

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ**  
**ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ**  
**ΠΑΤΡΩΝ**  
**UNIVERSITY OF PATRAS**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Έξυπνος διαμοιρασμός φασματικών πόρων σε δίκτυα 5G για  
αύξηση της φασματικής απόδοσης.**

Ευγενίου Βίκτωρας

A.M. 1051930

**Υπεύθυνος Καθηγητής**

Χρήστος Μπούρας , Καθηγητής

**Επιβλέπων**

Βασίλειος Κόκκινος

ΠΑΤΡΑ, Φεβρουάριος 2022



## **Πρόλογος**

Η παρούσα εργασία αποτελεί διπλωματική εργασία στα πλαίσια της προπτυχιακής φοίτησης στο τμήμα των Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών & Πληροφορικής (ΤΜΗΥΠ) του Πανεπιστημίου Πατρών. Ο τίτλος της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι «Εξυπνος διαμοιρασμός φασματικών πόρων σε δίκτυα 5G για αύξηση της φασματικής απόδοσης.».

## Περίληψη στα Ελληνικά

Στα μελλοντικά κινητά ευρυζωνικά συστήματα, υπάρχει άμεση ανάγκη για αύξηση του διαθέσιμου φάσματος και των ευρύτερων ευρών ζώνης σε σύγκριση με το τρέχον διαθέσιμο φάσμα. Επομένως, το φάσμα θα προσφέρεται είτε οριζόντια, είτε σε κατακόρυφα συστήματα κατανομής φάσματος. Ο διαμοιρασμός του φάσματος έχει τεράστια σημασία, η βασική προσέγγιση για τις κινητές ευρυζωνικές υπηρεσίες είναι η άδεια χρήσης του φάσματος για αποκλειστική πρόσβαση, η οποία προσφέρει επενδυτική βεβαιότητα και αξιοπιστία για τα ευρυζωνικά συστήματα κινητής τηλεφωνίας.

Τα ευρυζωνικά συστήματα μοιράζονται το φάσμα χρησιμοποιώντας δύο τεχνικές κατανομής φάσματος και ταξινομούνται ως κατανεμημένες λύσεις και κεντρικές λύσεις. Σε μία κατανεμημένη λύση, τα συστήματα συντονίζονται μεταξύ τους στην ίδια βάση, ενώ σε μια κεντρική λύση, κάθε σύστημα συντονίζεται ανάλογα με την κεντρική μονάδα και τα συστήματα δεν αλληλοεπιδρούν άμεσα μεταξύ τους.

Στόχος της συγκεκριμένης διπλωματικής είναι να μελετήσει τους διαφορετικούς τρόπος κατανομής του φάσματος σε δίκτυα 5G και στη συνέχεια να προτείνει έξυπνους μηχανισμούς διαμοιρασμού των φασματικών πόρων σε δίκτυα 5G, με στόχο την αύξηση της φασματικής απόδοσης του δικτύου.

## **Περίληψη στα Αγγλικά**

In future mobile broadband systems, there is an immediate need to increase the available bandwidth and wider bandwidth compared to the currently available bandwidth. Therefore, the spectrum will be offered either horizontally or in vertical spectrum distribution systems. The importance of spectrum sharing is enormous, as exclusive access with a spectrum license is expected to remain the key approach for mobile broadband services that provides reliability and investment certainty for mobile broadband systems.

Broadband systems share spectrum using two spectrum allocation techniques and are classified as distributed solutions and central solutions. In a distributed solution, the systems are tuned to each other on the same basis, while in a central solution, each system is tuned according to the central unit and the systems do not interact directly with each other.

The aim of this dissertation is to study the different ways of spectrum allocation in 5G networks and then to propose intelligent mechanisms for sharing spectral resources in 5G networks, in order to increase the spectral efficiency of the network.

# Περιεχόμενα

<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	10
<b>Κεφάλαιο 1. Δίκτυα 5G</b> .....	12
<b>1.1 Ιστορική Αναδρομή</b> .....	12
<b>1.2 Εισαγωγή στα δίκτυα 5G</b> .....	17
<b>1.3 Τεχνικά Χαρακτηριστικά του 5G Δικτύου</b> .....	19
<b>1.4 Αρχιτεκτονική Δικτύου</b> .....	23
<b>Κεφάλαιο 2. Φάσμα</b> .....	30
<b>2.1 Εισαγωγή στο Φάσμα συχνοτήτων τηλεπικοινωνίας</b> .....	30
<b>2.2 Αναγκαιότητα Φάσματος</b> .....	32
<b>2.2.1 Το Φάσμα στο 5G δίκτυο</b> .....	33
<b>2.2.2 Φάσμα Μεσαίας Ζώνης συχνοτήτων</b> .....	36
<b>2.2.3 Το Φάσμα στη ζώνη των mmWave</b> .....	40
<b>2.2.4 Τεχνικές Κοινής χρήσης του Φάσματος</b> .....	42
<b>2.2.5 Τρόποι και σενάρια κοινής χρήσης Φάσματος</b> .....	44
<b>2.3 Τεχνικές και Τεχνολογίες για αύξηση της Φασματικής απόδοσης για τα 5G δίκτυα</b> ... 46	
<b>2.3.1 Η Τεχνολογία Multiple Input Multiple Output (MIMO)</b> .....	46
<b>2.3.2 Η τεχνική Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)</b> .....	51
<b>2.3.3 Η τεχνολογία Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)</b> .....	54
<b>2.3.4 Η τεχνικές που βασίζονται στην τεχνολογία του Device to Device (D2D)</b> .....	55
<b>2.3.5 Η τεχνολογία Spectrally Efficient Frequency Division Multiplexing (SEFDM)</b> ....	61
<b>2.3.6 Η τεχνολογία του Non Orthogonal Multiple Access (NOMA)</b> .....	62
<b>2.3.7 Το δίκτυο Full Duplex Ultra Dense Network (FDUDN)</b> .....	66
<b>Κεφάλαιο 3. Διαχείριση Φάσματος</b> .....	68
<b>3.1 Εισαγωγή στα Small Cells και το δίκτυο HetNet</b> .....	68
<b>3.1.1 Small Cells</b> .....	68
<b>3.2 Διαχείριση Τηλεπικοινωνιακών Πόρων για ετερογενή 5G δίκτυα (HetNets)</b> .....	73
<b>3.2.1 Διαχείριση του τηλεπικοινωνιακού δικτύου στα HetNets</b> .....	74
<b>3.3 Κατανομή Πόρων στα CRN (Cognitive Radio Network) δίκτυα</b> .....	77
<b>3.3.1 Εισαγωγή στα CRN.</b> .....	77
<b>3.3.2 Ορισμός του CRN και οι κύριες λειτουργίες του.</b> .....	77
<b>3.3.3 Συνεργατική επικοινωνία.</b> .....	78
<b>3.3.4 Κατανομή Πόρων</b> .....	80
<b>3.4 Κατανομή πόρων σε ετερογενή δίκτυα NOMA</b> .....	81

3.4.1	Εισαγωγή .....	81
3.4.2	Βελτιστοποίηση Πόρων για ετερογενή δίκτυα NOMA.....	82
3.4.3	Κατανομή πόρων για συστήματα NOMA Downlink .....	83
3.5	Κατανομή πόρων για το 5G Radio Access Network (RAN).....	86
3.5.1	Αρχιτεκτονική του 5G RAN.....	87
3.5.2	RAN Slicing .....	89
3.5.3	Τεχνικές Κατανομής Πόρων .....	89
3.6	Κατανομή Πόρων στα OFDMA HetNets.....	92
3.7	Κατανομή Πόρων σε HetNets με downlink-uplink decoupled access .....	94
3.8	Σχέδια κατανομής και αναμετάδοσης πόρων για URLLC .....	96
Κεφάλαιο 4.	Επίλογος.....	97
4.1	Σύνοψη.....	97
4.2	Μελλοντικές επεκτάσεις.....	98
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....		99
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ.....		106

## Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1. Αρχιτεκτονική του Advance Mobile Phone System(AMPS) [2] .....	13
Εικόνα 2. GSM αρχιτεκτονική [6] .....	14
Εικόνα 3. Χρονοδιάγραμμα των εκδόσεων του 3GPP[12] .....	16
Εικόνα 4. Εξέλιξη των ασύρματων τεχνολογιών με τη πάροδο του χρόνου [14].....	17
Εικόνα 5. Εξέλιξη του 5G από το Rel-15 στο Rel-17.....	20
Εικόνα 6. Κατηγορίες του 5G NR [24].....	23
Εικόνα 7.Γενική περιγραφή της αρχιτεκτονικής του 5G .....	26
Εικόνα 8. Slices για mMTC και URCC [27] .....	27
Εικόνα 9. Λειτουργικά στρώματα 5G αρχιτεκτονικής [28].....	29
Εικόνα 10. Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα [30] .....	31
Εικόνα 11. FDD και TDD.....	35
Εικόνα 12. Massive MIMO uplink και downlink .....	49
Εικόνα 13. OFDM μοντέλο για την βελτίωση της φασματικής απόδοσης.....	54
Εικόνα 15. Αρχιτεκτονική HUDN με δυνατότητα NOMA .....	63
Εικόνα 16. Κατανομή πόρων για το προτεινόμενο ενιαίο πλαίσιο HUDN με δυνατότητα NOMA.....	65
Εικόνα 17. Τα χαρακτηριστικά των Small Cells .....	69
Εικόνα 18. Αρχιτεκτονική HetNet δικτύου.....	73
Εικόνα 19. Βασικά στοιχεία κατανομής πόρων.....	80
Εικόνα 20. Κοινή χρήση φάσματος για OFDMA και NOMA για δύο χρήστες.....	82
Εικόνα 21. Ετερογενή Δίκτυο NOMA.....	83
Εικόνα 22. Αρχιτεκτονική F-RAN.....	91
Εικόνα 23. Σενάριο Ύπνου στα HetNets .....	93



## **Λίστα Πινάκων**

Πίνακας 1. Σύγκριση των Ασύρματων δικτύων .....	21
Πίνακας 2. Κατανομή Πόρων στην inband επικοινωνία .....	59

# ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κάτι που μας έδειξαν οι δύο προηγούμενες χρονιές, με όσα διαδραματίστηκαν από την πανδημία του κορονοϊού μέχρι τις τεχνολογικές υπερβάσεις που έκανε η ανθρωπότητα, είναι πως η ανάγκη του διαδικτύου και των κινητών συσκευών είναι πλέον αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητας μας. Η εξέλιξη και η ανάπτυξη των τηλεπικοινωνιών αποτελεί “μονόδρομο” για την μετάβαση μας σε μια νέα πραγματικότητα, μια πραγματικότητα που θα μας διευκολύνει και θα μας προσαρμόσει στις νέες υπηρεσίες του διαδικτύου και των κοινωνιών που βασίζονται στην τεχνολογία. Πιο συγκεκριμένα, ο τομέας των δικτύων είναι σε θέση πλέον να προσφέρει αύξηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, ελαχιστοποίηση της χρόνο-καθυστερήσης και του χρόνου απόκρισης, αρκετά καλή ποιότητα υπηρεσιών, ικανοποιητική ασφάλεια, παροχή επιπλέον χωρητικότητας μέσω φασματικών συχνοτήτων, δυνατότητα εκ νέου διαμόρφωσης των υποδομών του δικτύου αλλά και ομοιόμορφη και πιο αξιόπιστη υποστήριξη πολλών περισσότερων χρηστών του δικτύου σε σχέση με τις προηγούμενες γενιές δικτύων.

Η αύξηση των χρηστών, των υπηρεσιών, της χωρητικότητας του δικτύου και της χρόνο-καθυστερήσης μεταξύ των συσκευών καθιστούν την αύξηση του διαθέσιμου φάσματος και των ευρύτερων ευρών ζώνης στα μελλοντικά κινητά ευρυζωνικά συστήματα υποχρεωτική. Ο διαμοιρασμός του φάσματος είναι μείζονος σημασίας καθώς η άδεια χρήσης του φάσματος παρέχει αξιοπιστία και επενδυτική βεβαιότητα για τα κινητά ευρυζωνικά συστήματα κινητής τηλεφωνίας. Στην συγκεκριμένη εργασία θα παρουσιαστούν διαφορετικοί τρόποι κατανομής του φάσματος σε δίκτυα Πέμπτης Γενιάς (5G), τρόποι και τεχνικές για την αύξηση της φασματικής απόδοσης αλλά και μηχανισμοί διαμοιρασμού των φασματικών πόρων σε 5G δίκτυα με στόχο την αύξηση της φασματικής απόδοσης του δικτύου.

Αρχικά, στο κεφάλαιο 1 θα ξεκινήσουμε κάνοντας μια ιστορική αναδρομή στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Αναφερόμενοι από τα δίκτυα Πρώτης Γενιάς μέχρι και τα δίκτυα Τέταρτης Γενιάς παραθέτουμε τα κυριότερα σημεία τους και τις τεχνολογίες που χρησιμοποίησαν. Συνεχίζουμε με την εισαγωγή στα δίκτυα 5G και τα χαρακτηριστικά τους, έπειτα μελετάμε την αρχιτεκτονική τους, τις καινοτομίες του και την λειτουργία τους και τέλος γιατί καθίστανται αναγκαία στις μέρες μας αλλά και τις τεχνολογίες που θα χρησιμοποιήσουν και τις προκλήσεις που τα χαρακτηρίζουν.

Στο κεφάλαιο 2, κάνουμε εισαγωγή στο Φάσμα συχνοτήτων, αναφέροντας την σημασία και την αναγκαιότητα του για τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Έπειτα, κάνουμε εισαγωγή του φάσματος στο 5G δίκτυο και τις ζώνες συχνοτήτων που χρησιμοποιεί. Κάνουμε ιδιαίτερη αναφορά και ανάλυση στις ζώνες φάσματος Μεσαίας ζώνης συχνοτήτων και Συχνοτήτων Χιλιοστών, οι οποίες είναι οι βασικές για την κάλυψη του 5G δικτύου. Αναφέρουμε τις τεχνικές κοινής χρήσης του φάσματος στο 5G, όπως η κάθετη και η οριζόντια κοινή χρήση. Ακόμα, περιγράφουμε και αναλύουμε τις τεχνικές και τις τεχνολογίες για τη αύξηση της φασματικής απόδοσης στο 5G δίκτυο.

Στο κεφάλαιο 3, περιγράφουμε αναλυτικά την ανάγκη των small cells στο υπάρχον δίκτυο. Κατηγοριοποιούμε τα small cells και αναφέρουμε τα κύρια χαρακτηριστικά τους και παράλληλα κάνουμε εισαγωγή στα ετερογενή δίκτυα. Στη συνέχεια, παραθέτουμε, μέσω εργασιών από τον επιστημονικό χώρο και ανάλυσης τους, τις τεχνικές κατανομής πόρων για

την αύξηση της φασματικής απόδοσης του δικτύου, όπου γίνεται μέσω των τεχνολογιών και των τεχνικών που είναι διαθέσιμες για τα υπάρχοντα δίκτυα.

Στο κεφάλαιο 4, πραγματοποιούμε μια συνοπτική αναφορά της παρούσας διπλωματικής εργασίας και αναφέρουμε κάποια ζητήματα τα οποία απαιτούν περαιτέρω επιστημονική έρευνα και μελέτη στο μέλλον.

Τέλος, παρατίθενται το κεφάλαιο της Βιβλιογραφίας που χρησιμοποιήθηκε για την συγγραφή της διπλωματικής, και το Παράρτημα με τα Ακρωνύμια στα οποία γίνεται η χρήση τους καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας.

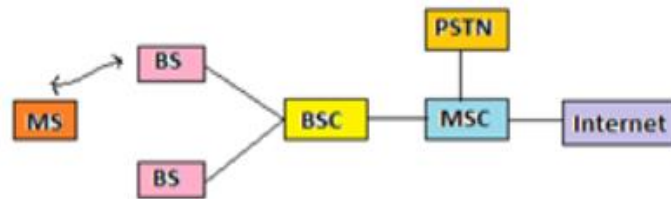
# Κεφάλαιο 1. Δίκτυα 5G

## 1.1 Ιστορική Αναδρομή

Η ανάγκη του διαδικτύου και των κινητών συσκευών από τους καταναλωτές, αλλά και οι απαιτήσεις τους σε αυτές, συντέλεσαν σε ένα βαθμό, ώστε η ασύρματη επικοινωνία μέσω της κινητής τηλεφωνίας να έχει τη μεγαλύτερη ανάπτυξη από οποιονδήποτε άλλο τομέα. Η δημιουργία και η εξέλιξη της βιομηχανίας των κινητών τηλεφώνων έχει ξεκινήσει από τις αρχές της δεκαετίας του 1970 και μέχρι τα τέλη της έκανε την εμφάνιση της η 1<sup>η</sup> γενιά κινητής ασύρματης επικοινωνίας (First Generation Networks, 1G). Βέβαια έπρεπε να περιμένουμε μέχρι και το 2000 και την 3<sup>η</sup> γενιά για να δούμε την δημοτικότητα του ασύρματου δικτύου να γίνεται ευρέως γνωστή στο κόσμο. Τότε η ασύρματη επικοινωνία άρχισε να γίνεται πιο ελκυστική στον άνθρωπο και να χρησιμοποιείται από όλο και περισσότερους. Έτσι αναπτύχθηκε μια τεχνολογία με υψηλό εύρος ζώνης και τεράστια δημοτικότητα στις συσκευές, αφού υπήρχαν πολλές παραπάνω δυνατότητες πέρα από την τηλεφωνία και τα μηνύματα. Σαν αποτέλεσμα λοιπόν η δημοτικότητα των smartphones και tablets εκτόξευε την κινητή ασύρματη επικοινωνία όσον αφορά την ανάπτυξη της, τη ζήτηση και τις τεχνολογίες που παρέχει τη τελευταία 10ετία. Οι άνθρωποι έχουν κάνει αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητας τους τις κινητές ασύρματες επικοινωνίες. Η ποικιλομορφία της κουλτούρας παίζει σημαντικό ρόλο για την ανάπτυξη αυτή των κινητών, αφού υιοθετήθηκε με φιλικό τρόπο από τους ανθρώπους και τις κοινωνίες. Η κυψελοειδή τεχνολογία και η εξέλιξη της, προωθούν την κοινωνία σε ένα κόσμο πλήρως συνδεδεμένο μεταξύ των ανθρώπων και των συσκευών. Η Πέμπτη εποχή θα είναι μια έξυπνη καινοτομία που θα συνδέει ολόκληρη την κοινωνία με τον τεράστιο αριθμό αντικειμένων μέσω του διαδικτύου, κάτι που ονομάζεται το Διαδίκτυο των πραγμάτων IoT (Internet of Things). Αυτό θα πραγματοποιηθεί με την αύξηση της χωρητικότητας του ασύρματου συστήματος [1][2].

Όταν μιλάμε για κινητή ασύρματη γενιά, αναφερόμαστε και στις αλλαγές που επιφέρει η φύση του συστήματος, όπως τεχνολογία, ταχύτητα, χωρητικότητα δεδομένων, συχνότητα, καθυστέρηση, κλπ. Κάθε γενιά κινητής τηλεφωνίας διαφοροποιείται από την άλλη. Με διαφορετική χωρητικότητα, νέες τεχνολογίες και τεχνικές. Η πρώτη γενιά (1G) κινητής ασύρματης επικοινωνίας δικτύου ήταν αναλογική δηλαδή εντός του δικτύου γινόταν αποστολή αναλογικών φωνητικών ραδιοκυμάτων και χρησιμοποιούταν για φωνητικές κλήσεις μεταξύ των συσκευών. Τα χαρακτηριστικά του ήταν κακή αξιοπιστία μεταβίβασης, ελάχιστος βαθμός ασφάλειας, χαμηλό επίπεδο απόδοσης φάσματος, μικρή ζωή μπαταρίας, αναλογικό σήμα, επέτρεπε φωνητικές κλήσεις σε 1 χώρα, μεγάλο μέγεθος τηλεφώνου, μικρή χωρητικότητα, κακοί φωνητικοί σύνδεσμοι και ελάχιστη ασφάλεια από τότε που πραγματοποιήθηκαν φωνητικές κλήσεις σε πύργους τηλεπικοινωνιακού δικτύου επικοινωνίας, κάνοντας αυτές τις κλήσεις ευαίσθητες σε ανεπιθύμητη υποκλοπή από τρίτους. Κάποια πρωτόκολλα που χρησιμοποιούσε ήταν το Mobile Telephone System (MTS), Nordic Mobile Telephone (NMT), Advanced Mobile Telephone System (AMTS), όπου η **αρχιτεκτονική του παρουσιάζεται στην Εικόνα 1** σαν παράδειγμα, Improved Mobile Telephone Service (IMTS), Push to Talk

(PTT), Total Access Communications System (TACS) , κάθε ήπειρος και κάθε χώρα χρησιμοποιούσε διαφορετικό πρωτόκολλο για τις επικοινωνίες του [3][4][5].

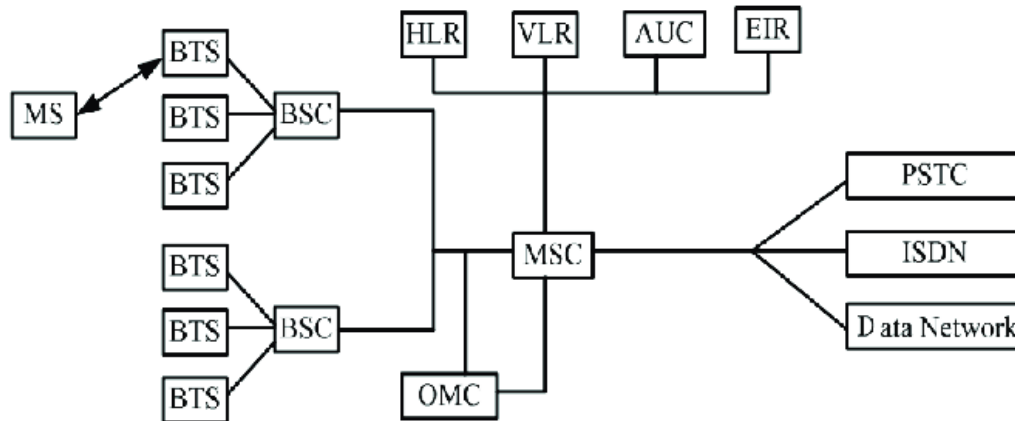


Εικόνα 1. Αρχιτεκτονική του Advance Mobile Phone System(AMPS) [2]

Η ασφαλέστερη επικοινωνία καθώς και η μεταφορά δεδομένων, είχε σαν αποτέλεσμα τα δίκτυα δεύτερης γενιάς (Second Generation Networks, 2G) να αναπτυχθούν. Υποστήριζαν την αποστολή γραπτών μηνυμάτων και χρησιμοποιούσαν ψηφιακό σήμα για μετάδοση φωνής ανάμεσα σε 2 συσκευές, δηλαδή την υποστήριξη ψηφιακής μετάδοσης ήχου και δεδομένων, που ήταν η πρώτη γενιά δικτύων που υποστήριξε τέτοιου είδους μετάδοση. Η αρχή του 2G έγινε το 1991, βασιζόταν στο πρωτόκολλο Global System for Mobile Communications (GSM) όπου ήταν και το πρώτο που υποστήριζε διεθνή περιαγωγή (International Roaming). Το GSM, **η αρχιτεκτονική του οποίου φαίνεται στην Εικόνα 2**, είναι ένα ψηφιακό κυψελοειδές σύστημα, εκμεταλλεύεται την τεχνική πολλαπλής πρόσβασης και τα ηλεκτρομαγνητικά σήματα μαζί με το διαχωρισμό των διαθέσιμων συχνοτήτων του φάσματος σε κανάλια και με την διαίρεση αυτών μεταδίδει το σήμα σε χρονοθυρίδες. Με λίγα λόγια έδινε τη δυνατότητα στις κινητές συσκευές εν μέσω μιας κλήσης να συνδεθούν σε διαφορετικές κυψέλες, χωρίς όμως να γίνεται διακοπή της σύνδεσης [6]. Αυτή η τεχνική ονομάστηκε handover<sup>1</sup>. Στόχος του 2G ήταν η παροχή υπηρεσιών γραπτών μηνυμάτων των Short Message Service (SMS) και Multimedia message (MMS), δεν μπορούσε να διαχειριστεί πολύπλοκα δεδομένα (π.χ. βίντεο), παρείχε καλύτερη ποιότητα και μεγαλύτερη χωρητικότητα, χρειαζόταν ισχυρό ψηφιακό σήμα για να μπορέσουν τα κινητά τηλέφωνα να λειτουργήσουν αλλιώς το σήμα θα ήταν αδύναμο. Την ίδια περίοδο στις χώρες της Βόρειας Αμερικής και στη Νότιο Κορέα, αναπτύχθηκε ένα εναλλακτικό πρωτόκολλο της έκδοσης του GSM που λεγόταν Code-Division Multiple Access (CDMA). Το CDMA μέσω ενός καναλιού επικοινωνίας παρείχε τη δυνατότητα σε πολλαπλούς πομπούς να αποστέλλουν ταυτόχρονα δεδομένα σε ένα δέκτη, έτσι οι χρήστες ομαδοποιούνταν ανά σύνολα συχνοτήτων. Το πρωτόκολλο GSM βελτιωνόταν συνεχώς και παρείχε ποιοτικότερες υπηρεσίες οι οποίες οδήγησαν στην ανάπτυξη του 2.5G, στο οποίο προστέθηκε η δυνατότητα αποστολής και λήψης e-mail και το web browsing. Ένα από τα μεταγενέστερα πρωτόκολλα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν το General Packet Radio Service (GPRS) και το Enhanced Data rates in GSM Environment (EDGE) που έθεσε τη γενιά 2.75 των Δικτύων. Το GPRS παρείχε τη δυνατότητα για χρέωση του συνδρομητή σύμφωνα με τη ποσότητα των δεδομένων που αποστέλλονταν (πακέτα) αντί για το χρόνο σύνδεσης του. Επίσης η μόνιμη

<sup>1</sup> Το handover στα δίκτυα τηλεπικοινωνιών είναι η εναλλαγή μιας κλήσης που βρίσκεται σε εξέλιξη ή η μεταφορά δεδομένων σε διαφορετική κυψέλη επειδή η κινητή μονάδα βρίσκεται εν κινήσει. Έτσι αποφεύγεται ο τερματισμός της μεταφοράς των δεδομένων, εφόσον ο χρήστης βγει εκτός ορίων της κυψέλης.

σύνδεση στο διαδίκτυο μαζί με την ευελιξία στον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων που έδινε το GPRS πρωτόκολλο έδωσε τις βάσεις για τη μετάβαση στο 3G δίκτυο [7].



Εικόνα 2. GSM αρχιτεκτονική [6]

Λίγο αργότερα και για την ακρίβεια το 2001 κάνει την εμφάνιση της στο κοινό η Τρίτη γενιά (Third Generation Networks, 3G) ευρυζωνικών δικτύων η οποία έδωσε τη δυνατότητα για υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, παροχή υποστήριξης πολυμέσων (multimedia support) καθώς και μεγαλύτερη χωρητικότητα εντός του τηλεπικοινωνιακού δικτύου. Σκοπός του ήταν ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων να αυξηθεί από τα 144 Kbps (το οποίο ήταν το κατώτατο όριο της ταχύτητας του) στα 384 kbps σε ένα ευρύ φάσμα μιας περιοχής και στα 2 Mbps σε μια τοπική περιοχή. Κάτι που ξεπεράστηκε κατά πολύ από τις τότε προσδοκίες των εταιρειών, μέσω επεκτάσεων βασικών πρωτοκόλλων στα 10.000 Kbps ή 10 Mbps. Τα δεδομένα στέλνονται με την τεχνολογία που ονομάζεται Packet Switching. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως βασίστηκε στη GSM τεχνολογία στην οποία έγινε επέκταση και ονομαζόταν πλέον Universal Mobile Telecommunications Service (UMTS). Καθώς τα κινητά τηλέφωνα γίνονταν όλο και πιο συνηθισμένα από τα σταθερά τηλέφωνα καθίσταται σαφές πως η ασύρματη πρόσβαση στο διαδίκτυο θα είναι ακόμα πιο επιθυμητή και οι χρήστες θα θέλουν ευρυζωνική πρόσβαση στο διαδίκτυο όπου και αν βρίσκονται. Οπότε η υψηλή ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων ήταν αναπόφευκτη. Το ασύρματο δίκτυο ευρείας ζώνης (Wide Band Wireless Network) που χρησιμοποιεί το 3G αυξάνει την ευκρίνεια. Εν συντομία το 3G αύξησε τους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων και το εύρος ζώνης για να έχει αποδοτικότερη διασύνδεση των εφαρμογών που εξαρτώνται από το WEB αλλά και για αρχεία ήχου και βίντεο. Παρέχει γρηγορότερη επικοινωνία, αποστολή και λήψη μεγάλων σε όγκο e-mail, ευρυζωνική δυνατότητα και μεγάλη χωρητικότητα, δυνατότητα 3D Gaming, υψηλές ταχύτητες στο WEB, μεγαλύτερη ασφάλεια, τηλεδιάσκεψη, χάρτες πλοήγησης. Το εύρος ζώνης του ήταν ανάμεσα στα 15-20 MHz που χρησιμοποιούσαν για υψηλές ταχύτητες στο διαδίκτυο, video chatting κλπ. Το 3G όπως προαναφέρθηκε χρησιμοποιούσε την UMTS τεχνολογία στην Ευρώπη, ενώ την CDMA2000 στην Αμερική που μετονομάστηκε σε Evolved-Data Optimized (EV-DO). Η International Mobile Telecommunications-2000 (IMT-2000) είναι η επίσημη Διεθνής

τηλεπικοινωνιακή ένωση για το 3G και αποσκοπεί στην παροχή ασύρματης πρόσβασης σε επίπεδο τηλεπικοινωνιακής υποδομής μέσω δορυφόρων και επίγειων συστημάτων, που εξυπηρετούν χρήστες σταθερών και κινητών τηλεφώνων μέσω δημόσιων και ιδιωτικών τηλεφωνικών δικτύων. Η τεχνολογία High Speed Downlink Packet Access (HSDPA) που χρησιμοποιήθηκε έπειτα, εκτόξευσε τη ταχύτητα downlink στα 14Mbps.

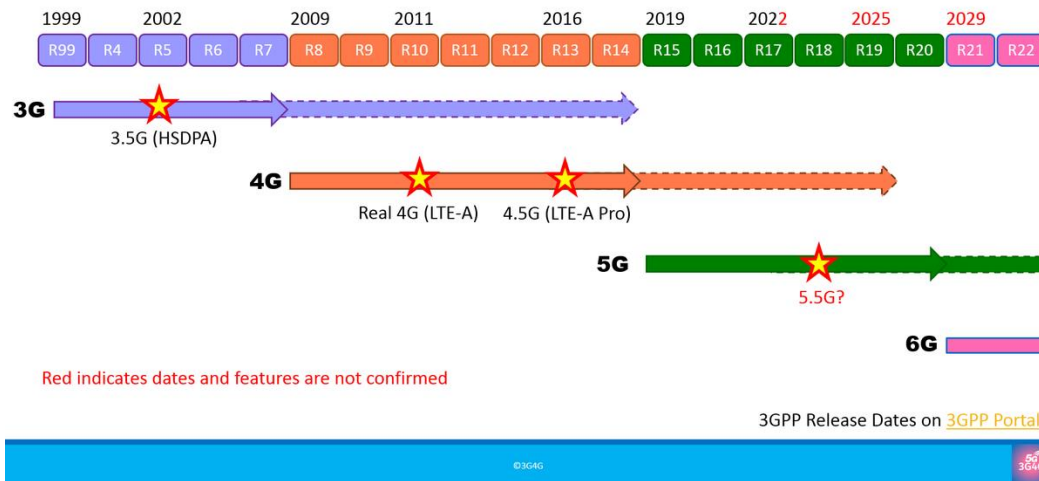
Το δίκτυο τέταρτης γενιάς (Fourth Generation Networks, 4G) ενσωματώνεται στη Τρίτη γενιά με σταθερό internet για την υποστήριξη του ασύρματου κινητού internet, το οποίο ξεπερνά τους περιορισμούς του 3G. Την εμφάνιση του την έκανε το 2009 στην αγορά. Το 4G κατάφερε να αυξήσει το εύρος ζώνης (Bandwidth) και να μειώσει το κόστος των πόρων. Βασίστηκε αποκλειστικά στο IP σύστημα δικτύου. Η τεχνολογία του 4G παρέχει μια ομαλή μετάβαση σε ένα ετερογενές δίκτυο. Χρησιμοποιεί μόνο πακέτα εναλλαγής (IPv6). Στόχος του ήταν οι υψηλές ταχύτητες, η λειτουργία υψηλής χωρητικότητας, υψηλή ποιότητα, χαμηλό κόστος υπηρεσιών και ασφάλεια για υπηρεσίες δεδομένων και φωνής, πολυμέσα και διαδίκτυο μέσω IP. Η μετάβαση στην ALL-IP αποσκοπούσε στην δημιουργία μιας κοινής πλατφόρμας για τις τεχνολογίες που έχουν ήδη αναπτυχθεί και οι υπηρεσίες που θα αναπτυχθούν και θα παρέχονται να ταιριάζουν με τις προσδοκίες των χρηστών. Ουσιαστικά με τη χρήση του 4G ο χρήστης έχει την ελευθερία και την ευελιξία να επιλέξει οποιαδήποτε υπηρεσία με λογικό και προσιτό QoS (Quality of Service)<sup>2</sup> [8] οπουδήποτε και ανά πάσα στιγμή [9]. Το πρωτόκολλο LTE (Long Term Evolution) όπως ορίζεται από το 3GPP (3rd Generation Partnership Project)<sup>3</sup> είναι μια ευέλικτη διεπαφή ραδιοκυμάτων, εμφανίστηκε με την έκδοση 8 του 3GPP το 2008 και είναι γνωστό και ως το πρότυπο 3.9G [9]. Στην Εικόνα 3 παρουσιάζεται το χρονοδιάγραμμα των εκδόσεων του 3GPP για τα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών. Μετά την επιτυχία του High Speed Packet Access (HSPA) και του EV-DO, η 3GPP συνένωσε αυτά τα δύο πρωτόκολλα για να ικανοποιήσει τις αυξανόμενες απαιτήσεις της απόδοσης της κινητής ευρυζωνικής σύνδεσης. Το αποτέλεσμα περιλαμβάνει έναν ευέλικτο και φασματικά αποτελεσματικό σχεδιασμό πρωτοκόλλου σύνδεσης με χαμηλά γενικά έξοδα, το οποίο πληροί τους απαιτητικούς στόχους που τέθηκαν για να εξασφαλίσουν καλή εξυπηρέτηση και απόδοση σε διάφορες εφαρμογές. Ο ρυθμός δεδομένων στο downlink κυμαινόταν από τα 300 Mb/s με το μοντέλο αρχιτεκτονικής Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (OFDMA) ενώ στο uplink από τα 75 Mb/s με μοντέλο αρχιτεκτονικής Single-Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA), για τερματικά σε ευνοϊκές συνθήκες, ενώ έως μερικές δεκάδες kb/s στην άκρη της κυψέλης, ανάλογα με το σενάριο ανάπτυξης. Το handover εξυπηρετούσε εφαρμογές, όπως της φωνής σε πραγματικό χρόνο και το latency (καθυστέρηση) μεταξύ τερματικού και σταθμού βάσης είχε προγραμματιστεί να είναι λιγότερο από τα 5 ms. Επίσης η αρχιτεκτονική του LTE σύμβαλε στην μείωση κόστους του δικτύου [10]. [11][12]

---

<sup>2</sup> Σχετίζεται με την κίνηση των δεδομένων. Ορίζεται ως η μέτρηση του μέσου όρου της απόδοσης μιας υπηρεσίας (όπως δίκτυο υπολογιστών, τηλεφωνία, cloud). Δίνει προτεραιότητα σε πακέτα, ώστε η εφαρμογή που χρησιμοποιεί αυτά τα πακέτα να έχει τη μικρότερη δυνατή καθυστέρηση. Επίσης χρησιμοποιεί ένα classification μηχανισμό στα δεδομένα κίνησης.

<sup>3</sup> Το 3GPP είναι ένα συνεργατικό έργο μεταξύ μιας ομάδας τηλεπικοινωνιακών ενώσεων με αρχικό στόχο την ανάπτυξη παγκόσμιων προδιαγραφών για κινητά συστήματα τρίτης γενιάς (3G). Το έργο βασίστηκε στις προδιαγραφές του Παγκόσμιου Συστήματος για Κινητές Επικοινωνίες (GSM) και στην προσπάθεια της International Telecommunication Union (ITU). Το έργο συνεργασίας έχει επεκτείνει από τότε την εστίασή του ώστε να περιλαμβάνει τη συντήρηση και ανάπτυξη τεχνικών προδιαγραφών και εκθέσεων της GSM.

## 3GPP Releases Timeline



Εικόνα 3. Χρονοδιάγραμμα των εκδόσεων του 3GPP[12]

Με την επέκταση του LTE στην έκδοση 10, το πρότυπο LTE-Advanced (LTE-A) έγινε το επίσημο πρότυπο για τα 4G δίκτυα. Πληρούσε τις απαιτήσεις που επέβαλλε η IMT στην τέταρτη γενιά δικτύων. Το downlink παρέχει μέγιστο ρυθμό δεδομένων 1 Gbps με μέγιστο εύρος ζώνης λειτουργίας τα 100 MHz, άρα χαμηλότερη καθυστέρηση συγκριτικά με το LTE. Το LTE-A θεωρείται δημοφιλές για τους χρήστες αφού έχει μειωμένο λειτουργικό κόστος και διαχειρίζεται αποτελεσματικά τις παρεμβολές. Επίσης, είναι το πιο αποδοτικό λόγω των ικανοτήτων του να διαχειρίζεται το δίκτυο και τις υπηρεσίες του δικτύου και να το κάνει με υψηλή ποιότητα. Οι περαιτέρω εκδόσεις 11 και 12 παρέχουν βελτιώσεις στο MIMO (Multiple-Input and Multiple-Output), τη συγκέντρωση φορέα και την αποτελεσματικότητα του φάσματος για την αύξηση της ταχύτητας και την επίλυση ζητημάτων κίνησης δεδομένων. Η μέθοδος Carrier aggregation (CA) είναι ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά του LTE-A καθώς έχει ρυθμό δεδομένων 1 Gbps και 500 Mbps για το Downlink και το Uplink αντίστοιχα. Το CA σχεδιάστηκε για να μπορούν οι συσκευές LTE των εκδόσεων 8 και 9 να είναι συμβατές με τις αντίστοιχες της έκδοσης 10, δηλαδή να υπάρχει προς τα πίσω συμβατότητα. Τα δεδομένα μεταδίδονται με μη συνεχή ή συνεχόμενο τρόπο μέσω των Component Carriers (CC) τα οποία είναι πολλαπλοί φορείς LTE. Μέσω του CA με το οποίο γίνεται επέκταση του εύρους ζώνης επιτυγχάνεται φασματική απόδοση στο σύστημα [13].

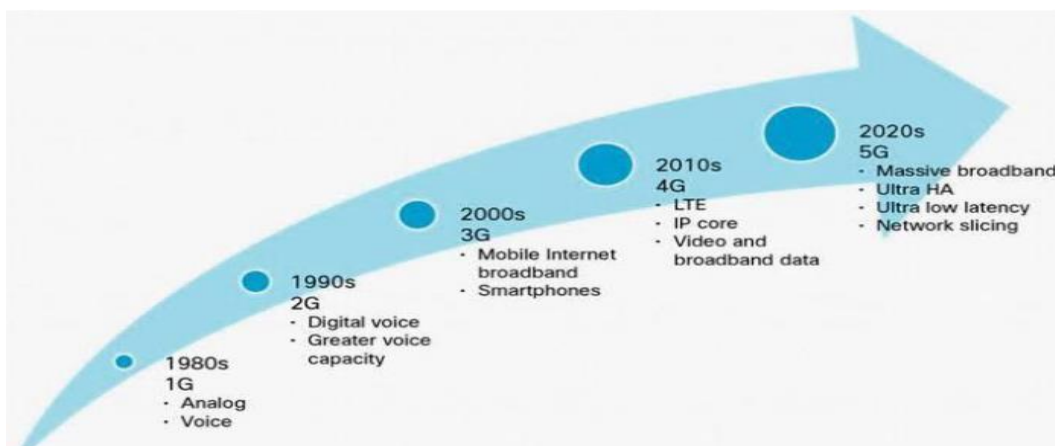
Τα ετερογενή δίκτυα χρησιμοποιώντας σταθμούς βάσης και μέσω ευέλικτων εφαρμογών χαμηλού κόστους καταφέρνουν να παρέχουν μια ομοιογενή ευρυζωνική εμπειρία στους χρήστες σε οποιαδήποτε σημείο στο δίκτυο. Χρησιμοποιώντας ένα σύνολο σταθμών βάσης σε μεγάλη ποικιλία, έχουν την ικανότητα να βελτιώσουν την φασματική απόδοση ανά μονάδα επιφάνειας. Οι σταθμοί βάσης με χαμηλή ισχύ μπορούν να αναπτυχθούν για να εξαφανίσουν τα κενά κάλυψης στο σύστημα για μακροεντολές και ως αποτέλεσμα να γίνει βελτίωση της χωρητικότητας στα θερμά σημεία. Οι σταθμοί βάσης σε ένα ομοιογενές δίκτυο, εξυπηρετούν και όλα τα κινητά τερματικά που έχουν την ισχυρότερη ισχύ σήματος, ενώ σήματα που λαμβάνονται από άλλους σταθμούς βάσης και θεωρούνται ανεπιθύμητα



αντιμετωπίζονται ως παρεμβολές. Οι στρατηγικές επιλογές διακομιστών, ο συντονισμός πόρων μεταξύ των σταθμών βάσης, και οι προηγμένες και αποτελεσματικές διαχειρίσεις παρεμβολών μπορούν να έχουν σημαντική απόδοση και εμπειρία για τον χρήστη σε σύγκριση με μια συμβατική ανάπτυξη υποδομής ενός κυψελοειδούς δικτύου.

## 1.2 Εισαγωγή στα δίκτυα 5G

Η Πέμπτη γενιά δικτύων (Fifth Generation Networks, 5G) έχει παρουσιαστεί σε ένα μεγάλο μέρος της αγοράς, τα πρώτα συμβατά τηλέφωνα με την τεχνολογία αυτή κυκλοφορούν σε όλο το κόσμο και παρέχουν στο χρήστη δυνατότητες που μέσω των προηγούμενων δικτύων δεν θα μπορούσαν να αξιοποιήσουν. Από το κατέβασμα μιας ταινίας Full HD, σε λίγα δευτερόλεπτα μέχρι συνομιλίες μέσω βίντεο τόσο συναρπαστικές που νιώθουμε ότι μπορούμε να αγγίξουμε το άλλο άτομο μέσα από την οθόνη. Το 5G μας μεταβαίνει σε μια νέα τεχνολογική εποχή, όπου και λόγω των συνθηκών έπρεπε να προσαρμοστούμε σύντομα για να καλύψουμε τις καθημερινές ανάγκες μας, από την εργασία μέχρι και την ψυχαγωγία, από την υγεία μέχρι και τη παιδεία. Μας διευκολύνει στην καθημερινότητα μας κάνοντας τα πάντα προσιτά, από την ιατρική εξέταση έως και το παρκάρισμα του αυτοκινήτου μας μέσα στη πόλη. Οι δυνατότητες αυτές πραγματοποιούνται αφού μιλάμε για ένα ετερογενές δίκτυο κινητής τηλεφωνίας με αυξημένη χωρητικότητα, ένα ασύρματο σύστημα μεταγωγής πακέτων με μεγάλη κάλυψη περιοχής και υψηλή απόδοση, με αυξημένες ταχύτητες, με σχεδόν μηδαμινό χρόνο απόκρισης και τεχνικές μείωσης της ενεργειακής κατανάλωσης. Στην Εικόνα 4 παρουσιάζεται χρονολογικά η εξέλιξη των ασύρματων δικτύων μέχρι το σήμερα και το 5G, και τονίζονται κάποια από τα βασικά χαρακτηριστικά των δικτύων που αναφέραμε προηγουμένως.



Εικόνα 4. Εξέλιξη των ασύρματων τεχνολογιών με τη πάροδο του χρόνου [14]

Το εύρος δυνατοτήτων του 5G είναι ήδη πολύ μεγαλύτερο από οποιαδήποτε γενιά κινητής τεχνολογίας. Όχι μόνο έχει τρομερή ανταπόκριση εξελισσόμενες απαιτήσεις των καταναλωτών, έχει και τέτοιο αντίκτυπο στις επιχειρήσεις όπου χρίζεται ως αναγκαίο για τη

λεγόμενη «τέταρτη βιομηχανική επανάσταση»<sup>4</sup>. Επίκειται η ενεργοποίηση και η υποστήριξη πολλών στοιχείων αυτής της επανάστασης, συμπεριλαμβανομένου του cloud computing, του Διαδικτύου των πραγμάτων και του γνωστικού υπολογισμού. Από τα αυτόνομα αυτοκίνητα, τις αυτοματοποιημένες βιομηχανικές κατασκευές και τα συνδεδεμένα μηχανήματα και αισθητήρες, το 5G δίνει την άδεια για πιο έξυπνους και αποτελεσματικούς κλάδους της βιομηχανίας (π.χ. κατασκευές, επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας κ.λπ.).

Οι κάθετοι τομείς της βιομηχανίας θα βοηθηθούν και θα αναπτυχθούν, μέσω των προηγμένων δυνατοτήτων του 5G, όπως ο υπολογισμός άκρων για φορητές συσκευές και η διαίρεση του δικτύου από άκρο σε άκρο. Με τον διαχωρισμό του δικτύου οι υπηρεσίες προσαρμόζονται στις ανάγκες ενός οργανισμού όσον αφορά την ταχύτητα, την απαιτούμενη ποιότητα υπηρεσιών, την ασφάλεια κ.λπ. Το Edge computing φέρνει τις υπολογιστικές δυνατότητες πιο κοντά στους καταναλωτές και τους τελικούς χρήστες της επιχείρησης, γεγονός που μπορεί να επιτρέψει πολύ χαμηλές καθυστερήσεις και προσαρμοσμένες τοπικές υπηρεσίες.

Μέσω του ήδη υπάρχοντος δικτύου κινητής τηλεφωνίας και των δημόσιων και ιδιωτικών κυψελών θα διανεμηθεί σε ευρείες περιοχές το 5G. Πάροχοι κινητής τηλεφωνίας παρέχουν δημόσια και τοπικά ιδιωτικά δίκτυα 4G και 5G, επίσης κι άλλοι έχουν την δυνατότητα να δημιουργήσουν τέτοια δίκτυα χρησιμοποιώντας φάσμα μη αδειοδοτούμενο ή έχοντας πρόσβαση σε αδειοδοτημένο φάσμα. Οι δυνατότητες αυτών των υπηρεσιών βασίζονται από την ποσότητα και τον τύπο του φάσματος που χρησιμοποιείται. Η εξαιρετικά γρήγορη ευρυζωνική σύνδεση, οι χαμηλές καθυστερήσεις και άλλες λειτουργίες δεν έχουν την δυνατότητα να παρέχονται σε μία ζώνη 5G, επειδή οι απαιτήσεις των πόρων του δικτύου δεν είναι συμβατές μπορεί να απαιτούνται πολλαπλές ζώνες.

Το 5G χρησιμοποιεί μια καθολική συσκευή για την παροχή όλων των εφαρμογών και διασυνδέει τις υπάρχουσες υποδομές επικοινωνίας. Χρησιμοποιεί προγράμματα διαμόρφωσης λογισμικού. Επικεντρώνεται στην ανάπτυξη του τερματικού χρήστη, όπου η πρόσβαση που θα έχουν τα τερματικά είναι σε διαφορετικές ασύρματες τεχνολογίες ταυτόχρονα σε συνδυασμό με διαφορετικές ροές τεχνολογιών. Το 5G δίκτυο προσπαθεί να υποστηρίξει πολλαπλές ετερογενείς συσκευές σε ένα δίκτυο, με το να αυξήσει τη χωρητικότητα του δικτύου, το εύρος ζώνης του δικτύου και τους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων αλλά και να μηδενίσει τη χρονική αναμονή απόκρισης. Όλα αυτά μειώνοντας την ενεργειακή κατανάλωση μέσα στο δίκτυο. Με τις κατάλληλες τεχνικές, την εξοικονόμηση ενέργειας, το κόστος και την αποδοτικότητα έχουν υλοποιηθεί τα παραπάνω χαρακτηριστικά του δικτύου. [15]

Τα δίκτυα 5G θα επικεντρώνονται κυρίως στο *World Wireless World Wide Web* (WWW) και το IPv6, μια ασύρματη επικοινωνία χωρίς περιορισμούς. Οι τεχνολογίες αυτές χρησιμοποιούν τεχνικές πρόσβασης για να μπορέσουν να διασφαλίσουν ετερογένεια και μέσω των τεχνικών αυτών γίνεται διαχωρισμός σε επίπεδα μέσα στο δίκτυο, αναλαμβάνοντας απαιτητικές εφαρμογές για τη καθημερινότητα μας αλλά και συνδεσιμότητα σε καθολικό βαθμό. Επιταχύνουν το ψηφιακό μετασχηματισμό κάθετων τμημάτων. Για υπηρεσίες εκτός

---

<sup>4</sup> Η πρώτη βιομηχανική επανάσταση συνδέεται με την επίδραση της ατμοηλεκτρικής ενέργειας. Η 2<sup>η</sup> με την επιστήμη και τη μαζική παραγωγή και η 3<sup>η</sup> χαρακτηρίστηκε από την ψηφιακή τεχνολογία και τους υπολογιστές.

cloud θα πρέπει να αυξήσει την αξιοπιστία και να μειώσει τη καθυστέρηση κάτι που καθίσταται δελεαστικό λόγω της έλλειψης αυτοματισμών και τεχνολογίας δικτύου. [16]

### 1.3 Τεχνικά Χαρακτηριστικά του 5G Δικτύου

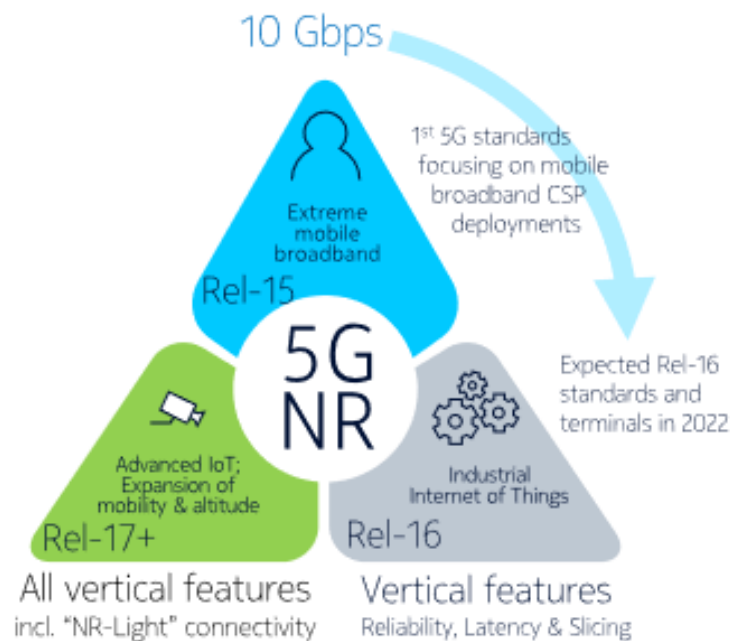
Η πρώτη έκδοση του συστήματος 5G, βασισμένη στην έκδοση 15 που αναπτύχθηκε από την 3GPP, περιλάμβανε το 5G Core (5GC) και το 5G New Radio (NR) με 5G User Equipment (UE) δηλαδή με συσκευές που υποστηρίζουν την 5G τεχνολογία. Εκεί που έδωσε βάση η έκδοση 15 ήταν στην ισχυροποίηση της ευρυζωνικής σύνδεσης για τις κινητές υπηρεσίες. Η έκδοση 16 που αναπτύχθηκε πάλι από τη 3GPP δίνει νέες δυνατότητες και υπηρεσίες που βασίζονται σε τρεις κύριους τομείς χρήσης, το Ultra-Reliable Low Latency Communication (URLLC), enhanced Mobile Broadband (eMBB), massive Machine Type Communications (mMTC) και το βιομηχανικό IoT, συμπεριλαμβανομένης της τεχνολογίας Time Sensitive Communication (TSC), των βελτιωμένων υπηρεσιών τοποθεσίας και της υποστήριξης για Non Public Networks (NPNs). Επιπρόσθετα, γίνεται εισαγωγή ορισμένων σημαντικών νέων τεχνολογιών από την έκδοση 16, όπως το Integrated Access & Backhaul<sup>5</sup> (IAB), το NR σε ζώνες χωρίς άδεια (NR-U), και το NR Vehicle-to-X (V2X), καθώς γίνονται και βελτιώσεις για μαζική σύγκλιση MIMO, ασύρματη και καλωδιακή σύγκλιση, εισαγωγή της υπηρεσίας Service Based Architecture (SBA) η οποία παρέχει ένα ανθεκτικό βασικό δίκτυο Cloud-Native με υποστήριξη end-to-end support για Network Slicing (NS). Η αύξηση που έχουν οι τύποι συνδεσιμότητας των χρηστών, οι περιπτώσεις χρήσης, καθώς και οι εφαρμογές που λειτουργούν πάνω από δίκτυα 5G θα δημιουργήσουν πρόσθετα χαρακτηριστικά ασφαλείας για να μπορέσουν να αντιμετωπιστούν οι απειλές, οι οποίες προβλέπεται πως θα αυξηθούν σε αριθμό, ποικιλία και κλίμακα. [17][18]

Όπως προαναφέραμε η πρώτη φάση του 5G ολοκληρώθηκε με την έκδοση 15 του 3GPP και θεμελίωσε τις επιχειρηματικές απαιτήσεις της αγοράς. Το NR, αποτελεί το διεθνές πρότυπο σε επίπεδο επικοινωνίας με μέσο διάδοσης τον αέρα. Στο τεχνικό σκέλος, το 5G NR θα περιέχει χαμηλές συχνότητες κάτω των 6 GHz και υψηλές συχνότητες άνω των 24 GHz, προσφέροντας συνολικά αυξημένες ταχύτητες, βελτιωμένη αποδοτικότητα και δυνατότητες επεκτασιμότητας του δικτύου και την αρχιτεκτονική και συντονισμό του δικτύου. Το NR χρησιμοποιεί τεχνολογίες επικοινωνίας τύπου μηχανής που είναι γνωστές ως LTE-M και Narrow Band IoT (NB-IoT), οι οποίες έχουν ήδη αναπτυχθεί από την 3GPP στην έκδοση 13. Παρέχοντας επιδόσεις καλύπτοντας μια ευρεία περιοχή χαμηλής ισχύος και ένα ευρύ φάσμα ρυθμών δεδομένων. Οι εκδόσεις 16 και 17 περιλαμβάνουν πρακτικές εφαρμογές, βελτιώσεις υπηρεσιών και πρωτόκολλων που θα οδηγήσουν στην 6η γενιά κινητών επικοινωνιών. Η έκδοση 16 θα υποστηρίζει πλήρως το βιομηχανικό διαδίκτυο των Πραγμάτων (Industrial IoT - IIoT), θα συμπεριλαμβάνει τα βελτιωμένα URLLC και TSC όπου είναι μια υπηρεσία επικοινωνίας που υποστηρίζει ντετερμινιστική και ισόχρονη επικοινωνία με υψηλή αξιοπιστία και διαθεσιμότητα. Αυτό επιτυγχάνεται με όρια στις καθυστερήσεις, απώλεια και αξιοπιστία

---

<sup>5</sup> Το τμήμα backhaul του δικτύου περιλαμβάνει τις ενδιάμεσες ζεύξεις μεταξύ του δικτύου του πυρήνα ή του δικτύου κορμού και των μικρών υποδικτύων στην άκρη του δικτύου.

πακέτων και συγχρονισμό σε επίπεδο νανοδευτερολέπτου, υποστήριξη για NPNs καθώς και δίκτυα mmWave. Η έκδοση 17 περιλαμβάνει αρχιτεκτονική αναμετάδοση και πολύ-μετάδοση, βελτιώσεις υποστήριξης στο Edge Computing, βελτιώσεις για την υποστήριξη ΠoT, υπηρεσίες εγγύτητας, περαιτέρω βελτιώσεις για δίκτυα με δυνατότητα ανάλυσης και ενεργοποίησης για την αυτοματοποίηση των δικτύων (enablers for Network Automation - eNA), τέλος υποστήριξη για NTNs και drones. Ακόμα με τις εκδόσεις 15 και 16, **(όπου η εξέλιξη τους μαζί με κάποιες τεχνολογίες τους απεικονίζονται στην Εικόνα 5)** έγινε η εισαγωγή της λειτουργίας ανάλυσης δεδομένων δικτύου (Network Data Analytics Function - NWDAF), με τη λειτουργία αυτή θα γίνει πλήρως αξιοποίηση των τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης (Artificial Intelligence - AI) και Machine Learning (ML) με σκοπό την αυτοματοποίηση του δικτύου με όσο δυνατόν λιγότερη ανθρώπινη αλληλεπίδραση. Λαμβάνοντας υπόψιν κάποια από τα χαρακτηριστικά που αναφέραμε για το 5G και για κάποια που μιλήσαμε στις πιο πάνω παραγράφους για τις υπόλοιπες τεχνολογίες των ασύρματων δικτύων, παραθέτουμε το Πίνακα 1, που παρουσιάζει κάποια σημαντικά στοιχεία των ασύρματων δικτύων. [18][19]



Εικόνα 5. Εξέλιξη του 5G από το Rel-15 στο Rel-17

Πίνακας 1. Σύγκριση των Ασύρματων δικτύων

Generation→Features↓	1G	2G	3G	4G	5G	6G
Year	1970-1980	1980-1990	1990-2000	2000-2010s	2015 onwards	After 5G
Speed	2.4Kbps	64Kbps	2Mbps	200Mbps to 1Gbps	1Gbps and Higher	10 to 11Gbps
Technology	Analog Cellular	Digital Cellular	Broadband CDMA, IP	Unified IP & seamless combination of broadband LAN, WAN, WLAN, PAN	4G+WWWW	5G+satellite
Standard	AMPS	GSM,PDC,IS-95,IS-136,EDGE,GPRS	CDMA 2000, UMTS,TD-SCDMA,WCDMA	LTE, WiMAX	LAS-CDMA, OFDM, MC-CDMA, UWB, Network-LMD S, IPv6	GPS,COMPASS, GLONASS, Galileo systems
Multiplexing	FDMA	TDMA,CDMA	CDMA	CDMA	CDMA	CDMA
Switching	Circuit	Circuit & Packet	Packet except circuit for air interface	Packet	Packet	Packet
Core Network	PSTN	PSTN and Packet network	Packet Network	Internet	Internet	Internet
Handoff	Horizontal	Horizontal	Horizontal & Vertical	Horizontal & Vertical	Horizontal & Vertical	Horizontal & Vertical
Services	Voice only	Digital voice and short messaging, packetized data	Integrated high quality audio, video and data	Dynamic information access, wearable devices	Dynamic information access, wearable devices with AI capabilities	Ultra fast Internet access

Η τεχνολογία 5G NR λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικές μεθόδους δοκιμών για την επαλήθευση των απαιτήσεων της συχνότητας του δικτύου (Radio Frequency - RF) και Διαχείρισης επικοινωνιακών Πόρων του δικτύου (Radio Resource Management - RRM) σε διαφορετικό εύρος συχνοτήτων, κατηγοριοποιήθηκε σε δύο εύρη συχνοτήτων, στο Εύρος Συχνοτήτων 1 (FR1) όπου η συχνότητα τους κυμαίνεται από 450 MHz έως 6 GHz και Εύρος Συχνοτήτων 2 (FR2) από 24,25 GHz έως 52,6 GHz [20].

Το FR2 χρησιμοποιεί στο NR μια ποσότητα φάσματος που υπερβαίνει κατά πολύ αυτή που καλύπτεται από το FR1. Κατά συνέπεια, η λειτουργία των mmWave παρέχει υψηλή χωρητικότητα και ρυθμό δεδομένων για την χρήση της τεχνολογίας eMBB και τη διασφάλιση της βέλτιστης εμπειρίας του χρήστη. Η υποστήριξη πολλαπλών ζωνών σε χωρισμένες συχνότητες ενός φορέα απαιτεί σωστό χειρισμό από το σχεδιασμό του RF και της κεραίας. Τέλος, το FR2 χαρακτηρίζεται από μια σημαντικά μεγαλύτερη απώλεια διάδοσης ασύρματου συνδέσμου, η οποία μπορεί να αντισταθμιστεί με την υποστήριξη συστοιχιών κεραίας πολλαπλών στοιχείων τόσο στο δίκτυο όσο και στις πλευρές των UE, μαζί με τη χρήση αναλογικών τεχνικών διαμόρφωσης δέσμης για να διασφαλιστεί ότι μπορεί να επιτευχθεί επαρκές επίπεδο κάλυψης [21][22].

Η ανάπτυξη συσκευών με δυνατότητα mmWave απαιτεί σωστή μοντελοποίηση του ενσωματωμένου σχεδιασμού και μετρήσεις για την αξιολόγηση της απόδοσης της συσκευής και την επικύρωση των χρησιμοποιούμενων μοντέλων. Επιπλέον, η λειτουργία mmWave φέρνει σημαντικές προκλήσεις στη δοκιμή και την επαλήθευση της απόδοσης της συσκευής, επομένως έχει ισχυρές επιπτώσεις στις διαδικασίες ανάπτυξης και πιστοποίησης των UE. Το

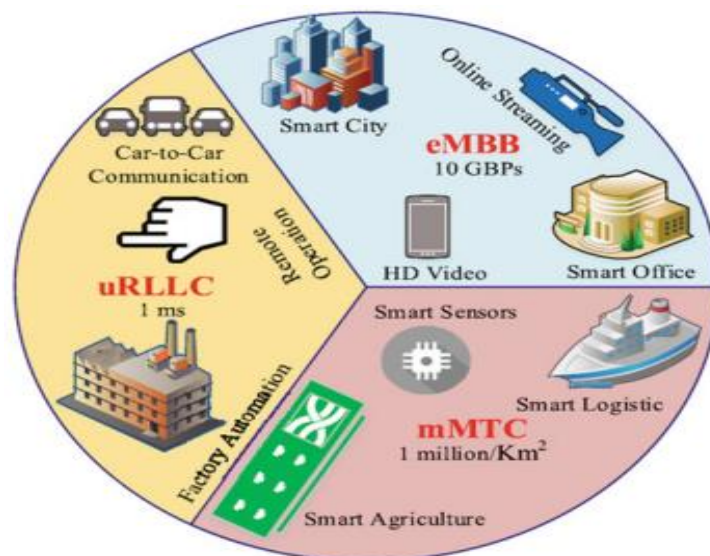
πολύ υψηλό επίπεδο ολοκληρωμένων εξαρτημάτων χαρακτηρίζουν τις συσκευές mmWave, λόγω της υψηλής συχνότητας λειτουργίας τους. Για την ελαχιστοποίηση των απωλειών των υλοποιήσεων των RF, οι συστοιχίες κεραιών που είναι ενσωματωμένες στο μπροστινό μέρος των RF και οι συμβατικοί σύνδεσμοι κεραιάς των RF (που συνήθως δίνονται για συσκευές χαμηλής συχνότητας NR και LTE) δεν διατίθενται για συσκευές NR mmWave. Ως αποτέλεσμα, στις συμβατικές μεθόδους επαλήθευσης και δοκιμών, όπου υπάρχει άμεση σύνδεση από τον εξοπλισμό δοκιμής στους συνδεδετές συχνοτήτων των UE, δεν ισχύουν τα ολοκληρωμένα σχέδια. Λαμβάνοντας υπόψη αυτές τις προκλήσεις, το 3GPP ανέπτυξε μια νέα αποκλειστική μεθοδολογία που ονομάζεται ακτινοβολούμενο, ατμοσφαιρικό περιβάλλον (OTA) για τον έλεγχο των απαιτήσεων mmWave, η οποία θα χρησιμοποιηθεί ως κοινή προσέγγιση για τον έλεγχο συμμόρφωσης NR mmWave.[22][23]

Οι μέθοδοι OTA αναπτύχθηκαν για να εφαρμοστούν σε συχνότητες φορέα κάτω των 6 GHz έτσι η λειτουργία του NR mmWave επιφέρει πρόσθετες προκλήσεις, ένα ευρύ φάσμα διαφορετικών τύπων συσκευών, την ανάγκη υποστήριξης ενός συνόλου απαιτήσεων τόσο για λειτουργίες RF όσο και για λειτουργίες ζώνης βάσης και μιας πολύ μεγάλης απώλειας διαδρομής. Το 3GPP εισήγαγε ένα σύνολο νέων βασικών μεθόδων δοκιμής ακτινοβολίας για το mmWave μέσω των εργασιών που είχε κάνει για το LTE. Οι νέες μέθοδοι δοκιμής βασίζονται κυρίως σε ρυθμίσεις Direct Distant Field (DDF) ή Indirect Far Field (IFF) και παρέχουν διαδικασίες που επιτρέπουν την επαλήθευση της UE RF, της διαχείρισης επικοινωνιών και της απόδοσης αποδιαμόρφωσης των UE. Λόγω της φύσης του OTA, οι αναπτυγμένες μέθοδοι δοκιμής εφαρμόζονται σε συσκευές με δυνατότητα mmWave (π.χ. smartphone) και όχι μόνο σε ασύρματα chipsets και προσπαθούν να διασφαλίσουν αξιόπιστη απόδοση στο τέλος σε πραγματικές συνθήκες πεδίου. Αυτές οι προκλήσεις δοκιμών εξαρτώνται από πολύπλοκα και ολοκληρωμένα σχέδια συσκευών.

Κλείνοντας λοιπόν το κομμάτι της ανάλυσης της τεχνολογίας 5G NR για μετάδοση μέσω αέρα, επιστρέφουμε στο επίσημο πρότυπο τεχνικών προδιαγραφών IMT-2020, το οποίο θα ορίζει 3 διαφορετικές περιπτώσεις (**απεικονίζονται στην Εικόνα 6 μαζί με τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά**), στις οποίες τα Δίκτυα 5G οφείλουν να ανταπεξέλθουν για την επόμενη δεκαετία. Οι περιπτώσεις χρήσης αναλύονται στις παρακάτω παραγράφους. [24]

- Enhanced Mobile Broadband (eMBB) : Διασφαλίζει συνεχή και συνεπή εμπειρία στο χρήστη. Η εμπειρία του χρήστη για το ρυθμό δεδομένων των 100Mbps και την χωρητικότητα της κίνησης της περιοχής στα 10 Mbps/m<sup>2</sup> γίνεται μέσω της υποστήριξης μεγάλου εύρους ζώνης και με τη βελτίωση της φασματικής απόδοσης σε σχέση με τα 4G δίκτυα. Παρέχει φασματική απόδοση περίπου 30 b/s/Hz για Download και 15 b/s/Hz για upload. Αυτό επιτυγχάνεται με το να διατηρούνται τα επίπεδα βιώσιμης κατανάλωσης ενέργειας. Γίνεται υποστήριξη συσκευών που κινούνται με 500 χλμ/ώρα. Λιγότερο από 1 ms χρόνο διακοπής κινητής τηλεφωνίας. Επιτρέπει την ευρυζωνική πρόσβαση σε περιοχές με υψηλή πυκνότητα (γραφεία, ειδικούς χώρους, στάδια). Θα παρέχει σταθερή πρόσβαση στο χρήστη σε τρένα υψηλής ταχύτητας ή κινούμενα οχήματα παντού και οποιαδήποτε στιγμή.

- **Massive Machine Type Communications (mMTC):** Μαζική συνδεσιμότητα του δικτύου. Αφορά μόνο την επικοινωνία μεταξύ των μηχανών. Η πυκνότητα της σύνδεσης εξυπηρετεί έως 1.000.000 συσκευές ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο λόγω της ζήτησης πολλών συσκευών στο διαδίκτυο. Υπηρεσίες που περιλαμβάνει: logistics, αυτόνομη οδήγηση, επιτήρηση και ασφάλεια, αυτοματοποίηση εργοστασίων, παρακολούθηση σε real-time της υγείας κάποιου ασθενούς, έξυπνη μέτρηση. Έξυπνες συσκευές ερμηνεύουν αυτόματα τα δεδομένα εισόδου και βάση αυτή δημιουργείται η αντίστοιχη απόκριση. Καταφέρνει να έχει υψηλή πυκνότητα συνδεδεμένων συσκευών  $1M/Km^2$ , IoT χαμηλού κόστους, ευρύτερη κάλυψη.
- **Ultra Reliable Low Latency (URLLC):** Επεκτείνει τα όρια του δικτύου μέσω αξιοπιστίας και latency. Απόκριση στο 1 ms. Με τη βελτίωση του δικτύου από την υπηρεσία πραγματοποιείται υποστήριξη πολλών εφαρμογών, επιτρέποντας στις υπάρχουσες μηχανές να επεκτείνουν τα παραδοσιακά τους όρια και να ενισχυθούν οι λειτουργίες τους. Εξασφαλίζει μεγαλύτερη αξιοπιστία και χαμηλότερη καθυστέρηση. Το συχνά αναφερόμενο Critical machine -type communication (C-MTC) υπόσχεται να καλύψει τόσο την ανθρώπινη όσο και τη μηχανική επικοινωνία. Υποστηρίζει την υπηρεσία “eMBB” και συνυπάρχει με το πρωτόκολλο “LTE” με σκοπό την κάλυψη του δικτύου.



Εικόνα 6. Κατηγορίες του 5G NR [24]

## 1.4 Αρχιτεκτονική Δικτύου

Για να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις του χρήστη και να ξεπεραστούν οι προκλήσεις που έχουν τεθεί στο σύστημα 5G, απαιτείται μια δραστική αλλαγή στη στρατηγική σχεδιασμού της ασύρματης κυψελοειδούς αρχιτεκτονικής του 5G. Στην παρούσα ασύρματη κυτταρική αρχιτεκτονική (wireless cellular architecture), για να επικοινωνεί ένας κινητός χρήστης είτε εντός είτε εκτός, πρέπει να υπάρχει ένας εξωτερικός σταθμός βάσης που βοηθά στην

επικοινωνία με το να βρίσκεται στη μέση ενός κελιού. Για να μπορέσει να υπάρξει επικοινωνία μεταξύ των εσωτερικών χρηστών και των εξωτερικών σταθμών βάσης, θα πρέπει τα σήματα να περνάνε από τους τοίχους που βρίσκεται ο εσωτερικός χρήστης, αυτό όμως οδηγεί με μεγάλη απώλεια σύνδεσης η οποία συνεπάγεται πως προκαλεί μειωμένη φασματική απόδοση, μειωμένο ρυθμό δεδομένων και μειωμένη ενεργειακή απόδοση των ασύρματων δικτύων.

Για να ξεπεραστεί αυτή η πρόκληση, πρέπει να πραγματοποιηθούν εξωτερικές και εσωτερικές ρυθμίσεις. Με την τεχνική αυτή θα υπάρξει μια μικρή μείωση στην απώλεια διείσδυσης στους τοίχους. Με τη τεχνολογία Massive MIMO, όπου αναπτύσσονται γεωγραφικά διασκορπισμένες συστοιχίες κεραιών και έχουν δεκάδες ή εκατοντάδες κεραιές θα γίνει υποστήριξη της ιδέας. Για τη κατασκευή ενός Massive δικτύου MIMO, θα πρέπει οι εξωτερικοί σταθμοί βάσης να είναι εφοδιασμένοι με μεγάλες συστοιχίες κεραιών και μεταξύ αυτών να διασκορπιστούν μερικές γύρω από ένα εξάγωνο κελί, όπου θα συνδεθούν με ένα σταθμό βάσης μέσω καλωδίων οπτικών ινών.

Κάθε χρήστης κινητών που βρίσκεται σε εξωτερικό χώρο έχει στη κατοχή του έναν συγκεκριμένο αριθμό μονάδων κεραιάς, με τη συνεργασία πολλών όμως μπορεί να κατασκευαστεί μια μεγάλη εικονική συστοιχία κεραιών, που μαζί με του σταθμού βάσης να σχηματίσουν εικονικούς μαζικούς συνδέσμους MIMO. Επίσης, κάθε κτήριο θα έχει στις εγκαταστάσεις του μεγάλες συστοιχίες κεραιών από την εξωτερική του μεριά, για να μπορέσει να επικοινωνεί με υπαίθριους σταθμούς βάσης με τη βοήθεια εξαρτημάτων γραμμών όρασης. Η επικοινωνία των εσωτερικών χρηστών θα γίνεται μέσω των ασύρματων σημείων πρόσβασης μέσα στο κτήριο σε σύνδεση με τις μεγάλες συστοιχίες καλωδίων. Έτσι θα βελτιωθεί η ενεργειακή απόδοση, η μέση απόδοση κυψελών, ο ρυθμός δεδομένων και η φασματική απόδοση του κυτταρικού συστήματος, όμως το κόστος υποδομής θα αυξηθεί. Με την εισαγωγή μιας τέτοιας αρχιτεκτονικής, οι εσωτερικοί χρήστες θα επικοινωνούν με εσωτερικά σημεία ασύρματης πρόσβασης, ενώ μεγαλύτερες συστοιχίες κεραιών θα παραμείνουν έξω από τα κτίρια. Όσον αφορά την εσωτερική επικοινωνία, ορισμένες τεχνολογίες όπως WiFi, Small Cell, Ultra Broadband, Millimeter Wave Communications και επικοινωνίες ορατού φωτός χαρακτηρίζονται χρήσιμες για τις επικοινωνίες μικρού εύρους με μεγάλους ρυθμούς δεδομένων. Παρόλα αυτά το mmWave και η επικοινωνία ορατού φωτός χρησιμοποιούν υψηλότερες συχνότητες που δεν προτείνονται συμβατικά για κυψελοειδείς επικοινωνίες. Η χρήση mmWave για εξωτερικές και υπεραστικές εφαρμογές δεν θεωρείται αποτελεσματική, επειδή τα κύματα δεν θα διεισδύσουν αποτελεσματικά σε πυκνά υλικά, επίσης μπορούν να διασκορπιστούν εύκολα από σταγονίδια βροχής, αέρια και χλωρίδα. Ωστόσο, τα mmWave και οι τεχνολογίες επικοινωνίας ορατού φωτός ενισχύουν τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων για εσωτερικές ρυθμίσεις διότι έχουν μεγάλο εύρος ζώνης. Παράλληλα με την εισαγωγή νέου φάσματος, το οποίο δεν χρησιμοποιείται συμβατικά για ασύρματη επικοινωνία, θα βελτιώσει τη χρήση του φάσματος των σημερινών Spectrathrough Cognitive Radio (CR) δικτύων.

Επειδή την κυτταρική αρχιτεκτονική του 5G το χαρακτηρίζει η ετερογένεια του, υποχρεωτικά θα περιλαμβάνει Macrocells, Microcells, Small Cells, και Relays. Εισάγεται για τη χρήση χρηστών υψηλής κινητικότητας, οι οποίοι βρίσκονται μέσα στα αυτοκίνητα και τα τρένα υψηλής ταχύτητας. Τα small cells για να επικοινωνούν με τους χρήστες τοποθετούνται μέσα στα κινούμενα αυτοκίνητα, ενώ η τεράστια μονάδα MIMO που αποτελείται από μεγάλες συστοιχίες κεραιών τοποθετείται έξω από το αυτοκίνητο για την σύνδεση με τον εξωτερικό σταθμό βάσης. Οι χρήστες small cells χρησιμοποιούν υπηρεσίες υψηλού ρυθμού δεδομένων με σημαντικά μειωμένη επιβάρυνση σηματοδότησης. Η αρχιτεκτονική του ασύρματου



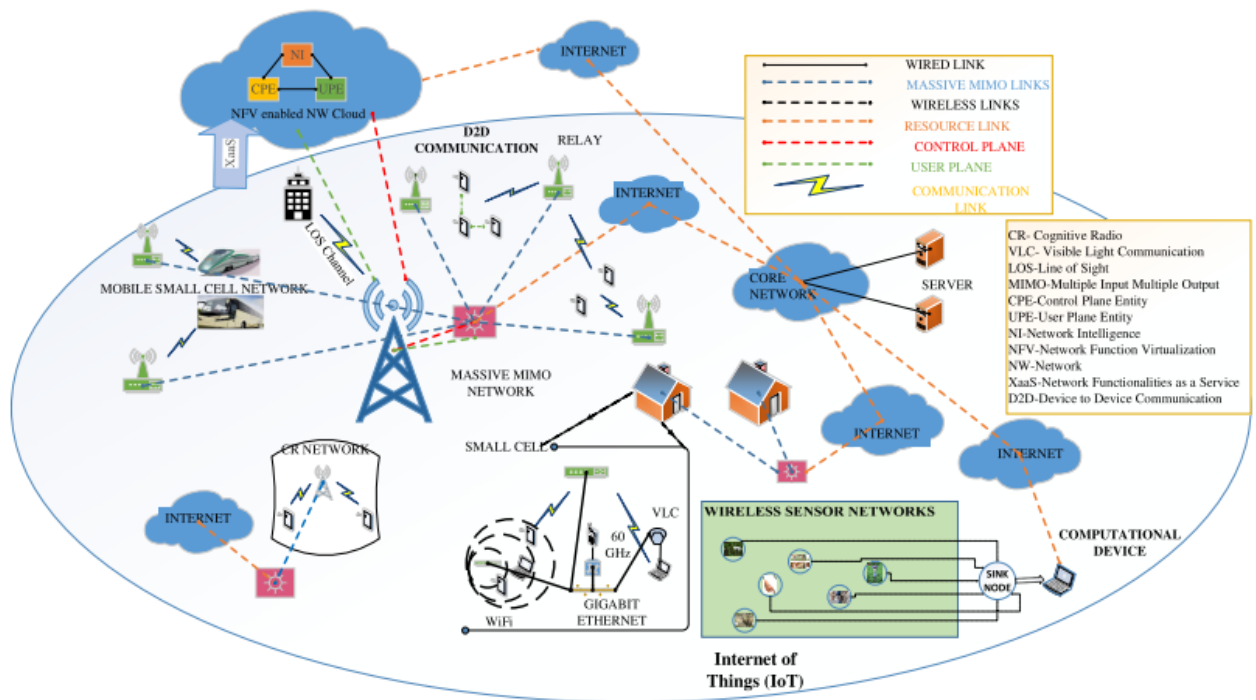
κυψελοειδούς δικτύου 5G αποτελείται από δύο λογικά επίπεδα: ένα δίκτυο τηλεπικοινωνιών και ένα cloud δικτύου. Διαφορετικοί τύποι εξαρτημάτων που εκτελούν διαφορετικές λειτουργίες αποτελούν το δίκτυο τηλεπικοινωνιών. Το Network Function Virtualization (NFV) αποτελείται από το User Plane Entity (UPE) και το Control Plane Entity (CPE) που σχετίζονται με το επίπεδο χρήστη και ελέγχου αντίστοιχα και εκτελούν υψηλότερες λειτουργίες στρώματος. Η λειτουργικότητα του δικτύου ως υπηρεσία (XaaS) παρέχει υπηρεσίες ανάλογα με τις ανάγκες, ένα παράδειγμα είναι η συγκέντρωση πόρων. Το XaaS συνδέει ένα δίκτυο τηλεπικοινωνιών και ένα cloud δικτύου.

Το NFV αναφέρεται στην υλοποίηση λογισμικού που βασίζεται σε λειτουργίες τηλεπικοινωνιακών δικτύων που είχαν εφαρμοστεί προηγουμένως σε παλιές συσκευές δικτύου ή διακομιστές. Χαρακτηριστικά παραδείγματα των VNFs είναι στοιχεία πακέτων του πυρήνα του 3GPP, τείχη προστασίας, Customer Premises Equipment (CPE). Ωστόσο, μόλις εικονικοποιηθούν, αυτά τα VNF γίνονται μέρος των αλυσίδων υπηρεσιών που μπορεί να περιλαμβάνουν κάθε είδους λειτουργικότητα που σχετίζεται άμεσα ή έμμεσα με πτυχές δικτύωσης. Αυτό σημαίνει ότι το NFV έχει ενσωματώσει διάφορα σενάρια στα οποία τα VNF δεν είναι πλέον αποκλειστικά αυστηρές λειτουργίες δικτύου, αλλά ενδεχομένως και τμήματα εφαρμογών που εμπλέκονται σε αλυσίδες υπηρεσιών NFV, οι οποίες μπορεί να είναι λίγο πολύ οτιδήποτε, που ποικίλλουν από διακομιστή επεξεργασίας βίντεο σε ένα στοιχείο αναγνώρισης εικόνας, αρκεί να είναι μοντελοποιημένο και ενορχηστρωμένο βάσει προδιαγραφών του NFV. Το NFV είναι ένα βασικό στέλεχος στα πλαίσια του τεμαχισμού του 5G με την έννοια ότι μπορεί να δημιουργήσει και ενορχηστρώσει τις λειτουργίες του δικτύου και των αλυσιδωτών υπηρεσιών που θα πραγματοποιήσουν τη λειτουργικότητα ενός NS (Network Slice). Αυτό σημαίνει ότι τα μοντέλα δεδομένων του NFV για τις υπηρεσίες, τις λειτουργίες και τις παρουσίες τους θα είναι μέρος του μοντέλου του slice. [25]

Η αρχιτεκτονική του 5G έχει την ίδια βαρύτητα και για το δίκτυο front end και το backhaul αντίστοιχα. Η επικοινωνία από συσκευή σε συσκευή (Device to Device - D2D), μικρά σημεία πρόσβασης κυττάρων και IoT έχει ενσωματωθεί στην προτεινόμενη αρχιτεκτονική κυψελοειδούς δικτύου 5G. Μια γενική περιγραφή της αρχιτεκτονικής του 5G παρουσιάζεται στην Εικόνα 7 [26].

Για να υπάρχει πλήρης έλεγχος και ασφάλεια σε κάθε διαφορετική υποδομή ενός Δικτύου 5G, απαιτείται ο διαχωρισμός του δικτύου σε πολλαπλά λογικά τμήματα δικτύου. Κάθε λογικό NS θα είναι ανεξάρτητο από τα υπόλοιπα και θα επιτελεί αυτόνομες λειτουργίες, θα χαρακτηρίζεται από αυτόνομη αρχιτεκτονική, πρωτόκολλα, ασφάλεια και λειτουργικότητα, ανάλογα με το τι ορίζουν οι απαιτήσεις. Θα διαχειρίζεται διαφορετικούς πόρους, θα διακατέχεται από διαφορετικές ασύρματες τεχνολογίες πρόσβασης (Radio Access Technology - RAT) και θα συνδέεται είτε με φυσική σύνδεση, είτε με εικονική, στο ενιαίο δίκτυο.

Ένα NS ορίζεται ως ένα σύνολο χαρακτηριστικών που πραγματοποιεί τις απαιτήσεις μιας συγκεκριμένης περίπτωσης χρήσης, παίρνοντας υπόψη τις δυνατότητες των Mobile Network Operators (MNO) που παρέχουν την υπηρεσία. Τα NS καλύπτουν τις διαφορετικές απαιτήσεις για eMBB, mMTC και URCC. Είναι μια σύνθεση λειτουργιών δικτύου που έχουν διαμορφωθεί επαρκώς, εφαρμογές δικτύου και υποδομές cloud (φυσικοί, εικονικοί ή ακόμη και εξομοιωμένοι πόροι, κ.λπ.), που συνδυάζονται για να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις μιας συγκεκριμένης περίπτωσης χρήσης, π.χ., εύρος ζώνης, καθυστέρηση, επεξεργασία και ανθεκτικότητα, σε συνδυασμό με επιχειρηματικό σκοπό.



Εικόνα 7. Γενική περιγραφή της αρχιτεκτονικής του 5G

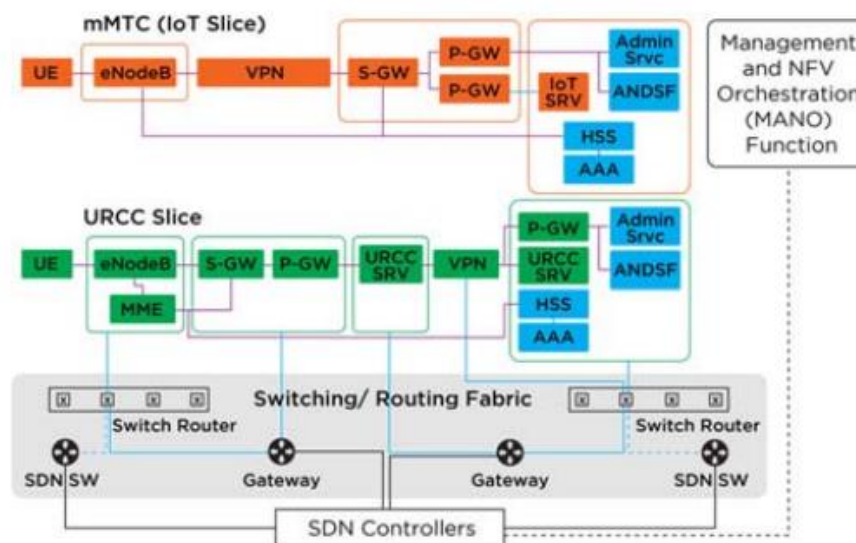
Το NS καλύπτει όλα τα τμήματα δικτύου, συμπεριλαμβανομένων των τηλεπικοινωνιακών δικτύων, της καλωδιακής πρόσβασης, των πυρήνων, των μεταφορών, των Edge Networks και θεωρείται μια έννοια από άκρο σε άκρο. Επιτρέπει την ταυτόχρονη ανάπτυξη πολλαπλών λογικών, αυτοτελών και ανεξάρτητων κοινόχρηστων ή διαχωρισμένων δικτύων σε μια κοινή πλατφόρμα υποδομής.

Τα Virtual Slices απαρτίζουν μια λογική υλοποίηση των αναγκαίων πόρων δικτύου. Ένα NS μπορεί να περιέχει το Core Network, το RAN (Radio Access Network), ακόμη και πόρους UE, με λίγα λόγια μια υπηρεσία δικτύου από άκρο σε άκρο. Χρησιμοποιώντας αυτοματοποιημένη διαχείριση βασισμένη σε τεχνολογίες NFV, οι MNO και οι Service Provider (SP) θα είναι σε θέση να υποστηρίξουν τέτοιες κοπές. Με το NFV γεννιέται ένας νέος τρόπος για τη δημιουργία μιας υποδομής από άκρο σε άκρο με δυνατότητα της εξέλιξης της εικονικοποίησης της πληροφορικής τεχνολογίας, ώστε να είναι δυνατή η ένωση των λειτουργιών του δικτύου 5G σε διακομιστές, διακόπτες και χώρο αποθήκευσης υψηλής έντασης. Μια επιπρόσθετη τεχνολογία για το NFV είναι το Software Defined Networking (SDN), με το οποίο γίνεται υλοποίηση (π.χ. δρομολόγηση και μεταγωγή) του επιπέδου ελέγχου, του επιπέδου χρήστη και του επιπέδου διαχείρισης για το 5G. Το SDN θεωρείται μια από τις λύσεις για τον προγραμματισμό του NFV και του δικτύου, τα οποία αποτελούν τα δομικά στοιχεία του πρωτοκόλλου για τα δίκτυα 5G [25].

Στην Εικόνα 8 απεικονίζεται ένα NS για τις τεχνολογίες mMTC (IoT) και URCC που περιλαμβάνονται λειτουργίες ελέγχου και επιπέδου χρήστη, και δημιουργήθηκαν, υλοποιήθηκαν με τη χρήση λειτουργιών δικτύου, όπου μπορεί να είναι Λειτουργίες φυσικού δικτύου (Physical Network Functions - PNF) ή εικονικού δικτύου (Virtual Network Functions - VNF) ή μια μίξη και των δύο. Ένας MNO αξιοποιεί τις υπηρεσίες Διαχείρισης και Εννοχρήστρωσης Δικτύου (Management and Network Orchestration - MANO) με σκοπό τη διαμόρφωση ελεγκτών SDN που χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωση του ιστού

μεταγωγής/δρομολόγησης. Ένας ενορχηστρωτής είναι σε θέση να καθορίσει ένα NS χρησιμοποιώντας μια στατική λίστα πληροφοριών και χρησιμοποιώντας έναν Περιγραφέα Υπηρεσιών Δικτύου (Network Service Descriptor - NSD), όπου παρέχει ένα σχέδιο για τη δημιουργία ενός NS από διάφορα VNF και των διασυνδέσεών τους.

Οι τρεις κύριες περιπτώσεις χρήσης του 5G επεκτείνονται από μια σειρά QoS Class Identifiers (QCI<sup>6</sup>), τα οποία προσδίδουν επιλεκτικότητα στις υπηρεσίες. Η κατηγορία eMBB για παράδειγμα, μπορεί να υποδιαιρεθεί σε υψηλή ταχύτητα, υψηλή κινητικότητα ή χαμηλό κόστος, στην οποία κάθε κατηγορία μπορεί να εξυπηρετείται με διαφορετικές προδιαγραφές NS. Με αυτήν την επέκταση που θα έχουν οι υπηρεσίες που θα καλύπτονται από τα δίκτυα 5G καθώς και η ευελιξία των δικτύων, είναι φυσικό επακόλουθο να επεκταθεί η έννοια του QCI για να καταστεί δυνατή η επιλογή NS(s). Η ποικιλία των υπηρεσιών που θα υποστηρίζονται από τα δίκτυα 5G προσθέτει νέες απαιτήσεις, τις οποίες πρέπει να χειρίζονται τα NS. Αυτές οι περιπτώσεις χρήσης όπως το eMBB, το mMTC και το URCC προϋποθέτουν διαφορετικούς τύπους χαρακτηριστικών του δικτύου από άποψη ασφάλειας και ποιότητας, όπως καθυστέρηση, ανθεκτικότητα, κινητικότητα, αξιοπιστία. Μια υπηρεσία eMBB μπορεί να έχει υψηλά ποσοστά δεδομένων και η καθυστέρηση μπορεί να είναι ανεκτή με τη ομαδική κινητικότητα και μόνο, ενώ σε μια υπηρεσία URCC, μια χαμηλή καθυστέρηση, η ανθεκτικότητα και η ασφάλεια μπορεί να είναι εξαιρετικά σημαντικές. Μια επικοινωνία mMTC μπορεί να μην προϋποθέτει λειτουργίες όπως η παράδοση και η διαχείριση της κινητικότητας ή να είναι απαιτητική όσον αφορά την καθυστέρηση. Ωστόσο, η πυκνότητα των συσκευών να βρίσκεται σε υψηλά ποσοστά.



Εικόνα 8. Slices για mMTC και URCC [27]

Για να γίνει εξυπηρέτηση όλων των πτυχών του NS, η αρχιτεκτονική του 5G χωρίζεται σε διαφορετικά επίπεδα, τα οποία φαίνονται στην Εικόνα 9 ως εξής:

- **Επίπεδο Υπηρεσίας (Service layer)** : Το επίπεδο υπηρεσίας εμπεριέχει λειτουργίες πολιτικής και απόφασης σε επίπεδο επιχείρησης και συστήματα υποστήριξης

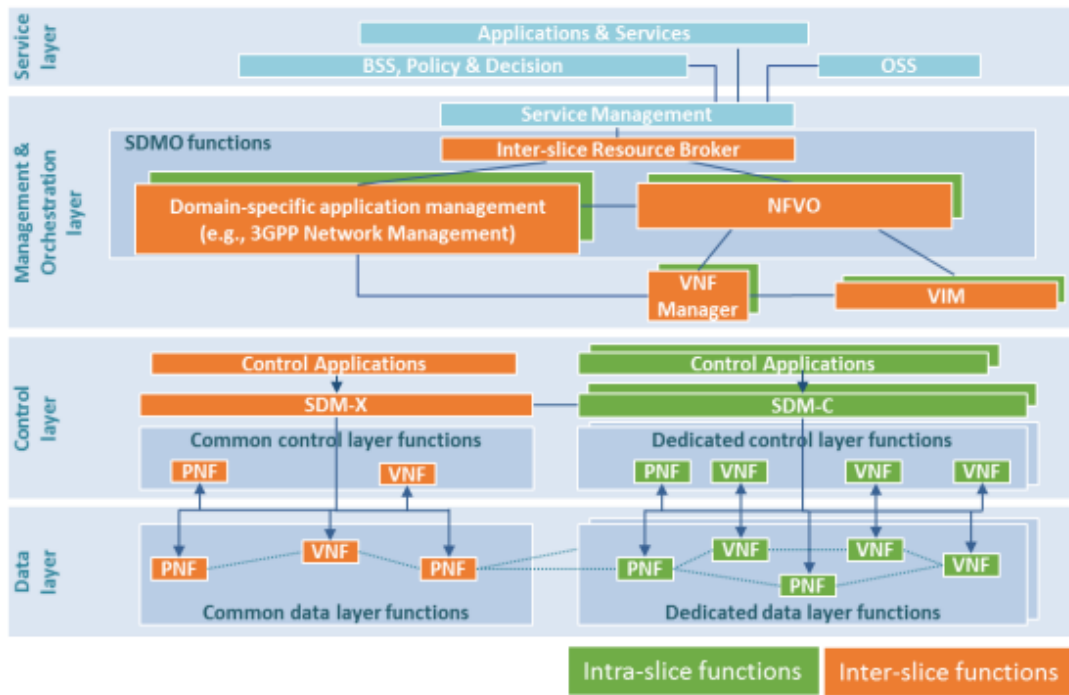
<sup>6</sup> Το QCI είναι ένας μηχανισμός που χρησιμοποιείται από τη 3GPP σε δίκτυα LTE για να διασφαλίσει ότι η κυκλοφορία των μεταφορών διαθέτει κατάλληλη Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS). Διαφορετική κίνηση φορέα απαιτεί διαφορετικό QoS και επομένως διαφορετικές τιμές QCI.

επιχειρήσεων, επιπλέον και εφαρμογές και υπηρεσίες που διαχειρίζεται ο ενοικιαστής. Αυτό το επίπεδο υπηρεσίας συγκαταλέγει τα συστήματα ενορχήστρωσης από άκρο σε άκρο.

- **Επίπεδο Οργάνωσης και Διαχείρισης (*Management and Orchestration Layer*)** : Το επίπεδο διαχείρισης και οργάνωσης περιλαμβάνει λειτουργίες του ETSI (European Telecommunications Standards Institute), NFV, MANO (Management and Network Orchestration), δηλαδή το VIM (Virtual Infrastructure Manager), το VNF (Virtual Network Function) Manager και το NFVO (Network Function Virtualisation Orchestration). Ένας Inter-slice broker διαχειρίζεται την κατανομή των πόρων μεταξύ των slices και αλληλοεπιδρά με τη λειτουργία Διαχείρισης Υπηρεσιών (Service Management function). Επιπρόσθετα, το στρώμα MANO του επιπέδου φιλοξενεί λειτουργίες διαχείρισης εφαρμογών για συγκεκριμένους τομείς. Για παράδειγμα, στην περίπτωση του 3GPP, αυτό συγκαταλέγει λειτουργίες Element Managers (EM) και Network Management (NM), συμπεριλαμβανομένης της λειτουργίας Network (Sub-) Slice Management Function (N (S) SMF).

Αυτές οι λειτουργίες θα μπορούσαν να πραγματοποιήσουν διεπαφές ETSI, NFV, MANO στο VNF Manager και το NFVO. Μεταξύ του επιπέδου υπηρεσίας και του Inter-slice broker λειτουργεί μια ενδιάμεση λειτουργία η Διαχείριση Υπηρεσιών. Μετατρέπει τις περιγραφές υπηρεσιών που αντιμετωπίζουν οι καταναλωτές σε περιγραφές υπηρεσιών που διαχειρίζονται πόρους και αντίστροφα. Επίσης είναι σημαντικό να πούμε ότι ο domain manager, ο Inter-Slice Broker και ο NFVO απαρτίζουν από κοινού το Software-Defined Mobile Network Orchestrator (SDM-O), το οποίο έχει την ευθύνη για την ολοκληρωμένη διαχείριση των υπηρεσιών του δικτύου. Το SDM-O μπορεί να διευθετήσει slices και να τα συγχωνεύσει σωστά στο σημείο πολυπλεξίας χρησιμοποιώντας τα πρότυπα του NS.

- **Επίπεδο Ελέγχου (*Control Layer*)** : Το επίπεδο ελέγχου φιλοξενεί τους δύο κύριους ελεγκτές, τον Συντονιστή κινητού δικτύου το οποίο καθορίζεται από το λογισμικό (Software-Defined Mobile Network Coordinator (SDM-X)) και τον ελεγκτή κινητού δικτύου καθορισμένου από λογισμικό (Software-Defined Mobile Network Controller (SDM-C)), συν άλλες εφαρμογές ελέγχου. Το SDM-C και το SDM-X ασχολούνται για αποκλειστικά NFs (Network Function) και κοινά NFs αντίστοιχα, και διέπνουν τις αρχές του SDN, μεταφράζουν τις αποφάσεις των εφαρμογών ελέγχου σε εντολές VNF (Virtual Network Function) και PNF (Physical Network Function). Το SDM-X και το SDM-C μπορούν να εκτελεστούν ως VNF ή PNF.
- **Επίπεδο Δεδομένων (*Data Layer*)** : Το επίπεδο δεδομένων εμπεριέχει τα VNF και PNF που χρειάζονται για τη μεταφορά και την επεξεργασία της κίνησης δεδομένων του χρήστη.



Εικόνα 9. Λειτουργικά στρώματα 5G αρχιτεκτονικής [28]

## Κεφάλαιο 2. Φάσμα

### 2.1 Εισαγωγή στο Φάσμα συχνοτήτων τηλεπικοινωνίας

Το φάσμα του δικτύου τηλεπικοινωνιών είναι ένας “σπάνιος πόρος” ή “σπάνιο δημόσιο αγαθό”, αποφασιστικής σημασίας για τη λειτουργία των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Τα τελευταία χρόνια η ζήτηση για διαθέσιμο φάσμα συχνοτήτων είναι ιδιαίτερα υψηλή με αποτέλεσμα αυτό να μην επαρκεί. Έτσι σήμερα αναπτύσσονται νέες τεχνικές για την αποτελεσματική διαχείριση και χρήση του πολύτιμου αυτού πόρου, με βασικό στοιχείο “την αρχή της ουδετερότητας ως προς την υπηρεσία και ως προς την τεχνολογία”.

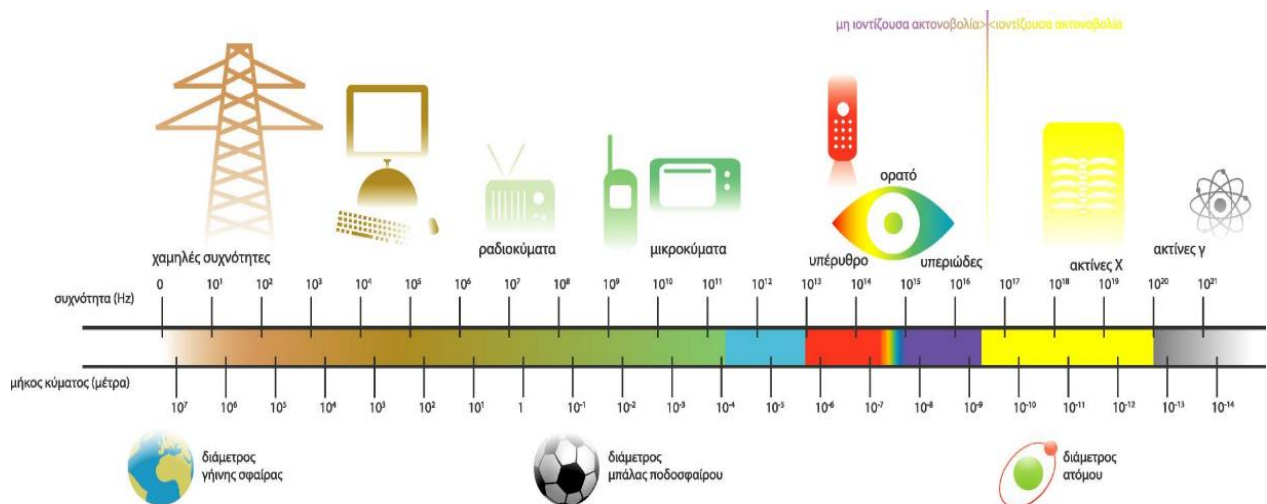
Έτσι, σκοπός των τεχνικών αυτών είναι η απονομή συχνοτήτων ανάλογα με τις ανάγκες του κάθε συστήματος (π.χ. κινητή τηλεφωνία, ασύρματα δίκτυα, κ.λ.π.) και της κάθε υπηρεσίας (μεταφορά φωνής, εικόνας, video). Στην κατεύθυνση αυτή εντάσσεται και η έρευνα γύρω από το CR. Σε παγκόσμιο επίπεδο η απονομή των συχνοτήτων στις διάφορες υπηρεσίες και χρήστες γίνεται από τη Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union - ITU), ενώ στην Ελλάδα την ευθύνη για την απονομή και διαχείριση του φάσματος έχει η Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων (ΕΕΤΤ).

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι "μια μορφή ταλαντευόμενης ηλεκτρικής και μαγνητικής ενέργειας η οποία μπορεί να διαχέεται στο χώρο χωρίς όφελος από φυσικές διασυνδέσεις. Η ακτινοβολούμενη θερμότητα, το φως και τα σήματα των τηλεπικοινωνιών είναι μορφές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας". Ο Heinrich Hertz, στα τέλη της δεκαετίας του 1880, χαρακτήρισε για πρώτη φορά και απέδειξε ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα κινούνται προς τα έξω από ένα ηλεκτρικό ερέθισμα με την ταχύτητα του φωτός. Δέκα χρόνια μετά, ένας Ιταλός φυσικός, ο Guglielmo Marconi εκμεταλλεύθηκε αυτό το φυσικό φαινόμενο σαν όχημα για την ανθρώπινη επικοινωνία. Δημιουργώντας μια σειρά ηλεκτρικών παλμών από έναν ηλεκτρικό σπινθήρα, έστειλε πληροφορίες γραμμένες σε κώδικα Μορς σε έναν δέκτη χωρίς το όφελος της φυσικής σύνδεσης που υπήρχε ως απαίτηση προηγουμένως για το τηλέφωνο και το τηλέγραφο. Αργότερα, το 1901 σε έναν λόφο στη Νέα Γη, ο Μαρκόνι σε μια κεραία με χάλκινο σύρμα που ήταν τοποθετημένη σε έναν χαρταετό 120 μέτρα στον αέρα, έλαβε ένα τηλεγραφικό σήμα που εστάλη από έναν ισχυρό πομπό από την Κορνουάλη της Αγγλίας. Ήταν η αρχή της εποχής της ασύρματης επικοινωνίας. Η τεχνολογική καινοτομία αναπτύχθηκε γρήγορα και, κατά τη διάρκεια του Πρώτου Παγκοσμίου Πολέμου, έγινε η πρώτη ραδιοφωνική μετάδοση φωνής μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα περιλαμβάνει το πλήρες φάσμα των ρυθμών με τους οποίους τα ηλεκτρικά κύματα κυμαίνονται καθώς διέρχονται από το διάστημα. Τα κύματα που προκύπτουν από έναν ταλαντωτή μεταδίδονται στο διάστημα μέσω μιας κεραίας που δονείται στην εκάστοτε συχνότητα αυτών των κυμάτων. Ταξιδεύουν σε μια συνεχόμενη αλληλουχία κορυφών και γουρνών, σαν κυματισμοί που παράγονται όταν κάποιος ρίχνει μια πέτρα σε μια λίμνη. Τα κύματα χαρακτηρίζονται από το μήκος κύματος ή την συχνότητα. Το τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που έχει εύρος συχνοτήτων από 30 Hz έως 300 GHz ονομάζεται φάσμα τηλεπικοινωνιών. [29]

Οι πληροφορίες που αποστέλλονται μέσω ήχου, βίντεο ή ψηφιακά, μπορούν να υπερτίθενται ή να μεταφέρονται σε ραδιοκύματα. Αυτή θεωρείται η τεράστια χρησιμότητα

τους. Όσο μεγαλώνει η συχνότητα, τόσο περισσότερες πληροφορίες θα μεταφέρονται από ένα ραδιοκύμα. Η συνάρτηση της συχνότητας είναι ένα χαρακτηριστικό διάδοσης των ραδιοκυμάτων. Λόγω των πολύ μεγάλων μηκών κύματος που έχουν τα κύματα χαμηλής συχνότητας μπορούν να διανύσουν μεγάλες αποστάσεις κοντά στο έδαφος. Ωστόσο, εξαρτώνται από φυσικές και ηλεκτρικές παρεμβολές και φέρουν λίγες πληροφορίες. Τα κύματα σε χαμηλές συχνότητες χρησιμοποιούνται εκτενώς από τον στρατό. Τα πολύ υψηλής συχνότητας (Very High Frequency - VHF), οπτικής επαφής κύματα, διαπερνούν την ατμόσφαιρα της γης και φτάνουν σε τροχιά δορυφόρους, αλλά μπορούν να διαθλασθούν ή απορριφθούν από ατμοσφαιρικά σωματίδια και σταγόνες βροχής. Ανάμεσα στα AM ραδιοκύματα με φορέα μεσαίας συχνότητας και του FM ραδιοφώνου με φορέα πολύ υψηλής συχνότητας υπάρχουν μικρά κύματα στη ζώνη υψηλής συχνότητας (High Frequency - HF). Τα «σύντομα» κύματα αναπηδούν επαναλαμβανόμενα μεταξύ της ιονόσφαιρας και της γης και λόγω της διαδικασίας ανάκλασης, διανύουν μεγάλες αποστάσεις γύρω από την καμπυλότητα της γης, κυρίως τη νύχτα. Σαν αποτέλεσμα του χαρακτηριστικού διάδοσης, η ζώνη συχνοτήτων HF είναι εξαιρετικά πλήρης και με τεράστια ζήτηση.

Υπάρχει ένα τμήμα του φάσματος που δίνει βέλτιστα αποτελέσματα για κάθε χρήση του φάσματος των τηλεπικοινωνιών. Είτε αυτό είναι για ραδιοφωνική ή τηλεοπτική μετάδοση, ραδιοπλοήγηση, ραντάρ, ρελέ μικροκυμάτων, κινητή επίγεια ή και εναέρια επικοινωνία, ραδιοαστρονομία ή δορυφορική επικοινωνία. Λόγω φυσικών περιορισμών όμως, υπάρχουν τμήματα του φάσματος που απλά χρησιμοποιούνται για κάποιους σκοπούς, παρόλα αυτά μπορεί να είναι ιδανικά για άλλους. Το φάσμα των τηλεπικοινωνιών χωρίζεται, σε ζώνες ποικίλων συχνοτήτων, όπως και παρουσιάζεται στην **Εικόνα 10**, και η τυπική χρήση και τα φυσικά του χαρακτηριστικά καθορίζονται με καλύτερο τρόπο από τη ζώνη συχνοτήτων του. Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα ονομάζεται το εύρος της περιοχής συχνοτήτων που καλύπτουν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα εκτείνεται θεωρητικά από σχεδόν μηδενικές συχνότητες έως το άπειρο.



Εικόνα 10. Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα [30]

## 2.2 Αναγκαιότητα Φάσματος

Οι αρχές του εικοστού πρώτου αιώνα χαρακτηρίστηκαν από μια επιτακτική ανάγκη για περισσότερο φάσμα. Τα δίκτυα έρχονται αντιμέτωπα με έναν συνεχώς αυξανόμενο αριθμό χρηστών που τρέχουν εφαρμογές που επιθυμούν εύρος ζώνης χρησιμοποιώντας ένα ευρύ φάσμα συσκευών. Παρόλα αυτά, το φάσμα θεωρείται ένας ακριβός και σπάνιος πόρος. Το γεγονός αυτό σε συνάρτηση με τη ζήτηση των χρηστών για υψηλότερα ποσοστά δεδομένων, για καλύτερο QoS και χαμηλότερο κόστος, οδήγησε τους τηλεπικοινωνιακούς χειριστές και τους μηχανικούς να αναγνωρίσουν ότι το καλύτερο μέσο για να αυξηθεί η ικανότητα των μελλοντικών συστημάτων επικοινωνίας είναι μέσω της βελτίωσης της απόδοσης του φάσματος.

Με την αύξηση των απαιτήσεων στα δίκτυα κινητής επικοινωνίας, η απόκτηση και η αποδοτικότερη χρήση του φάσματος θα είναι πιο σημαντική από ποτέ. Στις μελλοντικές απαιτήσεις των δικτύων θα περιλαμβάνετε η καλύτερη χρήση του φάσματος το οποίο είναι ήδη διαθέσιμο στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Επίσης, θα υπάρχει πρόσβαση σε πρόσθετο εύρος ζώνης σε παρόμοιες συχνότητες και θα γίνεται εκμετάλλευση υψηλότερων συχνοτήτων στις ζώνες αυτές. Είναι πολύ πιθανό, τα δίκτυα 5G να εξακολουθήσουν να βασίζονται στο βασικό φάσμα, που προορίζεται να χρησιμοποιηθεί από τους παρόχους κινητής τηλεφωνίας, έτσι ώστε να προστατεύεται το δίκτυο από παρεμβολές και να τους επιτρέψει να επιτυγχάνουν προβλέψιμα και αξιόπιστα επίπεδα απόδοσης. Παράλληλα, για να ενισχυθεί η χωρητικότητα και η απόδοση σε συγκεκριμένες τοποθεσίες και ώρες, είναι πιθανό το βασικό φάσμα να συνδυαστεί με το διαμοιρασμένο φάσμα και το μη αξιοποιήσιμο φάσμα.[31]

Η δυναμική ανταλλαγή φάσματος, με προσεκτική προστασία των δικαιωμάτων κάθε δικτύου θα βελτιώσει την αποτελεσματικότητα της χρήσης του φάσματος επιτρέποντας για παράδειγμα, στους παρόχους κινητής τηλεφωνίας να μοιράζονται μεγάλα εύρη ζώνης και να παρέχουν ποιοτικές υπηρεσίες στους μεμονωμένους χρήστες, ενώ παράλληλα θα επιτυγχάνουν αποτελεσματική χρήση του φάσματος όταν ο αριθμός των χρηστών είναι μικρός. Αυτό είναι προτιμότερο, από το να κατανεμηθεί ένα μικρό εύρος ζώνης σε όλους τους παρόχους κινητής τηλεφωνίας, το οποίο θα περιορίσει την διακίνηση των πακέτων (throughput), ή από το να κατανεμηθεί το φάσμα σε έναν μόνο πάροχο κινητής τηλεφωνίας, ο οποίος θα περιορίσει τον ανταγωνισμό και ενδέχεται να οδηγήσει στην υπολειτουργικότητα του φάσματος. Τρεις είναι οι κατηγορίες που διανέμεται το φάσμα. i) Χαμηλές συχνότητες, κάτω από 1GHz για κάλυψη αγροτικών περιοχών και κάλυψη εντός κτηρίων, ii) Βασικές συχνότητες, από περίπου 1GHz έως 6GHz, για γενική κάλυψη και χωρητικότητα, με τις υψηλές συχνότητες να χρησιμοποιούνται για την χωρητικότητα των hot-spots, iii) Υψηλές συχνότητες, από 6GHz έως δεκάδες GHz, για υψηλή χωρητικότητα σε περιοχές πυκνής χρήσης, όπως για παράδειγμα σε πανεπιστημιούπολεις και μέσω μαζικής μεταφοράς.

Η βιομηχανία της κινητής τηλεφωνίας έχει καταφέρει να συνδέσει πάνω από 5 δισεκατομμύρια μοναδικούς συνδρομητές, υπάρχει όμως πολλή δουλειά ακόμα. Ένα από τα βήματα που θα ακολουθηθούν για τη σύνδεση όλων είναι η αδειοδότηση των ζωνών φάσματος ψηφιακού μερίσματος. Ουσιαστικά μιλάμε για την «απελευθέρωση» συχνοτήτων που χρησιμοποιήθηκαν από την αναλογική τηλεόραση και θα μεταβούν στην ψηφιακή τηλεόραση με σκοπό την χρήση της ευρυζωνικής κινητής τηλεφωνίας. Οι ζώνες αυτές χρησιμοποιούνται ιδανικά από τις κινητές συσκευές, παρέχοντας καλά χαρακτηριστικά κάλυψης, λογική



χωρητικότητα και διαθεσιμότητα σε επαρκή τμήματα για την αποτελεσματική ανάπτυξη της κινητής ευρυζωνικότητας. Τα κοινωνικά οφέλη που ακολουθούν από τη χρήση του φάσματος για τις κινητές ευρυζωνικές συνδέσεις είναι πολύ μεγάλα. Μέσω της πρόσβασης στο Διαδίκτυο από την κινητή τηλεφωνία γεφυρώνετε το «ψηφιακό χάσμα» μεταξύ των εξοικειωμένων και των μη της τεχνολογίας. Επίσης, οι κινητές υπηρεσίες σε αυτήν τη ζώνη μπορούν να φτάσουν σε αγροτικές περιοχές που δεν εξυπηρετούνταν προηγουμένως με σχετικά οικονομικά αποδοτικό τρόπο.

Με την πυκνή ανάπτυξη εσωτερικών και εξωτερικών small cells απαιτείτε η παροχή νέου φάσματος για την μείωση των παρεμβολών. Η κατανομή του φάσματος έρχεται ως αποτέλεσμα σαν μια βιώσιμη λύση. Στην κοινή χρήση του φάσματος, τα UDN (Ultra-Dense Networks) cells κατανομούνται σε δευτερεύοντες χρήστες σε ένα γνωστικό καθεστώς δικτύου ως φάσμα. Ο διαμοιρασμός του φάσματος είναι μια ακόμη εναλλακτική λύση μεταξύ των δικτύων, όπου το φάσμα μοιράζεται μεταξύ πολλαπλών τελεστών. Η πολλαπλή πρόσβαση και η διαχείριση πόρων σε πυκνά μικρά κελιά είναι κάποιες επιπλέον λύσεις του προβλήματος. Ενώ είναι πολύ μικρή η πιθανότητα να υπάρχουν πολλαπλοί χρήστες στην περιοχή κάλυψης ενός small cell σε ένα πυκνό δίκτυο, υπάρχει πιθανότητα πολλοί χρήστες να εξυπηρετούνται από ένα small cell σε ένα δεδομένο hotspot.

### 2.2.1 Το Φάσμα στο 5G δίκτυο

Με την χρήση του 5G, οι σχετικές νέες υπηρεσίες και το σενάριο χρήσης του eMBB θα προϋποθέτουν ακόμη υψηλότερα ποσοστά δεδομένων και υψηλότερη χωρητικότητα σε πυκνές εφαρμογές. Ενώ πολλές από τις πρώτες εφαρμογές του 5G θα βρίσκονται σε ζώνες που έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί για προηγούμενες γενιές δικτύων, οι ζώνες συχνοτήτων που είναι πάνω από τα 24 GHz εξετάζονται ως συμπλήρωμα των ζωνών συχνοτήτων κάτω των 6 GHz. Με τις απαιτήσεις του 5G για ακραίες ταχύτητες δεδομένων και τοπικές περιοχές με πολύ υψηλές απαιτήσεις χωρητικότητας κυκλοφορίας, εξετάζεται η ανάπτυξη χρησιμοποιώντας ακόμη υψηλότερες συχνότητες, ακόμη και πάνω από 60 GHz, στις ζώνες των mmWave. Οι πρώτες εμπορικές υπηρεσίες παρουσιάζουν ήδη μεγάλες δυνατότητες στο 5G. Παρόλα αυτά, χρειάζονται σημαντικές ποσότητες ευρέως εναρμονισμένου φάσματος για να πραγματοποιηθεί αυτό το δυναμικό. Απαιτείται το φάσμα να βρίσκεται σε ζώνες χαμηλής, μεσαίας και υψηλής συχνότητας για υπάρξει υποστήριξη όλων των περιπτώσεων χρήσης.

Οι χαμηλές ζώνες, κάτω του 1 GHz μπορούν να υποστηρίξουν ευρεία κάλυψη, συμπεριλαμβανομένων εσωτερικών χώρων σε αστικές, αγροτικές και προαστιακές περιοχές. Το φάσμα μεσαίας ζώνης από την άλλη, προσφέρει ένα συνδυασμό πλεονεκτημάτων κάλυψης και χωρητικότητας. Τα περισσότερα εμπορικά δίκτυα του 5G βασίζονται στο φάσμα στην περιοχή των 3,5 GHz (3,3 GHz - 4,2 GHz). Με την πάροδο του χρόνου, θα χρειαστεί περισσότερο φάσμα για τη διατήρηση της ποιότητας των υπηρεσιών του 5G και για την κάλυψη της αυξανόμενης ζήτησης. Οι περιοχές των 3,5 GHz, 4,8 GHz, 6 GHz και 10 GHz θα συμπεριληφθούν σε αυτή την επέκταση και οι αποφάσεις θα ληφθούν στο WRC<sup>7</sup>.

---

<sup>7</sup> Η Παγκόσμια Διάσκεψη Ραδιοεπικοινωνιών (World Radiocommunication Conference) διοργανώνεται από την ITU για τον έλεγχο των Κανονισμών της διεθνούς συνθήκης που καθορίζουν τη χρήση του φάσματος συχνοτήτων καθώς και των γεωστατικών και μη γεωστατικών δορυφορικών τροχιών.

Οι εταιρείες κινητής τηλεφωνίας μπορούν να αξιοποιήσουν στο έπακρο το 5G. Η κατάργηση του 5G φάσματος για τις κάθετες ζώνες προτεραιότητας μπορεί να υποβάλλει σε κίνδυνο την επιτυχία των δημόσιων υπηρεσιών του 5G και να σπαταλήσει το φάσμα. Ωστόσο, η επιτυχία δεν είναι μόνο η κατανομή νέων ζωνών φάσματος. Η GSMA<sup>8</sup> (Global System for Mobile Communications Association) προτείνει στις κυβερνήσεις και τις ρυθμιστικές αρχές να δώσουν προτεραιότητα στις ευρυζωνικές υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας, παραπάνω από τη μεγιστοποίηση των εσόδων και κατά της ανάθεσης νέων συχνοτήτων. Οι υψηλές τιμές που έχει το φάσμα στο 5G απειλούν τις προσιτές, υψηλής ποιότητας κινητές ευρυζωνικές υπηρεσίες είτε για το 5G είτε για άλλες γενιές. Πρέπει να γίνει σωστή αδειοδότηση του φάσματος από τις κυβερνήσεις και τις ρυθμιστικές αρχές των κρατών εάν θέλουν η χώρα ή η περιοχή τους να είναι στην πρώτη γραμμή της καινοτομίας στο 5G δίκτυο.

Η προδιαγραφή του NR από το 3GPP περιλαμβάνει παραδοσιακές ζώνες κινητής τηλεφωνίας καθώς και νεότερες, ευρύτερες ζώνες σχεδιασμένες για το 5G. Υποστηρίζει ζώνες καναλιών που βρίσκονται μεταξύ των 5 MHz έως και 100 MHz για ζώνες κάτω των 6 GHz και μεγέθη καναλιών από 50 MHz έως 400 MHz σε ζώνες άνω των 24 GHz. Το φάσμα των mmWave μπορεί να εκχωρηθεί από τους ρυθμιστές γνωρίζοντας ότι θα υπάρχει ένα οικοσύστημα. Τα 28 GHz του φάσματος χρησιμοποιούνται ήδη σε εμπορικά δίκτυα, και ο αριθμός συσκευών αυξάνεται. Οι πλήρεις δυνατότητες πραγματοποιούνται καλύτερα μέσω των μεγαλύτερων μεγεθών καναλιών στις νέες ζώνες 5G. Το 5G καθιστώντας το φάσμα διαθέσιμο στα μεγαλύτερα δυνατά συνεχόμενα μπλοκ του, υποστηρίζει ταχύτερες, με χαμηλότερη καθυστέρηση και πιο πράσινες υπηρεσίες. Οι ελάχιστες τεχνικές απαιτήσεις της ITU για την εκπλήρωση των κριτηρίων από το IMT-2020 έχουν ως αποτέλεσμα την διανομή τουλάχιστον 100 MHz εύρους ζώνης ανά χειριστή. Προσδίδουν επίσης υποστήριξη έως και 1 GHz ανά χειριστή σε ζώνες άνω των 6 GHz, όπως τις ζώνες των mmWave. [32]

Για να μπορέσουν οι υπηρεσίες του 5G να αναπτυχθούν στο χρονικό πλαίσιο 2025-2030 θα χρειαστεί πολύ περισσότερο φάσμα. Έχει υπολογιστεί ότι θα μπορούσε να χρειαστεί ένα επιπλέον 1-2 GHz φάσματος μεσαίας ζώνης για να επιτευχθούν από τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας οι στόχοι της IMT-2020 των 100 Mbps ανά χρήστη σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές και να έχουν την δυνατότητα να υποστηρίξουν το FWA<sup>9</sup> (Fixed Wireless Access) ευρύτερα. Αυτό προστίθεται στις αρχικές μεσαίες ζώνες 5G (π.χ. 400 MHz στα 3,3-3,8 GHz) και απαιτεί ότι κι άλλες μεσαίες ζώνες που χρησιμοποιήθηκαν στο παρελθόν για υπηρεσίες των προηγούμενων γενιών δικτύου θα έχουν αναβαθμιστεί σε 5G.

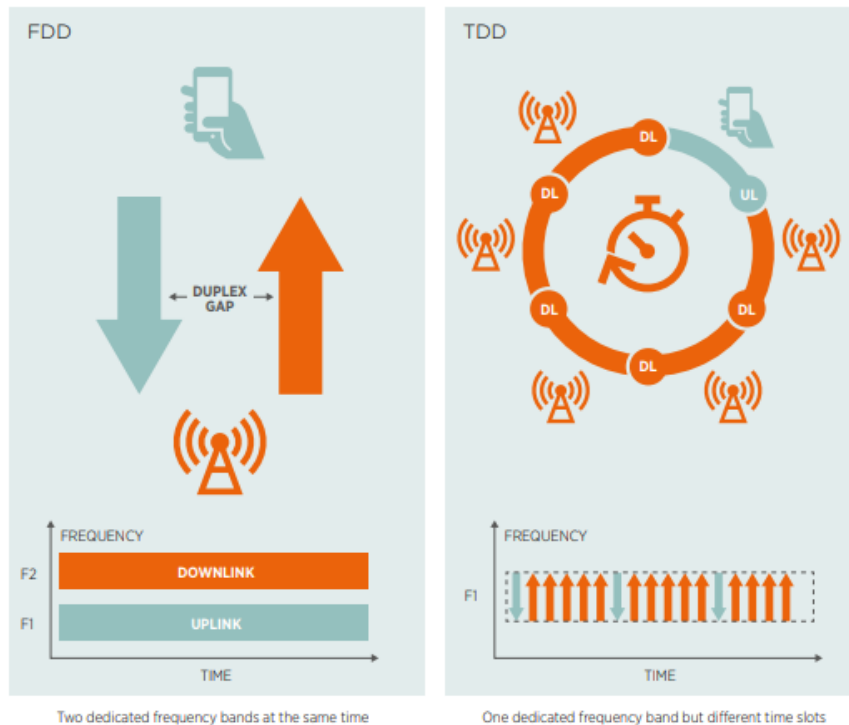
Οι νέες ζώνες ορίζονται σε συνεχή βάση από το 3GPP, κυρίως για τις LTE προδιαγραφές, αλλά τώρα και για τις νέες NR προδιαγραφές. Πολλές από τις νέες ζώνες έχουν οριστεί μόνο για το NR. Και τα δύο ζεύγη ζωνών, όπου διαχωρίζονται σε εύρη συχνοτήτων για uplink και downlink σύνδεση, και μη ζευγαρωτές ζώνες με ένα κοινό εύρος συχνοτήτων για uplink και downlink σύνδεση, περιλαμβάνονται στις προδιαγραφές NR. Οι ζευγαρωτές ζώνες έχουν χρήση στη λειτουργία Frequency Division Duplex (FDD), ενώ οι μη ζευγαρωτές

---

<sup>8</sup> Η GSMA είναι ένας βιομηχανικός οργανισμός που εκπροσωπεί τα συμφέροντα των παρόχων δικτύων κινητής τηλεφωνίας παγκοσμίως.

<sup>9</sup> Το FWA δίνει τη δυνατότητα στους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων να παρέχουν ευρυζωνικές υπηρεσίες εξαιρετικά υψηλής ταχύτητας σε προαστιακές και αγροτικές περιοχές, υποστηρίζοντας οικιακές και επαγγελματικές εφαρμογές όπου η τοποθέτηση και η συντήρηση των οπτικών ινών είναι απαγορευτικά δαπανηρή.

ζώνες έχουν στη Time Division Duplex (TDD)<sup>10</sup>. Στην Εικόνα 11 γίνεται μια περιληπτική αποτύπωση των FDD και TDD. Ορισμένες μη αντιστοιχισμένες ζώνες ορίζονται ως ζώνες συμπληρωματικής Downlink ή συμπληρωματικής Uplink. Αυτές οι ζώνες μέσω της συγκέντρωσης φορέα συνδυάζονται με το uplink ή downlink άλλων ζωνών.



Εικόνα 11. FDD και TDD

Το 5G είναι η πρώτη αξιόλογη ανάπτυξη του TDD στις περισσότερες χώρες. Όλες οι ζώνες στο 5G άνω των 3 GHz θα υιοθετήσουν το TDD. Αυτό σημαίνει ότι οι σταθμοί βάσης 5G και οι UE εκπέμπουν χρησιμοποιώντας το ίδιο κανάλι σε διαφορετικούς χρόνους. Αυτό ίσως δημιουργήσει προβλήματα παρεμβολών εντός και μεταξύ διαφορετικών δικτύων στο 5G. Οι μεταδόσεις υψηλότερης ισχύος από κάποιους σταθμούς βάσης σε ένα δίκτυο μπορεί να επηρεάσουν την ικανότητα των σταθμών βάσης σε άλλα δίκτυα στο να λαμβάνουν σήματα από συσκευές τελικού χρήστη με χαμηλότερη ισχύ. Τα αποτελεσματικά μέτρα παρεμβολής απαιτούν συνήθως τα δίκτυα TDD που λειτουργούν στην ίδια περιοχή συχνοτήτων και στην ίδια περιοχή να συγχρονίζονται. Οι σταθμοί βάσης με ίδια ζώνη TDD θα υποχρεούνται να εκπέμπουν στις ίδιες σταθερές χρονικές περιόδους και όλες οι συσκευές με τεχνολογία 4G και 5G θα εκπέμπουν σε διαφορετικές χρονικές περιόδους.

Η σημαντικά βελτιωμένη απόδοση του 5G έχει επίσης σημαντικό αντίκτυπο στο φάσμα για τη σύνδεση μεταξύ των σταθμών βάσης 5G και του πυρήνα κινητής τηλεφωνίας. Ενώ η backhaul οπτικών ινών είναι ιδανική, η ασύρματη backhaul εξακολουθεί να θεωρείται κρίσιμη καθώς η οπτική ίνα δεν είναι προσβάσιμη ή οικονομικά προσιτή σε όλες τις τοποθεσίες. Η επίγεια τεχνολογία backhaul που χρησιμοποιεί μικροκύματα αναμένεται να αποτελέσει

<sup>10</sup> Το TDD χρησιμοποιεί μια ενιαία ζώνη συχνοτήτων τόσο για εκπομπή όσο και για λήψη. Στη συνέχεια, μοιράζεται αυτή τη ζώνη εκχωρώντας εναλλασσόμενες χρονοθυρίδες για τη μετάδοση και τη λήψη λειτουργιών. Οι πληροφορίες που πρέπει να μεταδοθούν, είτε η φωνή, είτε το βίντεο ή τα δεδομένα υπολογιστή - είναι σε σειριακή δυαδική μορφή. Κάθε χρονική θυρίδα μπορεί να έχει μήκος 1 byte ή μπορεί να είναι ένα πλαίσιο πολλαπλών byte.

τουλάχιστον το 60 τοις εκατό του παγκόσμιου backhaul από κινητά την περίοδο 2021-2027. Παρόλα αυτά, το backhaul 5G προϋποθέτει εξαρχής νέες ευρύτερες ζώνες φάσματος, όπως το «E-band» (δηλαδή 70/80 GHz), και ενδέχεται να χρειαστεί επιπλέον νέες ζώνες μετά το 2025 (π.χ. 92-114 GHz και 130-175 GHz). Οι ζώνες μικροκυμάτων (π.χ. 6-42 GHz) θα συνεχίσουν να εκτυλίσσουν σημαντικό ρόλο, καθώς μπορούν να έχουν υποστήριξη σε συνδέσμους backhaul μεγαλύτερης απόστασης, ωστόσο έχουν σχετικά στενά μεγέθη καναλιών, οπότε θα υποστήριζαν καλύτερα το 5G εάν ήταν ευρύτερα.

Η εμβέλεια, η ταχύτητα και η ποιότητα των υπηρεσιών του 5G βασίζονται στις κυβερνήσεις και στις ρυθμιστικές αρχές που υποστηρίζουν την έγκαιρη πρόσβαση στη σωστή ποσότητα και στο τύπο προσιτού φάσματος, υπό κατάλληλες συνθήκες. Ήδη υπάρχει διαφοροποίηση στην ποσότητα του εκχωρημένου φάσματος και στις τιμές που ορίζονται από τις δημοπρασίες, πράγμα που σημαίνει ότι οι δυνατότητες των υπηρεσιών 5G θα ποικίλλουν μεταξύ των χωρών. Αυτό επηρεάζει άμεσα τα κοινωνικοοικονομικά οφέλη του 5G και την ανταγωνιστικότητα των εθνικών οικονομιών. Για να επιτύχει το 5G θα πρέπει να υπάρξει μια συνεργασία μεταξύ των κυβερνήσεων, της βιομηχανίας κινητής τηλεφωνίας και των ρυθμιστικών αρχών έτσι ώστε να διανεμηθεί σωστά το φάσμα για τα δίκτυα. Η GSMA περιγράφει κάποια σημεία με τα οποία θα πραγματοποιηθεί η επιτυχία του 5G στο [32].

### 2.2.2 Φάσμα Μεσαίας Ζώνης συχνοτήτων

Το φάσμα μεσαίας ζώνης προσφέρει ένα καλό μείγμα κάλυψης και χωρητικότητας για το 5G. Στην εργασία [33], οι συγγραφείς εξετάζουν πόση ποσότητα φάσματος μεσαίας ζώνης θα χρειαστούν τα δίκτυα 5G για να αξιοποιήσουν τις κινητές ευρυζωνικές υπηρεσίες υψηλής ταχύτητας σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές. Το φάσμα αυτό θα επιτρέψει στα MNO να παρέχουν στον καταναλωτή σταθερή ασύρματη πρόσβαση με ταχύτητες που μοιάζουν με αυτές των οπτικών ινών. Οι εμπορικές εταιρείες κινητής τηλεφωνίας έχουν την δυνατότητα να υποστηρίξουν τις ανάγκες μιας μεγάλης ποικιλίας περιπτώσεων χρήσης από κάθετους τομείς. Κάθε κάθετος τομέας έχει πολλές διαφορετικές απαιτήσεις (π.χ. χαμηλή καθυστέρηση, μεγάλη διάρκεια ζωής μπαταρίας, υψηλή απόδοση, κάλυψη ευρείας περιοχής, τοπική κάλυψη κ.λπ.). Αυτές οι διαφορετικές απαιτήσεις έχουν την ανάγκη από διαφορετικούς πόρους φάσματος και δικτύου. Οι MNO είναι σε θέση να υποστηρίξουν τέτοιες διαφορετικές απαιτήσεις λόγω της τεχνογνωσίας τους και των πλεονεκτημάτων του ευρύτερου φάσματος.

Με βάση τις απαιτήσεις της ITU IMT-2020 για αξιόπιστες ταχύτητες λήψης τελικού χρήστη στα 100 Mbps και ταχύτητες upload στα 50 Mbps με βάση της πυκνότητας πληθυσμού ως μέσο ανάλυσης της και την μελέτη 36 πόλεων στο χρονικό πλαίσιο 2025-2030 η έρευνα για τη ποσότητα του φάσματος δείχνει ότι:

Οι πυκνοκατοικημένες πόλεις έχουν ανάγκη, κατά μέσο όρο, συνολικά 2 GHz φάσματος μεσαίας ζώνης. Η ακρίβεια των απαιτήσεων ποικίλλουν ανάλογα με την πυκνότητα του πληθυσμού, τη διαθεσιμότητα των ινών και άλλους παράγοντες. Άρα δεν υπάρχει απλή συσχέτιση μεταξύ του επιπέδου εισοδήματος μιας χώρας και της ζήτησης του φάσματος.

Το πρόσθετο φάσμα στις μεσαίες ζώνες θα οδηγήσει σε κάθε τοποθεσία κυψέλης να υποστηρίξει 3,5 - 6 φορές περισσότερα σπίτια με 5G FWA. Ως αποτέλεσμα, θα δημιουργηθεί σημαντική εξοικονόμηση κόστους στην ανάπτυξη του δικτύου και θα φέρει προστιθέμενη συνδεσιμότητα σε περιοχές όπου άλλες ευρυζωνικές λύσεις δεν είναι οικονομικά βιώσιμες

(π.χ. σε μέρη που η οπτική ίνα δεν είναι ευρέως διαθέσιμη ή παραμένει περιορισμένη σε μεγαλύτερες πόλεις).

Η ανάλυση της εργασίας [33], κατέληξε στο ότι η ποσότητα του φάσματος που απαιτείται εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Την πυκνότητα του πληθυσμού (εξαιρουμένου του προσωρινού πληθυσμού). Την προβλεπόμενη ποσότητα του διαθέσιμου φάσματος έως το 2025. Τον γεωγραφικό διαχωρισμό των σταθμών βάσης (ενδιάμεση απόσταση). Την τεχνολογία 5G που χρησιμοποιείται σε κάθε ζώνη, με αναβαθμίσεις MIMO και small cells, macrocells σε εξωτερικούς χώρους. Το ποσοστό υψηλής ζώνης small cells εσωτερικού χώρου και εκφόρτωση Wi-Fi. Τέλος, τον συντελεστή δραστηριότητας του δικτύου κινητής τηλεφωνίας.

### **2.2.2.1 Φάσμα στη περιοχή 3.3 – 4.2 GHz**

Η βάση για τις πρώτες εφαρμογές του 5G παγκοσμίως θεωρούνται οι συχνότητες στην περιοχή 3,3 - 4,2 GHz. Το φάσμα αυτό βρίσκεται σε σημείο εξισορρόπησης μεταξύ κάλυψης και χωρητικότητας και παρέχει το τέλειο περιβάλλον για την πρώτη συνδεσιμότητα του 5G. Ο σχεδιασμός αυτών των συχνοτήτων πραγματοποιήθηκε σε πολλούς κύκλους των WRC και οι εργασίες για την εναρμόνιση συνεχίζονται μέχρι σήμερα. Το 5G χρησιμοποιεί επίσης τη ζώνη των mmWave για υψηλότερη χωρητικότητα και θα χρησιμοποιήσει χαμηλότερες συχνότητες για την παροχή μεγαλύτερης κάλυψης. Όμως, σε όλο τον κόσμο, η ισορροπία από τη ζώνη των 3,3 - 4,2 GHz τις έχει θέσει ως την γενέτειρα του 5G. Η διαδικασία της Ευρώπης για τη διάθεση της ζώνης στα 3,4 - 3,8 GHz ξεκίνησε πριν από το WRC του 2007 και ενώ υπάρχουν πρακτικά προβλήματα εφαρμογής, η ζώνη έχει εναρμονιστεί επιτυχώς εντός Ευρώπης. Τα νέα θέματα στην περιοχή των 3,5 GHz που θα εξεταστούν στο WRC-23 είναι μια ευκαιρία να διορθωθεί μέρος αυτής της διαφοράς και να εναρμονιστεί η ζώνη. Έτσι, θα πραγματοποιηθεί η ενθάρρυνση των επενδύσεων, θα ενισχυθεί ο ανταγωνισμός και θα μειωθεί το κόστος της κινητής ευρυζωνικότητας. Στο WRC-23 θα εξεταστεί το ενδεχόμενο επέκτασης του εύρους των 3,5 GHz που εκχωρείται από την υπηρεσία κινητής τηλεφωνίας και προσδιορίζεται για το IMT στους Κανονισμούς του δικτύου επικοινωνίας. [34]

Η διαθεσιμότητα εύρους ζώνης καναλιού τουλάχιστον 80-100 MHz ανά δίκτυο 5G θα ενισχύσει την απόδοση αιχμής, μέσης και ακμής κυψέλης με προσιτή πολυπλοκότητα. Το εύρος ζώνης του καναλιού επηρεάζει τους μέγιστους ρυθμούς δεδομένων και οι τεχνικές απόδοσης φάσματος όπως το MIMO θα πρέπει να εξαρτώνται από ένα περιβάλλον όπου υπάρχει ήδη επαρκές εύρος ζώνης καναλιού. Η συγκέντρωση πολλών φορέων στο ίδιο ακουστικό είναι επίσης ένα μέσο περιορισμού της βλάβης των αποσπασματικών στοιχείων του φάσματος, αλλά και οι δύο αυτές τεχνικές έχουν αντίκτυπο στην πολυπλοκότητα των τερματικών και, συνεπώς, στο κόστος της συσκευής. Στις αναδυόμενες αγορές, το κόστος της συσκευής είναι σημαντικός παράγοντας για να επιτευχθεί ο στόχος της εθνικής ευρυζωνικότητας και η υποστήριξη αυτών των τεχνολογιών που αυξάνουν την απόδοση του φάσματος θα μεγαλώσει την πολυπλοκότητα της συσκευής και θα αυξήσει την τιμή εισόδου.

Τα περισσότερα εύρη ζώνης καναλιών, τα οποία δεν βασίζονται σε αυτές τις τεχνικές, επιτρέπουν τη χαμηλότερη χρήση ενέργειας. Αρχικά, αυτό θα μειώσει το αποτύπωμα άνθρακα των κινητών, σε περιπτώσεις όπου οι καταναλωτές δεν έχουν άπλετη πρόσβαση σε πηγές ηλεκτρικής ενέργειας, θα είναι ζωτικής σημασίας για να έχουν συνεχή πρόσβασή και συνδεσιμότητα. Επιπρόσθετα, το μέγεθος καναλιού είναι ζωτικής σημασίας και επιτυγχάνει

την εξοικονόμηση χρημάτων και αυξάνει την απόδοση του δικτύου. Κάνει την ευρυζωνική σύνδεση πιο προσιτή και βοηθάει τη σύνδεση των μη συνδεδεμένων χρηστών. Πολλές εφαρμογές 5G έχουν αξιολογές απαιτήσεις ρυθμού δεδομένων. Οι εφαρμογές εικονικής πραγματικότητας και βίντεο, που ενεργοποιούνται από το eMBB, θα προϋποθέτουν ο ρυθμός να είναι πάνω από 100 Mbps. Το διαθέσιμο εύρος ζώνης καναλιού στο 5G NR θα επιδράσει τους ρυθμούς δεδομένων σε ολόκληρη την κλίμακα. Εκμεταλλευόμενοι τους στόχους της φασματικής απόδοσης από το IMT-2020, λαμβάνουμε μια αξιολόγηση της απόδοσης χρησιμοποιώντας διαφορετικά εύρη ζώνης καναλιών. Ο συγχρονισμός μεταξύ των δικτύων κινητής είναι σε θέση να συντελέσει στη μεγιστοποίηση της απόδοσης της περιοχής τω 3,5 GHz και να επιτύχει τη βέλτιστη χρήση του φάσματος.

Οι αποστάσεις διαχωρισμού μεταξύ μη συγχρονισμένων δικτύων αναμένεται να είναι περίπου 60 km για χρήση από κοινού καναλιού (δηλαδή διασυνοριακή) και περίπου 14 έως 16 km για χρήση γειτονικών καναλιών. Με τον συγχρονισμό των δικτύων TDD γίνεται η αποφυγή των παρεμβολών και μπορεί να μεγιστοποιηθεί μέσω διαδικασιών συγχρονισμού η αποτελεσματική χρήση του φάσματος. Επειδή δεν απαιτούνται πρόσθετες ζώνες προστασίας το κόστος του εξοπλισμού δικτύου μπορεί να ελαττωθεί. Ο συγχρονισμός ανάμεσα στους φορείς εκμετάλλευσης της ίδιας χώρας και περιοχής θα οδηγήσει στην αποφυγή των παρεμβολών, ενώ οι διασυνοριακές παρεμβολές είναι πιο πιθανές εάν τα δίκτυα δεν είναι συγχρονισμένα.

### **2.2.2.2 Η τεχνική του Time Division Duplex (TDD)**

Σύμφωνα με την αναφορά που έγινε στην προηγούμενη ενότητα, από τεχνικής άποψης η συχνότητα στα 3,5 GHz είναι ένα εξαιρετικό περιβάλλον για πολλές από τις παλαιότερες συνδεσιμότητες του 5G, επειδή παρέχει μια καλή ισορροπία μεταξύ κάλυψης και χωρητικότητας. Ακόμα, οι πρόσφατες τεχνικές εξελίξεις του δίνουν τη δυνατότητα να παρέχει παρόμοια κάλυψη στο downlink με τις τρέχουσες ζώνες του LTE στα 2,6 GHz και 1800 MHz με τα ίδια δίκτυα κυψέλης. Ωστόσο, ορισμένα τεχνικά ζητήματα φέρουν σημαντικό αντίκτυπο στην κάλυψη καθώς και στα επίπεδα απόδοσης. Ο συνδυασμός των 3,5 GHz και του 5G NR οδηγούν στην πρώτη σημαντική ανάπτυξη δικτύων κινητής τηλεφωνίας του TDD σε πολλές χώρες. Για την αποδοτικότερη εφαρμογή του φάσματος, όλα τα δίκτυα TDD, είτε LTE είτε 5G NR, που λειτουργούν στην ίδια περιοχή συχνοτήτων και εντός της ίδιας περιοχής πρέπει να συγχρονιστούν. Οι σταθμοί βάσης θα πρέπει να εκπέμπουν στις ίδιες σταθερές χρονικές περιόδους και όλες οι συσκευές θα πρέπει να εκπέμπουν μόνο σε αποκλειστικές χρονικές περιόδους. Η επιλεγμένη προσέγγιση συγχρονισμού επηρεάζει επίσης τις πιθανές περιπτώσεις χρήσης.

Ο συγγραφέας στο [35], προτρέπει τις ρυθμιστικές αρχές να δώσουν προτεραιότητα στον συγχρονισμό του TDD ή άλλες κατάλληλες εναλλακτικές λύσεις για την αντιμετώπιση ζητημάτων παρεμβολών μεταξύ των δικτύων, τόσο από εθνική όσο και από διεθνή άποψη.

Στα τωρινά δίκτυα, η ποσότητα της κίνησης μεταξύ του τερματικού χρήστη και του σταθμού βάσης (uplink) και αντίστροφα (downlink) παρουσιάζει ασυμμετρία (επειδή οι χρήστες κατεβάζουν περισσότερα από όσα ανεβάζουν). Στις ζώνες FDD το κανάλι έχει το ίδιο μέγεθος και για τις δύο κατευθύνσεις. Συγχρόνως, πιο προηγμένες δυνατότητες, όπως η

διαμόρφωση 256QAM και το MIMO υψηλότερης τάξης (4x4) συνήθως περιορίζονται για το downlink, παρέχοντας υποστήριξη για τις αυξημένες απαιτήσεις χωρητικότητας και λήψης. Η προσοχή στη χωρητικότητα του downlink έχει λειτουργήσει καλά μέχρι στιγμής. Ωστόσο, καθώς τα μοτίβα κυκλοφορίας μεταβάλλονται, αναμένεται να υπάρξουν περισσότερες βαριές εφαρμογές για το uplink (π.χ. αποθήκευση cloud, προσωπική μετάδοση) και είναι επιθυμητή η ευελιξία με τη χρήση του φάσματος uplink και downlink. Για να έχουμε αύξηση της ευελιξίας καθώς και της αποτελεσματικότητας του φάσματος, το TDD γίνεται ολοένα και πιο κοινό και σημαντικό. Το TDD κάνει χρήση της ίδιας συχνότητας για κάθε κατεύθυνση διπλής όψης, με ένα πλαίσιο που εμπεριέχει διαφορετικές χρονικές περιόδους και υποδοχές για επικοινωνίες uplink και downlink. Η απόδοση του δικτύου έχει τη δυνατότητα να προσαρμοστεί για να καλύψει διαφορετικές ανάγκες και να δώσει βοήθεια στην παροχή της καλύτερης δυνατής εμπειρίας με την αλλαγή της διάρκειας αυτών των χρονικών περιόδων.

Ένα από τα πλεονεκτήματα του 5G είναι ότι χρησιμοποιεί μια ποικιλία σεναρίων χρήσης, όπως βελτιωμένη ευρυζωνική σύνδεση κινητής τηλεφωνίας (η οποία απαιτεί βαριά δίκτυα uplink ή/και downlink, αλλά δεν θεωρείται κρίσιμη για την καθυστέρηση) και επικοινωνίες όπου είναι εξαιρετικά αξιόπιστες, χαμηλής καθυστέρησης (που βασίζεται σε κανονικές ακολουθίες uplink και downlink για μειωμένη καθυστέρηση). Διαφορετικά σενάρια (και κατ' επέκταση, εμπορικές προσφορές) απαιτούν προσαρμοσμένα χαρακτηριστικά απόδοσης, επομένως είναι πολύ σημαντική η λήψη της σωστής αναλογίας διάρκειας uplink προς downlink. Καθώς η πολλαπλότητα των διαμορφώσεων θα μπορούσε να οδηγήσει σε προβλήματα συνύπαρξης, ο σωστός συγχρονισμός του TDD είναι πολύ σημαντικός για την ανάπτυξη του 5G. Οι πάροχοι κινητής τηλεφωνίας έχουν την δυνατότητα να ξεπεράσουν τα όρια απόδοσης οποιασδήποτε επιλογής μορφής πλαισίου στη συχνότητα των 3,5 GHz, για παράδειγμα, χρησιμοποιώντας μια ποικιλία άλλων ζωνών. Ο συγχρονισμός μεταξύ των δικτύων κινητής TDD παραπέμπεται σε παραμέτρους που εξασφαλίζουν ότι τα γειτονικά δίκτυα αποστέλλουν και λαμβάνουν δεδομένα από κινητές ή σταθερές συσκευές ταυτόχρονα, με σκοπό να αποφεύγονται παρεμβολές. Τρεις κύριες προσεγγίσεις έχουν εξεταστεί από τον κλάδο:

- Η χρήση συγχρονισμένων δικτύων όπου όλα τα δίκτυα βρίσκονται παράλληλα σε λειτουργία uplink ή downlink. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αποφυγή των παρεμβολών μεταξύ της μετάδοσης ενός σταθμού βάσης και της λήψης ενός άλλου σταθμού βάσης στο ίδιο ή σε παρόμοιο δίκτυο. Το ίδιο ισχύει και για τις συσκευές.
- Η χρήση μη συγχρονισμένων δικτύων στο οποίο το καθένα βρίσκεται σε λειτουργία uplink ή downlink χωρίς να λαμβάνονται υπόψη άλλα δίκτυα. Αυτό πιθανότατα οδηγεί σε παρεμβολές.
- Για τη χρήση ημι-συγχρονισμένων δικτύων όπου ένα μέρος του πλαισίου είναι συγχρονισμένο, ενώ το άλλο μέρος του πλαισίου είναι ασυντόνιστο, φέρνει πιθανά προβλήματα συνύπαρξης κατά τις μη συγχρονισμένες περιόδους.

Σαν συμπέρασμα, με το μη συγχρονισμό σε εθνικό επίπεδο μεταξύ των φορέων εκμετάλλευσης, καθίσταται αδύνατη η ανάπτυξη δικτύων χωρίς να επηρεαστεί η απόδοση λόγω παρεμβολών. Επομένως, είναι υψίστης σημασίας να εξεταστεί προσεκτικά αυτό το ζήτημα πριν από την ανάθεση του φάσματος. Για να υπάρξει ένα επιτυχημένο αποτέλεσμα, πρέπει να υπάρξει συμφωνία από όλες τις ακόλουθες παραμέτρους: 1. Μια κοινή αναφορά ρολογιού φάσης (π.χ. UTC - Συντονισμένη παγκόσμια ώρα) και η ακρίβειά της. 2. Μια κοινή

δομή πλαισίου όπως ορίζεται από το 3GPP: a. Επιλογή αναφοράς χρονισμού (αρχή του πλαισίου), b. Επιλογή μορφής πλαισίου, c. Επιλογή απόστασης δευτερεύοντος φορέα, d. Επιλογή κανονικού ή εκτεταμένου προθέματος, e. Επιλογή ειδικής διαμόρφωσης υποδοχής. Οι συγγραφείς του [35], αναλύουν και προτείνουν τρόπους για να απονεμηθεί σωστά το φάσμα με τη χρήση του TDD.

### 2.2.3 Το Φάσμα στη ζώνη των mmWave

Λόγω της προσφοράς του τεράστιου όγκου φάσματος, των mmWave (24 GHz και άνω) θεωρούνται ζωτικής σημασίας για την κάλυψη της υψηλής ζήτησης κίνησης σε υψηλές ταχύτητες δικτύου για να διατηρηθούν οι απαιτήσεις της απόδοσης και της ποιότητας των υπηρεσιών του 5G. Πιο συγκεκριμένα, το mmWave μπορεί να είναι μια ισχυρή λύση για την κάλυψη της ζήτησης για τις βελτιωμένες υπηρεσίες δεδομένων κινητής τηλεφωνίας καθώς και για νέες περιπτώσεις χρήσης που θα ήταν πολύ δαπανηρό ή δύσκολο να ολοκληρωθούν χρησιμοποιώντας εναλλακτικό φάσμα. Αυτή τη στιγμή, τα 26, 28 και 40 GHz έχουν τη μεγαλύτερη διεθνή υποστήριξη. Το WRC το 2019, τροποποίησε τη διεθνή συνθήκη που διέπει τη χρήση συχνοτήτων φάσματος για να συμπεριλάβει αρκετές ζώνες συχνοτήτων mmWave για χρήση σε κινητές υπηρεσίες 5G, με περίπου 17 GHz φάσματος να προσδιορίζονται συνολικά παγκοσμίως ή περιφερειακά για το 5G στις περιοχές των 26 GHz (24,25–27,5 GHz), 40 GHz (37–43,5 GHz), 50 GHz (45,5–47 GHz και 47,2–48,2 GHz) και 66 GHz (66–71 GHz).

Παρά των δυνατοτήτων του mmWave χρειάστηκε να ξεπεραστούν σημαντικές τεχνικές προκλήσεις: τα σήματα mmWave ταξιδεύουν σχετικά σε μικρές αποστάσεις, θεωρούνται επιρρεπής σε εξασθενήσεις από δέντρα και άλλα εμπόδια και έχουν δυσκολία στο να διεισδύσουν μέσω του υλικού, ιδιαίτερα του σκυροδέματος αλλά και του γυαλιού και του ξύλου. Με αποτέλεσμα να μην είναι καλή λύση για να φτάσει σε εσωτερικούς χώρους ή να αντιμετωπίσει σοβαρά εμπόδια.

Ωστόσο, η ανάγκη για τις ζώνες mmWave γίνεται όλο και πιο ορατή, καθώς η κίνηση δεδομένων κινητής τηλεφωνίας συνεχίζει να πληθαίνει με ταχείς ρυθμούς, και η ζήτηση για υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων για την εξυπηρέτηση νέων εφαρμογών μαζί με μια πιθανή ανάγκη για μεγαλύτερη χωρητικότητα uplink. Οι ζώνες mmWave μπορούν να καλύψουν υψηλότερη χωρητικότητα και εύρος ζώνης από οποιαδήποτε άλλη ζώνη. Με δεδομένο ότι το φάσμα σε αυτές τις ζώνες είναι υπεραρκετό, το φάσμα mmWave είναι ιδανικά τοποθετημένο για να παρέχει υψηλές ταχύτητες, υψηλή χωρητικότητα και χαμηλή καθυστέρηση, όλα αυτά ταυτόχρονα. Το μικρό μήκος κύματος του mmWave βοηθάει στην εισαγωγή πολύ μικρών κεραιών, κάτι που βοηθά στη διαμόρφωση δέσμης για την ύπαρξη βελτιωμένης κάλυψης και φασματικής απόδοσης. Το mmWave μπορεί να είναι μια καλή λύση σε εσωτερικούς χώρους όπου τα χαρακτηριστικά διάδοσης μετατρέπονται σε πλεονέκτημα για την αποφυγή παρεμβολών μεταξύ των κυψελών.

Η αύξηση του αριθμού των διαθέσιμων τηλεφώνων mmWave και UE τα τελευταία χρόνια ήταν αξιοσημείωτη. Κάποιες συσκευές mmWave και FWA UE κυκλοφόρησαν το 2019 και περισσότερες από 30 συσκευές χειρός και 35 UE ήταν διαθέσιμες μέχρι το τέλος του 2020. Παρά την αβεβαιότητα που προκλήθηκε από την κρίση του Covid-19 και την πιθανή



οικονομική ύφεση, οι συσκευές 5G mmWave συνεχίζονται να αναπτύσσονται και να επεκτείνονται. [36]

Περιμένουμε ότι μεταξύ του 2020 και του 2022, το κόστος του εξοπλισμού του mmWave θα έχει σημαντική μείωση και θα προσθέσει σημαντικές τεχνικές και λειτουργικές βελτιώσεις. Κάποιες από αυτές τις βελτιώσεις περιλαμβάνουν προηγμένη διαχείριση δέσμης, MIMO πολλαπλών χρηστών, υψηλότερους ρυθμούς αιχμής, χαμηλότερο θόρυβο, υψηλότερη αποτελεσματική ιστροπική ακτινοβολούμενη ισχύ (Effective Isotropic Radiant Power - EIRP). Στο μέλλον, οι νέες ευέλικτες λύσεις εκτιμάται ότι θα προσθέσουν περισσότερη χωρητικότητα όταν έχουμε αύξηση της κυκλοφορίας και να ενισχύσουν την απόδοση γύρω από μια δεδομένη κυψέλη. Με την αύξηση της χρήσης των συσκευών mmWave από τους καταναλωτές, τα νέα massive MIMO θα μπορούν να χρησιμοποιούν σταδιακά περισσότερα UE και θα βασίζονται σε νέες τεχνολογίες προγραμματισμού πολλών χρηστών. Οι προδιαγραφές του 3GPP R16 που ολοκληρώθηκαν το 2020 περιλάμβαναν μια σειρά από αναβαθμίσεις για τη λειτουργία των mmWave, που δείχνουν μια συγκεκριμένη πορεία εξέλιξης για την τεχνολογία. Ακόμα, ένα ευρύ φάσμα προϊόντων εκτιμάται να είναι διαθέσιμο σε διάφορες επιλογές διαχωρισμού δικτύων πρόσβασης επικοινωνίας (Radio Access Network - RAN).

Τα σενάρια στην εργασία [36], λαμβάνουν υπόψη μόνο τη ζήτηση δεδομένων κινητής τηλεφωνίας που δημιουργείται σε εξωτερικούς χώρους και συγκρίνουν δύο εναλλακτικές στρατηγικές ανάπτυξης 5G:

- Τα δίκτυα 5G βασίζονται σε τοποθεσίες μεσαίας ζώνης μόνο για κάλυψη και χωρητικότητα: Υποθέτουμε ότι ένας δεδομένος πάροχος θα παρείχε πρώτα ένα στρώμα «κάλυψης» 5G φάσματος μεσαίας ζώνης που καλύπτει ολόκληρη την περιοχή και στη συνέχεια θα πυκνώσει το δίκτυο με νέες μεσαίες τοποθεσίες ζώνης (μακροοικονομικές και μικρές τοποθεσίες) όπου η ζήτηση επισκεψιμότητας υπερβαίνει την αναπτυγμένη χωρητικότητα.
- Τα δίκτυα 5G βασίζονται σε τοποθεσίες μεσαίας ζώνης για κάλυψη και τοποθεσίες mmWave για επιπλέον χωρητικότητα: Όπως με την πρώτη στρατηγική ανάπτυξης, υποθέσαμε ότι ένας δεδομένος φορέας εκμετάλλευσης θα έδινε πρώτα ένα στρώμα «κάλυψης» 5G φάσματος μεσαίας ζώνης που θα σκέπαζε ολόκληρη την περιοχή και στη συνέχεια θα πυκνώνει το δίκτυο με τοποθεσίες μόνο με mmWave (μακροεντολές και μικρές τοποθεσίες), αντί για τοποθεσίες μεσαίας ζώνης, όπου η ζήτηση κίνησης υπερτερεί της αναπτυγμένης χωρητικότητας.

Η αποδοτικότητα κόστους της δεύτερης στρατηγικής ανάπτυξης μιας μεσαίας ζώνης συν ενός δικτύου 5G με δυνατότητα mmWave σε μια πυκνή αστική περιοχή εξαρτάται από δύο βασικούς παράγοντες. Από τη μία πλευρά, η ανώτερη φασματική απόδοση και η μείζονα χωρητικότητα που παρέχεται από τα μεγάλα εύρη ζώνης των mmWave και συνεπάγονται σε μικρότερο αριθμό σταθμών βάσης που απαιτούνται για την κάλυψη των κενών χωρητικότητας, όποτε προκύπτουν αυτά τα κενά. Από την άλλη πλευρά, υπάρχει μεγαλύτερο κόστος ανά τοποθεσία που σχετίζεται με τον εξοπλισμό mmWave.

## 2.2.4 Τεχνικές Κοινής χρήσης του Φάσματος

Η κοινή χρήση του φάσματος θα διαδραματίσει ζωτικό ρόλο στη διαμόρφωση του 5G μοντέλου. Τα σημαντικά πλεονεκτήματα περιγράφονται στην κοινή χρήση του φάσματος, πρώτον είναι το ξεκλείδωμα του φάσματος που χρησιμοποιείται ελαφρώς από τον κύριο χρήστη, δεύτερον για την αύξηση της χρήσης του φάσματος και το τρίτο σημαντικότερο πλεονέκτημα είναι η προσέλκυση νέων παροχών υπηρεσιών για την ενεργοποίηση των νέων μοντέλων υπηρεσιών και ούτω καθεξής. Η κάθετη κοινή χρήση, οριζόντια και δυναμική κοινή χρήση είναι οι κύριοι τύποι κοινής χρήσης στο φάσμα.

*Κάθετη κοινή χρήση (Vertical sharing):* Η κατακόρυφη κοινή χρήση απεικονίζει την κοινή χρήση φάσματος με βάση την προτεραιότητα μεταξύ των διαφορετικών χρηστών, όπως μεταξύ κύριου και δευτερεύοντος χρήστη. Η άνιση κατανομή μεταξύ των χρηστών για τα δικαιώματα κοινής χρήσης, έχει υψηλότερη προτεραιότητα για το φάσμα, ενώ οι δευτερεύοντες χρήστες έχουν χαμηλότερη προτεραιότητα. Στατικά και δυναμικά μοντέλα περιέχονται στην κάθετη κοινή χρήση.

*Οριζόντια κοινή χρήση (Horizontal sharing):* Η οριζόντια κοινή χρήση περιγράφει την κοινή χρήση με βάση την προτεραιότητα στο φάσμα μεταξύ διαφορετικών χρηστών. Κάθε χρήστης έχει ή διαφορετικές προτεραιότητες ή ίση πρόσβαση στο φάσμα. Η κοινή χρήση μεταξύ διαφορετικών χρηστών συμβαίνει με διαφορετικά σενάρια κοινής χρήσης χρησιμοποιώντας διαφορετική ή ίδια τεχνολογία. Το οριζόντιο σχήμα κοινής χρήσης χωρίζεται σε δύο μέρη, το ομοιογενές και το ετερογενές. Εάν το φάσμα ασπάζεται το ίδιο σχήμα μεταξύ των χρηστών, η οριζόντια κοινή χρήση είναι ομοιογενής. Ειδικά, η κοινή χρήση είναι ετερογενής. Η ζώνη στα 2.4, 5 και E GHz με άδεια χρήσης εκμεταλλεύεται το σχήμα οριζόντιας κοινής χρήσης. Σε αυτήν τη μέθοδο κοινής χρήσης, πολλαπλές άδειες εισάγονται στην ίδια συχνότητα και τοποθεσία, χωρίς επικάλυψη.

*Δυναμική κοινή χρήση (Dynamic sharing):* Στη δυναμική κοινή χρήση, υπάρχει συνδυασμός της κατακόρυφης και οριζόντιας κοινής χρήσης για να επιτευχθεί κέρδος απόδοσης και υψηλότερη χρήση και χρησιμοποιούνται συνήθως στη ζώνη CBR των 3,5 GHz.

*Κοινή χρήση βάσει CR (CR-Based Sharing):* Η τεχνική κοινής χρήσης που βασίζεται στο CR και χρησιμοποιείται στο WSN (Wireless Sensor Network) σε μετάδοση φάσματος χωρίς άδεια αυξάνει την φασματική απόδοση. Αυτή η τεχνική εξαρτάται από μια γνωστική περίοδο που έχει δύο φάσεις. Η πρώτη φάση λέγεται ανίχνευση φάσματος και ουσιαστικά ο γνωστικός χρήστης αντιλαμβάνεται το περιβάλλον και συλλέγει τις πληροφορίες. Στη δεύτερη φάση ο γνωστικός χρήστης διαλέγει την καλύτερη ζώνη φάσματος σύμφωνα με τις πληροφορίες που έχει συλλέξει και προσαρμόσει από τη μετάδοση.

*Κοινή χρήση φάσματος που βασίζεται σε D2D (D2D-Based Spectrum Sharing):* Είναι η κοινή χρήση φάσματος βάσει D2D στο φάσμα του IoT. Η επικοινωνία D2D είναι η πιο αποδοτική. Μειώνει την απόσταση για την πραγματοποίηση της απαιτούμενης απόδοσης και ελαχιστοποιεί την κατανάλωση ενέργειας με μειωμένη καθυστέρηση.

Οι τεχνικές δυνατότητες που χρειάζονται για να δοθεί άδεια στα συστήματα eMBB να μοιράζονται το φάσμα κατηγοριοποιούνται σε κατανεμημένες λύσεις και κεντρικές λύσεις. Σε μια κατανεμημένη λύση τα συστήματα συντονίζονται μεταξύ τους σε ίση βάση. Σε μια

κεντρική λύση κάθε σύστημα συντονίζεται χωριστά με μια κεντρική οντότητα και τα συστήματα δεν αλληλοεπιδρούν άμεσα μεταξύ τους. [37]

#### **2.2.4.1 Τεχνικές κατανομής κατανεμημένου φάσματος**

Ο συντονισμός στις κατανεμημένες λύσεις μπορεί να είναι πιο αποτελεσματικός καθώς έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να πραγματοποιηθεί σε τοπικό πλαίσιο. Κατ' αρχήν είναι δυνατός ο συντονισμός μόνο εκείνων των μεταδόσεων που δημιουργούν πραγματικά παρεμβολές μεταξύ των συστημάτων. Οι λύσεις για κατανεμημένο συντονισμό μπορούν να προστεθούν εξ ολοκλήρου στα πρότυπα και επομένως, να οριστούν έτσι ώστε να λειτουργούν χωρίς να έχουν την ανάγκη για εμπορικές συμφωνίες μεταξύ χειριστών ή ιδιοκτητών εξοπλισμού.

Σε ένα peer-to-peer πρωτόκολλο συνύπαρξης, ο συντονισμός της κοινής χρήσης οριζόντιου φάσματος συντελείται μέσω ανταλλαγής μηνυμάτων απευθείας μεταξύ των συστημάτων κοινής χρήσης μέσω κάποιας καλά καθορισμένης διεπαφής. Το πρωτόκολλο καθορίζει τη συμπεριφορά των κόμβων όταν λαμβάνουν ορισμένα μηνύματα ή όταν λαμβάνουν χώρα ορισμένα γεγονότα.

Σε σχήματα που βασίζονται στη συμπεριφορά MAC (Media Access Control), το πρωτόκολλο MAC έχει σχεδιαστεί για να επιτρέπει την κοινή χρήση οριζόντιου φάσματος. Παραδείγματα είναι στα συστήματα WLAN IEEE 802.11 το αίτημα για αποστολή / διαγραφή για τα RTS/CTS που χρησιμοποιείται και η εναλλαγή συχνότητας που χρησιμοποιείται στο Bluetooth. Η λειτουργία συνύπαρξης Wi-Fi είναι ένα συγκεκριμένο παράδειγμα του τρόπου με τον οποίο μια συμπεριφορά MAC ενός συστήματος που δεν βασίζεται σε διαφωνίες μπορεί να προσαρμοστεί ώστε να επιτρέπει την ομαλή οριζόντια συνύπαρξη με συστήματα Wi-Fi: το πρωτόκολλο MAC μπορεί να αφήνει σιωπηλές περιόδους κατά τις οποίες τα συστήματα Wi-Fi μπορούν να λειτουργήσουν.

Η δυναμική επιλογή συχνότητας/καναλιού (Dynamic Frequency Selection - DFS/Dynamic Channel Selection - DCS) και η ανίχνευση του φάσματος θεωρούνται λύσεις στις οποίες τα συστήματα διαλέγουν δυναμικά το εύρος των συχνοτήτων λειτουργίας τους σε συνάρτηση με τα αποτελέσματα των μετρήσεων (π.χ. ανίχνευση ενέργειας ή ανίχνευση χαρακτηριστικών). Το DFS/DCS δεν χαρακτηρίζεται για την αξιοπιστία του (λόγω του «προβλήματος κρυφού κόμβου») και μπορεί να μην το κάνει ελκυστικό για την προστασία ενός πρωτεύοντος χρήστη σε κατακόρυφη κοινή χρήση. Στα οριζόντια σενάρια κοινής χρήσης το DFS/DCS θεωρείται ότι έχει υποστηρικτικό ρόλο. [37]

#### **2.2.4.2 Τεχνικές κεντρικού διαμοιρασμού φάσματος**

Οι κεντρικές λύσεις χρησιμεύουν για την κοινή χρήση σε μεγαλύτερες χρονικές κλίμακες, με λίγα λόγια, η ευαισθησία του φάσματος στη κοινή χρήση θα ήταν σε υψηλότερο επίπεδο σε σχέση με την πραγματική ευαισθησία κατανομής των πόρων σε κάθε σύστημα. Ο συντονισμός γίνεται σε συγκριτικά αργή χρονική κλίμακα πράγμα που το καθιστά περιοριστικό και έτσι, έχουμε πως μια τυπική λύση είναι συντηρητική. Πιθανόν να χωρίζει τους χρήστες σε ορθογώνιους πόρους χωρίς ολοκληρωμένες πληροφορίες σχετικά με το εάν θα παρέμβουν ή όχι. Η αξιοπιστία, η προβλεψιμότητα και ο έλεγχος είναι τα οφέλη. Εφόσον οι

νομισματικές συναλλαγές περιλαμβάνονται στην κοινή χρήση φάσματος, υπάρχει πιθανότητα οι κεντρικές προσεγγίσεις να είναι προτιμότερες.

Η προσέγγιση της βάσης δεδομένων γεωγραφικής τοποθεσίας (Geographic Location DataBase - GLDB) θεωρείται ως ένα παράδειγμα μιας τεχνικής κεντρικού διαμοιρασμού. Θεωρείται ένα σύστημα το οποίο επικοινωνεί με μια βάση δεδομένων για να λάβει πληροφορίες για το ποιοι πόροι είναι σε διαθεσιμότητα σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία. Περιγράφεται ως η απαιτούμενη λύση κάθετης κοινής χρήσης με σκοπό την πρόσβαση σε τοπικά αμεταχειρίστες μπάντες τηλεόρασης.

Η προσέγγιση μεσολαβητή φάσματος είναι ένα ακόμα παράδειγμα κοινής χρήσης κεντρικού διαμοιρασμού. Εδώ τα συστήματα οριζόντιας κοινής χρήσης αλληλοεπιδρούν με μια οντότητα κεντρικής διαχείρισης πόρων με σκοπό τη λήψη βραχυπρόθεσμων επιχορηγήσεων για να μπορεί να πραγματοποιηθεί χρήση φασματικών πόρων σε μια αποκλειστική βάση. Αυτή η επιχορήγηση οριοθετεί το πλαίσιο της εσωτερικής διαχείρισης των τηλεπικοινωνιακών πόρων του συστήματος. Ο μεσίτης που διαμοιράζει το φάσμα μπορεί σε κάποιες περιπτώσεις (π.χ., εάν υπάρχει πρόσθετη κατακόρυφη κοινή χρήση με έναν χρήστη υψηλότερης προτεραιότητας), να αποτελέσει ως μια επέκταση της βάσης δεδομένων σε μια γεωγραφική τοποθεσία. Και η GLDB προσέγγιση αλλά και η προσέγγιση φάσματος μεσολαβητή μπορούν να βοηθήσουν την οριζόντια κοινή χρήση ανάμεσα στα συστήματα χωρίς άδεια, συνήθως αυτό δεν απαιτείται από τη ρυθμιστική αρχή.

## 2.2.5 Τρόποι και σενάρια κοινής χρήσης Φάσματος

Στοιχεία σε ένα μελλοντικό σύστημα MBB πολλαπλών φορέων πολλαπλών RAT<sup>11</sup> μπορούν να προβλεφθούν σε μια δεδομένη χρονική στιγμή σε μια δεδομένη ζώνη συχνοτήτων για να λειτουργούν σε έναν από τους τρεις διαφορετικούς τρόπους κοινής χρήσης φάσματος: λειτουργία κύριου χρήστη, λειτουργία χωρίς άδεια και κοινόχρηστη λειτουργία με άδεια χρήσης. Αυτοί οι τρόποι λειτουργίας σχετίζονται με το ρυθμιστικό πλαίσιο της ζώνης που επηρεάζει τις τεχνολογίες που μπορεί να υπάρχουν και, ως εκ τούτου, ποιοι ενεργοποιητές κοινής χρήσης είναι κατάλληλοι.

### A. Λειτουργία κύριου χρήστη (*Primary user mode*)

Σύμφωνα με τα συστήματα MBB, που βρίσκονται σε λειτουργία πρωτεύοντος χρήστη, το μόνο σενάριο κοινής χρήσης φάσματος που σχετίζεται είναι η οριζόντια κοινή χρήση με άλλα κύρια συστήματα. Μπορεί κατ' αρχήν να υπάρχουν δευτερεύοντα συστήματα, αλλά το πρωτεύον σύστημα δεν χρειάζεται να λαμβάνει υπόψη τη λειτουργία αυτών. Τα σενάρια κοινής χρήσης λειτουργίας κύριου χρήστη που σχετίζονται είναι τα αμοιβαίας ενοικίασης και μειωμένου φάσματος συγκέντρωσης.

Σε ένα σενάριο αμοιβαίας ενοικίασης, υπάρχει υποδιαίρεση των πόρων του φάσματος σε μια ζώνη, σε πολλά μπλοκ, και κάθε χειριστής παίρνει την άδεια ενός μπλοκ. Οι φορείς που εκμεταλλεύονται τους πόρους του φάσματος «ενοικιάζουν» σε άλλους φορείς εκμετάλλευσης

---

<sup>11</sup> Το RAT είναι μια φυσική μέθοδος σύνδεσης για ένα δίκτυο επικοινωνίας που βασίζεται στο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο επικοινωνίας.

μέρη των αδειοδοτημένων πόρων τους. Ένας χρήστης μπορεί να νοικιάζει πόρους από πολλούς άλλους χρήστες ταυτόχρονα. Ο πραγματικός «κάτοχος» ενός πόρου έχει πάντα αυστηρή προτεραιότητα στην πρόσβαση στο εξουσιοδοτημένο τμήμα του φάσματος, συμπεριλαμβανομένης της δυνατότητας προκαταβολής ανά πάσα στιγμή. Αυτή η προσέγγιση θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε ζώνες που έχουν αρχικά χρησιμοποιηθεί με αποκλειστικό αδειοδοτημένο τρόπο, όπου υπάρχει ανάγκη να αυξηθεί ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων πέρα από αυτό που είναι δυνατό σε ένα μπλοκ με άδεια χρήσης.

Ένας φορέας εκμετάλλευσης μπορεί να χρησιμοποιήσει το σενάριο συγκέντρωσης περιορισμένου φάσματος για να πάρει εξουσιοδότηση, δηλαδή άδεια χρήσης, έως και ολόκληρης της ζώνης και σε κοινή βάση με περιορισμένο αριθμό άλλων γνωστών εξουσιοδοτημένων χρηστών. Δεν παρέχεται εγγύηση μέσω αυτής της ρύθμισης για στιγμιαία πρόσβαση σε μια ελάχιστη ποσότητα φάσματος, προβλέπεται όμως ότι οι συμφωνίες με αμοιβαίο τρόπο μεταξύ των δικαιωδίων μπορούν να έχουν προβλέψιμη ελάχιστη τιμή από το μακροπρόθεσμο μερίδιο ενός μεμονωμένου φορέα εκμετάλλευσης. Η κατάσταση κοινής χρήσης σε ζώνες χωρίς άδεια θεωρείται παρόμοια, αλλά είναι εκ των προτέρων γνωστό πόσες εξουσιοδοτήσεις θα διανέμει μια ρυθμιστική αρχή και ποιοι θα είναι οι κανόνες της ζώνης, προμηθεύοντας έτσι την απαραίτητη βεβαιότητα για επενδύσεις σε μεγάλα δίκτυα.

Όσον αφορά τους τεχνικούς ενεργοποιητές για τη λειτουργία κύριου χρήστη, ένας μεσολαβητής φάσματος ή ένα πρωτόκολλο ανταλλαγής μηνυμάτων peer-to-peer μέσω του backhaul φαίνεται να δίνει τη μεγαλύτερη ευελιξία, καθώς θα μπορούσε να αντιμετωπίσει τόσο το σενάριο αμοιβαίας ενοικίασης όσο και το σενάριο της ομάδας περιορισμένου φάσματος. Οι διαφορετικοί ενεργοποιητές μπορούν επίσης να συνδυαστούν για να δώσουν πρόσθετα οφέλη που μπορεί να εκμεταλλευτεί ένα σύστημα σε ένα συγκεκριμένο σενάριο κοινής χρήσης. Οι φάροι συνύπαρξης για παράδειγμα, απαρτίζουν ένα πρωτόκολλο συντονισμού (π.χ. της εκτίμησης της απώλειας διαδρομής μεταξύ των κόμβων συντονισμού ή όταν εξυπηρετούν το σκοπό της διεκδίκησης των πόρων). Εάν έχουμε περιορισμό συνύπαρξης σε συστήματα του ίδιου είδους ή έχουμε απαίτηση βέλτιστης απόδοσης μόνο για αυτές τις καταστάσεις, χρησιμοποιείται μια εναλλακτική λύση. Τα πρωτόκολλα ανταλλαγής μηνυμάτων συνύπαρξης ομότιμων μέσω του αέρα. Σε σύγκριση με μια λύση που βασίζεται σε backhaul, το over-the-air θεωρείται ταχύτερος συντονισμός και φέρνει υψηλότερη απόδοση. Θα μπορούσε να συνδυαστεί με μια προσέγγιση DCS/DFS ή beacon για να μπορέσει να συνυπάρξει με γνωστά ή άγνωστα άλλα συστήματα σε ζώνες όπου το σύνολο τεχνολογιών δεν είναι γνωστό.

### *B. Λειτουργία χωρίς άδεια*

Στην λειτουργία χωρίς άδεια, το MBB σύστημα οφείλει να μοιράζεται το φάσμα με άλλα συστήματα χωρίς άδεια, σε μερικές περιπτώσεις, διατηρεί την προστασία των πρωταρχικών χρηστών της ζώνης. Σύμφωνα με το ρυθμιστικό περιβάλλον και τη φύση του πρωτεύοντος συστήματος, υπάρχει πιθανότητα να γίνει απαίτηση διαφορετικών τεχνικών παραγόντων για αυτά τα σενάρια. Για μια οριζόντια κοινή χρήση σε ζώνη χωρίς άδεια, ένα σύστημα πρέπει να είναι προετοιμασμένο, έτσι ώστε να συνυπάρχει με όλες τις άλλες τεχνολογίες που υπάρχουν στη ζώνη. Επομένως, θα χρειαστούν μέθοδοι κοινής χρήσης που δεν είναι συγκεκριμένες για το σύστημα για να είναι σε ευρωστία. Για αυτή την περίπτωση προτιμώνται αποκεντρωμένες λύσεις συνύπαρξης.

### *Γ. Λειτουργία κοινής πρόσβασης με άδεια χρήσης (Licensed Shared Access - LSA)*

Στην λειτουργία LSA, αυτός που έχει την άδεια έχει πρόσβαση στο φάσμα που δεν χρησιμοποιείται από έναν κατεστημένο χρήστη σε συγκεκριμένες τοποθεσίες και/ή χρόνους.

Η ιδέα του LSA όπου η ομάδα εργασίας CEPT FM53 την αναπτύσσει αυτή τη στιγμή, αναμένεται να έχει άδειες μακροπρόθεσμες και αποκλειστικές, έτσι ώστε να μην είναι απαραίτητη η οριζόντια κοινή χρήση. Η έννοια του LSA καθώς εξελίσσεται μπορεί να συνδυαστεί με την οριζόντια κοινή χρήση, έτσι ώστε οι εκ δοθείσες άδειες να είναι μη αποκλειστικές και να προϋποθέτουν τη συνύπαρξη πολλών δικαιωδών (π.χ. να μοιράζονται ένα μεγάλο μέρος του φάσματος). Σε τέτοια σενάρια, η ανάγκη για αποτελεσματικές λύσεις οριζόντιας κοινής χρήσης είναι σημαντική.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, έχει γίνει εντοπισμός ενός αριθμού εργαλείων κοινής χρήσης φάσματος που θα δώσουν σε ένα μελλοντικό σύστημα MBB τη λειτουργία σεναρίων κοινής χρήσης φάσματος. Κάποιες φορές ένα συγκεκριμένο εργαλείο ενεργοποιεί ένα συγκεκριμένο σενάριο μόνο του, σε άλλες περιπτώσεις μπορεί να είναι υποχρεωτικός ο συνδυασμός εργαλείων. Οφείλεται να ειπωθεί ότι σε ορισμένες περιπτώσεις μόνο ένα υποσύνολο αυτών των εργαλείων μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα δεδομένο προϊόν ή παραλλαγή προϊόντος, καθώς υπάρχει δυνατότητα σχεδίασης για να αντιμετωπιστεί ένα υποσύνολο των σεναρίων φάσματος. Παρόλα αυτά, ένα MBB σύστημα πρέπει να τα υποστηρίζει όλα, έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί ο στόχος της δυνατότητας λειτουργίας υπό το πλήρες φάσμα διαφορετικών μελλοντικών μοντέλων εξουσιοδότησης φάσματος. [37]

## **2.3 Τεχνικές και Τεχνολογίες για αύξηση της Φασματικής απόδοσης για τα 5G δίκτυα**

Η φασματική απόδοση είναι η μέγιστη ποσότητα υπηρεσιών που προκύπτει από μια δεδομένη ποσότητα φάσματος όπου μετρείται σε bit ανά δευτερόλεπτο ανά hertz (b/s/Hz). Αυτή η μέτρηση βοηθάει τους MNO να αποφασίσουν πώς να καταναείμουν αποτελεσματικά το φάσμα και σε ποιον.

### **2.3.1 Η Τεχνολογία Multiple Input Multiple Output (MIMO)**

Μια βασική τεχνολογία για την επίτευξη μεγαλύτερης φασματικής απόδοσης είναι το MIMO. Το Massive MIMO, ή αλλιώς MIMO μεγάλης κλίμακας, χαρακτηρίζεται ως ένα MIMO πολλαπλών χρηστών και στον οποίο οι κεραιές στο σταθμό βάσης είναι πολύ περισσότερες από τις συσκευές ανά πόρο σηματοδότησης. Ο μεγάλος αριθμός κεραιών σταθμού βάσης σε σχέση με τις συσκευές χρήστη έχει ως αποτέλεσμα μια απόκριση καναλιού που είναι σχεδόν ορθογώνια και έχει τη δυνατότητα να αποφέρει τεράστια κέρδη στη φασματική απόδοση.

Οι τεχνικές προκλήσεις του μελλοντικού 5G ετερογενή δικτύου (HetNet - Heterogeneous network) μπορούν να βρουν λύσεις μέσω των τεράστιων τεχνολογιών MIMO και mmWave τα οποία ενσωματώνονται χωρίς κανένα πρόβλημα με τα τρέχοντα δίκτυα και τις τεχνολογίες πρόσβασης. Η φασματική και ενεργειακή απόδοση του ασύρματου δικτύου

βελτιώνεται σημαντικά με το masive MIMO. Η αύξηση της απόδοσης σε ένα πλούσιο περιβάλλον σκέδασης, επιτυγχάνεται, με τη Μετάδοση Μέγιστου Λόγου (Maximal Ratio Transmission - MRT) ή Μηδενική Πίεση (Zero Forcing), δηλαδή, με απλές στρατηγικές διαμόρφωσης δέσμης. Το σημαντικότερο είναι, πως το εξαιρετικά μικρό μήκος κύματος των mmWaves, καθιστά δυνατή την συσσώρευση πολλών στοιχείων κεραίας σε μια μικρή περιοχή, και έχει ως αποτέλεσμα την πραγματοποίηση Massive MIMO τόσο στο BS (Base Station) όσο και στο UE. Ειδικότερα, οι mmWave συχνότητες χρησιμοποιούνται στις εξωτερικές συνδέσεις backhaul από σημείο σε σημείο ή για να υποστηρίξουν ασύρματες εφαρμογές υψηλής ταχύτητας σε εσωτερικό χώρο (π.χ. ροή πολυμέσων υψηλής ανάλυσης). Οι τεχνολογίες mmWave έχουν ήδη εφαρμοστεί για μικρής εμβέλειας υπηρεσίες στο πρωτόκολλο IEEE 802.11ac. Παρόλα αυτά, δεν έχει γίνει καλή διερεύνηση για τις εφαρμογές κινητής τηλεφωνίας. Η υψηλή απώλεια διάδοσης, η εξασθένιση της βροχής και η απώλεια διείσδυσης είναι κάποιοι από τους λόγους. Επίσης, απορροφώνται ή διασκορπίζονται εύκολα από τα αέρια. Με τη μαζική ανάπτυξη των small cells στο 5G HetNet, οι τεχνολογίες του mmWave μικρής εμβέλειας καθίστανται πολύ χρήσιμες.

Ανάλογα τη ζώνη των συχνοτήτων στα mmWave παρατηρούμε και διαφορετικές συμπεριφορές. Τα μόρια οξυγόνου π.χ. απορροφούν εκ του φυσικού τους ηλεκτρομαγνητική ενέργεια στα 60 GHz σε μεγαλύτερο βαθμό από ό,τι στις περιοχές 30-160 GHz. Αυτή η απορρόφηση εξασθενεί σημαντικά τα σήματα 60-GHz σε απόσταση. Έτσι, τα σήματα δεν μπορούν να φτάσουν σε μακρινούς χρήστες. Έτσι οι συχνότητες στα 60 GHz θεωρούνται κατάλληλες για υψηλής ταχύτητας δεδομένα και ασφαλείς επικοινωνίες σε εσωτερικούς χώρους. Δεδομένων αυτών των παραγόντων, ωστόσο, υπάρχει μια γενική συναίνεση ότι οι ζώνες συχνοτήτων mmWave (30–300 GHz) μπορεί να είναι χρήσιμες για συνδέσεις backhaul, εσωτερικές επικοινωνίες, μικρού εμβέλειας και οπτικής επαφής (Line Of Sight - LOS).

Η συνολική απόδοση ενός ασύρματου συστήματος βελτιώνεται μέσω της ανάπτυξης πολλαπλών κεραιών στον πομπό και/ή στον δέκτη. Αυτό επιτυγχάνεται όταν οι συντελεστές καναλιού που ταιριάζουν σε διαφορετικές κεραίες εκπομπής-λήψης εμφανίζουν ανεξάρτητο ξεθώριασμα. Όταν σε μια δεδομένη φέρουσα συχνότητα, η απόσταση μεταξύ δύο κεραιών είναι τουλάχιστον  $0,5 \cdot m$ , όπου  $m$  είναι το μήκος κύματος, τότε έχουμε την εμφάνιση μιας ανεξάρτητης εξασθένησης [38]. Οπότε, για μια σταθερή χωρική διάσταση, οι ανεπτυγμένες κεραίες αυξάνονται με την αύξηση της φέρουσας συχνότητας, και ως αποτέλεσμα επιτρέπει την ανάπτυξη μεγάλου αριθμού κεραιών σε συχνότητες mmWave. Επιπρόσθετα, η ανάπτυξη του Massive MIMO μπορεί να υλοποιηθεί στα μέσα μεταφοράς, όπως τρένα και λεωφορεία, σε ζώνες συχνοτήτων μικροκυμάτων όπου βρίσκουμε επαρκή χώρο για να ολοκληρωθεί η ανάπτυξη του.

Μέσω της τεχνολογίας του CR, όπου θεωρείται μια πιο ευέλικτη προσέγγιση της διαχείρισης του διαθέσιμου φάσματος, θα βελτιώσουμε την φασματική απόδοση των ζωνών. Πιο συγκεκριμένα, θα γίνει με την ανίχνευση του αχρησιμοποίητου φάσματος (δηλαδή, των λευκών κενών) με τη χρήση διαφορετικών αλγορίθμων ανίχνευσης φάσματος. Και στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας αυτά τα εντοπισμένα λευκά κενά μπορούν να ενεργοποιηθούν οι μεταδόσεις χωρίς παρεμβολές μεταξύ UE και BS small cells. Κάποιες μη ορθογώνιες προσεγγίσεις για την διαχείριση του φάσματος έχουν αναπτυχθεί τελευταία, με τις περισσότερες από αυτές να απαιτούν συνεργασία μεταξύ BS διαφορετικών επιπέδων. Οπότε, είναι καλύτερο για το 5G να έχει ως βάση τις αυτόνομες τεχνικές διαχείρισης παρεμβολών που

οδηγούν σε λύσεις χαμηλής πολυπλοκότητας, καταναεμημένες λύσεις και πιθανώς τεχνολογίες CR.

Το 3-D MIMO και FD (Full Dimension) MIMO οι οποίες είναι τεχνικές διαμόρφωσης δέσμης, έχουν επιλεγεί για την αύξηση της φασματικής και ενεργειακής απόδοσης των MIMO συστημάτων, καθώς επιτρέπουν στα κυψελωτά συστήματα να έχουν υποστήριξη σε μεγάλο αριθμό UE χρησιμοποιώντας τεχνικές για πολλαπλούς χρήστες MIMO και για ένα πολυκύτταρο σύστημα κυψελών και για τεχνολογίες CoMP (Cooperative Multi-Point - συντονισμένη μετάδοση πολλαπλών σημείων). Συγκεκριμένα, η σχεδίαση πομποδέκτη CoMP, FD MIMO με περιορισμένο backhaul παρουσιάζει ένα ενδιαφέρον παράδειγμα σχεδίασης με μοναδικές προκλήσεις.

Σε αντίθετη περίπτωση, η κατανομή πόρων του 5G, ενδέχεται να πρέπει να λάβει υπόψη της διαφορετικές πληροφορίες περιβάλλοντος, εν αντιθέσει με την παραδοσιακή προσέγγιση (η οποία βασίζεται στο ποσοστό σφάλματος bit). Αυτές είναι, η εφαρμογή, το περιβάλλον και το απαιτούμενο QoS όσον αφορά την καθυστέρηση του δικτύου, το ποσοστό σφάλματος bit και οι απαιτήσεις ελάχιστου ρυθμού δεδομένων. Το πλαίσιο λαμβάνει υπόψη την κινητικότητα, τη θέση του χρήστη, την ανάλυση, άλλες συσκευές εγγύτητας, το επίπεδο μπαταρίας και την κεντρική μονάδα επεξεργασίας της συσκευής. Ο τρόπος ανάπτυξης που μπορεί να ενεργοποιήσει μια οικονομικά αποδοτική προσέγγιση κατανομής πόρων με επίγνωση του πλαισίου είναι ένα δύσκολο πρόβλημα.

Η επιτυχία ελάχιστου ρυθμού 1 Gb/s με ενεργειακά αποδοτικό τρόπο του 5G είναι δεδομένη. Ένας τρόπος για επίτευξη αυτή είναι να υιοθετηθεί η ιδέα μιας εικονικής κυψέλης (softcell), η οποία προτείνεται για το πυκνό ασύρματο HetNet. Συγκεκριμένα, οι πόροι που είναι διαθέσιμοι σε μια ομάδα ετερογενών κυψελών (μακρο, μικρο και femtocells) θεωρούνται ως ένα ενιαίο σύνολο πόρων που εξυπηρετεί κάθε UE, το οποίο, με τη σειρά του, βλέπει την ομάδα των κυττάρων ως ένα μεγάλο macrocell. Επίσης, η ιδέα του κύτταρο-φαντάσματος, που προτάθηκε αρχικά από το NTT DoCoMo [38], θεωρείται ότι κάνει καλύτερη διαχείριση των επιπέδων ελέγχου και δεδομένων σε διαφορετικές συχνότητες και κόμβους. Λίγο πιο αναλυτικά, τα επίπεδα ελέγχου και δεδομένων διαιρούνται με σκοπό τα κρίσιμα δεδομένα ελέγχου να μπορούν να μεταδοθούν μέσω αξιόπιστων ζεύξεων μικροκυμάτων μεταξύ του UE και του macro-BS. Σε αντίθετη περίπτωση, οι επικοινωνίες δεδομένων υψηλής ταχύτητας μεταξύ UE και BS small cells εκτελούνται στις ζώνες mmWave. Τα macro-BS λειτουργούν για να εξασφαλίσουν την κάλυψη μιας ευρείας περιοχής με σκοπό να διατηρήσουν την καλή συνδεσιμότητα και κινητικότητα. Από την άλλη πλευρά, όταν αναπτύσσονται μαζικά small cells, ο διαχωρισμός ανάμεσα στα επίπεδα ελέγχου και δεδομένων θα αυξήσει την ενεργειακή απόδοση του δικτύου.

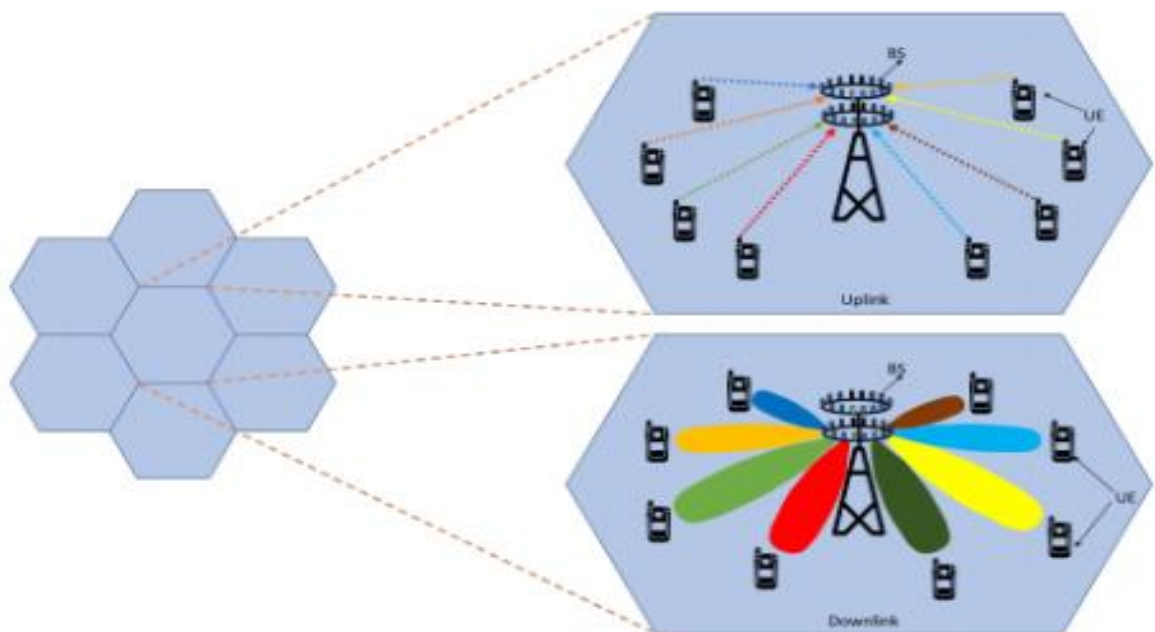
Με την συσχέτιση κάθε UE με περισσότερους από έναν κόμβους η αποδοτικότητα του 5G δικτύου αυξάνεται, όπως σε ένα εικονικό κελί. Ακόμα, η συσχέτιση κυττάρων οφείλει να σχεδιαστεί από κοινού με τη διαχείριση της κινητικότητας, έτσι ώστε η UE χαμηλής και υψηλής ταχύτητας να αντιμετωπίζονται διαφορετικά. Το UE υψηλής ταχύτητας βρίσκεται συνήθως μέσα σε οχήματα, όπου πρέπει να συνδέονται με macro-BS για να γίνει αποφυγή των συχνών μεταβιβάσεων. Όσο τα οχήματα μας επιτρέπουν την ανάπτυξη Massive MIMO, η αξιοπιστία του UE θα βελτιωθεί σημαντικά.

Για να αντιμετωπίσουμε αυτόν τον περιορισμό, διερευνάται στο άρθρο [39] ο ρόλος των DD-SSDB (Dynamic Device - Specific Single Down tilt Beam-forming, ένα σενάριο



σηματισμού δέσμης με κλίση μεμονωμένης κλίσης) και FD-MIMO για τη βελτίωση της φασματικής απόδοσης και τη μείωση της καθυστέρησης. Και τα δύο ανιχνεύονται κάνοντας χρήση ημι-καθορισμένης χαλάρωσης και την τεχνική του Dinkelbach. Έπειτα, με τη χρήση τεχνικής παρακολούθησης παλινδρόμησης, αυξητικού πλεονασμού και υβριδικού αιτήματος αυτόματης επανάληψης (Hybrid Automatic Repeat Request - HARQ), η απόδοση του FD-MIMO κατάφερε να βελτιώσει τη φασματική απόδοση και την καθυστέρηση (TRAdio).

Τέλος, η τεχνική του DD-SSDB που διατυπώνει το FD-MIMO εφαρμόζεται με τη χρήση μιας μεθόδου παρακολούθησης παλινδρόμησης. Σε συνδυασμό με την προσέγγιση Αυξητικής πλεονάζουσας θέσης, ο τόπος προβολής βίντεο εκτελεί σε μονάδες τη μετάδοση του πακέτου από την παροχή στο σημείο διακοπών. Σε περίπτωση που απαιτείται αναμετάδοση, εκπέμπει χρησιμοποιώντας τη μέθοδο IR στο HARQ για να επιβεβαιωθεί η εφαρμογή του σε σύγκριση με λύση σχεδόν υψηλότερης ποιότητας. Οι παραπάνω μέθοδοι απεικονίζουν τη διαδικασία για την επίτευξη μετρήσεων απόδοσης SE, Tradiolateny (ms) και ελάχιστο SIR με χρήση τεχνικής παρακολούθησης παλινδρόμησης. Ως βάση αυτής της ιδέας, το FD-MIMO που χρησιμοποιεί την τεχνική παρακολούθησης παλινδρόμησης έχει αναπτυχθεί για να εξετάσει τη βελτίωση της απόδοσης όσον αφορά το Ελάχιστο SIR, τη Φασματική Απόδοση και την Παράδοση Latency που είναι ο χρόνος μετάδοσης που απαιτείται από το eNodeB στον Εξοπλισμό Χρήστη. [39]



Εικόνα 12. Massive MIMO uplink και downlink

Το Massive MIMO είναι η πιο εκθαμβωτική καινοτομία για το 5G και έχει περάσει την περίοδο ασύρματης πρόσβασης (Στην Εικόνα 12 φαίνεται με ποιο τρόπο το Massive MIMO λειτουργεί στην uplink και downlink επικοινωνία αντίστοιχα.). Το Massive MIMO είναι η πρόοδος των σύγχρονων συστημάτων MIMO που χρησιμοποιούνται σε τρέχοντες ασύρματους οργανισμούς, τα οποία συγκεντρώνουν εκατοντάδες, ακόμη και μεγάλο αριθμό κεραιών στο σταθμό βάσης και εξυπηρετούν πολλούς πελάτες ταυτόχρονα. Οι πρόσθετες κεραιές που χρησιμοποιεί το Massive MIMO θα βοηθήσουν στη συγκέντρωση της ενέργειας σε μια πιο μέτρια περιοχή του δωματίου για καλύτερη φασματική ικανότητα και απόδοση. Καθώς η ποσότητα των καλωδίων αυξάνεται σε ένα Massive σύστημα MIMO, οι εκπεμπόμενες

ακτινοβολίες γίνονται μικρότερες και εμπλέκονται χωρικά προς τον πελάτη. Αυτές οι χωρικά εμπλεκόμενες συσκευές λήψης εκπέμπουν αυξανόμενη απόδοση για τον ιδανικό πελάτη και μειώνουν το εμπόδιο στον γειτονικό χρήστη [40].

Το ασύρματο σύστημα Massive MIMO παραπέμπει σε έναν τεράστιο αριθμό κεραιών με σημαντικούς βαθμούς, π.χ. τουλάχιστον 100 προετοιμάζονται στα BS της κυψέλης για να αναβαθμίσουν το όριο του συστήματος, τη φασματική και την ενεργειακή αποτελεσματικότητα τόσο στις επικοινωνίες uplink και downlink. Βασικά, τα Massive MIMO BS κάνουν κατάχρηση ενός εξαιρετικά σοβαρού επιπέδου χωρικής πολυπλεξίας για να βελτιώσουν το όριο του συστήματος. Καθώς τα BS αποστέλλονται με αμέτρητα συμπλέγματα συσκευών λήψης, είναι εφικτή η άμεση διαμόρφωση/προκωδικοποίηση δέσμης για την επέκταση της φασματικής και της ενεργειακής επάρκειας. Έχουν ληφθεί υπόψη μερικές εργασίες αναπαράστασης για την ανατομή της επίδρασης τεράστιου αριθμού συστάδων καλωδίων στη φασματική ικανότητα. Μια ομοιόμορφη γραμμική συστοιχία (Uniform Linear Array - ULA) που χρησιμοποιεί 400 εξαρτήματα καλωδίων κεραιάς τα οποία εξυπηρετούν 10 τερματικά πελάτη ανακατασκευάστηκαν στα 2,6 GHz κάνοντας χρήση δύο διαφορετικών σχεδίων προ κωδικοποίησης, τη διαμόρφωση ιδιοδέσμης (Beam Formation - BF) και τη μηδενική πίεση. Οι βασικές ευθείες προκωδικοποιήσεις έχουν υιοθετηθεί στις προσομοιώσεις, για παράδειγμα, συνδυασμός μέγιστου λόγου (Maximum Ratio Combination - MRC), ελάχιστο μέσο τετραγωνικό σφάλμα (Minimum Mean Square Error - MMSE) και μηδενική πίεση που αποδίδουν φασματική ικανότητα 42b/s/Hz (εκπληκτικά δεδομένα κατάστασης καναλιού, CSI - Channel State Information) και 28b/s/Hz (ελαττωματικό CSI). Εκτός από αυτό, υπήρξαν μερικές νέες βιώσιμες εκθέσεις άρθρων για τον έλεγχο του τεράστιου πλεονεκτήματος του MIMO για την κατανόηση του υποθετικού ενδιαφέροντός του, για παράδειγμα τους λόγους απόδειξης. Το σύστημα Argos 64 συστατικών που είναι κατάλληλο για την εξυπηρέτηση 15 πελατών ταυτόχρονα έχει επιτύχει ένα όριο έως και 85 τεμάχια/s/Hz. Οι χώροι δοκιμών RUSK Lund που εργάστηκαν στο Πανεπιστήμιο του Lund αποτελούνται από ένα στρογγυλό και κοίλο σύμπλεγμα και ευθύ έκθεμα. Κάθε σύμπλεγμα συσκευών λήψης είναι εξοπλισμένο με εξαρτήματα 128 κεραιών που μιλούν με 4 πελάτες στα 2,6 GHz πραγματοποιώντας σχέδιο προκωδικοποίησης/διαμόρφωσης δέσμης MRT. Τα αποτελέσματα για αρχή έδειξαν ότι η φασματική απόδοση για το άμεσο σύμπλεγμα είναι 48b/s/Hz και για το δείγμα στο σχήμα σωλήνα είναι στα 32b/s/Hz. Αναμφισβήτητα πολλές κεραιές BS μπορούν να βελτιώσουν το φασματικό όριο σε αντίθεση με τη χρήση ενός μεμονωμένου καλωδίου. Το φασματικό όριο αυξάνεται σχεδόν κατακόρυφα με τις κεραιές BS να εξυπηρετούν πολλούς πελάτες ταυτόχρονα. Εκτός από αυτό, πολλαπλές μέθοδοι προκωδικοποίησης έχουν χρησιμοποιηθεί στις αναπαραστάσεις ή τις αναλύσεις για να δείξουν την αύξηση του φασματικού ορίου. Γενικά, η προκωδικοποίηση μηδενικής πίεσης μπορεί να προχωρήσει ακριβώς όπως η προκωδικοποίηση BF ή MRC με τεράστιο αριθμό.

Με τον βαθμό ελευθερίας που έχει ένα Massive σύστημα MIMO επιτυγχάνεται μεγιστοποίηση του SE κάνοντας χρήση όλων των διαθέσιμων πόρων, όπως η μεγιστοποίηση των υψηλών ρυθμών μετάδοσης δεδομένων και την ισχύ μετάδοσης από μια διαθέσιμη κεραία. Η περιοχή της SE αυξάνεται γραμμικά με μεγάλο αριθμό κεραιών εκπομπής, ενώ σε σχέση με τη συσχέτιση χρήστη, η SE γίνεται κοίλη συνάρτηση. [41]

### 2.3.2 Η τεχνική Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

Η κυριαρχία της ορθογώνιας πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας (OFDM) στα δίκτυα 5G θεωρείται δεδομένη, και αυτό γιατί είναι μια ευρέως αποδεκτή κυματομορφή σε πολλά πρότυπα με διάφορους τύπους παραμετροποιημένων κυματομορφών. Για το λόγο της υπερβολικής χρήσης του Cyclic Prefix (CP), η φασματική απόδοση καθώς και η καθυστέρηση μετάδοσης υποβαθμίζονται. Ιδιαίτερα, σε κανάλια υψηλής διασποράς, ο ρυθμός CP μπορεί να είναι πολύ μεγάλος προκειμένου να διατηρηθεί η εξισορρόπηση του τομέα συχνότητας χαμηλού συμπλέγματος.

Στην εργασία [42], οι συγγραφείς προτείνουν μια νέα μέθοδος κάλυψης των απαιτήσεων χαμηλής καθυστέρησης και της υψηλής φασματικής απόδοσης των ασύρματων υπηρεσιών του 5G, καταργώντας την ανάγκη εισαγωγής CP μεταξύ των διαδοχικών συμβόλων του OFDM, κάνοντας διατήρηση ολόκληρης της διαδικασίας ανίχνευσης, στην πλευρά του δέκτη. Για την πραγματοποίησή του, εκμεταλλεύονται ειδικά σχεδιασμένα σήματα ευθυγράμμισης που έχουν την ικανότητα να αλληλοεξαιλείψουν την παρεμβολή του ενός συμβόλου από το άλλο και να εισάγουν ένα επιπλέον στοιχείο σήματος που περιστρέφει το σήμα κυκλικά με το κανάλι στην πλευρά του δέκτη. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αποδεικνύουν την ανωτερότητα του προτεινόμενου σχήματος όσον αφορά τη βελτίωση της φασματικής και της απόδοσης ισχύος, τη μείωση του λανθάνοντος χρόνου και τη βελτίωση της ασφάλειας του φυσικού επιπέδου έναντι της υποκλοπής ενώ χρησιμοποιείται ένας ισοσταθμιστής χαμηλής πολυπλοκότητας με ένα πάτημα τομέα συχνότητας. Αυτά τα πολυάριθμα πλεονεκτήματα, καταφέρνουν να κάνουν την προτεινόμενη τεχνική ιδανική για μελλοντικές ασύρματες υπηρεσίες και εφαρμογές του 5G, όπως η μαζική επικοινωνία τύπου μηχανής που έχει σαν βάση της το IoT, την εξαιρετικά αξιόπιστη και χαμηλής καθυστέρησης επικοινωνία και την βελτιωμένη κινητή ευρυζωνικότητα.

Στη βιβλιογραφία, αναφέρονται διάφορες τεχνικές που καταφέρνουν να μετριάσουν την απώλεια της φασματικής απόδοσης και του λανθάνοντος χρόνου λόγω CP. Είτε ελαττώνοντας είτε καταργώντας την περίοδο προστασίας της CP, κάνοντας διατήρηση της λογικής απόδοσης. Τα σχήματα βράχυνσης καναλιού, μια τεχνική που χρησιμοποιείται για τη μείωση του απαιτούμενου χρόνου φύλαξης και είναι ικανά να μειώσουν το μήκος CP με το να χρησιμοποιούν έναν ισοσταθμιστή τομέα χρόνου για να κάνουν πιο γρήγορη την αποτελεσματική απόκριση παλμού καναλιού, είτε έναν ισοσταθμιστή τομέα συχνότητας, ή σχεδιάζοντας κατάλληλους πίνακες προκωδικοποίησης. Εκτός από τη βράχυνση του καναλιού, πρότείνετε ένα ασύμμετρο παράθυρο που παρέχει σημαντική μείωση CP χωρίς αύξηση της εκπομπής εκτός ζώνης (OOBE) ούτε προκαλεί ISI/ICI (Inter Symbol Interference/ Inter Carrier Interference). Καταφέρνει να μειώσει την επιβάρυνση του CP και ουσιαστικά να αυξήσει την απόδοση κάνοντας χρήση μόνο ενός CP σε μια ομάδα (μπλοκ) γειτονικών συμβόλων OFDM αντί να κάνει εισαγωγή πολλών CP μεταξύ διαδοχικών συμβόλων OFDM σε κάθε μπλοκ μετάδοσης. Στον δέκτη, προτάθηκε μια τεχνική εξισορρόπησης τομέα συχνότητας που εφαρμόζει FFT (Fast Fourier transform) και IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) σε ολόκληρο το μπλοκ για την ακύρωση οποιουδήποτε ISI/ICI που προκύπτει από κανάλια πολλαπλών διαδρομών. [43]

Όλες οι τεχνικές που αναφέρθηκαν πάνω ταξινομούνται στην κατηγορία της CP-short προσέγγισης. Υπάρχουν όμως και άλλες τεχνικές που ταξινομούνται στην κατηγορία της

προσέγγισης χωρίς CP. Αυτές οι τεχνικές OFDM χωρίς CP στοχεύουν και, ως εκ τούτου, στην επίτευξη του μέγιστου κέρδους όσον αφορά την υψηλότερη φασματική απόδοση και τη χαμηλότερη καθυστέρηση. Μια τράπεζα φίλτρου διαμόρφωσης παλμών Nyquist χρησιμοποιήθηκε στο OFDM για την εξάλειψη της CP. Ένα σχέδιο μετάδοσης OFDM χωρίς CP, που ονομάζεται OFDM με βάση την επικάλυψη (Ov-OFDM), προτάθηκε για να συντομεύσει το συνολικό μήκος συμβόλων OFDM χωρίς επιβάρυνση προστασίας. Το σχήμα χρησιμοποιεί μια επικαλυπτόμενη εξίσωση τομέα συχνότητας MMSE για την εξάλειψη του ISI μεταξύ των συμβόλων OFDM.

Για να μπορέσουν να κατασταλούν τα ISI και ICI όταν δεν μεσολαβούνε διαστήματα προστασίας μεταξύ των συμβόλων, προτάθηκε ένας ισοσταθμιστής τομέα συχνότητας χαμηλής πολυπλοκότητας ο οποίος χρησιμοποιεί πλεονασμό στον τομέα συχνότητας. Επίσης, ένας ακόμα ισοσταθμιστής βασισμένος σε έναν γενικευμένο ακυρωτή πλευρικού λοβού πολλαπλών κεραιών προτάθηκε για την καταστολή του ISI για τα συστήματα SIMOOFDM υψηλής ταχύτητας χωρίς CP. Αυτή η μέθοδος βασίζεται στην αναπαράσταση μπλοκ της μετάδοσης OFDM και χρησιμοποιεί τον υποχώρο της δομής του ISI στα σενάρια πολλαπλών κεραιών. Εισηγάγαν ένα μη ορθογώνιο και χωρίς CP σχήμα που βασίζεται στην ανίχνευση ακολουθίας μέγιστης πιθανότητας στον τομέα συχνοτήτων για να βελτιώσει το φάσμα και την απόδοση ισχύος από τη μία πλευρά και να μειώσει την απαίτηση συγχρονισμού από την άλλη πλευρά. Ο αλγόριθμος ανίχνευσης ονομάζεται ανίχνευση ακολουθίας μέγιστης πιθανότητας στον τομέα συχνότητας.

Εισηχθη επίσης ένας αλγόριθμος ανίχνευσης πολλαπλών φορέων για συστήματα OFDM χωρίς χρόνο φύλαξης χρησιμοποιώντας διαδοχική ακύρωση παρεμβολών με ανάδραση απόφασης. Πιο πρόσφατα, προτάθηκε ένα σχήμα που ονομάζεται εξισορρόπηση κυκλικής μετατόπισης συμβόλων για την εφαρμογή ενός συστήματος OFDM χωρίς CP. Η βάση του σχήματος είναι η εκτέλεση της εξισορρόπησης ανάδρασης απόφασης πριν από τη λειτουργία του FFT για να αφαιρεθεί το ISI μεταξύ των επικαλυπτόμενων συμβόλων OFDM. Το σχήμα χρησιμοποιεί επίσης μηχανισμό αποκατάστασης CP στον δέκτη για τη μετατροπή της γραμμικής μετατόπισης σε κυκλική μετατόπιση, επιτρέποντας έτσι τη χρήση του μετασχηματισμού FFT στον δέκτη

Προτείνετε στην εργασία [44], ένα νέο σύστημα που βασίζεται στον τομέα ισχύος 2, που ονομάζεται CP-less OFDM (ή CP-free OFDM), το οποίο καταργεί την απαίτηση εισαγωγής CP μεταξύ διαδοχικών συμβόλων OFDM, διατηρώντας παράλληλα ολόκληρη τη διαδικασία ανίχνευσης ίδια στην πλευρά του δέκτη χωρίς την ανάγκη χρήσης οποιουδήποτε σύνθετου ισοσταθμιστή. Η επιτυχία του εξαρτάται από την προσθήκη ενός σήματος ευθυγράμμισης στην κορυφή (στον τομέα ισχύος) κάθε μεταδιδόμενου συμβόλου OFDM για να εξασφαλιστεί η ταυτόχρονη επίτευξη δύο στόχων: 1) αλληλο-ακύρωση της παρεμβολής των γειτονικών συμβόλων και 2) της διατήρησης της ιδιότητας της κυκλικότητας του από τα λαμβανόμενα σήματα πριν να επέλθει η διαδικασία εξισορρόπησης του τομέα συχνότητας χαμηλής πολυπλοκότητας. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως το προτεινόμενο σχήμα OFDM χωρίς CP αυξάνει την φασματική απόδοση, μειώνει την καθυστέρηση, αυξάνει την απόδοση ισχύος και μειώνει τη μυστικότητα του φυσικού στρώματος σε σύγκριση με το τυπικό CP-OFDM, όλα αυτά κάνοντας διατήρηση της χαμηλής πολυπλοκότητας και χρησιμοποιώντας απλό εξισωτή τομέα συχνότητας με ένα άγγιγμα. Ως αποτέλεσμα υπάρχει βελτίωση της φασματικής απόδοσης και απόδοσης λόγω της αφαίρεσης των χρονικών πόρων που απαιτούνται από το CP. Βελτιώνεται η απόδοση ισχύος από την εξοικονόμηση ενέργειας του

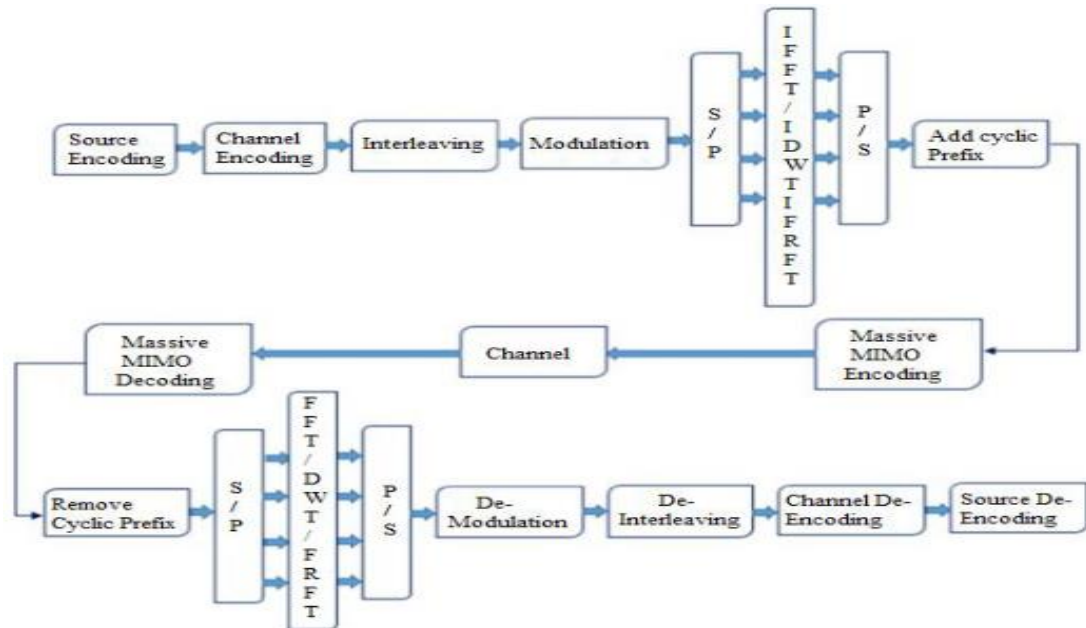
CP, και στην οποία η ισχύς του σήματος ευθυγράμμισης στον σχεδιασμό αυτό είναι μικρότερη από αυτή του CP στο OFDM. Μειώνεται η καθυστέρηση μετάδοσης λόγω της μείωσης της καθαρής χρονικής διάρκειας που είναι αναγκαία για τη μετάδοση κάθε συμβόλου. Οπότε, οδηγείτε σε ένα εξαιρετικά αποδοτικό σύστημα μετάδοσης με την κατάργηση της απαίτησης CP.

Αυτή η εργασία έχει προτείνει ένα σχέδιο OFDM χωρίς CP που εξαλείφει την ανάγκη χρήσης υπερβολικών CP μεταξύ συμβόλων OFDM. Ο σχεδιασμός φαίνεται να αυξάνει τη φασματική απόδοση, να βελτιώνει την απόδοση ισχύος, να μειώνει την καθυστέρηση και να βελτιώνει την ασφάλεια του φυσικού επιπέδου, ενώ διατηρεί χαμηλή πολυπλοκότητα δέκτη, καθιστώντας τον ισχυρό υποψήφιο για την κάλυψη των απαιτήσεων του μελλοντικού 5G και πέρα από υπηρεσίες και εφαρμογές. Με την εφαρμογή ενός ειδικού σχεδιασμού σήματος ευθυγράμμισης επιτυγχάνεται, μια νέα μέθοδος όπου βασίζεται στον τομέα ισχύος και καταργεί την απαίτηση CP διαφυλάσσοντας ταυτόχρονα ολόκληρη τη διαδικασία ανίχνευσης. Αυτά τα σήματα προστίθενται στον τομέα ισχύος των μεταδιδόμενων συμβόλων OFDM προκειμένου να επιτευχθούν δύο στόχοι ταυτόχρονα: 1) η αφαίρεση της παρεμβολής μεταξύ συμβόλων και 2) η κυκλική κυκλοφορία του σήματος στην πλευρά του δέκτη. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι η φασματική απόδοση και η απόδοση ισχύος βελτιώθηκαν, η καθυστέρηση μειώθηκε και η μυστικότητα βελτιώθηκε ενώ διατηρήθηκε η εξίσωση χαμηλής πολυπλοκότητας στην πλευρά Rx.

Ενώ η τεχνολογία OFDM θεωρείται μια από τις βασικές τεχνικές για το 4G, έχει ορισμένα μειονεκτήματα που την καθιστούν ανεπαρκή για την βελτιστοποίηση του φάσματος. Οι τεχνικές MCM (Multi-carrier Modulation) που έχουν ως στόχο την βελτίωση της χρήσης του φάσματος αποκτούν όλο και περισσότερη προσοχή από τους ακαδημαϊκούς και από τον επιχειρηματικό κόσμο. Αυτές οι τεχνικές προτείνουν τη δημιουργία πιο πολλών δεδομένων μέσα σε ένα συμβατικό επίπεδο χρονικής συχνότητας, αυτές είναι [45]:

- Με το να παραβιάσουν προμελετημένα την αρχή της ορθογωνικότητας που ορίζεται για τα συστήματα OFDM, κάνοντας μείωση του διαστήματος συχνοτήτων μεταξύ των υποφορέων έτσι ώστε να γίνει εξοικονόμηση του εύρους ζώνης ή να αυξηθεί ο ρυθμός δεδομένων στο ίδιο εύρος ζώνης.
- Μη ορθογώνιοι παλμοί με ειδικές ιδιότητες να μεταδοθούν.
- Να εφαρμοστούν προηγμένοι αλγόριθμοι ανίχνευσης στο δέκτη, π.χ. η αποκωδικοποίηση σφαίρας (Sphere Decoding - SD), η οποία λόγω των προόδων στην τεχνολογία πυριτίου έχει καταστεί εφικτή.

Με βάση των εργασιών που αναφέραμε παραπάνω και των πλεονεκτημάτων της OFDM τεχνολογίας, παραθέτουμε στην Εικόνα 13 ένα σχήμα ενός αλγορίθμου το οποίο βελτιστοποιεί την φασματική απόδοση του δικτύου.



Εικόνα 13. OFDM μοντέλο για την βελτίωση της φασματικής απόδοσης

### 2.3.3 Η τεχνολογία Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)

Το OFDMA, βελτιώνει την απόδοση του ασύρματου δικτύου με την καθιέρωση ανεξάρτητων διαμορφωτών υπομεταφορέων εντός συχνοτήτων. Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει σε πολλούς χρήστες την ταυτόχρονη μετάδοση. Η διαφορά του OFDM και του OFDMA είναι πως το OFDM είναι μια παλαιότερη, σχετική τεχνολογία για την αύξηση της χωρητικότητας και της αποδοτικότητας του ασύρματου δικτύου. Χρησιμοποιείται στην κινητή τηλεφωνία και τα μέσα μετάδοσης και σε κάποιες προηγούμενες εκδόσεις του Wi-Fi. Ουσιαστικά είναι ένας τύπος της τεχνολογίας OFDM για πολλαπλούς χρήστες. Μπορεί να εισαχθεί και στον τομέα του χρόνου και στον τομέα της συχνότητας [46].

Οι χρήστες των σημερινών δικτύων και είναι πολύ περισσότεροι από ποτέ και χρησιμοποιούν εφαρμογές και λειτουργίες με ένα τεράστιο αριθμό δεδομένων. Η συμφόρηση του δικτύου που προκαλείται από αυτά τα ταυτόχρονα αιτήματα προκαλεί επιβράδυνση, καθώς οι πελάτες πρέπει να σχηματίσουν μια ουρά για την ολοκλήρωση των μεταδόσεων. Το OFDMA επιλύει το πρόβλημα συμφόρησης φιλοξενώντας πολλούς χρήστες ταυτόχρονα και κατανέμοντας το εύρος ζώνης πιο αποτελεσματικά.

Τα χαρακτηριστικά του OFDMA είναι:

- Η υψηλή απόδοση του δικτύου. Αφού, τα χαρακτηριστικά και οι καινοτόμες τεχνολογίες του OFDMA επιτρέπουν στα κύματα των τηλεπικοινωνιών να διαβιβάζουν περισσότερα δεδομένα σε μικρότερα χρονικά πλαίσια.
- Η χαμηλή καθυστέρηση είναι ένα ακόμα χαρακτηριστικό. Ελαττώνει τους χρόνους απόκρισης του δικτύου και κάνει την θέαση βίντεο, την τεχνητή νοημοσύνη και τις εφαρμογές εικονικής και επαυξημένης πραγματικότητας πιο

αποδοτικές. Επιπλέον, βελτιστοποιεί το IoT, εμποδίζοντας τις συσκευές IoT να χρησιμοποιούν δυσανάλογους πόρους δικτύου.

- Τέλος, μειώνει την κατανάλωση ενέργειας, με το να επιτρέπει την ισχύ ανά κανάλι και να μειώνει τη μέγιστη ισχύ μετάδοσης για χρήστες χαμηλού ρυθμού δεδομένων, απαλείφοντας τους παλμικούς φορείς και κάνοντας διατήρηση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας στις συσκευές.

Τα οφέλη του OFDMA είναι:

- Το OFDMA βοηθά στη παροχή καλύτερης εξυπηρέτησης σε χώρους με υψηλή πυκνότητα (π.χ. αεροδρόμια, αίθουσες διαλέξεων και αθλητικές αρένες). Έχει την δυνατότητα να εμπνεύσει μια νέα εποχή ασύρματων υπολογιστών, διότι τα υψηλότερης χωρητικότητας και αποδοτικότητας δίκτυα, επιτρέπουν σε επιχειρήσεις την εκτέλεση πολύ περισσότερων ασύρματων εφαρμογών.
- Επιπρόσθετα, η ασύρματη πρόσβαση με υψηλή απόδοση καταφέρνει να υποστηρίζει την ανάπτυξη νέων εφαρμογών, αφού οι μηχανικοί λογισμικού δημιουργούν νέους τρόπους με τους οποίους θα επωφεληθούν από την ταχύτητα και τη χωρητικότητα με το OFDMA.

### **2.3.4 Η τεχνικές που βασίζονται στην τεχνολογία του Device to Device (D2D)**

Είναι πιο συνετό στο να εστιάσουμε στην αρχιτεκτονική που έχει επίκεντρο τη συσκευή και στην ευφυΐα της συσκευής, έτσι ώστε να πραγματοποιηθούν οι υψηλές απαιτήσεις της φασματικής απόδοσης που έχει θέσει το 5G. Με απλά λόγια στην επικοινωνία από συσκευή σε συσκευή (D2D). Η D2D χαρακτηρίστηκε πρώτη φορά ως επικοινωνία που βασίζεται σε relay. Η επικοινωνία αυτή εφαρμόστηκε πρακτικά στο 4G λόγω των τυχερών παιχνιδιών σε πραγματικό χρόνο, των υψηλών ανερχόμενων ρυθμών δεδομένων εφαρμογών κοινωνικού περιεχομένου και των υπηρεσιών cloud. Υποστηρίζει την επικοινωνία Peer-to-Peer, τη μεταφόρτωση κίνησης, την επίγνωση τοποθεσίας ή την εγγύτητα υπηρεσίας και εφαρμογή κοινωνικής υπηρεσίας και τη διανομή περιεχομένου. Προσφέρει βελτιώσεις που αφορούν την ενέργεια, την ισχύ, την καθυστέρηση και το φάσμα. Χρησιμοποιείται για τη βελτίωση της φασματικής απόδοσης εφόσον πληρούνται δύο απαιτήσεις: 1) Οι παρεμβολές λόγω του D2D ελαχιστοποιούνται. 2) Η ελάχιστη ποιότητα υπηρεσιών είναι εγγυημένη [47].

Όταν η επικοινωνία D2D προσαρτίζεται σε small cell networks (SCN) με μεγάλο αριθμό τυχαία αλληλεπικαλυπτόμενων small cells, η παρεμβολή μεταξύ των καναλιών των small cell users (SUE) και των χρηστών D2D είναι μια πρόκληση που πρέπει να ξεπεραστεί και ειδικά στο ετερογενές φάσμα, δηλ. , στις αδειοδοτημένες ζώνες φάσματος και στις ζώνες χωρίς άδεια. Για να ενισχυθεί η χωρητικότητα του δικτύου και να βελτιωθούν οι ποιότητες των υπηρεσιών, μία προτεινόμενη μέθοδος είναι να μειωθεί η απόσταση μεταξύ των σταθμών βάσης και του εξοπλισμού των χρηστών.

Η D2D επικοινωνία σχηματίζει ζεύγη D2D μεταξύ των κοντινών χρηστών και τους επιτρέπει να επικοινωνούν απευθείας χωρίς να συνδέονται σε σταθμούς βάσης ή στο κεντρικό

δίκτυο, αναβαθμίζοντας την ποιότητα μετάδοσης αφού η απόσταση της μετάδοσης έχει μειωθεί. Ωστόσο, δεν μπορούν να επιτευχθούν βελτιώσεις απόδοσης εάν δεν αντιμετωπιστεί σωστά η σοβαρή πρόκληση όπως η παρεμβολή μεταξύ καναλιών μεταξύ SUE και ζευγών D2D, ειδικά όταν υπάρχουν πολλά επικαλυπτόμενα μικρά κελιά. Επίσης η χωρητικότητα του δικτύου μπορεί να αυξηθεί σημαντικά προσθέτοντας περισσότερους φασματικούς πόρους. Οι ετερογενείς φασματικοί πόροι, δηλαδή οι κενές ζώνες του φάσματος, χειροτερεύουν την πολυπλοκότητα του προβλήματος των παρεμβολών όταν κάνουν διαθέσιμα περισσότερα εναλλακτικά κανάλια για την κοινή χρήση του φάσματος. Η σύνδεση των small cells με το D2D και του ετερογενούς φασματικού πόρου βελτιώνουν σημαντικά την απόδοση του δικτύου και την εμπειρία του χρήστη. Δυστυχώς, ο σχεδιασμός ενός τέτοιου ολοκληρωμένου μηχανισμού είναι δύσκολος λόγω των ακόλουθων πτυχών. Αρχικά, ο έλεγχος παρεμβολών και η διαχείριση πρόσβασης των ετερογενών φασματικών πόρων σε πολυκύτταρα δίκτυα είναι πολύ περίπλοκος. Δεύτερον, η κοινή χρήση πόρων φάσματος μεταξύ των ζευγών SUE και D2D επιτείνει επίσης αυτό το πρόβλημα. Τέλος, ο μεγάλος αριθμός χρηστών SUE και D2D από μια κεντρική διαχείριση πόρων θα προκαλέσει αλληλεπιδράσεις σηματοδότησης σε μεγάλη κλίμακα, κάτι που θα δυσκολέψει την διαχείριση του δικτύου. Επιπλέον, είναι απαραίτητο να γίνει εξέταση των καταναμημένων αλγορίθμων για να μειωθεί η πολυπλοκότητα του υπολογισμού και της εναλλαγής των γενικών εξόδων.

Για την αντιμετώπιση όλων των προαναφερθέντων ζητημάτων, ο συγγραφέας στο [48], εξετάζει το downlink D2D υποβοηθούμενο δίκτυο μικρών κυττάρων με ετερογενείς ζώνες φάσματος. Στο μοντέλο του συστήματος, αναφέρεται μια ετερογενής ομάδα φάσματος που απαρτίζεται από διαφορετικές ζώνες, έτσι ώστε να επιλεγεί το κανάλι πρόσβασης. Για να μπορέσει να βελτιωθεί το φάσμα, είναι υπό εξέταση η κοινή χρήση του φάσματος μεταξύ των χρηστών SUE και D2D. Προκύπτει ένα πρόβλημα επιλογής ζώνης και κατανομής καναλιού έτσι ώστε να γίνει μεγιστοποίηση της ικανοποίησης των χρηστών. Έπειτα, επαναλαμβάνετε το πρόβλημα μεταξύ δύο παιχνιδιών συνασπισμού και υποδεικνύετε ένας αλγόριθμος κατανομής καναλιών σε δύο στάδια. Στο πρώτο, υπάρχει σταθερή αντιστοίχιση μεταξύ διαφορετικών SUE και καναλιών σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων με τη χρήση ενός γραφήματος παρεμβολών. Στο δεύτερο παιχνίδι, σύμφωνα με την κατανομή καναλιών των SUE, το τελικό διαμέρισμα μεταξύ χρηστών D2D και SUE πραγματοποιείται μέσω μεταφοράς χρηστών D2D.

Στη συνέχεια προτείνεται ένας αλγόριθμος κατανομής καναλιών σε δύο στάδια σε δίκτυα μικρών κυττάρων με τη βοήθεια D2D.

- Προτείνεται ένα πλαίσιο επιλογής ζώνης downlink και κατανομής καναλιού για επικοινωνία D2D με υποστρώματα δικτύων μικρών κυττάρων με ετερογενείς ζώνες φάσματος. Το ετερογενές φάσμα χρησιμοποιείται σε κανάλια πολλών κυττάρων σε small cells. Η κοινή χρήση του φάσματος ανάμεσα σε D2D χρήστες και small cells χρηστών βελτιώνουν την φασματική απόδοση.
- Λαμβάνοντας υπόψη τον περιορισμό του ρυθμού μετάδοσης των SUE και των χρηστών D2D, τον περιορισμό του επιπέδου παρεμβολών των SUE, διατυπώνεται το πρόβλημα μεγιστοποίησης της ικανοποίησης των χρηστών, το οποίο είναι ένα δύσκολο NP πρόβλημα. Χωρίζεται το πρόβλημα βελτιστοποίησης σε δύο πιθανά παιχνίδια: ένα με τη χρήση γραφήματος παρεμβολών και ενός συνασπισμού με μεταφορά χρηστών D2D. Στο πρώτο παιχνίδι, υπάρχει σταθερή αντιστοίχιση μεταξύ διαφορετικών SUE και καναλιών σε άλλες ζώνες συχνοτήτων. Στο δεύτερο παιχνίδι, οι τελικοί



συνδυασμοί μεταξύ χρηστών D2D και SUE συντελούνται μέσω μεταφοράς χρηστών D2D.

- Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης εμφανίζουν τα πλεονεκτήματα του αλγορίθμου κατανομής καναλιού που προτάθηκε, σε σχέση με άλλους αλγορίθμους, σε σχέση με την απόδοση του συστήματος και τη χρησιμότητα του δικτύου. Επίσης, αναλύεται η απήχηση της επικοινωνίας D2D και η αποτελεσματικότητα των πιθανών παιχνιδιών και παιχνιδιών συνασπισμού. Γίνεται διερεύνηση των σχέσεων ανάμεσα στο απαιτούμενο ρυθμό μετάδοσης, των ζωνών φάσματος και της παραμέτρου ικανοποίησης.

Η επικοινωνία Inband επιτρέπει υψηλό έλεγχο στο κυψελοειδές φάσμα με άδεια και επομένως επιλέγεται για την απόκτηση υψηλής και αποτελεσματικής χρήσης του φάσματος. Έχει διερευνηθεί από τους ερευνητές διάφορα σχήματα επικοινωνίας inband και η ικανότητά τους να μειώνουν τις παρεμβολές έχοντας έλεγχο στο αδειοδοτημένο φάσμα. Ζητήματα όπως η δημόσια ασφάλεια, τα βιντεοπαιχνίδια και η κοινή χρήση περιεχομένου, τα οποία σχετίζονται με υψηλή επισκεψιμότητα και συμφόρηση του δικτύου, προκύπτουν όταν λαμβάνεται τεράστιος αριθμός αιτημάτων εγκατάστασης επικοινωνίας και αιτημάτων για ρυθμούς δεδομένων. Άρα, η επικοινωνία εντός ζώνης αυξάνει τη φασματική απόδοση επειδή το BS ελέγχει ολόκληρο το σύστημα επικοινωνίας.

Μαζί με την D2D τεχνολογία μπορεί να ενσωματωθεί και η mmWave τεχνολογία για την αύξηση της φασματικής απόδοσης. Ο συγγραφέας στο [48], έκανε ανάπτυξη ενός συστήματος για τη μείωση της πολυπλοκότητας της αποφυγής των παρεμβολών σε περιοχές υψηλής κυκλοφορίας. Το inband επιλέγει την αλλαγή που θα κάνει στην λειτουργία επικάλυψης με υψηλή κίνηση, όπου ο εκχωρημένος πόρος κάνοντας χρήση του τετραγωνικού προγραμματισμού σχεδιάζεται και διαμορφώνεται με σκοπό την αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος, κάνοντας χρήση ενός ευρετικού αλγορίθμου. Λόγω του επιλεκτικού τρόπου λειτουργίας, το σύστημα έχει καλή αποδοτικότητα υπό υψηλή κίνηση και υψηλή φασματική απόδοση. Η D2D επικοινωνία καταφέρνει να είναι και συγκεντρωμένη και κατανεμημένη, δηλαδή, οι συσκευές ελέγχονται από το BS ή εναλλάσσονται αυτόνομα.

Η σχεδίαση ενός D2D συστήματος επικοινωνίας γίνεται με βάση ορισμένες θεμελιώδεις έννοιες, όπως ο μηχανισμός κατανομής φάσματος, ο τύπος εξουσιοδότησης φάσματος, και ο μηχανισμός ελέγχου του συστήματος. Στη βιβλιογραφία η εντός της ζώνης επικοινωνία αναφέρεται συχνά, αφού μειώνει τις παρεμβολές μεταξύ των συσκευών. Οι βιομηχανικές εφαρμογές χρησιμοποιούν ευρέως την εξερχόμενη επικοινωνία. Ο μηχανισμός φάσματος του υποστρώματος προκαλεί την αύξηση της φασματικής απόδοσης του συστήματος, το φάσμα επικοινωνίας που διαμοιράζεται μεταξύ του κυψελοειδούς και του εξοπλισμού D2D οδηγεί σε παρεμβολές. Ο μηχανισμός επικάλυψης του φάσματος μειώνει την παρεμβολή σε βάρος της απόδοσης του φάσματος και γι' αυτό χρησιμοποιείται σε διαφορετικές υποδοχές καναλιών. Το κεντρικό σύστημα ελέγχου, βελτιστοποιεί την κατανομή των πόρων του φάσματος και μειώνει τις παρεμβολές. Στη μέθοδο κατανεμημένου ελέγχου, η επικοινωνία μπορεί να δημιουργήσει έλλειψη κάλυψης, με αποτέλεσμα την ταχεία προσαρμογή του δυναμικού συστήματος και τη λήψη αποφάσεων. Παρόλα αυτά, πολλές αποφάσεις παρεκκλίνουν της συνολικής κοινής απόφασης, κάνοντας πιο περίπλοκο το σύστημα επικοινωνίας και έχοντας σαν απαίτηση την πολύπλοκη επεξεργασία σήματος στο άκρο του χρήστη.

Σε όλους τους μηχανισμούς παρατηρούμε κάποια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Η ανάπτυξη λύσεων μικτού τρόπου λειτουργίας από του ερευνητές, όπως το κεντρικό σύστημα επικοινωνίας, επιτυγχάνει βελτιωμένη ευελιξία όπου το BS μετατρέπεται αυτόματα σε ένα καταναμημένο σύστημα μέχρι να φτάσει σε προσιτές συνθήκες φορτίου. Παρόμοια, το σύστημα επικοινωνίας υποστρώματος έχει την ικανότητα να μετατραπεί σε σύστημα επικοινωνίας επικάλυψης όταν η κίνηση ξεπερνάει το όριο και το σύστημα μπορεί να μετατραπεί αυτόματα στο υποκείμενο σύστημα με τη μείωση της κυκλοφορίας. Τα συστήματα επικοινωνίας D2D οφείλουν να βελτιωθούν.

Η αποτελεσματικότητα του D2D σε πολλαπλές κυψέλες είναι μεγαλύτερη από ό,τι σε μία κυψέλη, και αυτό γιατί, μπορεί να κάνει εξοικονόμηση περισσότερων πόρων, ειδικά όταν οι χρήστες λειτουργούν στα άκρα της κυψέλης. Ωστόσο, η διαδικασία εντοπισμού συσκευής ή ομότιμων και ρύθμισης συνεδρίας D2D θα ήταν επίσης πολύ πιο περίπλοκη επειδή τα γειτονικά eNB (evolved Node B - εξελιγμένο σταθμό βάσης) πρέπει να συνεργαστούν. Με γνώμονα την περιορισμένη σύνδεση backhaul με small cells και με την ανισορροπία κατανομής της κυκλοφορίας ανάμεσα στα διαφορετικά επίπεδα, η ανάπτυξη της επικοινωνίας D2D για τα μελλοντικά ετερογενή δίκτυα θεωρείται ότι θα αυξήσουν την φασματική απόδοση του δικτύου.

Το Inband, όπου στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται λεπτομερώς οι τεχνικές κατανομής των πόρων για αυτή την τεχνολογία, έχει δύο τύπους επικοινωνίας, το underlay και το overlay. Στην underlay επικοινωνία, οι ίδιοι πόροι κυψελοειδούς δικτύου διανέμονται μεταξύ των χρηστών D2D ενώ στην overlay επικοινωνία δίνονται αποκλειστικοί πόροι στους χρήστες D2D. Το Inband προκαλεί την φασματική επαναχρησιμοποίηση που θα βελτίωνε σημαντικά τη φασματική απόδοση και θα σήμαινε υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων και χαμηλότερο λανθάνοντα χρόνο που θεωρούνται βασικές απαιτήσεις για το 5G.

Στη underlay λειτουργία, οι χρήστες D2D έχουν τους ίδιους φασματικούς πόρους με τους χρήστες κινητής τηλεφωνίας. Η λειτουργία αυτή βελτιώνει την απόδοση των κυψελοειδών δικτύων όσον αφορά τη βελτιωμένη φασματική απόδοση, την ενεργειακή απόδοση, την κυψελοειδές χωρητικότητα, την QoS και άλλους στόχους απόδοσης. Στη λειτουργία underlay, ένα ζεύγος D2D επικοινωνεί σε ένα υποκανάλι και το κυψελοειδές σε άλλο υποκανάλι. Επειδή οι πόροι μοιράζονται μη ορθογώνια, οι χρήστες D2D και οι χρήστες κινητής τηλεφωνίας προκαλούν παρεμβολές μεταξύ τους.

Σύμφωνα με τους συγγραφείς στο [49], η επικοινωνία D2D μπορεί να λειτουργήσει με τρεις τρόπους: Αποκλειστικούς πόρους με άμεση επικοινωνία, επαναχρησιμοποίηση των ίδιων πόρων φάσματος με άμεση επικοινωνία και συμβατική επικοινωνία, δηλαδή αναμετάδοση μέσω eNB. Οι πόροι δίνουν έμφαση τόσο σε χρήστες κινητής τηλεφωνίας όσο και σε χρήστες D2D. Ένα μέρος των πόρων είναι αφιερωμένο στην άμεση επικοινωνία D2D και ένα άλλο στην κυψελοειδές επικοινωνία. Επειδή οι πόροι είναι ορθογώνιοι, δεν υπάρχει κάποια παρέμβαση. Ωστόσο, σπαταλάνε το πολύτιμο εύρος ζώνης κυψελών. Το D2D επικοινωνεί απευθείας σε ένα υποκανάλι και το κυψελοειδές σε ένα άλλο υποκανάλι. Το D2D και ο χρήστης κινητής τηλεφωνίας μπορούν να προκαλέσουν παρεμβολές μεταξύ τους, αλλά οι πόροι κινητής τηλεφωνίας χρησιμοποιούνται αποτελεσματικά. Αυτή η λειτουργία απαιτεί έλεγχο των παρεμβολών και ελάχιστη εκχώρηση QoS για κυψελοειδείς επικοινωνίες. Η αναμετάδοση επικοινωνίας D2D μέσω eNB είναι η ίδια με το συμβατικό κυψελοειδές δίκτυο.

Η κίνηση δεδομένων δρομολογείται μέσω eNB σε άλλη συσκευή και έτσι πραγματοποιείται επικοινωνία.

Πίνακας 2. Κατανομή Πόρων στην inband επικοινωνία

Proposed Algorithms	Objective	Direction	Network scenario	Solution and tool	Evaluation
Resource allocation [10]	Improve channel capacity	Uplink and Downlink	One D2D pair and one cellular user	Numerical integration in mathematics and MATLAB simulation	Numerical simulation
Rate splitting technique [11]	Improve the cell throughput by (650per)	Downlink	One D2D pair and one cellular user	Han-kobayashi based derivation	Numerical simulation
Mod switching based on position of D2D pair [12]	Improve throughput and outage probability	Uplink and Downlink	One D2D pair and one cellular user	Conversational scheme	Numerical simulation
Mode switching [13]	Improve Spectral efficiency	Uplink	One D2D pair and one cellular user	Derivation based on SINR	Numerical simulation
Graph based resource allocation [14]	Improve network performance	Uplink and Downlink	One D2D pair and multiple cellular user	Non-linear programming and Graph theory	Numerical simulation
Resource Allocation Optimization [15]	Increase in system throughput	Uplink and Downlink	One D2D pair and multiple cellular user	Shannon Capacity Formula	Numerical Simulation
Dynamic Source Routing (DSR) for multi-hop communication [10]	Channel capacity improvement	Uplink and Downlink	Multi D2D pairs and one Cellular user	Numerical integration in mathematics and MATLAB simulation	Numerical simulation
Resource management [16]	Improve throughput by (41.4per)	Uplink	Multi D2D pair and multi cellular users	3GPP LTE system simulation	System level simulation
Reverse iterative combinatorial auction algorithm [17]	improves system sum-rate up to (13per)	Downlink	Multi D2D pair and multi cellular users	Auction algorithm and Game theory	Numerical simulation and System level simulations
Sub-Channel and Transmission Mode scheduling [18]	To maximize sum throughput by keeping a threshold QoS	Uplink and Downlink	Multi D2D pair and multi cellular users	Lagrangian multiplier vector and Shannon capacity formula	Numerical Simulation
Joint Mode Switching and Resource Allocation based on Particle Swarm [15]	To maximize system throughput keeping a minimum QoS	Downlink	Multi D2D pair and multi cellular users	Optical Swarm Optimization	Numerical Simulation
Mode switching [13]	Increase System throughput	Uplink and Downlink	Multi D2D pair and multi cellular users	Shannon Capacity Formula	Numerical Simulation
Greedy Heuristic algorithm [14]	To improve the sum-rate and throughput	Uplink and Downlink	Multi D2D clusters and multi cellular users	Mixed integer non-linear programming and C++ programming	System level simulation
Resource Allocation by Using Fractional Frequency Reuse Factor (FFR) [19]	To have higher SINR in eNB and overall better throughput	Downlink	Multi D2D clusters and multi cellular users	Path loss Model	Numerical Simulation
Interference Aware Resource Allocation [20]	Improve Network coverage and QoS	Downlink	Multi D2D clusters and multi cellular users	Monte Carlo Simulation Rayleigh Fading Model	Numerical and system level simulation

Η κοινή χρήση των ίδιων φασματικών πόρων μεταξύ των χρηστών D2D και των χρηστών κινητής τηλεφωνίας μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τις παραμέτρους απόδοσης του δικτύου, όπως η φασματική απόδοση, η απόδοση, η χωρητικότητα κυψέλης, η χαμηλότερη καθυστέρηση κ.λπ. Ο έλεγχος παρεμβολών θεωρείται ως ένα από τα κύρια ζητήματα στην κοινή χρήση των πόρων. Έχουμε την δημιουργία παρεμβολών ανάμεσα στον χρήστη D2D και στους χρήστες κινητής τηλεφωνίας. Ενδοκυτταρικές και παρεμβολές μεταξύ των κυττάρων περιλαμβάνονται. Εάν δεν γίνεται έλεγχος των παρεμβολών, δεν θα ήταν μόνο αναποτελεσματική η χρήση των φασματικών πόρων, αλλά θα υποβαθμιζόταν και η χωρητικότητα του συστήματος και η απόδοση του δικτύου. Για την ελαχιστοποίηση ή την εξάλειψη της παρεμβολής μεταξύ χρήστη D2D και χρήστη κινητής τηλεφωνίας μπορούν να βρεθούν στη βιβλιογραφία διαφορετικές τεχνικές, όπως βέλτιστη κατανομή πόρων, επιλογή τρόπου λειτουργίας, έλεγχος ισχύος με βάση το QoS, τιμή SINR, απώλεια διαδρομής, ισχύς μετάδοσης, θέση ζεύγους D2D, απόσταση περιορισμός κ.λπ. Το μεγαλύτερο μέρος της βιβλιογραφίας έχει διαχειριστεί τις παρεμβολές διατηρώντας τη βέλτιστη κατανομή πόρων και την εναλλαγή τρόπου λειτουργίας.

Οι συγγραφείς στο [49], αποφάσισαν ότι η επιλογή ενός κυψελοειδούς χρήστη για ένα D2D έχει καλύτερη φασματική απόδοση και λιγότερες παρεμβολές. Προτείνουν ένα σχήμα περιορισμένης απόστασης, στο οποίο το eNB θα επιλέξει τον κυψελοειδές χρήστη για τη D2D επικοινωνία, διασφαλίζοντας την ελάχιστη απόσταση μεταξύ τους. Έχουν ελέγξει τη συσκευή D2D στην άκρη της κυψέλης και ένας χρήστης κινητής τηλεφωνίας μέσω του eNB θα επιλεγεί, για να διαφυλάσσει τον έλεγχο της παρεμβολής. Με την παραπομπή μέγιστης ισχύος μετάδοσης, το QoS του κυψελοειδούς χρήστη παραμένει στο μέγιστο επίπεδο. Έτσι, ο συγγραφέας έχει προτείνει δύο σχήματα για το uplink του κυψελοειδούς χρήστη, δηλαδή το Open Fractional Power Control (OFPC) και Target SINR Power Control (TSPC). Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης δείχνει ότι η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας στο πλαίσιο του σχήματος OFPC μειώνεται με την αύξηση της απόστασης μεταξύ της σύνδεσης D2D και του χρήστη κινητής τηλεφωνίας. Αυτή η τάση συνεχίζεται έως ότου η απόσταση φτάσει τη 1,5 φορά της ακτίνας κυψέλης, ενώ, για τον ίδιο περιορισμό απόστασης, η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας στο σχήμα TSPC είναι ελάχιστη, μετά την οποία εμφανίζει μια αυξητική τάση.

Οι συγγραφείς στο [50] αναφέρονται στην κοινή χρήση πόρων για την επικοινωνία D2D πολλαπλών λυμάτων όπου μετράνε το σήμα ισχύος στο downlink και συμπεραίνεται η απώλεια διαδρομής, με αποτέλεσμα η ισχύς της μετάδοσης να αυξηθεί προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι παρεμβολές. Με τη χρήση του Dynamic Source Routing (DSR) επιτυγχάνεται η πιθανότητα επιτυχίας.

Στην εργασία [51], οι συγγραφείς πρότειναν ένα σχήμα αναμετάδοσης D2D εντός συστάδας για τη βελτίωση της φασματικής απόδοσης στην επικοινωνία επικάλυψης. Γίνεται εστίαση στην επικοινωνία D2D ως μέσο αναμετάδοσης για τη διανομή περιεχομένου και για πολλαπλή μετάδοση. Από το eNB αποστέλλονται μπλοκ δεδομένων, τα οποία δεν λαμβάνονται σωστά από όλους τους χρήστες του D2D. Ωστόσο, και να ληφθούν σωστά, δεν μπορούν να αποκωδικοποιηθούν από όλους τους χρήστες του D2D όπως στάλθηκαν. Έτσι, οι συγγραφείς έχουν προτείνει την αναμετάδοση των μπλοκ δεδομένων από συσκευές που έχουν αποκωδικοποιήσει σωστά τα δεδομένα σε άλλες συσκευές που δεν έχουν αποκωδικοποιήσει σωστά τα δεδομένα. Το προτεινόμενο σχήμα επιλέγει δυναμικά αναμεταδότες με βάση το κόστος πόρων του γιλέκου. Στη συνέχεια, οι συγγραφείς πρότειναν ένα σχήμα αυξητικής αναμετάδοσης για επικοινωνία D2D. Η συσκευή αποστέλλει δεδομένα σε μια άλλη συσκευή κάνοντας χρήση μιας άμεσης σύνδεσης και ενός αντιγράφου των δεδομένων αυτών, τα οποία αποστέλλονται και στο eNB. Εάν γίνει λανθασμένα η απευθείας μετάδοση D2D, τα δεδομένα αποστέλλονται από το eNB. Το eNB χρησιμοποιείται ως εφεδρικός αναμεταδότης σε περίπτωση που υπάρξει αποτυχία της επικοινωνίας D2D. Με τη βοήθεια της αριθμητικής προσομοίωσης ο συγγραφέας έδειξε ότι η απόδοση του συστήματος είναι βελτιωμένη κατά 40% σε σύγκριση με το σύστημα υποστρώματος.

Οι συγγραφείς στο [52], έχουν επίσης προτείνει μια μέθοδο για τη βελτίωση της διανομής περιεχομένου στο κυψελοειδές δίκτυο χρησιμοποιώντας επικοινωνία D2D. Χρησιμοποιούν μια ασύγχρονη διανομή περιεχομένου η οποία επιτρέπει σε διαφορετικούς χρήστες να παρατηρούν το παρόμοιο περιεχόμενο την ίδια στιγμή, κάτι που βελτιώνει την φασματική απόδοση. Με τη βοήθεια της προσομοίωσης σύγκριναν την μέθοδο που προτάθηκε με την κωδικοποιημένη μέθοδο εκπομπής. Ουσιαστικά, η προτεινόμενη μέθοδος αυξάνει 10 φορές την απόδοση σε σύγκριση με τη μέθοδο κωδικοποιημένης εκπομπής και 100 φορές σε σύγκριση με το συμβατικό σύστημα.

### 2.3.5 Η τεχνολογία Spectrally Efficient Frequency Division Multiplexing (SEFDM)

Η φασματικά αποδοτική πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας SEFDM βελτιώνει τη φασματική απόδοση σε σχέση με τη OFDM. Η βέλτιστη ανίχνευση του SEFDM, για την ανάκτηση σημάτων που έχουν καταστραφεί από ICI, έχει σημαντικά μειονεκτήματα στην εκθετική αύξηση της πολυπλοκότητας ανίχνευσης με τη διεύρυνση του μεγέθους του συστήματος και του επιπέδου διαμόρφωσης.

Τα συστήματα 5G θα στοχεύουν στη μεγιστοποίηση της απόδοσης δεδομένων χωρίς να διακυβεύεται το σπάνια διαθέσιμο φάσμα. Το SEFDM είναι ένα τέτοιο σύστημα όπου η ορθογωνικότητα παραβιάζεται σκόπιμα για τη βελτίωση της φασματικής απόδοσης σε βάρος της εισαγωγής του ICI. Τέτοιες παρεμβολές είναι ανάλογες με τον αριθμό των υπο-φορέων, γεγονός που αποτελεί μεγάλη πρόκληση για την υλοποίηση του SEFDM και περιορισμό στην πιθανή χρήση του σε μελλοντικά συστήματα. Επομένως, τα μεγάλα συστήματα SEFDM με καλή απόδοση σφάλματος είναι ιδιαίτερα επιθυμητά. Στην εργασία [53], αναφέρονται στο μη κωδικοποιημένο B-SEFDM, όπου ελαττώνει την πολυπλοκότητα ανίχνευσης και επιφέρει καλή απόδοση σφάλματος διαμοιράζοντας τους υπο-φορείς σε πολλά μπλοκ. Αυτή η τεχνική εφαρμόζεται σε μη ορθογώνια μεγάλα συστήματα τα οποία χωρίζονται σε 128 υπο-φορείς. Επιπρόσθετα, προτείνεται και φαίνεται πως ένας ανιχνευτής χαμηλής πολυπλοκότητας, που η λειτουργία του βασίζεται σε βελτιστοποιημένη χαρτογράφηση, έχει πολύ βελτιωμένη απόδοση σε σύγκριση με άλλους ανιχνευτές που χρησιμοποιούνται για SEFDM. Για διάφορους συντελεστές συμπίεσης εύρους ζώνης αποδεικνύεται ότι πραγματοποιείται κέρδος απόδοσης πολλών dB. Ένα διαφορετικό σύστημα συζητείται επίσης σε αυτό το άρθρο, όπου η συνελκτική κωδικοποίηση χρησιμοποιείται με έναν αποτελεσματικό μαλακό ανιχνευτή που αποτελείται από ανιχνευτή FFT και αποκωδικοποιητή BCJR (Bahl-Cocke-Jelinek-Raviv) προτείνεται για ένα σύστημα SEFDM μεγάλου μεγέθους. Μέσω μιας πολλαπλής δομής FFT για να μπορέσει να υλοποιηθεί αποτελεσματικά τόσο η αποδιαμόρφωση όσο και η εύρεση στον ανιχνευτή FFT. Για την βελτίωση της απόδοσης του συστήματος, ο ανιχνευτής FFT συνεργάζεται με τον αποκωδικοποιητή BCJR. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι παρουσία καναλιού επιλεκτικής συχνότητας, σε σχέση με το OFDM, ο μαλακός ανιχνευτής μπορεί να εξοικονομήσει 40% του εύρους ζώνης με υποβάθμιση 1,1 dB και 45% του εύρους ζώνης με ποινή 1,6 dB στην περίπτωση 1024 μη ορθογώνιων υπο- μεταφορείς διατηρώντας παράλληλα αποδεκτή πολυπλοκότητα υλοποίησης.

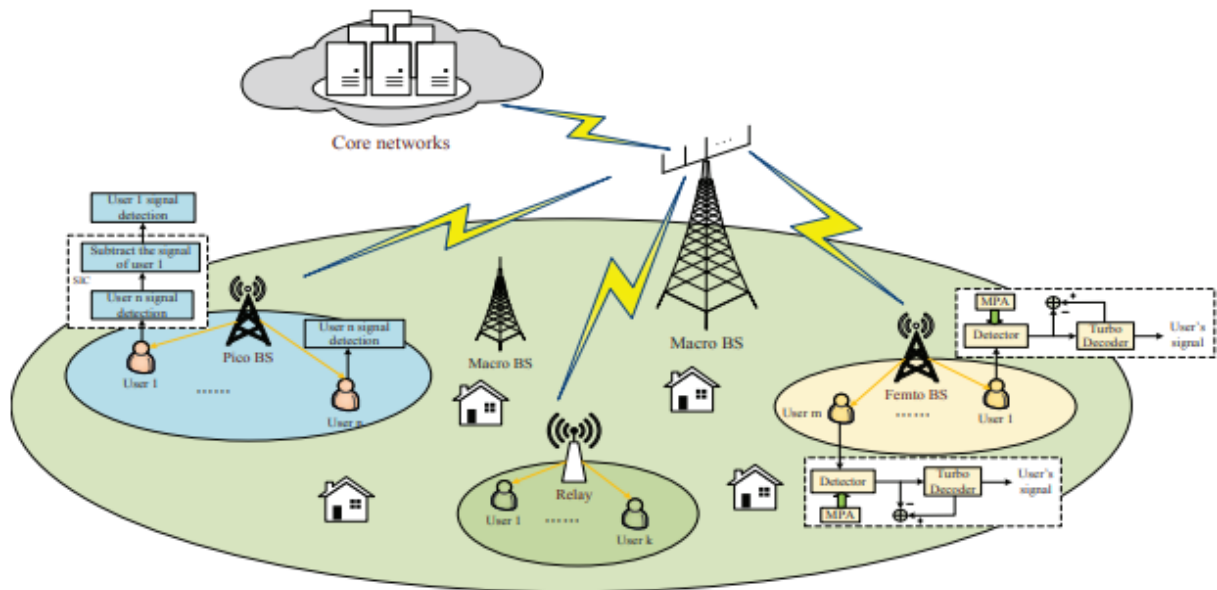
Ο σχεδιασμός του συστήματος λαμβάνει υπόψη την αρχιτεκτονική αντίστροφης συνένωσης, η οποία εναλλάσσει τον αλγόριθμο αντιστοίχισης κατανομής σταθερής σύνθεσης μαζί με τον κώδικα διόρθωσης σφαλμάτων soft-decision (SD-FEC-LDPC) για το σχήμα πιθανοτήτων. Η μη ορθογώνια σηματοδότηση πραγματοποιείται με τη χρήση της διαμόρφωσης SEFDM και με βάση τον διακριτό μετασχηματισμό Fourier (Discrete Fourier Transform - DFT) που έχει αντιστοιχισμένη αποδιαμόρφωση φιλτραρίσματος και προηγμένη ανίχνευση ακύρωσης παρεμβολών. Η χαμηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα, η υψηλή επιτεύξιμη φασματική απόδοση, και η αξιοπιστία ανακηρύσσουν το SEFDM ως καλό υποψήφιο για τη σηματοδότηση πολλαπλών φορέων για τις επικοινωνίες πέραν του 5G. Προσθέτοντας επιπλέον κέρδος διαμόρφωσης και ευελιξία στην προσαρμογή του ρυθμού, ο συνδυασμός δύο τεχνικών επίτευξης χωρητικότητας παρέχει σημαντική εικόνα για περαιτέρω βελτίωση της απόδοσης.

### 2.3.6 Η τεχνολογία του Non Orthogonal Multiple Access (NOMA)

Η πολλαπλή πρόσβαση NOMA η οποία είναι μη ορθογώνια τεχνική, προτείνεται ως βιώσιμη τεχνική πολλαπλής πρόσβασης (multiple access - MA) για να καλύψει τις απαιτήσεις στα 5G δίκτυα και πέραν αυτών. Εν αντιθέσει με των συμβατικών τεχνικών ορθογώνιας πολλαπλής πρόσβασης (Orthogonal Multiple Access - OMA), το NOMA στους τομείς συχνοτήτων και χρόνου, αποστέλλει στον ίδιο χρόνο σήματα, στο ίδιο μπλοκ πόρων ανάμεσα σε πολλαπλούς χρήστες, κάνοντας χρήση της κωδικοποίηση υπέρθεσης ισχύος (superposition coding - SC) στον πομπό. Το NOMA καταφέρνει να εξυπηρετεί έναν μεγάλο αριθμό συσκευών αναβαθμίζοντας σε πολύ καλό βαθμό την φασματική απόδοση σε σχέση με τις συμβατικές τεχνικές MA, η οποία έχει την ικανότητα να υποστηρίζει μαζική συνδεσιμότητα δικτύων IoT.

Με την εισαγωγή και εξοικείωση των δικτύων 5G, ο κύριος στόχος είναι η επίτευξη καλύτερης φασματικής απόδοσης. Αυτή η αύξηση της φασματικής απόδοσης θα επιτρέψει σε εφαρμογές που έχουν διαφορετικούς ρυθμούς δεδομένων, πιο υψηλούς συγκεκριμένα και θα πραγματοποιήσει τη μαζική συνδεσιμότητα για το IoT. Με τις νέες τεχνικές και τις πιο αποτελεσματικές χρήσεις των πόρων, η πραγματοποίηση υψηλότερων απαιτήσεων δεδομένων θα είναι δυνατή. Παρότι, υπάρχουν περιορισμένοι διαθέσιμοι ασύρματοι πόροι, συμπεριλαμβανομένου του φάσματος και της ισχύος εκπομπής. Ακόμα, η ισχύς μετάδοσης η οποία είναι απαραίτητη για την εξασφάλιση των αντίστοιχων απαιτήσεων απόδοσης με τις συμβατικές προσεγγίσεις θα είναι σημαντικά ανώτερη. Τα ετερογενή εξαιρετικά πυκνά δίκτυα (Heterogeneous Ultra Dense Networks - HUDN) και NOMA, όπου στην **Εικόνα 15 παρουσιάζεται το «πάντρεμα» αυτών των δύο τεχνικών στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα**, έχουν αναγνωριστεί ως δύο προτεινόμενες τεχνικές για τα συστήματα 5G λόγω των μεγάλων δυνατοτήτων τους για την ενίσχυση της αποδοτικότητας του φάσματος.

Η τεχνική HUDN που παρέχει υψηλότερη φασματική απόδοση, έχει δημιουργήσει ενδιαφέρον στο ερευνητικό κοινό. Τα HUDN σχετίζονται με τα δίκτυα που περιέχουν πολλούς διαφορετικούς τύπους small cells, έτσι ώστε τα σημεία πρόσβασης να βρίσκονται όσο το δυνατόν κοντινότερα στους τελικούς χρήστες. Τα HUDN περιέχουν macrocells, picocells, femtocells και ρελέ (relays) τα οποία μεταδίδουν σε χαμηλότερη ισχύ από τα macrocells και έχουν την ικανότητα της αποφόρτισης της κυκλοφορίας δεδομένων από τα macrocells. Η φασματική απόδοση και η χωρητικότητα του δικτύου θα ενισχυθούν σημαντικά με την αυξανόμενη πυκνότητα των small cells και με το δίκτυο backhaul. Παρόλα αυτά, δεν είναι εφικτή η ανάπτυξη small cells με άπειρη πυκνότητα σε πρακτικά σενάρια. Οπότε, χρειάζονται εκτενείς ερευνητικές προσπάθειες για την αποτύπωση των δικτύων πυκνότητας.



Εικόνα 14. Αρχιτεκτονική HUDN με δυνατότητα NOMA

Προκειμένου να υποστηριχθεί η εκρηκτική κυκλοφορία δεδομένων, η έννοια του ετερογενούς δικτύου (HetNet) έχει προταθεί με επικάλυψη μικρών κυψελών με χαμηλή ισχύ μετάδοσης σε κύτταρα μακροεντολών. Το NOMA στο ίδιο μπλοκ πόρων (resource block - RB) μεταδίδει δεδομένα σε πολλούς χρήστες, κάνοντας χρήση διάφορων επιπέδων ισχύος και/ή με διαφορετικούς κωδικούς. Για την υποστήριξη βαριάς κίνησης δεδομένων καθώς και της παροχής μαζικής συνδεσιμότητας, η τεχνική NOMA στα HUDNs θα μας βοηθήσει και θα μας εξυπηρετήσει.

Η NOMA τεχνολογία κατηγοριοποιείται σε NOMA τομέων κώδικα (Code Domain - CD-NOMA) και NOMA τομέων ισχύος (Power Domain - PD-NOMA). Επίσης κάποιες επιπρόσθετες κατηγορίες είναι, Low Density Spreading-OFDM (LDS-OFDM) χαμηλής πυκνότητας, CDMA διασποράς χαμηλής πυκνότητας (Low Density Spreading CDMA – LDS CDMA), και αραιού κώδικα πολλαπλής πρόσβασης (Sparse Code Multiple Access - SCMA). Οι πιο πολλές μελέτες έδωσαν έμφαση στις επιδόσεις διάφορων τεχνικών NOMA ξεχωριστά, όπως το PD-NOMA και το CD-NOMA. Σε διαφορετικά σενάρια έχουν διαφορετικές προτιμώμενες τεχνικές NOMA. Το PD-NOMA προτείνεται, σε ένα κινούμενο δίκτυο ή όταν υπάρχει πολύ μακρινό εφέ, όπου οι χρήστες αντιμετωπίζουν πολύ άσχημες συνθήκες καναλιού. Το SCMA επειδή έχει κέρδος διαμόρφωσης και χρησιμοποιεί την σχεδόν βέλτιστη αντίληψη αλγορίθμου μετάδοσης μηνύματος (Message Passing Algorithm - MPA), χρησιμοποιείται στις κακές συνθήκες καναλιού που αντιμετωπίζουν οι χρήστες και έχουν υψηλή αξιοπιστία σαν απαίτηση. Έτσι, με το να σχεδιαστεί ένα ενιαίο πλαίσιο NOMA για συστήματα 5G για την υποστήριξη όλων αυτών των σεναρίων, θα βοηθούσε στην πιο γρήγορη και παραγωγική αντιμετώπιση των προβλημάτων που προκύπτουν από το δίκτυο. Η κεντρική ιδέα του ενοποιημένου NOMA που προτείνεται είναι η παροχή ενός πλαισίου MA, όπου θα υποστηρίζει τη μαζική συνδεσιμότητα με ετερογενές QoS κάνοντας χρήση την ίδια υποδομή του υλικού.

Η αντιμετώπιση πολύ διαφορετικών συνθηκών καναλιού από τους χρήστες, όταν συνδέονται σε ένα BS από διαφορετικές βαθμίδες στα δίκτυα HUDN είναι δεδομένη. Έχει

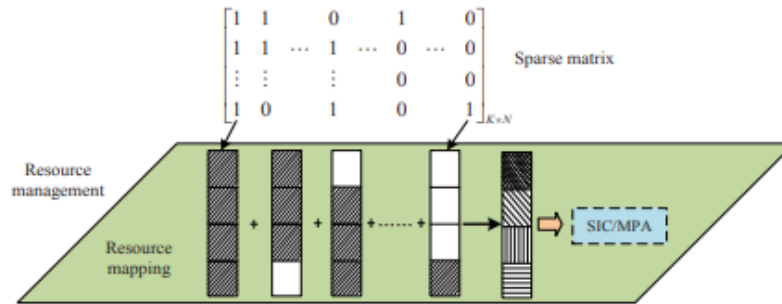
διαπιστωθεί ότι διαφορετικές τεχνικές NOMA έχουν διαφορετική απόδοση όσον αφορά την υποστήριξη μαζικής συνδεσιμότητας σε διάφορα σενάρια, δηλαδή εφαρμογές που απαιτούν διαφορετικές αξιοπιστίες ή/και ρυθμούς μετάδοσης. Ένας χρήστης μπορεί να είναι σε θέση να πρέπει να χρησιμοποιήσει διαφορετικές τεχνικές NOMA για την αντιμετώπιση διάφορων συνθηκών καναλιού και να έχει διαφορετικές απαιτήσεις μετάδοσης. Οπότε, χρειάζονται διαφορετικές αρχιτεκτονικές υλικού για να υποστηρίξουν διαφορετικά σενάρια, κάτι που προκαλεί προβλήματα στην πραγματική εφαρμογή των τεχνικών NOMA. Είναι αναγκαίο να δίνεται ένα ενοποιημένο πλαίσιο NOMA για HUDNs, που εφαρμόζεται στην ίδια αρχιτεκτονική υλικού, και έχει ευέλικτη ικανότητα υποστήριξης διαφόρων σεναρίων.

### **2.3.6.1 Κατανομή πόρων σε HUDN με δυνατότητα NOMA**

Η κατανομή πόρων είναι μια άλλη σημαντική πτυχή για το σχεδιασμό HUDN με δυνατότητα NOMA. Σημειώστε ότι η εφαρμογή του NOMA φέρνει πιο εξελιγμένες παρεμβολές των καναλιών στα υπάρχοντα HUDN, καθώς αυτά τα ξεχωριστά χαρακτηριστικά καθιστούν τα προβλήματα κατανομής πόρων πιο προκλητικά. Στην Εικόνα 16 απεικονίζεται η κατανομή πόρων για ένα προτεινόμενο ενιαίο πλαίσιο HUDN με δυνατότητα NOMA. Πιο αναλυτικά, οι ροές των ημερομηνιών των διαφορετικών χρηστών εξαπλώνονται σε πολλαπλά RBs, όπου το "1" και το "0" δηλώνουν την ύπαρξη αντιστοίχισης πόρων μεταξύ του RB και του αντίστοιχου χρήστη. Πιο συγκεκριμένα, τα σκιασμένα μπλοκ αναφέρονται στο RB που καταλαμβάνουν τα δεδομένα των χρηστών, γεγονός που υποδεικνύει μια αντιστοίχιση. Ο κάθε χρήστης έχει την δυνατότητα να επιλέγει τυχαία μία στήλη του αραιού πίνακα. Για να βελτιωθεί όμως η απόδοση ανίχνευση, ο απομακρυσμένος χρήστης κάνει την επιλογή της στήλης με μεγαλύτερο βάρος για την κατανομή πόρων. Από την άλλη μεριά, ο κοντινός χρήστης επιλέγει μία στήλη με μικρότερο βάρος στήλης. Επιπρόσθετα, κάνοντας πολλαπλασιασμό ενός συντελεστή κατανομής ισχύος με κάθε στήλη, ενισχύεται η απόδοση του δικτύου. Τέλος, χρησιμοποιώντας την τεχνολογία SIC (Successive Interference Cancellation)/MPA που βασίζεται σε στο MUD (Multi User Detection) εντοπίζουμε τις πληροφορίες για τον επιθυμητό χρήστη [54].

Στην κατανομή πόρων σε δίκτυα HUDN με την χρήση του NOMA, θα πρέπει να γίνει εξέταση από κοινού πολλών προβλημάτων για να αντιμετωπιστούν έξυπνα οι παρεμβολές εντός του BS και του inter-BS: i) πόσοι χρήστες θα ταξινομηθούν στο ίδιο RB. ii) ποιοι από αυτούς θα κατανέμονται σε ποια RB και iii) ο συντελεστής κατανομής ισχύος για κάθε RB σε συνδυασμό με τους χρήστες που μοιράζονται το ίδιο RB. Όλα αυτά τα προβλήματα μπορούν να αντιμετωπιστούν με σωστό σχεδιασμό του αραιού πίνακα και των αντίστοιχων συντελεστών κατανομής ισχύος. Στην πραγματικότητα, λόγω του μοναδικού χαρακτήρα της παρεμβολής εντός του BS που φέρνει το NOMA, η κατανομή πόρων σε HUDNs με δυνατότητα NOMA γίνεται πρόβλημα μείγματος αθέριων μη κυρτών βελτιστοποιήσεων, τα οποία συνήθως τείνουν να είναι NP-hard. Η θεωρία αντιστοίχισης θεωρείται μια αποτελεσματική προσέγγιση για να επιτευχθεί καλή αντιστάθμιση ανάμεσα στην απόδοση του συστήματος και την υπολογιστική πολυπλοκότητα.





Εικόνα 15. Κατανομή πόρων για το προτεινόμενο ενιαίο πλαίσιο HUDN με δυνατότητα NOMA

Η ΕΕ και η SE είναι δύο σημαντικές μετρήσεις στα τρέχοντα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας, ειδικά στα δίκτυα 5G. Οι δύο αυτοί στόχοι θεωρούνται αντικρουόμενοι μεταξύ τους, το οποίο σημαίνει πως δεν μπορούν να πραγματοποιήσουν τις βέλτιστες λύσεις τους ταυτόχρονα. Ως αποτέλεσμα, οι περισσότερες εργασίες επικεντρώνονται στο πρόβλημα βελτιστοποίησης ενός στόχου (Single Objective Optimization Problem - SOOP) της ΕΕ ή της SE. Η εργασία [55], έκανε εξέταση της βελτιστοποίησης του ΕΕ και SE εκφράζοντας τα αρχικά προβλήματα ως προβλήματα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων (Multi Objective Optimization Problem - MOOP). Ένα MOOP απαρτίζεται από ένα σύνολο βέλτιστων λύσεων τα οποία είναι γνωστά ως βέλτιστες λύσεις Pareto, αντί για μια ενιαία βέλτιστη λύση. Για να λυθεί το πρόβλημα ενός MOOP, η πιο διαδεδομένη μέθοδος είναι η μετατροπή του MOOP σε SOOP χρησιμοποιώντας μια συγκεκριμένη βέλτιστη λύση Pareto τη φορά. Ένας σύνθετος τρόπος είναι με τη χρήση σταθμισμένων συντελεστών για διαφορετικούς στόχους βελτιστοποίησης. Ωστόσο, η απόδοση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από σταθμισμένους συντελεστές που ορίζονται από τους χρήστες. Μέχρι να βρεθούν ικανοποιητικά αποτελέσματα, γίνεται εφαρμογή για διαφορετικούς σταθμισμένους συντελεστές η μέθοδος για την εύρεση πολλαπλών λύσεων. Με αποτέλεσμα, η ΕΕ και η SE δεν βελτιστοποιούνται από κοινού με μια αποδεκτή υπολογιστική πολυπλοκότητα. Το MOOP διαμορφώθηκε για την εξισορρόπηση των ανταλλαγών αυτών των δύο μετρήσεων σε ένα 5G UDN. Για το διατυπωμένο πρόβλημα Μικτού Ολοκληρωτικού Μη Γραμμικού Μη κυρτού Προγραμματισμού (Mixed Integral Nonlinear Non convex Programming - MINNP), τα RBs και η ισχύς μετάδοσης απαιτούνται για την κατανομή. Σε αντίθεση με τα περισσότερα τρέχοντα έργα στα οποία υιοθετούνται δύο βήματα με την εκχώρηση RB πρώτα και μετά τον προσδιορισμό της ισχύος. Στην εργασία, τα RB και η ισχύς μετάδοσης κατανέμονται από κοινού και η βέλτιστη ΕΕ και SE επιτυγχάνονται ταυτόχρονα. Παρόλο που ο Γενετικός Αλγόριθμος (Genetic Algorithm - GA) έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στις ασύρματες επικοινωνίες, υπάρχουν πολλές επικρίσεις όπως η υψηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα, η έλλειψη ελιτισμού και η ανάγκη καθορισμού της παραμέτρου κοινής χρήσης. Στην εργασία, γίνεται πρόταση μιας βελτιωμένης προσέγγισης που βασίζεται στο NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II) για να επιλυθεί το MOOP το οποίο αντεπεξέρχεται τις παραπάνω δυσκολίες και κάνει σύγκλιση στο βέλτιστο σύνολο Pareto. Εξ όσων γνωρίζουν οι συγγραφείς, είναι η πρώτη φορά που εφαρμόζεται το NSGA-II στο UDN για να εξισορροπηθεί η ανταλλαγή μεταξύ ΕΕ και SE.

Επιπλέον, στο άρθρο [55], λαμβάνοντας υπόψη το σενάριο εξαιρετικά πυκνού δικτύου, με στόχο τη μεγιστοποίηση της ΕΕ και SE του UDN ταυτόχρονα και την εγγύηση του QoS της μακροκυτταρικής κυψέλης, προτείνεται μια κοινή κατανομή ισχύος μετάδοσης και RBs. Για την εξισορρόπηση αυτών των δύο κριτηρίων, υλοποιείται ένα MOOP που αυξάνει από κοινού

την EE και τη SE. Αντί της χρήσης της παραδοσιακής μεθόδου σταθμισμένου αθροίσματος που δεν μπορεί να αποκτήσει τη βέλτιστη EE και SE ταυτόχρονα, προτείνεται ένας βελτιωμένος αλγόριθμος κατανομής πόρων με βάση το NSGA-II. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν την καλή απόδοση της προτεινόμενης προσέγγισης. Επιπλέον, αναδεικνύεται ότι ο αλγόριθμός έχει προφανείς ανωτερότητες.

### 2.3.6.2 SCMA

Το SCMA το οποίο είναι μια μη ορθογώνια κυματομορφή. Μέσω ενός πολυδιάστατου αστερισμού επιτυγχάνει αύξηση της φασματικής απόδοσης. Αυτή η κυματομορφή διευκολύνει ένα νέο σχήμα πολλαπλής πρόσβασης στο οποίο αραιές κωδικές λέξεις πολλαπλών επιπέδων UE επικαλύπτονται σε τομείς κώδικα και ισχύος και μεταφέρονται σε κοινόχρηστους πόρους χρόνου-συχνότητας. Συνήθως, η πολυπλεξία πολλαπλών συσκευών μπορεί να υπερφορτωθεί εάν ο αριθμός των επικαλυπτόμενων επιπέδων είναι μεγαλύτερος από το μήκος των πολυπλεξικών κωδικών λέξεων. Χάρη στο μειωμένο μέγεθος του πολυδιάστατου αστερισμού του SCMA και στην αραιότητα των κωδικών λέξεων SCMA, η υπερφόρτωση είναι ανεκτή και έχει μέτρια πολυπλοκότητα ανίχνευσης. Τα κωδικοποιημένα bit γίνονται αντιστοίχιση απευθείας με τις πολυδιάστατες αραιές κωδικές λέξεις που έχουν επιλεγεί από τα βιβλία κωδικών SCMA για κάποιο συγκεκριμένο επίπεδο. Με δυο παράγοντες γίνεται ο έλεγχος της πολυπλοκότητας της ανίχνευσης. Το πρώτο, είναι το επίπεδο αραιότητας των κωδικών λέξεων και το δεύτερο είναι η χρήση πολυδιάστατων αστερισμών με χαμηλό αριθμό σημείων προβολής ανά διάσταση. Τα κωδικοποιημένα bit μιας συσκευής αντιστοιχίζονται πρώτα σε μια κωδική λέξη από ένα βιβλίο κωδικών. Μέσω μιας τυφλής τεχνικής λήψης πολλαπλών UE που εφαρμόζεται για την ανίχνευση των δραστηριοτήτων της συσκευής και τις πληροφορίες που μεταδίδονται από αυτές ταυτόχρονα. Μέσω της τεχνικής αυτής, μπορεί να γίνει υποστήριξη μιας πολλαπλής πρόσβασης χωρίς επιχορηγήσεις. Λόγω των παραπάνω, η SCMA θεωρείται κατάλληλη για την υποστήριξη μαζικής συνδεσιμότητας [56].

### 2.3.7 Το δίκτυο Full Duplex Ultra Dense Network (FDUDN)

Ένα υπερπυκνό δίκτυο πλήρους διπλής όψης FDUDN έχει οραματιστεί ως ένα πολλά υποσχόμενο παράδειγμα δικτύου για τη βελτίωση της απόδοσης του φάσματος. Όπως ήταν αναμενόμενο, στα 5G δίκτυα η πυκνότητα των διαφόρων ειδών των κόμβων που έχουν χαμηλή κατανάλωση είναι 10 φορές μεγαλύτερη από αυτή του 4G, γεγονός που ορίζει τα UDN δίκτυα ως το κατάλληλο παράδειγμα χρήσης. Λόγω του πλεονεκτήματος της ασύρματης κάλυψης και της βελτίωσης της απόδοσης του φάσματος, τα UDN θεωρούνται ως βασική τεχνολογία του συστήματος 5G για την αντιμετώπιση της ταχέως αυξανόμενης ζήτησης μετάδοσης δεδομένων [57].

Η τεχνολογία full duplex (FD), επιτρέπει σε μια συσκευή να λαμβάνει και να εκπέμπει ταυτόχρονα στο ίδιο φάσμα. Για το λόγο του διπλασιασμού της φασματικής απόδοσης και της ευέλικτης χρήσης του φάσματος, η FD τεχνολογία έχει καταφέρει να αναγνωριστεί ως μια πολλά υποσχόμενη λύση για την αξιοποίηση των πόρων του ασύρματου φάσματος. Πρόσφατα, οι ερευνητές έκαναν πρόταση της κατασκευής ενός UDN με τη χρήση FD BS και απέδειξαν ότι επιτυγχάνεται σημαντική αύξηση στον ρυθμό του χρήστη και τη διεκπεραίωση του δικτύου. Έχει πολλά πλεονεκτήματα: i) Η αυτο-παρεμβολή στους κόμβους FD μπορεί εύκολα

να καταστεί σε ένα αρκετά χαμηλό επίπεδο, λόγω των UDN, τα οποία παρέχουν συνήθως χαμηλή ισχύ μετάδοσης. ii) Η πολυπλοκότητα της διαχείρισης του φάσματος σε ένα UDN μειώνεται αποτελεσματικά, αφού η FD τεχνολογία επαναχρησιμοποιεί το ίδιο φάσμα στο uplink και στο downlink. iii) Το FDUDN έχει την δυνατότητα να αποκτήσει τα διπλάσια κέρδη απόδοσης των τεχνολογιών FD και UDN.

Παρά την πιθανή βελτίωση στην απόδοση του συστήματος, το FD-UDN αποτελεί μεγάλη πρόκληση για την αντιμετώπιση των σοβαρών και πολύπλοκων παρεμβολών. Θεωρείται ότι στα ετερογενή UDNs, λόγω της τυχαίας κατασκευής μεγάλου αριθμού small cells δημιουργείται σοβαρή παρεμβολή μεταξύ των δικτύων. Με την υιοθέτηση της τεχνολογίας FD στα UDN, θα υπάρξει υπολειπόμενη αυτο-παρέμβαση, παρόλου που εξαλείφεται με προηγμένες τεχνικές ακύρωσης. Ως αποτέλεσμα, το περιβάλλον των παρεμβολών θα έχει μεγάλη πολυπλοκότητα και η διαχείριση των ασύρματων πόρων ορίζεται ως πολύ σημαντική για να γίνει μείωση της απώλειας των δεδομένων και να γίνει διασφάλιση των απαιτήσεων υπηρεσίας.

## Κεφάλαιο 3. Διαχείριση Φάσματος

### 3.1 Εισαγωγή στα Small Cells και το δίκτυο HetNet

Το φάσμα που είναι διαθέσιμο στα 300 MHz μέχρι και τα 3 GHz, δηλαδή το ασύρματο δίκτυο υπερυψηλής συχνότητας (Ultra High Frequency - UHF) είναι πλήρως κατειλημμένο και το οποίο έχει φτάσει σχεδόν το όριο Shannon [58][59]. Με λίγα λόγια δεν είναι σε θέση να καλύψει τις ανάγκες του 5G. Με χρήση φασμάτων υψηλότερης συχνότητας από 3 GHz έως 300 GHz έχει λυθεί το θέμα της μη διαθεσιμότητας του φάσματος. Εκτός από τις ζώνες 57 GHz έως 64 GHz και 164 GHz έως 200 GHz που απορροφούνται από το οξυγόνο και τους υδρατμούς [60], υπάρχουν ευρείες ζώνες συχνοτήτων που έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν. Ακόμα, έχουν δημιουργηθεί πολλές έρευνες πάνω στις ζώνες συχνοτήτων terahertz (THz) από 300 GHz έως 3 THz, που παρέχουν ακόμη μεγαλύτερα εύρη ζώνης για την φιλοξένηση μελλοντικών εφαρμογών με εξαιρετικά υψηλούς ρυθμούς δεδομένων. Στις ζώνες υψηλότερης συχνότητας πάει να πει ότι το μήκος κύματος λειτουργίας βρίσκεται στο mmWave και η δικτύωση στο mmWave έχει πολύ μεγαλύτερη διαφορά από τα υπάρχοντα ασύρματα δίκτυα. Για τα σήματα mmWave, η διείσδυση σήματος, οι απώλειες διαδρομής και τα εφέ αποκλεισμού είναι αρκετά υψηλά. Έτσι λοιπόν, η σημασία της διάδοσης της ανάκλασης, της διασποράς και του LOS θεωρείται πιο σημαντική στην εργασία [60]. Οπότε πρέπει να υπάρξει μείωση της απόστασης ανάμεσα στους χρήστες και στους κόμβους πρόσβασης οι οποίοι λειτουργούν στο mmWave, κάνοντας το δίκτυο small cells την πιο αποτελεσματική λύση. Αυτά τα δίκτυα μικρών κυψελών έχουν την ικανότητα επέκτασης της κάλυψης για κάθε περιοχή μονάδας. Και μέσω μιας ιδιαίτερα συγκεκριμένης ανάπτυξης, μπορούν να πραγματοποιήσουν την αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου, κάτι που έχει ανάγκη για να την ομαλή λειτουργία του ένα υπερπυκνό δίκτυο.

#### 3.1.1 Small Cells

Σύμφωνα με μια έκθεση από το Fortune Business Insights, η παγκόσμια επένδυση στην τεχνολογία των small cells 5G πρόκειται να αυξηθεί από 175 εκατομμύρια δολάρια το 2019 σε 15,9 δισεκατομμύρια δολάρια έως το 2026, με αποτέλεσμα έναν τεράστιο σύνθετο ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης του 81,9% σε αυτήν την περίοδο. Επειδή τα σήματα του mmWave, δεν μεταδίδονται μακριά και δεν έχουν την ικανότητα να διεισδύουν σε τοίχους, επέφερε την ανάπτυξη της τεχνολογίας των μικρών κυψελών 5G αφού θεωρούνται ζωτικής σημασίας για την κάλυψη εντός του κτιρίου.

Τα small cells δεν είναι νέα τεχνολογία. Τα femtocells χρησιμοποιούνταν σε ενισχυτές κινητής τηλεφωνίας 3G/4G. Τα small cells που χρησιμοποιούνται στο 5G παίρνουν τη σύνδεσή τους μέσω macrocells, και ύστερα στέλνουν τα δεδομένα σε ένα άλλο ή σε ένα relay. Ως αποτέλεσμα τα σήματα στέλνονται σε πολύ μεγαλύτερες αποστάσεις. Για την αποστολή σημάτων μέσω των mmWave, θα πρέπει να αυξηθεί σημαντικά ο αριθμός των small cells και η τοποθέτησή τους να γίνεται πιο κοντά μεταξύ τους. Έτσι θα ταξιδεύουν τα μικρότερα κύματα από τη μια τοποθεσία στην άλλη χωρίς να διακόπτεται η σύνδεση του χρήστη ή να μειώνεται η ταχύτητα του. Η τοποθέτηση 5G κυψελών σε φώτα δρόμου προτείνεται από τη Samsung σαν μια λύση. Θα υπάρξει περιορισμός των πύργων κινητής

τηλεφωνίας σε ένα χαμηλότερο φάσμα επιπέδου. Στις αστικές περιοχές οι χρήστες του 5G θα βασιστούν στις μικρές κυψέλες σε συνδυασμό με τους πύργους 5G. Πρέπει να διασφαλιστεί από τους χρήστες ότι χρησιμοποιούν backhaul, είτε οπτικών ινών είτε ασύρματο. Προϋπόθεση είναι η ύπαρξη κατάλληλης πηγής ενέργειας και φυσική πρόσβαση στην τοποθεσία από τους χρήστες.

Με την ανάπτυξη του 5G συνεπάγεται και η τοποθέτηση και η ανάπτυξη εκατοντάδων χιλιάδων μικρών κυψελών σε πόλεις και κομοπόλεις. Ο κάθε δήμος ακολουθεί του δικούς του κανόνες και υπογράφει περίπλοκες συμβάσεις μεταξύ των μεταφορέων, κυβερνητικών φορέων, ιδιοκτητών της γης, πωλητών εξοπλισμού, συνεργατών τεχνολογίας. Η προσαρμογή των συμβάσεων για καθένα από αυτά είναι δύσκολη, αλλά γίνεται πολύ πιο εύκολη με τη χρήση έξυπνων συμβάσεων που αντικαθιστούν τα νομικά με κωδικό και χρήση blockchain για την καταγραφή συναλλαγών. Αυτό είναι ένα παράδειγμα που θα μπορούσε να ξεκινήσει τη χρήση του blockchain σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας.

Συστήματα ασύρματης μετάδοσης μικρής εμβέλειας και χαμηλής ισχύος ή όπως λέμε σταθμούς βάσης χρησιμοποιούνται από τα small cells και καλύπτουν μικρές γεωγραφικές περιοχές ή μικρής απόστασης εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους. Έχουν ακριβώς τα ίδια χαρακτηριστικά με τους κλασικούς σταθμούς βάσης που λειτουργούν από τις εταιρείες τηλεπικοινωνιών εδώ και χρόνια. Χειρίζονται υψηλούς ρυθμούς δεδομένων για τις κινητές ευρυζωνικές συνδέσεις, για τους καταναλωτές του δικτύου και για το IoT, θεωρούνται ως υψηλής πυκνότητας συσκευές, χαμηλής ταχύτητας και χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας.

Τα small cells λειτουργούν όπως οι τεχνικές MIMO, όπως η διαμόρφωση δέσμης και τα κύματα χιλιοστών για μετάδοση. Σταθμοί μετάδοσης χαμηλής ισχύος έχουν την δυνατότητα να αναπτυχθούν χρησιμοποιώντας την ιδέα της μικρής κυψέλης. Επιπρόσθετα, οι μονάδες υλικού των small cells ελαττώνουν την πολυπλοκότητα, με αποτέλεσμα η εφαρμογή να είναι ταχύτερη και ευκολότερη. Οι συνδέσεις backhaul πραγματοποιούνται με οπτικές ίνες, καλώδια και μικροκύματα, κάνοντας τη διαμόρφωση λιγότερο περίπλοκη. Υπάρχουν τρεις τύποι μικρών κυψελών: τα femtocells, τα picocells και τα microcells, το καθένα χωρίζεται ανάλογα την διάκρισή του να βασίζεται στην κάλυψη και στον αριθμό των μεμονωμένων χρηστών που μπορεί να υποστηρίξει. Στην Εικόνα 17 βλέπουμε τα τρία είδη των Small Cells με κάποια από τα κύρια χαρακτηριστικά τους. [61]

Type of Small Cell	Coverage Radius	Indoor Outdoor	Transmit Power	Number of Users	Backhaul Type	Cost
Femtocells	30 - 165 ft 10 - 50 m	Indoor	100 mW 20 dBm	8 - 16	Wired, Fiber	Low
Picocells	330 - 820 ft 100 - 250 m	Indoor Outdoor	250 mW 24 dBm	32 - 64	Wired, Fiber	Low
Microcells	1600 - 8000 ft 500 - 2500 m	Outdoor	2000 - 5000 mW 33 - 37 dBm	200	Wired, Fiber, Microwave	Medium

Εικόνα 16. Τα χαρακτηριστικά των Small Cells

### **3.1.1.1 Femtocells**

Μικροί κινητοί σταθμοί βάσης για εφαρμογές σε οικιακό και εταιρικό επίπεδο που βοηθούν στο να επεκταθεί η κάλυψη του σήματος είναι τα Femtocells. Αυτά χρησιμοποιούνται κυρίως για την εκφόρτωση δικτύων όταν γίνεται συμφόρηση του δικτύου, για επέκταση της κάλυψης και για ενίσχυση της διείσδυσης των κτιρίων για τους εσωτερικούς καταναλωτές.

- Περιοχή κάλυψης: 10–50 μέτρα (εσωτερικός χώρος)
- 100 milliwatt
- Υποστηρίζει 8–16 χρήστες
- Backhaul: ενσύρματο, fiber
- Χαμηλό κόστος

Στις τηλεπικοινωνίες, ένα femtocell είναι ένας μικρός κυψελοειδής σταθμός βάσης χαμηλής κατανάλωσης. Τα τρέχοντα σχέδια συνήθως υποστηρίζουν τέσσερα έως οκτώ ταυτόχρονα ενεργά κινητά τηλέφωνα σε οικιακό περιβάλλον, ανάλογα με τον αριθμό έκδοσης και το υλικό του femtocell, και οκτώ έως δεκαέξι κινητά τηλέφωνα σε εταιρικές ρυθμίσεις. Τα femtocells επιτρέπουν στους MNO την επέκταση της κάλυψης των υπηρεσιών σε εσωτερικούς χώρους ή στο άκρο της κυψέλης, σε σημεία όπου η πρόσβαση θα ήταν περιορισμένη ή μη διαθέσιμη. Η μεγαλύτερη προσοχή δίνεται στην WCDMA τεχνολογία, παρόλα αυτά είναι εφαρμόσιμη σε όλα τα πρότυπα, συμπεριλαμβανομένων των λύσεων GSM, CDMA2000, TD-SCDMA, WiMAX και LTE.

Η βελτίωση στη κάλυψη και την ισχύ του σήματος, επωφελή τους καταναλωτές και τις μικρές επιχειρήσεις οι οποίες έχουν σταθερό και μόνιμο σταθμό βάσης στις εγκαταστάσεις τους. Με αποτέλεσμα κάποιο UE που βρίσκεται σχετικά κοντά στο femtocell, να καταναλώνει σημαντικά λιγότερη ενέργεια για την επικοινωνία μαζί του, αυξάνοντας έτσι τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας.

Για να μπορέσουν να έχουν ανταπόκριση στις απαιτήσεις της Ομοσπονδιακής Επιτροπής Επικοινωνιών, τα femtocells οφείλουν να παράγουν με υψηλή ακρίβεια σήματα συχνότητας. Το να μπορέσει να γίνεται αυτή η εκπομπή σε μόνιμη βάση αποτελεί μια σημαντική τεχνική πρόκληση. Αυτό αντιμετωπίζεται με το να χρησιμοποιεί ένα εξωτερικό σήμα μεγάλης ακρίβειας για τη συνεχή βαθμονόμηση του ταλαντωτή με σκοπό τη διασφάλιση της διατήρησης της ακρίβειάς του. Τεχνολογίες όπως το πρότυπο συγχρονισμού χρόνου IEEE 1588 μπορούν να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα αυτό. Επίσης, το Network Time Protocol (NTP) προσεγγίζει από κάποιους προγραμματιστές ως μια πιθανή λύση για την παροχή σταθερής συχνότητας. Τα macrocell χρησιμοποιούν σε συχνή βάση το GPS χρονισμό για να πραγματοποιήσουν τον συγχρονισμό του δικτύου. Αυτό θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί, αν και υπάρχουν ανησυχίες για το κόστος και τη δυσκολία εξασφάλισης καλής κάλυψης GPS.

### **3.1.1.2 Picocells**

Ένας άλλος τύπος τεχνολογίας μικρών κυψελών που κατά κύριο λόγο καλύπτει μια μικρή περιοχή όπως ένα κτίριο ή πιο πρόσφατα ένα αεροσκάφος είναι το picocell, το οποίο θεωρείται ως ένας μικρός κυψελοειδής σταθμός βάσης. Τα Picocells είναι εξαιρετικά για εφαρμογές σε γραφεία, νοσοκομεία, εμπορικά συγκροτήματα, σχολεία και πανεπιστήμια —

κυρίως για μικρές επιχειρήσεις για εκτεταμένη κάλυψη δικτύου και μεγάλη απόδοση δεδομένων.

- Περιοχή κάλυψης: 100–250 μέτρα (εσωτερικός χώρος)
- 250 milliwatt
- Υποστηρίζει 32–64 χρήστες
- Backhaul: ενσύρματο, fiber
- Χαμηλό κόστος

Στα κυψελωτά δίκτυα, τα picocells χρησιμοποιούνται συνήθως για να επεκτείνουν την κάλυψη σε εσωτερικούς χώρους όπου τα εξωτερικά σήματα δεν φτάνουν καλά ή για να προσθέσουν χωρητικότητα δικτύου σε περιοχές με πολύ πυκνή χρήση τηλεφώνου, όπως σιδηροδρομικούς σταθμούς ή στάδια. Τα Picocells καλύπτουν σε χωρητικότητα περιοχές που είναι ακριβό ή δύσκολο να γίνει η προσέγγιση τους, κάνοντας χρήση των macrocells.

Στα κυψελοειδή ασύρματα δίκτυα (π.χ. GSM), το picocell είναι μια χαμηλού κόστους, μικρή, σχετικά απλή μονάδα που κάνει σύνδεση με έναν ελεγκτή σταθμού βάσης (Base Station Controller - BSC). Πολλαπλά picocell συνδέονται σε κάθε BSC. Το BSC εκτελεί λειτουργίες διαχείρισης και παράδοσης πόρων του δικτύου και συγκεντρώνει δεδομένα που θα διαβιβαστούν στο κινητό κέντρο μεταγωγής (Mobile Switching Center - MSC) ή στον κόμβο υποστήριξης GPRS πύλης (Gateway GPRS Support Node - GGSN).

Η σύνδεση ανάμεσα στα picocell και του BSC κατά κύριο λόγο απαρτίζεται από μια καλωδίωση εντός του κτιρίου. Τα Picocells βελτιώνουν τη ροή δεδομένων για χρήστες κινητών και πετυχαίνουν την αύξηση της χωρητικότητας στο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας. Ειδικότερα, η ενσωμάτωση των picocells με macrocells σε ένα ετερογενή δίκτυο μειώνει τις απρόσκοπτες μεταβιβάσεις και την αυξημένη χωρητικότητα δεδομένων κινητής τηλεφωνίας. Τα Picocells λειτουργούν στις περισσότερες τεχνολογίες κινητής τηλεφωνίας, όπως π.χ. των GSM, CDMA, UMTS και LTE.

### **3.1.1.3      *Microcells***

Το microcell το οποίο εξυπηρετείται από έναν σταθμό βάσης με χαμηλή ισχύ που λειτουργεί σε μια περιορισμένη περιοχή όπως ξενοδοχεία, εμπορικά κέντρα, κόμβους μεταφορών ή μοναδικούς χώρους σε έξυπνες πόλεις. Ουσιαστικά είναι μια κυψέλη σε ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας. Έχει την δυνατότητα υποστήριξης περισσότερων σε αριθμό χρηστών σε μοναδικές γεωγραφικές περιοχές.

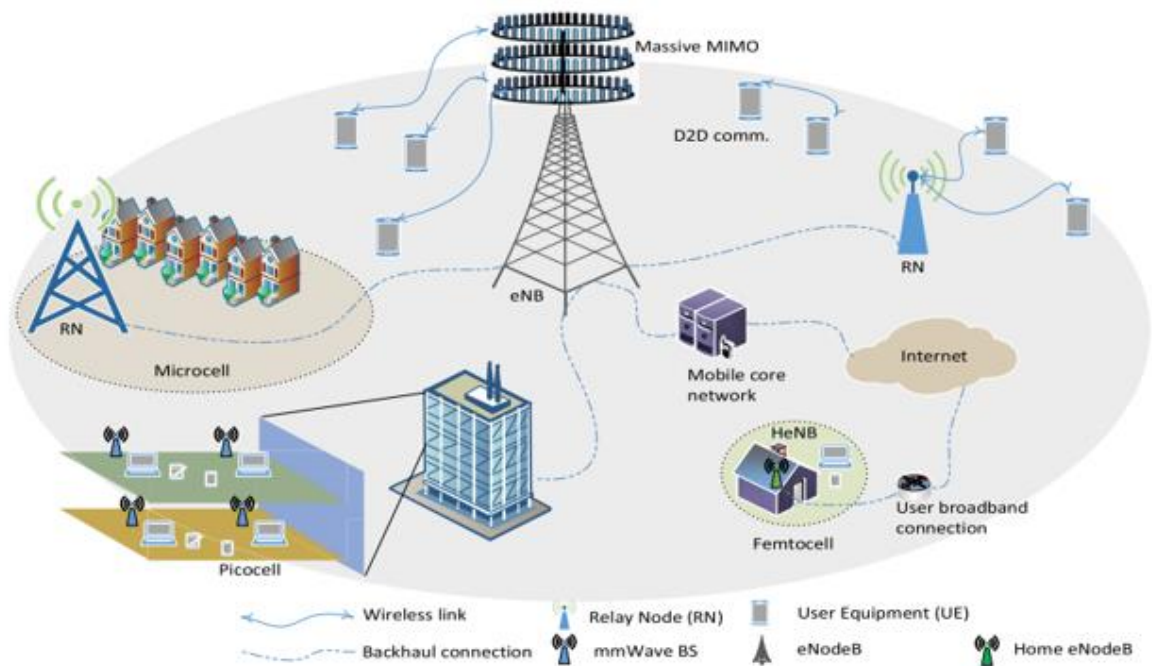
- Η περιοχή κάλυψης της συχνότητας του: 500 μέτρα–2,5 χιλιόμετρα
- Ισχύς: 2-5 watt
- Σύνδεση έως 200 ταυτόχρονοι χρήστες
- Backhaul: ενσύρματες ίνες, μικροκύματα
- Ακριβότερο από τα femtocells, picocells

Ένα microcell εξυπηρετείται από έναν κυψελοειδές σταθμό βάσης με χαμηλή ισχύ. Είναι κατά κύριο λόγο μεγαλύτερο από ένα picocell, αν και δεν ξεχωρίζονται πάντα εύκολα. Κάνει χρήση του ελέγχου ισχύος έτσι ώστε να περιορίσει την ακτίνα της περιοχής κάλυψης του. Συνήθως η εμβέλεια του είναι λιγότερη από τα δύο χιλιόμετρα πλάτος, σε σχέση με έναν τυπικό σταθμό βάσης που μπορεί να έχει εμβέλεια έως και 35 χιλιόμετρα. Ακριβώς όπως τα

picocells, έτσι και τα microcells έχουν την χρήση της προσθήκης χωρητικότητας στο δίκτυο σε περιοχές με πολύ πυκνή χρήση τηλεφώνου, π.χ. σιδηροδρομικοί σταθμοί. Υπάρχει συχνή ανάπτυξη τους κατά τη διάρκεια αθλητικών εκδηλώσεων και άλλων συμβάντων όπου είναι γνωστό ότι καθίσταται απαραίτητο η αύξηση της χωρητικότητας σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία εκ των προτέρων. Με τους ελέγχους ισχύος που αποδίδονται στα ψηφιακά δίκτυα παρουσιάζεται μείωση των παρεμβολών από κοντινές κυψέλες οι οποίες μεταδίδουν στις ίδιες συχνότητες. Με την ανάθεση πιο πολλών microcells και την καλύτερη κατανομή τους στο χώρο για να μπορέσουν να εξυπηρετηθούν οι περιοχές με υψηλή πυκνότητα, ο χειριστής δικτύου κινητής τηλεφωνίας βελτιστοποιεί το φάσμα και διασφαλίζει την αύξηση της χωρητικότητας. Τα συστήματα κινητής τηλεφωνίας, PHS και DECT, παρέχουν κάλυψη με microcells και picocells. Αυτά τα συστήματα λειτουργούν συνήθως για την παροχή συστημάτων κινητής τηλεφωνίας χαμηλού κόστους σε περιβάλλοντα με υψηλή πυκνότητα όπως οι μεγάλες πόλεις. Το PHS αναπτύσσεται σε μεγάλες πόλεις της Ιαπωνίας ως εναλλακτική λύση σε σχέση με τη συνηθισμένη υπηρεσία κινητής τηλεφωνίας. Το DECT χρησιμοποιείται σε πολλές επιχειρήσεις με σκοπό την ανάπτυξη ιδιωτικών μικροκυτταρικών δικτύων που λειτουργούν χωρίς άδεια σε μεγάλες πανεπιστημιούπολεις και στις οποίες δεν χρησιμοποιείται η ενσύρματη τηλεφωνική υπηρεσία. Χρησιμοποιείται επίσης ως ιδιωτικό, μη δικτυωμένο, ασύρματο τηλεφωνικό σύστημα όπου η χαμηλή ισχύς του διασφαλίζει ότι τα κοντινά συστήματα DECT δεν παρεμβαίνουν μεταξύ τους.

Με την έγκριση της πυκνοποίησης των microcells δικτύων, γίνεται εξυπηρέτηση περισσότερων χρηστών σε μια περιοχή που μοιράζεται το ίδιο φάσμα, δημιουργώντας με αυτό το τρόπο υψηλότερη SE. Μειώνεται επίσης η συνολική κατανάλωση ενέργειας των UE καθώς απαιτείται ελάχιστη μετάδοση ισχύος για την επικοινωνία με κοντινά small cells. Το δίκτυο των μικρών κυψελών έκανε την εμφάνιση του πρώτη φορά στο LTE Release 9, το οποίο λειτουργούσε με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και εφαρμόστηκε για τη χρήση σε μικρότερες περιοχές κάλυψης όπως σπίτια, γραφεία και εμπορικά κέντρα. Τα δίκτυα μικρών κυψελών κατηγοριοποιούνται σε τρεις κύριες κατηγορίες: femtocells, pico cells και relay nodes (RNs). Τα RN αναπτύσσονται από τις MNO στην άκρη ενός δικτύου κυψελών ή σε περιοχές νεκρών ζωνών, όπου η ισχύς σήματος από ένα δίκτυο macrocells είναι ασθενής ή μη διαθέσιμη. Η απόδοση και η κάλυψη βελτιώνονται μέσω των RN, και επιτυγχάνεται ισορροπία μεταξύ των χρηστών στην άκρη της κυψέλης και στο κέντρο της. Ο συνδυασμός των λειτουργιών του δικτύου ανάμεσα των μακροκυψελών και σε συνδυασμό με την πυκνή ανάπτυξη μικρών κυψελών ονομάζεται HetNet. **Ένα HetNet πολλαπλών επιπέδων ορίζεται ως οι διάφοροι τύποι δικτύων μικρών κυψελών και απεικονίζεται στην Εικόνα 18.** Το μελλοντικό HetNet 5G θα διαθέτει υψηλότερη πυκνότητα μέσω των small cells σε βαθμό που να υπάρχει ένα τέτοιο δίκτυο σε κάθε δωμάτιο ενός κτιρίου. Θεωρείται απαραίτητο έτσι ώστε να επιτευχθούν οι απαιτήσεις υψηλής χωρητικότητας και μαζικής συνδεσιμότητας για το 5G. Το HetNet θα εναρμονίζει πολλαπλές τεχνολογίες RAT όπως τα 2G, 3G, LTE-Advanced (LTE-A), WiFi και D2D για να γίνεται εύκολη υποστήριξη διαφόρων εφαρμογών. Θα διαχωρίσει τις τεχνολογίες εσωτερικού και εξωτερικού χώρου. Τα εσωτερικά δίκτυα μικρών κυψελών θα εφαρμόζουν την τεχνολογία των mmWave ενώ τα εξωτερικά θα κάνουν χρήση της Massive τεχνολογίας MIMO. Η Έκδοση 12 από το 3GPP έθεσε νέες τεχνολογίες στο 5G HetNet, όπως η δυνατότητα διπλής συνδεσιμότητας (Dual Connectivity - DC) που δίνει στους χρήστες τη δυνατότητα να συνδέονται τόσο σε δίκτυα macrocell όσο και σε δίκτυα small cells ταυτόχρονα. Κάνοντας χρήση τις ίδιες ή διαφορετικές φέρουσες συχνότητες. Το DC πρόκειται να βελτιώσει τον ρυθμό δεδομένων για HetNet συνολικά.





Εικόνα 17. Αρχιτεκτονική HetNet δικτύου

### 3.2 Διαχείριση Τηλεπικοινωνιακών Πόρων για ετερογενή 5G δίκτυα (HetNets)

Με τις μικτές τεχνολογίες στα HetNets, οι μελλοντικές κινητές συσκευές θα είναι εξοπλισμένες με πολλαπλές διεπαφές του τηλεπικοινωνιακού δικτύου επικοινωνίας για να μπορούν οι χρήστες να επωφελούνται από τις RAT τεχνολογίες και να εναλλάσσονται απρόσκοπτα μεταξύ των τεχνολογιών. Παρόλα αυτά, λαμβάνονται μέτρα προφύλαξης σχετικά με την εφαρμογή. Επιπλέον, με την ανάπτυξη μη συντονισμένων δικτύων femtocell από ιδιόκτητα κτίρια ή κατοικίες, η διαχείριση παρεμβολών του HetNets θα γίνει πιο περίπλοκη. Για παράδειγμα, ένας UE σε ένα HetNet μπορεί να λαμβάνει παρεμβολές από σταθμούς βάσης μακροκυψελών (MBS), UE και σταθμούς βάσης μικρών κυψελών (SBS) σε διαφορετική βαθμίδα. Θα υπάρξει επιδείνωση εφόσον το αναπτυγμένο femtocell BS κάνει χρήση του ίδιου φάσματος με το macrocell BS.

Λόγω της αύξησης της πυκνότητας των δικτύων των μικρών κυψελών και των τεχνολογιών πρόσβασης, η διαχείριση πόρων του δικτύου επικοινωνίας (Radio Resource Management - RRM) για τα μελλοντικά ετερογενή δίκτυα 5G θεωρούνται πολύ σημαντικά. Μια πρόσφατη έρευνα έδωσε έμφαση στη διαχείριση των πόρων, λαμβάνοντας υπόψιν τους την χρήση του φάσματος και τον μετριασμό των παρεμβολών. Οι επικοινωνίες οχήματος με όχημα (Vehicle to Vehicle - V2V) και η σύνδεση του τεράστιου αριθμού συσκευών IoT, οι οποίες θεωρούνται κρίσιμες εφαρμογές ελέγχου που συνδέονται με την επικοινωνία χαμηλής καθυστέρησης θα ενταχθούν μέσω του HetNet. Για την επίτευξη αυτών των απαιτήσεων, ορισμένες από τις βασικές τεχνολογίες που προσδιορίζονται στο πρωτόκολλο 5G περιλαμβάνουν μαζική υλοποίηση MIMO, μεταδόσεις mmWave, UDN και HetNets πολλαπλών επιπέδων.

### 3.2.1 Διαχείριση του τηλεπικοινωνιακού δικτύου στα HetNets

Το μέλλον των συστημάτων 5G αφορά τη μαζική συνδεσιμότητα, μεταξύ ανθρώπων μέσω του κυψελοειδούς δικτύου και μεταξύ εξοπλισμού, μηχανημάτων και οχημάτων που χρησιμοποιούν λειτουργίες IoT, V2V και M2M. Για να αντιμετωπιστούν οι απαιτήσεις αυτές, πρέπει να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικές τεχνικές διαχείρισης πόρων του δικτύου επικοινωνίας, ειδικά σε υπερπυκνά HetNets με πολλαπλούς RAT. Μια προσέγγιση όπου γίνεται διαχείριση των πόρων είναι με την εκτέλεση της ευέλικτης κατανομής των πόρων όπου διανέμονται δυναμικά με διαφορετικούς περιορισμούς, όπως η επίγνωση του QoS, η διεκπεραίωση του συστήματος και η ευαισθητοποίηση σχετικά με την ενέργεια. Οι συγγραφείς στην εργασία [62], αναλύουν τις πρόσφατες τεχνικές RRM με βάση των μηχανισμών που χρησιμοποιούνται και τις τοποθετούν σε κατηγορίες κάνοντας χρήση των μετρήσεων βελτιστοποίησης που εξετάζονται σε κάθε τεχνική.

#### 3.2.1.1 Κατανομή Πόρων

Η κατανομή πόρων είναι η διαδικασία με την οποία εκχωρούνται πόροι του δικτύου για χρήση για ασύρματες επικοινωνίες. Για την μεγιστοποίηση του όγκου των πληροφοριών οι οποίες μεταδίδονται επιτυχώς στους χρήστες σε ένα δίκτυο, σχεδιάστηκε η κατανομή των πόρων. Όμως, η παραδοσιακή τεχνική της κατανομής των πόρων δεν θα μπορέσει να καλύψει τις απαιτήσεις για τον μεγάλο όγκο δεδομένων που χρειάζονται για τις διάφορες εφαρμογές στις ασύρματες επικοινωνίες. Η σπανιότητα του φάσματος προϋποθέτει αποτελεσματική διαχείριση των πόρων. Σαν αποτέλεσμα, οι ερευνητές έχουν εφεύρει τεχνικές κατανομής πόρων για να βελτιστοποιηθούν οι μετρήσεις απόδοσης του συνολικού συστήματος, όπως η SE, η δικαιοσύνη, το QoS και το QoE.

##### 3.2.1.1.a Σύστημα Διαμόρφωσης

Η απόδοση του συστήματος ορίζεται ως το άθροισμα του ρυθμού δεδομένων τα οποία αποστέλλονται με επιτυχία σε όλες τις συσκευές ή στα τερματικά του δικτύου και μετριέται σε bit ανά δευτερόλεπτο (bps). Έγινε ταξινόμηση των χρηστών ανάλογα των απαιτήσεων του ρυθμού δεδομένων τους και πάρθηκε η απόφαση από τον ελεγκτή για το μέγεθος του εύρους ζώνης που θα ενδείκνυται να εκχωρηθεί σε κάθε χρήστη ανάλογα με τους διαθέσιμους πόρους. Έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων με βάση των προσεγγίσεων που βασίζονται στην απληστία και τον καλύτερο λόγο θορύβου σήματος προς παρεμβολή (Signal to Interference Noise Ratio - SINR). Τα αποτελέσματα παρουσίασαν βελτιώσεις στον ρυθμό δεδομένων, τη χρήση εύρους ζώνης και τον λόγο αποκλεισμού. Μια ακόμα μέθοδος κατανομής πόρων συσχετίζοντας τους χρήστες με την κατανομή ισχύος προτάθηκε στο άρθρο [63] για να επιλυθεί το πρόβλημα της βελτιστοποίησης του δικτύου, το οποίο χωρίστηκε σε δύο υποπρόβλημα. Το πρώτο υποπρόβλημα λύθηκε κάνοντας διορθώσεις στην κατανομή ισχύος, στην συσχέτιση χρηστών και στην κατανομή πόρων. Κάνοντας χρήση της θεωρίας των γραφημάτων μέσω ενός ουγγρικού αλγορίθμου. Για το δεύτερο υποπρόβλημα, έγινε διόρθωση

της συσχέτισης χρήστη και της κατανομής των πόρων και μετρίασαν την κατανομή ισχύος κάνοντας χρήση της μεθόδου προσέγγισης της κυρτής συνάρτησης διαφοράς. Μέσω της τροποποιημένης διπλής μεθόδου Lagrange που χρησιμοποιήθηκε για τη μείωση της υπολογιστικής πολυπλοκότητάς τους, έγινε μια περαιτέρω απλοποίηση των παραπάνω. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η τεχνική αυτή βελτιώνει σημαντικά τη συνολική απόδοση του συστήματος.

Δύο τύποι κοινής κατανομής πόρων, τα κεντρικά και τα κατανεμημένα σχήματα, προτάθηκαν από τους συγγραφείς στο [41], ο οποίος συνδύασε την κατανομή πόρων, τη συσχέτιση χρηστών και τη σχεδίαση πλαισίου σε ένα ασύρματο backhaul (WB) HetNet με το MIMO. Ο στόχος τους ήταν να μεγιστοποιήσουν τη διεκπεραίωση του συστήματος των χρηστών, με περιορισμούς τόσο από τη δικαιοσύνη όσο και από τον ρυθμό δεδομένων WB. Η κεντρική επαναληπτική μέθοδος διαιρέθηκε σε δύο υποπροβλήματα: αρχικά, η συσχέτιση χρηστών επιλύθηκε κάνοντας χρήση μιας προσέγγισης επιπέδου κοπής. Δεύτερον, ο σχεδιασμός του κοινού πλαισίου και η κατανομή των πόρων επιλύθηκαν με μια προσέγγιση πρωταρχικής αποσύνθεσης. Και τα δύο υποπροβλήματα επιλύθηκαν επαναληπτικά μέχρι την κατάσταση σύγκλισής τους για να επιτευχθεί μια βέλτιστη λύση. Επιπλέον, προτάθηκε επίσης ένα σύστημα κατανεμημένης κατανομής με τη χρήση επαναλαμβανόμενων παιχνιδιών μεταξύ των χρηστών, το οποίο υποδείχθηκε ότι φτάνει στην ισορροπία Nash. Στο σύνολο του, το κεντρικό σύστημα είχε μεγαλύτερη απόδοση από ένα κατανεμημένο σύστημα. Το σύστημα όμως δημιούργησε μεγάλα γενικά έξοδα, κάτι που έκανε τη χρήση του μη ρεαλιστική σε ένα δίκτυο μεγάλης κλίμακας. Επιπρόσθετα, οι πόροι μεταξύ των WB και των SUE εισάγονται ορθογώνια. Σαν αποτέλεσμα, η SE μειώνεται όσο αυξάνεται ο αριθμός των χρηστών.

Μια άλλη εφαρμογή μιας προσέγγισης θεωρίας παιγνίων παρουσιάστηκε στην εργασία [64], όπου μια κοινή μέθοδος κατανομής πόρων και ισχύος σε μια συνάθροιση φορέα επέτρεψε την λειτουργία ενός HetNet. Οι συγγραφείς εργάστηκαν πάνω σε ένα ιεραρχικό παιχνίδι για να πραγματοποιήσουν την βελτιστοποίηση της ισχύος μετάδοσης και της κατανομής των πόρων των μη αδειοδοτημένων χρηστών (Unlicensed Users - UU) χρησιμοποιώντας τις στρατηγικές τιμολόγησης του διαχειριστή δικτύου. Ο τρόπος συνεργασίας των UUs πραγματοποιήθηκε μέσω ενός συνδυασμού σχηματισμού αλληλεπικαλυπτόμενων συνασπισμών (Overlapping Coalitions Form - OCF) και του παιχνιδιού Stackelberg. Σαν αποτέλεσμα έδειξαν, ότι η κατανομή ισχύος και πόρων παρέμενε σταθερή και το πλαίσιο της θα μπορούσε να έχει εφαρμογή σε ένα ευρύ φάσμα ρυθμίσεων δικτύου με πολλαπλά BS όπου οι φασματικοί πόροι μοιράζονται συνεργατικά. Το θέμα ήταν, ότι ο συνδυασμός παιχνιδιών OCF και Stackelberg δημιούργησε αύξηση της πολυπλοκότητας του συστήματος, δημιουργώντας μεγαλύτερο χρόνο επεξεργασίας. Ακόμα πρότεινε μια μέθοδο κατανομής πόρων για πολλούς χρήστες σε ένα cognitive HetNet για να μεγιστοποιήσει τη διεκπεραίωση του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη τις παρεμβολές μεταξύ επιπέδων και τον περιορισμό της ισχύος εκπομπής του μικρού mmWave BS, έτσι ώστε η επίδρασή του στο δίκτυο μακροκυβελών να είναι ανεκτή. Αυτά τα μικρά mmWave BS μοντελοποιήθηκαν ως δευτερεύοντες χρήστες για την ανίχνευση του αδρανούς φάσματος με τη μέθοδο συνεταιριστικής ανίχνευσης φάσματος και την πρόσβαση σε αυτό χρησιμοποιώντας την προσέγγιση υποστρώματος. Η βελτιστοποίηση επιλύθηκε κάνοντας χρήση της μεθόδου διπλής αποσύνθεσης Lagrange και το πόρισμα ήταν ότι ο αλγόριθμος μπορούσε να κάνει σύγκλιση στη βέλτιστη τιμή του σε έναν μικρό αριθμό επαναλήψεων.

Στην εργασία [65], προτάθηκε ένα κοινό πρόβλημα συσχέτισης χρηστών και κατανομής πόρων σε ένα multiband mmWave HetNet. Δύο περιπτώσεις, μονής και πολλαπλής ζώνης εξετάστηκαν για τον τύπο πρόσβασης μετάδοσης των UE. Για την πρώτη περίπτωση, το πρόβλημα της άρθρωσης βρήκε λύση μέσω του προσδιορισμού της κατανομής του κλάσματος χρόνου και έπειτα με την εύρεση της βέλτιστης συσχέτισης χρήστη και της κατανομής ισχύος με βάση τη διπλή αποσύνθεση Lagrange και τις μεθόδους Newton Raphson. Για τη μετάδοση των UE μέσω ενός mmWave πολλαπλών ζωνών, το πρόβλημα λύθηκε με τη χρήση της μεθόδου προσέγγισης της αλυσίδας Markov. Η προτεινόμενη εργασία έδειξε ότι οι UE είναι πιο πιθανό να εκπέμπουν χρησιμοποιώντας το σχήμα μιας ζώνης αντί του σχήματος πολλαπλών ζωνών όταν ο αριθμός των UE είναι υψηλός. Τα αποτελέσματα παρουσίασαν μια καλύτερη ισορροπία φορτίου και δικαιοσύνη μέσω της μετάδοσης των UE σε μία μόνο ζώνη.

### **3.2.1.1.β Φασματική Απόδοση**

Με στόχο τη βελτίωση της SE, οι συγγραφείς στο [66] πρότειναν μια τεχνική κατανομής χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο παιχνιδιών υβριδικής ομαδοποίησης ενώ μετριάζει τις παρεμβολές co-tier και cross-tier. Πρώτον, το πρόβλημα της ομαδοποίησης επιλύθηκε χρησιμοποιώντας τη μέγιστη περικοπή  $K$  στη θεωρία γραφημάτων με βάση το γράφημα παρεμβολής που δημιουργήθηκε από την επίδραση της παρεμβολής που εκτιμάται από τη μέθοδο περιφερειακής μέσης κατάστασης καναλιού (Regional Average Channel State - RACS). Έπειτα, με τον μηχανισμό του παιχνιδιού δημοπρασίας κατανεμήθηκαν οι πόροι για όλους τους χρήστες μέσα σε κάθε σύμπλεγμα, όπου η κεφαλή του συμπλέγματος θεωρούταν ο κύριος χρήστης και οι υπόλοιποι κόμβοι ήταν οι δευτερεύοντες χρήστες. Ο αλγόριθμος μείωσε τις παρεμβολές μεταξύ των επιπέδων και των συνεπιπέδων και αύξησε στιγμιαία την SE, χρησιμοποιώντας τις μεθόδους ομαδοποίησης και δημοπρασίας. Μέσω της μεθόδου αυτής πραγματοποιούνται με επιτυχία ζητήματα επαναχρησιμοποίησης της συχνότητας και της χαμηλής απόδοσης των μικρών κυψελών. Για να εξαλειφθούν και οι δύο τύποι παρεμβολών, οι χρήστες μικρών κυψελών και macrocell συμπεριλήφθηκαν στο ίδιο επίπεδο, το οποίο σημαίνει πως δεν ελήφθησαν υπόψη η προτεραιότητα και το QoS.

Στην εργασία [67], πρότειναν ένα πλαίσιο βασισμένο στη θεωρία παιγνίων συνασπισμού<sup>12</sup> για να αντιπροσωπεύει τη συνεργασία μικρών κυψελών, με τη μίσθωση φάσματος να χρησιμοποιείται ως μηχανισμός κινήτρων. Αναφέρθηκαν δύο σχήματα διαχείρισης πόρων, η ευθυγράμμιση των παρεμβολών με μίσθωση φάσματος (Interference Alignment with Spectrum Leasing - IASL) για τον μετριασμό των παρεμβολών συν-επιπέδων, κάνοντας χρήση της τεχνικής ευθυγράμμισης των παρεμβολών και της Εκφόρτωσης κυκλοφορίας με μίσθωση φάσματος (Traffic Offloading with Spectrum Leasing - TOSL) για την εξισορρόπηση του φορτίου. Αυτά τα δύο προγράμματα παρουσίασαν βελτίωση στα κέρδη απόδοσης σε σύγκριση με τα μη συνεργατικά προγράμματα. Ακόμα, το πλαίσιο που προτάθηκε μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε τεχνολογίες NOMA και γνωστικών τηλεπικοινωνιακών τεχνολογιών.

---

<sup>12</sup> Επικεντρώνεται στην πρόβλεψη των συνασπισμών που θα σχηματιστούν, των κοινών ενεργειών που αναλαμβάνουν οι ομάδες και των συλλογικών απολαβών που προκύπτουν. Είναι σε αντίθεση με την παραδοσιακή μη συνεργατική θεωρία παιγνίων που εστιάζει στην πρόβλεψη των ενεργειών και των κερδών των μεμονωμένων παικτών και στην ανάλυση των ισορροπιών του Nash.

## 3.3 Κατανομή Πόρων στα CRN (Cognitive Radio Network) δίκτυα

### 3.3.1 Εισαγωγή στα CRN.

Οι γνωστικές τεχνικές του δικτύου και συνεργατικής επικοινωνίας έχουν ενσωματωθεί στην αποτελεσματική χρήση των πόρων του δικτύου, την τελευταία δεκαετία. Το Cognitive Radio είναι μια τεχνολογία που έχει σκοπό τη βελτίωση της χρήσης του φάσματος συχνοτήτων. Το CR, με ένα εύρος ζώνης παλαιών συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας και με την ίδια συνολική ισχύ μπορεί να προκαλέσει αύξηση του ρυθμού δεδομένων του μελλοντικού συστήματος ασύρματης επικοινωνίας. Ο συνδυασμός CR με τη συνεργατική επικοινωνία βελτιώνει ακόμα παραπάνω τη μελλοντική απόδοση του ασύρματου δικτύου. Η κατανομή πόρων στο CRN ορίζεται ως απαραίτητη με σκοπό την αντιμετώπιση των προκλήσεων των μελλοντικών ασύρματων δικτύων [68].

### 3.3.2 Ορισμός του CRN και οι κύριες λειτουργίες του.

Το CR αλλάζει τις παραμέτρους του πομπού του με βάση την αλληλεπίδραση με το περιβάλλον του [69]. Προτείνεται κυρίως για τη αναβάθμιση της χρήσης του φάσματος αφήνοντας μη αδειοδοτημένους (δευτερεύοντες) χρήστες να κάνουν χρήση υποχρησιμοποιούμενων αδειοδοτημένων ζωνών συχνοτήτων. Οι ασύρματες συσκευές χωρίς άδεια (π.χ. ασύρματα τηλέφωνα) χρησιμοποιούνται ήδη.

Στο πλαίσιο του CR, η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών στις ΗΠΑ συνέστησε δύο συστήματα για την αποφυγή παρεμβολών στις τηλεοπτικές λειτουργίες λόγω δευτερευόντων χρηστών. Αυτά είναι τα σχήματα ακρόασης πριν από τη συζήτηση και γεωγραφικής τοποθεσίας/βάσης δεδομένων από την εργασία [69]. Στο σχήμα ακρόασης-πριν-ομιλίας, η δευτερεύουσα/χωρίς άδεια συσκευή ανιχνεύει την παρουσία σημάτων του κύριου χρήστη προκειμένου να επιλέξει τα κανάλια συχνότητας που δεν χρησιμοποιούνται. Σε μια γεωγραφική τοποθεσία ή αλλιώς μια βάση δεδομένων, οι αδειοδοτημένοι και χωρίς άδεια χρήστες έχουν μια συσκευή ανίχνευσης τοποθεσίας (π.χ. GPS). Γι' αυτό το λόγο, οι θέσεις των πρωτευόντων και δευτερευόντων χρηστών αποθηκεύονται σε μια κεντρική βάση δεδομένων. Ο κεντρικός ελεγκτής, γνωστός και ως διαχειριστής φάσματος, των δευτερευόντων χρηστών έχει πρόσβαση στη βάση δεδομένων της τοποθεσίας. Με το να γνωρίζει τις θέσεις του κύριου και του δευτερεύοντος χρήστη, ο κεντρικός ελεγκτής κάνει διαχείριση των πόρων του, με σκοπό την ελάχιστη παρεμβολή στους κύριους χρήστες.

Οι βασικές λειτουργίες του CR για να υποστηρίξει την έξυπνη και αποτελεσματική χρήση του φάσματος συχνοτήτων είναι οι εξής:

- **Ανίχνευση φάσματος.** Με την ανίχνευση του φάσματος καθορίζετε η κατάσταση του και η δραστηριότητα των πρωταρχικών χρηστών. Ένας έξυπνος γνωστικός πομποδέκτης του δικτύου επικοινωνίας κάνει ανίχνευση της οπής του φάσματος χωρίς την παρέμβαση του στους κύριους χρήστες. Οι οπές φάσματος οι οποίες δεν χρησιμοποιούνται από τους κύριους χρήστες, είναι οι ζώνες συχνοτήτων. Η ανίχνευση του φάσματος πραγματοποιείται με το κεντρικό είτε με το κατανομημένο

τρόπο. Έχει την ικανότητα να μειώνει την πολυπλοκότητα των δευτερευόντων τερματικών χρηστών, διότι ο κεντρικός ελεγκτής εφαρμόζει τη λειτουργία ανίχνευσης. Στην ανίχνευση κατανεμημένου φάσματος, κάθε φορητή συσκευή (τερματικό δευτερεύοντος χρήστη) εντοπίζει το φάσμα από μόνο του. Και η κεντρική και η κατανεμημένη λήψη αποφάσεων εφαρμόζονται στην ανίχνευση κατανεμημένου φάσματος. Ο κεντρικός ελεγκτής, βάσει των πληροφοριών της ανίχνευσης φάσματος, μοιράζει τους πόρους για να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά το διαθέσιμο φάσμα. Μια από τις σημαντικές λειτουργίες του κεντρικού ελεγκτή είναι η αποτροπή των επικαλυπτόμενων κοινών χρήσεων του φάσματος ανάμεσα στους δευτερεύοντες χρήστες.

- **Δυναμική πρόσβαση στο φάσμα.** Η δυναμική πρόσβαση φάσματος (Dynamic spectrum access - DSA) ορίζεται με το πως γίνεται η διαχείριση του φάσματος σε πραγματικό χρόνο σαν απόκριση στο μεταβαλλόμενο περιβάλλον του επικοινωνιακού δικτύου. Π.χ. προσθήκη ή αφαίρεση ορισμένων πρωταρχικών χρηστών, αλλαγή τοποθεσίας, περιορισμοί παρεμβολών, διαθέσιμα κανάλια. σύμφωνα με το άρθρο [69] υπάρχουν τρία μοντέλα DSA. Το μοντέλο αποκλειστικής χρήσης, το μοντέλο απλής χρήσης και το μοντέλο κοινής χρήσης. Το μοντέλο αποκλειστικής χρήσης προσεγγίζεται με δύο τρόπους, τα δικαιώματα της ιδιοκτησίας του φάσματος και τη δυναμική κατανομή του φάσματος. Στο πρώτο τρόπο, αυτός που του ανήκει το φάσμα το πουλάει και το εμπορεύεται και θεωρείται ελεύθερος στο να επιλέξει την τεχνολογία που τον συμφέρει. Με τον δεύτερο τρόπο, βελτιώνεται η αποτελεσματικότητα του φάσματος κάνοντας αξιοποίηση των χωρικών και χρονικών στατιστικών κινήσεων διαφορετικών υπηρεσιών. Το έργο DRiVE (Dynamic Radio for IP Services in Vehicular Environments - δυναμικό δίκτυο επικοινωνίας για υπηρεσίες IP σε περιβάλλοντα οχημάτων) που χρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση, θεωρείται ως ένα κλασικό παράδειγμα δυναμικής κατανομής του φάσματος. Κάνει χρήση τεχνολογιών κινητής τηλεφωνίας (π.χ. GSM, GPRS και UMTS) και τεχνολογιών εκπομπής (π.χ. DVBT, DAB) με σκοπό την επίτευξη υπηρεσιών πολυμέσων για οχήματα με αποδοτικό φάσμα. Στο μοντέλο απλής χρήσης το φάσμα είναι προσβάσιμο σε όλους τους χρήστες. Η ζώνη ISM (βιομηχανική, επιστημονική και ιατρική) και το Wi-Fi είναι παραδείγματα του μοντέλου κοινής χρήσης. Χρησιμοποιεί τις προσεγγίσεις υποστρώματος και επικάλυψης του φάσματος. Επίσης, οι δευτερεύοντες χρήστες αναλύουν αρχικά το φάσμα και εντοπίζουν τη θέση μιας οπής φάσματος (κενή ζώνη συχνοτήτων). Αφού γίνει ο εντοπισμός των κενών ζωνών συχνοτήτων, οι δευτερεύοντες χρήστες αρχίζουν την εκπομπή σε αυτές τις ζώνες. Στην τεχνική του υποστρώματος φάσματος, οι δευτερεύοντες χρήστες έχουν την δυνατότητα να μεταδίδουν στις ζώνες συχνοτήτων που λειτουργούν από τους κύριους χρήστες, με τον όρο πως δεν θα δημιουργούν παρεμβολές για τους κύριους χρήστες. Η προσέγγιση αυτή δεν προϋποθέτει από τους δευτερεύοντες χρήστες να εκτελούν την ανίχνευση φάσματος. Ωστόσο, η παρεμβολή που προκαλείται από τη μετάδοση του δευτερεύοντος χρήστη δεν πρέπει να υπερβαίνει το όριο παρεμβολής.

### 3.3.3 Συνεργατική επικοινωνία.

Στο CRN επόμενης γενιάς η συνεργασία έχει σημαντικό ρόλο για την επίτευξη υψηλής απόδοσης, παρέχοντας τα μέσα για τις ασύρματες συσκευές χαμηλής κατανάλωσης. Μέσω της ποικιλομορφίας του χρόνου και του χώρου βελτιώνει την απόδοσή του. Τα πλεονεκτήματα της συνεργατικής επικοινωνίας στο CRN, σύμφωνα με τους συγγραφείς των [70],[71], είναι η χαμηλή ισχύ μετάδοσης, η υψηλότερη ενεργειακή απόδοση, η χαμηλή παρεμβολή στο πρωτεύον δίκτυο και η καλύτερη κάλυψη του δικτύου. Η συνεργασία στο CRN εισάγει επίσης ορισμένα μειονεκτήματα, π.χ. επιπλέον κίνηση relays και αύξηση της καθυστέρησης από άκρο σε άκρο. Η έρευνα για το CRN έδωσε έμφαση σε δύο τύπους συνεργασίας, στην αφοσιωμένη και στη δυναμική συνεργασία. Στην αποκλειστική συνεργασία, οι δευτερεύουσες συσκευές λειτουργούν ως RNs. Στη δυναμική συνεργασία, ο κάθε δευτερεύων χρήστης συνεργάζεται είτε με το πρωτεύον ή το δευτερεύον δίκτυο. Ο κύριος στόχος της συνεργασίας είναι η μεγιστοποίηση της απόδοσης με τη βοήθεια της συνεργασίας των χρηστών, της διαμόρφωσης δέσμης και της κατανομής ισχύος. Μια ενεργή συνεργασία ανάμεσα στους πρωτεύοντες και στους δευτερεύοντες χρήστες σε ένα ετερογενές ad-hoc<sup>13</sup> δίκτυο αναλύεται στο άρθρο [72]. Οι συγγραφείς προτείνουν ένα πρωτόκολλο συνεργασίας που επιτρέπει στους δευτερεύοντες χρήστες να αναμεταδίδουν σήματα από τους κύριους χρήστες με αντάλλαγμα κάποιο φάσμα. Αυτή η συνεργασία μεγιστοποιεί την SE του πρωτεύοντος χρήστη και την απόδοση των δευτερεύοντων χρηστών.

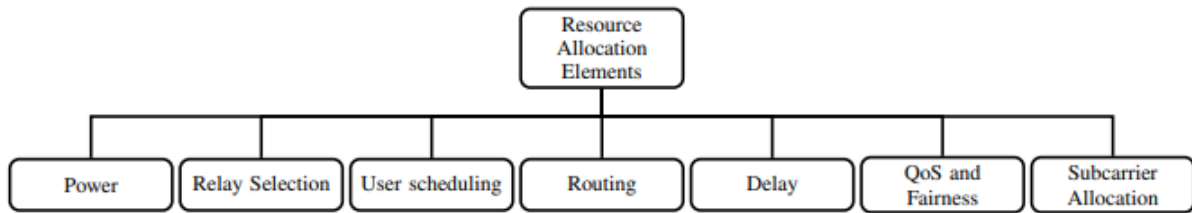
Στην εργασία [73], ο δευτερεύων πομπός του χρήστη αλλά και ο δέκτης συμμετέχουν στην αναμετάδοση των σημάτων του κύριου χρήστη. Οι συγγραφείς καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι η προτεινόμενη εφαρμογή παρέχει εγγυημένη ποιότητα υπηρεσίας από ότι στις άμεσες μεταδόσεις χωρίς κάποιο συνεργατικό γνωστικό RN. Επιπρόσθετα, στο ίδιο έγγραφο παρουσιάζεται το uplink και downlink με τη χρήση υβριδικών συστημάτων κατανεμημένου ελέγχου με δύο στάδια τα οποία προϋποθέτουν αμυδρή συνεργασία μεταξύ του δευτερεύοντος και κύριου δικτύου χρηστών. Στο πρώτο στάδιο, εφαρμόζεται μια κατανομή κατανεμημένης ισχύος για να μεγιστοποιηθεί η κάλυψη του CR δικτύου. Ενώ στο δεύτερο στάδιο, γίνεται διερεύνηση της κεντρικής κατανομής των καναλιών για την μεγιστοποίηση της SE του δικτύου.

Οι συγγραφείς στο [74], παρουσίασαν το πρόβλημα ανίχνευσης φάσματος πολλαπλών καναλιών ως παιχνίδι σχηματισμού συνασπισμών. Στο πλαίσιο τους, ο συνασπισμός αντιστοιχεί στους δευτερεύοντες χρήστες για την ανίχνευση και την πρόσβαση σε ένα συγκεκριμένο κανάλι. Η λειτουργία συνασπισμού που προτάθηκε στο έγγραφο δίνει προσοχή στην ακρίβεια ανίχνευσης και την ενεργειακή απόδοση. Προτάθηκαν ακόμα, κάποιοι κατανεμημένοι αλγόριθμοι που μεγιστοποιούν τη συνολική σημασία του συνασπισμού του συνεταιριστικού CRN. Ένα μοντέλο κατανομής πόρων ροής προσανατολισμένο σε ομάδες στο συνεταιριστικό CRN παρουσιάζεται στην εργασία [75]. Το πείραμα τους δίνει έμφαση στην δομή και το μέγεθος του συμπλέγματος, την κατάσταση σύνδεσης καναλιού, τη ροή της κυκλοφορίας και την ύπαρξη της λύσης. Όλα αυτά εξαρτώνται από την ποσότητα της αναμεταδιδόμενης κίνησης.

---

<sup>13</sup> Είναι ένας αποκεντρωμένος τύπος ασύρματου δικτύου. Δεν εξαρτάται από κάποια υποδομή που υπάρχει στο δίκτυο, όπως οι δρομολογητές στα ενσύρματα δίκτυα. Ο κάθε κόμβος παίρνει μέρος στη διαδικασία δρομολόγησης αποστέλλοντας τα δεδομένα προς τους άλλους κόμβους, με αποτέλεσμα ο καθορισμός των κόμβων που προωθούν τα δεδομένα να γίνεται δυναμικά με βάση τη συνδεσιμότητα του δικτύου.

### 3.3.4 Κατανομή Πόρων



Εικόνα 18. Βασικά στοιχεία κατανομής πόρων

**Κατανομή ισχύος.** Το κλειδί όλων των ασύρματων δικτύων είναι η αποτελεσματική κατανομή ισχύος της πηγής και του RN. Στα συνεργατικά CRN, η αποτελεσματική κατανομή ισχύος πραγματοποιείται πιο δύσκολα από το μη γνωστικό ασύρματο δίκτυο. Τα παραδοσιακά σχήματα κατανομής ισχύος για τα μη γνωστικά συνεταιριστικά δίκτυα δεν λειτουργούν στο συνεταιριστικό CRN, καθώς προκαλούν παρεμβολές στο πρωτεύον δίκτυο. Στο συνεταιριστικό CRN, η κατανομή ισχύος γίνεται μέσω του περιορισμού της αποδεκτής παρεμβολής στους κύριους χρήστες.

**Εκχώρηση/επιλογή RN.** Η χρήση RN σε ένα CRN μπορεί να ωφεληθεί με δύο τρόπους. Αρχικά, αυξάνει τον ρυθμό μετάδοσης και, έπειτα, η χρήση RN μειώνει την συνολική ισχύ μετάδοσης των συστημάτων. Η χρήση RNs ταυτόχρονα αυξάνει παραπάνω την απόδοση του CR δικτύου. Ένα καλά σχεδιασμένο σχέδιο εισαγωγής πολλών RNs και κατανομής ισχύος θεωρείται χρήσιμο με δύο τρόπους. Καταρχήν, μειώνει τις παρεμβολές που δημιουργούνται στους κύριους χρήστες στο CRN πολλαπλών χρηστών και αυξάνει τη συνδεσιμότητα του ασύρματου δικτύου. Σε ένα σύστημα RNs, εάν κάποιο RN δεν λειτουργεί ή υπολειτουργεί, ο δέκτης λαμβάνει δεδομένα από διαφορετικά RN.

**Προγραμματισμός χρήστη.** Στο συνεταιριστικό CRN πολλών χρηστών, λόγω των περιορισμών των πόρων και των παρεμβολών, επιτυγχάνεται υψηλή απόδοση με τον προγραμματισμό των χρηστών με έξυπνο. Οι συνδυασμοί των χρηστών διαλέγουν την ομάδα με τους καλύτερους χρήστες σε κάθε χρονική υποδοχή για την μεγιστοποίηση της συνολικής απόδοσης. Η απαρίθμηση όλων των δυνατών συνδυασμών για να βρεθεί αυτός που δίνει την καλύτερη απόδοση είναι υπολογιστικά αναποτελεσματικός.

**Δρομολόγηση.** Με την αναβάθμιση των ad-hoc δικτύων, οι ερευνητές έδωσαν σημασία στις δυνατότητες του multi-hop CRN. Πρέπει οι αποτελεσματικές τεχνικές και λύσεις δρομολόγησης να ενσωματωθούν στο ad hoc συνεταιριστικό CRN.

**Ποιότητα εξυπηρέτησης (QoS).** Το QoS σχετίζεται με την ικανοποίηση των χρηστών και είναι ένας γενικός όρος που αναφέρεται σε πολλές απαιτήσεις. Συμπεριλαμβάνει απώλεια απόδοσης, χρόνο απόκρισης, διακοπές και πιθανότητες αποκλεισμού, απαιτήσεις ρυθμού. Ο κύριος λόγος του QoS στο CRN είναι η μείωση του jitter λανθάνουσας κατάστασης και των σφαλμάτων που αποστέλλουν τα πακέτα.

**Καθυστέρηση.** Είναι από τις πιο σημαντικές μετρήσεις σε οποιοδήποτε ασύρματο δίκτυο, ειδικά αν αφορούν εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο, όπως είναι η φωνή και τα πολυμέσα. Η καθυστέρηση στο συνεταιριστικό CRN δεν έχει διερευνηθεί όσο θα έπρεπε.

**Κατανομή υπομεταφορέα.** Η κατανομή και η σύζευξη υποφορέων παίζουν σημαντικό ρόλο στο μελλοντικό συνεταιριστικό CRN που χρησιμοποιεί το OFDM σε φυσικό



επίπεδο. Μπορεί να πραγματοποιηθεί αύξηση της απόδοσης του συνεταιριστικού CRN με την χρήση έξυπνων υποφορέων. **Τα βασικά στοιχεία για την κατανομή των πόρων παρουσιάζονται στην Εικόνα 19.**

Το Cooperative CRN μπορεί να λειτουργήσει είτε με κεντρικό είτε με κατακεντρωμένο τρόπο. Στο Cooperative CRN, σε έναν κεντρικό ελεγκτή όπως ο σταθμός βάσης πραγματοποιείται η διαχείριση του φάσματος. Στο Cooperative CRN, η ανίχνευση του φάσματος πραγματοποιείται σε κάθε δευτερεύοντα χρήστη και η απόφαση λαμβάνεται σε έναν κεντρικό ελεγκτή [69]. Το κατακεντρωμένο συνεταιριστικό CRN λειτουργεί με πολλούς τρόπους. Μπορεί να είναι ad hoc συνεταιριστικό CRN και μπορεί να είναι ένας κεντρικός συνεταιρισμός κοινής χρήσης φάσματος CRN με αποφάσεις ανίχνευσης κατακεντρωμένου φάσματος. Οι RNs λαμβάνουν τις δικές τους αποφάσεις με σκοπό την συνεργασία με στόχο την στρατηγική ανταμοιβής. Στο κατακεντρωμένο ad-hoc συνεταιριστικό CRN, ο κάθε δευτερεύων χρήστης θεωρείται υπεύθυνος για τη φασματική διαχείριση και την ανίχνευση του φάσματος. Σε κάποια ad-hoc συνεταιριστικά CRN, κάθε SU έχει την ικανότητα λειτουργίας ως RN για το δίκτυο του κύριου χρήστη.

Στο γενικό πρόβλημα της κατανομής των πόρων, οι παράμετροι και οι σταθερές εισόδου καταχωρούνται από τον διαχειριστή του δικτύου ή τις ρυθμιστικές αρχές. Στο συνεργατικό CRN, ο κεντρικός ελεγκτής έχει επίγνωση των δευτερευόντων χρηστών και τους ηλεκτρονόμους του δικτύου. Σε περίπτωση συνεργασίας πρωτογενούς και δευτερευόντος δικτύου, είναι πιθανό ο συνεταιριστικός κεντρικός ελεγκτής CRN να έχει πληροφορίες σχετικά με τον αριθμό των πρωταρχικών χρηστών και τις αντίστοιχες γεωγραφικές τοποθεσίες τους. Οι ρυθμιστικές αρχές ορίζουν το όριο παρεμβολής. Το ποσό του κατωφλίου της παρεμβολής βασίζεται από το καθεστώς κοινής χρήσης του φάσματος, με λίγα λόγια, από το υπόστρωμα ή την επικάλυψη του φάσματος. Το κατώφλι παρεμβολής υποστρώματος φάσματος είναι πιο μικρό από το υπόστρωμα της επικάλυψης του φάσματος. Τα κριτήρια επιλογής του πρωτοκόλλου συνεργασίας εξαρτώνται από τη φύση και τους περιορισμούς του ασύρματου δικτύου. Η γνώση των CSI θεωρείται μια σημαντική παράμετρος εισόδου για το πρωτόκολλο συνεργασίας. Οι πιο πολλοί από τους αλγόριθμους κατανομής πόρων θεωρούν ότι το CSI είναι γνωστό τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη [76].

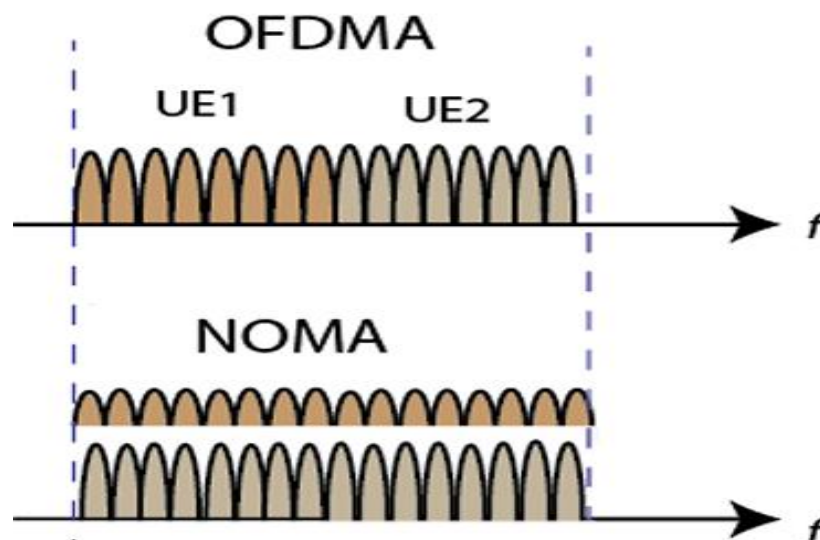
## **3.4 Κατανομή πόρων σε ετερογενή δίκτυα NOMA**

### **3.4.1 Εισαγωγή**

Η NOMA έχει προσελκύσει πολύ πρόσφατα την προσοχή λόγω της ικανότητάς της να βελτιώνει τη φασματική απόδοση του συστήματος στις ασύρματες επικοινωνίες. Λόγω των αμοιβαίων διασταυρούμενων παρεμβολών στα ετερογενή δίκτυα, νέες τεχνικές προκλήσεις που αφορούν την κατανομή πόρων εμφανίζονται από τα δίκτυα NOMA. Τα προγράμματα προγραμματισμού χρηστών που θεωρούνται αποδοτικά και ενεργειακά αλλά και η κατανομή ισχύος εντάσσονται στο ετερογενές δίκτυο downlink 5G NOMA για τις πληροφορίες κατάστασης τέλειων και ατελών καναλιών CSI αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του άρθρου [77] δείχνουν ότι τα σχήματα κατανομής πόρων μπορούν να

αυξήσουν σημαντικά την SE του ετερογενούς δικτύου 5G NOMA και για τις δύο περιπτώσεις τέλει CSI και ατελούς CSI

Με γνώμονα την ταχεία αύξηση του ασύρματου τερματικού εξοπλισμού και την ευρεία χρήση του κινητού Διαδικτύου, τα ετερογενή δίκτυα έχουν αναδειχθεί ως μία από τις πιο υποσχόμενες δικτυακές υποδομές για την παροχή υψηλής απόδοσης συστήματος και μεγάλη κάλυψη σεναρίων εσωτερικών χώρων και ακμών κυψέλης σε συστήματα ασύρματης επικοινωνίας 5G. Για τα ετερογενή δίκτυα, η επαναχρησιμοποίηση των ζωνών συχνοτήτων μέσα σε ένα microcell και ανάμεσα στα small cells είναι και πιο αποτελεσματική και βιώσιμη. Παρόλα αυτά, η παρεμβολή στα πολλαπλά επίπεδα υποβαθμίζει την ποιότητα της ασύρματης μετάδοσης. Το πλεονέκτημα του ετερογενούς δικτύου συνοδεύεται επίσης από ορισμένες θεμελιώδεις προκλήσεις σχετικά με τον μετριασμό παρεμβολών μεταξύ επιπέδων, οι οποίες έχουν μελετηθεί σε προηγούμενη έρευνα με ορισμένες τεχνικές, π.χ. τεχνική προκωδικοποίησης και διαχείριση πόρων. Στο έγγραφο [77], γίνεται εφαρμογή του NOMA με την τεχνολογία SIC σε ετερογενή δίκτυα με σκοπό να μειωθούν οι παρεμβολές μεταξύ των επιπέδων και να γίνει βελτίωση της SE του συστήματος μέσω της αναβάθμισης των πόρων. Στα ετερογενή δίκτυα OFDMA, η ζώνη συχνοτήτων χωρίζεται σε πολλές ζώνες υποσυχνοτήτων και οι χρήστες μέσω των macro και small cells εισχωρούνται σε ζώνες διαφορετικών υποσυχνοτήτων με σκοπό την αποφυγή των παρεμβολών μεταξύ των επιπέδων. Αντίθετα, στα ετερογενή δίκτυα NOMA, το SIC λειτουργεί στους δέκτες έτσι ώστε πολλοί χρήστες να εμπλέκονται στις ίδιες ζώνες υποσυχνότητας και οι χρήστες με υψηλότερο CSI να ακυρώνουν την παρεμβολή από τον χρήστη με χαμηλότερο CSI ο οποίος έχει πολυπλεχθεί στην ίδια υποσυχνότητα. Στην Εικόνα 20 παρουσιάζεται η διαφορά για το πως διανέμεται σε δύο χρήστες το φάσμα ανάμεσα στο OFDMA και στο NOMA.

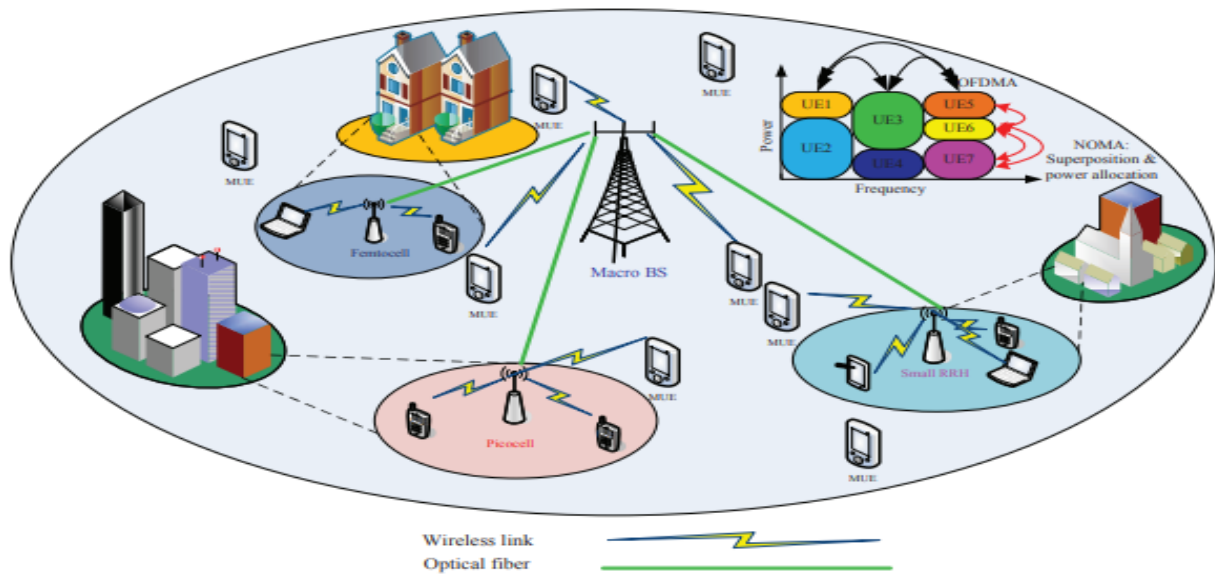


Εικόνα 19. Κοινή χρήση φάσματος για OFDMA και NOMA για δύο χρήστες.

### 3.4.2 Βελτιστοποίηση Πόρων για ετερογενή δίκτυα NOMA

Στα ετερογενή δίκτυα NOMA, το οποίο παρουσιάζεται στην Εικόνα 21, ένα macrocell με έναν BS επικαλύπτεται από πολλά μικρά κελιά όπου κάθε μικρό κελί εφαρμόζει την τεχνική NOMA. Σε αυτό το σύστημα, οι MUE και οι SUE μπορούν να εξυπηρετούνται

στην ίδια ζώνη υποσυχνότητων ταυτόχρονα για να επιτευχθεί υψηλή φασματική απόδοση. Το μοντέλο κοινής χρήσης στη ζώνη συχνότητας επικάλυψης υποδηλώνει ότι οι χρήστες που είναι συνδεδεμένοι σε ένα macrocell έχουν την δυνατότητα πρόσβασης στη ζώνη υποσυχνότητων με απόλυτη ελεύθερα και αποτελεσματικά με μόνη απαίτηση τον ελάχιστο ρυθμό δεδομένων που καθορίζεται από το QoS. Ένας υψηλότερος ρυθμός δεδομένων επιτυγχάνεται με το να καταναμηθεί περισσότερη ισχύς στους UE. Όμως, θα δημιουργήσει υψηλή κατανάλωση ενέργειας του UE. Επομένως, η αντιστάθμιση ανάμεσα στην βελτίωση του ρυθμού δεδομένων και της κατανάλωσης ενέργειας είναι μια αναπόφευκτη τάση στην επόμενη γενιά συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας [78].



Εικόνα 20. Ετερογενή Δίκτυο NOMA

### 3.4.3 Κατανομή πόρων για συστήματα NOMA Downlink

Το άρθρο [79] παρουσιάζει τις εξελίξεις στην κατανομή πόρων για συστήματα NOMA, εστιάζοντας στους αλγόριθμους ζευγοποίησης χρηστών (User Pairing - UP) και κατανομής ισχύος (Power Allocation - PA). Εκμεταλλεζόμενοι τη διαφορά κέρδους καναλιού ανάμεσα στους χρήστες, ο πρώτος αλγόριθμος καταφέρνει να ζευγαρώσει τους χρήστες με σκοπό να αποκτήσουν το υψηλότερο κέρδος χωρητικότητας. Ο δεύτερος αλγόριθμος κατανέμει την ισχύ στους χρήστες σε κάθε σύμπλεγμα έτσι ώστε να κάνει εξισορρόπηση της διεκπεραίωσης του συστήματος και της δικαιοσύνης των χρηστών.

Το NOMA δημιουργεί μια ισορροπία ανάμεσα στη φασματική απόδοση και την δικαιοσύνη των χρηστών, εφόσον είναι μια τεχνική πολλαπλής πρόσβασης για τα δίκτυα 5G. Το NOMA εκμεταλλεύεται τον τομέα της ισχύος για την εξυπηρέτηση πολλών χρηστών ταυτόχρονα, σε πολλά επίπεδα ισχύος, όπου η κατανομή ισχύος για κάθε χρήστη συμβάλει στον καθορισμό της συνολικής απόδοσης του συστήματος. Το Downlink NOMA ενώνει την κωδικοποίηση υπέρθεσης στο σταθμό βάσης και την αποκωδικοποίηση του SIC στο χρήστη. Για να διατηρηθεί η δικαιοσύνη των χρηστών, το NOMA εισάγει παραπάνω ισχύ στους χρήστες με ασθενέστερα κέρδη καναλιών. Λόγω της πρόσθετης επιβάρυνσης συστήματος για τον συντονισμό της ανάδρασης καναλιού και τη διάδοση σφαλμάτων, δεν είναι εφικτό να εφαρμοστεί το NOMA από κοινού σε όλους τους χρήστες. Συνεπώς, προκύπτει η ιδέα του

αλγόριθμου UP, όπου γίνεται διαίρεση των χρηστών στα κελιά σε πολλαπλά συμπλέγματα και σε κάθε σύμπλεγμα λειτουργεί το NOMA. Η απόδοση ενός συστήματος NOMA εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό τόσο από το UP όσο και από το PA. Το PA στο NOMA στοχεύει στον προσδιορισμό των χρηστών που θα αντιστοιχιστούν και της ισχύος που θα εκχωρηθεί σε κάθε χρήστη σε κάθε σύμπλεγμα. Κάνοντας μια εκτενή αναζήτηση όλων των πιθανών ζευγών των χρηστών και κατανέμοντας την ισχύ, μπορεί να επιτευχθεί η βέλτιστη απόδοση του NOMA PA, όπου θεωρείται υπολογιστικά πολύπλοκη. Περαιτέρω, εάν συσχετιστούν δυναμικά UP και PA, η σειρά αποκωδικοποίησης στις αναλογίες SIC και PA θα προσθέσει παραπάνω γενικά έξοδα σηματοδότησης.

### **3.4.3.1 Αλγόριθμος UP**

Με σκοπό την επίτευξη της επιθυμητής απόδοσης του συστήματος, την πολυπλοκότητα υλοποίησης και το περιβάλλον ανάπτυξης, χρησιμοποιούνται οι ανάλογοι αλγόριθμοι UP. Το UP στην ιδανική περίπτωση οφείλει να είναι συμβατό με τη στρατηγική PA για την παροχή υψηλής απόδοσης με αμελητέα υπολογιστική πολυπλοκότητα, κάνοντας διατήρηση της δικαιοσύνης των χρηστών. Οι αλγόριθμοι UP τόσο για το SISO όσο και για MIMO-NOMA εισάγονται ως εξής.

#### **A. UP στο SISO-NOMA**

Ο πιο εύκολος UP αλγόριθμος θεωρείται η τυχαία σύζευξη, όπου το BS κάνει την επιλογή των χρηστών τυχαία από ένα σύνολο υποψηφίων για τον σχηματισμό των συμπλεγμάτων. Παρατηρείτε χαμηλότερη απόδοση του αθροίσματος επειδή δεν λαμβάνει υπόψιν του τα κέρδη από τα κανάλια των χρηστών, παρόλο που έχει τη χαμηλότερη πολυπλοκότητα συστήματος. Επομένως, η σύνδεση του χρήστη που έχει το υψηλότερο κέρδος καναλιού με αυτήν του αντίστοιχου με το χαμηλότερο κέρδος προσφέρει την αποδοτικότερη SE, αντίθετα ο χρήστης του δεύτερου μεγαλύτερου κέρδους καναλιού συνδυάζεται με αυτόν του δεύτερου χαμηλότερου κέρδους καναλιού για την απόκτηση του δεύτερου καλύτερου κέρδους απόδοσης και ούτω καθεξής.

Ο επόμενος αλγόριθμος χαρακτηρίζεται ως ο αμέσως μεγαλύτερος αλγόριθμος UP με βάση τη διαφορά (NLUPA) και θεωρείται μια από τις πιο κοινές τεχνικές. Εν αντιθέσει με τον από πάνω αλγόριθμο, το NOMA παίρνει την ιδέα του CR και παντρεύει τον χρήστη με το υψηλότερο κέρδος καναλιού με τον χρήστη του δεύτερου υψηλότερου κέρδους καναλιού, τον χρήστη του τρίτου υψηλότερου κέρδους καναλιού με τον χρήστη του τέταρτου υψηλότερου κέρδους καναλιού και πάει λέγοντας, μέχρις ότου ο N-οστός χρήστης να εξυπηρετηθεί υπό την προϋπόθεση ότι το QoS του M-οστού χρήστη ( $n > m$ ) να είναι εγγυημένο. Ένας τέτοιος αλγόριθμος UP ονομάζεται ως το επόμενο καλύτερο ζεύγος ποικιλομορφίας. Το UP έχει την δυνατότητα να πραγματοποιήσει την ακύρωση των παρεμβολών των γειτονικών καναλιών κάνοντας χρήση της έννοιας του κάθετου UP όταν έχουμε εκχώρηση των γειτονικών υποκαναλιών σε διαδοχικά ζεύγη χρηστών. Επίσης, σε αυτόν τον αλγόριθμο, οι χρήστες κάθε συμπλέγματος εφαρμόζουν επιπλέον SIC για την ακύρωση των παρεμβολών από τα προηγούμενα συμπλέγματα.

#### **B. UP στο MIMO-NOMA**

Το UP στο MIMO-NOMA επηρεάζει το κέρδος του αθροίσματος. Παρατηρείται ότι σε ένα σύμπλεγμα δύο χρηστών το οποίο έχει μηδενική αναγκαστική προκωδικοποίηση, ο

αδύναμος χρήστης καναλιού δεν επιδρά στο ποσοστό του ισχυρού χρήστη. Σαν αποτέλεσμα, ο ισχυρός χρήστης θα είχε την δυνατότητα να επιλέξει πρώτος για τον σχηματισμό ενός συμπλέγματος. Έπειτα, θα επέλεγε ο αδύναμος χρήστης για να μπορέσει να βελτιωθεί η μέτρηση της απόδοσης. Η εν λόγω βελτιστοποίηση μπορεί συνήθως να επιτευχθεί με την ελαχιστοποίηση των παρεμβολών εντός και μεταξύ συστάδων. Εφόσον σχηματιστεί σύμπλεγμα δύο χρηστών, όπου τα κέρδη των καναλιών τους είναι εμφανή, αλλά υπάρχει υψηλή συσχέτιση μεταξύ του, έχουμε μείωση των παρεμβολών. Η αποτελεσματικότητα του NOMA διακρίνεται από τις μεγάλες διαφορές κέρδους των συμπλεγμάτων, και η συσχέτιση σε υψηλό βαθμό είναι βοηθός στην εξάλειψη της παρεμβολής μεταξύ των συστάδων. Εκτός από την προκωδικοποίηση μηδενικού εξαναγκασμού, τα κανάλια NOMA αξιοποιούνται για τη διαμόρφωση μιας νέας μορφής προκωδικοποίησης όπου ονομάζεται ως προκωδικοποίηση οιονεί υποβαθμισμένου καναλιού (Quasi Degraded Channel - QDC). Με την QDC, περιγράφεται ένας αλγόριθμος UP με χαμηλή πολυπλοκότητα όπου μειώνει την ισχύ της μετάδοσης. Ωστόσο, αυτό δεν είναι αποτελεσματικό όταν ο αριθμός των κεραιών εκπομπής στο BS είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των χρηστών κατερχόμενης ζεύξης. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος, υπάρχουν μερικές παραλλαγές, δηλαδή ο αλγόριθμος UP βάσει προβολής και ο αλγόριθμος UP που βασίζεται σε αντιστροφή. Τόσο ο μηδενικός εξαναγκασμός όσο και το MIMO-NOMA που βασίζεται σε προκωδικοποίηση QDC αντιμετωπίζουν προβλήματα μεγιστοποίησης ρυθμού αθροίσματος. Η ελάχιστη Ευκλείδεια απόσταση που είναι βασισμένη στην προκωδικοποίηση MIMO-NOMA, δίνει έμφαση στο να μειωθεί το ποσοστό του σφάλματος των συμβόλων (Symbol Error Rate - SER). Με βάση αυτή την προκωδικοποίηση, προτείνεται ένα ζεύγος αλγορίθμων UP για περαιτέρω μείωση του SER, δηλαδή οι αλγόριθμοι UP βάσει αριθμού συνθηκών και βασισμένοι σε ελάττωμα ορθογωνικότητας, στους οποίους οι βασικές ιδέες είναι ότι δύο χρήστες με μικρότερο αριθμό συνθηκών και μικρότερο ελάττωμα ορθογωνικότητας πρέπει να είναι ζευγαρωμένα, αντίστοιχα.

### Γ. Η έννοια του Divide-and-NLUPA

Γίνεται πρόταση ενός τροποποιημένου αλγορίθμου NLUPA, που αναφέρεται ως divide-and-NLUPA (D-NLUPA), για την εγγύηση ενός ελάχιστου ποσοστού κέρδους σε κάθε σύμπλεγμα, με σκοπό την εισαγωγή της έννοιας της δικαιοσύνης των συστάδων. Συνδέει τον χρήστη του καλύτερου κέρδους καναλιού με τον χρήστη του χειρότερου κέρδους καναλιού, του χρήστη του δεύτερου καλύτερου κέρδους καναλιού με τον χρήστη του δεύτερου χαμηλότερου κέρδους καναλιού και ούτω καθεξής. Το συνολικό κέρδος ρυθμού που επιτυγχάνεται από το NOMA σε σύγκριση με το OMA είναι λογαριθμικά ανάλογο με τα κέρδη των καναλιών των ισχυρών και αδύναμων χρηστών σε ένα σύμπλεγμα. Η διαφορά μεταξύ των κερδών των καναλιού διαμορφώνει το κέρδος της απόδοσης του συστήματος. Καθώς το εύρος αυξάνεται, η απόσταση αυξάνεται επίσης, αποφέροντας υψηλότερο κέρδος απόδοσης. Επομένως, είναι δυνατό να ληφθούν ορισμένα συμπλέγματα που στην πραγματικότητα δεν έχουν κανένα κέρδος αθροίσματος (το κέρδος είναι πολύ κοντά στο μηδέν). Για την εγγύηση ενός ελάχιστου κέρδους απόδοσης, προστίθεται το βήμα «διαίρεση» στο D-NLUPA, θέτοντας ένα ελάχιστο εύρος, κάνοντας αύξηση της αντίστοιχης ελάχιστης τιμής της απόστασης. Λόγω του βήματος αυτού, το σενάριο όπου οι συστάδες έχουν μηδενικό κέρδος κοντά στο μηδέν αποφεύγεται και κάθε σύμπλεγμα επιτυγχάνει ένα ελάχιστο κέρδος όπως έχει σχεδιαστεί. Η τιμή αυτού του ελάχιστου κέρδους εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο ανακατεύονται οι χρήστες στο στάδιο της διαίρεσης.

Για να συγκρίνουμε το κέρδος αθροίσματος του NLUPA και του D-NLUPA. Το στάδιο της «διαίρεσης» στο D-NLUPA εξασφαλίζει τη σύνδεση του χρήστη με τέτοιο τρόπο η ύπαρξη μιας ορισμένης ελάχιστης απόστασης ανάμεσα στους δύο χρήστες που σχηματίζουν ένα σύμπλεγμα να είναι εφικτή. Το D-NLUPA εξασφαλίζει ένα ελάχιστο κέρδος αθροίσματος για κάθε σύμπλεγμα, μέσω αυτής της ελάχιστης απόστασης,. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι περίπου το 50% των συστάδων που βασίζονται στο D-NLUPA παρουσιάζουν υψηλότερα κέρδη σε σύγκριση με το NLUPA, ενώ τα υπόλοιπα συμπλέγματα που βασίζονται στο DNLUPA αποκτούν χαμηλότερα κέρδη. Με το να ανακατανομηθούν τα κέρδη των συστάδων με ελεγχόμενο τρόπο, επιτυγχάνεται το πλεονέκτημα της δικαιοσύνης των συστάδων, και η συνολική απόδοση παραμένει ίδια τόσο για το NLUPA όσο και για το D-NLUPA. Επιπλέον, είναι αξιόλογο να ειπωθεί ότι η τυχαία σύζευξη αποκτά το μικρότερο αθροιστικό κέρδος.

### 3.5 Κατανομή πόρων για το 5G Radio Access Network (RAN)

Τα κινητά τηλέφωνα λειτουργούν μέσω ραδιοκυμάτων για την επικοινωνία τους, κάνοντας μετατροπή της φωνής και των δεδομένων σε ψηφιακά σήματα για την αποστολή τους ως ραδιοκύματα. Για πραγματοποιηθεί η σύνδεση του κινητού σε κάποιο δίκτυο ή στο διαδίκτυο, συνδέεται πρώτα μέσω ενός δικτύου RAN. Το RAN προσφέρει τηλεπικοινωνιακή πρόσβαση και διασφαλίζει τον συντονισμό των πόρων του δικτύου στις ασύρματες συσκευές. Οι συσκευές συνδέονται κατά κύριο λόγο σε ένα κυψελοειδές δίκτυο μέσω των τεχνολογιών LTE ή 5G NR. Τα τσιπ πυριτίου στο κεντρικό δίκτυο καθώς και ο UE ενισχύουν την ενεργοποίηση της λειτουργικότητας του RAN. [80]

Σήμερα, τα RAN μπορούν να υποστηρίξουν κεραιές MIMO, εύρη ζώνης ευρέος φάσματος, συνάθροιση φορέα πολλαπλών ζωνών και πολλά άλλα. Η εξέλιξη του RAN στο 5G δημιουργεί τεράστια απήχηση στις ασύρματες τεχνολογίες, συμπεριλαμβανομένης της ενεργοποίησης του Mobile Edge Computing (MEC) και του Network Slice. Το RAN συμβάλει επίσης στη χαμηλότερη καθυστέρηση που κάνει το 5G τόσο ισχυρό.

Ένα RAN ορίζεται ως ο συνδυασμός στοιχείων του τηλεπικοινωνιακού δικτύου που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία επικοινωνίας μεταξύ του εξοπλισμού χρήστη και του βασικού δικτύου. Παραδοσιακά, αυτό περιλαμβάνει στοιχεία σταθμού βάσης, ραδιόφωνα και κεραιές που παρέχουν κάλυψη κυψέλης σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Με την έλευση του 5G, η αρχιτεκτονική RAN έχει μεταμορφωθεί σε NFV, καθώς περισσότερη νοημοσύνη μετακινείται από τον πυρήνα προς την άκρη. Η καινοτομία 5G RAN επικεντρώνεται στην εξαιρετικά βελτιωμένη ταχύτητα και αξιοπιστία της μετάδοσης των mmWave. Οι Massive συστοιχίες κεραιών MIMO, η διαμόρφωση δέσμης και ο διαχωρισμός δικτύου είναι μεταξύ των καινοτομιών που επιτρέπουν τις περιπτώσεις χρήσης υψηλής χωρητικότητας και χαμηλής καθυστέρησης που σχετίζονται με το 5G NR. Ταυτόχρονα, ο διαχωρισμός και η εικονικοποίηση του RAN έχουν κάνει τις επιλογές ανάπτυξης πιο ευέλικτες σε αυτές τις αναδυόμενες υπηρεσίες 5G.

Το Virtualized RAN (vRAN) επιτρέπει την εκτέλεση συμβατικών λειτουργιών βασικής ζώνης χρησιμοποιώντας λογισμικό σε τυπικούς διακομιστές και όχι αποκλειστικό υλικό. Η εικονική αρχιτεκτονική RAN 5G διαχωρίζει τα επίπεδα ελέγχου και χρήστη, επιτρέποντας

υψηλά επίπεδα αυτοματισμού, ορατότητας και επεκτασιμότητας που δεν μπορούν να επιτευχθούν με RAN που βασίζεται στο υλικό.

Η αρχιτεκτονική Open RAN (O-RAN) βασίζεται στη διαλειτουργικότητα των στοιχείων RAN 5G χρησιμοποιώντας λογισμικό ανοιχτού κώδικα, υλικό λευκού κουτιού και ανοιχτές διεπαφές. Το παραδοσιακό μοντέλο RAN μίας πηγής μεταμορφώνεται σε ένα χωριστό τοπίο πολλών προμηθευτών καθώς το 5G O-RAN υπόσχεται βελτιωμένη απόδοση, καινοτομία και ανταγωνισμό. Η O-RAN Alliance ιδρύθηκε το 2018 από μια διαφορετική κοινοπραξία φορέων με κοινό στόχο την εξέλιξη των δικτύων RAN παγκοσμίως.

### 3.5.1 Αρχιτεκτονική του 5G RAN

Η εικονικοποίηση των παραδοσιακών στοιχείων RAN και η διάδοση της κεραίας μέσω του Massive MIMO και της ανάπτυξης μικρών κυψελών είναι από τα πιο ορατά χαρακτηριστικά της αρχιτεκτονικής 5G RAN. Οι λογικοί και φυσικοί διαχωρισμοί μεταξύ του επιπέδου χρήστη (User Plane - UP) και του επιπέδου ελέγχου (Control Plane - CP) καθιστούν επίσης το 5G RAN πιο προσαρμοστικό στις απαιτήσεις των υπηρεσιών. Το 3GPP συνεχίζει να αναπτύσσει προδιαγραφές, πυρήνα και αρχιτεκτονική δικτύων μεταφορών, τυποποιώντας τις νέες διεπαφές του 5G RAN.

Το NS και ο τεμαχισμός του 5G RAN χρησιμοποιούν τεχνολογία NFV για να επιτρέψουν σε πολλαπλά λογικά δίκτυα να λειτουργούν ταυτόχρονα και ανεξάρτητα σε ένα κοινό φυσικό δίκτυο. Οι περιπτώσεις χρήσης με διαφορετικές απαιτήσεις απόδοσης, καθυστέρησης και κάλυψης μπορούν να αντιμετωπιστούν πιο αποτελεσματικά με την κατανομή πόρων μεταξύ κάθετων χρηστών. Η τεχνολογία Beamforming χρησιμοποιεί αλγόριθμους επεξεργασίας σήματος για να καθορίσει την πιο αποτελεσματική διαδρομή μετάδοσης δεδομένων σε κάθε συσκευή από μια τεράστια συστοιχία MIMO. Η φάση και το πλάτος κάθε μεμονωμένης κεραίας βελτιστοποιούνται για να παράγουν συνολικά υψηλότερη κατευθυντική απολαβή. Ο εποικοδομητικός συνδυασμός πολλαπλών σημάτων βελτιώνει επίσης το εύρος ζώνης και την κάλυψη.

Η μη αυτόνομη λειτουργία 5G (Non Stand Alone - NSA) είναι ένα σημαντικό σταδιακό βήμα μεταξύ της αρχιτεκτονικής 4G και 5G. Όπως ορίζεται στην έκδοση 15 του 3GPP, η λειτουργία NSA<sup>14</sup> (Non-StandAlone) [81] χρησιμοποιεί την υπάρχουσα υποδομή LTE για να «αγκυρώσει» νέα στοιχεία 5G RAN. Η μη αυτόνομη λειτουργία δεν επιτρέπει την πλήρη απόδοση του 5G, αλλά αυξάνει το εύρος ζώνης πατώντας σε συχνότητες mmWave. Η αρχιτεκτονική της NSA εστιάζει επίσης στη διατήρηση της κινητικότητας LTE σε 5G και στην ελαχιστοποίηση του χρόνου διακοπής.

Με το O-RAN, το Massive MIMO, το NS και την αρχιτεκτονική 5G vRAN που προσθέτουν πολυπλοκότητα και ποικιλομορφία στο τοπίο RAN, τα εργαλεία και οι διαδικασίες δοκιμής του παρελθόντος δεν αρκούν πλέον. Το ευέλικτο RAN που επιτρέπει την επιτυχή συνύπαρξη περιπτώσεων χρήσης eMBB, URLLC και mMTC, παράγει επίσης ένα πολύ μεγαλύτερο σύνολο δοκιμών. Το ίδιο ισχύει για ένα οικοσύστημα O-RAN με έναν φαινομενικά απεριόριστο συνδυασμό προμηθευτών και στοιχείων RAN. Οι συστοιχίες

---

<sup>14</sup> Η NSA, όπως υποδηλώνει το όνομα, είναι μια υπηρεσία 5G που δεν «στέκεται μόνη της», αλλά είναι χτισμένη σε ένα υπάρχον δίκτυο 4G. Η SA (Stand Alone), από την άλλη πλευρά, επιτρέπει την εντελώς ανεξάρτητη λειτουργία μιας υπηρεσίας 5G χωρίς καμία αλληλεπίδραση με έναν υπάρχοντα πυρήνα 4G.

κεραιών 5G αυξάνουν την πυκνότητα ινών και σύνδεσης, καθιστώντας επιτακτική τη δοκιμή για τον εντοπισμό ελαττωμάτων ή θέσεων απώλειας ινών. Οι συχνότητες mmWave που επιτρέπουν κάθετες συνδέσεις υψηλής χωρητικότητας και χαμηλής καθυστέρησης οδηγούν επίσης σε υψηλότερο δυναμικό εύρος και απαιτήσεις Signal to noise Ratio (SNR) για την ανάλυση του φάσματος. Ενώ οι καινοτόμες τεχνικές διαμόρφωσης δέσμης ξεπερνούν τους περιορισμούς του δικτύου 5G πρόσβασης του δικτύου επικοινωνίας για τη βελτίωση της κάλυψης και του QoS, απαιτείται υψηλό επίπεδο πολυπλοκότητας δοκιμών για την εκτέλεση ακριβούς παρακολούθησης δέσμης και συνάθροισης καναλιών σε υψηλές συχνότητες.

Το Massive MIMO έχει αυξήσει την πυκνότητα της διάταξης κεραιών σε επίπεδο όπου οι θύρες σύνδεσης και οι παραδοσιακές δοκιμές με καλώδιο δεν είναι πλέον εφικτές. Αυτό έφερε νέα πρότυπα για τις δοκιμές 5G RAN Over The Air (OTA). Ο χρονισμός και ο συγχρονισμός είναι θεμελιώδη δομικά στοιχεία για όλα τα ασύρματα δίκτυα. Με τις διεπαφές 5G RAN που βασίζονται στην επικοινωνία TDD σε υψηλές συχνότητες, απαιτείται ακριβής δοκιμή OTA για την επικύρωση της μορφής πλαισίου TDD και την αποφυγή παρεμβολών μεταξύ κυψελών.

Το Multi MEC μεταφέρει τις εφαρμογές του δικτύου από τα κέντρα δεδομένων στην άκρη του, έτσι ώστε οι τελικοί χρήστες και οι συσκευές τους να βρίσκονται πιο κοντά σε αυτό. Τα δίκτυα οπτικών ινών, η υπολογιστική ισχύς και η εικονικοποίηση που επιτρέπουν το MEC αποκεντρώνουν επίσης τις λειτουργίες υλικού και λογισμικού, γεγονός που περιπλέκει τις πρακτικές δοκιμών, συντήρησης και παρακολούθησης.

Οι αλληλεπιδράσεις 4G/5G εισάγουν την πολυπλοκότητα των δοκιμών καθώς η μετάβαση μεταξύ ασύρματων γενεών εξελίσσεται αργά. Η συνύπαρξη με το 4G σε μη αυτόνομη λειτουργία δημιουργεί πιθανές παρεμβολές και ζητήματα μεταβίβασης που πρέπει να εξομοιωθούν στο εργαστήριο. Η αλληλεπίδραση και ο συγχρονισμός μεταξύ των επιπέδων 4G και 5G πρέπει επίσης να ελέγχονται διεξοδικά και να παρακολουθούνται επιτόπου.

Το τεράστιο IoT, το eMBB και το V2X (Vehicle to Everything) συγκαταλέγονται στις πολυάριθμες περιπτώσεις χρήσης 5G με μοναδικές απαιτήσεις απόδοσης για καθυστέρηση, πυκνότητα, εύρος ζώνης και ταχύτητα. Ενώ το NS και το NFV επιτρέπουν σε αυτούς τους κλάδους να λειτουργούν ανεξάρτητα, πρέπει επίσης να ελέγχονται και να παρακολουθούνται από άκρο σε άκρο για να επαληθεύεται η συμμόρφωση με το SLA<sup>15</sup> (Service Level Agreement).

Η επίτευξη της βέλτιστης απόδοσης απαιτεί συλλογή και ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο για να επαληθευτεί ότι οι προσδοκίες QoE<sup>16</sup> (Quality of Experience) ικανοποιούνται με συνέπεια. Το Vo5G (Voice Over 5G) θα συνεχίσει να αντικαθιστά τόσο το VoLTE<sup>17</sup> (Voice Over LTE) όσο και το Wi-Fi και οι εφαρμογές uRLLC, όπως η επικοινωνία μεταξύ οχήματος, καθιστούν τα αυστηρά πρότυπα καθυστέρησης καθοριστικής σημασίας για τη συμμόρφωση με το SLA. Καθώς η αρχιτεκτονική 5G RAN εξελίσσεται και οι μικρές κυψέλες, οι αυτονομίες του 5G και οι ιδιωτικές αναπτύξεις 5G πολλαπλασιάζονται, ο μακρύς κατάλογος των δοκιμαστικών προκλήσεων και ευκαιριών θα συνεχίσει να αυξάνεται. Με την

---

<sup>15</sup> Το SLA ορίζεται από το μέρος μιας σύμβασης και προσδιορίζει ποιες υπηρεσίες θα παρέχονται από έναν πάροχο υπηρεσιών και πιο θα είναι το απαιτούμενο επίπεδο για αυτές τις υπηρεσίες.

<sup>16</sup> Το QoE είναι το μέτρο των εμπειριών ενός πελάτη σε μια υπηρεσία.

<sup>17</sup> Συνδυάζει το 4G/LTE δίκτυο με τις υπηρεσίες φωνής, ώστε οι κλήσεις να πραγματοποιούνται μέσω του 4G δικτύου. Μεταφέρει τη φωνή πλέον σαν δεδομένα, όπως συμβαίνει κατά την περιήγηση στο διαδίκτυο.



ανάπτυξη επεκτάσιμων εργαλείων δοκιμής 5G RAN με δυνατότητα κλιμάκωσης, σχεδιασμένα να προσαρμόζονται στα πιο πρόσφατα πρότυπα 3GPP και αρχιτεκτονική RAN, έχει χαραχθεί μια μελλοντική πορεία προς τη δοκιμή και τη διασφάλιση του 5G RAN.

### 3.5.2 RAN Slicing

Η έννοια του NS, με πολλαπλά εικονικά δίκτυα που δημιουργούνται πάνω από μια κοινή φυσική υποδομή, είναι ένας κεντρικός πυλώνας της αρχιτεκτονικής 5G. Καθώς κάθε νέα περίπτωση χρήσης έχει τις δικές της απαιτήσεις απόδοσης, μια προσέγγιση που ταιριάζει σε όλους για το RAN δεν ισχύει πλέον. Όπως ένα σύγχρονο σύστημα μεταφοράς, η αρχιτεκτονική NS χρησιμοποιεί κοινές λωρίδες κυκλοφορίας μαζί με εξειδικευμένες λωρίδες προσαρμοσμένες στην ταχύτητα, τη χωρητικότητα και τους περιορισμούς του προϋπολογισμού του χρήστη. Απαιτείται μια προσέγγιση από άκρο σε άκρο (Edge to Edge - E2E) που επεκτείνεται στο RAN για να αξιοποιηθούν πλήρως οι δυνατότητες του NS.

Το 5G RAN slicing εφαρμόζει την εικονικοποίηση, την ενορχήστρωση με AI και τη βελτιστοποίηση πόρων που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία τμημάτων δικτύου στον πυρήνα του RAN. Για να επιτευχθεί αυτό, πρέπει να εφαρμοστεί εικονικοποιημένη, διαχωρισμένη αρχιτεκτονική RAN με ανοιχτά API και ευφυΐα ενσωματωμένα σε κάθε επίπεδο του RAN για να φέρει την ευφυΐα πιο κοντά στον χρήστη. Η ολοκλήρωση αυτής της μετάβασης E2E θα επιτρέψει την πιο αποτελεσματική παράδοση προηγμένων νέων περιπτώσεων χρήσης 5G. Ως προϋπόθεση για το τεμαχισμό του δικτύου 5G, το vRAN κερδίζει δυναμική μεταξύ των OEM, των παρόχων υπηρεσιών και των ενοποιητών συστημάτων στον κλάδο των τηλεπικοινωνιών. Καθώς το RAN γίνεται πιο εστιασμένο στο λογισμικό, η ικανότητα μίμησης του 5G vRAN και η βασική συμπεριφορά στο εργαστήριο γίνεται ανεκτίμητη.

Ο εξομοιωτής πυρήνα TeraVM παρέχει στους προγραμματιστές vRAN μια αξιόπιστη μέθοδο για να εκτελούν γρήγορα δοκιμές προτύπων 3GPP και να βελτιστοποιούν την επικύρωση. Το TeraVM-Virtualization επιτρέπει την εξομοίωση και τις μετρήσεις απόδοσης των ροών εφαρμογών τακτικής υπηρεσίας. Είναι μοναδικό καθώς είναι η μόνη διαθέσιμη δοκιμαστική λύση σήμερα που μπορεί να ενορχηστρωθεί σε ένα σύστημα NFV ως κανονικό VNF που επιτρέπει τη δοκιμή δεδομένων ως υπηρεσία για επικύρωση υπηρεσίας VNF. Οι δυνατότητες της πλατφόρμας περιλαμβάνουν πρότυπα διαμόρφωσης που βασίζονται στον ιστό για την απλοποίηση της παράδοσης δοκιμών και μια κεντρική βιβλιοθήκη δοκιμών που είναι προσβάσιμη σε όλους τους χρήστες [82].

### 3.5.3 Τεχνικές Κατανομής Πόρων

Σε μια ασύρματη επικοινωνία, πρέπει να κατανεύουμε με σύνεση ορισμένους διαθέσιμους πόρους, όπως χρονοθυρίδες, ισχύ μετάδοσης, ζώνη συχνοτήτων και κυματομορφές μετάδοσης ή κώδικες σε πολλαπλούς συνδέσμους παρεμβολής, ώστε να επιτύχουμε καλύτερη εκτέλεση πλαισίου, διασφαλίζοντας παράλληλα τη δικαιοσύνη και το QoS του χρήστη. Στο 5G του συστήματος ασύρματης επικοινωνίας παρέχει καλύτερη υπηρεσία κινητής τηλεφωνίας με βελτιωμένο QoS παντού. Με την πυκνή ανάπτυξη και τον

αυξανόμενο αριθμό των κόμβων στο δίκτυο, το RA και η διαχείριση των παρεμβολών καθίστανται τα σημαντικότερα ερευνητικά ζητήματα στα ετερογενή δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Σε αυτό, πρέπει να χρησιμοποιήσουμε αποτελεσματικά τους διαθέσιμους πόρους, γιατί το RA είναι πολύ σημαντικό στα μελλοντικά συστήματα ασύρματης επικοινωνίας (5G/6G).

Στα συστήματα 5G, παρέχεται παροχή ευρείας κάλυψης, βελτιωμένης φασματικής απόδοσης, εξαιρετικά αξιόπιστη επικοινωνία χαμηλής καθυστέρησης, μείωση της χρήσης ενέργειας, περισσότερος αριθμός συνδεδεμένων συσκευών, βελτιωμένη προσβασιμότητα και επίσης τεράστιους ρυθμούς δεδομένων από άποψη Gbps όλης της περιοχής κάλυψης κυψέλης. Το εύρος κάλυψης της κυψέλης, η συνολική χωρητικότητα λύσεις του αθροίσματος, η συνάθροιση φορέα, η διαμόρφωση υψηλότερου επιπέδου, η διαμόρφωση δέσμης και η πυκνή ανάπτυξη μικρών κυψελών προτείνονται για τα 5G. Χρησιμοποιώντας MIMO στο 5G, παρέχετε υψηλή απόδοση εύρους ζώνης και καλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας. Για την αύξηση περισσότερων κόμβων ή για τον εξοπλισμό IoT σε μια κυψέλη, παρέχεται περισσότερη κυκλοφοριακή συμφόρηση για την ικανοποίηση των απαιτήσεων των χρηστών. Το δίκτυο RAN cloud (C-RAN) εντάσσεται στην κινητή επικοινωνία του 5G, ο καλύτερος ισχυρός ελεγκτής νέφους (Cloud Controller - CC) στην αρχιτεκτονική δικτύου C-RAN έχει τις απομακρυσμένες μονάδες δικτύου (Remote Radio Units - RRU) και τις μονάδες ζώνης βάσης (Base Units - BBU). Απαιτούνται ορισμένες από τις ερευνητικές προκλήσεις όπως το mMTC, eMBB και uRLLC. Οι τύποι αυτών των υπηρεσιών μας οδηγούν στην εύρεση νέων RAN. Σε σύγκριση με το C-RAN, το F-RAN<sup>18</sup> (Fog RAN) [83] παρέχει το uRLLC.

Για να γίνει παράδοση μιας τεράστιας ποσότητας πληροφορίας από το UE στο σημείο πρόσβασης της “ομίχλης” χρειάζεται μεγάλο εύρος ζώνης και πολύ υψηλό φασματικό εύρος ζώνης βρίσκεται σε τηλεπικοινωνιακούς πόρους. Για την βελτιστοποίηση της φασματικής απόδοσης, απαιτείται χαμηλή καθυστέρηση και η δυνατότητα πολλαπλής πρόσβασης, το NOMA είναι μία από τις καλύτερες μεθόδους για την πραγματοποίηση αυτών [84]. Στο NOMA, το SIC χρησιμοποιείται στο F-AP για την διαχώριση των σημάτων διάφορων χρηστών. Ένα γεγονός είναι ότι το F-AP συνήθως δεν έχει αρκετή χωρητικότητα αποθήκευσης και υπολογιστικούς πόρους και μπορεί να μην ανταποκριθεί στις μεγάλης κλίμακας υπηρεσίες των χρηστών. Επομένως, η εφαρμογή του NOMA θα επηρεάσει το F-RAN. Η εφαρμογή του F-RAN με βάση την τεχνική NOMA RA αυξάνει το QoS και μειώνει τον λανθάνοντα χρόνο. Στο τμήμα πομπού και δέκτη του συστήματος NOMA, η διαδοχική ακύρωση παρεμβολών εφαρμόζεται στην πλευρά του δέκτη. Στο [85], τα χαρακτηριστικά ενός cloud κόμβου και οι υπηρεσίες του 5G προμηθεύονται από τις κοινές βέλτιστες λειτουργίες του Virtual Network Function (VNF).

Για να βελτιωθεί η απόδοση του συστήματος του χρησιμοποιούμενου αλγόριθμου προγραμματισμού πόρων επιπέδου, προτείνεται ένας αλγόριθμος προγραμματισμού επιπέδου τομής που βασίζεται στις απαιτήσεις της τεχνολογίας τεμαχισμού ασύρματου δικτύου και στον ορισμό λειτουργικών σεναρίων. Το VNF προσφέρει την καλύτερη χρήση των τηλεπικοινωνιακών πόρων και δημιουργεί τεράστιο κέρδος στο NS για τις επικοινωνίες του

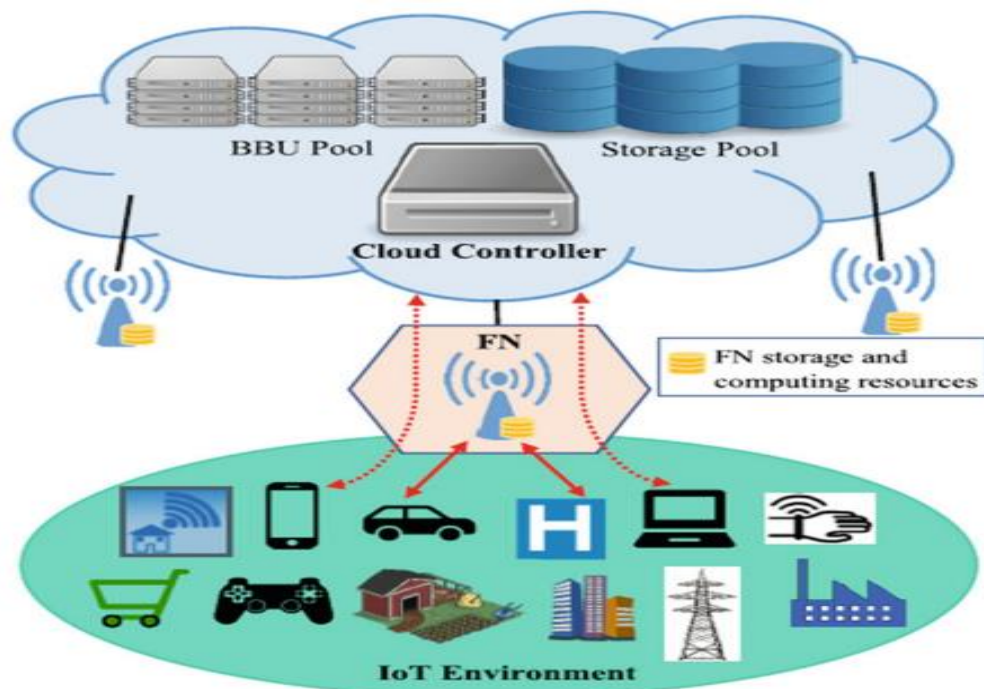
---

<sup>18</sup> Στα F-RAN, ένα επίπεδο υπολογιστικής ομίχλης σχηματίζεται στην άκρη των δικτύων και ένα μέρος των απαιτήσεων υπηρεσίας μπορεί να ανταποκριθεί τοπικά χωρίς να αλληλεπιδράσει με το κέντρο υπολογιστών νέφους μέσω των συνδέσεων fronthaul. Επομένως, εκμεταλλευόμενοι πλήρως την κατανομημένη προσωρινή αποθήκευση και την κεντρική επεξεργασία, τα F-RAN παρέχουν μεγάλη ευελιξία για την ικανοποίηση των απαιτήσεων ποιότητας υπηρεσίας διαφόρων σεναρίων 5G.

5G. Τα χαρακτηριστικά τεμαχισμού κάθε χρήστη και η προτεραιότητα της μεθόδου προγραμματισμού υπολογίζονται από τον αλγόριθμο PF (Proportional Fair) [86].

Οι διαφορετικές μέθοδοι κατανομής πόρων λαμβάνονται υπόψη από διάφορες υπάρχουσες πιθανές τεχνικές ή αλγόριθμους, όπως η ενισχυτική μάθηση (RL - Reinforcement Learning), η συνεργατική υπολογιστική ακμή, η διαδικασία απόφασης Markov (MDP - Markov Decision Process), ο μηχανισμός δέσμευσης πόρων, η κατανομή σταθερής ισχύος (FPA - Fixed Power Allocation), η κλασματική κατανομή ισχύος μετάδοσης (FTPA - Fractional Transmit Power Allocation), βελτιωμένη κατανομή ισχύος κλασματικής μετάδοσης (I-FTPA - Improved Fractional Transmit Power Allocation), μετάδοση μηνυμάτων (MP - Message Passing), σταθερή αντιστοίχιση (SM - Stable Matching), ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (ILP - Integer Linear Programming), αλγόριθμοι PF και μέθοδος κατανεμημένης δημοπρασίας επιτυγχάνουν την καλύτερη κατανομή των πόρων.

Στο έγγραφο [87], ο συγγραφέας χρησιμοποίησε ένα δίκτυο F-RAN, όπου η **αρχιτεκτονική του παρουσιάζεται στην Εικόνα 22**, η κατανομή των πόρων με βάση το RL μειώνει τις καθυστερήσεις. Στο F-RAN, το URLLC δεν θεωρείται παράγοντας μεγαλύτερης καθυστέρησης. Στο FN, το IoT προϋπόθετε χαμηλό λανθάνοντα χρόνο. Η διαδικασία MDP παρέχει μια επικοινωνία χαμηλής καθυστέρησης στο F-RAN. Το Q-learning, η μέθοδος Monte Carlo, η SARASA και η αναμενόμενη SARASA επιλύουν το πρόβλημα του MDP. Στόχος των εφαρμογών IoT σε ένα FN με τη χρήση MDP είναι η παροχή της υπηρεσίας σε έναν N αριθμό μπλοκ πόρων με τέλει συγχρονισμό. Το πρόβλημα στο MDP με FN είναι ότι μέσω του IoT, η υπηρεσία θα συνεχίσει την λειτουργία της ή θα τη σταματήσει.



Εικόνα 21. Αρχιτεκτονική F-RAN

### 3.5.3.1 Κατανομή Πόρων σε Υβριδικό C-RAN

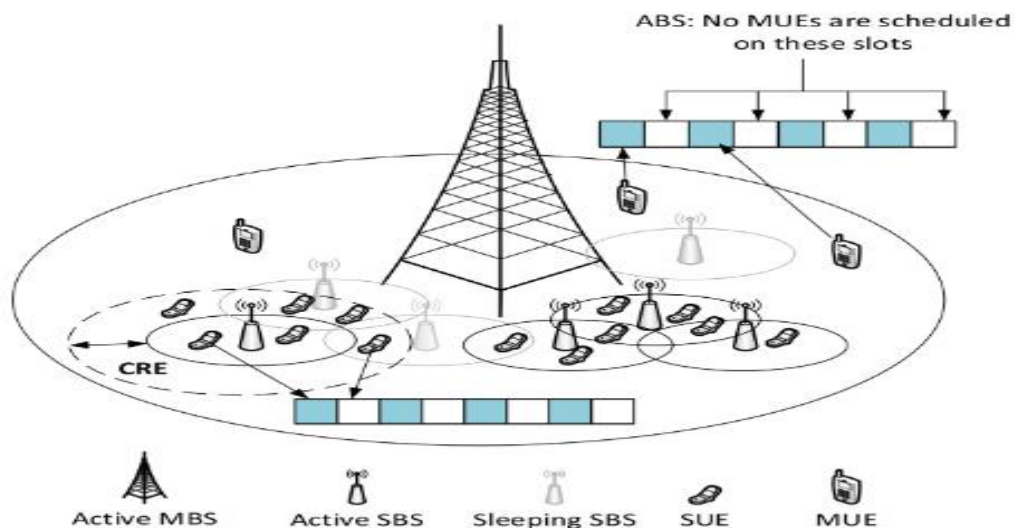
Στην εργασία [88], μια ένωση βέλτιστης διάταξης των λειτουργιών VNF και του RA σε ένα υβριδικό περιβάλλον cloud δίνει την απαίτηση ενός συστήματος επόμενης γενιάς του σημείου πρόσβασης cloud. Η σχέση μεταξύ των περιορισμών καθυστέρησης, των υπολογιστικών απαιτήσεων και του σχεδιασμού ενός ILP διαμορφώνουν ένα σταθερό σύστημα εκχώρησης. Απαιτείται ανάλυση του ελάχιστου υπολογιστικού ρυθμού για την εκπλήρωση κάθε ανάγκης VNF, με σταθερή εκχωρημένη άκρη ή κεντρικό σημείο πρόσβασης. Στο σημείο αυτό, κάνοντας χρήση των πληροφοριών, ο συγγραφέας οργανώνει έναν ακέραιο ILP που κάνει βελτιστοποίηση της χρήσης των VNF του νέφους. Το VNF εκπληρώνει τις ανάγκες χαμηλής καθυστέρησης με τον λιγότερο υπολογιστικό ρυθμό και οι υπολογιστικές του ανάγκες εξαρτώνται από το ότι βρίσκεται στο κοινό νέφος των γειτονικών VNF.

## 3.6 Κατανομή Πόρων στα OFDMA HetNets

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύετε το πρόβλημα κατανομής πόρων downlink σε ετερογενή δίκτυα OFDMA που αποτελούνται από macrocells και small cells που μοιράζονται την ίδια ζώνη συχνοτήτων. Το επίκεντρο αυτής της μελέτης είναι να δημιουργηθεί ένα ενεργειακά αποδοτικό σύστημα που επιτρέπει την κοινή πρόσβαση φάσματος σε μικρές κυψέλες, διασφαλίζοντας παράλληλα ένα ορισμένο επίπεδο ποιότητας υπηρεσιών για τους χρήστες μακροκυτταρικών κυψελών. Με την κατάσταση της αναστολής λειτουργίας των small cells μειώνεται η κατανάλωση ενέργειας και αυξάνεται η φασματική απόδοση. Στην εργασία [89], χρησιμοποιήθηκε ένας συνδυασμός γραμμικού δυαδικού ακέραιου προγραμματισμού και ευρετικού αλγόριθμου που βασίζεται στην προοδευτική ανάλυση. Επιπρόσθετα, πραγματοποιείται μια αναλυτική σύγκριση της κατανάλωσης ενέργειας του δικτύου με την δυνατότητα αναστολής και μη της λειτουργίας των κυψελών. Αποδεικνύεται μέσω του προτεινόμενου αλγορίθμου πως μειώνεται η κατανάλωση ενέργειας του δικτύου, αυξάνεται η φασματική απόδοση και πως επίσης ελαχιστοποιούνται οι παρεμβολές που προκαλούνται από τα small cells στους χρήστες που εξυπηρετούνται από τα macrocells.

Η μαζική ανάπτυξη μικρών κυψελών που επικαλύπτονται εντός της περιοχής μεγαλύτερων κυψελών εγείρει προκλήσεις σχετικά με την κοινή λειτουργία τους. Τα small cells που εξυπηρετούν τους συνδρομητές, οφείλουν να λειτουργούν σε μια αδειοδοτημένη ζώνη. Με γνώμονα ότι οι πόροι του φάσματος με άδεια είναι ακριβοί και σπάνιοι, οι χειριστές αναπτύσσουν τα small cells με τη λεγόμενη ανάπτυξη συν-καναλιού, κάνοντας επαναχρησιμοποίηση του διαθέσιμου φάσματος. Η κοινή χρήση της ζώνης συχνοτήτων μεταξύ των macrocell και των small cells μεγαλώνει το ICI εντός του δικτύου, το οποίο εάν δεν διαχειρίζεται μπορεί να επιδεινώσει σημαντικά τη συνολική απόδοση του δικτύου. Το πρόβλημα του ICI έχει απασχολήσει αρκετά το ερευνητικό πεδίο και εστιάζει καταρχήν στα ομογενή σενάρια μακροκυττάρων. Ωστόσο, οι έρευνες που έχουν σχεδιαστεί μόνο για ομοιογενή σενάρια, δεν μπορούν να ταιριάζουν απόλυτα σε δίκτυα με υποστρωμένες μακροκυψέλες και επικαλυμμένα πυκνά αναπτυγμένα SC. Η αιτία είναι πως οι κύριες παρεμβολές σε έναν χρήστη στο ομοιογενές σενάριο είναι σε περιορισμένο βαθμό και συνήθως δεν είναι τόσο ισχυρές όσο στο πυκνό σενάριο HetNet. Δεδομένου ότι τα small cells εξυπηρετούν λιγότερους χρήστες από ότι τα macrocell, θα κατανέμονται με περισσότερους πόρους εύρους ζώνης.

Λαμβάνοντας υπόψη την πυκνή ανάπτυξη των small cells που ανήκουν σε συνδρομητές, ενδέχεται να μην είναι επωφελείς όσον αφορά την ΕΕ, καθώς αυτές οι μικρές κυψέλες λειτουργούν όλες τις ώρες της ημέρας. Ακόμα κι αν δεν εξυπηρετούνται χρήστες, ένα σημαντικό ποσό της ενέργειας του κυκλώματος αντλείται από αυτούς τους κόμβους. Λαμβάνοντας υπόψη την μεγάλη ανάπτυξη των small cells και τις δυναμικές απαιτήσεις της κυκλοφορίας, οι λειτουργίες ύπνου αποτελούν μια λύση για να ξεπεραστεί η σπατάλη της ενέργειας σε περίπτωση που δεν χρησιμοποιούνται τα small cells. Ένα παράδειγμα της λειτουργίας αυτής παρουσιάζεται στην Εικόνα 23. Ένας κόμβος από small cells, εκτός από την πλήρη λειτουργία του, έχει και την κατάσταση αδράνειας. Η μετάβαση στην κατάσταση αδράνειας μειώνει σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας. Η κατάσταση ύπνου, όπου όλες σχεδόν οι μονάδες ενός small cells σταματούν να λειτουργούν, εξαρτώνται από ένα σταθερό χρονόμετρο. Ο χρονοδιακόπτης αυτός ρυθμίζεται χειροκίνητα για έναν στατιστικό κύκλο κυκλοφορίας, όταν η σύνδεση των UE στο δίκτυο είναι χαμηλή, δηλαδή κατά τη διάρκεια της νύχτας. Ένα μειονέκτημα ενός τέτοιου σχήματος είναι ότι δεδομένου ότι ο κύκλος της κατάστασης αδράνειας είναι στατικός και βασίζεται μόνο σε στατιστικά στοιχεία κυκλοφορίας, σε περίπτωση ασυνήθιστης δραστηριότητας η απόδοση του συστήματος ενδέχεται να υποβαθμιστεί ή να χρειαστεί να ρυθμιστεί ξανά με μη αυτόματο τρόπο.



Εικόνα 22. Σενάριο Ύπνου στα HetNets

Στην εργασία [90], χρησιμοποιείται το macrocell ομπρέλα για να καθοδηγήσουν τα SC να αλλάξουν την κατάσταση λειτουργίας τους, με βάση τα αναφερόμενα επίπεδα δραστηριότητας. Γίνεται μαθηματική διατύπωση του προβλήματος της βελτιστοποίησης και σε συναρτήσει με τους χρονικούς και υπολογιστικούς περιορισμούς του πρακτικού δικτύου πετυχαίνει τη λύση του προβλήματος βάσει ενός ευρετικού αλγορίθμου.

Το προτεινόμενο σχέδιο κατανομής πόρων με επίγνωση της κατανάλωσης ενέργειας (ECA – Energy Consumption Awareness) επιτυγχάνει ευρετικά τον στόχο που εκφράζεται στο πρόβλημα βελτιστοποίησης στο [91]. Στόχος είναι η διατήρηση της υπολογιστικής πολυπλοκότητας σε χαμηλά επίπεδα λαμβάνοντας υπόψη ένα πρακτικό δίκτυο.

Το σχήμα ECA λύνει στο πρώτο βήμα το πρόβλημα εκχώρησης RB χρησιμοποιώντας γραμμικό δυαδικό ακέραιο προγραμματισμό. Σκοπός είναι η καθοδήγηση των small cells με την αντίστοιχη παράμετρο σίγασης σε  $\varphi \sim n$ , προκειμένου να πραγματοποιηθεί το μέγιστο όριο

ανοχής της παρεμβολής για τα UE που εξυπηρετούνται από τα macrocells. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται σε μια τάξη χιλιοστών του δευτερολέπτου. Μόλις γίνει καθοδήγηση των small cells από την παράμετρο σίγασης, ο αλγόριθμος επεξεργάζεται την πιθανότητα απενεργοποίησης των μη χρησιμοποιούμενων small cells. Έτσι το macrocell υπολογίζει το άθροισμα της μέσης ζήτησης του ρυθμού των ημερομηνιών των MUEs τα οποία κυμαίνονται κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο. Εάν κυμαίνονται κάτω από αυτό το όριο, τα υποχρησιμοποιημένα SC μεταβαίνουν σε κατάσταση αναστολής λειτουργίας.

Γίνεται απλοποίηση της διαδικασίας συγκρίνοντας τον αριθμό των διαθέσιμων RB στο macrocell (τα RB που δεν χρησιμοποιούνται για την εξυπηρέτηση των MUE) με έναν ελάχιστο αριθμό κατωφλίου RB. Τώρα, με βάση την αναφερόμενη δραστηριότητα των SC, το πρόβλημα της κατάστασης ON/OFF επιλύεται με προοδευτικό τρόπο λαμβάνοντας υπόψη τα SC με τη χαμηλότερη χρήση στην αρχή. Οι συγγραφείς θεωρούν ότι ένα SC μπορεί να οδηγήσει σε χαμηλή χρήση εάν έχει πολύ χαμηλό φορτίο (εξυπηρετεί λίγους χρήστες με χαμηλή απαίτηση/περιορισμό μέσης τιμής δεδομένων) ή εάν έχει πολύ υψηλό παράγοντα σίγασης RB (προκαλώντας υψηλές παρεμβολές στους χρήστες macrocell). Εάν η χρήση RB πάνω από ένα ορισμένο ποσοστό της διαθέσιμης χωρητικότητας εντοπιστεί από το macrocell, αποσπά τα SUE με προοδευτικό τρόπο δίνοντας προτεραιότητα στα SUE με τις υψηλότερες απαιτήσεις μέσου ρυθμού δεδομένων. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσής του [91] υποδεικνύουν ξεκάθαρα ότι σχεδόν όλοι οι εξυπηρετούμενοι χρήστες macrocell προστατεύονται από παρεμβολές μεταξύ γειτονικών μικρών κυψελών.

### **3.7 Κατανομή Πόρων σε HetNets με downlink-uplink decoupled access**

Το HetNet 5G με αποσυνδεδεμένη στρατηγική συσχέτισης κυψελών downlink και uplink είναι μια πολλά υποσχόμενη λύση στις προκλήσεις που αντιμετωπίζει το HetNet 4G. Αυτό το κεφάλαιο αναλύει απόδοσης του σχήματος πρόσβασης 4G HetNet με συζευγμένο downlink και uplink (DUCo - downlink and uplink coupled) έναντι του 5G HetNet με αποσυνδεδεμένο downlink και uplink (DUDe - downlink and UL decoupled) που χρησιμοποιεί εξωτερική προσέγγιση και ευρετικούς αλγόριθμους. Πρώτον, ένα μαθηματικό πρόβλημα μεικτού ακέραιου μη γραμμικού προγραμματισμού (MINLP - Mixed Integer Nonlinear Programming), έχει διαμορφωθεί για την πρόσβαση DUCo και τα σχήματα πρόσβασης DUDe λαμβάνοντας υπόψη τη συσχέτιση κυψελών, την αντιμετώπιση ανισορροπιών κίνησης χρηστών, τον μετριασμό των παρεμβολών και τη μεγιστοποίηση αθροίσματος ρυθμού στο HetNet. Στη συνέχεια, το διατυπωμένο πρόβλημα ο συγγραφέας του [50] το λύνει, χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο εξωτερικής προσέγγισης (OAA - Outer Approximation Algorithm) για την εύρεση σχεδόν βέλτιστης λύσης. Με τον ίδιο τρόπο, πραγματοποιείται ανάπτυξη ευρετικών αλγορίθμων για την πρόσβαση DUCo και τα σχήματα πρόσβασης DUDe που αναλύουν τη συσχέτιση των κυψελών, τον μετριασμό των παρεμβολών, τη μεγιστοποίηση αθροίσματος ρυθμού και την αντιμετώπιση ανισορροπιών κίνησης χρηστών σε ένα HetNet. Με τη χρήση OAA και ευρετικών αλγορίθμων γίνεται μια λεπτομερής ανάλυση της απόδοσης των σχημάτων πρόσβασης DUCo και DUDe από τα αποτελέσματα που προέκυψαν. Ουσιαστικά έδειξαν, ότι το σχήμα πρόσβασης DUDe είναι ανώτερο από το σχήμα πρόσβασης DUCo σε ένα HetNet, σε σχέση με την συσχέτιση των κυψελών, μετριάζοντας τις παρεμβολές

και τη μεγιστοποίηση του αθροίσματος του ρυθμού και αντιμετωπίζοντας τις ανισορροπίες κίνησης των χρηστών.

Η ακραία πυκνότητα βελτίωσε την κάλυψη σε τυφλές περιοχές, βελτίωσε την χωρητικότητα για τους χρήστες που συνδέονται στα άκρα των κυψελών και αποφόρτισε τα macro BS, οδηγώντας τους χρήστες στο να συνδεθούν σε μικρά BS στο 4G HetNet. Τα 4G HetNets υιοθέτησαν σύστημα πρόσβασης DUCo όπου το MS συσχετίζεται με το ίδιο BS σε downlink και uplink βάσει του ισχυρότερου σήματος προς παρεμβολή συν το SINR σε downlink από macro BS και ποικιλία μικρών BS. Επειδή, παρατηρήθηκε τρομερή ανισότητα στο downlink μεταξύ των macro BS που έχουν υψηλή ισχύς σήματος και των μικρών BS τα οποία χαρακτηρίζονται από χαμηλότερη ισχύ, προτιμήθηκε από το MS να συνδεθεί σε ένα απομακρυσμένο macro BS με ισχυρότερο SINR αντί για κάποιο κοντινό μικρό BS. Επομένως, το MS που συσχετίστηκε με το macro BS θα έχει σημαντική παρεμβολή στο uplink σε κοντινά μικρά BS. Το σχήμα πρόσβασης DUCo δεν είναι το βέλτιστο στην τελική και υποβαθμίζει την απόδοση στο 4G DUCo HetNet.

Ως εκ τούτου, το HetNet 5G απαιτεί τη σύνδεση του MS με διαφορετικά BS στο downlink και uplink για να μετριάσει τις παρεμβολές στο uplink, να εξισορροπήσει το φορτίο κυκλοφορίας στο uplink και τη μεγιστοποίηση του αθροίσματος του ρυθμού. Επομένως, ένα νέο σχήμα κυψελών προτάθηκε, όπου τα MS μπορεί να συνδέονται με τα ίδια ή διαφορετικά BS (macro eNB, small eNB, Wi-Fi ή D2D) στο downlink και στο uplink του HetNet. Αυτό το καινοτόμο σχήμα συσχέτισης κυψελών ονομάστηκε σύστημα πρόσβασης αποσύνδεσης downlink και uplink (DUDe) και έχει δείξει την αύξηση της παραγωγικότητας του ρυθμού κατά 200 – 300% στα πυκνά HetNets.

Έχει γίνει παρουσίαση από τους ερευνητές διαφορετικών στρατηγικών συσχέτισης κυψελών με βάση το σχήμα πρόσβασης DUDe στο παρελθόν. Χρησιμοποιώντας τη θεωρία γραφημάτων και τον συγγρικό αλγόριθμο, πρότειναν τον αλγόριθμο συσχέτισης κελιών για την αύξηση του αθροίσματος του ρυθμού συστήματος και της εξισορρόπησης φορτίου κυκλοφορίας μεταξύ μακροεντολών BS και μικρού BS στο DUDe HetNets. Χρησιμοποιώντας εργαλεία από τη στοχαστική γεωμετρία, συσχέτισαν πιθανότητες κάλυψης ρυθμού για συσχέτισμό αποσυνδεδεμένων κυψελών downlink και uplink σε HetNet υπό την συχνότητα των 6 GHz-mmWave. Στόχοι όπως η μεγιστοποίηση του αθροίσματος του ρυθμού και η μέγιστη/ ελάχιστη δικαιοσύνη εξετάζονται, διερευνώντας την κατανομή πόρων και το σχηματισμό συμπλέγματος για μη ορθογώνια στρατηγική πολλαπλής πρόσβασης στα DUDe HetNets. Λαμβάνοντας υπόψη περιορισμούς όπως η χωρητικότητα οπισθοπορείας και το φορτίο κυψέλης, η στρατηγική συσχέτισης κυψελών διατυπώνεται, χρησιμοποιώντας δοκιμαστικό δίκτυο μικρών κυψελών της Vodafone. Χρησιμοποιώντας εργαλεία από τη στοχαστική γεωμετρία, εξήγαγαν την έκφραση για την πιθανότητα συσχέτισης για συσκευές σε αποσυνδεδεμένο HetNet και τον αντίκτυπό της στο κέρδος απόδοσης στο HetNet. Μελέτησαν τη συσχέτιση χρηστών σε μικρή κυψέλη κάτω των 6 GHz και μικρή κυψέλη mmWave στην περιοχή κάλυψης της μακροεντολής BS κάτω των 6 GHz χρησιμοποιώντας στρατηγική αποσυνδεδεμένης πρόσβασης downlink - uplink. Διερεύνησαν τη διπλή συνδεσιμότητα για όλους τους πιθανούς τρόπους πρόσβασης downlink και uplink Decoupled, προέκυψαν πιθανότητες συσχέτισης μετά την απλούστευση των συνθηκών συσχέτισης και εξήγαγαν πιθανότητες κάλυψης uplink χρησιμοποιώντας εργαλεία από στοχαστική γεωμετρία για την επίτευξη μέσης πιθανότητας κάλυψης uplink. Μέσω της συσχέτισης των κυψελών και με στόχο την μεγιστοποίηση της απόδοσης στο περιβάλλον DUDe HetNet, και με βάση την

ποιότητα του καναλιού σε μια δεδομένη χρονική θυρίδα, πρότειναν βέλτιστα κατανομημένα σχήματα δυναμικής διαίρεσης χρόνου σε σύστημα half duplex για την επιλογή της μετάδοσης downlink ή uplink.

Κάνοντας χρήση της μεθόδου OAA, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι χρησιμοποιώντας το σχήμα πρόσβασης DUDe σε σύγκριση με το σχήμα πρόσβασης DUCo στο HetNet, πιο πολλά MS συνδέονται στο δίκτυο. Το σχήμα πρόσβασης DUDe είχε καλύτερη απόδοση λόγω της ελευθερίας επιλογής που δόθηκε στα κράτη μέλη για συσχέτιση/προσάρτηση σε διαφορετικά BS με βάση το καλύτερο SINR στο downlink και το uplink στο HetNet. Το σχήμα πρόσβασης DUCo έχει όμως κακή απόδοση, για το λόγο ότι τα MS προσαρτώνται στο ίδιο BS με βάση το καλύτερο SINR στο downlink του HetNet. Επιπρόσθετα, παρουσιάζει ότι τα πιο πολλά MS προσαρτώνται σε macro eNB και σε σχέση με τα μικρά eNB, Wi-Fi και D2D στο downlink του HetNet. Κάνοντας χρήση της στρατηγικής πρόσβασης DUDe, οι ανισοροπίες της κυκλοφορίας των MS μεταξύ των κόμβων του HetNet στο downlink αντιμετωπίζονται.

### **3.8 Σχέδια κατανομής και αναμετάδοσης πόρων για URLLC**

Στο έγγραφο [92], αναπτύχθηκε ένα πλαίσιο για την κατανομή πόρων του δικτύου για την κίνηση URLLC σε περιπτώσεις χρήσης του 5G. Εξετάστηκαν δύο κατηγορίες περιπτώσεων χρήσης, ανάλογα με το προφίλ δημιουργίας κίνησης. Υπάρχει απαίτηση για την ατομική δέσμευση των πόρων, των πρώτων μεταδόσεων σε μια ντετερμινιστική παραγωγή πακέτων. Από την άλλη μια δεξαμενή πόρων δεσμεύεται να πραγματοποιήσει αναμεταδόσεις, προγραμματισμένες από το σταθμό βάσης. Όταν η κίνηση είναι σποραδική, επαρκεί ένα σχήμα που βασίζεται σε διαμάχες, όπου πολλά αντίγραφα κάθε πακέτου τοποθετούνται τυχαία σε διαφορετικούς πόρους προκειμένου να αυξηθεί η πιθανότητα επιτυχίας, παρά τις πιθανές συγκρούσεις. Και στις δύο περιπτώσεις, αντλήθηκαν αναλυτικές εκφράσεις για την αξιοπιστία και τις χρησιμοποιήσαν για να υπολογίσουν την ποσότητα των πόρων που απαιτούνται για την ικανοποίηση των στόχων αξιοπιστίας και καθυστέρησης. Για περιπτώσεις χρήσης που επιτρέπουν τη χρήση και των δύο σχημάτων, έδειξαν πώς να επιλέγουν μεταξύ μεμονωμένων κρατήσεων και συστημάτων που βασίζονται σε διαμάχες για τη χαμηλότερη δυνατή κατανάλωση πόρων.



## Κεφάλαιο 4. Επίλογος

### 4.1 Σύνοψη

Κλείνοντας την εργασία αυτή θα θέλαμε να συνοψίσουμε όλα τα παραπάνω κεφάλαια και να διατυπώσουμε μερικά χρήσιμα συμπεράσματα. Τα 5G δίκτυα αναπτύσσονται με γρήγορους ρυθμούς και η χρησιμοποίηση και η εγκατάσταση τους θα είναι άλλο ένα μέρος της καθημερινότητας μας πολύ σύντομα. Ο τρόπος που αλληλοεπιδρούμε με την τεχνολογία άλλαξε πολύ απότομα την τελευταία 2ετία και θα αλλάζει από δω και στο εξής ακόμα πιο γρήγορα. Οπότε θα πρέπει να συμμορφωνόμαστε με τις ήδη υπάρχουσες αλλαγές που ορίζονται αλλά και με τα νέα καινοτόμα πρότυπα της αγοράς και των αναγκών. Η ανάπτυξη της Πέμπτης Γενιάς δεν θα ήταν εφικτή χωρίς τις παλαιότερες γενιές δικτύων, που έθεσαν τις βάσεις και καθόρισαν τις παραμέτρους οι οποίες χρειαζόνταν βελτίωση για την αποδοτικότερη υλοποίηση των νεότερων δικτύων. Το 5G είναι εκείνο που έφερε την επανάσταση στο τομέα των δικτύων με τις καινοτόμες εφαρμογές που εισήγαγε, πλέον είμαστε όσο κοντά όσο ποτέ στην εποχή του ΙoT, των έξυπνων πόλεων και της βιομηχανικής αυτοματοποίησης. Για να μπορέσουν τα δίκτυα να προσφέρουν αυτές τις υπηρεσίες και να τις εναρμονιστούν με το περιβάλλον και τους καταναλωτές, κρίνεται επιτακτική η ανάγκη προσεκτικής μελέτης γύρω από τους πιο αποδοτικούς τρόπους για την κατανομή του φάσματος, στο υπάρχον διαθέσιμο φάσμα.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, ξεκινήσαμε κάνοντας μια ιστορική αναδρομή των δικτύων προηγούμενων γενιών μέχρι το σήμερα. Αναφέροντας κάποιες από τις βασικές τεχνικές και τεχνολογίες που χρησιμοποιήθηκαν και που μας επέτρεψαν στην ανάπτυξη ενός σύγχρονου και «έξυπνου» τηλεπικοινωνιακού δικτύου. Στη συνέχεια, κάναμε εισαγωγή του δικτύου της Πέμπτης Γενιάς, το πως και το πότε αναπτύχθηκε, τις λειτουργίες του, τις νέες τεχνολογίες που θα χρησιμοποιεί και την ικανότητα του να συνδυάζει και να εναρμονίζει τις ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες των δικτύων με τις οποίες θα διευκολύνει την καθημερινότητα μας, τις ανάγκες μας και την χρήση των ηλεκτρονικών συσκευών.

Με γνώμονα τα παραπάνω, και ως συνέχεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας διερευνήσαμε και αναλύσαμε το εύρος ζώνης που χρησιμοποιεί το 5G δίκτυο στο φάσμα των ραδιοσυχνοτήτων. Μέσω των τεχνικών της κοινής χρήσης του φάσματος καταφέραμε να το «μοιράσουμε» και να κάνουμε σωστή κατανομή των πόρων, με λίγα λόγια να το διαχειριστούμε για να επιτύχουμε καλύτερη φασματική απόδοση. Επίσης, αναφερθήκαμε στις τελευταίες τεχνολογίες και τεχνικές που διέπουν το 5G δίκτυο, τις χωρίσαμε σε κατηγορίες και σύμφωνα με τις μελέτες και τις εργασίες των ειδικών και των επιστημόνων προτείναμε αυτές που επιφέρουν καλύτερη φασματική απόδοση στο δίκτυο και ως αποτέλεσμα είχαν καλύτερα αποτελέσματα μεταξύ των χρηστών. Οι δυνατότητες που έχει το δίκτυο 5G είναι απεριόριστες και τα κράτη, οι φορείς και οι ρυθμιστικές αρχές θα πρέπει να δίνουν προτεραιότητα στις ευρυζωνικές υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας, πάνω από τη μεγιστοποίηση των εσόδων, κατά την ανάθεση των νέων συχνοτήτων, της κατανομής των πόρων και της ενεργειακής αποδοτικότητας. Με αυτό το τρόπο κάθε περιοχή ή ακόμα και κάθε χώρα θα βρίσκεται στην πρώτη γραμμή της καινοτομίας στο 5G δίκτυο και τα ευρυζωνικά δίκτυα θα έχουν τις βάσεις και τις αρχές για ακόμα μεγαλύτερη εξέλιξη και απόδοση στα επόμενα χρόνια.

## 4.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Τα δίκτυα έρχονται αντιμέτωπα με έναν συνεχώς αυξανόμενο αριθμό χρηστών που «τρέχουν» εφαρμογές που επιθυμούν ένα μεγάλο εύρος ζώνης χρησιμοποιώντας ένα ευρύ φάσμα συσκευών. Το ερευνητικό μέλλον θα είναι πιο απαιτητικό αλλά και πιο ενδιαφέρον. Τα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς δεν έχουν φτάσει ακόμα στην ακμή τους, στην πραγματικότητα η διαθεσιμότητα τους στο κοινό δεν έχει αξιοποιηθεί αφού η μετάβαση στη 5<sup>η</sup> γενιά δικτύων βρίσκεται ακόμα σε πρώιμο στάδιο. Οι δυνατότητες τους θα κορυφωθούν μέσα στην επόμενη πενταετία και οι έρευνες για την κατανομή των πόρων με στόχο την αύξηση της φασματικής αλλά και ενεργειακής απόδοσης όλο και πολλαπλασιάζονται και παρέχουν τρομερά νέα αποτελέσματα και τεχνικές για να πραγματοποιηθεί η αποδοτικότερη «μορφή» του ευρυζωνικού δικτύου. Για να καλυφθούν οι απαιτήσεις των 5G δικτύων, η τεχνολογία NOMA χαρακτηρίζεται ως η πλέον κατάλληλη. Οι δυνατότητες της εξυπηρετούν έναν μεγάλο αριθμό συσκευών, αυξάνοντας σε μεγάλο βαθμό την φασματική απόδοση και υποστηρίζοντας τη μαζική συνδεσιμότητα των δικτύων του IoT. Επίσης, η ανάπτυξη της τεχνολογίας μικρών κυψελών 5G είναι αναπόφευκτη και η επιστημονική κοινότητα θα επικεντρωθεί σε αυτή. Η αιτία είναι, πως τα σήματα mmWave, δεν μεταδίδονται σε μακρινές αποστάσεις και δεν έχουν την ικανότητα διείσδυσης ανάμεσα σε τοίχους ακόμα και σε δέντρα, ορίζοντας τα small cells την πηγή της κάλυψης τους. Επιπλέον, οι τεχνολογίες MIMO και mmWave παρέχουν ζωτικά μέσα για την επίλυση πολλών τεχνικών προκλήσεων και συμβάλλουν στην κατακόρυφη ανάπτυξη των HetNet. Επιπρόσθετα, μια άλλη τεχνική που θα εστιάσει η επιστημονική κοινότητα είναι το CR. Το CR σε συνδυασμό με ένα εύρος ζώνης παλαιών συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας και με την ίδια συνολική ισχύ μπορεί να προκαλέσει αύξηση του ρυθμού δεδομένων του μελλοντικού συστήματος ασύρματης επικοινωνίας. Η κατανομή πόρων στο CRN ορίζεται ως απαραίτητη με σκοπό την αντιμετώπιση των προκλήσεων των μελλοντικών ασύρματων δικτύων. Τέλος, είναι πιο συνετό στο να εστιάσουμε στην αρχιτεκτονική που έχει επίκεντρο τη συσκευή και στην ευφυΐα της συσκευής, έτσι ώστε να πραγματοποιηθούν οι υψηλές απαιτήσεις της φασματικής απόδοσης που έχει θέσει το 5G. Η D2D επικοινωνία σχηματίζει ζεύγη D2D μεταξύ των κοντινών χρηστών και τους επιτρέπει να επικοινωνούν απευθείας χωρίς να συνδέονται σε σταθμούς βάσης ή στο κεντρικό δίκτυο, αναβαθμίζοντας την ποιότητα μετάδοσης αφού η απόσταση της μετάδοσης έχει μειωθεί. Η σύνδεση των Small Cells με το D2D και του ετερογενούς φασματικού πόρου βελτιώνουν σημαντικά την απόδοση του δικτύου και την εμπειρία του χρήστη.

Υπάρχει ακόμα μεγαλύτερος χώρος για νέες τεχνικές και νέες τεχνολογίες αλλά και για την ανάπτυξη των ήδη υπαρχουσών. Με την αύξηση της δημοτικότητας των έξυπνων συσκευών από τους καταναλωτές αλλά και με την χρήση των τεχνολογιών και του διαδικτύου από μια αυξανόμενη μερίδα του κόσμου, οδηγούμαστε σε ακόμα περισσότερες νέες έρευνες που θα εστιάσουν στην κατανομή των πόρων αλλά και στη βελτίωση της φασματικής απόδοσης των δικτύων. Ακόμα και οι συσκευές που χρησιμοποιούμε θα αναβαθμιστούν και θα αλλάξουν. Τα τελευταία χρόνια για παράδειγμα, παρατηρήθηκε αύξηση στις φορητές συσκευές των οποίων οι λειτουργίες αναπληρώνουν σιγά σιγά αυτές των smartphone. Οι συσκευές αυτές είναι από φορητά ακουστικά μέχρι και εμφυτεύματα σώματος, τα οποία παίρνουν άμεσες αισθητηριακές εισόδους από ανθρώπινες αισθήσεις, οδηγώντας μας σε μια νέα γενιά δικτύων, τα δίκτυα Έκτης Γενιάς.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Bhushan, Naga, et al. "Network densification: the dominant theme for wireless evolution into 5G." *IEEE Communications Magazine* 52.2 (2014): 82-89.
- [2] Bhandari, Nikhil, Shivinder Devra, and Karamdeep Singh. "Evolution of cellular network: from 1G to 5G." *International Journal of Engineering and Techniques* 3.5 (2017): 98-105.
- [3] "2G – 3G Cellular Wireless data transport terminology", *Arc Electronics*<https://arcelect.com/2G-3G Cellular Wireless.htm>
- [4] Pereira, Vasco, and Tiago Sousa. "Evolution of Mobile Communications: from 1G to 4G." *Department of Informatics Engineering of the University of Coimbra, Portugal* 4 (2004): 20-0.
- [5] Vora, Lopa J. "Evolution of mobile generation technology: 1G to 5G and review of upcoming wireless technology 5G." *International journal of modern trends in engineering and research* 2.10 (2015): 281-290.
- [6] Rahnema, Moe. "Overview of the GSM system and protocol architecture." *IEEE Communications magazine* 31.4 (1993): 92-100.
- [7] Mondal, Sarmistha, Anindita Sinha, and Jayati Routh. "A survey on evolution of wireless generations 0G to 7G." *International Journal of Advance Research in Science and Engineering (IJARSE)* 1.2 (2015): 5-10.
- [8] <https://networksgr.blogspot.com/2012/08/qos-quality-of-service.html>
- [9] Astély, David, et al. "LTE: the evolution of mobile broadband." *IEEE Communications magazine* 47.4 (2009): 44-51.
- [10] Larmo, Anna, et al. "The LTE link-layer design." *IEEE Communications magazine* 47.4 (2009): 52-59.
- [11] Gawas, Anju Uttam. "An overview on evolution of mobile wireless communication networks: 1G-6G." *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication* 3.5 (2015): 3130-3133.
- [12] <https://www.3gpp.org/>
- [13] Kanchi, Sravanthi, et al. "Overview of LTE-A technology." *2013 IEEE global high tech congress on electronics. IEEE, 2013.*
- [14] Salih, Azar Abid, et al. "Evolution of mobile wireless communication to 5G revolution." *Technology Reports of Kansai University* 62.5 (2020): 2139-2151.

- [15] Pachauri, Akhilesh Kumar, and Ompal Singh. "5G Technology–Redefining wireless Communication in upcoming years." *International Journal of Computer Science and Management Research* 1.1 (2012): 12-19.
- [16] Astély, David, et al. "LTE: the evolution of mobile broadband." *IEEE Communications magazine* 47.4 (2009): 44-51.
- [17] Mukhopadhyay, Shameek, et al. "A study on wireless communication networks based on different generations." *Int. J. Curr. Trends Eng. Res.(IJCTER)* 2.5 (2016): 300-304.
- [18] Samdanis, Konstantinos, and Tarik Taleb. "The road beyond 5G: A vision and insight of the key technologies." *IEEE Network* 34.2 (2020): 135-141.
- [19] Ghosh, Amitabha, et al. "5G evolution: A view on 5G cellular technology beyond 3GPP release 15." *IEEE access* 7 (2019): 127639-127651
- [20] Bertenyi, Balazs, et al. "5G NR radio interface." *Journal of ICT Standardization* 6.1 (2018): 31-58.
- [21] Dahlman, Erik, Stefan Parkvall, and Johan Skold. *5G NR: The next generation wireless access technology*. Academic Press, 2020.
- [22] Lopez, Aida Vera, et al. "Opportunities and challenges of mmWave NR." *IEEE Wireless Communications* 26.2 (2019): 4-6.
- [23] Dogra, Anutusha, Rakesh Kumar Jha, and Shubha Jain. "A survey on beyond 5G network with the advent of 6G: Architecture and emerging technologies." *IEEE Access* 9 (2020): 67512-67547.
- [24] Popovski, Petar, et al. "5G wireless network slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: A communication-theoretic view." *Ieee Access* 6 (2018): 55765-55779.
- [25] Barakabitze, Alcardo Alex, et al. "5G network slicing using SDN and NFV: A survey of taxonomy, architectures and future challenges." *Computer Networks* 167 (2020): 106984.
- [26] Gupta, Akhil, and Rakesh Kumar Jha. "A survey of 5G network: Architecture and emerging technologies." *IEEE access* 3 (2015): 1206-1232.
- [27] Choyi, Vinod Kumar, et al. "Network slice selection, assignment and routing within 5G networks." *2016 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*. IEEE, 2016.
- [28] 5GPPP Architecture Working Group. "View on 5G Architecture: Version 2.0." (2017): 1-117.
- [29] Herter Jr, Christian A. "The electromagnetic spectrum: A critical natural resource." *Nat. Resources J.* 25 (1985): 651.

- [30] [https://www.eett.gr/opencms/opencms/EETT/Electronic\\_Communications/Antennas\\_EMR/health/EMRadiation/EMRadiation/](https://www.eett.gr/opencms/opencms/EETT/Electronic_Communications/Antennas_EMR/health/EMRadiation/EMRadiation/).
- [31] <https://www.gsma.com/spectrum/5g-spectrum-guide/>
- [32] <https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2021/04/5G-Spectrum-Positions.pdf>
- [33] <https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2021/07/5G-Mid-Band-Spectrum-Needs-Vision-2030.pdf>
- [34] <https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2021/10/3.5-GHz-for-5G.pdf>
- [35] <https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2020/04/3.5-GHz-5G-TDD-Synchronisation.pdf>
- [36] <https://data.gsmaintelligence.com/api-web/v2/research-file-download?id=59768858&file=210121-Economics-of-mmWave.pdf>
- [37] Irnich, Tim, et al. "Spectrum sharing scenarios and resulting technical requirements for 5G systems." *2013 IEEE 24th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC Workshops)*. IEEE, 2013.
- [38] Bogale, Tadilo Endeshaw, and Long Bao Le. "Massive MIMO and mmWave for 5G wireless HetNet: Potential benefits and challenges." *IEEE Vehicular Technology Magazine* 11.1 (2016): 64-75.
- [39] Nishanthi, C. H., and N. Ramamurthy. "Improving spectral efficiency and low latency in 5G framework utilizing FD-MIMO." *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing* (2020): 1-13.
- [40] Salh, Adeb, et al. "Trade-off Energy and Spectral Efficiency in 5G Massive MIMO System." *arXiv preprint arXiv:2105.10722* (2021).
- [41] M. Feng, S. Mao, and T. Jiang, "Joint frame design, resource allocation and user association for massive MIMO heterogeneous networks with wireless backhaul," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 17, no. 3, pp. 1937–1950, Mar. 2018.
- [42] Hamamreh, Jehad M., Zekeriyya Esat Ankarali, and Huseyin Arslan. "CP-less OFDM with alignment signals for enhancing spectral efficiency, reducing latency, and improving PHY security of 5G services." *IEEE Access* 6 (2018): 63649-63663.
- [43] Feng, Yi, and Jan Bajcsy. "Information rate of multi-antenna spectrally-efficient FDM communication." *2017 15th Canadian Workshop on Information Theory (CWIT)*. IEEE, 2017.
- [44] Naraiah, R. "Spectral Efficiency Improvement Techniques In Massive MIMO For 5G Communications." *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT)* 12.2 (2021): 1457-1465.
- [45] Liu, Xinyue, et al. "Spectrally Efficient FDM System with Probabilistic Shaping." *2021 IEEE 94th Vehicular Technology Conference (VTC2021-Fall)*. IEEE, 2021.
- [46] <https://www.cisco.com/c/en/us/products/wireless/what-is-ofdma.html>

- [47] Iqbal, Javed, et al. "Comparison of spectral efficiency techniques in device-to-device communication for 5G." *IEEE Access* 7 (2019): 57440-57449.
- [48] Liu, Yuanfei, et al. "Distributed resource allocation for D2D-assisted small cell networks with heterogeneous spectrum." *IEEE Access* 7 (2019): 83900-83914.
- [49] Alquhali, Abdullah H., et al. "D2D communication for spectral efficiency improvement and interference reduction: A survey." *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics* 9.3 (2020): 1085-1094.
- [50] Khan, Humayun Zubair, et al. "Resource allocation in 5G heterogeneous networks with downlink-uplink decoupled access." *Transactions on emerging telecommunications technologies* 31.3 (2020): e3831.
- [51] Saeed, Arsalan, et al. "Energy efficient resource allocation for 5G heterogeneous networks." *2015 IEEE 20th international workshop on computer aided modelling and design of communication links and networks (CAMAD)*. IEEE, 2015.
- [52] Lee, Woongsup, Ohyun Jo, and Minhoe Kim. "Intelligent resource allocation in wireless communications systems." *IEEE Communications Magazine* 58.1 (2020): 100-105.
- [53] Xu, Tongyang, and Izzat Darwazeh. "Spectrally efficient FDM: Spectrum saving technique for 5G?." *1st International Conference on 5G for Ubiquitous Connectivity*. IEEE, 2014.
- [54] Qin, Zhijin, et al. "User association and resource allocation in unified NOMA enabled heterogeneous ultra dense networks." *IEEE Communications Magazine* 56.6 (2018): 86-92.
- [55] Zhang, Haijun, et al. "Energy-efficient resource allocation in NOMA heterogeneous networks." *IEEE Wireless Communications* 25.2 (2018): 48-53.
- [56] Al-Obiedollah, Haitham. *Resource allocation techniques for non-orthogonal multiple access systems*. Diss. University of York, 2019.
- [57] Zhang, Guobin, et al. "Spectrum allocation and power control in full-duplex ultra-dense heterogeneous networks." *IEEE Transactions on Communications* 67.6 (2019): 4365-4380.
- [58] S. A. Busari, K. M. S. Huq, S. Mumtaz, L. Dai, and J. Rodriguez, "Millimeter-wave massive MIMO communication for future wireless systems: A survey," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 20, no. 2, pp. 836–869, 2nd Quart., 2018.
- [59] G. J. Sutton, J. Zeng, R. P. Liu, W. Ni, D. N. Nguyen, B. A. Jayawickrama, X. Huang, M. Abolhasan, Z. Zhang, E. Dutkiewicz, and T. Lv, "Enabling technologies for ultra-reliable and low latency communications: From PHY and MAC layer perspectives," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 21, no. 3, pp. 2488–2524, 3rd Quart., 2019.
- [60] T. S. Rappaport, Y. Xing, G. R. MacCartney, A. F. Molisch, E. Mellios, and J. Zhang, "Overview of millimeter wave communications for fifthgeneration (5G) wireless

- networks—With a focus on propagation models,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 65, no. 12, pp. 6213–6230, Dec. 2017.
- [61] <https://www.telit.com/blog/5g-networks-guide-to-small-cell-technology/>
- [62] Manap, Sulastrri, et al. "Survey of radio resource management in 5G heterogeneous networks." *IEEE Access* 8 (2020): 131202-131223.
- [63] F. Wang, W. Chen, H. Tang, and Q. Wu, “Joint optimization of user association, subchannel allocation, and power allocation in multi-cell multiassociation OFDMA heterogeneous networks,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 65, no. 6, pp. 2672–2684, Jun. 2017.
- [64] P. Yuan, Y. Xiao, G. Bi, and L. Zhang, “Toward cooperation by carrier aggregation in heterogeneous networks: A hierarchical game approach,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 66, no. 2, pp. 1670–1683, Feb. 2017.
- [65] R. Liu, Q. Chen, G. Yu, and G. Y. Li, “Joint user association and resource allocation for multi-band millimeter-wave heterogeneous networks,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 67, no. 12, pp. 8502–8516, Dec. 2019.
- [66] F. Ye, J. Dai, and Y. B. Li, “Hybrid-clustering game algorithm for resource allocation in macro-Femto HetNet,” *Ksii Trans. Internet Inf. Syst.*, vol. 12, no. 4, pp. 1638–1654, Apr. 2018.
- [67] C. Yang, J. Xiao, J. Li, X. Shao, A. Anpalagan, Q. Ni, and M. Guizani, “DISCO: Interference-aware distributed cooperation with incentive mechanism for 5G heterogeneous ultra-dense networks,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 7, pp. 198–204, Jul. 2018.
- [68] Zhang, Wensheng, et al. "Energy–spectral efficiency tradeoff in cognitive radio networks." *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 65.4 (2015): 2208-2218.
- [69] Naeem, Muhammad, et al. "Resource allocation techniques in cooperative cognitive radio networks." *IEEE Communications surveys & tutorials* 16.2 (2013): 729-744.
- [70] K.B. Letaief and W. Zhang, “Cooperative communications for cognitive radio networks,” *Proc. IEEE*, vol.97, no.5, pp.878-893, May 2009.
- [71] D. X. He and F. Y. Li, “Throughput and Energy Efficiency Comparison of One-hop, Two-hop, Virtual Relay and Cooperative Retransmission Schemes,” *Proc. European Wireless*, 2010.
- [72] W. Su, J.D. Matyjjas and N.B. Stella, “Active Cooperation Between Primary Users and Cognitive Radio Users in Heterogeneous Ad-Hoc Networks,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 60, no. 4, pp. 1796 -1805, April 2012.

- [73] W.-C.C. Weng, S.-M. Cheng and K.-C.C Kwang, "Connectivity of Multiple Cooperative Cognitive Radio Ad Hoc Networks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.* vol. 30, no. 2, pp. 263-270, Feb. 2012.
- [74] X. Hao, M. H. Cheung, V. W. S. Wong, and V. Leung, "A Coalition Formation Game for Energy-efficient Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks with Multiple Channels," *Proc. of IEEE Globecom*, 2011.
- [75] J F. W.-Jiang, J. W.-Heng; W. R. Ru, "Joint Resource Allocation in Cluster-Based Cognitive Radio Networks," *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. and Mobile Computing*, 2010.
- [76] K.J.R. Liu, A.K. Sadek, W. Su, and A. Kwasinski, *Cooperative communications and networking*, Cambridge University Press, 2008.
- [77] Saito, Yuya, et al. "System-level performance evaluation of downlink non-orthogonal multiple access (NOMA)." *2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. IEEE, 2013.
- [78] A. Benjebbovu, A. Li, Y. Saito, Y. Kishiyama, A. Harada, T. Nakamura, 'System-level performance of downlink NOMA for future LTE enhancements. in *Proceedings IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, December (2013), pp. 66–70
- [79] Islam, SM Riazul, et al. "Resource allocation for downlink NOMA systems: Key techniques and open issues." *IEEE Wireless Communications* 25.2 (2018): 40-47.
- [80] Shanmugavel, G., and M. S. Vasanthi. "Resource Allocation for 5G RAN—A Survey." *Advances in Computing and Network Communications*. Springer, Singapore, 2021. 33-42.
- [81] <https://www.affirmednetworks.com/sa-and-nsa-5g-architectures-the-path-to-profitability/>
- [82] Agarwal, Satyam, et al. "VNF placement and resource allocation for the support of vertical services in 5G networks." *IEEE/ACM Transactions on Networking* 27.1 (2019): 433-446.
- [83] <https://ieeaccess.ieee.org/closed-special-sections/fog-radio-access-networks-f-rans-for-5g-recent-advances-and-future-trends/>
- [84] W. Bai, T. Yao, H. Zhang, V.C.M. Leung, *Research on channel power allocation of fog wireless access network based on NOMA*. vol. 7, (IEEE, 2019)
- [85] A. De Domenico, Y.-F. Liu, W. Yu, *Optimal computational resource allocation and network slicing deployment in 5G hybrid C-Ran*. (IEEE, 2019).
- [86] M. Liang, X. Wang, *Application of 5G-based mobile communication technology in network resource scheduling*. (IEEE, 2019).
- [87] A. Nassar, Yasin, *Reinforcement learning for adaptive resource allocation in fog RAN for IoT with heterogeneous latency requirements*. *IEEE Access* 7, 529–551 (2019).
- [88] A. De Domenico, Y.-F. Liu, W. Yu, *Optimal computational resource allocation and network slicing deployment in 5G hybrid C-Ran*. (IEEE, 2019).
- [89] Heydari, Seyed Javad, Mahmoud Ferdosizade Naeiny, and Farokh Marvasti. "Iterative detection with soft decision in spectrally efficient FDM systems." *arXiv preprint arXiv:1304.4003* (2013).



- [90] Schaich, Frank, and Thorsten Wild. "Waveform contenders for 5G—OFDM vs. FBMC vs. UFMC." *2014 6th international symposium on communications, control and signal processing (ISCCSP)*. IEEE, 2014.
- [91] A. Saeed, E. Katranaras, M. Dianati, and M. Imran, "Control and Data Channel Resource Allocation in Macro-Femto Heterogeneous Networks," in *International Wireless Communications and Mobile Computing Conference 2015 (IWCMC)*, 2015.
- [92] Elayoubi, Salah Eddine, et al. "Radio resource allocation and retransmission schemes for URLLC over 5G networks." *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 37.4 (2019): 896-904.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

Συντόμευση	Επεξήγηση
1G	First Generation
2G	Second Generation
3G	Third Generation
3GPP	Third Generation Partnership Project
4G	Fourth Generation
5G	Fifth Generation
AMTS	Advanced Mobile Telephone System
AI	Artificial Intelligence
CA	Carrier Aggregation
CC	Component Carriers
C-MTC	Critical- Machine Type Communication
CDMA2000	Code-Division Multiple Access 2000
CSI	Channel State Information
CR	Cognitive Radio
CRN	Cognitive Radio Network
DSA	Dynamic Spectrum Access
E2E	Edge to Edge
EDGE	Enhanced Data rates in GSM Environment
EE	Energy Efficiency
eMBB	enhanced Mobile Broadband
eNA	Enablers for Network Automation
eV	Electron Volt
F-RAN	Fog RAN
FD	Full Duplex
FFT	Fast Fourier Transform
HetNet	Heterogeneous Network
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
KPIs	Key Performance Indicators
IMT-2000	International Mobile Telecommunications-2000
ICI	Inter Carrier Interference
IoT	Internet of Things
ISI	Inter Symbol Interference
IMTS	Improved Mobile Telephone Service
LTE	Long Term Evolution
MA	Multiple Access
MAC	Media Access Control
MBS	Macro Base Station
MEC	Multi Access Edge Computing
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
ML	Machine Learning
MMS	Multimedia Message

mMTC	Massive Machine Type Communications
MTS	Mobile Telephone System
NFV	Network Function Virtualization
NWDAF	Network Data Analytics Function
NMT	Nordic Mobile Telephone
NOMA	Non Orthogonal Multiple Access
NPNs	NonPublic Networks
NR	New Radio
NS	Network Slicing
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PA	Power Allocation
PTT	Push to Talk
QoS	Quality of Service
RAT	Radio Access Technology
SBS	Small Base Stations
SCMA	Sparse Code Multiple Access
SE	Spectral Efficiency
SIC	Successive Interference Cancellation
SIR	Signal to Interference Ratio
SISO	Single Input Single Output
SINR	Signal to Interference Noise Ratio
SLA	Service Level Agreements
TACS	Total Access Communications System
TSC	Time Sensitive Communication
UDN	Ultra Dense Networks
UMB	Ultra Mobile Broadband
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
UP	User Pairing
URLCC	Ultra-Reliable Low Latency Communication
UU	Unlicensed Users
VN	Virtual Network
WRC	World Radiocommunication Conference
WSN	Wireless Sensor Network
WWW	World-Wireless World Wide Web