



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ & ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΦΩΤΕΙΝΗΣ Π. ΝΤΑΒΟΥ

Επιβλέπων: Συμεών Χρ. Παπαβασιλείου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ & ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΠΟΛΥΕΠΙΠΕΔΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ 5^{ης} ΓΕΝΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΗ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΠΟΛΛΑΠΛΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΦΩΤΕΙΝΗΣ Π. ΝΤΑΒΟΥ

Επιβλέπων: Συμεών Χρ. Παπαβασιλείου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την Ιουνίου, 2016.

.....
Συμεών Παπαβασιλείου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Μιχαήλ Θεολόγου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Ιωάννα Ρουσσάκη
Επίκουρη Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούνιος 2016

.....

Φωτεινή Π. Ντάβου

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

Copyright Φωτεινή Π. Ντάβου

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 το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο τη μελέτη της βέλτιστης κατανομής πόρων σε πολυεπίπεδα ασύρματα δίκτυα 5^{ης} γενιάς με τη χρήση του καινοτόμου μη ορθογωνικού μοντέλου πολλαπλής πρόσβασης (Non-Orthogonal Multiple Access - NOMA), καθώς και τη σύγκριση αυτού με το μοντέλο πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση κώδικα (Code Division Multiple Access - CDMA).

Για την υλοποίηση του προβλήματος βέλτιστης κατανομής πόρων υιοθετήθηκαν βασικές αρχές της Θεωρίας Παιγνίων του John Forbes Nash, σύμφωνα με τις οποίες το πρόβλημα διαμορφώνεται ως ένα μη-συνεργατικό παίγνιο ταυτόχρονης κατανομής ισχύος και ρυθμού μετάδοσης. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος, αρκεί να αποδειχτεί τόσο η ύπαρξη όσο και η μοναδικότητα του σημείου ισορροπίας κατά Nash. Επιπρόσθετα, εισάγεται η έννοια της συνάρτησης ευχαρίστησης (utility function), η οποία είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται ευρέως στην Οικονομική Επιστήμη και αντικατοπτρίζει το βαθμό ευχαρίστησης των χρηστών του δικτύου ανάλογα με τη χρήση των πόρων και της ποιότητας των υπηρεσιών που τους παρέχονται από το δίκτυο, λαμβάνοντας υπόψιν και τις απαιτήσεις των χρηστών σε ρυθμό μετάδοσης, κατανάλωση ισχύος και τις παρεμβολές που υφίστανται εντός του δικτύου. Τέλος, εισάγεται η έννοια κοστολόγησης των πόρων του δικτύου με στόχο την επιβολή κοινωνικής συμπεριφοράς στους χρήστες, οι οποίοι εγωιστικά ανταγωνίζονται για την απόκτηση των πόρων του δικτύου εις βάρος των άλλων χρηστών.

Η μελέτη χωρίζεται σε τρία στάδια, όπου σε κάθε στάδιο προστίθεται σταδιακά και ένα νέο επίπεδο δικτύωσης στο σύστημα:

- 1. Μονοεπίπεδο σύστημα:** Εδώ το δίκτυό μας αποτελείται από μία μακροκυψέλη και ορισμένους χρήστες, χρησιμοποιώντας το μοντέλο NOMA. Στόχος σε αυτό το σημείο είναι να επιλύσουμε το πρόβλημα βέλτιστης κατανομής πόρων καθώς και να συγκρίνουμε τις τιμές των μεγεθών: ισχύς εκπομπής, ρυθμός μετάδοσης, ενεργειακή απόδοση και παρεμβολές με αυτές του αντίστοιχου προβλήματος σε CDMA τεχνική, ώστε να καταλήξουμε στην υπεροχή του μοντέλου NOMA. Παράλληλα, ελέγχεται η επιρροή της χρήσης κοστολόγησης στις τιμές των πόρων του δικτύου.
- 2. Διεπίπεδο σύστημα:** Σε αυτό το στάδιο, προστίθενται στο δίκτυο ένας αριθμός από φεμτοκυψέλες και χρήστες φεμτοκυψέλης. Στόχος είναι και πάλι η επίλυση του πρωταρχικού προβλήματος, καθώς και η σύγκριση με το αντίστοιχο διεπίπεδο CDMA πρόβλημα. Με στόχο την απλούστευση της παρουσίασης, στο παρόν μοντέλο δε γίνεται χρήση κοστολόγησης, ώστε να αναδειχθούν τα πλεονεκτήματα κυρίως εξαιτίας της πολυεπίπεδης δομής και όχι λόγω της κοστολόγησης.
- 3. Τριεπίπεδο σύστημα:** Αυτό το στάδιο χωρίζεται σε δύο σενάρια. Στο πρώτο σενάριο προστίθενται στο διεπίπεδο σύστημα οι κυψέλες ορατού φωτός (VLC) και οι χρήστες αυτών και γίνεται σύγκριση μεταξύ των δύο επιπέδων (διεπίπεδο και τριεπίπεδο) με στόχο να αποφανθούμε για την επίπτωση που θα έχει στη χρήση των πόρων του δικτύου η προσθήκη των VLC κυψελών.
Στο δεύτερο σενάριο, μετατρέπουμε τον αριθμό των VLC κυψελών και των χρηστών τους σε φεμτοκυψέλες με φεμτοχρήστες και συγκρίνουμε το σύστημα αυτό με το αντίστοιχο τριεπίπεδο σύστημα. Αυτή η μελέτη έχει ως στόχο να δείξει εάν έχει θετική, αρνητική ή

μηδενική επίδραση στη χρήση των πόρων του δικτύου, η αλλαγή από διεπίπεδο σε τριεπίπεδο σύστημα.

Εν κατακλείδι, παράλληλα με τη θεωρητική μοντελοποίηση των ανωτέρω προβλημάτων, πραγματοποιείται ένα σύνολο προσομοιώσεων με τη βοήθεια του εργαλείου MATLAB, ώστε να εξάγουμε με ακρίβεια αποτελέσματα για το πρόβλημα βέλτιστης κατανομής πόρων, καθώς και να καταλήξουμε σε συμπεράσματα για τα πλεονεκτήματα του μοντέλου NOMA, έναντι του προκατόχου του CDMA.

Λέξεις κλειδιά: ασύρματα δίκτυα, 5G, NOMA, μη ορθογωνικό μοντέλο πρόσβασης, κατανομή πόρων, θεωρία παιγνίων, ισορροπία κατά Nash, κοστολόγηση, φεμτοκυψέλες, VLC, τριεπίπεδο σύστημα

Abstract

The main objective of this diploma thesis, is the study of the efficient resource allocation on multi-tier 5G wireless networks with the use of the pioneer Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) model, and the comparison of this model with Code Division Multiple Access (CDMA) model.

Towards this direction, we followed the basic principles of Game Theory by John Forbes Nash, according to which the initial problem is modeled as a non-cooperative game of joint power and rate allocation. For the solution of this problem, the existence of a unique Nash equilibrium must be proved. Moreover, in this thesis, the notion of utility function is adopted, which is a term widely used in Economics Science. This function reflects the satisfaction of network users, depending on the use of the network resources and the quality of service they receive, taking into consideration users' requirements on rate, power and interference among the system. Finally, the idea of penalizing users via a representative pricing mechanism for using the system's resources is introduced, in order to encourage users to use resources more efficiently, as until this point, they were consuming the resources of the network in a selfish manner at the expense of the rest of the users.

Our study is divided into three parts where, in each part, a new tier is gradually added in the network:

1. **Single Tier:** In this step, our network consists of one macro cell and some users residing in its coverage area, implementing the NOMA model. The objective of this step is to solve the problem of efficient resource allocation, as well as to compare the values of the following: power, transmission rate, energy efficiency and interference, with the respective CDMA resource allocation problem, in order to conclude to NOMA model's superiority compared to CDMA. Lastly, we monitor the influence of the pricing policy on the values of the network resources.
2. **2-Tier:** In this step, we add a number of femto cells and femto users inside the network. The objective is again to solve the initial resource allocation problem and to compare the two models (NOMA and CDMA). Without loss of generality and for comparison purposes only, the usage of pricing policy is not studied in order to show the pure benefits stemming from the multi-tier architecture.
3. **3-Tier:** This step is divided into two scenarios. In the first scenario, we add VLC (Visible Light Communication) cells and VLC users to the 2-Tier network and then we compare the two steps (2-Tier and 3-Tier) in order to monitor the influence of the extra tier on the resources of the network.

In the second scenario, we substitute the VLC cells and VLC users into femto cells and femto users respectively and we compare this network with the 3-Tier network. This study's objective is to show if there is a positive, negative or neutral influence on the network resources, when there is a switch from 2-Tier to 3-Tier.

In conclusion, in parallel with the scientific modelling of the aforementioned problems, there are also numerous simulations in MATLAB environment carried out, in order to form results on the efficient resource allocation problem, as well as to form conclusions on the advantage of the NOMA model over CDMA.

Key words: wireless networks, 5G, NOMA, resource allocation, game theory, Nash equilibrium, pricing, femtocells, VLC, Multi-Tier architecture.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή, τον κ. Συμεών Παπαβασιλείου, για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου με την ανάθεση ενός ιδιαίτερα ενδιαφέροντος, καινοτόμου και απαιτητικού θέματος, καθώς και για την άριστη συνεργασία καθ'όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τη διδάκτορα Ε.Μ.Π, κ. Ειρήνη-Ελένη Τσιροπούλου, η οποία υπήρξε πολύτιμη σύμβουλος καθ'όλη τη διάρκεια, παρέχοντάς μου τις γνώσεις και οδηγίες τις για τη σωστή διεξαγωγή της έρευνας. Η συνεπής και συνεχής καθοδήγησή της διαδραμάτισε καίριο ρόλο στην ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Θα ήθελα να εκφράσω την αμέριστη ευγνωμοσύνη στους φίλους και συναδέλφους μου, οι οποίοι υπήρξαν συνοδοιπόροι μου στα φοιτητικά χρόνια και η υποστήριξη και συντροφικότητά τους μου έδωσε κίνητρο και έμπνευση. Τέλος, θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου, η οποία μου παρέχει αδιαλείπτως την υποστήριξή της για να γίνουν τα όνειρά μου πραγματικότητα.

Αφιερώνεται στην
οικογένειά μου

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1: Uplink NOMA με N κεραίες λήψεως	32
Εικόνα 2: Μορφή σήματος NOMA στη συχνότητα.....	33
Εικόνα 3: Χρήση του SIC μηχανισμού από το NOMA σύστημα στη ζεύξη καθόδου με δύο χρήστες και ένα σταθμό βάσης.....	33
Εικόνα 4: Σύστημα ζεύξης ανόδου MUSA.....	35
Εικόνα 5: Αποδέκτης SIC βασισμένος σε MMSE.....	36
Εικόνα 6: Αναπαράσταση NOMA-VLC συστήματος εσωτερικού χώρου για τη ζεύξη καθόδου, με δύο LEDs και τρεις χρήστες.....	37
Εικόνα 7: Κυψελωτό διεπίπεδο δίκτυο με μακροκυψέλη και δύο φεμτοκυψέλες.....	45
Εικόνα 8: Κυψελωτό τριεπίπεδο δίκτυο με μακροκυψέλη, δύο φεμτοκυψέλες και τέσσερις VLC κυψέλες.....	48
Εικόνα 9: Μεταφορά δεδομένων σε ασύρματο CDMA δίκτυο.....	58
Εικόνα 10: Η μακροκυψέλη με τους 9 χρήστες στις αποστάσεις d_i από το BS.....	66
Εικόνα 11: Διεπίπεδο σύστημα με μία μακροκυψέλη και έξι φεμτοκυψέλες.....	75
Εικόνα 12: Τοπολογία τριεπίπεδου NOMA με μία μακροκυψέλη, έξι φεμτοκυψέλες και δεκαοχτώ VLC κυψέλες.....	84
Εικόνα 13: OAP που δε βρίσκονται μέσα σε φεμτοκυψέλες (σε μεγέθυνση).....	84
Εικόνα 14: Τοπολογία διεπίπεδου NOMA με μία μακροκυψέλη και δεκαπέντε φεμτοκυψέλες....	86
Εικόνα 15: Τοπολογία τριεπίπεδου NOMA με μία μακροκυψέλη, έξι φεμτοκυψέλες και δεκαοχτώ VLC κυψέλες.....	86

Πίνακας Πινάκων

Πίνακας 1: Τιμές Παραμέτρων Προσομοίωσης CDMA.....	59
Πίνακας 2: Τιμές Παραμέτρων Προσομοίωσης μονοεπίπεδου NOMA.....	66
Πίνακας 3: Τιμές ισχύος εκπομπής για τους 9 χρήστες της μακροκυψέλης στα μοντέλα CDMA και NOMA, με και χωρίς κοστολόγηση.....	72
Πίνακας 4: Τιμές της συνάρτησης ευχαρίστησης για τους 9 χρήστες της μακροκυψέλης στα μοντέλα CDMA και NOMA, με και χωρίς κοστολόγηση.....	72
Πίνακας 5: Τιμές Παρεμβολών(Interference) για τους 9 χρήστες της μακροκυψέλης στα μοντέλα CDMA και NOMA, με και χωρίς κοστολόγηση.....	73
Πίνακας 6: Ποσοστά % βελτίωσης της ισχύος των χρηστών στο μοντέλο NOMA σε σχέση με το CDMA.....	73
Πίνακας 7: Ποσοστά % βελτίωσης των παρεμβολών των χρηστών στο μοντέλο NOMA σε σχέση με το CDMA.....	73
Πίνακας 8: Ποσοστά % βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης των χρηστών στο μοντέλο NOMA σε σχέση με το CDMA.....	73
Πίνακας 9: Τιμές ισχύος για τους 9 χρήστες της μακροκυψέλης στα μοντέλα CDMA και NOMA.....	79
Πίνακας 10: Μέσες τιμές ισχύος για κάθε φεμτοκυψέλη στα μοντέλα CDMA και NOMA.....	79
Πίνακας 11: Τιμές ισχύος για τους τέσσερις χρήστες μιας φεμτοκυψέλης(τυχαία επιλογή φεμτοκυψέλης) στα μοντέλα CDMA και NOMA.....	79
Πίνακας 12: Τιμές συνάρτησης ευχαρίστησης για τους 9 χρήστες της μακροκυψέλης στα μοντέλα CDMA και NOMA.....	80
Πίνακας 13: Μέσες τιμές συνάρτησης ευχαρίστησης για κάθε φεμτοκυψέλη στα μοντέλα CDMA και NOMA.....	80
Πίνακας 14: Τιμές συνάρτησης ευχαρίστησης για τους τέσσερις χρήστες μιας φεμτοκυψέλης (τυχαία επιλογή φεμτοκυψέλης)στα μοντέλα CDMA και NOMA	80
Πίνακας 15: Τιμές παρεμβολών(Interference) για τους 9 χρήστες της μακροκυψέλης στα μοντέλα CDMA και NOMA.....	80
Πίνακας 16: Μέσες τιμές παρεμβολών(Interference) για κάθε φεμτοκυψέλη στα μοντέλα CDMA και NOMA.....	81
Πίνακας 17: Τιμές παρεμβολών(Interference) για τους τέσσερις χρήστες μιας φεμτοκυψέλης (τυχαία επιλογή φεμτοκυψέλης) στα μοντέλα CDMA και NOMA	81
Πίνακας 18: Ποσοστά % βελτίωσης της ισχύος των χρηστών της μακροκυψέλης στο μοντέλο NOMA σε σχέση με το CDMA.....	81
Πίνακας 19: Ποσοστά % βελτίωσης της ισχύος των χρηστών της φεμτοκυψέλης (τυχαία επιλογή φεμτοκυψέλης) στο μοντέλο NOMA σε σχέση με το CDMA.....	81
Πίνακας 20: Ποσοστά % βελτίωσης των παρεμβολών των χρηστών της μακροκυψέλης στο μοντέλο NOMA σε σχέση με το CDMA.....	82
Πίνακας 21: Ποσοστά % βελτίωσης των παρεμβολών των χρηστών της φεμτοκυψέλης στο μοντέλο NOMA σε σχέση με το CDMA.....	82
Πίνακας 22: Ποσοστά % βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης των χρηστών της μακροκυψέλης στο μοντέλο NOMA σε σχέση με το CDMA.....	82
Πίνακας 23: Ποσοστά % βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης των χρηστών της φεμτοκυψέλης στο μοντέλο NOMA σε σχέση με το CDMA.....	82
Πίνακας 24: Τιμές ισχύος των εννιά MUE χρηστών στα τρία επίπεδα.....	88
Πίνακας 25: Μέσες τιμές ισχύος για κάθε φεμτοκυψέλη στα δύο επίπεδα.....	89
Πίνακας 26: Τιμές ενεργειακής απόδοσης των 9 MUE χρηστών στα τρία επίπεδα.....	90
Πίνακας 27: Μέσες τιμές ενεργειακής απόδοσης κάθε φεμτοκυψέλης στα δύο επίπεδα.....	90

Πίνακας 28: Τιμές παρεμβολών των MUE χρηστών σε μονοεπίπεδο, διεπίπεδο και τριεπίπεδο NOMA.....	91
Πίνακας 29: Μέσες τιμές παρεμβολών των φεμτοκυψελών σε διεπίπεδο και τριεπίπεδο NOMA.....	92
Πίνακας 30: Τιμές παρεμβολών των 4 FUE μέσα σε ένα FAP σε διεπίπεδο και τριεπίπεδο NOMA.....	93
Πίνακας 31: Τιμές ισχύος των MUE σε διεπίπεδο και τριεπίπεδο NOMA.....	94
Πίνακας 32: Τιμές ενεργειακής απόδοσης των MUE σε διεπίπεδο και τριεπίπεδο NOMA.....	94
Πίνακας 33: Τιμές παρεμβολών των MUE σε διεπίπεδο και τριεπίπεδο NOMA.....	95

Πίνακας Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Ισχύς εκπομπής των χρηστών ως προς την απόσταση από το σταθμό βάσης στο σημείο ισορροπίας για το παίγνιο με και χωρίς κοστολόγηση στα μοντέλα NOMA και CDMA...	69
Διάγραμμα 2: Αποδοτικότητα ενέργειας ως προς την απόσταση από το σταθμό βάσης στο σημείο ισορροπίας για το παίγνιο με και χωρίς κοστολόγηση στα μοντέλα NOMA και CDMA.....	70
Διάγραμμα 3: Αριθμός επαναλήψεων αλγορίθμου για τη σύγκλιση στο τελικό διάλυμα της ισχύος εκπομπής στο NOMA.....	70
Διάγραμμα 4: Αριθμός επαναλήψεων αλγορίθμου για τη σύγκλιση στο τελικό διάλυμα της ισχύος εκπομπής στο CDMA.....	71
Διάγραμμα 5: Παρεμβολές σε σχέση με την απόσταση από το σταθμό βάσης, για το παίγνιο με και χωρίς κοστολόγηση στα μοντέλα NOMA και CDMA.....	71
Διάγραμμα 6: Ισχύς εκπομπής των MUE χρηστών ως προς την απόσταση από το σταθμό βάσης στο σημείο ισορροπίας για το παίγνιο στα μοντέλα NOMA και CDMA.....	76
Διάγραμμα 7: Μέση ισχύς εκπομπής σε κάθε φεμτοκυψέλη στα μοντέλα NOMA και CDMA....	76
Διάγραμμα 8: Αποδοτικότητα ενέργειας για τους χρήστες MUE, ως προς την απόσταση από το σταθμό βάσης στο σημείο ισορροπίας στα μοντέλα NOMA και CDMA.....	77
Διάγραμμα 9: Μέση αποδοτικότητα ενέργειας κάθε φεμτοκυψέλης στα μοντέλα NOMA και CDMA.....	77
Διάγραμμα 10: Παρεμβολές των χρηστών MUE σε σχέση με την απόσταση από το σταθμό βάσης, για τα μοντέλα NOMA και CDMA.....	78
Διάγραμμα 11: Μέση τιμή παρεμβολών σε κάθε φεμτοκυψέλη στα μοντέλα NOMA και CDMA.....	78
Διάγραμμα 12: Παρεμβολές των χρηστών FUE σε μία φεμτοκυψέλη, σε σχέση με την απόσταση από το σταθμό βάσης της, για τα μοντέλα NOMA και CDMA.....	78
Διάγραμμα 13: Ισχύς εκπομπής των MUE χρηστών ως προς την απόσταση από το σταθμό βάσης στο σημείο ισορροπίας για το παίγνιο σε μονοεπίπεδο, διεπίπεδο και τριεπίπεδο NOMA.....	87
Διάγραμμα 14: Ισχύς εκπομπής των MUE χρηστών ως προς την απόσταση από το σταθμό βάσης στο σημείο ισορροπίας για το παίγνιο σε μονοεπίπεδο, διεπίπεδο και τριεπίπεδο NOMA στην περιοχή (720-736)m.....	87
Διάγραμμα 15: Μέση ισχύς εκπομπής σε κάθε φεμτοκυψέλη σε διεπίπεδο και τριεπίπεδο NOMA.....	88
Διάγραμμα 16: Αποδοτικότητα ενέργειας των MUE χρηστών σε μονοεπίπεδο, διεπίπεδο και τριεπίπεδο NOMA.....	89
Διάγραμμα 17: Αποδοτικότητα ενέργειας των MUE χρηστών σε μονοεπίπεδο, διεπίπεδο και τριεπίπεδο NOMA, στην περιοχή των (310-400)m.....	89
Διάγραμμα 18: Μέση ενεργειακή απόδοση σε κάθε φεμτοκυψέλη σε διεπίπεδο και τριεπίπεδο NOMA.....	90
Διάγραμμα 19: Παρεμβολές των MUE χρηστών σε μονοεπίπεδο, διεπίπεδο και τριεπίπεδο NOMA.....	91
Διάγραμμα 20: Παρεμβολές των FUE χρηστών σε διεπίπεδο και τριεπίπεδο NOMA.....	92
Διάγραμμα 21: Παρεμβολές των FUE χρηστών μέσα σε ένα FAP σε διεπίπεδο και τριεπίπεδο NOMA.....	92
Διάγραμμα 22: Ισχύς των MUE χρηστών στα δύο σενάρια.....	93
Διάγραμμα 23: Ενεργειακή απόδοση των MUE χρηστών στα δύο σενάρια.....	94
Διάγραμμα 24: Παρεμβολές των MUE χρηστών στα δύο σενάρια.....	94

Περιεχόμενα

Περίληψη	7
Abstract	10
Ευχαριστίες	12
Πίνακας Εικόνων	15
Πίνακας Πινάκων	16
Πίνακας Διαγραμμάτων	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο	23
Εισαγωγή.....	24
1.1 Ιστορική Εξέλιξη Συστημάτων Κινητών Επικοινωνιών	25
1.2 Δίκτυα 5 ^{ης} Γενιάς.....	26
1.3 Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας	26
1.4 Δομή Διπλωματικής Εργασίας	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο	29
Μοντέλο Μη Ορθογωνικής Πολλαπλής Πρόσβασης (NOMA)	30
2.1 Εισαγωγή.....	31
2.2 Μοντέλο Μη Ορθογωνικής Πολλαπλής Πρόσβασης (NOMA).....	31
2.2.1 Εισαγωγή στο Μοντέλο NOMA	31
2.2.2 Μοντέλο NOMA στη Ζεύξη Ανόδου	31
2.2.3 Μοντέλο NOMA στη Ζεύξη Καθόδου	33
2.3 Διάκριση Υπηρεσιών για Χρήστες.....	38
2.3.1 Υπηρεσίες Πραγματικού Χρόνου	38
2.3.2 Υπηρεσίες Μη-Πραγματικού Χρόνου	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο	41
Κατανομή Πόρων σε Ασύρματα Δίκτυα NOMA σε Τριεπίπεδο Σύστημα: Μακροκυψέλη, Φεμτοκυψέλη & Κυψέλη Μετάδοσης με Χρήση Ορατού Φωτός.....	42
3.1 Εισαγωγή	43
3.2 Τριεπίπεδο Σύστημα.....	43
3.3 Μοντέλο Συστήματος και Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	44
3.3.1. Υπολογισμός Σηματοθορυβικού Λόγου (SINR)	44
3.3.2. Συνάρτηση Ευχαρίστησης	50
3.3.3. Συνάρτηση Απόδοσης.....	50

3.4 Μη Συνεργατικό Παίγνιο Ελέγχου Ισχύος Εκπομπής στη Ζεύξη Ανόδου χωρίς Πολιτική Κοστολόγησης.....	51
3.4.1 Ορισμός.....	51
3.5 Μη Συνεργατικό Παίγνιο Ελέγχου Ισχύος Εκπομπής στη Ζεύξη Ανόδου με Πολιτική Κοστολόγησης.....	52
3.5.1 Εισαγωγή	52
3.5.2 Ορισμός συνάρτησης ευχαρίστησης.....	52
3.5.3 Εύρεση σημείου ισορροπίας κατά Nash του μη-συνεργατικού παιγνίου με χρήση κοστολόγησης.....	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4°	55
ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΠΟΡΩΝ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ CDMA.....	56
4.1 Εισαγωγή	57
4.2 Ορισμός Κωδικοποίησης CDMA.....	57
4.3 Κατανομή Πόρων σε Ασύρματα CDMA Δίκτυα.....	58
4.3.1 Εισαγωγή	58
4.3.2 Παράμετροι Δικτύου.....	59
4.3.3 Σύνολο Παρεμβολών I_{-i}	60
4.3.4 Μη Συνεργατικό Παίγνιο Ελέγχου Ισχύος Εκπομπής στη Ζεύξη Ανόδου χωρίς Πολιτική Κοστολόγησης	60
4.3.5 Μη Συνεργατικό Παίγνιο Ελέγχου Ισχύος Εκπομπής στη Ζεύξη Ανόδου με Πολιτική Κοστολόγησης	60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5°	63
ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ.....	64
5.1 Εισαγωγή	65
5.2 Μονοεπίπεδα Ασύρματα NOMA Δίκτυα.....	65
5.2.1 Σενάριο Προσομοίωσης.....	65
5.2.2 Αλγόριθμος Κατανομής Ισχύος Εκπομπής Χωρίς Πολιτική Κοστολόγησης	66
5.2.3 Αλγόριθμος Κατανομής Ισχύος Εκπομπής με Πολιτική Κοστολόγησης.....	67
5.2.4 Αριθμητικά Αποτελέσματα - Συγκρίσεις.....	68
5.3 Διεπίπεδα Ασύρματα NOMA Δίκτυα	74
5.3.1 Σενάριο Προσομοίωσης.....	74
5.3.2 Αλγόριθμος Κατανομής Ισχύος Εκπομπής.....	75
5.3.3 Αριθμητικά Αποτελέσματα - Συγκρίσεις.....	75
5.4 Τριεπίπεδα Ασύρματα NOMA Δίκτυα.....	82
5.4.1 Σενάριο Προσομοίωσης.....	82
5.4.2 Αλγόριθμος Κατανομής Ισχύος Εκπομπής.....	87

5.4.3 Σενάριο 1ο: Αριθμητικά Αποτελέσματα – Συγκρίσεις	87
5.4.3 Σενάριο 2ο: Αριθμητικά Αποτελέσματα – Συγκρίσεις.....	93
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο	97
ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....	98
6.1 Επίλογος	99
6.2 Μελλοντική Εργασία.....	99
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	100

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

Εισαγωγή

- 1.1 Ιστορική Εξέλιξη Συστημάτων Κινητών Επικοινωνιών
- 1.2 Δίκτυα 5^{ης} Γενιάς
- 1.3 Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας
- 1.4 Δομή Διπλωματικής Εργασίας

1.1 Ιστορική Εξέλιξη Συστημάτων Κινητών Επικοινωνιών

Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν σημειωθεί ραγδαίες τεχνολογικές εξελίξεις σε πολλούς τομείς της καθημερινότητάς μας. Οι κινητές επικοινωνίες είναι ένας κλάδος ο οποίος εξελίσσεται διαρκώς με αυξανόμενο ρυθμό. Εξετάζοντας τις τεχνολογίες από το 1G έως το 4G, μπορούμε να δούμε ότι έχουν σημειωθεί τόσο καινοτομίες όσο και βελτιώσεις. Στην παρούσα ενότητα, παρατίθεται μια σύντομη ιστορία των κινητών τηλεφώνων. [1]

Το 1857 ο Clark Maxwell διατύπωσε τη θεωρία της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, η οποία χρησιμοποιήθηκε ως βάση για την εφεύρεση της ραδιοφωνικής μετάδοσης τον 20^ο αιώνα. Οι πρώτοι, όμως, προάγγελοι των σημερινών κινητών συσκευών παρουσιάστηκαν στο τέλος της δεκαετίας του 1940 στις ΗΠΑ και του 1950 στην Ευρώπη. Αυτά τα «κινητά» τηλέφωνα περιορίζονταν από την περιορισμένη δυνατότητα κινητικότητας και την κακή εξυπηρέτηση. Επίσης, οι συσκευές αυτές ήταν αρκετά βαριές και πολύ ακριβές.

Η πρώτη γενιά των κινητών επικοινωνιών (1G) παρουσιάστηκε το 1970. Αυτά τα συστήματα αναφέρονταν ως αναλογικά κυψελοειδή συστήματα τηλεφωνίας τα οποία χρησιμοποιούνταν μόνο για την υπηρεσία φωνής. Οι συσκευές παρ'όλα αυτά ήταν ελαφρύτερες και πιο οικονομικές από τους προκατόχους τους. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνταν από τα συστήματα 1G ήταν οι εξής: Σύστημα Προηγμένου Κινητού Τηλεφώνου (Advanced Mobile Phone System – AMPS), Επικοινωνιακά Συστήματα Πλήρους Πρόσβασης (Total Access Communication Systems – TACS) και Σκανδιναβικό Κινητό Τηλέφωνο (Nordic Mobile Telephone – NMT). Η παγκόσμια αγορά κινητών τηλεφώνων αυξήθηκε από 30% σε 50% ετησίως και ο αριθμός των συνδρομητών αυξήθηκε στους περίπου 20 εκατομμύρια μέχρι και το 1990.

Στις αρχές του 1990, παρουσιάστηκαν τα τηλέφωνα 2G τα οποία χρησιμοποιούσαν την τεχνολογία GSM (Global System for Mobile Communications), η οποία χρησιμοποιεί ψηφιακά συστήματα διαμόρφωσης, όπως η τεχνολογία πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση χρόνου (Time Division Multiple Access - TDMA) και πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση κώδικα (Code Division Multiple Access - CDMA), με στόχο τη βελτίωση της ποιότητας φωνής. Παρ'όλα αυτά το δίκτυο προσέφερε περιορισμένη εξυπηρέτηση δεδομένων.

Τα συστήματα τρίτης γενιάς (3G) αποτελούν μια προσπάθεια για τη δημιουργία ενός διεθνούς προτύπου για 3G κινητά, η οποία ελέγχεται μέσω της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (International Telecom Union - ITU), υπό την αιγίδα του προγράμματος IMT-2000. Τα συστήματα αυτά συνδυάζουν υψηλής ταχύτητας κινητή πρόσβαση, με υπηρεσίες βασισμένες στο πρωτόκολλο Διαδικτύου (Internet Protocol – IP). Εκτός από την ταχύτητα μετάδοσης, βελτίωση σημειώθηκε και στην ποιότητα των υπηρεσιών (Quality of Services – QoS). Συγκεκριμένα, το 3G προσφέρει τη δυνατότητα χρήσης εφαρμογών ήχου, γραφικών και βίντεο. Με το 3G είναι δυνατόν να παρακολουθεί κάποιος ένα βίντεο και παράλληλα να συμμετέχει σε βίντεο-κλήση.

Σήμερα, η επικρατούσα γενιά είναι αυτή του 4G. Οι ρυθμοί μετάδοσης φτάνουν τα 20Mbps ενώ παράλληλα έχει γίνει αλματώδης βελτίωση στην ποιότητα των υπηρεσιών (Quality of Services – QoS). Τα 4G συστήματα αναμένεται να επιλύσουν τα εναπομείναντα προβλήματα που είχαν σημειωθεί στα 3G συστήματα και να παρέχουν ένα ευρύ φάσμα νέων υπηρεσιών, οι οποίες θα κυμαίνονται από υψηλής ποιότητας φωνή, σε βίντεο υψηλής ευκρίνειας και σε υψηλής ταχύτητας μεταφορά δεδομένων. Ο όρος 4G χρησιμοποιείται ευρέως για να συμπεριλάβει διάφορους τύπους ευρυζωνικής πρόσβασης (broadband) και όχι μόνο κυψελοειδή τηλεφωνικά συστήματα.

Το σχέδιο Μακροχρόνιας Εξέλιξης (Long Term Evolution – LTE), παρουσιάστηκε στο Συνεταιριστικό Έργο 3^{ης} Γενιάς Κινητών Επικοινωνιών (3rd Generation Partnership Project –

3GPP) [2] και επικεντρώθηκε στην ενίσχυση της παγκόσμιας επίγειας ραδιοπρόσβασης (Universal Terrestrial Radio Access - UTRA) και τη βελτιστοποίηση της αρχιτεκτονικής ραδιοπρόσβασης. Έτσι δικαιολογείται η επιπρόσθετη ονομασία Δίκτυο Παγκόσμιας Επίγειας Ραδιοπρόσβασης (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network - EUTRAN). Οι λόγοι που οδήγησαν στην ανάπτυξη του LTE ήταν ποικίλοι [3]:

- 1) η ανάγκη για συνέχεια της ανταγωνιστικότητας του 3G συστήματος στο μέλλον
- 2) η απαίτηση των χρηστών για υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και καλύτερης ποιότητας υπηρεσιών (QoS)
- 3) η συνεχόμενη ζήτηση για μείωση του κόστους των τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών
- 4) χαμηλότερη πολυπλοκότητα και
- 5) δυνατότητα για λογική κατανάλωση ισχύος στα τερματικά

1.2 Δίκτυα 5^{ης} Γενιάς

Κάθε γενιά κινητής τηλεφωνίας καλείται να ικανοποιήσει μια επιπλέον ανάγκη σε σχέση με τον προκάτοχό της. Για παράδειγμα, η μετάβαση από το 2G στο 3G επέτρεψε την πρόσβαση στο διαδίκτυο από τις κινητές συσκευές των χρηστών. Το 3.5G με το συνδυασμό των ευρυζωνικών δικτύων και των έξυπνων συσκευών (smartphones) επέφερε μια σημαντικά αναβαθμισμένη εμπειρία στην πλοήγηση των χρηστών στο διαδίκτυο μέσω του κινητού τηλεφώνου. Η μετάβαση από το 3.5G στο 4G έχει προσφέρει στους χρήστες μεγαλύτερες ταχύτητες δεδομένων και χαμηλότερα ποσοστά λαθών. Δεδομένης, λοιπόν, της συνεχούς ανάπτυξης του κινητού διαδικτύου (mobile Internet) και του διαδικτύου οντοτήτων (Internet of Things - IoT), η οποία συνεπάγεται την αύξηση της κίνησης στα ασύρματα δίκτυα, η ανάγκη για δίκτυα 5ης γενιάς (5G), είναι πλέον αναγκαία.

Η 5η γενιά ασύρματης δικτύωσης στοχεύει να δώσει λύση στα εξής προβλήματα: [4]

- Μεγαλύτερη αποδοτικότητα του φάσματος (αυτή η απαίτηση απορρέει από την αναμενόμενη αύξηση στον όγκο των δεδομένων)
- Μαζική συνδεσιμότητα συσκευών (συνέπεια του Internet of Things (IoT))
- Μικρότερη καθυστέρηση

Γι' αυτό το λόγο έχει πρόσφατα προταθεί το μοντέλο μη ορθογωνικής πολλαπλής πρόσβασης (Non-Orthogonal Multiple Access - NOMA), το οποίο αποτελεί ελπιδοφόρα τεχνολογία στα ασύρματα δίκτυα 5ης γενιάς, λόγω της ανώτερης αποδοτικότητας φάσματος που παρέχει σε σχέση με τα μοντέλα ορθογωνικής πολλαπλής πρόσβασης. Το μοντέλο θα αναλυθεί λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 2.

1.3 Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι καταρχάς η βέλτιστη κατανομή πόρων (ισχύς εκπομπής, ενεργειακή απόδοση, ρυθμός μετάδοσης και παρεμβολές) σε πολυεπίπεδα ασύρματα δίκτυα 5^{ης} γενιάς με τη χρήση του μοντέλου NOMA και κατά δεύτερον η σύγκριση του καινοτόμου μοντέλου αυτού με το μοντέλο πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση κώδικα (Code Division Multiple Access - CDMA), ώστε να επισημανθεί η σαφής καλύτερη απόδοσή του σε προβλήματα κατανομής πόρων του συστήματος. Για τη μελέτη αυτού του προβλήματος έγινε η χρήση της Θεωρίας Παιγνίων και η διατύπωση του προβλήματος ως ένα μη-συνεργατικό παίγνιο, με στόχο να βρεθεί το σημείο ισορροπίας κατά Nash το οποίο και θα αποτελέσει τη βέλτιστη λύση του προβλήματος. Τέλος, εισήχθησαν πολιτικές κοστολόγησης στους διαθέσιμους πόρους του

δικτύου, ώστε να ελεγχθεί η επίδρασή τους στη συμπεριφορά των χρηστών.

1.4 Δομή Διπλωματικής Εργασίας

Το υπόλοιπο κείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας οργανώνεται στα εξής κεφάλαια:

Κεφάλαιο 2^ο: Αρχικά θα παρουσιαστεί εκτενώς το μοντέλο μη ορθογωνικής πολλαπλής πρόσβασης (Non-Orthogonal Multiple Access - NOMA). Σε αυτό το κεφάλαιο θα δοθεί το θεωρητικό υπόβαθρο του μοντέλου και θα παρατεθούν κάποια παραδείγματα με στόχο την καλύτερη κατανόηση.

Κεφάλαιο 3^ο: Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει περιγραφή του προβλήματος βέλτιστης κατανομής πόρων, μέσα από τη διατύπωση του μαθηματικού μοντέλου. Θα δοθούν ορισμοί μέσα από τη Θεωρία των Παιγνίων και θα επεξηγηθεί το πρόβλημα που καλείται να επιλύσει η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία.

Κεφάλαιο 4^ο: Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει μία σύντομη περιγραφή του μοντέλου πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση κώδικα (Code Division Multiple Access – CDMA), κυρίως για εγκυκλοπαιδικούς σκοπούς, δεδομένου ότι θα γίνει σύγκριση αυτού με το μοντέλο NOMA.

Κεφάλαιο 5^ο: Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει η παρουσίαση του αλγορίθμου που χρησιμοποιήθηκε στο περιβάλλον MATLAB για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων, καθώς και θα δοθούν οι τιμές των σταθερών που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτό το πρόβλημα. Τέλος, θα παρατεθούν όλα τα αποτελέσματα, σε μορφή πινάκων και διαγραμμάτων, καθώς και θα αναλυθούν με στόχο την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Κεφάλαιο 6^ο: Εδώ, θα γίνει μια καθολική παρουσίαση των συμπερασμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καθώς και θα προταθούν ιδέες για μελλοντική εργασία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

Μοντέλο Μη Ορθογωνικής Πολλαπλής Πρόσβασης (NOMA)

- 2.1 Εισαγωγή
- 2.2 Μοντέλο Μη Ορθογωνικής Πολλαπλής Πρόσβασης (NOMA)
- 2.3 Διάκριση Υπηρεσιών για Χρήστες

2.1 Εισαγωγή

Πριν ασχοληθούμε αναλυτικά με την περιγραφή και δόμηση του μαθηματικού μοντέλου που θα αποτελέσει τη βάση του προβλήματος βέλτιστης κατανομής πόρων, αξίζει να γίνει μια εισαγωγή στο ασύρματο περιβάλλον που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί καθώς και στο καινοτόμο μη ορθογωνικό μοντέλο πολλαπλής πρόσβασης NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access). Το αρχικό δίκτυο αποτελείται από μία κυνέλη που απαρτίζεται από ένα σταθμό βάσης (Base Station, BS) και έναν αριθμό χρηστών ή αλλιώς Τερματικών Σημείων (Terminal Points), οι οποίοι βρίσκονται σε συγκεκριμένες αποστάσεις από το σταθμό βάσης. Οι χρήστες κατηγοριοποιούνται με βάση τις υπηρεσίες που απαιτούν, σε χρήστες πραγματικού χρόνου (Real Time users - RT) και χρήστες μη πραγματικού χρόνου (Non-Real Time users - NRT) και ανταλλάσσουν πληροφορίες με το σταθμό βάσης χρησιμοποιώντας την τεχνική πρόσβασης NOMA.

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, θα μελετηθεί το μοντέλο NOMA σε ασύρματα δίκτυα κατά τη ζεύξη ανόδου (uplink), όμως για εγκυκλοπαιδικούς λόγους θα αναλυθεί και το NOMA κατά τη ζεύξη καθόδου (downlink) και θα επισημανθούν οι διαφορές των δύο αυτών περιπτώσεων.

2.2 Μοντέλο Μη Ορθογωνικής Πολλαπλής Πρόσβασης (NOMA)

2.2.1 Εισαγωγή στο Μοντέλο NOMA

Το μοντέλο αυτό επιτρέπει στους διάφορους χρήστες να μεταδίδουν στον ίδιο χρόνο ή συχνότητα μέσω της πολυπλεξίας στο πεδίο της ισχύος ή μέσω της πολυπλεξίας με τη χρήση κώδικα. Το κυριότερο χαρακτηριστικό του μοντέλου NOMA είναι ότι γίνεται η χρήση ενός αποδέκτη διαδοχικής ακύρωσης παρεμβολών (Successive Interference Cancellation - SIC) στους χρήστες, όταν αναφερόμαστε στη ζεύξη καθόδου (downlink) ή στο σταθμό βάσης, όταν αναφερόμαστε στη ζεύξη ανόδου (uplink). Κατά την αποκωδικοποίηση του σήματος από τους χρήστες (ή το BS) με τη χρήση του SIC μηχανισμού, κάθε σήμα που προορίζεται σε έναν συγκεκριμένο χρήστη (ή μεταδίδεται προς το BS από ένα συγκεκριμένο χρήστη) αποκωδικοποιείται χωρίς να υπεισέρχονται οι παρεμβολές (interferences) των χρηστών με καλύτερη ποιότητα καναλιού μετάδοσης (channel gain), όταν αναφερόμαστε στη ζεύξη καθόδου ή με χειρότερη ποιότητα καναλιού μετάδοσης, όταν αναφερόμαστε στη ζεύξη ανόδου.

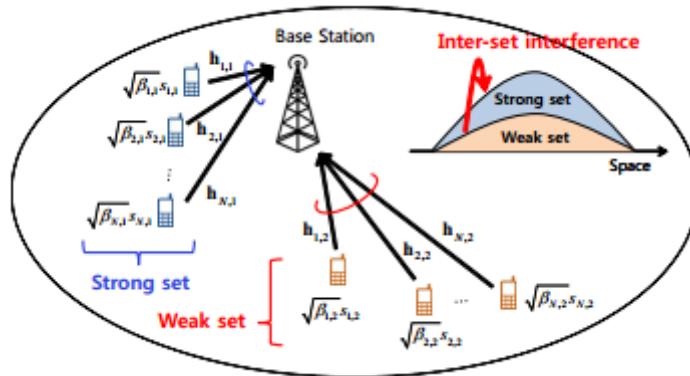
Στη συνέχεια αναλύεται το μοντέλο NOMA τόσο για τη ζεύξη καθόδου, όσο και για τη ζεύξη ανόδου.

2.2.2 Μοντέλο NOMA στη Ζεύξη Ανόδου

Ως ζεύξη ανόδου (uplink ή σε συντομία UL) σε ένα ασύρματο δίκτυο, ορίζουμε την κατεύθυνση από το κινητό τερματικό προς το σταθμό βάσης. Σε αυτή την περίπτωση, ο SIC μηχανισμός υλοποιείται στο σταθμό βάσης, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την αποκωδικοποίηση των σημάτων που μεταδίδονται από τους χρήστες. Για την αποκωδικοποίηση, γίνεται ταξινόμηση των χρηστών κατά φθίνουσα ποιότητα καναλιού μετάδοσης (channel gain), δηλαδή αποκωδικοποιείται πρώτα ο χρήστης με το καλύτερο κανάλι μετάδοσης και κατά συνέπεια δέχεται τις παρεμβολές από όλους τους χρήστες με χειρότερο κανάλι μετάδοσης από αυτόν.

Παρακάτω παρατίθεται ένα παράδειγμα από τη βιβλιογραφία, ώστε να γίνει πιο κατανοητό το μοντέλο στη ζεύξη ανόδου. [5]

Υποθέτουμε ότι στην κυψέλη του παρακάτω συστήματος, υπάρχει ένας σταθμός βάσης με N κεραίες λήψεως και $2N$ χρήστες οι οποίοι ομαδοποιούνται σε δύο ομάδες των N χρηστών η κάθε ομάδα. Η μία ομάδα χαρακτηρίζεται ως “ισχυρή”, λόγω της καλής ποιότητας καναλιού μετάδοσης των χρηστών και η άλλη ομάδα χαρακτηρίζεται ως “αδύναμη”, λόγω της κακής ποιότητας καναλιού μετάδοσης των χρηστών.



Εικόνα 1: Uplink NOMA με N κεραίες λήψεως

Ορίζουμε ως $H_1 = [h_{1,1} \dots h_{N,1}]$ τον πίνακα των κερδών καναλιού των χρηστών της “ισχυρής” ομάδας και ως $H_2 = [h_{1,2} \dots h_{N,2}]$ τον πίνακα κερδών καναλιού των χρηστών της “αδύναμης” ομάδας. Με $h_{n,1}$ και $h_{m,2}$ δηλώνουμε τους $N \times 1$ πίνακες των καναλιών του n -ιστού και m -ιστού χρήστη στην “ισχυρή” και “αδύναμη” ομάδα αντίστοιχα.

Το ληφθέν σήμα στο σταθμό βάσης για όλους τους χρήστες, ορίζεται ως εξής:

$$y = (H_1 * x_1 + H_2 * x_2) + n \quad (2.1)$$

όπου $x_1 = [\sqrt{a_{1,1}} s_{1,1} \dots \sqrt{a_{N,1}} s_{N,1}]^T$ και $x_2 = [\sqrt{a_{1,2}} s_{1,2} \dots \sqrt{a_{N,2}} s_{N,2}]^T$ είναι οι πίνακες των εκπεμπόμενων σημάτων των δύο ομάδων. Ως $s_{n,1}$ και $s_{m,2}$ ορίζουμε τα σήματα και ως $a_{n,1}$ και $a_{m,2}$ τους συντελεστές ελέγχου ισχύος του n -ιστού και m -ιστού χρήστη της “ισχυρής” και “αδύναμης” ομάδας αντίστοιχα. Συνεπώς, ο σηματοθορυβικός λόγος SINR για τις δύο ομάδες των χρηστών, για τον τυχαίο χρήστη n , ορίζεται ως εξής:

Για την “ισχυρή” ομάδα ισχύει:

$$SINR_{n,1} = \frac{\alpha_{n,1} * P_{n,1}}{\sum_{i=1}^N \alpha_{i,2} * P_{i,2} + \sigma^2} \quad (2.2)$$

όπου το P είναι η μεταδιδόμενη ισχύς και το σ αντικατοπτρίζει το λευκό θόρυβο. Από αυτόν τον τύπο, λοιπόν, συμπεραίνουμε ότι οι χρήστες με την καλύτερη ποιότητα καναλιού ακούν το θόρυβο όλων των χρηστών με χειρότερη ποιότητα καναλιού από αυτούς. Το φαινόμενο αυτό και ο συγκεκριμένος τύπος παρεμβολών ονομάζεται inter-set interference, δηλαδή παρεμβολές μεταξύ των 2 ομάδων.

Για την “αδύναμη” ομάδα ισχύει:

$$SINR_{n,2} = \frac{\alpha_{n,2} * P_{n,2}}{\sigma^2} \quad (2.3)$$

δηλαδή οι χρήστες με τη χειρότερη ποιότητα καναλιού, δεν ακούν καθόλου θόρυβο, παρά μόνο το λευκό.

2.2.3 Μοντέλο NOMA στη Ζεύξη Καθόδου

Ως ζεύξη καθόδου (downlink ή σε συντομία DL) σε ένα ασύρματο δίκτυο, ορίζουμε την κατεύθυνση από το σταθμό βάσης προς το κινητό τερματικό. Σε αυτή την περίπτωση, ο SIC μηχανισμός υλοποιείται στο κάθε τερματικό ξεχωριστά, το οποίο λαμβάνει σήμα από το σταθμό βάσης. Για την αποκωδικοποίηση, γίνεται μια ταξινόμηση των χρηστών κατά αύξουσα ποιότητα καναλιού, δηλαδή αποκωδικοποιείται πρώτα ο χρήστης με τη χειρότερη ποιότητα καναλιού και κατά συνέπεια δέχεται το θόρυβο από όλους τους χρήστες με καλύτερη ποιότητα καναλιού από αυτόν.

Παρακάτω παρατίθενται δύο παραδείγματα από τη βιβλιογραφία, όπου το πρώτο αφορά πολυπλεξία στο πεδίο της ισχύος και το δεύτερο στο πεδίο του κώδικα, με στόχο να γίνει πιο κατανοητό το μοντέλο στη ζεύξη καθόδου.

2.2.3.1 Πολυπλεξία στο Πεδίο της Ισχύος

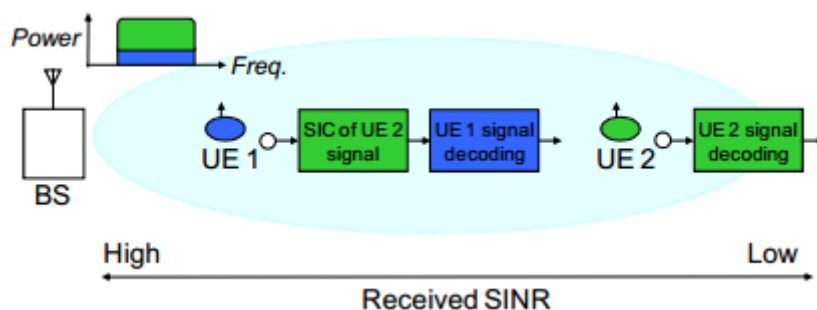
Σε αυτή την κατηγορία, διαφορετικοί χρήστες μεταδίδουν στον ίδιο χρόνο ή συχνότητα (superposition), αλλά με διαφορετικά επίπεδα ισχύος (power allocation) ανάλογα με την κατάσταση του καναλιού του κάθε χρήστη. Συγκεκριμένα, το μοντέλο NOMA αναθέτει μικρότερη ισχύ εκπομπής σε χρήστες με καλύτερες συνθήκες καναλιού. Σχηματικά αποδίδεται ως εξής: [6]



Εικόνα 2: Μορφή σήματος NOMA στη συχνότητα

Για να γίνει πιο κατανοητός ο τρόπος λειτουργίας του μοντέλου NOMA με πολυπλεξία στο πεδίο της συχνότητας, παρατίθεται το παρακάτω παράδειγμα: [7]

Έστω ότι έχουμε μία κυψέλη κάτω ζεύξης (downlink) με ένα σταθμό βάσης και δύο χρήστες ως εξής:



Εικόνα 3: Χρήση του SIC μηχανισμού από το NOMA σύστημα στη ζεύξη καθόδου με δύο χρήστες και ένα σταθμό βάσης

Ο σταθμός βάσης στέλνει το σήμα $UE(i)$ όπου $i=1,2$ για τους χρήστες 1 και 2 αντίστοιχα, με ισχύ εκπομπής (downlink transmission power) P_i , όπου $P_1 + P_2 \leq P$. Τα δύο αυτά σήματα θα

υπερτεθούν ως εξής: $x = \sqrt{P_1} * x_1 + \sqrt{P_2} * x_2$. Το λαμβανόμενο σήμα στον χρήστη i θα έχει την εξής μορφή: $y_i = h_i * x + w_i$, όπου το h_i είναι το κανάλι μετάδοσης μεταξύ του χρήστη i και του σταθμού βάσης και το w_i είναι ο θόρυβος Gauss, συμπεριλαμβανομένης της ενδοκυψελικής παρεμβολής. Η πυκνότητα ισχύος του θορύβου είναι το $N_{0,i}$.

Για την αποκωδικοποίηση των σημάτων, ταξινομούνται οι χρήστες κατά αύξουσα ποιότητα καναλιού, δηλαδή εάν ο χρήστης 1 έχει καλύτερη ποιότητα καναλιού από τον χρήστη 2 (δηλαδή πρακτικά βρίσκεται πιο κοντά στο σταθμό βάσης), τότε το μήνυμα που προορίζεται για το χρήστη 2 θα αποκωδικοποιηθεί πρώτο χωρίς να ενεργοποιηθεί ο SIC μηχανισμός. Ο χρήστης 2 συνεπώς θα αποκωδικοποιήσει το σήμα x_2 και θα αφαιρέσει τη συνιστώσα αυτή από το y_1 (δηλαδή το λαμβανόμενο σήμα στο χρήστη 1). Συνεπώς ο χρήστης 1 θα αποκωδικοποιήσει το σήμα x_1 χωρίς παρεμβολή από το x_2 .

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η απόδοση (throughput), ορίζεται ως εξής:

χρήστης 1:

$$SINR_1 = \log_2\left(1 + \frac{P_1 * |h_1|^2}{N_{0,1}}\right) \quad (2.4)$$

χρήστης 2:

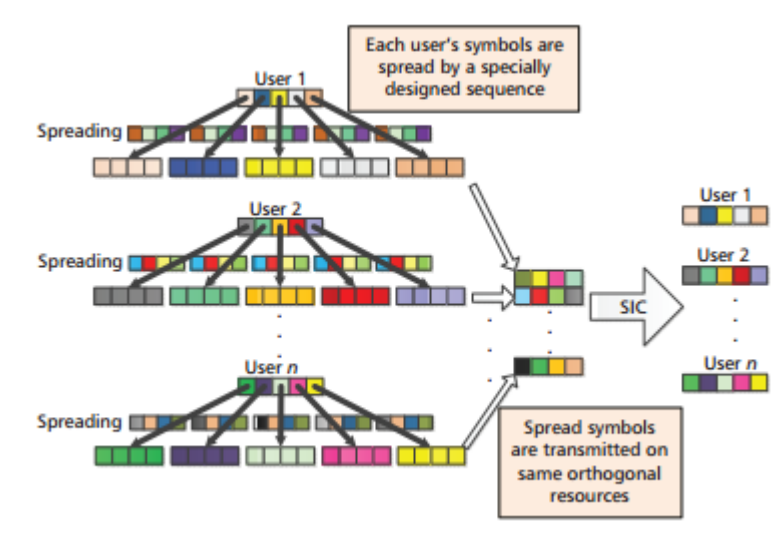
$$SINR_2 = \log_2\left(1 + \frac{P_2 * |h_2|^2}{P_1 * |h_2|^2 + N_{0,2}}\right) \quad (2.5)$$

Δηλαδή βλέπουμε ότι στον παρονομαστή του SINR για τον πρώτο χρήστη δεν υπάρχει καμία παρεμβολή από τον χρήστη 2, ενώ για το δεύτερο χρήστη η παρεμβολή από το χρήστη 1 έχει προστεθεί στο λευκό θόρυβο στον παρονομαστή.

2.2.3.2 Πολυπλεξία στο Πεδίο του Κώδικα

Στην πολυπλεξία στο πεδίο του κώδικα, σε διαφορετικούς χρήστες ανατίθενται διαφορετικοί κώδικες και έπειτα αυτοί μπορούν να μεταδώσουν στον ίδιο χρόνο ή συχνότητα (superposition). Αυτή η κατηγορία είναι παρόμοια με την τεχνική Πολλαπλής Πρόσβασης με Διαίρεση Κώδικα (Code Division Multiple Access - CDMA). Για να γίνει πιο κατανοητός ο τρόπος λειτουργίας του μοντέλου NOMA με πολυπλεξία στο πεδίο του κώδικα, παρατίθεται το παρακάτω παράδειγμα, στο οποίο αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας του μοντέλου MUSA (Multi User Sparse Access): [4][8]

Έστω ότι έχουμε K χρήστες οι οποίοι μεταδίδουν σειρές συμβόλων. Σε κάθε χρήστη ανατίθεται μια μοναδική ακολουθία εξάπλωσης (spreading sequence). Κάθε μεταδιδόμενο σύμβολο του χρήστη πολυπλέκεται με την ακολουθία εξάπλωσης που έχει ανατεθεί στο χρήστη: [8]



Εικόνα 4: Σύστημα ζεύξης ανόδου MUSA

Έπειτα, όλα τα σύμβολα μεταδίδονται στον ίδιο χρόνο ή συχνότητα.

Υποθέτουμε ότι στο σύστημα MUSA του παραδείγματος αυτού, υπάρχουν N υποφέρουσες (subcarriers), K χρήστες και κάθε χρήστης μεταδίδει ένα σύμβολο τη φορά. Υπερχείλιση παρατηρείται όταν $K > N$, κάτι το οποίο προκαλεί παρεμβολές μεταξύ των χρηστών. [4]

Το λαμβανόμενο σήμα στον υποφορέα $n \in N$ ορίζεται ως εξής:

$$\mathbf{y}_n = \sum_{k=1}^K \mathbf{g}_{n,k} s_{n,k} x_k + \mathbf{u}_n \quad (2.6)$$

όπου:

x_k είναι το μεταδιδόμενο σύμβολο του χρήστη $k \in K$

$s_{n,k}$ είναι η n -ιοστή συνιστώσα της ακολουθίας εξάπλωσης s_k του χρήστη k

$g_{n,k}$ είναι το κέρδος καναλιού του χρήστη k στο n -ιοστό υποφορέα

u_n είναι ο θόρυβος

Συνδυάζοντας όλα τα λαμβανόμενα σήματα από όλους του υποφορείς, δημιουργούμε τον εξής πίνακα:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{v} \quad (2.7)$$

όπου:

$$\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_N)^T$$

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_K)^T$$

\mathbf{H} = πίνακας καναλιού με διαστάσεις $N \times K$, όπου το στοιχείο $h_{n,k}$ αντιστοιχεί στο $g_{n,k} s_{n,k}$

$$\mathbf{v} = (v_1, v_2, \dots, v_N)^T$$

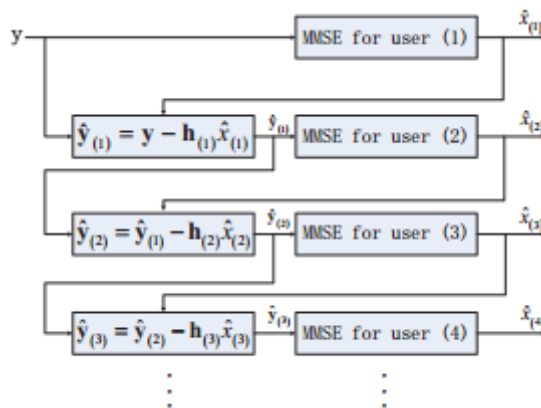
Στον παραλήπτη θα ενεργοποιηθεί ο μηχανισμός SIC με στόχο να επανακτηθεί το σήμα κάθε χρήστη. Δεδομένου του σήματος \mathbf{y} (όπως περιγράφηκε στην ανωτέρω σχέση), χρησιμοποιούμε ανιχνευτή του μικρότερου μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Minimum Mean Square Error detector - MMSE) με στόχο να βρούμε τον πίνακα μετασχηματισμού, ο οποίος να ελαχιστοποιεί το μέσο τετραγωνικό σφάλμα μεταξύ του πίνακα μετάδοσης \mathbf{x} και του αναμενόμενου πίνακα $\mathbf{x}' = \mathbf{W}_{MMSE} * \mathbf{y}$ ως εξής:

$$W_{MMSE} = \min_w E[||x - Wy||^2] \quad (2.8)$$

του οποίου η λύση είναι:

$$W_{MMSE} = (H^H H + \sigma^2 I)^{-1} H^H \quad (2.9)$$

Έπειτα, ο μηχανισμός SIC υλοποιείται ως εξής:



Εικόνα 5: Αποδέκτης SIC βασισμένος σε MMSE

Αρχικά, βρίσκουμε το SINR για κάθε χρήστη και έπειτα ταξινομούμε τους χρήστες κατά φθίνον SINR, δηλαδή ο χρήστης με το υψηλότερο SINR θα αποκωδικοποιηθεί πρώτος, χρησιμοποιώντας τον ανιχνευτή MMSE, ο οποίος δίνει σαν αποτέλεσμα την αναμενόμενη τιμή $x_1' = w_1 * y$, όπου το w_1 είναι η πρώτη γραμμή του πίνακα W_{MMSE} μετά την ταξινόμηση βάσει των SINR. Έπειτα, η αναμενόμενη τιμή του πρώτου χρήστη που αποκωδικοποιείται (και αποτελεί θόρυβο για τους υπόλοιπους χρήστες) αφαιρείται από το σήμα y (όπως δίδεται από τη σχέση 2.7), π.χ. : $y_1' = y - h_1 x_1'$ όπου το h_1 είναι το κανάλι του πρώτου χρήστη και το οποίο αφαιρείται από τον πίνακα καναλιού H . Τέλος, οι τιμές του SINR των υπόλοιπων χρηστών υπολογίζονται εξαρχής και ταξινομούνται εκ νέου και ακολουθούνται τα παραπάνω βήματα μέχρι να αποκωδικοποιηθούν τα σύμβολα όλων των χρηστών.

2.2.3.3 Εφαρμογή στα Συστήματα Επικοινωνίας με Χρήση Ορατού Φωτός (Visible Light Communication - VLC)

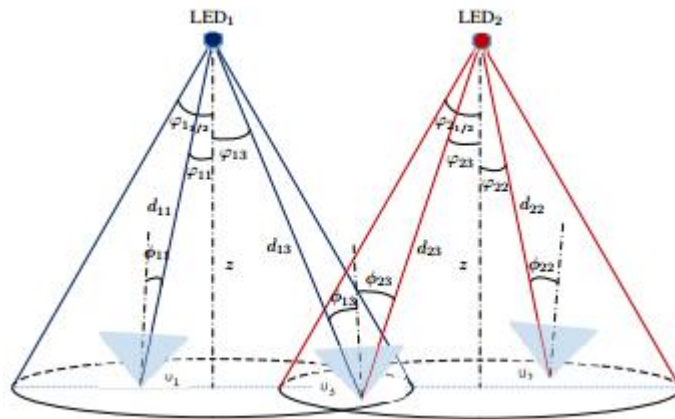
Το μοντέλο NOMA αποτελεί μια πολύ καλή επιλογή για την ενίσχυση της αποδοτικότητας του φάσματος στα συστήματα VLC, διότι: [9]

- Έχει τη δυνατότητα να πολυπλέξει ένα μικρό αριθμό χρηστών. Αυτό έρχεται σε συσχέτιση με τα συστήματα VLC, τα οποία βασίζονται στη μετάδοση με χρήση φωτοδιόδων (Light-Emitting Diode - LED), τα οποία δημιουργούν μικρές κυψέλες κατάλληλες να φιλοξενήσουν μικρό αριθμό χρηστών.
- Χρειάζεται συνεχώς πληροφορίες για την ποιότητα του καναλιού μετάδοσης (Channel State Information, CSI), κάτι το οποίο παρέχεται συνεχώς από τα VLC συστήματα, διότι η ποιότητα του καναλιού παραμένει σταθερή και αλλάζει μόνο με την κίνηση (μεταβολή της θέσης) των χρηστών.
- Αποδίδει καλύτερα σε περιβάλλον με υψηλό SNR (Signal to Noise Ratio), κάτι το οποίο συμβαίνει στα VLC συστήματα, διότι υπάρχει μικρή απόσταση ανάμεσα στις φωτοдиодούς και τον ανιχνευτή φωτός (photo detectors, PD).

- Η απόδοση των συστημάτων VLC μπορεί να βελτιστοποιηθεί, με το να προσαρμόζονται οι γωνίες εκπομπής των LEDs καθώς και το οπτικό πεδίο (Field Of Views, FOV) των ανιχνευτών φωτός. Αυτά τα δύο χαρακτηριστικά είναι δυνατόν να ενισχύσουν τις διαφορές στην ποιότητα των καναλιών μεταξύ των χρηστών, κάτι το οποίο είναι μεγίστης σημασίας για την απόδοση του μοντέλου NOMA.

Παρακάτω δίδεται ένα παράδειγμα εφαρμογής του μοντέλου NOMA σε σύστημα VLC με στόχο να γίνουν κατανοητά τα παραπάνω οφέλη: [9]

Υποθέτουμε ότι υπάρχουν δύο LED (i) και τρεις χρήστες (j) σε ένα δωμάτιο. Ο χρήστης 1 βρίσκεται στην εμβέλεια του LED1, ο χρήστης 2 στην εμβέλεια του LED2 και ο χρήστης 3 μπορεί να λαμβάνει δεδομένα και από τα δύο LED, διότι βρίσκεται στην περιοχή αλληλοκάλυψης αυτών.



Εικόνα 6: Αναπαράσταση NOMA-VLC συστήματος εσωτερικού χώρου για τη ζεύξη καθόδου, με δύο LEDs και τρεις χρήστες

Θεωρούμε τώρα ως G_l το σύνολο των χρηστών που είναι συνδεδεμένοι στο LED- l . Το μεταδιδόμενο σήμα από το LED- l (όπου $l=1,2$) δίνεται από την εξής σχέση:

$$\mathbf{z}_l = \sum_{j \in G_l} \mathbf{P}_{lj} * \mathbf{x}_j \quad (2.10)$$

όπου το P_{lj} είναι η μεταδιδόμενη ισχύς από το LED- l προς τον χρήστη j ο οποίος ανήκει στο σύνολο G_l και το x_j είναι το μεταδιδόμενο σήμα προς το χρήστη j . Τελικά, το σήμα το οποίο λαμβάνει ο τυχαίος χρήστης $U_i \in G_l$, είναι η συνεισφορά όλων των σημάτων που μεταδίδονται από όλα τα LEDs του δικτύου (L σε αριθμό) και είναι το εξής:

$$\mathbf{y}_i = \sum_{l=1}^L \sum_{j \in G_l} \mathbf{h}_{li} \mathbf{P}_{lj} \mathbf{x}_j + \mathbf{n}_i \quad (2.11)$$

και το SINR για τον χρήστη i είναι:

$$\text{SINR}_i = \sum_{l=1}^L \frac{h_{li} P_{li}}{\sum_{k>i} h_{li} P_{lk} + \sigma_i^2} \quad (2.12)$$

όπου ο χρήστης U_k αποκωδικοποιείται πρώτος, δηλαδή έχει καλύτερες συνθήκες καναλιού μετάδοσης από τον U_i .

2.3 Διάκριση Υπηρεσιών για Χρήστες

Βασικό χαρακτηριστικό των χρηστών στα ασύρματα δίκτυα αποτελεί το είδος της υπηρεσίας που αιτούνται προς το δίκτυο. Οι υπηρεσίες αυτές διακρίνονται σε δύο κατηγορίες ως προς το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, οι οποίες είναι οι εξής: [10]

- Υπηρεσίες Πραγματικού Χρόνου (Real Time services), οι οποίες αφορούν υπηρεσίες φωνής, βίντεο, ζωντανής μετάδοσης (live streaming), κλπ.
- Υπηρεσίες Μη-Πραγματικού Χρόνου (Non-Real Time services), όπως οι υπηρεσίες ηλεκτρονικού ταχυδρομείου, λήψη αρχείων, κλπ.

Η διάκριση των ειδών των υπηρεσιών είναι αρκετά σημαντική, διότι ανάλογα με την υπηρεσία που αιτείται ο χρήστης και προσφέρεται από το δίκτυο, διαμορφώνεται και ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων. Κατά συνέπεια οι χρήστες μπορούν να απολαμβάνουν υψηλή ποιότητα υπηρεσίας και μέγιστη ικανοποίηση. Μία ακόμα διαφοροποίηση των δύο αυτών υπηρεσιών που παρατέθηκαν παραπάνω, είναι ότι οι υπηρεσίες πραγματικού χρόνου απαιτούν ένα κατώτατο όριο επιτρεπτού ρυθμού μετάδοσης, κάτω από το οποίο η υπηρεσία δεν ανταποκρίνεται στις ανάγκες του χρήστη και καθίσταται επιζήμια και ανώφελη. Οι υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου έχουν πιο ελαστικά όρια στις τιμές του ρυθμού μετάδοσης και είναι πιο ανεκτικές σε καθυστερήσεις εξυπηρέτησης.

2.3.1 Υπηρεσίες Πραγματικού Χρόνου

Στη σημερινή εποχή, όπου η ανάπτυξη της τεχνολογίας είναι ραγδαία, καθίσταται αναγκαία η διάκριση των υπηρεσιών σε πραγματικού χρόνου, στις οποίες υπάρχει το αίτημα για μετάδοση πληροφορίας, όποτε αυτή ζητείται. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν σήμερα η μετάδοση εικόνας και ήχου μέσω διαδικτύου, καθώς και οι υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας.

Οι υπηρεσίες αυτές, είναι λοιπόν αρκετά απαιτητικές, και πρέπει να έχουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά:

1. Ύπαρξη κατώτατου ορίου ρυθμού μετάδοσης, όπως προαναφέρθηκε, διότι κάτω από το κατώφλι η υπηρεσία κρίνεται ανεπαρκής.
2. Διατήρηση του ρυθμού αυτού καθ'όλη τη διάρκεια της υπηρεσίας. Δηλαδή είναι αναγκαίο να υπάρχει μια σταθερή τιμή ρυθμού μετάδοσης καθ'όλη τη μετάδοση δεδομένων ώστε να μην υπάρχει αλλοίωση του σήματος.
3. Άμεση διόρθωση του ρυθμού μετάδοσης σε περίπτωση που λάβει τιμές κάτω από το κατώτατο επιτρεπτό όριο. Αυτό μπορεί να συμβεί με τη βοήθεια κάποιου χρονοδρομολογητή, ο οποίος θα διορθώνει κάθε μορφή αστοχίας που θα υποβαθμίζει την παρεχόμενη υπηρεσία.

2.3.2 Υπηρεσίες Μη-Πραγματικού Χρόνου

Οι υπηρεσίες αυτές αποτελούν σημαντικό κομμάτι της καθημερινότητας των χρηστών. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιων υπηρεσιών αποτελεί η μεταφορά μεγάλου όγκου δεδομένων μεταξύ των χρηστών και των παρόχων μιας υπηρεσίας. Μερικά από τα βασικά χαρακτηριστικά αυτών των υπηρεσιών είναι τα εξής:

1. Ανοχή του χρήστη στις διακυμάνσεις του ρυθμού μετάδοσης, καθώς αυτό που τον ενδιαφέρει πρωτίστως είναι η λήψη του αρχείου.

2. Απαίτηση όσο το δυνατόν υψηλότερου ρυθμού μετάδοσης, ώστε να ολοκληρωθεί η μεταφορά του αρχείου όσο πιο γρήγορα γίνεται.
3. Δυνατότητα λειτουργίας ακόμα και σε χαμηλές τιμές ρυθμού μετάδοσης, διότι ακόμα και με χαμηλό ρυθμό μετάδοσης, η μεταφορά του αρχείου εν τέλει θα ολοκληρωθεί, απλά θα χρειαστεί μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

Τελικά, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι τα επίπεδα του ρυθμού μετάδοσης επηρεάζουν την ευχαρίστηση που απολαμβάνει ο χρήστης από την υπηρεσία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

Κατανομή Πόρων σε Ασύρματα Δίκτυα NOMA σε Τριεπίπεδο Σύστημα: Μακροκυψέλη, Φεμτοκυψέλη & Κυψέλη Μετάδοσης με Χρήση Ορατού Φωτός

- 3.1 Εισαγωγή
- 3.2 Τριεπίπεδο Σύστημα
- 3.3 Μοντέλο συστήματος και Θεωρητικό Υπόβαθρο
- 3.4 Μη Συνεργατικό Παίγνιο Ελέγχου Ισχύος Εκπομπής στη Ζεύξη
Ανόδου χωρίς Πολιτική Κοστολόγησης
- 3.5 Μη Συνεργατικό Παίγνιο Ελέγχου Ισχύος Εκπομπής στη Ζεύξη
Ανόδου με Πολιτική Κοστολόγησης

3.1 Εισαγωγή

Το πρόβλημα αποδοτικής κατανομής πόρων σε ασύρματα δίκτυα χρησιμοποιώντας το μη ορθογωνικό μοντέλο πολλαπλής πρόσβασης (Non-Orthogonal Multiple Access – NOMA), αποτελεί ένα πολύ σύγχρονο αντικείμενο έρευνας με ευοίωνα αποτελέσματα. Έως τώρα έχουν μελετηθεί ποικίλες μεθοδολογίες με στόχο τη βέλτιστη αποδοτικά κατανομή των διαθέσιμων πόρων.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα εξεταστεί σταδιακά η χρήση του NOMA μοντέλου σε ασύρματο δίκτυο τριών επιπέδων (3-Tier). Στην αρχή θα μελετηθεί το μοντέλο NOMA για ένα επίπεδο, δηλαδή για ασύρματο δίκτυο που περιέχει μία μακροκυψέλη (Macrocell), στη συνέχεια θα προστεθεί το δεύτερο επίπεδο, δηλαδή θα προστεθούν οι φεμτοκυψέλες (Femtocells) και τέλος θα προστεθούν και οι κυψέλες μετάδοσης με χρήση ορατού φωτός (Visible Light Communication - VLC).

Σε αυτό το κεφάλαιο θα δοθεί ο ορισμός του τριεπίπεδου συστήματος και θα αναλυθεί πλήρως η μεθοδολογία και το θεωρητικό υπόβαθρο που χρησιμοποιήθηκε για το προαναφερθέν πρόβλημα σε κάθε επίπεδο ξεχωριστά. Τέλος, θα γίνει παρουσίαση των αποτελεσμάτων και σύγκριση με εκείνα του αντίστοιχου προβλήματος σε ασύρματα δίκτυα πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση κώδικα (Code Division Multiple Access – CDMA).

3.2 Τριεπίπεδο Σύστημα

Ο όρος τριεπίπεδο σύστημα αναφέρεται στη χρήστη τριών ειδών κυψελών για την κάλυψη μια περιοχής. Συγκεκριμένα, στην παρούσα διπλωματική εργασία, θα γίνει η μελέτη για κυψελωτά δίκτυα με τη χρήση μακροκυψέλης (Macrocell), φεμτοκυψέλης (Femtocell) και των κυψελών μετάδοσης με χρήση ορατού φωτός (Visible Light Communication - VLC).

Η μακροκυψέλη παρέχει ραδιοκάλυψη μέσω ενός σταθμού βάσης (base station) με υψηλή ισχύ εκπομπής. Οι κεραίες των μακρο-κυψελών τοποθετούνται συνήθως σε οροφές κτιρίων, σε μεγάλους αυτοκινητόδρομους καθώς και σε αγροτικές περιοχές, με στόχο να βρίσκονται αρκετά ψηλότερα από τα γύρω κτίρια και το έδαφος της περιοχής που θέλουν να καλύψουν. Οι σταθμοί βάσης παράγουν συνήθως ισχύ της τάξεως των δεκάδων *Watt* και η εμβέλειά τους είναι 1-20km [11].

Η φεμτοκυψέλη αποτελείται από ένα σταθμό βάσης (Femto Access Point - FAP) με μικρή ισχύ εκπομπής. Η κυψέλη αυτή χρησιμοποιείται συνήθως για την κάλυψη ενός γραφείου ή ενός σπιτιού, καθώς έχει εμβέλεια περίπου 30-50m. Τα θετικά που προσφέρει η χρήση μιας τέτοιας κυψέλης αφορούν κυρίως την κάλυψη, η οποία βελτιώνεται λόγω του ότι οι φεμτοκυψέλες “γεμίζουν” τα κενά κάλυψης και εξαλείφουν την απώλεια σήματος η οποία προκαλείται λόγω των κτιρίων και άλλων εμποδίων μέσα στην περιοχή κάλυψης. Επίσης, η χωρητικότητα βελτιώνεται, διότι μειώνεται ο αριθμός των κινητών τερματικών που προσπαθούν να συνδεθούν στις κύριες κυψέλες (δηλαδή τις μακροκυψέλες). Συνεπώς, το κινητό τερματικό του χρήστη πετυχαίνει καλύτερους ρυθμούς δεδομένων, κάνοντας χρήση μειωμένης ισχύος εκπομπής και αυτό οδηγεί σε μεγαλύτερη διάρκεια της μπαταρίας του ασύρματου χρήστη. [12]

Τέλος, με τον όρο VLC, αναφερόμαστε σε οποιαδήποτε πληροφορία η οποία μεταδίδεται χρησιμοποιώντας σήματα φωτός, τα οποία είναι ορατά στους χρήστες (ορατό φως, visible light). Για την υλοποίησή τους χρησιμοποιούνται LED (Light-Emitting Diode), τα οποία πετυχαίνουν ρυθμούς μετάδοσης έως και 500Mbit/s και έχουν εμβέλεια μερικά μέτρα. Οι VLC κυψέλες

αναπτύσσονται κυρίως σε εσωτερικούς χώρους, με στόχο να καλύπτουν γρήγορα και αποτελεσματικά διάφορες ανάγκες των χρηστών. Για παράδειγμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε έξυπνα σπίτια με στόχο να φωτίζουν καθώς και για πρόσβαση στο δίκτυο, κάτι το οποίο θα συντελέσει σε μείωση της κατανάλωσης ενέργειας μέσα στο κτίριο. Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε νοσοκομεία ή γενικά σε κέντρα περίθαλψης, με στόχο να αντικαταστήσουν τα κινητά τηλέφωνα και το WiFi, τα οποία θεωρούνται επιβλαβή και ανεπιθύμητα όταν βρίσκονται κοντά σε χειρουργεία και σε τομογράφους.[13]

3.3 Μοντέλο Συστήματος και Θεωρητικό Υπόβαθρο

Υποθέτουμε τη ζεύξη ανόδου ενός κυψελωτού δικτύου 5ης γενιάς, στο οποίο γίνεται πρόσβαση μέσω της τεχνικής NOMA. Βασικό βήμα στην κατεύθυνση επίλυσης της βέλτιστης κατανομής πόρων στα ασύρματα NOMA δίκτυα αποτελεί η ορθή διατύπωση του προβλήματος ως ένα μη συνεργατικό παίγνιο. Χρήσιμα εργαλεία αποτέλεσαν η Θεωρία Παιγνίων, καθώς επίσης και η συνάρτηση ευχαρίστησης.

Είναι πολύ σημαντικό να σημειωθεί, ότι για κάθε επίπεδο επικοινωνίας (tier), αλλάζει η μεθοδολογία υπολογισμού του σηματοθορυβικού λόγου (SINR), διότι αλλάζουν οι ενδοκυψελικές παρεμβολές και ο τρόπος που υπολογίζονται. Για το λόγο αυτό θα πραγματοποιηθεί ξεχωριστή ανάλυση του τρόπου υπολογισμού του SINR για κάθε επίπεδο. Έπειτα θα δοθούν οι ορισμοί και οι τύποι για τη συνάρτηση ευχαρίστησης, καθώς και άλλων χρήσιμων συναρτήσεων, οι οποίες θα αποτελέσουν τη βάση για τη διατύπωση του παιγνίου.

3.3.1. Υπολογισμός Σηματοθορυβικού Λόγου (SINR)

Στις παρακάτω τρεις υποενότητες, θα αναλυθεί ξεχωριστά ο τρόπος υπολογισμού των παρεμβολών και κατά συνέπεια του σηματοθορυβικού λόγου (SINR) σε ένα ασύρματο δίκτυο, όταν έχουμε ένα, δύο και τρία επίπεδα.

3.3.1.1 Ένα επίπεδο (Single Tier) - Μακροκυψέλη

Ορίζουμε ως $S = S_{RT} \cup S_{NRT}$ το σύνολο των χρηστών το οποίο αποτελείται από χρήστες που ζητούν υπηρεσίες πραγματικού χρόνου (S_{RT}) και από χρήστες που ζητούν υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου (S_{NRT}). Επιπρόσθετα, ορίζουμε ως N_{NRT} τον αριθμό των χρηστών που ζητούν υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου και ως N_{RT} τον αριθμό των χρηστών που ζητούν υπηρεσίες πραγματικού χρόνου.

Ορίζουμε ως G_i , P_i , R_i το κέρδος καναλιού, την ισχύ εκπομπής και το ρυθμό μετάδοσης, αντίστοιχα, του χρήστη $i \in S$, όπου για το P_i και το R_i ισχύουν τα εξής: $0 \leq P_i \leq P_{i,max}$ και $0 \leq R_i \leq R_{i,max}$. Το $R_{i,max}$ έχει διαφορετική τιμή για του χρήστες με υπηρεσίες πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου, αλλά επί του παρόντος θα δώσουμε το γενικό τύπο του γ_i .

Υποθέτουμε ότι οι χρήστες ταξινομούνται κατά φθίνουσα ποιότητα καναλιού μετάδοσης ως εξής:

$$G_1 > G_2 > \dots > G_i > \dots > G_j > \dots > G_N \quad (3.1)$$

Δηλαδή θα αποκωδικοποιηθεί πρώτος ο χρήστης 1, ο οποίος θα ακούει το θόρυβο των υπόλοιπων χρηστών που έχουν χειρότερη ποιότητα καναλιού μετάδοσης, όπως αναλύθηκε

διεξοδικά στην ενότητα 2.2.2. Ο σηματοθορυβικός λόγος του χρήστη $i \in S$ δίνεται από τον εξής τύπο:

$$\gamma_i(R_i, P_i, \overrightarrow{P_{j>i}}) = \frac{W}{R_{max}} * \frac{G_i * P_i}{\sum_{j>i}^N G_j * P_j + I_0} \quad (3.2)$$

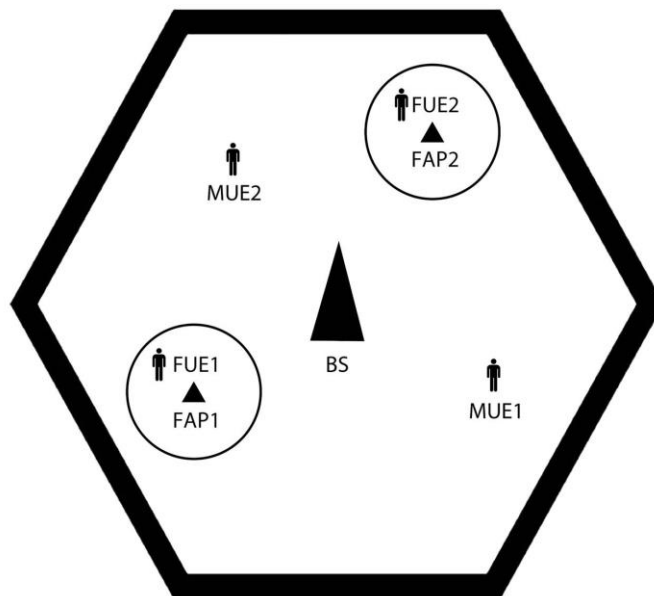
όπου j είναι ο δείκτης που υποδεικνύει ότι ο χρήστης αυτός βρίσκεται σε θέση πιο μακρινή από τον χρήστη i (εξού το $j > i$). Το $\overrightarrow{P_{j>i}}$ αποτελεί το διάνυσμα της ισχύος των χρηστών που βρίσκονται σε χειρότερες συνθήκες καναλιού μετάδοσης από τον i χρήστη, δηλαδή $G_j < G_i$, το W είναι το εύρος ζώνης του συστήματος και το I_0 συμβολίζει το λευκό θόρυβο.

3.3.1.2 Δύο Επίπεδα (2 -Tier) - Μακροκυψέλη & Φεμτοκυψέλη

Όταν στη μακροκυψέλη υπεισέρχονται και φεμτοκυψέλες, τότε ο υπολογισμός των παρεμβολών αλλάζει ανάλογα με το ποιος χρήστης θα εκπέμψει και ως προς ποια κυψέλη θα εκπέμψει. Για να γίνει πιο κατανοητός ο τρόπος υπολογισμού των παρεμβολών, παρατίθεται το παρακάτω γενικό παράδειγμα.

Έστω ότι έχουμε την μακροκυψέλη της παρακάτω εικόνας η οποία έχει στο κέντρο το σταθμό βάσης της (BS - Base Station). Μέσα σε αυτή βρίσκονται και φεμτοκυψέλες, καθεμιά από τις οποίες έχει το δικό της σταθμό βάσης (FAP - Femto Access Point). Οι χρήστες χωρίζονται σε χρήστες μακροκυψέλης (MUE - Macro User Equipment) και σε χρήστες φεμτοκυψέλης (FUE - Femto User Equipment).

Τέλος, οι χρήστες χωρίζονται όπως και πριν σε χρήστες πραγματικού (RT) και μη πραγματικού χρόνου (NRT) ανάλογα με το είδος της υπηρεσίας που αιτούνται.



Εικόνα 7: Κυψελωτό διεπίπεδο δίκτυο με μακροκυψέλη και δύο φεμτοκυψέλες

Για να υπολογίσουμε το *SINR* χρειάζεται να υπολογίσουμε και έπειτα να ταξινομήσουμε τα κέρδη του καναλιού μετάδοσης των χρηστών κατά φθίνουσα σειρά. Για τον υπολογισμό των κερδών, θα πρέπει να λάβουμε υπόψιν τις κάτωθι πέντε καταστάσεις: [16][17]

1. Μεταδίδει ένας χρήστης MUE προς το BS.

Ο τύπος για τον υπολογισμό του κέρδους που χρησιμοποιείται σε αυτή την περίπτωση είναι ο εξής:

$$G_i = \frac{0.097}{d_i^a} \quad (3.3)$$

Όπου d_i είναι η απόσταση του χρήστη MUE- i από το σταθμό βάσης και a είναι μια σταθερά.

2. Μεταδίδει ένας χρήστης MUE προς κάποιο FAP

Ο τύπος για τον υπολογισμό του κέρδους που χρησιμοποιείται σε αυτή την περίπτωση είναι ο εξής:

$$G_{i,j} = \frac{k_c * 0.3162}{d_{i,j}^a} \quad (3.4)$$

Όπου $d_{i,j}$ είναι η απόσταση του χρήστη MUE- i από το FAP- j , k_c και a είναι σταθερές.

3. Μεταδίδει ένας χρήστης FUE προς το BS

Ο τύπος για τον υπολογισμό του κέρδους που χρησιμοποιείται σε αυτή την περίπτωση είναι ο εξής:

$$G_i = \frac{k_c * 0.3162}{d_i^a} \quad (3.5)$$

Όπου $d_{i,j}$ είναι η απόσταση του χρήστη FUE- i από το BS, k_c και a είναι σταθερές.

4. Μεταδίδει ένας χρήστης FUE προς εξωτερικό FAP

Ο τύπος για τον υπολογισμό του κέρδους που χρησιμοποιείται σε αυτή την περίπτωση είναι ο εξής:

$$G_{i,j} = \frac{k_c * 0.1}{d_{i,j}^a} + \sum_k \frac{k_c * 0.1}{d_{k,j}^a} \quad (3.6)$$

Όπου $d_{i,j}$ είναι η απόσταση του χρήστη FUE- i από το FAP- j , $d_{k,j}$ είναι η απόσταση του χρήστη FUE- k από το FAP- j , k_c και a είναι σταθερές.

Με k συμβολίζονται οι χρήστες, που ζητούν το ίδιο είδος υπηρεσίας με τον χρήστη i (δηλαδή NRT ή RT), και βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση από το FAP σε σχέση με τον χρήστη i (δηλαδή έχουν χειρότερο Gain από τον χρήστη i).

5. Μεταδίδει ένας χρήστης FUE προς το FAP στο οποίο εδρεύει

Ο τύπος για τον υπολογισμό του κέρδους που χρησιμοποιείται σε αυτή την περίπτωση είναι ο εξής:

$$G_{ij} = \frac{k_c \cdot 0.1}{d_{ij}^3} \quad (3.7)$$

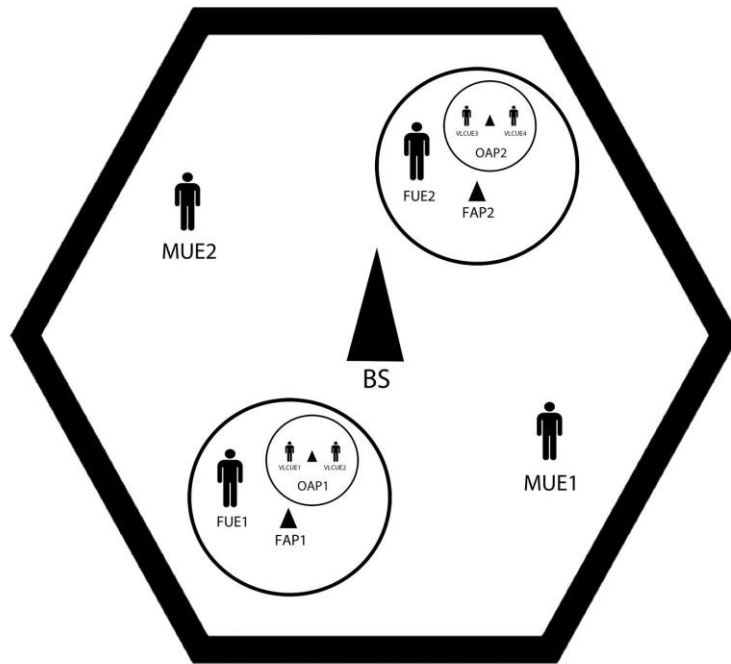
Όπου $d_{i,j}$ είναι η απόσταση του χρήστη FUE- i από το FAP- j , k_c και a είναι σταθερές. Αφού υπολογίζουμε τα κέρδη του καναλιού μετάδοσης, λαμβάνοντας υπόψιν τις παραπάνω καταστάσεις, τα ταξινομούμε κατά φθίνουσα σειρά.

Τέλος, υπολογίζουμε το γ_i για κάθε χρήστη i σύμφωνα με τον τύπο (3.2), όπου j είναι ο δείκτης που υποδεικνύει ότι ο χρήστης αυτός έχει χειρότερο κέρδος καναλιού μετάδοσης από τον i . Το $\overrightarrow{P_{j>i}}$ αποτελεί το διάνυσμα της ισχύος εκπομπής των χρηστών που βρίσκονται σε χειρότερες συνθήκες καναλιού από τον i , δηλαδή $G_j < G_i$, το W είναι το εύρος ζώνης του συστήματος και το I_0 συμβολίζει το λευκό θόρυβο. Τέλος, το R_{max} συμβολίζει το μέγιστο επιτρεπόμενο ρυθμό μετάδοσης και η τιμή του διαφέρει ανάλογα με το αν ο χρήστης είναι πραγματικού ή μη πραγματικού χρόνου.

3.3.1.3 Τρία Επίπεδα (3 -Tier) - Μακροκυψέλη & Φεμτοκυψέλη & VLC

Σε αυτή την περίπτωση, το πρόβλημα κατανομής πόρων γίνεται ακόμη πιο σύνθετο, διότι υπεισέρχονται οι χρήστες των VLC κυψελών. Για την κατανόηση του προβλήματος, παρατίθεται το παρακάτω απλό πρόβλημα.

Έστω ότι έχουμε την μακροκυψέλη της παρακάτω εικόνας η οποία έχει στο κέντρο το σταθμό βάσης της (BS - Base Station). Μέσα σε αυτή βρίσκονται δύο φεμτοκυψέλες, καθεμιά από τις οποίες έχει το δικό της σταθμό βάσης (FAP - Femto Access Point). Τέλος, μέσα στις φεμτοκυψέλες έχουν τοποθετηθεί VLC κυψέλες με τον αντίστοιχο σταθμό βάσης τους (OAP - Optical Access Point). Οι χρήστες χωρίζονται σε χρήστες μακροκυψέλης (MUE - Macro User Equipment), χρήστες φεμτοκυψέλης (FUE - Femto User Equipment) και χρήστες VLC κυψέλης (VLC UE - Visible Light Communication User Equipment). Τέλος, οι χρήστες χωρίζονται όπως και πριν σε χρήστες πραγματικού (RT) και μη πραγματικού χρόνου (NRT) ανάλογα με το είδος της υπηρεσίας που αιτούνται.



Εικόνα 8: Κυψελωτό τριεπίπεδο δίκτυο με Εμακροκυψέλη, δύο φεμτοκυψέλες και τέσσερις VLC κυψέλες

Για να υπολογίσουμε το $SINR$ χρειάζεται να υπολογίσουμε και έπειτα να ταξινομήσουμε τα κέρδη του καναλιού μετάδοσης των χρηστών κατά φθίνουσα σειρά. Για τον υπολογισμό των κερδών, θα πρέπει να λάβουμε υπόψιν τις κάτωθι έξι καταστάσεις: [16][17]

1. Μεταδίδει ένας χρήστης MUE προς το BS.

Ο τύπος για τον υπολογισμό του κέρδους που χρησιμοποιείται σε αυτή την περίπτωση είναι ο εξής:

$$G_i = \frac{0.097}{d_i^a} \quad (3.8)$$

Όπου d_i είναι η απόσταση του χρήστη MUE- i από το σταθμό βάσης και a είναι μια σταθερά. Σε αυτή την περίπτωση, τους VLC χρήστες τους αντιμετωπίζουμε ως FUE χρήστες, άρα χρησιμοποιούμε τον τύπο 3.11 για τον υπολογισμό του κέρδους τους.

2. Μεταδίδει ένας χρήστης MUE προς κάποιο FAP

Ο τύπος για τον υπολογισμό του κέρδους που χρησιμοποιείται σε αυτή την περίπτωση είναι ο εξής:

$$G_{i,j} = \frac{k_c * 0.3162}{d_{i,j}^a} \quad (3.9)$$

Όπου $d_{i,j}$ είναι η απόσταση του χρήστη MUE- i από το FAP- j , k_c και a είναι σταθερές. Σε αυτή την περίπτωση, τους VLC χρήστες τους αντιμετωπίζουμε ως FUE χρήστες, άρα χρησιμοποιούμε τον τύπο 3.11 για τον υπολογισμό του κέρδους τους.

3. Μεταδίδει ένας χρήστης FUE προς το BS

Ο τύπος για τον υπολογισμό του κέρδους που χρησιμοποιείται σε αυτή την περίπτωση είναι ο εξής:

$$G_i = \frac{k_c * 0.3162}{d_i^a} \quad (3.10)$$

Όπου $d_{i,j}$ είναι η απόσταση του χρήστη FUE- i από το BS, k_c και a είναι σταθερές.

Σε αυτή την περίπτωση, τους VLC χρήστες τους αντιμετωπίζουμε ως FUE χρήστες, άρα χρησιμοποιούμε τον τύπο 3.11 για τον υπολογισμό του κέρδους τους.

4. Μεταδίδει ένας χρήστης FUE προς εξωτερικό FAP

Ο τύπος για τον υπολογισμό του κέρδους που χρησιμοποιείται σε αυτή την περίπτωση είναι ο εξής:

$$G_{i,j} = \frac{k_c * 0.1}{d_{i,j}^a} + \sum_k \frac{k_c * 0.1}{d_{k,j}^a} \quad (3.11)$$

Όπου $d_{i,j}$ είναι η απόσταση του χρήστη FUE- i από το FAP- j , $d_{k,j}$ είναι η απόσταση του χρήστη FUE- k από το FAP- j , k_c και a είναι σταθερές.

Με k συμβολίζονται οι χρήστες, που ζητούν το ίδιο είδος υπηρεσίας με τον χρήστη i (δηλαδή NRT ή RT), και βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση από το FAP σε σχέση με τον χρήστη i (δηλαδή έχουν χειρότερο Gain από τον χρήστη i).

Σε αυτή την περίπτωση, τους VLC χρήστες τους αντιμετωπίζουμε ως FUE χρήστες, άρα χρησιμοποιούμε τον τύπο 3.11 για τον υπολογισμό του κέρδους τους, όταν δεν εδρεύουν μέσα στο FAP προς το οποίο γίνεται η μετάδοση και τον τύπο 3.12 όταν εδρεύουν μέσα στο FAP προς το οποίο γίνεται η μετάδοση.

5. Μεταδίδει ένας χρήστης FUE προς το FAP στο οποίο βρίσκεται

Ο τύπος για τον υπολογισμό του κέρδους που χρησιμοποιείται σε αυτή την περίπτωση είναι ο εξής:

$$G_{i,j} = \frac{k_c * 0.1}{d_{i,j}^3} \quad (3.12)$$

Όπου $d_{i,j}$ είναι η απόσταση του χρήστη FUE- i από το FAP- j , k_c και a είναι σταθερές.

Σε αυτή την περίπτωση, τους VLC χρήστες τους αντιμετωπίζουμε ως FUE χρήστες, άρα χρησιμοποιούμε τον τύπο 3.11 για τον υπολογισμό του κέρδους τους, όταν δεν εδρεύουν μέσα στο FAP προς το οποίο γίνεται η μετάδοση και τον τύπο 3.12 όταν εδρεύουν μέσα στο FAP προς το οποίο γίνεται η μετάδοση.

6. Μεταδίδει ένας χρήστης VLC UE προς κάποιο OAP

Ο τύπος για τον υπολογισμό του κέρδους που χρησιμοποιείται σε αυτή την περίπτωση είναι ο εξής: [15]

$$G_{ij} = \frac{(m+1) * A_{det} * (\cos(\varphi))^{m+1}}{2 * \pi * d_{ij}^2} \quad (3.13)$$

Όπου $d_{i,j}$ είναι η απόσταση του χρήστη VCL UE- i από το OAP- j .

Το m προέρχεται από το νόμο του Lambert που αφορά τη σειρά εκπομπής (Lambertian order of emission) και υπολογίζεται ως εξής:

$$m = - \frac{\log_{10} 2}{\log_{10} \cos \theta_{1/2}} \quad (3.14)$$

Όπου $\theta_{1/2}$ είναι η γωνία μισής ισχύος και στο πρόβλημα τίθεται ίση με $\frac{\pi}{4}$.

Το συνημίτιο ορίζεται ως εξής:

$$\cos \varphi = \frac{h}{d_{i,j}} \quad (3.15)$$

Όπου h είναι το ύψος του OAP, $d_{i,j}$ είναι η απόσταση του χρήστη VCL UE- i από το OAP- j και το φ ορίζεται ως η γωνία ακτινοβολίας.

Σε αυτή την περίπτωση, οι χρήστες MUE και FUE έχουν μηδενικό κέρδος ως προς το OAP.

Αφού υπολογίζουμε τα κέρδη του καναλιού μετάδοσης, λαμβάνοντας υπόψιν τις παραπάνω καταστάσεις, τα ταξινομούμε κατά φθίνουσα σειρά. Τέλος, υπολογίζουμε το γ_i για κάθε χρήστη i σύμφωνα με τον τύπο (3.2), όπου j είναι ο δείκτης που υποδεικνύει ότι ο χρήστης αυτός έχει χειρότερο κέρδος καναλιού μετάδοσης από τον i . Το $\overrightarrow{P_{j>i}}$ αποτελεί το διάνυσμα της ισχύος των χρηστών που βρίσκονται σε χειρότερες συνθήκες καναλιού από τον i , δηλαδή $G_j < G_i$, το W είναι το εύρος ζώνης του συστήματος και το I_0 συμβολίζει το λευκό θόρυβο. Τέλος, το R_{max} συμβολίζει το μέγιστο επιτρεπόμενο ρυθμό μετάδοσης και η τιμή του διαφέρει ανάλογα με το αν ο χρήστης είναι πραγματικού ή μη πραγματικού χρόνου.

3.3.2. Συνάρτηση Ευχαρίστησης

Η συνάρτηση ευχαρίστησης έχει τον ίδιο τύπο σε όλα τα επίπεδα (Tiers). Σε κάθε χρήστη αντιστοιχίζεται μία τέτοια συνάρτηση, έστω $U(R_i^*, P_i, \overrightarrow{P_{j>i}})$ η οποία εκπροσωπεί το βαθμό ευχαρίστησής του σε σχέση με το ρυθμό μετάδοσης (R) και την αντίστοιχη ισχύ εκπομπής (P). Έτσι, μπορεί να εκφραστεί ως εξής: [14]

$$U(R_i^*, P_i, \overrightarrow{P_{j>i}}) = \frac{R_i^*(P_i, \overrightarrow{P_{j>i}})}{P_i} \quad (3.16)$$

όπου το $R_i^*(P_i, \overrightarrow{P_{j>i}}) = R_i^F * f_i(\gamma_i)$, είναι ο επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης κατά τη ζεύξη ανόδου του χρήστη i και R_i^F είναι ο προκαθορισμένος ρυθμός μετάδοσης του χρήστη και $f_i(\gamma_i)$, είναι η συνάρτηση απόδοσης.

3.3.3. Συνάρτηση Απόδοσης

Η συνάρτηση απόδοσης αντικατοπτρίζει την πιθανότητα της επιτυχούς μετάδοσης του χρήστη i και είναι μια αύξουσα συνάρτηση του σηματοθορυβικού ρυθμού του χρήστη γ_i .

Η συνάρτηση αυτή έχει τις εξής ιδιότητες: [14]

1. είναι μια αύξουσα συνάρτηση του γ_i .
2. είναι μια συνεχής και 2-φορές παραγωγίσιμη συνάρτηση
3. $f_i(0)=0$, ώστε να εξασφαλίσει ότι το R_i θα είναι μηδέν όταν το P_i θα είναι μηδέν και ότι θα ισχύει $\lim_{P_i \rightarrow 0^+} U_i = 0$
4. $f_i(\infty)=1$

Η συνάρτηση αυτή είναι διαφορετική για τους δύο τύπους των χρηστών και αναλύεται παρακάτω.

3.3.3.1. Συνάρτηση $f_i(\gamma_i)$ χρηστών πραγματικού χρόνου

Η συνάρτηση $f_i(\gamma_i)$ χρηστών πραγματικού χρόνου είναι μια εκθετική συνάρτηση του SINR (γ_i) και ορίζεται ως εξής: [14]

$$(1 - e^{(-\alpha \gamma_i)})^M \quad (3.17)$$

όπου α , M είναι σταθερές.

3.3.3.2 Συνάρτηση $f_i(\gamma_i)$ χρηστών μη-πραγματικού χρόνου

Η συνάρτηση $f_i(\gamma_i)$ χρηστών μη-πραγματικού χρόνου είναι μια λογαριθμική συνάρτηση της συνάρτησης $f_i(\gamma_i)$ χρηστών πραγματικού χρόνου και ορίζεται ως εξής: [14]

$$\log(1 + D * (1 - e^{(-\alpha \gamma_i)})^M) \quad (3.18)$$

όπου α , M , D είναι σταθερές.

3.4 Μη Συνεργατικό Παίγνιο Ελέγχου Ισχύος Εκπομπής στη Ζεύξη Ανόδου χωρίς Πολιτική Κοστολόγησης

3.4.1 Ορισμός

Ορίζουμε ως $G=[S, \{A_i\}, \{U_i(\cdot)\}]$ το παίγνιο όπου $S = S_{RT} \cup S_{NRT}$ είναι το σύνολο των χρηστών που βρίσκονται στην κυψέλη, $A_i = [0, P_i^{max}] \times R^N$ είναι το σύνολο στρατηγικής του i -οστού χρήστη ($i \in S$) και $U_i(\cdot)$ είναι η συνάρτηση ευχαρίστησης του i -οστού χρήστη. N ορίζουμε τον αριθμό των χρηστών στην κυψέλη. Συνεπώς, το διάνυσμα $\vec{P}^* = (P_1^*, P_2^*, \dots, P_N^*) \in A$, με $A = \cup A_i$, $i \in S$ αποτελεί τη λύση του παρακάτω μη συνεργατικού παιγνίου: [14]

$$\max_{A_i} U_i = \max_{A_i} U_i(P_i, \vec{P}_{j>i}), \quad \forall i \in S \quad (3.19)$$

με περιορισμό : $\mathbf{0} \leq P_i \leq P_i^{max}$

Το $\vec{P}^* = (P_1^*, P_2^*, \dots, P_N^*)$ αποτελεί το σημείο ισορροπίας Nash (Nash equilibrium) του παραπάνω παιγνίου, εάν για οποιοδήποτε $i \in S$, ισχύει $U_i(P_i^*, \vec{P}_{j>i}^*) > U_i(P_i, \vec{P}_{j>i}^*)$ για όλα τα $P_i \in A_i$.

Συμπερασματικά, σύμφωνα με τα παραπάνω, το P_i ορίζεται ως εξής:

$$P_i = \min\left\{\frac{\gamma_i^* R_i^*(P_i, \overline{P}_{j>i}) * \sum_{j>i}^N G_j * P_j + I_0}{W * G_i}, P_i^{max}\right\} \quad (3.20)$$

όπου το γ_i^* είναι η μοναδική λύση της εξίσωσης:

$$\gamma_i^* \frac{df(\gamma_i)}{d\gamma_i} - f(\gamma_i) = 0 \quad (3.21)$$

3.5 Μη Συνεργατικό Παιγνίο Ελέγχου Ισχύος Εκπομπής στη Ζευξη Ανόδου με Πολιτική Κοστολόγησης

3.5.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει η εισαγωγή της κοστολόγησης ως προς την ισχύ εκπομπής των χρηστών. Το μη συνεργατικό παίγνιο όπως παρουσιάστηκε στην ενότητα 2.4 οδηγεί σε ένα σημείο ισορροπίας κατά Nash το οποίο να μεν αποτελεί τη βέλτιστη κατάσταση για τους χρήστες ως προς τις ζητούμενες παραμέτρους, αλλά δεν προκύπτει από την αρμονική συνεργασία των χρηστών, αλλά ως συνέπεια της εγωιστικής τους προσέγγισης με στόχο τη μεγιστοποίηση της ευχαρίστησής τους από την παροχή της εκάστοτε υπηρεσίας (RT ή NRT) εντός του κυψελωτού δικτύου.

Για το λόγο αυτό, στην ενότητα αυτή θα αναλυθεί το μοντέλο του παιγνίου με πολιτική κοστολόγησης, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για το πρόβλημα κατανομής πόρων στο ασύρματο δίκτυο NOMA. Σε αυτή τη διπλωματική εργασία, έγινε η χρήση μη γραμμικής κοστολόγησης και συγκεκριμένα κυρτή κοστολόγηση της ισχύος εκπομπής. Ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιήθηκε κυρτή κοστολόγηση αντί γραμμικής, είναι ότι η τελευταία δεν μπορεί να ανταποκριθεί ρεαλιστικά στην απορρόφηση πόρων του δικτύου, καθώς η ποινή που επιβάλλεται στους χρήστες με μικρή ή ακόμα και ελάχιστη ζήτηση πόρων είναι ανάλογη με την υπέρμετρη κατασπατάληση των πόρων που εντοπίζεται σε άλλους χρήστες.

3.5.2 Ορισμός συνάρτησης ευχαρίστησης

Ορίζουμε ως $G_{CP} = [S, \{A_i\}, \{U_i^{net}(\cdot)\}]$ το παίγνιο όπου $S = S_{RT} \cup S_{NRT}$ είναι το σύνολο των χρηστών που βρίσκονται στην κυψέλη, $A_i = [0, P_i^{max}] \times R^N$ είναι το σύνολο στρατηγικής του i -οστού χρήστη ($i \in S$) και N ορίζουμε τον αριθμό των χρηστών στην κυψέλη.

Σε αυτό το σημείο, εισάγουμε την έννοια της ολικής συνάρτησης ευχαρίστησης $U_i^{net}(\cdot)$. Η συνάρτηση αυτή προκύπτει ως η αλγεβρική διαφορά της συνάρτησης ευχαρίστησης $U_i(\cdot)$ για τον κάθε χρήστη και της συνάρτησης κοστολόγησης c_i ως προς την ισχύ εκπομπής. Συγκεκριμένα, η μορφή της ολικής συνάρτησης ευχαρίστησης που θα χρησιμοποιήσουμε στο συγκεκριμένο παίγνιο είναι η εξής: [14]

$$U_i^{net}(P_i, \overline{P}_{j>i}) = \frac{R_i^*(P_i, \overline{P}_{j>i})}{P_i} - c_i(P_i, \overline{P}_{j>i}) \quad (3.22)$$

όπου το c_i ορίζεται ως μια εκθετική συνάρτηση της ισχύος εκπομπής, δηλαδή

$$c_i(P_i, \overline{P}_{j>i}) = c * (e^{P_i} - 1) \quad (3.23)$$

όπου το c είναι ο συντελεστής κοστολόγησης.

Συνεπώς, ορίζουμε το πρόβλημα βελτιστοποίησης ως εξής: [14]

$$\max_{P_i \in A_i} U_i^{net} = \max_{P_i \in A_i} U_i^{net}(P_i, \overrightarrow{P_{j>i}}) = \frac{R_i^*(P_i, \overrightarrow{P_{j>i}})}{P_i} - c_i(P_i, \overrightarrow{P_{j>i}}) \quad (3.24)$$

με περιορισμό: $0 \leq P_i \leq P_i^{max}, \forall i \in S$

Το $\overrightarrow{P^*} = (P_1^*, P_2^*, \dots, P_N^*)$ αποτελεί το σημείο ισορροπίας κατά Nash (Nash equilibrium) του παραπάνω παιγνίου, εάν για οποιοδήποτε $i \in S$, ισχύει $U_i^{net}(P_i^*, \overrightarrow{P_{j>i}^*}) > U_i^{net}(P_i, \overrightarrow{P_{j>i}^*})$ για όλα τα $P_i \in A_i$.

3.5.3 Εύρεση σημείου ισορροπίας κατά Nash του μη-συνεργατικού παιγνίου με χρήση κοστολόγησης

Ένα σημείο ισορροπίας κατά Nash: $P_{net}^*, P_{net}^* \in (0, P_{crit}]$ για το παραπάνω παίγνιο, υπάρχει, είναι μοναδικό και δίνεται από τις παρακάτω συνθήκες: [14]

$$P_{net}^* = \min\{\min_{\Lambda_{k,i}} [\operatorname{argmax}(U_i^{net}(\Lambda_{k,i}))], P_i^{max}\} \quad (3.25)$$

όπου το $\Lambda_{k,i} = \{P_{1,i}^*, P_{2,i}^*, \dots, P_{K,i}^*\}$, $k=1, \dots, K$, $i \in S$ είναι το σύνολο των τοπικών μεγίστων του $P_i \in (0, P_{crit}]$.

Η σχέση $\min_{\Lambda_{k,i}} [\operatorname{argmax}(U_i^{net}(\Lambda_{k,i}))]$, υποδηλώνει ότι ζητάμε το μικρότερο P για το οποίο μεγιστοποιείται η συνάρτηση ευχαρίστησης.

Δηλαδή, το σημείο ισορροπίας είναι το μικρότερο εκ των P_i^{max} (δηλαδή της μεγαλύτερης δυνατής τιμές που μπορεί να λάβει η ισχύς) και του P το οποίο μεγιστοποιεί τη συνάρτηση ευχαρίστησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΠΟΡΩΝ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ CDMA

- 4.1 Εισαγωγή
- 4.2 Ορισμός Κωδικοποίησης CDMA
- 4.3 Κατανομή Πόρων σε Ασύρματα CDMA Δίκτυα

4.1 Εισαγωγή

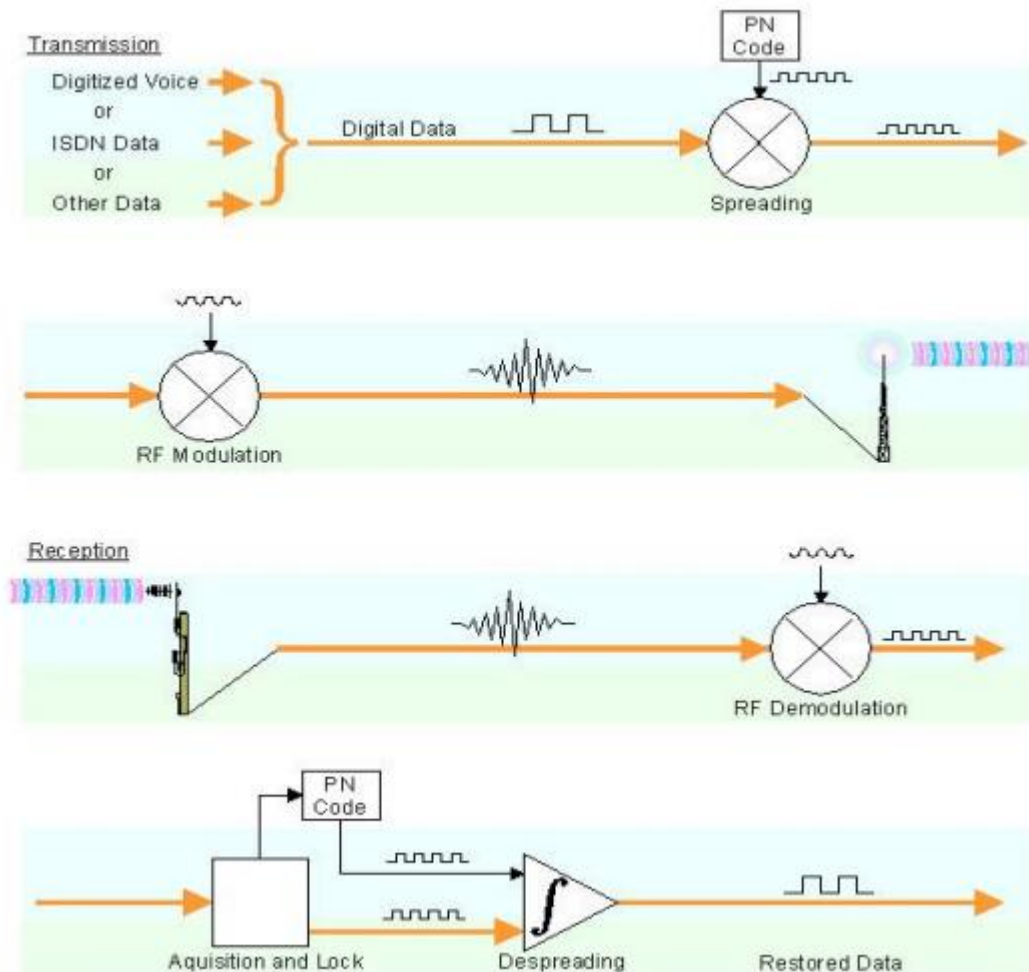
Πριν την παράθεση των αποτελεσμάτων από τις προσομοιώσεις του ασύρματου δικτύου NOMA, θα ήταν ορθό να αναφερθούμε στο πρόβλημα κατανομής πόρων σε ασύρματα δίκτυα πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση κώδικα (Code Division Multiple Access – CDMA), το οποίο αποτέλεσε αντικείμενο εκτενών επιστημονικών ερευνών προηγούμενων χρόνων. Συγκεκριμένα, σε αυτό το σύντομο κεφάλαιο, θα αναλυθούν τα βασικά χαρακτηριστικά της CDMA μορφής κωδικοποίησης και θα διατυπωθεί το πρόβλημα της αποδοτικής κατανομής πόρων σε ασύρματα δίκτυα CDMA, με στόχο να γίνει μετά μια πλήρης σύγκριση με το μη ορθογωνικό μοντέλο πολλαπλής πρόσβασης (Non-Orthogonal Multiple Access – NOMA) το οποίο μελετάται σε αυτή τη διπλωματική εργασία.

4.2 Ορισμός Κωδικοποίησης CDMA

Η τεχνική CDMA (Code Division Multiple Access) ή στα ελληνικά τεχνική Πολλαπλής Πρόσβασης με Διαίρεση Κώδικα, αποτελεί μια μέθοδο προσπέλασης. Σε αυτή τη μέθοδο χρησιμοποιείται η διαδικασία εξαπλωμένου φάσματος σε συνδυασμό με ένα ειδικό σχήμα κωδικοποίησης, σύμφωνα με το οποίο κάθε χρήστης ο οποίος επιθυμεί να στείλει δεδομένα έχει ένα συγκεκριμένο και μοναδικό γι' αυτόν κώδικα που καθιστά εφικτή την ταυτόχρονη μετάδοση των πληροφοριών στο ίδιο κανάλι από διαφορετικούς χρήστες.

Βασικά χαρακτηριστικά της τεχνικής CDMA είναι η δυνατότητα που παρέχει στους χρήστες να μεταδίδουν δεδομένα σε ένα κανάλι για όσο χρονικό διάστημα επιθυμούν, χωρίς να υπόκεινται σε περιορισμούς ως προς τη συχνότητα, μέσω της αρχής εξάπλωσης του φάσματος. Ένας αποκλειστικός κώδικας για κάθε χρήστη εξαπλώνει το φασματικό περιεχόμενο του μεταδιδόμενου σήματος με τέτοιο τρόπο ώστε στον παραλήπτη μόνο ο κώδικας να μπορεί να ανακτήσει το σήμα. Αρνητικό στοιχείο της μεθόδου αυτής είναι ότι το σύνολο των σημάτων που μεταδίδονται χρησιμοποιώντας μοναδική κωδικοποίηση για τον κάθε χρήστη λαμβάνονται στον παραλήπτη ως ανεπιθύμητος θόρυβος.

Για να γίνει πιο κατανοητός ο τρόπος λειτουργίας της τεχνικής CDMA, παρατίθεται η παρακάτω εικόνα: [10]



Εικόνα 9: Μεταφορά δεδομένων σε ασύρματο CDMA δίκτυο

Σύμφωνα με την παραπάνω εικόνα, προκειμένου να μεταδοθούν ορθά τα ζητούμενα σήματα, παράγεται ένας ψευδοτυχαίος κώδικας διαφορετικός για κάθε κανάλι και για κάθε διαδοχική σύνδεση. Το προκύπτον σήμα διαμορφώνει το φέρον το οποίο, αφού ενισχυθεί, αποστέλλεται. Στο στάδιο της λήψης, το λαμβανόμενο σήμα πολλαπλασιάζεται με το αντίστοιχο τοπικό που προκύπτει από έναν ταλαντωτή, έτσι ώστε να ανακτηθεί το εξαπλωμένο ψηφιακό σήμα ενώ και πάλι παράγεται ένας ψευδοτυχαίος κώδικας ώστε να αντιστοιχεί στο προσδοκώμενο σήμα. Τέλος, ο δέκτης αποκτά τον κώδικα και η φάση “κλειδώνει” τον κώδικά της σε αυτόν, με συνέπεια το λαμβανόμενο σήμα να συσχετίζεται με τον κώδικα και η πληροφορία να εξάγεται.

4.3 Κατανομή Πόρων σε Ασύρματα CDMA Δίκτυα

4.3.1 Εισαγωγή

Σε αυτή την ενότητα θα αναπτύξουμε σύντομα το μαθηματικό μοντέλο το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τη θεωρητική επίλυση του προβλήματος της κατανομής της ισχύος εκπομπής σε ασύρματα CDMA δίκτυα. Εδώ θεωρούμε και πάλι άνω ζεύξη κυψελωτού ασύρματου δικτύου.

4.3.2 Παράμετροι Δικτύου

Θεωρούμε το ίδιο δίκτυο το οποίο παρατίθεται στην Εικόνα 10 της ενότητας 5.2.1, με 9 χρήστες, οι οποίοι λαμβάνουν υπηρεσίες πραγματικού και μη-πραγματικού χρόνου, σε συγκεκριμένες αποστάσεις από το σταθμό βάσης.

Ορίζουμε ως R_i, P_i το ρυθμό μετάδοσης και την ισχύ εκπομπής αντίστοιχα για κάθε χρήστη.

Το κέρδος καναλιού, $G(i)$, για τον κάθε χρήστη ορίζεται όπως ακριβώς και στο μοντέλο NOMA, δηλαδή:

$$G(i) = \frac{0.097}{d_i^a} \quad (4.1)$$

όπου d_i είναι η απόσταση του χρήστη i από το σταθμό βάσης και a ο εκθετικός παράγοντας εξασθένισης (βλ. Πίνακα 1)

Η μέγιστη ισχύς εκπομπής έχει ορισθεί στα 2 Watt, ο μέγιστος εφικτός ρυθμός μετάδοσης για τους χρήστες μη πραγματικού χρόνου είναι 96000 bps, ενώ για τους χρήστες πραγματικού χρόνου 64000 bps. Το διαθέσιμο εύρος ζώνης φάσματος είναι $W = 3.84 * 10^6$ Hz και οι παρεμβολές εντός της κυψέλης, οι συντελεστές θερμικού θορύβου, αλλά και τα σήματα που μεταδίδονται από τους άλλους χρήστες θεωρούνται ως “λευκός προσθετικός θόρυβος” που ακολουθεί την κατανομή Gauss με σταθερή πυκνότητα φάσματος ισχύος $I_0 = 5 * 10^{-15}$.

Συνοπτικά, παραθέτουμε τον παρακάτω πίνακα με τις τιμές των σταθερών που προαναφέρθηκαν:

Όνομα Σταθεράς	Τιμή
N	9
W	$3.84 * 10^6$ Hz
Rfixed-RT	64000 bps
Rfixed-NRT	96000 bps
I_0	$5 * 10^{-15}$
M	80
a	4
ART	$0.31 * 3.7$
ANRT	$0.31 * 3.7$
D	1

Πίνακας 1: Τιμές Παραμέτρων Προσομοίωσης CDMA

Ο σηματοθορυβικός λόγος, γ_i , ορίζεται ως εξής:

$$\gamma_i(\mathbf{r}_i, \mathbf{p}_i, \overline{\mathbf{p}}_{-i}) = \frac{W G_i P_i}{r_i I_{-i}} \quad (4.2)$$

όπου το σύνολο παρεμβολών I_{-i} ορίζεται αναλυτικά στην αμέσως επόμενη ενότητα.

4.3.3 Σύνολο Παρεμβολών I_{-i}

Εδώ πρέπει να αναφέρουμε τη σημαντική διαφορά του μοντέλου CDMA με το NOMA. Στο CDMA μοντέλο το σύνολο των παρεμβολών που αντιλαμβάνεται ο κάθε χρήστης $i \in \mathcal{S}$, συνίσταται από τις παρεμβολές εντός του δικτύου και από το λευκό προσθετικό θόρυβο κατά Gauss και δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$I_{-i}(\overline{\mathbf{p}}_{-i}) = \sum_{j=1}^N G_j p_j - G_i p_i + I_0 \quad (4.3)$$

δηλαδή ο κάθε χρήστης λαμβάνει μεγαλύτερο θόρυβο από τον αντίστοιχο θόρυβο που λαμβάνει όταν χρησιμοποιείται μοντέλο NOMA, όπως αναλύθηκε στη Ενότητα 2.2.2.

4.3.4 Μη Συνεργατικό Παίγνιο Ελέγχου Ισχύος Εκπομπής στη Ζεύξη Ανόδου χωρίς Πολιτική Κοστολόγησης

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης ορίζεται με τον ίδιο τρόπο που ορίστηκε και στο μοντέλο NOMA, στην ενότητα 3.4.1 και παρατίθεται συνοπτικά παρακάτω.

Συγκεκριμένα, το πρόβλημα μοντελοποιείται ως ένα μη-συνεργατικό παίγνιο,

$$\max_{A_i} U_i = \max_{A_i} U_i(\mathbf{P}_i, \overline{\mathbf{P}}_{j>i}), \quad \forall i \in \mathcal{S} \quad (4.4)$$

με περιορισμό : $\mathbf{0} \leq \mathbf{P}_i \leq \mathbf{P}_i^{max}$, του οποίου η λύση είναι το διάνυσμα $\overline{\mathbf{P}}^* = (P_1^*, P_2^*, \dots, P_N^*)$.

Το $\overline{\mathbf{P}}^* = (P_1^*, P_2^*, \dots, P_N^*)$ αποτελεί το σημείο ισορροπίας Nash (Nash equilibrium) του παραπάνω παιγνίου, εάν για οποιοδήποτε $i \in \mathcal{S}$, ισχύει $U_i(\mathbf{P}_i^*, \overline{\mathbf{P}}_{j>i}^*) > U_i(\mathbf{P}_i, \overline{\mathbf{P}}_{j>i}^*)$ για όλα τα $P_i \in A_i$.

Το P_i ορίζεται ως εξής:

$$P_i = \min\left\{\frac{\gamma_i^* R_i^*(P_i, \overline{\mathbf{P}}_{j>i}^*) \sum_{j>i}^N G_j P_j + I_0}{W G_i}, P_i^{max}\right\} \quad (4.5)$$

όπου το γ_i^* είναι η μοναδική λύση της εξίσωσης:

$$\gamma_i^* \frac{df(\gamma_i)}{d\gamma_i} - f(\gamma_i) = 0 \quad (4.6)$$

4.3.5 Μη Συνεργατικό Παίγνιο Ελέγχου Ισχύος Εκπομπής στη Ζεύξη Ανόδου με Πολιτική Κοστολόγησης

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης ορίζεται με τον ίδιο τρόπο που ορίστηκε και στο μοντέλο NOMA, στην ενότητα 3.5.1 και παρατίθεται συνοπτικά παρακάτω:

Συγκεκριμένα, εδώ γίνεται η χρήση της συνάρτησης ευχαρίστησης $U_i^{net}(\cdot)$:

$$U_i^{net}(P_i, \overrightarrow{P_{j>i}}) = \frac{R_i^*(P_i, \overrightarrow{P_{j>i}})}{P_i} - c_i(P_i, \overrightarrow{P_{j>i}}) \quad (4.7)$$

όπου το c_i ορίζεται ως μια εκθετική συνάρτηση της ισχύος εκπομπής, δηλαδή

$$c_i(P_i, \overrightarrow{P_{j>i}}) = c * (e^{P_i} - 1) \quad (4.8)$$

όπου το c είναι ο συντελεστής κοστολόγησης.

Συνεπώς, ορίζουμε το πρόβλημα βελτιστοποίησης ως εξής:

$$\max_{P_i \in A_i} U_i^{net} = \max_{P_i \in A_i} U_i^{net}(P_i, \overrightarrow{P_{j>i}}) = \frac{R_i^*(P_i, \overrightarrow{P_{j>i}})}{P_i} - c_i(P_i, \overrightarrow{P_{j>i}}) \quad (4.9)$$

με περιορισμό: $0 \leq P_i \leq P_i^{max}, \forall i \in S$

Το $\overrightarrow{P^*} = (P_1^*, P_2^*, \dots, P_N^*)$ αποτελεί το σημείο ισορροπίας κατά Nash (Nash equilibrium) του παραπάνω παιγνίου, εάν για οποιοδήποτε $i \in S$, ισχύει $U_i^{net}(P_i^*, \overrightarrow{P_{j>i}^*}) > U_i^{net}(P_i, \overrightarrow{P_{j>i}^*})$ για όλα τα $P_i \in A_i$.

4.3.5.1 Εύρεση σημείου ισορροπίας κατά Nash του μη-συνεργατικού παιγνίου με χρήση κοστολόγησης

Ένα σημείο ισορροπίας κατά Nash: $P_{net}^*, P_{net}^* \in (0, P_{crit}]$ για το παραπάνω παίγνιο, υπάρχει, είναι μοναδικό και δίνεται από τις παρακάτω συνθήκες:

$$P_{net}^* = \min\{\min_{\Lambda_{k,i}} [\arg\max(U_i^{net}(\Lambda_{k,i}))], P_i^{max}\} \quad (4.10)$$

όπου το $\Lambda_{k,i} = \{P_{1,i}^*, P_{2,i}^*, \dots, P_{K,i}^*\}$, $k=1, \dots, K$, $i \in S$ είναι το σύνολο των τοπικών μεγίστων του $P_i \in (0, P_{crit}]$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ

- 5.1 Εισαγωγή
- 5.2 Μονοεπίπεδα Ασύρματα NOMA Δίκτυα
- 5.3 Διεπίπεδα Ασύρματα NOMA Δίκτυα
- 5.4 Τριεπίπεδα Ασύρματα NOMA Δίκτυα

5.1 Εισαγωγή

Σε αυτή την ενότητα θα επικεντρωθούμε στο παίγνιο ελέγχου ισχύος εκπομπής κατά τη ζεύξη ανόδου με και χωρίς κοστολόγηση (pricing). Αρχικά, θα ορίσουμε πλήρως το μοντέλο του παιγνίου, αξιοποιώντας τη μαθηματική γνώση που παρατέθηκε στις προηγούμενες ενότητες και θα παραθέσουμε τα αποτελέσματα από την εκτέλεση των προσομοιώσεων που έγιναν με τη βοήθεια του προγραμματιστικού περιβάλλοντος MATLAB. Έπειτα, θα αξιολογήσουμε τα αποτελέσματα και συγκεκριμένα τις τιμές που λαμβάνουν τα μεγέθη που αφορούν τους χρήστες, όπως η ισχύς εκπομπής, η συνάρτηση ευχαρίστησης και το πλήθος των επαναλήψεων του αλγορίθμου. Τέλος, θα συγκρίνουμε με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του παιγνίου σε ασύρματα δίκτυα πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση κώδικα (Code Division Multiple Access – CDMA), ώστε να διαπιστωθούν τα πλεονεκτήματα του καινοτόμου μη ορθογωνικού μοντέλου πολλαπλής πρόσβασης (Non-Orthogonal Multiple Access – NOMA), το οποίο αποτελεί το αντικείμενο αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Οι προσομοιώσεις έγιναν σταδιακά σε μονοεπίπεδο, διεπίπεδο και τριεπίπεδο σύστημα και η μεθοδολογία και τα αποτελέσματα θα παρουσιαστούν ξεχωριστά για κάθε στάδιο της μελέτης με σκοπό την καλύτερη κατανόηση από τον αναγνώστη.

5.2 Μονοεπίπεδα Ασύρματα NOMA Δίκτυα

5.2.1 Σενάριο Προσομοίωσης

Μελετάται η ζεύξη ανόδου ενός ασύρματου δικτύου NOMA, το οποίο αποτελείται από μία μακροκυψέλη και βασίζεται στη μετάδοση δεδομένων σε χρονοσχισμές. Υποθέτουμε ότι στην κυψέλη είναι συνεχώς συνδεδεμένοι $N=9$ χρήστες, οι οποίοι είναι χωρισμένοι σε δύο κατηγορίες, δηλαδή στους χρήστες οι οποίοι αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου και στους χρήστες που αιτούνται υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου. Η μέγιστη ισχύς εκπομπής έχει οριστεί στα 2 Watt, ο μέγιστος εφικτός ρυθμός μετάδοσης για τους χρήστες μη πραγματικού χρόνου είναι 96000 bps, ενώ για τους χρήστες πραγματικού χρόνου 64000 bps. Το διαθέσιμο εύρος ζώνης φάσματος είναι $W=3.5 \cdot 10^6$ Hz και ο λευκός θόρυβος είναι $I_o=5 \cdot 10^{-15}$. Συνοπτικά έχουμε τον παρακάτω πίνακα με τα δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν:

Όνομα Σταθεράς	Τιμή
N	9
W	$3.5 \cdot 10^6$ Hz
$R_{fixed-RT}$	64000 bps
$R_{fixed-NRT}$	96000 bps
I_o	$5 \cdot 10^{-15}$
M	80
A	4

A_{RT}	0.33 * 3.7
A_{NRT}	0.33 * 3.7
D	1

Πίνακας 2: Τιμές Παραμέτρων Προσομοίωσης μονοεπίπεδου NOMA

Το κέρδος του καναλιού μετάδοσης του κάθε χρήστη μοντελοποιείται ως εξής:

$$G(i) = \frac{0.097}{d_i^a} \quad (5.1)$$

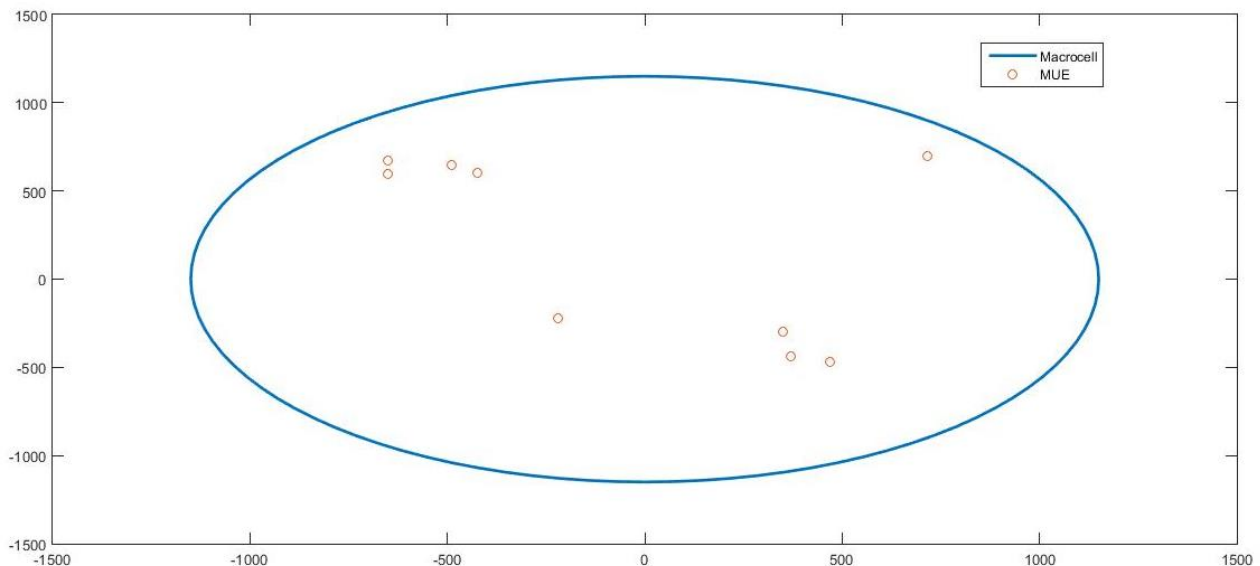
όπου d_i είναι η απόσταση του χρήστη i από το σταθμό βάσης και a ο εκθετικός παράγοντας εξασθένισης (βλ. Πίνακα 2)

Οι $N=9$ χρήστες της κυψέλης υποθέτουμε ότι τοποθετούνται μέσα στην κυψέλη στις εξής αποστάσεις από το σταθμό βάσης:

$$d = [310 \ 460 \ 570 \ 660 \ 740 \ 810 \ 880 \ 940 \ 1000] \text{ m}$$

Οι χρήστες που βρίσκονται στις θέσεις 310-660m είναι χρήστες πραγματικού χρόνου, από εδώ και στο εξής θα αναφέρονται με τη συντομογραφία RT (Real-Time users), ενώ οι χρήστες που βρίσκονται στις θέσεις 740-1000m είναι χρήστες μη-πραγματικού χρόνου και θα αναφέρονται με τη συντομογραφία NRT (Non-Real Time users).

Το δίκτυό μας έχει, λοιπόν, την παρακάτω μορφή:



Εικόνα 10: Η μακροκυψέλη με τους 9 χρήστες στις αποστάσεις d_i από το BS

5.2.2 Αλγόριθμος Κατανομής Ισχύος Εκπομπής Χωρίς Πολιτική Κοστολόγησης

Ο αλγόριθμος υλοποίησης του παιγνίου χωρίς χρήση κοστολόγησης οδηγεί στην εύρεση του μοναδικού σημείου ισορροπίας κατά Nash, με στόχο τη βέλτιστη κατανομή ισχύος εκπομπής στο ασύρματο δίκτυο.

Ο αλγόριθμος είναι ο ακόλουθος:

Βήμα 1: Κάθε χρήστης i επιλέγει μία τυχαία επιτρεπτή τιμή για την ισχύ εκπομπής p_i^0 (δηλαδή $0 \leq p_i^0 \leq p_i^{max}$). Ορίζουμε $k=0$, όπου k είναι ο αριθμός των επαναλήψεων του αλγορίθμου (iterations).

Βήμα 2: Ο τερματικός σταθμός ανακοινώνει τη συνολική παρεμβολή $I^k(p^k)$ από όλους του χρήστες του συστήματος, δεδομένης της ισχύος εκπομπής για κάθε χρήστη. Έπειτα, ο κάθε χρήστης υπολογίζει την παρεμβολή που δέχεται ατομικά από τους υπόλοιπους χρήστες $I_{j>i}^k(p_{j>i}^k)$ (σύμφωνα με το μοντέλο NOMA που αναλύθηκε παραπάνω) και επαναπροσδιορίζει την ισχύ εκπομπής του p_i^{k+1} όπως αναπτύχθηκε στην ενότητα 3.3.

Βήμα 3: Εάν οι τιμές της ισχύος εκπομπής για τον κάθε χρήστη μεταξύ των διαδοχικών επαναλήψεων συγκλίνουν σε μια συγκεκριμένη τιμή, δηλαδή εάν ισχύει: $(|P_i^{k+1} - P_i^k| \leq \epsilon)$ τότε σταματά.

Βήμα 4: Σε διαφορετική περίπτωση, όρισε $k=k+1$ και πήγαινε στο Βήμα 2.

5.2.3 Αλγόριθμος Κατανομής Ισχύος Εκπομπής με Πολιτική Κοστολόγησης

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η εισαγωγή μιας μορφής κοστολόγησης είναι αναγκαία διότι οι χρήστες επιδιώκουν εγωιστικά, ο καθένας ξεχωριστά, την επίτευξη του βέλτιστου επιπέδου ισχύος εκπομπής τους, κάτι το οποίο δεν είναι κοινωνικά αποδεκτό. Συνεπώς, μέσω της επιβολής μιας “ποινής” στη χωρίς μέτρο κατανάλωση των πόρων του δικτύου, οι χρήστες υποχρεώνονται σε μία πιο δίκαιη και συνεργατική συμπεριφορά, η οποία τελικά ευνοεί τόσο το σύστημα, όσο και τους ίδιους τους χρήστες, αφού αυξάνεται η τιμή της συνάρτησης ευχαρίστησής τους και μειώνεται η ισχύς εκπομπής τους.

Πριν παρουσιαστούν τα αριθμητικά αποτελέσματα, θα αναλυθούν τα βήματα του αλγορίθμου με στόχο να γίνει κατανοητή η συλλογιστική πορεία που ακολουθήθηκε μέχρι να καταλήξουμε στο σημείο ισορροπίας.

Συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος αυτός αποτελείται από δύο μέρη. Το πρώτο μέρος αφορά το σταθμό βάσης και είναι υπεύθυνο για την ανακοίνωση της τιμής που θα λαμβάνει ο συντελεστής κοστολόγησης (pricing factor) c σε κάθε επανάληψη. Το δεύτερο μέρος αφορά τον κάθε χρήστη ξεχωριστά, ο οποίος αφού λάβει την επιβληθείσα κοστολόγηση, θα πρέπει να λάβει ένα σύνολο αποφάσεων με στόχο να συγκλίνει στη βέλτιστη ισχύ εκπομπής του στην άνω ζεύξη και ταυτόχρονα να μεγιστοποιήσει την ευχαρίστησή του.

Ο αλγόριθμος υλοποίησης του παιγνίου με χρήση κοστολόγησης, είναι ο ακόλουθος:

- **Αλγόριθμος Μέρος 1ο (Δίκτυο)**

Βήμα 1: Ανακοίνωση της σταθεράς c , η οποία είναι κοινή για όλους τους χρήστες.

Βήμα 2: Κάθε χρήστης υπολογίζει τη συνάρτηση ευχαρίστησής του U_i^{tel} , χωρίς κοστολόγηση. Οι τιμές αυτές για όλους τους χρήστες, αποθηκεύονται σε έναν πίνακα.

Βήμα 3: Αθροίζονται όλες οι τιμές U_i^{tel} των χρηστών και αποθηκεύονται στη σταθερά SUMUtel.

Βήμα 4: Μεταβάλλουμε το c κατά Δc και ακολουθούμε τα βήματα 1-3.

Βήμα 5: Εάν $SUMU_{tel}(c+\Delta c) > SUMU_{tel}(c)$ και ταυτόχρονα το $U_i^{tel}(c+\Delta c) > U_i^{tel}(c)$ για κάθε χρήστη $i=1,2,\dots,9$, τότε αυξάνουμε ξανά το c κατά Δc και μεταβαίνουμε στο Βήμα 1. Εάν όμως ισχύει $SUMU_{tel}(c+\Delta c) > SUMU_{tel}(c)$ και ταυτόχρονα $U_i^{tel}(c+\Delta c) \leq U_i^{tel}(c)$, τότε σταματάμε να μεταβάλλουμε το c και ανακοινώνουμε $c = c_{best}$.

- **Αλγόριθμος Μέρος 2ο (Χρήστης)**

Βήμα 1: Κάθε χρήστης i επιλέγει τυχαία μία επιτρεπτή τιμή για την ισχύ εκπομπής p_i^0 (δηλαδή $0 \leq p_i^0 \leq p_i^{max}$). Ορίζουμε $k=0$, όπου k είναι ο αριθμός των επαναλήψεων του αλγορίθμου (iterations).

Βήμα 2: Ο τερματικός σταθμός ανακοινώνει τη συνολική παρεμβολή $I^k(p^k)$ από όλους του χρήστες του συστήματος, δεδομένης της ισχύος εκπομπής για κάθε χρήστη. Έπειτα, ο κάθε χρήστης υπολογίζει την παρεμβολή που δέχεται ατομικά από τους υπόλοιπους χρήστες $I_{j>i}^k(p_{j>i}^k)$ (σύμφωνα με το μοντέλο NOMA που αναλύθηκε παραπάνω) και επαναπροσδιορίζει την ισχύ εκπομπής του p_i^{k+1} όπως αναπτύχθηκε στην ενότητα 3.3.

Βήμα 3: Εάν οι τιμές της ισχύος εκπομπής για τον κάθε χρήστη μεταξύ των διαδοχικών επαναλήψεων συγκλίνουν σε μια συγκεκριμένη τιμή, δηλαδή εάν ισχύει: $(|P_i^{k+1} - P_i^k| \leq \epsilon)$ τότε σταμάτα.

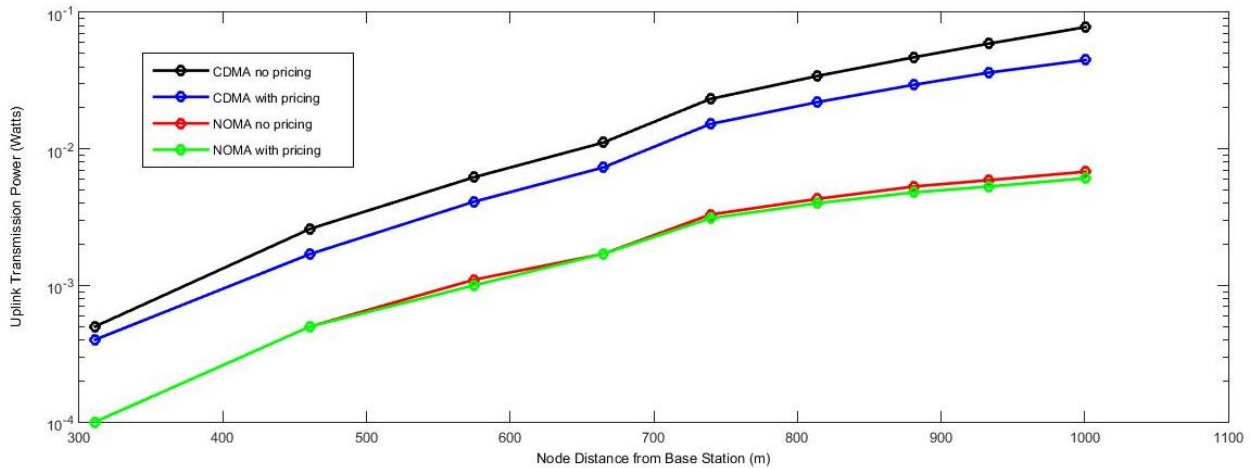
Βήμα 4: Σε διαφορετική περίπτωση, όρισε $k=k+1$ και πήγαινε στο Βήμα 2.

5.2.4 Αριθμητικά Αποτελέσματα - Συγκρίσεις

Σε αυτή την ενότητα παρατίθενται τα ποσοτικά αποτελέσματα, καθώς και οι γραφικές παραστάσεις από την εκτέλεση των δύο αλγορίθμων (χωρίς και με κοστολόγηση) στο περιβάλλον MATLAB για το μη συνεργατικό παίγνιο, όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 3, με τις τιμές των σταθερών όπως αναγράφονται στον Πίνακα 2. Παράλληλα παρατίθενται και οι γραφικές παραστάσεις των αποτελεσμάτων σε CDMA περιβάλλον, ώστε να γίνει η σύγκριση των δύο τεχνικών.

Με βάση τη σχέση για το κέρδος των καναλιών $G(i)$ που αναλύθηκε παραπάνω, συμπεραίνουμε ότι όσο πιο μακριά βρίσκεται ένας χρήστης από το σταθμό βάσης, τόσο δυσμενέστερες γίνονται οι συνθήκες για το συγκεκριμένο κανάλι. Γι' αυτό το λόγο, όσο αυξάνεται η απόσταση από το σταθμό βάσης, τόσο οι χρήστες αυξάνουν την ισχύ εκπομπής προκειμένου να ανταποκριθούν στις απαιτούμενες προδιαγραφές των λαμβανόμενων υπηρεσιών (RT, NRT). Επίσης, παρατηρείται μείωση του ρυθμού μετάδοσης, που αυτό απορρέει από την αναπόφευκτη υποβάθμιση της ποιότητας υπηρεσίας.

1. Για το διάνυσμα της ισχύος εκπομπής στη ζεύξη ανόδου \mathbf{P}^* ως προς την απόσταση των χρηστών από το σταθμό βάσης, τα αποτελέσματα που λάβαμε με χρήση των μοντέλων NOMA και CDMA με και χωρίς τη χρήση κοστολόγησης, συγκεντρώνονται στο παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 1: Ισχύς εκπομπής των χρηστών ως προς την απόσταση από το σταθμό βάσης στο σημείο ισορροπίας για το παίγνιο με και χωρίς κοστολόγηση στα μοντέλα NOMA και CDMA

Καταρχάς παρατηρούμε ότι και για τα δύο μοντέλα, είτε έχουμε κοστολόγηση είτε όχι, η ισχύς αυξάνεται με την αύξηση της απόστασης από το BS. Αυτό σημαίνει ότι πρώτον, η ισχύς εκπομπής εξαρτάται από τις συνθήκες καναλιού και δεύτερον ότι οι χρήστες που βρίσκονται πιο κοντά στο BS ευνοούνται διότι μεταδίδουν τις πληροφορίες τους με χαμηλότερες απαιτήσεις ισχύος εκπομπής.

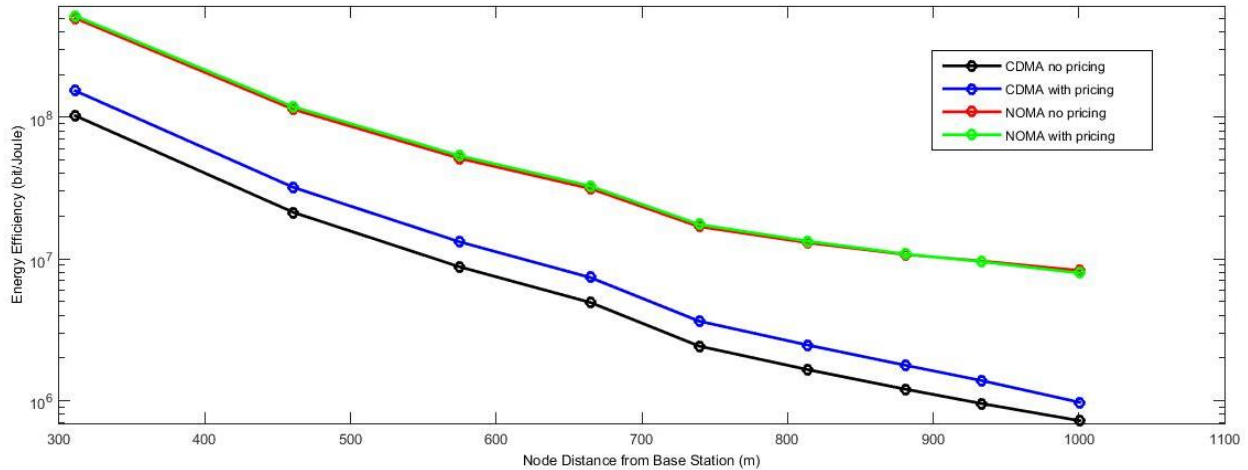
Όσον αφορά τη σύγκριση των δύο μοντέλων, παρατηρούμε τα εξής: Όταν χρησιμοποιούμε το μοντέλο NOMA χωρίς κοστολόγηση, η ισχύς εκπομπής λαμβάνει μέγιστη τιμή 0.0068W σε απόσταση 1000m και μικρότερη τιμή 0.0001W στα 310m. Στο πρόβλημα που χρησιμοποιεί την τεχνική CDMA, η μέγιστη τιμή της ισχύος εκπομπής είναι 0.0780W σε απόσταση 940m και η μικρότερη 0.0005W στα 310m. Τα αποτελέσματα αυτά είναι πολύ ενθαρρυντικά, καθώς παρατηρούμε μία αρκετά μεγάλη μείωση στα επίπεδα της εκπεμπόμενης ισχύος, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα οι χρήστες να εκπέμπουν με ακόμα χαμηλότερη ισχύ, και κατά συνέπεια να επιτυγχάνεται χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας και περισσότερη διάρκεια ζωής της μπαταρίας.

Όταν χρησιμοποιούμε κοστολόγηση, τότε η ισχύς μειώνεται ανεπαίσθητα σε σχέση με το αντίστοιχο πρόβλημα χωρίς κοστολόγηση. Αντιθέτως, βλέπουμε μια μεγάλη μείωση της ισχύος στο πρόβλημα που χρησιμοποιεί την τεχνική CDMA. Από αυτό συμπεραίνουμε πως η χρήση κοστολόγησης έχει πολύ μικρή επιρροή στη μείωση της ισχύος εκπομπής όταν χρησιμοποιείται το NOMA μοντέλο, κάτι το οποίο απορρέει από το εξής γεγονός:

Ο θόρυβος που προκαλείται από τις εκπομπές των χρηστών είναι ήδη μειωμένος λόγω του μοντέλου NOMA και κατά συνέπεια οι τιμές της ισχύος είναι ήδη σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Συνεπώς, η επιβολή μιας μορφής κοστολόγησης δεν θα επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό τους χρήστες.

2. Ένα πολύ σημαντικό μέγεθος, το οποίο δείχνει την κατανάλωση ισχύος εκπομπής σε σχέση με τα δεδομένα που μεταφέρονται, είναι η αποδοτικότητα ενέργειας (energy efficiency) η οποία μετράται σε $\frac{bps}{Watt} = \frac{bits/sec}{Joule/sec} = \frac{bits}{Joule}$

Παρακάτω δίνεται το διάγραμμα της αποδοτικότητας ενέργειας σε σχέση με την απόσταση από το σταθμό βάσης, με και χωρίς τη χρήση κοστολόγησης, για τα μοντέλα CDMA και NOMA.



Διάγραμμα 2: Αποδοτικότητα ενέργειας ως προς την απόσταση από το σταθμό βάσης στο σημείο ισορροπίας για το παίγνιο με και χωρίς κοστολόγηση στα μοντέλα NOMA και CDMA

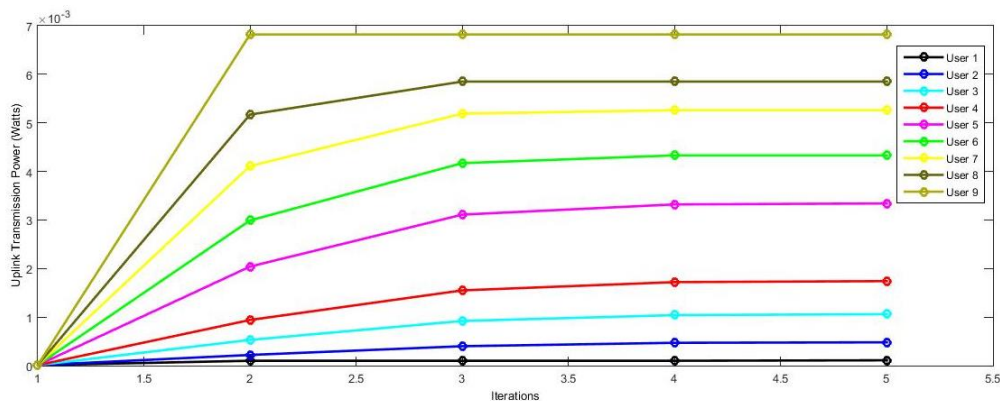
Από το παραπάνω διάγραμμα συμπεραίνουμε ότι το μοντέλο NOMA είναι ενεργειακά αποδοτικότερο σε σχέση με το CDMA, διότι για το ίδιο ποσό ενέργειας μεταφέρονται περισσότερα δεδομένα (bits).

Οι χρήστες που βρίσκονται πιο κοντά στο σταθμό βάσης, απολαμβάνουν καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών. Όσο αυξάνει η απόσταση, τόσο αυξάνει και η ισχύς εκπομπής (Watt), άρα μειώνεται η αποδοτικότητα ενέργειας ($\frac{bits}{Joule} = \frac{bits}{W*s}$), με αποτέλεσμα οι πιο απομακρυσμένοι χρήστες να λαμβάνουν μικρότερη απόδοση από την υπηρεσία που τους εξυπηρετεί (είτε είναι RT, είτε NRT).

3. Ένα πολύ σημαντικό στοιχείο είναι ο αριθμός των επαναλήψεων που απαιτούνται ώστε από ένα συγκεκριμένο σημείο εκκίνησης (εδώ $P=0$) να καταλήξουμε στο τελικό σημείο ισορροπίας για όλους τους χρήστες. Ο αριθμός των επαναλήψεων (iterations), αποτελεί πολύ βασικό κριτήριο για την αποτελεσματικότητα και την εγγυρότητα του αλγορίθμου.

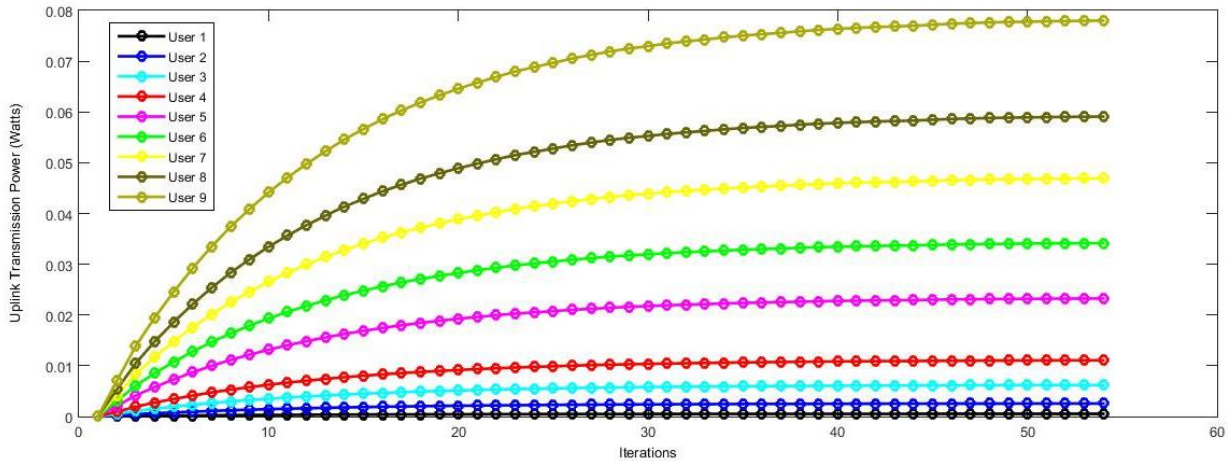
Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιούμε βασίζεται στην επαναληπτική δομή προκειμένου να τερματίσει την εκτέλεσή του στο ζητούμενο σημείο ισορροπίας κατά Nash, έχοντας ως κριτήριο τη σύγκλιση των παραμέτρων σε μια δεδομένη τιμή.

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται ο αριθμός επαναλήψεων του αλγορίθμου χωρίς κοστολόγηση για τη σύγκλιση στο τελικό διάνυσμα της ισχύος εκπομπής στο μοντέλο NOMA:



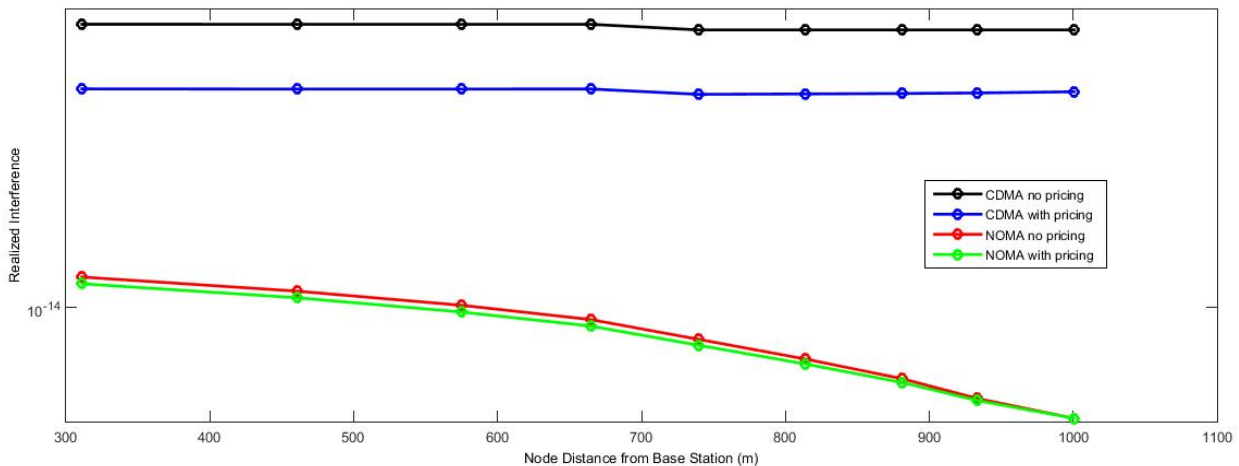
Διάγραμμα 3: Αριθμός επαναλήψεων αλγορίθμου για τη σύγκλιση στο τελικό διάνυσμα της ισχύος εκπομπής στο NOMA

Βλέπουμε ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος συγκλίνει στις 5 επαναλήψεις στην τελική τιμή της ισχύος εκπομπής, για όλους τους χρήστες. Αντιθέτως, ο αλγόριθμος του προβλήματος το οποίο χρησιμοποιεί την τεχνική CDMA, χρειάζεται 54 επαναλήψεις μέχρι να συγκλίνει, όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 4: Αριθμός επαναλήψεων αλγορίθμου για τη σύγκλιση στο τελικό διάνυσμα της ισχύος εκπομπής στο CDMA

4. Όσον αφορά τις παρεμβολές σε σχέση με την απόσταση από το σταθμό βάσης, παραθέτουμε το συγκριτικό διάγραμμα ανάμεσα στα δύο μοντέλα:



Διάγραμμα 5: Παρεμβολές σε σχέση με την απόσταση από το σταθμό βάσης, για το παίγνιο με και χωρίς κοστολόγηση στα μοντέλα NOMA και CDMA

Όπως ήταν αναμενόμενο, οι παρεμβολές στους χρήστες στο μοντέλο NOMA είναι αισθητά μικρότερες σε σχέση με το CDMA. Στο πρόβλημα που χρησιμοποιεί το μοντέλο NOMA, οι χρήστες κοντά στο σταθμό βάσης έχουν μεγαλύτερες παρεμβολές σε σχέση με τους χρήστες που βρίσκονται πιο μακριά, αφού όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως, δέχονται το θόρυβο των χρηστών με χειρότερο κέρδος καναλιού (G).

Τέλος, παραθέτουμε τους παρακάτω πίνακες με τα δεδομένα που λάβαμε από τις προσομοιώσεις για τους 9 χρήστες για τα μεγέθη: ισχύς εκπομπής, συνάρτηση ευχαρίστησης και παρεμβολές. Επίσης, υπολογίσαμε το μέσο όρο των μετρήσεων κάθε μεγέθους για κάθε μοντέλο και υπολογίσαμε τα ποσοστά βελτίωσης των μεγεθών αυτών, όταν χρησιμοποιούμε το μοντέλο NOMA σε σχέση με το CDMA.

Ισχύς Εκπομπής (Power σε Watt)

CDMA (no pricing)	0.0005	0.0026	0.0062	0.0111	0.0232	0.0342	0.0469	0.0591	0.0780
CDMA (pricing)	0.0004	0.0017	0.0041	0.0073	0.0152	0.0220	0.0295	0.0362	0.0448
NOMA (no pricing)	0.0001	0.0005	0.0011	0.0017	0.0033	0.0043	0.0053	0.0059	0.0068
NOMA (pricing)	0.0001	0.0005	0.0010	0.0017	0.0031	0.0040	0.0048	0.0053	0.0061

Πίνακας 3: Τιμές ισχύος εκπομπής για τους 9 χρήστες της μακροκυψέλης στα μοντέλα CDMA και NOMA, με και χωρίς κοστολόγηση

Συνάρτηση Ευχαρίστησης (Utility) (*10⁸)

CDMA (no pricing)	1.0236	0.2125	0.0878	0.0492	0.0242	0.0165	0.0120	0.0095	0.0072
CDMA (pricing)	1.5348	0.3190	0.1318	0.0738	0.0363	0.0246	0.0177	0.0138	0.0097
NOMA (no pricing)	4.9984	1.1338	0.5121	0.3133	0.1688	0.1300	0.1072	0.0964	0.0826
NOMA (pricing)	5.1850	1.1822	0.5342	0.3263	0.1747	0.1332	0.1080	0.0954	0.0793

Πίνακας 4: Τιμές της συνάρτησης ευχαρίστησης για τους 9 χρήστες της μακροκυψέλης στα μοντέλα CDMA και NOMA, με και χωρίς κοστολόγηση

Παρεμβολές και Λευκός Θόρυβος (Interference & White Noise)(* 10⁻¹³)

CDMA (no pricing)	0.5925	0.5924	0.5923	0.5923	0.5719	0.5719	0.5719	0.5719	0.5719
CDMA (pricing)	0.3950	0.3945	0.3946	0.3947	0.3817	0.3826	0.3837	0.3850	0.3879
NOMA (no pricing)	0.1213	0.1110	0.1016	0.0929	0.0821	0.0725	0.0641	0.0566	0.0500
NOMA (pricing)	0.1163	0.1065	0.0974	0.0892	0.0791	0.0703	0.0626	0.0559	0.0500

Πίνακας 5: Τιμές Παρεμβολών(Interference) για τους 9 χρήστες της μακροκυψέλης στα μοντέλα CDMA και NOMA, με και χωρίς κοστολόγηση

**Ποσοστά % βελτίωσης
Ισχύς Εκπομπής (Watt)**

	Μέση Τιμή	Ποσοστό Μείωσης
CDMA (no pricing)	0.0291	-
CDMA (pricing)	0.0179	38.49%(από το CDMA no pricing)
NOMA(no pricing)	0.0032	89.00%(από το CDMA no pricing)
NOMA (pricing)	0.0029	9.38%(από το NOMA no pricing)

Πίνακας 6: Ποσοστά % βελτίωσης της ισχύος εκπομπής των χρηστών στο μοντέλο NOMA σε σχέση με το CDMA

Παρεμβολές

	Μέση Τιμή	Ποσοστό Μείωσης
CDMA (no pricing)	$5.8100 * 10^{-14}$	-
CDMA (pricing)	$3.8886 * 10^{-14}$	33.07%(από το CDMA no pricing)
NOMA(no pricing)	$8.3567 * 10^{-15}$	85.62%(από το CDMA no pricing)
NOMA (pricing)	$8.0811 * 10^{-15}$	3.30%(από το NOMA no pricing)

Πίνακας 7: Ποσοστά % βελτίωσης των παρεμβολών των χρηστών στο μοντέλο NOMA σε σχέση με το CDMA

Ενεργειακή Απόδοση

	Μέση Τιμή	Ποσοστό Αύξησης
CDMA (no pricing)	$1.6028 * 10^7$	-
CDMA (pricing)	$2.4017 * 10^7$	49.84%(από το CDMA no pricing)
NOMA(no pricing)	$8.3807 * 10^7$	422.88%(από το CDMA no pricing)
NOMA (pricing)	$8.6870 * 10^7$	3.65%(από το NOMA no pricing)

Πίνακας 8: Ποσοστά % βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης των χρηστών στο μοντέλο NOMA σε σχέση με το CDMA

5.3 Διεπίπεδα Ασύρματα NOMA Δίκτυα

5.3.1 Σενάριο Προσομοίωσης

Σε αυτό το σενάριο μελετάται η ζεύξη ανόδου ενός ασύρματου δικτύου NOMA, το οποίο αποτελείται από μία μακροκυψέλη και έξι φεμτοκυψέλες και βασίζεται στη μετάδοση δεδομένων σε χρονοσχισμές. Για λόγους διευκόλυνσης της υλοποίησης των αλγορίθμων, υποθέτουμε ότι στη μακροκυψέλη είναι συνεχώς συνδεδεμένοι $N=9$ χρήστες, εκ των οποίων οι τέσσερις είναι χρήστες που αιτούνται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου και οι υπόλοιποι πέντε αιτούνται υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου. Επίσης, σε κάθε φεμτοκυψέλη υπάρχουν τέσσερις χρήστες, οι δύο πραγματικού και οι άλλοι δύο μη πραγματικού χρόνου. Η μέγιστη ισχύς εκπομπής έχει ορισθεί στα 2 *Watts*, ο μέγιστος εφικτός ρυθμός μετάδοσης για τους χρήστες μη πραγματικού χρόνου είναι 96000 *bps*, ενώ για τους χρήστες πραγματικού χρόνου 64000 *bps*. Το διαθέσιμο εύρος ζώνης φάσματος είναι $W=3.5 \cdot 10^6 \text{ Hz}$ και ο λευκός θόρυβος είναι $I_o=5 \cdot 10^{-15}$. Ο Πίνακας 2 συνοψίζει τις τιμές των παραμέτρων που θα χρησιμοποιηθούν στο διεπίπεδο πρόβλημα.

Οι τύποι που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των κερδών των χρηστών των κυψελών έχουν αναλυθεί διεξοδικά στο Κεφάλαιο 3.3.1.2.

Οι $N=9$ χρήστες της κυψέλης υποθέτουμε ότι τοποθετούνται μέσα στην κυψέλη στις εξής αποστάσεις από το σταθμό βάσης:

$$d = [310 \ 460 \ 570 \ 660 \ 740 \ 810 \ 880 \ 940 \ 1000] \text{ m}$$

Οι χρήστες που βρίσκονται στις θέσεις 310-660m είναι χρήστες πραγματικού χρόνου, από εδώ και στο εξής θα αναφέρονται με τη συντομογραφία RT, ενώ οι χρήστες που βρίσκονται στις θέσεις 740-1000m είναι χρήστες μη-πραγματικού χρόνου και θα αναφέρονται με τη συντομογραφία NRT.

Οι σταθμοί βάσεων των φεμτοκυψελών βρίσκονται στις εξής συντεταγμένες (x,y):

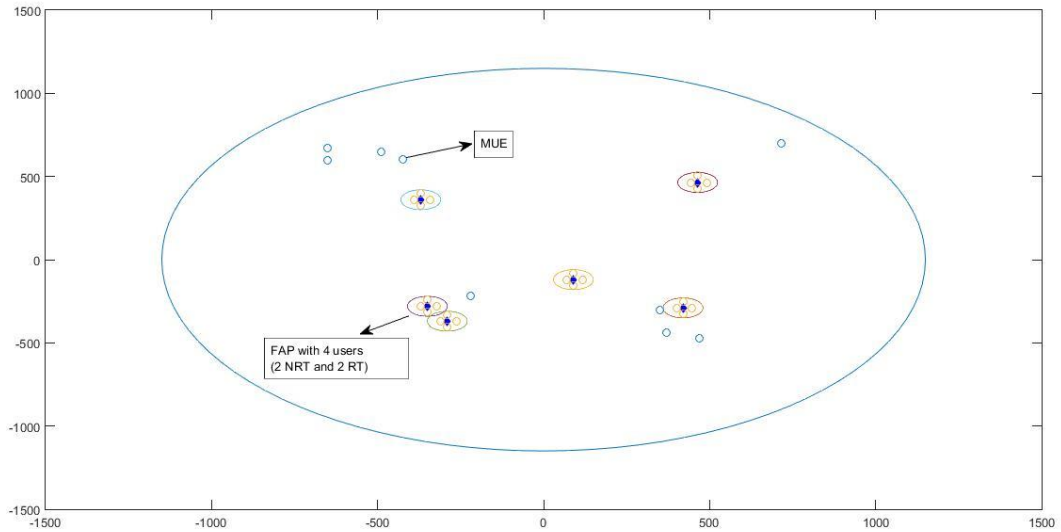
$$(420, -290) \ (90, -120) \ (-350, -280) \ (-290, -370) \ (-370, 360) \ (464, 464)$$

Οι τέσσερις χρήστες της κάθε φεμτοκυψέλης βρίσκονται στις εξής συντεταγμένες σε σχέση με το σταθμό βάσης της εκάστοτε φεμτοκυψέλης (x,y):

$$(x-20, y) \ (x, y-35) \ (x+27, y) \ (x, y+40)$$

Οι χρήστες που βρίσκονται στις θέσεις $(x-20, y)$ και $(x+27, y)$ είναι χρήστες πραγματικού χρόνου, ενώ αυτοί που βρίσκονται στις θέσεις $(x, y-35)$ και $(x, y+40)$ είναι χρήστες μη πραγματικού χρόνου.

Το δίκτυό μας έχει, λοιπόν, την παρακάτω μορφή:



Εικόνα 11: Διεπίπεδο σύστημα με μία μακροκυψέλη και έξι φεμτοκυψέλες

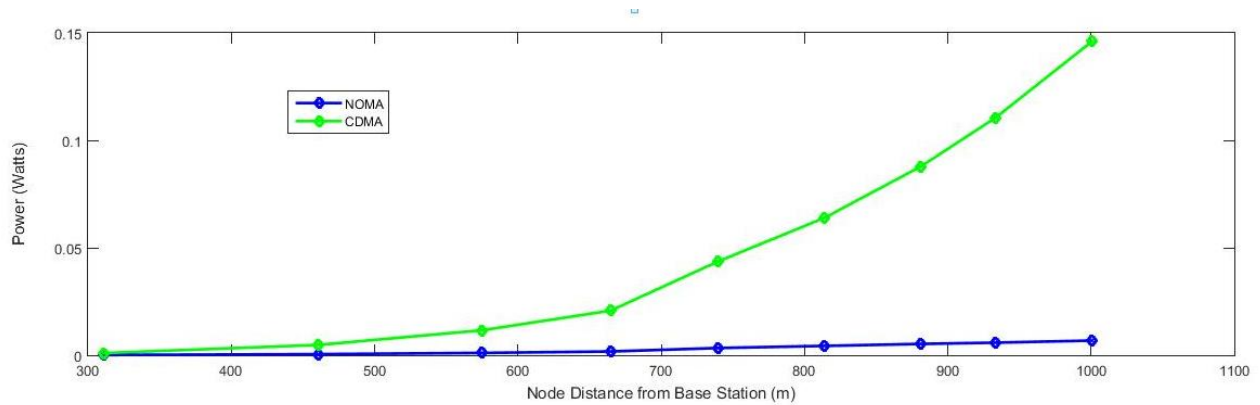
5.3.2 Αλγόριθμος Κατανομής Ισχύος Εκπομπής

Ο αλγόριθμος υλοποίησης του παιγνίου είναι ίδιος με αυτόν που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 5.2.2, με τη μόνη διαφορά ότι τώρα στο πρόβλημά μας υπεισέρχονται περισσότεροι χρήστες, διαφορετικών κυψελών, οπότε θα πρέπει ο κάθε χρήστης να συγκρίνει το κέρδος του με τα κέρδη όλων των άλλων χρηστών του συστήματος και εάν αυτοί έχουν χαμηλότερο κέρδος τότε θα υπολογίζονται στην παρεμβολή που δέχεται ο συγκεκριμένος χρήστης (σύμφωνα πάντα με το μοντέλο NOMA).

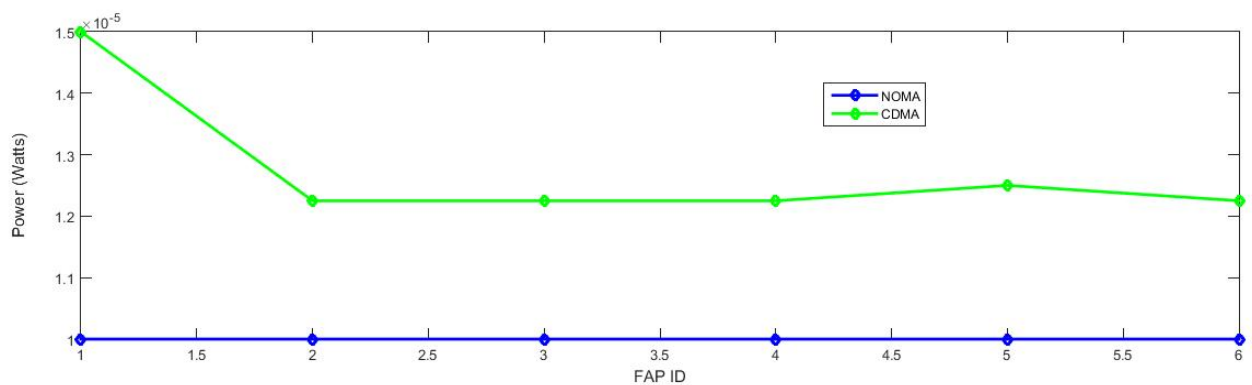
5.3.3 Αριθμητικά Αποτελέσματα - Συγκρίσεις

Σε αυτή την ενότητα παρατίθενται τα ποσοτικά αποτελέσματα, καθώς και οι γραφικές παραστάσεις από την εκτέλεση των δύο αλγορίθμων στο περιβάλλον MATLAB για το μη συνεργατικό παίγνιο, όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 3, με τις τιμές των σταθερών όπως αναγράφονται στον Πίνακα 2. Τα αποτελέσματα αυτά χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: στα αποτελέσματα που αφορούν τους χρήστες της μακροκυψέλης (Macrocell User Equipment - MUE) και σε αυτά που αφορούν τους χρήστες της φεμτοκυψέλης (Femtocell User Equipment - FUE). Παράλληλα παρατίθενται και οι γραφικές παραστάσεις των αποτελεσμάτων σε CDMA περιβάλλον, ώστε να γίνει η σύγκριση των δύο τεχνικών.

1. Για το διάνυσμα της ισχύος εκπομπής στη ζεύξη ανόδου \mathbf{P}^* ως προς την απόσταση των χρηστών από το σταθμό βάσης τους, τα αποτελέσματα που λάβαμε με χρήση των NOMA και CDMA μοντέλων συγκεντρώνονται στα παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 6: Ισχύς εκπομπής των MUE χρηστών ως προς την απόσταση από το σταθμό βάσης στο σημείο ισορροπίας για το παίγνιο στα μοντέλα NOMA και CDMA



Διάγραμμα 7: Μέση ισχύς εκπομπής σε κάθε φεμοκυψέλη στα μοντέλα NOMA και CDMA

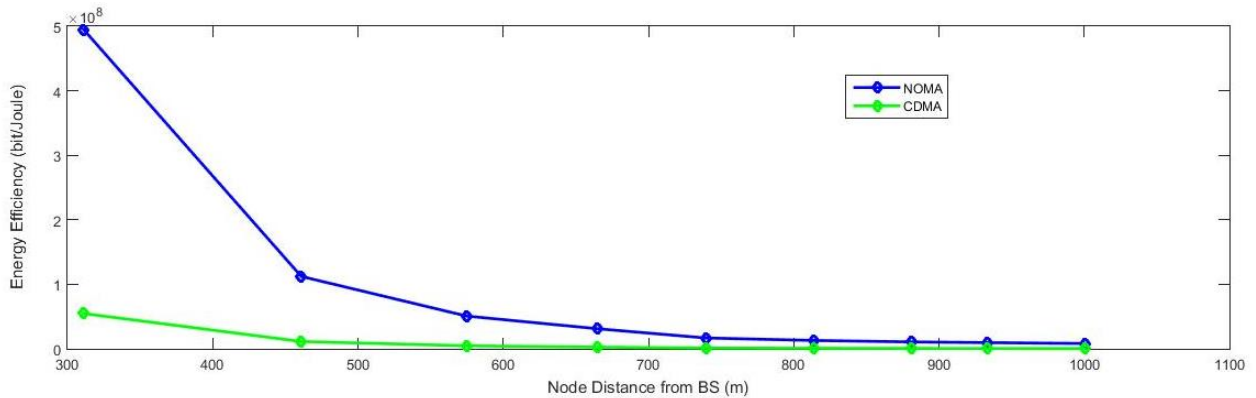
Καταρχάς παρατηρούμε ότι και για τους δύο χρήστες (MUE και FUE) η ισχύς μειώνεται σημαντικά όταν χρησιμοποιείται το μοντέλο NOMA, διότι όπως έχει αναλυθεί προηγουμένως, μειώνονται οι παρεμβολές που λαμβάνουν οι χρήστες.

Στο διάγραμμα 6 παρατηρείται ότι οι χρήστες που βρίσκονται πιο μακριά από το σταθμό βάσης εκπέμπουν με μικρότερη ισχύ στο NOMA απ'ότι στο CDMA μοντέλο. Όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως, οι χρήστες αυτοί λαμβάνουν λιγότερες παρεμβολές, αφού σύμφωνα με το μοντέλο NOMA οι χρήστες δέχονται παρεμβολές από τους χρήστες οι οποίοι έχουν χειρότερο κέρδος από αυτούς.

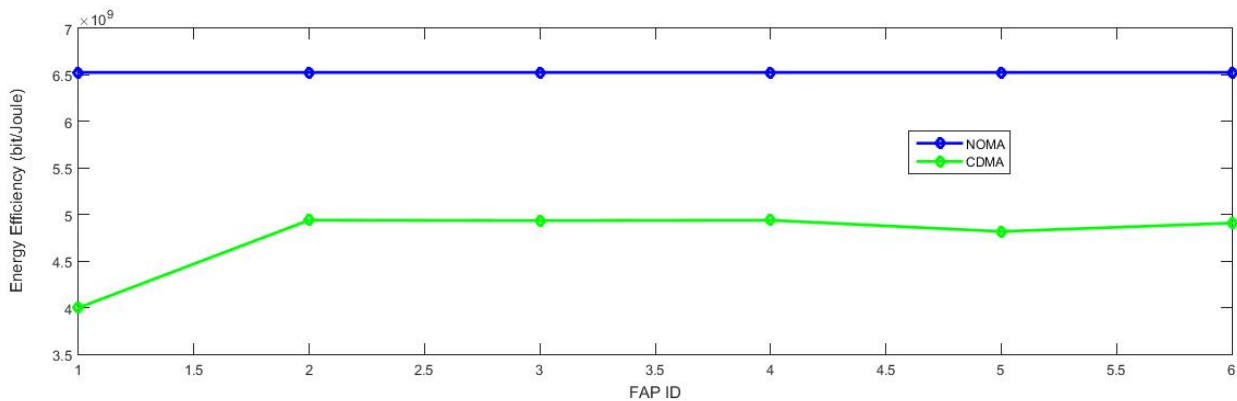
Στο διάγραμμα 7 απεικονίζεται ο μέσος όρος των τιμών της ισχύος εκπομπής κάθε φεμοκυψέλης, στην οποία βρίσκονται τέσσερις χρήστες. Εδώ παρατηρείται ότι για κάθε φεμοκυψέλη μειώνεται ο μέσος όρος της ισχύος. Επίσης, παρατηρείται ότι στο μοντέλο NOMA η ισχύς είναι ίδια σε όλες τις φεμοκυψέλες. Αυτό απορρέει από το γεγονός ότι η ισχύς λαμβάνει την ελάχιστη δυνατή τιμή της (δηλαδή τα 0.00001 Watt).

2. Ένα πολύ σημαντικό μέγεθος, το οποίο δείχνει την κατανάλωση ισχύος εκπομπής σε σχέση με τα δεδομένα που μεταφέρονται, είναι η αποδοτικότητα ενέργειας (energy efficiency) η οποία μετράται σε $\frac{\text{bits}}{\text{Joule}} = \frac{\text{bits}}{\text{W*s}}$.

Παρακάτω δίνεται το διάγραμμα της αποδοτικότητας ενέργειας σε σχέση με την απόσταση από το σταθμό βάσης, για τα μοντέλα CDMA και NOMA.



Διάγραμμα 8: Αποδοτικότητα ενέργειας για τους χρήστες MUE, ως προς την απόσταση από το σταθμό βάσης στο σημείο ισορροπίας στα μοντέλα NOMA και CDMA



Διάγραμμα 9: Μέση αποδοτικότητα ενέργειας κάθε φεμτοκυψέλης στα μοντέλα NOMA και CDMA

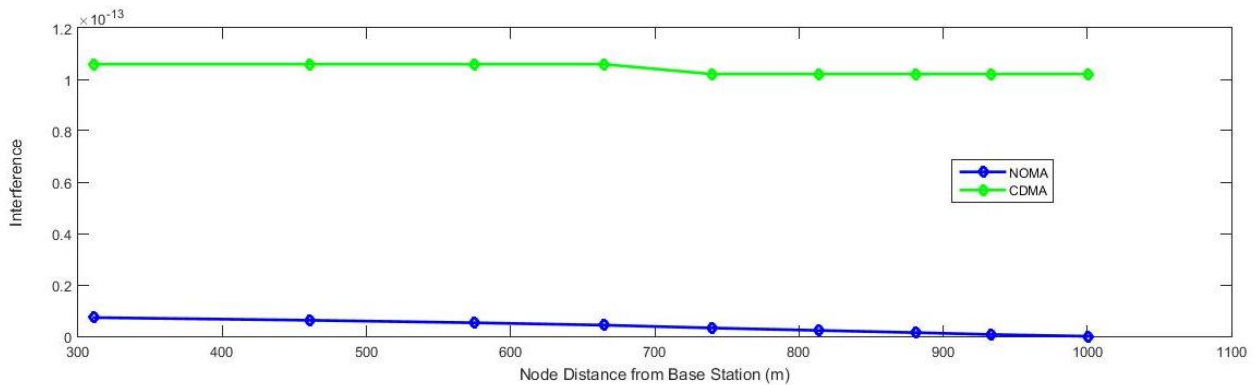
Από το παραπάνω διάγραμμα συμπεραίνουμε ότι το μοντέλο NOMA είναι ενεργειακά αποδοτικότερο σε σχέση με το CDMA, διότι για το ίδιο ποσό ενέργειας μεταφέρονται περισσότερα δεδομένα (bits).

Στο διάγραμμα 8 παρατηρούμε ότι οι χρήστες που βρίσκονται πιο κοντά στο σταθμό βάσης, απολαμβάνουν καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών. Όσο αυξάνει η απόσταση, τόσο αυξάνει και η ισχύς εκπομπής (Watt), άρα μειώνεται η αποδοτικότητα ενέργειας ($\frac{bits}{Joule} = \frac{bits}{W*s}$), με αποτέλεσμα οι πιο απομακρυσμένοι χρήστες να λαμβάνουν μικρότερη απόδοση από την υπηρεσία που τους εξυπηρετεί (είτε είναι RT, είτε NRT).

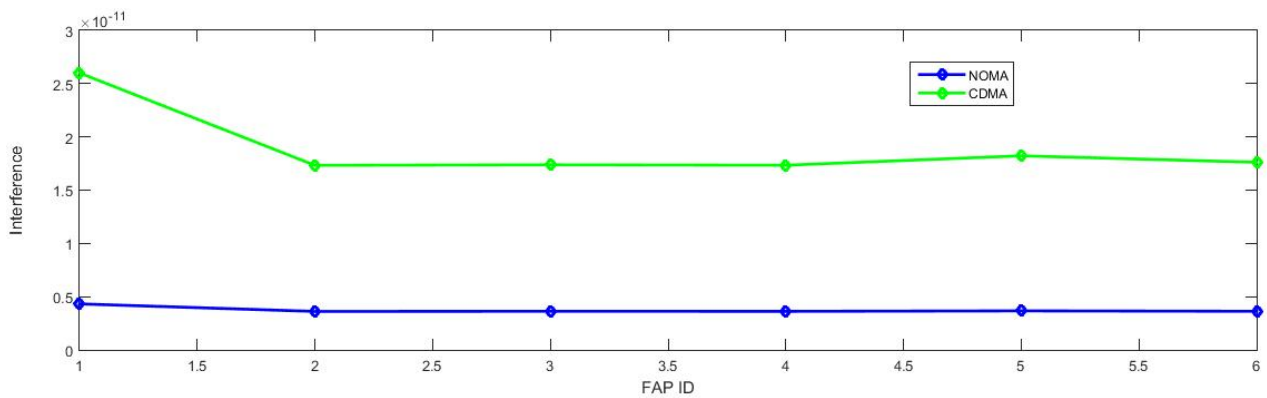
Στο διάγραμμα 9 παρατηρούμε και πάλι ότι η ενεργειακή απόδοση των χρηστών του προβλήματος που χρησιμοποιεί το μοντέλο NOMA είναι υψηλότερη. Ο λόγος για τον οποίο όλες οι φεμτοκυψέλες έχουν την ίδια τιμή ενεργειακής απόδοσης είναι ο ακόλουθος:

Η ενεργειακή απόδοση (Energy Efficiency - ENEF) ορίζεται ως $ENEF = \frac{R}{P}$, όπου R ο ρυθμός μετάδοσης σε $bits/s$ και P η ισχύς σε $Watt$. Η ισχύς λαμβάνει την ελάχιστη δυνατή της τιμή, όπως αναφέραμε παραπάνω ($0.00001 Watt$) και ο ρυθμός μετάδοσης λαμβάνει παρόμοια τιμή για τους χρήστες RT (συγκεκριμένα λαμβάνει την τιμή $64000 bits/s$) και για τους χρήστες NRT (συγκεκριμένα λαμβάνει την τιμή $66542 bits/s$). Συνεπώς ο μέσος όρος της ενεργειακής απόδοσης σε όλες τις φεμτοκυψέλες θα είναι ίδιος.

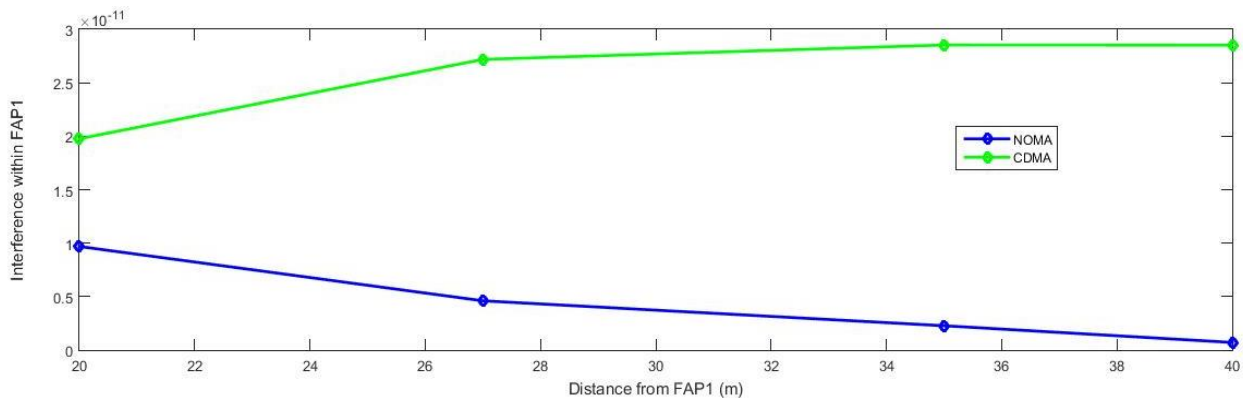
3. Όσον αφορά τις παρεμβολές σε σχέση με την απόσταση από το σταθμό βάσης, παραθέτουμε το συγκριτικό διάγραμμα ανάμεσα στα δύο μοντέλα:



Διάγραμμα 10: Παρεμβολές των χρηστών MUE σε σχέση με την απόσταση από το σταθμό βάσης, για τα μοντέλα NOMA και CDMA



Διάγραμμα 11: Μέση τιμή παρεμβολών σε κάθε φεμτοκυψέλη στα μοντέλα NOMA και CDMA



Διάγραμμα 12: Παρεμβολές των χρηστών FUE σε μία φεμτοκυψέλη, σε σχέση με την απόσταση από το σταθμό βάσης της, για τα μοντέλα NOMA και CDMA

Στο διάγραμμα 10 παρατηρούμε ότι οι παρεμβολές των χρηστών MUE μειώνονται στο NOMA καθώς απομακρύνονται από το σταθμό βάσης, όπως ήταν αναμενόμενο.

Στο διάγραμμα 11 παρατηρούμε ότι οι παρεμβολές σε μια φεμτοκυψέλη μειώνονται όταν χρησιμοποιείται το NOMA μοντέλο. Η ίδια τιμή παρεμβολών σε όλες τις φεμτοκυψέλες δικαιολογείται από το γεγονός ότι όλες οι φεμτοκυψέλες έχουν τον ίδιο αριθμό και τύπο χρηστών,

δηλαδή έχουν από τέσσερις χρήστες εκ των οποίων οι δύο είναι NRT και οι άλλοι δύο RT, σε ίσες αποστάσεις από το σταθμό βάσης της φεμτοκυψέλης. Συνεπώς λαμβάνουν παρόμοιες παρεμβολές. Η απόκλιση στις τιμές οφείλεται στο γεγονός ότι βρίσκονται σε διαφορετικές θέσεις μέσα στη μακροκυψέλη, οπότε λαμβάνουν διαφορετικές παρεμβολές από τους MUE χρήστες.

Στο διάγραμμα 12 παρατηρούμε τις παρεμβολές που λαμβάνουν οι τέσσερις χρήστες μιας φεμτοκυψέλης (έγινε τυχαία επιλογή της φεμτοκυψέλης). Όπως ήταν αναμενόμενο, οι παρεμβολές είναι μειωμένες στο NOMA σε σχέση με το CDMA μοντέλο και επίσης όσο απομακρύνονται οι χρήστες από το σταθμό βάσης, τόσο λιγότερες παρεμβολές δέχονται, διότι σύμφωνα με το μοντέλο NOMA, οι χρήστες ακούν μόνο το θόρυβο των χρηστών με χειρότερο κέρδος καναλιού από αυτούς.

Τέλος, παραθέτουμε τους παρακάτω πίνακες με τα δεδομένα που λάβαμε από τις προσομοιώσεις για τα εξής μεγέθη: ισχύς εκπομπής, συνάρτηση ευχαρίστησης και παρεμβολές. Επίσης, υπολογίσαμε το μέσο όρο των μετρήσεων κάθε μεγέθους για κάθε μοντέλο και υπολογίσαμε τα ποσοστά βελτίωσης των μεγεθών αυτών, όταν χρησιμοποιούμε το NOMA σε σχέση με το CDMA μοντέλο.

Ισχύς Εκπομπής των Χρηστών Μακροκυψέλης (Power σε Watt)

CDMA	0.0009	0.0048	0.0116	0.0207	0.0435	0.0639	0.0878	0.1106	0.1460
NOMA	0.0001	0.0004	0.0011	0.0017	0.0033	0.0043	0.0053	0.0058	0.0068

Πίνακας 9: Τιμές ισχύος εκπομπής για τους 9 χρήστες της μακροκυψέλης στα μοντέλα CDMA και NOMA

Μέση Ισχύς Εκπομπής στις Φεμτοκυψέλες(Femto Access Point - FAP) (Power σε Watt)

	FAP1	FAP2	FAP3	FAP4	FAP5	FAP6
CDMA	0.00015	0.0001225	0.0001225	0.0001225	0.000125	0.0001225
NOMA	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001

Πίνακας 10: Μέσες τιμές ισχύος για κάθε φεμτοκυψέλη στα μοντέλα CDMA και NOMA

Ισχύς Εκπομπής Χρηστών Φεμτοκυψέλης (Power σε Watt)

	RT	NRT	RT2	NRT2
CDMA	0.00001	0.000016	0.00001	0.00002
NOMA	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001

Πίνακας 11: Τιμές ισχύος για τους τέσσερις χρήστες μίας φεμτοκυψέλης (τυχαία επιλογή φεμτοκυψέλης) στα μοντέλα CDMA και NOMA

Συνάρτηση Ευχαρίστησης των Χρηστών Μακροκυψέλης (Utility) (*10⁸)

CDMA	0.5470	0.1135	0.0469	0.0262	0.0129	0.0088	0.0064	0.0050	0.0038
NOMA	4.9484	1.1220	0.5077	0.3120	0.1686	0.1299	0.1071	0.0963	0.0826

Πίνακας 12: Τιμές συνάρτησης ευχαρίστησης για τους 9 χρήστες της μακροκυψέλης στα μοντέλα CDMA και NOMA

Μέση Συνάρτηση Ευχαρίστησης στις Φεμτοκυψέλες(Femto Access Point - FAP) (Utility)(*10⁹)

	FAP1	FAP2	FAP3	FAP4	FAP5	FAP6
CDMA	4.6564	5.2366	5.2321	5.2357	5.1590	5.2100
NOMA	6.5271	6.5271	6.5271	6.5271	6.5271	6.5271

Πίνακας 13: Μέσες τιμές συνάρτησης ευχαρίστησης για κάθε φεμτοκυψέλη στα μοντέλα CDMA και NOMA

Συνάρτηση Ευχαρίστησης των Χρηστών στη Φεμτοκυψέλη (Utility) (*10⁹)

	RT	NRT	RT2	NRT2
CDMA	6.4000	3.4886	6.3980	2.3390
NOMA	6.4000	6.6542	6.4000	6.6542

Πίνακας 14: Τιμές συνάρτησης ευχαρίστησης για τους τέσσερις χρήστες μιας φεμτοκυψέλης (τυχαία επιλογή φεμτοκυψέλης) στα μοντέλα CDMA και NOMA

Παρεμβολές και Λευκός Θόρυβος των Χρηστών Μακροκυψέλης (Interference & White Noise)(* 10⁻¹³)

CDMA	1.0586	1.0586	1.0586	1.0586	1.0205	1.0205	1.0205	1.0205	1.0205
NOMA	0.0725	0.0621	0.0524	0.0431	0.0321	0.0226	0.0141	0.0066	0

Πίνακας 15: Τιμές παρεμβολών(Interference) για τους 9 χρήστες της μακροκυψέλης στα μοντέλα CDMA και NOMA

**Μέσες Παρεμβολές και Λευκός Θόρυβος στις Φεμτοκυψέλες(Femto Access Point - FAP)
(Interference & White Noise)(* 10⁻¹¹)**

	FAP1	FAP2	FAP3	FAP4	FAP5	FAP6
CDMA	2.5999	1.7329	1.7378	1.7339	1.8223	1.7614
NOMA	0.4320	0.3612	0.3625	0.3619	0.3664	0.3624

Πίνακας 16: Μέσες τιμές παρεμβολών(Interference) για κάθε φεμτοκυψέλη στα μοντέλα CDMA και NOMA

Παρεμβολές και Λευκός Θόρυβος (Interference & White Noise)(* 10⁻¹¹)

	RT	NRT	RT2	NRT2
CDMA	1.9765	2.8533	2.7184	2.8515
NOMA	0.9687	0.2274	0.4606	0.0712

Πίνακας 17: Τιμές παρεμβολών(Interference) για τους τέσσερις χρήστες μιας φεμτοκυψέλης (τυχαία επιλογή φεμτοκυψέλης) στα μοντέλα CDMA και NOMA

Ποσοστά % βελτίωσης

Ισχύς Χρηστών στη Μακροκυψέλη (Watt)

	Μέση Τιμή	Ποσοστό Μείωσης
CDMA	0.0544	-
NOMA	0.0032	94.078%(από το CDMA)

Πίνακας 18: Ποσοστά % βελτίωσης της ισχύος των χρηστών της μακροκυψέλης στο μοντέλο NOMA σε σχέση με το CDMA

Ισχύς Χρηστών στις Φεμτοκυψέλες (Watt)

	Μέση Τιμή	Ποσοστό Μείωσης
CDMA	0.0000127	-
NOMA	0.00001	21.5686%(από το CDMA)

Πίνακας 19: Ποσοστά % βελτίωσης της ισχύος των χρηστών της φεμτοκυψέλης (τυχαία επιλογή φεμτοκυψέλης) στο μοντέλο NOMA σε σχέση με το CDMA

Παρεμβολές Χρηστών Μακροκυψέλης

	Μέση Τιμή	Ποσοστό Μείωσης
CDMA	1.0375e-13	-
NOMA	3.3986e-15	96.724%(από το CDMA)

Πίνακας 20: Ποσοστά % βελτίωσης των παρεμβολών των χρηστών της μακροκυψέλης στο μοντέλο NOMA σε σχέση με το CDMA

Παρεμβολές Χρηστών Φεμτοκυψέλης

	Μέση Τιμή	Ποσοστό Μείωσης
CDMA	1.8980e-11	-
NOMA	3.7444e-12	80.272%(από το CDMA)

Πίνακας 21: Ποσοστά % βελτίωσης των παρεμβολών των χρηστών της φεμτοκυψέλης στο μοντέλο NOMA σε σχέση με το CDMA

Ενεργειακή Απόδοση Χρηστών Μακροκυψέλης

	Μέση Τιμή	Ποσοστό Αύξησης
CDMA	8.5654e+06	-
NOMA	8.3054e+07	89.687%(από το CDMA)

Πίνακας 22: Ποσοστά % βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης των χρηστών της μακροκυψέλης στο μοντέλο NOMA σε σχέση με το CDMA

Ενεργειακή Απόδοση Χρηστών Φεμτοκυψέλης

	Μέση Τιμή	Ποσοστό Αύξησης
CDMA	5.1216e+09	-
NOMA	6.5271e+09	21.533%(από το CDMA)

Πίνακας 23: Ποσοστά % βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης των χρηστών της φεμτοκυψέλης στο μοντέλο NOMA σε σχέση με το CDMA

5.4 Τριεπίπεδα Ασύρματα NOMA Δίκτυα

5.4.1 Σενάριο Προσομοίωσης

Σε αυτή την παράγραφο θα γίνει η ανάλυση της μελέτης της ζεύξης ανόδου ενός τριεπίπεδου ασύρματου NOMA, το οποίο αποτελείται από μία μακροκυψέλη, φεμτοκυψέλες και VLC κυψέλες.

Συγκεκριμένα μελετήθηκαν δύο σενάρια, τα οποία διαφοροποιούνται μεταξύ τους ως προς τον αριθμό των κυψελών και των χρηστών και περιγράφονται διεξοδικά παρακάτω:

Σενάριο 1^ο:

Σε αυτό το σενάριο υλοποιήθηκε ένα περιβάλλον με μία μακροκυψέλη, έξι φεμτοκυψέλες και δεκαοχτώ VLC κυψέλες, οι οποίες τοποθετήθηκαν ανά δύο μέσα σε κάθε φεμτοκυψέλη και οι υπόλοιπες έξι εκτός φεμτοκυψελών, αλλά εντός μακροκυψέλης.

Οι χρήστες ήταν συνολικά 69 εκ των οποίων 9 ήταν οι χρήστες μακροκυψέλης (Macrocell User Equipment – MUE), 24 οι χρήστες φεμτοκυψέλης (Femtocell User Equipment – FUE) και 36 οι χρήστες κυψελών μετάδοσης με χρήση ορατού φωτός (Visible Light Communication User Equipment - VLC UE).

Οι $N=9$ χρήστες της μακροκυψέλης τοποθετούνται μέσα στην κυψέλη στις εξής αποστάσεις από το σταθμό βάσης:

$$d = [310 \ 460 \ 570 \ 660 \ 740 \ 810 \ 880 \ 940 \ 1000] \text{ m}$$

Οι χρήστες που βρίσκονται στις θέσεις 310-660m είναι χρήστες πραγματικού χρόνου, από εδώ και στο εξής θα αναφέρονται με τη συντομογραφία RT, ενώ οι χρήστες που βρίσκονται στις θέσεις 740-1000m είναι χρήστες μη-πραγματικού χρόνου και θα αναφέρονται με τη συντομογραφία NRT.

Οι σταθμοί βάσεων των φεμτοκυψελών βρίσκονται στις εξής συντεταγμένες (x,y):

$$(420, -290) \ (90, -120) \ (-350, -280) \ (-290, -370) \ (-370, 360) \ (464, 464)$$

Οι τέσσερις χρήστες της κάθε φεμτοκυψέλης βρίσκονται στις εξής συντεταγμένες σε σχέση με το σταθμό βάσης της εκάστοτε φεμτοκυψέλης (x,y):

$$(x-20, y) \ (x, y-35) \ (x+27, y) \ (x, y+40)$$

Οι χρήστες που βρίσκονται στις θέσεις $(x-20, y)$ και $(x+27, y)$ είναι χρήστες πραγματικού χρόνου, ενώ αυτοί που βρίσκονται στις θέσεις $(x, y-35)$ και $(x, y+40)$ είναι χρήστες μη-πραγματικού χρόνου.

Οι σταθμοί βάσεων των VLC κυψελών (Optical Access Point – OAP) βρίσκονται στις εξής συντεταγμένες (x,y):

$$(400, -250) \ (450, -250) \ (115, -85) \ (65, -85) \ (-315, -245) \ (-365, -245)$$

$$(-275, -355) \ (-320, -355) \ (-340, 400) \ (-390, 400) \ (495, 505) \ (445, 505)$$

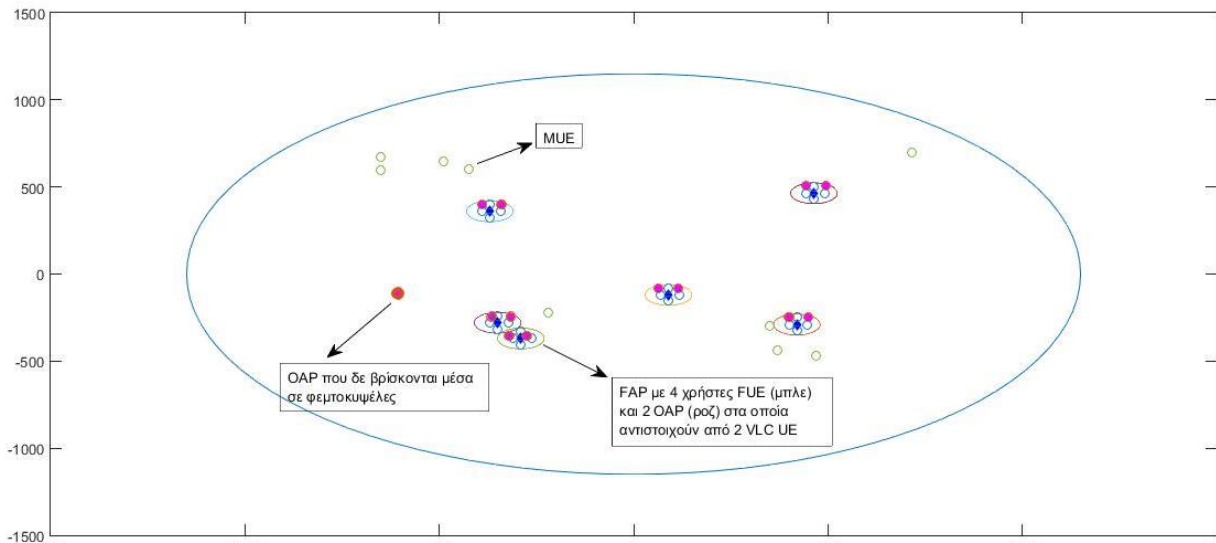
$$(-602, -108) \ (-604, -102) \ (-609, -108) \ (-602, -115) \ (-609, -115) \ (-605, -121)$$

Οι δύο χρήστες της κάθε VLC κυψέλης βρίσκονται στις εξής συντεταγμένες σε σχέση με το σταθμό βάσης της εκάστοτε κυψέλης (x,y):

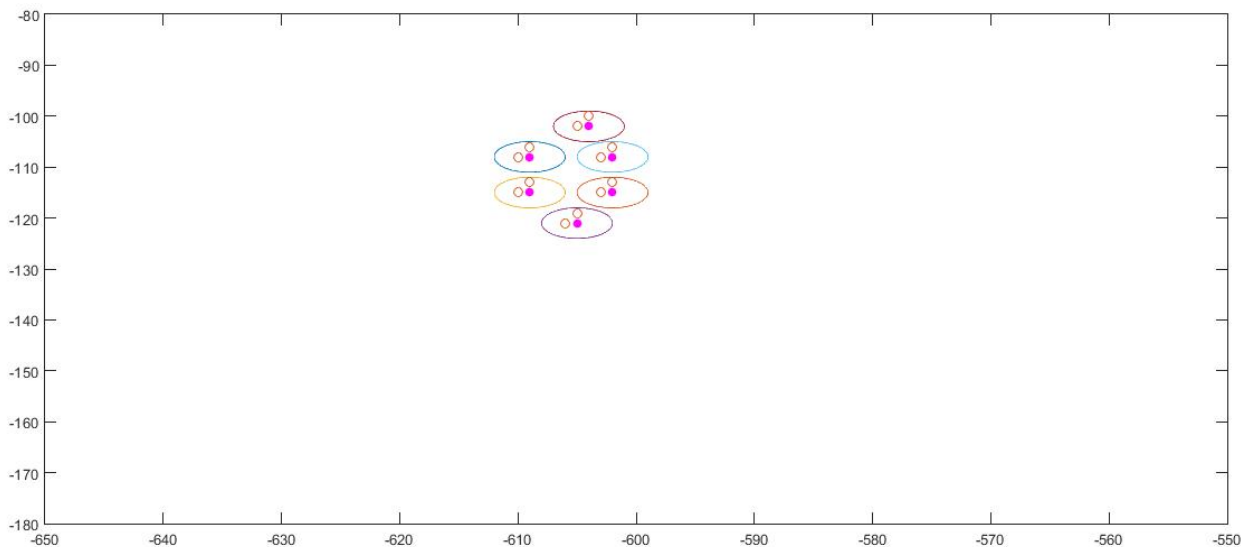
$$(x-1, y) \ (x, y+2)$$

Ο χρήστης που βρίσκεται στη θέση $(x-1, y)$ είναι χρήστης πραγματικού χρόνου, ενώ αυτός που βρίσκεται στη θέση $(x, y+2)$ είναι χρήστης μη-πραγματικού χρόνου.

Το δίκτυό μας έχει, λοιπόν, την παρακάτω μορφή:



Εικόνα 12: Τοπολογία τριεπίπεδου NOMA με μία μακροκυψέλη, έξι φεμτοκυψέλες και δεκαοχτώ VLC κυψέλες



Εικόνα 13: OAP που δε βρίσκονται μέσα σε φεμτοκυψέλες (σε μεγέθυνση)

Έπειτα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα με το διεπίπεδο σύστημα με στόχο να δούμε την επιρροή των VLC κυψελών στο σύστημα.

Σενάριο 2^ο:

Σε αυτό το σενάριο αντικαταστήσαμε τους 36 VLC UE του τριεπίπεδου συστήματος, με 36 FUE χρήστες τους οποίους τοποθετήσαμε σε 9 καινούργια FAP(4 χρήστες ανά FAP). Συγκεκριμένα η τοπολογία αποτελείται από μία μακροκυψέλη με 9 MUE και δεκαπέντε FAPs με 60 FUE (4 ανά FAP).

Για τα καινούργια FAPs έγινε προσπάθεια να τοποθετηθούν στις ίδιες θέσεις με τα OAPs που αντικατέστησαν. Όμως, υπάρχουν αποκλίσεις λόγω της διαφορετικής ακτίνας τους (τα OAPs έχουν μικρότερη ακτίνα από τα FAPs) και λόγω του ότι τα OAPs είχαν τοποθετηθεί μέσα στα FAPs, ενώ τα καινούργια FAPs δεν θέλαμε να αλληλεπικαλύπτονται με τα προϋπάρχοντα FAPs.

Οι $N=9$ χρήστες της μακροκυψέλης τοποθετούνται μέσα στην κυψέλη στις εξής αποστάσεις από το σταθμό βάσης:

$$d = [310 \ 460 \ 570 \ 660 \ 740 \ 810 \ 880 \ 940 \ 1000] \text{ m}$$

Οι χρήστες που βρίσκονται στις θέσεις 310-660m είναι χρήστες πραγματικού χρόνου, από εδώ και στο εξής θα αναφέρονται με τη συντομογραφία RT, ενώ οι χρήστες που βρίσκονται στις θέσεις 740-1000m είναι χρήστες μη-πραγματικού χρόνου και θα αναφέρονται με τη συντομογραφία NRT.

Οι σταθμοί βάσεων των φεμτοκυψελών βρίσκονται στις εξής συντεταγμένες (x,y):

$$(420, -290) \ (420, -170) \ (90, -120) \ (90, 0) \ (-350, -280) \ (-350, -160) \ (-200, -500) \ (-200, -380) \\ (-370, 360) \ (-370, 480) \ (464, 464) \ (464, 584) \ (-610, -98) \ (-610, 22) \ (-490, -38)$$

Οι τέσσερις χρήστες της κάθε φεμτοκυψέλης βρίσκονται στις εξής αποστάσεις σε σχέση με το σταθμό βάσης της εκάστοτε φεμτοκυψέλης (x,y):

$$(x-20, y) \ (x, y-35) \ (x+27, y) \ (x, y+40)$$

Οι χρήστες που βρίσκονται στις θέσεις $(x-20, y)$ και $(x+27, y)$ είναι χρήστες πραγματικού χρόνου, ενώ αυτοί που βρίσκονται στις θέσεις $(x, y-35)$ και $(x, y+40)$ είναι χρήστες μη-πραγματικού χρόνου.

Στο τριεπίπεδο σύστημα με το οποίο θα συγκριθεί το παραπάνω διεπίπεδο σύστημα έχει την εξής τοπολογία:

Οι $N=9$ χρήστες μακροκυψέλης βρίσκονται στις ίδιες ακριβώς αποστάσεις με το διεπίπεδο.

Οι σταθμοί βάσεων των φεμτοκυψελών βρίσκονται στις εξής συντεταγμένες (x,y):

$$(420, -290) \ (90, -120) \ (-350, -280) \ (-200, -500) \ (-370, 360) \ (464, 464)$$

Οι τέσσερις χρήστες της κάθε φεμτοκυψέλης βρίσκονται στις εξής αποστάσεις σε σχέση με το σταθμό βάσης της εκάστοτε φεμτοκυψέλης (x,y):

$$(x-20, y) \ (x, y-35) \ (x+27, y) \ (x, y+40)$$

Οι χρήστες που βρίσκονται στις θέσεις $(x-20, y)$ και $(x+27, y)$ είναι χρήστες πραγματικού χρόνου, ενώ αυτοί που βρίσκονται στις θέσεις $(x, y-35)$ και $(x, y+40)$ είναι χρήστες μη-πραγματικού χρόνου.

Οι σταθμοί βάσεων των VLC κυψελών βρίσκονται στις εξής συντεταγμένες (x,y):

$$(400, -250) \ (450, -250) \ (115, -85) \ (65, -85) \ (-315, -245) \ (-365, -245) \\ (-180, -460) \ (-230, -460) \ (-340, 400) \ (-390, 400) \ (495, 505) \ (445, 505)$$

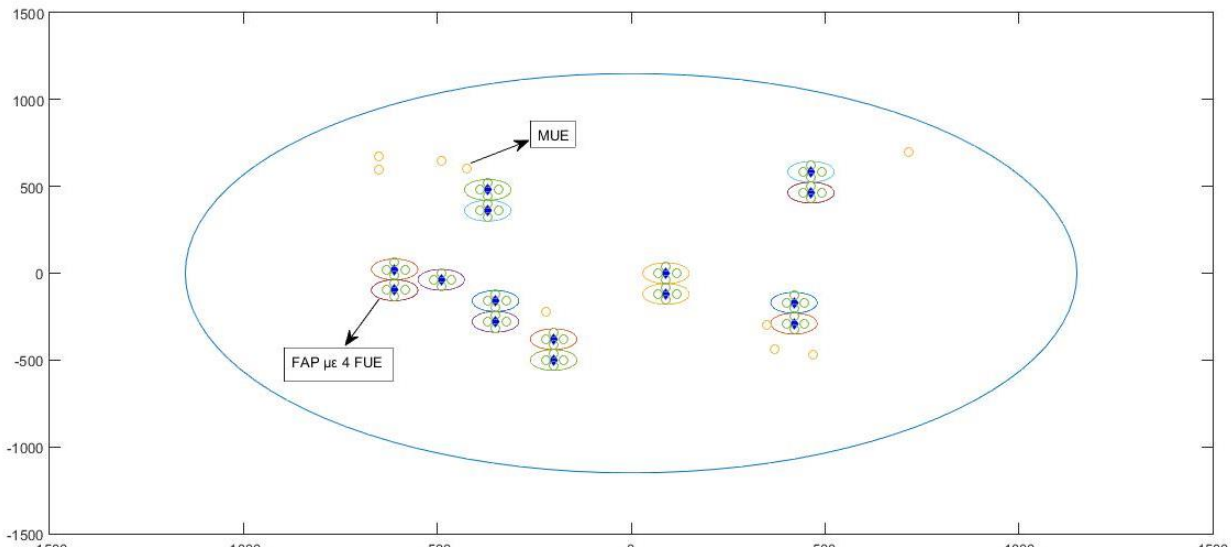
$(-602, -108)$ $(-604, -102)$ $(-609, -108)$ $(-602, -115)$ $(-609, -115)$ $(-605, -121)$

Οι δύο χρήστες της κάθε VLC κυψέλης βρίσκονται στις εξής αποστάσεις σε σχέση με το σταθμό βάσης της εκάστοτε κυψέλης (x,y) :

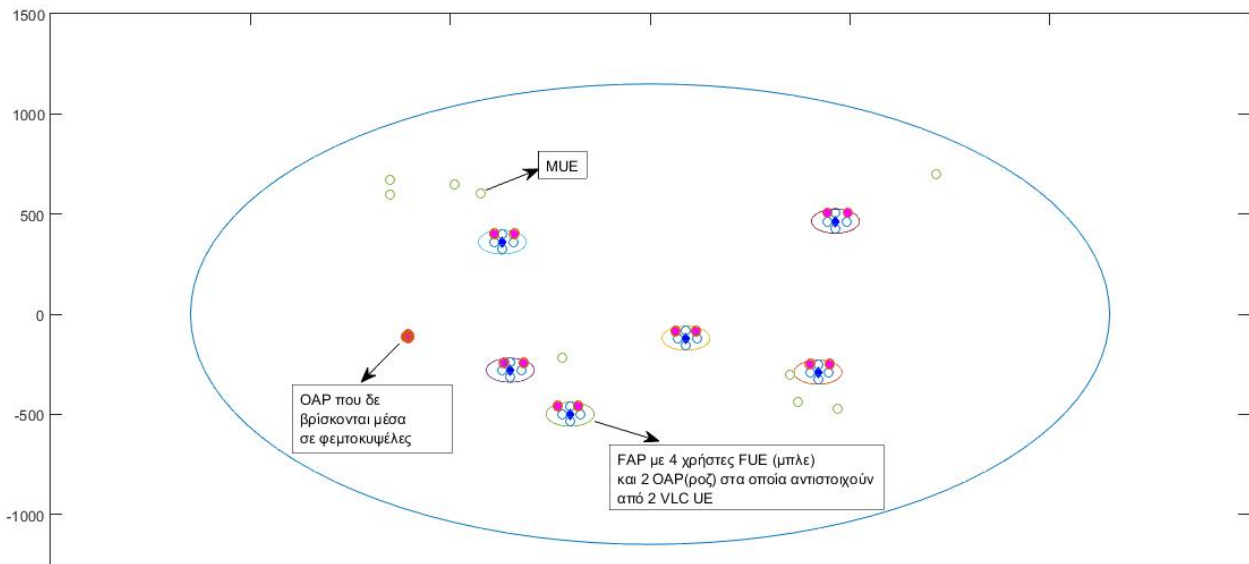
$$(x-1, y) \quad (x, y+2)$$

Ο χρήστης που βρίσκεται στη θέση $(x-1, y)$ είναι χρήστης πραγματικού χρόνου, ενώ αυτός που βρίσκεται στη θέση $(x, y+2)$ είναι χρήστης μη-πραγματικού χρόνου.

Τα δύο δίκτυα που παρουσιάστηκαν παραπάνω είναι τα εξής:



Εικόνα 14: Τοπολογία διεπίπεδου NOMA με μία μακροκυψέλη και δεκαπέντε φεμτοκυψέλες



Εικόνα 15: Τοπολογία τριεπίπεδου NOMA με μία μακροκυψέλη, έξι φεμτοκυψέλες και δεκαοχτώ VLC κυψέλες

Σκοπός αυτού του πειράματος ήταν να καθορίσουμε εάν το τριεπίπεδο NOMA (σενάριο 1^ο) υπερिशύει του διεπίπεδου NOMA (σενάριο 2^ο).

5.4.2 Αλγόριθμος Κατανομής Ισχύος Εκπομπής

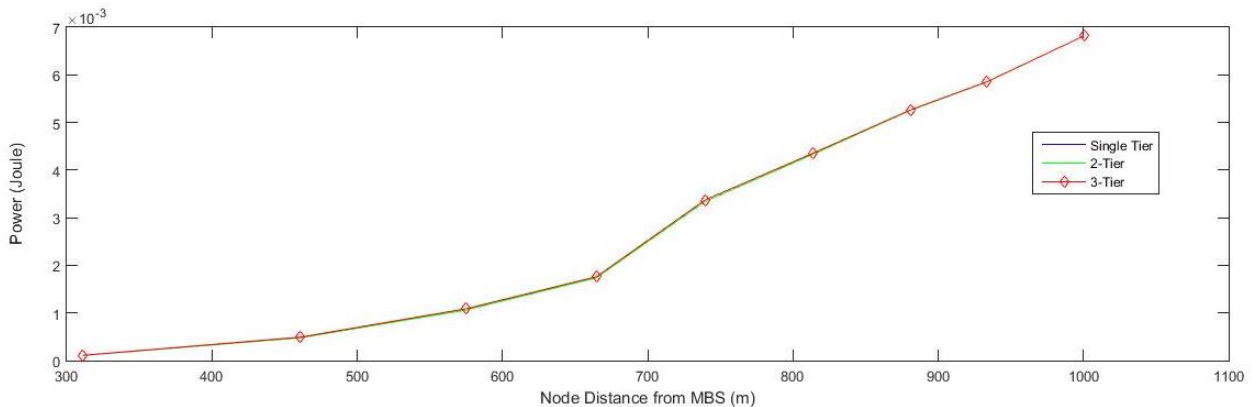
Ο αλγόριθμος υλοποίησης του παιγνίου είναι ίδιος με αυτόν που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 5.2.2, με τη μόνη διαφορά ότι τώρα στο πρόβλημά μας υπεισέρχονται περισσότεροι χρήστες, διαφορετικών κυψελών, οπότε θα πρέπει ο κάθε χρήστης να συγκρίνει το κέρδος του με τα κέρδη όλων των άλλων χρηστών του συστήματος και εάν αυτοί έχουν χαμηλότερο κέρδος (μοντέλο NOMA), τότε θα υπολογίζονται στην παρεμβολή που δέχεται ο συγκεκριμένος χρήστης.

5.4.3 Σενάριο 1^ο: Αριθμητικά Αποτελέσματα – Συγκρίσεις

Σε αυτή την ενότητα παρατίθενται τα ποσοτικά αποτελέσματα, καθώς και οι γραφικές παραστάσεις από την εκτέλεση του πρώτου σεναρίου στο περιβάλλον MATLAB, με τις τιμές των σταθερών όπως αναγράφονται στον Πίνακα 2. Τα αποτελέσματα αυτά θα συγκριθούν με τα αποτελέσματα του μονοεπίπεδου (5.2.1) και του διεπίπεδου συστήματος (5.3.1) και θα αναλυθούν διεξοδικά.

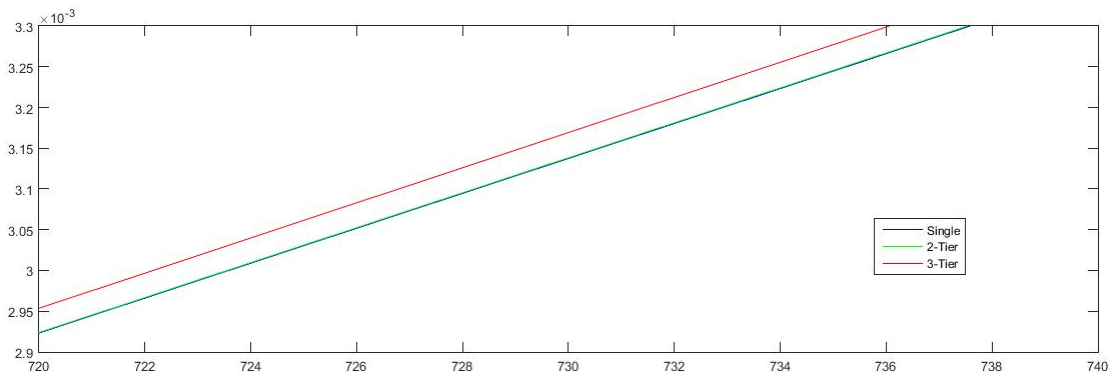
Εδώ δε γίνεται σύγκριση με τη CDMA τεχνική, καθώς δε χρησιμοποιείται σε κυψέλες VLC.

1. Για το διάνυσμα της ισχύος εκπομπής στην ζεύξη ανόδου P^* ως προς την απόσταση των MUE χρηστών από το σταθμό βάσης τους, τα αποτελέσματα που λάβαμε με χρήση του NOMA σε μονοεπίπεδο, διεπίπεδο και τριεπίπεδο σύστημα συγκεντρώνονται στο παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 13: Ισχύς εκπομπής των MUE χρηστών ως προς την απόσταση από το σταθμό βάσης στο σημείο ισορροπίας για το παίγνιο σε μονοεπίπεδο, διεπίπεδο και τριεπίπεδο NOMA

Παρατίθεται το ίδιο διάγραμμα, αλλά επικεντρωμένο στην περιοχή των 720-736m, ώστε να φαίνεται καλύτερα η αύξηση στην ισχύ, με την αύξηση των επιπέδων.



Διάγραμμα 14: Ισχύς εκπομπής των MUE χρηστών ως προς την απόσταση από το σταθμό βάσης στο σημείο ισορροπίας για το παίγνιο σε μονοεπίπεδο, διεπίπεδο και τριεπίπεδο NOMA στην περιοχή (720-736)m

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι τιμές που λαμβάνει η ισχύς στο σημείο ισορροπίας για τα τρία επίπεδα:

Ισχύς Εκπομπής Χρηστών Μακροκυψέλης (Power σε Watt)

	User 1	User 2	User 3	User 4
1-Tier	0,000108	0,000479	0,001062	0,001738
2-Tier	0,000109	0,000480	0,001063	0,001738
3-Tier	0,000111	0,000493	0,001088	0,001761

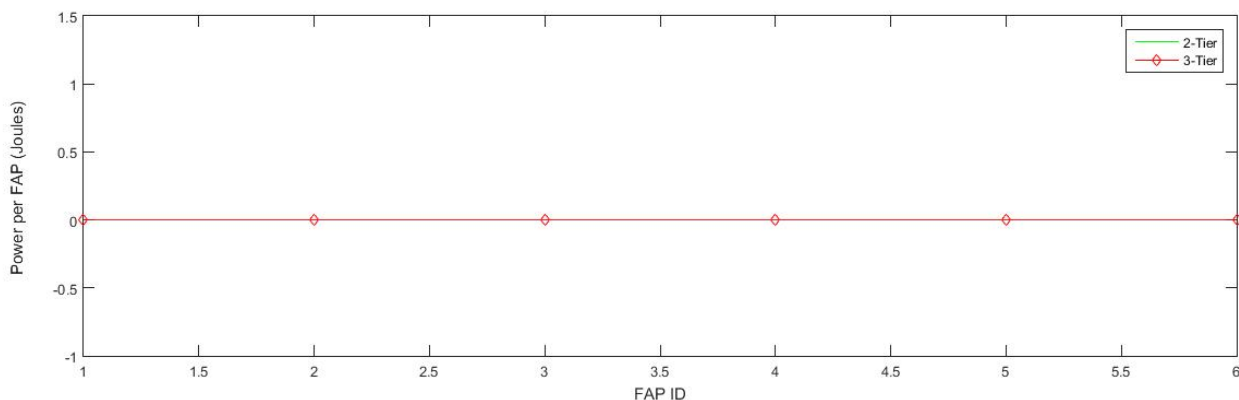
	User 5	User 6	User 7	User 8	User 9
1-Tier	0,003338	0,004334	0,005258	0,005849	0,006821
2-Tier	0,003339	0,004334	0,005258	0,005849	0,006821
3-Tier	0,003371	0,004356	0,005267	0,005854	0,006821

Πίνακας 24: Τιμές ισχύος των εννιά MUE χρηστών στα τρία επίπεδα

Στο Διάγραμμα 13, λοιπόν, παρατηρείται μια μικρή αύξηση στην ισχύ που καταναλώνουν οι MUE χρήστες (9) σε σχέση με την απόστασή τους από τη μακροκυψέλη, όταν τοποθετούνται τα FAPs (πράσινη γραμμή) και οι VLC κυψέλες (κόκκινη γραμμή). Όταν υπάρχει μόνο η μακροκυψέλη, η ισχύς των MUEs φαίνεται στη μπλε γραμμή.

Άρα παρατηρείται ότι με την αύξηση των επιπέδων, οι χρήστες αναγκάζονται να μεταδίδουν με αυξημένη ισχύ. Παράλληλα, όμως, βλέπουμε ότι η αύξηση της ισχύος είναι αρκετά μικρή (σχεδόν αμελητέα). Αυτό απορρέει από το γεγονός ότι γίνεται χρήση του μοντέλου NOMA, δηλαδή οι χρήστες δέχονται αρκετά μικρότερες παρεμβολές.

2. Για την ισχύ εκπομπής των FUE χρηστών, λαμβάνουμε τα εξής αποτελέσματα στο διεπίπεδο και τριεπίπεδο NOMA (το μονοεπίπεδο σύστημα δεν μπορεί να συγκριθεί εδώ, αφού δεν υπάρχουν FUE χρήστες):



Διάγραμμα 15: Μέση ισχύς εκπομπής σε κάθε φεμοκυψέλη σε διεπίπεδο και τριεπίπεδο NOMA.

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι μέσες τιμές του P (των 4 χρηστών) των 6 FAPs στα δύο επίπεδα.

Μέση Ισχύς Εκπομπής Φεμτοκυψελών (Power σε Watt)

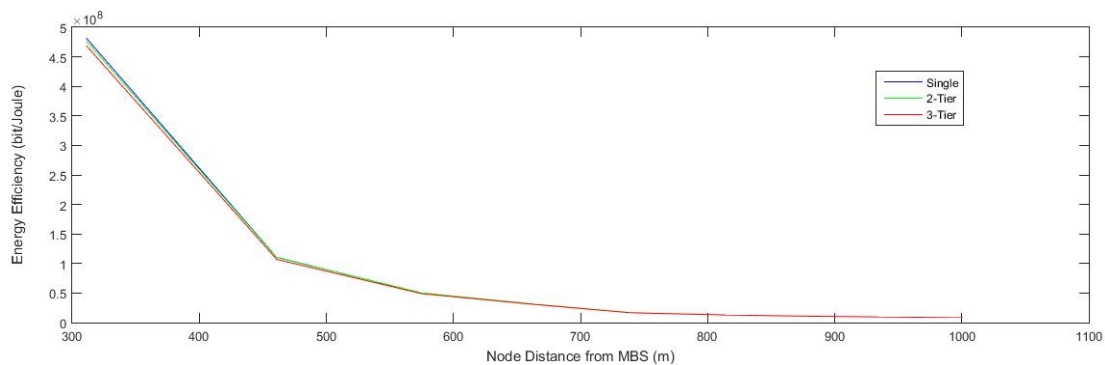
	FAP 1	FAP 2	FAP 3	FAP 4	FAP 5	FAP 6
2-Tier	1,001e-06	1,001e-06	1,001e-06	1,001e-06	1,001e-06	1,001e-06
3-Tier	1,001e-06	1,001e-06	1,001e-06	1,001e-06	1,001e-06	1,001e-06

Πίνακας 25: Μέσες τιμές ισχύος για κάθε φεμτοκυψέλη στα δύο επίπεδα

Δηλαδή παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει καμία αύξηση στην ισχύ, κάτι το οποίο απορρέει από το γεγονός ότι η μεταβολή στις παρεμβολές είναι απειροελάχιστη με την εισαγωγή των VLC χρηστών.

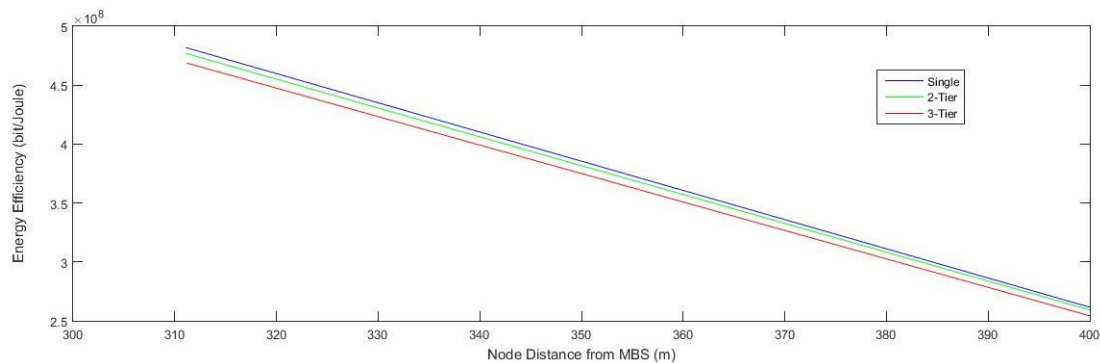
3. Ένα πολύ σημαντικό μέγεθος, το οποίο δείχνει την κατανάλωση ισχύος εκπομπής σε σχέση με τα δεδομένα που μεταφέρονται, είναι η αποδοτικότητα ενέργειας (energy efficiency) η οποία μετράται σε $\frac{\text{bits}}{\text{Joule}} = \frac{\text{bits}}{\text{W*s}}$.

Παρακάτω δίνεται το διάγραμμα της αποδοτικότητας ενέργειας ως προς την απόσταση των MUE χρηστών από το σταθμό βάσης τους σε μονοεπίπεδο, διεπίπεδο και τριεπίπεδο σύστημα:



Διάγραμμα 16: Αποδοτικότητα ενέργειας των MUE χρηστών σε μονοεπίπεδο, διεπίπεδο και τριεπίπεδο NOMA.

Παραθέτουμε το παραπάνω διάγραμμα στην περιοχή των 310-400m, ώστε να φαίνεται καλύτερα η μείωση.



Διάγραμμα 17: Αποδοτικότητα ενέργειας των MUE χρηστών σε μονοεπίπεδο, διεπίπεδο και τριεπίπεδο NOMA, στην περιοχή των (310-400)m

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι τιμές της ενεργειακής απόδοσης για τους 9 χρήστες:

Ενεργειακή Απόδοση Χρηστών Μακροκυψέλης (Energy Efficiency)(bits/Joule)

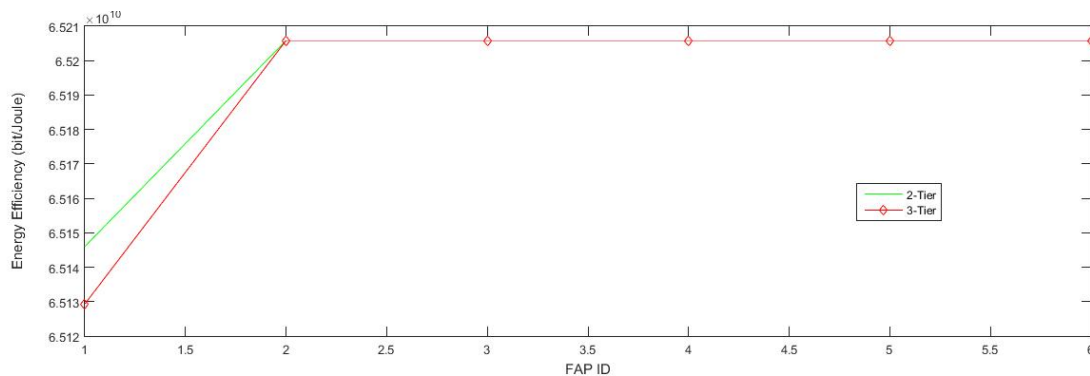
	User 1	User 2	User 3	User 4
1-Tier	481799857	110437022	50244942	30942375
2-Tier	476807403	110072482	50202354	30953691
3-Tier	468909734	106923163	48962646	30501174

	User 5	User 6	User 7	User 8	User 9
1-Tier	16790307	12984495	10719459	9636030	8262620
2-Tier	16783847	12983267	10718964	9636030	8262620
3-Tier	16613593	12914155	10700079	9627848	8262620

Πίνακας 26: Τιμές ενεργειακής απόδοσης των 9 MUE χρηστών στα τρία επίπεδα

Άρα συμπεραίνουμε ότι μειώνεται το ENEF με την αύξηση των επιπέδων δικτύωσης. Αυτό απορρέει εύκολα και από το γεγονός ότι αυξάνεται η ισχύς μετάδοσης άρα το ENEF, το οποίο ορίζεται ως Ρυθμός Μετάδοσης/Ισχύ Έκπομπής θα μειωθεί.

4. Για την ενεργειακή απόδοση των FUE χρηστών, λαμβάνουμε τα εξής αποτελέσματα στο διεπίπεδο και τριεπίπεδο NOMA:



Διάγραμμα 18: Μέση ενεργειακή απόδοση σε κάθε φεμτοκυψέλη σε διεπίπεδο και τριεπίπεδο NOMA.

Παρακάτω δίνεται ο πίνακας τιμών για το ENEF σε 2-Tier και 3-Tier.

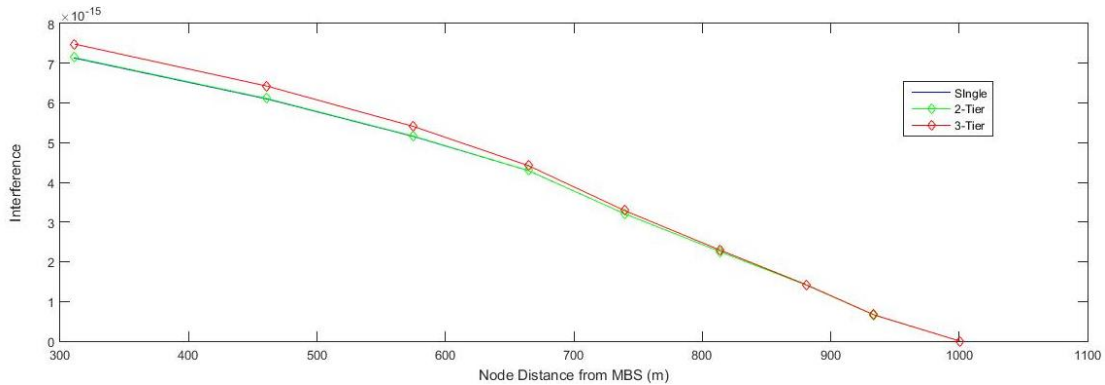
Μέση Ενεργειακή Απόδοση Φεμτοκυψελών (Energy Efficiency) (bits/Joule)

	FAP 1	FAP 2	FAP 3	FAP 4	FAP 5	FAP 6
2-Tier	65146013444	65205858808	65205858808	65205858808	65205858808	65205858808
3-Tier	65129322521	65205858808	65205858808	65205858808	65205858808	65205858808

Πίνακας 27: Μέσες τιμές ενεργειακής απόδοσης κάθε φεμτοκυψέλης στα δύο επίπεδα

Ομοίως και στους FUE χρήστες παρατηρούμε μια μικρή μείωση της ενεργειακής απόδοσης των FUE χρηστών, γεγονός που οφείλεται στην αύξηση της ισχύος, λόγω της προσθήκης των VLC UE.

5. Όσον αφορά τις παρεμβολές σε σχέση με την απόσταση από το σταθμό βάσης, παραθέτουμε τα αποτελέσματα για τους MUE χρήστες στα τρία επίπεδα.



Διάγραμμα 19: Παρεμβολές των MUE χρηστών σε μονοεπίπεδο, διεπίπεδο και τριεπίπεδο NOMA.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές των παρεμβολών για τα 3 Tiers:

Παρεμβολές Χρηστών Μακροκυψέλης

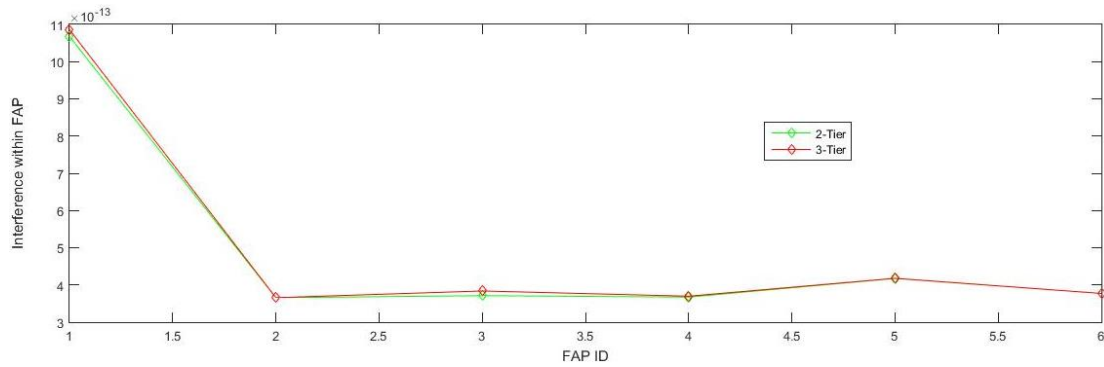
	User 1	User 2	User 3	User 4
1-Tier	7,129e-15	6,100e-15	5,157e-15	4,294e-15
2-Tier	7,143e-15	6,112e-15	5,166e-15	4,296e-15
3-Tier	7,483e-15	6,424e-15	5,409e-15	4,419e-15

	User 5	User 6	User 7	User 8	User 9
1-Tier	3,210e-15	2,253e-15	1,407e-15	6,600e-16	0
2-Tier	3,211e-15	2,253e-15	1,407e-15	6,600e-16	0
3-Tier	3,290e-15	2,290e-15	1,418e-15	6,648e-16	0

Πίνακας 28: Τιμές παρεμβολών των MUE χρηστών σε μονοεπίπεδο, διεπίπεδο και τριεπίπεδο NOMA

Παρατηρούμε ότι οι παρεμβολές αυξάνονται με την αύξηση των επιπέδων, κάτι το οποίο είναι λογικό, αφού προστίθενται επιπλέον χρήστες.

6. Για τις παρεμβολές των FUE χρηστών, λαμβάνουμε τα εξής αποτελέσματα στο διεπίπεδο και τριεπίπεδο NOMA:



Διάγραμμα 20: Παρεμβολές των FUE χρηστών σε διεπίπεδο και τριεπίπεδο NOMA.

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι μέσες τιμές των παρεμβολών για κάθε φεμτοκυψέλη στα δύο επίπεδα.

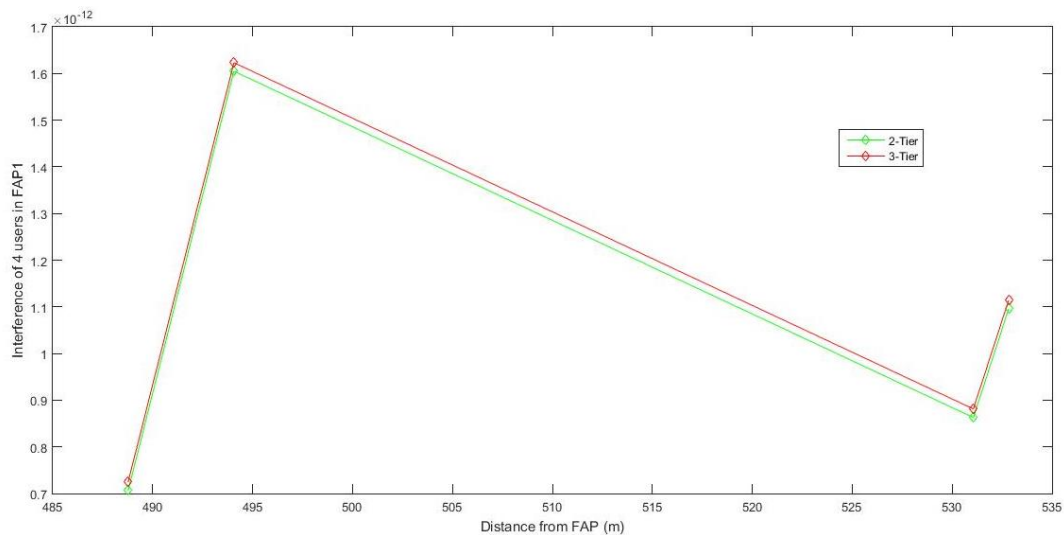
Μέσες Παρεμβολές Φεμτοκυψέλης

	FAP 1	FAP 2	FAP 3	FAP 4	FAP 5	FAP 6
2-Tier	1,0675e-12	3,656e-13	3,712e-13	3,673e-13	4,174e-13	3,771e-13
3-Tier	1,085e-12	3,657e-13	3,837e-13	3,697e-13	4,178e-13	3,772e-13

Πίνακας 29: Μέσες τιμές παρεμβολών των φεμτοκυψελών σε διεπίπεδο και τριεπίπεδο NOMA

Και εδώ, όπως ήταν αναμενόμενο, οι παρεμβολές αυξάνονται.

7. Στο παρακάτω διάγραμμα βλέπουμε πως διαμορφώνονται οι παρεμβολές κάθε χρήστη μέσα σε ένα FAP (εδώ έχουμε υπολογίσει για το FAP 1), σε διεπίπεδο όσο και σε τριεπίπεδο NOMA:



Διάγραμμα 21: Παρεμβολές των FUE χρηστών μέσα σε ένα FAP σε διεπίπεδο και τριεπίπεδο NOMA.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι παρεμβολές των χρηστών στο FAP 1, στο διεπίπεδο και στο τριεπίπεδο NOMA. Σε παρένθεση είναι οι αποστάσεις τους από το FAP.

Παρεμβολές Χρηστών Φεμτοκυψέλης

	RT user (494m)	NRT user (531m)	RT2 user (532m)	NRT2 user (488m)
2-Tier	1,604e-12	8,628e-13	1,096e-12	7,063e-13
3-Tier	1,623e-12	8,811e-13	1,114e-12	7,247e-13

Πίνακας 30: Τιμές παρεμβολών των 4 FUE μέσα σε ένα FAP (τυχαία επιλογή FAP) σε διεπίπεδο και τριεπίπεδο NOMA

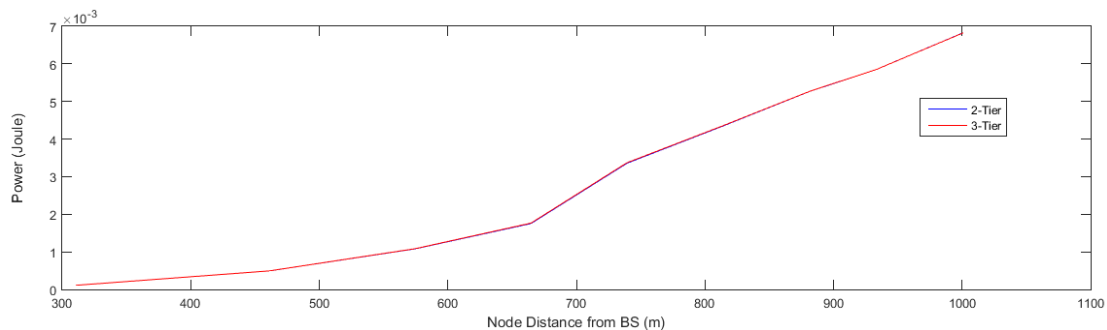
Ομοίως παρατηρούμε ότι οι παρεμβολές αυξάνονται. Παρ'όλα αυτά, η αύξηση είναι αμελητέα καθώς οι παρεμβολές που υπεισέρχονται είναι αμελητέες, λόγω της χρήσης του μοντέλου NOMA, δηλαδή ότι οι χρήστες δέχονται παρεμβολές μόνο από τους χρήστες με χειρότερο κέρδος και λόγω των μικρών διαστάσεων των κυψελών σε σχέση με τις αποστάσεις των χρηστών.

5.4.3 Σενάριο 2ο: Αριθμητικά Αποτελέσματα – Συγκρίσεις

Σε αυτή την ενότητα παρατίθενται τα ποσοτικά αποτελέσματα, καθώς και οι γραφικές παραστάσεις από την εκτέλεση του δεύτερου σεναρίου στο περιβάλλον MATLAB, με τις τιμές των σταθερών όπως αναγράφονται στον Πίνακα 2. Τα αποτελέσματα αυτά θα συγκριθούν με τα αποτελέσματα του πρώτου σεναρίου (Διάγραμμα 14) με στόχο να καθορίσουμε εάν το τριεπίπεδο NOMA υπερισχύει του διεπίπεδου NOMA.

Εδώ η σύγκριση μπορεί να γίνει μόνο στο επίπεδο των MUE χρηστών, διότι ο αριθμός των FUE είναι άνισος στις δύο τοπολογίες.

1. Παρακάτω παρουσιάζεται η ισχύς εκπομπής στην ζεύξη ανόδου P^* ως προς την απόσταση των MUE χρηστών από το σταθμό βάσης τους, τα αποτελέσματα που λάβαμε με χρήση του μοντέλου NOMA σε διεπίπεδο και τριεπίπεδο σύστημα συγκεντρώνονται στο παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 22: Ισχύς των MUE χρηστών στα δύο σενάρια

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι τιμές του P των για τις 2 περιπτώσεις:

Ισχύς Εκπομπής Χρηστών Μακροκυψέλης (Power σε Watt)

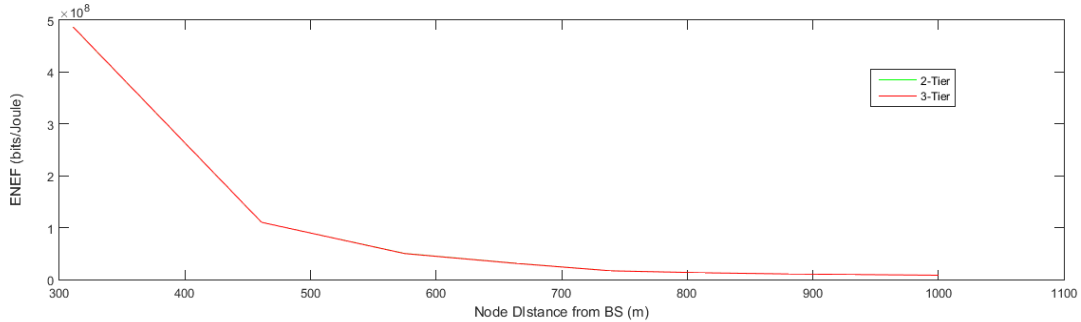
	User 1	User 2	User 3	User 4
2-Tier	0,000111	0,000492	0,001082	0,001753
3-Tier	0,000111001	0,000492001	0,001086	0,001765

	User 5	User 6	User 7	User 8	User 9
--	--------	--------	--------	--------	--------

2-Tier	0,003357	0,004347	0,005265	0,005854	0,006824
3-Tier	0,003371	0,004356	0,005267	0,005854001	0,006821

Πίνακας 31: Τιμές ισχύος των MUE σε διεπίπεδο και τριεπίπεδο NOMA

2. Στο παρακάτω διάγραμμα βλέπουμε την ενεργειακή απόδοση (bits/Joule) των MUE:



Διάγραμμα 23: Ενεργειακή απόδοση των MUE χρηστών στα δύο σενάρια

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι τιμές της ενεργειακής απόδοσης για τους 9 χρήστες για τα δύο σενάρια:

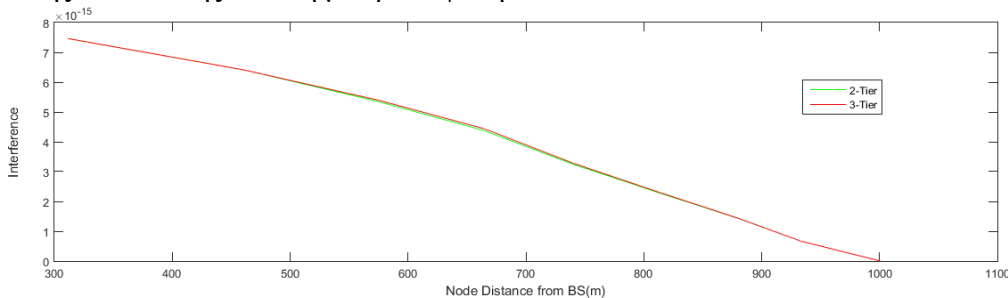
Ενεργειακή Απόδοση Χρηστών Μακροκυψέλης (bits/Joule)

	User 1	User 2	User 3	User 4
2-Tier	486327823	110281939	50277979	31032956
3-Tier	486457344	110313194	50050213	30850806

	User 5	User 6	User 7	User 8	User 9
2-Tier	16784774	12964490	10706163	9628606	8259650
3-Tier	16715283	12938039	10700079	9627848	8262620

Πίνακας 32: Τιμές ενεργειακής απόδοσης των MUE σε διεπίπεδο και τριεπίπεδο NOMA

3. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι παρεμβολές των MUE για τα δύο σενάρια, συναρτήσει της απόστασης από τη μακροκυψέλη.



Διάγραμμα 24: Παρεμβολές των MUE χρηστών στα δύο σενάρια

Στον πίνακα αυτόν παρουσιάζονται οι τιμές των παρεμβολών για τα δύο σενάρια:

Παρεμβολές Χρηστών Μακροκυψέλης

	User 1	User 2	User 3	User 4
2-Tier	7,46837e-15	6,41150e-15	5,34812e-15	4,37426e-15
3-Tier	7,46520e-15	6,408344e-15	5,39512e-15	4,43771e-15

	User 5	User 6	User 7	User 8	User 9
2-Tier	3,25689e-15	2,27600e-15	1,41514e-15	6,64383e-16	1,79787e-18
3-Tier	3,29122e-15	2,29087e-15	1,41879e-15	6,64829e-16	0

Πίνακας 33: Τιμές παρεμβολών των MUE σε διεπίπεδο και τριεπίπεδο NOMA

Παρατηρούμε ότι οι τιμές στα παραπάνω μεγέθη (ισχύς, ενεργειακή απόδοση και παρεμβολές) είναι πρακτικά οι ίδιες και στα δύο σενάρια. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι χρησιμοποιούμε το μοντέλο NOMA, δηλαδή ότι οι χρήστες ακούν μόνο τους χρήστες με χαμηλότερο κέρδος από αυτούς. Συνεπώς, η οποιαδήποτε διαφορά στις τιμές εξαλείφεται, είτε όταν έχουμε μόνο FAP, είτε όταν αντικαταστήσουμε FAP με OAP(τριεπίπεδο).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

- 6.1 Επίλογος
- 6.2 Μελλοντική Εργασία

6.1 Επίλογος

Στην παρούσα διπλωματική μελετήθηκε η βέλτιστη κατανομή πόρων (συγκεκριμένα η ισχύς, ο ρυθμός μετάδοσης, η ενεργειακή απόδοση και οι παρεμβολές) στην άνω ζεύξη ασύρματων κυψελωτών δικτύων με χρήση του καινοτόμου μοντέλου NOMA. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, οι χρήστες ενός δικτύου άνω ζεύξης δέχονται παρεμβολή μόνο από τους χρήστες οι οποίοι έχουν χαμηλότερο κέρδος καναλιού από αυτούς. Αυτή είναι μία πολύ σημαντική ιδιότητα, αφού μειώνονται τόσο οι ενδοκυψελικές παρεμβολές στο σύνολό τους, όσο και οι παρεμβολές του κάθε χρήστη ξεχωριστά. Η μελέτη έγινε σταδιακά σε μονοεπίπεδο, διεπίπεδο και τριεπίπεδο σύστημα.

Για την υλοποίηση της έρευνας αυτής έγινε χρήση της Θεωρίας των Παιγνίων και η εισαγωγή της έννοιας της Συνάρτησης Ευχαρίστησης. Σύμφωνα με τα παραπάνω, το πρόβλημα κατανομής πόρων διατυπώθηκε ως ένα μη-συνεργατικό παίγνιο, του οποίου η λύση ήταν η σύγκλιση σε ένα μοναδικό σημείο ισορροπίας κατά Nash.

Σημαντικό σημείο στη μελέτη του προβλήματος κατανομής πόρων, αποτέλεσε η χρήση της κοστολόγησης στους πόρους του δικτύου που καταναλώνουν οι χρήστες. Αυτό είχε ως στόχο τη συμμόρφωση των χρηστών σε μια πιο κοινωνικά αποδεκτή συμπεριφορά, μειώνοντας έτσι τη βλάβη που προκαλούν προς τους άλλους χρήστες του δικτύου εξαιτίας του έντονου ανταγωνισμού τους. Εδώ παρατηρήσαμε, όμως, ότι η έννοια της κοστολόγησης δεν είχε τόσο μεγάλη επιρροή στους χρήστες, δεδομένου ότι οι πόροι ήταν πολύ κοντά στις βέλτιστες τιμές τους λόγω της χρήσης του μοντέλου NOMA.

Τα αποτελέσματα σε μονοεπίπεδο και διεπίπεδο σύστημα συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα προβλήματα σε CDMA τεχνική, με στόχο να αποδείξουμε τα σημαντικά πλεονεκτήματα της τεχνικής NOMA. Πράγματι, τόσο θεωρητικά όσο και πρακτικά, αποδείχτηκε ότι το μοντέλο NOMA υπερτερεί σε μεγάλο βαθμό κάτι το οποίο είναι πολύ ελπιδοφόρο για τα συστήματα νέας τεχνολογίας.

Όσον αφορά το τριεπίπεδο σύστημα, έγινε η σύγκριση αυτού με το διεπίπεδο και παρ'ότι όπως ήταν λογικό οι τιμές της ισχύος και των παρεμβολών αυξάνονται ενώ της ενεργειακής απόδοσης μειώνονται, παρατηρούμε ότι οι μεταβολές αυτές είναι σχεδόν αμελητέες. Αυτό απορρέει από το γεγονός ότι γίνεται χρήση του μοντέλου NOMA, σύμφωνα με το οποίο οι παρεμβολές μειώνονται.

6.2 Μελλοντική Εργασία

Η εργασία αυτή αποτελεί τμήμα ενός ευρύτερου πλαισίου ερευνών σχετικά με τη βελτιστοποίηση της κατανομής πόρων σε ασύρματα περιβάλλοντα μετάδοσης δεδομένων. Δεδομένου της συνεχούς εξέλιξης της τεχνολογίας, η έρευνα θα πρέπει να είναι διαρκής και να προσαρμόζεται στα νέα τεχνολογικά δεδομένα. Συνεπώς, προτείνουμε κάποιες επεκτάσεις της παρούσας διπλωματικής.

Συγκεκριμένα, θα μπορούσε η έρευνα στο διεπίπεδο και τριεπίπεδο σύστημα να περιλαμβάνει αλληλοκάλυψη των φεμτοκυψελών και των VLC κυψελών ξεχωριστά, ώστε να μελετηθεί και το πρόβλημα απόφασης των χρηστών ως προς ποια κυψέλη να αποστείλουν δεδομένα. Τέλος, θα ήταν θεμιτό να μελετηθεί το πρόβλημα κάθε επιπέδου με αρκετά μεγαλύτερο αριθμό χρηστών από αυτών που χρησιμοποιήθηκε στη συγκεκριμένη διπλωματική, ώστε να προκύψουν συμπεράσματα σε μεγάλη κλίμακα.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Brighthub, “Evolution Of Mobile Technology: A Brief History of 1G, 2G, 3G and 4G Mobile Phones», [online]. Available: <http://www.brighthub.com/mobile/emerging-platforms/articles/30965.aspx>
- [2] Junxian Huang, Feng Qian, Alexandre Gerber, Z. Morley Mao, Subhabrata Sen, Olive Spatscheck – “A Close Examination of Performance and Power Characteristics of 4G LTE Networks” - University of Michigan, AT&T Labs – Research
- [3] Wikipedia , “LTE (telecommunication)”, [online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/LTE_\(telecommunication\)](https://en.wikipedia.org/wiki/LTE_(telecommunication))
- [4] Bichai Wang, Kun Wang, Zhaohua Lu, Tian Xie, and Jinguo Quan – “Comparison Study of Non-Orthogonal Multiple Access Schemes for 5G” – Tsingua University, Beijing, China
- [5] Beomju Kim, Wonsuk Chung, Sungmook Lim, Sangwook Suh, Jonghyung Kwun, Sooyong Choi, and Daesik Hong – “Uplink NOMA with Multi-Antenna” - Yonsei University, Korea
- [6] Yuya Saito, Yoshihisa Kishiyama, Anass Benjebbour, Takehiro Nakamura, Anxin Li, and Kenichi Higuchi – “Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for Cellular Future Radio Access” – Radio Access Network Development Department, NTT DOCOMO, INC.
- [7] Anass Benjebbour, Yuya Saito, Yoshihisa Kishiyama, Anxin Li, Atsushi Harada, Takehiro Nakamura – “Concept and Practical Considerations of Non-orthogonal Multiple Access(NOMA) for Future Radio Access” – Radio Access Network Development Department, NTT DOCOMO, INC.
- [8] Linglong Dai, Bichai Wang, Yifei Yuan, Shuangfeng Han, Chih-Lin I, and Zhaocheng Wang – “Non-Orthogonal Multiple Access for 5G: Solutions, Challenges, Opportunities, and Future Research Trends” – Tsingua University, Beijing, China
- [9] Hanaa Marshoud, Student Member, IEEE, Vasileios M. Kapinas, Member, IEEE, George K. Karagiannidis, Fellow, IEEE, and Sami Muhaidat, Senior Member, IEEE – “Non-Orthogonal Multiple Access for Visible Light Communication”
- [10] Βαμβακάς Ι. Παναγιώτης – «Βέλτιστη Κατανομή Ισχύος και Ρυθμού Μετάδοσης Ζεύξης Ανόδου Ασύρματων Δικτύων Υψηλών Ταχυτήτων με Χρήση Κοστολόγησης» - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διπλωματική Εργασία
- [11] Wikipedia , “Macrocell”, [online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Macrocell>
- [12] Wikipedia , “Femtocell”, [online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Femtocell>
- [13] Wikipedia , “Visible Light Communication”, [online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Visible_light_communication
- [14] Eirini Eleni Tsiropoulou, Georgios K. Katsinis, and Symeon Papavassiliou, Member IEEE – “Distributed Uplink Power Control in Multi-Service Wireless Networks via a Game Theoretic Approach with Convex Pricing” - NETMODE Lab, National Technical University of Athens
- [15] Tuan Nguyen, Mostafa Zaman Chowdhury and Yeong Min Jang – “A novel link switching scheme using pre-scanning and RSS prediction in visible light communication networks”
- [16] “Guidelines for Evaluation of Radio Transmission Technologies for IMT-2000,” ITU Recommendation M.1225, 1997.
- [17] V. Chandrasekhar, J. G. Andrews, T. Muharemovic, Z. Shen, and A. Gatherer - “Distributed Power Control in Femtocell – Underlay Cellular Networks” - IEEE GLOBECOM, 2009, pp. 1 – 6.