

Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας
Πολυτεχνική Σχολή
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**" Μη κυψελωτές αρχιτεκτονικές συστημάτων κινητών
επικοινωνιών νέας γενιάς "**

ΠΑΠΑΓΙΑΝΝΗΣ ΣΤΑΥΡΟΣ

A.M. 1201

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ:

ΛΟΥΤΑ ΜΑΛΑΜΑΤΗ & ΒΑΡΔΑΚΑΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΚΟΖΑΝΗ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2021

Δήλωση Πνευματικών Δικαιωμάτων

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 και τα άρθρα 2,4,6 παρ. 3 του Ν. 1256/1982, η παρούσα Διπλωματική Εργασία με τίτλο

“Μη κυψελωτές αρχιτεκτονικές συστημάτων κινητών επικοινωνιών νέας γενιάς”

καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας και αναφέρονται ρητώς μέσα στο κείμενο που συνοδεύουν, και η οποία έχει εκπονηθεί στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, υπό την επίβλεψη του μέλους του Τμήματος κ. Ιωάννη Βαρδάκα και κα. Μαλαματένιας Λούτα

αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή / και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή.

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

Copyright (C) Ονοματεπώνυμο Φοιτητή & Επιβλέποντα/ες, Έτος, Πόλη

Copyright (C) Σταύρος Παπαγιάννης, Ι. Βαρδάκας, Μ. Λούτα, 2021, Κοζάνη

Υπογραφή Φοιτητή:





University of Western Macedonia
Faculty of Engineering
Dept. of Electrical and Computer Engineering

DIPLOMA THESIS

" Cell free architectures of next generation mobile
communication systems "

PAPAGIANNIS STAVROS

SUPERVISORS

MALAMATI LOUTA & IOANNIS VARDAKAS

KOZANI, SEPTEMBER 2021

Περίληψη

Σε αυτή την εργασία αρχικά, παρουσιάζουμε αναλυτικά τη τεχνολογία των συστημάτων κινητών επικοινωνιών 5^{ης} γενιάς. Έπειτα, τονίζουμε τα πλεονεκτήματα καθώς και τις προκλήσεις που διαθέτει. Στη συνέχεια, εισαγουμε και αναλύουμε την νέα και πολλά υποσχόμενη τεχνολογία cell-free massive MIMO όσον αφορά την αρχιτεκτονική της, τα υπέρ και τα κατά της και τις διαφορές της από τις προηγούμενες τεχνολογίες. Τέλος, παρέχουμε έναν αλγόριθμο για κοινή αρχική πρόσβαση, ανάθεση πιλότου και σχηματισμό πλέγματος ο οποίος είναι κλιμακούμενος. Μια νέα δυαδικότητα ανερχόμενης και κατώτερης σύνδεσης αποδεικνύεται και χρησιμοποιείται για να σχεδιάσει ευρετικά τα διανύσματα προκωδικοποίησης με βάση τα διανύσματα συνδυασμού. Είναι ενδιαφέρον ότι η προτεινόμενη κλιμακούμενη προκωδικοποίηση και ο συνδυασμός υπεραποδίδει τη συμβατική επεξεργασία μέγιστης αναλογίας και αποδίδει επίσης στις καλύτερες εναλλακτικές λύσεις που δεν μπορούν να κλιμακωθούν.

Λέξεις κλειδιά: Cell-Free Massive MIMO, 5G and beyond, κλιμακωτή ανάπτυξη, συγκεντρωτικοί και κατανεμημένοι αλγόριθμοι, ομαδοποίηση δυναμικής συνεργασίας, δικτύωση με επίκεντρο τον χρήστη, δυαδικότητα uplink-downlink.

Abstract

In this paper, we first present in detail the technology of 5th generation mobile communication systems. Next, we highlight the advantages as well as the challenges it has. Next, we introduce and analyze the new and promising cell-free massive MIMO technology in terms of its architecture, its pros and cons and its various from previous technologies. Finally, we provide a novel algorithm for joint initial access, pilot assignment, and cluster formation that is proved to be scalable.. A new uplink and downlink duality is proved and used to heuristically design the precoding vectors on the basis of the combining vectors. Interestingly, the proposed scalable precoding and combining outperform conventional maximum ratio processing and also performs to the best unscalable alternatives.

Keywords: Cell-Free Massive MIMO, 5G and beyond, scalable implementation, centralized and distributed algorithms, dynamic cooperation clustering, user-centric networking, uplink-downlink duality.

Περιεχόμενα

| | |
|--|----|
| Περίληψη | 6 |
| Abstract | 8 |
| Περιεχόμενα..... | 10 |
| Κατάλογος Σχημάτων..... | 12 |
| Κατάλογος Πινάκων..... | 14 |
| Κατάλογος Αρκτικόμελων..... | 16 |
| 1 Εισαγωγή στα συστήματα κινητών επικοινωνιών 5G..... | 1 |
| 1.1 Πλεονεκτήματα 5G | 2 |
| 1.2 Υπηρεσίες και εφαρμογές..... | 4 |
| 1.2.1 Υπηρεσίες | 4 |
| 1.2.2 Εφαρμογές | 10 |
| 1.3 Προκλήσεις 5G | 13 |
| 1.3.1 Τεχνικές προκλήσεις | 13 |
| 1.3.2 Μη-τεχνικές προκλήσεις | 16 |
| 1.4 5G and beyond..... | 17 |
| 1.5 Συνεισφορά της παρούσας διπλωματικής εργασίας..... | 21 |
| 2 Η τεχνολογία του Cell-free massive MIMO | 23 |
| 2.1 Διαφορές CF massive MIMO με τις παραδοσιακές αρχιτεκτονικές..... | 23 |
| 2.2 Αρχιτεκτονική..... | 24 |
| 2.2.1 Ανάπτυξη συστήματος (Deployment)..... | 27 |
| 2.3 Τρόπος μετάδοσης | 31 |
| 2.3.1 Πρωτόκολλο TDD..... | 32 |
| 2.3.2 Πιλοτική ανάπτυξη UL..... | 33 |
| 2.3.3 Έλεγχος ισχύος | 33 |
| 2.4 Πλεονεκτήματα..... | 34 |
| 2.5 Μειονεκτήματα | 35 |
| 3 Μελέτη της βιβλιογραφίας δικτύων cell-free..... | 39 |
| 3.1 Αρθρογραφία | 39 |
| 3.2 Πίνακας συγκρίσεων άρθρων | 53 |
| 4 Κλιμακωτό σύστημα Cell-free massive MIMO..... | 57 |
| 4.1 Μοντέλο συστήματος..... | 57 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4.2 | Προσομοιωτής | 58 |
| 4.2.1 | Εκτίμηση καναλιού | 58 |
| 4.2.2 | Ανοδική κατεύθυνση..... | 60 |
| 4.2.3 | Καθοδική κατεύθυνση..... | 65 |
| 4.2.4 | Χωρική συσχέτιση (local scattering)..... | 73 |
| 4.2.5 | Διαμόρφωση προσομοιωτή..... | 75 |
| 4.2.6 | Τοπολογία συστήματος | 79 |
| 4.3 | Προσομοίωση δικτύου | 79 |
| 4.3.1 | Αλλαγή του αριθμού των AP..... | 80 |
| 4.3.2 | Αλλαγή αριθμού των UE..... | 84 |
| 4.3.3 | Αλλαγή αριθμού συνολικής ισχύς μετάδοσης downlink ανά AP (rho_tot) | 87 |
| | Βιβλιογραφία | 91 |

Κατάλογος Σημάτων

| | |
|--|----|
| Εικόνα 1.1 : υπηρεσίες και εφαρμογές 5G [3]..... | 4 |
| Εικόνα 2.2.1: αρχιτεκτονική (εδώ φαίνεται ότι πολλά AP που διαθέτουν massive MIMO κεραιές επικοινωνούν με όλα τα κοντινά UE και συνδέονται κατευθείαν με μια κεντρική CPU) [19]..... | 25 |
| Εικόνα 2.2.2: 2 αρχιτεκτονικές cell free massive MIMO. (Στην εικόνα 2.2.2.(a) έχουμε διάφορα καταναμημένα σημεία (DU) που συνδέονται με πάνω από μία CPU, μέσω fronthaul ζεύξεων, και εξυπηρετούν τους γειτονικούς χρήστες όλα μαζί. Στην εικόνα 2.2.2.(b) έχουμε τα διάφορα καταναμημένα DU που συνδέονται με μία μόνο CPU, μέσω fronthaul ζεύξεων, ενώ ο χρήστης εξυπηρετείται από όλα τα γειτονικά DU. [18] | 25 |
| Εικόνα 2.2.1.i: εσωτερικό ραδιολωρίδων (Αρχικά φαίνεται το ηλεκτρικό κύκλωμα από το οποίο αποτελούνται τα APU των ραδιολωρίδων. Έπειτα φαίνεται το εσωτερικό των ραδιολωρίδων όπου βρίσκονται οι κεραιές και τα APU. Η ραδιολωρίδα περιέχει επίσης τις συνδέσεις fronthaul μεταξύ των υλικών καθώς και τις λειτουργίες ρολογιού και ενέργειας, ενώ περιβάλλεται από ένα προστατευτικό στρώμα υλικού.) [19] | 27 |
| Εικόνα 2.2.1.ii: Διάφορες περιπτώσεις εφαρμογής ραδιολωρίδων (π.χ. σε πολυσύχναστες πλατείες και δρόμους, σε εμπορικά κέντρα και σε μεγάλα γήπεδα) [19] | 29 |
| Εικόνα 2.3.1: πρωτόκολλο TDD [22] | 32 |
| Εικόνα 4.3.1.i: 4 κεραιές 100 AP..... | 80 |
| Εικόνα 4.3.1.ii: 4κεραίες 50 AP..... | 80 |
| Εικόνα 4.3.1.iii: 4 κεραιές 150 AP..... | 81 |
| Εικόνα 4.3.1.iv: 4 κεραιές 200 AP..... | 81 |
| Εικόνα 4.3.1.v: 1 κεραία 300 AP | 82 |
| Εικόνα 4.3.1.vi: 1 κεραία 350 AP | 83 |
| Εικόνα 4.3.1.vii: 1 κεραία 400 AP | 83 |
| Εικόνα 4.3.1.viii: 1 κεραία 450 AP..... | 84 |
| Εικόνα 4.3.2.i: 4 κεραιές, 100 APs και 100 UEs | 85 |
| Εικόνα 4.3.2.ii: 4 κεραιές, 100 APs και 50 UEs | 85 |
| Εικόνα 4.3.2.iii: 4 κεραιές, 100 APs και 75 UEs..... | 86 |
| Εικόνα 4.3.2.iv: 4 κεραιές, 100 APs και 125 UEs | 86 |
| Εικόνα 4.3.2.v: 4 κεραιές, 100 APs και 150 UEs | 87 |
| Εικόνα 4.3.3.i: 4 κεραιές, 100 Aps, 100 UEs και 800 rho_tot..... | 88 |
| Εικόνα 4.3.3.ii: 4 κεραιές, 100 Aps, 100 UEs και 900 rho_tot | 88 |
| Εικόνα 4.3.3.iii: 4 κεραιές, 100 Aps, 100 UEs και 1000 rho_tot | 89 |
| Εικόνα 4.3.3.iv: 4 κεραιές, 100 Aps, 100 UEs και 1100 rho_tot..... | 89 |
| Εικόνα 4.3.3.v: 4 κεραιές, 100 Aps, 100 UEs και 1200 rho_tot..... | 90 |

Κατάλογος Πινάκων

| | |
|--------------------------------------|----|
| 3.2 Πίνακας συγκρίσεων άρθρων: | 53 |
|--------------------------------------|----|

Κατάλογος Αρκτικόλεξων

| | |
|--------|--|
| 1G | 1st Generation |
| 2D | 2 Dimensions |
| 3D | 3 Dimensions |
| 4G | 4th Generation |
| 5G | 5th Generation |
| 5G-MEC | 5G- Multi access Cloud Computing |
| ADC | Analog to Digital Changer |
| AI | Artificial Intelligence |
| AP | Access Point |
| APU | Antenna Processing Unit |
| APUS | AP selection and user scheduling algorithm |
| AQNM | Additive Quantization Noise Model |
| AR | Augmented Reality |
| BBU | Base Band Unit |
| BS | Base Station |
| CAPEX | Capital Expenditure |
| CB | Coordinated Beamforming |
| CF | Cell free |
| CFE | Compress-Forward-Estimate |
| CIR | Committed Information Rate |
| CPU | Central Processing Unit |
| C-RAN | Cloud radio access network |
| CS | Cloud server |

| | |
|--------|---|
| CSI | Channel State Information |
| CU | control units |
| D2D | Device to Device |
| D4PG | Distributed distributional deterministic policy gradients |
| DAS | Distributed Antenna System |
| db | Decibel |
| DDPG | Deep Deterministic Policy Gradient |
| DE | Deterministic Equivalent |
| DL | Downlink |
| DNN | Deep Neural Network |
| DPS | Dynamic Point Selection |
| DRL | Deep Reinforcement Learning |
| DSA | Directory System Agent |
| DU | Distributed Unit |
| E2E | End-to-End |
| ECF | Estimate-Compress-Forward |
| ECP | Edge Cloud Processor |
| eMBB | High Data Rate |
| EMCF | Estimate-Multiplycompress-Forward |
| FFDNet | Frequency Division Duplex network |
| FL | Federated Learning |
| GD | Gradient Descent |
| GP | Geometric Programme |
| GSM | Global System for Mobile Communications |
| IOT | Internet Of Things |
| ITU | International Telecommunication Union |

| | |
|---------|--|
| IUI | inter-user-interference |
| JP | Joint Processing |
| LP-MMSE | Local P-MMSE |
| LoS | Line of sight |
| LSF | Large Scale Fading |
| MAC | Medium Access Control |
| Mbps | Megabits per second |
| MF | Matched Filtering |
| MIMO | Massive Input Massive Output |
| MMSE | Minimum Mean Squared Error |
| mMTC | Very High Connection Capacity |
| mmWave | Milimeter Wave |
| MR | Maximum Ratio |
| MRC | maximum-ratio combining |
| MRT | maximum ratio transmission |
| ms | Milisecond |
| MS | Mobile Station |
| MU MIMO | Multiple Users MIMO |
| NCB | Normalized Conjugate Beamforming |
| NFV | Network Function Virtualization |
| NLoS | Non Line of Sight |
| NOMA | Non Orthogonal Multiple Access |
| OFDM | orthogonal frequency division multiplexing |
| OPEX | operating expense |
| P-MMSE | Partial MMSE |
| PHY | physical layer |

| | |
|---------|---|
| PLS | Physical Layer Security |
| PM | Pilot Matching |
| POV | Point Of View |
| PPP | Poisson point process |
| QoE | Quality of Experience |
| QoS | Quality of Service |
| RF | Radio Frequency |
| RTU | real time users |
| SC | Small Cell |
| SE | Spectral Efficiency |
| SCA | Successive Convex Approximation |
| SCMP | Successful Communication Probability |
| SCP | Successful Computation Probability |
| SDN | Software Defined Network |
| SECP | Successful Edge Computing Probability |
| SIC | Successive Interference Cancelation |
| SINR | Signal to Interference plus Noise Ratio |
| SLA | Service Level Agreement |
| SLR | Service Level Requirements |
| SOC | Second Order Cone |
| SR | Super Resolution |
| SSF | Small Scale Fading |
| SU MIMO | Single User MIMO |
| TDD | Time Division Duplex |
| THz | Terahertz |
| TP | Transmission Point |

| | |
|---------|--|
| UC | User Centric |
| UE | User Equipment |
| UHD | Ultra High Definition |
| UL | Uplink |
| UM MIMO | Ultra Massive MIMO |
| URLLC | Ultra Reliable Low Latency Communication |
| V2I | Vehicle to Infrastructure |
| V2V | Vehicle to Vehicle |
| VLC | Visible Light Communication |
| VR | Virtual Reality |
| ZF | Zero Forcing |
| EE | Energy Efficiency |

1 Εισαγωγή στα συστήματα κινητών επικοινωνιών 5G.

Στις τηλεπικοινωνίες, το 5G είναι το πρότυπο τεχνολογίας πέμπτης γενιάς για ευρυζωνικά κυψελοειδή δίκτυα, τα οποία οι εταιρείες κινητής τηλεφωνίας άρχισαν να αναπτύσσουν παγκοσμίως το 2019. Τα δίκτυα 5G προβλέπεται να έχουν περισσότερους από 1,7 δισεκατομμύρια συνδρομητές παγκοσμίως μέχρι το 2025, σύμφωνα με την Ένωση GSM. Όπως και οι προκάτοχοί του, τα δίκτυα 5G είναι κυψελοειδή δίκτυα, στα οποία η περιοχή εξυπηρέτησης χωρίζεται σε μικρές γεωγραφικές περιοχές που ονομάζονται κελιά. Όλες οι ασύρματες συσκευές 5G σε ένα κελί, συνδέονται στο διαδίκτυο και το τηλεφωνικό δίκτυο μέσω ραδιοκυμάτων μέσω μιας τοπικής κεραίας στο κελί. Το κύριο πλεονέκτημα των νέων δικτύων είναι ότι θα έχουν μεγαλύτερο εύρος ζώνης, δίνοντας υψηλότερες ταχύτητες λήψης, τελικά έως και 10 gigabits ανά δευτερόλεπτο (Gbit / s). [1]

Η αυξημένη ταχύτητα επιτυγχάνεται εν μέρει με τη χρήση επιπρόσθετων ραδιοκυμάτων υψηλότερης συχνότητας εκτός από τις συχνότητες χαμηλής και μεσαίας ζώνης που χρησιμοποιήθηκαν σε προηγούμενα κυψελοειδή δίκτυα. Ωστόσο, τα ραδιοκύματα υψηλότερης συχνότητας έχουν μικρότερο χρήσιμο φυσικό εύρος, απαιτώντας μικρότερα γεωγραφικά κελιά. Για ευρεία υπηρεσία, τα δίκτυα 5G λειτουργούν σε έως και τρεις ζώνες συχνοτήτων - χαμηλή, μεσαία και υψηλή. Τα κινητά τηλέφωνα και οι ασύρματες συσκευές 5G συνδέονται στο δίκτυο μέσω της κεραίας υψηλότερης ταχύτητας εντός εμβέλειας στην τοποθεσία τους.

Το χαμηλού εύρους (low-band) 5G χρησιμοποιεί ένα εύρος συχνοτήτων παρόμοιο με αυτό του 4G, 600-850 MHz (Megahertz), δίνοντας ταχύτητες λήψης λίγο υψηλότερες από 30-250 megabit ανά δευτερόλεπτο (Mbit / s). Οι σταθμοί βάσης των κυψελών χαμηλής ζώνης έχουν εύρος και περιοχή κάλυψης παρόμοιο με αυτούς των 4G. Η μεσαία ζώνη 5G χρησιμοποιεί μικροκύματα 2,5-3,7 GHz, επιτρέποντας ταχύτητες 100-900 Mbit / s, με κάθε σταθμό βάσης να παρέχει υπηρεσία έως και αρκετά χιλιόμετρα σε ακτίνα. Αυτό το επίπεδο υπηρεσίας είναι το πιο διαδεδομένο και αναπτύχθηκε σε πολλές μητροπολιτικές περιοχές το 2020. Η υψηλή ζώνη 5G χρησιμοποιεί συχνότητες 25-39 GHz (Gigahertz), κοντά στο κάτω μέρος της ζώνης κύματος χιλιοστών, αν και μπορεί να χρησιμοποιηθούν στο μέλλον υψηλότερες συχνότητες. Συχνά επιτυγχάνει ταχύτητες λήψης στο εύρος gigabit ανά δευτερόλεπτο (Gbit / s), συγκρίσιμο με το καλωδιακό internet. Ωστόσο, τα κύματα χιλιοστών (mmWave ή mmW) έχουν πιο περιορισμένο εύρος, απαιτώντας πολλά μικρά κελιά. Μπορούν να εμποδιστούν ή να μπλοκαριστούν από υλικά σε τοίχους ή παράθυρα. Λόγω του υψηλότερου κόστους τους, τα σχέδια είναι να αναπτύξουν αυτά τα κελιά μόνο σε πυκνά αστικά περιβάλλοντα και περιοχές όπου συγκεντρώνεται πλήθος ανθρώπων, όπως αθλητικά στάδια και συνεδριακά κέντρα. Οι παραπάνω ταχύτητες είναι αυτές που επιτεύχθηκαν σε πραγματικές δοκιμές το 2020 και οι ταχύτητες αναμένεται να αυξηθούν κατά τη διάρκεια της διάθεσης. [1]

1.1 Πλεονεκτήματα 5G

Τα αναδυόμενα δίκτυα 5G διαθέτουν χαμηλότερο λανθάνοντα χρόνο, υψηλότερη χωρητικότητα και αυξημένο εύρος ζώνης σε σύγκριση με το 4G. Αυτές οι βελτιώσεις στο δίκτυο θα έχουν εκτεταμένες επιπτώσεις στον τρόπο με τον οποίο οι άνθρωποι ζουν, εργάζονται και διασκεδάζουν σε όλο τον κόσμο. [2]

Αναβαθμίσεις ταχύτητας

Οι προβλεπόμενες ταχύτητες έως και 10 Gbps αντιπροσωπεύουν έως και 100x αύξηση σε σύγκριση με το 4G. Στην πράξη, οι βελτιώσεις ταχύτητας 4G έναντι 5G θα σημαίνουν συναρπαστικές δυνατότητες για τους καταναλωτές. Η μεταφορά μιας ταινίας υψηλής ανάλυσης με μέγιστες ταχύτητες λήψης θα διαρκέσει από επτά λεπτά έως μόλις έξι δευτερόλεπτα. Αφού οι εταιρείες κινητής τηλεφωνίας διαθέτουν πλήρη χαρακτηριστικά 5G, οι καταναλωτές και οι επιχειρήσεις ενδέχεται να αρχίσουν να θεωρούν τα δίκτυα 5G μια ισχυρή εναλλακτική λύση για γρήγορες ευρυζωνικές συνδέσεις.

Χαμηλή καθυστέρηση

Η καθυστέρηση μετρά πόσο καιρό χρειάζεται ένα σήμα για να μεταβεί από την πηγή του στον δέκτη του και μετά να επιστρέψει ξανά. Ένας από τους στόχους για κάθε ασύρματη γενιά ήταν η μείωση του λανθάνοντος χρόνου. Τα νέα δίκτυα 5G θα έχουν ακόμη μικρότερο λανθάνοντα χρόνο από το 4G, με τη μετάδοση δεδομένων με 'επιστροφή' να διαρκεί λιγότερο από πέντε χιλιοστά του δευτερολέπτου. Ο λανθάνων χρόνος 5G θα είναι ταχύτερος από την ανθρώπινη οπτική επεξεργασία, επιτρέποντας τον έλεγχο των συσκευών από απόσταση σε σχεδόν πραγματικό χρόνο. Η ταχύτητα της ανθρώπινης αντίδρασης θα γίνει ο περιοριστικός παράγοντας για απομακρυσμένες εφαρμογές που χρησιμοποιούν 5G και διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT-Internet Of Things) - και πολλές νέες εφαρμογές θα περιλαμβάνουν επικοινωνία από μηχανή σε μηχανή που δεν περιορίζεται από το πόσο γρήγορα μπορούν να ανταποκριθούν οι άνθρωποι. Ενώ η γεωργία, η κατασκευή και η εφοδιαστική θα επωφεληθούν από τη χαμηλότερη καθυστέρηση, οι παίκτες προβλέπουν επίσης με ανυπομονησία την ανάπτυξη 5G. Ο συνδυασμός υψηλής ταχύτητας και ελάχιστης καθυστέρησης είναι ιδανικός για εφαρμογές εικονικής πραγματικότητας (VR- Virtual Reality) και επαυξημένης πραγματικότητας (AR- Augmented Reality), οι οποίες είναι πιθανό να εκραγούν σε δημοτικότητα καθώς οι βελτιώσεις συνδεσιμότητας δημιουργούν μια πιο απρόσκοπτη, καθηλωτική εμπειρία. Περισσότερα όσον αφορά τις υπηρεσίες και εφαρμογές του 5G θα αναλυθούν στην επόμενη ενότητα.

Βελτιωμένη χωρητικότητα

Η ταχύτητα είναι συναρπαστική, αλλά ένα από τα ερωτήματα που σκέφτονται οι αναλυτές και οι ηγέτες της βιομηχανίας είναι το εξής: Πώς θα βοηθήσει το 5G τις επιχειρήσεις να κλιμακώσουν τις τεχνολογικές τους πρωτοβουλίες?

Το 5G θα προσφέρει έως και 1.000 φορές μεγαλύτερη χωρητικότητα από το 4G, δημιουργώντας γόνιμο έδαφος για ανάπτυξη IoT. Το 5G και το IoT είναι ένας τέλειος

συνδυασμός, ο οποίος θα επαναπροσδιορίσει τον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιούνται τα ασύρματα δίκτυα - και το Διαδίκτυο ως σύνολο -. Με χωρητικότητα εκατοντάδων ή χιλιάδων συσκευών που επικοινωνούν απρόσκοπτα, θα αναπτυχθούν νέες εφαρμογές και θήκες χρήσης για πόλεις, εργοστάσια, αγροκτήματα, σχολεία και σπίτια.

Φανταστείτε περιπτώσεις χρήσης 5G που περιλαμβάνουν χιλιάδες αισθητήρες σε εκατοντάδες διαφορετικά μηχανήματα που αυτοματοποιούν τις διαδικασίες διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας, διασφαλίζοντας την έγκαιρη παράδοση υλικών, ενώ χρησιμοποιείτε προγνωστική συντήρηση για την ελαχιστοποίηση των διακοπών εργασίας. Τα έξυπνα σπίτια και οι πόλεις θα κάνουν επίσης ένα τεράστιο άλμα στο μέλλον του 5G. Χρησιμοποιώντας περισσότερες συνδεδεμένες συσκευές από ποτέ, η τεχνητή νοημοσύνη (Artificial Intelligence-AI) θα μεταφερθεί σε μέρη που δεν ήταν ποτέ προηγουμένως με υπολογιστές αιχμής. Από τα σπίτια που παρέχουν εξατομικευμένες προτάσεις εξοικονόμησης ενέργειας που μεγιστοποιούν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε φανάρια που αλλάζουν τα μοτίβα τους με βάση τη ροή της κυκλοφορίας, οι εφαρμογές 5G που βασίζονται στην προστιθέμενη χωρητικότητα δικτύου θα επηρεάσουν σχεδόν όλους.

Αυξημένο εύρος ζώνης

Ο συνδυασμός αυξημένης ταχύτητας και χωρητικότητας δικτύου σε δίκτυα 5G θα δημιουργήσει τη δυνατότητα μετάδοσης μεγαλύτερων ποσοτήτων δεδομένων από ό, τι ήταν δυνατό με δίκτυα 4G. Τα δίκτυα 5G διαρθρώνονται διαφορετικά από τα παραδοσιακά δίκτυα 4G, επιτρέποντας μεγαλύτερη βελτιστοποίηση της κίνησης του δικτύου και ομαλό χειρισμό των αιχμών χρήσης. Τα γεμάτα γήπεδα και άλλοι χώροι αγωνίστηκαν για να παρέχουν απρόσκοπτη συνδεσιμότητα σε μεγάλο κοινό, αλλά το 5G θα μπορούσε να επιτρέψει στους αθλητικούς οπαδούς να μεταδώσουν ζωντανή την εμπειρία τους από οποιαδήποτε θέση στην αρένα. Για τις επιχειρήσεις, ο αντίκτυπος του αυξημένου εύρους ζώνης θα επαναληφθεί σε πολλά τμήματα και τμήματα με τη μορφή μεγάλων δεδομένων. Σήμερα, οι εταιρείες λαμβάνουν πολύ περισσότερες πληροφορίες από πελάτες, προμηθευτές και ομάδες από ό, τι μπορούν να επεξεργαστούν και να αναλύσουν πληροφορίες. Με συνδεσιμότητα 5G και μεγάλη ανάλυση δεδομένων, αυτές οι επιχειρήσεις μπορούν να μετατρέψουν μεγάλο όγκο δεδομένων σε ενεργή γνώση.

Διαθεσιμότητα και κάλυψη

Ενώ οι καταναλωτές και οι επιχειρήσεις είναι πρόθυμοι να βιώσουν τα οφέλη του 5G για τον εαυτό τους, η διαθεσιμότητα κάλυψης 5G εξακολουθεί να είναι περιορισμένη. Ωστόσο, όλοι οι μεγάλοι πάροχοι κινητής τηλεφωνίας όπως βλέπουμε και στην Ελλάδα, αναπτύσσουν δίκτυα 5G σε μεγάλες πόλεις καθώς προετοιμάζονται για ευρύτερες εκδόσεις.

1.2 Υπηρεσίες και εφαρμογές



Εικόνα 1.1 : υπηρεσίες και εφαρμογές 5G [3].

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, εδώ θα αναλυθούν οι υπηρεσίες και οι εφαρμογές των δικτύων 5G, χαρακτηριστικά τα οποία θα αλλάξουν άρδην την καθημερινότητα των ανθρώπων κατά μήκος όλου του πλανήτη.

1.2.1 Υπηρεσίες

Βίντεο εξαιρετικά υψηλής ευκρίνειας (ultra high definition video streaming): Οι δυνατότητες βίντεο ultra high definition (UHD) στο 5G θα αλλάξουν εντελώς τον τρόπο με τον οποίο οι άνθρωποι απολαμβάνουν ζωντανές μεταδόσεις αθλημάτων, παραστάσεων και μεγάλων εκδηλώσεων. Αυτές οι νέες δυνατότητες θα οδηγήσουν σε μια ανθιση της ανάπτυξης υπηρεσιών και θα δείξουν τις τεράστιες βελτιώσεις στην εμπειρία που καθιστά δυνατή το 5G. Η χρήση του 5G για βίντεο UHD μειώνει το χρόνο ανάπτυξης κατά 80 τοις εκατό σε σύγκριση με τις οπτικές ίνες και το φάσμα μικροκυμάτων. Επιτρέπει επίσης την ελευθερία λήψης βίντεο POV. Με ταχύτητες υπερ-ζεύξης έως 300+ Mbps, το βίντεο 5G UHD καταργεί επίσης την ανάγκη για οχήματα ζωντανής μετάδοσης. Η νέα αρχιτεκτονική 5G, όπως η υπολογιστική αιχμής και η τεχνολογία του **slicing**, αναμένεται να μειώσει τον λανθάνοντα χρόνο που απαιτείται για την επεξεργασία, την απόδοση και την παραγωγή επεξεργασίας βίντεο UHD σε λιγότερο από 10 ms. Η χρήση του slicing επίσης πληρεί τις απαιτήσεις ασφαλείας των επαγγελματικών μέσων για μετάδοση βίντεο UHD. Το 5G σε συνδυασμό με το cloud computing θα παρέχει νέες υπηρεσίες όπως η κατεύθυνση του

cloud (cloud direction), η μη γραμμική επεξεργασία cloud, η απεικόνιση υψηλής ανάλυσης cloud (super resolution-SR) και η μετατροπή 2D σε 3D. Αυτές οι υπηρεσίες θα μειώσουν δραματικά το κατώφλι για την παραγωγή βίντεο UHD, καθιστώντας πολύ πιο εύκολο να δημιουργηθούν διαφορετικές υπηρεσίες UHD. [4]

Slicing είναι μια αρχιτεκτονική δικτύου που επιτρέπει την πολυπλεξία εικονικών και ανεξάρτητων λογικών δικτύων στην ίδια υποδομή φυσικού δικτύου. Κάθε τμήμα δικτύου είναι ένα απομονωμένο δίκτυο από άκρο σε άκρο προσαρμοσμένο να πληρεί διαφορετικές απαιτήσεις που ζητούνται από μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Για το λόγο αυτό, αυτή η τεχνολογία αναλαμβάνει κεντρικό ρόλο για την υποστήριξη δικτύων κινητής τηλεφωνίας 5G που έχουν σχεδιαστεί για να συμπεριλαμβάνουν αποτελεσματικά μια πληθώρα υπηρεσιών με πολύ διαφορετικές απαιτήσεις επιπέδου υπηρεσίας (service level requirements-SLR). Η πραγματοποίηση αυτής της προσανατολισμένης προς την υπηρεσία προβολής του δικτύου αξιοποιεί τις έννοιες του δικτύου που καθορίζεται από λογισμικό (service defined networking-SDN) και της εικονικοποίησης λειτουργίας δικτύου (network function virtualization-NFV) που επιτρέπουν την εφαρμογή ευέλικτων και επεκτάσιμων τμημάτων δικτύου πάνω από μια κοινή υποδομή δικτύου.

Cloud computing: Τα τελευταία δέκα χρόνια, το cloud computing αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της διατήρησης υγιών υποδομών πληροφορικής καθώς οι επιχειρήσεις απαιτούν καλύτερη, ταχύτερη συνεργασία και παραγωγικότητα από το κατανεμημένο εργατικό δυναμικό τους. Όλο και πιο ασφαλές και επεκτάσιμο, το cloud αποτελεί μια αξιοσημείωτη λύση για καθολικά χαμηλές ταχύτητες δικτύου - επιτρέποντας την εύκολη μεταφορά και κοινή χρήση μεγάλων αρχείων μεταξύ συσκευών, ενώ παράλληλα παρέχει υπηρεσίες δημιουργίας αντιγράφων ασφαλείας και ανάκτησης για τη διασφάλιση αυτών των δεδομένων σε περίπτωση επίθεσης κυβερνοασφάλειας ή φυσικής καταστροφής. Πολλοί γίγαντες τεχνολογίας, συμπεριλαμβανομένης της Intel και της IBM, επενδύουν στο cloudification network, το οποίο είναι η διαδικασία επέκτασης των πλατφορμών cloud, των τεχνολογιών και των δυνατοτήτων εικονικοποίησης σε ένα δίκτυο για να το καταστήσει πιο ευέλικτο, ευέλικτο και επεκτάσιμο. Καθώς οι ανάγκες καταναλωτή και εύρους ζώνης αυξάνονται, τα δίκτυα αξιοποιούν το 5G για να προχωρήσουν γρήγορα προς αυτήν την αρχιτεκτονική που καθορίζεται από λογισμικό για να καλύψουν τις λειτουργικές απαιτήσεις και τις απαιτήσεις εφαρμογών. [5]

Το cloudification network επιτρέπει στους παρόχους δικτύου να βελτιστοποιήσουν και να αυτοματοποιήσουν το δίκτυο για μεγαλύτερη λειτουργικότητα εφαρμογών που λειτουργούν στα άκρα του δικτύου. Για να επιτευχθεί αυτό απαιτείται η απομάκρυνση από μια υποδομή που βασίζεται σε υλικό σε μια αρχιτεκτονική που βασίζεται σε λογισμικό χρησιμοποιώντας καθορισμένο λογισμικό (SDN), εικονικοποίηση

λειτουργίας δικτύου, μικροαπόκριση και 5G-MEC (υπολογιστής αιχμής πολλαπλών προσβάσεων)

Εικονική πραγματικότητα (virtual reality-VR) και επαυξημένη πραγματικότητα (augmented reality-AR): Το 5G θα βελτιώσει δραματικά την ποιότητα των εφαρμογών VR και AR, φέρνοντας καινοτομίες σε βιομηχανίες όπως τα ταξίδια, η υγειονομική περίθαλψη κ.λπ. Καθώς το 5G και οι εφαρμογές του εξελίσσονται, θα υπάρξει σημαντική υιοθέτηση τεχνολογίας στους παραπάνω τομείς. Αυτές οι περιοχές περιλαμβάνουν τεράστιο και περίπλοκο φόρτο εργασίας, καθιστώντας το cloud computing βασικό συστατικό. [6]

Απομακρυσμένη υγειονομική περίθαλψη (remote healthcare): [7]

Γρήγορη μετάδοση μεγάλων αρχείων απεικόνισης

Οι μαγνητικές τομογραφίες και άλλες μηχανές εικόνων είναι συνήθως πολύ μεγάλα αρχεία και συχνά πρέπει να αποστέλλονται σε ειδικό για έλεγχο. Όταν το δίκτυο έχει χαμηλό εύρος ζώνης, η μετάδοση μπορεί να διαρκέσει πολύ και να μην αποσταλεί επιτυχώς. Αυτό σημαίνει ότι ο ασθενής περιμένει ακόμη περισσότερο για θεραπεία και οι πάροχοι μπορούν να δουν λιγότερους ασθενείς στο ίδιο χρονικό διάστημα. Η προσθήκη ενός δικτύου υψηλής ταχύτητας 5G σε υπάρχουσες αρχιτεκτονικές μπορεί να βοηθήσει γρήγορα και αξιόπιστα τη μεταφορά τεράστιων αρχείων δεδομένων ιατρικών εικόνων, τα οποία μπορούν να βελτιώσουν τόσο την πρόσβαση στη φροντίδα όσο και την ποιότητα της περίθαλψης. Στο Austin Cancer Center, ο σαρωτής PET δημιουργεί εξαιρετικά μεγάλα αρχεία - έως 1 gigabyte πληροφοριών ανά ασθενή ανά μελέτη.

Επέκταση της τηλεϊατρικής

Η αγορά τηλεϊατρικής αναμένεται να αναπτυχθεί με σύνθετο ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης 16,5% από το 2017 έως το 2023. Η μελέτη διαπίστωσε ότι ο λόγος για την προβλεπόμενη αύξηση είναι η ζήτηση και στις αγροτικές περιοχές για υγειονομική περίθαλψη, ως αύξηση των κυβερνητικών πρωτοβουλιών. Η τηλεϊατρική απαιτεί ένα δίκτυο που μπορεί να υποστηρίξει βίντεο υψηλής ποιότητας σε πραγματικό χρόνο, που συχνά σημαίνει ενσύρματα δίκτυα. Με το 5G, τα συστήματα υγειονομικής περίθαλψης μπορούν να επιτρέψουν στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας να χειρίζονται ραντεβού τηλεϊατρικής, τα οποία μπορούν να αυξήσουν σημαντικά την εμπέλεια του προγράμματος. Όταν τα συστήματα υγειονομικής περίθαλψης χρησιμοποιούν αυτήν την τεχνολογία, οι ασθενείς μπορούν συχνά να υποβληθούν σε θεραπεία νωρίτερα και να έχουν πρόσβαση σε ειδικούς, διαφορετικά δεν είναι διαθέσιμοι. Μπορεί επίσης να επιτρέψει σε γιατρούς και άλλα μέλη του προσωπικού να συνεργαστούν πιο αποτελεσματικά.

Βελτίωση AR, VR και χωρικών υπολογιστών

Ενώ η επαυξημένη πραγματικότητα (AR), η εικονική πραγματικότητα (VR) και ο χωρικός υπολογιστής χρησιμοποιούνται ήδη σε υγειονομική περίθαλψη σε περιορισμένη βάση, το 5G μπορεί τελικά να ενισχύσει περαιτέρω την ικανότητα ενός γιατρού να προσφέρει καινοτόμες, λιγότερο επεμβατικές θεραπείες. Μεταξύ των πολλών απόλυτων δυναμικών εφαρμογών της 5G, μερικές από τις πιο συναρπαστικές περιλαμβάνουν τον ρόλο της στην προσομοίωση σύνθετων ιατρικών σεναρίων και στην παροχή εναλλακτικών θεραπειών για τους ασθενείς. Η AT&T εργάζεται στην πρώτη γραμμή αυτού του συναρπαστικού πεδίου, διερευνώντας ευκαιρίες για εφαρμογή 5G σε ιατρικές προκλήσεις. Η AT&T συνεργάζεται με το VITAS® Healthcare για να μελετήσει τις επιπτώσεις των ενδεχόμενων AR και VR με δυνατότητα 5G στην εμπλοκή των ασθενών. Ο στόχος είναι να μειωθεί ο πόνος και το άγχος για ασθενείς με τελική ασθένεια στο νοσοκομείο, παρέχοντας ηρεμιστικό και αποσπασμένο περιεχόμενο μέσω AR και VR με δυνατότητα 5G.

Αξιόπιστη, απομακρυσμένη παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο

Χρησιμοποιώντας συσκευές IoT, οι πάροχοι υγειονομικής περίθαλψης μπορούν να παρακολουθούν τους ασθενείς και να συλλέγουν δεδομένα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση της εξατομικευμένης και προληπτικής φροντίδας. Το 86% των γιατρών λένε ότι τα φορητά, τα οποία είναι ένας κοινός τύπος τηλεχειρισμού, αυξάνουν την εμπλοκή των ασθενών με τη δική τους υγεία. Επιπλέον, τα είδη ένδυσης προβλέπεται να μειώσουν το κόστος του νοσοκομείου κατά 16% τα επόμενα πέντε χρόνια. Παρά τα οφέλη, η χρήση της τεχνολογίας απομακρυσμένης παρακολούθησης περιορίζεται από την ικανότητα του δικτύου να χειρίζεται τα δεδομένα. Οι χαμηλές ταχύτητες δικτύου και οι αναξιόπιστες συνδέσεις θα μπορούσαν να σημαίνει ότι οι γιατροί δεν μπορούν να λάβουν τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο που χρειάζονται για να λάβουν γρήγορες αποφάσεις περί υγειονομικής περίθαλψης. Με την τεχνολογία 5G, η οποία έχει χαμηλότερη καθυστέρηση και υψηλότερη χωρητικότητα, τα συστήματα υγειονομικής περίθαλψης μπορούν να προσφέρουν απομακρυσμένη παρακολούθηση για περισσότερους ασθενείς. Οι πάροχοι μπορούν στη συνέχεια να είναι σίγουροι ότι θα λάβουν τα δεδομένα που χρειάζονται σε πραγματικό χρόνο και μπορούν να παρέχουν τη φροντίδα που χρειάζονται και περιμένουν οι ασθενείς τους.

Τεχνητή νοημοσύνη

Πολλές βασικές λειτουργίες υγειονομικής περίθαλψης αρχίζουν να χρησιμοποιούν τεχνητή νοημοσύνη (AI) για να προσδιορίσουν πιθανές διαγνώσεις και να αποφασίσουν για το καλύτερο σχέδιο θεραπείας για έναν συγκεκριμένο ασθενή. Επιπλέον, το AI μπορεί να βοηθήσει στην πρόβλεψη των ασθενών που είναι πιο πιθανό να έχουν μετεγχειρητικές επιπλοκές, επιτρέποντας στα συστήματα υγειονομικής περίθαλψης να παρέχουν έγκαιρες επεμβάσεις όταν είναι απαραίτητο. Οι μεγάλες

ποσότητες δεδομένων που απαιτούνται για ταχεία μάθηση σε πραγματικό χρόνο απαιτούν εξαιρετικά αξιόπιστα και δίκτυα υψηλού εύρους ζώνης. Επιπλέον, οι πάροχοι συχνά πρέπει να έχουν πρόσβαση σε δεδομένα από τις κινητές τους συσκευές. Με τη μετάβαση σε δίκτυα 5G, οι οργανισμοί υγειονομικής περίθαλψης μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα εργαλεία AI που χρειάζονται για να παρέχουν την καλύτερη δυνατή φροντίδα - από όπου κι αν βρίσκονται στο νοσοκομείο ή την κλινική.

5G και εκπαίδευση: [8]

Εξυπνες τάξεις: Περισσότερη αλληλεπίδραση με υψηλή τεχνολογία

Έχει αποδειχθεί πώς οι δάσκαλοι και οι μαθητές προσπαθούν να προσαρμοστούν σε μια εξ αποστάσεως εκπαίδευση που είναι εδώ για να μείνει. Ωστόσο, αυτή είναι η αρχή μιας νέας εποχής στην εκπαίδευση, επειδή το 5G πρόκειται να προχωρήσει ακόμη περισσότερο, παρέχοντας την απαραίτητη ικανότητα εύρους ζώνης για την ανάπτυξη περιεχομένου υψηλής τεχνολογίας από οπουδήποτε, οποτεδήποτε. Αυτό το διαδραστικό και εικονικό σενάριο θα αλλάξει για πάντα τον τρόπο μάθησης που είναι γνωστός μέχρι τώρα. Υπό αυτήν την έννοια, το 5G θα ανοίξει το δρόμο για εξυπνότερες (και απομακρυσμένες) αίθουσες διδασκαλίας με βάση πλατφόρμες μάθησης μικτής πραγματικότητας.

Ενσωμάτωση του Διαδικτύου των πραγμάτων και της ρομποτικής

Επίσης, η πέμπτη γενιά ασύρματης τεχνολογίας θα προωθήσει τη μεγαλύτερη χρήση της τεχνολογίας IoT, η οποία θα μπορούσε να δημιουργήσει, στο μέλλον, μια σταδιακή ένταξη της ρομποτικής στην τάξη ως διδακτικό υλικό. Η Φινλανδία, για παράδειγμα, πειραματίζεται με αυτήν την ιδέα μέσω του eLias, ενός ρομπότ που παρέχει υποστήριξη σε μαθήματα μαθηματικών και εκμάθηση γλωσσών. Ο eLias επιτρέπει στους νέους μαθητές να συμμετέχουν σε φυσικές συνομιλίες, προσθέτοντας παράλληλα μια διάσταση διασκέδασης μέσα από χορό και παιχνίδια.

Με αυτόν τον τρόπο, το 5G θα μπορούσε να χρησιμεύσει ως γέφυρα μεταξύ της επαυξημένης πραγματικότητας και των πραγματικών τάξεων για όλες τις ηλικίες. Η δια βίου μάθηση θα μπορούσε να φθάσει σε νέα επίπεδα παραγωγικότητας με ολογραφικούς εκπαιδευτές και έννοιες που προκύπτουν από βιβλία και βίντεο και γίνονται άμεση πραγματικότητα. Οι δυνατότητες είναι ατελείωτες σε αυτήν την τεχνολογική επανάσταση που μεταμορφώνει τον τρόπο διδασκαλίας και μάθησης.

Μαθαίνοντας εν κινήσει

Σε μια ολοένα και πιο κινητή κοινωνία, οι συσκευές στις τσέπες των ανθρώπων, στα αυτιά τους και στους καρπούς τους απαντούν σε ερωτήσεις και τους βοηθούν να μάθουν. Καθώς το 5G φτάνει σε περισσότερες γωνίες της καθημερινής ζωής, έχει την

ικανότητα να διευκολύνει και την εν κινήσει εκπαίδευση. Ένα επιτόπιο ταξίδι στο μουσείο μπορεί να επιτευχθεί μέσω εικονικής πραγματικότητας, που να έχει σαν αποτέλεσμα την διαδραστική εκμάθηση των μαθητών αντί για τον κλασικό (βαρετό κατά τα παιδιά) τρόπο.

Διαδίκτυο αφής (tactile internet): [9]

Με το URLLC του 5G (Ultra Reliable Low Latency Communication), θα είναι σύντομα δυνατό να υπάρχει καθυστέρηση μετ'επιστροφής στο χιλιοστό του δευτερολέπτου. Αυτό θα επιτρέψει τη δημιουργία διαδραστικών συστημάτων σε πραγματικό χρόνο - ικανά να προσφέρουν απομακρυσμένες φυσικές εμπειρίες. Η καθυστέρηση δευτερολέπτου μετ'επιστροφής, μαζί με την αξιοπιστία και τη διαθεσιμότητα της κατηγορίας φορέα 5G, θα ανοίξει ένα νέο κύμα απτών διαδικτυακών εφαρμογών 5G. Τέτοιες εφαρμογές θα επιτρέπουν όλο και περισσότερο την αλληλεπίδραση ανθρώπου-μηχανής, με βάση απτική ή απτική επικοινωνία. Με άλλα λόγια, μια αίσθηση αφής μπορεί να μεταφερθεί στην άλλη πλευρά του κόσμου σε πραγματικό χρόνο.

Υγειονομική περίθαλψη:

Η απομακρυσμένη διάγνωση, η θεραπεία, η χειρουργική επέμβαση δεν είναι μόνο οι όροι μάρκετινγκ που χρησιμοποιούνται για προωθήσεις 5G, αλλά μπορούν πραγματικά να γίνουν πραγματικότητα μέσα σε λίγα χρόνια. Οι χειρουργικές επεμβάσεις υψηλής ακρίβειας που πραγματοποιούνται από έμπειρους χειρουργούς με ρομποτική βοήθεια θα μειώσουν την ανάγκη ταξιδιού σε απομακρυσμένες ιατρικές εγκαταστάσεις σε διάφορες πόλεις / χώρες. Συσκευές γνωστές ως εξωσκελετές αναπτύσσονται από εταιρείες σε όλο τον κόσμο που έχουν απτική καθυστέρηση για να υποστηρίξουν άτομα με αναπηρίες και ηλικιωμένους να περπατούν.

Επιχειρηματική επικοινωνία:

Ο άμεσος αντίκτυπος του απλού διαδικτύου 5G θα είναι στον τρόπο που επικοινωνούμε στα επιχειρηματικά μας περιβάλλοντα. Προς το παρόν, γεωγραφικά ξεχωριστές ομάδες εργάζονται μέσω τηλεδιάσκεψης ήχου / βίντεο. Η τηλεμεταφορά σε οποιαδήποτε τοποθεσία της επιχείρησης μαζί με απτικές αλληλεπιδράσεις θα είναι ο κανόνας για επαγγελματικές συναντήσεις την επόμενη δεκαετία

Ηλεκτρονικό εμπόριο 4.0:

Οι διαδικτυακές αγορές είναι μια από τις βιομηχανίες που μπορούν να επωφεληθούν σε μεγάλο βαθμό από το διαδίκτυο αφής 5G. Ο δοκιμασμός ρούχων και η αίσθηση υφασμάτων και άλλων προϊόντων θα είναι επιτεύξιμη πριν από κάθε παραγγελία του καταναλωτή.

Βιομηχανία, ρομποτική και κατασκευή:

Τα έξυπνα εργοστάσια, οι γραμμές συναρμολόγησης, ο αυτοματισμός της βιομηχανίας και η απομακρυσμένη βιομηχανική λειτουργία είναι μερικές από τις περιπτώσεις χρήσης που θα επιτρέψει το διαδίκτυο αφής για βιομηχανικές δραστηριότητες. Η συντήρηση και επισκευή σε απομακρυσμένες περιοχές, η εξόρυξη υψηλού κινδύνου και ακρίβειας είναι μερικές από τις κρίσιμες εφαρμογές που θα επηρεαστούν προς το καλύτερο.

1.2.2 Εφαρμογές

Έξυπνα δίκτυα (smart grids) [10]

Το 5G slicing είναι μια ιδανική επιλογή για την ενεργοποίηση υπηρεσιών έξυπνου δικτύου. Χωρίζει το δίκτυο 5G σε λογικά απομονωμένα δίκτυα, όπου το καθένα μπορεί να θεωρηθεί ως ένα κομμάτι. Επίσης επιτρέπει στο δίκτυο τροφοδοσίας να προσαρμόζει με ευελιξία συγκεκριμένες φέτες (slices) με διαφορετικές λειτουργίες δικτύου και διαφορετικές εγγυήσεις συμφωνίας σε επίπεδο υπηρεσιών (Service Level Agreement -SLA) σύμφωνα με τις ανάγκες, για την κάλυψη διαφορετικών απαιτήσεων δικτύου. Με βάση τα σενάρια εφαρμογών των έξυπνων δικτύων και την αρχιτεκτονική του 5G slicing, η συνολική αρχιτεκτονική του σχεδιασμού και της διαχείρισης έξυπνων δικτύων 5G έχει ως εξής. Τα τμήματα της απόκτησης πληροφοριών συστημάτων διανομής χαμηλής τάσης, του έξυπνου αυτοματισμού καταναμημένου τροφοδότη και του ακριβούς ελέγχου φορτίου χιλιοστών του δευτερολέπτου χρησιμοποιούνται για την κάλυψη των απαιτήσεων τεχνικών προδιαγραφών διαφορετικών σεναρίων υπηρεσίας. Η διαχείριση slice για συγκεκριμένους τομείς και η ολοκληρωμένη διαχείριση slice end-to-end (E2E) χρησιμοποιούνται για την κάλυψη των απαιτήσεων υπηρεσίας σε αυτά τα σενάρια.

Έξυπνα σπίτια (smart homes) [11]

Σε αντίθεση με το 4G, το 5G θα λειτουργεί με συσκευές χαμηλής ισχύος, καθιστώντας το χρήσιμο για μια ευρύτερη γκάμα συνδεδεμένων προϊόντων. Το νέο δίκτυο ευρείας περιοχής θα επιτρέψει σε οποιαδήποτε συνδεδεμένη συσκευή να συνδεθεί απευθείας στο 5G, παρακάμπτοντας το Wi-Fi για πιο αξιόπιστη απόδοση. Αυτό σημαίνει επίσης ότι όλες οι συσκευές θα μπορούν να συνδεθούν χρησιμοποιώντας το ίδιο πρωτόκολλο για να αρχίσουν να αλληλεπιδρούν πιο αποτελεσματικά.

Είναι γνωστό ότι τα έξυπνα σπίτια εξοικονομούν κόστος ενέργειας. Ωστόσο, η τεχνολογία 5G θα κάνει τη διαδικασία ακόμα καλύτερη. Υποστηρίζοντας περισσότερες συσκευές σε ένα δίκτυο, η τεχνολογία θα επιτρέψει στους χρήστες να προσθέσουν έξυπνες οικιακές συσκευές που λειτουργούν αυτόματα για τη διαχείριση της χρήσης ενέργειας χωρίς χειροκίνητο προγραμματισμό. Για παράδειγμα, η σύνδεση μετρητών σε ένα κεντρικό δίκτυο σημαίνει ότι οι προμηθευτές ενέργειας μπορούν να ανιχνεύσουν

και να ανταποκριθούν σε διακυμάνσεις στη χρήση ενέργειας. Αυτό το νέο δίκτυο θα μπορεί επίσης να κάνει πράγματα όπως να εντοπίσει γρήγορα μια διαρροή αερίου και να στείλει μια κλήση έκτακτης ανάγκης.

Η χαμηλότερη καθυστέρηση και οι πιο αξιόπιστες συνδέσεις θα κάνουν τις έξυπνες οικιακές συσκευές όπως κουδούνια και κάμερες πολύ πιο χρήσιμες, καθώς και να διατηρούν τα πάντα στο σπίτι συνδεδεμένα, ανεξάρτητα από το πόσα άτομα χρησιμοποιούν το διαδίκτυο ταυτόχρονα. Οι ταχύτερες ταχύτητες σημαίνουν ότι οι χρήστες μπορούν να επωφεληθούν γρήγορα από τα δεδομένα που παρέχουν οι έξυπνες συσκευές τους, όπως οι αισθητήρες χρήσης νερού, για την προσαρμογή της συμπεριφοράς.

Έξυπνες πόλεις (smart cities) [12]

Το 5G, το οποίο προσφέρει ταχύτερες συνδέσεις, περισσότερη αξιοπιστία και μεγαλύτερη χωρητικότητα με χαμηλότερο κόστος, θα επιτρέψει στις πόλεις να συνδέσουν καλύτερα την υποδομή, τις συσκευές και τους ανθρώπους τους. Επιπλέον, σε σύγκριση με το τρέχον πρότυπο 4G, το 5G προσφέρει τη δυνατότητα ενεργοποίησης πρόσθετων δυνατοτήτων έξυπνης πόλης και θα είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την ενεργοποίηση διαφόρων εφαρμογών έξυπνης πόλης υψηλού εύρους ζώνης και χαμηλού λανθάνοντος χρόνου. Για παράδειγμα, το 5G θα υποστηρίξει την ευρεία ανάπτυξη συνδεδεμένων οχημάτων που επικοινωνούν με σήματα κυκλοφορίας για τη μείωση της κυκλοφορίας, καθώς και την ανάπτυξη μεγάλου αριθμού αισθητήρων για τη μέτρηση σε πραγματικό χρόνο της ασφάλειας των υποδομών όπως σωλήνες νερού, αυτοκινητόδρομοι και κτίρια.

Για τις πόλεις να αξιοποιήσουν αυτό το δυναμικό νωρίτερα και όχι αργότερα, ωστόσο, θα πρέπει να επιταχύνουν την ανάπτυξη και την υιοθέτηση του 5G. Ένας τρόπος είναι οι πόλεις να βελτιώσουν τις διαδικασίες αδειοδότησης. Το 5G χρησιμοποιεί μικρά κελιά που μπορούν να μεταδίδουν δεδομένα γρηγορότερα, αλλά όχι μέχρι τους πύργους των προηγούμενων ασύρματων δικτύων. Ως αποτέλεσμα, ο αριθμός των μικρών εγκαταστάσεων κυψέλης που απαιτούνται για την πλήρη εφαρμογή του 5G αναμένεται να είναι 10 έως 100 φορές ο αριθμός των υπαρχόντων πύργων κυψελών. Αυτό σημαίνει ότι οι καθυστερήσεις, οι ανεπάρκειες και το υψηλό κόστος στη διαδικασία αδειοδότησης επιβαρύνουν σημαντικά την ανάπτυξη 5G.

Γεωργία & κτηνοτροφία [13]

Το τεράστιο άλμα προς τα εμπρός στη συνδεσιμότητα που θα φέρει το 5G έχει ως στόχο να αυξήσει την κερδοφορία, την αποδοτικότητα και την ασφάλεια σε πολλές αγορές παγκοσμίως καθώς και τη γεωργία και τη κτηνοτροφία. Το 5G θα παρέχει δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και όταν χρησιμοποιείται παράλληλα με τις γεωργικές πρακτικές, αυτές οι νέες δυνατότητες παρακολούθησης και αυτοματοποίησης συστημάτων θα οδηγήσουν στην έξυπνη καλλιέργεια.

Οι συσκευές γεωργικού IoT (internet of things) θα επιτρέψουν στους αγρότες να μετρήσουν καλύτερα τα πράγματα σε καθημερινή βάση. Πράγματα όπως η επικοινωνία των καλλιεργειών; Επιτρέποντας στους αισθητήρες να επικοινωνούν επίπεδα υγρασίας, γονιμοποίησης και διατροφής, καθώς και αναφορά σχετικά με τα τρέχοντα και προβλεπόμενα καιρικά φαινόμενα, ώστε να επιτρέπεται η βελτιωμένη διαχείριση των καλλιεργειών και η ανάλυση των ζώων. Παρακολούθηση της ωριμότητας και της διατροφής των ζώων, χρησιμοποιώντας ξανά αισθητήρες για τη σύνδεση και τη μετάδοση δεδομένων σε έναν κεντρικό κόμβο και επιτρέποντας στους αγρότες να γνωρίζουν ακριβώς πότε τα ζώα είναι έτοιμα για επεξεργασία. Με το 5G, αυτές οι μετρήσεις μπορούν να είναι εξαιρετικά ακριβείς και επιτρέπουν στον αγρότη να παρακολουθεί μεγάλο αριθμό περιβαλλοντικών παραγόντων έως και σε ίντσες.

Οχήματα και μεταφορές [14]

Η σύνδεση ιδιωτικών οχημάτων και μέσω μαζικής μεταφοράς με 5G θα φέρει επανάσταση στον τρόπο με τον οποίο θα ταξιδεύουμε στην καθημερινή μας ζωή. Υπάρχουν δύο τύποι επικοινωνίας που θα προσφέρουν βελτιωμένη συνδεσιμότητα: επικοινωνία οχήματος προς όχημα (vehicle to vehicle-V2V) και οχήματος προς υποδομή (vehicle to infrastructure-V2I). Όχι μόνο θα κάνουν τους δρόμους πολύ πιο ασφαλείς, αλλά θα κάνουν τεράστιες βελτιώσεις που θα επηρεάσουν πράγματα όπως η ρύπανση, η παραγωγικότητα και ο συνολικός χρόνος ταξιδιού.

Επικοινωνία οχήματος προς όχημα (V2V)

Με την εμφάνιση αυτοματοποιημένων οχημάτων χωρίς οδηγό, η επικοινωνία μεταξύ οχημάτων και οχημάτων έχει γίνει μια από τις πιο αναμενόμενες εξελίξεις για το 5G. Αυτοκίνητα που είναι σε θέση να παρακολουθούν τους παράγοντες του οχήματος και του ταξιδιού χρησιμοποιώντας αισθητήρες, οι οποίοι στη συνέχεια στέλνουν και λαμβάνουν πληροφορίες μεταξύ τους ασύρματα για να «μιλούν» και «να ακούνε» βασικές πληροφορίες σε σχεδόν πραγματικό χρόνο, παρέχουν μια πληθώρα δεδομένων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση ορισμένων τρεχόντων ζητημάτων, συμπεριλαμβανομένης της οδικής ασφάλειας.

Βελτίωση της ασφάλειας στους δρόμους

Η τεχνολογία V2V θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί με διάφορους τρόπους για την αύξηση της ασφάλειας στους δρόμους. Για παράδειγμα, ένα αυτοκίνητο μπορεί να ξέρει σχεδόν αμέσως όταν έχει υπάρξει σύγκρουση υψηλής σοβαρότητας μπροστά από αυτό με αποτέλεσμα το ίδιο αλλά και τα υπόλοιπα αυτοκίνητα μπορούν να εφαρμόζουν άμεσα τα φρένα τους. Επίσης μπορούν να παρέχονται συνεχώς πληροφορίες σχετικά με αλλαγές στις καιρικές συνθήκες καθ' όλη τη διάρκεια ενός ταξιδιού, ώστε να

επιτρέπεται σε άλλους μετακινούμενους να προετοιμαστούν καλύτερα για τις μελλοντικές οδικές συνθήκες.

Επικοινωνία οχήματος προς υποδομή (V2I)

Τα ίδια οχήματα που διασυνδέονται με άλλα οχήματα που χρησιμοποιούν V2V θα μπορούν επίσης να συνδεθούν με την υποδομή γύρω τους, όπως φανάρια, στάσεις λεωφορείων και ακόμη και ο ίδιος ο δρόμος. Η συνδεσιμότητα μεταξύ οχήματος και υποδομής θα επιτρέψει στους μετακινούμενους ή στα ίδια τα οχήματα να αντιδράσουν στο δρόμο πριν από τη φυσική τους θέση. Και πάλι, αυτό θα αυξήσει την ασφάλεια στους δρόμους μειώνοντας τους εξωτερικούς παράγοντες κινδύνου και θα αυξήσει τους χρόνους αντίδρασης για τους οδηγούς. Ωστόσο, θα παρέχει ορισμένα άλλα οφέλη στην παραγωγικότητα των μετακινούμενων και στο συνολικό χρόνο ταξιδιού. Τα αυτοκίνητα θα μπορούν να αξιολογούν τη διαδρομή μπροστά, αποφεύγοντας περιοχές με συμφόρηση και σχεδιάζουν εναλλακτικές διαδρομές καθώς ξεκινά το ταξίδι. Όχι μόνο αυτό, θα μπορούσε να προσφέρει εναλλακτικές μεταφορές «ακούγοντας» τους τρέχοντες χρόνους λεωφορείων ή τρένων και αξιολογώντας το ταχύτερο ταξίδι σε πραγματικό χρόνο.

Οι υπηρεσίες cloud είναι ζωτικής σημασίας προκειμένου να συλλέγονται και να ανταποκρίνονται σε άλλα αυτοκίνητα καθώς και σε υποδομές κοντά σε πραγματικό χρόνο, τα συνδεδεμένα αυτοκίνητα απαιτούν δεδομένα. Πολλά δεδομένα χρειάζονται δυνατότητες κλιμάκωσης και αποθήκευσης που προσφέρει το cloud, γιατί χωρίς αυτό το αυτοκίνητο θα απαιτούσε απίστευτη ποσότητα επεξεργασίας. Κάτι που δεν θα ήταν οικονομικά αποδοτικό ή ιδιαίτερα φιλικό προς το περιβάλλον.

1.3 Προκλήσεις 5G

Υπάρχουν αρκετές προκλήσεις στην εφαρμογή δικτύων 5G και χωρίζονται σε τεχνικές και μη τεχνικές, συμπεριλαμβανομένων των επιχειρηματικών και κοινωνικών προκλήσεων και ζητημάτων ρύθμισης.

1.3.1 Τεχνικές προκλήσεις

Επικοινωνίες φάσματος χιλιοστομέτρων (mmWave)[15]

Οι επικοινωνίες mmWave έχουν προταθεί να είναι ζωτικής σημασίας μέρος του δικτύου κινητής τηλεφωνίας 5G για την παροχή υπηρεσιών υψηλού ποσοστού δεδομένων (high data rate) όπως VR, AR και βίντεο υψηλής ευκρίνειας (UHDV). Μπορεί να υποστηρίξει τις απαιτήσεις της μεγάλης αύξησης της ζήτησης κίνησης κινητής τηλεφωνίας και να μειώσει τα σημεία συμφόρησης του ασύρματου εύρους

ζώνης που αποτελεί βασικό πρόβλημα του 5G networks. Ωστόσο, η φραγή των ηλεκτρομαγνητικών σημάτων και ο σχεδιασμός ολοκληρωμένων κυκλωμάτων είναι οι προκλήσεις των επικοινωνιών mmWave. Αυτά τα κύματα στη ζώνη των 60 GHz δεν είναι προσβάσιμα σε φραγή από εμπόδια (π.χ. ανθρώπους και έπιπλα) και επιφέρουν μείωση 20-30 dB. Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη τις ανθρώπινες δραστηριότητες έχει αποδειχθεί ότι ένα κανάλι μπορεί να φραγεί 1 έως 2 τοις εκατό κατά μέσο όρο από 1 έως 5 άτομα. Επιπλέον, η πιθανότητα φραγής αυξάνεται γραμμικά καθώς ο χρήστης απομακρύνεται προς την άκρη του κελιού υπηρεσίας. Ένα άλλο ζήτημα είναι ο σχεδιασμός ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και ενός συστήματος φορέα υψηλής συχνότητας για ευρεία ζώνη κάλυψης που έχουν προκλήσεις στο σχεδιασμό εξαρτημάτων κυκλώματος και κεραιών mmWave communication. [15]

Επικοινωνίες μεταξύ συσκευών (device to device-D2D)

Υπάρχουν δύο βασικά ζητήματα για επικοινωνίες D2D στο 5G. Το πρώτο είναι ο έλεγχος και ο περιορισμός των παρεμβολών μεταξύ συσκευών D2D και χρηστών μικροκυττάρων (microcells users), επειδή δεν υπάρχει έλεγχος χειριστή (operator control) για άμεσες επικοινωνίες, διαχείριση παρεμβολών και κατανομή πόρων. Ένα άλλο ζήτημα είναι η ασφάλεια και το απόρρητο στην επικοινωνία D2D λόγω της δρομολόγησης των δεδομένων των χρηστών μέσω συσκευών άλλων χρηστών. [15]

Backhaul

Για να ανταποκριθούν στην αναμενόμενη χωρητικότητα του δικτύου 5G, οι προμηθευτές πρέπει να αναπτύξουν νέες τεχνολογίες. Το δίκτυο backhaul είναι υπεύθυνο για τη μετάδοση αυτού του τεράστιου όγκου πληροφορίας. Το Backhaul (backhaul network ή backbone ή transport), στα κυψελοειδή δίκτυα, ορίζεται ως ένα δίκτυο που συνδέει το δίκτυο πρόσβασης με το κεντρικό δίκτυο και αποτελείται από χαλκό, μικροκύματα και μερικές φορές δορυφόρους. Σε αυτό το περιβάλλον, η ανάπτυξη δικτύων backhaul για μικρές κυψέλες - για την υποστήριξη υψηλών ποσοστών δεδομένων και χαμηλού λανθάνοντος χρόνου - είναι μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις που αντιμετωπίζουν οι φορείς εκμετάλλευσης λόγω της έλλειψης ανεπαρκών δικτύων οπτικών ινών σε πολλές διαφορετικές περιοχές. Αυτό, έχει δημιουργήσει ένα νέο σημείο συμφόρησης στο backhaul. Δεν υπάρχει καμία μοναδική λύση για την αντιμετώπιση των απαιτήσεων 5g backhaul. Το μελλοντικό 5G (5G and beyond) μπορεί να σχεδιαστεί αξιοποιώντας υπάρχοντα δίκτυα μετάδοσης και νέες τεχνολογίες όπως το mmWave. Από αυτήν την άποψη, έχει προταθεί ότι η υιοθέτηση τεχνολογίας όπως τα SDNs μπορεί να βοηθήσει στην εξέλιξη του 5G backhaul για να διευκολύνει τη διαχείριση backhaul σε ένα ετερογενές περιβάλλον. [15]

Προκλήσεις ασφαλείας

Το 5G Network χρησιμοποιεί νέες τεχνολογίες, όπως Virtualization και Software Defined Networking (SDN) / NetworkFunction Virtualization (NFV) για υποδομή για παροχή υπηρεσιών και περιπτώσεις χρήσης. Από την άλλη πλευρά, η ασφάλεια των υπηρεσιών δεν μπορεί να παρασχεθεί εκτός εάν η υποδομή δικτύου είναι ασφαλής. Στα παραδοσιακά δίκτυα, τα στοιχεία είναι απομονωμένα από κάθε άλλο, ωστόσο στο 5G, οι λειτουργίες εικονικοποιούνται και οι πόροι υποδομής τους μοιράζονται. Σε αυτό το περιβάλλον, ορίζονται διαφορετικά εικονικά τμήματα δικτύου που απαιτούν ξεχωριστές δυνατότητες ασφάλειας. Επιπλέον, η ετερογένεια ασφάλειας στο δίκτυο 5G είναι ένα νέο ζήτημα που πρέπει να εξεταστεί. Σύμφωνα με το πλαίσιο υπηρεσιών Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union-ITU), το 5G υποστηρίζει διαφορετικές υπηρεσίες με διάφορες απαιτήσεις, συμπεριλαμβανομένων των, υψηλής χωρητικότητας σύνδεσης (very high connection capacity-mMTC), υψηλής αξιοπιστίας και πολύ χαμηλής καθυστέρησης (High Reliability and Very Low Delay-URLLC) και υψηλού ρυθμού δεδομένων (high data rate-eMBB). Κάθε ένα από αυτά έχει διαφορετικές απαιτήσεις ασφαλείας. Για παράδειγμα, οι υπηρεσίες IoT χρειάζονται ελαφριά ασφάλεια, ενώ οι υπηρεσίες URLLC όπως οι βιομηχανικές υπηρεσίες απαιτούν υψηλή αποτελεσματική ασφάλεια. Σε αυτό το περιβάλλον, απαιτείται ένα πλαίσιο ασφαλείας αρχιτεκτονικής πολλαπλών επιπέδων για τη δυναμική υποστήριξη πολιτικών και απειλών, ανίχνευσης και μετριάσμού. [15]

Καθυστέρηση (delay)

Η καθυστέρηση και η αξιοπιστία είναι κρίσιμες παράμετροι για τα δίκτυα 5G για την υποστήριξη νέων εφαρμογών σε πραγματικό χρόνο. Για παράδειγμα, τα απομακρυσμένα συστήματα ελέγχου υγείας, οι βιομηχανικές εφαρμογές, τα συστήματα cloud, τα έξυπνα δίκτυα και ούτω καθεξής χρειάζονται υποδομή επικοινωνίας υψηλής ταχύτητας για να λειτουργούν σωστά και με ασφάλεια. Επιπλέον, ο λανθάνων χρόνος είναι ένα μεγάλο πρόβλημα για την ασφάλεια, κρίσιμων εφαρμογών συστημάτων μεταφοράς σε μελλοντικά δίκτυα, λόγω του γεγονότος ότι τα οχήματα, ειδικά τα τρένα υψηλής ταχύτητας, θα είναι πολύ γρήγορα, έως και 500 km / h και θα χρειαστούν γρήγορη απόκριση στο αίτημα τους με υψηλή αξιοπιστία και διαθεσιμότητα. Επομένως, τα δίκτυα 5G πρέπει να υποστηρίζουν καθυστέρηση 1 ms για την εκτέλεση αυτών και νέων εφαρμογών στο μέλλον. Το ζήτημα λανθάνοντος χρόνου είναι ένα πολύ δύσκολο πρόβλημα, καθώς δεν μπορεί να επιτευχθεί μεταβάλλοντας μία μόνο παράμετρο ή μέθοδο. Οι εξελίξεις της διεπαφής αέρα, των στοιβών πρωτοκόλλου και των νέων δομών δικτύου μπορούν να συνδυαστούν για να ξεπεραστεί αυτή η δυσκολία. Επιπλέον, τεχνικές γρήγορης παράδοσης και νέες μέθοδοι προσωρινής αποθήκευσης μπορούν να βοηθήσουν στη μείωση του λανθάνοντος χρόνου των δικτύων 5G. Η προσδοκία για αύξηση των συνδεδεμένων συσκευών στα μελλοντικά δίκτυα είναι αναπόφευκτη όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Εκτός αυτού, η υποστήριξη των απαιτήσεων υπηρεσίας και της ποικιλίας συσκευών είναι μια άλλη δυσκολία για αυτήν την ιδέα. Οι συσκευές που είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο θα αποτελούνται από δύο κύριες κατηγορίες. Μία από αυτές είναι συσκευές όπως αισθητήρες, ετικέτες και έξυπνοι μετρητές συνδεδεμένοι στο δίκτυο μόνο για τη

μεταφορά δεδομένων σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές και η άλλη είναι συνεχώς συνδεδεμένες συσκευές για παρακολούθηση, όπως συστήματα παρακολούθησης υγείας και συστήματα παρακολούθησης μεταφοράς. [16]

Προκλήσεις στην ποιότητα εξυπηρέτησης

Γενικά, η ποιότητα εξυπηρέτησης (QoS) θεωρείται ότι αξιολογεί την απόδοση των δικτύων κινητής τηλεφωνίας σε συστήματα 3G και 4G. Η έννοια της ικανοποίησης των χρηστών θα είναι σημαντική στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 5G, που ονομάζεται QoE. Αυτή η νέα ιδέα χαρακτηρίζει τον τρόπο με τον οποίο οι χρήστες αντιλαμβάνονται μια υπηρεσία ή μια εφαρμογή ως προς όλες τις επιδόσεις του συστήματος, τις τιμές υπηρεσίας, την ποιότητα του περιεχομένου και ούτω καθεξής. Επομένως, αυτή η πολύ συγκεκριμένη μέτρηση μπορεί να εξαρτάται τόσο από τις εφαρμογές όσο και από τους χρήστες. Από την άλλη πλευρά, τα μελλοντικά δίκτυα πρέπει να διασφαλίζουν υπηρεσίες και εφαρμογές με βέλτιστο επίπεδο QoE για τους χρήστες. Το ζήτημα του κόστους είναι μια άλλη και πολύ σημαντική πρόκληση για τις μελλοντικές τεχνικές κινητής επικοινωνίας. Προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι προκλήσεις, απαιτείται η εξασφάλιση σημαντικών εξελίξεων που επηρεάζουν άμεσα το κόστος των δικτύων 5G. Δεδομένου ότι οι πελάτες δεν θα καλύψουν το κόστος, το νέο δίκτυο πρέπει να είναι σε προσιτό κόστος που θα διασφαλίζει τη βιώσιμη ποιότητα υπηρεσιών. [16]

1.3.2 Μη-τεχνικές προκλήσεις

Επιχειρηματικά μοντέλα

Μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις στη βιομηχανία Τεχνολογία πληροφοριών και επικοινωνίας είναι η εύρεση θεμάτων και τομέων που μπορούν να αποφέρουν προστιθέμενο κέρδος και αξία. Στην εποχή των 5G, το σημαντικό ζήτημα είναι ποιες ευκαιρίες για τους ενδιαφερόμενους, όπως οι πωλητές, οι φορείς εκμετάλλευσης και οι κλάδοι θα δημιουργηθούν από επιχειρηματικές περιπτώσεις 5G. Οι πάροχοι κινητής τηλεφωνίας ως παράγοντες που εφαρμόζουν το 5G πιστεύουν ότι το νέο επιχειρηματικό μοντέλο είναι απαραίτητο για την αντιμετώπιση οικονομικών πτυχών και την επίτευξη ισορροπημένου οφέλους και βιώσιμων επενδύσεων σε υποδομές. Για παράδειγμα, η εφαρμογή μικροκυττάρων για την υποστήριξη υπηρεσιών 5G mmWave έχει υψηλό κόστος και εάν αγνοηθεί το ζήτημα ενδιαφέροντος, η επένδυση στην ανάπτυξη 5G ενδέχεται να είναι περιορισμένη. Σε αυτήν την εποχή, σε σύγκριση με προηγούμενα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας που η υπηρεσία έχει παρασχεθεί για τους πελάτες, η ευκαιρία 5G παρέχει υπηρεσίες νέας γενιάς κυρίως σε τμήματα επιχειρήσεων. Με άλλα λόγια, ένα τεράστιο μέρος της αγοράς για τους χειριστές 5G είναι οι επιχειρηματικοί τομείς. Επιπλέον, στην προοπτική 5G, αναμένεται ότι η αγορά επικεντρώνεται όχι μόνο σε χρήστες αλλά και σε "πράγματα". Ως εκ τούτου, από την άποψη αυτή, οι φορείς εκμετάλλευσης θα πρέπει να έχουν ατζέντα για την παροχή της προτεινόμενης κατηγορίας υπηρεσιών (π.χ. eMBB) λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικούς τύπους αγοράς χρησιμοποιώντας νέα επιχειρηματικά μοντέλα. [15]

Επενδυτικό κόστος

Στο δίκτυο 5G, η υποστήριξη προσαρμοσμένων απαιτήσεων slicing απαιτεί ανακατασκευή ραδιοφωνικών και κεντρικών δικτύων όσον αφορά τη χρήση νέων τεχνολογιών όπως SDN, NFV και μικροκυψελών. Για παράδειγμα, η ανάπτυξη ενός μικρού πυκνού δικτύου σε μια αστική περιοχή απαιτεί πολύ μεγάλες κεφαλαιουχικές δαπάνες (capex). Από την άλλη πλευρά, η ανάπτυξη δικτύων μικροκυττάρων σε αγροτικές περιοχές λόγω του υψηλού κόστους του capex ενδέχεται να μην έχει επαρκές εισόδημα. Επιπλέον, τα λειτουργικά έξοδα αυτού του δικτύου προστίθεται σε αυτά τα κόστη. Ταυτόχρονα, για την ανάπτυξη backhaul, υπάρχει ανάγκη επένδυσης στην εφαρμογή οπτικών ινών, η οποία αυξάνει περαιτέρω το κόστος.[15]

Πολιτισμός και ψηφιακός γραμματισμός (Culture and digital literacy)

Η έλλειψη ψηφιακού γραμματισμού στη χρήση νέων υπηρεσιών που προσφέρονται από την 5G μπορεί να δημιουργήσει προκλήσεις για τη χρήση υπηρεσιών 5G που μπορούν να επηρεάσουν την υιοθέτηση 5G καθώς και τα έσοδα των χειριστών. Η διαδικασία της εκπαίδευσης για την επιτάχυνση των συναισθηματικών, γνωστικών και συμπεριφορικών αποκρίσεων στο ψηφιακό περιβάλλον μπορεί να προσφέρει ευκαιρίες. Σε αυτήν την περίπτωση, θα μπορούσε να δημιουργήσει νέες αγορές από φορείς που παρέχουν νέες υπηρεσίες [15]

1.4 5G and beyond

Όπως φαίνεται υπάρχουν διάφορες προκλήσεις στα δίκτυα 5G που χρειάζεται να ξεπεραστούν, γι'αυτό το λόγο τα τελευταία χρόνια γίνονται μελέτες πάνω στα νέα και πιο εξελιγμένα δίκτυα 5G and beyond.

Για να γίνει πραγματικότητα τα 5G and beyond δίκτυα, πολλές προηγμένες ιδέες έχουν προταθεί και αναλυθεί τα τελευταία χρόνια. Οι κύριες τεχνολογίες ενεργοποίησης που έχουν ληφθεί υπόψη είναι τα κύματα χιλιοστών, οι μικρές κυψέλες, η διαμόρφωση δέσμης (beamforming), η αρχιτεκτονική με βάση τη συσκευή, η τεχνολογία πλήρους διπλής όψης (full duplex) και massive MIMO, το κύμα Terahertz και το ορατό φάσμα φωτός (visible light spectrum).

Κύματα χιλιοστών (Millimeter Waves)

Γενικά, μια συχνότητα κάτω των 6 GHz χρησιμοποιείται για κυψελοειδή επικοινωνία, και η συχνότητα πάνω από αυτήν χρησιμοποιείται κυρίως για άλλες υπηρεσίες όπως η ιατρική, η τηλεανίχνευση μικροκυμάτων, το ραδιόφωνο, η terahertz υπολογιστική και η ραδιοαστρονομία. Η μαζική αύξηση της κυκλοφορίας δεδομένων έχει καταστήσει το φάσμα ραδιοσυχνοτήτων να έχει μεγάλη συμφόρηση. Το αποτέλεσμα είναι ότι υπάρχει περιορισμένο εύρος ζώνης για έναν χρήστη, προκαλώντας μια πιο αργή και

αναξιόπιστη σύνδεση. Ένας τρόπος επίλυσης αυτού του προβλήματος είναι η χρήση συχνότητας άνω των 6 GHz για ασύρματη επικοινωνία. Η συχνότητα άνω των 6 GHz δεν έχει χρησιμοποιηθεί ποτέ για ασύρματη επικοινωνία και έχει γίνει πολλή έρευνα σχετικά με την εκπομπή κυμάτων χιλιοστών. Τα κύματα χιλιοστών είναι συχνότητα μεταξύ 30 GHz έως 300 GHz, και ονομάζονται κύματα χιλιοστών, επειδή το μήκος της κυμαίνεται από 1 έως 10 mm σε σύγκριση με τα ραδιοκύματα που χρησιμοποιούνται στο τρέχον σύστημα κινητής επικοινωνίας, τα οποία μετρούν μήκος δεκάδων εκατοστών. Τα κύματα χιλιοστών μπορούν να παρέχουν εύρος ζώνης δέκα φορές περισσότερο από αυτό ολόκληρης της κυτταρικής ζώνης 4G. Αυτά τα κύματα υψηλής συχνότητας χρησιμοποιούνται σε ορισμένες δορυφορικές εφαρμογές, αλλά δεν έχουν χρησιμοποιηθεί ποτέ για κινητές ευρυζωνικές συνδέσεις. Ωστόσο επειδή το κύμα χιλιοστών έχει μικρότερο μήκος κύματος, δεν είναι κατάλληλα για εφαρμογές μεγάλης εμβέλειας. Ένα άλλο πρόβλημα με τα κύματα χιλιοστών είναι ότι δεν μπορούν να διεισδύσουν σε κτίρια και εμπόδια και τείνουν να απορροφηθούν από τη βροχή [17]

Υπο-χιλιοστόμετρο ή ζώνη Terahertz

Με την παγκοσμιοποίηση, η τρέχουσα ασύρματη αγορά επεκτείνεται ραγδαία. Με τη συζήτηση για τα δίκτυα 5G and beyond, η ζήτηση για υψηλότερο φάσμα είναι επικείμενη στο εγγύς μέλλον. Η συχνότητα υψηλότερη από τη ζώνη κύματος χιλιοστών (30 GHz – 300 GHz) θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για ασύρματη επικοινωνία. Η ζώνη συχνοτήτων μεταξύ 300 GHz έως 3 THz είναι γνωστή ως η ζώνη Terahertz. Αν και αυτή η ιδέα είναι σχετικά νέα, η έρευνα σε αυτόν τον τομέα μπορεί να είναι χρήσιμη για τη βιομηχανία ασύρματων επικοινωνιών. Εκτός από ένα υψηλότερο φάσμα, υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα της ζώνης THz, όπως η ανάπτυξη του δικτύου χωρίς παρεμβολές, η επεκτασιμότητα, η βελτιωμένη ασφάλεια, η διαθεσιμότητα φάσματος πράσινων πεδίων (greenfield spectrum), η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, η ενίσχυση του fronthaul για το ασύρματο δίκτυο και το μικρό μέγεθος κεραιών [17]

Η ιδέα του εξαιρετικά μαζικού MIMO (ultra massive MIMO-UM MIMO) έχει εμφανιστεί τα τελευταία χρόνια, η οποία εκμεταλλεύεται τα υλικά για την κατασκευή κεραιών και πομποδεκτών για την επίτευξη της χωρητικότητας της ζώνης THz. Υλικά όπως το γραφένιο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή νανο κεραιών και πομποδεκτών. Αυτές οι νανο κεραιές και πομποδέκτες μπορούν να λειτουργήσουν στη ζώνη THz. Το UM-MIMO μπορεί να εκμεταλλευτεί αυτές τις μικροσκοπικές κεραιές και πομποδέκτες για να παρέχει υψηλότερη χωρική πολυπλεξία και διαμόρφωση δέσμης. Έτσι, οι ρυθμοί δεδομένων και το εύρος επικοινωνίας μπορούν να βελτιωθούν με τη βοήθεια της χωρικής πολυπλεξίας και της διαμόρφωσης δέσμης, αντίστοιχα. [17]

Μικρά κελιά (small cells)

Τα μικρά κελιά είναι μικροί σταθμοί βάσης χαμηλής ισχύος που μπορούν να τοποθετηθούν σε απόσταση 100 μέτρων για να καλύψουν μικρές γεωγραφικές περιοχές. Αυτοί οι σταθμοί βάσης χαμηλής ισχύος εμποδίζουν το σήμα να πέσει σε

πολυσύχναστες περιοχές. Τα μικρά κελιά είναι πολύ ελαφριά και μικρά. Έτσι, μπορούν να τοποθετηθούν οπουδήποτε. Εάν χρησιμοποιούμε κύματα χιλιοστών αντί του παραδοσιακού φάσματος των 6 GHz, το μικρό κελί μπορεί να γίνει ακόμη μικρότερο. Τα μικρά κελιά θα διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών υψηλής ταχύτητας και εξαιρετικά χαμηλού λανθάνοντος χρόνου στα 5G and beyond. Τα μικρά κελιά μπορούν να χωριστούν περαιτέρω σε μικροκύτταρα, femtocells και picocells με βάση την περιοχή κάλυψης και τον αριθμό των χρηστών που μπορεί να υποστηρίξει. [17]

Διαμόρφωση δέσμης (beamforming)

Το Beamforming είναι η ικανότητα του σταθμού βάσης να προσαρμόζει το μοτίβο ακτινοβολίας της κεραίας. Το Beamforming βοηθά το σταθμό βάσης να βρει μια κατάλληλη διαδρομή για την παράδοση δεδομένων στον χρήστη και μειώνει επίσης τις παρεμβολές με τους κοντινούς χρήστες κατά μήκος της διαδρομής. Το Beamforming έχει πολλά πλεονεκτήματα για δίκτυα 5G and beyond.. Για τεράστια συστήματα MIMO, η διαμόρφωση δέσμης βοηθά στην αύξηση της απόδοσης του φάσματος και για κύματα χιλιοστών, βοηθά στην αύξηση του ρυθμού δεδομένων. Σε τεράστια συστήματα MIMO, ο σταθμός βάσης μπορεί να στείλει δεδομένα στον χρήστη από διάφορες διαδρομές και να διαμορφώνει την κίνηση των πακέτων και του χρόνου άφιξης για να επιτρέπει σε περισσότερους χρήστες να στέλνουν δεδομένα ταυτόχρονα. Δεδομένου ότι τα κύματα του χιλιοστού δεν μπορούν να διεισδύσουν σε εμπόδια και δεν διαδίδονται σε μεγαλύτερες αποστάσεις λόγω μικρότερου μήκους κύματος, η διαμόρφωση δέσμης εδώ βοηθά στην αποστολή συγκεντρωμένων πακέτων πληροφορίας προς τους χρήστες. Έτσι, η διαμόρφωση beamform βοηθά έναν χρήστη να λάβει ένα ισχυρό σήμα χωρίς παρεμβολές με άλλους χρήστες. [17]

Κεντρική αρχιτεκτονική συσκευών

Το 4G βασίζεται στην κεντρική αρχιτεκτονική του σταθμού βάσης όπου μια συσκευή βασίζεται σε σύνδεση κάτω ζεύξης και άνω ζεύξης και κανάλι ελέγχου και δεδομένων για να λάβει τις υπηρεσίες από το σταθμό βάσης. Με έναν αυξημένο αριθμό χρηστών, η πυκνότητα κυψελών ή ο σταθμός βάσης αυξάνεται ραγδαία, και αυτή η πυκνότητα στο δίκτυο θα απαιτούσε σημαντικές αλλαγές στα δίκτυα 5G and beyond. Επίσης, με την εισαγωγή κυμάτων χιλιοστών, πολλές ζώνες συχνοτήτων με εντελώς διαφορετικά χαρακτηριστικά διάδοσης θα συνυπάρχουν μαζί. Έτσι, μια κεντρική αρχιτεκτονική σταθμού βάσης θα μπορούσε να εξελιχθεί σε μια αρχιτεκτονική που επικεντρώνεται στη συσκευή σε μελλοντικά δίκτυα για να ξεπεράσει προκλήσεις όπως η πυκνότητα του δικτύου και οι αυξημένες ζώνες συχνοτήτων. Στην αρχιτεκτονική που επικεντρώνεται στη συσκευή, μια συσκευή χρήστη θα επικοινωνεί μέσω ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ διαφόρων ετερογενών κόμβων. [17]

Πλήρης τεχνολογία διπλής όψης (Full Duplex Technology)

Γενικά, η ασύρματη μετάδοση και λήψη δεν γίνεται στις ίδιες ζώνες συχνοτήτων για την αποφυγή παρεμβολών. Οποιοδήποτε αμφίδρομο σύστημα πρέπει επομένως να διαχωρίσει το κανάλι άνω ζεύξης (uplink) και κατερχόμενης ζεύξης (downlink) χρησιμοποιώντας το πεδίο χρόνου ή συχνότητας για να λάβει ορθογώνια μη παρεμβαλλόμενα σήματα (orthogonal non-interfering signals). Το πλήρες duplex αναφέρεται στην ταυτόχρονη μετάδοση και λήψη στην ίδια ζώνη συχνοτήτων. Τα δίκτυα 5G and beyond θα χρησιμοποιούν full-duplex για τη μετάδοση σημάτων για δυνητικό διπλασιασμό της χωρητικότητας του δικτύου ενώ είναι επωφελές για υψηλότερα επίπεδα (π.χ. επίπεδο MAC). [17]

Επικοινωνία με ορατό φως

Η επικοινωνία με ορατό φως (Visible Light Communication-VLC) παρέχει απόδοση όπως οι οπτικές ίνες για δίκτυα μελλοντικής γενιάς. Χρησιμοποιεί ορατό φως μεταξύ 400 και 800 THz χρησιμοποιώντας λαμπτήρες φθορισμού και LED για τη μετάδοση του σήματος σε μικρότερη απόσταση. Το VLC μπορεί να κατασκευαστεί με πολύ χαμηλό κόστος υλικού και μπορεί να επωφεληθεί από τη ζώνη χωρίς άδεια (unlicensed band). Το VLC δεν προκαλεί ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, γεγονός που την καθιστά μη εκτεθειμένη σε εξωτερική ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Δεδομένου ότι αυτή η τεχνολογία απαιτεί πηγή φωτισμού, αυτή η τεχνολογία είναι κυρίως χρήσιμη για εφαρμογές σε εσωτερικούς χώρους. Το VLC θα είναι πολύ χρήσιμο στις έξυπνες πόλεις και έχει αναγνωριστεί ως μία από τις βασικές τεχνολογίες ενεργοποίησης για δίκτυα 6G. [17]

Συστήματα μαζικών εισόδων-εξόδων (massive input massive output- MIMO)

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 απόδοσης. Πριν από την εισαγωγή του MIMO, χρησιμοποιήθηκαν ως επί το πλείστον συστήματα μιας εισόδου-μιας εξόδου (single-input-single-output), τα οποία είχαν πολύ χαμηλή απόδοση και δεν μπορούσαν να υποστηρίξουν μεγάλο αριθμό χρηστών με υψηλή αξιοπιστία. Για την κάλυψη αυτής της τεράστιας ζήτησης χρηστών, διάφορες νέες τεχνολογίες MIMO όπως MIMO ενός χρήστη (single user MIMO-SU MIMO), MIMO πολλαπλών χρηστών (multiple users MIMO-MU MIMO) και δικτυακό MIMO αναπτύχθηκαν. Ωστόσο, αυτές οι νέες τεχνολογίες δεν αρκούν για να καλύψουν τις συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις. Οι ασύρματοι χρήστες έχουν αυξηθεί εκθετικά τα τελευταία χρόνια και αυτοί οι χρήστες δημιουργούν τρισεκατομμύρια δεδομένα που πρέπει να αντιμετωπίζονται αποτελεσματικά με μεγαλύτερη αξιοπιστία.

Επιπλέον, υπάρχουν δισεκατομμύρια συσκευές IoT, που έχουν διάφορες εφαρμογές για έξυπνη υγειονομική περίθαλψη, έξυπνα σπίτια και έξυπνη ενέργεια, που

συμβάλλουν στην κυκλοφορία δεδομένων. Προβλέπεται ότι θα υπάρχουν περίπου 100 δισεκατομμύρια συνδεδεμένες συσκευές έως το τέλος του 2025. Οι τρέχουσες τεχνολογίες MIMO δεν είναι σε θέση να αντιμετωπίσουν αυτήν την τεράστια εισροή στην κίνηση δεδομένων με μεγαλύτερη ταχύτητα και αξιοπιστία. Έτσι, το δίκτυο 5G εξετάζει τη μαζική τεχνολογία MIMO ως μια πιθανή τεχνολογία για να ξεπεράσει το πρόβλημα που δημιουργείται από τη μαζική κυκλοφορία δεδομένων και τους χρήστες. Έχουν διεξαχθεί αρκετές μελέτες για το τεράστιο MIMO σε τεράστια συστήματα MIMO και τα οφέλη τους.

Το Massive MIMO είναι η πιο συναρπαστική τεχνολογία για το 5G and beyond από την εποχή της ασύρματης πρόσβασης. Το Massive MIMO είναι η πρόοδος των σύγχρονων συστημάτων MIMO που χρησιμοποιούνται σε τρέχοντα ασύρματα δίκτυα, τα οποία συγκεντρώνουν εκατοντάδες ακόμη και χιλιάδες κεραιές στο σταθμό βάσης και εξυπηρετούν δεκάδες χρήστες ταυτόχρονα. Οι επιπλέον κεραιές που χρησιμοποιεί το massive MIMO θα βοηθήσουν να εστιάσουν την ενέργεια σε μια μικρότερη περιοχή του χώρου για να παρέχουν καλύτερη φασματική απόδοση και απόδοση. Καθώς ο αριθμός της κεραιάς αυξάνεται σε ένα τεράστιο σύστημα MIMO, οι ακτινοβολημένες δέσμες γίνονται στενότερες και επικεντρώνονται χωρικά στον χρήστη. Αυτές οι χωρικά εστιασμένες δέσμες κεραιών αυξάνουν την απόδοση για τον επιθυμητό χρήστη και μειώνουν τις παρεμβολές στους γειτονικούς χρήστες. Συμπερασματικά το Massive MIMO προσφέρει ένα τεράστιο πλεονέκτημα έναντι του παραδοσιακού συστήματος MIMO. [17]

1.5 Συνεισφορά της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Σε αυτή την εργασία αναλύεται η τεχνολογία massive MIMO σε μη κυψελωτά δίκτυα, παρουσιάζεται εκτεταμένη βιβλιογραφία (state of the art) και υπογραμμίζονται τα χαρακτηριστικά της. Αναπτύχθηκαν κλιμακούμενοι αλγόριθμοι για αρχική πρόσβαση, ανάθεση πιλότου, σχηματισμό συμπλέγματος συνεργασίας και κεντρική και καταναμημένη επεξεργασία σήματος για συνδυασμό λήψης και μετάδοση προκωδικοποίησης. Αποδείξαμε ότι η MR (συζυγής διαμόρφωση δέσμης) έχει καλύτερη απόδοση από τον προτεινόμενο καταναμημένο συνδυασμό/προκωδικοποίηση LP-MMSE, ο οποίος με τη σειρά του υπεραποδίδει σε σχέση με τον κεντρικό συνδυασμό/προκωδικοποίηση P-MMSE. Η επεκτασιμότητα μπορεί να επιτευχθεί με αμελητέα απώλεια απόδοσης επειδή κάθε UE λαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος της ισχύος του από ένα μικρό υποσύνολο των AP, λόγω των μεγάλων διακυμάνσεων της διαδρομής. Τέλος παρουσιάζονται κάποιες γραφικές παραστάσεις όσον αφορά την ανερχόμενη και κατερχόμενη ζεύξη συγκρίνοντας τους αλγόριθμους MR, LP-MMSE και P-MMSE με αλλαγές του αριθμού των AP, UE και της συνολικής ισχύς μετάδοσης.

2 Η τεχνολογία του Cell-free massive MIMO

Από τότε που δοκιμάστηκαν τα πρώτα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας στη δεκαετία του 1970, έχει υπάρξει μια απίστευτη επανάσταση στις ασύρματες επικοινωνίες. Από το 1G έως το 4G, η τεράστια αύξηση της κίνησης έχει αντιμετωπιστεί με συνδυασμό αύξησης του εύρους ζώνης και της πυκνότητας του δικτύου, καθώς και μέσω εκλεπτυσμένων ραδιοεπαφών, αυξάνοντας παράλληλα τον αριθμό των κεραιών ανά περιοχή. Λόγω της οικονομικής απόδοσης, το τελευταίο συνέβαλε περισσότερο. Το Massive MIMO είναι μια βασική τεχνολογία 5G που χρησιμοποιεί μαζικές συστοιχίες κεραιών για να παρέχει ένα πολύ υψηλό κέρδος διαμόρφωσης δέσμης και χωρική πολυπλεξία των χρηστών και ως εκ τούτου αυξάνει τη φασματική και ενεργειακή απόδοση. Αποτελεί μια κεντρική λύση για την πυκνότητα ενός δικτύου και η απόδοσή του περιορίζεται από τις παρεμβολές μεταξύ κυττάρων που είναι εγγενείς στον κυτταροκεντρικό σχεδιασμό του. Αντίθετα, το πανταχού διαθέσιμο CF Massive MIMO αναφέρεται σε ένα κατανεμημένο σύστημα Massive MIMO που εφαρμόζει συνεκτική κεντρική μετάδοση από τον χρήστη για να ξεπεράσει τον περιορισμό παρεμβολών μεταξύ κυττάρων σε κυψελοειδή δίκτυα και να παρέχει επιπλέον μακροποικιλιομορφία. Παρακάτω θα μελετηθεί η αρχιτεκτονική της τεχνολογίας cell free massive MIMO καθώς και οι διαφορές της σε σχέση με το απλό massive MIMO, ο τρόπος μετάδοσης της πληροφορίας, το πρωτόκολλο TDD που χρησιμοποιεί μαζί με άλλα σημαντικά χαρακτηριστικά αυτής της τεχνολογίας και ο τρόπος ανάπτυξής της (deployment).

2.1 Διαφορές CF massive MIMO με τις παραδοσιακές αρχιτεκτονικές

Η έννοια των συστημάτων CF massive MIMO έχει πολλά κοινά με άλλες παρόμοιες αρχιτεκτονικές με μικρές διαφορές που στοχεύουν κυρίως στην εξάλειψη των κυψελών και στην ελαχιστοποίηση του fronthaul φορτίου (fronthaul traffic). Για παράδειγμα, η έννοια του δικτυακού MIMO (network MIMO) βασίζεται στη διατήρηση της κυψελοειδούς δομής, όπου πολλά σημεία πρόσβασης μοιράζονται δεδομένα χρήστη και πληροφορίες κατάστασης καναλιού (CSI) από κοινού για να κωδικοποιήσουν (downlink ή DL) και να αποκωδικοποιήσουν (uplink ή UL) τα σήματα για τους χρήστες. Από την άλλη πλευρά, σε ένα σύστημα CF massive MIMO, το CSI μπορεί να αποκτηθεί και να υποβληθεί σε επεξεργασία τοπικά σε κάθε πομπό, το οποίο είναι πιο επεκτάσιμο από το δικτυακό MIMO, οδηγώντας σε μειωμένο CSI. [18]

Το C-RAN (Cloud radio access network) είναι μια κεντρική αρχιτεκτονική δικτύου βασισμένη στην υπολογιστική νέφους που παρέχει συνεργατική υποστήριξη και δυνατότητες εικονικοποίησης (virtualization) και μοιράζεται μια αρχιτεκτονική δικτύου παρόμοια με τα συστήματα CF massive MIMO, με διαφορές στην ομαδοποίηση των χρηστών και την συγκέντρωση ορισμένων λειτουργιών του δικτύου. Το μειονέκτημα του C-RAN είναι η απαίτηση για fronthaul υψηλού εύρους ζώνης λόγω

της χρήσης μιας κεντρικής μονάδας βασικής ζώνης (BBU). Σε ένα καταναμημένο δίκτυο χωρίς κυψέλες, τα σημεία πρόσβασης ελέγχονται από μόνο ένα ή ένα σύνολο κεντρικών μονάδων ελέγχου (control units-CU), τα οποία ονομάζονται με διαφορετικά ονόματα ανά τη βιβλιογραφία, π.χ. κεντρική μονάδα επεξεργασίας [CPU], BBU, Κέντρο δεδομένων C-RAN και επεξεργαστής cloud-edge. Επιπλέον, αυτά τα CU μπορούν να έχουν διαφορετικούς βαθμούς συγκεντρωτισμού και δυνατότητες. [18]

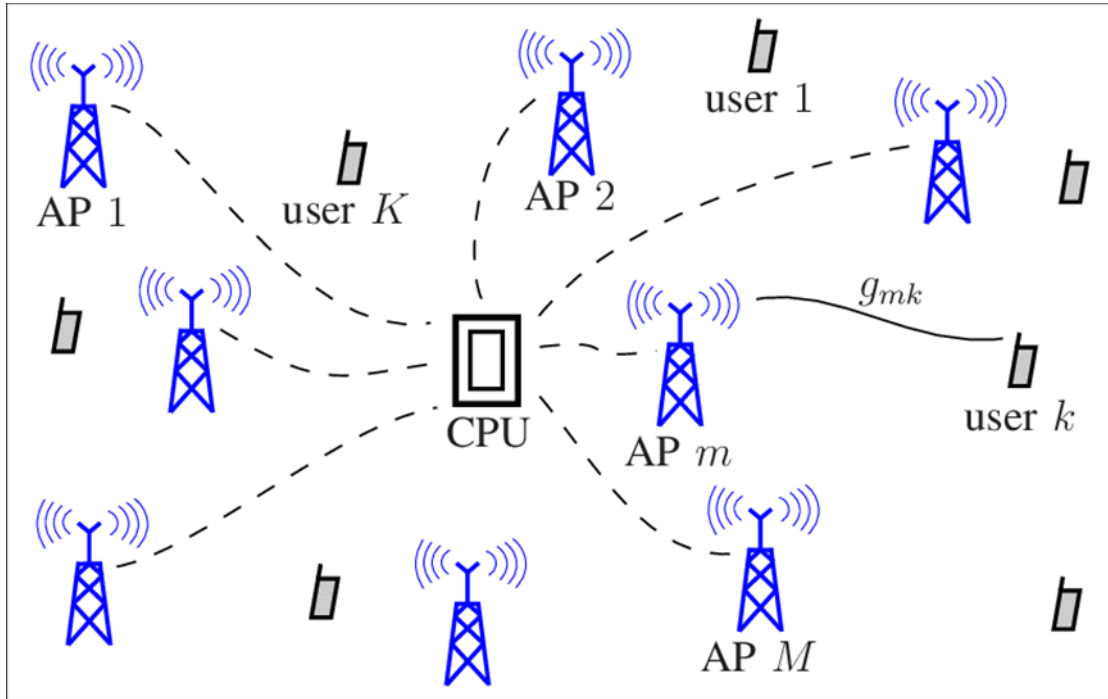
Οι διαφορές αρχιτεκτονικών με βάση τις κυψέλες και με βάση τον χρήστη, υπογραμμίζεται ότι είναι αρκετά σημαντικές, Πιο αναλυτικά, μια κυψελοκεντρική προσέγγιση δεν παρέχει ουσιαστικά οφέλη, διότι οι παρεμβολές εντός της κυψέλης κλιμακώνονται ανάλογα με τα σήματα εντός αυτής, ενώ δεν παρέχει λύση στα προβλήματα που υπάρχουν όσον αφορά την λήψη αδύναμων σημάτων από τους χρήστες. Ένα άλλο μειονέκτημα τους είναι, ότι η ομαδοποίηση χρηστών σε τέτοια συστήματα προκαλεί αύξηση της καθυστέρησης της διάδοσης του σήματος σε σχέση με τα συστήματα με βάση τον χρήστη.

Για την κωδικοποίηση των σημάτων σε διαφορετικά UE, τα AP απαιτούν τη γνώση των κερδών καναλιού από όλα τα UE του δικτύου. Λόγω του υψηλού γενικού κόστους που απαιτείται για την απόκτηση πληροφοριών καναλιού κατερχόμενης ζεύξης (downlink) μέσω ανατροφοδότησης UE, το CF massive MIMO μελετάται συνήθως στο πλαίσιο των συστημάτων αμφίδρομης κατανομής χρόνου (Time Division Duplex-TDD), όπου downlink μετάδοση θεωρείται αυτή από τα AP στους χρήστες και uplink η μετάδοση από τους χρήστες στα AP. Σε τέτοια συστήματα, τα κέρδη του καναλιού κατερχόμενης ζεύξης υπολογίζονται από μετρήσεις στην ανερχόμενη ζεύξη (uplink). Το CF massive MIMO έχει καλύτερη κάλυψη από το συντοπισμένο massive MIMO, καθώς καταπολεμά αποτελεσματικά τη σκίαση (shadowing) μέσω των κερδών μακροποικιλομορφίας και επειδή οι κεραιές βρίσκονται πιο κοντά στα UE. [18]

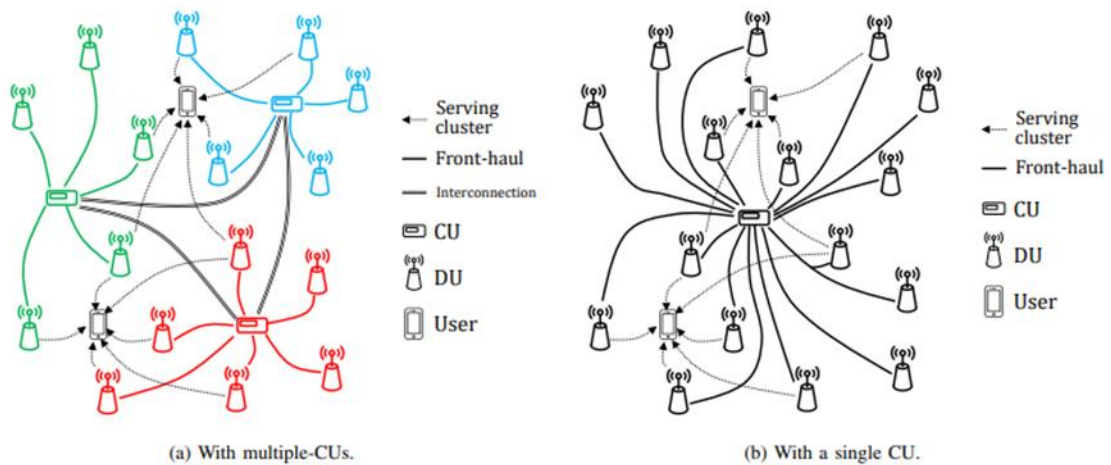
2.2 Αρχιτεκτονική

Τα μαζικά συστήματα πολλαπλών εισόδων-πολλαπλών εξόδων (MIMO) χωρίς κυψέλες έχουν μεγάλο αριθμό ανεξάρτητων ελεγχόμενων κεραιών καταναμημένων σε μια ευρεία περιοχή για ταυτόχρονη εξυπηρέτηση μικρού αριθμού εξοπλισμών χρηστών (UE). Αυτή η λύση έχει θεωρηθεί ως πολλά υποσχόμενη τεχνολογία επόμενης γενιάς λόγω της ικανότητάς της να προσφέρει παρόμοια ποιότητα υπηρεσιών σε όλα τα UE παρά την επεξεργασία σήματος χαμηλής πολυπλοκότητας. Το σύστημα αποτελείται από 1 ή περισσότερα CPU(ή CU) που συνδέονται με τα διάφορα καταναμημένα AP, που διαθέτουν πολλές massive MIMO κεραιές, τα οποία λειτουργούν την ίδια χρονική στιγμή όλα μαζί, μέσω τέλειων backhaul ζεύξεων. Αυτό παρέχει απεριόριστη χωρητικότητα στη CPU. Ένα backhaul μπορεί να περιλαμβάνει ενσύρματα, οπτικών ινών και ασύρματα εξαρτήματα. Επίσης τα AP μπορεί να συνδέονται ασύρματα με το CPU μέσω μίας μεγάλης massive MIMO κεραιάς που είναι στη θέση του CPU. Οι ασύρματες συνδέσεις ενδέχεται να περιλαμβάνουν τη χρήση ζωνών μικροκυμάτων και τοπολογιών δικτύων πλέγματος που μπορεί να χρησιμοποιούν ασύρματο κανάλι υψηλής χωρητικότητας για τη λήψη πακέτων στις συνδέσεις μικροκυμάτων ή ινών.

Με τη χρήση του CF συστήματος ο κάθε χρήστης δεν θα λαμβάνει σήμα από ένα μόνο σταθμό βάσης αλλά ανάλογα με τη θέση του θα επικοινωνεί με περισσότερα από ένα AP, καθώς αυτά διαθέτουν κεραιές προς όλες τις κατευθύνσεις. Με αυτό τον τρόπο, διασφαλίζεται πάντα και παντού η εξαιρετική ποιότητα σύνδεσης και ροής δεδομένων.



Εικόνα 2.2.1: αρχιτεκτονική (εδώ φαίνεται ότι πολλά AP που διαθέτουν massive MIMO κεραιές επικοινωνούν με όλα τα κοντινά UE και συνδέονται κατευθείαν με μια κεντρική CPU) [19]

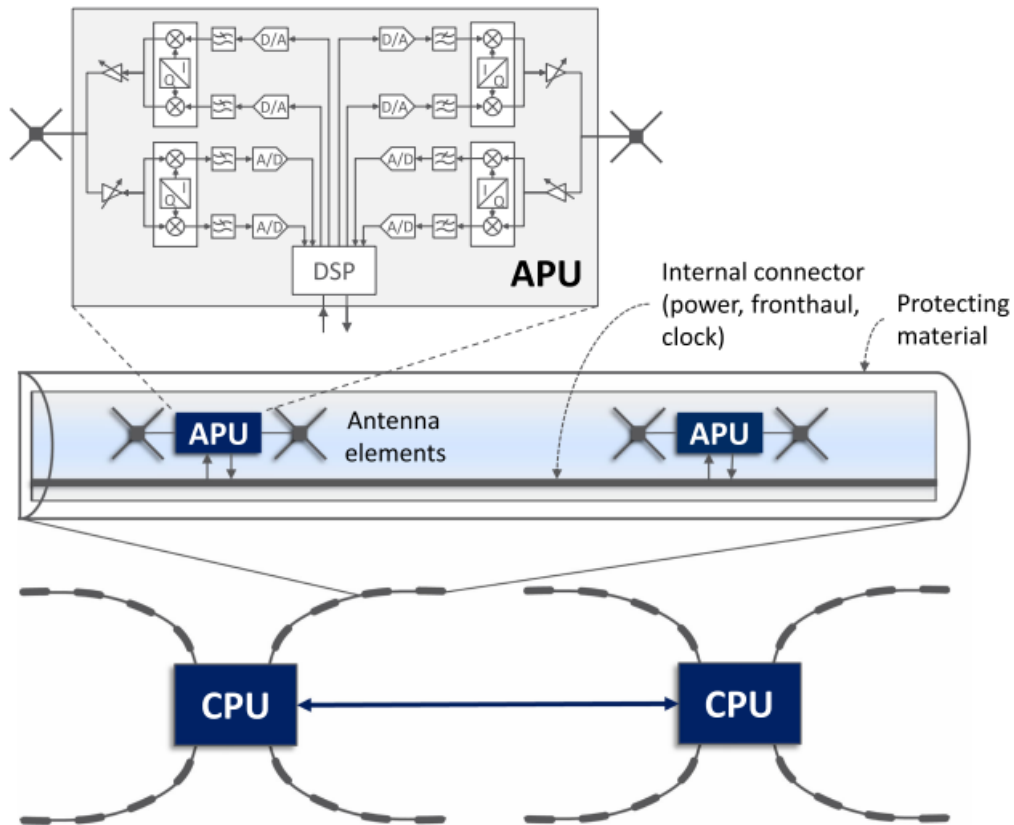


Εικόνα 2.2.2: 2 αρχιτεκτονικές cell free massive MIMO. (Στην εικόνα 2.2.2.(a) έχουμε διάφορα καταναμημένα σημεία (DU) που συνδέονται με πάνω από μία CPU,

μέσω fronthaul ζεύξεων, και εξυπηρετούν τους γειτονικούς χρήστες όλα μαζί. Στην εικόνα 2.2.2.(b) έχουμε τα διάφορα κατανεμημένα DU που συνδέονται με μία μόνο CPU, μέσω fronthaul ζεύξεων, ενώ ο χρήστης εξυπηρετείται από όλα τα γειτονικά DU. [18]

Το δίκτυο που διαθέτει πολλαπλά CPU, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.2.2.(a), είναι πιο επεκτάσιμο από αυτό που έχει ένα μόνο CPU, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.2.2.(b), επειδή η αρχιτεκτονική πολλαπλών CPU παρέχει έναν ιεραρχικό σχεδιασμό με σχετικά χαμηλές ροές κίνησης fronthaul. Η χρήση πολλαπλών CPU μπορεί επίσης να παρέχει χαμηλότερη καθυστέρηση σε σύγκριση με ένα κεντρικό CPU, επειδή τα σήματα της ζώνης βάσης (base band) μπορούν να συλλεχθούν σε τοπικά CPU και όχι μόνο στο κεντρικό δίκτυο. Επιπλέον, ένα τέτοιο σχήμα παρέχει μια ομαλή μετάβαση από την τρέχουσα κυψελωτής δομή, διότι οι κυψέλες εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται κατά το backhaul των CPU. Η αρχιτεκτονική πολλαπλών CPU μπορεί να εφαρμοστεί χρησιμοποιώντας τεχνολογίες όπως το δίκτυο βασισμένο σε λογισμικό (software defined network-SDN) και την προσομοίωση λειτουργιών δικτύου (network function virtualization -NFV) για να επιτρέψει καλύτερο συντονισμό και δυναμική εκχώρηση των διάφορων DU στα CPU. Αυτό συμβάλλει στην αποφυγή ενός μεγαλύτερου προβλήματος του δικτύου στην περίπτωση βλάβης ενός CPU και επιτρέπει την εξισορρόπηση φορτίου μεταξύ των CPU. Μια ενδιαφέρουσα πτυχή στην αρχιτεκτονική με πολλαπλά CPU είναι η δυνατότητα διασύνδεσης των CPU με σειριακές συνδέσεις backhaul. Έτσι με τη βοήθεια της ομαδοποίησης με βάση τον χρήστη (user-centric clustering), τα δεδομένα για κάθε χρήστη χρειάζεται να βρίσκονται μόνο στα γειτονικά CPU, δηλαδή, μόνο τα γειτονικά CPU πρέπει να διασυνδεθούν μειώνοντας με αυτό τον τρόπο τον απαιτούμενο αριθμό συνδέσεων. Εναλλακτικά, το backhaul των CPU μπορεί ακόμα να γίνει με τον συμβατικό τρόπο, δηλαδή την σύνδεση κάθε CPU στο κεντρικό δίκτυο. [18]

Μια αρχιτεκτονική δικτύου με ένα μόνο CPU, όπως φαίνεται στο 2.2.2.(b), είναι μια άλλη πιθανή ανάπτυξη. Αυτή η αρχιτεκτονική υιοθετείται στις περισσότερες μελέτες σχετικά με τα CF massive MIMO. Αυτή η αρχιτεκτονική είναι αρκετά απαιτητική όσον αφορά την χωρητικότητα του fronthaul ενώ παράλληλα απαιτεί πολλές ζεύξεις fronthaul μεταξύ των DUs, αυτά ωστόσο μπορούν να παραλειφθούν αν οι δικτυακές διεργασίες γίνονται τοπικά σε κάθε DU. Ωστόσο στην περίπτωση που οι διεργασίες δεν γίνονται σε κάθε DU υπάρχουν κάποιες τεχνικές που βοηθούν στην σωστή ανάπτυξη των συγκεκριμένων αρχιτεκτονικών. Μια από αυτές είναι η χρησιμοποίηση μιας αυτοκόλλητης ταινίας με ηλεκτρολογικά στοιχεία για την γρήγορη και εύκολη σύνδεση των διάφορων DUs (radio stripes system).



Εικόνα 2.2.1.i: εσωτερικό ραδιολωρίδων (Αρχικά φαίνεται το ηλεκτρικό κύκλωμα από το οποίο αποτελούνται τα APU των ραδιολωρίδων. Έπειτα φαίνεται το εσωτερικό των ραδιολωρίδων όπου βρίσκονται οι κεραίες και τα APU. Η ραδιολωρίδα περιέχει επίσης τις συνδέσεις fronthaul μεταξύ των υλικών καθώς και τις λειτουργίες ρολογιού και ενέργειας, ενώ περιβάλλεται από ένα προστατευτικό στρώμα υλικού.) [19]

2.2.1 Ανάπτυξη συστήματος (Deployment)

Το κόστος και η πολυπλοκότητα της ανάπτυξης, η περιορισμένη χωρητικότητα των συνδέσεων fronthaul/backhaul και ο συγχρονισμός δικτύου είναι τρία σημαντικά ζητήματα που πρέπει να λυθούν σε μια πρακτική ανάπτυξη.

Η καλωδίωση και η εσωτερική επικοινωνία μεταξύ των AP είναι δύσκολη σε πρακτικές εφαρμογές CF massive MIMO. Μια κατάλληλη, οικονομικά αποδοτική αρχιτεκτονική είναι το σύστημα που παρουσιάζεται στη συνέχεια.

Σε ένα σύστημα ραδιολωρίδας, οι κεραίες και οι σχετικές μονάδες επεξεργασίας των κεραιών (APU) βρίσκονται σειριακά μέσα στο ίδιο καλώδιο, το οποίο παρέχει επίσης συγχρονισμό, μεταφορά δεδομένων και τροφοδοσία μέσω κοινόχρηστου διαύλου (Εικόνα 2.2.1.i). Πιο συγκεκριμένα, τα AP αποτελούνται από στοιχεία κεραίας και τσιπ που είναι τοποθετημένα σε κύκλωμα (συμπεριλαμβανομένων ενισχυτών ισχύος,

μετατόπισης φάσης, φίλτρων, διαμορφωτών και μετατροπών A / D και D / A) μέσα στο προστατευτικό περίβλημα ενός καλωδίου ή μιας ραδιολωρίδας. Κάθε ραδιολωρίδα, συνδέεται με έναν ή περισσότερους επεξεργαστές (CPU) ενώ εμπεριέχει πολλά στοιχεία κεραίας, όπου κάθε στοιχείο κεραίας λειτουργεί ουσιαστικά ως ένα AP, ως εκ τούτου, μπορεί να θεωρηθεί ένα AP πολλαπλών κεραίων. Επιπλέον, ανάλογα με τη συχνότητα του φορέα, οι πολλαπλές κεραίες μπορούν είτε να είναι τοποθετημένες μαζί (co-located) (σε υψηλότερες συχνότητες τα στοιχεία κεραίας είναι μικρότερα) είτε να διανεμηθούν στη ραδιολωρίδα. Δεδομένου ότι ο συνολικός αριθμός κεραίων είναι μεγάλος, η ισχύς μετάδοσης κάθε κεραίας μπορεί να είναι πολύ χαμηλή, με αποτέλεσμα χαμηλή παραγωγή θερμότητας, μικρό όγκο και βάρος και χαμηλό κόστος (χρησιμοποιούνται μικρές κεραίες χαμηλού κέρδους). Για παράδειγμα, εάν η συχνότητα φορέα είναι 5,2 GHz, τότε το μέγεθος της κεραίας είναι 2,8 cm. Έτσι, οι κεραίες και το υλικό επεξεργασίας μπορούν να τοποθετηθούν εύκολα σε καλώδιο ή σε ραδιολωρίδα. [19]

Η επεξεργασία λήψης / μετάδοσης μιας κεραίας πραγματοποιείται ως εξής. Από την πλευρά του πομπού, κάθε APU λαμβάνει κάποιες ροές δεδομένων εισόδου από την προηγούμενη APU μέσω του κοινόχρηστου διαύλου. Σε κάθε κεραία, οι ροές δεδομένων εισόδου αθροίζονται με τον προ-υπολογιζόμενο φορέα κωδικοποίησης (precoding vector) και το σήμα μεταδίδεται μέσω του ραδιοκαναλιού στον δέκτη/ες. Ο φορέας κωδικοποίησης μπορεί να είναι συνάρτηση των εκτιμώμενων καναλιών UL. Από την πλευρά του δέκτη, το λαμβανόμενο ραδιοσήμα πολλαπλασιάζεται με τον φορέα συνδυασμού (combining vector) που έχει υπολογιστεί προηγουμένως στην πιλοτική φάση UL. Η έξοδος δίνει ροές δεδομένων. Οι επεξεργασμένες ροές στη συνέχεια συνδυάζονται με τις ροές δεδομένων που λαμβάνονται από τον κοινό δίαυλο και αποστέλλονται ξανά στον κοινόχρηστο δίαυλο της επόμενης APU. [19]

Το σύστημα ραδιολωρίδων διευκολύνει μια ευέλικτη και φθηνή ανάπτυξη Massive MIMO. Αυτό συμβαίνει για διάφορους λόγους: (i) Η ανάπτυξη δεν απαιτεί προσωπικό μεγάλης εξειδίκευσης. Θεωρητικά, μια ραδιολωρίδα χρειάζεται μόνο μία σύνδεση (plug and play) είτε στο δίκτυο fronthaul είτε απευθείας στην CPU. (ii) Ένα συμβατικό καταναμημένο σύστημα Massive MIMO απαιτεί μια τοπολογία αστέρα, δηλαδή ένα ξεχωριστό καλώδιο μεταξύ κάθε AP και της CPU, το οποίο μπορεί να είναι οικονομικά ανέφικτο. Αντίθετα, η εγκατάσταση ραδιολωρίδων δεν επηρεάζεται από τον αριθμό των στοιχείων κεραίας, ως εκ τούτου, η καλωδίωση γίνεται πολύ φθηνότερη. Η τοπολογία αστέρα μπορεί να είναι προτιμότερη από την άποψη της απόδοσης, αλλά το κόστος ανάπτυξης του δικτύου fronthaul μπορεί να είναι πολύ υψηλό ή ακόμη και απαγορευτικό. Ένας τρόπος αποτελεσματικής χρήσης των καλωδίων fronthaul είναι η ενσωμάτωση των στοιχείων της κεραίας σε αυτά, μετατρέποντας τα καλώδια σε ραδιολωρίδες. Ως αποτέλεσμα, επιτυγχάνεται μια τοπολογία αστέρα αλλά με πολλές ραδιολωρίδες με αποτέλεσμα την βελτίωση της κάλυψης του δικτύου. (iii) Το κόστος συντήρησης είναι μικρό καθώς ένα τέτοιο σύστημα προσφέρει αυξημένη ανθεκτικότητα (iv) η χαμηλή παραγωγή θερμότητας καθιστά τα συστήματα ψύξης απλούστερα και φθηνότερα. [19]



Εικόνα 2.2.1.ii: Διάφορες περιπτώσεις εφαρμογής ραδιολωριδών (π.χ. σε πολυσύχναστες πλατείες και δρόμους, σε εμπορικά κέντρα και σε μεγάλα γήπεδα) [19]

Ενώ τα κυψελοειδή AP είναι ογκώδη, οι ραδιολωρίδες καθιστούν δυνατή την <<αόρατη>> εγκατάσταση σε υπάρχοντα δομικά στοιχεία, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.2.1.ii. Επιπλέον, μια ανάπτυξη ραδιολωριδών μπορεί να διαθέτει, για παράδειγμα, αισθητήρες θερμοκρασίας, μικρόφωνα / ηχεία ή αισθητήρες κραδασμών και να παρέχει πρόσθετες λειτουργίες όπως συναγερμοί πυρκαγιάς ή ληστειών, προειδοποιήσεις σεισμού, τοποθέτηση σε εσωτερικούς χώρους καθώς και παρακολούθηση- έλεγχο του κλίματος.

2.2.1.1 Χωρητικότητα fronthaul και backhaul

Αν και δεν υπάρχει ανάγκη κοινής χρήσης CSI μεταξύ κεραιών, οι CPUs πρέπει να παρέχουν σε κάθε APU τις ροές δεδομένων. Τα δεδομένα παραδίδονται από το κεντρικό δίκτυο μέσω του backhaul και στη συνέχεια προωθούνται στα APU μέσω του fronthaul. Ομοίως, η CPU λαμβάνει τα σήματα από τις ραδιολωρίδες της μέσω fronthaul και τα αποκωδικοποιεί. Στη συνέχεια, τα δεδομένα παραδίδονται στο κεντρικό δίκτυο μέσω του backhaul. Η απαιτούμενη χωρητικότητα μιας ραδιολωρίδας είναι ανάλογη με τον αριθμό των ταυτόχρονων ροών δεδομένων που υποστηρίζει στο μέγιστο φορτίο δικτύου της.

Η απαιτούμενη χωρητικότητα backhaul μιας CPU αντιστοιχεί στο άθροισμα του ρυθμού των ροών δεδομένων που οι ραδιολωρίδες θα μεταδίδουν / λαμβάνουν στο

μέγιστο φορτίο δικτύου. Ο τρόπος περιορισμού αυτών των απαιτήσεων χωρητικότητας είναι να περιοριστεί ο αριθμός των UE που μπορούν να εξυπηρετηθούν ανά AP και CPU. Για να αποφευχθεί η δημιουργία ορίων κυψέλης, πρέπει να χρησιμοποιείται μια προοπτική με βάση τον χρήστη κατά την επιλογή του υποσυνόλου των AP που εξυπηρετούν ένα συγκεκριμένο UE.

2.2.1.2 Συγχρονισμός

Για την εξυπηρέτηση ενός UE μέσω κοινής μετάδοσης από πολλαπλά AP, η υποδομή δικτύου πρέπει να συγχρονιστεί. Το δίκτυο μπορεί να έχει μια αναφορά απόλυτου χρόνου (φάση), αλλά τα AP δεν είναι συγχρονισμένα. Αυτό σημαίνει ότι, στην πραγματικότητα, τα κυκλώματα πομπού και δέκτη κάθε AP έχουν τις δικές τους χρονικές αναφορές. Η διαφορά στην αναφορά χρόνου μεταξύ του πομπού και του δέκτη σε ένα δεδομένο AP αντιπροσωπεύει το σφάλμα βαθμονόμησης αμοιβαιότητας (reciprocity calibration error). Η διαφορά, για παράδειγμα, στην αναφορά χρόνου πομπού, μεταξύ οποιουδήποτε ζεύγους APs αντιπροσωπεύει το σφάλμα συγχρονισμού μεταξύ αυτών των δύο AP. Για να περιοριστεί τα σφάλματα αμοιβαιότητας και συγχρονισμού, πρέπει να εφαρμόζεται μια διαδικασία συγχρονισμού σε τακτά χρονικά διαστήματα. [21]

2.2.1.3 Ασφάλεια

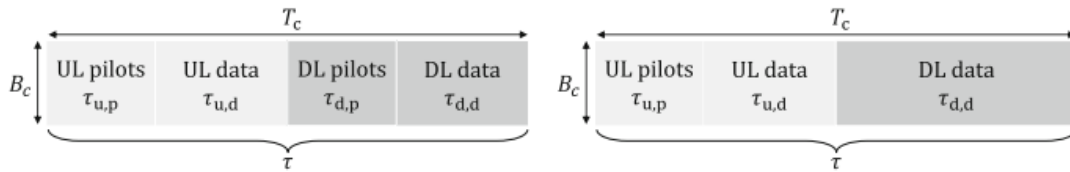
Όσον αφορά το ζήτημα της ασφάλειας, στις ασύρματες επικοινωνίες επόμενης γενιάς, η ασφάλεια φυσικού επιπέδου (PLS) θεωρείται ως μια ελκυστική επέκταση των παραδοσιακών προσεγγίσεων κρυπτογραφικής ασφάλειας που εφαρμόζονται στα ανώτερα επίπεδα. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά συγκεντρωτικά δίκτυα massive MIMO, η πυκνότητα των AP και UE στο δίκτυο CF massive MIMO είναι πολύ υψηλότερη, γεγονός που αυξάνει σημαντικά την πιθανότητα υποκλοπών εμπιστευτικών πληροφοριών. Αν και το PLS σε συγκεντρωτικά δίκτυα massive MIMO έχει λάβει μεγάλη προσοχή στη βιβλιογραφία, ο συνδυασμός PLS και CF massive MIMO εξακολουθεί να είναι περιορισμένος στην υπάρχουσα βιβλιογραφία. Δεδομένου ότι το πρωτόκολλο μετάδοσης και οι πιλοτικές ακολουθίες είναι τυποποιημένα και δημόσια, οι πιλοτικές ακολουθίες για την εκτίμηση καναλιών θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν από ένα κακόβουλο λογισμικό για να επιτεθεί στο δίκτυο. Προκειμένου να προστατευθούν τα δίκτυα από τις επιθέσεις, απαιτούνται εξελιγμένοι εντοπισμοί επιθέσεων και έλεγχος ισχύος. Για παράδειγμα, ένα απλό και αποτελεσματικό σχήμα ελάχιστου μήκους περιγραφής έχει προταθεί για την ανίχνευση των πιλοτικών επιθέσεων από πλαστογράφηση, προσδιορίζοντας τη διάσταση του υποδιαστήματος της λαμβανόμενης συσχέτισης σήματος. [21]

2.3 Τρόπος μετάδοσης

Το δίκτυο μπορεί να λειτουργεί σε λειτουργία κοινής επεξεργασίας (Joint Processing-JP), η οποία διαιρείται περαιτέρω σε λειτουργίες κοινής μετάδοσης (JT) και δυναμικής επιλογής DUs (dynamic point selection-DPS). Υφίσταται επίσης η λειτουργία του συντονισμένου προγραμματισμού / διαμόρφωσης δέσμης (coordinated scheduling-CS \ coordinated beamforming-CB). Κατά το JT, τα δεδομένα που προορίζονται για τον χρήστη μοιράζονται μεταξύ των συνεργαζόμενων DU και ταυτόχρονα μεταδίδονται στο δίκτυο. Από την άλλη πλευρά, στο DPS, τα δεδομένα χρήστη είναι διαθέσιμα σε πολλά DU στο σύμπλεγμα εξυπηρέτησης που συντονίζονται μεταξύ τους, αλλά τα δεδομένα μεταδίδονται από ένα DU (που ονομάζεται σημείο μετάδοσης (transmission point-TP)) κάθε φορά. Είναι ενδιαφέρον ότι το TP μπορεί να αλλάξει από ένα υποδίκτυο σε άλλο ανάλογα με την στιγμιαία κατάσταση του καναλιού. Οι λειτουργίες JT και DPS μπορούν να συνδυαστούν για να επιτρέψουν σε πολλαπλά DU να μεταδίδουν τα δεδομένα. Όσον αφορά το σχήμα CS \ CB, τα δεδομένα μεταδίδονται από ένα DU, αλλά οι αποφάσεις προγραμματισμού των χρηστών και της διαμόρφωσης δέσμης (beamforming) λαμβάνονται με συντονισμό μεταξύ των DU εντός του συμπλέγματος εξυπηρέτησης. Σε αυτό το σχήμα, τα δεδομένα για τον χρήστη πρέπει να είναι διαθέσιμα σε έναν πομπό, μειώνοντας έτσι τη ζήτηση σε πόρους δικτύου, ειδικά στο fronthaul. Άρα, όταν τα οφέλη του JT υπερβαίνουν το γενικό κόστος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η λειτουργία CS \ CB. Στη λειτουργία JT, έχουμε δύο διαφορετικούς τρόπους μετάδοσης που επιτυγχάνουν διαφορετικούς ρυθμούς δεδομένων στον χρήστη. Ο πρώτος τρόπος είναι συνεκτική μετάδοση (coherent transmission), όπου τα DU που εξυπηρετούν, αποκωδικοποιούν μαζί, με συνέπεια να στέλνουν τα ίδια δεδομένα σε κάθε χρήστη, και ως εκ τούτου ενεργούν ως ένα μοναδικό σύστημα συστοιχίας κεραιών. Μια τέτοια προσέγγιση απαιτεί συγχρονισμό φάσης μεταξύ των DU, κάτι που θα μπορούσε να είναι μια πρόκληση, ειδικά όταν τα DU που εξυπηρετούν τον χρήστη βρίσκονται υπό τον έλεγχο διαφορετικών CU. Ωστόσο, η χρήση κυκλικού προθέματος (cyclic prefix) μπορεί να εκπληρώσει αυτήν την απαίτηση και τα DUs μπορούν να θεωρηθούν σχεδόν συγχρονισμένα σε ακτίνα 1 km ή 5 km, με αποτέλεσμα την μείωση της καθυστέρησης του σήματος. [22]

Ο δεύτερος τρόπος είναι η μη συνεκτική μετάδοση, όπου τα DU μεταδίδουν διαφορετικές ροές δεδομένων στον χρήστη και κάθε πομπός αποκωδικοποιεί τα δεδομένα ανεξάρτητα, παρέχοντας έτσι ένα κέρδος ισχύος στον δέκτη. Ο ρυθμός δεδομένων (data rate) σε αυτήν την περίπτωση είναι το άθροισμα των επιμέρους ποσοστών δεδομένων των DU. Σε γενικές γραμμές, αυτή η λειτουργία παρέχει μικρότερους ρυθμούς δεδομένων από τη συνεκτική λειτουργία, επειδή ο χρήστης απαιτεί διαδοχική ακύρωση παρεμβολών (successive interference cancelation-SIC) για την αποκωδικοποίηση των ροών δεδομένων από τα DU που τον εξυπηρετούν. Αυτό καθιστά την πραγματική ισχύ σήματος που λαμβάνεται ως το άθροισμα των δυνάμεων σήματος που λαμβάνονται από τα DUs. Η αυστηρή απαίτηση συγχρονισμού φάσης δεν είναι απαραίτητη σε αυτή τη μέθοδο, καθιστώντας την ανάπτυξή του ευκολότερη από την πλευρά του πομπού, έχει ωστόσο ένα πολύ πιο περίπλοκο δέκτη που εφαρμόζει το SIC. Βέβαια, δεδομένου ότι το μέγεθος του συμπλέγματος εξυπηρέτησης (serving

cluster) είναι γενικά μικρό, η υπολογιστική πολυπλοκότητα του SIC στον χρήστη μπορεί να είναι προσιτή. [22]



Εικόνα 2.3.1: πρωτόκολλο TDD [22]

2.3.1 Πρωτόκολλο TDD

Το πρωτόκολλο TDD που συνιστάται για το CF massive MIMO απεικονίζεται στην εικόνα 2.3.1. Κάθε AP εκτιμά το κανάλι ανερχόμενης ζεύξης (uplink ή UL) από κάθε UE μέσω μετρήσεων στους πιλότους UL (Οι πιλότοι είναι προκαθορισμένα σήματα αναφοράς που μεταδίδονται για να επιτρέψουν στον δέκτη να εκτιμήσει το κανάλι.). Αυτές οι εκτιμήσεις ισχύουν και για τα κανάλια κατερχόμενης ζεύξης (downlink ή DL). Ως εκ τούτου, η πιλοτική απαίτηση πόρων είναι ανεξάρτητη από τον αριθμό των AP και δεν απαιτείται συνεχής ενημέρωση του UL. Μετά την εφαρμογή κωδικοποίησης, κάθε UE μπορεί να απευθύνεται σε ένα αποτελεσματικό κανάλι. Το UE πρέπει να εκτιμήσει το κέρδος του καναλιού για να αποκωδικοποιήσει τα δεδομένα του. Η εκτίμηση αποτελεσματικού κέρδους του DL λαμβάνεται είτε από πιλότους DL που αποστέλλονται από το AP κατά τη διάρκεια μιας DL φάσης εκπαίδευσης (εικόνα 2.3.1, αριστερά) είτε, ενδεχομένως, τυχαία από τη μετάδοση δεδομένων DL εάν δεν υπάρχουν πιλότοι DL (εικόνα 2.3.1, δεξιά). Η εικόνα 2.3.1 δείχνει δύο πιθανές διαμορφώσεις πλαισίου TDD, με και χωρίς μετάδοση πιλότων DL. Η διαμόρφωση που περιλαμβάνει την πιλοτική εκπαίδευση DL, που απεικονίζεται στα αριστερά στην εικόνα 2.3.1, αποτελείται από τέσσερις φάσεις:

- (i) εκπαίδευση UL,
- (ii) Διαβίβαση δεδομένων UL,
- iii) εκπαίδευση DL με βάση τους πιλότους, και
- (iv) Μετάδοση δεδομένων DL.

Η εικόνα 2.3.1, στα δεξιά, απεικονίζει το πλαίσιο TDD χωρίς μετάδοση πιλότου DL. Αυτό σημαίνει ότι για την αποκωδικοποίηση δεδομένων, τα UE βασίζονται στη σκλήρυνση καναλιών (channel hardening) είτε εκτιμούν τυφλά το κανάλι DL από τα δεδομένα.

Η σκλήρυνση των καναλιών σημαίνει ότι ένα κανάλι εξασθένησης συμπεριφέρεται σαν να ήταν κανάλι που δεν εξασθενίζει. Η τυχειότητα εξακολουθεί να υπάρχει, αλλά ο αντίκτυπος της στην επικοινωνία είναι αμελητέος

Το διάστημα συνοχής καναλιών ορίζεται ως το χρονικό διάστημα συχνότητας κατά το οποίο το κανάλι μπορεί να θεωρηθεί ως σχεδόν στατικό. Προσδιορίζεται από το περιβάλλον διάδοσης, την κινητικότητα του UE και τη συχνότητα του φορέα. Η επιλεκτικότητα συχνότητας του καναλιού μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη χρήση της ορθογωνικής πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας (orthogonal frequency division multiplexing- OFDM) η οποία μετατρέπει το κανάλι ευρείας ζώνης σε πολλά κανάλια επίπεδης ζώνης εξασθένησης. Εναλλακτικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σχήματα διαμόρφωσης ενός φορέα (single carrier) με παρόμοια απόδοση. [22]

2.3.2 Πιλοτική ανάπτυξη UL

Η πιλοτική ανάπτυξη UL καθορίζεται είτε τοπικά σε κάθε AP είτε κεντρικά στην CPU ενώ μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους:

- τυχαία ανάπτυξη: Αυτή η μέθοδος δεν απαιτεί συντονισμό, αλλά υπάρχει μεγάλη πιθανότητα τα UE που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση να χρησιμοποιούν τον ίδιο πιλότο, οδηγώντας σε κακή απόδοση.
- Βέλτιστη δυναμική ανάπτυξη (brute-force assignment): Μια αναζήτηση για όλες τις πιθανές πιλοτικές ακολουθίες μπορεί να πραγματοποιηθεί για τη μεγιστοποίηση μιας λειτουργίας της επιλογής, όπως τον ρυθμό μέγιστου-ελάχιστου (max-min rate).
- Άπληστη πιλοτική ανάπτυξη (Greedy pilot assignment): Τα UEs έχουν αρχικά τυχαίες πιλοτικές ακολουθίες. Στη συνέχεια, αυτές βελτιώνονται μέσω μικρών αλλαγών που αυξάνουν την λειτουργικότητα.
- Δομημένη πιλοτική ανάπτυξη (Structured pilot assignment): Υιοθετούνται πρακτικές επαναχρησιμοποίησης πιλότων για να διασφαλιστεί ότι οι χρήστες που μοιράζονται τον ίδιο πιλότο είναι αρκετά χωρικά διαιρεμένοι [19]

[

2.3.3 Έλεγχος ισχύος

Ο έλεγχος ισχύος είναι σημαντικός για τη διαχείριση του προβλήματος near-far και την προστασία των UE από έντονες παρεμβολές. Το near-far πρόβλημα είναι όταν η επίδραση ενός ισχυρού σήματος από μια κοντινή πηγή σήματος καθιστά δύσκολο για έναν δέκτη να ακούσει ένα ασθενέστερο σήμα από μια άλλη πηγή λόγω παρεμβολών. Ο έλεγχος ισχύος μπορεί να διαχειρίζεται από την CPU, όπου δίνει οδηγίες στα AP και UE για το ποιους συντελεστές ελέγχου ισχύος πρέπει να χρησιμοποιούν. Χρησιμοποιώντας όρια χωρητικότητας κλειστής μορφής (closed form) που εξαρτώνται μόνο από την εξασθένηση μεγάλης κλίμακας, ο έλεγχος ισχύος μπορεί να βελτιστοποιηθεί άρτια και να ενημερώνεται σπάνια. [19]

Γενικά, οι συντελεστές ελέγχου ισχύος πρέπει να επιλέγονται για μεγιστοποίηση ενός συγκεκριμένου στόχου απόδοσης. Αυτός ο στόχος μπορεί, για παράδειγμα, να είναι ο max-min ή ο sum ρυθμός: [19]

- Δίκαιος καταμερισμός max-min ελέγχου ισχύος (Max-min fairness power control): Ο στόχος αυτής της πολιτικής ελέγχου ισχύος είναι η παροχή της ίδιας απόδοσης (rate) σε όλα τα UE καθώς και η μεγιστοποίησή της. Όπως και στο κυψελοειδές Massive MIMO, οι συντελεστές ελέγχου ισχύος max-min μπορούν να ληφθούν αποτελεσματικά μέσω γραμμικής και δεύτερης τάξης κωνική βελτιστοποίηση (linear and second-order cone optimization).

- Έλεγχος ισχύος με προτεραιότητα χρήστη: Οι απαιτήσεις απόδοσης είναι συνήθως διαφορετικές μεταξύ των UE και μπορούν να ληφθούν υπόψη στην πολιτική ελέγχου ισχύος. Για παράδειγμα, τα UE που χρησιμοποιούν υπηρεσίες σε πραγματικό χρόνο ή έχουν πιο ακριβές συνδρομές έχουν μεγαλύτερη προτεραιότητα. Μπορούν επίσης να συμπεριληφθούν περιορισμοί ελάχιστων τιμών.

- Έλεγχος ισχύος με επιλογή AP: Λόγω της μείωσης της πυκνότητας των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (path loss), τα AP που βρίσκονται μακριά από ένα συγκεκριμένο UE δεν θα συμβάλουν σε μεγάλο βαθμό στην απόδοσή του. Η επιλογή AP υλοποιείται με τον καθορισμό συντελεστών ελέγχου μη μηδενικής ισχύος στα AP που έχουν σχεδιαστεί για να εξυπηρετούν αυτά τα UE.

Ο βέλτιστος έλεγχος ισχύος πραγματοποιείται στη CPU. Οι κεντρικές στρατηγικές ελέγχου ισχύος ενδέχεται να θέσουν σε κίνδυνο την επεκτασιμότητα και την καθυστέρηση του συστήματος καθώς ο αριθμός των AP και UE αυξάνεται σημαντικά. Απλούστερες, επεκτάσιμες και κατανεμημένες πολιτικές ελέγχου ισχύος, που παρέχουν ωστόσο μειωμένη απόδοση. Για την επίτευξη άρτιας απόδοσης δικτύου, η πιλοτική ανάπτυξη και ο έλεγχος ισχύος χρειάζεται να εκτελεστούν από κοινού.

2.4 Πλεονεκτήματα

Σε σύγκριση με τα παραδοσιακά κυψελωτά δίκτυα massive MIMO, τα συστήματα CF massive MIMO έχουν πολλά πλεονεκτήματα όπως η ισχυρή μακρο-ποικιλομορφία τους και οι δυνατότητες καταστολής παρεμβολών πολλαπλών χρηστών. Δεδομένου ότι υπάρχει μεγάλη πιθανότητα ότι κάθε UE περιβάλλεται από μεγάλο αριθμό AP που το εξυπηρετούν, όλα τα UE μπορεί να έχουν καλές συνθήκες καναλιού. Κάποια ακόμα βασικά πλεονεκτήματα θα αναλυθούν στην συνέχεια.[20]

- 1) Μεγάλη ενεργειακή απόδοση (EE): Η επίδραση της κατανάλωσης ενέργειας του fronthaul στην EE είναι σημαντική, ειδικά για την περίπτωση ύπαρξης μεγάλου αριθμού κεραιών, καθώς η αύξηση του αριθμού των κεραιών οδηγεί σε αύξηση της κατανάλωσης ισχύος στο fronthaul. Επιπλέον, η EE πρώτα αυξάνεται και στη συνέχεια μειώνεται ανάλογα με τον αριθμό των κεραιών στα AP. Ωστόσο, μπορούν να επιλέγουν μόνο μερικά από τα πλησιέστερα AP για να εξυπηρετήσουν κάθε UE αντί για όλα τα AP. Από την άλλη πλευρά, οι

βέλτιστοι αλγόριθμοι ελέγχου ισχύος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την περαιτέρω βελτίωση του ΕΕ. Είναι γεγονός ότι μπορεί να επιτευχθεί περισσότερη από δεκαπλάσια βελτίωση ΕΕ με εξελιγμένα σχήματα επιλογής AP σε σχέση με ένα συγκεντρωτικό massive MIMO σύστημα.

- 2) Ευέλικτη και αποτελεσματική ανάπτυξη της αρχιτεκτονικής: Τα CF APs έχουν μικρό αριθμό κεραιών, επομένως μπορούν να φιλοξενηθούν σε περιβάλλοντα περιορισμένου χώρου, όπως γραφεία, ή να είναι τοποθετημένα σε κολώνες φωτισμού δρόμων και φανάρια. Δεδομένης της βελτίωσης της ΕΕ σε σχέση με την ΕΕ στα συγκεντρωτικά συστήματα massive MIMO, είναι λογικό ότι το συνολικό κόστος ανάπτυξης και λειτουργίας της αρχιτεκτονικής CF massive MIMO είναι χαμηλό. Ως εκ τούτου, το CF massive MIMO παρέχει μια οικονομικά αποδοτικότερη λύση για δίκτυα επόμενης γενιάς.
- 3) Ρυθμός μετάδοσης: Ομοίως με το massive MIMO πολλαπλών κυψελών (multi-cell), η βασική ιδέα του CF massive MIMO είναι η χρησιμοποίηση εκατοντάδων ή και χιλιάδων κεραιών. Έχοντας πολύ περισσότερες κεραιές αντί χρήστες ανά περιοχή, οι βασικές ιδιότητες του massive MIMO μπορούν να αξιοποιηθούν ευεργετικά για επεκτάσιμες εφαρμογές. Ωστόσο, οι κατανομημένες κεραιές του CF massive MIMO ενδέχεται να εξακολουθούν να επιβάλλουν κάποια χωρική συσχέτιση μεταξύ των σημάτων που λαμβάνονται από τις κεραιές εκπομπής συγκεκριμένων APs σε διαφορετικές κοντινές περιοχές προς έναν συγκεκριμένο δέκτη UE.

Ως εκ τούτου, θα πρέπει να αυξηθεί η πυκνότητα των κεραιών και να μειωθεί ο εκθέτης της χαμένης πληροφορίας (pathloss) με τη βοήθεια κυρίως της γραμμής ορατότητας μεταξύ πομπού και δέκτη (Line of Sight-LoS). Προκειμένου να καταγράφονται με ακρίβεια οι αλλαγές δικτύου, το μοντέλο απώλειας διαδρομής πολλαπλών τμημάτων μπορεί να είναι πιο κατάλληλο για συστήματα CF massive MIMO, όπου η απώλεια διαδρομής περιλαμβάνει και τις μεταδόσεις LoS και NLoS. Αυτό δυνητικά οδηγεί στην ενδυνάμωση των καναλιών (channel hardening) και την ευνοϊκή διάδοση πληροφορίας στα συστήματα που λαμβάνονται υπόψη.

- 4) Ποιότητα εξυπηρέτησης (Quality Of Service-QoS): Στο CF massive MIMO, η μέση απόσταση μεταξύ των πλησιέστερων κεραιών και ενός UE μειώνεται ουσιαστικά με την χρησιμοποίηση ενός μεγάλου αριθμού κατανομημένων κεραιών, σε σύγκριση με ένα σύστημα μικρών κυψελών, όπου ένας χρήστης εξυπηρετείται από τη μοναδική πλησιέστερη κεραία. Άρα συμπεραίνεται ότι το QoS στα CF massive MIMO συστήματα είναι πολύ καλύτερο.

2.5 Μειονεκτήματα

Ωστόσο, η τεχνολογία CF massive MIMO παρουσιάζει και μειονεκτήματα. Το βασικό της μειονέκτημα είναι η ανάγκη για ζεύξεις χαμηλής καθυστέρησης και υψηλής χωρητικότητας σε όλα τα AP. Αυτές οι ζεύξεις χρειάζονται, για να διασφαλιστεί ένας συγχρονισμός χαμηλού λανθάνοντος χρόνου και συχνότητας μεταξύ όλων των AP καθώς και για τη μεταφορά των δεδομένων UE από και προς το κεντρικό δίκτυο.

αρά το γεγονός ότι η τεχνολογία CF παρουσιάζει πολλαπλά πλεονεκτήματα, υπάρχουν ακόμα αρκετές προκλήσεις για την επιτυχή υλοποίησή της σε πρακτικά συστήματα επικοινωνιών. Η επιλογή των καταλληλότερων τεχνικών επεξεργασίας σήματος είναι υψίστης σημασίας στα συστήματα CF massive MIMO, τα οποία διαφέρουν από αυτά των κεντρικών συστημάτων massive MIMO όσον αφορά τις ρυθμίσεις διαμόρφωσης κεραίας, τα διαφορετικά μοντέλα εξασθένισης καναλιών και τους πρακτικούς περιορισμούς που επιβάλλονται στο δίκτυο fronthaul. Η ακριβής εκτίμηση καναλιού είναι σημαντική για την υποστήριξη της αποτελεσματικής κωδικοποίησης και ανίχνευσης σήματος, προκειμένου να μειωθεί η παρεμβολή μεταξύ των χρηστών. Στην ανοδική κατεύθυνση δικτύου (UL ή uplink), τα UE στέλνουν σήματα σε όλες τις καταναμημένες κεραίες των AP για την εκτίμηση των καναλιών με βάση. Δύο προσεγγίσεις για τη μείωση απαιτήσεων του backhaul και του σχετικού κόστους CAPEX / OPEX είναι: [23]

1) η μερικώς καταναμημένη ανάπτυξη των AP,

2) περιορισμός της συσχέτισης AP-UE.

Στην πρώτη, τα AP δεν διανέμονται σε όλη την περιοχή του δικτύου αλλά μόνο σε συγκεκριμένες περιοχές, για παράδειγμα, σε έναν κύκλο γύρω από τις υπάρχουσες κυψέλες. Ορθογώνιες πιλοτικές ακολουθίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο δίκτυο για να αποφευχθεί το φαινόμενο παρεμβολής του σήματος. Τέλος είναι γνωστό ότι τα συστήματα CF massive MIMO δεν ανταλλάσσουν το CSI μεταξύ των AP στο uplink, ενώ έχει αποδειχθεί ότι η χρήση πιλοτικών downlink αλγορίθμων αυξάνει τη φασματική τους απόδοση.[23]

Παράλληλα, υπάρχουν ακόμα πολλές μελέτες που χρειάζεται να γίνουν για την αντιμετώπιση κάποιων σημαντικών ζητημάτων και προκλήσεων στα συστήματα CF massive MIMO. Ένα από αυτά είναι η χρησιμοποίηση του φάσματος των χιλιοστομέτρων (mmWave) το οποίο εκτείνεται από 10 GHz μέχρι 300 GHz. Η σύνδεση μεταξύ συστημάτων CF massive MIMO και mmWave είναι απλή, καθώς και οι δύο τεχνικές είναι εξαιρετικά κατάλληλες για επικοινωνίες μικρής εμβέλειας σε εσωτερικούς χώρους. Πιο συγκεκριμένα, σε συστήματα CF massive MIMO, η απόσταση μεταξύ των AP και UE μειώνεται σημαντικά για τον μετριασμό της απώλειας διαδρομής, ενώ ταυτόχρονα παρέχει κέρδη ποικιλομορφίας μακροχρόνιας μείωσης των επιβλαβών φαινομένων εξασθένισης, τα οποία αποτελούν το κύριο εμπόδιο στις συχνότητες mmWave. Συνήθως εγκαθίσταται ένας μεγάλος αριθμός AP με συστοιχία κεραίων μικρής διάστασης για χρήση mmWave με χαμηλή πολυπλοκότητα υλικού (hardware) και λογισμικού (software). Η ακρίβεια εκτίμησης και απόκρισης καναλιού (CIR) μπορεί επίσης να βελτιωθεί με τη γενικευμένη προσέγγιση τεχνικής μετάδοσης μηνυμάτων, υπό την προϋπόθεση ότι η κατανομή του καναλιού mmWave γίνεται με τον αλγόριθμο a-priori. Το υψηλό εύρος ζώνης των CF massive MIMO συστημάτων είναι ικανό να υποστηρίξει ένα υψηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, αλλά απαιτεί επίσης έναν υψηλό ρυθμό μετάδοσης στο backhaul. Μια ιδιαίτερα ελκυστική λύση είναι η χρήση ασύρματων ζεύξεων σε συχνότητες mmWave αντί καλωδίων οπτικών ινών στο fronthaul, γεγονός που μπορεί να μειώσει το λειτουργικό κόστος. [24]

Παράλληλα η έννοια της μη ορθογώνιας πολλαπλής πρόσβασης (Non Orthogonal Multiple Access-NOMA) έχει προταθεί πρόσφατα ως μια ευεργετική τεχνική πολλαπλής πρόσβασης για την αύξηση της SE, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί σε συστήματα CF. Η τεχνική NOMA είναι ικανή να αναγνωρίζει και να εκμεταλλεύεται τη λαμβανόμενη διαφορά ισχύος δύο ή περισσότερων UE για την υποστήριξη τους εντός του ίδιου χρονικού διαστήματος και συχνότητας με τη βοήθεια της διαδοχικής ακύρωσης παρεμβολών στα UE.[21]

3 Μελέτη της βιβλιογραφίας δικτύων cell-free

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται διάφορα άρθρα με θέμα τα συστήματα cell-free massive MIMO έτσι ώστε να παρέχουμε μία σφαιρική και εμπειριστατωμένη άποψη γύρω από τις διαφορετικές τεχνολογίες και αρχιτεκτονικές τους.

3.1 Αρθρογραφία

Στην εργασία [25] μελετάται ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα βασιζόμενο στην τεχνολογία cell-free mm Wave massive MIMO. Η αρχιτεκτονική του δικτύου βασίζεται στη διασύνδεση ενός CPU με πολλά σημεία πρόσβασης (Access Points-APs), όπου κάθε AP παρέχει συνδεσιμότητα στους τελικούς χρήστες (User Equipment-UE). Το τμήμα του δικτύου ανάμεσα στο CPU και τα APs (fronthaul) θεωρείται ότι έχει πεπερασμένη χωρητικότητα, ενώ η προτεινόμενη μελέτη θεωρεί ότι δεν λαμβάνεται υπόψη η παρουσία λαθών στο fronthaul (error-free fronthaul), στοχεύοντας στη μελέτη τόσο της καθοδικής (downlink), όσο και ανοδικής (uplink) κατεύθυνσης του δικτύου. Ο στόχος της προτεινόμενης μελέτης είναι η μεγιστοποίηση της ελάχιστης ταχύτητας μετάδοσης, η οποία αντιστοιχεί στην μεγιστοποίηση του λόγου σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή (Signal to Interference plus Noise Ratio-SINR), δίνοντας έμφαση στην ταχύτητα μετάδοσης ανά χρήστη (per user rate). Παράλληλα, παρουσιάζεται μία υβριδική υλοποίηση της τεχνολογίας beamforming, έχοντας στόχο την μειωμένη πολυπλοκότητα. Στη συνέχεια, προτείνεται μία υπο-βέλτιστη (suboptimal) τεχνική κατανομής πόρων ισχύος, βασισμένη στην ομαδοποίηση των APs. Τα αποτελέσματα της μελέτης δείχνουν ότι καθώς μειώνεται η χωρητικότητα του fronthaul, η βελτίωση της απόδοσης λόγω της αύξησης των κεραιών και/ή του αριθμού των RF chains επηρεάζεται αρνητικά λόγω της αντίστοιχης αύξησης του θορύβου κβαντοποίησης στο fronthaul. Στόχος της μελλοντικής ερευνητικής δραστηριότητας των συγγραφέων αποτελεί και η μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης (energy efficiency) ενός τέτοιου δικτύου.

Στην εργασία [26] μελετάται ένα πρόβλημα καταμερισμού πόρων στα συστήματα cell-free mmWave massive MIMO συστήματα κατερχόμενης ζεύξης, που διαθέτουν 1 CPU, όπου κάθε σημείο πρόσβασης (AP) εξυπηρετεί μια συστάδα από τελικούς χρήστες (UEs) μέσω συνδέσεων με το μητροπολιτικό δίκτυο οι οποίες χαρακτηρίζονται από τις ζεύξεις απεριόριστης χωρητικότητας και μηδενικών λαθών. Λαμβάνεται υπόψη ότι τα APs και UEs κατανέμονται τυχαία στην περιοχή μελέτης και ότι οι τυχαίες μεταβλητές μείωσης της σκίασης συσχετίζονται αφού σε ένα πρακτικό σενάριο τα AP και UE μπορεί να βρίσκονται κοντά, με αποτέλεσμα να έχουν κοινά εμπόδια. Θεωρείται ότι τα πιο ισχυρά AP δεν είναι απαραίτητα όσο τα πιο κοντινά στα UE λόγω του φαινομένου της σκίασης. Αυτό λύνεται με τη βοήθεια ενός αλγόριθμου χρησιμοποιώντας την κατερχόμενη και ανερχόμενη δυαδικότητα (uplink και downlink duality), με αποτέλεσμα την μεγιστοποίηση του ελάχιστου ρυθμού μετάδοσης που

μπορεί να επιτευχθεί μεταξύ των UEs του δικτύου. Επιπρόσθετα σαν υπόθεση του συστήματος, επισημαίνεται η χρησιμοποίηση ενός μοντέλου ομαδικής διάλειψης (block fading), όπου κανάλια μικρής κλίμακας είναι σταθερά σε ορισμένες χρονοθυρίδες, χωρίς να διαταράσσονται οι διαδικασίες εκτίμησης καναλιού και οι πληροφορίες κατάστασής του. Τέλος, θεωρείται η λειτουργία αμφίδρομης κατανομής χρόνου (time division duplexing-TDD), όπου κατά την διάρκεια της ανερχόμενης εκμάθησης (uplink training) οι χρήστες στέλνουν ταυτόχρονα πιλοτικές ακολουθίες (pilot sequences) στα AP. Κάθε AP μεταδίδει το κανάλι σε όλους τους χρήστες ανάλογα με τα λαμβανόμενα πιλοτικά σήματα. Ο στόχος της προτεινόμενης μελέτης είναι η ανάλυση της επίδοσης των cell free massive MIMO υπο-δικτύων καθώς και ο καθορισμός του κάτω ορίου της χωρητικότητάς τους, με την χρήση κάποιων προτεινόμενων beamformers (μέγιστων και ελάχιστων) έχοντας παράλληλα υπόψη την λανθάνουσα εκτίμηση καναλιού. Με κάποιες προσομοιώσεις, με τη χρήση ενός μοντέλου απωλειών διαδρομής τριών κλίσεων (three-slope path-loss) καθώς και ενός μη συσχετισμένου μοντέλου σκίασης αποδεικνύεται ότι αυτός ο τρόπος είναι αρκετά πιο αποτελεσματικός με τις παραδοσιακές τεχνικές conjugate beamforming και zero forcing.

Στην εργασία [27] παρουσιάζεται ένα ρεαλιστικό γενικό πλαίσιο που επιτρέπει την ορθή σύγκριση μεταξύ διαφορετικών λειτουργιών CPU-AP τόσο στην ανοδική (uplink) όσο και στην καθοδική κατεύθυνση δικτύου (downlink), ενός δικτύου cell-free massive MIMO ενός CPU με περιορισμένη χωρητικότητα στο fronthaul, στο οποίο χρησιμοποιούνται μετατροπείς αλλαγής του σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό (ADCs), χαμηλής ανάλυσης (low resolution). Θεωρείται ότι το ασύρματο αυτό σύστημα αποτελείται από διάφορα κατανομημένα AP που εξυπηρετούν τα UE με την ίδια χρονική συχνότητα. Τα APs και UEs συνδέονται με τη CPU μέσω συνδέσεων fronthaul με δυνατότητες uplink και downlink που συγχρονίζονται με το μοντέλο TDD, όπου κάθε διάστημα συνοχής χωρίζεται σε τρεις φάσεις, τη φάση εκπαίδευσης του uplink, την φάση μετάδοσης δεδομένων downlink και τη φάση μετάδοσης δεδομένων uplink. Στη φάση εκπαίδευσης του uplink, όλα τα UEs μεταδίδουν πιλοτικά σήματα uplink, επιτρέποντας την εκτίμηση της διάδοσης των καναλιών για κάθε UE στο δίκτυο. Στη συνέχεια, αυτές οι εκτιμήσεις καναλιών χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση των σημάτων που μεταδίδονται από τα UEs στη φάση μετάδοσης δεδομένων uplink και για τον υπολογισμό των φίλτρων κωδικοποίησης (precoding filters) που διέπουν τη μετάδοση δεδομένων downlink. Το μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιείται οδηγεί σε κάποιες εκφράσεις κλειστού τύπου της επιτευκτής απόδοσης (achievable rate), τόσο για ένα προσαρμοσμένα φιλτραρισμένο (matched filtering-MF) uplink όσο και για ένα κανονικοποιημένα συζυγές beamforming (normalized conjugate beamforming-NCB) downlink. Το προσθετικό μοντέλο θορύβου κβαντισμού (additive quantization noise model-AQNM) χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό της κατανάλωσης εύρους ζώνης για τις διαφορετικές λειτουργίες μεταξύ CPU-AP, επιτρέποντας έτσι μια ολοκληρωμένη σύγκριση μεταξύ τους. Χρησιμοποιώντας τα μαθηματικά μοντέλα για τις επιτευκτές αποδόσεις και την κατανάλωση εύρους ζώνης του fronthaul, στρατηγικές μεγιστοποίησης και ελαχιστοποίησης, ανά χρήστη, καταμερισμού ενέργειας και κβαντοποίησης του fronthaul σχεδιάζονται, οι οποίες παρέχουν ακριβείς λύσεις με την χρήση αλγορίθμων κυρτής βελτιστοποίησης. Τα συγκεκριμένα μοντέλα χωρίζονται σε 2 κατηγορίες, σε

αυτά όπου η ζώνη βάσης (base band) επεξεργάζεται στη CPU (BCU) και σε αυτά που επεξεργάζεται στα AP (BAP). Τα αποτελέσματα της μελέτης δείχνουν ότι η υποβέλτιστη πιλοτική τεχνική που βασίζεται στην ομαδοποίηση με βάση την διαφορετικότητα που προτείνεται είναι πιο αποτελεσματική από την κλασική μέθοδο. Επισημαίνεται επίσης ότι στόχος των επομένων ερευνών θα χρειαστεί να είναι ο αντίκτυπος που μπορεί να έχουν στην ενεργειακή απόδοση οι περιορισμοί χωρητικότητας fronthaul των cell-free massive MIMO δικτύων, χρησιμοποιώντας χαμηλής ανάλυσης ADCs λαμβάνοντας υπόψη την κατανάλωση ισχύος όλων των μονάδων επεξεργασίας σήματος στο σύστημα, και τη πιθανή χρήση πολλαπλών κεραιών AP. Τέλος σαν στόχο μελλοντικών ερευνών επισημαίνονται η διερεύνηση του σχεδιασμού βέλτιστων στρατηγικών κατανομής πόρων μεταξύ uplink και downlink και η ανάλυση του αντίκτυπου που μπορεί να έχει η χρήση ακριβέστερων μοντέλων θορύβου κβαντοποίησης στην απόδοση των cell-free massive MIMO δικτύων χρησιμοποιώντας χαμηλής ανάλυσης ADCs.

Στην εργασία [28] μελετάται η ανερχόμενη ζεύξη (uplink) και η βελτιστοποίηση της απόδοσης στα CF massive mimo συστήματα περιορισμένης χωρητικότητας fronthaul όπου πολλά σημεία πρόσβασης (APs) συνδέονται με ένα κεντρικό επεξεργαστή (CPU). Θεωρείται ότι το μεταδιδόμενο και λαμβανόμενο σήμα παραμορφώνεται μέσω ενός θορύβου Gaussian ενώ όλα τα AP είναι πανομοιότυπα. Οι εφικτοί ρυθμοί δεδομένων απορρέουν από τρεις στρατηγικές μετάδοσης χρησιμοποιώντας τεχνικές use-and-then-forget και συνδυασμού μέγιστων λόγων (maximum-ratio combining-MRC). Αυτές οι στρατηγικές είναι οι, compress-forward-estimate (CFE), estimate-compress-forward (ECF), και estimate-multiply-compress-forward (EMCF), οι οποίες μοιράζονται βέλτιστα την χωρητικότητα του fronthaul για την αποστολή πληροφοριών κατάστασης του καναλιού (CSI) ή/και σήματα δεδομένων των χρηστών στη CPU. Για να μοιραστεί αποτελεσματικά η χωρητικότητα fronthaul για τη μετάδοση του CSI και των σημάτων δεδομένων από το AP στην CPU, με βάση τις απαιτήσεις απόδοσης fronthaul που λαμβάνονται με τη χρήση της θεωρίας παραμόρφωσης απόδοσης (rate-distortion), προτείνονται κατανομές απόδοσης χαμηλής πολυπλοκότητας. Για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης των στρατηγικών CFE και ECF που υπόκεινται σε περιορισμούς μέγιστης ισχύος ανά χρήστη και χωρητικότητας, παρουσιάζονται δύο κατανομές ισχύος για την παράκαμψη του προβλήματος. Η μια είναι μια κατά προσέγγιση λύση που βασίζεται στον γεωμετρικό προγραμματισμό και η άλλη είναι ένας γενικός επαναληπτικός αλγόριθμος. Η απόδοση του υπό εξέταση συστήματος συγκρίνεται για τρεις στρατηγικές μετάδοσης από διαφορετικές οπτικές γωνίες (φασματική / ενεργειακή απόδοση, επιπτώσεις της πιλοτικής επαναχρησιμοποίησης και AP πολλαπλών κεραιών) μέσω εκτεταμένων αριθμητικών αποτελεσμάτων. Μέσα από ανάλυση βελτιστοποίησης (optimization) αποδεικνύεται ότι η στρατηγική μετάδοσης, η ισχύς επεξεργασίας του AP δηλαδή, επηρεάζει άμεσα το κέρδος απόδοσης.

Στην εργασία [29] μελετάται μια ασύρματη αρχιτεκτονική CF massive mimo συστήματος που υποστηρίζει οποιοδήποτε πλαίσιο federated μάθησης (federated learning-FL), όπου πολλά Aps συνδέονται με μια CPU μέσω backhaul ζεύξεων. Σε αυτό το σύστημα, μπορεί να αναπτυχθεί οποιοσδήποτε επαναληπτικός αλγόριθμος για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης FL πριν από την εκτέλεση της διαδικασίας FL, καθένas από τους οποίους συμβαίνει μέσα σε έναν χρόνο συνοχής μεγάλης κλίμακας

προκειμένου να διασφαλιστεί η σταθερότητα του καναλιού κατά τη λειτουργία του. Σε κάθε επανάληψη της διαδικασίας FL, προτείνεται η χρήση των AP για τη μετάδοση των ενημερώσεων εκπαίδευσης (training updates) μεταξύ της CPU και των UE. Με αυτόν τον τρόπο, επιτρέπεται η εφαρμογή σχεδίασης δέσμης / φιλτραρίσματος στα AP για να βελτιωθεί η απόδοση της μετάδοσης ενημέρωσης εκπαίδευσης. Για την βελτιστοποίηση της απόδοσης FL χρησιμοποιείται ένα στοχαστικό πρόβλημα μικτού χρονικού διαστήματος που ελαχιστοποιεί το χρόνο μιας διαδικασίας FL, το οποίο συλλαμβάνει τις πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις μεταξύ του χρόνου εκπαίδευσης FL της μετάδοσης και του υπολογισμού των ενημερώσεων εκπαίδευσης FL σε ένα δίκτυο CFmMIMO. Παράλληλα εφαρμόζεται ένα σχήμα φιλτραρίσματος συζευγμένης δέσμης / αντιστοίχισης στα AP για ευκολία εφαρμογής, ενώ η τοπική ακρίβεια, ο έλεγχος ισχύος, ο ρυθμός δεδομένων και η συχνότητα επεξεργασίας του UE έχουν σχεδιαστεί από κοινού, λαμβάνοντας υπόψη πρακτικούς περιορισμούς στην κατανάλωση ενέργειας των UE και στην ατελή εκτίμηση καναλιών. Έπειτα χρησιμοποιώντας τη διαδικτυακή διαδοχική προσέγγιση κυρτής προσέγγισης (online successive convex approximation approach), αναπτύσσεται ένας νέος αλγόριθμος για την επίλυση του διατυπωμένου προβλήματος με αποδεδειγμένη σύγκλιση στα γειτονικά στατικά σημεία. Τα αριθμητικά αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι ο συνδυασμός σχεδίασης μειώνει το χρόνο εκπαίδευσης έως και 55% σε σχέση με τις βασικές προσεγγίσεις. Δείχνουν επίσης ότι το CFmMIMO εδώ απαιτεί λιγότερο χρόνο εκπαίδευσης για τις διαδικασίες FL σε σύγκριση με το CFmMIMO διαίρεσης χρόνου πολλαπλής πρόσβασης και το συνεγκατεστημένο (collocated) CFmMIMO.

Στην εργασία [30] μελετάται ο κοινός έλεγχος ισχύος και ο προγραμματισμός σε uplink massive multiple-input-multiple-output (MIMO) συστήματα με τυχαία άφιξη κυκλοφορίας δεδομένων. Λαμβάνεται υπόψη τόσο το συσσωρευμένο (co-located) όσο και το Cell-Free (CF) Massive MIMO, όπου η διαφορά έγκειται στο εάν οι κεραιές βρίσκονται στο σταθμό βάσης ή σε μια ευρεία περιοχή δικτύου ενώ και τα 2 συστήματα διαθέτουν μόνο 1 CPU. Θεωρείται επίσης ότι ο χρόνος μετάδοσης των δεδομένων φυσικού επιπέδου (physical layer-PHY) χωρίζεται σε θυρίδες (slots) σταθερού μεγέθους, όπου κάθε slot περιέχει το χρόνο μετάδοσης ενός ή πολλαπλών πλαισίων φυσικού επιπέδου. Σε κάθε χρονοθυρίδα, πακέτα δεδομένων uplink δημιουργούνται από το χρήστη σύμφωνα με μια στατική και εργοδοτική στοχαστική διαδικασία. Τα παραγόμενα δεδομένα αποθηκεύονται στον αποθηκευτικό χώρο επιπέδου μεταφοράς, ο οποίος θεωρείται ότι έχει άπειρο μέγεθος. Τέλος θεωρείται ότι κάθε χρήστης διατηρεί μια ουρά μετάδοσης (transmission queue) στο επίπεδο σύνδεσης δεδομένων, το οποίο περιέχει τα δεδομένα που είναι έτοιμα να μεταδοθούν μέσω του ασύρματου καναλιού στους σταθμούς βάσης (base station-BS). Χρησιμοποιώντας τις τεχνικές βελτιστοποίησης Lyapunov, αναπτύσσεται ένας δυναμικός αλγόριθμος προγραμματισμού (Directory System Agent -DSA), ο οποίος αποφασίζει σε κάθε χρονική στιγμή τον αριθμό των δεδομένων που θα εισέρχονται στις ουρές μετάδοσης και τους ρυθμούς μετάδοσης μέσω του ασύρματου καναλιού. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος βελτιστοποιεί τη μακροπρόθεσμη απόδοση χρήστη, διατηρώντας παράλληλα τις ουρές μετάδοσης σταθερές. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι τα σύγχρονα (state-of-the-art) σχήματα ελέγχου ισχύος που αναπτύχθηκαν για το Massive MIMO με απεριόριστα (infinite) backlogs μπορεί να αποτύχουν να σταθεροποιήσουν το σύστημα ακόμη και όταν οι ρυθμοί άφιξης δεδομένων βρίσκονται

εντός της περιοχής χωρητικότητας δικτύου. Ο προτεινόμενος DSA παρέχει πλεονεκτήματα στην παροχή πεπερασμένης καθυστέρησης με βελτιστοποίηση απόδοσης, όποτε το δίκτυο μπορεί να σταθεροποιηθεί. Επίσης η συγκεκριμένη μελέτη, προσθέτει νέο περιεχόμενο σχετικά με τον δυναμικό έλεγχο και τη βελτιστοποίηση στο CF Massive MIMO, όπου το πρόβλημα του μέγιστου σταθμισμένου ποσοστού επιλύεται χρησιμοποιώντας το σταθμισμένο μέθοδος ελάχιστου μέσου τετραγώνου (Minimum Mean Squared Error-MMSE). Έπειτα αναλύεται η απόδοση του αλγορίθμου συνδυασμού μέγιστου λόγου (maximum-ratio combining MRC) κατά τη χρήση μηδενικής ώθησης (zero-forcing).

Στην εργασία [31] παρουσιάζεται μια cell-free IoT (internet of things) αρχιτεκτονική που επιτρέπει ένα μεγάλης κλίμακας συνδεδεμένο δίκτυο των πραγμάτων και τη μαζική και ποιοτική μετάδοση δεδομένων μεταξύ των κόμβων του συστήματος με στόχο την βελτιστοποίηση της κατανομής ενεργειακά αποδοτικών πόρων. Η αρχιτεκτονική αυτή αποτελείται από τυχαία κατανεμημένα APs και UEs, στην περιοχή μελέτης, όπου τα πρώτα συνδέονται με μια CPU και αυτή με τη σειρά της με ένα σύστημα βασισμένο στην τεχνολογία cloud. Τα UEs μπορεί να έχουν περισσότερες από 1 κεραίες και τα APs εξυπηρετούν τις συσκευές IoT μέσω του αλγορίθμου διαίρεσης χρόνου (TDD). Οι σταθμοί βάσης έχουν αρκετή χωρητικότητα για την μετάδοση και λήψη σημάτων ενώ ο θόρυβος του περιβάλλοντος θεωρείται ότι ακολουθά ένα πολύπλοκο μοντέλο Gaussian για διάφορες μεταβλητές. Τέλος στο σύστημα που μελετάται τα APs δεν μπορούν να μοιραστούν CSI. Έπειτα αναλύεται το πρόβλημα κατανομής πόρων και δημιουργείται ένα μοντέλο βελτιστοποίησης ενεργειακής απόδοσης που βασίζεται στον έλεγχο ισχύος για cellfree IoT. Στη συνέχεια, υπογραμμίζεται ότι χρησιμοποιούνται μέθοδοι μηχανικής μάθησης για την επίλυση του προβλήματος, η μέθοδος είναι μια μίξη της μεθόδου AdaBoost και της μεθόδου βελτιστοποίησης neighborhood field optimization. Για τη μελέτη της απόδοσης του παρουσιαζόμενου cell free IoT εκτελούνται εκτεταμένες προσομοιώσεις, ενώ η ενεργειακή απόδοση βελτιώνεται από τον προτεινόμενο αλγόριθμο σε σύγκριση. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, μέσω του αλγόριθμου ABNFO, δείχνουν ότι το cell-free IoT μπορεί να επιτύχει καλύτερη αξιοπιστία και βιωσιμότητα. Τέλος αναφέρονται μελλοντικές προκλήσεις που χρειάζεται να μελετηθούν, όπως η βελτιστοποίηση φασματικής απόδοσης των cell-free IoT υπό τον περιορισμό ενός κατώτερου ορίου της ενεργειακής απόδοσης.

Στις εργασίες [32] και [33] μελετάται μια αρχιτεκτονική Cell-free Massive MIMO, όπου τα τυχαία κατανεμημένα APs συνδέονται με τη CPU με απεριόριστες ζεύξεις fronthaul, που έχει ως στόχο, την ελαχιστοποίηση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας, βελτιστοποιώντας από κοινού την ένταση μετάδοσης κατερχόμενης ζεύξης (downlink) και τον αριθμό των ενεργών AP, ενώ ικανοποιεί τις φασματικές αποδόσεις που ζητούν όλοι οι χρήστες. Για την επίτευξη αυτού του στόχου προτείνεται ένα κωνικό πρόγραμμα μικτού ακέραιου δεύτερης τάξης (mixed-integer second order cone -SOC), ωστόσο λόγω του ότι οι αλγόριθμοι που επιλύουν προγράμματα SOC είναι πολύ περίπλοκοι για εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο, αναπτύσσονται δύο ευρετικοί αλγόριθμοι χαμηλής πολυπλοκότητας εκμεταλλευόμενοι τη δομή του προβλήματος βελτιστοποίησης. Ο πρώτος αλγόριθμος χρησιμοποιεί τόσο τη βελτιστοποιημένη ισχύ μετάδοσης όσο και την αραιότητα, ενώ ο δεύτερος αλγόριθμος χρησιμοποιεί μόνο

βελτιστοποιημένες εντάσεις μετάδοσης για να προσδιορίσει ποια AP θα απενεργοποιηθούν. Στην αρχιτεκτονική που μελετάται θεωρείται ότι τα AP μπορούν να διαθέτουν πολλαπλές κεραιές ενώ τα UE μόνο μια, ενώ κάθε χρήστης έχει μια συγκεκριμένη τιμή φασματικής απόδοσης που χρειάζεται να καλυφθεί. Κάθε χρήστης, επίσης, λαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος του downlink σήματος από τα πιο κοντινά AP και ένα πολύ μικρό από τα πιο μακρινά. Χρησιμοποιείται επίσης το μοντέλο block fading και το TDD πρωτόκολλο για τη μείωση της γρήγορης εξασθένησης των τηλεπικοινωνιακών καναλιών. Τέλος, θεωρείται ότι η απόκριση καναλιού μεταξύ AP και UE ακολουθά το μοντέλο εξασθένησης Rayleigh, ενώ κατά τη φάση εκπαίδευσης του πιλοτικού uplink χρησιμοποιείται μια αυθαίρετη ανάπτυξη. Τα αριθμητικά αποτελέσματα, μέσα από προσομοιώσεις, με τη χρήση του αλγορίθμου εξασθένησης μεγάλης κλίμακας (large-scale fading), δείχνουν ότι υπάρχουν σενάρια όπου απαιτείται μόνο ένα υποσύνολο των AP για να ικανοποιηθούν οι φασματικές απαιτήσεις για όλους τους χρήστες και μπορούν να επιτευχθούν μεγάλες μειώσεις ισχύος απενεργοποιώντας τα υπόλοιπα AP. Επιπλέον, οι αλγόριθμοι χαμηλής πολυπλοκότητας δίνουν συνολική κατανάλωση ισχύος κοντά στο ελάχιστο.

Στην εργασία [34] προτείνεται ένα βαθύ νευρωνικό δίκτυο (Deep Neural Network-DNN) για την εκτέλεση της κατανομής ισχύος σε ένα Cell-free Massive MIMO σύστημα, όπου πολλά Aps, πολλαπλών κεραιών, συνδέονται με μια CPU με ζεύξεις αμελητέας χωρητικότητας fronthaul. Θεωρείται ότι η άρτια κατανομή ισχύος δημιουργείται με τη χρησιμοποίηση ενός αλγορίθμου βελτιστοποίησης (optimization) μεγίστου και ελαχίστου. Τα UE έχουν μόνο μια κεραία, ενώ λαμβάνεται υπόψη το μοντέλο εξασθένησης Rayleigh. Το DNN που προτείνεται είναι ο συνδυασμός δύο συνελκτικών επιπέδων και τεσσάρων πλήρως συνδεδεμένων επιπέδων. Παίρνει ως εισαγωγή τις μακροπρόθεσμες πληροφορίες εξασθένησης και εξάγει την ισχύ για κάθε στοιχείο κεραίας σε κάθε χρήστη. Η περίπτωση που μελετάται είναι αυτή των δικτύων υπο-6GHz που βασίζονται σε κατανομή διαίρεσης χρόνου (TDD). Έπειτα εξετάζεται η πολιτική μέγιστης και ελάχιστης ισχύος, η οποία παρέχει δίκαιη ποιότητα υπηρεσιών για όλους τους χρήστες και υπογραμμίζεται η σημασία της μεγιστοποίησης του ελάχιστου καταμερισμού πόρων στον κάθε χρήστη. Στη συνέχεια, αποδεικνύεται, μέσω προσομοιώσεων, ότι το προαναφερθέν ζήτημα, αν και απαιτείται ένας χρονοβόρος ευρετικός αλγόριθμος για την κάλυψη των χρονικών περιορισμών που επιβάλλονται από τον χρόνο συνοχής, μπορεί να επιλυθεί καλύτερα από ένα καλά εκπαιδευμένο DNN. Η προσέγγιση DNN έχει χαμηλή χρονική πολυπλοκότητα ενώ εμφανίζει μια απόδοση πολύ κοντά στην ευρέως χρησιμοποιούμενη ευρετική με βάση τον αλγόριθμο διχοτόμησης. Το κόστος χρήσης ενός DNN είναι η απαιτούμενη μακροχρόνια εκπαίδευση, αυτό ωστόσο, δεν είναι πρόβλημα στην πράξη, αφού γίνεται εκτός σύνδεσης, προτού τεθεί σε λειτουργία το δίκτυο. Επιπρόσθετα, αναφέρεται ότι οι ιδιότητες του DNN που προτείνονται, πρέπει να ισχύουν σε οποιαδήποτε αρχιτεκτονική. Τέλος, επισημαίνεται ότι υπάρχουν διάφορες έρευνες που χρειάζεται να πραγματοποιηθούν μελλοντικά. Συγκεκριμένα, η εύρεση της καταλληλότερης δομής DNN, που σχετίζεται με τη διαμόρφωση του συστήματος CF massive MIMO, και τον προσδιορισμό των υπερ-παραμέτρων, η οποία είναι σημαντική για την χωρητικότητα του DNN είναι ένα από αυτά. Ένα άλλο ζήτημα είναι ότι η συγκεκριμένη μελέτη θεώρησε ένα δίκτυο μικροκυμάτων. Η επέκταση αυτού στον τομέα mmWave, μπορεί να είναι ένα πιο περίπλοκο πρόβλημα, καθώς οι UE είναι πιθανό να είναι εξοπλισμένοι

με πολλαπλές συστοιχίες κεραιών, αντί για μία μόνο κεραία. Επιπλέον, πρέπει να εξεταστούν πιο περίπλοκα μοντέλα καναλιών, π.χ. Rician ή ο συνδυασμός Rician και Rayleigh.

Στην εργασία [35] μελετάται μια αρχιτεκτονική που αποτελείται από APs που είναι καταναμημένα τυχαία σε μια κυκλική περιοχή και συνδέονται με μια CPU μέσω ιδανικών backhaul ζεύξεων, ενώ διαθέτουν μια μόνο κεραία. Τα UE που επικοινωνούν με τα APs διαθέτουν και αυτά μια μόνο κεραία. Το κανάλι επικοινωνίας είναι επίπεδο στη συχνότητα και αμετάβλητο στο χρόνο για το διάστημα συνοχής ενώ λειτουργεί υπο το μοντέλο TDD, μηδενικό μέσο όρο θορύβου Gaussian και διαθέτει άριστη αμοιβαιότητα (reciprocity). Κατά την ανερχόμενη ζεύξη, τα UE στέλνουν πιλοτικές ακολουθίες για να επιτρέψουν την εκτίμηση του καναλιού στη CPU. Σε αυτό το άρθρο θεωρείται ότι υπάρχει πλήρης γνώση της εξασθένισης μεγάλης κλίμακας από τη CPU και ότι οι πιλοτικές ακολουθίες ανακυκλώνονται σε κάθε UE. Όσον αφορά το downlink, λαμβάνεται υπόψη ότι οι απαιτήσεις ενέργειας είναι οι ίδιες σε όλα τα AP. Στόχος της μελέτης είναι η βελτιστοποίηση της φασματικής απόδοσης. Πιο αναλυτικά αξιολογείται η απόδοση ενός μερικώς καταναμημένου CF massive MIMO συστήματος με διαφορετικές πολιτικές ελέγχου ισχύος κατερχόμενης ζεύξης, και πιο συγκεκριμένα, ίσης ισχύος μετάδοσης, ίσης ισχύος λήψης, αντίστροφης διαρροής και διαδοχικών πολιτικών κυρτής προσέγγισης (successive convex approximation -SCA). Η πρώτη και η δεύτερη πολιτική εξισώνουν την ισχύ μετάδοσης από και προς τις συσκευές των χρηστών (UEs) ενώ η τρίτη μειώνει το ποσοστό των σφαλμάτων μετάδοσης σε αυτά. Η πολιτική SCA είναι ένας επαναληπτικός αλγόριθμος για τη μεγιστοποίηση του αθροίσματος της φασματικής απόδοσης των χρηστών. Έπειτα, συγκρίνεται η απόδοση διαφορετικών πολιτικών για το συντονισμένο beamforming (CB) και zero-forcing (ZF) και για τις υποθέσεις με και χωρίς περιορισμούς στην ένωση AP-UE. Στη συνέχεια, μελετάται μια επέκταση της πολιτικής SCA για τη μεγιστοποίηση του σταθμισμένου αθροίσματος της φασματικής απόδοσης η οποία βελτιώνει τον δίκαιο καταμερισμό πόρων μεταξύ των UE. Μελετάται επίσης ένα σενάριο στο οποίο οι προδιαγραφές κωδικοποίησης και μετάδοσης συντονίζονται μόνο σε υποσύνολα AP και όχι σε όλα τα υποσύνολα. Επιπρόσθετα, επεκτείνονται οι πολιτικές ελέγχου ισχύος σε αυτήν τη ρύθμιση και ποσοτικοποιείται η απώλεια απόδοσης σε σύγκριση με αυτή κατά τον συντονισμό μεταξύ όλων των AP. Τέλος, μέσω εκτεταμένων προσομοιώσεων, με τη βοήθεια του αστικού μακρομοντέλου (urban macro model) για την εξασθένιση μεγάλης κλίμακας, παρατηρείται ότι ο έλεγχος ισχύος οδήγησε σε απώλεια της φασματικής απόδοσης, επιβεβαιώνοντας ότι ο συντονισμός των κυψελών στην κατανομή της ισχύος κατερχόμενης ζεύξης (downlink) βοηθά στη μείωση των παρεμβολών.

Στην εργασία [36] παρέχεται μια λεπτομερή σύγκριση των προσεγγίσεων user-centric (UC) και cell free (CF), λαμβάνοντας υπόψη την περίπτωση στην οποία οι κινητοί σταθμοί (MS) και τα σημεία πρόσβασης (AP) είναι εξοπλισμένα με πολλαπλές κεραιές. Στην προσέγγιση UC, κάθε AP επικοινωνεί μόνο με έναν προκαθορισμένο αριθμό MSs, και πιο συγκεκριμένα με αυτά που λαμβάνει με την μεγαλύτερη ισχύ, ενώ συνδέεται με την κεντρική CPU μέσω ζεύξεων backhaul. Προτείνεται για χρήση, στα τυχαία καταναμημένα APs, ένα σχήμα διαμόρφωσης δέσμης μηδενικής ισχύος που δεν απαιτεί εκτίμηση καναλιού στα MS. Όλες οι επικοινωνίες γίνονται στο ίδιο φάσμα συχνοτήτων ενώ η ανερχόμενη και κατερχόμενη ζεύξη διαφοροποιούνται με τη

βοήθεια του μοντέλου TDD. Θεωρείται ότι υπάρχει γνώση κατά το uplink του φαινομένου εξασθένισης και ότι τα AP επικοινωνούν μόνο με τα πιο κοντινά BSs. Έπειτα αναπτύσσονται αλγόριθμοι εκτίμησης καναλιού που βασίζονται σε κριτήρια πιλοτικής αντιστοίχισης (pilot matching-PM) και γραμμικού ελάχιστου μέσου τετραγωνικού σφάλματος (MMSE). Μελετώνται χαμηλότερα όρια για τον επιτεύξιμο ρυθμό του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των σφαλμάτων εκτίμησης καναλιού, ενώ προτείνονται δύο στρατηγικές κατανομής ισχύος για την ανοδική και καθοδική ζεύξη. Η πρώτη στρατηγική κατανομής ισχύος μεγιστοποιεί το προτεινόμενο κατώτατο όριο για το συνολικό ποσοστό του συστήματος, ενώ η δεύτερη, στοχεύει στον ισομερισμό των πόρων και μεγιστοποιεί το ελάχιστο όριο φασματικής απόδοσης μεταξύ των χρηστών. Και τα δύο προβλήματα βελτιστοποίησης έχουν non-concave αντικειμενικές λειτουργίες, γεγονός που καθιστά τη λύση τους δύσκολη. Για την επίλυσή τους, χρησιμοποιείται η διαδοχική προσέγγιση μεγιστοποίησης χαμηλότερου ορίου και η συγχώνευση των εργαλείων εναλλαγής βελτιστοποίησης και του διαδοχικού κυρτού προγραμματισμού. Έπειτα μέσω προσομοιώσεων, αποδεικνύεται ότι η προσέγγιση UC είναι πιο βέλτιστη από τη CF, ειδικά στην ανερχόμενη ζεύξη, αφού παρουσιάζει σε πολλές πρακτικές καταστάσεις καλύτερη απόδοση. Τέλος, τονίζονται οι μελλοντικές μελέτες που χρειάζεται να γίνουν σε διάφορα μείζονος σημασίας ζητήματα πάνω σε παρεμφερείς αρχιτεκτονικές. Πιο αναλυτικά, μερικά από αυτά είναι, ο αντίκτυπος της κινητικότητας των χρηστών στην απόδοση των εφαρμογών CF και UC, η καταλληλότητα μιας αρχιτεκτονικής UC για υποστήριξη εξαιρετικά αξιόπιστων επικοινωνιών χαμηλού λανθάνοντος χρόνου και η σύζευξη των αρχιτεκτονικών CF massive MIMO με σχήματα 5G-and-beyond πολλαπλής πρόσβασης όπως το γνωστό non-orthogonal πολλαπλής πρόσβασης (NOMA).

Στην εργασία [37] μελετάται μια αρχιτεκτονική Cell-free mmWave Massive MIMO, όπου προτείνεται ένα πρακτικό και ακριβές πλαίσιο εκτίμησης καναλιού (channel estimation) που βασίζεται στο γρήγορο και ευέλικτο συνελκτικό νευρωνικό δίκτυο (FFDNet). Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική αποτελείται από διάφορα τυχαία καταναμημένα APs και UEs στην περιοχή μελέτης. Όλα τα UEs εξυπηρετούνται την ίδια χρονική στιγμή από έναν συγκεκριμένο αριθμό AP, χρησιμοποιώντας τους ίδιους πόρους χρόνου και συχνότητας. Τα APs συνδέονται με μια κεντρική CPU μέσω ζεύξεων fronthaul απεριόριστης χωρητικότητας. Κατά το uplink τα UE στέλνουν πιλοτικές ακολουθίες στα AP, ενώ λαμβάνοντας υπόψη την μεγάλη κατανάλωση ενέργειας και την πολυπλοκότητα των συχνοτήτων mmWave χρησιμοποιείται ένα υβριδικό μοντέλο. Το FFDNet δίκτυο που παρουσιάζεται διαθέτει έναν συνδυασμό από πραγματικά και φανταστικά τμήματα στην μητρική πλακέτα (matrix). Για την βελτίωση της αποτελεσματικότητας αποθορυβοποιητή (denoiser) ορίζεται ένας αναστρέψιμος τελεστής διαχείρισης που χωρίζει μια <<θορυβώδη>> πλακέτα σε 4 υπο-πλακέτες (sub-matrices). Στη συνέχεια χρησιμοποιείται ένας ευπροσάρμοστος χάρτης επιπέδων θορύβων, στο ίδιο μέγεθος με τις υπο-πλακέτες, για την βελτιστοποίηση του μοντέλου του αποθορυβοποιητή, έτσι ώστε να λειτουργεί για διαφορετικές συχνότητες θορύβων. Το FFDNet χρησιμοποιεί πολλά φίλτρα για να αποκτήσει διάφορες δυνατότητες και καταγράφει το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό, αυτό δηλαδή με την υψηλότερη τιμή στον χάρτη δυνατοτήτων κάθε επιπέδου. Αυτά τα χαρακτηριστικά σχηματίζουν το επόμενο επίπεδο και μεταφέρονται σε ένα πλήρως συνδεδεμένο συνελκτικό επίπεδο. Ο στόχος της συγκεκριμένης μελέτης είναι η

βελτιστοποίηση της εκτίμησης του καναλιού των συστημάτων CF mmWave massive MIMO και αυτό επιτυγχάνεται μέσω της μεθόδου deep learning. Deep learning θεωρείται ένα υποσύνολο της μηχανικής μάθησης στην τεχνητή νοημοσύνη που έχει δίκτυα ικανά να μαθαίνουν χωρίς επίβλεψη από δεδομένα που δεν είναι δομημένα ή δεν φέρουν ετικέτες.

Στην εργασία [38] μελετάται το uplink ενός συστήματος Cell-free Massive MIMO που αποτελείται από τυχαία κατανομημένα APs στα οποία γίνεται η εκτίμηση του καναλιού καθώς και η ποσοτικοποίηση των λαμβανομένων σημάτων. Τα AP συνδέονται με μια κεντρική CPU μέσω πεπερασμένων ζεύξεων fronthaul, ενώ στη CPU χρησιμοποιείται η τεχνική zero-forcing για την ανίχνευση των εκπεμπόμενων σημάτων από τους χρήστες. Προτείνεται ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης ποσοστού αθροίσματος (sum rate) που λαμβάνει υπόψη τους περιορισμούς ισχύος ανά χρήστη και τους περιορισμούς απαιτήσεων απόδοσης, καθώς και τις ποσοτικοποιημένες εκτιμήσεις καναλιών. Έπειτα, προτείνεται μια ευρετική και υποβέλτιστη προσέγγιση για την αναδιατύπωση του αρχικού προβλήματος βελτιστοποίησης ως ένα τυπικό γεωμετρικό πρόγραμμα (geometric programme-GP). Στη συνέχεια προτείνεται ένα σύστημα ελέγχου ισχύος μεγάλης εξασθένισης (large scale fading- LSF), με βάση το deep learning, για την κατανομή των συντελεστών ελέγχου ισχύος χρησιμοποιώντας μόνο τους συντελεστές LSF ως είσοδο. Ο στόχος της συγκεκριμένης μελέτης είναι η εκπαίδευση ενός νευρωνικού δικτύου έτσι ώστε να αντλεί τις βέλτιστες μεταδόσεις σημάτων για τους χρήστες που χρησιμοποιούν τους συντελεστές LSF ως εισόδους, με βάση τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης μέσα από έναν μεγάλο αριθμό τυχαία επιλεγμένων συντελεστών μικρής εξασθένισης (small scale fading- SSF). Με τη χρήση τεχνικών βελτιστοποίησης (optimization) και του αλγορίθμου deep learning που αναπτύχθηκε αποδεικνύεται ότι η προτεινόμενη αρχιτεκτονική αυξάνει αισθητά το επιτεύξιμο sum rate στα συστήματα Cell-free Massive MIMO.

Στην εργασία [23] μελετάται το uplink μιας αρχιτεκτονικής για τα cell free τηλεπικοινωνιακά συστήματα που διαθέτουν τυχαία κατανομημένα UE και AP, όπου και τα 2 διαθέτουν μια κεραία. Κάθε AP διαθέτει έναν επεξεργαστή, ο οποίος εν μέρει επεξεργάζεται το λαμβανόμενο σήμα από όλους τους συνδεδεμένους χρήστες, ενώ όλα τα AP συνδέονται μέσω backhaul ζεύξεων με έναν κεντρικό επεξεργαστή edge cloud (edge cloud processor-ECP). Για την λήψη των πληροφοριών κατάστασης καναλιού ανατίθενται κάποιες πιλοτικές ακολουθίες στον κάθε χρήστη, ενώ όσον αφορά την uplink εκπαίδευση του δικτύου χρησιμοποιείται ένα σύνολο από ορθοκανονικές πιλοτικές ακολουθίες. Κατά την εκπομπή του σήματος uplink, ένα σταθμισμένο άθροισμα σύνθετων σημάτων από όλα τα AP κατασκευάζεται για να μεγιστοποιήσει το περιεχόμενο του σήματος ελαχιστοποιώντας παράλληλα τις υπόλοιπες παρεμβολές από το θόρυβο. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται στη βάση των AP, προτού το ανιχνευόμενο σήμα κάθε χρήστη να προωθηθεί στον τελικό του προορισμό. Σε αυτή την μελέτη προτείνονται διάφορες τεχνικές διαμόρφωσης δέσμης για ένα δίκτυο χωρίς κυψέλη ανερχόμενης ζεύξης με κεντρική, ημι-κατανομημένη και πλήρως κατανομημένη επεξεργασία, όλες βασισμένες σε εκμάθηση βαθιάς ενίσχυσης (deep reinforcement learning-DRL). Αρχικά, προτείνεται μια πλήρως συγκεντρωτική μέθοδο διαμόρφωσης δέσμης που χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο βαθιάς ντετερμινιστικής διαβάθμισης πολιτικής (deep deterministic policy gradient -DDPG). Στη συνέχεια,

αυτή η μέθοδος ενισχύεται, επιτρέποντας την καταναμημένη εμπειρία (distributed experience) στα σημεία πρόσβασης (AP), αναπτύσσοντας έτσι ένα σχήμα διαμόρφωσης δέσμης που χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο διαβαθμισμένων ντετερμινιστικών διαβαθμιστικών πολιτικών (distributed distributional deterministic policy gradients -D4PG), με τα AP να αντιπροσωπεύουν τους καταναμημένους παράγοντες. Τέλος, για τη μείωση της υπολογιστικής πολυπλοκότητας, προτείνεται ένα πλήρως καταναμημένο σχήμα διαμόρφωσης δέσμης που διαιρεί τους υπολογισμούς διαμόρφωσης δέσμης μεταξύ των AP. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το σχήμα D4PG με καταναμημένη εμπειρία επιτυγχάνει την καλύτερη απόδοση ανεξάρτητα από το μέγεθος του δικτύου. Επιπλέον, η προτεινόμενη καταναμημένη τεχνική διαμόρφωσης δέσμης (beamforming) αποδίδει καλύτερα από τον αλγόριθμο DDPG με κεντρική μάθηση (centralized learning) μόνο για δίκτυα μικρής κλίμακας. Η υπεροχή απόδοσης του μοντέλου DDPG γίνεται πιο εμφανής καθώς αυξάνεται ο αριθμός των AP ή/και των χρηστών. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια του σταδίου λειτουργίας, όλα τα μοντέλα DRL επιδεικνύουν σημαντικά μικρότερο χρόνο επεξεργασίας από αυτόν του συμβατικού διαλύματος καθόδου κλίσης (gradient descent -GD). Μέσω προσομοιώσεων με τη βοήθεια της γλώσσας προγραμματισμού Python και Tensorflow 2.1.0, αποδεικνύεται ότι οι αλγόριθμοι DRL που προτείνονται είναι ικανοί να βελτιστοποιήσουν την απόδοση του συστήματος κατά το beamforming, ενώ υπογραμμίζεται η ανάγκη για μελλοντική έρευνα αυτών των αλγορίθμων πάνω σε αλλά ασύρματα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα.

Στην εργασία [24] μελετάται μια αρχιτεκτονική Cell-free Massive MIMO, με στόχο την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας του συστήματος, όπου τυχαία καταναμημένα APs, με 1 ή περισσότερες κεραίες και με έναν επεξεργαστή υπολογιστικής αιχμής (edge computing, συνδέονται με έναν κεντρικό cloud server (CS) μέσω άρτιων backhaul ζεύξεων. Η τοποθεσία των AP μοντελοποιείται κατά την ομογενή διαδικασία Poisson (Poisson point process-PPP), ενώ με τον ίδιο τρόπο μοντελοποιείται και η τοποθεσία των τυχαία καταναμημένων χρηστών ανά το σύστημα. Κάθε χρήστης μπορεί να επικοινωνεί με ορισμένα μόνο AP, αφού η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική ακολουθεί μια προσέγγιση με βάση των χρήστη. Θεωρείται επίσης ότι κάθε AP έχει μια περιοχή κάλυψης και μπορεί να υποστηρίξει σωστά όλους τους χρήστες μέσα σε αυτή. Το σύστημα που μελετάται λειτουργεί υπο αμφίδρομη λειτουργία διαίρεσης χρόνου (TDD), ενώ το κανάλι των εκάστοτε σημάτων κεραίας μεταξύ πομπού και δέκτη είναι ανεξάρτητο και ακολουθεί το μοντέλο εξασθένισης Rayleigh. Στη συνέχεια, αναλύονται οι επιδόσεις μετάδοσης uplink και downlink του συστήματος χρησιμοποιώντας στοχαστική γεωμετρία, με τον δέκτη μέγιστου μικτού λόγου (maximum ratio combining -MRC) στο δέκτη uplink και το μέγιστο λόγο μετάδοσης (maximum ratio transmission -MRT) στο downlink και παρουσιάζεται μια έκφραση για το επιτυχημένη πιθανότητα επικοινωνίας (successful communication probability -SCMP). Για το σενάριο υπολογιστικής αιχμής, εξετάζονται διάφορες περιπτώσεις, οι οποίες απαιτούν διαφορετικό μέσο χρόνο επεξεργασίας στους διακομιστές των AP και του κεντρικού cloud server. Χρησιμοποιώντας τη θεωρία ουράς (queueing theory), αντλείται η επιτυχημένη πιθανότητα υπολογισμού (successful computation probability -SCP) για μια συγκεκριμένη υπολογιστική καθυστέρηση και αναλύονται οι διάφορες παράμετροι του συστήματος (π.χ. ακτίνα κάλυψης AP, πιθανότητα εκφόρτωσης στο CS και πυκνότητα AP). Έπειτα, με βάση την ανάλυση των επιδόσεων επικοινωνίας και

υπολογισμού, αξιολογείται η επιτυχημένη πιθανότητα υπολογισμού αιχμής (successful edge computing probability -SECP) και διερευνάται πώς η ακτίνα κάλυψης και η πιθανότητα εκφόρτωσης στο CS επηρεάζουν το SECP. Αναλύεται επίσης η απόδοση των καταναμημένων συστημάτων κεραιών όσον αφορά το SECP για διαφορετικές πυκνότητες κεραιών, σε σύγκριση με εκείνη του συστήματος εντοπισμένης κεραιάς (co-located). Τέλος, μελετάται η ελάχιστη μέση κατανάλωση ενέργειας του προτεινόμενου συστήματος με δυνατότητα edge computing, για την επίτευξη ενός ελάχιστου επιθυμητού SECP και εξετάζεται η επίδραση της πυκνότητας των AP μεταξύ της ελάχιστης επιθυμητής SECP και της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας. Μέσω εκτεταμένων προσομοιώσεων στο λογισμικό MATLAB και με τη χρήση του SECP αποδεικνύεται ότι η αρχιτεκτονική που μελετάται μπορεί να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας του συστήματος ενώ υπογραμμίζεται η ανάγκη για μελλοντικές έρευνες κυρίως στον έλεγχο ισχύος μετάδοσης κατά την μετάδοση του downlink.

Στην εργασία [21] παρουσιάζεται μια αρχιτεκτονική Cell-Free Massive MIMO που αποτελείται από τυχαία καταναμημένα AP και UE με μια μόνο κεραιά, με στόχο την μεγιστοποίηση της τιμής του χρήστη (user rate). Τα AP συνδέονται με μια CPU μέσω backhaul ζεύξεων, ενώ θεωρείται επίσης ότι η CPU εκμεταλλεύεται μόνο τη γνώση των στατιστικών των καναλιών μεταξύ των χρηστών και των AP για την ανίχνευση δεδομένων από το ληφθέν σήμα. Διερευνάται ένα πρόβλημα μικτής ποιότητας υπηρεσίας (QoS) στην ανερχόμενη ζεύξη, όπου οι τιμές των χρηστών μη πραγματικού χρόνου μεγιστοποιείται με περιορισμούς ισχύος ανά χρήστη, ενώ οι ρυθμοί των χρηστών πραγματικού χρόνου (real time users-RTU) πληρούν τους στόχους των τιμών τους (target rates). Το αρχικό πρόβλημα μικτού QoS διατυπώνεται σε όρους συντελεστών φίλτρου δέκτη (receiver filter coefficients) και κατανομής ισχύος χρήστη, άρα μπορεί να διαχωριστεί σε 2 υπο προβλήματα. Ένας κατά προσέγγιση λόγος σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή (signal-to-interference-plus-noise ratio -SINR) παράγεται με βάση τα στατιστικά του καναλιού και εκμεταλλεύεται το μέγιστο λόγο συνδυασμού (maximal ratio combining -MRC) στα AP. Αποδεικνύεται ότι το πρόβλημα σχεδιασμού του φίλτρου δέκτη μπορεί να λυθεί μέσω ενός γενικευμένου προβλήματος ιδιοτιμίας (eigenvalue), ενώ το πρόβλημα κατανομής ισχύος του χρήστη μπορεί να διατυπωθεί χρησιμοποιώντας τυπικό γεωμετρικό προγραμματισμό.

Στην εργασία [39] μελετάται μια στατική αρχιτεκτονική ενός δικτύου χωρίς κυψέλες όπου υπάρχουν τυχαία καταναμημένα AP, με συγκεκριμένη περιοχή κάλυψης, και UE, που εξυπηρετούνται από πολλαπλά APs. Τα AP και UE έχουν μια μόνο κεραιά, ενώ τα AP συνδέονται μεταξύ τους και με τη κεντρική CPU, η οποία κωδικοποιεί και αποκωδικοποιεί τα σήματα από κάθε χρήστη, μέσω backhaul ζεύξεων. Οι πληροφορίες κατάστασης καναλιού (CSI), οι οποίες θα απαιτούνται στην CPU για την ανίχνευση σήματος για μεμονωμένα UE, θεωρείται ότι επιτυγχάνονται μέσω της εκπαίδευσης των πιλοτικών ακολουθιών. Για στατικά δίκτυα ανερχόμενης ζεύξης χωρίς κυψέλες, αντλείται μια ακριβή έκφραση κλειστής μορφής για την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας του χρήστη αξιοποιώντας την προσέγγιση Welch-Satterthwaite. Για την δραστική μείωση της πολυπλοκότητας επεξεργασίας σήματος στη CPU για το στατικό δίκτυο χωρίς κυψέλες, προτείνεται ένα σχήμα συμπλέγματος που χωρίζει δυναμικά τα AP σε υποσύνολα με κάθε υποσύνολο να λειτουργεί ως εικονικό AP σε ένα σύστημα καταναμημένων κεραιών (distributed antenna system -DAS). Προτείνεται επίσης ένα

σύστημα εντοπισμού σήματος βασισμένο στη διαδοχική ακύρωση παρεμβολών (successive interference cancellation- SIC) για μη ορθογώνια (non orthogonal) πολλαπλή πρόσβαση σε ένα δυναμικό δίκτυο χωρίς κυψέλες και ένας τροποποιημένος συνδυασμός DAS που λαμβάνει υπόψη παρεμβολές μεταξύ χρηστών (inter-user-interference -IUI). Στη συνέχεια, διατυπώνεται ένα γενικό πρόβλημα για τη βελτιστοποίηση από κοινού της ομαδοποίησης των AP και των διανυσμάτων διαμόρφωσης, έτσι ώστε το άθροισμα των χρηστών των uplink ή το ελάχιστο ποσοστό χρηστών να μεγιστοποιείται. Ο στόχος της συγκεκριμένης μελέτης είναι η μείωση της πολυπλοκότητας της κοινής επεξεργασίας σημάτων των χρηστών και για την επίλυση αυτού του προβλήματος, προτείνεται και σχεδιάζεται ένα νέο υβριδικό σχήμα deep reinforcement learning (DRL) με βάση το μοντέλο DDPG-DDQN. Μελετώνται και συγκρίνονται διαφορετικές μετρήσεις απόδοσης των συμβατικών στατικών και των δυναμικών δικτύων χωρίς κυψέλες με διαφορετικό αριθμό χρηστών και AP. Τέλος, αναφέρονται πιθανές επεκτάσεις που μπορεί να έχει η αρχιτεκτονική που μελετάται κυρίως όσον αφορά την σχεδίαση και την αξιολόγηση πιο ολοκληρωμένων DRL μοντέλων, τα οποία εκτελούν από κοινού τις εκτιμήσεις κατάστασης του καναλιού (channel state estimation -CSI) και επιλέγουν την καλύτερη διαμόρφωση συμπλέγματος για τα AP. Επίσης, η συγκριτική αξιολόγηση διαφορετικών αλγορίθμων DRL για τη βελτιστοποίηση της κατανομής πόρων σε διαφορετικές αρχιτεκτονικές δικτύου χωρίς κυψέλες θα ήταν σημαντική.

Στην εργασία [40] μελετάται ένα uplink σύστημα cell-free massive MIMO, όπου ορισμένα AP εξυπηρετούν κάποιους χρήστες σύμφωνα με το μοντέλο αμφίδρομης διαίρεσης χρόνου (TDD). Τα AP και οι συσκευές των χρηστών μπορεί να έχουν πάνω από 1 κεραία και το κανάλι επικοινωνίας ακολουθεί το μοντέλο εξασθένισης Rayleigh. Επίσης θεωρείται ότι στα AP υπάρχει η αρχιτεκτονική μετατροπής αναλογικού σε ψηφιακό σήμα (analog to digital-ADC), όπου κάθε κεραία των AP αποτελείται από 2 χαμηλής ανάλυσης (low resolution) ADCs, ενώ τα AP συνδέονται με μια κεντρική CPU μέσω backhaul ζεύξεων. Αξιοποιώντας το προσθετικό μοντέλο κβαντοποίησης του θορύβου (additive quantization noise model-AQNM), αντλείτε μια κατά προσέγγιση έκφραση φασματικής απόδοσης για τα συστήματα cell-free massive MIMO με δέκτη φιλτραρίσματος (filtering receiver), μέσω της μεθοδολογίας use and then forget. Έτσι παρέχεται ένα εργαλείο για τον εύκολο ποσοτικό προσδιορισμό της επίδρασης του αριθμού των συστοιχιών κεραίας (antenna arrays) και του αριθμού bit ποσοτικοποίησης των ADC χαμηλής ανάλυσης. Ο στόχος της συγκεκριμένης μελέτης είναι η παρουσίαση ενός μοντέλου βελτιστοποίησης της ενεργειακής και φασματικής απόδοσης, το οποίο λαμβάνει υπόψη την ισχύ που απαιτείται στα διάφορα κυκλώματα, τα εξαρτήματα ADC και τις backhaul ζεύξεις, με χαμηλό κόστος ανάπτυξης. Επίσης διερευνώνται οι αντισταθμίσεις μεταξύ ενεργειακής και φασματικής απόδοσης όσον αφορά θέματα του σχεδιασμού τους. Μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων στο λογισμικό MATLAB και μεθόδου βελτιστοποίησης (optimization) αποδεικνύεται ότι η αρχιτεκτονική που μελετάται, αν και με χαμηλότερο κόστος, μπορεί να πέτυχει τους ίδιους ρυθμούς απόδοσης με αλλά παρόμοια και ακριβότερα συστήματα. Επιπλέον, όταν ο αριθμός των κεραιών του χρήστη είναι μικρός, η ανάπτυξη περισσότερων κεραιών στους χρήστες μπορεί να βελτιώσει το άθροισμα φασματικής απόδοσης. Επιπλέον, παρατηρείται ότι η αρχιτεκτονική ADC χαμηλής ανάλυσης έχει πολλές

δυνατότητες να επιτύχει μια καλύτερη συνύπαρξη SE-EE σε σύγκριση με την ιδανική και ακριβότερη περίπτωση ADC.

Στην εργασία [41] παρουσιάζεται μια cell-free massive MIMO αρχιτεκτονική που αποτελείται από τυχαία κατανομημένα σημεία πρόσβασης AP, πολλαπλών κεραιών, και εξοπλισμούς χρήστη (UE), μιας μόνο κεραιάς. Τα AP εξυπηρετούν τα UE με την ίδια χρονική συχνότητα και ακολουθούν το μοντέλο αμφίδρομης διαίρεσης χρόνου (TDD). Επίσης τα AP συνδέονται με έναν κεντρικό επεξεργαστή CPU μέσω backhaul ζεύξεων. Στόχος της συγκεκριμένης μελέτης είναι η αύξηση της ενεργειακής απόδοσης λαμβάνοντας υπόψη την κατανάλωση ισχύος του υλικού και την κατανάλωση ενέργειας του backhaul. Το μοντέλο TDD γίνεται με τη διαδικασία εκπαίδευσης uplink, μετάδοσης δεδομένων payload uplink και μετάδοσης δεδομένων payload downlink. Στη συνέχεια προτείνεται ένας βέλτιστος αλγόριθμος ελέγχου ισχύος που στοχεύει στη μεγιστοποίηση της συνολικής ενεργειακής απόδοσης, κάτω από έναν περιορισμό φασματικής απόδοσης ανά χρήστη και έναν περιορισμό ισχύος ανά AP. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα ελέγχου ισχύος μπορεί να καθοριστεί με την επίλυση μιας ακολουθίας προγραμμάτων κώνου δεύτερης τάξης (second-order cone programs - SOCPs). Έπειτα μελετάται η επίδραση της backhaul κατανάλωσης ισχύος και δείχνεται ότι η backhaul κατανάλωση ισχύος επηρεάζει σημαντικά την ενεργειακή απόδοση, ειδικά όταν ο αριθμός των AP είναι μεγάλος. Για να μειωθεί αυτό το πρόβλημα, προτείνονται δύο σχήματα επιλογής AP, ένα επιλογής βασισμένο στην λαμβανομένη ισχύ και ένα άλλο επιλογής βασισμένο στη μεγαλύτερη κλίμακα εξασθένισης. Ακολουθώντας, συγκρίνονται ποσοτικά οι επιδόσεις του cell-free massive MIMO και συνεγκαταστημένου (colocated) massive MIMO. Τέλος μέσω των 2 σχημάτων επιλογής AP που προτείνονται και με τη βοήθεια προσομοιώσεων στο λογισμικό MATLAB αποδεικνύεται ότι η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική είναι ικανή να μεγιστοποιήσει την ενεργειακή αποδοτικότητα και να ελαχιστοποιήσει την κατανάλωση ισχύος στο δίκτυο backhaul, ενώ παράλληλα μπορεί να εξυπηρετεί άρτια τους χρήστες. Παρατηρείται επίσης ότι η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα αποτι η συνεγκαταστημένη.

Στην εργασία [42] μελετάται μια αρχιτεκτονική cell-free massive MIMO που αποτελείται από πολλά AP, μιας ή περισσότερων κεραιών, τα οποία εξυπηρετούν ορισμένα UEs, που διαθέτουν μια μόνο κεραιά, με την ίδια χρονική φάση και ακολουθώντας το μοντέλο TDD. Τα AP συνδέονται με μια κεντρική CPU, που είναι ένας ελεγκτής βασισμένος σε λογισμικό (software-defined network-SDN), μέσω τέλειων backhaul ζεύξεων. Θεωρείται επίσης ότι τα AP δεν βρίσκονται τυχαίως κατανομημένα στην περιοχή μελέτης αλλά τοποθετούνται με βάση της διαδικασίας Poisson (Poisson point process-PPP), η οποία επιτυγχάνει την ρεαλιστική ανάπτυξη τους στον χώρο. Για την εστίαση σε έναν τυπικό χρήστη, για την επίτευξη μια άρτιας ανάλυσης και έρευνας της απόδοσης του συστήματος, χρησιμοποιείται το θεώρημα Slivnyak. Όσον αφορά την εξασθένιση του καναλιού επικοινωνίας χρησιμοποιείται τόσο η μικρής κλίμακας όσο και η μεγάλης κλίμακας εξασθένιση ανάλογα με την απόσταση του χρήστη από τα AP ακολουθώντας το μοντέλο Rayleigh, ενώ θεωρείται ότι το uplink και το downlink μεταδίδονται μέσω πανομοιότυπων καναλιών. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιείται μια ασυμπτωτική ανάλυση απόδοσης μέσω του downlink ντετερμινιστικού ισοδύναμου (deterministic equivalent -DE) και του λόγου

θορύβου ως προς την παρεμβολή (SINR) με μέγιστο λόγο μετάδοσης (MRT). Το κανάλι εκτιμάται κατά τη διάρκεια μιας φάσης εκπαίδευσης ανερχόμενης ζεύξης (uplink), συμπεριλαμβανομένης της πιλοτικής μόλυνσης (pilot contamination). Με τη χρήση κωδικοποίησης συζευγμένης δέσμης (conjugate beamforming precoding) λαμβάνεται η πιθανότητα κάλυψης κατερχόμενης ζεύξης (downlink) και το επιτεύξιμο ποσοστό ανά χρήστη. Στη συνέχεια μελετάται η πιθανότητα κάλυψης και παρατηρείται ότι τα μαζικά συστήματα CF MIMO υπερτερούν της συγκρίσιμης αρχιτεκτονικής με μικρές κυψέλες (SCs). Συγκεκριμένα, η κάλυψη μειώνεται με τον στόχο SINR λόγω της αυξανόμενης παρεμβολής. Επίσης, καθώς αυξάνεται η πυκνότητα των AP, αυξάνεται η πιθανότητα κάλυψης σε μεγάλη πυκνότητα ενώ ένα όριο περιορίζει την πιθανότητα κάλυψης σε χαμηλότερες τιμές. Η συγκεκριμένη μελέτη επικεντρώνεται στο επιτεύξιμο ποσοστό χρηστών downlink και εξετάζει τα αποτελέσματα της διάρκειας της φάσης εκπαίδευσης και του αριθμού των χρηστών. Ο κύριος στόχος της είναι η βελτιστοποίηση, της κάλυψης του δικτύου, καθώς και των ρυθμών απόδοσής του και αυτό επιτυγχάνεται μέσω προσομοιώσεων Monte Carlo και μεθόδων βελτιστοποίησης και στοχαστικής γεωμετρίας στο λογισμικό MATLAB. Αποδεικνύεται τέλος, ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο μέσος αριθμός των AP, τόσο υψηλότερη είναι η προκύπτουσα κάλυψη και ο επιτεύξιμος ρυθμός δεδομένων. Αυξάνοντας την πυκνότητα των AP, η κάλυψη αυξάνεται μέχρι ενός σημείου, ενώ αυξάνεται ο αριθμός της απόδοσης των χρηστών. Οι χρήστες που βρίσκονται πιο κοντά στα AP έχουν μεγαλύτερο αντίκτυπο στην απόδοση τους ενώ όσο μεγαλύτερος είναι ο μέσος αριθμός των AP, τόσο μεγαλύτερος είναι ο αντίκτυπος.

Στην εργασία [43] μελετάται μια cell-free massive MIMO αρχιτεκτονική που αποτελείται από αυθαίρετα καταναμημένα AP κατά μήκος του δικτύου και UE. Τόσο τα AP όσο και τα UE διαθέτουν μια μόνο κεραία ενώ ο αριθμός των AP πρέπει να είναι σαφώς μεγαλύτερος των UE. Η εξασθένιση μικρής κλίμακας που θεωρείται είναι σχεδόν στατική και δεν ακολουθεί το μοντέλο Gaussian ενώ ως τεχνική διαμόρφωσης δέσμης (beamforming) για τη μετάδοση του downlink χρησιμοποιείται ο πομπός μεγίστου λόγου χαμηλής πολυπλοκότητας (low complexity maximum ratio transmitter MRT). Τα AP τροφοδοτούνται από ανεξάρτητα μικρο-δικτυα (micro-grids) (στα οποία γίνονται όλες οι επεξεργασίες δεδομένων) με διαφορετικές τιμές, ενώ αυτά τα οποία έχουν χαμηλές τιμές ή κακή ποιότητα καναλιού, μπορούν να μεταφέρουν την ενέργεια τους σε άλλα AP με υψηλότερες τιμές ή καλύτερη ποιότητα καναλιού. Η συνεργασία ισχύος μεταξύ των AP πραγματοποιείται μέσω ανταλλαγής ενέργειας με τη βοήθεια μιας υποδομής έξυπνου δικτύου (smart grid) προκειμένου να μειωθεί η συνολική κατανάλωση ισχύος δικτύου. Ο στόχος της συγκεκριμένης μελέτης είναι η ελαχιστοποίηση της συνολικής κατανάλωσης ισχύος δικτύου που υπόκειται στην ποιότητα των υπηρεσιών και στους περιορισμούς συνεργασίας των AP και αυτό λύνεται με τη βοήθεια γραμμικού προγραμματισμού (linear programming). Επιπλέον, το πρόβλημα σκοπιμότητας (feasibility) αντιμετωπίζεται προτείνοντας έναν μικτό αλγόριθμο επιλογής AP και προγραμματισμού χρηστών (AP selection and user scheduling algorithm (APUS), με τη βοήθεια της μεθόδου brute forcing. Μέσω προσομοιώσεων Monte Carlo στο λογισμικό MATLAB αποδεικνύεται ότι το σύστημα που προτείνεται μπορεί να μειώσει την συνολική κατανάλωση ενέργειας και να επιτρέπει στα AP να επικοινωνούν και να ανταλλάσσουν δεδομένα άρτια μεταξύ τους. Τέλος, αναφέρεται ότι η συγκεκριμένη μελέτη μπορεί να επεκταθεί και στις cell-free

massive MIMO αρχιτεκτονικές με βάση το machine learning, μέσω τεχνικών συνεργασίας κατανεμημένης ισχύος.

3.2 Πίνακας συγκρίσεων άρθρων

3.2 Πίνακας συγκρίσεων άρθρων:

| | Target of the presented analysis | CP U | fronthaul χωρητικότητα | Uplink/downlink | Ομαδοποίηση APs | Εργαλεία που χρησιμοποιούνται | Συζήτηση προκλήσεων/μελλοντικών μελετών |
|------|---|------|---------------------------|-----------------|-----------------|--|---|
| [25] | βελτιστοποίηση ισχύος στο δίκτυο, ενεργειακή απόδοση (energy efficiency), φασματική απόδοση (spectral efficiency), ρυθμό μετάδοσης, καθυστέρηση, αριθμό/κατανομή AP | 1 | Πεπερασμένη χωρητικότητα | +/+ | ναι | μέθοδοι βελτιστοποίησης | +/+ |
| [26] | Βελτιστοποίηση του καταμερισμού πόρων | 1 | Απειρίστη (infinite) | +/+ | όχι | κατερχόμενη και ανερχόμενη δυαδικότητα | -/- |
| [27] | Σύγκριση και βελτιστοποίηση διαφορετικών λειτουργιών CPU-AP για downlink και uplink σε fronthaul-constrained cell-free massive MIMO δίκτυα | 1 | Περιορισμένη χωρητικότητα | +/+ | ναι | χρήση χαμηλής ανάλυσης (low resolution) αναλογικούς-σε-ψηφιακούς μετατροπείς (ADCs). | +/+ |
| [28] | Βελτιστοποίηση της απόδοσης των Cell-Free Massive MIMO System με fronthaul περιορισμένης | 1 | Περιορισμένη χωρητικότητα | +/- | όχι | Τεχνικές (CFE), (ECF), (EMCF) | -/- |

| | | | | | | | |
|---------------|--|----------|------------------------------------|-----|-----|---|-----|
| | χωρητικότητα και υλισμικές βλάβες | | κότητα | | | | |
| [29] | Ελαχιστοποίηση του χρόνου εκπαίδευσης των federated learning Cell-Free Massive MIMO συστημάτων, | 1 | Backhaul | +/- | όχι | διαδικτυακή διαδοχική προσέγγιση κυρτής προσέγγισης | -/- |
| [30] | μελετάται ο έλεγχος ροής πολλαπλών στρωμάτων και η κατανομή απόδοσης σε συσσωρευμένα uplink συστήματα CF Massive MIMO. | 1 | Τυχαία άφιξη κυκλοφορίας δεδομένων | +/- | όχι | θεωρίας βελτιστοποίησης Lyapunov | -/- |
| [31] | Βελτιστοποίηση κατανομής ενεργειακά αποδοτικών πόρων και μετάδοσης δεδομένων | Πολλαπλά | Backhaul | +/+ | όχι | Machine learning, optimization | +/+ |
| [32], [33] | ελαχιστοποίηση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας, βελτιστοποίηση εξισορρόπησης φορτίου | 1 | Απειροστική χωρητικότητα | +/+ | ναι | δύο ευρετικοί αλγόριθμοι χαμηλής πολυπλοκότητας | -/- |
| [34] | Βελτιστοποίηση του καταμερισμού πόρων | 1 | Αμελητέα | +/+ | όχι | Μέθοδος deep learning | +/+ |
| [35] | Σύγκριση φασματικής απόδοσης σε CF Massive MIMO με καταναεμημένα σημεία πρόσβασης και βελτιστοποίηση της | 1 | Ιδανικό backhaul | +/+ | ναι | διαφορετικές πολιτικές ελέγχου | -/- |

| | | | | | | | | |
|------|--|------------|---|--------------------------|-----|-----|--|-----|
| [36] | Σύγκριση προσεγγίσεων και Βελτιστοποίηση του καταμερισμού πόρων | UC CF, του | 1 | Backhaul | +/+ | όχι | δύο στρατηγικές κατανομής ισχύος για uplink και downlink | +/+ |
| [37] | Βελτιστοποίηση εκτίμησης καναλιού | | 1 | Απεριόριστη χωρητικότητα | +/- | όχι | Deep learning | -/- |
| [38] | Αύξηση επιτεύξιμου sum rate | | 1 | πεπερασμένη | +/- | Όχι | Deep learning, optimization | -/- |
| [39] | Βελτιστοποίηση διαμόρφωσης δέσμης (beamforming) | | 1 | backhaul | +/- | Όχι | Deep reinforcement learning | -/+ |
| [24] | Μείωση κατανάλωσης ενέργειας | | 1 | backhaul | +/+ | Όχι | successful edge computing probability - SECP | +/+ |
| [21] | Μεγιστοποίηση της τιμών των χρηστών διατηρώντας σταθερό το SINR | | 1 | backhaul | +/- | Όχι | Γενικευμένο πρόβλημα eigenvalue, γεωμετρικός προγραμματισμός | -/- |
| [18] | μείωση της πολυπλοκότητας της κοινής επεξεργασίας σημάτων των χρηστών | | 1 | backhaul | +/- | Ναι | υβριδικό σχήμα deep reinforcement learning (DRL) | +/+ |
| [40] | Βελτιστοποίηση ενεργειακής και φασματικής απόδοσης με χαμηλό κόστος συστήματος | | 1 | backhaul | +/- | Όχι | Optimization | -/- |

| | | | | | | | |
|------|--|---|------------------|-----|-----|---|-----|
| [41] | Μεγιστοποίηση ενεργειακής αποδοτικότητας, ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ισχύος backhaul | 1 | backhaul | +/+ | Όχι | 2 σχήματα επιλογής AP | -/- |
| [42] | βελτιστοποίηση, της κάλυψης του δικτύου, καθώς και των ρυθμών απόδοσής του | 1 | Ιδανικό backhaul | +/+ | Ναι | Προσομοίωση Monte Carlo, optimization, στοχαστική γεωμετρία | -/- |
| [43] | Μείωση συνολικής κατανάλωσης ενέργειας, άρτια επικοινωνία μεταξύ των AP | 0 | - | -/+ | Όχι | Linear programming, Προσομοίωση Monte Carlo | -/+ |

4 Κλιμακωτό σύστημα Cell-free massive MIMO

Ο στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι ο καθορισμός και ο σχεδιασμός κλιμακωτών συστημάτων cell-free Massive MIMO. Όσον αφορά το UL και DL, η πρώτη υλοποίηση είναι ένα κεντρικό δίκτυο στο οποίο τα πιλοτικά σήματα που λαμβάνονται σε όλα τα AP συγκεντρώνονται σε CPUs, οι οποίες εκτελούν την εκτίμηση των καναλιών και επεξεργάζονται από κοινού τα σήματα των δεδομένων. Η δεύτερη εφαρμογή είναι ένα αποκεντρωμένο δίκτυο στο οποίο κάθε AP εκτιμά τοπικά τα κανάλια των σχετικών UE και χρησιμοποιεί αυτές τις πληροφορίες για την τοπική επεξεργασία των σημάτων των δεδομένων. Μόνο η αποκωδικοποίηση και η κωδικοποίηση των σημάτων δεδομένων πραγματοποιείται στις CPUs. Και για τις δύο υλοποιήσεις, οι νέες εκφράσεις SE ισχύουν για αυθαίρετα συμπλέγματα, χωρικά συσχετιζόμενα κανάλια εξασθένισης Rayleigh, ατελή CSI, AP με οποιονδήποτε αριθμό N κεραιών και ευρετικά (heuristic) ή βελτιστοποιημένα σχήματα επεξεργασίας σήματος. Επίσης μελετάται υπό ποιες συνθήκες αυτές οι μέθοδοι είναι επεκτάσιμες. Μια νέα δυαδικότητα UL και DL αποδεικνύεται και χρησιμοποιείται για να σχεδιαστούν ευρετικά οι διαμορφωτές DL βάσει των διανυσμάτων συνδυασμού UL. Τα αριθμητικά αποτελέσματα χρησιμοποιούνται για να δείξουν ότι το προτεινόμενο κλιμακούμενο πλαίσιο επιτυγχάνει σχεδόν το ίδιο SE με τις προηγμένες μη κλιμακούμενες λύσεις και ξεπερνά κατά πολύ τον αρχικό μέγιστο λόγο (MR) που βασίζεται σε αλγόριθμους cell-free Massive MIMO.[44].

4.1 Μοντέλο συστήματος

Θεωρείται ένα CF δίκτυο που αποτελείται από K UEs μιας μόνο κεραιάς και L APs, το καθένα εξοπλισμένο με κεραιές N , 3 που κατανέμονται αυθαίρετα στην περιοχή κάλυψης. Τα AP συνδέονται με επεξεργαστές cloud-edge, που ονομάζονται CPU, με αυθαίρετο τρόπο. Αυτή η εγκατάσταση επιτρέπει κοινή μετάδοση και λήψη στα UE σε ολόκληρη την περιοχή κάλυψης και ονομάζεται Cell-Free Massive MIMO όταν τα L και K είναι μεγάλα. Τα AP και UE λειτουργούν σύμφωνα με ένα πρωτόκολλο TDD με πιλοτική φάση για εκτίμηση καναλιών και φάση μετάδοσης δεδομένων. Επίσης, κάθε πακέτο χωρίζεται σε τ_p τμήματα για τους UL πιλότους, τ_u για τις UL πληροφορίες και τ_d για DL πληροφορίες έτσι ώστε $\tau_c = \tau_p + \tau_u + \tau_d$. Επιπλέον, χρησιμοποιείται η μέθοδος εξασθένισης Rayleigh καθώς και κατανομής Gaussian. Η πρώτη εκφράζει την εξασθένιση υψηλής κλίμακας, συμπεριλαμβανομένου του γεωμετρικού pathloss, της σκίασης, των κερδών της κεραιάς και της χωρικής συσχέτισης των καναλιών, ενώ η δεύτερη μοντελοποιεί την εξασθένιση χαμηλής ισχύος. Τέλος λαμβάνεται υπόψη ότι, τα διανύσματα καναλιών διαφορετικών AP διανέμονται ανεξάρτητα και ότι οι πίνακες χωρικής συσχέτισης είναι διαθέσιμοι όπου χρειάζεται.

4.2 Προσομοιωτής

Εδώ, παρουσιάζονται περαιτέρω στοιχεία για τις λειτουργίες του αλγόριθμου που εξετάζεται και πιο συγκεκριμένα όσον αφορά την εκτίμηση του καναλιού, το UL και DL καθώς και την τοπολογία του μελετώμενου συστήματος.

4.2.1 Εκτίμηση καναλιού

Εδώ, γίνεται η πραγματοποίηση (realization) των καναλιών και υπολογίζονται οι εκτιμήσεις αυτών των καναλιών για όλα τα UE σε ολόκληρο το δίκτυο. Τα κανάλια θεωρείται ότι είναι συσχετισμένα ενώ η εξασθένηση Rayleigh και ο εκτιμητής MMSE χρησιμοποιούνται. Αρχικά, παράγονται μη συσχετιζόμενες πραγματοποιήσεις καναλιών με βάση το μοντέλο εξασθένησης Rayleigh. Στη συνέχεια, εξετάζονται όλα τα κανάλια και εφαρμόζονται οι πίνακες χωρικής συσχέτισης και εφαρμόζεται η συσχέτιση (correlation) στις μη συσχετιζόμενες πραγματοποιήσεις καναλιών. Έπειτα, πραγματοποιείται η εκτίμηση του καναλιού, καταρχήν με την δημιουργία ενός πίνακα ταυτότητας $N \times N$. Μετά, παράγονται οι πραγματοποιήσεις του κανονικοποιημένου θορύβου (realizations of normalized noise) και γίνεται η προετοιμασία για την αποθήκευση των αποτελεσμάτων. Τέλος εξετάζονται όλα τα APs και οι πιλότοι τους, για να υπολογιστεί το επεξεργασμένο πιλοτικό σήμα για όλα τα UE που χρησιμοποιούν t πιλότους καθώς και ο πίνακας που χρησιμοποιείται στον εκτιμητή MMSE. Εξετάζονται όλα τα UEs που χρησιμοποιούν t πιλότους και υπολογίζεται η εκτίμηση MMSE και ο πίνακας χωρικής συσχέτισης της εκτίμησης. Όλες οι εκτιμήσεις θεωρούνται ότι είναι συσχετισμένες (correlated) ενώ παράλληλα λαμβάνεται υπόψη το MMSE. Οι αμοιβαίες παρεμβολές που δημιουργούνται από τα UEs που μοιράζονται πιλότους προκαλούν τη λεγόμενη μόλυνση πιλότου (pilot contamination) που υποβαθμίζει την απόδοση του συστήματος, παρόμοια με την περίπτωση στο πρότυπο Massive MIMO. Η μόλυνση των πιλότων έχει δύο κύριες συνέπειες. Αρχικά, μειώνει την ποιότητα εκτίμησης που καθιστά τη συνεκτική μετάδοση λιγότερο αποτελεσματική. Έπειτα, οι εκτιμήσεις με βάση το MMSE συσχετίζονται, γεγονός που οδηγεί σε πρόσθετες παρεμβολές. Και τα δύο έχουν αντίκτυπο στην απόδοση των UE, αλλά είναι μόνο το δεύτερο που ευθύνεται για τις αποκαλούμενες συνεκτικές παρεμβολές, το οποίο έχει λάβει ιδιαίτερη προσοχή στη βιβλιογραφία δεδομένου ότι μπορεί να αυξηθεί ανάλογα με τις κεραιές του συστήματος, ακριβώς όπως και το σήμα. Αυτό καταπολεμάται επειδή στην περίπτωση που μελετάται κάθε AP εξυπηρετεί το πολύ ένα UE ανά πιλοτική διεργασία και χρησιμοποιεί όλες του τις κεραιές για να εξυπηρετεί αυτά τα UEs. Συνοπτικά, το UE ορίζει το AP με τον ισχυρότερο συντελεστή ξεθωριάσματος μεγάλης κλίμακας ως το Master AP και ανατίθεται στον πιλότο του η λιγότερη ισχύς. Όταν ένα UE μετακινείται ή άλλα UE φεύγουν ή συνδέονται στο δίκτυο, η προτεινόμενη διαδικασία πρόσβασης μπορεί να επαναληφθεί. Το UE μπορεί να ξεκινήσει μια τέτοια διαδικασία ορίζοντας ένα νέο Master AP, οπότε η διαδικασία προχωρά σαν το UE να είναι ανενεργό και τώρα έχει πρόσβαση στο δίκτυο. Το νέο Master AP ενημερώνει το προηγούμενο Master AP ότι έχει αναλάβει την υπηρεσία του UE. Εναλλακτικά, το τρέχον Master AP μπορεί να ενημερώνει περιοδικά την ανάθεση πιλότου και να ελέγχει εάν αυτός ο πιλότος θα οδηγούσε σε λιγότερη μόλυνση πιλότου από τον πιλότο που έχει εκχωρηθεί στο UE. Σε αυτήν την περίπτωση, ο πιλότος

αλλάζει. Το AP χρησιμοποιεί τις εκτιμήσεις καναλιών MMSE για τη λήψη των δεδομένων UL και για την προετοιμασία των δεδομένων DL. [44]

Κώδικας:

```

%% Generate channel realizations

%Generate uncorrelated Rayleigh fading channel realizations
H =
(randn(L*N,numberOfRealizations,K)+1i*randn(L*N,numberOfRealizations,K));

%Go through all channels and apply the spatial correlation matrices
for l = 1:L

    for k = 1:K

        %Apply correlation to the uncorrelated channel realizations
        Rsqrt = sqrtm(R(:,:,l,k));
        H((l-1)*N+1:l*N,:,k) = sqrt(0.5)*Rsqrt*H((l-1)*N+1:l*N,:,k);

    end

end

%% Perform channel estimation

%Store identity matrix of size N x N
eyeN = eye(N);

%Generate realizations of normalized noise
Np = sqrt(0.5)*(randn(N,numberOfRealizations,L,tau_p) +
1i*randn(N,numberOfRealizations,L,tau_p));

%Prepare to store results
Hhat = zeros(L*N,numberOfRealizations,K);

if nargin>2
    B = zeros(size(R));
end

if nargin>3
    C = zeros(size(R));
end

%Go through all APs
for l = 1:L

    %Go through all pilots
    for t = 1:tau_p

        %Compute processed pilot signal for all UEs that use pilot t

```

```

yp = sqrt(p)*tau_p*sum(H((1-1)*N+1:1*N, :, t==pilotIndex), 3) +
sqrt(tau_p)*Np(:, :, 1, t);

%Compute the matrix that is inverted in the MMSE estimator
PsiInv = (p*tau_p*sum(R(:, :, 1, t==pilotIndex), 4) + eyeN);

%Go through all UEs that use pilot t
for k = find(t==pilotIndex)'

    %Compute the MMSE estimate
    RPsi = R(:, :, 1, k) / PsiInv;
    Hhat((1-1)*N+1:1*N, :, k) = sqrt(p)*RPsi*yp;

    if nargout>2
        %Compute the spatial correlation matrix of the
estimate
        B(:, :, 1, k) = p*tau_p*RPsi*R(:, :, 1, k);
    end

    if nargout>3
        %Compute the spatial correlation matrix of the
estimation
        %error
        C(:, :, 1, k) = R(:, :, 1, k) - B(:, :, 1, k);
    end

end

end

end

end

```

4.2.2 Ανοδική κατεύθυνση

Εδώ, υπολογίζεται η ανοδική κατεύθυνση για την φασματική απόδοση για διαφορετικά σχήματα συνδυασμού λήψης χρησιμοποιώντας το όριο χωρητικότητας (capacity bound). Αρχικά, δημιουργείται ένας πίνακας ταυτότητας $N \times N$ και υπολογίζεται ο παράγοντας προθέματος λαμβάνοντας υπόψη μόνο τη μετάδοση δεδομένων κατερχόμενης ζεύξης. Έπειτα, γίνεται η προετοιμασία αποθήκευσης των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και υπολογίζονται όλοι οι όροι για τον συνδυασμό των MR. Εξετάζεται ποια UEs εξυπηρετούνται από το AP και εξάγεται η πληροφορία για τα UE, την κλίμακα του θορύβου, και το επιθυμητό σήμα. Μελετάται η συνεκτική (coherent) και μη-συνεκτική (non-coherent) παρέμβαση από το i UE στο k UE. Στη συνέχεια, εξετάζονται όλες οι δημιουργίες καναλιών και δημιουργείται ένας πίνακας για να αποθηκευτούν τα Monte-Carlo αποτελέσματα. Μετα, εξετάζονται όλα τα AP και εξάγονται οι πραγματοποιήσεις και εκτιμήσεις καναλιού από όλα τα UE σε ένα AP. Μελετάται ποια UE εξυπηρετούνται από 1 AP, υπολογίζεται το άθροισμα λάθους εκτίμησης των UE με ένα πίνακα και το τελικό κέρδος του σήματος από τα UE που φτάνει σε αλλά UE με τη χρήση της κωδικοποίησης LP-MMSE. Ύστερα, υπολογίζεται η ένταση παρεμβολής σε μια προσομοίωση και εξετάζονται όλα τα UE, καθορίζοντας το σύνολο των AP που εξυπηρετούν το καθένα από αυτά ολοκληρωτικά και μερικώς. Η κωδικοποίηση P-MMSE υπολογίζεται μέσω του αριθμητή και παρονομαστή του

SINR και μεθόδων Monte-Carlo, ενώ το SE υπολογίζεται στιγμιαία για κάθε προσομοίωση. Τέλος, υπολογίζονται οι κωδικοποιήσεις LP-MMSE και P-MMSE και συγκρίνονται μεταξύ τους. Αρχικά, παράγονται και αναλύονται εφικτές εκφράσεις UL φασματικής απόδοσης (spectral efficiency-SE) για το μοντέλο σήματος που μελετάται, το clustering δυναμικής συνεργασίας (dynamic cooperation clustering-DCC). Υποθέτουμε ότι τα AP αναθέτουν το έργο της αποκωδικοποίησης δεδομένων UL σε μια κοντινή CPU με υψηλούς υπολογιστικούς πόρους. Δύο επίπεδα συνεργασίας μεταξύ των AP περιγράφονται παρακάτω ως προς το εφικτό φορτίο σηματοδότησης SE και fronthaul. Στο πρώτο επίπεδο, τα πιλοτικά σήματα και τα δεδομένα που λαμβάνονται στα AP συγκεντρώνονται (μέσω των συνδέσεων fronthaul) στην CPU, η οποία πραγματοποιεί εκτίμηση καναλιών και ανίχνευση δεδομένων με έναν πλήρως συγκεντρωτικό τρόπο. Στο δεύτερο επίπεδο, τα AP χρησιμοποιούν τις διαθέσιμες εκτιμήσεις του καναλιού και το σήμα UL για να υπολογίσουν μικρότερα πακέτα πληροφορίας, τα οποία στέλνονται πίσω στην CPU για τελική αποκωδικοποίηση. Το πιο προηγμένο επίπεδο συνεργασίας μεταξύ των AP για την αποκωδικοποίηση του σήματος από τα UE είναι όταν τα AP στέλνουν πιλοτικά σήματα και σήματα δεδομένων, που φροντίζουν για την εκτίμηση καναλιών και την ανίχνευση δεδομένων με κεντρικό τρόπο. Με άλλα λόγια, τα AP λειτουργούν ως διακόπτες που προωθούν όλα τα σήματα στην CPU. Η CPU μπορεί να επιλέξει έναν αυθαίρετο φορέα συνδυασμού λήψης για UE βάσει του CSI της. Η συλλογική εκτίμηση καναλιών μπορεί να υπολογιστεί μόνο εν μέρει, καθώς μόνο ορισμένα AP στέλνουν τα ληφθέντα πιλοτικά σήματα. [44]

Κώδικας:

```
%Store the N x N identity matrix
eyeN = eye(N);

%Compute the prelog factor assuming only downlink data transmission
prelogFactor = (1-tau_p/tau_c);

%Prepare to store simulation results
signal_MR = zeros(K,1);
interf_MR = zeros(K,1);
cont_MR = zeros(K,K);
scaling_MR = zeros(K,L);

if nargin > 1
    signal_LP_MMSE = zeros(K,1);
    interf_LP_MMSE = zeros(K,1);
    scaling_LP_MMSE = zeros(L,K,nbrOfRealizations);
    interUserGains_LP_MMSE = zeros(K,K,nbrOfRealizations);
end

if nargin > 2
    SE_P_MMSE = zeros(K,1);
end
```

```

if nargout > 3
    SE_MMSE = zeros(K,1);
end

%% Compute scaling factors for the combining vectors

%Compute all terms in Corollary 2 for MR combining
for l = 1:L
    %Extract which UEs are served by the AP
    servedUEs = find(D(l,')==1);

    %Go through all UEs served by the AP
    for ind = 1:length(servedUEs)

        %Extract UE index
        k = servedUEs(ind);

        %Noise scaling
        scaling_MR(k,l) = trace(B(:, :, l, k));

        %Desired signal term
        signal_MR(k) = signal_MR(k) +
sqrt(p)*real(trace(B(:, :, l, k)));

        for i = 1:K

            %Non-coherent interference from UE i to UE k
            interf_MR(k) = interf_MR(k) +
p*real(trace(B(:, :, l, k)*R(:, :, l, i))); %/real(trace(B(:, :, l, k)));

            if pilotIndex(k) == pilotIndex(i)

                %Coherent interference from UE i to UE k
                cont_MR(i,k) = cont_MR(i,k) +
sqrt(p)*real(trace((B(:, :, l, k)/R(:, :, l, k))*R(:, :, l, i)));
%/sqrt(real(trace(B(:, :, l, k))));

            end

        end

    end

end

end

end

%% Go through all channel realizations
for n = 1:nbrOfRealizations

```

```

%Matrix to store Monte-Carlo results for this realization
if nargout > 1
    interf_LP_MMSE_n = zeros(K,K);
end

%Go through all APs
for l = 1:L

    %Extract channel realizations from all UEs to AP l
    Hallj = reshape(H((l-1)*N+1:l*N,n,:), [N K]);

    %Extract channel estimates from all UEs to AP l
    Hhatallj = reshape(Hhat((l-1)*N+1:l*N,n,:), [N K]);

    %Extract which UEs are served by AP l
    servedUEs = find(D(l,)==1);

    %Compute sum of estimation error covariance matrices of the
UEs
    %served by AP l
    Cserved = sum(C(:, :, l, servedUEs), 4);

    %Compute MR combining
    V_MR = Hhatallj(:, servedUEs);

    if nargout > 1 %Compute LP-MMSE combining
        V_LP_MMSE = p*(p*(V_MR*V_MR'+Cserved)+eyeN)\V_MR;
    end

    %Go through all UEs served by the AP
    for ind = 1:length(servedUEs)

        %Extract UE index
        k = servedUEs(ind);

        %%LP-MMSE combining
        if nargout > 1

            %Compute LP-MMSE combining
            v = V_LP_MMSE(:, ind);

            %Compute realizations of the terms inside the
expectations
            %of the signal and interference terms
            signal_LP_MMSE(k) = signal_LP_MMSE(k) +
(Hallj(:, k)'*v)/nbrOfRealizations;
            interf_LP_MMSE_n(:, k) = interf_LP_MMSE_n(:, k) +
Hallj'*v;
            scaling_LP_MMSE(l, k, n) = norm(v).^2;

            %Compute gain of the signal from UE that arrives at
other UEs
            interUserGains_LP_MMSE(:, k, n) =
interUserGains_LP_MMSE(:, k, n) + Hallj'*v;

```

```

end

end

end

%Compute interference power in one realization
if nargout > 1
    interf_LP_MMSE = interf_LP_MMSE +
sum(abs(interf_LP_MMSE_n).^2,1)'/nbrOfRealizations;
end

%Consider the centralized schemes
if nargout > 2

    %Go through all UEs
    for k = 1:K

        %Determine the set of serving APs
        servingAPs = find(D(:,k)==1);
        La = length(servingAPs);

        %Determine which UEs that are served by partially the
same set
        %of APs as UE k
        servedUEs = sum(D(servingAPs,:),1)>=1;

        %Extract channel realizations and estimation error
correlation
        %matrices for the APs that involved in the service of UE
k
        Hhatallj_active = zeros(N*La,K);
        C_tot_blk = zeros(N*La,N*La);
        C_tot_blk_partial = zeros(N*La,N*La);

        for l = 1:La
            Hhatallj_active((l-1)*N+1:l*N,:) =
reshape(Hhat((servingAPs(l)-1)*N+1:servingAPs(l)*N,n,:), [N K]);
            C_tot_blk((l-1)*N+1:l*N, (l-1)*N+1:l*N) =
sum(C(:, :, servingAPs(l), :), 4);
            C_tot_blk_partial((l-1)*N+1:l*N, (l-1)*N+1:l*N) =
sum(C(:, :, servingAPs(l), servedUEs), 4);
        end

        %Compute P-MMSE combining
        v =
p*(p*(Hhatallj_active(:, servedUEs)*Hhatallj_active(:, servedUEs)'+C_to
t_blk_partial)+eye(La*N))\Hhatallj_active(:,k);

        %Compute numerator and denominator of instantaneous SINR
        numerator = p*abs(v'*Hhatallj_active(:,k))^2;
        denominator = p*norm(v'*Hhatallj_active)^2 +
v'*(p*C_tot_blk+eye(La*N))*v - numerator;

        %Compute instantaneous SE for one channel realization

```

```

SE_P_MMSE(k) = SE_P_MMSE(k) +
prelogFactor*real(log2(1+numerator/denominator))/nbrOfRealizations;

%Compute MMSE combining
v =
p*(p*(Hhatal1j_active*Hhatal1j_active'+C_tot_blk)+eye(La*N))\Hhatal1j
_active(:,k);

%Compute numerator and denominator of instantaneous SINR
numerator = p*abs(v'*Hhatal1j_active(:,k))^2;
denominator = p*norm(v'*Hhatal1j_active)^2 +
v'*(p*C_tot_blk+eye(La*N))*v - numerator;

%Compute instantaneous SE for one channel realization
SE_MMSE(k) = SE_MMSE(k) +
prelogFactor*real(log2(1+numerator/denominator))/nbrOfRealizations;

end

end

end

% Compute the SEs with different combining

%Compute SE with MR using the closed-form expression in Corollary 2
SE_MR = prelogFactor*real(log2(1+(abs(signal_MR).^2) ./ (interf_MR +
sum(abs(cont_MR).^2,1)' - abs(signal_MR).^2 + sum(Scaling_MR,2)))));

%Compute SE with LP-MMSE using Monte Carlo method
if nargin > 1
SE_LP_MMSE = prelogFactor*real(log2(1+(abs(signal_LP_MMSE).^2) ./
(interf_LP_MMSE - abs(signal_LP_MMSE).^2 +
sum(mean(Scaling_LP_MMSE,3),1)'/p ))));
end

```

4.2.3 Καθοδική κατεύθυνση

Εδώ, υπολογίζεται το DL SE για διαφορετικά σχήματα κωδικοποίησης. Αρχικά, δημιουργείται ένας πίνακας ταυτότητας $N \times N$ και υπολογίζεται ο παράγοντας προθέματος (prelog factor) λαμβάνοντας υπόψη μόνο τη μετάδοση δεδομένων κατερχόμενης ζεύξης. Έπειτα, γίνεται η προετοιμασία αποθήκευσης των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι παράγοντες κλιμάκωσης για την κωδικοποίηση, καταρχήν με τον υπολογισμό της κωδικοποίησης MR. Εξάγεται ποια UE εξυπηρετούνται από το AP 1 και υπολογίζεται ο κλιμακωτός παράγοντας (scaling factor) για τον πίνακα χωρικής συσχέτισης της εκτίμησης καναλιού. Ύστερα, υπολογίζεται η κωδικοποίηση LP-MMSE και P-MMSE. Όσον αφορά την κωδικοποίηση LP-MMSE, πρώτα εξάγονται ποια UE εξυπηρετούνται από κάθε AP και υπολογίζεται το άθροισμα των πινάκων συνδιακύμανσης σφάλματος εκτίμησης (estimation error covariance matrices) του καναλιού των UE που

εξυπηρετούνται από το AP 1. Υπολογίζεται η κωδικοποίηση LP-MMSE και του συντελεστή κλιμάκωσης με μεθόδους Monte Carlo. Όσον αφορά την κωδικοποίηση P-MMSE, αρχικά εξετάζονται όλα τα UE και εξακριβώνεται ποια AP ακριβώς τα εξυπηρετούν και ποια AP τα εξυπηρετούν μερικώς (αυτά τα UE χαρακτηρίζονται ως k). Εξάγονται οι πραγματοποιήσεις του καναλιού και οι πίνακες συσχέτισης λάθους καναλιού για τα AP που εμπλέκονται με την εξυπηρέτηση των k UE και τελικά πραγματοποιείται η κωδικοποίηση P-MMSE και υπολογίζεται ο συντελεστής κλιμάκωσης με μεθόδους Monte Carlo. Αρχικά παράγονται εφικτές εκφράσεις DL SE για το μοντέλο σήματος DCC και χρησιμοποιείται ο όρος σκλήρυνση (hardening), που χρησιμοποιείται ευρέως στη βιβλιογραφία Cell-free Massive MIMO, για τον υπολογισμό του SE. Το DL SE εξαρτάται από τα κανονικοποιημένα διαμορφωτικά διανύσματα σε αντίθεση με τα UL SEs στις που εξαρτώνται μόνο από τον φορέα συνδυασμού του UE. Ως εκ τούτου, ενώ ο συνδυασμός λήψης μπορεί να βελτιστοποιηθεί με βάση το UE, οι διαμορφωμένοι φορείς πρέπει ιδανικά να βελτιστοποιηθούν από κοινού για όλα τα UE, κάτι που δεν είναι επεκτάσιμο. Για να αποκτηθεί μια καλή ευρετική λύση, χρησιμοποιείται η μέθοδος δυαδικότητας UL-DL. Τα SINR που επιτυγχάνονται στο UL είναι επίσης εφικτά στο DL, επιλέγοντας σωστά τους συντελεστές ελέγχου ισχύος και τα κανονικά διαμορφωμένα διανύσματα. Παρά τη δυαδικότητα UL-DL, το SE συνήθως διαφέρει σε UL και DL, καθώς η απαιτούμενη πολιτική ελέγχου ισχύος έχει μη επεκτάσιμη πολυπλοκότητα και οι περιορισμοί ισχύος σε UL και DL το εμποδίζουν επίσης να χρησιμοποιηθεί πλήρως. Ωστόσο, προτείνεται να επιλεγθούν κωδικοποιητές DL σε cell-free δίκτυα με βάση τους συνδυαστές UL. Αυτό πρέπει να γίνει με βάση τις διαθέσιμες εκτιμήσεις καναλιών ενώ, εάν η επιλογή UL είναι επεκτάσιμη το ίδιο συμβαίνει και στο DL. Όπως και στο UL, θεωρούνται δύο επίπεδα συνεργασίας μεταξύ των AP όσον αφορά τον σχεδιασμό κωδικοποίησης. Και στα δύο επίπεδα, τα AP αναθέτουν την διαδικασία κωδικοποίησης δεδομένων DL σε μια κοντινή CPU. Δύο πιθανά σχήματα κωδικοποίησης που ικανοποιούν την απαίτηση επεκτασιμότητας είναι το κλασικό MR και το νέο τοπικό MMSE (local MMSE-LP-MMSE). Το MR είναι επίσης γνωστό ως συζευγμένη δέσμη δομών και είναι το τυπικό σχήμα στη βιβλιογραφία Cell-Free Massive MIMO, ενώ αυτή είναι η πρώτη φορά που λαμβάνεται υπόψη η κωδικοποίηση LP-MMSE. Το πλεονέκτημα αυτού του σχήματος έναντι του MR είναι διπλό αφού: 1) καταστέλλει τις χωρικές παρεμβολές εάν το $N > 1$ αφού η συνάρτηση μεγιστοποιεί την αναλογία μεταξύ της επιθυμητής ισχύος σήματος και των παρεμβολών που προκαλούνται στα άλλα UE που εξυπηρετούνται από το ίδιο AP και 2) μειώνει τις παραλλαγές στο αποτελεσματικό κέρδος των επιθυμητών και παρεμβατικών καναλιών για οποιοδήποτε N . Τα κέρδη του καναλιού έχουν περίπου τις ίδιες μέσες τιμές, αλλά το MR δίνει μια άπειρη εκθετική κατανομή (infinite tail), ενώ το LP-MMSE έχει μια μικρή και συμπαγή λύση. Αυτή η συμπεριφορά οδηγεί σε υψηλότερο SE όταν χρησιμοποιείται LP-MMSE υπό παρεμβολή μεταξύ χρηστών.[44]

Κωδικας:

```
%Store the N x N identity matrix
eyeN = eye(N);
```

```
%Compute the prelog factor assuming only downlink data transmission
prelogFactor = (1-tau_p/tau_c);
```

```
%Prepare to store simulation results
signal_MR = zeros(K,1);
```



```

interf_MR = zeros(K,1);
cont_MR = zeros(K,K);
scaling_MR = zeros(L,K);
interUserGains_MR = zeros(K,K,nbrOfRealizations);

if nargout > 1
    signal_LP_MMSE = zeros(K,1);
    interf_LP_MMSE = zeros(K,1);
    scaling_LP_MMSE = zeros(L,K);
    interUserGains_LP_MMSE = zeros(K,K,nbrOfRealizations);
end

if nargout > 4
    signal_P_MMSE = zeros(K,1);
    interf_P_MMSE = zeros(K,1);
    scaling_P_MMSE = zeros(K,1);
    interUserGains_P_MMSE = zeros(K,K,nbrOfRealizations);
end

%% Compute scaling factors for precoding

%Computation for MR precoding
for l = 1:L

    %Extract which UEs are served by AP l
    servedUEs = find(D(l,)==1);

    for ind = 1:length(servedUEs)

        %Compute scaling factor using the spatial correlation matrix
of the
        %channel estimate
        scaling_MR(l,servedUEs(ind)) =
trace(B(:, :, l, servedUEs(ind)));

    end

end

%Computation for LP-MMSE and P-MMSE precoding
if nargout > 1

    for n = 1:nbrOfRealizations

        %LP-MMSE precoding
        for l = 1:L

            %Extract which UEs are served by the AP
            servedUEs = find(D(l,)==1);

            %Compute sum of estimation error covariance matrices of
the UEs
            %served by AP l
            Cserved = sum(C(:, :, l, servedUEs), 4);

```

```

        %Compute LP-MMSE precoding
        V_MR = reshape(Hhat((l-1)*N+1:l*N,n,:), [N K]);
        V_LP_MMSE =
p*( (p*(V_MR(:,servedUEs)*V_MR(:,servedUEs)'+Cserved)+eyeN)\V_MR(:,ser
vedUEs));

        %Compute scaling factor by Monte Carlo methods
        scaling_LP_MMSE(l,servedUEs) =
scaling_LP_MMSE(l,servedUEs) +
sum(abs(V_LP_MMSE).^2,1)/nbrOfRealizations;

    end

    %P-MMSE precoding
    if nargout > 4

        %Go through all UEs
        for k = 1:K

            %Determine the set of serving APs
            servingAPs = find(D(:,k)==1);
            La = length(servingAPs);

            %Determine which UEs that are served by partially the
same set
            %of APs as UE k
            servedUEs = sum(D(servingAPs,:),1)>=1;

            %Extract channel realizations and estimation error
correlation
            %matrices for the APs that involved in the service of
UE k
            Hhatallj_active = zeros(N*La,K);
            C_tot_blk = zeros(N*La,N*La);
            C_tot_blk_partial = zeros(N*La,N*La);

            for l = 1:La
                Hhatallj_active((l-1)*N+1:l*N,:) =
reshape(Hhat((servingAPs(l)-1)*N+1:servingAPs(l)*N,n,:), [N K]);
                C_tot_blk((l-1)*N+1:l*N,(l-1)*N+1:l*N) =
sum(C(:, :, servingAPs(l), :), 4);
                C_tot_blk_partial((l-1)*N+1:l*N,(l-1)*N+1:l*N) =
sum(C(:, :, servingAPs(l), servedUEs), 4);
            end

            %Compute P-MMSE precoding
            V_P_MMSE =
p*( (p*(Hhatallj_active(:,servedUEs)*Hhatallj_active(:,servedUEs)'+C_t
ot_blk_partial)+eye(La*N))\Hhatallj_active(:,k));

            %Compute scaling factor by Monte Carlo methods
            scaling_P_MMSE(k) = scaling_P_MMSE(k) +
sum(abs(V_P_MMSE).^2,1)/nbrOfRealizations;

        end
    end

```

```

        end

    end

end

%Compute all terms in Corollary 3 for MR precoding
for l = 1:L

    %Extract which UEs are served by the AP
    servedUEs = find(D(l, :)==1);

    %Go through all UEs served by the AP
    for ind = 1:length(servedUEs)

        %Extract UE index
        k = servedUEs(ind);

        %Desired signal term
        signal_MR(k) = signal_MR(k) +
sqrt(rho_dist(l, k)*real(trace(B(:, :, l, k))));

        for i = 1:K

            %Non-coherent interference from UE k to UE i
            interf_MR(i) = interf_MR(i) +
rho_dist(l, k)*real(trace(B(:, :, l, k)*R(:, :, l, i)))/real(trace(B(:, :, l, k)
)));

            if pilotIndex(k) == pilotIndex(i)

                %Coherent interference from UE k to UE i
                cont_MR(i, k) = cont_MR(i, k) +
sqrt(rho_dist(l, k))*real(trace((B(:, :, l, k)/R(:, :, l, k))*R(:, :, l, i)))/s
qrt(real(trace(B(:, :, l, k))));

            end

        end

    end

end

end

%% Go through all channel realizations
for n = 1:nbOfRealizations

    %Matrix to store Monte-Carlo results for this realization
    if nargout > 1
        interf_LP_MMSE_n = zeros(K, K);
    end

    if nargout > 4
        interf_P_MMSE_n = zeros(K, K);
    end
end

```

```

end

%Go through all APs
for l = 1:L

    %Extract channel realizations from all UEs to AP l
    Hallj = reshape(H((l-1)*N+1:l*N,n,:), [N K]);

    %Extract channel estimates from all UEs to AP l
    Hhatallj = reshape(Hhat((l-1)*N+1:l*N,n,:), [N K]);

    %Extract which UEs are served by the AP
    servedUEs = find(D(l,)==1);

    %Compute MR precoding
    V_MR = Hhatallj(:,servedUEs);

    if nargout > 1 %Compute LP-MMSE precoding

        %Compute sum of estimation error covariance matrices of
the UEs
        %served by AP l
        Cserved = sum(C(:, :, l, servedUEs), 4);

        V_LP_MMSE = p*((p*(V_MR*V_MR'+Cserved)+eyeN)\V_MR);

    end

    %Go through all UEs served by the AP
    for ind = 1:length(servedUEs)

        %Extract UE index
        k = servedUEs(ind);

        %%Normalize MR precoding
        w = V_MR(:,ind)*sqrt(rho_dist(l,k)/scaling_MR(l,k));

        %Compute gain of the signal from UE that arrives at other
UEs
        interUserGains_MR(:,k,n) = interUserGains_MR(:,k,n) +
Hallj'*w;

        %%LP-MMSE precoding
        if nargout > 1

            %Normalize LP-MMSE precoding
            w =
V_LP_MMSE(:,ind)*sqrt(rho_dist(l,k)/scaling_LP_MMSE(l,k));

            %Compute realizations of the terms inside the
expectations
            %of the signal and interference terms
            signal_LP_MMSE(k) = signal_LP_MMSE(k) +
(Hallj(:,k)'*w)/nbrOfRealizations;

```

```

interf_LP_MMSE_n(:,k) = interf_LP_MMSE_n(:,k) +
Hallj'*w;

%Compute gain of the signal from UE that arrives at
other UEs
interUserGains_LP_MMSE(:,k,n) =
interUserGains_LP_MMSE(:,k,n) + Hallj'*w;

end

end

end

%Consider the centralized P-MMSE precoding scheme
if narginout > 4

%Go through all UEs
for k = 1:K

%Determine the set of serving APs
servingAPs = find(D(:,k)==1);
La = length(servingAPs);

%Determine which UEs that are served by partially the
same set
%of APs as UE k
servedUEs = sum(D(servingAPs,:),1)>=1;

%Extract channel realizations and estimation error
correlation
%matrices for the APs that involved in the service of UE
k
Hhatallj_active = zeros(N*La,K);
Hallj_active = zeros(N*La,K);
C_tot_blk = zeros(N*La,N*La);
C_tot_blk_partial = zeros(N*La,N*La);

for l = 1:La
Hhatallj_active((l-1)*N+1:l*N,:) =
reshape(Hhat((servingAPs(l)-1)*N+1:servingAPs(l)*N,n,:), [N K]);
Hallj_active((l-1)*N+1:l*N,:) =
reshape(H((servingAPs(l)-1)*N+1:servingAPs(l)*N,n,:), [N K]);
C_tot_blk((l-1)*N+1:l*N, (l-1)*N+1:l*N) =
sum(C(:, :, servingAPs(l), :), 4);
C_tot_blk_partial((l-1)*N+1:l*N, (l-1)*N+1:l*N) =
sum(C(:, :, servingAPs(l), servedUEs), 4);
end

%Compute P-MMSE precoding
w =
p*(p*(Hhatallj_active(:,servedUEs)*Hhatallj_active(:,servedUEs)'+C_tot_blk_partial)+eye(La*N))\Hhatallj_active(:,k));

%Apply power allocation
w = w*sqrt(rho_central(k)/scaling_P_MMSE(k));

```

```

        %Compute realizations of the terms inside the
expectations
        %of the signal and interference terms
        signal_P_MMSE(k) = signal_P_MMSE(k) +
(Hallj_active(:,k)'*w)/nbrOfRealizations;
        interf_P_MMSE_n(:,k) = interf_P_MMSE_n(:,k) +
Hallj_active'*w;

        %Compute gain of the signal from UE that arrives at other
UEs
        interUserGains_P_MMSE(:,k,n) =
interUserGains_P_MMSE(:,k,n) + Hallj_active'*w;

    end

end

    %Compute interference power in one realization
    if nargout > 1
        interf_LP_MMSE = interf_LP_MMSE +
sum(abs(interf_LP_MMSE_n).^2,2)/nbrOfRealizations;
    end

    if nargout > 1
        interf_P_MMSE = interf_P_MMSE +
sum(abs(interf_P_MMSE_n).^2,2)/nbrOfRealizations;
    end

end

% Compute the SEs with different precoding schemes

%Compute SE with MR using the closed-form expressions in Corollary 3
SE_MR = prelogFactor*real(log2(1+(abs(signal_MR).^2) ./ (interf_MR +
sum(abs(cont_MR).^2,2) - abs(signal_MR).^2 + 1)));

%Compute SE with LP-MMSE
if nargout > 1
    SE_LP_MMSE = prelogFactor*real(log2(1+(abs(signal_LP_MMSE).^2) ./
(interf_LP_MMSE - abs(signal_LP_MMSE).^2 + 1)));
end

%Compute SE with P-MMSE
if nargout > 1
    SE_P_MMSE = prelogFactor*real(log2(1+(abs(signal_P_MMSE).^2) ./
(interf_P_MMSE - abs(signal_P_MMSE).^2 + 1)));
end

%Prepare to compute SEs with perfect CSI at the UEs
if nargout > 2
    SE_MR_perfect = zeros(K,1);
end

if nargout > 3

```

```

    SE_LP_MMSE_perfect = zeros(K,1);
end

if nargout > 5
    SE_P_MMSE_perfect = zeros(K,1);
end

for k = 1:K

    %Compute SE with MR precoding, assuming perfect CSI at the UE
    if nargout > 2

        SE_MR_perfect(k) = prelogFactor*mean(log2( 1 +
abs(interUserGains_MR(k,k,:)).^2 ./ (
sum(abs(interUserGains_MR(k,[1:k-1 k+1:end],:)).^2,2) + 1) ),3);
    end

    %Compute SE with LP-MMSE precoding, assuming perfect CSI at the
    UE
    if nargout > 3

        SE_LP_MMSE_perfect(k) = prelogFactor*mean(log2( 1 +
abs(interUserGains_LP_MMSE(k,k,:)).^2 ./ (
sum(abs(interUserGains_LP_MMSE(k,[1:k-1 k+1:end],:)).^2,2) + 1) ),3);
    end

    %Compute SE with P-MMSE precoding, assuming perfect CSI at the UE
    if nargout > 5

        SE_P_MMSE_perfect(k) = prelogFactor*mean(log2( 1 +
abs(interUserGains_P_MMSE(k,k,:)).^2 ./ (
sum(abs(interUserGains_P_MMSE(k,[1:k-1 k+1:end],:)).^2,2) + 1) ),3);
    end

end

```

4.2.4 Χωρική συσχέτιση (local scattering)

Εδώ, δημιουργείται ένας πίνακας χωρικής συσχέτισης για το τοπικό μοντέλο scattering, για διαφορετικές γωνιακές κατανομές (angular distributions). Αρχικά, ρυθμίζεται η απόσταση της κεραίας εάν δεν καθορίζεται από την είσοδο (input) από κάποιον χρήστη και διαιρείται δια 2. Έπειτα, η γωνιακή κατανομή αλλάζει σε Gaussian εάν δεν καθορίζεται από είσοδο χρήστη και υπολογίζονται οι διάφορες γωνιακές κατανομές σε ακτίνια ανάλογα με την είσοδο του χρήστη. Ο πίνακας συσχέτισης έχει μορφή Toeplitz άρα χρειάζεται απλά να υπολογιστεί η πρώτη σειρά του πίνακα. Στη συνέχεια, εξετάζονται όλες οι στήλες της πρώτης σειράς του πίνακα και ανάλογα με την απόσταση από την πρώτη κεραία και τον μετασχηματισμό σε Gaussian υπολογίζεται ο ακέραιος συμπεριλαμβάνοντας 20 τυπικές αποκλίσεις. για ομοιόμορφη γωνιακή κατανομή, ορίζεται το άνω και κάτω όριο της ομοιόμορφης κατανομής και υπολογίζεται το ολοκλήρωμα σε ολόκληρο το διάστημα. Για γωνιακή κατανομή Laplace, ορίζεται η παράμετρος κλίμακας της κατανομής Laplace και υπολογίζεται ο ακέραιος συμπεριλαμβάνοντας 20 τυπικές αποκλίσεις. Τέλος, υπολογίζεται ο ολοκληρωμένος πίνακας χωρικής συσχέτισης χρησιμοποιώντας τη δομή Toeplitz.

Κώδικας:

```
%Set the antenna spacing if not specified by input
if nargin < 4

    %Half a wavelength distance
    antennaSpacing = 1/2;

end

%Set angular distribution to Gaussian if not specified by input
if nargin<5
    distribution = 'Gaussian';
end

%Compute the ASD in radians based on input
ASD = ASDdeg*pi/180;

%The correlation matrix has a Toeplitz structure, so we only need to
%compute the first row of the matrix
firstRow = zeros(M,1);

%Go through all the columns of the first row
for column = 1:M

    %Distance from the first antenna
    distance = antennaSpacing*(column-1);

    %For Gaussian angular distribution
    if strcmp(distribution,'Gaussian')

        %Define integrand of (2.23)
        F = @(Delta)exp(1i*2*pi*distance*sin(theta+Delta)).*exp(-
Delta.^2/(2*ASD^2))/(sqrt(2*pi)*ASD);

        %Compute the integral in (2.23) by including 20 standard
        deviations
        firstRow(column) = integral(F,-20*ASD,20*ASD);

    %For uniform angular distribution
    elseif strcmp(distribution,'Uniform')

        %Set the upper and lower limit of the uniform distribution
        limits = sqrt(3)*ASD;

        %Define integrand of (2.23)
        F =
        @(Delta)exp(1i*2*pi*distance*sin(theta+Delta))/(2*limits);

        %Compute the integral in (2.23) over the entire interval
```



```

firstRow(column) = integral(F,-limits,limits);

%For Laplace angular distribution
elseif strcmp(distribution,'Laplace')

%Set the scale parameter of the Laplace distribution
LaplaceScale = ASD/sqrt(2);

%Define integrand of (2.23)
F = @(Delta)exp(1i*2*pi*distance*sin(theta+Delta)).*exp(-
abs(Delta)/LaplaceScale)/(2*LaplaceScale);

%Compute the integral in (2.23) by including 20 standard
deviations
firstRow(column) = integral(F,-20*ASD,20*ASD);

end

end

%Compute the spatial correlation matrix by utilizing the Toeplitz
structure
R = toeplitz(firstRow);

```

4.2.5 Διαμόρφωση προσομοιωτή

Αυτή η συνάρτηση δημιουργεί πραγματοποιήσεις (realizations) της διαμόρφωσης του προσομοιωτή. Αρχικά, ορίζεται το μέγεθος της περιοχής κάλυψης να ισούται με 2000 μέτρα. Έπειτα ορίζεται το μοντέλο διάδοσης, ορίζοντας το εύρος ζώνης επικοινωνίας, την ένταση του θορύβου (σε dB), τον εκφραστή pathloss και την τυπική απόκλιση τις εξασθένισης της σκίασης. Στη συνέχεια, υπολογίζεται η ισχύς του θορύβου και το κέρδος του καναλιού σε DB σε απόσταση αναφοράς 1 μέτρου, λαμβάνοντας υπόψη ότι -35,3 dB αντιστοιχεί σε -148,1 dB σε 1 km. Μετα, ορίζεται η απόσταση της κεραίας (σε αριθμό μήκους κύματος), η γωνιακή τυπική απόκλιση γύρω από την ονομαστική γωνία (μετρούμενη σε μοίρες) και το όριο όταν ένα μη κύριο AP αποφασίζει να εξυπηρετήσει ένα UE. Ύστερα, εξετάζονται όλα τα setups και υπολογίζονται, οι τοποθεσίες των τυχαία κατανεμημένων AP, με ομοιόμορφη κατανομή, οι αποστάσεις, υποθέτοντας ότι τα AP είναι 10 μέτρα πάνω από τα UE και το κέρδος καναλιού δια του θορύβου. Προσδιορίζεται το κύριο AP για k UE αναζητώντας AP με την καλύτερη κατάσταση καναλιού, ορθογωνικοί πιλότοι αντιστοιχίζονται στα πρώτα UE και απλοί στα υπόλοιπα UE, υπολογίζεται η ληφθείσα ισχύ από το κύριο AP από κάθε χειριστή και βρίσκεται ο πιλότος με τη λιγότερη ισχύ δέκτη. Στη συνέχεια, εξετάζονται όλα τα AP και υπολογίζεται η ονομαστική γωνία μεταξύ k UE και i AP και δημιουργείται ένας κανονικοποιημένος πίνακας χωρικής συσχέτισης χρησιμοποιώντας το τοπικό μοντέλο scattering. Κάθε AP εξυπηρετεί το UE με την ισχυρότερη κατάσταση καναλιού σε καθέναν από τους πιλότους όπου το AP δεν είναι το κύριο AP, αλλά μόνο αν το κανάλι του δεν είναι πολύ αδύναμο σε σύγκριση με το κύριο AP. Τέλος, βρίσκεται το UE με t

πιλότο με το καλύτερο κανάλι και αυτό το UE εξυπηρετείται εφόσον το κανάλι είναι το πολύ οριακά ασθενέστερο από το κανάλι του κύριου AP.

Κώδικας:

```
%Size of the coverage area (as a square with wrap-around)
squareLength = 2000; %meter

%% Define propagation model

%Communication bandwidth
B = 20e6;

%Noise figure (in dB)
noiseFigure = 7;

%Compute noise power
noiseVarianceDbm = -174 + 10*log10(B) + noiseFigure;

%Pathloss exponent
alpha = 3.76;

%Standard deviation of shadow fading
sigma_sf = 10;

%Average channel gain in dB at a reference distance of 1 meter. Note
that
%-35.3 dB corresponds to -148.1 dB at 1 km, using pathloss exponent
3.76
constantTerm = -35.3;

%Define the antenna spacing (in number of wavelengths)
antennaSpacing = 1/2; %Half wavelength distance

%Angular standard deviation around the nominal angle (measured in
degrees)
ASDdeg = 20;

%Set threshold for when a non-master AP decides to serve a UE
threshold = -40; %dB

%Prepare to save results
gainOverNoisedB = zeros(L,K,nbrOfSetups);
R = zeros(N,N,L,K,nbrOfSetups);
distances = zeros(L,K,nbrOfSetups);
pilotIndex = zeros(K,nbrOfSetups);
D = zeros(L,K,nbrOfSetups);
masterAPs = zeros(K,1);

%% Go through all setups
for n = 1:nbrOfSetups
```

```

%Random AP locations with uniform distribution
APpositions = (rand(L,1) + li*rand(L,1)) * squareLength;

%Random UE locations with uniform distribution
UEpositions = (rand(K,1) + li*rand(K,1)) * squareLength;

%Compute alternative AP locations by using wrap around
wrapHorizontal = repmat([-squareLength 0 squareLength],[3 1]);
wrapVertical = wrapHorizontal';
wrapLocations = wrapHorizontal(:)' + li*wrapVertical(:)';
APpositionsWrapped = repmat(APpositions,[1
length(wrapLocations)]) + repmat(wrapLocations,[L 1]);

for k = 1:K

    %Compute distances assuming that the APs are 10 m above the
    UEs
    [distancetoUE,whichpos] = min(abs(APpositionsWrapped -
repmat(UEpositions(k),size(APpositionsWrapped)),[],2);
    distances(:,k,n) = sqrt(10^2+distancetoUE.^2);

    %Compute the channel gain divided by noise power
    gainOverNoisedB(:,k,n) = constantTerm -
alpha*10*log10(distances(:,k,n)) +
sigma_sf*randn(size(distances(:,k,n))) - noiseVarianceBm;

    %Determine the master AP for UE k by looking for AP with best
    %channel condition
    [~,master] = max(gainOverNoisedB(:,k,n));
    D(master,k,n) = 1;
    masterAPs(k) = master;

    %Assign orthogonal pilots to the first tau_p UEs
    if k <= tau_p

        pilotIndex(k,n) = k;

    else %Assign pilot for remaining UEs

        %Compute received power from to the master AP from each
        pilot
        pilotinterference = zeros(tau_p,1);

        for t = 1:tau_p

            pilotinterference(t) =
sum(db2pow(gainOverNoisedB(master,pilotIndex(1:k-1,n)==t,n)));

        end

        %Find the pilot with the least receiver power
        [~,bestpilot] = min(pilotinterference);
        pilotIndex(k,n) = bestpilot;

```

```

end

%Go through all APs
for l = 1:L

    %Compute nominal angle between UE k and AP l
    angletoUE = angle(UEpositions(k) -
APpositionsWrapped(l,whichpos(l)));

    %Generate normalized spatial correlation matrix using the
local
    %scattering model
    R(:, :, l, k, n) =
db2pow(gainOverNoisedB(l, k, n)) * functionRlocalscattering(N, angletoUE, A
SDdeg, antennaSpacing);

end

end

%Each AP serves the UE with the strongest channel condition on
each of
%the pilots where the AP isn't the master AP, but only if its
channel
%is not too weak compared to the master AP
for l = 1:L

    for t = 1:tau_p

        pilotUEs = find(t==pilotIndex(:,n));

        if sum(D(l,pilotUEs,n)) == 0 %If the AP is not a master
AP

            %Find the UE with pilot t with the best channel
            [gainValue, UEindex] =
max(gainOverNoisedB(l,pilotUEs,n));

            %Serve this UE if the channel is at most "threshold"
weaker
            %than the master AP's channel
            %[gainValue
gainOverNoisedB(masterAPs(pilotUEs(UEindex)),pilotUEs(UEindex),n) ]
            if gainValue -
gainOverNoisedB(masterAPs(pilotUEs(UEindex)),pilotUEs(UEindex),n) >=
threshold

                D(l,pilotUEs(UEindex),n) = 1;

            end

        end

    end

end

```

end

end

end

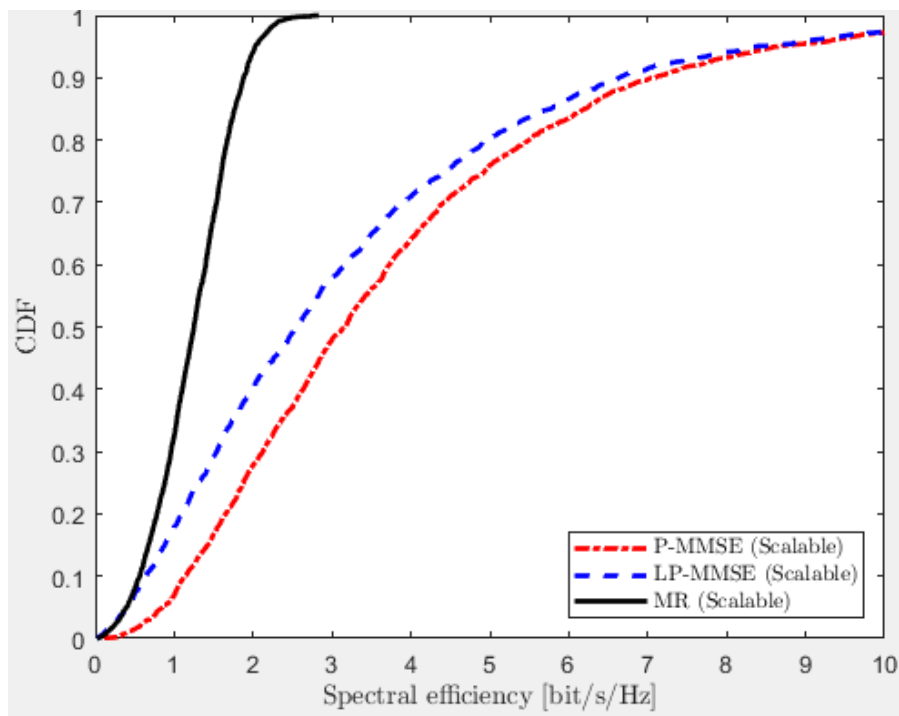
4.2.6 Τοπολογία συστήματος

Οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι έχουν περιγραφεί με βάση το ότι το δίκτυο έχει τοπολογία αστέρα, όπου τα AP είναι συνδεδεμένα με έναν μόνο επεξεργαστή. Ωστόσο, τα AP είναι εμφανή στην πραγματική τοπολογία του δικτύου, καθώς μόνο γειτονικά AP συνεργάζονται, πράγμα που σημαίνει ότι είναι δυνατές πολλές άλλες υλοποιήσεις. Είναι σημαντικό ότι η CPU δεν πρέπει να θεωρείται ως φυσική μονάδα, αλλά ως σύνολο κεντρικών εργασιών επεξεργασίας που πρέπει να εκτελούνται κάπου στο δίκτυο. Μια επιλογή είναι να υπάρχουν τοπικοί επεξεργαστές σε κάθε AP, όπως στα κλασικά κυψελοειδή δίκτυα, και συνδέσεις backhaul στο κεντρικό δίκτυο. Δεν υπάρχει φυσική CPU σε αυτήν την περίπτωση, αλλά οι εργασίες της κατανέμονται μεταξύ των AP. Για παράδειγμα, το Master AP του UE μπορεί να είναι αυτό που φροντίζει τις εργασίες CPU που σχετίζονται με αυτό το UE (π.χ. κωδικοποίηση δεδομένων DL και αποκωδικοποίηση δεδομένων UL). Όταν οι πληροφορίες αποστέλλονται προς / από την CPU, στην πραγματικότητα αποστέλλονται στο AP που είναι υπεύθυνο για την εκτέλεση των σχετικών εργασιών της CPU, τα οποία ενδέχεται να είναι διαφορετικά AP με την πάροδο του χρόνου. Μια άλλη επιλογή είναι ο χωρισμός των AP σε αποσυνδεδεμένα σύνολα και η σύνδεση του καθενός μέσω fronthaul σε έναν επεξεργαστή cloud-edge για κεντρική επεξεργασία. Οι διεργασίες της CPU κατανέμονται μεταξύ διαφορετικών φυσικών επεξεργαστών cloud-edge σε αυτήν την περίπτωση.

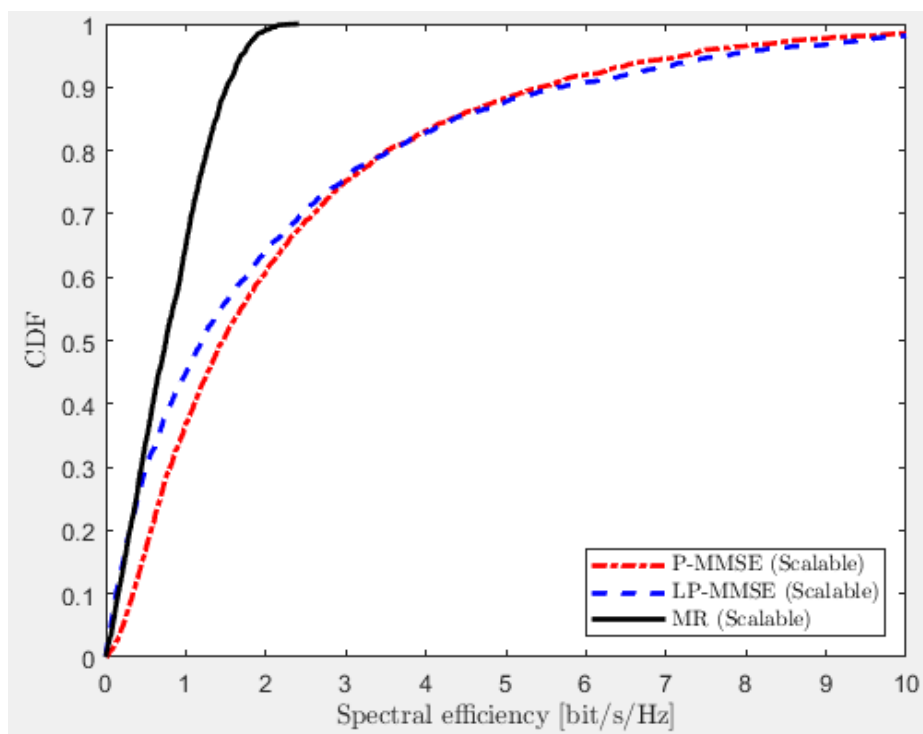
4.3 Προσομοίωση δικτύου

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που έλαβαν χώρα μέσω του λογισμικού MATLAB όσον αφορά την καθοδική κατεύθυνση του δικτύου. Εξετάζονται και συγκρίνονται πολλές και διαφορετικές περιπτώσεις ανάπτυξης του συγκεκριμένου συστήματος, με την αλλαγή του αριθμού διάφορων παραμέτρων π.χ. AP, UE και κεραιές. Σε κάθε περίπτωση συγκρίνουμε τρεις κλιμακούμενες λύσεις κωδικοποίησης: κατανεμημένο P-MMSE, κατανεμημένο LP-MMSE και κατανεμημένο MR. Ο άξονας x θεωρείται η φασματική απόδοση μετρημένη σε (bit/s)/Hz, ενώ ο άξονας y θεωρείται η αθροιστική συνάρτηση κατανομής (CDF).

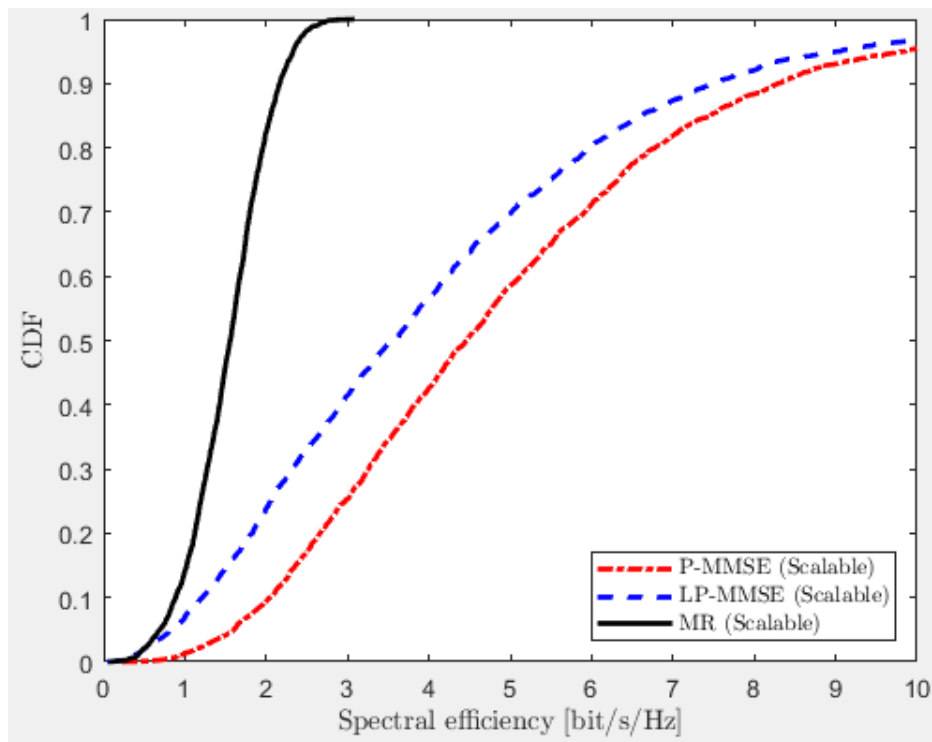
4.3.1 Αλλαγή του αριθμού των AP



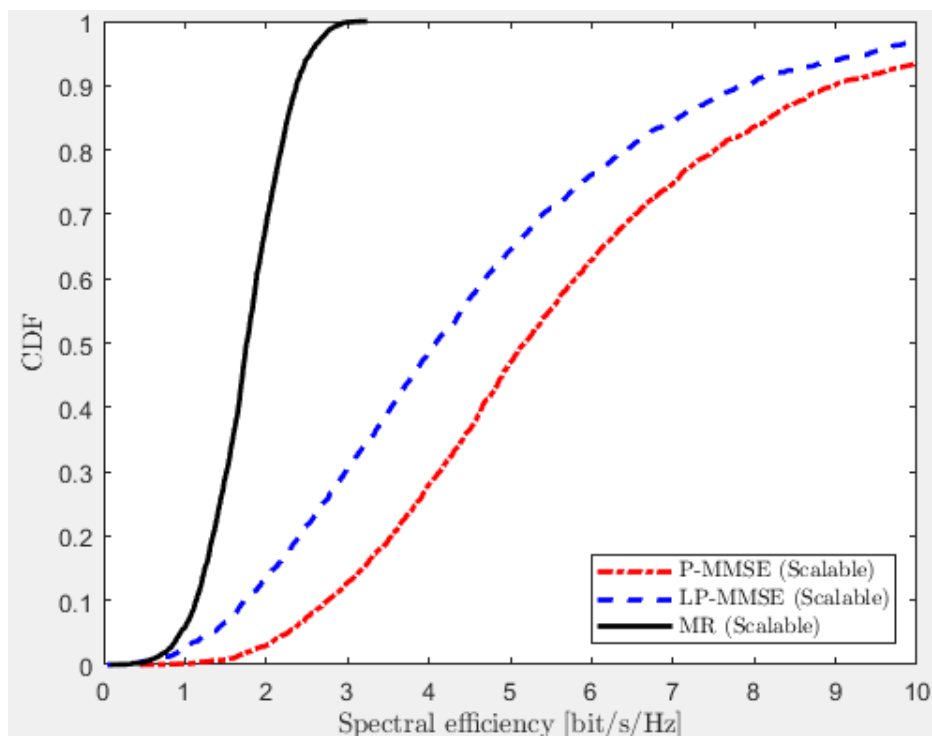
Εικόνα 4.3.1.i: 4 κεραίες 100 AP



Εικόνα 4.3.1.ii: 4κεραίες 50 AP

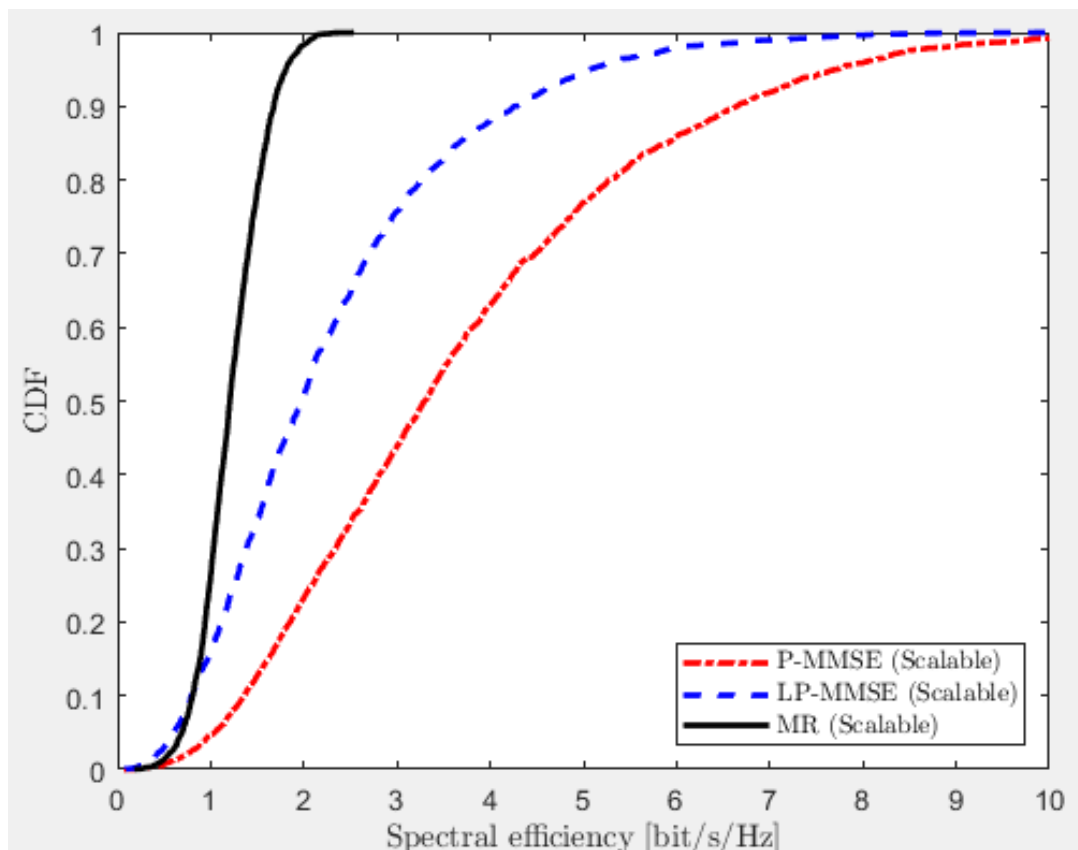


Εικόνα 4.3.1.iii: 4 κεραιές 150 AP

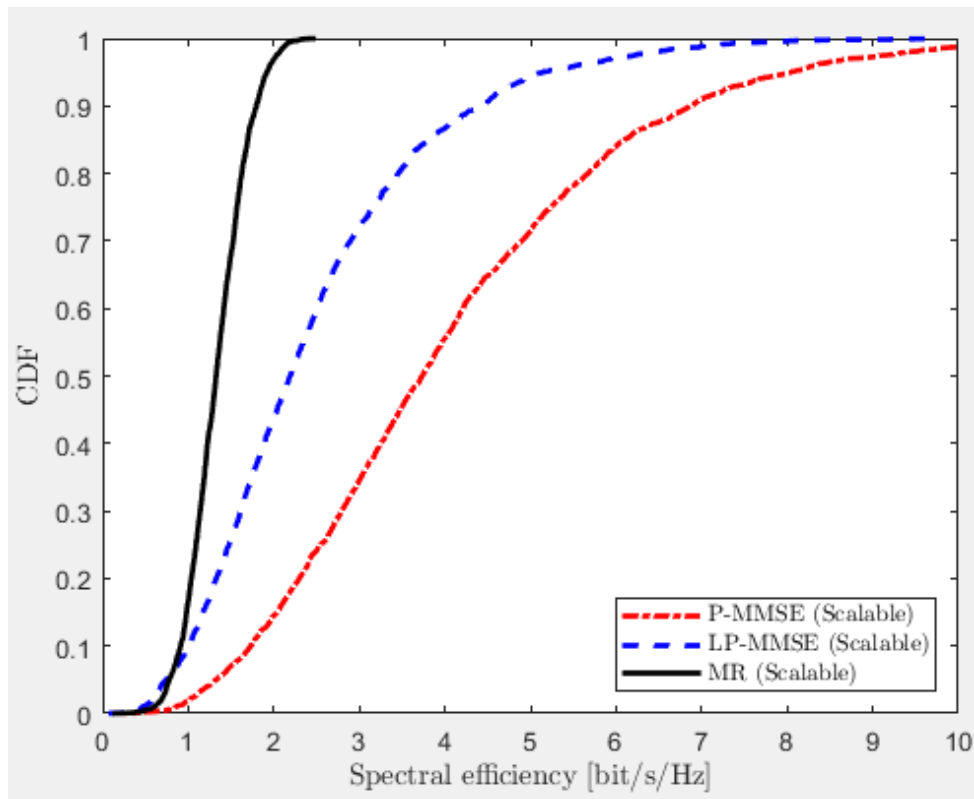


Εικόνα 4.3.1.iv: 4 κεραιές 200 AP

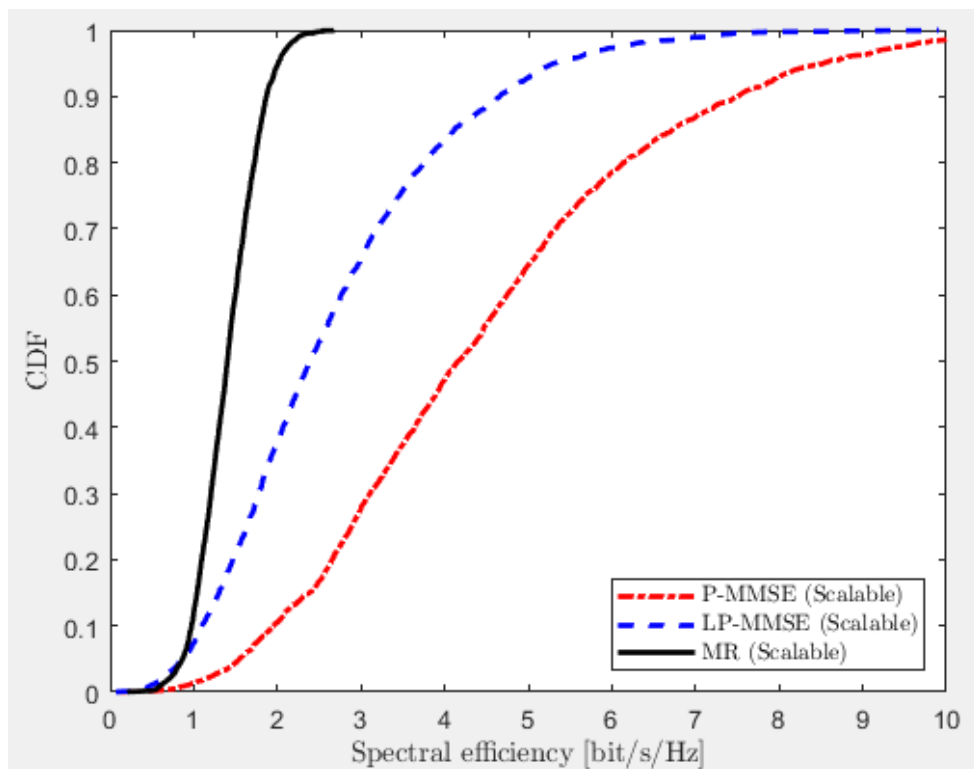
Είναι φανερό ότι οι κωδικοποιήσεις MR και LP-MMSE μένουν σταθερές, αλλάζει όμως η κωδικοποίηση P-MMSE σε κάθε περίπτωση. Επιπρόσθετα, η αποδοτικότητα της καμπύλης κωδικοποίησης MR, αν και γίνεται πιο γρήγορα με τη θροιστική συνάρτηση κατανομής, δεν φτάνει την μέγιστη φασματική απόδοση σε σχέση με τις άλλες δυο κωδικοποιήσεις. Παρατηρούμαι ότι για 50 AP η αποδοτικότητα των κωδικοποιήσεων P-MMSE και LP-MMSE είναι παρόμοια, ενώ με την αύξηση του αριθμού των AP η αποδοτικότητα της κωδικοποίησης P-MMSE μειώνεται, άρα και απομακρύνεται από την καμπύλη κωδικοποίησης LP-MMSE. Παρατηρείται επίσης ότι μετά τα 150 AP η καμπύλη κωδικοποίησης P-MMSE δεν μεταβάλλεται δραματικά εν συγκρίσει με την αλλαγή από 50 σε 100 AP για παράδειγμα.



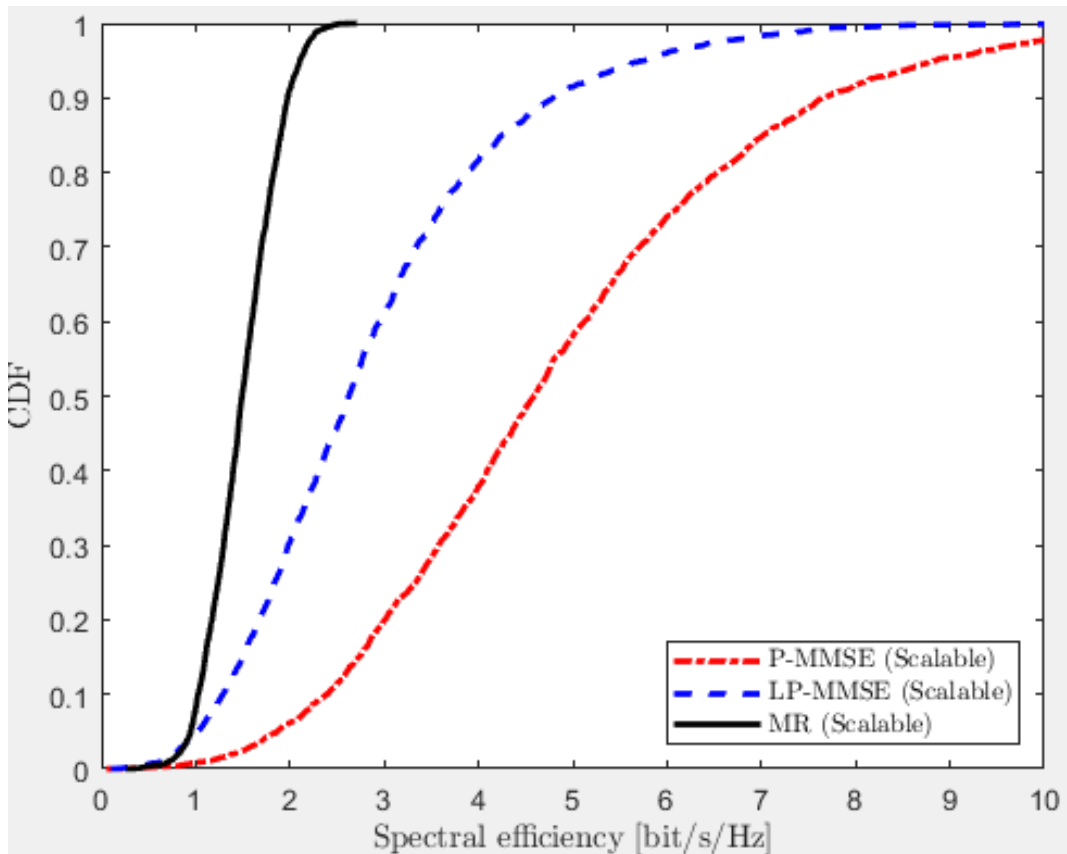
Εικόνα 4.3.1.v: 1 κεραία 300 AP



Εικόνα 4.3.1.vi: 1 κεραία 350 AP



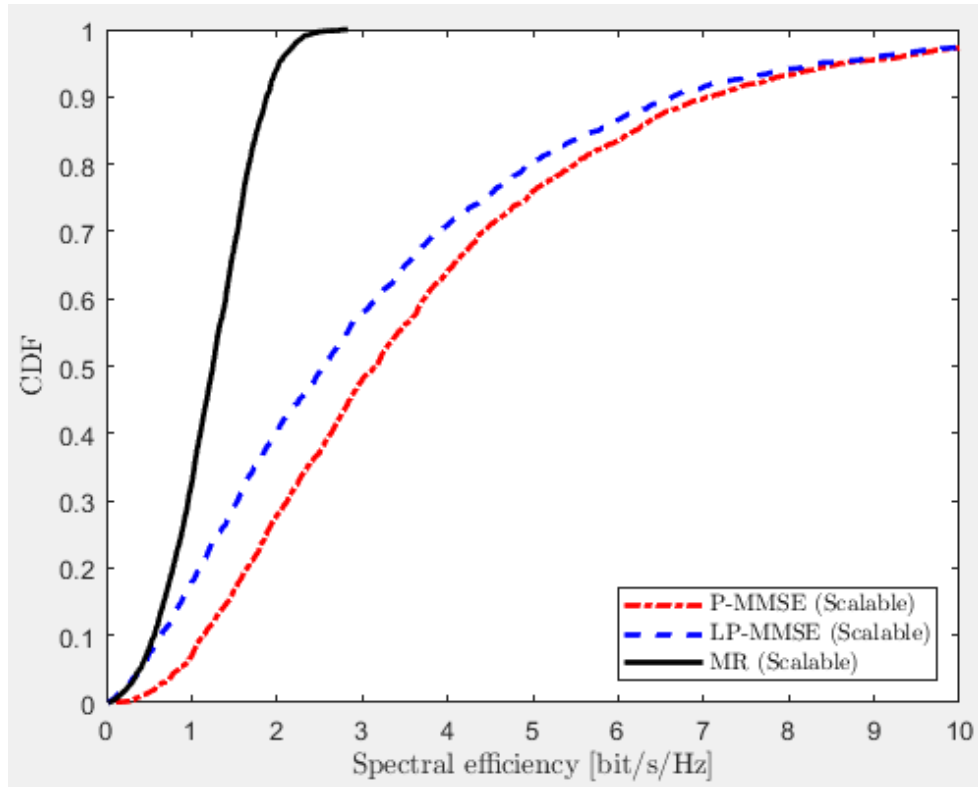
Εικόνα 4.3.1.vii: 1 κεραία 400 AP



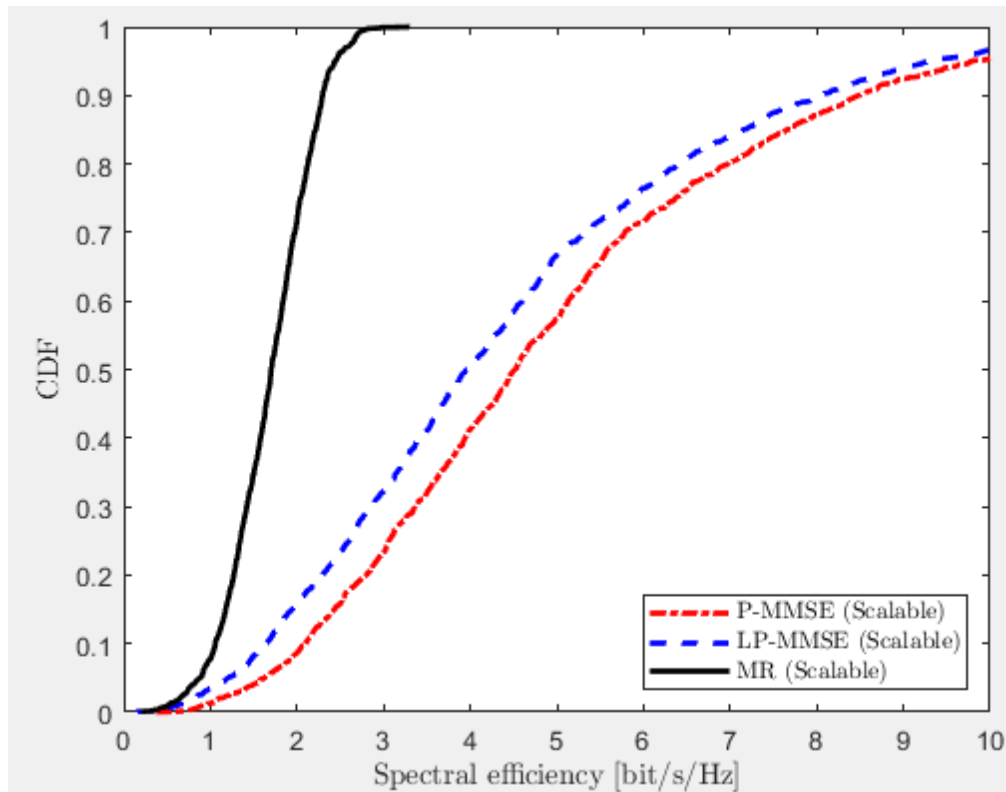
Εικόνα 4.3.1.viii: 1 κεραία 450 AP

Παρατηρείται ότι στο σύστημα μιας κεραίας οι καμπύλες κωδικοποίησης MR και P-MMSE μένουν σχεδόν σταθερές, ενώ μεταβάλλεται αυτή της κωδικοποίησης LP-MMSE. Με τη χρήση μιας μόνο κεραίας για την εξυπηρέτηση πολλών AP, όπως φαίνεται στις παραπάνω προσομοιώσεις, είναι πιο δύσκολο για το σύστημα να φτάσει στην μέγιστη δυνατή φασματική απόδοση με τη χρήση της κωδικοποίησης LP-MMSE. Επίσης με τη χρήση της κωδικοποίησης P-MMSE η επίτευξη της μέγιστης δυνατής φασματικής απόδοσης, αν και πιο αποτελεσματική από την LP-MMSE, είναι λιγότερη αποτελεσματική σε σχέση με αυτή στο σύστημα με 4 κεραίες. Τέλος, όσο αυξάνεται ο αριθμός των AP στο σύστημα μιας κεραίας, η καμπύλη κωδικοποίησης LP-MMSE απομακρύνεται από αυτή της P-MMSE, αφού φτάνει στην μέγιστη δυνατή φασματική απόδοση, όπως και η P-MMSE, αλλά πιο αργά.

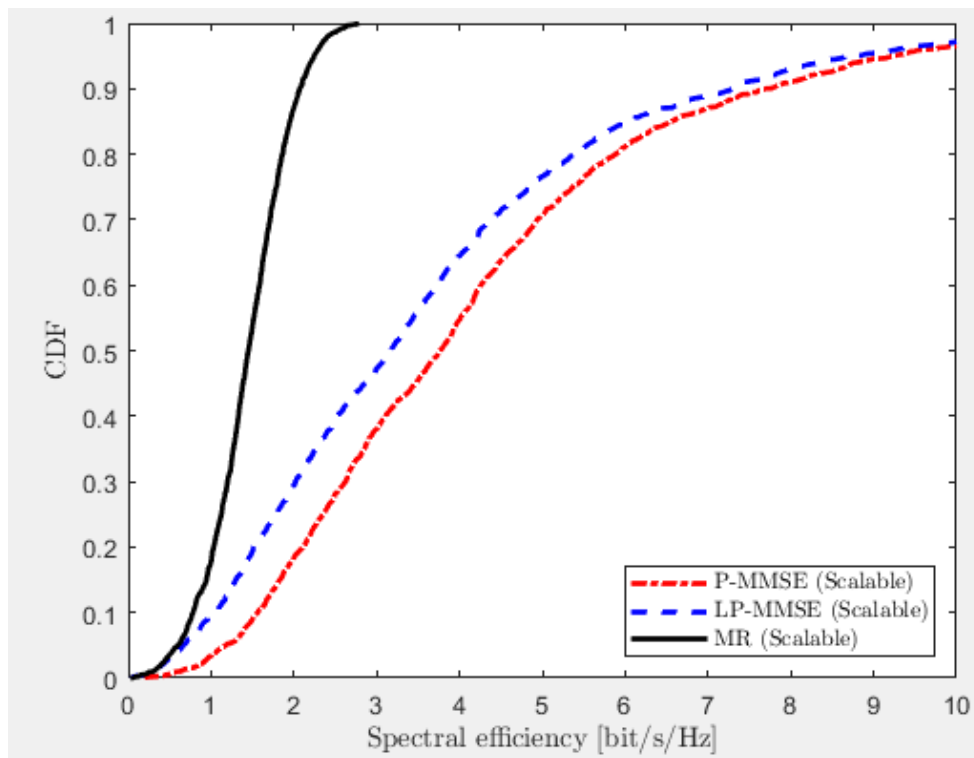
4.3.2 Αλλαγή αριθμού των UE



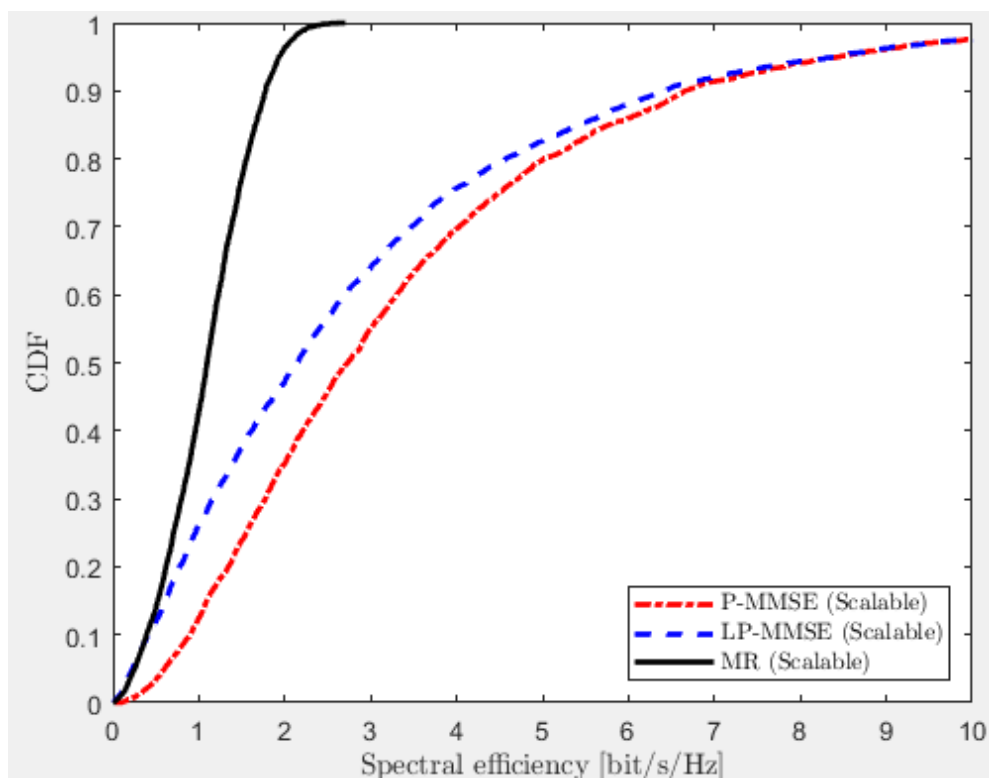
Εικόνα 4.3.2.i: 4 κεραίες, 100 APs και 100 UEs



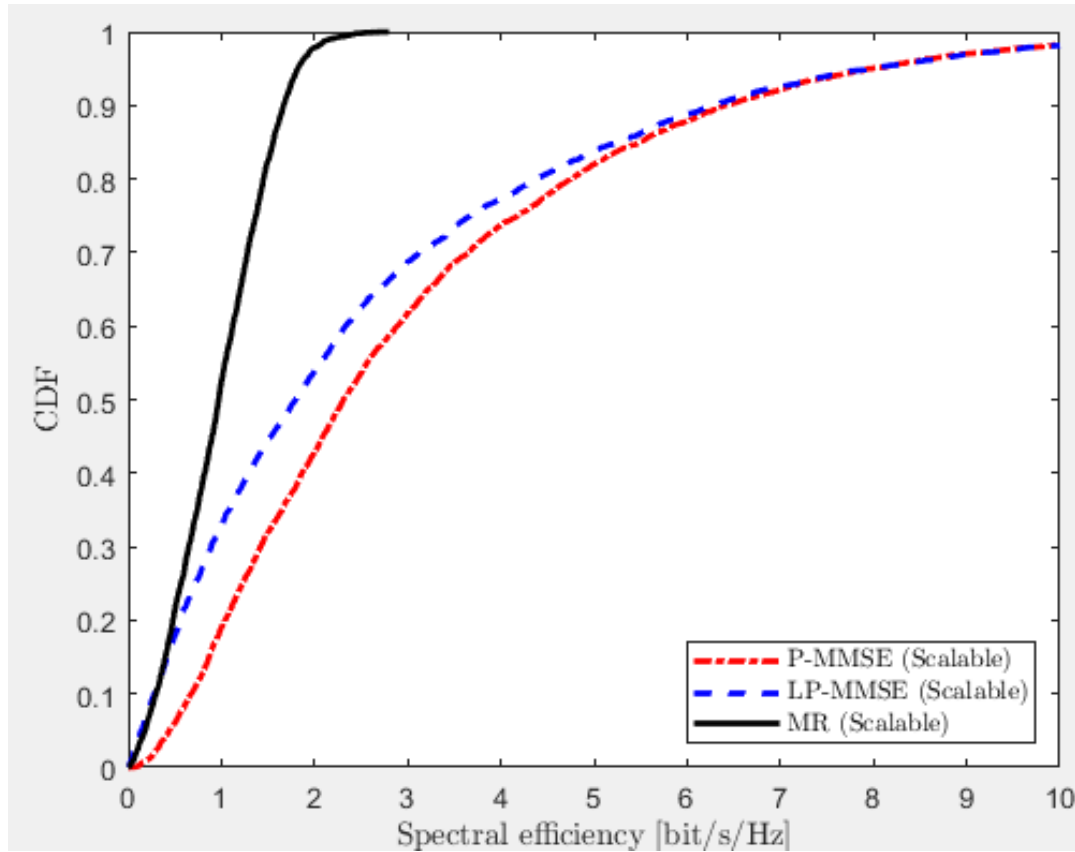
Εικόνα 4.3.2.ii: 4 κεραίες, 100 APs και 50 UEs



Εικόνα 4.3.2.iii: 4 κεραιές, 100 APs και 75 UEs



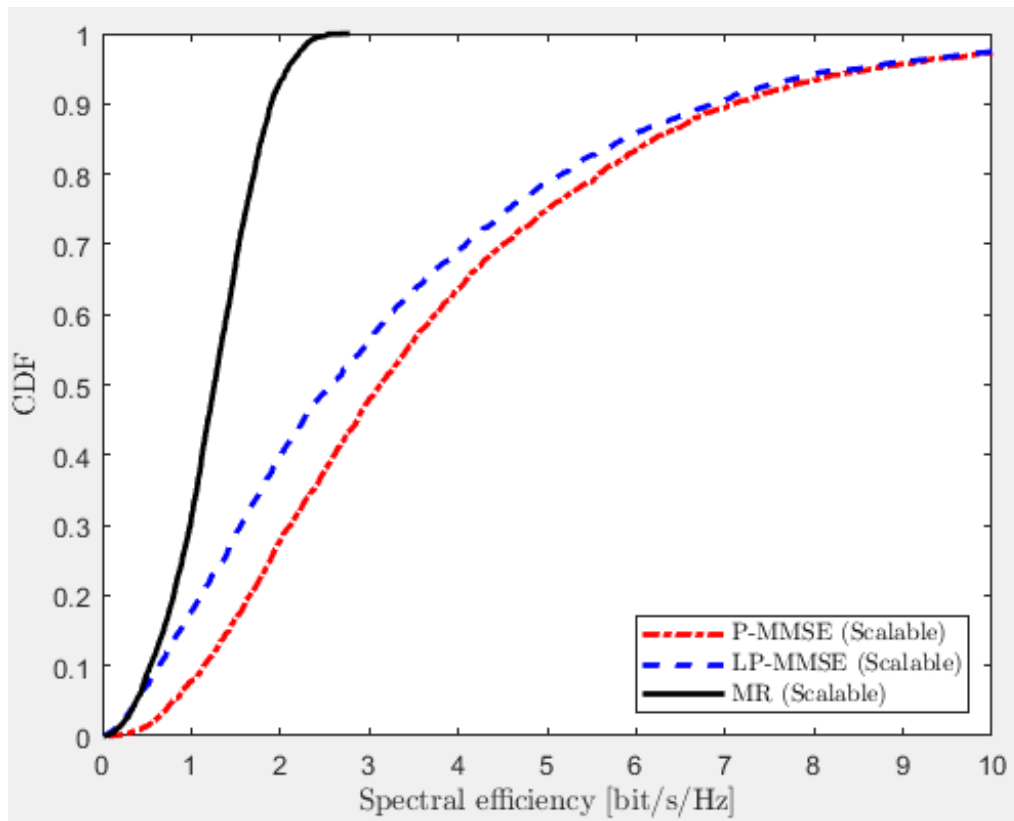
Εικόνα 4.3.2.iv: 4 κεραιές, 100 APs και 125 UEs



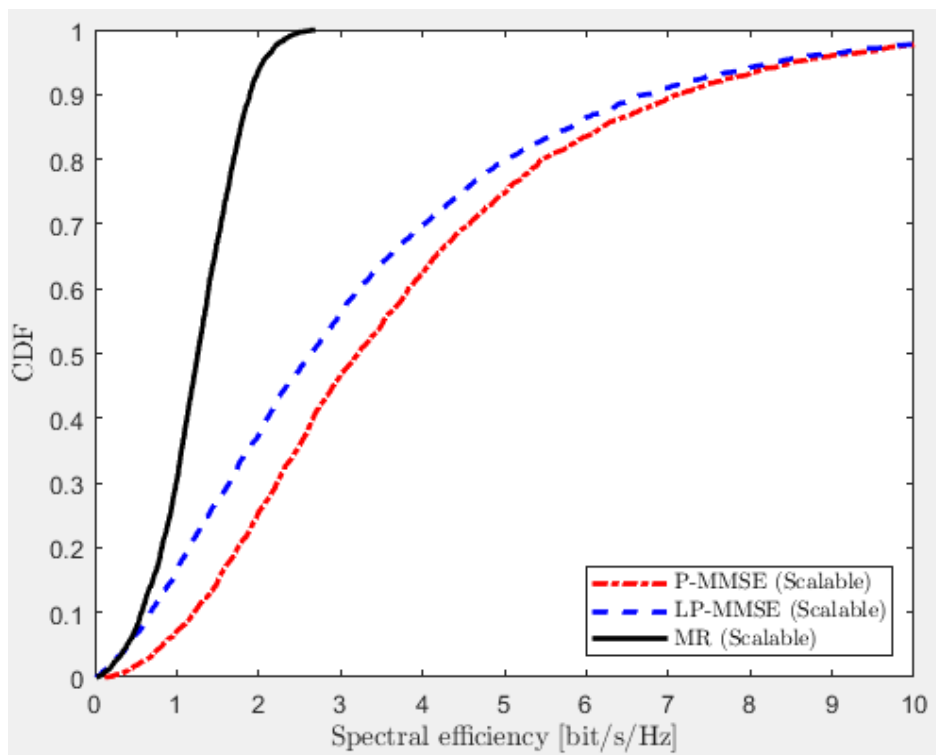
Εικόνα 4.3.2.v: 4 κεραίες, 100 APs και 150 UEs

Μέσα από αυτές τις προσομοιώσεις είναι φανερό ότι η αποδοτικότητα της καμπύλης κωδικοποίησης MR είναι σχετικά σταθερή, σε σχέση με τις άλλες 2 καμπύλες κωδικοποίησης, χωρίς ωστόσο να φτάνει ποτέ τη μέγιστη φασματική τους απόδοση. Επίσης παρατηρείται ότι, με την αύξηση των UEs το σύστημα αργεί να φτάσει στην μέγιστη φασματική του απόδοση, όσον αφορά τις κωδικοποιήσεις LP-MMSE και P-MMSE. Πιο αναλυτικά, η κωδικοποίηση P-MMSE φτάνει πιο γρήγορα στην μέγιστη φασματική απόδοση του συστήματος σε σχέση με την κωδικοποίηση LP-MMSE, ωστόσο με την αύξηση του αριθμού των UEs φαίνεται ότι η καμπύλη κωδικοποίησής της τείνει να μιμηθεί αυτή της κωδικοποίησης LP-MMSE. Όσο λιγότερα UEs υπάρχουν στο σύστημα τόσο μεγαλύτερη είναι η διάφορα των καμπυλών LP-MMSE και P-MMSE άρα και η απόσταση μεταξύ τους στα σχήματα.

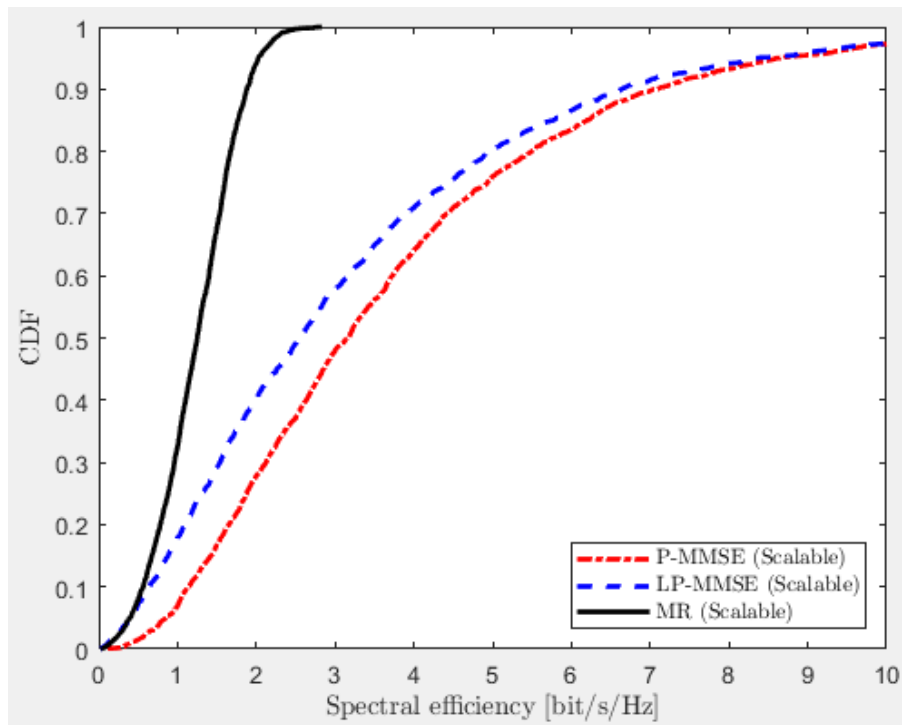
4.3.3 Αλλαγή αριθμού συνολικής ισχύος μετάδοσης downlink ανά AP (ρ_{tot})



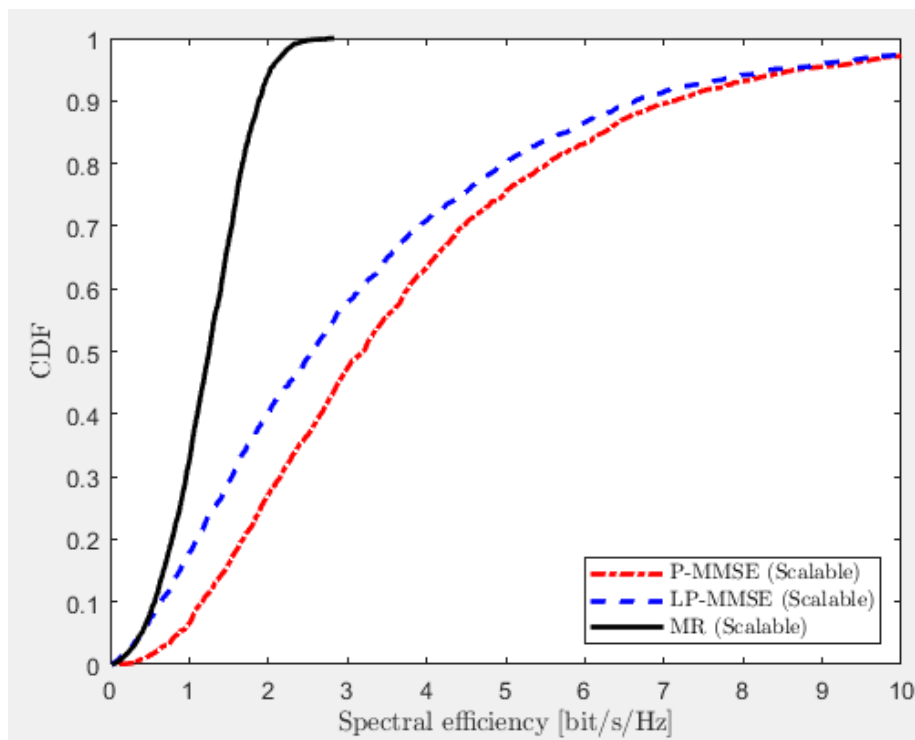
Εικόνα 4.3.3.i: 4 κεραίες, 100 Aps, 100 UEs και 800 rho_tot



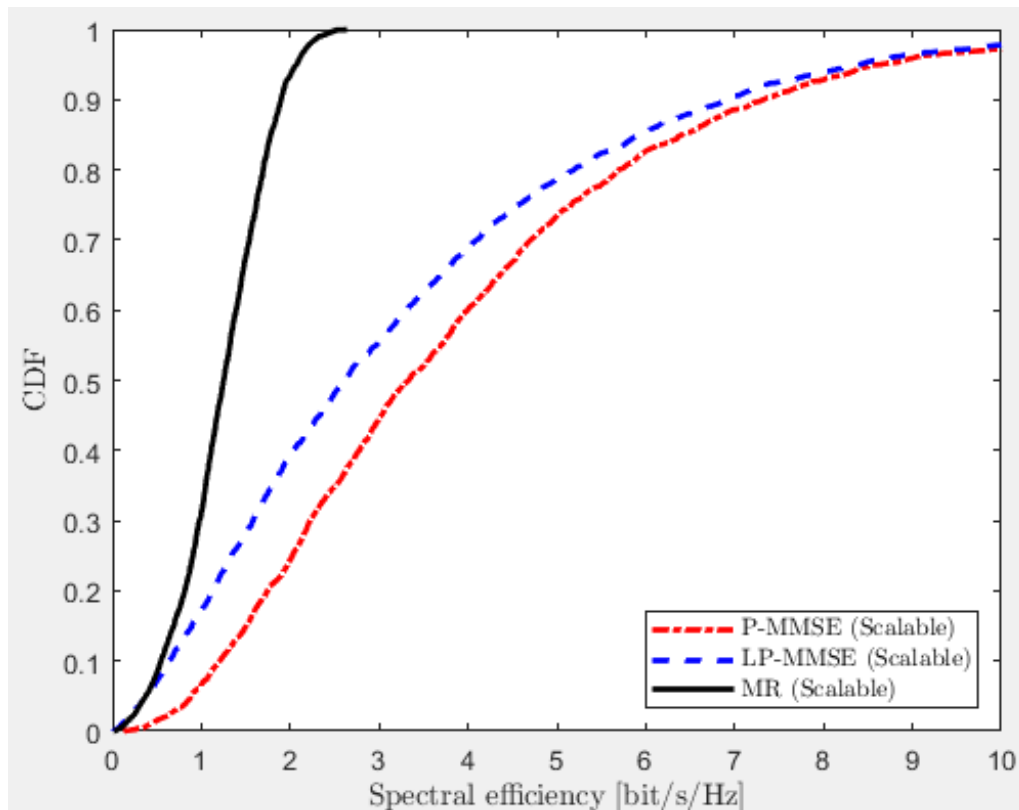
Εικόνα 4.3.3.ii: 4 κεραίες, 100 Aps, 100 UEs και 900 rho_tot



Εικόνα 4.3.3.iii: 4 κεραίες, 100 Aps, 100 UEs και 1000 rho_tot



Εικόνα 4.3.3.iv: 4 κεραίες, 100 Aps, 100 UEs και 1100 rho_tot



Εικόνα 4.3.3.v: 4 κεραιές, 100 Aps, 100 UEs και 1200 rho_tot

Μέσα από τις παραπάνω προσομοιώσεις διαπιστώνεται ότι οι καμπύλες κωδικοποίησης δεν αλλάζουν σχεδόν καθόλου με την αύξηση του αριθμού rho_tot. Έχουμε λοιπόν την καμπύλη κωδικοποίησης MR, η οποία είναι σχετικά σταθερή, σε σχέση με τις άλλες 2 καμπύλες κωδικοποίησης, χωρίς ωστόσο να φτάνει ποτέ τη μέγιστη φασματική τους απόδοση. Οι καμπύλες κωδικοποίησης LP-MMSE και P-MMSE μετά από ένα ορισμένο χρονικό διάστημα φτάνουν το σύστημα στο μέγιστη φασματική του απόδοση.

Βιβλιογραφία

- [1] The definitive guide to 5G low, mid, and high band speeds"
- [2] On the benefits of 5G wireless technology for future mobile cloud computing
- [3] 5G Mobile Communication Systems: Fundamentals, Challenges, and Key Technologies
- [4] 5G-QoE: QoE Modelling for Ultra-HD Video Streaming in 5G Networks
- [5] Benefits and impact of cloud computing on 5G signal processing: Flexible centralization through cloud-RAN
- [6] Virtual and augmented reality on the 5G highway
- [7] 5G-based smart healthcare network: architecture, taxonomy, challenges and future research directions
- [8] 5G enabled technologies for smart education
- [9] 5G-enabled tactile internet
- [10] 5G mobile cellular networks: Enabling distributed state estimation for smart grids
- [11] Enabling smart home with 5G network slicing
- [12] Impact of 5G technologies on smart city implementation
- [13] A survey on the 5G network and its impact on agriculture: Challenges and opportunities
- [14] 5G software defined vehicular networks
- [15] 5G Implementation: Major Issues and Challenges
- [16] 5G Mobile Communication Systems: Fundamentals, Challenges, and Key Technologies
- [17] 5G and Beyond: Fundamentals and Standards
- [18] User-centric Cell-free Massive MIMO Networks: A Survey of Opportunities, Challenges and Solutions
- [19] Cell-Free Massive MIMO versus Small Cells
- [20] Deep Learning-Aided Finite-Capacity Fronthaul Cell-Free Massive MIMO with Zero Forcing

- [21] Mixed Quality of Service in Cell-Free Massive MIMO
- [22] Ubiquitous cell-free Massive MIMO communications
- [23] Distributed Uplink Beamforming in Cell-Free Networks Using Deep Reinforcement Learning
- [24] Edge Computing-Enabled Cell-Free Massive MIMO Systems
- [25] Cell-Free Millimeter-Wave Massive MIMO Systems with Limited Fronthaul Capacity
- [26] DOWNLINK RESOURCE ALLOCATION IN CELL FREE MASSIVE MIMO SYSTEMS
- [27] Fronthaul-Constrained Cell-Free Massive MIMO With Low Resolution ADCs
- [28] Performance Analysis of Cell-Free Massive MIMO System with Limited Fronthaul Capacity and Hardware Impairments
- [29] Cell-Free Massive MIMO for Wireless Federated Learning
- [30] Dynamic Resource Allocation in Co-Located and Cell-Free Massive MIMO
- [31] Energy-Efficient Resource Allocation and Data Transmission of Cell-Free Internet of Things
- [32] Joint Power Allocation and Load Balancing Optimization for Energy-Efficient Cell-Free Massive MIMO Networks
- [33] OPTIMAL DESIGN OF ENERGY-EFFICIENT CELL-FREE MASSIVE MIMO: JOINT POWER ALLOCATION AND LOAD BALANCING
- [34] Power Allocation in Cell-Free Massive MIMO: A Deep Learning Method
- [35] Downlink Power Control in Cell-free Massive MIMO with Partially Distributed Access Points
- [36] User-Centric 5G Cellular Networks: Resource Allocation and Comparison with the Cell-Free Massive MIMO Approach
- [37] Channel Estimation for Cell-Free mmWave Massive MIMO Through Deep Learning
- [38] Deep Learning-Aided Finite-Capacity Fronthaul Cell-Free Massive MIMO with Zero Forcing
- [39] Multiple Access in Dynamic Cell-Free Networks: Outage Performance and Deep Reinforcement Learning-Based Design

- [40] On the Performance of Cell-Free Massive MIMO With Low-Resolution ADCs
- [41] On the Total Energy Efficiency of Cell-Free Massive MIMO
- [42] Performance Analysis of Cell-Free Massive MIMO Systems: A Stochastic Geometry Approach
- [43] Power Allocation and Cooperation in Cell-Free Massive MIMO Systems with Energy Exchange Capabilities
- [44] Scalable Cell-Free Massive MIMO Systems
- [45] <http://arxiv.org/pdf/1908.03119>