



Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών

Διπλωματική Εργασία

Κατανομή πόρων σε δίκτυα 5G

Τόλης Σπυρίδων

A.E.M 918

Επιβλέπων Καθηγητής: Επίκουρος Καθηγητής, Παναγιώτης
Σαρηγιαννίδης

Ιούλιος 2020, Κοζάνη

Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών

Διπλωματική Εργασία

Κατανομή πόρων σε δίκτυα 5G

Τόλης Σπυρίδων

A.E.M 918

Επιβλέπων Καθηγητής: Επίκουρος Καθηγητής, Σαρηγιαννίδης
Παναγιώτης

Ιούλιος 2020, Κοζάνη

Περίληψη

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία αφορά την κατανομή πόρων πάνω στα νέα δίκτυα κυψελωτών επικοινωνιών 5^{ης} γενιάς. Το βιβλιογραφικό μέρος της εργασίας αρχικά αναφέρεται στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα πρόσβασης, με έμφαση κυρίως στις κυψελοειδείς επικοινωνίες. Έπειτα αναλύονται η αρχιτεκτονική και οι βασικές τεχνολογίες που θα ενσωματώνουν τα δίκτυα 5G, ενώ επίσης γίνεται αναφορά και στις απαιτήσεις αυτών των δικτύων. Στη συνέχεια αναλύεται η κατανομή πόρων στα δίκτυα 5G. Συγκεκριμένα αναλύονται οι τεχνικές και οι διάφορες προσεγγίσεις που έχουν επιχειρηθεί, ενώ επίσης εξετάζονται και οι αλγόριθμοι που έχουν χρησιμοποιηθεί.

Στο πειραματικό κομμάτι της εργασίας προτείνεται ο αλγόριθμος κατανομής πόρων που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος blueSPACE. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος κατασκευάστηκε για συστήματα 5G και περιλαμβάνει τρεις φάσεις βελτιστοποίησης: α) την κατανομή πόρων στον τομέα ασύρματης πρόσβασης, β) την κατανομή πόρων στον τομέα της οπτικής δικτύωσης, γ) την κατανομή υπολογιστών πόρων σε νέφη κινητής υπολογιστικής (MEC). Στη συνέχεια υλοποιούνται δύο σενάρια προσομοίωσης ανάπτυξης του 5G, το πρώτο για ένα πολυσύχναστο τμήμα ενός αυτοκινητοδρόμου και το δεύτερο για την πόλη της Βαρκελώνης. Στόχος είναι να αξιολογηθεί η κατανομή πόρων που επιτυγχάνεται από το συγκεκριμένο αλγόριθμο σε σχέση με μία μη βελτιστοποιημένη κατανομή.

Η διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας είναι η εξής:

- **Κεφάλαιο 1^ο:** Εισαγωγή στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, τις βασικές αρχές λειτουργίας τους και τους παράγοντες που υποβαθμίζουν την απόδοσή τους.
- **Κεφάλαιο 2^ο:** Κυψελωτά δίκτυα επικοινωνιών και ανασκόπηση προηγούμενων γενεών αυτών των δικτύων.
- **Κεφάλαιο 3^ο:** Εκτενής αναφορά στα δίκτυα 5G όσον αφορά την αρχιτεκτονική και τις βασικές τεχνολογίες που τα διέπουν.
- **Κεφάλαιο 4^ο:** Κατανομή πόρων στα δίκτυα 5G, με έμφαση και στους τρεις τομείς (τομέας ασύρματης πρόσβασης, τομέας οπτικής δικτύωσης, υπολογιστικοί πόροι).
- **Κεφάλαιο 5^ο:** Εφαρμογή σεναρίων προσομοίωσης για αξιολόγηση του σχήματος που επιλέχθηκε για κατανομή πόρων.
- **Κεφάλαιο 6^ο:** Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις.

Λέξεις κλειδιά: Κατανομή πόρων, 5G, δίκτυα τηλεπικοινωνιών, SDM, RRH, BBU, Cloud RAN.

Abstract

This specific thesis deals with the resource allocations to the new 5th generation of cellular communications networks. The first part of the work initially refers to the telecommunication access networks, with an emphasis mainly on cellular communications. Then the architecture and the basic technologies that will integrate the 5G networks are analyzed, while reference is also made to the requirements of these networks. Then the resource allocation in 5G networks is analyzed. Specifically, the techniques and various approaches that have been attempted are analyzed, while the algorithms that have been used are also examined.

In the next part of this thesis, the resource allocation algorithm developed in the blueSPACE research program is proposed. This algorithm was developed for 5G systems and includes three optimization phases: a) the allocation of resources in the radio access network, b) the allocation of resources of the optical distribution network, c) the allocation of computer resources in mobile edge clouds (MEC). Then two 5G development simulation scenarios are implemented, the first for a busy section of a highway and the second for the city of Barcelona. The aim is to evaluate the allocation of resources achieved by this algorithm in relation to a non-optimized allocation.

The structure of this thesis is as follows:

- **Chapter 1:** Introduction to the telecommunications networks, their basic operating principles and the factors that degrade their performance.
- **Chapter 2:** Cellular communication networks and review of previous generations of these networks.
- **Chapter 3:** Extensive reference to 5G networks in terms of architecture and the basic technologies that govern them.
- **Chapter 4:** Distribution of resources in 5G networks, with emphasis on all three sectors (wireless access network, optical distribution network, computing resources).
- **Chapter 5:** Applying simulation scenarios to evaluate the scheme selected for resource allocation.
- **Chapter 6:** Conclusions and future work.

Keywords: Resource allocation, 5G, telecommunications networks, SDM, RRH, BBU, Cloud RAN.

Πνευματικά Δικαιώματα

Απαγορεύεται ρητά η αντιγραφή, η διανομή καθώς και η αποθήκευση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, όσον αφορά ολόκληρη την εργασία ή τμήματος αυτής. Επιτρέπεται η ανατύπωση, η διανομή και η αποθήκευσή της για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται πάντα η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Επιπλέον ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2019-2020, από το φοιτητή Τόλη Σπυρίδων, στα πλαίσια του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας.

Πριν από την παρουσίαση της διπλωματικής μου αισθάνομαι την υποχρέωση να ευχαριστήσω συγκεκριμένους ανθρώπους με τους οποίους συνεργάστηκα και με βοήθησαν στην εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας και την εκπλήρωση των σπουδών μου.

Πρώτον από όλους θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας, τον Επίκουρο Καθηγητή Παναγιώτη Σαρηγιαννίδη για την βοήθεια που μου παρείχε, την υπομονή, την καθοδήγηση και την άψογη συνεργασία που είχαμε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Θωμά Λάγκα, που είναι Επίκουρος Καθηγητής του τμήματος Πληροφορικής του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, για όλη τη βοήθειά του, τις συμβουλές του και τον αμέριστο χρόνο που μου παρείχε.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, για την ψυχολογική και την οικονομική υποστήριξη καθώς και για τη συμπαράστασή τους σε όλη τη διάρκεια της φοίτησής μου στη σχολή.

Τέλος αισθάνομαι την υποχρέωση να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ, σε όλους τους φίλους μου, του συμφοιτητές μου, τους καθηγητές και το προσωπικό του τμήματος για τη συνεργασία μας όλα αυτά τα χρόνια, καθώς και για τη βοήθεια που μου παρείχαν προκειμένου να φέρω εις πέρας αυτό το δύσκολο έργο και να πραγματοποιήσω τους στόχους μου.

Περιεχόμενα

1	ΔΙΚΤΥΑ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ	18
1.1	Εισαγωγή	18
1.2	Τύποι τηλεπικοινωνιακών δικτύων.....	19
1.3	Τοπολογίες τηλεπικοινωνιακών δικτύων.....	21
1.4	Απλοποιημένο Μοντέλο Τηλεπικοινωνιακών Συστημάτων.....	23
1.5	Μέσα μετάδοσης δεδομένων	25
1.5.1	Ενσύρματα μέσα μετάδοσης	25
1.5.2	Ασύρματα μέσα μετάδοσης	28
1.6	Πολυπλεξία	29
1.6.1	Πολυπλεξία με διαίρεση μήκους κύματος (Wavelength Division Multiplexing)	31
1.6.2	Πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου (Time Division Multiplexing).....	32
1.6.3	Πολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας (Frequency Division Multiplexing)	33
1.6.4	Ορθογώνια πολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)	33
1.6.5	Πολυπλεξία με διαίρεση κώδικα (Code Division Multiplexing)	34
1.7	Αιτίες υποβάθμισης της επικοινωνιακής ζεύξης	35
2	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΥΨΕΛΟΕΙΔΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ.....	38
2.1	Εισαγωγή	38
2.2	Κατηγορίες κυψελών	39
2.3	Κυψελωτά δίκτυα προηγούμενων γενεών	40
2.3.1	Δίκτυα Τηλεπικοινωνιών 1G	40
2.3.2	Δίκτυα Τηλεπικοινωνιών 2G	42
2.3.3	Δίκτυα Τηλεπικοινωνιών 2.5G	43
2.3.4	Δίκτυα Τηλεπικοινωνιών 3G	44
2.3.5	Δίκτυα Τηλεπικοινωνιών 3.75G	45
2.3.6	Δίκτυα Τηλεπικοινωνιών 4G	45
3	ΔΙΚΤΥΑ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ 5^{ΗΣ} ΓΕΝΙΑΣ	47
3.1	Εισαγωγή	47
3.2	Κίνητρα.....	48

3.3	Απαιτήσεις για την ανάπτυξη του 5G.....	50
3.4	Βασικές Τεχνολογίες	54
3.4.1	Δίκτυα καθορισμένα από το λογισμικό (Software-Defined Networking).....	55
3.4.2	Εικονικοποίηση λειτουργίας δικτύου (Network Function Virtualization)	56
3.4.3	Κύματα χιλιοστού (Millimeter wave)	58
3.4.4	Massive MIMO.....	60
3.4.5	Διαμόρφωση δέσμης (Beamforming)	61
3.4.6	Εξαιρετικά πυκνά κυψελωτά δίκτυα (Ultra-dense cellular networks)	62
3.4.7	Τεμαχισμός Δικτύου (Network slicing)	64
3.4.8	Cloud – RAN	66
3.4.9	Common Public Radio Interface.....	70
3.4.10	Επικοινωνίες μεταξύ συσκευών (Device-to-device communications)	70
3.4.11	Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things).....	72
4	ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΠΟΡΩΝ ΣΕ 5G ΔΙΚΤΥΑ.....	74
4.1	Κατανομή Ασύρματων Πόρων (Radio Resource Management)	74
4.1.1	Κατανομή ασύρματων πόρων με βάση την τεχνολογία Massive MIMO	75
4.1.2	Στρατηγική προγραμματισμού ύπνου των RRHs (RRH sleep scheduling strategy).....	77
4.1.3	Ανάπτυξη κρυφής μνήμης (cache) στα RRHs	81
4.1.4	Μηχανική Μάθηση (Machine Learning)	82
4.1.5	Κατανομή πόρων βασισμένη σε γεωμετρία fractal.....	83
4.2	Κατανομή οπτικών όρων (Optical Network Resources)	85
4.2.1	Οπτικές ίνες για δίκτυα SDM	86
4.2.2	Οπτικοί μεταγωγείς SDM	87
4.2.3	Οπτικοί αναμεταδότες SDM.....	88
4.2.4	Προτάσεις Κατανομής πόρων σε δίκτυα SDM.....	89
4.3	Κατανομή υπολογιστικών πόρων (Computing Resource Allocation).....	92
4.3.1	Κατανομή πόρων ομάδας BBU (BBU pool planning).....	93
4.3.2	Επιλογή BBU με βάση το κόστος-ανθεκτικότητα (Cost-Resilience BBU Selection).....	95
4.3.3	Κινητή Υπολογιστική Νέφος (Mobile Cloud Computing)	97
4.3.4	Κινητή Υπολογιστική στα άκρα του δικτύου (Mobile Edge Computing)	99
5	ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΠΟΡΩΝ.....	105
5.1	Περιγραφή.....	105
5.2	Μαθηματική Ανάλυση μοντέλου.....	107
5.2.1	Βελτιστοποίηση των πόρων ασύρματης πρόσβασης	108
5.2.2	Βελτιστοποίηση των πόρων του οπτικού δικτύου	110
5.2.3	Βελτιστοποίηση των υπολογιστικών πόρων	113
5.3	Σενάρια Προσομοίωσης.....	114
5.3.1	Σενάριο αυτοκινητόδρομου	115
5.3.2	Σενάριο «Βαρκελώνη».....	119
5.4	Αποτελέσματα Σεναρίων Προσομοίωσης	124
5.4.1	Σενάριο αυτοκινητόδρομου	124

5.4.2	Σενάριο «Βαρκελώνη».....	129
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ	133

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1. Τοπολογία Αστέρα [2].....	21
Σχήμα 1.2. Τοπολογία Δακτυλίου [2].....	21
Σχήμα 1.3. Τοπολογία Αρτηρίας [2].....	22
Σχήμα 1.4. Τοπολογία Βρόχου [2].....	22
Σχήμα 1.5. Γραφική απεικόνιση ενός απλοποιημένου μοντέλου τηλεπικοινωνιακού συστήματος.	23
Σχήμα 1.6. Χάλκινα συνεστραμμένα καλώδια [3].	25
Σχήμα 1.7. Ομοαξονικό Καλώδιο [4].	26
Σχήμα 1.8. Δομή οπτικής ίνας (μονότροπης) [5].....	27
Σχήμα 1.9. Πολυπλεξία / αποπολυπλεξία πολλαπλών εισόδων / εξόδων [6].....	30
Σχήμα 1.10. Βασική διαμόρφωση για μετάδοση WDM [7].	31
Σχήμα 1.11. Αναπαράσταση της πολυπλεξίας διαίρεσης χρόνου [1].....	32
Σχήμα 1.12. Αναπαράσταση της πολυπλεξίας διαίρεσης χρόνου [1].....	33
Σχήμα 1.13. Αναπαράσταση της πολυπλεξίας διαίρεσης κώδικα [8].....	35
Σχήμα 2.1. Πρόβλεψη της Cisco για αύξηση των δεδομένων κινητής τηλεφωνίας ως το 2020 [11].....	40
Σχήμα 3.1. Αρχιτεκτονική ενός 5G κυψελωτού δικτύου [13].....	47
Σχήμα 3.2. Παγκόσμια ανάπτυξη συνδέσεων επικοινωνιών τύπου M2M [11].....	48
Σχήμα 3.3. Συνολική κίνηση δεδομένων κινητής τηλεφωνίας [20].	52
Σχήμα 3.4. Απλοποιημένη αναπαράσταση μίας αρχιτεκτονικής SDN [22].....	55
Σχήμα 3.5. Αρχιτεκτονική του NFV [23].	57
Σχήμα 3.6. Κύματα χιλιοστού στα 5G δίκτυα [28].....	59
Σχήμα 3.7. Αναπαράσταση ενός συστήματος massive MIMO πολλαπλών χρηστών [29].....	60
Σχήμα 3.8. Εφαρμογές massive MIMO beamforming σε ασύρματα δίκτυα 5G [31].	62
Σχήμα 3.9. Παράδειγμα ενός δικτύου UDN [33].	63
Σχήμα 3.10. Παράδειγμα τεμαχισμού δικτύου με βάση την αρχιτεκτονική 5G [34]..	65
Σχήμα 3.11. Αρχιτεκτονική ενός δικτύου 5G C-RAN [36].....	67
Σχήμα 3.12. Πιθανά σενάρια ανάπτυξης επικοινωνίας μεταξύ συσκευών [38].....	71
Σχήμα 3.13. Συνολική αναπαράσταση του IoT και των δυνατοτήτων που προσφέρει [39].....	73
Σχήμα 4.1. Μοντέλο συστήματος των συστημάτων massive MIMO [42].....	76
Σχήμα 4.2. Αρχιτεκτονική ενός δικτύου Cloud-RAN, στην οποία όλα τα RRH συνδέονται μέσω διασυνδέσεων μεταφοράς σε μια ομάδα BBU [45].....	78
Σχήμα 4.3. Αρχιτεκτονική ενός δικτύου C-RAN με ανάπτυξη κρυφής μνήμης στα RRHs [50].....	81

Σχήμα 4.4. Τύποι και ιδιότητες των οπτικών ινών SDM [60].	87
Σχήμα 4.5. Αρχιτεκτονική Mobile cloud computing [77].	97
Σχήμα 4.6. Αρχιτεκτονική ενός συστήματος MEC [81].	100
Σχήμα 4.7. Αναπαράσταση της αρχιτεκτονικής ενός δικτύου Near-Far Edge Computing C-RAN για υποστήριξη της μεγάλης επεξεργασίας δεδομένων [82].	101
Σχήμα 4.8. Αρχιτεκτονική C-RAN πολλαπλών επιπέδων (Multi-layer CRAN) [83].	102
Σχήμα 5.1. Απεικόνιση σεναρίου αυτοκινητοδρόμου.	115
Σχήμα 5.2. Απεικόνιση της οπτικής τοπολογίας / αρχιτεκτονικής του σεναρίου προσομοίωσης αυτοκινητοδρόμου.	117
Σχήμα 5.3. Απεικόνιση σεναρίου Βαρκελώνης.	119
Σχήμα 5.4. Απεικόνιση της οπτικής τοπολογίας / αρχιτεκτονικής του σεναρίου προσομοίωσης «Βαρκελώνη».	122
Σχήμα 5.6. Ο αριθμός ενεργοποιημένων RRHs στο σενάριο προσομοίωσης αυτοκινητόδρομου.	125
Σχήμα 5.7. Ο αριθμός ενεργοποιημένων δεσμών / BBU's στο σενάριο προσομοίωσης αυτοκινητοδρόμου.	126
Σχήμα 5.8. Ο αριθμός των κατανεμημένων οπτικών κόμβων / θυρών / πυρήνων στο σενάριο προσομοίωσης αυτοκινητόδρομου.	127
Σχήμα 5.9. Ο αριθμός κατανεμημένων φυσικών διακομιστών στο σενάριο προσομοίωσης αυτοκινητοδρόμου.	128
Σχήμα 5.10. Ο αριθμός ενεργοποιημένων RRHs στο σενάριο προσομοίωσης «Βαρκελώνη».	129
Σχήμα 5.11. Ο αριθμός ενεργοποιημένων δεσμών / BBU's στο σενάριο προσομοίωσης «Βαρκελώνη».	130
Σχήμα 5.12. Ο αριθμός των κατανεμημένων οπτικών κόμβων / θυρών / πυρήνων στο σενάριο προσομοίωσης «Βαρκελώνη».	131
Σχήμα 5.13. Ο αριθμός κατανεμημένων φυσικών διακομιστών στο σενάριο προσομοίωσης αυτοκινητοδρόμου.	132

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Παράμετροι και τιμές προσομοίωσης για τον τομέα ασύρματης πρόσβασης για το σενάριο αυτοκινητοδρόμου.....	116
Πίνακας 2: Παράμετροι και τιμές προσομοίωσης οπτικού δικτύου για το σενάριο αυτοκινητοδρόμου.	117
Πίνακας 3: Οι ζητούμενοι πόροι MEC και οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση.	118
Πίνακας 4: Οι παρεχόμενοι πόροι MEC και οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση.	118
Πίνακας 5: Παράμετροι και τιμές προσομοίωσης για τον τομέα ασύρματης πρόσβασης για το σενάριο «Βαρκελώνη».	120
Πίνακας 6: Παράμετροι και τιμές προσομοίωσης για τον τομέα οπτικής δικτύωσης για το σενάριο «Βαρκελώνη».	121
Πίνακας 7: Οι ζητούμενοι πόροι MEC και οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση.	123
Πίνακας 8: Οι παρεχόμενοι πόροι MEC και οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση.	123

Ακρωνύμια

1^η γενιά (1st Generation): **1G**

2^η γενιά (2nd Generation): **2G**

3^η γενιά (3rd Generation): **3G**

4^η γενιά (4th Generation): **4G**

5^η γενιά (5th Generation): **5G**

Αναλογικό σε ψηφιακό (Analog to Digital): **A/D**

Αποπολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας Frequency Division Duplexing: **FDD**

Ασύρματο-οπτικό δίκτυο (Radio-Optical Network): **RON**

Ασύρματος εξοπλισμός (Radio Equipment): **RE**

Αποπολυπλέκτης (Demultiplexer): **DEMUX**

Βελτιστοποίηση δύο σταδίων (Two-Stage Optimization): **TSO**

Γραμμικός Προγραμματισμός (Linear Program): **LP**

Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things): **IoT**

Δίκτυο Οπτικής Διανομής (Optical Distribution Network): **ODN**

Διαμόρφωση συχνότητας (Frequency Modulation): **FM**

Διαχείριση Ασύρματων Πόρων (Radio Resource Management): **RRM**

Διαχειριστής δικτύου κινητής τηλεφωνίας (Mobile Network Operator): **MNO**

Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunications Union): **ITU**

Δίκτυο Καθορισμένο από το λογισμικό (Software Define Network): **SDN**

Εικονική Μηχανική (Virtual Machine): **VM**

Εικονική Πραγματικότητα (Virtual Reality): **VR**

Εικονικοποίηση Λειτουργίας Δικτύου (Network Function Virtualization): **NFV**

Εικονικός Σταθμός Βάσης (Virtual Base Stations): **VBS**

Ελαστικό Οπτικό Δίκτυο (Elastic Optical Network): **EON**

Ελάχιστο μέσο σφάλμα τετραγώνου (Minimum Mean Squared Error): **MMSE**

Ελεγκτής Ασύρματου εξοπλισμού (Radio Equipment Controller): **REC**

Ενεργειακή Αποδοτικότητα (Energy Efficiency): **EE**

Εξαιρετικά πυκνό δίκτυο (Ultra Dense Network): **UDN**

Εξαντλητική Αναζήτηση (Exhaustive Search): **ES**

Εξοπλισμός Χρήστη (User Equipment): **UE**

Κεντρική μονάδα επεξεργασίας (Central Processing Unit): **CPU**

Κινητή υπολογιστική νέφος; (Mobile Cloud Computing): **MCC**

Κινητή υπολογιστική στα άκρα του δικτύου: (Mobile Edge Computing): **MEC**

Κινητός σταθμός (Mobile Station): **MS**
Μηχανική Μάθηση (Machine Learning): **ML**
Μνήμη τυχαίας προσπέλασης (Random-Access Memory): **RAM**
Μορφή διαμόρφωσης (Modulation Format): **MF**
Ομοδιαυλική Παρεμβολή (Channel Interference): **CI**
Ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing): **OFDM**
Παραμόρφωση διαμόρφωσης (Intermodulation Distortion): **IMD**
Παρεμβολή Γειτονικού Διαύλου (Adjacent Channel Interference): **ACI**
Πληροφορία κατάστασης καναλιού (Channel State Information): **CSI**
Πιθανότητα Αποκλεισμού (Blocking Probability): **BP**
Πιθανότητα Αποκλεισμού Εύρους Ζώνης (Bandwidth Blocking Probability): **BBP**
Πολυπλέκτης (Multiplexer): **MUX**
Πολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας (Frequency Division Duplexing): **FDD**
Πολυπλεξία με διαίρεση κώδικα (Code Division Multiplexing): **CDM**
Πολυπλεξία με διαίρεση μήκους κύματος (Wavelength Division Multiplexing): **WDM**
Πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου (Time Division Multiplexing): **TDM**
Ποιότητα εξυπηρέτησης (Quality of Service): **QoS**
Σηματοθορυβικός λόγος (Signal-to-Noise Ratio): **SNR**
Σταθμισμένο ελάχιστο μέσο τετραγωνικό σφάλμα (Weighted Minimum Mean Square Error): **WMMSE**
Σταθμός Βάσης (Base Station): **BS**
Συντονισμένη μετάδοση πολλαπλών σημείων (Coordinated Multipoint Transmission): **CoMP**
Υπηρεσία μηνυμάτων πολυμέσων (Multimedia Messaging Service): **MMS**
Υπηρεσία σύντομων μηνυμάτων (Short Message Service): **SMS**
Υπολογιστική μονάδα (Computing Unit): **CU**
Υψηλή Ευκρίνεια (High Definition): **HD**
Φυσική λειτουργία δικτύου (Physical Network Function): **PNF**
Ψηφιακή μετάδοση βίντεο (Digital Video Broadcasting): **DVB**
Ψηφιακό σε αναλογικό (Digital to Analog): **D/A**

3rd Generation Partnership Project: **3GPP**
Advanced Mobile Phone System: **AMPS**
Adaptive Routing with Back-to-Back Regeneration: **ARBR**

Active RRH Set Determination: **ARSD**
Analog Radio over Fiber: **ARoF**
Back-To-Back: **B2B**
Best-Fit-Decreasing: **BFD**
Base Band Unit: **BBU**
Binary Phase Shift Keying: **BPSK**
Centralized Radio Access Network: **C-RAN**
Code Division Multiplexing: **CDM**
Code Division Multiple Access: **CDMA**
Common Public Radio Interface: **CPRI**
Cooperative Communication and Computation Resource Allocation 3C-RA: **3C-RA**
Cost-Resilience BBU Selection: **CRBS**
Device to Device: **D2D**
Denial of services: **DoS**
Distributed RRH Cell Coloring: **DRCC**
Dynamic Resource Provisioning: **DRP**
Edge to Edge: **E2E**
Enhanced Data Rate for GSM Evolution: **EDGE**
enhanced Mobile Broadband: **eMBB**
European Total Access Communication Systems: **ETACS**
European Telecommunications Standards Institute: **ETSI**
Evolution-Data Optimized: **EVDO**
Exabyte: **EB**
Far Edge Computing: **FEC**
Few-Mode Fiber: **FMF**
Few-mode multi-core fiber: **FM-MCF**
Fiber Bundle: **FB**
First Fit*S: **FF*S**
Foil Twisted Pair: **FTP**
Frequency Division Multiple Access: **FDMA**
General Packet Radio Services: **GPRS**
Genetic Algorithm: **GA**
Global Systems for Mobile communications: **GSM**
Greedy Lightpath Allocation: **GLA**
High-level Edge Cloud: **HEC**
High Speed Downlink Packet Access: **HSDPA**
High Speed Uplink Packet Access: **HSUPA**
Inter Symbol Interference: **ISI**
Interim standard 136: **IS-136**

Interim standard 95: **IS-95**
Internet Protocol: **IP**
Joint Resource Provisioning: **JRP**
Linear Scale Factor: **LSF**
Local Area Network: **LAN**
Long Short-Term Memory: **LSTM**
Long-Term Evolution: **LTE**
Low-level Edge Cloud: **LEC**
Machine to Machine: **M2M**
Management and Orchestration: **MANO**
Metropolitan Area Networks: **MAN**
Mixed-Integer Programming: **MIP**
Mobility Management Entity: **MME**
Multi-Core Fiber: **MCF**
Multi-Mode Fiber: **MMF**
Multidimensional Multiple-choice Knapsack Problem: **MMKP**
Multiple Inputs Multiple Outputs: **MIMO**
Near Edge Computing: **NEC**
Near-Far Computing Enhanced C-RAN: **NFC-RAN**
Network Function Virtualization Orchestrator: **NFVO**
Neural-Fitted Q-Iteration: **NFQ**
New Radio: **NR**
No RAU Sleeping: **NRS**
Nordic Mobile Telephone: **NMT**
North American Digital Cellular: **NADC**
Optical Line Terminal: **OLT**
Orthogonal Frequency Division Multiple Access: **OFDMA**
Optical Beam Forming Network: **OBFN**
Pacific digital cellular: **PDC**
Personal Area Network: **PAN**
Point-to-Multipoint: **PMP**
Radio Access Network: **RAN**
Radio Access Technology: **RAT**
Radio Aggregation Units: **RAU**
Reconfigurable Optical add Drop Multiplexers: **ROADM**
Remote Radio Head: **RRH**
Routing and Spectrum Allocation: **RSA**
Routing, Spectrum and Core Allocation: **RSCA**
Routing, Spatial mode and Spectrum Allocation: **RSSA**

Shielded Twisted Pair: **STP**
Signal to Interference and Noise Ratio: **SINR**
Simulated Annealing: **SA**
Single Mode Fiber: **SMF**
Single-mode multi-core fiber: **SM-MCF**
Space Division Multiplexing: **SDM**
Standard Interference Function: **SIF**
Spectrally Spatially Flexible Optical Network: **SS-FON**
Tabu Search: **TS**
Time Division Multiple Access: **TDMA**
Total Access Communication System: **TACS**
Ultra-High Frequency: **UHF**
Ultra-Mobile Band: **UMB**
Universal Mobile Telecommunications Systems: **UMTS**
Unshielded Twisted Pair: **UTP**
Vehicle-to-Infrastructure: **V2I**
Vehicle-to-Vehicle: **V2V**
Virtual Network Function: **VNF**
Wide Area Network: **WAN**
Wideband Code Division Multiple Access: **WCDMA**
Worldwide Interoperability for Microwave Access: **WiMAX**

1 ΔΙΚΤΥΑ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Προκειμένου να αντιληφθεί κάποιος την έννοια των τηλεπικοινωνιών, είναι απαραίτητο να έχει μία συνολική εκτίμηση των εννοιών της «επικοινωνίας» και της «πληροφορίας». Σύμφωνα με τους C. E. Shannon και W. Weaver, ως επικοινωνία ορίζονται όλες εκείνες οι διαδικασίες που εμπλέκονται στην μεταφορά της πληροφορίας από τον αποστολέα στον παραλήπτη. Όσον αφορά τα συστήματα επικοινωνιών, αυτές οι διαδικασίες ορίζονται από τα πρωτόκολλα επικοινωνίας. Γι' αυτό συνήθως αναφερόμαστε σε «τηλεπικοινωνία», που είναι υποβοηθούμενη με τεχνικά μέσα μετάδοσης σημάτων σε κάποια απόσταση. Η πληροφορία προέρχεται από διάφορες μορφές όπως ομιλούμενες λέξεις, γραπτά και έντυπα έγγραφα και ηλεκτρονικά δεδομένα και μπορεί να επεξεργαστεί, να αποθηκευτεί και να μεταδοθεί.

Οι τηλεπικοινωνίες παρέχουν το μηχανισμό μετάδοσης της πληροφορίας και περιλαμβάνουν τα παρακάτω:

1. Μεταφορά πληροφοριών μεταξύ τοποθεσιών, είτε:
 - i) ένα προς ένα (π.χ. τηλεφωνία),
 - ii) ένα προς πολλά (π.χ. εκπομπή).
2. Αναμετάδοση πληροφοριών από ένα σύστημα τηλεπικοινωνιών σε άλλο.
3. Διαχείριση της υπηρεσίας μεταφοράς προκειμένου να παρέχεται η επιτήρηση, η συντήρηση και ο λογαριασμός για αυτή την υπηρεσία.
4. Προσδιορισμός αξίας της επικοινωνίας π.χ:
 - i) αποθήκευση και προώθηση κατόπιν αιτήματος,
 - ii) ευέλικτη δρομολόγηση,
 - iii) εξατομικευμένη χρέωση.
5. Προσδιορισμός αξίας της πληροφορίας, όπως η πιστοποίηση μίας πιστωτικής κάρτας.

Όλες αυτές οι λειτουργίες συμβάλλουν στις υπηρεσίες που παρέχονται στους χρήστες ενός τηλεπικοινωνιακού δικτύου. Πρόκειται για ένα σύνολο κόμβων, που συνδέονται μεταξύ τους μέσω γραμμών επικοινωνίας για την ανταλλαγή της πληροφορίας. Τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα ενώ αρχικά σχεδιάστηκαν για να μεταφέρουν μόνο φωνή, πλέον έχουν εξελιχθεί και μπορούν να μεταφέρουν όλων των ειδών τις πληροφορίες (φωνή, δεδομένα, εικόνα κ.α.).

1.2 ΤΥΠΟΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

Υπάρχουν διάφορες κατηγορίες στις οποίες μπορούν να ταξινομηθούν τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα. Κάθε τεχνολογία έχει τα δικά της χαρακτηριστικά, τις τεχνολογίες και το πεδίο εφαρμογής της. Όσον αφορά τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση των δεδομένων σε ένα δίκτυο, τα δίκτυα διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- **Δίκτυα μεταγωγής:** τα δεδομένα εισέρχονται στο δίκτυο από κάποια πηγή πληροφορίας και μεταφέρονται στο δέκτη, μέσω ενδιάμεσων κόμβων, οι οποίοι αποφασίζουν ή όχι για την αποτελεσματική διακίνηση των δεδομένων. Προκειμένου να αυξηθεί η αξιοπιστία του δικτύου οι κόμβοι συνδέονται με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει εναλλακτικός δρόμος μεταξύ των τερματικών σημείων. Για τη μετάδοση των δεδομένων σε αυτά τα δίκτυα χρησιμοποιούνται τρεις τεχνικές: Μεταγωγή κυκλώματος (Circuit switching), Μεταγωγή πακέτων (Packet switching) και Μεταγωγή μηνύματος (Message switching).
- **Δίκτυα πολλαπλής πρόσβασης στο κανάλι διάδοσης:** Πρόκειται για εντελώς διαφορετικά δίκτυα σε σχέση με τα δίκτυα μεταγωγής. Εδώ δεν υπάρχουν ενδιάμεσοι κόμβοι μεταγωγής μεταξύ πομπού και δέκτη, ενώ το μέσο επικοινωνίας είναι κοινό για όλους τους συνδρομητές. Σημαντικό χαρακτηριστικό αυτών των δικτύων είναι ότι σε μια συγκεκριμένη περιοχή του μέσου επικοινωνίας μόνο ένας συνδρομητής μπορεί κάθε στιγμή να εκπέμπει, ενώ το εκπεμπόμενο σήμα μπορεί να λαμβάνεται από όλους τους συνδρομητές. Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι είναι δυνατόν να υπάρχουν πολλοί πομποί που μοιράζονται χρονικά το ίδιο μέσο μετάδοσης. Οι πιο γνωστοί τύποι τέτοιων δικτύων είναι: τα επίγεια ασύρματα δίκτυα, τα δορυφορικά δίκτυα και τα τοπικά δίκτυα (LAN).

Άλλη μία σημαντική κατηγορία ταξινόμησης των δικτύων τηλεπικοινωνιών είναι ανάλογα με την προσφερόμενη γεωγραφική τους κάλυψη. Σύμφωνα με αυτήν την κατηγορία τα δίκτυα χωρίζονται ως εξής:

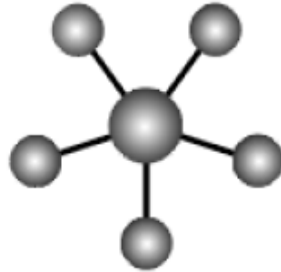
- **Δίκτυα Προσωπικής Περιοχής - Personal Area Networks (PAN):** Πρόκειται για ένα δίκτυο που είναι υπεύθυνο για την ανταλλαγή πληροφοριών κοντά σε ένα άτομο. Στις περισσότερες περιπτώσεις είναι ασύρματα συστήματα και περιλαμβάνουν τη μετάδοση δεδομένων μεταξύ συσκευών όπως laptops, smartphones, H/Y κ.τ.λ.
- **Τοπικά Δίκτυα - Local Area Networks (LAN):** Έχουν σχεδιαστεί για μικρές φυσικές περιοχές όπως ένα γραφείο, ένα κτίριο ή συγκρότημα κτιρίων ή ένα εργοστάσιο. Πρόκειται για δίκτυα που είναι εύκολο να σχεδιαστούν και να αντιμετωπιστούν προβλήματα. Χαρακτηριστικά τους είναι οι υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων (10 έως 100 Mbps), η χαμηλή καθυστέρηση μετάδοσης δεδομένων και ο σχετικά μικρός αριθμός σφαλμάτων.
- **Αστικά Δίκτυα - Metropolitan Area Networks (MAN):** Είναι δίκτυα που το μέγεθός τους δεν ξεπερνάει τα όρια μίας πόλης και καλύπτει συνήθως ακτίνα από 5 έως 50 χμ. Αυτά τα δίκτυα παρέχουν συνήθως επικοινωνία μέσω οπτικών ινών και ξεπερνούν τους περιορισμούς των τοπικών δικτύων σε ταχύτητα και απόσταση.
- **Δίκτυα Ευρείας Περιοχής - Wide Area Networks (WAN):** Το μέγεθος αυτών των δικτύων μπορεί να καλύπτει μία μεγάλη γεωγραφική έκταση ή ακόμα και μία ολόκληρη χώρα. Πολλά τέτοια δίκτυα διασυνδεδεμένα μεταξύ τους, συγκροτούν διεθνή δίκτυα που καλύπτουν ηπείρους. Αυτά τα δίκτυα χαρακτηρίζονται από χαμηλές ταχύτητες [1], και μεγάλες καθυστερήσεις σε σχέση με τα δίκτυα LAN.

Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα μπορούν να ταξινομηθούν και στις παρακάτω κατηγορίες, ανάλογα με:

- το προσφερόμενο εύρος ζώνης (bandwidth)
- με το φυσικό μέσο διασύνδεσής τους
- το είδος των υποστηριζόμενων εφαρμογών
- τον τρόπο πρόσβασης σε αυτά
- το κανονιστικό πλαίσιο λειτουργίας τους
- το χρησιμοποιούμενο υλικό και λογισμικό τους.

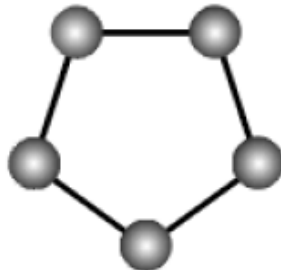
1.3 ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

Τοπολογία Αστέρα (Star): Πρόκειται για μία πολύ διαδεδομένη τοπολογία δικτύου. Όλοι οι σταθμοί εργασίας συνδέονται με τον κεντρικό κόμβο του αστέρα, ο οποίος είναι συνήθως ένας κατανεμητής καλωδίων. Η μετάδοση από οποιονδήποτε κόμβο σε κάποιον άλλον, πραγματοποιείται μέσω του κεντρικού κόμβου και οποιοδήποτε πρόβλημα και αν υπάρξει σε κάποιον κόμβο, το δίκτυο συνεχίζει την ομαλή λειτουργία του. Ωστόσο σε περίπτωση που καταρρεύσει ο κεντρικός κόμβος, διακόπτεται ολοκληρωτικά η επικοινωνία, γι' αυτό και η απόδοση του αστέρα εξαρτάται από τις δυνατότητες του κεντρικού κόμβου. Γενικά δίκτυα σε μορφή αστέρα χρησιμοποιούνται σε μικρές και μεσαίες εφαρμογές.



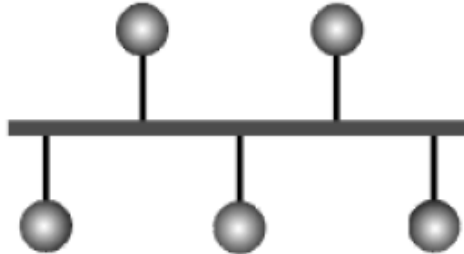
Σχήμα 1.1. Τοπολογία Αστέρα [2].

Τοπολογία Δακτυλίου (Ring): Στη συγκεκριμένη τοπολογία οι τερματικοί σταθμοί συνδέονται σε ένα κλειστό δακτύλιο μέσω κάποιου φυσικού μέσου. Η σύνδεση πραγματοποιείται με τη λογική ότι όλα τα δεδομένα ταξιδεύουν σειριακά πάνω στο δακτύλιο περνώντας διαδοχικά από όλους τους σταθμούς. Με αυτό τον τρόπο κάθε τερματικός σταθμός λειτουργεί ως επαναλήπτης (repeater), καθώς τα δεδομένα, τα οποία αν δεν τον αφορούν, τα επανεκπέμπει προς τον επόμενο σταθμό στη σειρά.



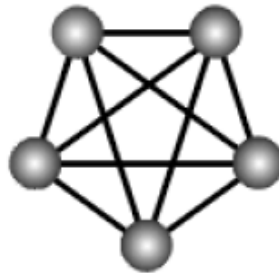
Σχήμα 1.2. Τοπολογία Δακτυλίου [2].

Τοπολογία Αρτηρίας (Bus): Το συγκεκριμένο δίκτυο χρησιμοποιείται από τους τερματικούς σταθμούς, ώστε να συνδέονται πάνω σε ένα κοινό καλώδιο το οποίο αποτελεί τη «ραχοκοκαλιά» του δικτύου και επιτρέπει την ανάπτυξη μεγάλων ταχυτήτων διάδοσης των δεδομένων. Αυτό οφείλει τους τερματικούς σταθμούς, γιατί εκμεταλλευόμενοι τον κοινό δρόμο, εισάγουν δεδομένα σε διαφορετικές χρονικές στιγμές.



Σχήμα 1.3. Τοπολογία Αρτηρίας [2].

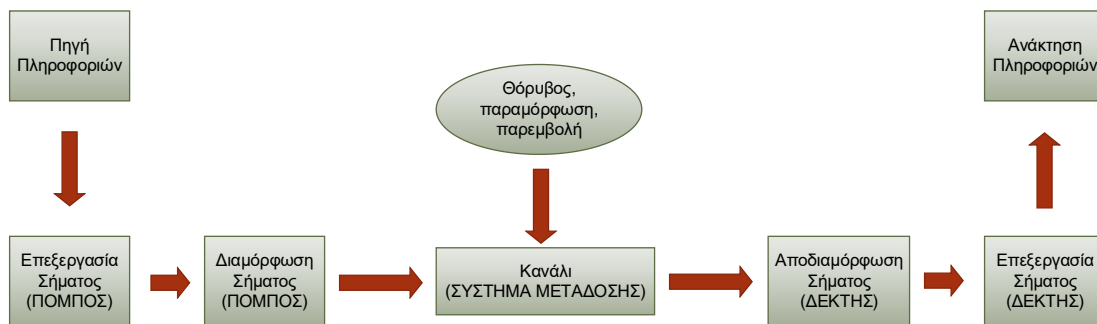
Τοπολογία Βρόχου (Mesh): Πρόκειται για έναν τύπο δικτύου όπου οι διασυνδέσεις μεταξύ των τερματικών δημιουργούν βρόχους. Το κάθε τερματικό είναι συνδεδεμένο με τα υπόλοιπα με δύο τουλάχιστον δρόμους. Το βασικό χαρακτηριστικό αυτού του δικτύου λοιπόν, είναι η ύπαρξη περισσότερων από ένα δρόμους για την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ δύο σημείων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό ενός πλέγματος μεταξύ των κόμβων του δικτύου.



Σχήμα 1.4. Τοπολογία Βρόχου [2].

1.4 ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Τα βασικά στοιχεία ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος είναι ο πομπός, το σύστημα μετάδοσης και ο δέκτης. Ο σχεδιασμός των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων έχει ως σκοπό την αποστολή πληροφοριών από μια πηγή προς έναν ή πολλούς παραλήπτες. Η μετάδοση της πληροφορίας είναι μία πολύπλοκη διαδικασία, καθώς εμπεριέχει διαφορές ως προς τον πομπό, το μέσο μετάδοσης, το δέκτη, αλλά και ως προς την ίδια την πληροφορία. Είναι λοιπόν επιτακτική η ανάγκη απλοποίησης του συστήματος για την καλύτερη κατανόησή του. Παρακάτω παρατίθεται ένα τέτοιο απλοποιημένο μοντέλο τηλεπικοινωνιακού συστήματος. Πρόκειται για μοντέλο που ικανοποιεί τη μεταφορά πληροφορίας σε ένα μόνο χρήστη (single-user communication) και για αυτό αποτελείται μόνο από ένα πομπό και ένα δέκτη. Στα συστήματα επικοινωνιών η μετάδοση κρίνεται επιτυχημένη όταν ο δέκτης μπορεί να αποκτήσει σωστά (επαρκώς και αξιόπιστα) την πληροφορία.



Σχήμα 1.5. Γραφική απεικόνιση ενός απλοποιημένου μοντέλου τηλεπικοινωνιακού συστήματος.

Πηγή Πληροφορίας (Source): Η πηγή παράγει τα δεδομένα που πρόκειται να μεταδοθούν. Η πληροφορία που παράγεται από την πηγή μπορεί να είναι διαφόρων μορφών, όπως για παράδειγμα φωνή, κείμενο ή εικόνα. Για παράδειγμα πηγές μπορεί να είναι το τηλέφωνο ή ένας υπολογιστής. Η έξοδος της πηγής πληροφορίας, είναι μία χρονικά μεταβαλλόμενη συνάρτηση χωρίς τη δυνατότητα πρόβλεψης. Άλλωστε εάν ο δέκτης γνώριζε τι πρόκειται να λάβει, δε θα είχε σκοπό η αποστολή της πληροφορίας.

Μετατροπέας Εισόδου/Εξόδου (Transducer): Ο μετατροπέας εισόδου χρησιμοποιείται για τη μετατροπή της εξόδου μίας πηγής σε ένα ηλεκτρικό σήμα, ώστε να είναι κατάλληλο για μετάδοση. Παραδείγματα μετατροπέων εισόδου είναι το μικρόφωνο. Οι μετατροπείς εξόδου χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή των

ηλεκτρικών σημάτων που λαμβάνονται σε μορφή που μπορεί να κατανοήσει ο χρήστης, όπως για παράδειγμα εικόνα ή ήχος. Παραδείγματα μετατροπέων εξόδου είναι η κάμερα, τα ηχεία, η οθόνη κτλ.

Πομπός (Transmitter): Είναι υπεύθυνος για το μετασχηματισμό και την κωδικοποίηση του ηλεκτρικού σήματος, σε μορφή κατάλληλη για μετάδοση από κάποιο σύστημα μετάδοσης (κανάλι / διάλυος επικοινωνίας). Κατά την επεξεργασία του σήματος, το σήμα φιλτράρεται και στη συνέχεια κωδικοποιείται και κρυπτογραφείται. Στην περίπτωση που το σήμα είναι ψηφιακό, προστίθεται και η διαδικασία μετατροπής του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (Analog-to-Digital Converter – ADC). Εκτός από αυτές τις λειτουργίες στον πομπό πραγματοποιούνται επίσης, η ενίσχυση του διαμορφωμένου σήματος και η ακτινοβολία του σήματος με τη βοήθεια μίας κεραίας εκπομπής, στην περίπτωση της ασύρματης μετάδοσης. Τέλος είναι πολύ σημαντικό τα σήματα που μεταδίδονται από τον πομπό να μην παρεμβάλλονται μεταξύ τους. Για αυτό το λόγο ο πομπός εκτελεί τη διαδικασία της διαμόρφωσης σήματος, που πρόκειται για την αντιστοίχιση του σήματος πληροφορίας στο κανάλι μέσω μίας διαδικασίας.

Σύστημα Μετάδοσης (Transmission System): Είναι το φυσικό μέσο που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση του σήματος από τον πομπό στο δέκτη. Στην ασύρματη μετάδοση το σύστημα μετάδοσης είναι ο αέρας / ατμόσφαιρα, ενώ τα τελευταία χρόνια ήρθε στο προσκήνιο η ασύρματη μετάδοση οπτικών σημάτων με δέσμες φωτός με τη χρήση laser. Στην ενσύρματη μετάδοση πρόκειται για συνεστραμμένα ζεύγη χάλκινων καλωδίων, ομοαξονικά καλώδια και οπτικές ίνες. Βασικό χαρακτηριστικό των συστημάτων μετάδοσης είναι ότι ανεξαρτήτως του μέσου μετάδοσης του σήματος που χρησιμοποιείται, το σήμα υποβαθμίζεται. Σε αυτό οφείλονται διάφοροι λόγοι όπως παρεμβολές, θόρυβος, πολυδιαδρομική (multipath) διάδοση κ.α. Για αυτό το λόγο απαιτείται πολύ προσεκτικός και λεπτομερής σχεδιασμός των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων.

Δέκτης (Receiver): Οι κύριες λειτουργίες του δέκτη είναι η ανάκτηση του σήματος, η αναδημιουργία του από την υποβαθμισμένη του μορφή και μετατροπή του σε μορφή κατανοητή από τον προορισμό. Κατά την επεξεργασία του σήματος, ο δέκτης εκτελεί λειτουργίες όπως το φιλτράρισμα του σήματος, η καταστολή του θορύβου και η ανίχνευση των συμβόλων στην περίπτωση που το σήμα είναι ψηφιακό.

Προορισμός (Destination): Λαμβάνει τα δεδομένα από το δέκτη.

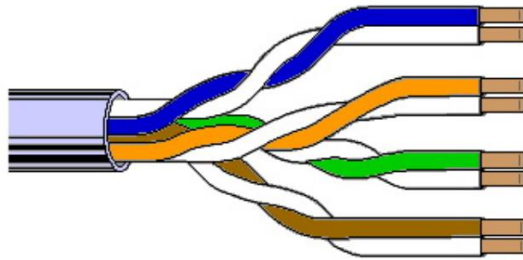
1.5 ΜΕΣΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Τα μέσα μετάδοσης αποτελούν το φυσικό δρόμο μεταξύ του πομπού και του δέκτη και είναι υπεύθυνα για τη μετάδοση των δεδομένων της πληροφορίας. Κάθε μέσο μετάδοσης διαφέρει από τα υπόλοιπα ως προς το εύρος ζώνης, την ταχύτητα μετάδοσης, την καθυστέρηση, το κόστος, την ευαισθησία στο θόρυβο, τη συντήρηση κ.τ.λ. Υπάρχουν δύο κατηγορίες μέσων μετάδοσης, τα ενσύρματα και τα ασύρματα.

1.5.1 Ενσύρματα μέσα μετάδοσης

Πριν την εμφάνιση των επίγειων και δορυφορικών μικροκυματικών συστημάτων μετάδοσης, τα ενσύρματα μέσα μετάδοσης, μονοπωλούσαν το ενδιαφέρον και χρησιμοποιούταν αποκλειστικά στα δίκτυα τηλεπικοινωνιών. Ως ενσύρματα μέσα μετάδοσης θεωρούνται τα χάλκινα (συνεστραμμένα) καλώδια, τα ομοαξονικά καλώδια και οι οπτικές ίνες.

Χάλκινα συνεστραμμένα καλώδια (Twisted Pair): Πρόκειται για το παλαιότερο μέσο μετάδοσης. Αποτελείται από δύο χάλκινα μονωμένα σύρματα συνεστραμμένα μεταξύ τους. Το υλικό κατασκευής μπορεί να είναι είτε συμπαγές χάλκινο σύρμα, είτε νήματα χάλκινου σύρματος και τοποθετείται μέσα σε πλαστικό περίβλημα.



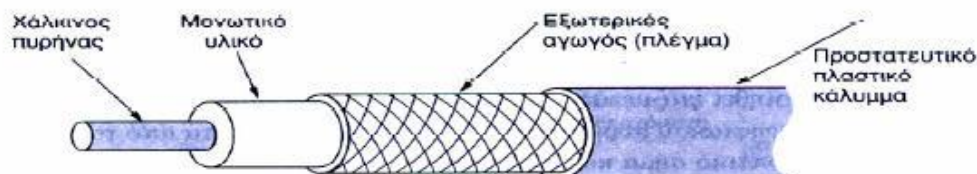
Σχήμα 1.6. Χάλκινα συνεστραμμένα καλώδια [3].

Συνήθως κατασκευάζονται σε τέσσερα ζεύγη συρμάτων και ανάλογα με το επίπεδο θωράκισης διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

- **Αθωράκιστα συνεστραμμένα καλώδια (UTP):** Το πλαστικό περίβλημα είναι κατασκευασμένο από πολυεστέρα (μη αγώγιμο υλικό). Τα καλώδια είναι συνεστραμμένα με τέτοιο τρόπο ώστε να μειώνονται τα φαινόμενα μεταφοράς ενέργειας και αλληλεπίδρασης. Χρησιμοποιούνται κυρίως για κοντινές αποστάσεις εξαιτίας του χαμηλού κόστους και της ευκολίας εγκατάστασης.

- **Θωρακισμένα συνεστραμμένα καλώδια (FTP):** Εμπεριέχουν μεταλλικό πλέγμα πριν το εξωτερικό περίβλημα, για την προστασία από την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Χρησιμοποιούνται σε περιοχές που υπάρχει αυξημένος κίνδυνος ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών, όπως αεροδρόμια, νοσοκομεία κ.τ.λ. λόγω της υψηλής προστασίας που παρέχουν.
- **Θωρακισμένα συνεστραμμένα καλώδια (S-FTP):** Εκτός από το μεταλλικό πλέγμα εξοπλίζονται και με ένα μεταλλικό φύλλο στο εξωτερικό τους περίβλημα. Χρησιμοποιούνται σε περιοχές πολύ ισχυρών ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών.
- **Θωρακισμένα συνεστραμμένα καλώδια (STP/S-STP):** Στα συγκεκριμένα καλώδια χρησιμοποιείται θωράκιση αλουμινίου για κάθε ζεύγος που υπάρχει. Όλα τα ζεύγη συρμάτων επικαλύπτονται από επικασσιτερωμένο πλέγμα χαλκού. Τέλος το εξωτερικό τους περίβλημα αποτελείται από μονωτικό υλικό.

Ομοαξονικό καλώδιο: Αποτελείται από δύο αγωγούς, έναν κεντρικό και έναν εξωτερικό. Είναι πιο δύσκαμπτο και πιο ακριβό από τα υπόλοιπα καλώδια. Ανάμεσα στον εσωτερικό και τον εξωτερικό αγωγό τοποθετείται διηλεκτρικό υλικό για την απομόνωση των αγωγών. Επίσης ο εξωτερικός αγωγός καλύπτεται από μονωτικό προστατευτικό περίβλημα. Με αυτό τον τρόπο ο εσωτερικός αγωγός επηρεάζεται ελάχιστα από το θόρυβο. Έχουν διάμετρο 0,6 - 2cm και προσφέρουν υψηλό εύρος ζώνης συχνοτήτων που φτάνει το 1 GHz. Το βασικό πλεονέκτημα αυτού του καλωδίου είναι ότι έχει μεγάλο εύρος ζώνης και επιτυγχάνει μεγάλες ταχύτητες δεδομένων. Ωστόσο είναι πιο δύσκαμπτο και πιο ακριβό από τα υπόλοιπα καλώδια. Λόγω της μεγάλης διαμέτρου του, γίνεται δύσκολο στην εγκατάστασή του. Ακόμη, λόγω της μορφολογίας του, επιδέχεται μόνο συγκεκριμένους τύπους συνδέσεων.



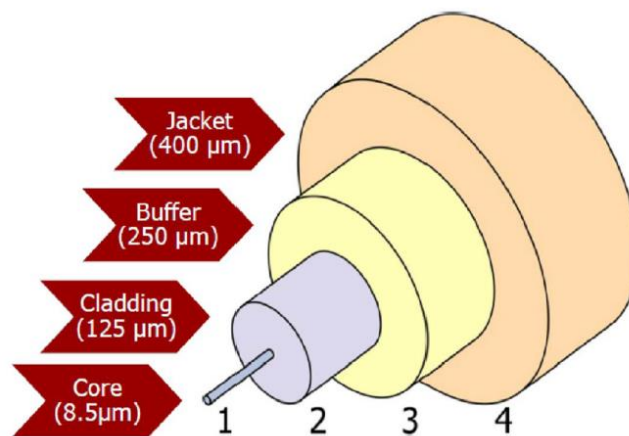
Σχήμα 1.7. Ομοαξονικό Καλώδιο [4].

Το ομοαξονικό καλώδιο παρέχεται σε δύο τύπους ανάλογα με την ηλεκτρική αντίσταση του καλωδίου:

- Ομοαξονικό καλώδιο 50 Ohm: χρησιμοποιείται κυρίως για ψηφιακές μεταδόσεις
- Ομοαξονικό καλώδιο 75 Ohm: χρησιμοποιείται για αναλογικές μεταδόσεις.

Τα ομοαξονικά καλώδια χρησιμοποιούνται κυρίως στην καλωδιακή τηλεόραση, σε τοπικά δίκτυα υπολογιστών ή σε κομβικές συνδέσεις του τηλεφωνικού συστήματος και μπορούν να μεταδίδουν τόσο αναλογικά όσο και ψηφιακά σήματα.

Οπτικές ίνες: Πρόκειται για πολύ λεπτές ίνες γυαλιού ή πλαστικού σε σχήμα κυλίνδρου, με διάμετρο μικρότερη από 8mm. Μία οπτική ίνα αποτελείται από τρεις ομόκεντρες κυλινδρικές οντότητες. Η πρώτη είναι ένας γυάλινος πυρήνας (core). Η δεύτερη κυλινδρική οντότητα είναι ο μανδύας (cladding). Πρόκειται για επένδυση γυαλιού υψηλής καθαρότητας. Τέλος χρησιμοποιείται ένα εξωτερικό πλαστικό περίβλημα (jacket) για την προστασία της οπτικής ίνας και δεν παίζει κανένα ρόλο στην λειτουργία της. Πριν την τοποθέτηση του περιβλήματος η ίνα καλύπτεται από τον απομονωτή (buffer). Η μετάδοση εδώ, γίνεται με τη χρήση κατευθυνόμενων οπτικών δεσμών που έχουν ως μέσο μετάδοσης το γυαλί. Οι δέσμες φωτός αντανακλώνται στα τοιχώματα του γυαλιού της ίνας, μεταφέροντας έτσι την πληροφορία. Τα καλώδια, περιέχουν πλήθος οπτικών ινών και χρησιμοποιούνται κυρίως για επίγειες και υποθαλάσσιες συνδέσεις μεγάλων αποστάσεων.



Σχήμα 1.8. Δομή οπτικής ίνας (μονότροπης) [5].

Οι οπτικές ίνες διαθέτουν τεράστιο εύρος ζώνης, με αποτέλεσμα την επίτευξη υψηλών ταχυτήτων μετάδοσης, της τάξεως των Gbps. Επίσης λόγω της δομής τους και

του υλικού κατασκευής τους, η εξασθένιση των σημάτων είναι πολύ μικρή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το μικρότερο κόστος εξοπλισμού (π.χ. ενισχυτές σήματος). Ακόμη θεωρούνται ως ένα ασφαλές μέσο μετάδοσης, καθώς η παρεμβολή και η υποκλοπή είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθούν σε αυτό το μέσο μετάδοσης.

Οι οπτικές ίνες χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- **Μονότροπες (Single Modes):** η διάμετρος του πυρήνα τους κυμαίνεται από 5μm έως 10μm. Στην προκειμένη περίπτωση υποστηρίζεται μόνο ένας τρόπος μετάδοσης του οπτικού σήματος, ο αξονικός. Το οπτικό σήμα ταξιδεύει σε ευθεία γραμμή και φτάνει σε μεγάλες αποστάσεις με τη μέγιστη δυνατή ταχύτητα.
- **Πολύτροπες (Multi Modes):** Μερικά τυπικά μεγέθη των πυρήνων αυτών των ινών είναι 50μm/125μm, 62,5μm/125μm, 82μm/125μm και 100μm/140μm. Η μετάδοση σε αυτή την περίπτωση αποτελείται από διάφορες ακτίνες του οπτικού σήματος που ταξιδεύουν ανακλώμενες υπό διαφορετικές γωνίες μέσα στο γυαλί. Οι πολύτροπες ίνες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τις διακριτού βήματος (step index) και τις βαθμιαίου βήματος (graded index).

1.5.2 Ασύρματα μέσα μετάδοσης

Όπως προαναφέρθηκε, πριν την εμφάνιση των ασύρματων μέσων μετάδοσης, το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο αποτελούνταν εξ ολοκλήρου από ενσύρματα μέσα. Με τον ερχόμο των ασύρματων μέσων μετάδοσης πυροδοτήθηκαν σημαντικές εξελίξεις στον τομέα των δικτύων, καθώς πλέον οι χρήστες δε δεσμευόταν στην ανταλλαγή πληροφοριών από την ύπαρξη κάποιου φυσικού μέσου μετάδοσης. Σε αυτά τα δίκτυα η μετάδοση δεδομένων επιτυγχάνεται μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ως φορείς πληροφορίας. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα έχουν μεταβαλλόμενη συχνότητα φέροντος, ανάλογη με το ρυθμό μετάδοσης που απαιτείται κάθε φορά από το υπάρχον δίκτυο. Η μετάδοση και η λήψη σημάτων πραγματοποιείται από ειδικές κεραίες, οι οποίες βρίσκονται τοποθετημένες στους σταθμούς λήψης και μετάδοσης. Κατηγορίες ασύρματων μέσων μετάδοσης αποτελούν οι επίγειες μικροκυμματικές ζεύξεις, οι δορυφορικές μικροκυμματικές ζεύξεις και η κυψελοειδής τηλεφωνία:

- **Επίγειες μικροκυμματικές ζεύξεις:** Χρησιμοποιούνται για την παροχή διασύνδεσης μεταξύ δύο ή περισσότερων σταθερών επίγειων σημείων, για την παροχή τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών, όπως τη μετάδοση δεδομένων, φωνής, video κ.τ.λ. Στηρίζονται στην κατευθυντική μετάδοση μικροκυμάτων και χρησιμοποιούν πολύ υψηλές ζώνες συχνοτήτων. Μπορούν να υποστηρίξουν

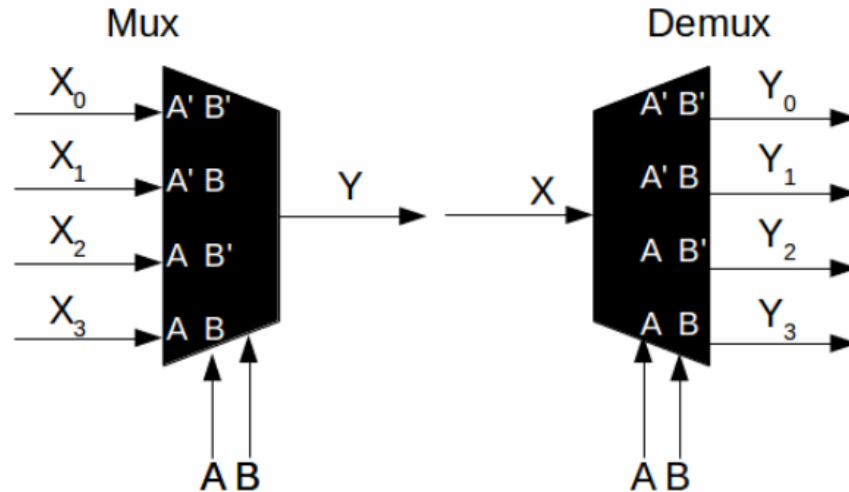
ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων από μερικές δεκάδες Mbps έως και εκατοντάδες. Για να καταστεί εφικτή η μετάδοση δεδομένων, απαιτείται οπτική επαφή μεταξύ του πομπού και του δέκτη, που στην προκειμένη περίπτωση είναι τα παραβολικά πιάτα. Οι επίγειες μικροκυματικές ζεύξεις βρίσκουν εφαρμογή για μικρές από σημείο σε σημείο (point-to-point) συνδέσεις, όπως ένα κλειστό κύκλωμα τηλεόρασης ή συνδέσεις δεδομένων μεταξύ τοπικών δικτύων.

- **Δορυφορικές μικροκυματικές ζεύξεις:** Έκαναν την εμφάνισή τους για πρώτη φορά το έτος 1958, όταν οι ΗΠΑ εκτόξευσαν το πρώτο δορυφόρο. Έχουν τη δυνατότητα να αναμεταδίδουν σήματα σε πολύ μεγάλες αποστάσεις, χρησιμοποιώντας δορυφόρους. Οι δορυφορικές ζεύξεις χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, στις ανοδικές (uplink), που χρησιμοποιούνται για την αποστολή σημάτων από τους επίγειους σταθμούς βάσης προς τους δορυφόρους και τις καθοδικές (downlink), στις οποίες οι δορυφόροι αναμεταδίδουν τα σήματα. Η εκπομπή των καθοδικών ζεύξεων χρησιμοποιείται για υπηρεσίες εκπομπής (π.χ. μετάδοση τηλεοπτικού σήματος).
- **Κυψελοειδής τηλεφωνία:** Το πρώτο σύστημα κυψελοειδής τηλεφωνίας που εφαρμόστηκε στην πράξη, κατασκευάστηκε το 1960-70 στο εργαστήριο της Bell. Τα κυψελοειδή συστήματα διαιρούν τις αστικές περιοχές σε κυψέλες (εξάγωνα), οι οποίες περιλαμβάνουν έναν πομπό χαμηλής ισχύος που τοποθετείται σε ένα σταθμό βάσης. Κάθε κυψέλη λειτουργεί σε διαφορετική συχνότητα από τις γειτονικές της για αποφυγή παρεμβολών. Η κίνηση των χρηστών εντός των κυψελών παρακολουθείται από έναν κεντρικό υπολογιστή και κατά τη μετάβαση του χρήστη σε γειτονική κυψέλη, το τηλεφωνικό κέντρο τον μετάγει αυτόματα σε ένα ελεύθερο κανάλι της νέας κυψέλης.

1.6 ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑ

Καθώς το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο εξαπλωνόταν ραγδαία, οι συνδρομητές διαρκώς αυξανόταν. Για να ικανοποιηθούν οι αυξημένες ανάγκες τους, χρειαζόταν επιπλέον κυκλώματα. Κατέστη λοιπόν κατανοητό, ότι υπήρχε φυσικό όριο στη χρήση των καλωδίων, τόσο στα τηλεφωνικά κέντρα, όσο και μεταξύ τους μέσω των υπόγειων φρεατίων. Ήταν επιτακτική η ανάγκη να μεταφέρονται ταυτόχρονα περισσότερα από ένα τηλεφωνικά κανάλια από το ίδιο φυσικό κύκλωμα. Έτσι έκανε την εμφάνισή της η τεχνική της πολυπλεξίας. Ως πολυπλεξία (multiplexing), ορίζεται η τεχνική κατά την οποία τα δεδομένα από πολλές πηγές μεταδίδονται από το ίδιο τηλεπικοινωνιακό μέσο (χάλκινο καλώδιο, οπτικό καλώδιο κλπ.). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη

αξιοποίηση των τηλεπικοινωνιακών γραμμών υψηλής χωρητικότητας. Αυτή η διαδικασία στα ενσύρματα συστήματα επικοινωνιών λέγεται πολυπλεξία, ενώ στα ασύρματα λέγεται πολλαπλή προσπέλαση. Μέσω της πολυπλεξίας μπορούν οι πόροι του συστήματος να διαμοιραστούν σε πολλαπλούς χρήστες.



Σχήμα 1.9. Πολυπλεξία / αποπολυπλεξία πολλαπλών εισόδων / εξόδων [6].

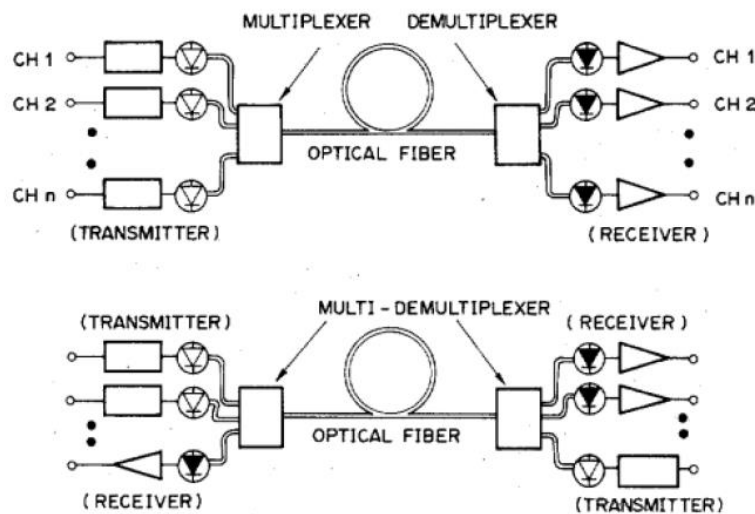
Η πολυπλεξία επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας μια συσκευή που ονομάζεται πολυπλέκτης (Multiplexer -MUX). Σκοπός του πολυπλέκτη είναι να συνδυάσει τις γραμμές εισόδου για τη δημιουργία μίας γραμμής εξόδου. Η πολυπλεξία ακολουθεί τη λογική «πολλά προς ένα», δηλαδή πολλές γραμμές εισόδου και μία γραμμή εξόδου. Έτσι διαιρείται η χωρητικότητα ενός τηλεπικοινωνιακού καναλιού σε λογικά κανάλια, ένα για κάθε μεταδιδόμενο πακέτο δεδομένων ή για κάθε σήμα αντίστοιχα. Η αποπολυπλεξία (demultiplexing) που εκτελείται από τον παραλήπτη, επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας μια συσκευή που ονομάζεται αποπολυπλέκτης (Demultiplexer - DEMUX) και τοποθετείται στο τέλος της λήψης. Σκοπός του είναι ο διαχωρισμός των σημάτων που έχουν υποστεί πολυπλεξία. Επομένως, μπορούμε να πούμε ότι η αποπολυπλεξία ακολουθεί τη λογική «ένα προς πολλά».

Υπάρχουν αρκετές τεχνικές πολυπλεξίας που χρησιμοποιούνται σήμερα, ωστόσο οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες είναι οι εξής: πολυπλεξία με διαίρεση μήκους κύματος (Wavelength Division Multiplexing - WDM), πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου (Time Division Multiplexing - TDM), πολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας (Frequency Division Multiplexing - FDM), ορθογώνια πολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - OFDM), πολυπλεξία διαίρεσης κώδικα (Code Division Multiplexing - CDM).

1.6.1 Πολυπλεξία με διαίρεση μήκους κύματος (Wavelength Division Multiplexing)

Η συγκεκριμένη πολυπλεξία βρίσκει εφαρμογή σε δίκτυα οπτικών ινών και αποτελεί ένα χρήσιμο μέσο για την πλήρη αξιοποίηση των χαρακτηριστικών χαμηλών απωλειών οπτικών ινών. Κατά την πολυπλεξία με διαίρεση μήκους κύματος (Wavelength Division Multiplexing - WDM), πολλαπλά οπτικά κανάλια μπορούν να μεταδοθούν ταυτόχρονα σε διαφορετικά μήκη κύματος μέσω μιας μόνο οπτικής ίνας.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι δύο βασικές διαμορφώσεις για συστήματα μετάδοσης WDM, δηλαδή, η μονόδρομη και η αμφίδρομη μετάδοση. Και οι δύο απαιτούν μία μόνο οπτική ίνα, αρκετές πηγές φωτός και φωτοανιχνευτές και οπτικές συσκευές πολυπλεξίας / αποπολυπλεξίας. Το μονόδρομο σύστημα μετάδοσης απαιτεί συνολικά έναν πολυπλέκτη (MUX) και έναν αποπολυπλέκτη (DEMUX), ενώ το αμφίδρομο σύστημα μετάδοσης απαιτεί έναν πολυπλέκτη / αποπολυπλέκτη (MUX / DEMUX) σε κάθε άκρο. Στο σχεδιασμό συστημάτων WDM, η απόδοση των οπτικών πολυπλεκτών, μαζί με τις οπτικές ίνες, τις πηγές φωτός και τους φωτοανιχνευτές, αποτελεί το κύριο μέλημα των κατασκευαστών.



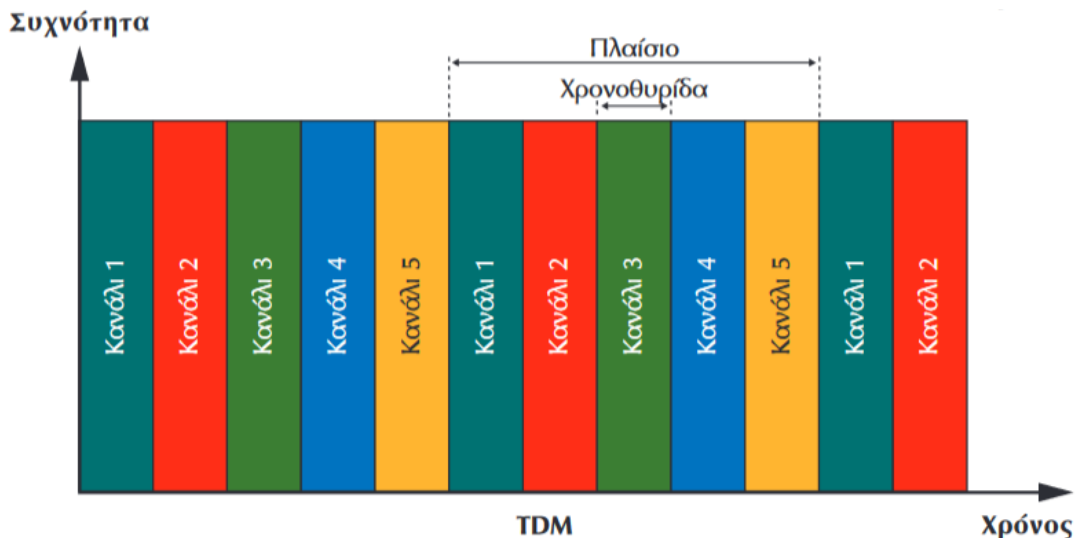
Σχήμα 1.10. Βασική διαμόρφωση για μετάδοση WDM [7].

Τα συστήματα WDM ενσωματώνουν πολλά πλεονεκτήματα όπως: αύξηση της χωρητικότητας μετάδοσης ανά ίνα, μείωση του κόστους συστήματος, ταυτόχρονη μετάδοση διαφορετικών σημάτων σήματος διαμόρφωσης και δυνατότητα επέκτασης του καναλιού υπηρεσίας μετά την εγκατάσταση των οπτικών ινών. Αυτός είναι και ο λόγος που η τεχνολογία WDM έχει τόσο μεγάλη απήχηση σε διάφορους τομείς της επικοινωνίας.

1.6.2 Πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου (Time Division Multiplexing)

Η πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου (Time Division Multiplexing - TDM) στηρίζεται στον επιμερισμό του χρόνου. Ο χρόνος διαιρείται σε ισομεγέθη τμήματα που ονομάζονται χρονοπλαίσια (time frames). Τα χρονοπλαίσια επιμερίζονται σε μικρότερα ισομεγέθη τμήματα που ονομάζονται χρονοθυρίδες (timeslots). Τα σήματα εισόδου δειγματοληπτούνται συνεχόμενα με υψηλό ρυθμό. Κάθε φορά μπορεί να μεταδίδεται μόνο ένα δείγμα ενός σήματος εισόδου. Τα δείγματα από τα διάφορα σήματα εισόδου μεταφέρονται σε διαδοχικά πλαίσια, το καθένα από τα οποία, περιέχει τον αριθμό των χρονοθυρίδων. Σε κάθε σήμα εισόδου μπορεί να αφιερώνεται μία ή περισσότερες χρονοθυρίδες για κάθε πλαίσιο. Με αυτό τον τρόπο τα δεδομένα που προέρχονται από διαφορετικές πηγές υφίστανται χρονική πολυπλεξία και εν τέλει μεταδίδονται στην ίδια γραμμή.

Στην πλευρά του δέκτη, αφού τα δεδομένα υφιστούν αποπολυπλεξία μεταφέρονται προς τις αντίστοιχες θύρες. Ο αριθμός των θυρών στους δύο πολυπλέκτες είναι ο ίδιος. Κατά τη διαδικασία της λήψης τα δεδομένα εξέρχονται από τις τερματικές θύρες του πολυπλέκτη με την ίδια ταχύτητα που μεταδόθηκαν στο σημείο εκπομπής.

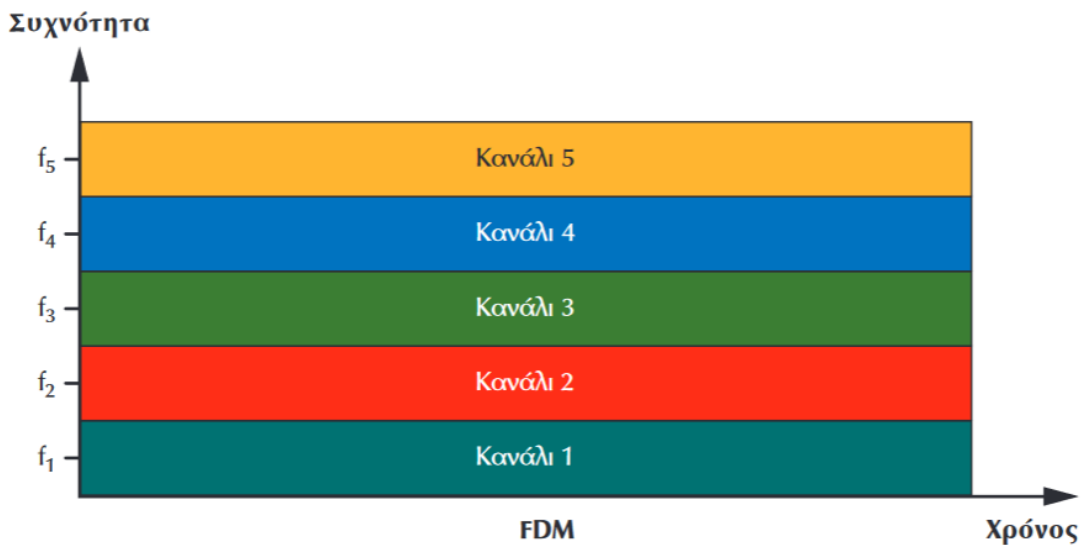


Σχήμα 1.11. Αναπαράσταση της πολυπλεξίας διαίρεσης χρόνου [1].

Μια παραλλαγή αυτής της πολυπλεξίας αποτελεί η στατιστική πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου (Statistical Time Division Multiplexing – Statistical TDM). Σε αυτή την πολυπλεξία το κύριο κανάλι υψηλής ταχύτητας διαμοιράζεται σταθερά μεταξύ των ακραίων καναλιών, δεσμεύοντας χρονοθυρίδες, χωρίς να λαμβάνεται υπόψιν αν αυτά τα κανάλια έχουν δεδομένα προς μετάδοση ή όχι. Μέσω της στατιστικής πολυπλεξίας διαίρεσης χρόνου επιτυγχάνεται καλύτερη εκμετάλλευση του τηλεπικοινωνιακού καναλιού συγκριτικά με την απλή TDM.

1.6.3 Πολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας (Frequency Division Multiplexing)

Η πολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας (Frequency Division Multiplexing - FDM), χρησιμοποιείται κατά τη μετάδοση αναλογικών σημάτων. Το εύρος ζώνης συχνοτήτων του καναλιού χωρίζεται σε επιμέρους συχνότητες, κάθε μία από τις οποίες αφιερώνεται σε κάποια ξεχωριστή σύνδεση. Αυτό σημαίνει ότι πολλά σήματα, μπορούν να μεταδοθούν ταυτόχρονα πάνω από ένα κανάλι επικοινωνίας, διαμορφώνοντας κάθε σήμα σε μία διαφορετική φέρουσα συχνότητα. Πρέπει να υπάρχει επαρκής διαχωρισμός μεταξύ των φέρουσων συχνοτήτων, ώστε να μην υπάρχει αλληλοεπικάλυψη των φασμάτων των μεταδιδόμενων σημάτων. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.12, κάθε σήμα καταλαμβάνει διαφορετική ζώνη συχνοτήτων. Προκειμένου να μετατεθεί κάθε σήμα, στην κατάλληλη ζώνη συχνοτήτων χρησιμοποιούνται διαμορφωτές. Οι πολυπλέκτες εδώ, είναι υπεύθυνοι για το συνδυασμό των διαμορφωμένων σημάτων. Για να είναι εφικτή η πολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας, απαιτείται το εύρος ζώνης του επικοινωνιακού διαύλου να είναι μεγαλύτερο από το εύρος ζώνης των σημάτων προς μετάδοση.



Σχήμα 1.12. Αναπαράσταση της πολυπλεξίας διαίρεσης χρόνου [1].

1.6.4 Ορθογώνια πολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

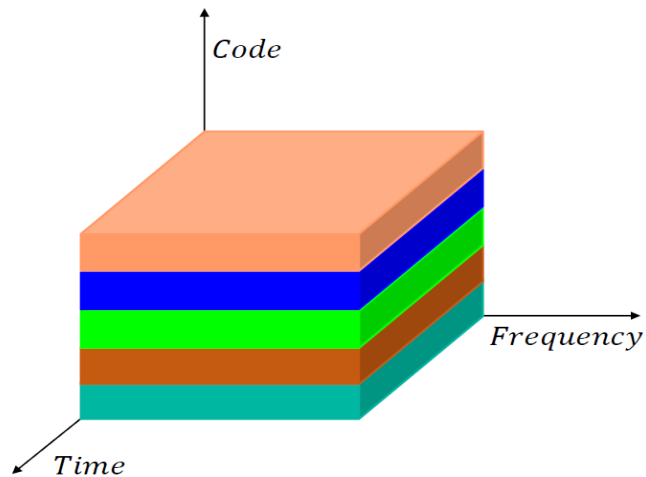
Η ορθογώνια πολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - OFDM), αποτελεί μία ευέλικτη μέθοδο πολυπλεξίας καναλιών με

αυξημένη χωρητικότητα και χρησιμοποιείται για τη μετάδοση μεγάλων ποσοτήτων ψηφιακών δεδομένων, τα οποία μεταδίδονται μέσω ραδιοφωνικών κυμάτων. Η συγκεκριμένη πολυπλεξία είναι βασισμένη στην πολυπλεξία FDM. Χρησιμοποιεί ένα μεγάλο αριθμό από στενά διατεταγμένα ορθογώνια σήματα υπο-φερουσών, για να μεταφέρει δεδομένα σε διάφορες παράλληλες ροές δεδομένων ή κανάλια. Τα δεδομένα χωρίζονται και μοιράζονται σε έναν μεγάλο αριθμό υποδιαύλων με μικρότερο εύρος ζώνης. Οι υποδιαύλοι διαχωρίζονται σε διαστήματα συχνότητας, σχηματίζοντας έτσι το φάσμα του μεταδιδόμενου σήματος.

Ένας από τους κύριους λόγους που αυτή η τεχνική πολυπλεξίας προτιμάται, είναι επειδή παρουσιάζει αυξημένη ανοχή στη διασυμβολική παρεμβολή. Η διασυμβολική παρεμβολή αποτελεί ένα σημαντικό περιορισμό για τα συστήματα μετάδοσης υψηλού ρυθμού δεδομένων. Επίσης λόγω της κατανομή των δεδομένων σε μεγάλο αριθμό φορέων σε ένα σήμα OFDM, οι διακυμάνσεις που προκαλούνται από παρεμβολές σε μία δεδομένη συχνότητα, επηρεάζουν μόνο ένα μικρό αριθμό φορέων. Οι υπόλοιποι φορείς λαμβάνονται σωστά. Επιπλέον η συγκεκριμένη πολυπλεξία εμφανίζει σχεδόν αμελητέα παρεμβολή στις αντανakλάσεις, εξαιτίας του χαμηλότερου ρυθμού δεδομένων. Επειδή τα μεταδιδόμενα δεδομένα κατανέμονται στους φορείς του σήματος, μειώνεται ο ρυθμός μετάδοσης που λαμβάνεται από κάθε φορέα.

1.6.5 Πολυπλεξία με διαίρεση κώδικα (Code Division Multiplexing)

Η πολυπλεξία με διαίρεση κώδικα (Code Division Multiplexing - CDM) αναφέρεται σε οποιοδήποτε από τα διάφορα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται σε ασύρματες επικοινωνίες δεύτερης γενιάς (2G) και τρίτης γενιάς (3G). Η συγκεκριμένη τεχνολογία χρησιμοποιήθηκε σε συστήματα κινητής τηλεφωνίας εξαιρετικά υψηλής συχνότητας (UHF) στις ζώνες 800-MHz και 1,9-GHz. Πρόκειται για μία μορφή πολυπλεξίας, η οποία επιτρέπει σε πολλά σήματα να καταλαμβάνουν ένα μόνο κανάλι μετάδοσης, βελτιστοποιώντας τη χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Η πολυπλεξία με διαίρεση κώδικα χρησιμοποιεί μετατροπή αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC) σε συνδυασμό με την τεχνολογία ευρέως φάσματος. Αρχικά η είσοδος ψηφιοποιείται σε δυαδικά στοιχεία. Έπειτα η συχνότητα του μεταδιδόμενου σήματος μεταβάλλεται σύμφωνα με ένα καθορισμένο μοτίβο (κωδικός), οπότε μπορεί να υποκλαπεί μόνο από έναν δέκτη του οποίου η απόκριση συχνότητας είναι προγραμματισμένη με τον ίδιο κωδικό. Υπάρχουν τρισεκατομμύρια επιλογές πιθανών κωδικών που θα μπορούσαν να ταιριάζουν, κάτι που βελτιώνει το απόρρητο και καθιστά δύσκολη την «κλωνοποίηση». Ακόμη η συγκεκριμένη πολυπλεξία εκχωρεί σε κάθε κανάλι τον δικό του κωδικό για να τα διαχωρίσει μεταξύ τους. Οι μοναδικοί κώδικες που προκύπτουν αποκωδικοποιούν το αρχικό επιθυμητό σήμα, ενώ αφαιρούν εντελώς το αποτέλεσμα των άλλων κωδικοποιημένων καναλιών.



Σχήμα 1.13. Αναπαράσταση της πολυπλεξίας διαίρεσης κώδικα [8].

1.7 ΑΙΤΙΕΣ ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗΣ ΤΗΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΖΕΥΞΗΣ

Όπως έχει προαναφερθεί, ένα σήμα μεταδίδεται μέσω ενός καναλιού (μέσο μετάδοσης). Έτσι το σήμα είναι ευάλωτο σε διάφορες αλλοιώσεις που μπορεί να προκύψουν. Ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα λοιπόν, μπορεί να υποστεί υποβάθμιση από διάφορες παραμέτρους. Στη συνέχεια γίνεται επεξήγηση μερικών από αυτών.

Παραμόρφωση (distortion): Πρόκειται για μία συνηθισμένη κατάσταση στα καθοδηγούμενα μέσα. Η αιτία από την οποία προκαλείται, είναι ότι ο δέκτης παραλαμβάνει τις διάφορες συνιστώσες της συχνότητας του σήματος, σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα. Η παραμόρφωση γίνεται ιδιαίτερα αντιληπτή στα μη καθοδηγούμενα μέσα μετάδοσης, εξαιτίας της σημαντικής εξάρτησης από τη συχνότητα και το περιβάλλον διάδοσης. Υπάρχουν διάφορες μορφές παραμόρφωσης όπως οι:

- μεταβολές εξαρτώμενες από την συχνότητα,
- μεταβολές εξαιτίας του φιλτραρίσματος,
- μεταβολές της απολαβής με τον χρόνο,
- μετατοπίσεις στη συχνότητα.

Διαλείψεις (fading): Πολλές φορές υπάρχει περίπτωση να φτάσουν στο δέκτη σήματα, τα οποία προέρχονται από τον ίδιο πομπό αλλά ακολουθούν διαφορετικές διαδρομές. Πρόκειται για ένα ιδιαίτερα ενοχλητικό φαινόμενο που εξασθενεί το σήμα σε τέτοιο βαθμό, ώστε ο χρήστης να το θεωρεί ως θόρυβο. Οι διαλείψεις χωρίζονται σε μεγάλης (Long-term fading, Shadowing) και μικρής κλίμακας (Short-term fading). Οι διαλείψεις μεγάλης κλίμακας οφείλονται στην παρουσία μεγάλων εμποδίων, κατά τη διάδοση των ραδιοσημάτων. Σε αυτό παίζει πολύ σημαντικό ρόλο η μορφολογία του εδάφους γύρω από το σταθμό βάσης. Το φαινόμενο των διαλείψεων μικρής κλίμακας αναφέρεται στις ταχύτατες μεταβολές στο πλάτος του σήματος (ή στην ισχύ), σε σχετικά μικρές αποστάσεις από τον πομπό.

Οι κύριοι λόγοι στους οποίους οφείλεται το φαινόμενο των διαλείψεων είναι:

- οι πολλαπλές εκδόσεις του μεταδιδόμενου σήματος που φτάνουν στον δέκτη, εξαιτίας των ανακλάσεων, περιθλάσεων κ.λπ.
- η ταχύτητα των περιβαλλόντων αντικειμένων,
- η ταχύτητα του κινητού και,
- το εύρος ζώνης του σήματος που μεταδίδεται.

Τα αποτελέσματα των διαλείψεων επηρεάζουν άμεσα με τη σχεδίαση του δέκτη, το σχήμα διαμόρφωσης, καθώς και την κωδικοποίηση που θα επιλεγεί.

Παρεμβολή (interference): Δημιουργείται όταν στο χρησιμοποιούμενο από το κανάλι εύρος ζώνης, εκτός από το επιθυμητό σήμα, φθάνουν και άλλα εξωτερικά ανεπιθύμητα σήματα. Στην ουσία πρόκειται για πρόσμιξη του μεταδιδόμενου σήματος, με άλλα εξωτερικά σήματα από διαφορετικές πηγές. Οι κύριοι λόγοι στους οποίους οφείλονται οι παρεμβολές στις τηλεπικοινωνίες είναι:

- η επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων,
- τα ανεπιθύμητα φασματικά κατάλοιπα που προκύπτουν από την ατελή συμπεριφορά φίλτρων στις κεραίες πομπού και δέκτη,
- η αποπόλωση που οδηγεί στην απώλεια της ορθογωνιότητας των μεταδιδόμενων κυμάτων (προκαλείται κυρίως λόγω βροχής),
- η μη γραμμική ενίσχυση του σήματος και η παραγωγή ανεπιθύμητων σημάτων σε άλλες συχνότητες.

Επιγραμματικά οι βασικότερες κατηγορίες παρεμβολών όσον αφορά τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα είναι: η παρεμβολή γειτονικού διαύλου (Adjacent Channel Interference – ACI), η ομοδιαλυκή παρεμβολή (channel interference - CI), η

διασυμβολική παρεμβολή (Inter Symbol Interference - ISI), η παρεμβολή ενδοδιαμόρφωσης (Intermodulation Distortion - IMD), η παρεμβολή λόγω αποπόλωσης (depolarization) και η ετεροσχισμική παρεμβολή (cross slot interference).

Θόρυβος (noise): Αποτελεί έναν από τους πιο καθοριστικούς παράγοντες της ποιότητας και της αξιοπιστίας μιας ασύρματης ζεύξης. Υπάρχουν διάφοροι τύποι θορύβου οι οποίοι δημιουργούνται από διαφορετικά αίτια. Οι περισσότεροι από αυτούς έχουν "ηλεκτρική" προέλευση, με την έννοια ότι συνδέονται με την κίνηση ηλεκτρικών φορέων (π.χ. ηλεκτρόνια) υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου. Όπως αναφέρεται στο [9], οι πηγές που παράγουν θόρυβο ταξινομούνται σε δύο βασικές κατηγορίες. Η πρώτη περιλαμβάνει τον τεχνητό θόρυβο και η δεύτερη τον φυσικό θόρυβο. Ο τεχνητός θόρυβος είναι κρουστικής μορφής και σύντομης διάρκειας. Η εμφάνισή του οφείλεται σε ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως μηχανήματα σε λειτουργία, ηλεκτρικές συσκευές κ.τ.λ. Ο φυσικός θόρυβος διακρίνεται σε ουράνιο και κυκλωματικό θόρυβο. Για τον ουράνιο θόρυβο οφείλεται η διαστημική ακτινοβολία και τα καιρικά φαινόμενα. Ο κυκλωματικός θόρυβος, αποτελείται από τον θερμικό θόρυβο και τον θόρυβο βολής.

Οι δύο σημαντικότερες κατηγορίες θορύβου είναι ο θερμικός θόρυβος (thermal noise) και ο θόρυβος βολής (shot noise). Ο θερμικός θόρυβος δημιουργείται εξαιτίας της τυχαίας κίνησης των ελεύθερων ηλεκτρονίων των αγωγών. Ο θόρυβος αυτός συναντάται και ως θόρυβος Johnson και θόρυβος Nyquist προς τιμή εκείνου που ανακάλυψε το φαινόμενο αυτό και εκείνου, που απέδειξε ότι ο θόρυβος αυτός είναι αποτέλεσμα του δεύτερου νόμου της θερμοδυναμικής. Ο θόρυβος βολής δημιουργείται λόγω των τυχαίων διακυμάνσεων των ηλεκτρονίων από την κάθοδο μιας λυχνίας ή στις τυχαίες μεταβολές που προκαλούνται στη διάχυση των φορέων φορτίων σε μία δίοδο ή ένα transistor.

Άλλες κατηγορίες θορύβων αποτελούν ο ροζ θόρυβος, που πρόκειται για ένα είδος ηλεκτρονικού θορύβου που δημιουργείται κυρίως γύρω από το τρανζίστορ, ο θόρυβος popcorn, που προκαλεί την απότομη μετάβαση από το ένα επίπεδο τάσης σε ένα άλλο και ο θόρυβος ενδοδιαμόρφωσης που δημιουργείται όταν σήματα σε διαφορετικές συχνότητες μοιράζονται το ίδιο μέσο διάδοσης.

2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΥΨΕΛΟΕΙΔΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σημερινή αγορά ασύρματων επικοινωνιών αναπτύσσεται ταχύτατα και σε αυτό οφείλεται ο συνεχώς αυξανόμενος αριθμός συνδρομητών. Αυτή η εξέλιξη στα κυψελοειδή ασύρματα συστήματα ξεκίνησε όταν εμφανίστηκε για πρώτη φορά η «κυψελοειδής ιδέα». Το κυψελοειδές σύστημα αναπτύχθηκε για πρώτη φορά στο εργαστήριο της Bell το 1960-70. Τα βασικά οφέλη για την ανάπτυξη του κυψελοειδούς συστήματος [10], ήταν:

- Λειτουργία σε ελάχιστο εύρος ζώνης και παροχή υψηλής εξυπηρέτησης και ικανοποίησης των καταναλωτών χρησιμοποιώντας υψηλή απόδοση φάσματος.
- Σε σχέση με τα ενσύρματα δίκτυα, τα ασύρματα στις περισσότερες περιπτώσεις, είναι φθηνότερα στην εγκατάσταση και τη συντήρηση, ενώ υπάρχει δυνατότητα περαιτέρω μείωσης κόστους.
- Το σύστημα χωρητικότητας για την κινητή τηλεφωνία είναι υψηλό, επειδή ένας μεγάλος αριθμός συνδρομητών δεν μπορεί να δημιουργήσει πιθανότητα αποκλεισμού λόγω της μεγάλης περιοχής κάλυψης.
- Το πιο προσιτό χαρακτηριστικό ήταν η αμφίδρομη μετάδοση, η οποία επιτρέπει στον χρήστη να στέλνει και να λαμβάνει πληροφορίες ταυτόχρονα, χρησιμοποιώντας μόνο μία ασύρματη ζεύξη.
- Μετά την αμφίδρομη μετάδοση, η κοινή χρήση του φάσματος επιτυγχάνεται με υψηλή χωρητικότητα εκχωρώντας ταυτόχρονα το διαθέσιμο εύρος ζώνης σε πολλούς χρήστες. Η τεχνική αυτή είναι γνωστή ως τεχνική πολλαπλής πρόσβασης.

Στην κυψελοειδή αρχιτεκτονική, η περιοχή κάλυψης διαιρείται σε μικρότερες περιοχές που ονομάζονται κυψέλες (εξάγωνα). Ένας σταθερός σταθμός βάσης που συχνά τοποθετείται στο κέντρο της κυψέλης, παρέχει κάλυψη στους κινητούς σταθμούς (Mobile Stations - MS). Ο σταθμός βάσης συνδέεται με το κεντρικό δίκτυο μέσω μίας διασύνδεσης που ονομάζεται backhaul και συνήθως παρέχεται μέσω ενσύρματης ή σημείου-προς-σημείο (point-to-point) μικροκυμματικής ζεύξης. Μία κυψέλη μπορεί να υποδιαιρεθεί περαιτέρω σε τομείς. Σε κάθε τομέα, ο σταθμός βάσης

επικοινωνεί με τους κινητούς σταθμούς μέσω μίας πολυσημειακής ζεύξης (point-to-multipoint - PMP). Κάθε σταθμός βάσης διαχειρίζεται την κατανομή πόρων για την υποστήριξη επικοινωνιών μεταξύ αυτού και των κινητών σταθμών που εξυπηρετεί. Οι κινητοί σταθμοί ενημερώνονται για την κατανομή των πόρων μέσω του σταθμού βάσης. Η κάλυψη σε έναν τομέα ενισχύεται συνήθως από την ανάπτυξη αναλογικών επαναληπτών (analog repeaters). Οι επαναλήπτες είναι απλές συσκευές που λαμβάνουν το σήμα που μεταδίδεται από το σταθμό βάσης (καθώς και τα σήματα από γειτονικές κυψέλες, εάν υπάρχουν) και με πολύ μικρή καθυστέρηση ενισχύουν και προωθούν αυτό το σήμα.

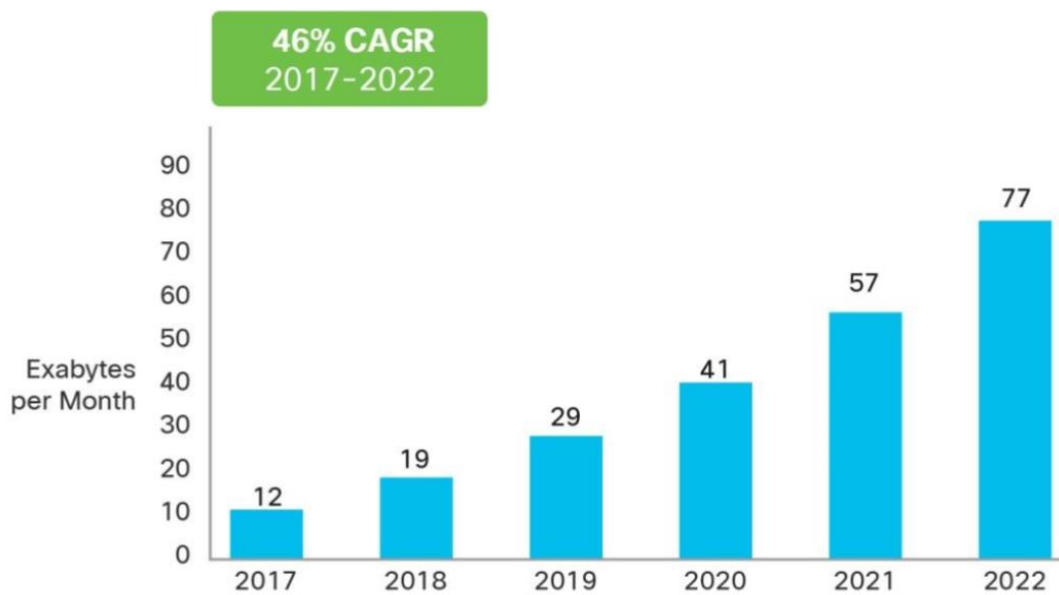
2.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΚΥΨΕΛΩΝ

Η γεωγραφική έκταση που καταλαμβάνει η κάθε κυψέλη διαμορφώνεται με βάση την ισχύ εκπομπής του σταθμού βάσης. Αν για παράδειγμα αυξηθεί η ισχύς εκπομπής ενός σταθμού βάσης, τότε θα αυξηθεί και η περιοχή κάλυψης. Οι κυψέλες χωρίζονται στις παρακάτω τεχνολογίες με βάση την ακτίνα κάλυψής τους. Για την αποτελεσματική κάλυψη μίας γεωγραφικής περιοχής απαιτείται συνδυασμός των παρακάτω κατηγοριών.

- **Πικοκυψέλες (Pico Cells):** Έχουν ακτίνα περίπου εκατό μέτρων και χρησιμοποιούνται κυρίως για εσωτερικούς χώρους, αλλά και για την παροχή επικοινωνιών εντός πλοίων και αεροπλάνων.
- **Μικροκυψέλες (Micro Cells):** Έχουν ακτίνα μέχρι ένα χιλιόμετρο και χρησιμοποιούνται ευρύτατα για την κάλυψη αστικών περιοχών.
- **Μακροκυψέλες (Macro Cells):** Έχουν ακτίνα κάλυψης έως και 20 χμ, και είναι της τάξης μερικών δεκάδων χιλιομέτρων. Οι μακροκυψέλες χρησιμοποιούνται για την κάλυψη πυκνοκατοικημένων περιοχών.
- **Υπερκυψέλες (Hyper Cells):** Η ακτίνα κάλυψής της ξεπερνά τα 20 χμ και συνήθως χρησιμοποιούνται για την παροχή επικοινωνιών σε επαρχιακές και αγροτικές περιοχές.
- **Κυψέλες μέγιστης κάλυψης (Overlay Cells):** Πρόκειται για κυψέλες με τεράστια ακτίνα κάλυψης, που φτάνει μέχρι μερικές εκατοντάδες χιλιόμετρα. Η χρήση τους αφορά κυρίως δορυφορικές κινητές επικοινωνίες.

2.3 ΚΥΨΕΛΩΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΩΝ ΓΕΝΕΩΝ

Όπως παρατηρούμε όλοι μας ο κόσμος των ασύρματων τηλεπικοινωνιών εξελίσσεται ραγδαία. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια εκπληκτική ανάπτυξη στον κλάδο της ασύρματης βιομηχανίας. Στο Σχήμα 2.1. απεικονίζεται η παγκόσμια κίνηση δεδομένων κινητής τηλεφωνίας από το 2017 έως το 2022, σύμφωνα με προβλέψεις της εταιρίας Cisco. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, η συνολική επισκευσιμότητα των δεδομένων κινητής τηλεφωνίας αναμένεται να αυξηθεί σε 77 exabytes το μήνα έως το 2022, μια επταπλάσια αύξηση σε σχέση με το 2017.



Σχήμα 2.1. Πρόβλεψη της Cisco για αύξηση των δεδομένων κινητής τηλεφωνίας ως το 2020 [11].

Η τρέχουσα ανάπτυξη όλων των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων είναι το αποτέλεσμα διαφόρων γενεών και συνεχώς εξελισσόμενων νέων τεχνολογιών. Σε αυτή την ενότητα εξετάζονται οι διάφορες γενιές κινητής ασύρματης τεχνολογίας, με τις τεχνολογίες τις οποίες ενσωμάτωσαν, ενώ αναλύονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της καθεμιάς γενιάς.

2.3.1 Δίκτυα Τηλεπικοινωνιών 1G

Η 1η γενιά ανακοινώθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1980. Τα κινητά συστήματα πρώτης γενιάς βασιζόταν σε αναλογική τεχνολογία. Η πρώτη τεχνολογία

χρησιμοποιούσε διαμόρφωση συχνότητας (Frequency Modulation - FM), αμφίδρομη διαίρεση συχνότητας (Frequency Division Duplexing - FDD) και πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης συχνότητας (Frequency Division Multiple Access - FDMA) [12]. Τα δίκτυα αυτής της γενιάς μπορούσαν να υποστηρίξουν μεταπομπή (handover) και είχαν τη δυνατότητα περιαγωγής (roaming). Το μοναδικό χαρακτηριστικό αυτών των δικτύων ήταν η χρήση κυψελοειδής τεχνολογίας που διαμόρφωνε εξαγωνικές κυψέλες. Ωστόσο δεν ήταν σε θέση να προσφέρουν διαλειτουργικότητα μεταξύ των χωρών. Αυτό ήταν το βασικότερο μειονέκτημα αυτών των δικτύων. Γενικά, χαρακτηριζόταν από πολλά μειονεκτήματα, όπως η χωρητικότητα κάτω του ορίου, το απερίσκεπτο handoff, οι κατώτεροι συσχετισμοί φωνής και το γεγονός πως δεν υπήρχε ασφάλεια, αφού βασιζόταν σε αναλογικά συστήματα.

Από τους κύριους συνδρομητές ήταν το Advanced Mobile Phone System (AMPS) στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής. Το σύστημα AMPS χρησιμοποιούσε μοτίβο επαναχρησιμοποίησης εφτά κυψελών με διατάξεις για τμηματοποίηση και διαχωρισμό κυψελών για αύξηση της χωρητικότητας όταν χρειαζόταν. Χρησιμοποιούσε διαμόρφωση συχνότητας (FM) και αμφίδρομη διαίρεσης συχνότητας (FDD) για ασύρματη μετάδοση. Ακόμη χρησιμοποιούσε πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης συχνότητας (FDMA) και το εύρος ζώνης του καναλιού ήταν 30 KHz. Στις ΗΠΑ, οι μεταδόσεις από κινητά σε σταθμούς βάσης χρησιμοποιούσαν συχνότητα μεταξύ 824-849MHz, ενώ ο σταθμός βάσης μετέδιδε σε κινητά χρησιμοποιώντας συχνότητες μεταξύ 869MHz και 894 MHz. Ο ρυθμός δεδομένων του AMPS στο κανάλι ελέγχου ήταν 10 kbps.

Στα μέσα της δεκαετίας του 1980 αναπτύχθηκαν τα ευρωπαϊκά συστήματα επικοινωνιών (European Total Access Communication Systems - ETACS), στο Ηνωμένο Βασίλειο. Πρόκειται για σχεδόν πανομοιότυπα συστήματα με το AMPS, εκτός από το γεγονός ότι κλιμακώθηκαν ώστε να χωρέσουν σε κανάλια των 25 KHz που χρησιμοποιούταν σε όλη την Ευρώπη.

Άλλα συστήματα που αναπτύχθηκαν ήταν το Nordic Mobile Telephone (NMT) στις σκανδιναβικές χώρες (Δανία, Φινλανδία, Ισλανδία, Νορβηγία και Σουηδία) καθώς και στις γειτονικές του χώρες Ελβετία και Κάτω Χώρες, Ανατολική Ευρώπη και Ρωσία. Επίσης η Ιταλία χρησιμοποίησε ένα σύστημα τηλεπικοινωνιών που ονομαζόταν RTMI, ενώ η Γαλλία χρησιμοποίησε το Radiocom 2000. Τέλος στη Δυτική Γερμανία, την Πορτογαλία και τη Νότια Αφρική χρησιμοποιήθηκε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα γνωστό ως C-450.

2.3.2 Δίκτυα Τηλεπικοινωνιών 2G

Η 2η γενιά παρουσιάστηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1980 [10], ενώ σε κάποια σημεία του κόσμου συνεχίζει να χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα. Αυτή η γενιά προοριζόταν για υπηρεσίες δεδομένων και φωνής. Εν αντιθέσει με την πρώτη γενιά χρησιμοποιήθηκε ψηφιακή τεχνολογία. Υποστηρίχθηκαν υπηρεσίες δεδομένων χαμηλού ρυθμού bit καθώς και η παραδοσιακή υπηρεσία ομιλίας. Η ψηφιακή τεχνολογία πολλαπλής πρόσβασης (Time Division Multiple Access – TDMA και Code Division Multiple Access – CDMA) χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά σε κινητά τηλέφωνα 2ης γενιάς. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την υψηλότερη φασματική απόδοση, τις πιο προηγμένες υπηρεσίες περιαγωγής και τις βελτιωμένες υπηρεσίες δεδομένων. Η τεχνολογία 2G βασιζόταν σε δύο πρότυπα - CDMA και TDMA με βάση την πολυπλεξία. Στην πράξη, τα σχήματα TDMA και CDMA συνδυάζονται με το FDMA. Έτσι, ο όρος «TDMA» χρησιμοποιείται για να περιγράψει συστήματα που πρώτα διαιρούν το κανάλι σε θέσεις συχνότητας και στη συνέχεια διαιρούν κάθε υποδοχή συχνότητας σε πολλαπλές χρονικές θέσεις. Ομοίως, το CDMA είναι στην πραγματικότητα ένα υβρίδιο των CDMA και FDMA όπου το κανάλι χωρίζεται αρχικά σε υποδοχές συχνότητας. Αυτά τα δίκτυα χρησιμοποιήθηκαν κυρίως για φωνητική επικοινωνία και είχε ρυθμό δεδομένων έως 64kbps. Βασικό χαρακτηριστικό αυτών των δικτύων ήταν ότι στα κινητά τηλέφωνα 2G η μπαταρία τους διαρκούσε περισσότερο λόγω των ασύρματων σημάτων που είχαν χαμηλή ισχύ. Επίσης τα συστήματα κινητής τηλεφωνίας 2G αν και παρείχαν αποτελεσματική μετάδοση δεδομένων φωνής, οι εφαρμογές περιήγησης στο διαδίκτυο έχουν πολύ χαμηλότερες ταχύτητες.

Τα πρότυπα στην τεχνολογία 2G, κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- 1) Global Systems for Mobile communications (GSM): ήταν το πρώτο σύστημα 2ης γενιάς. Αναπτύχθηκε στη Φινλανδία το 1991 και χρησιμοποιούταν ευρέως στην τεχνολογία 2G από τους περισσότερους συνδρομητές. Ο σκοπός του GSM ήταν διπλός: η αναβάθμιση της τεχνολογίας μετάδοσης και η παροχή ενός ενιαίου προτύπου στην Ευρώπη. Τα χαρακτηριστικά του προτύπου GSM καθιστούσαν τη διεθνή περιαγωγή πολύ συχνή μεταξύ των χειριστών κινητών τηλεφώνων, επιτρέποντας στους συνδρομητές να χρησιμοποιούν τα τηλέφωνα τους σε πολλά μέρη του κόσμου. Το GSM επέτρεψε στους χρήστες να κάνουν χρήση των υπηρεσιών σύντομων μηνυμάτων (SMS) σε οποιοδήποτε δίκτυο κινητής τηλεφωνίας ανά πάσα στιγμή. Η συχνότητα ανερχόμενης ζεύξης (από σταθμό βάσης προς κινητό σταθμό) ήταν 890-915 MHz και η συχνότητα κατερχόμενης ζεύξης (από κινητό σταθμό σε σταθμό βάσης) ήταν 935-960 MHz. Ο διαχωρισμός του φέροντος για GSM ήταν 200KHz και το εύρος ζώνης του 25MHz. Το GSM περιλαμβάνει διάφορους τύπους «τηλεϋπηρεσιών» (π.χ. videotext, teletext) και υπηρεσιών δεδομένων (π.χ. επικοινωνία από υπολογιστή σε υπολογιστή). Τέλος ένα από τα πιο δημοφιλή χαρακτηριστικά του GSM ήταν

η παροχή διαφορετικής ταυτότητας για κάθε συνδρομητή (SIM) η οποία έδινε μια μοναδική ταυτότητα σε κάθε συνδρομητή.

- 2) Interim standard 136 (IS-136): Το συγκεκριμένο πρότυπο είναι γνωστό και ως NADC (North American Digital Cellular). Χρησιμοποιούσε πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου (TDMA) με αμφίδρομη διαίρεση συχνότητας (FDD). Η συχνότητα ανερχόμενης ζεύξης ήταν 1850-1910 MHz και η συχνότητα κατερχόμενης ζεύξης ήταν 1930-1990 MHz. Το εύρος ζώνης του καναλιού ήταν 60MHz και είχε ρυθμό δεδομένων καναλιού 46,6 kbps.
- 3) Pacific digital cellular (PDC): Πρόκειται για ένα πρόμοιο πρότυπο με το IS-136. Επομένως, οι συχνότητες ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης ήταν παρόμοιες με εκείνες του IS-136. Χρησιμοποιούσε πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου (TDMA) με αμφίδρομη διαίρεση συχνότητας (FDD). Ο ρυθμός δεδομένων του καναλιού ήταν 42 kbps και ο διαχωρισμός των φερόντων ήταν 25 KHz.
- 4) Interim standard 95 (IS-95): Χρησιμοποιούσε πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης κώδικα (CDMA) με αμφίδρομη διαίρεση συχνότητας (FDD). Υποστήριζε 64 κανάλια φωνής ανά φορέα που είχαν ορθογώνια κωδικοποίηση. Η συχνότητα ανερχόμενης ζεύξης ήταν 824-849 MHz και η συχνότητα κατερχόμενης ζεύξης ήταν 869-894 MHz. Τέλος το σήμα διαμορφωνόταν μέσω διαμόρφωσης (Binary Phase-Shift Keying - BPSK).

2.3.3 Δίκτυα Τηλεπικοινωνιών 2.5G

Οι επερχόμενες τεχνολογίες που αναπτύχθηκαν με βάση το αρχικό σύστημα GSM, έφεραν στο προσκήνιο τα δίκτυα 2.5G. Ήταν μια κυψελοειδή ασύρματη τεχνολογία που αναπτύχθηκε μεταξύ του προκατόχου του, 2G και του διαδόχου του, 3G. Πρόκειται για ένα κυψελοειδές σύστημα 2ης γενιάς που συγχωνεύεται με τις υπηρεσίες General Packet Radio Services (GPRS) και άλλες παροχές που δεν προσφερόταν σε δίκτυα προηγούμενων γενιών. Το GPRS είναι μια τεχνολογία για δίκτυα GSM που προσθέτει πρωτόκολλα εναλλαγής πακέτων, συντομότερο χρόνο εγκατάστασης για συνδέσεις ISP και τη δυνατότητα χρέωσης με την ποσότητα των δεδομένων που αποστέλλονται, αντί του χρόνου σύνδεσης. Η εναλλαγή πακέτων είναι μια τεχνική σύμφωνα με την οποία οι πληροφορίες (φωνή ή δεδομένα) που αποστέλλονται χωρίζονται σε πακέτα, το πολύ μερικών Kbytes το καθένα, τα οποία στη συνέχεια δρομολογούνται από το δίκτυο μεταξύ διαφορετικών προορισμών με βάση τα δεδομένα διευθύνσεων σε κάθε πακέτο. Το GPRS υποστήριζε ευέλικτους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων καθώς και συνεχή σύνδεση με το δίκτυο.

Ένα σύστημα 2.5G χρησιμοποιούσε γενικά πλαίσια συστήματος 2G, αλλά εφάρμοζε εναλλαγή πακέτων μαζί με εναλλαγή κυκλώματος και μπορούσε να έχει ρυθμό δεδομένων έως 144kbps. Οι κύριες τεχνολογίες που ενσωμάτωναν τα δίκτυα 2.5G ήταν GPRS, Enhanced Data Rate for GSM Evolution (EDGE) και Code Division Multiple Access (CDMA) 2000.

2.3.4 Δίκτυα Τηλεπικοινωνιών 3G

Η τρίτη γενιά τηλεπικοινωνιακών δικτύων εδραιώθηκε στα τέλη του 2000. Τα συστήματα 3G χαρακτηρίζονται ως αξιοσημείωτη γενιά, λόγω των πρόσθετων παροχών τους, την παγκόσμια περιαγωγή και τη βελτιωμένη ποιότητα φωνής. Το βασικό χαρακτηριστικό της τεχνολογίας 3G είναι οι γρήγοροι ρυθμοί μεταφοράς δεδομένων. Επίσης συγχωνεύουν πρόσβαση υψηλής ταχύτητας σε κινητές συσκευές με βάση το Πρωτόκολλο Διαδικτύου (IP). Η γενιά αυτή βασιζόταν στην οικογένεια προτύπων της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (ITU) στο πλαίσιο του Διεθνούς Προγράμματος Κινητών Τηλεπικοινωνιών, IMT-2000 [10]. Οι δραστηριότητες του 3G ξεκίνησαν στην Ευρώπη και τη Βόρεια Αμερική με τα αντίστοιχα ονόματα IMT0-2000 και CDMA-2000. Υπάρχουν πολλές τεχνολογίες 3G που αναπτύχθηκαν όπως W-CDMA, GSM EDGE, UMTS, DECT, WiMax και CDMA 2000. Το WCDMA και το CDMA-2000 έχουν πολλά παρόμοια χαρακτηριστικά. Ωστόσο, μια σημαντική διαφορά είναι ότι το WCDMA ήταν συμβατό με τα δίκτυα GSM, ενώ το CDMA 2000 ήταν συμβατό με τα δίκτυα IS-95. Οι τεχνολογίες 3G χρησιμοποιούσαν TDMA και CDMA για τη χρήση υπηρεσιών προστιθέμενης αξίας όπως κινητή τηλεόραση, GPS και τηλεδιάσκεψη. Η τεχνολογία 3G ήταν πολύ ευέλικτη, επειδή ήταν σε θέση να υποστηρίξει τις πέντε μεγάλες τεχνολογίες ραδιοφώνου. Αυτές οι τεχνολογίες ραδιοφώνου λειτουργούν υπό CDMA, TDMA και FDMA. Τα νέα δίκτυα κινητής ευρυζωνικότητας δημιούργησαν δύο ξεχωριστές οικογένειες 3G: 3GPP και 3GPP2. Το 3ο Generation Partnership Project (3GPP) δημιουργήθηκε το 1998 για να προωθήσει την ανάπτυξη δικτύων 3G που προέρχονταν από το GSM. Οι τεχνολογίες 3GPP εξελίχθηκαν ως εξής:

- 1) Η υπηρεσία General Packet Radio Service (GPRS) προσέφερε ταχύτητες έως 114 Kbps.
- 2) Οι ενισχυμένες τιμές δεδομένων για το Global Evolution (EDGE) έφτασαν τα 384 Kbps.
- 3) Το UMTS Wideband CDMA (WCDMA) προσέφερε ταχύτητες κάτω ζεύξης έως 1,92 Mbps.

- 4) Η τεχνολογία HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) αύξησε την ταχύτητα κατεβάσματος στα 14 Mbps.
- 5) Η τεχνολογία EUTRA (LTE Evolved UMTS Terrestrial Radio Access) στόχευε στα 100 Mbps.

Ωστόσο αυτή η γενιά περιείχε και κάποια μειονεκτήματα, όπως το γεγονός ότι τα σχέδια δικτύου ήταν ακριβότερα σε σχέση με το 2G, ενώ απαιτούσαν και περισσότερη ισχύ, κάτι που αποτελεί και το σημαντικότερο μειονέκτημά τους.

Δεδομένου ότι το 3G περιλαμβάνει την εισαγωγή και τη χρήση τεχνολογιών πολλαπλής πρόσβασης Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA), Code Division Multiple Access (CDMA) και 2000 Universal Mobile Telecommunications Systems (UMTS) , οι εξελισσόμενες τεχνολογίες όπως High Speed Uplink / Downlink Packet Access (HSUPA / HSDPA) και το Evolution-Data Optimized (EVDO) οδήγησαν σε μία ενδιάμεση γενιά μεταξύ 3G και 4G που ονομάζεται 3.5G. Τα δίκτυα 3.5G είχαν βελτιωμένο ρυθμό δεδομένων 5-30 Mbps.

2.3.5 Δίκτυα Τηλεπικοινωνιών 3.75G

Τα δίκτυα 3.75G ενσωμάτωναν δύο επαναστατικές τεχνολογίες για τον τομέα των κινητών επικοινωνιών, τις Long-Term Evolution technology (LTE) και Fixed Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX). Αυτές τεχνολογίες είχαν τη δυνατότητα να συμπληρώσουν τη χωρητικότητα του δικτύου, ενώ επίσης παρέχαν σε σημαντικό αριθμό χρηστών τη δυνατότητα πρόσβασης σε ένα ευρύ φάσμα υπηρεσιών υψηλής ταχύτητας, όπως βίντεο κατ 'απαίτηση (video on demand), κοινή χρήση αρχείων peer to peer και σύνθετες υπηρεσίες Web. Παράλληλα δόθηκε πρόσβαση σε ένα συμπληρωματικό φάσμα, το οποίο έδωσε τη δυνατότητα στους διαχειριστές του δικτύου να διαχειρίζονται το δίκτυό τους πολύ ικανοποιητικά και προσέφερε καλύτερη κάλυψη με βελτιωμένη απόδοση για μικρότερο κόστος.

2.3.6 Δίκτυα Τηλεπικοινωνιών 4G

Το 4G αναφέρεται γενικά ως απόγονος των 3G και 2G προτύπων. Εν αντιθέσει με τα δίκτυα 3G που άργησαν σημαντικά να εδραιωθούν και χαρακτηριζόταν από υπερμεγέθη κόστη, η μετάβαση στα δίκτυα 4G ήταν γρήγορη και άμεση. Το 3rd Generation Partnership Project (3GPP) προτυποποίησε το Long Term Evolution (LTE) Advanced ως το επόμενο πρότυπο 4G μαζί με το Mobile Worldwide Interoperability

for Microwave Access (WiMAX). Οι στόχοι που καθορίστηκαν για το πρότυπο ασύρματης επικοινωνίας 4G ήταν:

- Να είναι ένα φασματικά αποδοτικό σύστημα, που θα προσέφερε υψηλή χωρητικότητα δικτύου.
- Ο ονομαστικός ρυθμός δεδομένων να ανέρχεται στα 100 Mbps σε υψηλές ταχύτητες.
- Ομαλή μεταπομπή (handoff) σε ετερογενή δίκτυα.
- Πανταχού παρούσα συνδεσιμότητα και παγκόσμια περιαγωγή σε πολλά δίκτυα.
- IPv6- Τα δίκτυα 4G βασίζονται μόνο στην εναλλαγή πακέτων. Απαιτείται μετάδοση δεδομένων χαμηλού χρόνου απόκρισης. Το ασύρματο δίκτυο 4G θα πρέπει να υποστηρίζει μεγάλο αριθμό ασύρματων συσκευών που να μπορούν να διευθετηθούν και να δρομολογηθούν.
- UMB - Ultra Mobile Band

Τα δίκτυα 4G βελτίωναν τα κυρίαρχα δίκτυα επικοινωνίας προσφέροντας μια ολοκληρωμένη και αξιόπιστη λύση βασισμένη σε IP. Σε σχέση με τις προηγούμενες γενιές παροχές όπως η φωνή, τα δεδομένα και τα πολυμέσα θα μεταβιβαζόταν στους συνδρομητές κάθε φορά και παντού και με πολύ υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων. Διάφορες εφαρμογές αναπτύχθηκαν επωφελούμενες την ανάπτυξη των δικτύων 4G, όπως η υπηρεσία μηνυμάτων πολυμέσων (MMS), η ψηφιακή μετάδοση βίντεο (DVB) και η συνομιλία μέσω βίντεο, η κινητή τηλεόραση και το περιεχόμενο υψηλής τηλεοπτικής τηλεόρασης. Τα δίκτυα αυτά δεν έφεραν κάποια νέα και επαναστατική τεχνολογία, ωστόσο κατάφεραν να αυξήσουν σε πολύ μεγάλο βαθμό τις ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων και έδωσαν επίσης στην επιστήμη ένα σημαντικό εργαλείο.

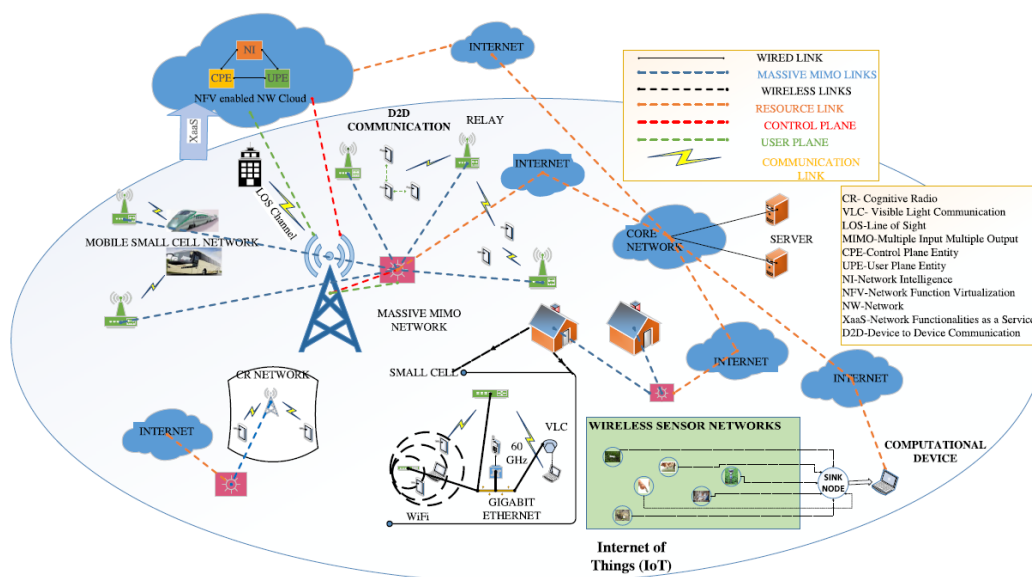
3 ΔΙΚΤΥΑ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ 5^{ΗΣ} ΓΕΝΙΑΣ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το 5G είναι η 5^η γενιά δικτύων κινητής τηλεφωνίας και πρόκειται για μία πολύ σημαντική αναβάθμιση των σημερινών δικτύων 4G LTE. Πίσω από την ανάπτυξη του 5G υπάρχουν δύο σημαντικές τάσεις: η τεράστια αύξηση της ζήτησης για ασύρματες ευρυζωνικές υπηρεσίες που μπορούν να μεταφέρουν απαιτητικές υπηρεσίες (π.χ. βίντεο) και το Internet of Things (IoT), στο οποίο μεγάλος αριθμός έξυπνων συσκευών επικοινωνούν μέσω Internet. Για να αξιοποιήσει αυτές τις ανάγκες το 5G θα παρέχει εξαιρετικά υψηλή ευρυζωνική ταχύτητα, πολύ χαμηλή καθυστέρηση και αξιόπιστη συνδεσιμότητα διαδικτύου.

Τα δίκτυα 5G αντιπροσωπεύουν:

- Μια επανάσταση, σε σχέση με τα δίκτυα 4G, όσον αφορά την χωρητικότητα, την απόδοση και την πρόσβαση φάσματος στον τομέα των ασύρματων δικτύων.
- Μια επανάσταση, όσον αφορά την ευελιξία και τον προγραμματισμό σε όλους τους τομείς του δικτύου.

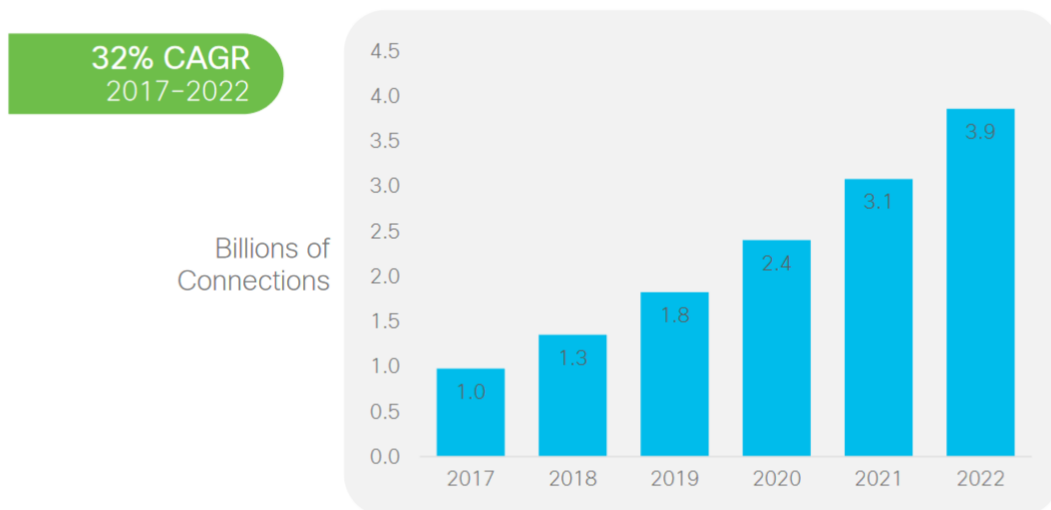


Σχήμα 3.1. Αρχιτεκτονική ενός 5G κυψελωτού δικτύου [13].

3.2 ΚΙΝΗΤΡΑ

Η συνεχόμενη αύξηση συσκευών όπως smartphones, laptops και tablets που τείνουν να κατακλύσουν την αγορά [14], σε συνδυασμό με τις ολοένα και μεγαλύτερες απαιτήσεις των χρηστών (π.χ. υψηλότερος ρυθμός δεδομένων) και την ανάπτυξη απαιτητικών εφαρμογών (εικονική πραγματικότητα), δε δύνανται να ικανοποιηθούν από τα σημερινά δίκτυα κινητών επικοινωνιών. Παρατηρείται ότι οι απαιτήσεις των χρηστών σε σχέση με προηγούμενα χρόνια αυξάνονται σημαντικά, κυρίως για μεγάλους ρυθμούς δεδομένων για μεγάλο όγκο δεδομένων και φυσικά για χαμηλή καθυστέρηση. Με την ταχύτερη ανάπτυξη του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT), οι απαιτήσεις για εφαρμογές υψηλής ταχύτητας δεδομένων, όπως υψηλής ποιότητας ασύρματη ροή βίντεο (video streaming), κοινωνική δικτύωση και επικοινωνία μεταξύ μηχανών, αυξάνονται εκθετικά. Σύμφωνα με μελέτες, προβλέπεται ότι η συνολική ημερήσια κυκλοφορία κινητής τηλεφωνίας σε αντιπροσωπευτικές χώρες της Δυτικής Ευρώπης θα αυξηθεί 67 φορές από 186 terabyte (TB) σε 12540 TB από το 2010 έως το 2020. Η συνολική παγκόσμια κίνηση κινητά των 351 exabyte (EB) το 2025 θα αντιπροσωπεύει αύξηση 174% σε σύγκριση με το 2020 [15].

Τα τελευταία χρόνια παρατηρούμε πως οι συσκευές των χρηστών εξελίσσονται με πολύ γρήγορο ρυθμό. Πλέον δε μιλάμε για συσκευές που χρησιμοποιούνται μόνο για επικοινωνία μεταξύ ανθρώπων ή για ένα απλό σερφάρισμα στο ίντερνετ, αλλά για μηχανές που επικοινωνούν με άλλες μηχανές χωρίς την ανθρώπινη μεσολάβηση (machine to machine type communications - M2M).



Σχήμα 3.2. Παγκόσμια ανάπτυξη συνδέσεων επικοινωνιών τύπου M2M [11].

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω γράφημα από το 2017 έως το 2020 οι συνδέσεις επικοινωνιών τύπου M2M θα γνωρίσουν αύξηση έως και 4 φορές μεγαλύτερη. Τέτοιες επικοινωνίες μεταξύ μηχανών έχουν πληθώρα εφαρμογών. Ας πάρουμε για παράδειγμα τα αυτοοδηγούμενα οχήματα, τα οποία επικοινωνούν μεταξύ τους καθιστώντας ασφαλή τη μετάβαση των επιβατών τους στον επιθυμητό προορισμό, αλλά και για οχήματα που επεμβαίνουν στην οδήγηση του οδηγού σε περίπτωση που υπάρχουν ενδείξεις για την πρόκληση ατυχήματος (π.χ. έξυπνο φρενάρισμα).

Η βιομηχανία έχει προβλέψει ότι για να επιτύχει την ικανότητα να εξυπηρετεί περισσότερους χρήστες με υψηλότερα ποσοστά δεδομένων σε επίπεδο δικτύου, απαιτούνται περισσότεροι φασματικοί πόροι για την επόμενη γενιά δικτύων ασύρματης επικοινωνίας και το τρέχον φάσμα πρέπει να χρησιμοποιηθεί πιο αποτελεσματικά. Συγκεκριμένα μόνο το 2015 η παγκόσμια κίνηση δεδομένων αυξήθηκε κατά 74%, από 2.1 σε 3.7 exabytes [16]. Είναι επιτακτική λοιπόν η ανάγκη εξέλιξης των ασύρματων δικτύων επικοινωνίας, καθώς τα τρέχοντα ασύρματα συστήματα αντιμετωπίζουν συμφόρηση στους πόρους του φάσματος, κάτι που καθιστά δύσκολη την ενίσχυση της απόδοσης στο περιορισμένο διαθέσιμο εύρος ζώνης. Επιπλέον τα υπάρχοντα κυψελωτά δίκτυα συμπεριλαμβανομένων της πρώτης γενιάς (1G), της δεύτερης γενιάς (2G), της τρίτης γενιάς (3G) και της τέταρτης γενιάς (4G) απέχουν πολύ από την ικανοποίηση των σημαντικών αυξήσεων της κυκλοφορίας και της υψηλής ενεργειακής απόδοσης (EE), επειδή μεγάλο μέρος της ισχύς που καταναλώνεται από ένα σταθμό βάσης (BS) χρησιμοποιείται για την αντιμετώπιση της απώλειας διαδρομής, η οποία με τη σειρά της προκαλεί παρεμβολές σε άλλους χρήστες. Τα συστήματα πέμπτης γενιάς 5G αναμένεται να παρέχουν περίπου 1000 φορές μεγαλύτερη χωρητικότητα ασύρματης περιοχής και να εξοικονομήσει έως και 90 τοις εκατό της κατανάλωσης ενέργειας ανά υπηρεσία σε σύγκριση με τα τρέχοντα συστήματα 4G [17]. Ακόμη, θα παρέχουν πάνω από Gb/s/km² φασματική χωρητικότητα περιοχής σε πυκνά αστικά περιβάλλοντα, 10 φορές υψηλότερη διάρκεια ζωής μπαταρίας συνδεδεμένων συσκευών και μειωμένη καθυστέρηση πέντε φορές από άκρη σε άκρη (E2E) σε συστήματα 5G.

Ένα επίσης σημαντικό κίνητρο για την ανάπτυξη των 5G δικτύων αποτελεί η περιορισμός των 4G δικτύων, ως προς την παροχή υποστήριξης για ετερογενή δίκτυα. Τα ετερογενή ασύρματα δίκτυα (HetNets) αποτελούνται από ασύρματα δίκτυα διαφορετικών τεχνολογιών πρόσβασης, π.χ. 3G, 4G, ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN), WiFi και Bluetooth. Αν και τα δίκτυα αυτά έχουν ήδη προτυποποιηθεί σε δίκτυα 4G, η βασική αρχιτεκτονική τους δεν προοριζόταν για να τα υποστηρίξει [18]. Επιπλέον, τα τρέχοντα κυψελοειδή δίκτυα επιτρέπουν σε έναν εξοπλισμό χρήστη (User Equipment – UE) να έχει ένα κανάλι ανερχόμενης ζεύξης και ένα κανάλι κατερχόμενης ζεύξης, το οποίο πρέπει να συσχετίζεται μόνο με ένα σταθμό βάσης που αποτρέπει τη μέγιστη χρήση των ετερογενών δικτύων. Στα HetNets υπάρχει η δυνατότητα ένας UE να μπορεί να επιλέξει ένα κανάλι ανερχόμενης ζεύξης και ένα κανάλι κατερχόμενης

από δύο διαφορετικούς σταθμούς βάσης που ανήκουν σε δύο διαφορετικά ασύρματα δίκτυα για βελτίωση της απόδοσης.

Επίσης τα τρέχοντα κυψελοειδή δίκτυα αποτελούνται από ένα μόνο σταθμό βάσης, που είναι εγκατεστημένος κοντά στο κέντρο της κυψέλης που καλύπτει και αλληλεπιδρά με όλους τους UE's ανεξάρτητα από την εσωτερική ή εξωτερική τοποθεσία των UE's. Οι UE's εκτιμάται ότι παραμένουν σε εσωτερικούς χώρους για περίπου 80% του χρόνου και μόλις 20% για εξωτερικούς χώρους [18]. Επιπλέον, η επικοινωνία μεταξύ εσωτερικού UE και του εξωτερικού σταθμού βάσης δεν είναι αποτελεσματική από την άποψη του ρυθμού μεταφοράς δεδομένων, της φασματικής απόδοσης και της ενεργειακής απόδοσης, λόγω της εξασθένησης των σημάτων που διέρχονται από τα τοιχώματα.

3.3 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΟΥ 5G

Σε αντίθεση με τις προηγούμενες γενιές δικτύων κινητής τηλεφωνίας, το κυψελοειδές δίκτυο 5G προβλέπεται να υποστηρίζει πλήθος συσκευών και εφαρμογών όπως ηλεκτρονική υγεία, έξυπνες συσκευές, Internet of Things (IoT), αυτόνομα οχήματα κτλ. Σύμφωνα με τη διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU) [19], υπάρχουν τρία είδη σεναρίων υπηρεσιών που θα υποστηρίζονται ευρύτατα στο 5G, τα οποία είναι:

- ευρυζωνικές υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας,
- μαζική επικοινωνία μεταξύ συσκευών (Massive Machine-Type Communication - mMTC),
- εξαιρετικά αξιόπιστες επικοινωνίες χαμηλού χρόνου απόκρισης (latency).

Όλες αυτές οι εφαρμογές και οι υπηρεσίες χρειάζονται πιο εξελιγμένα δίκτυα που όχι μόνο μπορούν να υποστηρίξουν υψηλή απόδοση, αλλά και να παρέχουν χαμηλή καθυστέρηση στην παράδοση δεδομένων, υψηλή επεκτασιμότητα για να μπορούν να εξυπηρετήσουν μεγάλο αριθμό συσκευών, πανταχού παρούσα παροχή συνδεσιμότητας στους χρήστες, ενώ παράλληλα πρέπει να είναι και ενεργειακά αποδοτικά. Σε αυτήν την ενότητα, περιγράφονται αυτές οι απαιτήσεις ανάπτυξης του δικτύου 5G.

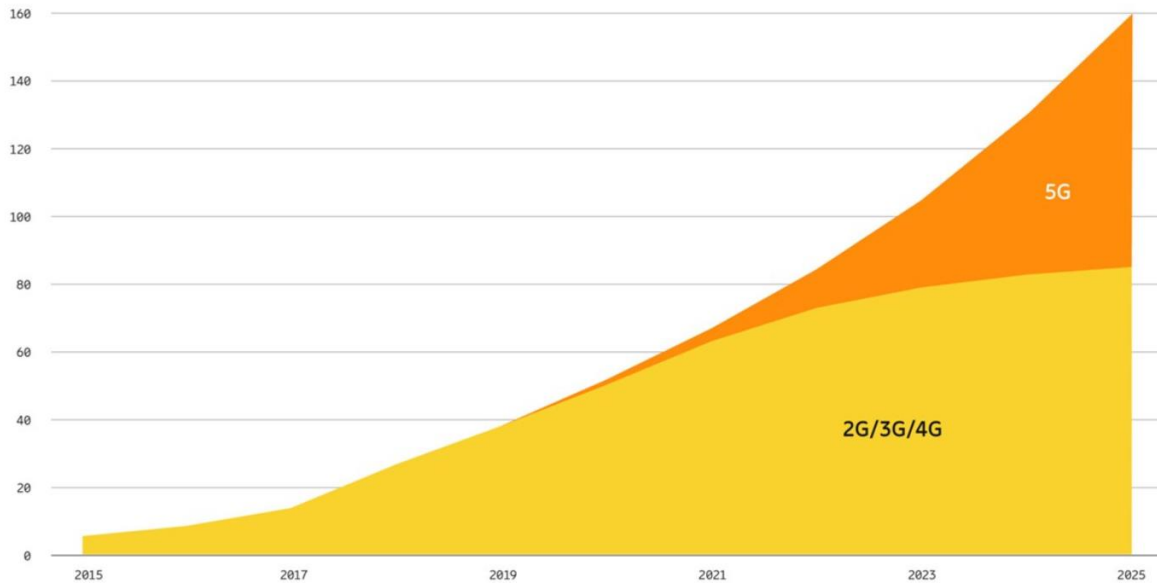
Υψηλός ρυθμός δεδομένων (High data rate): Πρόκειται ίσως για το σημαντικότερο παράγοντα αξιολόγησης των ασύρματων δικτύων επικοινωνιών. Η αύξηση του ρυθμού δεδομένων είναι επιτακτική ανάγκη για την κάλυψη των tablets, φορητών υπολογιστών και γενικά των έξυπνων συσκευών των χρηστών που τα τελευταία χρόνια έχουν κατακλύσει την αγορά, αλλά και για την προσφορά υπηρεσιών σε εφαρμογές όπως ροή βίντεο υψηλής ευκρίνειας (HD) και εικονική πραγματικότητα (VR). Τέτοιες εφαρμογές απαιτούν πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων σε περίπου 25 Mbps για να παρέχουν ικανοποιητική εμπειρία στους χρήστες.

Με αυτές τις αναδυόμενες εφαρμογές που απαιτούν υψηλότερα ποσοστά δεδομένων, τα δίκτυα 5G αναμένεται να παρέχουν βελτίωση έως και εκατό φορές καλύτερη σε σχέση με τα τρέχοντα δίκτυα 4G, κάτι που μεταφράζεται σε μέγιστο ρυθμό δεδομένων περίπου έως 10 Gbps. Επίσης η χειρότερη περίπτωση εξυπηρέτησης ενός χρήστη με τα νέα δεδομένα θα πρέπει να ανέρχεται στα 100 Mbps. Μία πολύ σημαντική έννοια για την αξιολόγηση του επιπέδου ρυθμού δεδομένων είναι ο «Μέσος Ρυθμός Δεδομένων (Edge Rate)», ο οποίος πρέπει να είναι σε θέση να υποστηρίξει περίπου το 95% των χρηστών που είναι συνδεδεμένοι στο δίκτυο με ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης 100 Mbps.

Η ανάπτυξη περισσότερων σταθμών βάσης σε μια γεωγραφική περιοχή, η χρήση των ζωνών υψηλότερης συχνότητας και η βελτίωση συνδέσεων ενδέχεται να υποστηρίξουν την επέκταση χωρητικότητας του δικτύου δισεκατομμυρίων εξοπλισμών χρηστών (UE's), υψηλό ρυθμό δεδομένων, υψηλό όγκο δεδομένων και αποτελεσματική μεταφορά δεδομένων backhaul στο κεντρικό δίκτυο. Ως εκ τούτου, η χωρητικότητα του δικτύου απαιτείται να αυξηθεί σημαντικά, διατηρώντας την κατανάλωση ενέργειας και το κόστος υπό αυστηρό έλεγχο.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.3, η παγκόσμια επισκεψιμότητα δεδομένων για κινητά προβλέπεται να φτάσει τα 38 exabytes το μήνα έως το τέλος του 2019 και να αυξηθεί σε 160 exabytes το μήνα το 2025 [20]. Επιπλέον μέχρι το 2025, προβλέπεται ότι τα δίκτυα 5G θα μεταφέρουν το 45% της συνολικής κίνησης δεδομένων κινητής τηλεφωνίας.

Global mobile data traffic (EB per month)



Σχήμα 3.3. Συνολική κίνηση δεδομένων κινητής τηλεφωνίας [20].

Χαμηλός χρόνος απόκρισης (Low latency): Ο χρόνος απόκρισης, δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται ώστε ένα πλαίσιο να πάει από την πηγή στο δέκτη, στα υπάρχοντα δίκτυα LTE είναι περίπου 15 milliseconds (ms). Με την ανάπτυξη ωστόσο απαιτητικών εφαρμογών, όπως είναι για παράδειγμα η εικονική πραγματικότητα (VR), ο χρόνος απόκρισης πρέπει να ελαττωθεί σε περίπου 1 ms. Ο χαμηλός χρόνος απόκρισης αποτελεί κρίσιμο παράγοντα σε πολλές εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο, π.χ. μετάδοση μηνυμάτων από ρομπότ που παρακολουθούν ασθενείς, συστήματα ασφάλειας ζωής, τυχερά παιχνίδια που βασίζονται σε cloud, αισθητήρες, drones και συνδεδεμένα συστήματα μεταφοράς. Ωστόσο, είναι πολύ δύσκολο να υπάρχει πολύ χαμηλή καθυστέρηση σε ένα δίκτυο μεγάλης κλίμακας χωρίς να αυξάνεται το κόστος υποδομής δικτύου. Αυτή η ζήτηση απαιτεί τεχνολογική καινοτομία ευέλικτη αρχιτεκτονική στα υψηλότερα επίπεδα του δικτύου, η οποία μπορεί να αντιμετωπιστεί μέσω ενός δικτύου καθοριζόμενου από το λογισμικό (software-defined networking), καθώς και στο σχεδιασμό κυματομορφής (waveform design).

Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας: Τα δίκτυα 5G κρίνεται αναγκαίο να είναι ενεργειακά αποδοτικά. Υπάρχουν πολλοί τρόποι και ένα ευρύ φάσμα στη βιβλιογραφία, σύμφωνα με τη μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα το 5G New Radio (NR), έχει σχεδιαστεί για να επιτρέπει την ανάπτυξη πυκνότερων δικτύων καταργώντας του παραδοσιακούς σταθμούς βάσης και ταυτόχρονα να προσφέρει αυξημένη ενεργειακή απόδοση, μειώνοντας έτσι τόσο το

λειτουργικό κόστος, όσο και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Οι νέοι σταθμοί βάσεις θα έχουν χαμηλότερες απαιτήσεις σε ενέργεια ενώ μελετάται η δυνατότητα τροφοδοσίας τους μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Επίσης τα νέα δίκτυα αναμένεται να υποστηρίζουν συσκευές IoT που βασικά είναι μερικοί αισθητήρες που συλλέγουν πληροφορίες σχετικά με ένα περιβάλλον και τις μεταδίδουν σε έναν κεντρικό διακομιστή. Πρόκειται για συσκευές χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και χαμηλού κόστους, με διάρκεια ζωής έως και αρκετά χρόνια. Σε επόμενα κεφάλαια θα εξεταστούν σε βάθος διάφορες τεχνικές που χρησιμοποιούνται για μείωση της κατανάλωσης ενέργειας (π.χ προγραμματισμός ύπνου των σταθμών βάσης - RRH sleep scheduling strategy).

Υψηλή επεκτασιμότητα (scalability): Για να μπορέσουν να καλυφθούν οι ολοένα αυξανόμενες ανάγκες των χρηστών, απαιτείται ένα πολύ επεκτάσιμο δίκτυο που να μπορεί να προσαρμοστεί αποτελεσματικά σε αυτήν την αύξηση του αριθμού των συσκευών. Η υποδομή ενός τέτοιου δικτύου θα πρέπει να μπορεί να ελέγχει τη μεταδιδόμενη ισχύ προσαρμοστικά για την εκτίμηση του καναλιού και να ελαχιστοποιεί τις παρεμβολές.

Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο απαιτείται αναβάθμιση σε όλα τα επίπεδα δικτύου. Στο φυσικό επίπεδο, θα πρέπει να υπάρχουν αρκετοί πόροι φάσματος συχνοτήτων για να υποστηρίξει το μεγάλο όγκο μετάδοσης δεδομένων. Στα επίπεδα δικτύου και μεταφοράς, είναι αναγκαία η ύπαρξη δικτύων που ευνοούν την ανάπτυξη έξυπνων αλγορίθμων δρομολόγησης για μεγάλες ομάδες χρηστών για γρήγορη και αξιόπιστη σύνδεση.

Βελτιωμένη συνδεσιμότητα και αξιοπιστία: Με την αύξηση της πυκνότητας των σταθμών βάσης και τον αριθμό των συνδεδεμένων συσκευών, ο αριθμός των παραδόσεων (handovers) που πρέπει να χειριστεί ο σταθμός βάσης θα αυξηθεί κατά τουλάχιστον δύο τάξεις μεγέθους. Για να μπορεί να εξυπηρετηθεί κάτι τέτοιο, είναι αναγκαία η ανάπτυξη νέων αλγορίθμων και τεχνικών που παρέχουν βελτιωμένη κάλυψη σε ακραίες περιοχές κυττάρων. Επίσης δημιουργείται το ζήτημα της αξιοπιστίας, καθώς ο έλεγχος ταυτότητας και απορρήτου σχετίζεται με την παράδοση. Σε εφαρμογές 5G η καθυστέρηση επικοινωνίας με τον διακομιστή ελέγχου ταυτότητας για κάθε παράδοση θα πρέπει να κυμαίνεται σε ελάχιστα milliseconds (ms). Τελευταίο αλλά εξίσου σημαντικό είναι το γεγονός, ότι καθώς θα χρησιμοποιηθούν ζώνες υψηλότερης συχνότητας σε κύματα χιλιοστών (mmWave), το εύρος μετάδοσης σημάτων μειώνεται σημαντικά. Περισσότερες πληροφορίες παρατίθενται σε επόμενη ενότητα. Όλα αυτά λοιπόν αποτελούν μία μεγάλη πρόκληση για το 5G, όσον αφορά τη συνδεσιμότητα και την αξιοπιστία.

Βελτιωμένη ασφάλεια: Τα πολλά υποσχόμενα χαρακτηριστικά των δικτύων 5G δημιουργούν δύσκολες προκλήσεις στο σχεδιασμό δικτύων προσανατολισμένων στην ασφάλεια και την προστασία της ιδιωτικής ζωής. Για παράδειγμα, ένας τεράστιος αριθμός νέων τύπων κοινωνικών συσκευών μπορεί να προέρχεται από διάφορους τύπους επιθέσεων όπως η πλαστοπροσωπία, η άρνηση παροχής υπηρεσιών (denial-of-services - DoS), η υποκλοπή, ο άνθρωπος-στη-μέση (man-in-the-middle) κ.λπ. Επίσης, η μεταφορά ενός τεράστιου όγκου δεδομένων σε ασφαλείς και υψηλής ταχύτητας τρόπους είναι κρίσιμη, αποτρέποντας παράλληλα τη διείσδυση κακόβουλων αρχείων. Στα έως τώρα υπάρχοντα δίκτυα κινητών επικοινωνιών ο σκοπός του τομέα της ασφάλειας, ήταν η διατήρηση του απορρήτου των χρηστών και η προστασία της βασικής συνδεσιμότητας. Με την είσοδο του 5G η κίνηση σε όλο το δίκτυο αναμένεται να αυξηθεί δραματικά. Έτσι λοιπόν και η ασφάλεια πρέπει να επεκταθεί σε όλο το δίκτυο και να μπορεί να αντιμετωπίζει διαφόρων ειδών προκλήσεις όπως πιστοποίηση, εξουσιοδότηση, την ανάπτυξη νέων πρωτοκόλλων κρυπτογράφησης και τη διασφάλιση δραστηριοτήτων όπως το cloud computing.

Συμβατότητα: Η ανάπτυξη του 5G δεν πρόκειται να συμβεί από τη μία στιγμή στην άλλη, αλλά ούτε και ο ερχομός του πρόκειται να σηματοδοτήσει την παύση της χρήσης των προηγούμενων γενιών. Είναι αναγκαίο λοιπόν τα συστήματα του 5G, να συνεργάζονται αρμονικά με εκείνα των προηγούμενων γενεών. Επιπλέον το δίκτυο θα κληθεί να κληθεί να εξυπηρετήσει διαφόρων ειδών συσκευές, ενώ αναμένεται επίσης και η ανάπτυξη των επικοινωνιών μεταξύ μηχανών (D2D communications).

3.4 ΒΑΣΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ

Η επίτευξη του οράματος της πέμπτης γενιάς (5G) κινητών δικτύων θα εισάγει νέες τεχνολογικές καινοτομίες και σημαντικές αλλαγές στην παροχή εφαρμογών και υπηρεσιών αιχμής στα υπάρχοντα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Ο συνολικός τεχνικός στόχος του 5G είναι να παρέχει ένα σύστημα που υποστηρίζει:

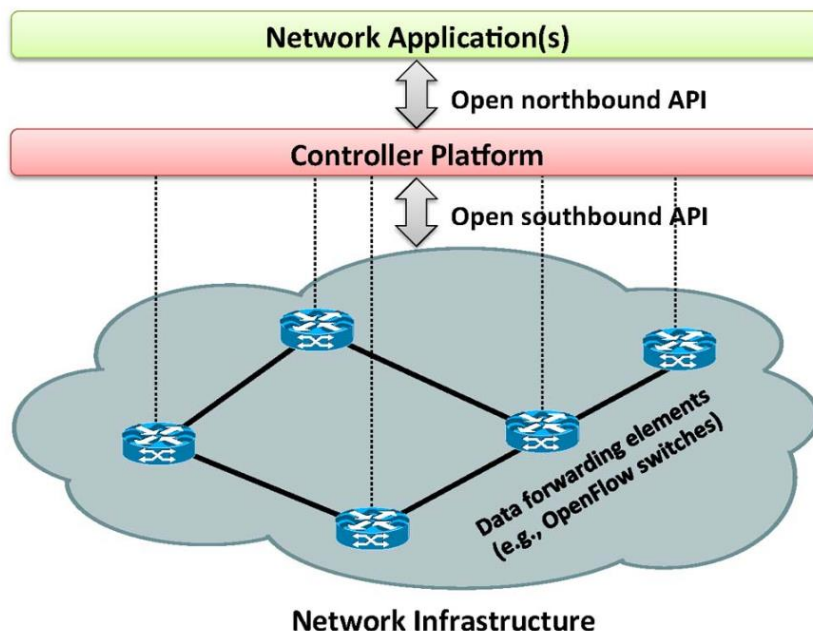
- 1000 φορές αυξημένος όγκος δεδομένων ανά περιοχή
- 10 έως 100 φορές αυξημένος αριθμός συνδεδεμένων συσκευών
- 10 έως 100 φορές αυξημένος τυπικός ρυθμός δεδομένων χρήστη
- 10 φορές μεγαλύτερη διάρκεια ζωής της μπαταρίας για συσκευές Massive Machine Communication (MMC) χαμηλής ισχύος

- 5 φορές χαμηλότερη καθυστέρηση

Σε αυτή την ενότητα εξετάζονται τεχνολογίες και προσεγγίσεις που θα διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη του 5G.

3.4.1 Δίκτυα καθορισμένα από το λογισμικό (Software-Defined Networking)

Το καθορισμένο από το λογισμικό δίκτυο (SDN) είναι ένα παράδειγμα δικτύου που εξελίχθηκε από την εργασία που έγινε στο UC Berkeley και στο Stanford [21]. Το κίνητρο ήταν να διασπαστούν τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών αντικαθιστώντας τον ιδιόκτητο εξοπλισμό και τις υπηρεσίες καθορισμένες από το hardware, με προγραμματιζόμενες κοινές υπηρεσίες και μεθόδους που βασίζονται σε λογισμικό που εκτείνονται σε πολλές πλατφόρμες προμηθευτών. Η επαναστατική αλλαγή στο να καταστούν τα δίκτυα προγραμματιζόμενα και να επιτραπεί σε εφαρμογές και υπηρεσίες δικτύου να ελέγχουν άμεσα την υποδομή, πυροδότησε μια σημαντική κατεύθυνση ανάπτυξης στα δίκτυα έρευνας και εκπαίδευσης και στα εμπορικά δίκτυα, επηρεάζοντας ιδιαίτερα τους καθιερωμένους προμηθευτές εξοπλισμού δικτύων μεταξύ των παραγόντων της αγοράς.



Σχήμα 3.4. Απλοποιημένη αναπαράσταση μίας αρχιτεκτονικής SDN [22].

Το SDN είναι μία ανερχόμενη, διαχειρίσιμη, προσαρμόσιμη και οικονομικά αποδοτική αρχιτεκτονική. Αυτό την καθιστά ιδανική για το υψηλό εύρος ζώνης και την απαιτητικότητα των σημερινών εφαρμογών. Η λογική πίσω από το SDN έχει δύο σκέλη:

- χωρίζει το επίπεδο δεδομένων από το επίπεδο ελέγχου και
- εισάγει νέα λειτουργικότητα ελέγχου δικτύου.

Οι αποφάσεις ελέγχου αφαιρούνται από το hardware και η νοημοσύνη του δικτύου είναι πλέον λογικά συγκεντρωμένη. Η διαχείριση και η λειτουργία του δικτύου απλοποιούνται μέσω του SDN, καθώς οι εντολές προώθησης και δρομολόγησης διαμορφώνονται από ελεγκτές SDN. Έτσι ένας διαχειριστής δικτύου μπορεί να διαμορφώσει την κίνηση από μια κεντρική κονσόλα ελέγχου, χωρίς να χρειάζεται να τροποποιήσει μεμονωμένους διακόπτες στο δίκτυο. Ο κεντρικός ελεγκτής SDN κατευθύνει τους διακόπτες για παροχή υπηρεσιών δικτύου όπου χρειάζεται, ανεξάρτητα από τις συγκεκριμένες συνδέσεις μεταξύ διακομιστή και συσκευών.

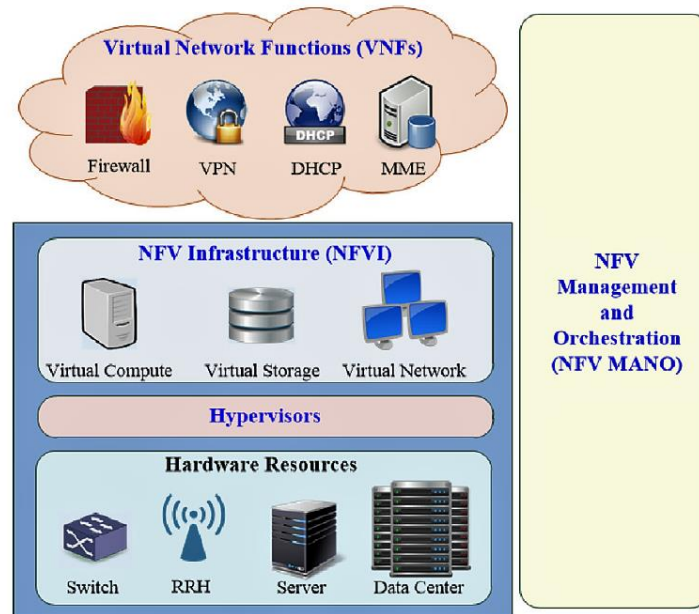
Πιο αναλυτικά, μια τυπική αναπαράσταση της αρχιτεκτονικής SDN περιλαμβάνει τρία επίπεδα: το επίπεδο εφαρμογής, το επίπεδο ελέγχου και το επίπεδο δεδομένων. Το επίπεδο εφαρμογής αποτελείται από εφαρμογές δικτύου (π.χ. email) και επικοινωνεί με το επίπεδο ελέγχου μέσω της διεπαφής northbound. Το επίπεδο ελέγχου αποτελείται από τους ελεγκτές SDN που διέπουν τις συσκευές του δικτύου, οι οποίες με τη σειρά τους ανήκουν στο επίπεδο δεδομένων. Τέλος η επικοινωνία μεταξύ του επιπέδου ελέγχου και των δεδομένων πραγματοποιείται μέσω της διεπαφής southbound.

Το SDN έχει τραβήξει μεγάλη προσοχή τα τελευταία χρόνια. Η ικανότητα διαχείρισης υπηρεσιών δικτύου μέσω λειτουργιών χαμηλότερου επιπέδου ανοίγει ένα ευρύ φάσμα νέων επιλογών αρχιτεκτονικής, διαχείρισης και λειτουργίας, συμπεριλαμβανομένων νέων μορφών αλληλεπίδρασης μεταξύ χρηστών δικτύων και εφαρμογών.

3.4.2 Εικονικοποίηση λειτουργίας δικτύου (Network Function Virtualization)

Η άνοδος του ισχυρού hardware γενικής χρήσης, της τεχνολογίας υπολογιστικού νέφους και των ευέλικτων δικτύων που καθορίζονται από το λογισμικό (SDN), οδήγησε στην πρώτη ιδέα της εικονικοποίησης κλασικών λειτουργιών δικτύου, όπως δρομολογητές, τείχη προστασίας (firewalls) και εξελισσόμενους πυρήνες πακέτων. Στις συμβατικές αρχιτεκτονικές, οι διαχειριστές είναι αναγκασμένοι να αγοράζουν και να εγκαθιστούν ιδιόκτητες συσκευές για την ανάπτυξη κάθε λειτουργίας δικτύου, ενώ

το εξειδικευμένο υλικό είναι συνήθως πολύ ακριβό και μετά βίας διαμορφώσιμο. Αυτές οι λειτουργίες δικτύου, οι οποίες έχουν εκτελεστεί σε ειδικό και συχνά εξειδικευμένο hardware στο παρελθόν, τώρα λειτουργούν ως εφαρμογές λογισμικού σε εικονικές μηχανές πάνω στην υποδομή νέφους.



Σχήμα 3.5. Αρχιτεκτονική του NFV [23].

Η εικονικοποίηση λειτουργίας δικτύου (NFV) πρόκειται για μία αναδυόμενη τεχνολογία η οποία στοχεύει στην προσφορά νέων τρόπων σχεδιασμού, ανάπτυξης και διαχείρισης σύγχρονων υπηρεσιών δικτύου. Η βασική ιδέα πίσω από την ανάπτυξη του NFV είναι να αξιοποιήσει τις τεχνολογίες εικονικοποίησης (virtualization), καθώς επιτρέπει την εικονικοποίηση ολόκληρων λειτουργιών δικτύου που συνδέονται με το hardware. Αποσυνδέει το φυσικό υλικό και τις υποκείμενες λειτουργίες δικτύου και αφήνει τις λειτουργίες του δικτύου να εκτελούνται κεντρικά σε γενικούς διακομιστές cloud, παρέχοντας έτσι πλεονεκτήματα στην επεκτασιμότητα και την ευελιξία. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει τη συγκέντρωση εξοπλισμού δικτύου και υπηρεσιών σε κέντρα δεδομένων, όπου λειτουργίες δικτύου λειτουργούν ως εφαρμογές λογισμικού σε πλατφόρμες επεξεργαστών γενικής χρήσης. Επιπλέον, οι λειτουργίες δικτύου μπορούν να μεταφερθούν σε διαφορετικές τοποθεσίες δικτύου χωρίς να χρειάζεται να αγοραστεί και να εγκατασταθεί νέος εξοπλισμός δικτύου. Το NFV μειώνει σημαντικά τα έξοδα κεφαλαίου (CAPEX) που απαιτούνται για την αγορά συσκευών υλικού και εξοικονομεί λειτουργικά έξοδα (OPEX) συγκεντρώνοντας πόρους για λειτουργίες εικονικού δικτύου που εκτελούνται σε ένα συγκεντρωτικό σύνολο διακομιστών.

Η συνολική αρχιτεκτονική του NFV αποτελείται από τέσσερα βασικά στοιχεία:

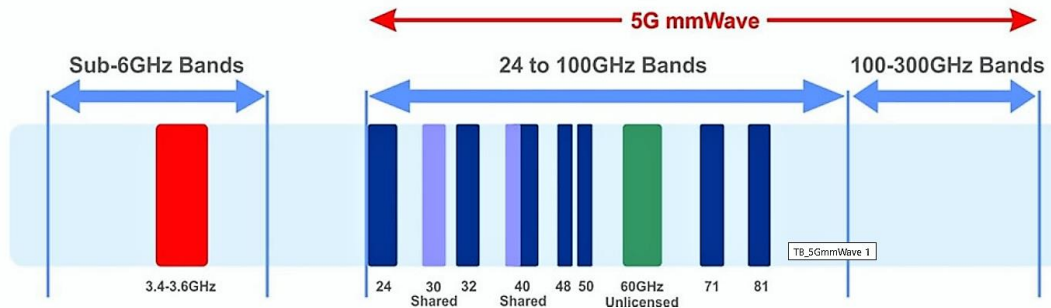
- **Λειτουργίες εικονικού δικτύου (VNFs):** Μια λειτουργία virtualized network (VNF) είναι μια υλοποίηση μιας λειτουργίας δικτύου, όπως για παράδειγμα ένα τείχος προστασίας ή ένας δρομολογητής.
- **Υποδομή NFV (NFVI):** Το NFVI περιέχει τους πόρους για το hardware και το software στους οποίους αναπτύσσονται τα VNF και αποτελείται από εικονικούς και φυσικούς πόρους αποθήκευσης, υπολογισμών και δικτύων.
- **Hypervisors:** Παρέχουν την αφαίρεση των εικονικών πόρων πάνω από το physical hardware για να λειτουργούν τα VNFs. Ρυθμίζουν δηλαδή το επίπεδο εικονικοποίησης που προσφέρει virtual machines (π.χ. εικονικούς υπολογισμούς και αποθήκευση) και εικονικά δίκτυα σε φυσικούς υπολογιστές, αποθηκευτικούς και δικτυακούς πόρους.
- **Διαχείριση και ενορχήστρωση NFV (NFV MANO):** Το πλαίσιο NFV MANO είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση των VNF και την αντιστοίχιση μεταξύ εικονικών και φυσικών πόρων.

3.4.3 Κύματα χιλιοστού (Millimeter wave)

Τα σημερινά ασύρματα δίκτυα αντιμετωπίζουν ένα σημαντικό πρόβλημα. Όλο και περισσότεροι άνθρωποι και συσκευές καταναλώνουν περισσότερα δεδομένα από ποτέ. Ωστόσο παραμένουν στις ίδιες ζώνες του φάσματος ραδιοσυχνοτήτων που χρησιμοποιούν οι πάροχοι κινητής τηλεφωνίας. Αυτό σημαίνει μικρότερο εύρος ζώνης για όλους, προκαλώντας πιο αργή εξυπηρέτηση και μειωμένες συνδέσεις. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα προτείνεται να μεταδοθούν σήματα σε ένα εντελώς νέο φάσμα συχνοτήτων που δεν έχει χρησιμοποιηθεί ποτέ πριν για κινητή υπηρεσία. Τα κύματα χιλιοστού (mmWaves) μεταδίδονται σε συχνότητες μεταξύ 30 και 300 gigahertz [24] και ονομάζονται έτσι επειδή ποικίλουν σε μήκος από 1 έως 10 mm.

Πολλές πρόσφατες έρευνες τόσο από την ακαδημαϊκή όσο και από τη βιομηχανική κοινότητα εστιάζουν στο θέμα της επικοινωνίας μέσω κυμάτων χιλιοστών. Ένα από τα θέματα που αποκτούν μεγάλο ενδιαφέρον είναι τα χαρακτηριστικά μετάδοσής τους, καθώς δεν μπορούν εύκολα να ταξιδεύουν μέσα από κτίρια ή εμπόδια και μπορούν να απορροφηθούν από το φύλλωμα και τη βροχή, μιας και αυξάνεται η συχνότητά τους. Σύμφωνα με έρευνες που διεξήχθησαν [25], [26], [27], αποδείχθηκε ότι το φαινόμενο αποκλεισμού στις συχνότητες των κυμάτων του χιλιοστού είναι αναπόφευκτο. Κατά συνέπεια, το εύρος κάλυψης ενός σταθμού βάσης κύματος χιλιοστών περιορίζεται δραματικά, μόνο σε μερικές εκατοντάδες μέτρα, ακόμη και αν χρησιμοποιηθούν

κεραίες υψηλού κέρδους (πάνω από 50 dBi σε πομπό και δέκτη) που χρησιμοποιούνται τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη.

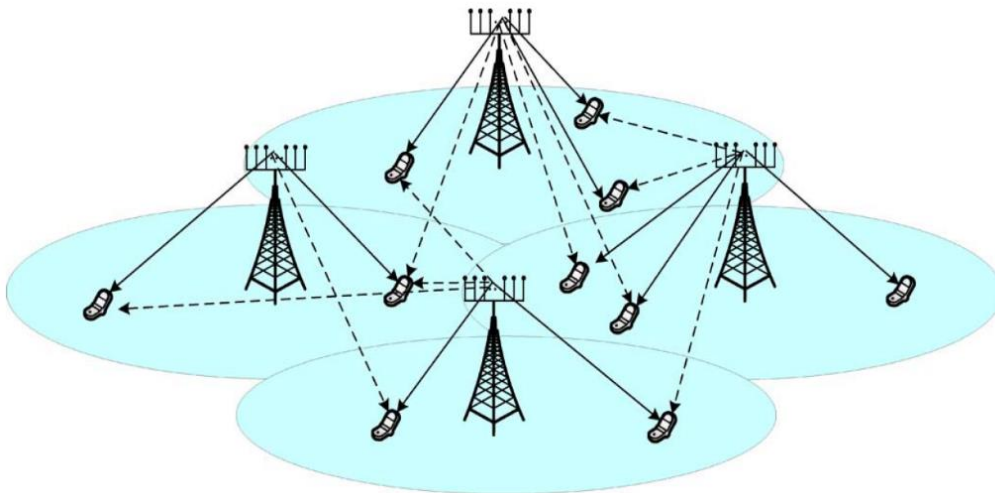


Σχήμα 3.6. Κύματα χιλιοστού στα 5G δίκτυα [28].

Μία λύση που προτείνεται για την αντιμετώπιση της υψηλής ατμοσφαιρικής εξασθένησης που προκαλείται από τα κύματα χιλιοστών είναι η χρήση μεγάλου αριθμού κεραιών στους σταθμούς βάσης. Για αυτό το λόγο οι παραδοσιακές πανκατευθυντικές κυψελοειδείς κεραιές θα αντικατασταθούν με ένα μεγάλο σύνολο κατευθυντικών κεραιών στενής δέσμης που μπορούν να εξυπηρετήσουν ταυτόχρονα πολλούς χρήστες. Οι νέες κεραιές που θα αναπτυχθούν είναι απαραίτητες για την εξυπηρέτηση ενός ευρέος φάσματος χρηστών σε περιοχές με μεγάλη πυκνότητα. Εκτός από τις τεχνικές που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στις κεραιές, εντοπίζεται στη βιβλιογραφία η χωρική πολυπλεξία (spatial multiplexing). Η **χωρική πολυπλεξία**, χρησιμοποιεί τα πολλαπλά στοιχεία κεραιάς για τη μετάδοση πολλαπλών ανεξάρτητων και ξεχωριστά κωδικοποιημένων ροών δεδομένων. Ενώ κάθε ροή δεδομένων ταξιδεύει μέσω διαφορετικών καναλιών διάδοσης, οι δέκτες που είναι επίσης εξοπλισμένοι με πολλαπλές κεραιές θα μπορούν να λαμβάνουν και να ανακατασκευάζουν τα αρχικά δεδομένα που μεταδίδονται με καλύτερη φασματική απόδοση. Η χωρική πολυπλεξία είναι κυρίως αποτελεσματική όταν οι διαδρομές διάδοσης μπορούν να υποστηρίξουν πολλαπλές ροές δεδομένων για μετάδοση και επίσης όταν το κανάλι έχει υψηλό σηματοθορυβικό λόγο (SNR) που δεν θα επηρεάσει την ισχύ του σήματος όταν το αρχικό σήμα πρέπει χωριστεί σε πολλαπλές ροές δεδομένων. Ακόμη, η τεχνολογία διαμόρφωσης δέσμης εννοείται μιας και πρόκειται για τεχνολογία που αποδίδει καλά όταν το κανάλι έχει περιορισμένη ισχύ ή χαμηλό SNR, ως αποτέλεσμα του συνδυασμού πολλαπλών κεραιών.

3.4.4 Massive MIMO

Το MIMO σημαίνει πολλαπλή είσοδος πολλαπλή έξοδος (Multiple-input multiple-output) και προϋποθέτει την χρήση πολλαπλών στοιχείων κεραίας τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη. Η βασική αρχή του είναι η εξής: ένα ασύρματο δίκτυο που επιτρέπει τη μετάδοση και τη λήψη περισσότερων από ένα σημάτων δεδομένων ταυτόχρονα μέσω του ίδιου ασύρματου καναλιού. Η τεχνολογία αυτή έχει μελετηθεί ευρέως τις τελευταίες δύο δεκαετίες και έχει εφαρμοστεί σε πολλά ασύρματα πρότυπα, καθώς μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την χωρητικότητα και την αξιοπιστία των ασύρματων συστημάτων. Σε μια πρόσφατη προσπάθεια για την επίτευξη πιο δραματικών κερδών καθώς και για την απλοποίηση της απαιτούμενης επεξεργασίας σήματος, έχουν προταθεί μαζικά συστήματα MIMO (massive MIMO systems). Σε αντίθεση με τα τυπικά δίκτυα MIMO, που τείνουν να χρησιμοποιούν δύο ή τέσσερις κεραίες, το Massive MIMO, χρησιμοποιεί ιδιαίτερα υψηλό αριθμό κεραιών (δεκάδες ή και εκατοντάδες κεραίες).



Σχήμα 3.7. Αναπαράσταση ενός συστήματος massive MIMO πολλαπλών χρηστών [29].

Τα πλεονεκτήματα ενός δικτύου Massive MIMO σε σχέση με ένα κανονικό, περιλαμβάνουν τεράστια αύξηση της φασματικής απόδοσης και μειωμένη καθυστέρηση [30]. Εφόσον υπάρχουν πολλές περισσότερες κεραίες στο σταθμό βάσης από αυτές στα κινητά τερματικά, οι διαδικασίες προ-κωδικοποίησης σήματος θα απλοποιηθούν, με αποτέλεσμα την αυξημένη φασματική απόδοση. Ένα χαρακτηριστικό αυτών των δικτύων είναι ότι μπορεί να πολλαπλασιάσει την χωρητικότητα μιας ασύρματης σύνδεσης χωρίς να χρειάζεται περισσότερο φάσμα. Επίσης όσες περισσότερες κεραίες είναι εξοπλισμένες στον πομπό / δέκτη, τόσο περισσότερες είναι οι πιθανές διαδρομές σήματος και τόσο καλύτερη είναι η απόδοση

σε σχέση με το ρυθμό δεδομένων και την αξιοπιστία των συνδέσμων. Ακόμη ο μεγαλύτερος αριθμός κεραιών, θα καταστήσει το δίκτυο πολύ πιο ανθεκτικό σε παρεμβολές και σκόπιμο jamming.

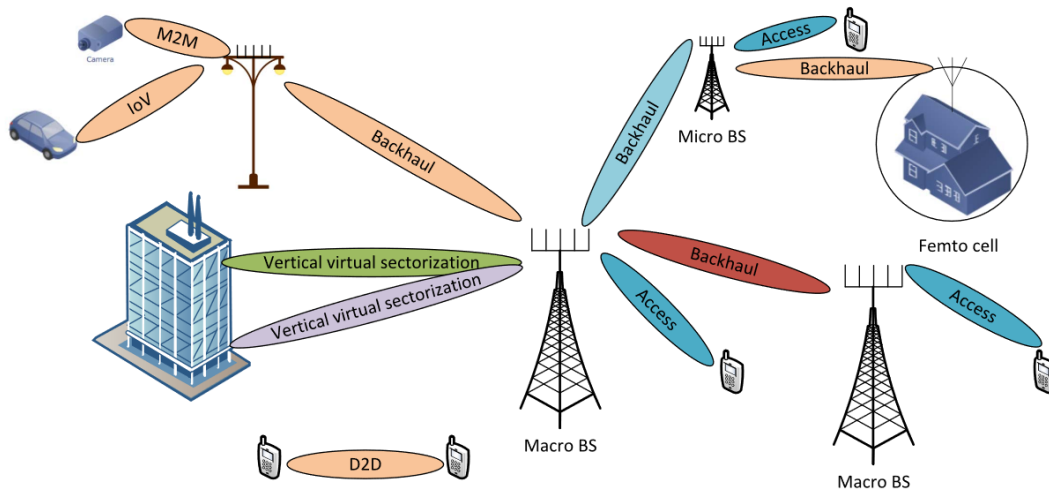
Η μειωμένη καθυστέρηση επιτυγχάνεται με το νόμο των μεγάλων αριθμών που είναι ενσωματωμένοι στην αρχιτεκτονική του Massive MIMO. Η συγκεκριμένη προσέγγιση εξαλείφει την εξάρτηση συχνότητας του καναλιού και η επιλεκτική συχνότητα εξασθένισης δεν θα επηρεάσει την ισχύ του σήματος. Κατά συνέπεια, κάθε μεταδιδόμενη ροή δεδομένων δεν θα υποφέρει πλέον από παραμόρφωση καναλιών και θα μπορεί να φτάσει στον δέκτη με μειωμένη καθυστέρηση. Αξίζει επίσης να επισημανθεί ότι ένα δίκτυο Massive MIMO θα χρησιμοποιεί τεχνολογία beamforming, επιτρέποντας έτσι την στοχευμένη χρήση του φάσματος.

Γενικά γίνεται αντιληπτό ότι η μαζική ικανότητα του Massive MIMO να εξυπηρετεί πολλούς χρήστες και πολλαπλές συσκευές, ταυτόχρονα σε μια περιοχή με μεγάλη κίνηση δεδομένων, διατηρώντας ταυτόχρονα τα υψηλά ποσοστά δεδομένων και να έχει συνεπή απόδοση, την καθιστά την τέλεια τεχνολογία για την αντιμετώπιση των αναγκών της προσεχούς εποχής 5G.

3.4.5 Διαμόρφωση δέσμης (Beamforming)

Πρόκειται για μία σχετικά απλή τεχνική η οποία έχει ωστόσο σημαντικά αποτελέσματα. Το beamforming είναι μια τεχνική που εστιάζει ένα ασύρματο σήμα προς μια συγκεκριμένη συσκευή λήψης, αντί να εξαπλώνεται το σήμα προς όλες τις κατευθύνσεις από μια κεραία εκπομπής, όπως θα συνέβαινε κανονικά. Η προκύπτουσα πιο άμεση σύνδεση είναι ταχύτερη και πιο αξιόπιστη από ότι θα ήταν χωρίς διαμόρφωση.

Το beamforming μπορεί να βρει πρακτική εφαρμογή και να οφελήσει συστήματα MIMO, τα οποία αποτελούνται από σταθμούς βάσης που απαρτίζονται από δεκάδες ή και εκατοντάδες απομακρυσμένες κεραιές, για να κάνουν πιο αποτελεσματική χρήση του φάσματος γύρω από αυτά. Σε τεράστιους σταθμούς βάσης MIMO, οι αλγόριθμοι επεξεργασίας σήματος σχεδιάζουν την καλύτερη διαδρομή μετάδοσης μέσω του αέρα σε κάθε χρήση. Έτσι, μπορούν να στείλουν μεμονωμένα πακέτα δεδομένων σε πολλές διαφορετικές κατευθύνσεις, ενώ «ανακλώνται» από κτίρια και άλλα αντικείμενα με ένα ακριβώς συντονισμένο μοτίβο. Το beamforming επιτρέπει σε πολλούς χρήστες και κεραιές να ανταλλάσσουν πολύ περισσότερες πληροφορίες ταυτόχρονα.



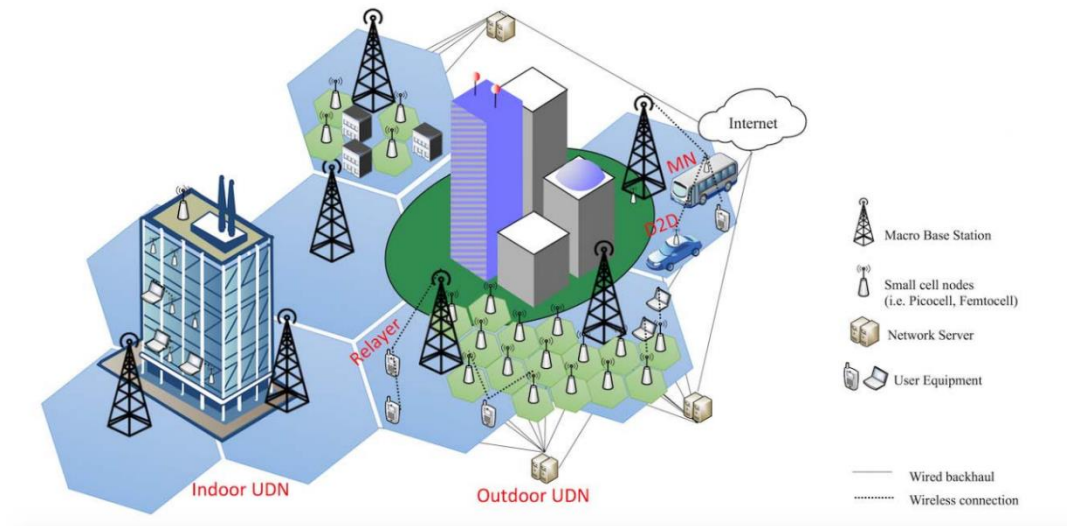
Σχήμα 3.8. Εφαρμογές massive MIMO beamforming σε ασύρματα δίκτυα 5G [31].

Για κύματα χιλιοστών, η διαμόρφωση δέσμης χρησιμοποιείται κυρίως για την αντιμετώπιση ενός διαφορετικού συνόλου προβλημάτων. Τα κυψελοειδή σήματα αποκλείονται εύκολα από αντικείμενα και τείνουν να εξασθενούν σε μεγάλες αποστάσεις. Σε αυτήν την περίπτωση, η διαμόρφωση δέσμης μπορεί να βοηθήσει εστιάζοντας ένα σήμα σε μια συγκεντρωμένη δέσμη που δείχνει μόνο προς την κατεύθυνση ενός χρήστη, αντί να εκπέμπει σε πολλές κατευθύνσεις ταυτόχρονα. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να ενισχύσει τις πιθανότητες άφιξης του σήματος και να μειώσει τις παρεμβολές για όλους τους άλλους.

3.4.6 Εξαιρετικά πυκνά κυψελωτά δίκτυα (Ultra-dense cellular networks)

Καθώς η κίνηση δεδομένων παγκοσμίως, ολοένα και αυξάνεται, η παραδοσιακή αρχιτεκτονική δικτύου macrocell, δε μπορεί να συμβαδίσει με αυτή την αύξηση. Σε κυψελοειδή δίκτυα 5G, οι μαζικές κεραιές MIMO θα ενσωματωθούν σε σταθμούς βάσης (BS), όπου εκατοντάδες κεραιές θα χρησιμοποιούνται για μετάδοση ασύρματης κίνησης της τάξεως των gigabit. Μια άλλη πιθανή βασική τεχνολογία για δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 5G, όπως προαναφέρθηκε, είναι η τεχνολογία επικοινωνίας μέσω κύματος χιλιοστών, η οποία αναμένεται να παρέχει εύρος ζώνης εκατοντάδων megahertz για ασύρματες μεταδόσεις. Με κίνητρο τις δύο παραπάνω τεχνολογίες, παρουσιάστηκαν μικρά δίκτυα κυψελών για κυψελωτά δίκτυα 5G. Για την ικανοποίηση της απρόσκοπτης κάλυψης, η πυκνότητα των σταθμών βάσης (BS) των 5G αναμένεται να ανέλθει σε 40-50 BS / km² [32]. Επομένως, το μελλοντικό

κυψελοειδές δίκτυο 5G, θα είναι ένα εξαιρετικά πυκνό κυψελοειδές δίκτυο (Ultra-dense network - UDN).



Σχήμα 3.9. Παράδειγμα ενός δικτύου UDN [33].

Όπως φαίνεται στο Σχήμα , ένα απλοποιημένο δίκτυο UDN περιλαμβάνει τα εξής στοιχεία: πυκνά αναπτυγμένες μικρές κυψέλες, σταθμούς βάσης (macro BS), διακομιστή / ελεγκτή δικτύου, κινούμενους κόμβους και εξοπλισμούς χρηστών (UEs). Ένας μεγάλος αριθμός μικρών κυψελών μπορεί να υποστηρίξει τον αυξανόμενο αριθμό UEs και οι κινητοί UEs εκτελούν τις λειτουργίες σύνδεσης, αποσύνδεσης, αναζήτησης και επανασύνδεσης. Επίσης οι κινούμενοι κόμβοι μπορούν επίσης να βοηθήσουν στην επικοινωνία μεταξύ οχημάτων ή UEs (V2V). Τα βασικά χαρακτηριστικά ενός δικτύου UDN είναι:

1. Μεγάλος αριθμός μικρών κελιών και σημείων πρόσβασης (μεγαλύτερος ή ίσος με τον αριθμό UE).
2. Πυκνή και πλούσια διασυνδεδεμένη ανάπτυξη πολλαπλών επιπέδων.
3. Γρήγορη πρόσβαση και ευέλικτη εναλλαγή (π.χ. παραδόσεις).

Μερικά από τα πλεονεκτήματα ανάπτυξης μικρών κυψελών είναι τα εξής:

- Υψηλός ρυθμός δεδομένων και αποτελεσματική χρήση φάσματος: Ο μικρός φυσικός διαχωρισμός μεταξύ μικρών σταθμών βάσης και UE's οδηγεί σε υψηλότερο ρυθμό δεδομένων και καλύτερη κάλυψη εσωτερικού χώρου.

Επίσης, η απόδοση του φάσματος αυξάνεται λόγω των λιγότερων UE's σε άμεση επικοινωνία με ένα παραδοσιακό σταθμό βάσης (Macro BS).

- Εξοικονόμηση ενέργειας: Η χρήση μικρών κυψελών μειώνει την κατανάλωση ενέργειας του δικτύου. Ακόμη μειώνει την κατανάλωση ενέργειας και στις συσκευές των χρηστών, καθώς τους δίνει τη δυνατότητα να επικοινωνούν σε μικρότερο εύρος με χαμηλή επιβάρυνση σηματοδότησης.
- Εξοικονόμηση χρημάτων: Είναι πιο οικονομικό να εγκατασταθεί ένας μικρός σταθμό βάσης χωρίς δυσκίνητο σχεδιασμό σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς σταθμούς βάσης, ενώ παράλληλα το κόστος διαχείρισης-λειτουργίας είναι πολύ χαμηλότερο.

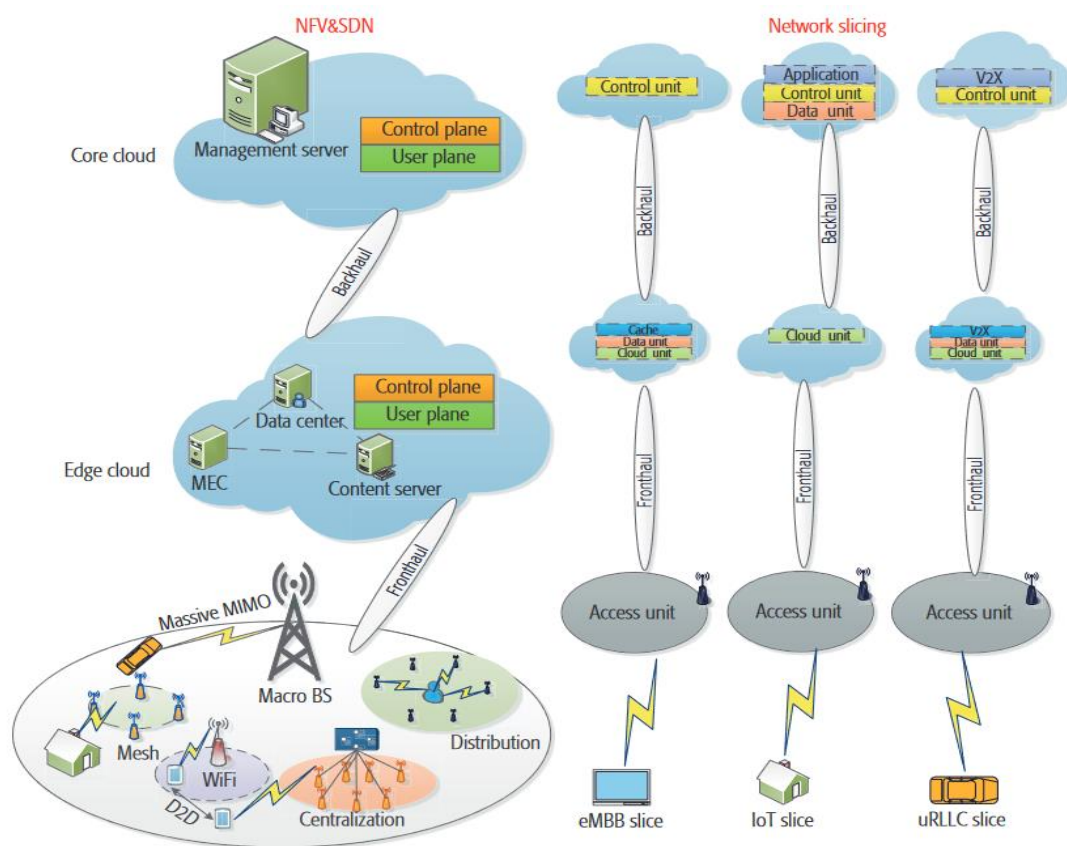
Ωστόσο παρά τα πολλά εμφανή οφέλη που φέρνει ένα δίκτυο UDN, συνοδεύεται και από μερικά ρεαλιστικά ζητήματα όπως το κόστος εφαρμογής και η λειτουργική αξιοπιστία. Οι μικρές κυψέλες επιβάλλουν πράγματι ένα αρχικό κόστος στην υποδομή, αλλά λιγότερο από το κόστος που σχετίζεται με ένα παραδοσιακό σταθμό βάσης. Επιπλέον υφίσταται υποχρεωτικός ο συχνός έλεγχος αυθεντικοποίησης λόγω των συχνών handoffs. Τέλος μια ενεργή ή παθητική (ενεργοποίηση / απενεργοποίηση) κατάσταση ενημέρωσης οποιασδήποτε μικρής κυψέλης σίγουρα θα οδηγούσε σε συχνές τοπολογικές ενημερώσεις.

3.4.7 Τεμαχισμός Δικτύου (Network slicing)

Οι τεχνολογίες δικτύου και δικτύωσης για συστήματα 5G, έρχονται καθημερινά αντιμέτωπες με τις άφθονες, διακριτές, προσαρμοσμένες απαιτήσεις υπηρεσιών. Αυτό έχει γίνει το επίκεντρο των ερευνητικών και αναπτυξιακών δραστηριοτήτων των διαχειριστών, των πωλητών εξοπλισμού και των ερευνητικών ιδρυμάτων σε όλο τον κόσμο. Προκειμένου να παρέχονται προσαρμοσμένες αξιόπιστες υπηρεσίες χρησιμοποιώντας περιορισμένους πόρους δικτύου, μειώνοντας παράλληλα τις κεφαλαιουχικές δαπάνες και τα λειτουργικά έξοδα των δικτύων 5G, ο τεμαχισμός δικτύου προτάθηκε πρόσφατα από την ασύρματη βιομηχανία ως βασικός παράγοντας για τη δημιουργία υπηρεσιών δικτύου και προσαρμοσμένων υπηρεσιών κατ'απαίτηση. Με τον τεμαχισμό ενός φυσικού δικτύου σε ξεχωριστά λογικά δίκτυα, ο τεμαχισμός δικτύου μπορεί να υποστηρίξει κατ'απαίτηση προσαρμοσμένες υπηρεσίες για διαφορετικά σενάρια εφαρμογής, ενώ χρησιμοποιεί το ίδιο φυσικό δίκτυο. Έτσι, οι πόροι του δικτύου μπορούν να αποδοθούν δυναμικά και αποτελεσματικά σε λογικά τμήματα δικτύου σύμφωνα με τις αντίστοιχες απαιτήσεις QoS. Ο τεμαχισμός δικτύου είναι μια μορφή εικονικής αρχιτεκτονικής δικτύου που εμπλέκει τις τεχνολογίες SDN και NFV. Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει τη δημιουργία πολλαπλών εικονικών δικτύων

πάνω από μια κοινή φυσική υποδομή. Ο τεμαχισμός δικτύου λοιπόν σε «φέτες» (slices), επιτρέπει στους διαχειριστές του δικτύου να δημιουργούν εικονικά δίκτυα από άκρο σε άκρο που μοιράζονται την ίδια φυσική υποδομή.

Όσον αφορά την περίπτωση του 5G, αναμένεται να διαδραματίσει κρίσιμο ρόλο. Προβλέπεται ότι θα χρησιμοποιηθεί κυρίως για τον διαχωρισμό του κεντρικού δικτύου, αλλά μπορεί επίσης να εφαρμοστεί και στον τομέα ασύρματης πρόσβασης (RAN). Πιο συγκεκριμένα, ένα μοναδικό φυσικό δίκτυο θα χωρίζεται σε πολλά εικονικά δίκτυα που μπορούν να υποστηρίξουν RANs ή σε διαφορετικούς τύπους υπηρεσιών που εκτελούνται σε ένα μόνο RAN.



Σχήμα 3.10. Παράδειγμα τεμαχισμού δικτύου με βάση την αρχιτεκτονική 5G [34].

Στο σχήμα 3.10. αναπαρίσταται ένα σύστημα 5G βασισμένο σε τεμαχισμό δικτύου. Παρατηρούμε ότι στο επίπεδο ασύρματης πρόσβασης, ένα ετερογενές δίκτυο φιλοξενεί πολλαπλές τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης (RAT) και υποστηρίζει αποτελεσματική συνεργασία μεταξύ τους. Η αρχιτεκτονική του κυρίου δικτύου έχει εξελιχθεί σε ένα βασικό νέφος που παρέχει ορισμένες σημαντικές λειτουργίες του επιπέδου ελέγχου. Παρατηρούμε ότι το επίπεδο ελέγχου διαχωρίζεται από το επίπεδο χρήστη έτσι ώστε να μειωθούν τα σήματα ελέγχου και οι καθυστερήσεις των

μεταδόσεων δεδομένων. Επίσης οι διακομιστές και άλλες λειτουργίες του RAN βρίσκονται στο cloud edge, το οποίο είναι μια κεντρική ομάδα εικονικοποιημένων λειτουργιών. Στα δεξιά του σχήματος φαίνεται ο τεμαχισμός δικτύου. Μία «φέτα» δικτύου από άκρη-σε-άκρη (edge-to-edge) είναι μια συγκεκριμένη συλλογή λειτουργιών δικτύου και μονάδων κατανομής πόρων που απομονώνονται από άλλα τμήματα δικτύου. Για παράδειγμα για μία «φέτα» βελτιωμένου εύρους κινητής ευρυζωνικότητας (enhanced mobile broadband - eMBB), απαιτείται μεγάλο εύρος ζώνης για την υποστήριξη υπηρεσιών υψηλού ρυθμού δεδομένων, όπως ροή βίντεο υψηλής ευκρίνειας. Παράλληλα απαιτούνται μια λειτουργία προσωρινής αποθήκευσης, μια μονάδα δεδομένων και μια μονάδα ενός νέφους, για να βοηθήσουν τις λειτουργίες ελέγχου στην εφαρμογή των υπηρεσιών τεμαχισμού eMBB. Στο 5G, η αξιοπιστία, η χαμηλή καθυστέρηση και η ασφάλεια θα είναι κρίσιμης σημασίας για την «φέτα» παροχής αξιόπιστης και χαμηλής καθυστέρησης επικοινωνίας (ultra Reliable and Low-Latency Communication - uRLLC). Για αυτή την περίπτωση όλες οι ειδικές λειτουργίες θα πρέπει να δημιουργούνται στο ακραίο νέφος.

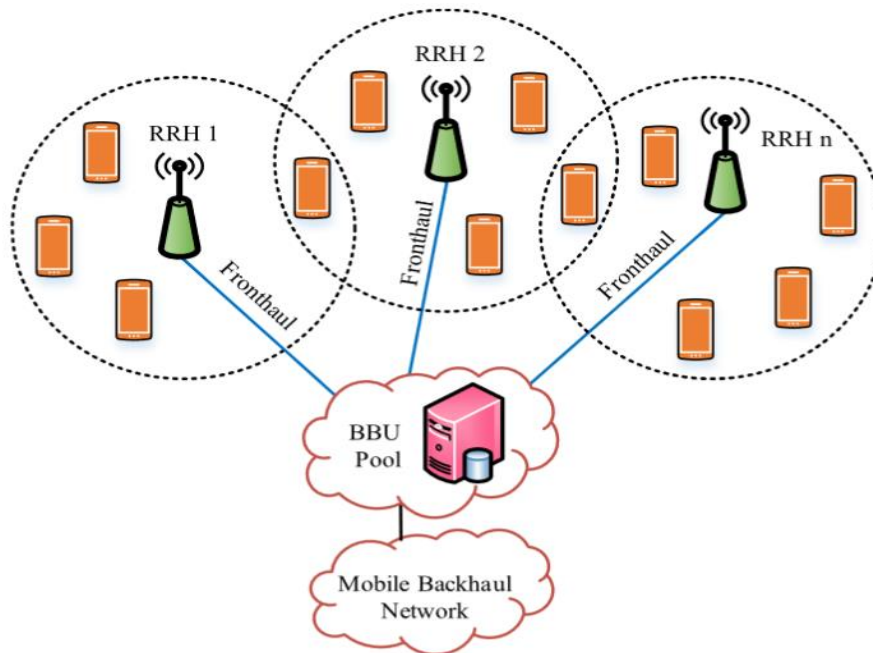
Υπάρχει πληθώρα περιπτώσεων χρήσης και νέων υπηρεσιών που μπορούν να υποστηριχθούν. Αυτές οι νέες περιπτώσεις χρήσης και οι υπηρεσίες θα τοποθετήσουν διαφορετικές απαιτήσεις στο δίκτυο όσον αφορά τη λειτουργικότητα, τις απαιτήσεις και την απόδοση. Για παράδειγμα σε ένα σενάριο 5G για περίπτωση ηλεκτρονικής υγείας (e-health), τα βίντεο streams υψηλής ευκρίνειας μεταξύ συνδεδεμένων ασθενοφόρων και του νοσοκομείου βοηθούν τους νοσηλευτές να θεραπεύσουν ή να σταθεροποιήσουν την κατάσταση των ασθενών που βρίσκονται σε πορεία προς το νοσοκομείο και τα νοσοκομεία να προετοιμαστούν για την άφιξή τους. Μια τέτοια υπηρεσία streaming απαιτεί υψηλή απόδοση και πολύ μικρή καθυστέρηση. Και οι δύο θα μπορούσαν να παραδοθούν μέσω του ίδιου κοινού φυσικού δικτύου σε εικονικά τμήματα δικτύου για τη βελτιστοποίηση της χρήσης του φυσικού δικτύου.

3.4.8 Cloud – RAN

Το Cloud-RAN (C-RAN) έχει ως στόχο να βελτιώσει συνολικά όλη την απόδοση του δικτύου και να μειώσει τις δαπάνες, διαχειρίζοντας τους πόρους του δικτύου. Σε μια αρχιτεκτονική C-RAN, ο σταθμός βάσης LTE αποτελείται από τις απομακρυσμένες κεραίες (Remote Radio Heads - RRHs), τις μονάδες επεξεργασίας βασικής ζώνης (Baseband Units - BBUs) και το optical fronthaul [35].

Τα **BBU's** λειτουργούν ως εικονικοί σταθμοί βάσης (Virtual Base Stations - VBS), οι οποίοι εκτελούν τις λειτουργίες επεξεργασίας βασικής ζώνης (π.χ διαμόρφωση / αποδιαμόρφωση, κωδικοποίηση / αποκωδικοποίηση). Είναι εικονικοποιημένα και

συγκεντρωμένα σε μια οντότητα που ονομάζεται ομάδα BBU (BBU pool), η οποία βρίσκεται συχνά σε ένα κέντρο δεδομένων, εν' αντιθέσει με τα RRHs που βρίσκονται σε απομακρυσμένες περιοχές. Η BBU pool αποτελείται από πολλά BBU's που αναπτύσσονται σε servers με υψηλή ισχύ επεξεργασίας. Η BBU pool αποτελεί κρίσιμο μέρος της αρχιτεκτονικής Cloud RAN, καθώς εκεί πραγματοποιούνται οι διεργασίες επεξεργασίας βασικής ζώνης. Ένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα της BBU pool έγκειται στην υποστήριξη της δυναμικής κατανομής των πόρων BBU στα RRHs. Ως αποτέλεσμα, είναι εφικτές αποτελεσματικές λειτουργίες μηχανικής κυκλοφορίας, όπως η εξισορρόπηση φορτίου, η ενεργειακά αποδοτική κατανομή πόρων και ο καλύτερος χειρισμός της κίνησης κινητής τηλεφωνίας μεταξύ των ομάδων BBU, εάν υπάρχουν περισσότερες από μία ομάδες BBU. Επίσης, η συγκέντρωση συμβάλλει στη διαχείριση της κινητικότητας καθώς οι χρήστες μετακινούνται μεταξύ των κυψελών.



Σχήμα 3.11. Αρχιτεκτονική ενός δικτύου 5G C-RAN [36].

Τα **RRHs** είναι υπεύθυνα για τη μετάδοση των σημάτων ραδιοσυχνότητας (RF) στα τερματικά των χρηστών, την ενίσχυση των ραδιοσυχνοτήτων, το φιλτράρισμα και τη μετατροπή από αναλογικό σε ψηφιακό (A/D) και από ψηφιακό σε αναλογικό (D/A). Χαρακτηρίζονται από το χαμηλό τους κόστος και τη χαμηλή κατανάλωση ισχύος και αποτελούνται εξαρτήματα πομποδεκτών ραδιοσυχνοτήτων όπως ενισχυτή ισχύος, duplexer και ενισχυτή χαμηλού θορύβου [37]. Τα RRHs είναι δυνατόν να αναπτυχθούν ευρέως και μάλιστα με οικονομικά αποδοτικό τρόπο, καθώς οι περισσότερες από τις λειτουργίες επεξεργασίας θα εκτελούνται στην BBU pool.

Το **fronthaul** είναι μία διασύνδεση χαμηλής καθυστέρησης και υψηλού εύρους ζώνης, μεταξύ της BBU pool και των RRHs και έχει μεγάλο αντίκτυπο στην απόδοση του C-RAN. Η δουλειά του είναι να μεταφέρει τα δεδομένα από την BBU pool στα RRHs. Προκειμένου να εξασφαλιστεί υψηλή απόδοση δικτύου, απαιτούνται σύνδεσμοι με υψηλό ρυθμό δεδομένων και εύρος ζώνης, καθώς και χαμηλός χρόνος απόκρισης και jitter.

Γενικά στην αρχιτεκτονική C-RAN, υπάρχει η δυνατότητα οι λειτουργίες βασικής ζώνης να διαμοιράζονται μεταξύ των BBU's και των RRHs. Το μεγαλύτερο μέρος αυτών των λειτουργιών ανατίθεται στα BBU's, ενώ ένα υποσύνολο αυτών στα RRHs. Ο διαμοιρασμός αυτός μπορεί να πραγματοποιηθεί σε οποιοδήποτε επίπεδο πρωτοκόλλου και εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τη διασύνδεση fronthaul. Υψηλότερη ποιότητα και χωρητικότητα διασυνδέσεων επιτρέπουν περισσότερες λειτουργίες χαμηλότερου επιπέδου στο νέφος.

Η συνολική αρχιτεκτονική του C-RAN, παρέχει μια ποικιλία υπηρεσιών ως προς το λογισμικό, την εξοικονόμηση ενέργειας και την ευέλικτη και επεκτάσιμη αρχιτεκτονική για τα μελλοντικά κυψελοειδή δίκτυα επικοινωνιών. Μερικά από τα πλεονεκτήματα σε σχέση με τα συμβατικά RANs είναι τα εξής:

Εύκολη διαχείριση δικτύου: Διευκολύνουν την εγκατάσταση εικονικών πόρων κατ' απαίτηση και εκτελούν πόρους του νέφους που διαχειρίζονται δυναμικά τις παρεμβολές, την κυκλοφορία, την ισορροπία φορτίου, την κινητικότητα ενώ επίσης πραγματοποιούν συντονισμένη επεξεργασία σήματος.

Μείωση κόστους: Τα κεφάλαια και οι λειτουργικές δαπάνες μπορούν να μειωθούν, καθώς τα BBU's συγκεντρώνονται σε κέντρα δεδομένων και η εγκατάσταση RRH απαιτεί λιγότερο υλικό. Επιπλέον, η αναβάθμιση λογισμικού και υλικού γίνεται ευκολότερη και λιγότερο δαπανηρή.

Ενεργειακή απόδοση: Με την τοποθέτηση των BBU's στα κέντρα δεδομένων, η συνολική κατανάλωση ενέργειας του δικτύου αυτομάτως μειώνεται. Αυτό συνδέεται με το γεγονός ότι οι τοποθεσίες των κυψελών περιλαμβάνουν μόνο τα RRHs, τα οποία έχουν περιορισμένη κατανάλωση ενέργειας. Η ενεργειακή απόδοση μπορεί επίσης να αυξηθεί με δυναμική διαχείριση (π.χ. ενεργοποίηση και λειτουργία) των BBU's, ανάλογα με τη ζήτηση κίνησης δεδομένων και το φορτίο δικτύου, όπως θα δούμε και σε επόμενο κεφάλαιο.

Προηγμένες τεχνικές επεξεργασίας: Καθώς τα BBU's βρίσκονται σε ισχυρά κέντρα δεδομένων, έχουν πρόσβαση σε υψηλότερους πόρους επεξεργασίας. Οι προηγμένες τεχνικές επεξεργασίας μπορούν να εφαρμοστούν εύκολα αξιοποιώντας αυτούς τους πόρους επεξεργασίας.

«Κλιμάκωση» των BBU's: Υπάρχει η δυνατότητα τα BBU's να κλιμακώνονται δυναμικά σύμφωνα με τις απαιτήσεις του δικτύου. Για παράδειγμα, όταν υπάρχει αύξηση της κίνησης δικτύου, ένα εικονικό BBU μπορεί να κλιμακωθεί για να χρησιμοποιήσει περισσότερους υπολογιστικούς πόρους.

Επέκταση πόρων: Προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη απόδοση φάσματος, είναι απαραίτητο οι κινητές συσκευές να είναι συνδεδεμένες στο σταθμό με την καλύτερη ποιότητα συνδέσμου.

Ανάλυση μεγάλων δεδομένων: Για την ανάλυση μεγάλων δεδομένων μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι πόροι επεξεργασίας των κέντρων δεδομένων. Με την ανάλυση τεράστιων ποσών δεδομένων του χρήστη και του δικτύου, οι διαχειριστές μπορούν να εξαγάγουν πολύτιμα συμπεράσματα σχετικά με την απόδοση του δικτύου και την ποιότητα των υπηρεσιών.

Παρά τα όσα θετικά ενσωματώνει το C-RAN, υπάρχουν επίσης πολλές προκλήσεις και ανοιχτά ζητήματα που πρέπει να διερευνηθούν περαιτέρω προκειμένου να αξιοποιηθεί πλήρως. Τέτοιες προκλήσεις είναι οι εξής:

Μια αποτελεσματική τεχνική μεταφοράς δεδομένων μέσω του fronthaul: Η μεταφορά δεδομένων στο cloud έχει αναλογικό αντίκτυπο στην απόδοση ενός C-RAN. Ως εκ τούτου απαιτείται γρήγορη και αποτελεσματική μεταφορά των δεδομένων και συνάμα και αξιόπιστη.

Απόδοση σε πραγματικό χρόνο: Δεδομένου ότι τα δίκτυα C-RANs θα χρησιμοποιηθούν αντί ενός σταθμού βάσης που παρέχει όλες τις υπηρεσίες στους χρήστες, απαιτείται η μεταφορά και επεξεργασία όλων των δεδομένων στο cloud τόσο γρήγορα, όσο γρήγορα μπορεί να μεταδώσει και ένας σταθμός βάσης. Διαφορετικά, είναι δύσκολο να βρεθούν λύσεις σε προβλήματα σε πραγματικό χρόνο χρησιμοποιώντας ένα C-RAN.

Αξιοπιστία: Ο πάροχος cloud δεν διασφαλίζει καμία εγγύηση εκτέλεσης του υλικού και του λογισμικού χωρίς σφάλματα.

Ασφάλεια: Οι πόροι του cloud μοιράζονται μεταξύ πολλών χρηστών και δεν είναι ποτέ υπό τον έλεγχο μιας μόνο αρχής. Ως εκ τούτου, ένας κακόβουλος χρήστης μπορεί εύκολα να αποκτήσει πρόσβαση στο επίπεδο ελέγχου ενός C-RAN, με αποτέλεσμα ένα πιο σοβαρό πρόβλημα.

Δυνατότητα διαχείρισης: Έχει καταστεί σαφές ότι ένα δίκτυο πρέπει να είναι εύκολα διαχειρίσιμο. Επιπλέον, η δυναμική κατανομή των πόρων σε cloud σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα είναι ένα κρίσιμο ζήτημα που απαιτεί επίλυση.

3.4.9 Common Public Radio Interface

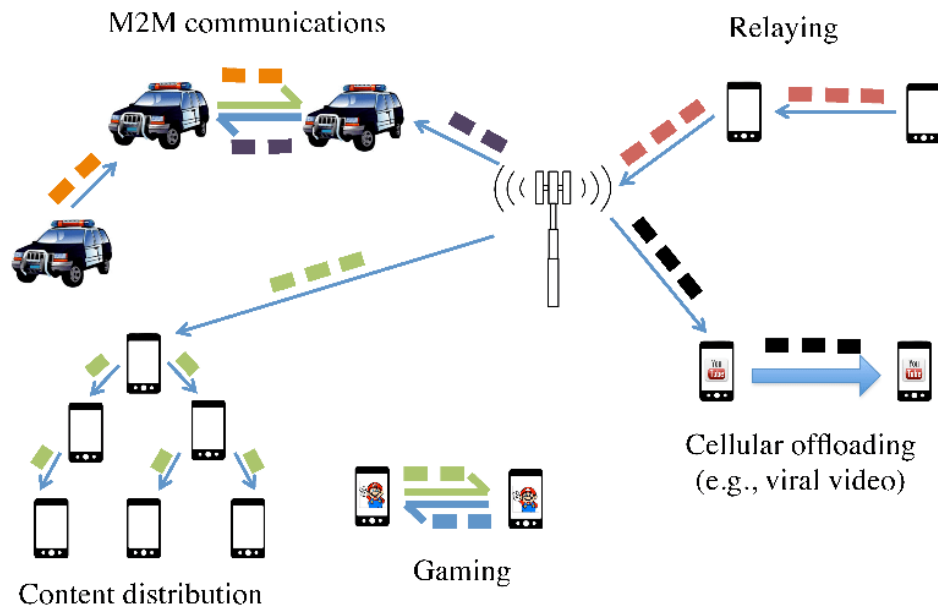
Το CPRI είναι μια προδιαγραφή για ασύρματα δίκτυα επικοινωνίας που καθορίζει τα βασικά κριτήρια για διασύνδεση μεταφοράς, συνδεσιμότητας και ελέγχου επικοινωνιών μεταξύ των μονάδων βασικής ζώνης (BBU) και των απομακρυσμένων ασύρματων μονάδων (RRHs). Είναι η τυπική διεπαφή που επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ του ασύρματου εξοπλισμού (radio equipment - RE) και του ελεγκτή ασύρματου εξοπλισμού (REC). Η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία φυσικής μεταφοράς για το CPRI, είναι οι οπτικές ίνες point-to-point, λόγω του χαμηλού κόστους και της ευκολίας στην εγκατάσταση.

Τα πιο σημαντικά οφέλη που περιλαμβάνει το CPRI είναι τα εξής:

- Οι κατασκευαστές των σταθμών βάσης μπορούν να χρησιμοποιήσουν ένα κοινό πρωτόκολλο.
- Το κοινό μπορεί να συνεισφέρει ιδέες και προτάσεις σχετικά με τις προδιαγραφές CPRI.
- Οι προδιαγραφές διατίθενται ελεύθερα στο κοινό.

3.4.10 Επικοινωνίες μεταξύ συσκευών (Device-to-device communications)

Στα παραδοσιακά κυψελοειδή δίκτυα, η πλειονότητα των επικοινωνιών πραγματοποιείται μεταξύ του σταθμού βάσης και των συσκευών. Ας πάρουμε για παράδειγμα δύο χρήστες κινητής τηλεφωνίας οι οποίοι βρίσκονται στο εύρος της άμεσης επικοινωνίας τους. Προκειμένου οι συσκευές τους να επικοινωνήσουν μεταξύ τους πρέπει να δημιουργηθεί η διασύνδεση μέσω του σταθμού βάσης. Κάτι τέτοιο δεν είναι αποτελεσματικό για υπηρεσίες σε πραγματικό χρόνο που απαιτούν υψηλά ποσοστά δεδομένων και χαμηλή καθυστέρηση. Για αυτό το λόγο και προκειμένου να ενισχυθεί η φασματική απόδοση ήρθε στο προσκήνιο η επικοινωνία μεταξύ συσκευών (D2D). Υπάρχουν πολλές περιπτώσεις χρήσης επικοινωνιών D2D που έχουν διερευνηθεί ευρέως ως μέρος των δικτύων LTE-A. Στα δίκτυα 5G, οι απαιτητικές εφαρμογές που πρόκειται να αναπτυχθούν (gaming, virtual reality, e-health), καθιστούν αναγκαία και υποχρεωτική την υποστήριξη τέτοιων επικοινωνιών από το δίκτυο. Εφόσον οι συσκευές θα επικοινωνών μεταξύ τους, θα μειωθεί η κίνηση δεδομένων μεταξύ του σταθμού βάσης και των κοντινών συσκευών. Κάτι τέτοιο μπορεί εκφορτώσει τη χωρητικότητα των σταθμών βάσης και ταυτόχρονα να προσφέρει μια καλύτερη εμπειρία χρήστη.



Σχήμα 3.12. Πιθανά σενάρια ανάπτυξης επικοινωνίας μεταξύ συσκευών [38].

Μία πολύ σημαντική παράμετρος αυτών των επικοινωνιών, αποτελεί η επικοινωνία μεταξύ οχημάτων. Υπάρχουν δύο σημαντικές περιπτώσεις χρήσης οι επικοινωνίες οχήματος προς όχημα (vehicle-to-vehicle - V2V) και οι επικοινωνίες οχήματος προς υποδομή (vehicle-to-infrastructure - V2I), οι οποίες μπορούν να γενικευτούν ως επικοινωνίες V2X. Τα οχήματα που επικοινωνούν μεταξύ τους καθώς και με την υποδομή θα βοηθήσουν στην ανάπτυξη πολλών τεχνολογιών όπως αυτόνομα αυτοκίνητα, αυτοματοποιημένη παρακολούθηση παραβίασης κυκλοφορίας, κ.λπ. Η τεχνολογία πίσω από τις επικοινωνίες V2X επιτρέπει στα οχήματα να ανταλλάσσουν ασύρματα πληροφορίες σχετικά με την ταχύτητα, τη θέση και την κατεύθυνση τους. Επιπλέον τους δίνει τη δυνατότητα να μεταδίδουν και να λαμβάνουν παν-κατευθυντικά μηνύματα (έως και 10 φορές ανά δευτερόλεπτο), δημιουργώντας μια «επίγνωση» 360 μοιρών για άλλα οχήματα σε κοντινή απόσταση. Τα οχήματα που είναι εξοπλισμένα με κατάλληλο λογισμικό και μπορούν να υποστηρίξουν αυτή την τεχνολογία μπορούν να χρησιμοποιούν τα μηνύματα από τα γύρω οχήματα για να προσδιορίσουν πιθανές απειλές κατά τη διάρκεια της οδήγησης (έξυπνο φρενάρισμα).

Τα μηνύματα που εκπέμπονται έχουν εμβέλεια συνήθως άνω των 300 μέτρων και μπορούν να εντοπίσουν κινδύνους που κρύβονται από την κυκλοφορία, το έδαφος ή τον καιρό. Η επικοινωνία V2V επεκτείνει και βελτιώνει τα διαθέσιμα συστήματα αποφυγής σύγκρουσης που χρησιμοποιούν ραντάρ και κάμερες για τον εντοπισμό απειλών σύγκρουσης. Αυτή η νέα τεχνολογία δεν βοηθά μόνο τους οδηγούς να επιβιώσουν από μια συντριβή, αλλά τους βοηθά να αποφύγουν εντελώς το σφάλμα.

Τέλος να επισημάνουμε ότι υπάρχουν αρκετοί τύποι οχημάτων που θα μπορούσαν να υποστηρίξουν επικοινωνία μεταξύ συσκευών, όπως αυτοκίνητα, φορτηγά, λεωφορεία ακόμη και μοτοσικλέτες. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα πεζοί και ποδηλάτες μπορούν να αξιοποιήσουν μια μέρα αυτή την τεχνολογία για να βελτιώσουν την ορατότητά τους στους οδηγούς.

3.4.11 Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things)

Το Διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT) είναι ένα δίκτυο καθημερινών φυσικών αντικειμένων, οχημάτων, συσκευών, κτιρίων κ.λπ. Αποτελεί μια βασική ιδέα που αλλάζει πολλές προοπτικές στο τοπίο των κυψελοειδών δικτύων 5G. Το 5G-IoT αναμένεται να παρέχει σε εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο κατ'απαίτηση, όλες τις διαδικτυακές, αναδιαμορφώσιμες και κοινωνικές εμπειρίες οι οποίες απαιτούν την αρχιτεκτονική 5G-IoT να μπορεί να συντονίζεται από άκρο σε άκρο, με αυτόματα, και έξυπνη λειτουργία σε κάθε φάση. Οι αρχιτεκτονική του 5G-IoT αναμένεται να παρέχει:

- Λογικά ανεξάρτητα δίκτυα σύμφωνα με τις απαιτήσεις των εφαρμογών.
- Χρήση του δικτύου Cloud-RAN για ανακατασκευή του δικτύου ασύρματης πρόσβασης (RAN), ώστε να παρέχει μαζικές συνδέσεις πολλαπλών προτύπων που απαιτούνται από το 5G.
- Απλοποίηση αρχιτεκτονικής του δικτύου κορμού για την εφαρμογή κατ'απαίτηση (on-demand) διαμόρφωσης των λειτουργιών του δικτύου.

Πολλές από τις συσκευές που χρησιμοποιούμε στην καθημερινότητά μας, έχουν τη δυνατότητα να «αισθάνονται» κάποιες πληροφορίες. Αυτές τι πληροφορίες τις μεταβιβάζουν σε έναν απομακρυσμένο διακομιστή (server), κυρίως μέσω του διαδικτύου. Ο διακομιστής μπορεί επίσης να δώσει εξ αποστάσεως εντολές για τον έλεγχο της συσκευής. Τέτοιες συσκευές μπορεί να είναι πλυντήρια ρούχων, έξυπνα ρολόγια, οθόνες υγείας κ.λπ. Στη συνέχεια, οι πληροφορίες που συλλέγονται στο διακομιστή υποβάλλονται σε επεξεργασία για να αποκτήσουν «γνώσεις» σχετικά με την υποκείμενη διαδικασία. Αυτή η γνώση χρησιμοποιείται για την κατασκευή πιο έξυπνων συστημάτων όπως έξυπνα σπίτια, έξυπνες πόλεις, ευφυή συστήματα μεταφορών, συστήματα υγειονομικής περίθαλψης κ.λπ. Με εφαρμογές σε πολλές διαφορετικές περιοχές, η έλευση του IoT θα επιτρέψει τη σύνδεση πολλών συσκευών στο Διαδίκτυο. Αυτό προβλέπεται ότι θα αυξήσει σε πολύ μεγάλο βαθμό τον αριθμό διασυνδεδεμένων συσκευών στο διαδίκτυο. Λόγω του τεράστιου αριθμού συσκευών IoT που αναμένεται να συνδεθούν και του πλήθους των εφαρμογών στις οποίες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν, οι συσκευές IoT παίζουν σημαντικό ρόλο στο

σχεδιασμό συστημάτων 5G και τα διάφορα μέρη του δικτύου 5G σχεδιάζονται λαμβάνοντας υπόψιν τις απαιτήσεις του ΙοΤ.



Σχήμα 3.13. Συνολική αναπαράσταση του ΙοΤ και των δυνατοτήτων που προσφέρει [39].

Όσον αφορά τη βιομηχανία, το Industry ΙοΤ (ΙΙοΤ) εξακολουθεί να εξελίσσεται και αντιμετωπίζει πολλές προκλήσεις, συμπεριλαμβανομένων των νέων απαιτήσεων για προϊόντα και λύσεις, καθώς και μετασχηματισμό των επιχειρηματικών μοντέλων. Ωστόσο σε ορισμένα κρίσιμα βιομηχανικά συστήματα, όπως η κυκλοφορία, το ΙΙοΤ εξακολουθεί να αντιμετωπίζει πολλές τεχνικές προκλήσεις, όπως η αξιοπιστία, η δύναμη της σύνδεσης κ.λπ.

4 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΠΟΡΩΝ ΣΕ 5G ΔΙΚΤΥΑ

Ένα ασύρματο - οπτικό δίκτυο 5G (5G-RON) περιλαμβάνει μια κεντρική αρχιτεκτονική δικτύου ασύρματης πρόσβασης (C-RAN) αποτελούμενη από ένα δίκτυο ασύρματης πρόσβασης 5G (5G RAN) και ένα δίκτυο οπτικών ινών [40]. Όπως περιγράφεται στο [41], προκειμένου να σχεδιαστεί και να λειτουργήσει αποτελεσματικά ένα δίκτυο 5G-RON, απαιτούνται αλγόριθμοι βελτιστοποίησης μεταξύ διαφορετικών επιπέδων που λαμβάνουν υπόψη τόσο τις ιδιότητες του σήματος στον τομέα RAN, όσο και τις νέες αρχιτεκτονικές των οπτικών δικτύων fronthaul.

Ένα από τα πιο σημαντικά προβλήματα που καλείται να λύσει το 5G, είναι η σωστή και αποδοτική κατανομή πόρων (Resource Allocation). Αυτή η ενότητα εξετάζει τις σύγχρονες προσεγγίσεις για την κατανομή πόρων, περιγράφοντας τους ανεπτυγμένους αλγόριθμους σχεδιασμού και τις αρχιτεκτονικές που έχουν μέχρι στιγμής χρησιμοποιηθεί για τη βέλτιστη κατανομή των πόρων σε υποδομές 5G.

Η κατανομή πόρων σε συστήματα 5G διακρίνεται σε τρεις τομείς:

- τον τομέα της ασύρματης πρόσβασης (Radio Access Resources),
- τον τομέα της οπτικής δικτύωσης (Optical Network Resources) που παρέχει τις διαδρομές με οπτικές ίνες,
- και στον τομέα του Mobile Edge Computing (Computing Resources) που παρέχει υπολογιστικούς πόρους.

4.1 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΠΟΡΩΝ (RADIO RESOURCE MANAGEMENT)

Η διαχείριση των πόρων στα υπερσύγχρονα ασύρματα δίκτυα (RANs) περιλαμβάνει ένα λαβύρινθο αλληλοσυνδεόμενων αλγορίθμων, ο καθένας προσαρμοσμένος και βελτιστοποιημένος για μια συγκεκριμένη εργασία. Με την τεχνολογία RAN να εξελίσσεται συνεχώς, η προσθήκη νέων λειτουργιών του

συστήματος γίνεται συνήθως με το σχεδιασμό νέων αλγορίθμων ή με τον επανασχεδιασμό ήδη υπαρχόντων.

Οι υπηρεσίες που απαιτούν υψηλή ταχύτητα δεδομένων, όπως η ενισχυμένη κινητή ευρυζωνικότητα (enhanced Mobile Broadband - eMBB), απαιτούν πολυδιάστατη σύνδεση μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης (RAT) που λειτουργούν σε ένα ευρύ φάσμα ζωνών συχνοτήτων (κύματα χιλιοστών). Οι άκρες αξιόπιστες επικοινωνίες χαμηλής καθυστέρησης (URLLC), όπως και οι επικοινωνίες μεταξύ συσκευών (mMTC), στοχεύουν σε ένα ευρύ φάσμα υπηρεσιών που σχετίζονται με το Internet-of-Things (IoT). Για παράδειγμα η επικοινωνία μεταξύ αυτοκινήτων (π.χ. για την υποστήριξη αυτόνομων αυτοκινήτων), θα δημιουργήσει σοβαρές απαιτήσεις για τις λειτουργίες κατανομής πόρων σε ασύρματα δίκτυα, όσον αφορά την καθυστέρηση και την αξιοπιστία.

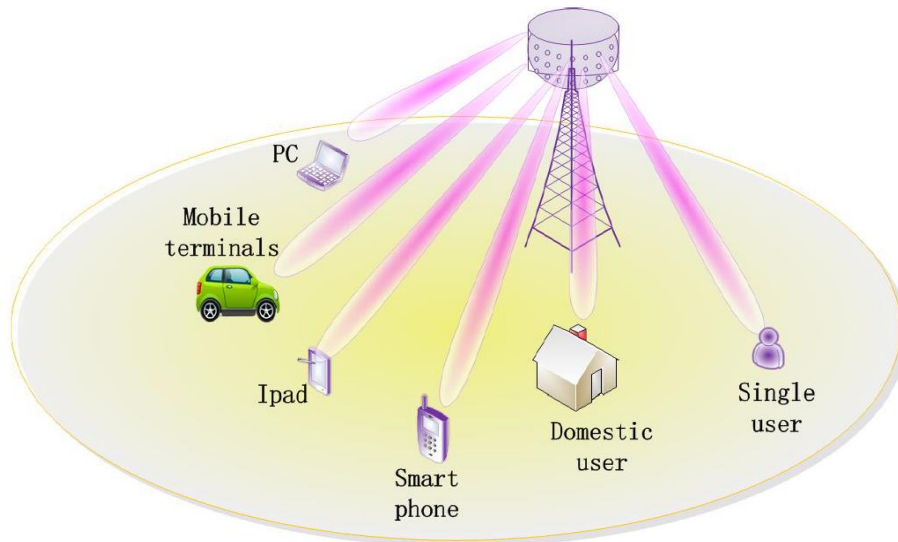
Για να ανταποκριθεί σε ένα τέτοιο ευρύ φάσμα απαιτήσεων, το 5G θα ενσωματώσει μια ποικιλία νέων στοιχείων τεχνολογίας, π.χ. massive MIMO, κύματα χιλιοστού, τεμαχισμός δικτύου κ.λπ., σε ένα όλο και πιο πολύπλοκο RAN. Έτσι, η βελτιστοποίηση της κατανομής πόρων σε ασύρματα δίκτυα, για την πλήρη κάλυψη των συστημάτων 5G θα έρθει με μία άνευ προηγουμένου υπολογιστική πολυπλοκότητα και αυστηρούς περιορισμούς χρόνου εκτέλεσης.

Η πρώτη φάση κατανομής λοιπόν, επικεντρώνεται στους πόρους «πάνω στον αέρα», οι οποίοι εκχωρούνται απευθείας στους χρήστες κινητής τηλεφωνίας 5G. Οι βασικές οντότητες για ασύρματη πρόσβαση είναι τα RRHs, τα οποία τοποθετούνται στην άκρη του δικτύου, σε περιοχές κοντά στο χρήστη και παρέχουν υποδοχές ασύρματης επικοινωνίας στον εξοπλισμό του χρήστη (UE).

4.1.1 Κατανομή ασύρματων πόρων με βάση την τεχνολογία Massive MIMO

Στα συστήματα κινητής τηλεφωνίας 5G, η διαχείριση των ασύρματων πόρων (RRM) αναμένεται να φτάσει σε νέα επίπεδα πολυπλοκότητας. Για το λόγο αυτό, υπάρχει ανάγκη για νέες τεχνικές και αλγόριθμους για τη βέλτιστη κατανομή των ασύρματων πόρων.

Μια επερχόμενη τεχνολογία για τα ασύρματα δίκτυα είναι η τεχνολογία massive MIMO, η οποία προσφέρει εξαιρετική φασματική απόδοση και δυνατότητες μετάδοσης. Ένα δίκτυο massive MIMO ανταποκρίνεται επίσης περισσότερο στις συσκευές που εκπέμπουν σε ζώνες υψηλότερης συχνότητας, γεγονός που θα βελτιώσει την κάλυψη.



Σχήμα 4.1. Μοντέλο συστήματος των συστημάτων massive MIMO [42].

Στο άρθρο [42] διερευνήθηκε η ενεργειακά αποδοτική κατανομή ισχύος για συστήματα Massive MIMO. Οι συγγραφείς διατύπωσαν ένα πρόβλημα μη κυρτής (non-convex) βελτιστοποίησης για τη μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης, λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις της ποιότητας υπηρεσιών (QoS). Στη συνέχεια μετέτρεψαν το συγκεκριμένο πρόβλημα, σε ένα πρόβλημα κυρτής βελτιστοποίησης χρησιμοποιώντας τη μέθοδο διπλής λειτουργίας Lagrangian, αξιοποιώντας τις ιδιότητες του κλασματικού προγραμματισμού (fractional programming) και του κατώτερου ορίου του ρυθμού δεδομένων του χρήστη. Ωστόσο όπως προέκυψε, λόγω της συσσώρευσης πολλαπλών μεταβλητών που προκαλείται από την παρεμβολή μεταξύ χρηστών, είναι απίθανο να βρεθεί μια λύση στο παραπάνω πρόβλημα βελτιστοποίησης. Για αυτό το λόγο λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς του ρυθμού μετάδοσης των δεδομένων του χρήστη, πρότειναν έναν αλγόριθμο κανονικής παρεμβολής SIF (Standard Interference Function) χαμηλής πολυπλοκότητας, βασισμένο σε άπειρες επαναλήψεις. Η απόδοση της αποδοτικότητας του αλγορίθμου αξιολογήθηκε μέσω προσομοίωσης. Θεωρήθηκε μία απλή κυψέλη με ακτίνα 500m και τους χρήστες τοποθετημένους ομοιόμορφα. Μέσω των αποτελεσμάτων προσομοίωσης αποδεικνύεται ότι ο αλγόριθμος θα εξασφάλιζε αποτελεσματικότητα υπολογισμών ακόμη και για μεγάλο αριθμό χρηστών. Ένα ακόμη σημαντικό που προκύπτει είναι ότι ο επαναληπτικός αλγόριθμος μπορεί πάντα να συγκλίνει στη μέγιστη ενεργειακή αποδοτικότητα που επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας τον εξαντλητικό αλγόριθμο αναζήτησης.

Ομοίως, στο άρθρο [43] οι συγγραφείς προτείνουν ένα ενεργειακά αποδοτικό σχήμα κατανομής πόρων, αυτή τη φορά για ένα σύστημα αναμετάδοσης MIMO πολλαπλών ζευγών ενίσχυσης και προώθησης. Στο παρών σύστημα ένας

αποκλειστικός αναμεταδότης βοηθά στην ανταλλαγή πληροφοριών ανά ζεύγη μεταξύ πολλών συσκευών εξοπλισμού χρήστη με μία κεραία. Η ενεργειακή απόδοση του συστήματος (EE) θεωρητικά αναλύεται με την εφαρμογή της ανάλυσης μεγάλου συστήματος και της θεωρίας τυχαίων πινάκων (random matrix theory). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να παρέχεται εξαιρετική προσέγγιση για το σύστημα με μέτριο αριθμό κεραιών, ενώ παράλληλα επιτρέπει την ανάπτυξη πολλών αποτελεσματικών αλγορίθμων. Σε αντίθεση με τα συμβατικά σχήματα κατανομής πόρων, οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι αποφεύγουν πολύπλοκους υπολογισμούς πινάκων και τις στιγμιαίες πληροφορίες κατάστασης καναλιού (Channel State Information - CSI).

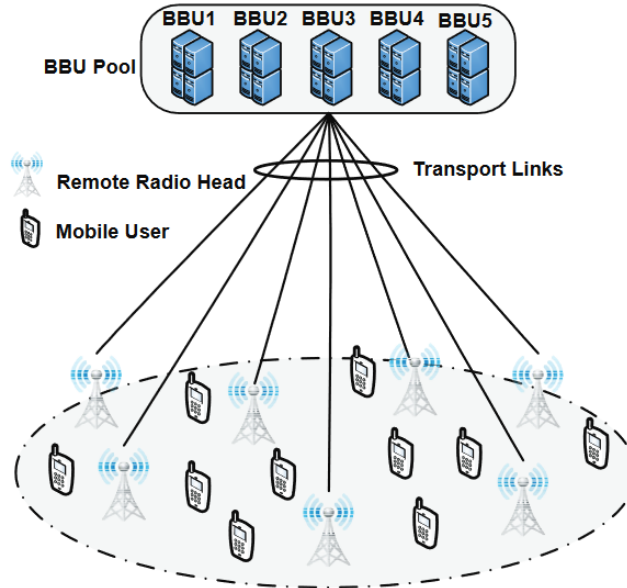
Όσον αφορά το σχήμα που χρησιμοποιήθηκε, δεδομένης μίας σταθερής επιλογής ζεύγους εξοπλισμού χρήστη (UE) και ενός αριθμού κεραιών αναμετάδοσης, προτείνονται η βέλτιστη κατανομή ισχύος μετάδοσης και η ίση κατανομή ισχύος μετάδοσης, οι οποίες χρησιμοποιούνται στο τελικό βήμα και στα επαναληπτικά βήματα του πρακτικού πλαισίου βελτιστοποίησης. Στη συνέχεια, δεδομένης της επιλογής ζευγαριών εξοπλισμού χρήστη (UE) και της κατανομής ισχύος, μελετάται ο βέλτιστος αριθμός κεραιών αναμετάδοσης. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο “Linear Scale Factor (LSF) Based Optimal Relay Power Allocation”, ο οποίος χρησιμοποιεί τη μέθοδο Dinkelbach.

Τέλος, προτείνεται μια επιλογή ζεύγους μεγίστων και ελαχίστων εξοπλισμών χρήστη (UE) βασισμένη σε Linear Scale Factor (LSF), μαζί με τη βελτιστοποίηση του αριθμού των κεραιών αναμετάδοσης και της μετάδοσης ισχύος για την επίτευξη της βελτιστοποιημένης ενεργειακής απόδοσης του συστήματος. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο “LSF-Based max-min User Selection Algorithm”.

4.1.2 Στρατηγική προγραμματισμού ύπνου των RRHs (RRH sleep scheduling strategy)

Στο C-RAN, όλα τα RRHs πρέπει να συνδεθούν με την BBU pool, μέσω των διασυνδέσεων του fronthaul. Αυτό πρόκειται να οδηγήσει σε σημαντική κατανάλωση ενέργειας, η οποία απαιτεί περαιτέρω έρευνα στην βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης (EE). Μία τεχνική που αναπτύχθηκε για το λόγο αυτό και αναγνωρίζεται και ως πολύ αποτελεσματική όπως αναφέρεται στο [44], είναι η στρατηγική προγραμματισμού ύπνου των RRHs (RRH sleep scheduling strategy). Η βασική ιδέα αυτής της στρατηγικής είναι να απενεργοποιήσει τα περιττά εξαρτήματα των σταθμών βάσης λαμβάνοντας υπόψη την κατανομή της κυκλοφορίας. Ως εκ τούτου, χρειάζονται νέες καινοτόμες στρατηγικές ελέγχου ύπνου για να επιτρέψουν στα RRHs και στις αντίστοιχες διασυνδέσεις μεταφοράς να παραμένουν σε κατάσταση αναστολής

λειτουργίας, γεγονός που θα βελτιώσει σημαντικά την ενεργειακή αποδοτικότητα των δικτύων.



Σχήμα 4.2. Αρχιτεκτονική ενός δικτύου Cloud-RAN, στην οποία όλα τα RRH συνδέονται μέσω διασυνδέσεων μεταφοράς σε μια ομάδα BBU [45].

Το έργο που παρουσιάζεται στο άρθρο [46], εισάγει την ιδέα της ελαχιστοποίησης της κατανάλωσης ενέργειας των C-RAN, αξιοποιώντας τις στρατηγικές προγραμματισμού ύπνου των RRHs και της ενοποίησης των εικονικών μηχανών (VM). Προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η κατανάλωση ενέργειας στο C-RAN, μοντελοποιείται το πρόβλημα ως ένα πρόβλημα κοινής διάθεσης πόρων (joint resource provisioning - JRP) των RRHs και των υπολογιστικών μονάδων (CUs). Για την επίλυση αυτού του προβλήματος οι συγγραφείς πρότειναν έναν αλγόριθμο, ο οποίος σύμφωνα με την κατανομή του εξοπλισμού χρήστη (UE) και το φορτίο κίνησης στο δίκτυο, είναι σε θέση να βελτιστοποιήσει την επιλογή των ενεργών RRHs και να ενοποιήσει τα VMs σε υπολογιστικές μονάδες (CUs). Το πρώτο μέρος του αλγορίθμου ονομάζεται Dynamic Resource Provisioning (DRP). Σύμφωνα με αυτό, οι UEs συνδέονται με τα ενεργά RRHs, ακολουθώντας τον αλγόριθμο Max-SINR (Signal to Interference and Noise Ratio). Στη συνέχεια επιλέγεται το RRH με το χαμηλότερο φορτίο κυκλοφορίας και εάν ένα UE δεν μπορεί να μετακινηθεί σε άλλα ενεργά RRHs, αυτό το RRH παραμένει ενεργό. Το δεύτερο μέρος είναι ο αλγόριθμος επιλογής των εικονικών μηχανών (VMs) ο “BFD (Best-Fit-Decreasing)”, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την επιλογή του βέλτιστου VM. Προφανώς, αυτό το μέρος ανήκει στη διαδικασία κατανομής πόρων computing που θα εξεταστεί εκτενέστερα σε επόμενο κεφάλαιο.

Για την αξιολόγηση της απόδοσης του προτεινόμενου σχήματος, θεωρείται ένα δίκτυο με πυκνά αναπτυγμένα RRH. Η απόσταση μεταξύ των δύο RRHs είναι 100μ. Τα RRHs και οι υπολογιστικές μονάδες (CU's) είναι ομοιογενείς. Οι UE's είναι μη ομοιόμορφα κατανομημένοι στο δίκτυο και κάθε UE απαιτεί τυχαίο ρυθμό δεδομένων. Ο αλγόριθμος DRP συγκρίνεται με τους ήδη υπάρχοντες αλγόριθμους Exhaustive Search (ES), Two-Stage Optimization (TSO) και No RAU Sleeping (NRS). Από τις προσομοιώσεις προκύπτει ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος μπορεί να μειώσει σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας των C-RANs μεταβάλλοντας δυναμικά τις καταστάσεις λειτουργίας των RRHs και ενοποιώντας τα VMs στην ομάδα BBU. Επίσης η απενεργοποίηση μέρους των RRHs μπορεί να εξοικονομήσει ενέργεια. Ωστόσο δε μπορεί να επιτύχει την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας του δικτύου. Τέλος η προτεινόμενη στρατηγική για την ενοποίηση των VMs αποδεικνύεται πως μπορεί να συμβάλει στη μείωση της ενέργειας.

Επιπλέον, οι συγγραφείς στο άρθρο [47] επικεντρώνονται στη βελτιστοποίηση της ενεργειακής αποδοτικότητας του δικτύου, μέσω της δυναμικής ενεργοποίησης των RRHs και του sparse beamforming, προκειμένου να αποκομιστούν πλήρως όλα τα οφέλη που προσφέρει το Green C-RAN. Για να επιτευχθεί αυτό, διατυπώνεται ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης της ενεργειακής αποδοτικότητας με προσαρμοστική ενεργοποίηση των RRHs. Προκειμένου να διευκολυνθεί ο σχεδιασμός αλγορίθμων και η βέλτιστη ανάλυση δομής διαμόρφωσης δέσμης (beamforming), ενσωματώθηκαν οι αλγόριθμοι σταθμισμένου ελάχιστου μέσου τετραγωνικού σφάλματος (MMSE) και της θεωρίας group sparsity. Στη συνέχεια προτείνεται ένας νέος ενεργειακά αποδοτικός αλγόριθμος βασισμένος στις θεωρίες “group sparsity” και “block-coordinate descent”. Επιπλέον χρησιμοποιείται άλλος ένας αλγόριθμος (Active Settlement Determination Set - ARSD), όπου σύμφωνα με αυτόν, η ενεργή λειτουργία προτεραιότητας κάθε RRH ορίζεται για να ληφθούν τα βέλτιστα ενεργά RRHs. Για την προσομοίωση των αλγορίθμων χρησιμοποιήθηκε ένα δίκτυο με χρήστες RRHs δύο κεραιών και χρήστες μίας κεραίας, ομοιόμορφα και ανεξάρτητα κατανομημένα στην τετραγωνική περιοχή $[-500 \ 500] \times [500 \ 500]$ μέτρα. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης καταδεικνύουν το δυναμικό υψηλής ενεργειακής απόδοσης αυτού του σχήματος.

Τα RRHs πρόκειται να αντιμετωπίσουν την πρόκληση του συνεχώς αυξανόμενου φορτίου κίνησης. Οι τιμές του φορτίου κίνησης κυμαίνονται διαφορετικά με την πάροδο του χρόνου και τις διαφορετικές τοποθεσίες δημιουργώντας έτσι ένα παλιρροιακό φαινόμενο. Τα RRHs σε διαφορετικούς περιοχές θα αντιμετωπίσουν διαφορετικές διακυμάνσεις της ζήτησης της κίνησης κατά τη διάρκεια της ημέρας. Για παράδειγμα, τα RRHs που βρίσκονται σε περιοχές γραφείων και επιχειρήσεων, θα βιώσουν την υψηλότερη ζήτηση κίνησης κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ το βράδυ θα παραμείνουν ανεπαρκή. Αντίθετα, τα RRHs που βρίσκονται σε κατοικημένες περιοχές δεν αξιοποιούνται σε τόσο μεγάλο βαθμό κατά τη διάρκεια της ημέρας. Τέτοιες χωρο-χρονικές διακυμάνσεις έχουν ως αποτέλεσμα πλεόνασμα μεγάλης

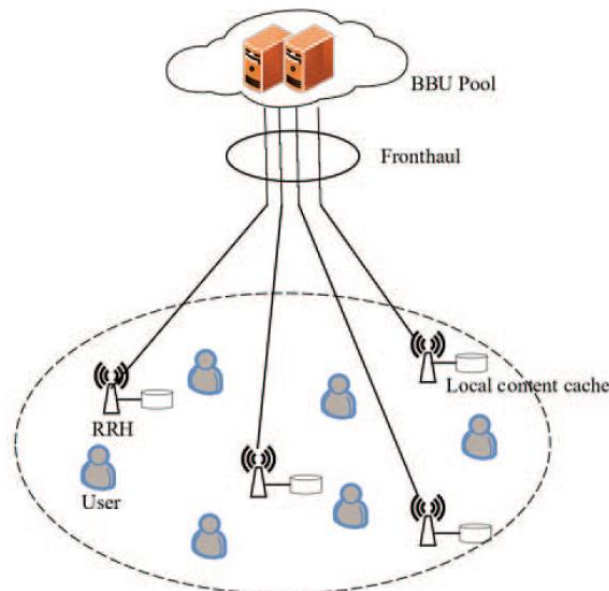
χωρητικότητας όταν το σύστημα είναι αδρανές. Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι η αναγνώριση αυτής της κατάστασης δίνει τη δυνατότητα για εξοικονόμηση ενέργειας μέσω της προσαρμογής του δικτύου στην πραγματική ζήτηση κίνησης.

Στο άρθρο [48], οι συγγραφείς σχεδίασαν ένα νέο ενεργειακά αποδοτικό σχήμα ανάπτυξης των RRHs. Το προτεινόμενο σχήμα επιλέγει δυναμικά ένα υποσύνολο RRHs ανάλογα με τη ζήτηση κυκλοφορίας και τις δυνατότητες των RRHs. Πιο συγκεκριμένα προτείνεται μια δομή C-RAN, στην οποία το σύστημα μπορεί να επιλέξει δυναμικά ένα υποσύνολο RRHs ανάλογα με τις διαφορετικές δυνατότητες τους και τη μεταβαλλόμενη ζήτηση κυκλοφορίας, για επίτευξη της ελαχιστοποίησης της ενέργειας για την ανάπτυξη των RRHs. Στη συνέχεια σχεδιάστηκε ένα νέο ενεργειακά αποδοτικό σύστημα ανάπτυξης δικτύου, για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας του δικτύου. Το πρόβλημα ανάπτυξης δικτύου διασπάστηκε σε δύο υποβέλτιστα προβλήματα: 1) συσχέτιση κόμβου ζήτησης RRH-κυκλοφορίας, το οποίο διαμορφώνεται ως ένα πολυδιάστατο πρόβλημα knapsack (MMKP) και επιλύεται από πολλαπλασιαστές Lagrange, 2) καθορισμός ενεργού συνόλου RRH μέσω της στρατηγικής ύπνου. Προκειμένου να αξιολογηθεί το προτεινόμενο σύστημα, συγκρίνεται με τον ήδη υπάρχοντα αλγόριθμο (Genetic Algorithm - GA). Τα αριθμητικά αποτελέσματα, που προκύπτουν από την προσομοίωση, δείχνουν ότι το προτεινόμενο σχήμα υπερτερεί του σχήματος GA όσον αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας.

Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η απενεργοποίηση των RRHs εκτός από όλα τα θετικά τα οποία προσφέρει εγκυμονεί και κάποιες προκλήσεις. Για παράδειγμα με την απενεργοποίηση ενός μέρους των RRHs θα αυξηθεί αναπόφευκτα η συνολική ισχύς μετάδοσης για την κάλυψη της ίδιας ζήτησης κυκλοφορίας. Για αυτό το λόγο κρίνεται απαραίτητη η αντιστάθμιση μεταξύ της ισχύος μετάδοσης και της κατανάλωσης ισχύος του συστήματος μετάδοσης. Στην εργασία [49] διατυπώθηκε το πρόβλημα επιλογής RRH ως αντιστάθμιση μεταξύ της ελαχιστοποίησης της κατανάλωσης ισχύος και της ισχύος μετάδοσης, ικανοποιώντας ταυτόχρονα μια σειρά από περιορισμούς δικτύου (υπολογισμός της ισχύος μετάδοσης, περιορισμούς φάσματος και απαιτήσεις κυκλοφορίας). Για την αντιμετώπιση του διατυπωμένου προβλήματος ένας αποτελεσματικός τοπικός αλγόριθμος αναζήτησης. Στη συνέχεια ο αλγόριθμος προσομοιώνεται προκειμένου να αξιολογηθεί η απόδοσή του. Αυτό που προκύπτει είναι ότι ο αλγόριθμος όντως ελαχιστοποιεί την κατανάλωση ενέργειας. Τέλος καθώς αυξάνονται τα RRHs, παρουσιάζεται μια μικρή αύξηση και στη συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια.

4.1.3 Ανάπτυξη κρυφής μνήμης (cache) στα RRHs

Μεταξύ άλλων σχετικών προσεγγίσεων, η εργασία στο [50] διερευνά την κατανομή πόρων βάσει της κρυφής μνήμης περιεχομένου (content cache) στο C-RAN και προτείνει την ιδέα της ανάπτυξης της κρυφής μνήμης (cache) σε RRHs. Σύμφωνα λοιπόν με αυτή την ιδέα εκχωρούνται διαφορετικά RRHs σε διαφορετικούς χρήστες κινητών. Κάθε χρήστης κινητής τηλεφωνίας εξυπηρετείται από ένα RRH και κάθε RRH χρησιμοποιεί μέρος της μνήμης cache. Οι χρήστες μπορούν να επιλέξουν δυναμικά το καλύτερο RRH για επικοινωνία με τη λειτουργία προτεραιότητας. Το περιεχόμενο της μνήμης cache στα RRHs, μπορεί να αλλάξει δυναμικά μέσω μίας λειτουργίας δημοτικότητας. Ένας βαθμός δημοτικότητας είναι ανάλογος με τη συχνότητα επικοινωνίας μεταξύ των χρηστών και των RRHs.



Σχήμα 4.3. Αρχιτεκτονική ενός δικτύου C-RAN με ανάπτυξη κρυφής μνήμης στα RRHs [50].

Το προτεινόμενο σχήμα λοιπόν, στοχεύει στο να βρει έναν αποτελεσματικό τρόπο επιλογής ποιο RRH θα επικοινωνήσει με το χρήστη. Εφόσον στο RRH έχει αναπτυχθεί προσωρινή μνήμη, ο πρώτος παράγοντας επιλογής είναι αν αυτό περιέχει cache του χρήστη. Έτσι, μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτός ο βαθμός δημοτικότητας για να αποφασιστεί σε ποιο RRH θα πρέπει να αναπτυχθεί μνήμη cache. Για παράδειγμα αν ο χρήστης επικοινωνεί με αυτό το RRH πιο συχνά, η τιμή αυτού του βαθμού δημοτικότητας είναι υψηλότερη και έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να αναπτυχθεί μνήμη cache του χρήστη σε αυτό.

Ο πρώτος αλγόριθμος “Caching scheme” που αναπτύχθηκε περιγράφει ότι οι χρήστες κινητών συσκευών πιθανώς να αλλάξουν τα RRHs από τα οποία

εξυπηρετούνται καθώς αναπτύσσεται το προτεινόμενο σχήμα. Ο αλγόριθμος, χρησιμοποιεί ένα πρόγραμμα προσωρινής αποθήκευσης, το οποίο στοχεύει να βρει έναν αποτελεσματικό τρόπο για να επιλέξει ποιο RRH να επικοινωνήσει με τον χρήστη και στη συνέχεια να μεταφέρει την κρυφή μνήμη περιεχομένου στα RRHs, λαμβάνοντας υπόψιν διαφορετικά σχήματα caching και χρησιμοποιώντας διαφορετικούς αριθμούς χρηστών. Τέλος για να ελαττωθεί η πίεση που ασκεί η κίνηση του fronthaul και να μεγιστοποιηθεί η διακίνηση του δικτύου (throughput), ένας επαναληπτικός αλγόριθμος κατανομής πόρων (Iterative Resource Allocation Algorithm) που βασίζεται στο προτεινόμενο σχήμα caching εφαρμόζεται και τελικά προσομοιώνεται παρέχοντας ελπιδοφόρα αποτελέσματα. Ο αλγόριθμος αυτός αντιμετωπίζει επίσης αποτελεσματικά το πρόβλημα κατανομής ισχύος.

4.1.4 Μηχανική Μάθηση (Machine Learning)

Η έλευση του 5G, ωστόσο, δεν αποτελεί απλώς μια ευκαιρία ανάπτυξης τεχνολογίας αιχμής, αλλά και μια ευκαιρία για απομάκρυνση από τον παραδοσιακό σχεδιασμό RRM. Μία τέτοια πρόταση αποτελεί η μηχανική μάθηση (Machine Learning - ML). Τα τελευταία χρόνια, η μηχανική μάθηση σημείωσε εξαιρετική ανάπτυξη χάρη σε νέες τεχνικές, πιο ισχυρά εργαλεία και υποδομές υπολογιστικών πόρων, ικανές να χειριστούν μεγαλύτερες ποσότητες δεδομένων σε μικρότερο χρονικό διάστημα. Τα χαρακτηριστικά υψηλού παραλληλισμού ορισμένων τεχνικών ML τα καθιστούν ιδιαίτερα κατάλληλα για την αντιμετώπιση της υψηλότερης πολυπλοκότητας των λειτουργιών 5G RRM, ενώ επιτρέπει επίσης την ταχύτερη εκτέλεση που απαιτείται στο 5G. Μεταξύ αυτών των τεχνικών, η ενισχυμένη μάθηση (Reinforcement Learning - RL) έχει αναδειχθεί ως ιδιαίτερα κατάλληλο για την επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων ελέγχου, όπως το RRM στο RAN. Τα ασύρματα δίκτυα είναι κρίσιμα συστήματα που πρέπει πάντα να βρίσκονται σε λειτουργία. Η μάθηση με αποτελεσματικό τρόπο είναι, επομένως, ζωτικής σημασίας για την ελαχιστοποίηση του αντίκτυπου της εξερεύνησης, διατηρώντας παράλληλα όλα τα πλεονεκτήματα μιας «αυτομάθησης» πολιτικής ελέγχου. Παρακάτω παρατίθενται τέσσερις προσεγγίσεις για να καταστεί η μάθηση σε δίκτυα 5G όσο πιο αποτελεσματική γίνεται [51].

Μεταφορά μάθησης: Η μεταφορά μάθησης είναι μια από τις πιο αποτελεσματικές τεχνικές για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας της μάθησης, καθώς επιτρέπει τη "συγκέντρωση" των δεδομένων από ολόκληρο το δίκτυο. Οι «εμπειρίες» που αποκτώνται και συγκεντρώνονται σε ένα μέρος του δικτύου μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν σε οποιοδήποτε άλλο μέρος του δικτύου και αντίστροφα.

Συλλογή δεδομένων υψηλής ποιότητας: Το e-greedy είναι ένας μη κατευθυνόμενος τύπος εξερεύνησης. Παρά την απλότητά του είναι αρκετά αποτελεσματικό. Υπάρχουν ωστόσο πιο προηγμένα σχήματα εξερεύνησης ικανά να κατευθύνουν την εξερεύνηση σε πιο ενημερωτικά σημεία του χώρου, βελτιώνοντας έτσι την ποιότητα των συλλεγόμενων δεδομένων.

Αναπαράσταση Compact state: Η τρίτη στρατηγική για τη διευκόλυνση της μαθησιακής εργασίας είναι η μείωση του αριθμού των χαρακτηριστικών που χαρακτηρίζουν μία περιοχή προκειμένου να μειωθεί η διάσταση του μαθησιακού χώρου. Αυτό απαιτεί την αναγνώριση των πιο ενημερωτικών χαρακτηριστικών για την περιγραφή της κατάστασης του πράκτορα σε σχέση με το πρόβλημα κατανομής πόρων.

Αποτελεσματική χρήση δεδομένων: Απαιτείται ένας αποτελεσματικός αλγόριθμος προκειμένου εξάγει όσο το δυνατόν περισσότερες γνώσεις από αυτόν τον τομέα.

Στο άρθρο [51], οι συγγραφείς προκειμένου να αντιμετωπίσουν την υψηλότερη πολυπλοκότητα των λειτουργιών κατανομής πόρων ασύρματης πρόσβασης (RRM), παρουσιάζουν μία αρχιτεκτονική δικτύου 5G RRM που αξιοποιεί τις πιο πρόσφατες εξελίξεις στον τομέα της μηχανικής μάθησης σε συνδυασμό με τη μεγάλη ποσότητα δεδομένων που είναι άμεσα διαθέσιμα στο δίκτυο από μετρήσεις και παρατηρήσεις συστήματος. Το αποτέλεσμα είναι ένα πλαίσιο μάθησης γενικού σκοπού ικανό να παράγει αλγόριθμους εξειδικευμένους σε λειτουργίες RRM απευθείας από δεδομένα που συλλέγονται στο δίκτυο. Η βάση του προτεινόμενου μαθησιακού πλαισίου είναι ένας αλγόριθμος γενικού σκοπού για την παραγωγή πολιτικών ελέγχου εξειδικευμένων σε μεμονωμένες λειτουργίες κατανομής πόρων. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος αξιοποιεί τρία βασικά συστατικά: Neural-Fitted Q-Iteration (NFQ), σύνολο και μεταφορά μάθησης. Η συγκεκριμένη προσέγγιση επαληθεύεται σε τρεις περιπτώσεις μελέτης και συζητούνται μελλοντικές οδηγίες σχετικά με τις εφαρμογές της μηχανικής μάθησης στο RRM.

4.1.5 Κατανομή πόρων βασισμένη σε γεωμετρία fractal

Όπως είναι ήδη γνωστό τα νέα δίκτυα 5G ανήκουν στην κατηγορία των ετερογενών δικτύων (HetNet). Τα ετερογενή δίκτυα προϋποθέτουν την ύπαρξη πολλών μικρών κυψελών, οι οποίες λειτουργούν εντός της κάλυψης των μακροκυψελών χρησιμοποιώντας διαχωρισμένο φάσμα [52]. Ωστόσο η αρχιτεκτονική ενός τέτοιου δικτύου προσθέτει νέα επίπεδα πολυπλοκότητας στην κατανομή των πόρων ασύρματης πρόσβασης. Μία προσέγγιση προκειμένου να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα είναι η κατανομή πόρων με χρήση της γεωμετρίας fractal. Ένα fractal είναι ένα μαθηματικό σύνολο που εμφανίζει ένα αυτο-παρόμοιο μοτίβο που επαναλαμβάνεται σε κάθε κλίμακα [53].

Στο άρθρο [54], προτείνεται μία μέθοδος για κατανομή πόρων σε πολυεπίπεδα ετερογενή δίκτυα με βάση τη γεωμετρία fractal. Στα πλαίσια αυτής της δουλειάς αναπτύσσεται μια fractal τοπολογία ετερογενών δικτύων πολλαπλών επιπέδων για τη μεγιστοποίηση της χωρητικότητας και την ελαχιστοποίηση των παρεμβολών, για διάφορους συνδυασμούς παραμέτρων δικτύου, όπως η πυκνότητα χρήστη, η κινητικότητα και οι απαιτήσεις απόδοσης. Επιπλέον μέσω ενός μοτίβου fractal αναπτύσσεται μία μέθοδος επαναχρησιμοποίησης συχνότητας. Το μοτίβο fractal βασίζεται στο τρίγωνο Sierpinsky και έχει ως στόχο να προσδιορίσει τις θέσεις των μακροκυψελών και των μικρών κυψελών.

Η αύξηση του αριθμού των μικρών κυψελών επιτρέπει την επίτευξη σημαντικού κέρδους στην χωρητικότητα του δικτύου με βελτιωμένη επαναχρησιμοποίηση συχνότητας. Η επαναχρησιμοποίηση του φάσματος σε πολυεπίπεδα ετερογενή δίκτυα είναι ένα πολύπλοκο πρόβλημα, επειδή όλα τα επίπεδα πρέπει να αναλυθούν ταυτόχρονα. Στη συνέχεια προτείνεται ένας νέος αλγόριθμος για την παρακολούθηση του δικτύου και την ανακατανομή των πόρων σε πραγματικό χρόνο. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος βασίζεται σε ένα προτεινόμενο μοντέλο fractal που το καθιστά ανιχνεύσιμο ανεξάρτητα από την περιοχή κάλυψης στόχου. Επισημαίνεται ότι ο συγκεκριμένος αλγόριθμος είναι κατάλληλος για σχεδόν όλες τις πιθανές τοπολογίες HetNets.

Προκειμένου να εξεταστεί η αποδοτικότητα του αλγορίθμου, διενεργούνται προσομοιώσεις για διάφορες εφαρμογές, όπως για υπερφόρτωση και υποαξιοποίηση. Πιο αναλυτικά σε περίπτωση υπερφόρτωσης, η τοπολογία μπορεί να αναδιαταχθεί, με τη μείωση της ακτίνας της υπερφορτωμένης μικρής κυψέλης και την αύξηση της ακτίνας των μη χρησιμοποιημένων γειτονικών μικρών κυψελών. Σε περίπτωση υποαξιοποίησης, η μικρή κυψέλη μπορεί να μετακινηθεί σε γειτονικές μικρές κυψέλες ή ακόμη και σε μακροκυψέλες.

4.2 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΟΠΤΙΚΩΝ ΟΡΩΝ (OPTICAL NETWORK RESOURCES)

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται σημαντική αύξηση της συνολικής κίνησης στο διαδίκτυο. Αυτή η τάση οδηγεί σε εξάντληση τη διαθέσιμη χωρητικότητα των οπτικών δικτύων. Τα υπάρχοντα οπτικά δίκτυα που χρησιμοποιούν πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος (WDM), βασίζονται σε μοντροπικές ίνες (Single Mode Fibers - SMFs) ή αλλιώς ίνες μονής δέσμης, στις οποίες τα οπτικά σήματα μεταδίδονται παράλληλα μέσω καναλιών μη επικαλυπτόμενων και σταθερών αποστάσεων στον τομέα των συχνοτήτων.

Για να αξιοποιηθούν αποτελεσματικά οι πόροι του φάσματος στις μοντροπικές ίνες (SMFs), η έννοια της φασματικά ευέλικτης (ελαστικής) οπτικής δικτύωσης αναπτύχθηκε τα τελευταία χρόνια [55]. Τα βασικά χαρακτηριστικά των ελαστικών οπτικών δικτύων (EON) είναι η προσαρμοστική χρήση διαφόρων μορφών διαμόρφωσης, οι οποίες μπορεί να διαφέρουν μεταξύ τους ως προς τη φασματική απόδοση, την εμβέλεια μετάδοσης και την πολυπλεξία μήκους κύματος, ενώ μπορούν να υιοθετήσουν διάφορες τεχνικές μετάδοσης (OFDM, NWDM, TFP) [55]. Τα δίκτυα EON επιτρέπουν τη μετάδοση μέσω υπερκαναλιών (superchannel - SCh), όπου ένα SCh υψηλής χωρητικότητας που μεταδίδεται μέσω του δικτύου αποτελείται από έναν αριθμό οπτικών φερόντων (OCs). Οι ελαστικές οπτικές τεχνολογίες μπορούν να προσφέρουν τεράστιο εύρος ζώνης, καθώς και ευελιξία και επαναδιαμόρφωση. Αρχικά ένα δίκτυο EON κατανέμει πόρους φάσματος ικανοποιητικά σε ένα τμήμα δικτύου με συγκεκριμένη ζήτηση εύρους ζώνης. Για αυτό το λόγο μπορεί να κάνει καλύτερη χρήση των πόρων του φάσματος σε σύγκριση με το αντίστοιχο σταθερό δίκτυο, με αποτέλεσμα να έχει περισσότερο εύρος ζώνης διαθέσιμο στους χρήστες. Όπως χαρακτηριστικά αναφέρεται στο [56], ανάλογα με το ρυθμό bit και το σχήμα διαμόρφωσης, μπορεί να επιτευχθεί ένα κέρδος σε πραγματικό εύρος ζώνης μεταξύ 33% και 100% χρησιμοποιώντας ένα EON αντί ενός σταθερού δικτύου που λειτουργεί με το ίδιο φασματικό πλάτος. Δεύτερον, η φασματική απόδοση ενός EON μπορεί περαιτέρω να βελτιωθεί υιοθετώντας διαφορετικούς ρυθμούς δεδομένων για διαφορετικά φασματικά κανάλια και μεταβάλλοντας αντίστοιχες μορφές διαμόρφωσης και οπτικές αποστάσεις, προσφέροντας έτσι έναν καλύτερο βαθμό ποιότητας εύρους ζώνης σε τμήματα του δικτύου. Τέλος, οι μεταβλητές οπτικές συσκευές εύρους ζώνης που προτείνονται για δίκτυα EON έχουν τη δυνατότητα να προσαρμόσουν δυναμικά το εκχωρημένο φασματικό πλάτος, το ρυθμό δεδομένων ή το σχήμα διαμόρφωσης προκειμένου να κλιμακωθεί ή να εξαλειφθεί βάσει της διασποράς της κίνησης.

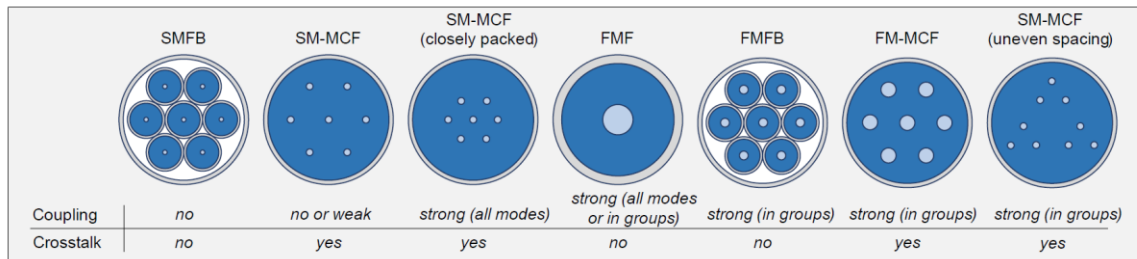
Στον τομέα των οπτικών ινών, έχει επίσης αναπτυχθεί μία τεχνολογία πολυπλεξίας που επιτρέπει την παράλληλη μετάδοση διαφόρων spatial modes σε κατάλληλα σχεδιασμένες οπτικές ίνες. Η πολυπλεξία αυτή ονομάζεται Space Division Multiplexing (SDM) και υπερβαίνει τις δυνατότητες των συστημάτων WDM και EON.

Στη συγκεκριμένη τεχνολογία ο διαχωρισμός των καναλιών επιτυγχάνεται με διαχωρίζομενες χωρικά διαδρομές του σήματος, όπως για παράδειγμα με διαχωριστούς ηλεκτρικούς αγωγούς ή οπτικούς κυματοδηγούς (ακόμη και ατμοσφαιρικών διαδρομών). Η ιδέα της αύξησης της χωρητικότητας των ινών μέσω πολυπλεξίας SDM, είναι σχεδόν τόσο παλιά όσο η ίδια η επικοινωνία με τις ίνες, με την κατασκευή ινών που περιέχουν πολλαπλούς πυρήνες. Η πρώτη και πιο προφανής προσέγγιση για το SDM, αναφέρεται ήδη από το 1979 [57]. Παρ' όλα αυτά μόλις πρόσφατα δόθηκε σοβαρή προσοχή στη δημιουργία μιας πλήρους πλατφόρμας δικτύωσης, όπως απαιτείται, για να αξιοποιηθεί αυτή η προσέγγιση πολλαπλών ινών (MCF). Η πολυπλεξία SDM αυξάνει τις δυνατότητες του δικτύου και δημιουργεί ειδικά συστήματα κατανομής πόρων. Επίσης υποστηρίζει νέες τεχνολογίες όπως η ευέλικτη κατανομή πόρων συχνοτήτων, η προσαρμοστική χρήση διαφόρων μορφών διαμόρφωσης (Modulation Formats - MFs) και η μετάδοση πολλαπλών φερόντων multi-carrier (super-channel, SCh) [58], [59], [60].

4.2.1 Οπτικές ίνες για δίκτυα SDM

Στα SDM δίκτυα τα οπτικά σήματα μεταδίδονται παράλληλα μέσω spatial modes που διαδίδονται σε κατάλληλα σχεδιασμένες οπτικές ίνες. Υπάρχουν διάφοροι τύποι οπτικών ινών [60], [61] που μπορούν να χρησιμοποιηθούν όπως οι εξής:

- **Single-Mode Multi-Core Fiber (SM-MCF or MCF):** Πρόκειται για ένα με επένδυση, η οποία περιλαμβάνει πολλούς πυρήνες μονής δέσμης. Κάθε πυρήνας μπορεί να μεταφέρει μόνο μία δέσμη.
- **Few-Mode Fiber (FMF):** Είναι ένα είδος ινών πολλαπλών δεσμών (multi-mode fiber - MMF), που επιτρέπει τη μετάδοση SDM μέσω ενός σχετικά χαμηλού αριθμού δεσμών. Χρησιμοποιούνται για μεγάλες αποστάσεις μετάδοσης σε σχέση με τις ίνες MMFs, διότι μετριάζουν τις βλάβες και την παρεμβολή των παράλληλα μεταδιδόμενων δεσμών.
- **Few-Mode Multi-Core Fiber (FM-MCF):** Συνδυάζει τη διάδοση διασταυρούμενων δεσμών σε πολλαπλούς πυρήνες. Οι ίνες FM-MCF υπερτερούν σε σχέση με τις δύο προηγούμενες κατηγορίες.
- **Fiber Bundle (FB):** Η απλούστερη μορφή SDM, επιτυγχάνεται με τη συσσώρευση πολλών ινών σε μια δέσμη ινών. Πρόκειται για μια τεχνολογία που διατίθεται στο εμπόριο και θα διευκολύνει τη μετάβαση από τα τρέχοντα αναπτυγμένα δίκτυα σε SDM.



Σχήμα 4.4. Τύποι και ιδιότητες των οπτικών ινών SDM [60].

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο πιο ελπιδοφόρος τύπος ινών για τη μετάδοση SDM είναι η ίνα (MCF). Πρόκειται για έναν τύπο οπτικής ίνας που συναντάται πολύ συχνά στη βιβλιογραφία.

4.2.2 Οπτικοί μεταγωγείς SDM

Προκειμένου η οπτική δικτύωση SDM να είναι έτοιμη για ανάπτυξη, απαιτεί εύελικτες και οικονομικά αποδοτικές λύσεις μεταγωγής [62]. Οι ακόλουθες προσεγγίσεις είναι υποψήφιες λύσεις για φασματική-χωρική μεταγωγή (spectral-spatial switching):

- **Ανεξάρτητη χωρική / φασματική μεταγωγή (Independent Spatial / Spectral Switching):** Το εύρος ζώνης των ινών SDM μπορεί να κάνει μεταγωγή ανεξάρτητα για κάθε συνδυασμό χωρικής λειτουργίας και φάσματος. Πρόκειται για την καλύτερη περίπτωση μεταγωγής, καθώς όλες οι φασματικές «φέτες» (δηλ. οι φασματικοί πόροι) και τα spatial modes μπορούν να κατευθύνονται ανεξάρτητα σε οποιαδήποτε θύρα εξόδου. Αρνητικό στην προκειμένη περίπτωση αποτελεί το κόστος υψηλής πολυπλοκότητας hardware.
- **Χωρική μεταγωγή (Spectral Switching):** Το εύρος ζώνης των ινών SDM μπορεί να αλλάξει μόνο στο φασματικό πεδίο και τα φιλτραρισμένα φάσματα όλων των spatial modes κάνουν μεταγωγή από κοινού, σχηματίζοντας χωρικά SCh.
- **Φασματική μεταγωγή (Spatial Switching):** Το εύρος ζώνης των ινών SDM μπορεί να αλλάξει μόνο ένα ολόκληρο spatial mode κάθε φορά. Αυτό σημαίνει ότι ολόκληρο το φάσμα ενός spatial mode αλλάζει από κοινού, κάτι που πρόκειται για μια ακραία μορφή φασματικού SCh.
- **Ομαδοποιημένη φασματική μεταγωγή (Grouped spectral switching):** Συναντάται επίσης και ως fractional joint switching. Όπως και στην περίπτωση της φασματικής μεταγωγής, το εύρος ζώνης των ινών SDM μπορεί να αλλάξει

μόνο στο φασματικό πεδίο. Ωστόσο εδώ η κοινή μεταγωγή *spatial modes* περιορίζεται σε μια ολόκληρη υποομάδα *modes*.

4.2.3 Οπτικοί αναμεταδότες SDM

Τα δίκτυα SS-FONs επιτρέπουν τη μετάδοση διαφορετικών τύπων υπερκαναλιών ή αλλιώς υπερδιαύλων (Superchannels - Schs). Τα SChs αποτελούνται από πολλαπλά οπτικά σήματα (*carriers*) κατανεμημένα τόσο στο φασματικό όσο και στο χωρικό πεδίο. Η μετάδοση τους μέσω δικτύου απαιτεί επαρκή κατανομή φασματικών-χωρικών πόρων σε συνδέσμους δικτύου και κατάλληλη διαμόρφωση εξοπλισμού μεταγωγής. Σύμφωνα με το άρθρο [60], υπάρχουν τρεις γενικοί τύποι κατάλληλων αναμεταδοτών SDM, καθένας ικανός να παράξει και να τερματίσει ένα συγκεκριμένο SCh. Πιο αναλυτικά οι συγκεκριμένοι αναμεταδότες είναι οι εξής:

- Φασματικοί αναμεταδότες (Spectral transponders): Αυτού του τύπου οι αναμεταδότες δημιουργούν φασματικά SChs, που αποτελούνται από πολλαπλά οπτικά σήματα που δρομολογούνται παράλληλα, χρησιμοποιώντας ένα *spatial mode* σε μια ίνα SDM.
- Χωρικοί αναμεταδότες (Spatial transponders): Αυτοί οι αναμεταδότες μοιράζονται μια μοναδική πηγή λέιζερ και επιτρέπουν την ταυτόχρονη μετάδοση και λήψη πολλαπλών σημάτων χρησιμοποιώντας έναν πολυπλέκτη και έναν αποπολυπλέκτη SDM. Προσφέρουν τη δυνατότητα παράλληλης μετάδοσης μέσω ινών SDM στις οποίες όλα τα οπτικά σήματα ενός SCh χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα, αλλά έχουν εκχωρήσει διαφορετικά *spatial modes*.
- Φασματικοί - Χωρικοί αναμεταδότες (Spectral-spatial transponders): Σκοπός αυτών των αναμεταδοτών είναι να επεκτείνουν την έννοια των χωρικών αναμεταδοτών μέσω της παραγωγής και λήψης φασματικών-χωρικών SChs. Καθένα από αυτά, αποτελείται από φασματικά SChs που μεταδίδονται σε πολλαπλά *spatial modes*.

4.2.4 Προτάσεις Κατανομής πόρων σε δίκτυα SDM

Όλες οι λύσεις SDM οπτικών ινών, μεταγωγών και αναμεταδοτών, μπορούν να συνδυαστούν σε διαφορετικές διαμορφώσεις. Αυτό οδηγεί σε διαφορετικά σενάρια δικτύου SDM με διαφορετικά σχήματα κατανομής πόρων και περιορισμών.

Τα φασματικά-χωρικά ευέλικτα οπτικά δίκτυα (Spectrally Spatially Flexible Optical Networks - SS-FONs) μπορούν να συνδυάσουν την πολυπλεξία SDM με τις τεχνολογίες ελαστικού οπτικού δικτύου (Elastic Optical Network - EON). Ο συνδυασμός SDM με τεχνολογίες πολυπλεξίας διαίρεσης μήκους κύματος, που βασίζονται είτε σε σταθερά είτε σε ευέλικτα δίκτυα συχνοτήτων, επιτρέπει σημαντική αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος μετάδοσης και βελτιώνει την ευελιξία του δικτύου μέσω της από κοινού διαχείρισης φασματικών και χωρικών πόρων.

Το βασικό θέμα στην οπτική δικτύωση είναι η παροχή συνδέσεων οπτικών διαδρομών (lightpaths) για τα μεταδιδόμενα σήματα. Ένα lightpath είναι μια οπτική διαδρομή που δημιουργείται μεταξύ ενός ζεύγους κόμβων προέλευσης-προορισμού. Τα lightpaths που μεταφέρουν SChs δρομολογούνται μέσω του δικτύου σε κατάλληλα εκχωρημένα κανάλια φάσματος.

Σε αυτά τα οπτικά δίκτυα, το πρόβλημα της δρομολόγησης και της κατανομής φάσματος (Routing and Spectrum Allocation - RSA), έγκειται στην εύρεση κατάλληλων lightpath συνδέσεων, προσαρμοσμένες στο πραγματικό εύρος των μεταδιδόμενων σημάτων (π.χ SChs), για αιτήματα end-to end που ανταγωνίζονται για πόρους φάσματος. Σε δίκτυα SS-FONs, υπάρχει το πρόβλημα της δρομολόγησης, των spatial modes και της κατανομής φάσματος (Routing, Spatial mode, and Spectrum Allocation - RSSA). Το RSSA προσθέτει νέες μεταβλητές απόφασης που σχετίζονται με την επιλογή των spatial modes λειτουργίας σε δικτυακούς συνδέσμους, κάτι που αποτελεί ένα πρόβλημα NP-complete. Η πιο συνηθισμένη λύση στη βιβλιογραφία είναι μια παραλλαγή του αλγόριθμου k-shortest path, που χρησιμοποιείται για την επίλυση του RSSA. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για την επίλυση του RSSA, όπως η μοντελοποίηση μέσω Mixed-Integer Programming (MIP), άπληστων αλγορίθμων και metaheuristics. Καθένα από αυτά έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Σε αυτές τις λύσεις έχουν αναπτυχθεί διάφοροι αλγόριθμοι για τα συστήματα κατανομής φάσματος και χωρικών πόρων και αλγορίθμων RSSA σε δίκτυα SDM. Στο άρθρο [60], οι συγγραφείς παρουσιάζουν μια περιεκτική επισκόπηση των συστημάτων κατανομής πόρων και των αλγοριθμικών προσεγγίσεων που εξετάζονται για τα οπτικά δίκτυα SDM. Πρόκειται για μια εκτενή και πολύ λεπτομερή εργασία που κατατάσσει τα συστήματα κατανομής πόρων και τους αλγορίθμους για οπτικά δίκτυα SDM.

Ο συγγραφέας στο άρθρο [63], επικεντρώνεται στη βελτιστοποίηση πολλαπλών επιπέδων δικτύων ασύρματης - οπτικής επικοινωνίας 5G (5G radio-optical communication networks - 5G-RONs). Πρόκειται για δίκτυα που εφαρμόζουν την κλασική αρχιτεκτονική δικτύου C-RAN με το οπτικό δίκτυο fronthaul που εξασφαλίζει

τη συνδεσιμότητα μεταξύ των RRHs και των BBU's. Συγκεκριμένα, μελετάται ένα πρόβλημα προγραμματισμού 5G-RON, το οποίο αφορά την οικονομικά αποδοτική τοποθέτηση των RRH, των BBU's και των οπτικών ινών, με την απαίτηση να επιτευχθεί συγκεκριμένο επίπεδο πληθυσμιακής κάλυψης. Το πρόβλημα διατυπώνεται ως ένα πρόβλημα ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (ILP). Σε αυτή την εργασία εξετάζονται διαφορετικές διαστάσεις του δικτύου, διαφορετική ακτίνα κάλυψης των RRHs, καθώς και δύο εκδόσεις του μοντέλου ILP, πρώτα χωρίς τη χρήση περιορισμών και κατόπιν με περιορισμούς καθυστέρησης. Με βάση τα αριθμητικά αποτελέσματα που προκύπτουν, αποτυπώνεται η δυσκολία στην απόκτηση βέλτιστων λύσεων ILP, ακόμη και για δίκτυα μέτριου μεγέθους και η δυσκολία αυτή αυξάνεται ανάλογα με την ακτίνα κάλυψης των RRHs. Εκτός αυτού, εάν ληφθούν υπόψη οι περιορισμοί καθυστέρησης αυξάνεται σημαντικά το μέγεθος του μοντέλου και περιπλέκεται ιδιαίτερα η επίλυσή του. Ακόμη αξίζει να σημειωθεί το υψηλό κόστος του οπτικού δικτύου fronthaul, το οποίο οδηγεί σε περαιτέρω προσπάθειες για την ανάπτυξη αποτελεσματικών μεθόδων και αλγορίθμων για βελτιστοποίηση των 5G-RON. Αυτό που εν τέλει προκύπτει από το συγκεκριμένο άρθρο είναι ότι η δυσκολία του συγκεκριμένου προβλήματος θα αυξηθεί πιθανότατα κάτω από περίπλοκα σενάρια, λαμβάνοντας υπόψη τις δυνατότητες των νέων τεχνολογιών του C-RAN και των αρχιτεκτονικών του δικτύου fronthaul.

Στο άρθρο [58], διερευνάται για πρώτη φορά η δυναμική παροχή οπτικών διαδρομών (lightpaths) σε δίκτυο SS-FONs με οπτικές ίνες MCFs και πραγματοποιείται φασματική μετάδοση υπερκαναλιών, στην οποία επιτυγχάνεται ευέλικτη αναγέννηση σήματος με πομποδέκτες που λειτουργούν σε συνεχόμενες διαμορφώσεις (back-to-back – B2B), ενώ επίσης επιτρέπεται και η μετατροπή διαμόρφωσης. Η αναγέννηση σήματος B2B οδηγεί σε συνδέσεις οπτικών διαδρομών, όπου κάθε τμήμα διαδρομής μπορεί να χρησιμοποιεί διαφορετικές πολυτροπικές ίνες και μπορεί να έχει διαφορετική υποδοχή συχνότητας. Επιπλέον, η αναγέννηση σήματος επιτρέπει συχνά τη χρήση αποδοτικότερων πολύτροπικών ινών, κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε χαμηλότερη χρήση φάσματος και λιγότερους πομποδέκτες.

Για να επιτευχθεί βελτιστοποιημένη κατανομή πόρων περιορισμένου φάσματος και πομποδεκτών, οι συγγραφείς προτείνουν έναν νέο αλγόριθμο δρομολόγησης οπτικών διαδρομών που ονομάζεται Adaptive Routing with Back-to-Back Regeneration (ARBR). Με τη χρήση αυτού του αλγορίθμου μελετώνται πιθανά κέρδη απόδοσης όσον αφορά την πιθανότητα αποκλεισμού εύρους ζώνης (BBP) σε τέτοια ευέλικτα σενάρια δικτύου. Στη συνέχεια της εργασίας αναλύονται τρία εναλλακτικά σενάρια που διαφέρουν στον τρόπο με τον οποίο παρέχονται δυναμικές συνδέσεις οπτικών διαδρομών, δηλαδή ένα σενάριο αναφοράς στο οποίο ελαχιστοποιείται η χρήση του αναγεννητή και δεν επιτρέπεται η μετατροπή διαμόρφωσης και δύο άλλα σενάρια με σκόπιμη B2B αναγέννηση. Η απόδοση του αλγορίθμου συγκρίνεται με άλλες μεθόδους αναφοράς σε δύο αντιπροσωπευτικές τοπολογίες δικτύου, υποθέτοντας διαφορετικά

σενάρια αναγέννησης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο αλγόριθμος ξεπερνά σε μεγάλο βαθμό τις άλλες μεθόδους από την άποψη της μετρικής πιθανότητας αποκλεισμού εύρους ζώνης (Bandwidth Blocking Probability - BBP).

Τα δίκτυα SS-FONs που συνδυάζουν πολυπλεξία SDM με ευέλικτες τεχνολογίες ελαστικού οπτικού δικτύου (EON), εκτός από τα πολλά θετικά που προσφέρουν, φέρνουν επιπλέον πολυπλοκότητα στον έλεγχο του δικτύου λόγω του χειρισμού ενός μεγαλύτερου αριθμού spatial modes σε SDM από ό, τι σε συμβατικά EON. Στο άρθρο [64], οι ερευνητές καταπιάνονται με το πρόβλημα RSSA στα δίκτυα SS-FONs στα οποία επιτρέπεται η μετατροπή spatial modes σε εναλλαγή κόμβων. Έτσι προτείνουν και αξιολογούν δύο βελτιώσεις στην επεξεργασία RSSA, δηλαδή την παραλληλοποίηση του αλγορίθμου και την εφαρμογή ειδικών δομών δεδομένων, οι οποίες θα είναι ενσωματωμένες σε μια υβριδική προσομοίωση “annealing” με άπληστους ευρετικούς αλγόριθμους RSSA. Το πρόβλημα RSSA διατυπώνεται ως ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού (Mixed Integer Programming - MIP), χρησιμοποιώντας την προσέγγιση μοντελοποίησης link-lightpath (LL) [65]. Στη συνέχεια προτείνουν και αξιολογούν έναν αποτελεσματικό αλγόριθμο επικεντρωμένο στη βελτιστοποίηση του RSSA σε SS-FONs με μετατροπή των spatial modes. Ο αλγόριθμος είναι ο SA-GLA και αποτελεί ένα συνδυασμό των Greedy Lightpath Allocation (GLA) και Simulated Annealing (SA). Ο αλγόριθμος GLA στοχεύει στην επιλογή του καλύτερου lightpath και είναι σε θέση να παράγει γρήγορα εφικτές λύσεις RSSA, ενώ ο SA διερευνά το εφικτό χώρο λύσης στην αναζήτηση βέλτιστων λύσεων. Πρόκειται λοιπόν για έναν αλγόριθμο που εισάγει δύο ενσωματώσεις στη βελτίωση των οπτικών δικτύων SS-FONs, την παράλληλη επεξεργασία και τις βελτιωμένες δομές δεδομένων.

Για την αξιολόγηση του αλγορίθμου χρησιμοποιήθηκε ένα ευρωπαϊκό δίκτυο 28 κόμβων και 82 συνδέσεων (EURO28). Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η εφαρμογή παράλληλης επεξεργασίας και η χρήση ειδικών δομών δεδομένων μπορεί να επιταχύνει σημαντικά την αναζήτηση βέλτιστων λύσεων RSSA. Η ποιότητα των λαμβανόμενων λύσεων είναι υψηλή, το οποίο είναι ένα καλό αποτέλεσμα λαμβάνοντας υπόψη το μέγεθος των βελτιστοποιημένων παρουσιών δικτύου (τόσο ως προς τον αριθμό των spatial modes, των απαιτήσεων και τη διάσταση του δικτύου).

Συνεχίζοντας την έρευνα στο [66], προτείνονται αποτελεσματικές τεχνικές δρομολόγησης και κατανομής φάσματος και πυρήνα, σε δίκτυα EON πολυπλεξίας SDM. Οι οπτικές ίνες που χρησιμοποιούνται για ένα σενάριο σχεδιασμού δικτύου είναι οι MCFs. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένας επεκτάσιμος ευρετικός αλγόριθμος για την επίλυση του προβλήματος RSCA σε δίκτυα SS-FONs, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη τους περιορισμούς ποιότητας-μετάδοσης (QoT). Αρχικά γίνεται μια προσέγγιση με βάση το crosstalk που στοχεύει στη μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας όσον αφορά την κατανομή πόρων, ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα την πολυπλοκότητα του

υπολογισμού κατά τη διαδικασία κατανομής. Αυτή η προσέγγιση στη συνέχεια ενισχύεται με μια διαδικασία βασισμένη σε ανατροφοδότηση (χρησιμοποιώντας ένα εργαλείο εκτίμησης QoT) που στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του αριθμού των συνδέσεων που δεν μπορούν να δημιουργηθούν στο δίκτυο λόγω των εκτιμήσεων QoT.

4.3 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ (COMPUTING RESOURCE ALLOCATION)

Αξιοποιώντας την οπτική τεχνολογία στο δίκτυο πρόσβασης, τα BBU's μετακινούνται από την τοποθεσία της κυψέλης στο Central office (CO), φέρνοντας έτσι τις λειτουργίες ελέγχου δικτύου από τους σταθμούς βάσης σε ένα κεντρικό σημείο συγκέντρωσης, κυρίως στις εγκαταστάσεις του CO. Αυτή η κίνηση, που ονομάζεται συγκέντρωση των BBU's, προσφέρει πολλαπλά οφέλη στο δίκτυο και τους παρόχους υπηρεσιών, όπως η μείωση της ενέργειας και του κόστους, καθώς ο απαιτούμενος κλιματισμός και εξοπλισμός που απαιτείται μειώνονται σημαντικά. Αυτή η συγκέντρωση επιτρέπει επίσης την ακύρωση παρεμβολών μεταξύ των κυψελών στα κυψελοειδή δίκτυα με βάση τη συντονισμένη μετάδοση και λήψη πολλαπλών σημείων (CoMP) καθώς και το δίκτυο MIMO.

Τα τελευταία χρόνια πάρα πολλές ερευνητικές προσπάθειες έχουν επικεντρωθεί για το πώς η απόδοση του RAN μπορεί να επιτευχθεί περαιτέρω. Για παράδειγμα, η αρχιτεκτονική Cloud RAN διευκολύνει την οργάνωση της τοποθεσίας κυψέλης μειώνοντας τη γεωγραφική κατανομή των τοποθεσιών συντήρησης. Σε γενικές γραμμές, η αρχιτεκτονική Cloud RAN αποτελείται από σημαντικό αριθμό κατανεμημένων RRH χαμηλής ισχύος και χαμηλού κόστους που αναπτύσσονται στο δίκτυο. Η BBU pool αποτελεί κρίσιμο μέρος της αρχιτεκτονικής Cloud RAN, όπου πραγματοποιούνται οι εργασίες επεξεργασίας βασικής ζώνης. Ένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα της ομάδας BBU έγκειται στην υποστήριξη της δυναμικής κατανομής των πόρων BBU στα RRHs. Ως αποτέλεσμα, είναι εφικτές αποτελεσματικές λειτουργίες μηχανικής κυκλοφορίας, όπως η εξισορρόπηση φορτίου, η ενεργειακά αποδοτική κατανομή πόρων και ο καλύτερος χειρισμός της κίνησης κινητής τηλεφωνίας μεταξύ των BBU pool, εάν υπάρχουν περισσότερες από μία BBU pool. Επίσης, η συγκέντρωση συμβάλλει αποτελεσματικά στη διαχείριση της κινητικότητας καθώς οι χρήστες μετακινούνται μεταξύ κυψελών.

4.3.1 Κατανομή πόρων ομάδας BBU (BBU pool planning)

Όπως έγινε γνωστό στην ενότητα «Κατανομή ασύρματων πόρων», η εξοικονόμηση πόρων και ενέργειας μέσω του προγραμματισμού ύπνου RRH, είναι μία πολύ σημαντική προσέγγιση στον τομέα της κατανομής πόρων. Προς αυτή την κατεύθυνση σημαντικό ρόλο μπορεί να διαδραματίσει η βελτιστοποίηση σχεδίασης της BBU pool. Η βασική ιδέα είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους ανάπτυξης των BBU's, λαμβάνοντας υπόψη τις ικανότητες επεξεργασίας τους, τις απαιτήσεις κυκλοφορίας των RRHs και τον συγχρονισμό σήματος μεταξύ RRH και BBU.

Στο άρθρο [67], εξετάζεται το πρόβλημα σχεδιασμού της BBU pool στο C-RAN για την ελαχιστοποίηση του κόστους ανάπτυξης των BBU. Η γενική διατύπωση του προβλήματος αποδίδει μια εργασία βελτιστοποίησης NP-Hard. Ο κύριος σκοπός της βελτιστοποίησης είναι η επιλογή ενός υποσυνόλου υποψήφιων ισότοπων για την ανάπτυξη την BBU pool για να ικανοποιήσει τη ζήτηση κυκλοφορίας όλων των RRHs με το ελάχιστο κόστος. Για το λόγο αυτό, οι συγγραφείς ανέπτυξαν έναν αποτελεσματικό αλγόριθμο τοπικής αναζήτησης, ο οποίος υπολογίζει το ελάχιστο κόστος ανάπτυξης. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος προσομοιώνεται σε ένα γενικό πλαίσιο βελτιστοποίησης για το C-RAN με πολλαπλές BBU pools και αποτελείται από τρεις τοπικές λειτουργίες βελτίωσης, για την ταχεία εύρεση της τοπικά βέλτιστης λύσης.

Στο κομμάτι της προσομοίωσης θεωρείται περιοχή εξυπηρέτησης $20 \times 20 \text{ km}^2$, ενώ τα RRHs και η BBU pool τοποθετούνται μέσω ομοιόμορφης κατανομής. Η χωρητικότητα της BBU pool, καθώς και η ζήτηση κίνησης κατανέμονται ομοιόμορφα. Το μέγιστο μήκος της οπτικής σύνδεσης μεταξύ RRH και BBU ορίζεται σε 10 km . Το κόστος εγκατάστασης κάθε BBU pool ισούται με 20000. Το κόστος των οπτικών ινών μεταξύ των RRHs και της BBU pool ορίζεται σε $1000 / \text{km}$. Όσον αφορά το συνολικό κόστος βελτιστοποιείται σε μεγάλο βαθμό, καθώς ο προτεινόμενος αλγόριθμος για κάθε επανάληψη με διαφορετικό αριθμό BBU pools συγκλίνει γρήγορα. Τα αποτελέσματα δείχνουν σημαντική μείωση του κόστους ανάπτυξης. Οι ίδιοι συγγραφείς [68] συγκρίνουν τον αλγόριθμό τους με άλλους σχετικούς αλγόριθμους (Genetic Algorithm (GA) και Tabu Search (TS)) με πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα.

Οι συγγραφείς στο άρθρο [69], ασχολούνται με την ανακατανομή των πόρων στην BBU pool. Στη συγκεκριμένη εργασία μελετάται μία προσέγγιση μηχανικής μάθησης μέσω ενός επαναλαμβανόμενου νευρωνικού δικτύου (RNN) για την ανακατανομή των πόρων στην BBU pool σε ένα δίκτυο 5G CRAN χρησιμοποιώντας ένα οπτικό δίκτυο μεταγωγής (Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexers – ROADMs). Τα επαναλαμβανόμενα νευρωνικά δίκτυα (RNNs) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη δεδομένων χρονοσειρών μέσω διασυνδεδεμένων νευρώνων βάσει προηγούμενων δειγμάτων χρόνου για την πραγματοποίηση προβλέψεων για την επόμενη χρονική σειρά. Οι συγγραφείς χρησιμοποιούν ένα δίκτυο μακροπρόθεσμης

μνήμης (Long Short-Term Memory – LSTM). Στη συνέχεια αναπτύσσεται ένας αλγόριθμος βασισμένος σε νευρωνικά δίκτυα που μπορεί να προβλέψει με ακρίβεια τις μελλοντικές απαιτήσεις πόρων ενός δικτύου ROADM. Η πραγματοποίηση ακριβών προβλέψεων 30 λεπτά νωρίτερα επιτρέπει την ανακατανομή πόρων προτού χρειαστεί η πραγματική ζήτηση και επομένως δίνει αρκετό χρόνο για την αναδιάρθρωση του οπτικού δικτύου για να δρομολογήσει την κίνηση μέσω του C-RAN σε μια BBU pool με διαθέσιμους υπολογιστικούς πόρους. Στο κομμάτι των προσομοιώσεων το δίκτυο LSTM εκπαιδεύεται με 740 δείγματα και προβλέπει το μελλοντικό μοτίβο κίνησης με μέσο τετραγωνικό σφάλμα 96,9 Gbps. Με τη χρήση του προβλεπόμενου μοτίβου κίνησης για την αναδιάταξη του δικτύου ROADM 30 λεπτά νωρίτερα, επιτυγχάνεται 7% αύξηση της απόδοσης του δικτύου και μείωση των πόρων επεξεργασίας κατά 18%.

Εν τω μεταξύ, στο άρθρο [70], παρουσιάστηκε ένα σχήμα εικονικοποίησης BBU που στοχεύει στην ελαχιστοποίηση της συνολικής κατανάλωσης ισχύος της BBU pool συναρτήσει του περιορισμού χωρητικότητας επεξεργασίας και με μια γραμμική σειρά υπολογιστικής πολυπλοκότητας. Αυτό το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε μέσω ενός ευριστικού αλγόριθμου προσομοίωσης (annealing-based), για να βρουν σχεδόν βέλτιστα αποτελέσματα σε ελάχιστο χρόνο. Ωστόσο οι περιορισμοί της ανθεκτικότητας και του κόστους επεξεργασίας δεν ελήφθησαν υπόψη και, σε περίπτωση που κάτι τέτοιο δε συμβεί, η προσομοίωση μπορεί να βρει περιορισμούς για ένα τέτοιο σενάριο.

Συνεχίζοντας την έρευνα, στην εργασία [71], σχεδιάστηκε ένα πρόγραμμα κατανομής πόρων για την BBU pool, το οποίο μπορεί να παρέχει κατ'απαίτηση υπολογιστικούς πόρους των ενεργών BBU's για την κυκλοφορία άφιξης σε πραγματικό χρόνο από τα RRHs. Έτσι, όλα τα BBU στην ομάδα μπορούν να μοιραστούν με όλα τα RRHs. Κάτι τέτοιο μπορεί να επιτευχθεί με οπτικούς / ηλεκτρονικούς διακόπτες. Οι συγγραφείς προκειμένου να ρυθμίσουν δυναμικά τις συνδέσεις μεταξύ της BBU pool και των RRHs τοποθέτησαν έναν οπτικό διακόπτη (OS) μπροστά από την BBU pool. Χρησιμοποίησαν έναν πολυπλέκτης διαίρεσης μήκους κύματος (WDM MUX) για πολυπλεξία/ αποπολυπλεξία μηκών κύματος από και προς το τερματικό της οπτικής γραμμής (optical line terminal - OLT). Η λειτουργία της ανάθεσης των BBU's μπορεί να πραγματοποιηθεί αναδιαμορφώνοντας τον οπτικό διακόπτη (OS) του λειτουργικού συστήματος. Συγκεκριμένα, όταν το δίκτυο φορτώνεται ελαφρά λόγω της κίνησης, το λειτουργικό σύστημα μπορεί να διαμορφωθεί έτσι ώστε πολλαπλά RRHs να μπορούν να ανακατευθυνθούν με ευελιξία σε ένα BBU. Ένα μέρος των BBU στην ομάδα μπορεί να απενεργοποιηθεί σε μια συγκεκριμένη περίοδο για να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας. Έτσι, ορισμένα BBU's μπορούν να τεθούν σε κατάσταση αναστολής και να βρίσκονται σε κατάσταση ετοιμότητας, ώστε να επανέρθουν στην ενεργή κατάσταση όποτε χρειάζονται για να συνεισφέρουν στους επιπλέον υπολογιστικούς πόρους τους. Προκειμένου να κατανέμονται προσαρμοστικά οι βασικοί υπολογιστικοί πόροι της

BBU pool για την αντιμετώπιση της κίνησης, χρησιμοποιούνται αλυσίδες semi-Markov για να μοντελοποιηθεί η κατάσταση μετάβασης κάθε BBU στην ομάδα (pool).

Το σύστημα αξιολογήθηκε μέσω αριθμητικών αποτελεσμάτων, λαμβάνοντας υπόψιν διάφορες παραμέτρους του συστήματος. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η απόδοση του συστήματος είναι ευαίσθητη ως προς το ποσοστό άφιξης της κίνησης δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα μεγαλύτερη ενεργειακή αποδοτικότητα επιτυγχάνεται για μικρούς αριθμούς αύξησης της κίνησης. Προκύπτει λοιπόν, ότι η απόδοση εξοικονόμησης ενέργειας μειώνεται σταδιακά καθώς αυξάνεται το ποσοστό άφιξης κυκλοφορίας. Αυτό συμβαίνει επειδή ενεργοποιούνται περισσότερα BBU's για την αντιμετώπιση της συνεχώς αυξανόμενης κυκλοφορίας δεδομένων από τα RRHs.

4.3.2 Επιλογή BBU με βάση το κόστος-ανθεκτικότητα (Cost-Resilience BBU Selection)

Στο άρθρο [72], οι συγγραφείς έρχονται αντιμέτωποι με το πρόβλημα που αντιμετωπίζει ένας διαχειριστής δικτύου κινητής τηλεφωνίας (Mobile Network Operator - MNO) κατά την επιλογή BBU από διάφορους παρόχους υπηρεσιών cloud, όπου ο καθένας χαρακτηρίζεται από ξεχωριστές πιθανότητες αποτυχίας και διαφορετικές τιμές κόστους. Εκτός από αυτό το πρόβλημα που είναι το βασικό, εξετάζονται επίσης η ανθεκτικότητα, το λειτουργικό κόστος, η ισχύς επεξεργασίας και οι περιορισμοί στην ικανότητα επεξεργασίας και τους προϋπολογισμούς κόστους. Όσον αφορά την ελαστικότητα της BBU pool αποτελεί σημαντική απαίτηση για τους διαχειριστές MNO's προκειμένου να διασφαλιστούν περιορισμένες διακοπές στη διαθεσιμότητα του δικτύου, τηρώντας παράλληλα τον προϋπολογισμό χωρητικότητας και τον χειρισμό του φορτίου κίνησης. Επιπλέον, δεδομένου ότι τα BBU's παρέχονται από διαφορετικούς παρόχους υπηρεσιών cloud (Cloud Service Providers - CSP), καθένα με ξεχωριστές πιθανότητες αποτυχίας και κόστος επεξεργασίας, λαμβάνεται προσεκτική απόφαση για την επιλογή BBU για την κάλυψη των περιορισμών του δικτύου και του προϋπολογισμού των χειριστών.

Γενικά πρόκειται για μία εκτενή ανάλυση που αξιολογεί αρκετές πολιτικές επιλογής BBU και παρέχει γενικές οδηγίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τους διαχειριστές (MNO) για να αποφασίσουν την καλύτερη στρατηγική βελτιστοποίησης ανάλογα με τις ανάγκες τους: ελαχιστοποίηση ισχύος επεξεργασίας BBU, ανθεκτικότητα, διαχείριση κυκλοφορίας ή όλα τα προηγούμενα. Στη συνέχεια οι συγγραφείς παρουσιάζουν έναν ισχυρό αλγόριθμο που βασίζεται στο πλαίσιο του

σχήματος Branch-and-Price [73]. Οι αλγόριθμοι αυτού του τύπου βασίζονται στην επίλυση ανά στήλη της γραμμικής χαλάρωσης σε κάθε κόμβο ενός δέντρου branch-and-bound. Σε έναν τέτοιο αλγόριθμο, ένα σύνολο στηλών εξαιρείται από τη χαλάρωση του γραμμικού προγραμματισμού (LP), προκειμένου να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα πιο αποτελεσματικά μειώνοντας την υπολογιστική δυσκολία. Έπειτα, οι στήλες "κοστολογούνται" και προστίθενται στη χαλάρωση LP, όπως απαιτείται. Για να αποφασίσει ποια στήλη θα προστεθεί, δημιουργείται ένα υπο-πρόβλημα που ονομάζεται "πρόβλημα κοστολόγησης", για να προσδιορίσει ποιες στήλες πρέπει να εισέλθουν στη βάση ώστε να αυξηθεί ο στόχος λειτουργία (για παράδειγμα στο παραπάνω άρθρο σε περίπτωση προβλήματος μεγιστοποίησης). Τέλος εάν βρεθούν τέτοιες στήλες, τότε ο LP βελτιστοποιείται εκ νέου.

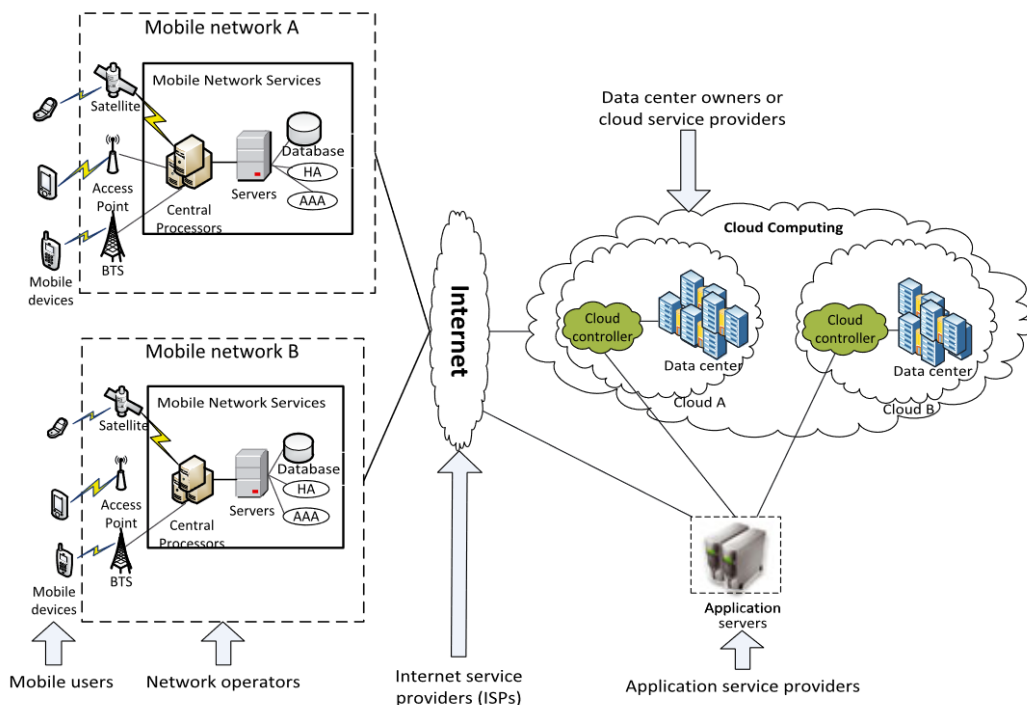
Ο αλγόριθμος του άρθρου [72], στοχεύει στην αντιμετώπιση του προβλήματος κόστους-ελαστικότητας για επιλογή BBU (Cost-Resilience BBU Selection - CRBS), το οποίο υιοθετείται για την ελαχιστοποίηση της ισχύος επεξεργασίας που καταναλώνει η BBU pool, τη μεγιστοποίηση της ελαστικότητας της και την αύξηση του χειρισμού του φορτίου κυκλοφορίας των RRHs, συναρτήσει της χωρητικότητας της εικονικοποίησης και των περιορισμών του προϋπολογισμού κόστους. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης δείχνουν την καλή απόδοση του αλγορίθμου Branch-and-Price για την επίλυση του προβλήματος επιλογής BBU για διαφορετικά σενάρια.

Γενικά είναι σαφές ότι πολύ λίγα ερευνητικά έργα έχουν αντιμετωπίσει το πρόβλημα της επιλογής ανθεκτικών και φθηνών BBU's στο C-RAN, ή γενικότερα το πρόβλημα της ανθεκτικότητας στο C-RAN. Ένα τέτοιο ερευνητικό έργο είναι το [74], στο οποίο οι συγγραφείς μελέτησαν το πρόβλημα της ανθεκτικής χαρτογράφησης δικτύου cloud με εικονική τοποθέτηση BBU. Παρουσιάστηκαν διαφορετικές προσεγγίσεις βασισμένες σε ένα δίκτυο cloud πρόσβασης one-to-one και στην εικονική προστασία της BBU pool, μαζί με έναν «μερικό» (partial) αλγόριθμο χαρτογράφησης δικτύου cloud για τη μείωση των διακοπών αποτυχίας με κόστος στο διαθέσιμο εύρος ζώνης.

Όσον αφορά την ανάθεση BBU-RRH, οι συγγραφείς του [75] τόνισαν ότι η εικονικοποίηση BBU στο C-RAN μπορεί να βοηθήσει στη μείωση του αριθμού των σταθμών βάσης κατά 75% κατ'ανώτατο όριο, με βάση την ανάλυση της κυκλοφορίας της μητροπολιτικής περιοχής του Τόκιο. Συνεχίζοντας την ερευνητική δράση οι ίδιοι συγγραφείς πρότειναν στο [76] σχήματα εναλλαγής BBU-RRH που μπορούν να καλύψουν φορτία κυκλοφορίας αιχμής για όλα τα RRH σε ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα. Το προτεινόμενο προσαρμοστικό σχήμα τους μπορεί να εκχωρήσει δυναμικά RRH σε BBU με βάση γειτονικά φορτία RRHs και όρια χρήσης πόρων BBU σε σύντομο χρονικό διάστημα. Ωστόσο, σε όλη την πορεία του άρθρου δε συζητήθηκε καθόλου ποια ήταν η ισχύς επεξεργασίας που χρησιμοποιήθηκε στην BBU pool για μια τέτοια διαδικασία.

4.3.3 Κινητή Υπολογιστική Νέφος (Mobile Cloud Computing)

Μια τυπική λύση για την κατανομή των υπολογιστικών πόρων (computing resources) σε περιβάλλον κινητής δικτύωσης είναι η κινητή υπολογιστική νέφος (MCC). Το MCC είναι εμπνευσμένο από την ενσωμάτωση του δημοφιλούς cloud computing στο περιβάλλον κινητής τηλεφωνίας, και δημιουργήθηκε για να προσφέρει άφθονους υπολογιστικούς πόρους στους χρήστες κινητών τηλεφώνων, στους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων, καθώς και στους παρόχους της κινητής υπολογιστικής. Οι χρήστες κινητής τηλεφωνίας που υποφέρουν από περιορισμένους υπολογιστικούς πόρους και έχουν αυξανόμενες απαιτήσεις μπορούν να εκφορτώσουν τις διεργασίες στις ισχυρές πλατφόρμες του νέφους.



Σχήμα 4.5. Αρχιτεκτονική Mobile cloud computing [77].

Πρόκειται για μία τεχνολογία που αξιοποιεί ενοποιημένους πόρους ποικίλων νεφών και τεχνολογιών δικτύου προς απεριόριστη λειτουργικότητα, αποθήκευση και κινητικότητα για να εξυπηρετεί πλήθος κινητών συσκευών οπουδήποτε, οποτεδήποτε μέσω του καναλιού Ethernet ή του Διαδικτύου. Ενσωματώνει cloud computing, mobile computing και ασύρματη δικτύωση και στοχεύει στην παροχή υπηρεσιών που βασίζονται σε νέφος στους χρήστες κινητής τηλεφωνίας. Στο MCC, ο χρόνος εκτέλεσης και η ενεργειακή κατανάλωση βελτιώνονται σημαντικά μεταφέροντας την εκτέλεση εφαρμογών και διεργασιών από το φιλοξενούμενη συσκευή του χρήστη στους πόρους που βρίσκονται στο νέφος. Επομένως, μόλις αναπτυχθεί πλήρως το

MCC, οι κινητές συσκευές δεν θα απαιτούν υψηλούς πόρους επεξεργασίας, όπως κεντρική μονάδα επεξεργασίας (CPU), μνήμη τυχαίας προσπέλασης (RAM), αποθήκευση και ιδιαίτερα μπαταρία, επειδή τα δεδομένα και οι απαιτητικές διεργασίες θα διαχειρίζονται σε υπολογιστικούς πόρους απομακρυσμένων νεφών.

Ο συνδυασμός των C-RAN και Mobile Cloud Computing επιτρέπει την κοινή κατανομή των υπολογιστικών πόρων και των πόρων επικοινωνίας στη διαδικασία της κατανομής των πόρων. Υπάρχουν διάφορες προσεγγίσεις που συνδυάζουν το C-RAN και το MCC, προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη κατανομή πόρων. Πιο συγκεκριμένα, οι συγγραφείς στο άρθρο [78], προτείνουν την κοινή ελαχιστοποίηση της ενέργειας και την κατανομή πόρων στο C-RAN με το MCC υπό τους χρονικούς περιορισμούς των συγκεκριμένων διεργασιών. Σε αυτή την εργασία προτείνεται μια νέα δομή C-RAN, με το mobile cloud (virtual machines), να συσχετίζεται μαζί με τα BBU's σε μία cloud pool. Οι απαιτητικές υπολογιστικές εργασίες, επεξεργάζονται στο mobile cloud και στη συνέχεια το αποτέλεσμα αυτής της επεξεργασίας επιστρέφει στις συσκευές του χρήστη, μέσω των RRHs. Ο αλγόριθμος κοινής ελαχιστοποίησης ενέργειας που αναπτύχθηκε, βασίζεται στην επαναληπτική μέθοδο του “σταθμισμένου ελάχιστου μέσου τετραγωνικού σφάλματος” (Weighted Minimum Mean Square Error - WMMSE). Ως αποτέλεσμα επιστρέφει το άθροισμα των RRHs που χρησιμοποιήθηκαν, το διάνυμα του beamforming, το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και την υπολογιστική χωρητικότητα. Σκοπός του αλγορίθμου είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού ενεργειακού κόστους στο mobile cloud και γενικά στο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας.

Επιπλέον οι συγγραφείς προτείνουν στο [79] προτείνουν μια αρχιτεκτονική δικτύου πολλαπλών διαδρομών C-RAN που συνδυάζει τις αρχιτεκτονικές των C-RAN και MCC. Σε αυτήν την προσέγγιση, οι εξοπλισμοί των χρηστών (UE's) οργανώνονται στο C-RAN σε “αυτο-οργανωμένα” δίκτυα. Σε αυτή τη δουλειά αναπτύσσεται ένας αλγόριθμος κοινής δρομολόγησης και επιλογής VM. Αυτός ο αλγόριθμος λαμβάνει υπόψιν του ταυτόχρονα, τους υπολογιστικούς πόρους καθώς και πόρους επικοινωνίας και στοχεύει στοχεύει στην εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού δρομολόγησης - VM, ο οποίος ελαχιστοποιεί το ενεργειακό κόστος, ικανοποιώντας τους χρονικούς περιορισμούς που του επιβάλλονται.

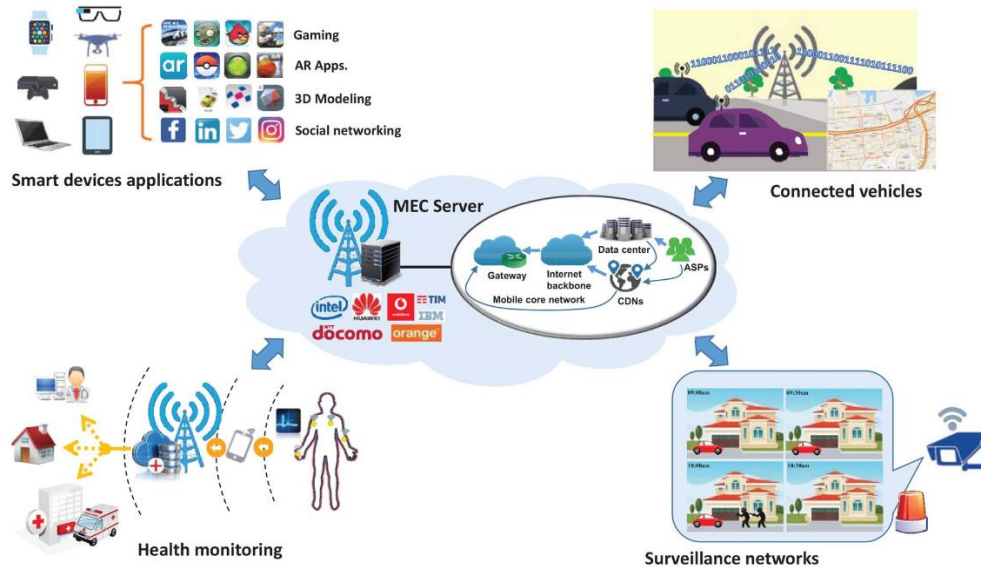
Συνεχίζοντας την αναζήτηση πάνω σε σχήματα κατανομής πόρων το άρθρο [80], εστιάζει στην ελαχιστοποίηση του κόστους των φορέων εκμετάλλευσης κινητής τηλεφωνίας. Στην συγκεκριμένη εργασία προτείνεται η από κοινού οικονομικά αποδοτική κατανομή πόρων μεταξύ MCC και C-RAN, θεωρώντας ότι το νέφος κινητής τηλεφωνίας είναι υπεύθυνο για τις υπολογιστικές διεργασίες, ενώ το κάθε BBU είναι υπεύθυνο για την επιστροφή των αποτελεσμάτων εκτέλεσης στους εξοπλισμούς των χρηστών (UE's) μέσω των RRHs. Συγκεκριμένα, μοντελοποιείται το κόστος του φορέα εκμετάλλευσης κινητής τηλεφωνίας σε δύο τομείς, δηλαδή την εκτέλεση της

διεργασίας στο νέφος για κινητά και το κόστος μετάδοσης των αποτελεσμάτων σε UE μέσω των RRHs. Στη συνέχεια διατυπώνεται η ελαχιστοποίηση του κοινού κόστους ως ένα πρόβλημα μη κυρτής βελτιστοποίησης, το οποίο είναι NP-Hard. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί επιτυχώς η κοινή κατανομή πόρων μεταξύ του νέφους κινητής και του C-RAN, μετατρέπεται το NP-Hard πρόβλημα σε ένα ισοδύναμο WMMSE πρόβλημα, ενώ επίσης γίνεται και χρήση ενό επαναληπτικού αλγορίθμου. Για την προσομοίωση του συστήματος θεωρείται ένα δίκτυο C-RAN με 4 RRHs, το καθένα εξοπλισμένο με 2 κεραίες και 5 χρήστες κινητής τηλεφωνίας, ο εξοπλισμός των οποίων περιλαμβάνει μία κεραία. Από τις προσομοιώσεις προκύπτει ότι το προτεινόμενο σχήμα μπορεί να ελαχιστοποιήσει το κόστος του φορέα εκμετάλλευσης κινητής τηλεφωνίας ενώ ταυτόχρονα να ανταποκρίνεται στους χρονικούς περιορισμούς των διεργασιών των χρηστών κινητής τηλεφωνίας.

4.3.4 Κινητή Υπολογιστική στα άκρα του δικτύου (Mobile Edge Computing)

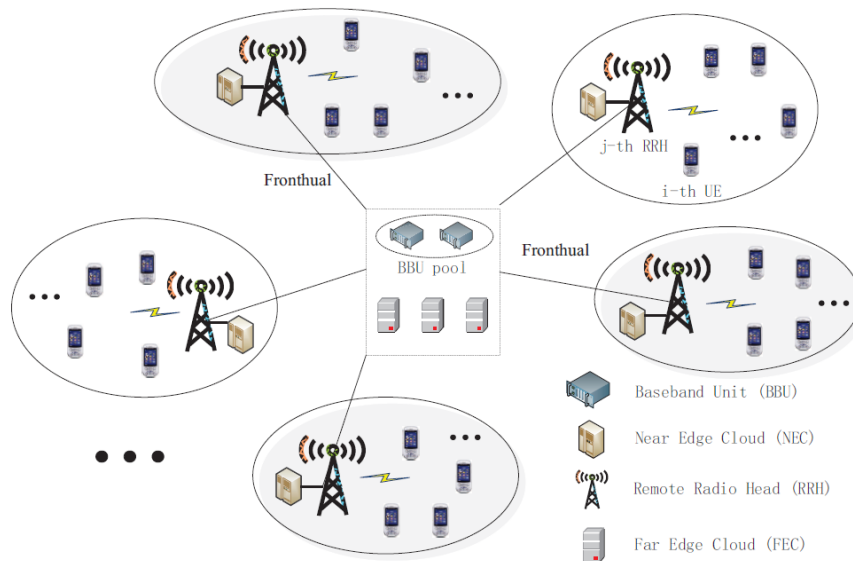
Παρά τα οφέλη που ενσωματώνει το MCC, έχει και κάποια μειονεκτήματα. Πιο συγκεκριμένα η μεγάλη απόσταση διάδοσης από τον τελικό χρήστη στο απομακρυσμένο κέντρο νέφους, θα έχει ως αποτέλεσμα υπερβολικά μεγάλο χρόνο απόκρισης για κινητές εφαρμογές. Μία επερχόμενη τεχνολογία που μπορεί να αντιμετωπίσει αυτά τα μειονεκτήματα είναι το Mobile Edge Computing (MEC), το οποίο είναι μια μορφή αρχιτεκτονικής δικτύου που επιτρέπει την ανάπτυξη κινητής υπολογιστικής στην άκρη ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Η έννοια του MEC προτάθηκε για πρώτη φορά από το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιών Πρότυπο (ETSI) το 2014, και ορίστηκε ως μια νέα πλατφόρμα που παρέχει δυνατότητες πληροφορικής και κινητής υπολογιστικής στο Δίκτυο Ασύρματης Πρόσβασης (RAN) σε κοντινή απόσταση από συνδρομητές κινητής τηλεφωνίας [81]. Ο αρχικός ορισμός του MEC αναφέρεται στη χρήση σταθμών βάσης για εκφόρτωση εργασιών υπολογισμού από φορητές συσκευές. Το MEC υλοποιείται με βάση μια εικονικοποιημένη πλατφόρμα που αξιοποιεί τις πρόσφατες εξελίξεις στην εικονικοποίηση των λειτουργιών δικτύου (NFV), τα δίκτυα που εστιάζουν στην πληροφορία (ICN) και τα δίκτυα που καθορίζονται από λογισμικό (SDN). Βασικό επίκεντρο της έρευνας MEC είναι η ανάπτυξη αυτών των γενικών τεχνολογιών δικτύου, ώστε να μπορούν να εφαρμοστούν στα άκρα του δικτύου. Το MEC, όπως και το MCC, επιτρέπει στους εξοπλισμούς των χρηστών (UE) να εκφορτώνουν υπολογιστικές διεργασίες στο cloud για να ελαφρύνει το φορτίο του και να έχει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής της μπαταρίας.

Υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των συστημάτων MEC και MCC όσον αφορά τον computing server, την απόσταση από τους τελικούς χρήστες, τον τυπικό χρόνο απόκρισης κλπ. Σε σύγκριση με το MCC, η MEC έχει τα πλεονεκτήματα της επίτευξης χαμηλότερου χρόνου απόκρισης, εξοικονόμησης ενέργειας για κινητές συσκευές, υποστήριξη εκτέλεσης διεργασιών με γνώμονα το περιβάλλον και ενίσχυση του απορρήτου και της ασφάλειας για εφαρμογές για κινητά.



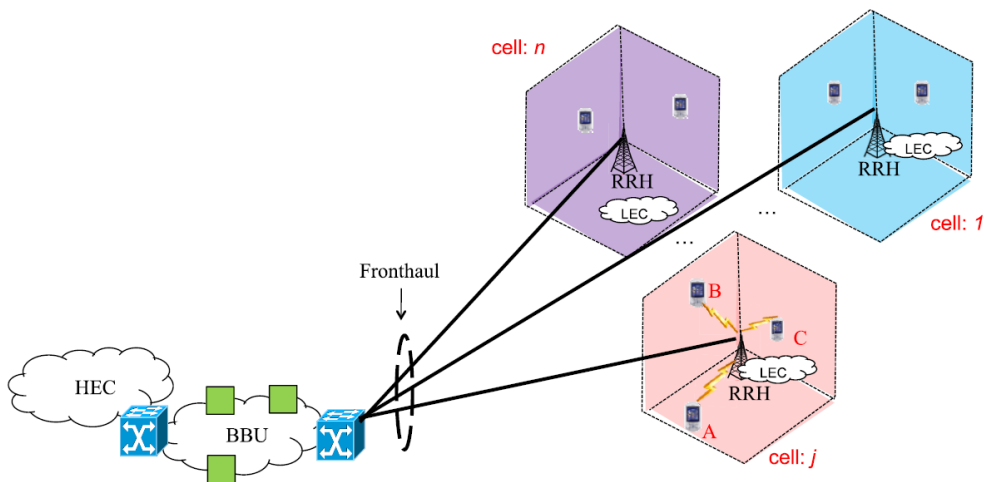
Σχήμα 4.6. Αρχιτεκτονική ενός συστήματος MEC [81].

Τον τελευταίο καιρό, υπάρχει μια αυξανόμενη τάση για περαιτέρω συγχώνευση του MEC με την BBU pool. Στο άρθρο [82], προτείνεται μια αρχιτεκτονική Near-Far Computing Enhanced C-RAN (NFC-RAN). Σύμφωνα με αυτή την αρχιτεκτονική το mobile cloud αναφέρεται ως Far Edge Computing (FEC) και βρίσκεται δίπλα στα BBU's. Ένα άλλο επίπεδο cloud computing, που ονομάζεται Near Edge Computing (NEC), προτείνει την ανάπτυξη στα RRHs, πολύ πιο κοντά στους UE's, επομένως, μπορεί να ανταποκριθεί γρήγορα σε εφαρμογές που απαιτούν πολύ χαμηλή καθυστέρηση. Το ίδιο άρθρο επιπλέον παρουσιάζει πως επιτυγχάνεται η κατανομή μεταξύ διαφορετικών εργασιών NEC και FEC, καθώς η σωστή κατανομή επηρεάζει την απόδοση ολόκληρου του δικτύου. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν μια πολύ σημαντική αύξηση στη σχέση μεταξύ του ποσοστού επιτυχούς εργασίας έναντι του αριθμού εργασιών εκφόρτωσης.



Σχήμα 4.7. Αναπαράσταση της αρχιτεκτονικής ενός δικτύου Near-Far Edge Computing C-RAN για υποστήριξη της μεγάλης επεξεργασίας δεδομένων [82].

Παρά τα όσα θετικά επιφέρει το MEC, αυτή η τεχνολογία βρίσκεται ακόμη υπό ανάπτυξη. Στην πράξη, το CRAN με το MEC ενδέχεται να μην είναι σε θέση να παρέχει τις υπηρεσίες υπολογισμών και επικοινωνιών χαμηλού χρόνου απόκρισης που απαιτούνται. Στο CRAN με ενσωμάτωση του MEC, εάν ένας εξοπλισμός χρήστη (UE) εκφορτώνει υπολογιστικές διεργασίες σε ένα απομακρυσμένο νέφος, το UE ενδέχεται να αντιμετωπίσει χαμηλότερη ποιότητα υπηρεσίας (QoS). Αυτό συμβαίνει επειδή όταν ένα UE μεταδίδει απαιτητικές διεργασίες στο απομακρυσμένο νέφος μέσω ενός περιορισμένου fronthaul, μπορεί να προκαλέσει τεράστια χρονική καθυστέρηση. Σε αυτό έρχεται να προστεθεί το γεγονός ότι η χωρητικότητα ενός fronthaul είναι περιορισμένη, επομένως το fronthaul μπορεί να μην είναι σε θέση να ικανοποιήσει όλα τα εισερχόμενα αιτήματα των UE's. Για να αντιμετωπιστεί αυτή η κατάσταση, προτείνεται μία αρχιτεκτονική C-RAN πολλαπλών επιπέδων (Multi-layer CRAN) [83], η οποία αποτελεί έναν νέο τύπο αρχιτεκτονικής MEC, που παρέχει δυναμικό υπολογισμό μέσω στρατηγικών εκφόρτωσης και επιτρέπει υπηρεσίες υπολογισμού χαμηλής καθυστέρησης και υπηρεσίες επικοινωνίας.



Σχήμα 4.8. Αρχιτεκτονική C-RAN πολλαπλών επιπέδων (Multi-layer CRAN) [83].

Το CRAN πολλαπλών επιπέδων χρησιμοποιεί τοπικά νέφη για να διαχειριστεί τις διεργασίες των UE's για τη μείωση της καθυστέρησης και για την εξοικονόμηση της χωρητικότητας του fronthaul. Στο CRAN πολλαπλών επιπέδων, ένα κεντρικό υψηλού επιπέδου Edge Cloud (High-level Edge Cloud - HEC) αναπτύσσεται δίπλα στην BBU pool για να διαχειριστεί τις περισσότερες από τις εκφορτωμένες υπολογιστικές διεργασίες από τα Remote Radio Heads (RRHs). Ένα χαμηλού επιπέδου Edge Cloud (Low-level Edge Cloud - LEC) αναπτύσσεται σε κάθε RRH για να διαχειρίζεται τοπικά τις απαιτητικές στο χρόνο διεργασίες των χρηστών ή τις διεργασίες που δεν είναι κατάλληλες για εκφόρτωση στο HEC. Λόγω του χρόνου μετάδοσης που εξοικονομείται στο fronthaul, το CRAN πολλαπλών επιπέδων έχει ως εκ τούτου τη δυνατότητα να προσφέρει καλύτερα υπολογιστικές υπηρεσίες και επικοινωνίες χαμηλής καθυστέρησης.

Όπως εύκολα γίνεται αντιληπτό, λόγω των διαχωρισμών HEC και LEC στο CRAN πολλαπλών επιπέδων, η κατανομή επικοινωνιακών και υπολογιστικών πόρων αποτελεί μία κρίσιμη διαδικασία. Στο CRAN πολλαπλών επιπέδων, οι κατανομές πόρων πρέπει να γίνονται συνεργατικά μεταξύ των RRHs. Προκειμένου να επωφεληθούμε πλήρως από τα πιθανά πλεονεκτήματα του CRAN πολλαπλών επιπέδων, η κατανομή πόρων θα πρέπει να ελαχιστοποιεί τον χρόνο απόκρισης και το κόστος ενέργειας των υπηρεσιών, να μεγιστοποιεί την απόδοση του δικτύου, να έχει επίγνωση της καθυστέρησης χρόνου και να είναι επεκτάσιμη σε σχέση με το μέγεθος του δικτύου. Αυτό καθιστά ανέφικτες τις παραδοσιακές μεθόδους κατανομής πόρων για CRAN, λόγω των υπολογιστικών τους περιπλοκών καθώς και του σχετικού λανθάνοντος χρόνου σηματοδότησης. Το ζήτημα γίνεται ακόμη χειρότερο για την περίπτωση ενός CRAN πολλαπλών επιπέδων με αυξημένο μέγεθος δικτύου.

Στο άρθρο [83] προτείνεται μία τέτοια αρχιτεκτονική C-RAN πολλαπλών επιπέδων προκειμένου να παρέχει υπηρεσίες υπολογισμών και επικοινωνιών χαμηλού χρόνου απόκρισης. Στην παρούσα εργασία, εισάγεται ένας επαναληπτικός αλγόριθμος κατανομής ασύρματων και υπολογιστικών πόρων από κοινού, που ονομάζεται “Cooperative Communication and Computation Resource Allocation (3C-RA)”. Ο 3C-RA χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο “Distributed RRH Cell Colouring algorithm (DRCC)”, για να επιτρέπει σε κάθε RRH να εκτελεί την κατανομή πόρων με κατανεμημένο τρόπο με υψηλή απόδοση. Σε κάθε κελί RRH, η κατανομή πόρων επικοινωνίας χρησιμοποιεί μια αναλογική προσέγγιση με βάση την αμεροληψία σε συνδυασμό με την κατανομή υπολογιστικών πόρων. Ο 3C-RA χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο DRCC για να “χρωματίσει” τα κελιά των RRHs του C-RAN πολλαπλών επιπέδων, προκειμένου να διασφαλίσει ότι κανένα γειτονικό κελί RRH δεν έχει το ίδιο χρώμα και, στη συνέχεια, η κατανομή πόρων των κυττάρων των RRHs πραγματοποιείται επαναληπτικά.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι το CRAN πολλαπλών επιπέδων μπορεί καλύτερα να παρέχει υπηρεσίες υπολογισμού και επικοινωνίας χαμηλού λανθάνοντος χρόνου με χαμηλότερο κόστος. Επίσης, το 3C-RA μπορεί να επιτρέψει στο CRAN πολλαπλών επιπέδων να έχει υψηλότερη απόδοση δικτύου, βελτιωμένες υπολογιστικές και επικοινωνιακές υπηρεσίες χαμηλού χρόνου απόκρισης καθώς και μειωμένο ενεργειακό κόστος.

Τέλος, στο έργο που παρουσιάστηκε στο [84] μελετάται η κατανομή πόρων σε ένα σύστημα πολλαπλών χρήσεων MEC βασισμένο σε Time Division Multiple Access (TDMA) και Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA). Αρχικά για το σύστημα TDMA MECO (Mobile Edge Computing Offloading) με απεριόριστη ή πεπερασμένη ικανότητα υπολογισμού νέφους, η βέλτιστη κατανομή πόρων διατυπώνεται ως ένα κυρτό πρόβλημα βελτιστοποίησης για την ελαχιστοποίηση της σταθμισμένης κατανάλωσης ενέργειας, υπό τον περιορισμό της καθυστέρησης υπολογισμού. Η βέλτιστη πολιτική που βρήκαν οι συγγραφείς, έχει δομή threshold-based σε σχέση με μια παράγωγη συνάρτηση προτεραιότητας εκφόρτωσης, η οποία αποδίδει προτεραιότητες για τους χρήστες σύμφωνα με τα κέρδη των καναλιών τους και την κατανάλωση ενέργειας από τοπικούς υπολογιστές. Ως αποτέλεσμα, οι χρήστες με προτεραιότητες πάνω και κάτω από ένα καθορισμένο κατώφλι εκτελούν πλήρη και ελάχιστη εκφόρτωση, αντίστοιχα. Ακόμη, για την περίπτωση του cloud με πεπερασμένη χωρητικότητα, προτείνεται ένας μη βέλτιστος αλγόριθμος κατανομής πόρων για τη μείωση της πολυπλοκότητας υπολογισμού για τον υπολογισμό του ορίου.

Στη συνέχεια, εξετάζεται το σύστημα OFDMA MECO, για το οποίο η βέλτιστη κατανομή πόρων διατυπώνεται ως ένα πρόβλημα μικτού ακεραίου. Για να επιλυθεί αυτό το δύσκολο πρόβλημα και να χαρακτηριστεί η δομή του, προτείνεται ένας αλγόριθμος χαμηλής πολυπλοκότητας με τη μετατροπή του προβλήματος OFDMA στο

αντίστοιχο του TDMA. Η αντίστοιχη κατανομή πόρων επιτυγχάνεται με τον ορισμό της συνάρτησης προτεραιότητας εκφόρτωσης μέσου όρου και φαίνεται ότι έχει σχεδόν βέλτιστη απόδοση στην προσομοίωση. Η αντίστοιχη κατανομή πόρων προέρχεται από τον καθορισμό μιας μέσης συνάρτησης προτεραιότητας εκφόρτωσης και φαίνεται ότι έχει σχεδόν βέλτιστη απόδοση στην προσομοίωση.

5 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΠΟΡΩΝ

Ως σύστημα κατανομής πόρων για δίκτυα 5G, προτείνεται ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος blueSPACE [85]. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος κατανομής πόρων στοχεύει στη βέλτιστη κατανομή πόρων, προσαρμόζοντας δυναμικά τις προδιαγραφές των ζητούμενων υπηρεσιών και τις τρέχουσες συνθήκες της διαθέσιμης υποδομής. Παράλληλα με την εκπλήρωση των απαιτήσεων για πόρους, βασικό στόχο αποτελεί και η ελαχιστοποίηση της ενέργειας που καταναλώνεται κατά την παροχή αυτών των πόρων. Όπως έχει προαναφερθεί η κατανομή πόρων στα δίκτυα 5G αποτελείται από τρεις τύπους πόρων: α) τους πόρους ασύρματης πρόσβασης, β) τους πόρους του οπτικού δικτύου και γ) τους υπολογιστικούς πόρους. Το σύστημα που προτείνεται είναι σε θέση να εφαρμόσει βελτιστοποίηση κατανομής και στους τρεις τομείς για αυτό και αποτελείται από τρεις φάσεις βελτιστοποιήσεων. Όλες οι φάσεις βελτιστοποίησης διαμορφώνονται ως προβλήματα ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (ILP) χαμηλής πολυπλοκότητας και στη συνέχεια επιλύονται μέσω του κατάλληλα αναπτυγμένου αλγορίθμου.

5.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Η πρώτη φάση της διαδικασίας κατανομής του αλγορίθμου αφορά τους πόρους του τομέα ασύρματης πρόσβασης (RAN). Στα δίκτυα 5G οι ασύρματοι πόροι παρέχονται σε ομάδες χρηστών που καλύπτονται από το ίδιο αίτημα υπηρεσίας, με τη μορφή θυρίδων επικοινωνίας. Οι διαθέσιμοι πόροι για συνδέσεις μέσω του αέρα, διατίθενται μέσω των RRHs, τα οποία εκπέμπουν έναν αριθμό κατευθυνόμενων δεσμών, σύμφωνα με την τεχνολογία του beamforming. Στο συγκεκριμένο σύστημα το διαθέσιμο εύρος ζώνης χωρίζεται σε έναν αριθμό υπό-φορέων τύπου OFDMA και ομαδοποιούνται σε υποδιαύλους, που αποτελούν τη μικρότερη μονάδα της κατανομής. Για τους μέγιστους θεωρητικούς ρυθμούς δεδομένων χρησιμοποιείται ο μέγιστος αριθμός υπό-φορέων. Σε αυτή την περίπτωση όλοι μεταφέρουν δεδομένα και χρησιμοποιείται διαμόρφωση τύπου 256-QAM.

Τα αιτήματα κίνησης που καταφθάνουν στο σύστημα κατανομής πόρων περιλαμβάνουν το ζητούμενο εύρος ζώνης όσον αφορά τη ζήτηση ρυθμού δεδομένων

για συγκεκριμένες περιοχές της συνολικής ασύρματης κάλυψης. Κάθε περιοχή καλύπτεται από μία ή και περισσότερες δέσμες που εκπέμπονται από τα RRHs. Ο καταναμητής ασύρματων πόρων αναθέτει για κάθε αίτημα υπηρεσίας σε κάθε απαιτούμενη περιοχή, συγκεκριμένους υπό-διαύλους σε δέσμες των RRHs, ώστε να παρέχουν την απαραίτητη κάλυψη. Ακόμη κάθε αίτημα υπηρεσίας περιλαμβάνει μια ένδειξη της απαιτούμενης ελάχιστης ποιότητας υπηρεσίας (QoS). Αυτή αντιστοιχίζεται σε έναν από τους διαθέσιμους τρόπους μετάδοσης (διαμόρφωση), με την έννοια ότι οι «χαμηλότερες» λειτουργίες διαμόρφωσης διασφαλίζουν υψηλότερη αξιοπιστία (π.χ. χαμηλότερος ρυθμός σφάλματος Bit (BER)) σε βάρος υψηλότερου εύρους ζώνης για την παροχή του ίδιου ρυθμού δεδομένων. Ως εκ τούτου, ο εκχωρητής εκχωρεί επίσης συγκεκριμένους τρόπους μετάδοσης σε συγκεκριμένους υποδιαύλους.

Στόχος του ανεπτυγμένου αλγορίθμου είναι να παρέχει τους απαιτούμενους πόρους ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα την κατανάλωση ενέργειας, ενεργοποιώντας όσο το δυνατόν λιγότερα RRHs (κυρίως) και δέσμες (δευτερευόντως). Μια τέτοια προσέγγιση επιτρέπει την εναλλαγή των ανενεργών στοιχείων σε κατάσταση αναστολής λειτουργίας για σκοπούς εξοικονόμησης ενέργειας. Επίσης ο αλγόριθμος λαμβάνει υπόψη τις πιθανές παρεμβολές μεταξύ των δεσμών που παρεμβάλλονται, αποφεύγοντας την ταυτόχρονη κατανομή πόρων σε παρεμβαλλόμενους υπό-διαύλους. Τέλος, γίνεται εκχώρηση διαθέσιμων ζωνών συχνοτήτων σε δέσμες, αποφεύγοντας την εκχώρηση της ίδιας ζώνης σε παρεμβαλλόμενες δέσμες.

Η δεύτερη φάση της διαδικασίας κατανομής αφορά τους οπτικούς πόρους. Στο μοντέλο κατανομής πόρων, ο τομέας του οπτικού δικτύου, περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία του Δικτύου Οπτικής Διανομής (ODN), ξεκινώντας από τα BBU's και τελειώνοντας στα RRHs, καλύπτοντας όλα τα ενδιάμεσα στοιχεία οπτικής μεταγωγής. Ο καταναμητής οπτικών πόρων είναι υπεύθυνος για την εκχώρηση οπτικών διαδρομών μεταξύ κάθε ζεύγους BBU-beam. Το μοντέλο έχει σχεδιαστεί ώστε να είναι συμβατό με οποιαδήποτε αρχιτεκτονική δικτύου SS-FON, επιτρέποντας όλους τους δυνατούς συνδυασμούς που περιεγράφηκαν στο κεφάλαιο «Κατανομή οπτικών πόρων». Έτσι ο καταναμητής οπτικών πόρων λαμβάνει ως είσοδο τις κατανομές ασύρματης πρόσβασης, προκειμένου να προσδιορίσει τα ενεργά RRHs, τα οποία αντιστοιχίζονται με τα BBU's. Κάθε ζεύγος BBU-RRH αποτελεί μια οπτική ζήτηση που απαιτεί μια πλήρη οπτική διαδρομή μέσα στο δίκτυο ODN.

Όλα τα στοιχεία του δικτύου ODN διαμορφώνονται ως «κόμβοι» και χαρακτηρίζονται από έναν αριθμό θυρών εισόδου / εξόδου, καθώς και από συγκεκριμένες δυνατότητες μεταγωγής. Κάθε θύρα συνδέεται με μια γειτονική θύρα ενός παρακείμενου κόμβου, χρησιμοποιώντας έναν σύνδεσμο οπτικών ινών. Οι οπτικές ίνες χαρακτηρίζονται από τον αριθμό των πυρήνων που υποστηρίζουν έναν συγκεκριμένο αριθμό μηκών κύματος.

Στόχος του ανεπτυγμένου αλγορίθμου είναι να παρέχει τους απαιτούμενους πόρους ελαχιστοποιώντας την κατανάλωση ενέργειας ενεργοποιώντας (με σειρά προτεραιότητας) όσο το δυνατόν λιγότερους οπτικούς διακόπτες, θύρες, πυρήνες και μήκη κύματος. Μια τέτοια προσέγγιση επιτρέπει την εναλλαγή των ανενεργών στοιχείων σε κατάσταση αναστολής λειτουργίας για σκοπούς εξοικονόμησης ενέργειας. Η κατανομή των οπτικών πόρων αποφασίζει ποιοι κόμβοι / θύρες / πυρήνες / μήκη κύματος θα χρησιμοποιηθούν ώστε να εδραιωθεί μία οπτική διαδρομή για κάθε οπτική ζήτηση.

Η τρίτη και τελευταία φάση της διαδικασίας κατανομής αφορά τους υπολογιστικούς πόρους MEC. Ο υπολογιστικός τομέας του μοντέλου κατανομής πόρων που έχει υιοθετηθεί, περιλαμβάνει όλους τους υπολογιστικούς πόρους που παρέχονται από διακομιστές που αναπτύσσονται κοντά στα Central Offices (CO), για την παροχή στους χρήστες κινητής τηλεφωνίας τη δυνατότητα εκφόρτωσης υπολογιστικών απαιτήσεων. Το σχεδιασμένο μοντέλο λαμβάνει υπόψη τις απαιτήσεις για πόρους MEC που περιλαμβάνονται στα ζητούμενα αιτήματα υπηρεσιών, προκειμένου να εκχωρηθεί αντίστοιχα τα VM's που φιλοξενούνται δυναμικά στους διαθέσιμους φυσικούς διακομιστές.

Αυτή τη φορά ο στόχος του αλγορίθμου είναι να παρέχει τους απαιτούμενους πόρους ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα την κατανάλωση ενέργειας ενεργοποιώντας όσο το δυνατόν λιγότερους φυσικούς διακομιστές. Μια τέτοια προσέγγιση επιτρέπει τη μετάβαση των ανενεργών υπολογιστικών στοιχείων σε κατάσταση αναστολής λειτουργίας για σκοπούς εξοικονόμησης ενέργειας.

5.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Σε αυτή την ενότητα αναλύεται το μαθηματικό μοντέλο της προσέγγισης βελτιστοποίησης κατανομής πόρων. Γίνεται διαχωρισμός της ενότητας σε τρία μέρη: α) βελτιστοποίηση των πόρων ασύρματης πρόσβασης, β) βελτιστοποίηση των πόρων του οπτικού δικτύου και γ) βελτιστοποίηση των υπολογιστικών πόρων. Όπως έχει ήδη γνωστοποιηθεί ο κύριος στόχος όλων των διαδικασιών βελτιστοποίησης είναι η εξοικονόμηση ενέργειας. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της δυναμικής προσαρμογής στις απαιτήσεις υπηρεσίας (των διαφόρων εισερχόμενων απαιτήσεων) και της χρήσης των διαθέσιμων πόρων.

5.2.1 Βελτιστοποίηση των πόρων ασύρματης πρόσβασης

Στον τομέα της ασύρματης πρόσβασης η κατανομή πόρων έγκειται στην παροχή επαρκούς εύρους ζώνης σε κάθε υπηρεσία σύμφωνα με τον απαιτούμενο ρυθμό δεδομένων και τον τρόπο μετάδοσης. Ο στόχος της είναι να εκχωρηθούν οι απαιτούμενοι πόροι, λαμβάνοντας υπόψιν τους περιορισμούς, ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα την κατανάλωση ενέργειας. Λαμβάνοντας υπόψη ότι τα RRH χωρίς κατανεμημένα αιτήματα υπηρεσιών μπορούν να μεταβούν σε κατάσταση αναστολής λειτουργίας, ο στόχος βελτιστοποίησης είναι η χρήση όσο το δυνατόν λιγότερων RRHs για την κατανομή των ασύρματων πόρων.

Ο αλγόριθμος εφαρμόζεται ως διαδικασία βελτιστοποίησης 2 σταδίων (με το δεύτερο στάδιο να είναι προαιρετικό) και το αντίστοιχο πρόβλημα να διαμορφώνεται ως πρόβλημα ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (ILP). Οι μεταβλητές αποφάσεων διαμορφώνονται σε έναν πίνακα δυαδικών στοιχείων (x), προκειμένου να αντιστοιχηθούν ως κατανομές στο αποτέλεσμα εξόδου του αλγορίθμου. Η διαδικασία του ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού αποτελείται από τέσσερα στάδια περιορισμών.

1^{ος} Περιορισμός: Οι ήδη κατειλημμένες θέσεις κατανομής, που χαρακτηρίζονται ως υποδίαυλοι, επισημαίνονται ως δεσμευμένες, ώστε να αποφεύγεται η κατανομή τους από την τρέχουσα διαδικασία.

$$\text{για κάθε RRH } i, \text{ για κάθε δέσμη } j, \text{ για κάθε υποδίαυλο } k$$

$$\sum_{l=1}^{\text{τρόποι μετάδοσης}} x(i, j, k, l) + \text{κατειλημμένες θέσεις κατανομής}(i, j, k) \leq 1$$

2^{ος} Περιορισμός: Επιτρέπεται μόνο ένας τρόπος μετάδοσης ανά υποδίαυλο. Επισημαίνεται ότι όλοι οι υπο-φορείς στον ίδιο υποδίαυλο πρέπει να μεταδίδονται με τον ίδιο τρόπο.

$$\text{για κάθε RRH } i, \text{ για κάθε δέσμη } j, \text{ για κάθε υποδίαυλο } k$$

$$\sum_{l=1}^{\text{τρόποι μετάδοσης}} x(i, j, k, l) \leq 1$$

3ος Περιορισμός: Οι υποδιάυλοι δεν πρέπει να κατανέμονται σε δέσμες (beams) με κοινό φάσμα ραδιοσυχνοτήτων που επικαλύπτονται χωρικά. Οι δέσμες αυτές χαρακτηρίζονται ως παρεμβαλλόμενες δέσμες.

για κάθε υποδιάυλο

$$\sum_{l=1}^{\text{τρόποι μετάδοσης}} x(i, j, k, l) + \sum_{l=1}^{\text{τρόποι μετάδοσης}} x(\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}, l) + \text{παρεμβαλλόμενοι υποδιάυλοι } (i, j, k, \hat{i}, \hat{j}, \hat{k}) \leq 2$$

4ος Περιορισμός: Οι συνολικοί υπο-φορείς που κατανέμονται σε όλα τα αιτήματα υπηρεσίας μιας συγκεκριμένης περιοχής που απαιτούν έναν συγκεκριμένο τρόπο μετάδοσης πρέπει να είναι υψηλότερο ή ίσο με το άθροισμα των αντίστοιχων αιτημάτων τους.

για κάθε περιοχή a , για κάθε τρόπο μετάδοσης l

$$\sum_{i=1}^{\text{αριθμός RRHs}} \left(\sum_{j=1}^{\text{αριθμός δεσμ}(i)} \left(\sum_{k=1}^{\text{αριθμός υποδιαύλων}(i,j)} \text{κατειλημμένη περιοχή κάλυψης δέσμης } (i, j, a) \times x(i, j, k, l) \times \text{αριθμός υποφέροντων ανά υποδιάυλο} \right) \right) \geq \sum_{s=1}^{\text{αριθμός υπηρεσιών}} \text{κατειλημμένη περιοχή κάλυψης δέσμης } (i, j, a) \times \left| \frac{\text{ρυθμός δεδομένων αιτήματος υπηρεσίας } (s, a, l)}{\text{ρυθμός δεδομένων υποφέροντος } (l)} \right|$$

1ο Στάδιο Βελτιστοποίησης: Η βελτιστοποίηση πραγματοποιείται ως διαδικασία ελαχιστοποίησης. Ο στόχος είναι να εξυπηρετηθούν οι χρήστες (αιτήματα υπηρεσιών) παρέχοντας τις λιγότερες δυνατές κατανομές (υποδιάυλους) ενώ ενεργοποιούνται όσο το δυνατόν λιγότερα RRHs (για εξοικονόμηση ενέργειας). Οι κατανομές για κάθε RRH σταθμίζονται σύμφωνα με την κατάσταση προτεραιότητάς τους και τον αριθμό των ζητούμενων υπο-φορέων που μπορούν να καλύψουν.

2ο Στάδιο Βελτιστοποίησης (προαιρετικό): Με βάση την κατανομή που προέκυψε από το 1ο Στάδιο, το 2ο Στάδιο Βελτιστοποίησης υιοθετεί τους ίδιους περιορισμούς συν έναν ακόμη. Ο νέος περιορισμός προβλέπει ο συνολικός αριθμός των κατανεμημένων θυρίδων (υποδιάλυσι) θα πρέπει να είναι χαμηλότερος ή ίσος με αυτόν από το προηγούμενο στάδιο. Το συγκεκριμένο στάδιο βελτιστοποίησης είναι προαιρετικό.

5.2.2 Βελτιστοποίηση των πόρων του οπτικού δικτύου

Η κατανομή των πόρων οπτικής δικτύωσης έγκειται στην καθιέρωση οπτικών διαδρομών από άκρο-σε-άκρο μεταξύ των δεσμών των RRHs και των BBU's. Στόχος της διαδικασίας βελτιστοποίησης είναι ο εντοπισμός των συντομότερων οπτικών διαδρομών, χρησιμοποιώντας παράλληλα όσο το δυνατόν λιγότερα οπτικά στοιχεία. Όπως έχει προαναφερθεί ο συνολικός αλγόριθμος στοχεύει στην ελαχιστοποίηση της καταναλισκόμενης ισχύς. Για αυτό το λόγο συγκεντρώνονται οι οπτικές διαδρομές σε κοινούς κόμβους μεταγωγής/ θύρες / πυρήνες. Με αυτό τον τρόπο απενεργοποιούνται τα αχρησιμοποίητα στοιχεία μεταγωγής μέσω του υπάρχοντος ελεγκτή SDN (Software Defined Networking), έτσι ώστε η ενέργεια να μπορεί να εξοικονομηθεί.

Όσον αφορά τη διαδικασία βελτιστοποίησης, διαμορφώνεται όπως και στον τομέα της ασύρματης πρόσβασης, ως ένα πρόβλημα ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού. Το συγκεκριμένο πρόβλημα διαμορφώνεται ώστε να μπορεί να προσδιορίσει γρήγορα τις βέλτιστες διαδρομές, προσαρμόζοντας δυναμικά στις απαιτήσεις κυκλοφορίας και τους διαθέσιμους πόρους οπτικής δικτύωσης. Τα αιτήματα εισαγωγής σε αυτή την περίπτωση έχουν τη μορφή απαιτήσεων δρομολόγησης που δημιουργούνται μετά την εκχώρηση των ασύρματων πόρων. Ως εκ τούτου, το πρώτο βήμα του αντίστοιχου αλγορίθμου είναι η σειριακή κατανομή των BBU's σε ενεργές δέσμες RRHs. Οι μεταβλητές αποφάσεων διαμορφώνονται σε έναν πίνακα δυαδικών στοιχείων (x), προκειμένου να αντιστοιχηθούν ως κατανομές στο αποτέλεσμα εξόδου του αλγορίθμου. Η διαδικασία του ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού αποτελείται από τρία στάδια περιορισμών.

1^{ος} Περιορισμός: Οι ήδη κατειλημμένες θέσεις κατανομής, επισημαίνονται ως δεσμευμένες, ώστε να αποφεύγεται η περαιτέρω κατανομή τους από την τρέχουσα διαδικασία. Επιπλέον μέσω του ίδιου περιορισμού εξασφαλίζεται η ανάθεση μόνο μίας οπτικής ζήτησης ανά συγκεκριμένο οπτικό πόρο.

για κάθε οπτικό κόμβο j , για κάθε θύρα k , για κάθε πυρήνα l ,
για κάθε μήκος κύματος m

$$\begin{aligned}
 & \text{αρ. οπτικών αιτημάτων} \\
 & \sum_{i=1} x(i, j, k, l, m) \\
 + & \text{αρ. προηγούμενων οπτικών αιτημάτων} \\
 & \sum_{i=1} \text{κατηλειμμένες οπτικές θυρίδες}(i, j, k, l, m) \leq 1
 \end{aligned}$$

2ος Περιορισμός: Δημιουργία οπτικών διαδρομών (lightpaths) από αρχικές πηγές (BBU's) προς τελικούς προορισμούς (RRHs), ανάλογα με τις δυνατότητες μεταγωγής του κάθε κόμβου. (Ως θύρα εισόδου_εξόδου ορίζεται η επιλογή η θύρα να πρόκειται είτε για θύρα εισόδου, είτε για εξόδου).

1) Πλήρως φασματικοί-χωρικοί κόμβοι μεταγωγής

για κάθε απαίτηση « i », για κάθε κόμβο « j »:
 άθροισμα των κατανομών εισόδου - άθροισμα των κατανομών εξόδου = $u(i, j)$
 (1: « j » είναι η αρχική πηγή του « i »
 -1: « j » είναι η ο τελικός προορισμός του « i »
 0: κανένα από τα δύο)

$$\begin{aligned}
 & \text{συνολικές θύρες} \left(\sum_{k=1} \left(\text{συνολικοί πυρήνες} \left(\sum_{l=1} \left(\text{συνολικά μήκη κύματος} \right. \right. \right. \right. \\
 & \left. \left. \left. \left. \sum_{m=1} x(i, j, k, l, m) \right. \right. \right. \right. \\
 & \left. \left. \left. \left. \times \text{θύρα εισόδου_εξόδου} \right) \right) \right) = u(i, j) \begin{cases} 1 \\ 0 \\ -1 \end{cases}
 \end{aligned}$$

2) Μόνο φασματικοί κόμβοι μεταγωγής (ο πυρήνας εισόδου αντιστοιχίζεται με τον πυρήνα εξόδου)

για κάθε απαίτηση « i », για κάθε κόμβο « j », για κάθε πυρήνα « l »:
 άθροισμα των κατανομών εισόδου - άθροισμα των κατανομών εξόδου = $u(i, j)$
 (1: « j » είναι η αρχική πηγή του « i »
 -1: « j » είναι η ο τελικός προορισμός του « i »
 0: κανένα από τα δύο)

$$\sum_{k=1}^{\text{συνολικές θύρες}} \left(\sum_{m=1}^{\text{συνολικά μήκη κύματος}} x(i, j, k, l, m) \times \text{θύρα εισόδου_εξόδου} \right) = u(i, j) \begin{cases} 1 \\ 0 \\ -1 \end{cases}$$

- 3) Μόνο χωρικοί κόμβοι μεταγωγής (το μήκος κύματος εισόδου αντιστοιχίζεται με το μήκος κύματος εξόδου)

για κάθε απαίτηση «i», για κάθε κόμβο «j», για κάθε μήκος κύματος «m»:
 άθροισμα των κατανομών εισόδου - άθροισμα των κατανομών εξόδου = u (i, j)
 (1: «j» είναι η αρχική πηγή του «i»
 -1: «j» είναι η ο τελικός προορισμός του «i»
 0: κανένα από τα δύο)

$$\sum_{k=1}^{\text{συνολικές θύρες}} \left(\sum_{l=1}^{\text{συνολικοί πυρήνες}} x(i, j, k, l, m) \times \text{θύρα εισόδου_εξόδου} \right) = u(i, j) \begin{cases} 1 \\ 0 \\ -1 \end{cases}$$

- 4) Μόνο μεταγωγή θύρας χωρίς φασματική-χωρική μεταγωγή (ο πυρήνας εισόδου / μήκος κύματος αντιστοιχίζεται με τον πυρήνα εξόδου / μήκος κύματος)

για κάθε απαίτηση «i», για κάθε κόμβο «j», για κάθε πυρήνα «l», για κάθε μήκος κύματος «m»:
 άθροισμα των κατανομών εισόδου - άθροισμα των κατανομών εξόδου = u (i, j)
 (1: «j» είναι η αρχική πηγή του «i»
 -1: «j» είναι η ο τελικός προορισμός του «i»
 0: κανένα από τα δύο)

$$\sum_{k=1}^{\text{συνολικές θύρες}} (x(i, j, k, l, m) \times \text{θύρα εισόδου_εξόδου}) = u(i, j) \begin{cases} 1 \\ 0 \\ -1 \end{cases}$$

3ος Περιορισμός: Οι κατανομές στα δύο τερματικά σημεία κάθε ζεύξης (γειτονικές θύρες γειτονικών κόμβων) πρέπει να αποτελούνται από ακριβώς τα ίδια χαρακτηριστικά.

5.2.3 Βελτιστοποίηση των υπολογιστικών πόρων

Η κατανομή των υπολογιστικών πόρων επικεντρώνεται στους πόρους του Mobile Edge Computing (MEC). Στόχος της συγκεκριμένης βελτιστοποίησης είναι η ελαχιστοποίηση των συνολικών απαιτούμενων διακομιστών που απαιτούνται για τις υπολογιστικές διεργασίες, προκειμένου να μειωθεί η καταναλισκόμενη ενέργεια. Το σύστημα παραμετροποιείται με τις καθορισμένες προδιαγραφές των ζητούμενων εικονικών μηχανών και τα χαρακτηριστικά των διαθέσιμων φυσικών διακομιστών MEC. Η επιλογή των φυσικών διακομιστών δίνει προτεραιότητα βάσει των χαρακτηριστικών τους με την ακόλουθη σειρά:

- 1) Αριθμός συνολικών vCPUs
- 2) Ποσό συνολικής μνήμης (RAM)
- 3) Ποσό συνολικής αποθήκευσης
- 4) Συνολική χωρητικότητα δικτύου
- 5) Αριθμός συνολικών vGPUs.

Όπως και στις δύο προηγούμενες φάσεις βελτιστοποίησης, έτσι και εδώ η βελτιστοποίηση των υπολογιστικών πόρων διαμορφώνεται ως ένα πρόβλημα ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού. Το συγκεκριμένο πρόβλημα μπορεί να λυθεί λαμβάνοντας υπόψη δυναμικά αιτήματα υπηρεσιών και τις τρέχουσες συνθήκες του συστήματος. Οι μεταβλητές αποφάσεων διαμορφώνονται σε έναν πίνακα δυαδικών στοιχείων (x), προκειμένου να αντιστοιχηθούν ως κατανομές στο αποτέλεσμα εξόδου του αλγορίθμου. Η διαδικασία του ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού αποτελείται από τρία στάδια περιορισμών.

1^{ος} Περιορισμός: Μια εικονική μηχανή ενός συγκεκριμένου αιτήματος υπηρεσίας πρέπει να εκχωρείται μόνο σε έναν φυσικό διακομιστή MEC.

για κάθε αίτημα υπηρεσίας j , για κάθε αιτούμενη εικονική μηχανή k

$$\sum_{i=1}^{\text{αριθμός διακομιστών}} x(i, j, k) = 1$$

2^{ος} Περιορισμός: Τα χαρακτηριστικά των CPU και GPU που αντιστοιχούν σε κάθε εικονική μηχανή για κάθε αίτημα υπηρεσίας δεν πρέπει να είναι χαμηλότερα από τους αιτούμενους πόρους

για κάθε φυσικό διακομιστή i , για κάθε αίτημα υπηρεσίας j , για κάθε αιτούμενη εικονική μηχανή k , για κάθε πόρου l

$$x(i, j, k) \times \text{αιτούμενοι πόροι MEC}(j, k, l) \leq \text{πόροι φυσικών διακομιστών}(i, l)$$

3ος Περιορισμός: Οι εκχωρημένοι πόροι καθενός από τους ποσοτικούς τύπους των CPU / GPU πρέπει να είναι χαμηλότεροι ή ίσοι με τους διαθέσιμους πόρους του διακομιστή του συγκεκριμένου τύπου.

$$\begin{aligned} & \text{για κάθε φυσικό διακομιστή } i, \text{ για κάθε «ποσοτικό» τύπο πόρου } l \\ & \sum_{j=1}^{\text{αριθμός αιτημάτων υπηρεσιών}} \left(\sum_{k=1}^{\text{αριθμός ζητούμενων VMs}} x(i, j, k) \times \text{αιτούμενοι πόροι MEC}(j, k, l) \right) \\ & \leq \text{πόροι φυσικών διακομιστών}(i, l) \end{aligned}$$

5.3 ΣΕΝΑΡΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

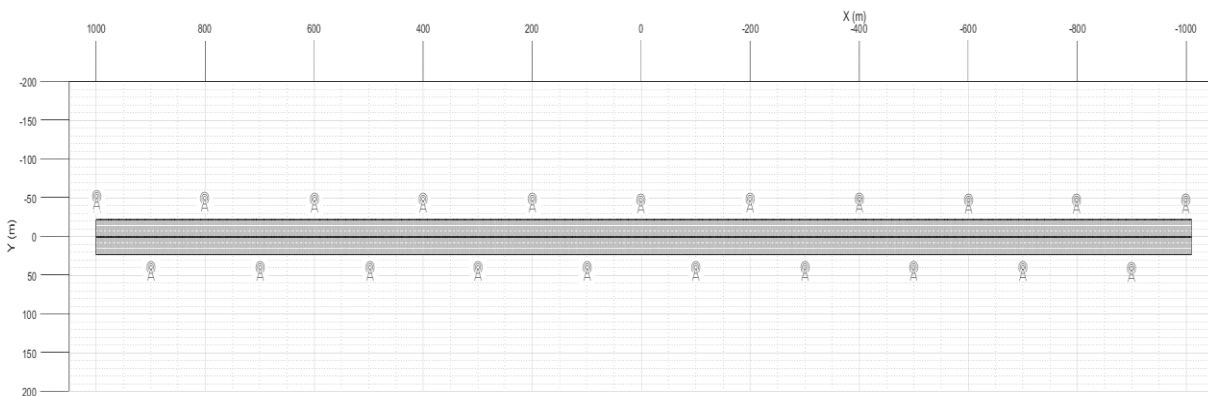
Το σύστημα που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση ήταν ο αλγόριθμος κατανομής πόρων που αναπτύχθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού έργου blueSPACE [85] και η προσομοίωση των σεναρίων πραγματοποιήθηκε στο MATLAB. Το πρώτο σενάριο προσομοίωσης θεωρεί την ανάπτυξη 5G για την κάλυψη ενός αυτοκινητόδρομου, ενώ στο δεύτερο σενάριο γίνεται προσπάθεια ρεαλιστικής αναπαράστασης μίας τοπολογίας 5G, στην πόλη της Βαρκελώνης. Σημειώνεται ότι η τοπολογία κάθε σεναρίου επηρεάζει άμεσα την ασύρματη και την οπτική κατανομή (δηλαδή τις δύο πρώτες φάσεις της συνολικής διαδικασίας κατανομής), ενώ η τρίτη φάση (κατανομή MEC) δεν επηρεάζεται άμεσα από τα χαρακτηριστικά ανάπτυξης του δικτύου, αλλά κυρίως από τη διανομή των διαθέσιμων πόρων MEC και φυσικά το είδος των αιτημάτων για υπηρεσίες computing. Για τις προσομοιώσεις θεωρήθηκε ένας αυξανόμενος αριθμός αιτημάτων υπηρεσιών, για αυτό και τα αποτελέσματα κατανομής που προκύπτουν από την εξέταση του αλγορίθμου συγκρίνονται με μία αστάθμητη κατανομή.

Το σενάριο μαζί με την προσομοίωσή του περιγράφεται λεπτομερώς στις ακόλουθες δύο ενότητες. Όλες οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν σε σύστημα εξοπλισμένο με Intel i7-7700k @ 4,5GHz με 16 GB DDR4 RAM.

5.3.1 Σενάριο αυτοκινητόδρομου

Πρόκειται για ένα φανταστικό σενάριο που αντιπροσωπεύει την κάλυψη 5G που θα παρέχεται σε έναν πολυσύχναστο αυτοκινητόδρομο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1. Το συγκεκριμένο σενάριο βασίζεται σε μια ευθεία περιοχή ενός πολυσύχναστου αυτοκινητόδρομου. Τα RRHs τοποθετούνται στις άκρες του δρόμου σε ίσες αποστάσεις και αναμένεται να βρίσκονται σε υπερυψωμένα σημεία, όπως στην κορυφή των θέσεων των φανών του δρόμου περίπου από 10 έως και 30 μέτρων. Η ενδιάμεση απόσταση (ISD) είναι η απόσταση μεταξύ των RRHs κατά μήκος του δρόμου.

Τα αιτήματα κίνησης μοντελοποιούνται ώστε να δημιουργούνται με τυχαία κατανομή, με ένα μέσο ρυθμό δεδομένων που αποδίδεται σε κάθε χρήστη κινητής τηλεφωνίας σε εύρος $[1, 2 \times \text{Average Rate}]$ Mbps. Επιπλέον, τα αιτήματα κατανέμονται ομοιόμορφα και σε όλες τις περιοχές που βρίσκονται τοποθετημένα τα RRHs. Διευκρινίζεται ότι για το συγκεκριμένο σενάριο θεωρήθηκε ένας πολύ μεγάλος αριθμός αιτημάτων υπηρεσιών.



Σχήμα 5.1. Απεικόνιση σεναρίου αυτοκινητοδρόμου.

Οι παράμετροι προσομοίωσης στον τομέα ασύρματης πρόσβασης παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα.

Παράμετροι Προσομοίωσης	Τιμές
Εύρος ζώνης δέσμης (Beam bandwidth)	760.32 MHz

Απόσταση μεταξύ υποφορέων (Subcarrier spacing)	240 KHz
Αριθμός υποφορέων ανά υποδιάλο (Number of subcarriers per subchannel)	176
Αριθμός διαμορφώσεων μετάδοσης (Number of transmission modes)	4 (QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM)
Αριθμός Περιοχών (Number of areas)	21
Αριθμός RRHs (Number of RRHs)	21
Αριθμός δεσμών ανά RRH (Number of beams per RRH)	2
Δέσμες που παρεμβάλλονται (Interfering beams)	Δέσμες που καλύπτουν τα ίδια σημεία του δρόμου επισημαίνονται ως παρεμβολές

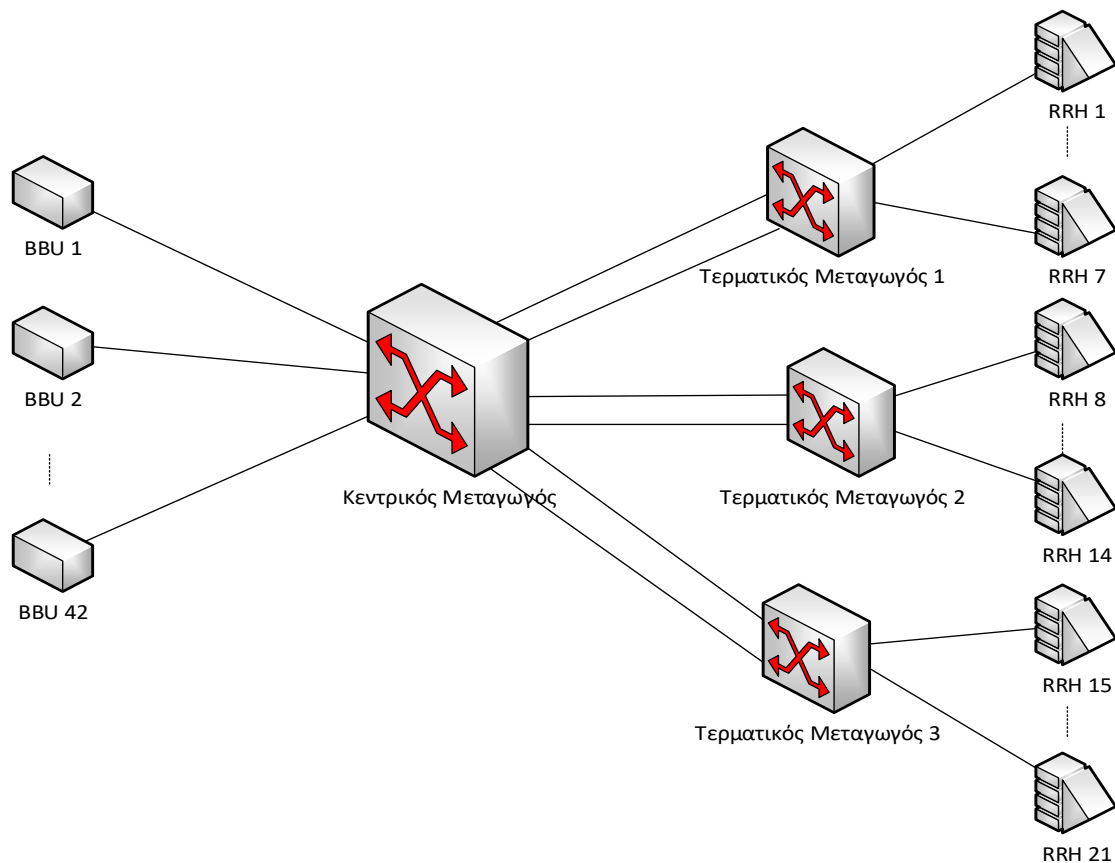
Πίνακας 1: Παράμετροι και τιμές προσομοίωσης για τον τομέα ασύρματης πρόσβασης για το σενάριο αυτοκινητοδρόμου.

Όσον αφορά τον τομέα του οπτικού δικτύου, το σενάριο του αυτοκινητοδρόμου περιλαμβάνει ένα BBU για κάθε πιθανή δέσμη και πλήρεις φασματικές / χωρικές δυνατότητες για κάθε ενδιάμεσο οπτικό κόμβο μεταγωγής. Αναλυτικότερα, το συγκεκριμένο ODN είναι δομημένο σε 4 επίπεδα: 1) BBU's, 2) Κεντρικός Μεταγωγός, 3) Τερματικοί Μεταγωγείς, 4) RRHs. Οι παράμετροι προσομοίωσης του τομέα οπτικού δικτύου και οι τιμές τους παρουσιάζονται στον Πίνακα, ενώ μια επισκόπηση του ODN απεικονίζεται στο Σχήμα που σχεδιάστηκε με το πρόγραμμα Microsoft Visio.

Παράμετροι Προσομοίωσης	Τιμές
Αριθμός BBU's (Number of BBU's)	42 - Κάθε ένα εξοπλισμένο με μία θύρα στον κεντρικό μεταγωγό / 1 πυρήνας / 1 μήκος κύματος
Αριθμός των οπτικών μεταγωγών	1 Κεντρικός μεταγωγός (πλήρως φασματική / χωρική μεταγωγή)

(Number of optical switches)	<ul style="list-style-type: none"> - 42 θύρες στα BBU's/ 1 πυρήνας / 1 μήκος κύματος - 2 θύρες (συνολικά 6) σε κάθε τερματικό μεταγωγό / 4 πυρήνες / 2 μήκη κύματος 3 Τερματικοί μεταγωγοί (πλήρως φασματική / χωρική μεταγωγή) <ul style="list-style-type: none"> - Κάθε ένας εξοπλισμένος με 2 θύρες στον κεντρικό μεταγωγό / 4 πυρήνες / 2 μήκη κύματος - Κάθε ένας εξοπλισμένος με 7 θύρες σε 7 RRHs / 2 πυρήνες / 1 μήκος κύματος
Αριθμός RRHs (Number of RRHs)	21 (Κάθε RRH υποστηρίζει 2 δέσμες) <ul style="list-style-type: none"> - Κάθε ένα εξοπλισμένο με 1 θύρα σε 1 τερματικό μεταγωγό / 2 πυρήνες / 1 μήκος κύματος

Πίνακας 2: Παράμετροι και τιμές προσομοίωσης οπτικού δικτύου για το σενάριο αυτοκινητοδρόμου.



Σχήμα 5.2. Απεικόνιση της οπτικής τοπολογίας / αρχιτεκτονικής του σεναρίου προσομοίωσης αυτοκινητοδρόμου.

Τέλος για τον τομέα του computing θεωρούμε χρήστες κινητών που ζητούν πόρους MEC και ομαδοποιούνται κατά 10. Οι προδιαγραφές των αιτημάτων υπολογιστικών πόρων παρουσιάζεται στους παρακάτω πίνακες.

Ζητούμενοι πόροι MEC	Τιμές
Αριθμός ζητούμενων VMs i	$2 + (i \text{ modulo } 2) \rightarrow [2, 3]$
Αριθμός vCPUs ανά αιτούμενο VM	$2 + (i \text{ modulo } 2) \rightarrow [2, 3]$
Αριθμός of Μνήμης σε GB ανά αιτούμενο VM	$2 + (i \text{ modulo } 2) \rightarrow [2, 3]$
Αριθμός χωρητικότητας δικτύου σε MB ανά αιτούμενο VM	{ίσος με τον απαιτούμενο ρυθμό δεδομένων στον τομέα ασύρματης πρόσβασης}
Αριθμός vGPUs ανά αιτούμενο VM	2
Επίπεδο CPU ανά αιτούμενο VM	$1 + (i \text{ modulo } 3) \rightarrow [1, 3]$
Επίπεδο GPU ανά αιτούμενο VM	$1 + (i \text{ modulo } 3) \rightarrow [1, 3]$

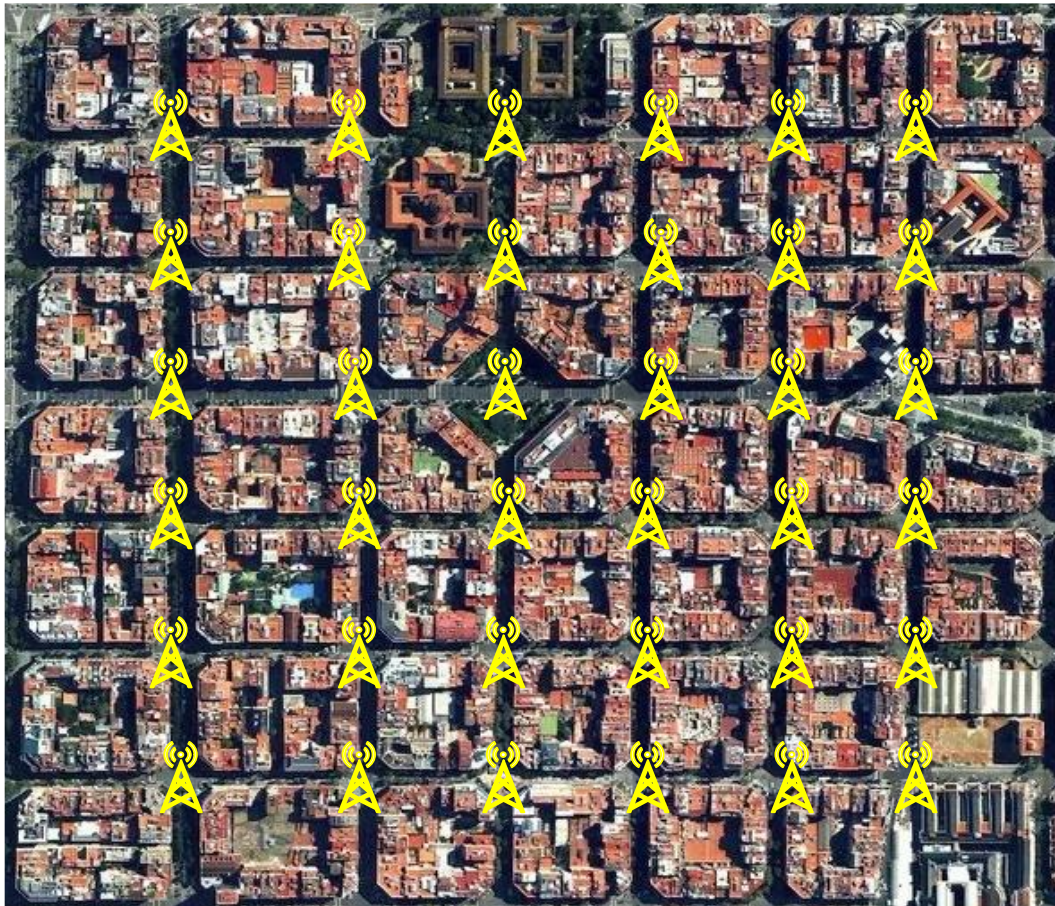
Πίνακας 3: Οι ζητούμενοι πόροι MEC και οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση.

Provided MEC Resource	Value
Αριθμός φυσικών διακομιστών (physical servers)	50
Αριθμός vCPUs ανά φυσικό διακομιστή i	51
Αριθμός μνήμης σε GB ανά φυσικό διακομιστή i	51
Αριθμός αποθήκευσης σε GB Storage ανά φυσικό διακομιστή i	51
Αριθμός χωρητικότητας δικτύου σε MB ανά φυσικό διακομιστή i	12750
Αριθμός vGPUs ανά φυσικό διακομιστή i	51
Επίπεδο CPU ανά φυσικό διακομιστή i	$1 + (i \text{ modulo } 4) \rightarrow [1, 4]$
Επίπεδο GPU ανά φυσικό διακομιστή i	$1 + (i \text{ modulo } 4) \rightarrow [1, 4]$

Πίνακας 4: Οι παρεχόμενοι πόροι MEC και οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση.

5.3.2 Σενάριο «Βαρκελώνη»

Το επόμενο σενάριο που υλοποιήθηκε για την εξέταση της απόδοσης του αλγορίθμου ήταν το σενάριο «Βαρκελώνη». Το συγκεκριμένο σενάριο πρόκειται για ένα φανταστικό σενάριο, ωστόσο έγινε προσπάθεια ρεαλιστικής απεικόνισης του σχεδιασμού και της τοπολογίας εγκατάστασης του δικτύου με βάση τα πρότυπα του 5G. Η ιδέα πάρθηκε από το [86]. Στο συγκεκριμένο άρθρο γίνεται μελέτη της ανάπτυξης ενός δικτύου UDN στα πλαίσια του 5G. Για αυτό το σενάριο λοιπόν θεωρήθηκε ένα συμμετρικό πλέγμα RRHs, ώστε να καλυφθούν επαρκώς όλες οι περιοχές. Πιο συγκεκριμένα για τις 49 περιοχές που πρόκειται να τους παρέχεται κάλυψη εγκαθίστανται 36 RRHs, εντελώς συμμετρικά διατεταγμένα μεταξύ τους, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.3. Σε αυτή την περίπτωση συνεισφέρει σημαντικά η αρχιτεκτονική με βάση την οποία είναι δομημένη η πόλη της Βαρκελώνης. Τα RRHs είναι εξοπλισμένα με 4 δέσμες (beams) το καθένα.



Σχήμα 5.3. Απεικόνιση σεναρίου Βαρκελώνης.

Τα αιτήματα κίνησης μοντελοποιούνται ώστε να δημιουργούνται με τυχαία κατανομή, με ένα μέσο ρυθμό δεδομένων που αποδίδεται σε κάθε χρήστη κινητής

τηλεφωνίας σε εύρος $[1, 2 \times \text{Average Rate}]$ Mbps. Επιπλέον, τα αιτήματα κατανέμονται ομοιόμορφα και σε όλες τις περιοχές που βρίσκονται τοποθετημένα τα RRHs. Σε αντίθεση με το προηγούμενο σενάριο θεωρείται ένα λιγότερο πολυσύχναστο δίκτυο, που έχει ως αποτέλεσμα να καταφθάνουν στο σύστημα λιγότερα αιτήματα υπηρεσιών, συγκεκριμένα 80% λιγότερα. Επιπλέον για αυτό το σενάριο παρέχεται σημαντικά μεγάλο εύρος ρυθμού δεδομένων (έως και 1 Gbps).

Οι παράμετροι προσομοίωσης στον τομέα ασύρματης πρόσβασης παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα.

Παράμετροι Προσομοίωσης	Τιμές
Εύρος ζώνης δέσμης (Beam bandwidth)	760.32 MHz
Απόσταση μεταξύ υπό-φορέων (Subcarrier spacing)	240 KHz
Αριθμός υποφορέων ανά υποδιάυλο (Number of subcarriers per subchannel)	176
Αριθμός διαμορφώσεων μετάδοσης (Number of transmission modes)	4 (QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM)
Αριθμός Περιοχών (Number of areas)	49
Αριθμός RRHs (Number of RRHs)	36
Αριθμός δεσμών ανά RRH (Number of beams per RRH)	4
Δέσμες που παρεμβάλλονται (Interfering beams)	Ως παρεμβαλλόμενες επισημαίνονται οι δέσμες που καλύπτουν τις ίδιες περιοχές (τετράγωνα).

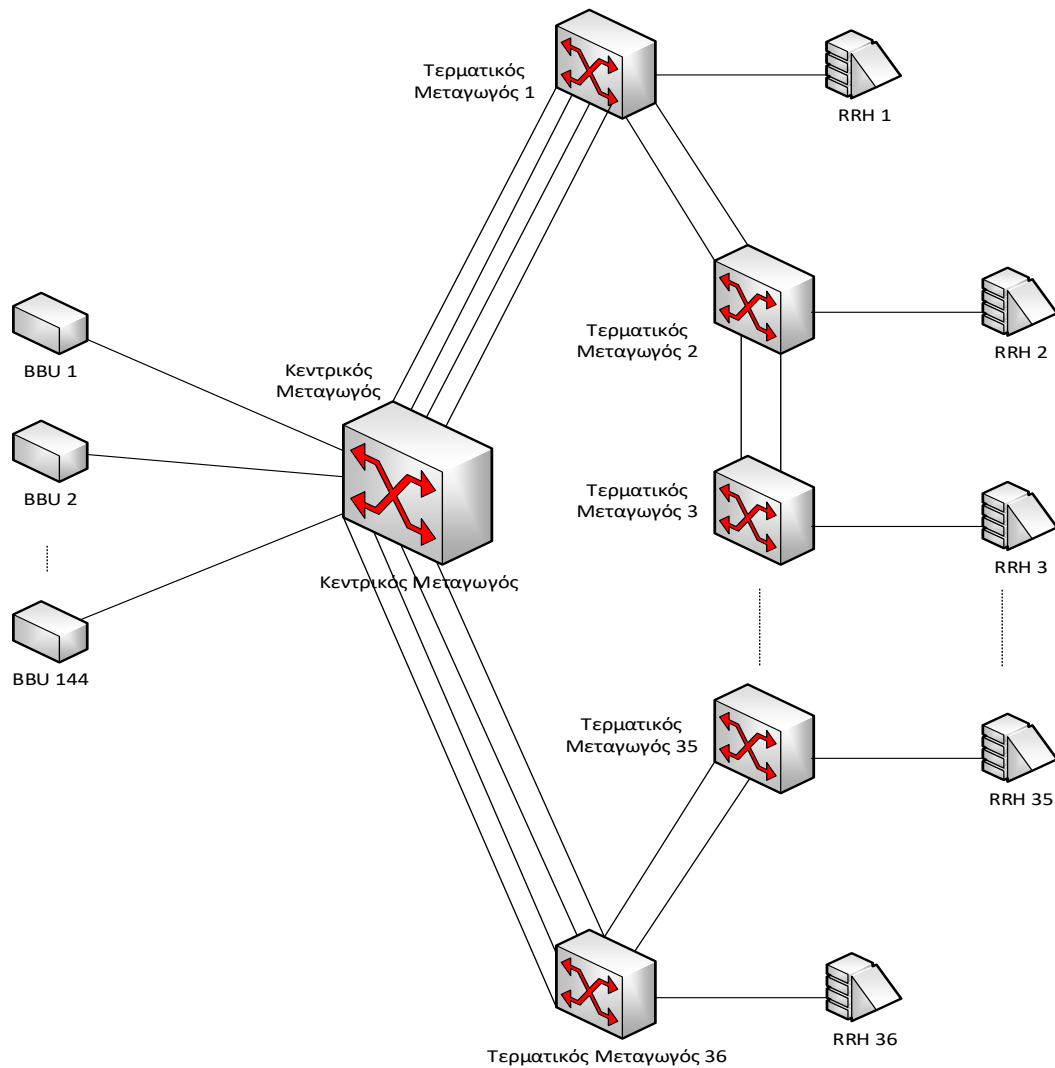
Πίνακας 5: Παράμετροι και τιμές προσομοίωσης για τον τομέα ασύρματης πρόσβασης για το σενάριο «Βαρκελώνη».

Στο συγκεκριμένο σενάριο, ο τομέας του οπτικού δικτύου, είναι δομημένος σε 4 επίπεδα: 1) BBU's, 2) Κεντρικός Μεταγωγός, 3) Τερματικοί Μεταγωγείς, 4) RRHs. Περιλαμβάνει ένα BBU για κάθε πιθανή δέσμη (σύνολο 144) και πλήρεις φασματικές

/ χωρικές δυνατότητες για κάθε ενδιάμεσο οπτικό κόμβο μεταγωγής. Οι παράμετροι προσομοίωσης του τομέα οπτικού δικτύου και οι τιμές τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 6, ενώ μια επισκόπηση του ODN απεικονίζεται στο Σχήμα 5.4. που σχεδιάστηκε με το πρόγραμμα Microsoft Visio.

Παράμετροι Προσομοίωσης	Τιμές
Αριθμός BBU's (Number of BBU's)	144 - Κάθε ένα εξοπλισμένο με μία θύρα στον κεντρικό μεταγωγό / 1 πυρήνας / 1 μήκος κύματος
Αριθμός των οπτικών μεταγωγών (Number of optical switches)	1 Κεντρικός μεταγωγός (πλήρως φασματική / χωρική μεταγωγή) - 144 θύρες στα BBU's/ 1 πυρήνας / 1 μήκος κύματος - 4 θύρες (συνολικά 8) μόνο στον πρώτο και στον τελευταίο μεταγωγό / 8 πυρήνες / 4 μήκη κύματος
	36 Τερματικοί μεταγωγοί (πλήρως φασματική / χωρική μεταγωγή) - Κάθε ενδιάμεσος τερματικός μεταγωγός εξοπλισμένος με: <ul style="list-style-type: none"> • 4 θύρες στον τερματικό μεταγωγό / 8 πυρήνες / 16 μήκη κύματος - Ο 1 ^{ος} και ο τελευταίος τερματικός μεταγωγός εξοπλισμένοι με: <ul style="list-style-type: none"> • 4 θύρες στον κεντρικό μεταγωγό / 8 πυρήνες / 4 μήκη κύματος • 4 θύρες στον τερματικό μεταγωγό / 8 πυρήνες / 16 μήκη κύματος
Αριθμός RRHs (Number of RRHs)	36 (Κάθε RRH υποστηρίζει 4 δέσμες) - Κάθε ένα εξοπλισμένο με 1 θύρα σε 1 τερματικό μεταγωγό / 4 πυρήνες / 1 μήκος κύματος

Πίνακας 6: Παράμετροι και τιμές προσομοίωσης για τον τομέα οπτικής δικτύωσης για το σενάριο «Βαρκελώνη».



Σχήμα 5.4. Απεικόνιση της οπτικής τοπολογίας / αρχιτεκτονικής του σεναρίου προσομοίωσης «Βαρκελώνη».

Τέλος για τον τομέα του computing θεωρούμε χρήστες κινητών που ζητούν πόρους MEC και ομαδοποιούνται κατά 10. Οι προδιαγραφές των αιτημάτων υπολογιστικών πόρων παρουσιάζεται στους παρακάτω πίνακες.

Ζητούμενοι πόροι MEC	Τιμές
Αριθμός ζητούμενων VMs i	$2 + (i \text{ modulo } 2) \rightarrow [2, 3]$
Αριθμός vCPUs ανά αιτούμενο VM	$2 + (i \text{ modulo } 2) \rightarrow [2, 3]$
Αριθμός of Μνήμης σε GB ανά αιτούμενο VM	$2 + (i \text{ modulo } 2) \rightarrow [2, 3]$

Αριθμός χωρητικότητας δικτύου σε MB ανά αιτούμενο VM	{ίσος με τον απαιτούμενο ρυθμό δεδομένων στον τομέα ασύρματης πρόσβασης}
Αριθμός vGPUs ανά αιτούμενο VM	2
Επίπεδο CPU ανά αιτούμενο VM	$1 + (i \text{ modulo } 3) \rightarrow [1, 3]$
Επίπεδο GPU ανά αιτούμενο VM	$1 + (i \text{ modulo } 3) \rightarrow [1, 3]$

Πίνακας 7: Οι ζητούμενοι πόροι MEC και οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση.

Provided MEC Resource	Value
Αριθμός φυσικών διακομιστών (physical servers)	50
Αριθμός vCPUs ανά φυσικό διακομιστή i	51
Αριθμός μνήμης σε GB ανά φυσικό διακομιστή i	51
Αριθμός αποθήκευσης σε GB Storage ανά φυσικό διακομιστή i	51
Αριθμός χωρητικότητας δικτύου σε MB ανά φυσικό διακομιστή i	12750
Αριθμός vGPUs ανά φυσικό διακομιστή i	51
Επίπεδο CPU ανά φυσικό διακομιστή i	$1 + (i \text{ modulo } 4) \rightarrow [1, 4]$
Επίπεδο GPU ανά φυσικό διακομιστή i	$1 + (i \text{ modulo } 4) \rightarrow [1, 4]$

Πίνακας 8: Οι παρεχόμενοι πόροι MEC και οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση.

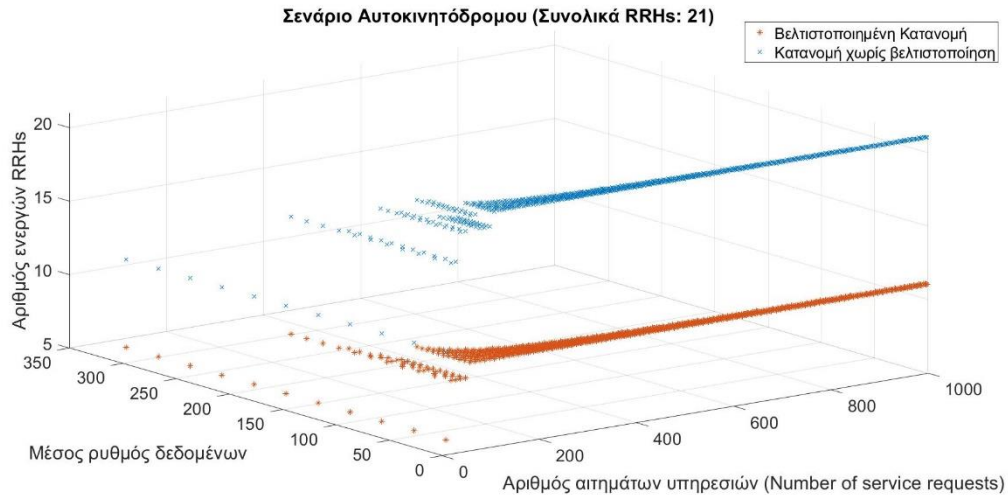
5.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Οι προσομοιώσεις για την αξιολόγηση των ανεπτυγμένων αλγορίθμων κατανομής πόρων έχουν διεξαχθεί διαδοχικά στο MATLAB. Πρόκειται για ένα υπολογιστικό περιβάλλον αριθμητικών υπολογισμών και μία γλώσσα προγραμματισμού που αναπτύχθηκε από την MathWorks. Το MATLAB επιτρέπει εύκολους χειρισμούς πινάκων, σχεδίαση συναρτήσεων και δεδομένων, δημιουργία διαπαφών χρήστη κ.α. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για έναν αυξανόμενο αριθμό αιτημάτων υπηρεσιών που μπορούν να αντιμετωπιστούν από την υποδομή που παρέχεται από το υπό εξέταση σενάριο. Η συνολική διαδικασία επικεντρώνεται στις δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας από την προτεινόμενη προσέγγιση βελτιστοποίησης. Για το λόγο αυτό, τα αποτελέσματα συγκρίνονται με προεπιλεγμένες αντικειμενικές συναρτήσεις, οι οποίες δεν περιλαμβάνουν συντελεστές για τη στάθμιση των κατανομών. Ωστόσο, σε όλες τις περιπτώσεις, τα αιτήματα υπηρεσιών λαμβάνουν πλήρως όλους τους πόρους που αιτούνται. Ακόμη εξαιτίας της χρήσης του γραμμικού προγραμματισμού που χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση, εξασφαλίζεται χαμηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα. Στις ακόλουθες ενότητες, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ξεχωριστά για τα σενάρια προσομοίωσης ενός πολυσύχναστου αυτοκινητοδρόμου και για την πόλη της Βαρκελώνης. Τα αποτελέσματα χωρίζονται σε τρεις φάσεις κατανομής (κατανομή ασύρματων πόρων, κατανομή οπτικών πόρων, κατανομή υπολογιστικών πόρων).

5.4.1 Σενάριο αυτοκινητόδρομου

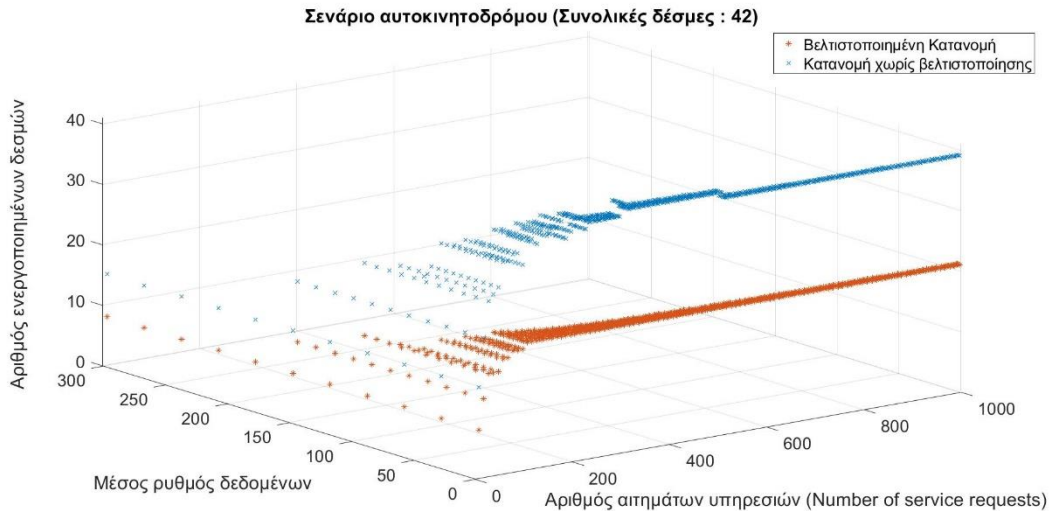
Κατανομή ασύρματων πόρων

Το Σχήμα 5.6. αναφέρεται στον αριθμό των ενεργοποιημένων RRHs, σε σχέση με το μέσο ρυθμό δεδομένων και τον αριθμό των αιτημάτων υπηρεσιών. Καταγράφονται δύο ειδών κατανομές α) κατανομή χωρίς βελτιστοποίηση, β) κατανομή με χρήση του κατανεμητή ασύρματων πόρων.



Σχήμα 5.6. Ο αριθμός ενεργοποιημένων RRHs στο σενάριο προσομοίωσης αυτοκινητόδρομου.

Αυτό που γίνεται άμεσα αντιληπτό είναι ότι στη μη βελτιστοποιημένη κατανομή καθώς αυξάνεται ο αριθμός των αιτημάτων υπηρεσιών, χρησιμοποιούνται πολλά RRHs (στην προκειμένη περίπτωση και τα 21 που υπάρχουν στο σύστημα) προκειμένου να μοιραστεί το φορτίο κίνησης. Αντίθετα κατά τη βελτιστοποιημένη κατανομή παρατηρούμε ότι για τον ίδιο αριθμό αιτημάτων υπηρεσιών είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν σημαντικά λιγότερα RRHs. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται μόλις 11 από τα 21 διαθέσιμα RRHs, που μεταφράζεται σε μία μείωση της τάξης περίπου του 50%. Τα RRHs τα οποία πλέον δε χρησιμοποιούνται, μεταβαίνουν σε «λειτουργία ύπνου», προσφέροντας έτσι στο σύστημα σημαντική μείωση της κατανάλωση ενέργειας. Επίσης είναι φανερό ότι στην αρχή της προσομοίωσης χρησιμοποιούνται λιγότερα RRHs από ότι στη συνέχεια. Αυτό συμβαίνει γιατί καθώς καταφθάνουν στο σύστημα περισσότερα αιτήματα υπηρεσιών αυξάνεται το φορτίο κίνησης που πρέπει να διαχειριστούν τα RRHs. Όπως γίνεται αντιληπτό ο αριθμός των ενεργοποιημένων RRHs δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από τον αριθμό των χρηστών (αριθμός αιτημάτων υπηρεσιών). Αυτό συμβαίνει διότι κατά την παραμετροποίηση του συστήματος θεωρήθηκε ότι οι χρήστες κατανέμονται ομοιόμορφα και στις 21 περιοχές, επομένως, ακόμη και με τον μικρότερο αριθμό χρηστών, όλες οι περιοχές απαιτούν κάλυψη με επαρκή αριθμό RRHs και δεσμών.



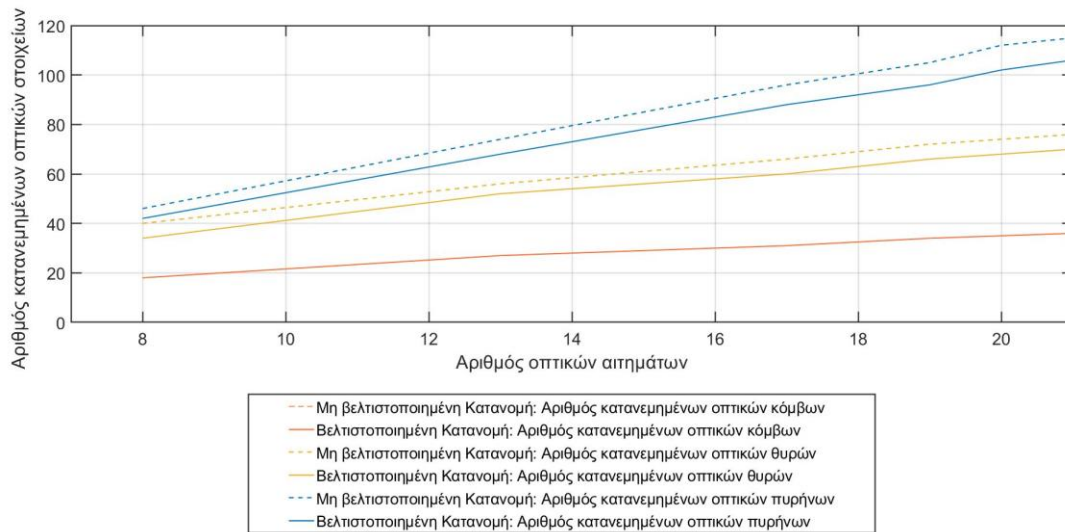
Σχήμα 5.7. Ο αριθμός ενεργοποιημένων δεσμών / BBU's στο σενάριο προσομοίωσης αυτοκινητοδρόμου.

Στο Σχήμα 5.7. γίνεται λόγος για τις δέσμες που χρησιμοποιούνται από τα RRH's, προκειμένου να εξυπηρετήσουν τα αιτήματα υπηρεσίας που καταφθάνουν στο σύστημα, σε σχέση με το μέσο ρυθμό δεδομένων και του αριθμού των χρηστών (αιτήματα υπηρεσιών). Σύμφωνα με την παραμετροποίηση του συστήματος κάθε ένα RRH περιλαμβάνει δύο δέσμες. Όπως και στην περίπτωση των ενεργών RRHs, έτσι και εδώ παρατηρούμε ότι κατά τη βελτιστοποιημένη κατανομή των πόρων, εξοικονομούνται σχεδόν οι μισές δέσμες. Πιο συγκεκριμένα ενεργοποιούνται συνολικά περίπου οι 21 από τις 42 συνολικά δέσμες που υπάρχουν στο σύστημα. Τα οφέλη από την ελαχιστοποίηση ενεργοποίησης των δεσμών των RRH's, δε σταματούν μόνο εδώ. Κάθε δέσμη αντιστοιχίζεται σε ένα BBU, μέσω της διεπαφής fronthaul. Αυτό σημαίνει ότι με την ελαχιστοποίηση ενεργοποίησης των δεσμών, ενεργοποιούνται και λιγότερα BBU's, κάτι που αποτελεί επίσης ένα πολύτιμο χαρακτηριστικό της κατανομής των πόρων και της εξοικονόμησης της ενέργειας.

Κατανομή οπτικών πόρων

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την κατανομή των οπτικών πόρων αναπαρίστανται στο Σχήμα 5.8. Το συγκεκριμένο γράφημα περιλαμβάνει τον αριθμό των εκχωρημένων οπτικών στοιχείων (κόμβοι, θύρες, πυρήνες) έναντι του αριθμού των οπτικών αιτημάτων. Όσον αφορά τα αιτήματα στον τομέα του οπτικού δικτύου, πρόκειται για την εδραίωση των απαιτούμενων οπτικών διαδρομών, ώστε να αντιστοιχιστούν τα RRHs στα BBU's. Είναι προφανές ότι κατά τη βελτιστοποιημένη κατανομή γίνεται σημαντική εξοικονόμηση πόρων σε οπτικές θύρες και οπτικούς

πυρήνες. Πιο συγκεκριμένα για τον πλήρη αριθμό οπτικών αιτημάτων (21), επιτυγχάνεται μείωση περίπου 7,8% της χρήσης των οπτικών πυρήνων και 7,9% της χρήσης των οπτικών θυρών. Από το γράφημα γίνεται επίσης αντιληπτό ότι δεν παρουσιάζεται καμία βελτιστοποίηση στους χρησιμοποιούμενους οπτικούς κόμβους. Κάτι τέτοιο είναι απόλυτα φυσιολογικό καθώς η διανομή των οπτικών αιτημάτων και η τοπολογία που έχει αναπτυχθεί για το συγκεκριμένο σενάριο προσομοίωσης, απαιτούν τη χρήση όλων των μεταγωγών σε όλες τις περιπτώσεις.

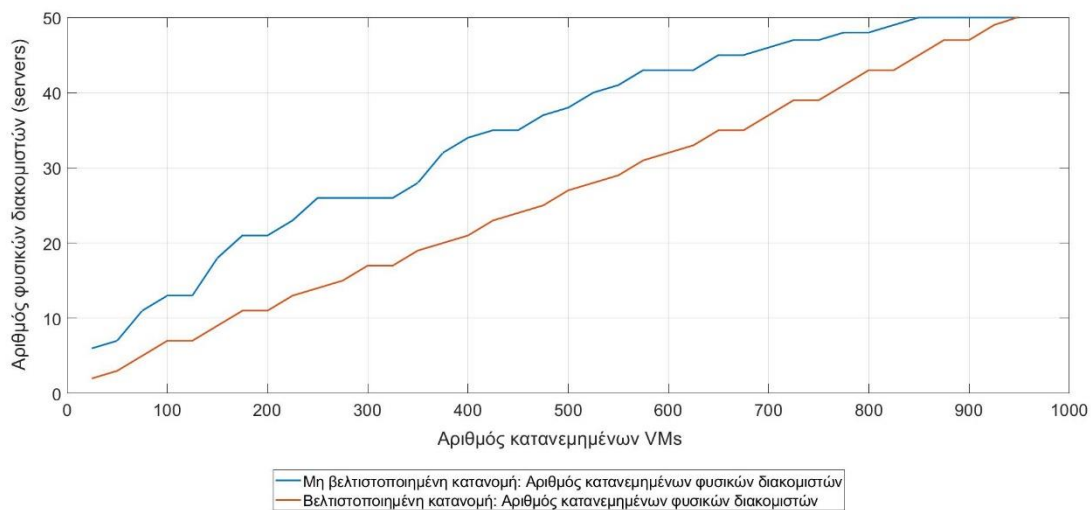


Σχήμα 5.8. Ο αριθμός των κατανεμημένων οπτικών κόμβων / θυρών / πυρήνων στο σενάριο προσομοίωσης αυτοκινητόδρομου.

Κατανομή υπολογιστικών πόρων

Το Σχήμα 5.9. αφορά την κατανομή των υπολογιστικών πόρων. Πρόκειται για τους εκχωρημένους φυσικούς διακομιστές που βρίσκονται τοποθετημένοι σε ένα νέφος κινητής στα άκρα του δικτύου (MEC), προς τον αριθμό των εκχωρημένων εικονικών μηχανών (VMs). Επισημαίνεται ότι οι εικονικές μηχανές αποτελούν παραμετροποίηση του συστήματος για αυτό και εξαιρούνται από την κατανομή. Ο αριθμός των εικονικών μηχανών ποικίλει ανάλογα με τη ζήτηση του κάθε αιτήματος υπηρεσίας. Από το γράφημα προκύπτει ότι κατά τη βελτιστοποίηση επιτυγχάνεται σημαντική μείωση των χρησιμοποιούμενων φυσικών διακομιστών σε σχέση με τη μη βελτιστοποιημένη κατανομή. Σημειώνεται ότι κατά τη βελτιστοποίηση εξετάζεται πάντα η διαθεσιμότητα των πόρων του κάθε διακομιστή (CPU, RAM, Network Capacity, Storage, GPU). Επίσης ελέγχονται οι δυνατότητες κάθε διακομιστή όσον αφορά τις κατηγορίες CPU και GPU, ώστε να εξασφαλίζεται ότι οι ζητούμενες εικονικές μηχανές θα

«φιλοξενηθούν» σε διακομιστές που πληρούν τις ζητούμενες προδιαγραφές. Αυτό μάλιστα αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τη διαδικασία κατανομής. Ένα ενδιαφέρον στοιχείο που προκύπτει από το γράφημα είναι ότι για μεγάλο αριθμό κατανεμημένων εικονικών μηχανών γίνεται χρήση όλων των φυσικών διακομιστών που υπάρχουν στο σύστημα. Αυτό συμβαίνει γιατί εξαιτίας των πολλών αιτημάτων υπηρεσιών που καταφθάνουν στο σύστημα, προκύπτουν όλο και περισσότερα αιτήματα για κατανομή εικονικών μηχανών (VMs). Αποτέλεσμα αυτού του γεγονότος είναι όλοι οι πόροι του συστήματος να έχουν κατανεμηθεί και η κατανομή να μη μπορεί να συνεχιστεί λόγω έλλειψης αυτών των πόρων.

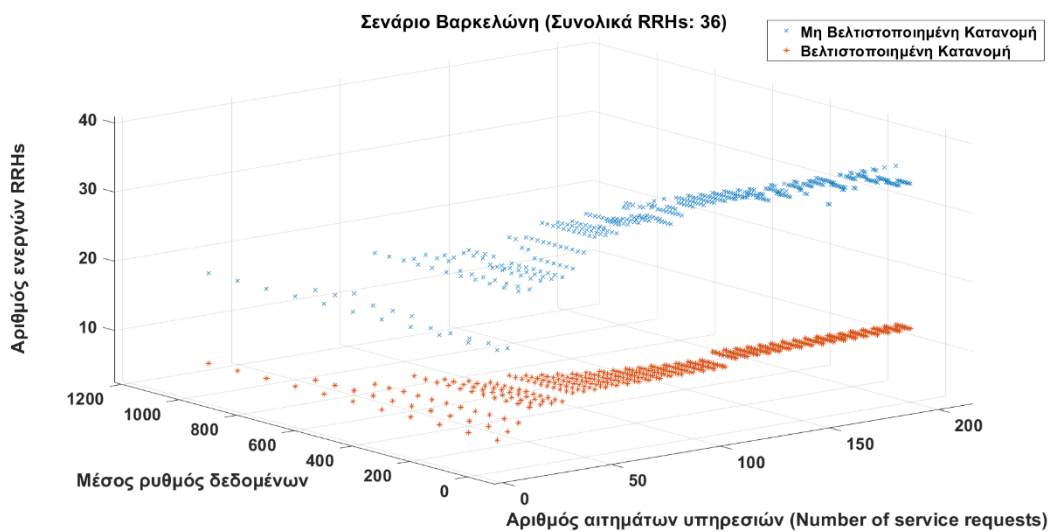


Σχήμα 5.9. Ο αριθμός κατανεμημένων φυσικών διακομιστών στο σενάριο προσομοίωσης αυτοκινητοδρόμου.

5.4.2 Σενάριο «Βαρκελώνη»

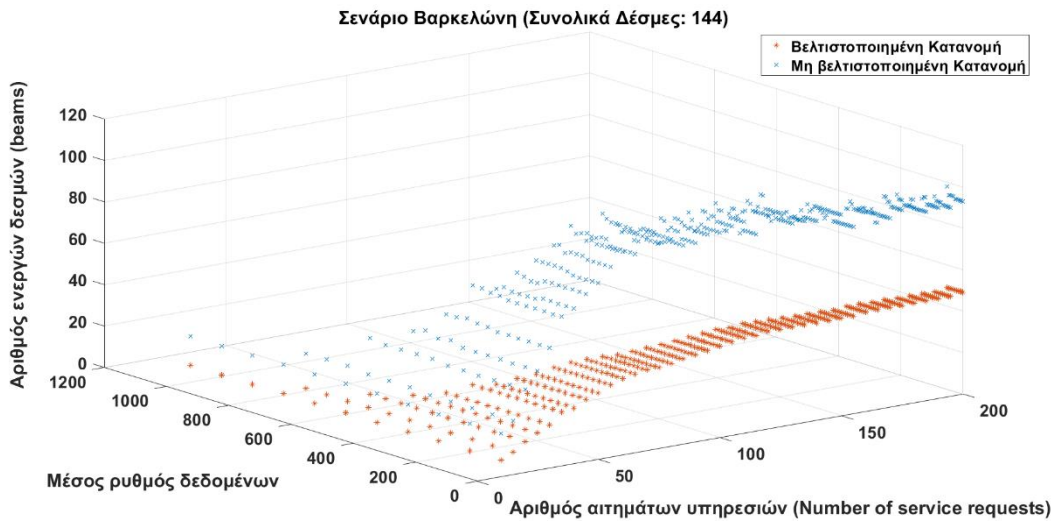
Κατανομή ασύρματων πόρων

Στο Σχήμα 5.10. φαίνεται ο αριθμός των ενεργοποιημένων RRHs, σε σχέση με το μέσο ρυθμό δεδομένων και τον αριθμό των αιτημάτων υπηρεσιών. Καταγράφονται και πάλι δύο ειδών κατανομές α) κατανομή χωρίς βελτιστοποίηση, β) κατανομή με χρήση του κατανεμητή ασύρματων πόρων.



Σχήμα 5.10. Ο αριθμός ενεργοποιημένων RRHs στο σενάριο προσομοίωσης «Βαρκελώνη».

Στο συγκεκριμένο γράφημα γίνεται καλύτερα αντιληπτή η βελτιστοποιημένη κατανομή που πραγματοποιεί ο συγκεκριμένος αλγόριθμος. Σε αυτό οφείλεται ο μεγαλύτερος αριθμός των RRHs που τοποθετήθηκε σε τοπολογία συμμετρικού πλέγματος αλλά και οι σημαντικά περισσότερες περιοχές (49), που είχαν ανάγκη επαρκούς κάλυψης. Ακόμη εξαιτίας του μεγαλύτερου εύρους ρυθμού μετάδοσης που δόθηκε ως παράμετρος στο σύστημα είναι διακριτή μία μεγαλύτερη διασπορά των τιμών κυρίως στην περίπτωση της μη βελτιστοποιημένης κατανομής. Πιο αναλυτικά από τα 36 συνολικά RRHs του συστήματος, στην περίπτωση της μη βελτιστοποιημένης κατανομής χρησιμοποιούνται σχεδόν όλα. Αντίθετα στην περίπτωση της βελτιστοποιημένης κατανομής ενεργοποιούνται μόλις τα 2/3 των συνολικών RRHs (περίπου 12-13), ενώ τα υπόλοιπα μεταβαίνουν σε «λειτουργία ύπνου». Αυτό μεταφράζεται σε μία μείωση της λειτουργίας των RRHs σε ποσοστό περίπου 67%.



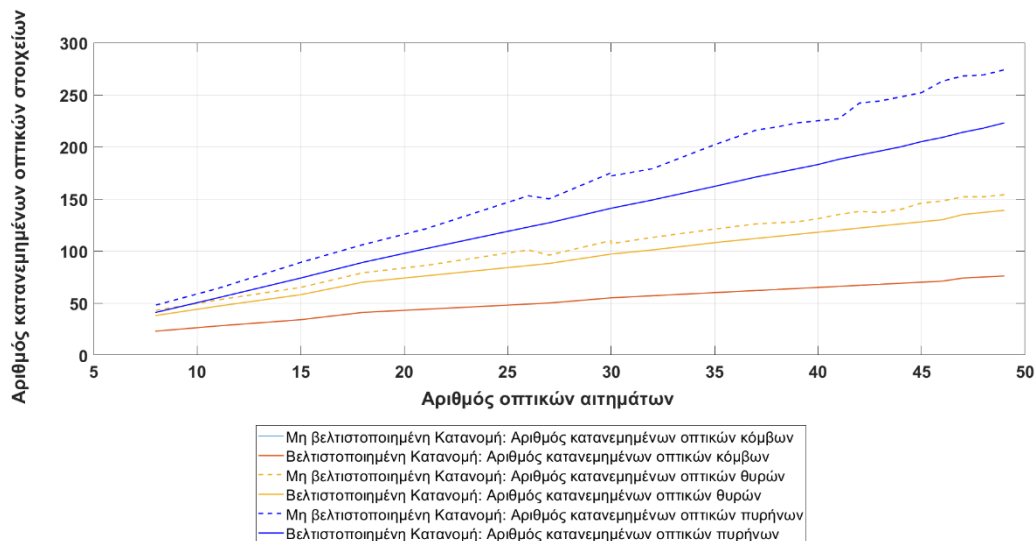
Σχήμα 5.11. Ο αριθμός ενεργοποιημένων δεσμών / BBU's στο σενάριο προσομοίωσης «Βαρκελώνη».

Στη γραφική παράσταση στο Σχήμα 5.11. απεικονίζεται η κατανομή των δεσμών που προσφέρει ο αλγόριθμος, σε σχέση με μία μη βελτιστοποιημένη κατανομή. Υπενθυμίζεται ότι το σύστημα έχει παραμετροποιηθεί ώστε κάθε RRH να περιλαμβάνει τέσσερις δέσμες. Στη μη βελτιστοποιημένη κατανομή είναι εμφανές ότι καθώς αυξάνονται τα αιτήματα υπηρεσιών αυξάνονται οι δέσμες των RRHs που χρησιμοποιούνται. Μάλιστα πολύ γρήγορα φαίνεται ότι χρησιμοποιούνται σχεδόν όλες οι δέσμες που διαθέτει το σύστημα. Αντίθετα κατά τη βελτιστοποιημένη κατανομή ο αλγόριθμος επιτυγχάνει μία σταθμισμένη κατανομή, με σαφώς μικρότερη χρήση πόρων. Ο αλγόριθμος επιτυγχάνει μία βελτιστοποίηση κατανομής πόρων περίπου 47,5%. Αυτό έχει άμεσο αντίκτυπο και στην ενεργοποίηση των BBU's, όπου θα χρησιμοποιηθούν κατά μέσο όρο 47,5% λιγότερα BBU's.

Κατανομή οπτικών πόρων

Το γράφημα της κατανομής των πόρων οπτικής δικτύωσης για το σενάριο «Βαρκελώνη» αποτυπώνεται στο Σχήμα 5.12. Περιλαμβάνει τον αριθμό των εκχωρημένων οπτικών στοιχείων (κόμβοι, θύρες, πυρήνες) συναρτήσει του αριθμού των οπτικών αιτημάτων. Από το γράφημα όπως και στην περίπτωση του σεναρίου του αυτοκινητόδρομου γίνεται αντιληπτό ότι δεν παρουσιάζεται καμία βελτιστοποίηση

στους χρησιμοποιούμενους οπτικούς κόμβους, καθώς η διανομή των οπτικών αιτημάτων και η τοπολογία που έχει αναπτυχθεί για το συγκεκριμένο σενάριο προσομοίωσης, απαιτούν τη χρήση όλων των μεταγωγών σε όλες τις περιπτώσεις. Αντίθετα επιτυγχάνεται σημαντική μείωση της χρήσης των οπτικών πυρήνων και των οπτικών θυρών. Μάλιστα είναι εμφανές ότι ακόμη και για μεγάλο αριθμό οπτικών αιτημάτων που καταφθάνουν στο σύστημα, ο αλγόριθμος όχι απλά συνεχίζει να είναι αποδοτικός, αλλά επιτυγχάνεται, μέσω της διαδικασίας βελτιστοποίησης, ακόμη μεγαλύτερη μείωση αυτών των οπτικών στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα με τη χρήση του οπτικού κατανεμητή χρησιμοποιούνται συνολικά 17,6% λιγότεροι οπτικοί πυρήνες και συνολικά 11,4% λιγότερες οπτικές θύρες, από ότι σε μία μη βελτιστοποιημένη κατανομή.

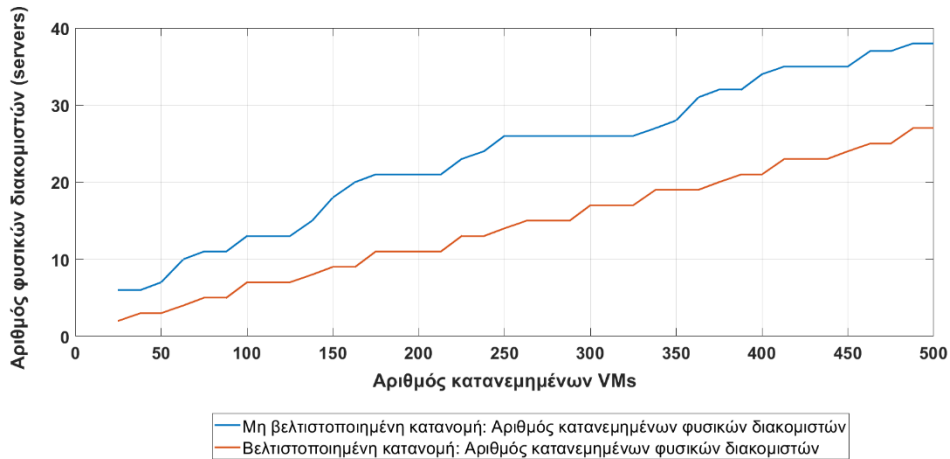


Σχήμα 5.12. Ο αριθμός των κατανεμημένων οπτικών κόμβων / θυρών / πυρήνων στο σενάριο προσομοίωσης «Βαρκελώνη».

Κατανομή υπολογιστικών πόρων

Το γράφημα στο Σχήμα 5.13. αφορά την κατανομή των υπολογιστικών πόρων (MEC). Από το γράφημα προκύπτει ότι κατά τη βελτιστοποίηση με τη χρήση του κατανεμητή υπολογιστικών πόρων επιτυγχάνεται σημαντική μείωση των χρησιμοποιούμενων φυσικών διακομιστών, σε σχέση με τη μη βελτιστοποιημένη κατανομή. Σε αυτό το σενάριο επειδή ο αριθμός αιτημάτων υπηρεσιών ήταν σημαντικά μικρότερος από το προηγούμενο σενάριο του αυτοκινητοδρόμου, είναι εμφανές ότι δεν χρησιμοποιήθηκαν όλοι οι διαθέσιμοι φυσικοί διακομιστές και έτσι δεν εξαντλήθηκαν

όλοι οι πόροι του συστήματος. Ο αριθμός των απαιτούμενων φυσικών διακομιστών, αυξάνεται σε σχέση με τα ζητούμενα VMs. Είναι εμφανής και σε αυτή την περίπτωση η δουλειά που κάνει ο αλγόριθμος, εξοικονομώντας ένα πολύ σημαντικό ποσοστό διακομιστών, ικανοποιώντας πάντα τους περιορισμούς που έχουν επιβληθεί, που φτάνει περίπου το 29%, για την περίπτωση των 500 καταχωρημένων VMs.



Σχήμα 5.13. Ο αριθμός κατανεμημένων φυσικών διακομιστών στο σενάριο προσομοίωσης αυτοκινητοδρόμου.

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Είναι πλέον αδιαμφισβήτητο ότι τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητάς μας. Ποτέ άλλοτε οι ζωές των ανθρώπων δεν ήταν τόσο εξαρτημένες από την ανάγκη για επικοινωνία. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τα δίκτυα επικοινωνιών να γνωρίσουν μία πρωτοφανή ανάπτυξη. Οι συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες των χρηστών, σε συνδυασμό με το μεγάλο πλήθος των συνδεδεμένων συσκευών και την ανάπτυξη όλο και πιο απαιτητικών εφαρμογών, δημιουργούν τεράστια συμφόρηση στο δίκτυο και δεν είναι πλέον δυνατή η εξυπηρέτηση τους από τα υπάρχοντα δίκτυα. Για αυτό το λόγο, τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς κινητών επικοινωνιών είναι προ των πυλών και σιγά σιγά ξεκινά η εφαρμογή τους σε πολλά σημεία του κόσμου σε πειραματικό στάδιο.

Όπως έχει προαναφερθεί τα δίκτυα 5G, δεν αποτελούν μία επαναστατική αλλαγή σε σχέση με τα υπάρχοντα δίκτυα, αλλά πρόκειται για πολλές νέες τεχνολογίες και ανάπτυξη των ήδη υπάρχοντων. Πλέον μιλάμε για δίκτυα καθορισμένα από το λογισμικό, που απεξαρτώνται από την ύπαρξη φυσικού εξοπλισμού και έχουν τη δυνατότητα να εκμεταλλεύονται τις τεχνολογίες της εικονικοποίησης στο έπακρο. Στόχος αυτών των δικτύων είναι να μετακινηθούν τα σημεία πρόσβασης πιο κοντά στους χρήστες, για αυτό λοιπόν οι συμβατικοί σταθμοί βάσης θα αντικατασταθούν από πολλούς μικρότερους σταθμούς βάσης με μικρότερη ακτίνα κάλυψης.

Όλες αυτές οι νέες τεχνολογίες που θα ενσωματώνει το 5G, θα προσφέρουν στους χρήστες πολύ υψηλούς ρυθμούς δεδομένων, χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, σχεδόν μηδενική καθυστέρηση και βελτιωμένη συνδεσιμότητα και αξιοπιστία. Ωστόσο όλες αυτές οι τεχνολογίες σε συνδυασμό με την ιδέα ενός πιο πυκνού δικτύου (UDN), θα προσθέσουν νέα επίπεδα πολυπλοκότητας σε αυτά τα δίκτυα και θα καταστήσουν την αποτελεσματική κατανομή των πόρων μία πολύ απαιτητική διαδικασία. Η κατανομή των πόρων στα δίκτυα 5G, αποτελείται από τρεις τομείς με βάση την αρχιτεκτονική: τον τομέα της ασύρματης πρόσβασης, τον τομέα της οπτικής δικτύωσης και την κατανομή των υπολογιστικών πόρων.

Η κατανομή των πόρων στον τομέα της ασύρματης πρόσβασης, επικεντρώνεται στους πόρους «πάνω στον αέρα», οι οποίοι εκχωρούνται απευθείας στους χρήστες κινητής τηλεφωνίας 5G. Οι βασικές οντότητες για ασύρματη πρόσβαση είναι τα RRHs, τα οποία τοποθετούνται στην άκρη του δικτύου, σε περιοχές κοντά στο χρήστη και

παρέχουν υποδοχές ασύρματης επικοινωνίας στον εξοπλισμό του χρήστη (UE). Η διαχείριση των πόρων περιλαμβάνει ένα λαβύρινθο αλληλοσυνδεδεμένων αλγορίθμων, ο καθένας προσαρμοσμένος και βελτιστοποιημένος για μια συγκεκριμένη εργασία. Με την τεχνολογία RAN να εξελίσσεται συνεχώς, η προσθήκη νέων λειτουργιών του συστήματος γίνεται συνήθως με το σχεδιασμό νέων αλγορίθμων ή με τον επανασχεδιασμό ήδη υπαρχόντων.

Η κατανομή των πόρων στον τομέα της οπτικής δικτύωσης, έγκειται στην παροχή κατάλληλων συνδέσεων οπτικών διαδρομών (lightpaths) για τα μεταδιδόμενα σήματα. Για αυτό το λόγο έρχεται στο προσκήνιο η ιδέα της ελαστικής οπτικής δικτύωσης (EON), σε συνδυασμό με τα νέα φασματικά/χωρικά δίκτυα (SS-FON) που μπορούν να συνδυάσουν την πολυπλεξία SDM με τις τεχνολογίες ελαστικού οπτικού δικτύου. Αυτό πρόκειται να προσφέρει σημαντική αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος μετάδοσης και να βελτιώνει την ευελιξία του δικτύου μέσω της από κοινού διαχείρισης φασματικών και χωρικών πόρων.

Η κατανομή των υπολογιστικών πόρων έχει ως σκοπό τη βέλτιστη δυνατή ανάθεση των πόρων επεξεργασίας που βρίσκονται εγκατεστημένοι στα νέφη κινητής τηλεφωνίας. Οι συγκεκριμένοι πόροι είναι υπεύθυνοι για την εκτέλεση απαιτητικών διεργασιών που εκφορτώνονται στα BBU's από τους χρήστες, αλλά και για βασικές λειτουργίες όπως για παράδειγμα επεξεργασία βασικής ζώνης.

Το σύστημα κατανομής πόρων που προτάθηκε, πραγματοποιεί βελτιστοποίηση και στους τρεις τομείς που προαναφέρθηκαν. Όλες οι φάσεις βελτιστοποίησης διαμορφώνονται ως προβλήματα ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (ILP) χαμηλής πολυπλοκότητας και στη συνέχεια επιλύονται μέσω κατάλληλα αναπτυγμένου αλγορίθμου. Το συγκεκριμένο σύστημα υποστηρίζει την ανάπτυξη πολλών και διαφορετικών τοπολογιών τόσο για τον τομέα της ασύρματης πρόσβασης, όσο και για τον τομέα της οπτικής δικτύωσης.

Για την αξιολόγηση του συστήματος αναπτύχθηκαν δύο σενάρια προσομοίωσης, το πρώτο για ένα τμήμα ενός πολυσύχναστου αυτοκινητόδρομου και το δεύτερο για μία ρεαλιστική αναπαράσταση δικτύου για την πόλη της Βαρκελώνης. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις ήταν πολύ ενθαρρυντικά. Στον τομέα της ασύρματης πρόσβασης, εξοικονομείται ένα πολύ μεγάλο ποσοστό πόρων, μέσω της στρατηγικής απενεργοποίησης των RRHs και της αποτελεσματικής κατανομής των αιτημάτων υπηρεσιών στα RRHs. Αυτό έχει επίσης άμεσο αντίκτυπο στην κατανάλωση της ενέργειας, λόγω της μείωσης των ενεργών RRHs. Επιπλέον οι χρησιμοποιούμενες δέσμες των RRHs, παρουσιάζουν σημαντική μείωση. Επειδή κάθε δέσμη αντιστοιχίζεται σε ένα BBU, μέσω της διεπαφής fronthaul, με την ελαχιστοποίηση ενεργοποίησης των δεσμών, ενεργοποιούνται και λιγότερα BBU's, κάτι που αποτελεί άλλο ένα σημαντικό στοιχείο που προσφέρει το προτεινόμενο σύστημα.

Στη βελτιστοποίηση των οπτικών πόρων, παρατηρήθηκε επίσης αξιοσημείωτη μείωση των χρησιμοποιούμενων οπτικών στοιχείων, που έγκειται στη μείωση των χρησιμοποιούμενων οπτικών πυρήνων και των μηκών κύματος. Η μείωση στη χρήση των οπτικών πόρων, σημαίνει περισσότερα οπτικά κανάλια προς μετάδοση.

Η κατανομή των υπολογιστικών πόρων στο συγκεκριμένο σύστημα έχει ως σκοπό την εκχώρηση των διαθέσιμων φυσικών διακομιστών με βάση τα χαρακτηριστικά τους, στις αιτούμενες εικονικές μηχανές από τους χρήστες. Από τις προσομοιώσεις και για τα δύο σενάρια, σημειώθηκε σημαντική μείωση στην εκχώρηση των φυσικών διακομιστών από το συγκεκριμένο αλγόριθμο σε σχέση με μία μη βελτιστοποιημένη κατανομή.

Εν κατακλείδι, το σύστημα που προτάθηκε αποτελεί αδιαμφισβήτητα ένα πολύ αποτελεσματικό καταναμητή πόρων, που προσφέρει βελτιστοποίηση και στους τρεις τομείς της κατανομής πόρων στα νέα δίκτυα 5G.

Μελλοντικές Επεκτάσεις: Όπως έχει προαναφερθεί το σύστημα που προτείνεται, πρόκειται για έναν πλήρη καταναμητή πόρων που προσφέρει βελτιστοποίηση και στους τρεις τομείς βελτιστοποίησης για συστήματα 5G και είναι ικανό να ανταπεξέλθει σε ένα πλήθος νέων σεναρίων και περιπτώσεις χρήσεων με διαφορετικές τοπολογίες και διαμορφώσεις σε όλους τους τομείς. Υπάρχει πλήθος σεναρίων που μπορούν να υποστηριχθούν και να αναπτυχθούν και είναι για παράδειγμα η κατανομή πόρων σε ένα εμπορικό κατάστημα (mall), σε ένα γραφείο εικονικής πραγματικότητας και στον τομέα e-health που τα τελευταία χρόνια συγκεντρώνει μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον. Επίσης λόγω της ευελιξίας του αλγορίθμου είναι δυνατή η υλοποίηση πιο εξελιγμένων σεναρίων όπως για παράδειγμα η περίπτωση της επικοινωνίας μεταξύ αυτοδηγούμενων οχημάτων (V2V communications), αλλά και της επικοινωνίας μεταξύ συσκευών (MTC communications).

Ακόμη μέσω του συγκεκριμένου αλγορίθμου είναι δυνατή η παραμετροποίηση του συστήματος με διαφορετικές τιμές παραμέτρων κάθε φορά (π.χ. αριθμός αιτημάτων υπηρεσιών, ρυθμός δεδομένων, αριθμός φυσικών διακομιστών κ.τ.λ.), δίνοντας έτσι τη δυνατότητα στους εκάστοτε χρήστες να διαμορφώνουν προσομοιώσεις με βάση το σύστημα στο οποίο θέλουν κάθε φορά να επιτεύξουν βελτιστοποίηση κατανομής πόρων.

Βιβλιογραφία

- [1] Κ. Αρβανίτης, Γ. Κολυβάς, Σ. Ούτσιος «Τεχνολογία Δικτύων Επικοινωνιών», *Τεχνικά Επαγγελματικά Λύκεια*, Αθήνα.
- [2] «Εισαγωγή στις Τηλεπικοινωνίες», *ΕΚΠΑ*, Τμήμα Πληροφορικής & Τηλεπικοινωνιών, Τομέας Επικοινωνιών και Επεξεργασίας Σήματος, Αθήνα, 2006.
- [3] "digitaltvinfo.gr," 02 August 2011. [Online]. Available: <https://digitaltvinfo.gr/articles/for-beginners/item/5677->.
- [4] Ν. Σωτηρίου, Γ. Σιακαντάρης, «Δίκτυα Ηλεκτρονικών Υπολογιστών», 2006-2007, [Online]. Available: http://lyk-vatheos.eyv.sch.gr/Ergasies/2006-2007/tech_plir_A/Diktya07.files/image012.jpg
- [5] Χ. Ευθυμίου, «Εισαγωγή Στις Οπτικές Επικοινωνίες», *Εκδόσεις ΤΕΙ Σερρών*, 2011.
- [6] B. Baddeley, "Hackaday Dictionary: Mux/Demux," Hackaday , 6 September 2016, [Online]. Available: <https://hackaday.com/2016/09/06/hackaday-dictionary-muxdemux/>.
- [7] H. Ishio, J. Minowa and K. Nosu, "Review and status of wavelength-division-multiplexing technology and its application," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 2, no. 4, pp. 448-463, August 1984, doi: 10.1109/JLT.1984.1073653.
- [8] M. Alam, Q. Zhang, "A Survey: Non-Orthogonal Multiple Access with Compressed Sensing Multiuser Detection for mMTC", in *arXiv: Signal Processing*, 12 Oct. 2018.
- [9] Π. Κωπτής, Π.Δ. Αράπογλου, «Ασύρματες Επικοινωνίες», *Εκδόσεις Α. Τζιόλα & Υοί ΑΕ*, 2014.
- [10] S. Mondal, A. Sinha, J. Routh, "A Survey on Evolution of Wireless Generations 0G to 7G," in *International Journal of Advance Research in Science and Engineering-IJARSE*, vol. 1, no. 2, 2019/2020.
- [11] Thomas Barnett, Jr., Shruti Jain, Usha Andra, Taru Khurana (March 2019), "Cisco Visual Networking Index (VNI) Global and Americas/EMEAR Mobile Data Traffic Forecast, 2017–2022", Mar. 2019.
- [12] C. S. Patil, R. R. Karhe, M. A. Aher, "Review on Generations in Mobile Cellular Technology," in *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 2, no. 10, October 2012.

- [13] A. Gupta and R. K. Jha, "A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies," in *IEEE Access*, vol. 3, pp. 1206-1232, 2015, doi: 10.1109/ACCESS.2015.2461602.
- [14] Cisco, "Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2015–2020", white paper, Feb. 2016.
- [15] UMTS Forum Report 44, "Mobile Traffic Forecasts: 2010–2020 Report" UMTS Forum, Jan. 2011.
- [16] Vincent W.S. Wong, Robert Schober, Derrick Wing Kwan Ng, Li-Chun Wang, "Key Technologies for 5G Wireless Systems", Cambridge University Press, April 2017, doi: 10.1017/9781316771655.
- [17] M. Peng, Y. Li, Z. Zhao and C. Wang, "System architecture and key technologies for 5G heterogeneous cloud radio access networks," in *IEEE Network*, vol. 29, no. 2, pp. 6-14, March-April 2015, doi: 10.1109/MNET.2015.7064897.
- [18] Nisha Panwar, Shantanu Sharma, Awadhesh Kumar Singh, "A survey on 5G: The next generation of mobile communication", in *Physical Communication*, vol.18, Part 2, 2016, pp. 64-84, doi: 10.1016/j.phycom.2015.10.006.
- [19] ITU-R, "IMT Vision Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond", Recommendation ITU-R M.2083-0, Technical Report, *International Telecommunication Union*, 2015.
- [20] H. Hemmer, C. Ashraf and A. Powell, "Ericsson Mobility Report," June 2020. [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/49da93/assets/local/mobility-report/documents/2020/june2020-ericsson-mobility-report.pdf>
- [21] N. McKeown et al., "OpenFlow: Enabling innovation in campus networks" in *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 38, no. 2, pp. 69–74, 2008, doi:10.1145/1355734.1355746
- [22] P. Fondo-Ferreiro, F. Gil-Castañeira, "The Role of Software-Defined Networking in Cellular Networks. Proceedings", vol.21, 31 Jul. 2019, doi: 10.2310.3390/proceedings2019021023.
- [23] Akyildiz, Ian & Nie, Shuai & Lin, Shih-Chun & Chandrasekaran, Manoj, "5G Roadmap: 10 Key Enabling Technologies", in *Computer Networks*, 2016, doi: 10.1016/j.comnet.2016.06.010.
- [24] A. Nordrum, K. Clark and IEEE Spectrum Staff, "5G Bytes: Millimeter Waves Explained," *IEEE Spectrum*, 06 May 2017. [Online]. Available: <https://spectrum.ieee.org/video/telecom/wireless/5g-bytes-millimeter-waves-explained>.
- [25] Hao Xu, V. Kukshya and T. S. Rappaport, "Spatial and temporal characteristics of 60-GHz indoor channels," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 20, no. 3, pp. 620-630, April 2002, doi: 10.1109/49.995521.

- [26] T. S. Rappaport *et al.*, "Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work!," in *IEEE Access*, vol. 1, pp. 335-349, 2013, doi: 10.1109/ACCESS.2013.2260813.
- [27] M. Samimi *et al.*, "28 GHz Angle of Arrival and Angle of Departure Analysis for Outdoor Cellular Communications Using Steerable Beam Antennas in New York City," *2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Dresden, 2013, pp. 1-6, doi: 10.1109/VTCSpring.2013.6691812.
- [28] "The Emergence of 5G mmWave," Accton, [Online]. Available: <https://www.accton.com/Technology-Brief/the-emergence-of-5g-mmwave/>.
- [29] L. Lu, G. Y. Li, A. L. Swindlehurst, A. Ashikhmin and R. Zhang, "An Overview of Massive MIMO: Benefits and Challenges," in *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 8, no. 5, pp. 742-758, Oct. 2014, doi: 10.1109/JSTSP.2014.2317671.
- [30] J. Mundy, "What Is Massive MIMO Technology?," 5G.co.uk, [Online]. Available: <https://5g.co.uk/guides/what-is-massive-mimo-technology/>.
- [31] I. Ahmed *et al.*, "A Survey on Hybrid Beamforming Techniques in 5G: Architecture and System Model Perspectives," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 4, pp. 3060-3097, Fourthquarter 2018, doi: 10.1109/COMST.2018.2843719.
- [32] Y. Yang, "Ultra-Densification for Future Cellular Networks: Performance Analysis and Design Insights", PhD dissertation, Stockholm, Dec. 2018.
- [33] W. Yu, H. Xu, H. Zhang, D. Griffith and N. Golmie, "Ultra-Dense Networks: Survey of State of the Art and Future Directions," in *2016 25th International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN)*, Waikoloa, HI, 2016, pp. 1-10, doi: 10.1109/ICCCN.2016.7568592.
- [34] H. Zhang, N. Liu, X. Chu, K. Long, A. Aghvami and V. C. M. Leung, "Network Slicing Based 5G and Future Mobile Networks: Mobility, Resource Management, and Challenges," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 8, pp. 138-145, Aug. 2017, doi: 10.1109/MCOM.2017.1600940.
- [35] D. Pliatsios, P. Sarigiannidis, S. Goudos, "Realizing 5G vision through Cloud RAN: technologies, challenges, and trends", in *J Wireless Com Network*, 136, 2018, doi: 10.1186/s13638-018-1142-1.
- [36] M. A. Habibi, M. Nasimi, B. Han and H. D. Schotten, "A Comprehensive Survey of RAN Architectures Toward 5G Mobile Communication System," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 70371-70421, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2919657.
- [37] S. Hung, H. Hsu, S. Lien and K. Chen, "Architecture Harmonization Between Cloud Radio Access Networks and Fog Networks," in *IEEE Access*, vol. 3, pp. 3019-3034, 2015, doi: 10.1109/ACCESS.2015.2509638.

- [38] T. Turinawe, I. Mukonyezi, "DEVICE TO DEVICE COMMUNICATION IN 5G TECHNOLOGY", in *Researchgate*, 31 Aug. 2017.
- [39] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari and M. Ayyash, "Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2347-2376, Fourthquarter 2015, doi: 10.1109/COMST.2015.2444095.
- [40] I. A. Alimi, A. L. Teixeira and P. P. Monteiro, "Toward an Efficient C-RAN Optical Fronthaul for the Future Networks: A Tutorial on Technologies, Requirements, Challenges, and Solutions," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 1, pp. 708-769, Firstquarter 2018, doi: 10.1109/COMST.2017.2773462.
- [41] M. Klinkowski, "Planning of 5G C-RAN with Optical Fronthaul: A Scalability Analysis of an ILP Model," in *2018 20th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Bucharest, 2018, pp. 1-4. doi: 10.1109/ICTON.2018.8473987.
- [42] J. Zhang, Y. Jiang, P. Li, F. Zheng and X. You, "Energy Efficient Power Allocation in Massive MIMO Systems Based on Standard Interference Function," *2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Nanjing, 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/VTCSpring.2016.7504223.
- [43] H. Gao, T. Lv, X. Su, H. Yang and J. M. Cioffi, "Energy-Efficient Resource Allocation for Massive MIMO Amplify-and-Forward Relay Systems," in *IEEE Access*, vol. 4, pp. 2771-2787, 2016, doi: 10.1109/ACCESS.2016.2570805.
- [44] Y. Zeng, X. Wen, Z. Lu, Y. Chen and H. Shao, "Joint remote radio head activation and beamforming for energy efficient C-RAN," *2016 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, Poznan, 2016, pp. 550-554, doi: 10.1109/ISWCS.2016.7600965.
- [45] Y. Shi, J. Zhang and K. B. Letaief, "Group Sparse Beamforming for Green Cloud-RAN," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 13, no. 5, pp. 2809-2823, May 2014, doi: 10.1109/TWC.2014.040214.131770.
- [46] N. Yu, Z. Song, H. Du, H. Huang and X. Jia, "Dynamic Resource Provisioning for Energy Efficient Cloud Radio Access Networks," in *IEEE Transactions on Cloud Computing*, vol. 7, no. 4, pp. 964-974, 1 Oct.-Dec. 2019, doi: 10.1109/TCC.2017.2715812.
- [47] Y. Zeng, X. Wen, Z. Lu, Y. Chen and H. Shao, "Joint remote radio head activation and beamforming for energy efficient C-RAN," *2016 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, Poznan, 2016, pp. 550-554. doi: 10.1109/ISWCS.2016.7600965.

- [48] Aini Li, Yan Sun, Xiaodong Xu and Chunjing Yuan, "An energy-effective network deployment scheme for 5G Cloud Radio Access Networks," *2016 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPs)*, San Francisco, CA, 2016, pp. 684-689, doi: 10.1109/INFOCOMW.2016.7562164.
- [49] W. Zhao and S. Wang, "Remote Radio Head Selection for Power Saving in Cloud Radio Access Networks," *2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Nanjing, 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/VTCSpring.2016.7504446.
- [50] S. Ye, Y. Tao, Z. Zhang and P. Zhang, "Fronthaul-constrained resource allocation for downlink cached C-RAN," *2016 First IEEE International Conference on Computer Communication and the Internet (ICCCI)*, Wuhan, 2016, pp. 305-309, doi: 10.1109/CCI.2016.7778931.
- [51] F. D. Calabrese, L. Wang, E. Ghadimi, G. Peters, L. Hanzo and P. Soldati, "Learning Radio Resource Management in RANs: Framework, Opportunities, and Challenges," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 9, pp. 138-145, Sept. 2018, doi: 10.1109/MCOM.2018.1701031.
- [52] M. Jo, T. Maksymyuk, R. L. Batista, T. F. Maciel, A. L. F. de Almeida and M. Klymash, "A survey of converging solutions for heterogeneous mobile networks," in *IEEE Wireless Communications*, vol. 21, no. 6, pp. 54-62, December 2014, doi: 10.1109/MWC.2014.7000972.
- [53] "What is a Fractal?," FractalFORCE, [Online]. Available: <https://thefractalforge.com/what-is-a-fractal/>.
- [54] T. Maksymyuk, M. Brych and A. Masyuk, "Fractal geometry based resource allocation for 5G heterogeneous networks," *2015 Second International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*, Kharkiv, 2015, pp. 69-72, doi: 10.1109/INFOCOMMST.2015.7357272.
- [55] R. Boutaba, N. Shahriar, S. Fathi, "Elastic Optical Networking for 5G Transport", in *J Netw Syst Manage* 25, 819–847 (2017), doi.org/10.1007/s10922-017-9434-z.
- [56] A. Mayoral, V. López, O. González de Dios, and J. P. Fernández-Palacios, "Migration steps toward flexi-grid networks" *J. Opt. Commun. Netw.* vol.6, no.11, pp. 988–996, 2014, doi.org/10.1364/JOCN.6.000988.
- [57] Inao, S. et al., "Multicore optical fiber", in *Proc. Optical Fiber Communications Conference*, WB1, 46-8, 1979, doi: 10.1364/OFC.1979.WB1.
- [58] K. Walkowiak, M. Klinkowski and P. Lechowicz, "Dynamic routing in spectrally spatially flexible optical networks with back-to-back regeneration," in *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 10, no. 5, pp. 523-534, May 2018. doi: 10.1364/JOCN.10.000523.

- [59] D. Klonidis *et al.*, "Spectrally and spatially flexible optical network planning and operations," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 2, pp. 69-78, Feb. 2015, doi: 10.1109/MCOM.2015.7045393.
- [60] M. Klinkowski, P. Lechowicz, and K. Walkowiak, "Survey of resource allocation schemes and algorithms in spectrally-spatially flexible optical networking" *Optical Switching and Networking*, vol. 27, Jan. 2018, Pages 58-78, doi.org/10.1016/j.osn.2017.08.003.
- [61] D.J Richardson, J.M. Fini, L.E. Nelson, "Space-division multiplexing in optical fibres", *Nature Photon*, vol.7, pp. 354–362, 2013, doi.org/10.1038/nphoton.2013.94.
- [62] D. Siracusa, F. Pederzoli, D. Klonidisz, V. Lopezy and E. Salvadori, "Resource allocation policies in SDM optical networks (Invited paper)," *2015 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, Pisa, 2015, pp. 168-173, doi: 10.1109/ONDM.2015.7127293.
- [63] M. Klinkowski, "Planning of 5G C-RAN with Optical Fronthaul: A Scalability Analysis of an ILP Model," *2018 20th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Bucharest, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICTON.2018.8473987.
- [64] M. Klinkowski, G. Zalewski and K. Walkowiak, "Optimization of spectrally and spatially flexible optical networks with spatial mode conversion," in *2018 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, Dublin, 2018, pp. 148-153. doi: 10.23919/ONDM.2018.8396122 762055 — blueSPACE — H2020-ICT-2016-2 58 D5.2 – Report on resource allocation planning algorithms and related studies 19.06.2019 version 1.0.
- [65] L. Velasco *et al.*, "Modeling the routing and spectrum allocation problem for flexgrid optical networks" *Photon Netw Commun*, vol. 24, no. 3, pp. 177–186, 2012, doi.org/10.1007/s11107-012-0378-7.
- [66] G. Savva, G. Ellinas, B. Shariati and I. Tomkos, "Physical Layer-Aware Routing, Spectrum, and Core Allocation in Spectrally-Spatially Flexible Optical Networks with Multicore Fibers," *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Kansas City, MO, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICC.2018.8422782.
- [67] S. Xu and S. Wang, "Efficient Algorithm for Baseband Unit Pool Planning in Cloud Radio Access Networks," *2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Nanjing, 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/VTCSpring.2016.7504207.
- [68] S. Xu and S. Wang, "Baseband Unit Pool Planning for Cloud Radio Access Networks: An Approximation Algorithm," in *IEEE Communications Letters*, vol. 21, no. 2, pp. 358-361, Feb. 2017, doi: 10.1109/LCOMM.2016.2620461.
- [69] W. Mo, C. L. Gutterman, Y. Li, G. Zussman and D. C. Kilper, "Deep Neural Network Based Dynamic Resource Reallocation of BBU Pools in 5G C-RAN ROADMs Networks," in *2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC)*, San Diego, CA, 2018, pp. 1-3, doi: 10.1364/OFC.2018.Th1B.4.

- [70] M. Qian, W. Hardjawana, J. Shi and B. Vucetic, "Baseband Processing Units Virtualization for Cloud Radio Access Networks," in *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 4, no. 2, pp. 189-192, April 2015, doi: 10.1109/LWC.2015.2393355.
- [71] Xiaobo Zeng, Min Zhu and Guixin Li, "Modelling and analysis of baseband unit pool for green C-RANs," *2017 19th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Girona, 2017, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICTON.2017.8025008.
- [72] M.Y. Lyazidi, L. Giupponi, J. Mangues-Bafalluy, N. Aitsaadi, and R. Langar, "An Optimization Scheme for Cost-Resilience BBU Selection in Cloud-Radio Access Network", *RANworld*, Oct 2019, Rome Italy.
- [73] Vanderbeck, F. "Branching in branch-and-price: a generic scheme", in *Math. Program.* 130, pp. 249–294, 2011, doi.org/10.1007/s10107-009-0334-1.
- [74] C. Colman-Meixner, G. B. Figueiredo, M. Fiorani, M. Tornatore and B. Mukherjee, "Resilient cloud network mapping with virtualized BBU placement for cloud-RAN," *2016 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS)*, Bangalore, 2016, pp. 1-3, doi: 10.1109/ANTS.2016.7947790.
- [75] S. Namba, T. Matsunaka, T. Warabino, S. Kaneko and Y. Kishi, "Colony-RAN architecture for future cellular network," *2012 Future Network & Mobile Summit (FutureNetw)*, Berlin, 2012, pp. 1-8.
- [76] S. Namba, T. Warabino and S. Kaneko, "BBU-RRH switching schemes for centralized RAN," *7th International Conference on Communications and Networking in China*, Kun Ming, 2012, pp. 762-766, doi: 10.1109/ChinaCom.2012.6417586.
- [77] H.T Dinh, C. Lee, D. Niyato, P. Wang, "A survey of mobile cloud computing: Architecture, applications, and approaches", in *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol.13, pp. 1587-1611, 11 Oct. 2013, doi: 10.1002/wcm.1203.
- [78] K. Wang, K. Yang and C. S. Magurawalage, "Joint Energy Minimization and Resource Allocation in C-RAN with Mobile Cloud," in *IEEE Transactions on Cloud Computing*, vol. 6, no. 3, pp. 760-770, 1 July-Sept. 2018, doi: 10.1109/TCC.2016.2522439.
- [79] Peng Liu, Gaochao Xu, Kun Yang, Jiaqi Ge, Zhejun Kuang, "Joint routing and mobile VM selection algorithm in multihop C-RAN networks", in *Wiley Online Library*, vol. 31, no. 7, doi.org/10.1002/dac.3402.
- [80] K. Wang, K. Yang, X. Wang and C. S. Magurawalage, "Cost-effective resource allocation in C-RAN with mobile cloud," *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Kuala Lumpur, 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICC.2016.7511044.
- [81] Y. Mao, C. You, J. Zhang, K. Huang and K. B. Letaief, "A Survey on Mobile Edge Computing: The Communication Perspective," in *IEEE Communications*

Surveys & Tutorials, vol. 19, no. 4, pp. 2322-2358, Fourthquarter 2017, doi: 10.1109/COMST.2017.2745201.

[82] L. Zhang, K. Wang, D. Xuan and K. Yang, "Optimal Task Allocation in Near-Far Computing Enhanced C-RAN for Wireless Big Data Processing," in *IEEE Wireless Communications*, vol. 25, no. 1, pp. 50-55, February 2018, doi: 10.1109/MWC.2018.1700188.

[83] H. Mei, K. Wang and K. Yang, "Multi-Layer Cloud-RAN With Cooperative Resource Allocations for Low-Latency Computing and Communication Services," in *IEEE Access*, vol. 5, pp. 19023-19032, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2752279.

[84] C. You, K. Huang, H. Chae and B. Kim, "Energy-Efficient Resource Allocation for Mobile-Edge Computation Offloading," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 3, pp. 1397-1411, March 2017, doi: 10.1109/TWC.2016.2633522.

[85] "blueSPACE," Bluespace 5G Technologies, June 2017. [Online]. Available: <https://bluespace-5gppp.squarespace.com/>.

[86] I. Demirkol, D. Camps-Mur, J. Bartelt and Jim Zou, "5G transport network blueprint and dimensioning for a dense urban scenario," in *2017 European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*, Oulu, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/EuCNC.2017.7980773.