



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

# OPTICAL ACCESS NETWORK SYSTEM FIBER TO THE ANTENNA FOR 5G

ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ – ΤΣΑΜΠΙΚΟΣ ΜΑΤΖΑΝΟΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ

Θεόφιλος Χρυσικός  
Διδάσκων Π.Δ. 407/80

Λαμία, 31/10/2022





ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

# OPTICAL ACCESS NETWORK SYSTEM FIBER TO THE ANTENNA FOR 5G

ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ – ΤΣΑΜΠΙΚΟΣ ΜΑΤΖΑΝΟΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ

Θεόφιλος Χρυσικός  
Διδάσκων Π.Δ. 407/80

Λαμία, 31/10/2022





UNIVERSITY OF  
THESSALY

SCHOOL OF SCIENCE

DEPARTMENT OF COMPUTER SCIENCE & TELECOMMUNICATIONS

OPTICAL ACCESS NETWORK SYSTEM FIBER  
TO THE ANTENNA FOR 5G

ATHANASIOS – TSAMPIKOS MATZANOS

FINAL THESIS

ADVISOR

Theofilos Chrysikos

Teaching Associate

Lamia, 31/10/2022



«Με ατομική μου ευθύνη και γνωρίζοντας τις κυρώσεις <sup>(1)</sup>, που προβλέπονται από της διατάξεις της παρ. 6 του άρθρου 22 του Ν. 1599/1986, δηλώνω ότι:

1. Δεν παραθέτω κομμάτια βιβλίων ή άρθρων ή εργασιών άλλων αυτολεξεί **χωρίς να τα περικλείω σε εισαγωγικά** και χωρίς να αναφέρω το συγγραφέα, τη χρονολογία, τη σελίδα. Η αυτολεξεί παράθεση χωρίς εισαγωγικά χωρίς αναφορά στην πηγή, είναι λογοκλοπή. Πέραν της αυτολεξεί παράθεσης, λογοκλοπή θεωρείται και η παράφραση εδαφίων από έργα άλλων, συμπεριλαμβανομένων και έργων συμφοιτητών μου, καθώς και η παράθεση στοιχείων που άλλοι συνέλεξαν ή επεξεργάστηκαν, χωρίς αναφορά στην πηγή. Αναφέρω πάντοτε με πληρότητα την πηγή κάτω από τον πίνακα ή σχέδιο, όπως στα παραθέματα.

2. Δέχομαι ότι η αυτολεξεί **παράθεση χωρίς εισαγωγικά**, ακόμα κι αν συνοδεύεται από αναφορά στην πηγή σε κάποιο άλλο σημείο του κειμένου ή στο τέλος του, είναι αντιγραφή. Η αναφορά στην πηγή στο τέλος π.χ. μιας παραγράφου ή μιας σελίδας, δεν δικαιολογεί συρραφή εδαφίων έργου άλλου συγγραφέα, έστω και παραφρασμένων, και παρουσίασή τους ως δική μου εργασία.

3. Δέχομαι ότι υπάρχει επίσης περιορισμός στο μέγεθος και στη συχνότητα των παραθεμάτων που μπορώ να εντάξω στην εργασία μου εντός εισαγωγικών. Κάθε μεγάλο παράθεμα (π.χ. σε πίνακα ή πλαίσιο, κλπ), προϋποθέτει ειδικές ρυθμίσεις, και όταν δημοσιεύεται προϋποθέτει την άδεια του συγγραφέα ή του εκδότη. Το ίδιο και οι πίνακες και τα σχέδια

4. Δέχομαι όλες τις συνέπειες σε περίπτωση λογοκλοπής ή αντιγραφής.

Ημερομηνία: 31/10/2022

Ο – Η Δηλ.

ΜΑΤΖΑΝΟΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ - ΤΣΑΜΠΙΚΟΣ

(1) «Όποιος εν γνώσει του δηλώνει ψευδή γεγονότα ή αρνείται ή αποκρύπτει τα αληθινά με έγγραφη υπεύθυνη δήλωση του άρθρου 8 παρ. 4 Ν. 1599/1986 τιμωρείται με φυλάκιση τουλάχιστον τριών μηνών. Εάν ο υπαίτιος αυτών των πράξεων σκόπευε να προσπορίσει στον εαυτόν του ή σε άλλον περιουσιακό όφελος βλάπτοντας τρίτον ή σκόπευε να βλάψει άλλον, τιμωρείται με κάθειρξη μέχρι 10 ετών.»

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέπων καθηγητή της πτυχιακής μου εργασίας, κ. Χρυσικό Θεόφιλο, και να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου για την εμπιστοσύνη που επέδειξε στο πρόσωπό μου, για την υποστήριξή του από την πρώτη στιγμή της συγγραφής της εργασίας, για τις πολύτιμες και καίριες επιστημονικές του συμβουλές και για την συγκινητική του συμπαράσταση και συνεργασία καθ' όλη τη διάρκεια της ερευνητικής διαδικασίας.





## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

---

Οι ειδικοί συμφωνούν ότι η οπτική ίνα είναι ο μόνος τρόπος για την παροχή της πυκνής χωρητικότητας του Ράδιο-Δικτύου Πρόσβασης (RAN) που απαιτείται για το 5G. Αυτό είναι μια απλή συνέπεια του όγκου των δεδομένων που μεταφέρονται μέσω του δικτύου. Από την πρώτη εμπορική εγκατάσταση οπτικών ινών στη δεκαετία του 1970, το κλισέ της απεριόριστης χωρητικότητας παραμένει. Ωστόσο, καμία άλλη τεχνολογία δεν μπορεί να ανταποκριθεί στη χωρητικότητα των οπτικών ινών, καθιστώντας την ένα κρίσιμο δομικό στοιχείο στην ανάπτυξη του 5G. Τα καλώδια για την ανάπτυξη 5G RAN δρομολογούνται ως επί το πλείστον με τον ίδιο τρόπο όπως τα καλώδια για τα παραδοσιακά δίκτυα τηλεπικοινωνιών, δηλαδή σε αγωγούς ή πάνω από το έδαφος πάνω από ιστούς. Οι εξελίξεις στην καλωδίωση οπτικών ινών που χρησιμοποιούνται από φορείς εκμετάλλευσης σταθερών δικτύων διαδραματίζουν επίσης σημαντικό ρόλο για τους φορείς εκμετάλλευσης κινητής τηλεφωνίας. Για παράδειγμα, εάν σκάψει μια νέα τάφρο σωλήνων σε έναν δρόμο, είναι πολύ πιθανό να τοποθετηθεί και ένα μικροκαλώδιο σε αυτήν. Τα όλο και μικρότερα καλώδια προορίζονται για τη βέλτιστη χρήση του διαθέσιμου χώρου σε σωλήνες και αγωγούς. Το σκάψιμο των τάφρων είναι ένα από τα μεγαλύτερα κόστη στην ανάπτυξη του δικτύου και οποιαδήποτε πιθανή εξοικονόμηση θα προσθέσει αξία εδώ. Ξεκινά από τις ίδιες τις ίνες.



## ABSTRACT

---

Experts agree that fibre is the only way to provide the dense Radio Access Network (RAN) capacity required for 5G. This is a simple consequence of the volume of data carried over the network. Since the first commercial deployment of fiber optics in the 1970s, the cliché of unlimited capacity remains. However, no other technology can match the capacity of fibre, making it a critical building block in the deployment of 5G. A basic comparison of the differences in data rates from 3G to 5G is shown in the graph below. The cables for 5G RAN deployment are mostly routed in the same way as cables for traditional telecom networks, i.e. in conduits or above ground over masts. Developments in fibre optic cabling used by fixed network operators also play an important role for mobile operators. For example, if a new pipe trench is dug in a road, it is very likely that a micro-cable will be placed in it. Smaller and smaller cables are intended to make optimal use of the space available in pipes and ducts. Digging trenches is one of the largest costs in network development and any potential savings will add value here. It starts with the fibres themselves.

## Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	10
ABSTRACT .....	12
ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ .....	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ 5G .....	21
2.1 Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ 5G .....	21
2.2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΠΟΥ ΑΝΑΜΕΝΟΝΤΑΙ ΣΤΟ 5G .....	22
2.4 ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ 5G .....	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. FIBER TO THE ANTENNA FOR 5G .....	26
3.1 ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ .....	26
3.2 ΥΠΟΣΧΟΜΕΝΕΣ ΚΥΜΑΤΟΣΕΙΡΕΣ ΓΙΑ ΤΟ 5G .....	27
3.3 ΥΠΟΣΧΟΜΕΝΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΓΙΑ ΤΟ 5G .....	28
3.4 ΤΟ ΠΑΘΗΤΙΚΟ ΟΠΤΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ .....	33
3.5 ACCES ΓΙΑ ETHERNET BACKHAUL .....	35
3.6 ΤΜΗΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΩΝ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΓΙΑ RAN FRONTHAUL .....	37
3.7 ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ ΚΑΙ 5G .....	41
3.8 ΣΥΝΕΡΓΕΙΕΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΤΗΛΕΦΩΝΙΑΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΙΝΗΤΗΣ ΤΗΛΕΦΩΝΙΑΣ ΜΕ ΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ .....	44
3.9 ΚΕΡΑΙΕΣ 5G ΚΑΤΩ ΤΩΝ 6 GHz .....	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΣΕΝΑΡΙΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	50
4.1 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΟΠΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ .....	50
4.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΟΡΤΙPERFORMER .....	51
View menu .....	51
Help menu .....	52
4.3 ΣΕΝΑΡΙΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ΟΡΤIPerFORMER .....	53
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	56
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	58



## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

Οι συνεχώς εξελισσόμενες νέες εφαρμογές και ο αυξανόμενος αριθμός χρηστών απαιτούν υψηλό ρυθμό δεδομένων, γεγονός που θα αυξήσει την κυκλοφορία δεδομένων με ρυθμό άνω του 50% ετησίως ανά συνδρομητή. Η εμφάνιση νέων τεχνολογιών, όπως το Διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT) και η εικονική πραγματικότητα, θα επιταχύνει συνεχώς αυτή τη ζήτηση υψηλού ρυθμού δεδομένων. Το δίκτυο πέμπτης γενιάς (5G) έχει σχεδιαστεί για να αντιμετωπίσει αυτό το πρόβλημα και να παρέχει υψηλό ρυθμό δεδομένων. Τα δίκτυα 5G θα χρησιμοποιήσουν διάφορες οπτικές τεχνολογίες και έννοιες, όπως δίκτυο ραδιοεπικοινωνίας μέσω οπτικών ινών (RoF), παθητικό οπτικό δίκτυο (PON), οπτική γέφυρα χιλιοστομετρικών κυμάτων (mm-Wave, MMW), LiFi κ.λπ. [1].

Για την αύξηση του ρυθμού και της ταχύτητας δεδομένων, το εύρος ζώνης μετάδοσης είναι ο κύριος περιοριστικός παράγοντας στο σημερινό δίκτυο 4G. Αυτός ο περιορισμός έχει ξεπεραστεί στο δίκτυο 5G με τη χρήση διαφόρων τεχνικών. Η χρήση οπτικών τεχνικών είναι μια από τις σημαντικές έννοιες που προσφέρει μεγάλο φάσμα και ταχύτητα πολλαπλών Gigabits ανά δευτερόλεπτο (Gbps) [1].

Οι προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν κατά την υλοποίηση των δικτύων επικοινωνίας 5G είναι ο αυξανόμενος αριθμός συνδέσεων, ο μεγάλος όγκος δεδομένων, η αύξηση της χωρητικότητας χωρίς αύξηση του κόστους, η γρήγορη και ευέλικτη ανάπτυξη της αρχιτεκτονικής, η χαμηλή καθυστέρηση ( $< 1$  ms), η γρήγορη μεταφορά δεδομένων, η πυκνωση του δικτύου, το μέγεθος των μικρών κυψελών κ.λπ. [2]

Πρόσφατα οι τεχνολογίες οπτικών δικτύων αναδείχθηκαν ως μία από τις πολλά υποσχόμενες λύσεις για την εξάλειψη των διαφόρων προβλημάτων που αντιμετωπίζουν τα δίκτυα επικοινωνιών 5G λόγω της διαθεσιμότητας μεγάλου εύρους ζώνης στο οπτικό φάσμα και της αποδοτικότητας κόστους. Η ανάπτυξη συστημάτων με βάση την φωτονική τεχνολογία αξιοποιεί την οπτική δικτύωση για το 5G. Για παράδειγμα, προτείνονται διάφορες τεχνικές για τη γεφύρωση των οπτικών κυμάτων

σε κύματα χιλιοστού, τα οποία παίζουν σημαντικό ρόλο στη δικτύωση 5G, το LiFi και η επικοινωνία με οπτική κάμερα (OCC) αναδύονται ως αντικατάσταση του WiFi, τεχνικές οπτικής επικοινωνίας ελεύθερου χώρου για επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων [3].

Οι τεχνολογίες οπτικών δικτύων ελεύθερου χώρου (FSO) που χρησιμοποιούν την ορατή και υπέρυθη ζώνη του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος για τη μετάδοση σήματος παίζουν επίσης σημαντικό ρόλο σε κάποιο μέρος των δικτύων 5G λόγω της υψηλής διαθεσιμότητας εύρους ζώνης, του χαμηλού κόστους και της ευκολίας ανάπτυξής τους [4].

Ωστόσο, σε αντίθεση με τις τεχνολογίες που βασίζονται σε οπτικές ίνες, τα FSO υποφέρουν από εξασθένηση, απορρόφηση και απώλεια σήματος που εξαρτώνται από το εύρος, γεγονός που τα καθιστά χρήσιμα στο δίκτυο επικοινωνιών εσωτερικού χώρου στο 5G. Η τεχνολογία Light Fidelity (LiFi) και η τεχνολογία επικοινωνίας με οπτικές κάμερες είναι σημαντικές τεχνολογίες FSO που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για επικοινωνία χαμηλής εμβέλειας με υψηλό ρυθμό δεδομένων και αποδοτικότητα κόστους στο δίκτυο 5G [5].

Η κύρια πρόκληση του δικτύου 5G είναι να παρέχει πρόσβαση σε πληροφορίες όταν τις χρειαζόμαστε, όπου τις χρειαζόμαστε και σε οποιαδήποτε μορφή τις χρειαζόμαστε. Οι οπτικές και ασύρματες τεχνολογίες παίζουν βασικό ρόλο για την επίτευξη αυτού του στόχου. Οι οπτικές ίνες δεν μπορούν να πάνε παντού, αλλά όπου πάνε παρέχουν τεράστιο εύρος ζώνης, πλεονέκτημα το οποίο είναι σημαντικό για την αντιμετώπιση της πρόκλησης ταχύτητας και χωρητικότητας στο δίκτυο 5G [3].

Μια ενδιαφέρουσα προσέγγιση για την αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων τόσο του ασύρματου δικτύου όσο και του δικτύου οπτικών ινών είναι η ενσωμάτωση του δικτύου οπτικών ινών και του ασύρματου δικτύου και αυτή η προσέγγιση ονομάζεται δίκτυο ραδιοεπικοινωνίας μέσω οπτικών ινών (RoF). Το RoF προφανώς βελτιώνει την κάλυψη των κυττάρων, επίσης το RoF απαιτεί διαμόρφωση του φωτός με ραδιοδεδομένα για οπτική μετάδοση. Προσφέρει τεράστια αύξηση του εύρους ζώνης σε σχέση με τις υπάρχουσες άλλες λύσεις και δεν απαιτεί μετατροπή ψηφιακού σε αναλογικό (DAC), γεγονός που την καθιστά λύση χαμηλής καθυστέρησης [6].



Η οπτική τεχνολογία χιλιοστομετρικών κυμάτων είναι μία από τις βασικές τεχνολογίες για το σύστημα επικοινωνιών 5G. Η χρήση της ζώνης συχνοτήτων χιλιοστομετρικών κυμάτων (30 GHz έως 300 GHz) είναι μια από τις σημαντικές έννοιες που προσφέρει μεγάλο φάσμα και πολλαπλά Gigabits ανά δευτερόλεπτο (Gbps). Μια από τις κύριες προκλήσεις στην εφαρμογή του συστήματος επικοινωνιών κυμάτων χιλιοστού είναι η παραγωγή καλής ποιότητας φέροντος σήματος υψηλής συχνότητας σε αυτή τη ζώνη. Τα σήματα εύρους ζώνης MHz μπορούν να παραχθούν με τη χρήση κοινού ηλεκτρικού ταλαντωτή και στη συνέχεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί η έννοια του πολλαπλασιασμού της συχνότητας για τη δημιουργία σήματος διπλασιασμένης συχνότητας [3].

Ωστόσο, σε κάθε διπλασιασμό της συχνότητας ο θόρυβος φάσης αυξάνεται κατά 6 dB, οπότε είναι δύσκολο να παραχθεί κύμα χιλιοστού με χαμηλό θόρυβο φάσης και επίσης η παραγωγή MMW με χρήση ηλεκτρονικών εξαρτημάτων είναι δαπανηρή. Η ανάπτυξη συστήματος παραγωγής MMW με βάση την φωτονική τεχνολογία αξιοποιεί τη δικτύωση οπτικών κυμάτων χιλιοστού για το 5G. Προτείνονται διάφορες τεχνικές για τη γεφύρωση των οπτικών κυμάτων σε κύματα χιλιοστού, οι οποίες παίζουν σημαντικό ρόλο στη δικτύωση κυμάτων χιλιοστού [3].

Αυτή η ερευνητική εργασία είναι αφιερωμένη στη μελέτη των διαφόρων οπτικών τεχνολογιών για τη δικτύωση και στην ανασκόπηση όλων των πρόσφατων εξελίξεων και προκλήσεων που έρχονται στο δρόμο για τη δικτύωση 5G. Στην παρούσα εργασία συζητούνται και εξετάζονται κυρίως τα ακόλουθα σημεία [3]:

1. Σημασία του δικτύου επικοινωνιών 5G
2. Προκλήσεις στα δίκτυα επικοινωνίας 5G
3. Ορισμένες πιθανές οπτικές τεχνολογίες για την αντιμετώπιση των προκλήσεων στα δίκτυα 5G: Τεχνολογία Radio over fiber (RoF), παθητικά οπτικά δίκτυα (PONs), Light Fidelity (LiFi), επικοινωνία με οπτικές κάμερες (OCC), φωτονική γέφυρα κυμάτων χιλιοστού για το 5G.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ

---

Η ασύρματη τεχνολογία έχει μακρά ιστορία και ξεκίνησε περίπου την εποχή που ο James C. Maxwell προέβλεψε θεωρητικά και στη συνέχεια απέδειξε την ύπαρξη ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων τη δεκαετία του 1860 και όταν ο Heinrich R. Hertz επιβεβαίωσε πειραματικά την πραγματική ύπαρξη του ηλεκτρομαγνητικού κύματος το 1888 [4].

Το 1895, ο Guglielmo Marconi κατάφερε να λάβει τον κώδικα Μορς σε ραδιοκύμα που μεταδιδόταν από πομπό με σπινθηριστή σε δέκτη που βρισκόταν σε απόσταση 2,4 χιλιομέτρων. Το πείραμα αυτό κατέδειξε τη βασική ιδέα και το πλαίσιο της ασύρματης επικοινωνίας σήμερα. Στην ασύρματη επικοινωνία, ο πομπός στέλνει πληροφορίες στόχου με την επικάλυψή τους σε ένα φέρον κύμα και ο δέκτης λαμβάνει τις πληροφορίες εξάγοντας τις επικαθήμενες πληροφορίες από το φέρον κύμα [7].

Στη συνέχεια, η έρευνα για την ασύρματη επικοινωνία προχώρησε κυρίως για στρατιωτική χρήση και αναπτύχθηκαν και βελτιώθηκαν διάφορες ασύρματες τεχνολογίες. Η ασύρματη επικοινωνία επεκτάθηκε επίσης σε εμπορική βάση στον τομέα των ραδιοτηλεοπτικών εκπομπών, μια από τις σημαντικές εφαρμογές της ασύρματης επικοινωνίας. Οι ραδιοφωνικές εκπομπές ξεκίνησαν στο πρώτο μισό του 20ού αιώνα και οι τηλεοπτικές εκπομπές στο δεύτερο μισό. Από τα τέλη της δεκαετίας του 1980, η ασύρματη επικοινωνία χρησιμοποιείται ευρέως σε κινητά τηλέφωνα και άλλα κινητά τερματικά από ιδιώτες, καθώς οι τεχνολογίες αυτές, κυρίως στους ημιαγωγούς και το λογισμικό, αναπτύχθηκαν ταχύτατα παράλληλα με την εξάπλωση της νέας υποδομής του Διαδικτύου. Αυτές αλλάζουν ακόμη και τα μοντέλα της επιχειρηματικής και κοινωνικής ζωής [2].

Οι τεχνολογίες ασύρματης επικοινωνίας αναπτύσσονται και εξαπλώνονται σε διάφορους τομείς της βιομηχανίας. Ειδικότερα, η έρευνα και η ανάπτυξη της τεχνολογίας των ασύρματων δικτύων αισθητήρων και των εφαρμογών της βρίσκονται

σε ταχεία πρόοδο. Αναπτύσσονται νέα συστήματα, τα οποία ενσωματώνουν κόμβους και συσκευές αισθητήρων γενικής χρήσης και μπορούν να λειτουργούν για αρκετά χρόνια με μπαταρίες, ενώ παράλληλα διαμορφώνουν αυτόνομα τα δικά τους δίκτυα. Εν τω μεταξύ, οι ασύρματες ψηφιακές τεχνολογίες έχουν προχωρήσει και η πρακτική χρήση τους για την επίλυση ζητημάτων ασφάλειας, όπως η ραδιοπαγίδευση ή η παρεμβολή, που αποτελούν προβλήματα με τα συμβατικά αναλογικά ασύρματα συστήματα, έχει σημειώσει σημαντική πρόοδο [4].

Με βάση την ανάπτυξη αυτών των πλατφορμών, οι εφαρμογές των ασύρματων τεχνολογιών επικοινωνίας εξαπλώνονται σε διάφορους τομείς, όπως η πρόληψη καταστροφών, η αντιμετώπιση καταστροφών, η πρόληψη του εγκλήματος, οι έλεγχοι ασφαλείας, η προστασία του περιβάλλοντος, η υγεία και η πρόνοια, οι μεταφορές και η εφοδιαστική, καθώς και η παρακολούθηση και ο έλεγχος κτιρίων και εγκαταστάσεων [1].

Η Yokogawa έχει αναπτύξει ασύρματες συσκευές και συστήματα πεδίου για διάφορες τοποθεσίες σε βιομηχανίες και χρησιμοποιούνται σήμερα σε πολλές εγκαταστάσεις. Η αποτελεσματικότητά τους σε πολλές πραγματικές εφαρμογές είναι αποδεδειγμένη - τέτοια πλεονεκτήματα όπως η μη ανάγκη καλωδίωσης και η δυνατότητα τοποθέτησης αισθητήρων σε κινητά ή περιστρεφόμενα σώματα, κάτι που είναι φυσικά αδύνατο με τα παραδοσιακά ενσύρματα συστήματα [8].

Από την αρχαιότητα, οι άνθρωποι έχουν χρησιμοποιήσει πολυάριθμους τρόπους για τη μετάδοση πληροφοριών. Πρώτα χρησιμοποιήθηκαν οι ανθρώπινες φωνές, στη συνέχεια ήχοι όπως τύμπανα ή κόρνες κοχυλιών, και στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε ο καπνός από φωτιές σήματος. Είναι ενδιαφέρον ότι έχουν βρεθεί κάποιες αποδείξεις ότι το χρώμα ή το διάστημα των σημάτων καπνού άλλαζε για να προσδιορίσει διαφορετικές έννοιες. Η εφευρετικότητα και η σοφία των αρχαίων ανθρώπων είναι εντυπωσιακή, καθώς κατανόησαν την αναγκαιότητα της ψηφιοποίησης των πληροφοριών και φαίνεται ότι την πέτυχαν [4].

Μετά από αυτό, το κείμενο άρχισε να χρησιμοποιείται για τη μετάδοση πληροφοριών και εφαρμόστηκαν διάφορες μέθοδοι, όπως συστήματα ταχυδρομικής διανομής με τη χρήση αλόγων [4].

Αυτή ήταν η αρχή του σημερινού ταχυδρομικού συστήματος και εξελίχθηκε περαιτέρω σε τηλεγράφο, τηλέφωνο, συστήματα ηλεκτρονικού ταχυδρομείου που βασίζονται στο Διαδίκτυο και συστήματα κοινωνικής δικτύωσης (SNS). Σήμερα, μπορεί να ειπωθεί ότι οι άνθρωποι αντιμετωπίζουν μια εκρηκτική ποικιλομορφία στη μετάδοση πληροφοριών [3].

Οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις αντιμετωπίζουν επίσης μια κατάσταση με αλλαγές παρόμοιες με αυτές που περιγράφονται παραπάνω. Οι παραδοσιακοί στόχοι ανίχνευσης στις εγκαταστάσεις ήταν απλά φυσικά μεγέθη, όπως η θερμοκρασία και ο ρυθμός ροής ή η στοιχειομετρική ποσότητα. Ωστόσο, με την πρόσφατη πρόοδο των συσκευών πεδίου όσον αφορά τη λειτουργικότητα, την απόδοση και την ψηφιοποίηση, μπορούν να ληφθούν διάφοροι τύποι δεδομένων, συμπεριλαμβανομένων των δονήσεων, του ήχου και του βίντεο, ενώ είναι δυνατή και η ταυτόχρονη πρόσβαση σε συσσωρευμένα δεδομένα χρονοσειρών. Αυτά καθιστούν δυνατή την κατανόηση των συνθηκών ολόκληρου του συστήματος πιο ολοκληρωμένα απ' ό,τι μόνο με τις παραδοσιακές μετρήσεις [4].

Η μέτρηση και ο έλεγχος που περιλαμβάνουν αυτά τα δεδομένα γίνεται έτσι όλο και πιο σημαντική. Εν τω μεταξύ, για τα δεδομένα αυτά, πρέπει να οριστούν πιο σύνθετες παράμετροι στις συσκευές πεδίου. Για να ανταποκριθεί κανείς σε αυτές τις τάσεις, απαιτείται αναπόφευκτα ψηφιακή επικοινωνία και για το σκοπό αυτό αυξάνεται η σημασία της βιομηχανικής ασύρματης επικοινωνίας και των δικτύων αισθητήρων [5].

Το μοντέλο υπολογιστικού νέφους έχει αναδειχθεί ως η υποδομή που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία τέτοιων πολύπλοκων και μεγάλων όγκων δεδομένων. Τα δεδομένα μετρήσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ασφάλεια, τη συντηρησιμότητα και την αποδοτικότητα ολόκληρης της εγκατάστασης με τη χρήση ανάλυσης δεδομένων, ανάλυσης τάσεων κ.ο.κ., την οποία άλλα συστήματα δεν μπορούν να εκτελέσουν εύκολα [6].

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ 5G

---

### 2.1 Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ 5G

Το 5G (Κινητά και Ασύρματα Δίκτυα Πέμπτης Γενιάς) μπορεί να είναι μια πλήρης ασύρματη επικοινωνία χωρίς περιορισμούς, η οποία μας φέρνει το τέλειο πραγματικό ασύρματο κόσμο - World Wide Wireless Web (WWWW). Το 5G δηλώνει την επόμενη σημαντική φάση των προτύπων κινητών τηλεπικοινωνιών πέρα από τα πρότυπα 4G/IMT-Advanced. Κάθε νέα έκδοση βελτιώνει περαιτέρω τις επιδόσεις του συστήματος και προσθέτει νέες δυνατότητες με νέους τομείς εφαρμογής. Ορισμένες από τις πρόσθετες εφαρμογές που επωφελούνται από την κινητή συνδεσιμότητα είναι ο οικιακός αυτοματισμός, οι έξυπνες μεταφορές, η ασφάλεια και τα ηλεκτρονικά βιβλία.

Η τεχνολογία κινητής τηλεφωνίας 5G έχει αλλάξει τα μέσα χρήσης των κινητών τηλεφώνων σε πολύ υψηλό εύρος ζώνης [4]. Ο χρήστης δεν έχει ξαναζήσει ποτέ στο παρελθόν μια τόσο υψηλής αξίας τεχνολογία. Οι τεχνολογίες 5G περιλαμβάνουν όλα τα είδη προηγμένων χαρακτηριστικών που καθιστούν την τεχνολογία κινητής τηλεφωνίας 5G πιο ισχυρή και με τεράστια ζήτηση στο εγγύς μέλλον. Για τα παιδιά που διασκεδάζουν με την τεχνολογία Bluetooth και τα δίκτυα Pico έχουν γίνει διαθέσιμα στην αγορά. Οι χρήστες μπορούν επίσης να συνδέσουν τα κινητά τηλέφωνα τεχνολογίας 5G με το φορητό τους υπολογιστή για να αποκτήσουν ευρυζωνική πρόσβαση στο διαδίκτυο. Η τεχνολογία 5G περιλαμβάνει κάμερα, εγγραφή MP3, αναπαραγωγή βίντεο, μεγάλη μνήμη τηλεφώνου, ταχύτητα κλήσης, αναπαραγωγή ήχου και πολλά άλλα που δεν μπορεί κανείς να φανταστεί.

Στην πέμπτη γενιά, η αρχιτεκτονική δικτύου αποτελείται από ένα τερματικό χρήστη (το οποίο έχει καθοριστικό ρόλο στη νέα αρχιτεκτονική) και έναν αριθμό ανεξάρτητων, αυτόνομων τεχνολογιών ραδιοπρόσβασης (RAT). Το σύστημα κινητής τηλεφωνίας 5G είναι ένα μοντέλο βασισμένο σε όλα τα IP για τη διαλειτουργικότητα των ασύρματων και κινητών δικτύων.

Μέσα σε κάθε τερματικό, κάθε μια από τις τεχνολογίες ραδιοπρόσβασης θεωρείται ως η σύνδεση IP με τον εξωτερικό κόσμο του Διαδικτύου [8].

## 2.2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΠΟΥ ΑΝΑΜΕΝΟΝΤΑΙ ΣΤΟ 5G

Κατά την εξέταση του σεναρίου LTE, η έμφαση δόθηκε στη διαθεσιμότητα του εύρους ζώνης. Αλλά όταν το θέμα ξεπεράστηκε, η έρευνα στόχευε στην παροχή διάχυτης συνδεσιμότητας που θα παρείχε στους χρήστες γρήγορη και ευέλικτη πρόσβαση στο διαδίκτυο, όπου κι αν βρίσκονται, είτε ανάμεσα στη θάλασσα, είτε στο υπέδαφος, είτε στον ουρανό. Αν και το πρότυπο LTE ενσωματώνει μια παραλλαγή που ονομάζεται Machine Type MTC) για το IoT. Οι τεχνολογίες 5G έχουν σχεδιαστεί από την αρχή για να υποστηρίξουν συσκευές τύπου MTC [4].

Όσον αφορά τις νέες τεχνολογίες, σχεδόν κάθε τεχνολογία αποτελεί προϋπόθεση των παλαιότερων εκδόσεων. Ομοίως, το 5G θα περιλαμβάνει τις τεχνολογίες 2G, 3G, LTE, LTE-A, Wi-Fi, M2M κ.λπ. Μπορούμε να προβλέψουμε ότι ο σχεδιασμός του 5G θα είναι ικανός να υποστηρίξει πολλές εφαρμογές όπως το IoT, η επαυξημένη πραγματικότητα για ροή HD, τα συνδεδεμένα wearable και το immersive gaming [5].

Επιπλέον, το 5G θα διαθέτει την ικανότητα να χειρίζεται την πληθώρα συνδεδεμένων συσκευών και διάφορους τύπους κίνησης. Για παράδειγμα, το 5G θα παρέχει πολύ πιο γρήγορες συνδέσεις ταχύτητας για ροή βίντεο υψηλής ευκρίνειας καθώς και χαμηλό ρυθμό δεδομένων για δίκτυα αισθητήρων [3].

Τα δίκτυα 5G θα αποκτήσουν νέες αρχιτεκτονικές, όπως οι κατηγορίες Radio Access Networks(RAN), όπως το cloud RAN και το virtual RAN, για να δημιουργήσουν ένα πιο συγκεντρωτικό δίκτυο και να αξιοποιήσουν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τις φάρμες διακομιστών μέσω τοπικών κέντρων δεδομένων στα άκρα του δικτύου [5].

Τέλος, το 5G θα χρησιμοποιήσει τις γνωστικές ραδιοτεχνικές για να επιτρέψει στην υποδομή να αποφασίζει αυτόματα το είδος του προσφερόμενου καναλιού να διαφοροποιεί μεταξύ των κινητών και των ακίνητων αντικειμένων και να προσαρμόζεται στις συνθήκες στο περιορισμένο χρονικό πλαίσιο.

Με άλλα λόγια, τα δίκτυα 5G θα μπορούν να εξυπηρετούν ταυτόχρονα το βιομηχανικό δίκτυο και τις εφαρμογές κοινωνικής δικτύωσης [8].

## 2.3 ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ 5G

Οι κύριες προκλήσεις στις οποίες πρέπει να δοθεί έμφαση είναι οι προκλήσεις του 1000 φορές υψηλότερου όγκου κίνησης και του 100 φορές υψηλότερου ρυθμού δεδομένων των χρηστών. Αυτή η εκρηκτική αύξηση της κίνησης και ο ρυθμός δεδομένων χρήστη μπορούν να ελεγχθούν από πολλές τεχνολογίες, αλλά μπορούμε να επικεντρωθούμε στις τρεις που μπορούν να ελέγξουν μια τόσο υψηλή αναλογία [4].

Πρόκειται για τις τεχνολογίες φυσικού επιπέδου (PHY), οι οποίες περιλαμβάνουν τη μαζική πολλαπλή είσοδο και πολλαπλή έξοδο (MIMO), την τράπεζα φίλτρων πολλαπλών φορέων (FBMC), τη μη ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση (NOMA) κ.λπ. Επικεντρώνεται κυρίως στη βελτίωση της αποδοτικότητας του φάσματος για την ενίσχυση της χωρητικότητας του δικτύου. Επιπλέον, η εκμετάλλευση του ανεκμετάλλευτου φάσματος στη συχνότητα κυμάτων χιλιοστού (mm) μπορεί να είναι πολύ χρήσιμη για τη βελτίωση της χωρητικότητας του δικτύου [5].

Ωστόσο, η πύκνωση του δικτύου είναι το πιο κυρίαρχο συστατικό που συμβάλλει στη χωρητικότητα του συστήματος ασύρματων επικοινωνιών. Πιστεύεται ότι η χωρητικότητα του δικτύου που χρησιμοποιεί Universal Domain Network(UDN) μπορεί να αυξηθεί σε γραμμική αναλογία με τον αριθμό των κυψελών. Λαμβάνοντας υπόψη την πύκνωση του δικτύου, το ετερογενές δίκτυο(HetNet) που περιλαμβάνει μακρο ENodeB(eNB) και eNB χαμηλής ισχύος(micro eNb, pico, eNB, κ.λπ.). Επιπλέον, η επικοινωνία μεταξύ συσκευών (D2D), ένα υποκατάστατο του HetNet, είναι ικανό να βελτιώσει τον μέγιστο ρυθμό δεδομένων και την αποδοτικότητα φάσματος [4].

Η εξισορρόπηση φορτίου μεταξύ συστημάτων πολλαπλών τεχνολογιών πρόσβασης ραδιοσυχνοτήτων (RAT) είναι ακόμη σε θέση να ενισχύσει τη χωρητικότητα του δικτύου μέσω της βελτίωσης της αποδοτικότητας των πόρων του δικτύου. Αν και η πύκνωση του δικτύου μπορεί να βελτιώσει τη χωρητικότητα του

δικτύου μειώνοντας την απώλεια διαδρομής μεταξύ του χρήστη και του σταθμού βάσης, αυξάνει τόσο τα παρεμβαλλόμενα όσο και τα επιθυμητά σήματα και ουσιαστικά επισκιάζει τον αντίκτυπο του θερμικού θορύβου. Θα μπορούσε να θεωρηθεί ισοδύναμο να πούμε ότι το σύστημα γίνεται περιορισμένη παρεμβολή και η μετανάστευση παρεμβολής θα αποτελούσε βελτίωση για την αποδοτικότητα της ζεύξης. Επιπλέον, η παρεμβολή γίνεται πιο σύνθετη καθώς αυξάνεται η πυκνότητα των σύνθετων κυψελών. Στην πλευρά του δέκτη, απαιτείται η προηγμένη ακύρωση παρεμβολής, η αρχιτεκτονική του δικτύου θα πρέπει επίσης να υποστηρίζει την αποδοτικότητα και τον συντονισμό μεταξύ των διαφόρων κυψελών. Δεδομένου ότι η ποσότητα σηματοδότησης ελέγχου στον κατανεμημένο μηχανισμό συντονισμού θα αυξηθεί τετραγωνικά με την αύξηση της έντασης των μικρών κυψελών [4].

Ο κεντρικός συντονισμός θα ήταν το πρώτο σημαντικό χαρακτηριστικό προτεραιότητας για την αρχιτεκτονική 5G. Με βάση την κεντρική επεξεργασία, η απόδοση του δικτύου μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω μέσω του κοινού συντονισμού και της διαχείρισης των πόρων σε πολλαπλές κυψέλες και πολλαπλά συστήματα RAT. Εκτός αυτού, λόγω της περιορισμένης περιοχής κάλυψης της μικρής κυψέλης και της κινητικότητας των χρηστών, οι ταχέως κινούμενοι χρήστες θα υποβάλλονται σε συχνές μεταβιβάσεις. Για να παρέχεται η αποδοτικότητα της απρόσκοπτης κινητικότητας, η διαχείριση πολλαπλών μικρών κυψελών πρέπει να γίνεται με κεντρικό τρόπο. Είναι σαφές ότι ο κεντρικός συντονισμός και η διαχείριση είναι απαραίτητα για το δίκτυο ραδιοπρόσβασης (RAN) του κινητού δικτύου 5G. Εν τω μεταξύ, το κυψελοειδές δίκτυο πυρήνα (CN) θα πρέπει επίσης να εξεταστεί για τη διαχείριση της εκρηκτικής αύξησης του όγκου της εμπλεκόμενης τηλεπικοινωνιακής κίνησης [5].

## 2.4 ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ 5G

Το σύστημα επικοινωνίας 5G αναμένεται να προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, παρέχοντας ακραία ευρυζωνική επικοινωνία, μαζική επικοινωνία και εξαιρετικά αξιόπιστη υπηρεσία με χαμηλή καθυστέρηση. Αυτά τα πλεονεκτήματα θα κυμαίνονται από την επικοινωνία ανθρώπου με άνθρωπο, ανθρώπου με μηχανή και μηχανής με μηχανή [8].



**Αδιάλειπτη κινητή ευρυζωνική επικοινωνία:** Εξαιτίας αυτής της δυνατότητας θα υπάρξει βελτίωση στην επικοινωνία από άνθρωπο σε άνθρωπο και από άνθρωπο σε μηχανή με βίντεο εξαιρετικά υψηλής ευκρίνειας, βιντεοκλήσεις και σταθερές ασύρματες υπηρεσίες με εικονική ή επαυξημένη πραγματικότητα. Επίσης, αναμένεται επικοινωνία μηχανής προς μηχανή με παρακολούθηση βίντεο και κινητή υπολογιστική νέφους [8].

**Επικοινωνία μαζικής κλίμακας:** Η επικοινωνία μαζικής κλίμακας παρέχεται επίσης στο 5G μέσω φορητών συσκευών, κοινωνικής δικτύωσης, έξυπνων σπιτιών/πόλεων με παρακολούθηση της υγείας, οχημάτων προς υποδομές και βιομηχανικού αυτοματισμού [3].

**Εξαιρετικά αξιόπιστη υπηρεσία χαμηλής καθυστέρησης:** Οι εξαιρετικά αξιόπιστες υπηρεσίες χαμηλής καθυστέρησης είναι το όραμα για το 5G μέσω της βελτίωσης της δημόσιας ασφάλειας, της παροχής απομακρυσμένης παρακολούθησης της υγείας και της βελτίωσης της επικοινωνίας μεταξύ οχημάτων και πεζών και οχημάτων [9].

Τα προαναφερθέντα σημεία δείχνουν τη σημασία του συστήματος κινητών επικοινωνιών 5G στη ζωή όλων μας. Εν ολίγοις μπορεί να ειπωθεί ότι το 5G θα παρέχει βελτιωμένη επικοινωνία με υπερυψηλή αξιοπιστία, υψηλή ασφάλεια, άψογη κινητικότητα, εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση, ακραία ευρυζωνικότητα, βαθιά κάλυψη, εξαιρετικά χαμηλό κόστος και εξαιρετικά χαμηλή ενέργεια [10].

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. FIBER TO THE ANTENNA FOR 5G

---

### 3.1 ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

**IoT και αυξημένος αριθμός συνδέσεων:** Το IoT θα είναι το κύριο υποσχόμενο πράγμα στο σύστημα επικοινωνίας 5G και λόγω του IoT αναμένεται να υπάρξει τεράστια αύξηση του αριθμού των συσκευών στο δίκτυο. Αυξημένος αριθμός συσκευών σημαίνει αυξανόμενη ζήτηση συνολικού όγκου δεδομένων και αυξανόμενη ζήτηση διαχείρισης τεράστιου αριθμού συσκευών. Υπάρχει ένα όριο στο σημερινό επίπεδο ελέγχου των δικτύων που βασίζονται στο 3Gpp, το οποίο δεν θα είναι σε θέση να διαχειριστεί τον αυξημένο αριθμό φορτίων σύνδεσης, οπότε υπάρχει ανάγκη ανάπτυξης νέου επιπέδου ελέγχου για τον αυξημένο αριθμό συνδέσεων στο σύστημα επικοινωνίας 5G [7].

**Όγκος δεδομένων:** Το 5G αναμένεται να παρέχει ποιότητα βίντεο UHD με υψηλή ανάλυση και εικονική/αυξημένη πραγματικότητα. Εξαιτίας αυτού, ο όγκος κατανάλωσης δεδομένων θα αυξάνεται κατά 25-50 % κάθε χρόνο και αυτό αναμένεται να συνεχιστεί. Ορισμένοι ερευνητές έχουν προβλέψει ότι στο σύστημα επικοινωνίας 5G ο όγκος κατανάλωσης δεδομένων θα φτάσει τα 25 exabytes ανά μήνα μέχρι το 2020, δηλαδή 10 φορές περισσότερο από τη σημερινή κατανάλωση που είναι 2,5 exabytes ανά μήνα. Έτσι, η χωρητικότητα δεδομένων θα αποτελέσει την κύρια πρόκληση στο σύστημα επικοινωνιών 5G [8].

**Αύξηση της χωρητικότητας χωρίς αύξηση του κόστους:** Στο σημερινό σενάριο οι χρήστες θέλουν να χρησιμοποιούν περισσότερα δεδομένα, αλλά δεν θέλουν να πληρώνουν περισσότερες φορές για τους λογαριασμούς τους σε σύγκριση με τους προηγούμενους λογαριασμούς τους. Κατά την ανάπτυξη του συστήματος επικοινωνιών 5G αυτή είναι μια από τις κύριες προκλήσεις για την αύξηση της χωρητικότητας δεδομένων χωρίς αύξηση του κόστους λειτουργίας, ώστε οι χρήστες να μην χρειάζεται να πληρώνουν περισσότερα για την αυξημένη χωρητικότητα δεδομένων τους. Για την επίλυση αυτού του ζητήματος αναπτύσσεται η έννοια της μακροκυψέλης και της μικρής κυψέλης στο σύστημα 5G [7].

**Γρήγορη και ευέλικτη ανάπτυξη της αρχιτεκτονικής:** Η ανάπτυξη γρήγορης και ευέλικτης αρχιτεκτονικής για το σύστημα επικοινωνιών 5G αποτελεί πρόκληση. Η έννοια C-RAN υιοθετείται και υλοποιείται στο σύστημα επικοινωνιών 5G, στο οποίο ορισμένες από τις λειτουργίες από το RAN θα μεταφερθούν στο cloud της μονάδας ζώνης βάσης (BBU). Αυτό μπορεί να προσφέρει κλιμάκωση, οικονομία, ευελιξία και ευκολότερη αναδιαμόρφωση λόγω της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας [3].

**Πυκνότητα δικτύου:** Το σύστημα 5G χωρίζεται σε διάφορα επίπεδα, από το επίπεδο των μακροκυττάρων έως το τοπικό επίπεδο για συνδεσιμότητα υψηλής ταχύτητας. Η αύξηση του αριθμού των στρωμάτων έχει δημιουργήσει πρόκληση για το συντονισμό του δικτύου στο σχεδιαστή του δικτύου [5].

**Χαμηλή καθυστέρηση:** Το όραμα για το σύστημα επικοινωνιών 5G είναι να παρέχει σύστημα επικοινωνιών με εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση ( $< 1$  ms), η οποία αποτελεί την πιο δύσκολη πρόκληση στο σχεδιασμό του δικτύου. Για την επίτευξη αυτού του στόχου πρέπει να εξελιχθούν και να χρησιμοποιηθούν διάφορες τεχνολογίες επικοινωνίας υψηλής ταχύτητας στο σύστημα επικοινωνίας 5G [8].

## 3.2 ΥΠΟΣΧΟΜΕΝΕΣ ΚΥΜΑΤΟΣΕΙΡΕΣ ΓΙΑ ΤΟ 5G

**Ζώνη κυμάτων χιλιοστού:** Αυτή η ζώνη κυμαίνεται από μήκος κύματος 1mm -10 mm ή σε συχνότητα 300 GHz - 30 GHz. Στη ζώνη κυμάτων είναι πολύ ενδιαφέρουσα για το πρόσφατο ερευνητικό ενδιαφέρον λόγω του σήματος μικρού μήκους κύματος, τα εξαρτήματα για αυτή τη ζώνη μπορούν να είναι μικρότερα και συμπαγή σε σύγκριση με το σύστημα μικροκυμάτων. Επίσης, η τεράστια διαθεσιμότητα μη αδειοδοτημένου εύρους ζώνης την καθιστά χρήσιμη για χρήση στο 5G για υψηλούς ρυθμούς δεδομένων. Εκτός από όλα τα πλεονεκτήματα, η ζώνη κυμάτων mm υποφέρει από τεράστιες απώλειες εξασθένησης και απορρόφησης κατά τη διάδοση στον ελεύθερο χώρο, επίσης δεν μπορεί να περάσει μέσα από εμπόδια που έρχονται στο δρόμο του [6].

**Ζώνη οπτικών κυμάτων:** Αυτή η ζώνη κυμαίνεται από το μήκος κύματος 390 nm έως 750 nm. Λόγω της τεράστιας διαθεσιμότητας εύρους ζώνης, αυτή η ζώνη είναι επίσης μια πολλά υποσχόμενη ζώνη κυμάτων για την επικοινωνία 5G για την αύξηση

του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων και της χωρητικότητας. Επιπλέον, ο πρόσφατα αναπτυχθείς φωτονικός πομποδέκτης κυμάτων mm τον καθιστά πιο σημαντικό, διότι μπορεί να γεφυρώσει τόσο τις τεχνολογίες φωτονικών όσο και τις τεχνολογίες κυμάτων mm για το σύστημα 5G [2].

### 3.3 ΥΠΟΣΧΟΜΕΝΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΓΙΑ ΤΟ 5G

Λόγω της τεράστιας διαθεσιμότητας εύρους ζώνης και του φάσματος χωρίς άδεια χρήσης στην ορατή και υπέρυθρη περιοχή στον οπτικό τομέα, οι τεχνολογίες φωτονικών δικτύων αναμένεται να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στο σύστημα επικοινωνίας 5G. Ορισμένες από τις πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες οπτικών δικτύων για το 5G παρατίθενται παρακάτω [10]:

**Πιστότητα φωτός (LiFi):** Ο Harald Haas από το Πανεπιστήμιο του Edinburg παρουσίασε για πρώτη φορά το LiFi το 2011. Το LiFi είναι ένα σύστημα επικοινωνίας ορατού φωτός (VLC) και μοιάζει πολύ με το WiFi. Το WiFi χρησιμοποιεί ραδιοκύματα για τη μετάδοση δεδομένων, αλλά το LiFi χρησιμοποιεί ορατό φως από LED με ειδικό τσιπ για τη μετάδοση του σήματος. Λόγω του υψηλού διαθέσιμου εύρους ζώνης στο ορατό φάσμα, το LiFi μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε δίκτυα υψηλής ταχύτητας και χωρητικότητας. Το μήκος συνοχής του λευκού φωτός που παράγεται από τις λυχνίες LED έχει πολύ μικρό μήκος συνοχής, δηλαδή η παρεμβολή είναι πολύ μικρότερη στο LiFi σε σύγκριση με το WiFi και έτσι το LiFi μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πιο πυκνό περιβάλλον δικτύου. Η υψηλή ταχύτητα μεταγωγής, η υψηλή ενεργειακή απόδοση, η μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, η συμπαγής κατασκευή, η χαμηλότερη παραγωγή θερμότητας, η μειωμένη χρήση επιβλαβών υλικών στο σχεδιασμό των LED, το χαμηλό κόστος των LED και η τεράστια διαθεσιμότητα φάσματος έχουν καταστήσει την τεχνολογία LiFi πολύ υποσχόμενη λύση για το σύστημα επικοινωνίας 5G [9].

Στο πειραματικό περιβάλλον το LiFi έδειξε ταχύτητα 224 Gbps, η οποία είναι 100 φορές μεγαλύτερη από αυτή που μπορεί να παρέχει το WiFi. Αυτό κατέστη εφικτό λόγω του πολύ μεγαλύτερου φάσματος που είναι διαθέσιμο για το LiFi από το WiFi, καθώς και λόγω του ορατού φάσματος που είναι μη αδειοδοτημένο, γεγονός που καθιστά το LiFi πολύ αποδοτική τεχνολογία για το σύστημα επικοινωνίας 5G.

Επιπλέον, τα απαιτούμενα εξαρτήματα για το LiFi είναι πολύ λιγότερα σε σύγκριση με το WiFi, γεγονός που το καθιστά πολύ χρήσιμο για τα δίκτυα επικοινωνίας [11].

Το κύριο μειονέκτημα του LiFi είναι ότι δεν μπορεί να ταξιδέψει μέσα από τοίχους ή αδιαφανή μέσα, γεγονός που το καθιστά τεχνολογία πολύ μικρής εμβέλειας στο 5G. Ένας άλλος περιοριστικός παράγοντας στην τεχνολογία LiFi είναι ότι οι λυχνίες LED πρέπει να είναι συνεχώς αναμμένες για τη μετάδοση δεδομένων, αν και υπάρχει η δυνατότητα να χαμηλώσει το φως των λυχνιών LED ώστε να είναι λιγότερο ορατό από τον άνθρωπο. Εν ολίγοις, μπορούμε να πούμε ότι το LiFi δεν αντικαθιστά το WiFi, αλλά το LiFi και το WiFi μπορούν να συνεργαστούν στο σύστημα επικοινωνίας 5G για καλύτερες επιδόσεις [10].

Το σύστημα LiFi μπορεί να είναι κυρίως χρήσιμο για εσωτερικό περιβάλλον, όπως και το WiFi, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως η επικοινωνία λαμπτήρων δρόμου με οχήματα, η επικοινωνία σηματοδοτών με οχήματα, το LiFi μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για εξωτερικό περιβάλλον [6].

**Επικοινωνία οπτικής κάμερας (OCC):** Το σύστημα επικοινωνίας με οπτική κάμερα (OCC) μοιάζει πολύ με το LiFi, με τη διαφορά ότι το OCC χρησιμοποιεί αισθητήρα εικόνας αντί για φωτοανιχνευτή όπως στο LiFi. Στη συνέχεια, το λαμβανόμενο σήμα από τον αισθητήρα μπορεί να αποδιαμορφωθεί χρησιμοποιώντας αλγορίθμους επεξεργασίας σήματος και εικόνας και να εξαχθούν τα δεδομένα εξόδου [5].

**Σύστημα οπτικής επικοινωνίας ελεύθερου χώρου (FSOC):** Το FSOC είναι επίσης ένας σημαντικός τύπος οπτικού συστήματος ασύρματης επικοινωνίας και μπορεί να είναι πολύ σημαντικός στο σύστημα επικοινωνίας 5G. Το FSOC δεν χρησιμοποιεί ολόκληρο το φάσμα του ορατού φωτός, αλλά χρησιμοποιεί στενό φάσμα από το εγγύς υπέρυθρο ή το ορατό ή από το υπεριώδες φάσμα. Λόγω της χρήσης στενού φάσματος μπορεί να είναι πιο χρήσιμο για επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων. Κυρίως χρησιμοποιούνται δίοδοι λέιζερ (LD) ως πηγή αντί για LED στο FSOC για τη μετάδοση πληροφοριών από τον πομπό στον δέκτη. Για τη μείωση των διασταυρούμενων παρεμβολών και τη διάδοση της οπτικής δέσμης σε μεγάλη απόσταση μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές διαμόρφωσης οπτικής δέσμης. Το FSOC είναι μια πολλά

υποσχόμενη τεχνική για το σύστημα επικοινωνιών 5G για επικοινωνία σε μεγάλες αποστάσεις [2].

Στην πλευρά του δέκτη χρησιμοποιείται ο φωτοανιχνευτής για την ανίχνευση του σήματος και αφού περάσει από χαμηλοπερατό φίλτρο χρησιμοποιείται το κατάλληλο σχήμα αποδιαμόρφωσης για την ανάκτηση των πληροφοριών. Σε σύγκριση με το σύστημα επικοινωνίας RF, το FSOC έχει πολύ μεγάλο διαθέσιμο εύρος ζώνης, γεγονός που το καθιστά χρήσιμο για το σύστημα επικοινωνίας 5G με υψηλό ρυθμό δεδομένων [11].

Ως εφαρμογή το σύστημα FSOC μπορεί να χρησιμοποιηθεί για σύνδεση κτιρίου με κτίριο, σύνδεση αυτοκινήτου με αυτοκίνητο, σύνδεση backhaul για κυψελοειδή σταθμό βάσης με σύνδεση οπτικών ινών υψηλής χωρητικότητας [8].

Το σύστημα FSOC έχει δείξει πολλά πλεονεκτήματα στο σύστημα επικοινωνίας 5g, αν και πρέπει να ληφθούν υπόψη ορισμένοι περιοριστικοί παράγοντες, όπως η αξιοπιστία της σύνδεσης, η ευαισθησία στις καιρικές συνθήκες, όπως η ομίχλη, η βροχή, η ομίχλη, οι ατμοσφαιρικές αναταράξεις, κατά την υλοποίηση του δικτύου [3].

**Τεχνική Radio-over-fibre (RoF):** Η κύρια πρόκληση του δικτύου 5G είναι να παρέχει πρόσβαση σε πληροφορίες όταν τις χρειαζόμαστε, όπου τις χρειαζόμαστε και σε οποιαδήποτε μορφή τις χρειαζόμαστε. Οι οπτικές και ασύρματες τεχνολογίες παίζουν βασικό ρόλο για την επίτευξη αυτού του στόχου. Η οπτική ίνα δεν μπορεί να πάει παντού, αλλά όπου πάει παρέχει τεράστιο εύρος ζώνης, το οποίο είναι σημαντικό για την αντιμετώπιση της πρόκλησης ταχύτητας και χωρητικότητας στο δίκτυο 5G. Μια ενδιαφέρουσα προσέγγιση για την αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων τόσο του ασύρματου όσο και του δικτύου οπτικών ινών είναι η ενσωμάτωση του δικτύου οπτικών ινών και του ασύρματου δικτύου και αυτή η προσέγγιση ονομάζεται δίκτυο ραδιοεπικοινωνίας μέσω οπτικών ινών (RoF). Το RoF βελτιώνει σημαντικά την κάλυψη των κυττάρων, επίσης το RoF απαιτεί διαμόρφωση του φωτός με ραδιοδεδομένα για οπτική μετάδοση. Προσφέρει τεράστια αύξηση του εύρους ζώνης σε σχέση με τις υπάρχουσες λύσεις και δεν απαιτεί μετατροπή ψηφιακού σε αναλογικό (DAC), γεγονός που την καθιστά τεχνική χαμηλής καθυστέρησης [5].

Το απλουστευμένο σύστημα επικοινωνίας RoF στο οποίο το ραδιοσήμα στη ζώνη κυμάτων mm μεταδίδεται με τη χρήση του συστήματος RoF. Σε αυτό το σύστημα το κεντρικό δίκτυο συνδέεται με ένα κεντρικό γραφείο (CO), στο κεντρικό γραφείο το φωτεινό σήμα διαμορφώνεται σύμφωνα με τη μετάδοση του σήματος κυμάτων mm. Η διαμόρφωση του φωτός μπορεί να γίνει με δύο τρόπους- ο πρώτος είναι η διαμόρφωση του λέιζερ [10].

Στη συνέχεια χρησιμοποιούνται τεχνικές πολυπλεξίας με διαίρεση μήκους κύματος για την αύξηση της χωρητικότητας του καναλιού. Τέλος, το φωτεινό σήμα που μεταφέρει πληροφορίες μεταδίδεται μέσω σύνδεσης οπτικών ινών σε μονάδα ραδιοπρόσβασης (RAU). Στη RAU μπορεί να γίνει η οπτική σε ηλεκτρική μετατροπή για την ανάκτηση των πληροφοριών. Σε αυτό το σύστημα οι RAUs απλοποιούνται πολύ, πράγμα πολύ σημαντικό για χαμηλή καθυστέρηση και αποδοτικότητα κόστους, δεδομένου ότι η RAU χρειάζεται να εκτελεί μόνο τη μετατροπή του οπτικού σήματος σε ηλεκτρικό [1].

**Φωτονική γέφυρα κυμάτων mm:** Η οπτική τεχνολογία χιλιοστοκύματος συγκαταλέγεται μεταξύ των βασικών τεχνολογιών για το σύστημα επικοινωνιών 5G. Η χρήση της ζώνης συχνοτήτων χιλιοστομετρικών κυμάτων (30 GHz έως 300 GHz) είναι μια από τις σημαντικές έννοιες που προσφέρει μεγάλο φάσμα και πολλαπλά Gigabits ανά δευτερόλεπτο (Gbps). Μια από τις κύριες προκλήσεις στην εφαρμογή του συστήματος επικοινωνιών κυμάτων χιλιοστού είναι η παραγωγή καλής ποιότητας φέροντος σήματος υψηλής συχνότητας σε αυτή τη ζώνη. Τα σήματα της ζώνης των megahertz μπορούν να παραχθούν με τη χρήση κοινού ηλεκτρικού ταλαντωτή και στη συνέχεια με συχνότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί η έννοια του πολλαπλασιασμού για τη δημιουργία σήματος διπλασιασμού συχνότητας. Ωστόσο, σε κάθε διπλασιασμό της συχνότητας ο θόρυβος φάσης αυξάνεται κατά 6 dB, οπότε είναι δύσκολο να παραχθεί κύμα χιλιοστού με χαμηλό θόρυβο φάσης και επίσης η παραγωγή MMW με χρήση ηλεκτρονικών εξαρτημάτων είναι δαπανηρή. Η ανάπτυξη συστήματος παραγωγής MMW με βάση το φωτονικό σύστημα αξιοποιεί τη δικτύωση οπτικών κυμάτων χιλιοστού για το 5G. Προτείνονται διάφορες τεχνικές για τη γεφύρωση των οπτικών κυμάτων σε κύματα χιλιοστού, οι οποίες παίζουν σημαντικό ρόλο στη δικτύωση κυμάτων χιλιοστού [9].

Επιπλέον, το κόστος συντήρησης και επισκευής των συνδέσεων ιών μεγάλων αποστάσεων είναι πολύ υψηλό, και σε αυτή την περίπτωση η φωτονική γέφυρα χιλιοστομετρικών κυμάτων παίζει σημαντικό ρόλο. Όπως φαίνεται στο σχήμα 7, στην έννοια της φωτονικής γέφυρας χιλιοστομετρικών κυμάτων στην πλευρά του πομπού το οπτικό κύμα που προέρχεται από το τερματικό οπτικής γραμμής (OLT) μετατρέπεται σε χιλιοστομετρικό κύμα και μεταδίδεται μέσω διάδοσης σε ελεύθερο χώρο, στη συνέχεια, στην πλευρά του δέκτη τα χιλιοστομετρικά κύματα μπορούν να μετατραπούν σε οπτικό πεδίο και να μεταδοθούν σε μια μονάδα οπτικού δικτύου (ONU) χρησιμοποιώντας οπτικό διαχωριστή. Αυτή η οπτική τεχνική αναμένεται να αποτελέσει μια πολλά υποσχόμενη λύση στη δικτύωση 5G. Η βασική ιδέα που χρησιμοποιείται στη φωτονική γέφυρα κυμάτων mm είναι ο διπλασιασμός της συχνότητας RF με χρήση οπτικών μέσων [8].

**Ενσωμάτωση του κέντρου δεδομένων στη συγκλίνουσα αρχιτεκτονική πρόσβασης-μετρό μέσω ευέλικτης οπτικής μεταγωγής:** Το πλαίσιο 5G εξαρτάται κυρίως από την εικονικοποίηση των δικτύων και των λειτουργιών και γι' αυτό η ενσωμάτωση του κέντρου δεδομένων (DC) και των δικτύων πρόσβασης-metro είναι σημαντική για τη διαφάνεια στο τέλος. Κατά τη σύνδεση των κέντρων δεδομένων με το δίκτυο μετρό πρόσβασης, η καθυστέρηση είναι το κύριο ζητούμενο. Λόγω των καλύτερων επιδόσεων όσον αφορά την καθυστέρηση από τις οπτικές τεχνολογίες, οι ερευνητές έχουν δείξει μεγάλο ενδιαφέρον για τις τεχνολογίες οπτικών δικτύων εντός του κέντρου δεδομένων (intra-DC) και μεταξύ των κέντρων δεδομένων (inter-DC). Στην αρχιτεκτονική του δικτύου 5G οι τεχνολογίες σύνδεσης μεταξύ των κέντρων δεδομένων με χρήση οπτικής μεταγωγής έτυχαν ιδιαίτερου ενδιαφέροντος λόγω της πολύ χαμηλής καθυστέρησης και έχει γίνει επίσης ενδιαφέρουσα η χρήση αυτών των τεχνολογιών για την επικοινωνία DC με άλλες υποδομές δικτύου 5G [1].

Στην εργασία, έχει αποδειχθεί ότι το SDN και το ευέλικτο οπτικό δίκτυο πλέγματος συνεργάζονται για υψηλή απόδοση, χαμηλή καθυστέρηση και υψηλή διαφάνεια στη μεταφορά δεδομένων στο σύστημα επικοινωνίας 5G. Η παροχή ελαστικής διαδρομής μεταξύ της τοπολογίας δικτύου πέντε κόμβων για το νέφος BBU μπορεί να γίνει με τη χρήση των ακόλουθων βημάτων [11]:



- Πρώτον, το αίτημα προσαρμογής εύρους ζώνης έχει σταλεί από την παρακολούθηση δικτύου σε έναν ελεγκτή.
- Στη συνέχεια, ο ελεγκτής SDN στέλνει αίτημα τροποποίησης φωτεινής διαδρομής με κατάλληλο σχήμα στους οπτικούς μεταγωγείς με δυνατότητα ανοιχτής ροής.
- Στη συνέχεια, μετά την τροποποίηση της διαδρομής φωτός οι οπτικοί διακόπτες με δυνατότητα ανοιχτής ροής επιστρέφουν το μήνυμα απάντησης στον ελεγκτή SDN.
- Στο τελευταίο βήμα, ο ελεγκτής SDN στέλνει μήνυμα προσαρμογής εύρους ζώνης σε ένα μόνιτορ δικτύου.

Το οπτικό C-RAN με δυνατότητα cloudified 5G είναι ένα περιβάλλον πολλαπλών πόρων στο οποίο οι ραδιοπόροι, οι οπτικοί πόροι και οι οπτικοί πόροι ενσωματώνονται στην ίδια αρχιτεκτονική δικτύου. Ένα άλλο πλεονέκτημα του ευέλικτου οπτικού δικτύου πλέγματος με ελαστικότητα καθορισμένη από λογισμικό είναι ότι μπορεί να ενσωματώσει διαφορετικούς πόρους με ευελιξία και χαμηλή καθυστέρηση [3].

### 3.4 ΤΟ ΠΑΘΗΤΙΚΟ ΟΠΤΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ

Το παθητικό οπτικό δίκτυο είναι μια ευρέως υιοθετημένη λύση για τον διαμορισμό των πόρων οπτικών ινών μεταξύ των διαφόρων τελικών σημείων του οπτικού δικτύου πρόσβασης. Η λύση αυτή αποτελείται από δύο κύρια στοιχεία, το τερματικό οπτικής γραμμής (OLT) που βρίσκεται συνήθως στο CO και τη μονάδα οπτικού δικτύου (ONU) που βρίσκεται στον τελικό χρήστη [8].

Λέγεται παθητική επειδή τα στοιχεία μεταξύ του OLT και της ONU δεν χρειάζονται τροφοδοσία. Για παράδειγμα, σε ένα σενάριο FTTH, θα έχουμε ένα OLT για πολλαπλές ONU. Ο διαμορισμός της υποδομής οπτικών ινών γίνεται με τη χρήση ενός σχήματος πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση χρόνου (TDMA) στην ανοδική ζεύξη και μιας εκπομπής στην καθοδική ζεύξη [10].

Σήμερα, αυτή η τεχνολογία είναι πανταχού παρούσα και σχεδόν κάθε σπίτι που συνδέεται με οπτικές ίνες τη χρησιμοποιεί. Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται επίσης για επιχειρηματικούς σκοπούς. Στην περίπτωση αυτή μπορεί να θεωρηθεί μια σύνδεση

PtP που προέρχεται από το CO. Το OLT διαθέτει πολλαπλές κάρτες γραμμής. Οι κάρτες διαθέτουν πολλαπλές θύρες. Στην περίπτωση σύνδεσης PtMP, κάθε θύρα αντιστοιχεί σε ένα δέντρο PON με πολλαπλούς πελάτες. Οι χρήστες στο ίδιο δέντρο PON μπορούν να ζητήσουν περισσότερο ή λιγότερο εύρος ζώνης ανάλογα με τη φύση της προσφοράς στην οποία έχουν εγγραφεί, την καθημερινή χρήση του εύρους ζώνης τους καθώς και τη φύση της κίνησης (Internet, VoIP ...), δημιουργώντας έτσι μια δυναμική στην απόδοση ενός δέντρου PON. Αυτή η δυναμική διαχειρίζεται από έναν αλγόριθμο ενσωματωμένο στο OLT που ονομάζεται Dynamic Bandwidth Allocation (DBA) [5].

Ελέγχει το εύρος ζώνης με την αστυνόμευση του χρονικού διαστήματος επικοινωνίας για κάθε ONU. Ο αλγόριθμος DBA είναι συγκεκριμένος για τον προμηθευτή και οι λεπτομέρειες της λειτουργίας του δεν παρέχονται στους τηλεπικοινωνιακούς φορείς. Ο αλγόριθμος εκθέτει την παραμετροποίηση του εύρους ζώνης μέσω των προφίλ T-CONT (Transmission Container). Η διαμόρφωση των προφίλ T-CONT αξιοποιεί 5 τύπους εύρους ζώνης [5]:

- Σταθερό: το εύρος ζώνης κατανέμεται μόνιμα στην ONU και δεν μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί για άλλους χρήστες εάν το εύρος ζώνης δεν χρησιμοποιείται.
- Διασφαλισμένο: το εύρος ζώνης είναι εγγυημένο ότι θα διατεθεί στην ONU εάν χρειάζεται αλλά αν δεν χρησιμοποιείται, μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί για άλλους πελάτες.
- Μη εξασφαλισμένο: το εύρος ζώνης χορηγείται εάν το σταθερό και το εξασφαλισμένο εύρος ζώνης περιορισμοί δεν υπάρχουν.
- Βέλτιστη προσπάθεια: έχει χαμηλότερη προτεραιότητα από τη μη εξασφαλισμένη, μπορεί να εκχωρηθεί εάν το διαθέσιμο εύρος ζώνης μπορεί να το επιτρέψει. Αυτός ο τύπος καθώς και ο μη εξασφαλισμένος επιτρέπουν την υποβολή προσφορών διαδικτύου σε πελάτες που ανέρχονται σε περισσότερο από το χωρητικότητα του ίδιου του δέντρου PON, βασιζόμενοι στη μη ταυτόχρονη χρήση του πλήρους χωρητικότητας του δέντρου PON. Στον τρόπο βέλτιστης προσπάθειας, το εύρος ζώνης κατανέμεται μέχρι ένα ορισμένο μέγιστο επίπεδο.
- Μέγιστο: το ανώτατο όριο όσον αφορά το εύρος ζώνης που μπορεί να διατεθεί.

Η κύρια περίπτωση χρήσης του PON είναι η υλοποίηση της αρχιτεκτονικής PtMP για την εξυπηρέτηση οικιακών χρηστών. Ωστόσο, υπάρχουν και άλλες εφαρμογές αυτής της τεχνολογίας. Για παράδειγμα, ορισμένες λύσεις PON χρησιμοποιούν πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος (WDM) ή και πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου (TDM) και WDM σε αυτό που είναι γνωστό ως πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος χρόνου (TWDM). Υπάρχουν δύο κύριοι φορείς τυποποίησης που εργάζονται επί του παρόντος για τις προδιαγραφές των διαφόρων τεχνολογιών PON, η ITU και η IEEE. Καθένας από αυτούς καθορίζει τις προδιαγραφές που πρέπει να ακολουθήσουν οι τηλεπικοινωνιακοί φορείς προκειμένου να αναπτύξουν το δικό τους δίκτυο PON. Τα δύο πρότυπα προσδιορίζουν διαφορετικά τις απαιτήσεις του φυσικού επιπέδου που είναι απαραίτητες για την κατασκευή ενός συστήματος PON. Κατά συνέπεια, μια ONU που βασίζεται στο πρότυπο IEEE δεν θα μπορούσε να επικοινωνήσει με ένα OLT που βασίζεται στο πρότυπο ITU [5].

### 3.5 ACCES ΓΙΑ ETHERNET BACKHAUL

Το Mobile Backhaul είναι το δίκτυο μεταφοράς μεταξύ της τοποθεσίας κυψέλης κεραίας και του ελεγκτή σταθμού βάσης (BSC) ή του ελεγκτή ραδιοδικτύου (RNC), αντίστοιχα για τα RAN 2G και 3G. Με το 4G, δεν υπάρχουν ελεγκτές ραδιοδικτύου. Οι λειτουργίες ελεγκτή έχουν ενσωματωθεί στον εξελιγμένο κόμβο B (eNB - συνώνυμο της ψηφιακής μονάδας) για το κύριο μέρος και επίσης εντός της πύλης εξυπηρέτησης. Έτσι, το 4G RAN backhaul είναι το τμήμα του δικτύου μεταφοράς μεταξύ των θέσεων κεραιών κυψελών και του Evolved Packet Core (EPC), δηλαδή του πυρήνα κινητής τηλεφωνίας 4G. Εδώ, θα εστιάσουμε το ενδιαφέρον μας στο τελευταίο μίλι αυτού του backhaul μεταφοράς. Δεν αξιολογούμε έτσι τις τεχνικές συζητήσεις σχετικά με το δίκτυο backhaul συνάθροισης που βασίζεται σε τοπολογίες δακτυλίου ή πλέγματος με τυπική μεταφορά Internet Protocol/MultiProtocol Label Switching (IP/MPLS) [12]:

1) Μια αποκλειστική οπτική ίνα που υποστηρίζει μια συνδεσιμότητα από σημείο σε σημείο (PtP) μεταξύ του κόμβου πρόσβασης, εξοπλισμένου με ένα ράφι οπτικού τερματικού γραμμής (OLT) και μια αποκλειστική κάρτα PtP, και του χώρου της

κεραίας, εξοπλισμένου με μια μονάδα οπτικού δικτύου (ONU). Αυτή η τοπολογία PtP είναι η πιο απλή λύση για περιοχές με σημαντικούς πόρους οπτικών ινών. Η συνέργεια με τη λειτουργία FTTH θα μπορούσε να αξιοποιηθεί με τη χρήση υπεράριθμων αναπτυγμένων οπτικών ινών, την κοινή χρήση γραφείου με αποκλειστικό συρτάρι οπτικών ινών, παρόμοιους αναδόχους υπηρεσιών,... Στο μέλλον, το δίκτυο πρόσβασης PtP θα μπορούσε επίσης να υποστηρίξει μια συγκλίνουσα λειτουργία με τα εργαλεία PON: κοινή διεπαφή διαχείρισης και πρωτόκολλο.

2) Η λύση PtMP (point-to-multipoint) επιτρέπει την κοινή χρήση των διαθέσιμων αλλά περιορισμένων πόρων οπτικών ινών. Η πιο κοινή και ευρέως διαδεδομένη λύση είναι το παθητικό οπτικό δίκτυο με δυνατότητα Gigabit (G-PON). Μετά το παλαιό G-PON, το XGS-PON (PON που λειτουργεί σε 10Gbit/s downstream και 2,5 ή 10Gbit/s upstream) αναγνωρίζεται ως η επόμενη λύση που μπορεί να αναπτυχθεί για εμπλουτισμένη σταθερή ευρυζωνικότητα αλλά και για RAN backhaul. Και οι δύο λύσεις βασίζονται σε ένα ζεύγος καναλιών μήκους κύματος που επιτυγχάνουν το upstream και το downstream και είναι σε θέση να συνυπάρχουν στο ίδιο οπτικό δίκτυο διανομής (ODN). Η πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου/πολλαπλής πρόσβασης (TDM/TDMA) χρησιμοποιείται για τον διαμοιρασμό του τμήματος κορμού του ODN εξοπλισμένο με οπτικό διαχωριστή ισχύος στον κόμβο διακλάδωσης και μια ενιαία οπτοηλεκτρονική διεπαφή στον κόμβο πρόσβασης. Ωστόσο, το TDM PON δεν χρησιμοποιείται ουσιαστικά για κινητή μεταφορά λόγω της πολυπλοκότητας της ανάμειξης της λειτουργίας κινητών και σταθερών δικτύων στην ίδια θύρα OLT. Από το 2015 έχουν τυποποιηθεί λύσεις PON πολλαπλών μηκών κύματος: η πρώτη που αναμειγνύει διαστάσεις χρόνου και μήκους κύματος (TWDM-PON) και η δεύτερη που λαμβάνει υπόψη μόνο την προσέγγιση πολλαπλών μηκών κύματος (PtP WDM PON).

3) Αυτή η τελευταία τεχνική λύση που βασίζεται αποκλειστικά στην πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος (WDM) θα μπορούσε να υποστηρίξει είτε τοπολογία δρομολόγησης μήκους κύματος, όπου ο κόμβος διακλάδωσης αποτελείται από μια διάταξη πολυπλέκτη μήκους κύματος (WM), όπως οι συστοιχισμένες σχάρες κυματοδηγού (AWG) ή ένας συνδυασμός φίλτρων λεπτού υμενίου (TFF), είτε τοπολογία επιλογής μήκους κύματος, όπου ο κόμβος διακλάδωσης αποτελείται από έναν οπτικό διαχωριστή ισχύος ή ένα ζωνοπερατό φίλτρο μήκους κύματος. Αυτές οι

λύσεις PtP WDM PON απαιτούν επίσης διεπαφές πολλαπλών πομποδεκτών στον κόμβο πρόσβασης.

Είναι υποχρεωτικό οι τρεις αυτές λύσεις πρόσβασης να βασίζονται σε μία μόνο ίνα. Με άλλα λόγια, οι ανοδικές και οι καθοδικές ροές να λειτουργούν σε αμφίδρομη διπλεξική λειτουργία στην οπτική ίνα. Κάθε ONU χρησιμοποιεί ένα ζεύγος καναλιών μήκους κύματος. Σε περίπτωση που χρησιμοποιείται πολυπλεξία μήκους κύματος στο δίκτυο πρόσβασης (PtP WDM ή TWDM PON), είναι απαραίτητο να λειτουργεί με άχρωμη οπτική μονάδα στην ONU. Τα άχρωμα οπτικά είναι, εξ ορισμού, ικανά να λειτουργούν σε οποιοδήποτε μήκος κύματος. Όλα αυτά τα κανάλια μήκους κύματος πρέπει να ελέγχονται από ένα OLT για τον καθορισμό και τον έλεγχο της κατανομής του μήκους κύματος και την αποφυγή οποιασδήποτε συμπεριφοράς μήκους κύματος στο σχετικό ODN. Επίσης, για κάθε λύση σταθερής πρόσβασης, η ONU περιμένει την άδεια του OLT για να εκπέμψει οπτική ισχύ προκειμένου να είναι συμβατή με την υποχρεωτική λειτουργία "σιωπηλής εκκίνησης". Η πολιτική κατανάλωσης ισχύος πρέπει επίσης να βελτιστοποιηθεί υπό τον έλεγχο του OLT. Το OLT πρέπει επίσης να είναι η μοναδική πηγή διαχείρισης, ελέγχου μήκους κύματος, ελέγχου χρόνου και συγχρονισμού των ONU [13].

### 3.6 ΤΜΗΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΩΝ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΓΙΑ RAN FRONTHAUL

Ο όρος midhaul έχει οριστεί από ως το δίκτυο Ethernet του φορέα μεταξύ των θέσεων κεραιών (ιδίως όταν η μία θέση είναι θέση μικρής κυψέλης). Το σενάριο αναφοράς του Metro Ethernet Forum (MEF) δείχνει ότι το midhaul θεωρείται ως επέκταση backhaul μεταξύ ενός DU μικρής κυψέλης και του κύριου DU μακροκυψέλης [12].

Εξετάζονται επίσης δύο άλλα σενάρια: i) το midhaul μεταξύ δύο δεξαμενών DU και ii) το midhaul μεταξύ δύο δεξαμενών DU μέσω ενός ελεγκτή δικτύου. Όλα τα σενάρια midhaul βασίζονται στο Ethernet και χρησιμοποιούν την ίδια συνδεσιμότητα σταθερής πρόσβασης με το backhaul [14].

Ο όρος fronthaul χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά για τον σχεδιασμό της αποκλειστικής συνδεσιμότητας μεταξύ της ψηφιακής μονάδας (DU) και της

ραδιομονάδας (RU). Οι λειτουργίες επεξεργασίας ραδιοσήματος υποστηρίζονται συνήθως από έναν εξοπλισμό που εντοπίζεται στη βάση της κεραίας. Όσον αφορά τον ενισχυτή RF στο εσωτερικό της RU, σημειώνουμε ότι η απόδοσή του (κατανάλωση ισχύος και κόστος) εξαρτάται από την ηλεκτρική εξασθένηση ραδιοσυχνοτήτων (RF) του ομοαξονικού καλωδίου που φτάνει στην. Είναι επιθυμητό ένας εξωτερικός παράγοντας μορφής για αυτό το RU να παραμένει κοντά στην κεραία. Όσον αφορά τις συνδέσεις μεταξύ DU και RUs, οι κύριες απαιτήσεις ήταν να επιτρέπουν τη μικρότερη δυνατή υποβάθμιση του σήματος RF και να φθάνουν σε διάδοση μερικές δεκάδες μέτρα. Ο συνδυασμός DAC & ADC (ψηφιακός σε αναλογικό μετατροπέα και αντίστροφα) και ψηφιακής μετάδοσης μέσω οπτικών ινών με κανονικούς συνδέσιμους οπτοηλεκτρονικούς πομποδέκτες επέτρεψε την ικανοποίηση αυτών των απαιτήσεων.

Αυτή η προσέγγιση για το διαχωρισμό του εξοπλισμού RAN είναι γνωστή ως λειτουργική διαίρεση fronthaul χαμηλού επιπέδου RAN και χρησιμοποιεί διεπαφές CPRI, OBSAI ή ORI. Κάθε σύνδεσμος fronthaul μεταξύ DU και RU βασίζεται σε μια σταθερή και συμμετρική σειριακή ψηφιακή διεπαφή υψηλού ρυθμού μετάδοσης bit που δημιουργείται από την ψηφιοποίηση των ραδιοσημάτων βασικής ζώνης, στο πεδίο του χρόνου. Τυπικά, απαιτούνται τρεις φορές 2,5 Gbit/s για τη μεταφορά ενός ραδιοσήματος 20 MHz 2x2 πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (MIMO) για τρεις τομείς των οποίων ο μέγιστος μέγιστος ρυθμός μετάδοσης bit για κινητά περιορίζεται σε περίπου 150 Mbit/s. Ο λόγος πίσω από αυτή την κακή φασματική απόδοση μπορεί να εξηγηθεί ευθέως από τις πράξεις κβαντισμού και κωδικοποίησης που απαιτούνται για τη μετατροπή των ραδιοσημάτων σε ακολουθίες κλειδώματος on-off (OOK) που χρησιμοποιούνται στην οπτική ζεύξη.

Επίσης, το ρολόι αυτού του σήματος OOK χρησιμεύει ως αναφορά για την παραγωγή κινητών RF στο εσωτερικό της RU. Δεδομένου ότι υπάρχουν εμπορικοί οπτικοί πομποδέκτες και μπορούν να φτάσουν αρκετές δεκάδες χιλιόμετρα με τους απαιτούμενους ρυθμούς μετάδοσης, η επέκταση της εμβέλειας του fronthaul καθίσταται δυνατή. Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται για να φτάσουν στις τοποθεσίες των κεραίων εντός του ορίου του μέγιστου χρόνου μετ' επιστροφής που διατίθεται στο fronthaul (τυπικά 20 km για μία διαδρομή, δεδομένου ότι η τιμή αυτή εξαρτάται από την υλοποίηση του RAN). Η πρώτη χρησιμοποιεί μια αποκλειστική οπτική ίνα ανά RU.

Βλέπουμε ότι απαιτούνται αρκετές οπτικές ίνες για να φτάσουν σε όλες τις RU (μία ανά τομέα, ανά ραδιοφορέα, ανά ραδιοτεχνολογία). Για να επιτευχθεί η κοινή χρήση των ινών, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί PtP WDM PON. Η παθητική λύση πρόσβασης με βάση το μήκος κύματος είναι συμβατή με τον απαιτούμενο ρυθμό γραμμής και τη χαμηλή καθυστέρηση (χωρίς πλαισίωση) με τη χρήση χρωματισμένων πομποδεκτών στα DUs και RUs.

Με το 5G, προτάθηκε νέα λειτουργική κατανομή RAN με βάση τρεις οδηγούς [14]:

1) η πρώτη έχει ως στόχο τη γενίκευση του Ethernet για τη διεπαφή fronthaul για μεγαλύτερη διαλειτουργικότητα και την επαναχρησιμοποίηση των κοινών λειτουργιών, διαχείρισης και συντήρησης (OAM) του Ethernet. Τα γραφεία CPRI και IEEE ξεκίνησαν δράση προδιαγραφών για τη σύνταξη προτύπου για το eCPRI και το Radio over Ethernet, αντίστοιχα, για να επιτύχουν ενθουσίαση και αντιστοίχιση των ραδιοδειγμάτων Inphase/Quadrature (I/Q) που προέρχονται από διάφορες διεπαφές fronthaul. Το έγγραφο IEEE P1914.3 που ακολουθείται από τις πρωτοβουλίες xRAN και O-RAN αντιμετωπίζει αυτό το ζήτημα.

2) ο δεύτερος οδηγός είναι η στενότητα χωρητικότητας και η χρονική ευαισθησία της προϋπάρχουσας διεπαφής fronthaul (που σχετίζεται επίσης με το κόστος του πομποδέκτη) για την υποστήριξη ραδιοτεχνολογιών με υψηλό επίπεδο MIMO και μεγάλο εύρος ζώνης RF που προβλέπονται στο 5G.

3) ένας τελευταίος οδηγός αφορά την εξάρτηση της επεξεργασίας ραδιοσημάτων σε πραγματικό χρόνο. Η δυνατότητα υλοποίησης ορισμένων από τις λειτουργίες DU (L3 και ένα μέρος της L2) εντός μιας κεντρικής μονάδας (CU) μέσω λογισμικού επιτρέπει τη χρήση αγνωστικού διακομιστή για τη φιλοξενία τους.

Έτσι, πρέπει τώρα να εξετάσουμε δύο διεπαφές fronthaul: τη διάσπαση υψηλού στρώματος με βάση την επιλογή 2 και που αναφέρεται ως F1 και τη διάσπαση χαμηλού στρώματος με βάση την επιλογή 7 (και επίσης την επιλογή 6 ενδεχομένως ) που υποστηρίζεται από το eCPRI. Ο εξοπλισμός RAN τεμαχίζεται σε τρία μέρη: Central Unit (CU), Distributed Unit (DU) και Radio Unit (RU).

Σημειώνουμε ότι ο όρος DU στην εν λόγω δημοσίευση [13] προσδιορίζει τόσο την ψηφιακή μονάδα (για τον παραδοσιακό εξοπλισμό RAN) όσο και την κατανεμημένη μονάδα (για τον εξοπλισμό RAN με εικονικοποίηση).

Αυτό το νέο split fronthaul χαμηλού επιπέδου RAN βασίζεται στο natively Ethernet για τη μετάδοση του επιπέδου χρήστη, του συγχρονισμού, του ελέγχου και της διαχείρισης και του OAM. Ο ρυθμός σφάλματος πακέτων πρέπει να είναι συμβατός με την ενθυλάκωση ραδιοσήματος. Αυτή η νέα διεπαφή πρέπει επίσης να έχει μειωμένη απόδοση σε σύγκριση με το CPRI (επιλογή 8) και εξάρτηση της κίνησης σε πραγματικό χρόνο ανάλογα με το φορτίο της κινητής κυψέλης.

Η καθυστέρηση από άκρο σε άκρο πρέπει να περιορίζεται σε περίπου 100  $\mu$ s. Οι λύσεις σταθερής πρόσβασης για τη μεταφορά αυτής της διεπαφής είναι παρόμοιες με τις προηγούμενες fronthaul. Ωστόσο, η πλαισίωση Ethernet επιτρέπει ότι το βελτιστοποιημένο TDM/TDMA PON θα μπορούσε να είναι μια πιθανή λύση.

Το νέο διαχωρισμένο fronthaul υψηλού επιπέδου βασίζεται επίσης εγγενώς στο πρωτόκολλο Ethernet με ρυθμό μετάδοσης που εξαρτάται από το φορτίο κίνησης του τελικού χρήστη. Η απόδοση θα πρέπει να είναι συγκρίσιμη με την κίνηση backhaul συν περίπου 10 % με ασυμμετρία για upstream και downstream. Αυτή η εκτίμηση του ρυθμού μετάδοσης περιλαμβάνει το άθροισμα του φορτίου κίνησης που εξαρτάται από τον τελικό χρήστη και της επιπλέον κίνησης που αφιερώνεται στους μηχανισμούς ελέγχου, χρονοπρογραμματισμού και ασφάλειας RAN.

Ένα άλλο πολύ ενδιαφέρον χαρακτηριστικό αυτού του διαχωρισμού υψηλού επιπέδου είναι ότι επιτρέπει επίσης πιο χαλαρές απαιτήσεις καθυστέρησης και, συνεπώς, υλοποιήσεις βασισμένες σε λογισμικό. Τυπικά, περίπου 10 ms (έως 50 ms) μονόδρομη καθυστέρηση από άκρο σε άκρο θα μπορούσε να είναι αποδεκτή, αλλά η τιμή αυτή θα μπορούσε να περιοριστεί στα 0,5 ms για υπηρεσίες 5G με εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση (απτική αλληλεπίδραση).

Ομοίως με τις παραδοσιακές απαιτήσεις για το backhaul, η υποστήριξη του συγχρονισμού θα απαιτηθεί επίσης για αυτό το fronthaul διαχωρισμού υψηλού στρώματος. Οι λύσεις σταθερής πρόσβασης για τη μεταφορά αυτής της διεπαφής είναι παρόμοιες με τις προηγούμενες λύσεις backhaul [12].



### 3.7 ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ ΚΑΙ 5G

Για να μπορέσουμε να διαπιστώσουμε τους συσχετισμούς μεταξύ της επέκτασης των οπτικών ινών στο δίκτυο σταθερής γραμμής και του 5G, είναι σημαντικό να κατανοήσουμε τις απαιτήσεις που θέτει το 5G στη σύνδεση των κινητών ραδιοσταθμών και τις κινητήριες δυνάμεις που οδηγούν στην αναμενόμενη συγκέντρωση κυττάρων. Για τον σκοπό αυτό, κατωτέρω παρουσιάζονται αρχικά τα βασικά χαρακτηριστικά ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας [13]-[14]:

- Ένα κινητό δίκτυο αποτελείται από κυψέλες που επικαλύπτονται με την έννοια των σε μεγάλο βαθμό αδιάλειπτων υπηρεσιών κοινής ωφέλειας. Το μέγεθος των κυττάρων επηρεάζεται από την ισχύ μετάδοσης και τις συνθήκες διάδοσης που εξαρτώνται από τη συχνότητα, δηλαδή, όσο υψηλότερη είναι η συχνότητα, τόσο μεγαλύτερη είναι η εξασθένιση και, συνεπώς, δυνητικά μικρότερο το μέγεθος του κυττάρου.
- Όσον αφορά την ισχύ μετάδοσης, ουσιαστικά διακρίνουμε μεταξύ μακροκυψελών και μικρών κυψελών. Οι πρώτες παρέχονται συνήθως από θέσεις εκπομπής σε στέγες ή πύργους και αποτελούν την κυρίαρχη σήμερα μορφή δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Οι σταθμοί βάσης μικρών κυψελών βρίσκονται συνήθως στο εσωτερικό κτιρίων (εσωτερικές εγκαταστάσεις κοινής ωφέλειας) ή σε "έπιπλα πόλης" (π.χ. λάμπες δρόμων, στάσεις λεωφορείων κ.λπ.) ή σε μικρότερα ύψη σε κτίρια.
- Ο ρυθμός δεδομένων που μπορεί να επιτευχθεί για έναν μεμονωμένο χρήστη εξαρτάται από την τεχνολογία κινητής τηλεφωνίας, το χρησιμοποιούμενο εύρος ζώνης συχνοτήτων, την απόσταση του χρήστη από την κεραία εκπομπής και τον αριθμό των ταυτόχρονων χρηστών σε μια δεδομένη κυψέλη κινητής τηλεφωνίας ("κοινόχρηστο μέσο"), καθώς και από την ελαχιστοποίηση των διασταυρούμενων παρεμβολών μεταξύ των κυψελών.

Ως εκ τούτου, έχουμε τις ακόλουθες επιλογές προκειμένου να αυξήσουμε το ρυθμό δεδομένων για τους χρήστες κινητών τηλεφώνων [14]:

- Χρήση της τελευταίας τεχνολογίας κινητής τηλεφωνίας με υψηλότερη φασματική απόδοση

- Ανάθεση περισσότερου φάσματος σε μια θέση εκπομπής (π.χ. για 4G ή LTE Advanced με πολλαπλάσιο των 20 MHz)
- Μείωση του αριθμού των χρηστών ανά κυψέλη (συγκέντρωση θέσεων)

Με την πρόοδο της τυποποίησης του 5G, οι απαιτήσεις για το 5G γίνονται όλο και πιο σαφείς. Σύμφωνα με την τρέχουσα πρόταση της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (ITU), η τεχνολογία 5G προορίζεται να χαρακτηρίζεται από τις ακόλουθες ιδιότητες [14]:

- Θεωρητικοί μέγιστοι ρυθμοί δεδομένων έως και 20/10 Gbps (downstream / upstream) υπό ιδανικές συνθήκες
- Ρυθμοί μετάδοσης 100/50 Mbps (downstream / upstream) για κάθε χρήστη ανά πάσα στιγμή σε κεντρικές τοποθεσίες της πόλης
- Μικροί χρόνοι καθυστέρησης 1 ms για υπηρεσίες με ακραίες απαιτήσεις καθυστέρησης ή 4 ms για την περίπτωση ευρυζωνικών εφαρμογών κινητής τηλεφωνίας
- Πυκνότητες κίνησης 10 Mbps/m<sup>2</sup> για hotspots εντός κτιρίων

Είναι σαφές στον κλάδο ότι αυτές οι απαιτήσεις δεν μπορούν να ικανοποιηθούν παντού και δεν μπορούν να ικανοποιηθούν ταυτόχρονα για κάθε σενάριο χρήσης. Αντιθέτως, υποτίθεται ότι θα τεθούν ορισμένες εστίες χρήσης. Αυτό ισχύει, για παράδειγμα, για τις βιομηχανικές και μεταποιητικές εγκαταστάσεις, για το θέμα της δικτυωμένης οδήγησης και για τις εκτεταμένες κινητές ευρυζωνικές εφαρμογές (π.χ. κινητή κατανάλωση βίντεο) [12]-[14].

Ως ενδεικτικό παράδειγμα αυτών των απαιτήσεων, η περίπτωση εφαρμογής μπορεί να ονομαστεί "συνδεδεμένη οδήγηση" [14].

Από τη μία πλευρά, η συνδεδεμένη οδήγηση χρησιμοποιεί μια αξιόπιστη σύνδεση με εγγυημένη και μέτρια καθυστέρηση. Από την άλλη πλευρά, η προβλεπόμενη πιο έντονη χρήση κινητών ευρυζωνικών υπηρεσιών από τους επιβάτες του οχήματος απαιτεί υψηλή χωρητικότητα δικτύου κατά μήκος των δρόμων [15].

Ανεξάρτητα από την τελική τυποποίηση, μπορεί να ειπωθεί ότι τα σημάδια επιδόσεων 5G (ρυθμοί δεδομένων, καθυστερήσεις, πυκνότητα κυκλοφορίας) θα

υπερβαίνουν κάπως τις τρέχουσες δυνατότητες των τεχνολογιών κινητής τηλεφωνίας 4G/4.5G. Θέτουν σημαντικά αυξημένες απαιτήσεις τόσο για τα εύρη ζώνης σύνδεσης των κινητών ραδιοσταθμών όσο και για τις μελλοντικές τοποθεσίες, οι οποίες θα επεκταθούν κυρίως σε αστικές περιοχές και βιομηχανικές εγκαταστάσεις καθώς και κατά μήκος των οδών κυκλοφορίας [12].

Το 5G οδηγεί σε αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου κινητής τηλεφωνίας και απαιτεί πρόσθετο φάσμα (τις λεγόμενες πρωτοπόμενες ζώνες 5G3). Το νέο φάσμα στην ανώτερη περιοχή συχνοτήτων άνω των 6 GHz (π.χ. 26 GHz) έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά διάδοσης από τις συχνότητες που χρησιμοποιούνταν προηγουμένως [14].

Ειδικότερα, αυξάνονται οι απαιτήσεις για την οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη, γεγονός που περιορίζει την εμβέλεια. Επιπλέον, υπάρχουν περιορισμοί έγκρισης, ιδίως σε αστικές περιοχές, για παράδειγμα όσον αφορά τα φορτία έδρασης ή τα φορτία ανέμου ή επίσης όσον αφορά τη ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα. Για τους λόγους αυτούς, το νέο φάσμα θα χρησιμοποιηθεί κυρίως σε νέες θέσεις, πράγμα που ισοδυναμεί με συγκέντρωση θέσεων. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για την πρωτοποριακή ζώνη 5G στα 3,5 GHz, η οποία είναι επίσης πιθανό να προσφερθεί για αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου σε τοποθεσίες όπου υπάρχει η αντίστοιχη ζήτηση, για παράδειγμα, κατά μήκος των κύριων οδικών αξόνων κυκλοφορίας [13].

Επιπλέον, ουσιαστικά υψηλότερα εύρη ζώνης φέροντος τουλάχιστον 100 MHz (για συχνότητες κάτω των 6 GHz) ή έως και 1 GHz (για συχνότητες άνω των 6 GHz) αναμένεται για το 5G. Αυτό συνοδεύεται από σημαντική αύξηση των ρυθμών δεδομένων που πρέπει να εκφορτίζονται ανά θέση [15].

Συνοπτικά, μπορεί να ειπωθεί ότι το 5G επιτρέπει σημαντική αύξηση του ρυθμού δεδομένων που πρέπει να εκφορτιστεί ανά θέση πομπού και απαιτεί επίσης τη θέση σε λειτουργία πολλών νέων κινητών ραδιοσταθμών [14]. Λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις του 5G όσον αφορά τον ρυθμό δεδομένων, την καθυστέρηση και την ασφάλεια αποτυχίας, η οπτική ίνα είναι το πιο ασφαλές και επεκτάσιμο μέσο για το μέλλον. Επιπλέον, είναι αποδοτικό μακροπρόθεσμα, επειδή δεν υπάρχουν πλέον ενεργά στοιχεία δικτύου μεταξύ του κέντρου ελέγχου και του κινητού ραδιοσταθμού.

Σήμερα, οι κινητοί ραδιοσταθμοί είναι ήδη συνδεδεμένοι με οπτικές ίνες, αλλά και με κατευθυντικά ραδιοφωνικά και χάλκινα καλώδια. Στο μέλλον, οι εναλλακτικές συνδέσεις των κινητών ραδιοσταθμών για το 5G θα παραμείνουν σχετικές για λόγους κόστους, υπό την προϋπόθεση ότι πληρούν τις απαιτήσεις του αντίστοιχου σεναρίου χρήσης 5G στον αντίστοιχο κινητό ραδιοσταθμό. Τα ευρέως διαδεδομένα δίκτυα HFC ενδέχεται επίσης να συμβάλουν σημαντικά μέσω της επικείμενης ανάπτυξης του ισχυρού DOCSIS [14].

Τέλος, η κίνηση δεδομένων που συλλέγεται μέσω εναλλακτικών συνδέσεων πρέπει επίσης να μεταφέρεται σε ένα δίκτυο οπτικών ινών (στη θέση ραδιοφωνικής κατεύθυνσης, στη διεπαφή περιοχής εξυπηρέτησης, στον κόμβο οπτικών ινών). Από τεχνική άποψη, η αμιγής σύνδεση των κινητών ραδιοσταθμών με οπτικές ίνες είναι μακροπρόθεσμα η πιο αποδοτική επιλογή [15].

Ακόμη και για λόγους διαχείρισης του δικτύου, η σύνδεση οπτικών ινών των θέσεων 5G είναι βέλτιστη. Λόγω της κυψελοειδούς φύσης των δικτύων κινητής τηλεφωνίας, υπάρχουν πάντα παρεμβολές με γειτονικές κυψέλες στην άκρη της κυψέλης, γεγονός που μειώνει σημαντικά την απόδοση. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να μειωθεί με την εισαγωγή του 5G. Ωστόσο, αυτό απαιτεί τον γρήγορο και χαμηλής καθυστέρησης συντονισμό όλων των γειτονικών σταθμών εκπομπής και λήψης. Για το λόγο αυτό, η οπτική ίνα είναι η πρώτη επιλογή από τεχνικής άποψης, ως εναλλακτικές backhaul τεχνολογίες μπορεί να οδηγήσουν σε αναγκαίους συμβιβασμούς στις επιτεύξιμες επιδόσεις συντονισμού [13].

### 3.8 ΣΥΝΕΡΓΕΙΕΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΤΗΛΕΦΩΝΙΑΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΙΝΗΤΗΣ ΤΗΛΕΦΩΝΙΑΣ ΜΕ ΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

Αφού εκπονηθεί ο τεχνολογικός συσχετισμός μεταξύ της επέκτασης των οπτικών ινών και του 5G, οι συνέργειες συζητούνται παρακάτω. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η υποδομή οπτικών ινών βρίσκεται διαρκώς σε προχωρημένη ανάπτυξη. Η κινητήρια δύναμη είναι κυρίως η ευρυζωνική επέκταση στο δίκτυο σταθερής τηλεφωνίας, στο πλαίσιο της οποίας όλοι οι φορείς εκμετάλλευσης δικτύου

αναπτύσσουν οπτικές ίνες σε εθνικό επίπεδο προκειμένου να συνδέσουν οικιστικές και εμπορικές περιοχές. Κατά τη διάρκεια της εξέλιξης του δικτύου στα προηγούμενα τηλεφωνικά δίκτυα (βασισμένα σε χάλκινα καλώδια) και στα δίκτυα καλωδιακής τηλεόρασης (βασισμένα σε ομοαξονικό καλώδιο), το δίκτυο οπτικών ινών επεκτείνεται σε ευρεία περιοχή μέχρι τη διεπαφή περιοχής εξυπηρέτησης ("Fiber to the cabinet") ή μέχρι τους κόμβους οπτικών ινών ("Hybrid fiber coax"/HFC). Η κάλυψη των δικτύων HFC περιλαμβάνει περίπου το 70 % των νοικοκυριών. τα επόμενα χρόνια, η ενίσχυση του δικτύου χαλκού θα αξιοποιηθεί πάνω από το 90 % των νοικοκυριών με οπτικές ίνες [12].

Στην περιοχή επέκτασης, τα δίκτυα σύνδεσης οπτικών ινών που φτάνουν μέχρι το κτίριο (FTTB και FTTH) θα δημιουργήσουν την πιο εκτεταμένη υποδομή οπτικών ινών που καλύπτει όλες τις αναπτυγμένες διαδρομές. Επί του παρόντος, τα δίκτυα FTTB/H είναι διαθέσιμα για το 7 % περίπου των νοικοκυριών [14].

Η επέκταση αυτών των υποδομών οπτικών ινών διέπεται ουσιαστικά από την αγορά. Σε μη οικονομικές περιοχές, η χρηματοδοτούμενη επέκταση συμβάλλει στην εξάπλωση των υποδομών οπτικών ινών [14].

Η επέκταση της υποδομής οπτικών ινών σταθερής γραμμής προς τις θέσεις των πελατών δημιουργεί δυνατότητες συνέργειας για μελλοντική σύνδεση οπτικών ινών με κινητούς ραδιοφωνικούς σταθμούς (μικρών κυψελών). Σε ορισμένα σημεία, οι οπτικές ίνες μπορούν να συνδεθούν σε όλες τις αρχιτεκτονικές δικτύων σταθερής γραμμής. Πρόκειται, για παράδειγμα, για πολυλειτουργικά περιβλήματα (FTTC, HFC), διανομείς δικτύου (FTTH/B) και υποδοχές οπτικών ινών σε φρεάτια (όλες οι τοπολογίες). Με τις τοπολογίες FTTH/B, υπάρχει ακόμη μια πρόσθετη δυνατότητα σύνδεσης στο ίδιο το κτίριο. Σε όλα αυτά τα σημεία μπορεί να δημιουργηθεί μια συνεχής σύνδεση μεταξύ του "σημείου παρουσίας οπτικών ινών" (για παράδειγμα στον κύριο διανομέα) και των κινητών ραδιοσταθμών. Εάν απαιτούνται πρόσθετα τεχνικά έργα, η σύνδεση μέσω ενός κενού αγωγού (μικροσωλήνες) οδηγεί σε μια μελλοντικά ασφαλή οχύρωση διαδρομής για μεταγενέστερη επέκταση FTTH/B [15].

Λόγω της προϊούσας προμήθειας καλωδίων οπτικών ινών στην περιοχή των σταθερών γραμμών, η υποδομή οπτικών ινών σε αυτές τις περιοχές επέκτασης δεν είναι πλέον ο μόνος περιοριστικός παράγοντας, αλλά οι ίδιες οι τοποθεσίες (π.χ. άδειες

επέκτασης/χρήσης και απαιτήσεις). Ωστόσο, οι δραστηριότητες ευρυζωνικής επέκτασης στο δίκτυο σταθερής γραμμής επικεντρώνονται σε πυκνοκατοικημένες περιοχές. Ως εκ τούτου, υπάρχουν νέες προκλήσεις, για παράδειγμα, σε περιοχές για γεωργική και δασική χρήση ή κατά μήκος οδών κινητικότητας, όπως περιφερειακές, κρατικές και ομοσπονδιακές εθνικές οδούς, οι οποίες είναι, πράγματι, δευτερεύουσας σημασίας για τις υπηρεσίες της μαζικής αγοράς, αλλά και στο επίκεντρο της Βιομηχανίας 4.0 ή του IoT [13].

Η ανάγκη δημιουργίας μικρών κυψελών και σύνδεσής τους με το δίκτυο οπτικών ινών εξαρτάται επίσης άμεσα από τις υπηρεσίες και τις απαιτήσεις τους. Από την τρέχουσα προοπτική, οι κυψέλες αυτές χρησιμοποιούνται κυρίως για την αύξηση της χωρητικότητας και όχι απαραίτητα για την ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των μικρών κυψελών που απαιτούνται, τόσο πιο δαπανηρή είναι η επέκταση του δικτύου και τόσο πιο δύσκολη είναι η ανάπτυξη βιώσιμων επιχειρηματικών περιπτώσεων. Σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την επιχειρηματική υπόθεση είναι η απόκτηση θέσης, η υλοποίηση της σύνδεσης δικτύου και ο αναμενόμενος κύκλος εργασιών [13].

Δεδομένου ότι οι υπηρεσίες πολύ υψηλού εύρους ζώνης προορίζονται επίσης για χρήση σε περιοχές με περιοχές για γεωργική και δασική χρήση ή κατά μήκος διαδρομών κινητικότητας, όπως περιφερειακές, κρατικές και ομοσπονδιακές εθνικές οδούς, προκύπτει ότι δεν υπάρχει δυνατότητα συνέργειας ή υπάρχει πολύ μικρή δυνατότητα συνέργειας με την επέκταση οπτικών ινών όλων των φορέων του δικτύου σταθερής γραμμής για κάθε αναγκαία συνολική συγκέντρωση κυψελών και τη σύνδεση οπτικών ινών της [14].

Για την επέκταση του δικτύου 5G, είναι επομένως απαραίτητο να αναπτυχθούν βιώσιμα επιχειρηματικά μοντέλα για διαφορετικές περιπτώσεις χρήσης, στο πλαίσιο εμπορικών συνεργασιών μεταξύ των φορέων εκμετάλλευσης δικτύων, καθώς και με τη βιομηχανία και άλλους συμμετέχοντες στην αγορά. Για παράδειγμα, μια επίπεδη δομή μικρών κυψελών για μέγιστους ρυθμούς δεδομένων κατά μήκος των κρατικών ή περιφερειακών αυτοκινητοδρόμων αποτελεί μεγαλύτερη πρόκληση από ένα σενάριο IoT, το οποίο διευκολύνεται από τις μακροκυψέλες της περιοχής.

Στην πορεία, η υποδομή θα αναπτυχθεί παράλληλα με εφαρμογές κινητής τηλεφωνίας και τα επιχειρηματικά μοντέλα θα προκύψουν σύμφωνα με τα κριτήρια βιωσιμότητας [15].

### 3.9 ΚΕΡΑΙΕΣ 5G ΚΑΤΩ ΤΩΝ 6 GHz

Προκειμένου να σχεδιαστεί μια αποτελεσματική κεραία για συσκευές επικοινωνίας 5G, απαιτείται η διαχείριση αρκετών προκλήσεων στο φάσμα μικροκυμάτων. Καθώς οι μικροκυματικές συχνότητες πρέπει να περάσουν από υψηλή καθυστέρηση, χαμηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και χαμηλή χωρητικότητα, επομένως, προκειμένου να ικανοποιηθούν οι αδυσώπητες ανάγκες των πελατών, ο σχεδιασμός των κεραιών έχει σημαντική σημασία.

Τα τελευταία χρόνια έχει διεξαχθεί σημαντική έρευνα για τον σχεδιασμό κεραιών για συσκευές 5G στην περιοχή του φάσματος κάτω των 6 GHz. Οι κεραίες που αναφέρονται στη βιβλιογραφία για τις χαμηλότερες ζώνες 5G είναι συνήθως μεγάλες σε μέγεθος και είναι μονοπολικές κεραίες. Λαμβάνοντας υπόψη τη δομή, οι κεραίες κατηγοριοποιούνται ως διαμορφώσεις ενός στοιχείου, συστοιχίας και MIMO. Αυτή η υποενότητα περιγράφει τις κεραίες 5G μεμονωμένων στοιχείων, συστοιχιών και MIMO που λειτουργούν σε χαμηλότερες συχνότητες 5G [16].

Ορισμένες από τις βιβλιογραφικές εργασίες έχουν αναφέρει μια κεραία ενός στοιχείου για εφαρμογές 5G. Η κεραία 5G που αναφέρθηκε στο είναι μια μαγνητοηλεκτρική διπολική κεραία με κωνικό έδαφος σχήματος H, που λειτουργεί σε ζώνη κάτω των 6 GHz. Με τη χρήση της τεχνικής του κωνικού εδάφους, το ύψος της κεραίας μειώνεται. Το μέγιστο κέρδος που επιτυγχάνεται από αυτή την κεραία είναι 6,8 dBi. Ομοίως, η εργασία στην παρουσιάζει μια ενιαία συμπαγή κεραία που υποστηρίζει μια ζώνη 5G sub-6 GHz. Η προτεινόμενη κεραία είναι μια σχισμοειδής κεραία με σχισμές σχήματος U και E με πλήρες επίπεδο γείωσης. Αυτή η κεραία επιτυγχάνει μέγιστο κέρδος 1,1 dBi. Επιπλέον, προτείνεται μια εύκαμπτη ενιαία κεραία κυκλικού σχήματος τροφοδοτούμενη από συνεπίπεδο κυματοδηγό (CPW) για εφαρμογές 5G υπο-6 GHz, ενώ επιτυγχάνεται μέγιστο κέρδος 3 dBi για την προτεινόμενη κεραία [4].

Ο σχεδιασμός της κεραίας που αναφέρεται στο είναι μια κεραία εξαγωνικού σχήματος με δυνατότητα αναδιαμόρφωσης συχνότητας που λειτουργεί στις συχνότητες κάτω των 6 GHz για συστήματα 5G. Η αναφερόμενη κεραία είναι μια πανκατευθυντική κεραία με μέγιστο κέρδος 1,5 dBi. Ομοίως, παρουσιάζεται μια άλλη επαναδιαμορφώσιμη σε συχνότητα κεραία ενός στοιχείου για συσκευές 5G. Το κέρδος για αυτή την κεραία κυμαίνεται από 1,2 έως 3,6 dBi στις συχνότητες λειτουργίας. Η κεραία που προτείνεται στο είναι μια τυπωμένη κεραία χαμηλού προφίλ με δυνατότητα αναδιαμόρφωσης συχνότητας και διαγράμματος.

Οι δίοδοι PIN χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της δέσμης- έτσι, ανάλογα με την κατάσταση των διακοπών, η κεραία μπορεί να κατευθύνει το φασόλι σε επτά διαφορετικές κατευθύνσεις. Το κέρδος της κεραίας για διαφορετικές καταστάσεις διακοπών κυμαίνεται από 1,7 έως 3,8 dBi. Μια άλλη εργασία ανέφερε μια μονοπολική κεραία τριγωνικού σχήματος για συσκευές 5G κάτω των 6 GHz, που διαθέτει αναδιαμόρφωση συχνότητας.

Το μέγιστο κέρδος που επιτυγχάνεται από αυτή την κεραία σε διαφορετικές καταστάσεις μεταγωγής είναι πάνω από 2,5 dBi. Από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση παρατηρείται ότι είναι εύκολος ο σχεδιασμός μιας κεραίας ενός στοιχείου και επίσης μπορεί εύκολα να ενσωματωθεί σε συσκευές επικοινωνίας 5G. Ωστόσο, το μέγιστο κέρδος που επιτυγχάνεται από τις μεμονωμένες κεραίες είναι χαμηλό [4].

Προκειμένου να ξεπεραστούν οι απώλειες διάδοσης λόγω ατμοσφαιρικών εξασθενήσεων και απορροφήσεων, απαιτούνται κεραίες υψηλού κέρδους για την επικοινωνία 5G. Καθώς μια κεραία ενός στοιχείου δεν μπορεί να επιτύχει υψηλό κέρδος, επομένως, η διαμόρφωση συστοιχίας πολλαπλών στοιχείων είναι μια από τις κύριες μεθοδολογίες για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος. Σε μια συστοιχία, πολλαπλές ακτίνες κεραίας προστίθενται εποικοδομητικά για να ενισχύσουν το κέρδος της κεραίας, διαχειριζόμενες έτσι τις απώλειες διαδρομής σε κάποιο βαθμό. Πρόσφατα, έχουν αναφερθεί διάφορα σχέδια συστοιχιών κεραίων για συστήματα 5G κάτω των 6 GHz. Η στρατηγική που προτείνεται στην είναι μια κεραία τεσσάρων στοιχείων που αποτελείται από τέσσερις υβριδικές κεραίες που λειτουργούν σε υπο-6 GHz για το 5G. Η προτεινόμενη γεωμετρία έλαβε μέγιστο κέρδος 8,4 dBi, το οποίο είναι σημαντικά υψηλό για συσκευές 5G.



Ομοίως, στο [16] παρουσιάζεται μια συστοιχία κεραιών φιλτραρίσματος διπλής ζώνης με διπλή πόλωση. Η γεωμετρία που παρουσιάζεται είναι μια συστοιχία  $1 \times 4$ , η οποία πέτυχε πολύ υψηλό κέρδος 17,7 dBi, καθιστώντας την έτσι κατάλληλη για βάσεις 5G [16].

Η αναφερόμενη κεραία είναι μια κεραία χαμηλού προφίλ και υψηλού κέρδους με μέγιστο κέρδος 7,2 dBi. Επιπλέον, η συστοιχία φύλλων αποτελείται από χωρητικά συζευγμένα στοιχεία που τοποθετούνται πάνω από ένα επίπεδο γείωσης έχουν κάνει μια νέα συμβολή στη μηχανική κεραιών για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που σχετίζονται με το στενό εύρος ζώνης και χαμηλό κέρδος. Η απόδοση της προτεινόμενης συστοιχίας κεραιών δοκιμάζεται με την τοποθέτησή της σε διάφορα μέρη του σώματος, όπως η παλάμη, το γόνατο, το πίσω χέρι κ.λπ. Το μέγιστο κέρδος που επιτυγχάνεται είναι σχεδόν 6 dBi. Παρατηρείται ότι οι συστοιχίες κεραιών που αναφέρθηκαν σε βιβλιογραφικές εργασίες που συζητούνται σε αυτή την ενότητα έχουν επιτύχει υψηλό κέρδος (το οποίο απαιτείται για την επικοινωνία 5G) με κόστος το αυξημένο μέγεθος και την πολυπλοκότητα του σχεδιασμού [4].

Το σύστημα κεραιών MIMO είναι ένα σύστημα με πολλαπλά στοιχεία ακτινοβολίας που χρησιμοποιούνται τόσο στο τερματικό εκπομπής όσο και στο τερματικό λήψης. Η MIMO θεωρείται ότι είναι η κεντρική λύση για την ενίσχυση της χωρητικότητας ενός καναλιού σε σύγκριση με τα συμβατικά ασύρματα συστήματα μίας εισόδου και μίας εξόδου (SISO). Αν και η τεχνολογία MIMO προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, εντούτοις, η τοποθέτηση πολλαπλών ακτινοβολητών σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους αυξάνει τη σύζευξη μεταξύ των γειτονικών ακτινοβολητών. Ως αποτέλεσμα, διακυβεύεται η απόδοση ποικιλομορφίας των κεραιών [4].

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΣΕΝΑΡΙΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

---

### 4.1 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΟΠΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ

Παρακάτω παρατίθενται οι μελλοντικές προκλήσεις και η ερευνητική κατεύθυνση για τις τεχνολογίες οπτικών δικτύων που θα χρησιμοποιηθούν στο 5G [9]:

- Υπάρχει περαιτέρω ανάγκη για πειραματικές μετρήσεις για την παροχή γνώσεων σχετικά με την πρακτική ανάπτυξη των οπτικών δικτύων και για την προσέλκυση του ενδιαφέροντος της βιομηχανίας για τις πιο υποσχόμενες λύσεις.
- Η ασφάλεια είναι το κύριο μέλημα στο σύστημα επικοινωνιών 5G. Επομένως, υπάρχει ανάγκη να αναπτυχθούν περισσότερες υποσχόμενες τεχνολογίες για την ασφάλεια.
- Τα ζητήματα συνδεσιμότητας και περιοχής κάλυψης απαιτούν επίσης περισσότερη έρευνα και ανάπτυξη στον οπτικό τομέα.
- Παρόλο που οι οπτικές τεχνολογίες είναι σημαντικές στο 5G, δεν αντικαθιστούν τις τεχνολογίες RF, οπότε απαιτείται η ανάπτυξη καλύτερης υβριδικής αρχιτεκτονικής δικτύου.
- Οι ατμοσφαιρικές απώλειες είναι ο κύριος περιορισμός για το οπτικό σύστημα επικοινωνίας που πρέπει να αντιμετωπιστεί με καλύτερο τρόπο.
- Η ανάπτυξη του οπτικού ασύρματου συστήματος MIMO είναι απαραίτητη για τη μελλοντική ζήτηση των δικτύων 5G.

- Επιλογή δικτύου: Το 5G αναμένεται να χρησιμοποιεί τόσο οπτικές όσο και τεχνολογίες RF και για το υβριδικό σύστημα, μια αποτελεσματική τεχνική επιλογής δικτύου είναι πολύ σημαντική.

- Ετερογενής τύπος δέκτη: Και οι δύο δέκτες για τα δίκτυα RF και τα οπτικά δίκτυα του υβριδικού συστήματος θα πρέπει να είναι ταυτόχρονα ενεργοί, ώστε η απόδοση να είναι καλύτερη.

## 4.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ OPTIPERFORMER

### Μενού και κουμπιά του OptiPerformer:

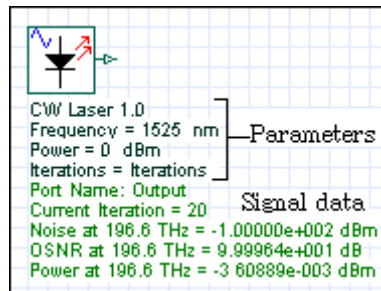
#### File menu

<b>Close</b>	—	Close the active (current) project in the project layout window.
<b>Exit</b>	—	Close <b>OptiPerformer</b> .




#### View menu

<b>Parameter Set-up</b>	—	Hides/displays the <b>Parameter Set-up</b> window (also called the <b>Parameter Settings</b> window)/
<b>Calculation Control</b>	—	Hides/displays the <b>Calculation Control</b> window (also called the <b>Perform Control</b> window).
<b>File Display</b>	—	Hides/displays the <b>File Display</b> window.
<b>Zoom Percent</b>	—	Select the zoom percentage: 10, 50, 75, 100, 150, 200, 400, or 800.
<b>Zoom In</b>	—	Zoom in on the active (current) layout.
<b>Zoom Out</b>	—	Zoom out on the active (current) layout.
<b>Zoom to Window</b>	—	Zoom to the active (current) layout window.
<b>Zoom 1:1</b>	—	Return the active (current) layout to default size with no zoom.

Display Properties		
<b>View Signal Data</b>	—	Select to display calculated port signal data in the active (current) layout (see <a href="#">Figure 8</a> ).
<b>View Parameters</b>	—	Select to display calculated component parameter data in the active (current) layout (see <a href="#">Figure 8</a> ).
<b>View Results</b>	—	Select to display calculated component results data in the active (current) layout .
<b>Refresh Layout (Ctrl+W)</b>	—	Update displayed port/component data on the active (current) layout during calculations.










## Layout menu

<b>Previous Sweep Iteration (Ctrl+Page Up)</b>		Display the sweep iteration prior to the active (current) iteration.
<b>Next Sweep Iteration (Ctrl+Page Down)</b>		Display the sweep iteration after the active (current) iteration.
<b>Bill of Materials</b>		Opens the Bill of Materials dialog box for the active (current) layout. See <a href="#">Bill of Materials</a> for more information.

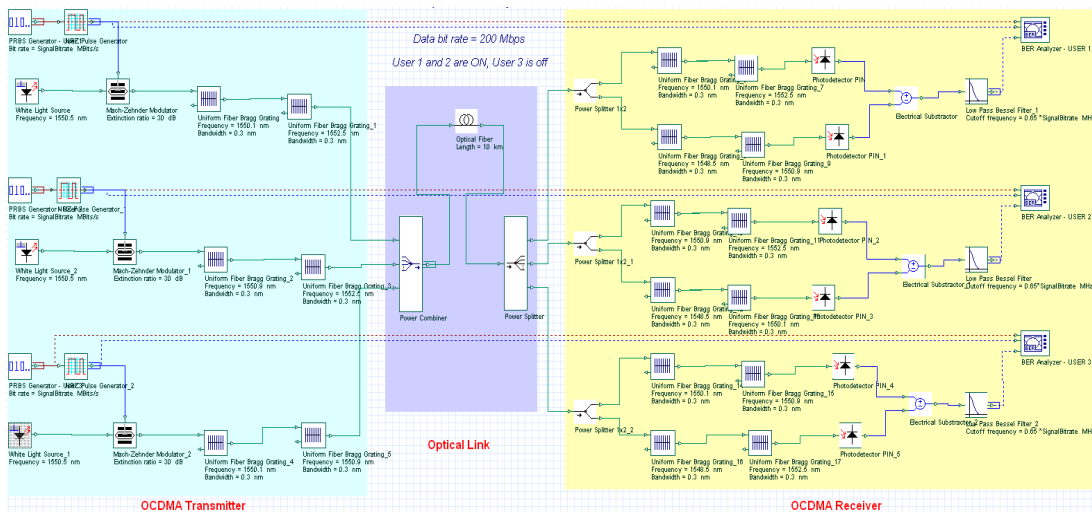
## Help menu

<b>Help topics</b>		Displays help topic information about OptiSystem.
<b>About OptiPerformer</b>		Provides information about Optiwave Corporation—mailing address, telephone and fax numbers, E-mail address, and URL.

## Performer Control

	<b>Open File</b>	Opens a Performer project file (*.osp).
	<b>Run Calculation</b>	Runs the calculations for the active Performer project file.
	<b>Abort Calculation</b>	Aborts the calculations. Does not display/save results.
	<b>Previous Sweep Iteration (Ctrl+Page Up)</b>	Display the sweep iteration prior to the active (current) iteration.
	<b>Next Sweep Iteration (Ctrl+Page Down)</b>	Display the sweep iteration after the active (current) iteration.
	<b>Bill of Materials</b>	Opens the Bill of Materials dialog box for the active (current) layout.
	<b>Performer Project Info</b>	Opens the <b>About the Design</b> dialog box.

## 4.3 ΣΕΝΑΡΙΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΟ OPTIPERFORMER



Ένα ευρυζωνικό δίκτυο πρόσβασης προσφέρει διάφορες υπηρεσίες υψηλής ταχύτητας στον τελικό χρήστη, όπως διαδίκτυο, πολυμέσα, τηλεϊατρική και εξ αποστάσεως μάθηση. Η οπτική ίνα στο σπίτι (FTTH) είναι μια αρχιτεκτονική δικτύου οπτικής πρόσβασης που χρησιμοποιεί οπτικές ίνες για να αντικαταστήσει όλα ή μέρος των μεταλλικών καλωδίων προς τον τελικό χρήστη. Χρησιμοποιώντας το OptiSystem μπορούμε να διερευνήσουμε την απόδοση διαφορετικών αρχιτεκτονικών για δίκτυα FTTH. Σε αυτό το σημείωμα εφαρμογής, εξηγούμε μια δομή οπτικής πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση κώδικα (OCDMA) που χρησιμοποιεί τρεις χρήστες.

#### Πλεονεκτήματα

- Η σάρωση πολλαπλών παραμέτρων επιτρέπει στους σχεδιαστές συστημάτων να μελετούν συμβιβασμούς σε σχέση με τις παραμέτρους που τους ενδιαφέρουν και να επιλέγουν τα βέλτιστα σχέδια για την ανάπτυξη.

- Επιτρέπει στους χρήστες να αναλύσουν διαφορετικούς αλγορίθμους για την ηλεκτρονική εξισορρόπηση.

- Το νέο σετ δοκιμών BER επιτρέπει την προσομοίωση εκατομμυρίων bits για άμεση καταμέτρηση σφαλμάτων.

- FEC

- Διασυνδέσεις με δημοφιλή εργαλεία σχεδίασης.

- Μειώνει σημαντικά το κόστος ανάπτυξης προϊόντων και ενισχύει την παραγωγικότητα μέσω ενός ολοκληρωμένου περιβάλλοντος σχεδίασης που βοηθά στο σχεδιασμό, τη δοκιμή και την προσομοίωση οπτικών συνδέσεων στο επίπεδο μετάδοσης των σύγχρονων οπτικών δικτύων.

Στην παραπάνω διάταξη, έχουμε προσομοιώσει ένα δίκτυο OCDMA βασισμένο σε πλέγμα Bragg ινών (FBG) 3 χρηστών στα 200 Mbit/s. Οι ομοιόμορφες FBGs χρησιμοποιούνται για την εμφύτευση των κωδικών Modified Quadratic Congruence (MQC) με κωδικοποίηση φασματικού πλάτους. Το σήμα παράγεται χρησιμοποιώντας μια ασυνεπή πηγή διαμορφωμένη με δεδομένα NRZ PRBS χρησιμοποιώντας έναν διαμορφωτή Mach-Zehnder. Η οπτική ζεύξη είναι 10 km

μονότροπης ίνας. Ο δέκτης αποτελείται από δύο φασματικά φίλτρα και δύο φωτοανιχνευτές συνδεδεμένους σε ισορροπημένη διάταξη, οι οποίοι εκτελούν την αποκωδικοποίηση με ένα χαμηλοπερατό φίλτρο και έναν αναλυτή BER. Σε αυτό το πείραμα οι χρήστες 1 και 2 είναι ενεργοποιημένοι και ο χρήστης 3 είναι απενεργοποιημένος.

Τα επόμενα δύο σχήματα παρουσιάζουν τα φάσματα των κωδικοποιημένων δεδομένων για τους χρήστες 1 και 2. Στη συνέχεια απεικονίζεται το σήμα στο πεδίο του χρόνου για τον χρήστη 1 και διαγράμματα ματιών για τους χρήστες 1 και 2. Χρησιμοποιώντας το OptiSystem μπορείτε να αναλύσετε την απόδοση των οπτικών δικτύων πρόσβασης μεταβάλλοντας τα σχήματα κωδικοποίησης, τη μορφή διαμόρφωσης, τον αριθμό των χρηστών και το μήκος διάδοσης.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

---

Η υποδομή μεταφορών υψηλής χωρητικότητας είναι ζωτικής σημασίας για την αποτελεσματική λειτουργία των δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Ενώ η χωρητικότητα μπορεί να αυξηθεί σχετικά εύκολα για να φιλοξενήσει τις γενιές κινητών 2G, 3G και 4G, οι απαιτούμενες παροχές για το επερχόμενο 5G θα αποτελέσουν τεχνική πρόκληση. Οι υποσχέσεις του επερχόμενου 5G θα μπορούσαν να επαναληφθούν ως μια εμπειρία χρήστη που μοιάζει με "οπτική ίνα", επιτρέποντας την παροχή των απαιτούμενων δυνατοτήτων, όπως υψηλές διελεύσεις, χαμηλές καθυστερήσεις κ.λπ. Τα οπτικά δίκτυα είναι επομένως η προτιμώμενη τεχνολογία για τη μεταφορά της κίνησης στις τοποθεσίες κεραιών με επαρκές εύρος ζώνης και ποιότητα υπηρεσιών [12].

Στο τμήμα του σταθερού δικτύου πρόσβασης, το Ethernet είναι η κυρίαρχη τεχνολογία πρωτοκόλλου και διεπαφής για την οπισθοδρόμηση της ραδιοφωνικής κεντρικής μονάδας (CU) και της ψηφιακής μονάδας (DU), λόγω της δυνατότητας υποστήριξης πολιτικών ποιότητας υπηρεσιών, συγκέντρωσης και ενσωματωμένης κίνησης συγχρονισμού και χαρακτηριστικών ασφαλείας. Τα οπτικά δίκτυα πρόσβασης που βασίζονται σε τοπολογίες σημείου προς σημείο και σημείου προς πολλαπλά σημεία υποστηρίζουν σήμερα την οπισθοδρόμηση κινητής τηλεφωνίας με βάση το Ethernet. Στη δεύτερη ενότητα του παρόντος εγγράφου, περιγράφουμε τις διάφορες τεχνικές επιλογές του mobile Ethernet backhaul για το τμήμα του δικτύου πρόσβασης (τελευταίο μίλι) σε συνέργεια (ή όχι) με την ανάπτυξη οπτικών ινών στο σπίτι (FTTH) που προορίζονται για οικιακούς πελάτες [13].

Σε αντίθεση με το backhaul, το δίκτυο ραδιοπρόσβασης (RAN) εισάγει νέα είδη τμημάτων δικτύου όπου η οπτική ίνα είναι απαραίτητη, τα οποία είναι γνωστά ως midhaul και fronthaul. Στην τρίτη ενότητα παρουσιάζονται αυτά τα δύο τμήματα δικτύου και περιγράφονται οι λύσεις σταθερής οπτικής πρόσβασης που υποστηρίζουν το fronthaul. Θα επικεντρωθούμε στην τελευταία εξέλιξη για το RAN, η οποία συνίσταται στην εικονικοποίηση των χαρακτηριστικών. Το εξελιγμένο fronthaul που βασίζεται στο Ethernet συζητείται σε συνάρτηση με τη λειτουργική διάσπαση του RAN. Παρουσιάζονται επίσης τα πιθανά δίκτυα οπτικής πρόσβασης για την υποστήριξη αυτής της εξέλιξης του RAN [14].



Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι οι τεχνολογίες οπτικών δικτύων θα διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στο σύστημα επικοινωνιών 5G. Το παρόν έγγραφο παρέχει μια ολοκληρωμένη επισκόπηση του συστήματος επικοινωνιών επόμενης γενιάς 5G, της σημασίας του και των προκλήσεων στην υλοποίηση της υποδομής του. Επιπλέον, εξετάστηκαν ορισμένες πιθανές οπτικές τεχνολογίες (με βάση τις οπτικές ίνες και τον ελεύθερο χώρο) που είναι ικανές να παρέχουν κρίσιμη λύση για την αντιμετώπιση των προκλήσεων για την υλοποίηση του δικτύου 5G [16].

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

1. Al-Zubaidi, F. M., Cardona, J. L., Montero, D. S., & Vazquez, C. (2021). Optically powered radio-over-fiber systems in support of 5G cellular networks and IoT. *Journal of Lightwave Technology*, 39(13), 4262-4269.
2. Zou, J. S., Sasu, S. A., Lawin, M., Dochhan, A., Elbers, J. P., & Eiselt, M. (2020). Advanced optical access technologies for next-generation (5G) mobile networks. *Journal of Optical Communications and Networking*, 12(10), D86-D98.
3. Abdalla, A. M., Rodriguez, J., Elfergani, I., & Teixeira, A. (Eds.). (2019). *Optical and wireless convergence for 5G networks*. John Wiley & Sons.
4. Tsakyridis, A., Ruggeri, E., Kalfas, G., Oldenbeuving, R. M., van Dijk, P. W., Roeloffzen, C. G., ... & Vagionas, C. (2021). Reconfigurable fiber wireless IFoF fronthaul with 60 GHz phased array antenna and silicon photonic ROADMs for 5G mmWave C-RANs. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 39(9), 2816-2826.
5. Mufutau, A. O., Guiomar, F. P., Fernandes, M. A., Lorences-Riesgo, A., Oliveira, A., & Monteiro, P. P. (2020). Demonstration of a hybrid optical fiber–wireless 5G fronthaul coexisting with end-to-end 4G networks. *Journal of Optical Communications and Networking*, 12(3), 72-78.
6. Saliou, F., Chanclou, P., Neto, L. A., Simon, G., Potet, J., Gay, M., ... & Debregeas, H. (2021). Optical access network interfaces for 5G and beyond. *Journal of Optical Communications and Networking*, 13(8), D32-D42.
7. Konstantinou, D., Bressner, T. A., Rommel, S., Johannsen, U., Johansson, M. N., Ivashina, M. V., ... & Monroy, I. T. (2020). 5G RAN architecture based on analog radio-over-fiber fronthaul over UDWDM-PON and phased array fed reflector antennas. *Optics Communications*, 454, 124464.
8. Hadi, M. U., Kausar, S., & Mittal, I. (2021, July). Efficient Pre-BPF based Sigma Delta Radio over Fiber System for 5G NR Fronthauls. In *IEEE EUROCON 2021-19th International Conference on Smart Technologies* (pp. 308-311). IEEE.
9. Klinkowski, M., & Jaworski, M. (2022). Planning of Optical Connections in 5G Packet-Optical xHaul Access Network. *Applied Sciences*, 12(3), 1146.

10. de Souza Lopes, C. H., Lima, E. S., Pereira, L. A. M., Borges, R. M., Ferreira, A. C., Abreu, M., ... & Junior, A. C. S. (2020). Non-standalone 5G NR fiber-wireless system using FSO and fiber-optics fronthauls. *Journal of Lightwave Technology*, 39(2), 406-417.
11. Jaffer, S. S., Hussain, A., Qureshi, M. A., & Khawaja, W. S. (2020). Towards the shifting of 5G front haul traffic on passive optical network. *Wireless Personal Communications*, 112(3), 1549-1568.
12. Waterhouse, R., & Novack, D. (2015). Realizing 5G: Microwave photonics for 5G mobile wireless systems. *IEEE Microwave Magazine*, 16(8), 84-92.
13. Nishimura, K., Ishimura, S., Bekkali, A., Tanaka, K., Hirayama, H., Tsukamoto, Y., ... & Suzuki, M. (2019, March). Optical access technology for B5G MFH/MBH. In *Optical Fiber Communication Conference* (pp. W3J-1). Optical Society of America.
14. Liu, X. (2019). Evolution of fiber-optic transmission and networking toward the 5G era. *Iscience*, 22, 489-506.
15. Castro, C., Elschner, R., Merkle, T., Schubert, C., & Freund, R. (2020). Experimental demonstrations of high-capacity THz-wireless transmission systems for beyond 5G. *IEEE Communications Magazine*, 58(11), 41-47.
16. Gomes, N. J., & Assimakopoulos, P. (2020, July). Optical fronthaul options for meeting 5G requirements. In *2020 20th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)* (pp. 1-4). IEEE.
17. <https://optiwave.com/>
18. Koonen, Ton. "Fiber to the home/fiber to the premises: what, where, and when?." *Proceedings of the IEEE* 94.5 (2006): 911-934.
19. Green, Paul E. "Fiber to the home: the next big broadband thing." *IEEE Communications Magazine* 42.9 (2004): 100-106.
20. Lin, Chun-Ting, et al. "Hybrid optical access network integrating fiber-to-the-home and radio-over-fiber systems." *IEEE Photonics Technology Letters* 19.8 (2007): 610-612.