



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

**ΕΠΕΚΤΑΣΙΜΟΤΗΤΑ ΕΤΕΡΟΓΕΝΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ 5<sup>ης</sup> ΓΕΝΙΑΣ (5G) ΜΕ ΤΗΝ  
ΚΑΤΑΛΛΗΛΗ ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΟΜΒΩΝ ΑΝΑΜΕΤΑΔΟΣΗΣ (RELAY  
SELECTION) ΚΑΙ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΜΙΜΟ ΚΕΡΑΙΩΝ ΣΤΟ ΣΤΑΘΜΟ ΒΑΣΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κολιάτσης Α. Αναστάσιος

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

Αθήνα, Οκτώβριος 2022





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

**ΕΠΕΚΤΑΣΙΜΟΤΗΤΑ ΕΤΕΡΟΓΕΝΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ 5<sup>ης</sup> ΓΕΝΙΑΣ (5G) ΜΕ ΤΗΝ  
ΚΑΤΑΛΛΗΛΗ ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΟΜΒΩΝ ΑΝΑΜΕΤΑΔΟΣΗΣ (RELAY  
SELECTION) ΚΑΙ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΜΙΜΟ ΚΕΡΑΙΩΝ ΣΤΟ ΣΤΑΘΜΟ ΒΑΣΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κολιάτσης Α. Αναστάσιος

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

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 17<sup>η</sup> Οκτωβρίου 2022

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

Βενιέρης Στ. Ιάκωβος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Παναγόπουλος Δ. Αθανάσιος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2022

.....

Κολιάτσης Α. Αναστάσιος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών

Copyright © Αναστάσιος Κολιάτσης, 2022

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

## **Περίληψη**

Στόχος της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη ενός συστήματος 5ης γενιάς με πλήθος σταθμών βάσης (BS) και κόμβων αναμετάδοσης (Relay Nodes – RNs). Μελετώνται διάφορες τεχνικές ως προς την επιλογή RN ή/και BS από τους χρήστες. Η εργασία περιλαμβάνει, τόσο ανασκόπηση του θεωρητικού υπόβαθρου της χρήσης RN σε ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών επόμενης γενιάς (5G και Beyond), όσο και υπολογιστική προσομοίωση πραγματικού σεναρίου 5G συστήματος, με έμφαση στη βελτιστοποίηση της επιλογής RN στην 5G τοπολογία αλλά και την κατανομή των διαθέσιμων ραδιοπόρων.

Στα πρώτα πέντε κεφάλαια γίνεται αναφορά στην ιστορική αναδρομή των ασυρμάτων δικτύων επικοινωνιών, μελετάται η θεωρία γύρω από τον ασύρματο διάυλο, τις απώλειες διάδοσης και παρουσιάζονται και αναλύονται τα κυψελωτά δίκτυα και τα συστήματα MIMO. Παρατίθενται οι επικρατέστερες τεχνικές ψηφιακής διαμόρφωσης και οι βασικές τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης στα ασύρματα συστήματα (TDMA, FDMA, CDMA, OFDMA, NOMA), ενώ γίνεται εισαγωγή στη θεωρία των κόμβων αναμετάδοσης και αναφορά στους τρόπους διείσδυσης αυτής της νέας τεχνολογίας στα υπάρχοντα συστήματα.

Στο Κεφάλαιο 6, παρουσιάζεται η υπολογιστική προσομοίωση πραγματικού σεναρίου 5G. Αναλύονται οι βασικές έννοιες του συστήματος, ενώ με τη βοήθεια διαγραμμάτων γίνεται επεξήγηση των διαδικασιών που ακολουθούνται. Τέλος, στο Κεφάλαιο 7, γίνεται ανάλυση των αριθμητικών αποτελεσμάτων για τα διάφορα σενάρια της προσομοίωσης και εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα μέσω των γραφημάτων που παρέχονται.

**Λέξεις – Κλειδιά:** Κυψελωτά Δίκτυα, Δίκτυα 5<sup>ης</sup> Γενιάς, 5G, Relay Nodes, RNs, Συστήματα Πολλαπλών Εισόδων-Εξόδων, MIMO, Έλεγχος Ισχύος, Προηγμένα Σχήματα Διαίρεσης Συχνότητας



## ***Abstract***

The aim of this thesis is the extensive study of a 5th generation system with a multitude of base stations and RNs. Various techniques for user selection of RN and/or BS will be studied. The thesis includes, both a review of the theoretical background of the use of RN in wireless next generation communication networks (5G and Beyond), as well as a computational simulation of a real 5G system scenario, with emphasis on the optimization of the RN selection in the 5G topology but also on the allocation of the available radio sources.

In the first five chapters, reference is made to the historical review of wireless communication networks, the theory regarding wireless channels and propagation losses, as well as cellular networks and MIMO systems are presented and analysed. The most common digital modulation techniques and the basic multi-channel access techniques in wireless systems are presented (TDMA, FDMA, CDMA, OFDMA, NOMA), while an introduction is made to the theory of relay nodes and a reference to the ways in which this new technology is inserted into existing systems.

In Chapter 6, the computational simulation of a real 5G scenario is presented. The basic concepts of the system are analysed, while the procedures followed are explained with the aid of diagrams. Finally, in Chapter 7, the numerical results for the various simulation scenarios are analysed and useful conclusions are drawn through the graphs provided.

**Keywords:** Cellular Networks, 5<sup>th</sup> Generation Networks, 5G, Relay Nodes, RNs, Multiple Input Multiple Output Systems, MIMO, Power Control, Advanced Multiple Access Schemes





## ***Ευχαριστίες***

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2021-22 στο Εργαστήριο Ευφών Επικοινωνιών και Δικτύων Ευρείας Ζώνης (ICBNet) της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Θα ήθελα να ευχαριστήσω την Καθηγήτρια κα Δήμητρα–Θεοδώρα Κακλαμάνη, η οποία μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα και να διευρύνω τις γνώσεις μου γύρω από αυτόν τον τομέα. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον υποψήφιο Διδάκτορα Ιωάννη Μπαρτσιώκα, για την άριστη συνεργασία που είχαμε στα πλαίσια εκπόνησης αυτής της εργασίας, τον πολύτιμο χρόνο που διέθεσε για να μου δώσει σημαντικά στοιχεία και εξηγήσεις πάνω στο θέμα, αλλά και για την προθυμία του και τη βοήθεια, που ποτέ δε δίστασε να μου δώσει. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, η οποία υπήρξε πάντα ένα ανεκτίμητο στήριγμα για μένα και στην οποία οφείλω όλη τη διαδρομή των σπουδών μου, μέχρι σήμερα.

## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

Κατάλογος Εικόνων.....	13
Κατάλογος Πινάκων .....	15
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	17
1.1 Δομή και στόχος της εργασίας.....	17
1.2 Ιστορική αναδρομή επικοινωνιών .....	17
2 Ο ΑΣΥΡΜΑΤΟΣ ΔΙΑΥΛΟΣ.....	29
2.1 Εισαγωγή .....	29
2.2 Βασικά στοιχεία θεωρίας κεραιών.....	30
2.3 Θόρυβος στις τηλεπικοινωνίες .....	34
2.4 Απώλειες Διάδοσης.....	35
2.4.1 Απώλειες διάδοσης μεγάλης κλίμακας.....	36
2.4.1.1 Μοντέλο ελευθέρου χώρου (Free space path-loss).....	37
2.4.1.2 Μοντέλο δύο ακτίνων (Two-Ray Tracing model) .....	37
2.4.1.3 Γενικό μοντέλο ανίχνευσης ακτίνων (General Ray Tracing) .....	37
2.4.1.4 Εμπειρικά μοντέλα απωλειών διαδρομής .....	38
2.4.1.4.1 Μοντέλο Okumura.....	38
2.4.1.4.2 Μοντέλο Hata .....	39
2.4.1.4.3 Μοντέλο COST 231.....	40
2.4.1.4.4 Μοντέλα εσωτερικών χώρων.....	40
2.4.1.5 Μοντέλο της 3GPP.....	41
2.4.1.6 Σκίαση (Shadow Fading) .....	44
2.4.2 Απώλειες διάδοσης μικρής κλίμακας.....	44
2.4.2.1 Μετατόπιση Doppler.....	46
3 ΚΥΨΕΛΩΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ MIMO .....	47
3.1 Εισαγωγή .....	47

3.2	Δομή κυψελωτού δικτύου.....	47
3.3	Επαναχρησιμοποίηση Καναλιών.....	48
3.4	Τρόποι αύξησης του αριθμού των χρηστών σε μια κυψέλη.....	49
3.5	Συστήματα Πολλαπλής Εισόδου – Πολλαπλής Εξόδου MIMO .....	51
3.5.1	Περιγραφή MIMO Συστήματος .....	52
3.5.2	Χωρητικότητα MIMO συστήματος.....	53
4	ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΑΙ ΠΟΛΛΑΠΛΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ .....	55
4.1	Τεχνικές ψηφιακής διαμόρφωσης.....	55
4.2	Τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης.....	57
4.2.1	Πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου (TDMA).....	57
4.2.2	Πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης συχνότητας (FDMA).....	59
4.2.3	Πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση κώδικα (CDMA).....	60
4.3	Ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (OFDM).....	61
4.4	Πολλαπλή πρόσβαση ορθογώνιας διαίρεσης συχνότητας (OFDMA).....	62
4.5	Μη ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση (NOMA).....	64
5	ΚΟΜΒΟΙ ΑΝΑΜΕΤΑΔΟΣΗΣ – RELAY NODES.....	69
5.1	Εισαγωγή .....	69
5.2	Βασικοί τύποι κόμβων αναμετάδοσης.....	70
5.2.1	Σταθεροί κόμβοι αναμετάδοσης.....	71
5.2.2	Mobile Relay Nodes .....	71
5.2.3	D2D επικοινωνία .....	72
6	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΥΨΕΛΩΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΕΜΠΤΗΣ ΓΕΝΙΑΣ (5G) ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΕΡΑΙΩΝ MIMO ΚΑΙ ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΜΕ ΚΟΜΒΟΥΣ ΑΝΑΜΕΤΑΔΟΣΗΣ (RELAY NODES).....	75
6.1	Εισαγωγή .....	75
6.2	Ανάλυση βασικών εννοιών συστήματος .....	78
6.3	Σενάρια επιλογής και ενεργοποίησης κόμβων αναμετάδοσης.....	79

6.4	Κατασκευή τοπολογίας κυψελωτού συστήματος.....	81
6.5	Εισαγωγή χρηστών και υπολογισμός απωλειών διαδρομής.....	84
6.6	Υπολογισμός συνολικών απωλειών.....	88
6.7	Πίνακας μιγαδικών αποκρίσεων MIMO.....	88
6.8	Εκχώρηση καναλιών στο χρήστη .....	91
6.9	Έλεγχος ισχύος .....	94
6.10	Απόρριψη χρηστών .....	94
7	ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ – ΑΝΑΛΥΣΗ.....	97
7.1	Monte Carlo Simulations .....	97
7.2	Ανάλυση Αποτελεσμάτων .....	97
8	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ.....	111
	Βιβλιογραφία .....	113

## **Κατάλογος Εικόνων**

Εικόνα 1.1: Εξέλιξη δικτύων κινητών επικοινωνιών .....	19
Εικόνα 1.2: Σύγκριση απόδοσης του 5G σε σχέση με το 4G .....	25
Εικόνα 1.3: Απαιτήσεις για το 6G σε σύγκριση με το 5G.....	27
Εικόνα 1.4: Η αρχιτεκτονική των δικτύων 6G .....	28
Εικόνα 2.1: Απώλειες διαδρομής, σκίαση συναρτήσει της απόστασης.....	36
Εικόνα 2.2: Πολυδιαδρομική διάδοση (multipath propagation) .....	45
Εικόνα 3.1: MIMO $N_B \times N_U$ και οι αντίστοιχες αποκρίσεις .....	52
Εικόνα 4.1: Μορφή του σήματος ASK. ....	55
Εικόνα 4.2: Μορφή του σήματος PSK. ....	56
Εικόνα 4.3: Μορφή του διαμορφωμένου σήματος κατά FSK. ....	56
Εικόνα 4.4: Σύστημα TDMA δύο χρονοθυρίδων.....	58
Εικόνα 4.5: Κατανομή χρηστών στο πεδίο της συχνότητας .....	59
Εικόνα 4.6: Γραφική αναπαράσταση CDMA .....	60
Εικόνα 4.7: Σύγκριση αξιοποίησης διαθέσιμου φάσματος .....	61
Εικόνα 4.8: Σύγκριση μεταξύ τεχνικών OFDM και OFDMA .....	63
Εικόνα 4.9: Διαφορά μεταξύ OMA-NOMA .....	65
Εικόνα 4.10: Ζεύξη ανόδου (uplink NOMA).....	66
Εικόνα 4.11: Ζεύξη καθόδου (downlink NOMA).....	67
Εικόνα 5.1: Ενσωμάτωση RN σε τοπολογία δικτύου. ....	69
Εικόνα 5.2: Σταθερά και κινητά Relay Nodes .....	72
Εικόνα 6.1: Διάγραμμα ροής του συνολικού αλγορίθμου της προσομοίωσης .....	77
Εικόνα 6.2: Παράδειγμα LOS – NLOS επικοινωνίας.....	78
Εικόνα 6.3: Κυψέλη με τρεις τομείς των 120 μοιρών .....	82
Εικόνα 6.4: Συστήματα κυψελών ενός και δύο tiers.....	83

Εικόνα 6.5: Παράδειγμα τυχαίας τοποθέτησης χρηστών σε σύστημα 2 tiers.....	84
Εικόνα 6.6: Διάγραμμα ροής της εισαγωγής χρήστη.....	87
Εικόνα 6.7: Διαδικασία μοντελοποίησης συντελεστή καναλιών.....	89
Εικόνα 6.8: Γωνίες άφιξης και αναχώρησης.....	90
Εικόνα 6.9: Διαγράμματα ροής συστήματος α)χωρίς RN, β) με Inband RNs.....	92
Εικόνα 6.10: Διάγραμμα ροής συστήματος με ενεργοποιημένα Outband RNs.....	93
Γράφημα 1: Αριθμός συνολικών εξυπηρετούμενων χρηστών συστήματος με 20,30,40 PRBs ανά χρήστη.....	100
Γράφημα 2: Αριθμός εξυπηρετούμενων χρηστών κεντρικού κελιού με 20,30,40 PRBs ανά χρήστη.....	101
Γράφημα 3: Μέση ισχύς εκπομπής με 20,30,40 PRBs ανά χρήστη.....	102
Γράφημα 4: Μέση ισχύς εκπομπής κεντρικής κυψέλης με 20,30,40 PRBs ανά χρήστη.....	103
Γράφημα 5: Μέσο SINR χρηστών με 20,30,40 PRBs ανά χρήστη.....	104
Γράφημα 6: Συνολικό Throughput συστήματος με 20 PRBs ανά χρήστη.....	105
Γράφημα 7: Συνολικό Throughput συστήματος με 30 PRBs ανά χρήστη.....	106
Γράφημα 8: Συνολικό Throughput συστήματος με 40 PRBs ανά χρήστη.....	106
Γράφημα 9: Απορριφθέντες χρήστες συστήματος με 20,30,40 PRBs ανά χρήστη.....	108

## **Κατάλογος Πινάκων**

Πίνακας 2.1: Ζώνες Συχνοτήτων .....	30
Πίνακας 2.2: Πρότυπο απωλειών 3GPP TR 38.901 .....	43
Πίνακας 6.1: Παράμετροι σχεδίασης κυψελών σύμφωνα με το πρότυπο ETSI TR 138 901 .	82
Πίνακας 6.2: Μοντέλο υπολογισμού απωλειών διαδρομής του προτύπου TR 138 901 .....	85
Πίνακας 7.1: Παράμετροι συστήματος .....	99





## **1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

### **1.1 Δομή και στόχος της εργασίας**

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη και ανάλυση της επεκτασιμότητας ενός ετερογενούς δικτύου πέμπτης γενιάς (5G) με τη χρήση κόμβων αναμετάδοσης (Relay Nodes) αλλά και συστημάτων Πολλαπλής Εισόδου – Πολλαπλής Εξόδου (MIMO).

Στα πρώτα τρία κεφάλαια γίνεται αναφορά στην ιστορική αναδρομή των ασυρμάτων δικτύων επικοινωνιών, μελετάται η θεωρία γύρω από τον ασύρματο διάυλο, τις απώλειες διάδοσης και παρουσιάζονται και αναλύονται τα κυψελωτά δίκτυα και τα συστήματα MIMO. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρατίθενται οι επικρατέστερες τεχνικές ψηφιακής διαμόρφωσης και οι βασικές τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης στα ασύρματα συστήματα (TDMA, FDMA, CDMA) ενώ γίνεται μια πιο εκτενής ανάλυση της διαμόρφωσης OFDM, της τεχνικής πολλαπλής πρόσβασης OFDMA, καθώς και της τεχνικής NOMA, που αποτελεί μία αναδυόμενη τεχνική για τα συστήματα 5G. Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στη θεωρία των κόμβων αναμετάδοσης και αναφορά στους τρόπους διείσδυσης αυτής της νέας τεχνολογίας στα υπάρχοντα συστήματα.

Στο Κεφάλαιο 6, παρουσιάζεται η υπολογιστική προσομοίωση πραγματικού σεναρίου 5G. Αναλύονται οι βασικές έννοιες του συστήματος, ενώ με τη βοήθεια διαγραμμάτων γίνεται επεξήγηση των διαδικασιών που ακολουθούνται. Τέλος, στο Κεφάλαιο 7, γίνεται ανάλυση των αριθμητικών αποτελεσμάτων για τα διάφορα σενάρια της προσομοίωσης και εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα μέσω των γραφημάτων που παρέχονται.

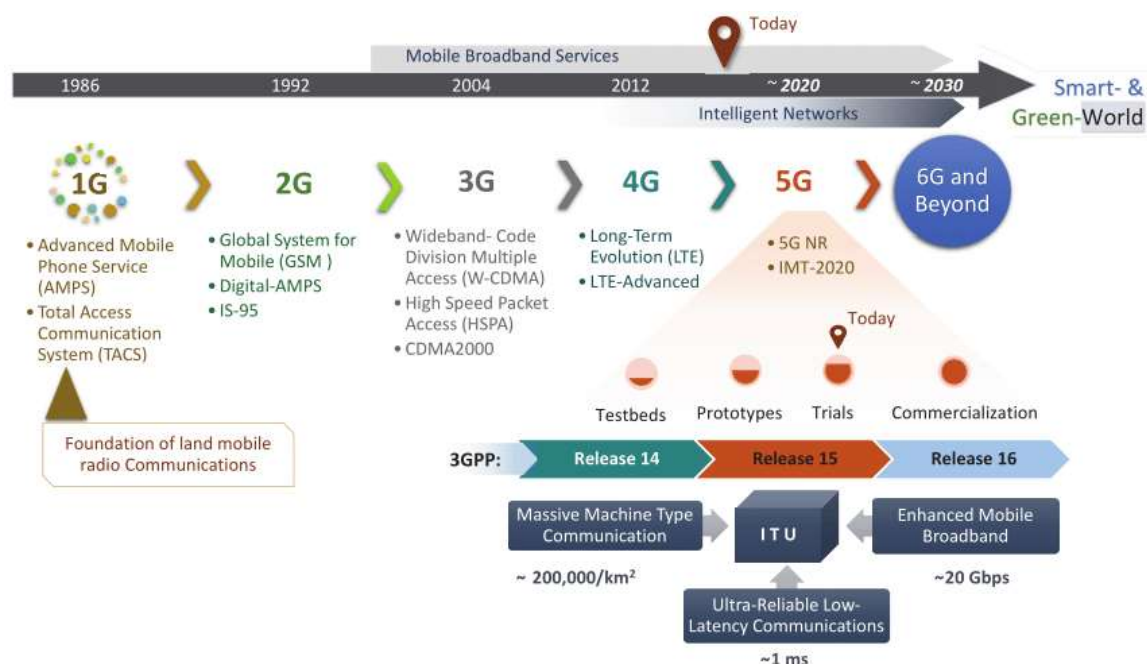
### **1.2 Ιστορική αναδρομή επικοινωνιών**

Από τα προϊστορικά κιόλας χρόνια, η χρήση καθρεφτών και σημάτων καπνού, τα ταχυδρομικά περιστερία και οι αγγελιοφόροι κατέδειξαν την ανάγκη των ανθρώπων για επικοινωνία από απόσταση. Σημαντικότερη περίοδος για την εξέλιξη των επικοινωνιών και την ασύρματη μετάδοση μηνυμάτων αργότερα, ήταν σαφέστατα η ανακάλυψη του ηλεκτρισμού και του ηλεκτρομαγνητισμού. Η θεωρία των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων του

J. C. Maxwell σε συνδυασμό με το πείραμα της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής του M. Faraday και το δίπολο Hertz, έβαλαν τις βάσεις για την πραγματοποίηση της ασύρματης μετάδοσης πληροφορίας. Ο G. Marconi ήταν ο πρώτος που κατάφερε το 1901 να υλοποιήσει υπερατλαντική μετάδοση σήματος, συνδυάζοντας τον πομπό του Hertz με το δέκτη του A. Ρορον.

Αυτές οι τεχνολογίες συνέχισαν την ανάπτυξη για πάνω από εκατό χρόνια, καθώς οι άνθρωποι άρχισαν να ξετυλίγουν το κουβάρι της πολυπλοκότητας των τηλεπικοινωνιών. Η επόμενη σημαντική πρόοδος σημειώθηκε κατά τη διάρκεια του δεύτερου παγκοσμίου πολέμου, όταν η στρατιωτική έρευνα κινήθηκε γύρω από τα ραντάρ και την τηλεπισκόπηση. Οι εφαρμογές που προέκυψαν από αυτές τις τεχνολογίες, ήταν η ραδιοφωνία και η τηλεοπτική μετάδοση στη δεκαετία του 1940. Στη δεκαετία του 1970 η AT&T Bell Labs πρωτοεμφάνισε την ιδέα των κυψελωτών συστημάτων και συνέχισε να πρωτοστατεί στην πρόοδο και ανάπτυξη προτύπων και φασματικών αποδόσεων, καθώς και τη μείωση των τιμών που θα οδηγούσαν σε εμπορική αποδοχή. Η τεράστια διεύρυνση των καταναλωτικών τομέων κατά τη διάρκεια των δεκαετιών του 80 και του 90 οδήγησε στη δημιουργία των σύγχρονων ασύρματων υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας που γνωρίζουμε σήμερα. Από τότε, μέχρι τώρα, πολλά έχουν προχωρήσει στον κλάδο των τηλεπικοινωνιών καθώς η ζήτηση των καταναλωτών είναι η ταχύτερη και πιο αξιόπιστη συνδεσιμότητα. Η ανάπτυξη από το 1G στο 4G και τώρα στο 5G, έχει επιταχύνει τον ρυθμό προόδου στις περισσότερες τεχνολογίες ασύρματων επικοινωνιών.

*Επεκτασιμότητα Ετερογενών Δικτύων 5<sup>ης</sup> Γενιάς (5G) με την Κατάλληλη Επιλογή Κόμβων Αναμετάδοσης (Relay Selection) και τη Χρήση MIMO Κεραιών στο Σταθμό Βάσης*



**Εικόνα 1.1: Εξέλιξη δικτύων κινητών επικοινωνιών<sup>1</sup>**

Οι πρώτες υπηρεσίες ασύρματης επικοινωνίας έγιναν διαθέσιμες μετά τον δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο. Σε αυτή την εποχή πριν τα κυψελοειδή δίκτυα, ο κινητός χρήστης ρύθμιζε την κλήση ενώ υπήρχαν ελάχιστα κανάλια διαθέσιμα. Αποτελείτο από τις εξής κύριες τεχνολογίες όπως, τα συστήματα προηγμένων συστημάτων κινητού τηλεφώνου (AMTS), το κινητό τηλεφωνικό σύστημα (MTS), Push to talk (PTT) και το βελτιωμένο σύστημα κινητής τηλεφωνίας (IMTS). Η κάθε συσκευή συνδεόταν στο τοπικό δίκτυο μόνον εάν βρισκόταν εντός ακτίνας 20 χιλιομέτρων. Βασικοί χρήστες του δικτύου ήταν συνήθως υλοτόμοι, εργοδηγοί κατασκευών, κτηματομεσίτες και διασημότητες.

Τα δίκτυα 0.5G αποτέλεσαν μία ομάδα τεχνολογιών με βελτιωμένα χαρακτηριστικά σε σχέση με το προαναφερθέν δίκτυο. Τα νεότερά αυτά συστήματα κινητής τηλεφωνίας

<sup>1</sup> Nawaz, Syed Junaid, et al. "Quantum machine learning for 6G communication networks: State-of-the-art and vision for the future." IEEE access 7 (2019): 46317-46350.

διαφέρουν στο γεγονός ότι ήταν διαθέσιμα πλέον για εμπορικές υπηρεσίες οι οποίες ήταν μέρος ενός δημόσιου δικτύου με τηλεφωνικούς αριθμούς, παρά μέρος ενός κλειστού, όπως της αστυνομίας ή των ταξί. Το πρώτο εμπορικό δίκτυο, Auto radio Puhelin (ARP), εμφανίστηκε το 1971 στη Φινλανδία και έως το 1978 προσέφερε 100% γεωγραφική κάλυψη με εγκατεστημένους 140 σταθμούς βάσης. Λειτουργούσε στη συχνότητα των 150MHz, με ισχύ εκπομπής που κυμαινόταν από 1 έως 5Watts. Λόγω της αναλογικής φύσης του, δεν είχε κωδικοποίηση και αυτό είχε ως αποτέλεσμα να μπορούν να υποκλέπτονται οι κλήσεις. Ένα άλλο μειονέκτημα του ARP ήταν ότι δεν υποστήριζε διαπομπή (handover), δηλαδή όταν ένας χρήστης μετέβαινε από μία κυψέλη σε μία άλλη, η κλήση διακοπτόταν.

Η πρώτη γενιά (1G) ήταν το πρότυπο αναλογικών τηλεπικοινωνιών που εισήχθη τη δεκαετία του 1980 και συνεχίστηκε μέχρι την εφεύρεση της τεχνολογίας 2G. Η τεχνολογία χρησιμοποιήθηκε στο πρώτο ασύρματο κινητό τηλέφωνο και όταν άρχισε να αυξάνεται η δημοτικότητα του στο ευρύ κοινό, αντικατέστησε τα δίκτυα 0G. Χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στην Ιαπωνία το 1979 και εξαπλώθηκε γρήγορα σε ολόκληρο τον κόσμο. Τα δίκτυα πρώτης γενιάς χρησιμοποιούσαν το αναλογικό ραδιοφωνικό σήμα και προσέφεραν χωρητικότητα καναλιού στα 30KHz και ταχύτητα 2.4kbps. Τα κινητά τηλέφωνα χρησιμοποιούσαν ένα ενιαίο καθολικό πρότυπο δικτύου που είναι γνωστό ως Advance Mobile Phone System (AMPS) βασισμένο στην τεχνική πολλαπλής πρόσβασης Frequency Division Multiple Access (FDMA). Τα δίκτυα προορίζονταν για βιομηχανική, στρατιωτική και ερευνητική εφαρμογή και χρησιμοποιούσαν μια σειρά από ανόμοια δίκτυα με πολύ μικρές περιοχές εκπομπής.

Η γενιά δικτύων 2G κυκλοφόρησε εμπορικά με το πρότυπο GSM στη Φινλανδία από τον πάροχο Radiolinja (τώρα μέρος της Elisa Oyj) το 1991. Τρία κύρια οφέλη των δικτύων 2G έναντι των προκατόχων τους ήταν:

- Ψηφιακά κρυπτογραφημένες τηλεφωνικές συνομιλίες, τουλάχιστον μεταξύ του κινητού τηλεφώνου και του σταθμού βάσης κινητής τηλεφωνίας, αλλά όχι απαραίτητα στο υπόλοιπο δίκτυο.

- Σημαντικά πιο αποτελεσματική χρήση του φάσματος ραδιοσυχνοτήτων επιτρέποντας περισσότερους χρήστες ανά ζώνη συχνοτήτων.
- Υπηρεσίες δεδομένων για κινητά.

Η τεχνολογία δεύτερης γενιάς παρείχε πολλές και σημαντικές αναβαθμίσεις στην κινητή επικοινωνία και επέτρεψε στα διάφορα δίκτυα να παρέχουν υπηρεσίες όπως σύντομα μηνύματα κειμένου (SMS - Short Message Service), εικονομηνύματα και μηνύματα πολυμέσων (MMS - Multimedia Messaging Service). Συστήματα ψηφιακής πολλαπλής πρόσβασης όπως TDMA (Time Division Multiple Access) και CDMA (Code Division Multiple Access) αποτέλεσαν βάση για την ανάπτυξη των τεχνολογιών GSM, PDC, iDEN και iS-136. Το GSM (Group Special Mobile) , το πιο κοινά αποδεκτό σύστημα των κινητών επικοινωνιών, χρησιμοποιήθηκε σε περισσότερες από 212 χώρες σε όλο τον κόσμο και κατέστησε δυνατή τη χρήση συσκευών από τους χρήστες του δικτύου σε διάφορα μέρη του πλανήτη. Βασιζόταν σε πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση χρόνου (TDMA), αρχικά από την Ευρώπη, αλλά χρησιμοποιήθηκε στο μεγαλύτερο μέρος του κόσμου εκτός της Ιαπωνίας και της Βόρειας Αμερικής. Στη Βόρεια Αμερική, τα Digital AMPS (IS-54 και IS-136) και CDMAone (IS-95) ήταν τα κύρια συστήματα. Στην Ιαπωνία, το σύστημα που αναπτύχθηκε παντού ήταν το Personal Digital Cellular (PDC).

Στη συνέχεια, μεταβατικό στάδιο πριν την εμφάνιση των δικτύων τρίτης γενιάς, αποτέλεσαν τα δίκτυα 2.5G και 2.75G τα οποία χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα. Το σύστημα GPRS (General Packet Radio Service), δημιούργημα του ευρωπαϊκού οργανισμού European Telecommunications Standards Institute (ETSI), υποστηρίζει πρωτόκολλα ασύρματων εφαρμογών όπως επικοινωνία μέσω email και πρόσβαση στον παγκόσμιο ιστό (World Wide Wireless Web) και παρέχει στο χρήστη ταχύτητες με ρυθμό δεδομένων από 56Kbps έως 384Kbps. Το πρότυπο EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution), με βασικό πλεονέκτημα τη συμβατότητα με παλαιότερα συστήματα, επιτρέπει ως επέκταση των GSM δικτύων έως και τριπλασιασμό της χωρητικότητάς τους με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων.

Η εμφάνιση του Internet στα τέλη της δεκαετίας του 90 προκάλεσε την αυξανόμενη ζήτηση για χρήση του από κινητές συσκευές. Η διαφαινόμενη επιτυχία του δικτύων 2G σήμανε την ώθηση για ταχύτερες και πιο αποτελεσματικές μεταδόσεις δεδομένων κινητής τηλεφωνίας. Η ανάπτυξη της **τρίτης γενιάς δικτύων (3G)** περιλάμβανε συντονισμένες προσπάθειες από διάφορες εταιρείες τηλεπικοινωνιών και συμμόρφωση με τα πρότυπα για να διασφαλιστεί ότι η τεχνολογία θα είναι λειτουργική και προσβάσιμη σε περισσότερους χρήστες. Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών ITU ανέπτυξε το IMT-2000 το οποίο είναι ένα παγκόσμιο πρότυπο για τα ασύρματα δίκτυα δεδομένων. Θεμελιώδης στόχος του IMT-2000 είναι να παρέχει καθολική κάλυψη και να διευκολύνει την απρόσκοπτη περιαγωγή σε πολλά δίκτυα και επίσης να φέρει ταχύτητες μετάδοσης έως 394Kbps για κινητούς σταθμούς και 2Mbps για σταθερούς σταθμούς. Αποτελείται από τα εξής πρότυπα:

- **CDMA2000** – ως μια αναβάθμιση του υπάρχοντος συστήματος ψηφιακής πολλαπλής πρόσβασης CDMA (Code Division Multiple Access) που χρησιμοποιείται ειδικά στη Βόρεια Αμερική και σε ορισμένα μέρη της Ασίας.
- **W-CDMA** – που προτάθηκε να είναι μια αναβάθμιση στα δίκτυα GSM ως εναλλακτική λύση στο CDMA2000 για αναβαθμισμένα συστήματα CDMA στην Ιαπωνία και στην Ευρώπη.
- **UMTS** – ακρωνύμιο για τα Universal Mobile Telecommunications Systems που προτάθηκε για πρώτη φορά από το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (ETSI) και τυποποιήθηκε από το πρόγραμμα συνεργασίας 3<sup>ης</sup> γενιάς (3GPP). Έγινε πρότυπο για ασύρματα δίκτυα 3G στην Ευρώπη και σε ορισμένα μέρη στην Ασία (ιδιαίτερα την Κίνα και την Ιαπωνία). Η τελευταία έκδοση UMTS, το Evolved High Speed Packet Access ή *HSPA+*, παρέχει υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων.
- **UWC-136** – ακρωνύμιο του Universal Wireless Communications, ένα πρότυπο ασύρματων δικτύων 3G που προσφέρθηκε για πρώτη φορά από την Ένωση Τηλεπικοινωνιών Βιομηχανίας (TIA).

Τον Ιούνιο του 2001, η ιαπωνική εταιρεία τηλεπικοινωνιών NTT DoCoMo ξεκίνησε μια δοκιμαστική υπηρεσία 3G σε λίγες επιλεγμένες περιοχές. Τον επόμενο Οκτώβριο, η εταιρεία κυκλοφόρησε την πρώτη της εμπορική υπηρεσία 3G που λειτουργούσε σε δίκτυο W-CDMA και μετονομάστηκε ως FOMA (Freedom of Mobile Multimedia Access) υψηλής ταχύτητας. Η Manx Telecom από το Βρετανικό Isle of Man ήταν η πρώτη στην Ευρώπη που ξεκίνησε μια δοκιμαστική υπηρεσία 3G στα τέλη του 2001, χρησιμοποιώντας την τεχνολογία UMTS. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, μια βραχύβια εταιρεία τηλεπικοινωνιών που ονομάζεται Monet Mobile Networks ήταν ο πρώτος πάροχος που ξεκίνησε μια εμπορική υπηρεσία 3G (τεχνολογία CDMA 1xEV-DO).

Η εμφάνιση των δικτύων τρίτης γενιάς ήταν ένα τεράστιο άλμα σε σχέση με τα προηγούμενα για τους εξής λόγους:

- Παρέχουν υψηλότερες ταχύτητες έως 2Mbps (με W-CDMA ή CDMA2000) και 28Mbps (με HSPA+), επιτρέποντας ταχύτερη μεταφόρτωση και λήψη αρχείων (ακόμη και μαζικά).
- Έχουν βελτιωμένη ιδιωτικότητα και ασφάλεια.
- Επιτρέπουν αναβαθμισμένες υπηρεσίες, όπως παιχνίδια υψηλής ευκρίνειας, κινητή τηλεόραση, ροή βίντεο (streaming) και ζωντανές διασκέψεις.
- Παρέχουν υψηλής ταχύτητας περιήγηση στο Web και ασύρματη εφαρμογή πρωτοκόλλου (WAP).

Το 3G έφερε επανάσταση στην επικοινωνία και τη χρήση του Διαδικτύου. Έχει πιστωθεί ευρέως τη δημιουργία smartphones καθώς και λειτουργιών όπως το Facebook, το Twitter, το Instagram και άλλες εφαρμογές για κινητά.

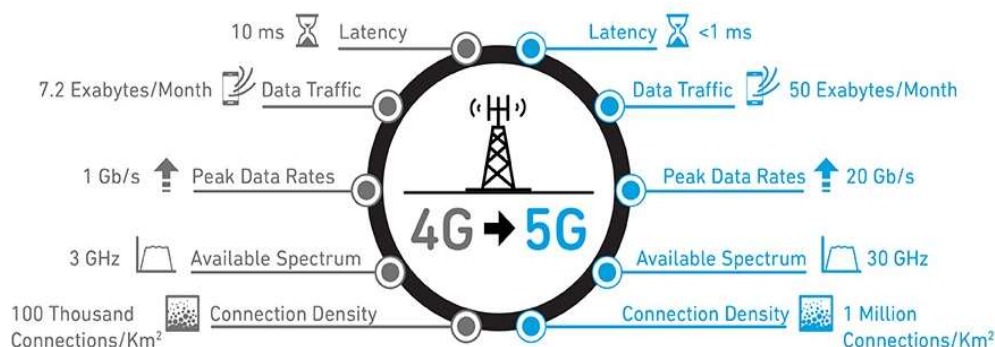
Τα συστήματα τέταρτης γενιάς (4G), σε αντίθεση με τις προηγούμενες γενιές, δεν υποστηρίζουν την τεχνική μεταγωγής κυκλώματος, αλλά αποκλειστικά τη μεταγωγή πακέτου και βασίζονται στη φιλοσοφία all-Internet Protocol (IP) και συγκεκριμένα στο IPv6 [13]. Αποτελούν μία υπερ-λειτουργία μεταξύ των ήδη υπάρχοντων τύπων δικτύων,

έτσι ώστε να διασφαλίζεται η ελεύθερη και απρόσκοπτη μετάβαση από τη μια τεχνολογία στην άλλη. Τον Μάρτιο του 2008, η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών ITU-R καθόρισε ένα σύνολο απαιτήσεων για τα πρότυπα 4G, που ονομάστηκε IMT-Advanced κατά το οποίο ρυθμίζονται οι απαιτήσεις για μέγιστη ταχύτητα στα 100 Mbit/s για επικοινωνία υψηλής κινητικότητας (όπως τραίνα και αυτοκίνητα) και 1 Gbit/s για επικοινωνία χαμηλής κινητικότητας (όπως πεζοί και ακίνητοι χρήστες)[24].

Λόγω περιορισμών στην Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS), το Wi-Fi υπολείπεται ως ασύρματη τεχνολογία που οδήγησε στην εμφάνιση των WiMAX και LTE. Το LTE αναπτύχθηκε από την 3GPP και οι τεχνολογίες πολλαπλής πρόσβασης που χρησιμοποιεί είναι η OFDMA για την ευθεία ζεύξη και η SC-FDMA (Single Carrier FDMA) για την αντίστροφη[11]. Το WiMAX και το LTE παρέχουν ευρυζωνική ασύρματη υπηρεσία κάνοντας χρήση Σταθμών Βάσης (BS) που αποτελούνται από κεραιές πολλαπλών εισόδων και εξόδων (Multiple Input Multiple Output – MIMO), παρέχοντας στα κινητά τερματικά (MS), υψηλές ταχύτητες, μέσω της πολυπλεξίας πολλαπλών ροών δεδομένων[25].

Η πέμπτη γενιά ασυρμάτων δικτύων είναι ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον τεχνολογιών ή αλλιώς ένα οικοσύστημα τεχνολογιών, που συνδέει μεταξύ τους τις τεχνολογίες που εισάγει, έτσι ώστε να πετύχει τις μεγαλύτερες δυνατές ταχύτητες, με ελάχιστες καθυστερήσεις και μεγάλες αποδόσεις για πολλές και διαφορετικές χρήσεις. Το 5G, εισάγει ένα πρωτόγνωρο άλμα σε ταχύτητες ευρυζωνικού δικτύου και επιτρέπει την αδιάκοπη και μαζική επικοινωνία ανάμεσα στους υπολογιστές και σε άλλες «έξυπνες» συσκευές με μεγάλη απόδοση, μικρή κατανάλωση σε πραγματικό χρόνο, και σε εφαρμογές ψυχαγωγικού ή τηλεπικοινωνιακού χαρακτήρα, αλλά και σε πιο σύνθετες δραστηριότητες, όπως για παράδειγμα ο έλεγχος βιομηχανικών διαδικασιών, οι αισθητήρες αναγνώρισης κίνησης, οι πειραματικές ενέργειες βελτίωσης της καθημερινότητας, κ.ά.[20]





Εικόνα 1.2: Σύγκριση απόδοσης του 5G σε σχέση με το 4G<sup>2</sup>

Το 5G περιγράφει μια σειρά από περιπτώσεις χρήσης που εστιάζουν σε:

- **Ευρυζωνική πρόσβαση σε πυκνές περιοχές:** Παρέχει ευρυζωνική πρόσβαση με εύρος ζώνης έως και 10Gbps και διαθεσιμότητα υπηρεσιών σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, π.χ. σε πυκνά αστικά κέντρα ή εκδηλώσεις, στάδια ή υπαίθρια φεστιβάλ.
- **Υψηλή κινητικότητα χρηστών:** παρέχει ευρυζωνική υποστήριξη για χρήστες κινητών σε πολύ γρήγορα κινούμενα οχήματα όπως τρένα υψηλής ταχύτητας.
- **Massive Internet of Things:** Παρέχει ευρυζωνική πρόσβαση για εξαιρετικά πυκνά δίκτυα αισθητήρων. Αυτή η χρήση θα περιλαμβάνει επικοινωνίες τύπου μηχανήματος χαμηλού κόστους / μεγάλης εμβέλειας / χαμηλής ισχύος (MTC) καθώς και MTC ευρείας ζώνης με ορισμένες δυνατότητες πιο κοντά στην επικοινωνία ανθρώπινου τύπου (HTC).
- **Εξαιρετικά αξιόπιστη επικοινωνία:** Παρέχει εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση, αξιοπιστία και διαθεσιμότητα υποστήριξης σύνδεσης δικτύου, για παράδειγμα, αυτόνομη οδήγηση

---

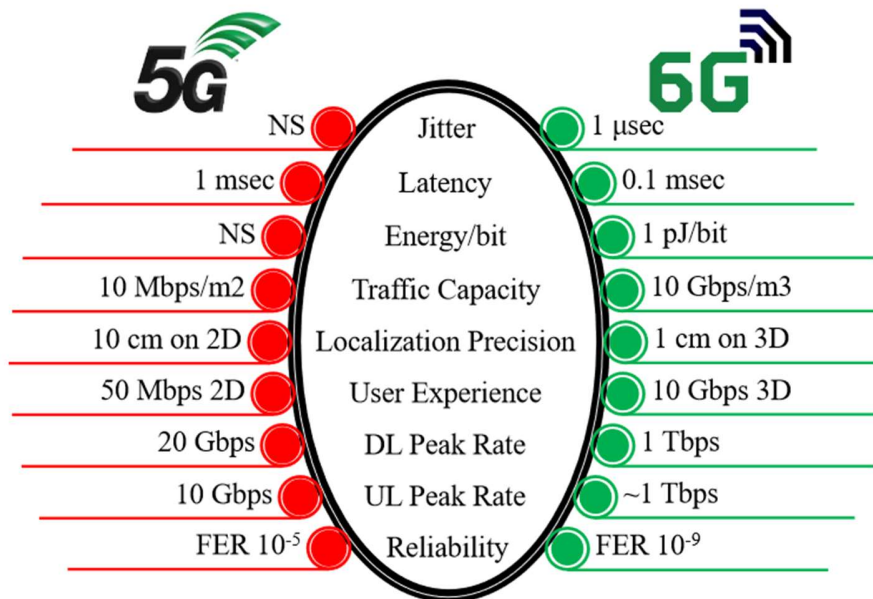
<sup>2</sup> Sivalingam, Thushan, et al. "Positioning of multiple unmanned aerial vehicle base stations in future wireless network." 2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring). IEEE, 2020.

Η 5η γενιά ασύρματης δικτύωσης έχει ως στόχο να εξασφαλίσει αποτελεσματικές λύσεις σε ένα σύνολο προβλημάτων όπως την μεγαλύτερη αποδοτικότητα του φάσματος, λόγω της αύξησης του όγκου δεδομένων, την μαζική συνδεσιμότητα συσκευών λόγω της ανάπτυξης του Internet of Things (IoT), καθώς και τη μικρότερη καθυστέρηση. Για το λόγο αυτό προτείνεται η χρήση του μοντέλου της μη ορθογωνικής πολλαπλής πρόσβασης (Non-Orthogonal Multiple Access - NOMA), το οποίο αποτελεί μια καινοτόμα τεχνολογία στα ασύρματα δίκτυα 5ης γενιάς, εξαιτίας της καλύτερης αποδοτικότητας φάσματος την οποία παρέχει σε σχέση με τα μοντέλα ορθογωνικής πολλαπλής πρόσβασης.[23].

Σύμφωνα με την 3GPP οι τρεις κύριοι τεχνικοί στόχοι του 5G δικτύου ή τρεις τύποι υπηρεσιών όπως αναφέρονται μερικές φορές είναι α) Βελτιωμένες κινητές ευρυζωνικές συνδέσεις (Enhanced Mobile Broadband - eMBB), β) Επικοινωνίες τύπου μαζικής μηχανής (Massive Machine Type Communications - mMTC) και γ) Εξαιρετικά αξιόπιστες και χαμηλού λανθάνοντος χρόνου επικοινωνίες (Ultra-reliable and Low-latency Communications URLLC). Συγκεκριμένα, το eMBB αναφέρεται σε ευρυζωνικές υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας μεγάλου όγκου που έχουν υψηλές απαιτήσεις για εύρος ζώνης, όπως βίντεο υψηλής ευκρίνειας, εικονική πραγματικότητα (VR) και επαυξημένη πραγματικότητα (AR), το mMTC αναφέρεται σε υπηρεσίες IoT μεγάλης κλίμακας, υπηρεσίες που περιλαμβάνουν υψηλές απαιτήσεις για πυκνότητα σύνδεσης, όπως η έξυπνη πόλη και η έξυπνη γεωργία και το URLLC αναφέρεται σε υπηρεσίες ευαίσθητες σε καθυστέρηση, όπως υποβοηθούμενη και αυτοματοποιημένη οδήγηση, βιομηχανικός αυτοματισμός και απομακρυσμένη διαχείριση.[20]

Το Internet of Things (IoT) θεωρείται ως ένα de facto παράδειγμα για τη βελτίωση της επικοινωνίας και της διασύνδεσης των υπολογιστικών συστημάτων. Μεγάλος αριθμός φυσικών και εικονικών συσκευών συνδέεται στο ίντερνετ κάνοντας χρήση των δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Η τελευταία γενιά των δικτύων 5G χρησιμοποιεί επαναστατικές τεχνολογίες ωστόσο μελλοντικά, δεδομένης της αύξησης των συσκευών και του όγκου διακίνησης δεδομένων, δεν μπορεί να ανταποκριθεί πλήρως στις συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις. Ως εκ τούτου, αυτό που οραματίζεται η επόμενη γενιά δικτύων 6G, είναι να

διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο για την άμβλυνση τέτοιων προκλήσεων, παρέχοντας νέες υπηρεσίες επικοινωνίας, χωρητικότητα δικτύου και συνδέσεις εξαιρετικά χαμηλού χρόνου απόκρισης (ultra-Reliable Low Latency Communications - uRLLC).

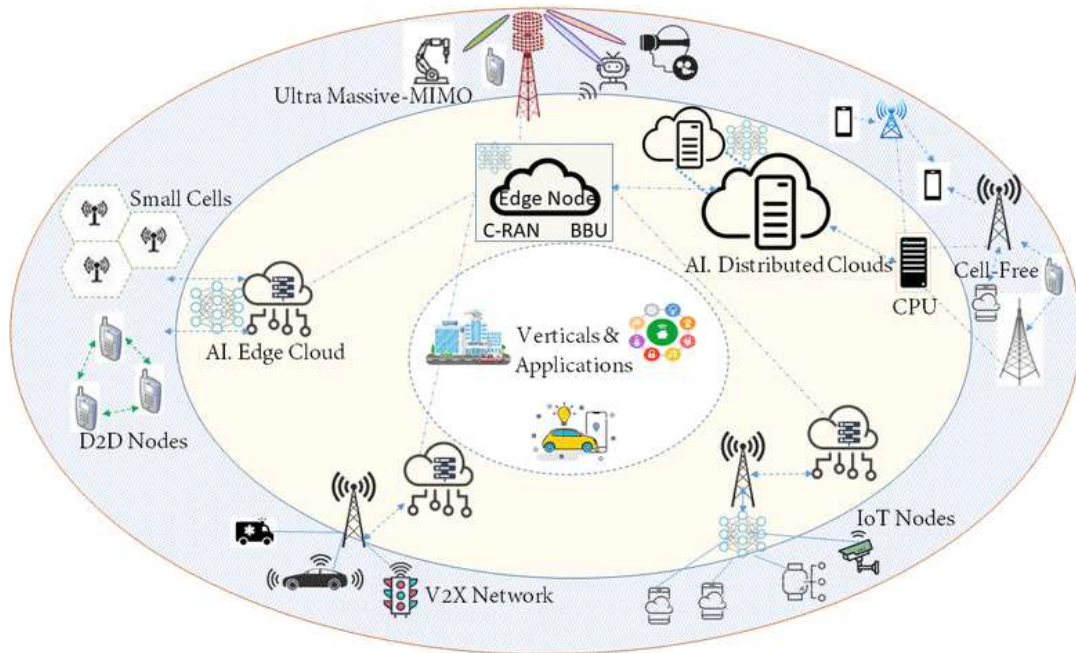


Εικόνα 1.3: Απαιτήσεις για το 6G σε σύγκριση με το 5G.<sup>3</sup>

Σε συνδυασμό με την τεχνητή νοημοσύνη (AI), η υπολογιστική υποδομή του 6G θα είναι σε θέση να διευκολύνει την ύπαρξη νέων εφαρμογών όπως, η επικοινωνία μέσω ολογραφήματος (holographic communication), η περαιτέρω ανάπτυξη της αυτοματοποίησης της παραγωγής των βιομηχανιών, η εικονική πραγματικότητα και η απομακρυσμένη πραγματοποίηση χειρουργικών επεμβάσεων. Το 6G αναμένεται να υποστηρίξει ταχύτητες δεδομένων 1 terabyte ανά δευτερόλεπτο και μήκη κύματος κάτω του χιλιοστού (sub-mm waves). Τα σημεία πρόσβασης θα μπορούν να εξυπηρετούν πολλαπλούς πελάτες ταυτόχρονα μέσω πολλαπλής

<sup>3</sup> Shahraki, Amin, et al. "A comprehensive survey on 6G networks: Applications, core services, enabling technologies, and future challenges." arXiv preprint arXiv:2101.12475 (2021).

πρόσβασης ορθογώνιας διαίρεσης συχνότητας (OFDMA). Οι υψηλότερες συχνότητες θα επιτρέψουν πολύ ταχύτερους ρυθμούς δειγματοληψίας, επιπλέον θα παρέχουν σημαντικά καλύτερη απόδοση και υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων.



**Εικόνα 1.4: Η αρχιτεκτονική των δικτύων 6G<sup>4</sup>**

---

<sup>4</sup> Bhat, Jagadeesha R., and Salman A. Alqahtani. "6G ecosystem: Current status and future perspective." IEEE Access 9 (2021): 43134-43167.

## **2 Ο ΑΣΥΡΜΑΤΟΣ ΔΙΑΥΛΟΣ**

### **2.1 Εισαγωγή**

Η ασύρματη μετάδοση πληροφορίας βασίζεται στην εκπομπή και την λήψη των σημάτων μέσω των κεραίων και της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της ασύρματης μετάδοσης σε σύγκριση με την ενσύρματη, είναι η αλγεβρική απόσβεση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος καθώς αυξάνεται η απόσταση από την πηγή, η δυνατότητα πραγματοποίησης κινητών επικοινωνιών και το μικρό κόστος στησίματος και λειτουργίας ενός ασύρματου δικτύου. Τύποι κεραίων που χρησιμοποιούνται στις διάφορες εφαρμογές μετάδοσης ποικίλουν από απλές διπολικές, βροχοκεραίες, κεραίες Yagi, παραβολικά κάτοπτρα που χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην καθημερινή ζωή, έως ιδιαίτερα σύνθετες κεραίες που χρησιμοποιούνται σε εξειδικευμένες εφαρμογές, όπως κεραίες για δίκτυα υψηλών ταχυτήτων, επικοινωνία μεταξύ εδάφους και διαστημοπλοίων, ραντάρ ,κλπ.[11].

Η επίδοση μίας ασύρματης ζεύξης, δεν εξαρτάται μόνο από τον τύπο των κεραίων που χρησιμοποιεί αλλά και από την ανθεκτικότητα της διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που επηρεάζεται από διάφορα φαινόμενα. Η διάδοση στο περιβάλλον της γης χαρακτηρίζεται από φαινόμενα διάθλασης, σκέδασης, ανάκλασης και απορρόφησης που οφείλονται στην μορφολογία της επιφάνειας της γης και της ατμόσφαιρας που την περιβάλλει. Η γήινη επιφάνεια δεν είναι επίπεδη και εμφανίζει αγωγιμότητα με τιμή που ποικίλει από υψηλή (θαλάσσια ύδατα) έως αμελητέα (έρημοι). Τα διάφορα μετεωρολογικά φαινόμενα που επικρατούν στην ατμόσφαιρα, μεταβάλλουν τις διηλεκτρικές ιδιότητες της. Η θερμοκρασία η υγρασία και κυρίως η βροχή για συχνότητες μεγαλύτερες των 10GHz, επηρεάζουν σημαντικά την αξιοπιστία και τη διαθεσιμότητα των ασυρμάτων ζεύξεων. Αυτές οι ατμοσφαιρικές διαταραχές δημιουργούν κέντρα σκέδασης και ακτινοβολίας στην τροπόσφαιρα, ενώ η ιονόσφαιρα συμπεριφέρεται ως αγωγίμο σώμα που ανακλά ή απορροφά τα ραδιοκύματα[11].

Σε κάθε ασύρματη ζεύξη, χρησιμοποιούνται συγκεκριμένες συχνότητες οι οποίες επιλέγονται βάσει της εκάστοτε εφαρμογής. Στον παρακάτω πίνακα αναφέρονται οι ζώνες συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται στις τηλεπικοινωνίες.

<i>Τύπος</i>	<i>Συχνότητα</i>
ELF (Extremely Low Frequencies)	<3KHz
VLF (Very Low Frequencies)	3-30KHz
LF (Low Frequencies)	30-300KHz
MF (Medium Frequencies)	300-3000KHz
HF (High Frequencies)	3-30MHz
VHF (Very High Frequencies)	30-300Mhz
UHF (Ultra High Frequencies)	300-3000MHz
SHF (Super High Frequencies)	3-30GHz
EHF (Extremely High Frequencies)	3-300GHz

*Πίνακας 2.1: Ζώνες Συχνοτήτων*

## **2.2 Βασικά στοιχεία θεωρίας κεραιών**

Γενικά, η κεραία αποτελεί μία διάταξη η λειτουργία της οποίας εστιάζεται στη μετατροπή των υψίσυχνων ρευμάτων σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα και αντίστροφα για τη μεταφορά της πληροφορίας. Συνεπώς, ο υπολογισμός των ραδιοκυμάτων και κατ' επέκταση η ανάλυση μιας οποιασδήποτε κεραίας βασίζεται στις γνωστές εξισώσεις Maxwell για τα Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία. Η περιοχή που ακτινοβολεί μια κεραία διακρίνεται σε τρεις βασικές περιοχές:

- **Την κοντινή περιοχή (Near Field)**, η οποία εκτείνεται σε απόσταση έως και  $0.62\left(\frac{D^3}{\lambda}\right)^{1/2}$ , όπου δεν ακτινοβολείται ηλεκτρομαγνητική ενέργεια και το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο εμφανίζει άεργη συμπεριφορά ( $D$  είναι η μεγαλύτερη διάσταση της κεραίας και  $\lambda$  το μήκος κύματος).
- **Την περιοχή Fresnel**, η οποία εκτείνεται μετά την κοντινή περιοχή και σε απόσταση έως  $\frac{2D^2}{\lambda}$ . Είναι το πεδίο στο οποίο ακτινοβολείται ηλεκτρομαγνητική ενέργεια αλλά οι μαγνητικές και ηλεκτρικές συνιστώσες εξαρτώνται ακτινικά.
- **Τη μακρινή περιοχή (Fraunhofer)**, γνωστή και ως ζώνη ακτινοβολίας. Ορίζεται ως η περιοχή, όπου οι εγκάρσιες συνιστώσες του πεδίου δεν εξαρτώνται από την απόσταση και η ακτινική συνιστώσα είναι τόσο μικρή, ώστε να μπορούμε να αναφερόμαστε σε εγκάρσιο πεδίο.

Ο τρόπος με τον οποίο ακτινοβολεί μια κεραία στο χώρο, περιγράφεται από το διάγραμμα ακτινοβολίας. Ανάλογα με το πεδιακό μέγεθος, τα διαγράμματα ακτινοβολίας διακρίνονται σε *διαγράμματα πεδίου* και *ισχύος*. Στις περισσότερες περιπτώσεις το διάγραμμα ακτινοβολίας προσδιορίζεται για τη μακρινή περιοχή μιας κεραίας και σχεδιάζεται ως συνάρτηση των συντεταγμένων διεύθυνσης.

Βασικό στοιχείο που χαρακτηρίζει τα διαγράμματα είναι οι *λοβοί ακτινοβολίας*, οι οποίοι αποτελούν τμήματα μεταξύ περιοχών ελάχιστης έως μηδενικής έντασης ακτινοβολίας. **Κύριος λοβός (main lobe)** είναι αυτός που δείχνει την κατεύθυνση της μέγιστης ακτινοβολίας. Στις περισσότερες κεραίες συνήθως υπάρχουν περισσότεροι του ενός κύριοι λοβοί. Κάθε λοβός, που δεν είναι κύριος, καλείται δευτερεύων (minor lobe). **Πλευρικός λοβός (side lobe)** είναι κάθε λοβός που δεν περιέχει οποιαδήποτε άλλη διεύθυνση από αυτήν που μας ενδιαφέρει. Τέλος, **οπίσθιος λοβός (back lobe)** λέγεται αυτός που περιέχει την αντίθετη κατεύθυνση από αυτή του κύριου λοβού.

Κύριος στόχος της σχεδίασης μίας κεραίας είναι να εμφανίζονται το λιγότερο δυνατό πλευρικοί λοβοί, αφού αυτοί σχετίζονται με την ακτινοβολία προς ανεπιθύμητες κατευθύνσεις.

Το επίπεδο ενός πλευρικού λοβού εκφράζεται συνήθως σε σχέση με αυτό του κύριου λοβού. Συγκεκριμένα, στάθμη ενός πλευρικού λοβού εννοούμε τον λόγο της ισχύος του πλευρικού λοβού στην κατεύθυνση μεγίστου του προς την αντίστοιχη ισχύ του κύριου λοβού. Συνήθως, στάθμες πλευρικών της τάξης των -20dB θεωρούνται ικανοποιητικές για τις περισσότερες εφαρμογές. **Γωνιακό εύρος** καλείται η γωνία μεταξύ των μηδενισμών ή ελαχίστων του διαγράμματος, στην οποία βρίσκεται η κατεύθυνση μεγίστου. Πρακτικά, ενδιαφέρον παρουσιάζει το εύρος ημίσεως ισχύος  $\Delta_{3dB}$  (half-power beamwidth), που ορίζεται ως η γωνία που περιλαμβάνει την κατεύθυνση μεγίστου, και η οποία σχηματίζεται από τις διευθύνσεις στις οποίες η ένταση ακτινοβολίας είναι η μισή τιμή της μέγιστης.

Εκτός από τα διαγράμματα ακτινοβολίας, άλλα βασικά χαρακτηριστικά χρήσιμα για τη μελέτη των κεραιών είναι:

- **Ένταση ακτινοβολίας**, μέγεθος που χαρακτηρίζει τη μακρινή περιοχή ακτινοβολίας μιας κεραιάς και αποτυπώνει τη ροή ισχύος ανά μονάδα στερεάς γωνίας μέσω του τύπου:

$$U(\theta, \varphi) = r^2 |\vec{P}(\vec{r})|$$

όπου  $\vec{P}$ , η μέση πυκνότητα ισχύος και  $\vec{r}$  το διάνυσμα κατεύθυνσης.

- **Κατευθυντικότητα**, η οποία αποτελεί τη μέγιστη τιμή του κατευθυντικού κέρδους, και δείχνει κατά πόσο κατευθυντική είναι μία κεραιά. Η τιμή της είναι μεγαλύτερη από τη μονάδα εκτός από την περίπτωση του ισοτροπικού ακτινοβολητή που είναι ίση προς τη μονάδα, αφού η ακτινοβολία του είναι ίδια προς όλες τις διευθύνσεις του χώρου. Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$D_m = \frac{U(\theta, \varphi)_{max}}{U_0} = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)_{max}}{W_{rad}}$$



- **Κατευθυντικό κέρδος**, είναι ο λόγος της έντασης ακτινοβολίας μιας κεραίας προς την ένταση ακτινοβολίας ισοδύναμου ιστροπικού ακτινοβολητή  $U_0$ , δηλαδή κεραίας που ακτινοβολεί ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις και ορίζεται ως

$$D_g(\theta, \varphi) = \frac{U(\theta, \varphi)}{U_0} = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)}{W_{rad}}$$

όπου,  $U_0 = \frac{W_{rad}}{4\pi}$  και  $W_{rad}$  η ισχύς ακτινοβολίας της κεραίας, που υπολογίζεται από το ολοκλήρωμα της έντασης ακτινοβολίας σε μία κλειστή επιφάνεια  $\Omega$ :

$$W_{rad} = \iint_{\Omega} U(\theta, \varphi) d\Omega$$

- **Κέρδος ισχύος**, που εκφράζει την απόδοση ακτινοβολίας μιας κεραίας:

$$G_g(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)}{W_{in}}$$

- **Κέρδος κεραίας**, το οποίο είναι το μέγιστο κέρδος ισχύος:

$$G_g(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)_{max}}{W_{in}}$$

- **Συντελεστής απόδοσης κεραίας**, που εκφράζει το λόγο ισχύος ακτινοβολίας προς την ισχύ τροφοδοσίας μιας κεραίας:

$$n_r = \frac{W_{rad}}{W_{in}}$$

- **Ενεργός επιφάνεια κεραίας**, η οποία περιγράφει την ικανότητα μίας κεραίας να συλλέξει ηλεκτρομαγνητική ισχύ όταν χρησιμοποιείται για λήψη. Δίδεται από τον τύπο:

$$A_\varepsilon = \frac{W_T}{P}$$

όπου  $W_T$  η ισχύς που φτάνει στους ακροδέκτες της κεραίας και  $P$  το μέτρο του διανύσματος Poynting του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που προσπίπτει στην κεραία.

- **Εύρος ζώνης κεραίας**, που αποτελεί το εύρος συχνοτήτων μέσα στο οποίο η κεραία ικανοποιεί συγκεκριμένες προδιαγραφές.

### 2.3 Θόρυβος στις τηλεπικοινωνίες

Ο θόρυβος είναι ένα μη επιθυμητό φαινόμενο σε μορφή τυχαίου σήματος, που δυσχεραίνει τη λειτουργία ενός συστήματος και μπορεί να περιορίσει σημαντικά την αξιοπιστία του. Μπορεί να ταξινομηθεί σε δύο βασικές κατηγορίες αν και οι πηγές του συνήθως είναι πολλές.

- **Τεχνητός θόρυβος**: Προκαλείται από ανθρώπινες παρεμβάσεις η κατασκευές (μηχανήματα, κινητήρες, ηλεκτρονικά κυκλώματα, κ.α.). Η επίδραση του στα συστήματα μπορεί να κατασταλεί συνήθως με συγκεκριμένες διατάξεις-φίλτρα.
- **Φυσικός θόρυβος**: Προέρχεται από διάφορα φυσικά φαινόμενα και μπορεί να χωριστεί σε **ουράνιο** και **κυκλωματικό** θόρυβο. Στην πρώτη κατηγορία, ο θόρυβος οφείλεται στην δραστηριότητα του ήλιου και τη γαλαξιακή ακτινοβολία, επιδρά κυρίως στις τηλεπικοινωνίες και εισέρχεται στα συστήματα μέσω του δέκτη. Μπορεί να ελαχιστοποιηθεί αποφεύγοντας με κατάλληλο προσανατολισμό της κεραίας, της πηγές κοσμικής ακτινοβολίας. Ο κυκλωματικός θόρυβος οφείλεται στην τυχαία κίνηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων σε ένα κύκλωμα και ονομάζεται και **θερμικός** θόρυβος.

Η ανάλυση θορύβου τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα βασίζεται σε μία ιδανική μορφή του θορύβου που καλείται **λευκός θόρυβος**, η φασματική πυκνότητα ισχύος του οποίου είναι ανεξάρτητη της συχνότητας λειτουργίας. Ορίζεται από τη σχέση:

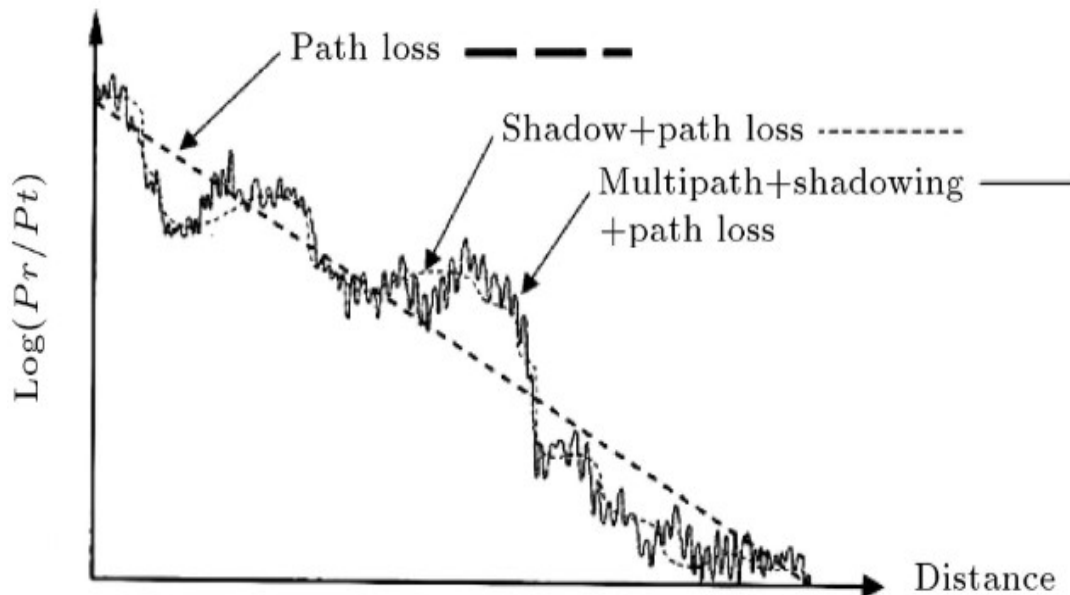
$$S_n(f) = \frac{N_0}{2}$$

όπου  $N_0 = kT_e$ ,  $k$  η σταθερά Boltzmann και  $T_e$  η ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου στο δέκτη.

Ο Λευκός θόρυβος είναι προσθετικής μορφής δηλαδή προστίθεται στο επιθυμητό σήμα και συνήθως αναφέρεται ως προσθετικός λευκός θόρυβος τύπου *Gauss AWGN (Additive, White, Gaussian Noise)*.

## **2.4 Απώλειες Διάδοσης**

Το ασύρματο κανάλι αποτελεί μια σοβαρή πρόκληση ως μέσο για αξιόπιστη επικοινωνία υψηλής ταχύτητας. Όμως όχι μόνο είναι ευαίσθητο σε παρεμβολές και θόρυβο, αλλά η ευαισθησία αυτή αλλάζει με την πάροδο του χρόνου με απρόβλεπτο τρόπο ως αποτέλεσμα της κίνησης των χρηστών και τη δυναμική του περιβάλλοντος. Παρακάτω αναλύεται η διακύμανση της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος λόγω απώλειας διαδρομής (*pathloss*), σκιάσεων (*shadowing*) και άλλων παρεμβολών. Η απώλεια διαδρομής προκαλείται από τη διάχυση της ισχύος ενός πομπού καθώς και από τις επιδράσεις του καναλιού διάδοσης. Δεδομένου ότι οι διακυμάνσεις στη λαμβανόμενη ισχύ λόγω απώλειας διαδρομής και σκίασης συμβαίνουν σε σχετικά μεγάλες αποστάσεις, αυτές οι παραλλαγές μερικές φορές αναφέρονται ως *απώλειες διάδοσης μεγάλης κλίμακας*. Ωστόσο διακυμάνσεις ισχύος υπάρχουν και λόγω της προσθήκης στοιχείων σήματος πολλαπλών διαδρομών (*multipath*). Αυτές οι παραλλαγές συμβαίνουν σε πολύ μικρές αποστάσεις, και έτσι μερικές φορές αναφέρονται ως *απώλειες διάδοσης μικρής κλίμακας* ή *αλλιώς διαλείψεις*.



Εικόνα 2.1: Απώλειες διαδρομής, σκίαση συναρτήσει της απόστασης<sup>5</sup>

### 2.4.1 Απώλειες διάδοσης μεγάλης κλίμακας

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται μέσα από περιβάλλοντα όπου αντανακλώνται, διασκορπίζονται και διαθλώνται από τοίχους, εδάφη, κτίρια και άλλα αντικείμενα. Η ανάλυση της διάδοσης ενός Η/Μ κύματος μπορεί να γίνει λύνοντας τις εξισώσεις του Maxwell με συνοριακές συνθήκες που εκφράζουν τα φυσικά χαρακτηριστικά αυτών των αντικειμένων που εμπλέκονται. Αυτό απαιτεί πολύπλοκους υπολογισμούς και για αυτόν το λόγο έχουν αναπτυχθεί προσεγγίσεις και αναλυτικά μοντέλα που απλουστεύουν τη διαδικασία.

---

<sup>5</sup> Dehghan, Seyyed M. Mehdi, and Hadi Moradi. "A multi-step Gaussian filtering approach to reduce the effect of non-Gaussian distribution in aerial localization of an RF source in NLOS condition." 2013 First RSI/ISM International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM). IEEE, 2013.

## 2.4.2 Μοντέλο ελεύθερου χώρου (Free space path-loss)

Θεωρούμε ένα σήμα που μεταδίδεται μέσω ελεύθερου χώρου σε έναν δέκτη που βρίσκεται σε απόσταση  $d$  από τον πομπό. Αν υποθέσουμε ότι δεν υπάρχουν εμπόδια μεταξύ του πομπού και του δέκτη και ότι το σήμα διαδίδεται κατά μήκος μιας ευθείας γραμμής (*Line Of Sight - LOS*), τότε η απώλειες διαδρομής ελεύθερου χώρου περιγράφονται από τη σχέση:

$$P_L dB = 10 \log_{10} \frac{P_t}{P_r} = -10 \log_{10} G_t G_r \frac{\lambda^2}{(4\pi d)^2}$$

όπου  $P_t$  η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος,  $P_r$  η ισχύς του εκπεμπόμενου,  $G_t$  και  $G_r$  είναι τα αντίστοιχα κέρδη κεραιών πομπού και δέκτη και  $\lambda$  το μήκος κύματος.

## 2.4.3 Μοντέλο δύο ακτίνων (Two-Ray Tracing model)

Το μοντέλο δύο ακτίνων (Two-Ray model) πολλές φορές συναντάται και με την ονομασία «μοντέλο επίπεδης γης» και βασίζεται στο μοντέλο απωλειών ελεύθερου χώρου με τη διαφορά ότι λαμβάνει υπόψη, πέραν της απευθείας (LOS) συνιστώσας, και το ηλεκτρικό πεδίο της ανακλώμενης από το τέλεια αγωγίμα έδαφος συνιστώσας  $E_g$ . Συνεπώς το ηλεκτρικό πεδίο του λαμβανόμενου σήματος είναι το διανυσματικό άθροισμα των δύο συνιστωσών:

$$E_{total} = E_{LOS} + E_g$$

### 2.4.3.1 Γενικό μοντέλο ανίχνευσης ακτίνων (General Ray Tracing)

Η γενική ανίχνευση ακτίνων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της δυναμικής του πεδίου και εξάπλωσης της διάδοσης καθυστέρησης σε αστικό περιβάλλον για οποιαδήποτε διαμόρφωση κτιρίου και τοποθέτηση κεραίας. Για αυτό το μοντέλο, η βάση

δεδομένων κτιρίου (ύψος, θέση και διηλεκτρικές ιδιότητες) και οι θέσεις του πομπού και του δέκτη σχετικές στα κτίρια πρέπει να προσδιορίζονται επακριβώς.

## 2.4.3.2 Εμπειρικά μοντέλα απωλειών διαδρομής

### 2.4.3.2.1 Μοντέλο Okumura

Ένα από τα πιο κοινά μοντέλα πρόβλεψης σήματος σε μεγάλες αστικές μακροκυψέλες (*urban macrocells*) είναι το μοντέλο **Okumura**. Εφαρμόζεται σε αποστάσεις 1–100 km και σε εύρη συχνοτήτων 150–1500 MHz. Ο Okumura χρησιμοποίησε εκτενείς μετρήσεις της εξασθένησης του σήματος μεταξύ σταθμού βάσης και κινητού τερματικού σε όλο το Τόκιο, για την ανάπτυξη ενός συνόλου καμπυλών που δίνουν τη σχετική διάμεση εξασθένηση της διάδοσης σήματος σε αστικό έδαφος. Ο εμπειρικός τύπος απώλειας διαδρομής του Okumura σε απόσταση  $d$  που συναρτηθεί της συχνότητας φέροντος  $f_c$  δίνεται από τη σχέση:

$$P_L(dB) = L(f_c, d) + A_\mu(f_c, d) - G(h_{BS}) - G(h_{MS}) - G_{AREA}$$

Όπου  $L(f_c, d)$  οι απώλειες διαδρομής ελευθέρου χώρου,  $A_\mu(f_c, d)$  η μέση εξασθένηση,  $G(h_{BS})$  το κέρδος της κεραίας του σταθμού βάσης σε ύψος  $h_{BS}$ ,  $G(h_{MS})$  το κέρδος της κεραίας του κινητού τερματικού σε ύψος  $h_{MS}$  και  $G_{AREA}$  το κέρδος ανάλογα τον τύπο του περιβάλλοντος. Τα κέρδη  $G(h_{BS})$  και  $G(h_{MS})$  υπολογίζονται από τους εξής εμπειρικούς τύπους:

$$G(h_{BS}) = 20 \log_{10} \left( \frac{h_{BS}}{200} \right), \quad 30 \text{ m} < h_{BS} < 1000 \text{ m}$$

$$G(h_{MS}) = \begin{cases} 10 \log_{10} \left( \frac{h_{MS}}{3} \right) & h_{MS} \leq 3 \text{ m} \\ 20 \log_{10} \left( \frac{h_{MS}}{3} \right) & 3 \text{ m} < h_{MS} \leq 3 \text{ m} \end{cases}$$

### 2.4.3.2.2 Μοντέλο Hata

Το μοντέλο **Hata** είναι μια εμπειρική διατύπωση των γραφικών δεδομένων απώλειας διαδρομής που παρέχονται από τον Okumura και ισχύει για περίπου το ίδιο εύρος συχνοτήτων, 150–1500 MHz. Εφαρμόζεται σε κατοικημένες περιοχές με τις απώλειες διάδοσης να καθορίζονται από την πυκνότητα της δόμησης ως εξής:

Για αστικό περιβάλλον (*urban area*) ισχύει,

$$P_{L,urban}(dB) = 69.55 + 26.16 \log_{10}(f_c) - 13.82 \log_{10}(h_{BS}) - a(h_{MS}) + (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_{BS})) \log_{10}(d)$$

Οι παράμετροι σε αυτό το μοντέλο είναι ίδιοι με το Okumura και  $a(h_{MS})$  είναι διορθωτικός παράγοντας που για μικρές ή μεσαίες πόλεις υπολογίζεται από:

$$a(h_{MS}) = (1.11 \log_{10}(f_c) - 0.7)h_{MS} - (1.56 \log_{10}(f_c) - 0.8)$$

ενώ για μεγάλες πόλεις,

$$a(h_{MS}) = \begin{cases} 8.29(\log_{10}(1.54h_{MS}))^2 - 1.1 & f_c \leq 200 \text{ MHz} \\ 3.2\log_{10}(11.75h_{MS})^2 - 4.97 & f_c \geq 400 \text{ MHz} \end{cases}$$

Για προαστιακό περιβάλλον (*suburban area*) ισχύει,

$$P_{L,suburban}(dB) = P_{L,urban} - 2 \left( \log_{10} \left( \frac{f_c}{28} \right) \right)^2 - 5.4$$

και για τις υπόλοιπες περιοχές,

$$P_{L,rural}(dB) = P_{L,urban} - 4.78(\log_{10}(f_c))^2 + 18.33 \log_{10}(f_c) - K$$

όπου ο συντελεστής  $K$  μεταβάλλεται από 35.94 (επαρχία) έως 40.94 (έρημος).

### 2.4.3.2.3 Μοντέλο COST 231

Το μοντέλο COST 231 αποτελεί επέκταση του μοντέλου Hata για συχνότητες έως και 2 GHz. Ισχύει,

$$P_{L,urban}(dB) = 46.3 + 33.9 \log_{10}(f_c) - 13.82 \log_{10}(h_{BS}) - a(h_{MS}) + (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_{BS})) \log_{10}(d) + C_M$$

Όπου ο συντελεστής  $C_M$  είναι 0 dB για μεσαίες πόλεις και προάστια και 3 dB για μεγάλες πόλεις και  $a(h_{MS})$  είναι ο διορθωτικός παράγοντας όπως στο μοντέλο Hata.

Το μοντέλο αυτό ισχύει αυστηρά μόνο για τις παρακάτω τιμές συχνότητας, ύψους σταθμού βάσης και κινητού τερματικού και απόστασης:

$$1.5 \text{ GHz} < f_c \leq 2 \text{ GHz}$$

$$30 \text{ m} < h_{BS} \leq 200 \text{ m}$$

$$1 \text{ m} < h_{MS} \leq 10 \text{ m}$$

$$1 \text{ km} < d \leq 20 \text{ km}$$

### 2.4.3.2.4 Μοντέλα εσωτερικών χώρων

Τα εσωτερικά περιβάλλοντα διαφέρουν πολύ ως προς τα υλικά που χρησιμοποιούνται για τους τοίχους και τα δάπεδα, τη διάταξη των δωματίων, τους διάδρομους, τα παράθυρα και τους ανοιχτούς χώρους, το μέγεθος κάθε δωματίου και τον αριθμό των ορόφων. Όλοι αυτοί οι παράγοντες έχουν σημαντικό αντίκτυπο στις απώλειες διαδρομής σε ένα εσωτερικό χώρο. Έτσι, είναι δύσκολο να βρεθούν γενικά μοντέλα που μπορούν να εφαρμοστούν με ακρίβεια. Τα μοντέλα απώλειας διαδρομής εσωτερικού χώρου πρέπει να αποτυπώνουν με ακρίβεια τις επιπτώσεις της εξασθένησης σε όλους τους ορόφους λόγω χωρισμάτων καθώς και μεταξύ των ορόφων. Μετρήσεις σε ένα ευρύ φάσμα κτιρίων, τα χαρακτηριστικά και οι συχνότητες



σήματος δείχνουν ότι η εξασθένηση ανά όροφο είναι μεγαλύτερη για τον πρώτο όροφο και μειώνεται σε κάθε επόμενο.

### **2.4.3.3 Μοντέλο της 3GPP**

Στην παρούσα εργασία για την προσομοίωση του συστήματος 5G, θα γίνει χρήση του μοντέλου της 3GPP με βάση το πρότυπο TR 38.901 που δημιουργήθηκε από κοινού με τον ETSI και υιοθετήθηκε επίσης από την ITU-R. Στο μοντέλο αυτό αναλύονται οι απώλειες διαδρομής για εσωτερικούς χώρους, αγροτικές και αστικές περιοχές, χωρισμένες σε μικροκυψέλες (*urban micro*) και μακροκυψέλες (*urban macro*). Στην ανάλυση μας αναφερόμαστε αποκλειστικά σε μικροκυψέλες αστικών περιοχών. Ο παρακάτω πίνακας συμπεριλαμβάνει τους τύπους υπολογισμού των απωλειών διαδρομής ανά κατηγορία περιβάλλοντος και συνθήκες οπτικής επαφής χρήστη με το σταθμό βάσης (*LOS* ή *NLOS*)

Επεκτασιμότητα Ετερογενών Δικτύων 5<sup>ης</sup> Γενιάς (5G) με την Κατάλληλη Επιλογή Κόμβων Αναμετάδοσης (Relay Selection) και τη Χρήση MIMO Κεραίων στο Σταθμό Βάσης

Scenario	LOS/NLOS	Pathloss [dB], $f_c$ is in GHz and $d$ is in meters, see note 6	Shadow fading std [dB]	Applicability range, antenna height default values
RMa	LOS	$PL_{\text{RMa-LOS}} = \begin{cases} PL_1 & 10\text{m} \leq d_{2D} \leq d'_{\text{BP}} \\ PL_2 & d'_{\text{BP}} \leq d_{2D} \leq 10\text{km} \end{cases}, \text{ see note 5}$ $PL_1 = 20 \log_{10}(40\pi d_{3D} f_c / 3) + \min(0.03h^{1.72}, 10) \log_{10}(d_{3D}) - \min(0.044h^{1.72}, 14.77) + 0.002 \log_{10}(h) d_{3D}$ $PL_2 = PL_1(d_{\text{BP}}) + 40 \log_{10}(d_{3D} / d_{\text{BP}})$	$\sigma_{\text{SF}} = 4$  $\sigma_{\text{SF}} = 6$	$h_{\text{BS}} = 35\text{m}$ $h_{\text{UT}} = 1.5\text{m}$ $W = 20\text{m}$ $h = 5\text{m}$ h = avg. building height W = avg. street width The applicability ranges:
	NLOS	$PL_{\text{RMa-NLOS}} = \max(PL_{\text{RMa-LOS}}, PL'_{\text{RMa-NLOS}})$ for $10\text{m} \leq d_{2D} \leq 5\text{km}$ $PL'_{\text{RMa-NLOS}} = 161.04 - 7.11 \log_{10}(W) + 7.51 \log_{10}(h) - (24.37 - 3.7(h/h_{\text{BS}})^2) \log_{10}(h_{\text{BS}}) + (43.42 - 3.1 \log_{10}(h_{\text{BS}}))(\log_{10}(d_{3D}) - 3) + 20 \log_{10}(f_c) - (3.2(\log_{10}(11.75h_{\text{UT}}))^2 - 4.97)$	$\sigma_{\text{SF}} = 8$	$5\text{m} \leq h \leq 50\text{m}$ $5\text{m} \leq W \leq 50\text{m}$ $10\text{m} \leq h_{\text{BS}} \leq 150\text{m}$ $1\text{m} \leq h_{\text{UT}} \leq 10\text{m}$
UMa	LOS	$PL_{\text{UMa-LOS}} = \begin{cases} PL_1 & 10\text{m} \leq d_{2D} \leq d'_{\text{BP}} \\ PL_2 & d'_{\text{BP}} \leq d_{2D} \leq 5\text{km} \end{cases}, \text{ see note 1}$ $PL_1 = 28.0 + 22 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c)$ $PL_2 = 28.0 + 40 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c) - 9 \log_{10}((d'_{\text{BP}})^2 + (h_{\text{BS}} - h_{\text{UT}})^2)$	$\sigma_{\text{SF}} = 4$	$1.5\text{m} \leq h_{\text{UT}} \leq 22.5\text{m}$ $h_{\text{BS}} = 25\text{m}$
	NLOS	$PL_{\text{UMa-NLOS}} = \max(PL_{\text{UMa-LOS}}, PL'_{\text{UMa-NLOS}})$ for $10\text{m} \leq d_{2D} \leq 5\text{km}$ $PL'_{\text{UMa-NLOS}} = 13.54 + 39.08 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c) - 0.6(h_{\text{UT}} - 1.5)$	$\sigma_{\text{SF}} = 6$	$1.5\text{m} \leq h_{\text{UT}} \leq 22.5\text{m}$ $h_{\text{BS}} = 25\text{m}$ Explanations: see note 3
			Optional $PL = 32.4 + 20 \log_{10}(f_c) + 30 \log_{10}(d_{3D})$	$\sigma_{\text{SF}} = 7.8$
UMi - Street Canyon	LOS	$PL_{\text{UMi-LOS}} = \begin{cases} PL_1 & 10\text{m} \leq d_{2D} \leq d'_{\text{BP}} \\ PL_2 & d'_{\text{BP}} \leq d_{2D} \leq 5\text{km} \end{cases}, \text{ see note 1}$ $PL_1 = 32.4 + 21 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c)$ $PL_2 = 32.4 + 40 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c) - 9.51 \log_{10}((d'_{\text{BP}})^2 + (h_{\text{BS}} - h_{\text{UT}})^2)$	$\sigma_{\text{SF}} = 4$	$1.5\text{m} \leq h_{\text{UT}} \leq 22.5\text{m}$ $h_{\text{BS}} = 10\text{m}$
	NLOS	$PL_{\text{UMi-NLOS}} = \max(PL_{\text{UMi-LOS}}, PL'_{\text{UMi-NLOS}})$ for $10\text{m} \leq d_{2D} \leq 5\text{km}$ $PL'_{\text{UMi-NLOS}} = 35.3 \log_{10}(d_{3D}) + 22.4 + 21.3 \log_{10}(f_c) - 0.3(h_{\text{UT}} - 1.5)$	$\sigma_{\text{SF}} = 7.82$	$1.5\text{m} \leq h_{\text{UT}} \leq 22.5\text{m}$ $h_{\text{BS}} = 10\text{m}$ Explanations: see note 4

Επεκτασιμότητα Ετερογενών Δικτύων 5<sup>ης</sup> Γενιάς (5G) με την Κατάλληλη Επιλογή Κόμβων Αναμετάδοσης (Relay Selection) και τη Χρήση MIMO Κεραίων στο Σταθμό Βάσης

		Optional $PL = 32.4 + 20\log_{10}(f_c) + 31.9\log_{10}(d_{3D})$	$\sigma_{SF} = 8.2$	
InH - Office	LOS	$PL_{InH-LOS} = 32.4 + 17.3\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c)$	$\sigma_{SF} = 3$	$1m \leq d_{3D} \leq 150m$
	NLOS	$PL_{InH-NLOS} = \max(PL_{InH-LOS}, PL'_{InH-NLOS})$ $PL'_{InH-NLOS} = 38.3\log_{10}(d_{3D}) + 17.30 + 24.9\log_{10}(f_c)$	$\sigma_{SF} = 8.03$	$1m \leq d_{3D} \leq 150m$
		Optional $PL'_{InH-NLOS} = 32.4 + 20\log_{10}(f_c) + 31.9\log_{10}(d_{3D})$	$\sigma_{SF} = 8.29$	$1m \leq d_{3D} \leq 150m$
InF	LOS	$PL_{LOS} = 31.84 + 21.50\log_{10}(d_{3D}) + 19.00\log_{10}(f_c)$	$\sigma_{SF} = 4$	$1 \leq d_{3D} \leq 600 m$
	NLOS	InF-SL: $PL = 33 + 25.5\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c)$ $PL_{NLOS} = \max(PL, PL_{LOS})$	$\sigma_{SF} = 5.7$	
		InF-DL: $PL = 18.6 + 35.7\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c)$ $PL_{NLOS} = \max(PL, PL_{LOS}, PL_{InF-SL})$	$\sigma_{SF} = 7.2$	
		InF-SH: $PL = 32.4 + 23.0\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c)$ $PL_{NLOS} = \max(PL, PL_{LOS})$	$\sigma_{SF} = 5.9$	
		InF-DH: $PL = 33.63 + 21.9\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c)$ $PL_{NLOS} = \max(PL, PL_{LOS})$	$\sigma_{SF} = 4.0$	
<p>Note 1: Breakpoint distance <math>d_{BP} = 4 h_{BS} h_{UT} f_c / c</math>, where <math>f_c</math> is the centre frequency in Hz, <math>c = 3.0 \times 10^8</math> m/s is the propagation velocity in free space, and <math>h_{BS}</math> and <math>h_{UT}</math> are the effective antenna heights at the BS and the UT, respectively. The effective antenna heights <math>h_{BS}</math> and <math>h_{UT}</math> are computed as follows: <math>h_{BS} = h_{BS} - h_E</math>, <math>h_{UT} = h_{UT} - h_E</math>, where <math>h_{BS}</math> and <math>h_{UT}</math> are the actual antenna heights, and <math>h_E</math> is the effective environment height. For UMi <math>h_E = 1.0m</math>. For UMa <math>h_E = 1m</math> with a probability equal to <math>1/(1+C(d_{2D}, h_{UT}))</math> and chosen from a discrete uniform distribution <math>uniform(12, 15, \dots, (h_{UT}-1.5))</math> otherwise. With <math>C(d_{2D}, h_{UT})</math> given by</p> $C(d_{2D}, h_{UT}) = \begin{cases} 0 & , h_{UT} < 13m \\ \left( \frac{h_{UT} - 13}{10} \right)^{1.5} g(d_{2D}) & , 13m \leq h_{UT} \leq 23m \end{cases}$ <p>where</p> $g(d_{2D}) = \begin{cases} 0 & , d_{2D} \leq 18m \\ \frac{5}{4} \left( \frac{d_{2D}}{100} \right)^3 \exp\left( \frac{-d_{2D}}{150} \right) & , 18m < d_{2D} \end{cases}$ <p>Note that <math>h_E</math> depends on <math>d_{2D}</math> and <math>h_{UT}</math> and thus needs to be independently determined for every link between BS sites and UTs. A BS site may be a single BS or multiple co-located BSs.</p> <p>Note 2: The applicable frequency range of the PL formula in this table is <math>0.5 &lt; f_c &lt; f_H</math> GHz, where <math>f_H = 30</math> GHz for RMA and <math>f_H = 100</math> GHz for all the other scenarios. It is noted that RMA pathloss model for <math>&gt;7</math> GHz is validated based on a single measurement campaign conducted at 24 GHz.</p> <p>Note 3: UMa NLOS pathloss is from TR36.873 with simplified format and <math>PL_{UMa-LOS} =</math> Pathloss of UMa LOS outdoor scenario.</p> <p>Note 4: <math>PL_{UMa-LOS} =</math> Pathloss of UMi-Street Canyon LOS outdoor scenario.</p> <p>Note 5: Break point distance <math>d_{BP} = 2\pi h_{BS} h_{UT} f_c / c</math>, where <math>f_c</math> is the centre frequency in Hz, <math>c = 3.0 \times 10^8</math> m/s is the propagation velocity in free space, and <math>h_{BS}</math> and <math>h_{UT}</math> are the antenna heights at the BS and the UT, respectively.</p> <p>Note 6: <math>f_c</math> denotes the center frequency normalized by 1GHz, all distance related values are normalized by 1m, unless it is stated otherwise.</p>				

Πίνακας 2.2: Πρότυπο απωλειών 3GPP TR 38.901<sup>6</sup>

<sup>6</sup> ETSI, TR. "138 901 v16. 1.0," "5G." Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100.

#### 2.4.3.4 Σκίαση (Shadow Fading)

Ένα σήμα που μεταδίδεται μέσω ενός ασύρματου καναλιού θα έχει τυπικά τυχαία διακύμανση λόγω μπλοκαρίσματος από αντικείμενα στη διαδρομή του, με αποτέλεσμα τυχαίες διακυμάνσεις της λαμβανόμενης ισχύος σε μια δεδομένη απόσταση. Τέτοιες παραλλαγές προκαλούνται επίσης από αλλαγές στην ανάκλαση από επιφάνειες και διεσπαρμένα αντικείμενα στο χώρο. Το πιο κοινό μοντέλο για τον υπολογισμό αυτής της τυχαίας μεταβλητής είναι το μοντέλο σκίασης. Για δίκτυα εξωτερικού αλλά και εσωτερικού χώρου έχει επιβεβαιωθεί πειραματικά ότι η κατανομή της μεταβλητής αυτής είναι λογαριθμοκανονική και η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (*Probability Density Function - PDF*) είναι

$$p(\psi) = \frac{\xi}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\psi d}} \frac{1}{\psi} \exp\left[-\frac{(10\log_{10}\psi - \mu_{\psi dB})^2}{2\sigma_{\psi dB}^2}\right], \quad \psi > 0$$

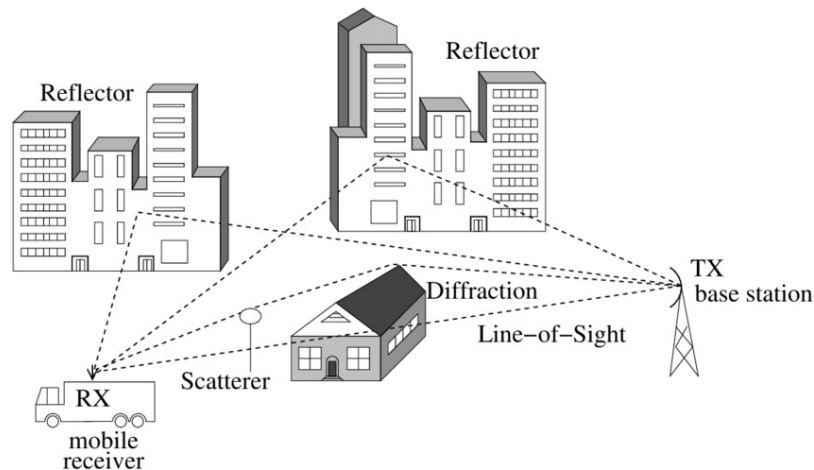
όπου  $\xi = 10/\ln 10$  και  $\mu_{\psi dB}$ ,  $\sigma_{\psi dB}$  η μέση και η τυπική απόκλιση αντίστοιχα της μεταβλητής  $\psi_{dB} = 10 \log(\psi)$ . Η τυπική απόκλιση  $\sigma_{\psi dB}$  λαμβάνει τιμές από 4 έως 13 dB για συστήματα εξωτερικού χώρου και η μέση απόσβεση  $\mu_{\psi dB}$  εξαρτάται από το περιβάλλον διάδοσης και από την απόσταση [10].

#### 2.4.4 Απώλειες διάδοσης μικρής κλίμακας

Με τον όρο *διαλείψεις (fading)* περιγράφονται οι ταχείες μεταβολές του πλάτους, της συχνότητας και της φάσης του σήματος που παρατηρούνται για μικρές αποστάσεις ή σύντομα χρονικά διαστήματα [1]. Το φαινόμενο έχει ως βασικές αιτίες 4 φυσικούς μηχανισμούς:

- **Πολυδιαδρομική διάδοση (multipath propagation)** – Οι συνιστώσες του μεταδιδόμενου κύματος, ύστερα από την ανάκλαση ή σκέδαση του από τα διάφορα εμπόδια του περιβάλλοντος διάδοσης, ακολουθούν διαφορετικές διαδρομές από την απευθείας συνιστώσα, οπότε καταφθάνουν στην κεραία του δέκτη με χρονική

καθυστέρηση και συνεισφέρουν αθροιστικά ή αφαιρετικά στην υπέρθεσή τους για την εύρεση του τελικού σήματος, προκαλώντας έτσι διαλείψεις.



Εικόνα 2.2: Πολυδιαδρομική διάδοση (multipath propagation)<sup>7</sup>

- **Κινητικότητα τερματικών:** Η κίνηση αυτή μεταξύ σταθμών βάσης και τερματικών προκαλεί ολίσθηση της φέρουσας συχνότητας στο δέκτη, λόγω του φαινομένου της μετατόπισης Doppler, με αποτέλεσμα οι multipath συνιστώσες του σήματος λήψης να εμφανίζουν πολλαπλές συχνότητες[10].
- **Κινητικότητα σκεδαστών:** Εκτός από τα κινητά τερματικά, αντικείμενα που κινούνται και δρουν ως ανακλαστικές επιφάνειες, προκαλούν επίσης το φαινόμενο Doppler που υφίσταται το μεταδιδόμενο κύμα. [10].
- **Φασματική θεώρηση** - αφορά την σχέση του εύρους ζώνης του σήματος με το *εύρος ζώνης συνοχής (coherence bandwidth)* του διαύλου. Αν το πρώτο είναι μεγαλύτερο, το σήμα υφίσταται παραμόρφωση με τις διαλείψεις να αποκτούν δευτερεύουσα σημασία,

---

<sup>7</sup> Shutin, Dmitriy. “Multipath tracking and prediction for multiple-input multiple-output wireless channels.” na, 2006.

ενώ στην αντίθετη περίπτωση το σήμα παρουσιάζει ταχείες μεταβολές του πλάτους λόγω διαλείψεων, χωρίς όμως παραμόρφωση. [15]

#### 2.4.4.1 Μετατόπιση Doppler

Το φαινόμενο της μετατόπισης ή αλλιώς ολίσθησης **Doppler**, αναφέρεται στις εξαρτώμενες από το χρόνο διαλείψεις, που προκαλούνται από τη σχετική κίνηση μεταξύ κινητού τερματικού και περιβάλλοντος διάδοσης και εμφανίζονται ως μια μεταβολή της φάσης του λαμβανόμενου σήματος. Για τερματικό που κινείται με σταθερή ταχύτητα  $u$  επί διαδρομής μήκους  $d$  και λαμβάνει σήματα από απομακρυσμένη πηγή, υπάρχει διαφορά μήκους  $\Delta l = d \cos \theta = u \Delta t \cos \theta$  μεταξύ των διαδρομών από την πηγή μέχρι τα ακραία σημεία της διαδρομής  $d$  με  $\Delta t$  τον χρόνο που χρειάζεται το κινητό τερματικό για να ολοκληρώσει την διαδρομή του. Λόγω της διαφοράς  $\Delta l$  το σήμα λήψης παρουσιάζει διαφορά φάσης:

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

Όπου  $\Delta l = d \cos \theta = u \Delta t \cos \theta$  είναι η διαφορά μήκους μεταξύ των διαδρομών από τα ακραία σημεία. Έτσι, η μεταβολή της φέρουσας συχνότητας ή αλλιώς μετατόπιση ή ολίσθηση **Doppler** είναι:

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

Είναι σαφές πως η μεταβολή της συχνότητας λόγω φαινομένου Doppler εξαρτάται από την ταχύτητα του τερματικού, την κατεύθυνση της κίνησής του ως προς την πηγή και την συχνότητα του φέροντος.

## **3 ΚΥΨΕΛΩΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ MIMO**

### **3.1 Εισαγωγή**

Η τεχνολογία των κυψελοειδών δικτύων είναι γέννημα των απαιτήσεων της αγοράς κινητής τηλεφωνίας για ποιοτική επικοινωνία και ήρθε να καλύψει τις ελλείψεις που παρουσίαζαν τα παραδοσιακά συστήματα εξαιτίας της φύσης και των αρχών λειτουργίας τους. Η κατασκευή των κυψελοειδών δικτύων επιτυγχάνει την αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος από την πλευρά της τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Σήμερα, όλα τα πλεονεκτήματα των κυψελοειδών συστημάτων είναι διαθέσιμα στους συνδρομητές κινητής τηλεφωνίας. Η σπουδαιότητά του, σε σχέση με τα παραδοσιακά συστήματα κινητής τηλεφωνίας, είναι η κάλυψη μεγαλύτερων γεωγραφικών περιοχών, η αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου (εξυπηρέτηση μεγάλου αριθμού κινητών συνδρομητών) και προσφορά ποιότητας στην επικοινωνία, έλλειψη παρεμβολών ή και λανθασμένων μεταδιδόμενων πληροφοριών, με μείωση κόστους και παροχή φιλικού περιβάλλοντος προς τους χρήστες.

### **3.2 Δομή κυψελωτού δικτύου**

Βασική αρχή ενός κυψελωτού δικτύου είναι η αντικατάσταση ενός πομπού μεγάλης ισχύος με πολλούς πομπούς μικρότερης, καθένας εκ των οποίων καλύπτει ένα μικρό τμήμα του συνολικού συστήματος. Το τμήμα αυτό λέγεται κυψέλη (cell). Σε μια ομοιόμορφη από πλευράς πληθυσμού περιοχή, οι κυψέλες δημιουργούνται με τέτοιο τρόπο, ώστε οι κεραίες να ισαπέχουν περίπου μεταξύ τους. Μία κυψέλη αποτελείται από τρία βασικά στοιχεία:

1. **Ο σταθμός βάσης (BS):** Ο κύριος σκοπός ενός σταθμού βάσης είναι να διευκολύνει την επικοινωνία μεταξύ κινητών σταθμών, εξου και αποτελείται από τα ραδιοφωνικά κανάλια, πομπό και κεραία δέκτη που είναι τοποθετημένα σε πύργο. Σε κάθε κυψέλη υπάρχει μόνο ένας και η τοποθέτησή του είναι ζωτικής σημασίας και μπορεί να επηρεάσει τη συνολική του απόδοση. Πλέον οι σταθμοί βάσης τοποθετούνται στο λόφο

ή στο βουνοκορφές, ψηλά πάνω από το έδαφος που βοηθά τη συνδεσιμότητα και την κάλυψη να είναι ισχυρότερη.

- 2. Κινητός σταθμός (mobile station)** Ο κάθε κινητός χρήστης έχει έναν πομπό σχετικά χαμηλής ισχύος (έως 100 W) και μπορεί να ακουστεί σε μια μικρή γεωγραφική περιοχή. Ο χρήστης που ανήκει σε μια κυψέλη επικοινωνεί με το υπόλοιπο δίκτυο μέσω του σταθμού βάσης της κυψέλης, δηλαδή (συνήθως) μέσω του σταθμού βάσης από τον οποίο έχει την καλύτερη λήψη ή το δυνατότερο σήμα. Σε γειτονικούς σταθμούς βάσης ανατίθενται διαφορετικές ομάδες καναλιών έτσι ώστε να μην υπάρχουν παρεμβολές μεταξύ των χρηστών που βρίσκονται σε κοντινές κυψέλες.

Οι κυψέλες συχνά οργανώνονται έτσι ώστε γειτονικές κεραιές (σταθμοί βάσης) να είναι περίπου ισαπέχουσες. Το σχήμα των κυψελών που προκύπτει τότε είναι εξαγωνικό. Στην γενική περίπτωση πάντως η εικόνα των εξαγωνικών κυψελών είναι ένα μοντέλο που απλοϊκά αναπαριστά τον τρόπο οργάνωσης των κυψελικών δικτύων, μια και στην πραγματικότητα οι κυψέλες δεν είναι απαραίτητα εξαγωνικές. Κάθε χρήστης «ανήκει» στην κυψέλη της οποίας το σήμα «ακούει» πιο δυνατά. Ο χρήστης καταλαβαίνει ότι άλλαξε κυψέλη όχι μετρώντας την θέση του σε σχέση με κάποια νοητή γραμμή, αλλά μετρώντας την ισχύ που λαμβάνει από τους διάφορους σταθμούς βάσης. Για παράδειγμα είναι πιθανό λόγω φυσικών ή άλλων εμποδίων η κεραιά της οποίας το σήμα ένας χρήστης «ακούει» πιο δυνατά να μην είναι η πιο κοντινή σε αυτόν. Τότε το σχήμα των κυψελών μπορεί να απέχει πολύ από το να είναι εξαγωνικό, ακόμα και αν οι σταθμοί βάσεις έχουν τοποθετηθεί σε ίσες αποστάσεις.

### **3.3 Επαναχρησιμοποίηση Καναλιών**

Ένα καίριο ζήτημα που αφορά την λειτουργία και απόδοση των κυψελικών δικτύων είναι η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης καναλιών σε διαφορετικές κυψέλες όταν αυτές βρίσκονται σε απόσταση μεγαλύτερη μιας ελάχιστης απόστασης η μία από την άλλη. Η



επαναχρησιμοποίηση των καναλιών είναι και η κύρια ιδέα πίσω από την κυψελική αρχιτεκτονική.

Ο κύριος περιοριστικός παράγοντας στην επικοινωνία στα κυψελικά δίκτυα είναι η παρεμβολή που δημιουργείται από άλλους χρήστες. Για τη ελαχιστοποίηση αυτής της παρεμβολής είναι αναγκαίο σε γειτονικές κυψέλες να ανατεθούν διαφορετικά κανάλια επικοινωνίας. Επειδή τα διαθέσιμα στο σύστημα (TDMA, FDMA, ή CDMA) κανάλια είναι πεπερασμένα, είναι σκόπιμο να επιδιώκεται η επαναχρησιμοποίηση των καναλιών που χρησιμοποιεί μια κυψέλη σε άλλες κυψέλες, όπου αυτό δεν δημιουργεί φαινόμενα παρεμβολής. Με λίγα λόγια γειτονικές κυψέλες πρέπει να χρησιμοποιούν διαφορετικά κανάλια (π.χ., διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων σε FDMA συστήματα) ενώ κυψέλες που βρίσκονται αρκετά μακριά, ώστε το επίπεδο παρεμβολής που δημιουργεί η μία στην άλλη να είναι μικρό, μπορεί να χρησιμοποιούν τα ίδια κανάλια.

Μέτρο της αποδοτικότητας κατά την επαναχρησιμοποίηση καναλιών σε ένα κυψελικό σύστημα αποτελεί η απόσταση επαναχρησιμοποίησης καναλιών (channel reuse distance), που ορίζεται σαν η ελάχιστη απόσταση μεταξύ δυο κυψελών που μπορούν να χρησιμοποιήσουν το ίδιο κανάλι με αποδεκτά επίπεδα παρεμβολής. Οι παράγοντες που περιορίζουν την απόσταση επαναχρησιμοποίησης είναι κυρίως δύο: οι παρεμβολές που δημιουργούν χρήστες που χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι σε διαφορετικές κυψέλες (co-channel interference) και οι παρεμβολές που δημιουργούν χρήστες που βρίσκονται στην ίδια κυψέλη και χρησιμοποιούν κοντινά (π.χ. γειτονικά) κανάλια επικοινωνίας (adjacent channel interference).

### **3.4 Τρόποι αύξησης του αριθμού των χρηστών σε μια κυψέλη**

Οι τρόποι με τους οποίους μπορούμε να αυξήσουμε τον αριθμό των χρηστών που εξυπηρετούνται σε μια κυψέλη είναι:

1. **Πρόσθεση νέων καναλιών.** Το μέγεθος των κυψελών παραμένει ως έχει και προσθέτουμε νέα κανάλια. Για παράδειγμα, αν είχαμε 10 σχισμές ανά πλαίσιο σε

ένα TDMA σύστημα, χρησιμοποιούμε πλέον 20 σχισμές ανά πλαίσιο. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η χειροτέρευση της ποιότητας κάθε καναλιού. Για να παραμείνει η ποιότητα η ίδια, θα πρέπει παράλληλα να αυξήσουμε το εύρος ζώνης στο σύστημα μας, κάτι που συνήθως δεν είναι δυνατόν να γίνει.

2. **Δανεισμός συχνοτήτων.** Μια κυψέλη μπορεί να δανειστεί κανάλια από μια γειτονική της, αν τα δικά της κανάλια είναι όλα απασχολημένα. Το MSC επιβλέπει αυτή τη διαδικασία έτσι ώστε τα δανεισμένα κανάλια να μην δημιουργούν παρεμβολές στις άλλες κυψέλες, δηλαδή ο περιορισμός ελάχιστης απόστασης επαναχρησιμοποίησης καναλιών να εξακολουθεί να ισχύει και μετά τον δανεισμό. Αυτή η μέθοδος εξετάζεται στη συνέχεια του κεφαλαίου, όπου παρουσιάζονται λεπτομερώς διάφοροι μέθοδοι ανάθεσης καναλιών σε κλήσεις.
3. **Σπάσιμο κυψελών (cell splitting).** Κυψέλες σε περιοχές με μεγάλη ζήτηση σπάνε σε μικρότερες κυψέλες. Η χωρητικότητα έτσι αυξάνει, αλλά αυτή η μέθοδος δημιουργεί την ανάγκη για περισσότερους σταθμούς βάσης και αυξάνει το κόστος. Επίσης, θα πρέπει πλέον να είναι μικρότερη η ισχύς εκπομπής τόσο για το κινητό όσο και για τον σταθμό βάσης, ώστε να αποφευχθούν προβλήματα σε γειτονικές κυψέλες. Με τον τρόπο αυτό επιβεβαιώνεται η ανάγκη για έλεγχο της ισχύος.
4. **Τμηματοποίηση της κυψέλης (cell sectoring).** Στην περίπτωση αυτή, η κεραία δεν μεταδίδει προς όλες τις κατευθύνσεις ομοιόμορφα, αλλά έχει συγκεντρωμένη το μεγαλύτερο μέρος της ισχύος της προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Για παράδειγμα χρησιμοποιώντας κεραίες που εκπέμπουν σε μια γωνία 120° (ή 60°) αντί για 360°, ουσιαστικά χωρίζεται η κυψέλη σε 3 (ή 6, αντίστοιχα) κομμάτια, και εξαπλασιάζεται η χωρητικότητα. Αυτή η μέθοδος απαιτεί την χρήση κατευθυντικών κεραιών (directional antennas).

5. **Μικροκυψέλες (microcells).** Όταν η διάμετρος των κυψελών γίνεται πολύ μικρή, μιλάμε πλέον για μικροκυψέλες ή και για πικοκυψέλες (picocells). Οι κεραιές τότε τοποθετούνται σε κτίρια, λόφους, κολώνες φωτισμού κλπ.

### 3.5 Συστήματα Πολλαπλής Εισόδου – Πολλαπλής Εξόδου MIMO

Μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1990, τα συστήματα που αποτελούνταν από μία κεραία στον πομπό και μία στον δέκτη (*Single Input Single Output - SISO*), είχαν εδραιωθεί στις εφαρμογές αλλά και στην αντίληψη της επιστημονικής κοινότητας. Για τέτοιου είδους συστήματα υπάρχουν όμως συγκεκριμένα όρια για τον ρυθμό μετάδοσης, ιδιαίτερα όταν απαιτούμε αξιοπιστία. Συγκεκριμένα, σε ένα SISO σύστημα και στην περιοχή των υψηλών SNR η συμπεριφορά της χωρητικότητας είναι σχεδόν γραμμική και αυξάνεται κατά 1 bps/Hz, όταν το SNR αυξάνεται κατά 3 dB. Οι ερευνητές αναγκάστηκαν από τις έντονες απαιτήσεις, να αναζητήσουν νέες δομές και αρχιτεκτονικές για καλύτερη απόδοση των συστημάτων επικοινωνίας. Σε αυτά τα πλαίσια προτάθηκαν τα συστήματα πολλαπλών εισόδων - πολλαπλών εξόδων (*Multiple Input – Multiple Output – MIMO*), τα οποία αξιοποιούν το φαινόμενο της διάδοσης μέσω πολλαπλών διαδρομών με τέτοιο τρόπο, που επιτυγχάνεται η μετάδοση πολλών ροών δεδομένων (stream data) στο ίδιο κανάλι και με αυτόν τον τρόπο πετυχαίνουν πολλαπλασιασμό της χωρητικότητας της ζεύξης. Η υλοποίηση των MIMO συστημάτων βασίζεται στη χρήση περισσότερων από μία κεραιών στον πομπό ή/και στον δέκτη. Η χρήση πολλών κεραιών δεν ήταν καινούργια, αλλά βασίστηκε σε προηγούμενες μελέτες και τεχνικές, οι οποίες είχαν στόχο να καταπολεμήσουν το multipath, κάτι το οποίο αποτελεί και τη θεμελιώδη διαφορά με τα συστήματα πολλαπλών εισόδων - πολλαπλών εξόδων. Η ρίζα των MIMO ανάγεται στη δεκαετία του 1970, όταν κάποιες ερευνητικές εργασίες αναφέρονταν στα πολυκάναλα (multichannel) συστήματα ψηφιακής μετάδοσης και την παρεμβολή (crosstalk) μεταξύ των αγωγών ενός καλωδίου. Οι έρευνες αυτές δεν αναφέρονται στη μετάδοση πολλαπλών stream πληροφορίας, μέσω της αξιοποίησης του

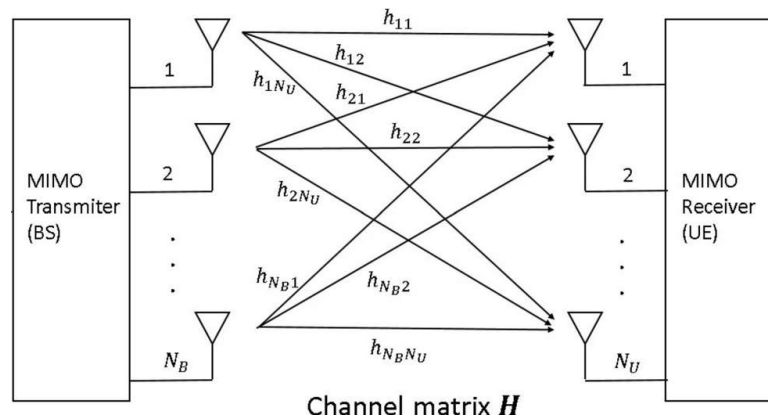
φαινομένου του multipath, ωστόσο κάποιες μαθηματικές μέθοδοι, σχετικές με την αμοιβαία παρεμβολή (mutual interference) αποδείχθηκαν χρήσιμες στην ανάπτυξη των MIMO.

### 3.5.1 Περιγραφή MIMO Συστήματος

Η δομή ενός πολύθυρου τηλεπικοινωνιακού συστήματος, το οποίο αποτελείται από  $M$  κεραίες στον πομπό και  $N$  κεραίες στον δέκτη, δίνεται από τη σχέση

$$y = H x n$$

Όπου  $H \in \mathbb{C}^{N \times M}$  είναι ο πίνακας καναλιού με στοιχεία τα οποία περιέχουν πληροφορίες για το πλάτος και τη φάση των διαδρομών διάδοσης (propagation path) μεταξύ των  $M$  θυρών εκπομπής και των  $N$  θυρών λήψης. Επίσης, τα στοιχεία του πίνακα  $H$  εκφράζουν τον λόγο ανάμεσα στην τάση της κεραίας εκπομπής και την τάση που επάγεται στην κεραία λήψης. Οι διαφορετικές θύρες, μπορεί να αντιστοιχούν σε διαφορετικές κεραίες, διαφορετικές πολώσεις ή σε διαφορετικά διαγράμματα ακτινοβολίας. Ακόμα, οι θύρες μπορεί να αναφέρονται σε έναν συνδυασμό των παραπάνω.



Εικόνα 3.1: MIMO  $N_B \times N_U$  και οι αντίστοιχες αποκρίσεις<sup>8</sup>

<sup>8</sup> Lee, Ju-Hong, and Wei-En Sun. "Robust beamforming and spatial precoding for quasi-OSTBC massive MIMO communications." EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking 2019.1 (2019): 1-16.

### 3.5.2 Χωρητικότητα MIMO συστήματος

Η χωρητικότητα ενός ασύρματου συστήματος MIMO με M κεραίες εκπομπής και N κεραίες λήψης, δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$C = \max_{\{R_s: \text{Tr}(R_s) \leq P^{S,av}\}} \log_2 \frac{\det(HR_sH^H + R_n)}{\det(R_n)}$$

Όπου,

- $R_s = E\{ss^H\} \in C^{M \times M}$  εκφράζει τη συμμεταβλητότητα των μεταδιδόμενων συμβόλων (s).
- $R_n = E\{nn^H\} \in C^{N \times N}$  εκφράζει τη συμμεταβλητότητα του θορύβου (n).
- $P^{S,av}$  εκφράζει τη μέση εκπεμπόμενη ισχύ.

Αν ο θόρυβος θεωρηθεί AWGN, και έτσι τα στοιχεία του πίνακα n είναι τυχαίες και ανεξάρτητες μεταβλητές, ομοιόμορφα κατανομημένες με ίδια διακύμανση  $N_o$ , σχέση παίρνει την μορφή

$$C = \max_{\{R_s: \text{Tr}(R_s) \leq P^{S,av}\}} \log_2 \det \left( I + \frac{HR_sH^H}{N_o} \right)$$

με το I να είναι ο μοναδιαίος πίνακας  $N \times N$  [27].



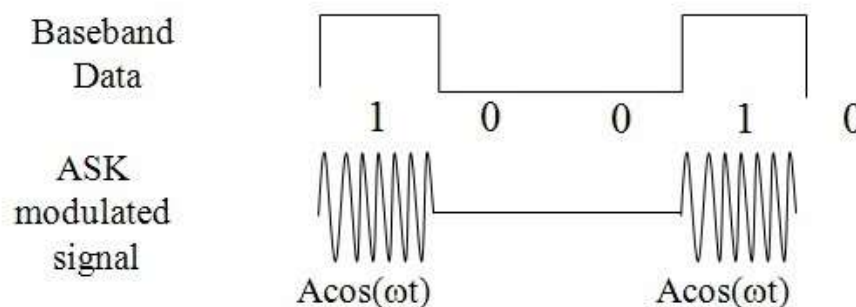
## 4 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΑΙ ΠΟΛΛΑΠΛΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ

### 4.1 Τεχνικές ψηφιακής διαμόρφωσης

Όπως στις αναλογικές διαμορφώσεις, έτσι και στις ψηφιακές, η διαμόρφωση είναι η διαδικασία της αλλαγής ενός ή περισσότερων χαρακτηριστικών μιας περιοδικής κυματομορφής (φέρον σήμα) βάσει ενός άλλου μεταβαλλόμενου σήματος (σήμα πληροφορίας). Κατά τη διαδικασία της κωδικοποίησης το σήμα πληροφορίας εξέρχεται ως μια ροή δυαδικών ψηφίων.

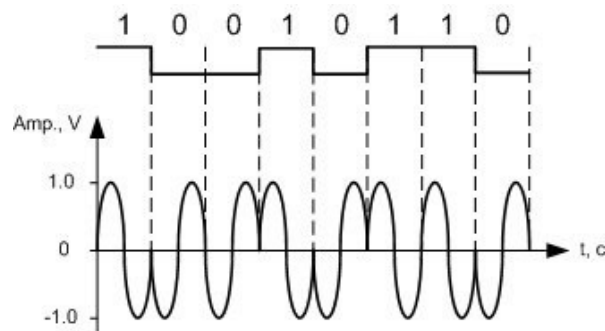
Η επιλογή της τεχνικής της ψηφιακής διαμόρφωσης επιλέγεται ανάλογα με την αποδοτικότητα φάσματος σε σχέση με τον ρυθμό μετάδοσης των παρεχόμενων υπηρεσιών, την ευκολία υλοποίησης και την ανθεκτικότητα σε σφάλματα. Συνήθεις κωδικοποιήσεις είναι οι παρακάτω [26]:

- **Κωδικοποίηση ASK (Amplitude Shift Keying):** Στη δυαδική κωδικοποίηση ASK χρησιμοποιούνται μόνο δύο καταστάσεις για τα σύμβολα, οπότε το φέρον απλά ενσωματώνεται ή όχι και γι' αυτό η διαδικασία καλείται επίσης και ON-OFF διαμόρφωση (On-Off Keying – OOK)



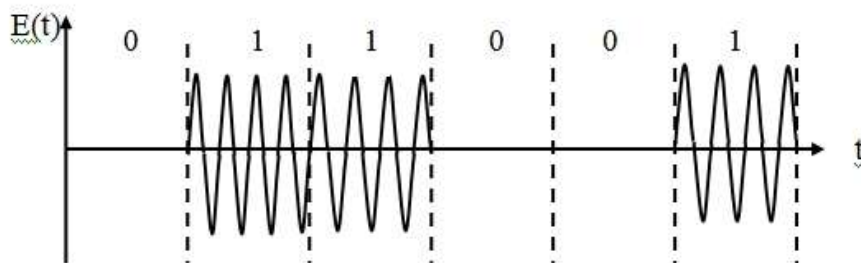
Εικόνα 4.1: Μορφή του σήματος ASK.

- **Κωδικοποίηση PSK (Phase Shift Keying):** Στην Ψηφιακή Διαμόρφωση Φάσης PSK η πληροφορία περιέχεται στη στιγμιαία φάση του διαμορφωμένου φέροντος. Αυτή η φάση συνήθως ενσωματώνεται στο φέρον και εκτιμάται ως προς ένα σταθερό φέρον αναφοράς γνωστής φάσης, και γι' αυτό ονομάζεται σύμφωνη PSK (coherent PSK).



**Εικόνα 4.2: Μορφή του σήματος PSK.**

- **Κωδικοποίηση FSK (Frequency Shift Keying):** Η μέθοδος FSK μεταφέρει τα δεδομένα χρησιμοποιώντας φορείς με διακριτές συχνότητες, ώστε να αναπαραστήσει με αυτές τις καταστάσεις συμβόλων. Μια σημαντική ιδιότητα της FSK είναι ότι το πλάτος του διαμορφωμένου σήματος είναι σταθερό, καθώς μεταβαίνουμε από μία σε άλλη συμβολική κατάσταση.



**Εικόνα 4.3: Μορφή του διαμορφωμένου σήματος κατά FSK.**



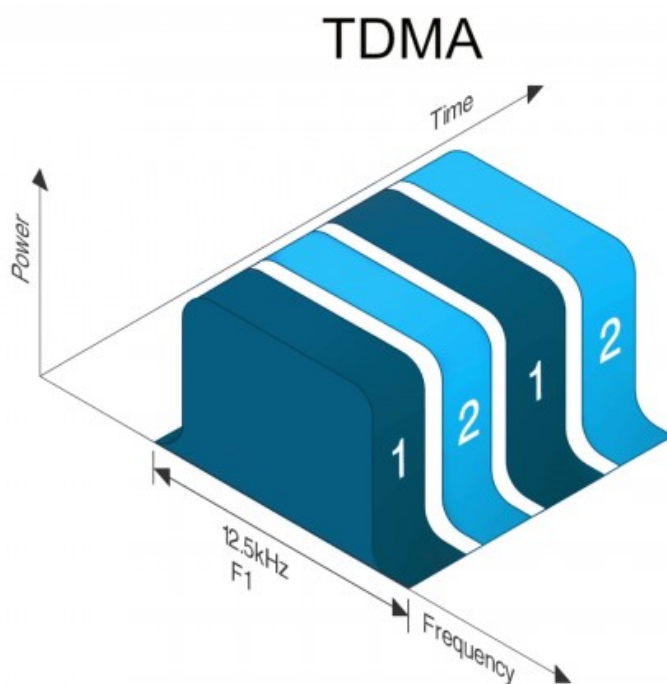
## **4.2 Τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης**

Σε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα, η ταυτόχρονη μετάδοση πληροφορίας από περισσότερους από έναν χρήστες σε ένα κοινό κανάλι, δημιουργεί παρεμβολές μεταξύ τους. Για να ελαχιστοποιηθούν οι παρεμβολές αυτές λοιπόν, επιβάλλεται ο διαχωρισμός των αντίστοιχων σημάτων. Η ταυτόχρονη πρόσβαση πολλαπλών χρηστών στους ίδιους πόρους και η απαίτηση ώστε τα σήματα τους είναι διαχειρίσιμα και διακριτά, εξασφαλίζεται με χρήση διάφορων τεχνικών πολλαπλής πρόσβασης. Οι τεχνικές αυτές κατηγοριοποιούνται, ανάλογα με το πεδίο στο οποίο πραγματοποιείται ο διαχωρισμός των πόρων και ο συντονισμός της πρόσβασης, σε διαίρεση συχνότητας FDMA (Frequency Division Multiple Access), χρόνου TDMA (Time Division Multiple Access), κώδικα CDMA (Code Division Multiple Access) και χώρου SDMA (Space Division Multiple Access). Επιπλέον, κάποιες συνδυαστικές μέθοδοι πολλαπλής πρόσβασης, όπως η τεχνική OFDMA, πραγματοποιούν την δέσμευση των πόρων σε περισσότερα του ενός πεδία. Κατά την ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση (OMA), η οποία είναι βάση ανάπτυξης όλων αυτών των τεχνικών, οι διαφορετικοί χρήστες κατανέμονται ορθογωνικά στη διάσταση του χρόνου, της συχνότητας ή του κώδικα, προκειμένου η ετεροσυσχέτισή τους να είναι μηδενική και να αντιμετωπίζονται οι παρεμβολές μεταξύ τους. Εκτός αυτών υπάρχουν και μη-ορθογωνικές τεχνικές, όπως η NOMA (Non Orthogonal Multiple Access), η οποία θα αναλυθεί παρακάτω [11].

### **4.2.1 Πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου (TDMA)**

Η τεχνική TDMA χρησιμοποιείται κυρίως στα ψηφιακά συστήματα κινητών επικοινωνιών. Σε κάθε μία χρονοθυρίδα (time slot) αντιστοιχίζεται ένας χρήστης, ο οποίος μπορεί να εκπέμψει. Οι χρονοθυρίδες αυτές έχουν πολύ μικρή διάρκεια και επαναλαμβάνονται συνεχώς με κυκλικό τρόπο. Έτσι, η κάθε συσκευή περιμένει μέχρι να έρθει η σειρά της να εκπέμψει, περιμένοντας όλους τους άλλους χρήστες να εκπέμψουν τα δικά τους σήματα. Όταν έρθει η σειρά ενός χρήστη, η συσκευή του εκπέμπει για όσο χρόνο διαρκεί η χρονοθυρίδα του και κατόπιν διακόπτει τη μετάδοση, έως ότου ξαναέρθει η σειρά της δικής του χρονοθυρίδας.

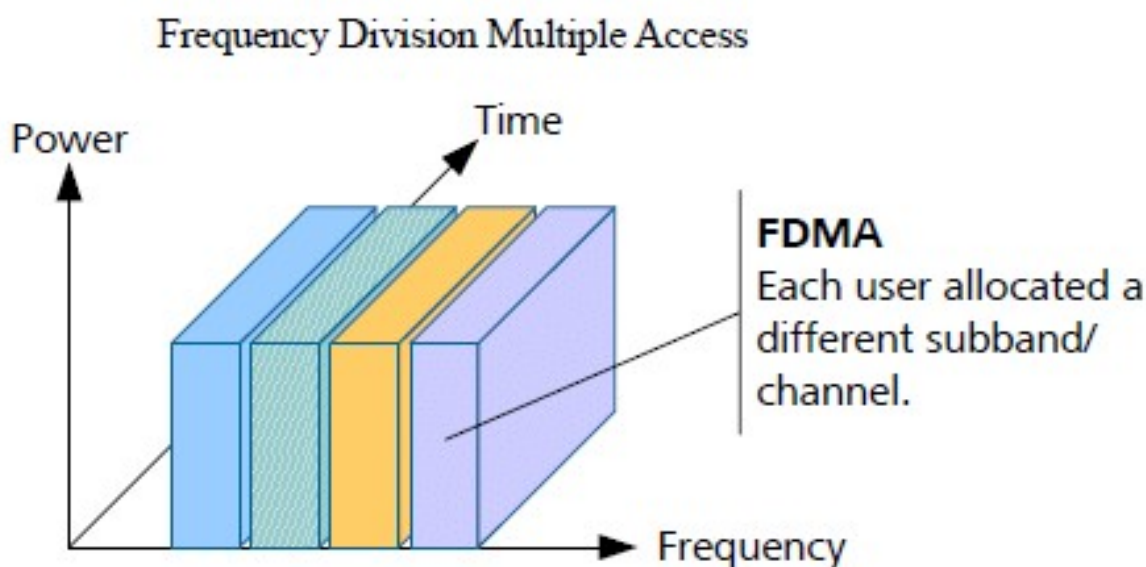
Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η εκπομπή στην TDMA είναι διακοπτόμενη. Αυτό ίσως φαίνεται παράδοξο, αλλά καθώς ο χρήστης της κινητής τηλεφωνίας δεν το αντιλαμβάνεται διότι οι εναλλαγές των χρονοθυρίδων γίνονται με πολύ γρήγορο ρυθμό (εκατοντάδες φορές το δευτερόλεπτο), ώστε η συνομιλία να φαίνεται συνεχής. Με την τεχνική αυτή, με έναν πομποδέκτη ο σταθμός βάσης μπορεί να εξυπηρετήσει πολλούς χρήστες [26]. Για παράδειγμα, το ευρωπαϊκό σύστημα κινητής τηλεφωνίας 2ης γενιάς GSM, χρησιμοποιεί την τεχνική TDMA, με συνολικά 8 χρονοθυρίδες ανά κανάλι, επομένως κάθε φέρον εξυπηρετεί 8 χρήστες. Όμως, απαιτούνται ιδιαίτερα κυκλώματα στις κινητές συσκευές διότι πρέπει να επιτυγχάνεται συγχρονισμός με το σταθμό βάσης για τη σωστή τήρηση των χρονοθυρίδων. Το βασικότερο πλεονέκτημα της TDMA είναι η μεγαλύτερη χωρητικότητα και φασματική απόδοση σε σχέση με την FDMA. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, πολλοί χρήστες χρησιμοποιούν το κοινό μέσο στην ίδια συχνότητα, αλλά διαμοιράζονται μεταξύ τους στο πεδίο του χρόνου.



**Εικόνα 4.4: Σύστημα TDMA δύο χρονοθυρίδων**

#### 4.2.2 Πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης συχνότητας (FDMA)

Κατά τη χρήση της τεχνικής FDMA, σε κάθε χρήστη ανατίθεται μία διαφορετική συχνότητα, οι χρήστες δηλαδή χρησιμοποιούν ταυτόχρονα το κοινό μέσο, αλλά διαχωρίζονται μεταξύ τους στο πεδίο της συχνότητας, όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα. Η τεχνική αυτή χαρακτηρίζεται από χαμηλή χωρητικότητα, αλλά πλεονεκτεί σε σύγκριση με άλλες λόγω του χαμηλού κόστους υλοποίησης για τις κινητές συσκευές. Από την άλλη, η υψηλή κατανάλωση ισχύος αλλά και το κόστος του σταθμού βάσης είναι ιδιαίτερα υψηλό, καθώς απαιτούνται τόσο πομποδέκτες, όσες και οι διαθέσιμες συχνότητες. Ένα σημαντικό όμως πλεονέκτημα της, είναι ότι δεν απαιτεί ιδιαίτερα κυκλώματα συγχρονισμού μεταξύ των σταθμών βάσης και των κινητών σταθμών, όπως απαιτείται από την τεχνική TDMA [26].



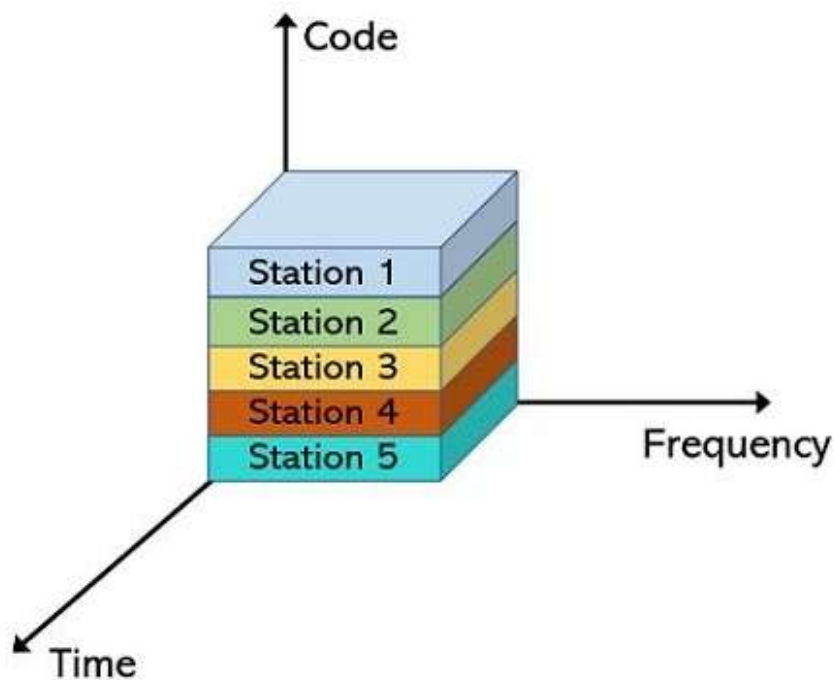
*Εικόνα 4.5: Κατανομή χρηστών στο πεδίο της συχνότητας<sup>9</sup>*

---

<sup>9</sup> Shivam, Y. "A Detail Survey of Channel Access Method for Cognitive Radio Network (CRN) Applications toward 4G." 2021.

### 4.2.3 Πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση κώδικα (CDMA)

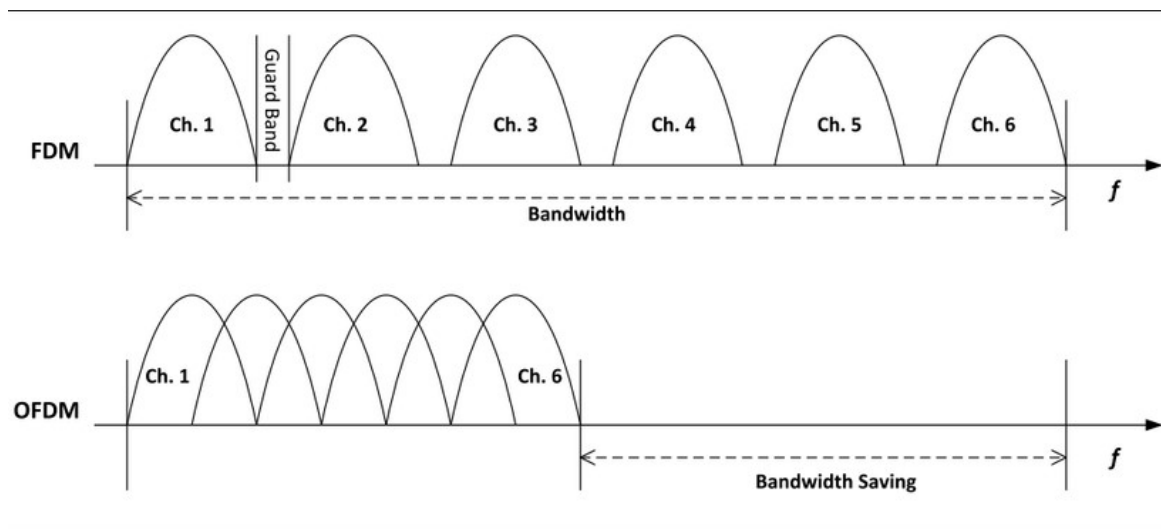
Η τεχνική διαίρεσης κώδικα είναι η πιο σύγχρονη από τις προηγούμενες. Όλοι οι χρήστες κατανέμονται ταυτόχρονα στο κοινό μέσο τόσο στο πεδίο της συχνότητας, όσο και στο πεδίο του χρόνου. Στην τεχνική CDMA, το εύρος συχνοτήτων είναι κοινό για όλους τους χρήστες, οι οποίοι διαχωρίζονται μεταξύ τους διότι ο κάθε χρήστης κωδικοποιεί τα σήματά του με ένα μοναδικό ψηφιακό κωδικό. Οι κωδικοί αυτοί είναι προσεκτικά σχεδιασμένοι ώστε να έχουν ένα σημαντικό χαρακτηριστικό, που ονομάζεται ορθογωνιότητα. Η ιδιότητα αυτή των κωδικών επιτρέπει στα σήματα από διαφορετικούς χρήστες να παραμένουν ανεξάρτητα μεταξύ τους. Έτσι, όταν ο δέκτης επιχειρεί να αποκωδικοποιήσει τα σήματα ενός χρήστη, εφαρμόζει τον μοναδικό του κωδικό-κλειδί, με αποτέλεσμα τα σήματα όλων των υπολοίπων χρηστών να εξαλείφονται. Όπως είναι φανερό, εξαιτίας της κοινής χρήσης των συχνοτήτων από όλους τους χρήστες, η τεχνική αυτή αναφέρεται και ως *καθολική επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων*. [26]



Εικόνα 4.6: Γραφική αναπαράσταση CDMA

### 4.3 Ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (OFDM)

Η τεχνική OFDM είναι μία μορφή διαμόρφωσης που βασίζεται στην τεχνική FDM. Βασική αρχή της είναι ο διαχωρισμός του διαθέσιμου φάσματος συχνοτήτων σε *υποφέροντα (subcarriers)* ώστε να έχουμε ταυτόχρονη μετάδοση πληροφορίας από κανάλια χαμηλού ρυθμού όσα ο αριθμός των υποφερόντων. Κάθε subcarrier διαμορφώνεται με ένα συμβατικό σύστημα διαμόρφωσης (BPSK, QPSK, M-QAM). Ωστόσο η OFDM είναι βελτιωμένη σε σχέση με την FDM αφού τα υποφέροντα δεν είναι το ένα μετά το άλλο, αλλά επικαλύπτονται με τέτοιο τρόπο ώστε να μην χάνεται η πληροφορία και να χρησιμοποιείται αποδοτικά το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Συγκεκριμένα το πρόβλημα της σπατάλης εύρους ζώνης αντιμετωπίζεται από την OFDM μέσω του γεγονότος ότι τα κανάλια της που έχουν σημαντικά μικρότερη συχνοτική απόσταση και παράλληλα είναι ορθογώνια μεταξύ τους, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ότι παρόλο που θα επικαλύπτονται δεν θα παρεμβάλλεται το ένα με το άλλο.



Εικόνα 4.7: Σύγκριση αξιοποίησης διαθέσιμου φάσματος<sup>10</sup>

<sup>10</sup> Tamer, Ufuk, "Testbed implementation of a MIMO-OFDM data link at sub 6 GHz frequency bands using an SDR platform." MS thesis. Middle East Technical University, 2018.

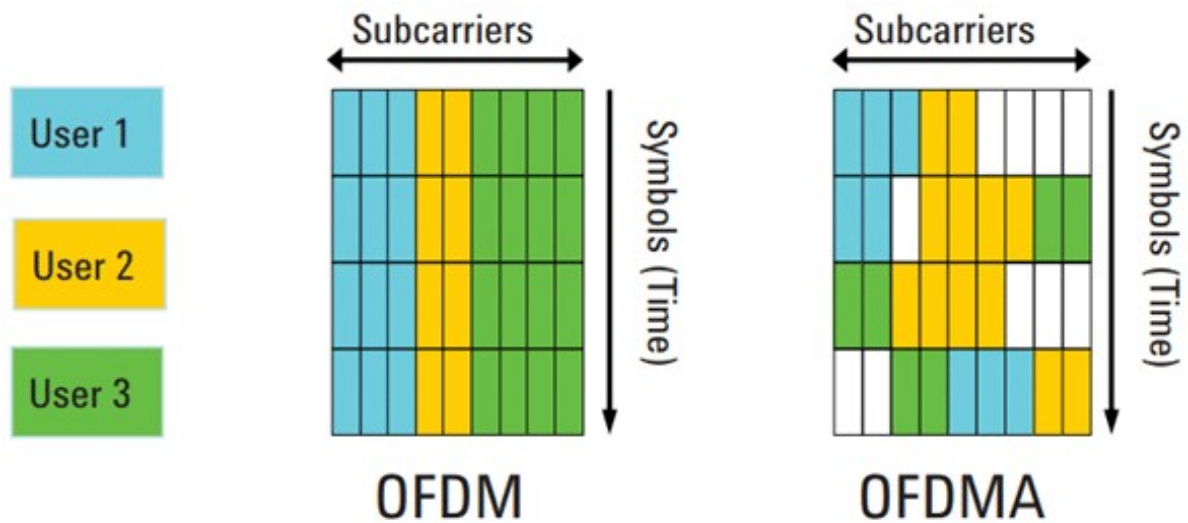
Αποτέλεσμα αυτού είναι να αποφεύγεται η παρεμβολή ανάμεσα σε υποφέροντα (Intercarrier Interference – ICI), καθώς το μέγιστο του φάσματος ενός υποφέροντος αντιστοιχεί σε μηδενικές τιμές των φασμάτων των άλλων υποφερόντων.

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της OFDM είναι ότι κάνει πιο αποδοτική τη χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης καθώς επιτρέπει την φασματική επικάλυψη των υποφερόντων της χωρίς αυτά να παρεμβάλλονται μεταξύ τους. Επιπλέον, επειδή η διαχώριση αυτού του εύρους ζώνης γίνεται σε στενά υποφέροντα, την καθιστά πιο ανθεκτική στην επιλεκτική εξασθένηση συχνότητας (frequency selective fading) και έτσι επηρεάζονται μόνο κάποιες υποφέρουσες και όχι ολόκληρο το σήμα [22].

Από την άλλη, τα κύρια μειονεκτήματά της είναι η μεγάλη αναλογία μέγιστης προς μέση ισχύ (φαινόμενο PAPR) που παρουσιάζει, με αποτέλεσμα να απαιτούνται RF ενισχυτές οι οποίοι πρέπει να έχουν μεγάλη γραμμική περιοχή λειτουργίας και να προσαρμόζονται στις μεγάλες μεταβολές πλάτους, που αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην λειτουργούν με υψηλό επίπεδο απόδοσης. Επιπλέον είναι ευαίσθητη σε μετατοπίσεις συχνότητας της φέρουσας που προκαλούνται από αναταραχές και από το φαινόμενο Doppler και τέλος είναι απαιτητική ως προς τον συγχρονισμό ανάμεσα στον πομπό και στον δέκτη [22].

#### **4.4 Πολλαπλή πρόσβαση ορθογώνιας διαίρεσης συχνότητας (OFDMA)**

Επέκταση της OFDM είναι η Πολλαπλή Πρόσβαση Ορθογώνιας Διαίρεσης Συχνότητας–OFDMA. Η OFDMA παρέχει τη δυναμική ανάθεση του φάσματος καναλιού σε περισσότερους του ενός χρήστες. Το κανάλι διαιρείται σε μικρότερα υποκανάλια τα οποία καλούνται Resource Units (RUs) η αλλιώς subcarriers. Το παρακάτω γράφημα αποτυπώνει ένα απλό σύστημα τεσσάρων καναλιών που εξυπηρετούν τρεις χρήστες.



Εικόνα 4.8: Σύγκριση μεταξύ τεχνικών OFDM και OFDMA<sup>11</sup>

Σε κάθε χρονική σχισμή, τα RUs ανατίθενται στον κάθε χρήστη ανάλογα τις ανάγκες τους σε εύρος ζώνης. Αυτό συμβαίνει δυναμικά και κάθε χρονική σχισμή μπορεί να διαθέτει ένα σετ διαφορετικών RUs προς διάθεση. Ένας συγκεκριμένος πόρος συχνότητας εκχωρείται σε κάθε χρήστη ανεξαρτήτως με το αν αντιμετωπίζει καλή ή κακή κατάσταση καναλιού. Στην περίπτωση, λοιπόν, που ένας χρήστης με κακή κατάσταση καναλιού καταλαμβάνει αποκλειστικά έναν από τους περιορισμένους πόρους εύρους ζώνης, ο αντίκτυπος στην απόδοση του συστήματος είναι προφανώς αρνητικός, καθώς δεν καθίσταται δυνατή η πλήρης αξιοποίηση όλων των ζωνών συχνοτήτων, κάτι που βελτιώνεται με τη χρήση της τεχνικής NOMA.

---

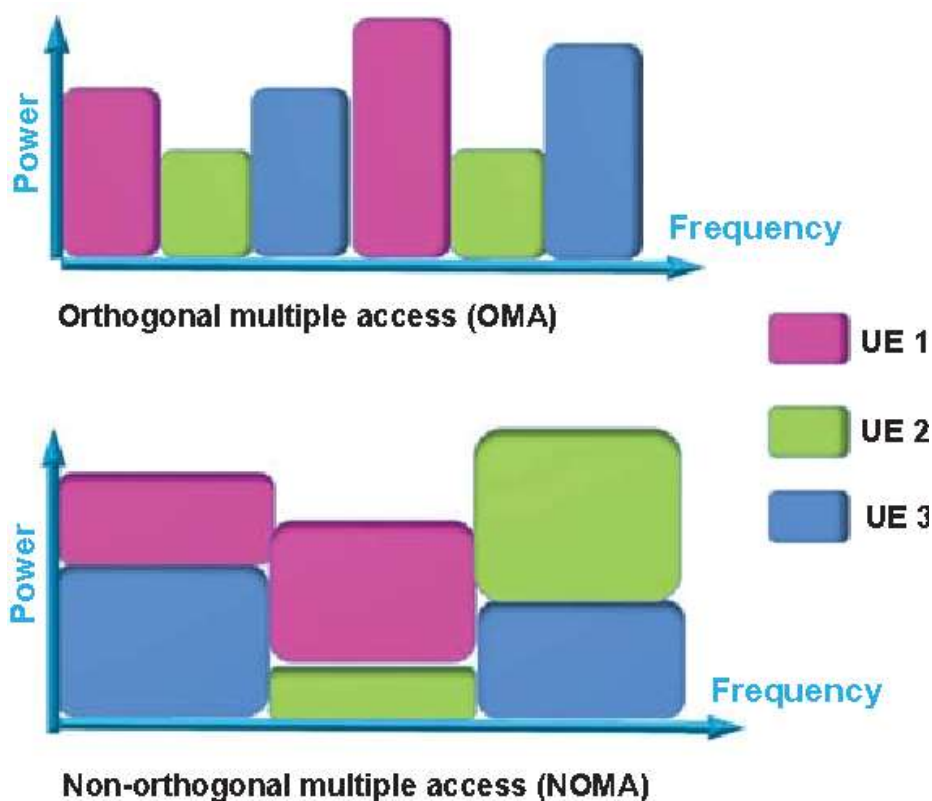
<sup>11</sup> Abderrachid, Driouche, and Roumane, Ahmed. "Étude des mécanismes de gestion de congestion dans la EUTRAN pour les applications M2M IoT (cas d'étude PRACH)." na, 2016

## **4.5 Μη ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση (NOMA)**

Το μοντέλο μη ορθογωνικής πολλαπλής πρόσβασης NOMA (Non- Orthogonal Multiple Access) αποτελεί μια μεθοδολογία για τον σχεδιασμό τεχνικών ράδιο-πρόσβασης για τα 5G δίκτυα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για να ικανοποιήσει τόσο τις ανάγκες των χρηστών όσο και τις ανάγκες του δικτύου σε διάφορες τεχνολογίες των 5G δικτύων. Ειδικότερα αποτελεί μια από τις υποσχόμενες τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης για την ενίσχυση της απόδοσης του συστήματος στα 5G δίκτυα. Η NOMA προσφέρει ένα σύνολο σημαντικών πλεονεκτημάτων σε ένα δίκτυο, όπως για παράδειγμα, η αύξηση της φασματικής απόδοσης.

Ειδικότερα, το μοντέλο μη ορθογωνικής πολλαπλής πρόσβασης NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access) 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 βασικότερο χαρακτηριστικό του μοντέλου NOMA είναι ότι εκτελεί διαδοχική ακύρωση παρεμβολών (Successive Interference Cancellation - SIC) στους χρήστες, όταν αναφερόμαστε στη ζεύξη καθόδου (downlink) ή στο σταθμό βάσης, όταν αναφερόμαστε στη ζεύξη ανόδου (uplink). Στην τεχνολογία OMA κάθε χρήστης καταλαμβάνει έναν πόρο αποκλειστικά, ενώ στη NOMA τον ίδιο πόρο τον χρησιμοποιούν πολλοί χρήστες ταυτόχρονα. Στην *Εικόνα 4.9*, απεικονίζεται η διαφορά μεταξύ της ορθογωνικής πολλαπλής πρόσβασης (OMA) και της μη ορθογώνιας πολλαπλής πρόσβασης (NOMA). Ο πόρος που διατίθεται σε διαφορετικούς χρήστες, έχει διαφορετικό χρώμα:





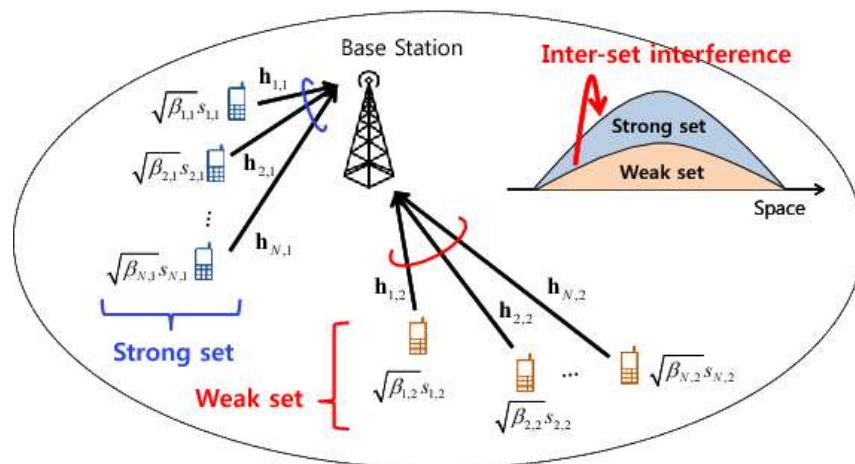
Εικόνα 4.9: Διαφορά μεταξύ OMA-NOMA<sup>12</sup>

Κατά την αποκωδικοποίηση του σήματος από τους χρήστες (ή το BS) με τη χρήση του SIC μηχανισμού, κάθε σήμα που προορίζεται για 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. Υπάρχουν διαφορετικές λύσεις NOMA, οι οποίες μπορούν κατά κύριο λόγο να ταξινομηθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Όπως και τα βασικά

---

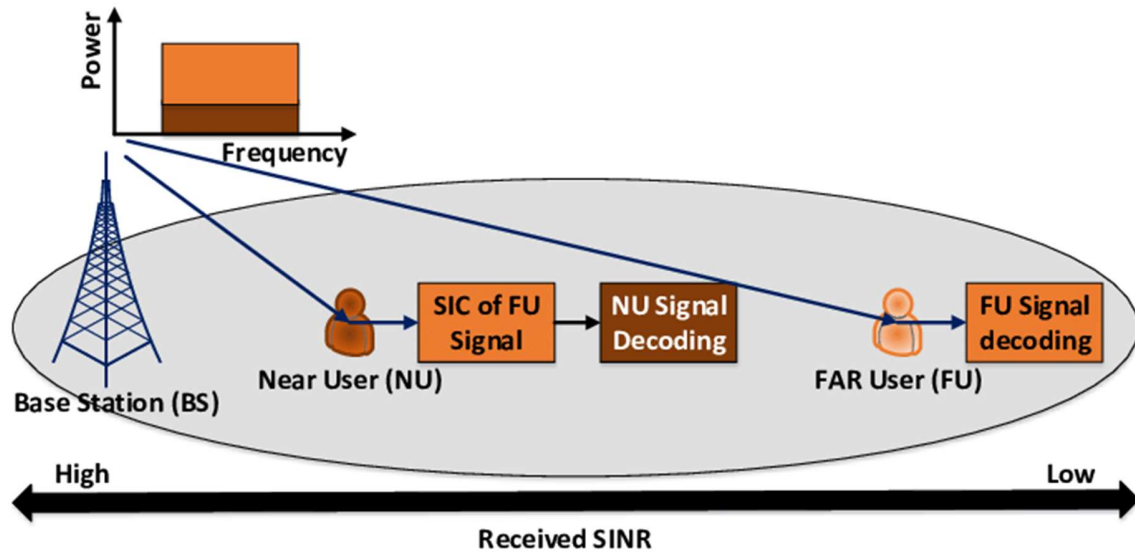
<sup>12</sup> Lei, Lei. "From Orthogonal to Non-orthogonal Multiple Access: Energy-and Spectrum-Efficient Resource Allocation." Diss. Linköping University Electronic Press, 2016.

συστήματα πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης κώδικα (CDMA - code division multiple access), η μέθοδος NOMA μοιράζεται το σύνολο των διαθέσιμων πόρων (χρόνος / συχνότητα). Ωστόσο η τεχνική NOMA χρησιμοποιεί ειδικές αλληλουχίες εξάπλωσης που είναι είτε αραιές ακολουθίες είτε μη-ορθογώνιες αλληλουχίες αλληλοσυσχέτισης χαμηλού συντελεστή συσχέτισης. Διαιρείται επίσης σε μερικές διαφορετικές κατηγορίες, όπως (α) low-density spreading CDMA (LDS-CDMA) (β) low-density spreading-based OFDM (LDS-OFDM) και (γ) sparse code multiple access. Η χρήση ακολουθιών διασποράς χαμηλής πυκνότητας βοηθά το LDS-CDMA να περιορίσει τον αντίκτυπο της παρεμβολής σε κάθε τσιπ των βασικών συστημάτων CDMA. Το LDS-OFDM μπορεί να θεωρηθεί ως μια συγχώνευση των LDS-CDMA και OFDM, όπου τα σύμβολα πληροφοριών διαχέονται πρώτα σε ακολουθίες διασποράς χαμηλής πυκνότητας και τα προκύπτοντα τσιπ μεταδίδονται έπειτα σε ένα σετ υποφερόντων. Η SCMA είναι μια πρόσφατη τεχνική NOMA τομέα κώδικα βασισμένη σε LDS-CDMA. Σε αντίθεση με την τεχνική LDS-CDMA, τα δυαδικά ψηφία πληροφοριών μπορούν να χαρτογραφηθούν απευθείας σε διαφορετικές αραιές λέξεις κώδικα επειδή τόσο η χαρτογράφηση δυαδικών ψηφίων όσο και η εξάπλωση δυαδικών ψηφίων συνδυάζονται [23].



Εικόνα 4.10: Ζεύξη ανόδου (uplink NOMA)<sup>13</sup>

<sup>13</sup> Kim, Beomju, and al, "Uplink NOMA with multi-antenna." 2015 IEEE 81st vehicular technology conference (VTC Spring). IEEE, 2015.



Εικόνα 4.11: Ζεύξη καθόδου (downlink NOMA)<sup>14</sup>

---

<sup>14</sup> Usman, Muhammad Rehan, et al. "On the performance of perfect and imperfect SIC in downlink non orthogonal multiple access (NOMA)." *2016 international conference on smart green technology in electrical and information systems (ICSGTEIS)*, 2016.

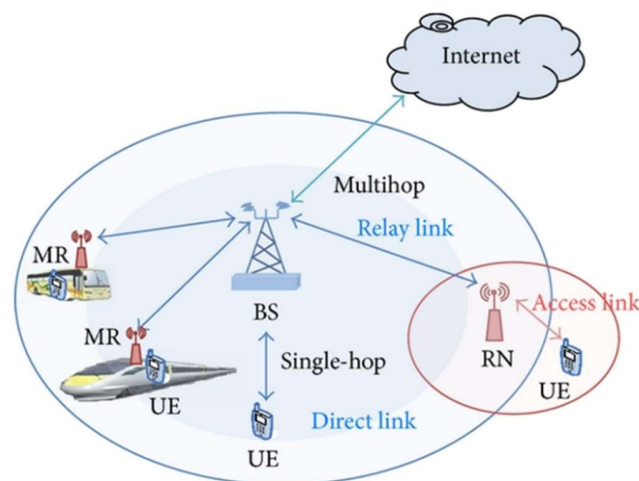
---



## 5 ΚΟΜΒΟΙ ΑΝΑΜΕΤΑΔΟΣΗΣ – RELAY NODES

### 5.1 Εισαγωγή

Η Πέμπτη γενιά δικτύων αναμένεται να αντιμετωπίσει τις έντονες απαιτήσεις των κινητών χρηστών εξαιτίας της εκθετικής αύξησης των συσκευών και εφαρμογών που απαιτούν μεγάλο εύρος ζώνης. Για την κάλυψη αυτών των απαιτήσεων εύρους ζώνης, τα 5G συστήματα λειτουργούν στην περιοχή συχνοτήτων 3-300 GHz. Η ασύρματη μετάδοση σε αυτές τις υψηλές συχνότητες είναι επιρρεπής σε απώλειες διαδρομής και απορρόφηση σημάτων από το νερό και το οξυγόνο, το οποίο μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία σκιάσεων στην περιοχή του δικτύου. Το φαινόμενο των σκιάσεων μπορεί να εμφανίζεται οποιαδήποτε στιγμή και σε οποιοδήποτε μέρος, εξαιτίας εμποδίων στο χώρο αλλά και της κίνησης των κινητών τερματικών. Το μεγαλύτερο μέρος των σκιάσεων μπορεί να εξαλειφθεί τοποθετώντας περισσότερες κεραιές ή χρησιμοποιώντας κόμβους αναμετάδοσης (relay nodes) που πλεονεκτούν σε σύγκριση με τους σταθμούς βάσης σε θέματα κόστους και ενεργειακών αναγκών.



**Εικόνα 5.1: Ενσωμάτωση RN σε τοπολογία δικτύου.<sup>15</sup>**

---

<sup>15</sup> Aldhaibani, Jaafar A., Abid Yahya, and R. Badlishah Ahmad. "Coverage extension and balancing the transmitted power of the moving relay node at LTE-A cellular network." The Scientific World Journal, 2014.

## **5.2 Βασικοί τύποι κόμβων αναμετάδοσης**

Καθώς διάφοροι τύποι κινητών τερματικών και έξυπνες συσκευές πρόκειται να συνυπάρχουν στο ίδιο δίκτυο, είναι πολύ σημαντικό το σύστημα να παρέχει βελτιωμένες συνδέσεις πρόσβασης για να υποστηρίξει την αυξημένη ζήτηση ραδιοπόρων. Καθώς η πυκνότητα των τερματικών αυξάνεται, διάφορες συσκευές μπορούν να λειτουργήσουν ως κόμβοι αναμετάδοσης για την προώθηση της κυκλοφορίας από τους τερματικούς κόμβους στο κεντρικό δίκτυο και αντίστροφα. Αυτά περιλαμβάνουν, αφενός, μικρές κυψέλες που εγκαθίστανται στο δίκτυο από χρήστες για να παρέχουν βελτιωμένη κάλυψη εσωτερικών χώρων. Από την άλλη πλευρά, η χρήση των τερματικών ως Relay Nodes για όλα τα είδη κίνησης ενισχύει τις παραδοσιακές αναπτύξεις κινητής τηλεφωνίας με στοιχεία ad-hoc (όπου είναι απαραίτητο ή χρειάζεται). Με παρόμοια έννοια, οχήματα είτε ιδιωτικά είτε δημόσια, μπορούν να λειτουργήσουν ως κινούμενα RNs προκειμένου να αποφευχθούν οι σκιάσεις σε αστικές περιοχές. Τελευταίο αλλά εξίσου σημαντικό, οι σταθεροί κόμβοι αναμετάδοσης με αυξημένες δυνατότητες επεξεργασίας προορίζονται να παρέχουν βελτιωμένη συνδεσιμότητα σε ομάδες τερματικών που δεν μπορούν να επικοινωνήσουν απευθείας με το σταθμό βάσης χρησιμοποιώντας προηγμένες τεχνικές μετριασμού παρεμβολών.

Η ταξινόμηση των RNs μπορεί να γίνει με διάφορα κριτήρια διαφοροποίησης, που σχετίζονται με τη χρήση εύρους ζώνης, την πολυπλοκότητα και τη συνολική ανάπτυξη. Όσον αφορά το RF εύρος ζώνης, χωρίζονται σε:

- **Inband RNs**, που χρησιμοποιούν το διαθέσιμο εύρος ζώνης των BS, απλώς αναθέτοντας εκ νέου subcarriers στο χρήστη που θα εξυπηρετήσουν και
- **Outband RNs**, που εκχωρούν επιπλέον subcarriers για την εξυπηρέτηση των τερματικών που είχαν απορριφθεί αρχικά [41].

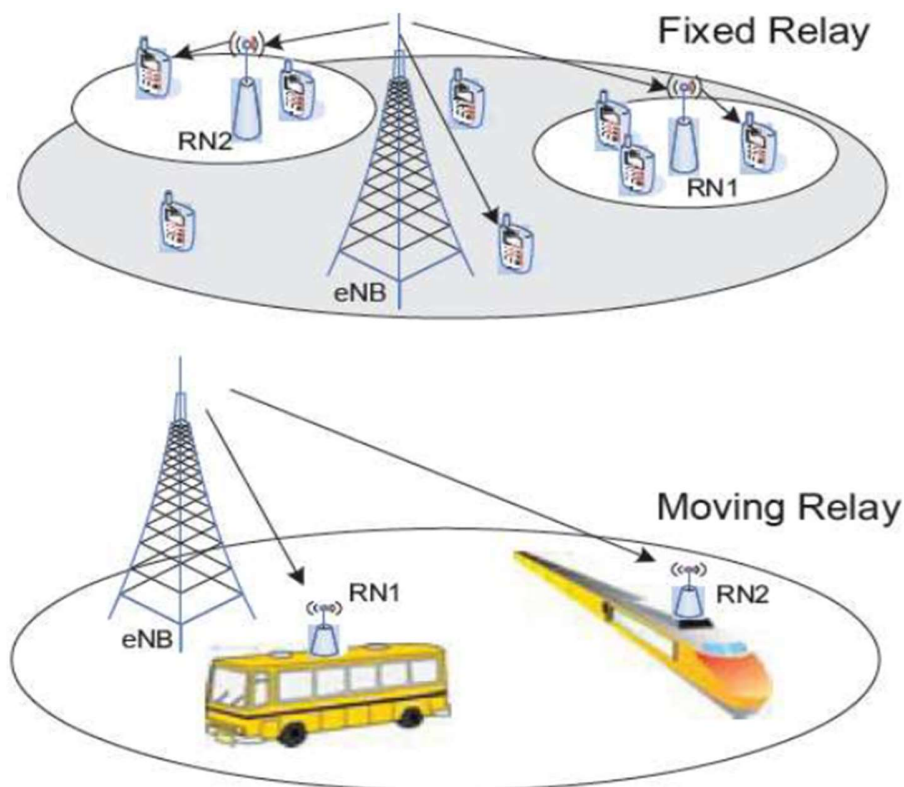
### **5.2.1 Σταθεροί κόμβοι αναμετάδοσης**

Σε συμβατικά κυψελωτά τα δίκτυα, η κάλυψη και η χωρητικότητα στα σύνορα κυψέλης παραμένουν σχετικά περιορισμένες λόγω χαμηλού SINR όπου οι χρήστες κινητής τηλεφωνίας ενδέχεται να υποφέρουν από μεγάλη εξασθένηση σήματος και παρεμβολή από τη γειτονική κυψέλη. Επιπλέον, μπορεί να υπάρχει υψηλός ανταγωνισμός για τους διαθέσιμους ραδιοφωνικούς πόρους λόγω του μεγάλου αριθμού χρηστών μέσα στο κελί. Μια υποσχόμενη λύση για να ξεπεραστούν τα παραπάνω προβλήματα είναι η ανάπτυξη σταθερών κόμβων αναμετάδοσης κοντά στην άκρη της κυψέλης, κάτι που θα βοηθήσει στην επέκταση της περιοχής κάλυψης των κυψελών. Τα σταθερά RNs είναι σχετικά μικροί κόμβοι με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, που συνδέουν το κεντρικό δίκτυο με ασύρματη σύνδεση μέσω του σταθμού βάσης. Αυτό το χαρακτηριστικό προσφέρει ευελιξία ανάπτυξης, ενίσχυση της τοπολογίας του δικτύου και εξαλείφει το υψηλό κόστος εξοπλισμού [40].

### **5.2.2 Mobile Relay Nodes**

Η 3GPP εξέτασε την ανάπτυξη κινητών κόμβων αναμετάδοσης (Mobile Relay Nodes - MRNs), με ίδιες λειτουργίες με τους Σταθερούς κόμβους αναμετάδοσης, αλλά η κύρια διαφορά είναι ότι παρέχει συνδεσιμότητα στους χρήστες εντός του οχήματος (τρένα ή λεωφορεία) κατά τη διάρκεια του ταξιδιού τους. Πρόσφατα, τα περισσότερα σχήματα και αλγόριθμοι μετάδοσης και λήψης έχουν προταθεί για εφαρμογή σε MRN. Ένα ενδιαφέρον σχήμα είναι το Multi-Input and Multi-Output (MIMO), το οποίο παρέχει μεγάλο κέρδος φασματικής απόδοσης χωρίς αύξηση της ισχύος και του εύρους ζώνης. Επιπλέον, η χρήση τεχνικών MIMO θα βοηθήσει στον μετριασμό ορισμένων από τα κύρια προβλήματα σε αυτά τα περιβάλλοντα, όπως η απώλεια διαδρομής και η υψηλή διείσδυση οχημάτων. Η διασφάλιση της Ποιότητας Υπηρεσίας (QoS) των χρηστών επί των οχημάτων σε αυτά τα σενάρια είναι μια πρόκληση. Ωστόσο, σε αυτά τα περιβάλλοντα η χωρητικότητα είναι ανομοιόμορφα κατανομημένη και υπάρχει χαμηλή πυκνότητα χρηστών, επομένως, υπάρχουν πόροι στο σταθμό βάσης που δεν αξιοποιούνται πλήρως. Υπό αυτή την έννοια, μια άλλη τεχνική που

χρησιμοποιείται για τη βελτίωση της χωρητικότητας είναι το σχήμα σχηματισμού δέσμης, στο οποίο ο κύριος λοβός της κεραίας δείχνει σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση, σε αυτήν την περίπτωση, προς τα MRN [35].



Εικόνα 5.2: Σταθερά και κινητά Relay Nodes<sup>16</sup>

### 5.2.3 D2D επικοινωνία

Το σενάριο της χρήσης D2D επικοινωνίας βασίζεται στην εκμετάλλευση άλλων τερματικών για την συμβολή τους στην ελάφρυνση του φόρτου του δικτύου, μετριάζοντας

---

<sup>16</sup>Bulakci, Omer. "Multi-hop moving relays for IMT-advanced and beyond." *arXiv preprint arXiv:1202.0207*, 2012



έτσι την εξασθένηση του ασύρματου σήματος, μειώνοντας την απώλεια διαδρομής και αξιοποιώντας τη χωρική ποικιλομορφία, καθώς και μείωση των παρεμβολών, που είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος βελτίωσης της χωρητικότητας, της κάλυψης κυψέλης, της βελτίωσης της απόδοσης, της ποιότητας υπηρεσίας (QoS) καθώς και της αξιοπιστίας των μεταδόσεων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι επικοινωνίες D2D επωφελούνται από μικρότερη απόσταση ζεύξης, κάτι που είναι ωφέλιμο από την άποψη της αξιοπιστίας. Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την αξιοπιστία προέρχονται από:

- συγκρούσεις με άλλους χρήστες λόγω ασυντόνιστης πρόσβασης στο κανάλι.
- συνύπαρξη με άλλα συστήματα στα ίδια κανάλια συχνοτήτων.
- παρεμβολές από χρήστες σε παρακείμενα κανάλια.
- μετατοπίσεις Doppler από κινούμενες συσκευές, δυσκολία συγχρονισμού, ξεπερασμένο CSI.
- συμφόρηση κυψελών καθώς και
- χρονικές μεταβαλλόμενες επιδράσεις καναλιού ή καθυστερημένη λήψη πακέτων.

Για να βελτιωθεί η αξιοπιστία της επικοινωνίας, έχουν μελετηθεί διάφορες τεχνικές, όπως τεχνικές διαμόρφωσης, πλεονασμός (διαφορετικοί φορείς και σημεία μετάδοσης), ποικιλομορφία (σε συχνότητα και χώρο), πολλαπλή συνδεσιμότητα, προσωρινή αποθήκευση, μηχανισμοί αναμετάδοσης (για σφάλμα διόρθωση) και αντιγραφή πακέτων [32].



## **6 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΥΨΕΛΩΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΕΜΠΤΗΣ ΓΕΝΙΑΣ (5G) ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΕΡΑΙΩΝ MIMO ΚΑΙ ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΜΕ ΚΟΜΒΟΥΣ ΑΝΑΜΕΤΑΔΟΣΗΣ (RELAY NODES)**

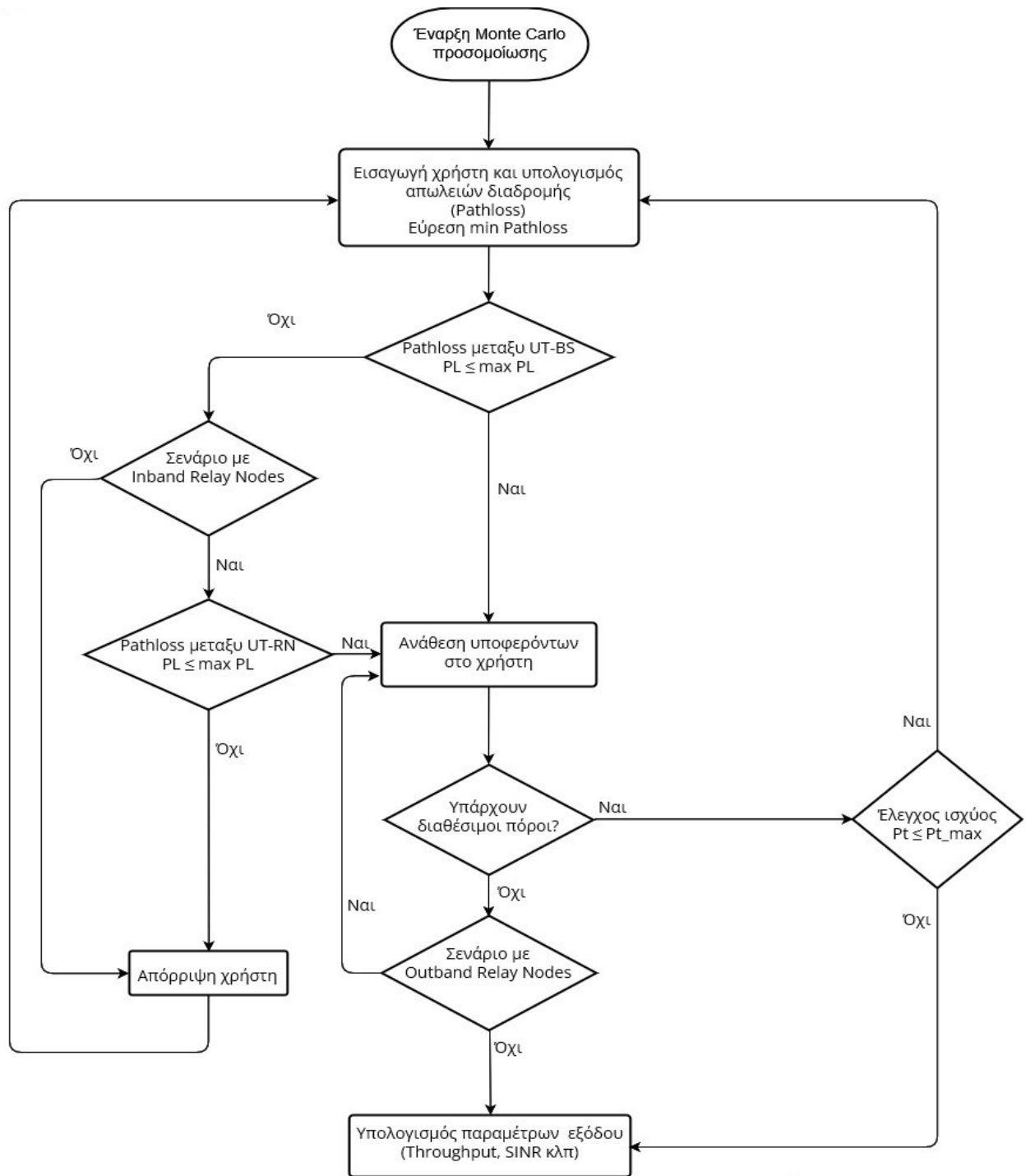
### **6.1 Εισαγωγή**

Η προσομοίωση που μελετάμε στοχεύει να συνδυάσει τις τεχνικές OFDMA και MIMO και μαζί με τις διαδικασίες ενεργοποίησης των κόμβων αναμετάδοσης, να κάνει ανάλυση της βελτίωσης της αποδοτικότητας του 5G συστήματος σε ό,τι αφορά την χωρητικότητα, την κάλυψη και την μείωση παρεμβολών. Η παρούσα εργασία χωρίζεται σε δύο μέρη. Το πρώτο κομμάτι αφορά τη δημιουργία ενός στατικού στο χρόνο τηλεπικοινωνιακού κυψελωτού συστήματος 5G, το οποίο εύκολα μπορεί να επεκταθεί σε χρονικά μεταβλητό. Το δεύτερο αφορά την εισαγωγή κόμβων αναμετάδοσης (RN - **Relay Nodes**) στο σύστημα. Βάση της προσομοίωσης είναι το πρότυπο ETSI TR 138 901 (v16.1.0) που έχει αναπτυχθεί από την 3GPP και είναι το πλέον ενεργό και αναγνωρίσιμο για την μοντελοποίηση συστημάτων 5G.

Σε πρώτη φάση μελετάται η σχεδίαση της τοπολογίας του δικτύου, η οποία αποτελείται από ομόκεντρες περιφέρειες εξαγωνικών κυψελών, που ονομάζονται tiers, ενώ κάθε κυψέλη χωρίζεται σε τρεις τομείς των 120°. Στο κέντρο κάθε κυψέλης τοποθετείται ο σταθμός βάσης (**BS - Base Station**) που ανήκει σε αυτήν, ενώ στις μέσες άκρες του κάθε τομέα τοποθετούνται οι κόμβοι αναμετάδοσης (RN - **Relay Nodes**). Στη συνέχεια προχωρούμε στην εισαγωγή χρηστών στο σύστημα, δίνοντάς τους τυχαία θέση στο χώρο, οι οποίοι όμως πρέπει να πληρούν συγκεκριμένα κριτήρια που αφορούν τη γεωγραφική θέση, τις απώλειες διαδρομής και την ύπαρξη διαθέσιμων πόρων στο σύστημα. Σε περίπτωση που κάποιος χρήστης δεν ικανοποιεί κάποια από αυτά, απορρίπτεται αυτόματα. Με τη χρήση της τεχνικής OFDMA, γίνεται η ανάθεση των υποφερόντων (sub-carriers) στους χρήστες αφού πρώτα υπολογιστούν, κάνοντας χρήση του προτύπου της 3GPP, τα μιγαδικά κέρδη διαύλου που ενσωματώνονται σε κατάλληλο πίνακα (MIMO H-matrix). Στο επόμενο βήμα γίνεται έλεγχος της εκπεμπόμενης

ισχύος του κάθε χρήστη, ώστε να διασφαλίζεται η ποιότητα υπηρεσιών (Quality of Service – QoS). Το πόσοι χρήστες θα εισαχθούν τελικά στο σύστημα καθορίζεται από την ύπαρξη διαθέσιμων προς ανάθεση υποφερόντων αλλά και από την μέγιστη ισχύ εκπομπής των σταθμών βάσης.

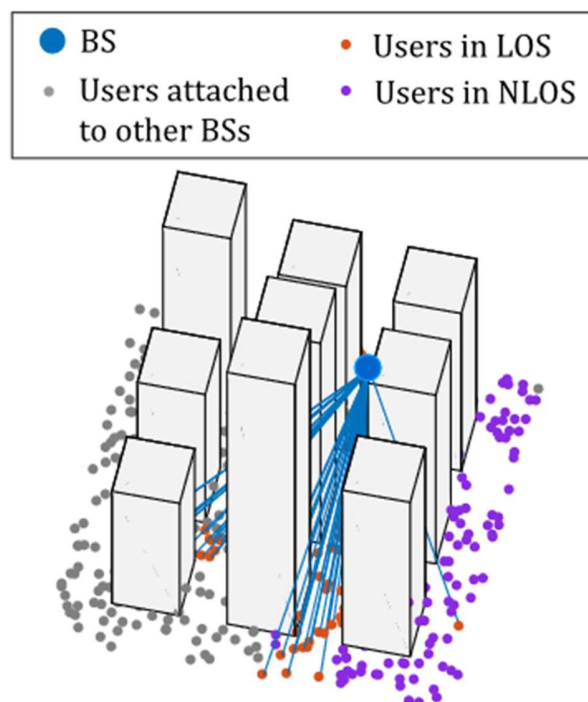
Στο τέλος κάνοντας χρήση των ψηφιακών διαμορφώσεων QPSK, προχωρούμε στον υπολογισμό του συνολικού throughput (διέλευση) που επιτυγχάνεται καθώς και τη συνολική πολυπλοκότητα του συστήματος. Με τη βοήθεια της απλής μεθόδου στατιστικής επεξεργασίας Monte Carlo (MC) εξασφαλίζουμε την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Η υλοποίηση του παρόντος προσομοιωτή πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον MATLAB (έκδοση R2021b). Στην επόμενη εικόνα φαίνεται ένα απλοποιημένο διάγραμμα ροής μίας επανάληψης του αλγορίθμου.



Εικόνα 6.1: Διάγραμμα ροής του συνολικού αλγορίθμου της προσομοίωσης

## 6.2 Ανάλυση βασικών εννοιών συστήματος

- **Αριθμός tier (επίπεδα κυψελών).** Είναι οι ομοιόμορφα τοποθετημένες κυκλικές περιφέρειες κυψελών (tiers) γύρω από την κεντρική κυψέλη. Ο αριθμός των tiers συνδέεται άμεσα με την χωρητικότητα του συστήματος σε χρήστες.
- **Αριθμός κεραιών εκπομπής και λήψης MIMO ( $M_t, M_r$ ).** Οι παράμετροι  $M_t$  και  $M_r$  καθορίζουν το σύνολο των στοιχείων του κεραιοσυστήματος εκπομπής και λήψης MIMO. Αύξηση ή μείωση του αριθμού έχει ανάλογη επίπτωση στον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων του συστήματος. Οι κεραιές εκπομπής συμβολίζονται με  $M_t$  και λήψης με  $M_r$ , δηλαδή σύστημα  $\{M_t \times M_r\}$ .
- **Σενάρια LOS και NLOS.** Η ύπαρξη οπτικής επαφής του χρήστη με το σταθμό βάσης καθορίζει το αν αναφερόμαστε σε LOS (Line Of Sight) ή NLOS (Non Line Of Sight) επικοινωνία.



Εικόνα 6.2: Παράδειγμα LOS – NLOS επικοινωνίας

- **Inband Relay Nodes.** Κόμβοι αναμετάδοσης που χρησιμοποιούν το εύρος ζώνης του σταθμού βάσης στον οποίο ανήκουν.
- **Outband Relay Nodes.** Κόμβοι αναμετάδοσης με ανεξάρτητο εύρος ζώνης.
- **Αριθμός υποφερόντων (Subcarriers).** Σε κάθε σταθμό βάσης ή Outband Relay Node ανατίθεται συγκεκριμένος αριθμός υποφερόντων προς διάθεση στους χρήστες.
- **PRBs ανά χρήστη.** Βασικό δομικό στοιχείο της 5G τοπολογίας είναι το PRB (Physical Resource Block). Ένα PRB αποτελείται από 12 subcarriers. Κάθε χρήστης που εισάγεται στο σύστημα αιτείται συγκεκριμένο αριθμό PRBs, από τον οποίο εξαρτάται η ρυθμοαπόδοση (throughput) όσο και η μέγιστη χωρητικότητα του συστήματος σε χρήστες.
- **Μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς εκπομπής σταθμού βάσης.** Είναι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να εκπέμψει ο σταθμός βάσης κάθε κυψέλης λόγω κατασκευαστικών ή άλλων περιορισμών.

### **6.3 Σενάρια επιλογής και ενεργοποίησης κόμβων αναμετάδοσης**

Βασικό ζητούμενο της προσομοίωσης μας είναι η επεκτασιμότητα και η αποδοτικότητα του συστήματος όταν σε αυτό συμπεριληφθούν κόμβοι αναμετάδοσης. Η προσομοίωση περιλαμβάνει 5 σενάρια τα οποία αναλύουμε παρακάτω:

- 1) **No RNs** - Χρήση μόνο σταθμών βάσης στο κέντρο κάθε κυψέλης, χωρίς ενεργοποίηση κόμβων αναμετάδοσης.
- 2) **1 Inband RN** - Χρήση σταθμών βάσης στο κέντρο κάθε κυψέλης με παράλληλη ενεργοποίηση ενός κόμβου αναμετάδοσης σε μια προκαθορισμένη γωνία της κυψέλης που χρησιμοποιεί το εύρος ζώνης του αντίστοιχου σταθμού βάσης.

- 3) **3 Sector Mid-Edge Inband RNs** - Χρήση σταθμών βάσης στο κέντρο κάθε κυψέλης και 3 κόμβους αναμετάδοσης σε προκαθορισμένες γωνίες της κυψέλης (μέσες άκρες τομέων) που χρησιμοποιούν το εύρος ζώνης των σταθμών βάσης.
- 4) **3 Sector Mid-Edge Inband RNs + 1 Outband RN** - Χρήση σταθμών βάσης στο κέντρο κάθε κυψέλης, 3 κόμβους αναμετάδοσης σε προκαθορισμένες γωνίες της κυψέλης (μέσες άκρες τομέων) που χρησιμοποιούν το εύρος ζώνης των σταθμών βάσης και 1 κόμβο αναμετάδοσης σε μια προκαθορισμένη γωνία της κυψέλης με ανεξάρτητο εύρος ζώνης
- 5) **3 Sector Mid-Edge Inband RNs + 3 Outband RN** - Χρήση σταθμών βάσης στο κέντρο κάθε κυψέλης, 3 κόμβους αναμετάδοσης σε προκαθορισμένες γωνίες της κυψέλης που χρησιμοποιούν το εύρος ζώνης των σταθμών βάσης και 3 κόμβους αναμετάδοσης σε μια προκαθορισμένη γωνία της κυψέλης με ανεξάρτητο εύρος ζώνης.

Παρακάτω, παρουσιάζονται τα βασικά βήματα που ακολουθούνται στον αλγόριθμο και αναλύεται η διαδικασία επιλογής των κόμβων αναμετάδοσης:

**Βήμα 1:** Ορίζονται τα διαθέσιμα υποφέροντα κάθε σταθμού βάσης και κάθε κόμβου αναμετάδοσης. Η επιλογή του υποψήφιου χρήστη γίνεται σύμφωνα με τις μικρότερες απώλειες διαδρομής. Στην περίπτωση που οι μικρότερες απώλειες ξεπερνούν το μέγιστο όριο που έχει τεθεί (Maximum Pathloss), ανάλογα το επιλεγμένο σενάριο, ο χρήστης μπορεί να εξυπηρετηθεί από ένα Inband RN. Σε αυτήν την περίπτωση υπολογίζονται αντιστοίχως οι απώλειες διαδρομής πάλι, με το κάθε RN να θεωρείται κινητό τερματικό στη ζεύξη BS-RN και ο χρήστης να θεωρείται κινητό τερματικό στη ζεύξη RN-UT.

**Βήμα 2:** Η ανάθεση των πόρων στο χρήστη γίνεται χρησιμοποιώντας την τεχνική ανάθεσης OFDMA.

**Βήμα 3:** Γίνεται ανάθεση πόρων από την εξέταση των διαθέσιμων υποφερόντων, βάση της μιγαδικής απόκρισης του καναλιού (υπολογισμός πίνακα  $H - H$  matrix). Τα διαθέσιμα subcarriers υπολογίζονται με σειρά προτεραιότητας από τον υποψήφιο BS. Σε περίπτωση που



δεν υπάρχουν διαθέσιμα υποφέροντα προς διάθεση, ανάλογα το επιλεγμένο σενάριο, ο χρήστης απορρίπτεται και εκτελείται η διαδικασία ενεργοποίησης των Outband RNs, με σκοπό την εξυπηρέτηση του. Σε αυτήν την περίπτωση υπολογίζονται αντιστοίχως οι απώλειες διαδρομής πάλι.

**Βήμα 4:** Γίνεται συνεχής έλεγχος ισχύος με τον υπολογισμό του κέρδους καναλιού και την απαιτούμενη ισχύ εκπομπής (Transmission Power – Pt) για την επίτευξη καλύτερης ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service – QoS). Εάν η ισχύς εκπομπής υπερβεί το μέγιστο όριο που έχει τεθεί, τότε αυτόματα ο χρήστης απορρίπτεται και οι πόροι που είχε δεσμεύσει, απελευθερώνονται.

**Βήμα 5:** Τέλος γίνεται υπολογισμός του συνολικού throughput (διέλευση) που επιτυγχάνεται και το SINR χρήστη.

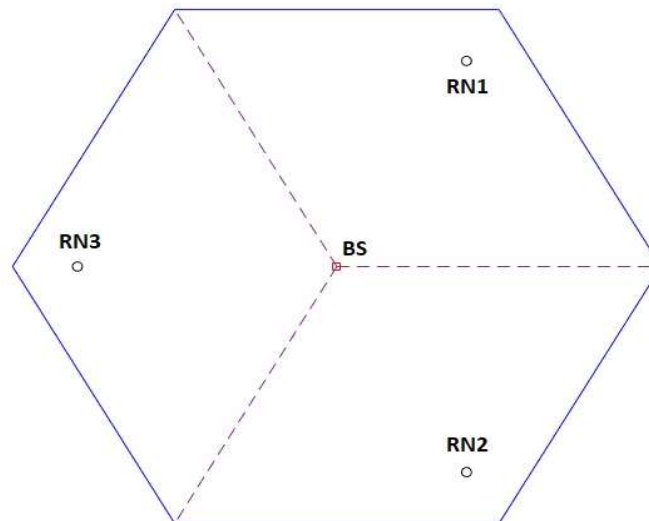
## **6.4 Κατασκευή τοπολογίας κυψελωτού συστήματος**

Αν και ο κύκλος θα αναπαριστούσε καλύτερα την περιοχή κάλυψης από μια ομοιοκατευθυντική κεραία, χάριν απλότητας χρησιμοποιούμε κυψέλες σε μορφή εξάγωνου, ώστε να μην υπάρχουν επικαλύψεις ή κενά μεταξύ των περιοχών. Βασική παράμετρος στη σχεδίαση της κυψέλης είναι η ακτίνα R, η οποία εξαρτάται από το είδος της περιοχής κάλυψης (αστική, αγροτική, εσωτερικός η εξωτερικός χώρος). Στην προσομοίωση μας θα ασχοληθούμε με αστικό περιβάλλον και συγκεκριμένα το Urban Micro (Umi – street canyon) όπως το ορίζει το πρότυπο ETSI TR 138 901 (v16.1.0) της 3GPP στον παρακάτω πίνακα.

Parameters		UMi - street canyon	UMa
Cell layout		Hexagonal grid, 19 micro sites, 3 sectors per site (ISD = 200m)	Hexagonal grid, 19 macro sites, 3 sectors per site (ISD = 500m)
BS antenna height $h_{BS}$		10m	25m
UT location	Outdoor/indoor	Outdoor and indoor	Outdoor and indoor
	LOS/NLOS	LOS and NLOS	LOS and NLOS
	Height $h_{UT}$	Same as 3D-UMi in TR36.873	Same as 3D-UMa in TR36.873
Indoor UT ratio		80%	80%
UT mobility (horizontal plane only)		3km/h	3km/h
Min. BS - UT distance (2D)		10m	35m
UT distribution (horizontal)		Uniform	Uniform

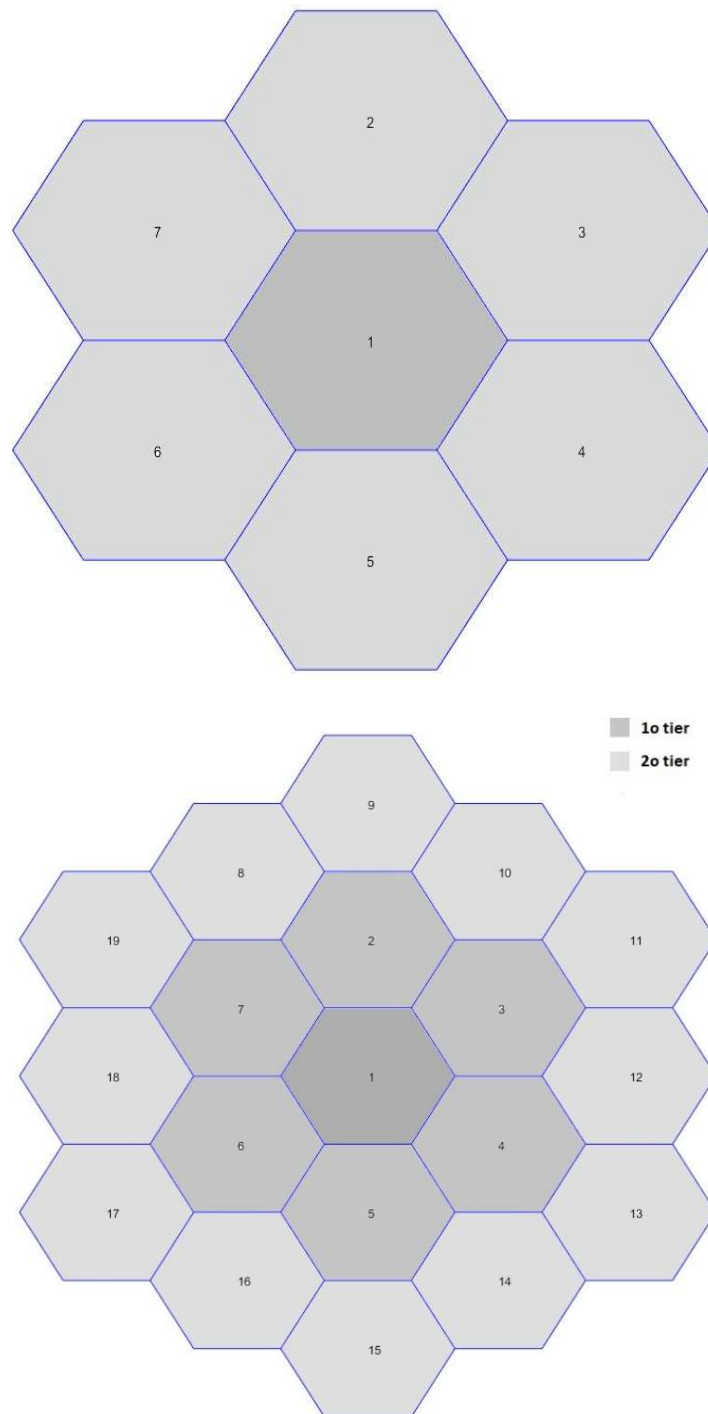
**Πίνακας 6.1: Παράμετροι σχεδίασης κυψελών σύμφωνα με το πρότυπο ETSI TR 138 901<sup>17</sup>**

Όπως αναφέραμε σε προηγούμενο κεφάλαιο, βασικό κομμάτι της σχεδίασης κυψέλης είναι η δημιουργία τομέων (sectors) εντός αυτής. Κάθε κυψέλη χωρίζεται σε τρεις τομείς των 120°. Ο BS κάθε κυψέλης τοποθετείται στο κέντρο ενώ τα RNs εσωτερικά των γωνιών και σε απόσταση  $0,8 \cdot R$  από το κέντρο. Στις επόμενες εικόνες παρουσιάζονται μια κυψέλη με τομείς καθώς και κυψελωτά συστήματα του ενός και δύο tiers.



**Εικόνα 6.3: Κυψέλη με τρεις τομείς των 120 μοιρών**

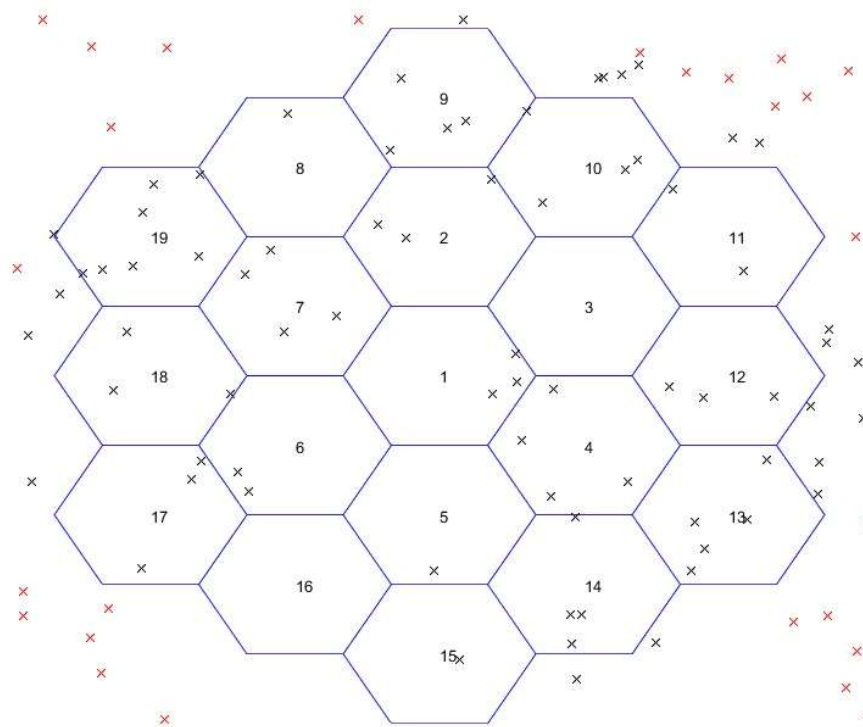
<sup>17</sup> ETSI, TR. "138 901 v16. 1.0,"5G." Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100.



**Εικόνα 6.4:** Συστήματα κοψελών ενός και δύο tiers

## 6.5 Εισαγωγή χρηστών και υπολογισμός απωλειών διαδρομής

Για να υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή στην τοπολογία, κάθε χρήστης εισάγεται σειριακά στο σύστημα σε τυχαίο γεωγραφικά σημείο. Γίνεται αποδεκτός μόνο αν βρίσκεται εντός του κύκλου με ακτίνα  $r < R_c$ , όπου  $R_c$  η ακτίνα ενός υποθετικού κύκλου με κέντρο ίδιο με το κέντρο του κυψελωτού συστήματος και εμβαδό ίσο με το άθροισμα των εμβαδών των κυψελών του. Στο παράδειγμα της εικόνας(αριθμός) οι χρήστες που σημειώνονται με κόκκινο χρώμα είναι οι γεωγραφικά μη αποδεκτοί.



**Εικόνα 6.5:** Παράδειγμα τυχαίας τοποθέτησης χρηστών σε σύστημα 2 tiers.

Για την εξυπηρέτηση του χρήστη, απαιτείται να ευρεθούν πρώτα οι ελάχιστες απώλειες διαδρομής μεταξύ του χρήστη, όλων των πιθανών BS και RN που δύνανται να τον

εξυπηρετήσουν. Ο σταθμός βάσης ή ο κόμβος αναμετάδοσης που είναι υποψήφιος να εξυπηρετήσει τον χρήστη, χρειάζεται την ελάχιστη δυνατή ισχύ για την εκπομπή/λήψη κατά την επικοινωνία μεταξύ τους. Για τον υπολογισμό των απωλειών διαδρομής συμβουλευόμαστε τον παρακάτω πίνακα που περιλαμβάνεται στο πρότυπο ETSI TR 138 901 (v16.1.0) της 3GPP.

UMI - Street Canyon	LOS	$PL_{\text{UMi-LOS}} = \begin{cases} PL_1 & 10\text{m} \leq d_{2D} \leq d'_{\text{BP}} \\ PL_2 & d'_{\text{BP}} \leq d_{2D} \leq 5\text{km} \end{cases}, \text{ see note 1}$ $PL_1 = 32.4 + 21 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c)$ $PL_2 = 32.4 + 40 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c) - 9.5 \log_{10}((d'_{\text{BP}})^2 + (h_{\text{BS}} - h_{\text{UT}})^2)$	$\sigma_{\text{SF}} = 4$	$1.5\text{m} \leq h_{\text{UT}} \leq 22.5\text{m}$ $h_{\text{BS}} = 10\text{m}$
	NLOS	$PL_{\text{UMi-NLOS}} = \max(PL_{\text{UMi-LOS}}, PL'_{\text{UMi-NLOS}})$ <p style="text-align: center;">for <math>10\text{m} \leq d_{2D} \leq 5\text{km}</math></p> $PL'_{\text{UMi-NLOS}} = 35.3 \log_{10}(d_{3D}) + 22.4 + 21.3 \log_{10}(f_c) - 0.3(h_{\text{UT}} - 1.5)$	$\sigma_{\text{SF}} = 7.82$	$1.5\text{m} \leq h_{\text{UT}} \leq 22.5\text{m}$ $h_{\text{BS}} = 10\text{m}$ Explanations: see note 4

**Πίνακας 6.2: Μοντέλο υπολογισμού απωλειών διαδρομής του προτύπου TR 138 901<sup>18</sup>**

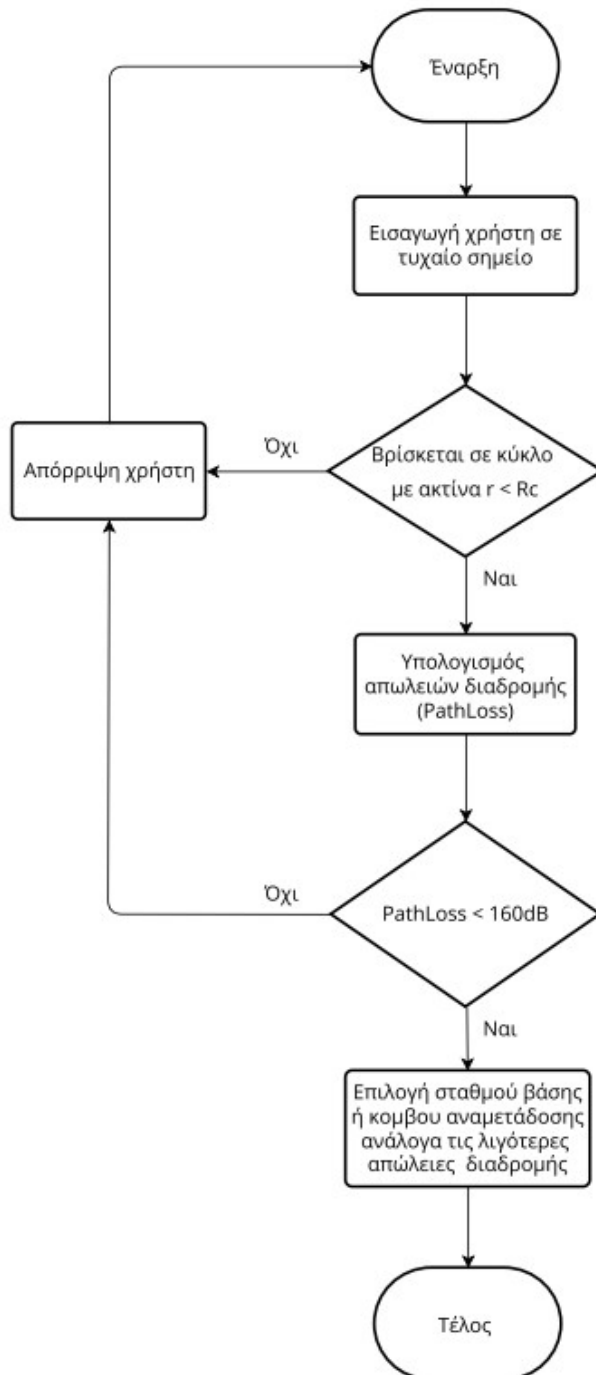
Στην τοπολογία του συστήματος μας επικρατούν LOS αλλά και NLOS συνθήκες. Βέβαια λόγω του σεναρίου που έχουμε επιλέξει και αφορά μικροαστικές περιοχές, είναι λογικό να θεωρήσουμε πως οι πιθανότητες για οπτική επαφή μεταξύ χρήστη και BS είναι μηδενικές. Όταν οι απώλειες διαδρομής εμφανίζονται να είναι άνω των 160dB, ο χρήστης απορρίπτεται αυτόματα από το σύστημα, καθώς σε αντίθετη περίπτωση δεν θα ήταν αρκετά δυνατή η ομαλή παροχή υπηρεσιών, επιβαρύνοντας σημαντικά το σύστημα.

- Στην περίπτωση που δεν γίνεται χρήση **RNs**, αν οι απώλειες διαδρομής μεταξύ **BS** και χρήστη υπερβούν τα **160dB**, τότε ο χρήστης απορρίπτεται.

<sup>18</sup> ETSI, TR. "138 901 v16. 1.0,"5G." Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100.

- Στην περίπτωση που γίνεται χρήση μόνο **Inband RNs**, αν οι απώλειες διαδρομής μεταξύ **BS** και χρήστη υπερβούν τα **160dB**, ο χρήστης δεν απορρίπτεται και γίνεται έλεγχος απωλειών διαδρομής ώστε να επιλεγεί ο κατάλληλος κόμβος αναμετάδοσης. Αν και πάλι έχουμε υπέρβαση του **PL<sub>max</sub>** τότε ο χρήστης τελικά απορρίπτεται.
- Στην περίπτωση που γίνεται χρήση **Inband RNs** αλλά και **Outband RNs** αν οι απώλειες διαδρομής μεταξύ **BS** και χρήστη υπερβούν τα **160dB**, ο χρήστης δεν απορρίπτεται και γίνεται έλεγχος απωλειών διαδρομής ώστε να επιλεγεί ο κατάλληλος κόμβος αναμετάδοσης. Ενώ στην περίπτωση που δεν υπάρχουν διαθέσιμοι πόροι στο σταθμό βάσης που έχει επιλέξει ο χρήστης, γίνεται προσπάθεια σύνδεσής του σε Outband RN πάλι όμως τηρώντας το όριο των **160dB**.

Στην επόμενη εικόνα φαίνεται ένα απλοποιημένο διάγραμμα ροής μίας επανάληψης του αλγορίθμου εισαγωγής χρήστη:



Εικόνα 6.6: Διάγραμμα ροής της εισαγωγής χρήστη.

## 6.6 Υπολογισμός συνολικών απωλειών

Με γνωστό τον σταθμό βάσης που θα εξυπηρετήσει το χρήστη, εξετάζουμε σε ποιόν τομέα της κυψέλης ανήκει ο χρήστης. Οι συνολικές απώλειες υπολογίζονται κάνοντας χρήση του τύπου:

$$TL = PL + A_{1,2,3} - G_{BS}(\text{ή } G_{RN}) - G_{UT}$$

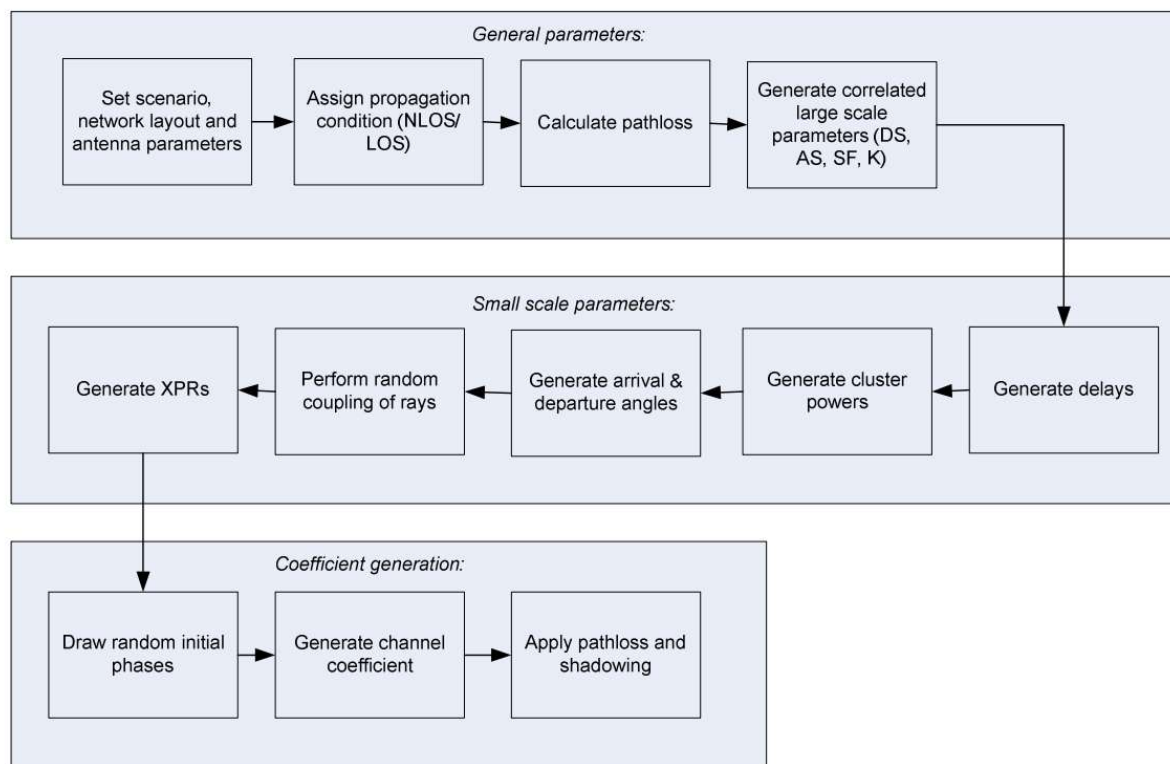
Όπου  $PL$  είναι οι απώλειες διαδρομής μεταξύ BS και χρήστη,  $A_{1,2,3}$  είναι ο παράγοντας σχετικής εξασθένισης BS - χρήστη και  $G_{BS} = 18$ ,  $G_{RN} = 9$  και  $G_{UT} = 18$  το κέρδος των κεραιών BS, RN και χρήστη αντίστοιχα.

Ακολούθως υπολογίζεται η εξασθένιση στην εκπομπή σήματος προς τον χρήστη από όλες τις κατευθυντικές κεραιές (τομείς) της τοπολογίας μας. Η γνώση αυτή είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό των ενδεχόμενων παρεμβολών, καθώς πρέπει να γνωρίζουμε για κάθε κατευθυντική κεραία εκπομπής (τομέα δηλαδή) αν το σήμα που εκπεμφθεί από αυτήν θα ληφθεί από τον χρήστη με επιπλέον απόσβεση 20 dB (σε περίπτωση που η κεραία δεν είναι στραμμένη προς τον χρήστη, οπότε εκπέμπει εξασθενημένη ακτινοβολία προς τον χρήστη μέσω πλάγιων ή οπίσθιων λοβών) ή χωρίς επιπλέον απόσβεση (στην περίπτωση που η κεραία είναι στραμμένη προς τον χρήστη, οπότε θα εκπέμπει προς αυτόν μέσω του κύριου λοβού της).

## 6.7 Πίνακας μιγαδικών αποκρίσεων MIMO

Η διαδικασία του υπολογισμού του πίνακα  $H$  γίνεται μέσω της εφαρμογής του **fast fading model** που περιγράφεται στο πρότυπο ETSI TR 138 901 (v16.1.0). Ο πίνακας  $H$ , ο οποίος έχει διαστάσεις  $M_r \times M_t$  και περιέχει τα κέρδη για κάθε διάυλο που δημιουργείται μεταξύ ενός χρήστη και κάθε μίας εκ των κεραιών εκπομπής του συστήματος. Ο πίνακας περιλαμβάνει τυχαίες μιγαδικές μεταβλητές, καθώς η απόκριση του ραδιοδιαύλου θεωρείται τυχαία σε περιβάλλον πολύοδης διάδοσης. Ο υπολογισμός είναι αρκετά πολύπλοκος και καθορίζεται από τα παρακάτω βασικά βήματα:



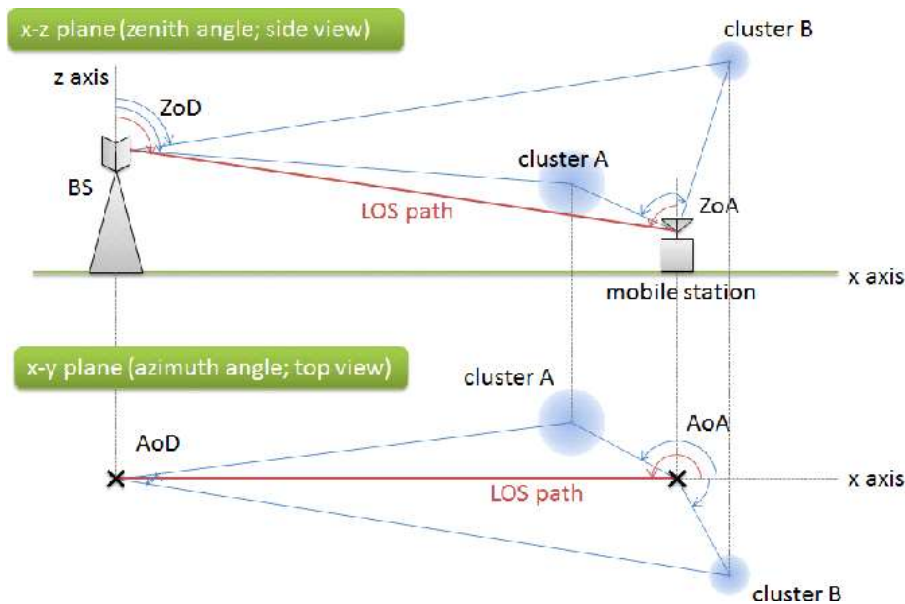


Εικόνα 6.7: Διαδικασία μοντελοποίησης συντελεστή καναλιών<sup>19</sup>

- 1) **Ορισμός παραμέτρων περιβάλλοντος, τοπολογίας δικτύου και συστοιχίας κεραιών:** Γίνεται επιλογή σεναρίου (Umi-Street Canyon), κατασκευάζεται η τοπολογία του συστήματος και καθορίζονται οι παράμετροι του κεραιοσυστήματος
- 2) **Υπολογισμός παραμέτρων μεγάλης κλίμακας,** όπως είναι οι γωνιακές εξαπλώσεις (ASA, ASD, ZSA, ZSD), η καθυστέρηση εξάπλωσης (Delay Spread), ο συντελεστής Ricean K και η σκίαση (Shadow Fading)
- 3) **Υπολογισμός καθυστερήσεων πλέγματος**
- 4) **Υπολογισμός ισχύων πλέγματος**

<sup>19</sup> ETSI, TR. "138 901 v16. 1.0,"5G." Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100.

- 5) Υπολογισμός γωνιών άφιξης και αναχώρησης για αζιμούθιο και ανύψωση, οι οποίες σχηματίζονται μεταξύ ενός σταθμού βάσης και ενός κινητού τερματικού και του ευθύγραμμου τμήματος που τους ενώνει.



Εικόνα 6.8: Γωνίες άφιξης και αναχώρησης

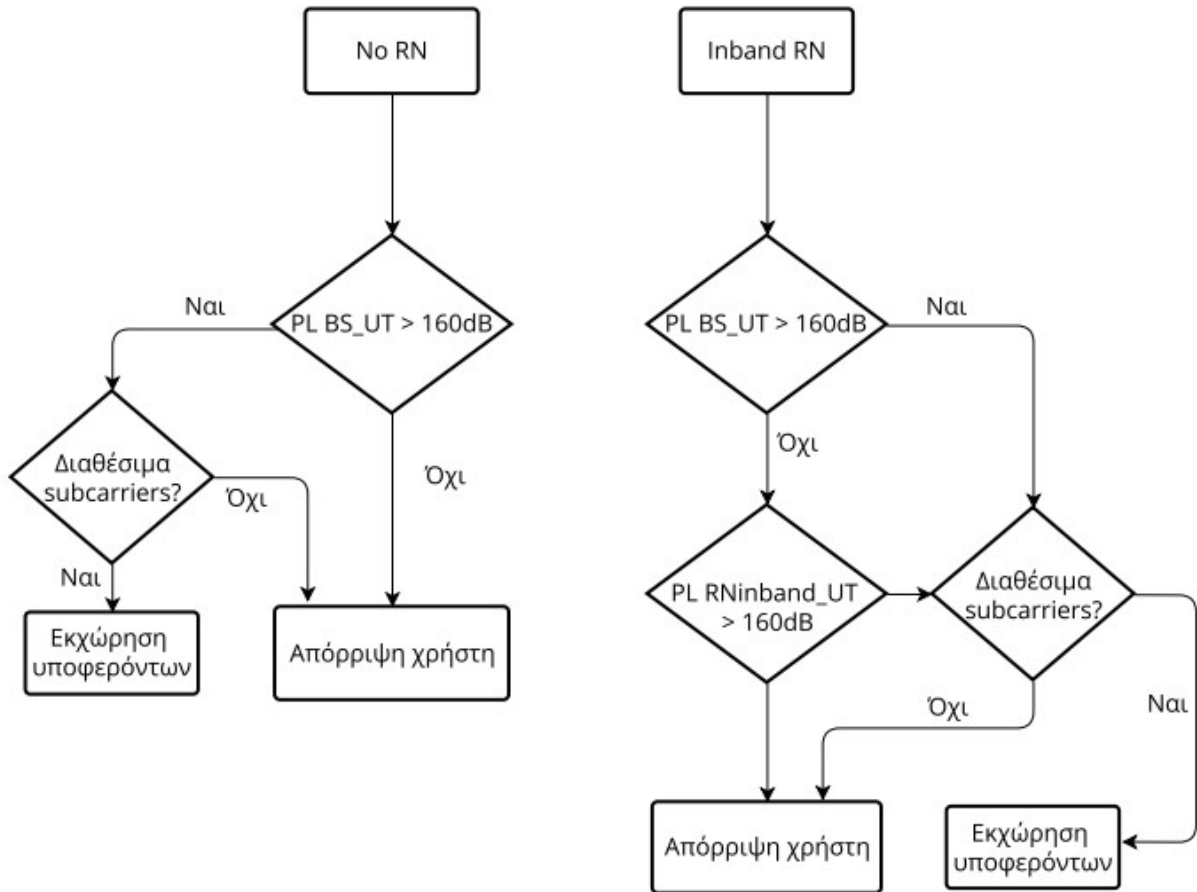
- 6) Σύζευξη ακτινών σε ένα πλέγμα για αζιμούθιο και ανύψωση: Τυχαία σύζευξη των γωνιών που υπολογίστηκαν στο προηγούμενο βήμα, εντός ενός πλέγματος ή εντός ενός υπο-πλέγματος στην περίπτωση δύο ισχυρότερων πλεγμάτων.
- 7) Δημιουργία αναλογιών ισχύος πολλαπλής πόλωσης (XPR), που ακολουθεί λογαριθμοκανονική κατανομή και αφορά κάθε ακτίνα και πλέγμα.
- 8) Υπολογισμός τυχαίων αρχικών φάσεων, για κάθε ακτίνα και πλέγμα και για τέσσερις συνδυασμούς πόλωσης.
- 9) Υπολογισμός συντελεστών καναλιού (στοιχεία πίνακα  $H$ )

## **6.8 Εκχώρηση καναλιών στο χρήστη**

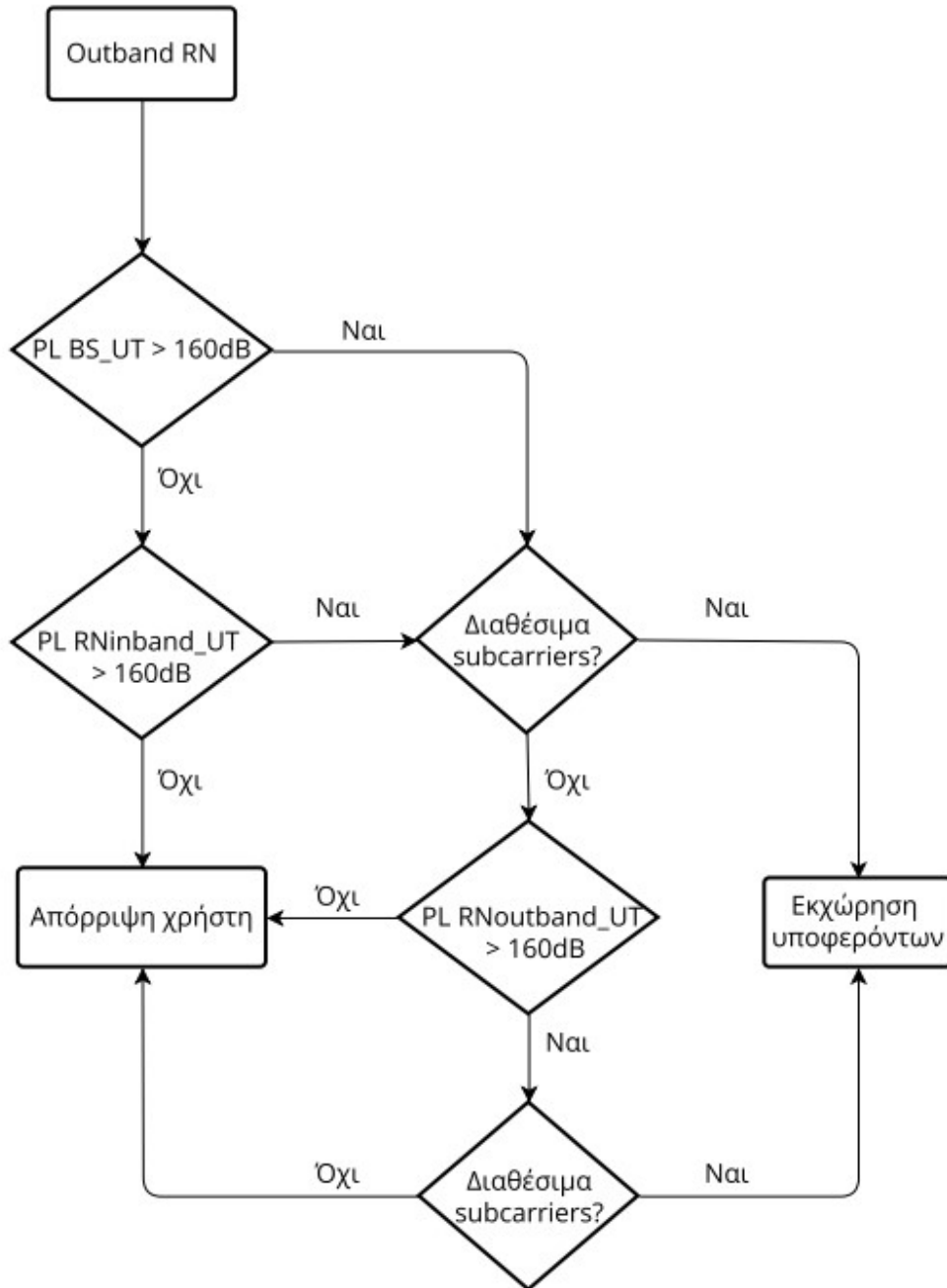
Αφού εισαχθεί ο χρήστης, βρεθεί ο κατάλληλος σταθμός ή κόμβος αναμετάδοσης για να τον εξυπηρετήσει και υπολογιστούν οι απώλειες διάδοσης, το επόμενο βήμα είναι να εκχωρηθούν (αν υπάρχουν) διαθέσιμα υποφέροντα. Ο αριθμός του συνόλου των καναλιών (ή υποφερόντων) καθορίζεται από την αρχή, καθώς αποτελεί βασική παράμετρο του σχεδιασμού του συστήματος. Ακολουθώντας την τεχνική πολλαπλής πρόσβασης OFDMA, το σήμα πληροφορίας διαχωρίζεται σε επιμέρους τμήματα, τα οποία μεταδίδονται μέσω αντίστοιχου πλήθους υποφερόντων. Τα subcarriers είναι ορθογώνια μεταξύ τους, ώστε να υπάρχει καλύτερη φασματική απόδοση. Κάθε υποφέρον του εκάστοτε σταθμού βάσης ανατίθεται μόνον σε ένα χρήστη και αδύνατον να εκχωρηθεί στη συνέχεια σε επόμενο χρήστη που εξυπηρετείται από τον ίδιο BS. Το υποφέρον ωστόσο ενός σταθμού βάσης μπορεί να αξιοποιηθεί και σε μία άλλη κυψέλη με διαφορετικά επίπεδα ισχύος ανά χρήστη (πολυπλεξία στο πεδίο της ισχύος).

Στην πραγματικότητα, τα subcarriers ανατίθενται όχι μεμονωμένα αλλά ανά ομάδες (ή PRBs). Το **PRB (Physical Resource Block)**, το οποίο είναι το μικρότερο στοιχείο κατανομής πόρων, αποτελείται από 12 υποφέροντα. Χάριν απλότητας, στην εργασία μας ο μέγιστος αριθμός PRBs ισούται με τον αριθμό subcarriers που διατίθενται για τους χρήστες με μέγιστη τιμή 132 και με subcarrier spacing 6MHz. Κάθε χρήστης αιτείται συγκεκριμένο αριθμό PRBs (PRBs per MS) και αυτό αποτελεί σημαντική παράμετρο για το σύστημα μας όπως θα διαπιστώσουμε στο επόμενο κεφάλαιο.

Εφόσον τα PRBs που έχει αιτηθεί ο χρήστης είναι διαθέσιμα, τα εκχωρούμε με τυχαίο τρόπο και τα θεωρούμε ως μη διαθέσιμα στον αντίστοιχο σταθμό βάσης. Στην περίπτωση μη διαθέσιμων καναλιών ο χρήστης απορρίπτεται και προχωρούμε στην εισαγωγή νέου. Στα παρακάτω διαγράμματα ροής απεικονίζεται η λειτουργία της εκχώρησης καναλιών του αλγόριθμου μας.



Εικόνα 6.9: Διαγράμματα ροής συστήματος α)χωρίς RN, β) με Inband RNs



Εικόνα 6.10: Διάγραμμα ροής συστήματος με ενεργοποιημένα Outband RNs

## 6.9 Έλεγχος ισχύος

Κύριος παράγοντας για την αντιμετώπιση των ομοδιαυλικών παρεμβολών είναι ο έλεγχος της εκπεμπόμενης ισχύος των χρηστών και κυρίως αυτών που εξυπηρετούνται από BS γειτονικών κελιών. Κατά την διαδικασία υπολογισμού της ισχύος εκπομπής, κάθε subcarrier εξετάζεται ξεχωριστά. Για δεδομένο SINR (Signal to Interference and Noise Ratio), ο υπολογισμός της ισχύος εκπομπής ανά subcarrier για κάθε χρήστη γίνεται μέσω της επίλυσης του γραμμικού συστήματος που έχει ως αγνώστους της ζητούμενες ισχείς και προκύπτει από την επόμενη εξίσωση:

$$p_{n,s} = \text{SINR}_{n,s} \left( \sum_{\substack{n'=1, n' \neq n \\ s \in S_{n'}}}^N p_{n',s} \frac{TL_{n,k}}{TL_{n',l}} + I_o \cdot TL_{n,k} \right)$$

όπου  $N$  είναι οι ομοδιαυλικοί χρήστες σε όμορες κυψέλες (εκτός του  $n$ ),  $p_{n,s}$  και  $p_{n',s}$  οι ισχείς εκπομπής στο subcarrier  $s$  του  $n$ -οστού χρήστη και του  $n'$ -οστού ομοδιαυλικού χρήστη αντίστοιχα,  $k$  και  $l$  οι αντίστοιχοι τομείς εξυπηρέτησης της,  $TL_{n,k}$  και  $TL_{n',l}$  οι συνολικές απώλειες της για της τομείς εξυπηρέτησής της και  $I_o$  ο θερμικός θόρυβος από το  $n$ -οστό τερματικό. Της,  $S_{n'}$  είναι το σύνολο των υποφερόντων του  $n'$ -οστού ομοδιαυλικού τερματικού.

## 6.10 Απόρριψη χρηστών

Απαραίτητο στοιχείο της λειτουργίας του αλγορίθμου, είναι η διαδικασία της απόρριψης χρηστών από τα μητρώα του συστήματος. Η πιθανότητα απόρριψης (blocking probability), είναι μία σημαντική παράμετρος που βοηθά να εκτιμήσουμε το ποσοστό εξυπηρέτησης χρηστών από το σύστημα και άρα την αποδοτικότητα αυτού. Για τον υπολογισμό της παραμέτρου της λαμβάνουμε υπόψη μόνο της χρήστες που απορρίπτονται κατά τη διαδικασία ανάθεσης υποφερόντων και κατά τη διαδικασία ελέγχου ισχύος εκπομπής,

διότι οι υπόλοιποι μη αποδεκτοί χρήστες απορρίπτονται απευθείας από το σύστημα, χωρίς να εισάγονται στα μητρώα του (γεωγραφικά μη αποδεκτοί χρήστες ή με μεγάλες απώλειες διαδρομής).





## **7 ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ – ΑΝΑΛΥΣΗ**

### **7.1 Monte Carlo Simulations**

Με την έως τώρα ανάλυση των πραγμάτων, συμπεραίνουμε πως το σύστημά της αποτελείται από παραμέτρους και διαδικασίες που είναι ευαίσθητες σε σφάλματα και αποκλίσεις από την πραγματικότητα. Καταλαβαίνουμε συνεπώς, πως είναι αναγκαία η χρησιμοποίηση μαθηματικών μεθόδων και υπολογιστικών μοντέλων που βοηθούν στην εξομάλυνση των όποιων σφαλμάτων και κάνουν τη διαδικασία ανάλυσης των αποτελεσμάτων πιο αξιόπιστη.

Η μέθοδος Monte Carlo βασίζεται στον, γνωστό από της πιθανότητες, νόμο των μεγάλων αριθμών. Η λογική της μεθόδου είναι η προσομοίωση μιας τυχαίας μεταβλητής  $X$  με την χρήση πολλών, ανεξάρτητων μεταξύ τους επαναλήψεων και στην συνέχεια υπολογισμό της μέσης τιμής αυτών των τυχαίων αριθμών ως εκτίμηση της μέσης τιμής της  $X$ . Στην προσομοίωσή μας, χρησιμοποιείται αυτή η τεχνική, ώστε όσο περισσότερες επαναλήψεις έχουμε τόσο πιο κοντά στην πραγματική τιμή της  $E(X)$  θα είναι η εκτίμηση μας.

### **7.2 Ανάλυση Αποτελεσμάτων**

Στόχος του υπολογιστικού αλγορίθμου που δημιουργήσαμε είναι να γίνει σύγκριση των δεικτών απόδοσης του συστήματός της βάσει των επιλεγμένων σεναρίων που αφορούν σε ενεργοποίηση των κόμβων αναμετάδοσης. Οι **Key Performance Indicators (KPIs)** είναι οι εξής:

- Αριθμός εξυπηρετούμενων χρηστών συστήματος και κεντρικού κελιού
- Συνολική ισχύς εκπομπής
- Συνολικό SINR
- Συνολικό Throughput

- Απορριφθέντες χρήστες

Για τη λειτουργία του συστήματος και την εξαγωγή των παραπάνω KPIs, ως παράμετροι εισόδου ή/και ελέγχου, χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες παράμετροι.

- **Παράμετρος ενεργοποίησης η μη των κόμβων αναμετάδοσης:** Καθορίζει το επιλεγμένο σενάριο ύπαρξης ή όχι των RNs για την προσομοίωση.
- **Αριθμός PRBs ανά χρήστη:** Κάθε χρήστης που εισάγεται στο σύστημα αιτείται συγκεκριμένο αριθμό PRBs, από τον οποίο εξαρτάται η ρυθμοαπόδοση (throughput) όσο και η μέγιστη χωρητικότητα του συστήματος σε χρήστες.
- **Αριθμός tiers:** Ο αριθμός της συνδέεται άμεσα με την χωρητικότητα του συστήματος σε χρήστες.
- **Αριθμός στοιχείων MIMO:** Ορίζουμε τα συνολικά στοιχεία εκπομπής και λήψης των σταθμών βάσης αλλά και των τερματικών.
- **Μέγιστος αριθμός της διάθεση υποφερόντων ανά BS:** Το σύνολο των subcarriers που διαθέτει της ανάθεση ο κάθε BS για της χρήστες.
- **Μέγιστος αριθμός της διάθεση υποφερόντων ανά Outband Relay Node:** Το σύνολο των subcarriers που διαθέτει της ανάθεση το κάθε Outband RN για της χρήστες.
- **Ακτίνα κυψέλης:** Ορίζει το μέγεθος της κάθε κυψέλης.
- **Μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς:** Διαλέγουμε το άνω όριο επιτρεπόμενης ισχύος εκπομπής του BS.

Για την εκτέλεση της προσομοίωσης, οι βασικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα

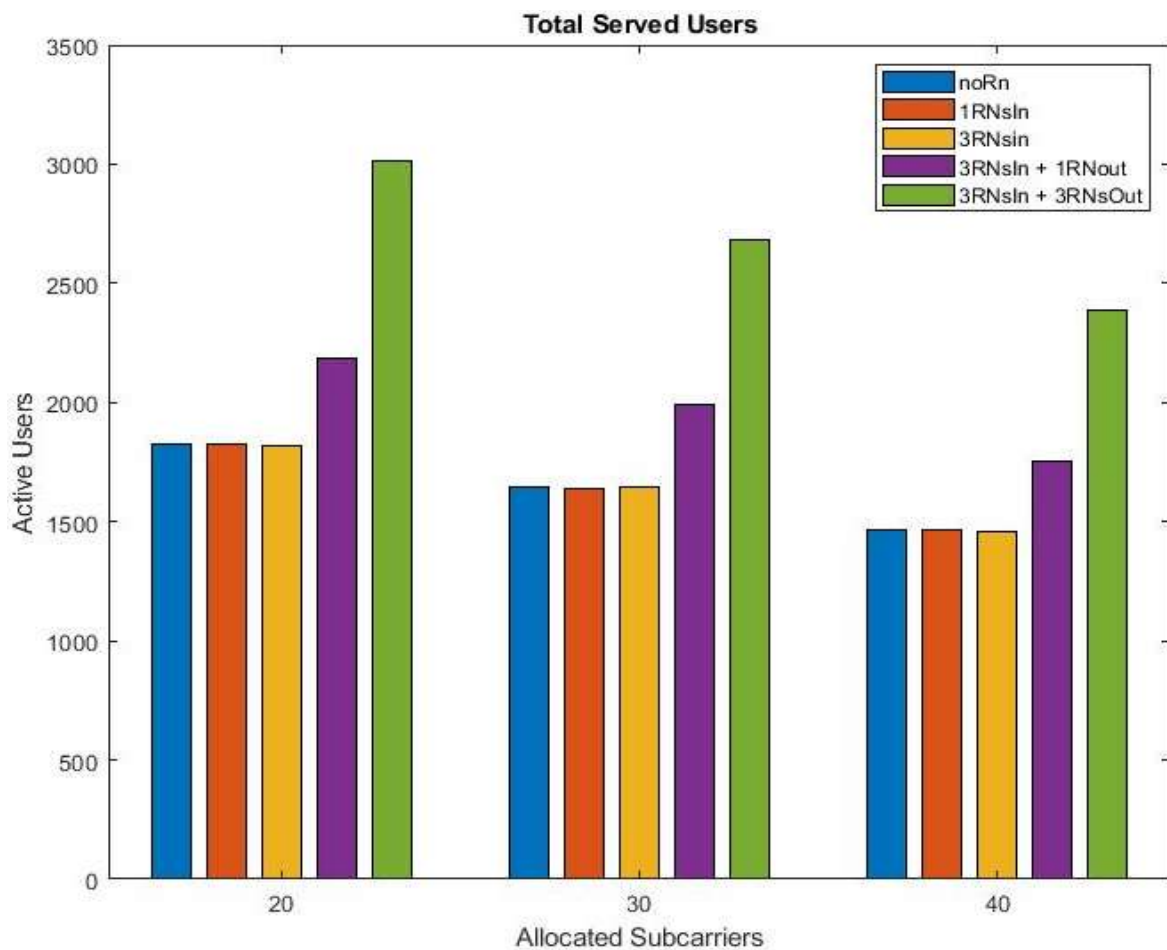
Παράμετροι	Τιμή
Αριθμός tier	2
Τομείς	3/120 <sup>0</sup>
Μέγιστος αριθμός PRBs ανά BS	132
Μέγιστος αριθμός PRBs ανά Outband RN	64
PRBs ανά χρήστη	20, 30, 40
Μέγιστη ισχύς εκπομπής ανά PRB	0,0240 Watt
Επίπεδο διαμόρφωσης	QPSK
Στοιχεία κεραιών MIMO	2x2
Επαναλήψεις Monte Carlo	100
Ύψος κεραιών BSs/RNs	hBS=10m/hRN=5m
Ύψος τερματικού χρήστη	1,5m<hUT<22,5m
Κεντρική συχνότητα	28 GHz
Subcarrier spacing	6 MHz
Κέρδη κεραιών	BSs/RNs/UTs 18/9/4 dB
Μέγιστη ισχύς εκπομπής BS/RN	3,126 Watt

*Πίνακας 7.1: Παράμετροι συστήματος*

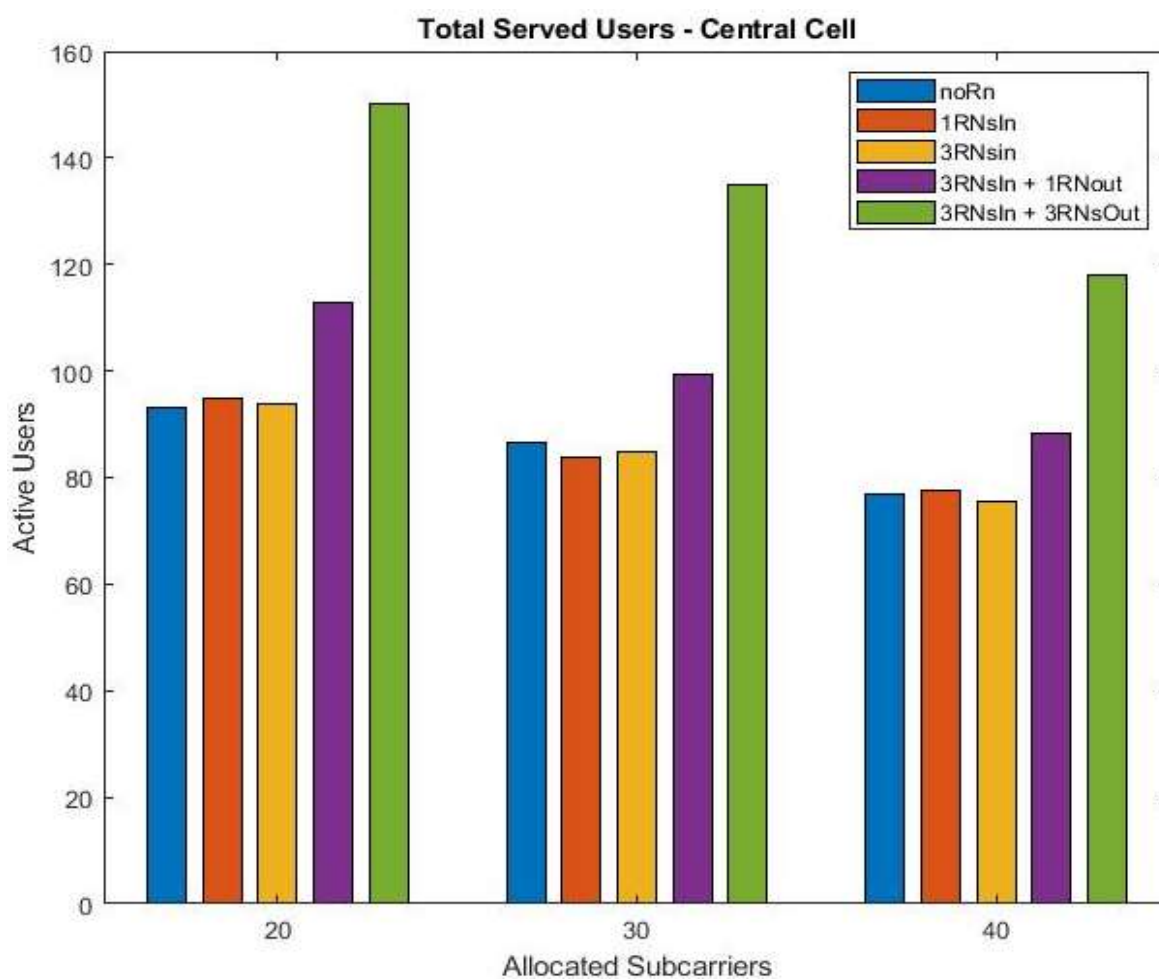
Με χρήση της μεθόδου των Monte Carlo επαναλήψεων, η οποία παρουσιάστηκε σε προηγούμενη ενότητα, και χρησιμοποιώντας 100 τέτοιες επαναλήψεις, υπολογίστηκαν οι μετρικές απόδοσης του υπό μελέτη συστήματος, οι οποίες αναλύονται παρακάτω. Όπως,

προαναφέραμε μέσω της μεθόδου Monte Carlo εξάγουμε τις μετρικές που μας ενδιαφέρουν με μειωμένα επίπεδα αβεβαιότητας, και συνεπώς αυξημένη αξιοπιστία.

Στα γραφήματα 1 και 2 παρουσιάζεται ο συνολικός αριθμός εξυπηρετούμενων χρηστών (τόσο από το σύστημα όσο και ειδικότερα από το κεντρικό κελί) για κάθε σενάριο υλοποίησης/ενεργοποίησης RN με βάση τον μέγιστο αριθμό ανατιθέμενων PRBs ανά χρήστη.



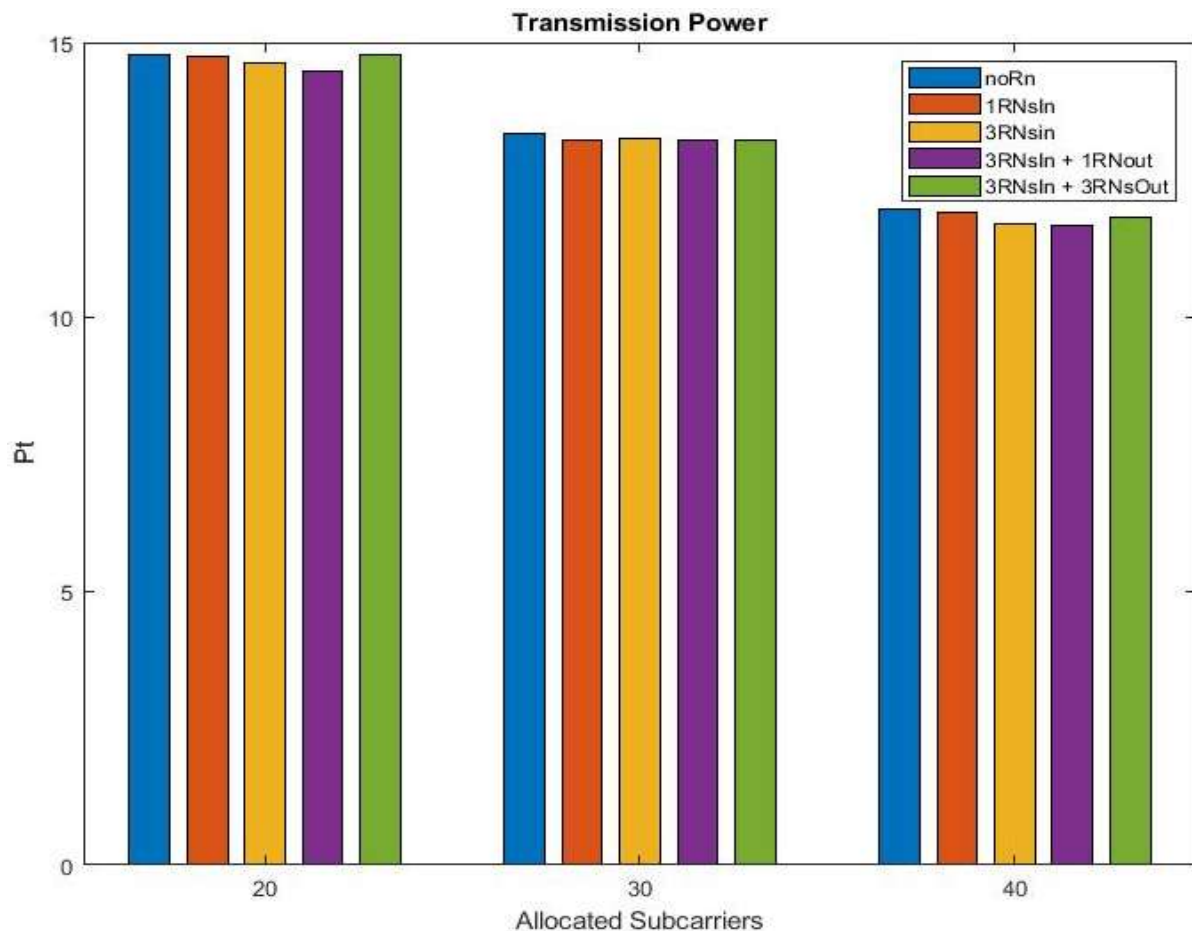
**Γράφημα 1: Αριθμός συνολικών εξυπηρετούμενων χρηστών συστήματος με 20,30,40 PRBs ανά χρήστη**



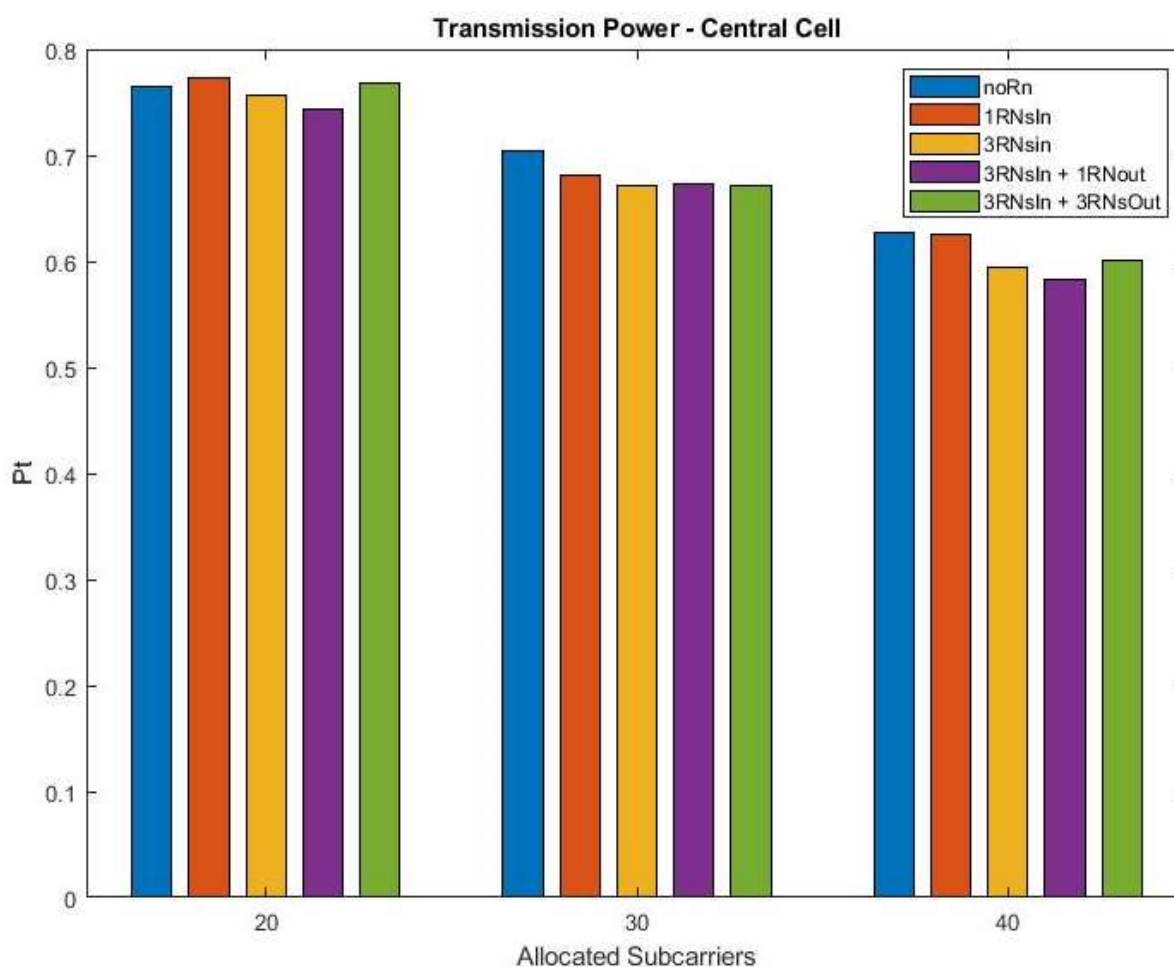
**Γράφημα 2:** Αριθμός εξυπηρετούμενων χρηστών κεντρικού κελιού με 20,30,40 PRBs ανά χρήστη

Όπως είναι αναμενόμενο, αυξάνοντας τον αριθμό των subcarriers ανά χρήστη, παρουσιάζεται μείωση των συνδεδεμένων τερματικών στους BS, αφού οι συνολικοί διαθέσιμοι ραδιοπόροι (sub-carriers/PRBs) παραμένουν σταθεροί. Για παράδειγμα με βάση το Γράφημα 1, αύξηση των μέγιστων PRBs ανά χρήστη από 20 σε 40, επιφέρει κατά μέσο όρο μείωση 20,18% στους αποδεχθέντες χρήστες. Συγκρίνοντας το σύστημα χωρίς RN με τα συστήματα που χρησιμοποιούν RNs, παρατηρούμε τα εξής: α) Ενεργοποίηση Inband RNs ανά κυψέλη

(σενάρια 2, 3) επιφέρει κατά μέσο όρο αύξηση των εξυπηρετούμενων χρηστών κατά 1,07%.  
β) Ενεργοποίηση Outband RN (σενάρια 3, 4) ανά κυψέλη επιφέρει αύξηση των εξυπηρετούμενων χρηστών κατά 41,26 %. Συγκρίνοντας τώρα την επίδοση των Inband σε σχέση με τα Outband RNs παρατηρείται αύξηση κατά μέσο όρο 37.88%, Επομένως, η επιλογή κόμβων αναμετάδοσης και κυρίως των Outband RNs αυξάνει τον αριθμό αποδεκτών χρηστών, καθώς προστίθενται επιπλέον πόροι στο σύστημα. Στα γραφήματα 3 και 4 παρουσιάζεται η μέση ισχύς εκπομπής (τόσο από το σύστημα όσο και ειδικότερα από το κεντρικό κελί) για κάθε σενάριο υλοποίησης/ενεργοποίησης RN με βάση τον μέγιστο αριθμό ανατιθέμενων PRBs ανά χρήστη.



Γράφημα 3: Μέση ισχύς εκπομπής με 20,30,40 PRBs ανά χρήστη

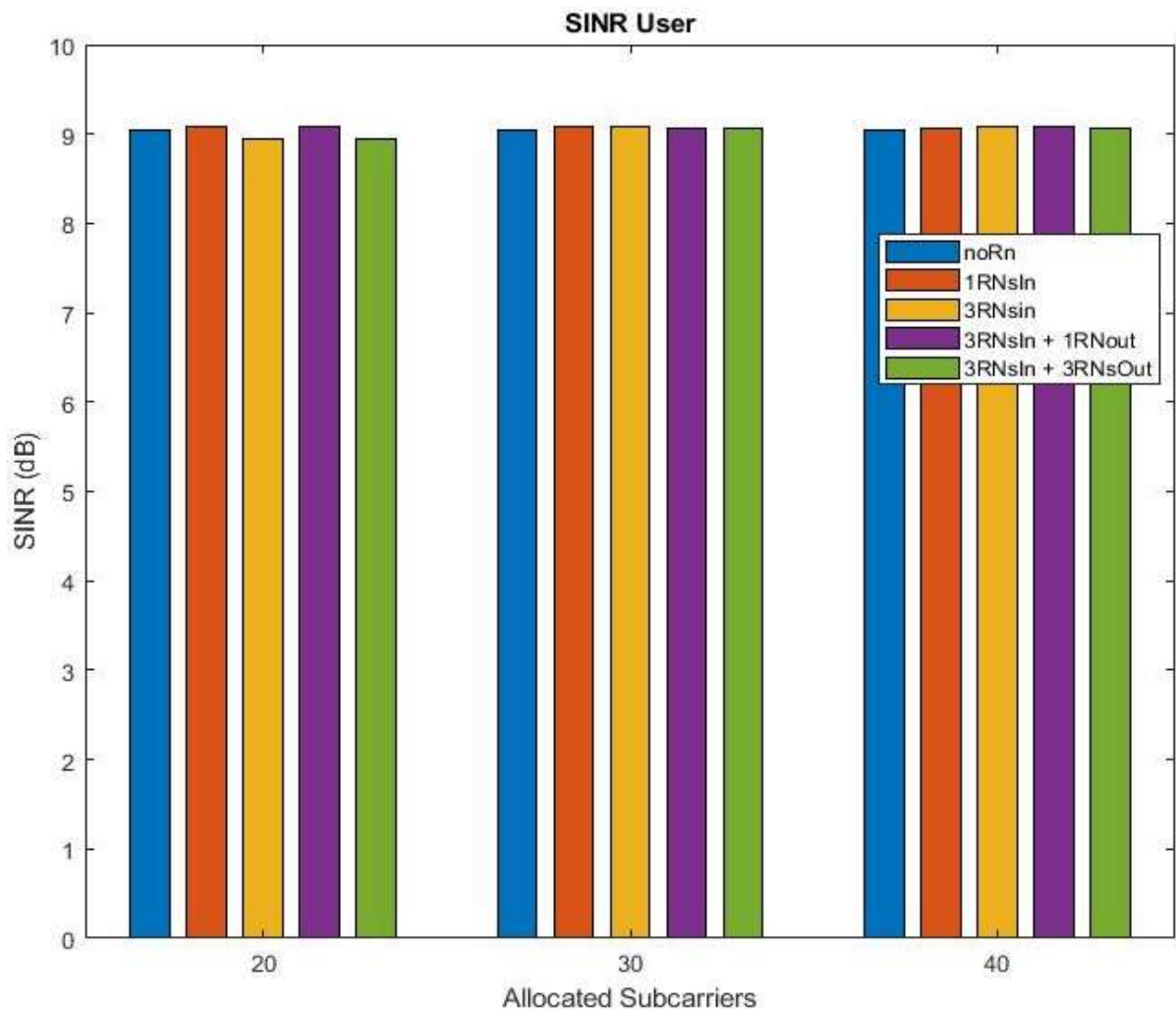


**Γράφημα 4: Μέση ισχύς εκπομπής κεντρικής κυψέλης με 20,30,40 PRBs ανά χρήστη**

Κατά αντιστοιχία με τους εξυπηρετούμενους χρήστες, όπως είναι αναμενόμενο, αυξάνοντας τον αριθμό των subcarriers ανά χρήστη, τόσο λιγότερη είναι η ισχύς εκπομπής που χρειάζεται ο BS για την εξυπηρέτηση των UTs. Για παράδειγμα με βάση το Γράφημα 3, αύξηση των μέγιστων PRBs ανά χρήστη από 20 σε 40, επιφέρει κατά μέσο όρο μείωση 9,54% στην ισχύ εκπομπής. Συγκρίνοντας το σύστημα χωρίς RN με τα συστήματα που χρησιμοποιούν RNs, παρατηρούμε τα εξής: α) Ενεργοποίηση Inband RNs ανά κυψέλη (σενάρια 2, 3) επιφέρει κατά μέσο όρο μείωση στην ισχύ εκπομπής κατά 0,91%. β) Ενεργοποίηση Outband RN (σενάρια 3,

4) ανά κυψέλη επιφέρει μείωση στην ισχύ εκπομπής 1,24%. Συγκρίνοντας τώρα την επίδοση των Inband σε σχέση με τα Outband RNs ελάχιστη μείωση κατά μέσο όρο 0,2%,

Σε ό,τι έχει να κάνει με το SINR χρήστη που απεικονίζεται στο επόμενο γράφημα, δεν παρουσιάζεται σχεδόν καμία μεταβολή κατά την αύξηση των PRBs στο χρήστη, ούτε κατά την αλλαγή σεναρίου.



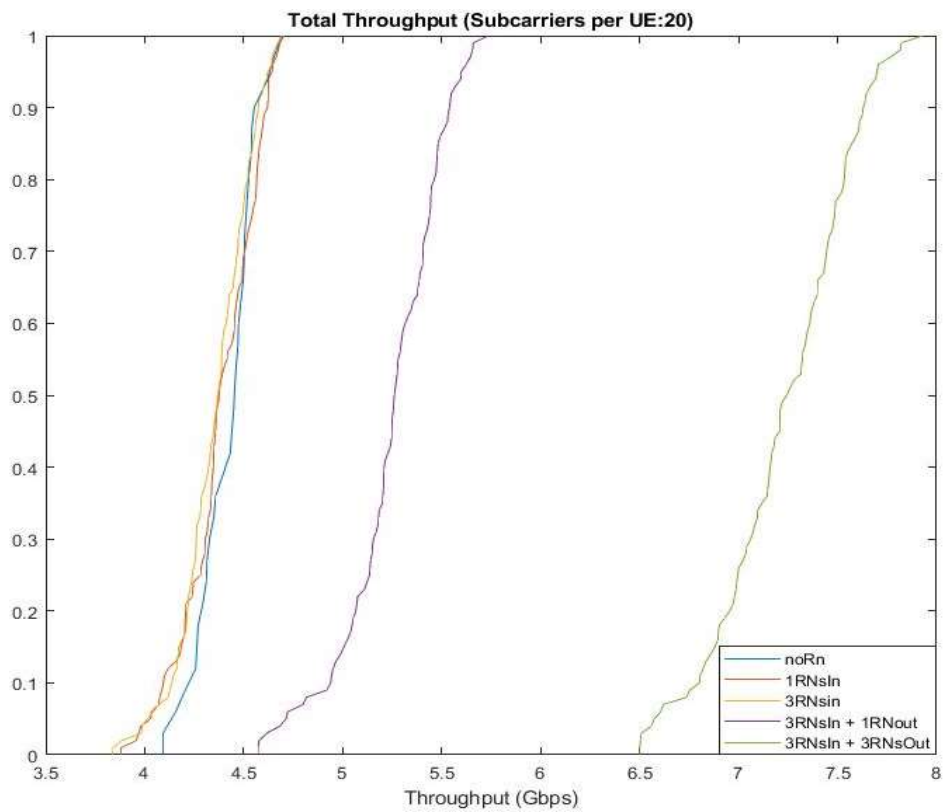
Γράφημα 5: Μέσο SINR χρηστών με 20,30,40 PRBs ανά χρήστη



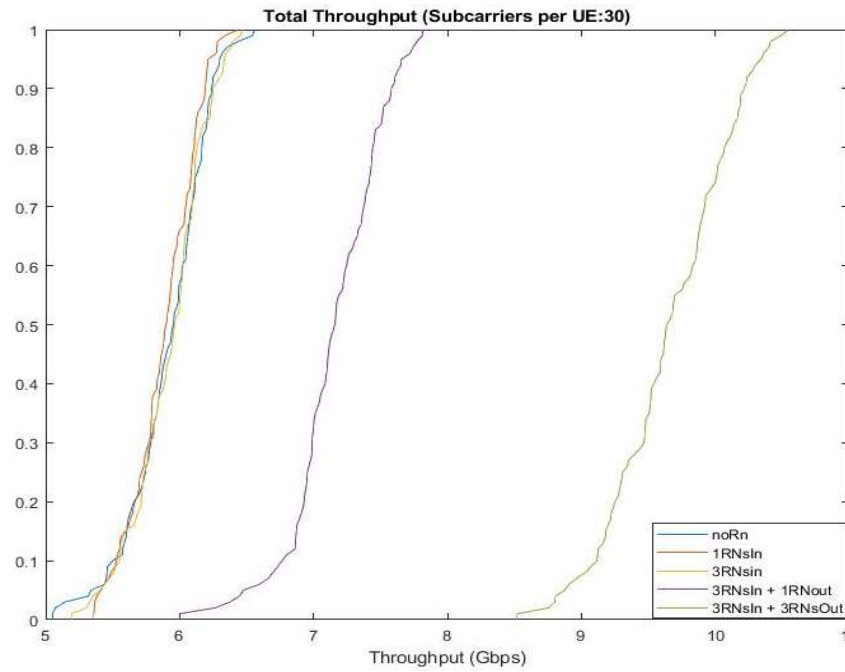
Αποτέλεσμα αρκετά αναμενόμενο καθώς η αλλαγή του αριθμού των υποφερόντων μπορεί να επηρεάζει εξίσου τόσο την ωφέλιμη ισχύ όσο και τις διάφορες παρεμβολές.

Στα γραφήματα 6,7 και 8 παρουσιάζεται το συνολικό throughput του συστήματος το οποίο είναι άμεσα συνδεδεμένο με το σύνολο των εξυπηρετούμενων χρηστών, τον αριθμό των δεσμευμένων PRBs ανά τερματικό και υπολογίζεται από τον τύπο:

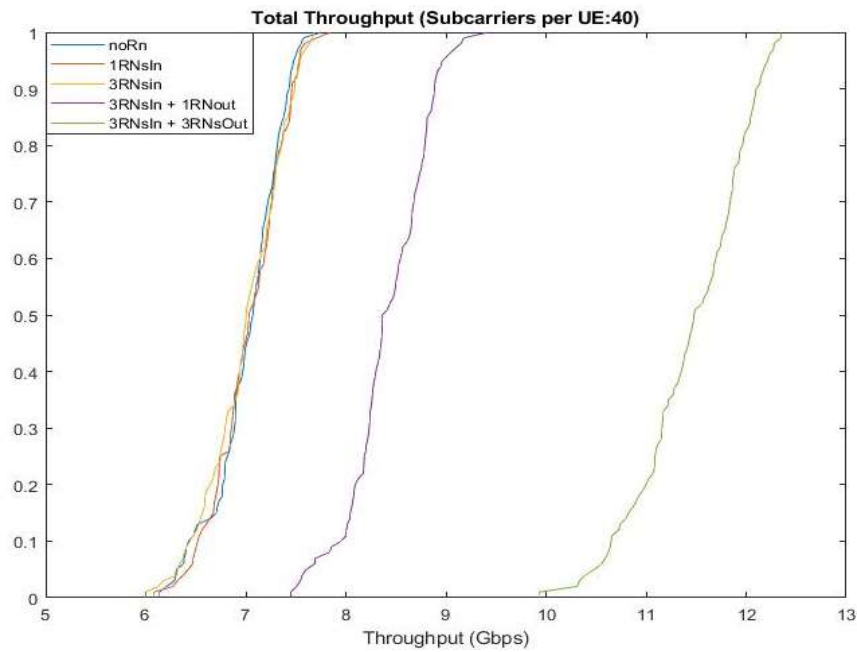
$$Total\ Throughput = total\ users * PRBs\ per\ UT * subcarrier\ spacing * cells * 12$$



**Γράφημα 6: Συνολικό Throughput συστήματος με 20 PRBs ανά χρήστη**



Γράφημα 7: Συνολικό Throughput συστήματος με 30 PRBs ανά χρήστη

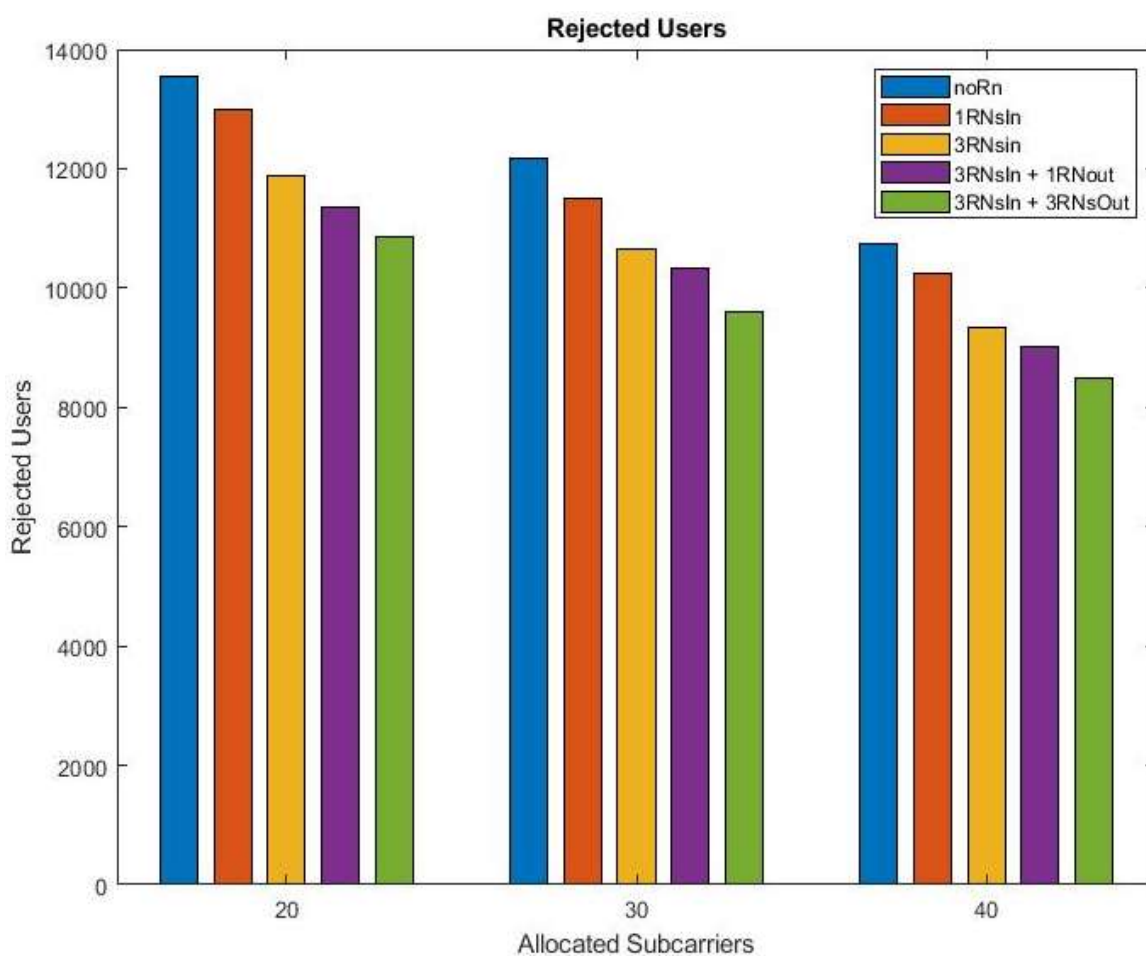


Γράφημα 8: Συνολικό Throughput συστήματος με 40 PRBs ανά χρήστη

Παρατηρείται αύξηση της συνολικής ρυθμοαπόδοσης κυρίως κατά την ενεργοποίηση Outband RNs, ενώ κατά τη χρήση μόνο Inband RNs δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη μεταβολή καθώς οι διαθέσιμοι πόροι του συστήματος παραμένουν σταθεροί. Ειδικότερα, κατά τη χρήση ενός Outband RN (σενάριο 4) σε σύγκριση με τη μη ενεργοποίηση RN (σενάριο 1) και τη χρήση μόνο Inband RNs (σενάρια 2 και 3) εντοπίζουμε αύξηση του συνολικού Throughput περίπου κατά 21%. Αυτό το ποσοστό αύξησης εμφανίζεται σταθερό και στις 3 περιπτώσεις με 20, 30 και 40 PRBs ανά χρήστη. Αντίστοιχα κατά την ενεργοποίηση 3 Outband RNs, σε σύγκριση με τα σενάρια 1,2 και 3 (όχι RNs ή μόνο Inband RNs), το ποσοστό αύξησης κυμαίνεται γύρω στο 69,8% για 20 PRBs ανά κινητό τερματικό, στο 62,1% για PRBs = 30 και στο 57,3% για 40 PRBs ανά χρήστη. Παρατηρούμε μία μείωση του ποσοστού αύξησης της ρυθμοαπόδοσης όταν μεγαλώνει ο αριθμός των subcarriers. Αυτό είναι απολύτως φυσιολογικό, καθώς όσα περισσότερα PRBs απαιτεί κάθε χρήστης, τόσο περισσότερο αυξάνεται η πολυπλοκότητα του συστήματος και έτσι μειώνεται ο αριθμός των αποδεχθέντων χρηστών. Από την άλλη, αύξηση για παράδειγμα των subcarriers προς απόδοση, από 20 σε 40 δημιουργεί αύξηση της ρυθμοαπόδοσης κατά 55,6%. Αποτέλεσμα απόλυτα λογικό που δικαιολογείται από τον τύπο που παραθέσαμε πιο πάνω.

Η συμβολή των Outband RNs στην αύξηση γενικά του συνολικού Throughput, όπως συμπεραίνουμε, είναι καταλυτική και προκύπτει προφανώς από την έξτρα χωρητικότητα που προσφέρουν στο σύστημα και αρά έξτρα αποδεκτούς χρήστες. Ταυτόχρονα ο μεγαλύτερος αριθμός των υποφερόντων ανά χρήστη, συμβάλλει και αυτός με τη σειρά του στην αύξηση του συνολικού throughput.

Τέλος, στο γράφημα 9, απεικονίζεται ο αριθμός των απορριφθέντων χρηστών της τοπολογίας.



**Γράφημα 9: Απορριφθέντες χρήστες συστήματος με 20,30,40 PRBs ανά χρήστη**

Η σύγκριση του παραπάνω αποτελέσματος με το γράφημα 1 και το συνολικό αριθμό εξυπηρετούμενων χρηστών αποδεικνύει φανερά την βελτίωση της αποδοτικότητας του συστήματος. Συγκεκριμένα, όσο αφορά τη διαφορά μεταξύ ενεργοποίησης Inband RNs και μη χρήση τους, βλέπουμε μία μείωση των απορριφθέντων χρηστών της τάξης του 9,69%. Το ίδιο συμβαίνει όταν στο σύστημά μας συμπεριλαμβάνονται Outband RNs. Οι απορριφθέντες χρήστες σε αυτήν την περίπτωση σε σύγκριση με το σενάριο 1 (no RNs) μειώνονται κατά 18,64%. Η διαφορά απόδοσης μεταξύ της χρήσης Inband και Outband RNs αποτυπώνεται με

ένα ποσοστό της τάξης του 10,5 %. Τέλος η αύξηση του αριθμού των PRBs από 20 σε 40 προκαλεί μείωση των χρηστών που δεν συνδέονται στο σύστημα, κατά 21,14%

Τόσο η ενεργοποίηση επιπλέον κόμβων αναμετάδοσης, όσο και η αύξηση των διαθέσιμων υποφερόντων ανά UT αυξάνουν την πιθανότητα αποδοχής κάποιου χρήστη. Στην περίπτωση της χρησιμοποίησης RNs, όπως είναι λογικό, μειώνεται το ενδεχόμενο εμφάνισης φαινομένων όπως η NLOS ζεύξη, η σκίαση και οι απώλειες διαδρομής.



## **8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Στην παρούσα εργασία, ερευνήσαμε το ενδεχόμενο της χρήσης κεραιών MIMO και της επιλογής των κόμβων αναμετάδοσης ως επέκταση και αναβάθμιση του συστήματος 5G. Παρουσιάσαμε δύο τύπους RNs, τα Inband και τα Outband και εξηγήσαμε τον τρόπο λειτουργίας και χρησιμότητας τους στην τοπολογία του δικτύου. Αναλύοντας την θεωρία που παρείχαμε και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, είναι φανερό πως, η χρησιμότητα των παραπάνω καταδεικνύεται απολύτως πρακτική για την εξέλιξη των μελλοντικών δικτύων 5G. Για να δείξουμε την αποδοτικότητα των παραπάνω ισχυρισμών, παρουσιάσαμε αριθμητικά αποτελέσματα και γραφήματα που αφορούν την αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος, την μείωση της εκπεμπόμενης ισχύος από τους σταθμούς βάσης καθώς και την βελτίωση της συνολικής διέλευσης δεδομένων. Δεν πρέπει να αγνοούμε βέβαια το γεγονός της ύπαρξης και αρνητικών επιδράσεων, κυρίως όταν αναφερόμαστε σε εμπορικά συστήματα. Ιδιαίτερα όσο αφορά τα Outband Relay Nodes των οποίων το κόστος λειτουργίας είναι αυξημένο, είναι σαφές πως πρέπει να γίνονται συγκεκριμένοι συμβιβασμοί, ώστε να επιτυγχάνεται βέλτιστη ποιότητα υπηρεσίας σε συνδυασμό με τα παραπάνω οφέλη.

Μία ενδιαφέρουσα επέκταση της εργασίας αυτής θα ήταν ο συνδυασμός των προτεινόμενων σεναρίων χρήσης κόμβων αναμετάδοσης, με σκοπό τη ικανοποίηση εφαρμογών όπως οι εφαρμογές χαμηλής ισχύος (low power applications), χαμηλής καθυστέρησης επικοινωνίες (low latency communication), οι εφαρμογές internet of things καθώς και επίσης μελέτη του multiband relaying το οποίο αφορά τον συνδυασμό των χαρακτηριστικών των LTE και 5G δικτύων, με σκοπό την μεγιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, μέσω της αποδοτικότερης ανάθεσης ραδιοπόρων.





## Βιβλιογραφία

- [1] Mohammad Meraj, and Sumit Kumar, “**Evolution of Mobile Wireless Technology from 0G to 5G,**” *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, vol. 6, no. 3, pp. 2545-2551, 2015.
- [2] Chauhan Dharmendra, Hadia S. K., Desai Devanshi, Parekh Dhimant, and Patel Krina, “**Evolution Of Mobile Communication Network: From 0g To 5g,**” *International Journal of Research and Analytical Reviews*, vol.6, 2019.
- [3] Modesta E. Ezema, Francis A. Okoye, and Anthony O. Okwori. “**A framework of 5G networks as the foundation for IoTs technology for improved future network,**” *International Journal of Physical Sciences*, vol.14, no. 10 pp. 97-107, 2019.
- [4] Goldsmith, Andrea, “**Wireless communications,**” *Cambridge university press*, 2005.
- [5] Καψάλης, Χρήστος, and Π. Κωττής, “**Κεραίες Ασύρματες Ζεύξεις,**” *Εκδόσεις Τζιόλα*, 2008.
- [6] Nawaz, Syed Junaid, and al. “**Quantum machine learning for 6G communication networks: State-of-the-art and vision for the future,**” *IEEE access*, vol.7 pp. 46317-46350, 2019.
- [7] Balanis, Constantine A. “**Antenna theory: analysis and design,**” *John wiley & sons*, 2015.
- [8] Κωττής, Παναγιώτης Γ. “**Διαμόρφωση και μετάδοση σημάτων,**” *Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη*, 2008.
- [9] Σκόντας, Φώτιος. “**Επίδοση τεχνικών μετάδοσης σε συστήματα πολλαπλών εισόδων και πολλαπλών εξόδων (MIMO) με εφαρμογές σε ευρυζωνικά δίκτυα 4ης γενιάς,**” 2016.
- [10] Αλεβιζάκη, Παναγιώτα. “**Καταστολή Η/Μ παρεμβολών σε δίκτυα 5G με τεχνολογίες Massive MIMO κεραιών και τεχνικές πολυτονικής πρόσβασης**” 2020.

[11] Gopal, B. G., and P. G. Kuppusamy. “**A comparative study on 4G and 5G technology for wireless applications,**” *IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering* vol.10, no.6, pp. 2278-2834, 2015.

[12] Medudula, Murali Krishna, Mahim Sagar, and Ravi Parkash Gandhi. “**Telecom management in emerging economies,**” *Springer India*, 2016.

[13] Μπαρτσιώκας, Ιωάννης. “**Συστήματα πολλαπλών κεραιών σε ευρυζωνικά δίκτυα 5ης γενιάς,**” 2020.

[14] Δρόσος, Μιχαήλ. “**Επίδοση τεχνικών μετάδοσης και ανάθεσης ραδιοπόρων σε ευρυζωνικά δίκτυα τέταρτης γενιάς,**” 2017.

[15] Μερτζάνης, Κωνσταντίνος. “**Μελέτη και προσομοίωση δικτύου WiMax,**” *MS thesis*. 2011.

[16] Shahraki, Amin, et al. “**A comprehensive survey on 6G networks: Applications, core services, enabling technologies, and future challenges,**” *arXiv preprint arXiv*, 2101.12475, 2021.

[17] Κωνσταντίνου, Φ., Χ. Καυάλης, and Π. Κωττής. “**Εισαγωγή στις τηλεπικοινωνίες,**” *Αθήνα: Παπασωτηρίου*, 1995.

[18] Κολα, Τ., “**Δίκτυα δημόσιας χρήσης και διασύνδεση δικτύων,**” *Εξαμηνιαία Εργασία*, 2017

[19] Ζιόγος, Φώτιος. “**Η Εφαρμογή της Μηχανικής Μάθησης στα Δίκτυα Επικοινωνιών με έμφαση σε 5G Δίκτυα και Οπτικά Δίκτυα,**” 2021.

[20] Karimian, Noushin. “**Design and analysis of OFDM system for powerline based communication,**” *Diss. University of Central Lancashire*, 2012.

[21] Μπακογιάννης, Δημήτριος. “**Ανάπτυξη τηλεπικοινωνιακών υποσυστημάτων OFDM με την αναπτυξιακή πλατφόρμα ZedBoard Zynq-7000 ARM/FPGA SoC,**” 2020.

[22] Χατζηκωνσταντίνου, Χριστόφορος. “**Τεχνικές NOMA (Non Orthogonal Multiple Access),**” *MS thesis. Πανεπιστήμιο Πειραιώς*, 2020.

[23] Komal, 4G technology, 2013

[24] Bhandarkar S., Kammar R., 4G technology, 2016

[25] Κιουράνας, Αναστάσιος. “**Ανάπτυξη αξιόπιστου δέκτη με τεχνικές βαθιάς μάθησης,**” 2020.

[26] Σεχρεμέλης, Λουκάς AM, and Ευάγγελος AM Χριστακόπουλος. “**Εξαγωγή μοντέλου ραδιοκάλυψης της περιοχής της Ναυπάκτου βάσει πεδιομετρήσεων στάθμης ισχύος λήψης φορητής συσκευής,**” 2016.

[27] Μητσολίδου, Χαρίκλεια. “**Μελέτη Χωρητικότητας Συστήματος Κεραίων Πολλαπλών Εισόδων-Πολλαπλών Εξόδων (MIMO),**” 2011.

[28] Na, Zhenyu, et al. “**Subcarrier allocation based simultaneous wireless information and power transfer algorithm in 5G cooperative OFDM communication systems,**” *Physical Communication* 29, pp. 164-170, 2018

[29] Mishra, Pavan Kumar, Sudhakar Pandey, and Sanjay Kumar Biswash. “**A device-centric scheme for relay selection in a dynamic network scenario for 5G communication,**” *IEEE Access* 4, pp. 3757-3768, 2016

[30] Verdecia-Peña, Randy, and José I. Alonso. “**Analysis of A&F Mobile Relay Nodes with Power Control and Link Selection in HSR Scenarios,**” *16th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*. IEEE, 2020.

[31] Iqbal, Adeel, and al. “**cDERSA: cognitive D2D enabled relay selection algorithm to mitigate blind-spots in 5G cellular networks,**” *IEEE Access* 9, pp. 89972-89988.

[32] Driouech, Safaa, Essaid Sabir, and Mehdi Bennis. “**D2D mobile relaying for efficient throughput-reliability delivering in 5G,**” *ICC 2020-2020 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. IEEE, 2020.

[33] Verdecia-Peña, Randy, and José I. Alonso. “**MIMO Channel Estimation in an SDR platform for Evaluation of D&F relay nodes.**” *Electronics* vol. 9, no. 10, pp. 1662, 2020

[34] Mokhtar, Rana M., Heba M. Abdel-Atty, and Korany R. Mahmoud. “**Optimization of the deployment of relay nodes in cellular networks,**” *IEEE Access* 8, pp. 136605-136616, 2020

[35] Nomikos, Nikolaos, Dimitrios N. Skoutas, and Prodromos Makris. “**Relay selection in 5G networks,**” *2014 international wireless communications and mobile computing conference (IWCMC)*. IEEE, 2014.

[36] Kim, Haesik, Takeo Fujii, and Kenta Umebayashi. “**Relay Nodes Selection Using Reinforcement Learning,**” *2021 International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication (ICAIIIC)*. IEEE, 2021.

[37] Hu, Yulin, M. Cenk Gursoy, and Anke Schmeink. “**Relaying-enabled ultra-reliable low-latency communications in 5G,**” *IEEE Network*, vol. 32, no. 2, pp. 62-68, 2018

[38] Zhang, Haijun, and al. “**Resource allocation in spectrum-sharing OFDMA femtocells with heterogeneous services,**” *IEEE Transactions on Communications* vol. 62,no. 7, pp. 2366-2377, 2014

[39] Verdecia-Peña, Randy, and José I. Alonso, “**A Two-Hop mmWave MIMO NR-relay nodes to Enhance the Average system Throughput and BER in Outdoor-to-Indoor Environments,**” *Sensors*, vol. 21, no. 4, pp. 1372, 2021

[40] Bulakei, Omer, “**Multi-hop moving relays for IMT-advanced and beyond,**” *arXiv preprint arXiv:1202.0207*, 2012

[41] Psilopanagiotis, Konstantinos, Bartsiokas, Ioannis, Gkonis, Panagiotis, and Kaklamani, Dimitra, “**On Relay-Based Subcarrier Allocation and Power Management in 5G Multicellular Networks,**” *2022 IEEE 95th Vehicular Technology Conference:(VTC2022-Spring)*, pp. 1-6, 2022, June

