



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αρχιτεκτονικές οπτικών δικτύων για τη μετάβαση στο 6G

ΝΟΥΡ ΑΛΟΣΑΜΙ
A.M. : 141233

Εισηγητής: ΑΝΤΩΝΗΣ, ΜΠΟΓΡΗΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αρχιτεκτονικές οπτικών δικτύων για τη μετάβαση στο 6G

**ΝΟΥΡ ΑΛΟΣΑΜΙ
Α.Μ. :141233**

Εισηγητής: ΑΝΤΩΝΗΣ, ΜΠΟΓΡΗΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Εξεταστική Επιτροπή:

**ΝΙΚΟΛΑΟΣ, ΜΥΡΙΔΑΚΗΣ, ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ, ΚΑΡΚΑΖΗΣ, ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

Ημερομηνία εξέτασης

11 ΟΚΤΩΒΡΙΟΥ 2024

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Νουρ Αλοσάμι του Μοχάμμεντ με αριθμό μητρώου 141233, φοιτήτρια του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής και Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής δηλώνω ότι:

«Βεβαιώνω 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 συγγράφει 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 πτυχίου μου».

Ο/Η Δηλών/ούσα

Νουρ Αλοσάμι



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώθηκε μετά από επίμονες προσπάθειες, σε ένα ενδιαφέρον γνωστικό αντικείμενο, όπως αυτό της επεξεργασίας κειμένου. Αισθάνομαι βαθιά ευγνωμοσύνη και ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Αντώνη Μπόγρη, του οποίου η πολύτιμη καθοδήγηση, η θετική του συνεργασία, η αφοσίωση καθώς και η διδασκαλία του αποτέλεσαν φάρο στην ακαδημαϊκή μου πορεία. Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους διδάσκοντες που με βοήθησαν να διευρύνω τις γνώσεις μου και να αναπτύξω την κριτική μου σκέψη καθώς και την διάρκεια της φοίτησης μου χαρίζοντάς μου εφόδια για το μέλλον. Επιπρόσθετα θα ήθελα να εκφράσω την εκτίμηση μου στην σχολή μου για τις εκπαιδευτικές ευκαιρίες και την ακαδημαϊκή υποδομή που μου παρείχε, επιτρέποντάς μου να εξελιχθώ επιστημονικά και προσωπικά.

Τέλος εκφράζω την ευγνωμοσύνη μου και το από καρδιάς ευχαριστώ στους γονείς μου και στους στενούς μου φίλους. Η αδιάκοπη υποστήριξη, πίστη, υπομονή και μεγάλη αγάπη που μου προσέφεραν έπαιξαν σημαντικό ρόλο στις δυνατότητές μου καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου και με ενδυνάμωσαν να υπερβώ κάθε εμπόδιο. Η συνεισφορά τους υπήρξε καθοριστική για την επίτευξη των στόχων μου και την εξέλιξη μου μέχρι σήμερα. Κάθε επιτυχία μου είναι αφιερωμένη σε αυτούς που με στήριξαν ψυχολογικά και οικονομικά σε αυτή τη διαδρομή, όσο δύσκολη κι αν ήταν.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα ευρυζωνικά δίκτυα οπτικής πρόσβασης (broadband optical access networks) δεν έχουν σταματήσει να εξελίσσονται καθώς συνεχώς αυξάνεται η ζήτηση εύρους ζώνης, οι πελάτες και οι απαιτήσεις για μεγαλύτερες ταχύτητες και ποιότητα. Συνήθως αναφέρονται ως Fiber-To-The-(FTT), και ακολουθεί το λεκτικό του τελικού σημείου σύνδεσης. Η τοπολογία σύνδεσης μπορεί να είναι ένα φυσικό σημείο προς ένα άλλο (P2P) ή προς πολλαπλό (σύνδεση P2MP). Στην ουσία πρόκειται για άμεση σύνδεση τελικού χρήστη με οπτική ίνα. Τα παθητικά οπτικά δίκτυα (passive optical networks) χρησιμοποιούν σύνδεση P2MP και ένα μη τροφοδοτούμενο οπτικό δίκτυο διανομής (unpowered optical distribution network - ODN), εξοικονομώντας κόστος, λόγω του μικρού αριθμού πομποδεκτών και της υψηλής ενεργειακής απόδοσης. Τα παραπάνω πλεονεκτήματα βρίσκουν εφαρμογή ακόμα και στην επικείμενη μετάβαση σε τηλεφωνικά δίκτυα 6G όπου οι υψηλότερες συχνότητες φορέα θα απαιτούν κυψέλες μικρότερης εμβέλειας, μικρότερου μεγέθους και υψηλής πυκνότητας. Το 2020 υπολογίστηκε ότι η μετάβαση σε δίκτυα 6G θα υπερδιπλασιάσει τις παγκόσμιες επενδύσεις σε παθητικά δίκτυα μέχρι το 2030 (μία αύξηση της τάξης του 8,7% ετησίως). Στόχος όμως των δικτύων 6G είναι η υποστήριξη ενός μεγάλου εύρους απαιτητικών εφαρμογών όπως: επαυξημένη πραγματικότητα (augmented reality – AR), από ήπτερνετ (tactile internet), ολογραφικές επικοινωνίες, διασύνδεση ανθρώπου με ρομπότ, ψηφιακή ανίχνευση κα, οπότε η ζήτηση για χωρητικότητες ευρυζωνικότητας θα είναι άνευ προηγουμένου (περισσότερο από 1Tbps). Θα υπάρχουν οπωσδήποτε απαιτήσεις για μείωση των χρονοκαθυστερήσεων, αύξηση της αξιοπιστίας και της συνδεσιμότητας.

Η παρούσα εργασία αποτελεί συστηματική βιβλιογραφική επισκόπηση των ερευνών που συνδυάζουν τα παθητικά δίκτυα με την επικείμενη τεχνολογία 6G με στόχο να αναδείξει τις σύγχρονες τάσεις και τεχνολογίες και να μπορέσει ο αναγνώστης να αποκτήσει ολοκληρωμένη εικόνα για το μέλλον.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|---|----|
| ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ | 3 |
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ | 4 |
| ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ | 7 |
| ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ..... | 7 |
| ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ | 7 |
| ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ | 9 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 13 |
| 1.1 Γενιά 1G..... | 15 |
| 1.2 Γενιά 2G..... | 16 |
| 1.3 Γενιά 3G..... | 17 |
| 1.4 Γενιά 4G..... | 19 |
| 1.5 Γενιά 5G..... | 22 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Η ΑΝΑΓΚΗ ΓΙΑ ΠΑΘΗΤΙΚΑ ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ (PONs) | 23 |
| 2.1 Ευρυζωνικότητα, ευρυζωνικά δίκτυα και υπηρεσίες | 23 |
| 2.1 Μετάβαση από point-to-point συνδέσεις σε παθητικά οπτικά δίκτυα | 24 |
| 2.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα PONs έναντι point-to-point συνδέσεων..... | 27 |
| 2.3 Τεχνολογίες και εξέλιξη παθητικών οπτικών δικτύων (PONs) | 29 |
| 2.4 Παθητικά οπτικά δίκτυα και δίκτυα 5 ^{ης} γενιάς..... | 37 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΙΧΜΗΣ ΚΑΙ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΟ OPTICAL FRONTHAUL..... | 45 |
| 3.1 Μείωση κόστους (Cost reduction)..... | 45 |
| 3.2 Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης και βιωσιμότητας (Cost efficiency and sustainability)..... | 45 |
| 3.3 Μείωση καθυστέρησης και διακύμανσης (Latency and Jitter reduction) | 46 |

| | |
|--|----|
| 3.4 Ενσωμάτωση ασύρματων τεχνολογιών σε οπτικό fronthaul..... | 47 |
| 3.4.1 Συνδυασμός οπτικών ινών και ασύρματων τεχνολογιών | 47 |
| 3.4.2 Συνδυασμός Free Space Optics (FSO) και ασύρματων τεχνολογιών | 48 |
| 3.5 Βελτιστοποίηση κατανομής πόρων (Improved resource allocation) | 48 |
| 3.6 Αξιοποίηση μηχανικής μάθησης και τεχνητή νοημοσύνης | 49 |
| 3.7 Ευελιξία και διαμόρφωση με τη χρήση Software Defined Networks (SDNs)... | 50 |
| 3.8 Αύξηση της χωρητικότητας με τη χρήση πολυπλεξίας διαίρεσης χώρου (Space Division Multiplexing -SDM)..... | 50 |
| 3.9 Αντιμετώπιση θεμάτων ασφάλειας και προστασία ιδιωτικότητας..... | 51 |
| 3.10 Συγκεντρωτικός πίνακας ερευνών για 5G/6G οπτικό fronthaul..... | 53 |
| 3.11 Ερευνητικά προγράμματα σχετικά με το οπτικό 5G+/6G fronthaul | 58 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΔΙΚΤΥΑ 6 ^η ΓΕΝΙΑΣ ΚΑΙ ΠΑΘΗΤΙΚΑ ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ (PONS) | 61 |
| 4.1 Ανάγκη για μεγαλύτερη χωρητικότητα, αξιοπιστία, ντετερμινιστική απόδοση | 63 |
| 4.1.1 Χωρητικότητα (capacity)..... | 67 |
| 4.1.2 Χρονοκαυστέρηση (latency) | 67 |
| 4.2 Βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση (energy efficiency) και αξιοπιστία και ανθεκτικότητα δικτύου (network resilience)..... | 69 |
| 4.3 Θέματα ασφαλείας | 70 |
| 4.4 Απαιτήση για ανάπτυξη συνοδευόμενων τεχνολογιών | 71 |
| 4.5 Αποδοτικό κόστος ανάπτυξης (cost efficient development) | 72 |
| 4.6 Προβλήματα συμβατότητας | 73 |
| 4.7 Προηγμένες τεχνικές παρακολούθησης, μοντελοποίησης και διάγνωσης (Advanced Analytics and Diagnostic Tools)..... | 74 |
| 4.8 Ψηφιακό Δίδυμο (Digital Twin) Οπτικού Fronthaul | 75 |
| 4.9 Θέματα σε σχέση με την επικοινωνία ανθρώπου και δικτύου | 76 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ | 77 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 79 |

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

| | |
|---|----|
| Διάγραμμα 1 - Χρονική εξέλιξη των παθητικών οπτικών δικτύων | 32 |
| Διάγραμμα 2 - Χρονοδιάγραμμα εξέλιξης τεχνολογίας ευρυζωνικών παθητικών οπτικών δικτύων και δικτύων κινητής τηλεφωνίας..... | 35 |
| Διάγραμμα 3 - Προοπτική 6G - Εφαρμογές, τάσεις και τεχνολογίες..... | 62 |

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

| | |
|--|----|
| Σχήμα 1 - Κυβερνοφυσικό συνεχές από την εταιρεία Ericsson | 14 |
| Σχήμα 2 - Αρχιτεκτονική Προηγμένου Συστήματος Κινητής Τηλεφωνίας (Advanced Mobile Phone System - AMPS)..... | 15 |
| Σχήμα 3 - Αρχιτεκτονική συστήματος GPRS | 17 |
| Σχήμα 4 - Αρχιτεκτονική δικτύου 3G..... | 19 |
| Σχήμα 5 - Αρχιτεκτονική δικτύου 4G..... | 21 |
| Σχήμα 6 - Τοπολογίες παθητικών οπτικών δικτύων (passive optical networks)..... | 26 |
| Σχήμα 7 - Συνδεσμολογία παθητικού οπτικού δικτύου (παθητικό αστέρι - passive star) | 27 |
| Σχήμα 8 – Ιστορικό παθητικών οπτικών δικτύων και ανάπτυξη δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Όπου λ κανάλι μήκους κύματος | 36 |
| Σχήμα 9 - Παροχή broadband και 5G fronthaul από παθητικά οπτικά δίκτυα (PONs) | 41 |
| Σχήμα 10 - Αρχιτεκτονική δικτύου ραδιομετάδοσης 5G..... | 44 |
| Σχήμα 11 - Δίκτυο πρόσβασης γενιάς 6G | 69 |

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

| | |
|--|----|
| Πίνακας 1 - Συγκριτικός πίνακας των γενιών κινητής τεχνολογίας | 22 |
| Πίνακας 2 - Συγκριτικός πίνακας πλεονεκτημάτων-μειονεκτημάτων PONs έναντι point-to-point συνδέσεων | 28 |

| | |
|---|----|
| Πίνακας 3 - Βασικές τεχνολογίες, πρότυπα και χαρακτηριστικά των παθητικών οπτικών δικτύων..... | 30 |
| Πίνακας 4 - Χαρακτηριστικά μεγέθη GPON XG-PON και XGS-PON..... | 34 |
| Πίνακας 5 - Συγκεντρωτικός πίνακας ερευνητικών project για το οπτικό fronthaul Beyond 5G και 6G | 58 |
| Πίνακας 6 - Απαιτήσεις δικτύων 5G/6G..... | 65 |
| Πίνακας 7 - Απαιτήσεις μέγιστης χρονοκαυστέρησης σε προτεινόμενες τεχνολογίες 6G | 68 |

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

| | |
|---------------|---|
| 1G | First Generation |
| 2G | Second Generation |
| 3G | Third Generation |
| 4G | Fourth Generation |
| 5G | Fifth Generation |
| 6G | Sixth Generation |
| 3GPP | 3rd Generation Partnership Project |
| AI | Artificial Intelligence |
| AR | Augmented Reality |
| ARQ | Automatic Repeat Request |
| ATM | Asynchronous Transfer Mode |
| BBU | BaseBand Unit |
| BS | Base Station |
| CA | Carrier Aggregation |
| CDMA | Code Division Multiple Access |
| CoE | CPRI over Ethernet |
| CoMP | Coordinated Multi-Point |
| COTS | Commercial Off-The-Shelf |
| CPRI | Common Public Radio Interface |
| C-RAN | Centralized/Cloud Radio Access Network |
| CU | Central Unit |
| CWDM | Coarse Wavelength Division Multiplexing |
| D-RAN | Distributed RAN |
| DA-RAN | DisAggregated-RAN |
| DAS | Distributed Antenna Systems |
| DBA | Dynamic Bandwidth Allocation |
| DFT-S | Discrete Fourier Transform Spread |
| DL | DownLink |
| DT | Digital Twin |
| DU | Distributed Unit |
| DWBA | Dynamic Wavelength and Bandwidth Allocation |

| | |
|---------------|---|
| DWDM | Dense Wavelength Division Multiplexing |
| EB | Exabytes |
| eICIC | enhanced Inter-Cell Interference Cancellation |
| eCPRI | ethernet Common Public Radio Interface |
| EDR | Enhanced Data Rate |
| eMBB | enhanced Mobile BroadBand |
| FDMA | Frequency Division Multiple Access |
| FiWi | Fiber-Wireless |
| F-RAN | Fog Radio Access Network |
| FSO | Free Space Optics |
| FTTH | Fiber To The Home |
| GSM | Global System for Mobile communication |
| HAP | High Altitude Platform |
| H-CRAN | Heterogeneous C-RAN |
| HDR | High Data Rate |
| HetNet | Heterogeneous Network |
| HPC | High-Performance Computing |
| HSP | High Speed PON |
| IA | Interference Alignment |
| I/Q | In-phase Signal/Quadrature Waveform |
| IEEE | Institute of Electrical and Electronics Engineers |
| IoT | Internet of Things |
| LAN | Local Area Network |
| LoS | Line-of-Sight |
| LTE | Long-Term Evolution |
| M2M | Machine-to-Machine |
| MAC | Media Access Control |
| MIMO | Multi-Input-Multi-Output |
| MMTC | massive Machine-To-Machine Communications |
| mmWave | millimeter Wave |
| MNO | Mobile Network Operator |
| NDR | Next Data Rate |
| NFV | Network Function Virtualization |

| | |
|----------------|--|
| NG-OAN | Next-Generation Optical Access Network |
| NG-PON2 | Next Generation Passive Optical Networks stage 2 |
| OBSAI | Open Base Station Architecture Initiative |
| OCDM | Optical Code Division Multiplexing |
| ODN | Optical Distribution Network |
| OFDM | Orthogonal Frequency Division Multiplexing |
| OLT | Optical Line Terminal |
| OMA | Orthogonal Multiple Access |
| ONU | Optical Network Unit |
| OPM | Optical Performance Monitoring |
| O-RAN | Open Radio Access Network |
| ORI | Open Radio Interface |
| P2MP | Point-to-MultiPoint |
| P2P | Point-to-Point |
| PAM-4 | Four-level Pulsed Amplitude Modulation |
| PDCP | Packet Data Convergence Protocol |
| PDM-PON | Polarization Division Multiplexing-PON |
| PDU | Protocol Data Unit |
| PHY | Physical Layer |
| PON | Passive Optical Network |
| QAM | Quadrature Amplitude Modulation |
| QDR | Quad Data Rate |
| QoS | Quality of Service |
| QSFP | Quad Small Form-factor Pluggable |
| RAN | Radio Access Network |
| RCA | Root Cause Analysis |
| RE | Radio Equipment |
| REC | Radio Network Controller |
| RF | Radio Frequency |
| RLC | Radio Link Control |
| RNC | Radio Network Controller |
| RoF | Radio over Fiber |
| RRC | Radio Resource Control |
| RRH | Remote Radio Head |

| | |
|----------------|---|
| RSP | Radio Signal Processing |
| RU | Radio Unit |
| SAN | Storage Area Network |
| SDM | Space Division Multiplexing |
| SM-MIMO | Sparse Massive-Multiple Input Multiple Output |
| SDN | Software Defined Network |
| SFP | Small Form-factor Pluggable |
| SIC | Successive Interference Cancellation |
| SMS | Short Messaging Service |
| SSII | Self-Induced Intermodulation Interference |
| TDM | Time Division Multiplexing |
| TDMA | Time Division Multiple Access |
| TWDM | Time and Wavelength Division Multiplexing |
| UAV | Unmanned Aerial Vehicle |
| UMTS | Universal Mobile Telecommunications System |
| URLLC | Ultra-Reliable and Low-Latency Communications |
| V2X | Vehicle-to-everything |
| vBBU | Virtual BaseBand Unit |
| VR | Virtual Reality |
| vRAN | Virtualized Radio Access Network |
| WDM | Wavelength Division Multiplexing |
| XDR | eXtreme Data Rate |
| XR | Extended Reality |
| ZB | Zetabytes |

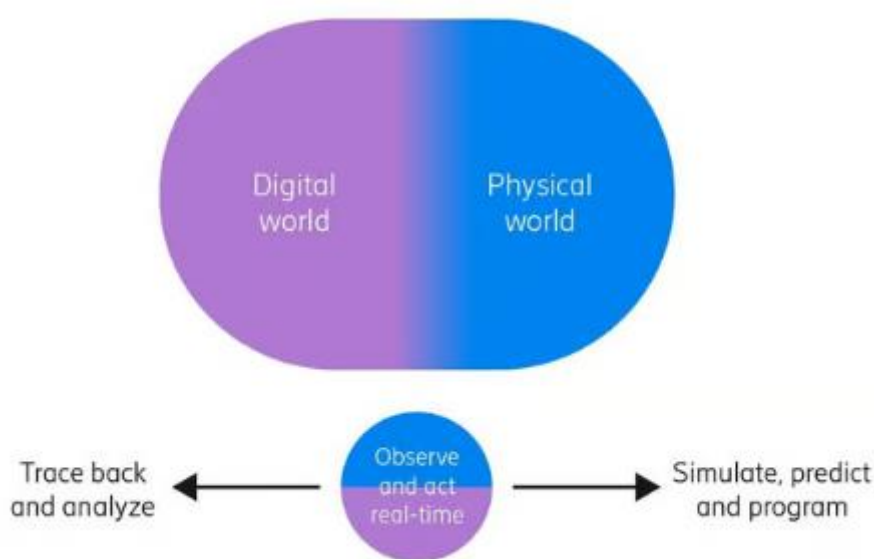
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα ευρυζωνικά δίκτυα οπτικής πρόσβασης (broadband optical access networks) δεν έχουν σταματήσει να εξελίσσονται καθώς συνεχώς αυξάνεται η ζήτηση εύρους ζώνης, οι πελάτες και οι απαιτήσεις για μεγαλύτερες ταχύτητες και ποιότητα. Συνήθως αναφέρονται ως Fiber-To-The-(FTT), και ακολουθεί το λεκτικό του τελικού σημείου σύνδεσης. Η τοπολογία σύνδεσης μπορεί να είναι ένα φυσικό σημείο προς ένα άλλο (P2P) ή προς πολλαπλό (σύνδεση P2MP). Στην ουσία πρόκειται για άμεση σύνδεση τελικού χρήστη με οπτική ίνα. Τα παθητικά οπτικά δίκτυα (passive optical networks) χρησιμοποιούν σύνδεση P2MP και ένα μη τροφοδοτούμενο οπτικό δίκτυο διανομής (unpowered optical distribution network - ODN), εξοικονομώντας κόστος, λόγω του μικρού αριθμού πομποδεκτών και της υψηλής ενεργειακής απόδοσης. Τα παραπάνω πλεονεκτήματα βρίσκουν εφαρμογή ακόμα και στην επικείμενη μετάβαση σε τηλεφωνικά δίκτυα 6G όπου οι υψηλότερες συχνότητες φορέα θα απαιτούν κυψέλες μικρότερης εμβέλειας, μικρότερου μεγέθους και υψηλής πυκνότητας (Ali et al., 2020; Bourdoux et al., 2020; Ranaweera et al., 2022; E. Wong, 2022)

Με τον όρο γενιά κυψελοειδούς ασύρματου δικτύου (G) εννοείται «... μία θεμελιώδης, δομική και μη αντιστρεπτή αλλαγή σε μία τεχνολογία μετάδοσης πληροφορίας η οποία μπορεί να περιλαμβάνει νέες ζώνες συχνοτήτων...» (Sharma, 2013, p. 47). Από το 1981 που εμφανίστηκε η τεχνολογία 1G, κάθε περίπου 10 χρόνια εμφανιζόταν και νέα γενιά ασύρματων δικτύων. Οι δύο πρώτες γενιές 1G και 2G ήταν αναλογικές και ακολούθησε το 3G που υποστήριζε πολυμεσικές εφαρμογές και διευρυμένο φάσμα μετάδοσης. Από το 2011 μέχρι και σήμερα η τεχνολογία στηρίζεται στο πρωτόκολλο IP (Internet Protocol) και αποκαλείται γενιά 4G ενώ από το 2019 εμφανίστηκε η γενιά 5G ενσωματώνοντας και την πρόοδο στην τεχνητή νοημοσύνη προσφέροντας μεγαλύτερες ταχύτητες και μικρότερη χρονοκαθυστέρηση (Duda, A. and Sreenan, 2003; Sharma, 2013).

Το όραμα για την επόμενη γενιά δικτύων τηλεπικοινωνιών (6G) είναι η ενοποίηση του ψηφιακού και του φυσικού κόσμου. Η έλευση της γενιάς αυτής των δικτύων υπολογίζεται να γίνει γύρω στο 2030. Στόχος των ερευνητών και των βιομηχανιών που συντελούν στην ανάπτυξη των δικτύων 6G είναι η βελτίωση των χαρακτηριστικών των προηγούμενων γενιών όπως χωρητικότητα, κάλυψη, ρυθμό μετάδοσης, χαμηλής απόκρισης, αλλά και η ανάπτυξη νέων χαρακτηριστικών που θα σχετίζονται με τη

διάθεση και πρόβλεψη των υπηρεσιών, την αξιοπιστία, την ενεργειακή απόδοση και τη βιωσιμότητα. Τα παραπάνω θα πρέπει να επιτευχθούν με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη απόδοση κόστους (cost effectiveness) αλλά και να διασφαλιστεί η ομαλή μετάβαση στην γενιά 6G από τις παλαιότερες γενιές, δηλαδή η ταυτόχρονη υποστήριξη παλαιότερων συνδέσεων. Η πρόοδος στην τεχνητή νοημοσύνη, στην παραλληλοποίηση των υπολογιστών αλλά και η ολοένα μεγαλύτερη χρήση της υπολογιστικής νέφους (cloud computing) θεωρείται ότι είναι η κινητήριος δύναμη της νέας γενιάς δικτύων 6G (Cagenius et al., 2023)



Σχήμα 1 - Κυβερνοφυσικό συνεχές από την εταιρεία Ericsson

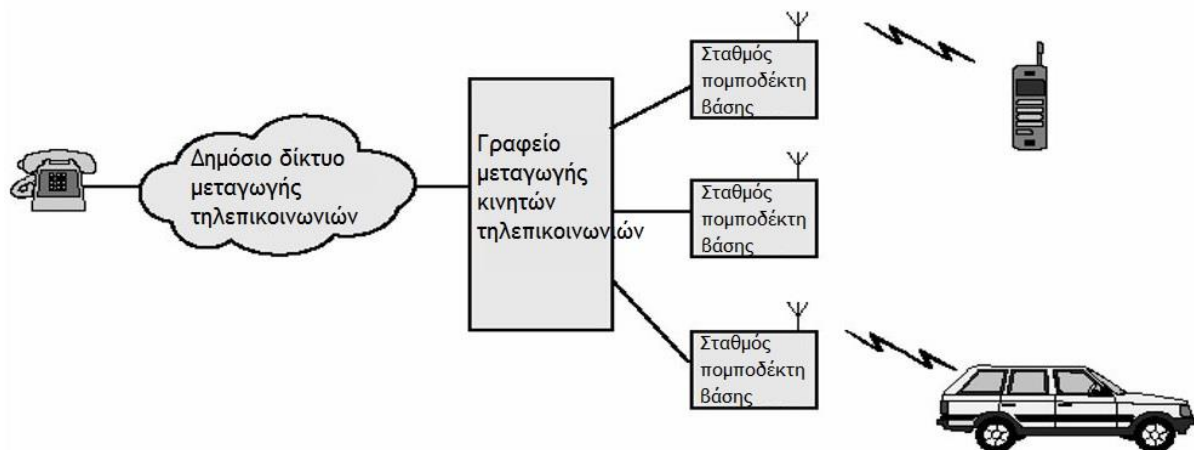
(Cagenius et al., 2023)

Το 2020 υπολογίστηκε ότι η μετάβαση σε δίκτυα 6G θα υπερδιπλασιάσει τις παγκόσμιες επενδύσεις σε παθητικά δίκτυα μέχρι το 2030 (μία αύξηση της τάξης του 8,7% ετησίως). Στόχος όμως των δικτύων 6G είναι η υποστήριξη ενός μεγάλου εύρους απαιτητικών εφαρμογών όπως: επαυξημένη πραγματικότητα (augmented reality – AR), απτό ίντερνετ (tactile internet), ολογραφικές επικοινωνίες, διασύνδεση ανθρώπου με ρομπότ, ψηφιακή ανίχνευση κα, οπότε η ζήτηση για χωρητικότητες ευρυζωνικότητας θα είναι άνευ προηγουμένου (περισσότερο από 1Tbps). Θα υπάρχουν οπωσδήποτε απαιτήσεις για μείωση των χρονοκαθυστερήσεων, αύξηση της αξιοπιστίας και της συνδεσιμότητας (Ali et al., 2020; Bourdoux et al., 2020; Ranaweera et al., 2022; E. Wong, 2022).

Η παρούσα εργασία αποτελεί συστηματική βιβλιογραφική επισκόπηση των ερευνών που συνδυάζουν τα παθητικά δίκτυα με την επικείμενη τεχνολογία 6G με στόχο να αναδείξει τις σύγχρονες τάσεις και τεχνολογίες και να μπορέσει ο αναγνώστης να αποκτήσει ολοκληρωμένη εικόνα για το μέλλον.

1.1 Γενιά 1G

Το 1983 ανακοινώθηκε ως πατέντα από τις εταιρείες Bell Labs και Motorola το πρώτο ασύρματο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο στηριζόμενη στην τεχνολογία που ονομάστηκε: Προηγμένο Σύστημα Κινητής Τηλεφωνίας (Advanced Mobile Phone System - AMPS) (Anju & Gawas, 2015; AT & T, 2011). Η τεχνολογία σχεδιάστηκε αποκλειστικά για την μεταφορά φωνής, είχε διαμόρφωση συχνότητας και χρησιμοποιούσε πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης συχνότητας (Frequency Division Multiple Access - FDMA) με χωρητικότητα καναλιού 30KHz και ζώνη συχνοτήτων μεταξύ 824 και 894 MHz. Μερικά χρόνια μετά στα συστήματα AMPS ενσωματώθηκε εύρος ζώνης 10 MHz που αποκαλέστηκε Διευρυμένο Φάσμα (Expended Spectrum) το οποίο ήταν διαθέσιμο για την πόλη του Σικάγο των Ηνωμένων Πολιτειών σε μία ακτίνα περίπου 5,5 τετραγωνικών χιλιομέτρων (Anju & Gawas, 2015).



Σχήμα 2 - Αρχιτεκτονική Προηγμένου Συστήματος Κινητής Τηλεφωνίας (Advanced Mobile Phone System - AMPS)

(Kulubi, 2016)

Η αρχιτεκτονική AMPS αποτέλεσε τη βάση των συστημάτων τηλεπικοινωνιών 2G (Anju & Gawas, 2015; Kulubi, 2016)

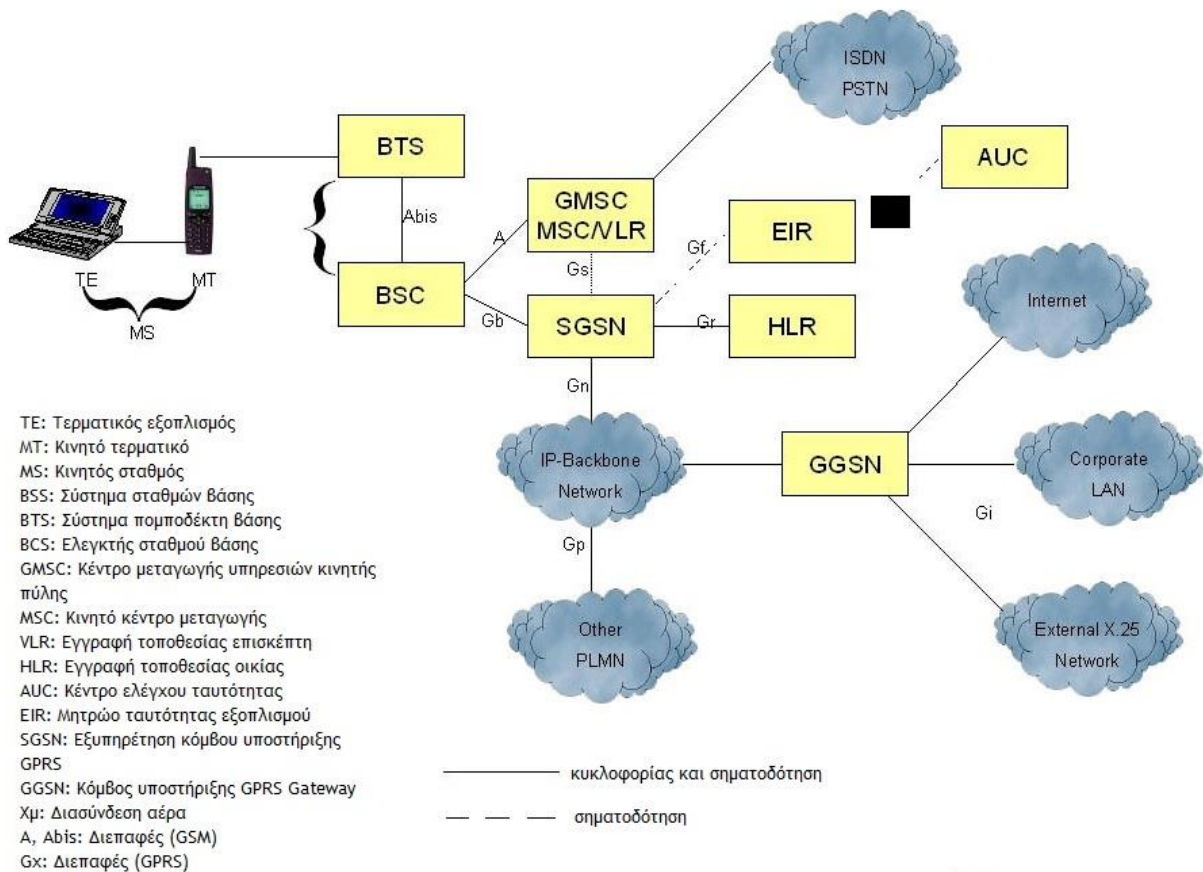
1.2 Γενιά 2G

Η δεύτερη γενιά τηλεπικοινωνιακού συστήματος ήταν ψηφιακή τεχνολογία που ενσωματώθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1980. Χρησιμοποιούσε ψηφιακά σήματα για μετάδοση φωνής με ταχύτητα μέχρι και 64 Kbps. Το εύρος ζώνης της τεχνολογίας 2G ήταν μεταξύ 30 και 200 KHz και ενσωμάτωνε υπηρεσίες όπως την υπηρεσία μεταφοράς σύντομων μηνυμάτων κειμένου (Short Messaging Service – SMS), εικόνων και πολυμέσων (Multimedia Message Service – MMS). Χρησιμοποιούσε συνδυασμούς ψηφιακής διαμόρφωσης όπως Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Χρόνου (Time Division Multiple Access – TDMA) και Πολλαπλή Πρόσβαση με Διαίρεση Κώδικα (Code Division Multiple Access – CDMA). Η διαμόρφωση TDMA επιτρέπει τη διαίρεση των σημάτων σε χρονοθυρίδες (time slots). Η διαμόρφωση CDMA παρείχε σε κάθε χρήστη έναν ειδικό κωδικό για επικοινωνία μέσω ενός πολυπλεξικού (multiplex) φυσικού καναλιού. Οι βασικές τεχνολογίες TDMA ήταν: Global System for Mobile (GSM), Personal Digital Cellular (PDC), integrated Digital Enhanced Network (iDEN). Το πρώτο ψηφιακό σύστημα παρουσιάστηκε στη Βόρεια Αμερική το οποίο ονομάστηκε Interim Standard (IS-54) (North America TDMA Digital Cellular), και αργότερα το 1996 ενσωμάτωσε πρόσθετες πληροφορίες και ονομάστηκε Interim Standard (IS-136) (Sharma, 2013). Για τη διαμόρφωση CDMA χρησιμοποιήθηκε η τεχνολογία: Interim Standard 95 (IS-95) η οποία ονομάζεται και CDMAOne (Anju & Gawas, 2015; Prabhakar, 2013) και εμφανίστηκε για πρώτη φορά το 1993 (Sharma, 2013).

Το πρότυπο GSM αξιοποιήθηκε εμπορικά για πρώτη φορά στη Φινλανδία το 1991 (Anju & Gawas, 2015). Τα συστήματα 2G προσέφεραν υψηλότερη απόδοση φάσματος, καλύτερες υπηρεσίες δεδομένων και πιο προηγμένη περιαγωγή, σε σύγκριση με τα συστήματα πρώτης γενιάς (Sharma, 2013), και μάλιστα ήταν το πρώτο που μπορούσε να υποστηρίξει διεθνή περιαγωγή (roaming), δίνοντας τη δυνατότητα χρήσης κινητού τηλεφώνου σε κάποιες χώρες του εξωτερικού με βελτιωμένη ποιότητα (Anju & Gawas, 2015).

Η «επανάσταση» που έφερε η τεχνολογία GSM επέσυρε βελτιωμένες εκδόσεις που οδήγησαν στην ανάπτυξη βελτιωμένων συστημάτων που ονομάστηκαν γενιάς 2,5G. Η γενιά 2,5G, αξιοποιούσε τον τομέα μεταγωγής κυκλώματος της 2G αλλά και ένα τομέα μεταγωγής πακέτων, με μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης των 144 Kbps (Anju &

Gawas, 2015), ενσωματώνοντας τεχνολογίες όπως τη Γενική Πακετομεταγόμενη Ραδιούπηρεσία (General Packet Radio Service – GPRS) (Anju & Gawas, 2015; Sharma, 2013) και Βελτιωμένο ρυθμό δεδομένων για το περιβάλλον GSM (Enhanced Data rates in GSM Environment – EDGE). Το GPRS παρείχε τα πρωτόκολλα μεταγωγής πακέτων, απαιτούσε λίγο χρόνο εγκατάστασης για συνδέσεις ISP και τη δυνατότητα χρέωσης του συνδρομητή ανάλογα με την ποσότητα των δεδομένων που αποστέλλονται και όχι τον χρόνο που ήταν συνδεδεμένο στο δίκτυο όπως συνέβαινε μέχρι τότε (Anju & Gawas, 2015). Το GPRS υποστήριζε ευέλικτους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και παρείχε απρόσκοπτη σύνδεση με το δίκτυο αποτελώντας το σημαντικότερο τεχνολογικό βήμα προς την επόμενη γενιά δικτύων 3G (Anju & Gawas, 2015; Sharma, 2013)



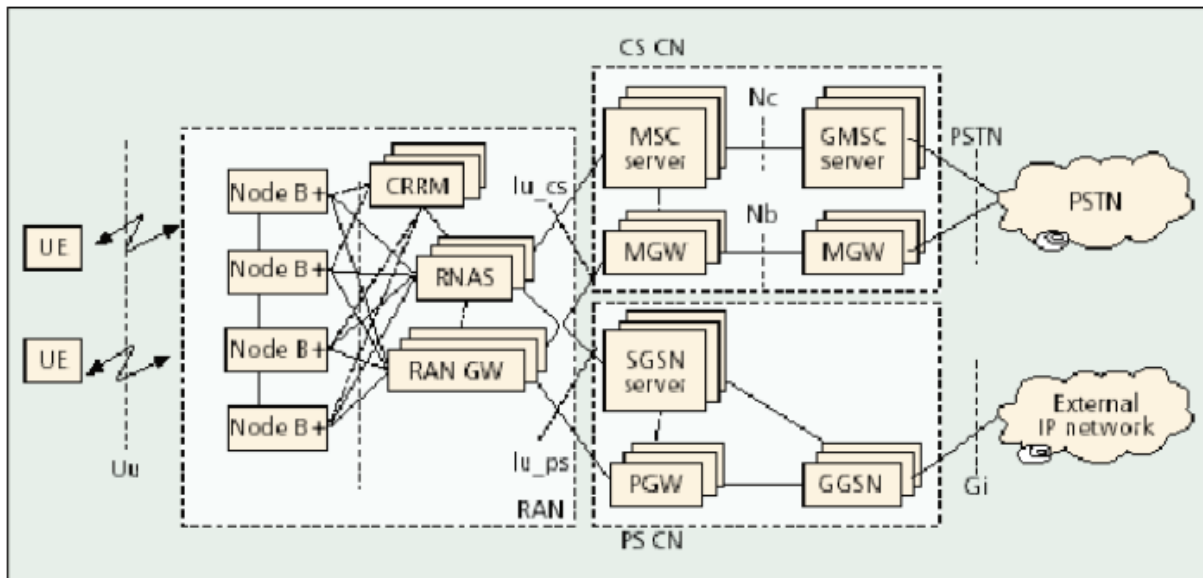
Σχήμα 3 - Αρχιτεκτονική συστήματος GPRS
 (ETSI, 1999)

1.3 Γενιά 3G

Η 3^η γενιά ασύρματων κινητών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων εμφανίστηκε το 2000 με σκοπό να αυξήσει τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων σε 384 Kbps σε ευρύ φάσμα ενώ σε τοπικό επίπεδο τα 2Mbps, αλλά και να προσφέρει αναβαθμισμένες υπηρεσίες στους χρήστες σε σχέση με τις δύο πρώτες γενιές (Anju & Gawas, 2015), αυξάνοντας τη διαφάνεια μέσω ενός Wide Band Wireless Network (Sharma, 2013). Σε ένα περιβάλλον EDGE ήταν δυνατή η μεταφορά μεγάλου όγκου δεδομένων, τα οποία όμως σε ένα περιβάλλον μεταγωγής στον αέρα συμπεριφέρεται σαν διακόπτης κυκλώματος. Ως αποτέλεσμα μέρος της αποτελεσματικότητας της συνδεσιμότητας χάνεται σε μία τέτοια κατάσταση. Παράλληλα, τα πρότυπα για την ανάπτυξη ασύρματων δικτύων ήταν κατακερματισμένα, καθώς ίσχυαν διαφορετικά πρότυπα για κάθε μέρος του κόσμου (Anju & Gawas, 2015; Mishra, 2004; Sharma, 2013). Ο οργανισμός 3rd Generation Partnership Project(3GPP) ανέπτυξε το σύστημα 3G Universal Mobile Telecommunication System (UMTS), όπως αποκαλείται στην Ευρώπη, το οποίο ικανοποιούσε τα πρότυπα IMT-2000, εφαρμόζοντας μία τεχνική προδιαγραφή διαλειτουργικότητας. Technical Specification for Interoperability (TSI). Στην συνέχεια τα πρότυπα IMT2000 ενσωμάτωσε ένα νέο 3G πρότυπο από την Κίνα που ονομαζόταν SCDMA (Anju & Gawas, 2015). Το θέμα της διαλειτουργικότητας και της ενοποίησης των προτύπων δημιούργησε την ανάγκη για παραγωγή ενός ενιαίου παγκόσμιου δικτύου που θα παρέχει υπηρεσίες ανεξάρτητα από την τεχνολογία της πλατφόρμας και των προτύπων αρχιτεκτονικού σχεδιασμού (Mishra, 2004). Στην πραγματικότητα λοιπόν το δίκτυο 3G δεν ήταν ένα πρότυπο αλλά μία σειρά από πρότυπα που μπορούν να αλληλεπιδράσουν (Sharma, 2013).

Τα κύρια χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν BS (Base Station) ή nod B, RNC (Radio Network Controller), εκτός από WMSC (Wideband CDMA Mobile Switching Centre) and SGSN/GGSN. Το UMTS χρησιμοποιούσε την τεχνολογία WCDMA για την επικοινωνία με τη διεπαφή χρήστη. (Anju & Gawas, 2015). Τα δίκτυα 3G επέτρεπαν στους παρόχους των δικτύων να προσφέρουν ένα διευρυμένο εύρος ανεπτυγμένων υπηρεσιών βελτιώνοντας την σταθερότητα και την ταχύτητα του δικτύου. Συγκεκριμένα, πέρα από τη φωνητική επικοινωνία περιελάμβανε υπηρεσίες δεδομένων, πρόσβαση σε συνδρομητική τηλεόραση και βίντεο, «σερφάρισμα» στο διαδίκτυο, email, τηλεδιασκέψεις, υπηρεσίες φαξ και ψηφιακούς χάρτες πλοήγησης (navigation maps) (Anju & Gawas, 2015; Sharma, 2013). Το εύρος ζώνης ήταν μεταξύ 15 και 20 MHz που χρησιμοποιήθηκε για υψηλή ταχύτητα internet, video chat κα

(Sharma, 2013). Η πρώτη εμπορική χρήση 3G δικτύου έγινε από την εταιρεία NTT Do co mo στην Ιαπωνία το 2001 (Anju & Gawas, 2015)



Σχήμα 4 - Αρχιτεκτονική δικτύου 3G

(Camarda & Striccoli, 2010)

1.4 Γενιά 4G

Η κινητή τηλεφωνία τέταρτης γενιάς (4G) υιοθετήθηκε για πρώτη φορά στα τέλη της δεκαετίας του 2000 και βασίζεται εξ ολοκλήρου στο πρωτόκολλο IP. Ο κύριος στόχος της τεχνολογίας 4G είναι να παρέχει υπηρεσίες υψηλής ταχύτητας, ποιότητας χωρητικότητας και ασφάλειας σε χαμηλό κόστος περιλαμβάνοντας υπηρεσίες φωνητικής επικοινωνίας, ανταλλαγής δεδομένων, πολυμέσων και χρήση internet μέσω IP (Anju & Gawas, 2015). Η πρώτη επιτυχημένη δοκιμή 4G σε πραγματικές συνθήκες πραγματοποιήθηκε στην Ιαπωνία το 2005 από την εταιρεία NTT Do Co MO μεταδίδοντας πακέτα πληροφορίας με ρυθμό 1 Gbps (Sharma, 2013).

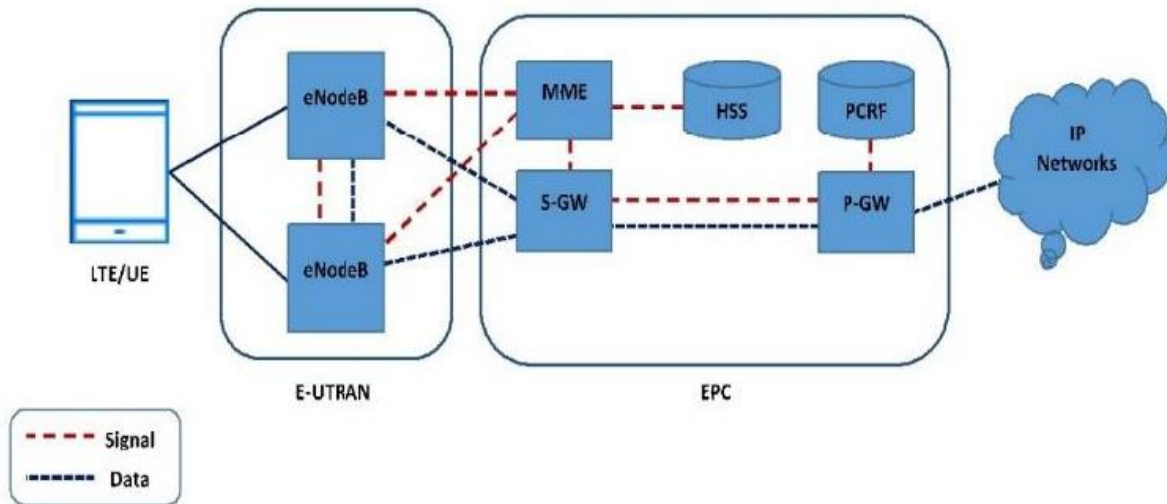
Για τη χρήση των υπηρεσιών 4G τα τερματικά χρήστη θα πρέπει να είναι σε θέση να επιλέγουν τα ασύρματα συστήματα για να εκτελώντας ταυτόχρονα πολλαπλές λειτουργίες. Στα συστήματα GSM, οι σταθμοί βάσης εξέπεμπαν περιοδικά σήματα για την συνδρομή υπηρεσιών στους ασύρματους σταθμούς. Η διαδικασία αυτή όμως ήταν ιδιαίτερα περίπλοκη στα ετερογενή 4G συστήματα εξαιτίας των διαφορών μεταξύ των ασύρματων τεχνολογιών και των πρωτοκόλλων και προτύπων σύνδεσης και πρόσβασης (Sharma, 2013). Άρα ο κύριος λόγος για την μετάβαση στο 4G ήταν να

δημιουργηθεί μία κοινή πλατφόρμα που θα ενοποιεί όλες τις τεχνολογίες που είχαν αναπτυχθεί ως τότε. Τα δίκτυα 4G έχουν ικανότητες ρυθμού μεταφοράς δεδομένων 100 Mbps έως 1 Gbps (Anju & Gawas, 2015; Sharma, 2013).

Εν μέρει η τεχνολογία δικτύων 4G αναπτύχθηκε λόγω της βελτίωσης της τεχνολογίας μέσω του σχεδιασμού ραδιοεπικοινωνιών που βελτίωσαν υπάρχοντα συστήματα όπως το 3rd Generation Partnership Project (3GPP) το οποίο λειτούργησε ως βάση για το αναβαθμισμένο πρότυπο Long Term Evolution (LTE) (Parikh & Basu, 2011; Sharma, 2013). Προχωρημένα συστήματα πετύχαιναν ρυθμούς λήψης (downloading) και ανεβάσματος (uploading) πληροφορίας της τάξης των 30bps/Hz και 15 Bps/Hz αντίστοιχα. Βασικά στοιχεία που έπρεπε να ενσωματώνει το LTE

Εκτός από τα σχήματα πολλαπλής πρόσβασης, οι τεχνικές μετάδοσης καναλιών βελτιωμένης πολλαπλής εισόδου πολλαπλής εξόδου (multiple-input multiple-output - MIMO) και ο εκτενής συντονισμός μεταξύ πολλαπλών τοποθεσιών κυψέλης που ονομάστηκαν συντονισμένη μετάδοση/λήψη πολλαπλών σημείων (Coordinated multipoint - CoMP) (Sharma, 2013).

Για την πρόσβαση σε ασύρματο δίκτυο 4G τα τερματικά χρήστη πολλαπλών λειτουργιών θα πρέπει να μπορούν να επιλέγουν το ασύρματο σύστημα στόχος. Για την παροχή ασύρματων υπηρεσιών οποτεδήποτε και οπουδήποτε, η κινητικότητα του τερματικού είναι ο βασικός παράγοντας στην αρχιτεκτονική 4G (Anju & Gawas, 2015; Sharma, 2013). Η κινητικότητα τερματικού σημαίνει ότι επιτρέπει σε διαφορετικούς πελάτες κινητής τηλεφωνίας να κάνουν περιαγωγή στα γεωγραφικά όρια των ασύρματων δικτύων (Anju & Gawas, 2015; Sharma, 2013). Η τεχνολογία 4G ενσωματώνει παλαιότερες και σύγχρονες ασύρματες τεχνολογίες, όπως OFDM, MC-CDMA, LAS-CDMA και Network-LMDS για να παρέχει αδιάλειπτη περιαγωγή από τη μια τεχνολογία στην άλλη. Νέες τεχνολογίες 4G που αναπτύχθηκαν ήταν η Long Term Evolution (LTE) και το Wireless Interoperability for Microwave Access (WiMax) (Anju & Gawas, 2015).



Σχήμα 5 - Αρχιτεκτονική δικτύου 4G

(Degambur et al., 2021)

Δύο βασικά προβλήματα για να μπορεί να έχει το τερματικό τη βέλτιστη κινητικότητα (mobility) είναι το πώς θα γίνει η διαχείριση της τοποθεσίας (location) και της μεταβίβασης και παράδοσης των πακέτων πληροφορίας (handoff ή handover). Εφαρμόζοντας διαχείριση τοποθεσίας (location management) το σύστημα 4G προσπαθεί να εντοπίσει ένα κινητό τερματικό για πιθανή σύνδεση και περιλαμβάνει το χειρισμό όλων των πληροφοριών σχετικά με τα τερματικά περιαγωγής. Η διαχείριση του handoff διασφαλίζει την αδιάλειπτη επικοινωνία όταν το τερματικό είναι σε περιαγωγή. Κάθε τερματικό αποκτά μία διεύθυνση IPv6 και όταν βγαίνει έξω από το τοπικό δίκτυο η διεύθυνση παύει να ισχύει και αποκτά μία νέα που αποκαλείται care of address στο νέο δίκτυο που θα συνδεθεί (Naik et al., 2012; Sharma, 2013).

Στα δίκτυα της γενιάς 4G χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά πολλαπλοί φορείς που λειτουργούν ταυτόχρονα για τη δημιουργία ευρύτερων καναλιών για μετάδοση δεδομένων, με απώτερο στόχο την αύξηση της ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων. Η τεχνική αυτή διασύνδεσης δικτύων τηλεπικοινωνιών ονομάστηκε carrier aggregation.

1.5 Γενιά 5G

Πίνακας 1 - Συγκριτικός πίνακας των γενιών κινητής τεχνολογίας

| Χαρακτηριστικό | 1G | 2G | 3G | 4G | 5G |
|---------------------------------------|----------------------------------|--|--|--|--|
| Έναρξη χρήσης και εφαρμογή | 1970-1980 | 1990-2004 | 2004-2010 | 2010 μέχρι σήμερα | 2019 μέχρι σήμερα |
| Εύρος ζώνης δεδομένων (bawidth) | 2 kbps | 64 kbps | 2 Mbps | 1 Gbps | > 1 Gbps |
| Τεχνολογία | Αναλογική κυψελοειδής τεχνολογία | Ψηφιακή κυψελοειδής τεχνολογία | CDMA 2000 (1xRTT, EVDO, UMTS, EDGE) Broad bandwidth CDMA, IP technology | Wi-Max LTE WiFi Unified IP και seamless συνδυασμός ευρυζωνικότητας (broadband) | Unified IP και seamless συνδυασμός ευρυζωνικότητας (broadband) www |
| Υπηρεσία | Κινητή τηλεφωνία (φωνητικό σήμα) | Ψηφιακό φωνητικό σήμα, SMS, πακεταρισμένα δεδομένα | Υψηλής ποιότητας ενσωματωμένος ήχος, βίντεο και δεδομένα | Δυναμική πρόσβαση σε πληροφορίες Φορητές (wearable) συσκευές | πρόσβαση σε πληροφορίες Φορητές (wearable) συσκευές με ενσωματωμένη λειτουργία AI |
| Λειτουργία πολυπλεξίας (multiplexing) | FDMA | TDMA, CDMA | CDMA | OFDMA | CDMA & BDMA |
| Μεταγωγή (switching) | Κύκλωμα | Κύκλωμα, πακέτα | Πακέτα | Πακέτα | Πακέτα |
| Κεντρικό δίκτυο | PSTN | PSTN | Packet Network | Internet | Internet |
| Μεταπομπή (Handoff) | MAHO (Mobile Assisted Handoff) | GSM | UMTS | LTE | inter gNB ή intra AMF |

(Patel et al., 2012; Sharma, 2013)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Η ΑΝΑΓΚΗ ΓΙΑ ΠΑΘΗΤΙΚΑ ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ (PONs)

2.1 Ευρυζωνικότητα, ευρυζωνικά δίκτυα και υπηρεσίες

Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) «ευρυζωνικότητα (broadband access)» καλείται: «.. το προηγμένο, εφικτό και καινοτόμο από πολιτική, κοινωνική, οικονομική και τεχνολογική άποψη περιβάλλον αποτελούμενο από:

- την παροχή γρήγορων συνδέσεων στο Διαδίκτυο σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο μέρος του πληθυσμού
- με ανταγωνιστικές τιμές (με τη μορφή καταναλωτικού αγαθού)
- χωρίς εγγενείς περιορισμούς στα συστήματα μετάδοσης και τον τερματικό εξοπλισμό των επικοινωνούντων άκρων
- την κατάλληλη δικτυακή υποδομή που:
 - α) επιτρέπει την κατανομημένη ανάπτυξη υπαρχόντων και μελλοντικών δικτυακών εφαρμογών και πληροφοριακών υπηρεσιών
 - β) δίνει τη δυνατότητα αδιάλειπτης σύνδεσης των χρηστών σε αυτές
 - γ) ικανοποιεί τις εκάστοτε ανάγκες των εφαρμογών σε εύρος ζώνης, αναδραστικότητα και διαθεσιμότητα, και
 - δ) είναι ικανή να αναβαθμίζεται συνεχώς και με μικρό επιπλέον κόστος ώστε να εξακολουθεί να ικανοποιεί τις ανάγκες όπως αυτές αυξάνουν και μετεξελίσσονται με ρυθμό και κόστος που επιτάσσονται από την πρόοδο της πληροφορικής και της τεχνολογίας επικοινωνιών
- τη δυνατότητα του πολίτη να επιλέγει:
 - α) ανάμεσα σε εναλλακτικές προσφορές σύνδεσης που ταιριάζουν στον εξοπλισμό του
 - β) μεταξύ διαφόρων δικτυακών εφαρμογών
 - γ) μεταξύ διαφόρων υπηρεσιών πληροφόρησης και ψυχαγωγίας και με πιθανή συμμετοχή του ίδιου του πολίτη στην παροχή περιεχομένου, εφαρμογών και υπηρεσιών
- το κατάλληλο ρυθμιστικό πλαίσιο αποτελούμενο από πολιτικές, μέτρα, πρωτοβουλίες, άμεσες και έμμεσες παρεμβάσεις, αναγκαίες για την ενδυνάμωση της καινοτομίας, την προστασία του ανταγωνισμού, και την εγγύηση της σοβαρής ισορροπημένης οικονομικής ανάπτυξης ικανής να

προέλθει από τη γενικευμένη συμμετοχή στην Ευρυζωνικότητα και την Κοινωνία της Πληροφορίας.

Ευρυζωνικά δίκτυα και υπηρεσίες είναι: αυτά που εγγυώνται σε κάθε εποχή την απρόσκοπτη και διαφανή πρόσβαση όλων των πολιτών στην πληροφορία και τα συστήματα επικοινωνίας, για την εκπλήρωση των αναγκών τους. Επειδή το περιβάλλον αυτό χαρακτηρίζεται από μια διαρκή δυναμική και τελεί υπό διαμόρφωση, απουσιάζει από τον παραπάνω ορισμό οποιαδήποτε αναφορά σε συγκεκριμένα χαρακτηριστικά δικτύου, συγκεκριμένη τεχνολογία μετάδοσης και το σημαντικότερο: δεν προσδιορίζει συγκεκριμένο ρυθμό μετάδοσης πάνω από τον οποίο ένα δίκτυο χαρακτηρίζεται ευρυζωνικό. Βέβαια, ο ορισμός αυτός επιτρέπει τον αποκλεισμό κάποιων τεχνολογιών, όπως για παράδειγμα το PSTN ή το ISDN, οι δυνατότητες των οποίων είναι περιορισμένες και μη επεκτάσιμες (Εργαστήριο Ραδιοεπικοινωνιών ΑΠΘ, 2019)

2.1 Μετάβαση από point-to-point συνδέσεις σε παθητικά οπτικά δίκτυα

Τα ευρυζωνικά δίκτυα οπτικής πρόσβασης (Broadband Optical Access Networks) συνεχίζουν να αναπτύσσονται με στόχο να μπορέσουν να ικανοποιήσουν τις ολοένα και αυξανόμενες απαιτήσεις για μεγαλύτερο εύρος ζώνης και ποιότητα υπηρεσιών, όπως και ολοένα και περισσότερων διασυνδέσεων (πελατών). Συνήθως αναφέρονται εμπορικά ως Fiber to the Home (οπτική ίνα μέχρι το σπίτι), Fiber to the cabinet (οπτική ίνα μέχρι το ΚΑΦΑΟ), Fiber to the building (οπτική ίνα μέχρι το κτίριο), Fiber to the mobile cell tower (οπτική ίνα μέχρι τον πύργο κινητής τηλεφωνίας). Η τοπολογία της εγκατάστασης περιλαμβάνει συνδεσμολογίες: ζεύξη σημείου και πολλαπλού σημείου (Point-to-Multipoint P2MP) και δισημειακή ή ζεύξη από σημείο σε σημείο (Point to point - P2P), Τα δίκτυα οπτικής πρόσβασης παρέχουν απευθείας ή πολύ κοντινή σύνδεση των τελικών χρηστών με οπτικές ίνες (Ranaweera et al., 2022; E. Wong, 2022)

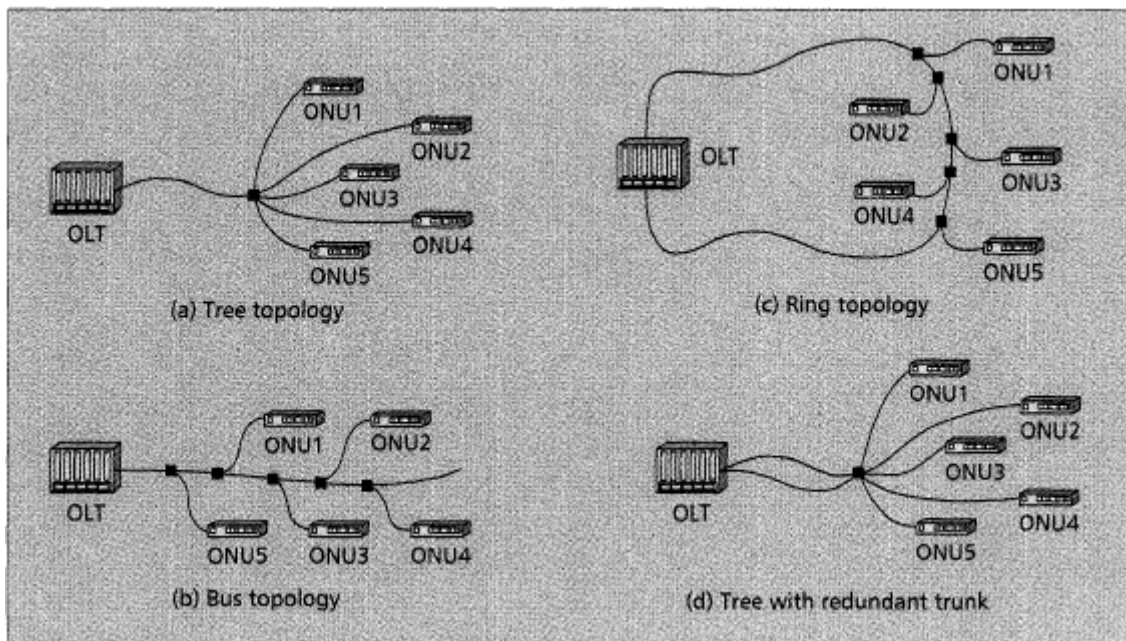
Το βασικότερο πρόβλημα των τηλεπικοινωνιακών δικτύων και των ευρυζωνικών συνδέσεων είναι το λεγόμενο πρόβλημα του πρώτου μιλίου (first mile) το οποίο στο παρελθόν ονομαζόταν τελευταίο μίλι (last mile), δηλαδή τον τελικό τρόπο σύνδεσης του τελικού χρήστη με τον τηλεπικοινωνιακό πάροχο, η οποία είναι η σημαντικότερη παράμετρος δικτύωσης (Kramer & Pesavento, 2002).

Τα δίκτυα οπτικής πρόσβασης με τη χρήση οπτικών ινών θεωρούνται ότι διαθέτουν σημαντικά συγκριτικά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλους τρόπους μετάδοσης, κυρίως ως προς τη χωρητικότητα εύρους ζώνης. Ενσωματώνονται εδώ και χρόνια χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα σε δίκτυα κορμού (backbone networks), δίκτυα ευρείας ζώνης (Wide Area Networks - WANs), μητροπολιτικά δίκτυα (Metropolitan Area Networks - MANs) και ακόμη και τοπικά δίκτυα (Local Area Networks – LANs (Kazovsky et al., 2007).

Αρχικά τα ασύρματα οπισθοζευκτικό κυκλώματα (mobile backhaul) αποτελούνταν από T1/E1 κυκλώματα πολυπλεξίας διαίρεσης χρόνου (time-division multiplexing – TDM) χαλκού και μικροκυμάτων. Εκείνη την εποχή αν υπήρχε η απαίτηση για μεγαλύτερο εύρος ζώνης απλά γινόταν προσθήκη κυκλωμάτων. (Sizer et al., 2022). Ο αρχικός τρόπος σύνδεσης των οπτικών ινών με τη χρήση αρχιτεκτονικών σημείου προς σημείο (point-to-point) αποδείχθηκε δαπανηρός κυρίως για λόγους πρόσβασης. Πέρα από το κόστος της ανάπτυξης οπτικών ινών, απαιτούνταν συντήρηση για τα ενεργά στοιχεία που ήταν εκτός της εγκατάστασης. Τα ενεργά στοιχεία αυτά, αποτελούνται από πολλά εξαρτήματα που συνδέουν ηλεκτρικά με οπτικά στοιχεία (Electrical-to-Optical – E/O) και το αντίθετο (Optical-to-Electrical) τα οποία σχεδόν απαγορεύουν την ανάπτυξή τους σε μεγάλη κλίμακα (Kazovsky et al., 2007).

Με την έλευση του προτύπου LTE η αδυναμία επεκτασιμότητας (scalability) των κυκλωμάτων πολυπλεξίας (Time Division Multiplexing – TDM) ώστε να μπορούν να ανταποκριθούν στην ζήτηση για περισσότερα δεδομένα οδήγησε στην μετάβαση σε οπισθοζευκτικά κυκλώματα που στηρίζονται στο Ethernet αντικαθιστώντας τα καλώδια χαλκού με οπτικές ίνες (Sizer et al., 2022). Ακόμη η ανάγκη για την μεταφορά οπτικής ίνας μέχρι το τελικό σημείο που ονομάστηκε Fiber-to-the-X (FTTX) (όπου X το τελικό σημείο) οδήγησε στην ανάπτυξη παθητικών οπτικών δικτύων πολυπλεξίας διαίρεσης χρόνου (TDM-PONs). Μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί διάφορα είδη παθητικών οπτικών δικτύων (PONs) τα οποία βασίζονται στην ίδια περίπτωση τοπολογία παθητικών συζεύξεων αλλά στηρίζονται σε διαφορετικές τεχνολογίες μεταφοράς (Kazovsky et al., 2007; Kim, 2003). Υπάρχουν διάφορα διεθνή πρότυπα (standards) τα οποία συνήθως ορίζονται από το IEEE και το ITU και όλα τα προϊόντα που ακολουθούν αυτά τα πρότυπα αναπτύσσονται από διάφορους παρόχους δικτύου

(Kazonky et al., 2007) και στηρίζονται στα πρωτόκολλα: ATM, Ethernet, TDM ή WDM (Kramer & Pesavento, 2002).

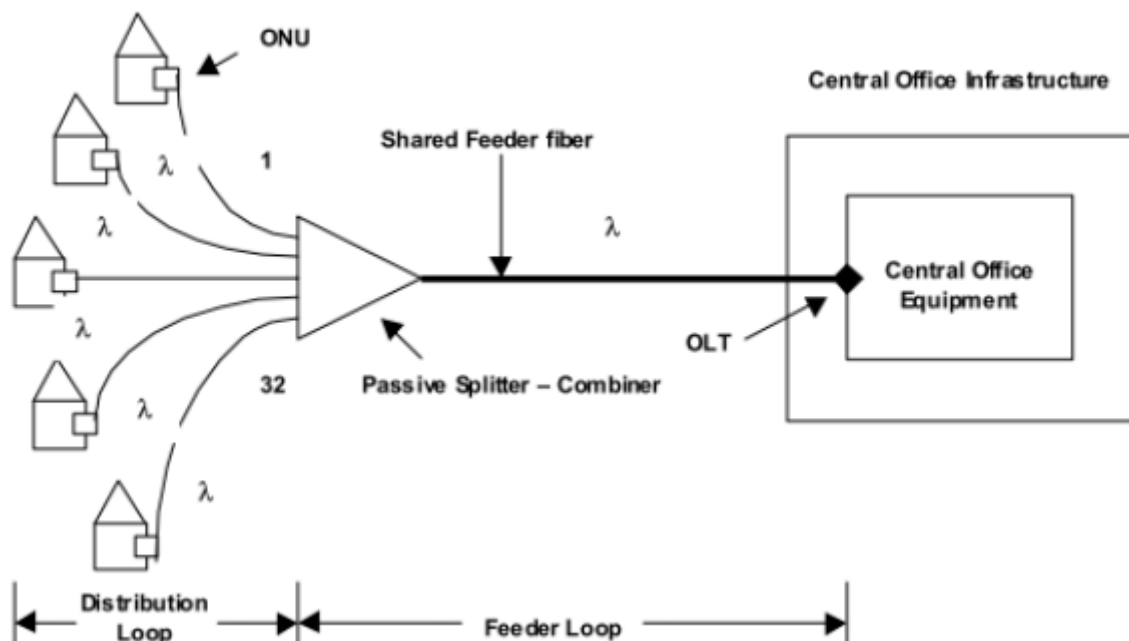


Σχήμα 6 - Τοπολογίες παθητικών οπτικών δικτύων (passive optical networks)

(Kramer & Pesavento, 2002)

2.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα PONs έναντι point-to-point συνδέσεων

Τα παθητικά οπτικά δίκτυα δε χρειάζονται καθόλου ηλεκτρική ισχύ τροφοδοσίας καθώς δε διαθέτουν κανένα ενεργό στοιχείο. Σημαντικός είναι ο ρόλος του παθητικού διαχωριστή (passive splitter) ο οποίος στέλνει αντίγραφα του σήματος που μεταφέρει η ίνα τροφοδοσίας (shared feeder fiber) στις ίνες διανομής λ για να φτάσουν στις μονάδες οπτικού δικτύου (Optical Network Units – ONUs). Τα τερματικά οπτικής γραμμής (Optical Line Terminal - OLT) και οι μονάδες οπτικού δικτύου (Optical Network Units – ONUs) θα πρέπει να είναι σε θέση να υποστηρίξουν ένα πρόσθετο μέσος ενημέρωσης πρόσβασης. Το πρωτόκολλο ελέγχου θα πρέπει να προσδιορίζεται σε μία χρονική θυρίδα στην μονάδα οπτικού δικτύου ώστε να εξασφαλίζεται η μεταφορά δεδομένων προς το τερματικό οπτικής γραμμής σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα (Kazovsky et al., 2007).



Σχήμα 7 - Συνδεσμολογία παθητικού οπτικού δικτύου (παθητικό αστέρι - passive star)

(Kazovsky et al., 2007)

Τα παθητικά οπτικά δίκτυα χρησιμοποιούν δύο μήκη κύματος ανάντη και κατάντη:

- Ανάντη: 1310 nm
- Κατάντη: 1510 nm

Η παραπάνω διαφοροποίηση μήκους κύματος εκπομπής και λήψης δίνει τη δυνατότητα απομόνωσης μεταξύ πομπού και δέκτη laser, άρα δεν απαιτούνται συσκευές για το διαχωρισμό οι οποίες έχουν μεγάλο κόστος. Το γεγονός ότι το εύρος μήκους κύματος μεταξύ 1530 με 1565 nm δε χρησιμοποιούνταν αξιοποιήθηκε από τα Wavelength Division Multiplexing (WDM) PONs τα οποία εμφανίστηκαν αργότερα. Βασικό πρόβλημα των παθητικών οπτικών δικτύων παραμένει ο διαμοιρασμός του εύρους ζώνης ανάλογα με τους χρήστες που πρέπει να εξυπηρετήσει (στα τέλη της δεκαετίας του 2010 το ίδιο εύρος ζώνης διαμοιραζόταν σε μέγιστου 10 τελικούς χρήστες), το γεγονός όμως ότι περιορίζουν σημαντικά το κόστος ανάπτυξης δικτύωσης είναι το μεγαλύτερο τους πλεονέκτημα (Prat, 2008).

Πίνακας 2 - Συγκριτικός πίνακας πλεονεκτημάτων-μειονεκτημάτων PONs έναντι point-to-point συνδέσεων

| Πλεονεκτήματα | Μειονεκτήματα |
|---|---|
| Παθητικό δίκτυο χωρίς απαίτηση για ενεργά στοιχεία άρα για πρόσθετα κυκλώματα | Το εύρος ζώνης πρέπει να διαμοιράζεται σε πολλαπλούς χρήστες |
| Περιορισμός της χρήσης πομποδεκτών | Πρέπει να γίνεται διαχωρισμός οπτικής ίνας μεταξύ των θυρών εξόδου (output ports) – σύνθετοι πομποδέκτες |
| Περιορισμός στη χρήση οπτικών ινών | Χιλιομετρικός περιορισμός της μετάδοσης |
| Χαμηλότερο κόστος ανάπτυξης και κόστος σε ένα κύκλο ζωής (life-cycle) | Προβληματική ασφάλεια καθώς οι οπτικές τερματικές μονάδες (Optical Line Units - ONUs) λαμβάνουν το ίδιο σήμα Απαιτείται αυστηρός προγραμματισμός για τον καταμερισμό χρόνου για την upstream σύνδεση |

(Kazovsky et al., 2007; Kramer & Pesavento, 2002; Prat, 2008)

Εστιάζοντας στα TDM-PONs αυτά διαθέτουν μόνο ένα μήκος κύματος για μετάδοση κατάντη πληροφορίας (downstream data) και ένα για ανάντη (upstream data) τα οποία διαμοιράζονται σε όλους τους χρήστες, περιορίζονται το εύρος ζώνης (Gutierrez et al., 2005). Έτσι το μεγαλύτερο μέρος του διαθέσιμου εύρους ζώνης της οπτικής ίνας πάει χαμένο (Kazovsky et al., 2007). Για την επέκταση της χωρητικότητας των TDM-PONs χωρίς τη δραστική αλλαγή των υποδομών, αναπτύχθηκε η τεχνολογία πολυπλεξίας διαίρεσης μήκους κύματος (Wavelength Division Multiplexing - WDM) με διάφορες αρχιτεκτονικές υλοποίησης (Froberg et al., 2000; Kani et al., 2003)

2.3 Τεχνολογίες και εξέλιξη παθητικών οπτικών δικτύων (PONs)

Βασικό πρόβλημα σε κάθε γενιά τηλεπικοινωνιακού δικτύου είναι η εναρμόνιση παρόχων, τελικών χρηστών και η υποστήριξη της προηγούμενης γενιάς κάθε φορά που αναπτύσσεται η επόμενη. Για τον σκοπό αυτό έχουν καταρτιστεί διεθνή πρότυπα (standards) και πρωτόκολλα επικοινωνίας (communication protocols). Στην αγορά των τηλεπικοινωνιών, οι κύριοι οργανισμοί που προσφέρουν τα παραπάνω είναι:

- International Telecommunication Union (ITU-T)
- Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE)

Σε κάποιες περιπτώσεις πρωτόκολλα και πρότυπα έχουν καταρτιστεί και από κοινοπραξίες όπως:

- Full Services Access Network (FSAN)
- Metro Ethernet Forum (MEF)

Μέχρι στιγμής έχουν αναπτυχθεί οι εξής κύριες τεχνολογίες και τα εξής πρότυπα (standards) από τους φορείς: ITU και IEEE για παθητικά οπτικά δίκτυα:

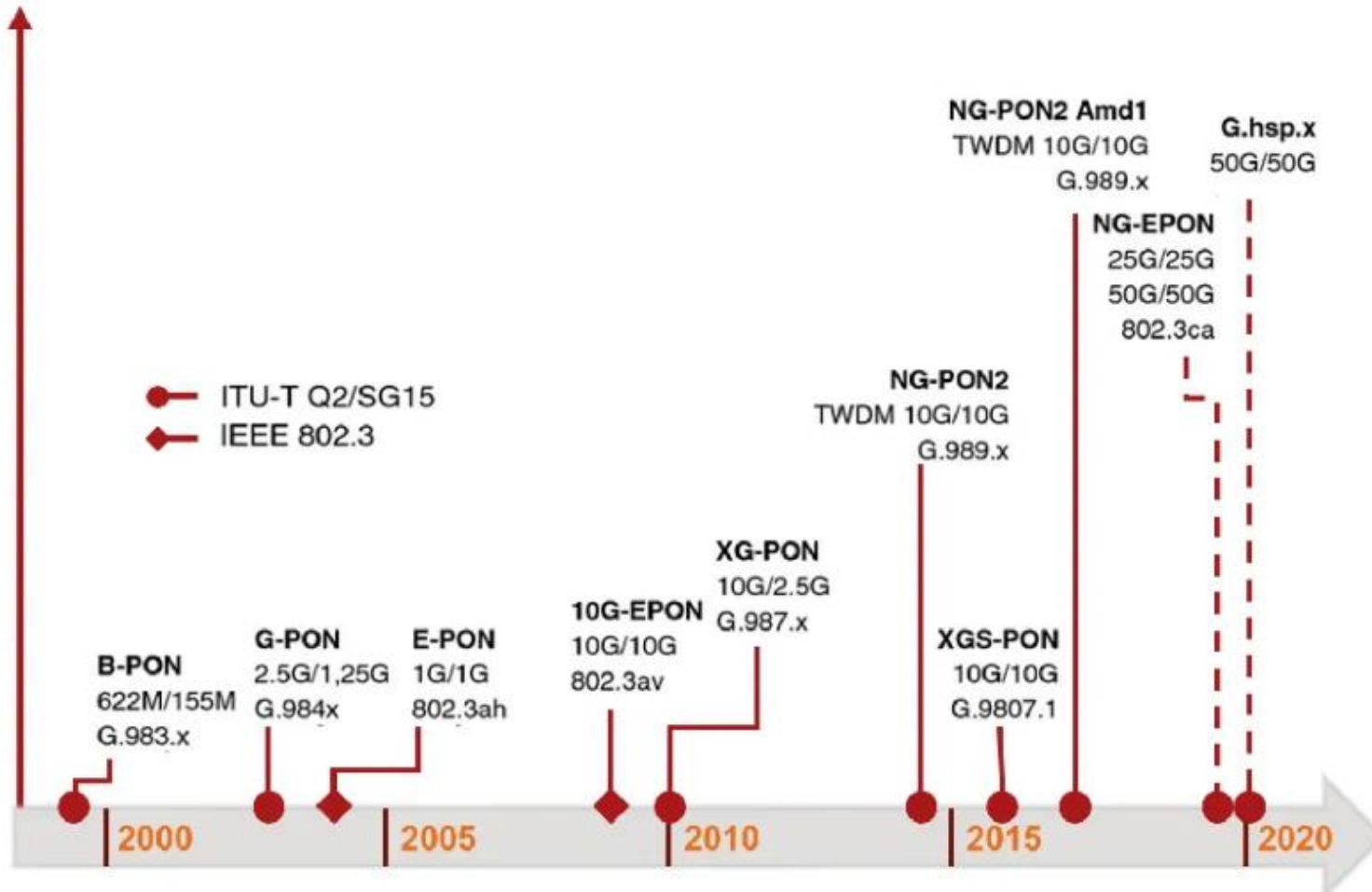
Πίνακας 3 - Βασικές τεχνολογίες, πρότυπα και χαρακτηριστικά των παθητικών οπτικών δικτύων

| Χρόνος ανάπτυξης | Τεχνολογία | Φορέας | Πρότυπο (Standard) | Εύρος Ζώνης | | Χαρακτηριστικά |
|---------------------|---|--------|--------------------|---------------|------------------|--|
| | | | | Ανάντη (Mbps) | Κατάντη (Mbps) | |
| Δεκαετία 1990 | Asynchronous Transfer Mode PON (ATM-PON) | ITU | Q.834.1 | 622 Mbps | | Για 1 ^η φορά διαμοιράστηκε ίντερνετ σε πολλαπλούς χρήστες με τη χρήση ενός router και μη ενεργών splitters |
| 2004 | Ethernet Passive Optical Network (EPON) | IEEE | 802.3ah-2004 | 1 Gbps | 1 Gbps | Βασίστηκε στο two-way Ethernet protocol Σύγχρονη μετάδοση |
| 2007 | Broadband PON (BPON) | ITU | G.983 | 622 Mbps | 155 έως 622 Mbps | Βελτιωμένη έκδοση του APON |
| Αρχή δεκαετίας 2000 | Gigabit-capable PON (GPON) | ITU | G.984 | 1,25 Gbps | 2,5 Gbps | ασύγχρονη μετάδοση (ATM) καθορισμός της ταχύτητας της επικοινωνίας δεδομένων για κάθε χρήστη και καθορίζει πρωτόκολλα για: <ul style="list-style-type: none"> • διόρθωση σφαλμάτων, κρυπτογράφηση (AES) • έλεγχο γραμμής (OMCI) • κωδικό πρόσβασης ή έλεγχο ταυτότητας σειριακού αριθμού |
| 2009 | 10G Ethernet Passive Optical Network (10G-EPON) | IEEE | 802.3av | 10 Gbps | 1 Gbps ή 10 Gbps | Ασύγχρονη ή σύγχρονη μετάδοση |

| Χρόνος ανάπτυξης | Τεχνολογία | Φορέας | Πρότυπο (Standard) | Εύρος Ζώνης | | Χαρακτηριστικά |
|------------------|---|--------|--------------------|--------------------|--------------------|--|
| | | | | Ανάντη (Mbps) | Κατάντη (Mbps) | |
| 2014 | wavelength division multiplexing (WDM) PON | ITU | G.984.5 | 1,25 Gbps | 2,5 Gbps | Μετάδοση πολλαπλών υπηρεσιών (βίντεο, δεδομένα και ομιλία) στην ίδια οπτική ίνα |
| 2010 | 10 Gigabit Non-symmetrical PON (10G-PON - XG-PON) | ITU | G.987 | 10 Gbps | 2.5 Gbps | Μπορεί να υποστηρίξει ταυτόχρονα χρήστες GPON και 10G-PON |
| 2015 | Time Wavelength Division Multiplexing (TWDM) (NG-PON) | ITU | G.983, G.984 | 2,5 Gbps ή 10 Gbps | 2,5 Gbps ή 10 Gbps | Συμμετρική μετάδοση 4 ή περισσότερα μήκη κύματος ανά οπτική ίνα |
| 2016 | 10 Gigabit Symmetrical (XGS-PON) | ITU | G.987 | 10 Gbps | 10 Gbps | Συμμετρική μετάδοση Διαφορετικά μήκη κύματος από το αρχικό GPON πρότυπο Εξέλιξη του NG-PON2, μπορεί να μεταδίδει για GPON, XGS-PON and NG-PON2 |

(ITU Q.834.1, IEEE 802.3ah-2004, ITU G.983, ITU G.984, IEEE 802.3av, ITU G.984.5, ITU G.987)

Στο παρακάτω διάγραμμα οπτικοποιείται η εξέλιξη των παθητικών οπτικών δικτύων. Στον άξονα y απεικονίζεται ο ρυθμός μετάδοσης και στον άξονα x η χρονική εξέλιξη:



Διάγραμμα 1 - Χρονική εξέλιξη των παθητικών οπτικών δικτύων

(Jaffer et al., 2020)

Τα παθητικά οπτικά δίκτυα (Passive Optical Networks – PONs) προτιμώνται κυρίως σε ζεύξεις σημείου πολλαπλού σημείου (P2MP) με μη τροφοδοτούμενα οπτικά δίκτυα διανομής (Optical Distribution Network – ODN), όπου με περιορισμένους πομποδέκτες έχουν μεγαλύτερη ενεργειακή αποδοτικότητα. Ακριβώς αυτή η τοπολογία P2MP των παθητικών οπτικών δικτύων επιτρέπει στο κατάντη (downstream) και ανάντη (upstream) εύρος ζώνης να μοιράζεται φυσικά μέσω πολυπλεξίας διαίρεσης χρόνου (time division multiplexing - TDM) και της πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης χρόνου (time division multiple access - TDMA), σύμφωνα με τα πρότυπα ITU-T G.984 Gigabit PON (GPON) που καταρτίστηκε το 2003 και IEEE 802.3ah Gigabit Ethernet PON (1G-EPON) το 2004 αντίστοιχα (E. Wong, 2022).

Τα GPON έχουν ρυθμό μετάδοσης κατάντη 2,5 Gbps και ανάντη 1,25 Gbps, ενώ τα 1G-EPON έχουν ισομετρικό 1,25 Gbps. Με στόχο να υποστηρίζονται μεγαλύτεροι ρυθμοί μετάδοσης στα ήδη υπάρχοντα μη τροφοδοτούμενα οπτικά δίκτυα διανομής (Optical Distribution Network – ODN), αναπτύχθηκαν το 2009 νέα πρότυπα για 10 Gbps PON (IEEE Std. 802.3av10 GE-PON και ITU-T G.987 10G-PON standard, XG-PON). Τα πρότυπα αυτά δίνουν τη δυνατότητα συμβατότητας με χαμηλότερους ρυθμούς μετάδοσης και τα ήδη ανεπτυγμένα ODNs, επιτρέποντας όμως αναβαθμίσεις περιορίζοντας το οικονομικό και επιχειρησιακό κόστος στις ήδη υπάρχουσες υποδομές. Το 2013 ο στόχος για δίκτυα με ρυθμό 40 Gbps μέσω πολυπλεξίας τεσσάρων (4) ζευγαριών των 10Gbps οδήγησε στην ανάπτυξη του προτύπου ITU-T G.989 Next-Generation PON 2 (NG-PON2) (E. Wong, 2022; C. Zhang et al., 2021).

Η ανάγκη για συμμετρικά παθητικά δίκτυα για οικιακή και βιομηχανική χρήση αλλά και για x-haul κινητές εφαρμογές οδήγησε στην ανάπτυξη των XGSPON μέσω του προτύπου IEEE 802.3ca25G/50G-EPON. Το πρότυπο περιλαμβάνει δύο συμμετρικά 25G-EPONs με αποτέλεσμα ένα ρυθμό μετάδοσης 50 Gbps (Cao et al., 2019). Πολύ πρόσφατα (2021) αναπτύχθηκε το πρότυπο ITU-T G.9804 High Speed PON (HSP) που υποστηρίζει τις ίδιες ταχύτητες (Systems, 2013). Τα ITU-T HSP είναι το πρώτο πρότυπο που καθορίζει την επεξεργασία του ψηφιακού σήματος μειώνοντας έτσι το κόστος εφόσον χρησιμοποιεί οπτικές ίνες των 25 Gbps αντί για 50 Gbps. Οι έρευνες για την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών με τη χρήση συνεκτικής μετάδοσης (coherent transmission), ορθογώνιας πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας (orthogonal frequency division multiplexing) και δεσμό μήκους κύματος (wavelength bonding), έχουν ως

τελικό στόχο την ανάπτυξη PONs ρυθμών μετάδοσης 100 Gbps και μεγαλύτερων. Μέχρι στιγμής έχουν αναπτυχθεί και αντίστοιχα πρότυπα όπως IEEE802.3cs και ITU-T G.9807.3 (E. Wong, 2022; C. Zhang et al., 2021).

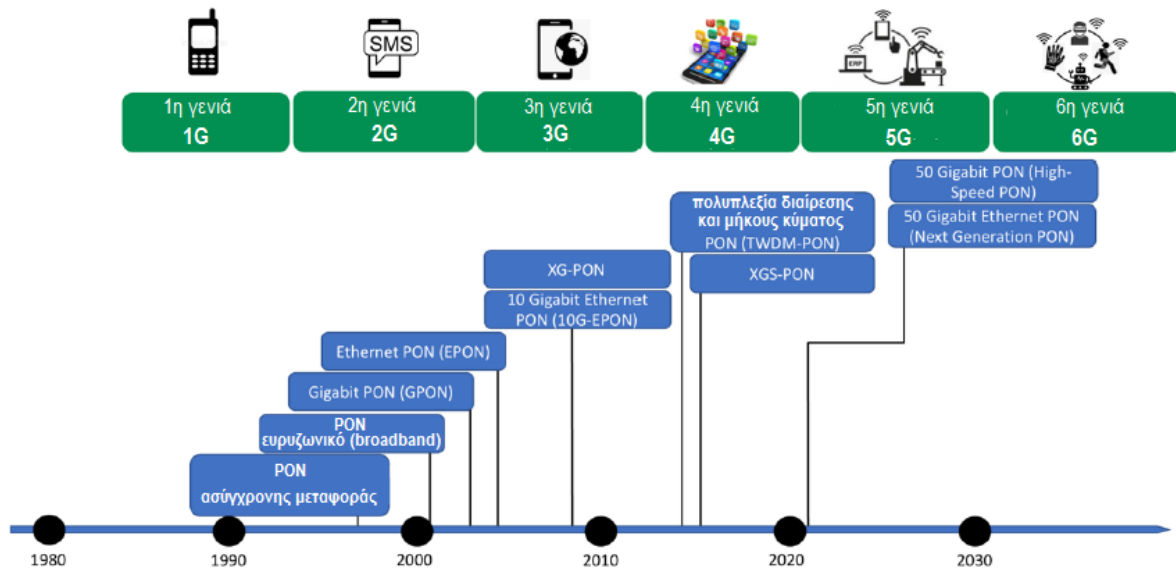
Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά μεγέθη των βασικών οπτικών παθητικών δικτύων (PONs) σύμφωνα με τους Saad et al (2020), Systems (2013), Wong (2022), Zhang et al (2021):

Πίνακας 4 - Χαρακτηριστικά μεγέθη GPON XG-PON και XGS-PON

| Παθητικό δίκτυο (PON) | Ethernet PON (EPON) | Gigabit PON (GPON) | 10 Gigabit PON (XG-PON) | Symmetric XG-PON (XGS-PON) |
|--|---------------------|--------------------|-------------------------|----------------------------|
| Ανάντη (upstream) (nm) | 1310 | 1260-1360 | 1260-1280 | 1260-1280 |
| Κατάντη (downstream) (nm) | 1490 | 1480-1500 | 1575-1580 | 1575-1580 |
| Video (nm) | - | 1530-1565 | 1530-1565 | - |
| Αναλογία διαχωρισμού (splitting ratio) | 1:32 | 1:128 | 1:256 | 1:256 |
| Upload (Gbps) | 1:25 | 1:25 | 2:5 | 10 |
| Download (Gbps) | 1:25 | 2:5 | 10 | 10 |
| Μέγιστη απόσταση μετάδοσης (Km) | 20 | 60 | 100 | 100 |

(Saad et al., 2020; Systems, 2013; E. Wong, 2022; C. Zhang et al., 2021)

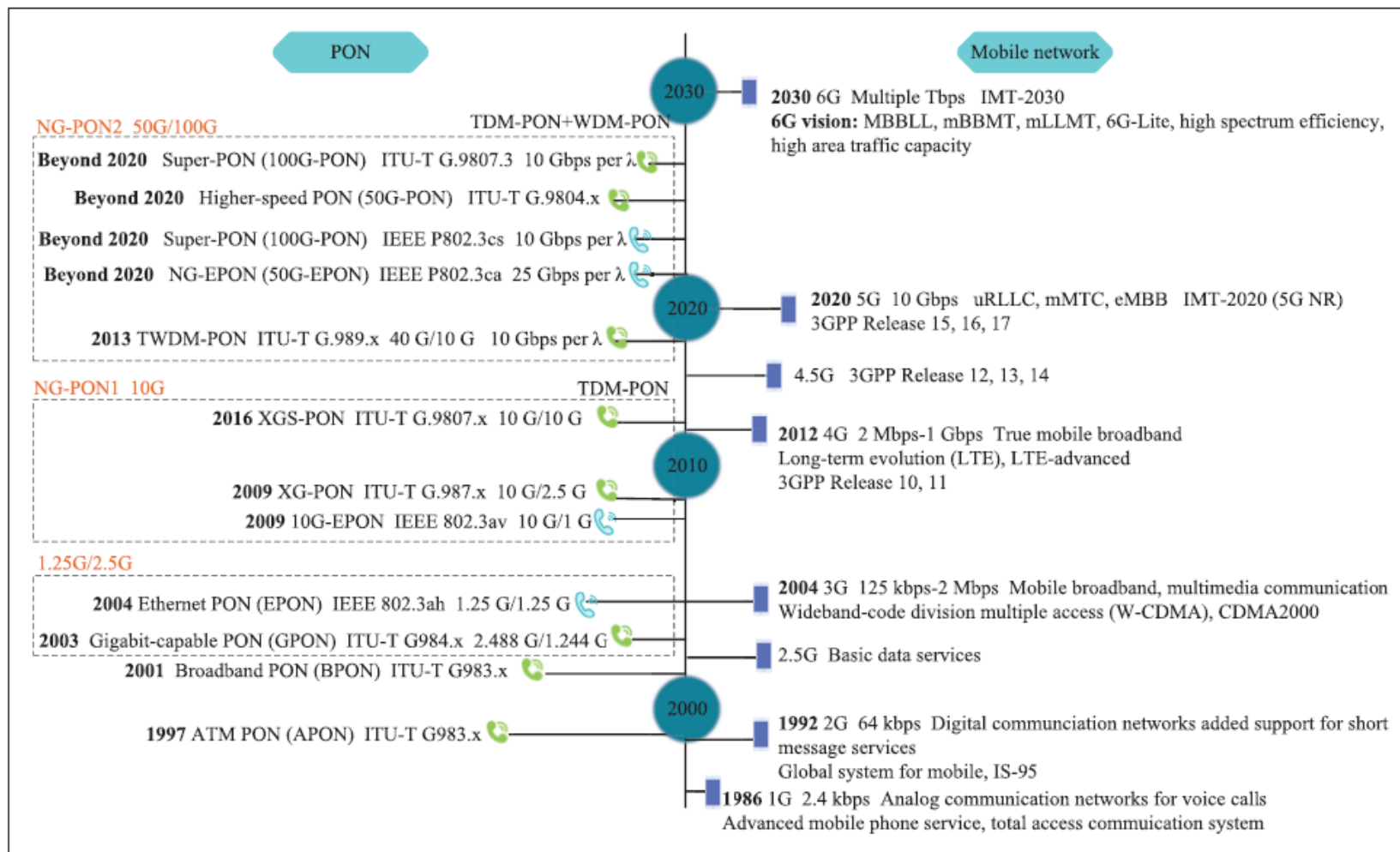
Στο παρακάτω διάγραμμα ο Wong (2022) κάνει μία γραφική απεικόνιση της διαχρονικής εξέλιξης των παθητικών οπτικών δικτύων (PONs) στο χρόνο από τη δεκαετία του 1990 μέχρι και σήμερα, αλλά και τις τάσεις τα PONs νέας γενιάς:



Διάγραμμα 2 - Χρονοδιάγραμμα εξέλιξης τεχνολογίας ευρυζωνικών παθητικών οπτικών δικτύων και δικτύων κινητής τηλεφωνίας

(E. Wong, 2022)

Οι Guo et al (2022) παρουσιάζουν στο διάγραμμα ροής τους πιο αναλυτικά την εξέλιξη των παθητικών οπτικών δικτύων στο χρόνο παρουσιάζοντας αναλυτικότερα την εξέλιξη μετά το 2020 που αναμένεται να «κουμπώσει» στα δίκτυα νέας γενιάς 6G:



Σχήμα 8 – Ιστορικό παθητικών οπτικών δικτύων και ανάπτυξη δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Όπου λ κανάλι μήκους κύματος

(Guo et al., 2022).

2.4 Παθητικά οπτικά δίκτυα και δίκτυα 5^{ης} γενιάς

Μέχρι την ανάπτυξη των δικτύων 5G δεν υπήρχε ιδιαίτερη ανάγκη για τη χρήση PONs (Jaffer et al., 2020; Levi, 2020). Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας και οι σχετικές ζώνες συχνοτήτων διαμορφώνονται συνήθως μέσα σε ένα πλαίσιο που ορίζεται από την πολιτική κατανομής φάσματος, με σκοπό τη βέλτιστη χρήση και αξιοποίησή του. Ωστόσο, στην πράξη παρατηρείται συχνά ότι ένα μέρος του ήδη διαθέσιμου φάσματος δεν χρησιμοποιείται επαρκώς, αλλά σποραδικά και με σημαντικές γεωγραφικές διαφοροποιήσεις. Η έλλειψη φάσματος, σε συνδυασμό με την ανεπαρκή χρήση του, εμποδίζει την ικανοποίηση της αυξανόμενης ζήτησης χωρητικότητας και διαθεσιμότητας.

Στόχοι είναι:

- Η πύκνωση των δικτύων με τη χρήση μικρών κυψελών
- Η αντιμετώπιση της αυξημένης ανάγκης για διευρυμένο φάσμα
- Η κατά το δυνατόν μεγαλύτερη εκμετάλλευση φασματικών πόρων από πολύ διαφορετικές μεταξύ τους τεχνολογίες τηλεπικοινωνιών

Ακόμα θα πρέπει τα δίκτυα 5G:

- Να είναι αποτελεσματικά όχι μόνο στα αστικά κέντρα αλλά και σε αραιοκατοικημένες αστικές περιοχές αλλά και σε απομακρυσμένα χωριά και σημεία στην ύπαιθρο για να μην παρατηρηθούν τα ίδια φαινόμενα στο χάσμα του παρεχόμενου ψηφιακού φάσματος που συνέβησαν στα δίκτυα γενιάς 3G και 4G.
- Να είναι σε θέση να υποστηρίξουν τα πολυμορφικά σύγχρονα δίκτυα, λόγω της πολυπλοκότητας των υπηρεσιών, των διαφορετικών εξοπλισμών πρόσβασης (σταθεροί υπολογιστές, smartphones, tablets), των ζωνών συχνοτήτων (ελεύθερες ή/και εμπορικά εκμεταλλεύσιμες), τα διαφορετικά περιβάλλοντα, τους ετερογενείς κόμβους σύνδεσης

(HORIZON 2020, 2019)

Για την οδήγηση και τη διατήρηση του απαιτούμενου υψηλού εύρους ζώνης, τα ασύρματα κανάλια μετάδοσης έπρεπε να προσαρμοστούν σε πολύ μικρά εύρη ζώνης

μεγέθους χιλιοστών. Παρόλο που έτσι αυξήθηκε η χωρητικότητα, αναπόφευκτα προέκυψε το πρόβλημα της απόδοσης σε μεγάλες αποστάσεις. Ενώ η ακτίνα μετάδοσης σε 4G δίκτυα είναι περίπου 1 χιλιόμετρο, σε δίκτυα 5G πέφτει στα 100 μέτρα, άρα απαιτούνται περισσότερα σημεία μετάδοσης. Η γενική υπόθεση είναι ότι η πυκνότητα ανάπτυξης ενός δικτύου 5G πρέπει να είναι μέχρι και 50 φορές μεγαλύτερη ώστε να παρέχει την ίδια κάλυψη, άρα απαιτούνται και ο αντίστοιχος πολλαπλάσιος αριθμός κεραιών. Η Κίνα πρωτοπόρος της ενσωμάτωσης της τεχνολογίας 5G μέχρι το 2020 είχε αναπτύξει 600.000 πύργους και σταθμούς βάσης σε όλη τη χώρα με σκοπό να προσφέρει τις υπηρεσίες του δικτύου 5G σε όσο το δυνατόν περισσότερους πελάτες. Παρά το τεράστιο μέγεθος του εγχειρήματος, πρόκειται για ένα μικρό ποσοστό κάλυψης σε πανεθνικό επίπεδο (Levi, 2020).

Στην πραγματικότητα μέχρι σήμερα δεν είναι δυνατή η πανεθνική κάλυψη με τεχνολογίες 5G με τη χρήση οπτικών ινών. Υπάρχουν μάλιστα ακόμα ημιαστικές ή αγροτικές περιοχές ακόμα σε ανεπτυγμένες χώρες στις οποίες δεν υπάρχει ούτε καν επαρκής κάλυψη δικτύου 4G. Ενώ οι περισσότερες έρευνες σήμερα επικεντρώνονται στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών 5G, δεν έχουν δοθεί πειστικές απαντήσεις για το πώς θα αναπτυχθούν και πώς θα διασυνδέονται τόσοι πολλοί πύργοι μετάδοσης. Στην αρχιτεκτονική του δικτύου 4G, ο κάθε σταθμός βάσης συστεγάζεται με κάθε πύργο, απαιτείται να υπάρχει εφεδρική μπαταρία και διάταξη για τον έλεγχο υπερθέρμανσης, άρα υπάρχει απαίτηση για μεγάλο χώρο ανάπτυξης. Στα δίκτυα 5G αντίθετα υπάρχει διαχωρισμός μεταξύ της επεξεργασίας δεδομένων και το φέρον ραδιοφωνικό σήμα. Η μετάδοση και κατανομή δεδομένων γίνεται απομακρυσμένα, κάτι που μειώνει σημαντικά το μέγεθος των σταθμών, κάτι που εξουδετερώνει μερικώς τον απαιτούμενο μεγάλο αριθμό πύργων (Levi, 2020).

Οι περισσότεροι πύργοι κινητής τηλεφωνίας 3G/4G χρησιμοποιούν τεχνολογία μικροκυμάτων για συνδεσιμότητα ως κύριο στοιχείο backhaul. Ωστόσο, τα δίκτυα 5G θα αναπτυχθούν με βάση την τοπολογία cloud RAN όπου τα δεδομένα του τομέα κεραίας θα τρέχουν απευθείας μέσω οπτικών ινών προς τους DU. Τέτοια δεδομένα θα απαιτούν συνδέσεις 10-Gbps έως 25-Gbps, κάτι που είναι στο υψηλότερο επίπεδο για την τεχνολογία μικροκυμάτων. Παράλληλα, ο διαχωρισμός της κατανεμημένης μονάδας (Distributed Unit) από την ραδιοφωνική μονάδα (Radio Unit) απαιτεί πολύ μεγαλύτερο αριθμό και διασυνδέσεις οπτικών ινών. Επιπλέον, οι χρησιμοποιούμενες

οπτικές ίνες πρέπει να διαθέτουν μέχρι και 20 φορές μεγαλύτερη χωρητικότητα για να καλύψουν τις απαιτήσεις εύρους ζώνης 5G. Και αυτές οι συνδέσεις οπτικών ινών πρέπει να μειώνουν μέχρι και 10 φορές την καθυστέρηση (delay) απόκρισης (Jaffer et al., 2020; Levi, 2020; Sizer et al., 2022).

Μία σκέψη θα ήταν η τοποθέτηση δισεκατομμυρίων οπτικών ινών για τη διασύνδεση εκατομμυρίων ραδιοπύργων. Έργο τεράστιο, που επέφερε καθυστερήσεις, θα έπρεπε να αντιμετωπιστούν υλικοτεχνικοί περιορισμοί, κάτι που θα επέφερε τεράστιο κόστος στους παρόχους τηλεπικοινωνιακών συνδέσεων. Τα δίκτυα 5G θα πρέπει να είναι οικονομικά αποδοτικά (cost effective) άρα θα πρέπει να βελτιστοποιηθεί το κόστος εγκατάστασης, άρα να αξιοποιηθεί η ήδη υπάρχουσα υποδομή οπτικών ινών και να μεγιστοποιηθεί η χωρητικότητα των δικτύων ραδιοφωνικής πρόσβασης (Radio Access Network – RAN) (Levi, 2020)

Η μόνη αποδοτική λύση είναι η χρήση παθητικών οπτικών δικτύων (PONs) τα οποία χρησιμοποιούνταν ήδη από τα δίκτυα 4G (Levi, 2020). Η τεχνολογία των παθητικών οπτικών δικτύων (Passive Optical Networks) για δικτύωση οπτικών ινών μέχρι τον τελικό χρήστη (Fiber to the Home – FTTH), η οποία παρουσίαζε αρκετά συγκριτικά πλεονεκτήματα για ασύρματα οπισθοζευτικά κυκλώματα (mobile backhaul), καθώς ανταποκρινόταν στις ανάγκες για χωρητικότητα, υστέρηση και συγχρονισμό (Sizer et al., 2022).

Ο τρόπος διασύνδεσης των PONs (σημείο προς πολλαπλά σημεία, μειώνει σημαντικά το κόστος σε σχέση με τις τεχνολογίες διασύνδεσης οπτικών ινών σημείου προς σημείο (point-to-point). Η διασύνδεση σημείου προς πολλαπλά σημεία έχει τα παρακάτω πλεονεκτήματα σε σχέση με τη διασύνδεση σημείου προς σημείο:

1. Διαμοιρασμός οπτικών ινών
2. Απαιτήση για λιγότερες οπτικές διεπαφές (optical interfaces)
3. Χαμηλότερου κόστους συνάθροιση (aggregation)
4. Οι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι με που παρέχουν υπηρεσίες οπτικών ινών μέχρι το τελικό χρήστη (FTTH) θα μπορούσαν να αξιοποιήσουν τα PON backhaul τόσο για να προσφέρουν υπηρεσίες σε δικούς τους πελάτες τόσο για χονδρική πώληση σε άλλους.

Παρά τα πλεονεκτήματα τα Παθητικά Οπτικά Δίκτυα για μετάδοση Gigabit (Gigabit Passive Optical Networks – GPONs) χρησιμοποιήθηκαν ελάχιστα σε κινητά οπισθοζευτικά κυκλώματα (mobile backhaul) μέχρι και τη γενιά 4G. Το κίνητρο της μείωσης του κόστους δεν ήταν τόσο υψηλό σε σχέση με το γεγονός ότι θα έπρεπε να γίνει εκπαίδευση των τεχνικών σε μία νέα τεχνολογία. Αυτό που θα έδινε το κίνητρο για την ανάπτυξη mobile backhaul PON θα ήταν η πύκνωση των κυψελών κάτι που έγινε απαιτητό στα δίκτυα 5G (Sizer et al., 2022).

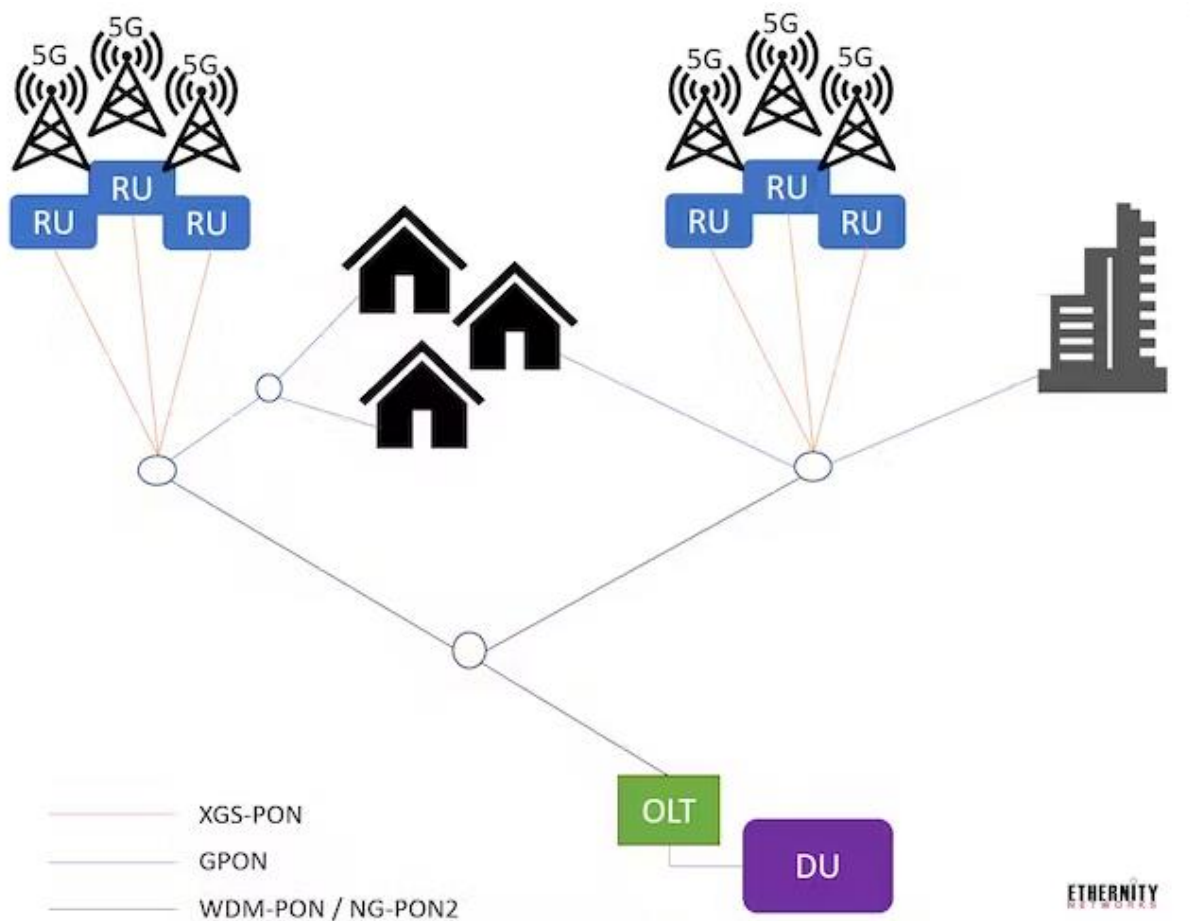
Τα PONs μπορούν να μεταδώσουν δεδομένα 5G με τη χρήση οπτικών ινών από τους πύργους ραδιοφωνίας στα δίκτυα ραδιοφωνικής πρόσβασης (RAN). Τα PONs είναι έχουν αναπτυχθεί για την ευελιξία, την αξιοπιστία και την αποτελεσματικότητά τους στην μεταφορά ευρυζωνικών δεδομένων από κινητά ή φορητά σημεία σε ένα ενιαίο δίκτυο. Συγκριτικά με άλλα δίκτυα διανομής που χρησιμοποιούν πολλαπλούς τύπους διανομής λόγω εναρμόνισης διαφορετικών τεχνολογιών, παρουσιάζει σημαντικά συγκριτικά πλεονεκτήματα καθώς εφαρμόζεται ενιαία δικτύωση (Levi, 2020).

Σε πολλές χώρες, έχει αναπτυχθεί δίκτυο PON για να ενεργοποιήσει την ευρυζωνική σύνδεση οπτικών ινών στο σπίτι/επιχείρηση (Fiber to the Home or the Business - FTTx). Για να φτάσει το 5G σε σπίτια και επιχειρήσεις, πρέπει επίσης να υπάρχει σύνδεση από τα εκατομμύρια κεραίες ραδιοφώνου στο RAN. Χρησιμοποιώντας μια αρχιτεκτονική που βασίζεται στην τοπολογία δέντρου από σημείο σε πολλαπλό σημείο του PON, οι χειριστές μπορούν να μειώσουν την ποσότητα των ινών κορμού που χρησιμοποιούνται. Τα υπάρχοντα δίκτυα FTTx είναι μεγάλα και εκτεταμένα, με επαρκείς πόρους γραμμής και θύρας, καθώς και τις απαραίτητες οπτικές συσκευές και τροφοδοτικό. Το PON προσφέρει ανθεκτικότητα, έτσι ώστε η συνδεσιμότητα να διατηρείται ακόμα και αν αποσυνδεθεί μια γραμμή. Πάνω απ' όλα, το PON μειώνει το κόστος δικτύωσης επαναχρησιμοποιώντας υπάρχοντα φίλτρα ινών και οπτικών ινών και μπορεί να χειριστεί διάφορα ρεύματα κυκλοφορίας με πολύ μεγαλύτερη χωρητικότητα από άλλες επιλογές μεταφοράς. Ως εκ τούτου, η υπάρχουσα ίνα PON είναι ένας ιδανικός αγωγός και οικονομικά αποδοτική λύση για τη μεταφορά της κίνησης 5G από τις RU στους DU και ίσως ακόμη και μετά στο υπόλοιπο δίκτυο πρόσβασης (Levi, 2020; Sizer et al., 2022).

Υπάρχουν διαφορετικές εναλλακτικές PON ως πιθανές επιλογές για την υποδομή 5G. Το FTTH έχει μια μέγιστη απαίτηση μέχρι σήμερα για GPON, το οποίο μπορεί να

παρέχει κορυφαία χωρητικότητα περίπου 2,5 Gbps κατάντη και 1,2 Gbps ανάντη. Αλλά το fronthaul απαιτεί πολύ μεγαλύτερη χωρητικότητα, προσφέρουν τα XGS-PON, με ταχύτητες από 10-Gbps ανάντη και κατάντη, έως και 25G PON. Στην πραγματικότητα τα 10G PONs μοιάζουν απολύτως ικανοποιητικά για την εξυπηρέτηση συνδέσεων FTTH αλλά δειλά εμφανίζονται φορείς που επιθυμούν μεγαλύτερες ταχύτητες (Sizer et al., 2022).

Την ίδια στιγμή κάποιοι αναζητούν υποστήριξη για WDM-PON (μερικές φορές ονομάζεται Combined PON – CPON), το οποίο επικαλύπτει νέα μήκη κύματος σε δίκτυα PON παλαιού τύπου χωρίς να θέτει σε κίνδυνο το εύρος ζώνης της υπάρχουσας σταθερής ευρυζωνικής υπηρεσίας. Για παράδειγμα, μια μεμονωμένη ίνα θα μπορούσε να κάνει χρήση τεσσάρων χρωμάτων (μήκη κύματος) εντός της ίνας για GPON (δύο ανάντη και δύο κατάντη) για να εξυπηρετήσει τόσο το GPON για FTTH όσο και το XGS-PON για το 5G fronthaul στην ίδια ίνα (Levi, 2020; Sizer et al., 2022)



Σχήμα 9 - Παροχή broadband και 5G fronthaul από παθητικά οπτικά δίκτυα (PONs)

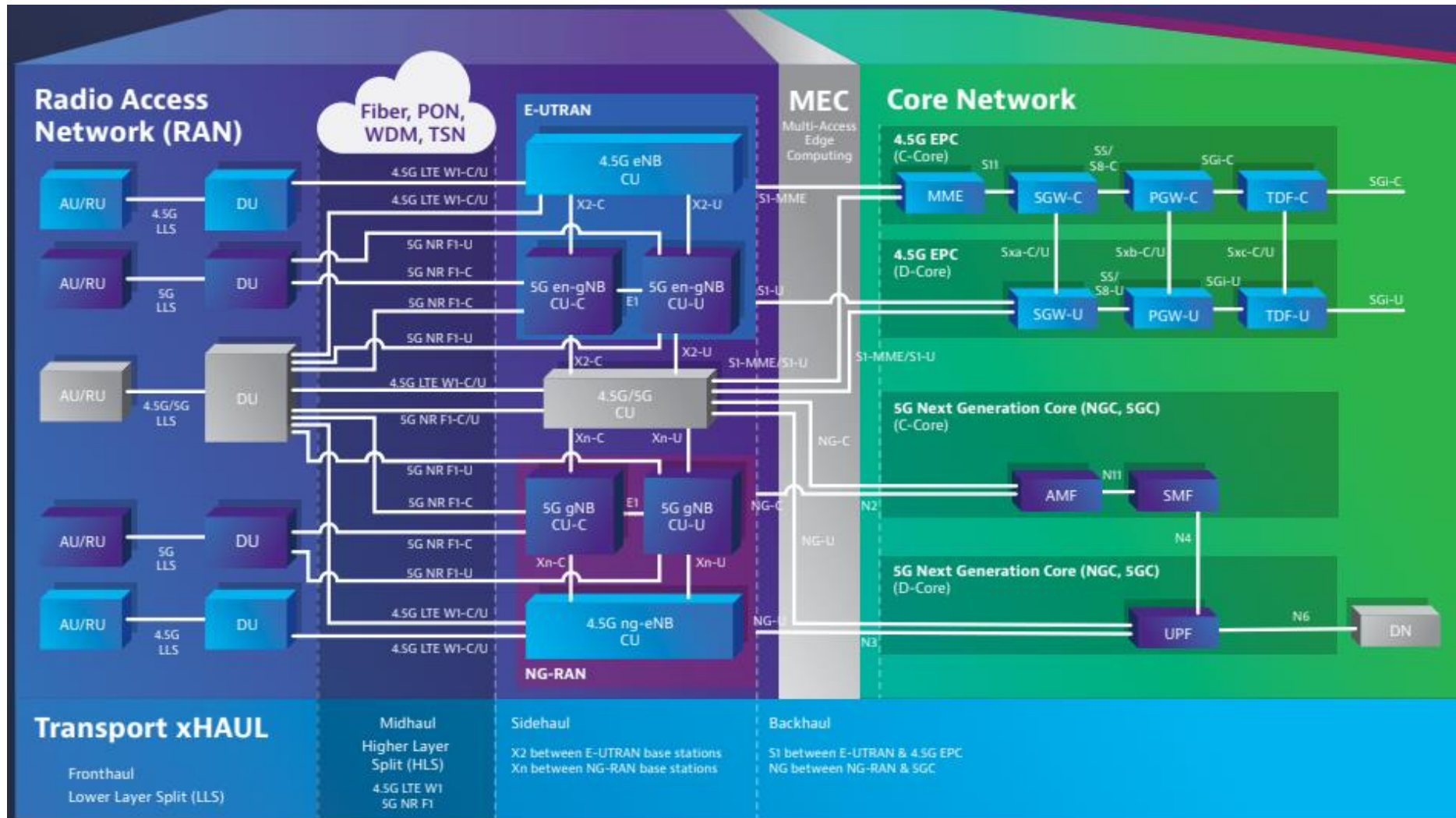
(Levi, 2020)

Τελευταία τεχνολογία 5G που προτείνεται είναι το NG-PON2, το οποίο μπορεί να χειριστεί έως και 40 Gbps σε κάθε κατεύθυνση μέσω PON χρησιμοποιώντας οκτώ μήκη κύματος XGS-PON. Αυτό στη συνέχεια απαιτεί έναν συντονιζόμενο δέκτη σε κάθε τελικό σημείο για να μπορεί να διαφοροποιεί και να επιβλέπει τα διάφορα χρώματα. Λόγω της τεράστιας χωρητικότητας μεταφοράς του, έχει τη δυνατότητα να επεκτείνει το δίκτυο PON για να συνδέσει επίσης το midhaul μεταξύ DU και κεντρικών μονάδων (CU) ακόμη πιο βαθιά στο δίκτυο ραδιοπρόσβασης. Τα PON για δίκτυα 5G περιλαμβάνουν έναν δομικό περιορισμό για ανάπτυξη δικτύων 5G. Επειδή το PON λειτουργεί με πρωτόκολλο TDMA, υπάρχει φυσικά πρόσθετη καθυστέρηση μεταξύ της άφιξης της κυκλοφορίας και της απόκρισης. Αυτό μπορεί να προκαλέσει καθυστέρηση έως και χιλιοστού του δευτερολέπτου, η οποία είναι ναι μεν ασήμαντη για δίκτυα 3G και 4G είναι πολύ σημαντική για 5G. Για αυτό και αναπτύχθηκαν τα WDM-PON τα οποία μειώνουν σημαντικά την καθυστέρηση (Levi, 2020; Sizer et al., 2022).

Διαφορετικά, μέχρι σήμερα δεν έχει σημειωθεί μεγάλη πρόοδος σχετικά με την αντιμετώπιση προβλημάτων λανθάνοντος χρόνου στο fronthaul, αν και έχουν προταθεί διάφορες λύσεις για την αντιμετώπιση αυτού του περιορισμού. Μια τέτοια πρόταση χρησιμοποιεί το DU και το CU για να ειδοποιεί ένα OLT κάθε φορά που ένας χρήστης στην περιοχή του έχει πρόσβαση στο δίκτυο 5G, έτσι ώστε το εύρος ζώνης να μπορεί να εκχωρηθεί εκ των προτέρων χωρίς να χρειάζεται να περιμένει κανείς για άδεια (Levi, 2020).

Βεβαίως, καθώς όλο και περισσότερα δίκτυα 5G προχωρούν προς τη μαζική ανάπτυξη και καθώς τα PON αναγνωρίζονται ως οικονομικά αποδοτικά μέσα υψηλής χωρητικότητας για την ανάπτυξη μεταφοράς 5G από την κεραία στο RAN, περισσότερη προσπάθεια θα αφιερωθεί στην εργασία γύρω και στη μείωση του λανθάνοντος χρόνου για την κάλυψη του 5G σημεία αναφοράς. Τελικά, το PON διαφοροποιείται στους παρόχους υπηρεσιών ως η βέλτιστη επιλογή μεταφοράς 5G fronthaul επειδή είναι άμεσα διαθέσιμη και προσφέρει ένα ενιαίο δίκτυο διανομής τόσο για σταθερή ευρυζωνική όσο και για μεταφορά δεδομένων κινητής τηλεφωνίας. Αλλά το PON παρέχει επίσης αξία επειδή είναι απλό στην εγκατάσταση, κλιμακώνεται και μπορεί να ρυθμιστεί εύκολα με βάση τη ζήτηση, είναι διαλειτουργικό με άλλες αναπτυγμένες αρχιτεκτονικές δικτύου και είναι εξαιρετικά αξιόπιστο. Πάνω απ' όλα, το PON βελτιστοποιεί το κόστος του χειριστή, το οποίο είναι κρίσιμο σε μια εποχή που

κατανέμονται τόσα πολλά έξοδα υποδομής για την υλοποίηση του αναγκαστικά πυκνού δικτύου πύργων που αποτελούν τη ραχοκοκαλιά του 5G (Romano, 2018; Sizer et al., 2022).



Σχήμα 10 - Αρχιτεκτονική δικτύου ραδιομετάδοσης 5G

(Romano, 2018)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΙΧΜΗΣ ΚΑΙ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΟ OPTICAL FRONTHAUL

Στο παρόν κεφάλαιο έχει επιχειρηθεί μία συστηματική βιβλιογραφική επισκόπηση εμπειρικών ερευνών που αναπτύσσουν ή προτείνουν οπτικές λύσεις για δίκτυα 5^{ης} και 6^{ης} γενιάς. Οι έρευνες έχουν κατηγοριοποιηθεί ανάλογα με τις βασικές τους επιδιώξεις και παρουσιάζονται σε συγκεντρωτικό πίνακα στο κεφάλαιο 3.10

3.1 Μείωση κόστους (Cost reduction)

Ένα από τα βασικά προβλήματα που προκύπτει κατά την ανάπτυξη δικτύων 5^{ης} και 6^{ης} γενιάς είναι η γεωμετρική αύξηση του κόστους με την αύξηση της πυκνότητας του δικτύου (Sizer et al., 2022). Ερευνητές έχουν προτείνει σε παρόχους την μείωση του κόστους ανάπτυξης fronthaul δικτύων μέσω του διαμοιρασμού των πόρων του δικτύου, όπως της γενικής υποδομής των οπτικών ινών (Chanclou et al., 2018; Kumar & Oughton, 2023). Η μείωση του κόστους μπορεί να επιτευχθεί και μέσω της αναζήτησης εναλλακτικών αρχιτεκτονικών δικτύων όπως είναι τα παθητικά οπτικά δίκτυα, που θα αντικαταστήσουν την ευρέως χρησιμοποιούμενη Point-to-Point (P2P) (Fayad et al., 2022; Ranaweera & Lim, 2021). Σημαντική μείωση του κόστους επιτυγχάνεται με την αξιοποίηση της υπάρχουσας υποδομής οπτικών ινών (Ranaweera et al., 2013)

3.2 Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης και βιωσιμότητας (Cost efficiency and sustainability)

Η αύξηση στην ταχύτητα, τη διασπορά και την πυκνότητα δεδομένων ασύρματης δικτύωσης έχει αυξήσει κατακόρυφα τις ενεργειακές απαιτήσεις. Για την επίτευξη ισορροπίας μεταξύ κόστους και αποτελεσματικότητας αλλά και για την εξασφάλιση της επεκτασιμότητας του δικτύου αναζητούνται νέες τεχνικές που θα βελτιώσουν την ενεργειακή απόδοση (Fayad et al., 2024).

Έρευνες προτείνουν μοντέλα μέτρησης της κατανάλωσης ενέργειας και βιωσιμότητας διαφόρων αρχιτεκτονικών οπτικών δικτύων 5^{ης} και 6^{ης} γενιάς (Fayad et al., 2023; Fiorani et al., 2016). Στην έρευνα των Lorincz, Klarin and Begusic (2023) προτείνεται η απενεργοποίηση ή μείωση του ρυθμού μετάδοσης πληροφορίας κατά τις χρονικές

στιγμές χαμηλής ζήτησης από καταναλωτές, με τη χρήση παθητικών οπτικών δικτύων και αρχιτεκτονικής C-RAN, μειώνοντας έτσι σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας η οποία είναι on-demand. Με τη χρήση δυναμικής κατανομής εύρους ζώνης (dynamic allocation bandwidth), οι πόροι κατανέμονται με βάση την ζήτηση και τις απαιτήσεις, και παραμένουν αδρανείς μειώνοντας τις απαιτήσεις για ενέργεια.

Οι Zhang et al (2018) προτείνουν τη χρήση παθητικού οπτικού δικτύου πολυπλεξίας διαίρεσης μήκους κύματος (Wavelength Division Multiplexing – WDM) το οποίο θα έχει τη δυνατότητα αποπολυπλεξίας με τη χρήση δρομολογητών διατεταγμένου πλέγματος κυματοδηγού (Arrayed Waveguide Grating Router – AWGR). Οι Zhu, Zhang and Ji (2019) χρησιμοποίησαν Free Space Optics (FSOs) ζωνών χιλιοστού (mmWave) και πέτυχαν τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του οπτικού fronthaul.

3.3 Μείωση καθυστέρησης και διακύμανσης (Latency and Jitter reduction)

Καθυστέρηση (latency) θεωρείται ως ο χρόνος που απαιτείται για την μετάδοση ενός σήματος από σημείο σε σημείο. Στο οπτικό εμπροσθοζευκτικό κύκλωμα (optical fronthaul) η μείωση της καθυστέρησης, ή του χρόνου αναμονής όπως αλλιώς ονομάζεται, είναι σημαντικός παράγοντας για την απρόσκοπτη επικοινωνία μεταξύ μονάδας βασικής ζώνης (BaseBand Unit – BBU) και της απομακρυσμένης μονάδας εισόδου (Remote Radio Head – RRH). Αυξημένη καθυστέρηση μπορεί να οδηγήσει σε: κακής ποιότητας ραδιοφωνική μετάδοση και μετάδοση βίντεο και πιθανή αποτυχία στην μετάδοση και παραλαβή δεδομένων, άρα σε πιθανές διακοπές σύνδεσης και χαμηλότερη αξιοπιστία του δικτύου (Fayad et al., 2024)

Διακύμανση (Jitter) είναι η μεταβολή της καθυστέρησης στην πάροδο του χρόνου. Στο οπτικό fronthaul η διακύμανση μπορεί να προκαλέσει: (1) απώλεια πακέτων δεδομένων (packet loss), καθώς τυχόν υψηλή διακύμανση μπορεί να σημαίνει ότι τα πακέτα δεδομένων φθάνουν αταξινόμητα ή απορρίπτονται λόγω υπερχειλίσις προσωρινής μνήμης (buffer overflow) και (2) μειωμένη αξιοπιστία και σταθερότητα του δικτύου, λόγω διαλείπουσας λειτουργίας του δικτύου (Fayad et al., 2024).

Η όσο το δυνατόν μείωση της διακύμανσης είναι σημαντική παράμετρος για τεχνολογίες αιχμής που συνδέονται με την 5^η και 6^η γενιά δικτύωσης όπως είναι τα αυτόνομα συστήματα μεταφοράς ή διάφοροι βιομηχανικοί αυτοματισμοί (Chitimalla et al., 2017; Lometti & Sestito, 2020).

Στην έρευνα των Chitimalla et al (2017) επιχειρείται μίας μορφής ενθυλάκωσης της Κοινής Διασύνδεσης Δημόσιου Ραδιοφώνου (Common Public Radio Interface – CPRI) σε δίκτυο Ethernet (CPRI over Ethernet – CoE) που μειώνει την καθυστέρηση και τη διακύμανση σε εφαρμογές 5G. Στις έρευνες των Wang et al (2019) και Wang et al (2020) η μείωση της διακύμανσης επιτυγχάνεται με βελτιωμένες τοπολογίες δικτύωσης 5^{ης} γενιάς.

3.4 Ενσωμάτωση ασύρματων τεχνολογιών σε οπτικό fronthaul

3.4.1 Συνδυασμός οπτικών ινών και ασύρματων τεχνολογιών

Η ενσωμάτωση οπτικών ινών που θα διαθέτουν τεχνολογίες μικροκυμάτων και κυμάτων ζωνών χιλιοστού (mmWave) προσφέρει τα εξής πλεονεκτήματα:

- Ευελιξία (flexibility) και επεκτασιμότητα (scalability): ο συνδυασμός οπτικών ινών που θα αποτελούν τη ραχοκοκαλιά του δικτύου (backbone network) με συνδέσεις μικροκυμάτων ή/και κυμάτων ζωνών χιλιοστού που δίνουν τη δυνατότητα παραμετροποιήσιμων δυναμικών συνδέσεων, προτιμάται σε περιπτώσεις όπου δεν είναι δυνατή η περαιτέρω εγκατάσταση νέων οπτικών ινών όπως συνήθως συμβαίνει σε πυκνοκατοικημένα αστικά κέντρα ή σε απομακρυσμένες περιοχές με αραιή δόμηση. Τέτοιου τύπου δίκτυα είναι εύκολα επεκτάσιμα και παραμετροποιήσιμα στις νέες συνθήκες και απαιτήσεις που επιφέρουν τα δίκτυα 5^{ης} και 6^{ης} γενιάς (Kalfas et al., 2019)
- Ενισχυμένη ανθεκτικότητα δικτύου (Enhanced network resilience): οι ασύρματες τεχνολογίες μπορούν να λειτουργήσουν ως εναλλακτική επιλογή όταν συμβεί κάποιο πρόβλημα με τις οπτικές ίνες και το αντίθετο. Έτσι επιτυγχάνεται η δραστική μείωση τυχόν αποτυχιών ή διακοπών διασύνδεσης βελτιώνοντας σημαντικά την αξιοπιστία του δικτύου (Yang et al., 2014)
- Μειωμένο κόστος επέκτασης δικτύου: αξιοποιώντας την ήδη υπάρχουσα υποδομή οπτικών ινών και επεκτείνοντάς την με την ενσωμάτωση ασύρματων τεχνολογιών απαλλάσσει από το κόστος προμήθειας και εγκατάστασης νέων οπτικών ινών. Παράλληλα ο δυναμικός χαρακτήρας μίας υβριδικής ενσύρματης / ασύρματης σύνδεσης παρουσιάζει μειώνει το κόστος λειτουργίας (Farias et al., 2016)

3.4.2 Συνδυασμός Free Space Optics (FSO) και ασύρματων τεχνολογιών

Η χρήση οπτικής ελευθέρου χώρου (Free space optics – FSO) θεωρείται ότι θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στην κινητή τηλεφωνία 6^{ης} γενιάς (6G) αν αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά οι επιδράσεις από τις καιρικές συνθήκες ιδίως σε συνδέσεις μεγάλων αποστάσεων. Η πυκνή νέφωση, η ομίχλη και οι ανεμοθύελλες επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση της οπτικής ελευθέρου χώρου (Free space optics – FSO). Υβριδικά συστήματα που περιλαμβάνουν οπτική ελευθέρου χώρου(FSO) και mmWave εξουδετερώνουν τις αδυναμίες του κάθε συστήματος εξασφαλίζοντας υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης χωρίς απώλειες σύνδεσης. Όταν τα FSOs επηρεάζονται από καιρικές συνθήκες ομίχλης και πυκνής νέφωσης, η υψηλή διαπερατότητα των mmWave διασφαλίζει την απρόσκοπτη σύνδεση, ενώ σε συνθήκες έντονης βροχόπτωσης που επηρεάζονται τα mmWave, τα FSOs λειτουργούν απρόσκοπτα (Mohsan et al., 2023; H. Zhang et al., 2016)

3.5 Βελτιστοποίηση κατανομής πόρων (Improved resource allocation)

Η βελτιστοποίηση της κατανομής των πόρων του δικτύου συγκεντρώνει πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα:

- Βελτιωμένη απόδοση του δικτύου: Σε περιπτώσεις όπου απαιτείται διακίνηση μεγάλου όγκου δεδομένων η βελτιστοποίηση της χρήσης των διαθέσιμων πόρων είναι πολύ σημαντική. Στα δίκτυα 6^{ης} γενιάς η διακίνηση δεδομένων αναμένεται να είναι πολλαπλάσια από ότι στο παρελθόν άρα η αναπροσαρμογή της χρήσης των πόρων αποτελεί μονόδρομο (Mohsan et al., 2023).
- Βελτιωμένη φασματική απόδοση: η βελτιωμένη κατανομή πόρων με στόχο την καλύτερη απόδοση του φάσματος, η οποία με την σειρά της αυξάνει τον υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και μείωση της καθυστέρησης στοιχεία απαραίτητα για τα δίκτυα της 6^{ης} γενιάς (Fan et al., 2022; Sizer et al., 2022)
- Αυξημένη ενεργειακή απόδοση: η βελτιστοποίηση της κατανομής των πόρων μειώνει την απαιτούμενη ενέργεια για την μετάδοση και επεξεργασία σήματος, κάτι που είναι ιδιαίτερα ελκυστικό για την ανάπτυξη δικτύων 6^{ης} γενιάς όπου

θεωρητικά θα απαιτούν περισσότερους ενεργειακούς πόρους (Georgiadis et al., 2023; Rajatheva et al., 2020)

- Βελτίωση επεκτασιμότητας και προσαρμοστικότητας του δικτύου: η καλύτερη κατανομή των πόρων μπορεί να επιτρέψει την συνδεσιμότητα περισσότερων συσκευών και χρηστών χωρίς να τίθεται σε κίνδυνο η απόδοση και η αξιοπιστία του δικτύου (Fayad et al., 2024)

Βελτιστοποιημένη κατανομή πόρων μπορεί να επιτευχθεί μέσω δυναμικής εκχώρησης εύρους ζώνης (Dynamic Bandwidth Allocation – DBA), δηλαδή την εκχώρηση εύρους ζώνης ανάλογα με την κατάσταση του δικτύου και τις απαιτήσεις των χρηστών. Μέσω DBA γίνεται βέλτιστη χρήση πόρων με αποτέλεσμα τη βελτιστοποίηση της αποτελεσματικότητας του δικτύου με στόχο την ικανοποίηση των χρηστών. Βασικό πλεονέκτημα είναι ότι χωρίς σωστή κατανομή πόρων δεν είναι δυνατή η επεκτασιμότητα του δικτύου με λογικό κόστος (Garima et al., 2022; E. Wong & Ruan, 2023; Zaouga et al., 2019)

3.6 Αξιοποίηση μηχανικής μάθησης και τεχνητή νοημοσύνης

Η αξιοποίηση της μηχανικής μάθησης (machine learning) και της τεχνητής νοημοσύνης (artificial intelligence) θεωρείται ότι θα είναι καθοριστική στην ανάπτυξη και λειτουργία δικτύων, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις όπου συμβατικά μαθηματικά μοντέλα, ή οι συμβατικοί αλγόριθμοι επίλυσης προβλημάτων αποτυγχάνουν να δώσουν λύσεις σε περίπλοκες καταστάσεις (model και algorithm deficit αντίστοιχα) (E. Wong et al., 2023). Η ενσωμάτωση της μηχανικής μάθησης όμως δεν είναι ανεμπόδιστη. Ο δυναμικός χαρακτήρας και η πολυπλοκότητα των δικτύων 5^{ης} και 6^{ης} γενιάς μέχρι στιγμής, παράγει πολλές φορές κατακερματισμένα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο που δεν ανταποκρίνονται τις περισσότερες φορές στις προδιαγραφές των μοντέλων τεχνητής νοημοσύνης. Θα μπορούσαν όμως να έχουν βοηθητικό ρόλο στη βελτιστοποίηση της απόδοσης ή σε περιπτώσεις συμφόρησης δεδομένων (data congestion)(Quran et al., 2022; E. Wong et al., 2023; E. Wong & Ruan, 2022)

Οι αλγόριθμοι τεχνητής νοημοσύνης επιτρέπουν την «έξυπνη» διαχείριση δικτύου μέσω δυναμικής κατανομής πόρων, προγνωστικό εντοπισμό σφαλμάτων και συντήρηση (E. Wong & Ruan, 2023). Τα μοντέλα πρόβλεψης κίνησης που βασίζονται

στην μηχανική μάθηση για το διαχωρισμό διεπαφής του fronthaul με δυναμικό τρόπο με βάση τη ζήτηση. Η μηχανική μάθηση και η τεχνητή νοημοσύνη έχουν τη δυνατότητα επεξεργασίας τεραστίων ποσοτήτων δεδομένων για να βοηθήσουν στην κατασκευή μοντέλων πρόβλεψης της συμπεριφοράς του δικτύου με σκοπό τη βελτιστοποίηση κατανομής πόρων. Τέτοιου τύπου μοντέλα ελαχιστοποιούν την ανάγκη για ανθρώπινη επέμβαση, ενισχύοντας τη δυνατότητα αυτόματων λειτουργιών κυρίως ως προς την συντήρηση (Vardakas et al., 2022; E. Wong et al., 2023).

Παρόλα αυτά, όπως επισημάνθηκε και παραπάνω, η μηχανική μάθηση έχει σημαντικούς περιορισμούς. Η ανάπτυξη και η απόδοση των μοντέλων μηχανικής μάθησης εξαρτάται σε απόλυτο βαθμό από την ποσότητα και την ποιότητα των δεδομένων. Ακόμη, πρόκειται για περίπλοκα μοντέλα πολλές φορές δύσκολα στην κατανόηση των αποτελεσμάτων που παράγουν, απαιτούν ειδικά καταρτισμένο επιστημονικό προσωπικό, έτσι είναι δύσκολο να ενσωματωθούν. Τα παραπάνω δημιουργούν προβληματισμό κατά την αρχική ανάπτυξή τους, καθώς δεν είναι δυνατή η εκ των προτέρων πρόβλεψη για το αν θα πρόκειται για οικονομικά αποδοτικές λύσεις (Fayad et al., 2024)

3.7 Ευελιξία και διαμόρφωση με τη χρήση Software Defined Networks (SDNs)

Τα δίκτυα που έχουν τη δυνατότητα προγραμματισμού μέσω λογισμικού (Software Defined Network – SDN), ενσωματώνουν δυναμικές λειτουργίες ώστε να προσαρμόζουν την κίνηση δεδομένων και να δίνουν προτεραιότητα στις κρίσιμες υπηρεσίες. (Psaromanolakis et al., 2020; Talli et al., 2017). Επιπλέον, ο κεντρικός έλεγχος του SDN διευκολύνει την αποτελεσματική παρακολούθηση δικτύου, την αντιμετώπιση προβλημάτων και τη συλλογή μετρήσεων απόδοσης σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας την προληπτική παρακολούθηση, τον εντοπισμό σφαλμάτων και τη γρήγορη απόκριση σε περιστατικά (Camps-Mur et al., 2019; Datsika et al., 2021; Kondepu et al., 2019).

3.8 Αύξηση της χωρητικότητας με τη χρήση πολυπλεξίας διαίρεσης χώρου (Space Division Multiplexing -SDM)

Πρακτικά πολυπλεξία διαίρεσης χώρου (Space Division Multiplexing – SDM) είναι η διαίρεση της περιοχής διατομής (cross-sectional area) μίας οπτικής σε πολλαπλά κανάλια, καθένα από τα οποία έχει την ικανότητα μεταφοράς δεδομένων διαφορετικής ροής. Με τη χρήση χωρικών καναλιών (spatial channels) αυξάνεται σημαντικά η χωρητικότητα του δικτύου σε σχέση με τη χρήση συμβατικών οπτικών ινών ενός καναλιού (Puttnam et al., 2021; Rommel et al., 2019). Το σημαντικό αυτό πλεονέκτημα της πολυπλεξίας διαίρεσης χώρου την κάνει ιδιαίτερα ελκυστική για την επεκτασιμότητα δικτύων 5^{ης} γενιάς και την ανάπτυξη δικτύων 6^{ης} γενιάς όπου απαιτείται σημαντικά υψηλότερος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων και μειωμένη καθυστέρηση (Gasulla & Carmany, 2019; S. Wang et al., 2022)

3.9 Αντιμετώπιση θεμάτων ασφάλειας και προστασία ιδιωτικότητας

Η δικτύωση 5^{ης} και η αναμενόμενη 6^{ης} γενιάς παρουσιάζει σημαντικά προβλήματα ασφαλείας και απειλής της ιδιωτικότητας (privacy) κυρίως για το οπτικό fronthaul (Furdek et al., 2016). Σημαντικά ερωτήματα προκύπτουν για το πώς θα εξασφαλιστεί η ασφάλεια των επικοινωνιών, η προστασία των ψηφιακών πιστοποιητικών, και ο ασφαλής συγχρονισμός δεδομένων (M. Wong et al., 2022). Η γενικότερη τάση είναι η ενσωμάτωση αλγορίθμων μηχανικής μάθησης για τον εντοπισμό και την αντιμετώπιση παραβιάσεων ασφαλείας τόσο για επιθέσεις φυσικού επιπέδου όσο και για πιο προηγμένες απειλές που στηρίζονται για παράδειγμα στην τεχνητή νοημοσύνη (Furdek & Natalino, 2022)

Ερευνητές προσπαθούν να αναπροσαρμόσουν την αρχιτεκτονική των μοντέλων ασφαλείας των δικτύων ώστε να ενσωματώνουν τεχνολογίες μηχανικής μάθησης οι οποίες είναι σε θέση να ανιχνεύουν απειλές πολλών διαφορετικών μορφών (Furdek et al., 2021). Η έμφαση σε τέτοιου τύπου μοντέλα είναι στην πρόληψη επίθεσης από απειλές, καθώς έχουν την ικανότητα να «μαθαίνουν» τα μοτίβα των επιθέσεων εξετάζοντας πρότερα παραδείγματα και να βελτιώνονται επιτυγχάνοντας καλύτερα αποτελέσματα. Τελευταία η μηχανική μάθηση ενσωματώνεται στη βελτίωση της ασφαλείας των οπτικών δικτύων, όπου αναλύονται πολύπλοκα σετ δεδομένων που προκύπτουν από τα συστήματα παρατήρησης των οπτικών δεδομένων (Optical Performance Monitoring – OPM) (Furdek & Natalino, 2022). Έχουν αναπτυχθεί μάλιστα μοντέλα παρακολούθησης του επιπέδου ασφαλείας των δικτύων με τη χρήση της μηχανικής μάθησης (Furdek et al., 2020).

Η μέθοδος ανάλυσης γενεσιουργικών αιτιών (root-cause analysis – RCA) μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην αυτόνομη διαχείριση ασφάλειας των οπτικών δικτύων (Natalino et al., 2022). Η RCA πλαισιώνεται από κλιμακούμενα στοιχεία ασφαλείας φυσικού επιπέδου σχεδιασμένα για SDN που στηρίζονται σε μικροϋπηρεσίες, ενισχύοντας την ικανότητα προσαρμογής του δικτύου σε εξελισσόμενες απειλές (Natalino, Manso, et al., 2021). Όλο και περισσότερο χρησιμοποιούνται αυτόνομα συστήματα ασφαλείας, τα οποία «μαθαίνουν» και εξελίσσονται όσο εξελίσσεται και επεκτείνεται το ίδιο το δίκτυο (Natalino, Di Giglio, et al., 2021)

3.10 Συγκεντρωτικός πίνακας ερευνών για 5G/6G οπτικό fronthaul

| Δημοσίευση | Τεχνολογία | Στόχος | Αρχιτεκτονική |
|----------------------------|---|---|--------------------|
| Ranaweera et al (2019) | | | |
| Skubic et al (2017) | P2P, WDM-PON, TWDM-PON | μείωση κόστους | Δεν προσδιορίζεται |
| Ranaweera et al (2021) | | | |
| Chung et al (2022) | TDM-PON | μείωση καθυστέρησης και διακύμανσης, αύξηση χωρητικότητας | C-RAN |
| Tanini et al (2019) | P2P | μείωση κόστους | C-RAN |
| Fayad and Cinkler (2022) | P2P, Terrestrial FSO | Μείωση κόστους, καθυστέρησης και διακύμανσης | C-RAN |
| Jaffer et al (2021) | WDM-PON, Terrestrial FSO | Μείωση κόστους | C-RAN |
| Yaacoub and Alouini (2021) | P2P, Terrestrial FSO, Non-Terrestrial FSO | Μείωση κόστους | C-RAN |
| Alzenad et al (2018) | P2P, Terrestrial FSO, Non-Terrestrial FSO | Μείωση κόστους | C-RAN |
| Zhou et al (2022) | Terrestrial FSO, Non-Terrestrial FSO | Μείωση κόστους | C-RAN |
| Fayad et al (2022) | TWDM-PON | Μείωση κόστους | C-RAN |
| Yu et al (2018) | WDM-PON | Βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση, και κατανομή πόρων | C-RAN |
| Zhu, Zhang, and Ji (2019) | Terrestrial FSO | Βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση, και κατανομή πόρων | C-RAN |
| Chitimalla et al (2017) | P2P | μείωση καθυστέρησης και διακύμανσης | C-RAN, v-RAN |

| Δημοσίευση | Τεχνολογία | Στόχος | Αρχιτεκτονική |
|---|--------------------------------|--|---------------|
| Wang et al (2020) Bidkar et al (2020) | TDM-PON | Μείωση κόστους, καθυστέρησης και διακύμανσης | C-RAN |
| Wang et al (2019) | WDM-PON | Μείωση κόστους, καθυστέρησης και διακύμανσης | C-RAN |
| Shah et al (2021) | OFDM-PON | Μείωση κόστους, αύξηση χωρητικότητας | C-RAN |
| Rajasekaran et al (2022) | OCDM-PON | Αύξηση χωρητικότητας | C-RAN |
| Garima, Jha and Singh (2023) | TDM-PON | μείωση καθυστέρησης και διακύμανσης, βελτιωμένη κατανομή πόρων | C-RAN |
| Rommel et al (2019) | P2P | Αύξηση χωρητικότητας | H-RAN |
| Wong, Prasad and Soong (2022) | | Βελτιωμένη ασφάλεια | C-RAN |
| Fayad et al (2022) Fayad, Cinkler and Rak (2023) | P2P, TWDM-PON, Terrestrial FSO | Δεν αναφέρεται | v-RAN |
| Masoudi, Lisi and Cavdar (2020) | TWDM-PON | Μείωση κόστους | C-RAN, v-RAN |
| Sousa et al (2020) | P2P, Terrestrial FSO | Μείωση κόστους | C-RAN |
| Kim, Chang and Lee (2022) | WDM-PON, Non Terrestrial FSO | Μείωση κόστους | C-RAN |
| Mukhopadhyay and Ruffini (2023) | TDM-PON, Terrestrial FSO | Μείωση κόστους | C-RAN |
| Pandey, A. Choudhary, and A. Dixit (2021) | P2P, WDM-PON | Μείωση κόστους, αύξηση χωρητικότητας | C-RAN |
| Han, Han and Liu (2021) | WDM-PON, Terrestrial FSO | Δεν αναφέρεται | C-RAN |
| Mondal and Ruffini (2022) | TWDM-PON | Μείωση κόστους, καθυστέρησης και διακύμανσης | O-RAN |
| Ranaweera et al (2018) | P2P, WDM-PON | Μείωση κόστους | C-RAN |

| Δημοσίευση | Τεχνολογία | Στόχος | Αρχιτεκτονική |
|---|--------------------------|--|---------------|
| Zeb, Zhang and Lu (2019) | WDM-PON | Μείωση καθυστέρησης και διακύμανσης, αύξηση χωρητικότητας | C-RAN |
| Chaudhary, Zou and Fettweis (2018) | WDM-PON | Μείωση κόστους | C-RAN |
| Zhang et al (2018) | P2P | Μείωση κόστους, αύξηση χωρητικότητας | C-RAN |
| El-Nahal et al (2023) | WDM-PON, Terrestrial FSO | Αύξηση χωρητικότητας | C-RAN |
| Effenberger and Zhang (2022) | WDM-PON | Αύξηση χωρητικότητας | C-RAN |
| Elhattab and Hamouda (2020) | Terrestrial FSO | Αύξηση χωρητικότητας | H-RAN |
| Fan et al (2022) | P2P, WDM-PON | Βελτιωμένη κατανομή πόρων, αύξηση χωρητικότητας | C-RAN |
| Mikaeil, Hu and Li (2019) | TWDM-PON | Επαναδιαμόρφωση fronthaul μέσω Software Defined Network (SDN), βελτιωμένη κατανομή πόρων | C-RAN |
| Lagkas et al (2021) | P2P, WDM-PON | Επαναδιαμόρφωση fronthaul μέσω Software Defined Network (SDN), βελτιωμένη κατανομή πόρων | C-RAN |
| Ramantas et al (2018) Alevizaki et al (2019) | P2P | Μείωση κόστους, Επαναδιαμόρφωση fronthaul μέσω Software Defined Network (SDN), βελτιωμένη κατανομή πόρων, αύξηση χωρητικότητας | C-RAN |
| Camps-Mur et al (2019) | P2P, WDM-PON | Επαναδιαμόρφωση fronthaul μέσω Software Defined Network (SDN) | C-RAN |

| Δημοσίευση | Τεχνολογία | Στόχος | Αρχιτεκτονική |
|--|----------------------|--|---------------|
| Nascimento et al (2019) | P2P | Μείωση κόστους, μείωση καθυστέρησης και διακύμανσης, αύξηση χωρητικότητας, τεχνητή νοημοσύνη – μηχανική μάθηση | C-RAN |
| Mikaeil et al (2018) | P2P | Μείωση καθυστέρησης και διακύμανσης, αύξηση χωρητικότητας, τεχνητή νοημοσύνη – Μηχανική μάθηση | C-RAN |
| Agheli, Emadi and Beyranvand (2020) | P2P, Terrestrial FSO | Μείωση κόστους, βελτίωση ενεργειακής απόδοσης, αύξηση χωρητικότητας | C-RAN |
| Tan, Yang and Wang (2017) | TDM-PON | Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης | C-RAN |
| Tan and Wang (2017) | TWDM-PON | Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης | C-RAN |
| Wang et al (2016) | TWDM-PON | Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης, βελτιωμένη κατανομή πόρων | C-RAN, v-RAN |
| Tinini et al (2021) | TWDM-PON | Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης, βελτιωμένη κατανομή πόρων | F-RAN |
| Pérez et al (2019) Pérez (2020) | P2P | Μείωση καθυστέρησης και διακύμανσης, αύξηση χωρητικότητας | C-RAN |
| Klinkowski (2020) Pérez, Hernández and Larrabeiti, (2018) | P2P | Μείωση καθυστέρησης και διακύμανσης | C-RAN |
| Musumeci et al (2016) | P2P, WDM-PON | Μείωση κόστους, μείωση καθυστέρησης και διακύμανσης | C-RAN |
| Nakayama and Hisano (2019) | TWDM-PON | Μείωση καθυστέρησης και διακύμανσης, βελτιωμένη κατανομή πόρων | C-RAN |

| Δημοσίευση | Τεχνολογία | Στόχος | Αρχιτεκτονική |
|---|------------------------|--|----------------------------|
| dos Santos et al (2022) | WDM-PON, TWDM-PON | Αύξηση χωρητικότητας | C-RAN, F-RAN |
| Tinini et al (2019) Tinini, Batista, and Figueiredo (2018) | TWDM-PON | Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης, βελτιωμένη κατανομή πόρων, αύξηση χωρητικότητας | C-RAN, F-RAN, v-RAN |
| Su et al (2019) | P2P | Μείωση καθυστέρησης και διακύμανσης, Επαναδιαμόρφωση fronthaul μέσω Software Defined Network (SDN) | C-RAN, v-RAN |
| Habibi et al (2020) | P2P, WDM-PON, TWDM-PON | Μείωση καθυστέρησης και διακύμανσης, Επαναδιαμόρφωση fronthaul μέσω Software Defined Network (SDN) | C-RAN, H-RAN, F-RAN, v-RAN |
| Sun, Yu and Zhang (2023) | Terrestrial FSO | Μείωση καθυστέρησης και διακύμανσης | C-RAN |
| Plazas et al (2023) | WDM-PON | Αύξηση χωρητικότητας | C-RAN |

3.11 Ερευνητικά προγράμματα σχετικά με το οπτικό 5G+/6G fronthaul

Στον ακόλουθο πίνακα συνοψίζονται μερικά από τα ερευνητικά προγράμματα που έχουν ολοκληρωθεί ή υλοποιούνται σε σχέση με το 5G, Beyond 5G και 6G οπτικό fronthaul:

Πίνακας 5 - Συγκεντρωτικός πίνακας ερευνητικών project για το οπτικό fronthaul Beyond 5G και 6G

| Project | Ερευνητικά αντικείμενα | Χρόνος υλοποίησης |
|--|--|-------------------|
| 5G PICTURE: 5G Programmable Infrastructure Converging neTwork and compUte REsources. | DA-RAN, δίκτυο που βασίζεται στο λογισμικό, ευέλικτοι λειτουργικοί διαχωρισμοί, συγκλίνουσες υπηρεσίες fronthaul και backhaul. | 2017-2020 |
| 5g-XHaul: Dynamically Reconfigurable Optical-Wireless Backhaul/Fronthaul with Cognitive Control Plane for Small Cells and Cloud-RANs. | Υψηλής χωρητικότητας και μικρής καθυστέρησης λύσεις μεταφοράς, Τεμαχισμός δικτύου, λύσεις Fronthaul και backhaul, ενσωμάτωση οπτικών και ασύρματων τεχνολογιών, βελτίωση ενεργειακής απόδοσης, βελτιωμένη διαχείριση δικτύου | 2015-2018 |
| 6G Flagship: 6G-Enabled Wireless Smart Society & Ecosystem. | Χαρακτηριστικά 6 ^{ης} γενιάς, επεκτασιμότητα και συμβατές λύσεις με 3GPPP Federation, μηχανική μάθηση ομοσπονδιακού επιπέδου, αρχιτεκτονικές 6 ^{ης} γενιάς | 2018-2026 |
| 5G-Crosshaul: The 5G Integrated fronthaul/backhaul transport network. | Υψηλής χωρητικότητας και μικρής καθυστέρησης λύσεις μεταφοράς, Τεμαχισμός δικτύου, λύσεις Fronthaul και backhaul, ενσωμάτωση οπτικών και ασύρματων τεχνολογιών, βελτίωση ενεργειακής απόδοσης, βελτιωμένη διαχείριση δικτύου | 2015-2017 |
| Metro-Haul: METRO High bandwidth, 5G Application-aware optical network, with edge storage, compUte and low Latency. | Διαχωρισμένοι κόμβοι οπτικού δικτύου, Έξυπνος έλεγχος, τεμαχισμός δικτύου πολλαπλών επιπέδων, Edge computing και τεμαχισμός δικτύου. | 2017-2020 |
| Hexa-X: A flagship for B5G/6G vision and intelligent fabric of technology enablers connecting human, physical, and digital worlds. | Νέες τεχνολογίες ραδιοπρόσβασης, διεπαφές με τη χρήση της τεχνητής νοημοσύνης για μελλοντικά δίκτυα, αρχιτεκτονικές δικτύωσης 6 ^{ης} γενιάς, fronthaul/backhaul υψηλής χωρητικότητας. | 2021-2024 |

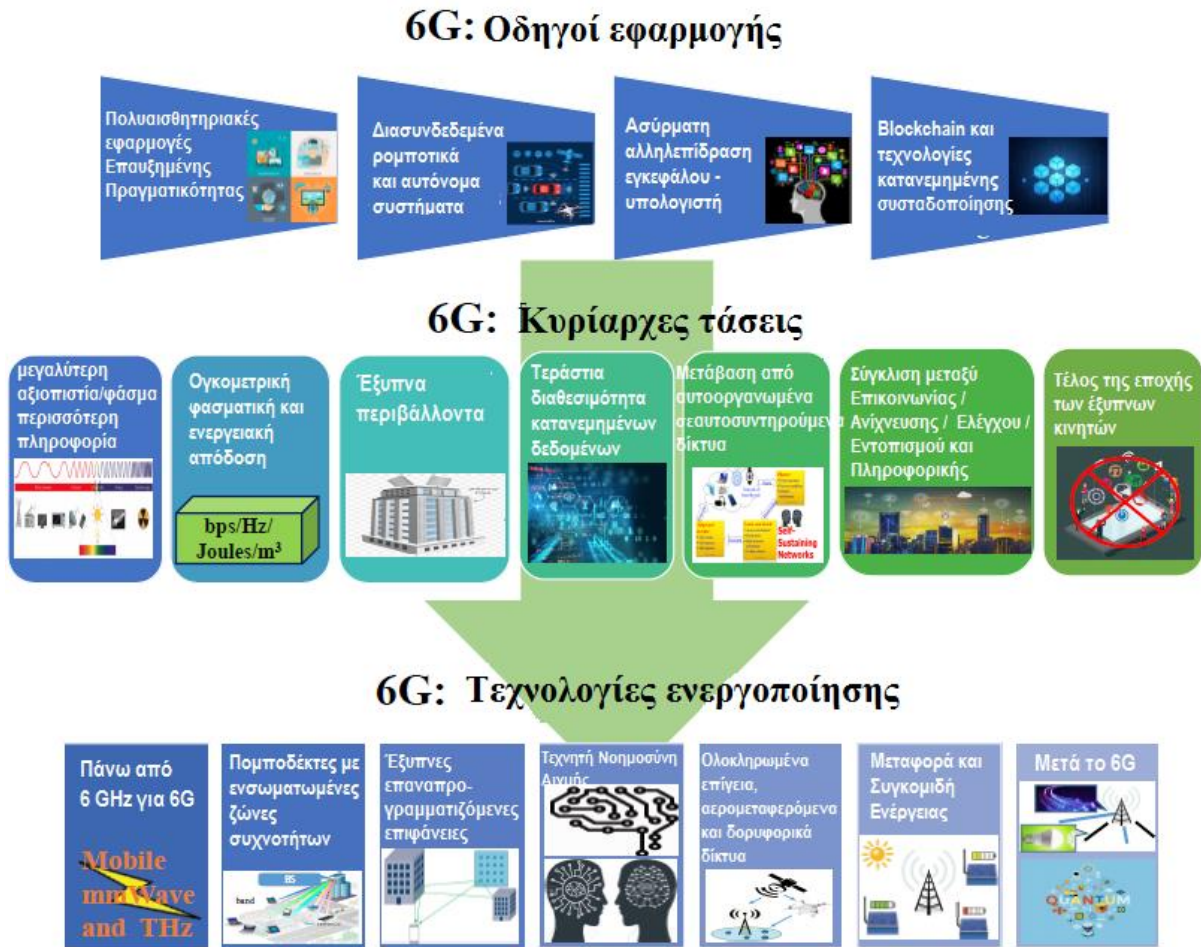
| Project | Ερευνητικά αντικείμενα | Χρόνος υλοποίησης |
|--|---|-------------------|
| <p>5G-COMPLETE: A unified network, Computational and stOrage resource Management framework targeting end-to-end Performance optimization for secure 5G muLti-tEchnology and multi-Tenancy Environments.</p> | <p>Ασύρματο fronthaul οπτικών ινών, Ethernet fronthauling και πρότυπο eCPRI, αναλογικά σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης, τεχνολογία Unikernel και μετα-κβαντικά κρυπτοσυστήματα.</p> | 2019-2022 |
| <p>TERAWAY: Terahertz technology for ultra-broadband and ultra-wideband operation of backhaul and fronthaul links in systems with SDN management of network and radio resources.</p> | <p>Δέκτες ικανότητας λήψης THz, Οπτικές έννοιες και φωτονική ολοκλήρωση, διαχείριση πόρων δικτύου και ραδιοφώνου, λύσεις backhaul και fronthaul</p> | 2019-2023 |
| <p>Int5gent: Integrating 5G enabling technologies in a holistic service to physical layer 5G system platform.</p> | <p>Ενσωμάτωση καινοτόμων μπλοκ τεχνολογίας επιπέδου δεδομένων, αρχιτεκτονική 5^{ης} γενιάς με ικανότητα Edge Computing, επικύρωση και επίδειξη προηγμένων υπηρεσιών 5^{ης} γενιάς και λύσεων Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things – IoT)</p> | 2020-2024 |
| <p>MARSAL: ML-based, networking and computing infrastructure resource management of 5G and beyond intelligent networks.</p> | <p>Optical-wireless convergence, fixed-mobile convergence, distributed cell-free O-RAN for B5G, AI, elastic edge computing, self-driven infrastructure. Οπτική-ασύρματη σύγκλιση, σταθερή σύγκλιση κινητής τηλεφωνίας, καταμεμημένο O-RAN χωρίς κυψέλες για B5G, Τεχνητή Νοημοσύνη, Ελαστικό Edge Computing, έμφαση στην αυτόνομη υποδομή</p> | 2021-2024 |
| <p>FLEX-SCALE: Flexible Scalable Energy Efficient Networking.</p> | <p>Οπτικό x-haul για δίκτυο 6^{ης} γενιάς, Μετασχηματιστικοί πομποδέκτες και οπτικοί διακόπτες, αλγόριθμοι σχεδιασμού και λειτουργίας x-haul, έλεγχος SDN μέσω μηχανικής μάθησης, μείωση κόστους και κατανάλωσης ενέργειας</p> | 2023-2025 |
| <p>EMPOWER-6G: Empower converged optical wireless configurations with cell-free technologies for high-density 6G networks.</p> | <p>Συγκλίνουσα αρχιτεκτονική οπτικής και ασύρματης τεχνολογίας, δίκτυα πρόσβασης χωρίς κυψέλες, ραδιοφωνική πρόσβαση, mmWave, οπτικές μεταφορές, Multi-Access Edge Computing πολλαπλής πρόσβασης (Multi Access Edge Computing - MEC), Εικονικές Λειτουργίες Δικτύου (Network Function Virtualization – NFV), πρωτόκολλα επιπέδου ελέγχου.</p> | 2023-2027 |

| Project | Ερευνητικά αντικείμενα | Χρόνος υλοποίησης |
|---|---|-------------------|
| PROTEUS-6G: Programmable Reconfigurable Optical Transport for Efficiently offering Unconstrained Services in 6G. | Οπτικό fronthaul και midhaul, Δυναμική διαχείριση ραδιοφωνικών εκπομπών | 2024-2027 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΔΙΚΤΥΑ 6^η ΓΕΝΙΑΣ ΚΑΙ ΠΑΘΗΤΙΚΑ ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ (PONs)

Όπως είναι λογικό η 6^η γενιά δικτύων αποτελεί ακόμα πρόταση παρόλο που υπάρχει ενεργή κινητοποίηση για την ανάπτυξή της. Το ίδιο συμβαίνει και για τα παθητικά οπτικά δίκτυα που θα υποστηρίζουν υπηρεσίες της 6^{ης} γενιάς. Οι παροχές που έχουν «υποσχεθεί» οι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι για τα δίκτυα 6^{ης} γενιάς, απαιτούν υψηλά στάνταρ χωρητικότητας και απόδοσης (Sizer et al., 2022). Οι ερευνητές του τομέα των τηλεπικοινωνιών έχουν εστιάσει στο πώς θα μπορέσει να προσαρμοστεί το fronthaul των οπτικών δικτύων στην 6^η γενιά, καθώς είναι πολλές οι απαιτήσεις. Με λίγα λόγια θα πρέπει αυξηθεί η ικανότητα μετάδοσης δεδομένων (capacity) με μειωμένη καθυστέρηση (latency), έχοντας λιγότερες ενεργειακές απαιτήσεις και με μεγαλύτερη ευελιξία (Fayad et al., 2024).

Ο κυρίαρχος οδηγός για την μετάβαση στην επόμενη γενιά δικτύων ήταν πάντοτε η αύξηση της ταχύτητας και του όγκου της μεταφοράς δεδομένων, κάτι που δε φαίνεται να είναι ο αυτοσκοπός της μετάβασης στην 6^η γενιά (6G) (Ali et al., 2020; Saad et al., 2020). Παρόλο που η ζήτηση για μεγαλύτερες ταχύτητες μεταφοράς και αύξηση του όγκου δεδομένων θα συνεχίσουν να αποτελούν κυρίαρχα ζητούμενα, στόχος θα είναι η συνδεσιμότητα ανθρώπων και συσκευών, το λεγόμενο Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things – IoT), αν και ο όρος σήμερα έχει διευρυνθεί ακόμα περισσότερο σε Διαδίκτυο των Πάντων (Internet of Everything – IoE). Δισεκατομμύρια άνθρωποι και συσκευές θα είναι διαρκώς διασυνδεδεμένοι, μετατοπίζοντας τις τάσεις της τεχνολογίας από την αύξηση της ταχύτητας και του ρυθμού μετάδοσης της ασύρματης πληροφορίας σε συνεργαζόμενα δίκτυα ευρυζωνικότητας (enchanced Mobile Broadband – eMBB), σε υψηλής αξιοπιστίας τηλεπικοινωνίες χαμηλής καθυστέρησης (Ultra Reliable Low Latency Telecommunications – URLLT) (Saad et al., 2020)



Διάγραμμα 3 - Προοπτική 6G - Εφαρμογές, τάσεις και τεχνολογίες

(Saad et al., 2020)

Νέες προτεινόμενες τεχνολογίες για τα PONs για τα δίκτυα 6^{ης} γενιάς είναι:

- Συστήματα αναλυτικής κατανομής δυναμικού εύρους ζώνης (disaggregated dynamic bandwidth allocation - DBA schemes) (Ruffini et al., 2020)
- Συνεργαζόμενα συστήματα αναλυτικής κατανομής δυναμικού εύρους ζώνης (disaggregated dynamic bandwidth allocation - DBA schemes) που χρησιμοποιούν πληροφορίες κυκλοφορίας fronthaul μέσω ενός αποστολής μηνύματος διεπαφής συνεργατικής μεταφοράς για την μείωση της καθυστέρησης και της χρήσης bandwidth (Ruffini et al., 2020; Uzawa et al., 2020)
- Μηχανισμοί τεμαχισμού δικτύου για την καταχώριση μονάδας οπτικού δικτύου (optical network unit) που δε θα διακόπτει τη διακοπή της λειτουργίας του

δικτύου και έτσι μειώνει την καθυστέρηση του δικτύου (network latency) (Uzawa et al., 2020)

- Για το παραπάνω προτάθηκε ένα αποκλειστικό μήκος κύματος ενεργοποίησης για την καταχώριση μονάδας οπτικού δικτύου (optical network unit) που βασίζεται στο πρότυπο: ITU-T Recommendation G.9804.3 (Systems, 2013).
- Νέοι τρόποι δυναμικής κατανομής εύρους ζώνης (Dynamic Bandwidth Allocations - DBA) με τη χρήση αλγορίθμων μηχανικής μάθησης (machine learning) για την καλύτερη πρόβλεψη της κυκλοφορίας δεδομένων προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η κατανομή του εύρους ζώνης (Ruan, Dias, et al., 2020; Ruan, Mondal, et al., 2020)

Ο απαιτούμενος ρυθμός μετάδοσης Xhaul για τα δίκτυα 6^{ης} γενιάς στην ουσία υποδεικνύει την ενσωμάτωση τουλάχιστον 8 κυψελών ανά PON έτσι τα F1 HLS, 7.3 HLS θα απαιτούσαν 25 G PON και το 7.2 HLS 200 G PON

Το δίκτυα 6G στην ουσία θα είναι ένα ανοικτό περιβάλλον cloud. Τα δίκτυα μεταφοράς δεδομένων θα ενταχθούν στην παραπάνω αρχιτεκτονική ως απομακρυσμένες υπηρεσίες που θα ελέγχονται αποκλειστικά μέσω λογισμικού. Τα παθητικά οπτικά δίκτυα έχουν ήδη αναβαθμιστεί ώστε να προγραμματίζονται δυναμικά δικτυακά μέσω λογισμικού (Software Defined Network – SDN). Ο εικονικός προγραμματισμός (virtual programming) του δικτύου θα ενσωματώσει τεχνολογίες μηχανικής μάθησης και τεχνητής νοημοσύνης (Sizer et al., 2022).

4.1 Ανάγκη για μεγαλύτερη χωρητικότητα, αξιοπιστία, ντετερμινιστική απόδοση

Η εικόνα που σχηματίζεται για το μέλλον είναι ότι τα δίκτυα επικοινωνιών πρέπει να βελτιώσουν τη χωρητικότητα, την αξιοπιστία και την ντετερμινιστική απόδοσή τους ώστε να μπορέσουν να καλύψουν την ζήτηση (Y. Liu et al., 2023). Αναμένεται εκθετική αύξηση του αριθμού των δικτύων και των σημείων πρόσβασης, καθώς η ζήτηση για ολοένα και μεγαλύτερη χωρητικότητα θα οδηγήσει στην παραγωγή μικρότερων κυψελών και νέων ζωνών φάσματος σε συχνότητες που θα έχουν μικρότερη εμβέλεια

(Akyildiz et al., 2020; Fayad et al., 2024; Latva-Aho & Leppänen, 2019; Rappaport et al., 2019; Sizer et al., 2022; Viswanathan & Mogensen, 2020)

Ο στόχος για δημιουργία εφαρμογών που θα αξιοποιούν υψηλής ευκρίνειας γεωγραφικά δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, θα απαιτήσει τεράστιες ταχύτητες uploading για την ανάλυση δυναμικών δεδομένων υψηλής ανάλυσης. Ένας ακόμα στόχος που έχει τεθεί για τα δίκτυα 6G, δηλαδή η αυτόνομη οδήγηση (autonomous driving) θα απαιτήσει πολύ μεγάλες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων αλλά και απαιτήσεις για ελαχιστοποίηση της χρονοκαθυστέρησης, κυρίως σε ανοικτούς εξωτερικούς χώρους. Θα χρειαστούν επομένως νέες ζώνες φάσματος και τεράστιοι σταθμοί βάσης MIMO όπως κατανεμημένοι σταθμοί MIMO (Sizer et al., 2022)

Τα δίκτυα 6G απαιτούν μηδενική καθυστέρηση και πολύ υψηλό ρυθμό μεταφοράς δεδομένων, άρα πολύ υψηλή αξιοπιστία, επομένως απαιτείται πολύ υψηλή αξιοπιστία φάσματος και αδιάλειπτη παροχή και μεταφορά ενέργειας. Ακόμα δεν έχουν ποσοτικοποιηθεί με ακρίβεια οι απαιτήσεις των δικτύων αυτών από πλευράς απαιτήσεων ενέργειας, υστέρησης και μεταφοράς δεδομένων (Bennis et al., 2018; Kasgari & Saad, 2019)

Πίνακας 6 - Απαιτήσεις δικτύων 5G/6G

| | Γενιά 5G | Μεταβατική περίοδος 5G έως 6G | Γενιά 6G |
|--|--|---|---|
| Τύποι εφαρμογών | Ενισχυμένη ευρυζωνικότητα κινητής Αξιόπιστες επικοινωνίες χαμηλής καθυστέρησης Μαζικές επικοινωνίες μεταξύ μηχανών | Ενισχυμένη και αξιόπιστη ευρυζωνικότητα κινητής Αξιόπιστες επικοινωνίες χαμηλής καθυστέρησης Μαζικές κινητές επικοινωνίες μηχανικού τύπου Υβριδικές επικοινωνίες χαμηλής καθυστέρησης μεταξύ μηχανών | Αξιόπιστες κινητές επικοινωνίες χαμηλής καθυστέρησης Μαζικές κινητές επικοινωνίες μηχανικού τύπου υψηλής αξιοπιστίας Ανθρωποκεντρικές υπηρεσίες Πολυχρηστικές επικοινωνίες |
| Τύποι συσκευών | Έξυπνα κινητά Αισθητήρια Drones | Έξυπνα κινητά Αισθητήρια Drones Εξοπλισμός Επαυξημένης πραγματικότητας | Αισθητήρια και συσκευές καταναμημένων καταλόγων Διασυνδεδεμένα ρομποτικά και αυτόνομα συστήματα Συσκευές επαυξημένης πραγματικότητας Συσκευές αλληλεπίδρασης εγκεφάλου - υπολογιστή Έξυπνα εμφυτεύματα με τη μορφή τσιπ |
| Φασματική και ενεργειακή απόδοση | 10πλάσια bits / Hz / επιφάνεια / ενέργεια σε σχέση με τα 4G | 100πλάσια bits / Hz / επιφάνεια / ενέργεια σε σχέση με τα 5G | 10πλάσια bits / Hz / επιφάνεια και όγκο / ενέργεια σε σχέση με τα 5G |
| Ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας | 1 Gbps | 100 Gbps | 1 Tbps |
| Χρόνος υστέρησης από σταθμό σε σταθμό | 5 msec | 1 msec | Λιγότερο από 1 msec |
| Ραδιοφωνική υστέρηση | 100 nsec | 100 nsec | 10 nsec |

| | Γενιά 5G | Μεταβατική περίοδος 5G έως 6G | Γενιά 6G |
|--------------------------------|---|--|---|
| Καθυστέρηση προσπέλασης | 100 nsec | 50 nsec | 10 nsec |
| Αξιοπιστία | 99,999 % | 99,9999 % | 99,99999 % |
| Ζώνες συχνοτήτων | Sub-6 GHz MmWave για σταθερή πρόσβαση | Sub-6 GHz MmWave για σταθερή πρόσβαση μεταξύ 26 και 28 GHz | Sub-6 GHz MmWave για κινητή πρόσβαση THz ζώνες Οπτικές επικοινωνίες όχι ραδιοφωνικές |
| Αρχιτεκτονική | Πυκνό δίκτυο μικρών σταθμών Sub-6 κάτω από δίκτυο μεγάλων σταθμών Μικρές κυψέλες MmWave για σταθερή πρόσβαση | Πυκνό δίκτυο μικρών σταθμών Sub-6 κάτω από δίκτυο μεγάλων σταθμών Μικροσκοπικές κυψέλες MmWave για σταθερή πρόσβαση | Έξυπνες επιφάνειες που υποστηρίζονται από μικροσκοπικές κυψέλες MmWave για σταθερή πρόσβαση Προσωρινά hotspot με την μορφή drones ή μπαλονιών κυψέλες THz |

(Ali et al., 2020; Saad et al., 2020)

4.1.1 Χωρητικότητα (capacity)

Από ότι φαίνεται η μελλοντική επιδίωξη είναι για χωρητικότητα της τάξης των Tbps κάτι που επιβάλλει την ανάπτυξη συνεκτικών (coherent) οπτικών επικοινωνιών με τη χρήση Free Space Optics (FSO) και παθητικών οπτικών δικτύων (PONs). Αυτού του είδους οι επικοινωνίες θεωρούνται υψηλά υποσχόμενης για τη βελτίωση του fronthaul κατά πολλά επίπεδα πάνω από την 5^η γενιά (Fayad et al., 2024). Μέσω της αξιοποίησης των συνεκτικών (coherent) ιδιοτήτων του φωτός, δίνεται η δυνατότητα ταυτόχρονης μετάδοσης πολλαπλών μηκών κύματος σε μία οπτική ίνα, αυξάνοντας τη χωρητικότητα (capacity) μέχρι και κατά 100 Gbps ανά οπτική ίνα, κάνοντας όμως τη διασύνδεση πολύ πιο περίπλοκη (Lavery et al., 2019). Πρόσφατες επιστημονικές έρευνες έχουν αποδείξει τη δυνατότητα μεταφοράς μέχρι και 800 Gbps σε απόσταση μέχρι και 42 μέτρων σε εξωτερικό χώρο εκτεθειμένο σε μετεωρολογικές συνθήκες και χρονικά μεταβαλλόμενες αναταράξεις (time turbulence), μέσω συνεκτικής ζεύξης μετάδοσης Free Space Optics (FSO) (Guiomar et al., 2022). Βέβαια απαιτούνται προσαρμογές και ανάπτυξη ως προς τη διαμόρφωση των σημάτων που έχουν να κάνουν με την πολυδιάστατη σηματοδότηση (multidimensional signaling) και διαμόρφωση υψηλής τάξης (higher-order modulation). Η κατεύθυνση αυτή των ερευνών προκρίνει τη χρήση παθητικών οπτικών δικτύων (PONs) (X. Liu, 2022).

4.1.2 Χρονοκαθυστέρηση (latency)

Μέχρι και τη γενιά 5G τυχόν προβληματική συνδεσιμότητα επηρέαζε την επικοινωνία μεταξύ ατόμων ή επιχειρήσεων, προκαλώντας κυρίως καθυστερήσεις και δυσαρέσκεια των χρηστών. Επιδίωξη της 6^{ης} γενιάς όμως είναι να επηρεάσει καταλυτικά την καθημερινή ζωή με εφαρμογές όπως είναι η τηλειατρική ή η αυτόνομη οδήγηση. Σε τέτοιες περιπτώσεις αποτυχημένες συνδέσεις ή καθυστερήσεις στην συνδεσιμότητα έχουν σοβαρές συνέπειες για την ανθρώπινη ζωή (Y. Liu et al., 2023).

Οι κύριοι λόγοι χρονοκαθυστέρησης (latency) προέρχονται από:

1. Το optical fronthaul
2. Τις ηλεκτρικές / οπτικές συσκευές
3. Την επεξεργασία σήματος

Για παράδειγμα σε ένα συνεκτικό σύστημα έκτασης 20 χιλιομέτρων που καλύπτει τις απαιτήσεις της δικτύωσης fronthaul 5^{ης} γενιάς (5G) το optical fronthaul, οι συσκευές και η επεξεργασία σήματος προκαλούν χρονοκαυστέρηση 98, 10 και 5 μs αντίστοιχα, και αθροίζονται συνολικά σε 113 μs που είναι μοιραίο σε συνθήκες που κινδυνεύουν ανθρώπινες ζωές όπως είναι η τηλεϊατρική ή η αυτόνομη οδήγηση (Fan et al., 2022).

Πίνακας 7 - Απαιτήσεις μέγιστης χρονοκαυστέρησης σε προτεινόμενες τεχνολογίες 6G

| Προτεινόμενες τεχνολογίες 6G | Απαιτήσεις χρονοκαυστέρησης (latency) |
|--|---------------------------------------|
| Συσκευές παρακολούθησης ενδείξεων ζωής | 1 ms |
| Τηλεϊατρική | 0,1 ms |
| Σερβομηχανισμοί | 0,1 ms |
| Ανιχνευτές κίνησης | 1 μs |
| Drones | 1 ms |
| Αυτόνομη οδήγηση | 0,1 ms |
| Vehicle-to-everything (V2X) | 0,1 ms |

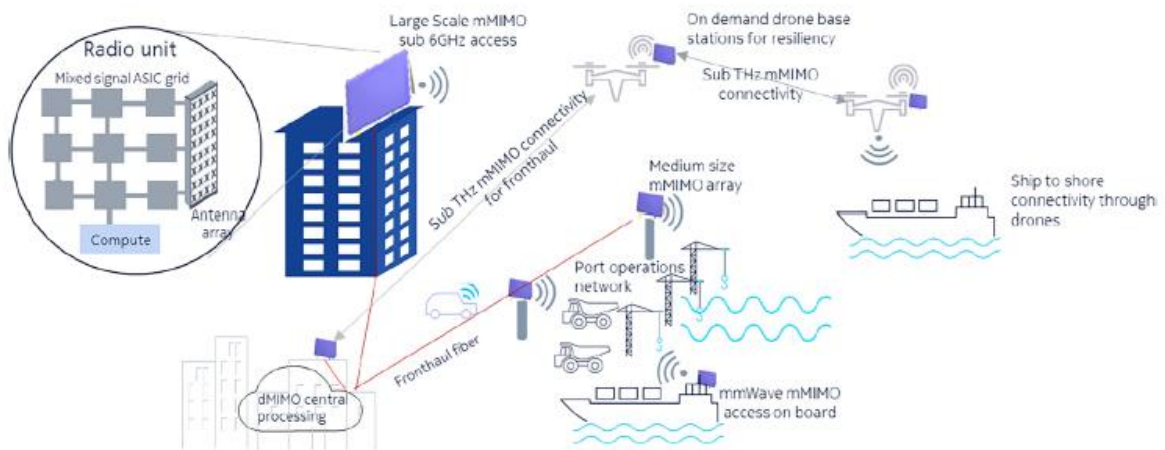
(Y. Liu et al., 2023)

Με βάση τις τεχνολογίες που έχουν υλοποιηθεί μέχρι σήμερα η μόνη αρχιτεκτονική που μπορεί να προσφέρει μικρότερες καθυστερήσεις είναι αυτή σημείου προς σημείο (Point-to-Point - P2P). Άρα θα πρέπει να υπάρχει ενοποιημένη διαχείριση για όλους τους διαφορετικούς τομείς του δικτύου που θα ελέγχει την ποιότητα των υπηρεσιών (Quality of Service - QoS) σε πραγματικό χρόνο (Larrabeiti et al., 2023). Κάτι που θα πρέπει να παρακολουθείται είναι η κίνηση (traffic) των δεδομένων στο fronthaul, που είναι δύσκολη διεργασία λόγω του μεγάλου εύρους ζώνης και των απαιτήσεων μικρής χρονοκαυστέρησης και τρομώδους διακύμανσης φάσης του σήματος χρονισμού. Απαιτείται ο εκσυγχρονισμός των συστημάτων παρακολούθησης της χρονοκαυστέρησης ώστε να εντοπίζονται οι προβληματικοί τομείς δικτύου που την προκαλούν (Fayad et al., 2024)

Η ανάγκη ακόμα για υποστήριξη εφαρμογών με απαιτήσεις για μικρή χρονοκαυστέρηση (latency), θα οδηγήσει στην μαζική παραγωγή νέων EDGE (Enhanced Data GSM Environment) cloud αποθήκευσης δεδομένων (EDGE cloud data centers) τα οποία θα πρέπει να βρίσκονται πολύ κοντά στις τελικές συσκευές. Οι παραπάνω ανάγκες θα διαφοροποιήσουν σημαντικά τον τρόπο σύνδεσης από σημείο

προς σημείο ή σημεία (point-to-point ή points) που είναι σήμερα, σε κοινόχρηστες συνδέσεις. Η ανάγκη για μείωση του κόστους και της χρονοκαθυστέρησης θα οδηγήσει σε λύσεις παρόμοιες με αυτές που αναπτύχθηκαν για την αποθήκευση δεδομένων σε νέφος (cloud storage), δηλαδή θα αναπτυχθεί ένα σύνολο συνδέσεων και όχι μία τελική σύνδεση, και θα χρησιμοποιείται ο κατάλληλος συνδυασμός ανάλογα με τη ζήτηση και τις συνθήκες (Akyildiz et al., 2020; Latva-Aho & Leppänen, 2019; Rappaport et al., 2019; Sizer et al., 2022; Viswanathan & Mogensen, 2020)

Παράδειγμα μίας τέτοιας μελλοντικής διασύνδεσης παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 11 - Δίκτυο πρόσβασης γενιάς 6G

(Sizer et al., 2022)

4.2 Βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση (energy efficiency) και αξιοπιστία και ανθεκτικότητα δικτύου (network resilience)

Το σύνθημα της εποχής είναι η βιώσιμη ανάπτυξη που επιτυγχάνεται με ενεργειακά αποδοτικές λύσεις. Βασικός στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας κάτι που επιτυγχάνουν τα παθητικά στοιχεία όπως είναι τα παθητικά οπτικά δίκτυα (PONs). Η χρήση νέων τεχνολογιών όπως είναι η μηχανική μάθηση ή η τεχνητή νοημοσύνη σε συνδυασμό με νέα προηγμένα υλικά, μπορούν να βοηθήσουν στον χρονοπρογραμματισμό και στην καλύτερη κατανομή πόρων για βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση (Fayad et al., 2024).

Ο στόχος της δικτύωσης 6^{ης} γενιάς για παροχή αδιάλειπτων υπηρεσιών πολλαπλασιάζει την ανάγκη για αυτόματη προσαρμογή του δικτύου ώστε να λειτουργεί με αξιοπιστία σε τυχόν αστοχίες υλικού ή περιβαλλοντικές διακοπές (network resilience) (Chiesa et al., 2021; Rak et al., 2021). Στόχος ερευνών είναι η ανάπτυξη αρχιτεκτονικών δικτύου που θα λειτουργούν δυναμικά και θα αναπροσαρμόζονται ώστε να αντιμετωπίσουν δυσλειτουργίες ελαχιστοποιώντας ή μηδενίζοντας τις διακοπές. Πέρα από προηγμένα υλικά, χρειάζεται δυναμικός προγραμματισμός με τη χρήση προηγμένων αλγορίθμων (Fayad et al., 2024).

4.3 Θέματα ασφαλείας

Πολλαπλές έρευνες αναδεικνύουν σημαντικά θέματα πιθανών ευπαθειών των δικτύων 5G (Abdalla & Marojevic, 2023; Dik & Berger, 2023; Furdek et al., 2021; M. Wong et al., 2022). Δεν υπάρχει ακόμα ικανός αριθμός ερευνών για την αξιολόγηση της δικτύωσης 6G ως προς την ασφάλεια. Απαιτείται προηγμένη κρυπτογράφηση με state-of-art μεθόδους. Τα παθητικά οπτικά δίκτυα (PONs) εγείρουν θέματα ασφαλείας ιδίως όταν είναι συνδεδεμένοι πολλαπλοί χρήστες. Η διασφάλιση του έλεγχου ταυτότητας χρήστη χωρίς να διαμοιράζονται στοιχεία και να προστατεύεται η ιδιωτικότητα των χρηστών χωρίς να μειώνεται η αποτελεσματικότητα θεωρείται πρόβλημα στο οποίο δύσκολα επιτυγχάνεται ισορροπία (Fayad et al., 2024). Τα οπτικά εμπροσθοζευτικά (fronthaul) που διαμορφώνονται μέσω software είναι λογικό να εκτίθενται περισσότερο σε ψηφιακές απειλές. Απαιτείται η ανάπτυξη νέων λογισμικών ανίχνευσης απειλών που θα ενσωματώνουν λειτουργίες της τεχνητής νοημοσύνης (Fayad et al., 2024)

Η πιθανή ανάπτυξη συνδυαστικών λύσεων με Free Space Optics (FSO) και παθητικών οπτικών δικτύων (PONs), από την μία μειώνει την καθυστέρηση (latency) και αυξάνει το ρυθμό μετάδοσης, από την άλλη αυξάνει την ευπάθεια του συστήματος σε πιθανές υποκλοπές, λόγω των χαρακτηριστικών των Free Space Optics (FSO). Πιθανές λύσεις που θα μειώσουν την τρωτότητα των συστημάτων θεωρούνται η διαμόρφωση δέσμης (beam modulation) και η ανάπτυξη δικτυακών επικοινωνιών που θα διασφαλίζονται με τεχνολογίες κβαντικού υπολογισμού (quantum key distribution)

(Abdalla & Marojevic, 2023; Dik & Berger, 2023; Fayad et al., 2024; Furdek et al., 2021; M. Wong et al., 2022).

4.4 Απαίτηση για ανάπτυξη συνοδευόμενων τεχνολογιών

Τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα 6^{ης} γενιάς (6G) σχεδιάζονται να αξιοποιούν την τεχνολογία 5G, ενσωματώνοντας δορυφορικές επικοινωνίες για να παρέχουν παγκόσμια τηλεπικοινωνιακή κάλυψη. Ο στόχος είναι η αξιοποίηση των δορυφορικών δεδομένων για εντοπισμό θέσης, ανταλλαγή πολυμέσων, ευρυζωνικότητας, πληροφοριών για τον καιρό για βελτίωση αλλά και παροχή καινοτόμων τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών (Anju & Gawas, 2015). Το πρόβλημα των προηγούμενων γενιών κινητής για κάλυψη όσο το δυνατόν μεγαλύτερη επιφάνεια, μετατρέπεται σε πρόβλημα χώρου (όγκου), (Mozaffari et al., 2019) άρα απαιτούνται νέες αρχιτεκτονικές πομποδέκτη και μοντέλα μετάδοσης (Ali et al., 2020; Xing & Rappaport, 2018) τα οποία θα είναι τρισδιάστατης μορφής (Ali et al., 2020; Kasgari & Saad, 2019; Saad et al., 2020).

Η συνύπαρξη διαφορετικών κυμάτων μετάδοσης, μικροκυμάτων, mmWave και THz, στην ίδια τεχνολογία είναι κάτι που πρέπει επίσης να αντιμετωπιστεί (Ali et al., 2020; Semiari et al., 2019). Βασικό πρόβλημα μάλιστα σε αυτή την κατεύθυνση είναι ότι οι πάροχοι δορυφορικών επικοινωνιών χρησιμοποιούν διαφορετικά πρότυπα (standards) (Anju & Gawas, 2015). Η εναρμόνιση των τόσο διαφορετικών προτύπων μάλιστα αποτελεί βασικό πρόβλημα το οποίο ενισχύεται από το γεγονός ότι η γενιά 6G σχεδιάζεται ώστε να αποτελεί ένα δυναμικό, επεκτάσιμο περιβάλλον, δηλαδή τα πρότυπα πρέπει να αλλάζουν σε συνεχή βάση (Cao et al., 2019). Η προτυποποίηση (standardization) προκύπτει από την ανάγκη για ενσωμάτωση και εναρμόνιση ετερογενών στοιχείων και διαφορετικών τεχνολογιών και διασφαλίζει την ομοιομορφία και αυξάνει την ολική αξιοπιστία του δικτύου (Fayad et al., 2024).

Τα μοναδικά στοιχεία των δικτύων 6G όπως οι μεγάλοι ρυθμοί μετάδοσης πληροφοριών (data rates), χαμηλής καθυστέρησης (latency) και η δυναμική κατανομή πόρων (dynamic resource allocation) αλλά και η ποικιλομορφία στοιχείων όπως παθητικά οπτικά δίκτυα (PONs), Free Space Optics (FSO) και οι Peer to Peer (P2P) συνδέσεις δημιουργούν προκλήσεις για τους φορείς πιστοποίησης για ανάπτυξη εναρμονισμένων προτύπων (standards). Βασικός στόχος είναι η αγορά των

επικοινωνιών 6G να είναι όσο το δυνατόν πιο ανοικτή (ελεύθερη), με προσφορές από πολλαπλούς προμηθευτές, ακυρώνοντας μονοπώλια και ενισχύοντας την καινοτομία (Fayad et al., 2024).

Η αντικατάσταση της επικοινωνιών multiple-input and multiple-output (MIMO) με έξυπνες επιφάνειες εμπεριέχει προβλήματα προσαρμογής, καθώς πολλαπλές συσκευές θα πρέπει να προσαρμοστούν, αλλά και να δίνεται η δυνατότητα η δυνατότητα λειτουργίας στις παλαιότερες συσκευές τουλάχιστον για ένα μεταβατικό στάδιο (Hu et al., 2018). Η αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ ρομποτικών και αυτόνομων συστημάτων με τον πραγματικό κόσμο απαιτεί εισαγωγή, επεξεργασία και ανταλλαγή δεδομένων που θα παράγονται και θα διακινούνται ασύρματα. Οι κυψελοειδείς επικοινωνίες αδυνατούν σε μεγάλο βαθμό να φέρουν εις πέρας αυτού του τύπου την επικοινωνία και ακόμα λιγότερο να τη βελτιώσουν. Τα παραπάνω δε φαίνεται να έχουν ληφθεί υπόψη στην σχεδίαση των δικτύων 5G (Ali et al., 2020; Saad et al., 2020).

4.5 Αποδοτικό κόστος ανάπτυξης (cost efficient development)

Το κόστος ανάπτυξης του optical fronthaul για τα δίκτυα 6ης γενιάς αποτελεί σημαντικό πρόβλημα τόσο για τους ερευνητές όσο και για τους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους (Fayad et al., 2023; Ranaweera & Lim, 2021). Βασικό πρόβλημα είναι το «συνολικό κόστος ιδιοκτησίας» (total cost of ownership – TCO) το οποίο δεν είναι ανάλογο των πιθανών κερδών. Σε αντίθεση με την έξαρση των επενδύσεων σε τηλεπικοινωνίες που συνέβη στις δεκαετίες του 2000 και 2010, παρατηρείται μία στασιμότητα αν όχι κάμψη τη δεκαετία του 2020, καθώς τα κέρδη των τηλεπικοινωνιακών παρόχων μειώθηκαν δραστικά. Μία τέτοια εξέλιξη φαίνεται να περιορίζει τις επενδύσεις σε νέες τεχνολογίες που απαιτούνται για την ανάπτυξη των δικτύων 6^{ης} γενιάς (Sizer et al., 2022; Tomkos et al., 2020).

Για τη διατήρηση του κόστους σε οικονομικά αποδοτικά επίπεδα απαιτείται η εκμετάλλευση όλων των δυνατοτήτων της υπάρχουσας υποδομής (infrastructure). Οι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι μπορούν να το επιτύχουν με την επαναχρησιμοποίηση και αναβάθμιση των τωρινών δικτύων οπτικών ινών, περιορίζοντας την ανάγκη για νέες εγκαταστάσεις (Fayad et al., 2024). Η υλοποίηση ασύρματων οπισθοζευκτικών κυκλωμάτων (backhaul) εμπροσθοζευκτικών κυκλωμάτων (fronthaul) με ενσωματωμένη πρόσβαση μπορεί να μειώσει το κόστος εφαρμογής (Sizer et al.,

2022). Η αρχιτεκτονική των παθητικών οπτικών δικτύων (PONs) δίνει τη δυνατότητα για διαμοιρασμό και εικονική χρήση δικτύου (virtualization) που μπορεί να μειώσει περαιτέρω το κόστος, καθώς πολλαπλοί χρήστες μπορούν να αξιοποιήσουν την ίδια υποδομή με το ίδιο αρχικό κεφάλαιο και επιχειρησιακό κόστος. Έτσι τα παθητικά οπτικά δίκτυα (PONs) δείχνουν να είναι μονόδρομος στην ανάπτυξη δικτύων 6^{ης} γενιάς (Fayad et al., 2024; Sizer et al., 2022)

Οι πάροχοι εξετάζουν μείωση του κόστους αλλά και βελτίωση της αποτελεσματικότητας μέσω αύξησης του αυτοματισμού και οπτικοποίησης των υπηρεσιών. Πάντως το κόστος ανάπτυξης νέων τεχνολογιών και κυρίως το κόστος της μελέτης, σχεδίασης και τοποθέτησης από πλευράς πολιτικού μηχανικού (civil engineering) παραμένει η «αχίλλειος πτέρνα» που θα καθορίσει τις εξελίξεις. Η παραπάνω παράμετρος είναι αυτή που δεν επιτρέπει και την ισοκατανομή των τεχνολογιών αυτών μεταξύ των διάφορων περιοχών. Για παράδειγμα αναμένεται οι πάροχοι να δείξουν περιορισμένο ενδιαφέρον για ανάπτυξη δικτύωσης 6^{ης} γενιάς για απομακρυσμένες περιοχές. Έτσι αναμένεται ότι η ανάπτυξη του δικτύου 6^{ης} γενιάς να είναι ετεροχρονισμένη ακόμα και σε περιοχές στην ίδια χώρα (Sizer et al., 2022; Tomkos et al., 2020)

4.6 Προβλήματα συμβατότητας

Τα βελτιωμένα χαρακτηριστικά που πρέπει να έχουν τα δίκτυα γενιάς 6G πρέπει να συνοδεύονται με την παραγωγή νέων εναρμονισμένων προτύπων δικτύωσης τα οποία θα συγκρατήσουν χαμηλά το κόστος. Λόγω του carrier aggregation, κάθε νέα τεχνολογία ραδιοσυχνοτήτων (radio-access technology – RAT) θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης μεγαλύτερου φάσματος από την προηγούμενη γενιά έτσι ώστε να βελτιώνεται η απόδοση. Επιπροσθέτως, επειδή το φάσμα που παράγεται από τις νέες τεχνολογίες ραδιοσυχνοτήτων είναι συνήθως υψηλότερης ζώνης, θα πρέπει να συνδυάζεται με χαμηλότερες ζώνες για να βελτιώνει την κάλυψη. Η γενιά 5G αναγκάστηκε να ενσωματώσει πολλαπλά πρότυπα συνδεσιμότητας ώστε να είναι απρόσκοπτη η λειτουργία τόσο των ραδιοσυχνοτήτων 4^{ης} (4G) όσο και 5^{ης} γενιάς (5G) (Cagenius et al., 2023).

Για την αποφυγή του κατακερματισμού της αγοράς ενσωματώθηκαν μόνο δύο: μη αυτόνομο New Radio (NR) και αυτόνομο New Radio (NR) (Cagenius et al., 2018). Η

διασύνδεση μεταξύ των RAN της 4^{ης} και 5^{ης} γενιάς αποδείχθηκε τεχνικά αρκετά περίπλοκη προβληματίζοντας τις βιομηχανίες τόσο των δικτύων όσο και των συσκευών. Ακόμη, για την συνάθροιση φάσματος στα δίκτυα 5^{ης} γενιάς, χρησιμοποιήθηκαν δύο τεχνικές: (1) συνάθροιση φορέων (carrier aggregation) και (2) αμφίδρομη συνδεσιμότητα (dual connectivity) αυξάνοντας την πολυπλοκότητα της συνδεσιμότητας του εξοπλισμού του τελικού χρήστη και του δικτύου. Τα δίκτυα 5G επιτρέπουν να μοιράζεται το φάσμα με το 4G χρησιμοποιώντας δυναμική κοινή χρήση φάσματος κάτι που δημιούργησε προβλήματα ιδίως για τις εναέριες επικοινωνίες καθώς υπάρχουν πάρα πολλές διαθέσιμες συνδέσεις 4G πάντοτε ενεργές (Cagenius et al., 2023).

Οδηγός επομένως για την υλοποίηση δικτύων 6^{ης} γενιάς δεν είναι μόνο οι καλύτερες και αναβαθμισμένες υπηρεσίες αλλά και η ανάγκη για την μείωση της πολυπλοκότητας διασύνδεσης που παρουσιάζεται κάθε φορά που υπάρχει μετάβαση σε μία νέα γενιά, κάτι που ήταν ιδιαίτερα έντονο κατά την μετάβαση από την 4^η στην 5^η, τα προβλήματα της οποία εξακολουθούν να υπάρχουν μέχρι και σήμερα. Η προσπάθεια εξισορρόπησης της συμβατότητας με τις νέες και καλύτερες υπηρεσίες είναι το κυρίαρχο πρόβλημα των δικτύων 5^{ης} γενιάς κάτι που οι κατασκευαστές όπως η Ericsson θέλουν να αποφύγουν εκ των προτέρων στην 6^η γενιά. Σε αυτήν την κατεύθυνση προτείνεται τα δίκτυα 6^{ης} γενιάς να εκπέμπουν σε αυτόνομες standalone ραδιοσυχνότητες και μόνο ώστε να μην υπάρξουν πολλαπλές εκδόσεις δικτύων που αυξάνουν την πολυπλοκότητα (Cagenius et al., 2023).

4.7 Προηγμένες τεχνικές παρακολούθησης, μοντελοποίησης και διάγνωσης (Advanced Analytics and Diagnostic Tools)

Τα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα 5G στηρίζονται σε μεγάλο βαθμό σε μαθηματικά μοντέλα τα οποία καθορίζουν τη δομή των συστημάτων αυτών. Τα μοντέλα αυτά παρουσιάζουν ατέλειες καθώς δεν μπορούν να απεικονίσουν με ακρίβεια την πολυπλοκότητα των δικτύων. Παράλληλα ένα μέρος των υπηρεσιών δεν έχουν μοντελοποιηθεί ακόμα. Τόσο η βελτίωση, όσο και η παραγωγή νέων μοντέλων απαιτούν νέες μοντελοποιήσεις των οποίων η παραγωγή δεν απαιτεί μόνο μεγάλη υπολογιστική ισχύ, αλλά και μεγάλα ποσά ενέργειας, αλλά και χρόνο ο οποίος δεν είναι πάντοτε διαθέσιμος (Ali et al., 2020; Saad et al., 2020).

Η ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών και υπηρεσιών με τα δίκτυα 6G θα απαιτεί ακόμα πιο περίπλοκα μοντέλα άρα και περισσότερους πόρους με την μορφή προγραμματισμού και χρονοπρογραμματισμού, τεχνολογικών υλικών και ενέργειας άρα απαιτείται μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα την οποία φαίνεται να προσφέρει μόνο η εκτεταμένη χρήση τεχνητής νοημοσύνης (Fayad et al., 2024; Saad et al., 2020).

Οι αλγόριθμοι ευρετικής αναζήτησης (heuristic analysis) που χρησιμοποιούνται κατά κόρον σήμερα για την απεικόνιση δικτύων 5G αναμένεται να αντικατασταθούν σε μεγάλο βαθμό από αλγορίθμους μηχανικής μάθησης (machine learning – ML) (Ali et al., 2020; Urban et al., 2018). Η μηχανική μάθηση αποτελεί από μόνη της ένα δυναμικό πεδίο έρευνας το οποίο εξελίσσεται και μεταλλάσσεται ταυτόχρονα (Fayad et al., 2024).

Σημαντικό πρόβλημα αποτελεί και η συντήρηση του δικτύου. Η διασπορά και η πολυπλοκότητα που αναμένεται να έχουν τα δίκτυα 6G πιθανότατα επιβάλλει την ενσωμάτωση της αυτόνομης ρομποτικής (autonomous robotics) τα οποία θα στηρίζονται στον προγραμματισμό με τη χρήση μηχανικής μάθησης, ελαχιστοποιώντας την ανθρώπινη παρέμβαση για κάποιες από τις διεργασίες (routines) μειώνοντας σημαντικά το κόστος (Fayad et al., 2024).

4.8 Ψηφιακό Δίδυμο (Digital Twin) Οπτικού Fronthaul

Αν και πολλοί ερευνητές δεν αποδέχονται την μεταφρασμένη εκδοχή του όρου digital twin (οπτικό δίδυμο), όταν αναφέρεται σε σύστημα ή διαδικασία θεωρείται εικονικό αντίγραφο του/της που μπορεί να βοηθήσει στον προγραμματισμό του/της ή τη βελτίωσή της (D. Wang et al., 2021). Είναι στην ουσία ολοκληρωμένη ψηφιακή οπτική αναπαράσταση της υποδομής fronthaul. Δίνει τη δυνατότητα παρεμβάσεων σε πραγματικό χρόνο για την εξασφάλιση της απρόσκοπτης λειτουργίας του δικτύου (Faruk & Savory, 2024; Janz et al., 2022; Morette et al., 2023; Wu et al., 2023).

Με την ανάλυση του ιστορικού δεδομένων και την δυνατότητα προσομοιώσεων διαφόρων σεναρίων μπορεί να προβλέψει τηςνχωρητικότητα και της απόδοση του δικτύου, κάτι απαραίτητο για τη βέλτιστη λειτουργία και βελτίωση του fronthaul ενός δικτύου 6G. Έτσι γίνεται σωστή πρόβλεψη χρήσης και κατανομής πόρων ανάλογα με τη ζήτηση. Αυτός ο δυναμικός προγραμματισμός και η προσαρμοστικότητα επιτρέπει ακόμα προτού εφαρμοστούν κάποιες αλλαγές ή αναβαθμίσεις να έχουν ελεγχθεί

εικονικά για τις τυχόν επιδράσεις που θα έχουν στο δίκτυο. Τα οπτικά δίδυμα διαρκώς προσαρμόζονται και «μαθαίνουν» από την παραγωγή δεδομένων πραγματικού χρόνου και σε ένα βαθμό λειτουργούν αυτόνομα για τη βελτίωση των υπηρεσιών. Όπως είναι λογικό βασικός στόχος των προσομοιώσεων είναι η πρόβλεψη τυχόν λαθών και αστοχιών και επαναπρογραμματισμός για την αποφυγή τους (Fayad et al., 2024).

Μία πρόταση ακόμα θα είναι η βελτίωση της προσαρμοστικότητας του SM-MIMO όταν συμβαίνουν ατμοσφαιρικές επιδράσεις στις ζεύξεις FSO. Η αποκρυπτογράφηση της πολυπλοκότητας των αλληλεπιδράσεων μεταξύ καιρικών συνθηκών και FSO θα μπορούσε να αποτελέσει μελλοντικό πεδίο έρευνας για τη διασφάλιση της απόδοσης του δικτύου (Fayad et al., 2024)

4.9 Θέματα σε σχέση με την επικοινωνία ανθρώπου και δικτύου

Το γεγονός ότι δίνεται μεγάλη έμφαση στη γενιά 6G στην αλληλεπίδραση και την συνδεσιμότητα του ανθρώπου με συσκευές μέσω διεπαφών, δημιουργεί από μόνο του νέες προκλήσεις για την μέτρηση και τη διασφάλιση της ποιότητας των υπηρεσιών. Δεν έχει ακόμα αποφασιστεί ο βαθμός συμμετοχής και παρέμβασης του ανθρώπινου παράγοντα σε αυτό. Θα είναι αυτόνομα συστήματα που θα αξιολογούν την ποιότητα των υπηρεσιών μέσω αποκρίσεων του νευρικού συστήματος, θα παρεμβαίνει η ανθρώπινη βούληση με κίνδυνο υστέρησης στην απόκριση λόγω του χρόνου που θα απαιτεί η διαδικασία αξιολόγησης; Τέλος εγείρονται θέματα τύπου βιοηθικής, δηλαδή υπέρμετρης χρήσης της τεχνολογική παρέμβασης σε θέματα που σχετίζονται περισσότερο με την ανθρώπινη υγεία και ψυχολογία (Ali et al., 2020; Chen et al., 2018).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι Rajatheva et al (2020) θέτουν βασικά αλλά μάλλον ρητορικά ερωτήματα για την 6^η γενιά δικτύωσης: πώς θα μοιάζει, ποιες τεχνολογίες θα περιλαμβάνει και με τι χαρακτηριστικά; Στην πραγματικότητα κανένας δε γνωρίζει ακριβώς πώς θα εξελιχθεί η τεχνολογία και η μορφή των δικτύων στο μέλλον. Η πλέον δημοφιλής απάντηση για την 6^η γενιά είναι ότι θα ενσωματώνει όλα τα στοιχεία τα οποία δεν ήταν αρκετά ώριμα ή δεν υπήρχαν οι τεχνολογίες ώστε να ενταχθούν στην 5^η γενιά. Η πιο ριζοσπαστική άποψη είναι ότι η 6^η γενιά δεν θα αποτελεί εξέλιξη της 5^{ης} γενιάς, δηλαδή ότι δεν θα διαθέτει βελτιωμένα χαρακτηριστικά όπως συνέβαινε με κάθε γενιά, αλλά θα είναι μία πρωτοποριακή και εις βάθος ανανέωση της υποδομής και των τεχνολογιών δικτύωσης, κάτι σαν μία «τεχνολογική επανάσταση» (Rajatheva et al., 2020).

Τεχνολογίες όπως απτικό (tactile) ίντερνετ, ολογραφική επικοινωνία, επικοινωνία ανθρώπου μηχανής ή ανθρώπου – ρομπότ, ψηφιακοί αισθητήρες που απαιτούν εύρος ζώνης που δεν έχει ζητηθεί ξανά της τάξης των Tbps, αλλά και πολύ χαμηλή καθυστέρηση της τάξης των μικροδευτερολέπτων, υψηλή αξιοπιστία και ευρέως κλίμακας συνδεσιμότητας σε τρισδιάστατες περιοχές κάλυψης (E. Wong, 2022).

Η κύρια βάση που δινόταν στην μετάβαση σε κάθε γενιά, δηλαδή η αύξηση της χωρητικότητας και η μείωση της καθυστέρησης, είναι δυνατόν να επιτευχθεί με την βελτίωση των αρχιτεκτονικών δικτύωσης με τη χρήση οπτικών ινών και συνδέσεων P2P, PONs και FSO. Όταν ζητούμενες είναι λύσεις που θα συγκρατήσουν το κόστος τότε η ενσωμάτωση παθητικών οπτικών δικτύων (PONs) αποτελεί μονόδρομο έναντι της δικτύωσης σημείου προς σημείο (P2P). Παρόλο που η ανάπτυξη οπτικών ινών μέσω παθητικών οπτικών δικτύων φαίνεται να έχει τη δυνατότητα να υποστηρίξει το απαιτούμενο εύρος ζώνης, υπάρχουν αρκετές προκλήσεις που έχουν να κάνουν με την «ετερογενή φύση» που αναμένεται να έχει η δικτύωση 6^{ης} γενιάς με πολλαπλές εμπυθιστικές (immersive) υπηρεσίες σε ένα δυναμικό περιβάλλον (E. Wong, 2022)

Πιο συγκεκριμένα αν ο στόχος είναι η μεταφορά δεδομένων με ρυθμό μετάδοσης της τάξης των Tb θα πρέπει να αναπτυχθούν συνεκτικοί πομποί και δέκτες βελτιωμένης τεχνολογίας. Ταυτόχρονα απαιτούνται νέοι μηχανισμοί για την μείωση της καθυστέρησης για τις κρίσιμες υπηρεσίες που θα ενσωματώνουν τα δίκτυα 6^{ης} γενιάς, οι οποίοι θα στηρίζονται είτε σε βελτιωμένες αρχιτεκτονικές, είτε σε δυναμικό

προγραμματισμό μέσω μηχανικής μάθησης ή/και τεχνητής νοημοσύνης, αντιμετωπίζοντας ταυτόχρονα την ευπάθεια των συστημάτων ασφαλείας των παθητικών οπτικών δικτύων. Η εναλλακτική χρήση FSOs στην περίπτωση που δεν είναι δυνατή η δικτύωση μέσω καλωδίωσης, παρόλο που αποτελεί πολλά υποσχόμενη, θα πρέπει πρώτα να αντιμετωπιστούν οι πιθανή ευπάθεια του συστήματος σε καιρικά φαινόμενα (Fayad et al., 2024).

Στην παρούσα εργασία επιχειρήθηκε μία συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση εμπειρικών ερευνών σχετικά με τις τεχνολογίες αιχμής (cutting edge) που έχουν αναπτυχθεί ώστε να πλαισιώνουν την εμπροσθοζευτική (fronthaul) δικτύωση 5^{ης} γενιάς +, όπως τα θέματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν ώστε να μπορέσουν οι τεχνολογίες αυτές να ενσωματωθούν στην 6^η γενιά. Από την ανάλυση των ερευνών και των τάσεων που αναμένεται να επικρατήσουν προκύπτει το βασικό συμπέρασμα ότι η βελτίωση ή η ενσωμάτωση μίας και μόνο τεχνολογίας δεν είναι αρκετή ώστε να δώσει λύσεις στην πολυπλοκότητα και τις απαιτήσεις της δικτύωσης 6^η γενιάς. Είναι φανερό όμως ότι μπορεί να βασιστεί μόνο σε τεχνολογίες οπτικού τύπου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abdalla, A. S., & Marojevic, V. (2023). *End-to-End O-RAN Security Architecture, Threat Surface, Coverage, and the Case of the Open Fronthaul*. <http://arxiv.org/abs/2304.05513>
- Akyildiz, I. F., Kak, A., & Nie, S. (2020). 6G and Beyond: The Future of Wireless Communications Systems. *IEEE Access*, 8. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3010896>
- Ali, S., Saad, W., Rajatheva, N., Chang, K., Steinbach, D., Sliwa, B., Wietfeld, C., Mei, K., Shiri, H., Zepernick, H.-J., Chu, T. M. C., Ahmad, I., Huusko, J., Suutala, J., Bhadauria, S., Bhatia, V., Mitra, R., Amuru, S., Abbas, R., ... Malik, H. (2020). *6G White Paper on Machine Learning in Wireless Communication Networks*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.13875> Focus to learn more
- Anju, M., & Gawas, U. (2015). An Overview on Evolution of Mobile Wireless Communication Networks: 1G-6G. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, 3(5), 3130–3133.
- AT & T. (2011). Testing the First Public Cell Phone Network AT & T Archives. *Techchannel.Att.Com*. <https://web.archive.org/web/20131029194138/http://techchannel.att.com/play-video.cfm/2011/6/13/AT%26T-Archives-AMPS%3A-coming-of-age>
- Bennis, M., Debbah, M., & Poor, H. V. (2018). Ultrareliable and Low-Latency Wireless Communication: Tail, Risk, and Scale. *Proceedings of the IEEE*, 106(10). <https://doi.org/10.1109/JPROC.2018.2867029>
- Bourdoux, A., Barreto, A. N., van Liempd, B., de Lima, C., Dardari, D., Belot, D., Lohan, E. S., Seco-Granados, G., Sardeddeen, H., Wymeersch, H., Suutala, J., Saloranta, J., Guillaud, M., Isomursu, M., Valkama, M., Aziz, M. R. K., Berkvens, R., Sanguanpuak, T., Svensson, T., & Miao, Y. (2020). 6G White Paper on Localization and Sensing (6G Research Visions No. 12). *ArXiv*, 12.
- Cagenius, T., Mildh, G., Rune, G., Vikberg, J., Wahlqvist, M., & Willars, P. (2023). 6G network architecture – a proposal for early alignment. *Ericsson Technology Review - Charting the Future of Innovation*, 11. <https://doi.org/ISSN 0014-0171 284 23-3398>
- Cagenius, T., Ryde, A., Vikberg, J., & Willars, P. (2018). Simplifying the 5G ecosystem by reducing architecture options. *Ericsson Technology Review - Charting the Future of Innovation*, 10. <https://doi.org/ISSN 0014-0171>
- Camarda, P., & Striccoli, D. (2010). Transmission Optimization of Digital Compressed Video in Wireless Systems. In *Digital Video*. <https://doi.org/10.5772/8025>
- Camps-Mur, D., Gutiérrez, J., Grass, E., Tzanakaki, A., Flegkas, P., Choumas, K., Giatsios, D., Beldachi, A. F., Diallo, T., Zou, J., Legg, P., Bartelt, J., Chaudhary, J. K., Betzler, A., Aleixendri, J. J., González, R., & Simeonidou, D. (2019). 5G-XHaul: A Novel Wireless-Optical SDN Transport Network to Support Joint 5G

- Backhaul and Fronthaul Services. *IEEE Communications Magazine*, 57(7).
<https://doi.org/10.1109/MCOM.2019.1800836>
- Cao, B., Zhang, L., Li, Y., Feng, D., & Cao, W. (2019). Intelligent Offloading in Multi-Access Edge Computing: A State-of-the-Art Review and Framework. In *IEEE Communications Magazine* (Vol. 57, Issue 3).
<https://doi.org/10.1109/MCOM.2019.1800608>
- Chanclou, P., Neto, L. A., Grzybowski, K., Tayq, Z., Saliou, F., & Genay, N. (2018). Mobile fronthaul architecture and technologies: A RAN equipment assessment [invited]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 10(1).
<https://doi.org/10.1364/JOCN.10.0000A1>
- Chen, M., Saad, W., & Yin, C. (2018). Virtual reality over wireless networks: Quality-of-service model and learning-based resource management. *IEEE Transactions on Communications*, 66(11). <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2018.2850303>
- Chiesa, M., Kamisinski, A., Rak, J., Retvari, G., & Schmid, S. (2021). A Survey of Fast-Recovery Mechanisms in Packet-Switched Networks. In *IEEE Communications Surveys and Tutorials* (Vol. 23, Issue 2).
<https://doi.org/10.1109/COMST.2021.3063980>
- Chitimalla, D., Kondepu, K., Valcarengi, L., Tornatore, M., & Mukherjee, B. (2017). 5G fronthaul-latency and jitter studies of CPRI over ethernet. *Journal of Optical Communications and Networking*, 9(2). <https://doi.org/10.1364/JOCN.9.000172>
- Datsika, E., Vardakas, J. S., Ramantas, K., Mekikis, P. V., Monroy, I. T., Neto, L. A., & Verikoukis, C. (2021). SDN-Enabled Resource Management for Converged Fi-Wi 5G Fronthaul. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 39(9).
<https://doi.org/10.1109/JSAC.2021.3064651>
- Degambur, L. N., Mungur, A., Armoogum, S., & Pudaruth, S. (2021). Resource Allocation in 4G and 5G Networks: A Review. *International Journal of Communication Networks and Information Security*, 13(3).
<https://doi.org/10.54039/IJCNIS.V13I3.5116>
- Dik, D., & Berger, M. S. (2023). Open-RAN Fronthaul Transport Security Architecture and Implementation. *IEEE Access*, 11.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3274487>
- Duda, A. and Sreenan, C. J. (2003). Challenges for Quality of Service in Next Generation Mobile Networks. *Proc. of Information Technology & Telecommunications Conference (IT&T)*.
- ETSI. (1999). *GSM 03.60 version 6.4.1 Release 1997*.
https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/301300_301399/301344/06.04.01_60/en_301344v060401p.pdf
- Fan, Y., Fu, M., Jiang, H., Liu, X., Liu, Q., Xu, Y., Yi, L., Hu, W., & Zhuge, Q. (2022). Point-to-Multipoint Coherent Architecture with Joint Resource Allocation for B5G/6G Fronthaul. *IEEE Wireless Communications*, 29(2).
<https://doi.org/10.1109/MWC.004.2100528>

- Farias, F., Fiorani, M., Tombaz, S., Mahloo, M., Wosinska, L., Costa, J. C. W. A., & Monti, P. (2016). Cost- and energy-efficient backhaul options for heterogeneous mobile network deployments. *Photonic Network Communications*, 32(3). <https://doi.org/10.1007/s11107-016-0676-6>
- Faruk, M. S., & Savory, S. J. (2024). Measurement Informed Models and Digital Twins for Optical Fiber Communication Systems. *Journal of Lightwave Technology*, 42(3). <https://doi.org/10.1109/JLT.2023.3328765>
- Fayad, A., Cinkler, T., & Rak, J. (2023). 5G/6G optical fronthaul modeling: Cost and energy consumption assessment. *Journal of Optical Communications and Networking*, 15(9). <https://doi.org/10.1364/JOCN.486547>
- Fayad, A., Cinkler, T., & Rak, J. (2024). Toward 6G Optical Fronthaul: A Survey on Enabling Technologies and Research Perspectives. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 14(8). <https://doi.org/10.1109/COMST.2024.3408090>
- Fayad, A., Cinkler, T., Rak, J., & Jha, M. (2022). Design of Cost-Efficient Optical Fronthaul for 5G/6G Networks: An Optimization Perspective. *Sensors*, 22(23). <https://doi.org/10.3390/s22239394>
- Fiorani, M., Tombaz, S., Mårtensson, J., Skubic, B., Wosinska, L., & Monti, P. (2016). Modeling energy performance of C-RAN with optical transport in 5G network scenarios. *Journal of Optical Communications and Networking*, 8(11). <https://doi.org/10.1364/JOCN.8.000B21>
- Froberg, N. M., Henion, S. R., Rao, H. G., Hazzard, B. K., Parikh, S., Romkey, B. R., & Kuznetsov, M. (2000). The NGI ONRAMP test bed: Reconfigurable WDM technology for next generation regional access networks. *Journal of Lightwave Technology*, 18(12). <https://doi.org/10.1109/50.908695>
- Furdek, M., & Natalino, C. (2022). Machine learning for network security management, attacks, and intrusions detection. In *Machine Learning for Future Fiber-Optic Communication Systems*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-32-385227-2.00017-6>
- Furdek, M., Natalino, C., Di Giglio, A., & Schiano, M. (2021). Optical network security management: Requirements, architecture, and efficient machine learning models for detection of evolving threats [Invited]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 13(2). <https://doi.org/10.1364/JOCN.402884>
- Furdek, M., Natalino, C., Lipp, F., Hock, D., Giglio, A. Di, & Schiano, M. (2020). Machine Learning for Optical Network Security Monitoring: A Practical Perspective. In *Journal of Lightwave Technology* (Vol. 38, Issue 11). <https://doi.org/10.1109/JLT.2020.2987032>
- Furdek, M., Wosinska, L., Gosciencin, R., Manousakis, K., Aibin, M., Walkowiak, K., Ristov, S., Gushev, M., & Marzo, J. L. (2016). An overview of security challenges in communication networks. *Proceedings of 2016 8th International Workshop on Resilient Networks Design and Modeling, RNDM 2016*. <https://doi.org/10.1109/RNDM.2016.7608266>
- Garima, Jha, V., & Singh, R. K. (2022). A Novel Dynamic Bandwidth Allocation

- Scheme for XGPON based Mobile Fronthaul for Small Cell CRAN. *Optical Switching and Networking*, 45. <https://doi.org/10.1016/j.osn.2022.100674>
- Gasulla, I., & Capmany, J. (2019). Multicore fibres for 5G fronthaul evolution. In *Optical and Wireless Convergence for 5G Networks*. <https://doi.org/10.1002/9781119491590.ch4>
- Georgiadis, P., Anastasopoulos, M., Manolopoulos, A.-I., Alevizaki, V.-M., Nikaein, N., & Tzanakaki, A. (2023). *Demonstration of Energy Efficient Optimization in Beyond 5G Systems supported by Optical Transport Networks*. <https://doi.org/10.1364/ofc.2023.w4f.4>
- Guiomar, F. P., Fernandes, M. A., Nascimento, J. L., Rodrigues, V., & Monteiro, P. P. (2022). Coherent Free-Space Optical Communications: Opportunities and Challenges. *Journal of Lightwave Technology*, 40(10). <https://doi.org/10.1109/JLT.2022.3164736>
- Guo, H., Wang, Y., Liu, J., & Kato, N. (2022). Super-Broadband Optical Access Networks (OANs) in 6G: Vision, Architecture, and Key Technologies. *IEEE Wireless Communications*. <https://doi.org/10.1109/MWC.007.2100550>
- Gutierrez, D., Kim, K. S., Rotolo, S., An, F., & Kazovsky, L. G. (2005). FTTH Standards , Deployments and Research Issues. *8th Joint Conference on Information Sciences*.
- HORIZON 2020, I.-14-2014. (2019). Δυναμικά αναδιαρθρωτικό οπτικο-ασύρματο, οπισθο/εμπροσθο-ζευκτικό δίκτυο με γνωστικό επίπεδο ελέγχου για μικρές κυψέλες και ραδιοπρόσβαση στο νέφος (5G-XHaul). *Επικοινωνίες ΕνΤ@χει - Τεύχος 9*, 3. <https://www.eett.gr/wp-content/uploads/2021/10/59.pdf>
- Hu, S., Rusek, F., & Edfors, O. (2018). Beyond Massive MIMO: The Potential of Data Transmission with Large Intelligent Surfaces. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 66(10). <https://doi.org/10.1109/TSP.2018.2816577>
- Jaffer, S. S., Hussain, A., Qureshi, M. A., & Khawaja, W. S. (2020). Towards the Shifting of 5G Front Haul Traffic on Passive Optical Network. *Wireless Personal Communications*, 112(3). <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07115-6>
- Janz, C., You, Y., Hemmati, M., Jiang, Z., Javadtalab, A., & Mitra, J. (2022). Digital Twin for the Optical Network: Key Technologies and Enabled Automation Applications. *Proceedings of the IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium 2022: Network and Service Management in the Era of Cloudification, Softwarization and Artificial Intelligence, NOMS 2022*. <https://doi.org/10.1109/NOMS54207.2022.9789844>
- Kalfas, G., Vagionas, C., Antonopoulos, A., Kartsakli, E., Mesodiakaki, A., Papaioannou, S., Maniotis, P., Vardakas, J. S., Verikoukis, C., & Pleros, N. (2019). Next Generation Fiber-Wireless Fronthaul for 5G mmWave Networks. *IEEE Communications Magazine*, 57(3). <https://doi.org/10.1109/MCOM.2019.1800266>
- Kani, J. I., Teshima, M., Akimoto, K., Takachio, N., Suzuki, H., Iwatsuki, K., & Ishii, M.

- (2003). A WDM-Based Optical Access Network for Wide-Area Gigabit Access Services. *IEEE Communications Magazine*, 41(2). <https://doi.org/10.1109/MCOM.2003.1179497>
- Kasgari, A. T. Z., & Saad, W. (2019). Model-Free Ultra Reliable Low Latency Communication (URLLC): A Deep Reinforcement Learning Framework. *IEEE International Conference on Communications*, 2019–May. <https://doi.org/10.1109/ICC.2019.8761721>
- Kazovsky, L. G., Shaw, W. T., Gutierrez, D., Cheng, N., & Wong, S. W. (2007). Next-generation optical access networks. *Journal of Lightwave Technology*, 25(11). <https://doi.org/10.1109/JLT.2007.907748>
- Kim, K. S. (2003). On the evolution of PON-based FTTH solutions. *Information Sciences*, 149(1–3). [https://doi.org/10.1016/S0020-0255\(02\)00241-4](https://doi.org/10.1016/S0020-0255(02)00241-4)
- Kondepu, K., Sgambelluri, A., Cugini, F., Castoldi, P., Morenilla, R. A., Larrabeiti, D., Vermeulen, B., & Valcarengi, L. (2019). Performance evaluation of SDN-controlled green mobile fronthaul using a federation of experimental network testbeds. *Photonic Network Communications*, 37(3). <https://doi.org/10.1007/s11107-018-00822-y>
- Kramer, G., & Pesavento, G. (2002). Ethernet passive optical network (EPON): Building a next-generation optical access network. *IEEE Communications Magazine*, 40(2). <https://doi.org/10.1109/35.983910>
- Kulubi, J. (2016). *Advanced Mobile Phone Service (AMPS)*. Multimedia University of Kenya. http://www.ece2526.elimu.net/Notes/AMPS/Amps_Home.html
- Kumar, S. K. A., & Oughton, E. J. (2023). Infrastructure Sharing Strategies for Wireless Broadband. *IEEE Communications Magazine*, 61(7). <https://doi.org/10.1109/MCOM.005.2200698>
- Larrabeiti, D., Contreras, L. M., Otero, G., Hernández, J. A., & Fernandez-Palacios, J. P. (2023). Toward end-to-end latency management of 5G network slicing and fronthaul traffic (Invited paper). *Optical Fiber Technology*, 76. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2022.103220>
- Latva-Aho, M., & Leppänen, K. (2019). Key Drivers and Research Challenges for 6G Ubiquitous Wireless Intelligence - 6G Research Visions 1, September 2019. In *White Paper* (Vol. 1, Issue September).
- Lavery, D., Bayvel, P., & Killey, R. (2019). MB2.1-coherent technologies for passive optical networks (invited). *IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series 2019, SUM 2019*. <https://doi.org/10.1109/PHOSST.2019.8795042>
- Levi, D. (2020). The Case for Using PON for 5G Fronthaul. *LIGHTWAVE Magazine*. <https://www.lightwaveonline.com/5g-mobile/article/14188094/the-case-for-using-pon-for-5g-fronthaul>
- Liu, X. (2022). Enabling Optical Network Technologies for 5G and Beyond. *Journal of Lightwave Technology*, 40(2). <https://doi.org/10.1109/JLT.2021.3099726>

- Liu, Y., Deng, Y., Nallanathan, A., & Yuan, J. (2023). Machine Learning for 6G Enhanced Ultra-Reliable and Low-Latency Services. *IEEE Wireless Communications*, 30(2). <https://doi.org/10.1109/MWC.006.2200407>
- Lometti, A., & Sestito, V. (2020). Fronthaul in 5G transport networks: IEEE1914.1 architecture and requirements. *International Conference on Transparent Optical Networks, 2020–July*. <https://doi.org/10.1109/ICTON51198.2020.9203468>
- Lorincz, J., Klarin, Z., & Begusic, D. (2023). Advances in Improving Energy Efficiency of Fiber–Wireless Access Networks: A Comprehensive Overview. In *Sensors* (Vol. 23, Issue 4). <https://doi.org/10.3390/s23042239>
- Mishra, A. R. (2004). Fundamentals of Cellular Network Planning and Optimisation. In *Fundamentals of Cellular Network Planning and Optimisation*. <https://doi.org/10.1002/0470862696>
- Mohsan, S. A. H., Khan, M. A., & Amjad, H. (2023). Hybrid FSO/RF networks: A review of practical constraints, applications and challenges. In *Optical Switching and Networking* (Vol. 47). <https://doi.org/10.1016/j.osn.2022.100697>
- Morette, N., Hafermann, H., Frignac, Y., & Pointurier, Y. (2023). Machine learning enhancement of a digital twin for wavelength division multiplexing network performance prediction leveraging quality of transmission parameter refinement. *Journal of Optical Communications and Networking*, 15(6). <https://doi.org/10.1364/JOCN.487870>
- Mozaffari, M., Kasgari, A. T. Z., Saad, W., Bennis, M., & Debbah, M. (2019). Beyond 5G with UAVs: Foundations of a 3D Wireless Cellular Network. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 18(1). <https://doi.org/10.1109/TWC.2018.2879940>
- Naik, G., Aigal, V., Sehgal, P., & Poojary, J. (2012). Challenges in the implementation of Fourth Generation Wireless Systems. *International Journal of Engineering Research And*, 2(2).
- Natalino, C., Di Giglio, A., Schiano, M., & Furdek, M. (2021). Autonomous Security Management in Optical Networks. *2021 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, OFC 2021 - Proceedings*.
- Natalino, C., Manso, C., Vilalta, R., Monti, P., Munoz, R., & Furdek, M. (2021). Scalable Physical Layer Security Components for Microservice-Based Optical SDN Controllers. *2021 European Conference on Optical Communication, ECOC 2021*. <https://doi.org/10.1109/ECOC52684.2021.9605943>
- Natalino, C., Schiano, M., Giglio, A. Di, & Furdek, M. (2022). Root Cause Analysis for Autonomous Optical Network Security Management. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 19(3). <https://doi.org/10.1109/TNSM.2022.3198139>
- Parikh, J., & Basu, A. (2011). LTE Advanced The 4G Mobile Broadband Technology. *International Journal of Computer Applications*, 13(5). <https://doi.org/10.5120/1776-2449>

- Patel, S., Chauhan, M., & Kapadiya, K. (2012). 5G: Future Mobile Technology-Vision 2020. *International Journal of Computer Applications*, 54(17), 6–10. <https://doi.org/10.5120/8656-2264>
- Prabhakar, L. (2013). A Comparative Study of Three TDMA Digital Cellular Mobile Systems (GSM, IS-136 NA-TDMA and PDC) Based On Radio Aspect. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 4(6), 139–143. <https://doi.org/10.14569/ijacsa.2013.040619>
- Prat, J. (2008). Next-generation FTTH passive optical networks: Research towards unlimited bandwidth access. In *Next-Generation FTTH Passive Optical Networks: Research Towards Unlimited Bandwidth Access*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8470-6>
- Psaromanolakis, N., Ropodi, A., Fragkogiannis, P., Tsagkaris, K., Neto, L. A., El Ankouri, A., Wang, M., Simon, G., & Chanclou, P. (2020). Software defined networking in a converged 5G fiber-wireless network. *2020 European Conference on Networks and Communications, EuCNC 2020*. <https://doi.org/10.1109/EuCNC48522.2020.9200957>
- Puttnam, B. J., Rademacher, G., & Luís, R. S. (2021). Space-division multiplexing for optical fiber communications. *Optica*, 8(9). <https://doi.org/10.1364/optica.427631>
- Quran, A., Troia, S., Ayoub, O., Di Cicco, N., & Tornatore, M. (2022). A Reinforcement Learning-based Dynamic Bandwidth Allocation for XGS-PON Networks. *2022 International Conference on Optical Network Design and Modelling (ONDM)*. <https://doi.org/978-3-903176-44-7>
- Rajatheva, N., Atzeni, I., Bjornson, E., Bourdoux, A., Buzzi, S., Dore, J.-B., Erkucuk, S., Fuentes, M., Guan, K., Hu, Y., Huang, X., Hulkkonen, J., Jornet, J. M., Katz, M., Nilsson, R., Panayirci, E., Rabie, K., Rajapaksha, N., Salehi, M., ... Xu, W. (2020). White Paper on Broadband Connectivity in 6G. *6G Research Visions*, 10. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.14247>
- Rak, J., Girão-Silva, R., Gomes, T., Ellinas, G., Kantarci, B., & Tornatore, M. (2021). Disaster resilience of optical networks: State of the art, challenges, and opportunities. *Optical Switching and Networking*, 42. <https://doi.org/10.1016/j.osn.2021.100619>
- Ranaweera, C., Kua, J., Dias, I., Wong, E., Lim, C., & Nirmalathas, A. (2022). 4G to 6G: Disruptions and drivers for optical access [Invited]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 14(2). <https://doi.org/10.1364/JOCN.440798>
- Ranaweera, C., & Lim, C. (2021). Rethinking of Optical Transport Network Design for 5G/6G Mobile Communication. *IEEE Future Networks Tech Focus*, 12. <https://research.chalmers.se/en/publication/524550>
- Ranaweera, C., Resende, M. G. C., Reichmann, K., Iannone, P., Henry, P., Kim, B. J., Magill, P., Oikonomou, K. N., Sinha, R. K., & Woodward, S. (2013). Design and optimization of fiber optic small-cell backhaul based on an existing fiber-to-the-node residential access network. *IEEE Communications Magazine*, 51(9).

<https://doi.org/10.1109/MCOM.2013.6588652>

- Rappaport, T. S., Xing, Y., Kanhere, O., Ju, S., Madanayake, A., Mandal, S., Alkhateeb, A., & Trichopoulos, G. C. (2019). Wireless communications and applications above 100 GHz: Opportunities and challenges for 6g and beyond. *IEEE Access*, 7. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2921522>
- Romano, G. (2018). *Submission of initial 5G description for IMT-2020*. 3GPP A Global Initiative. <https://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/5g-description>
- Rommel, S., Perez-Galacho, D., Fabrega, J. M., Munoz, R., Sales, S., & Tafur Monroy, I. (2019). High-Capacity 5G Fronthaul Networks Based on Optical Space Division Multiplexing. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 65(2). <https://doi.org/10.1109/TBC.2019.2901412>
- Ruan, L., Dias, M. P. I., & Wong, E. (2020). Enhancing latency performance through intelligent bandwidth allocation decisions: A survey and comparative study of machine learning techniques. *Journal of Optical Communications and Networking*, 12(4). <https://doi.org/10.1364/JOCN.379715>
- Ruan, L., Mondal, S., Dias, I., & Wong, E. (2020). Low-latency federated reinforcement learning-based resource allocation in converged access networks. *Optics InfoBase Conference Papers, Part F174-OFC 2020*. <https://doi.org/10.1364/OFC.2020.W2A.28>
- Ruffini, M., Ahmad, A., Zeb, S., Afraz, N., & Slyne, F. (2020). Virtual DBA: Virtualizing passive optical networks to enable multi-service operation in true multi-tenant environments. *Journal of Optical Communications and Networking*, 12(4). <https://doi.org/10.1364/JOCN.379894>
- Saad, W., Bennis, M., & Chen, M. (2020). A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems. *IEEE Network*, 34(3). <https://doi.org/10.1109/MNET.001.1900287>
- Semiari, O., Saad, W., Bennis, M., & Debbah, M. (2019). Integrated millimeter wave and sub-6 GHz wireless networks: A roadmap for joint mobile broadband and ultra-reliable low-latency communications. *IEEE Wireless Communications*, 26(2). <https://doi.org/10.1109/MWC.2019.1800039>
- Sharma, P. (2013). Evolution of Mobile Wireless Communication Networks-1G to 5G as well as Future Prospective of Next Generation Communication Network. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing (IJCSMC) - Not Index*, 2(August), 47–53.
- Sizer, T., Samardzija, D., Viswanathan, H., Thai Le, S., Bidkar, S., Dom, P., Harstead, E., & Pfeiffer, T. (2022). Integrated Solutions for Deployment of 6G Mobile Networks. *Journal of Lightwave Technology*, 40(2). <https://doi.org/10.1109/JLT.2021.3110436>
- Systems, D. (2013). Recommendation ITU-T G.984.1. *Networks*.
- Talli, G., Slyne, F., Porto, S., Carey, D., Brandonisio, N., Naughton, A., Ossieur, P.,

- McGettrick, S., Blumm, C., Ruffini, M., Payne, D., Bonk, R., Pfeiffer, T., Parsons, N., & Townsend, P. (2017). SDN Enabled Dynamically Reconfigurable High Capacity Optical Access Architecture for Converged Services. *Journal of Lightwave Technology*, 35(3). <https://doi.org/10.1109/JLT.2016.2604864>
- Tomkos, I., Klionidis, D., Pikasis, E., & Theodoridis, S. (2020). Toward the 6G Network Era: Opportunities and Challenges. *IT Professional*, 22(1). <https://doi.org/10.1109/MITP.2019.2963491>
- Urban, P. J., Amaral, G. C., Zeglinski, G., Weinert-Raczka, E., & Von Der Weid, J. P. (2018). A tutorial on fiber monitoring for applications in analogue mobile fronthaul. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 20(4). <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2846747>
- Uzawa, H., Honda, K., Nakamura, H., Hirano, Y., Nakura, K. I., Kozaki, S., & Terada, J. (2020). Dynamic bandwidth allocation scheme for network-slicing-based TDM-PON toward the beyond-5G era. *Journal of Optical Communications and Networking*, 12(2). <https://doi.org/10.1364/JOCN.12.00A135>
- Vardakas, J. S., Ramantas, K., Vinogradov, E., Rahman, M. A., Girycki, A., Pollin, S., Pryor, S., Chanclou, P., & Verikoukis, C. (2022). Machine Learning-Based Cell-Free Support in the O-RAN Architecture: An Innovative Converged Optical-Wireless Solution Toward 6G Networks. *IEEE Wireless Communications*, 29(5). <https://doi.org/10.1109/MWC.002.2200026>
- Viswanathan, H., & Mogensen, P. E. (2020). Communications in the 6G Era. *IEEE Access*, 8. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2981745>
- Wang, D., Zhang, Z., Zhang, M., Fu, M., Li, J., Cai, S., Zhang, C., & Chen, X. (2021). The role of digital twin in optical communication: Fault management, hardware configuration, and transmission simulation. *IEEE Communications Magazine*, 59(1). <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2000727>
- Wang, S., Yang, H., Qin, Y., Peng, D., & Fu, S. (2022). Power-Over-Fiber in Support of 5G NR Fronthaul: Space Division Multiplexing Versus Wavelength Division Multiplexing. *Journal of Lightwave Technology*, 40(13). <https://doi.org/10.1109/JLT.2022.3159540>
- Wang, X., Ji, Y., Zhang, J., Bai, L., & Zhang, M. (2019). Low-Latency Oriented Network Planning for MEC-Enabled WDM-PON Based Fiber-Wireless Access Networks. *IEEE Access*, 7. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2926795>
- Wang, X., Ji, Y., Zhang, J., Bai, L., & Zhang, M. (2020). Joint Optimization of Latency and Deployment Cost over TDM-PON Based MEC-Enabled Cloud Radio Access Networks. *IEEE Access*, 8. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2959119>
- Wong, E. (2022). Towards 6G: The Evolution of Passive Optical Networks. *2022 IEEE Photonics Conference, IPC 2022 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/IPC53466.2022.9975774>
- Wong, E., Mondal, S., & Ruan, L. (2023). Machine learning enhanced next-generation optical access networks - challenges and emerging solutions [Invited Tutorial].

- Journal of Optical Communications and Networking*, 15(2).
<https://doi.org/10.1364/JOCN.470902>
- Wong, E., & Ruan, L. (2022). Towards 6G: Machine Learning Driven Resource Allocation in Next Generation Optical Access Networks (Invited). *2022 European Conference on Optical Communication, ECOC 2022*.
- Wong, E., & Ruan, L. (2023). Towards 6G: fast and self-adaptive dynamic bandwidth allocation for next-generation mobile fronthaul. *Journal of Optical Communications and Networking*, 15(8). <https://doi.org/10.1364/JOCN.483983>
- Wong, M., Prasad, A., & Soong, A. C. K. (2022). The Security Aspect of 5G Fronthaul. *IEEE Wireless Communications*, 29(2).
<https://doi.org/10.1109/MWC.002.2100445>
- Wu, Y., Zhang, M., Zhang, L., Li, J., Chen, X., & Wang, D. (2023). Dynamic Network Topology Portrait for Digital Twin Optical Network. *Journal of Lightwave Technology*, 41(10). <https://doi.org/10.1109/JLT.2023.3241187>
- Xing, Y., & Rappaport, T. S. (2018). Propagation Measurement System and Approach at 140 GHz-Moving to 6G and above 100 GHz. *2018 IEEE Global Communications Conference, GLOBECOM 2018 - Proceedings*.
<https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2018.8647921>
- Yang, Y., Sung, K. W., Wosinska, L., & Chen, J. (2014). Hybrid fiber and microwave protection for mobile backhauling. *Journal of Optical Communications and Networking*, 6(10). <https://doi.org/10.1364/JOCN.6.000869>
- 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).
<https://doi.org/10.1364/JOCN.10.000749>
- Zaouga, A., De Sousa, A., Najja, M., & Monteiro, P. (2019). Low latency dynamic bandwidth allocation algorithms for NG-PON2 to support 5G fronthaul and data services. *International Conference on Transparent Optical Networks, 2019–July*.
<https://doi.org/10.1109/ICTON.2019.8840370>
- Zhang, C., Yang, M., Zheng, W., Zheng, Y., Wu, Y., & Zhang, Y. (2021). Analysis of wavelength deployment schemes in terms of optical network unit cost and upstream transmission performance in NG-EPONs. *Journal of Optical Communications and Networking*, 13(9). <https://doi.org/10.1364/JOCN.425722>
- Zhang, H., Dong, Y., Cheng, J., Hossain, M. J., & Leung, V. C. M. (2016). Fronthauling for 5G LTE-U ultra dense cloud small cell networks. *IEEE Wireless Communications*, 23(6). <https://doi.org/10.1109/MWC.2016.1600066WC>
- Zhu, P., Zhang, J., & Ji, Y. (2019). Resource Allocation in Energy Efficient Hybrid FSO/mmW Fronthaul: A Differential Evolution Approach. *IEEE International Conference on Communications*, 2019–May.
<https://doi.org/10.1109/ICC.2019.8761942>

Εργαστήριο Ραδιοεπικοινωνιών ΑΠΘ. (2019). *Ορισμός Ευρυζωνικότητας (Ευρυζωνική πρόσβαση και Ευρυζωνικές Υπηρεσίες)*. Τμήμα Φυσικής Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
http://broadband.physics.auth.gr/gr/broadband/broadband_definition.htm