



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

**Επίδοση τεχνικών μετάδοσης και ανάθεσης ραδιοπόρων σε
ευρυζωνικά δίκτυα τέταρτης γενιάς**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Ν. Χορτομάνης

Επιβλέπουσα : Δήμητρα-Θεοδώρα Κακλαμάνη
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2018



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

**Επίδοση τεχνικών μετάδοσης και ανάθεσης ραδιοπόρων σε
ευρυζωνικά δίκτυα τέταρτης γενιάς**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Ν. Χορτομάνης

Επιβλέπουσα : Δήμητρα-Θεοδώρα Κακλαμάνη
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 9^η Νοεμβρίου 2018.

.....
Δήμητρα-Θεοδώρα Κακλαμάνη
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....
Ιάκωβος Βενιέρης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Νικόλαος Ουζούνογλου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2018

.....
Ιωάννης Ν. Χορτομάνης

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

Copyright © Ιωάννης Χορτομάνης, 2018.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία επιχειρήθηκε προσομοίωση ασύρματου συστήματος επικοινωνίας με χρήση της τεχνικής πολλαπλής πρόσβασης Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) καθώς και κεραιοσυστημάτων πολλαπλής εισόδου – πολλαπλής εξόδου (Multiple Input – Multiple Output, MIMO). Οι τεχνικές αυτές τυγχάνουν ευρείας χρήσης, και μεταξύ άλλων έχουν υιοθετηθεί στα πρότυπα κινητής τηλεφωνίας τέταρτης γενιάς LTE και LTE Advanced.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη ανασκόπηση της εξέλιξης των κινητών επικοινωνιών, αρχίζοντας από την πρώτη γενιά (1G) και καταλήγοντας στην επερχόμενη πέμπτη γενιά (5G). Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται συνοπτικά το φυσικό υπόβαθρο του ασύρματου διαύλου, με επεξήγηση των φαινομένων που άπτονται των απωλειών διάδοσης, της σκίασης, των διαλείψεων και των παρεμβολών. Στο τρίτο κεφάλαιο παρατίθενται οι τρόποι διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται στις σύγχρονες ψηφιακές επικοινωνίες καθώς και σύντομη συγκριτική ανάλυση των κύριων τεχνικών πολλαπλής πρόσβασης στο ασύρματο σύστημα (FDMA, TDMA, CDMA, SDMA και OFDMA). Στο επόμενο (τέταρτο) κεφάλαιο αναλύονται τα συστήματα MIMO και η χρήση τους στα σύγχρονα κυψελωτά συστήματα.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναλύεται ο τρόπος δόμησης και η λειτουργία του προσομοιωτή. Γίνεται λεπτομερής επεξήγηση όλων των επιμέρους συναρτήσεων που υλοποιήθηκαν καθώς και του κυρίου σώματος του αλγορίθμου προσομοίωσης που τις χρησιμοποιεί. Επίσης αναλύονται οι παράμετροι της προσομοίωσης και παρατίθενται απεικονίσεις της τοπολογίας του κυψελωτού συστήματος μετά την χρήση των περισσότερων συναρτήσεων. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την περιγραφή εναλλακτικών τρόπων διαχείρισης πόρων, πέραν του βασικού που περιγράφηκε με τις προηγούμενες συναρτήσεις.

Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο παρατίθενται όλα τα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά από εκτεταμένη εκτέλεση μεγάλου αριθμού προσομοιώσεων με χρήση διαφορετικών τιμών παραμέτρων καθώς και διαφορετικών τεχνικών διαχείρισης των πόρων του συστήματος. Παρατίθενται αποτελέσματα για μετρικές που έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, όπως η χωρητικότητα του συστήματος σε αριθμό χρηστών, η ρυθμαπόδοση του συστήματος, η ισχύς φερόντων ανά χρήστη, η συνολική ισχύς του συστήματος και η ενεργειακή αποδοτικότητα. Ξεχωριστή σημασία δίνεται στην επεξήγηση των αποτελεσμάτων βάσει του τρόπου λειτουργίας του συστήματος και στην επιλογή των βέλτιστων λύσεων ανάλογα με τις χρησιμοποιούμενες παραμέτρους.

Λέξεις – Κλειδιά: Κυψελωτά Δίκτυα, Δίκτυα 4ης Γενιάς, 4G, Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Συχνότητας, OFDMA, Πολυπλεξία Ορθογωνικής Διαίρεσης Συχνότητας, OFDM, Συστήματα Πολλαπλών Εισόδων/Εξόδων, MIMO, Έλεγχος Ισχύος, Προσαρμοστική Διαμόρφωση, ACM

Abstract

In this work, a simulation of a wireless communication system using the Orthogonal Frequency Division Multiple Access Technique (OFDMA) and Multiple Input (Multiple Output) MIMO systems has been attempted. These techniques are widely used, as among others they have been adopted in fourth-generation LTE and LTE Advanced mobile phone standards.

The first chapter provides a brief overview of the evolution of mobile communications, starting with the first generation (1G) and ending with the upcoming fifth generation (5G). The second chapter summarizes the natural background of the wireless channel, explaining the phenomena of propagation, shadowing, fading and interference. In the third chapter are presented the modulation types used in modern digital communications as well as a short comparative analysis of the main multiple access techniques in the wireless system (FDMA, TDMA, CDMA, SDMA and OFDMA). In the next (fourth) chapter we analyze the MIMO systems and their use in modern cellular systems.

In the fifth chapter we analyze the structure and the functionality of the mimo/ofdma simulator. A detailed explanation of all the individual functions implemented as well as the main body of the simulation algorithm is used. In this chapter we also analyze the simulation parameters and display the topology of the cellular system after using most of the functions. The chapter concludes with the description of alternative resource allocation methods beyond the baseline described with the previous functions.

Finally, the sixth chapter lists all the results that resulted from the extensive execution of a large number of simulations using different parameter values as well as different resource allocation techniques. Results are shown for metrics of particular interest, such as system capacity in number of users, system data rate, user power, total system power, and energy efficiency. Of particular importance is the explanation of results based on the mode of operation of the system and the choice of optimal solutions depending on the parameters used.

Keywords: Cellular Networks, 4th Generation Networks, 4G, Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA, Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM, Multiple Input Multiple Output Systems, MIMO, Power Control, Adaptive Modulation, ACM

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2017-18 στη σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω να εκφράσω προς την Καθηγήτρια κα Δήμητρα-Θεοδώρα Κακλαμάνη για την ανάθεση σε εμένα αυτού του ιδιαίτερα ενδιαφέροντος θέματος διπλωματικής εργασίας καθώς και για την έμπρακτη εμπιστοσύνη της στο πρόσωπό μου.

Εξαιρετικά σημαντικός παράγοντας στην επιτυχή περάτωση της παρούσας εργασίας υπήρξε ο Διδάκτορας και Ερευνητής Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών κος Παναγιώτης Γκόνης, τον οποίον ευχαριστώ θερμότατα για την άψογη καθοδήγησή του, τον χρόνο που διέθεσε καθώς και την υπομονή του.

Ευχαριστώ επίσης την οικογένειά μου και τους φίλους μου για την βοήθεια που έλαβα από αυτούς καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Abstract	7
Ευχαριστίες	9
Περιεχόμενα	11
1. Ιστορική αναδρομή δικτύων κινητής τηλεφωνίας	15
1.1 Δίκτυα πρώτης γενιάς (1G)	15
1.2 Δίκτυα δεύτερης γενιάς (2G)	15
1.3 Δίκτυα τρίτης γενιάς (3G)	16
1.4 Δίκτυα τέταρτης γενιάς (4G)	17
1.6 Δίκτυα πέμπτης γενιάς (5G)	20
2. Ο ασύρματος διάυλος	23
2.1 Φαινόμενα διάδοσης	23
2.2 Απώλειες διαδρομής	24
2.2.1 Απώλειες Διαδρομής για διάδοση στον Ελεύθερο Χώρο	25
2.2.2 Μοντέλο διάδοσης COST-231 Hata	25
2.3 Σκίαση	26
2.4 Διαλείψεις	27
2.4.1 Μετατόπιση Doppler	28
2.4.2 Διασπορά Καθυστέρησης	28
2.4.3 Εύρος Ζώνης Συνοχής	29
2.4.4 Διασπορά Doppler και χρόνος συνοχής	29
2.4.5 Ταξινόμηση Διαύλων με Διαλείψεις	30
2.5 Παρεμβολές	32
2.5.1 Ομοδιαυλικές παρεμβολές	32
2.5.2 Παρεμβολή γειτονικού διαύλου (διακαναλική παρεμβολή)	33
2.5.3 Διασυμβολική παρεμβολή	33

2.6 Θόρυβος	34
3. Τεχνικές Διαμόρφωσης και Πολλαπλής Πρόσβασης	36
3.1 Τεχνικές Διαμόρφωσης	36
3.1.1 Διαμόρφωση ASK (Amplitude Shift Keying).	36
3.1.2 Διαμόρφωση FSK (Frequency Shift Keying).	37
3.1.3 Διαμόρφωση PSK (Phase Shift Keying)	37
3.1.4 Διαμόρφωση M-QAM (M-Quadrature Amplitude Modulation).	39
3.1.5 Διαμόρφωση MAPSK (M-Quadrature Amplitude Modulation)	40
3.1.6 Διαμορφώσεις MSK (Minimum Shift Keying) και GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying).	42
3.1.7 Διαμόρφωση OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)	44
3.2 Τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης	49
3.2.1 Τεχνική FDMA	49
3.2.2 Τεχνική TDMA	50
3.2.3 Τεχνική CDMA.	51
3.2.4 Τεχνική SDMA.	52
3.2.5 Τεχνική OFDMA.	54
4. Συστήματα κεραιών Πολλαπλής Εισόδου – Πολλαπλής Εξόδου (MIMO systems)	57
4.1 Εισαγωγή.	57
4.2 Τεχνικές υλοποίησης των συστημάτων MIMO.	57
4.3 Αρχή λειτουργίας των συστημάτων MIMO	58
4.3.1 Πίνακας H για χωρικά ανεξάρτητα κανάλια.	59
5. Προσομοίωση Κυψελωτού Συστήματος MIMO – OFDMA	57
5.1 Επισκόπηση Βασικών Παραμέτρων.	61
5.2 Περιγραφή επιμέρους αλγορίθμων και συναρτήσεων	63
5.2.1 Δημιουργία εξαγωνικής κυψέλης.	63
5.2.2 Δημιουργία τοπολογίας εξαγωνικών κυψελών	66

5.2.3 Γεωγραφική εισαγωγή χρήστη στο σύστημα.	69
5.2.4 Εύρεση τομέα εξυπηρέτησης χρήστη και πίνακα «επιπλέον» απωλειών.	72
5.2.5 Ανάθεση φερόντων.	75
5.2.6 Προσδιορισμός στοιχείων MIMO.	78
5.2.7 Υπολογισμός ισχύος εκπομπής φερόντων	79
5.2.8 Έλεγχος υπερβάσεων ισχύος.	82
5.2.9 Κύριο σώμα αλγόριθμου	85
5.3 Εναλλακτικά σενάρια ανάθεσης πόρων	89
5.3.1 Αλλαγή της διαμόρφωσης των φερόντων.	89
5.3.2 Ανάθεση των φερόντων ανά BS (και όχι ανά τομέα).	92
5.3.3 Απόδοση φερόντων και αλλαγή διαμόρφωσης συναρτήσει της απόστασης χρήστη – BS εξυπηρέτησης.	92
5.3.4 Ανάθεση φερόντων και αλλαγή διαμόρφωσης με γνώση του καναλιού.	94
6. Αποτελέσματα προσομοίωσης – παρουσίαση και ανάλυση	96
6.1 Σύγκριση του αριθμού αποδεκτών χρηστών συναρτήσει επιτρεπόμενης πιθανότητας αποκλεισμού και αριθμού φερόντων ανά χρήστη	96
6.2 Σύγκριση της ρυθμαπόδοσης για ανάθεση φερόντων ανά BS και ανά τομέα.	98
6.3 Σύγκριση των τεχνικών χωρίς γνώση του καναλιού	99
6.4 Προσθήκη του σεναρίου με γνώση του καναλιού	103
6.5 Ισχύς φερόντων ανά χρήστη	106
6.6 Συνολική ισχύς συστήματος	108
6.7 Ενεργειακή αποδοτικότητα.	110
6.8 Μέση ρυθμαπόδοση ανά χρήστη.	111
6.7 Ενεργειακή αποδοτικότητα.	110
Βιβλιογραφία	115

1. Ιστορική αναδρομή δικτύων κινητής τηλεφωνίας

1.1 Δίκτυα πρώτης γενιάς (1G)

Τα κινητά τηλεπικοινωνιακά συστήματα εμφανίστηκαν για πρώτη φορά στα τέλη της δεκαετίας του '70. Στην επονομαζόμενη και πρώτη τους γενιά (1G) χρησιμοποιήθηκαν τεχνικές αναλογικών επικοινωνιών, οι οποίες ήταν παρόμοιες με αυτές που χρησιμοποιούνται στην αναλογική ραδιοφωνία. Οι χρησιμοποιούμενες κυψέλες ήταν μεγάλων διαστάσεων και τα συστήματα δεν χρησιμοποιούσαν αποτελεσματικά το διαθέσιμο φάσμα ραδιοσυχνοτήτων, οπότε η χωρητικότητά τους ήταν πολύ μικρή με τα σημερινά δεδομένα. Οι κινητές συσκευές (τερματικά χρηστών) ήταν μεγάλες και ακριβές και χρησιμοποιούνταν σχεδόν αποκλειστικά από επιχειρηματίες [1].

Το πρώτο κυψελωτό σύστημα που λειτούργησε παγκοσμίως δημιουργήθηκε από την ιαπωνική εταιρεία *Nippon Telephone and Telegraph (NTT)* το 1979 στην μητροπολιτική περιοχή του Τόκιο. Το σύστημα χρησιμοποιούσε 600 αμφίδρομους διαύλους επικοινωνίας διαμορφωμένους κατά συχνότητα. Οι δίαυλοι είχαν εύρος 25 kHz ο καθένας και το χρησιμοποιούμενο φάσμα ήταν στο διάστημα των 925 – 940 και των 870 – 885 MHz. Δύο χρόνια αργότερα (1981), η σουηδική εταιρεία *Ericsson* ανέπτυξε το πρώτο κυψελωτό σύστημα με ονομασία *Nordic Mobile Telephone 450*, το οποίο μετεξελίχθηκε το 1986 στο *Nordic Mobile Telephone 900* στις ζώνες συχνοτήτων των 890-915 και των 917-950 MHz. Το πρώτο κυψελωτό σύστημα που δημιουργήθηκε στις ΗΠΑ ονομάστηκε *Advanced Mobile Phone Service (AMPS)* και δημιουργήθηκε από την *AT&T* στο Σικάγο. Το συγκεκριμένο σύστημα εξέπεμπε στις ζώνες των 824-849 και των 869-894 MHz και διέθετε 832 αμφίδρομα κανάλια εύρους ζώνης 30 kHz.

Τα παραπάνω συστήματα αποτελούν τα πιο γνωστά κυψελωτά δίκτυα πρώτης γενιάς. Χρησιμοποιούν διαμόρφωση συχνότητας (FM) και για την πολλαπλή πρόσβαση των χρηστών και την αμφιδρόμηση των καναλιών την τεχνική *Frequency Division Duplexing (FDD)*. Στα προαναφερθέντα συστήματα η απόσταση των φερόντων άνω και κάτω ζεύξης είναι της τάξης των 45 MHz ώστε οι πομποδέκτες να μπορούν να διακρίνουν και να απομονώνουν τις συχνότητες.

Με την πάροδο του χρόνου άρχισε να γίνεται εμφανής η αδυναμία των αναλογικών κυψελωτών συστημάτων να ανταπεξέλθουν στις ανάγκες της αγοράς λόγω της χαμηλής χωρητικότητας που παρουσίαζαν, του υψηλού κόστους των τερματικών και της υποδομής των δικτύων, της ασυμβατότητας μεταξύ των διαφόρων αναλογικών δικτύων αλλά και της αντίληψης των χρηστών ότι η χρησιμότητά τους ήταν περιορισμένη [2].

1.2 Δίκτυα δεύτερης γενιάς (2G)

Οι κινητές τηλεπικοινωνίες έγιναν καταναλωτικό προϊόν ευρείας χρήσης με την εισαγωγή των συστημάτων δεύτερης γενιάς (2G) στις αρχές της δεκαετίας του 1990. Τα συστήματα αυτά ήταν τα πρώτα που χρησιμοποίησαν την ψηφιακή τεχνολογία, η οποία επέτρεψε την αποτελεσματικότερη χρήση του ραδιοφάσματος και την κατασκευή μικρότερων, φθηνότερων συσκευών. Αρχικά σχεδιάστηκαν μόνο για φωνή, αλλά στη συνέχεια μετατράπηκαν για να υποστηρίξουν άμεσα μηνύματα μέσω της υπηρεσίας *ShortMessage (SMS)*. Το πιο δημοφιλές σύστημα 2G ήταν το

Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Επικοινωνιών (GSM), το οποίο σχεδιάστηκε αρχικά ως πανευρωπαϊκή τεχνολογία, αλλά αργότερα έγινε δημοφιλές σε όλο τον κόσμο. Επίσης αξιοσημείωτο ήταν το σύστημα IS-95, γνωστό και ως *cdmaOne*, το οποίο σχεδιάστηκε από την *Qualcomm* και έγινε το κυρίαρχο σύστημα 2G στις Ηνωμένες Πολιτείες [3].

Το GSM λειτουργεί με βάση την τεχνολογία πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση χρόνου (TDMA). Στο TDMA, ένα κανάλι επικοινωνίας στενής ζώνης υποδιαιρείται σε έναν αριθμό χρονικών θυρίδων (time slots) και οι πολλαπλοί χρήστες μοιράζονται το φάσμα ραδιοσυχνοτήτων στις χρονικές θυρίδες που τους έχουν διατεθεί. Όσον αφορά τους ρυθμούς δεδομένων, τα συστήματα GSM υποστηρίζουν φωνητικές υπηρεσίες μέχρι 13 kbps και υπηρεσίες δεδομένων μέχρι 9,6 kbps.

Η επιτυχία των συστημάτων επικοινωνίας 2G ήρθε ταυτόχρονα με την πρόωπη ανάπτυξη του Διαδικτύου. Ήταν φυσιολογικό για τους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων να φέρουν μαζί τις δύο έννοιες, επιτρέποντας στους χρήστες να κάνουν λήψη δεδομένων σε κινητές συσκευές. Για να γίνει αυτό, τα αποκαλούμενα συστήματα 2.5G βασίστηκαν σε αρχικές ιδέες από το 2G, εισάγοντας στο δίκτυο την τεχνολογία μεταγωγής πακέτων και τροποποιώντας την ασύρματη διεπαφή έτσι ώστε να μπορεί να χειρίζεται και δεδομένα εκτός από φωνή. Η *Ασύρματη Υπηρεσία Γενικού Πακέτου (GPRS)* ενσωμάτωσε αυτές τις τεχνικές στο GSM, ενώ το *IS-95* εξελίχθηκε σε ένα σύστημα γνωστό ως *IS-95B*.

Τα περισσότερα δίκτυα GSM λειτουργούν στις ζώνες των 900 MHz ή των 1800 MHz. Στις περιπτώσεις που οι ζώνες αυτές είχαν ήδη αποδοθεί για άλλες χρήσεις, χρησιμοποιήθηκαν στην θέση τους οι ζώνες των 850 MHz και των 1900 MHz (για παράδειγμα στον Καναδά και στις Ηνωμένες Πολιτείες). Σε ελάχιστες χώρες εκχωρήθηκαν οι ζώνες συχνοτήτων των 400 και των 450 MHz επειδή χρησιμοποιούνταν προηγουμένως για συστήματα πρώτης γενιάς.

1.3 Δίκτυα τρίτης γενιάς (3G)

Όμως ο όγκος των δεδομένων που διακινούνταν μέσω του Διαδικτύου συνέχιζε να αυξάνεται. Προς την κατεύθυνση αυτή, οι σχεδιαστές βελτίωσαν πρώτα την απόδοση των συστημάτων 2G χρησιμοποιώντας τεχνικές όπως τον *Ενισχυμένο Ρυθμό Δεδομένων για την Εξέλιξη του GSM (EDGE)* και στη συνέχεια παρουσιάζοντας ισχυρότερα τρίτης γενιάς (3G) συστήματα μετά το 2000. Τα συστήματα 3G χρησιμοποιούν διαφορετικές τεχνικές για την ασύρματη μετάδοση και λήψη από τους 2G προκατόχους τους, γεγονός που αυξάνει τους μέγιστους ρυθμούς δεδομένων που μπορούν να επιτευχθούν και κάνουν πιο αποτελεσματική χρήση του διαθέσιμου ραδιοφάσματος.

Ο *3GPP (Σχέδιο Σύμπραξης Τρίτης Γενιάς)* είναι ο οργανισμός τυποποίησης που διαχειριζόταν αρχικά το ευρωπαϊκό πρότυπο κινητής τηλεφωνίας και αργότερα εξελίχθηκε σε παγκόσμιο οργανισμό τυποποίησης. Είναι υπεύθυνος για τη θέσπιση τεχνικών προδιαγραφών για τα κινητά συστήματα από το 3G και μετά. Το 1997, ο 3GPP άρχισε να εργάζεται σε μια προσπάθεια τυποποίησης για την επίτευξη των στόχων που καθορίστηκαν από το έργο *IMT-2000* της *ITU (Διεθνής Τηλεπικοινωνιακή Ένωση)*. Ο στόχος αυτού του έργου ήταν η μετάβαση από την βασισμένη στο TDMA τεχνολογία του 2G/GSM σε βασισμένη στο CDMA

τεχνολογία 3G ευρείας ζώνης η οποία ονομάστηκε *Παγκόσμιο Σύστημα Κινητής Τηλεπικοινωνίας (UMTS)*.

Η εμφάνιση του UMTS ήταν μια σημαντική αλλαγή στις κινητές επικοινωνίες την εποχή εκείνη. Τυποποιήθηκε το 2001 με την Έκδοση 4 του Προτύπου 3GPP. Το σύστημα UMTS μπορεί να επιτύχει ρυθμό δεδομένων μέγιστης ταχύτητας 1,92 Mbps στην κατερχόμενη ζεύξη. Μια αναβάθμιση του UMTS, το σύστημα *Πρόσβαση Πακέτων Υψηλής Ταχύτητας Κατερχόμενης Ζεύξης (HSDPA)* τυποποιήθηκε το 2002 ως Έκδοση 5 του 3GPP. Ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων που προσφέρει αυτό το πρότυπο είναι 14,4 Mbps το οποίο κατέστη δυνατό με την εισαγωγή ταχύτερης χρονοδρομολόγησης χρησιμοποιώντας μικρότερα υποπλάισια και διαμόρφωση 16QAM.

Το σύστημα *Πρόσβαση Πακέτων Υψηλής Ταχύτητας Ανερχόμενης Ζεύξης (HSUPA)* τυποποιήθηκε το 2004 ως Έκδοση 6, με μέγιστο ρυθμό μετάδοσης της τάξης των 5,76 Mbps. Και τα δύο αυτά πρότυπα, γνωστά ως *HSPA (Πρόσβαση Πακέτων Υψηλής Ταχύτητας)* αναβαθμίστηκαν στην συνέχεια στην Έκδοση 7 του προτύπου 3GPP γνωστό ως *HSPA+ ή MIMO (Πολλαπλής Εισόδου – Πολλαπλής Εξόδου) HSDPA*. Ο ρυθμός μετάδοσης του προτύπου HSPA+ φτάνει έως και 84 Mbps και ήταν το πρώτο πρότυπο κινητών επικοινωνιών που εισήγαγε τεχνική 2×2 MIMO και την χρήση του υψηλότερης τάξης σχήματος διαμόρφωσης 64QAM. Κάποιες προηγμένες λειτουργίες που εισήχθησαν αρχικά ως μέρος των προτύπων 3G της Βόρειας Αμερικής ενσωματώθηκαν επίσης στα HSPA και HSPA+. Αυτά τα χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση, υβριδική αυτόματη αίτηση επανάληψης (HARQ), κωδικοποίηση τούρμπο και ταχύτερη χρονοδρομολόγηση.

Τα περισσότερα δίκτυα 3G στην Ευρώπη λειτουργούν στη ζώνη συχνοτήτων των 2100 MHz.

1.4 Δίκτυα τέταρτης γενιάς (4G)

Το πρότυπο *Long Term Evolution (LTE)* (υποψήφιο σύστημα 4G) προτάθηκε από την ιαπωνική *NTT DoCoMo* και κατόπιν υιοθετήθηκε ως παγκόσμιο πρότυπο, το οποίο οριστικοποιήθηκε τον Δεκέμβριο του 2008. Η πρώτη του έκδοση τέθηκε σε εμπορική λειτουργία τον Δεκέμβριο του 2009 στο Όσλο και τη Στοκχόλμη. Ωστόσο, όπως θα εξηγηθεί είναι αμφισβητήσιμο το αν η πρώτη αυτή έκδοση του προτύπου θα πρέπει να θεωρηθεί ως 4G σύστημα, αν και οι πάροχοι κινητών επικοινωνιών το διαφήμισαν ως τέτοιο. Το πρότυπο εν γένει προσφέρει μεγαλύτερο εύρος ζώνης και υποστηρίζει περισσότερες υπηρεσίες σε σχέση με όλα τα προϋπάρχοντα. Σε αντίθεση με τις προηγούμενες γενιές, ένα σύστημα 4G δεν υποστηρίζει την παραδοσιακή υπηρεσία τηλεφωνίας με κυκλώματα μεταγωγής, αλλά επικοινωνία βασισμένη στο IP πρωτόκολλο του Internet, όπως η IP τηλεφωνία. Το LTE προσέφερε μεγαλύτερη ασφάλεια και υψηλότερες ταχύτητες ροής δεδομένων (μέχρι 300 Mbps στην κάτω και 75 Mbps στην άνω ζεύξη, βασίζεται στην τεχνική πολλαπλής πρόσβασης με ορθογωνική διαίρεση συχνότητας (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA*) και υιοθετεί τεχνολογίες κεραιοσυστημάτων πολλαπλής εισόδου – πολλαπλής εξόδου (*Multiple Input – Multiple Output, MIMO*)).

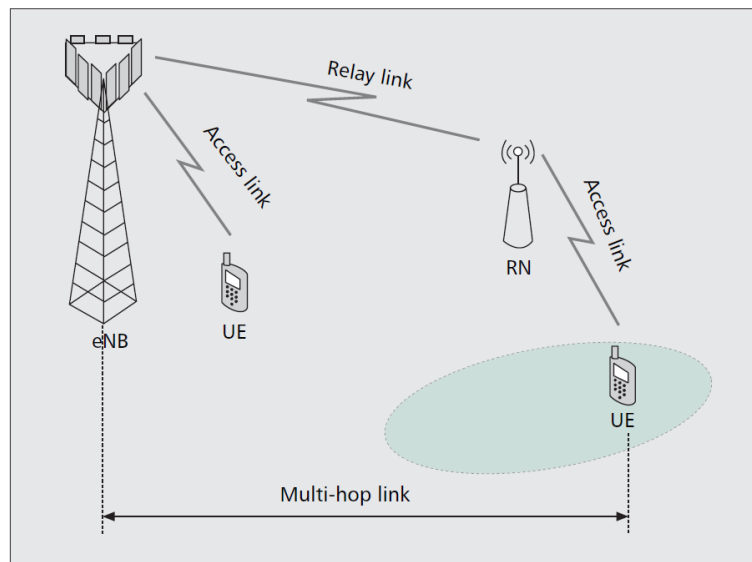
Τα κυριότερα δίκτυα που αναπτύχθηκαν για εμπορική εκμετάλλευση με σκοπό να καλύψουν τις προϋποθέσεις ονόματι *IMT Advanced* [6] που θέτει η ITU για τα δίκτυα

τέταρτης γενιάς είναι το προαναφερθέν *LTE (Long Term Evolution)* και το *WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access)*. Παρ'όλα αυτά η πρώτη έκδοση τόσο του LTE όσο και του WiMAX δεν κατάφεραν να εκπληρώσουν το σκοπό τους, αφού αδυνατούσαν να επιτύχουν τις προδιαγραφές που είχε θέσει η ITU για τα 4G συστήματα (και κυρίως τον επιθυμητό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, ο στόχος του οποίου ήταν το 1 Gbps). Για τον λόγο αυτό αναφέρονται συχνά ως *δίκτυα 3.9G*. Αυτό οδήγησε στον σχεδιασμό των βελτιωμένων δικτύων *LTE Advanced* και *Mobile WiMAX Release 2*.

Το σύστημα *LTE Advanced* σχεδιάστηκε με στόχο να ξεπεραστούν τις αρχικές αδυναμίες του LTE ώστε να πληρούνται οι προϋποθέσεις που τέθηκαν για τα δίκτυα 4G από την ITU. Η οριστική προτυποποίηση έλαβε χώρα τον Μάρτιο του 2011 με την έκδοση 10 του 3GPP. Τα κύρια χαρακτηριστικά του είναι [7]:

- Αυξημένες ταχύτητες αιχμής 3Gbps στην κάτω ζεύξη και 1.5Gbps στην άνω.
- Βελτίωση της φασματικής απόδοσης στα 30bps/Hz
- Αυξημένος αριθμός ταυτόχρονα ενεργών χρηστών
- Βελτιωμένη απόδοση στα όρια των κυψελών (cell edges), τουλάχιστον 2.40 bps/Hz/cell στην ζεύξη καθόδου με χρήση κεραιών MIMO 2x2

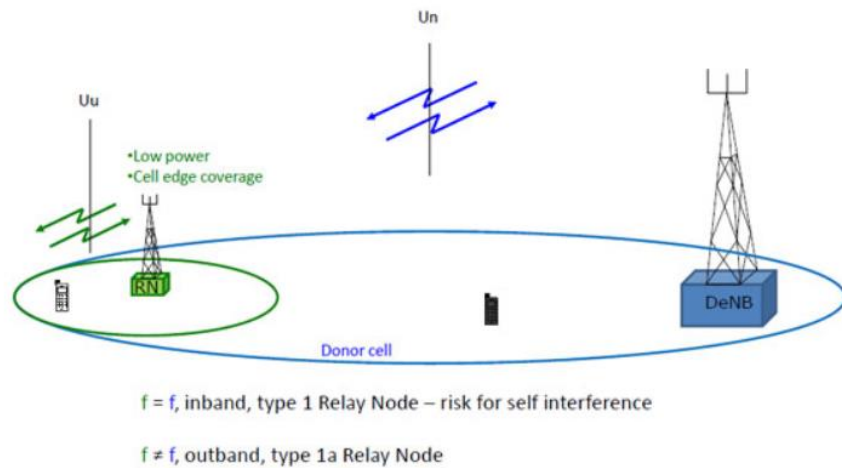
Για να επιτευχθούν τα παραπάνω γίνεται χρήση νέων τεχνολογιών όπως χρήση επιπλέον κεραιών MIMO σε σχέση με το LTE (8X8 στην κάτω ζεύξη και 4X4 στην άνω) και *κόμβων μεταγωγής (relay nodes)* [8], όπως παρίσταται στην εικόνα 1.1.



Εικόνα 1.1: Κόμβος μεταγωγής ως ενδιάμεσος κόμβος επικοινωνίας σταθμού βάσης-χρήστη

Οι κόμβοι μεταγωγής είναι σταθμοί βάσης χαμηλής ισχύος εγκατεστημένοι στις απομακρυσμένες περιοχές των κυψελών και σε hotspots, οι οποίοι ενισχύουν τη χωρητικότητα, διευρύνουν την περιοχή κάλυψης, δεν απαιτούν τη χρήση οπτικών ινών (καθώς η επικοινωνία με τους σταθμούς βάσης (BS) γίνεται ασύρματα), ενώ υποστηρίζουν *τεχνικές συνάθροισης (carrier aggregation)* όπου η πληροφορία

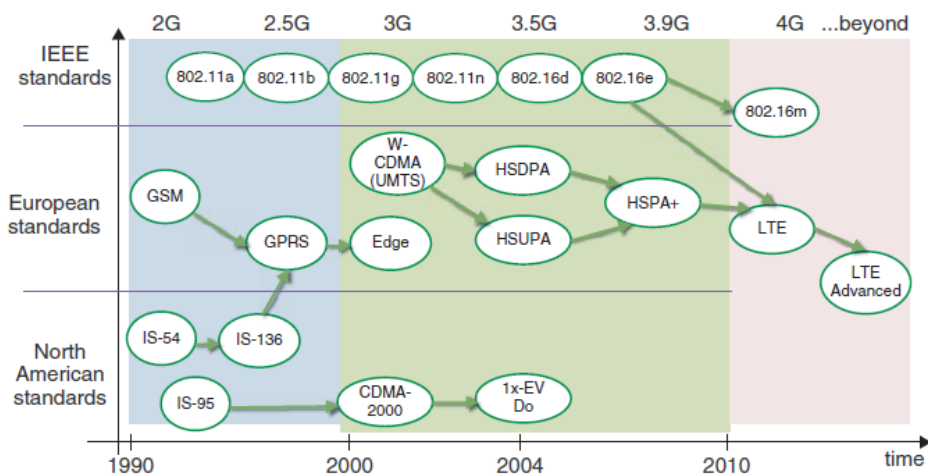
διανέμεται σε έως και σε 5 φέρουσες συνιστώσες (*component carriers*) προκειμένου να βελτιωθεί η χωρητικότητα του δικτύου. Όπως φαίνεται στην εικόνα 1.2, ένας κόμβος μεταγωγής μπορεί να χρησιμοποιήσει για επικοινωνία με τον χρήστη είτε την ίδια συχνότητα με αυτήν του BS (όπου ενυπάρχει κίνδυνος παρεμβολής) είτε διαφορετική (όπου και αποφεύγεται η παρεμβολή με τον BS).



Εικόνα 1.2: Επιλογή συχνοτήτων κόμβου μεταγωγής

Συνεπάγεται λοιπόν πως η δυνατότητα για υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων ενισχύεται, καθώς και η πιο δίκαιη εξυπηρέτηση των χρηστών, και κυρίως αυτών που βρίσκονται στα όρια κάθε κυψέλης.

Ακολουθεί ένα χρονικό της εξέλιξης των συστημάτων κινητών επικοινωνιών μέχρι και το πρότυπο LTE Advanced (εικόνα 1.3), καθώς και μια σύγκριση των επιδόσεών τους όσον αφορά τον μέγιστο ρυθμό μεταφοράς δεδομένων (εικόνα 1.4).



Εικόνα 1.3: Εξέλιξη των συστημάτων κινητών επικοινωνιών

Technology	Theoretical peak data rate (at low mobility)
GSM	9.6 kbps
IS-95	14.4 kbps
GPRS	171.2 kbps
EDGE	473 kbps
CDMA-2000 (1xRTT)	307 kbps
WCDMA (UMTS)	1.92 Mbps
HSDPA (Rel 5)	14 Mbps
CDMA-2000 (1x-EV-DO)	3.1 Mbps
HSPA+ (Rel 6)	84 Mbps
WiMAX (802.16e)	26 Mbps
LTE (Rel 8)	300 Mbps
WiMAX (802.16m)	303 Mbps
LTE-Advanced (Rel 10)	1 Gbps

Εικόνα 1.4: Μέγιστες τιμές ρυθμού μεταφοράς δεδομένων για κάθε τεχνολογία κινητών επικοινωνιών

1.6 Δίκτυα πέμπτης γενιάς (5G)

Η προτυποποίηση της επόμενης γενιάς ασύρματων δικτύων αναμένεται να έχει ολοκληρωθεί μέχρι το 2020. Η πρώτη προσπάθεια να οριστούν και να αναπτυχθούν ξεκίνησε το 2012 με το project της Ευρωπαϊκής Ένωσης *MENTIS*, το 2013 οι εταιρείες *Huawei*, *Samsung* και *NSN* ξεκίνησαν τις πρώτες εργαστηριακές δοκιμές, ενώ το 2014 στη Βαρκελώνη παρουσιάστηκε η κοινοπραξία δικτύων πέμπτης γενιάς *5G PPP (5G Public Private Partnership)*.

Τα δίκτυα πέμπτης γενιάς θα πρέπει να είναι σε θέση να εξυπηρετήσουν τον εκθετικά αυξανόμενο αριθμό των χρηστών και να ικανοποιούν απαιτήσεις μεγαλύτερης κλίμακας. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές που δημοσίευσε η ITU τον Φεβρουάριο του 2017 [9], το 5G δίκτυο θα πρέπει να προσφέρει:

- Μέγιστο δυνατό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων: 20 Gbit/s στην κάτω ζεύξη και 10 Gbit/s στην άνω ζεύξη
- Φασματική απόδοση κάτω ζεύξης 30 bit/s/Hz και άνω ζεύξης 15 bit/s/Hz
- Πραγματική ταχύτητα που απολαμβάνει ο χρήστης σε αστικό περιβάλλον: 100 Mbit/s στην κάτω ζεύξη και 50 Mbit/s στην άνω ζεύξη (αντίστοιχα για εσωτερικά hotspot περιβάλλοντα 1Gbit/sec και 500 Mbit/sec και για την ύπαιθρο 50 Mbit/sec και 25 Mbit/sec [10])
- Ρυθμό δεδομένων ανά μονάδα επιφάνειας: 10 Mbit/s/m²
- Καθυστέρηση απόκρισης στο επίπεδο του χρήστη: 1 έως 4 ms ανάλογα με την περίπτωση

- Πυκνότητα συνδεδεμένων συσκευών: 1 000 000 τερματικά ανά km²
- Αξιοπιστία: πιθανότητα επιτυχούς μετάδοσης πλαισίου επιπέδου 2 των 32 bytes εντός χρόνου 1ms ίση με 1-10⁻⁵
- Υποστήριξη υψηλών ρυθμών μετάδοσης για χρήστες υψηλής κινητικότητας (120 – 500 km/h)

Οι βελτιώσεις που αναμένεται να επιφέρει το 5G σε σχέση με το 4G απεικονίζονται σχηματικά παρακάτω [11]:

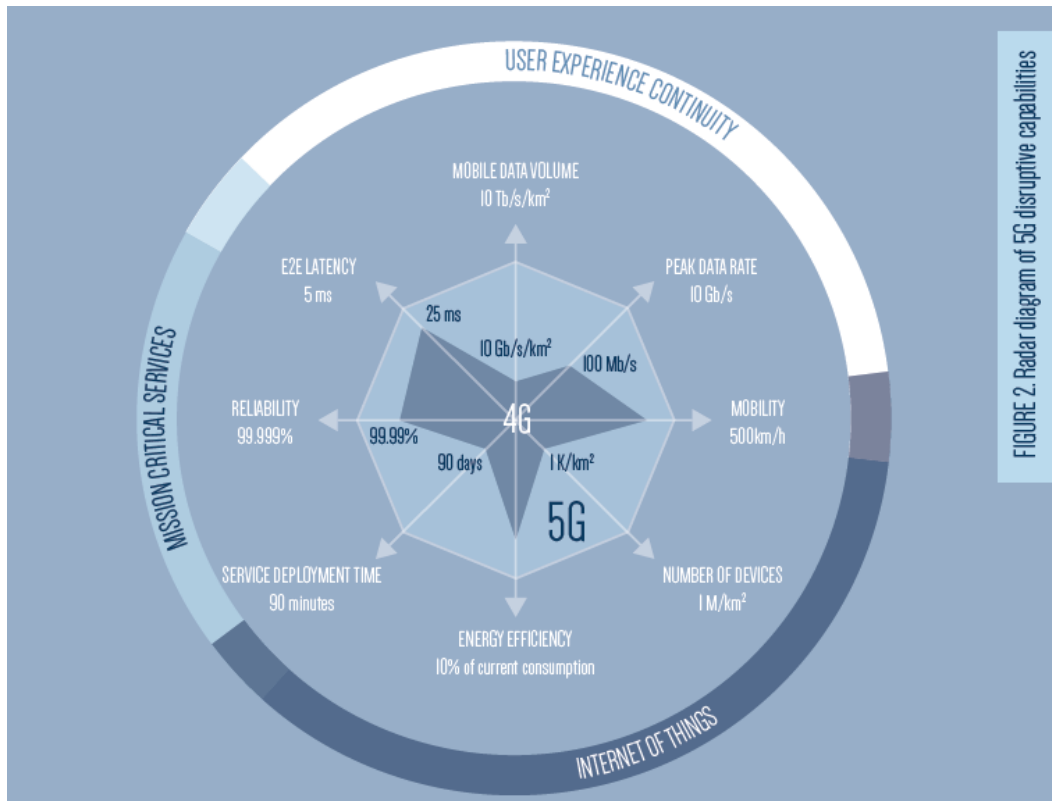
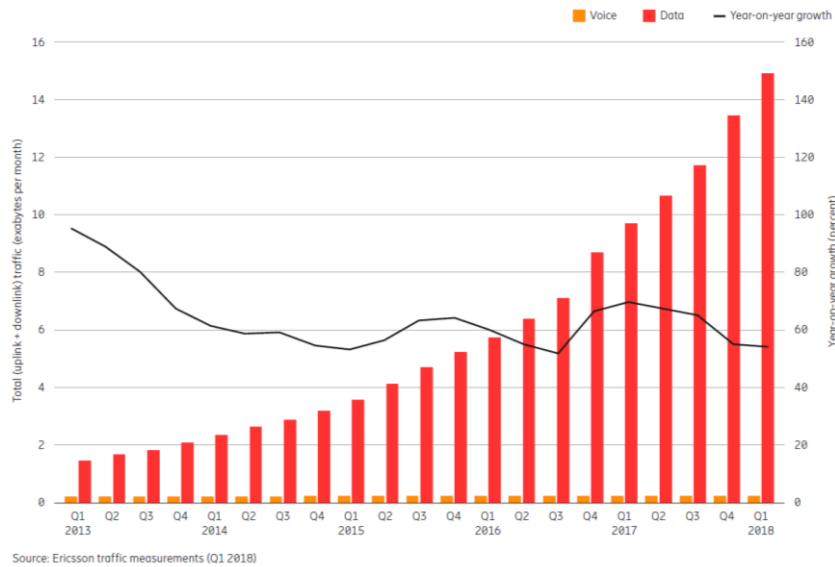


FIGURE 2. Radar diagram of 5G disruptive capabilities

Εικόνα 1.5: Σύγκριση επιδόσεων ανάμεσα στην 4G και στην 5G τεχνολογία

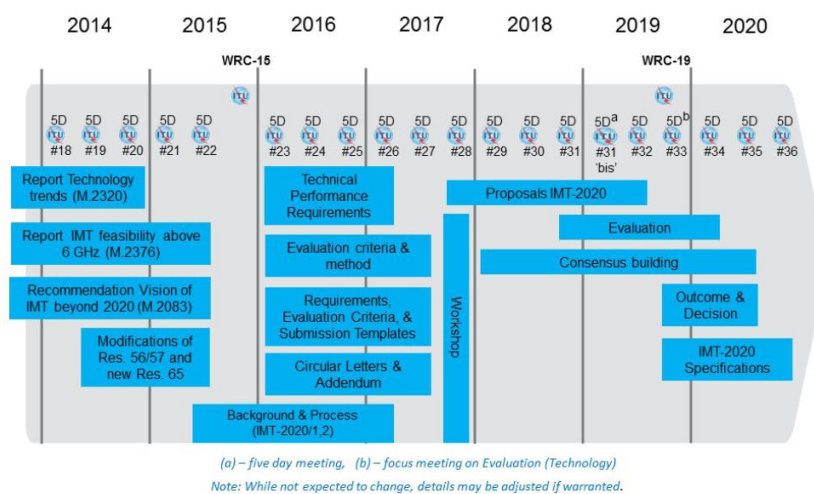
Λόγω των αυξημένων απαιτήσεων σε διακίνηση δεδομένων [12], όπως φαίνεται και στην εικόνα, μελετώνται τεχνικές αποδοτικής διαχείρισης του διαθέσιμου φάσματος (αύξηση χωρητικότητας δικτύου) εστιάζοντας σε υψηλότερες συχνότητες (6GHz-300GHz), ενώ ταυτόχρονα επιδιώκεται και η βελτίωση της ευφύιας των δικτύων. Παράλληλα, επειδή θα υποστηρίζεται η επαναχρησιμοποίηση φάσματος (frequency reuse) ακόμη και σε περιπτώσεις με υψηλό αριθμό εξυπηρετούμενων χρηστών, τα δίκτυα νέας γενιάς θα πρέπει να είναι σε θέση να διαχειριστούν τις ομοδιαυλικές παρεμβολές (Co-Channel Interference, CCI), οι οποίες θα είναι περισσότερο έντονες. Στην εικόνα 1.6 βλέπουμε την μεγάλη και συνεχόμενη αύξηση της διακίνησης δεδομένων στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας σύμφωνα με τα πρόσφατα (Ιούνιος 2018) στατιστικά της Ericsson, όπου και διαφαίνεται η ανάγκη συνεχούς εξέλιξης των δικτύων κινητών επικοινωνιών, προκειμένου να μπορούν αυτά να ανταποκριθούν στις ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις δικτυακής κίνησης.



Εικόνα 1.6: Κίνηση δεδομένων στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, σε exabytes/μήνα, σύμφωνα με μετρήσεις της Ericsson (Ιούνιος 2018)

Δεδομένου ότι στις περισσότερες περιπτώσεις οι χρήστες βρίσκονται εντός κτιρίων και άρα το σήμα πρέπει να διέλθει μέσα από τοίχους, τζάμια κλπ, αυξάνονται οι απώλειες διάδοσης και επηρεάζονται αρνητικά η ενεργειακή και φασματική απόδοση καθώς και ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων (data rate). Για το λόγο αυτό είναι αναγκαίο να χρησιμοποιηθούν συστήματα κεραιών μαζικού (Massive) MIMO, προς ενίσχυση της ευρωστίας του συστήματος.

Μέχρι την στιγμή που γράφονται αυτές οι γραμμές, η πρώτη φάση της οριστικοποίησης των προδιαγραφών του 5G (Έκδοση 15) προγραμματίζεται να ολοκληρωθεί μέχρι τον Μάρτιο του 2019, ώστε να καταστεί δυνατή η έγκαιρη εμπορική ανάπτυξη του συστήματος. Η δεύτερη φάση (Έκδοση 16) προβλέπεται να ολοκληρωθεί μέχρι το Μάρτιο του 2020, για υποβολή στην ITU ως υποψήφια για την τεχνολογία IMT-2020. Στην ακόλουθη εικόνα απεικονίζεται η χρονική εξέλιξη της διαδικασίας προτυποποίησης του 5G σύμφωνα με την ITU [13].



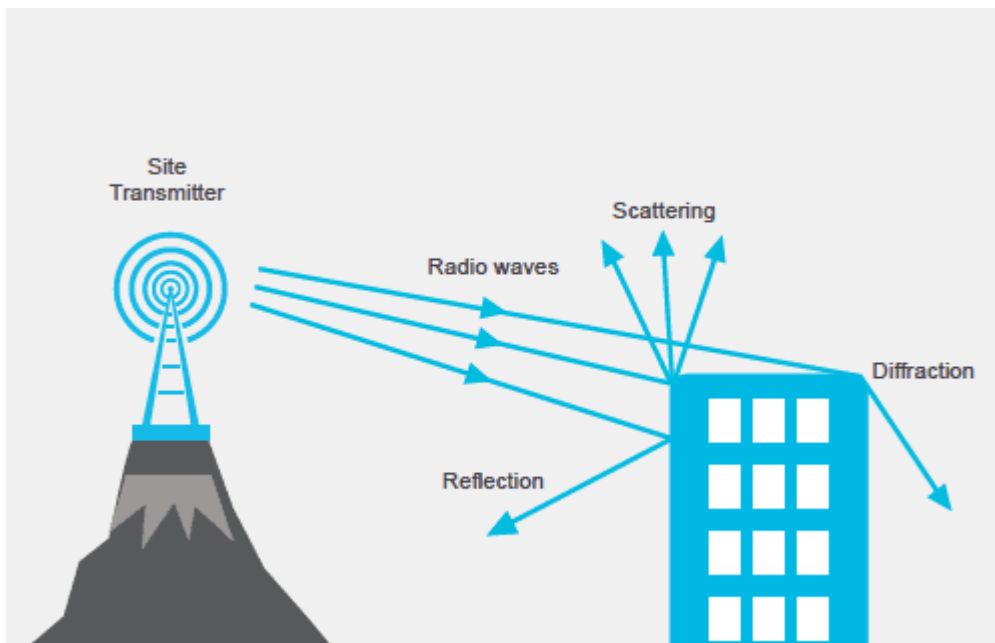
Εικόνα 1.7: χρονική εξέλιξη της διαδικασίας προτυποποίησης του 5G

2. Ο ασύρματος διάυλος

2.1 Φαινόμενα διάδοσης

Η απόδοση των συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας υπαγορεύεται κυρίως από το περιβάλλον του ασύρματου διαύλου. Σε αντίθεση με τα γενικώς στατικά και προβλέψιμα χαρακτηριστικά του ενσύρματου διαύλου, ο ασύρματος διάυλος έχει δυναμικά και απρόβλεπτα χαρακτηριστικά, πράγμα που καθιστά την λεπτομερή ανάλυση του ασύρματου τηλεπικοινωνιακού συστήματος αρκετά δύσκολη. Τα τελευταία χρόνια, με την ταχεία ανάπτυξη των ευρυζωνικών υπηρεσιών κινητής επικοινωνίας η βελτιστοποίηση του ασύρματου συστήματος επικοινωνιών έχει καταστεί ιδιαίτερα κρίσιμης σημασίας. Στην πραγματικότητα, η κατανόηση των ασύρματων καναλιών θέτει τα θεμέλια για την ανάπτυξη υψηλών επιδόσεων και φασματικά αποδοτικής τεχνολογίας ασύρματης μετάδοσης.

Στην ασύρματη επικοινωνία, η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων αναφέρεται στη συμπεριφορά των ραδιοκυμάτων όταν μεταδίδονται από πομπό σε δέκτη. Κατά τη διάρκεια της διάδοσης, τα ραδιοκύματα επηρεάζονται κυρίως από τρεις διαφορετικούς τύπους φυσικών φαινομένων: την *ανάκλαση*, την *περίθλαση* και την *σκέδαση*, τα οποία απεικονίζονται στην εικόνα 2.1.



Εικόνα 2.1: Απεικόνιση της ανάκλασης, της περίθλασης και της σκέδασης

Η *ανάκλαση* είναι το φυσικό φαινόμενο που συμβαίνει όταν το διαδιδόμενο ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσκρούει σε ένα αντικείμενο με πολύ μεγάλες διαστάσεις σε σύγκριση με το μήκος κύματος, όπως για παράδειγμα είναι η επιφάνεια ενός κτιρίου ή της γης. Αυτό αναγκάζει μέρος της ισχύος του σήματος μετάδοσης να εκτρέπεται σε σημαντικό βαθμό προς την προέλευσή του ή προς άλλη κατεύθυνση αντί να περάσει σε όλη τη διαδρομή προς τον δέκτη.

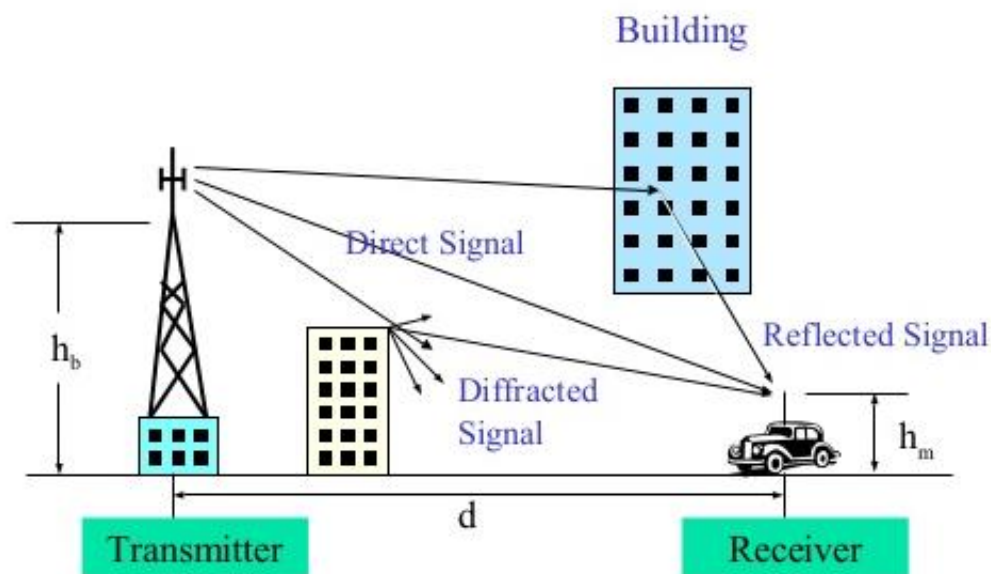
Η *διάθλαση* αναφέρεται σε διάφορα φαινόμενα που συμβαίνουν όταν η διαδρομή διάδοσης μεταξύ του πομπού και του δέκτη εμποδίζεται από επιφάνεια με αιχμηρές ανωμαλίες ή μικρά ανοίγματα. Εμφανίζεται ως κάμψη των κυμάτων γύρω από τα

μικρά εμπόδια και εξαπλώνεται πέρα από τα μικρά ανοίγματα (οπές) με την μορφή κυμάτων. Τα δευτερεύοντα κύματα που παράγονται από τη διάθλαση είναι χρήσιμα για τη δημιουργία μιας διαδρομής μεταξύ του πομπού και του δέκτη, ακόμη και όταν δεν υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ τους.

Η σκέδαση είναι το φυσικό φαινόμενο που αναγκάζει την ακτινοβολία ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος να αποκλίνει από μια ευθεία πορεία λόγω ενός ή περισσότερων τοπικών εμποδίων τα οποία έχουν μικρές διαστάσεις σε σύγκριση με το μήκος κύματος. Τα εμπόδια που προκαλούν την σκέδαση, όπως το φύλλωμα των δέντρων, οι πινακίδες του δρόμου και τα φωτιστικά σώματα, αναφέρονται ως σκεδαστές.

Με άλλα λόγια, η διάδοση ραδιοκυμάτων είναι μια πολύπλοκη και όχι ιδιαίτερα προβλέψιμη διαδικασία που διέπεται από την ανάκλαση, τη διάθλαση και τη σκέδαση, η ένταση των οποίων ποικίλλει σε διαφορετικές περιπτώσεις ανάλογα με τα διαφορετικά περιβάλλοντα διάδοσης [14].

Στην εικόνα 2.2 απεικονίζεται η επίδρασή των φαινομένων αυτών στην λήψη του εκπεμπόμενου σήματος από τον χρήστη (πολυδιαδρομική διάδοση).



Εικόνα 2.2: Επίδραση των φαινομένων διάδοσης στην λήψη του σήματος από τον χρήστη (πολυδιαδρομική διάδοση σήματος)

2.2 Απώλειες διαδρομής

Οι απώλειες διαδρομής αποτελούν απαραίτητο στοιχείο μελέτης αφού από αυτές προκύπτει η κάλυψη που μπορεί να παρέχει το ασύρματο σύστημα. Υπάρχουν πολλά διαφορετικά μοντέλα απωλειών αναλόγα με την απόσταση, την συχνότητα λειτουργίας και το περιβάλλον διάδοσης αλλά ακολούθως θα αναλυθεί το μοντέλο διαδρομής για διάδοση στον ελεύθερο χώρο που αποτέλεσε και βάση όλων των

υπόλοιπων μοντέλων, και το μοντέλο με ονομασία *COST-231 Hata* [15] το οποίο και καλύπτει όλες τις απαραίτητες προϋποθέσεις για χρήση στις προσομοιώσεις μας.

2.2.1 Απώλειες Διαδρομής για διάδοση στον Ελεύθερο Χώρο

Στα περισσότερα περιβάλλοντα διάδοσης παρατηρείται ότι η ένταση του σήματος μειώνεται συναρτήσει της απόστασης. Στην περίπτωση ελεύθερου χώρου και ιστροπικής κεραίας, η κεραία εκπέμπει το σήμα ιστροπικά και σφαιρικά προς όλες τις κατευθύνσεις. Έτσι η πυκνότητα ισχύος του σήματος σε απόσταση d είναι η συνολική εκπεμπόμενη ισχύς δια την σφαιρική επιφάνεια που είναι $4\pi d^2$. Η σχέση μεταξύ λαμβανόμενης P_r και εκπεμπόμενης ισχύος P_t δίνεται από τον Νόμο του Friis:

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (2.1)$$

Όπου G_t και G_r είναι τα αντίστοιχα κέρδη κεραιών πομπού και δέκτη και λ είναι το χρησιμοποιούμενο μήκος κύματος.

Στην σχεδίαση των ασύρματων συστημάτων χρησιμοποιείται ο όρος απώλειες διάδοσης (propagation loss) ή απώλειες διδρομής (path loss) για να εκφραστεί ο λόγος της ισχύος που ακτινοβολείται από την κεραία του πομπού προς την ισχύ που λαμβάνεται από την κεραία του δέκτη. Όταν το σύστημα λειτουργεί στον ελεύθερο χώρο και χρησιμοποιούνται ιστροπικές κεραίες (οπότε $G_t=G_r=1$), οι απώλειες διάδοσης ελεύθερου χώρου L_f δίνονται από την σχέση:

$$L_f = \frac{P_t}{P_r} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (2.2)$$

Η προηγούμενη σχέση δείχνει ότι οι απώλειες διαδρομής στον ελεύθερο χώρο εξαρτώνται τόσο από το τετράγωνο της απόστασης d όσο και αντιστρόφως ανάλογα από το τετράγωνο του μήκους κύματος.

2.2.2 Μοντέλο διάδοσης COST-231 Hata

Το μοντέλο αυτό αποτελεί εξέλιξη του γνωστού εμπειρικού μοντέλου Okumura-Hata και έχει πολύ καλή εφαρμογή σε αστικά περιβάλλοντα ευρωπαϊκών πόλεων [16]. Το μοντέλο αποτυπώνεται στις ακόλουθες σχέσεις:

$$PL(dB) = A + B \log d + C \quad (2.3)$$

$$A = 46.3 + 33.9 \log f_c - 13.82(H_{bs}) - a(H_{ms}) \quad (2.4)$$

$$B = 44.9 - 6.55 \log(H_{bs}) \quad (2.5)$$

όπου H_{bs} είναι το ύψος του σταθμού εκπομπής, H_{ms} είναι το ύψος του κινητού τερματικού και ο συντελεστής C ισούται με 0dB για πόλεις μεσαίου μεγέθους και 3dB για μητροπολιτικά κέντρα / μεγαλουπόλεις. Για να δίνει το συγκεκριμένο μοντέλο

σωστά αποτελέσματα θα πρέπει να έχει εφαρμογή σε μακροκυψέλες, δηλαδή σε περιπτώσεις όπου η κεραία του σταθμού βάσης είναι πάνω από τις στέγες των σπιτιών, και επίσης πρέπει να ικανοποιούνται τα παρακάτω κριτήρια:

$$1500 \leq f_c \leq 2000 \text{ MHz} \quad (2.6a)$$

$$30 \leq H_{bs} \leq 200 \text{ m} \quad (2.6b)$$

$$1 \leq H_{ms} \leq 10 \text{ m} \quad (2.6c)$$

$$1 \leq d \leq 20 \text{ km} \quad (2.6d)$$

Με δεδομένο ότι στην προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε, η συχνότητα λειτουργίας (f_c) ήταν 2000 MHz, το υψόμετρο του σταθμού βάσης (H_{bs}) ήταν 30 m, το υψόμετρο του κινητού τερματικού ήταν 1.5 m και η ακτίνα κάθε κυψέλης 1 km, οι ανωτέρω συνθήκες ικανοποιούνται οπότε προκύπτει ότι για την μοντελοποίηση των απωλειών διάδοσης στον δίαυλο το COST-231 Hata μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Αντικατάσταση των ανωτέρω τιμών στις σχέσεις (2.2 – 2.4) δίνει την εξίσωση απωλειών που τελικά χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία:

$$PL(dB) = 137.4 + 35.2 \log_{10}(d) \quad (2.7)$$

2.3 Σκίαση

Με τον όρο *σκίαση* περιγράφεται το φαινόμενο που προκαλεί η ανομοιομορφία του περιβάλλοντος διάδοσης. Η σκίαση προκαλείται κυρίως από τα χαρακτηριστικά του εδάφους στην περιοχή που διαδίδεται το σήμα στο περιβάλλον των επίγειων κινητών επικοινωνιών. Εμπόδια μεγάλων κατά βάση διαστάσεων (φυσικά ή τεχνητά) προκαλούν διακυμάνσεις στην ισχύ του λαμβανόμενου σήματος η οποία παύει πλέον να εξαρτάται μόνο από την απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη, όπως φαίνεται και στο επόμενο σχήμα.

Σαν συνέπεια, το σήμα υπόκειται σε τυχαίες, αργά εξελισσόμενες μεταβολές οι οποίες ονομάζονται μακροσκοπικές διαλείψεις ή διαλείψεις σκίασης. Το πρόβλημα που προκαλείται από την σκίαση είναι ότι όλες οι θέσεις που βρίσκονται σε δοθείσα απόσταση από τον πομπό μπορεί να μην λαμβάνουν επαρκή στάθμη του σήματος για την σωστή αποδιαμόρφωση της πληροφορίας. Η τιμή των απωλειών διάδοσης $L(d)$ σε μια συγκεκριμένη θέση είναι μια τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί λογαριθμοκανονική κατανομή με την μέση τιμή των απωλειών να υπολογίζεται συναρτήσει της απόστασης, όπως φαίνεται κι από τον ακόλουθο τύπο:

$$L(d) = L_0 + 10 \cdot n \cdot \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \text{ (dB)} \quad (2.8)$$

Το άθροισμα των δύο πρώτων όρων ονομάζεται *μέσος όρος περιοχής (area mean)* [17] ενώ ο τρίτος όρος (X_σ) είναι τυχαία μεταβλητή Gauss με μηδενική μέση τιμή, τυπική απόκλιση σ (dB) και συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \exp\left(-\frac{(x - m)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.9)$$

όπου x η μετρούμενη στάθμη ισχύος σε dBW, m η μέση τιμή των απωλειών διάδοσης που εξαρτώνται από την απόσταση (σε dB) και σ η τυπική απόκλιση (επίσης σε dB), η οποία εξαρτάται μόνο από το περιβάλλον διάδοσης. Συνηθισμένες τιμές για το σ είναι μεταξύ του εύρους 4-12 dB, με συνηθέστερη αυτή των 8 dB, η οποία και θα επιλεγεί στην προσομοίωση που θα ακολουθήσει.

2.4 Διαλείψεις

Οι *διαλείψεις* (*fading*) αποτελούν γενικό όρο που περιγράφει τις ταχείες μεταβολές που παρατηρούνται στο πλάτος, στην φάση και τη συχνότητα του σήματος σε μικρές αποστάσεις ή σε μικρά χρονικά διαστήματα. Για τον λόγο αυτό, οι διαλείψεις συχνά χαρακτηρίζονται και ως *απώλειες διάδοσης μικρής κλίμακας*.

Τα αίτια που προκαλούν τις διαλείψεις εξαρτώνται από τη συχνότητα λειτουργίας, το περιβάλλον διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και τα χαρακτηριστικά των σημάτων. Η δυσμενής επίδρασή τους υπερτίθεται στις απώλειες διάδοσης και την σκίαση, δηλαδή τις απώλειες διάδοσης μεγάλης κλίμακας στις οποίες αναφερθήκαμε νωρίτερα.

Το φαινόμενο των διαλείψεων έχει ως βασικές αιτίες 4 φυσικούς μηχανισμούς [18]:

1. Πολυδιαδρομική διάδοση – Η παρουσία σκεδαστών στο περιβάλλον διάδοσης δημιουργεί πολλαπλούς διαύλους μετάδοσης του σήματος προς το σημείο λήψης. Οι αντίστοιχες πολλαπλές εκδοχές του σήματος φτάνουν στην κεραία λήψης σε διαφορετικούς χρόνους ακολουθώντας διαφορετικές διαδρομές. Η ανασύνθεση στον δέκτη του αρχικού σήματος από τις πολυδιαδρομικές αυτές συνιστώσες που χαρακτηρίζονται από τυχαία πλάτη και φάσεις προκαλεί διαλείψεις.

2. Κινητικότητα τερματικών – Η σχετική κίνηση του χρήστη ως προς τον σταθμό βάσης προκαλεί λόγω του φαινομένου Doppler αντίστοιχη χρονική μεταβολή της φέρουσας συχνότητας, ανάλογη της ταχύτητας αυτής, με αποτέλεσμα οι διάφορες πολυδιαδρομικές συνιστώσες του σήματος να εμφανίζουν θετική ή αρνητική μετατόπιση συχνότητας (δηλαδή μεταβάλλεται η συχνότητά τους), ανάλογα με το αν ο χρήστης πλησιάζει ή απομακρύνεται από τον σταθμό βάσης.

3. Κινητικότητα σκεδαστών στο περιβάλλον διάδοσης – Ακόμα και αν ο χρήστης είναι ακίνητος, είναι πιθανό να υπάρχουν κινούμενα εμπόδια στο περιβάλλον διάδοσης (οχήματα, άνθρωποι), τα οποία και προκαλούν διαλείψεις. Σε αυτήν την περίπτωση οι πολυδιαδρομικές συνιστώσες υφίστανται μετατοπίσεις Doppler που μεταβάλλονται χρονικά κατά τυχαίο τρόπο. Ειδικά εφόσον η ταχύτητα του τερματικού του χρήστη είναι μικρότερη από την ταχύτητα των κινούμενων σκεδαστών, το δυναμικό περιβάλλον διάδοσης έχει κυρίαρχη επίδραση.

4. Φασματική θεώρηση – Η θεώρηση αυτή αφορά την σχέση του εύρους ζώνης του σήματος με το εύρος ζώνης συνοχής (coherence bandwidth) του διαύλου. Αν το πρώτο είναι μεγαλύτερο, το σήμα υφίσταται παραμόρφωση με τις διαλείψεις να αποκτούν δευτερεύουσα σημασία, ενώ στην αντίθετη περίπτωση το σήμα παρουσιάζει ταχείες μεταβολές του πλάτους λόγω διαλείψεων, χωρίς όμως να υφίσταται παραμόρφωση.

2.4.1 Μετατόπιση Doppler

Εάν θεωρήσουμε τερματικό που κινείται με σταθερή ταχύτητα u επί διαδρομής μήκους d και λαμβάνει σήματα από απομακρυσμένη πηγή, υπάρχει διαφορά μήκους $\Delta l = d \cos \theta = u \Delta t \cos \theta$ μεταξύ των διαδρομών από την πηγή μέχρι τα ακραία σημεία της διαδρομής d (όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2), με Δt τον χρόνο που απαιτείται για να μετακινηθεί το κινητό τερματικό από την αρχή μέχρι το τέλος της διαδρομής.

Λόγω της διαφοράς μήκους των δύο ακραίων διαδρομών Δl το σήμα λήψης θα παρουσιάζει μεταβολή φάσης:

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi \Delta l}{\lambda} = \frac{2\pi u \Delta t}{\lambda} \cos \theta \quad (2.10)$$

Άρα, η μεταβολή της φέρουσας συχνότητας ή αλλιώς *μετατόπιση* ή *ολίσθηση Doppler* είναι:

$$f_D = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta \varphi}{\Delta t} = \frac{u}{\lambda} \cos \theta \quad (2.11)$$

Από την σχέση (2.11) φαίνεται η ότι η μεταβολή της συχνότητας λόγω φαινομένου Doppler εξαρτάται από την ταχύτητα του τερματικού, την κατεύθυνση της κίνησής του ως προς την πηγή και την συχνότητα του φέροντος. Αν κινείται προς την πηγή η μετατόπιση Doppler είναι θετική και η συχνότητα λήψης αυξάνεται, ενώ αντίθετα μειώνεται όταν το τερματικό απομακρύνεται από την πηγή. Κατά την πολυδιαδρομική διάδοση, αφού λαμβάνονται σήματα από διάφορες κατευθύνσεις, υπάρχει φασματική διασπορά του σήματος.

2.4.2 Διασπορά Καθυστέρησης

Το σήμα λήψης δίνεται από την σχέση:

$$r(t) = \text{Re}\left\{ \sum_{n=0}^{N(t)} \alpha_n(t) \exp(-j\varphi_n(t)) u(t - \tau_n(t)) \right\} \exp(j2\pi f_c t + \psi) \quad (2.12)$$

Η μεταβολή της φάσης μιας τυχαίας πολυδιαδρομικής συνιστώσας συγκριτικά με την απευθείας συνιστώσα, δίνεται από τον τύπο:

$$\varphi_n(t) = 2\pi f_c \tau_n(t) - \varphi_{D_n}(t) \quad (2.13)$$

όπου f_c η φέρουσα συχνότητα, $\tau_n(t)$ η χρονική καθυστέρηση λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης και $\varphi_{D_n}(t)$ η μετατόπιση φάσης Doppler. Μιας και η συχνότητα είναι της τάξης των GHz, μια μικρή μεταβολή της καθυστέρησης $\tau_n(t)$ προκαλεί μεγάλες αλλαγές στην φάση του σήματος.

Ταχεία μεταβολή της φάσης των συνιστωσών έχει ως αποτέλεσμα την ταχεία μεταβολή του πλάτους του ληφθέντος σήματος και άρα την εμφάνιση διαλείψεων. Για την ποσοτικοποίηση των φαινομένων αυτών και την δυνατότητα

χαρακτηρισμού των ιδιοτήτων ενός διαύλου, έχουν οριστεί κάποια μεγέθη. Ένα από αυτά είναι η μέση επιπλέον καθυστέρηση (*mean excess delay*) που ορίζεται ως:

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_n P_{R(\tau_n)} \tau_n}{\sum_n P_{R(\tau_n)}} \quad (2.14)$$

όπου τ_n η καθυστέρηση και $P_{R(\tau_n)}$ η ισχύς της n-οστής πολυδιαδρομικής συνιστώσας. Το μέγεθος

$$\sigma_\tau = \sqrt{\overline{\tau^2} - \bar{\tau}^2} \quad (2.15)$$

ονομάζεται διασπορά καθυστέρησης (*delay spread*) του διαύλου, με

$$\overline{\tau^2} = \frac{\sum_n P_{R(\tau_n)} \tau_n^2}{\sum_n P_{R(\tau_n)}} \quad (2.16)$$

Η διασπορά καθυστέρησης αποτελεί μέτρο της διαφοράς στον χρόνο άφιξης στον δέκτη της πρώτης συνιστώσας (συνήθως η *Line Of Sight - LOS* αν αυτή υπάρχει) και των πολυδιαδρομικών συνιστωσών που εμφανίζουν την μεγαλύτερη καθυστέρηση, περιγράφει δηλαδή την χρονική διασπορά ενός σήματος στον δίαυλο λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης. Σε χρονικά μεταβαλλόμενους διαύλους η διασπορά είναι τυχαία μεταβλητή.

2.4.3 Εύρος Ζώνης Συνοχής

Το εύρος ζώνης συνοχής (*coherence bandwidth*) B_c χαρακτηρίζει την συμπεριφορά ενός διαύλου στο πεδίο της συχνότητας και είναι αντιστρόφως ανάλογο της διασποράς καθυστέρησης $\overline{\tau^2}$. Συγκεκριμένα, δείχνει το πόσο πρέπει να απέχουν οι συχνότητες δύο συνιστωσών ώστε όταν διέρχονται από τον δίαυλο να αντιμετωπίζονται με τον ίδιο τρόπο φασματικά. Για εύρος συχνοτήτων μικρότερο του εύρους ζώνης συνοχής, ο δίαυλος θεωρείται επίπεδος (*flat*), καθώς η φασματική του συμπεριφορά είναι σταθερή κατά πλάτος και γραμμική κατά τη συχνότητα.

Το εύρος ζώνης συνοχής ορίζεται προσεγγιστικά κι εξαρτάται από το επιθυμητό επίπεδο συσχέτισης μεταξύ διαφορετικών συνιστωσών. Αν επιθυμείται η συσχέτιση να ξεπερνάει το 0.9, τότε ισχύει η σχέση:

$$B_c \approx \frac{1}{50\sigma_\tau} \quad (2.17)$$

ενώ για συσχέτιση μεγαλύτερη του 0.5:

$$B_c \approx \frac{1}{5\sigma_\tau} \quad (2.18)$$

2.4.4 Διασπορά Doppler και χρόνος συνοχής

Η διασπορά *Doppler* ορίζεται ως το διπλάσιο της μέγιστης μετατόπισης *Doppler* (θέτοντας $\cos\theta = 1$ στην (2.11)) :

$$B_D = 2f_{Dmax} = \frac{2u}{\lambda} \quad (2.19)$$

Υποδεικνύει την φασματική διεύρυνση ενός σήματος λόγω της κίνησης του δέκτη ή των εμποδίων του περιβάλλοντος διάδοσης. Αν το εύρος ζώνης του σήματος υπερβαίνει κατά πολύ το B_D , τότε αυτή η διεύρυνση θεωρείται αμελητέα κι ο δίαυλος θεωρείται *δίαυλος αργών διαλείψεων*.

Ο *χρόνος συνοχής* (coherence time) T_C είναι το αντιστρόφως ανάλογο μέγεθος της διασποράς Doppler, δηλαδή ισχύει:

$$T_C \approx \frac{1}{B_D} \quad (2.20)$$

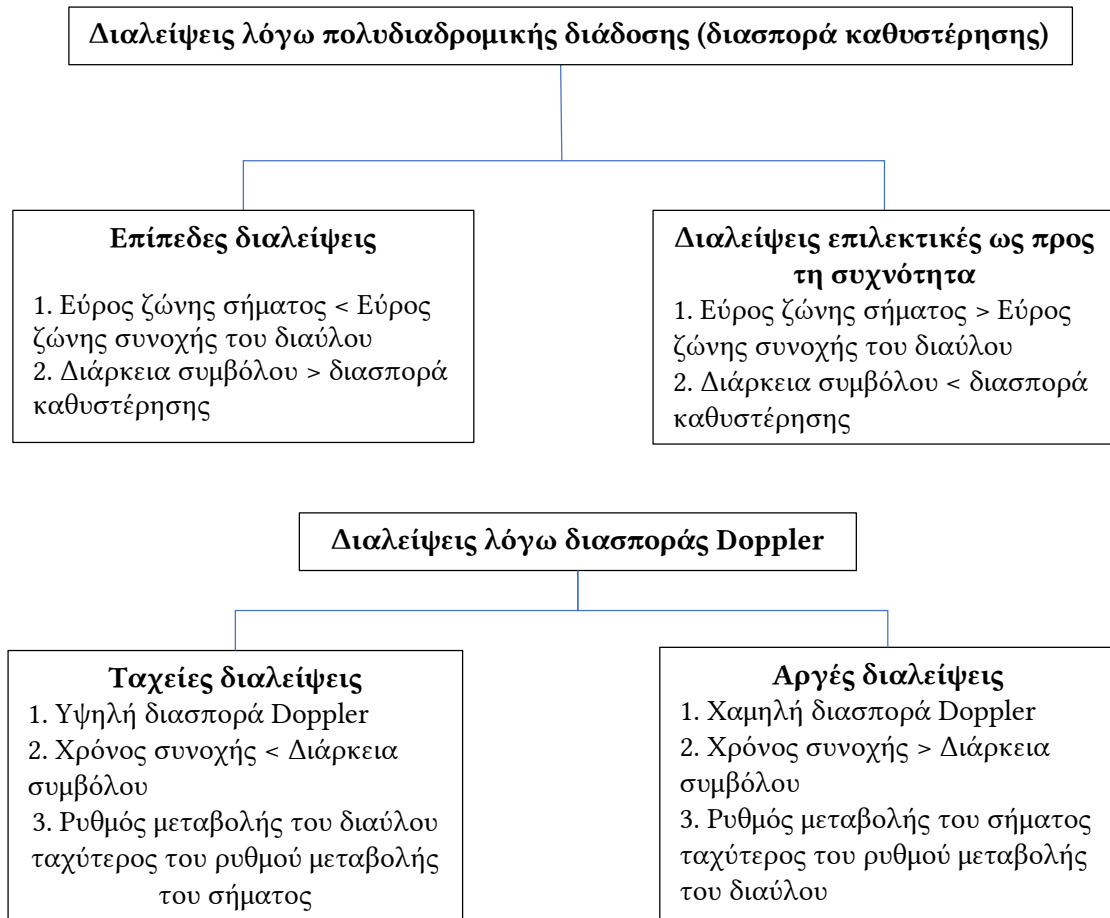
Ο χρόνος αυτός χαρακτηρίζει την χρονική διάρκεια κατά την οποία η κρουστική απόκριση ενός διαύλου μπορεί να θεωρηθεί σταθερή. Αν το αντίστροφο του εύρους ζώνης ενός σήματος ξεπερνάει κατά πολύ το χρόνο συνοχής τότε αντιμετωπίζεται διαφορετικά με τον χρόνο κατά την μετάδοση του στο δίαυλο, με συνέπεια να προκαλείται παραμόρφωση. Όπως και για το εύρος ζώνης συνοχής, υπολογίζεται με προσεγγιστικές σχέσεις και αναλόγως της συσχέτισης μεταξύ διαφορετικών συνιστωσών. Για συσχέτιση πλάτους μεγαλύτερη του 0.5 είναι:

$$T_C = \sqrt{\frac{9}{16\pi B_D^2}} \quad (2.21)$$

2.4.5 Ταξινόμηση Διαύλων με Διαλείψεις

Υπάρχουν τέσσερα είδη διαλείψεων (σχήμα 2.3)-η πολυδιαδρομική διάδοση και η διασπορά καθυστέρησης που προκαλεί οδηγούν σε διαλείψεις επίπεδες ή επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα (frequency selective fading), ενώ η διασπορά Doppler ευθύνεται για διαλείψεις επιλεκτικές ως προς το χρόνο (time selective fading), ταχείες ή αργές. Το είδος των διαλείψεων εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του υπό μετάδοση σήματος, του διαύλου και της μεταξύ τους σχέσης.

Οι κατηγορίες διαλείψεων φαίνονται στο επόμενο σχήμα:



Εικόνα 2.3: Κατηγοριοποίηση των διαλείψεων

Αναλυτικότερα, η επεξήγηση των διαλείψεων έχει ως εξής:

- Επίπεδες διαλείψεις - οι επίπεδες διαλείψεις λέγονται και μη επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα διαλείψεις. Ένα σήμα υφίσταται επίπεδες διαλείψεις όταν το εύρος ζώνης του είναι μικρότερο από το εύρος ζώνης συνοχής του διαύλου B_C ή ισοδύναμα, η περίοδος συμβόλου είναι μεγαλύτερη της διασποράς καθυστέρησης T_C . Το πλάτος του σήματος λήψης εξακολουθεί ν' αλλάζει λόγω της χρονικής μεταβολής του διαύλου, όμως φασματικά παραμένει αναλλοίωτο κατά την διέλευση του. Οι διάυλοι επίπεδων διαλείψεων αποκαλούνται ως στενής ζώνης. Η συνηθέστερη στατιστική τους περιγραφή γίνεται με κατανομή Rayleigh.

- Διαλείψεις επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα - στην περίπτωση αυτή ο διάυλος είναι επιλεκτικός ως προς τη συχνότητα και φασματικά δεν μένει αμετάβλητος για το σύνολο των συχνοτήτων του σήματος, προκαλώντας παραμόρφωση στο σήμα λήψης. Οι διάυλοι αυτοί καλούνται ευρυζωνικοί. Επιλεκτικές διαλείψεις συμβαίνουν όταν το εύρος ζώνης του σήματος ξεπερνάει το εύρος ζώνης συνοχής του διαύλου ή ισοδύναμα, όταν η περίοδος συμβόλου είναι μικρότερη της διασποράς καθυστέρησης. Η μεγάλη χρονική διασπορά έχει ως συνέπεια πολυδιαδρομικές συνιστώσες να καταφθάνουν στον δέκτη κατά την μετάδοση άλλου συμβόλου,

οδηγώντας με αυτό τον τρόπο σε διασυμβολική παρεμβολή (ISI-intersymbol interference).

- Ταχείες διαλείψεις - οι ταχείες διαλείψεις συμβαίνουν όταν η περίοδος συμβόλου υπερβαίνει τον χρόνο συνοχής του διαύλου T_c ή, ισοδύναμα, όταν το εύρος ζώνης του σήματος υπολείπεται της διασποράς Doppler. Κατά την διάρκεια ενός συμβόλου, η κρουστική απόκριση του διαύλου μεταβάλλεται με γρήγορο ρυθμό, προκαλώντας στο σήμα παραμόρφωση και φασματική διασπορά. Να σημειωθεί εδώ ότι αν ένας διάυλος χαρακτηρίζεται από ταχείες ή αργές διαλείψεις δεν επηρεάζει την ταυτόχρονη ύπαρξη ή μη επίπεδων ή επιλεκτικών ως προς τη συχνότητα διαλείψεων. Οι μεν πρώτες οφείλονται στην ύπαρξη κινητικότητας στο περιβάλλον διάδοσης, οι δε άλλες στην πολυδιαδρομική διάδοση, παραγόντων δηλαδή ανεξάρτητων μεταξύ τους.
- Αργές διαλείψεις - στις αργές διαλείψεις ο διάυλος μεταβάλλεται πιο αργά συγκριτικά με το μεταδιδόμενο σήμα και κατά την διάρκεια ενός συμβόλου μπορεί να θεωρηθεί αμετάβλητος. Στην περίπτωση αυτή, ο χρόνος συνοχής του διαύλου είναι μεγαλύτερος της περιόδου συμβόλου ή, ισοδύναμα, η διασπορά Doppler είναι μικρότερη του εύρους ζώνης του σήματος.

2.5 Παρεμβολές

Ο βασικότερος ίσως παράγοντας καθορισμού της ποιότητας μίας ζεύξης σε ένα κυψελωτό περιβάλλον είναι οι παρεμβολές. Πηγή παρεμβολών μπορεί να είναι ένα άλλο κινητό τερματικό στην ίδια κυψέλη, ένα κινητό τερματικό σε γειτονική κυψέλη, εκπομπές παραπλήσιων σταθμών βάσης που λειτουργούν στην ίδια ζώνη συχνοτήτων, καθώς και οποιοδήποτε άλλο ασύρματο σύστημα που εισάγει ισχύ στο φάσμα λειτουργίας του κυψελωτού συστήματος. Οι δύο κύριοι τύποι παρεμβολών που λαμβάνουν χώρα σε κυψελωτά συστήματα είναι η ομοδιαυλική παρεμβολή και η παρεμβολή γειτονικών διαύλων.

2.5.1 Ομοδιαυλική παρεμβολή

Η ομοδιαυλική παρεμβολή εμφανίζεται μεταξύ στοιχείων του δικτύου που λειτουργούν στο ίδιο φάσμα. Προφανώς τα στοιχεία αυτά βρίσκονται σε διαφορετικές κυψέλες (ομοδιαυλικές κυψέλες ή co-channel cells), αλλά λόγω της αδυναμίας ακριβούς ελέγχου της ισχύος εκπομπής, υπάρχουν διαρροές σε έκταση πέραν της ακτίνας κυψέλης. Σε αντίθεση με τον απλό θερμικό θόρυβο ο οποίος μπορεί να αντιμετωπιστεί με απλή αύξηση της ισχύος του σήματος, η αντιμετώπιση των παρεμβολών είναι μια πιο πολύπλοκη διαδικασία, κι αυτό διότι η απλή αύξηση ισχύος του εκπεμπόμενου σήματος επιφέρει ταυτόχρονα και αύξηση των παρεμβολών στα ομοδιαυλικά στοιχεία του συστήματος.

Στη γενική περίπτωση, για τον υπολογισμό του λόγου ωφέλιμου σήματος προς ομοδιαυλική παρεμβολή και θερμικό θόρυβο (Signal to Interference and Noise Ratio - SINR) χρησιμοποιούμε την γενική σχέση

$$SINR = \frac{S}{N + I} = \frac{S}{N + \sum_{k=1}^n I_k} \quad (2.22)$$

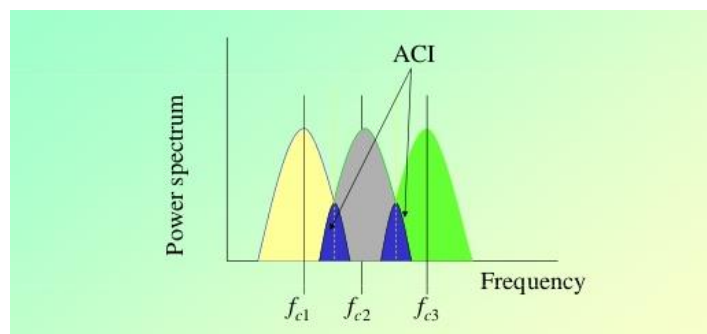
όπου S η στάθμη της ισχύος σήματος στο δέκτη, N ο θερμικός θόρυβος και I_k οι στάθμες ισχύος στο δέκτη από τα $k = 1, \dots, N$ παρεμβάλλοντα τερματικά.

Για την αντιμετώπιση της ομοδιαυλικής παρεμβολής υπάρχουν οι εξής λύσεις:

- Αύξηση του αριθμού κυψελών στην ομάδα επαναχρησιμοποίησης, έτσι ώστε η ισχύς παρεμβολής να εξασθενίσει σημαντικά.
- Αποδοτική κατανομή διαύλων στο σύστημα.
- Χρήση κατευθυντικών κεραιών (τομεοποίηση των κυψελών).
- Χρήση συστημάτων διαφορικής λήψης.

2.5.2 Παρεμβολή γειτονικού διαύλου (διακαναλική παρεμβολή)

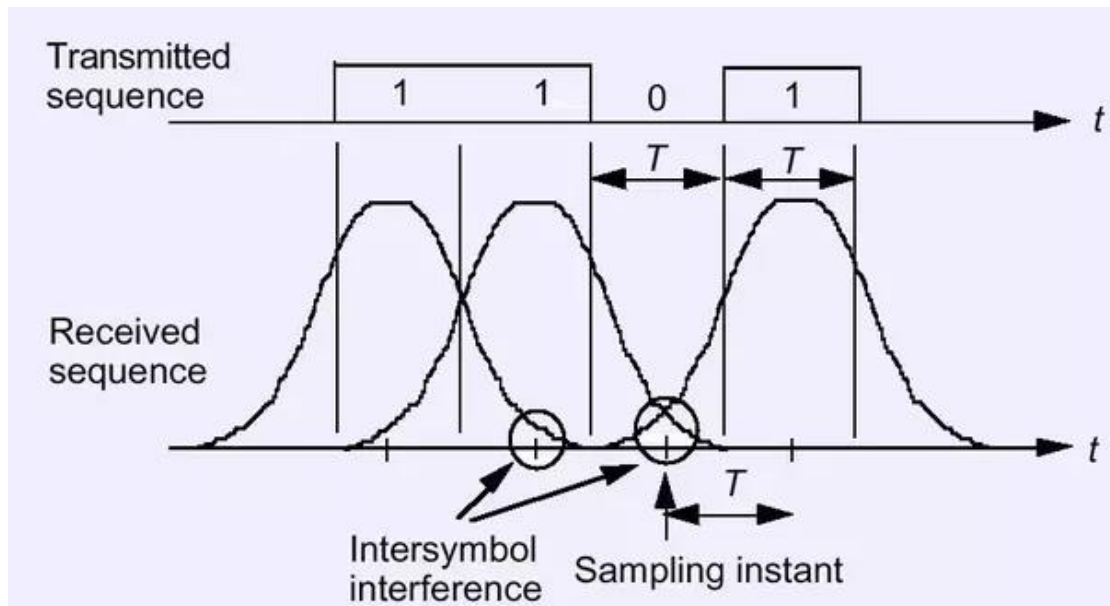
Είναι η παρεμβολή που προκύπτει όταν η ισχύς γειτονικών σημάτων προς το επιθυμητό δεν απορρίπτεται πλήρως από τα φίλτρα ραδιοσυχνοτήτων. Η παρεμβολή γειτονικού διαύλου προκύπτει ως αποτέλεσμα δύο αιτιών. Ένα μέρος της παρεμβολής οφείλεται στη διέλευση μέσω του φίλτρου λήψης της ανεπιθύμητης ισχύος που οφείλεται σε φασματικές ουρές των γειτονικών διαύλων που δεν έχουν καταπιεσθεί πλήρως από τα φίλτρα ραδιοσυχνοτήτων των αντίστοιχων πομπών. Ένα άλλο μέρος της παρεμβολής οφείλεται στο ότι το φίλτρο λήψης δεν προκαλεί πλήρη απόσβεση εκτός του εύρους ζώνης του επιθυμητού σήματος, επιτρέποντας έτσι σε ένα μέρος της ισχύος των γειτονικών διαύλων να υπερτίθεται στην ισχύ του επιθυμητού σήματος (εικόνα 2.4).



Εικόνα 2.4: Διακαναλική παρεμβολή

2.5.3 Διασυμβολική παρεμβολή

Είναι η παρεμβολή που οφείλεται στη χρονική εξάπλωση των ψηφίων, με αποτέλεσμα να επιδρά δυσμενώς στην αποκωδικοποίηση άλλου ή άλλων γειτονικών ψηφίων. Οι λόγοι στους οποίους οφείλεται η διασυμβολική παρεμβολή είναι συνήθως η ανεπάρκεια εύρους ζώνης συχνοτήτων (ή ο υψηλός ρυθμός μετάδοσης), ο μη ακριβής συγχρονισμός, η παραμόρφωση που δημιουργούν τα ενσύρματα μέσα μετάδοσης και η έντονη πολυδιαδρομική διάδοση (μεγάλη διασπορά καθυστέρησης) κατά την ασύρματη μετάδοση. Η τελευταία περίπτωση αντιμετωπίζεται με χρήση της τεχνικής ορθογωνικής πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας (OFDM = Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Στην επόμενη εικόνα (2.5) παρουσιάζεται η διασυμβολική παρεμβολή στο πεδίο του χρόνου:



Εικόνα 2.5: Διασυμβολική παρεμβολή

2.6 Θόρυβος

Ο όρος *θόρυβος* (*noise*) χρησιμοποιείται συνήθως για να προσδιορίσει ανεπιθύμητες κυματομορφές οι οποίες έχουν την τάση να διαταράσσουν τη μετάδοση και την επεξεργασία των σημάτων στα συστήματα επικοινωνιών, και πάνω στις οποίες δεν έχουμε πλήρη έλεγχο. Σε ένα επικοινωνιακό σύστημα, δυνητικές πηγές θορύβου μπορεί να είναι εξωτερικές ως προς το σύστημα (για παράδειγμα, ο *ατμοσφαιρικός θόρυβος*, ο *γαλακτικός θόρυβος*, ο *τεχνητός θόρυβος*) ή εσωτερικές ως προς αυτό (με κύριους εκπροσώπους τον *θόρυβο βολής* (*shot noise*) και τον *θερμικό θόρυβο* (*thermal noise*)) [19].

Η ανάλυση θορύβου των συστημάτων επικοινωνιών βασίζεται συνήθως σε μια ιδανική μορφή θορύβου που ονομάζεται *λευκός θόρυβος* (*white noise*), η πυκνότητα φάσματος του οποίου είναι ανεξάρτητη από την συχνότητα λειτουργίας. Το επίθετο *λευκός* χρησιμοποιείται με την έννοια ότι το λευκό φως περιέχει ίσες ποσότητες όλων των συχνοτήτων μέσα στο ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής εκπομπής. Η πυκνότητα φάσματος ισχύος του θορύβου με μια συνάρτηση δείγμα $w(t)$ εκφράζεται ως

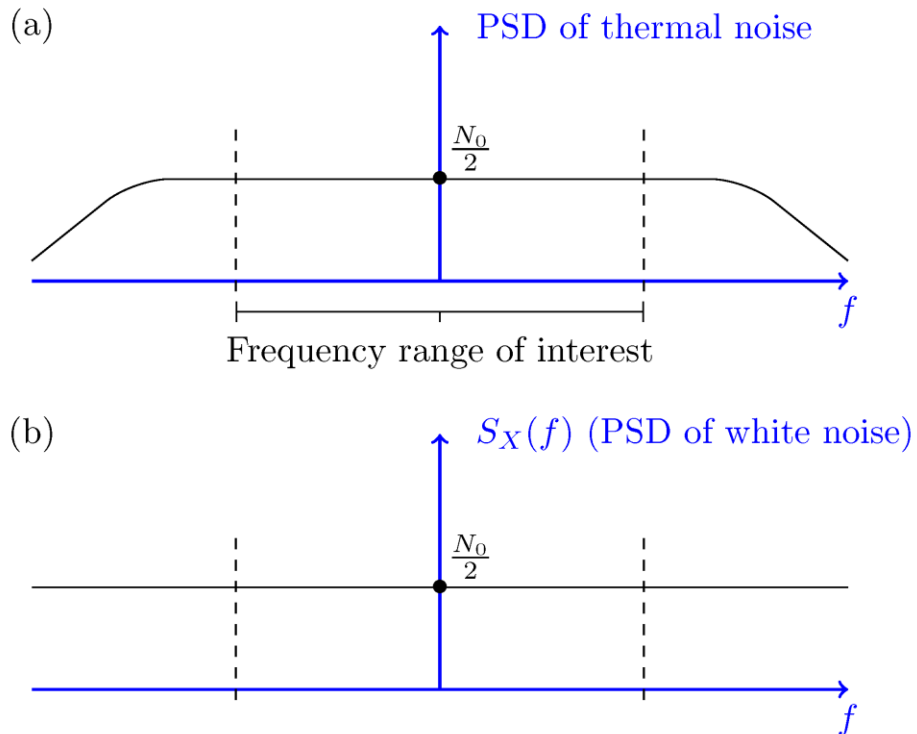
$$S_w(f) = \frac{N_0}{2} \quad (2.23)$$

με την παράμετρο N_0 να αναφέρεται συνήθως στην βαθμίδα εισόδου του δέκτη και να εκφράζεται ως

$$N_0 = kT_e \quad (2.24)$$

με $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K την σταθερά Boltzmann και T_e την ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου του δέκτη. Ο λευκός θόρυβος προστίθεται στο σήμα λήψης και καλείται συνήθως *λευκός προσθετικός θόρυβος* τύπου Gauss (AWGN-Additive White Gaussian Noise).

Ο λευκός θόρυβος έχει άπειρη ισχύ (άρα δεν είναι φυσικά υλοποιήσιμος) αλλά έχει απλές μαθηματικές ιδιότητες που τον κάνουν χρήσιμο στην στατιστική ανάλυση των συστημάτων. Τυπικές μορφές πυκνότητας φάσματος ισχύος θερμικού και λευκού θορύβου απεικονίζονται παρακάτω.



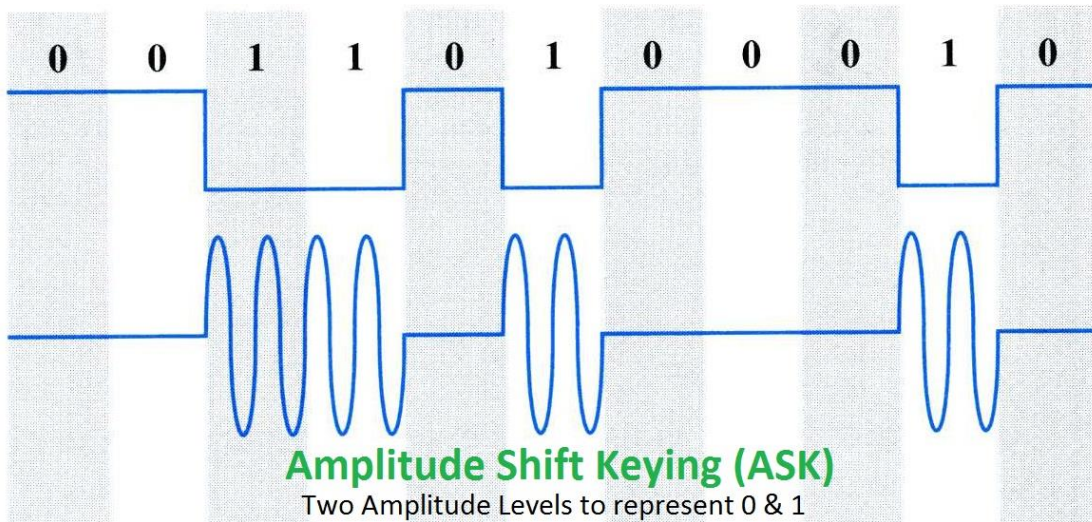
Εικόνα 2.5: Πυκνότητα φάσματος ισχύος θερμικού και λευκού θορύβου

3 Τεχνικές Διαμόρφωσης και Πολλαπλής Πρόσβασης

3.1 Τεχνικές Διαμόρφωσης

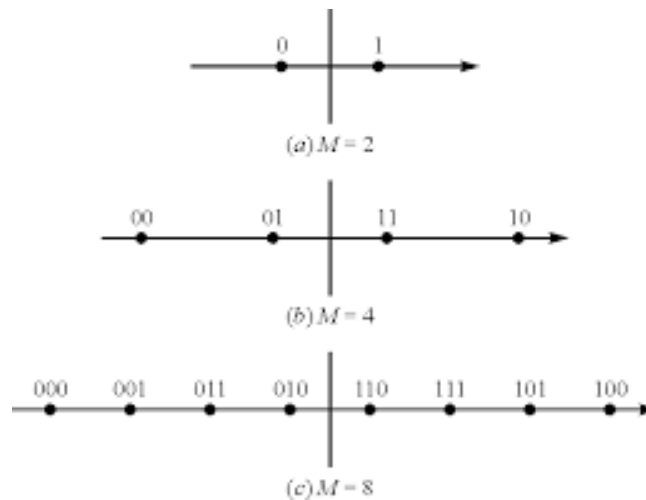
3.1.1 Διαμόρφωση ASK (Amplitude Shift Keying)

Στην ASK, η συχνότητα και η φάση του διαμορφωμένου σήματος παραμένουν σταθερά, ενώ το πλάτος μπορεί να λάβει μια από M πιθανές τιμές. Μια αντιστοίχιση του ψηφιακού σήματος βασικής ζώνης με το διαμορφωμένο φέρον για διαμόρφωση ASK με $M=2$ ακολουθεί στην εικόνα 3.1.



Εικόνα 3.1: Παράδειγμα διαμόρφωσης ASK για $M=2$ στάθμες σήματος

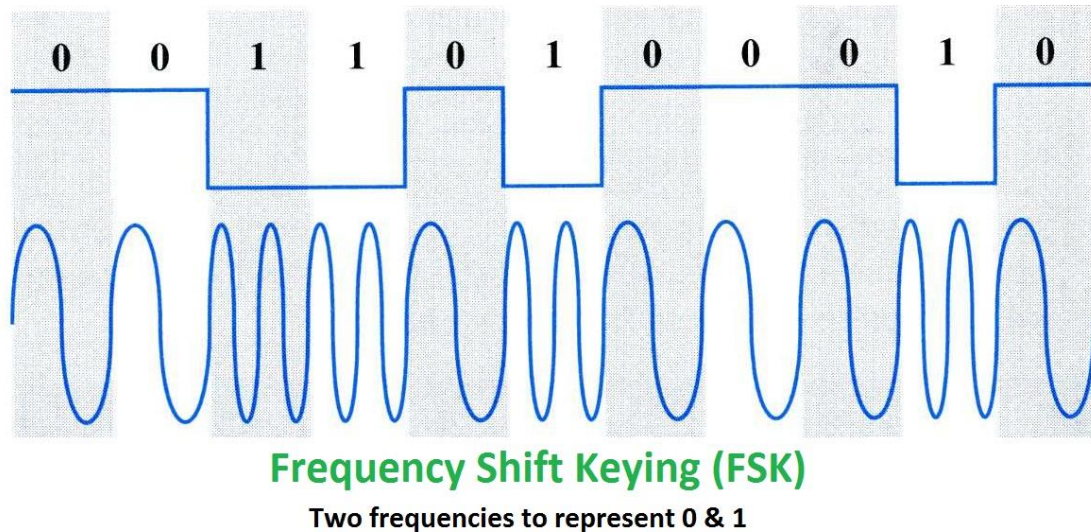
Η διαμόρφωση ASK πλέον δεν χρησιμοποιείται αυτούσια, αλλά μόνο σε συνδυασμό με άλλες διαμορφώσεις, όπως με την PSK και την FSK. Στην εικόνα 3.2 φαίνεται οι (ευθύγραμμοι) αστερισμοί σημάτων της ASK διαμόρφωσης για $M=2, 4$ και 6 .



Εικόνα 3.2: Αστερισμοί σημάτων της ASK διαμόρφωσης για $M=2, 4$ και 6

3.1.2 Διαμόρφωση FSK (Frequency Shift Keying)

Η διαμόρφωση FSK υλοποιείται με την αντιστοίχιση των ψηφίων 0 και 1 με δύο συχνότητες f_0 και f_1 . Σε αυτήν την περίπτωση τόσο το πλάτος, όσο και η φάση του διαμορφωμένου σήματος παραμένουν σταθερά. Στην πολυσταθμική εκδοχή της, η συχνότητα λαμβάνει μία από M πιθανές τιμές (μία για κάθε σύμβολο του αλφάβητου της διαμόρφωσης). Ακολούθως απεικονίζεται η αντιστοίχιση συμβόλων-κυματομορφής για την βασική περίπτωση όπου $M=2$ (απλή FSK).



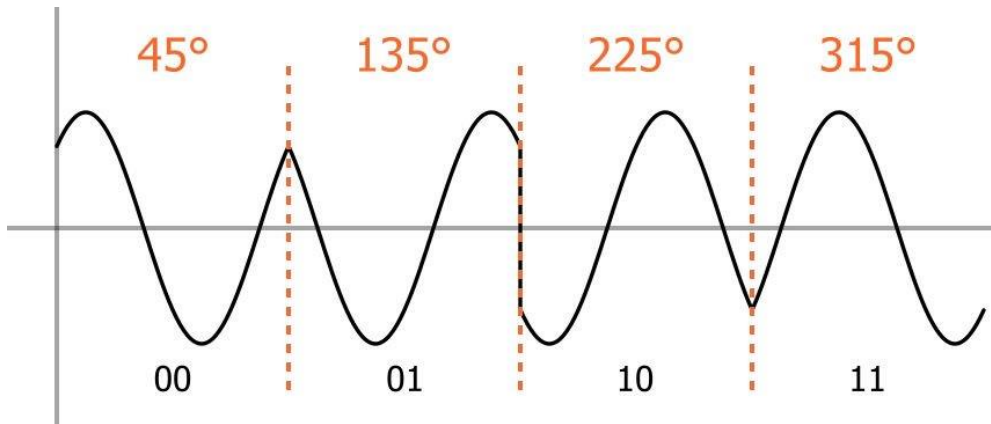
Εικόνα 3.3: Παράδειγμα διαμόρφωσης FSK για $M=2$ στάθμες σήματος

Εδώ δεν χρησιμοποιείται διάγραμμα αστερισμού για απεικόνιση των συμβόλων καθώς δεν μεταβάλλεται ούτε το πλάτος ούτε η φάση του σήματος.

3.1.3 Διαμόρφωση PSK (Phase Shift Keying)

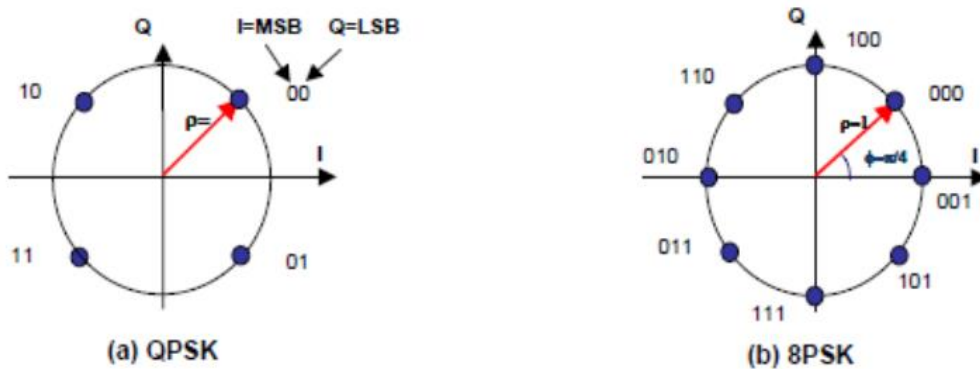
Στην κωδικοποίηση (διαμόρφωση) PSK, το πλάτος και η συχνότητα του διαμορφωμένου σήματος παραμένουν σταθερά ενώ η φάση του φέροντος εναλλάσσεται μεταξύ δύο τιμών που απέχουν κατά 180° σε αντιστοίχιση με το είδος του ψηφίου που μεταδίδεται [20]. Στην αντίστοιχη πολυσταθμική ψηφιακή διαμόρφωση (Multiple PSK ή MPSK) η φάση λαμβάνει μια από τις M πιθανές τιμές (μία για κάθε σύμβολο του αλφάβητου της διαμόρφωσης). Η αντιστοίχιση των συμβόλων σε σημεία του αστερισμού πραγματοποιείται με κωδικοποίηση Gray, οπότε αμέσως γειτονικά σημεία του αστερισμού διαφέρουν μόνο κατά ένα ψηφίο.

Στην εικόνα 3.4 παρουσιάζεται μια τυπική αντιστοίχιση (mapping) συμβόλων πληροφορίας με τις αντίστοιχες διαμορφωμένες κυματομορφές, για την περίπτωση της QPSK διαμόρφωσης (όπου $M=4$).



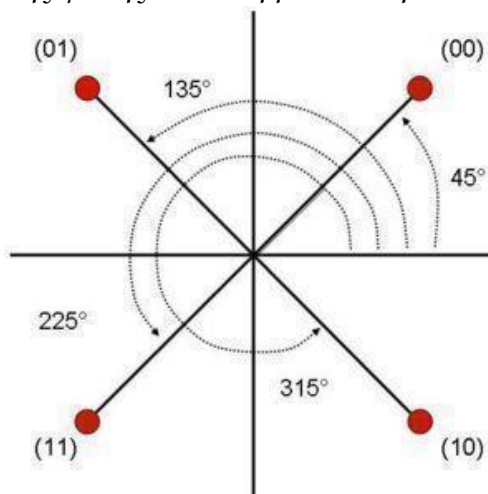
Εικόνα 3.4: Παράδειγμα διαμόρφωσης PSK για $M=4$ (QPSK)

Με το διάγραμμα αστερισμού σημάτων (constellation diagram) τα σύμβολα πληροφορίας αποτυπώνονται εποπτικά στο μιγαδικό επίπεδο (εδώ για τις διαμορφώσεις φάσης QPSK και 8PSK). Στην MPSK διαμόρφωση τα σημεία του αστερισμού σχηματίζουν πάντα έναν κύκλο.



Εικόνα 3.5: Διάγραμμα αστερισμού για MPSK με $M=4$ και $M=8$

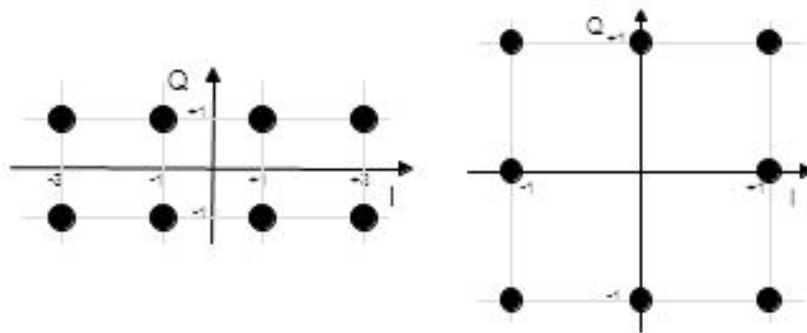
Ο τρόπος μέτρησης της φάσης κάθε συμβόλου παριστάνεται στην εικόνα 3.6.



Εικόνα 3.6: Γωνίες συμβόλων σε διάγραμμα αστερισμού για QPSK

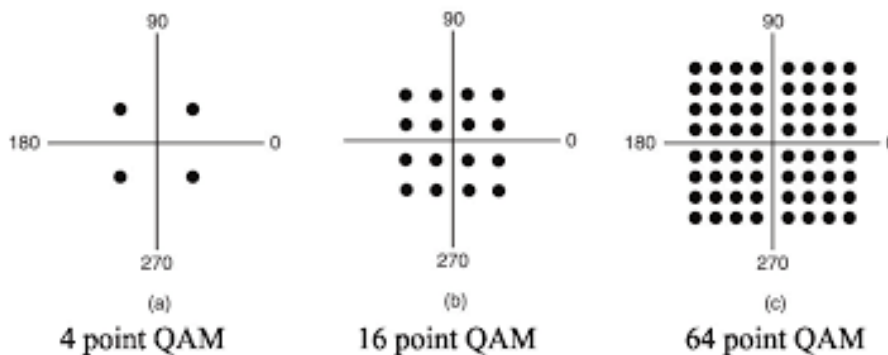
3.1.4 Διαμόρφωση M-QAM (M-Quadrature Amplitude Modulation)

Στην διαμόρφωση αυτή η πληροφορία κωδικοποιείται τόσο κατά το πλάτος, όσο και κατά την φάση του σήματος. Αποτελεί συνδυασμό των PSK και ASK, όπου τα ψηφιακά σύμβολα του αλφαβήτου έχουν διαφορετικά πλάτη ή/και φάσεις. Τα σημεία του αστερισμού σχηματίζουν ορθογωνικό πλέγμα, λόγω του ότι η διαμόρφωση αυτή ουσιαστικά ισοδυναμεί με συνδυασμό δύο διαμορφώσεων πλάτους των οποίων οι φάσεις παρουσιάζουν διαφορά 180 μοιρών. Η μορφή του διαγράμματος αστερισμού μπορεί να διαφέρει για διαμόρφωση με το ίδιο M (όπως φαίνεται στην εικόνα 3.7), καθώς οι δύο επιμέρους κάθετες διαμορφώσεις πλάτους μπορεί να είναι διαφορετικές.



Εικόνα 3.7: Διαγράμματα αστερισμού (ορθογωνικό και τετραγωνικό) για δύο διαφορετικές 8-QAM υλοποιήσεις

Τα διαγράμματα αστερισμού υλοποιήσεων MQAM για M=4, 16 και 64 απεικονίζονται κάτωθι:

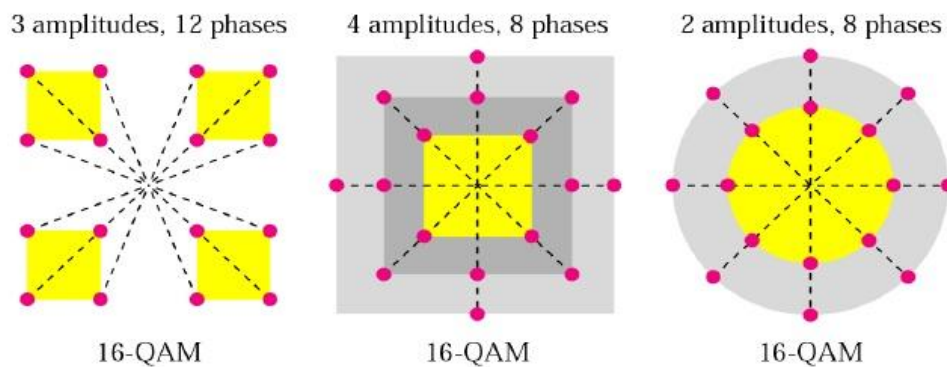


Εικόνα 3.8: Διαγράμματα αστερισμού για MQAM διαφορετικής τάξης διαμόρφωσης (αριθμού M)

3.1.5 Διαμόρφωση MAPSK (M-Quadrature Amplitude Modulation)

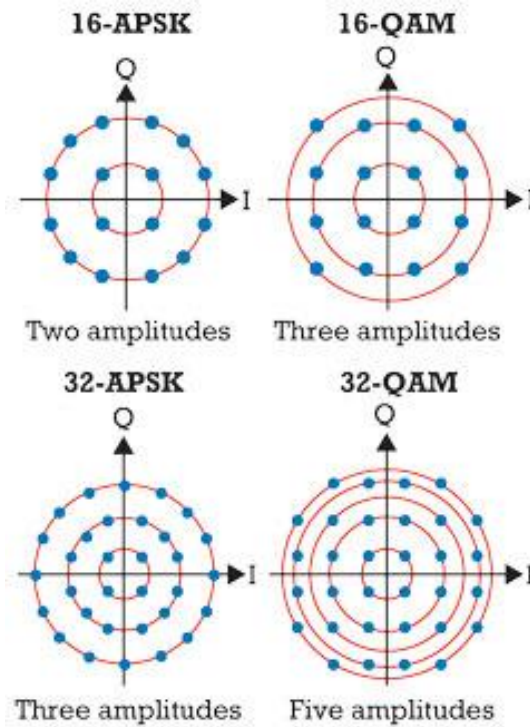
Παραλλαγή της διαμόρφωσης MQAM είναι η διαμόρφωση MAPSK. Όπως και στην MQAM, και στην περίπτωση της MAPSK τα σύμβολα πληροφορίας αντιστοιχίζονται στις μεταβολές του πλάτους και της φάσης του σήματος. Η διαφορά εδώ είναι ότι ο αστερισμός δεν είναι πλέον τετραγωνικός αλλά αποτελείται από ομόκεντρους κύκλους διαφορετικής ακτίνας. Τοποθετώντας τα σημεία του αστερισμού επί ομόκεντρων κύκλων, μειώνεται το πλήθος των δυνατών τιμών που μπορεί να λάβει το πλάτος (δηλαδή η ισχύς) των σημείων του αστερισμού σε σχέση με το αντίστοιχο πλήθος της MQAM.

Για παράδειγμα, στην εικόνα 3.8 φαίνεται ότι υπάρχουν 2 δυνατές τιμές πλάτους για την 16APSK έναντι 3 η και 4 (ανάλογα με τον αστερισμό) δυνατών τιμών για την 16QAM. Λόγω του ότι με αυτόν τον τρόπο (μείωση των δυνατών τιμών του πλάτους) αντιμετωπίζονται καλύτερα οι δυσμενείς επιπτώσεις που οφείλονται στη μη γραμμική λειτουργία των ενισχυτών που είναι απαραίτητοι σε ζεύξεις μεγάλων αποστάσεων [21], το σχήμα διαμόρφωσης MAPSK χρησιμοποιείται στις δορυφορικές επικοινωνίες και έχει υιοθετηθεί από το πρότυπο DVB-S2 [22].



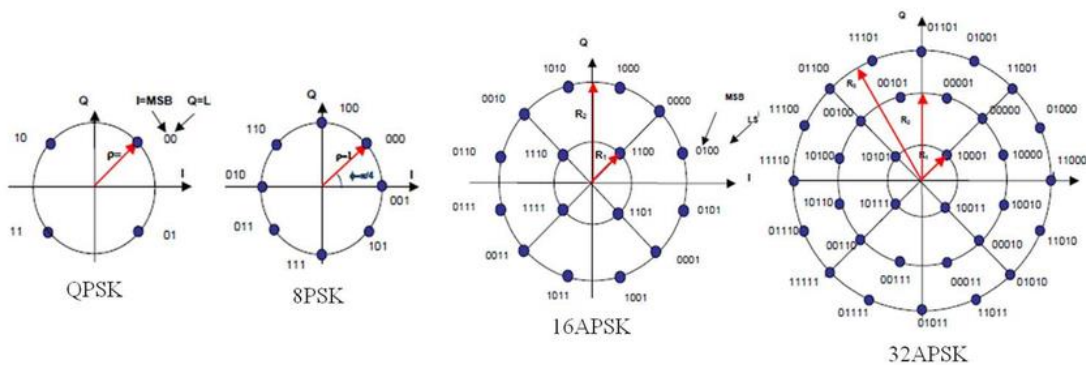
Εικόνα 3.9: Διαγράμματα αστερισμού για διαφορετικά 16-QAM

Σε μεγαλύτερους αστερισμούς παρατηρούμε πως η μείωση των επιπέδων πλάτους είναι ακόμα μεγαλύτερη (π.χ. 3 επίπεδα στο 32-APSK σε σχέση με 5 επίπεδα στο 32-QAM). Σχετικό παράδειγμα παρατίθεται στην εικόνα 3.10.



Εικόνα 3.10: Επίπεδα πλάτους για M-APSK και M-QAM για M=16 και M=32

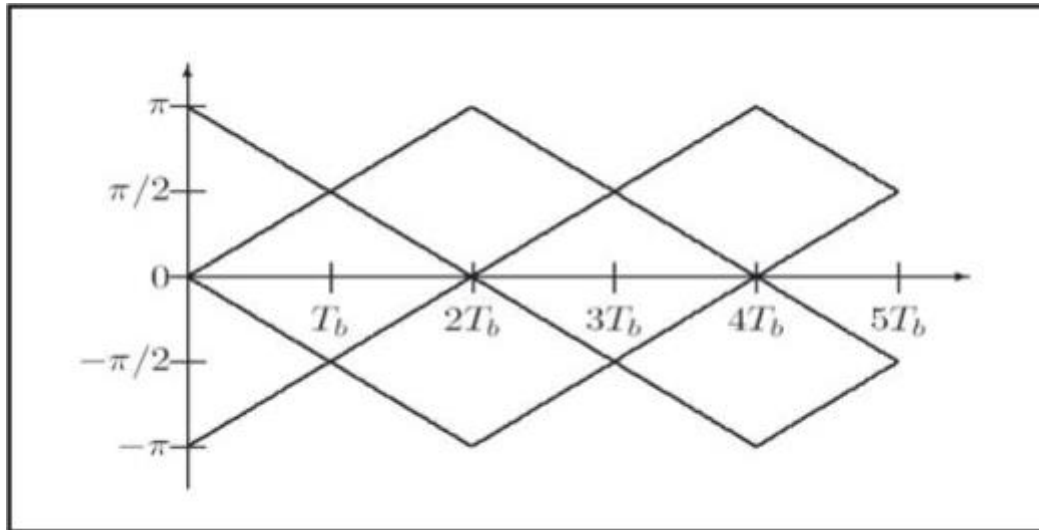
Ακολουθούν τα διαγράμματα αστερισμού υλοποιήσεων M-APSK για M=4, 8, 16 και 32:



Εικόνα 3.11: Διαγράμματα αστερισμού για M-APSK διαφορετικής τάξης διαμόρφωσης (αριθμού M)

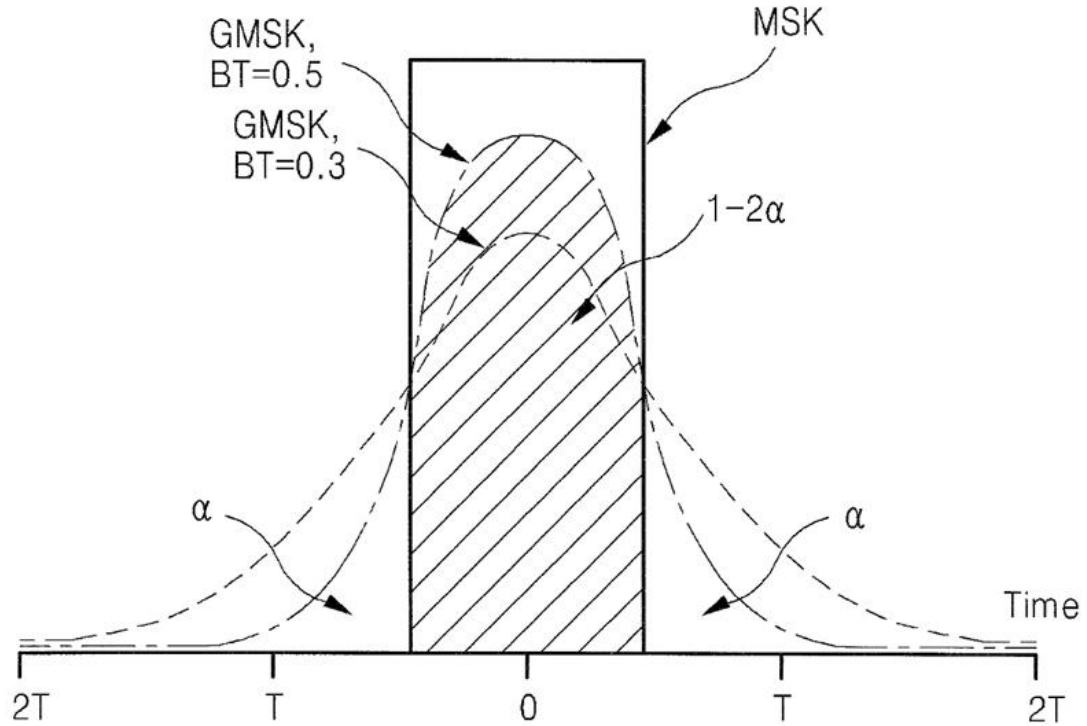
3.1.6 Διαμορφώσεις MSK (Minimum Shift Keying) και GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying)

Η διαμόρφωση MSK αποτελεί ειδική περίπτωση της δυαδικής FSK ($M=2$, δύο δυνατές συχνότητες εκπομπής), με τον ελάχιστο δυνατό διαχωρισμό που εξασφαλίζει την ορθογωνιότητα των δύο εκδοχών του FSK σήματος. Έτσι λοιπόν, η MSK είναι η διαμόρφωση FSK με τις ελάχιστες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης. Ακολουθεί το διάγραμμα Trellis της φάσης μιας δυαδικής MSK διαμόρφωσης:



Εικόνα 3.12: διάγραμμα Trellis της φάσης MSK διαμόρφωσης

Η GMSK είναι μια μορφή δυαδικής διαμόρφωσης που προκύπτει από την MSK. Αφού διαμορφωθεί η κυματομορφή σύμφωνα με την MSK, διέρχεται από ένα φίλτρο μορφοποίησης παλμών Gauss, που της προσδίδει καλύτερη απόδοση ως προς την ισχύ και το φάσμα. Στην επόμενη εικόνα φαίνονται οι επιπτώσεις της εισαγωγής φίλτρου Gauss στον παλμό:



Εικόνα 3.13: Εφαρμογή φίλτρου Gauss με πλάτη 0.3 και 0.5 για την δημιουργία GMSK από MSK

Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται βασικά χαρακτηριστικά (αριθμός bit ανά σύμβολο, αριθμός σημείων αστερισμού, παραδείγματα συμβόλων) για κάποια από τα πλέον χρησιμοποιούμενα είδη διαμορφώσεων:

Multiplier	Scheme	Number of Bits	Bits Per Symbol	Symbol Example
1x	On-Off Keying	2^1	1	0
2x	QPSK	2^2	2	01
4x	16 QAM	2^3	4	0101
5x	32 QAM	2^4	5	01010
6x	64 QAM	2^5	6	010101
7x	128 QAM	2^6	7	0101010
8x	256 QAM	2^7	8	01010101
9x	512 QAM	2^8	9	010101010
10x	1024 QAM	2^9	10	0101010101

Εικόνα 3.14: Βασικά χαρακτηριστικά διαμορφώσεων

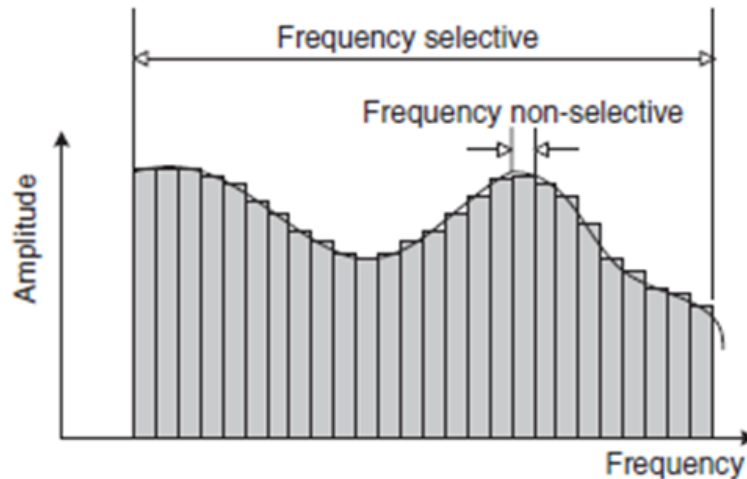
3.1.7 Διαμόρφωση OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

Προκειμένου να υποστηριχθεί ένας συγκεκριμένος ρυθμός συμβόλων ανά δευτερόλεπτο (έστω R_s), το ελάχιστο απαιτούμενο εύρος ζώνης είναι το εύρος ζώνης Nyquist, το οποίο είναι $R_s/2$ Hz. Αυτό σημαίνει ότι για μετάδοση δεδομένων με χρήση ενός φέροντος απαιτείται μεγαλύτερο εύρος ζώνης προκειμένου να μεταδοθούν δεδομένα με υψηλότερο ρυθμό. Καθώς ο ρυθμός συμβόλων αυξάνεται, το εύρος ζώνης του σήματος γίνεται επίσης μεγαλύτερο. Όταν πλέον το εύρος ζώνης σήματος γίνει μεγαλύτερο από το εύρος ζώνης συνοχής του ασύρματου διαύλου, ο δίαυλος εμφανίζει επιλεκτικές ως προς την συχνότητα διαλείψεις καθώς και διαλείψεις πολυδιαδρομικής διάδοσης, κάτι που προκαλεί και διασυμβολική παρεμβολή (Inter-Symbol Interference, ISI).

Προκειμένου να ξεπεραστεί η επιλεκτικότητα συχνότητας που προκύπτει από την μετάδοση σε δίαυλο ευρείας ζώνης με χρήση ενός φέροντος (ειδικά για υψηλού ρυθμού μετάδοση δεδομένων), η μετάδοση μπορεί να γίνει με χρήση πολλαπλών φερόντων επιτυγχάνοντας σημαντική απάλυνση των παρενεργειών που προαναφέρθηκαν.

Μια ειδική μορφή πολυδιαυλικής διαμόρφωσης είναι η *Ορθογωνική Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας* (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - OFDM). Σε αυτό το είδος διαμόρφωσης, η ροή των ψηφιακών συμβόλων διαιρείται σε πολλαπλές ροές και η μετάδοση πραγματοποιείται σε αντίστοιχου αριθμού ορθογώνια υποφέροντα τα οποία έχουν διαφορετικές κεντρικές συχνότητες. Η τεχνική OFDM έχει χρησιμοποιηθεί σε πλήθος εφαρμογών – στα πρότυπα κινητής επικοινωνίας LTE, LTE Advanced, στην ψηφιακή τηλεόραση (πρότυπα DVB-T/T2, DVB-H, DMB-T/H, DVB-C2), στο WiMax, στα πρότυπα ασυρμάτων δικτύων IEEE 802.11a,g,n,ac,ad, στην τεχνολογία ψηφιακού ραδιοφώνου DAB (Digital Audio Broadcasting) και σε άλλες εφαρμογές.

Η αυξητική τάση στην ζήτηση δεδομένων και η απαίτηση για ολοένα και μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης οδήγησε στην ανάγκη υπερκέρρασης των προβλημάτων (επιλεκτικές ως προς την συχνότητα διαλείψεις, διασυμβολική παρεμβολή) που εμπόδιζαν την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων. Η υιοθέτηση της διαμόρφωσης OFDM μετριάζει την εμφάνιση των φαινομένων αυτών διαιρώντας το συνολικό φάσμα εκπομπής σε επιμέρους τμήματα (φέροντα) στενής ζώνης και μεταδίδοντας την πληροφορία παράλληλα σε καθένα από αυτά. Αν το εύρος του καθενός από αυτά τα φέροντα είναι αρκούντως στενό, οι διαλείψεις θα είναι επίπεδες (μη επιλεκτικές) και το σήμα λήψης δεν θα είναι παραμορφωμένο, όπως φαίνεται στην επόμενη εικόνα.



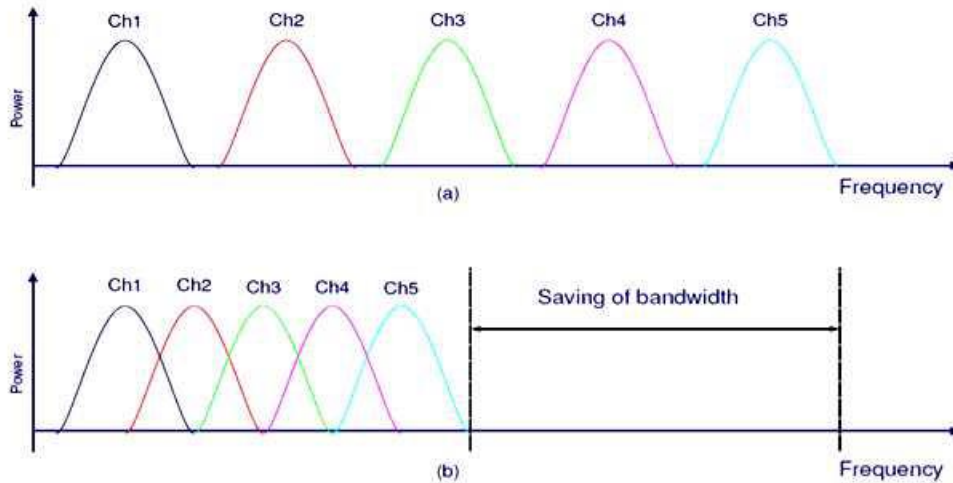
Εικόνα 3.15: Αντιμετώπιση της επιλεκτικότητας συχνοτήτων με διαίρεση του φάσματος σε επιμέρους φέροντα

Το σημαντικό προτέρημα της δραστηκής μείωσης των ISI παρεμβολών, εξηγεί την καίρια σημασία της OFDM στα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά συστήματα.

Η κύρια ιδέα της ορθογωνικής πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing OFDM) είναι η διαίρεση του προς μετάδοση ευρυζωνικού σήματος (wideband signal) σε μεγάλο αριθμό παράλληλων σημάτων στενής ζώνης (narrowband signals). Τα πολλαπλά υποφέροντα επιλέγονται να είναι ορθογώνια μεταξύ τους υπό ιδανικές συνθήκες διάδοσης.

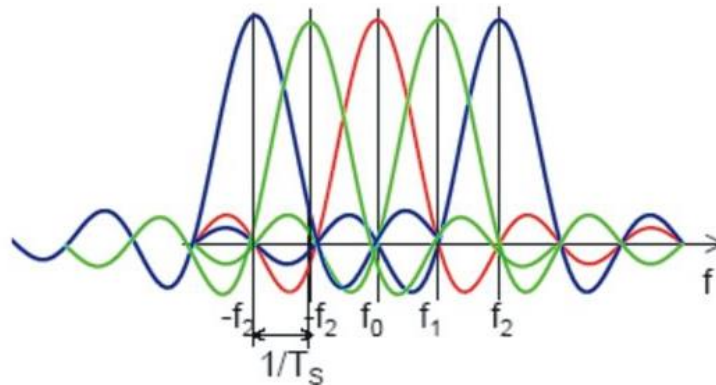
Στην τεχνική OFDM τα προς μετάδοση ψηφιακά δεδομένα διοχετεύονται παράλληλα στα υποκανάλια, με χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης, δηλαδή έχουμε ισοδύναμα πολλά συστήματα τα οποία μεταδίδουν, ταυτόχρονα το καθένα, ένα μικρό μέρος της πληροφορίας, με αργό ρυθμό μετάδοσης, ώστε το καθένα να είναι σήμα στενής ζώνης, ενώ ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης παραμένει σταθερός. Το πλήθος των υποδιαύλων καθορίζεται ώστε το εύρος ζώνης του καθενός από αυτούς (B_i) να είναι μικρότερο από το εύρος ζώνης συνοχής (B_c) του ασύρματου διαύλου (ή ισοδύναμα η διάρκεια συμβόλου T_i καθενός από αυτούς να είναι μεγαλύτερη από τη διασπορά καθυστέρησης σ_t του διαύλου), οπότε κάθε υποδιάυλος χαρακτηρίζεται από επίπεδες διαλείψεις (flat fading). Με αυτό τον τρόπο μειώνεται δραστηκά η διασυμβολική παρεμβολή (ISI), όπως απεικονίστηκε και στην προηγούμενη εικόνα.

Σε σύγκριση με την απλή πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (FDM = Frequency Division Multiplexing), η τεχνική OFDM επιτυγχάνει εξοικονόμηση φάσματος, αφού τα υποκανάλια είναι αλληλεπικαλυπτόμενα. Η αλληλοεπικάλυψη των καναλιών επιτρέπεται, με την προϋπόθεση ότι μεταξύ τους θα είναι ορθογώνια (Orthogonal FDM). Ακολουθεί μια σχηματική απεικόνιση του κέρδους αυτού.



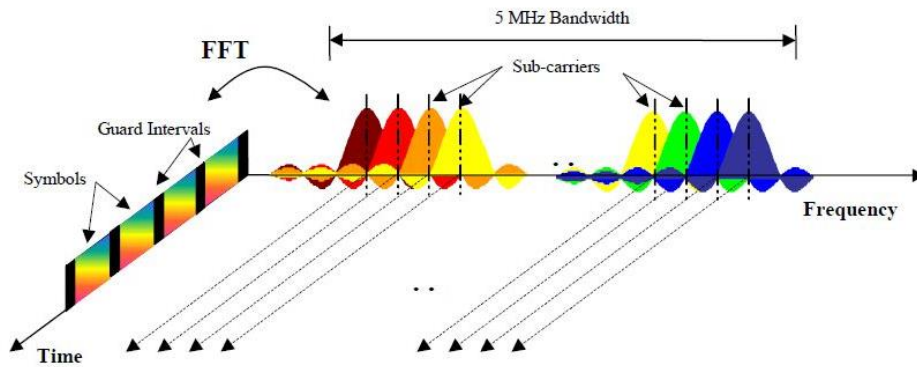
Εικόνα 3.16: Κέρδος σε φάσμα με την χρήση της OFDM σε σχέση με την FDM

Η ορθογωνιότητα εξασφαλίζει ότι στα σημεία όπου το φάσμα ενός υποκαναλιού παρουσιάζει κορυφή (ολικό μέγιστο), το φάσμα των γειτονικών υποκαναλιών παρουσιάζει μηδενισμό. Για να ισχύει αυτό, θα πρέπει τα υποκανάλια να έχουν φέρουσες συχνότητες που να είναι ακέραια πολλαπλάσια μιας βασικής συχνότητας ($f_n = n f_1$), όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 3.17: Ορθογώνια διατεταγμένα φέροντα

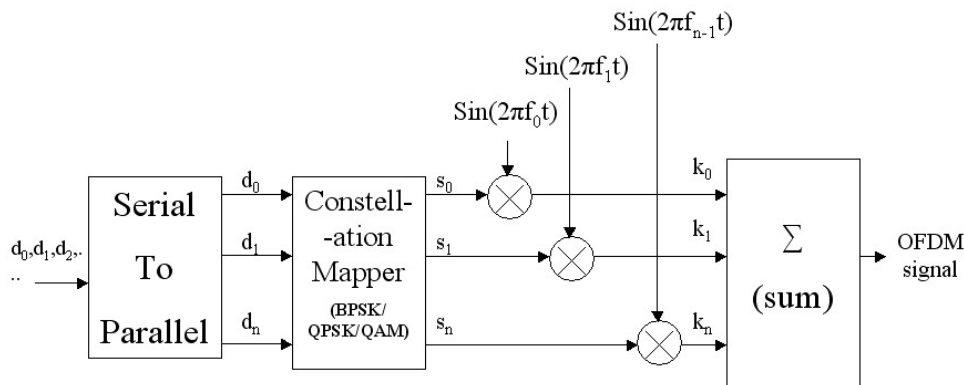
Ακολούθως απεικονίζεται η λειτουργία της OFDM στον χρόνο και στην συχνότητα. Είναι εμφανές ότι στο πεδίο του χρόνου, μεταξύ διαδοχικών συμβόλων, εισάγονται χρονικά διαστήματα φύλαξης (Guard Intervals), για την προστασία του OFDM σήματος από την διασυμβολική παρεμβολή.



Εικόνα 3.18: Λειτουργία της OFDM στον χρόνο και στην συχνότητα

Η πρόοδος στα ηλεκτρονικά κυκλώματα επέτρεψε την υλοποίηση της OFDM με ευθύ και αντίστροφο διακριτό μετασχηματισμό Fourier (DFT-Discrete Fourier Transform) αλλά και με πιο γρήγορους αλγόριθμους πραγματοποίησης των μετασχηματισμών αυτών (FFT-Fast Fourier Transform και IFFT-Inverse Fast Fourier Transform) με τρόπο αρκετά αποδοτικό και με χαμηλό κόστος.

Ακολουθώς παρατίθεται το μπλοκ διάγραμμα ενός κυκλώματος που υλοποιεί την OFDM διαμόρφωση. Το γεγονός αυτό αποτελεί απλούστευση της διαδικασίας, καθώς υπάρχουν γρήγοροι αλγόριθμοι για την υλοποίηση των μετασχηματισμών αυτών (FFT-Fast Fourier Transform και IFFT-Inverse Fast Fourier Transform), εύκολοι στην υλοποίηση και χωρίς μεγάλο κόστος, λόγω της ανάπτυξης στους τομείς της ψηφιακής σχεδίασης και των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.



Εικόνα 3.19: Διάγραμμα OFDM υλοποίησης

Στα σήματα OFDM παρατηρούνται γενικά μεγάλες τιμές Peak-to-Average Power Ratio (PAPR), καθώς πολλές φορές τα ανεξάρτητα υποκανάλια συνδυάζονται προσθετικά στο χρόνο. Έτσι, για να αποφευχθεί η παραμόρφωση που προκαλεί η μη γραμμική λειτουργία, θα πρέπει οι ενισχυτές είτε να παρουσιάζουν μεγάλο εύρος γραμμικής λειτουργίας, άρα να είναι και υψηλού κόστους, είτε να λειτουργούν με μεγάλο περιθώριο ισχύος (backoff) και χαμηλή απόδοση. Αποδεικνύεται ότι το PAPR αυξάνει γραμμικά με τον αριθμό των υποκαναλιών. Συνεπώς, το πλήθος των υποκαναλιών N , πέρα από κάτω όριο που σχετίζεται με την αποφυγή των επιλεκτικών διαλείψεων και της διασυμβολικής παρεμβολής, έχει και άνω όριο, το

οποίο τίθεται από την επιθυμία για γραμμική λειτουργία των ενισχυτών χωρίς σημαντική αλλοίωση και μείωση των παρεμβολών μεταξύ φερόντων ICI.

Η OFDM τεχνική παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα [23]:

- Αυξάνει την ευρωστία των ασύρματων διαύλων, χάρη στην υποδιαίρεση του διαύλου ευρείας ζώνης μεταδιδόμενο σήμα σε πολλαπλούς υποδιαύλους στενής ζώνης, περιορίζοντας τις διασυμβολικές παρεμβολές πρέπει να περιορίζονται σε μεγάλο βαθμό εντός ενός *διαστήματος προστασίας* (*guard interval*) που υπάρχει ως πρόθεμα στην αρχή κάθε συμβόλου
- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν δέκτες χαμηλής πολυπλοκότητας, εκμεταλλευόμενοι την ευκολότερη ισοστάθμιση στο πεδίο των συχνοτήτων (λόγω της ύπαρξης πλέον στενών, επίπεδων διαύλων)
- Απλός συνδυασμός σημάτων από πολλαπλούς πομπούς σε δίκτυα εκπομπής
- φασματική αποδοτικότητα- σε αντίθεση με τα παραδοσιακά FDM συστήματα όπου τα κανάλια είναι διαχωρισμένα και μεταξύ τους υπάρχουν διαστήματα προστασίας για την αποφυγή ACI παρεμβολών, στα OFDM τα κανάλια επικαλύπτονται χωρίς απώλεια της ορθογωνιότητας και με τον ρυθμό μετάδοσης να παραμένει ίδιος λόγω του μεγάλου αριθμού διαφορετικών ροών
- μείωση διασυμβολικής παρεμβολής- τα OFDM συστήματα παρουσιάζουν μεγάλη ανοχή στις επιλεκτικές διαλείψεις, καθώς η διάρκεια συμβόλου για κάθε υποκανάλι είναι μεγαλύτερη από τα συμβατικά συστήματα και υπερβαίνει την διασπορά διαύλου ενώ υπάρχει και διάστημα φύλαξης με την μορφή κυκλικού προθέματος από σύμβολο σε σύμβολο
- ανθεκτικότητα στα δυσμενή φαινόμενα του διαύλου- μιας και η πληροφορία διαιρείται σε πλήθος υποκαναλιών στενού εύρους ζώνης, μόνο ένα μικρό τμήμα της θα επηρεάζεται από τις παρεμβολές και τις επιλεκτικές διαλείψεις, καθιστώντας δυνατή την ανάκτησή της στο δέκτη με κατάλληλα σχήματα κωδικοποίησης και ανάδευσης των δεδομένων
- έχει περιορισμένες απαιτήσεις χρονισμού - σε σχέση με τα TDMA συστήματα δεν απαιτείται αυστηρός χρονικός συντονισμός, οι επιπτώσεις σε περίπτωση αστοχίας περιορίζονται σε στροφή της φάσης του σήματος
- απλούστερη ισοστάθμιση καναλιού- κάθε υποκανάλι λόγω του στενού εύρους ζώνης αντιμετωπίζει μη επιλεκτικές (επίπεδες) διαλείψεις, η αντιστάθμιση των οποίων στο δέκτη είναι εύκολο έργο

Από την άλλη, τα σημαντικότερα μειονεκτήματα των OFDM συστημάτων είναι:

- υψηλές τιμές του PAPR - το OFDM παρουσιάζει μεγάλη δυναμική περιοχή, μειώνοντας την αποδοτικότητα των ενισχυτών για την αποφυγή παραμόρφωσης, καθώς θα πρέπει να λειτουργούν με μεγάλο περιθώριο ισχύος για παραμονή στην γραμμική περιοχή

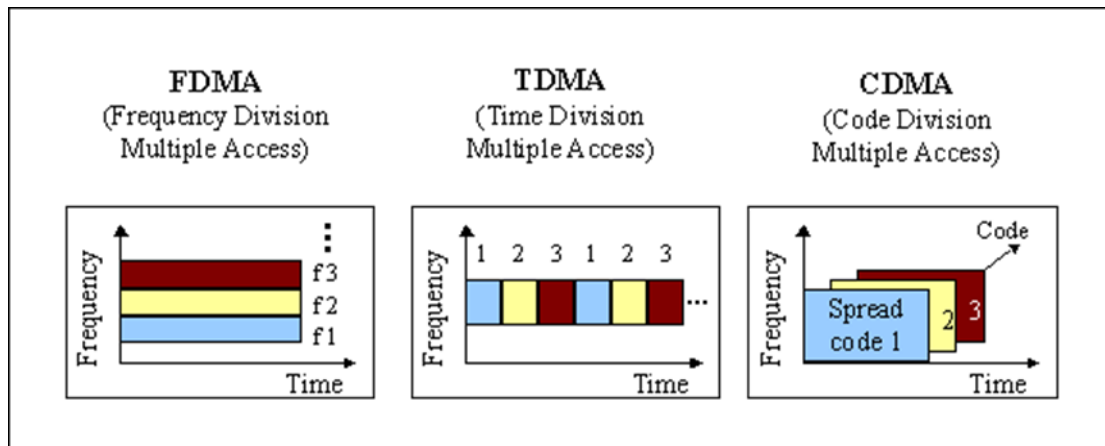
- ευαισθησία στην απόκλιση συχνότητας- ο συγχρονισμός των φερουσών συχνοτήτων των καναλιών πρέπει να είναι ακριβής για την αποφυγή της ICI παρεμβολής
- ευαισθησία στη διασπορά Doppler- προκαλεί ολίσθηση συχνότητας και ICI παρεμβολές

3.2 Τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης

Το μέσο μετάδοσης για όλους τους χρήστες ενός ασύρματου συστήματος επικοινωνιών είναι κοινό, ο ασύρματος δίαυλος. Για να επιτευχθεί η παροχή υπηρεσιών θα πρέπει σε κάθε χρήστη να αποδοθεί ανεξάρτητο και προστατευμένο από παρεμβολές άλλων κανάλι. Ο διαχωρισμός αυτός μπορεί να γίνει εφικτός σε τέσσερα διαφορετικά πεδία- στον χρόνο, την συχνότητα, την κωδικοποίηση και τον χώρο- δημιουργώντας σε καθένα από αυτά ορθογώνιες, μη επικαλυπτόμενες περιοχές προς αξιοποίηση. Η κατανομή των καναλιών στους χρήστες πραγματοποιείται από τα σχήματα πολλαπλής πρόσβασης. Ανάλογα με το πεδίο διαχωρισμού των πόρων του συστήματος, οι τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης διακρίνονται σε διαίρεσης συχνότητας FDMA (Frequency Division Multiple Access), χρόνου TDMA (Time Division Multiple Access), κώδικα CDMA (Code Division Multiple Access) και χώρου SDMA (Space Division Multiple Access). Επιπλέον, υπάρχουν σχήματα όπου ο διαχωρισμός γίνεται σε περισσότερα του ενός πεδία. Θα γίνει εκτενής αναφορά παρακάτω σε ένα από αυτά, την πολυδιαυλική πρόσβαση OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), που μπορεί να θεωρηθεί συνδυασμός FDMA και TDMA.

3.2.1 Τεχνική FDMA

Στην τεχνική πολλαπλής πρόσβασης FDMA ο διαχωρισμός των χρηστών γίνεται στο πεδίο των συχνοτήτων. Δημιουργούνται επιμέρους κανάλια διαφορετικών φερουσών συχνοτήτων, σταθερού εύρους ζώνης και παραχωρούνται κατ' αποκλειστικότητα σε κάθε χρήστη, είτε με στατικό τρόπο είτε δυναμικά, ανάλογα δηλαδή με την επικοινωνιακή κίνηση στο σύστημα. Για την εξασφάλιση της απομόνωσης και της ορθογωνιότητας των καναλιών, εισάγονται μεταξύ τους φασματικά διαστήματα φύλαξης (guard intervals), περιορίζοντας έτσι την παρεμβολή γειτονικού διαύλου. Το εύρος ζώνης των καναλιών είναι σταθερό και επιλέγεται βάσει των υπηρεσιών που προσφέρει το σύστημα. Συνήθως, επιλέγεται στενό εύρος για τα κανάλια, μικρότερο του εύρους ζώνης συνοχής του διαύλου, προς αποφυγή της διασυμβολικής παρεμβολής. Η αποκλειστική διάθεση τμήματος του φάσματος σε ένα χρήστη, ακόμα και σε ανενεργές χρονικές περιόδους, σε συνδυασμό με την σπατάλη φάσματος μόνο για λόγους αξιοπιστίας της ζεύξης (διαστήματα φύλαξης), καθιστούν την τεχνική FMDMA μη αποδοτική φασματικά. Επιπλέον, το κόστος εξοπλισμού είναι αυξημένο, κυρίως για τους σταθμούς βάσης όπου απαιτείται πομπός για κάθε διαφορετική συχνότητα και υψηλής ποιότητας ζωνοπερατά φίλτρα για την διαίρεση των καναλιών.



Εικόνα 3.20: Σύγκριση τεχνικών πολλαπλής πρόσβασης

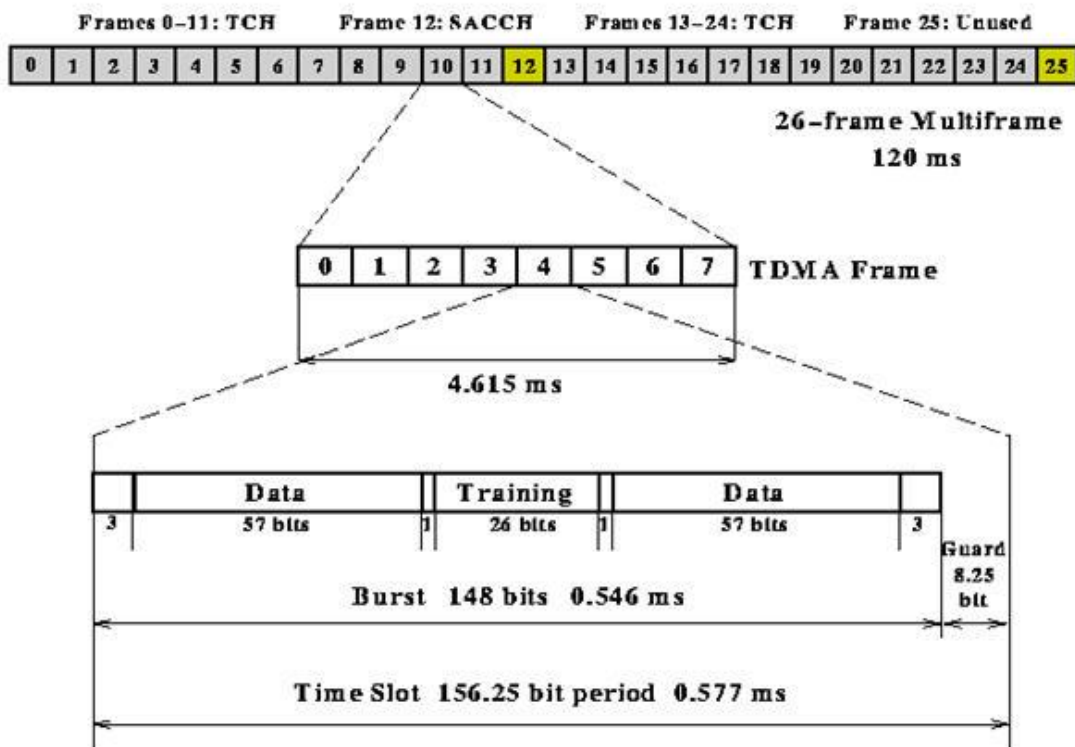
Η τεχνική FDMA είναι απλή, χωρίς τις ανάγκες συγχρονισμού των άλλων σχημάτων πολλαπλής πρόσβασης και ήταν η πρώτη επιλογή για ασύρματα συστήματα επικοινωνίας πρώτης γενιάς.

Πλέον σπάνια χρησιμοποιείται αυτούσια, αλλά σαν μέρος υβριδικών σχημάτων πολλαπλής πρόσβασης, όπως το OFDMA.

3.2.2 Τεχνική TDMA

Η τεχνική TDMA διακρίνει τα φυσικά κανάλια στο πεδίο του χρόνου. Σε κάθε χρήστη παραχωρούνται χρονοσχισμές (slots), το σύνολο των οποίων αποτελεί ένα TDMA πλαίσιο (frame), όπως φαίνεται στο σχήμα 3.9. Τόσο στο τέλος όσο και στην αρχή μιας χρονοσχισμής υπάρχουν ψηφία ελέγχου, μιας και είναι απαραίτητος ο αυστηρός συντονισμός μεταξύ των χρηστών για την διατήρηση της απομόνωσης κάθε σύνδεσης. Η TDMA έχει πολλαπλάσιο ρυθμό μετάδοσης από την FDMA, και αντίστοιχα μικρότερη περίοδο συμβόλου. Όταν όμως ένας διάυλος είναι ευρυζωνικός, έχει δηλαδή μεγάλη διασπορά καθυστέρησης συγκρίσιμη της

διάρκειας των χρονοσχισμών, εμφανίζεται έντονο το φαινόμενο της διασυμβολικής παρεμβολής. Για να μειωθεί λοιπόν η επίδραση της πολυδιαδρομικής διάδοσης στη ποιότητα την ζεύξης, εισάγονται χρονικά διαστήματα προστασίας μέσα σε μία σχισμή, κατά την διάρκεια των οποίων δεν υπάρχει μετάδοση δεδομένων, διατηρώντας με αυτό τον τρόπο την ορθογωνιότητα των διαφορετικών ροών. Ακολουθεί η εικόνα ενός πλαισίου TDMA.



Εικόνα 3.21: Πλαίσιο TDMA

Η TDMA είναι αρκετά πιο πολύπλοκη ως προς την υλοποίηση από την FDMA, ενώ δαπανάται μέρος της πληροφορίας σε πλεονάζοντα ψηφία για λόγους συγχρονισμού και κενά διαστήματα ασφάλειας. Έχει όμως κάποια σημαντικά πλεονεκτήματα. Υποστηρίζει μεταβαλλόμενο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων σύμφωνα με τις ανάγκες κάθε χρήστη, αποδίδοντας διαφορετικό αριθμό χρονοσχημάτων. Δεν επηρεάζεται από παρεμβολές λόγω ενδοδιαμόρφωσης και είναι περισσότερο αποδοτική φασματικά, αφού δεν χρησιμοποιούνται συχνοτικά διαστήματα φύλαξης. Η μετάδοση δεν είναι συνεχής για κάθε χρήστη, οπότε το ανενεργό διάστημα μπορεί να αξιοποιηθεί από το τερματικό για βοηθητικές λειτουργίες, όπως την εύρεση του καλύτερου σταθμού βάσης, ή απλά να απενεργοποιηθεί για καλύτερη διαχείριση της διαθέσιμης ισχύος.

3.2.3 Τεχνική CDMA

Με την τεχνική CDMA, δεν υπάρχει διαχωρισμός στα πεδία του χρόνου και της συχνότητας. Κάθε χρήστης μπορεί να συνδέεται ταυτόχρονα με τους άλλους και να μοιράζεται το σύνολο του εύρους ζώνης συχνοτήτων του συστήματος, χωρίς παρεμβολή. Η ορθογωνιότητα μεταξύ τους επιτυγχάνεται με κατάλληλη κωδικοποίηση. Τα σήματα πληροφορίας, πριν μεταδοθούν, πολλαπλασιάζονται με μοναδικούς ψηφιακούς κώδικες, που ονομάζονται κώδικες εξάπλωσης (spreading sequence) και είναι ψευδοτυχαίες ακολουθίες, ορθογώνιες, με διάρκεια ψηφίου

αρκετά μικρότερη σε σχέση με την πληροφορία. Επομένως, το σήμα που προκύπτει από το γινόμενο πληροφορίας-κώδικα καταλαμβάνει πολλαπλάσιο εύρος ζώνης από το αρχικό, κατά ένα παράγοντα που ονομάζεται παράγοντας εξάπλωσης (spreading factor). Γι' αυτό και η CDMA ανήκει στις τεχνικές απλωμένου φάσματος (spread spectrum).

Ο δέκτης έχει γνώση όλων των κωδικών εξάπλωσης και ανάλογα με τον προς επιλογή χρήστη, πολλαπλασιάζει το σήμα λήψης με την κατάλληλη ψευδοτυχαία ακολουθία. Λόγω ορθογωνιότητας, οι ροές των άλλων χρηστών θα μηδενιστούν και θα απομείνει μόνο η επιθυμητή πληροφορία. Σε αυτή την περίπτωση δεν υπάρχει παρεμβολή μεταξύ των χρηστών, όμως επειδή ο αριθμός των ορθογωνίων κωδικών σε συγκεκριμένο εύρος ζώνης είναι περιορισμένος, για την αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος επιλέγονται ημι-ορθογωνικοί κώδικες. Οι κώδικες αυτοί δεν παρουσιάζουν μηδενική συσχέτιση, οπότε κατά την αποκωδικοποίηση υπάρχει παρεμβολή άλλων χρηστών. Ένα CDMA σύστημα, επομένως, δεν έχει ανώτατο όριο χρηστών όπως τα TDMA, FDMA με τον συγκεκριμένο αριθμό καναλιών. Μπορούν να εισέρχονται συνεχώς χρήστες με τίμημα την μείωση της ποιότητας υπηρεσίας λόγω ετεροσυσχέτισης κωδικών.

Η πολλαπλή πρόσβαση με CDMA έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις FDMA, TDMA. Εμφανίζει σημαντική ανοχή στις διαλείψεις που οφείλονται στην πολυδιαδρομική διάδοση. Λόγω απλωμένου φάσματος, η ισχύς του σήματος μοιράζεται σε μεγάλο εύρος ζώνης, οπότε σε επιλεκτικό δίαυλο επηρεάζεται μόνο μικρό μέρος του σήματος. Δεν υπάρχουν διαστήματα φύλαξης σε χρόνο και συχνότητα, τα οποία δρουν εις βάρος της χωρητικότητας του συστήματος, και η διαπομπή (handover) κατά τη μετάβαση σε γειτονική κυψέλη με κοινό δίαυλο δεν είναι πλέον απαραίτητη. Λόγω της εγγενούς κωδικοποίησης των δεδομένων, το επίπεδο ασφάλειας από φαινόμενα υποκλοπών είναι υψηλό κατά τη μετάδοση, ενώ με την τεχνική απλωμένου φάσματος αντιμετωπίζονται με επιτυχία περιπτώσεις εκούσιας παρεμβολής από σήματα στενής ζώνης (jammings).

Μείζον, όμως, ζήτημα για τα CDMA είναι το near-far problem, το οποίο αφορά την uplink ζεύξη. Στο φαινόμενο αυτό, ένας σταθμός βάσης λαμβάνει ισχυρά σήματα από χρήστες οι οποίοι είναι σε κοντινή απόσταση ή αντιμετωπίζουν ευνοϊκές συνθήκες διάδοσης σε αντίθεση με το εξασθενημένο σήμα λήψης από χρήστη σε μακρινή απόσταση ή με δυσμενείς συνθήκες διάδοσης. Επομένως, τα σήματα της δεύτερης κατηγορίας χρηστών, επικαλύπτονται από αυτά της πρώτης, και απαιτούνται εξελιγμένα σχήματα ελέγχου ισχύος ώστε να φτάνει ίδια ισχύς από κάθε κινητό σταθμό στο σταθμό βάσης.

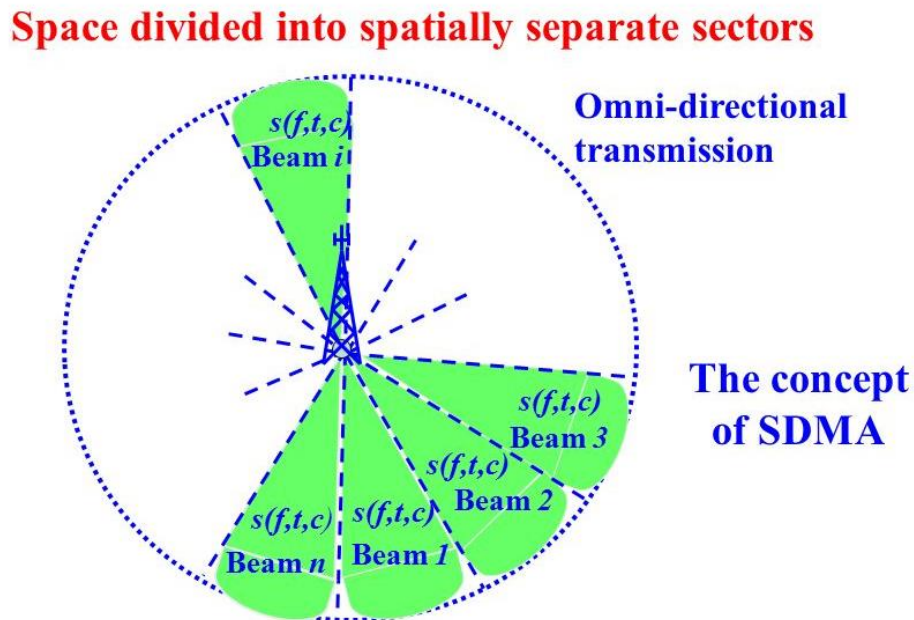
3.2.4 Τεχνική SDMA

Με την τεχνική SDMA ο διαχωρισμός γίνεται στο πεδίο του χώρου, αξιοποιώντας τις διαφορετικές θέσεις των χρηστών μέσα στην περιοχή κάλυψης. Συστήματα έξυπνων, προσαρμοστικών και μεγάλης κατευθυντικότητας κεραιών μεταβάλλουν την ΗΜ ισχύ προς κάθε χρήστη με δυναμικό τρόπο, δημιουργώντας ποίκιλους λοβούς ακτινοβολίας ανάλογα με την κατεύθυνση. Συνήθως το επιθυμητό διάγραμμα ακτινοβολίας επιτυγχάνεται με στοιχειοκεραίες και για να είναι

ορθώγνια τα φυσικά κανάλια που προκύπτουν θα πρέπει η γωνιακή απόσταση των χρηστών να υπερβαίνει το εύρος δέσμης της στοιχειοκεραίας. Τα στοιχεία της στοιχειοκεραίας συχνά είναι πανομοιότυπες χαμηλού κέρδους κεραίες τοποθετημένες σε σταθερή μεταξή τους απόσταση, γραμμικά (ULA-Uniform Linear Array) ή κυκλικά (UCAUniform Circular Array).

Κάθε λοβός ακτινοβολίας εξυπηρετεί συγκεκριμένη περιοχή και μπορεί να εφαρμοστεί για τον καθένα κάποιο από τα προαναφερθέντα σχήματα πολλαπλής πρόσβασης. Η SDMA υλοποιείται στα κυψελωτά συστήματα, με την τομεοποίηση της περιοχής κάλυψης της κυψέλης σε N τομείς γωνιακού εύρους $360^\circ/N$.

Η σχηματική περιγραφή της SDMA τεχνικής παρουσιάζεται κάτωθι, και αμέσως μετά ακολουθεί μια συγκριτική επισκόπηση των προαναφερθείσων τεχνικών.



33

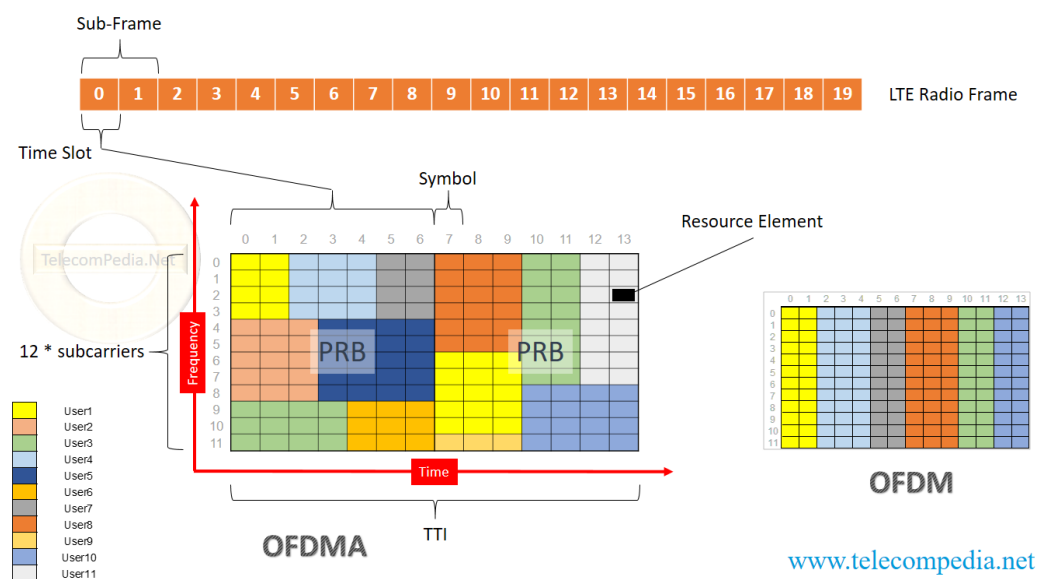
Εικόνα 3.21: Πολλαπλή πρόσβαση SDMA

Approach	SDMA	TDMA	FDMA	CDMA
Idea	segment space into cells/sectors	segment sending time into disjoint time-slots, demand driven or fixed patterns	segment the frequency band into disjoint sub-bands	spread the spectrum using orthogonal codes
Terminals	only one terminal can be active in one cell/one sector	all terminals are active for short periods of time on the same frequency	every terminal has its own frequency, uninterrupted	all terminals can be active at the same place at the same moment, uninterrupted
Signal separation	cell structure, directed antennas	synchronization in the time domain	filtering in the frequency domain	code plus special receivers
Advantages	very simple, increases capacity per km ²	established, fully digital, flexible	simple, established, robust	flexible, less frequency planning needed, soft handover
Dis-advantages	inflexible, antennas typically fixed	guard space needed (multipath propagation), synchronization difficult	inflexible, frequencies are a scarce resource	complex receivers, needs more complicated power control for senders
Comment	only in combination with TDMA, FDMA or CDMA useful	standard in fixed networks, together with FDMA/SDMA used in many mobile networks	typically combined with TDMA (frequency hopping patterns) and SDMA (frequency reuse)	still faces some problems, higher complexity, lowered expectations; will be integrated with TDMA/FDMA

Εικόνα 3.22: Συγκριτικός πίνακας τεχνικών πολλαπλής πρόσβασης

3.2.5 Τεχνική OFDMA

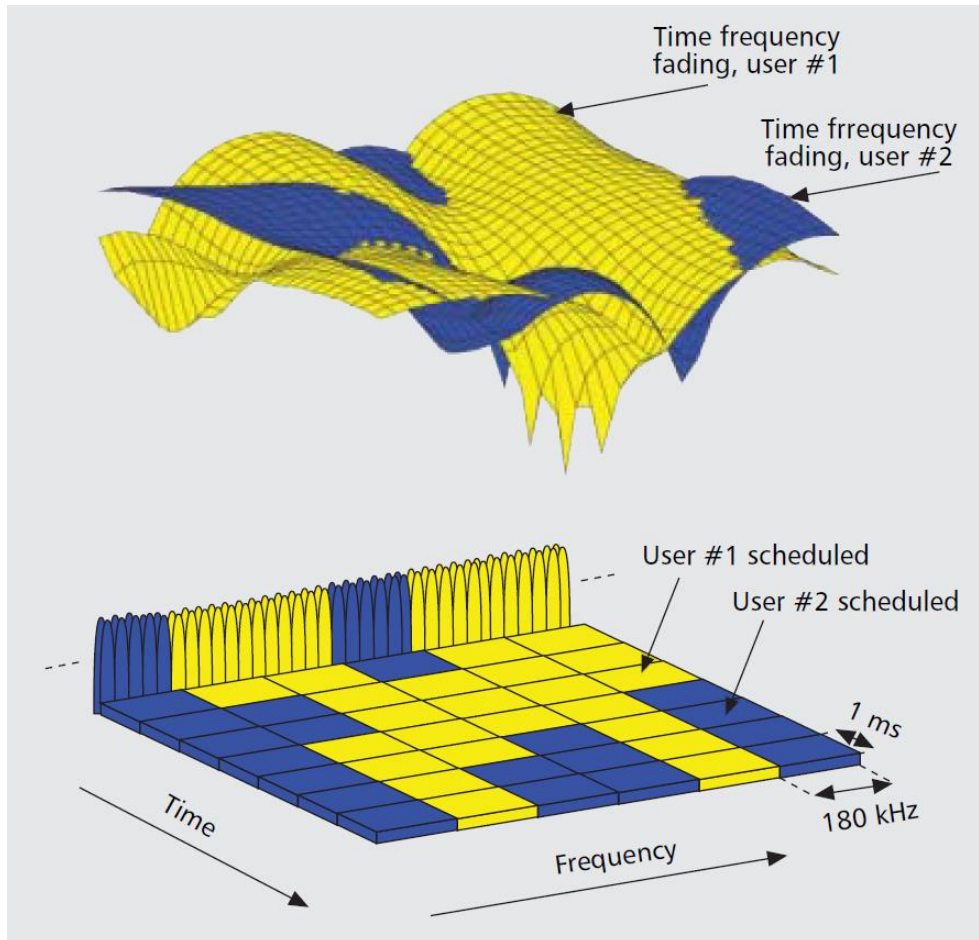
Η επιτυχής αντιμετώπιση των επιλεκτικών διαλείψεων και της διασυμβολικής παρεμβολής που προκαλούν, μέσω της διαμόρφωσης OFDM, οδήγησε στην επέκταση κι εφαρμογή της ως σχήμα πολλαπλής πρόσβασης OFDMA. Τα υποκανάλια εξακολουθούν να είναι ορθογώνια μεταξύ τους και στενού εύρους ζώνης, με τη διαφορά ότι αντί να αποδίδονται όλα σε ένα χρήστη, η OFDMA αποφασίζει ποιο υποσύνολο αυτών θα δοθεί στον κάθε χρήστη. Οι χρήστες δηλαδή εξακολουθούν εκπέμπουν OFDM σήμα, αρκεί να έχουν μεγάλο πλήθος υποκαναλιών ώστε η διάρκεια συμβόλου να ξεπερνάει την χρονική διασπορά του διαύλου. Σε σχέση, δηλαδή, με τις παραπάνω τεχνικές, ο διαχωρισμός υφίσταται τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και της συχνότητας. Η διαφοροποίηση από την OFDM γίνεται στις εισόδους του IFFT στον πομπό, όπου διαφορετικές ομάδες εκχωρούνται στους χρήστες για την εισροή της παράλληλης πληροφορίας. Παραδείγματα κατανομής των πόρων δίνονται στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 3.23: Απονομή πόρων με τεχνική OFDMA

Ο αριθμός των υποκαναλιών ενός χρήστη ανά διάρκεια συμβόλου και η σχετική θέση τους στο φάσμα, μπορούν να μεταβάλλονται με το χρόνο. Χρήστες διαφορετικών απαιτήσεων σε ρυθμό μετάδοσης δεδομένων εξυπηρετούνται εκχωρούμενοι αντίστοιχο τμήμα του διαθέσιμου εύρους ζώνης σε υποκανάλια.

Για την εκχώρηση των καναλιών λαμβάνεται υπόψη και η κατάσταση του διαύλου για κάθε κανάλι και χρήστη [24], όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 3.24: Κατάσταση διαύλου και ανάθεση πόρων στην OFDMA

Η OFDMA διατηρεί τα πλεονεκτήματα της OFDM, γεγονός που την κάνει ιδιαίτερα δημοφιλή. Έχει υιοθετηθεί από τα συστήματα 4ης γενιάς LTE και τα πρότυπα 802.11a,n,ac.

Κάποια από τα πλεονεκτήματά της είναι:

- αποτελεσματικότητα στην αντιμετώπιση της διασυμβολικής παρεμβολής που προκύπτει λόγω επιλεκτικών διαλείψεων
- εύκολη υλοποίηση και εξ' ολοκλήρου ψηφιακή, με τη χρήση IFFT/FFT
- προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση για κάθε υποκανάλι και χρήση ανθεκτικών ή φασματικά αποδοτικών σχημάτων, ανάλογα με την κατάσταση του διαύλου

- μεταβλητή κατανομή της ισχύος εκπομπής στα υποκανάλια, προς αύξηση της χωρητικότητας
- καλύτερη φασματική αποδοτικότητα λόγω επικάλυψης υποκαναλιών στο πεδίο της συχνότητας
- η κατανομή των υποκαναλιών σε όλο το διαθέσιμο φάσμα προστατεύει από την παρεμβολή μεταξύ φέροντων ICI που προέρχεται από αποκλίσεις των φερουσών συχνοτήτων λόγω λαθών συγχρονισμού και διασποράς Doppler
- επίτευξη διαφορικού κέρδους λόγω πολλών χρηστών (multi-user diversity gain), επιλέγοντας χρήστες με καλύτερες συνθήκες διάδοσης για βέλτιστη αξιοποίηση των ραδιοπόρων

Πέρα όμως από τα πλεονεκτήματα της διαμόρφωσης OFDM, η OFDMA κληρονομεί και τα μειονεκτήματά της, σε διαφορετική μορφή:

- οι παρεμβολές μεταξύ γειτονικών καναλιών που δημιουργούσαν ενδοσυμβολική παρεμβολή στην OFDM, πλέον μπορούν να προκαλέσουν και παρεμβολές μεταξύ χρηστών αν τα γειτονικά υποκανάλια έχουν αποδοθεί σε διαφορετικούς χρήστες
- εντονότερο πρόβλημα υψηλών τιμών του λόγου PARP, καθώς αυτός αυξάνεται περίπου γραμμικά με την αύξηση των υποκαναλιών και γενικά στην OFDMA αυτά είναι περισσότερα
- ανάγκη εφαρμογής τεχνικών ελέγχου της ισχύος και του χρονισμού των σημάτων uplink που φτάνουν στους σταθμούς βάσης συστημάτων κινητών επικοινωνιών. Ένα OFDMA σύμβολο αποτελείται από σήματα πολλών χρηστών και αυτά λόγω διαφορετικών αποστάσεων και πολυδιαδρομικής διάδοσης φτάνουν με ποικίλες εξασθενήσεις και χρονικές καθυστερήσεις στον σταθμό.

4 Συστήματα κεραιών Πολλαπλής Εισόδου – Πολλαπλής Εξόδου (MIMO systems)

4.1 Εισαγωγή

Οι πολλαπλές κεραιές μπορούν να χρησιμοποιηθούν με διαφορετικούς τρόπους και για διαφορετικούς σκοπούς [25]:

- Πολλαπλές κεραιές λήψης στον δέκτη μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παράλληλη λήψη διαφορετικών συμβόλων. Στο ανερχόμενο τμήμα της ζεύξης (uplink), χρησιμοποιούνται στα κυψελωτά συστήματα εδώ και αρκετά χρόνια. Ωστόσο, καθώς στις συσκευές LTE χρησιμοποιούνται κεραιές τουλάχιστον διπλής λήψης, παρατηρείται επίσης βελτίωση και στην απόδοση της κατερχόμενης ζεύξης (downlink). Ο απλούστερος τρόπος χρήσης πολλαπλών κεραιών λήψης είναι για την συλλογή πρόσθετης ενέργειας από το μεταδιδόμενο σήμα και συνακόλουθα την μείωση της εξασθένησής του, αλλά μπορούν να επιτευχθούν και επιπλέον κέρδη σε περιπτώσεις με περιορισμούς λόγω παρεμβολών, εάν οι κεραιές χρησιμοποιούνται όχι μόνο για διαφορική λήψη αλλά και για την καταστολή των παρεμβολών.

- Πολλαπλές κεραιές εκπομπής στο σταθμό βάσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διαφοροποιημένη μετάδοση και για υποστήριξη διαφορετικών τύπων μορφοποίησης δέσμης. Ο κύριος στόχος της μορφοποίησης δέσμης είναι η βελτίωση του λόγου σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο (SINR) του ληφθέντος σήματος και, τελικά, η βελτίωση της χωρητικότητας και της κάλυψης του συστήματος.

- Η χωρική πολυπλεξία, η οποία μερικές φορές αναφέρεται ως πολλαπλή είσοδος / πολλαπλή έξοδος (MIMO) ή πιο συγκεκριμένα MIMO ενός χρήστη (SU-MIMO) υλοποιείται χρησιμοποιώντας πολλαπλές κεραιές τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη. Η χωρική πολυπλεξία έχει ως αποτέλεσμα αυξημένο ρυθμό δεδομένων (εφόσον το επιτρέπουν οι συνθήκες διάδοσης των καναλιών) δημιουργώντας αρκετά παράλληλα "κανάλια" μετάδοσης δεδομένων, κάτι ιδιαίτερα αποτελεσματικό σε περιπτώσεις περιορισμένου εύρους ζώνης. Εναλλακτικά, συνδυάζοντας τις χωρικές ιδιότητες με την κατάλληλη επεξεργασία του σήματος στον δέκτη προς μείωση των παρεμβολών, πολλαπλές συσκευές μπορούν να εκπέμπουν στην ίδια συχνότητα και χρονική στιγμή προκειμένου να βελτιωθεί η συνολική χωρητικότητα της κυψέλης. Η περίπτωση αυτή ονομάζεται MIMO πολλαπλών χρηστών (MU-MIMO).

4.2 Τεχνικές υλοποίησης των συστημάτων MIMO

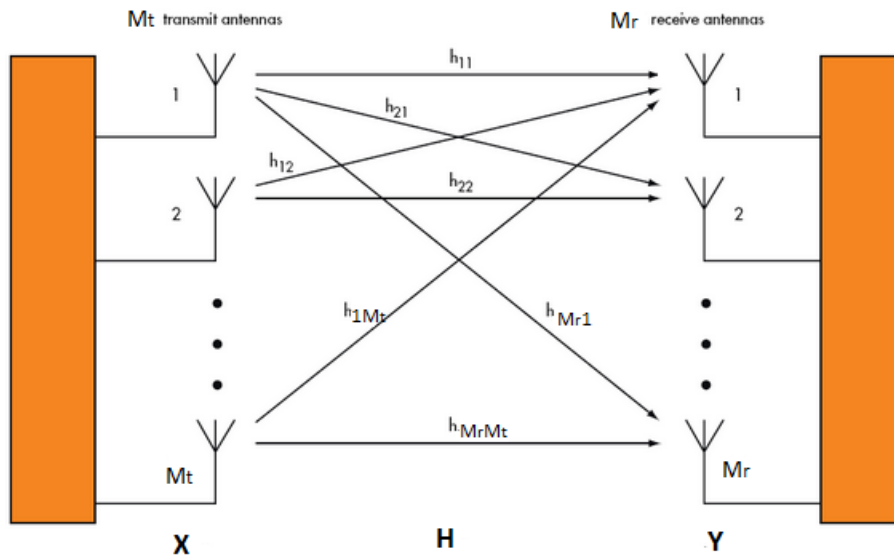
Ανάλογα με την επεξεργασία του σήματος στον πομπό και το δέκτη, ένα σύστημα MIMO μπορεί να υλοποιηθεί με τους ακόλουθους τρόπους:

- Χωρική πολυπλεξία (SM = Spatial Multiplexing): στην τεχνική αυτή η κύρια ροή δεδομένων διαιρείται σε ένα πλήθος υπο-ροών χαμηλότερου ρυθμού μετάδοσης και μικρότερου εύρους ζώνης. Η κάθε μία από αυτές τις ροές αποστέλλεται από διαφορετικές κεραιές του πομπού και με κατάλληλη επεξεργασία των σημάτων που λαμβάνει η κάθε κεραιά του δέκτη επιτυγχάνεται η αποκωδικοποίηση της κύριας ροής. Η τεχνική αυτή επιτυγχάνει αύξηση του ρυθμού μετάδοσης (της χωρητικότητας), χωρίς αύξηση της ισχύος εκπομπής.

- Χωρο-χρονική κωδικοποίηση (STC = Space-Time Coding): σύμφωνα με την τεχνική αυτή τα σήματα που μεταδίδονται από τις κεραιές του πομπού προς τις κεραιές του δέκτη συσχετίζονται στο χώρο στο πεδίο του χρόνου. Η τεχνική αυτή βελτιώνει την επίδοση του συστήματος ως προς τα σφάλματα, αλλά δεν είναι πολύ αποδοτική όσον αφορά τη χωρητικότητα.

4.3 Αρχή λειτουργίας των συστημάτων MIMO

Έστω ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα με M_t κεραιές εκπομπής και M_r κεραιές λήψης όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί.



Εικόνα 4.1: Σχηματική διάταξη συστήματος MIMO

Ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να πετύχουμε αύξηση της χωρητικότητας (του μέγιστου ρυθμού μετάδοσης) ή/και την αύξηση της αξιοπιστίας της ζεύξης ελαχιστοποιώντας τα σφάλματα.

Θεωρούμε ότι το εύρος συνοχής του διαύλου είναι πολύ μεγαλύτερο από το εύρος ζώνης των εκπεμπόμενων σημάτων, άρα οι διαλείψεις δεν είναι επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα (flat fading channel).

Σε κάθε κεραιά λήψης j θεωρούμε ότι έχουμε λευκό προσθετικό θόρυβο Gauss (AWGN = Additive White Gaussian Noise).

Μια πολύ σημαντική παράμετρος για την επίδοση του συστήματος είναι κατά πόσο ο πομπός και ο δέκτης γνωρίζουν τον πίνακα H του διαύλου. Όταν μια συσκευή λειτουργεί ως δέκτης συνήθως πραγματοποιεί εκτίμηση του πίνακα H μέσω μιας τεχνικής εκτίμησης διαύλου. Όταν λειτουργεί ως πομπός, αξιοποιεί την πληροφορία που ήδη έχει για το H σε συστήματα TDD (Time Division Duplex), ή για συστήματα FDD (Frequency Division Duplex), μέσω ανάδρασης λαμβάνει την πληροφορία αυτή από την άλλη πλευρά της ζεύξης. Αν ο πίνακας H δεν είναι γνωστός στον πομπό ή/και στο δέκτη πρέπει να γίνει κάποια υπόθεση για τη στατιστική συμπεριφορά του.

4.3.1 Πίνακας \mathbf{H} για χωρικά ανεξάρτητα κανάλια

Η περίπτωση των χωρικά ανεξάρτητων καναλιών αποτελεί την πιο απλή περίπτωση μοντελοποίησης καναλιού MIMO. Όταν τα κανάλια διάδοσης μεταξύ του πομπού και του δέκτη θεωρηθούν μεταξύ τους ανεξάρτητα, τότε ο πίνακας \mathbf{H} , διαστάσεων $M \times N$, θεωρείται χωρικά λευκός με μηδενική μέση τιμή, δηλαδή τα στοιχεία του πίνακα \mathbf{H} θεωρούνται ανεξάρτητες κυκλικά συμμετρικές μιγαδικές τυχαίες μεταβλητές Gauss μηδενικής μέσης τιμής (ZMCSCG = Zero Mean Circularly Symmetric Complex Gaussian). Συγκεκριμένα μια μιγαδική τυχαία μεταβλητή $Z=X+jY$ ακολουθεί την κατανομή ZMCSCG αν οι πραγματικές μεταβλητές X και Y είναι ανεξάρτητες κανονικές κατανομές (Gaussian) με μέση τιμή μηδέν και με ίση διασπορά σ^2 .

Υποθέτοντας στατικό διάυλο (ιδανικός διάυλος σταθερής απόκρισης ή διάυλος επίπεδων διαλείψεων), η έξοδος του MIMO θα είναι:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (4.1)$$

όπου \mathbf{s} είναι το διάνυσμα των N σημάτων εκπομπής, \mathbf{y} το διάνυσμα των M σημάτων λήψης και \mathbf{n} το διάνυσμα θορύβου, τα οποία γράφονται ως εξής:

$$\mathbf{s} = [s_1 \dots s_N]^T, \mathbf{y} = [y_1 \dots y_M]^T, \mathbf{n} = [n_1 \dots n_M]^T$$

Ο πίνακας \mathbf{H} είναι διαστάσεων $M \times N$ και περιλαμβάνει τις μιγαδικές αποκρίσεις (κέρδη) h_{ij} για κάθε δυνατό συνδυασμό διαύλου μεταξύ κεραίας εκπομπής j και κεραίας λήψης i . Για στατικό διάυλο ο πίνακας \mathbf{H} λαμβάνει τη μορφή:

$$\begin{pmatrix} h_{11} & \dots & h_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M1} & \dots & h_{MN} \end{pmatrix}$$

Η χωρική πολυπλεξία, δηλαδή η διαχωριστικότητα των σημάτων εκπομπής στον δέκτη, καθορίζεται από τη γεωμετρία των M χωρικών υπογραφών, όπου ως χωρικές υπογραφές (spatial signatures) της κάθε κεραίας εκπομπής ορίζουμε τις στήλες του πίνακα \mathbf{H} που αντιστοιχούν στα διανύσματα λήψης.

5. Προσομοίωση Κυψελωτού Συστήματος MIMO - OFDMA

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλύσουμε τον αλγόριθμο με τον οποίο υλοποιήθηκε η προσομοίωση ενός κυψελωτού τηλεπικοινωνιακού συστήματος, όπως επίσης και διάφορα σενάρια σύμφωνα με τα οποία πραγματοποιήθηκε η ανάθεση πόρων στους χρήστες, καθώς και οι συνακόλουθοι υπολογισμοί. Σε όλα τα σενάρια χρησιμοποιείται τόσο η τεχνική MIMO όσο και η τεχνική OFDMA, καθώς είναι ο κορμός των τεχνικών στις οποίες βασίζονται τα σύγχρονα συστήματα κινητής τηλεφωνίας τέταρτης γενιάς (LTE, LTE Advanced). Το σύστημα που θα προσομοιωθεί θεωρείται ημιστατικό, δηλαδή δεν είναι πλήρως στατικό λόγω του ότι παρέχει διαφορετικά αποτελέσματα σε κάθε εκτέλεσή της προσομοίωσής του (κυρίως λόγω του ότι η εισαγωγή των χρηστών όπως θα δειχθεί γίνεται με τυχαίο τρόπο) αλλά επίσης δεν είναι και δυναμικό, διότι λείπει η διάσταση του χρόνου στην υλοποίηση της προσομοίωσης (δηλαδή η προσομοίωση αποτυπώνει την κατάσταση του συστήματος σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή).

Η τοπολογία του συστήματός μας αποτελείται από κλασικές εξαγωνικές κυψέλες οι οποίες έχουν έναν σταθμό – δηλαδή κεραία - βάσης (BS) στο κέντρο τους και οι οποίες είναι περιφερειακά διατεταγμένες σε ομόκεντρους δακτυλίους γύρω από μία κεντρική κυψέλη, ούτως ώστε σε κάθε περίπτωση να προκύπτει μια συμμετρική τοπολογία κυψελών.

Η προσομοίωση (τόσο η συγγραφή του κώδικα των επιμέρους συναρτήσεων όσο και η εξαγωγή των γραφημάτων και σχημάτων) υλοποιήθηκε και εκτελέστηκε στην γλώσσα προγραμματισμού και το αναπτυξιακό περιβάλλον του Matlab (έκδοση 2016b).

Η λειτουργία του προσομοιωτή συνίσταται στην συνεχή εισαγωγή χρηστών στο τηλεπικοινωνιακό σύστημα και σε επιμέρους υπολογισμούς που τους αφορούν (υπολογισμοί απωλειών διάδοσης, ανάθεση φερόντων κλπ) μέχρι να προκύψει υπέρβαση μιας προκαθορισμένης πιθανότητας αποκλεισμού (απόρριψης) χρήστη. Μετά την οριστικοποίηση των χρηστών που παραμένουν έγκυροι στο σύστημα, ενδέχεται να επιχειρηθεί και αλλαγή διαμόρφωσης των φερόντων τους, με τρόπους που θα εξηγηθούν στις αντίστοιχες ενότητες. Η προσομοίωση ουσιαστικά λειτουργεί σε δύο στάδια, με το πρώτο στάδιο να υπολογίζει τον μέγιστο αριθμό χρηστών που μπορεί να εξυπηρετήσει το σύστημα δεδομένων των παραμέτρων με τις οποίες εκτελείται η προσομοίωση και το δεύτερο να υπολογίζει την συνολική ρυθμαπόδοση (throughput) του συστήματος (δηλαδή το άθροισμα των επιμέρους ρυθμαποδόσεων των χρηστών). Τα κύρια αποτελέσματα που μας ενδιαφέρουν είναι ο αριθμός των εξυπηρετούμενων χρηστών και η συνολική ρυθμαπόδοση, με δευτερεύοντα ενδιαφέροντα αποτελέσματα την μέση ισχύ φερόντων ανά χρήστη, μεγέθη που αφορούν την κεντρική κυψέλη και την συνολική ισχύ εκπομπής του συστήματος, καθώς και το πως επηρεάζονται όλα αυτά από τις τιμές των παραμέτρων με τις οποίες εκτελείται η προσομοίωση.

Η τεχνική MIMO υλοποιείται σε συνάρτηση που θα περιγραφεί, και στην οποία υπολογίζονται τα μιγαδικά κέρδη των $M_r \times M_t$ διαύλων του συστήματος σε αντίστοιχο πίνακα (με M_r τον αριθμό κεραιών που έχει ο δέκτης και M_t τον αριθμό κεραιών του πομπού). Η τεχνική OFDMA υλοποιείται σε αντίστοιχη συνάρτηση

μέσω του τρόπου ανάθεσης των (υπο)φερόντων στους χρήστες. Η προσομοίωση εκτείνεται τόσο στο φυσικό επίπεδο (υπολογισμός απωλειών διάδοσης, διαμόρφωση σήματος κλπ) όσο και στο επίπεδο ζεύξης/MAC (ανάθεση φερόντων, έλεγχος ισχύος εκπομπής σταθμών βάσης). Για την εξάλειψη της τυχαιότητας των αποτελεσμάτων που οφείλεται κυρίως στην τυχαία εισαγωγή χρηστών, εκτελούνται συγκεκριμένου αριθμού προσομοιώσεις Monte Carlo, μέσω των οποίων λαμβάνουμε τους μέσους όρους των αποτελεσμάτων κάθε προσομοίωσης, για όλα τα αποτελέσματα που μας ενδιαφέρουν.

5.1 Επισκόπηση Βασικών Παραμέτρων

Οι παραμετροποιήσιμες μεταβλητές από τις τιμές των οποίων εξαρτώνται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι οι εξής:

1. Ακτίνα έκαστης κυψέλης (R): Η ακτίνα της κυψέλης (εισερχόμενη ως παράμετρος σε km) είναι η ακτίνα του περιγεγραμμένου κύκλου της εξαγωνικής κυψέλης (με άλλα λόγια, ορίζει τον κύκλο που με κέντρο το κέντρο του εξαγώνου, διέρχεται από τις κορυφές του). Ουσιαστικά καθορίζει την πυκνότητα τοποθέτησης των κεραιών στην επιφάνεια της τοπολογίας μας και από αυτήν εξαρτώνται η επιφάνεια κάθε κυψέλης (εξαγώνου) καθώς και η μέση απόσταση από κάθε κεραία των τυχαία τοποθετημένων χρηστών (άρα και οι μέσες απώλειες διάδοσης).

2. Αριθμός περιφερειών αποτελούμενες από εξαγωνικές κυψέλες (tiers): Η τοπολογία μας είναι πάντα συμμετρική και αποτελείται από μια εξαγωνική κυψέλη στο κέντρο της και σειρές κυψελών διατεταγμένες περιφερειακά από αυτήν. Το σύστημά μας μπορεί να αποτελείται από μία μόνο κυψέλη ή από 1, 2, ... , n κυκλικές περιφέρειες κυψελών διατεταγμένες ομοιόμορφα γύρω από την κεντρική.

3. Αριθμός διαθέσιμων φερόντων ανά τομέα (initial carriers per sector): Η τιμή της παραμέτρου αυτής καταδεικνύει τον αριθμό των (υπο)φερόντων που έχουν ανατεθεί αρχικά σε κάθε τομέα και είναι κατ' αρχήν διαθέσιμοι για τους χρήστες με την έναρξη της προσομοίωσης. Τα φέροντα ανατίθενται στους χρήστες με τεχνική OFDMA, που σημαίνει ότι είναι ορθογώνια μεταξύ τους και κάθε φέρον κάποιου τομέα το κατέχει σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή το πολύ ένας μόνο χρήστης. Αυτό ισχύει και σε οποιαδήποτε φάση της δικής μας προσομοίωσης, και ας μην έχει αυστηρά την διάσταση του χρόνου (άπαξ και έχει ανατεθεί σε κάποιον χρήστη του τομέα δεν ανατίθεται σε άλλον, εκτός αν πρώτα έχει αφαιρεθεί η χρήση του από τον προηγούμενο χρήστη).

4. Διαθέσιμο εύρος ζώνης (bandwidth): Είναι το εύρος του τμήματος του φάσματος που έχει διαθέσιμο ο πάροχος και το οποίο με την τεχνική επαναχρησιμοποίησης συχνότητας χρησιμοποιεί εκ νέου σε κάθε τομέα (ή σε κάποιες περιπτώσεις, σε κάθε κυψέλη). Σαν παράμετρος στην προσομοίωσή μας έχει ως μέγεθος το kHz. Το διαθέσιμο αυτό εύρος ζώνης διαιρείται σε ισομεγέθη υποφέροντα, που είναι αυτά για τα οποία κάναμε λόγο πριν. Όσο μεγαλύτερο είναι το διαθέσιμο εύρος ζώνης, σε τόσο περισσότερα ίσου φασματικού μεγέθους υποφέροντα μπορεί να διαιρεθεί (άρα περισσότερα φέροντα μπορούν να είναι διαθέσιμα), ή, εναλλακτικά, μπορεί να διαιρεθεί σε ίδιο αριθμό αλλά μεγαλύτερου μεγέθους φέροντα. Προφανώς η διαίρεση

του εύρους ζώνης με τον αριθμό φερόντων ανά τομέα (ή κυψέλη, ανάλογα με τον τρόπο ανάθεσης) δίνει το μέγεθος (δηλαδή, το φασματικό εύρος) κάθε φέροντος.

5. Αριθμός φερόντων που αιτείται κάθε χρήστης (wanted carriers per user): Κάθε χρήστης ζητάει από το σύστημα έναν αριθμό από φέροντα προκειμένου να εξυπηρετήσει τις ανάγκες επικοινωνίας του στο κανάλι καθόδου (downlink). Ο αριθμός των φερόντων που θα λάβει ο χρήστης είναι ένας παράγοντας από τον οποίο θα εξαρτηθεί τόσο η ρυθμαπόδοση (throughput) που θα έχει διαθέσιμη ο κάθε χρήστης όσο και η μέγιστη χωρητικότητα του συστήματος σε αριθμό χρηστών.

6. Μέγιστη επιτρεπόμενη πιθανότητα απόρριψης (blocking probability allowed): Είναι η μέγιστη τιμή που επιτρέπεται να λάβει ο λόγος των απορριφθέντων χρηστών προς το άθροισμα των αποδεκτών και απορριφθέντων χρηστών σε κάθε στιγμή της προσομοίωσης. Υπέρβαση της πιθανότητας αυτής οδηγεί σε τερματισμό της προσομοίωσης και υπολογισμό των τελικών μεγεθών που μας ενδιαφέρουν με την προσομοίωση ως είχε την στιγμή της διακοπής. Η προσομοίωση ξεκινάει με την πιθανότητα αυτή να έχει μηδενική τιμή, αν και στην πραγματικότητα η αρχική τιμή της είναι αδιάφορη, καθώς θα επανυπολογιστεί εκ νέου πριν από την πρώτη φορά που θα εξεταστεί αν υπερβαίνει την επιτρεπόμενη μέγιστη τιμή.

7. Αριθμοί κεραιών εκπομπής και λήψης (Mt, Mr): Το βασικό στοιχείο της τεχνικής MIMO (Multiple Input – Multiple Output) είναι η χρησιμοποίηση πολλαπλών κεραιών τόσο στον πομπό, όσο και στον δέκτη, προκειμένου να αυξηθεί είτε η ρυθμαπόδοση είτε η ευρωστία του συστήματος. Οι αριθμοί αυτοί δεν πρέπει κατ' ανάγκη να έχουν ταυτόσημη τιμή, αλλά μπορεί οι κεραιές στον πομπό να είναι είτε περισσότερες είτε λιγότερες από αυτές του δέκτη. Η ύπαρξη Mt κεραιών εκπομπής και Mr κεραιών λήψης δημιουργεί Mt x Mr ξεχωριστούς διαύλους διάδοσης του σήματος για κάθε συγκεκριμένο φέρον και χρήστη.

8. Ισχύς θορύβου (Pn): Ο θόρυβος θεωρείται γκαουσιανός λευκός προσθετικός με την ισχύ του ομοιόμορφα κατανομημένη στο πεδίο των συχνοτήτων.

9. Μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς χρήστη (Allowed user power): Είναι η μέγιστη τιμή (σε Watt) που μπορεί να λάβει το άθροισμα της ισχύος όλων των φερόντων που έχει στην διάθεσή του ένας χρήστης. Υπέρβαση αυτής της τιμής οδηγεί, όπως θα δούμε, στην απόρριψη του συγκεκριμένου χρήστη από το σύστημα. Ουσιαστικά είναι ένας τρόπος να αποφευχθεί η μονοπώληση της ισχύος της κεραίας από κάποιον συγκεκριμένο χρήστη εις βάρος κάποιων άλλων και να μετριασθούν οι ισχυρές παρεμβολές που μπορεί η υψηλή ισχύς κάποιων φερόντων να δημιουργήσει.

10. Μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς τομέα (Allowed sector power): Ορισμένη επίσης σε Watt, είναι η μέγιστη τιμή που μπορεί να λάβει το άθροισμα της ισχύος όλων των φερόντων ενός οποιουδήποτε τομέα (δηλαδή, κατευθυντικής κεραίας) του συστήματος. Είναι το μέγιστο όριο ισχύος μέχρι το οποίο μπορεί να εκπέμψει η κατευθυντική κεραία του τομέα είτε λόγω κατασκευαστικών είτε λόγω λειτουργικών περιορισμών. Υπέρβαση αυτής της τιμής οδηγεί, όπως επίσης θα φανεί, στην απόρριψη του τελευταίου χρήστη που εισήλθε στο σύστημα.

11. Συχνότητα λειτουργίας, υψόμετρο κεραίας σταθμού βάσης, υψόμετρο χρήστη, τυπική απόκλιση σκίασης, συντελεστής a, συντελεστής απωλειών, κέρδος κεραίας

σταθμού βάσης, κέρδος κεραίας κινητού τερματικού: Λοιπές παράμετροι προσομοίωσης.

12. Λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR): Χρησιμοποιείται ο λόγος σήματος προς θόρυβο που απαιτεί ο εκάστοτε τρόπος διαμόρφωσης. Στις διαμορφώσεις υψηλότερης τάξης (επιπέδου) απαιτείται υψηλότερος λόγος σήματος προς θόρυβο προκειμένου να αποδιαμορφωθεί σωστά το σήμα και να εξαχθεί συμπέρασμα για το μεταδοθέν σύμβολο μέσα από έναν πυκνότερο αστερισμό σήματος.

13. Αριθμός Monte Carlo προσομοιώσεων (monte carlo simulations): Ο αριθμός των επαναλαμβανόμενων προσομοιώσεων που θα εκτελεστούν προκειμένου να ληφθεί ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων τους και να εξαλειφθεί κατά το δυνατόν η τυχαιότητα στην εκτέλεση της προσομοίωσης. Μεγαλύτερος αριθμός Monte Carlo προσομοιώσεων οδηγεί σε πιο αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα (ακριβέστερη σύγκλιση σε συγκεκριμένες τιμές) έχοντας βέβαια το μειονέκτημα του μεγαλύτερου απαιτούμενου χρόνου εκτέλεσης.

5.2 Περιγραφή επιμέρους αλγορίθμων και συναρτήσεων

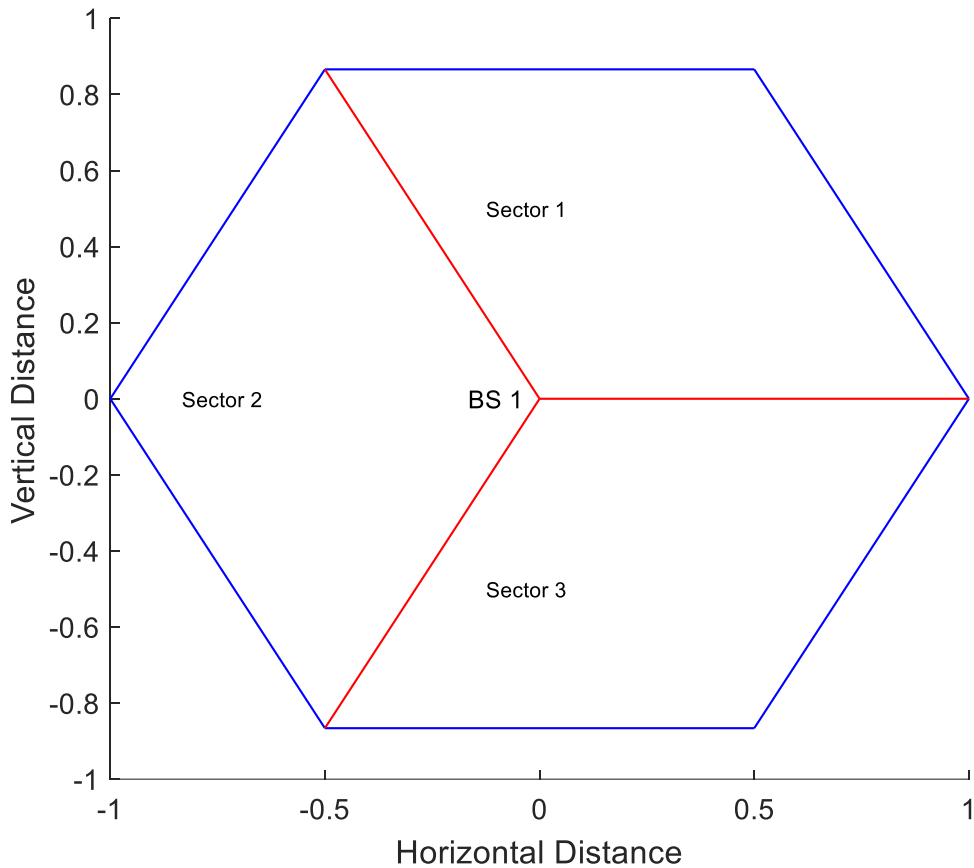
5.2.1 Δημιουργία εξαγωνικής κυψέλης

Για τον σχεδιασμό της κυψέλης γίνεται κλήση της αντίστοιχης συνάρτησης του συστήματος με ονομασία `cell_design`. Έχοντας ως ορίσματα εισόδου τις συντεταγμένες του κέντρου της κυψέλης, την ακτίνα της κυψέλης, το χρώμα της καθώς και μια `binary` μεταβλητή η τιμή της οποίας ορίζει το αν θα εκτυπωθεί η κυψέλη ή όχι, η συνάρτηση αρχικά ελέγχει για το αν ο χρήστης έχει εισάγει άκυρο όρισμα ακτίνας (δηλαδή, αρνητικό αριθμό ή μηδέν). Στην περίπτωση αυτή διακόπτεται η εκτέλεση του προγράμματος και εμφανίζεται στον χρήστη σχετικό ενημερωτικό μήνυμα. Αν έχει δοθεί θετικός αριθμός σαν όρισμα (οπότε η κυψέλη θα έχει ακτίνα θετικού μήκους και άρα θα μπορεί να δημιουργηθεί) τότε ορίζεται η γωνία σε μοίρες που αποτελεί τον κάθε τομέα καθώς και ο αριθμός των σημείων που θα αποτελούν κάθε ευθύγραμμο τμήμα που θα παριστά μια ακμή της εξαγωνικής κυψέλης. Κατόπιν εκτυπώνονται αριστερόστροφα μία προς μία οι πλευρές του εξαγώνου με επανυπολογισμό κάθε φορά των συντεταγμένων των άκρων τους και μεταβολή της γωνίας στροφής για την εκτύπωση κατά $360^\circ/60 = 60^\circ$. Με δεδομένη την ακτίνα R του περιγεγραμμένου περί το εξάγωνο κύκλου (δηλαδή την απόσταση του κέντρου του από οποιαδήποτε κορυφή του), η επιφάνεια του εξαγώνου είναι ίση με

$$S_{hex} = 3 \times \frac{\sqrt{3}}{2} \times R^2 \quad (5.1)$$

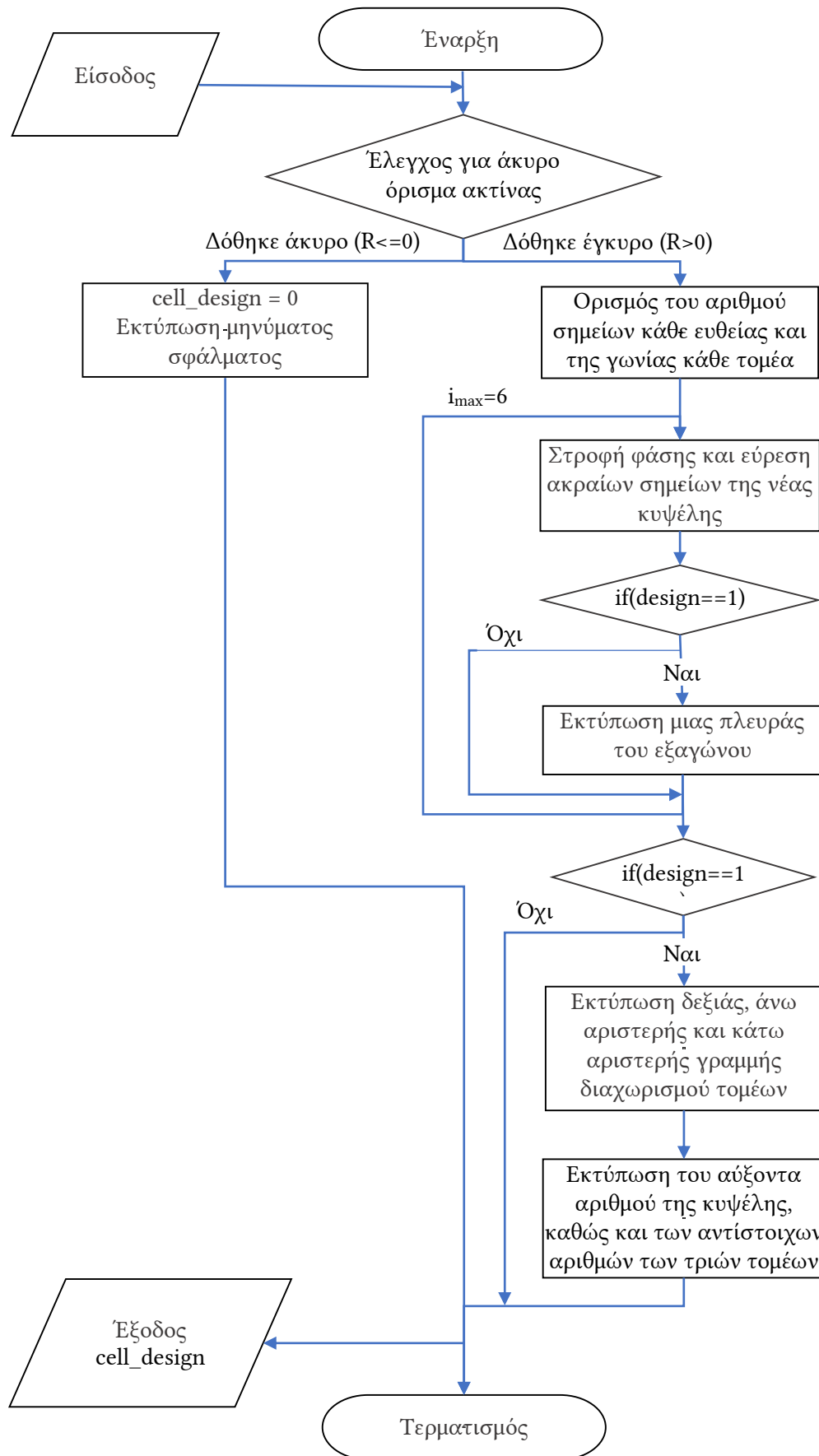
Το επόμενο βήμα είναι η εκτύπωση των εσωτερικών ακτίνων οι οποίοι διαχωρίζουν την κυψέλη σε τομείς. Με γνώμονα ότι κάθε διαχωριστική γραμμή τομέα απέχει από την επόμενη 120° , εκτυπώνεται πρώτα το ευθύγραμμο τμήμα που θα αναπαριστά την δεξιά γραμμή διαχωρισμού τομέων (δηλαδή τον διαχωρισμό του άνω δεξιού από τον κάτω δεξιό τομέα), κατόπιν η άνω αριστερή γραμμή διαχωρισμού τομέων (που θα διαχωρίζει τον άνω δεξιό από τον αριστερό τομέα), και τέλος η κάτω αριστερή γραμμή διαχωρισμού τομέων (που θα διαχωρίζει τον αριστερό από τον κάτω δεξιό

τομέα). Ως χρώμα των γραμμών οριοθέτησης των τομέων επιλέχθηκε το κόκκινο (με ενσωματωμένη την επιλογή αυτή στον κώδικα της `cell_design`) ενώ ως χρώμα των πλευρών της εξαγωνικής κυψέλης επιλέχθηκε το μπλε (το οποίο είναι όρισμα της συνάρτησης `cell_design`). Ακολούθως παρατίθεται η εικόνα μιας τυπικής σχεδιασμένης κυψέλης.



Εικόνα 5.1: Εξαγωνική κυψέλη χωρισμένη σε τομείς

Ακολουθεί το διάγραμμα ροής της προαναφερθείσας λεκτικά περιγραφής.



Εικόνα 5.2 Λογικό διάγραμμα συνάρτησης cell_design

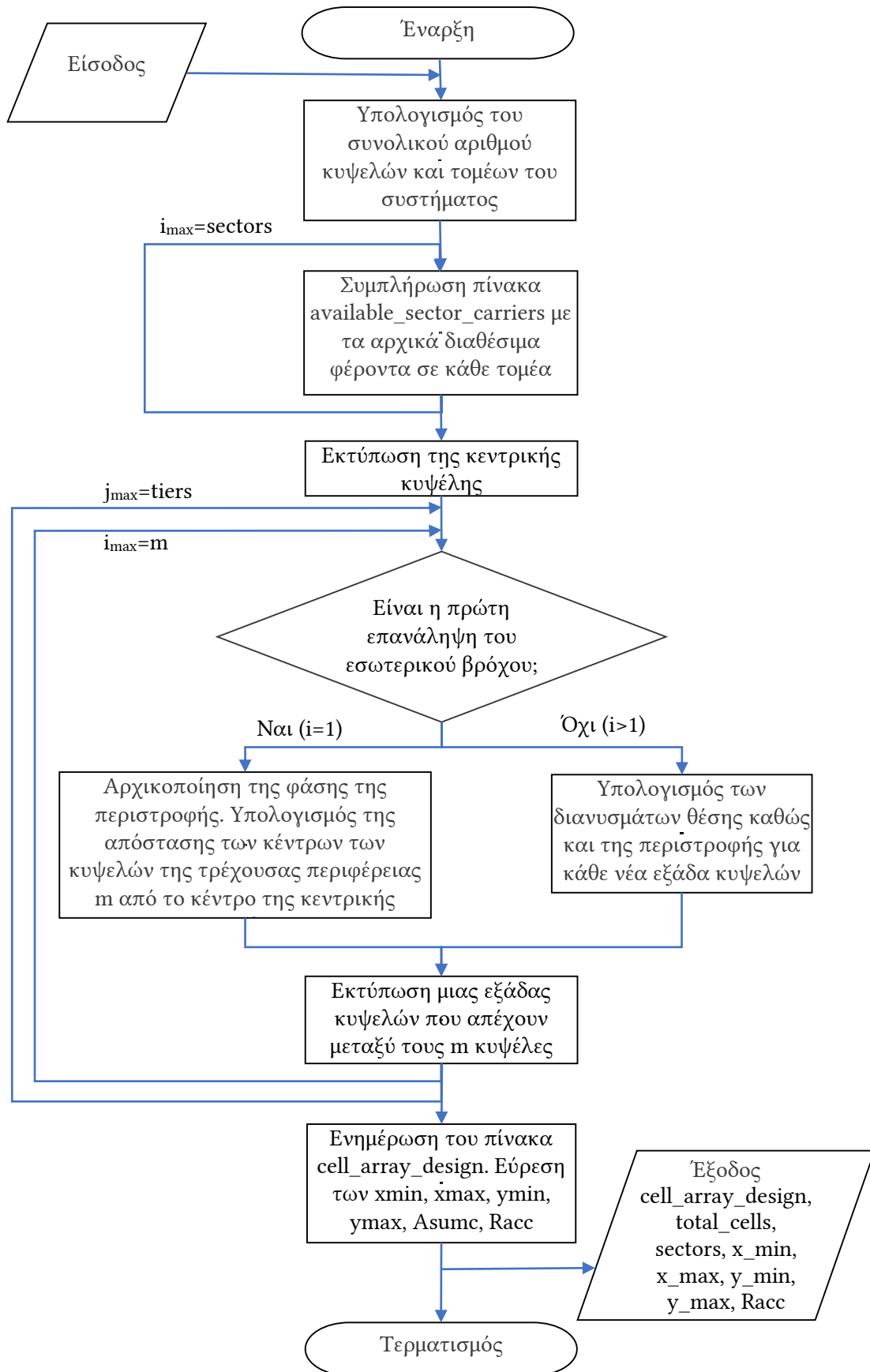
5.2.2 Δημιουργία τοπολογίας εξαγωνικών κυψελών

Ένα μεγαλύτερο σύστημα αποτελούμενο από πολλές κυψέλες, μπορεί να δημιουργηθεί με επάλληλη προσθήκη «στρώσεων» ή περιφερειών (tiers) από κυψέλες περιμετρικά της πρώτης κυψέλης. Δημιουργήθηκε λοιπόν η συνάρτηση `cell_array_design`, η οποία καλεί επαναληπτικά την συνάρτηση `cell_design` και σχεδιάζει κυψέλες κυκλικά διατεταγμένες γύρω από την κεντρική, κάνοντας έτσι δυνατή την απεριόριστη τοπολογική επέκταση του συστήματος (πάντα κατά συμμετρικό τρόπο). Η εκτέλεση της συνάρτησης αυτής, υπολογίζει κατ' αρχήν τον συνολικό αριθμό κυψελών και τομέων του συστήματος (ο οποίος βέβαια εξαρτάται από τον αριθμό περιφερειών που δόθηκε στην κλήση της συνάρτησης μέσω του ορίσματος εισόδου tiers) και κατόπιν δημιουργεί πίνακα με τα αρχικά διαθέσιμα φέροντα σε κάθε τομέα. Ο πίνακας αυτός έχει αριθμό γραμμών ίσο με τον αριθμό τομέων του συστήματος και αριθμό στηλών ίσο με τα διατιθέμενα φέροντα ανά τομέα (δηλαδή διαστάσεις `sectors x initial_carriers_per_sector`). Επόμενο βήμα είναι η εκτύπωση της κεντρικής κυψέλης και ακολούθως εκτυπώνονται σε κάθε περιφέρεια οι κυψέλες ανά εξάδες που απέχουν μεταξύ τους αριθμό κυψελών ίσο με τον αριθμό της περιφέρειας στην οποία βρίσκεται εκείνη την στιγμή η διαδικασία εκτύπωσης. Εκμεταλλευόμενοι το γεγονός ότι οι περιφέρειες των κυψελών απαρτίζονται πάντα από αριθμό κυψελών πολλαπλάσιο του 6, αναλύουμε κάθε τέτοια περιφέρεια (έστω την περιφέρεια n) σε $n + n-1 + n-2 + \dots$ σειρές. Για την δημιουργία της πρώτης «στρώσης» κυψελών, τοποθετούμε ένα διάνυσμα ακριβώς από πάνω από το κέντρο της κεντρικής κυψέλης, και σχεδιάζουμε έτσι την πρώτη κυψέλη της πρώτης σειράς. Στην συνέχεια περιστρέφουμε το διάνυσμα αριστερόστροφα 5 φορές (60 μοίρες κάθε φορά), και σχεδιάζουμε και τις υπόλοιπες 5 κυψέλες που ολοκληρώνουν την πρώτη περιφέρεια. Για την δεύτερη σειρά, στο 1ο βήμα όπως ακριβώς πριν. Άρα σχεδιάζουμε τις 6 πρώτες κυψέλες του 2ου tier. Για τις υπόλοιπες 6, πηγαίνουμε πάλι στην αρχική κυψέλη του 2ου tier (δηλαδή αυτή που είναι αμέσως πάνω από την κυψέλη του 1ου tier και πάνω ακριβώς από την κεντρική κυψέλη), στρέφουμε το αρχικό διάνυσμα 60 μοίρες, συνεχίζουμε όπως πριν. Για τις υπόλοιπες περιφέρειες (tiers) ακολουθείται η ίδια διαδικασία.

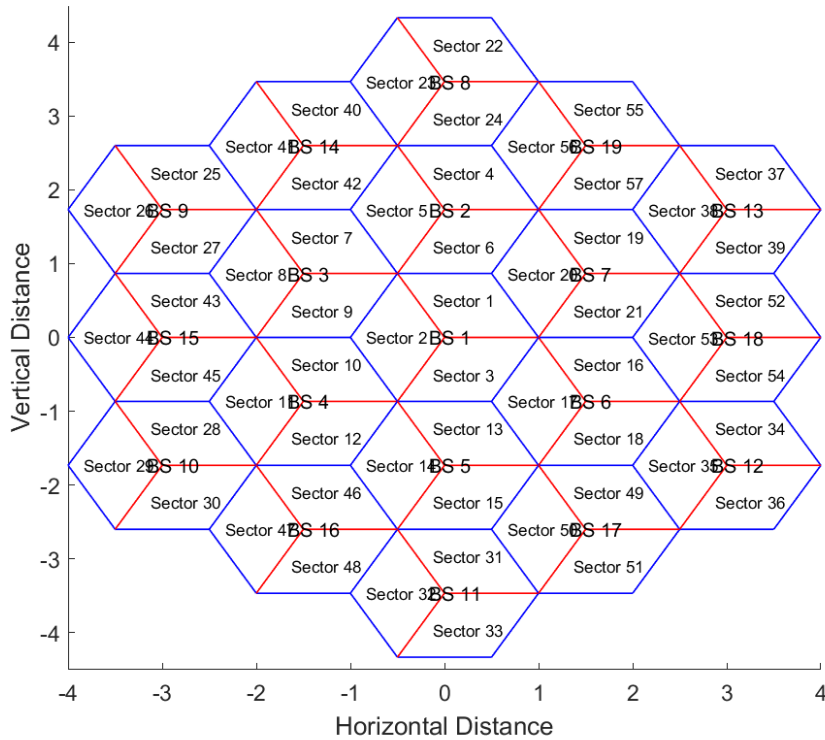
Μετά την δημιουργία όλων των κυψελών (και έχοντας βέβαια αποθηκεύσει κατά την διάρκεια της διαδικασίας τις συντεταγμένες των κέντρων αλλά και των κορυφών τους), υπολογίζουμε τις ελάχιστες και μέγιστες τιμές των συντεταγμένων της σχεδιασμένης τοπολογίας, οι οποίες αντιπροσωπεύουν και τα ακραία γεωγραφικά σημεία όλου του κυψελωτού συστήματος (η ελάχιστη τιμή του x δηλώνει το δυτικό άκρο της συνολικής τοπολογίας, η μέγιστη το ανατολικό ενώ η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή του y ορίζουν το νότιο και το βόρειο άκρο αντίστοιχα). Τέλος υπολογίζεται η συνολική επιφάνεια των κυψελών (A_{sumc}) και μέσω αυτής η ακτίνα R_{acc} του κύκλου που αντιστοιχεί σε αυτό το εμβαδό. Η ακτίνα αυτή υπολογίζεται με

$$\text{την ακόλουθη σχέση: } R_{acc} = \sqrt{\frac{A_{sumc}}{\pi}} \quad (5.2)$$

Η κυκλική επιφάνεια που ορίζεται από αυτήν την ακτίνα με κέντρο το κέντρο της αρχικής κυψέλης θα είναι η επιφάνεια στην οποία θα «επιτρέπεται» η εισαγωγή χρηστών στο σύστημα. Ακολουθεί το σχετικό λογικό διάγραμμα, καθώς και μια εικόνα της τοπολογίας για αριθμό περιφερειών κυψελών (tiers) ίσο με 2.

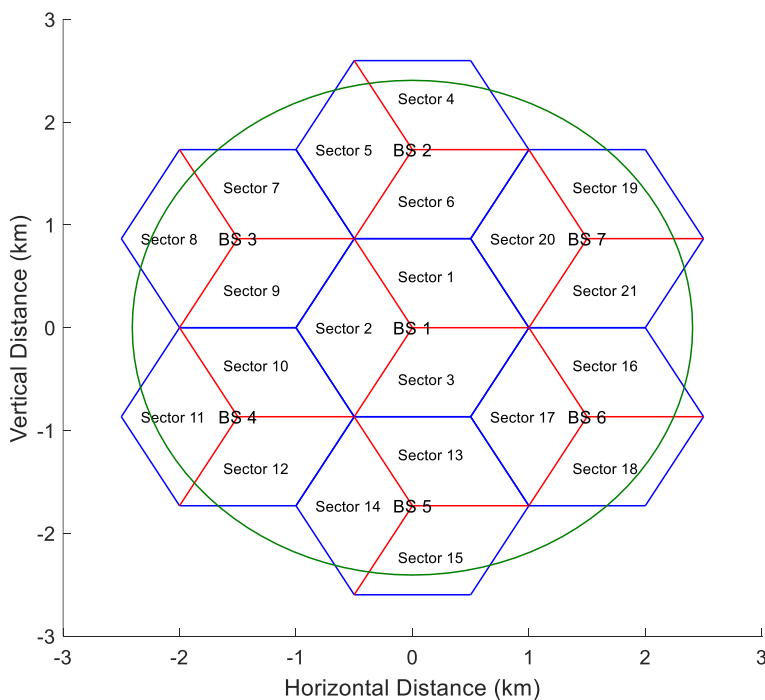


Εικόνα 5.3 Λογικό διάγραμμα συνάρτησης cell_array_design



Εικόνα 5.4: Επιφάνεια εξαγωνικών κυψελών με δύο περιφέρειες (tiers)

Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζεται η τοπολογία συστήματος κυψελών με μία περιφέρεια, στην οποία εμφανίζεται με πράσινο χρώμα η περίμετρος του προαναφερθέντος κύκλου εντός του οποίου επιτρέπεται η εισαγωγή χρηστών.

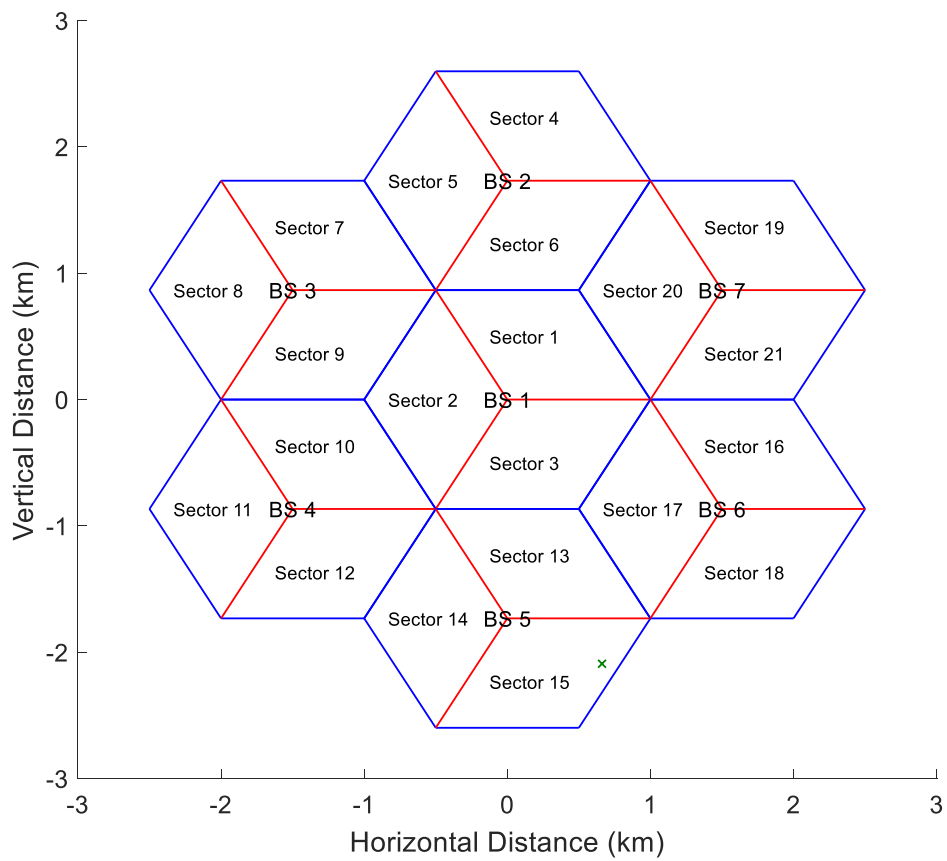


Εικόνα 5.5: Περιφέρεια κύκλου με εμβαδό ίσο με το εμβαδό των κυψελών

5.2.3 Γεωγραφική εισαγωγή χρήστη στο σύστημα

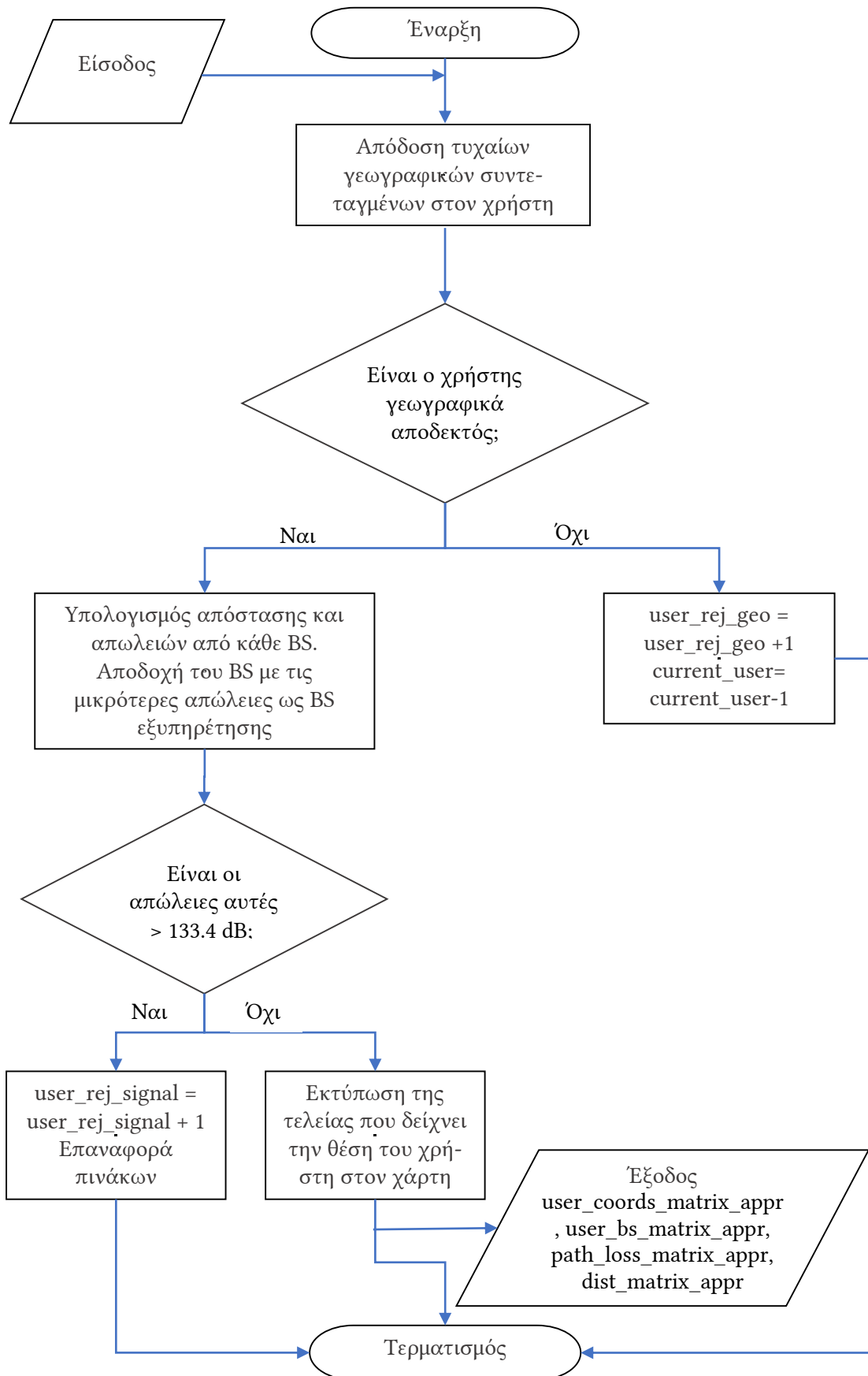
Με την κλήση της `user_entry` επιχειρούμε την εισαγωγή χρήστη στο σύστημα. Προκειμένου να έχουμε σχετικά ομοιόμορφη κατανομή του φορτίου στην τοπολογία μας, η εισαγωγή των χρηστών γίνεται σε τυχαίο γεωγραφικά σημείο. Αρχικά αυξάνεται ο μετρητής του τρέχοντος (αποδεκτού) χρήστη, ο οποίος θα μειωθεί εκ νέου αν ο χρήστης δεν γίνει τελικά αποδεκτός. Ακολούθως μηδενίζονται (αρχικοποιούνται) οι μεταβλητές-σημαίες που καταδεικνύουν την απόρριψη χρήστη λόγω γεωγραφικής θέσης, ανεπίτρεπτων απωλειών σήματος, έλλειψης φερόντων στον τομέα εξυπηρέτησής του, υπέρβασης ισχύος χρήστη, αρνητικής τιμής ισχύος φέροντος και υπέρβασης ισχύος φερόντων τομέα. Επόμενο βήμα είναι η απόδοση τυχαίων γεωγραφικών συντεταγμένων στον χρήστη (δηλαδή η εισαγωγή του σε τυχαία θέση κάπου στην τοπολογία) και ο έλεγχος για το αν το σημείο εισαγωγής του είναι εντός του προαναφερθέντος κύκλου που έχει επιφάνεια ίση με την συνολική επιφάνεια των κυψελών. Αν το σημείο είναι εκτός της επιφάνειας αυτής τότε η εκτέλεση της συνάρτησης τερματίζεται, αφού πρώτα μειωθεί κατά 1 ο μετρητής αποδεκτών χρηστών και αυξηθεί ο μετρητής των απορριφθέντων λόγω θέσης χρηστών. Επίσης τίθεται η σημαία απόρριψης λόγω γεωγραφικής θέσης και οι συντεταγμένες του χρήστη δεν αποθηκεύονται (αφού δεν θα μας χρησιμεύσουν περαιτέρω) για εξοικονόμηση υπολογιστικών πόρων.

Αν ο χρήστης περάσει τον γεωγραφικό έλεγχο τότε γίνεται κατ' αρχήν αποδεκτός και οι συντεταγμένες του αποθηκεύονται στον πίνακα `user_coords_matrix_appr`. Κατόπιν υπολογίζεται η ευκλείδεια απόσταση του χρήστη από το κέντρο κάθε κυψέλης και μέσω αυτής οι απώλειες διαδρομής (συμπεριλαμβανομένης της σκίασης) από κάθε σταθμό βάσης. Έχοντας υπολογίσει τις απώλειες διαδρομής από όλες τις κεραιές, επιλέγουμε ως BS εξυπηρέτησης του χρήστη τον σταθμό βάσης που παρέχει τον διάυλο με τις μικρότερες απώλειες διαδρομής προς αυτόν. Αν αυτές οι απώλειες είναι μεγαλύτερες από ένα προκαθορισμένο όριο (133.4 dB), τότε ο χρήστης απορρίπτεται προκειμένου να μην απαιτηθεί υπερβολικά μεγάλη ισχύς προκειμένου να εξυπηρετηθεί, οπότε και θα τεθεί σε κίνδυνο η ομαλή λειτουργία του συστήματος και θα υπάρξει αυξημένη πιθανότητα δημιουργίας ισχυρών παρεμβολών προς άλλους χρήστες. Σε αυτήν την περίπτωση αυξάνεται ο μετρητής των απορριφθέντων λόγω ανεπαρκούς σήματος χρηστών, τίθεται η σχετική σημαία, επανέρχεται ο μετρητής αποδεκτών χρηστών στην προ της εισαγωγής χρήστη τιμή του και διαγράφονται οι σχετικές με τον χρήστη πληροφορίες (συντεταγμένες κλπ) που είχαν αποθηκευθεί στους αντίστοιχους πίνακες. Αν ο χρήστης περάσει και τον δεύτερο αυτό έλεγχο τότε οι πληροφορίες αυτές διατηρούνται, ο χρήστης γίνεται αποδεκτός και εμφανίζεται μια τελεία πράσινου χρώματος η οποία δείχνει την ακριβή γεωγραφική θέση του χρήστη στην τοπολογία του συστήματος (για ευκολότερη εποπτεία, στο επόμενο διάγραμμα η τελεία έχει αντικατασταθεί με το σημείο "x", όπου φαίνεται ότι ο χρήστης έχει εισαχθεί στην επιφάνεια του τομέα 15).



Εικόνα 5.6: Χρήστης γεωγραφικά εισηγμένος στην επιφάνεια του τομέα 15

Ακολουθεί το λογικό διάγραμμα (flowchart) της συνάρτησης user_entry.



Εικόνα 5.7: Λογικό διάγραμμα συνάρτησης user_entry

5.2.4 Εύρεση τομέα εξυπηρέτησης χρήστη και πίνακα «επιπλέον» απωλειών

Η συνάρτηση αυτή ξεκινάει με την ένωση του χρήστη με τον BS εξυπηρέτησής του (τον οποίο βρήκαμε με την χρήση της προηγούμενης συνάρτησης User_entry) με μία πράσινη γραμμή. Με γνωστό τον σταθμό βάσης που εξυπηρετεί κάθε χρήστη, γίνεται κατόπιν γεωμετρικός έλεγχος συντεταγμένων για να βρεθεί σε ποιον τομέα της κυψέλης εξυπηρέτησής του ανήκει ο χρήστης (δηλαδή ποια από τις τρεις κατευθυντικές κεραίες του σταθμού βάσης εκπέμπει προς την πλευρά του).

Αρχικά ελέγχουμε για το αν ο χρήστης ανήκει στον κάτω δεξιά τομέα. Αυτό μεταφράζεται ως «αν οι συντεταγμένες του χρήστη ανήκουν στην επιφάνεια που σχηματίζεται από την επέκταση του κάτω δεξιά τομέα της κυψέλης (επέκταση που ορίζεται ως η προέκταση στο άπειρο των ευθειών που τον χωρίζουν από τους άλλους δύο τομείς)» τότε ο χρήστης βρίσκεται στην πλευρά εκπομπής του προαναφερθέντος τομέα (δηλαδή από τις τρεις κεραίες του BS, η κεραία του συγκεκριμένου τομέα είναι προσανατολισμένη προς τον χρήστη) και στο κελί του πίνακα user_sector_matrix αποθηκεύεται ο αριθμός του τομέα που εξυπηρετεί τον χρήστη (ο οποίος, αφού είναι κάτω δεξιά τομέας, είναι ο 3 * (αριθμός BS εξυπηρέτησης χρήστη)).

Αν ο πρώτος γεωμετρικός έλεγχος δεν επαληθευθεί, εξετάζουμε με τον ίδιο τρόπο αν ο χρήστης «ανήκει» στον άνω δεξιά τομέα της κυψέλης εξυπηρέτησής του (οπότε η κατευθυντική κεραία του συγκεκριμένου τομέα θα είναι στραμμένη προς αυτόν). Αν αυτός ο έλεγχος είναι αληθής, τότε ο χρήστης εξυπηρετείται από τον $[3 * (\text{αριθμός BS εξυπηρέτησης χρήστη}) - 2]$ τομέα (ακολουθώντας την αρίθμηση των άνω δεξιά τομέων).

Τέλος, αν δεν επαληθευθεί καμία από τις προηγούμενες δύο ανισότητες, σημαίνει πως ο αριστερός τομέας της κυψέλης εξυπηρέτησης είναι στραμμένος προς τον χρήστη (αφού για τον έλεγχο που πραγματοποιούμε όλη η επιφάνεια της τοπολογίας έχει χωριστεί στην συμμετρική επέκταση και των τριών τομέων και ο χρήστης βρέθηκε ότι δεν ανήκει στην επέκταση των άλλων δύο) και ο χρήστης εξυπηρετείται από τον $[3 * (\text{αριθμός BS εξυπηρέτησης χρήστη}) - 1]$ τομέα (ακολουθώντας την αρίθμηση των αριστερών τομέων).

Ακολουθώς υπολογίζεται η εξασθένηση στην εκπομπή σήματος προς τον χρήστη από όλες τις κατευθυντικές κεραίες (τομείς) της τοπολογίας μας. Η γνώση αυτή είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό των ενδεχόμενων παρεμβολών, καθώς πρέπει να γνωρίζουμε για κάθε κατευθυντική κεραία εκπομπής (τομέα δηλαδή) αν το σήμα που θα εκπεμφθεί από αυτήν θα ληφθεί από τον χρήστη με επιπλέον απόσβεση 20 dB (σε περίπτωση που η κεραία δεν είναι στραμμένη προς τον χρήστη, οπότε εκπέμπει εξασθενημένη ακτινοβολία προς τον χρήστη μέσω πλάγιων ή οπίσθιων λοβών) ή χωρίς επιπλέον απόσβεση (στην περίπτωση που η κεραία είναι στραμμένη προς τον χρήστη, οπότε θα εκπέμπει προς αυτόν μέσω του κύριου λοβού της). Οι τιμές αυτές (0 ή 20) αποθηκεύονται σε πίνακα με όνομα user_sector_attenuation_matrix διαστάσεων current_user x sectors. Ο πίνακας αυτός λοιπόν περιέχει τις επιπλέον τιμές απόσβεσης για κάθε χρήστη από κάθε τομέα.

Εκτελώντας επαναληπτικά λοιπόν για κάθε BS την διαδικασία που προαναφέρθηκε προηγουμένως για την εύρεση του τομέα εξυπηρέτησης χρήστη, βρίσκουμε για κάθε

κυψέλη ποιος τομέας της είναι προσανατολισμένος προς τον χρήστη (οπότε η αντίστοιχη τιμή στον πίνακα *user_sector_attenuation_matrix* θα είναι μηδενική) και θέτουμε τιμή επιπλέον απόσβεσης ίση με 20 (σε dB) στους άλλους δύο τομείς της κυψέλης, οι οποίοι προφανώς δεν είναι προσανατολισμένοι προς τον χρήστη.

Στο τέλος του βρόχου των υπολογισμών για κάθε κυψέλη, ενημερώνονται τα στοιχεία του πίνακα *path_loss_sector* που αφορούν τις απώλειες διάδοσης ανάμεσα στον συγκεκριμένο χρήστη και στις τρεις κατευθυντικές κεραιές (τομείς) της υπό εξέταση κυψέλης, λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι, αφού οι κεραιές αυτές βρίσκονται στο ίδιο σημείο (στο κέντρο της κυψέλης) τότε οι απώλειες διάδοσης χρήστη-κεραιών είναι οι ίδιες και για τις τρεις κεραιές και ισούνται με τις απώλειες μεταξύ χρήστη και BS που υπολογίστηκαν μέσω της συνάρτησης *user_entry* (πίνακας *path_loss_matrix_appr*).

Σαν τελευταία λειτουργία, στην συνάρτηση αυτή υπολογίζονται οι συνολικές απώλειες του συγκεκριμένου χρήστη από κάθε τομέα του συστήματος. Έχοντας πλέον την γνώση της επιπλέον απόσβεσης (0 ή 20 dB) από κάθε τομέα, προσθέτουμε στοιχείο προς στοιχείο στις απώλειες διάδοσης χρήστη-τομέα την τιμή της επιπλέον απόσβεσης (ανάλογα με το αν ο τομέας αυτός είναι προσανατολισμένος προς τον χρήστη, όπως προείπαμε) και από τον αριθμό αυτόν αφαιρούμε τα κέρδη των κεραιών εκπομπής G_b (του τομέα) και λήψης G_m (κινητού τερματικού χρήστη). Έτσι συμπληρώνεται η *current_user* γραμμή του πίνακα *total_loss_user* με τις τιμές των συνολικών απωλειών χρήστη-τομέα, για κάθε έναν τομέα. Προκύπτει δηλαδή:

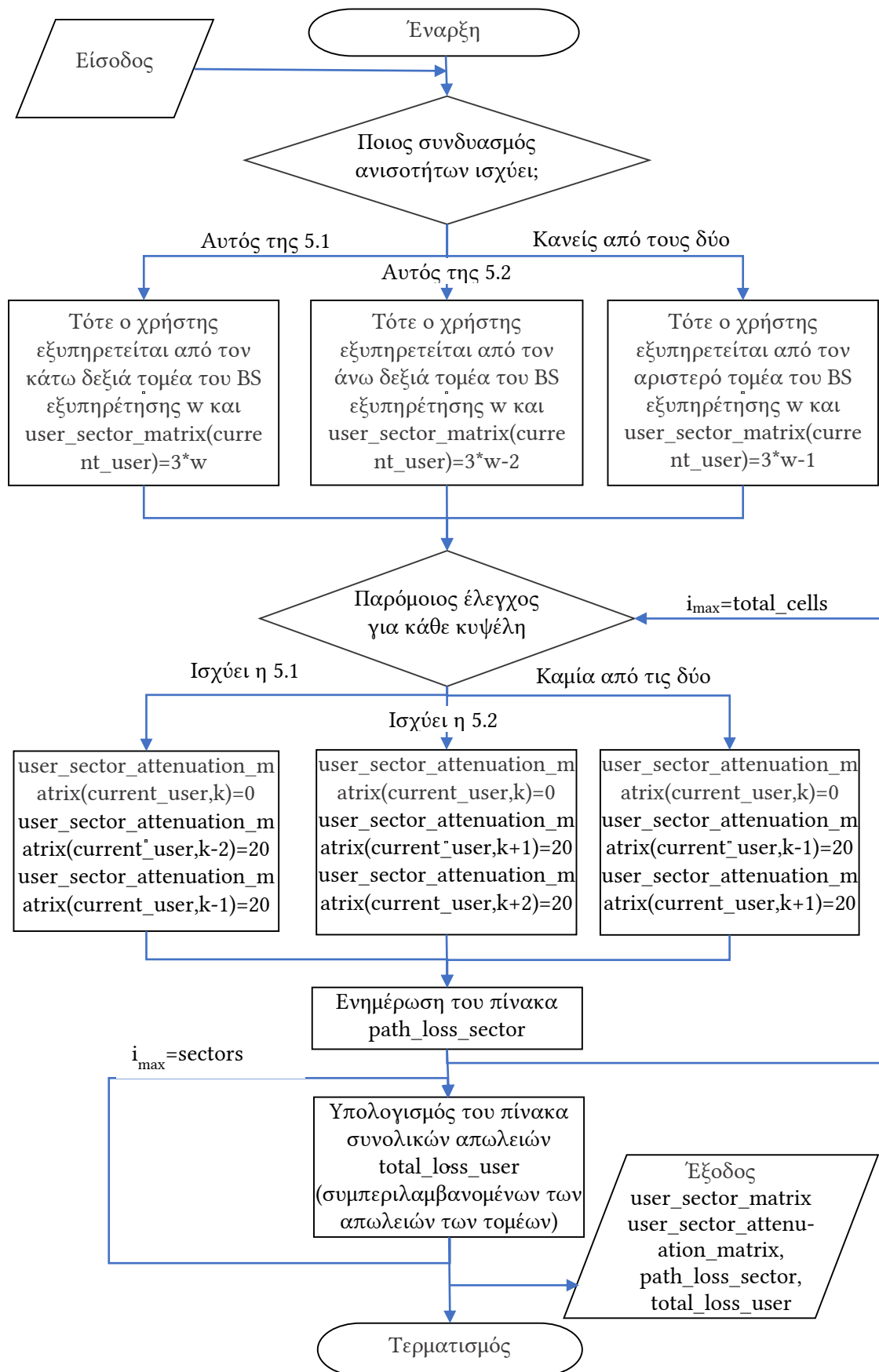
$$Total_{Loss} = Path_{Loss} + Orientation_{Loss_{1,2}} - G_b - G_m \quad (5.3)$$

με $Orientation_{Loss_1} = 0 \text{ dB}$, $0^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$

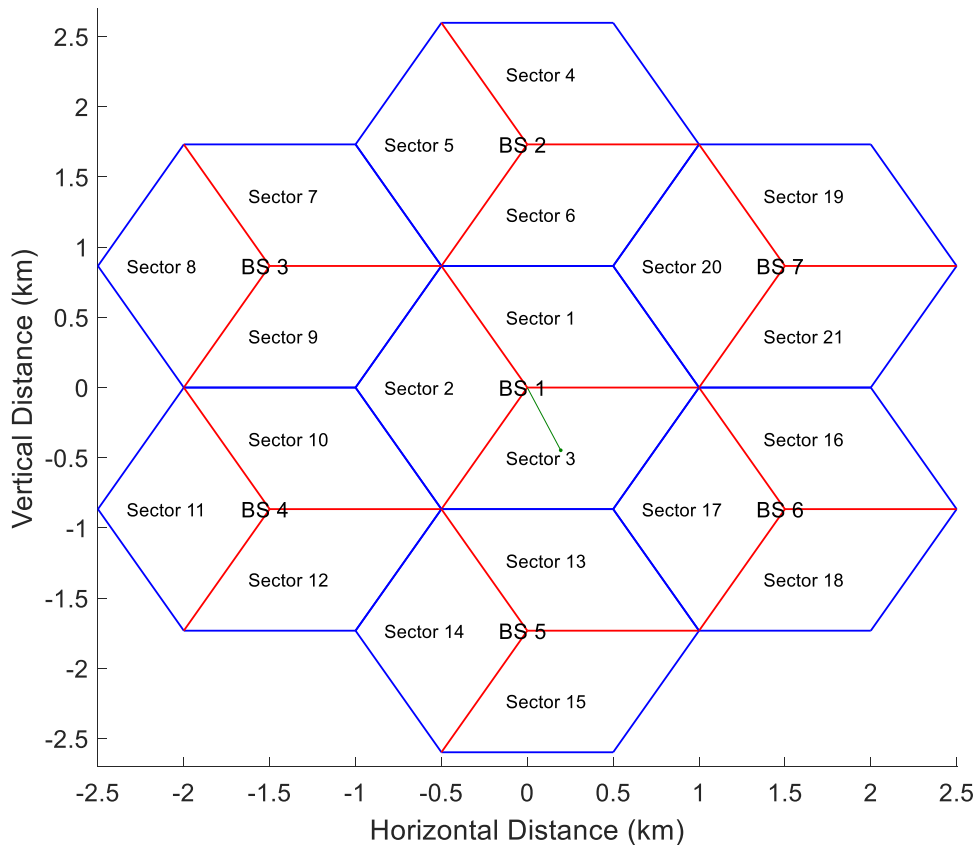
και $Orientation_{Loss_2} = 20 \text{ dB}$, αλλού

Όπου $Total_{Loss}$ είναι οι συνολικές απώλειες μεταξύ χρήστη και κεραιάς εκπομπής, $Path_{Loss}$ οι μεταξύ τους απώλειες διάδοσης, $Orientation_{Loss}$ είναι η επιπλέον απόσβεση λόγω της σχετικής θέσης χρήστη-τομέα και G_b , G_m τα κέρδη κεραιάς εκπομπής και λήψης αντίστοιχα (με τιμές 14 dB και 0 dB αντίστοιχως).

Κατόπιν παρατίθεται το λογικό διάγραμμα της συνάρτησης καθώς και μια εικόνα της τοπολογίας των κυψελών με έναν εισηγμένο χρήστη να παριστάνεται με πράσινη τελεία και να συνδέεται με τον τομέα εξυπηρέτησής του με πράσινη γραμμή.



Εικόνα 5.8: Λογικό διάγραμμα συνάρτησης attenuation



Εικόνα 5.9: Εισαγωγή χρήστη και ένωσή του με τον BS εξυπηρέτησής του

5.2.5 Ανάθεση φερόντων

Αφού ο χρήστης έχει εισαχθεί γεωγραφικά στην τοπολογία και έχουν υπολογιστεί οι απώλειες διάδοσης από όλες τις κεραιές (τομείς) προς αυτόν, επόμενο βήμα είναι να ανατεθούν φέροντα από το σύστημα προς τον χρήστη, ώστε να μπορεί να δεχθεί δεδομένα μέσω της ζεύξης καθόδου. Τα φέροντα προς το παρόν ανατίθενται με τυχαίο τρόπο, ως εξής:

Για κάθε ζητούμενο φέρον (1^ο, 2^ο, 3^ο κλπ) από τον τρέχοντα χρήστη, βρίσκουμε τα διαθέσιμα φέροντα του τομέα εξυπηρέτησής του (δηλαδή, τα φέροντα που δεν έχουν αποδοθεί ακόμα για χρήση σε αυτόν ή σε κάποιον άλλον χρήστη) και υπολογίζουμε το πλήθος τους. Αν το πλήθος τους είναι μηδενικό, σημαίνει πως ο τομέας δεν έχει πλέον άλλα φέροντα διαθέσιμα. Σε αυτήν την περίπτωση, αν το φέρον που ζητούσε ο χρήστης ήταν το πρώτο του, σημαίνει πως δεν μπορεί να αποδοθεί κανένα φέρον στον χρήστη οπότε ο χρήστης πρέπει να απορριφθεί από το σύστημα καθώς δεν μπορεί να εξυπηρετηθεί λόγω έλλειψης φερόντων (hard blocking). Αυξάνεται λοιπόν κατά 1 ο μετρητής των απορριφθέντων χρηστών λόγω έλλειψης φερόντων `user_rej_carrier`, αντιστοίχως μειώνεται ο μετρητής των αποδεκτών χρηστών `current_user`, διαγράφονται τα στοιχεία του χρήστη από όλους τους σχετικούς πίνακες και βγαίνουμε από την συνάρτηση ώστε να εισαχθεί ο επόμενος χρήστης.

Αν είχε αποδοθεί έστω και ένα φέρον στον χρήστη (οπότε ο χρήστης θα εξυπηρετηθεί μεν αλλά όχι με όσα φέροντα θα επιθυμούσε), τότε απλώς βγαίνουμε από την συνάρτηση χωρίς καμία άλλη διαδικασία ώστε να προχωρήσουμε στο επόμενο βήμα της διαδικασίας εισαγωγής χρήστη, που όπως θα δούμε είναι οι υπολογισμοί των σχετικών με το σύστημα MIMO πινάκων.

Αν υπάρχουν διαθέσιμα φέροντα στον τομέα εξυπηρέτησης χρήστη, τότε αποδίδεται στον χρήστη με τυχαίο τρόπο ένα από αυτά, συνακόλουθα αφαιρείται από τα διαθέσιμα του τομέα εξυπηρέτησής του και ενημερώνονται όλοι οι πίνακες που τηρούν τις σχετικές με τα φέροντα πληροφορίες. Οι πίνακες αυτοί είναι:

user_subcarriers: περιέχει αριθμημένα τα φέροντα που έχουν ανατεθεί σε κάθε χρήστη (μέγεθος $current_users \times wanted_carriers_per_user$).

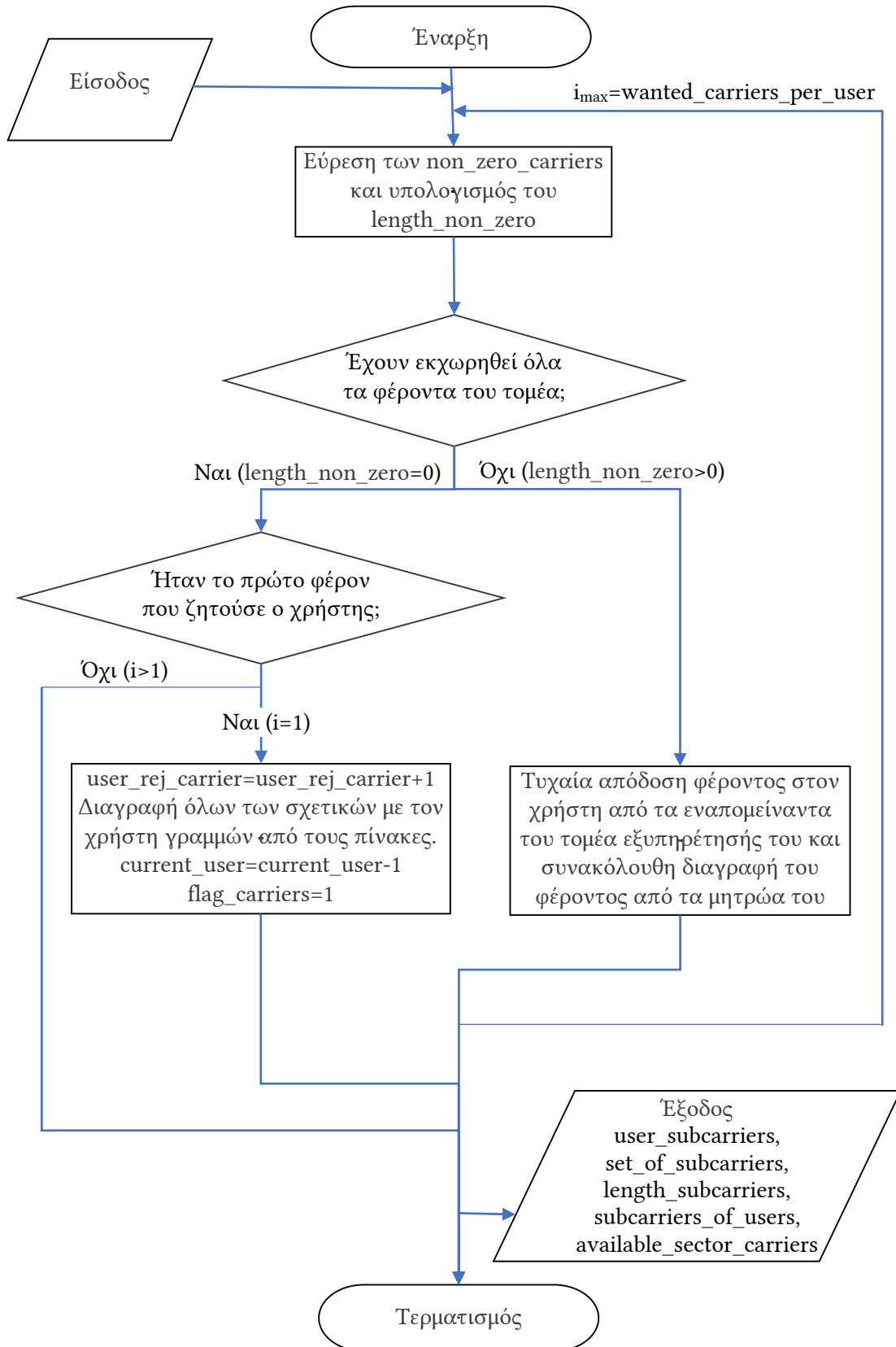
set_of_subcarriers: διάνυσμα μεγέθους $initial_carriers_per_sector$ το οποίο περιέχει αριθμημένα τα φέροντα που έχουν ανατεθεί στον τρέχοντα χρήστη.

length_subcarriers: πληροφορεί για το πλήθος των φερόντων που έχουν ανατεθεί σε κάθε χρήστη.

subcarriers_of_users: με διαστάσεις $current_users \times initial_carriers_per_sector$, κάθε γραμμή του αντιστοιχεί σε κάποιον χρήστη και κάθε στήλη του σε ένα φέρον από όλα όσα είναι αρχικά διαθέσιμα σε κάθε τομέα. Το στοιχείο της γραμμής i και της στήλης j έχει την τιμή 2 αν το j -οστό φέρον του τομέα εξυπηρέτησης του i -οστού χρήστη έχει αποδοθεί σε αυτόν και 0 αλλιώς.

available_sector_carriers: περιέχει όλα τα φέροντα όλων των τομέων. Αν κάποιο φέρον είναι ακόμα διαθέσιμο τότε το συγκεκριμένο στοιχείο του πίνακα έχει την τιμή του αριθμού του φέροντος (από 1 έως 128 στην περίπτωσή μας), αλλιώς λαμβάνει την τιμή 0.

Στην εικόνα 5.10 απεικονίζεται η λειτουργική ροή της συνάρτησης *carrier_allocation*.



Εικόνα 5.10: Λογικό διάγραμμα συνάρτησης carrier_allocation

5.2.6 Προσδιορισμός στοιχείων MIMO

Αφού έχουν αποδοθεί πλέον φέροντα στον χρήστη, προκύπτει η ανάγκη υπολογισμού των χαρακτηριστικών του MIMO συστήματος μετάδοσης. Οι υπολογισμοί αυτοί πραγματοποιούνται με κλήση της συνάρτησης *MIMO_matrices* η οποία αρχικά υπολογίζει τα μιγαδικά κέρδη του διαύλου διάδοσης για κάθε δίαυλο που υπάρχει μεταξύ του χρήστη και οποιασδήποτε κεραιάς εκπομπής του συστήματος. Ο αριθμός των στατιστικά ανεξάρτητων αυτών διαύλων είναι, για κάθε χρήστη, ίσος με αριθμό τομέων στο σύστημα \times αρχικά διαθέσιμα φέροντα ανά τομέα \times κεραιές εκπομπής ανά τομέα \times κεραιές λήψης ανά χρήστη, ή αλλιώς

$$\text{Channels_per_user} = \text{sectors} \times \text{initial_carriers_per_sector} \times M_t \times M_r \quad (5.4)$$

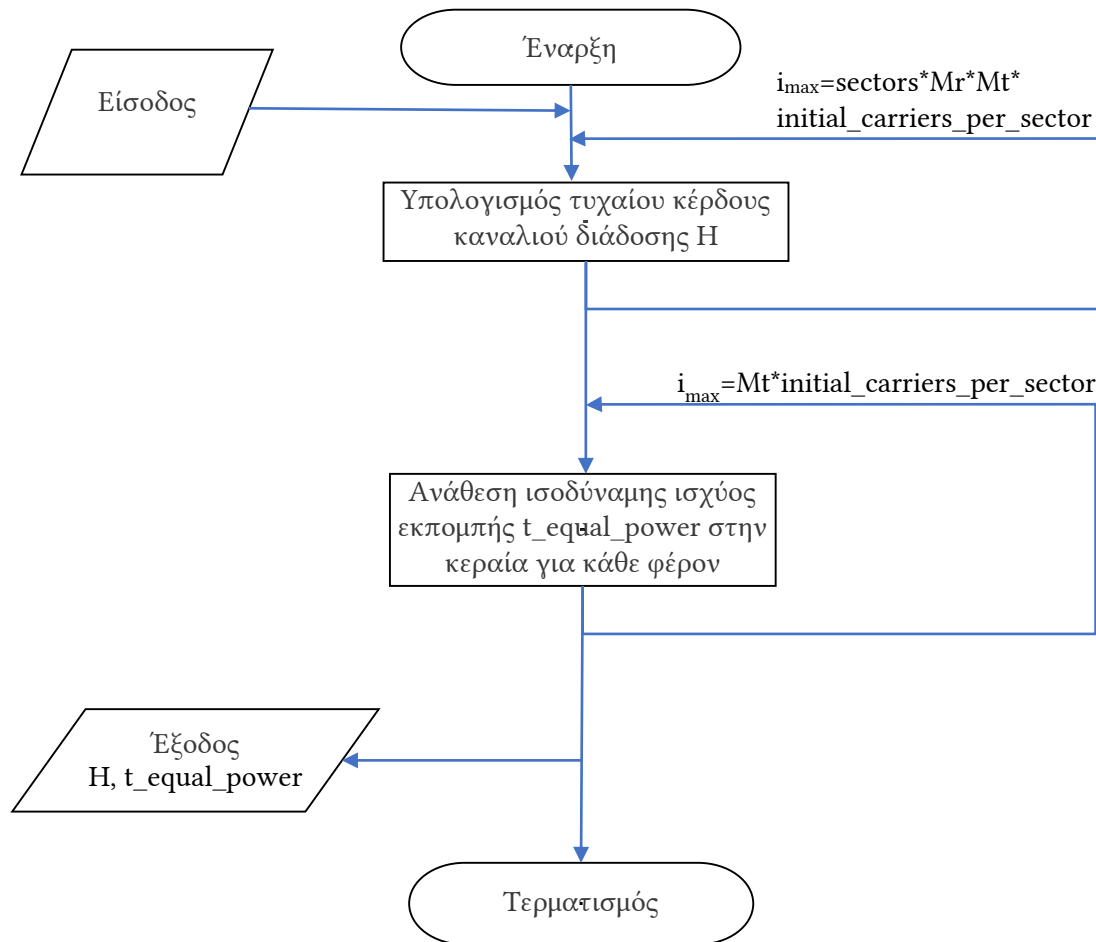
Σε κάθε έναν τέτοιο δίαυλο ανατίθεται ένα τυχαία υπολογισμένο κέρδος διαύλου:

$$H(\text{current_user}, i, j, k, l) = \frac{\sqrt{2}}{2} \times (\text{rand} + j\text{rand}) \quad (5.5)$$

Με το i να παίρνει τιμές από 1 έως *sectors*, το j από 1 έως M_t , το k από 1 έως M_r και το l από 1 έως *initial_carriers_per_sector*.

Η δεύτερη λειτουργία της *MIMO_matrices* είναι η εύρεση των διανυσμάτων ισχύος των κεραιών εκπομπής, τα οποία αποθηκεύονται στον πίνακα ***t_equal_power***. Για το βασικό μας σενάριο, επειδή λειτουργούμε χωρίς γνώση του διαύλου, δεν μπορούμε να γνωρίζουμε για ποιους διαύλους μεταξύ κεραιών και χρηστών (άρα και για τα αντίστοιχα φέροντα) είναι καλύτερες οι συνθήκες διάδοσης οπότε η πρακτική μας είναι να ισοκατανείμουμε την ισχύ εκπομπής σε κάθε φέρον κάθε κεραιάς εκπομπής του MIMO συστήματος. Για κάθε φέρον που έχει ανατεθεί στον χρήστη και για κάθε κεραιά εκπομπής του τομέα εξυπηρέτησής του, ανατίθεται στο αντίστοιχο στοιχείο του πίνακα ***t_equal_power*** η τιμή $\frac{1}{\sqrt{M_t}}$ (στην περίπτωσή μας, $\frac{1}{\sqrt{2}}$).

Η λειτουργία της *MIMO_matrices* απεικονίζεται στην εικόνα 5.11.



Εικόνα 5.11: Λογικό διάγραμμα συνάρτησης MIMO_matrices

5.2.7 Υπολογισμός ισχύος εκπομπής φερόντων

Αφού έχουν ανατεθεί τα φέροντα στον χρήστη και έχουν υπολογιστεί τα σχετικά με το MIMO περιβάλλον διάδοσης μεγέθη, προκύπτει η ανάγκη να γίνει επικαιροποιημένος υπολογισμός των ισχύων των φερόντων του συστήματος με εισαγωγή και των φερόντων του καινούριου χρήστη, τα οποία νωρίτερα δεν χρησιμοποιούνταν. Ο υπολογισμός αυτός πρέπει να γίνει ώστε να προκύψουν οι ισχύεις (σε Watt) που θα απαιτηθούν από την κεραία εκπομπής (BS) για την χρήση κάθε φέροντος από αυτά που έχουν ανατεθεί στον χρήστη αλλά και για να επικαιροποιηθούν οι ισχύεις των υπόλοιπων φερόντων του συστήματος με τα οποία τα πρόσφατα ανατεθειμένα φέροντα παρεμβάλλουν. Η εκπομπή από τις κεραίες του τομέα μιας οποιασδήποτε τιμής ισχύος σε συχνότητες (φέροντα) που προηγουμένως δεν χρησιμοποιούνταν (άρα είχαν μηδενική ισχύ) προκαλεί διατομεακές ή διακυψελικές παρεμβολές σε φέροντα αντίστοιχων συχνοτήτων (άλλων τομέων ή κυψελών) που χρησιμοποιούν άλλοι χρήστες, με συνέπεια να χρειάζεται ο υπολογισμός των ισχύων όλων των εμπλεκόμενων φερόντων, προκειμένου οι ισχύεις εκπομπής των φερόντων να ικανοποιούν το νέο SINR. Με δεδομένη την αύξηση της παρεμβολής (Interference), ο λόγος SINR θα προκύψει χαμηλότερος από πριν, οπότε για να διατηρηθεί στα ίδια επίπεδα (ώστε να εξακολουθεί να επιτυγχάνεται η QPSK

αποδιαμόρφωση), θα πρέπει να αυξηθεί η ισχύς εκπομπής κάποιων από τα αλληλοπαρεμβαλλόμενα φέροντα.

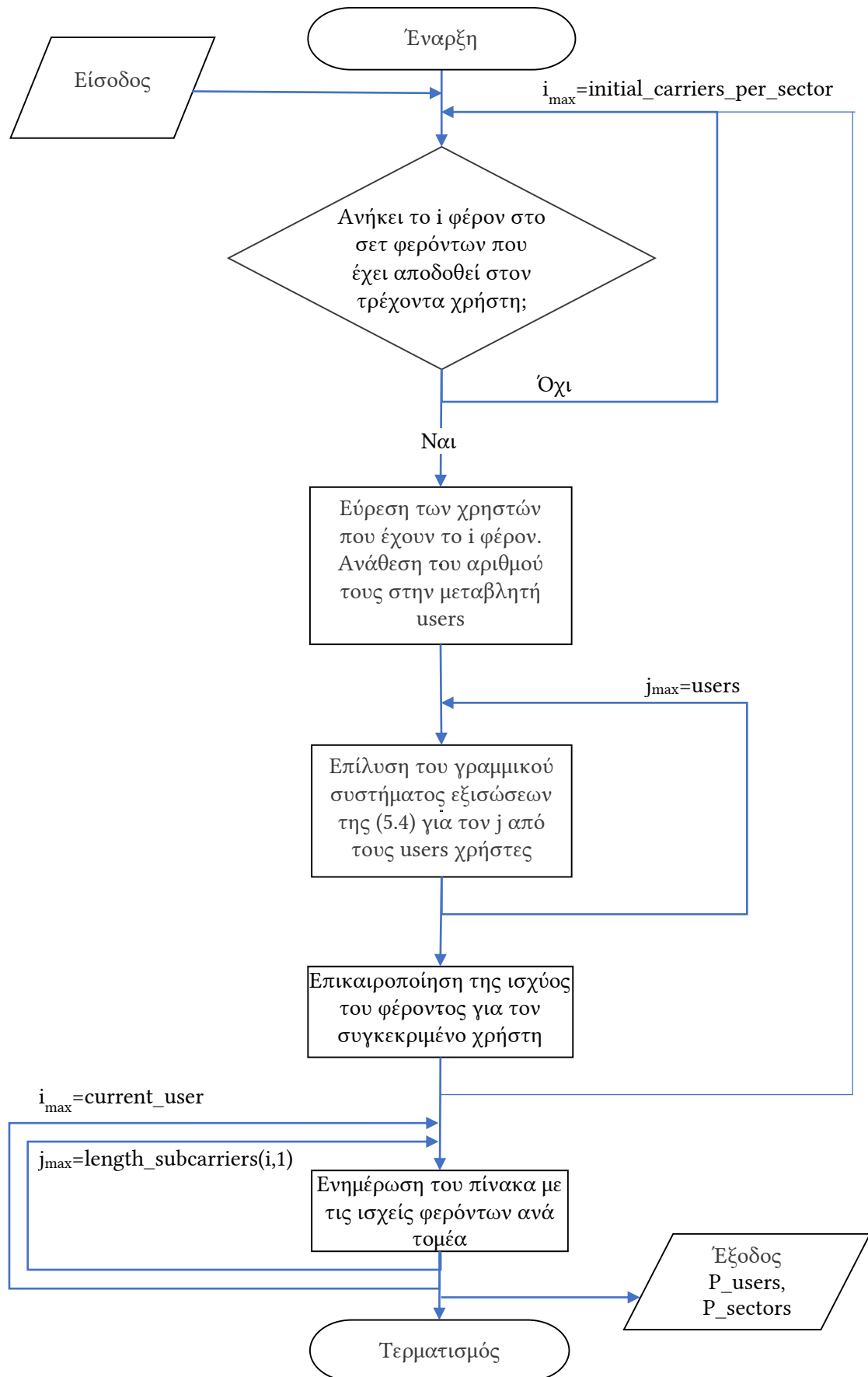
Η συνάρτηση που επιτελεί αυτό το έργο λέγεται *power_control*, και η λειτουργία της έχει ως εξής [26]:

Ελέγχονται ανά ένα και με την σειρά όλα τα φέροντα (τμήματα συχνοτήτων) που είναι διαθέσιμα αρχικώς στο σύστημά μας (128 στην δική μας προσομοίωση). Για κάθε ένα από αυτά, εξετάζουμε αν ανήκει στο *set_of_subcarriers* διάνυσμα (που σημαίνει ότι μόλις αποδόθηκε στον νεοεισελθόντα χρήστη). Αν δεν ανήκει, σημαίνει πως στον καινούριο χρήστη δεν ανατέθηκε το συγκεκριμένο φέρον, οπότε οι ισχύεις εκπομπής του φέροντος αυτού - από οποιονδήποτε χρήστη οποιουδήποτε τομέα και αν χρησιμοποιείται - δεν χρειάζονται επανυπολογισμό αφού οι μεταξύ τους παρεμβολές δεν πρόκειται να έχουν μεταβληθεί. Έτσι δεν υπάρχει κάτι άλλο να γίνει οπότε προχωρούμε στον έλεγχο του επόμενου κατά σειρά φέροντος.

Αν τώρα το φέρον ανήκει στο *set_of_subcarriers* διάνυσμα, σημαίνει ότι είναι ένα από τα φέροντα που μόλις αποδόθηκαν για χρήση στον καινούριο χρήστη. Σε αυτήν την περίπτωση είναι απαραίτητος ο επανυπολογισμός των ισχύων όλων των αντίστοιχων φερόντων όλων των τομέων που έχουν ανατεθεί σε χρήστες καθώς, όπως προλέχθηκε, με δεδομένο ότι χρησιμοποιείται το OFDMA σχήμα πρόσβασης, η καινούρια εκπομπή ισχύος σε αυτήν την συχνότητα θα προκαλέσει επιπλέον παρεμβολές στους χρήστες που χρησιμοποιούν το ίδιο φέρον. Βρίσκουμε λοιπόν σε ποιους χρήστες από όσους εξυπηρετούνται αυτήν την στιγμή από το σύστημα έχει ανατεθεί το συγκεκριμένο φέρον, και για τους χρήστες αυτούς επιλύεται το σύστημα εξισώσεων 5.12, το οποίο οδηγεί στην επικαιροποίηση των τιμών ισχύος εκπομπής του φέροντος αυτού για όλους τους χρήστες που το χρησιμοποιούν, ανεξαρτήτως τομέα. Τα στοιχεία του πίνακα *P_users* που αφορούν τους χρήστες που χρησιμοποιούν το προς έλεγχο φέρον ενημερώνονται με τις νέες τιμές ισχύος.

Αφού ολοκληρωθεί πλέον ο έλεγχος όλων των φερόντων και έχει ενημερωθεί πλήρως ο πίνακας ισχύων χρηστών *P_users*, επανυπολογίζεται και ο πίνακας των ισχύων τομέων *P_sectors*, αντιγράφοντας τις τιμές ισχύων των μη μηδενικών στοιχείων της *P_users* (δηλαδή των φερόντων που κατέχουν οι χρήστες) στα κατάλληλα στοιχεία της *P_sectors*.

Ακολουθεί το σχετικό λειτουργικό διάγραμμα (εικόνα 5.12).



Εικόνα 5.12: Λογικό διάγραμμα συνάρτησης power_control

5.2.8 Έλεγχος υπερβάσεων ισχύος

Τι γίνεται όμως αν οι ισχύεις των φερόντων που έχουν προκύψει έχουν τιμές χωρίς φυσική σημασία (για παράδειγμα, αρνητικές) ή υπερβαίνουν κάποια λειτουργικά ή κατασκευαστικά όρια; Εδώ έρχεται η συνάρτηση `power_check`, κλήση της οποίας πραγματοποιεί αυτόν τον έλεγχο «εγκυρότητας» των τιμών των ισχύων, σύμφωνα με ορισμένες προϋποθέσεις. Όπως έχει προαναφερθεί, επιθυμούμε το άθροισμα των ισχύων των φερόντων που έχει στην διάθεσή του ένας χρήστης να μην υπερβαίνει κάποιο όριο, ώστε ο χρήστης αυτός να μην μονοπωλεί την ισχύ του συστήματος, προκαλώντας επιπλέον και υπερβολικές παρεμβολές σε άλλους χρήστες. Επίσης, δεδομένης της κατασκευαστικής δυνατότητας κάθε κεραίας για εκπομπή συνολικής ισχύος εντός κάποιων τιμών, υπάρχει και περιορισμός της συνολικής ισχύος εκπομπής κάθε BS ή, επιμεριζόμενης στους τρεις τομείς, κάθε τομέα. Με συνολική επιτρεπόμενη εκπομπή ισχύος 20W ανά BS και ίσο επιμερισμό της στους τρεις τομείς της κυψέλης, προκύπτει επιτρεπόμενη εκπομπή ισχύος ίση με 6.6W ανά τομέα. Τέλος, απαιτείται ξεχωριστός έλεγχος για την ύπαρξη αρνητικών τιμών ισχύος, οι οποίες δεν έχουν φυσική σημασία και δεν δύναται να υφίστανται σε ένα πραγματικό σύστημα.

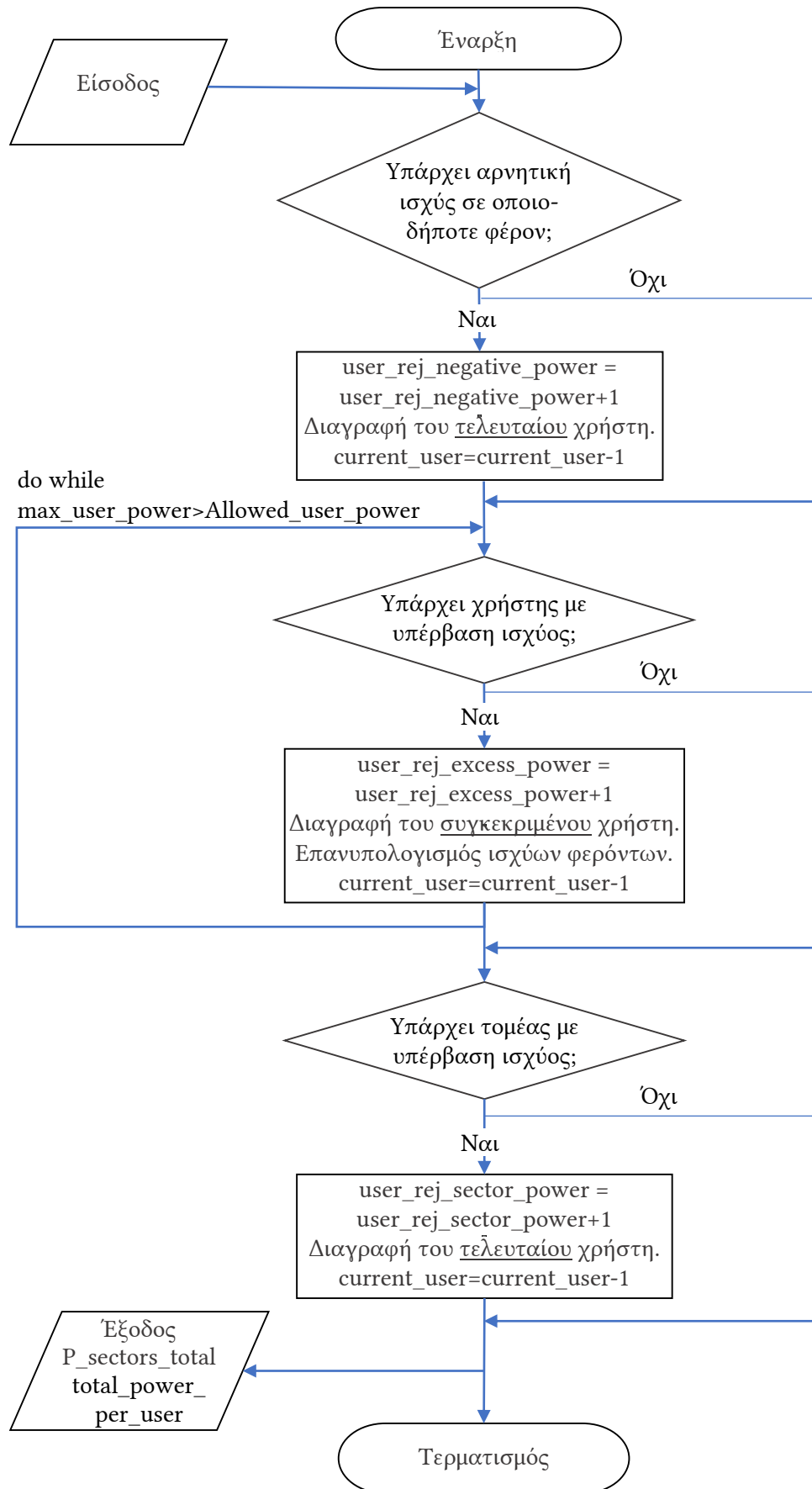
Σαν πρώτο βήμα, βρίσκουμε την συνολική ισχύ φερόντων κάθε χρήστη. Κατόπιν ελέγχουμε για αρνητικές τιμές ισχύος φερόντων, ελέγχοντας τις τιμές του πίνακα `P_users`. Αν βρεθεί έστω και μία αρνητική τιμή ισχύος, τίθεται η σχετική μεταβλητή-σημαία, διαγράφεται ο τελευταίος (δηλαδή ο τρέχων) χρήστης που εισήλθε στο σύστημα (πραγματοποιώντας τις συνακόλουθες ενημερώσεις στους σχετικούς πίνακες), μειώνεται κατά ένα ο μετρητής των αποδεκτών χρηστών με ταυτόχρονη αύξηση του μετρητή των απορριφθέντων λόγω αρνητικών τιμών ισχύος και βγαίνουμε από την συνάρτηση.

Εάν δεν βρεθούν αρνητικές τιμές ισχύος σε φέροντα, τότε ελέγχουμε το αν ικανοποιείται ο περιορισμός της αθροιστικής ισχύος φερόντων χρήστη. Αρχικά βρίσκουμε την συνολική ισχύ φερόντων ανά χρήστη, και μέσω αυτής τον χρήστη με την μεγαλύτερη ισχύ (ο οποίος θα έχει την μεγαλύτερη από τις τιμές αυτές). Αν αυτή η τιμή υπερβαίνει την μέγιστη επιτρεπόμενη ανά χρήστη (οπότε προκύπτει αθροιστική υπέρβαση ισχύος χρήστη), τότε τίθεται η σχετική μεταβλητή-σημαία, διαγράφεται ο συγκεκριμένος (δηλαδή αυτός που παρουσίασε την υπέρβαση ισχύος) χρήστης (ξανά πραγματοποιώντας τις αντίστοιχες ενημερώσεις στους σχετικούς πίνακες) και μειώνεται κατά ένα ο μετρητής των αποδεκτών χρηστών με ταυτόχρονη αύξηση του μετρητή των απορριφθέντων λόγω υπέρβασης ισχύος χρήστη. Ταυτόχρονα βρίσκουμε τα φέροντα που χρησιμοποιούσε ο εν λόγω χρήστης, ενημερώνουμε με αυτά το διάνυσμα `set_of_subcarriers` και με την χρήση του καλούμε εκ νέου την συνάρτηση `power_control` (όπου θα επανυπολογιστούν οι νέες τιμές ισχύων για αυτά τα φέροντα) και `power_check` (για καινούριο έλεγχο εγκυρότητας των προκυπτουσών τιμών ισχύος). Κατόπιν επανεκτελείται ο προηγούμενος βρόχος, προκειμένου να διαπιστωθεί αν εξακολουθεί να υπάρχει χρήστης που παρουσιάζει αθροιστική υπέρβαση ισχύος φερόντων. Επειδή η αφαίρεση του χρήστη (άρα και των ισχύων των φερόντων που χρησιμοποιούσε) οδηγεί κάθε φορά σε μια πιο ευνοϊκή από την άποψη εκπομπής ισχύος φερόντων κατάσταση, είναι πιθανό ενώ πριν την πρώτη αφαίρεση χρήστη να υπήρχει και

άλλος που να υπερέβαινε την μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή ισχύος αλλά μετά την αφαίρεση του «προβληματικού» χρήστη και την συνακόλουθη μείωση των παρεμβολών οι απαιτούμενες ισχύεις εκπομπής μπορεί να μειωθούν οπότε πλέον να μην υφίσταται ανάγκη απόρριψης και άλλου χρήστη.

Τρίτος και τελευταίος έλεγχος της συνάρτησης αυτής είναι ο έλεγχος για την ικανοποίηση του περιορισμού της αθροιστικής ισχύος φερόντων τομέα. Υπολογίζεται το άθροισμα ισχύος των φερόντων που έχει κάθε τομέας και, αν βρεθεί τομέας με υπέρβαση της μέγιστης επιτρεπτής ισχύος τότε ακολουθούνται πάλι παρόμοιες διαδικασίες με την περίπτωση εύρεσης αρνητικών τιμών ισχύος (δηλαδή, διαγράφεται ο τελευταίος χρήστης και όποια πληροφορία έχει σχέση με αυτόν).

Στην εικόνα 5.13 απεικονίζονται οι λειτουργίες της προαναφερθείσας συνάρτησης.



Εικόνα 5.13: Λογικό διάγραμμα συνάρτησης power_check

5.2.9 Κύριο σώμα αλγόριθμου

Η κύρια συνάρτηση εκτέλεσης της προσομοίωσης, η οποία καλεί και όλες τις υπόλοιπες, έχει το αρκετά ταιριαστό όνομα *master_function*. Στην συνάρτηση αυτή αρχικοποιούνται οι πίνακες που θα χρησιμεύσουν για την αποθήκευση των μέσων όρων όλων των Monte Carlo προσομοιώσεων, ορίζεται ο αριθμός αυτών των προσομοιώσεων και κατόπιν εκτελείται ο βρόχος της κάθε ξεχωριστής προσομοίωσης, μέχρι να φτάσουμε στον αριθμό προσομοιώσεων που έχει οριστεί αρχικά.

Εντός λοιπόν του βρόχου αυτού (δηλαδή, για μια δεδομένη επανάληψη της προσομοίωσης ενός σεναρίου), αρχικοποιούνται όλες οι χρήσιμες παράμετροι, μεταβλητές και πίνακες που έχουν προαναφερθεί. Ακολουθώς καλείται η *cell_array_design*, η οποία σχεδιάζει την τοπολογία του κυψελωτού συστήματος με βάση τις παραμέτρους που έχουν εισαχθεί από τον χρήστη στην *master_function*. Όπως προαναφέρθηκε, η *cell_array_design* επιστρέφει τον συνολικό αριθμό κυψελών και τομέων, πίνακα με τα αρχικά διαθέσιμα φέροντα σε όλους τους τομείς, τις συντεταγμένες των κέντρων των κυψελών (δηλαδή των BS), τις συντεταγμένες των ακραίων σημείων της συνολικής τοπολογίας και την ακτίνα του κύκλου που αντιστοιχεί στο εμβαδό της συνολικής επιφάνειας των κυψελών.

Κατόπιν, για όσο δεν έχει ξεπεραστεί το μέγιστο επιτρεπόμενο ποσοστό απόρριψης χρήστη, ακολουθείται η διαδικασία εισαγωγής νέου χρήστη με όλους τους συνακόλουθους υπολογισμούς και ελέγχους που προαναφέρθηκαν στην περιγραφή των προηγούμενων συναρτήσεων. Με κλήση της *User_entry* γίνεται προσπάθεια εισαγωγής νέου χρήστη στο σύστημα, προσπάθεια που επαναλαμβάνεται για όσο ο επιχειρούμενος να εισαχθεί χρήστης απορρίπτεται είτε λόγω γεωγραφικής θέσης (βρίσκεται εκτός του προαναφερθέντος κύκλου) είτε λόγω μη αποδεκτών απωλειών διάδοσης. Όταν πλέον έχει εισαχθεί νέος χρήστης, καλείται η *attenuation*, η οποία βρίσκει τον τομέα εξυπηρέτησης του χρήστη, υπολογίζει τον πίνακα *H* των επιπλέον απωλειών των τομέων ανάλογα με τον προσανατολισμό τους και τέλος επιστρέφει τον πίνακα των συνολικών απωλειών ενημερωμένο με τις απώλειες διάδοσης του χρήστη από όλους τους τομείς (με τις απώλειες αυτές να συμπεριλαμβάνουν, εκτός από τις απώλειες διάδοσης, και τις επιπλέον απώλειες των τομέων βάσει του πίνακα *H* καθώς και τα κέρδη των κεραιών εκπομπής (BS) και λήψης (χρήστη)).

Επόμενο βήμα είναι η (τυχαία, για το βασικό σενάριο) απόδοση φερόντων στον χρήστη, η οποία πραγματοποιείται με κλήση της συνάρτησης *carrier_allocation*. Με την επιστροφή της συνάρτησης γνωρίζουμε πλέον αν δόθηκαν φέροντα στον χρήστη, καθώς και πόσα δόθηκαν και ποια είναι αυτά. Έτσι μπορούν να υπολογιστούν τα μεγέθη του MIMO περιβάλλοντος διάδοσης (κέρδη διαύλων, διανύσματα κεραιών) για τον τρέχοντα χρήστη, πράγμα που γίνεται με την κλήση της συνάρτησης *MIMO_matrices*.

Στην περίπτωση που έχει αποδοθεί στον χρήστη έστω και ένα φέρον, ακολουθεί η κλήση των συναρτήσεων *power_control* και *power_check*, προκειμένου να γίνει ο απαραίτητος έλεγχος ισχύος που προαναφέρθηκε. Εάν δεν αποδόθηκε στον εισαχθέντα χρήστη κάποιο φέρον (δηλαδή όλα τα αρχικώς διαθέσιμα φέροντα του τομέα εξυπηρέτησής του έχουν εξαντληθεί), δεν υπάρχει λόγος να γίνει έλεγχος

ισχύος, οπότε μεταβαίνουμε κατευθείαν στον έλεγχο της υπέρβασης της πιθανότητας απόρριψης (στον οποίο θα μεταβούμε και μετά τον έλεγχο ισχύος, στην περίπτωση που στον χρήστη είχε αποδοθεί φέρον).

Για την πραγματοποίηση του ελέγχου της υπέρβασης της πιθανότητας απόρριψης, αθροίζουμε τους απορριφθέντες μέχρι τώρα χρήστες όλων των κατηγοριών (εκτός από τους χρήστες που απορρίφθηκαν εξ' αρχής λόγω γεωγραφικής θέσης ή υπερβολικών απωλειών, οι οποίοι δεν έγιναν εξ' αρχής αποδεκτοί από το σύστημα). Βρίσκουμε λοιπόν το άθροισμα των χρηστών που έχουν απορριφθεί μέχρι στιγμής λόγω έλλειψης φερόντων στον τομέα τους, λόγω ύπαρξης αρνητικών τιμών ισχύος, λόγω υπέρβασης ισχύος χρήστη και λόγω υπέρβασης ισχύος τομέα, δηλαδή:

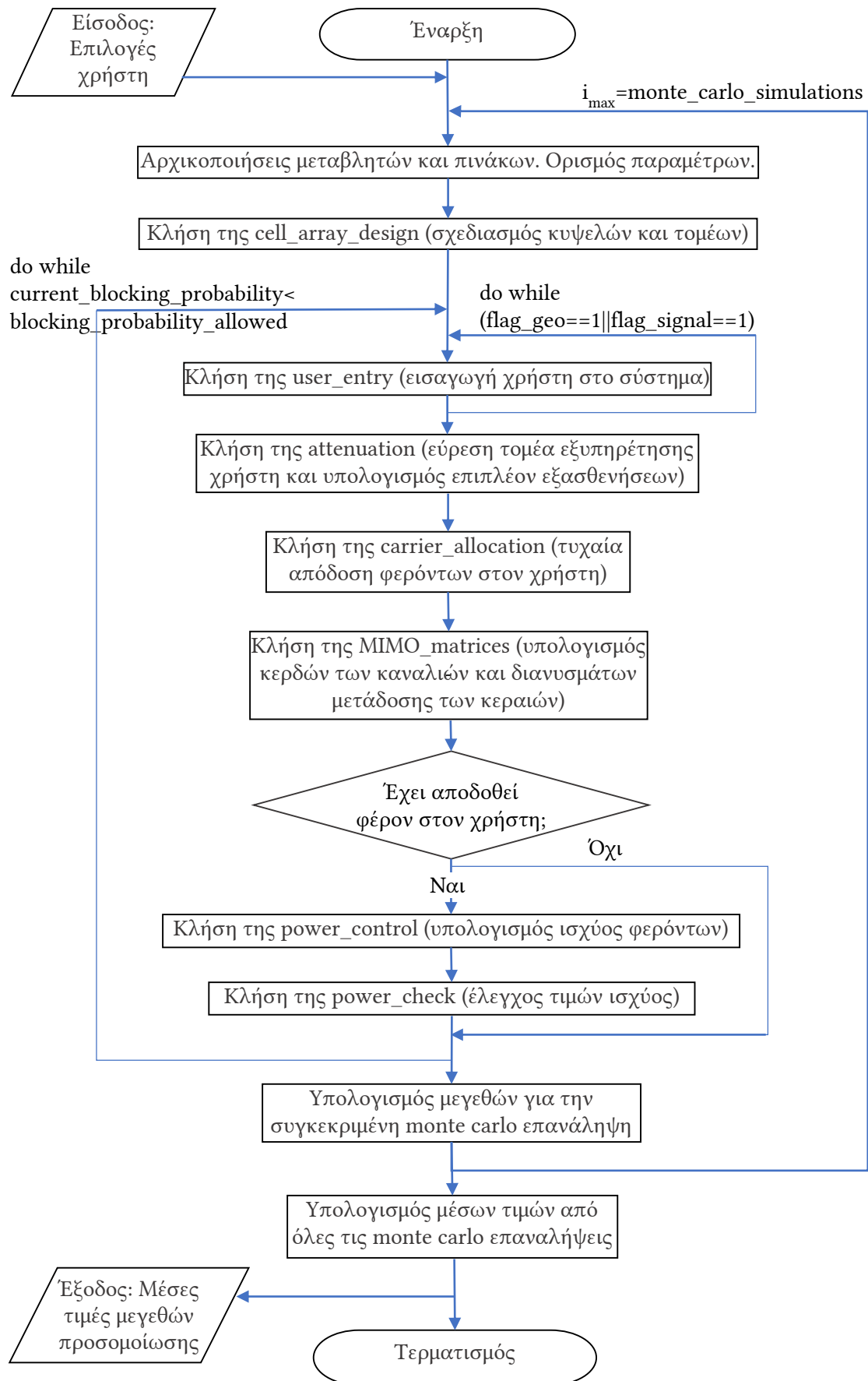
$$\text{rejected_users} = \text{user_rej_carrier} + \text{user_rej_negative_power} + \text{user_rej_excess_power} + \text{user_rej_sector_power} \quad (5.4)$$

Κατόπιν βρίσκουμε την τρέχουσα πιθανότητα αποκλεισμού χρήστη, διαιρώντας το προηγούμενο άθροισμα απορριφθέντων χρηστών με το άθροισμα όλων των χρηστών που βρίσκονται εντός συστήματος αυτήν την στιγμή συν τους απορριφθέντες:

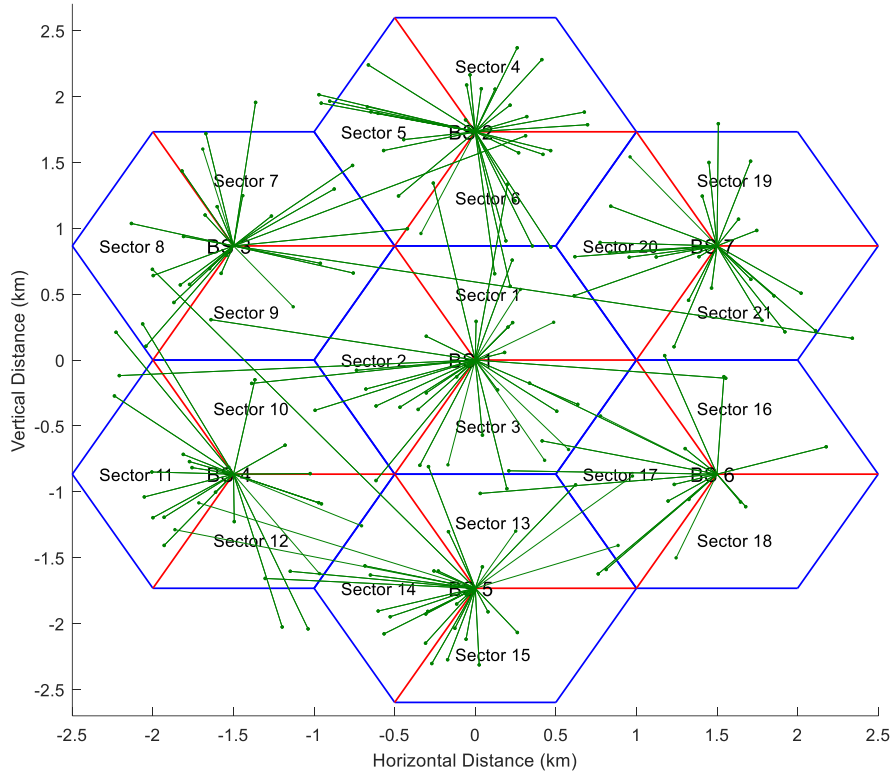
$$\text{current_blocking_probability} = \text{rejected_users} / (\text{current_user} + \text{rejected_users}) \quad (5.5)$$

Εάν η τρέχουσα αυτή πιθανότητα είναι μικρότερη από την μέγιστη επιτρεπτή τότε η προσομοίωση συνεχίζεται και γίνεται προσπάθεια εισαγωγής νέου χρήστη. Εάν η πιθανότητα είναι ίση ή μεγαλύτερη από την επιτρεπόμενη, η προσομοίωση τερματίζεται και οδηγούμαστε στον υπολογισμό και την αποθήκευση των μεγεθών της προσομοίωσης που μας ενδιαφέρουν, καθώς και στην τελική σχεδίαση της τοπολογίας με όλους τους χρήστες που έχουν παραμείνει αποδεκτοί από το σύστημα (οι οποίοι παριστάνονται με πράσινες κουκκίδες στην τοπολογία) και ενωμένους με πράσινη γραμμή με τον BS εξυπηρέτησής τους. Εδώ ολοκληρώνεται και το βασικό σενάριο προσομοίωσης, το οποίο όμως επαναλαμβάνεται όσες φορές έχουμε ορίσει στην μεταβλητή `monte_carlo_simulations`, ώστε τελικά να προκύψει ο μέσος όρος των μεγεθών από όλες τις εκτελεσθείσες προσομοιώσεις.

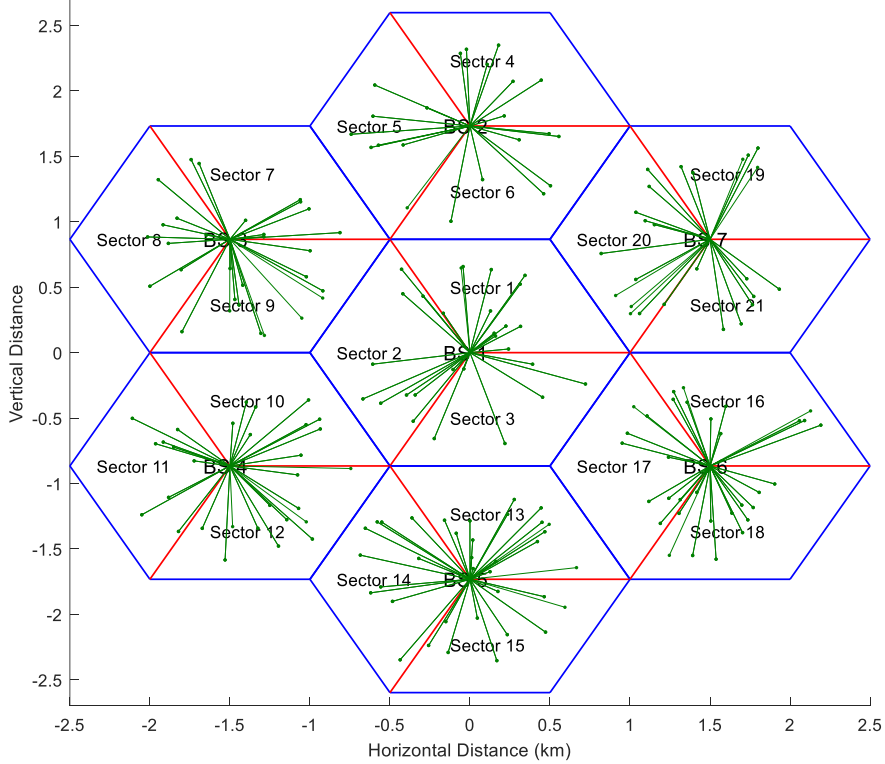
Εκτός από το λογικό διάγραμμα της συνάρτησης `master_function`, ακολουθούν και δύο απεικονίσεις της τοπολογίας μετά την εκτέλεση της προσομοίωσης με παραμέτρους `initial_carriers_per_sector = 3` και `blocking_probability = 0.2`, με και χωρίς σκίαση αντίστοιχα, οπότε μπορεί να γίνει αντιληπτή η επίδρασή της στην επιλογή των BS εξυπηρέτησης των χρηστών.



Εικόνα 5.14: Λογικό διάγραμμα συνάρτησης master_function



Εικόνα 5.15: Εκτέλεση της προσομοίωσης συμπεριλαμβανομένης της σκίασης



Εικόνα 5.16: Εκτέλεση της προσομοίωσης χωρίς την συμπερίληψη της σκίασης

5.3 Εναλλακτικά σενάρια ανάθεσης πόρων

5.3.1 Αλλαγή της διαμόρφωσης των φερόντων

Η πρώτη «βελτίωση» του βασικού σεναρίου είναι η προσπάθεια μεταβολής της διαμόρφωσης των φερόντων έχοντας ως επιδίωξη την αύξηση της ρυθμαπόδοσης (throughput) του συστήματος. Όπως προαναφέρθηκε, αρχικά για όλα τα φέροντα υπάρχει διαμόρφωση QPSK, της οποίας το Eb/No (δηλαδή το SNR κατ' ουσίαν) έχει την τιμή 9.6 dB. Έχοντας οριστικοποιήσει τους χρήστες που έχουν γίνει αποδεκτοί από το σύστημα, μπορούμε να επιχειρήσουμε να εισάγουμε διαμόρφωση μεγαλύτερης τάξης σε κάποια ή και όλα τα φέροντα, τηρώντας βέβαια τους περιορισμούς ισχύος οι οποίοι έχουν επιβληθεί εξ' αρχής. Οι επιπλέον διαμορφώσεις που θα δοκιμαστούν είναι η 16-QAM (με Eb/No ίσο με 16.4 dB) και η 64-QAM (με Eb/No ίσο με 22.4 dB) οι οποίες και χρησιμοποιούνται στα LTE/LTE Advanced κυψελωτά συστήματα.

Όπως είδαμε στην αντίστοιχη ενότητα περιγραφής των μεθόδων διαμόρφωσης, με την διαμόρφωση QPSK επιτυγχάνεται μετάδοση 2 bit ανά σύμβολο, ενώ για τις 16-QAM και 64-QAM οι αριθμοί αυτοί είναι αντίστοιχα 4 και 6 bit ανά σύμβολο. Η επιτυχής λοιπόν αλλαγή διαμόρφωσης για κάποιο φέρον χρήστη οδηγεί είτε σε διπλασιασμό της ρυθμαπόδοσης - σε σχέση με την QPSK - για εκείνο το φέρον και χρήστη (στην περίπτωση της 16-QAM διαμόρφωσης) είτε σε τριπλασιασμό της (στην περίπτωση της 64-QAM διαμόρφωσης) σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$Carrier_throughput = \frac{bits}{symbol} * \frac{bandwidth (Hz)}{initial_carriers_per_sector} \quad (5.6)$$

(5.6) Η συνολική ρυθμαπόδοση που έχει στην διάθεσή του κάποιος χρήστης προκύπτει από το άθροισμα της ρυθμαπόδοσης που του παρέχουν όλα τα φέροντα που έχει διαθέσιμα.

$$User_throughput = \sum_{i=1}^{i=user_carriers} \left(\frac{bits}{symbol} * \frac{bandwidth (Hz)}{initial_carriers_per_sector} \right)_i$$

(5.7)

Η συνολική ρυθμαπόδοση όλου του συστήματος υπολογίζεται αθροίζοντας τις τιμές ρυθμαπόδοσης όλων των χρηστών που έχουν παραμείνει αποδεκτοί στο τέλος της προσομοίωσης:

$$Total_throughput = \sum_{users} \sum_{i=1}^{i=user_carriers} \left(\frac{bits}{symbol} * \frac{bandwidth (Hz)}{initial_carriers_per_sector} \right)_i$$

(5.8)

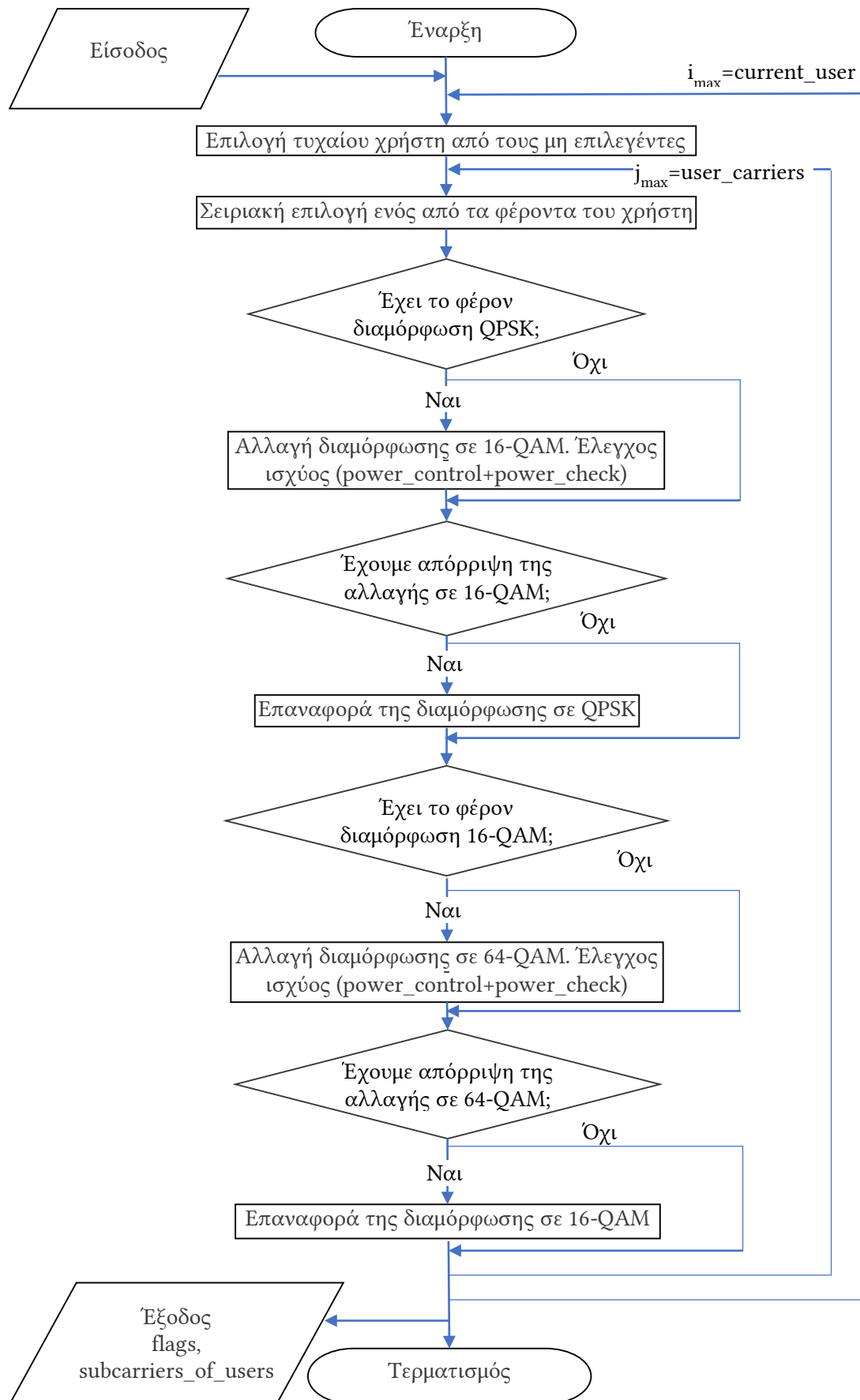
Στην πρώτη αυτή επιχείρηση αλλαγής διαμόρφωσης φερόντων, η επιλογή των χρηστών στα φέροντα των οποίων θα επιχειρηθεί αλλαγή διαμόρφωσης γίνεται με τυχαίο τρόπο. Επιλέγεται κάθε φορά τυχαία κάποιος χρήστης από την δεξαμενή των

χρηστών στους οποίους δεν έχει επιχειρηθεί ακόμα αλλαγή διαμόρφωσης, και για κάθε φέρον από αυτά που έχουν ανατεθεί στον χρήστη, επιχειρείται κατ' αρχήν η αλλαγή διαμόρφωσης σε 16-QAM. Θέτουμε την κατάλληλη σημαία που δείχνει ότι επιχειρείται αλλαγή διαμόρφωσης σε 16-QAM, αποθηκεύουμε τους πίνακες που είναι πιθανόν να αλλάξουν με τον επερχόμενο έλεγχο ισχύος και το συγκεκριμένο φέρον του συγκεκριμένου χρήστη λαμβάνει την τιμή 4 στον πίνακα `subcarriers_of_users` (αφού σε διαμόρφωση 16-QAM έχουμε μετάδοση 4 bit ανά σύμβολο). Ενημερώνουμε το `set_of_subcarriers` διάνυσμα με τους αριθμούς φερόντων του επιλεγμένου χρήστη, και κατόπιν καλούμε το δίδυμο των συναρτήσεων `power_control - power_check` προκειμένου να γίνει ο έλεγχος ισχύος και να αποφασιστεί αν η επιχειρούμενη αλλαγή είναι αποδεκτή από το σύστημα.

Η `power_control` έχει τροποποιηθεί κατάλληλα ώστε για κάθε φέρον που ανήκει στο `set_of_subcarriers` διάνυσμα με το οποίο έχει κληθεί (δηλαδή για κάθε φέρον που ανήκει στον τρέχοντα χρήστη) να εξετάζει την τιμή του στον πίνακα `subcarriers_of_users` και, αναλόγως με την τιμή του εκεί (2, 4, ή 6 για QPSK, 16-QAM και 64-QAM διαμόρφωση αντίστοιχα) να θέτει την κατάλληλη τιμή στο `Eb/No` (9.6, 16.4 και 22.4 dB αντιστοίχως).

Αν η επιχειρούμενη αλλαγή διαμόρφωσης του φέροντος απορριφθεί από την `power_control`, επαναφέρουμε τους πίνακες που ενδεχομένως έχουν αλλάξει στην προγενέστερη κατάσταση τους που είχαμε αποθηκεύσει πριν από την προσπάθεια αλλαγής διαμόρφωσης και συνεχίζουμε με τον έλεγχο του επόμενου καναλιού του χρήστη ή, στην περίπτωση που τα έχουμε εξετάσει όλα, με τον επόμενο τυχαία επιλεγμένο χρήστη.

Αν τώρα η αλλαγή διαμόρφωσης του φέροντος σε 16-QAM γίνει αποδεκτή, επιχειρούμε άλλη μια μεταβολή διαμόρφωσης, αυτήν την φορά σε 64-QAM. Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με προηγουμένως (με μόνη διαφορά την διαφορετική μεταβλητή-σημαία και την ανάθεση της τιμής 6 στο αντίστοιχο κελί του πίνακα `subcarriers_of_users`), ελέγχουμε αν η αλλαγή της διαμόρφωσης του συγκεκριμένου φέροντος σε 64-QAM γίνεται αποδεκτή, και σε κάθε περίπτωση συνεχίζουμε με τον έλεγχο του επόμενου καναλιού ή/και χρήστη. Ακολουθεί το σχετικό λογικό διάγραμμα.



Εικόνα 5.17: Λογικό διάγραμμα συνάρτησης modulation_change

5.3.2 Ανάθεση των φερόντων ανά BS (και όχι ανά τομέα)

Η διαφορά εδώ είναι ότι τα 128 διαθέσιμα φέροντα του συστήματός μας κατανομούνται ανά σταθμό βάσης (BS) και όχι ανά τομέα. Αυτό σημαίνει ότι ο αριθμός αυτός των φερόντων πρέπει να κατανεμηθεί όσο το δυνατόν ισότιμα στους τρεις τομείς έκαστης κυψέλης. Επειδή $128/3=42.6667$ (δηλαδή δεν προκύπτει ακέραιος αριθμός φερόντων προς ανάθεση σε κάθε τομέα), λήφθηκε η απόφαση να ανατίθενται από 43 φέροντα σε δύο τομείς από τους τρεις και 42 φέροντα στον τρίτο τομέα κάθε κυψέλης (έτσι έχουμε $43+43+42=128$). Για να επιτευχθεί αυτό, το τμήμα της `cell_array_design` που έχει να κάνει με την ανάθεση φερόντων στους τομείς και την αποθήκευσή τους στον πίνακα `available_sector_carriers` τροποποιήθηκε ως εξής:

Αμέσως μετά τον υπολογισμό των κυψελών και τομέων του συστήματος, εξετάζουμε τι είδους τομέας είναι ο κάθε τομέας του συστήματος και αναλόγως αναθέτουμε τα αντιστοιχα φέροντα. Έτσι λοιπόν, αν το υπόλοιπο της διαίρεσης του αύξοντα αριθμού του τομέα ισούται με 1 (δηλαδή πρόκειται για τομέα με $\alpha/\alpha 1, 4, 7, \dots, 3*k+1$ με $k= 0, 1, 2, 3, \dots, (\text{sectors} - 1)$, οπότε είναι άνω δεξιά τομέας), τότε αναθέτουμε σε αυτόν τα πρώτα 43 φέροντα, δηλαδή τα φέροντα υπ' αριθ. 1 έως και 43. Αλλιώς, αν το υπόλοιπο της διαίρεσης του αύξοντα αριθμού του τομέα ισούται με 2 (δηλαδή πρόκειται για τομέα με $\alpha/\alpha 2, 5, 8, \dots, 3*k+2$ με $k= 0, 1, 2, 3, \dots, (\text{sectors} - 1)$, οπότε πρόκειται περί αριστερού τομέα), τότε αναθέτουμε σε αυτόν τα επόμενα 43 φέροντα, δηλαδή τα φέροντα υπ' αριθ. 44 έως και 86. Τέλος, αν το υπόλοιπο της διαίρεσης του αύξοντα αριθμού του τομέα ισούται με 0 (δηλαδή πρόκειται για τομέα με $\alpha/\alpha 3, 6, 9, \dots, 3*k$ με $k= 1, 2, 3, \dots, \text{sectors}$, οπότε έχουμε κάτω δεξιά τομέα), τότε αναθέτουμε σε αυτόν τα τελευταία 42 φέροντα, δηλαδή τα φέροντα υπ' αριθ. 87 έως και 128.

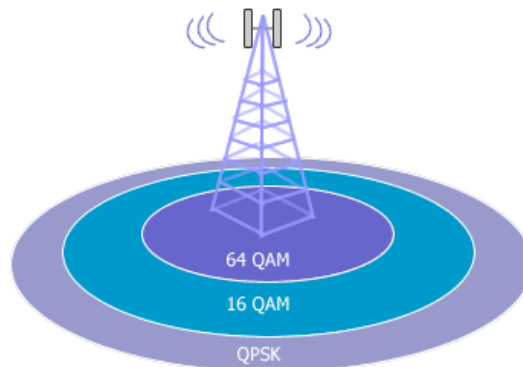
5.3.3 Απόδοση φερόντων και αλλαγή διαμόρφωσης συναρτήσεων της απόστασης χρήστη – BS εξυπηρέτησης

Εξακολουθώντας να λειτουργούμε θεωρώντας ότι δεν έχουμε γνώση του καναλιού, ένας τρόπος ομαδοποίησης των χρηστών που εισέρχονται στο σύστημα είναι ανάλογα με την απόσταση που απέχουν από τον σταθμό βάσης (BS) από τον οποίο εξυπηρετούνται. Έτσι θα μπορούσαμε να αποδώσουμε περισσότερα φέροντα σε χρήστες που βρίσκονται κοντινότερα στους αντίστοιχους σταθμούς βάσης (οπότε πιθανότατα έχουν καλές συνθήκες διάδοσης και συνεπώς η απόδοση περισσότερων φερόντων σε αυτούς θα απαιτήσει ενδεχομένως μικρά ποσά ισχύος και άρα θα προκαλέσει μειωμένες παρεμβολές) και λιγότερα σε χρήστες που είναι μακριά (οπότε είναι πιο πιθανό να ισχύει το αντίθετο). Με αυτόν τον τρόπο ελπίζουμε σε αύξηση της συνολικής ρυθμαπόδοσης του συστήματος, αν και πλέον οι χρήστες δεν θα έχουν όλοι τον ίδιο αριθμό φερόντων οπότε οι διαφορές στην ρυθμαπόδοση που θα έχει διαθέσιμη κάθε χρήστης αναμένεται να αυξηθούν (μειώνεται η ομοιομορφία στην κατανομή της ρυθμαπόδοσης στους χρήστες).

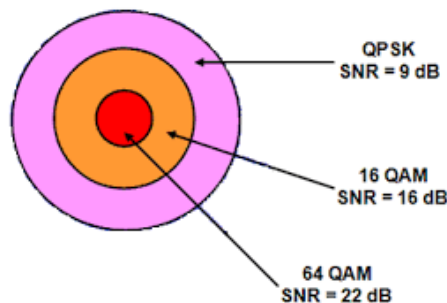
Ο προσομοιωτής μας αλλάζει λίγο σε αυτήν την περίπτωση, καθώς εντός της κύριας συνάρτησης `master_function` και αμέσως μετά την γεωγραφική εισαγωγή χρήστη και την εύρεση του τομέα εξυπηρέτησής του (συναρτήσεις `user_entry` και `attenuation`) εξετάζουμε την απόσταση του χρήστη από τον BS εξυπηρέτησής του.

Χωρίζουμε λοιπόν την κάθε κυψέλη σε δακτυλίους πλάτους ίσου με το ένα πέμπτο της ακτίνας της κυψέλης. Εάν ο χρήστης βρίσκεται πολύ κοντά (σε απόσταση μικρότερη από το ένα πέμπτο της ακτίνας R της κυψέλης), τότε η μεταβλητή `wanted_carriers_per_user` θα πάρει την τιμή 5, οπότε με την επερχόμενη κλήση της `carrier_allocation` θα αποδοθούν στον χρήστη 5 φέροντα (επίσης με τυχαία επιλογή, όπως και προηγουμένως). Για χρήστη που βρίσκεται σε κάθε έναν πιο απομακρυσμένο (εξωτερικό) δακτύλιο, η ανάθεση φερόντων μειώνεται κατά 1, μέχρι την τελική τιμή 1, εάν ο χρήστης βρίσκεται σε απόσταση μεγαλύτερη από τα τέσσερα πέμπτα της ακτίνας R της κυψέλης.

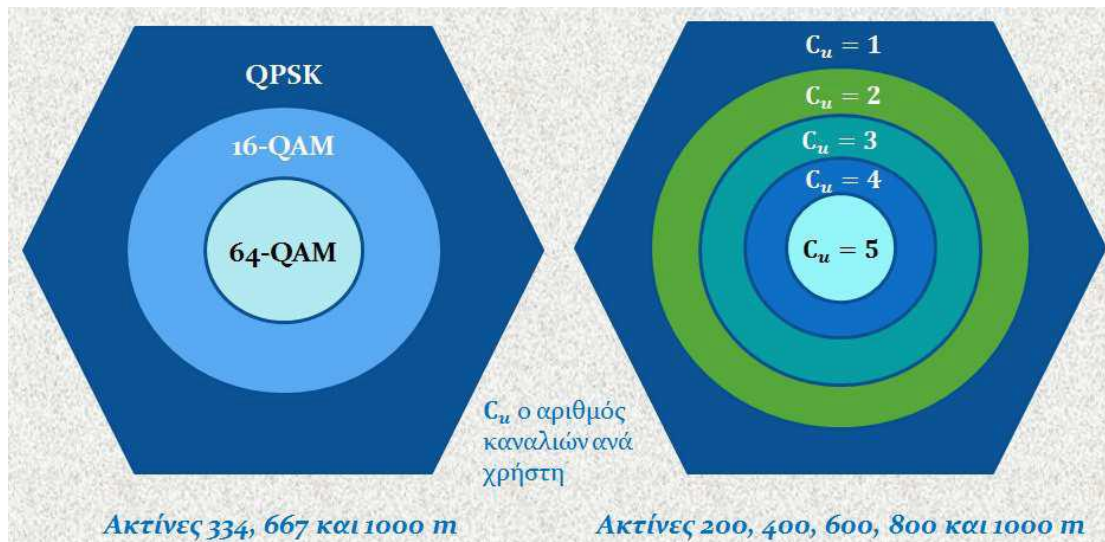
Κατόπιν επιχειρούμε αλλαγή διαμόρφωσης των φερόντων, αλλά με διαφορετική στρατηγική σε σχέση με πριν. Συγκεκριμένα, εάν ο χρήστης βρίσκεται σε απόσταση από τον BS εξυπηρέτησής του ίση μέχρι και το ένα τρίτο της ακτίνας R της κυψέλης, επιτρέπουμε να επιχειρηθεί αλλαγή διαμόρφωσης των φερόντων του αρχικά σε 16-QAM και, αν η αλλαγή αυτή γίνει αποδεκτή, και σε 64-QAM. Εάν ο χρήστης βρίσκεται σε μέση απόσταση (μεταξύ του ενός τρίτου και των δύο τρίτων της ακτίνας της κυψέλης), τότε επιτρέπεται προσπάθεια αλλαγής διαμόρφωσης μόνο σε 16-QAM. Τέλος, αν ο χρήστης είναι αρκετά απομακρυσμένος (μακρύτερα από τα δύο τρίτα της ακτίνας της κυψέλης) δεν επιχειρείται αλλαγή διαμόρφωσης και τα φέροντα του χρήστη παραμένουν σε διαμόρφωση QPSK. Οι εικόνες που ακολουθούν αναπαριστούν τον διαχωρισμό της κυψέλης σε ομόκεντρους δακτυλίους.



Εικόνα 5.18: Χωρισμός της επιφάνειας ανά διαμόρφωση



Εικόνα 5.19: Απεικόνιση των τιμών SNR για κάθε τύπο διαμόρφωσης



Εικόνα 5.20: Ζώνες διαφορετικής διαμόρφωσης (αριστερά) και διαφορετικού αριθμού ανάθεσης φερόντων (δεξιά)

Ο λόγος που υιοθετούμε αυτήν την στρατηγική είναι επειδή θεωρούμε ότι οι χρήστες που βρίσκονται εγγύτερα στον σταθμό βάσης που τους εξυπηρετεί είναι πιθανότερο να απαιτήσουν μικρότερη ισχύ εκπομπής για τα φέροντα που τους εξυπηρετούν (για κάθε είδος διαμόρφωσης), οπότε είναι πιθανότερο το σύστημα να «αντέξει» την αλλαγή διαμόρφωσης των φερόντων τους σε σχέση με τους χρήστες που βρίσκονται μακρύτερα (και για τους οποίους η αλλαγή διαμόρφωσης θα ήταν πιο ενεργοβόρα, άρα θα προκαλούσε μεγαλύτερες παρεμβολές, δηλαδή την ανάγκη εκπομπής με μεγαλύτερη ισχύ των ίδιων φερόντων που είναι σε χρήση από άλλους ομοδιαυλικούς χρήστες).

5.3.4 Ανάθεση φερόντων και αλλαγή διαμόρφωσης με γνώση του καναλιού

Μετά την υλοποίηση σεναρίων στα οποία θεωρούσαμε ότι δεν είχαμε γνώση του καναλιού (*Channel State Information - CSI*), επόμενο βήμα είναι η δημιουργία προσομοίωσης έχοντας ως δεδομένο ότι γνωρίζουμε τις συνθήκες διάδοσης για κάθε κανάλι. Για τον σκοπό αυτό, ακολουθούμε πάλι τα βασικά βήματα του σεναρίου 3 (*random_user_modulation*), όπου ανατίθεται και πάλι σταθερός αριθμός φερόντων σε κάθε χρήστη (εξαιρουμένης βέβαια της περίπτωσης που έχουν εξαντληθεί), με τις εξής όμως διαφορές:

- i) Η επιλογή φερόντων θα είναι και αυτή βέλτιστη και όχι τυχαία. Δηλαδή, εάν x τα διαθέσιμα κανάλια για κάποιον χρήστη σε έναν τομέα, εξετάζουμε ένα ένα τα κανάλια. Τώρα πλέον το διάνυσμα κατανομής ισχύος στις κεραιές λαμβάνει την ονομασία t_{msnr} και υπολογίζεται για μέγιστο σηματοθορυβικό λόγο όπου και ορίζεται να είναι ίσο με το ιδιοδιάνυσμα που αντιστοιχεί στην μέγιστη ιδιοτιμή του πίνακα $\text{conj}(H)^*H$, με $\text{conj}(x)$ να είναι ο μιγάδας του x και H το κανάλι του χρήστη ως προς τον τομέα του. Για κάθε τέτοιο κανάλι, έστω H , βρίσκουμε τα διανύσματα για μέγιστο σηματοθορυβικό λόγο t_{msnr} και

εν συνεχεία το γινόμενο $t'H^*H^*t$ (με $t=t_{\text{msnr}}$). Δίνουμε λοιπόν στον χρήστη το κανάλι το οποίο μεγιστοποιεί αυτόν τον παράγοντα.

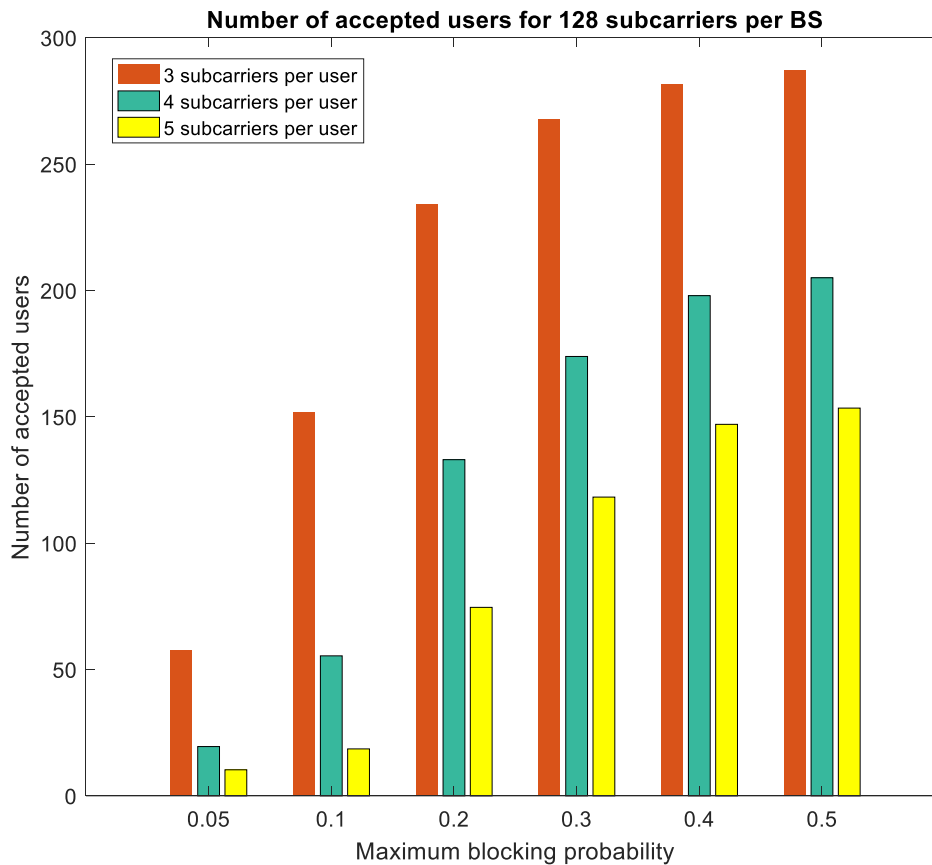
- ii) Αφού τελειώσει η παραπάνω διαδικασία, ταξινομούμε τους χρήστες βάσει του ποιος έχει τον ισχυρότερο δίαυλο (δηλαδή το άθροισμα τετραγώνων των στοιχείων του H). Πάμε στον χρήστη με το πιο δυνατό κανάλι, και δοκιμάζουμε να του αλλάξουμε το επίπεδο διαμόρφωσης. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως πρέπει να αλλάξει το E_b/N_0 και από 9.6 dB να γίνει σε πρώτη φάση 16.4 dB για 16-QAM διαμόρφωση και σε δεύτερη 22.4 dB για 64-QAM διαμόρφωση. Προφανώς κάτι τέτοιο απαιτεί ξανά έλεγχο ισχύος (δηλαδή επανεκτέλεση των συναρτήσεων `power_control - power_check`). Εάν από τον έλεγχο ισχύος προκύψει αρνητική τιμή ή υπέρβαση στάθμης ισχύος για κάποιον χρήστη, τότε προφανώς ακυρώνεται η αλλαγή επιπέδου διαμόρφωσης. Αλλιώς, δοκιμάζουμε για τον ίδιο χρήστη το αμέσως επόμενο επίπεδο διαμόρφωσης (π.χ. από 16-QAM σε 64-QAM). Εάν τελειώσουν τα επίπεδα διαμόρφωσης, τότε πάμε στον αμέσως επόμενο χρήστη με το πλέον δυνατό κανάλι και η διαδικασία συνεχίζεται με τον ίδιο τρόπο. Άρα, μόλις τελειώσει η διαδικασία αυτή, μετράμε την ενεργή ρυθμαπόδοση στο σύστημα, δηλαδή τον συνολικό ρυθμό μετάδοσης προς τους χρήστες.

6. Αποτελέσματα προσομοίωσης – παρουσίαση και ανάλυση

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των σεναρίων που περιγράφηκαν προηγουμένως, για διάφορες παραμέτρους εκτέλεσης. Όπως προαναφέρθηκε, παρέχονται τα αποτελέσματα που βρέθηκαν μετά την εκτέλεση Monte Carlo προσομοιώσεων, ο αριθμός των οποίων θα αναφέρεται κάθε φορά. Επισημαίνεται πως σε όλα τα σενάρια που περιέχουν τροποποίηση της διαμόρφωσης των φερόντων χρησιμοποιήθηκε η τακτική της ανάθεσης 128 φερόντων ανά τομέα.

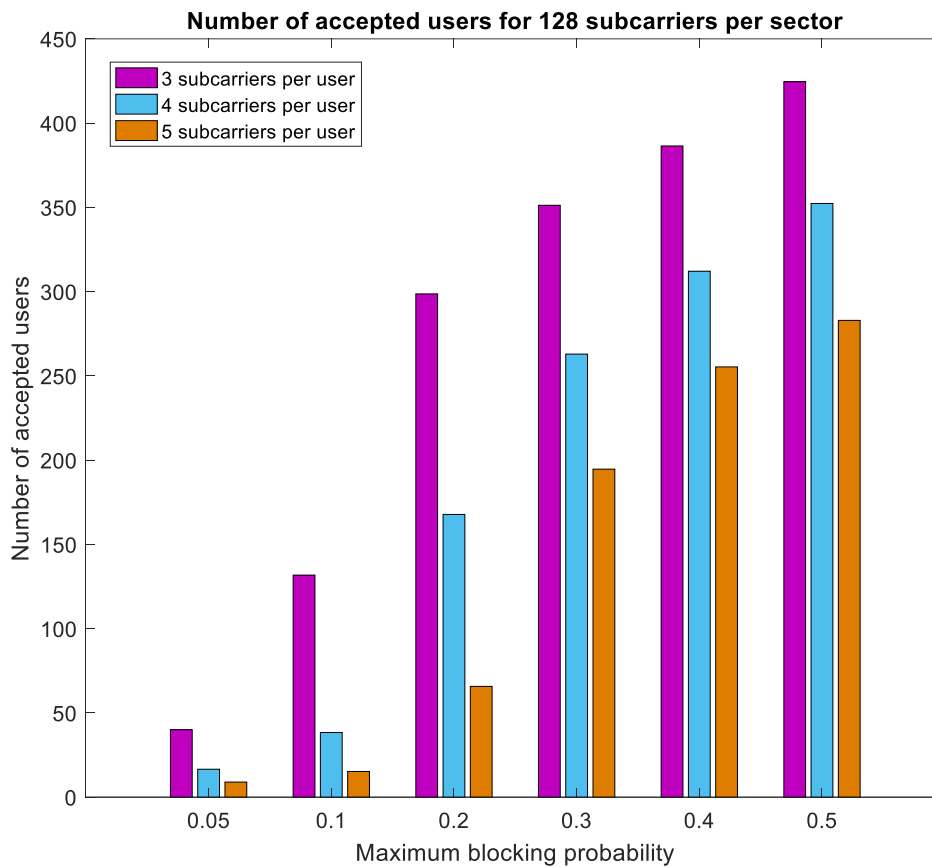
6.1 Σύγκριση του αριθμού αποδεκτών χρηστών συναρτήσει επιτρεπόμενης πιθανότητας αποκλεισμού και αριθμού φερόντων ανά χρήστη

α) Με ανάθεση 128 φερόντων ανά σταθμό βάσης (BS)



Εικόνα 6.1: Αριθμός αποδεκτών χρηστών με ανάθεση 128 φερόντων ανά σταθμό βάσης (BS)

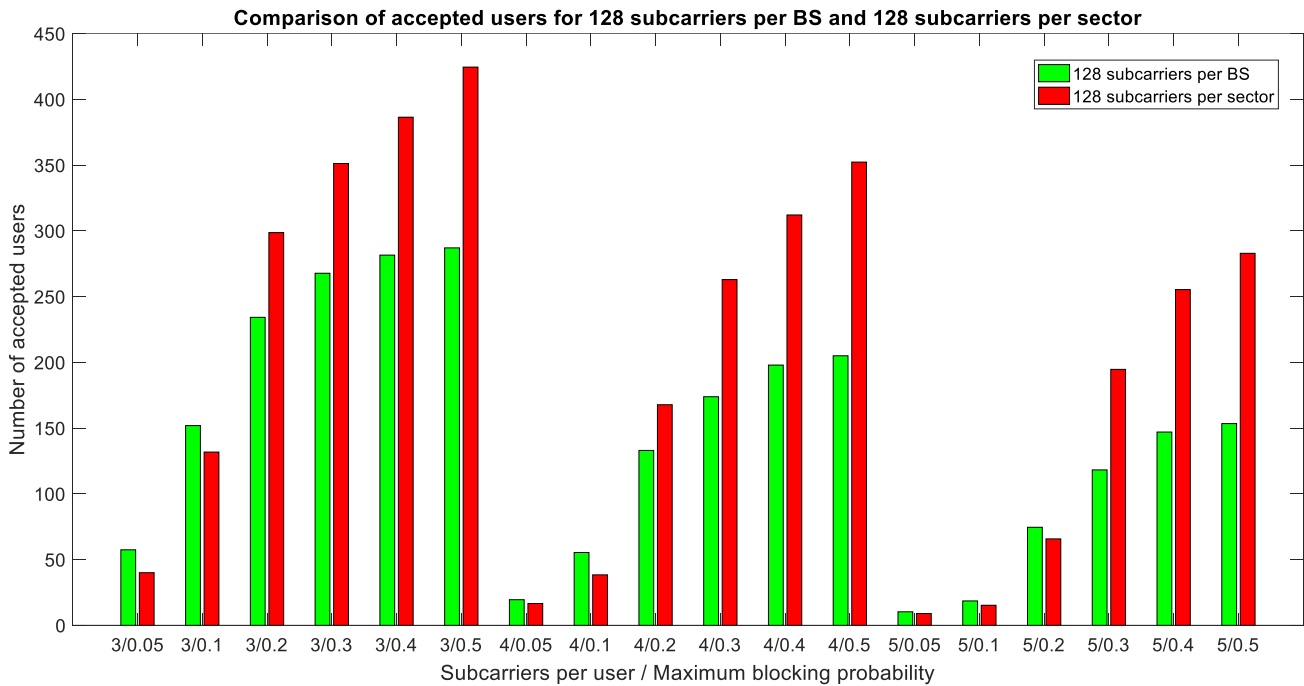
β) Με ανάθεση 128 φερόντων ανά τομέα (sector)



Εικόνα 6.2: Αριθμός αποδεκτών χρηστών με ανάθεση 128 φερόντων ανά τομέα (κατευθυντική κεραία)

Όπως παρατηρούμε, για οποιονδήποτε τρόπο ανάθεσης φερόντων (είτε ανά σταθμό βάσης είτε ανά τομέα), ο αριθμός των χρηστών που γίνονται αποδεκτοί από το σύστημα αυξάνεται με την επιτρεπόμενη πιθανότητα αποκλεισμού (για τον ίδιο αριθμό αποδιδόμενων φερόντων ανά χρήστη) ενώ μειώνεται με τον αριθμό των φερόντων (για την ίδια τιμή πιθανότητας αποκλεισμού). Το αποτέλεσμα αυτό είναι εξαιρετικά λογικό, καθώς με την αύξηση της μέγιστης επιτρεπόμενης πιθανότητας απόρριψης χρήστη πραγματοποιούνται κατά μέσο όρο περισσότερες εισαγωγές χρηστών στο σύστημα, αφού το «χαλαρότερο» όριο της αυξημένης πιθανότητας απόρριψης θα απαιτήσει περισσότερες επαναλήψεις του βρόχου εισαγωγής χρηστών για να ξεπεραστεί. Επίσης, με δεδομένο ότι ο αριθμός φερόντων ανά BS ή ανά τομέα είναι συγκεκριμένος και σταθερός, δικαιολογείται απόλυτα η μείωση των αποδεκτών χρηστών με την αύξηση του αριθμού των αποδιδόμενων φερόντων ανά χρήστη, αφού η αύξηση αυτή από την μία προκαλεί την δημιουργία παρεμβολών από κάθε χρήστη σε περισσότερα φέροντα (παρεμβολή η οποία θα καταστήσει πιο πιθανή την απόρριψη κάποιου χρήστη μετά από τον σχετικό έλεγχο ισχύος) και από την άλλη οδηγεί πιο γρήγορα στην εξάντληση των φερόντων (λόγω του συγκεκριμένου πεπερασμένου αριθμού τους).

6.2 Σύγκριση της ρυθμαπόδοσης για ανάθεση φερόντων ανά BS και ανά τομέα



Εικόνα 6.3: Αποδεκτοί χρήστες για τις περιπτώσεις ανάθεσης 128 φερόντων ανά BS και ανά τομέα, συναρτήσει του αριθμού φερόντων ανά χρήστη και της πιθανότητας απόρριψης

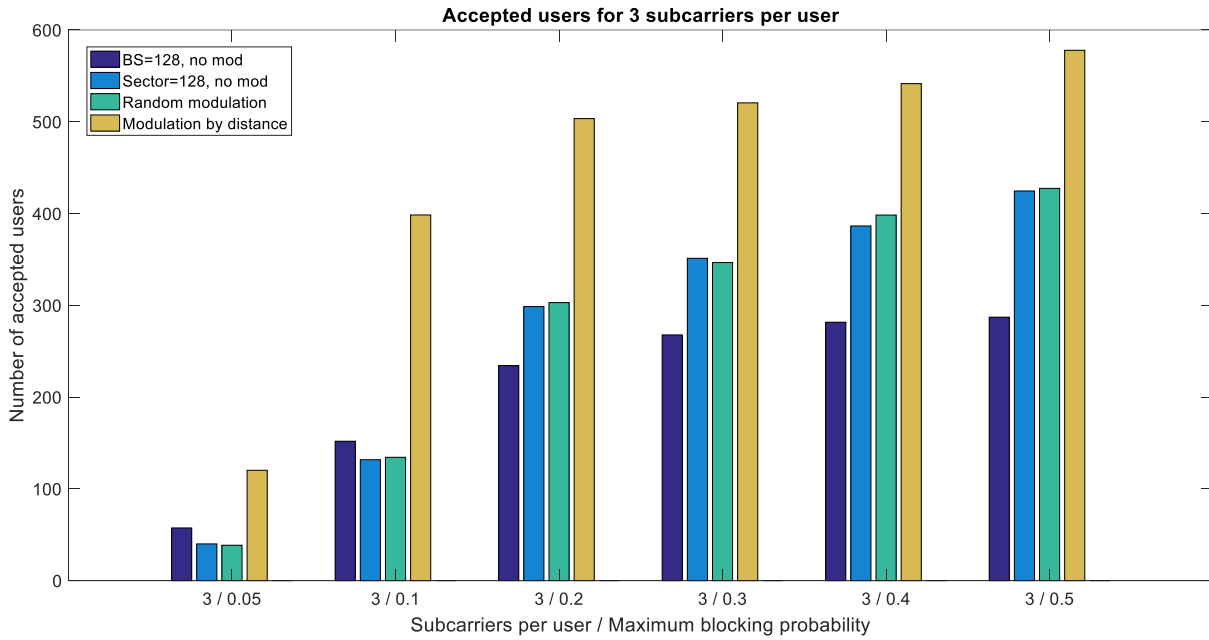
Εδώ το συμπέρασμα που προκύπτει είναι πως για κάθε αριθμό ανατιθέμενων φερόντων ανά χρήστη, για μικρές τιμές επιτρεπόμενης πιθανότητας αποκλεισμού (π.χ. για τιμές 0.05, 0.1) η τεχνική ανάθεσης φερόντων ανά σταθμό βάσης (δηλαδή ανά κυψέλη) υπερτερεί σε αριθμό αποδεκτών χρηστών της τεχνικής ανάθεσης του ίδιου αριθμού φερόντων ανά τομέα, ενώ το αντίθετο συμβαίνει για μεγαλύτερες τιμές της πιθανότητας απόρριψης.

Για μικρές τιμές της πιθανότητας λοιπόν, αυτό από το οποίο εξαρτάται κυρίως ο αριθμός των χρηστών που θα εισαχθούν είναι οι μεταξύ τους αλληλοπαρεμβολές, οι οποίες είναι αυξημένες στην περίπτωση της ανάθεσης φερόντων ανά τομέα λόγω του ότι οι χρήστες που κατέχουν τα ίδια φέροντα είναι πιθανότερο να είναι πιο κοντά μεταξύ τους (αφού μπορεί να κάνει χρήση του ίδιου φέροντος και χρήστης άλλου τομέα μεν, αλλά της ίδιας κυψέλης). Η διάθεση των φερόντων ανά σταθμό βάσης όμως εξασφαλίζει μεγαλύτερη επιφανειακή απομόνωση των φερόντων (ανά κυψέλη και όχι ανά τομέα), οπότε και μεγαλύτερες μέσες αποστάσεις μεταξύ παρεμβαλλόμενων χρηστών. Για μεγάλες τιμές της πιθανότητας αποκλεισμού όμως, όπου και εισέρχονται πολλοί περισσότεροι χρήστες, την πραγματική «οροφή» στον αριθμό εξυπηρετούμενων χρηστών την θέτει η έλλειψη φερόντων, η οποία είναι πιθανότερο να συμβεί νωρίτερα στην περίπτωση της ανάθεσης φερόντων ανά BS, καθώς τότε υπάρχουν διαθέσιμα προς ανάθεση από όλες τις κυψέλες το 1/3 των φερόντων σε σχέση με την περίπτωση ανάθεσης ανά τομέα.

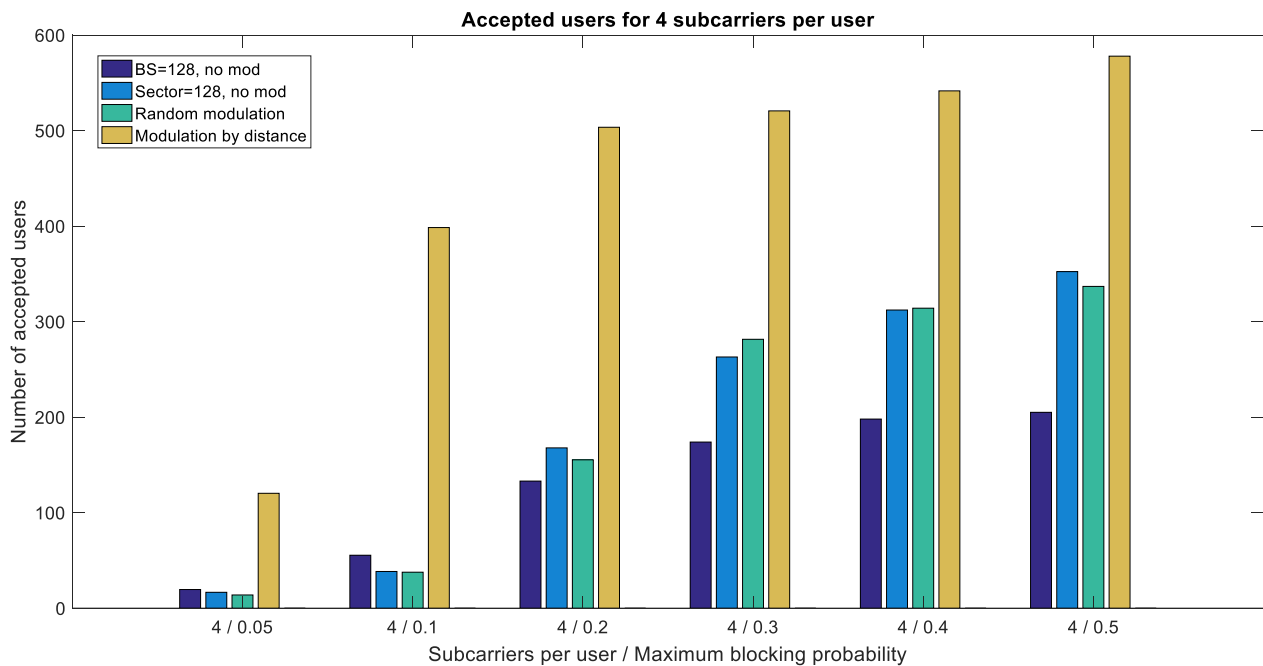
Στο βασικό σενάριο (χωρίς επιχείρηση αλλαγής της διαμόρφωσης των φερόντων), η ίδια εικόνα με τον αριθμό αποδεκτών χρηστών ισχύει και για την ρυθμαπόδοση, λόγω του σταθερού αριθμού αποδιδόμενων φερόντων ανά χρήστη αλλά και της κοινής διαμόρφωσής τους (QPSK).

6.3 Σύγκριση των τεχνικών χωρίς γνώση του καναλιού

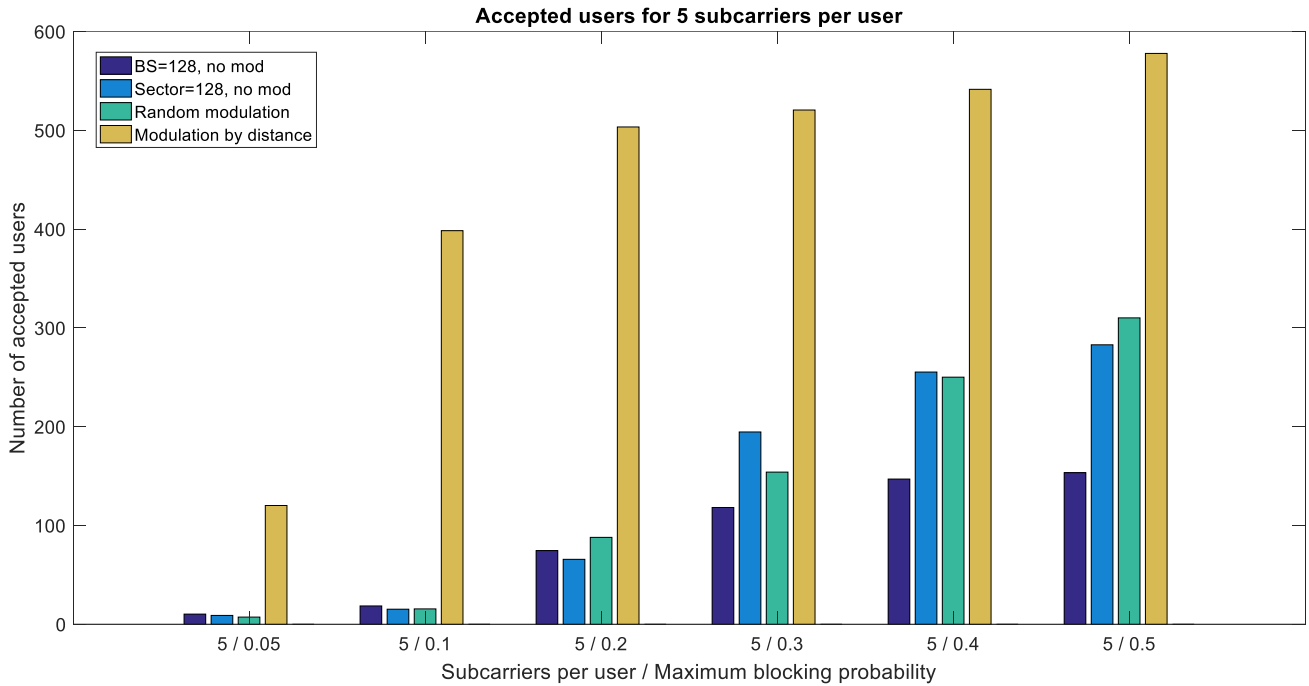
α) Αριθμός αποδεκτών (εξυπηρετούμενων) χρηστών



Εικόνα 6.4: Αποδεκτοί χρήστες για ανάθεση 3 φερόντων σε κάθε χρήστη



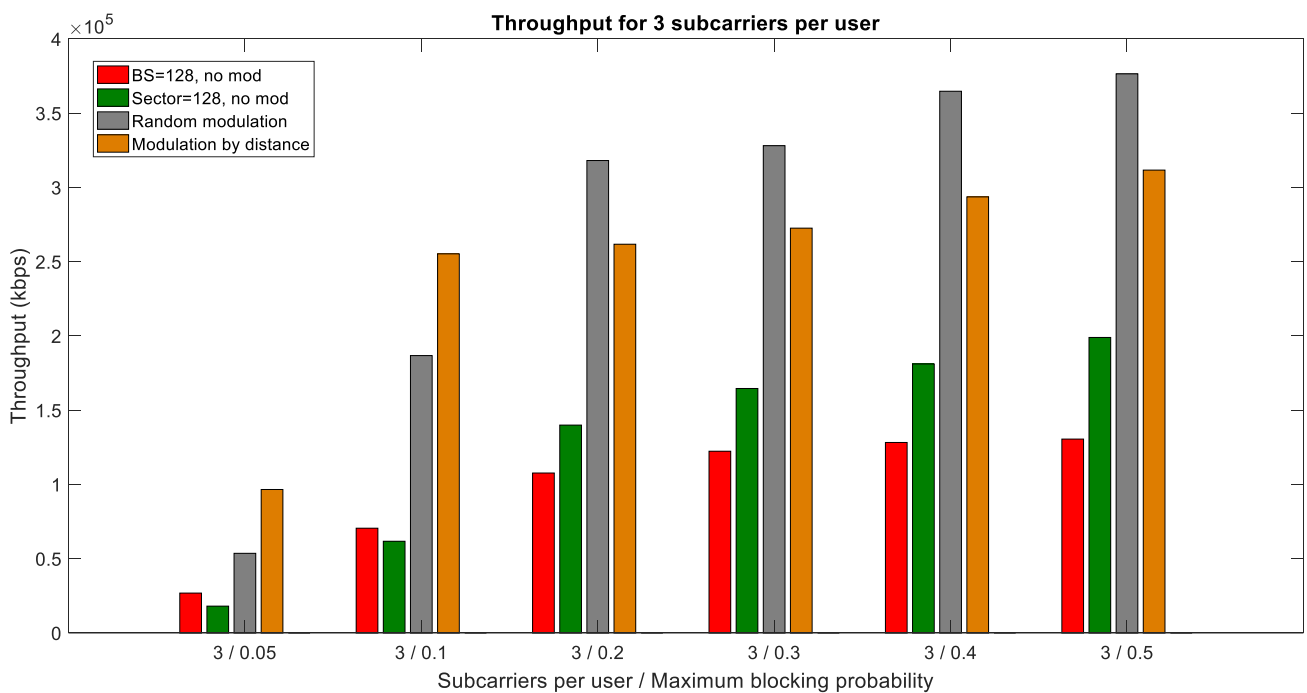
Εικόνα 6.5: Αποδεκτοί χρήστες για ανάθεση 4 φερόντων σε κάθε χρήστη



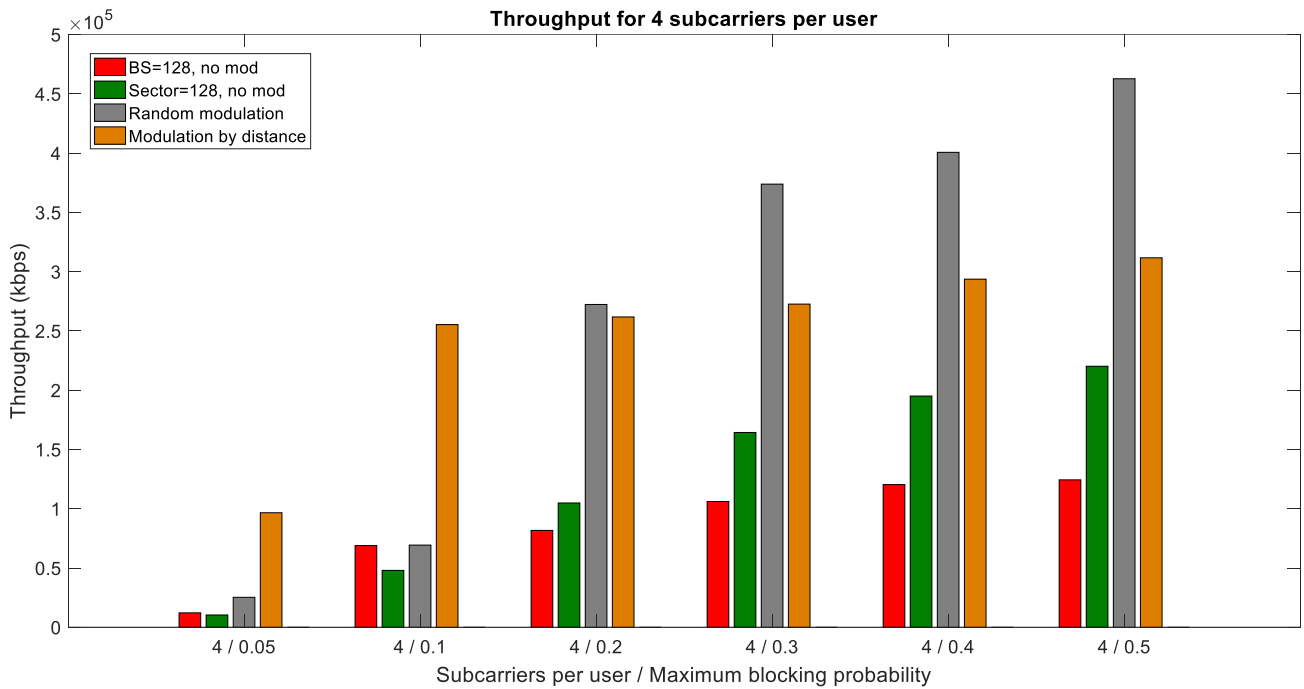
Εικόνα 6.6: Αποδεκτοί χρήστες για ανάθεση 5 φερόντων σε κάθε χρήστη

Η εισαγωγή χρηστών με την στρατηγική της απόστασης αυξάνει σε μεγάλο βαθμό τον επιτρεπόμενο αριθμό τους, πράγμα που εξηγείται με το ότι σε μεγάλο τμήμα της επιφάνειας της τοπολογίας οι χρήστες εξυπηρετούνται από ένα ή και δύο μόνο φέροντα.

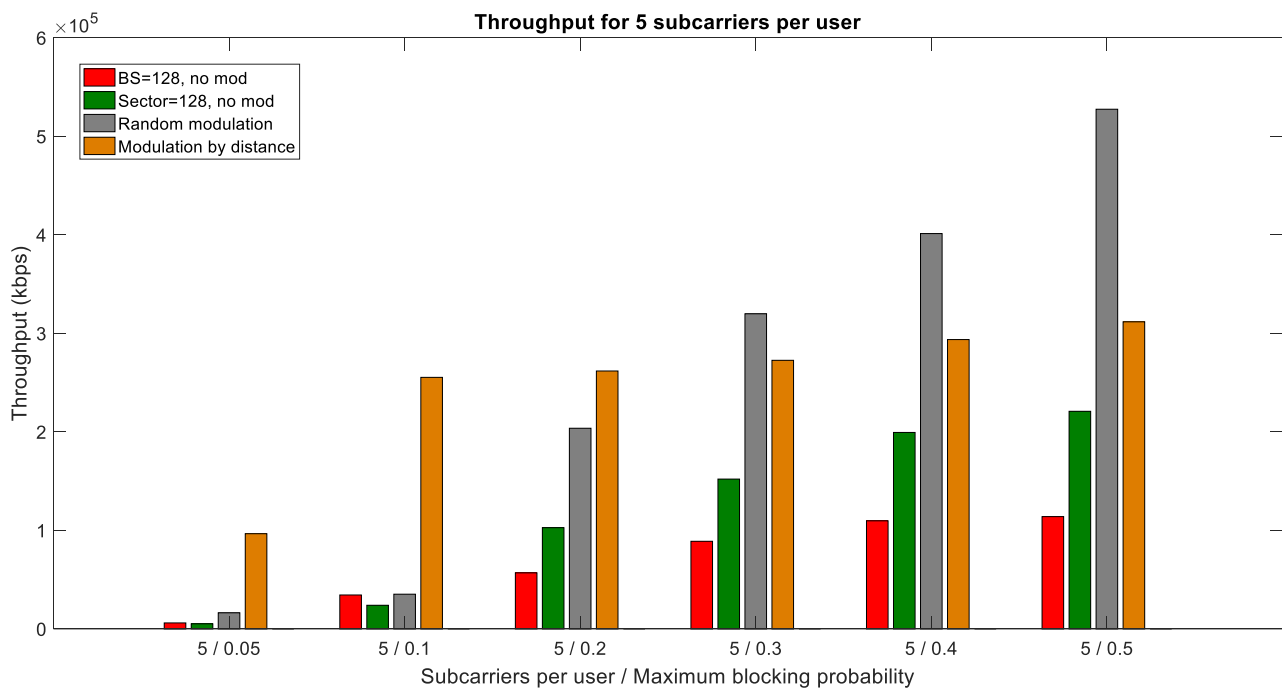
β) Ρυθμαπόδοση συστήματος



Εικόνα 6.7: Ρυθμαπόδοση για ανάθεση 3 φερόντων σε κάθε χρήστη



Εικόνα 6.8: Ρυθμαπόδοση για ανάθεση 4 φερόντων σε κάθε χρήστη

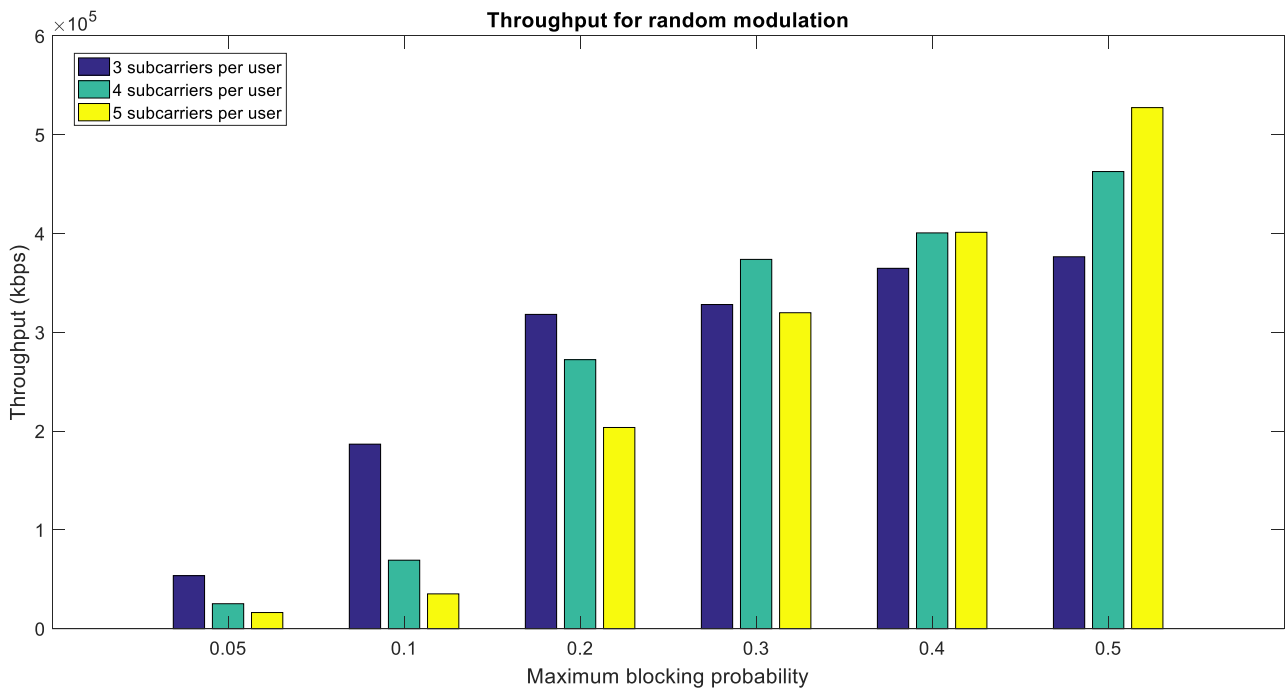


Εικόνα 6.9: Ρυθμαπόδοση για ανάθεση 5 φερόντων σε κάθε χρήστη

Συγκρίνοντας τις τεχνικές ανάθεσης πόρων χωρίς γνώση του καναλιού διάδοσης, παρατηρούμε αύξηση της συνολικής ρυθμαπόδοσης του συστήματος στις περιπτώσεις που επιχειρήθηκε αλλαγή διαμόρφωσης των φερόντων. Η αλλαγή διαμόρφωσης φερόντων με τυχαία σειρά περίπου διπλασιάζει την ρυθμαπόδοση σε

σχέση με την απλή ανάθεση φερόντων ανά τομέα (χωρίς αλλαγή διαμόρφωσης φερόντων), που σημαίνει πως καταφέρνει να αλλάξει την διαμόρφωση αρκετών φερόντων από QPSK σε 16-QAM ή και 64-QAM. Ο διπλασιασμός αυτός της ρυθμαπόδοσης θα μπορούσε να θεωρηθεί πως προέκυψε με την μεταβολή της διαμόρφωσης όλων των φερόντων από QPSK σε 16-QAM (στην πραγματικότητα βέβαια κάποια φέροντα παρέμειναν σε QPSK διαμόρφωση ενώ άλλα άλλαξαν σε 16-QAM και άλλα σε 64-QAM), κάτι που σημαίνει πως υπήρξε μεν σημαντική βελτίωση (από 2 bit/symbol σε 4 bit/symbol κατά μέσο όρο για όλα τα φέροντα) αλλά η βελτίωση αυτή απέχει από την μέγιστη δυνατή εφικτή (6 bit/symbol κατά μέσο όρο για όλα τα φέροντα). Ο διπλασιασμός λοιπόν της ρυθμαπόδοσης του συστήματος (για συγκεκριμένο αριθμό χρηστών και φερόντων ανά χρήστη), καίτοι σημαντικός, υπολείπεται του τριπλασιασμού που θα μπορούσε να επιτευχθεί ιδανικά (αν μεταβαλλόταν η διαμόρφωση όλων των φερόντων από QPSK σε 64-QAM).

Η τεχνική της ανάθεσης φερόντων και αλλαγής διαμόρφωσης συναρτήσκει της απόστασης λειτουργεί αρκετά καλύτερα από την τυχαία διαμόρφωση φερόντων για μικρές τιμές της πιθανότητας αποκλεισμού, παρότι ο μέσος αριθμός φερόντων ανά χρήστη σε αυτήν την περίπτωση είναι μικρότερος (με την ανάθεση συναρτήσκει της απόστασης ο μέσος αριθμός φερόντων ανά χρήστη είναι ίσος με περίπου 2.5, δηλαδή μικρότερος από τα 3 φέροντα με τα οποία εκτελέσαμε τις προσομοιώσεις των υπόλοιπων σεναρίων).



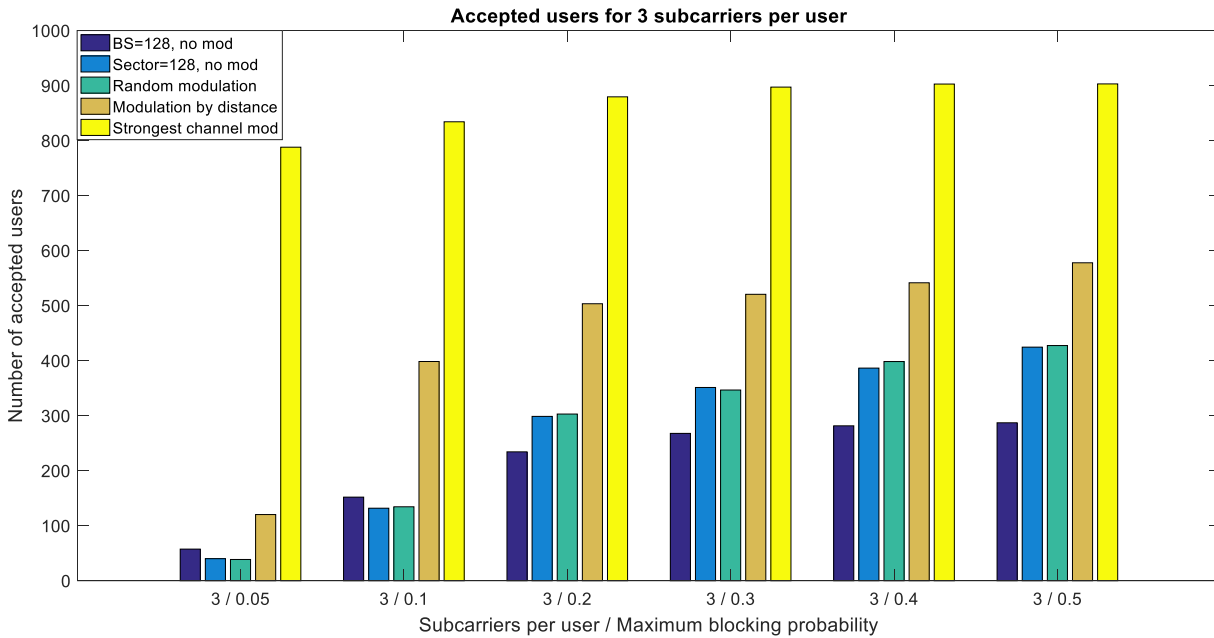
Εικόνα 6.10: Ρυθμαπόδοση με την χρήση τυχαίας διαμόρφωσης

Παρατηρείται ότι για μικρές τιμές της επιτρεπτής πιθανότητας αποκλεισμού, η τακτική της ανάθεσης τριών φερόντων σε κάθε χρήστη δίνει καλύτερα αποτελέσματα (μεγαλύτερη ρυθμαπόδοση συστήματος) από τις τακτικές ανάθεσης μεγαλύτερου αριθμού φερόντων. Το αντίθετο συμβαίνει για τις μεγάλες τιμές της επιτρεπτής πιθανότητας αποκλεισμού (όπου υπερσχύει η τακτική της ανάθεσης 5

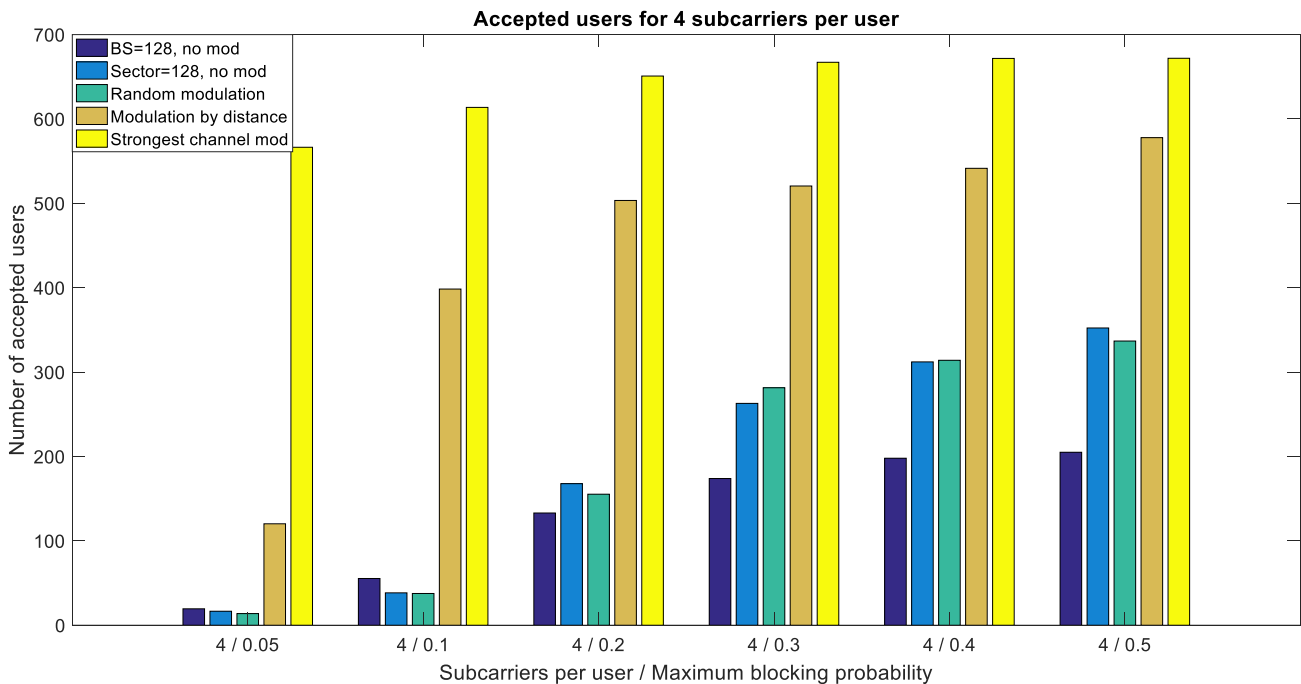
φερόντων ανά χρήστη), με την τακτική της ανάθεσης 4 φερόντων να είναι η καλύτερη επιλογή για μεσαίες τιμές της πιθανότητας αποκλεισμού (κυρίως για την τιμή 0.3).

6.4 Προσθήκη του σεναρίου με γνώση του καναλιού

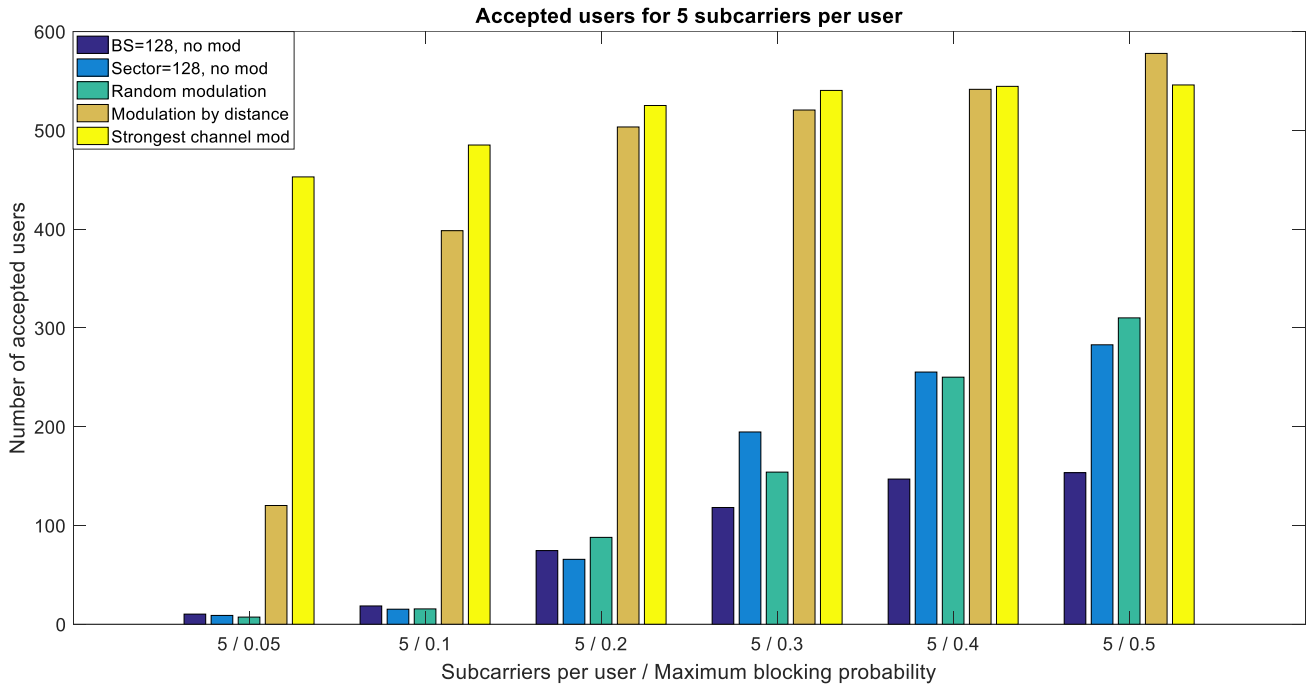
α) Αριθμός αποδεκτών (εξυπηρετούμενων) χρηστών



Εικόνα 6.11: Αποδεκτοί χρήστες για ανάθεση 3 φερόντων σε κάθε χρήστη



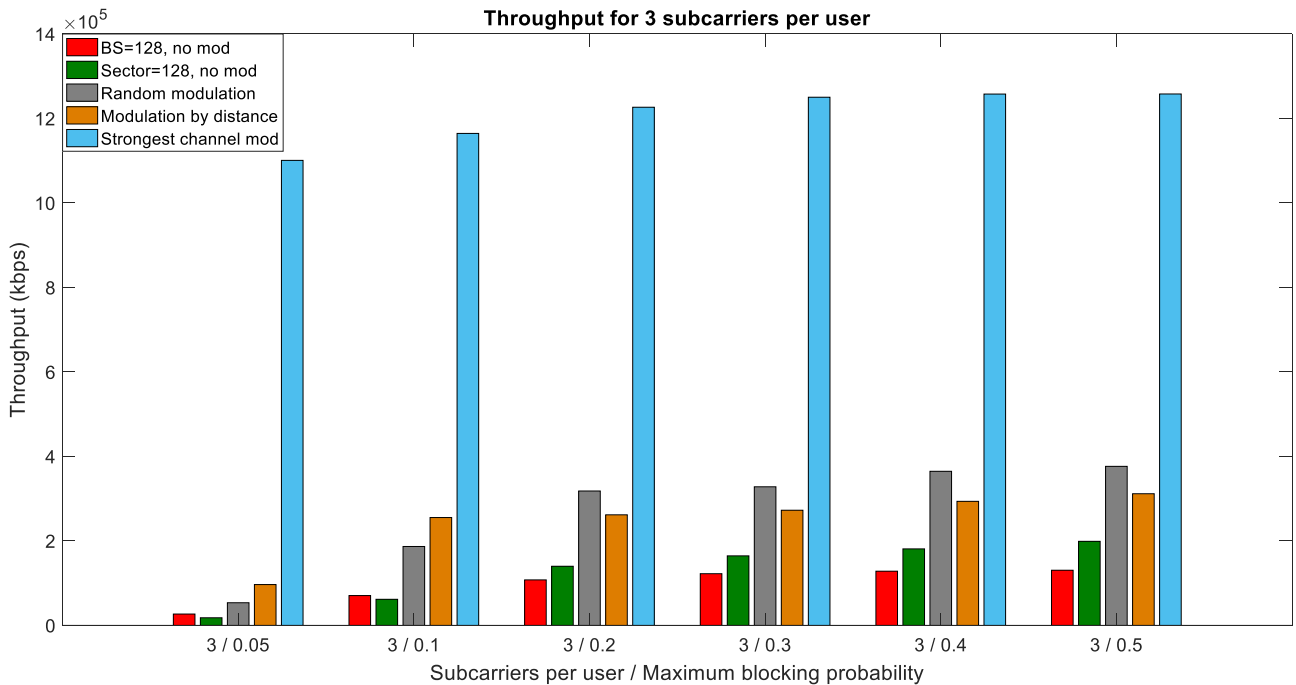
Εικόνα 6.12: Αποδεκτοί χρήστες για ανάθεση 4 φερόντων σε κάθε χρήστη



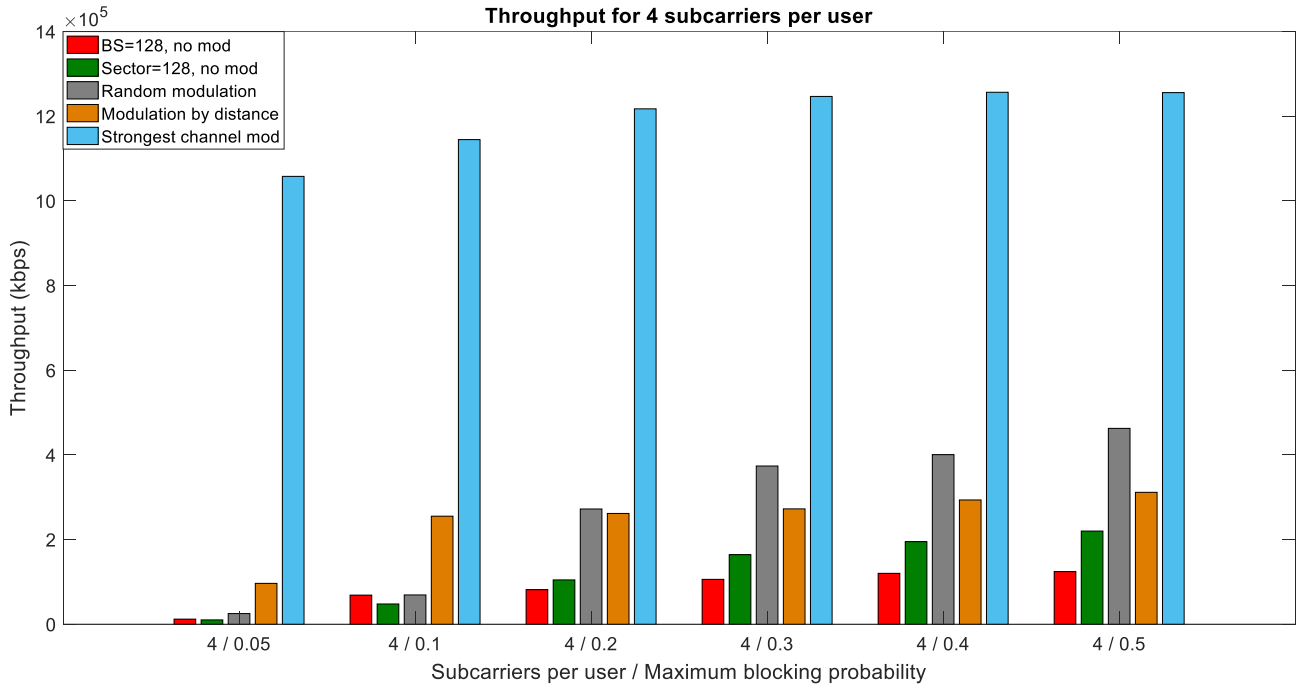
Εικόνα 6.13: Αποδεκτοί χρήστες για ανάθεση 5 φερόντων σε κάθε χρήστη

Η γνώση του καναλιού (βέλτιστη ανάθεση φερόντων και διανυσμάτων μετάδοσης) αυξάνει πολύ τον αριθμό των χρηστών που γίνονται αποδεκτοί σε κάθε περίπτωση.

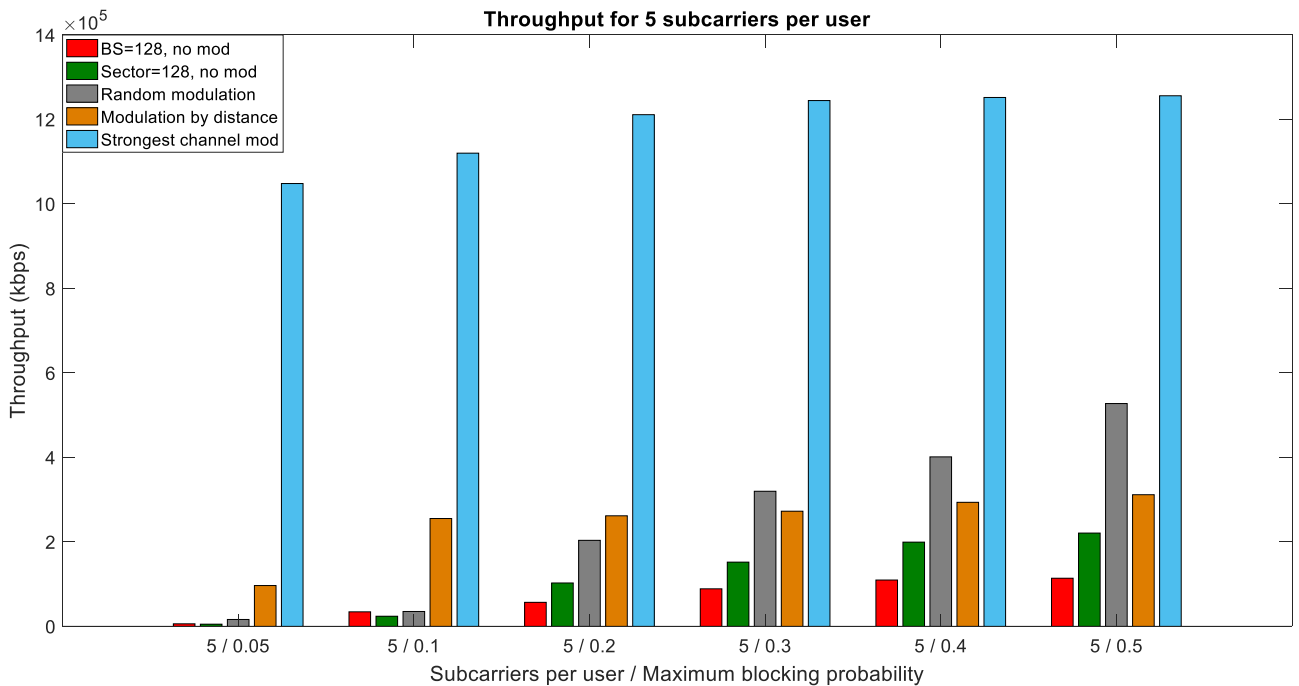
β) Ρυθμαπόδοση συστήματος



Εικόνα 6.14: Ρυθμαπόδοση για ανάθεση 3 φερόντων σε κάθε χρήστη



Εικόνα 6.15: Ρυθμαπόδοση για ανάθεση 4 φερόντων σε κάθε χρήστη



Εικόνα 6.16: Ρυθμαπόδοση για ανάθεση 3 φερόντων σε κάθε χρήστη

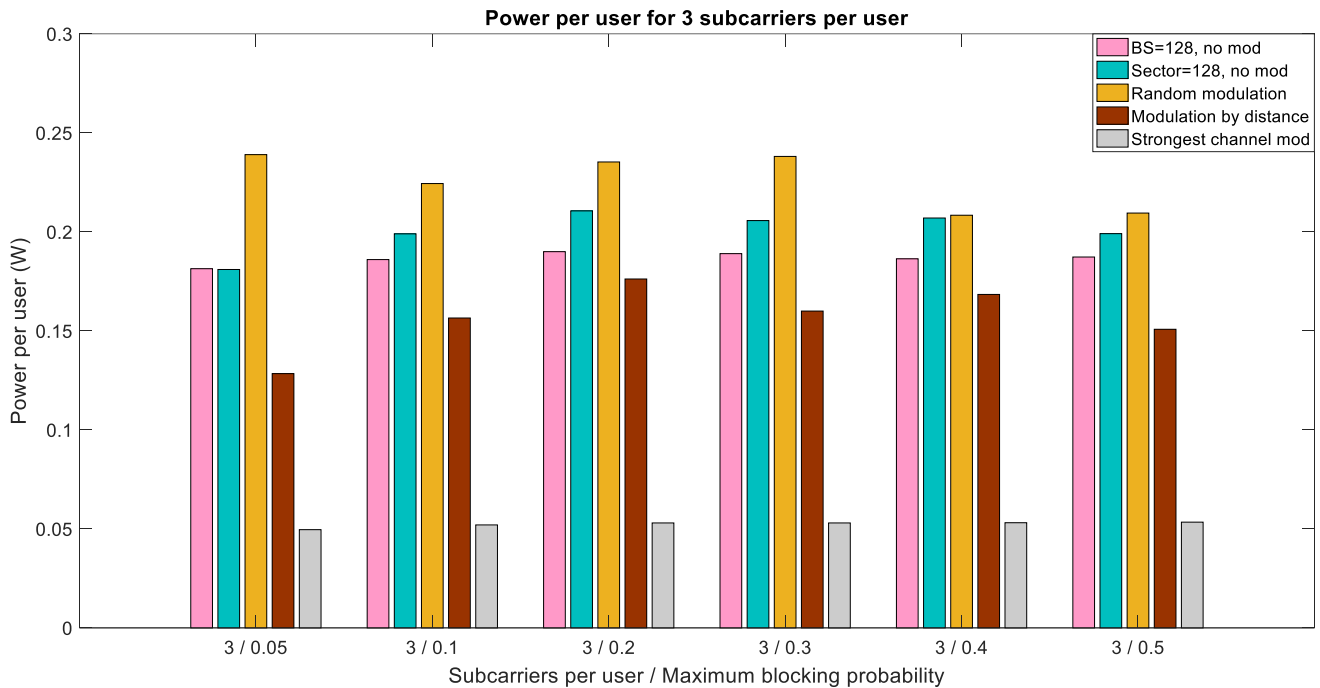
Η αλλαγή διαμόρφωσης βάσει του δυνατότερου καναλιού εκμεταλλεύεται με σχεδόν βέλτιστο τρόπο την δυνατότητα ανάθεσης διαμόρφωσης υψηλότερου επιπέδου, φτάνοντας σε μέγιστα επίπεδα διαμόρφωσης (64-QAM) σχεδόν όλα τα φέροντα. Βέβαια η μέθοδος αυτή αυξάνει την πολυπλοκότητα του συστήματος, άρα τόσο το κόστος των επιμέρους συστημάτων (ηλεκτρονικά κλπ) όσο και την καθυστέρηση (latency) του συστήματος, καθώς οι απαιτούμενοι υπολογισμοί για την

αλληλεπίδραση των χρηστών είναι πολύ μεγαλύτεροι. Επίσης πρέπει να επισημανθεί πως μεγαλύτερο τμήμα της διαθέσιμης ρυθμαπόδοσης θα καταναλωθεί στις διαδικασίες ελέγχου της κατάστασης των καναλιών (λόγω της ανάγκης διακίνησης σχετικής πληροφορίας), σε σχέση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις, όπου κάτι τέτοιο δεν απαιτείται.

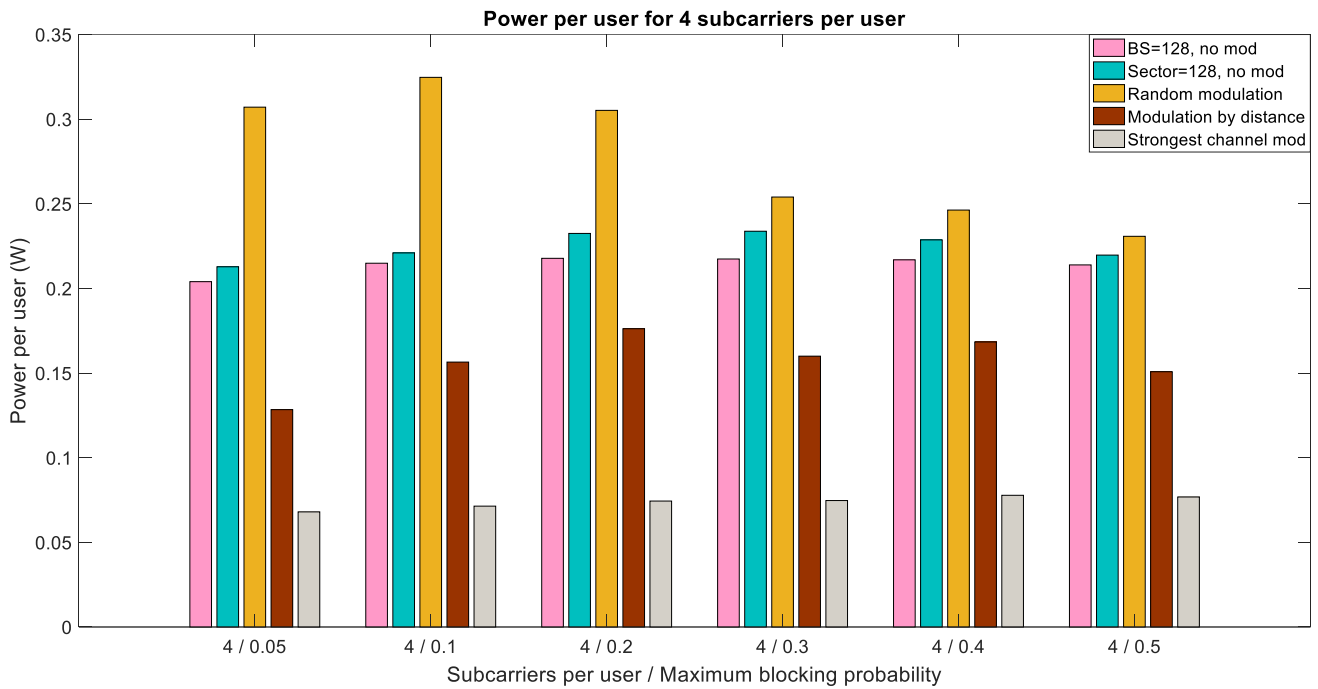
Εν κατακλείδι, η γνώση του καναλιού βελτιώνει εντυπωσιακά την αποδοτικότητα του συστήματος, φτάνοντάς την πολύ κοντά στην ιδανική, τόσο από την άποψη του μέγιστου δυνατού αριθμού χρηστών όσο και από την άποψη της μέγιστης δυνατής ρυθμαπόδοσης γι' αυτούς τους χρήστες.

6.5 Ισχύς φερόντων ανά χρήστη

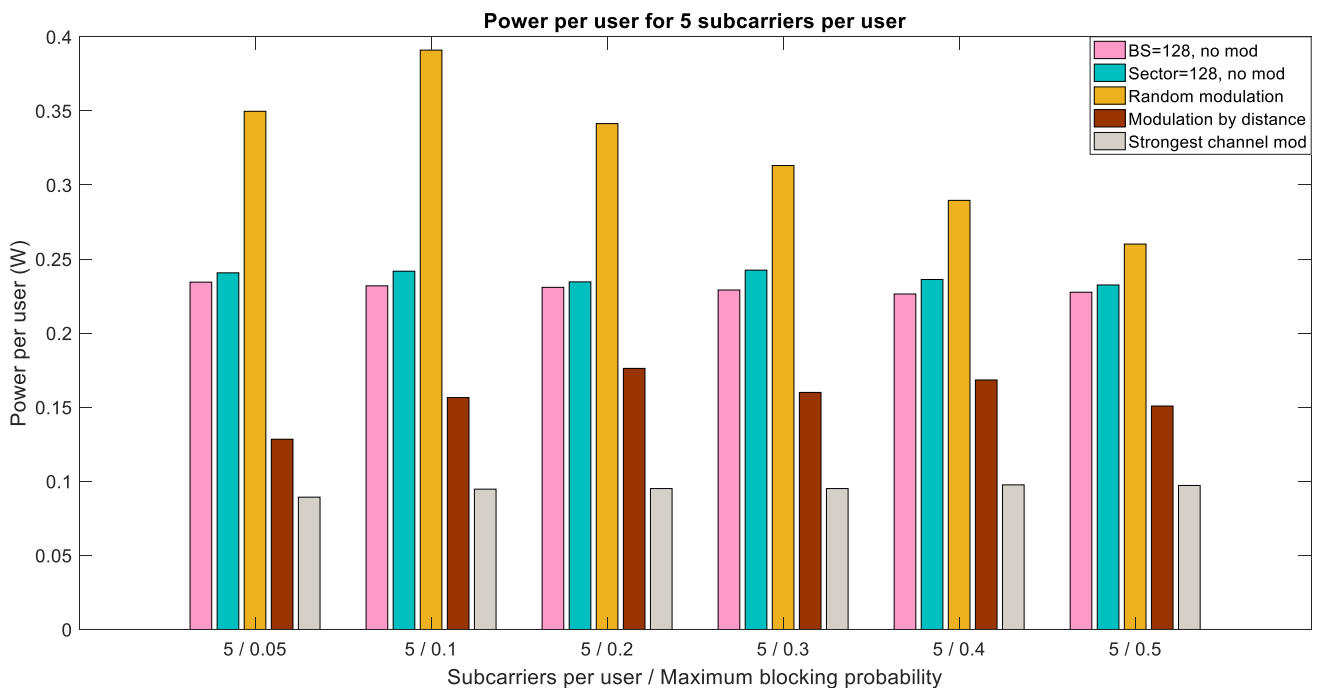
Ακολουθώς παρουσιάζεται το μέσο άθροισμα της ισχύος των φερόντων έκαστου χρήστη, για διαφορετικές τεχνικές απόδοσης πόρων, αριθμό φερόντων και πιθανότητα αποκλεισμού.



Εικόνα 6.17: Συνολική ισχύς φερόντων χρήστη για 3 φέροντα ανά χρήστη



Εικόνα 6.18: Συνολική ισχύς φερόντων χρήστη για 4 φέροντα ανά χρήστη



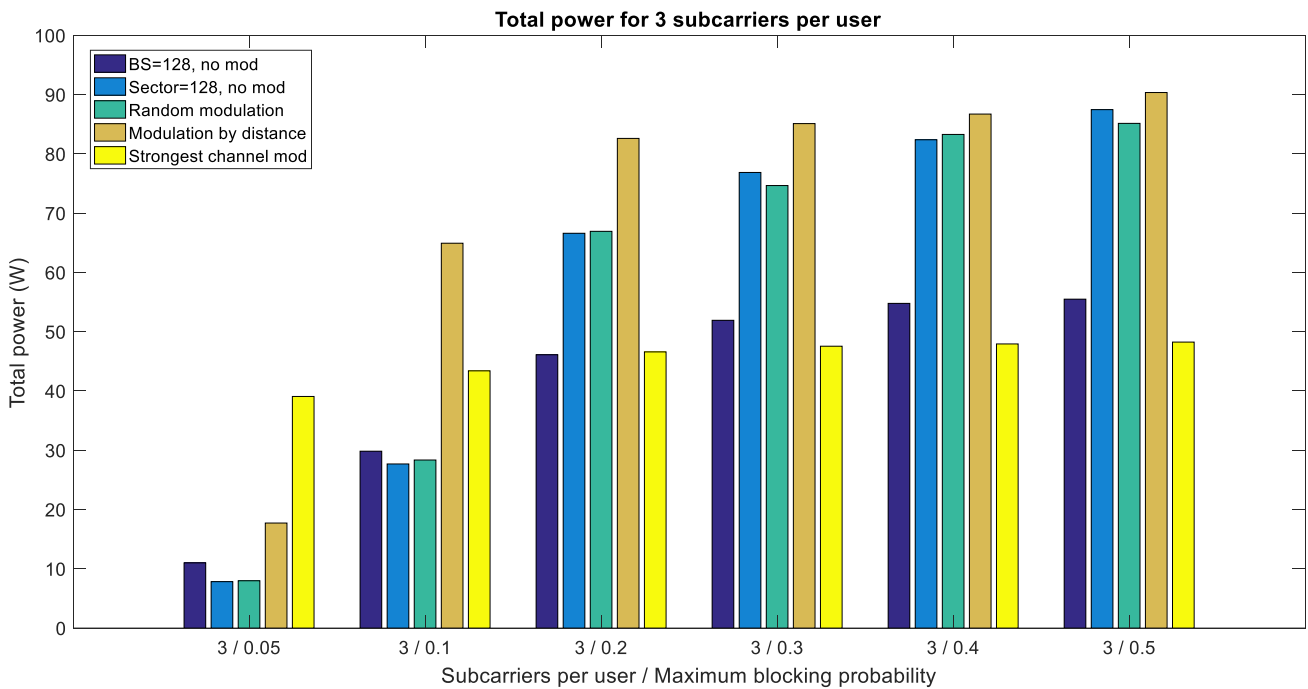
Εικόνα 6.19: Συνολική ισχύς φερόντων χρήστη για 5 φέροντα ανά χρήστη

Η μέση ισχύς ανά χρήστη είναι αυξημένη στην περίπτωση όπου υπάρχει τυχαία προσαρμοστική διαμόρφωση σε σχέση με την περίπτωση χωρίς καθόλου επιπλέον διαμόρφωση πέραν της QPSK (λογικό, καθώς με την βελτίωση της διαμόρφωσης αυξάνεται το απαιτούμενο SNR, οπότε και η ισχύς εκπομπής από την κεραία για το δεδομένο φέρον). Στην περίπτωση όμως της ανάθεσης φερόντων και αλλαγής διαμόρφωσης σύμφωνα με την απόσταση του χρήστη από την κεραία βάσης, η μέση

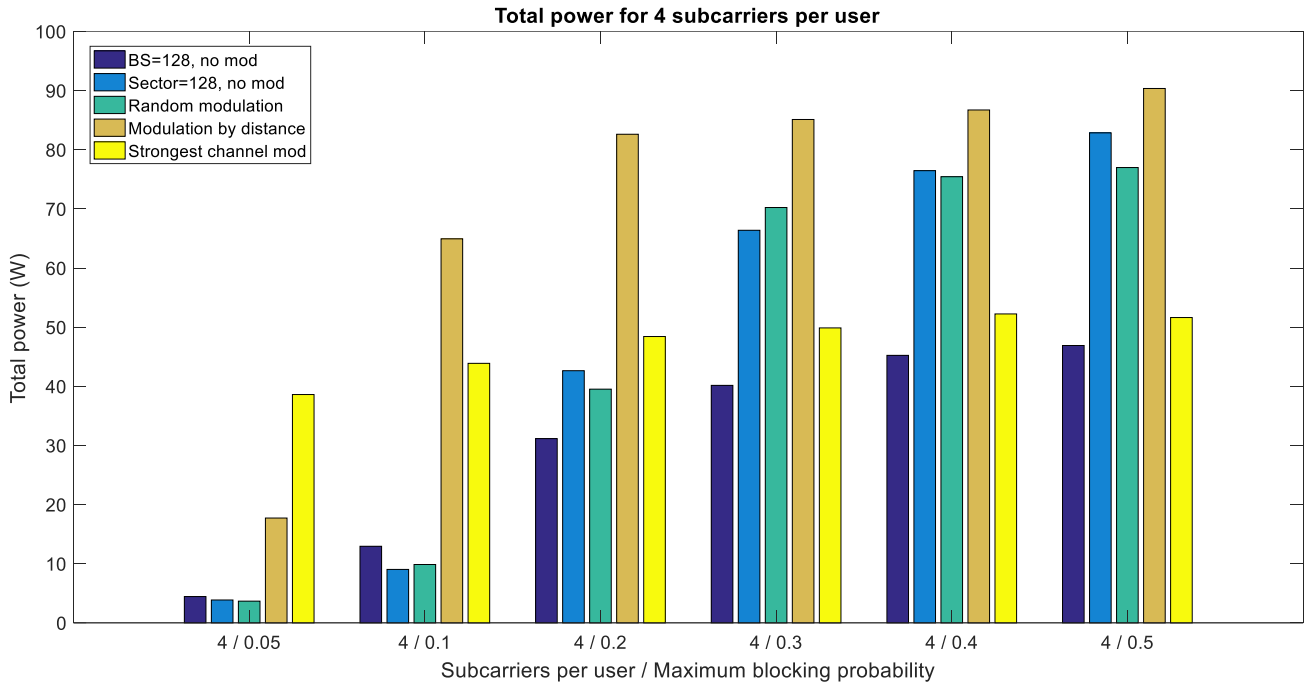
ισχύς ανά χρήστη είναι μειωμένη (βέβαια, και ο μέσος αριθμός φερόντων ανά χρήστη είναι περίπου 2.5). Στην περίπτωση της ανάθεσης φερόντων και αλλαγής διαμόρφωσης βάσει του δυνατότερου καναλιού, η μέση ισχύς είναι πολύ μικρότερη των άλλων περιπτώσεων (λογικό, καθώς κάθε φορά επιλέγεται το κανάλι με τις βέλτιστες συνθήκες διάδοσης, κάτι που επιτρέπει στο σύστημα να εκπέμπει σε αυτό το φέρον για τον συγκεκριμένο χρήστη με πολύ μικρές τιμές ισχύος).

6.6 Συνολική ισχύς συστήματος

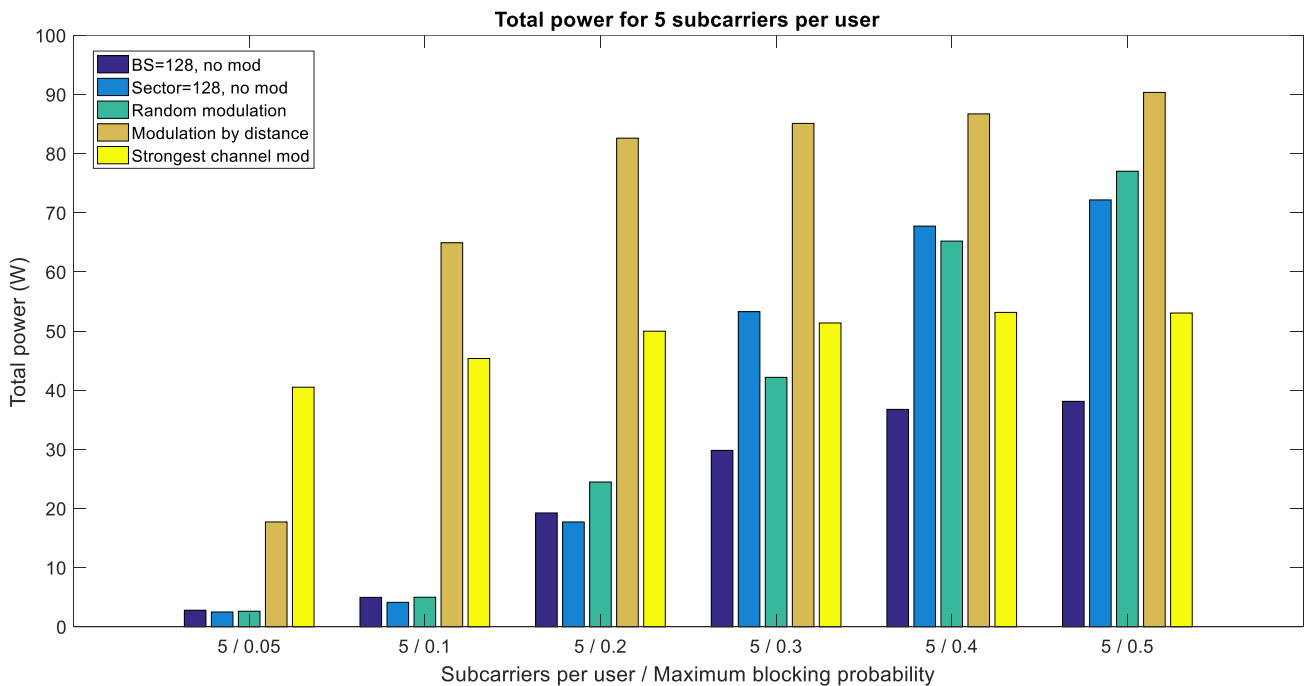
Η συνολική ισχύς του συστήματος (δηλαδή το άθροισμα της ισχύος όλων των φερόντων που έχουν αποδοθεί σε χρήστες) παρουσιάζεται στα επόμενα διαγράμματα για κάθε τεχνική απόδοσης πόρων, αριθμό φερόντων και πιθανότητα αποκλεισμού.



Εικόνα 6.20: Συνολική ισχύς συστήματος για 3 φέροντα ανά χρήστη



Εικόνα 6.21: Συνολική ισχύς συστήματος για 4 φέροντα ανά χρήστη

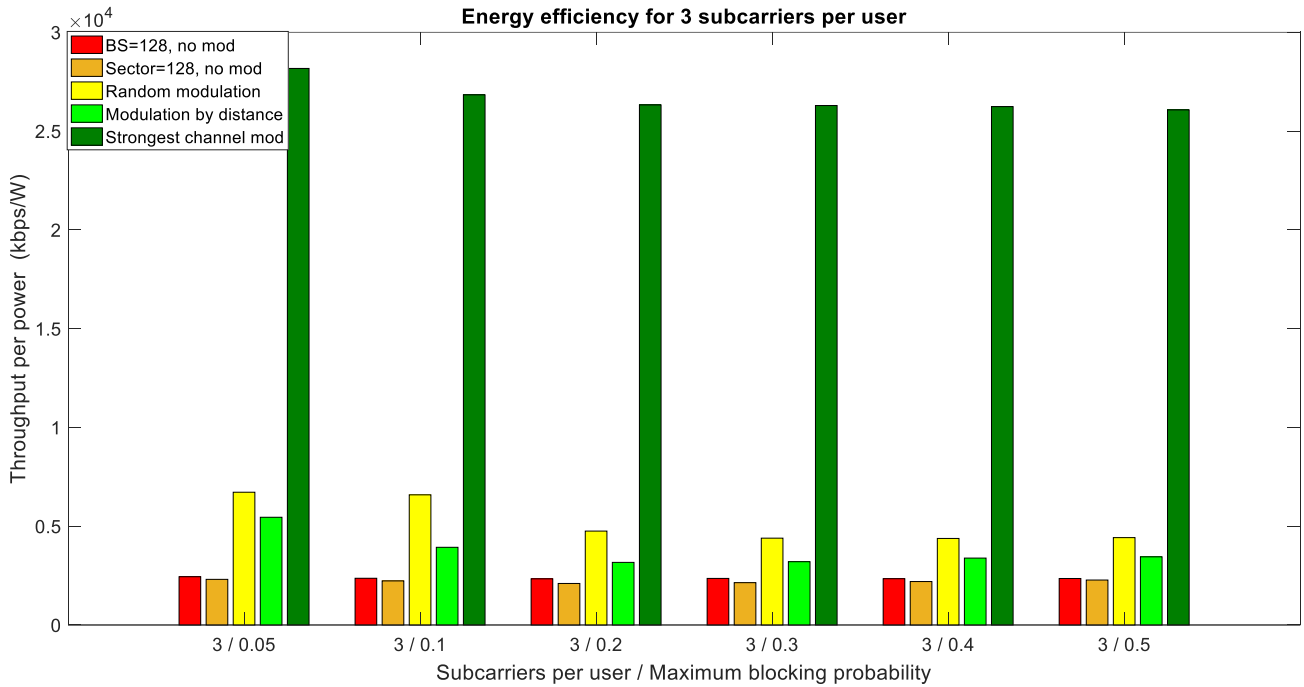


Εικόνα 6.22: Συνολική ισχύς συστήματος για 5 φέροντα ανά χρήστη

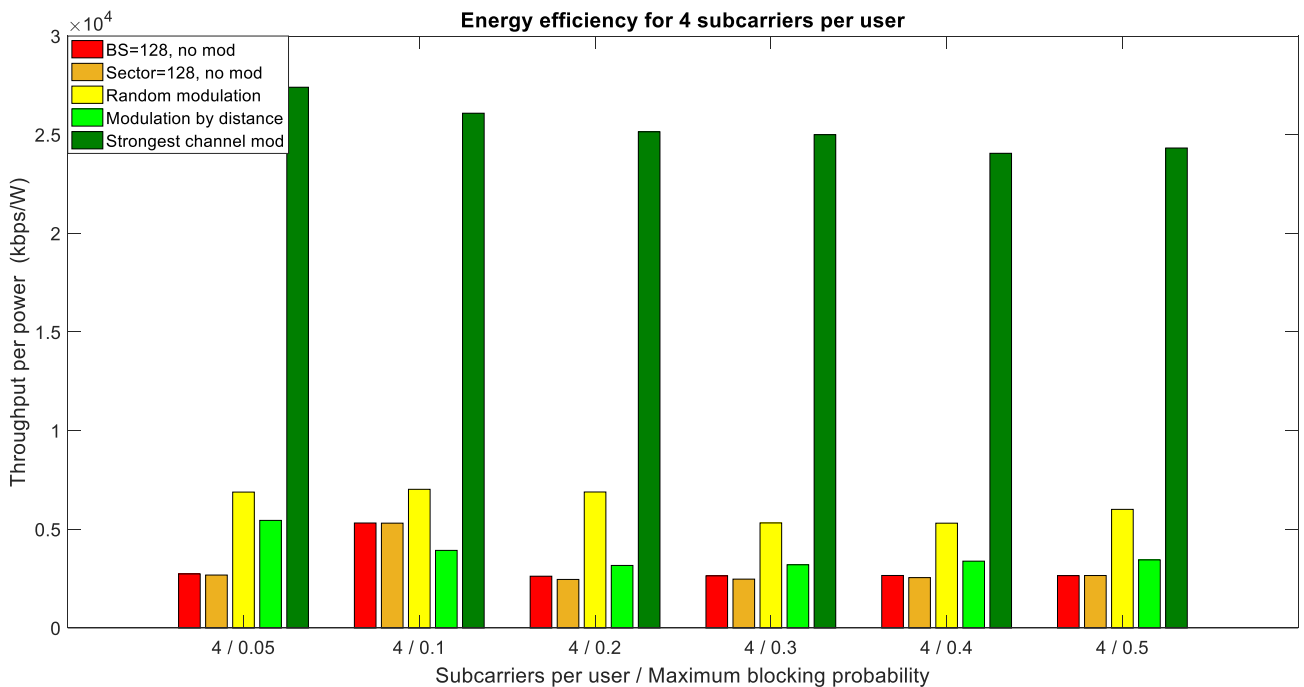
Παρατηρούμε πως η γνώση των χαρακτηριστικών του καναλιού που επιτρέπει στην μέθοδο της ανάθεσης φερόντων και αλλαγής διαμόρφωσης βάσει του δυνατότερου καναλιού να κάνει χρήση φερόντων τα οποία χρησιμοποιούν πολύ μικρή ισχύ εξασφαλίζει αρκετά μικρή συνολική τιμή ισχύος εκπομπής, παρόλο τον συγκριτικά πολύ μεγάλο αριθμό χρηστών που εξυπηρετεί.

6.7 Ενεργειακή αποδοτικότητα

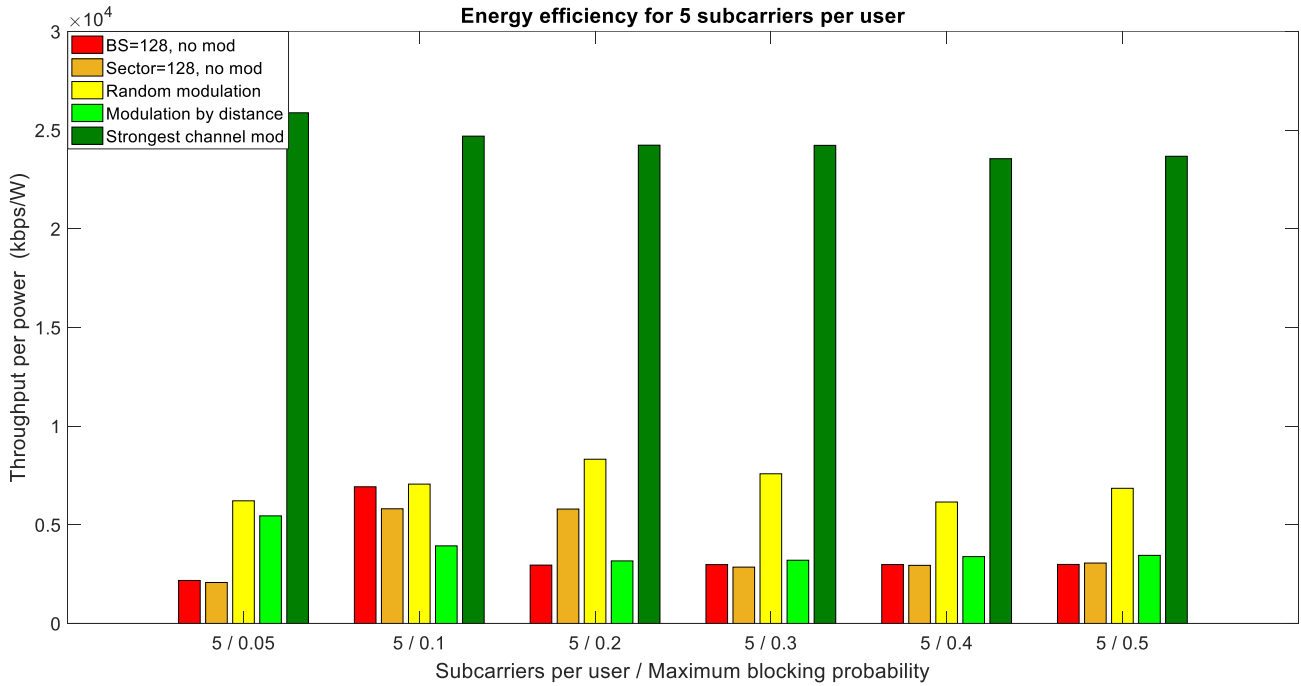
Η ενεργειακή αποδοτικότητα (kbps/W) κάθε τεχνικής απεικονίζεται στα επόμενα διαγράμματα.



Εικόνα 6.22: Ενεργειακή αποδοτικότητα για 3 φέροντα ανά χρήστη



Εικόνα 6.23: Ενεργειακή αποδοτικότητα για 4 φέροντα ανά χρήστη

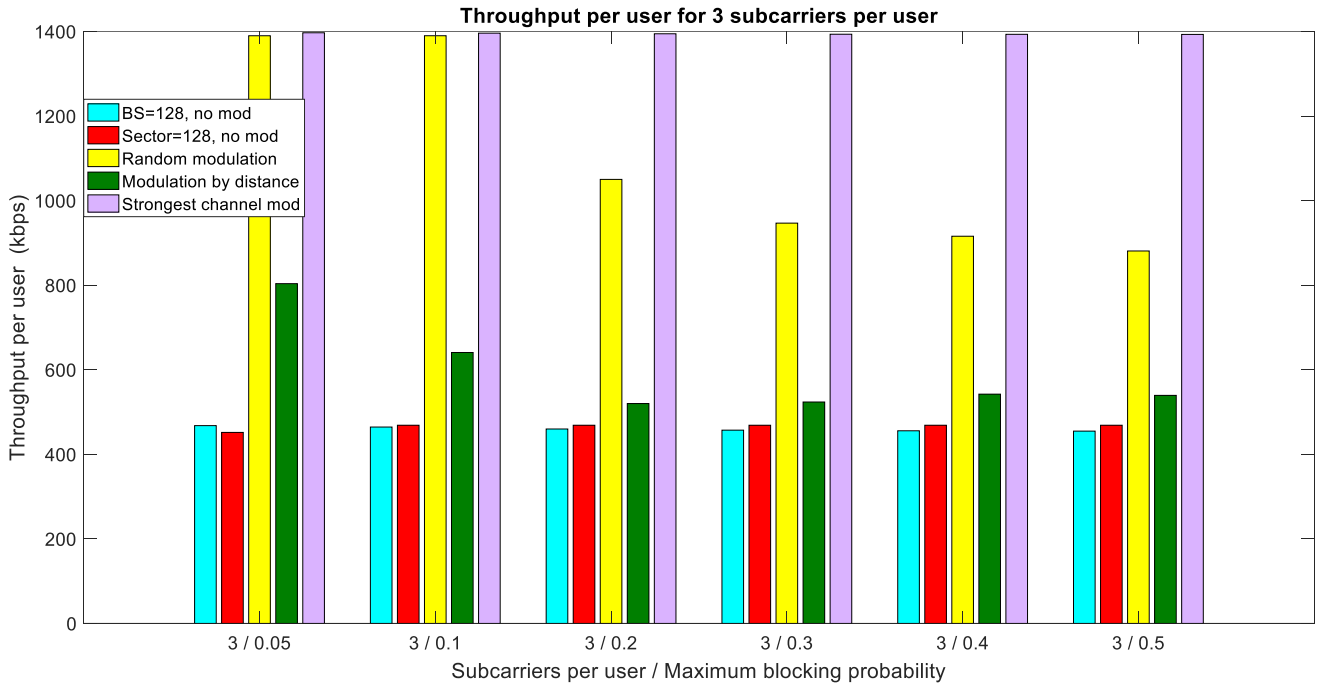


Εικόνα 6.24: Ενεργειακή αποδοτικότητα για 5 φέροντα ανά χρήστη

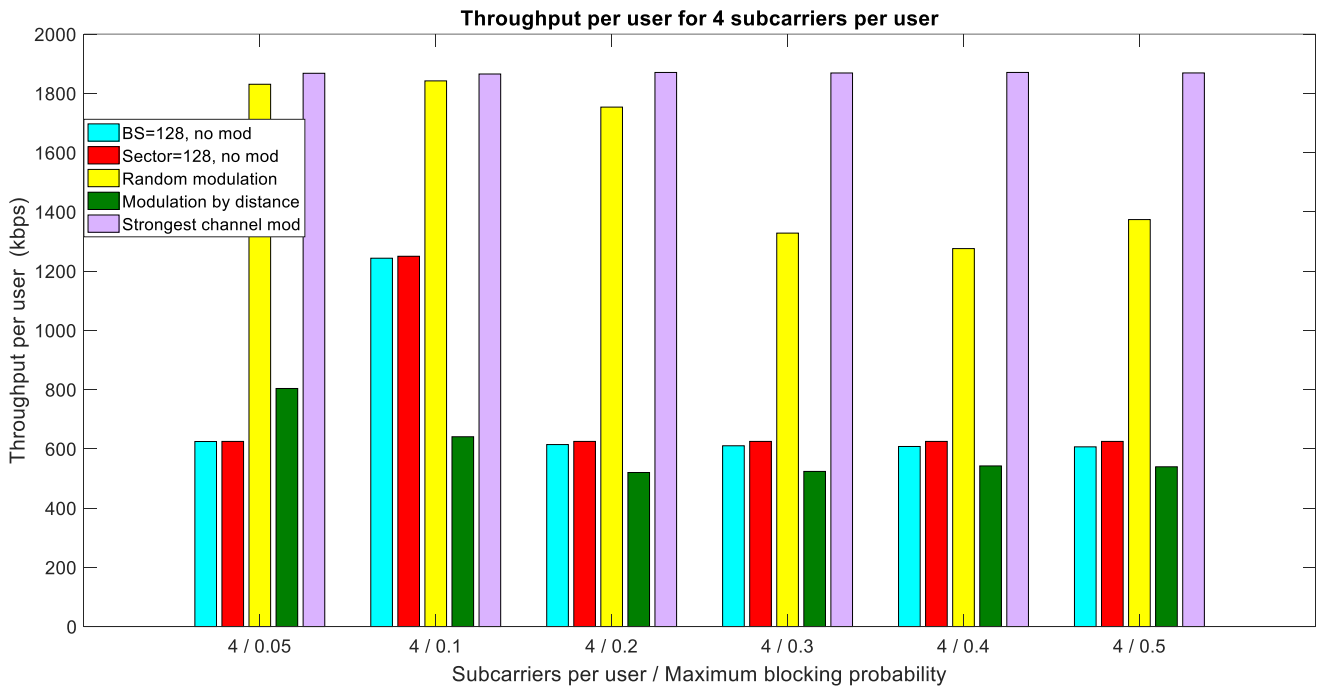
Όπως αναμενόταν, η ενεργειακή αποδοτικότητα βελτιστοποιείται στην περίπτωση του σεναρίου που κάνει χρήση της γνώσης του καναλιού. Επιτυγχάνεται μεγάλη οικονομία ισχύος στην χρήση των φερόντων, και αυτός είναι και ο κύριος λόγος που το σύστημα πλέον μπορεί να εξυπηρετήσει τόσους χρήστες, φτάνοντας σχεδόν στο μέγιστο της δυναμικότητάς του, βάσει του αριθμού των τομέων του και των φερόντων που είναι αρχικώς διαθέσιμα.

6.8 Μέση ρυθμαπόδοση ανά χρήστη

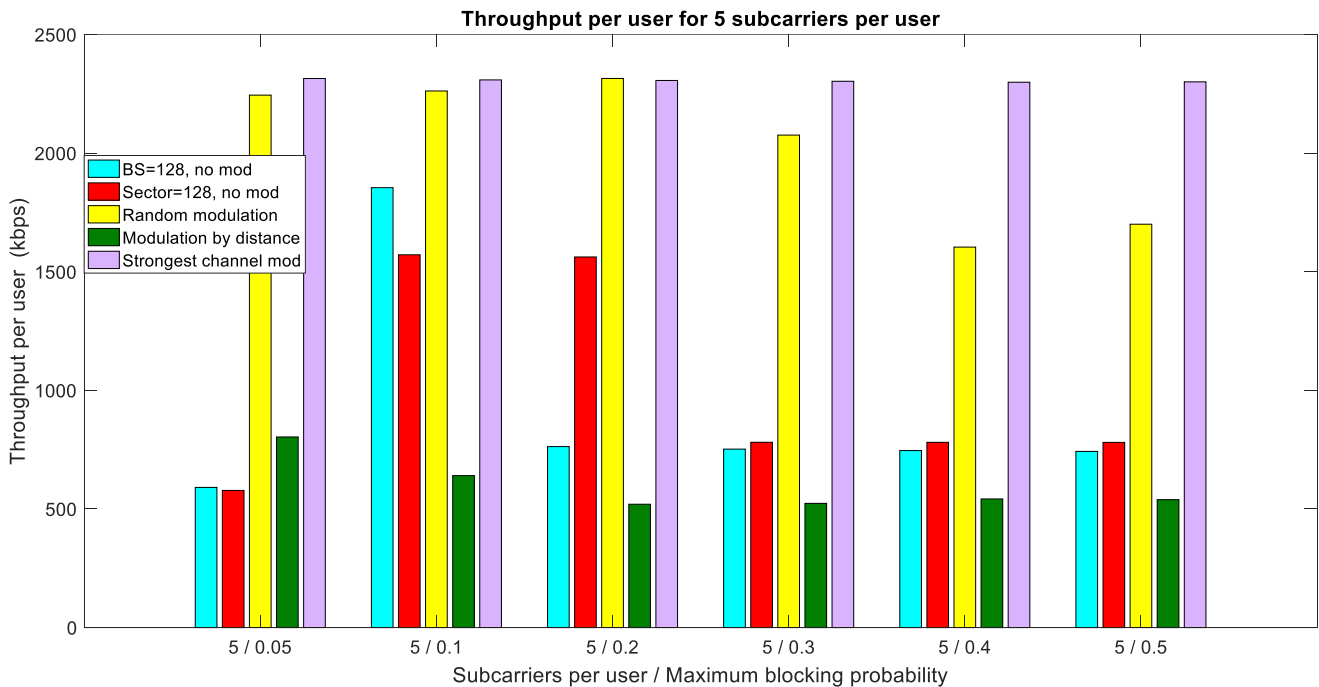
Ακολουθεί η ρυθμαπόδοση που απολαμβάνουν κατά μέσο όρο οι χρήστες (σε kbps).



Εικόνα 6.25: Ρυθμαπόδοση ανά χρήστη για 3 φέροντα ανά χρήστη



Εικόνα 6.26: Ρυθμαπόδοση ανά χρήστη για 4 φέροντα ανά χρήστη



Εικόνα 6.27: Ρυθμαπόδοση ανά χρήστη για 4 φέροντα ανά χρήστη

Η ρυθμαπόδοση του σεναρίου με την τυχαία προσαρμοστική διαμόρφωση ανταγωνίζεται αρκετά καλά την αντίστοιχη του σεναρίου με την επιλογή του δυνατότερου καναλιού για μικρές τιμές της πιθανότητας απόρριψης (όπου στο σενάριο της προσαρμοστικής διαμόρφωσης δεν προλαβαίνει να εισέλθει μεγάλος αριθμός χρηστών ο οποίος να προκαλέσει ισχυρές παρεμβολές). Με την αύξηση της πιθανότητας όμως οι χρήστες αυξάνονται, κάνοντας την μέση ρυθμαπόδοση ανά χρήστη σε αυτήν την περίπτωση να μειωθεί αρκετά, σε αντίθεση με το σενάριο που κάνει χρήση της γνώσης του καναλιού, όπου η μέση ρυθμαπόδοση ανά χρήστη παραμένει σταθερή, αφού ήδη από πολύ μικρές τιμές της πιθανότητας αποκλεισμού ο αριθμός των χρηστών που έχει εισέλθει είναι πολύ κοντά στον μέγιστο εφικτό.

Κάτι που αξίζει να αναφερθεί εδώ, είναι ότι η ανομοιομορφία στην ρυθμαπόδοση ανάμεσα στους αποδεκτούς από το σύστημα χρήστες διαφέρει ανάλογα με την υλοποίηση. Στην περίπτωση του βασικού σεναρίου, είχαμε ανάθεση σταθερού αριθμού φερόντων ανά χρήστη (3, 4 ή 5, ανάλογα με την τιμή της παραμέτρου `initial_carriers_per_user`) και δεν υπήρχε αλλαγή στην διαμόρφωση των φερόντων (όλα είχαν διαμόρφωση QPSK). Αυτό οδηγούσε στο να απολαμβάνουν όλοι οι χρήστες την ίδια (σχετικά χαμηλή βέβαια) ρυθμαπόδοση, με εξαίρεση την σχετικά σπάνια περίπτωση όπου κάποιοι χρήστες μπορεί να αντιμετώπιζαν *hard blocking* λόγω έλλειψης φερόντων οπότε και θα είχαν στην διάθεσή τους λιγότερα φέροντα από τους υπόλοιπους.

Η ανομοιομορφία στην ρυθμαπόδοση των χρηστών αυξήθηκε στο τρίτο σενάριο (όπως και στο πέμπτο) με την εισαγωγή της συνάρτησης που επιχειρεί αλλαγή διαμόρφωσης στα φέροντα (`modulation_change`), οπότε ο σταθερός αριθμός φερόντων ανά χρήστη (εξαιρουμένου του *hard blocking*) δεν συνεπάγεται και σταθερή ρυθμαπόδοση ανάμεσα στους χρήστες, καθώς κάποιος χρήστης μπορεί να

έχει φέροντα που έχουν υποστεί διαφορετικές διαμορφώσεις από τα φέροντα κάποιου άλλου χρήστη. Ενδεικτικά, για την περίπτωση των τριών φερόντων ανά χρήστη ($available_carriers_per_user = 3$), η ελάχιστη ρυθμαπόδοση που μπορεί να έχει διαθέσιμη κάποιος χρήστης είναι ίση με $3 carriers * 2 \frac{bit}{symbol} * \frac{10000 Hz}{128 carriers} = 468.75 kbps$ ενώ η μέγιστη είναι $3 carriers * 6 \frac{bit}{symbol} * \frac{10000 Hz}{128 carriers} = 1406.25 kbps$ (δηλαδή η τριπλάσια).

Η ανομοιομορφία στην ρυθμαπόδοση των χρηστών αυξάνεται έτι περαιτέρω με την διαδικασία της απόδοσης διαφορετικού αριθμού φερόντων σε χρήστες που ανήκουν σε διαφορετικές ζώνες απόστασης από τον σταθμό βάσης που τους εξυπηρετεί. Έτσι κάποιος χρήστης τώρα μπορεί να έχει 5 φέροντα διαθέσιμα, ενώ κάποιος άλλος μόνο 1. Αυτό από μόνο του οδηγεί σε πενταπλάσια μέγιστη δυνατή τιμή ρυθμαπόδοσης χρήστη σε σχέση με την ελάχιστη δυνατή. Αυτή η ανομοιομορφία όμως αυξάνεται επιπλέον με την χρήση της στρατηγικής της επιχείρησης αλλαγής διαμόρφωσης φερόντων ανάλογα με την απόσταση του χρήστη από τον BS εξυπηρετήσής του, όπου οι χρήστες που βρίσκονται εγγύτερα σε αυτόν μπορούν να έχουν φέροντα με διαμόρφωση υψηλότερης τάξης από αυτούς που βρίσκονται μακρύτερα. Προκύπτει λοιπόν ότι οι χρήστες που έχουν περισσότερα διαθέσιμα φέροντα μάλλον θα απολαμβάνουν και καλύτερης διαμόρφωσης σε αυτά, οπότε οι διαφορές στην ρυθμαπόδοση μεταξύ των χρηστών καθίστανται περισσότερο ακραίες. Ένας απλός υπολογισμός δείχνει ότι οι τιμές ρυθμαπόδοσης που μπορεί να έχει διαθέσιμες κάποιος χρήστης μπορεί να κυμαίνονται από $1 carrier * 2 \frac{bit}{symbol} * \frac{10000 Hz}{128 carriers} = 156.25 kbps$ έως $5 carriers * 6 \frac{bit}{symbol} * \frac{10000 Hz}{128 carriers} = 2343.75 kbps$ (εδώ η μέγιστη δυνατή τιμή είναι δεκαπενταπλάσια της ελάχιστης).

Βιβλιογραφία

- [1] Christopher Cox, *An introduction to LTE, LTE-advanced, SAE, VoLTE and 4G mobile communications – Second Edition*, John Wiley & Sons, Ltd, 2014
- [2] *Αξιοποίηση Τεχνικών Κατανομής Φερόντων και Προσαρμοστικής Διαμόρφωσης για Βελτίωση Ποιότητας Υπηρεσιών στην Τεχνολογία Ασύρματης Δικτύωσης WiMAX*, Διπλωματική εργασία Ιωάννη Κ. Πετρόπουλου
- [3] Zarrinkoub Houman, *Understanding LTE with MATLAB : from mathematical foundation to simulation, performance evaluation and implementation*, John Wiley & Sons, Ltd, 2014
- [4] ETSI, *4th Generation (LTE), Long Term Evolution (LTE)*
<https://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/mobile/4G>
- [5] Anna Larmo, Magnus Lindström, Michael Meyer, Ghyslain Pelletier, Johan Torsner, and Henning Wiemann, Ericsson Research, *The LTE Link-Layer Design*, IEEE Communications Magazine, April 2009
- [6] ITU, *ITU global standard for international mobile telecommunications 'IMT-Advanced'*
<https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/imt-adv/Pages/default.aspx>
- [7] 3GPP, Jeanette Wannstrom, for 3GPP, *LTE-Advanced*, June 2013
<http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/97-lte-advanced>
- [8] Afif Osseiran, Ericsson AB, Eric Hardouin and Alexandre Gouraud, Orange Labs, Mauro Boldi, Telecom Italia, Ivan Cosovic, DOCOMO Euro-Labs, Karine Gosse, Motorola, Jijun Luo, Simone Redana, and Werner Mohr, Nokia Siemens Networks, Jose F. Monserrat, Polytechnic University of Valencia, Tommy Svensson, Chalmers University of Technology, Antti Tölli, University of Oulu, Alben Mihovska, Aalborg University, Marc Werner, Qualcomm, *The Road to IMT-Advanced Communication Systems: State-of-the-Art and Innovation Areas Addressed by the WINNER+ Project*, IEEE Communications Magazine, June 2009
- [9] ITU, Radiocommunication Study Groups, *Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s)*, 22 February 2017
<https://www.itu.int/md/R15-SG05-C-0040/en>
- [10] 3GPP, Toon Norp, Chairman 3GPP SA WG1, *5G service requirements*, February 27, 2017
http://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1831-sa1_5g
- [11] 5G-PPP, *5G Vision - The 5G Infrastructure Public Private Partnership: the next generation of communication networks and services*
<https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2015/02/5G-Vision-Brochure-v1.pdf>
- [12] Ericsson, *Ericsson Mobility Report*, June 2018

<https://www.ericsson.com/assets/local/mobility-report/documents/2018/ericsson-mobility-report-june-2018.pdf>

[13] ITU, *ITU towards "IMT for 2020 and beyond"*

<https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/imt-2020/Pages/default.aspx>

[14] Yong Soo Cho, Jaekwon Kim, Won Young Yang and Chung G. Kang, *MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB®*, John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, 2010

[15] Andreas F. Molisch, *Wireless Communications, 2nd Edition*, John Wiley & Sons, Ltd, November 2010

[16] Κανάτας Αθανάσιος, Κωνσταντίνου Φίλιππος, Πάντος Γεώργιος, *Συστήματα Κινητών Επικοινωνιών*, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2014

[17] Μ. Ε. Θεολόγου, *Δίκτυα Κινητών & Προσωπικών Επικοινωνιών, 2η Έκδοση*, Εκδόσεις Τζιόλα, 2010

[18] Παναγιώτης Γ. Κωττής, Παντελής-Δανιήλ Μ. Αράπογλου, *Ασύρματες Επικοινωνίες*, Εκδόσεις Τζιόλα, 2011

[19] Simon Haykin, Michael Moher, *Communication Systems, 5th Edition*, John Wiley & Sons, Ltd, 2009

[20] Παναγιώτης Γ. Κωττής, *Εισαγωγή στις Τηλεπικοινωνίες, Διαμόρφωση και Μετάδοση Σημάτων*, Εκδόσεις Τζιόλα, 2012

[21] Παναγιώτης Γ. Κωττής, Χρήστος Ν. Καψάλης, *Δορυφορικές Επικοινωνίες*, Εκδόσεις Τζιόλα, 2013

[22] Alberto Morello and Ulrich Reimers, *DVB-S2, the second generation standard for satellite broadcasting and unicasting*, International Journal of Satellite Communications and Networking, 2004

[23] Stefania Sesia, Issam Toufik, Matthew Baker, *LTE—the UMTS long term evolution: from theory to practice, Second Edition*, John Wiley & Sons, Ltd, 2011

[24] David Astély, Erik Dahlman, Anders Furuskär, Ylva Jading, Magnus Lindström, and Stefan Parkvall, *LTE: The Evolution of Mobile Broadband*, IEEE Communications Magazine, April 2009

[25] Erik Dahlman, Stefan Parkvall, Johan Skold, *4G, LTE-Advanced Pro and The Road to 5G, Third Edition*, Elsevier Ltd, 2016

[26] Panagiotis K. Gkonis, Maria A. Seimeni, Nikolaos P. Asimakis, Dimitra I. Kaklamani, and Iakovos S. Venieris, *A New Subcarrier Allocation Strategy for MIMO-OFDMA Multicellular Networks Based on Cooperative Interference Mitigation*, Hindawi Publishing Corporation, Scientific World Journal, Volume 2014