |x| & & w(x) = 0
\end{aligned} \tag{5.6}$$

$$\text{όπου } x = f_{n,m,s} - f_{n,m',s'} \tag{5.7}$$

Με βάση τα ανωτέρω, η συνάρτηση  $w$  που λαμβάνεται υπόψη στην παρούσα εργασία είναι η ακόλουθη:

Με παρόμοιο σκεπτικό, οι ενδοϋπηρεσιακές παρεμβολές που προκαλούνται στο τερματικό  $T_m$  λόγω εκπομπών από το ΣΒ  $B_n$  που προορίζονται για τερματικά που ζητούν υπηρεσίες διαφορετικές από αυτή που ζητείται από το  $T_m$  υπολογίζονται μέσω της σχέσης

$$I_{n,m,s}^{(2)} = \sum_{l=1}^L \sum_{\substack{m'=1 \\ m' \neq m, s' \neq s}}^M \sum_{s'=1}^S p_{n,m',s'} \cdot g_{n,m',l}(f_{n,m,s}) \cdot w(f_{n,m',s'} - f_{n,m,s}) \tag{5.8}$$

Αντίστοιχα, οι διυπηρεσιακές παρεμβολές οι οποίες προκαλούνται στο τερματικό  $T_m$  εξαιτίας εκπομπών από το ΣΒ  $B_n$  που προορίζονται για τερματικά που ζητούν την ίδια υπηρεσία με αυτή που ζητεί το τερματικό  $T_m$  υπολογίζονται μέσω της σχέσης

$$I_{n,m,s}^{(3)} = \sum_{l=1}^L \sum_{m'=1}^M p_{n,m',s'} \cdot g_{n,m',l}(f_{n,m,s}) \cdot w(f_{n,m',s'} - f_{n,m,s}) \tag{5.9}$$

Το υπό διατύπωση τριπλό πρόβλημα βελτιστοποίησης της κατανομής πόρων αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση του πλήθους νομαδικών τερματικών που βρίσκονται εντός της κάλυψης του υπό εξέταση δικτύου και δεν απολαμβάνουν τον ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης που έχει προδιαγραφεί για την εξυπηρέτηση της υπηρεσίας που ζήτησαν. Ο ρυθμός μετάδοσης που απολαμβάνει ένα τερματικό εξαρτάται τόσο από το επίπεδο της ισχύος εκπομπής του ΣΒ που το εξυπηρετεί όσο και από το κανάλι που έχει αποδοθεί στη μεταξύ τους ζεύξη. Στο πλαίσιο αυτό, για ένα τερματικό  $T_m$  που έχει ζητήσει την υπηρεσία  $G_s$  και εξυπηρετείται από το ΣΒ  $B_n$ , πρέπει να διασφαλίζεται

έναν ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης  $R_{s,\min}$ . Ο ρυθμός μετάδοσης αυτός πρέπει να ικανοποιεί τις απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας που καθορίζονται για την υπηρεσία  $G_s$ . Το προτεινόμενο σχήμα αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση του πλήθους τερματικών εντός της περιοχής κάλυψης που δεν απολαμβάνουν τον απαιτούμενο κατά υπηρεσία ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης  $R_{s,\min}$ . Ως  $R_{s,\min}$  ορίζεται ο ελάχιστος ρυθμός μετάδοσης που απαιτείται για την εξυπηρέτηση της υπηρεσίας που ζητά το νομαδικό τερματικό. Ως εκ τούτου, στην προσπάθεια να ελαχιστοποιηθεί το πλήθος των κινητών τερματικών που δεν απολαμβάνουν τον ελάχιστο απαιτούμενο ρυθμός μετάδοσης, η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος ελαχιστοποίησης ορίζεται ως

$$T = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^S b_{n,m,s} \quad (5.10)$$

όπου

$$b_{n,m,s} = \begin{cases} 1 & R_{n,m,s} < R_{s,\min} \\ 0 & R_{n,m,s} > R_{s,\min} \end{cases} \quad (5.11)$$

Η άθροιση που παρουσιάζεται στην Εξίσωση (5.10) περιλαμβάνει όλα τα τερματικά εντός της περιοχής κάλυψης που δεν απολαμβάνουν τον ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης που αντιστοιχεί στην υπηρεσία που ζητούν. Η τιμή του  $T$  αντικατοπτρίζει την μέση πιθανότητα αποκλεισμού κλήσης (Call Blocking Probability - CBP) που επιτυγχάνεται από το προτεινόμενο σχήμα και ποσοτικοποιεί το ποσοστό τερματικών οι οποίες αποκλείονται από το κυψελωτό δίκτυο.

Το προτεινόμενο επαναληπτικό σχήμα, που πραγματοποιεί βελτιστοποίηση με χρήση Γενετικών Αλγορίθμων, προχωρεί σε επεξεργασία και ανανέωση των τιμών των πινάκων  $\mathbf{X}$ ,  $\mathbf{P}$  και  $\mathbf{F}$  μέχρις ότου

$$T < T_{th} \quad (5.12)$$

όπου  $T_{th}$  είναι ένα προκαθορισμένο επίπεδο (threshold) που σχετίζεται με τη φασματική χρησιμοποίηση. Καθώς χαμηλότερες τιμές του  $T_{th}$  αντικατοπτρίζουν υψηλότερα επίπεδα φασματικής εκμετάλλευσης, το μέγεθος  $T_{th}$  επίσης αντικατοπτρίζει τη μέση CBP του κυψελωτού δικτύου. Οι πίνακες  $\mathbf{X}$ ,  $\mathbf{P}$  και  $\mathbf{F}$ , που επιτυγχάνουν τη

χαμηλότερη τιμή της συνάρτησης  $T$ , που είναι ταυτόχρονα και χαμηλότερη από την τιμή του  $T_{th}$ , είναι η λύση του προβλήματος απόδοσης πόρων και συναπαρτίζουν το εκάστοτε ζητούμενο σχέδιο απόδοσης πόρων. Σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα σε περιπτώσεις που η τιμή του  $T_{th}$  είναι πολύ χαμηλή ή σε περιπτώσεις όπου πολλοί χρήστες ζητούν την περισσότερο απαιτητική σε όρους ρυθμού μετάδοσης υπηρεσία αυτό δεν είναι εφικτό. Σε αυτές τις περιπτώσεις, το προτεινόμενο σχήμα δε δύναται να εξυπηρετήσει ορισμένους χρήστες, παρουσιάζεται δηλαδή το φαινόμενο της άρνησης υπηρεσίας (Denial of Service - DoS).

## 5.2. Το προτεινόμενο σχήμα βασισμένο στους γενετικούς αλγορίθμους

Για να αποδοθούν ΣΒ και πόροι σε κυβελωτά δίκτυα που υποστηρίζουν πολλαπλές υπηρεσίες ακολουθείται προσέγγιση βασισμένη στη βελτιστοποίηση μέσω γενετικών αλγορίθμων. Όπως παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 2, ο αντίστοιχος γενετικός αλγόριθμος επεξεργάζεται τρεις πληθυσμούς στοιχείων: ένα πληθυσμό ΣΒ, ένα πληθυσμό κβαντισμένων επιπέδων ισχύος εκπομπής από τους ΣΒ και ένα πληθυσμό καναλιών που μπορούν να αποδοθούν από τους ΣΒ στα τερματικά που αυτοί εξυπηρετούν. Τα κανάλια εκπροσωπούνται από τις αντίστοιχες φέρουσες συχνότητες. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, το προτεινόμενο σχήμα επεξεργάζεται τους τρεις πληθυσμούς με σκοπό την ελαχιστοποίηση του πλήθους τερματικών που βρίσκονται εντός της κάλυψης του δικτύου και δεν απολαμβάνουν τον κατά υπηρεσία απαιτούμενο ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης. Ο συνολικός πληθυσμός που αντιπροσωπεύει τα τριπλά σχέδια απόδοσης πόρων τα οποία επεξεργάζεται το προτεινόμενο σχήμα σε κάθε επανάληψη αποτελείται από  $Q_1$  πίνακες  $\mathbf{X}$ ,  $Q_2$  πίνακες  $\mathbf{P}$  και  $Q_3$  πίνακες  $\mathbf{F}$ . Επομένως, τα  $Q_i$ ,  $i=1,2,3$ , είναι τα πληθυσμιακά μεγέθη που απαιτούνται για τη σύγκλιση του προτεινόμενου σχήματος. Τα  $Q_1$ ,  $Q_2$  και  $Q_3$  αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους που σχετίζονται με την πολυπλοκότητα του υπό εξέταση προβλήματος μεγιστοποίησης και με την ταχύτητα με την οποία επιτυγχάνεται η σύγκλιση του προτεινόμενου σχήματος καθώς, σε κάθε επανάληψη, το σχήμα επεξεργάζεται τα μέλη και των τριών πληθυσμών με σκοπό τον προσδιορισμό των αντίστοιχων ανανεωμένων τιμών τους. Με βάση το προτεινόμενο σχήμα, οι τρεις πληθυσμοί εξελίσσονται,

οδηγώντας σε βελτιωμένες τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης, όπως αυτή υπολογίζεται με εφαρμογή της (5.10). Μετά από ένα πλήθος ανανεώσεων των γενεών, το προτεινόμενο σχήμα συγκλίνει προς ένα υποβέλτιστο τριπλό σχέδιο απόδοσης πόρων, δηλαδή σε ένα σχέδιο απόδοσης πόρων που είναι τόσο πλησιέστερο προς το βέλτιστο όσο μικρότερη είναι η ελάχιστη τιμή του  $T$  που σε κάθε περίπτωση πρέπει να είναι μικρότερη του  $T_{th}$ . Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, το προτεινόμενο σχήμα επεξεργάζεται  $(Q_1 \cdot N \cdot M \cdot S)$  στοιχεία του πίνακα  $\mathbf{X}$ ,  $(Q_2 \cdot N \cdot M \cdot S)$  στοιχεία του πίνακα  $\mathbf{P}$  και  $(Q_3 \cdot N \cdot M \cdot S)$  στοιχεία του πίνακα  $\mathbf{F}$ . Η λειτουργία του περιλαμβάνει τις ακόλουθες φάσεις:

### 1. Εναρκτηρία Φάση

Δημιουργούνται τρεις αρχικοί πληθυσμοί για τους πίνακες  $\mathbf{X}$ ,  $\mathbf{P}$  και  $\mathbf{F}$  με τυχαία επιλογή των κανονικοποιημένων στοιχείων των πινάκων ακολουθώντας την ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα  $[0,1]$ . Τα στοιχεία αυτά κατόπιν λαμβάνουν τις μη κανονικοποιημένες τιμές τους.

### 2. Ανανέωση της τριπλής απόδοσης πόρων

Στη φάση αυτή, πραγματοποιούνται

(i) Ανανέωση των στοιχείων των πινάκων  $\mathbf{X}$ ,  $\mathbf{P}$  και  $\mathbf{F}$  ώστε να δημιουργηθούν οι αντίστοιχες νέες γενεές των τριών πληθυσμών. Το 80% των νέων γενεών προκύπτουν από διασταύρωση προγόνων της προηγούμενης γενεάς, ενώ το υπόλοιπο 20% αποτελείται από μεταλλαγμένα στοιχεία της προηγούμενης γενεάς που προκύπτουν προσθέτοντας σε επιλεγμένα κατά τυχαίο τρόπο στοιχεία τυχαίους αριθμούς που ακολουθούν την κανονική κατανομή. Στο πλαίσιο της προτεινόμενης εργασίας επιλέχθηκε η κανονική κατανομή και κατάλληλες παράμετροι αυτής (μεγάλες τιμές διασποράς) με στόχο να επιτευχθεί όσο το δυνατό μεγαλύτερο εύρος πιθανών τιμών των μεταλλαγμένων στοιχείων.

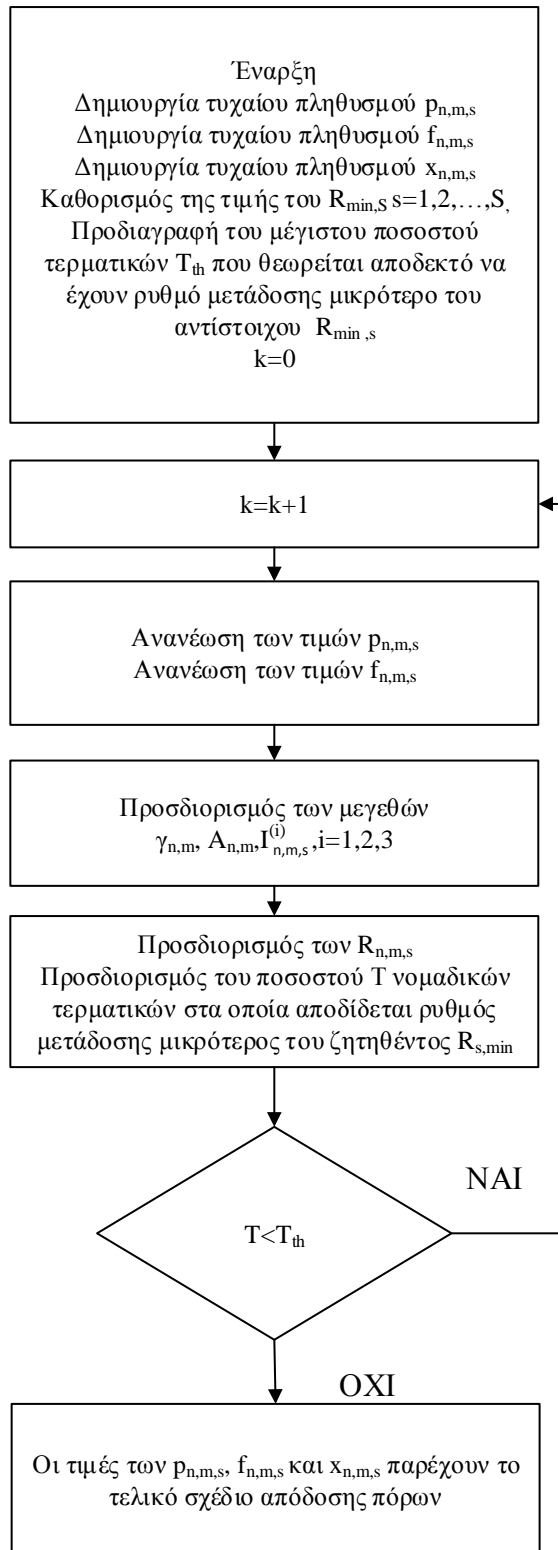
(ii) Υπολογισμός των μεγεθών  $A_{n,m}(f_{n,m,s})$ ,  $\gamma_{n,m}(f_{n,m,s})$ ,  $I_{n,m,s}^{(1)}$ ,  $I_{n,m,s}^{(2)}$ ,  $I_{n,m,s}^{(3)}$  με εφαρμογή των εξισώσεων (5.3) έως (5.6).

Ακολουθώς, με εφαρμογή των εξισώσεων (5.3) έως (5.6) προσδιορίζονται οι ρυθμοί μετάδοσης  $R_{n,m,s}$  που απολαμβάνουν τα νομαδικά τερματικά εντός του κυψελωτού δικτύου. Οι ρυθμοί μετάδοσης αυτοί επιτυγχάνονται κάνοντας χρήση του τρέχοντος

σχεδίου απόδοσης πόρων, που αντιστοιχεί στην εκάστοτε τρέχουσα γενεά πινάκων  $\mathbf{X}$ ,  $\mathbf{P}$  και  $\mathbf{F}$ .

### 3. Τερματισμός του σχήματος

Με χρήση της εξίσωσης (5.10) υπολογίζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης  $T$  για κάθε γενεά με βάση τις ανανεωμένες τιμές των πινάκων  $\mathbf{X}$ ,  $\mathbf{P}$  και  $\mathbf{F}$ . Το προτεινόμενο σχήμα επεξεργάζεται επαναληπτικά τους πληθυσμούς των πινάκων  $\mathbf{X}$ ,  $\mathbf{P}$  και  $\mathbf{F}$  μέχρι η τιμή του μεγέθους  $T$  να καταστεί μικρότερη από το προκαθορισμένο ποσοστό τερματικών για τα οποία θεωρείται αποδεκτό να μην απολαμβάνουν τον απαιτούμενο για την εξυπηρέτηση της υπηρεσίας που ζήτησαν ρυθμό μετάδοσης. Αφού, λοιπόν, προδιαγραφούν τα μεγέθη  $R_{s,\min}$ ,  $s=1,2,\dots,S$  το μέγεθος  $T$  είναι το πλήθος των νομαδικών τερματικών που έχουν ρυθμό μετάδοσης  $R < R_{s,\min}$ . Πρέπει να σημειωθεί πως το μέγεθος  $T$  δεν μπορεί να υπερβαίνει το  $T_{th}$ . Οι πίνακες  $\mathbf{X}$ ,  $\mathbf{P}$  και  $\mathbf{F}$  που αντιστοιχούν στη χαμηλότερη τιμή του μεγέθους  $T$ , που ταυτόχρονα ικανοποιεί τη συνθήκη  $T < T_{th}$  αποτελούν μία υποβέλτιστη λύση στο πρόβλημα  $\min\max$  που εξετάζεται και συναποτελούν το τελικό τριπλό σχέδιο απόδοσης πόρων. Το διάγραμμα ροής του προτεινόμενου σχήματος απεικονίζεται στο Σχήμα 5.3.



Σχήμα 5.3. Διάγραμμα ροής του προτεινόμενου σχήματος.

### 5.3. Αποτελέσματα Προσομοιώσεων

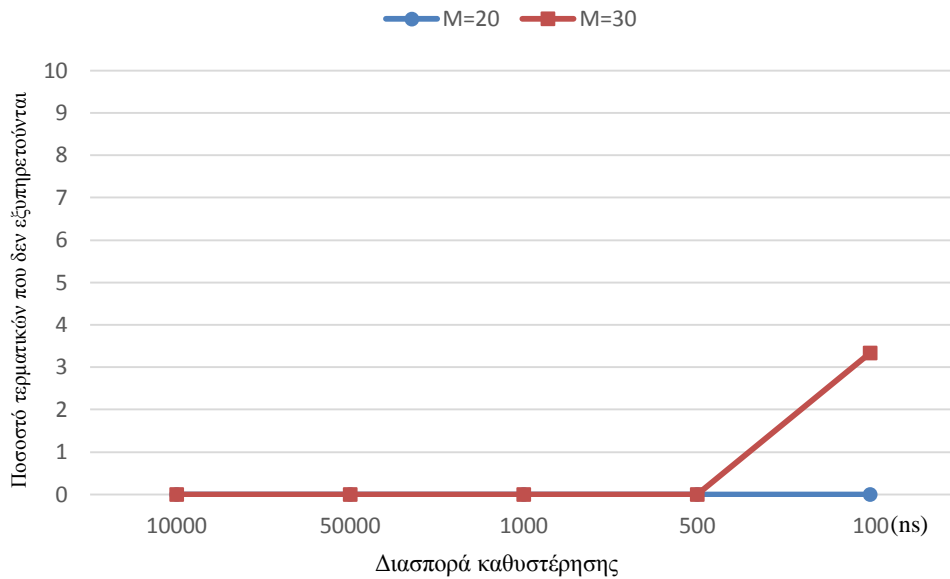
Το WINNER II αποτελεί εργαλείο προσομοιώσεων ραδιοπρόσβασης (radio access) [5-10] που είναι κατάλληλο για την προσομοίωση μιας μεγάλης σειράς σεναρίων ασύρματων επικοινωνιών. Πέραν των λοιπών εφαρμογών, το εργαλείο αυτό προσομοιώνει διάφορα σενάρια ασύρματων δικτύων, βασισμένο στη δυνατότητά του να διαφοροποιεί είτε την τοπολογία των πομπών και των δεκτών είτε τις συνθήκες διάδοσης. Το WINNER II δέχεται ως εισόδους τις συντεταγμένες των Σταθμών Βάσης και το πλήθος και τα χαρακτηριστικά των τομέων (sectors), καθώς επίσης και το πλήθος των τερματικών. Το συγκεκριμένο εργαλείο μπορεί να αντιμετωπίσει τόσο ζεύξεις οπτικής επαφής (Line Of Sight – LOS) ζεύξεις όσο και ζεύξεις χωρίς οπτική επαφή (NLOS). Καθώς το WINNER II είναι ικανό να καθορίζει τα κέρδη και τις καθυστερήσεις κατά τις πολυδιαδρομικές διαδρομές (paths) κάθε ζεύξης, προσομοιώνει αποτελεσματικά η πολυδιαδρομική διάδοση. Το προιαθορισμένο πλήθος πολυδιαδρομικών συνιστωσών που λαμβάνεται υπόψη από το WINNER II έχει τεθεί ίσο με  $L=23$ . Μέσω κατάλληλης ρύθμισης των παραμέτρων, η πλατφόρμα του WINNER II επιτρέπει την υλοποίηση διαφόρων σεναρίων προσομοίωσης.

Η περιοχή κάλυψης της προσομοίωσης που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.1 καλύπτεται από 4 ή 8 Σταθμούς Βάσης που είναι χρωματισμένοι με κόκκινο χρώμα. Επίσης, θεωρείται ότι 30 ή 60 νομαδικά τερματικά, χρωματισμένα με γαλάζιο χρώμα, απαιτούν εξυπηρέτηση. Τα νομαδικά τερματικά είναι διασπαρμένα εντός της περιοχής εξυπηρέτησης με τυχαίο τρόπο – ακολουθώντας την ομοιόμορφη κατανομή – και μπορούν να ζητήσουν είτε την υπηρεσία  $S_1$  είτε την υπηρεσία  $S_2$ . Το προτεινόμενο σχήμα απόδοσης πόρων αναθέτει την εξυπηρέτηση κάθε τερματικού στον κατάλληλο ΣΒ. Καθορίζονται επίσης (i) το επίπεδο ισχύος εκπομπής του και (ii) τη φέρουσα συχνότητα που χρησιμοποιεί κάθε ΣΒ για να εξυπηρετήσει το τερματικό. Η επεξεργασία αυτή - που πραγματοποιείται σε κάθε γενεά - με στόχο να προσομοιωθούν όλες οι πιθανές αποδόσεις πόρων και να καθορισθούν όλοι οι πιθανοί ρυθμοί μετάδοσης που μπορούν να δοθούν στα νομαδικά τερματικά. Στην προσπάθεια να υποστηριχθεί συνεχής εξυπηρέτηση των τερματικών που αυτοί εξυπηρετούν, οι ΣΒ έχουν τη δυνατότητα να εκπέμπουν σε κβαντισμένα επίπεδα ισχύος, χαρακτηριστικό που τους προσφέρει τη δυνατότητα να προσαρμόζουν την ισχύ εκπομπής τους στις

μεταβαλλόμενες συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον διάδοσης και την τρέχουσα τηλεπικοινωνιακή κίνηση που πρέπει να εξυπηρετήσει το δίκτυο. Στις προσομοιώσεις που ακολουθούν, τα επίπεδα ισχύων εκπομπής των ΣΒ κανονικοποιούνται με βάση τη μέγιστη ισχύ εκπομπής τους, η οποία κυμαίνεται μεταξύ 15W και 20W. Επιπλέον, η φασματική ζώνη που αποδίδεται στο κυψελωτό δίκτυο στο πλαίσιο της εξυπηρέτησης των υπηρεσιών  $S_1$  και  $S_2$  θεωρείται ότι εκκινεί από τη συχνότητα  $F_L = 3.510\text{GHz}$  και τερματίζεται στη συχνότητα  $F_H = 3.600\text{GHz}$ , και αποτελεί τμήμα του φάσματος που έχει αποδοθεί προς χρήση για υπηρεσίες LTE.

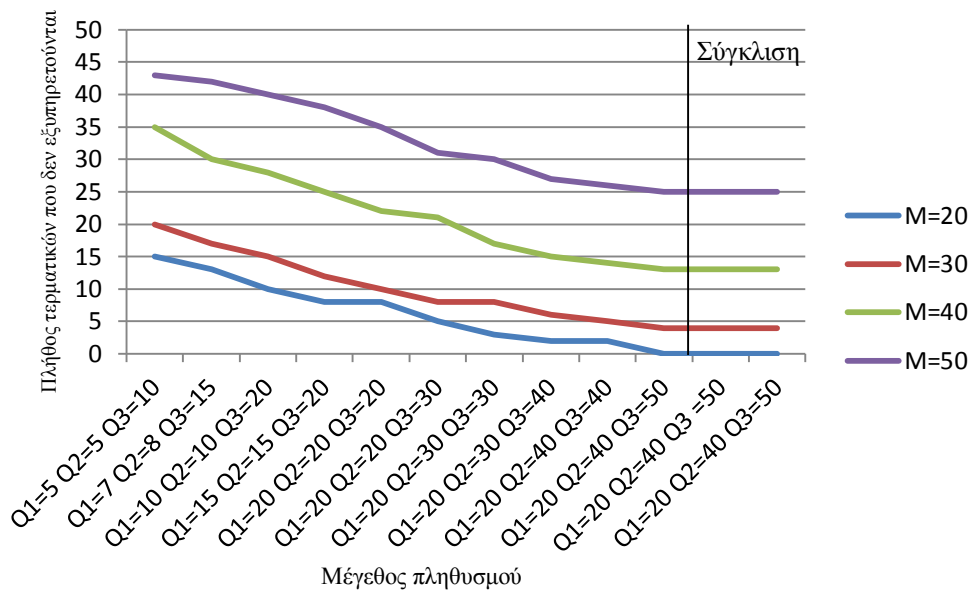
Το προτεινόμενο σχήμα ελέγχθηκε για το ενδεικτικό σενάριο κυψελωτού δικτύου που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.1, όπου προσφέρονται δύο υπηρεσίες, συγκεκριμένα η  $S_1$  και η  $S_2$ , που απαιτούν ελάχιστους ρυθμούς μετάδοσης 16Mbps και 10Mbps, αντίστοιχα. Θεωρείται πως τα τερματικά λειτουργούν σε ένα αγροτικό περιβάλλον, όπου τυπικές τιμές διασποράς καθυστέρησης ποικίλλουν μεταξύ 100 ns έως και 10  $\mu\text{s}$ . Το ποσοστό των τερματικών που δεν εξυπηρετούνται ( $N = 20$ ) σε συνάρτηση με διάφορες τιμές της διασποράς καθυστέρησης απεικονίζεται στο Σχήμα 5.4. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 5.4, το προτεινόμενο σχήμα επιτυγχάνει να αποδώσει ικανοποιητικούς ρυθμούς μετάδοσης σε όλα τα τερματικά. Στο παρόν κεφάλαιο, η διασπορά καθυστέρησης λαμβάνεται ίση με  $D_s = 100\text{ns}$ .





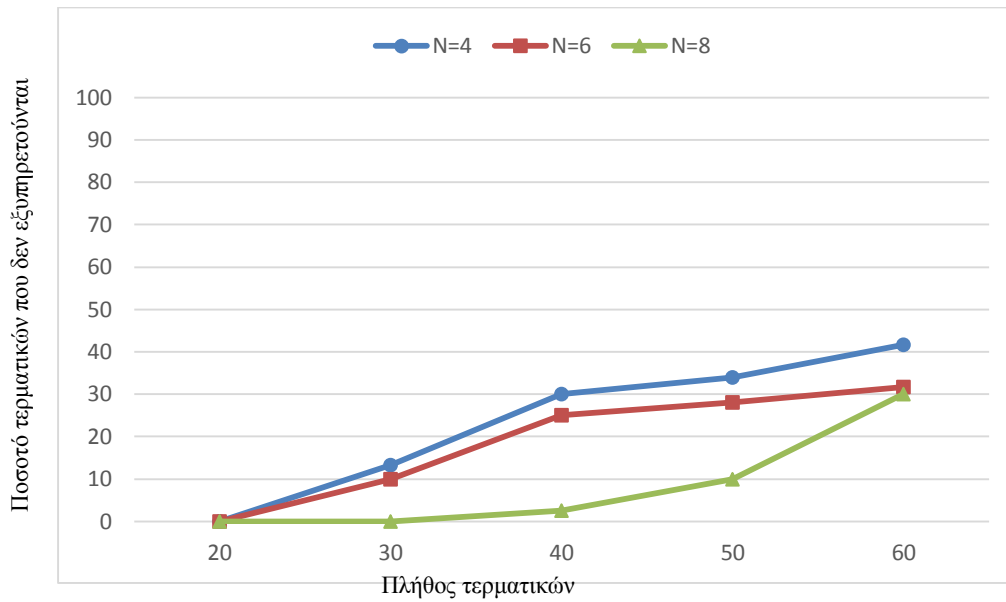
Σχήμα 5.4. Ποσοστό τερματικών που δεν εξυπηρετούνται σε σχέση με τη διασπορά καθυστέρησης όταν όλα τα κινητά τερματικά ζητούν την υπηρεσία S1. ( $N = 4$ ).

Για να καθορισθούν τα κατάλληλα μεγέθη πληθυσμών  $Q_1$ ,  $Q_2$  και  $Q_3$  πραγματοποιήθηκαν πολυάριθμες προσομοιώσεις μέσω των οποίων οποίες το προτεινόμενο σχήμα αποδίδει ΣΒ, κανάλια και επίπεδα ισχύος εκπομπής σε διάφορα πλήθη τερματικών ( $M = 20, 30, 40, 50$ ). Το πλήθος των τερματικών που δεν εξυπηρετούνται καθώς μεταβάλλεται ο πληθυσμός απεικονίζεται στο Σχήμα 5.4. Από το Σχήμα 5.4 είναι φανερό ότι οι ελάχιστες τιμές των  $Q_i$  που απαιτούνται ώστε να επέλθει σύγκλιση είναι  $Q_1 = 20$ ,  $Q_2 = 40$  και  $Q_3 = 50$  καθώς επαύξηση των μεγεθών των πληθυσμών πέραν των τιμών αυτών έχει αμελητέα επίπτωση στο πλήθος των τερματικών που δεν εξυπηρετούνται. Για τις λοιπές προσομοιώσεις τα μεγέθη των πληθυσμών που χρησιμοποιούνται για τους πίνακες  $\mathbf{X}$ ,  $\mathbf{P}$  και  $\mathbf{F}$  τίθενται ίσα με  $Q_1 = 20$ ,  $Q_2 = 40$  και  $Q_3 = 50$ .

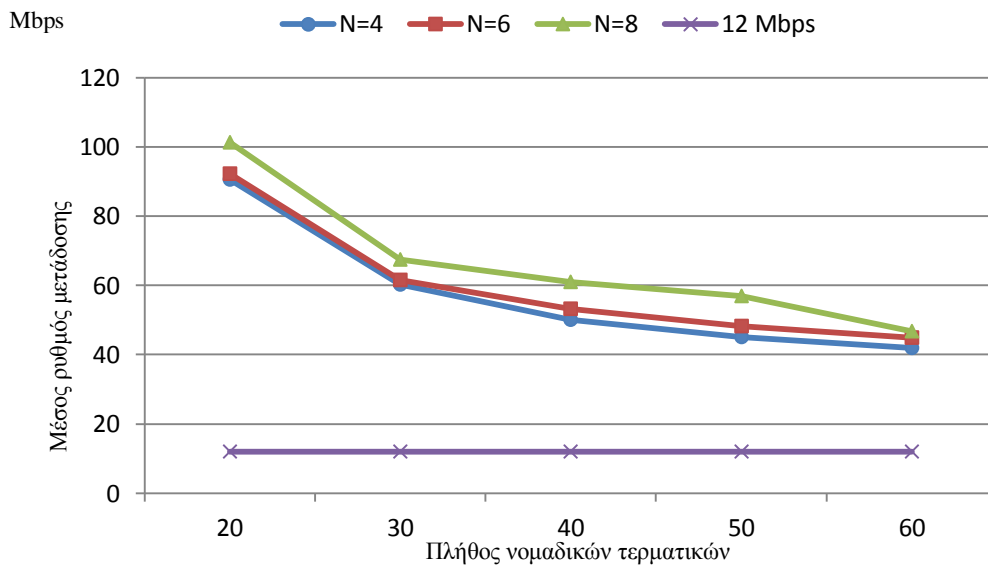


Σχήμα 5.5. Πλήθος τερματικών που δεν εξυπηρετούνται σε σχέση με το μέγεθος των πληθυσμών όταν όλα τα κινητά τερματικά ζητούν την υπηρεσία S1. ( $N = 4$ )

Για να επιδειχθεί ο τρόπος με τον οποίο το προτεινόμενο σχήμα διαχειρίζεται και αποδίδει με βέλτιστο τρόπο ΣΒ, κανάλια και επίπεδα ισχύος εκπομπής όταν τα τερματικά ζητούν διαφορετικές υπηρεσίες, εξετάσθηκαν τυχαίες τοποθετήσεις των τερματικών. Για να ελεγχθεί η εγκυρότητά του, το προτεινόμενο σχήμα ελέγχθηκε για την τοπολογία που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.1 θεωρώντας ότι τα τερματικά ζητούν την υπηρεσία S1. Το πλήθος των τερματικών που δεν εξυπηρετούνται, καθώς επίσης και ο μέσος ρυθμός μετάδοσης που επιτυγχάνεται από το προτεινόμενο σχήμα για διάφορα πλήθη νομαδικών τερματικών ( $M = 20,30,40,50$ ) απεικονίζονται στα Σχήματα 5.6 και 5.7.



Σχήμα 5.6. Ποσοστό τερματικών που δεν εξυπηρετούνται σε σχέση με το πλήθος τερματικών που ζητούν την υπηρεσία S1.

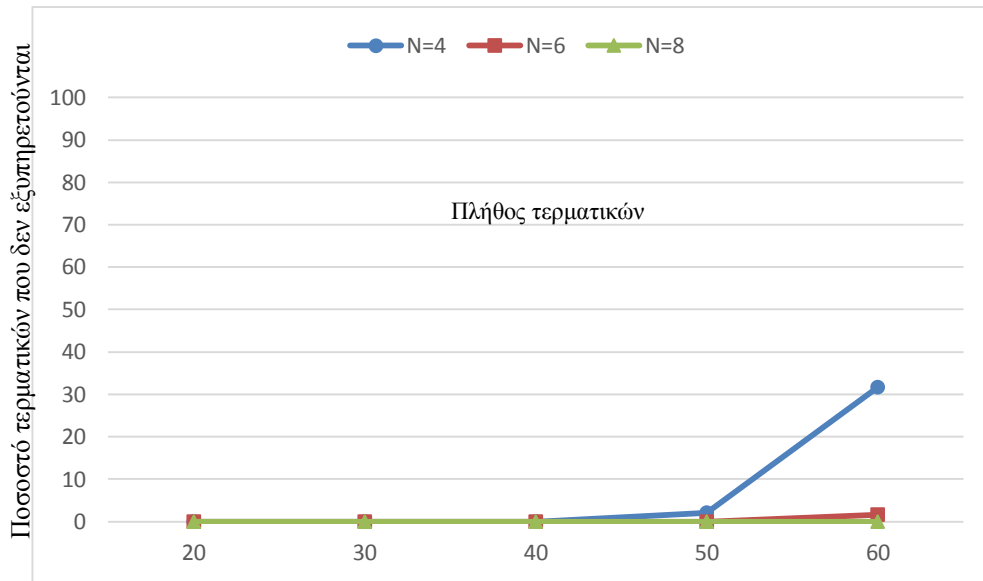


Σχήμα 5.7. Μέσος ρυθμός μετάδοσης σε σχέση με το πλήθος των νομαδικών τερματικών όταν όλα τα τερματικά ζητούν την υπηρεσία S1.

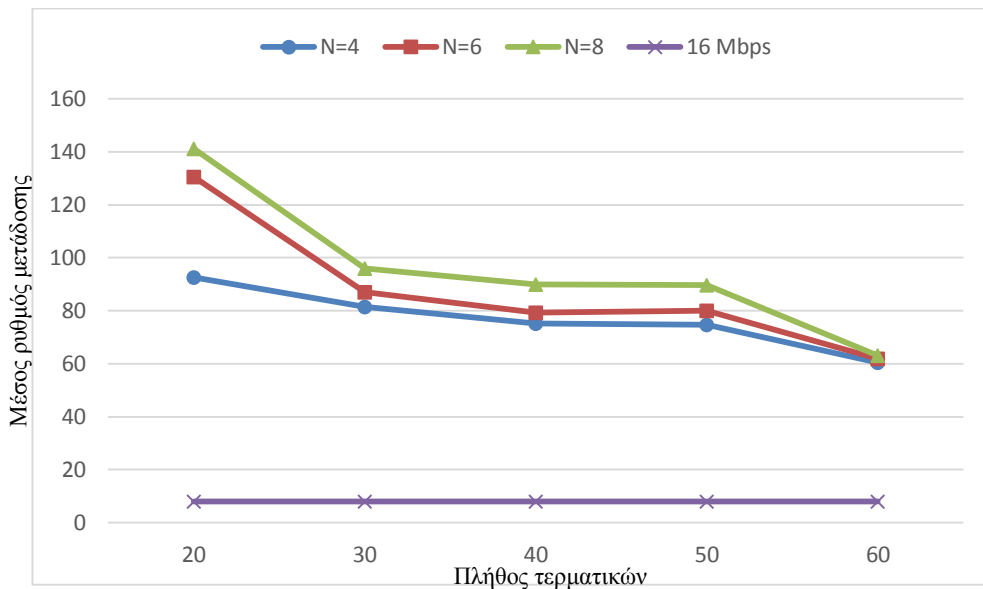
Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.6 και 5.7, και όπως είναι αναμενόμενο, καθώς το πλήθος των τερματικών που ζητούν εξυπηρέτηση αυξάνεται, αυξάνεται και το ποσοστό των τερματικών που δεν απολαμβάνουν τον ελάχιστο απαιτούμενο ρυθμό μετάδοσης των 12 Mbps, δηλαδή δεν εξυπηρετούνται. Αντίστοιχα αποτελέσματα που αφορούν τερματικά που ζητούν την υπηρεσία S2 παρουσιάζονται

στα Σχήματα 5.8 και 5.9. Καθώς το πλήθος των τερματικών που ζητούν την υπηρεσία S2 αυξάνεται, το αντίστοιχο πλήθος των τερματικών που αποκλείονται από την εξυπηρέτησή της αυξάνεται, επίσης. Παρ' όλα αυτά, καθώς  $R_{1,\min} > R_{2,\min}$ , το αντίστοιχο πλήθος τερματικών που αποκλείονται από την υπηρεσία S2 είναι αισθητά μικρότερος από το αντίστοιχο πλήθος των τερματικών που αποκλείονται από την υπηρεσία

S1.

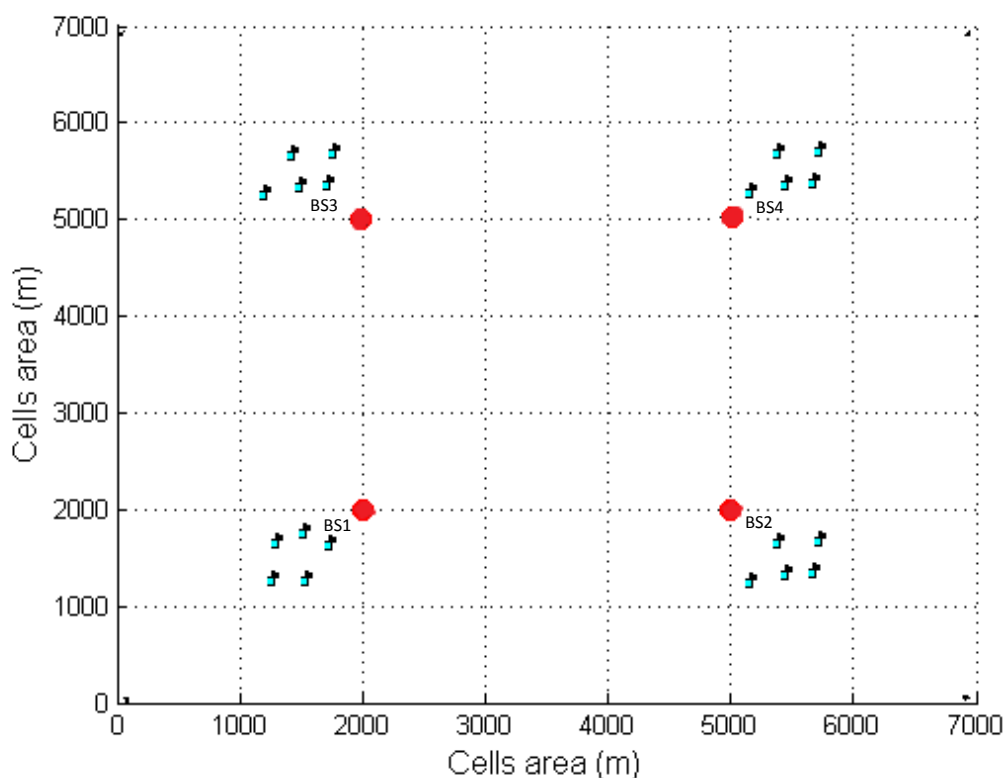


Σχήμα 5.8. Ποσοστό τερματικών που δεν εξυπηρετούνται σε σχέση με το πλήθος τερματικών που ζητούν εξυπηρέτηση της υπηρεσίας S2.



Σχήμα 5.9. Μέσος ρυθμός μετάδοσης σε σχέση με το πλήθος των νομαδικών τερματικών που ζητούν εξυπηρέτηση της Υπηρεσίας S2.

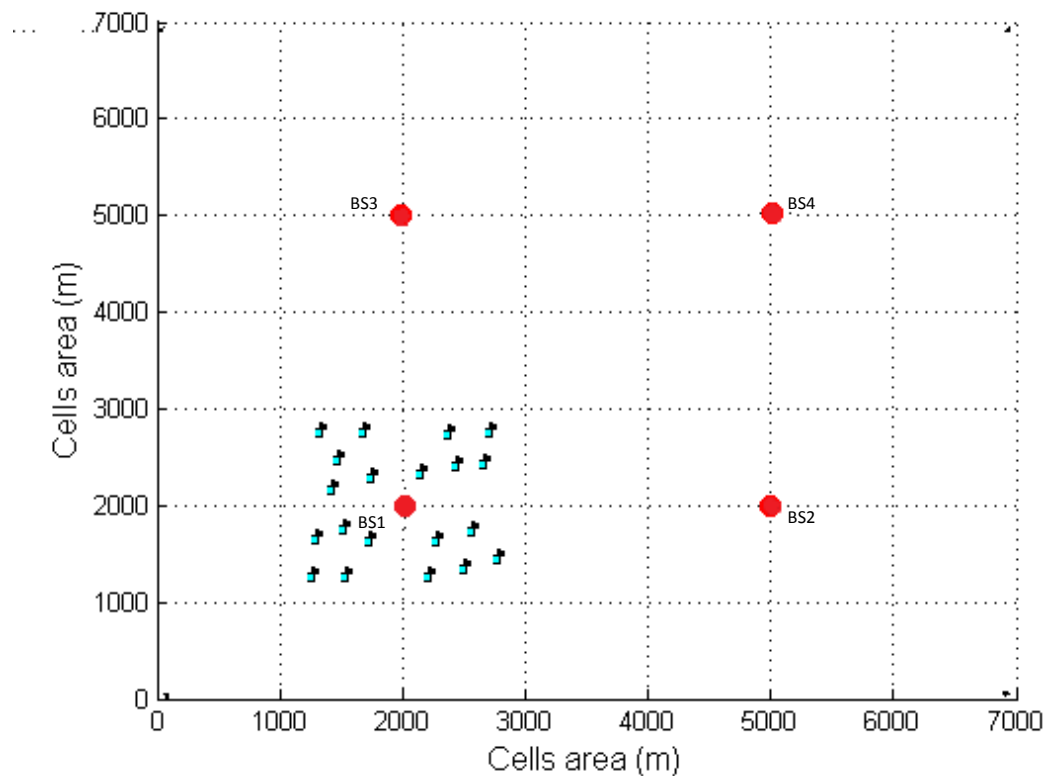
Το προτεινόμενο σχήμα ελέγχθηκε και στην περίπτωση που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.10, σύμφωνα με το οποίο τα 20 τερματικά βρίσκονται στις τέσσερις γωνίες της περιοχής κάλυψης. Το ποσοστό των τερματικών που αποκλείονται από την υπηρεσία στην περίπτωση αυτού του σεναρίου παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.12, από όπου είναι εμφανές πως το προτεινόμενο σχήμα επιτυγχάνει καλύτερα αποτελέσματα όταν τα τερματικά ζητούν την υπηρεσία S2 αντί της S1. Παρ' όλα αυτά, ακόμη και στην περίπτωση κατά την οποία όλα τα τερματικά ζητούν την υπηρεσία S1, το ποσοστό των τερματικών που δεν εξυπηρετούνται κυμαίνεται μεταξύ 15% ( $M = 20$ ) και 40% ( $M = 40$ ).



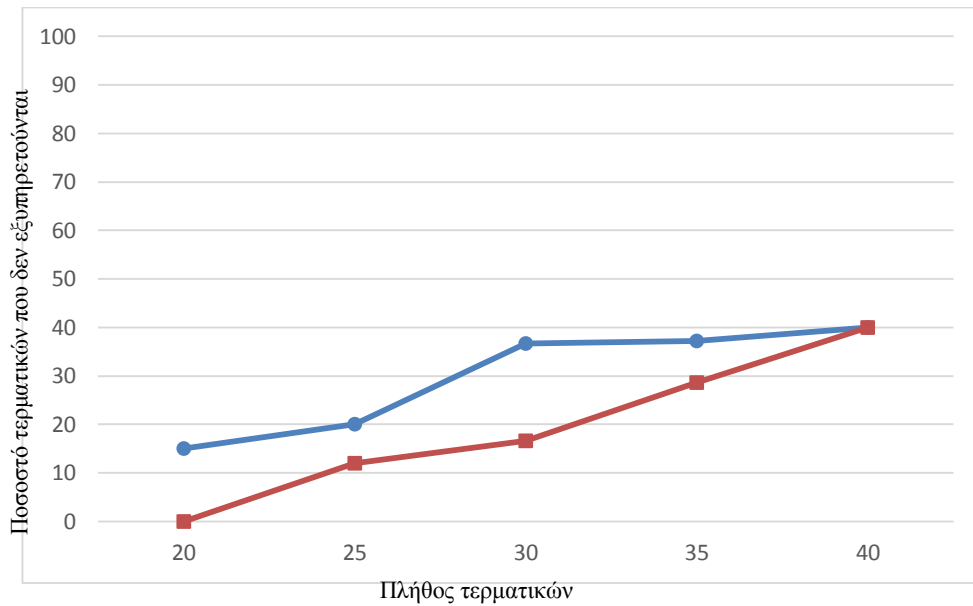
Σχήμα 5.10. Αιχραία τοποθέτηση των 20 κινητών τερματικών στο υποθετικό κυψελωτό δίκτυο που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.1.

Τέλος, το προτεινόμενο σχήμα ελέγχθηκε, επίσης, στην περίπτωση του αιχραίου σεναρίου που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.11, όπου οι 20 τερματικά που ζητούν εξυπηρέτηση της υπηρεσίας S1 βρίσκονται όλα πολύ κοντά σε ένα ΣΒ, συγκεκριμένα

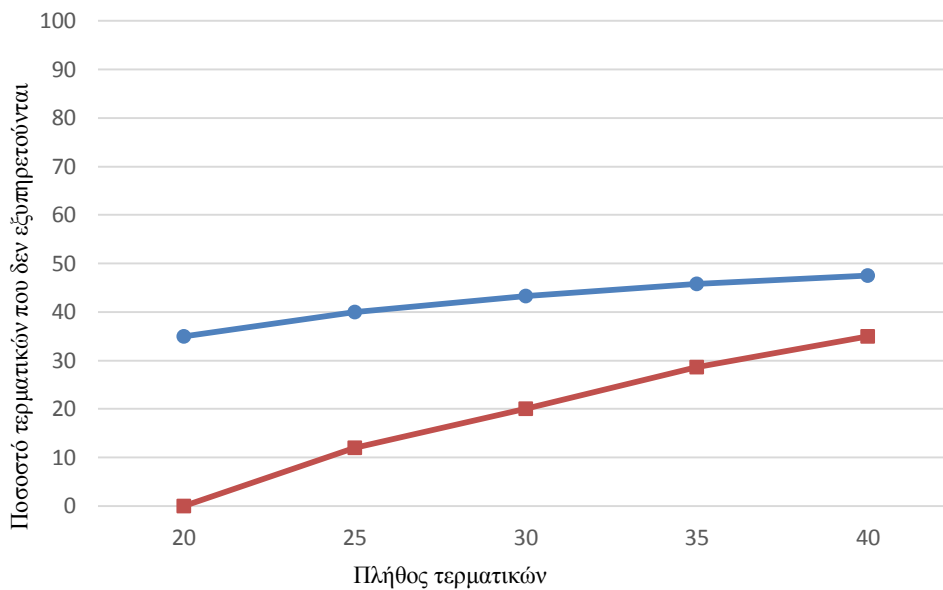
του BS1. Το ποσοστό τερματιών που δεν εξυπηρετούνται στην περίπτωση αυτού του ακραίου σεναρίου απεικονίζεται στο Σχήμα 4.13, από όπου φαίνεται ότι το ποσοστό αυτό κυμαίνεται μεταξύ 47.5% (θεωρώντας πως τα τερματικά ζητούν την υπηρεσία S1 και  $M = 40$ ) και 35% (θεωρώντας πως τα τερματικά ζητούν την υπηρεσία S1 και  $M = 20$ ) ή μεταξύ 35% (θεωρώντας πως τα τερματικά ζητούν την υπηρεσία S2 και  $M = 40$ ) και 0% (θεωρώντας πως τα τερματικά ζητούν την υπηρεσία S2 και  $M = 20$ ).



Σχήμα 5.11. Ακραία τοποθέτηση των 20 κινητών τερματικών στο υποθετικό κυβελωτό δίκτυο που απεικονίζεται στο Σχήμα 4.1.



Σχήμα 5.12. Ποσοστό τερματικών που ζητούν την υπηρεσία S1 (μπλε γραμμή) ή την υπηρεσία S2 (κόκκινη γραμμή) που δεν εξυπηρετούνται υπό το σενάριο που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.10.



Σχήμα 5.13. Ποσοστό τερματικών που ζητούν την υπηρεσία S1 (μπλε γραμμή) ή την υπηρεσία S2 (κόκκινη γραμμή) που δεν εξυπηρετούνται υπό το σενάριο που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.11.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΠΕΜΠΤΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

[5.1] Y. Guangxiang, et al., "Carrier aggregation for LTE-advanced mobile communication systems," Communications Magazine, IEEE, vol. 48, pp. 88-93, 2010.

- [5.2] Ying Song; YuZhong Sun; Weisong Shi, "A Two-Tiered On-Demand Resource Allocation Mechanism for VM-Based Data Centers," *Services Computing, IEEE Transactions on* , vol.6, no.1, pp.116,129, First Quarter 2013.
- [5.3] Ksairi, N.; Bianchi, P.; Ciblat, P.; Hachem, W., "Resource Allocation for Downlink Cellular OFDMA Systems—Part II: Practical Algorithms and Optimal Reuse Factor," *Signal Processing, IEEE Transactions on* , vol.58, no.2, pp.735,749, Feb. 2010.
- [5.4] Quansheng Xu; Xi Li; Hong Ji; Xiaojiang Du, "Energy-Efficient Resource Allocation for Heterogeneous Services in OFDMA Downlink Networks: Systematic Perspective," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on* , vol.63, no.5, pp.2071,2082, Jun 2014.
- [5.5] Huiling Zhu; Jiangzhou Wang, "Radio Resource Allocation in Multiuser Distributed Antenna Systems," *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on* , vol.31, no.10, pp.2058,2066, October 2013.
- [5.6] Mikael Fallgren, Gabor Fodor, Anders Forsgren, "Optimization Approach to joint cell, channel and power allocation in wireless communication networks", <http://www.gfodor.iblogger.org/upload/conference/OptApproach-JointChannelPower-1569588655.pdf>.
- [5.7] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principle and Practice*, Prentice Hall, 2002.
- [5.8] H. Zhang and S. Rangarajan, "Joint load balancing, scheduling and interference mitigation in multicell and multicarrier wireless data systems," Proc. of 7th International Conf. Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks, 2009.
- [5.9] H. Chaouchi, "QoS-aware handover control in current and future wireless/mobile networks," *Annals of Telecommunications*, vol. 59, no. 5–6, pp. 731–746.
- [5.10] IST-WINNER II, D1.1.2 "WINNER II Channel Models", ver 1.0, Sep 2007, <https://www.istwinner.org/WINNER2-Deliverables/>.
- [5.11] Rong, L.; Ben Haddada, O.; Elayoubi, S-E, "Analytical Analysis of the Coverage of a MBSFN OFDMA Network," *Global Telecommunications Conference*,



2008. *IEEE GLOBECOM 2008. IEEE* , vol., no., pp.1,5, Nov. 30 2008-Dec. 4 2008.

[5.12] E. G. Villegas, R. V. Ferre and j. P. Aspas, "Implementation of a distributed dynamic channel assignment mechanism for IEEE 802.11 networks", Proceedings of PIMRC 2005, September 2005.

[5.13] Pinagapany S., Kulkarni A.V., D.Y. Patil, "Solving channel allocation problem in cellular radio networks using genetic algorithm", 3rd International Conference on Communication Systems Software and Middleware and Workshops, 2008. COMSWARE 2008. Publication Date: 6-10 Jan. 2008

[5.14] Reddy, Y.B.; Gajendar, N.; Taylor, Portia; Madden, Damian; "Computationally Efficient Resource Allocation in OFDM Systems: Genetic Algorithm Approach," Information Technology, 2007. ITNG '07. Fourth International Conference on , vol., no., pp.36-41, 2-4 April 2007

[5.15] Zbigniew Michalewicz, "Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs", Springer - Verlag, third Edition, 1999.

[5.16] L. G. Anderson, A simulation study of some dynamic channel assignment algorithms in a high capacity mobile telecommunications system, *IEEE Transactions on Communications* 21 (1973), 1294–1301.

[5.17] Bal Randhawa, Ian Parker, Samuel Antwi, "LTE Interference into Domestic Digital Television Systems", Report 2010-0026 (Issue 2)

[5.18] L. Hentilä, P. Kyösti, M. Käske, M. Narandzic, and M. Alatossava. (2007, December.) MATLAB implementation of the WINNER Phase II Channel Model ver1.1 [Online]. Available: [https://www.ist-winner.org/phase\\_2\\_model.html](https://www.ist-winner.org/phase_2_model.html)

[5.19] Hale, W.K.: Frequency assignment: Theory and applications. Proceedings of the IEEE 68 (1980) 1497–1514.

[5.20] Minjae Kim, Yunseok Kang, Hyuckjae Lee, "Interference analysis of DTV into LTE uplink systems", [http://ap-s.ei.tuat.ac.jp/isapx/2011/pdf/\[ThB2-2\]%20SF05\\_1001.pdf](http://ap-s.ei.tuat.ac.jp/isapx/2011/pdf/[ThB2-2]%20SF05_1001.pdf)

[5.21] In-kyoung Cho, Il-kyoo Lee and Youn-ok Park, "Study on Coexistence Between Long Term Evolution and Digital Broadcasting services", *International Journal of Advanced Science and Technology*, Vol. 38, January, 2012

[5.22] I. Parker, S. Munday, “Assessment of LTE 800 MHz Base Station Interference into DTT Receivers”, <http://stakeholders.ofcom.org.uk/binaries/consultations/dtt/annexes/Ite-800-mhz.pdf>

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μετά τη μετάβαση από την αναλογική στην ψηφιακή τηλεοπτική ευρυεκπομπή, ένα σημαντική τμήμα της ζώνης UHF θα μπορεί να αποδοθεί σε διαφορετικές υπηρεσίες. Αυτό το τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος έχει καταστεί διαθέσιμο και πλέον είναι εξαιρετικής σημαντικότητας η αποτελεσματική απόδοσή του σε διαφορετικές υπηρεσίες. Πέραν αυτού, η σπανιότητα του πόρου αυτού, καθιστά επιτακτική την ανάγκη ανάπτυξης αποτελεσματικών σχημάτων απόδοσης ραδιοπόρων που να επιτυγχάνει ικανοποιητικά αποτελέσματα όσον αφορά την ελαχιστοποίηση των παρεμβολών μεταξύ υπηρεσιών που δραστηριοποιούνται στο ίδιο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

Σε αυτό το πλαίσιο, στην παρούσα διατριβή παρουσιάζεται ένα σχήμα απόδοσης καναλιών σε κυψελωτά δίκτυα τα οποία λειτουργούν στη φασματική ζώνη των 790 – 862 MHz (ζώνη του Ψηφιακού Μερίσματος) ή σε φασματικά κενά (white spaces) διασπαρμένα σε όλο το UHF φάσμα. Λαμβάνοντας υπόψη τόσο τους περιορισμούς εντός του δικτύου όσο και τους περιορισμούς οι οποίοι επιβάλλονται λόγω των παρεμβολών από γειτονικούς σταθμούς ευρυεκπομπής ψηφιακής τηλεόρασης το προτεινόμενο σχήμα μεγιστοποιεί τη συνολική χρησιμοποίηση του διαθέσιμου φάσματος και διασφαλίζει ότι όλα τα κανάλια που χρησιμοποιούνται από το κυψελωτό δίκτυο δεν παρεμβάλλονται από γειτονικούς σταθμούς ευρυεκπομπής ψηφιακής τηλεόρασης. Ακόμη, η προτεινόμενη μέθοδος επιτυγχάνει ένα πολύ υψηλό επίπεδο δικαιοσύνης όσον αφορά το πλήθος των καναλιών που αποδίδονται στις κυψέλες του κυψελωτού δικτύου. Για την υλοποίηση της μεθόδου επιλέχθηκε μία προσέγγιση βασισμένη στους Γενετικούς Αλγορίθμους, που αποτελούν μία ιδιαίτερος αποτελεσματική μεταυριστική μέθοδο βελτιστοποίησης.

Πέραν αυτού, στα πλαίσια της παρούσας διατριβής παρουσιάζεται μία μέθοδος απόδοσης καναλιών σε παρόχους Ψηφιακής Τηλεόρασης και σε παρόχους πολλαπλών κινητών υπηρεσιών που λειτουργούν στην ζώνη UHF στην ίδια γεωγραφική περιοχή. Μέσω της συνύπαρξης πομπών παρόχων διαφορετικών ασύρματων κινητών υπηρεσιών και μέσω του ταυτόχρονου περιορισμού της κάλυψής τους σε κοινές κυψέλες, η διαμερισσιμότητα (granularity) της περιοχής κάλυψης αυξάνεται, γεγονός που οδηγεί στο να καθίσταται εφικτή η αποδοτική και διαχειρίσιμη αναχρησιμοποίηση

συχνοτήτων. Το γεγονός αυτό, με τη σειρά του, οδηγεί σε εξοικονόμηση ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

Τέλος, στα πλαίσια της παρούσας διατριβής παρουσιάστηκε ένα σχήμα απόδοσης ραδιοπόρων το οποίο επιτυγχάνει την ταυτόχρονη απόδοση Σταθμών Βάσης, καναλιών μετάδοσης και επιπέδων ισχύος εκπομπής στα νομαδικά τεμαχικά ενός κυψελωτού δικτύου που ζητούν ετερογενείς υπηρεσίες. Η προτεινόμενη μέθοδος απόδοσης ραδιοπόρων υλοποιείται κάνοντας χρήση σχήματος βασισμένου στους γενετικούς αλγορίθμους και αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση του πλήθους χρηστών που δεν απολαμβάνουν ένα ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης εντός της κάλυψης του κυψελωτού δικτύου. Γίνεται χρήση της δεύτερης έκδοσης της πλατφόρμας WINNER (Wireless World Initiative New Radio – WINNER II) με στόχο τη ρεαλιστική προσομοίωση κυψελωτών δικτύων, που προσφέρουν πολλαπλές υπηρεσίες σε χρήστες.

Πιθανή μελλοντική επέκταση της παρούσας εργασίας μπορεί να ενσωματώσει διαφορετική πλατφόρμα προσομοίωσης κυψελωτών δικτύων, πέραν του WINNER II. Τροποποίηση του αλγορίθμου απόδοσης ραδιοπόρων που παρουσιάζεται στην παρούσα διατριβή με την ενσωμάτωση των αποτελεσμάτων διαφορετικών εργαλείων προσομοίωσης κρίνεται ως ιδιαίτερος ενδιαφέρουσα. Ακόμη, πιθανή επέκταση της παρούσας διατριβής αφορά στην ανάπτυξη βάσεως δεδομένων, η οποία, πέρα από μία στατική καταγραφή των ελευθέρων διαύλων σε ορισμένη γεωγραφική περιοχή θα συμπεριλαμβάνει και την υποδομή για την απόδοση ραδιοπόρων σε τυχόν δευτερεύουσες υπηρεσίες που επιθυμούν να λειτουργήσουν σε φασματικά κενά.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α. ΤΑ ΠΡΟΤΥΠΑ MPEG-2 ΚΑΙ MPEG-4

Το 1990 ξεκίνησαν μελέτες για ένα πρότυπο κωδικοποίησης κινούμενων εικόνων και της αντίστοιχης πληροφορίας ηχητικού περιεχομένου. Το πρότυπο θα υποστήριζε ρυθμούς από 2 ως 10 Mbps και θα είχε τη δυνατότητα κωδικοποίησης οπτικού σήματος με αλληλοδιαδοχή πεδίων. Το 1994 δημοσιεύτηκε το νέο πρότυπο που ονομάστηκε MPEG-2 και καθιερώθηκε διεθνώς το 1995. Το πρότυπο MPEG-2, που στη σημερινή εκδοχή του υποστηρίζει ρυθμούς μέχρι 30 Mbps, έτυχε γενικής αποδοχής και αποτελεί τη βάση πάνω στην οποία βασίζονται τα συστήματα ψηφιακής τηλεόρασης. Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας για την επιτυχία του MPEG-2 είναι η δυνατότητά του να κωδικοποιεί την πληροφορία με μεταβλητό ρυθμό δεδομένων (VBR –Variable Bit Rate).

Το πρότυπο MPEG-2 περιλαμβάνει τρία μέρη:

1. Το σύστημα: Περιγράφει το συγχρονισμό ήχου και εικόνας, την πολύπλεξη και προδιαγράφει τη δομή του ρεύματος μεταφοράς (transport stream).
2. Την εικόνα: Περιλαμβάνει την κωδικοποιημένη παρουσίαση των δεδομένων video και τη διαδικασία της αποκωδικοποίησης.
3. Τον ήχο: Περιλαμβάνει την κωδικοποιημένη παρουσίαση των δεδομένων ήχου και τη διαδικασία της αποκωδικοποίησης.

Βασικό χαρακτηριστικό της κωδικοποίησης είναι ο εντοπισμός της επαναλαμβανόμενης πληροφορίας, ώστε αυτή να κωδικοποιείται μόνο μια φορά και να περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο η πληροφορία αυτή επαναλαμβάνεται.. Το σύστημα συμπιέζει την πληροφορία που πλεονάζει χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές η σημαντικότερη από τις οποίες είναι η συμπίεση. Η διαδικασία της συμπίεσης πραγματοποιείται σε στάδια. Συγκεκριμένα:

1. Το στάδιο της διαίρεσης της εικόνας σε macroblock.

2. Το στάδιο του διακριτού μετασχηματισμού συνημίτονου (DCT).
3. Το στάδιο κβάντισης και κωδικοποίησης.

### **A.1. Το πρότυπο MPEG-4**

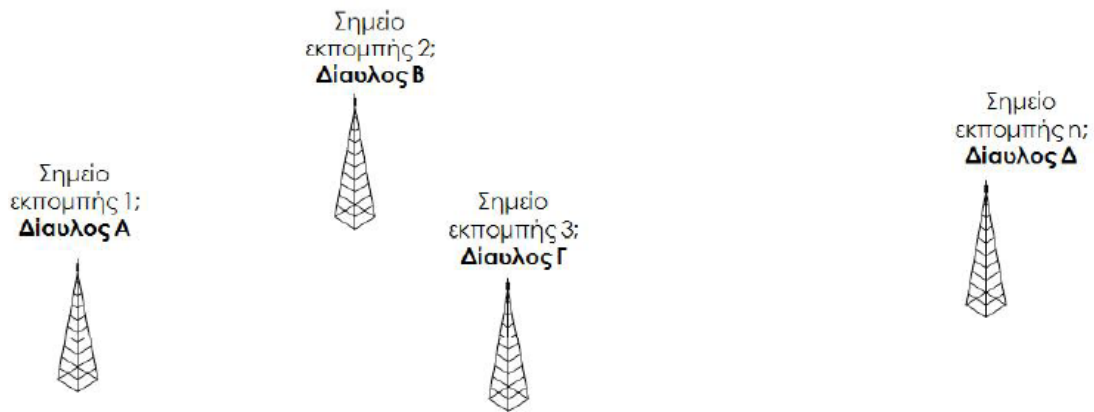
Το πρότυπο MPEG-2 υιοθετήθηκε ευρέως υιοθετηθεί σε εμπορικές εφαρμογές ψηφιακών επικοινωνιών όπως στην ψηφιακή μετάδοση ήχου, στην ψηφιακή τηλεόραση, και στο video on demand. Μετά την καθιέρωση του προτύπου MPEG-2 ο διεθνής οργανισμός προτυποποίησης ISO προχώρησε στον ορισμό του προτύπου MPEG-4. Το MPEG-4 έρχεται να καλύψει τις νέες απαιτήσεις σε περιβάλλοντα πολυμέσων όπου οπτικοακουστική πληροφορία μεταδίδεται σε ψηφιακή μορφή. Το πρότυπο MPEG-4 υλοποιεί τους τρόπους με τους οποίους το οπτικοακουστικό υλικό παράγεται και διανέμεται στους τελικούς καταναλωτές. Και στα τρία αυτά στάδια υπεισέρχονται συνεχείς βελτιώσεις όσον αφορά το χρησιμοποιούμενο υλικό (hardware) και λογισμικό (software). Ως προς την παραγωγή οπτικοακουστικής πληροφορίας έχουν συντελεσθεί σημαντικές εξελίξεις. Σε αντίθεση με το παρελθόν, όπου ο μοναδικός τρόπος να παραχθεί οπτικοακουστική πληροφορία ήταν με τη χρήση κάμερας και μικροφώνου, σήμερα το μεγαλύτερο μέρος της πληροφορίας αυτής παράγεται από ηλεκτρονικούς υπολογιστές.

Το MPEG-4 αποτελεί το τρέχον πρότυπο περιγραφής και κωδικοποίησης εφαρμογών πολυμέσων προσφέροντας πολλές νέες δυνατότητες. Αναμένεται να είναι το μελλοντικό πρότυπο εφαρμογών πολυμέσων. Για να είναι δυνατή όμως η χρησιμοποίηση και η αξιοποίηση των δυνατοτήτων αυτών απαιτούνται αλγόριθμοι που δεν περιλαμβάνονται στο πρότυπο. Ο στόχος του προτύπου MPEG-4 είναι η επίτευξη ρυθμών δεδομένων της τάξης των 5 έως 64 Kbps για κινητές εφαρμογές και μέχρι 4 Mbps για τηλεοπτικές εφαρμογές. Η φιλοσοφία του MPEG-4 βασίζεται στην ιδέα του τεμαχισμού της οπτικοακουστικής πληροφορίας σε οπτικοακουστικά αντικείμενα (AVOs –Audio Visual Objects) τα οποία μπορούν να πολυπλεχθούν και να μεταδοθούν μέσω ετερογενών δικτύων. Το πρότυπο MPEG-4, δε, ένα σύνολο δυνατοτήτων που το κάνει πολύ ελκυστικό για χρήση σε εφαρμογές πολυμέσων.

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β. ΠΟΛΥΣΥΧΝΟΤΙΚΑ (Multi – Frequency Networks - MFNs) ΚΑΙ ΜΟΝΟΣΥΧΝΟΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ (Single Frequency Networks - SFNs)**

### **Β.1. Πολυσυχνοτικά Δίκτυα (Multi Frequency Networks - MFN)**

Προκειμένου να καλύψουν την περιοχή ενδιαφέροντός τους, τα συμβατικά – αναλογικά – δίκτυα ευρυεκπομπής χρησιμοποιούν πολλούς πομπούς με διαφορετικές συχνότητες. Τα δίκτυα αυτά αναφέρονται ως δίκτυα πολλών συχνοτήτων (Multi-Frequency Networks – MFN). Για την εγκατάσταση ενός τέτοιου δικτύου και αφού γίνουν οι αρχικές μελέτες ραδιοκάλυψης, επιλέγονται οι κατάλληλες θέσεις για την εγκατάσταση των σταθμών εκπομπής, με στόχο να εξασφαλίζεται η όσο το δυνατό καλύτερη κάλυψη της περιοχής ενδιαφέροντος. Στο πλαίσιο της MFN λειτουργίας, γειτονικοί σταθμοί εκπέμπουν σε διαφορετικές συχνότητες, ώστε σε κοινές περιοχές κάλυψης να μην προκαλούνται παρεμβολές. Απαιτείται, λοιπόν, μελέτη για την ορθή αξιοποίηση του ραδιοφάσματος, ώστε οι συχνότητες που χρησιμοποιεί ο σταθμός εκπομπής κάθε δικτύου να είναι εναρμονισμένες με τις συχνότητες των σταθμών εκπομπής των άλλων δικτύων που λειτουργούν στην ίδια γεωγραφική περιοχή, αλλά και με σταθμούς του ίδιου δικτύου που λειτουργούν σε τηλεπικοινωνιακά όμορους νομούς. Αυτό καθιστά τη σχεδίαση και ανάπτυξη των MFN δικτύων μία πολύπλοκη διαδικασία, αφού προϋποθέτει από κοινού σχεδιασμό και διαχείριση συχνοτήτων για όλα τα δίκτυα που συνυπάρχουν σε μια περιοχή. Επιπλέον, προκειμένου να επεκταθεί το δίκτυο ή να βελτιωθούν οι συνθήκες λήψης του ραδιοσήματος σε περιοχές όπου υπάρχουν έντονα φαινόμενα σκίασης, απαιτείται η εγκατάσταση πρόσθετων πομπών και επανασχεδιασμός απόδοσης συχνοτήτων. Επίσης, όσον αφορά τη λήψη σήματος από κινητά τερματικά ή δέκτες προκειμένου να λαμβάνουν το ίδιο πρόγραμμα από εναλλακτικούς πομπούς του ίδιου δικτύου που, όμως, εκπέμπουν σε διαφορετική συχνότητα, οι κινούμενοι δέκτες πρέπει να επανασυντονίζονται κάθε φορά σε διαφορετική συχνότητα.



Σχήμα Β.3. Δίκτυο ευρεικομπής του οποίου οι πομποί λειτουργούν σε διαφορετικές συχνότητες.

Στο Σχήμα Β.1 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα MFN δικτύου, όπου κάθε πομπός εκπέμπει σε διαφορετική φέρουσα συχνότητα.

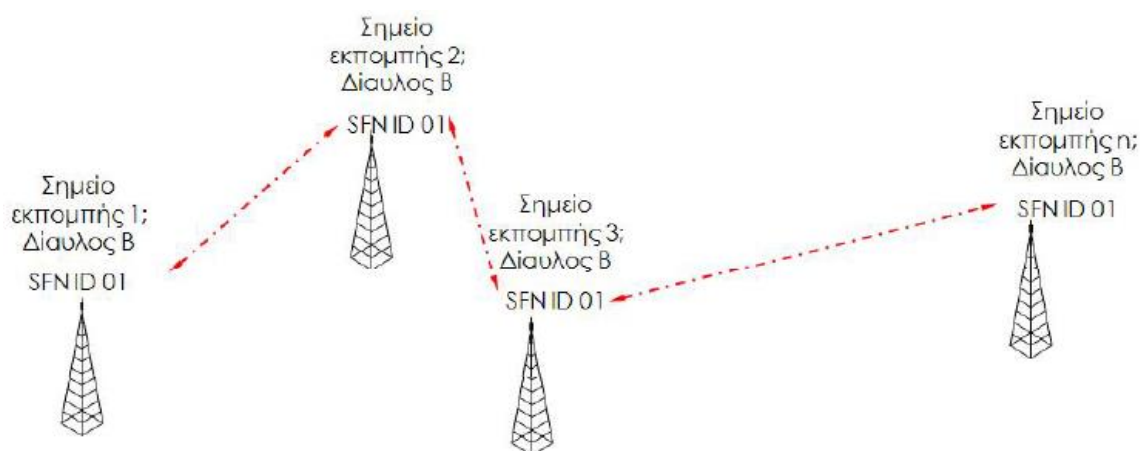
## B.2. Μονοσυχνοτικά Δίκτυα (Single Frequency Networks - SFN)

Στη σύγχρονη ψηφιακή ευρεικομπή, τα προβλήματα του από κοινού σχεδιασμού και διαχείρισης συχνοτήτων για όλα τα δίκτυα που συνυπάρχουν σε μια περιοχή αντιμετωπίζονται με τη χρήση δικτύων απλής συχνότητας (Single Frequency Networks – SFN), στα οποία όλοι οι πομποί ενός δικτύου εκπέμπουν στην ίδια φέρουσα ραδιοσυχνότητα σε όλη την περιοχή κάλυψης. Κατ’ αυτόν τον τρόπο, δεν υπάρχουν απαιτήσεις κοινού σχεδιασμού και εναρμόνισης συχνοτήτων, αφού εκχωρείται μόνο ένα κανάλι σε ένα δίκτυο για όλη την περιοχή κάλυψης, οπότε όλοι οι δέκτες εντός της περιοχής κάλυψης παραμένουν συντονισμένοι σε μία μόνο συχνότητα. Για την απρόσκοπτη λειτουργία των δικτύων αυτών επιβάλλονται συγκεκριμένες προδιαγραφές στο στρώμα δικτύου, που αντιμετωπίζονται με τη χρήση σύγχρονων τεχνικών.

Σε ένα SFN δίκτυο όλοι οι πομποί εκπέμπουν στην ίδια συχνότητα. Λόγω της πολυδιαδρομικής διάδοσης σήματα από διαφορετικούς πομπούς που εκπέμπουν το ίδιο περιεχόμενο και καταφθάνουν στην κεραία λήψης, συναποτελούν το συνολικό σήμα λήψης. Η προσέγγιση της χρήσης μονοσυχνοτικών δικτύων έχει το σχεδιαστικό πλεονέκτημα ότι χρειάζεται τα λιγότερα σε πλήθος κανάλια συχνοτήτων από οποιαδήποτε άλλη προσέγγιση, χαρακτηριστικό που την καθιστά ιδιαίτερα ελκυστική



για χώρες όπως η Ελλάδα που εμφανίζουν μεγάλο βαθμό πληρότητας του τηλεοπτικού φάσματος.



**Σχήμα B.2.** Ενδεικτικό μονοσυχνотικό δίκτυο.

Στο σχήμα B.2 απεικονίζεται ένα παράδειγμα μονοσυχνотικού δικτύου, όπου όλοι οι πομποί εκπέμπουν στην ίδια φέρουσα συχνότητα, επιτυγχάνοντας κάλυψη της ίδιας περιοχής ενδιαφέροντος με αυτή του Σχήματος B.1 με τη χρήση μόνο μίας συχνότητας.

Τα βασικά χαρακτηριστικά λειτουργίας ενός δικτύου SFN είναι:

- Η αποδοτικότητα του φάσματος
- Η μικρότερη απόσταση αναχρησιμοποίησης συχνότητας
- Η δυνατότητα επέκτασης της περιοχής κάλυψης

### **B.2.1. Αξιοποίηση φάσματος στα SFN Δίκτυα**

Η υψηλή αξιοποίηση του ραδιοφάσματος αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης SFN δικτύων σε σύγκριση με τα MFN δίκτυα. Με χρήση SFN δικτύων, ευρείες περιοχές μπορούν να εξυπηρετηθούν με χρήση ενός πολυπλέκτη σε κοινή φέρουσα συχνότητα. Τα οποιαδήποτε κενά κάλυψης που προκύπτουν στη περιοχή κάλυψης καλύπτονται εύκολα με την προσθήκη ενός πρόσθετου πομπού χωρίς την ανάγκη για νέα κανάλια. Η αποδοτικότητα φάσματος είναι ιδιαίτερα επιθυμητό χαρακτηριστικό όταν το φάσμα είναι περιορισμένο.

### ***B.2.2. Αποδοτικότητα ισχύος στα SFN Δίκτυα***

Τα SFN δίκτυα δεν είναι μόνο αποδοτικά ως προς τη συχνότητα αλλά και ως προς την αξιοποίηση της ισχύος εκπομπής. Αυτό μπορεί να γίνει αντιληπτό αν ληφθούν υπόψη οι έντονες διακυμάνσεις της ισχύος λήψης ενός οποιοδήποτε σταθμού. Όπως συμβαίνει συνήθως, προκειμένου να επιτευχθεί ικανοποιητική κάλυψη σε υψηλό γεωγραφικό ποσοστό, αυξάνεται σημαντικά η ισχύς εκπομπής. Στα SFN δίκτυα με ομοιοκατευθυντική λήψη δεν απαιτείται η αύξηση της ισχύος, καθώς στο σήμα λήψης συμβάλλουν επιμέρους σήματα που καταφθάνουν από διαφορετικούς πομπούς, οι διακυμάνσεις ισχύος των οποίων είναι ελάχιστα συσχετισμένες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η εξασθένηση του σήματος από κάποιο πομπό να αντισταθμίζεται από το σήμα λήψης από άλλο πομπό. Έτσι τα SFN δίκτυα μπορούν να χρησιμοποιούν πομπούς χαμηλής ισχύος εκπομπής. Η αποδοτικότητα ισχύος αυτή των SFN δικτύων καλείται κέρδος δικτύου (network gain) και είναι πολύ σημαντική, ιδιαίτερα στα όρια γεωγραφικής κάλυψης των πομπών.

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ. ΤΗΛΕΟΠΤΙΚΑ ΚΕΝΑ ΔΙΑΣΤΗΜΑΤΑ (TV WHITE SPACES - TVWS)**

Ο όρος White Space αναφέρεται στο μέρος του αδειοδοτημένου ραδιοφάσματος που οι δικαιούχοι του δεν το χρησιμοποιούν συνεχώς ή σε όλες τις γεωγραφικές περιοχές. Πολλές ρυθμιστικές αρχές σε όλο τον κόσμο κινούνται προς την κατεύθυνση που επιτρέπει την πρόσβαση σε αυτές τις συχνότητες χωρίς να απαιτείται αδειοδότηση, υπό την προϋπόθεση ότι οι αδειοδοτημένες, πρωτεύουσες τηλεοπτικές ή άλλου είδους, μεταδόσεις δεν επηρεάζονται αρνητικά. Επιτρέποντας την πρόσβαση στις κατά περίπτωση διαθέσιμες αυτές ζώνες συχνοτήτων, επιτυγχάνεται αποτελεσματικότερη και αποδοτικότερη χρήση του ραδιοφάσματος.

Μέρος του φάσματος που θα απελευθερωθεί από τη μετάβαση στην ψηφιακή εκπομπή τηλεόρασης μπορεί να αδειοδοτηθεί για άλλες χρήσεις, όπως για παράδειγμα στην Ελλάδα όπου τα τηλεοπτικά κανάλια 61-69 (συχνότητες 798 – 862 MHz) έχουν αποδοθεί για κινητές υπηρεσίες.

Μερικές από τις προτάσεις για τον έλεγχο της πρόσβασης στο φάσμα των TVWS, προϋποθέτουν τη χρήση των γνωστικών συστημάτων ραδιοεπικοινωνίας (cognitive radio). Ως γνωστικό δίκτυο ραδιοεπικοινωνιών (Cognitive Radio Network – CRN) καλείται ένα σύστημα ραδιοεπικοινωνιών με τερματικά που χρησιμοποιούν τεχνολογία που τους επιτρέπει να αποκτήσουν γνώση του γεωγραφικού περιβάλλοντός τους και να ρυθμίζουν τις παραμέτρους εκπομπής τους ώστε να ελαχιστοποιούν τις παρεμβολές που προκαλούν σε πρωτεύοντα δίκτυα (primary networks).

### **Γ.1. Προστασία υπαρχουσών υπηρεσιών**

Τρεις είναι οι κύριες τεχνικές που έχουν προταθεί για την υποβοήθηση των White Space Devices (WSDs) ώστε να είναι σε θέση να εντοπίζουν μη κατειλημμένα κανάλια. Αυτές είναι η ανίχνευση του φάσματος (spectrum sensing), η χρήση βάσεων

δεδομένων γεω-εντοπισμού (geo-location database) και η χρήση πομπών-φάρων (beacon transmitter).

### **Γ.1.1. Τεχνική ανίχνευσης φάσματος**

Με την τεχνική αυτή, μέσω της διεξαγωγής μετρήσεων οι WSDs προσπαθούν να ανιχνεύσουν την παρουσία πρωτεύοντων χρηστών ή υπηρεσιών σε πιθανό διαθέσιμο κανάλι. Όταν κάποιο κανάλι αναγνωριστεί ως ελεύθερο (vacant), εξετάζονται τα γειτονικά του για πιθανούς περιορισμούς στην ισχύ εκπομπής. Δεδομένου ότι ορισμένες παθητικές υπηρεσίες (π.χ. Ραδιοαστρονομία, που καταλαμβάνει τη ζώνη 608-614 MHz), δεν είναι δυνατόν να προστατευθούν κατ' αυτό τον τρόπο, συγκεκριμένα κανάλια πρέπει να εξαιρεθούν μόνιμα από την απόδοση σε WSDs.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της ανίχνευσης φάσματος είναι ότι δεν βασίζεται σε ήδη υπάρχουσα υποδομή (π.χ. βάση δεδομένων). Ένα σημαντικό μειονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι ότι, αν υιοθετηθούν πολύ αυστηρά (χαμηλά) κατώφλια ανίχνευσης θα υπάρξει μείωση των διαθέσιμων καναλιών. Επίσης, στην περίπτωση όπου ανιχνευθεί ελεύθερο κανάλι και αφού η WSD ξεκινήσει τη λειτουργία της, πρέπει ανά τακτά χρονικά διαστήματα να γίνεται επανέλεγχος του φάσματος για να διασφαλισθεί ότι αυτό παραμένει ελεύθερο.

### **Γ.1.2. Τεχνική με χρήση Βάσης Δεδομένων**

Με αυτή την προσέγγιση, οι WSDs προσδιορίζουν τη θέση τους λαμβάνοντας υπόψη μια βάση δεδομένων γεωεντοπισμού και αποφασίζουν ποιες συχνότητες μπορούν να χρησιμοποιήσουν. Κρίσιμες παράμετροι για αυτό είναι η ακρίβεια προσδιορισμού της θέσης και η συχνότητα ερωτήσεων προς τη βάση δεδομένων. Για τη λειτουργία της τεχνικής αυτής, πριν επιτραπεί η χρήση ενός ελεύθερου καναλιού, όπως π.χ. ενός TVWS είναι απαραίτητη η πρόσβαση, με κάποιο τρόπο, στη βάση δεδομένων, προτού.

### Γ.1.3. Τεχνική με χρήση Σήματος Φάρου

Η τεχνική αυτή αναφέρεται στην αποστολή από φάρους ειδικών σημάτων φάρων (beacons) που χρησιμοποιούνται για να υποδείξουν ποια κανάλια είναι ήδη κατειλημμένα από πρωτεύουσες ή άλλες υπηρεσίες και ποια είναι ελεύθερα. Συνήθως, η μέθοδος αυτή δεν χρησιμοποιείται αυτοτελώς, αλλά για την υποβοήθηση της τεχνικής ανίχνευσης φάσματος, αυξάνοντας όμως το κόστος των αντίστοιχων συστημάτων.

### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΩΝ

[1] Federal Communications Commission, "Second Report and Order and Memorandum Opinion and Order in the Matter of Unlicensed Operation in the TV Broadcast Bands, Additional Spectrum for Unlicensed Devices Below 900 MHz and in the 3 GHz Band", Docket Number 08-260, November 14, 2008.

[2] Murty, R.; Chandra, R.; Moscibroda, T.; Bahl, P., "SenseLess: A database-driven white spaces network," *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN), 2011 IEEE Symposium on* , vol., no., pp.10,21, 3-6 May 2011

[3] Morris, O.J., "MPEG-2: where did it come from and what is it?," *MPEG-2 - What it is and What it isn't, IEE Colloquium on* , vol., no., pp.1/1,1/5, 24 Jan 1995



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΩΝ

1. Nikolaos C. Kapsalis, Panayotis G. Cottis, "Dynamic Channel Allocation to Interfered Cellular Networks", *Wireless Personal Communications* (2014) 78:193–213
2. Kapsalis, Nikolaos C., and Panayotis G. Cottis. "Channel Allocation to Multiservice Wireless Networks: A Collocation—Based Approach to Enhance Spectrum Utilization." *Wireless Personal Communications* 74.2 (2014): 359-371.
3. T.-H. Velivasaki, S.-D. J. Kakarakis, N. Kapsalis and C. Capsalis, "Metaheuristic Channel Assignment in DVB-T Networks in Conformity with Digital Dividend Requirements," *Wireless Personal Communications*, Volume 70, Issue 2 , pp 709-730, 2013
4. N. C. Kapsalis, S.-D. J. Kakarakis, and C. N. Capsalis, "Prediction of multiple magnetic dipole model parameters from near field measurements employing stochastic algorithms," *Progress In Electromagnetics Research Letters*, Vol. 34, 111-122, 2012.
5. Kakarakis, S.J.; Kapsalis, N.C.; Capsalis, C.N., "A Semianalytical Heuristic Approach for Prediction of Eut's Multiple Dipole Model by Reducing the Number of Heuristics," *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on* , vol.PP, no.99, pp.1,6
6. S. Spantideas, N. C. Kapsalis, S.-D. J. Kakarakis, and C. N. Capsalis, "," *Progress In Electromagnetics Research M*, Vol. 39, 161-170, 2014

## ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΙΔΑΚΤΟΡΑ

Ο Υποψήφιος Διδάκτωρ Νικόλαος Χ. Καψάλης γεννήθηκε στην Αθήνα το 1985, σπούδασε στο Τμήμα Πληροφορικής του Οικονομικού Πανεπιστημίου Αθηνών από όπου και αποφοίτησε το 2008.

Με απόφαση της Γενικής Συνέλευσης της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π. (10/2008), ο κ. Ν. Καψάλης έγινε δεκτός στο Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών του Ε.Μ.Π. (εγγραφή 10/2008) προς απόκτηση Διδακτορικού Διπλώματος στη θεματική περιοχή «Μελέτη και Κοστολόγηση Ραδιοπórων». Τον Ιούλιο του 2015 εξετάστηκε επιτυχώς από την επταμελή επιτροπή και το Σεπτέμβριο του 2015 ανακηρύχθηκε Διδάκτωρ του ΕΜΠ. Στο πλαίσιο του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών παρακολούθησε επιτυχώς έξι μεταπτυχιακά και τέσσερα προπτυχιακά μαθήματα. Το 2009 έγινε δεκτός στο Διατμηματικό Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα «Τεχνοοικονομικά Συστήματα» από όπου και αποφοίτησε το 2011.

Ο κ. Ν. Καψάλης έλαβε Βραβεία του «Θωμαΐδείου» κληροδοτήματος για δημοσίευση σε διεθνές επιστημονικό συνέδριο το 2011 και για δημοσιεύσεις σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά το 2012 και το 2013. Έχει διατελέσει κριτής στα έγκριτα επιστημονικά περιοδικά PIER (Progress in Electromagnetics Research), IEEE Transactions on Wireless Communications, το Engineering Optimization (Taylor and Francis), το EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking και IET Communications.

Τα ερευνητικά του ενδιαφέροντα συγκαταλέγονται στους ακόλουθους τομείς:

- Δυναμική Απόδοση Πórων
- Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα
- Ψηφιακό Μέρισμα
- Στοχαστικοί Αλγόριθμοι Βελτιστοποίησης