

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



**Τεχνολογίες Επικοινωνιών Εξαιρετικής Αξιοπιστίας και Χαμηλής
Καθυστέρησης (URLLC) για το 5G και παραπέρα**

**Communications Technologies for Ultra Reliable Low Latency
Communications (URLLC) for the 5G and beyond.**

Φοιτήτρια: Αναστασία Πετρίδου

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Κωνσταντίνος Μαυρομμάτης

ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, Φεβρουάριος ,2023

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

Κωνσταντίνος Μαυρομμάτης

Επιβλέπων Καθηγητής

Σταύρος Φατούρος

Αναπλ. Καθηγητής

Νικόλαος Μυριδάκης

Επικ. Καθηγητής

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη ΠΕΤΡΙΔΟΥ ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ του ΙΩΑΝΝΗ, με αριθμό μητρώου 71347431 φοιτήτριας του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ,

δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου.»

Ο/Η Δηλών/ούσα

Πετρίδου Αναστασία

-

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κύριο Μαυρομάτη Κωνσταντίνο για όλες τις συμβουλές και την καθοδήγηση που μου έδωσε. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και όλους τους ανθρώπους που ήταν δίπλα μου και με στήριξαν σε όλη την διάρκεια της φοίτησης μου.

Περίληψη

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη και η περιγραφή Τεχνολογιών για την Επίτευξη Επικοινωνιών Εξαιρετικής Αξιοπιστίας και Χαμηλής Καθυστέρησης (URLLC) για την Πέμπτη γενιά επικοινωνιών (5G) καθώς και την εξέλιξή τους. Πιο συγκεκριμένα, στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν ορισμένα εισαγωγικά στοιχεία αναφορικά με την έννοια του URLLC, για τα δίκτυα LTE, για τα δίκτυα 5G καθώς και για την τεχνολογία Massive MIMO.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάστηκε η δομή και η τοπολογία του URLLC. Έγινε αναφορά στην αρχιτεκτονική και στη δομή του URLLC, στην αρχή λειτουργίας του, στη δομή του καναλιού, στα χαρακτηριστικά και, τέλος, στη σπουδαιότητα του URLLC.

Το τρίτο κεφάλαιο είχε ως θέμα τη χρήση κεραιών Massive MIMO. Παρουσιάστηκε η αρχή λειτουργίας, η δομή και τα χαρακτηριστικά, καθώς και τα θέματα εφαρμογής του URLLC.

Στο τέταρτο κεφάλαιο έγινε αναφορά στις εφαρμογές του URLLC για 5G και 6G. Το URLLC χρησιμοποιείται στο Internet of Things, στην ευρυζωνική υπηρεσία κινητής τηλεφωνίας, στο Edge Computing, στην τεχνητή νοημοσύνη στα εμπυθιστικά παιχνίδια και στην εικονική πραγματικότητα, στις βιομηχανικές εφαρμογές, στην υγειονομική περίθαλψη, στη λιανική πώληση, στη γεωργία, στη παραγωγή, καθώς και στην εφοδιαστική.

Λέξεις – κλειδιά: *Συστήματα 5ης γενιάς δικτύων – LTE – URLLC – Massive MIMO*

Abstract

The subject of the diploma thesis was the study and description of Technologies for Achieving Ultra-Reliable and Low-Latency Communications (URLLC) for the Fifth generation of communications (5G) as well as their evolution. More specifically, in the first chapter some introductory information was presented regarding the concept of URLLC, for LTE networks, for 5G networks as well as for Massive MIMO technology.

The second chapter presented the structure and topology of URLLC. Reference was made to the architecture and structure of URLLC, its working principle, channel structure, features and finally the importance of URLLC.

The third chapter dealt with the use of Massive MIMO antennas. The working principle, structure and features, as well as implementation issues of URLLC were introduced.

In the fourth chapter, URLLC applications for 5G and 6G were mentioned. URLLC is used in the Internet of Things, mobile broadband, edge computing, artificial intelligence in immersive gaming and virtual reality, industrial applications, healthcare, retail, agriculture, manufacturing, and logistics.

Keywords: *5th generation network systems – LTE – URLLC – Massive MIMO*

Περιεχόμενα

| | |
|--|----|
| 1. Εισαγωγή..... | 10 |
| 1.1. Εισαγωγή στην έννοια του URLLC..... | 10 |
| 1.2. Δίκτυα LTE | 11 |
| 1.3. Δίκτυα 5G | 15 |
| 1.4. Τεχνολογία Massive MIMO | 18 |
| 2. Δομή και Τοπολογία URLLC..... | 21 |
| 2.1. Αρχιτεκτονική και Δομή..... | 25 |
| 2.2. Αρχή λειτουργίας..... | 27 |
| 2.3. Βασικές εκτιμήσεις για το URLLC | 28 |
| 2.4. Ιεραρχία καναλιών 5G..... | 29 |
| 2.5. Λογικά κανάλια 5G NR | 32 |
| 2.6. Κανάλια μεταφοράς 5G NR..... | 34 |
| 2.7. Κανάλια δεδομένων φυσικού επιπέδου 5G NR..... | 35 |
| 2.8. Φυσικά κανάλια 5G NR Downlink | 36 |
| 2.8. Φυσικά κανάλια 5G NR Uplink..... | 37 |
| 2.10. Σπουδαιότητα..... | 47 |
| 3. Χρήση κεραιών Massive MIMO..... | 49 |
| 3.1. Αρχή λειτουργίας..... | 50 |
| 3.2. Διαχείριση πολλαπλών ακτινών και διαμόρφωση δέσμης | 52 |
| 3.3. Δομή | 52 |
| 3.4. Μετάδοση Uplink | 54 |
| 3.5. Μετάδοση downlink..... | 55 |
| 3.6. Χαρακτηριστικά..... | 55 |
| 4. Θέματα εφαρμογής URLLC..... | 61 |
| 4.1. Πλήρως συνδεδεμένη και υπο-συνδεδεμένη υβριδική αρχιτεκτονική διαμόρφωσης δέσμης | 63 |
| 5. Εφαρμογές του URLLC για 5G ή και 6G | 67 |
| 5.1. Αξιοποίηση της ισχύος του IoT..... | 67 |
| 5.2. Ευρυζωνική υπηρεσία κινητής τηλεφωνίας | 68 |
| 5.3. Συνδεδεσιμότητα για Edge Computing..... | 68 |
| 5.4. Απελευθέρωση της τεχνητής νοημοσύνης | 69 |
| 5.6. Εμβυθιστικά παιχνίδια και εικονική πραγματικότητα..... | 69 |

| | |
|---------------------------------|----|
| 5.6.Βιομηχανικές εφαρμογές..... | 70 |
| 5.7.Υγειονομική περίθαλψη..... | 70 |
| 5.8.Λιανική πώληση | 71 |
| 5.9.Γεωργία | 72 |
| 5.10.Παραγωγή | 72 |
| 5.11.Εφοδιαστική | 72 |
| Συμπεράσματα..... | 74 |
| Βιβλιογραφία..... | 76 |

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

| | |
|---|----|
| <u><i>Εικόνα 1: Σύγκριση των βασικών δυνατοτήτων του IMT – Advanced (4ης γενιάς) με το IMT – 2020 (5ης γενιάς) (Πηγή: Tang et al., 2021).</i></u> | 15 |
| <u><i>Εικόνα 2: Τεχνολογία Massive MIMO (Πηγή: Prasad, Hossain & Bhargava, 2017).</i></u> | 19 |
| <u><i>Εικόνα 3: Ανατομία των δομικών στοιχείων του URLLC, που αποτελείται από την ουρά, την κλίμακα και τον κίνδυνο μαζί με τα μοναδικά χαρακτηριστικά τους. Επιπλέον, επισημαίνονται μαθηματικά εργαλεία προσαρμοσμένα στις απαιτήσεις κάθε μπλοκ (Πηγή: Bastug et al., 2017).</i></u> | 24 |
| <u><i>Εικόνα 4: Χαρτογράφηση λογικών, μεταφορικών και φυσικών καναλιών 5G NR downlink (Πηγή: Sun & Du, 2017).</i></u> | 31 |
| <u><i>Εικόνα 5: Χαρτογράφηση λογικών, μεταφορικών και φυσικών καναλιών 5G NR uplink (Πηγή: Sun & Du, 2017).</i></u> | 31 |
| <u><i>Εικόνα 6: Massive MIMO uplink και downlink (Πηγή: Björnson, Hoydis & Sanguinetti, 2017).</i></u> | 54 |
| <u><i>Εικόνα 7: TDD και FDD για Massive MIMO (Πηγή: Elijah et al., 2015).</i></u> | 59 |
| <u><i>Εικόνα 8: Η FDD χρειάζεται χρόνο εκπαίδευσης ανάλογο του $2M+K$ ενώ για τη TDD είναι ανάλογο του K (Πηγή: Elijah et al., 2015).</i></u> | 59 |
| <u><i>Εικόνα 9: Ψηφιακή διαμόρφωση δέσμης (Πηγή: Li et al., 2018).</i></u> | 62 |
| <u><i>Εικόνα 10: Δομή αναλογικής διαμόρφωσης δέσμης (Πηγή: Li et al., 2018).</i></u> | 63 |
| <u><i>Εικόνα 11: Δομή υβριδικού συστήματος μετάδοσης MIMO (Πηγή: Li et al., 2018).</i></u> | 63 |
| <u><i>Εικόνα 12: Υβριδικός διαμορφωτής δέσμης με πλήρως συνδεδεμένη δομή (Πηγή: Li et al., 2018).</i></u> | 64 |
| <u><i>Εικόνα 13: Υβριδικός διαμορφωτής δέσμης με υπο-συνδεδεμένη δομή (Πηγή: Li et al., 2018).</i></u> | 65 |

1. Εισαγωγή

1.1. Εισαγωγή στην έννοια του URLLC

Πρόσφατα, το απτικό διαδίκτυο (tactile internet - TI) αναδείχθηκε ως μια νέα τεχνολογία που θα μετατρέψει το διαδίκτυο από το διαδίκτυο των πραγμάτων (Internet of Things - IoT) σε διαδραστικές τεχνικές πραγματικού χρόνου με ένα χαρτοφυλάκιο τεχνικών, κοινωνικών και εμπορικών περιπτώσεων χρήσης, το οποίο θα φέρει επανάσταση στις περισσότερες πτυχές των μελλοντικών τεχνολογιών επικοινωνίας (Li et al., 2018 Maier & Ebrahimzadeh, 2019). Κρίσιμη ερευνητική προσπάθεια από ακαδημαϊκούς και βιομηχανικούς φορείς έχει καταβληθεί για την έρευνα του TI (Varsha & Shashikala, 2017). Αυτές οι μελέτες εμφορούνται γενικά από τις διάφορες περιπτώσεις χρήσης του TI, όπως η ρομποτική για την υγειονομική περίθαλψη, τα αυτόνομα οχήματα οδήγησης και η επαυξημένη πραγματικότητα (augmented reality - AR).

Συμπερασματικά, αυτά τα συστήματα επικοινωνίας ανθρώπου-μηχανής (human-to-machine - H2M) και μηχανής-μηχανής (machine-to-machine - M2M) απαιτούν ο χρόνος απόκρισης να είναι όσο το δυνατόν μικρότερος, προσεγγίζοντας τα λίγα χιλιοστά του δευτερολέπτου (ms). Για παράδειγμα, ο απτικός έλεγχος ενός ρομποτικού βραχίονα/ενεργοποιητή πραγματοποιείται κάτω από 10 ms. Ομοίως, η επικοινωνία πολυμέσων (ήχου/βίντεο) έχουν χρόνο απόκρισης έως και 100 ms (Fettweis, 2014). Κατά συνέπεια, παρατηρείται ότι το TI θα χαρακτηρίσει την επόμενη γενιά συνεργασίας H2M όπου οι τεχνολογίες επικοινωνίας θα δίνουν μια μικρή καθυστέρηση στην χρήση τους απο τον άνθρωπο αναδεικνύοντας τα ουσιαστικά σε συστήματα πραγματικού χρόνου. Αρκετές ερευνητικές εργασίες έχουν επισημάνει διάφορες πιθανές εφαρμογές του TI (Fettweis et al., 2014· Simsek et al., 2016· Tanwar et al., 2019· Budhiraja et al., 2019).

Μία από τις βασικές υπηρεσίες των δικτύων 5ης γενιάς (5th Generation - 5G) είναι η ενίσχυση της χωρητικότητας των εξαιρετικά αξιόπιστων και χαμηλής καθυστέρησης

επικοινωνιών (ultra-reliable and low latency communications - URLLC), αυτό είναι απαραίτητο προκειμένου αυτά να δουλεύουν με εξαιρετικούς βαθμούς υψηλής αξιοπιστίας και χαμηλής καθυστέρησης επικοινωνίας από άκρο σε άκρο (end-to-end - E2E). Το έργο σύμπραξης 3ης γενιάς (3rd generation partnership project - 3GPP) χαρακτηρίζει τη βασική αξιοπιστία του URLLC που είναι απαραίτητη για ένα ενιαίο πλαίσιο δεδομένων 32 ατόμων ως 99,9% και μια καθυστέρηση E2E < 1 ms (Aijaz et al., 2016). Είναι βέβαιο ότι αυτές οι απαιτήσεις URLLC του 5G θα προσφέρουν ώθηση για διαφορετικές δυνητικές και ενεργητικές εφαρμογές.

Για την ενεργοποίηση των υπηρεσιών URLLC, η 3GPP έχει υποδείξει διάφορα χαρακτηριστικά για το 5G New Radio (NR) ως νέα τεχνολογία ραδιοπρόσβασης (radio access technology - RAT) (Patriciello et al., 2018), τα οποία συνοπτικά αποτελούν χαρακτηριστικά αυξημένης αξιοπιστίας και μειωμένης καθυστέρησης (Sachs et al., 2018). Το 5G NR εξαρτάται από μια ευέλικτη κυματομορφή ορθογωνικής πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση συχνότητας (orthogonal frequency-division multiple access - OFDM), όπως η τεχνολογία μακροπρόθεσμης εξέλιξης (long-term evolution - LTE). Ωστόσο, σε αντίθεση με το LTE, το 5G NR προσφέρει προσαρμόσιμη αριθμολογία, με στόχο τη χρήση διαφορετικών διαστημάτων υπο-φορέων για την παραγωγή σήματος, προτρέποντας σε διάφορα μήκη των συμβόλων OFDMA (Maier & Ebrahimzadeh, 2019).

Στη συνέχεια, με την επέκταση της απόστασης των υποφορέων OFDM από 15 kHz σε 120 kHz, μια χρονοθυρίδα για την μετάδοση 14 συμβόλων μπορεί να μειωθεί από 1 ms σε 125 μs διάρκειας. Εκτός αυτού, έχουν εισαχθεί μικρότερες θυρίδες, οι οποίες επιτρέπουν στην κυκλοφορία URLLC να χρησιμοποιεί σημαντικά μικρότερες χρονοθυρίδες (Sachs et al., 2018).

1.2. Δίκτυα LTE

Σε αντίθεση με το μοντέλο μεταγωγής κυκλώματος των προηγούμενων κυψελοειδών συστημάτων, το Long Term Evolution (LTE) έχει σχεδιαστεί για να υποστηρίζει μόνο

υπηρεσίες μεταγωγής πακέτων. Στοχεύει στην παροχή απρόσκοπτης συνδεσιμότητας πρωτοκόλλου Διαδικτύου (IP) μεταξύ του εξοπλισμού χρήστη (User equipment - UE) και του πακέτου δικτύου δεδομένων (Packet data network - PDN), χωρίς καμία διακοπή των εφαρμογών των τελικών χρηστών κατά τη διάρκεια της κινητικότητας (Ali, Hossain & Kim, 2017).

Ενώ ο όρος "LTE" περιλαμβάνει την εξέλιξη της ραδιοπρόσβασης του Παγκόσμιου Συστήματος Κινητών Τηλεπικοινωνιών (Universal Mobile Telecommunication System - UMTS) μέσω του εξελιγμένου UTRAN (Evolved UMTS terrestrial radio access network - E-UTRAN), συνοδεύεται από την εξέλιξη των μη ραδιολογικών πτυχών υπό τον όρο «Εξέλιξη της αρχιτεκτονικής του συστήματος» (System Architecture Evolution - SAE), η οποία περιλαμβάνει το αναπτυγμένο πυρήνα πακέτων (Evolved Packet Core - EPC). Το LTE και το SAE μαζί αποτελούν το σύστημα εξελιγμένων πακέτων (Evolved Packet System - EPS) (Ali, Hossain & Kim, 2017).

Το EPS χρησιμοποιεί την έννοια των φορέων EPS για τη δρομολόγηση της κυκλοφορίας IP από μια πύλη στο PDN στο UE. Ένας φορέας είναι μια ροή πακέτων IP με καθορισμένη ποιότητα υπηρεσίας (QoS) μεταξύ της πύλης και του UE. Το E-UTRAN και το EPC μαζί δημιουργούν και απελευθερώνουν φορείς όπως απαιτείται από τις εφαρμογές.

Η εργασία παρέχει μία ολοκληρωμένη παρουσίαση της συνολικής αρχιτεκτονικής του δικτύου EPS, δίνοντας μια επισκόπηση των λειτουργιών που παρέχονται από το δίκτυο πυρήνα (core network - CN) και το E-UTRAN. Εξηγείται η στοίβα πρωτοκόλλων στις διάφορες διεπαφές, καθώς και μια επισκόπηση των λειτουργιών που παρέχονται από τα διάφορα επίπεδα πρωτοκόλλων.

Η από άκρο σε άκρο διαδρομή φορέα μαζί με τις πτυχές QoS συζητούνται επίσης, συμπεριλαμβανομένης μιας τυπικής διαδικασίας για τη δημιουργία ενός φορέα. Ενώ επιπλέον παρουσιάζονται λεπτομερώς οι διεπαφές δικτύου, με ιδιαίτερη έμφαση στις διεπαφές E-UTRAN και στις διαδικασίες που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις διεπαφές, συμπεριλαμβανομένων εκείνων για την υποστήριξη της κινητικότητας των χρηστών (Ali, Hossain & Kim, 2017).

Η μακροπρόθεσμη εξελικτική τεχνολογία πρόσβασης που ονομάζεται LTE (Long Term Evolution) γίνεται με γρήγορους ρυθμούς, η τεχνολογία δικτύου που επιλέγεται

για την ανάπτυξη του 4G σε όλο τον κόσμο. Καθώς η ζήτηση των χρηστών για κινητές ευρυζωνικές υπηρεσίες συνεχίζει να αυξάνεται, το LTE και η ικανότητά του να παρέχει οικονομικά αποδοτικά πολύ γρήγορες, υψηλής απόκρισης κινητές υπηρεσίες δεδομένων φαίνεται η τεχνολογία η οποία απαιτείται αυτή την στιγμή για τις συγκεκριμένες υπηρεσίες.

Μέχρι το 2014, η Juniper Research προβλέπει ότι τα έσοδα από τους συνδρομητές κινητών ευρυζωνικών υπηρεσιών LTE θα ξεπεράσουν τα 70 δισεκατομμύρια δολάρια παγκοσμίως, με 300 εκατομμύρια συνδρομητές μέχρι το 2015. Από τον Αύγουστο του 2010, σύμφωνα με την Παγκόσμια Ένωση Προμηθευτών Κινητής Τηλεφωνίας (GSA), έχουν προγραμματιστεί ή βρίσκονται σε εξέλιξη 101 σταθερές εγκαταστάσεις δικτύων LTE σε 41 χώρες σε όλο τον κόσμο. Μέχρι το τέλος του 2010, η GSA αναμένει περίπου 22 δίκτυα LTE σε εμπορική λειτουργία. Εκτός από αυτά τα στατιστικά στοιχεία, άλλοι 31 φορείς εκμετάλλευσης συμμετέχουν επί του παρόντος σε διάφορες πιλοτικές δοκιμές και τεχνολογικές δοκιμές LTE, οι οποίες αν προστεθούν στα παραπάνω μεταφράζονται σε 132 φορείς εκμετάλλευσης σε 56 χώρες που επενδύουν τώρα στο LTE (Kumar, Patil & Ram, 2015).

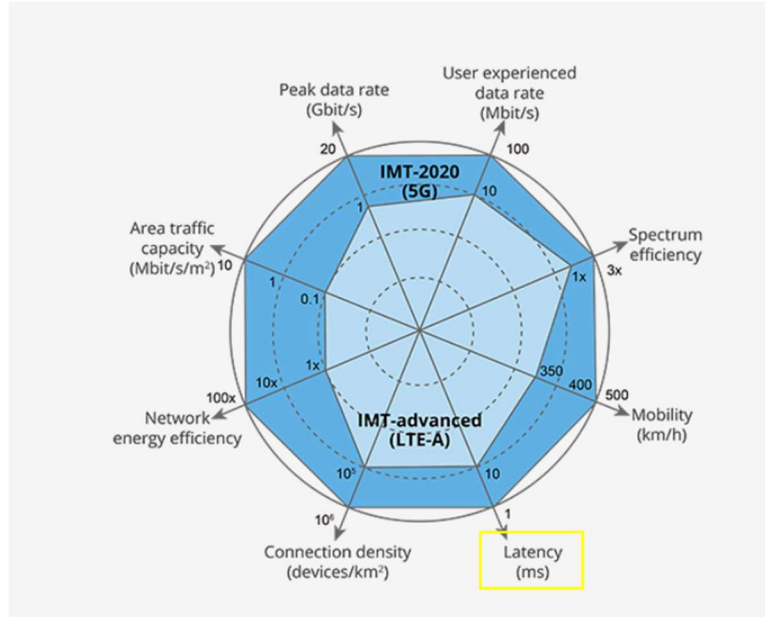
Για πολλούς φορείς εκμετάλλευσης, το LTE αντιπροσωπεύει μια σημαντική εξέλιξη από τα παλαιότερα συστήματα κινητής τηλεφωνίας, καθώς είναι η πρώτη τεχνολογία δικτύου που βασίζεται αποκλειστικά στο πρωτόκολλο Internet (IP) και θα επηρεάσει τον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζονται, αναπτύσσονται και διαχειρίζονται τα δίκτυα. Οι φορείς εκμετάλλευσης κινητής τηλεφωνίας θα πρέπει να αντιμετωπίσουν συγκεκριμένες προκλήσεις που σχετίζονται με το LTE, όπως η διαλειτουργικότητα με τα παλαιά και άλλα συστήματα 4G, η διασφάλιση QoS δικτύου από άκρο σε άκρο και η παροχή υπηρεσιών υψηλής ποιότητας, καθώς και η αλληλεπίδραση με το IMS για την παροχή υπηρεσιών πολυμέσων και φωνής (Kumar, Patil & Ram, 2015).

Με το LTE, τα συστήματα του 3GPP (3rd Generation Partnership Project) έχουν τη δυνατότητα να παραμείνουν ανταγωνιστικά ως τεχνολογία για τα επόμενα τουλάχιστον δέκα χρόνια. Το όραμα του LTE για την ασύρματη πρόσβαση θα οδηγήσει σε μια ολοκληρωμένη μετάβαση προς ένα σύστημα μόνο με μεταγωγή πακέτων, το οποίο είναι σαφώς μη ιεραρχικό και χρησιμοποιεί ευρέως τα πρωτόκολλα και τις πρακτικές της Ομάδας Εργασίας Τεχνολογίας Διαδικτύου (Internet Engineering Task Force - IETF).

Το LTE έχει σχεδιαστεί περαιτέρω για να είναι διαλειτουργικό με τα παλαιότερα συστήματα UMTS και να προσφέρει υποστήριξη για απρόσκοπτη κινητικότητα μέσω ασύρματων προσβάσεων εκτός 3GPP, συμπεριλαμβανομένων, μεταξύ άλλων, των WiMAX, 1x-EVDO και Wi-Fi (Soltanmohammadi, Ghavami & Naraghi-Pour, 2016).

Το δίκτυο πρόσβασης LTE ενσωματώνει τεχνολογίες διεπαφής ραδιοσυχνοτήτων τελευταίας τεχνολογίας, όπως OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) και προηγμένες τεχνικές κεραιών για τη μεγιστοποίηση της αποδοτικής χρήσης του φάσματος RF. Φιλοξενεί επίσης διάφορες επιλογές για ζώνες συχνοτήτων, εύρος ζώνης φέροντος και τεχνικές duplexing για την αποτελεσματική αξιοποίηση των διαφορετικών τμημάτων του αχρησιμοποίητου φάσματος σε διάφορες χώρες και γεωγραφικές περιοχές.

Το πιο σημαντικό είναι ότι η εξέλιξη της αρχιτεκτονικής του δικτύου LTE σε μια αρχιτεκτονική all-IP επιτρέπει την απρόσκοπτη παροχή εφαρμογών και υπηρεσιών σε δύο ξεχωριστά και διακριτά δίκτυα. Εκτός από τη μείωση του κόστους και της πολυπλοκότητας ανάπτυξης και λειτουργίας, η μετάβαση σε IP επιτρέπει στο LTE να υποστηρίζει ποιότητα υπηρεσίας (Quality of service – QoS) για υπηρεσίες δεδομένων πακέτων σε πραγματικό χρόνο, όπως VoIP και ζωντανή ροή βίντεο (Soltanmohammadi, Ghavami & Naraghi-Pour, 2016).



Εικόνα 1: Σύγκριση των βασικών δυνατοτήτων του IMT – Advanced (4ης γενιάς) με το IMT – 2020 (5ης γενιάς)
(Πηγή: Tang et al., 2021).

1.3. Δίκτυα 5G

Οι τεχνολογίες της πληροφορίας και των επικοινωνιών (Information and communication technologies – ICT) έχουν θεωρηθεί ως βασικά συστατικά της κοινωνικής και οικονομικής ανάπτυξης, επειδή έχουν δημιουργήσει νέα οφέλη και ευκολίες που δεν είχαν παρατηρηθεί στο παρελθόν. Από τότε που εισήχθησαν οι υπηρεσίες ασύρματων δικτύων 4G, οι άνθρωποι έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιούν ευρυζωνικές υπηρεσίες με τις κινητές συσκευές τους (π.χ. έξυπνα τηλέφωνα και υπολογιστές-ταμπλέτες) και η εμπειρία του τελικού χρήστη έχει γίνει σχεδόν ισοδύναμη με εκείνη των ενσύρματων συνδέσεων.

Παρά τις τόσο προηγμένες τεχνολογίες ασύρματων δικτύων 4G, είναι δύσκολο να παρέχονται κινητές υπηρεσίες που απαιτούν υψηλή ταχύτητα, ταχεία απόκριση, υψηλή αξιοπιστία και ενεργειακή απόδοση. Ως εκ τούτου, αυτά τα χαρακτηριστικά έχουν καταστεί βασικές απαιτήσεις για τις μελλοντικές υπηρεσίες στην εποχή του 5G. Τα τρέχοντα δίκτυα 4G/LTE δεν μπορούν να παρέχουν στιγμιαίες υπηρεσίες cloud, απτικό

διαδίκτυο, βελτιωμένες υπηρεσίες vehicle-to-all (eV2X), διαδίκτυο των πραγμάτων (Internet of Things – IoT) και επικοινωνία με drones και ρομπότ, ενώ παράλληλα εγγυώνται την ποιότητα της εμπειρίας στους χρήστες κινητής τηλεφωνίας. Επιπλέον, τα δίκτυα LTE μπορούν να παρέχουν εμπειρία βίντεο υψηλής ποιότητας μόνο σε περιορισμένο αριθμό κινητών χρηστών ταυτόχρονα (Aijaz, Dohler, Aghvami, Friderikos & Frodigh, 2016).

Με την εισαγωγή νέου περιεχομένου, όπως βίντεο 360 μοιρών και ολογραμμάτων, και νέων υπηρεσιών, όπως έξυπνες μεταφορές και επικοινωνίες τύπου μηχανής, οι μελλοντικές υπηρεσίες 5G μπορούν να αναπτυχθούν προς διάφορες κατευθύνσεις, όπως απεριόριστη μετάδοση δεδομένων, μαζικός αριθμός ενεργών συνδέσεων και νέοι τύποι κινητών συσκευών, ιδίως αισθητήρων, που τροφοδοτούνται από βιώσιμες πηγές ενέργειας.

Το πεδίο εφαρμογής των υπηρεσιών 5G δεν περιορίζεται στις προσωπικές επικοινωνίες, αλλά επεκτείνεται στους τομείς των κοινωνιών, συμπεριλαμβανομένων των κινητών τηλεφώνων, των φορητών συσκευών, των αισθητήρων, των ενεργοποιητών, των οχημάτων, των ρομπότ και ούτω καθεξής. Ως εκ τούτου, τα δίκτυα 5G μπορούν να θεωρηθούν ως η βασική υποδομή που θα καινοτομήσει για την κοινωνία, καθώς και τις βιομηχανίες ICT (Aijaz, Dohler, Aghvami, Friderikos & Frodigh, 2016).

Η έρευνα σχετικά με τις υπηρεσίες 5G και τις τεχνικές απαιτήσεις τους έχει διεξαχθεί από τη Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών-Τομέας Ραδιοεπικοινωνιών (ITU-R), το έργο σύμπραξης 3ης γενιάς (3GPP) και τη συμμαχία κινητών δικτύων επόμενης γενιάς (NGMN). Στην ομάδα εργασίας (WP) 5D της ITU-R, το 5G ορίζεται με την ονομασία International Mobile Telecommunications-2020 (IMT-2020) και διάφορες υπηρεσίες 5G παρουσιάζονται συνοπτικά σε μεγάλα στελέχη (Rajesh, Sivakumar & Dharan, 2019).

Τα προτεινόμενα σενάρια χρήσης ομαδοποιούνται σε τρεις κατηγορίες: ενισχυμένη κινητή ευρυζωνικότητα (eMBB), μαζικές επικοινωνίες τύπου μηχανής (mMTC) και εξαιρετικά αξιόπιστες επικοινωνίες χαμηλής καθυστέρησης (URLLC). Ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων, η χωρητικότητα κίνησης περιοχής, η ενεργειακή απόδοση του δικτύου, η πυκνότητα σύνδεσης, η καθυστέρηση, η κινητικότητα, η αποδοτικότητα

φάσματος και ο ρυθμός δεδομένων που βιώνει ο χρήστης επιλέγονται ως βασικοί δείκτες απόδοσης (key performance indicators - KPI), οι οποίοι μπορούν να θεωρηθούν ως τεχνικές απαιτήσεις (Rajesh, Sivakumar & Dharan, 2019).

Οι υπάρχουσες προσεγγίσεις για την κατηγοριοποίηση των υπηρεσιών 5G εξακολουθούν να βασίζονται στην τεχνική άποψη των φορέων εκμετάλλευσης δικτύων και των παρόχων υπηρεσιών, παρόλο που ο τελικός στόχος των υπηρεσιών 5G είναι η μεγιστοποίηση της ικανοποίησης των τελικών χρηστών. Ως εκ τούτου, υπάρχει αναντιστοιχία απόψεων μεταξύ του στόχου και της κατηγοριοποίησης των υπηρεσιών 5G.

Για να ξεπεραστεί αυτή η αναντιστοιχία, στην παρούσα εργασία προτείνονται τα κύρια χαρακτηριστικά των υπηρεσιών 5G όσον αφορά την εμπειρία του τελικού χρήστη, αναλύοντας τις υψηλές προσδοκίες των μελλοντικών υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας. Ως αποτέλεσμα αυτής της ανάλυσης, οι υπηρεσίες 5G κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με τα ακόλουθα πέντε χαρακτηριστικά: βιωσιμότητα, ευφυΐα, πανταχού παρούσες, αυτονομία και δημοσιότητα. Κάθε κατηγορία περιλαμβάνει τυπικές υπηρεσίες 5G ως εξής:

- Υπηρεσίες 5G με εμπύθιση: εικονική πραγματικότητα/επαυξημένη πραγματικότητα (VR/AR), μαζική ροή περιεχομένου.
- Ευφυείς υπηρεσίες 5G: υπολογιστική με επίκεντρο τον χρήστη, υπηρεσίες συνωστισμένης περιοχής.
- Πανταχού παρούσες υπηρεσίες 5G: Διαδίκτυο των πραγμάτων
- Αυτόνομες υπηρεσίες 5G: έξυπνες μεταφορές, μη επανδρωμένα αεροσκάφη, ρομπότ.

- Δημόσιες υπηρεσίες 5G: παρακολούθηση καταστροφών, ιδιωτική ασφάλεια/δημόσια ασφάλεια, υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης.

Η επερχόμενη τεχνολογία 5G είναι σχεδιασμένη για τρεις κύριες περιπτώσεις χρήσης, δηλαδή την ενισχυμένη κινητή ευρυζωνικότητα (eMBB), τις μαζικές επικοινωνίες τύπου μηχανής (mMTC) και την εξαιρετικά αξιόπιστη επικοινωνία χαμηλής καθυστέρησης (URLLC) . Η URLLC μπορεί να υποστηριχθεί τόσο μέσω της νέας διεπαφής αέρα 5G όσο και μέσω της ενσωμάτωσης διαφόρων υφιστάμενων τεχνολογιών επικοινωνίας.

Το URLLC θα επιτρέψει την υποστήριξη νέων περιπτώσεων χρήσης υπό την ομπρέλα των κρίσιμων επικοινωνιών τύπου μηχανής (MTC), των οποίων οι απαιτήσεις υπερβαίνουν τις δυνατότητες των σημερινών ασύρματων τεχνολογιών. Οι απαιτήσεις αξιοπιστίας όσον αφορά τα ποσοστά επιτυχούς παράδοσης πακέτων μπορεί να είναι από 5-9 (1-10⁻⁵) έως 9-9 (1-10⁻⁹), ενώ επίσης η αποδεκτή καθυστέρηση μπορεί να είναι σε επίπεδο κάτω του δευτερολέπτου ή ακόμη και σε μερικά χιλιοστά του δευτερολέπτου.

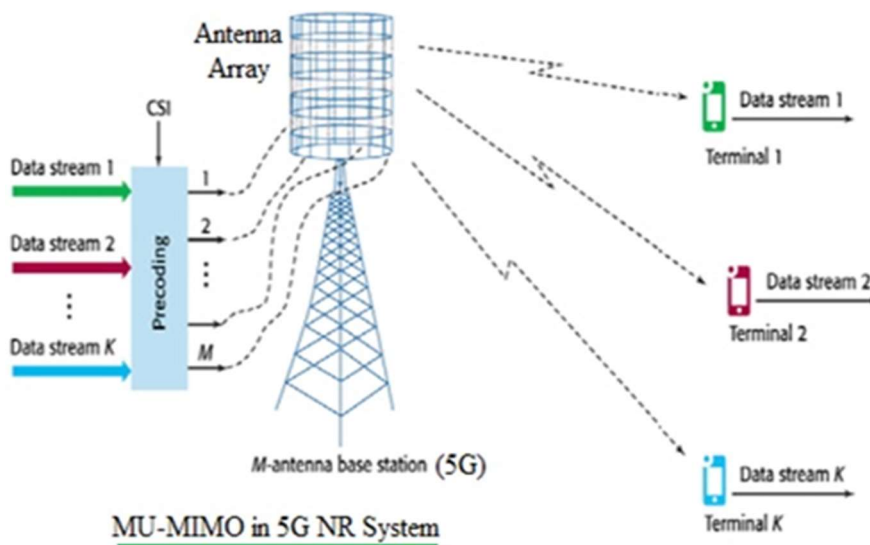
Υπάρχουν προτάσεις για τον τρόπο μείωσης της καθυστέρησης στα μελλοντικά κυψελοειδή συστήματα, π.χ. με τη μείωση του χρονικού διαστήματος μετάδοσης (Transmission time interval - TTI), τη γρήγορη πρόσβαση στην άνω ζεύξη ή με τη διάτρηση πόρων URLLC πάνω από το eMBB. Ωστόσο, τα οφέλη αυτών των βελτιώσεων δεν μπορούν να αξιοποιηθούν μέχρις ότου τα χαρακτηριστικά αυτά να έχουν αναπτυχθεί ευρέως. Επιπλέον, πολύ υψηλά επίπεδα αξιοπιστίας είναι δύσκολο να επιτευχθούν με οποιαδήποτε μεμονωμένη τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας και ως εκ τούτου αναμένεται να επιτευχθούν μέσω της ενσωμάτωσης πολλαπλών τεχνολογιών επικοινωνίας (Rajesh, Sivakumar & Dharan, 2019).

1.4.Τεχνολογία Massive MIMO

Το MIMO είναι μια μέθοδος αύξησης της χωρητικότητας ραδιοζεύξης με εκμετάλλευση πολλαπλών διαδόσεων χρησιμοποιώντας πολλαπλές κεραιές εκπομπής και λήψης. Το MIMO είναι βασικό στοιχείο των προτύπων ασύρματης επικοινωνίας

όπως το IEEE 802.11n (Wi-Fi), το IEEE 802.11ac (Wi-FiFi), το HSPA+ (3G) και το WiMAX (4G LTE).

Ο όρος "MIMO" αναφέρεται στη χρήση πολλαπλών κεραιών στον πομπό και στον δέκτη. Στη σύγχρονη χρήση, το "MIMO" αναφέρεται συγκεκριμένα σε πρακτικές τεχνικές για την αποστολή και λήψη πολλαπλών σημάτων δεδομένων ταυτόχρονα χρησιμοποιώντας πολλαπλές μεταδόσεις μέσω του ίδιου ραδιοφωνικού καναλιού (Prasad, Hossain & Bhargava, 2017).



Εικόνα 2: Τεχνολογία Massive MIMO (Πηγή: Prasad, Hossain & Bhargava, 2017).

Ο όρος MIMO, ή Multiple Input Multiple Output, αναφέρεται σε μεθόδους ασύρματης μετάδοσης δεδομένων που χρησιμοποιούν περισσότερες από μία εισόδους και περισσότερες από μία εξόδους. Συχνά αναφέρονται ως beamforming και diversity, αυτές είναι μόνο δύο από τις πολλές διαφορετικές τεχνολογίες έξυπνων κεραιών.

Πολλοί σταθμοί βάσης 4G χρησιμοποιούν συνολικά 12 θύρες κεραίας. Αν και χειρίζονται όλη την κίνηση κινητής τηλεφωνίας, 8 είναι αφιερωμένα στον πομπό και 4 στον δέκτη. Οι σταθμοί βάσης 5G μπορούν να υποστηρίξουν έως και 100 θύρες εισόδου και εξόδου — καθιστώντας δυνατή την τοποθέτηση περισσότερων κεραιών σε μια συστοιχία.

Με την εφαρμογή MIMO ή πολλαπλής εισόδου πολλαπλής εξόδου, οι σταθμοί βάσης μπορούν ταυτόχρονα να λαμβάνουν και να εκπέμπουν σήματα σε περισσότερους χρήστες. Αυτό αυξάνει τις δυνατότητες των δικτύων κινητής τηλεφωνίας κατά 22 ή περισσότερες. Υπάρχουν πολλά διαφορετικά συστήματα MIMO ευρέος εύρους ζώνης.

Αυτά τα συστήματα συνήθως χρησιμοποιούν μεγάλο αριθμό κλώνων κεραίας σε μια συστοιχία. Πολλοί τύποι κεραιών είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι, συμπεριλαμβανομένων των σφαιρών, των κυλίνδρων, των τετραγώνων και του γραμμικού σχήματος. Αυτά βοηθούν στον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών και της απόδοσης συστημάτων MIMO με πολλές κεραιές (Larsson & Van der Perre, 2017).

Τα πρακτικά συστήματα συχνά περιορίζουν τη χρήση δισδιάστατων γραμμικών κεραιών σε μία μόνο εφαρμογή. Οι σφαίρες, οι κύλινδροι και τα τετράγωνα επιτρέπουν την επικοινωνία σε τρεις διαστάσεις και χρησιμοποιούνται συνήθως σε πολλές πρακτικές εφαρμογές. Πολλά κινητά τηλέφωνα 4G χρησιμοποιούν ήδη την τεχνολογία MIMO για να βελτιώσουν το σήμα τους. Ωστόσο, επί του παρόντος μόνο οι δοκιμές στο πεδίο και στο εργαστήριο επιτρέπουν τη δοκιμή του MIMO. Για τις περισσότερες εφαρμογές, οι κατανεμημένες κεραιές χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της επικοινωνίας σε εσωτερικούς χώρους. Το Massive MIMO υπόσχεται να αυξήσει εκθετικά τις ταχύτητες 5G. Αυτό απαιτεί μεγάλο αριθμό κεραιών για κάθε χρήστη. Ωστόσο, αυτό προκαλεί επίσης εκτεταμένες παρεμβολές εάν διασταυρωθούν πολλαπλά σήματα 5G.

Οι πρώτες δοκιμές έδειξαν ότι το Massive MIMO σημείωσε νέο ρεκόρ για τη φασματική απόδοση. Αυτή είναι μια μέτρηση του πόσα bit δεδομένων μπορούν να μεταδοθούν ανά δευτερόλεπτο σε έναν δεδομένο αριθμό χρηστών. Η διαμόρφωση δέσμης είναι σημαντική για τους σταθμούς 5G επειδή απαιτεί Massive MIMO. Αυτό αυξάνει την ανάλυση της δέσμης και την καθιστά πιο αποτελεσματική σε υψηλότερες συχνότητες (Larsson & Van der Perre, 2017).

Το Massive MIMO αυξάνει επίσης τη χωρητικότητα δεδομένων και βελτιώνει την ενεργειακή απόδοση όταν χρησιμοποιείται με τεράστιο MIMO. Το Massive MIMO προσφέρει σημαντικούς βαθμούς ελευθερίας χάρη στην προσθήκη πληροφοριών κατάστασης καναλιού. Μπορεί επίσης να προσφέρει ενεργειακή απόδοση μέσω της υπόσχεσής του για χαμηλή κατανάλωση ενέργειας ανά στοιχείο κεραίας. Επιπλέον, τα

πολλά στοιχεία του Massive MIMO το καθιστούν εξαιρετική επιλογή για διαμόρφωση δέσμης (Prasad, Hossain & Bhargava, 2017).

2. Δομή και Τοπολογία URLLC

Η πρωτοφανής αύξηση της κίνησης δεδομένων που προκάλεσαν οι εφαρμογές του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT), από επικοινωνίες τύπου μηχανής (MTC) έως επικοινωνίες κρίσιμης σημασίας (αυτόνομη οδήγηση, μη επανδρωμένα αεροσκάφη και επαυξημένη/εικονική πραγματικότητα), θέτουν πρωτοφανείς προκλήσεις όσον αφορά τη χωρητικότητα, την καθυστέρηση, την αξιοπιστία και την επεκτασιμότητα (Bastug et al., 2017· Mozaffari et al., 2016· Kalør et al., 2017). Αυτό επιδεινώνεται περαιτέρω από:

- το αυξανόμενο μέγεθος του δικτύου και τις αυξανόμενες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των κόμβων
- το υψηλό επίπεδο αβεβαιότητας λόγω τυχαίων αλλαγών στην τοπολογία
- την ετερογένεια μεταξύ των εφαρμογών, των δικτύων και των συσκευών.

Οι αυστηρές απαιτήσεις αυτών των νέων εφαρμογών δικαιολογούν μια αλλαγή υποδείγματος από τα αντιδραστικά και συγκεντρωτικά δίκτυα προς μαζικά, χαμηλής καθυστέρησης, εξαιρετικά αξιόπιστα και προληπτικά δίκτυα 5G. Μέχρι τώρα, τα ανθρωποκεντρικά δίκτυα επικοινωνίας έχουν σχεδιαστεί με έμφαση στη βελτίωση της χωρητικότητας του δικτύου με ελάχιστη προσοχή στην καθυστέρηση ή την αξιοπιστία, ενώ υποθέτουν λίγους χρήστες (Bastug et al., 2017).

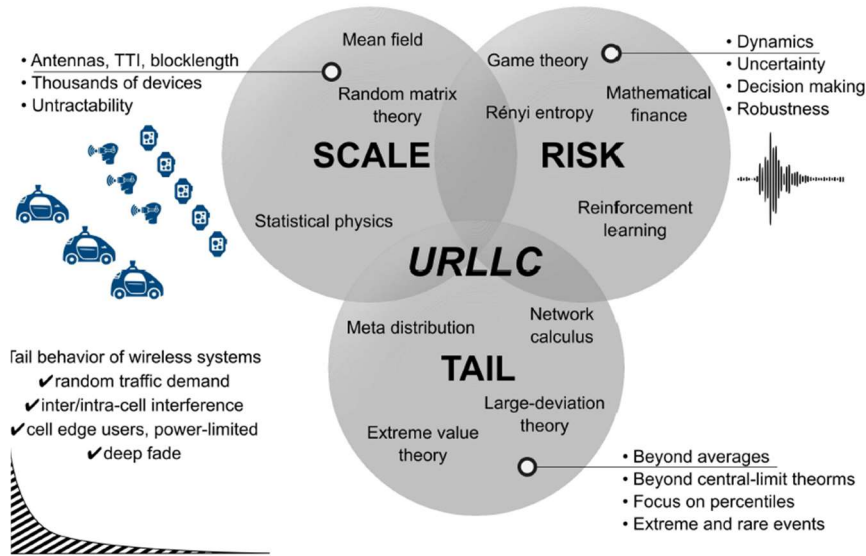
Η επίτευξη εξαιρετικά αξιόπιστης και χαμηλής καθυστέρησης επικοινωνίας (URLLC) αποτελεί μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις που αντιμετωπίζουν τα δίκτυα 5G. Η

URLLC εισάγει πληθώρα προκλήσεων όσον αφορά τον σχεδιασμό του συστήματος. Ενώ η ενισχυμένη κινητή ευρυζωνικότητα (eMBB) στοχεύει σε υψηλή φασματική απόδοση, μπορεί επίσης να βασίζεται σε υβριδικές αυτόματες επαναληπτικές αιτήσεις (HARQ) αναμεταδόσεων για την επίτευξη υψηλής αξιοπιστίας. Αυτό, ωστόσο, δεν ισχύει για το URLLC λόγω των μεγάλων περιορισμών καθυστέρησης. Επιπλέον, ενώ η εξασφάλιση του URLLC σε επίπεδο ζεύξης σε ελεγχόμενα περιβάλλοντα είναι σχετικά εύκολη, η εξασφάλιση σε επίπεδο δικτύου και σε ευρεία περιοχή και σε απομακρυσμένα σενάρια (π.χ. απομακρυσμένη χειρουργική) είναι δύσκολη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για περιπτώσεις χρήσης σε τοπική περιοχή η καθυστέρηση οφείλεται κυρίως στην ασύρματη πρόσβαση στο μέσο, ενώ σε περιπτώσεις ευρείας περιοχής υπάρχουν καθυστερήσεις λόγω των ενδιάμεσων κόμβων/μονοπατιών, του fronthaul / backhaul και του πυρήνα/του cloud. Επιπλέον, ο τυπικός ρυθμός σφάλματος μπλοκ (BLER) των συστημάτων 4G είναι 10⁻², ο οποίος μπορεί να επιτευχθεί με κωδικοποίηση καναλιού (π.χ. κώδικας Turbo) και μηχανισμούς επαναμετάδοσης (π.χ. μέσω HARQ). Αντίθετα, οι απαιτήσεις επιδόσεων του URLLC είναι πιο αυστηρές με στόχο BLER [10⁻⁹ - 10⁻⁵] ανάλογα με την περίπτωση χρήσης (Ateya et al., 2018).

Από τη σκοπιά του φυσικού στρώματος, ο σχεδιασμός του URLLC αποτελεί πρόκληση, καθώς θα έπρεπε να ικανοποιεί δύο αντικρουόμενες απαιτήσεις: χαμηλή καθυστέρηση και εξαιρετικά υψηλή αξιοπιστία. Από τη μία πλευρά, η ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης επιβάλλει τη χρήση σύντομων πακέτων, η οποία με τη σειρά της προκαλεί σοβαρή υποβάθμιση του κέρδους κωδικοποίησης καναλιού. Από την άλλη πλευρά, η διασφάλιση της αξιοπιστίας απαιτεί περισσότερους πόρους (π.χ. ιστιμμία, πλεονασμό και επαναμεταδόσεις), αν και αυξάνει την καθυστέρηση (ιδίως για τον πλεονασμό στο πεδίο του χρόνου). Επιπλέον, το URLLC εγγυάται ένα σχεδιασμό συστήματος προσαρμοσμένο στις μοναδικές απαιτήσεις των διαφόρων κάθετων τομέων για τους οποίους ενδιαφέρει η ικανότητα διακοπής. Αυτό κυμαίνεται από τους χρήστες (συμπεριλαμβανομένων των χρηστών της άκρης της κυψέλης) που είναι συνδεδεμένοι στο δίκτυο ραδιοπρόσβασης και οι οποίοι πρέπει να λαμβάνουν ίδιο βαθμό εξυπηρέτησης, μέχρι τα οχήματα που μεταδίδουν αξιόπιστα τα μηνύματα ασφαλείας τους και τις βιομηχανικές εγκαταστάσεις, όπου οι αισθητήρες, οι ενεργοποιητές και οι ελεγκτές επικοινωνούν εντός πολύ σύντομων κύκλων (Li et al., 2018).

Εάν επιτύχει, το URLLC θα απελευθερώσει μια πληθώρα νέων εφαρμογών και θα ψηφιοποιήσει ένα πλήθος κάθετων κλάδων. Για παράδειγμα, ο επιδιωκόμενος χρόνος καθυστέρησης 1 ms (και ακόμη μικρότερος) είναι ζωτικής σημασίας για τη χρήση απτικής ανατροφοδότησης και αισθητήρων πραγματικού χρόνου που επιτρέπουν στους γιατρούς να εξετάζουν τα σώματα των ασθενών από ένα απομακρυσμένο χειρουργείο. Ομοίως, η κατασκευαστική βιομηχανία μπορεί να χειρίζεται βαριά μηχανήματα από απόσταση και να ελαχιστοποιεί άλλους πιθανούς κινδύνους. Για τους οπαδούς των σπορ, αντί να παρακολουθούν αγώνες του NBA στην τηλεόραση, η χρήση ενός σετ ακουστικών εικονικής πραγματικότητας (VR) επιτρέπει να έχουν θέα 360 μοιρών δίπλα στο γήπεδο, νιώθοντας την ένταση του πλήθους από την άνεση του σπιτιού. Η καθυστέρηση από άκρο σε άκρο για την XR (επαυξημένη, εικονική και καθηλωτική πραγματικότητα) αποτελεί σοβαρή πρόκληση που πρέπει να αντιμετωπιστεί. Ομοίως, η υπερ-υψηλή αξιοπιστία όσον αφορά την επιτυχή παράδοση ρυθμού πακέτων, η οποία μπορεί να είναι τόσο υψηλή όσο το $1 - 10^{-5}$ (ή ακόμη και $1 - 10^{-9}$), θα βοηθήσει στην αυτοματοποίηση των εργοστασίων, στην αιχμή του δόρατος της απομακρυσμένης παρακολούθησης και του ελέγχου. Αναμφίβολα, αυτές οι τεχνολογικές εξελίξεις θα είναι δυνατές μόνο με ένα κλιμακούμενο, εξαιρετικά αξιόπιστο και χαμηλής καθυστέρησης δίκτυο (Ashraf et al., 2018).

Στην ουσία, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3, το URLLC μπορεί να αναλυθεί σε τρία βασικά δομικά στοιχεία (Rényi, 1961):



Εικόνα 3: Ανατομία των δομικών στοιχείων του URLLC, που αποτελείται από την ουρά, την κλίμακα και τον κίνδυνο μαζί με τα μοναδικά χαρακτηριστικά τους.

Επιπλέον, επισημαίνονται μαθηματικά εργαλεία προσαρμοσμένα στις απαιτήσεις κάθε μπλοκ (Πηγή: Bastug et al., 2017).

• Κίνδυνος

Ο κίνδυνος συναντάται φυσικά όταν πρόκειται για λήψη αποφάσεων υπό αβεβαιότητα, όταν τα κανάλια μεταβάλλονται στο χρόνο και παρουσία δυναμικής δικτύου. Εδώ διακυβεύονται αποκεντρωμένοι ή ημι-κεντρικοί αλγόριθμοι που παρέχουν εγγυήσεις απόδοσης και ευρωστία, και κυρίως η θεωρία παιγνίων και η ενισχυτική μάθηση. Επιπλέον, η εντροπία Rényi είναι ένα πληροφοριοθεωρητικό κριτήριο που ποσοτικοποιεί με ακρίβεια την αβεβαιότητα που ενσωματώνεται σε μια κατανομή, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις στιγμές, περιλαμβάνοντας την εντροπία Shannon ως ειδική περίπτωση.

• Ουρά

Η έννοια της συμπεριφοράς ουράς στα ασύρματα συστήματα σχετίζεται εγγενώς με την ουρά της τυχαίας ζήτησης κίνησης, την ουρά της κατανομής της καθυστέρησης, την ενδοκυτταρική/διακυτταρική παρεμβολή και τους χρήστες που βρίσκονται στην άκρη της κυψέλης, με περιορισμένη ισχύ ή σε βαθιά εξασθένιση. Συνεπώς, απαιτείται ένα πλαίσιο αρχών και μαθηματικά εργαλεία που να χαρακτηρίζουν αυτές τις ουρές με έμφαση στα εκατοστημόρια και τα ακραία γεγονότα. Από αυτή την άποψη, η θεωρία

ακραίων τιμών, η μαθηματική χρηματοοικονομική και ο υπολογισμός δικτύων αποτελούν σημαντικές μεθοδολογίες.

- **Κλίμακα**

Αυτό έχει ως κίνητρο τον τεράστιο όγκο συσκευών, κεραιών, αισθητήρων και άλλων κόμβων που θέτουν σοβαρές προκλήσεις όσον αφορά την κατανομή των πόρων και τον σχεδιασμό του δικτύου. Η κλίμακα είναι ιδιαίτερα σημαντική για περιπτώσεις χρήσης επικοινωνίας τύπου μηχανής κρίσιμης αποστολής (π.χ. αυτοματοποίηση βιομηχανικών διαδικασιών), οι οποίες βασίζονται σε μεγάλο αριθμό αισθητήρων, ενεργοποιητών και ελεγκτών που απαιτούν επικοινωνία με πολύ υψηλή αξιοπιστία και χαμηλή καθυστέρηση από άκρο σε άκρο. Σε αντίθεση με τις δυσκίνητες και χρονοβόρες προσομοιώσεις Monte-Carlo, απαιτούνται μαθηματικά εργαλεία που επικεντρώνονται στην ανάλυση μεγάλων συστημάτων και παρέχουν μια εύχρηστη διατύπωση και γνώσεις. Για το σκοπό αυτό, η θεωρία μέσων πεδίων (και παιγνίων μέσων πεδίων), η στατιστική φυσική και η θεωρία τυχαίων πινάκων αποτελούν σημαντικά εργαλεία (Holfeld et al., 2016).

2.1. Αρχιτεκτονική και Δομή

Οι εξαιρετικά αξιόπιστες επικοινωνίες χαμηλής καθυστέρησης (Ultra Reliable Low Latency Communications - URLLC), ένα υποσύνολο της αρχιτεκτονικής του δικτύου 5G, εξασφαλίζουν αποτελεσματικότερο χρονοπρογραμματισμό των μεταφορών δεδομένων, επιτυγχάνοντας συντομότερες μεταδόσεις μέσω ενός μεγαλύτερου υποφορέα και ακόμη και χρονοπρογραμματισμό επικαλυπτόμενων μεταδόσεων. Υποστηρίζει εξαιρετικά σημαντική μεταφορά δεδομένων που απαιτεί χαμηλή καθυστέρηση, όπως τα αυτοκινούμενα αυτοκίνητα και οι απομακρυσμένες χειρουργικές επεμβάσεις (Lin, Liao & Wu, 2018).

Η αρχιτεκτονική του δικτύου 5G έχει σχεδιαστεί με γνώμονα τρεις βασικούς τομείς υπηρεσιών (Gupta & Jha, 2015):

- 1. Μαζικές επικοινωνίες τύπου μηχανής (massive machine-type communications - mMTC):** Αυτό θα χρησιμοποιηθεί για τη σύνδεση μεγάλου αριθμού συσκευών και αναμένεται να μεταμορφώσει τη βιομηχανία IoT.
- 2. Βελτιωμένη κινητή ευρυζωνικότητα (enhanced mobile broadband - eMBB):** Αυτό υποστηρίζει εφαρμογές υψηλού εύρους ζώνης, όπως η επαυξημένη/εικονική πραγματικότητα (AR και VR) και η ροή, παρέχοντας ταχύτερες ταχύτητες λήψης και βελτιωμένες εμπειρίες χρήστη.
- 3. Εξαιρετικά αξιόπιστη επικοινωνία χαμηλής καθυστέρησης (ultra-reliable low-latency communications - URLLC):** Αυτό θα χρησιμοποιείται για κρίσιμες εφαρμογές που απαιτούν εγγυημένη σύνδεση και χαμηλή καθυστέρηση.

Το URLLC υποστηρίζει περιπτώσεις χρήσης που απαιτούν υψηλή αξιοπιστία δικτύου, πάνω από 99,999%, και εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση περίπου 1 χιλιοστό του δευτερολέπτου για τη μετάδοση δεδομένων. Για παράδειγμα, η αυτόνομη οδήγηση θα απαιτούσε μια σύνδεση ικανή για κάτι τέτοιο, καθώς υπάρχει τόσο υψηλός κίνδυνος. Η αυτόνομη οδήγηση έχει ένα πλήθος πλεονεκτημάτων, από την εξοικονόμηση χρόνου έως τη βελτίωση της ασφάλειας με την εξάλειψη των λαθών του χρήστη. Ωστόσο, θα πρέπει όλα τα οχήματα να είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους από όχημα σε όχημα, καθώς και με τα οδικά συστήματα, από όχημα σε υποδομή, όπως τα συστήματα φωτεινών σηματοδοτών, οι υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης και τα προγράμματα συντήρησης του οδικού δικτύου. Τα δεδομένα θα πρέπει να διαμοιράζονται σε πραγματικό χρόνο, με ελάχιστη καθυστέρηση, καθώς οι απαιτήσεις ασφαλείας απαιτούν εξαιρετικά αξιόπιστες συνδέσεις (Gupta & Jha, 2015).

Τα έξυπνα εργοστάσια και η βιομηχανία 4.0 έχουν παρόμοιες απαιτήσεις, όπου τα μηχανήματα και η ρομποτική πρέπει να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους σε πραγματικό χρόνο. Μπορεί επίσης να απαιτούν πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο από άλλους αισθητήρες σε ολόκληρη την εγκατάσταση παραγωγής. Τα συστήματα χαμηλής καθυστέρησης επιτρέπουν σε αυτά τα μηχανοκίνητα συστήματα να λειτουργούν με ασφάλεια και αποτελεσματικότητα για την ενίσχυση των γραμμών παραγωγής.

Άλλες περιπτώσεις χρήσης θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν την εξ αποστάσεως και επαυξημένης πραγματικότητας υγειονομική περίθαλψη, όπως η εξ αποστάσεως χειρουργική επέμβαση, η έξυπνη διανομή ηλεκτρικής ενέργειας και τα παιχνίδια και η ψυχαγωγία που βασίζονται στο cloud (Gupta & Jha, 2015).

2.2. Αρχή λειτουργίας

Το network slicing, γνωστό και ως τεχνολογία software-defined networking (SDN), επιτρέπει σε κάθε μία από τις τρεις περιοχές 5G να λειτουργεί ξεχωριστά στο οικοσύστημα 5G. Κάθε περιοχή λειτουργεί ουσιαστικά ως το δικό της δίκτυο, με τις δικές της απαιτήσεις παροχής, ασφάλειας και ποιότητας υπηρεσιών. Έτσι, το mMTC, το οποίο απαιτεί χαμηλή ασφάλεια και χαμηλό εύρος ζώνης, διαχωρίζεται από το URLLC, το οποίο παρέχει υψηλή ασφάλεια και υψηλή αξιοπιστία. Ωστόσο, κάθε μία από αυτές τις περιοχές υπάρχει μέσα στην ίδια φυσική υποδομή δικτύου (Afolabi et al., 2018).

Το URLLC επιδεικνύει εξαιρετική αξιοπιστία και χαμηλή καθυστέρηση. Αυτό ορίζεται ως το να μην αποτυγχάνει να παραδοθεί πάνω από το 0,001% των πακέτων των 20 byte μετά από 1 ms. Η αρχιτεκτονική του δικτύου 5G στοχεύει στην εξάλειψη αυτών των αποτυχιών και σφαλμάτων παράδοσης χρησιμοποιώντας τεχνολογίες όπως η διαμόρφωση δέσμης, η τεμαχισμός δικτύου και τα πρωτόκολλα αναμετάδοσης πακέτων (Alsenwi et al., 2019).

Για να επιτευχθούν μεταδόσεις με εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση, η τεχνολογία 5G μπορεί να χρησιμοποιήσει πρόσβαση ανερχόμενης ζεύξης χωρίς παραχώρηση. Σε ένα σύστημα 4G LTE, είναι δεδομένο ότι η συσκευή χρήστη και ο σταθμός βάσης θα ανταλλάσσουν μια σειρά αιτημάτων σηματοδότησης, μια "χειραγία", πριν ανταλλάξουν δεδομένα. Ο σταθμός βάσης πρέπει να χορηγήσει πρόσβαση πριν από την αποστολή των δεδομένων, προσθέτοντας καθυστερήσεις έως και 11 ms.

Ένα σύστημα URLLC 5G μπορεί να χρησιμοποιήσει πρόσβαση χωρίς παραχώρηση, με την οποία οι σταθμοί βάσης μπορούν να δεσμεύουν χωρητικότητα για μεταδόσεις ανερχόμενης ζεύξης. Η συσκευή χρήστη δεν χρειάζεται να περιμένει για αιτήματα προγραμματισμού και παραχώρησης πρόσβασης, γεγονός που μειώνει δραματικά την

καθυστέρηση από άκρο σε άκρο. Όσον αφορά τα δεδομένα καθοδικής ζεύξης, οι πόροι μπορούν να διατεθούν από άλλες περιοχές δικτύου. Αυτό είναι γνωστό ως προεξόφληση και η συσκευή θα ειδοποιηθεί ότι ο τύπος σύνδεσης έχει αλλάξει (Anand et al., 2020).

2.3.Βασικές εκτιμήσεις για το URLLC

Η εισαγωγή του δικτύου 5G φέρνει αυξημένη πολυπλοκότητα του δικτύου που επιτρέπει τη χρήση νέων τεχνολογιών για την ικανοποίηση ενός ευρέος φάσματος καταναλωτικών και επιχειρηματικών απαιτήσεων. Αυτό με τη σειρά του σημαίνει διαφοροποίηση του κλάδου των επικοινωνιών, με έναν τεράστιο αριθμό ευκαιριών που προκύπτουν καθώς η διαθεσιμότητα του 5G γίνεται ευρύτερα διαδεδομένη σε όλο τον κόσμο. Ειδικότερα, το URLLC θα δώσει κινητή συνδεσιμότητα σε κρίσιμες εφαρμογές που συζητούνται εδώ και πολλά χρόνια, αλλά μόλις τώρα υλοποιούνται.

Οι σχεδιαστές ηλεκτρονικού υλικού και οι μηχανικοί λογισμικού θα αντιμετωπίσουν ακόμη μεγαλύτερες προκλήσεις όσον αφορά την ανάπτυξη συσκευών υψηλών επιδόσεων. Νέα πρωτόκολλα, μέθοδοι κωδικοποίησης και τεχνικές παροχής ενδέχεται να απαιτηθούν από τους προγραμματιστές λογισμικού για ορισμένες εφαρμογές, ώστε να εξασφαλιστεί η μέγιστη δυνατή ασφάλεια και αξιοπιστία. Το υπάρχον υλικό θα πρέπει επίσης να επικαιροποιηθεί ώστε να ανταποκρίνεται στις προδιαγραφές των ζωνών συχνοτήτων 5G, καθώς και στις συνεχώς εξελισσόμενες απαιτήσεις ταχύτητας και διάρκειας ζωής της μπαταρίας (Rao & Vrzic, 2018).

Δομή καναλιού

Προκειμένου να είναι δυνατή η μεταφορά των δεδομένων σε όλο το δίκτυο ραδιοπρόσβασης 5G, τα δεδομένα και οι πληροφορίες οργανώνονται σε διάφορα κανάλια δεδομένων.

Με την οργάνωση των δεδομένων σε διάφορα κανάλια, το σύστημα επικοινωνιών 5G είναι σε θέση να διαχειρίζεται τις μεταφορές δεδομένων με ομαλό τρόπο και το σύστημα είναι σε θέση να κατανοεί ποια δεδομένα φθάνουν και, ως εκ τούτου, είναι σε θέση να τα επεξεργάζεται με τον απαιτούμενο τρόπο (Wang et al., 2019).

Καθώς υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι δεδομένων που πρέπει να μεταφερθούν - τα δεδομένα του χρήστη προφανώς πρέπει να μεταφερθούν, αλλά και οι πληροφορίες ελέγχου για τη διαχείριση της ζεύξης ραδιοεπικοινωνιών, καθώς και τα δεδομένα για την παροχή συγχρονισμού, πρόσβασης και τα παρόμοια. Όλες αυτές οι λειτουργίες είναι απαραίτητες και απαιτούν τη μεταφορά δεδομένων μέσω του δικτύου ραδιοπρόσβασης.

Το σύστημα κινητών ή ασύρματων επικοινωνιών 5G χρησιμοποιεί ένα παρόμοιο στρώμα πρόσβασης με αυτό που χρησιμοποιεί το 4G LTE. Αν και υπάρχουν δύο στοίβες πρωτοκόλλων: επίπεδο χρήστη και επίπεδο ελέγχου, εξακολουθούν να υιοθετούν το γνωστό μοντέλο αναφοράς OSI. Ως αποτέλεσμα, υπάρχουν διάφορα στρώματα πρωτοκόλλου και αντίστοιχα υπάρχουν διάφορα στρώματα καναλιού δεδομένων που ορίζονται για τις ραδιοεπικοινωνίες (Wang et al., 2019)

2.4.Ιεραρχία καναλιών 5G

Προκειμένου να ομαδοποιηθούν τα δεδομένα που πρόκειται να αποσταλούν μέσω του δικτύου ραδιοπρόσβασης 5G NR, οργανώνονται με έναν πολύ λογικό τρόπο. Καθώς υπάρχουν πολλές διαφορετικές λειτουργίες για την ημερομηνία που αποστέλλεται μέσω της ζεύξης ραδιοεπικοινωνιών, πρέπει να επισημαίνονται σαφώς και να έχουν καθορισμένες θέσεις και μορφές (Zhu & Hossain, 2015).

Για να διασφαλιστεί αυτό, υπάρχουν πολλές διαφορετικές μορφές "καναλιού" δεδομένων που χρησιμοποιούνται. Τα υψηλότερου επιπέδου "χαρτογραφούνται" ή περιέχονται μέσα σε άλλα, μέχρι τελικά στο φυσικό επίπεδο, το κανάλι να περιέχει δεδομένα από κανάλια υψηλότερου επιπέδου.

Με αυτόν τον τρόπο υπάρχει μια λογική και διαχειρίσιμη ροή δεδομένων από τα υψηλότερα επίπεδα της στοίβας πρωτοκόλλων μέχρι το φυσικό επίπεδο.

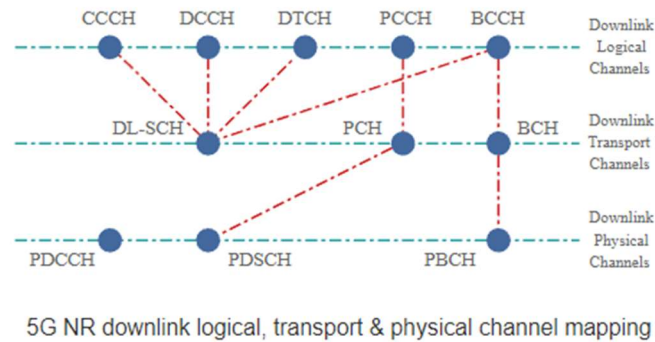
Υπάρχουν τρεις κύριοι τύποι καναλιών δεδομένων που χρησιμοποιούνται στα συστήματα κινητών επικοινωνιών. Αυτό ισχύει και για τα συστήματα 5G, και κατά συνέπεια η ιεραρχία δίνεται παρακάτω (Zhu & Hossain, 2015):

- **Λογικό κανάλι:** Τα λογικά κανάλια μπορούν να ανήκουν σε δύο ομάδες: κανάλια ελέγχου και κανάλια κίνησης:
- **Κανάλια ελέγχου:** Τα κανάλια ελέγχου χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά δεδομένων από το επίπεδο ελέγχου
- **Κανάλια κυκλοφορίας:** Τα λογικά κανάλια κίνησης χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά δεδομένων από το επίπεδο χρήστη.
- **Κανάλια μεταφοράς:** Είναι η πολυπλεξία των λογικών δεδομένων που θα μεταφερθούν από το φυσικό επίπεδο και τα κανάλια του μέσω της ραδιοδιεπαφής.
- **Φυσικό κανάλι:** Τα φυσικά κανάλια είναι εκείνα που βρίσκονται πιο κοντά στην πραγματική μετάδοση των δεδομένων μέσω του δικτύου ραδιοπρόσβασης / σήματος RF 5G. Χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά των δεδομένων μέσω της ραδιοδιεπαφής.

Τα φυσικά κανάλια έχουν συχνά κανάλια υψηλότερου επιπέδου που αντιστοιχίζονται σε αυτά για την παροχή μιας συγκεκριμένης υπηρεσίας. Επιπλέον, τα φυσικά κανάλια μεταφέρουν δεδομένα ωφέλιμου φορτίου ή λεπτομέρειες συγκεκριμένων χαρακτηριστικών μετάδοσης δεδομένων, όπως διαμόρφωση, πολυπλεξία σήματος αναφοράς, ισχύς μετάδοσης, πόροι RF κ.λπ. (Zaidi et al., 2018).

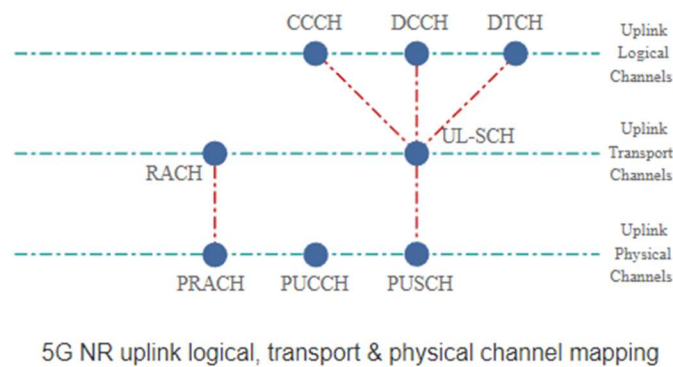
Χαρτογράφηση καναλιών συστήματος ασύρματων επικοινωνιών 5G

Τα ονόματα των καναλιών, τόσο για την ανερχόμενη όσο και για την κατερχόμενη ζεύξη είναι ουσιαστικά τα ίδια με αυτά που χρησιμοποιούνται για το 4G LTE. Ωστόσο, τα ονόματα και οι περιγραφές των καναλιών που χρησιμοποιούνται για το σύστημα επικοινωνιών 5G παρατίθενται παρακάτω, στην προκειμένη περίπτωση για την κατερχόμενη ζεύξη (Sun & Du, 2017).



Εικόνα 4: Χαρτογράφηση λογικών, μεταφορικών και φυσικών καναλιών 5G NR downlink (Πηγή: Sun & Du, 2017).

Η ανερχόμενη ζεύξη από τον εξοπλισμό χρήστη προς το σταθμό βάσης διαθέτει επίσης μια ποικιλία καναλιών τα οποία αντιστοιχίζονται με παρόμοιο τρόπο με εκείνα για την κατερχόμενη ζεύξη του συστήματος κινητών επικοινωνιών 5G.



Εικόνα 5: Χαρτογράφηση λογικών, μεταφορικών και φυσικών καναλιών 5G NR uplink (Πηγή: Sun & Du, 2017).

2.5. Λογικά κανάλια 5G NR

Υπάρχουν πολλά διαφορετικά λογικά κανάλια που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο ραδιοπρόσβασης 5G NR. Ορισμένα από αυτά θα είναι γνωστά ονόματα από το σύστημα 4G LTE, καθώς τα ονόματα έχουν μεταφερθεί (Rinaldi, Raschella & Pizzi, 2021):

- **Κανάλι ελέγχου εκπομπής, BCCH:** Το BCCH χρησιμοποιείται στην καθοδική ζεύξη και χρησιμοποιείται για την αποστολή πληροφοριών τύπου εκπομπής στους εξοπλισμούς χρηστών εντός της κυψέλης. Οι πληροφορίες συστήματος που μεταδίδονται από το 5G NR BCCH χωρίζονται σε διαφορετικά μπλοκ:
 - Master Information Block, MIB: Υπάρχει ένα MIB και αυτό αντιστοιχίζεται στο κανάλι μεταφοράς BCH και στη συνέχεια στο φυσικό κανάλι PBCH.
 - Μπλοκ πληροφοριών συστήματος, SIB: Υπάρχουν διάφορα μπλοκ πληροφοριών συστήματος, SIB. Αυτά αντιστοιχίζονται στο κανάλι μεταφοράς DL-SCH και στη συνέχεια στο φυσικό κανάλι PDSCH.
- **Κανάλι ελέγχου σελιδοποίησης, PCCH:** Πρόκειται για κανάλι κάτω ζεύξης. Χρησιμοποιείται για την κλήση των UE των οποίων η θέση σε επίπεδο κυψέλης δεν είναι γνωστή στο δίκτυο. Ως αποτέλεσμα, το μήνυμα σελιδοποίησης πρέπει να μεταδοθεί σε πολλαπλές κυψέλες. Το PCCH αντιστοιχίζεται στο κανάλι μεταφοράς PCH και στη συνέχεια στο φυσικό κανάλι PDSCH.
- **Κοινό κανάλι ελέγχου, CCCH:** Αυτό το κανάλι 5G χρησιμοποιείται τόσο στην κατερχόμενη όσο και στην ανερχόμενη ζεύξη για τη μετάδοση πληροφοριών ελέγχου από και προς τους εξοπλισμούς χρήστη ή τα κινητά. Το κανάλι χρησιμοποιείται για αρχική πρόσβαση, δηλαδή για τα κινητά που δεν έχουν σύνδεση ελέγχου ραδιοπόρων, RRC.
- **Αφιερωμένο κανάλι ελέγχου, DCCH:** Το DCCH χρησιμοποιείται εντός της ανοδικής και καθοδικής ζεύξης για τη μεταφορά αποκλειστικών πληροφοριών ελέγχου μεταξύ του UE ή του κινητού και του δικτύου. Χρησιμοποιείται από

το UE και το δίκτυο μετά την εγκαθίδρυση μιας σύνδεσης ελέγχου ραδιοπόρων, RRC.

- **Αφιερωμένο κανάλι κίνησης, DTCH:** Αυτό το κανάλι 5G είναι παρόν τόσο στην ανοδική όσο και στην καθοδική ζεύξη. Είναι αφιερωμένο σε ένα UE και χρησιμοποιείται για τη μεταφορά πληροφοριών χρήστη από και προς ένα συγκεκριμένο UE και το δίκτυο.

2.6.Κανάλια μεταφοράς 5G NR

Υπάρχουν πέντε διαφορετικά κανάλια μεταφοράς. Ορισμένα χρησιμοποιούνται στην ανοδική ζεύξη, άλλα στην καθοδική ζεύξη και ορισμένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στα δύο (Ahmadi, 2019):

- **Κανάλι εκπομπής, BCH:** Το κανάλι BCH 5G χρησιμοποιείται στην καθοδική ζεύξη μόνο για τη μετάδοση των πληροφοριών συστήματος BCCH και συγκεκριμένα των πληροφοριών Master Information Block, MIB. Προκειμένου τα δεδομένα να μπορούν να αξιοποιηθούν, έχουν συγκεκριμένη μορφή.
- **Κανάλι σελιδοποίησης, PCH:** Το PCH χρησιμοποιείται για τη μεταφορά πληροφοριών σελιδοποίησης από το λογικό κανάλι PCCH. Το PCH υποστηρίζει ασυνεχή λήψη, DRX, για να μπορέσει το UE να εξοικονομήσει ισχύ μπαταρίας λειτουργώντας σε συγκεκριμένη ώρα για να λάβει το PCH.

Προκειμένου το PCH να λαμβάνεται από όλα τα κινητά / UEs στην κυψέλη, το PCH πρέπει να μεταδοθεί σε ολόκληρη την κυψέλη ως ένα ενιαίο μήνυμα, ή όπου χρησιμοποιείται σχηματισμός δέσμης, αυτό μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας πολλές διαφορετικές περιπτώσεις PCH (Ahmadi, 2019):

- **Downlink Shared Channel, DL-SCH:** Όπως υποδηλώνει το όνομα, πρόκειται για ένα κανάλι μόνο για την καθοδική ζεύξη. Είναι το κύριο κανάλι μεταφοράς που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση δεδομένων καθοδικής ζεύξης και υποστηρίζει όλα τα βασικά χαρακτηριστικά του 5G NR. Αυτά περιλαμβάνουν: δυναμική προσαρμογή ρυθμού- HARQ, και αλγόριθμους για channel aware scheduling και πολυπλεξία.

Το DL-SCH χρησιμοποιείται επίσης για τη μετάδοση ορισμένων τμημάτων των πληροφοριών συστήματος BCCH, συγκεκριμένα του SIB. Κάθε UE διαθέτει ένα DL-SCH για κάθε κυψέλη στην οποία συνδέεται (Ahmadi, 2019):

- **Uplink Shared Channel, UL-SCH:** Πρόκειται για το αντίστοιχο κανάλι ανοδικής ζεύξης του DL-SCH, δηλαδή το κανάλι μεταφοράς ανοδικής ζεύξης που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση δεδομένων ανοδικής ζεύξης.
- **Κανάλι τυχαίας πρόσβασης, RACH:** Το RACH είναι ένα κανάλι μεταφοράς, το οποίο μεταφέρει το προοίμιο τυχαίας πρόσβασης το οποίο χρησιμοποιείται για να ξεπεραστούν οι συγκρούσεις μηνυμάτων που μπορεί να προκύψουν όταν τα UEs έχουν ταυτόχρονη πρόσβαση στο σύστημα.

2.7. Κανάλια δεδομένων φυσικού επιπέδου 5G NR

Τα φυσικά κανάλια 5G χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά πληροφοριών μέσω της πραγματικής ραδιοδιεπαφής. Σε αυτά αντιστοιχίζονται τα κανάλια μεταφοράς όπως φαίνεται στα διαγράμματα, αλλά περιλαμβάνουν επίσης διάφορα δεδομένα φυσικού επιπέδου που απαιτούνται για τη συντήρηση και τη βελτιστοποίηση της ζεύξης ραδιοεπικοινωνιών μεταξύ του UE και του σταθμού βάσης (Campos, 2017).

Τα κανάλια φυσικού επιπέδου κινητών επικοινωνιών 5G μοιάζουν με αυτά του 4G LTE, αλλά τα PCH και PCPCH έχουν αφαιρεθεί. Η λειτουργία HARQ έχει επίσης επικαιροποιηθεί ώστε να είναι πιο ευέλικτη. Επίσης, το κανάλι ελέγχου καθοδικής ζεύξης PDCCH διαχειρίζεται τώρα από διαδικασίες επιπέδου 3 (Campos, 2017).

Υπάρχουν τρία φυσικά κανάλια για καθένα από τα uplink και downlink:

2.8. Φυσικά κανάλια 5G NR Downlink

- **Φυσικό κοινόχρηστο κανάλι κατερχόμενης ζεύξης, PDSCH:** Το φυσικό κοινόχρηστο κανάλι κατερχόμενης ζεύξης 5G NR, PDSCH μεταφέρει δεδομένα που μοιράζονται τη χωρητικότητα σε βάση χρόνου και συχνότητας. Το φυσικό κανάλι PDSCH μεταφέρει μια ποικιλία στοιχείων δεδομένων: δεδομένα χρήστη, μηνύματα ελέγχου υψηλότερου στρώματος που αφορούν το UE και αντιστοιχίζονται από υψηλότερα κανάλια, μπλοκ πληροφοριών συστήματος (SIB) και σελιδοποίηση.

Το PDSCH χρησιμοποιεί μια προσαρμοστική μορφή διαμόρφωσης που εξαρτάται από τις συνθήκες σύνδεσης, δηλαδή το λόγο σήματος προς θόρυβο. Χρησιμοποιεί επίσης ένα ευέλικτο σχήμα κωδικοποίησης. Ο συνδυασμός αυτών σημαίνει ότι υπάρχει ευέλικτη κωδικοποίηση και ρυθμός δεδομένων (Braun et al., 2019).

- **Φυσικό κανάλι ελέγχου κάτω ζεύξης, PDCCH:** Όπως υποδηλώνει το όνομα, το φυσικό κανάλι ελέγχου κάτω ζεύξης 5G μεταφέρει δεδομένα ελέγχου κάτω ζεύξης. Η κύρια λειτουργία του είναι ο προγραμματισμός των μεταδόσεων downlink στο PDSCH και επίσης των μεταδόσεων δεδομένων uplink στο PUSCH.

Το PDCCH χρησιμοποιεί QPSK ως μορφή διαμόρφωσης και πολική κωδικοποίηση ως σχήμα κωδικοποίησης, εκτός από τα μικρά πακέτα δεδομένων (Braun et al., 2019).

- **Φυσικό κανάλι εκπομπής, PBCH:** Αυτό το κανάλι 5G αποτελεί μέρος του μπλοκ σήματος συγχρονισμού. Η λειτουργία του είναι να παρέχει στα UE το μπλοκ κύριων πληροφοριών, MIB. Μια περαιτέρω λειτουργία του PBCH σε συνδυασμό με το κανάλι ελέγχου είναι η υποστήριξη του συγχρονισμού του

χρόνου και της συχνότητας. Αυτό βοηθά στην απόκτηση, επιλογή και επανεπιλογή κυψελών.

Το PBCH χρησιμοποιεί σταθερή μορφή δεδομένων και υπάρχει ένα μπλοκ που εκτείνεται σε ένα TTI 80 ms.

Το PBCH χρησιμοποιεί διαμόρφωση QPSK και μεταδίδει ένα μοτίβο σήματος αναφοράς αποδιαμόρφωσης για συγκεκριμένη κυψέλη, μοτίβο DMRS, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διαμόρφωση δέσμης (Braun et al., 2019).

2.8. Φυσικά κανάλια 5G NR Uplink

- **Φυσικό κανάλι τυχαίας πρόσβασης, PRACH:** Αυτό το κανάλι 5G, χρησιμοποιείται για την πρόσβαση στο κανάλι. Εκπέμπει ένα αρχικό προοίμιο τυχαίας πρόσβασης που αποτελείται από ακολουθίες οι οποίες μπορεί να έχουν δύο διαφορετικά μήκη:

Μια μακρά ακολουθία είναι η 839 η οποία εφαρμόζεται στις αποστάσεις των υποφορέων 1,25kHz και 5 kHz (Cassiau et al., 2018).

Μια σύντομη ακολουθία μήκους 139 εφαρμόζεται σε αποστάσεις υποφορέων 15 kHz και 30 kHz (ζώνες FR1) και 60 kHz και 120 kHz (ζώνες FR2).

- **Φυσικό κοινόχρηστο κανάλι ανοδικής ζεύξης, PUSCH:** Το φυσικό κοινόχρηστο κανάλι ανοδικής ζεύξης 5G, PUSCH, είναι το αντίστοιχο του PDSCCH. Χρησιμοποιείται για τη μεταφορά δεδομένων από το UL-SCH και τα υψηλότερα χαρτογραφημένα κανάλια του σε κοινή βάση συχνότητας και χρόνου.

Όπως και το PDSCH, το PUSCH έχει επίσης μια πολύ ευέλικτη μορφή. Η κατανομή των πόρων συχνότητας γίνεται με τη χρήση μπλοκ πόρων με ένα ευέλικτο σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που εξαρτάται από το SNR της ζεύξης (Cassiau et al., 2018).

Για την υποστήριξη της εκτίμησης και αποδιαμόρφωσης της σύνδεσης καναλιού, το PUSCH περιέχει σήματα DMRS.

- **Φυσικό κανάλι ελέγχου ανερχόμενης ζεύξης, PUCCH:** Το φυσικό κανάλι ελέγχου ανερχόμενης ζεύξης 5G, PUCCH, μεταφέρει τα δεδομένα ελέγχου ανερχόμενης ζεύξης. Είναι επίσης πιθανό, ανάλογα με την κατανομή των πόρων, οι πληροφορίες ελέγχου άνω ζεύξης ή τα δεδομένα να αποστέλλονται επίσης στο PUSCH, παρόλο που στην κατεύθυνση της κάτω ζεύξης, οι πληροφορίες ελέγχου αποστέλλονται πάντα στο PDCCH.

Η χρήση αυτών των καναλιών 5G παρέχει μια μέθοδο για την οργάνωση της ροής δεδομένων μέσω της ραδιοδιεπαφής του δικτύου επικοινωνιών 5G. Η χρήση καναλιών επιτρέπει στο σύστημα επικοινωνιών να αναγνωρίζει τον τύπο των δεδομένων που αποστέλλονται και να τα διαχειρίζεται ανάλογα. Η μορφή που χρησιμοποιείται είναι πολύ παρόμοια με εκείνη που χρησιμοποιείται στο 4G LTE και βασίζεται στην τεχνολογία προηγούμενων γενεών κινητών επικοινωνιών ή κινητών τηλεφώνων (Cassiau et al., 2018).

Χαρακτηριστικά

Σε αυτή την ενότητα εξετάζονται οι βασικοί παράγοντες για την επικοινωνία χαμηλής καθυστέρησης και υψηλής αξιοπιστίας.

1. Χαμηλή καθυστέρηση

Η ανάλυση της καθυστέρησης αποδίδει ντετερμινιστικές και τυχαίες συνιστώσες που είτε είναι σταθερές είτε κλιμακώνονται με τον αριθμό των κόμβων. Ενώ η ντετερμινιστική συνιστώσα καθορίζει την ελάχιστη καθυστέρηση, οι τυχαίες

συνιστώσες επηρεάζουν την κατανομή της καθυστέρησης και πιο συγκεκριμένα τις ουρές της. Οι ντετερμινιστικές συνιστώσες λανθάνουσας κατάστασης αποτελούνται από το χρόνο μετάδοσης πληροφοριών και γενικών εξόδων (δηλ. bit ισοτιμίας, σήματα αναφοράς και δεδομένα ελέγχου), καθώς και από τους χρόνους αναμονής μεταξύ των μεταδόσεων. Οι τυχαίες συνιστώσες περιλαμβάνουν το χρόνο επαναμετάδοσης πληροφοριών και γενικών εξόδων όταν είναι απαραίτητο, καθυστερήσεις στην ουρά, τυχαίους χρόνους επαναφοράς και άλλες καθυστερήσεις επεξεργασίας/υπολογισμού. Στη συνέχεια, εξετάζονται διάφοροι παράγοντες για την επικοινωνία χαμηλής καθυστέρησης (Alsenwi et al., 2019):

- **Σύντομο χρονικό διάστημα μετάδοσης (Transmission Time Interval - TTI), σύντομη δομή πλαισίου και υβριδικό αίτημα αυτόματης επανάληψης (Hybrid Automatic Repeat Request - HARQ)**

Η μείωση της διάρκειας του TTI (π.χ. από 1 ms στο LTE σε 0,125 ms όπως στο νέο ραδιόφωνο 5G) με τη χρήση λιγότερων συμβόλων OFDM ανά TTI και η συντόμευση των συμβόλων OFDM μέσω μεγαλύτερης απόστασης υποφερόντων, καθώς και η μείωση του χρόνου μετάδοσης HARQ (roundtrip time - RTT) μειώνουν την καθυστέρηση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι απαιτείται λιγότερος χρόνος για να γίνουν αρκετές αναμεταδόσεις HARQ ώστε να επιτευχθεί ένας στόχος αξιοπιστίας και να γίνει ανεκτή μεγαλύτερη καθυστέρηση στην ουρά πριν από την προθεσμία (λόγω των περιορισμών των αναμεταδόσεων HARQ). Επιπλέον, η μείωση της διάρκειας του συμβόλου OFDM αυξάνει την απόσταση των υποφορέων και συνεπώς είναι διαθέσιμα λιγότερα μπλοκ πόρων στο πεδίο της συχνότητας, προκαλώντας μεγαλύτερο φαινόμενο αναμονής στην ουρά. Από την άλλη πλευρά, η μικρότερη διάρκεια TTI εισάγει περισσότερη επιβάρυνση ελέγχου μειώνοντας έτσι τη χωρητικότητα (χαμηλότερη διαθεσιμότητα πόρων για άλλες μεταδόσεις δεδομένων URLLC). Αυτό το μειονέκτημα μπορεί να αμβλυνθεί με τη χρήση μετάδοσης χωρίς παραχώρηση στην ανοδική ζεύξη. Στην κάτω ζεύξη, απαιτούνται μεγαλύτερες TTI σε υψηλά προσφερόμενα φορτία για να αντιμετωπιστούν μη αμελητέες καθυστερήσεις ουράς (Alsenwi et al., 2019).

- **Πολυπλεξία eMBB/URLLC**

Αν και η στατική/ημι-στατική κατανομή των πόρων μεταξύ των μεταδόσεων eMBB και URLLC μπορεί να είναι προτιμότερη από την άποψη της καθυστέρησης/αξιοπιστίας, είναι αναποτελεσματική από την άποψη της χρήσης των πόρων του συστήματος, απαιτώντας μια λύση δυναμικής πολυπλεξίας. Η επίτευξη υψηλής αξιοπιστίας του συστήματος για το URLLC απαιτεί τη διάθεση περισσότερων πόρων του τομέα συχνότητας σε μια μετάδοση ανοδικής ζεύξης (uplink - UL) αντί της ενίσχυσης της ισχύος σε πόρους στενής ζώνης. Αυτό σημαίνει ότι απαιτούνται πόροι ευρείας ζώνης για τη μετάδοση UL του URLLC για την επίτευξη υψηλής αξιοπιστίας με χαμηλή καθυστέρηση. Επιπλέον, απαιτούνται έξυπνες τεχνικές για τον χρονικό προγραμματισμό προκειμένου να προτιμηθεί μία άλλη προγραμματισμένη κίνηση όταν ένα πακέτο χαμηλής καθυστέρησης φτάνει στη μέση του πλαισίου (δηλαδή, διακόπτοντας την τρέχουσα μετάδοση eMBB). Ταυτόχρονα, η κυκλοφορία eMBB θα πρέπει να επηρεάζεται ελάχιστα κατά τη μεγιστοποίηση της χωρητικότητας διακοπής URLLC (Li, Jiang, Chen, Ji & Smees, 2017).

- **Κρυφή αποθήκευση δεδομένων, υπολογισμός και τεμαχισμός**

Έχει αποδειχθεί ότι η προώθηση της κρυφής αποθήκευσης δεδομένων και των υπολογιστικών πόρων στην άκρη του δικτύου μειώνει σημαντικά την καθυστέρηση. Η τάση αυτή θα συνεχιστεί αμείωτη με την έλευση εφαρμογών έντασης πόρων (π.χ. εικονική πραγματικότητα) και άλλων κρίσιμων εφαρμογών (π.χ. αυτόνομη οδήγηση). Παράλληλα, η τμηματοποίηση του δικτύου θα διαδραματίσει επίσης καθοριστικό ρόλο στην κατανομή αποκλειστικής προσωρινής αποθήκευσης, εύρους ζώνης και υπολογιστικών πόρων (περιοχές) (Li, Jiang, Chen, Ji & Smees, 2017).

- **Μηχανική μάθηση και τεχνητή νοημοσύνη (AI) στην άκρη του δικτύου**

Η μηχανική μάθηση (ML) αποτελεί το θεμέλιο των προληπτικών και χαμηλής καθυστέρησης δικτύων. Η παραδοσιακή ML βασίζεται στην αρχή ενός και μόνο κόμβου (σε κεντρική τοποθεσία) με πρόσβαση στο παγκόσμιο σύνολο δεδομένων και τεράστιο όγκο αποθήκευσης και υπολογιστών, που φιλτράρει αυτά τα δεδομένα για

ταξινόμηση και εξαγωγή συμπερασμάτων. Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση είναι σαφώς ανεπαρκής για εφαρμογές ευαίσθητες στην καθυστέρηση και υψηλής αξιοπιστίας, προκαλώντας τεράστιο ενδιαφέρον για την κατανεμημένη ML. Αυτό επιβάλλει ένα νέο κλιμακούμενο και κατανεμημένο πλαίσιο μηχανικής μάθησης, στο οποίο τα δεδομένα εκπαίδευσης που περιγράφουν το πρόβλημα αποθηκεύονται με κατανεμημένο τρόπο σε έναν αριθμό διασυνδεδεμένων κόμβων και το πρόβλημα βελτιστοποίησης επιλύεται συλλογικά. Αυτό αποτελεί το επόμενο σύνορο για την ML, που αναφέρεται επίσης ως AI-on-edge ή on-device ML (Konečný et al., 2016).

- **Πρόσβαση χωρίς παραχώρηση έναντι πρόσβασης με βάση την παραχώρηση**

Αυτό σχετίζεται με τον δυναμικό χρονικό προγραμματισμό της ζεύξης ανόδου ή την πρόσβαση με βάση τον ανταγωνισμό για σποραδική/καταιγιστική κυκλοφορία έναντι του μόνιμου χρονικού προγραμματισμού για περιοδική κυκλοφορία. Υποστηρίζεται η γρήγορη πρόσβαση στην άνω ζεύξη για συσκευές σε βάρος της χαμηλότερης χωρητικότητας (λόγω της εκ των προτέρων κατανομής πόρων). Για τον ημι-μόνιμο προγραμματισμό οι αχρησιμοποίητοι πόροι μπορούν να ανακατανεμηθούν στην κίνηση eMBB. Σε μια άλλη λύση που αναφέρεται ως ομαδικός ημι-διαρκής χρονικός προγραμματισμός, η πρόσβαση με βάση τον ανταγωνισμό πραγματοποιείται εντός μιας ομάδας χρηστών με παρόμοια χαρακτηριστικά, ελαχιστοποιώντας έτσι τις συγκρούσεις εντός της ομάδας. Στην περίπτωση αυτή ο σταθμός βάσης ελέγχει το φορτίο και προσαρμόζει δυναμικά το μέγεθος της δεξαμενής πόρων. Για τις αναμεταδόσεις, ο BS θα μπορούσε επίσης να προγραμματίσει προληπτικά μια ευκαιρία αναμετάδοσης που μοιράζεται από μια ομάδα UE με παρόμοια κίνηση για καλύτερη αξιοποίηση των πόρων. Από την άλλη πλευρά, η πρόσβαση χωρίς παραχώρηση συντομεύει τη διαδικασία για την ανάθεση πόρων άνω ζεύξης, με την οποία παραλείπεται η φάση κράτησης (Samarakoon et al., 2018).

- **Μη ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση (Non-orthogonal multiple access - NOMA)**

Η NOMA (και οι παραλλαγές της) μειώνει την καθυστέρηση υποστηρίζοντας πολύ περισσότερους χρήστες από τις συμβατικές προσεγγίσεις που βασίζονται στην ορθογωνική πρόσβαση, αξιοποιώντας την πολυπλεξία ισχύος ή το πεδίο κώδικα στην άνω ζεύξη, χρησιμοποιώντας στη συνέχεια διαδοχική ακύρωση παρεμβολών (successive interference cancellation - SIC), ή πιο προηγμένα σχήματα δέκτη (π.χ. πέραςμα μηνυμάτων ή λήψη Turbo). Ωστόσο, δεν είναι καλά κατανοητά τα ζητήματα που σχετίζονται με τις ατελείς πληροφορίες κατάστασης καναλιού (channel state information - CSI), τη διάταξη των χρηστών, την καθυστέρηση επεξεργασίας λόγω πολυπλεξίας και άλλες δυναμικές που επηρεάζουν την καθυστέρηση (και την αξιοπιστία) (Islam et al., 2016).

- **Δορυφόροι χαμηλής/μέσης τροχιάς (LEO/MEO) και μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAV)**

Ωστόσο, οι ενσύρματες συνδέσεις είναι ακριβές και μερικές φορές ανέφικτες λόγω γεωγραφικών περιορισμών, όπως οι απομακρυσμένες περιοχές. Στην περίπτωση αυτή, τα UAV μπορούν να επιτρέψουν μια αξιόπιστη και χαμηλής καθυστέρησης ασύρματη συνδεσιμότητα backhaul για τα επίγεια δίκτυα. Επιπλέον, για εφαρμογές μεγάλης εμβέλειας ή σε αγροτικές περιοχές, οι δορυφόροι LEO είναι ο μόνος τρόπος για τη μείωση της καθυστέρησης backhaul στην οποία μια υβριδική αρχιτεκτονική αποτελούμενη από αερόστατα, LEO/MEO και άλλα στρατοσφαιρικά οχήματα είναι ενεργοποιητές επικοινωνίας χαμηλής καθυστέρησης (Ahmadi, 2019).

- **Κοινή ευέλικτη κατανομή πόρων για ανοδική/καθοδική ζεύξη**

Για συστήματα διπλής ζεύξης με διαίρεση χρόνου (Time Division Duplex - TDD), απαιτείται κοινή κατανομή ανοδικής/καθοδικής ζεύξης και η αλληλεπίδραση του μήκους της χρονοθυρίδας σε σχέση με το κόστος μεταγωγής (ή turn around). Το θέμα αυτό έχει μελετηθεί στο πλαίσιο του LTE-A. Εδώ, για το σύστημα διπλής διαίρεσης συχνότητας (Frequency Division Duplex - FDD) διερευνώνται τόσο η εξέλιξη του LTE όσο και το νέο ραδιόφωνο (New Radio - NR), ενώ για το TDD διερευνάται μόνο το NR, δεδομένου ότι το LTE TDD δεν εξετάζεται για τις βελτιώσεις URLLC (Ahmadi, 2019).

2. Αξιοπιστία

Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την αξιοπιστία προέρχονται από (Kalør et al., 2017):

- συγκρούσεις με άλλους χρήστες λόγω μη συντονισμένης πρόσβασης στο κανάλι
- συνύπαρξη με άλλα συστήματα στις ίδιες ζώνες συχνοτήτων
- παρεμβολές από χρήστες σε γειτονικά κανάλια
- μετατοπίσεις Doppler από κινούμενες συσκευές
- δυσκολία συγχρονισμού
- ξεπερασμένες πληροφορίες για την κατάσταση του καναλιού
- χρονικά μεταβαλλόμενες επιδράσεις του καναλιού ή καθυστερημένη λήψη πακέτων.

Η αξιοπιστία σε επίπεδο φυσικού επιπέδου (συνήθως εκφραζόμενη σε ρυθμό σφάλματος μπλοκ) εξαρτάται από παράγοντες όπως το κανάλι, ο σχηματισμός, οι κώδικες ανίχνευσης σφαλμάτων, η τεχνική διαμόρφωσης, η ποικιλομορφία, οι μηχανισμοί αναμετάδοσης κ.λπ. Μια ποικιλία τεχνικών για την αύξηση της αξιοπιστίας περιλαμβάνει τη χρήση κωδικών χαμηλού ρυθμού για να υπάρχει αρκετός πλεονασμός σε κακές συνθήκες καναλιού, επαναμεταδόσεις για διόρθωση σφαλμάτων και ARQ στο επίπεδο μεταφοράς. Κρίσιμα, η ποικιλομορφία και η διαμόρφωση δέσμης παρέχουν πολλαπλές ανεξάρτητες διαδρομές από τον πομπό στον δέκτη και για την ενίσχυση του λαμβανόμενου λόγου σήματος προς θόρυβο (signal-to-noise ratio - SNR). Η ποικιλομορφία συχνότητας συμβαίνει όταν η πληροφορία μεταδίδεται μέσω ενός καναλιού επιλεκτικής συχνότητας, ενώ η χρονική ποικιλομορφία συμβαίνει όταν μια κωδική λέξη διόρθωσης σφαλμάτων προς τα εμπρός (Forward Error Correction - FEC) κατανέμεται σε πολλούς χρόνους συνοχής, ώστε να βλέπει πολλά διαφορετικά κανάλια (π.χ. με τη χρήση HARQ). Η ποικιλομορφία πολλαπλών χρηστών προκύπτει όταν μια μετάδοση αναμεταδίδεται από διαφορετικούς χρήστες από την πηγή στον προορισμό. Στη συνέχεια, συζητούνται διάφοροι παράγοντες αξιοπιστίας:

- **Πολυ-συνδεσιμότητα και αξιοποίηση της ποικιλομορφίας χρόνου/συχνότητας/RAT**

Ενώ η ποικιλομορφία είναι απαραίτητη, η χρονική ποικιλομορφία δεν αποτελεί βιώσιμη λύση όταν η ανεκτή καθυστέρηση είναι μικρότερη από το χρόνο συνοχής του καναλιού ή όταν οι απαιτήσεις αξιοπιστίας είναι πολύ αυστηρές. Από την άλλη πλευρά, η ποικιλομορφία συχνότητας μπορεί να μην κλιμακώνεται με τον αριθμό των χρηστών/συσκευών, καθιστώντας τη χωρική ποικιλομορφία τη μόνη λύση. Από αυτή την άποψη, η πολυ-συνδεσιμότητα είναι υψίστης σημασίας για την εξασφάλιση υψηλής αξιοπιστίας επικοινωνίας (Luvisotto, Pang & Dzung, 2016).

- **Πολυεκπομπή**

Όταν οι παραλήπτες ενδιαφέρονται για τις ίδιες πληροφορίες (π.χ. ασφάλεια της κυκλοφορίας σε κρίσιμες αποστολές ή ένα κοινό οπτικό πεδίο στην εικονική πραγματικότητα), η πολυεκπομπή είναι πιο αξιόπιστη από τη χρήση μονοεκπομπής. Ωστόσο, η αξιοπιστία μπορεί να είναι ευαίσθητη στο εύρος κάλυψης, στο σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (Modulation and Coding Scheme - MCS) που χρησιμοποιείται εντός της ομάδας πολλαπλής διανομής και στο ποιος καθορίζει το MCS. Επιπλέον, η χρησιμότητα της πολλαπλής διανομής θα εξαρτηθεί από το αν η μετάδοση είναι μεγάλης ή μικρής εμβέλειας, καθώς η απόδοση περιορίζεται εγγενώς από τους χρήστες των άκρων των κυψελών (Luvisotto, Pang & Dzung, 2016).

- **Αναπαραγωγή δεδομένων (περιεχόμενο και υπολογισμοί)**

Απαιτείται όταν δεν είναι δυνατός ο συντονισμός μεταξύ των κόμβων, όταν απαιτείται backhaul χαμηλού ρυθμού για το συντονισμό ή λόγω έλλειψης πληροφοριών για την κατάσταση του καναλιού. Αυτό γίνεται εις βάρος της χαμηλότερης χωρητικότητας. Μια λύση θα μπορούσε να είναι η αναπαραγωγή των ίδιων δεδομένων μέχρι τη λήψη επιβεβαίωσης στην περίπτωση του HARQ (Zhan et al., 2018).

- **HARQ + σύντομη δομή πλαισίου, σύντομο TTI**

βελτίωση της χωρητικότητας διακοπής μέσω επαρκών επαναμεταδόσεων για την επίτευξη υψηλής αξιοπιστίας. Εδώ η βέλτιστη επιλογή επιπέδου MCS με τον περιορισμό της απαιτούμενης αξιοπιστίας και καθυστέρησης (όχι απαραίτητα βελτιστοποιημένη για φασματική αποδοτικότητα) αποτελεί ένα ανοικτό ερευνητικό πρόβλημα (Zhan et al., 2018).

- **Σχεδιασμός καναλιού ελέγχου**

Σε αντίθεση με το LTE όπου η εστίαση ήταν κυρίως στην προστασία των δεδομένων αλλά όχι του καναλιού ελέγχου, η εξασφάλιση υψηλής αξιοπιστίας για το κανάλι ελέγχου είναι απαραίτητη. Αυτό μπορεί να γίνει με την αποστολή πληροφοριών για τον προϋπολογισμό καθυστέρησης από τον χρήστη στο σταθμό βάσης (BS) στο κανάλι ελέγχου, έτσι ώστε στην καθοδική ζεύξη ο BS να μπορεί να επιλέξει το βέλτιστο σχήμα κωδικοποίησης διαμόρφωσης με βάση τόσο την αναφορά του δείκτη ποιότητας καναλιού (CQI) όσο και τον εναπομένοντα προϋπολογισμό καθυστέρησης. Επιπλέον, μπορεί να προβλεφθεί η αναπαραγωγή των ίδιων δεδομένων μέχρι τη λήψη επιβεβαίωσης για το HARQ με κόστος τη σπατάλη πόρων (Zhan et al., 2018).

- **Κατασκευαστική ποικιλομορφία μέσω κωδικοποίησης δικτύου και αναμετάδοσης**

Όταν η χρονική ποικιλομορφία δεν μπορεί να στηριχθεί (λόγω ακραίων περιορισμών καθυστέρησης και αξιοπιστίας) ή παρουσία ακραίων γεγονότων εξασθένησης, η κατασκευαστική ποικιλομορφία και η ευρωστία αποτελούν το κλειδί για τη διασφάλιση του URLLC. Για παράδειγμα, στον βιομηχανικό αυτοματισμό, η εκμετάλλευση της ποικιλομορφίας πολλαπλών χρηστών και η κωδικοποίηση δικτύου με ταυτόχρονη αναμετάδοση για να καταστεί δυνατή μια αμφίδρομη αξιόπιστη επικοινωνία χωρίς να βασίζεται στην ποικιλομορφία χρόνου και συχνότητας είναι σημαντική λόγω των περιορισμών του χρόνου κύκλου, του καναλιού και της δυναμικής του δικτύου (Kalør et al., 2017).

- **Τεμαχισμός δικτύου**

Αναφέρεται στη διαδικασία τεμαχισμού ενός φυσικού δικτύου σε λογικά υποδίκτυα βελτιστοποιημένα για συγκεκριμένες εφαρμογές, κατά την οποία ο στόχος είναι η κατανομή αποκλειστικών πόρων για κάθετους τομείς ενδιαφέροντος, όπως η επικοινωνία οχημάτων με οχήματα και ο βιομηχανικός αυτοματισμός. Η κατασκευή τμημάτων δικτύου με αυστηρές εγγυήσεις αξιοπιστίας για αυτές τις κρίσιμες για την αποστολή εφαρμογές είναι ένα δύσκολο έργο λόγω των δυσκολιών στη μοντελοποίηση και την πρόβλεψη των καθυστερήσεων αναμονής με πολύ υψηλή ακρίβεια. Για παράδειγμα, στο σενάριο του βιομηχανικού αυτοματισμού, λόγω του ποικίλου συνόλου των απαιτήσεων των εφαρμογών του, θα μπορούσε να διατεθεί μια περιοχή για τη μετάδοση βίντεο υψηλής ευκρίνειας μεταξύ ενός ατόμου που παρακολουθεί εξ αποστάσεως μια διαδικασία (ή ένα ρομπότ) και μια άλλη περιοχή για την παροχή μιας εξαιρετικά αξιόπιστης μετάδοσης μεταξύ αισθητήρων, ελεγκτών και ενεργοποιητών (Kalør et al., 2017)..

- **Προληπτική απόρριψη πακέτων**

Όταν το κανάλι βρίσκεται σε βαθιά εξασθένιση, τα πακέτα που δεν μπορούν να μεταδοθούν ακόμη και με τη μέγιστη ισχύ εκπομπής μπορούν να απορριφθούν προληπτικά στον πομπό. Ομοίως, η απόρριψη πακέτων μπορεί να προκύψει στον δέκτη όταν επιτευχθεί ο μέγιστος αριθμός επαναμεταδόσεων. Αυτό είναι διαφορετικό από τα σενάρια ενισχυμένης κινητής ευρυζωνικότητας που βασίζονται σε άπειρους απομονωτές ουράς αναμονής. Σε αυτή την περίπτωση πρέπει είτε να χρησιμοποιηθεί χωρική ποικιλομορφία είτε να αυξηθούν οι πόροι (Kalør et al., 2017).

- **Κώδικες μπλοκ χώρου-χρόνου**

Η ορθογώνια κωδικοποίηση μπλοκ χώρου-χρόνου είναι μια πολύ επιτυχημένη τεχνική ποικιλομορφίας εκπομπής, επειδή επιτυγχάνει πλήρη ποικιλομορφία χωρίς CSI στον

πομπό και ανάγκη για κοινή αποκωδικοποίηση πολλαπλών συμβόλων. Τυπικά, χαρακτηρίζεται από τον αριθμό των ανεξάρτητων συμβόλων N_s που μεταδίδονται σε T χρονοθυρίδες- ο ρυθμός κωδικοποίησης είναι $R_c = N_s/T$. Παρουσία ατέλειας του καναλιού, η ορθογώνια κωδικοποίηση μπλοκ χώρου-χρόνου μπορεί να υπερτερεί έναντι άλλων προσεγγίσεων που επιδιώκουν την ποικιλομορφία, όπως η μετάδοση μέγιστου λόγου (Kalør et al., 2017).

2.10. Σπουδαιότητα

Το URLLC έχει πρόσφατα κεντρίσει το ενδιαφέρον των ερευνητών παγκοσμίως. Ένα πείραμα πεδίου που διεξήχθη από την NTT DOCOMO Inc. και την Huawei για το URLLC έδειξε αρκετά θετικά αποτελέσματα (Park et al., 2020):

- **eMBB:** Το eMBB επικεντρώνεται σε υψηλότερο ρυθμό δεδομένων, με μεγάλο ωφέλιμο φορτίο και παρατεταμένες εφαρμογές που βασίζονται στη συνδεσιμότητα στο διαδίκτυο. Πιθανές εφαρμογές θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν cloud office/gaming, εικονική/επαυξημένη πραγματικότητα (VR/AR) και βίντεο τριών διαστάσεων/υπερ-υψηλής ευκρίνειας (3D/UHD).
- **URLLC:** Το URLLC επικεντρώνεται σε μια σύνδεση με εξαιρετικά μεγάλη απόκριση και εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση. Ο ρυθμός δεδομένων δεν αναμένεται να είναι πολύ υψηλός στο URLLC, αλλά προσφέρει υψηλή κινητικότητα. Οι δυνητικές εφαρμογές του URLLC περιλαμβάνουν βιομηχανικό αυτοματισμό, αυτόνομη οδήγηση, κρίσιμες εφαρμογές και ιατρική βοήθεια από απόσταση.
- **mMTC:** Το mMTC επικεντρώνεται στην παροχή συνδεσιμότητας σε μεγάλο αριθμό συσκευών (Internet of Things - IoT), αλλά με χαμηλή αξιοπιστία. Μπορεί να παρέχει επικοινωνία μεγάλης εμβέλειας με ενεργειακή απόδοση και ασύγχρονη πρόσβαση. Τέτοια χαρακτηριστικά είναι πολύ κατάλληλα για συσκευές χαμηλής ισχύος σε μαζική ποσότητα.

Η επίτευξη των απαιτήσεων URLLC είναι μια αρκετά μεγάλη πρόκληση για τα δίκτυα 5G και θα απαιτήσει μαζικές τροποποιήσεις στο σχεδιασμό του συστήματος της τρέχουσας τηλεπικοινωνιακής υποδομής. Λόγω των ενθαρρυντικών αποτελεσμάτων που επιτεύχθηκαν με το URLLC, μπορεί να διαδραματίσει αναπόσπαστο ρόλο στην εποχή του 5G. Αν και οι τρέχουσες απαιτήσεις των χρηστών βασίζονται αρχικά στο υψηλό εύρος ζώνης, η καθυστέρηση και η αξιοπιστία αναμένεται επίσης να διαδραματίσουν ζωτικό ρόλο σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου και δίκτυα κρίσιμων αποστολών (Park et al., 2020):

- **Ιατρική και υγειονομική περίθαλψη:** Απομακρυσμένη χειρουργική επέμβαση/διάγνωση ασθενών: Η εξ αποστάσεως χειρουργική επέμβαση ή η εξ αποστάσεως διάγνωση ασθενών μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια ενός ρομπότ. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η αξιοπιστία των δεδομένων που μεταδίδονται ως οδηγίες για το ρομπότ πρέπει να είναι εξαιρετικά αξιόπιστη, διότι ακόμη και μια μικρή καθυστέρηση ή καθυστέρηση θα μπορούσε να είναι πολύ επιβλαβής για τον ασθενή.
- **MME/ Ψυχαγωγία/ Επιχειρήσεις:** Διαδικτυακά παιχνίδια, ψυχαγωγία με βάση το νέφος (VR/AR): Με τη βοήθεια της τεχνολογίας, ολόκληρος ο κόσμος συρρικνώνεται όσον αφορά τις επικοινωνίες. Οι χρήστες επιθυμούν να είναι ενήμεροι για τα παγκόσμια γεγονότα και την ψυχαγωγία σε πραγματικό χρόνο. Ακόμα και όσον αφορά τις επιχειρήσεις, η καθυστέρηση θα μπορούσε να έχει τεράστιο αντίκτυπο στις συναλλαγές που πραγματοποιούνται στον κόσμο. Στα διαδικτυακά παιχνίδια, η καθυστέρηση θα μπορούσε να είναι πολύ απογοητευτική για τους παίκτες.
- **Μεταφορές:** Διανομή με drone, απομακρυσμένη οδήγηση, αυτοκινούμενα αυτοκίνητα, διαχείριση της κυκλοφορίας, διαχείριση υποσταθμών (συγχρονισμός συστημάτων, διαχείριση της κυκλοφορίας): Μέσω νέων χαρακτηριστικών και αξιοθέατων για τους χρήστες, όπως το Amazon Prime Air [8] για την παράδοση παραγγελιών, είναι πολύ σημαντικό τα drones να ανταποκρίνονται σε πραγματικό χρόνο. Παρόμοια με το Amazon Prime Air, το

αυτοκινούμενο αυτοκίνητο της Google (WAYMO) [9] είναι αρκετά σημαντικό για τη μελλοντική αυτοκινητοβιομηχανία. Η σημασία της αξιοπιστίας και της καθυστέρησης είναι αυτονόητη σε τέτοια έργα.

- **Βιομηχανικός αυτοματισμός:** Συστήματα ελέγχου, αυτοματοποιημένες γραμμές συναρμολόγησης με ρομπότ, αναφορές κατάστασης μηχανών, επιτήρηση διαδικασιών, διαχείριση δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας: Προκειμένου να μεγιστοποιήσουν την παραγωγικότητα, οι βιομηχανίες έχουν στραφεί προς την αυτοματοποίηση. Υψηλότερη αξιοπιστία και παραγωγικότητα μπορεί να επιτευχθεί με την αντικατάσταση των ανθρώπων με ρομπότ στη διαδικασία παραγωγής. Εκτός από τη μεταποιητική βιομηχανία, οι τομείς της γεωργίας, της δημοσιογραφίας και της εκπαίδευσης έχουν επίσης στραφεί προς την αυτοματοποίηση [10]. Στους αναφερόμενους βιομηχανικούς τομείς, η αξιοπιστία θα αποτελέσει βασικό παράγοντα. Όπως ότι η αυτοματοποιημένη γραμμή συναρμολόγησης αυτοκινήτων πρέπει να έχει ελάχιστη καθυστέρηση για να συμβαδίζει με τις ανάγκες ζήτησης και την υψηλή αξιοπιστία για να αποφεύγονται τυχόν ζημιές στα εξαρτήματα του αυτοκινήτου κατά τη συναρμολόγηση.

3. Χρήση κεραιών Massive MIMO

Η Massive MIMO προέκυψε ως επέκταση ενός συστήματος MIMO πολλαπλών χρηστών. Ένα από τα σπουδαιότερα πράγματα στην εποχή μας είναι ότι το 5G συμβάλλει στην υλοποίηση του Ευφυούς Διαδικτύου των Πάντων (Intelligent Internet of Everything - ΙΙοΕ), φέρνοντας μεγάλες αλλαγές στη ζωή των ανθρώπων, σε πολλούς κλάδους και σε ολόκληρη την κοινωνία, κάνοντας τον κόσμο καλύτερα συνδεδεμένο και ψηφιακό. Η Massive MIMO, ως μία από τις βασικές τεχνολογίες του 5G, είναι το κλειδί για την ικανοποίηση των απαιτήσεων υψηλής απόδοσης και των νέων απαιτήσεων υπηρεσιών αυτής της εκπληκτικής νέας εποχής. Αν και η Massive MIMO προσφέρει μεγάλες υποσχέσεις για ένα εξαιρετικά ικανό 5G με μεγαλύτερο εύρος ζώνης, περισσότερες συνδέσεις, χαμηλότερη καθυστέρηση και καλύτερη αξιοπιστία, η αξιοποίηση των πλήρων δυνατοτήτων του απαιτεί αποτελεσματικές απαντήσεις στις

προκλήσεις της κάλυψης δικτύου, της εμπειρίας χρήστη και της ικανότητας δικτύου, κάτι που αφορά όλους τους φορείς εκμετάλλευσης κινητών δικτύων και τους προμηθευτές συστημάτων (Elijah et al., 2015).

Μετά την εισαγωγή της τεχνολογίας Massive MIMO, η διαφοροποίηση και η ευελιξία της κάλυψης του ασύρματου δικτύου στον τρισδιάστατο χώρο έχουν βελτιωθεί σημαντικά. Το μοντέλο διάδοσης των ραδιοκυμάτων, η συμπεριφορά των χρηστών και η κατανομή των υπηρεσιών, η διαχείριση της δέσμης και η διαμόρφωση δέσμης είναι πιο περίπλοκα, ευέλικτα και δύσκολα μετρήσιμα. Ο εντοπισμός των προβλημάτων στα ασύρματα δίκτυα, η αποτελεσματικότητα των λύσεων αντιμετώπισης και η αποτελεσματικότητα και οι επιπτώσεις των νέων λειτουργιών γίνονται πιο περίπλοκες όσο αυξάνεται η κλίμακα του δικτύου (Larsson & Van der Perre, 2017).

Ενώ η Massive MIMO επιτρέπει το 5G με πολύ μεγαλύτερη ποικιλομορφία και ευελιξία της προσβασιμότητας και της ικανότητας του δικτύου σε έναν τρισδιάστατο χώρο, η πολυπλοκότητα του δικτύου εγείρει τα ερωτήματα σχετικά με τον εντοπισμό των προβλημάτων του δικτύου, την προσφορά αποτελεσματικών λύσεων και τη μεγιστοποίηση των πλεονεκτημάτων των νέων τεχνολογιών χωρίς να καταβάλλεται πολύ υψηλό τίμημα (Elijah et al., 2015).

3.1. Αρχή λειτουργίας

Ενώ οι παραδοσιακές ραδιοσυσκευές έχουν συχνά μόνο δύο, τέσσερα ή το πολύ οκτώ κανάλια TRX, οι ραδιοσυσκευές που τροφοδοτούνται από την τεχνολογία Massive MIMO μπορούν να έχουν 32 ή 64 κανάλια TRX, με έως και 512 ή και περισσότερα στοιχεία κεραίας, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά υψηλότερο κέρδος χωρητικότητας από τον παραδοσιακό εξοπλισμό. Επιπλέον, ενώ οι παραδοσιακές συσκευές επικεντρώνονται περισσότερο στην κάλυψη στην οριζόντια διάσταση, η Massive MIMO προσφέρει πολύ μεγαλύτερη ευελιξία και στην κατακόρυφη διάσταση. Η Massive MIMO μπορεί να εκμεταλλευτεί σε μεγάλο βαθμό τους πόρους στη χωρική διάσταση και να επιτρέψει στους χρήστες που βρίσκονται κάτω από τον ίδιο σταθμό βάσης να χρησιμοποιούν τους ίδιους πόρους χρόνου και συχνότητας, γεγονός που

αυξάνει σημαντικά τη χωρητικότητα του δικτύου χωρίς πυκνότερους σταθμούς βάσης και μεγαλύτερο εύρος ζώνης συχνοτήτων (Chataut & AkI, 2020).

Λαμβάνοντας ως παράδειγμα τη διαμόρφωση του σήματος συγχρονισμού και του μπλοκ PBCH (SSB), το SSB καθορίζει τη βασική απόδοση κάλυψης του δικτύου. Το κανάλι εκπομπής 4G αποστέλλεται με σταθερή ευρεία δέσμη και η κάλυψή του δεν αλλάζει στις περισσότερες περιπτώσεις. Ωστόσο, το 5G SSB μπορεί να διαμορφωθεί με έως και 7 (δομή πλαισίου 2,5 ms) ή 8 (δομή πλαισίου 5 ms) δέσμες ανάλογα με τη δομή πλαισίου. Περισσότερες δέσμες SSB έχουν ως αποτέλεσμα την ευέλικτη διαμόρφωση, δηλαδή μπορούν να διαμορφωθούν πολλαπλές οριζόντιες δέσμες ή να διαμορφωθεί συνδυασμός οριζόντιων και κάθετων δεσμών. Διαφορετικές δέσμες μπορούν να διαμορφωθούν ευέλικτα με διαφορετικά πλάτη και ύψη, έτσι ώστε η διαμόρφωση δέσμης 5G SSB να μπορεί να υποστηρίξει άφθονα σενάρια και να ικανοποιήσει με ακρίβεια τις απαιτήσεις διαφορικής κάλυψης. Ωστόσο, η αύξηση της ευελιξίας επιφέρει επίσης σημαντική αύξηση της πολυπλοκότητας της διαμόρφωσης. Υπάρχουν περισσότεροι από δεκάδες χιλιάδες συνδυασμοί διαμόρφωσης παραμέτρων κεραίας για δέσμες 5G SSB. Εδώ προκύπτει ένα τεράστιο τεχνικό πρόβλημα σχετικά με τον τρόπο γρήγορης και ακριβούς εύρεσης της διαμόρφωσης που είναι πιο κατάλληλη για το τρέχον σενάριο μεταξύ δεκάδων χιλιάδων παραμέτρων κεραίας, και την αποτελεσματική αντιστοίχιση της διαμόρφωσης με την αλλαγή των σεναρίων και των τρόπων συμπεριφοράς των χρηστών (Prasad et al., 2017).

Με βάση τα σχεδόν ορθογώνια χαρακτηριστικά μεταξύ των καναλιών πολλαπλών χρηστών, η Massive MIMO μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τη χωρητικότητα του δικτύου μέσω της πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση χώρου (Space Division Multiple Access – SDMA).

Λόγω της πολυπλοκότητας της διάδοσης του ασύρματου καναλιού και της τυχαιότητας της κατανομής των χρηστών και των υπηρεσιών, ο σχεδιασμός ενός σταθμού βάσης απαιτεί έναν καλά εκτελεσμένο αλγόριθμο για τη μετάδοση downlink και τη λήψη uplink για να επιτευχθεί ένα σταθερό κέρδος SDMA πολλαπλών χρηστών και απόδοση κατά των παρεμβολών. Υπό την προϋπόθεση ενός συγκεκριμένου αριθμού κεραιών, η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου Massive MIMO αυξάνεται ραγδαία με την αύξηση του αριθμού των χρηστών και του μέγιστου αριθμού επιπέδων πολυπλεξίας MU-

MIMO, η οποία γίνεται μία από τις βασικές τεχνικές δυσκολίες που επηρεάζουν τη χωρητικότητα του συστήματος (Papadopoulos et al., 2016).

3.2. Διαχείριση πολλαπλών ακτινών και διαμόρφωση δέσμης

Το 5G SSB προσφέρει πολύ μεγαλύτερη ευελιξία για την κάλυψη του καναλιού εκπομπής από το 4G. Η μετάδοση και η κάλυψη του καναλιού ελέγχου εκπομπής του 4G, όπως και στην περίπτωση των 2G και 3G, γίνεται μέσω μιας ευρείας δέσμης.

Στην εποχή του 5G, εισάγεται η τεχνολογία συστοιχίας κεραιών μεγάλης κλίμακας. Όπως και το κανάλι υπηρεσίας PDSCH, μέσω της συνεργασίας όλων των στοιχείων κεραιάς και των καναλιών μετάδοσης RF στη συστοιχία κεραιών, το σύστημα 5G παρέχει δυνατότητα στενής διαμόρφωσης δέσμης SSB. Πολλαπλές στενές δέσμες SSB μπορούν να σαρωθούν και να μεταδοθούν στο πεδίο του χρόνου και στο πεδίο του χώρου. Με αυτόν τον τρόπο, το SSB μπορεί να επιτύχει όχι μόνο την ίδια απόδοση κάλυψης με το κανάλι υπηρεσίας, αλλά και τρισδιάστατο ευέλικτο τρόπο κάλυψης σε οριζόντιες και κάθετες διαστάσεις. Το 5G, από την άλλη πλευρά, χρησιμοποιεί τεχνολογίες διαμόρφωσης δέσμης που βασίζονται σε μια μαζική συστοιχία στοιχείων κεραιάς και κανάλια μετάδοσης RF για τη μετάδοση πολλαπλών στενών ακτινών SSB τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο του χώρου, με τον ίδιο τρόπο μετάδοσης του PDSCH. Αυτό βοηθά στην επίτευξη της ίδιας κάλυψης του SSB και των καναλιών υπηρεσίας και πολύ ευέλικτης κάλυψης σε τρισδιάστατο χώρο (Papadopoulos et al., 2016).

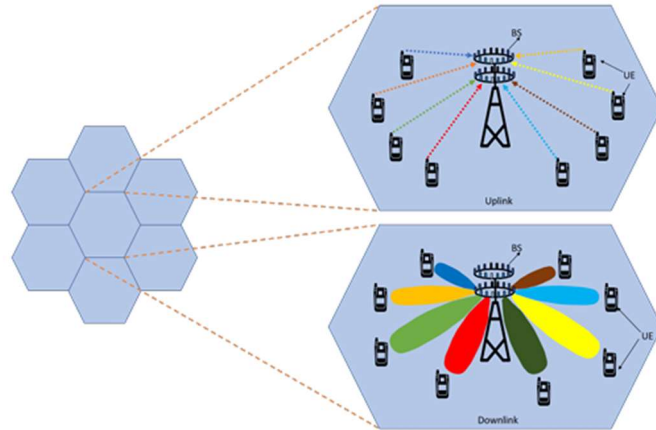
3.3. Δομή

Τα συστήματα MIMO αποτελούν αναπόσπαστο μέρος των σημερινών ασύρματων συστημάτων και τα τελευταία χρόνια έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς για την επίτευξη υψηλής φασματικής απόδοσης και ενεργειακής αποδοτικότητας. Πριν από την εισαγωγή της MIMO, χρησιμοποιούνταν κυρίως συστήματα μίας εισόδου και μίας

εξόδου, τα οποία είχαν πολύ χαμηλή απόδοση και δεν μπορούσαν να υποστηρίξουν μεγάλο αριθμό χρηστών με υψηλή αξιοπιστία. Για να ικανοποιηθεί αυτή η μαζική ζήτηση χρηστών, αναπτύχθηκαν διάφορες νέες τεχνολογίες MIMO, όπως η τεχνολογία MIMO ενός χρήστη (SU-MIMO), η τεχνολογία MIMO πολλών χρηστών (MU-MIMO) και η τεχνολογία MIMO δικτύου. Ωστόσο, και αυτές οι νέες τεχνολογίες δεν επαρκούν για να καλύψουν τις συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις. Οι ασύρματοι χρήστες έχουν αυξηθεί εκθετικά τα τελευταία χρόνια και οι χρήστες αυτοί παράγουν τρισεκατομμύρια δεδομένα που πρέπει να διεκπεραιώνονται αποτελεσματικά και με μεγαλύτερη αξιοπιστία (Björnson, Hoydis & Sanguinetti, 2017).

Επιπλέον, υπάρχουν δισεκατομμύρια συσκευές IoT, που έχουν διάφορες εφαρμογές στην έξυπνη υγειονομική περίθαλψη, τα έξυπνα σπίτια και την έξυπνη ενέργεια, οι οποίες συμβάλλουν στην κυκλοφορία δεδομένων. Οι τρέχουσες τεχνολογίες MIMO που σχετίζονται με το δίκτυο 4G/LTE δεν είναι σε θέση να διαχειριστούν αυτή την τεράστια εισροή στην κυκλοφορία δεδομένων με μεγαλύτερη ταχύτητα και αξιοπιστία. Έτσι, το δίκτυο 5G εξετάζει την τεχνολογία massive MIMO ως μια πιθανή τεχνολογία για την αντιμετώπιση του προβλήματος που δημιουργείται από την μαζική κίνηση δεδομένων και τους χρήστες. Έχουν διεξαχθεί αρκετές μελέτες σχετικά με τα συστήματα massive MIMO και τα οφέλη τους (Xie, Gao & Jin, 2016).

Η Massive MIMO είναι η πιο γοητευτική τεχνολογία για το 5G και πέρα από την εποχή της ασύρματης πρόσβασης. Η Massive MIMO είναι η εξέλιξη των σύγχρονων συστημάτων MIMO που χρησιμοποιούνται στα τρέχοντα ασύρματα δίκτυα, τα οποία ομαδοποιούν εκατοντάδες ή και χιλιάδες κεραιές στο σταθμό βάσης και εξυπηρετούν ταυτόχρονα δεκάδες χρήστες. Οι επιπλέον κεραιές που χρησιμοποιεί η Massive MIMO θα βοηθήσουν στην εστίαση της ενέργειας σε μια μικρότερη περιοχή του χώρου για να παρέχουν καλύτερη φασματική απόδοση και ρυθμό μετάδοσης. Το σύστημα Massive MIMO downlink και το σύστημα uplink παρουσιάζεται στην Εικόνα 6. Καθώς αυξάνεται ο αριθμός των κεραιών σε ένα σύστημα massive MIMO, οι δέσμες ακτινοβολίας γίνονται στενότερες και χωρικά εστιασμένες προς τον χρήστη. Αυτές οι χωρικά εστιασμένες δέσμες κεραιών αυξάνουν την απόδοση μετάδοσης για τον επιθυμητό χρήστη και μειώνουν τις παρεμβολές στον γειτονικό χρήστη. Η Massive MIMO προσφέρει ένα τεράστιο πλεονέκτημα σε σχέση με το παραδοσιακό σύστημα MIMO (Björnson, Hoydis & Sanguinetti, 2017).



Εικόνα 6: Massive MIMO uplink και downlink (Πηγή: Björnson, Hoydis & Sanguinetti, 2017).

3.4. Μετάδοση Uplink

Το κανάλι uplink χρησιμοποιείται για τη μετάδοση δεδομένων και του πιλοτικού σήματος από το τερματικό χρήστη στο σταθμό βάσης. Θεωρείται ένα σύστημα Massive MIMO uplink εξοπλισμένο με M κεραίες στο σταθμό βάσης και ταυτόχρονη επικοινωνία με N ($M \gg N$) χρήστες με μία κεραία. Εάν το σήμα που μεταδίδεται από τον χρήστη ή το ντετερμινιστικό πιλοτικό σήμα για την εκτίμηση του καναλιού είναι $x \in \mathbb{C}^N$, το σήμα που λαμβάνεται στο σταθμό βάσης κατά τη διάρκεια της uplink δίνεται ως εξής (Wen et al., 2019):

$$y = Hx + n_{uplink} \quad (1)$$

όπου $y \in \mathbb{C}^M$ είναι το σήμα που λαμβάνεται στο σταθμό βάσης, H είναι το διάνυσμα του καναλιού μεταξύ του τερματικού χρήστη και του σταθμού βάσης και τα στοιχεία του $H \in \mathbb{C}^{M \times N}$ είναι ανεξάρτητα και πανομοιότυπα κατανομημένα με μηδενική μέση τιμή και μοναδιαία διακύμανση, δηλαδή $H \sim CN(0, 1)$. Ο πρόσθετος όρος $n_{uplink} \in \mathbb{C}^M$ είναι η προσθήκη της παρεμβολής από διάφορες μεταδόσεις και του θορύβου του δέκτη. Η παρεμβολή που προστίθεται είναι ανεξάρτητη από το σήμα x του χρήστη, αλλά μπορεί να εξαρτάται από το κανάλι H (Wen et al., 2019):

$$n_{uplink} = n_{uplink} - interference + n_{noise} \quad (2).$$

3.5. Μετάδοση downlink

Το κανάλι downlink χρησιμοποιείται για τη μετάδοση δεδομένων ή την εκτίμηση του καναλιού μεταξύ χρήστη και σταθμού βάσης. Ο σταθμός βάσης χρησιμοποιεί πιλοτικά σήματα για την εκτίμηση του καναλιού. Θεωρείται ένα σύστημα Massive MIMO downlink, όπου ο σταθμός βάσης είναι εξοπλισμένος με M κεραιές και εξυπηρετεί N χρήστες που έχουν ταυτόχρονα μία κεραιά. Ο σταθμός βάσης στέλνει ανεξάρτητες πληροφορίες σε πολλούς χρήστες ταυτόχρονα. Το λαμβανόμενο σήμα, $y_k \in C^{M \times 1}$ στον k -οστό χρήστη είναι (Wen et al., 2019):

$$y_k = h_k x_k + n_{downlink} \quad (3)$$

όπου h_k είναι ένα διάνυσμα καναλιού μεταξύ του k -οστού χρήστη και του σταθμού βάσης, του οποίου τα στοιχεία είναι ανεξάρτητα και πανομοιότυπα κατανεμημένα με μηδενική μέση τιμή και μοναδιαία διακύμανση, δηλαδή $h \sim CN(0, I)$. $x_k \in C^M$ είναι το σήμα που μεταδίδεται από το σταθμό βάσης για το χρήστη k και, $n_{downlink}$ είναι ο πρόσθετος θόρυβος που αποτελείται από το θόρυβο δέκτη $n_{noise} \sim CN(0, \sigma^2 I)$ και την παρεμβολή κατά την downlink $n_{downlink} - interference$ που προκαλείται από την ταυτόχρονη μετάδοση σε άλλους χρήστες και δίνεται ως εξής (Wen et al., 2019):

$$n_{downlink} = n_{downlink} - interference + n_{noise} \quad (4).$$

3.6. Χαρακτηριστικά

- **Ευνοϊκός πολλαπλασιασμός**

Η ευνοϊκή διάδοση είναι ένα φαινόμενο που εμφανίζεται όταν τα κανάλια διάδοσης δύο χρηστών κινητής τηλεφωνίας είναι αμοιβαία ορθογώνια. Η ευνοϊκή διάδοση βοηθά

τον BS να ακυρώσει την παρεμβολή μεταξύ των χρηστών χωρίς να χρειάζεται να σχεδιάσει προηγμένους αλγορίθμους για την καταστολή παρεμβολών. Κατά συνέπεια, ενισχύει την φασματική απόδοση (spectral efficiency – SE) και των δύο χρηστών. Τίθεται ως υπόθεση ότι υπάρχει ένα ενιαίο κύτταρο που αποτελείται από ένα BS που έχει M κεραιές και δύο χρήστες με μία κεραιά. Τα διανύσματα $g_1 \sim CN(0, I_M)$ και $g_2 \sim CN(0, I_M)$ υποδηλώνουν τις αποκρίσεις καναλιού των δύο χρηστών σε ένα κανάλι στενής ζώνης. Αυτά τα διανύσματα είναι κυκλικά συμμετρικά μιγαδικά γκαουσιανά κατανεμημένα με μηδενική μέση τιμή και πίνακα συσχέτισης I_M και αυτό το μοντέλο καναλιού είναι γνωστό ως ανεξάρτητη και ταυτόσημα κατανεμημένη (independent and identically distributed - i.i.d) εξασθένιση Rayleigh. Στην περίπτωση που τα διανύσματα του καναλιού είναι ορθογώνια, το εσωτερικό γινόμενο ικανοποιεί (Ali et al., 2021):

$$g_1^H g_2 = 0. \quad (5)$$

Ο BS μπορεί τότε να διαχωρίσει το λαμβανόμενο σήμα από αυτούς τους δύο χρήστες χωρίς καμία απώλεια στα επιθυμητά σήματα. Υποθετικά ότι x_1 και x_2 υποδηλώνουν τα σήματα δεδομένων που μεταδίδονται από αυτούς τους δύο χρήστες. Το λαμβανόμενο σήμα στο BS δίνεται από (Ali et al., 2021):

$$y = g_1 x_1 + g_2 x_2 \quad (6)$$

Υποθέτοντας ότι ο BS έχει τέλεια γνώση και των δύο διανυσμάτων καναλιού, μπορεί να ακυρώσει την παρεμβολή μεταξύ των χρηστών λαμβάνοντας το εσωτερικό γινόμενο του λαμβανόμενου σήματος y με το κανάλι του επιθυμητού χρήστη. Επιπλέον, η επίδραση του θορύβου αμελείται για λόγους απλότητας. Για παράδειγμα, όταν εξετάζεται ο χρήστης 1, το εσωτερικό γινόμενο είναι:

$$g_1^H y = \|g_1\|^2 x_1 + g_1^H g_2 x_2 = \|g_1\|^2 x_1 \quad (7)$$

που δίνει το επιθυμητό σήμα του χρήστη 1, αφού το μέρος $g_1^H g_2 x_2$ είναι μηδέν χάρη στην ορθογωνιότητα των διανυσμάτων. Αυτή είναι μια ιδανική κατάσταση για τον BS, γι' αυτό και ονομάζεται ευνοϊκή διάδοση. Ωστόσο, αυτό δεν είναι πολύ πιθανό να συμβεί στην πράξη ή αν τα διανύσματα του καναλιού προέρχονται από τυχαίες

κατανομές. Ωστόσο, στην περίπτωση των σταθμών βάσης της Massive MIMO, προκύπτει ότι μια κατά προσέγγιση ευνοϊκή διάδοση μπορεί να συμβεί ασυμπτωτικά στην περίπτωση των καναλιών εξασθένισης Rayleigh. Ορίζεται ως το εσωτερικό γινόμενο των δύο κανονικοποιημένων διανυσμάτων που ικανοποιεί (Ali et al., 2021):

$$\frac{g_1^H g_2}{M} \rightarrow 0 \quad (8)$$

- **Σκλήρυνση καναλιού**

Η σκλήρυνση καναλιού αναφέρεται στο γεγονός ότι το κανάλι είναι λιγότερο ευαίσθητο στα φαινόμενα εξασθένισης μικρής κλίμακας και συμπεριφέρεται περισσότερο σαν ένα ντετερμινιστικό κανάλι όταν χρησιμοποιεί όλες τις κεραίες. Υποθέτοντας ότι $g \sim CN(0, I_M)$ είναι το διάνυσμα του καναλιού ενός αυθαίρετου χρήστη προς ένα σταθμό βάσης Massive MIMO με M κεραίες, η ασυμπτωτική σκλήρυνση καναλιού ορίζεται ως εξής (Larsson & Van der Perre, 2017):

$$\frac{\|g\|^2}{\mathbb{E}\{\|g\|^2\}} \rightarrow 1 \quad (9)$$

όταν $M \rightarrow \infty$ η σύγκλιση ισχύει σχεδόν σίγουρα. Ας σημειωθεί ότι η τετραγωνική νόρμα στην παραπάνω εξίσωση είναι έτσι όταν ο BS επεξεργάζεται το λαμβανόμενο σήμα, γι' αυτό και η τιμή της είναι σημαντική για τον προσδιορισμό της απόδοσης της επικοινωνίας. Η ασυμπτωτική σκλήρυνση του καναλιού συνεπάγεται ότι η τιμή του $\|g\|^2$ είναι κοντά στη μέση τιμή του, οπότε οι διακυμάνσεις είναι μικρές. Το φαινόμενο αυτό αποτελεί επέκταση της έννοιας της χωρικής ποικιλομορφίας από τα συμβατικά συστήματα MIMO μικρής κλίμακας στην περίπτωση που οι BS διαθέτουν μεγάλο αριθμό κεραιών. Η σκλήρυνση του καναλιού συνεπάγεται ότι η ποιότητα του καναλιού $\|g\|^2$ για μια δεδομένη υλοποίηση καναλιού προσεγγίζεται καλά από τη μέση ποιότητα του καναλιού $\mathbb{E}\{\|g\|^2\}$. Ως εκ τούτου, αν γίνει επιλογή συντελεστών ισχύος με βάση την ποιότητα του καναλιού, δεν χρειάζεται να προσαρμοστούν στις μεταβολές εξασθένισης μικρής κλίμακας, αλλά η ίδια ισχύς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μεγάλο

χρονικό διάστημα. Θεωρείται η σκλήρυνση του καναλιού ως ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των συστημάτων Massive MIMO (Larsson & Van der Perre, 2017).

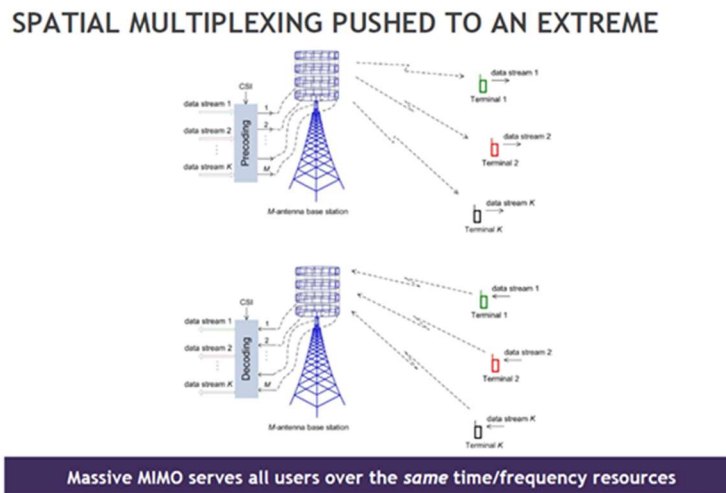
- **TDD και FDD για Massive MIMO**

Προκειμένου να επεξεργαστεί τα σήματα uplink και downlink, κάθε BS πρέπει να εκτιμήσει τα διανύσματα καναλιού των χρηστών που εξυπηρετεί σε κάθε μπλοκ συνοχής καναλιού. Ένα μπλοκ συνοχής ορίζεται ως το μπλοκ χρόνου - συχνότητας στο οποίο το κανάλι εξασθένισης είναι στατικό (Papadopoulos et al., 2016).

Στη Massive MIMO, η πλήρης στατιστική πληροφορία για την κατάσταση του καναλιού είναι διαθέσιμη στους BS. Ωστόσο, θα πρέπει να γίνει εκτίμηση καναλιού σε κάθε BS, για να ληφθούν οι στιγμιαίες πληροφορίες κατάστασης καναλιού. Η εκτίμηση του καναλιού πραγματοποιείται μέσω πιλοτικής μετάδοσης. Στη φάση της πιλοτικής μετάδοσης, κάθε πομπός (π.χ. ένας κυψελοειδής χρήστης στην πιλοτική μετάδοση της uplink) στέλνει μία από τις ακολουθίες από το σύνολο των προκαθορισμένων ακολουθιών πιλοτικού σήματος που είναι γνωστές τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη (π.χ. το BS στην πιλοτική μετάδοση της uplink). Για την εκτίμηση του καναλιού από τον πομπό, ο δέκτης συγκρίνει το σήμα με το "αληθινό" σήμα από το σύνολο. Για την υποστήριξη της πιλοτικής μετάδοσης πολλαπλών πομπών σε συστήματα Massive MIMO, γενικά είναι προτιμότερο να υπάρχει ο ίδιος αριθμός ορθογώνιων πιλοτικών ακολουθιών με τον αριθμό των κεραιών εκπομπής. Είναι επίσης επιθυμητό να διατηρούνται τα πιλοτικά σήματα όσο το δυνατόν πιο σύντομα, ώστε να χρησιμοποιούνται οι περισσότεροι πόροι σε ένα μπλοκ συνοχής για τη μετάδοση δεδομένων. Η πιλοτική μετάδοση για την εκτίμηση καναλιού στην downlink και στην uplink ενός συστήματος Massive MIMO απαιτεί διαφορετικό αριθμό πιλοτικών συμβόλων. Στην uplink, υποθέτοντας ότι υπάρχουν K χρήστες μίας κεραιάς, το σύστημα απαιτεί K ακολουθίες πιλοτικών σημάτων για την εκτίμηση των καναλιών uplink. Ωστόσο, εάν το BS έχει M κεραιές, η πιλοτική μετάδοση στην downlink απαιτεί M πιλοτικά σήματα, όπου $M \gg K$ είναι φυσιολογικό στα συστήματα Massive MIMO (Elijah et al., 2015).



Εικόνα 7: TDD και FDD για Massive MIMO (Πηγή: Elijah et al., 2015).



Εικόνα 8: Η FDD χρειάζεται χρόνο εκπαίδευσης ανάλογο του $2M+K$ ενώ για τη TDD είναι ανάλογο του K (Πηγή: Elijah et al., 2015).

Η Αμφίδρομη Διαίρεση Χρόνου (Time Division Duplex - TDD) αναφέρεται στο διαχωρισμό των μεταδόσεων uplink και downlink στο πεδίο του χρόνου, ενώ χρησιμοποιείται ολόκληρο το εύρος ζώνης. Υποθέτοντας ότι και οι δύο συμβαίνουν στον ίδιο χρόνο συνοχής, ισχύει η αμοιβαιότητα του καναλιού. Αυτό σημαίνει ότι το κανάλι είναι το ίδιο και στις δύο κατευθύνσεις. Συνεπώς, κάνοντας εκτίμηση καναλιού σε μία κατεύθυνση (δηλαδή στην uplink εδώ), το εκτιμώμενο κανάλι ισχύει και για την άλλη κατεύθυνση (δηλαδή την downlink). Επομένως, στα συστήματα TDD Massive MIMO, είναι απαραίτητες μόνο K πιλοτικές ακολουθίες. Ως εκ τούτου, η εκτίμηση του καναλιού δεν εξαρτάται από το M (Chataut & Akl, 2020).

Στη Αμφίδρομη Διαίρεση Συχνότητας (Frequency Division Duplex - FDD), η μετάδοση uplink και downlink πραγματοποιείται ταυτόχρονα, αλλά σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων. Ως εκ τούτου, λόγω των διαφορετικών ζωνών συχνοτήτων για uplink και downlink, η αμοιβαιότητα του καναλιού δεν ισχύει. Συνεπώς, πρέπει να εκτιμηθούν τα κανάλια ξεχωριστά για κάθε κατεύθυνση. Επομένως, είναι απαραίτητες τόσο uplink πιλότοι όσο και downlink πιλότοι για την εκτίμηση καναλιού στη FDD. Στην downlink, είναι απαραίτητες M ακολουθίες πιλοτικών σημάτων και επιπλέον M σήματα για την αναφορά του εκτιμώμενου καναλιού στον BS στην uplink. Εκτός αυτού, είναι απαραίτητοι K πιλότοι για την εκτίμηση καναλιού της uplink. Συνολικά, υποθέτοντας ότι οι πόροι αποφασίζονται εξίσου μεταξύ uplink και downlink, το FDD χρειάζεται $(2M+1)/2$ σήματα πιλότων. Ο διαχωρισμός χρόνου - συχνότητας αυτών των δύο πρωτοκόλλων απεικονίζεται στο παραπάνω σχήμα. στο FDD υπάρχουν συνήθως πολλά 100 MHz μεταξύ της άνω και κάτω ζεύξης. Μπορεί κανείς να δει ότι η επιβάρυνση εκτίμησης καναλιού στο TDD Massive MIMO είναι σημαντικά μικρότερη από ό,τι στο FDD Massive MIMO και δεν κλιμακώνεται με το M . Επομένως, το TDD είναι ένας προτιμώμενος τρόπος διπλής μετάδοσης για τα συστήματα Massive MIMO. Από την άλλη πλευρά, οι απαιτήσεις χαμηλής καθυστέρησης θα μπορούσαν να αντιμετωπιστούν ευκολότερα σε ένα σύστημα FDD. Εάν, για παράδειγμα, ένα σύστημα αυτόματου ελέγχου χρειάζεται ένα μικρό κομμάτι δεδομένων μέσα σε σύντομο χρονικό διάστημα, αλλά το σύστημα έχει μόλις μεταβεί σε μια υποδοχή ανοδικής ζεύξης, τότε υπάρχει μεγάλη πιθανότητα οι πληροφορίες να είναι άκυρες μέχρι να φτάσει το σύστημα στην υποδοχή καθοδικής ζεύξης (το σύστημα 4G χρησιμοποιεί FDD) (Chataut & Akl, 2020).

4. Θέματα εφαρμογής URLLC

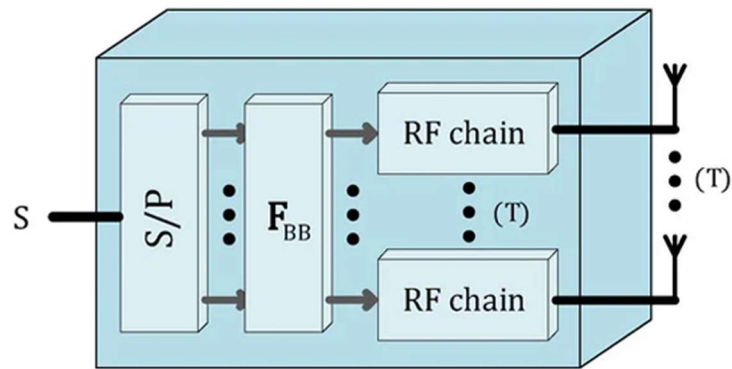
Ο ψηφιακός σχηματισμός δέσμης παρέχει τη μεγαλύτερη ευελιξία όσον αφορά τους δυνατούς αλγορίθμους σχηματισμού δέσμης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, με την ψηφιακή επεξεργασία του σήματος, είναι δυνατή η προσαρμογή της φάσης και του πλάτους κάθε σήματος που τροφοδοτεί ένα στοιχείο κεραίας. Αυτό το σενάριο, που παρουσιάζεται στο σχήμα, απαιτεί κάθε κεραία συνδεδεμένη με τη βασική ζώνη μέσω ενός ειδικού μίκτη, ενός DAC, ενός φίλτρου και ενός ενισχυτή, δηλαδή μια ολόκληρη αλυσίδα RF. Αυτό μετατρέπει την υλοποίηση της ψηφιακής διαμόρφωσης δέσμης σε μια αρχιτεκτονική Massive MIMO με εκατοντάδες κεραίες σε ένα ακριβό και δύσκολο έργο λόγω της υψηλής κατανάλωσης ισχύος, της πολυπλοκότητας και του κόστους (Ali et al., 2021).

Οι συχνότητες χιλιοστομετρικών κυμάτων θα λειτουργούν πιθανώς μαζί με μαζικές συστοιχίες κεραιών για να ξεπεραστεί η εξασθένηση διάδοσης. Αυτό καθιστά έναν πλήρως ψηφιακό διαχωρισμό χρηστών μη εφικτό, δεδομένου ότι η ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για όλες τις μετατροπές από αναλογικό σε ψηφιακό και από ψηφιακό σε αναλογικό θα ήταν τεράστια. Μια πιθανή λύση είναι να αποδοθεί σε κάθε χρήστη ένας δικός του πίνακας διαμόρφωσης δέσμης ραδιοσυχνότητας, που συνεπάγεται διαχωρισμό των χρηστών στο χρόνο και όχι στη συχνότητα. Με άλλα λόγια, μπορεί να είναι δύσκολο να υπάρχει ένας πλήρως ψηφιακός διαμορφωτής δέσμης που εξαρτάται από τις υποφέρουσες λόγω περιορισμών πολυπλοκότητας υλικού, ενώ είναι απλούστερο να υπάρχει ένας μοναδικός διαμορφωτής δέσμης για όλο το διαθέσιμο εύρος ζώνης ραδιοσυχνοτήτων (Radio Frequency - RF) που μπορεί να αλλάζει με το ρυθμό χρονοθυρίδας (Ali et al., 2021).

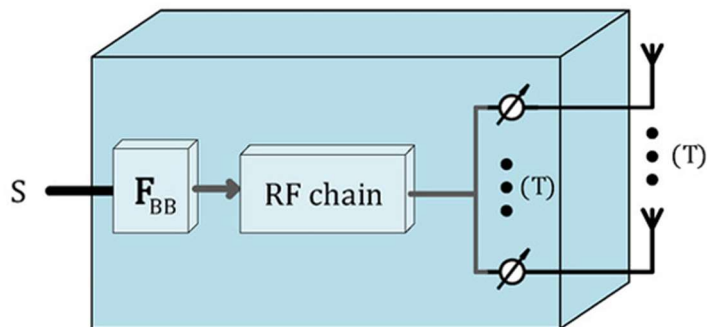
Από την άλλη πλευρά, ο αναλογικός σχηματισμός δέσμης είναι μια απλούστερη και φθηνότερη παραλλαγή, καθώς η βασική ζώνη συνδέεται με τις πολλαπλές κεραίες μέσω μετατοπιστών φάσης. Αυτοί θα συνδεθούν σε κάθε κεραία έτσι ώστε να είναι δυνατή η ρύθμιση μόνο της φάσης του σήματος. Οι μετατοπιστές φάσης μειώνουν τους περιορισμούς υλικού, επιτρέποντας υλοποιήσεις χαμηλής πολυπλοκότητας. Ωστόσο, η απόδοση των πλήρως αναλογικών τεχνικών διαμόρφωσης δέσμης είναι περιορισμένη και συνήθως χρησιμοποιείται μόνο για μετάδοση μιας ροής. Αυτοί οι περιορισμοί

καθιστούν πολύ δύσκολη τη διαμόρφωση πολλαπλών ακτινών, τη ρύθμιση των πλευρικών ακτινών με ακρίβεια ή την καθοδήγηση των μηδενικών (Li et al., 2018).

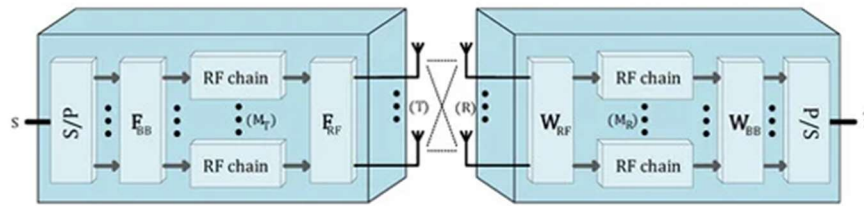
Η αναλογική διαμόρφωση δέσμης είναι μια απλούστερη και φθηνότερη παραλλαγή, καθώς η βασική ζώνη συνδέεται με τις πολλαπλές κεραίες μέσω μετατοπιστών φάσης. Αυτοί θα συνδεθούν σε κάθε κεραία έτσι ώστε να είναι δυνατή η ρύθμιση μόνο της φάσης του σήματος. Οι μετατοπιστές φάσης μειώνουν τους περιορισμούς υλικού, επιτρέποντας υλοποιήσεις χαμηλής πολυπλοκότητας. Ωστόσο, η απόδοση των πλήρως αναλογικών τεχνικών διαμόρφωσης δέσμης είναι περιορισμένη και συνήθως χρησιμοποιείται μόνο για μετάδοση μίας ροής. Αυτοί οι περιορισμοί καθιστούν πολύ δύσκολη τη διαμόρφωση πολλαπλών ακτινών, τη ρύθμιση των πλευρικών ακτινών με ακρίβεια ή την καθοδήγηση των μηδενικών (Li et al., 2018).



Εικόνα 9: Ψηφιακή διαμόρφωση δέσμης (Πηγή: Li et al., 2018).



Εικόνα 10: Δομή αναλογικής διαμόρφωσης δέσμης (Πηγή: Li et al., 2018).



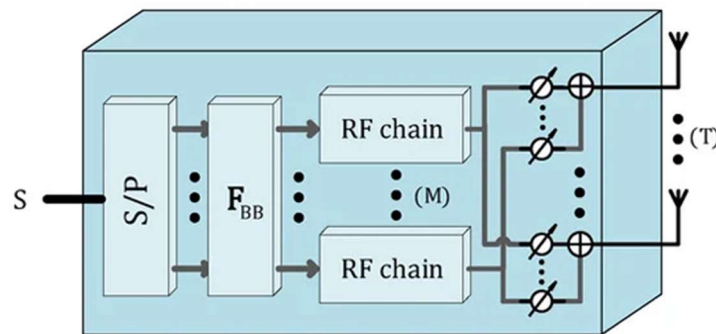
Εικόνα 11: Δομή υβριδικού συστήματος μετάδοσης MIMO (Πηγή: Li et al., 2018).

4.1. Πλήρως συνδεδεμένη και υπο-συνδεδεμένη υβριδική αρχιτεκτονική διαμόρφωσης δέσμης

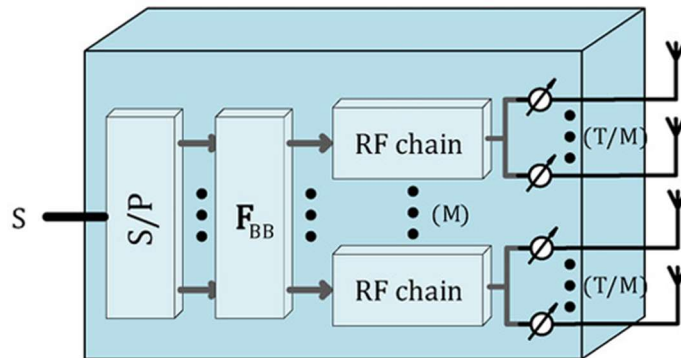
Η ανάγκη για ένα κατάλληλο σχήμα επεξεργασίας σήματος για Massive MIMO προκάλεσε τη μελέτη και ανάλυση μεταξύ των συμβιβασμών μεταξύ ψηφιακών και αναλογικών υλοποιήσεων. Ο υβριδικός σχηματισμός δέσμης έχει αναδειχθεί ως μια προσέγγιση που συνδυάζει τα καλύτερα και από τους δύο κόσμους χρησιμοποιώντας ένα μικρό αριθμό αλυσίδων RF και συνδέοντάς τες με τη συστοιχία κεραιών μέσω ενός σταδίου αναλογικών μετατοπιστών φάσης, για παράδειγμα. Η προσέγγιση αυτή έχει ως κίνητρο το γεγονός ότι ο αριθμός των αλυσίδων μετατροπής άνω-κάτω περιορίζεται μόνο σε μικρότερο βαθμό από τον αριθμό των ροών δεδομένων που πρόκειται να μεταδοθούν. Η λύση αυτή έχει προσελκύσει την προσοχή της ακαδημαϊκής κοινότητας και ακόμη και της βιομηχανίας. Ωστόσο, εξακολουθεί να υπάρχει το δύσκολο έργο του σχεδιασμού βέλτιστων υβριδικών σχημάτων διαμόρφωσης δέσμης, τα οποία έχουν πολύπλοκη φύση λόγω του μη κυρτού περιορισμού σταθερού modulo που επιβάλλουν οι αναλογικοί μετατοπιστές φάσης. Εκτός από τον μη κυρτό περιορισμό, οι μετατοπιστές φάσης συνήθως ελέγχονται ψηφιακά και έχουν διακριτή ανάλυση. Αυτές οι συνθήκες δημιουργούν έναν μεγάλο αριθμό πιθανών συνδυασμών βαρών και φάσεων διαμόρφωσης δέσμης προς βελτιστοποίηση, ο οποίος συνεπάγεται σημαντική υπολογιστική πολυπλοκότητα (Prasad et al., 2017).

Όσον αφορά την υλοποίηση της υβριδικής διαμόρφωσης δέσμης με αναλογικά και ψηφιακά πεδία, έχουν προκύψει δύο τύποι αρχιτεκτονικών: πλήρως συνδεδεμένες και

υπο-συνδεδεμένες αρχιτεκτονικές που παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα, αντίστοιχα. Στην πλήρως συνδεδεμένη αρχιτεκτονική, κάθε αλυσίδα RF συνδέεται με όλες τις κεραίες πομπού μέσω μιας αναλογικής διάταξης (διακόπτης, μετατοπιστής φάσης κ.λπ.). Αυτή η αρχιτεκτονική επιτρέπει μεγαλύτερο αριθμό συνδυασμών και ρυθμίσεων σήματος, αλλά η βελτιστοποίηση του ψηφιακού και του αναλογικού προκωδικοποιητή μπορεί να έχει υψηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα (Prasad et al., 2017).



Εικόνα 12: Υβριδικός διαμορφωτής δέσμης με πλήρως συνδεδεμένη δομή (Πηγή: Li et al., 2018).



Εικόνα 13: Υβριδικός διαμορφωτής δέσμης με υπο-συνδεδεμένη δομή (Πηγή: Li et al., 2018).

Στην υπο-συνδεδεμένη αρχιτεκτονική, κάθε αλυσίδα RF συνδέει μόνο ένα υποσύνολο κεραιών. Σε σύγκριση με την αντίστοιχη πλήρως συνδεδεμένη αρχιτεκτονική, οι υπο-συνδεδεμένες αρχιτεκτονικές επιτρέπουν μικρότερο αριθμό μετατοπιστών φάσης.

Έτσι, η κατανάλωση ισχύος μειώνεται και η υπολογιστική πολυπλοκότητα είναι επίσης χαμηλότερη. Είναι επίσης σημαντικό να αναφερθεί ότι η υπο-συνδεδεμένη αρχιτεκτονική μπορεί να υλοποιηθεί με δυναμικό ή σταθερό τρόπο. Στη δυναμική υπο-συνδεδεμένη περίπτωση, κάθε αλυσίδα RF μπορεί να συνδεθεί δυναμικά σε διαφορετικό σύνολο κεραιών και, στη σταθερή υπο-συνδεδεμένη, κάθε αλυσίδα RF είναι πάντα φυσικά συνδεδεμένη με το ίδιο σύνολο κεραιών (Papadopoulos et al., 2016).

Καθώς αυξάνεται ο αριθμός των αλυσίδων RF, η απόδοση αυτών των ενισχυτών ισχύος καθίσταται κρίσιμη για την ικανοποίηση των απαιτήσεων ενεργειακής απόδοσης σε συστήματα Massive MIMO. Έτσι, η χρήση μη γραμμικών ενισχυτών ισχύος στο στάδιο ενίσχυσης RF επιτρέπει την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ισχύος, η οποία είναι ιδιαίτερα σημαντική για σενάρια υψηλού ρυθμού μετάδοσης bit και κρίσιμη σε ρυθμούς δεδομένων Gigabit και άνω. Ωστόσο, για να αποφευχθεί η παραμόρφωση του σήματος στους μη γραμμικούς ενισχυτές, το μεταδιδόμενο σήμα θα πρέπει να έχει χαμηλό PAPR, το οποίο είναι δύσκολο να επιτευχθεί, ιδίως σε σήματα OFDM ή σήματα ενιαίου μεταφορέα που χρησιμοποιούν σχηματισμούς υψηλής τάξης και/ή ιδιαίτερα επιλεκτικό φίλτράρισμα. Είναι τότε απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν τεχνικές αποκρυπτογράφησης και μείωσης του PAPR. Ωστόσο, οι τεχνικές μείωσης του PAPR έχουν περιορισμούς και συνήθως συνδέονται με αυξημένη πολυπλοκότητα επεξεργασίας ή/και μη γραμμική παραμόρφωση. Επιπλέον, η χρήση τέτοιων περιορισμών ενισχυτή με αποδοτική ισχύ μπορεί να απαιτεί τη χρήση τεχνικών προκωδικοποίησης, των οποίων η πολυπλοκότητα και η κατανάλωση ισχύος ενδέχεται να θέσουν σε κίνδυνο την ενεργειακή απόδοση ολόκληρου του συστήματος. Αποδείχθηκε ότι η διαμόρφωση ενιαίου μεταφορέα μπορεί, θεωρητικά, να επιτύχει σχεδόν βέλτιστες επιδόσεις αθροιστικού ρυθμού σε συστήματα Massive MIMO που λειτουργούν με χαμηλό λόγο ισχύος εκπομπής προς ισχύ θορύβου δέκτη, διακριτό από το προφίλ καθυστέρησης ισχύος του καναλιού και με δέκτη χωρίς εξισορρόπηση. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η διαμόρφωση ενιαίου μεταφορέα διατηρεί μια σχεδόν σταθερή περιβάλλουσα, αποδίδοντας βέλτιστη απόδοση PAPR. Τα συμβατικά συστήματα MIMO μπορούν να χρησιμοποιήσουν τόσο μη γραμμική προκωδικοποίηση όσο και γραμμικές τεχνικές προκωδικοποίησης χωρίς ευνοϊκή μεταχείριση, αν και οι μη γραμμικές μέθοδοι, όπως οι μέθοδοι mesh-assisted και η paper coding κωδικοποίηση, έχουν καλύτερη απόδοση θυσιάζοντας τη χαμηλή πολυπλοκότητα

υλοποίησης. Δίνεται μια λύση για το πρόβλημα PAPR, όπου πραγματοποιείται μια σχεδόν σταθερή αποσύνθεση συμβόλου πριν από το στάδιο ενίσχυσης. Το σύστημα αυτό αναπτύχθηκε περαιτέρω και αξιολογήθηκε ο αντίκτυπος της διαφορετικής αποσύνθεσης συμβόλων. Σε αντίθεση με το συμβατικό MIMO, τα συστήματα Massive MIMO μπορούν να χρησιμοποιήσουν γραμμικούς προκωδικοποιητές, όπως MRT, MMSE και ZF, προκειμένου να μειώσουν την πολυπλοκότητα υλοποίησης (Papadopoulos et al., 2016).

Ο ZF είναι ένας γνωστός αλγόριθμος συνδυασμού που μπορεί επίσης να εφαρμοστεί στον ψηφιακό σχηματισμό δέσμης και μπορεί να εξουδετερώσει την παρεμβολή πολλαπλών χρηστών σε ένα σύστημα MIMO πολλαπλών χρηστών. Στην περίπτωση αυτή, ο πίνακας ZF FZF υπολογίζεται απευθείας από το κανάλι διάδοσης H ως εξής (Elijah et al., 2015):

$$\mathbf{F}_{BB}^{ZF} = \mathbf{H}^H (\mathbf{H}\mathbf{H}^H)^{-1} \quad (10)$$

Η τεχνική MMSE είναι μια εναλλακτική λύση όπου η αρχή αυτής της μεθόδου είναι η ελαχιστοποίηση του MMSE μεταξύ των πραγματικών μεταδιδόμενων δεδομένων και του λαμβανόμενου σήματος. Ο πίνακας που σχετίζεται με αυτή τη βελτιστοποίηση είναι (Elijah et al., 2015):

$$\mathbf{F}_{BB}^{MMSE} = (\mathbf{H}^H \mathbf{H} + 2\sigma_n^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{H}^H \quad (11)$$

όπου σ_n^2 είναι η διακύμανση του θορύβου. Σε αντίθεση με την ZF, ο δέκτης MMSE προωθεί έναν καλύτερο συνδυασμό μείωσης των παρεμβολών και βελτίωσης του θορύβου, καθώς έχει σχεδιαστεί για να ελαχιστοποιεί τον συνολικό θόρυβο.

Η τεχνική μέγιστου λόγου χρησιμοποιήθηκε στη μετάδοση και μελετήθηκε ως τεχνική λήψης. Τα σήματα από όλα τα στοιχεία της κεραιάς σταθμίζονται σε σχέση με το SNR τους, όντας τα βέλτιστα βάρη προσαρμοσμένα στο ασύρματο κανάλι. Το πλάτος μεταβάλλεται και η φάση των επιμέρους σημάτων πρέπει να προσαρμόζεται, απαιτώντας έτσι μια ξεχωριστή αλυσίδα RF και ένα κύκλωμα φάσης για κάθε στοιχείο κεραιάς. Το MR παρέχει ένα SNR εξόδου ίσο με το άθροισμα των επιμέρους SNR, το οποίο παράγει την καλύτερη στατιστική μείωση της εξασθένισης από οποιαδήποτε

γνωστή τεχνική γραμμικής ποικιλομορφίας. Στην MR, ο πίνακας προκωδικοποίησης θα υπολογιστεί ως εξής (Elijah et al., 2015):

$$\mathbf{F}_{BB}^{\text{MRC}} = \frac{\mathbf{H}^H}{T} \quad (12)$$

5. Εφαρμογές του URLLC για 5G ή και 6G

Η πέμπτη γενιά ασύρματης τεχνολογίας (5G) αντιπροσωπεύει την αλλαγή του προσώπου της συνδεσιμότητας. Σχεδιασμένο για μέγιστη ταχύτητα και χωρητικότητα, το 5G έχει τη δυνατότητα να επεκτείνει σημαντικά τον τρόπο με τον οποίο διακινούνται τα δεδομένα και θα επιτρέψει ένα ευρύ φάσμα νέων εφαρμογών και περιπτώσεων χρήσης που υπερβαίνουν κατά πολύ τα smartphone.

Οι μηχανικοί εργάζονται ήδη σκληρά σε εφαρμογές και συσκευές που θα αξιοποιήσουν τα οφέλη του 5G. Από την εξέλιξη του IoT έως τις επαναστατικές εξελίξεις στον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιείται η τεχνητή νοημοσύνη στον πραγματικό κόσμο, πολλές από τις πιο συναρπαστικές τεχνολογικές εξελίξεις του αύριο θα εξαρτηθούν από τη συνδεσιμότητα 5G (Liu, Effiook & Hitchcock, 2020).

5.1. Αξιοποίηση της ισχύος του IoT

Όταν ο όρος "Internet of Things" επινοήθηκε το 1999, ήταν σε μεγάλο βαθμό εννοιολογικός. Δύο δεκαετίες αργότερα, τα πάντα, από οικιακούς θερμοστάτες έως αισθητήρες έξυπνων πόλεων, εξαρτώνται από την τεχνολογία IoT. Τώρα, το 5G και το IoT είναι έτοιμα να ενεργοποιήσουν εφαρμογές που θα φάνταζαν αδύνατες μόλις πριν από λίγα χρόνια.

Η υπόσχεση του 5G για χαμηλή καθυστέρηση και υψηλή χωρητικότητα δικτύου συμβάλλει στην εξάλειψη των μεγαλύτερων περιορισμών στην επέκταση του IoT. Δίνοντας στις συσκευές τη δυνατότητα να αντιλαμβάνονται και να ανταποκρίνονται

σχεδόν σε πραγματικό χρόνο, το 5G και το IoT αποτελούν ένα φυσικό ζεύγος που θα επηρεάσει σχεδόν κάθε βιομηχανία και καταναλωτή (Wang et al., 2018).

5.2. Ευρυζωνική υπηρεσία κινητής τηλεφωνίας

Η αναβαθμισμένη υπηρεσία κινητής τηλεφωνίας είναι από τις πιο αξιοσημείωτες από τις αρχικές επιπτώσεις της ανάπτυξης του δικτύου 5G. Όλοι οι μεγάλοι φορείς ασύρματης τηλεφωνίας των ΗΠΑ, καθώς και πολλοί μικρότεροι πάροχοι υπηρεσιών επικοινωνιών, σκοπεύουν να αναπτύξουν δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 5G που θα παρέχουν υπηρεσίες που μοιάζουν με ευρυζωνικές, όπως βίντεο ροής υψηλής ευκρίνειας χωρίς το φοβερό buffering. Με μια εξαιρετικά αυξημένη χωρητικότητα δικτύου, το 5G προβλέπεται επίσης να μειώσει τις επιβραδύνσεις κατά τη διάρκεια των αιχμών χρήσης - για παράδειγμα, οι φίλαθλοι των σπορ μπορούν να συνεχίσουν να κάνουν streaming κατά τη διάρκεια του μεγάλου αγώνα (Wang et al., 2018).

5.3. Συνδεσιμότητα για Edge Computing

Με τη μετάβαση σε cloud-native δίκτυα 5G, οι επιχειρήσεις μπορούν να επωφεληθούν από τη στρατηγικά κατανεμημένη υπολογιστική ισχύ, επιτρέποντας την επεξεργασία και αποθήκευση περισσότερων δεδομένων στο σωστό μέρος με βάση τις ανάγκες της εφαρμογής. Η ευφυής υπολογιστική άκρη λειτουργεί στη σύγκλιση της εξαιρετικά χαμηλής καθυστέρησης του 5G, του IoT και των τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης. Οι συσκευές και οι εφαρμογές μπορούν να αξιοποιήσουν τους υπολογιστικούς πόρους του υπολογιστικού νέφους της άκρης χωρίς να χρειάζεται να έχουν πρόσβαση σε μία κεντρική βάση δεδομένων που βρίσκεται ενδεχομένως χιλιάδες χιλιόμετρα μακριά.

Καθώς το 5G edge computing γίνεται όλο και πιο διαδεδομένο, οι βιομηχανίες θα είναι σε θέση να αυξήσουν δραματικά τη χρήση των δεδομένων και να δράσουν ταχύτερα - συχνά άμεσα και αυτόνομα - με βάση τις γνώσεις τους (Pant & Malviya, 2022).

5.4.Απελευθέρωση της τεχνητής νοημοσύνης

Η εφαρμογή της τεχνητής νοημοσύνης σε τεράστια κλίμακα όγκου δεδομένων θα επιταχυνθεί με γρήγορη και αποτελεσματική συνδεσιμότητα. Για παράδειγμα, η τεχνητή νοημοσύνη της έξυπνης πόλης θα μπορούσε να συσχετίσει αυτόματα τα δεδομένα των φωτεινών σηματοδοτών και να εφαρμόσει νέα πρότυπα μετά την έναρξη λειτουργίας ενός γειτονικού συγκροτήματος διαμερισμάτων. Η έξυπνη ασφάλεια και η μηχανική όραση μπορούν να διατηρήσουν ασφαλείς εγκαταστάσεις με αυτόματη αναγνώριση πιθανών παραβιάσεων ασφαλείας ή μη εξουσιοδοτημένων επισκεπτών.

Ενώ το 5G θα βοηθήσει να καταστεί δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων TN στην άκρη, θα διαδραματίσει επίσης ρόλο στην παροχή δεδομένων από συσκευές στο κεντρικό cloud για την εκπαίδευση ή την τελειοποίηση μοντέλων τεχνητής νοημοσύνης. Για παράδειγμα, τα δεδομένα του πραγματικού κόσμου σχετικά με τις οδικές συνθήκες που συλλέγονται από συνδεδεμένα οχήματα μπορούν να βελτιώσουν τις υπηρεσίες χαρτογράφησης που βασίζονται στο cloud (You et al., 2019).

5.6.Εμβυθιστικά παιχνίδια και εικονική πραγματικότητα

Για τους χρήστες παιχνιδιών, το 5G υπόσχεται ένα πιο καθηλωτικό μέλλον. Η ζωντανή ροή υψηλής ευκρίνειας θα λάβει μεγάλη ώθηση από τις ταχύτητες 5G, και χάρη στην εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση, τα παιχνίδια 5G δεν θα είναι συνδεδεμένα με συσκευές με υψηλή υπολογιστική ισχύ. Η επεξεργασία, η αποθήκευση και η ανάκτηση θα μπορούν να γίνουν στο cloud, ενώ το ίδιο το παιχνίδι θα εμφανίζεται και θα ελέγχεται από μια κινητή συσκευή.

Το 5G χαμηλής καθυστέρησης θα οδηγήσει σε σημαντικές καινοτομίες στις εφαρμογές εικονικής πραγματικότητας (Virtual Reality - VR), οι οποίες εξαρτώνται από τη γρήγορη ανατροφοδότηση και τους χρόνους απόκρισης για την παροχή μιας ρεαλιστικής εμπειρίας. Οι εφαρμογές αυτές είναι πιθανό να αυξηθούν εκρηκτικά σε

αριθμό και πολυπλοκότητα καθώς τα δίκτυα και οι συσκευές 5G θα γίνουν η νέα κανονικότητα.

Καθώς το 5G edge computing γίνεται πιο διαδεδομένο, οι βιομηχανίες θα μπορούν να αυξήσουν δραματικά τη χρήση των δεδομένων και να ενεργούν ταχύτερα με βάση τις γνώσεις τους - συχνά άμεσα και αυτόματα (Baratè et al., 2019).

5.6.Βιομηχανικές εφαρμογές

Είτε ο στόχος τους είναι να αυξήσουν τις ευκαιρίες εσόδων, να μειώσουν το συνολικό κόστος ιδιοκτησίας (total cost of ownership - TCO) ή να βελτιώσουν τις εμπειρίες των πελατών, οι σημερινές επιχειρήσεις αναμένεται να δουν σημαντικά οφέλη από την αναβάθμιση του 5G (Rao & Prasad,2018).

5.7.Υγειονομική περίθαλψη

Η τεχνολογία 5G θα υποστηρίξει τους ιατρούς να εκτελούν προηγμένες ιατρικές διαδικασίες με ένα αξιόπιστο ασύρματο δίκτυο συνδεδεμένο σε μια άλλη πλευρά του πλανήτη. Οι συνδεδεμένες αίθουσες διδασκαλίας θα βοηθήσουν τους φοιτητές να παρακολουθούν σεμινάρια και σημαντικούς διδάσκοντες.

Τα άτομα με χρόνιες ιατρικές παθήσεις θα επωφεληθούν από τις έξυπνες συσκευές και την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο. Οι γιατροί θα μπορούν να συνδέονται με τους ασθενείς από οπουδήποτε και οποτεδήποτε και να τους συμβουλεύουν όταν χρειάζεται. Οι επιστήμονες εργάζονται πάνω σε έξυπνες ιατρικές συσκευές που μπορούν να πραγματοποιούν χειρουργικές επεμβάσεις από απόσταση (Chen et l., 2018).

Ο κλάδος της υγειονομικής περίθαλψης πρέπει να ενσωματώσει όλες τις λειτουργίες με τη χρήση ενός ισχυρού δικτύου. Το 5G θα τροφοδοτήσει τον κλάδο της υγειονομικής περίθαλψης με έξυπνες ιατρικές συσκευές, το Διαδίκτυο των ιατρικών

πραγμάτων, έξυπνες αναλύσεις και τεχνολογίες ιατρικής απεικόνισης υψηλής ευκρίνειας.

Οι έξυπνες ιατρικές συσκευές, όπως τα wearables, θα παρακολουθούν συνεχώς την κατάσταση ενός ασθενούς και θα ενεργοποιούν ειδοποιήσεις κατά τη διάρκεια έκτακτων περιστατικών. Τα νοσοκομεία και οι υπηρεσίες ασθενοφόρων θα λαμβάνουν ειδοποιήσεις κατά τη διάρκεια κρίσιμων καταστάσεων και θα μπορούν να λαμβάνουν τα απαραίτητα μέτρα για την επιτάχυνση της διάγνωσης και της θεραπείας.

Οι ασθενείς με ειδικές ανάγκες μπορούν να παρακολουθούνται με τη χρήση ειδικών ετικετών και συσκευών ακριβούς εντοπισμού θέσης. Οι βάσεις δεδομένων υγειονομικής περίθαλψης μπορούν να είναι προσβάσιμες από οποιαδήποτε τοποθεσία η ανάλυση των δεδομένων που συλλέγονται μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την έρευνα και τη βελτίωση των θεραπειών.

Οι ιατροί θα μπορούν να μοιράζονται μεγάλα αρχεία, όπως μια έκθεση μαγνητικής τομογραφίας, η οποία συχνά έχει μέγεθος μεγαλύτερο από 1 GB, μέσα σε δευτερόλεπτα χρησιμοποιώντας ένα δίκτυο 5G (Gupta et al., 2021).

5.8. Λιανική πώληση

Για τις εφαρμογές λιανικής πώλησης 5G, η εμπειρία του πελάτη θα είναι το παν. Τα καταστήματα του αύριο μπορεί να μην μοιάζουν πλέον με τους σημερινούς διαδρόμους με τα γεμάτα ράφια. Ένα κατάστημα θα μοιάζει περισσότερο με εκθεσιακό χώρο, ένα κατάστημα που θα επιτρέπει να προστεθούν αντικείμενα σε ένα εικονικό καλάθι αντί οι άνθρωποι να ψωνίζουν με ένα φυσικό καλάθι.

Τα καταστήματα μπορεί επίσης να χρησιμοποιούν το 5G για τη διαχείριση των αποθεμάτων σε πραγματικό χρόνο. Οι καταναλωτές θα μπορούσαν να δουν ακόμη και αλλαγές όπως καταστήματα χωρίς ταμείο που απλώς παρακολουθούν τι βάζει ο καθένας στο καλάθι του αντί για την παραδοσιακή γραμμή στο ταμείο (Ganesh, 2021).

5.9.Γεωργία

Τα αγροκτήματα του μέλλοντος θα χρησιμοποιούν περισσότερα δεδομένα και λιγότερα χημικά. Λαμβάνοντας δεδομένα από αισθητήρες που βρίσκονται απευθείας στα χωράφια, οι αγρότες μπορούν να εντοπίζουν με απόλυτη ακρίβεια ποιες περιοχές χρειάζονται νερό, έχουν κάποια ασθένεια ή απαιτούν διαχείριση των παρασίτων.

Καθώς τα wearables γίνονται λιγότερο ακριβά και το 5G διευκολύνει την κλιμάκωση των δικτύων που περιέχουν μεγάλο αριθμό συσκευών IoT, μπορεί επίσης να εμφανιστεί η παρακολούθηση της υγείας των ζώων. Με πιο ακριβή δεδομένα για την υγεία, οι αγρότες μπορούν να μειώσουν τη χρήση αντιβιοτικών χωρίς να θέσουν σε κίνδυνο την ασφάλεια των τροφίμων (Ganesh, 2021).

5.10.Παραγωγή

Οι χώροι των εργοστασίων θα μεταμορφωθούν πλήρως από τη σύγκλιση του 5G, της τεχνητής νοημοσύνης και του IoT. Πέρα από την προγνωστική συντήρηση που βοηθά στον έλεγχο του κόστους και την ελαχιστοποίηση του χρόνου διακοπής λειτουργίας, τα εργοστάσια θα χρησιμοποιούν επίσης το 5G για τον έλεγχο και την ανάλυση των βιομηχανικών διαδικασιών με πρωτοφανή βαθμό ακρίβειας.

Με την ώθηση συνδεσιμότητας που παρέχει το 5G, οι κατασκευαστές μπορούν επίσης να αλλάξουν τις παραδοσιακές διαδικασίες διασφάλισης ποιότητας, εκσυγχρονίζοντάς τις με τεχνολογία αισθητήρων και τεχνητής νοημοσύνης (Ganesh, 2021).

5.11.Εφοδιαστική

Στις μεταφορές και τα logistics, η παρακολούθηση των αποθεμάτων είναι δαπανηρή, αργή και δύσκολη. Το 5G προσφέρει τη δυνατότητα μεγαλύτερης επικοινωνίας μεταξύ των οχημάτων, καθώς και μεταξύ των οχημάτων και της ίδιας της υποδομής. Η

παρακολούθηση του στόλου και η πλοήγηση θα γίνουν σημαντικά ευκολότερες σε κλίμακα με το 5G. Η πλοήγηση των οδηγών θα μπορούσε ενδεχομένως να τροφοδοτηθεί με ένα σύστημα επαυξημένης πραγματικότητας που αναγνωρίζει και επισημαίνει πιθανούς κινδύνους χωρίς να αποσπά την προσοχή του οδηγού από το δρόμο (Ganesh, 2021).

Συμπεράσματα

Το μέλλον του 5G γράφεται ακόμη και μπορεί να είναι τόσο σημαντικό για τη συνδεσιμότητα όσο και η αυγή του διαδικτύου. Ίσως το πιο συναρπαστικό μέρος των περιπτώσεων χρήσης του 5G είναι ότι κανείς δεν γνωρίζει ακριβώς τι θα ακολουθήσει.

Ό,τι κι αν επιφυλάσσει το μέλλον, ένα πράγμα είναι σίγουρο: το 5G θα κάνει πολύ περισσότερα από το να προσφέρει ταχύτερη τηλεφωνική σύνδεση. Θα αλλάξει τη ζωή των ανθρώπων.

Τα έξυπνα σπίτια, οι συγχρονισμένες συσκευές IoT για ρολόγια και τηλέφωνα και οι εφαρμογές γυμναστικής είναι κοινός τόπος. Θα αναπτυχθούν με τις δυνατότητες ταχύτητας και απόδοσης του 5G. Με μεγάλη εξάρτηση από το κινητό IoT σε τόσο μεγάλη κλίμακα σήμερα, στα επόμενα 20 χρόνια, το μέλλον του 5G θα μοιάζει εντελώς διαφορετικό.

Θα δημιουργηθούν εφαρμογές αυτόνομων οχημάτων μεγάλης κλίμακας και αυτοματισμούς υπηρεσιών κοινής ωφέλειας, όπως η διαχείριση αποβλήτων. Θα δημιουργηθεί επίσης παραγωγή ενέργειας μέσω έξυπνων δικτύων και έξυπνη περιβαλλοντική παρακολούθηση για τη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου και της ρύπανσης.

Οι αγρότες θα μπορούν να παρακολουθούν τις καλλιέργειες, το ζωικό κεφάλαιο και τα μηχανήματα μέσω μη επανδρωμένων αεροσκαφών και υπερ πυκνών δικτύων αισθητήρων.

Οι οικιακοί χρήστες θα μπορούν να ενσωματώσουν πλήρως το παράδειγμα εργασίας από το σπίτι που καθοδηγείται από τον COVID, το οποίο φαίνεται πιθανό να επιβιώσει από την πανδημία ως νέο εταιρικό κανόνα. Επιπλέον, οι οικιακοί χρήστες θα είναι σε θέση να βελτιστοποιούν τη χρήση ενέργειας και να μεταδίδουν την αγαπημένη τους ψυχαγωγία από οπουδήποτε.

Η κοινωνία θα γίνει πιο αποτελεσματική, οι έξυπνες πόλεις θα ανταποκριθούν στο όνομά τους και οι χρήστες μπορούν να περιμένουν εξατομικευμένες ροές πληροφοριών που θα είναι προσαρμοσμένες στις προτιμήσεις τους.

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη και η περιγραφή Τεχνολογιών για την Επίτευξη Επικοινωνιών Εξαιρετικής Αξιοπιστίας και Χαμηλής Καθυστέρησης (URLLC) για την Πέμπτη γενιά επικοινωνιών (5G) καθώς και την εξέλιξή τους. Πιο συγκεκριμένα, στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν ορισμένα εισαγωγικά στοιχεία αναφορικά με την έννοια του URLLC, για τα δίκτυα LTE, για τα δίκτυα 5G καθώς και για την τεχνολογία Massive MIMO.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάστηκε η δομή και η τοπολογία του URLLC. Έγινε αναφορά στην αρχιτεκτονική και στη δομή του URLLC, στην αρχή λειτουργίας του, στη δομή του καναλιού, στα χαρακτηριστικά και, τέλος, στη σπουδαιότητα του URLLC.

Το τρίτο κεφάλαιο είχε ως θέμα τη χρήση κεραιών Massive MIMO. Παρουσιάστηκε η αρχή λειτουργίας, η δομή και τα χαρακτηριστικά, καθώς και τα θέματα εφαρμογής του URLLC.

Στο τέταρτο κεφάλαιο έγινε αναφορά στις εφαρμογές του URLLC για 5G και 6G. Το URLLC χρησιμοποιείται στο Internet of Things, στην ευρυζωνική υπηρεσία κινητής τηλεφωνίας, στο Edge Computing, στην τεχνητή νοημοσύνη στα εμβυθιστικά παιχνίδια και στην εικονική πραγματικότητα, στις βιομηχανικές εφαρμογές, στην υγειονομική περίθαλψη, στη λιανική πώληση, στη γεωργία, στη παραγωγή, καθώς και στην εφοδιαστική.

Βιβλιογραφία

1. Afolabi, I., Taleb, T., Samdanis, K., Ksentini, A., & Flinck, H. (2018). Network slicing and softwarization: A survey on principles, enabling technologies, and solutions. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20(3), 2429-2453.
2. Ahmadi, S. (2019). 5G NR: Architecture, technology, implementation, and operation of 3GPP new radio standards. Academic Press.
3. Ahmed, A., Al-Dweik, A., Iraqi, Y., Mukhtar, H., Naeem, M., & Hossain, E. (2021). Hybrid automatic repeat request (HARQ) in wireless communications systems and standards: A contemporary survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 23(4), 2711-2752.
4. Aijaz, A., Dohler, M., Aghvami, A. H., Friderikos, V., & Frodigh, M. (2016). Realizing the tactile Internet: Haptic communications over next generation 5G cellular networks. *IEEE Wireless Communications*, 24(2), 82-89.
5. Al-Falahy, N., & Alani, O. Y. (2017). Technologies for 5G networks: Challenges and opportunities. *It Professional*, 19(1), 12-20.
6. Ali, M. S., Hossain, E., & Kim, D. I. (2017). LTE/LTE-A random access for massive machine-type communications in smart cities. *IEEE Communications Magazine*, 55(1), 76-83.
7. Ali, R., Zikria, Y. B., Bashir, A. K., Garg, S., & Kim, H. S. (2021). URLLC for 5G and beyond: Requirements, enabling incumbent technologies and network intelligence. *IEEE Access*, 9, 67064-67095.
8. Alsenwi, M., Tran, N. H., Bennis, M., Bairagi, A. K., & Hong, C. S. (2019). eMBB-URLLC resource slicing: A risk-sensitive approach. *IEEE Communications Letters*, 23(4), 740-743.
9. Anand, A., De Veciana, G., & Shakkottai, S. (2020). Joint scheduling of URLLC and eMBB traffic in 5G wireless networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 28(2), 477-490.

10. Ashraf, M. I., Liu, C. F., Bennis, M., & Saad, W. (2017, June). Towards low-latency and ultra-reliable vehicle-to-vehicle communication. In *2017 European Conference on Networks and Communications (EuCNC)* (pp. 1-5). IEEE.
11. Ateya, A. A., Muthanna, A., Makolkina, M., & Koucheryavy, A. (2018, November). Study of 5G services standardization: specifications and requirements. In *2018 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)* (pp. 1-6). IEEE.
12. Baratè, A., Haus, G., Ludovico, L. A., Pagani, E., & Scarabottolo, N. (2019, June). 5G technology for augmented and virtual reality in education. In *Proceedings of the International Conference on Education and New Developments (Vol. 2019, pp. 512-516)*.
13. Bastug, E., Bennis, M., Médard, M., & Debbah, M. (2017). Toward interconnected virtual reality: Opportunities, challenges, and enablers. *IEEE Communications Magazine*, 55(6), 110-117.
14. Björnson, E., Hoydis, J., & Sanguinetti, L. (2017). Massive MIMO has unlimited capacity. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 17(1), 574-590.
15. Borkar, S., & Pande, H. (2016, January). Application of 5G next generation network to Internet of Things. In *2016 International Conference on Internet of Things and Applications (IOTA)* (pp. 443-447). IEEE.
16. Braun, V., Schober, K., & Tirola, E. (2019, April). 5G NR physical downlink control channel: Design, performance and enhancements. In *2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)* (pp. 1-6). IEEE.
17. Budhiraja, I., Tyagi, S., Tanwar, S., Kumar, N., & Rodrigues, J. J. (2019). Tactile Internet for smart communities in 5G: An insight for NOMA-based solutions. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(5), 3104-3112.

18. Campbell, K., Diffley, J., Flanagan, B., Morelli, B., O’Neil, B., & Sideco, F. (2017). The 5G economy: How 5G technology will contribute to the global economy. *IHS economics and IHS technology*, 4, 16.
19. Campos, J. (2017). Understanding the 5G NR physical layer. *Keysight Technologies release*.
20. Cassiau, N., Maret, L., Doré, J. B., Savin, V., & Ktéνας, D. (2018, November). Assessment of 5G NR physical layer for future satellite networks. In *2018 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP)* (pp. 1020-1024). IEEE.
21. Chataut, R., & Akl, R. (2020). Massive MIMO systems for 5G and beyond networks—overview, recent trends, challenges, and future research direction. *Sensors*, 20(10), 2753.
22. Chen, B., Qiao, S., Zhao, J., Liu, D., Shi, X., Lyu, M., ... & Zhai, Y. (2020). A security awareness and protection system for 5G smart healthcare based on zero-trust architecture. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(13), 10248-10263.
23. Chen, M., Li, W., Hao, Y., Qian, Y., & Humar, I. (2018). Edge cognitive computing based smart healthcare system. *Future Generation Computer Systems*, 86, 403-411.
24. Elijah, O., Leow, C. Y., Rahman, T. A., Nunoo, S., & Iliya, S. Z. (2015). A comprehensive survey of pilot contamination in massive MIMO—5G system. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(2), 905-923.
25. Fettweis, G. P. (2014). The tactile internet: Applications and challenges. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 9(1), 64-70.
26. Fettweis, G., Boche, H., Wiegand, T., Zielinski, E., Schotten, H., Merz, P., ... & Steinbach, E. (2014). The tactile internet-ITU-T technology watch report. *Int. Telecom. Union (ITU), Geneva*.
27. Ganesh, E. N. (2021). Study of 5G Technology and its operations and maintenance to improve flexibility, impacts: Review. *Recent Trends in*

- Electronics & efficiency and availability. Although maintenance Communication Systems, 8(3), 40-49p.
28. Gupta, A., & Jha, R. K. (2015). A survey of 5G network: Architecture and emerging technologies. *IEEE access*, 3, 1206-1232.
 29. Gupta, N., Juneja, P. K., Sharma, S., & Garg, U. (2021, May). Future aspect of 5G-IoT architecture in smart healthcare system. In 2021 5th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS) (pp. 406-411). IEEE.
 30. Hetzer, D., Muehleisen, M., Kousaridas, A., & Alonso-Zarate, J. (2019, June). 5g connected and automated driving: Use cases and technologies in cross-border environments. In 2019 European conference on networks and communications (EuCNC) (pp. 78-82). IEEE.
 31. Holfeld, B., Wieruch, D., Wirth, T., Thiele, L., Ashraf, S. A., Huschke, J., ... & Ansari, J. (2016). Wireless communication for factory automation: An opportunity for LTE and 5G systems. *IEEE Communications Magazine*, 54(6), 36-43.
 32. Hu, F. (Ed.). (2016). Opportunities in 5G networks: A research and development perspective. CRC press.
 33. Islam, S. R., Avazov, N., Dobre, O. A., & Kwak, K. S. (2016). Power-domain non-orthogonal multiple access (NOMA) in 5G systems: Potentials and challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(2), 721-742.
 34. Kalør, A. E., Guillaume, R., Nielsen, J. J., Mueller, A., & Popovski, P. (2017). Network slicing for ultra-reliable low latency communication in industry 4.0 scenarios. *arXiv preprint arXiv:1708.09132*.
 35. Konečný, J., McMahan, H. B., Ramage, D., & Richtárik, P. (2016). Federated optimization: Distributed machine learning for on-device intelligence. *arXiv preprint arXiv:1610.02527*.

36. Kumar, P., Patil, B., & Ram, S. (2015). Selection of radio propagation model for long term evolution (LTE) network. *International Journal of Engineering Research and General Science*, 3(1), 373-379.
37. Larsson, E. G., & Van der Perre, L. (2017). Massive MIMO for 5G.
38. LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *nature*, 521 (7553), 436-444. *Google Scholar Google Scholar Cross Ref Cross Ref*.
39. Li, C. P., Jiang, J., Chen, W., Ji, T., & Smees, J. (2017, June). 5G ultra-reliable and low-latency systems design. In *2017 European Conference on Networks and Communications (EuCNC)* (pp. 1-5). IEEE.
40. Li, C., Li, C. P., Hosseini, K., Lee, S. B., Jiang, J., Chen, W., ... & Li, J. (2018). 5G-based systems design for tactile Internet. *Proceedings of the IEEE*, 107(2), 307-324.
41. Li, Z., Uusitalo, M. A., Shariatmadari, H., & Singh, B. (2018, August). 5G URLLC: Design challenges and system concepts. In *2018 15th international symposium on wireless communication systems (ISWCS)* (pp. 1-6). IEEE.
42. Lin, H. L., Liao, P. K., & Wu, W. D. (2018). *U.S. Patent Application No. 15/835,768*.
43. Liu, E., Effiok, E., & Hitchcock, J. (2020). Survey on health care applications in 5G networks. *IET Communications*, 14(7), 1073-1080.
44. Luvisotto, M., Pang, Z., & Dzung, D. (2016). Ultra high performance wireless control for critical applications: Challenges and directions. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 13(3), 1448-1459.
45. Maier, M., & Ebrahimzadeh, A. (2019). Towards immersive tactile Internet experiences: Low-latency FiWi enhanced mobile networks with edge intelligence. *Journal of Optical Communications and Networking*, 11(4), B10-B25.
46. Marabissi, D., Mucchi, L., Fantacci, R., Spada, M. R., Massimiani, F., Fratini, A., ... & Fedele, L. (2018). A real case of implementation of the future 5G city. *Future Internet*, 11(1), 4.

47. Mozaffari, M., Saad, W., Bennis, M., & Debbah, M. (2016). Unmanned aerial vehicle with underlaid device-to-device communications: Performance and tradeoffs. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 15(6), 3949-3963.
48. Pant, M., & Malviya, L. (2022). Design, developments, and applications of 5G antennas: a review. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 1-27.
49. Papadopoulos, H., Wang, C., Bursalioglu, O., Hou, X., & Kishiyama, Y. (2016). Massive MIMO technologies and challenges towards 5G. *IEICE Transactions on Communications*, 99(3), 602-621.
50. Park, J., Samarakoon, S., Shiri, H., Abdel-Aziz, M. K., Nishio, T., Elgabli, A., & Bennis, M. (2020). Extreme URLLC: Vision, challenges, and key enablers. *arXiv preprint arXiv:2001.09683*.
51. Patriciello, N., Lagen, S., Giupponi, L., & Bojovic, B. (2018, September). 5G new radio numerologies and their impact on the end-to-end latency. In *2018 IEEE 23rd international workshop on computer aided modeling and design of communication links and networks (CAMAD)* (pp. 1-6). IEEE.
52. Prasad, K. S. V., Hossain, E., & Bhargava, V. K. (2017). Energy efficiency in massive MIMO-based 5G networks: Opportunities and challenges. *IEEE Wireless Communications*, 24(3), 86-94.
53. Rajesh, K. P., Sivakumar, K., & Dharan, D. (2019, June). The Upcoming 5G Mobile Services and Network Essentials. In *Journal of Analysis and Computation (JAC)*, Forthcoming, National Conference on: Research Challenges in Information Systems of Computer Science (NCRCSIS).
54. Rao, J., & Vrzic, S. (2018). Packet duplication for URLLC in 5G: Architectural enhancements and performance analysis. *IEEE Network*, 32(2), 32-40.
55. Rao, S. K., & Prasad, R. (2018). Impact of 5G technologies on industry 4.0. *Wireless personal communications*, 100(1), 145-159.

56. Rényi, A. (1961, June). On measures of entropy and information. In *Proceedings of the fourth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability* (Vol. 1, No. 547-561).
57. Rinaldi, F., Raschella, A., & Pizzi, S. (2021). 5G NR system design: a concise survey of key features and capabilities. *Wireless Networks*, 27(8), 5173-5188.
58. Sachs, J., Wikstrom, G., Dudda, T., Baldemair, R., & Kittichokechai, K. (2018). 5G radio network design for ultra-reliable low-latency communication. *IEEE network*, 32(2), 24-31.
59. Samarakoon, S., Bennis, M., Saad, W., & Debbah, M. (2018, December). Federated learning for ultra-reliable low-latency V2V communications. In *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)* (pp. 1-7). IEEE.
60. Simsek, M., Aijaz, A., Dohler, M., Sachs, J., & Fettweis, G. (2016). 5G-enabled tactile internet. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 34(3), 460-473.
61. Soltanmohammadi, E., Ghavami, K., & Naraghi-Pour, M. (2016). A survey of traffic issues in machine-to-machine communications over LTE. *IEEE Internet of Things Journal*, 3(6), 865-884.
62. Sun, L., & Du, Q. (2017). Physical layer security with its applications in 5G networks: A review. *China communications*, 14(12), 1-14.
63. Tang, Y., Dananjayan, S., Hou, C., Guo, Q., Luo, S., & He, Y. (2021). A survey on the 5G network and its impact on agriculture: Challenges and opportunities. *Computers and Electronics in Agriculture*, 180, 105895.
64. Tanwar, S., Tyagi, S., Budhiraja, I., & Kumar, N. (2019). Tactile Internet for autonomous vehicles: Latency and reliability analysis. *IEEE Wireless Communications*, 26(4), 66-72.
65. Varsha, H. S., & Shashikala, K. P. (2017, February). The tactile internet. In *2017 International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications (ICIMIA)* (pp. 419-422). IEEE.

66. Wang, D., Chen, D., Song, B., Guizani, N., Yu, X., & Du, X. (2018). From IoT to 5G I-IoT: The next generation IoT-based intelligent algorithms and 5G technologies. *IEEE Communications Magazine*, 56(10), 114-120.
67. Wang, D., Song, B., Chen, D., & Du, X. (2019). Intelligent cognitive radio in 5G: AI-based hierarchical cognitive cellular networks. *IEEE Wireless Communications*, 26(3), 54-61.
68. Wen, F., Wymeersch, H., Peng, B., Tay, W. P., So, H. C., & Yang, D. (2019). A survey on 5G massive MIMO localization. *Digital Signal Processing*, 94, 21-28.
69. Xie, H., Gao, F., & Jin, S. (2016). An overview of low-rank channel estimation for massive MIMO systems. *IEEE Access*, 4, 7313-7321.
70. You, X., Zhang, C., Tan, X., Jin, S., & Wu, H. (2019). AI for 5G: research directions and paradigms. *Science China Information Sciences*, 62(2), 1-13.
71. Zaidi, A., Athley, F., Medbo, J., Gustavsson, U., Durisi, G., & Chen, X. (2018). *5G Physical Layer: principles, models and technology components*. Academic Press.
72. Zhan, M., Pang, Z., Xiao, M., Luvisotto, M., & Dzung, D. (2018). Wireless high-performance communications: Improving effectiveness and creating ultrahigh reliability with channel coding. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 12(3), 32-37.
73. Zhu, K., & Hossain, E. (2015). Virtualization of 5G cellular networks as a hierarchical combinatorial auction. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 15(10), 2640-2654.