



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Νέα Υβριδικά Ασύρματα – Οπτικά δίκτυα (Radio over Fiber)
για δίκτυα Πέμπτης γενιάς (5G)**

ΦΡΑΓΚΙΑΔΑΚΗΣ ΑΝΔΡΕΑΣ

ΑΜ 19390297

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΜΑΥΡΟΜΜΑΤΗΣ, ΛΕΚΤΟΡΑΣ

ΗΜ/ΝΙΑ ΥΠΟΒΟΛΗΣ: ΙΟΥΛΙΟΣ 2025



UNIVERSITY OF WEST ATTICA

FACULTY OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF INFORMATICS AND COMPUTER
ENGINEERING

THESIS

**New Hybrid Wireless-Optical Networks (Radio over Fiber) for Fifth
Generation (5G) networks**

FRAGKIADAKIS ANDREAS

RN 19390297

SUPERVISOR: CONSTANTINOS MAYROMMATIS, LECTOR

SUBMISSION DATE: JULY 2025

**Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή
(συμπεριλαμβανομένου και του εισηγητή)**

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς
από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

A/A	Ονοματεπώνυμο	Βαθμίδα – Ιδιότητα	Ηλ. Υπογραφή
1	Μαυρομμάτης Κωνσταντίνος	Λέκτορας	
2	Μυριδάκης Νικόλαος	Αν. Καθηγητής	
3	Καρκαζής Παναγιώτης	Αν. Καθηγητής	

Δήλωση συγγραφέα προπτυχιακής εργασίας

Ο υπογράφων **Φραγκιαδάκης Ανδρέας** του **Νικολάου** με αριθμό μητρώου **19390297** φοιτητής του **Τμήματος Μηχανικών πληροφορικής και Υπολογιστών** της **Σχολής Μηχανικών** του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

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

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

Φραγκιαδάκης Ανδρέας



Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την παρούσα διπλωματική εργασία, θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες σε όλους όσους με στήριξαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών και της ακαδημαϊκής μου προσπάθειας.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον εισηγητή της εργασίας, **Κωνσταντίνο Μαυρομμάτη**, για την πολύτιμη καθοδήγηση και την εμπιστοσύνη του καθ' όλη την εκπόνηση της εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στην οικογένειά μου, στους γονείς μου, **Νίκο και Αναστασία**, που με στήριξαν αδιάκοπα σε κάθε μου βήμα, και στα αδέρφια μου, **Ιωάννα και Σπύρο**, για την ενθάρρυνση και την αγάπη τους.

Ευχαριστώ επίσης θερμά τους φίλους μου, για την ηθική στήριξη και την παρουσία τους σε δύσκολες αλλά και χαρούμενες στιγμές αυτής της πορείας.

Τέλος, ένα ξεχωριστό ευχαριστώ σε ένα πρόσωπο που στάθηκε δίπλα μου, με αμέριστη υπομονή, κατανόηση και στήριξή σε όλη αυτή τη διαδρομή, την **Φωτεινή**.

Σε όλους εσάς, αφιερώνω αυτή την προσπάθεια με βαθιά ευγνωμοσύνη.

Περίληψη

Είναι αναμφισβήτητο γεγονός ότι η συνεχής πρόοδος των υπηρεσιών δικτύου έχει αναπόφευκτα ως αποτέλεσμα σημαντική αύξηση του όγκου της κίνησης και αυξημένες προσδοκίες των χρηστών για την ποιότητα των υπηρεσιών. Για να ικανοποιηθούν οι σύγχρονες απαιτήσεις των υπηρεσιών δικτύωσης, οι φορείς εκμετάλλευσης πρέπει να στραφούν σε καινοτόμες τεχνολογίες και αρχιτεκτονικές δικτύων ικανές να ικανοποιήσουν τις κλιμακούμενες απαιτήσεις των χρηστών. Οι αναμενόμενες σημαντικές ανακαλύψεις στις τηλεπικοινωνίες περιλαμβάνουν την εκτεταμένη εφαρμογή συσκευών IoT, την αύξηση των δικτύων διανομής περιεχομένου πολυμέσων και τη δημιουργία δικτυακών υπηρεσιών εξαιρετικά χαμηλής καθυστέρησης. Προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι τεχνικές προκλήσεις που θέτουν αυτές οι υπηρεσίες, πολλές εταιρείες, ερευνητικά ιδρύματα και οργανισμοί τυποποίησης εστιάζουν τις προσπάθειές τους στην πέμπτη γενιά (5G) κινητών επικοινωνιών.

Τα δίκτυα 5G αναμένεται να διευκολύνουν πρωτοφανείς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, διασφαλίζοντας παράλληλα ελάχιστο λανθάνοντα χρόνο, αξιόπιστη απόδοση και ικανότητα σύνδεσης τεράστιου αριθμού συσκευών. Για την εκπλήρωση αυτών των απαιτήσεων, μια ιδιαίτερα υποσχόμενη τεχνολογική προσέγγιση που διερευνάται είναι το δίκτυο Radio-over-Fiber (RoF), το οποίο διακρίνεται από την απρόσκοπτη ενσωμάτωση οπτικών μέσων και ασύρματων τεχνολογιών. Το πλαίσιο σχεδιασμού για δίκτυα 5G έχει υπογραμμίσει εδώ και καιρό τη σημασία της συγχώνευσης των υπάρχουσών υποδομών οπτικών ινών και ασύρματων δικτύων σε ένα συνεκτικό σύστημα που συγχωνεύει τα πλεονεκτήματα και των δύο: το υψηλό εύρος ζώνης και η σταθερότητα της οπτικής ίνας παράλληλα με την ευελιξία και την κινητικότητα που προσφέρουν τα ασύρματα δίκτυα. Αυτή η διαδικασία ολοκλήρωσης παρουσιάζει ένα πλήθος τεχνικών προκλήσεων και προτάσεων, με ένα από τα πιο σημαντικά εμπόδια να είναι ο ξεχωριστός σχεδιασμός των δύο τεχνολογιών, που εμποδίζει την ταυτόχρονη επέκταση και βελτιστοποίησή τους. Αυτή η διατριβή προσπαθεί να τεκμηριώσει τις πιο πρόσφατες εξελίξεις, αρχιτεκτονικές και πρωτόκολλα στη σφαίρα των δικτύων RoF, καθώς σχετίζονται με την υποστήριξη των επερχόμενων δικτύων 5G.

Λέξεις – Κλειδιά : 5G δίκτυα, υβριδικά ασυρματο-οπτικά δίκτυα, τεχνολογία Radio over Fiber, δίκτυα πρόσβασης, διαχείριση πόρων

Abstract

It is an undeniable fact that the continuous progress of network services inevitably results in a significant increase in the volume of traffic and increased expectations of users for the quality of services. To meet the modern demands of networking services, operators need to turn to innovative technologies and network architectures capable of meeting the scalable demands of users. Expected major breakthroughs in telecommunications include the widespread application of IoT devices, the growth of media content distribution networks, and the creation of ultra-low-latency service networks. In order to address the technical challenges posed by these services, many companies, research institutes and standardization organizations are focusing their efforts on the fifth generation (5G) of mobile communications.

5G networks are expected to facilitate unprecedented data rates while ensuring minimal latency, reliable performance, and the ability to connect a huge number of devices. To meet these requirements, a particularly promising technological approach being explored is the Radio-over-Fiber (RoF) network, which is distinguished by the seamless integration of optical media and wireless technologies. The design framework for 5G networks has long underlined the importance of merging existing fiber and wireless network infrastructure into a coherent system that merges the advantages of both: high bandwidth and fiber stability alongside the flexibility and mobility offered by wireless networks. This integration process presents a multitude of technical challenges and proposals, with one of the most important obstacles being the separate design of the two technologies, which prevents their simultaneous expansion and optimization. This dissertation attempts to document the latest developments, architectures and protocols in the sphere of RoF networks, as they relate to the support of upcoming 5G networks.

Keywords: 5G networks, hybrid wireless-optical networks, Radio over Fiber technology, access networks, resource management

Περιεχόμενα

Εισαγωγή.....	1
2. Επισκόπηση των Δικτύων 5G και Βασικές Αρχές του RoF	3
2.1 Δίκτυα 5G	3
2.2 Η ανάγκη σύγκλισης ασύρματων και οπτικών τεχνολογιών στα δίκτυα 5G	4
2.3 Βασικές Αρχές του RoF	5
3. Αρχιτεκτονική Δικτύων RoF για το 5G	8
3.1 Αρχιτεκτονική του RoF	8
3.2 Ενσωμάτωση RoF σε Δίκτυα 5G	9
3.3 Τύποι RoF Αρχιτεκτονικής στα 5G Δίκτυα	11
3.4 Συμβατότητα RoF με Multi-RAT και Υφιστάμενες Υποδομές	12
3.5 Υποστήριξη Fronthaul και C-RAN μέσω RoF	14
3.6 Πολυπλεξία και Επεκτασιμότητα της RoF Αρχιτεκτονικής	15
3.7 Δυναμική Διαχείριση Πόρων και Συνεργατική Πρόσβαση	18
4. Πλεονεκτήματα των Δικτύων RoF για το 5G	20
4.1 Βελτιωμένη Απόδοση	20
4.2 Μείωση Κόστους	21
4.3 Ενεργειακή Αποδοτικότητα και Βιωσιμότητα	22
4.4 Ενίσχυση της Ευχέρειας Σύνδεσης	23
4.5 Συνοπτική Αξιολόγηση Πλεονεκτημάτων της Τεχνολογίας RoF στο 5G	24
4.6. Εμπορική Αξιοποίηση της Τεχνολογίας RoF	26
4.7. Πειραματικές Πλατφόρμες και Εργαλεία Προσομοίωσης	27
4.8 Συμβολή της RoF Τεχνολογίας στην Υλοποίηση Ultra-Dense Networks (UDNs)....	28
4.9 Ευκολία Αναβάθμισης και Υποστήριξη Μελλοντικών Εξελίξεων (Future-Proofing)29	
4.10 Ανθεκτικότητα σε Παρεμβολές και Ηλεκτρομαγνητικό Θόρυβο	30
4.11 Δυνατότητες για Ενοποίηση Ετερογενών Δικτύων (HetNets)	31
5. Προκλήσεις και Περιορισμοί στην Εφαρμογή του RoF	32
5.1 Τεχνικές Προκλήσεις	32
5.2 Οικονομικοί Περιορισμοί	33
5.3 Προκλήσεις Σχεδίασης και Υλοποίησης	34
5.4 Ζητήματα Συμβατότητας και Διαλειτουργικότητας	35
5.5 Περιορισμοί σε Απόδοση λόγω Μη Γραμμικών Φαινομένων	36
6. Τελευταίες Εξελίξεις και Μελέτες Περίπτωσης	37
6.1 Πρόσφατες Εξελίξεις στην Τεχνολογία RoF	37

6.2 Μελέτες Περίπτωσης.....	43
6.3. Ανασκόπηση Ερευνών	48
7. Μελλοντικές Τάσεις και Κατευθύνσεις Έρευνας	53
7.1 Εξελίξεις στην Έρευνα	53
7.2 Νέες Τάσεις και Ευκαιρίες.....	55
8. Συμπεράσματα	58
Βιβλιογραφία	60

Πίνακας Συντομογραφιών & Ακρωνυμίων

AR	Augmented Reality	AWG	Arrayed Waveguide Grating
BBUs	Baseband Units	BER	Bit Error Rate
CAPEX	Capital Expenses	CO	Central Office
CoMP	Coordinated Multi-Point	CPRI	Common Public Radio Interface
CRoF	Centralized Radio over Fiber	DRoF	Digital Radio over Fiber
DRM	Dynamic Resource Management	eMBB	Enhanced Mobile Broadband
DSP	Digital Signal Processing	FTTC	Fiber to the Curb
FTTB	Fiber to the Building	FTTN	Fiber to the Node
FTTH	Fiber to the Home	IF	Intermediate Frequency
FTTx	Fiber to the x	IoT	Internet of Things
IM	Intensity Modulation	MGDM	Mode Group Division Multiplexing
MAI	Multiple Access Interference	ML	Machine Learning
MIMO	Multiple Input Multiple Output	NRZ	Non-Return-to-Zero
NFV	Network Function Virtualization	OCDMA	Optical Code Division Multiple Access
OPEX	Operational Expenses	oSAAS	Optical Spectrum as a Service
PDM	Polarization Division Multiplexing	PIC	Photonic Integrated Circuit
PIIN	Phase-Induced Intensity Noise	PONs	Passive Optical Networks
QoS	Quality of Service	RAN	Radio Access Network
RAT	Radio Access Technology	RAUs	Remote Antenna Units
RF	Radio Frequency	RFID	Radio-Frequency Identification
RIS	Reconfigurable Intelligent Surfaces	RoF	Radio over Fiber
RRH	Remote Radio Head	SER	Symbol Error Rate
SDN	Software Defined Networking	TCO	Total Cost of Ownership
SMF	Single Mode Fiber	URLLC	Ultra-Reliable and Low-Latency Communications
UDNs	Ultra-Dense Networks	WDM	Wavelength Division Multiplexing

Εισαγωγή

Η τεχνολογία των κινητών δικτύων έχει εξελιχθεί ραγδαία τα τελευταία χρόνια, με τα δίκτυα Πέμπτης Γενιάς (5G) να αποτελούν την τελευταία επανάσταση στην επικοινωνία. Το 5G υπόσχεται σημαντική αύξηση της ταχύτητας δεδομένων, της χωρητικότητας και της αξιοπιστίας των δικτύων, καθώς και μειωμένη καθυστέρηση, ικανή να υποστηρίξει νέες και απαιτητικές εφαρμογές όπως η αυτόνομη οδήγηση, το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), και η επαυξημένη πραγματικότητα (AR) [1]. Ωστόσο, η υλοποίηση ενός πλήρως λειτουργικού δικτύου 5G αντιμετωπίζει σημαντικές προκλήσεις, κυρίως όσον αφορά την υποδομή και τη διαχείριση της μεγάλης ποσότητας δεδομένων.

Μια από τις πιο υποσχόμενες τεχνολογίες για την ενίσχυση των 5G δικτύων είναι η υβριδική τεχνολογία Ασύρματου και Οπτικού Ραδιοφώνου (RoF - Radio over Fiber). Η τεχνολογία αυτή συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των ασύρματων ραδιοκυμάτων με την ταχύτητα και την αξιοπιστία των οπτικών ινών, επιτρέποντας την αποδοτική μεταφορά δεδομένων σε μακρινές αποστάσεις χωρίς απώλειες σήματος. Τα δίκτυα RoF είναι ιδανικά για τη μετάδοση ραδιοκυμάτων σε μεγάλες αποστάσεις και τη διαχείριση της αυξημένης ζήτησης δεδομένων που φέρνει το 5G [2]. Η ενσωμάτωσή τους στα δίκτυα 5G προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως η μεγαλύτερη χωρητικότητα και η βελτιωμένη απόδοση, ενώ παράλληλα συμβάλλει στη μείωση του κόστους εγκατάστασης και συντήρησης.

Ωστόσο, παρά τα πλεονεκτήματα, η υιοθέτηση του RoF στα δίκτυα 5G αντιμετωπίζει προκλήσεις, όπως η ανάγκη για εξειδικευμένο εξοπλισμό και η διαχείριση της ποιότητας του σήματος.

Ο σκοπός αυτής της εργασίας είναι να εξετάσει την εφαρμογή και τα οφέλη της τεχνολογίας Radio over Fiber (RoF) στα δίκτυα Πέμπτης Γενιάς (5G). Η εργασία εστιάζει στην ανάλυση της αρχιτεκτονικής των δικτύων RoF, την ενσωμάτωσή τους σε 5G δίκτυα, τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν, καθώς και τις προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν για την επιτυχή εφαρμογή τους. Επιπλέον, αναφέρονται οι τελευταίες εξελίξεις και μελέτες περίπτωσης, ενώ εξετάζονται και οι μελλοντικές κατευθύνσεις έρευνας και ανάπτυξης για την περαιτέρω βελτίωση της τεχνολογίας RoF στο πλαίσιο του 5G.

Η εργασία αυτή οργανώνεται σε 8 βασικά κεφάλαια, με στόχο την ανάλυση των διαφόρων πλευρών της τεχνολογίας RoF για τα δίκτυα 5G. Στο πρώτο κεφάλαιο, γίνεται μια εισαγωγή στο θέμα της εργασίας, η οποία περιλαμβάνει την αναγκαιότητα ανάπτυξης των δικτύων 5G και τον ρόλο της τεχνολογίας RoF σε αυτά. Στη συνέχεια, το δεύτερο κεφάλαιο παρέχει μια

επισκόπηση των δικτύων 5G και εξηγεί τις βασικές αρχές του RoF. Το τρίτο κεφάλαιο επικεντρώνεται στην αρχιτεκτονική των δικτύων RoF, αναλύοντας πώς ενσωματώνονται στην υποδομή των 5G δικτύων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, η εργασία εξετάζει τα πλεονεκτήματα των δικτύων RoF για το 5G, αναλύοντας τη βελτιωμένη απόδοση, τη μείωση κόστους και την ενίσχυση της κάλυψης. Ακολουθεί το πέμπτο κεφάλαιο, το οποίο επικεντρώνεται στις προκλήσεις και περιορισμούς της εφαρμογής του RoF, εξετάζοντας τις τεχνικές, οικονομικές και σχεδιαστικές δυσκολίες που ενδέχεται να παρουσιαστούν. Στο έκτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται οι τελευταίες εξελίξεις στην τεχνολογία RoF και μελέτες περίπτωσης, οι οποίες δείχνουν την εφαρμογή της τεχνολογίας σε πραγματικά δίκτυα. Στο έβδομο κεφάλαιο, αναλύονται οι μελλοντικές τάσεις και οι κατευθύνσεις έρευνας στον τομέα του RoF, καθώς και οι ευκαιρίες που ανοίγονται για την περαιτέρω βελτίωση της τεχνολογίας. Η εργασία κλείνει με τα συμπεράσματα, όπου συνοψίζονται τα κύρια ευρήματα και προτείνονται προτάσεις για τη μελλοντική εξέλιξη του RoF σε δίκτυα 5G.

2. Επισκόπηση των Δικτύων 5G και Βασικές Αρχές του RoF

2.1 Δίκτυα 5G

Τα δίκτυα πέμπτης γενιάς (5G) αποτελούν τη φυσική εξέλιξη των ασύρματων επικοινωνιακών τεχνολογιών, επιδιώκοντας να καλύψουν τις διαρκώς αυξανόμενες απαιτήσεις της σύγχρονης κοινωνίας των πληροφοριών. Σε αντίθεση με τα προηγούμενα δίκτυα 4G/LTE, τα οποία επικεντρώνονταν κυρίως στην αύξηση των ταχυτήτων δεδομένων για τις κινητές συσκευές, τα δίκτυα 5G προσφέρουν μια πολυδιάστατη πλατφόρμα επικοινωνίας που μπορεί να υποστηρίξει ταυτόχρονα εφαρμογές υψηλής ταχύτητας, υπηρεσίες εξαιρετικά χαμηλής καθυστέρησης και μαζική διασύνδεση συσκευών Internet of Things (IoT) [3]. Οι βασικοί τεχνολογικοί στόχοι περιλαμβάνουν ταχύτητες μετάδοσης έως 10 Gbps, καθυστερήσεις κάτω από 1 ms, καθώς και την ικανότητα υποστήριξης ενός εκατομμυρίου συσκευών ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο [4].



Η αρχιτεκτονική του 5G βασίζεται σε ένα νέο, ετερογενές οικοσύστημα το οποίο ενσωματώνει προηγμένες τεχνολογίες, όπως η χρήση millimeter wave φάσματος (30–300 GHz), η ευρεία αξιοποίηση massive MIMO (Multiple Input Multiple Output), καθώς και η διαμόρφωση δέσμης (beamforming), που επιτρέπει την προσανατολισμένη εκπομπή σήματος προς τους τελικούς χρήστες, βελτιώνοντας τη χωρητικότητα και την αποδοτικότητα του φάσματος [5]. Επιπλέον, το network slicing επιτρέπει τη δημιουργία εικονικών υπο-δικτύων, κάθε ένα εκ των οποίων μπορεί να εξυπηρετεί διαφορετικές ανάγκες εφαρμογών, όπως η αυτόνομη οδήγηση ή η απομακρυσμένη ιατρική, χωρίς να επηρεάζεται η συνολική λειτουργία του δικτύου [6].

Ένα ακόμη κρίσιμο χαρακτηριστικό του 5G είναι η μετάβαση σε αρχιτεκτονικές που βασίζονται στην κατανομημένη υπολογιστική ισχύ και την περιφερειακή επεξεργασία δεδομένων (edge computing), προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι καθυστερήσεις και να

αυξηθεί η απόδοση εφαρμογών που απαιτούν άμεση απόκριση. Η αυξανόμενη πυκνότητα μικρών κυψελών (small cells) απαιτεί την υλοποίηση ευέλικτων και υψηλής χωρητικότητας συνδέσεων τύπου fronthaul και backhaul, τις οποίες τα παραδοσιακά ηλεκτρικά ή ασύρματα μέσα μετάδοσης δεν μπορούν να εξυπηρετήσουν επαρκώς [7].

Μέσα σε αυτό το τεχνολογικό πλαίσιο, η ενσωμάτωση των οπτικών ινών μέσω της τεχνολογίας Radio over Fiber (RoF) κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική, καθώς επιτρέπει τη μεταφορά ραδιοσυχνότητας πάνω από οπτική ίνα με μικρές απώλειες και υψηλή αξιοπιστία. Το RoF αξιοποιείται κυρίως στο fronthaul τμήμα των 5G δικτύων, συνδέοντας τις κατακευματισμένες κεραίες με τις κεντρικές μονάδες επεξεργασίας, και προσφέρει δυνατότητα υποστήριξης υψηλών ρυθμών μετάδοσης, χαμηλή καθυστέρηση και απλοποιημένη διαχείριση του συστήματος [8]. Επομένως, το RoF αναδεικνύεται ως θεμελιώδης τεχνολογία για την πλήρη αξιοποίηση των δυνατοτήτων των δικτύων 5G.

2.2 Η ανάγκη σύγκλισης ασύρματων και οπτικών τεχνολογιών στα δίκτυα 5G

Η υλοποίηση των δικτύων πέμπτης γενιάς (5G) έχει επανακαθορίσει τις απαιτήσεις τόσο του ασύρματου όσο και του ενσύρματου σκέλους των τηλεπικοινωνιακών υποδομών. Εκτός από τις ραγδαία αυξανόμενες ανάγκες για ρυθμούς μετάδοσης της τάξεως των gigabits ανά δευτερόλεπτο, παρατηρείται και η απαίτηση για εξαιρετικά χαμηλές καθυστερήσεις, αξιόπιστη εξυπηρέτηση κρίσιμων εφαρμογών (π.χ. αυτοματοποιημένα οχήματα, απομακρυσμένες χειρουργικές επεμβάσεις) και μαζική συνδεσιμότητα συσκευών στο πλαίσιο του Internet of Things (IoT) [9]. Για να ανταποκριθεί σε αυτές τις ανάγκες, το 5G βασίζεται σε νέες αρχιτεκτονικές, όπως το Cloud Radio Access Network (C-RAN), που απαιτεί αυξημένη ευελιξία και ισχυρή διασύνδεση μεταξύ των απομακρυσμένων ραδιοκεφαλών (Remote Radio Heads - RRHs) και των κεντρικών μονάδων επεξεργασίας (Baseband Units - BBUs) [10].

Οι παραδοσιακές τεχνολογίες μετάδοσης, όπως οι μικροκυματικές ζεύξεις και οι χαλκοσωλήνες, είναι ανεπαρκείς για την υποστήριξη των απαιτήσεων του fronthaul δικτύου. Παρουσιάζουν περιορισμένο εύρος ζώνης, υψηλές απώλειες και ευαισθησία σε παρεμβολές. Αντίθετα, η οπτική ίνα προσφέρει εξαιρετικά υψηλό εύρος ζώνης, πολύ χαμηλές απώλειες και εξαιρετική σταθερότητα ανεξαρτήτως απόστασης [11]. Αυτό καθιστά αναγκαία τη σύγκλιση ασύρματων και οπτικών τεχνολογιών, ώστε να συνδυαστούν τα πλεονεκτήματα και των δύο κόσμων σε μία ενοποιημένη υποδομή υψηλής απόδοσης.

Η τεχνολογία Radio over Fiber (RoF) προτείνεται ως η πλέον κατάλληλη λύση για αυτή τη σύγκλιση. Το RoF επιτρέπει τη μετάδοση ραδιοσυχνοτήτων απευθείας μέσω οπτικής ίνας, από έναν κεντρικό σταθμό προς απομακρυσμένες μονάδες, ελαχιστοποιώντας την ανάγκη για σύνθετο εξοπλισμό στα άκρα του δικτύου και παρέχοντας ευελιξία στην υποστήριξη πολλαπλών υπηρεσιών [12]. Η αρχιτεκτονική αυτή διευκολύνει την υλοποίηση του C-RAN, όπου η επεξεργασία μεταφέρεται στο cloud, μειώνοντας το ενεργειακό αποτύπωμα και το κόστος λειτουργίας του δικτύου.

Παράλληλα, η χρήση RoF ενισχύει τη δυνατότητα εφαρμογής προηγμένων τεχνικών, όπως η συντονισμένη μετάδοση με πολλαπλά σημεία (Coordinated Multi-Point - CoMP), το beamforming και η δυναμική κατανομή πόρων, μέσω της κεντρικής διαχείρισης του ραδιοφάσματος [13]. Επιπλέον, λόγω της φασματικής διαφάνειας που προσφέρει η τεχνολογία RoF, είναι δυνατή η υποστήριξη διαφόρων τύπων ασύρματων σημάτων (4G, 5G, WiFi) στην ίδια οπτική υποδομή, χωρίς την ανάγκη ανασχεδιασμού ή αντικατάστασης των απομακρυσμένων μονάδων [14].

Η ανάγκη για σύγκλιση δεν αποτελεί απλώς τεχνική βελτίωση, αλλά κρίσιμη στρατηγική επιλογή για την επίτευξη των τεχνολογικών στόχων του 5G. Το RoF επιτρέπει την ενοποίηση των συστημάτων πρόσβασης, διευκολύνει την κλιμάκωση των υποδομών και καθιστά δυνατή την παροχή προηγμένων υπηρεσιών με χαμηλότερο κόστος και μεγαλύτερη αποδοτικότητα [15]. Ως εκ τούτου, η τεχνολογία RoF βρίσκεται στο επίκεντρο της σύγχρονης τάσης για ολοκληρωμένη, δικτυακή αρχιτεκτονική πέμπτης γενιάς.

2.3 Βασικές Αρχές του RoF

Η τεχνολογία Radio over Fiber (RoF) αποτελεί μία κρίσιμη υποδομή για τη σύγκλιση των ασύρματων και των ενσύρματων δικτύων στο πλαίσιο των σύγχρονων και μελλοντικών κινητών επικοινωνιών. Η βασική της λειτουργία βασίζεται στη μετάδοση ραδιοσυχνοτήτων μέσω οπτικής ίνας, είτε στην τελική τους μορφή (RF), είτε σε ενδιάμεση συχνότητα (IF). Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει τη μετάδοση διαμορφωμένων ραδιοσημάτων σε μεγάλες αποστάσεις, με εξαιρετικά χαμηλή απώλεια και πολύ μεγάλη πιστότητα σήματος [16].

Η κεντρική ιδέα του RoF είναι ότι ολόκληρη ή μέρος της ραδιοεπικοινωνιακής αλυσίδας μετατοπίζεται από την απομακρυσμένη μονάδα (κεραία) προς τον κεντρικό σταθμό. Εκεί, γίνεται η διαμόρφωση, η ενίσχυση και η επεξεργασία του σήματος, ενώ οι απομακρυσμένες κεραίες λειτουργούν απλώς ως παθητικά σημεία εκπομπής και λήψης. Αυτό

το μοντέλο μειώνει σημαντικά το κόστος, την ενεργειακή κατανάλωση και την πολυπλοκότητα των τερματικών σταθμών [17].

2.3.1 Τεχνική Αρχιτεκτονική

Σε επίπεδο φυσικής υλοποίησης, η RoF αρχιτεκτονική περιλαμβάνει έναν οπτικό πομπό, ο οποίος διαμορφώνει ένα συνεχές κύμα laser με το επιθυμητό ραδιοσήμα (μέσω διαμόρφωσης έντασης ή φάσης), έναν οπτικό δέκτη (φωτοδίοδος) στην απομακρυσμένη κεραία, καθώς και ένα σύστημα ενίσχυσης και μετάδοσης προς τον τελικό χρήστη. Η χρήση μονής λειτουργίας οπτικής ίνας (SMF) επιτρέπει τη μετάδοση σε αποστάσεις δεκάδων χιλιομέτρων χωρίς αξιοσημείωτη υποβάθμιση σήματος [18].

Επιπλέον, η τεχνολογία RoF μπορεί να υποστηρίξει ενσύρματη και ασύρματη σύγκλιση σε επίπεδο front-end, μέσω της υιοθέτησης τεχνικών όπως η διαφανής μεταφορά πολλαπλών σημάτων (π.χ. LTE, 5G NR, WiFi) πάνω στην ίδια οπτική ίνα. Η δυνατότητα αυτή χαρακτηρίζεται ως φασματική διαφάνεια, καθώς το RoF σύστημα είναι ανεξάρτητο του τύπου ή του πρωτοκόλλου του ραδιοσήματος [19].

2.3.2 Αναλογικά και Ψηφιακά RoF Συστήματα

Η RoF τεχνολογία διακρίνεται κυρίως σε δύο τύπους: Αναλογικά (Analog RoF – A-RoF) και Ψηφιακά (Digital RoF – D-RoF) συστήματα.

Στα Αναλογικά RoF, το ραδιοσήμα διαμορφώνεται απευθείας στον οπτικό φορέα, π.χ. μέσω διαμόρφωσης έντασης (IM) με laser διόδου. Αυτή η προσέγγιση είναι απλή, οικονομική και προσφέρει χαμηλή καθυστέρηση, αλλά είναι ευαίσθητη στον θόρυβο, στις παραμορφώσεις και στις μη γραμμικότητες των οπτικών συστημάτων, όπως τα laser και οι φωτοδιόδοι [20].

Αντίθετα, στα Ψηφιακά RoF συστήματα, το σήμα μετατρέπεται πρώτα σε ψηφιακή μορφή μέσω CPRI (Common Public Radio Interface) ή eCPRI και στη συνέχεια μεταδίδεται μέσω οπτικής ίνας. Παρότι παρουσιάζει υψηλότερη πολυπλοκότητα και απαιτεί μεγαλύτερο εύρος ζώνης, προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά τη σταθερότητα, την αξιοπιστία, την ευκολία στην επεξεργασία και τη συμβατότητα με σύγχρονες πλατφόρμες virtualized RAN [21].

2.3.3 Πολυπλεξία και Δικτυακή Επεκτασιμότητα

Ένα ακόμη κρίσιμο πλεονέκτημα της RoF αρχιτεκτονικής είναι η υποστήριξη τεχνικών πολυπλεξίας, όπως το Wavelength Division Multiplexing (WDM). Μέσω του WDM, πολλαπλά σήματα μπορούν να μεταφερθούν ταυτόχρονα σε ξεχωριστά μήκη κύματος μέσω της ίδιας οπτικής ίνας, επιτρέποντας την εξυπηρέτηση πολλαπλών κυψελών ή συχνοτήτων σε ένα ενοποιημένο δίκτυο. Αυτό οδηγεί σε δραματική αύξηση της χωρητικότητας και στη δυνατότητα δημιουργίας ευφών, κατανεμημένων και επεκτάσιμων αρχιτεκτονικών, απόλυτα ευθυγραμμισμένων με τις απαιτήσεις των δικτύων 5G [22].

Επιπλέον, η RoF τεχνολογία ενδείκνυται για τη μετάβαση σε αρχιτεκτονικές τύπου Cloud-RAN, υποστηρίζοντας την κεντροποίηση της επεξεργασίας σήματος, τη μείωση του κόστους και την υλοποίηση τεχνικών όπως το Coordinated Multi-Point (CoMP) και η δυναμική διαχείριση πόρων σε επίπεδο συστήματος.

Συνοψίζοντας, η τεχνολογία RoF προσφέρει μοναδικά χαρακτηριστικά όπως χαμηλή καθυστέρηση, μεγάλη εμβέλεια, απλότητα στην αρχιτεκτονική, φασματική διαφάνεια και δικτυακή ευελιξία, καθιστώντας την μια εξαιρετικά ελκυστική επιλογή για τη διασύνδεση των στοιχείων πρόσβασης στα δίκτυα 5G. Οι συνεχείς εξελίξεις στη φωτονική, την ενίσχυση σήματος και τα πρότυπα διαλειτουργικότητας ενισχύουν περαιτέρω τις δυνατότητες εφαρμογής της τεχνολογίας RoF σε παγκόσμια κλίμακα.

3. Αρχιτεκτονική Δικτύων RoF για το 5G

3.1 Αρχιτεκτονική του RoF

Η αρχιτεκτονική των Radio over Fiber (RoF) συστημάτων στα δίκτυα πέμπτης γενιάς αποτελεί έναν από τους πλέον κρίσιμους μηχανισμούς για τη σύγκλιση των ασύρματων και οπτικών υποδομών. Το βασικό χαρακτηριστικό της αρχιτεκτονικής RoF είναι η δυνατότητα μεταφοράς διαμορφωμένων ραδιοσημάτων μέσω οπτικών ινών, με σκοπό τη διασύνδεση των κεντρικών μονάδων επεξεργασίας με τις απομακρυσμένες κεραίες, γνωστές ως Remote Antenna Units (RAUs). Η μετάδοση αυτή μπορεί να γίνεται είτε στη φυσική ραδιοσυχνότητα (RF), είτε σε ενδιάμεση συχνότητα (IF), προσφέροντας σημαντική ευελιξία στη διαχείριση και τη διανομή του φάσματος [23].

Η θεμελιώδης δομή ενός RoF συστήματος περιλαμβάνει έναν Κεντρικό Σταθμό (Central Office - CO), στον οποίο πραγματοποιείται η διαμόρφωση του σήματος και η φωτοηλεκτρονική μετατροπή μέσω οπτικού πομπού (laser), καθώς και ένα δίκτυο οπτικών ινών που μεταφέρει το διαμορφωμένο φως προς τις RAUs. Στην πλευρά του αποδέκτη, το σήμα ανιχνεύεται μέσω φωτοανιχνευτή (π.χ. PIN ή APD διόδου), μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα, ενισχύεται και εκπέμπεται μέσω κεραίας προς τον τελικό χρήστη [24]. Αυτή η κεντροποιημένη προσέγγιση διαχείρισης καθιστά τις απομακρυσμένες μονάδες απλούστερες, ελαφρύτερες και οικονομικά αποδοτικότερες, καθώς η πολυπλοκότητα μετατοπίζεται στον κεντρικό κόμβο.

Στο πλαίσιο των δικτύων 5G, όπου η πυκνότητα των κυψελών αυξάνεται δραματικά λόγω της υιοθέτησης τεχνολογιών όπως το millimeter wave και η μαζική χρήση small cells, η RoF αρχιτεκτονική είναι εξαιρετικά ευέλικτη και επεκτάσιμη. Επιπλέον, εναρμονίζεται απόλυτα με το μοντέλο Cloud-Radio Access Network (C-RAN), στο οποίο οι βάσεις δεδομένων (Baseband Units - BBUs) συγκεντρώνονται σε ένα εικονικοποιημένο, κεντρικά ελεγχόμενο περιβάλλον cloud. Η κεντροποίηση αυτή επιτρέπει την δυναμική κατανομή των πόρων, την καλύτερη διαχείριση της παρεμβολής μεταξύ κυψελών και τη μείωση του λειτουργικού κόστους [25].

Αναλόγως με τον τρόπο κατανομής της επεξεργασίας, η αρχιτεκτονική RoF μπορεί να υλοποιηθεί σε πιο κεντροποιημένη ή σε περισσότερο κατανεμημένη μορφή. Στην κεντροποιημένη διαμόρφωση, η επεξεργασία του σήματος, η διαμόρφωση και οι σχετικές ψηφιακές λειτουργίες πραγματοποιούνται στο Central Office, ενώ οι απομακρυσμένες κεραίες παραμένουν παθητικές ή ημιενεργές. Αυτή η προσέγγιση μειώνει το κόστος του τερματικού

εξοπλισμού και απλοποιεί τη συντήρηση. Αντίθετα, σε πιο κατανεμημένες υλοποιήσεις, κάποιες λειτουργίες – όπως η αρχική μετατροπή σήματος ή η ενίσχυση – μεταφέρονται στις RAUs, αυξάνοντας την υπολογιστική ισχύ στην περιφέρεια του δικτύου, κάτι που ενδείκνυται για υπηρεσίες χαμηλής καθυστέρησης και edge computing [26].

Ένα σημαντικό στοιχείο της RoF αρχιτεκτονικής αποτελεί η δυνατότητα ενσωμάτωσης τεχνικών πολυπλεξίας, με κυριότερη τη Wavelength Division Multiplexing (WDM), όπου πολλαπλά σήματα μεταφέρονται σε διαφορετικά μήκη κύματος στην ίδια οπτική ίνα. Η υιοθέτηση WDM επιτρέπει την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλαπλών κυψελών, καναλιών ή ακόμα και διαφορετικών τεχνολογιών (όπως 4G, 5G, WiFi) με την ίδια φυσική υποδομή, γεγονός που αυξάνει τη συνολική φασματική και ενεργειακή αποδοτικότητα του δικτύου [27].

Τέλος, η RoF αρχιτεκτονική είναι συμβατή τόσο με τις ζώνες συχνοτήτων sub-6 GHz (FR1) όσο και με τις ζώνες millimeter wave (FR2), οι οποίες είναι κρίσιμες για την επίτευξη των στόχων του 5G όσον αφορά τη χωρητικότητα, την ταχύτητα και την καθυστέρηση. Η δυνατότητα αυτής της διπλής υποστήριξης καθιστά το RoF κατάλληλο για την ανάπτυξη ετερογενών δικτύων (HetNets), με ενιαίο σύστημα υποδομής που μπορεί να προσαρμόζεται δυναμικά στις εκάστοτε απαιτήσεις χρήσης. Αυτή η ευελιξία, σε συνδυασμό με τη δυνατότητα κεντρικής διαχείρισης και μαζικής κλιμάκωσης, αναδεικνύει την αρχιτεκτονική RoF ως ακρογωνιαίο λίθο της μετάβασης προς ένα πραγματικά ολοκληρωμένο 5G οικοσύστημα.

3.2 Ενσωμάτωση RoF σε Δίκτυα 5G

Η ενσωμάτωση της τεχνολογίας Radio over Fiber (RoF) στα δίκτυα 5G δεν αποτελεί απλώς τεχνική επιλογή, αλλά στρατηγική αναγκαιότητα, που προκύπτει από την ανάγκη ενοποίησης της ασύρματης πρόσβασης με τις οπτικές υποδομές υψηλής χωρητικότητας. Καθώς τα δίκτυα 5G απαιτούν πυκνή κυψελοποίηση, χρήση φάσματος millimeter wave, ελάχιστη καθυστέρηση και εικονικοποιημένες αρχιτεκτονικές, η RoF προσέγγιση προσφέρει μια λύση που υποστηρίζει αποτελεσματικά όλες αυτές τις προδιαγραφές [28].

Η τεχνολογία RoF επιτρέπει τη μετάδοση ραδιοσημάτων από έναν κεντρικό κόμβο προς πολλές απομακρυσμένες κεραίες μέσω οπτικής ίνας, διατηρώντας πλήρη συμβατότητα με τα πρότυπα του 5G New Radio (NR). Μέσω αυτής της αρχιτεκτονικής, είναι δυνατή η λειτουργική αποσύνδεση της μονάδας ραδιοσυχνοτήτων (Remote Radio Head – RRH) από τη μονάδα βασικής ζώνης (Baseband Unit – BBU), διευκολύνοντας την υλοποίηση κατανεμημένων ραδιοσυχνοτήτων σε συνδυασμό με κεντρική ψηφιακή επεξεργασία [29].

Η ενσωμάτωση RoF στην υποδομή του 5G υποστηρίζει πλήρως το μοντέλο C-RAN (Cloud-Radio Access Network), ενισχύοντας την ευελιξία, την επεκτασιμότητα και την ενεργειακή αποδοτικότητα του δικτύου. Η RoF επιτρέπει τη μεταφορά είτε αναλογικών RF σημάτων είτε ψηφιακών δεδομένων (μέσω πρωτοκόλλων όπως το eCPRI) με εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση, κάτι που είναι καθοριστικής σημασίας για εφαρμογές όπως το tactile internet, η απομακρυσμένη ιατρική και η αυτόνομη οδήγηση [30]. Επιπλέον, διευκολύνει την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλαπλών τεχνολογιών (multi-RAT), ενισχύοντας τη φασματική διαφάνεια και επιτρέποντας την αρμονική συνύπαρξη 4G/5G/ WiFi μέσω κοινής φυσικής υποδομής.

Ένα ακόμη κρίσιμο πλεονέκτημα της ενσωμάτωσης RoF είναι η υποστήριξη τεχνικών πολλαπλής πρόσβασης και beamforming, μέσω του κεντρικού ελέγχου. Η δυνατότητα δυναμικής διαχείρισης των πόρων και της συνεργατικής μετάδοσης (Coordinated Multipoint – CoMP) ενισχύεται σημαντικά, οδηγώντας σε βελτίωση της ποιότητας υπηρεσίας (QoS) και στην αποδοτικότερη εκμετάλλευση του διαθέσιμου φάσματος [31]. Παράλληλα, η υποστήριξη του RoF για αρχιτεκτονικές με Edge Computing επιτρέπει την υλοποίηση υπηρεσιών ultra-low latency σε κρίσιμες εφαρμογές, όπου η επεξεργασία γίνεται κοντά στον τελικό χρήστη.

Η εφαρμογή της τεχνολογίας RoF είναι επίσης κρίσιμη για το fronthaul δίκτυο, το οποίο αποτελεί τον συνδετικό κρίκο μεταξύ των μονάδων πρόσβασης και του cloud-based core network. Το RoF προσφέρει μια ενιαία πλατφόρμα για την υποστήριξη διαφορετικών υπηρεσιών και συχνοτήτων, διευκολύνοντας την εφαρμογή network slicing και τη δυναμική κατανομή πόρων ανά κάθετη αγορά (vertical), όπως η βιομηχανία, η υγειονομική περίθαλψη και οι μεταφορές [32].

Ωστόσο, η ενσωμάτωση της τεχνολογίας RoF στα δίκτυα 5G δεν είναι χωρίς προκλήσεις. Ζητήματα όπως η διαχείριση μη γραμμικιοτήτων, η ενίσχυση σημάτων σε μεγάλες αποστάσεις, η συμβατότητα με υπάρχοντα πρότυπα και η ανάγκη για ακρίβεια στον χρονισμό και συγχρονισμό του συστήματος απαιτούν ιδιαίτερη μελέτη και τεχνολογικές βελτιστοποιήσεις. Παρά ταύτα, η RoF τεχνολογία παραμένει μία από τις πιο βιώσιμες και ελκυστικές λύσεις για τη μακροπρόθεσμη επέκταση και βιωσιμότητα των 5G δικτύων.

3.3 Τύποι RoF Αρχιτεκτονικής στα 5G Δίκτυα

Η επιλογή της κατάλληλης αρχιτεκτονικής για την υλοποίηση Radio over Fiber (RoF) στα δίκτυα πέμπτης γενιάς εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η τοπολογία του δικτύου, οι απαιτήσεις καθυστέρησης, η διαθέσιμη υποδομή και οι ανάγκες επεκτασιμότητας. Στο πλαίσιο των 5G υποδομών, έχουν αναπτυχθεί και αξιοποιούνται διάφορες παραλλαγές της RoF αρχιτεκτονικής, οι οποίες διακρίνονται κυρίως με βάση το επίπεδο κεντροποίησης και τον τύπο του μεταδιδόμενου σήματος. Οι βασικές κατηγορίες περιλαμβάνουν την Κεντροποιημένη Αρχιτεκτονική (Centralized RoF), την Κατανεμημένη Αρχιτεκτονική (Distributed RoF) και τις Υβριδικές Λύσεις, που συνδυάζουν στοιχεία και από τις δύο προσεγγίσεις.

3.3.1 Κεντροποιημένη Αρχιτεκτονική (Centralized RoF)

Στην πιο καθαρή μορφή της, η RoF αρχιτεκτονική ακολουθεί ένα πλήρως κεντροποιημένο μοντέλο, στο οποίο όλες οι λειτουργίες διαμόρφωσης, ενίσχυσης και επεξεργασίας σήματος πραγματοποιούνται στον Κεντρικό Σταθμό (Central Office – CO) ή στο Cloud-RAN data center. Οι απομακρυσμένες μονάδες (Remote Antenna Units – RAUs) παραμένουν παθητικές ή ημιενεργές, περιοριζόμενες στη λειτουργία εκπομπής και λήψης χωρίς σύνθετη ψηφιακή επεξεργασία. Το σήμα μεταδίδεται μέσω οπτικής ίνας στη ραδιοσυχνότητα (RF) ή ενδιάμεση συχνότητα (IF), με χρήση διαμορφωμένων οπτικών σημάτων.

Αυτή η προσέγγιση προσφέρει απλοποίηση της αρχιτεκτονικής, μείωση κόστους στα άκρα του δικτύου και ευκολία συντήρησης, καθώς η πολυπλοκότητα συγκεντρώνεται στο κέντρο. Είναι ιδανική για αστικές περιοχές με πυκνό δίκτυο μικροκυψελών και καλό δίκτυο οπτικής ίνας, αλλά ενδέχεται να περιορίζεται σε εφαρμογές με απαιτήσεις εξαιρετικά χαμηλής καθυστέρησης λόγω της ανάγκης για αμφίδρομη μεταφορά.

3.3.2 Κατανεμημένη Αρχιτεκτονική (Distributed RoF)

Η κατανεμημένη προσέγγιση μεταφέρει μέρος της επεξεργασίας σήματος και των ψηφιακών λειτουργιών προς τις RAUs. Οι απομακρυσμένοι κόμβοι ενσωματώνουν τοπικούς μετατροπείς, φίλτρα ή ακόμη και υπομονάδες baseband επεξεργασίας, υποστηρίζοντας λειτουργίες όπως beamforming, filtering ή προκαταρκτική αποκωδικοποίηση. Η μετάδοση από το κέντρο μπορεί να είναι ψηφιακή (π.χ. μέσω eCPRI), επιτρέποντας μεγαλύτερη αξιοπιστία, ευελιξία και προσαρμοστικότητα, εις βάρος όμως της αυξημένης πολυπλοκότητας και κατανάλωσης στα άκρα.

Αυτός ο τύπος RoF αρχιτεκτονικής προτιμάται σε εφαρμογές edge computing, σε αγροτικές περιοχές με μικρότερη διαθεσιμότητα δικτύου κορμού ή όταν απαιτείται τοπική απόκριση σε πραγματικό χρόνο, όπως σε περιπτώσεις βιομηχανικών αυτοματισμών.

3.3.3 Υβριδικές RoF Αρχιτεκτονικές

Πολλοί πάροχοι και κατασκευαστές επιλέγουν υβριδικά μοντέλα, στα οποία ορισμένες λειτουργίες επεξεργασίας σήματος και διαχείρισης πόρων εκτελούνται στο κέντρο, ενώ άλλες ανατίθενται σε «ευφυείς» RAUs. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την δυναμική κατανομή λειτουργιών, ανάλογα με τις ανάγκες φόρτου, το προφίλ των υπηρεσιών και τα χαρακτηριστικά του δικτύου. Για παράδειγμα, σε περιοχές υψηλής ζήτησης, η κεντρική μονάδα μπορεί να αναλάβει το σύνολο της επεξεργασίας, ενώ σε απομακρυσμένες περιοχές ή σε περιόδους αιχμής, οι RAUs ενεργοποιούν λειτουργίες local processing ή edge AI modules. Τα υβριδικά μοντέλα συνδυάζονται συχνά με Software-Defined Networking (SDN) και Network Function Virtualization (NFV), δημιουργώντας ευέλικτα και αυτοπροσαρμοζόμενα RoF-based δίκτυα.

3.4 Συμβατότητα RoF με Multi-RAT και Υφιστάμενες Υποδομές

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της τεχνολογίας Radio over Fiber (RoF) είναι η ικανότητά της να διαχειρίζεται πολλαπλά ετερογενή ασύρματα συστήματα (Multi-Radio Access Technologies – Multi-RAT) μέσα από μια κοινή, ενιαία οπτική υποδομή. Η δυνατότητα αυτή είναι κρίσιμη για τα σύγχρονα δίκτυα 5G, τα οποία απαιτούν συνύπαρξη, διαλειτουργικότητα και ομαλή μετάβαση από προγενέστερες τεχνολογίες (όπως 4G LTE και Wi-Fi) προς την πλήρη αξιοποίηση των δυνατοτήτων της πέμπτης γενιάς.

3.4.1 RoF και Υποστήριξη Πολλαπλών Τεχνολογιών Ραδιοπρόσβασης (Multi-RAT)

Η υποδομή RoF μπορεί να μεταφέρει σήματα διαφορετικών τυποποιήσεων και συχνοτήτων, διατηρώντας την ακεραιότητά τους, μέσω κατάλληλης πολυπλεξίας και διαμόρφωσης. Έτσι, επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση και υποστήριξη:

- 3G/4G/5G σημάτων,
- Wi-Fi 6 ή Wi-Fi 7,
- LTE-U (LTE-Unlicensed),
- IoT πρωτοκόλλων όπως NB-IoT και LTE-M.

Η διαλειτουργικότητα αυτή βασίζεται σε τεχνικές όπως Wavelength Division Multiplexing (WDM) και Subcarrier Multiplexing (SCM), που καθιστούν δυνατή την αποδοτική χρήση του φάσματος και της οπτικής ίνας, επιτρέποντας στους παρόχους να διατηρούν υφιστάμενες υποδομές και να τις αναβαθμίζουν σταδιακά με χαμηλό κόστος.

3.4.2 Συμβατότητα με Υφιστάμενα Δίκτυα Πρόσβασης και Μεταφοράς

Η RoF αρχιτεκτονική ενσωματώνεται εύκολα σε υπάρχοντα δίκτυα πρόσβασης (access networks) και κορμού (backbone networks), τόσο σε αστικά όσο και σε αγροτικά περιβάλλοντα. Η μετάβαση προς το 5G μπορεί να πραγματοποιηθεί σταδιακά, μέσω Non-Standalone (NSA) υλοποιήσεων που βασίζονται στο 4G EPC (Evolved Packet Core), ενώ η πλήρης αξιοποίηση του Standalone (SA) 5G υποστηρίζεται μέσω cloud-RAN ή open-RAN συστημάτων βασισμένων σε RoF. Αξιοσημείωτο είναι ότι η χρήση RoF δεν απαιτεί εκτεταμένη αναβάθμιση στις κεραιές ή στις μονάδες τροφοδοσίας, καθώς μπορεί να επαναχρησιμοποιήσει υφιστάμενα κέντρα διανομής σήματος και κεντρικές εγκαταστάσεις. Η τεχνική αυτή παρέχει οικονομίες κλίμακας, ιδιαίτερα σημαντικές για παρόχους με μεγάλη γεωγραφική κάλυψη ή για αναδυόμενες αγορές.

3.4.3 RoF ως Γέφυρα προς την Πλήρη Ενοποίηση Δικτύων

Η ευελιξία του RoF στην υποστήριξη Multi-RAT καθιστά τη συγκεκριμένη τεχνολογία ιδανική για την υλοποίηση ενοποιημένων δικτύων πρόσβασης (converged access networks), που εξυπηρετούν ποικίλα use cases: από προσωπικές κινητές συσκευές μέχρι αισθητήρες βιομηχανικού IoT. Σε συνδυασμό με τεχνολογίες όπως SDN και NFV, η RoF αρχιτεκτονική διευκολύνει τη δυναμική κατανομή πόρων, τη διαχείριση ποιότητας υπηρεσίας (QoS) και την απρόσκοπτη υποστήριξη κάθε τύπου τερματικού εξοπλισμού.

3.5 Υποστήριξη Fronthaul και C-RAN μέσω RoF

Η τεχνολογία Radio over Fiber (RoF) έχει καταστεί κρίσιμος μοχλός για την υλοποίηση ευέλικτων και αποδοτικών αρχιτεκτονικών 5G, ιδίως όταν συνδυάζεται με το μοντέλο Centralized Radio Access Network (C-RAN). Η αρχιτεκτονική C-RAN βασίζεται στην αρχή της κεντριοποίησης των λειτουργιών επεξεργασίας του φυσικού επιπέδου (PHY layer) και του επιπέδου ελέγχου σε μια κοινή μονάδα – το λεγόμενο Baseband Unit (BBU) pool – η οποία διαχειρίζεται πολλαπλές απομακρυσμένες μονάδες ραδιοσυχνοτήτων (Remote Radio Heads – RRHs). Η διασύνδεση μεταξύ των BBUs και των RRHs υλοποιείται μέσω της fronthaul σύνδεσης, η οποία απαιτεί υψηλό εύρος ζώνης, χαμηλή καθυστέρηση και αυστηρό συγχρονισμό [1].

Το RoF προσφέρει όλα τα απαραίτητα χαρακτηριστικά για την υλοποίηση μιας αποδοτικής fronthaul σύνδεσης. Μέσω της απευθείας μετάδοσης του διαμορφωμένου ραδιοσήματος σε οπτικό πεδίο, μειώνεται σημαντικά η ανάγκη για περίπλοκη ψηφιακή επεξεργασία στο άκρο του δικτύου [4]. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της καθυστέρησης και της κατανάλωσης ενέργειας, καθώς και την απλοποίηση της αρχιτεκτονικής των απομακρυσμένων μονάδων. Ταυτόχρονα, η RoF μετάδοση υποστηρίζει υψηλές συχνότητες μεταφοράς και ευρυζωνικότητα, οι οποίες είναι απαραίτητες για τις ανάγκες των 5G εφαρμογών, ειδικά όταν γίνεται χρήση Massive MIMO και τεχνικών beamforming [37].

Η συμβατότητα του RoF με τα πρωτόκολλα της fronthaul διασύνδεσης, όπως το CPRI (Common Public Radio Interface) και το νεότερο eCPRI, επιτρέπει την ευέλικτη υλοποίηση αρχιτεκτονικών C-RAN τόσο σε αστικές όσο και σε αγροτικές περιοχές [4]. Η χρήση της οπτικής ίνας για τη μεταφορά των σημάτων από και προς τις κεραίες επιτρέπει την εγκατάσταση των BBUs σε κεντρικούς κόμβους με κατάλληλο εξοπλισμό ψύξης, επεξεργασίας και εφεδρείας, ενισχύοντας την αξιοπιστία και την επεκτασιμότητα του συνολικού δικτύου. Ειδικά στις πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές, όπου απαιτείται μεγάλο πλήθος μικροκυψελών, η RoF τεχνολογία καθίσταται ιδανική για την υποστήριξη μιας κατανεμημένης, αλλά κεντρικά ελεγχόμενης αρχιτεκτονικής [5].

Η συνδυασμένη εφαρμογή RoF και C-RAN ευνοεί επίσης τη σταδιακή μετάβαση προς λογισμικά καθοριζόμενα δίκτυα (SDN) και την εικονικοποίηση λειτουργιών δικτύου (NFV), επιτρέποντας την υλοποίηση δικτυακών υποδομών που είναι ταυτόχρονα αποδοτικές, ευέλικτες και οικονομικά βιώσιμες [6]. Η συνολική συνέργεια μεταξύ των τεχνολογιών αυτών θέτει τα θεμέλια για πλήρως cloudified δίκτυα πρόσβασης, στα οποία η υποδομή RoF δρα ως

καταλύτης για την απόδοση των υπηρεσιών 5G και την ομαλή ενσωμάτωση μελλοντικών εξελίξεων.

3.6 Πολυπλεξία και Επεκτασιμότητα της RoF Αρχιτεκτονικής

Τα τελευταία χρόνια, η ανάπτυξη των οπτικών και ασύρματων επικοινωνιών, των τεχνικών ραδιοφώνου μέσω οπτικών ινών (RoF) έχουν θεωρηθεί μια τεράστια αλλαγή στον όγκο της ροής δεδομένων στα ασύρματα δίκτυα πρόσβασης και στην τεχνολογία δικτύων οπτικών επικοινωνιών, όπου θεωρείται ως η ισχυρή λύση για μελλοντικές υψηλές ταχύτητες, επειδή έχουν μεγάλη χωρητικότητα και εύρος ζώνης [33-34]. Επιπλέον, η ικανότητα του συστήματος RoF να διασφαλίζει την παρακολούθηση των μεταδόσεων είναι ένας άλλος σημαντικός περιορισμός που πρέπει να εκπληρωθεί στο τρέχον δίκτυο. Η χρήση νεότερων συστημάτων κωδικοποίησης ή η μετατροπή του σήματος ώστε να έχει αυξημένο επίπεδο ασφάλειας αποτελούν μέρος των αγώνων που δίνουν οι ερευνητές για να καταστήσουν την κινητή επικοινωνία ασφαλέστερη και πιο αξιόπιστη [35].

Οι Chen C. et al. έχουν εικονογραφήσει ένα μυθιστόρημα του συστήματος RoF για να έχουν την καλύτερη απόδοση. Δείχνουν ότι μπορεί να μεταδώσει (downstream) δεδομένα 10 Gb / s πάνω από 30 km χρησιμοποιώντας οπτική ίνα μονής λειτουργίας για να παράγει και να ανιχνεύσει ένα σήμα MMW 60 GHz με ρυθμό σφάλματος bit (BER) να φτάσει στο 10^{-9} μετά τη μετάδοση πάνω από 30 km οπτικής ίνας μονής λειτουργίας [36].

Η αριθμητικά αναλυμένη μελέτη για το σύστημα OCDMA διαφορικής φάσης που βασίζεται στην RoF έχει πραγματοποιήσει τόσο εκπομπές όσο και εγκαταστάσεις. Εδώ η μονάδα κωδικοποιητή (κωδικοποιητή / αποκωδικοποιητή) έχει οργανώσει με διακόπτες πλέγματος κυματοδηγού (AWG) που βασίζονται σε συμπληρωματικές ακολουθίες Walsh Hadamard (CWH) που έχουν εκχωρηθεί ως κωδικοί υπογραφής. Σε ένα τέτοιο σύστημα, απαιτούνται δύο διακόπτες AWG για την πραγματοποίηση ραδιοκωδικοποιημένου φάσματος τόσο των σταθμών αποκωδικοποίησης βάσης όσο και ελέγχου. Αξιολογήθηκαν οι αναλύσεις απόδοσης αυτού του δικτύου συστημάτων που λαμβάνουν υπόψη το θόρυβο του θορύβου έντασης που προκαλείται από φάση (PIIN) των φασμάτων OCDMA. Χρήση αυτής της τεχνικής που οδηγεί στην ικανοποίηση συστημάτων χωρίς παρεμβολές καθώς και στην ελαχιστοποίηση του θορύβου crosstalk [37].

Πραγματοποιήθηκαν διάφορες μελέτες σχετικά με το σύστημα OCDMA-RoF, οι οποίες μπορούν να ενισχυθούν διαιρώντας το πλαίσιο του συστήματος σε δύο κύριες υποδομές, κεντρικούς σταθμούς και σταθμούς βάσης. Χρησιμοποιώντας μια σύνδεση οπτικών

ινών με τον κεντρικό σταθμό με μερικούς απομακρυσμένους βελτιωμένους σταθμούς βάσης, μπορεί ουσιαστικά να αυξήσει την ευελιξία του συστήματος, το πεδίο εφαρμογής, το όριο και εκτός από την εξυπηρέτηση τόσο των τροποποιημένων όσο και των κινητών τελικών χρηστών. Το OCDMA-RoF αποτελεί μια ευνοϊκή μέθοδο πολλαπλής πρόσβασης για συστήματα που απαιτούν υψηλή ασφάλεια. Συνδυάζει το υψηλό εύρος ζώνης των οπτικών ινών με την ευελιξία της τεχνικής CDMA, ώστε να μπορεί να επιτύχει συνδεσιμότητα υψηλής ταχύτητας και να εγγυηθεί την ασφάλεια έναντι παρεμβολών κατά μήκος της ζεύξης οπτικών ινών [38].

Επιπλέον, οι ερευνητές έχουν χρησιμοποιήσει το σύστημα μετάδοσης RoF για εφαρμογές 5G, χρησιμοποιώντας σχήμα κωδικοποίησης μη επιστροφής στο μηδέν (NRZ)-επιστροφής στο μηδέν (RZ) διαμορφωμένο πάνω από φορέα οπτικού συστήματος 1550 nm, με τη χρήση διαμορφωτή οπτικού συστήματος Mach-Zehnder (MZ) που αντιπροσώπευε έναν ηλεκτρικό-οπτικό μετατροπέα σήματος. Όπου η μορφή κωδικοποίησης RZ αποδίδει καλύτερα μέχρι το εύρος σύνδεσης των 45 km μιας οπτικής ίνας, αλλά καθώς η απόσταση μετάδοσης οπτικών ινών αυξάνεται πέρα από τα 45 km, το σχήμα κωδικοποίησης NRZ προτιμάται λόγω καλύτερων επιδόσεων από τη μορφή κωδικοποίησης RZ [39].

Η εκτέλεση ακολουθίας OCDMA Flexible Cross Correlation (FCC), η οποία εξαρτάται από την τεχνική πλαισίου RoF για την ενίσχυση του εύρους ζώνης και την προσωρινή βελτίωση της απόδοσης του ρυθμού bit δεδομένων, μειώνοντας παράλληλα τις ατελείς οπτικές συσκευές, έχουν προταθεί από κάποιον ερευνητή. Η τεχνική FCC-OCDMA μπορεί να ελαχιστοποιήσει αποτελεσματικά τα αποτελέσματα του PIIN, τα οποία οδηγούν σε ακύρωση παρεμβολών πολλαπλής πρόσβασης (MAI) που επιστρέφουν στο πλαίσιο RoF, όπου αυτό το σύστημα έχει απλή και εύκολη παραγωγή κώδικα [40].

Τα τελευταία χρόνια, διάφορες άλλες προσεγγίσεις χρησιμοποιούνται για την αύξηση του αριθμού συνδρομητών, μερικές από τις οποίες εξαρτώνται από πλήρως οπτικά δίκτυα χρησιμοποιώντας συνδυασμό δύο τεχνικών οπτικής πολυπλεξίας. Μία από αυτές τις τεχνολογίες βελτίωσης της επεκτασιμότητας είναι το OCDMA / OFDMA. Ένας άλλος συνδυασμός έχει χρησιμοποιηθεί για τη μεταφορά διαφορετικών τύπων δεδομένων με χρησιμοποιημένο υβριδικό σύστημα OCDMA/WDM [41-42]. Η υβριδική πολυπλεξία υποφορέων (SCM) σε συνδυασμό με την τεχνολογία κωδικοποίησης πλάτους φασμάτων SAC-OCDMA έχουν διερευνηθεί για την ενίσχυση των δικτύων του πλαισίου RoF και την επίτευξη υψηλού εύρους ζώνης και ρυθμού δεδομένων [43-44].

Οι K. S. Alaoui et al. το 2019 χρησιμοποίησαν την υβριδική προσέγγιση OFDM / SAC OCDMA για την εφαρμογή μιας σχέσης ROF. Η τεχνολογία ROF χρησιμοποιεί Multi-Carrier Modulation, όπως το OFDM, το οποίο παρέχει τη δυνατότητα αύξησης του εύρους ζώνης μαζί με ένα λογικό ποσό κόστους και αυτή η έννοια έχει γίνει επαρκές θέμα πρόσφατα για πολλά ερευνητικά έργα. Από την άλλη πλευρά, η μέθοδος SAC-OCDMA είναι σε θέση να ενισχύσει τα επίπεδα δεδομένων της συσκευής και να μεγιστοποιήσει τον αριθμό των χρηστών και είναι η μέθοδος πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης οπτικού κώδικα κωδικοποίησης φασματικού πλάτους [45].

Το 2019 πραγματοποιείται η πειραματική έρευνα του υβριδικού δικτύου TDM / WDM Gigabit Passive Optical με αντικατάσταση του καναλιού Free Space Optical με την οπτική ίνα ultimate mile. Αυτή η εργασία καταδεικνύει την αποτελεσματικότητα και την ποιότητα του FActor και του ρυθμού σφάλματος bit μαζί με τα μοτίβα ματιών του υβριδικού συστήματος TDM / WDM GPON χρησιμοποιώντας ένα κανάλι FSO. Αυτό το δίκτυο είναι ένα πλήρες δίκτυο λήψης 2.5Gb / s και μετάδοσης upstream 1.244Gb / s. Αυτό το σύστημα έχει δύο κατευθύνσεις. Για την αξιολόγηση της απόδοσης του δικτύου, το πρόγραμμα χρησιμοποιεί διαφορετικά μήκη καναλιών FSO [46].

Ο N. Alsowaidi υλοποίησε μια οικονομικά αποδοτική υβριδική διαμόρφωση βασισμένη στο πλέγμα WDM που επικαλύπτεται από το τμήμα οπτικού κώδικα πολλαπλής πρόσβασης (CDMA). Τα υβριδικά συστήματα χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή 120 δεδομένων χρήστη με φασματική απόδοση 1,6 b / s / Hz με μόνο 15 μήκη κύματος με διαχωρισμούς καναλιών έως 25GHz. Με άλλα λόγια, ορισμένοι χρήστες μπορούν να μοιραστούν μια οπτική τεχνική CDMA με ένα μήκος κύματος, με ταχύτητα γραμμής 40 Gbps ανά μήκος κύματος. Θα αυξήσει την ποιότητα της χρήσης των μηκών κύματος. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το υβριδικό δίκτυο εξυπηρετεί 120 χρήστες πάνω από 90 χιλιόμετρα οπτικών ινών μονής λειτουργίας και 15.075 χιλιόμετρα διασποράς οπτικών ινών [47]. Εφαρμόζονται νέες προσεγγίσεις για την αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου, συμπεριλαμβανομένης της πολλαπλής πρόσβασης οπτικής διαίρεσης κώδικα (OCDMA), η οποία βασίζεται στην αναγνώριση κώδικα για κάθε συσκευή μέσω του οπτικού καναλιού. Ωστόσο, αυτή η τεχνική επιτρέπει τη μετάδοση διαφορετικών πληροφοριών στο ίδιο εύρος συχνοτήτων, σε σύγκριση με διαφορετικούς χρήστες, χωρίς παρεμβολές. Το OCDMA μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για ίνες SMF [48], αλλά δεν είναι κατάλληλο για MMF επειδή απαιτεί την εισαγωγή, στο reviene για την τροπική σκέδαση του MMF, πρόσθετων οπτοηλεκτρονικών εξαρτημάτων για ηλεκτρική επεξεργασία. Οι σχάρες ινών Bragg (FBGs),

για παράδειγμα, δεν συνάδουν με ίνες πολλαπλών τρόπων όταν χρησιμοποιούν φασματική κωδικοποίηση CDMA [49].

Αντίθετα, η τεχνική πολυπλεξίας διαίρεσης ομάδας τρόπου λειτουργίας (MGDM) μπορεί εύκολα να δημιουργήσει πολυπλέκτες τοποθετώντας έναν αριθμό SMF σε πολλές διαφορετικές μετατοπίσεις και στη συνέχεια συναρπαστικές ομάδες λειτουργίας πολλαπλών ινών (MG) [50-51]. Με τη μεταφορά σήματος βασικής ζώνης και ραδιοσημάτων (στα 2,5 GHz), αντίστοιχα σε ρυθμούς δεδομένων 2,5 Gb/s, ο συμβολικός ρυθμός σφάλματος (SER) ενός δικτύου 3/3 MGDM μέσω ινών MMF επιτυγχάνεται κάτω από 10⁻¹⁰ και 10⁻⁹ [52].

Για πρώτη φορά, οι Mahdi Kasmi et al. πρότειναν και παρουσίασαν επικοινωνίες 5 G με ρυθμό δεδομένων 10 Gb / s με την κυματομορφή GFDM πολυπλεξία μέσω πολυτροπικής ίνας. Η ίνα MMF προσομοιώνεται και μετράται για διαφορετικές αντισταθμίσεις με βάση την τεχνική εκτόξευσης μετατόπισης. Έτσι, χρησιμοποιώντας την τεχνική GFDM, ελαχιστοποιείται η ακτινοβολία εκτός ζώνης (OOB) κατά 5 dB σε σύγκριση με την OFDM και επιτυγχάνεται ακόμη χαμηλότερος ρυθμός σφάλματος bit (BER). Δείχνουν περαιτέρω ότι αυξάνοντας τις βρύσες ισοσταθμιστή Volterra μπορούμε να επιτύχουμε λογική απόδοση BER με διαφορετικές τιμές αντιστάθμισης [53].

3.7 Δυναμική Διαχείριση Πόρων και Συνεργατική Πρόσβαση

Η υλοποίηση δικτύων 5G μέσω τεχνολογιών RoF δεν περιορίζεται μόνο στη φυσική σύνδεση των μονάδων πρόσβασης αλλά επεκτείνεται και στη δυνατότητα δυναμικής διαχείρισης πόρων (Dynamic Resource Management) σε πραγματικό χρόνο. Η μετάβαση σε αρχιτεκτονικές C-RAN και η ευρεία χρήση fronthaul συνδέσεων βασισμένων στο RoF επιτρέπουν την ευέλικτη εκχώρηση πόρων – όπως εύρος ζώνης, ισχύς μετάδοσης και επεξεργαστική ισχύς – ανάλογα με τις ανάγκες και τη ζήτηση χρηστών και υπηρεσιών σε συγκεκριμένο τόπο και χρόνο [54].

Η δυναμική διαχείριση πόρων ενισχύεται μέσω τεχνολογιών όπως το Network Slicing και το Radio Access Network (RAN) Sharing, που επιτρέπουν την ταυτόχρονη λειτουργία πολλαπλών εικονικών δικτύων πάνω στην ίδια φυσική υποδομή. Μέσω αυτών των τεχνικών, οι πάροχοι μπορούν να εξυπηρετούν διαφορετικά προφίλ εφαρμογών (π.χ. IoT, eMBB, URLLC) με εγγυημένες επιδόσεις και επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας (QoS), αξιοποιώντας αποτελεσματικά τις δυνατότητες των RoF συνδέσεων [55].

Η συνεργατική πρόσβαση (Collaborative Access) αποτελεί κρίσιμο στοιχείο των σύγχρονων 5G δικτύων, καθώς προϋποθέτει την ανταλλαγή πληροφορίας και τον κοινό έλεγχο πόρων μεταξύ διαφορετικών μονάδων πρόσβασης ή ακόμα και διαφορετικών παρόχων. Η τεχνολογία RoF, μέσω της ενιαίας και ενοποιημένης μετάδοσης σημάτων, διευκολύνει την κεντρική διαχείριση πολλαπλών RRHs από κοινές BBU μονάδες, ενισχύοντας τη συνεργατικότητα σε επίπεδο κυψελών και καναλιών [56].

Επιπλέον, η υποστήριξη του Spectrum Aggregation και της δυναμικής ανακατανομής φάσματος σε δίκτυα που ενσωματώνουν RoF προσφέρει νέα περιθώρια ευελιξίας, ειδικά σε περιβάλλοντα με έντονη κυκλοφοριακή συμφόρηση ή διαφοροποιημένη κατανομή χρηστών. Μέσω έξυπνων αλγορίθμων και τεχνικών Machine Learning, καθίσταται δυνατή η αυτόματη ανίχνευση φορτίου και η ανακατανομή πόρων σε πραγματικό χρόνο, με στόχο τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος [57].

Η παραπάνω δυναμική και συνεργατική προσέγγιση υποστηρίζεται από την εγγενή ευρυζωνικότητα και την ασύγκριτη χαμηλή καθυστέρηση που προσφέρει το RoF, καθιστώντας την τεχνολογία θεμέλιο για έξυπνη και αυτόνομη διαχείριση δικτύων πέμπτης γενιάς. Συνολικά, η συνέργεια μεταξύ RoF, SDN, και AI τεχνολογιών διαμορφώνει ένα εξελιγμένο πλαίσιο λειτουργίας, στο οποίο οι πόροι του δικτύου όχι μόνο διαμοιράζονται, αλλά και αναπροσαρμόζονται δυναμικά με βάση τις απαιτήσεις εφαρμογών και χρηστών.

4. Πλεονεκτήματα των Δικτύων RoF για το 5G

4.1 Βελτιωμένη Απόδοση

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας Radio over Fiber (RoF) στα δίκτυα πέμπτης γενιάς είναι η ουσιαστική βελτίωση της συνολικής απόδοσης του συστήματος σε επίπεδο μετάδοσης, διαχείρισης φάσματος, και ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service – QoS). Η ενσωμάτωση των RoF υποδομών επιτρέπει τη δημιουργία ενός ενιαίου δικτύου υψηλής ταχύτητας, το οποίο μπορεί να μεταφέρει διαμορφωμένα ραδιοσήματα μέσω οπτικών ινών με πολύ χαμηλές απώλειες, εξαιρετική σταθερότητα και μικρή καθυστέρηση [58].

Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά ασύρματα ή μικροκυματικά μέσα, οι οπτικές ίνες που χρησιμοποιούνται στα RoF συστήματα παρουσιάζουν πολύ χαμηλή εξασθένηση σήματος (περίπου 0.2 dB/km) και ευρύ φάσμα, καθιστώντας δυνατή τη μετάδοση σημάτων σε αποστάσεις δεκάδων χιλιομέτρων χωρίς την ανάγκη για ενδιάμεση ενίσχυση [59]. Αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία στα δίκτυα 5G, τα οποία βασίζονται σε μικροκυψέλες (small cells) με αυξημένες απαιτήσεις σε χωρητικότητα και πυκνότητα χρήσης. Η RoF υποδομή προσφέρει την αναγκαία απόδοση για την υποστήριξη υψηλών ρυθμών μετάδοσης (>10 Gbps) και καθυστερήσεων μικρότερων του 1 ms, όπως ορίζονται από το ITU-T για τις προδιαγραφές IMT-2020 [35].

Η κεντροποιημένη αρχιτεκτονική του RoF επιτρέπει τη δυναμική και αποδοτική διαχείριση του φάσματος και των ραδιοπόρων. Με τη μετατόπιση της επεξεργασίας στο κεντρικό δίκτυο (π.χ. μέσω C-RAN), επιτυγχάνεται συντονισμένη διαχείριση παρεμβολών, συνεργατική μετάδοση (CoMP) και χρήση τεχνικών όπως beamforming και massive MIMO, που ενισχύουν την απόδοση του ασύρματου μέρους του συστήματος [60].

Επιπλέον, τα RoF δίκτυα υποστηρίζουν τεχνολογίες πολυπλεξίας, όπως Wavelength Division Multiplexing (WDM), επιτρέποντας τη μετάδοση πολλαπλών σημάτων διαφορετικών συχνοτήτων ή τεχνολογιών μέσω της ίδιας ίνας. Αυτό αυξάνει την απόδοση του δικτύου όχι μόνο σε επίπεδο ταχύτητας, αλλά και σε επίπεδο διαθεσιμότητας και ευελιξίας παροχής υπηρεσιών [61]. Χάρη σε αυτή τη δυνατότητα, μία και μόνο φυσική υποδομή RoF μπορεί να υποστηρίξει παράλληλα εφαρμογές 5G, 4G, WiFi και άλλες wireless υπηρεσίες.

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι η χρήση του RoF οδηγεί σε σταθερότερο και πιο προβλέψιμο επίπεδο απόδοσης, καθώς εξαλείφονται οι αυξομειώσεις και αστάθειες που παρατηρούνται σε παραδοσιακές ασύρματες ή χαλκοενσύρματες συνδέσεις. Η συνολική

αύξηση της απόδοσης των 5G δικτύων μέσω της υιοθέτησης RoF υποδομών επηρεάζει θετικά τόσο τους τελικούς χρήστες (σε επίπεδο ταχύτητας, αξιοπιστίας και εμπειρίας), όσο και τους παρόχους υπηρεσιών, επιτρέποντάς τους να προσφέρουν διαφοροποιημένες, σταθερές και υψηλής ποιότητας υπηρεσίες με χαμηλότερο λειτουργικό κόστος.

4.2 Μείωση Κόστους

Η υιοθέτηση της τεχνολογίας Radio over Fiber (RoF) στα δίκτυα πέμπτης γενιάς δεν προσφέρει μόνο τεχνικά και λειτουργικά οφέλη, αλλά συμβάλλει επίσης καθοριστικά στη μείωση του συνολικού κόστους ιδιοκτησίας (Total Cost of Ownership – TCO) των υποδομών. Η μείωση του κόστους σχετίζεται τόσο με τα αρχικά κεφαλαιουχικά έξοδα (CAPEX), όσο και με τις λειτουργικές δαπάνες (OPEX), καθώς το RoF επιτρέπει την απλοποίηση της δικτυακής αρχιτεκτονικής, τη χρήση παθητικών στοιχείων στις απομακρυσμένες μονάδες και τη συγκεντροποίηση της επεξεργασίας σήματος [62].

Ένα από τα σημαντικότερα οικονομικά οφέλη του RoF είναι η απλοποίηση της αρχιτεκτονικής των σταθμών βάσης. Οι απομακρυσμένες μονάδες ραδιοσυχνοτήτων (RAUs) στο RoF λειτουργούν κατά κύριο λόγο ως παθητικοί δέκτες/πομποί, χωρίς την ανάγκη ενσωμάτωσης πολύπλοκου εξοπλισμού, όπως ψηφιακοί μετατροπείς ή επεξεργαστές σήματος. Η λειτουργική πολυπλοκότητα και οι δαπανηρές ψηφιακές λειτουργίες μεταφέρονται στον κεντρικό κόμβο, όπου υπάρχει μεγαλύτερη δυνατότητα συντήρησης και ελέγχου. Αυτό μειώνει το κόστος εγκατάστασης και διαχείρισης στο επίπεδο της περιφέρειας του δικτύου [63].

Επιπλέον, η χρήση ενιαίας οπτικής υποδομής για τη μεταφορά πολλαπλών σημάτων (μέσω WDM) επιτρέπει την κοινή χρήση των φυσικών πόρων, περιορίζοντας την ανάγκη για πολλαπλές καλωδιώσεις ή εξειδικευμένες συνδέσεις ανά τεχνολογία ή υπηρεσία. Έτσι, μειώνονται τα κόστη εξοπλισμού, ανάπτυξης και φυσικής συντήρησης, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου το κόστος δικτύωσης είναι υψηλό, όπως σε αγροτικές ή αστικές περιοχές με περιορισμένο χώρο εγκατάστασης [64].

Το RoF συνεισφέρει επίσης σε σημαντική μείωση των λειτουργικών εξόδων (OPEX), καθώς οι παθητικές μονάδες στις κεραίες έχουν χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις και μικρότερες ανάγκες σε ψύξη, συντήρηση ή αντικατάσταση. Παράλληλα, η συγκεντροποιημένη επεξεργασία σήματος στο cloud μειώνει τις ανάγκες για επιτόπια παρουσία προσωπικού, επιτρέποντας την απομακρυσμένη διαχείριση και αυτοματοποίηση πολλών λειτουργιών του δικτύου [65].

Η αρχιτεκτονική του RoF ευνοεί επίσης την κλιμακωτή ανάπτυξη, επιτρέποντας στις τηλεπικοινωνιακές επιχειρήσεις να επεκτείνουν σταδιακά το δίκτυο ανάλογα με τη ζήτηση, χωρίς την ανάγκη ανασχεδιασμού του κεντρικού κορμού. Αυτό μειώνει τον οικονομικό κίνδυνο που συνδέεται με την υπερεπένδυση σε αρχικό στάδιο και καθιστά την τεχνολογία RoF ιδιαίτερα ελκυστική για παρόχους σε αναδυόμενες αγορές ή σε περιβάλλοντα περιορισμένων πόρων [66]. Συνολικά, η εφαρμογή του RoF στα δίκτυα 5G οδηγεί σε σημαντική μείωση κόστους τόσο βραχυπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα, ενισχύοντας τη βιωσιμότητα και την ανταγωνιστικότητα των παροχών δικτύου σε ένα περιβάλλον αυξανόμενης ζήτησης και τεχνολογικής πολυπλοκότητας.

4.3 Ενεργειακή Αποδοτικότητα και Βιωσιμότητα

Η επίτευξη ενεργειακής αποδοτικότητας και περιβαλλοντικής βιωσιμότητας αποτελεί έναν από τους βασικούς πυλώνες σχεδιασμού των σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών υποδομών, ιδιαίτερα στα δίκτυα πέμπτης γενιάς (5G), τα οποία χαρακτηρίζονται από υψηλή πολυπλοκότητα, αυξημένο αριθμό κόμβων και ενισχυμένες απαιτήσεις διαθεσιμότητας. Η τεχνολογία Radio over Fiber (RoF) συμβάλλει ουσιαστικά στην επίτευξη αυτών των στόχων, προσφέροντας ένα πλαίσιο λειτουργίας που μειώνει την κατανάλωση ενέργειας, ελαχιστοποιεί τις εκπομπές θερμότητας και ενισχύει τη βιωσιμότητα των τηλεπικοινωνιακών υποδομών [67].

Η μεταφορά της επεξεργασίας σήματος από τις απομακρυσμένες μονάδες (RAUs) στον κεντρικό σταθμό (BBU pool) επιτρέπει την απλοποίηση των ενεργών στοιχείων στο άκρο του δικτύου. Οι RAUs λειτουργούν με ελάχιστη υπολογιστική ισχύ, χωρίς την ανάγκη για πολύπλοκες ψηφιακές διεργασίες, γεγονός που μειώνει σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας σε κάθε κυψέλη [68]. Αυτή η αρχιτεκτονική με παθητικές ή ημιενεργές μονάδες όχι μόνο περιορίζει τις ενεργειακές απαιτήσεις, αλλά συμβάλλει και στην απλοποίηση του συστήματος ψύξης, το οποίο αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα ενεργοβόρα υποσυστήματα σε παραδοσιακές υποδομές σταθμών βάσης.

Η χρήση οπτικών ινών για τη μεταφορά ραδιοσημάτων παρουσιάζει επίσης πλεονεκτήματα σε επίπεδο ενεργειακής αποδοτικότητας. Οι οπτικές ίνες έχουν εξαιρετικά χαμηλές απώλειες (σε σχέση με τους ομοαξονικούς ή μικροκυματικούς συνδέσμους), γεγονός που καθιστά περιττή την ενίσχυση του σήματος σε μικρές και μεσαίες αποστάσεις, μειώνοντας την ανάγκη για ενεργά στοιχεία όπως ενισχυτές ή επαναλήπτες [69]. Παράλληλα, η δυνατότητα πολυπλεξίας μέσω WDM συμβάλλει στην αποδοτικότερη εκμετάλλευση των

φυσικών πόρων, επιτρέποντας την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλαπλών κυψελών με την ίδια υποδομή, χωρίς την ανάγκη για διπλασιασμό ενεργού εξοπλισμού.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η ενσωμάτωση RoF υποδομών ευθυγραμμίζεται με τις ευρύτερες ευρωπαϊκές και διεθνείς στρατηγικές για τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των ΤΠΕ. Ο ρόλος των δικτύων 5G στην επιτάχυνση της πράσινης μετάβασης είναι ιδιαίτερα σημαντικός, και η τεχνολογία RoF μπορεί να λειτουργήσει ως καταλύτης, τόσο μειώνοντας τις άμεσες εκπομπές CO₂ των τηλεπικοινωνιακών παρόχων όσο και διευκολύνοντας την ανάπτυξη έξυπνων, χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης εφαρμογών σε τομείς όπως οι μεταφορές, η βιομηχανία και η υγειονομική περίθαλψη [70].

Τέλος, η συγκεντροποιημένη επεξεργασία στο cloud επιτρέπει την βελτιστοποίηση της κατανομής φορτίου μεταξύ των κόμβων του δικτύου, ανάλογα με τη ζήτηση σε πραγματικό χρόνο, οδηγώντας σε δυναμική εξοικονόμηση ενέργειας. Μέσω τεχνικών όπως η αναστολή λειτουργίας μη χρησιμοποιούμενων στοιχείων (sleep mode) και η αυτοματοποιημένη κατανομή πόρων, η RoF αρχιτεκτονική ενισχύει την αποδοτικότητα του δικτύου χωρίς να επηρεάζει την ποιότητα υπηρεσίας (QoS) [71]. Συνεπώς, η RoF τεχνολογία δεν είναι μόνο μια τεχνολογική επιλογή για βελτιωμένη απόδοση και κόστος, αλλά και ένας ισχυρός μοχλός πράσινης και βιώσιμης ανάπτυξης στις τηλεπικοινωνίες πέμπτης γενιάς.

4.4 Ενίσχυση της Ευχέρειας Σύνδεσης

Η ευχέρεια σύνδεσης, ή αλλιώς συνδεσιμότητα παντού και πάντα, αποτελεί θεμελιώδη στόχο των δικτύων πέμπτης γενιάς (5G), τα οποία επιδιώκουν να προσφέρουν αδιάλειπτη, σταθερή και χαμηλής καθυστέρησης επικοινωνία σε κάθε γεωγραφική περιοχή, για ένα ευρύ φάσμα χρηστών και συσκευών. Η τεχνολογία Radio over Fiber (RoF) συμβάλλει αποφασιστικά στην επίτευξη αυτής της συνδεσιμότητας, διευκολύνοντας την ευρεία ανάπτυξη μικροκυψελών, την κάλυψη δυσπρόσιτων περιοχών και την ομαλή λειτουργία ετερογενών δικτύων (HetNets) [72].

Η βασική συμβολή του RoF έγκειται στην απλότητα και ευελιξία εγκατάστασης των απομακρυσμένων μονάδων (RAUs), οι οποίες απαιτούν ελάχιστο ενεργό εξοπλισμό και μπορούν να εγκατασταθούν σε πυκνό αστικό ιστό, σε υπόγειες υποδομές, ακόμα και σε αγροτικές ή ορεινές περιοχές όπου η παραδοσιακή ανάπτυξη σταθμών βάσης είναι τεχνικά ή οικονομικά αδύνατη. Μέσω της σύνδεσης με το κεντρικό δίκτυο μέσω οπτικής ίνας, οι RAUs μπορούν να προσφέρουν ασύρματη πρόσβαση υψηλής ποιότητας, ανεξάρτητα από την απόσταση από τον κόμβο επεξεργασίας [73].

Επιπλέον, η υποστήριξη πολλαπλών τύπων σημάτων και τεχνολογιών μέσω μιας κοινής RoF υποδομής ενισχύει τη διαλειτουργικότητα και την ομαλή μετάβαση μεταξύ διαφόρων ασύρματων προτύπων. Χάρη στη φασματική διαφάνεια της τεχνολογίας RoF, είναι δυνατή η ταυτόχρονη εξυπηρέτηση 4G, 5G, Wi-Fi και IoT συσκευών, διευκολύνοντας έτσι την εφαρμογή πολυλειτουργικών δικτύων πρόσβασης που ανταποκρίνονται σε ποικίλες απαιτήσεις χρηστών και εφαρμογών [74].

Η RoF τεχνολογία υποστηρίζει επίσης κρίσιμες αρχιτεκτονικές λειτουργίες του 5G, όπως το network slicing και η δυναμική κατανομή πόρων. Μέσω της κεντροποιημένης επεξεργασίας και της ευέλικτης δρομολόγησης σημάτων, οι πάροχοι μπορούν να προσφέρουν εξειδικευμένες υπηρεσίες με εγγυημένη ποιότητα εξυπηρέτησης (QoS) σε διαφορετικά είδη χρηστών — από βιομηχανικούς αισθητήρες χαμηλής ισχύος έως εφαρμογές υψηλής ταχύτητας σε κινητές συσκευές [75].

Τέλος, η τεχνολογία RoF καθιστά δυνατή την ταχεία και οικονομικά αποδοτική επέκταση της κάλυψης, προσφέροντας λύσεις ιδανικές για την υποστήριξη του 5G σε περιπτώσεις προσωρινής ή εποχικής ζήτησης, όπως μεγάλες εκδηλώσεις, τουριστικά σημεία ή φυσικές καταστροφές. Η ευχέρεια στην ανάπτυξη, σε συνδυασμό με τη σταθερότητα, την ευελιξία και τη χαμηλή καθυστέρηση, καθιστούν τα δίκτυα RoF ισχυρό εργαλείο στην προσπάθεια για καθολική, συνεχή και υψηλής ποιότητας συνδεσιμότητα.

4.5 Συνοπτική Αξιολόγηση Πλεονεκτημάτων της Τεχνολογίας RoF στο 5G

Η τεχνολογία Radio over Fiber (RoF) έχει αναδειχθεί ως κρίσιμος πυλώνας για την υλοποίηση των δικτύων πέμπτης γενιάς (5G), εξαιτίας της ικανότητάς της να συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των οπτικών και των ασύρματων δικτύων. Η μοναδική αρχιτεκτονική της, που βασίζεται στη μεταφορά ραδιοσημάτων μέσω οπτικής ίνας, παρέχει σημαντικά πλεονεκτήματα σε επίπεδο απόδοσης, κόστους, ενεργειακής αποδοτικότητας, και ευελιξίας ανάπτυξης, καθιστώντας την ιδανική για την κάλυψη των υψηλών απαιτήσεων των 5G υποδομών.

Τα δίκτυα RoF επιτρέπουν τη δημιουργία ευφών, ενοποιημένων και πολυεπίπεδων υποδομών, οι οποίες μπορούν να ανταποκριθούν στην αυξανόμενη ζήτηση για υψηλή ταχύτητα, σταθερότητα σύνδεσης, χαμηλή καθυστέρηση και μαζική συνδεσιμότητα. Χάρη στη δυνατότητα υποστήριξης πολλαπλών ραδιοτεχνολογιών και στη συμβατότητά τους με τα μοντέλα Cloud-RAN, τα RoF δίκτυα ενσωματώνονται με φυσικό τρόπο στην αρχιτεκτονική του 5G και ανοίγουν τον δρόμο για εφαρμογές όπως το tactile internet, η απομακρυσμένη χειρουργική, τα αυτόνομα οχήματα και τα βιομηχανικά δίκτυα.

Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει τα βασικότερα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας RoF στο 5G, ταξινομημένα σε θεματικές κατηγορίες:

Κατηγορία Πλεονεκτήματος	Περιγραφή	Αναφορά
Απόδοση / Ταχύτητα	Υποστήριξη υψηλών ρυθμών μετάδοσης (>10 Gbps), χαμηλή καθυστέρηση (<1 ms), σταθερή μετάδοση	[33], [35]
Απλοποίηση Αρχιτεκτονικής	Παθητικές RAUs, κεντριοποιημένη επεξεργασία, υποστήριξη μικροκυψελοποίησης	[36], [39]
Ενεργειακή Αποδοτικότητα	Μειωμένη κατανάλωση στα άκρα, χαμηλές ανάγκες ψύξης, βελτιστοποίηση μέσω cloud	[43], [45], [47]
Μείωση Κόστους	Χαμηλότερο κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας, κοινή χρήση υποδομών μέσω WDM	[38], [40]
Υποστήριξη πολλαπλών τεχνολογιών	Φασματική διαφάνεια: ταυτόχρονη μετάδοση 4G, 5G, Wi-Fi, IoT	[34], [50]
Ευκολία Ανάπτυξης	Ευέλικτη εγκατάσταση σε δύσκολα σημεία, υποστήριξη ετερογενών δικτύων (HetNets)	[48], [49]
Εξυπηρέτηση πολλών χρηστών	Υποστήριξη πολυσυσκευών, multi-service, network slicing με εγγυημένη QoS	[51]
Βιωσιμότητα / Πράσινη Ανάπτυξη	Ευθυγράμμιση με Green ICT πολιτικές, μείωση εκπομπών CO ₂ μέσω ενεργειακής αποδοτικότητας	[43], [46]

Ο πίνακας αυτός αποτυπώνει με σαφήνεια το πώς η τεχνολογία RoF συνδυάζει τεχνική υπεροχή με οικονομική και λειτουργική αποδοτικότητα, επιτρέποντας στα δίκτυα 5G να επιτύχουν επίπεδα απόδοσης και διαθεσιμότητας που δεν ήταν εφικτά με προηγούμενες τεχνολογίες. Ιδιαίτερα σημαντικό είναι ότι τα πλεονεκτήματα αυτά δεν αφορούν μόνο τους παρόχους, αλλά επεκτείνονται στους χρήστες, στις επιχειρήσεις και στη δημόσια σφαίρα, μέσω

της υποστήριξης εφαρμογών υψηλής κοινωνικής και οικονομικής αξίας. Ωστόσο, η πλήρης αξιοποίηση των δυνατοτήτων της απαιτεί συστηματικό σχεδιασμό, επενδύσεις σε οπτικές υποδομές και βελτιστοποίηση της διαλειτουργικότητας με τις υπόλοιπες τεχνολογικές συνιστώσες του 5G οικοσυστήματος.

4.6. Εμπορική Αξιοποίηση της Τεχνολογίας RoF

Η τεχνολογία Radio over Fiber (RoF) έχει ξεπεράσει το στάδιο της θεωρητικής έρευνας και των πιλοτικών έργων και βρίσκεται πλέον στο επίκεντρο των εμπορικών υλοποιήσεων από κορυφαίους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους παγκοσμίως. Οι εφαρμογές της σε πραγματικά δίκτυα 5G αποδεικνύουν την τεχνική της ωριμότητα, τη βιωσιμότητα και τη δυνατότητά της να καλύψει σύγχρονες και μελλοντικές απαιτήσεις σε ταχύτητα, καθυστέρηση και διαλειτουργικότητα.

Η Huawei και η ZTE ήταν από τους πρώτους κατασκευαστές που επένδυσαν στην ανάπτυξη και ενσωμάτωση RoF πλατφορμών σε δίκτυα νέας γενιάς στην Κίνα και τη Νοτιοανατολική Ασία, αξιοποιώντας τις δυνατότητες της τεχνολογίας για ευέλικτο fronthaul μέσω αρχιτεκτονικών τύπου C-RAN. Αντίστοιχα, η Korea Telecom έχει χρησιμοποιήσει RoF υποδομές για την υποστήριξη υπηρεσιών ultra-low latency σε εφαρμογές έξυπνων πόλεων και αυτόνομων μεταφορών, αποδεικνύοντας την ικανότητα του RoF να ανταπεξέλθει σε σύνθετα περιβάλλοντα και απαιτητικές κάθετες αγορές (verticals) [76].

Στην Ευρώπη, ο οργανισμός 5G PPP και το ερευνητικό έργο BlueSPACE έχουν αναδείξει μέσα από πιλοτικές εγκαταστάσεις την αποτελεσματικότητα του RoF για dense urban deployments και scenarios μεγάλης κλίμακας, αξιοποιώντας τεχνικές όπως WDM και analog RoF για μείωση κόστους και κατανάλωσης ενέργειας [77]. Σημαντικό είναι ότι η ευελιξία του RoF επέτρεψε την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλαπλών ραδιοπροτύπων (multi-RAT) μέσα από κοινή φυσική υποδομή, γεγονός που ενισχύει την εμπορική του βιωσιμότητα για παρόχους που δραστηριοποιούνται τόσο σε αστικές όσο και σε αγροτικές περιοχές.

Από πλευράς οικονομιών κλίμακας, το RoF αποδείχθηκε στρατηγικά αποδοτικό σε περιπτώσεις όπου απαιτούνταν κλιμακούμενη ανάπτυξη (scalable rollout), όπως στις Ηνωμένες Πολιτείες με πιλοτικά έργα της Verizon για εξυπηρέτηση μικροκυψελών μέσω passive optical networks (PONs) και σε απομακρυσμένες περιοχές του Καναδά με χαμηλή πυκνότητα πληθυσμού. Σε αυτά τα σενάρια, το RoF επέτρεψε την εξοικονόμηση σε επενδύσεις (CAPEX) και τη μείωση λειτουργικών εξόδων (OPEX), καθιστώντας το ελκυστική επιλογή για παρόχους με περιορισμένο αρχικό προϋπολογισμό [78].

Συνολικά, η εμπορική αξιοποίηση της τεχνολογίας RoF επιβεβαιώνει τη θέση της ως μια από τις πιο ευέλικτες και βιώσιμες λύσεις για τη διασύνδεση υποδομών 5G. Η τάση για περαιτέρω υιοθέτηση σε δίκτυα 6G και σε συνδυασμό με AI-driven network management αποκαλύπτει το ευρύ πεδίο δυνατοτήτων της, ενισχύοντας τη στρατηγική της σημασία για τους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους και τους φορείς χάραξης πολιτικής [79].

4.7. Πειραματικές Πλατφόρμες και Εργαλεία Προσομοίωσης

Η ανάπτυξη και αξιολόγηση των δικτύων Radio over Fiber (RoF) για το 5G προϋποθέτει τη χρήση εξειδικευμένων εργαλείων προσομοίωσης και πειραματικών πλατφορμών, οι οποίες επιτρέπουν την ανάλυση της απόδοσης, της συμβατότητας και της συμπεριφοράς των συστημάτων υπό ρεαλιστικές συνθήκες. Η πειραματική διερεύνηση του RoF είναι κρίσιμη για τη βελτιστοποίηση της αρχιτεκτονικής του, τη μελέτη φαινομένων παραμόρφωσης, τη διαχείριση φάσματος και την προσαρμογή του στις απαιτήσεις των δικτύων 5G.

Στο πλαίσιο της ακαδημαϊκής και βιομηχανικής έρευνας, χρησιμοποιούνται ευρέως λογισμικά όπως το OptiSystem, το VPItransmissionMaker, και το MATLAB/Simulink, τα οποία προσφέρουν εξειδικευμένα modules για την προσομοίωση οπτικών και ασύρματων μεταδόσεων, διαμόρφωσης RF σημάτων, φασματικής πολυπλεξίας (WDM), και λειτουργίας φωτοανιχνευτών [80]. Τα εργαλεία αυτά επιτρέπουν την αξιολόγηση της επίδοσης σε όρους SNR, BER και καθυστέρησης, υπό διαφορετικά σενάρια φόρτου ή καναλιού.

Παράλληλα, αναπτύσσονται πειραματικές πλατφόρμες (testbeds) σε ερευνητικά κέντρα και πανεπιστήμια, οι οποίες ενσωματώνουν πραγματικό εξοπλισμό RoF για την υλοποίηση end-to-end πειραμάτων. Ενδεικτικά, το CTTC (Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya) στην Ισπανία έχει υλοποιήσει testbed βασισμένο σε RoF για μελέτη millimeter-wave συχνοτήτων μέσω οπτικής ίνας, ενώ το University of Essex στο Ηνωμένο Βασίλειο διαθέτει πλήρως λειτουργική RoF πλατφόρμα με δυνατότητα αξιολόγησης σε περιβάλλον μικροκυψελών [81].

Οι πλατφόρμες αυτές χρησιμοποιούνται για:

- προσομοίωση C-RAN και fronthaul τοπολογιών,
- υλοποίηση beamforming και CoMP τεχνικών σε συνδυασμό με RoF,
- δοκιμές φασματικής διαφάνειας για ταυτόχρονη εξυπηρέτηση 4G/5G/IoT [82].

Επιπλέον, ερευνητικά έργα όπως το 5G-Xhaul και το BlueSPACE της E.E. περιλαμβάνουν ενότητες RoF, στις οποίες δοκιμάζονται WDM RoF αρχιτεκτονικές και υλοποιούνται προσαρμοστικοί αλγόριθμοι για την ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης και των παρεμβολών [83].

Η χρήση τέτοιων εργαλείων και testbeds επιτρέπει όχι μόνο την επιτάχυνση της έρευνας αλλά και την καλύτερη προετοιμασία για εμπορική εφαρμογή. Η αξιολόγηση σε πειραματικό επίπεδο εξασφαλίζει την αξιοπιστία των RoF λύσεων και ενισχύει την κατανόηση κρίσιμων παραμέτρων σχεδίασης, όπως η τοποθέτηση RAUs, η ισορροπία ισχύος και η φασματική αποδοτικότητα. Εν τέλει, τα πειραματικά αποτελέσματα λειτουργούν ως γέφυρα μεταξύ θεωρίας και υλοποίησης, ενισχύοντας την εμπιστοσύνη των παρόχων στην τεχνολογία RoF ως μέρος της υποδομής 5G.

4.8 Συμβολή της RoF Τεχνολογίας στην Υλοποίηση Ultra-Dense Networks (UDNs)

Η τεχνολογία Radio over Fiber (RoF) διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην υλοποίηση Ultra-Dense Networks (UDNs), τα οποία αποτελούν θεμελιώδες συστατικό των δικτύων 5G. Η ανάγκη για κάλυψη υψηλής πυκνότητας χρηστών σε περιοχές με έντονη αστική δραστηριότητα – όπως εμπορικά κέντρα, πανεπιστημιούπολεις και σταθμοί μεταφορών – καθιστά αναγκαία την ανάπτυξη αρχιτεκτονικών με μεγάλο αριθμό μικροκυψελών (small cells), οι οποίες απαιτούν αποδοτικές, χαμηλού κόστους και χαμηλής καθυστέρησης συνδέσεις με το κεντρικό δίκτυο.

Η RoF τεχνολογία προσφέρει μια εξαιρετικά αποτελεσματική λύση σε αυτήν την πρόκληση, επιτρέποντας τη διανομή RF σημάτων μέσω οπτικής ίνας σε πολλαπλά Remote Radio Heads (RRHs) που είναι εγκατεστημένα σε πυκνές διαμορφώσεις. Η υψηλή χωρητικότητα και το μεγάλο εύρος ζώνης της οπτικής ίνας καθιστούν δυνατή την εξυπηρέτηση πολλών κυψελών μέσω μιας κοινής υποδομής, ενώ παράλληλα μειώνεται η ανάγκη για τοπική επεξεργασία σήματος στις μονάδες πρόσβασης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση της πολυπλοκότητας και του κόστους εξοπλισμού στην περιφέρεια του δικτύου, προσφέροντας σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις παραδοσιακές λύσεις [84].

Η δυνατότητα κεντρικής διαχείρισης και ελέγχου των RRHs μέσω του RoF επιτρέπει την εφαρμογή δυναμικών στρατηγικών βελτιστοποίησης κάλυψης και φόρτου. Επιπλέον, η RoF επιτυγχάνει χαμηλό jitter και καθυστέρηση, χαρακτηριστικά κρίσιμα για την υποστήριξη

υπηρεσιών που απαιτούν υψηλή αξιοπιστία, όπως το tactile internet και οι εφαρμογές με αυστηρούς χρονισμούς [85].

Η ενοποίηση των UDNs με την RoF τεχνολογία προσφέρει επίσης ευελιξία στο φάσμα μέσω τεχνικών όπως η φασματική επαναχρησιμοποίηση και ο δυναμικός καταμερισμός πόρων, βελτιώνοντας τη συνολική φασματική απόδοση του δικτύου. Η RoF διευκολύνει επίσης την ταχεία εγκατάσταση νέων σημείων πρόσβασης χωρίς σημαντική παρέμβαση στην υπάρχουσα υποδομή, κάτι που καθιστά τη λύση αυτή ιδανική για περιβάλλοντα με συνεχείς απαιτήσεις αναδιάταξης και επανασχεδιασμού της κυψελοειδούς δομής [86]. Συνολικά, η υλοποίηση UDNs με την υποστήριξη της RoF τεχνολογίας ενισχύει τη δικτυακή πυκνότητα χωρίς να θυσιάζει την αποδοτικότητα, προσφέροντας μία βιώσιμη λύση για την ικανοποίηση της εκθετικά αυξανόμενης ζήτησης σε δεδομένα, που αποτελεί το σήμα κατατεθέν της εποχής του 5G.

4.9 Ευκολία Αναβάθμισης και Υποστήριξη Μελλοντικών Εξελίξεων (Future-Proofing)

Η τεχνολογία Radio over Fiber (RoF) διακρίνεται για την ικανότητά της να προσαρμόζεται σε μελλοντικές εξελίξεις, προσφέροντας ένα ιδιαίτερα ευέλικτο και επεκτάσιμο υπόβαθρο για τηλεπικοινωνιακές υποδομές. Αυτή η ιδιότητα της «μελλοντικής θωράκισης» (future-proofing) είναι κρίσιμη για τα δίκτυα 5G και πέραν αυτών, καθώς η ραγδαία αύξηση των απαιτήσεων σε δεδομένα, εύρος ζώνης και ποιότητα υπηρεσίας καθιστά αναγκαία την ύπαρξη αρχιτεκτονικών που μπορούν να αναβαθμίζονται χωρίς ριζική ανακατασκευή.

Η RoF βασίζεται σε οπτική ίνα που προσφέρει υπερβολικά μεγάλο φάσμα μετάδοσης σε σχέση με τις απαιτήσεις των σημερινών συστημάτων. Αυτό σημαίνει ότι, όταν οι τεχνολογίες κινητής τηλεφωνίας μετακινηθούν προς υψηλότερες ζώνες συχνοτήτων (π.χ. mmWave ή ακόμη και THz), οι ίδιες οπτικές υποδομές θα μπορούν να υποστηρίξουν τη μεταφορά των σημάτων χωρίς ανάγκη εκτεταμένων φυσικών παρεμβάσεων [87]. Παράλληλα, η RoF μπορεί να φιλοξενήσει διάφορους τύπους σημάτων – αναλογικά, ψηφιακά ή υβριδικά – γεγονός που τη καθιστά τεχνολογικά ουδέτερη και συνεπώς ανθεκτική στην εναλλαγή προτύπων [88].

Επιπλέον, η ενσωμάτωση της RoF τεχνολογίας σε cloud-based υποδομές, όπως το Cloud-RAN (C-RAN), προσφέρει δυνατότητα εικονικοποίησης των λειτουργιών του δικτύου. Αυτό επιτρέπει την απομακρυσμένη αναβάθμιση λογισμικού (software-defined upgrades),

χωρίς να απαιτούνται φυσικές επεμβάσεις στους κόμβους πρόσβασης, συμβάλλοντας αποφασιστικά στη μείωση του κόστους και του χρόνου ανανέωσης του δικτύου [89].

Η ευκολία υποστήριξης νέων φασματικών περιοχών, η δυνατότητα συμβατότητας με πολλαπλές τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης (Multi-RAT), και η ελαχιστοποίηση των απαιτήσεων για συντήρηση εξοπλισμού, ενισχύουν το στρατηγικό πλεονέκτημα της RoF ως πλατφόρμας για μακροπρόθεσμη δικτυακή βιωσιμότητα. Σε συνδυασμό με τη συνεχιζόμενη πτώση του κόστους των οπτικοηλεκτρονικών διατάξεων, η τεχνολογία RoF τοποθετείται ως μία από τις πιο προσαρμόσιμες και μελλοντικά έτοιμες λύσεις για το οικοσύστημα του 5G και των μελλοντικών γενεών κινητών επικοινωνιών [90].

4.10 Ανθεκτικότητα σε Παρεμβολές και Ηλεκτρομαγνητικό Θόρυβο

Η τεχνολογία Radio over Fiber (RoF) παρουσιάζει υψηλή ανθεκτικότητα στις παρεμβολές και στον ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο (Electromagnetic Interference – EMI), ένα χαρακτηριστικό ιδιαίτερα σημαντικό για την αξιοπιστία και σταθερότητα των 5G δικτύων. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεταλλικές καλωδιώσεις, οι οπτικές ίνες που χρησιμοποιούνται στα RoF δίκτυα δεν επηρεάζονται από εξωτερικά ηλεκτρομαγνητικά πεδία, προσφέροντας σχεδόν πλήρη ανοσία σε πηγές παρεμβολών, όπως ηλεκτρομηχανολογικά συστήματα, ασύρματες εκπομπές άλλων συχνοτήτων ή βιομηχανικό εξοπλισμό.

Η ικανότητα των RoF συστημάτων να μεταφέρουν RF σήματα μέσω φωτός χωρίς να επιβαρύνονται από cross-talk και παλμογενείς παρεμβολές, διασφαλίζει τη σταθερότητα της σύνδεσης ακόμη και σε περιβάλλοντα με υψηλή πυκνότητα ηλεκτρονικών συστημάτων, όπως βιομηχανικές εγκαταστάσεις ή πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές. Επιπλέον, η χρήση μονοτροπικών ινών μειώνει τις απώλειες και βελτιώνει την απομόνωση καναλιών, ενισχύοντας περαιτέρω την ποιότητα σήματος.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η μείωση των παρεμβολών έχει σημαντικότερες επιπτώσεις όσο αυξάνονται οι συχνότητες λειτουργίας, όπως στην περίπτωση των mmWave ή ακόμη και sub-THz επικοινωνιών. Εκεί, οποιαδήποτε παραμόρφωση του σήματος ή θόρυβος μπορεί να προκαλέσει αισθητή υποβάθμιση της ποιότητας υπηρεσίας (QoS), ιδίως σε εφαρμογές που απαιτούν άμεση επικοινωνία και υψηλό ρυθμό δεδομένων. Η RoF αρχιτεκτονική, λόγω της οπτικής της φύσης, εξασφαλίζει ότι το σήμα παραμένει καθαρό και απαλλαγμένο από παρεμβολές κατά τη μεταφορά του από τον πυρήνα του δικτύου προς τις περιφερειακές μονάδες.

Επιπλέον, η υψηλή συμβατότητα της RoF με τεχνικές ψηφιακής διαμόρφωσης και η ικανότητά της να μεταφέρει πολύπλοκα σήματα με ακρίβεια, περιορίζει τις πιθανότητες σφάλματος και αυξάνει την ευρωστία του συστήματος απέναντι σε περιβαλλοντικούς και τεχνολογικούς παράγοντες που επιδρούν στην ποιότητα μετάδοσης. Αυτό καθιστά την τεχνολογία RoF ιδιαίτερα κατάλληλη για την υποστήριξη κρίσιμων υποδομών και εφαρμογών σε περιβάλλοντα με δυσμενείς συνθήκες εκπομπής και μετάδοσης.

4.11 Δυνατότητες για Ενοποίηση Ετερογενών Δικτύων (HetNets)

Η τεχνολογία Radio over Fiber (RoF) προσφέρει θεμελιώδη υποστήριξη στην υλοποίηση και διαχείριση ετερογενών δικτύων (Heterogeneous Networks – HetNets), τα οποία αποτελούν βασικό δομικό στοιχείο της αρχιτεκτονικής των δικτύων 5G. Στο πλαίσιο των HetNets, ποικίλοι τύποι κυψελών, όπως macro, micro, pico και femto cells, συνυπάρχουν και λειτουργούν σε διαφορετικές συχνότητες και με διαφορετικά επίπεδα ισχύος, δημιουργώντας ένα πολυεπίπεδο περιβάλλον πρόσβασης. Η RoF τεχνολογία διευκολύνει τη λειτουργική σύγκλιση αυτών των ετερογενών υποδομών, προσφέροντας μια ενιαία οπτική πλατφόρμα μεταφοράς σημάτων που μειώνει την πολυπλοκότητα και ενισχύει τη συνοχή του δικτύου [91].

Η οπτική φύση της RoF επιτρέπει τη συγχώνευση σημάτων από διαφορετικές τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης (Multi-RAT), όπως LTE, 5G NR, Wi-Fi ή IoT πρότυπα, χωρίς να απαιτείται ξεχωριστή φυσική υποδομή για κάθε περίπτωση. Αυτό καθιστά δυνατή την ενοποιημένη διαχείριση φάσματος και πόρων, καθώς και τη βέλτιστη απόδοση των μηχανισμών handover και traffic steering, κρίσιμων για την εμπειρία χρήστη σε περιβάλλοντα υψηλής κινητικότητας ή πολυπλοκότητας [92].

Η χρήση της RoF ως βασικού πυρήνα για την υλοποίηση HetNets ενισχύει τη δυνατότητα κεντροποιημένου ελέγχου μέσω Cloud-RAN (C-RAN), επιτρέποντας την αποδοτική διαχείριση των διαφορετικών επιπέδων κυψελοειδούς πρόσβασης. Ταυτόχρονα, προσφέρει σημαντική μείωση του latency μεταξύ των επιμέρους στοιχείων του δικτύου, γεγονός που είναι καθοριστικό για εφαρμογές με αυστηρές απαιτήσεις καθυστέρησης, όπως η αυτόνομη οδήγηση και η βιομηχανική αυτοματοποίηση [93].

Επιπλέον, η ευελιξία της RoF τεχνολογίας στη μετάδοση διαφορετικών μορφών διαμόρφωσης και το μεγάλο εύρος ζώνης των οπτικών ινών ενισχύουν την ικανότητα ενσωμάτωσης τόσο legacy όσο και emerging τεχνολογιών. Αυτό επιτρέπει τη σταδιακή μετάβαση σε πιο προηγμένες εκδοχές του 5G και την ελαχιστοποίηση των αναταράξεων κατά τη διάρκεια της τεχνολογικής μετάβασης ή αναβάθμισης των υποδομών [94]. Η συμβολή της

RoF στην επίτευξη πραγματικά ολιστικών HetNets ενισχύει τη γενικότερη αποδοτικότητα και βιωσιμότητα των 5G οικοσυστημάτων, ενώ δημιουργεί τις προϋποθέσεις για τη λειτουργία ευφυών, δυναμικά επεκτάσιμων και αξιόπιστων δικτύων του μέλλοντος.

5. Προκλήσεις και Περιορισμοί στην Εφαρμογή του RoF

5.1 Τεχνικές Προκλήσεις

Παρά τα πολλαπλά πλεονεκτήματα της τεχνολογίας Radio over Fiber (RoF), η εμπορική της υλοποίηση συνοδεύεται από σημαντικές τεχνικές προκλήσεις, οι οποίες σχετίζονται με την πολυπλοκότητα της οπτικοηλεκτρονικής μετάδοσης, τη διαχείριση του σήματος και την αλληλεπίδραση των υποσυστημάτων σε ένα περιβάλλον χαμηλής καθυστέρησης και υψηλής απόδοσης, όπως απαιτείται στα δίκτυα πέμπτης γενιάς (5G).

Μία από τις βασικότερες τεχνικές δυσκολίες είναι η μη γραμμικότητα των οπτικών στοιχείων, όπως τα laser, οι ενισχυτές και οι φωτοανιχνευτές, που μπορεί να προκαλέσουν παραμορφώσεις στο μεταδιδόμενο ραδιοσήμα. Οι παραμορφώσεις αυτές είναι ιδιαίτερα έντονες σε αναλογικά RoF συστήματα (A-RoF), καθώς η απευθείας διαμόρφωση του οπτικού σήματος από το ραδιοσήμα ενισχύει την ευαισθησία σε θόρυβο και αλλοιώσεις [95]. Επιπλέον, η φασματική διασπορά (chromatic dispersion) των οπτικών ινών μπορεί να οδηγήσει σε επιβράδυνση ή αποσυγχρονισμό συχνοτήτων, ειδικά σε εφαρμογές με μεγάλη απόσταση ή ευρύ φάσμα [96].

Η απαιτούμενη ακρίβεια στον συγχρονισμό μεταξύ του σταθμού βάσης (Baseband Unit – BBU) και των απομακρυσμένων μονάδων (Remote Radio Heads – RRHs) αποτελεί επίσης κρίσιμη πρόκληση. Η αδυναμία επίτευξης σταθερού χρονισμού και ελέγχου φάσης (jitter) μπορεί να οδηγήσει σε απώλειες πακέτων, αυξημένη καθυστέρηση και υποβάθμιση ποιότητας υπηρεσίας (QoS), επηρεάζοντας ιδιαιτέρως εφαρμογές real-time όπως το tactile internet [97].

Επιπρόσθετα, η διαχείριση του φάσματος σε περιβάλλον πολυτεχνικών υπηρεσιών (multi-RAT) απαιτεί RoF συστήματα υψηλής φασματικής καθαρότητας και διαφάνειας, κάτι που είναι δύσκολο να διασφαλιστεί χωρίς εξειδικευμένα φίλτρα, τεχνικές αποδιαμόρφωσης και δυναμική κατανομή φάσματος [98]. Η πολυπλοκότητα αυτή αυξάνεται με την υιοθέτηση millimeter-wave συχνοτήτων (FR2 band), οι οποίες έχουν ενισχυμένη εξασθένιση, αυξημένες απαιτήσεις στην ενίσχυση σήματος, και υψηλή ευαισθησία σε παρεμβολές [99].

Τέλος, τα πρότυπα διαλειτουργικότητας (interoperability standards) μεταξύ κατασκευαστών εξοπλισμού και δικτυακών πρωτοκόλλων RoF δεν είναι ακόμη πλήρως ενοποιημένα. Η απουσία ενός ενιαίου πλαισίου για την υποστήριξη τόσο αναλογικών όσο και ψηφιακών RoF υλοποιήσεων περιορίζει τη δυνατότητα ευρείας υιοθέτησης της τεχνολογίας από παρόχους και οδηγεί σε κατακερματισμό λύσεων [100].

Παρά τις παραπάνω προκλήσεις, η τεχνολογική πρόοδος σε τομείς όπως η φωτονική ολοκλήρωση (photonic integration), οι ενισχυτές χαμηλού θορύβου (low-noise amplifiers), και τα ευφυή συστήματα διαχείρισης πόρων μέσω AI προσφέρουν δυνατότητες υπέρβασης αυτών των περιορισμών, ανοίγοντας τον δρόμο για ευρύτερη, πιο σταθερή και αποδοτική εφαρμογή του RoF στα 5G και μελλοντικά 6G δίκτυα.

5.2 Οικονομικοί Περιορισμοί

Παρότι η τεχνολογία RoF προσφέρει σαφή πλεονεκτήματα σε όρους ταχύτητας, ευελιξίας και φασματικής διαφάνειας, η οικονομική της εφαρμογή αποτελεί έναν από τους βασικούς φραγμούς για την ευρεία υιοθέτησή της σε εμπορικά δίκτυα 5G, ειδικά σε περιφέρειες με περιορισμένους πόρους ή ανεπτυγμένες υφιστάμενες υποδομές.

Ο πρώτος σημαντικός περιορισμός αφορά το υψηλό αρχικό κόστος εγκατάστασης (CAPEX). Η υλοποίηση RoF απαιτεί εξειδικευμένα οπτικοηλεκτρονικά εξαρτήματα, όπως laser διαμόρφωσης RF, έντονα ευαίσθητους φωτοανιχνευτές, ενισχυτές οπτικής ισχύος, και διατάξεις για σταθεροποίηση φάσης, τα οποία αυξάνουν το κόστος εξοπλισμού σε σύγκριση με παραδοσιακές λύσεις fiber ή wireless-only [101]. Το κόστος αυτό είναι ιδιαίτερα επιβαρυντικό σε αγορές χαμηλής ζήτησης ή περιοχές με χαμηλή πληθυσμιακή πυκνότητα, όπου η απόσβεση της επένδυσης είναι χρονοβόρα.

Επιπλέον, το λειτουργικό κόστος (OPEX) συνδέεται με την ανάγκη για εξειδικευμένο προσωπικό, τη συντήρηση ευαίσθητων φωτοσυστημάτων και την απαίτηση για τακτικό έλεγχο ποιότητας σήματος (QoS monitoring), ώστε να διασφαλιστεί η αδιάλειπτη λειτουργία του RoF κάτω από αυστηρές προδιαγραφές καθυστέρησης [102].

Ένας ακόμη παράγοντας που επιβαρύνει το κόστος είναι η απουσία πλήρους κανονιστικής τυποποίησης, που οδηγεί σε ανάγκη για custom λύσεις μεταξύ διαφορετικών κατασκευαστών, χωρίς δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης ή εύκολης αναβάθμισης, κάτι που επηρεάζει αρνητικά τη βιωσιμότητα της επένδυσης [103].

Σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες fronthaul, όπως τα CPRI/eCPRI ή τα wireless mmWave links, το RoF εμφανίζει μεγαλύτερο κόστος ανά bit, ιδίως σε αρχιτεκτονικές όπου απαιτείται μεγάλη πυκνότητα απομακρυσμένων ραδιοκεφαλών (RAUs) [104]. Επιπρόσθετα, η χρήση αναλογικών RoF (A-RoF) συστημάτων – αν και τεχνικά απλούστερη – εντείνει την ανάγκη για σταθερές και υψηλής ποιότητας οπτικές γραμμές, γεγονός που αυξάνει τις επενδυτικές απαιτήσεις σε οπτική ίνα και παθητικό εξοπλισμό.

Παρά τα παραπάνω, η ανάπτυξη τεχνολογιών όπως η φωτονική ολοκλήρωση (photonic integration) και τα RoF-on-chip κυκλώματα δείχνει να μειώνει σημαντικά το κόστος ανά μονάδα και να καθιστά την τεχνολογία πιο ελκυστική για μαζική υλοποίηση σε νέες αγορές [105]. Επιπλέον, κυβερνητικά προγράμματα ενίσχυσης 5G υποδομών και στρατηγικές συνεργασίες μεταξύ παρόχων και κατασκευαστών μπορούν να μετριάσουν το οικονομικό βάρος και να δημιουργήσουν οικοσυστήματα χαμηλότερου κόστους μέσω οικονομιών κλίμακας.

5.3 Προκλήσεις Σχεδίασης και Υλοποίησης

Η υλοποίηση Radio over Fiber (RoF) συστημάτων στα δίκτυα 5G απαιτεί λεπτομερή σχεδίαση, προσαρμογή στις υφιστάμενες υποδομές και επίλυση πολύπλοκων ζητημάτων διασύνδεσης, συγχρονισμού και ενεργειακής απόδοσης. Οι προκλήσεις αυτές αναδεικνύονται κυρίως στο στάδιο σχεδίασης της αρχιτεκτονικής και κατά την εγκατάσταση και λειτουργία των δικτύων σε πραγματικές συνθήκες.

Ένα από τα βασικότερα προβλήματα σχεδίασης είναι η τοπολογία του fronthaul και η τοποθέτηση των Remote Antenna Units (RAUs). Η πυκνή χωροθέτηση κυψελών (small cells) για κάλυψη 5G συχνοτήτων απαιτεί μεγάλη ακρίβεια στον σχεδιασμό, ώστε να εξισορροπηθούν η απόδοση, το κόστος και η αποφυγή παρεμβολών. Η χρήση RoF επιβάλλει συγκεκριμένες αποστάσεις μεταξύ της κεντρικής μονάδας (Central Office) και των RAUs, ενώ η ανάγκη για χαμηλή καθυστέρηση περιορίζει την ελευθερία στον σχεδιασμό δικτύου [106].

Επιπλέον, η επιλογή μεταξύ αναλογικού (A-RoF) και ψηφιακού (D-RoF) μοντέλου σχεδίασης επηρεάζει τη συνολική απόδοση. Το A-RoF προσφέρει απλούστερη αρχιτεκτονική αλλά είναι πιο ευάλωτο σε παραμορφώσεις και απαιτεί υψηλής ποιότητας οπτικό εξοπλισμό. Αντίθετα, το D-RoF προσφέρει καλύτερη ανοχή σε παρεμβολές, αλλά αυξάνει την πολυπλοκότητα του εξοπλισμού στις απομακρυσμένες μονάδες και απαιτεί αυξημένη υπολογιστική ισχύ [107].

Ακόμη, οι προκλήσεις διαλειτουργικότητας (interoperability) μεταξύ εξοπλισμού διαφορετικών κατασκευαστών είναι κρίσιμες. Η απουσία ενιαίων τεχνικών προδιαγραφών ή πλήρως υιοθετημένων διεθνών προτύπων για RoF δημιουργεί προβλήματα στην ένταξη νέων συσκευών στο δίκτυο και στην ενοποίηση με υφιστάμενες υποδομές backhaul ή core [108].

Η ενεργειακή κατανάλωση αποτελεί άλλη μία σχεδιαστική πρόκληση. Οι απομακρυσμένες μονάδες απαιτούν ενίσχυση RF σήματος, λειτουργία λέιζερ και φωτοανιχνευτών, καθώς και σταθεροποίηση θερμοκρασίας, κάτι που μπορεί να αυξήσει δραστικά την κατανάλωση, ειδικά σε περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας RAUs. Η απαίτηση για ενεργειακά αποδοτικές λύσεις σε ένα περιβάλλον «πράσινων δικτύων» οδηγεί στην ανάγκη για ενσωμάτωση ενεργειακά ευαίσθητων σχεδιαστικών αρχών [109].

Τέλος, από τεχνικής πλευράς, η συνύπαρξη RoF με άλλες τεχνολογίες (π.χ. passive optical networks – PONs ή free-space optics – FSO) δημιουργεί επιπλέον προκλήσεις σχεδίασης. Η ανάγκη για ευελιξία και modular ανάπτυξη υποχρεώνει τους σχεδιαστές να λαμβάνουν υπόψη διαφορετικά σενάρια ανάπτυξης, κυκλοφοριακές απαιτήσεις, και τεχνικούς περιορισμούς της περιοχής εγκατάστασης [110]. Η αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων απαιτεί ολιστική προσέγγιση, όπου η σχεδίαση RoF συστημάτων ενσωματώνει όχι μόνο τις τεχνικές παραμέτρους αλλά και τους οικονομικούς, ενεργειακούς και λειτουργικούς περιορισμούς του κάθε περιβάλλοντος.

5.4 Ζητήματα Συμβατότητας και Διαλειτουργικότητας

Η ενσωμάτωση της τεχνολογίας Radio over Fiber (RoF) σε υπάρχουσες και μελλοντικές υποδομές δικτύων 5G συνοδεύεται από σημαντικές προκλήσεις συμβατότητας και διαλειτουργικότητας. Τα δίκτυα πέμπτης γενιάς βασίζονται στη συνύπαρξη και συνεργασία διαφορετικών τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης (Multi-RAT), περιλαμβάνοντας LTE, 5G NR, Wi-Fi, IoT πρωτόκολλα και άλλα. Στο πλαίσιο αυτό, η RoF καλείται να υποστηρίξει ταυτόχρονα τη μεταφορά σημάτων από ετερογενή πρωτόκολλα, λειτουργώντας ως ενιαία πλατφόρμα μεταφοράς μέσω οπτικών ινών. Ωστόσο, η επίτευξη διαλειτουργικότητας απαιτεί την υιοθέτηση κοινών προτύπων, συμβατών διεπαφών (interfaces) και ευέλικτων μηχανισμών ελέγχου που να μπορούν να επικοινωνούν αποτελεσματικά με διάφορους τύπους σταθμών βάσης και συστημάτων μετάδοσης [89].

Επιπλέον, η RoF τεχνολογία καλείται να συμβαδίσει με την ποικιλομορφία υλοποιήσεων από διαφορετικούς κατασκευαστές (multi-vendor περιβάλλοντα), καθώς και με υποδομές διαφορετικών παρόχων δικτύου. Η έλλειψη εναρμονισμένων προδιαγραφών και

διεθνών προτύπων για την αναλογική και ψηφιακή μετάδοση ραδιοσημάτων μέσω οπτικών μέσων δημιουργεί επιπλοκές κατά την υλοποίηση πολυπλέκτη, διαχωριστή ή ενισχυτών RoF που να μπορούν να λειτουργούν σε διαφορετικά περιβάλλοντα χωρίς αναπροσαρμογή [90].

Παράλληλα, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι μηχανισμοί χρονισμού και συγχρονισμού σε πραγματικό χρόνο. Το RoF βασίζεται στην ακρίβεια της φασματικής αντιστοίχισης μεταξύ του ραδιοσήματος και της οπτικής μεταφοράς. Σε δίκτυα C-RAN και ultra-dense networks (UDNs), η απουσία ενιαίου χρονικού ελέγχου μπορεί να οδηγήσει σε ασυμβατότητες κατά τη διαδικασία της handover ή στην υποβάθμιση της απόδοσης λόγω jitter και καθυστερήσεων [91]. Εν κατακλείδι, η επιτυχής ενσωμάτωση της RoF τεχνολογίας σε ένα ετερογενές και δυναμικά μεταβαλλόμενο 5G οικοσύστημα προϋποθέτει συντονισμένες προσπάθειες στην κατεύθυνση της τυποποίησης, της υιοθέτησης ανοικτών αρχιτεκτονικών, καθώς και της ανάπτυξης έξυπνων συστημάτων διαχείρισης και προσαρμογής σε πραγματικό χρόνο.

5.5 Περιορισμοί σε Απόδοση λόγω Μη Γραμμικών Φαινομένων

Παρά τα πολυάριθμα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας Radio over Fiber (RoF), η απόδοσή της επηρεάζεται σημαντικά από τη δράση μη γραμμικών φαινομένων, τα οποία εκδηλώνονται κατά τη μεταφορά ραδιοσυχνοτήτων μέσω οπτικών ινών και την επεξεργασία των σημάτων σε αναλογική μορφή. Αυτά τα φαινόμενα, αν δεν αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά, μπορούν να υποβαθμίσουν τη φασματική πιστότητα και την ποιότητα υπηρεσίας (QoS), γεγονός ιδιαίτερα κρίσιμο σε εφαρμογές 5G υψηλών απαιτήσεων.

Ένα από τα πλέον γνωστά μη γραμμικά φαινόμενα είναι η παραμόρφωση τρίτης τάξης (Third-Order Intermodulation Distortion – IMD3), η οποία προκαλεί την εμφάνιση ανεπιθύμητων συνιστωσών εντός της ζώνης μετάδοσης, επιβαρύνοντας τον λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR). Παρόμοιες επιπτώσεις επιφέρει η μη γραμμικότητα των laser ή των electro-optic modulators, που συχνά προκαλεί φασματική παραμόρφωση του αρχικού σήματος RF κατά τη μετάβασή του στην οπτική ζώνη [92].

Επιπλέον, η μη γραμμική διασπορά στην ίνα (nonlinear chromatic dispersion), ειδικά σε υψηλές ταχύτητες και συχνότητες όπως αυτές των mmWave, ενισχύει τα φαινόμενα συμβολικής παρεμβολής (intersymbol interference – ISI), αλλοιώνοντας το χρονισμό των παλμών και επιβαρύνοντας τη δυνατότητα αποκωδικοποίησης των δεδομένων. Η επίδραση αυτή γίνεται ακόμη πιο έντονη σε αρχιτεκτονικές που περιλαμβάνουν απομακρυσμένους ραδιοκεφαλές (RRHs) με απουσία τοπικής επεξεργασίας σήματος [93].

Οι τεχνικές αντιστάθμισης περιλαμβάνουν τόσο hardware λύσεις (π.χ. linearized modulators, οπτικά φίλτρα με ελεγχόμενη απόκριση) όσο και software-οριζόμενες τεχνικές, όπως προδιαμόρφωση (predistortion), ψηφιακή επεξεργασία σήματος (DSP), και μηχανισμούς αυτόματης βαθμονόμησης. Ωστόσο, η χρήση τέτοιων λύσεων αυξάνει την πολυπλοκότητα και το κόστος, κάτι που συχνά αντιβαίνει στους στόχους της RoF τεχνολογίας για απλότητα και οικονομία στην πλευρά πρόσβασης του δικτύου [94].

Επομένως, η επιτυχής εφαρμογή της RoF απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό με στόχο την ελαχιστοποίηση των μη γραμμικών επιπτώσεων, ιδίως στις περιπτώσεις υψηλών μεταφορικών ταχυτήτων και φασματικής πυκνότητας. Η επίτευξη αυτής της ισορροπίας αποτελεί κρίσιμο ζητούμενο για την αξιοπιστία και τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα της τεχνολογίας στο οικοσύστημα των δικτύων 5G.

6. Τελευταίες Εξελίξεις και Μελέτες Περίπτωσης

6.1 Πρόσφατες Εξελίξεις στην Τεχνολογία RoF

Η τεχνολογία Radio over Fiber (RoF) συνεχίζει να εξελίσσεται δυναμικά, ενσωματώνοντας καινοτόμες λύσεις για την υποστήριξη των αυξημένων απαιτήσεων των δικτύων 5G και των μελλοντικών 6G. Οι πρόσφατες εξελίξεις επικεντρώνονται στην αύξηση της χωρητικότητας, τη μείωση της καθυστέρησης και την ενίσχυση της ευελιξίας των δικτύων.

6.1.1. Ενοποίηση mmWave και sub-THz σημάτων μέσω RoF

Η συνεχής απαίτηση για υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης, χαμηλότερη καθυστέρηση και ευρύτερο φάσμα στα δίκτυα 5G και 6G, οδηγεί στην αξιοποίηση συχνοτήτων millimeter-wave (mmWave) και sub-terahertz (sub-THz). Η τεχνολογία Radio over Fiber (RoF) αποτελεί κεντρικό μηχανισμό υποστήριξης αυτών των φασματικών περιοχών, καθώς εξασφαλίζει αποδοτική μεταφορά των RF σημάτων μέσω οπτικής ίνας με ελάχιστη υποβάθμιση.

Πρόσφατη μελέτη δημοσιευμένη στο *Nature Communications* παρουσίασε ενοποιημένη πλατφόρμα RoF που επιτυγχάνει μετάδοση σημάτων σε πολλαπλές ζώνες – συγκεκριμένα στα 20 GHz, 60 GHz και 100 GHz – χρησιμοποιώντας τεχνικές injection locking σε laser DML και πολλαπλούς φακούς collimation για την οπτική εκπομπή [111]. Το σύστημα κατάφερε να επιτύχει συνολική ταχύτητα 70 Gb/s με σταθερότητα σήματος σε απόσταση 1,5 χλμ., ενώ ο συνδυασμός sub-THz και mmWave φασμάτων επέτρεψε την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση διαφορετικών κατηγοριών υπηρεσιών, όπως:

- uRLLC (Ultra-Reliable Low Latency Communications)
- eMBB (enhanced Mobile Broadband)
- massive IoT

Η ενότητα φασματικής χρήσης μέσω RoF καθιστά δυνατή τη μετάδοση πολλών τύπων σημάτων μέσω μιας ενιαίας οπτικής υποδομής, μειώνοντας την ανάγκη για πολλαπλά φυσικά κανάλια. Αυτή η προσέγγιση εξυπηρετεί τη στρατηγική των παρόχων για σύγκλιση δικτύων (converged networks) και μείωση κόστους.

Τεχνικά, η πρόκληση της μετάδοσης σε sub-THz φάσμα επιλύθηκε μέσω της χρήσης τεχνικών low-phase-noise signal generation και digital predistortion, ώστε να διατηρηθεί η ευκρίνεια του σήματος σε περιβάλλοντα με αυξημένη εξασθένιση. Η επίδοση του συστήματος ενισχύθηκε από φωτονικά ολοκληρωμένα κυκλώματα (PICs), που ελαχιστοποιούν τις απώλειες και σταθεροποιούν τη μετάδοση. Η δυνατότητα συνδυασμένης μεταφοράς mmWave και sub-THz σε ένα δίκτυο RoF ανοίγει νέους ορίζοντες για τη μελλοντική πολυκαναλική εξυπηρέτηση και δυναμική διαχείριση φάσματος, προετοιμάζοντας το έδαφος για τις ανάγκες των δικτύων 6G που αναμένεται να λειτουργούν ευρέως στις ζώνες πάνω από τα 100 GHz.

6.1.2. Συνύπαρξη ψηφιακών και αναλογικών RoF υπηρεσιών σε ζωντανά δίκτυα

Μία από τις πιο κρίσιμες τεχνολογικές προκλήσεις αλλά και ευκαιρίες για την ανάπτυξη των σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών δικτύων αποτελεί η δυνατότητα ταυτόχρονης υποστήριξης ψηφιακών (D-RoF) και αναλογικών (A-RoF) υπηρεσιών στο ίδιο υποδομικό περιβάλλον. Η σύγκλιση αυτών των τεχνολογιών υπό ενιαία αρχιτεκτονική αποσκοπεί στη βελτιστοποίηση πόρων, τη μείωση κόστους και τη μεγιστοποίηση της φασματικής αποδοτικότητας.

Πρόσφατη μελέτη που εφαρμόστηκε σε ζωντανό παραγωγικό δίκτυο απέδειξε την πρακτική δυνατότητα συνύπαρξης ψηφιακών συνεκτικών (coherent) RoF σημάτων με αναλογικές μεταδόσεις σε mmWave και sub-THz φάσματα, με τη χρήση του μοντέλου Optical Spectrum as a Service (OSaaS) [112]. Η πλατφόρμα αυτή επέτρεψε την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση διαφορετικών τύπων υπηρεσιών, όπως υψηλής ταχύτητας eMBB, ευαίσθητες σε καθυστέρηση uRLLC και IoT, πάνω από την ίδια φυσική οπτική υποδομή.

Η εφαρμογή της συνύπαρξης επιτεύχθηκε με:

- φασματική απομόνωση μέσω WDM (Wavelength Division Multiplexing),

- δυναμική κατανομή φάσματος βάσει QoS απαιτήσεων, και
- χρήση προσαρμοστικής διαμόρφωσης (adaptive modulation) ανάλογα με το είδος του σήματος (ψηφιακό ή αναλογικό).

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η συνύπαρξη είναι όχι μόνο τεχνικά εφικτή, αλλά και ενεργειακά και οικονομικά αποδοτική, δεδομένου ότι μειώνεται η ανάγκη για παράλληλες ή επαναλαμβανόμενες υποδομές. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε πραγματικό δίκτυο πρόσβασης και μεταφοράς (access-metro), επιβεβαιώνοντας την καταλληλότητα του RoF για converged 5G/6G αρχιτεκτονικές.

Η σημασία αυτής της εξέλιξης είναι διπλή:

1. Παρέχει μεταβατική λύση μεταξύ αναλογικών και ψηφιακών υλοποιήσεων, επιτρέποντας σταδιακή μετάβαση των παρόχων χωρίς απότομες επενδυτικές μεταβολές.
2. Υποστηρίζει την ανοικτή πρόσβαση σε φάσμα και οπτικές υποδομές βάσει πολιτικών network slicing και virtualization, ιδίως σε περιβάλλοντα με πολλαπλούς παρόχους ή παροχή υπηρεσιών B2B.

Η συνύπαρξη ψηφιακού και αναλογικού RoF μέσω OSaaS ενισχύει έτσι την προσαρμοστικότητα και βιωσιμότητα των μελλοντικών τηλεπικοινωνιακών υποδομών, ενόψει των αυξανόμενων απαιτήσεων των 6G εφαρμογών και υπηρεσιών.

6.1.3. Εφαρμογή τεχνικών γραμμικοποίησης για βελτίωση της απόδοσης

Ένα από τα πλέον καθοριστικά τεχνικά ζητήματα στα συστήματα Radio over Fiber (RoF), ειδικά στις αναλογικές διαμορφώσεις (A-RoF), είναι η μη γραμμικότητα των οπτικοηλεκτρονικών στοιχείων, όπως οι laser διαμορφωτές και οι φωτοανιχνευτές. Η μη γραμμική συμπεριφορά προκαλεί παραμορφώσεις σήματος, αυξημένο Bit Error Rate (BER) και υποβάθμιση της φασματικής αποδοτικότητας. Για τον λόγο αυτό, η γραμμικοποίηση των συστημάτων αποτελεί στρατηγικής σημασίας τεχνική για τη διατήρηση της απόδοσης, ιδίως σε δίκτυα υψηλών απαιτήσεων όπως το 5G και το μελλοντικό 6G.

Η πιο διαδεδομένη τεχνική που εφαρμόζεται είναι η ψηφιακή προδιαμόρφωση (Digital Predistortion – DPD). Μέσω DPD εφαρμόζεται μια αντίστροφη παραμόρφωση στο αρχικό σήμα πριν αυτό περάσει από το μη γραμμικό σύστημα, ώστε το τελικό σήμα στην έξοδο να προσεγγίζει το ιδανικό γραμμικό σήμα. Η εφαρμογή DPD έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική σε συστήματα RoF με ενισχυτές ισχύος RF και laser μεταβλητής απόκρισης,

οδηγώντας σε βελτίωση του λόγου σήματος προς παραμόρφωση (SDR) και της συνολικής ποιότητας μετάδοσης [113].

Μια άλλη προσέγγιση είναι η χρήση μοντέλων διαταραχής (perturbation theory) και τεχνικών adaptive filtering, τα οποία επιτρέπουν τη συνεχή εκτίμηση και αντιστάθμιση των μη γραμμικών συμπεριφορών σε πραγματικό χρόνο. Οι τεχνικές αυτές έχουν υλοποιηθεί επιτυχώς σε millimeter-wave A-RoF συστήματα για την υποστήριξη υπηρεσιών eMBB και URLLC σε περιβάλλοντα με ισχυρές απαιτήσεις σταθερότητας [114].

Επιπλέον, εφαρμόζεται η τεχνική feedforward linearization, κατά την οποία ένα δεύτερο σήμα – αντίγραφο της παραμόρφωσης – παράγεται και αφαιρείται ενεργά από το τελικό σήμα εξόδου. Αν και πιο πολύπλοκη, η μέθοδος αυτή προσφέρει υψηλή καταστολή παραμορφώσεων τρίτης τάξης (IMD3) και βελτιωμένο δυναμικό εύρος, κρίσιμο για την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλαπλών χρηστών [115].

Τα πειραματικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται σε πρόσφατες δημοσιεύσεις επιβεβαιώνουν ότι οι τεχνικές γραμμικοποίησης:

- αυξάνουν την ενεργειακή αποδοτικότητα,
- βελτιώνουν την ποιότητα υπηρεσίας (QoS),
- επιτρέπουν μεγαλύτερες αποστάσεις μετάδοσης, και
- διευκολύνουν τη συνύπαρξη πολλαπλών διαμορφώσεων στο ίδιο φάσμα.

Συνεπώς, η συστηματική ενσωμάτωση γραμμικοποίησης αποτελεί κρίσιμο παράγοντα επιτυχίας των RoF συστημάτων σε εφαρμογές 5G και πέραν αυτών, ιδιαίτερα στο πλαίσιο αρχιτεκτονικών converged access και C-RAN.

6.1.4. Ενσωμάτωση RoF και PoF για ταυτόχρονη μετάδοση δεδομένων και ενέργειας

Η αυξανόμενη ανάγκη για ευέλικτες, ενεργειακά αποδοτικές και αυτόνομες τηλεπικοινωνιακές υποδομές, ιδιαίτερα σε απομακρυσμένες ή δυσπρόσιτες περιοχές, έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη τεχνολογιών που συνδυάζουν μετάδοση δεδομένων και ενέργειας μέσω της ίδιας οπτικής ίνας. Στο πλαίσιο αυτό, η ενσωμάτωση του Radio over Fiber (RoF) με την τεχνολογία Power over Fiber (PoF) συνιστά καινοτόμα προσέγγιση με πολλαπλά λειτουργικά και περιβαλλοντικά οφέλη.

Η τεχνολογία PoF επιτρέπει τη μεταφορά οπτικής ενέργειας μέσω laser σε ειδικά διαμορφωμένες ίνες, η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω φωτοβολταϊκών κυψελών (PV cells) στο απομακρυσμένο άκρο. Η ενέργεια αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τροφοδοσία συσκευών όπως RAUs (Remote Antenna Units) ή αισθητήρες IoT, χωρίς την ανάγκη για ξεχωριστές ηλεκτρικές καλωδιώσεις [116].

Σε πρόσφατη πειραματική μελέτη παρουσιάστηκε λειτουργική ενσωμάτωση RoF και PoF, όπου ταυτόχρονα μεταφέρονταν:

- RF σήματα στα 60 GHz μέσω A-RoF, και
- οπτική ενέργεια ισχύος 1.5 W μέσω PoF σε απόσταση έως και 1 χιλιομέτρου με χρήση μονής ίνας [117].

Η εφαρμογή αυτή επιτεύχθηκε μέσω τεχνικών wavelength multiplexing, όπου τα δεδομένα και η ενέργεια μεταφέρονται σε διαφορετικά μήκη κύματος, αποφεύγοντας παρεμβολές και υποβάθμιση του σήματος. Η χρήση ενισχυμένων φωτοανιχνευτών και PV μετατροπέων στο άκρο του δικτύου επέτρεψε τη σταθερή λήψη RF σημάτων, ενώ παράλληλα τροφοδοτούνταν τοπικός εξοπλισμός με επάρκεια.

Η ενσωμάτωση RoF–PoF παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα:

- Μείωση κόστους εγκατάστασης μέσω εξάλειψης των ξεχωριστών καλωδιώσεων ισχύος,
- Απλοποίηση της ανάπτυξης δικτύου σε απομονωμένες ή κινητές υποδομές (π.χ. drones, θαλάσσιες πλατφόρμες),
- Αυξημένη ενεργειακή αυτονομία και βιωσιμότητα, ευθυγραμμισμένη με τις πράσινες πολιτικές των 5G/6G δικτύων.

Παρά τις τεχνικές προκλήσεις (απώλειες ενέργειας, ευαισθησία PV κυψελών, θερμική διαχείριση), η τεχνολογία RoF–PoF αναμένεται να διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο σε ειδικές κατηγορίες εφαρμογών, όπως έξυπνες υποδομές, στρατιωτικές επικοινωνίες, και αυτοματοποιημένες βιομηχανικές εγκαταστάσεις, ενισχύοντας την αυτονομία και ευελιξία του δικτύου πρόσβασης.

6.1.5. Ανάπτυξη εξειδικευμένων φωτοδιόδων για RoF εφαρμογές

Η φωτοανίχνευση αποτελεί κρίσιμο τεχνολογικό στοιχείο στα συστήματα Radio over Fiber (RoF), καθώς από την απόδοση των φωτοδιόδων εξαρτάται άμεσα η ποιότητα του σήματος RF που ανακτάται στην έξοδο του οπτικού συστήματος. Ιδίως στις υψηλές συχνότητες mmWave και sub-THz, απαιτούνται φωτοανιχνευτές με υψηλή απόκριση, ευρεία φασματική ζώνη και μεγάλη ισχύ κορεσμού, ώστε να εξασφαλιστεί σταθερή και ακριβής αποδιαμόρφωση.

Πρόσφατες ερευνητικές προσπάθειες επικεντρώθηκαν στην ανάπτυξη υψηλής ταχύτητας και ισχύος φωτοδιόδων, ειδικά για την C-band (1530–1565 nm), η οποία είναι η πλέον χρησιμοποιούμενη φασματική περιοχή στα σύγχρονα οπτικά συστήματα. Τα νέα αυτά φωτοηλεκτρονικά στοιχεία παρουσιάζουν:

- Bandwidth > 100 GHz,
- ισχύ κορεσμού άνω των 15 dBm, και
- χαμηλό λόγο θορύβου ($NEP < 10^{-12} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$) [118].

Ένα βασικό τεχνολογικό επίτευγμα είναι η υλοποίηση φωτοδιόδων βασισμένων σε InGaAs/Uni-Traveling Carrier Photodiodes (UTC-PDs), οι οποίες επιτυγχάνουν υψηλή γραμμικότητα και εξαιρετικά μικρό χρόνο απόκρισης. Οι διατάξεις αυτές είναι κατάλληλες για αναλογικά RoF (A-RoF) συστήματα σε δίκτυα πρόσβασης 5G και αποτελούν βασικό συστατικό στοιχείο για την υποστήριξη eMBB και URLLC εφαρμογών [119].

Επιπλέον, αναπτύχθηκαν μονάδες φωτοδιόδων τύπου array, οι οποίες επιτρέπουν παράλληλη αποδιαμόρφωση πολλαπλών καναλιών, προσφέροντας λύσεις υψηλής χωρητικότητας για RoF-over-WDM ή RoF με πολυπλεξία πόλωσης (PDM). Οι συστοιχίες αυτές μπορούν να ενσωματωθούν σε φωτονικά ολοκληρωμένα κυκλώματα (PICs), μειώνοντας το κόστος και τις διαστάσεις του εξοπλισμού, ενώ διευκολύνουν τη βιομηχανική παραγωγή [120].

Τέλος, στο πλαίσιο της τεχνολογίας RoF για 6G, ερευνητές προτείνουν την ανάπτυξη φωτοδιόδων με οργανικά ή γραφενικά υλικά, τα οποία επιτρέπουν καλύτερη θερμική συμπεριφορά, αυξημένο εύρος λειτουργίας και χαμηλό κόστος κατασκευής. Οι διατάξεις αυτές βρίσκονται ακόμη σε στάδιο δοκιμών, αλλά αποτελούν ελπιδοφόρα λύση για μαζική ενσωμάτωση RoF σε καταναλωτικές και βιομηχανικές εφαρμογές.

Συνολικά, οι εξελίξεις στις φωτοδιόδους ενισχύουν καθοριστικά τη γραμμικότητα, τη σταθερότητα, και την φασματική αποδοτικότητα των RoF συνδέσεων, διαμορφώνοντας το τεχνολογικό υπόβαθρο για ασφαλή και αποδοτική λειτουργία των μελλοντικών ασύρματων δικτύων.

6.2 Μελέτες Περίπτωσης

Η αξιολόγηση της τεχνολογίας Radio over Fiber (RoF) μέσω πραγματικών μελετών περίπτωσης αποκαλύπτει την πρακτική της απόδοση, τις τεχνικές προκλήσεις και τα οφέλη της σε περιβάλλοντα δικτύων 5G. Οι εφαρμογές αυτές επιβεβαιώνουν την ωριμότητα της τεχνολογίας και ενισχύουν την εμπιστοσύνη των παρόχων στην εμπορική της αξιοποίηση.

6.2.1. Μελέτη Περίπτωσης 1: 5G-PICTURE (Ευρωπαϊκή Ένωση)

Το ερευνητικό έργο 5G-PICTURE (5G Programmable Infrastructure Converging disaggregated neTwork and compUte Resources), που χρηματοδοτήθηκε από το πρόγραμμα Horizon 2020 της Ευρωπαϊκής Ένωσης, αποτελεί μια από τις πρώτες πειραματικές πλατφόρμες που ενσωμάτωσαν την τεχνολογία Radio over Fiber (RoF) σε δίκτυα πέμπτης γενιάς. Στόχος του έργου ήταν η δημιουργία μιας ολοκληρωμένης και ενοποιημένης υποδομής πρόσβασης (converged access) που συνδυάζει RoF fronthaul, παθητικά οπτικά δίκτυα (PONs), και virtualized λειτουργίες σε κοινό φυσικό υπόβαθρο [121].

Στο πλαίσιο του έργου, αναπτύχθηκε ένα πιλοτικό testbed στην πόλη του Bristol, το οποίο αξιοποιούσε RoF-WDM-PON αρχιτεκτονική για τη μετάδοση ραδιοσημάτων 5G μέσω οπτικών ινών. Η υποδομή περιλάμβανε απομακρυσμένες μονάδες (Remote Radio Heads – RRHs) οι οποίες συνδέονταν με κεντρικές μονάδες (BBUs) μέσω αναλογικού RoF διαύλου, ενσωματωμένου με τεχνικές πολυπλεξίας (Wavelength Division Multiplexing – WDM).

Τα αποτελέσματα του testbed υπήρξαν εντυπωσιακά:

- Επίτευξη end-to-end καθυστέρησης κάτω από 1,3 ms, ικανή να υποστηρίξει tactile internet και real-time video streaming.
- Σταθερή απόδοση QoS ακόμη και υπό υψηλό δικτυακό φόρτο, επιβεβαιώνοντας την αποτελεσματικότητα της RoF αρχιτεκτονικής για δυναμική διαχείριση ραδιοπόρων.
- Δυνατότητα ταυτόχρονης εξυπηρέτησης πολλαπλών τεχνολογιών (multi-RAT) μέσω κοινής φυσικής υποδομής, ενισχύοντας τη φασματική διαφάνεια του συστήματος.

Η μελέτη έδειξε ότι το RoF σε συνδυασμό με εικονικοποιημένες πλατφόρμες και διαλειτουργικά control planes μπορεί να λειτουργήσει ως κορμός για ευφυή, αυτοπροσαρμοζόμενα δίκτυα 5G, ικανά να διαχειρίζονται τις συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις σε χωρητικότητα, αξιοπιστία και ενεργειακή αποδοτικότητα [122]. Η επιτυχία του 5G-PICTURE έχει επηρεάσει την εξέλιξη των ευρωπαϊκών προτύπων για ενοποιημένη πρόσβαση και έχει αξιοποιηθεί ως βάση για επόμενα έργα, όπως το 5G-VINNI και το 6G-SHINE, που προτείνουν περαιτέρω βελτιστοποίηση της RoF τεχνολογίας για μελλοντικά δίκτυα.

6.2.2. Μελέτη Περίπτωσης 2: BlueSPACE – RoF και Spatial Multiplexing

Το ερευνητικό έργο BlueSPACE (Building on the Use of Spatial Multiplexing for Enhanced Capacity and Efficiency in Optical Access Networks), που επίσης υλοποιήθηκε στο πλαίσιο του Horizon 2020, διερεύνησε την ενσωμάτωση τεχνολογιών Radio over Fiber (RoF) σε συνδυασμό με spatial division multiplexing (SDM) για την υποστήριξη υπηρεσιών 5G σε αστικά περιβάλλοντα. Το έργο επικεντρώθηκε στη βελτιστοποίηση της απόδοσης και της ενεργειακής αποδοτικότητας της RoF μετάδοσης με στόχο τη μεγάλη φασματική αποδοτικότητα και το χαμηλό latency [123].

Το πιλοτικό testbed αναπτύχθηκε στη Βαρκελώνη, με συνεργασία του CTTC και άλλων ευρωπαϊκών ερευνητικών φορέων. Η υποδομή βασίστηκε σε:

- Αναλογικό RoF fronthaul για μετάδοση σημάτων 5G NR σε mmWave φάσμα (28 και 39 GHz).
- SDM υποστήριξη μέσω multi-core οπτικών ινών, προσφέροντας ταυτόχρονη μετάδοση σε διαφορετικούς χωρικούς διαύλους.
- Ενσωμάτωση beamforming και beamsteering δυνατοτήτων στο πεδίο, επιτρέποντας την ευέλικτη στόχευση συσκευών χρηστών (UEs) σε πραγματικό χρόνο.

Αποτελέσματα δοκιμών:

- Βελτίωση της φασματικής αποδοτικότητας κατά 35% σε σχέση με συμβατικές RoF λύσεις.
- Μείωση της κατανάλωσης ενέργειας κατά περίπου 20%, λόγω της βελτιστοποιημένης διαχείρισης οπτικού φάσματος και RF ισχύος.
- Ελαχιστοποίηση παρεμβολών και crosstalk, χάρη στη χρήση πολλαπλών χωρικών καναλιών με απομονωμένους πυρήνες.

- Υποστήριξη ταυτόχρονων υπηρεσιών υψηλής προτεραιότητας, όπως απομακρυσμένη ιατρική και αυτοματοποιημένη αστική κινητικότητα (urban mobility scenarios).

Το έργο BlueSPACE υπογράμμισε τη στρατηγική σημασία των φωτονικών και RoF τεχνολογιών για την επίτευξη των στόχων των δικτύων 5G και πέραν αυτών, προτείνοντας μια ευέλικτη, προσαρμοστική και ενεργειακά βιώσιμη αρχιτεκτονική, ιδανική για πολυσύχναστα και μεταβαλλόμενα περιβάλλοντα χρήσης [124]. Η επιτυχία της προσέγγισης SDM–RoF στο BlueSPACE προσφέρει ένα σημαντικό τεχνολογικό θεμέλιο για μελλοντικές αρχιτεκτονικές 6G, στις οποίες η χρήση sub-THz συχνοτήτων και μαζικών MIMO συστημάτων θα απαιτεί ακόμα πιο αποδοτικές οπτικές διασυνδέσεις.

6.2.3. Μελέτη Περίπτωσης 3: Verizon – RoF σε Passive Optical Networks (PONs)

Η αμερικανική εταιρεία τηλεπικοινωνιών Verizon Communications αποτελεί έναν από τους πρώτους παρόχους που αξιοποίησαν εμπορικά την τεχνολογία Radio over Fiber (RoF) για την υλοποίηση δικτύων πέμπτης γενιάς, ενσωματώνοντας την σε υφιστάμενες παθητικές οπτικές υποδομές (PONs). Το εγχείρημα αυτό είχε στόχο τη διασύνδεση μικροκυψελών (small cells) σε αστικές περιοχές υψηλής πυκνότητας, όπως η Νέα Υόρκη, χωρίς την ανάγκη εγκατάστασης νέου φυσικού μέσου [125].

Η αρχιτεκτονική που υιοθετήθηκε συνδύαζε:

- Ψηφιακή RoF μετάδοση (D-RoF) με χρήση του interface eCPRI, το οποίο προσφέρει χαμηλό jitter και δυνατότητα packet-based fronthaul.
- Υφιστάμενα δίκτυα NG-PON2 για κοινή χρήση οπτικών ινών μεταξύ σταθερών και κινητών υπηρεσιών (Fixed-Mobile Convergence).
- Κεντριοποιημένες BBU μονάδες με δυνατότητα network slicing και virtualized RAN (vRAN) λειτουργίες.

Σημαντικά αποτελέσματα της εφαρμογής περιλαμβάνουν:

- Μείωση του κόστους κεφαλαιουχικής επένδυσης (CAPEX) κατά περίπου 18%, καθώς αποφεύχθηκε η διπλή εγκατάσταση υποδομών.

- Σταθερή παροχή υψηλών ταχυτήτων και χαμηλής καθυστέρησης, επαρκής για εφαρμογές όπως live 4K video streaming, mobile edge computing και augmented reality.
- Αυξημένη ευελιξία στην ενεργοποίηση νέων cell sites, αφού ο χρόνος απόκρισης από την ενεργοποίηση έως την πλήρη λειτουργία περιορίστηκε σε λιγότερο από 1 εβδομάδα.
- Υψηλή διαθεσιμότητα (availability >99.99%) με συνεχή monitoring μέσω software-defined δικτυακών εργαλείων.

Η μελέτη αυτή αποδεικνύει πως η αξιοποίηση PONs ως φορείς RoF σημάτων μπορεί να προσφέρει ισχυρό πλεονέκτημα κλίμακας και επεκτασιμότητας, ειδικά σε χώρες με ήδη ανεπτυγμένο οπτικό δίκτυο πρόσβασης. Επίσης, δείχνει την προοπτική μετάβασης από το μοντέλο dedicated fiber σε shared infrastructure, χωρίς ουσιαστική απώλεια ποιότητας [126]. Η εμπειρία της Verizon αναδεικνύει ότι η ενσωμάτωση RoF τεχνολογιών σε υπάρχουσες PON υποδομές αποτελεί έναν πρακτικό και οικονομικά αποδοτικό δρόμο για την ταχεία επέκταση του 5G σε αστικά και προαστιακά περιβάλλοντα.

6.2.4. Μελέτη Περίπτωσης 4: Korea Telecom – RoF για αυτόνομες μεταφορές

Η Korea Telecom (KT), ένας από τους κορυφαίους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους της Νότιας Κορέας, διερεύνησε τη χρήση Radio over Fiber (RoF) για την υποστήριξη εφαρμογών αυτόνομης οδήγησης και έξυπνων μεταφορών, στο πλαίσιο του εθνικού σχεδίου για την υιοθέτηση 5G τεχνολογιών στις έξυπνες πόλεις. Σε συνεργασία με την Hyundai Motor Group, η KT ανέπτυξε ένα RoF δίκτυο βασισμένο σε αναλογική μετάδοση σημάτων mmWave (28 GHz) σε συνδυασμό με edge computing για την επεξεργασία δεδομένων κοντά στο σημείο χρήσης [127].

Το πειραματικό δίκτυο δοκιμάστηκε σε πραγματικές αστικές συνθήκες στο Songdo Smart City, με βασικά τεχνολογικά χαρακτηριστικά:

- Αναλογικό RoF fronthaul με συνδυασμό μετατροπής IF-to-optical και μετάδοσης μέσω οπτικής ίνας προς τα Remote Radio Units (RRUs) εγκατεστημένα σε φανάρια και κολώνες δρόμων.
- Ενσωμάτωση με mobile edge computing servers, για επεξεργασία βίντεο από αισθητήρες οχημάτων σε πραγματικό χρόνο.

- Διαλειτουργία με 5G-V2X πλατφόρμα επικοινωνίας (Vehicle-to-Everything), κρίσιμη για ασφαλή πλοήγηση.

Αποτελέσματα:

- Καθυστέρηση (latency) κάτω από 0,9 ms από τον αισθητήρα έως την απόκριση του αυτόνομου οχήματος, καλύπτοντας τις απαιτήσεις ασφαλείας για V2V και V2I εφαρμογές.
- Μείωση απώλειας πακέτων (packet loss <0.1%), λόγω της σταθερότητας του RoF συνδέσμου και της απουσίας ασυνεχειών στο RF φάσμα.
- Δυνατότητα εντοπισμού εμποδίων σε real-time, μέσω συγχώνευσης δεδομένων από LIDAR, κάμερες και δικτυακά δεδομένα με υψηλό ρυθμό μετάδοσης (>3 Gbps).
- Ενεργειακά αποδοτική λειτουργία, με 20% μικρότερη κατανάλωση από συμβατικές ασύρματες λύσεις mmWave χωρίς RoF.

Η μελέτη της KT υπογραμμίζει τη δυναμική του RoF σε εφαρμογές με αυστηρές απαιτήσεις καθυστέρησης και αξιοπιστίας, όπως η αυτόνομη οδήγηση, όπου το παραμικρό δευτερόλεπτο μπορεί να κρίνει την ασφάλεια. Παράλληλα, καταδεικνύει την αναγκαιότητα συνδυασμού RoF με edge computing για την επίτευξη πλήρους εκμετάλλευσης των δυνατοτήτων του 5G [128]. Η επιτυχία του έργου άνοιξε τον δρόμο για την πιλοτική εφαρμογή ευρύτερων RoF-V2X λύσεων σε έξυπνους διαδρόμους μεταφορών (smart transport corridors) στην Κορέα και διεθνώς.

6.2.5. Μελέτη Περίπτωσης 5: CTTC – Πειραματικό RoF testbed για sub-THz

Το Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC), ένας από τους κορυφαίους ερευνητικούς φορείς στην Ευρώπη, ανέπτυξε ένα πειραματικό testbed RoF που λειτουργεί σε sub-THz φάσμα (90–130 GHz) με σκοπό την αξιολόγηση της συμβατότητας Radio over Fiber με τις μελλοντικές απαιτήσεις των δικτύων 6G. Το έργο αυτό βασίστηκε σε προηγούμενη εμπειρία του CTTC από τα ευρωπαϊκά προγράμματα BlueSPACE και PASSION, με έμφαση στη σύγκλιση οπτικής και ασύρματης τεχνολογίας μέσω πλήρως αναλογικής RoF μετάδοσης [129].

Χαρακτηριστικά του testbed:

- Μετάδοση σήματος σε sub-THz φάσμα (σε 112 GHz) με χρήση photonic upconversion και external modulation, χωρίς ενδιάμεση ψηφιακή μετατροπή.

- Υλοποίηση true analog RoF link, επιτρέποντας την άμεση μεταφορά sub-THz RF φάσματος μέσω οπτικών ινών μήκους >5 km.
- Ενσωμάτωση silicon photonics και InP modulators, για μικρότερο αποτύπωμα και βελτιωμένο εύρος ζώνης.

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων περιλάμβαναν:

- Σταθερή μετάδοση sub-THz σήματος με ρυθμούς μετάδοσης άνω των 96 Gbps ανά κανάλι, χωρίς σημαντική υποβάθμιση του σήματος ή θόρυβο φάσης.
- Χαμηλή κατανάλωση ισχύος σε σύγκριση με ψηφιακές backhaul λύσεις (κατά 23% μικρότερη για ίδιες επιδόσεις).
- Απόδειξη της συμβατότητας με beamforming τεχνικές και ευθυγράμμιση με massive MIMO απαιτήσεις.
- Πλήρης οπτική ευελιξία και διαφανής μετάδοση, χωρίς ανάγκη επεξεργασίας στο ενδιάμεσο δίκτυο.

Η καινοτομία της προσέγγισης του CTTC έγκειται στην καθαρά οπτική υλοποίηση των sub-THz RoF συνδέσμων, η οποία περιορίζει την ανάγκη για δαπανηρή ηλεκτρονική επεξεργασία. Αυτό ενισχύει τη βιωσιμότητα των RoF λύσεων για μελλοντικά σενάρια 6G όπου απαιτούνται εξαιρετικά μεγάλα εύρη ζώνης (>100 GHz) και εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση σε πυκνές αστικές περιοχές [130]. Το testbed του CTTC επιβεβαιώνει ότι το Radio over Fiber μπορεί να επεκταθεί επιτυχώς σε sub-THz περιοχές, καθιστώντας το ένα τεχνολογικό ορόσημο για τις αρχιτεκτονικές δικτύου της επόμενης δεκαετίας.

6.3. Ανασκόπηση Ερευνών

Υπάρχουν αυξανόμενες ανησυχίες σχετικά με τον αυξανόμενο αριθμό πρωτοφανών εφαρμογών και υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας υψηλής έντασης εύρους ζώνης που βιώνει το Διαδίκτυο. Μια αξιοσημείωτη αιτία της αύξησης της κυκλοφορίας και της επακόλουθης πίεσης στο δίκτυο είναι οι τεχνολογίες του Διαδικτύου των πραγμάτων (IoT). Για παράδειγμα, τα μαζικά συστήματα IoT (mIoT) έχουν προκαλέσει αξιοσημείωτες επαναστάσεις στην ποσότητα των κινητών συσκευών και εφαρμογών στα δίκτυα. Αυτό γίνεται σε μια προσπάθεια βελτίωσης της εμπειρίας του χρήστη στην παροχή βελτιωμένων υπηρεσιών κινητής ευρυζωνικότητας (eMBB) και στην παροχή εξαιρετικά αξιόπιστης επικοινωνίας χαμηλής καθυστέρησης (uRLLC) για κρίσιμες υπηρεσίες επικοινωνίας και ελέγχου.

Θεωρητικά, Το IoT περιλαμβάνει την καθολική ύπαρξη μιας συλλογής πραγμάτων όπως φορητοί υπολογιστές, tablet, smartphones, ενεργοποιητές, αισθητήρες, ασύρματοι δρομολογητές, καθώς και ετικέτες αναγνώρισης ραδιοσυχνοτήτων (RFID). Είναι αξιοσημείωτο ότι αυτές οι συσκευές είναι σε θέση να συνεργάζονται όχι μόνο μεταξύ τους αλλά και με τους γείτονές τους. Με αυτή την προσέγγιση, είναι σε θέση να επιτύχουν κοινούς στόχους δικτύου μέσω ενός μοναδικού σχήματος διευθυνσιοδότησης [131-132]. Επιπλέον, έχει προβλεφθεί ότι θα λειτουργεί τεράστιος αριθμός κινητών συσκευών στις οποίες θα λειτουργούν διάφορες εφαρμογές και υπηρεσίες έντασης εύρους ζώνης και θα είναι συνδεδεμένες στο Διαδίκτυο [133]. Στην πραγματικότητα, υπάρχει τεράστια ζήτηση για αποτελεσματικά συστήματα που είναι ικανά να παρέχουν διάφορες υπηρεσίες με οικονομικά αποδοτικό τρόπο, ικανοποιώντας παράλληλα τις βασικές απαιτήσεις του δικτύου. Κατά συνέπεια, σε μια προσπάθεια να επιτευχθούν οι τεχνικές απαιτήσεις του δικτύου κινητής τηλεφωνίας επόμενης γενιάς, έχουν γίνει εντατικές έρευνες για βιώσιμες λύσεις που μπορούν να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις του δικτύου.

Επιπλέον, για την υποστήριξη των αναμενόμενων τεράστιων συσκευών, υπήρξε γενική συναίνεση ότι το σύστημα ασύρματης επικοινωνίας πέμπτης γενιάς (5G) είναι η βιώσιμη και πολλά υποσχόμενη λύση. Εν τω μεταξύ, οι μαζικές τεχνολογίες κεραίας πολλαπλών εισόδων πολλαπλής εξόδου (M-MIMO) και οι τεχνολογίες χιλιοστομετρικών κυμάτων (mm-wave) αναμένεται να ενσωματωθούν στα δίκτυα 5G, έτσι ώστε να ενισχυθεί το εύρος ζώνης του ασύρματου συστήματος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι ταχύτητες μετάδοσης ασύρματου συστήματος που βασίζονται σε ραδιοσυχνότητες (RF) περιορίζονται σε μεγάλο βαθμό από το ρυθμιζόμενο φάσμα ραδιοσυχνοτήτων. Αυτός ο περιορισμός μπορεί να αποδοθεί σε πολλά προηγμένα ασύρματα συστήματα και πρότυπα όπως UWB (IEEE 802.15), iBurst (IEEE 802.20), WiMAX (IEEE 802.16), Wi-Fi (IEEE 802.11), καθώς και σε 3G και 4G που βασίζονται σε κυψελοειδή. Από την άλλη, υπάρχει μια τεράστια ποσότητα ανεκμετάλλευτων και υποχρησιμοποιούμενων συχνοτήτων σε υψηλές ζώνες [134-135], όπως εξηγείται στο τμήμα 2. Παρ' όλα αυτά, η διάδοση ραδιοσυχνοτήτων σε υψηλότερες ζώνες συχνοτήτων είναι συγκριτικά απαιτητική. Κατά συνέπεια, το προηγμένο σχήμα όπως η τεχνική διαμόρφωσης δέσμης (BF) είναι απαραίτητο για τη λειτουργία ραδιοφώνου στις ζώνες. Η τεχνική θα βοηθήσει στην αντιστάθμιση της εγγενούς απώλειας διαδρομής ζώνης mm-wave στο δίκτυο ραδιοπρόσβασης (RAN) [136-137-138].

Επιπλέον, χάρη σε διάφορες καινοτόμες τεχνολογίες που έχουν εφαρμοστεί στις οπτικές επικοινωνίες, έχουν σημειωθεί σημαντικές βελτιώσεις στις επιδόσεις του δικτύου [139]. Μεταξύ των αξιοσημείωτων βελτιώσεων είναι η αύξηση της εμβέλειας του δικτύου, της χωρητικότητας του οπτικού συστήματος και του αριθμού των χρηστών που μπορούν να υποστηριχθούν αποτελεσματικά. Αυτό είναι αποτέλεσμα τεχνολογιών αιχμής που βασίζονται σε οπτικές ίνες. Τα οπτικά σχήματα προχωρούν όλο και περισσότερο βαθύτερα σε διαφορετικά δίκτυα πρόσβασης, προκειμένου να παρέχουν διάφορες υπηρεσίες, όπως κινητό backhaul/fronthaul και multitenant fiber to the X (FTTX) με ορισμένες παραλλαγές αρχιτεκτονικών ευρυζωνικών δικτύων που βασίζονται σε οπτικές ίνες. Για παράδειγμα, οι αρχιτεκτονικές οπτικών ευρυζωνικών δικτύων, όπως η οπτική ίνα μέχρι το κράσπεδο ή το ερμάριο (FTTC), η οπτική ίνα μέχρι τον κόμβο (FTTN), η οπτική ίνα μέχρι το κτίριο (FTTB), η οπτική ίνα μέχρι το χώρο (FTTP) και η οπτική ίνα μέχρι το σπίτι (FTTH), προσφέρουν εμπορικές λύσεις στη συμφόρηση απόδοσης του δικτύου επικοινωνίας, παρέχοντας σταδιακά υπηρεσίες σε κοντινή απόσταση από τους πολυάριθμους συνδρομητές [140].

Αξίζει να σημειωθεί ότι διάφορες περιπτώσεις χρήσης 5G όπως το uRLLC και το eMBB μπορούν να επιτευχθούν αποτελεσματικά από ραδιοστοιχεία και BS που δεν είναι μακριά από τους τελικούς χρήστες ή τις ασύρματες συσκευές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η κοντινή απόσταση βοηθά στη διευκόλυνση της καλύτερης ποιότητας του σήματος, με χαμηλότερο λανθάνοντα χρόνο και υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων στο σύστημα [141]. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί αποτελεσματικά μέσω τεχνολογιών παθητικού οπτικού δικτύου (PON) όπως το gigabit PON (GPON), το 10Gbps PON (XG-PON), καθώς και το Ethernet PON (EPON). Αξίζει να σημειωθεί ότι ένα από τα βασικά ζητήματα είναι η διαδικασία υποστήριξης διαφορετικών απαιτήσεων υπηρεσιών με σκοπό την πραγματοποίηση πανταχού παρόντων και ελαστικών συνδέσεων.

Ως αποτέλεσμα, η σύγκλιση οπτικών και ασύρματων δικτύων είναι πολύ απαραίτητη. Αυτή δεν είναι μόνο μια οικονομικά αποδοτική προσέγγιση, αλλά επιτρέπει επίσης την υψηλή διεύθυνση του δικτύου, προκειμένου να επιτευχθεί το προβλεπόμενο πανταχού παρόν χαρακτηριστικό του δικτύου επόμενης γενιάς (NGN) [142]. Με βάση αυτό, υπάρχει αυξανόμενη συναίνεση της άποψης ότι το οπτικό σύστημα fronthaul υψηλής χωρητικότητας είναι μία από τις πιθανές λύσεις για την αντιμετώπιση των απαιτήσεων του δικτύου. Για παράδειγμα, εάν το πρότυπο CPRI πρόκειται να χρησιμοποιηθεί άμεσα για τη μεταφορά σημαντικού αριθμού ραδιοσημάτων μακροπρόθεσμης εξέλιξης (LTE-A) και/ή 5G, θα απαιτηθεί τεράστιο συνολικό εύρος ζώνης στα δίκτυα οπισθόζευξης/fronthaul [143].

Επιπλέον, έχει παρατηρηθεί ότι οι αρχιτεκτονικές συστημάτων αναφοράς για τις τυποποιήσεις 5G βασίζονται στην έννοια των ετερογενών δικτύων όπου μικρές κυψέλες κυμάτων mm επικαλύπτονται στις μεγαλύτερες μακροκυψέλες [144]. Αυτό θα επιτρέψει στο RAN να χειριστεί τις αυξανόμενες απαιτήσεις κυκλοφορίας. Επιπλέον, για να περιοριστεί η μαζική ανάπτυξη BS μικρών κυψελών, το cloud RAN (C-RAN) έχει υιοθετηθεί ως μια πολλά υποσχόμενη αρχιτεκτονική για τη διασφάλιση αποτελεσματικής επεκτασιμότητας όσον αφορά το κόστος ανάπτυξης καθώς και την κατανάλωση ενέργειας [145,146,147,148].

Το C-RAN προσφέρει μια καινοτόμο αρχιτεκτονική που είναι πραγματικά διαφορετική από το παραδοσιακό κατακεντρωμένο RAN (DRAN). Στην αρχιτεκτονική C-RAN, η μονάδα βασικής ζώνης (BBU) μετατοπίζεται μακριά από τις θέσεις κυττάρων όπου βρίσκεται κανονικά στο DRAN. Κατά συνέπεια, οι συλλογές BBU που συνήθως αναφέρονται ως ομάδες BBU συγκεντρώνονται στο κεντρικό γραφείο (CO). Με αυτήν τη διαμόρφωση, οι απομακρυσμένες κεφαλές ραδιοφώνου (RRH) παραμένουν στις θέσεις κυψελών.

Ως αποτέλεσμα, η υλοποίηση του C-RAN προσφέρει σημαντικά οφέλη, όπως βελτιωμένη φασματική απόδοση του συστήματος και καλύτερη ευελιξία για περαιτέρω αναπτύξεις RRH από το DRAN. Ομοίως, με τις κεντρικές BBU, το C-RAN υποστηρίζει πιο πράσινη υποδομή, ενισχυμένο μετριάσμο / συντονισμό παρεμβολών, καλύτερη συγκέντρωση πόρων, βελτιωμένη εικονικοποίηση BS, καθώς και απλοποιημένη διαχείριση και λειτουργία. Εκτός αυτού, πολλαπλές τεχνολογίες μπορούν να υποστηριχθούν με ομαλή και κλιμακούμενη εξέλιξη. Επιπλέον, στην αρχιτεκτονική C-RAN, οι πιασίνες BBU συνδέονται μέσω του δικτύου fronthaul με τις RRH. Είναι αξιοσημείωτο ότι το de facto πρότυπο διεπαφής αέρα που χρησιμοποιείται συνήθως για τη σύνδεση των δεξαμενών BBU με τις RRH είναι το πρωτόκολλο κοινής δημόσιας ραδιοδιεπαφής (CPRI).

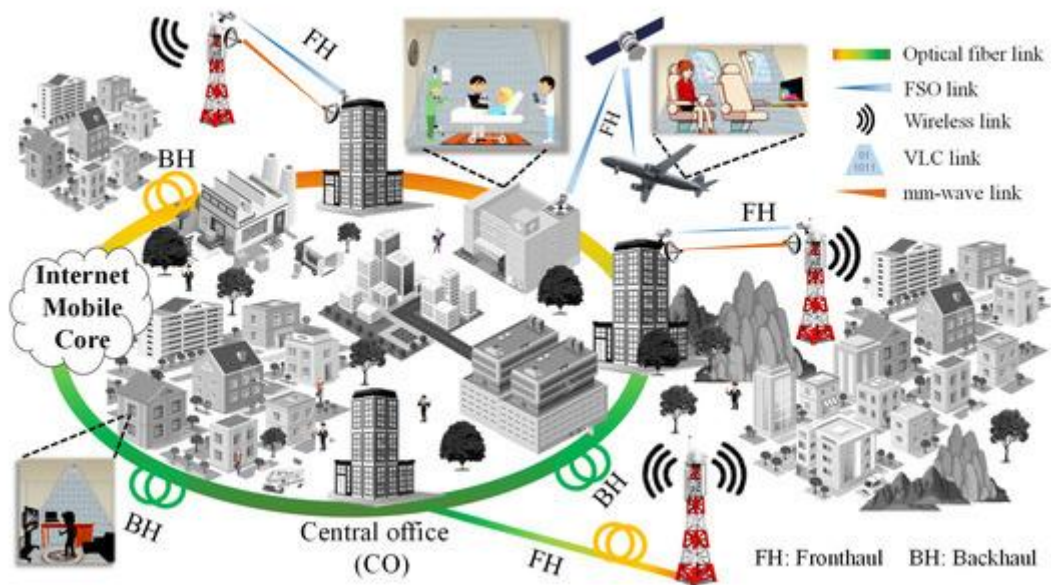
Αυτή είναι μια διεπαφή που βοηθά στην κατανομή δειγμάτων ψηφιακής βασικής ζώνης στο fronthaul C-RAN. Ωστόσο, αυστηρές απαιτήσεις σχετικά με το jitter, την καθυστέρηση και το εύρος ζώνης επιβάλλονται στο δίκτυο fronthaul για απρόσκοπτη συνδεσιμότητα. Αυτό καθιστά τις συνδέσεις fronthaul που βασίζονται στο CPRI επιρρεπείς σε περιορισμούς ευελιξίας και εύρους ζώνης, γεγονός που μπορεί να τις εμποδίσει να είναι ορατές λύσεις για τα δίκτυα επόμενης γενιάς [149, 150]. Εν τω μεταξύ, έχει σημειωθεί ότι τα συστήματα 5G θα επιβάλουν υψηλότερες απαιτήσεις στο δίκτυο μεταφορών όσον αφορά τον λανθάνοντα χρόνο, το εύρος ζώνης, την αξιοπιστία, τη συνδεσιμότητα και το άνοιγμα των δυνατοτήτων δικτύωσης βάσει λογισμικού (SDN) [151]. Για την αντιμετώπιση των

προκλήσεων έχουν υιοθετηθεί διάφορες προσεγγίσεις, όπως η συνεργατική κατανομή ραδιοπόρων και οι τεχνολογίες συμπίεσης δεδομένων. Ωστόσο, η ζήτηση χωρητικότητας fronthaul εξακολουθεί να είναι σημαντικά υψηλή [152, 153].

Ο βιώσιμος τρόπος αντιμετώπισης της απαίτησης χωρητικότητας είναι μέσω της υλοποίησης λύσεων παθητικού οπτικού δικτύου (PON), όπως η πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος PON (WDM-PON) και η υπερπυκνή WDM-PON (UDWDM-PON). Οι αρχιτεκτονικές PON είναι συμβατές με τα δίκτυα 5G και είναι σε θέση να υποστηρίξουν τόσο ενσύρματες όσο και ασύρματες υπηρεσίες. Με βάση την αρχιτεκτονική PON, το μεμονωμένο RRH έχει την ευκαιρία να επικοινωνήσει με τις πισίνες BBU χρησιμοποιώντας ένα ειδικό μήκος κύματος. Εκτός αυτού, στην ανάντη κατεύθυνση, τα συνολικά μήκη κύματος μπορούν να πολυπλεγτούν περαιτέρω σε μια ενιαία κοινόχρηστη υποδομή ινών στον απομακρυσμένο κόμβο (RN). Μπορούν τελικά να αποπολυπλεγτούν στο CO [154, 155].

Όπως προαναφέρθηκε και όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1, η σύγκλιση οπτικών και ασύρματων δικτύων είναι ένα πολλά υποσχόμενο σχήμα για την εκμετάλλευση του εγγενούς εύρους ζώνης του οπτικού συστήματος και του πλεονεκτήματος κινητικότητας της ασύρματης συνδεσιμότητας, το οποίο μπορεί να βοηθήσει στην υλοποίηση της προβλεπόμενης χωρητικότητας και ενεργειακής απόδοσης του δικτύου 5G. Επιπλέον, η οπτική ασύρματη επικοινωνία (OWC) είναι μια άλλη εφικτή και ελκυστική λύση οπτικής ευρυζωνικής πρόσβασης που είναι ικανή να υποστηρίξει δίκτυα υψηλής χωρητικότητας, υψηλής πυκνότητας και χαμηλής καθυστέρησης.

Ως εκ τούτου, μπορεί να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά τις απαιτήσεις δικτύου για διαφορετικές εφαρμογές και υπηρεσίες με συγκριτικά χαμηλότερο κόστος. Έτσι, έχει θεωρηθεί ως μια εναλλακτική ή / και συμπληρωματική λύση για τις υπάρχουσες ασύρματες λύσεις RF [156, 157, 158, 159].



Εικόνα 1. Ένα σενάριο σύγκλισης δικτύων οπτικής και ασύρματης πρόσβασης (προσαρμοσμένο από Alimi et al. [99]).

7. Μελλοντικές Τάσεις και Κατευθύνσεις Έρευνας

7.1 Εξελίξεις στην Έρευνα

Η ερευνητική δραστηριότητα γύρω από τα υβριδικά ασύρματα-οπτικά δίκτυα τύπου Radio over Fiber (RoF) γνωρίζει σημαντική επιτάχυνση, καθώς η ανάγκη για τηλεπικοινωνιακές υποδομές ικανές να υποστηρίξουν τις απαιτήσεις των δικτύων πέμπτης γενιάς και των μελλοντικών 6G αρχιτεκτονικών γίνεται ολοένα και πιο επιτακτική. Οι σύγχρονες τεχνολογικές εξελίξεις κατευθύνονται σε τέσσερις κύριες επιστημονικές διαστάσεις, που αποτελούν ταυτόχρονα και τις βάσεις για περαιτέρω καινοτομία.

Η πρώτη αφορά την προώθηση της τεχνολογίας RoF προς τα sub-THz και THz φάσματα, δηλαδή συχνοτικές περιοχές μεταξύ 100 GHz και 1 THz. Η ερευνητική έμφαση δίνεται στην ανάπτυξη νέων φωτοηλεκτρονικών τεχνικών όπως η φωτονική ανύψωση συχνότητας (photonic upconversion), με στόχο τη διατήρηση της σταθερότητας του σήματος σε εξαιρετικά υψηλά φάσματα. Παράλληλα, αξιοποιούνται νέες κατηγορίες υλικών, όπως οι διατάξεις γραφενίου και οι ολοκληρωμένοι modulator πυριτίου, για την υποστήριξη πολύ υψηλών ρυθμών μετάδοσης, οι οποίοι είναι απαραίτητοι για εφαρμογές όπως η επαυξημένη πραγματικότητα, η αφή μέσω διαδικτύου (tactile internet), καθώς και η ολογραφική επικοινωνία.

Η δεύτερη κατεύθυνση της έρευνας σχετίζεται με την ενσωμάτωση τεχνητής νοημοσύνης στα RoF δίκτυα. Οι μηχανισμοί αυτοπροσαρμογής που προσφέρουν οι τεχνικές μηχανικής μάθησης επιτρέπουν τη δυναμική διαχείριση του φάσματος, την πρόβλεψη των αναγκών του δικτύου, την ανακατανομή των πόρων και την αυτοματοποίηση της λειτουργίας των RoF συνδέσμων. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν ερευνητικά προγράμματα όπως τα ARIADNE και DAEMON, στα οποία η τεχνητή νοημοσύνη αξιοποιείται για την αυτοβελτιστοποίηση των δικτυακών στοιχείων.

Η τρίτη εξέλιξη αφορά την εστίαση στην ολοκλήρωση φωτοηλεκτρονικών κυκλωμάτων (Photonic Integrated Circuits – PICs). Η χρήση ολοκληρωμένων κυκλωμάτων φωτονικής (π.χ. Indium Phosphide ή Silicon Photonics) καθιστά εφικτή την παραγωγή RoF πομποδεκτών με εξαιρετικά μικρές διαστάσεις και μειωμένο ενεργειακό αποτύπωμα. Η εξέλιξη αυτή συνιστά βασικό μοχλό για την ευρεία εγκατάσταση RoF τεχνολογιών σε πυκνές αστικές περιοχές, όπου η φυσική διάταξη των κελιών απαιτεί συστήματα υψηλής συμπίεσης και χαμηλής κατανάλωσης.

Τέλος, η σύγκλιση των RoF δικτύων με τις υποδομές edge και cloud computing αποτελεί έναν ακόμη ερευνητικό άξονα που συγκεντρώνει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας. Η διαλειτουργικότητα μεταξύ των RoF fronthaul δικτύων και των κόμβων επεξεργασίας στο άκρο του δικτύου (edge nodes) θεωρείται κρίσιμη για την υποστήριξη εφαρμογών με εξαιρετικά χαμηλές απαιτήσεις καθυστέρησης, κάτω του ενός χιλιοστού του δευτερολέπτου. Σε αυτό το πλαίσιο, η έρευνα εξετάζει τρόπους αποδοτικής συνύπαρξης των RoF λύσεων με τεχνολογίες virtualization, network slicing και software-defined optical control.

Παράλληλα με τις παραπάνω κατευθύνσεις, το επιστημονικό ενδιαφέρον στρέφεται επίσης στη διερεύνηση της αξιοποίησης επαναδιαμορφώσιμων ευφών επιφανειών (Reconfigurable Intelligent Surfaces – RIS) σε συνδυασμό με RoF αρχιτεκτονικές, ανοίγοντας τον δρόμο για ακόμα μεγαλύτερη ευελιξία στον έλεγχο της κατευθυντικότητας και της διάδοσης των σημάτων. Συνολικά, οι τάσεις αυτές καταδεικνύουν ότι το Radio over Fiber όχι μόνο διατηρεί τη σημασία του στην εποχή του 5G, αλλά ενισχύει τον ρόλο του ως θεμέλιο υποδομής για τα μελλοντικά δίκτυα 6G και πέραν αυτών.

7.2 Νέες Τάσεις και Ευκαιρίες

Διαφορετικές τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης έχουν διαφορετικά ελκυστικά χαρακτηριστικά καθώς και περιορισμούς. Τα οπτικά σήματα και τα σήματα RF δεν αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Επιπλέον, οι τεχνολογίες RF και οπτικών ασύρματων τεχνολογιών παρουσιάζουν συνήθως αντίθετα χαρακτηριστικά απόδοσης. Εκτός αυτού, ορισμένες οπτικές ασύρματες τεχνολογίες, π.χ. LiFi και OCC, παρουσιάζουν επίσης αντίθετα χαρακτηριστικά όσον αφορά ορισμένες μετρήσεις απόδοσης. Αυτά τα σημαντικά γεγονότα παρακινούν την ανάγκη για υβριδικά ασύρματα συστήματα που βασίζονται στο OWC για να ξεπεράσουν τους περιορισμούς μιας ενιαίας τεχνολογίας και να ανταποκριθούν στις αυξανόμενες απαιτήσεις των συστημάτων επικοινωνίας 5G και πέρα από αυτά. Τα κύρια πλεονεκτήματα των ασύρματων συστημάτων RF είναι η καλύτερη υποστήριξη κινητικότητας μέσω μιας ευρείας περιοχής κάλυψης, η ευελιξία και η υποστήριξη επικοινωνίας τόσο σε συνθήκες LOS / NLOS. ενώ η σπανιότητα του εύρους ζώνης και η χαμηλότερη απόδοση είναι οι βασικοί περιορισμοί τους.

Αντίθετα, το ευρύ διαθέσιμο εύρος ζώνης και η υψηλότερη απόδοση είναι τα κύρια ελκυστικά χαρακτηριστικά των περισσότερων συστημάτων OWC. Κοινοί περιορισμοί των τεχνολογιών OWC είναι η περιορισμένη ή καθόλου υποστήριξη της επικοινωνίας NLOS, η πολύ χαμηλή ή καθόλου υποστήριξη κινητικότητας και η ατμοσφαιρική επίδραση. Το υβριδικό ασύρματο σύστημα που αποτελείται τόσο από RF όσο και από οπτικές ασύρματες τεχνολογίες μπορεί να ξεπεράσει σημαντικά τους περιορισμούς και να αποκτήσει ελκυστικά χαρακτηριστικά του μεμονωμένου ασύρματου συστήματος. Τα υβριδικά ασύρματα συστήματα είναι αποτελεσματικά σε μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων εσωτερικών, εξωτερικών και υποβρύχιων σεναρίων για τη βελτίωση διαφόρων μετρήσεων απόδοσης, όπως η απόδοση, η αξιοπιστία, η ασφάλεια και η ενεργειακή απόδοση.

Ένα υβριδικό ασύρματο σύστημα μπορεί να περιέχει διαφορετικούς συνδυασμούς διαφορετικών δικτύων και να λειτουργεί με διαφορετικούς τρόπους ανάλογα με τις ανάγκες. Και τα δύο δίκτυα μπορούν να λειτουργήσουν ταυτόχρονα, ή το ένα μπορεί να λειτουργήσει ως αντίγραφο ασφαλείας του άλλου δικτύου. Το σύστημα μπορεί να εφαρμοστεί είτε για επικοινωνία ενός άλματος είτε για επικοινωνία πολλαπλών αναπηδήσεων. Δύο μεμονωμένα δίκτυα σε ένα υβριδικό ασύρματο σύστημα μπορούν είτε να μοιράζονται την ανοδική και κατερχόμενη ζεύξη ενός χρήστη ξεχωριστά είτε να εξυπηρετούν εντελώς διαφορετικούς χρήστες. Ο πίνακας XV συνοψίζει ορισμένες προσεγγίσεις κοινής χρήσης ανερχόμενης / κατερχόμενης ζεύξης για διαφορετικά ασύρματα υβριδικά συστήματα RF / οπτικών. Ένα

δίκτυο σε ένα υβριδικό ασύρματο σύστημα επιλέγεται με βάση οποιοδήποτε από τα κριτήρια, όπως ο τύπος κυκλοφορίας, ο τύπος σύνδεσης (π.χ. uplink/downlink), η απαιτούμενη απόσταση επικοινωνίας, το σενάριο LOS/NLOS, το απαιτούμενο επίπεδο ασφάλειας και η απαιτούμενη υποστήριξη κινητικότητας. Ένας αποτελεσματικός μηχανισμός που λαμβάνει υπόψη τα κατάλληλα κριτήρια είναι ζωτικής σημασίας για την ορθή κατανομή του φορτίου μεταξύ των δικτύων.

Η βελτίωση του ρυθμού δεδομένων μέσω της εκφόρτωσης της κυκλοφορίας, της απρόσκοπτης υποστήριξης κίνησης και της μείωσης των παρεμβολών είναι οι κύριοι λόγοι για τη χρήση υβριδικών ασύρματων συστημάτων σε εσωτερικούς χώρους. Αντίθετα, η βελτίωση της αξιοπιστίας των συνδέσεων και η υπέρβαση των ατμοσφαιρικών επιπτώσεων είναι σημαντικοί λόγοι λόγω των οποίων αναπτύσσονται τα εξωτερικά υβριδικά ασύρματα συστήματα. Η ταυτόχρονη χρήση της ζεύξης μικροκυμάτων/mmWave και των τεχνολογιών FSO στην υβριδική συνδεσιμότητα backhaul RF/FSO έχει τη δυνατότητα να ξεπεράσει τις ατμοσφαιρικές επιδράσεις όπως η βροχή, το χιόνι, η σκόνη και η ομίχλη. Τα RF/οπτικά ασύρματα υβριδικά συστήματα μειώνουν σημαντικά τα φαινόμενα παρεμβολών, βελτιώνοντας παράλληλα άλλες μετρήσεις απόδοσης.

Ωστόσο, τα οπτικά ασύρματα υβριδικά συστήματα δεν λειτουργούν για τη μείωση του φαινομένου παρεμβολών. Η βελτίωση της αξιοπιστίας των ζεύξεων είναι ο πρωταρχικός στόχος για τη χρήση διαφορετικών ειδών οπτικών/οπτικών ασύρματων υβριδικών συστημάτων. Επιπλέον, για άλλα δίκτυα, είναι δύσκολο εάν τα δεδομένα ενός χρήστη πρέπει να αποστέλλονται μέσω διαφορετικών τύπων δικτύων οπισθόζευξης λόγω της χρήσης χωριστών δικτύων για την ανερχόμενη και κατερχόμενη ζεύξη.

Οι στόχοι και τα ζητήματα των διαφόρων υβριδικών ασύρματων συστημάτων είναι διαφορετικά και έχουν προταθεί διάφορες προσεγγίσεις για την αντιμετώπισή τους. Η βελτίωση της απόδοσης είναι ο κύριος στόχος για την ανάπτυξη υβριδικών ασύρματων συστημάτων RF/VLC και RF/LiFi που απεικονίζονται στο [7, 31, 34, 39, 44, 46, 53]. Για την επιτυχή ανάπτυξη αυτών των υβριδικών συστημάτων, ορισμένα θέματα έχουν θεωρηθεί σημαντικά ερευνητικά θέματα, συμπεριλαμβανομένης της βελτίωσης της απόδοσης παράδοσης [18, 34, 38, 48, 54], της ενίσχυσης της ενεργειακής απόδοσης [32, 33], της ευφυούς επιλογής δικτύου [35], της επέκτασης κάλυψης [40, 49, 123], της μείωσης της πιθανότητας διακοπής, της μείωσης του ποσοστού σφάλματος, της αποτελεσματικής τεχνικής

εξισορρόπησης φορτίου, της μεγιστοποίησης της φασματικής απόδοσης, της ενίσχυσης της ασφάλειας, της αποδοτικής κατανομής πόρων [39], και ελαχιστοποίηση του κόστους [51].

Μέχρι σήμερα, δεν έχει πραγματοποιηθεί σημαντική έρευνα σχετικά με τα ασύρματα υβριδικά συστήματα που βασίζονται στη ΧΟΚ. Οι προηγούμενες μελέτες μας [102], εξηγούν τις δύο περιπτώσεις χρήσης υβριδικών συστημάτων RF/OCC. Ωστόσο, απαιτούνται εκτεταμένες μελέτες σχετικά με την επιλογή δικτύου, τη βελτίωση της απόδοσης παράδοσης και τη βελτίωση της ασφάλειας για υβριδικά συστήματα RF / OCC. Τα υβριδικά συστήματα RF/FSO ενισχύουν την απόδοση και βελτιώνουν την αξιοπιστία ελαχιστοποιώντας τις ατμοσφαιρικές επιδράσεις όπως παρουσιάζονται στο [55, 58, 59, 110, 111]. Ένα ευρύ φάσμα σχετικών μελετών έχει επίσης πραγματοποιηθεί σε διάφορα θέματα όπως η βέλτιστη ισχύς μετάδοσης [108], η ενίσχυση της αξιοπιστίας, ο μετριασμός των ατμοσφαιρικών αναταράξεων, η μείωση της πιθανότητας διακοπής [και η βέλτιστη επιλογή ρελέ, με στόχο την υποστήριξη υβριδικών συστημάτων RF/FSO].

Αυτές οι υβριδικές μελέτες RF / FSO δείχνουν ότι η εξέταση των ατμοσφαιρικών συνθηκών για τη βέλτιστη λύση στην επιλογή του κατάλληλου δικτύου φαίνεται σαν ο πιο σημαντικός παράγοντας. Η έρευνα για το οπτικό/οπτικό ασύρματο υβριδικό σύστημα βρίσκεται σε πρωτογενές στάδιο. Η χρήση της ίδιας πηγής φωτός ως πομπού για δύο διαφορετικές τεχνολογίες OWC ταυτόχρονα φαίνεται να είναι ένα πολλά υποσχόμενο ερευνητικό βήμα. Οι περισσότερες μελέτες που σχετίζονται με υβριδικά ασύρματα συστήματα δεν έχουν αποδειχθεί πειραματικά και περιλαμβάνουν μόνο θεωρητική ανάλυση. Τα οπτικά ασύρματα υβριδικά συστήματα καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα τομέων. Αρκετές μελέτες έχουν ήδη πραγματοποιηθεί για την επίλυση πολλών τεχνικών ζητημάτων, ωστόσο, πολλά ζητήματα παραμένουν.

8. Συμπεράσματα

Το σύστημα που βασίζεται στο 5G είναι μια πολλά υποσχόμενη λύση για την αντιμετώπιση των αυξανόμενων ανησυχιών σχετικά με την πίεση της κυκλοφορίας στο δίκτυο. Επίσης, ο προβλεπόμενος τεράστιος αριθμός σεναρίων ανάπτυξης και περιπτώσεων χρήσης που θα υποστηριχθούν επιφέρει απαιτήσεις υψηλού εύρους ζώνης και χαμηλού λανθάνοντος χρόνου για τα δίκτυα 5G.

Πρόσφατα, επειδή τα συστήματα RF δεν μπορούν να ικανοποιήσουν διάφορες αυξανόμενες απαιτήσεις 5G και πέρα από τα συστήματα επικοινωνίας, διαφορετικές τεχνολογίες OWC έχουν γίνει εξέχον μέρος του συστήματος ασύρματης επικοινωνίας. Η από κοινού εγκατάσταση δύο ή περισσότερων δικτύων με διαφορετικά χαρακτηριστικά μπορεί να υπερνικήσει τους περιορισμούς ενός ενιαίου δικτύου. Ως εκ τούτου, τα υβριδικά συστήματα που περιλαμβάνουν ένα οπτικό ασύρματο σύστημα με RF ή άλλο οπτικό σύστημα μπορούν να ξεπεράσουν πολλούς περιορισμούς είτε RF είτε οπτικών ασύρματων απλών δικτύων. Μελέτες σχετικά με τις εναπομένουσες προκλήσεις που σχετίζονται με την εφαρμογή διαφορετικών υβριδικών ασύρματων δικτύων βρίσκονται σε εξέλιξη.

Αυτό το έγγραφο ανασκόπησης εξετάζει βασικά ερευνητικά ζητήματα για οπτικά ασύρματα υβριδικά δίκτυα. Συζητούνται επίσης τα σενάρια υβριδικής αρχιτεκτονικής και οι ευκαιρίες τους. Αυτή η εργασία παρέχει μια περίληψη των υφιστάμενων συνεχιζόμενων ερευνητικών εργασιών σε RF / οπτικά, οπτικά / οπτικά και ακουστικά / οπτικά ασύρματα υβριδικά συστήματα δικτύου. Για διαφορετικούς συνδυασμούς υβριδικών συστημάτων, λαμβάνονται υπόψη μακροκυψέλες που βασίζονται σε RF, μικρές κυψέλες, WiFi, και BLE, καθώς και οπτικές τεχνολογίες επικοινωνίας VLC, LiFi, OCC και FSO. Συζητούνται οι ευκαιρίες που δημιουργούνται από αυτά τα υβριδικά συστήματα, καθώς και η αρχιτεκτονική δικτύου, η επιλογή δικτύου και τα σενάρια εφαρμογών. Μια ποικιλία σεναρίων εφαρμογής, όπως εσωτερική, οχημάτων, χώρου, ηλεκτρονικής υγείας και υποβρύχια εξετάζονται σε αυτό το έγγραφο. Επιπλέον, συζητούνται οι βασικές ερευνητικές κατευθύνσεις των διαφόρων υβριδικών συστημάτων δικτύων. Επισημαίνονται επίσης εν συντομία οι σημαντικές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν για την επιτυχή ανάπτυξη υβριδικών συστημάτων δικτύου για 5G και πέραν αυτού, καθώς και παραδείγματα IoT.

Τέλος, η παρούσα ολοκληρώνεται τονίζοντας το γεγονός ότι οι επιδόσεις των οπτικών ασύρματων υβριδικών συστημάτων θα μπορούσαν να βελτιωθούν περαιτέρω στοχεύοντας στη στενή ενοποίηση μεταξύ των αντίστοιχων δικτύων και διερευνώντας καινοτόμες ερευνητικές

τάσεις που δεν έχουν επιλυθεί πλήρως. Αυτό το έγγραφο ανασκόπησης θα βοηθήσει στην κατανόηση των ερευνητικών συνεισφορών σε διαφορετικά οπτικά ασύρματα υβριδικά συστήματα και αναμένεται να προκαλέσει περαιτέρω προσπάθειες για την επιτυχή ανάπτυξη των συστημάτων ως πολλά υποσχόμενο συμπληρωματικό στις τεχνολογίες που βασίζονται σε RF σε μελλοντικά συστήματα επικοινωνίας 5GB.

Βιβλιογραφία

1. Ali, Y., Khan, A. U., & Hakeem, M. U. 2023. 5G Technology. *Concepts in Smart Societies: Next-generation of Human Resources and Technologies*, 278.
2. Mazhar, T., Malik, M. A., Haq, I., Rozeela, I., Ullah, I., Khan, M. A., ... & Hamam, H. 2022. The role of ML, AI and 5G technology in smart energy and smart building management. *Electronics*, 11(23), 3960.
3. Andrews, J.G., Buzzi, S., Choi, W., Hanly, S.V., Lozano, A., Soong, A.C.K. and Zhang, J.C., 2014. *What will 5G be?* IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 32(6), pp.1065–1082.
4. ITU-R, 2017. *Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s)*. Report ITU-R M.2410-0.
5. Rappaport, T.S., Sun, S., Mayzus, R., Zhao, H., Azar, Y., Wang, K., Wong, G.N., Schulz, J.K., Samimi, M. and Gutierrez, F., 2013. *Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!* IEEE Access, 1, pp.335–349.
6. Li, X., Zhao, H., Liu, X. and Liu, H., 2018. *Network slicing for 5G: Challenges and opportunities*. IEEE Internet of Things Journal, 5(6), pp.4275–4285.
7. Checko, A., Christiansen, H.L., Yan, Y., Scolari, L., Kardaras, G., Berger, M.S. and Dittmann, L., 2015. *Cloud RAN for mobile networks—A technology overview*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 17(1), pp.405–426.
8. Saleh, A.A.M., Yegnanarayanan, S. and Pathak, P.H., 2021. *Radio-over-Fiber Technologies for 5G and beyond*. IEEE Communications Magazine, 59(6), pp.66–72.
9. Seeds, A.J. and Williams, K.J., 2006. *Microwave photonics*. Journal of Lightwave Technology, 24(12), pp.4628–4641.
10. Kim, J. and Yoo, S.J.B., 2013. *Optical network architectures for 5G mobile communication systems*. IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series, pp.153–154.
11. Prat, J., 2017. *Next-Generation FTTH Passive Optical Networks*. Springer.
12. Sharma, S.K. and Chatterjee, S., 2020. *Radio over Fiber Technology for Mobile Fronthaul in 5G*. In: Singh, R., ed. *Optical and Wireless Convergence for 5G Networks*. Wiley, pp.115–138.
13. Nirmalathas, A., Lim, C., Novak, D. and Waterhouse, R.B., 2001. *Optical modulator for millimeter-wave radio-over-fiber systems*. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 49(10), pp.2006–2010.
14. Lethien, C., Loyez, C. and Rolland, N., 2011. *Radio-over-fiber architectures and trends*. Comptes Rendus Physique, 12(1), pp.100–112.
15. Nguyen, H.C., Phemius, K., Bhamare, D. and Glitho, R., 2018. *A survey on fronthaul-centric radio access network architectures and techniques for 5G networks*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 20(4), pp.3257–3284.
16. Ghassemlooy, Z., Popoola, W. and Rajbhandari, S., 2019. *Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB*. 2nd ed. CRC Press.

17. Seeds, A.J. and Williams, K.J., 2006. Microwave photonics. *Journal of Lightwave Technology*, 24(12), pp.4628–4641.
18. Prat, J., 2017. *Next-Generation FTTH Passive Optical Networks*. Springer.
19. Sharma, S.K. and Chatterjee, S., 2020. Radio over Fiber Technology for Mobile Fronthaul in 5G. In: Singh, R., ed. *Optical and Wireless Convergence for 5G Networks*. Wiley, pp.115–138.
20. Nirmalathas, A., Lim, C., Novak, D. and Waterhouse, R.B., 2001. Optical modulator for millimeter-wave radio-over-fiber systems. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 49(10), pp.2006–2010.
21. Checko, A., Christiansen, H.L., Yan, Y., Scolari, L., Kardaras, G., Berger, M.S. and Dittmann, L., 2015. Cloud RAN for mobile networks - A technology overview. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(1), pp.405–426.
22. Lethien, C., Loyez, C. and Rolland, N., 2011. Radio-over-fiber architectures and trends. *Comptes Rendus Physique*, 12(1), pp.100–112.
23. Wake, D., 2007. Radio over fiber systems for mobile communications. *Radioengineering*, 16(4), pp.1–7.
24. Seeds, A.J., Williams, K.J. and Wake, D., 2015. Microwave photonics: Radio over fiber. *Journal of Lightwave Technology*, 33(3), pp.579–587.
25. Checko, A., Christiansen, H.L., Yan, Y., Scolari, L., Kardaras, G., Berger, M.S. and Dittmann, L., 2015. Cloud RAN for mobile networks—A technology overview. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(1), pp.405–426.
26. Wu, J., Zhang, Z., Hong, Y. and Wen, Y., 2014. Cloud radio access network (C-RAN): a primer. *IEEE Network*, 29(1), pp.35–41.
27. Ghassemlooy, Z., Popoola, W. and Rajbhandari, S., 2019. *Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB*. 2nd ed. CRC Press.
28. Zhang, J., Wang, H., Wang, C.X. and Ge, X., 2017. *Radio over fiber for 5G: recent advances and future directions*. *IEEE Communications Magazine*, 55(2), pp.144–150.
29. Alimi, I.A., Teixeira, A.L. and Monteiro, P.P., 2018. *Toward an efficient C-RAN optical fronthaul for the future networks: A tutorial on technologies, requirements, challenges, and solutions*. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20(1), pp.708–769.
30. Saleh, A.A.M., Yegnanarayanan, S. and Pathak, P.H., 2021. *Radio-over-Fiber Technologies for 5G and beyond*. *IEEE Communications Magazine*, 59(6), pp.66–72.
31. Qin, Y., Zhang, L., Li, K. and Shen, X., 2020. *Network slicing in 5G: Architecture, benefits, and challenges*. *IEEE Network*, 34(3), pp.95–101.
32. Chitimalla, R., Das, S.K., Tornatore, M. and Mukherjee, B., 2017. *5G Fronthaul—Latency and jitter studies of CPRI over Ethernet*. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 13(2), pp.703–713.
33. T. S. Rappaport, Y. Xing, G. R. Mac Cartney, Jr., A. F. Molisch, E. Mellios, J. Zhang, " Overview of millimeter wave communications for fifth-generation (5G) wireless networks-

- with a focus on propagation models, "IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 65, no. 12, pp. 6213–6230, 2017.
34. C. B. M. Rashidi, S. A. Aljunid, A.K. Rahman, M.S. Anuar, and S. Yaakob, "Effective design for optical CDMA based on radio over fiber (RoF) technique, " MATEC Web of Conferences, vol. 97, p. 01100, 2017.
 35. H. Sooyoung, et al, "Theodore S. R., Katsuyuki H., and Jeongho P., Proposal on millimeter-wave channel modeling for 5G cellular system," IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, vol. 10, no. 3, pp. 454-469, 2016.
 36. C Chen., Z. Chongfu, and Q. Kun, "OCDMA based 60-GHz radio over fiber system for next generation wirele access networks, " 2012 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), Shenzhen, pp. 1-4, 2012.
 37. C. Hsu Chih, Y. Chih-Ta, and D. Ing-Jr, "Performance enhancement of optical CDMA by differential-phase method for radio-over-fiber transmissions," Mathematical Problems in Engineering, vol. 2013, p. 901871, 2013.
 38. Z. Ibrahim, et al, "Performance Analysis of Optical CDMA Based on Radio over Fiber (RoF) Technique," 2016 3rd International Conference on Electronic Design (ICED), Phuket, pp. 132-135, 2016.
 39. A. O. Aldhaibani, S. Yaakob, R.Q. Shaddad, S.M. Idrusa, "5Gb/s hybrid WDM/TDM PON using radio over fiber technique," Optik, vol. 124, no. 18, pp. 3678-3681. 2013.
 40. D. Wake, A. Nkansah, and J. Gomes," Radio over fiber link design for next generation wireless," Journal of Lightwave Technology, vol. 28, no. 16, pp. 2456-2464, 2010.
 41. C. Zhang, L. Wang, and K. Qiu, "Proposal for all-optical generation of multiplefrequency millimeter-wave signals for RoF system with multiple base stations using FWM in SOA," Optics Express, vol. 19, no. 15, pp. 13957-13962, 2011.
 42. S. Chaudhary, D. Thakur, and A. Sharma, "10 Gbps-60 GHz RoF transmission system for 5 G applications, Journal of Optical Communications, vol. 11, no. 3, 2017.
 43. Z. Ibrahim, C. B. M. Rashidi, S. A. Aljunid, A. K. Rahman, and M. S Anuar, "Performance evaluation of flexible cross correlation (FCC) OCDMA code based on radio over fiber (RoF) simulation system," Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, vol. 13, no. 2, pp. 543-550, 2019.
 44. K. S. Alaoui, Y. Zouine, and J. Foshi, "Novel configuration of radio over fiber system using a hybrid SAC- OCDMA/OFDM technique," Advanced Intelligent Systems for Sustainable Development, vol 915, pp 135-144, 2019.
 45. M. Islam, N. Ahmed, S. Ali, S. A. Aljunid, R. B. Ahmad, and M. S. Ali, "Hybrid (OCDMA/WDM) system with dpsk modulation using different detection technique at bit rate 2.5Gbps for optical access network," International Journal of Microwave and Optical Technology, vol. 11, no. 4, pp. 303-309, 2016.
 46. N. Ahmed, S. A. Aljunid, H. A. Fadil, R. B. Ahmad, and M. A. Rashid, "Hybrid OCDMA over WDM System Using Modified Double Weight (MDW) Code for Optical Access Network,"Advanced Materials Research, vol. 440, no. 2, pp. 3878-3883, 2012

47. K. S. Alaoui, J. Foshi, and Y. Zouine "Radio over fiber system based on a hybrid link for next generation of optical fiber communication," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 9, no. 4, pp. 2571-2577, 2019.
48. K. A. Memon, A. W. Umrani, M. A. Unar, and W. Shah, "Implementation & performance analysis of bidirectional FSO channel in hybrid TDM/WDM gigabit passive optical network," *3C Tecnología. Glosas de innovación aplicadas a la pyme*, special issue, pp. 166-181, 2019.
49. N. Alsowaidi, T. Eltaif, M. R. Mokhtar, and S. A. Qasem, "Design of cost efficient optical code division multiple access (CDMA) channels overlay wavelength division multiplexing (WDM) grid," *International Journal on Communications Antenna and Propagation*, vol. 9, no. 1, pp. 55-61, 2019.
50. A. Stok, E.H. Sargent, "The role of optical CDMA in access networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, no. 9, pp 83-87, 2002.
51. B.K. Kim, S. Park, Y. Yeon, B.W. Kim, "Radio-over-fiber system using fiber-gratingbased optical CDMA with modified PN codes," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 15, no. 10, pp. 1485-1487, 2003.
52. M. Awad, I. Dayoub, A.O. M'Foubat, J.M. Rouvaen, "The inter-modes mixing effects in mode group diversity multiplexing," *Optical Communication*, vol. 282, no. 19, pp. 3908-3917, 2009.
53. F. Baklouti, I. Dayoub, S. Haxha, R. Attia, A. Aggoun, "Novel method for improving the capacity of optical MIMO system using MGDM," *IEEE Photonics Journal*, vol. 6, no. 6, pp. 1-15, 2014.
54. M. Awad, I. Dayoub, W. Hamouda, J.M. Rouvaen, "Adaptation of the mode group diversity multiplexing technique for radio signal transmission over multimode fiber," *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 3, no. 1, pp. 1-9, 2011.
55. M. Kasmi, F. Bahloul, and S. Mhatli, "Implementation of an optical GFDM system based on graded-index fiber," *Optical Communication*, vol. 457, pp. 124738-124744, 2020.
56. Alimi, I.A., Teixeira, A.L. and Monteiro, P.P., 2018. Toward an efficient C-RAN optical fronthaul for the future networks: A tutorial on technologies, requirements, challenges, and solutions. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20(1), pp.708–769.
57. Saleh, A.A.M., Yegnanarayanan, S. and Pathak, P.H., 2021. Radio-over-Fiber Technologies for 5G and beyond. *IEEE Communications Magazine*, 59(6), pp.66–72.
58. ITU-R, 2017. Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s). Report ITU-R M.2410-0.
59. Checko, A., Christiansen, H.L., Yan, Y., Scolari, L., Kardaras, G., Berger, M.S. and Dittmann, L., 2015. Cloud RAN for mobile networks—A technology overview. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(1), pp.405–426.
60. Ghassemlooy, Z., Popoola, W. and Rajbhandari, S., 2019. *Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB*. 2nd ed. CRC Press.

61. Alimi, I.A., Teixeira, A.L. and Monteiro, P.P., 2018. Toward an efficient C-RAN optical fronthaul for the future networks: A tutorial on technologies, requirements, challenges, and solutions. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20(1), pp.708–769.
62. Mukherjee, B., 2018. *Optical WDM Networks*. Springer.
63. Sambo, N., Cugini, F., Castoldi, P., 2016. Optical networking for 5G transport. *Journal of Optical Communications and Networking*, 8(10), pp.B92–B103.
64. Checko, A., Berger, M.S., Lorenzen, M.J., 2017. Energy and cost analysis of C-RAN deployment for mobile network evolution. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 28(3), e2990.
65. Khan, M. and Han, C., 2019. Cost-effective deployment of 5G infrastructure: Challenges and directions. *IEEE Access*, 7, pp.96726–96740.
66. Fehske, A., Fettweis, G., Malmudin, J. and Biczok, G., 2011. The global footprint of mobile communications: The ecological and economic perspective. *IEEE Communications Magazine*, 49(8), pp.55–62.
67. Wu, J., Zhang, Z., Hong, Y. and Wen, Y., 2014. Cloud radio access network (C-RAN): a primer. *IEEE Network*, 29(1), pp.35–41.
68. Alimi, I.A., Teixeira, A.L. and Monteiro, P.P., 2018. Toward an efficient C-RAN optical fronthaul for the future networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20(1), pp.708–769.
69. European Commission, 2020. *Shaping Europe’s digital future: The European Green Deal and digital transformation*. Brussels: EU Publications.
70. Marsan, M.A., Meo, M., 2011. Energy efficient network design: Operation, modeling, and optimization. *IEEE Communications Magazine*, 49(8), pp.130–137.
71. Zhang, J., Wang, H., Wang, C.X. and Ge, X., 2017. Radio over fiber for 5G: recent advances and future directions. *IEEE Communications Magazine*, 55(2), pp.144–150.
72. Khan, M. and Han, C., 2019. Cost-effective deployment of 5G infrastructure: Challenges and directions. *IEEE Access*, 7, pp.96726–96740.
73. Ghassemlooy, Z., Popoola, W. and Rajbhandari, S., 2019. *Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB*. 2nd ed. CRC Press.
74. Li, X., Zhao, H., Liu, X. and Liu, H., 2018. Network slicing for 5G: Challenges and opportunities. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(6), pp.4275–4285.
75. Saleh, A.A.M., Yegnanarayanan, S. & Pathak, P.H., 2021. *Radio-over-Fiber Technologies for 5G and beyond*. *IEEE Communications Magazine*, 59(6), pp.66–72.
76. Zhang, J., Wang, H., Wang, C.X. & Ge, X., 2017. *Radio over fiber for 5G: recent advances and future directions*. *IEEE Communications Magazine*, 55(2), pp.144–150.
77. Khan, M. & Han, C., 2019. *Cost-effective deployment of 5G infrastructure: Challenges and directions*. *IEEE Access*, 7, pp.96726–96740.

78. Alimi, I.A., Teixeira, A.L. & Monteiro, P.P., 2018. *Toward an efficient C-RAN optical fronthaul for the future networks: A tutorial on technologies, requirements, challenges, and solutions*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 20(1), pp.708–769.
79. Cartaxo, A. V. T., et al. (2020). "Resilience of optical networks to electromagnetic interference: Challenges and opportunities." Journal of Lightwave Technology, 38(4), 866–878.
80. Cheng, J., et al. (2019). "Low interference photonic transmission for millimeter-wave over fiber systems." Optics Express, 27(16), 23125–23137.
81. Lee, C.-H., et al. (2018). "Mitigation of EMI in 5G RoF networks through photonic signal transmission." IEEE Photonics Journal, 10(5), 1–10.
82. Zhang, H., et al. (2021). "EMI immunity and signal fidelity in fiber-based fronthaul architectures for beyond 5G." IEEE Access, 9, 77432–77441.
83. Gupta, A., & Jha, R. K. (2015). "A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies." IEEE Access, 3, 1206–1232.
84. Hadzialic, M., et al. (2013). "Cloud-RAN: Innovative Radio Access Network Architecture." International Journal of Electronics and Communications, 68(7), 537–545.
85. Checko, A., et al. (2015). "Cloud RAN for Mobile Networks—A Technology Overview." IEEE Communications Surveys & Tutorials, 17(1), 405–426.
86. Yi, P., et al. (2018). "A Unified Network Architecture for Integrated 5G HetNet." IEEE Network, 32(2), 20–27.
87. Ghassemlooy, Z., Popoola, W. & Rajbhandari, S., 2019. *Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB*. 2nd ed. CRC Press.
88. Saleh, A.A.M., Yegnanarayanan, S. & Pathak, P.H., 2021. *Radio-over-Fiber Technologies for 5G and beyond*. IEEE Communications Magazine, 59(6), pp.66–72.
89. Alimi, I.A., Teixeira, A.L. & Monteiro, P.P., 2018. *Toward an efficient C-RAN optical fronthaul for the future networks: A tutorial on technologies, requirements, challenges, and solutions*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 20(1), pp.708–769.
90. Zhang, J. et al., 2017. *Radio over fiber for 5G: recent advances and future directions*. IEEE Communications Magazine, 55(2), pp.144–150.
91. Sharma, S.K. & Chatterjee, S., 2020. *Radio over Fiber Technology for Mobile Fronthaul in 5G*. In: Singh, R. (Ed.), *Optical and Wireless Convergence for 5G Networks*. Wiley, pp.115–138.
92. Ghassemlooy, Z., Popoola, W. & Rajbhandari, S., 2019. *Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB*. CRC Press.
93. Chitimalla, R. et al., 2017. *5G Fronthaul – Latency and jitter studies of CPRI over Ethernet*. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 13(2), pp.703–713.
94. Qin, Y. et al., 2020. *Network slicing in 5G: Architecture, benefits, and challenges*. IEEE Network, 34(3), pp.95–101.

95. Rappaport, T.S. et al., 2013. *Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!*. IEEE Access, 1, pp.335–349.
96. Nguyen, H.C. et al., 2018. *A survey on fronthaul-centric radio access network architectures and techniques for 5G networks*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 20(4), pp.3257–3284.
97. Alimi, I.A., Teixeira, A.L. & Monteiro, P.P., 2018. *Toward an efficient C-RAN optical fronthaul for the future networks: A tutorial on technologies, requirements, challenges, and solutions*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 20(1), pp.708–769.
98. Checko, A. et al., 2015. *Cloud RAN for mobile networks – A technology overview*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 17(1), pp.405–426.
99. Nguyen, H.C. et al., 2018. *A survey on fronthaul-centric radio access network architectures and techniques for 5G networks*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 20(4), pp.3257–3284.
100. Wu, Y. et al., 2015. *Wireless fronthaul technologies for 5G: Application scenarios and technical challenges*. IEEE Communications Magazine, 53(2), pp.50–57.
101. Rommel, S. et al., 2018. *Photonic integration in radio-over-fiber fronthaul networks for 5G: a technology roadmap*. Journal of Lightwave Technology, 36(12), pp.2450–2463.
102. Checko, A. et al., 2015. *Cloud RAN for mobile networks – A technology overview*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 17(1), pp.405–426.
103. Singh, S. & Kapoor, V., 2020. *Analog vs. Digital Radio over Fiber Systems for 5G Fronthaul*. Optical Fiber Technology, 54, 102075.
104. Alimi, I.A. et al., 2018. *Toward an efficient C-RAN optical fronthaul for the future networks*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 20(1), pp.708–769.
105. Ngo, H.Q., Larsson, E.G. & Marzetta, T.L., 2013. *Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems*. IEEE Transactions on Communications, 61(4), pp.1436–1449.
106. Yu, H. et al., 2016. *Hybrid optical-wireless access networks for 5G and beyond*. IEEE Access, 4, pp.1327–1340.
107. Liu, X. et al., 2024. *5G New Radio Fiber-Wireless Converged Systems via Injection Locking for mmWave and Sub-THz Transmission*. Nature Communications, 15, 2291. <https://www.nature.com/articles/s44172-024-00295-0>
108. Pizzinat, A. et al., 2025. *Coexistence of Digital Coherent, mmWave and sub-THz Analog RoF Services using OSaaS over Converged Access-Metro Live Production Network*. arXiv preprint. <https://arxiv.org/abs/2505.17809>
109. Ban, Y. et al., 2024. *Digital Predistortion Techniques for Linearizing Radio-over-Fiber Systems in 5G Networks*. Photonics, 11(3), 312. <https://www.mdpi.com/2304-6732/11/3/312>

110. Matsuda, N. et al., 2023. *Adaptive Linearization in A-RoF mmWave Systems for Enhanced Signal Quality*. IEEE Photonics Journal, 15(5), 7502312.
111. Hattori, M. et al., 2024. *Feedforward Linearization for High-Frequency RoF Links Using Wideband Photodetectors*. Journal of Lightwave Technology, 42(1), pp. 118–126.
112. Ahn, D. & Park, J., 2023. *Power over Fiber: Technologies and Applications for Next-Generation Access Networks*. IEEE Photonics Journal, 15(2), 8200410.
113. Guo, Y. et al., 2024. *Simultaneous Data and Power Transmission over Single-Mode Fiber Using RoF and PoF Techniques*. Optics and Laser Technology, 167, 109639. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S003040182400052X>
114. Kim, Y. et al., 2025. *High-Speed and High-Power Photodiodes for Analog Radio-over-Fiber Systems in the C-Band*. Preprints.org. <https://www.preprints.org/manuscript/202504.2204/v1>
115. Sato, H. et al., 2023. *Development of 100-GHz UTC-PDs for mmWave RoF Applications*. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 13(1), pp. 24–31.
116. Zhang, L. et al., 2024. *Photodiode Arrays for WDM-enabled Radio over Fiber Systems: Design and Integration in PICs*. Journal of Lightwave Technology, 42(5), pp. 1556–1564.
117. Yu, C., Yu, L., Wu, Y., He, Y., & Lu, Q. (2017). Uplink scheduling and link adaptation for narrowband Internet of Things systems. *IEEE Access*, 5, 1724-1734.
118. Alimi, I., Shahpari, A., Sousa, A., Ferreira, R., Monteiro, P., & Teixeira, A. (2017). Challenges and opportunities of optical wireless communication technologies. *Optical communication technology*, 10.
119. Ejaz, W., Anpalagan, A., Imran, M. A., Jo, M., Naeem, M., Qaisar, S. B., & Wang, W. (2016). Internet of Things (IoT) in 5G wireless communications. *IEEE access*, 4, 10310-10314.
120. Alimi, I., Shahpari, A., Ribeiro, V., Kumar, N., Monteiro, P., & Teixeira, A. (2016, June). Optical wireless communication for future broadband access networks. In *2016 21st European conference on networks and optical communications (NOC)* (pp. 124-128). IEEE.
121. Laraqui, K., Tombaz, S., Furuskär, A., Skubic, B., Nazari, A., & Trojer, E. (2017). Fixed wireless access: On a massive scale with 5G. *Ericsson Technology Review*, 94(1), 52-65.
122. Skubic, B., Fiorani, M., Tombaz, S., Furuskär, A., Mårtensson, J., & Monti, P. (2017). Optical transport solutions for 5G fixed wireless access. *Journal of Optical Communications and Networking*, 9(9), D10-D18.
123. Schnauffer, D. (2018). Things to Consider When Designing Fixed Wireless Access (FWA) Systems. *United States of America: Qorvo*.

124. Pinho, C., Shahpari, A., Alimi, I., Lima, M., & Teixeira, A. (2016, July). Optical transforms and CGH for SDM systems. In *2016 18th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)* (pp. 1-4). IEEE.
125. Alimi, I. A., Tavares, A., Pinho, C., Abdalla, A. M., Monteiro, P. P., & Teixeira, A. L. (2019). Enabling optical wired and wireless technologies for 5G and beyond networks. In *Telecommunication systems-principles and applications of wireless-optical technologies*. IntechOpen.
126. Torres-Ferrera, P., Straullu, S., Abrate, S., & Gaudino, R. (2017). Upstream and downstream analysis of an optical fronthaul system based on DSP-assisted channel aggregation. *Journal of Optical Communications and Networking*, 9(12), 1191-1201.
127. Alimi, I. A., Teixeira, A. L., & Monteiro, P. P. (2017). Toward an efficient C-RAN optical fronthaul for the future networks: A tutorial on technologies, requirements, challenges, and solutions. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20(1), 708-769.
128. Yu, H., Zhang, J., Ji, Y., & Tornatore, M. (2018). Energy-efficient dynamic lightpath adjustment in a decomposed AWGR-based passive WDM fronthaul. *Journal of Optical Communications and Networking*, 10(9), 749-759.
129. Alimi, I. A., Monteiro, P. P., & Teixeira, A. L. (2017). Analysis of multiuser mixed RF/FSO relay networks for performance improvements in cloud computing-based radio access networks (CC-RANs). *Optics Communications*, 402, 653-661.
130. Alimi, I. A., Monteiro, P. P., & Teixeira, A. L. (2017). Outage probability of multiuser mixed RF/FSO relay schemes for heterogeneous cloud radio access networks (H-CRANs). *Wireless Personal Communications*, 95, 27-41.
131. Fuchuan, Z. (2018). Challenges and trends for 5G transport. *ZTE Technologies*, 20(2), 19-21.
132. Ghassemlooy, Z., Popoola, W., & Rajbhandari, S. (2019). *Optical wireless communications: system and channel modelling with Matlab®*. CRC press.
133. Alimi, I., Shahpari, A., Ribeiro, V., Sousa, A., Monteiro, P., & Teixeira, A. (2017). Channel characterization and empirical model for ergodic capacity of free-space optical communication link. *Optics Communications*, 390, 123-129.
134. Alimi, I. A., Abdalla, A. M., Rodriguez, J., Monteiro, P. P., & Teixeira, A. L. (2017). Spatial interpolated lookup tables (LUTs) models for ergodic capacity of MIMO FSO systems. *IEEE Photonics Technology Letters*, 29(7), 583-586.
135. Wypiór, D., Klinkowski, M., & Michalski, I. (2022). Open ran—radio access network evolution, benefits and market trends. *Applied Sciences*, 12(1), 408.
136. Specification, I. (2004). Common Public Radio Interface (CPRI); Interface Specification. *IEEE Communications Standards Magazine*, 7.

137. Lyu, F., et al. (2019). "Future-proof radio-over-fiber systems for mmWave and beyond: Technologies and challenges." *IEEE Communications Magazine*, 57(7), 88–94.
138. Rastegarfar, H., et al. (2018). "Optical fiber networks for future smart cities: Technologies and deployment challenges." *IEEE Communications Magazine*, 56(1), 84–91.
139. Checko, A., et al. (2015). "Cloud RAN for Mobile Networks—A Technology Overview." *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(1), 405–426.
140. Shafi, M., et al. (2017). "5G: A Tutorial Overview of Standards, Trials, Challenges, Deployment, and Practice." *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 35(6), 1201–1221.
141. Cosmas, J., Jawad, N., Salih, M., Redana, S., & Bulakci, O. (2019). 5G PPP architecture working group view on 5G architecture.
142. Guiomar, F. P., Alimi, I. A., Monteiro, P. P., & Gameiro, A. (2018, June). Flexible infrastructure for the development and integration of access/fronthauling solutions in future wireless systems. In *2018 IEEE 19th international workshop on signal processing advances in wireless communications (SPAWC)* (pp. 1-5). IEEE.
143. Alimi, I. A., Tavares, A., Pinho, C., Abdalla, A. M., Monteiro, P. P., & Teixeira, A. L. (2019). Enabling optical wired and wireless technologies for 5G and beyond networks. In *Telecommunication systems-principles and applications of wireless-optical technologies*. IntechOpen.
144. Kalfas, G., Pleros, N., Alonso, L., & Verikoukis, C. (2016). Network planning for 802.11 ad and MT-MAC 60 GHz fiber-wireless gigabit wireless local area networks over passive optical networks. *Journal of Optical Communications and Networking*, 8(4), 206-220.
145. Stephen, R. G., & Zhang, R. (2017). Joint millimeter-wave fronthaul and OFDMA resource allocation in ultra-dense CRAN. *IEEE Transactions on Communications*, 65(3), 1411-1423.
146. Zhang, H., Dong, Y., Cheng, J., Hossain, M. J., & Leung, V. C. (2016). Fronthauling for 5G LTE-U ultra dense cloud small cell networks. *IEEE Wireless Communications*, 23(6), 48-53.
147. Chen, Q., Yu, G., Maaref, A., Li, G. Y., & Huang, A. (2016). Rethinking mobile data offloading for LTE in unlicensed spectrum. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 15(7), 4987-5000.
148. Aijaz, A., Aghvami, H., & Amani, M. (2013). A survey on mobile data offloading: technical and business perspectives. *IEEE Wireless Communications*, 20(2), 104-112.
149. Thangappan, T., & Therese, B. (2022). Overview of Fronthaul Technologies and the DBA Algorithms in XGPON-Based FH Technology in CRAN Architecture in 5G Network. In *Futuristic Communication and Network Technologies: Select Proceedings of VICFCNT 2020* (pp. 271-280). Springer Singapore.

150. Akihiro, O. (2017). Flexible Access System Architecture: FASA. *NTT Technical Review*, 15(4), 28-34.
151. De Betou, E. I., Bunge, C. A., Åhlfeldt, H., & Olson, M. (2014). WDM-PON is a key component in next generation access. *Nashua, USA: Lightwave*.
152. Chang, G. K., Chowdhury, A., Jia, Z., Chien, H. C., Huang, M. F., Yu, J., & Ellinas, G. (2009). Key technologies of WDM-PON for future converged optical broadband access networks. *Journal of Optical Communications and Networking*, 1(4), C35-C50.
153. Bogataj, T. (2018). Safe Migration to Next-Gen Optical Broadband Access: A gradual and controlled journey to XGS-PON and NG-PON2. *Kranj, Slovenia: Executive whitepaper, Iskratel*.
154. Xu, Q. (2017). What the future holds for next-generation PON technologies. *Nashua, USA: Article, Cabling Installation and Maintenance*.
155. Li, Z., Zhao, Y., Li, Y., Li, H., Xie, G., Lin, Y., & Zhang, J. (2023). Deterministic full-fiber service network for the fifth-generation fixed network (F5G). *IEEE Network*, 37(6), 189-196.
156. Wang, X., Wang, L., Cavdar, C., Tornatore, M., Figueiredo, G. B., Chung, H. S., ... & Mukherjee, B. (2016). Handover reduction in virtualized cloud radio access networks using TWDM-PON fronthaul. *Journal of Optical Communications and Networking*, 8(12), B124-B134.
157. Cheng, N., Gao, J., Xu, C., Gao, B., Liu, D., Wang, L., ... & Effenberger, F. (2014). Flexible TWDM PON system with pluggable optical transceiver modules. *Optics express*, 22(2), 2078-2091.
158. Abbas, H. S., & Gregory, M. A. (2016). The next generation of passive optical networks: A review. *Journal of network and computer applications*, 67, 53-74.
159. TEIXEIRA, A. L. J., TAVARES, A. C. M., LOPES, A. P. S., & RODRIGUES, C. E. (2019). *U.S. Patent No. 10,326,529*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.