



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ &**  
**ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Διαχείριση Εύρους Ζώνης σε Υβριδικά Οπτικά Ασύρματα Δίκτυα  
Πρόσβασης

Bandwidth Allocation in Hybrid Optical Wireless Access Networks

**Βεντούρης Αντώνιος**

**Επιβλέπων Καθηγητής:** Επίκουρος Καθηγητής -  
Σαρηγιαννίδης Παναγιώτης

Κοζάνη,

Μάρτιος 2017

.....  
Βεντούρης Αντώνιος  
Διπλωματούχος Μηχανικός Πληροφορικής & Τηλεπικοινωνιών ΠΔΜ.

Copyright © Βεντούρης Αντώνιος 2017  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπων καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής & Τηλεπικοινωνιών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας και συγκεκριμένα τον Επίκουρο Καθηγητή, κύριο Παναγιώτη Σαρηγιαννίδη για την εξαιρετική καθοδήγησή του, την συνεχή επίβλεψη, την υπομονή, καθώς επίσης και τη συνεργασία που είχαμε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας, αλλά και των σπουδών.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους πολύ καλούς φίλους που απέκτησα κατά τη διάρκεια των σπουδών στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής & Τηλεπικοινωνιών, για τις όμορφες στιγμές, για τη στήριξη και την άψογη συνεργασία που είχαμε όλα αυτά τα χρόνια, παράλληλα με τους πολύ καλούς φίλους που ήδη είχα. Συγκεκριμένα, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τους παρακάτω: Βιβή, Γιάννη, Ειρήνη, Εύη, Θωμά, Ντίνα, Σάκη, Τάνια, σε αλφαβητική σειρά, καθώς επίσης και πολλούς ακόμα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τους γονείς μου και την αδερφή μου Μαρία, για την πνευματική και υλική υποστήριξη που μου πρόσφεραν όλα αυτά τα χρόνια.

Αντώνιος Βεντούρης  
Κοζάνη, Μάρτιος 2017

## Πρόλογος

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής είναι η μελέτη, σχεδίαση και αποτίμηση, με μεθόδους προσομοίωσης, ενός υβριδικού παθητικού οπτικού δικτύου τύπου EPON – LTE. Το περιβάλλον προσομοίωσης στο οποίο υλοποιήθηκε η προτεινόμενη αρχιτεκτονική δικτύου, είναι το εργαλείο MATLAB R2016a. Η αρχιτεκτονική δικτύου, καθώς και όλα τα σενάρια προσομοίωσης αναπτύχθηκαν σύμφωνα με τις προδιαγραφές που ορίζει το πρότυπο IEEE 802.3ah.

## Περίληψη

Η εξέλιξη των δικτύων τηλεπικοινωνιών τις τελευταίες δεκαετίες έχει γίνει με καταγιστικό ρυθμό κυρίως χάρη στην εξάπλωση του διαδικτύου. Η συνεχής αύξηση του αριθμού των χρηστών, ωστόσο, καθιστά απαραίτητη την αναβάθμιση των υφιστάμενων δομών. Η αντικατάσταση των καλωδίων χαλκού με καλώδια οπτικών ινών θεωρήθηκε η ιδανικότερη λύση. Τα δίκτυα κορμού (Backbone Networks) και τα μητροπολιτικά δίκτυα (Metropolitan Networks) ήταν τα πρώτα που αναβαθμίστηκαν λόγω του σημαντικού ρόλου τους στη δομή του δικτύου, ενώ σε εξέλιξη βρίσκεται και η διαδικασία αναβάθμισης των δικτύων πρόσβασης. Το σύγχρονα δίκτυα πρόσβασης καλούνται να διαχειριστούν το μεγάλο όγκο δεδομένων που τους διοχετεύεται και να παρέχουν συγχρόνως υψηλές ταχύτητες στον τελικό χρήστη. Τα παθητικά οπτικά δίκτυα (Passive Optical Networks – PONS) θεωρήθηκαν η ιδανικότερη λύση για τα δίκτυα πρόσβασης τόσο από άποψη κόστους, όσο και από άποψη κατανάλωσης ενέργειας. Ωστόσο, έρευνες έχουν δείξει πως τα υβριδικά οπτικά-ασύρματα δίκτυα (Hybrid Optical-Wireless Networks) θα αποδειχθούν αποδοτικότερα, καθώς εκμεταλλεύονται τα πλεονεκτήματα των σταθερών και ασύρματων δικτύων. Στην παρούσα εργασία, παρουσιάζεται ένα υβριδικό οπτικό δίκτυο στο οποίο το δίκτυο κορμού είναι τύπου EPON, ενώ παράλληλα δρομολογούνται μέσα σε αυτό δεδομένα κινητής τηλεφωνίας και πιο συγκεκριμένα δικτύου 4G-LTE.

Στο μοντέλο προσομοιώνονται δύο μηχανισμοί. Ο πρώτος αφορά στην εύρεση και επιλογή του κατάλληλου configuration για το LTE μέσω πιθανοτήτων που βασίζονται στο λόγο καθοδικών προς ανοδικών πλαισίων. Ο δεύτερος αφορά ένα μηχανικό αυτόματο (μηχανική μάθηση) για την εκτίμηση του κατάλληλου configuration του LTE για τα επόμενα πλαίσια. Το καταλληλότερο configuration είναι εκείνο που έχει το μεγαλύτερο μέγεθος υποπλαισίων, δηλαδή τα περισσότερα καθαρά bits (payload) που μπορεί να εξυπηρετήσει. Επομένως, αυτός ο μηχανισμός μπορεί να ανιχνεύσει εάν το κάθε πλαίσιο χρειάζεται περισσότερο εύρος ζώνης (bandwidth) για να εξυπηρετηθεί ή όχι. Με αυτό τον τρόπο, επιτυγχάνεται η κατανομή εύρους ζώνης (bandwidth allocation).

## Λέξεις κλειδιά

Παθητικά Οπτικά Δίκτυα, EPON, Υβριδικά Παθητικά Οπτικά Δίκτυα, Δίκτυα Πρόσβασης, Οπτικές Ίνες.

## **Abstract**

Telecommunication networks have experienced great development mainly due to the spread of the Internet. Given the constantly increasing number of users though, the need of upgrading the existing telecommunication networks becomes necessary. The upgrade of the copper cables with fiber cables is considered as one of the most promising solutions. Backbone and metropolitan networks were the first to be upgraded as they are the most important ones, while the advancements in access networks are still in progress. The main target of the advanced access networks is to handle efficiently the large volume of data and provide high speeds to the end user at the same time. Passive Optical Networks (PONS) that were initially used seemed to be cost and energy effective, however the latest studies show that Hybrid Optical Networks can be proven more effective since they can exploit the advantages of the fixed and wireless networks simultaneously.

In the current thesis, a hybrid optical wireless access network is introduced, in which the core network is EPON type while 4G-LTE data are also inserted. Two mechanisms are also presented. The first one aims at finding most suitable configuration for the LTE in terms of determining the downlink/uplink ratio. The second one is a learning automata based mechanism which estimates the most suitable configuration of the LTE for the upcoming frames. The most suitable configuration results as the one that can handle the biggest number of subframes (payload). Thus, this mechanism can sense whether each frame needs more bandwidth or not and bandwidth allocation is achieved.

## **Keywords**

Passive Optical Networks, EPON, Hybrid Passive Optical Networks, Access Networks, Optical Fibers.

## Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	3
Πρόλογος.....	4
Περίληψη.....	5
Λέξεις Κλειδιά.....	5
Abstract.....	6
Keywords.....	6
<b>1. Εισαγωγή.....</b>	<b>9</b>
1.1 Οπτικές Ίνες στο Φυσικό Επίπεδο Δικτύων.....	10
1.2 Τύποι Οπτικών Ινών.....	11
1.3 Σηματοδότηση.....	13
1.4 Οπτικοί Δέκτες.....	14
1.5 Οπτικοί Ενισχυτές.....	14
1.6 Το Σύγχρονο Τηλεπικοινωνιακό Δίκτυο.....	14
1.7 Η Εξέλιξη του Τηλεπικοινωνιακού Δικτύου και το Πρόβλημα του Bottleneck.....	15
<b>2. Παθητικά Οπτικά Δίκτυα (PONs).....</b>	<b>17</b>
2.1 Γενικά.....	17
2.2 Δομή.....	17
2.3 Αρχιτεκτονική.....	18
2.4 Τοπολογία.....	19
2.5 Πολυπλεξία με Διαίρεση Χρόνου (Time Division Multiplexing).....	22
2.6 Πολλαπλή Πρόσβαση με Διαίρεση Χρόνου (Time Division Multiple Access).....	23
2.7 Πολυπλεξία με Διαίρεση Μήκους Κύματος (Wavelength Division Multiplexing, WDM).....	24
2.8 Πλεονεκτήματα της Χρήσης PON στο Δίκτυο Πρόσβασης.....	24
2.9 Ethernet PON (EPON).....	25
2.9.1 Εισαγωγή.....	25
2.9.2 Αρχιτεκτονική.....	26
2.9.2.1 OLT – ONU Λειτουργίες.....	27
2.9.2.2 Ροή Κίνησης EPON.....	28
2.9.2.3 Επίπεδα Ισχύος Οπτικής Δέσμης.....	31
2.9.3 Λειτουργίες MPCP.....	32
2.9.3.1 Διαδικασία Ανίχνευσης.....	32
2.9.3.2 Ανάθεση Εύρους Ζώνης.....	33
2.9.3.3 Μηχανισμός Ranging.....	34
2.9.4 10G-EPON.....	35
<b>3. Εξέλιξη των Δικτύων Κινητών Επικοινωνιών.....</b>	<b>36</b>
3.1 Συστήματα Πρώτης Γενιάς.....	38
3.2 Συστήματα Δεύτερης Γενιάς.....	39

3.3	Συστήματα Τρίτης Γενιάς.....	41
3.4	Συστήματα Τέταρτης Γενιάς.....	42
4.	<b>Δίκτυα Τέταρτης Γενιάς – 4G (LTE)</b> .....	45
4.1	Χαρακτηριστικά του LTE.....	45
4.2	Αρχιτεκτονική του LTE.....	46
4.3	Διαστρωματωμένη Αρχιτεκτονική του LTE.....	47
4.4	Ανοδικά Κανάλια του LTE.....	49
4.5	Φυσικό Επίπεδο στο LTE.....	51
4.5.1	Το Πλέγμα Πόρων για το LTE.....	51
4.5.2	Ανοδικά Σήματα Αναφοράς.....	53
4.5.3	Καθοδικά Σήματα Αναφοράς.....	55
4.5.4	Ορθογωνική Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας.....	55
4.5.5	OFDMA.....	56
4.5.6	SC-OFDMA.....	57
4.5.7	Λειτουργία TDD στο LTE.....	58
5.	<b>Υβριδικό Μοντέλο &amp; Μηχανισμοί</b> .....	60
5.1	Υβριδικό Μοντέλο & Εργαλείο Προσομοίωσης – MATLAB.....	60
5.2	Μηχανισμός Εύρεσης Κατάλληλου LTE Configuration.....	67
5.3	Μηχανισμός Αυτόματου Μάθησης για την Εκτίμηση του Καταλληλότερου Configuration για το LTE.....	69
6.	<b>Αποτίμηση – Συμπεράσματα – Μελλοντικές Επεκτάσεις</b> .....	72
6.1	Αποτίμηση.....	72
7.	<b>Συμπεράσματα – Μελλοντικές Επεκτάσεις</b> .....	81
7.1	Συμπεράσματα.....	81
7.2	Μελλοντικές Επεκτάσεις.....	81
	<b>Κατάλογος Σχημάτων</b> .....	82
	<b>Πίνακας Συντμήσεων</b> .....	85
	<b>Βιβλιογραφία</b> .....	89



## 1. Εισαγωγή

Την τελευταία δεκαετία η ζήτηση για εύρος ζώνης και δικτυακές υπηρεσίες, τόσο από τους οικιακούς χρήστες, όσο και από τους επιχειρησιακούς πελάτες, αυξάνεται διαρκώς. Σε αυτό το διάστημα τα Παθητικά Οπτικά Δίκτυα (PONs), έχουν αναδειχθεί ως μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία πρόσβασης που προσφέρει ευελιξία, δυνατότητες ευρείας κάλυψης και οικονομικώς αποδοτικό διαμοιρασμό των ακριβών οπτικών ζεύξεων, συγκριτικά με τις συμβατικές λύσεις σημείου προς σημείο [1]. Αυτά τα πλεονεκτήματα των Παθητικών Οπτικών Δικτύων έχουν πυροδοτήσει τα τελευταία χρόνια μια σημαντική εμπορική δραστηριότητα, η οποία αντικατοπτρίζεται και στις εργασίες κάποιων αρχών προτυποποίησης.

Η πρώτη σχετική πρόταση ήρθε το 1955 και δημοσιεύτηκε το 1998 από τον τομέα προτυποποίησης της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union – Telecommunication / ITU – T). Η πρόταση αυτή αφορούσε τις πρώτες συστάσεις της σειράς G.983.x, οι οποίες αναφέρονται συχνά ως πρωτόκολλο ATM-PON και είχαν συνταχθεί από την ομάδα Full Service Access Network (FSAN). Το πρωτόκολλο αυτό χρησιμοποιεί το ATM ως στρώμα μεταφοράς και επιδεικνύει ορισμένα ισχυρά χαρακτηριστικά, γεγονός που επαληθεύεται από το εύρος των υλοποιήσεων που έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι σήμερα. Ωστόσο, τα πολλά μειονεκτήματα της τεχνολογία ATM δεν την καθιστούν κατάλληλη για την υλοποίηση PONs που μεταφέρουν κυρίως κίνηση IP και αυτό έγινε αμέσως εμφανές. Έτσι, η πρόταση γρήγορα αντικαταστάθηκε από το Broadband PON (B-PON) και στη συνέχεια από το Gigabit PON (G-PON), το οποίο έχει κυρίως καθιερωθεί ως πρότυπο ITU-T G.984. Από το 2010, έχει ξεκινήσει η προτυποποίηση της επόμενης γενιάς G-PON του 10G-PON ή XG-PON [4], [5], [6].

Παράλληλα με την ITU-T, το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE) εξέδωσε το 2004 το πρότυπο 802.3ah, σαν κομμάτι του προγράμματος ‘Ethernet στο πρώτο μίλι’ (Ethernet in the First Mile – EFM), το οποίο περιγράφει το Ethernet Παθητικό Οπτικό Δίκτυο (E-PON). Όπως υποδηλώνει και το όνομά του, το δίκτυο αυτό βασίζεται στην ευρέως διαδεδομένη τεχνολογία του Ethernet.

Οι διαφορές μεταξύ των προτύπων αφορούν κυρίως τον τρόπο με τον οποίο ενθυλακώνονται τα πακέτα σε αυτά άλλων επιπέδων. Τα πρότυπα προσδιορίζουν την κωδικοποίηση, τους ρυθμούς μετάδοσης, τις μορφές και τα μεγέθη των πακέτων δεδομένων και ελέγχου και τα μηνύματα που μπορούν να ανταλλάξουν οι οπτικές μονάδες δικτύου (Optical Network Units – ONUs) με το οπτικό τερματικό γραμμής (Optical Line Terminal – OLT) και αντίστροφα. Αντίθετα, ο τρόπος με τον οποίο ανατίθεται το εύρος ζώνης για μετάδοση, δεν καθορίζεται αυστηρά. Για το λόγο αυτό, το πρόβλημα της δυναμικής ανάθεσης εύρους ζώνης (Dynamic Bandwidth Allocation – DBA) αποτελεί μια ερευνητική περιοχή με μεγάλο ενδιαφέρον.

Σε ένα EPON δίκτυο δεν γίνεται κατάτμηση και συνένωση πακέτων, συνεπώς το μέγεθος του πλαισίου μετάδοσης δεν είναι σταθερό. Το γεγονός όμως ότι σε ένα EPON το μικρότερο μέγεθος πακέτου που υποστηρίζεται είναι 64 bytes (ελάχιστο πλαίσιο Ethernet), προσδίδει μεγάλη επιβάρυνση στα μηνύματα ελέγχου. Το βασικό πλεονέκτημα των EPON, είναι η συμβατότητα με υπάρχοντα εξοπλισμό Ethernet.

## 1.1 Οπτικές Ύνες στο Φυσικό Επίπεδο Δικτύων

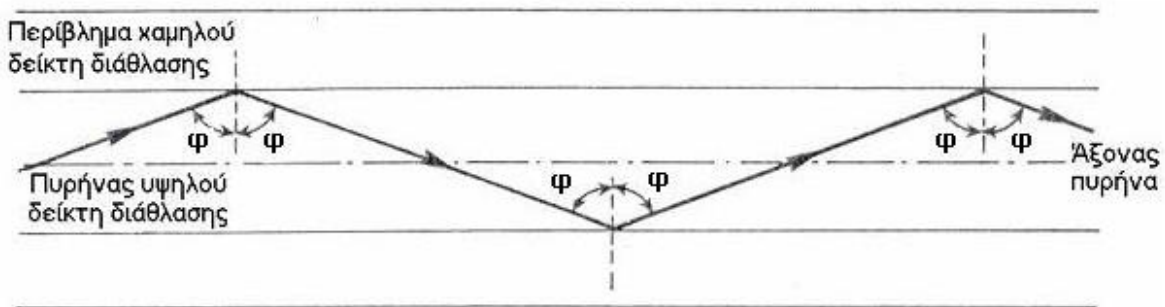
Οι οπτικές ίνες αφορούν το πρώτο επίπεδο του δικτυακού μοντέλου OSI. Με βάση την εξέλιξη των τεχνολογιών του φυσικού επιπέδου, είναι δυνατή η κατηγοριοποίηση των δικτύων σε τρεις γενιές [2]:

**A.** Δίκτυα τα οποία χρησιμοποιούν καλώδια χαλκού ή τεχνολογίες μικροκυμάτων (π.χ. Ethernet, Δορυφόροι, κλπ)

**B.** Δίκτυα που χρησιμοποιούν συνδυασμό καλωδίων χαλκού και οπτικών ινών. Χαρακτηριστικό τους είναι ότι οι λειτουργίες δρομολόγησης γίνονται σε ηλεκτρονική μορφή και η μεταφορά των δεδομένων με τη χρήση οπτικών σημάτων.

**Γ.** Τέλος, έχουμε τα δίκτυα τρίτης γενιάς, που χρησιμοποιούνται οπτικές ίνες, ενώ οι λειτουργίες δρομολόγησης και μεταφοράς δεδομένων γίνονται με βάση την οπτική τεχνολογία, χωρίς καμία ενδιάμεση μετατροπή των σημάτων σε ηλεκτρονική μορφή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μεγάλη αύξηση του παραγόμενου εύρους ζώνης.

Ένα οπτικό σύστημα μετάδοσης έχει τρία στοιχεία: την πηγή φωτός, το μέσο μετάδοσης και τον ανιχνευτή. Συμβατικά, ένας παλμός φωτός στο bit 1, ενώ η απουσία φωτός στο bit 0. Το μέσο μετάδοσης είναι μια εξαιρετικά λεπτή ίνα γυαλιού. Ο ανιχνευτής δημιουργεί ένα ηλεκτρικό παλμό, όταν πέφτει πάνω του φως. Συνδέοντας μια πηγή φωτός στο ένα άκρο οπτικής ίνας και έναν ανιχνευτή στο άλλο, έχουμε ένα μονοκατευθυντικό σύστημα μετάδοσης, που δέχεται ένα ηλεκτρικό σήμα, το μετατρέπει σε παλμούς φωτός και το μεταδίδει, ενώ στο τέλος το μετατρέπει σε ηλεκτρικό σήμα στη λήψη.



Σχήμα 1. Εκπομπή Δέσμης Φωτός Διαμέσου Οπτικής Ύνας

Τα οπτικά σήματα εσωτερικά ανακλώμενα, μπορούν να ταξιδέψουν μεγάλες αποστάσεις, αφού ισχύει η εξής αρχή: «Όταν μια ακτίνα φωτός περνά από το ένα μέσα σε άλλο, π.χ. γυαλί σε αέρα, η ακτίνα διαθλάται στη διαχωριστική επιφάνεια γυαλιού/αέρα», όπως φαίνεται στο Σχήμα 1. Η ποσότητα διάθλασης εξαρτάται από

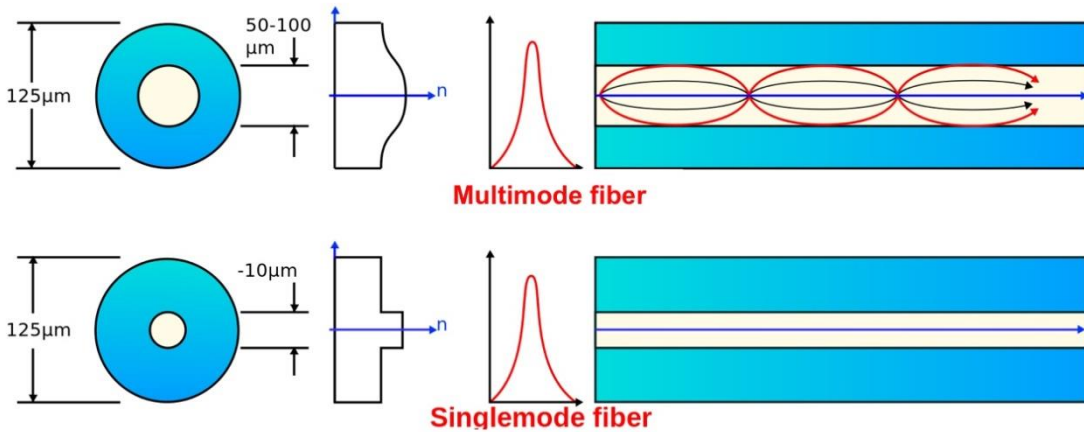
τις ιδιότητες των δύο μέσων. Για γωνίες πρόσπτωσης μεγαλύτερες από μια συγκεκριμένη κρίσιμη τιμή, το φως διαθλάται πίσω στο γυαλί και δεν διαφεύγει στον αέρα. Συνεπώς, παγιδεύεται εντός της ίνας. Με αυτό τον τρόπο, η ακτίνα μπορεί να διαδοθεί για πολλά χιλιόμετρα, με σχεδόν μηδενική απώλεια. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα να διαδίδονται πολλές διαφορετικές ακτίνες, αρκεί να στέλνονται με διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης και η γωνία αυτή να είναι μεγαλύτερη της κρίσιμης. Μια οπτική ίνα αποτελείται από μια δέσμη γυάλινων νημάτων (fibers), κάθε μια από τις οποίες είναι ικανή να μεταδίδει μηνύματα διαμορφωμένα σε κύματα φωτός. Οι οπτικές ίνες έχουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα παραδοσιακά τηλεπικοινωνιακά μέσα, όπως είναι το μεγαλύτερο εύρος ζώνης (bandwidth) και κατά συνέπεια να μπορούν να μεταφέρουν περισσότερες πληροφορίες. Επηρεάζονται λιγότερο από παρεμβολές συγκριτικά με τα μεταλλικά καλώδια, είναι πιο λεπτές και πιο ελαφρές και μπορούν να μεταδώσουν δεδομένα σε ψηφιακή αντί για αναλογική μορφή.

Οι οπτικές ίνες έχουν στο κέντρο τους τον πυρήνα, μέσω του οποίου μεταδίδεται το οπτικό σήμα. Ο πυρήνας εγκλωβίζει τις ακτίνες φωτός και τις οδηγεί στο τέρμα. Τα κύματα μεταφέρονται από τον πυρήνα της οπτικής ίνας. Όσο πιο στενός είναι ο πυρήνας, τόσο πιο γρήγορα μεταφέρεται το κύμα φωτός. Ο οπτικός πυρήνας περιβάλλεται από στρώμα γυάλινης επικάλυψης (cladding), η οποία περιβάλλει την οπτική ίνα, κρατάει το φως στον πυρήνα, εμποδίζοντας το σήμα να διασκορπιστεί και να χάσει την ισχύ του. Η επικάλυψη με τη σειρά της περιβάλλεται από το εξωτερικό προστατευτικό υλικό, το οποίο προστατεύει την ίνα από τους περιβαλλοντολογικούς κινδύνους.

Η δέσμη φωτός εκπέμπεται στον πυρήνα της οπτικής ίνας και προσπίπτει με τέτοια γωνία στην επικάλυψη, ώστε να υπάρχει ολική ανάκλαση και να μεταδίδεται σε όλο το μήκος της ίνας, η οποία εγκλωβίζει όλη την ενέργεια της ακτίνας φωτός.

## 1.2 Τύποι Οπτικών Ίνών

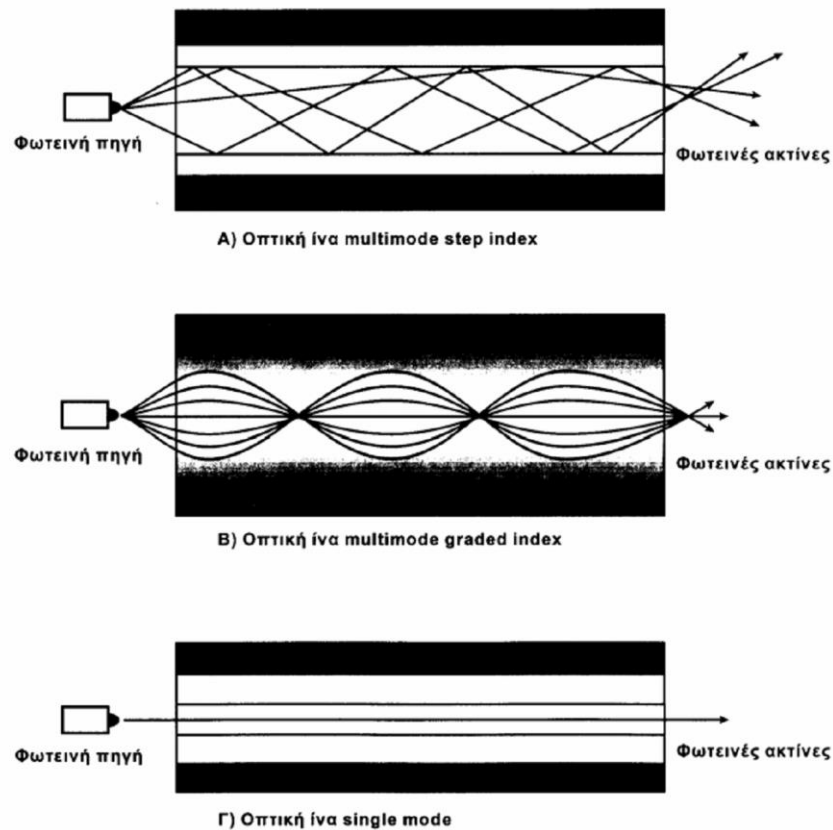
Υπάρχουν πολλές γωνίες με τις οποίες το φως μπορεί να εισέλθει σε μια οπτική ίνα και να δημιουργήσει διαφορετικές γωνίες προσβολής της επικάλυψης, οι οποίες αναφέρονται και ως τρόποι (modes).



Σχήμα 2. Οπτικές Ίνες [33]

Ο αριθμός των τρόπων (modes) αυξάνει παράλληλα με την αύξηση της διαμέτρου του πυρήνα. Οι μονότροπες (single-mode) οπτικές ίνες έχουν συνήθως διάμετρο πυρήνα περίπου 10 $\mu\text{m}$ , ενώ οι πολύτροπες 50-100 $\mu\text{m}$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 2. Οι μονότροπες ίνες, σε αντίθεση τις πολύτροπες δεν διαχέουν τη δέσμη φωτός, αλλά απαιτούν συγκέντρωση φωτός μεγάλης έντασης σε πυρήνα μικρής διαμέτρου, γεγονός που απαιτεί τη χρήση Laser. Η διάμετρος, δηλαδή, του πυρήνα, να είναι στο επίπεδο του μήκους κύματος του εκπεμπόμενου οπτικού σήματος. Αναφέρεται και σαν ομοαξονική μετάδοση.

Επιπλέον, για τις πολύτροπες ίνες υπάρχει ένας επιπλέον διαχωρισμός ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής τους και πιο συγκεκριμένα με το αν η μεταβολή του δείκτη διάθλασης, μεταξύ του πυρήνα και της επικάλυψης είναι απότομη (step index) ή είναι βαθμιαία όσο απομακρυνόμαστε από το κέντρο του πυρήνα της ίνας (graded index). Οι τρόποι διάδοσης του οπτικού σήματος σε κάθε μια από τις παρακάτω περιπτώσεις φαίνονται στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3. Τύποι Οπτικών Ινών

### 1.3 Σηματοδοσία

Για τη δημιουργία της φωτεινής δέσμης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν δυο είδη πηγών, οι Δίοδοι Εκπομπής Φωτός LED (Light Emitting Diodes) και τα Laser ημιαγωγών. Οι Δίοδοι Εκπομπής Φωτός LED παράγουν δεδομένα με χαμηλό ρυθμό και χρησιμοποιούνται για μετάδοση δεδομένων σε μικρές αποστάσεις. Αποτελούν σχετικά αργές συσκευές, κατάλληλες για εφαρμογές με ταχύτητες χαμηλότερες από 1Gbps, ενώ εμφανίζουν ένα σχετικά ευρύ πλάτος φάσματος. Οι διατάξεις αυτές χρησιμοποιούνται συνήθως σε επικοινωνιακές εφαρμογές πολύτροπων οπτικών ινών. Ωστόσο, παρουσιάζουν κάποια πλεονεκτήματα, όπως η μεγάλη διάρκεια ζωής, η μικρή ευαισθησία σε μεταβολές της θερμοκρασίας και το χαμηλό κόστος [2].

Από την άλλη πλευρά, οι συσκευές Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), παράγουν δέσμες φωτονίων μέσω της διέγερσης με ηλεκτρικό ρεύμα ιονισμένων υλικών. Οι δέσμες φωτονίων ενισχύονται με σύστημα καθρεπτών και στη συνέχεια εξέρχονται με τη μορφή εξαιρετικά εστιασμένων ακτίνων. Τα Laser μπορούν να συντονιστούν, όσο αφορά το μήκος κύματός τους, με χρήση μεθόδων συντονισμού, όπως ο μηχανικός συντονισμός, ο ακουστοπτικός, ο ηλεκτροπτικός και ο injection-current-based. Τα μηχανικά συντονιζόμενα Laser, μπορούν να συντονιστούν σε όλο το ωφέλιμο φάσμα, της τάξεως των 100nm, αλλά ο χρόνος εναλλαγής καναλιών είναι της τάξης των msec, λόγω των μηχανικών

στοιχείων, μέσω των οποίων γίνεται ο συντονισμός. Τα ακουστοοπτικά Laser, συνδυάζουν μέσο εύρος και μέσο χρόνο συντονισμού, της τάξεως των 10μsec. Οι μικρότεροι χρόνοι εναλλαγής καναλιών μπορούν να επιτευχθούν με τη χρήση Laser ημιαγωγών, όπως τα Distributed-Feedback Laser (DFB) και Distributed-Bragg-Reflector (DBR) που έχουν χρόνο συντονισμού μικρότερο των 10nsec, αλλά έχουν περιορισμένο εύρος μήκους κύματος, της τάξεως μερικών καναλιών. Διαθέτουν χαρακτηριστικά και απόδοση που τους καθιστά καταλληλότερους για εφαρμογές μονότροπης ίνας.

### 1.4 Οπτικοί Δέκτες

Το άκρο λήψης μιας οπτικής ίνας αποτελείται από μια φωτοδίοδο, η οποία με κατάλληλους καθρέπτες, δέχεται τη δέσμη φωτός από την οπτική ίνα και συντονίζονται σε συγκεκριμένο μήκος κύματος, ανάλογα με την απόσταση των καθρεπτών μεταξύ τους. Οι οπτικοί δέκτες μπορεί να είναι παθητικοί (passive), ενεργοί (active) και διόδου Laser (Laser-diode-amplifier-based). Το πλεονέκτημα των παθητικών δεκτών, είναι ότι μπορούν να πετύχουν υψηλή ανάλυση. Το μειονέκτημα, είναι οι σημαντικές απώλειες και ο μεγάλος χρόνος συντονισμού, της τάξεως των msec, καθώς στην κατασκευή τους περιλαμβάνουν μηχανικά στοιχεία. Οι ενεργοί και οι διόδου Laser δέκτες, μπορούν να συντονιστούν με μεγαλύτερες ταχύτητες, της τάξεως των nsec, έχοντας όμως μικρότερη ανάλυση με αποτέλεσμα να μπορούν να συντονιστούν σε λιγότερα κανάλια [2].

### 1.5 Οπτικοί Ενισχυτές

Με τους εκπομπούς (Laser) και τους δέκτες (Filters), οι οπτικοί ενισχυτές (optical amplifiers), είναι από τα βασικά στοιχεία στη σχεδίαση οπτικών δικτύων. Οι οπτικοί ενισχυτές παρέχουν το μέσο στα οπτικά σήματα, ώστε να αναγεννιόνται χωρίς την ανάγκη χρήσης οπτικό-ηλεκτρικών μεταλλακτών. Οι ενισχυτές τύπου Erbium-Doped (Erbium-Doped Fiber Amplifiers (EDFA)) που λειτουργούν σε οπτικό μήκος κύματος 1.5μm, χρησιμοποιούνται στο πεδίο των επικοινωνιών μεγάλων αποστάσεων και είναι από τις πλέον αξιόπιστες λύσεις [2].

### 1.6 Το Σύγχρονο Τηλεπικοινωνιακό Δίκτυο

Ο βασικός τρόπος διαχωρισμού του τηλεπικοινωνιακού δικτύου σε επί μέρους δίκτυα, αποτελείται από τα δίκτυα κορμού, τα μητροπολιτικά δίκτυα και τα δίκτυα πρόσβασης.

Το δίκτυο κορμού (core network), εύκολα συμπεραίνεται από την ονομασία του ότι αποτελεί τον κορμό του τηλεπικοινωνιακού δικτύου. Μέσω αυτού, είναι δυνατή η επικοινωνία ανάμεσα σε μικρότερα δίκτυα (sub-networks). Συνήθως, το δίκτυο κορμού αναπτύσσεται ως τα σύνορα της κάθε χώρας και έχει τοπολογία βρόχου (mesh topology). Αυτό σημαίνει ότι κάθε κόμβος επικοινωνεί με οποιονδήποτε άλλο κόμβο με αποκλειστικό δίκτυο σημείο προς σημείο (point to point). Μέσω του δικτύου κορμού, είναι δυνατή η επικοινωνία ανάμεσα στα δίκτυα διαφορετικών

πόλεων, καθώς επίσης και διαφορετικών χωρών. Συνήθως, ο κάθε τηλεπικοινωνιακός πάροχος διαθέτει το δικό του δίκτυο κορμού, το οποίο όμως, διασυνδέεται και με τα δίκτυα κορμού άλλων παρόχων. Όπως είναι φυσικό, ο όγκος των δεδομένων που μετακινούνται μέσω τέτοιων δικτύων είναι τεράστιος. Για το λόγο αυτό και η χωρητικότητα των καλωδίων τους είναι αντιστοίχως μεγάλη. Οι συσκευές που συναντώνται στους κόμβους του δικτύου κορμού, είναι συνήθως, μεταγωγείς (switches) και δρομολογητές (routers).

Τα μητροπολιτικά δίκτυα (metropolitan networks) αναπτύσσονται κυρίως σε πόλεις ή μικρότερα αυτόνομα συγκροτήματα κτιρίων, όπως για παράδειγμα σε πανεπιστήμια ή εγκαταστάσεις εταιρειών. Είναι και αυτά μια μικρογραφία των δικτύων κορμού. Τα καλώδια που αποτελούν ένα μητροπολιτικό δίκτυο, είναι και αυτά μεγάλης χωρητικότητας, όπως αυτά των δικτύων κορμού.

Στον αντίποδα, βρίσκεται το δίκτυο πρόσβασης (access network), που χρησιμοποιείται για τη σύνδεση των τερματικών χρηστών με τους κόμβους πρόσβασης. Είναι το τελευταίο κομμάτι του τηλεπικοινωνιακού δικτύου, αυτό που συνήθως ονομάζεται last-mile. Ξεκινά από τον τοπικό κόμβο πρόσβασης και φτάνει μέχρι τις εγκαταστάσεις του κάθε πελάτη. Από εκεί ξεκινούν και εκεί καταλήγουν τα δεδομένα που διατρέχουν ολόκληρο το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο. Είναι ένα δίκτυο συνεχώς εξελισσόμενο, αφού με το πέρασμα των χρόνων αυξάνονται τόσο οι πελάτες που εξυπηρετεί, όσο και οι υπηρεσίες που προσφέρει.

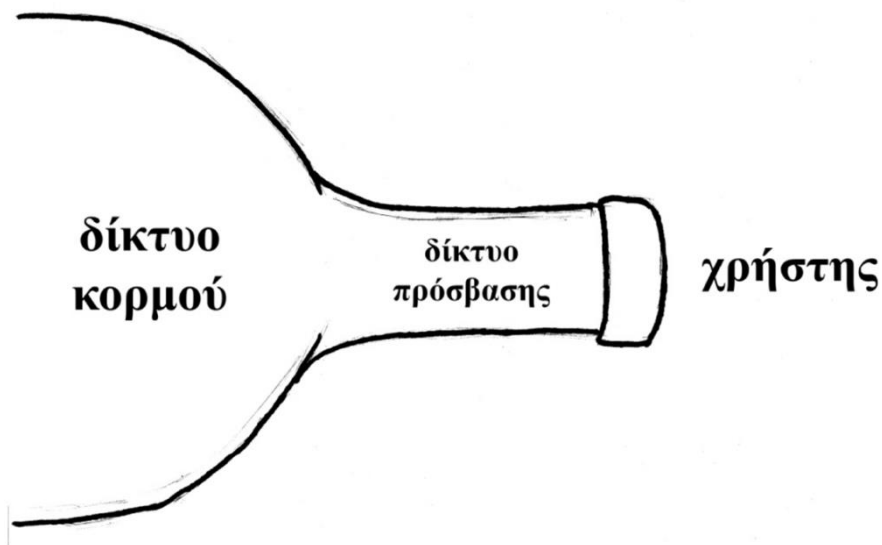
### **1.7 Η Εξέλιξη του Τηλεπικοινωνιακού Δικτύου και το Πρόβλημα της Συμφόρησης**

Τα δίκτυα κορμού και τα μητροπολιτικά δίκτυα, από τα πρώτα χρόνια ανάπτυξής τους, εξοπλίζονταν με καλώδια μεγάλης χωρητικότητας και αντοχής στις κάθε είδους παρεμβολές και εξασθενίσεις, διότι εξ' ορισμού είναι δίκτυα που διαχειρίζονται μεγάλο φόρτο δεδομένων, σε μεγάλες αποστάσεις και με τις μέγιστες δυνατές ταχύτητες. Για τον λόγο αυτό αποτέλεσαν και τα πρώτα στρώματα του δικτύου που αναβαθμίστηκαν, ώστε να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις της σύγχρονης εποχής. Η ανάγκη για μετάδοση δεδομένων με υψηλό ρυθμό και σε μεγάλες αποστάσεις, έρχιζε υποχρεωτική την χρήση οπτικών ινών για την υποστήριξη των δικτύων αυτών. Τα καλώδια οπτικών ινών ζυγίζουν λιγότερο από αυτά του χαλκού και η διάμετρος τους είναι πολύ μικρότερη. Σε σύγκριση με τα καλώδια χαλκού, μπορούν να μεταφέρουν ένα σήμα με πολύ μεγαλύτερη ταχύτητα και σε μεγαλύτερες αποστάσεις, χωρίς να παρουσιάζεται σημαντική μείωση στην ισχύ του. Δεν επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές ή παρεμβολές ραδιοσυχνοτήτων, ενώ παράλληλα απαιτούν και λιγότερη ενέργεια για τη διάδοση του σήματος.

Ενώ λοιπόν, η χρήση οπτικής ίνας αποτελεί ιδανική λύση για το δίκτυο κορμού και τα μητροπολιτικά δίκτυα, στα δίκτυα πρόσβασης η ένα προς ένα αντικατάσταση των καλωδίων χαλκού με οπτικές ίνες από τον τοπικό κόμβο πρόσβασης μέχρι τον τερματισμό είναι μια πολύ δύσκολη και δαπανηρή διαδικασία. Τα δίκτυα πρόσβασης, αποτελούν τον τελευταίο κρίκο της αλυσίδας που συνδέει τη δικτυακή υποδομή του παρόχου με τις εγκαταστάσεις του χρήστη. Αυτό μεταφράζεται σε μεγάλο αριθμό τερματικών στοιχείων. Οπότε, θα απαιτούνταν πολλαπλάσιοι αριθμοί οπτικών πομποδεκτών σε σχέση με αυτούς που χρησιμοποιούνται στα μητροπολιτικά δίκτυα

και στα δίκτυα κορμού. Αυτό μεταφράζεται σε αυξημένο κόστος για την τοποθέτηση και συντήρηση των στοιχείων αυτών, ενώ απαιτείται και περισσότερο χώρος για να φιλοξενηθεί ο αναγκαίος εξοπλισμός, τόσο στον τοπικό κόμβο πρόσβασης (κέντρο σύνδεση – central office), όσο και στις εγκαταστάσεις των πελατών. Για τον λόγο αυτό οι υπάρχουσες υποδομές του τηλεφωνικού δικτύου με τα καλώδια χαλκού προτιμήθηκαν για τα δίκτυα πρόσβασης για πολλά χρόνια.

Η παραπάνω διαφοροποίηση ανάμεσα στη δομή του δικτύου κορμού και του δικτύου πρόσβασης, είναι η αιτία του προβλήματος της συμφόρησης κίνησης στο σημείο της διεπαφής των δύο δικτύων, γνωστό με το χαρακτηρισμό access network bottleneck.



**Σχήμα 4. Το πρόβλημα της Συμφόρησης**

Το δίκτυο πρόσβασης αδυνατεί να ανταποκριθεί βέλτιστα στον φόρτο που του μεταβιβάζεται από το δίκτυο κορμού και αυτό, γιατί η χρήση καλωδίων χαλκού περιορίζει σημαντικά τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων κατά μήκος του δικτύου (4kHz ανά κατεύθυνση μετάδοσης), καθώς και την απόσταση του κέντρου σύνδεσης με τα τερματικά στοιχεία. Παράλληλα απαιτείται και η τοποθέτηση ειδικού εξοπλισμού στις εγκαταστάσεις του πελάτη, ώστε να ελέγχει τον όγκο δεδομένων που μεταδίδονται και να αποφεύγεται η υπερφόρτωση του δικτύου. Για να ξεπεραστούν τα προβλήματα της μειωμένης ταχύτητας, αλλά και της περιορισμένης απόστασης από το κέντρο σύνδεση, η αναζήτηση νέων τεχνικών αναβάθμισης και ανάπτυξης του δικτύου πρόσβασης αποτελούσε μονόδρομο για τις εταιρείες παροχής τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών (ISPs). Έπρεπε να βρεθεί τρόπος να αξιοποιηθούν τα προτερήματα των καλωδίων οπτικών ινών με όσο το δυνατό μικρότερο κόστος.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος του χαμηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων στα δίκτυα πρόσβασης, τις τελευταίες δεκαετίες, έχουν προταθεί και εφαρμοστεί αρκετές και διαφορετικές υλοποιήσεις οπτικών δικτύων πρόσβασης (Optical Access Networks, OAN) που σκοπό έχουν να περιορίσουν το κόστος κατασκευής και συντήρησης και παράλληλα να είναι και εύκολα αναβαθμίσιμες.



## 2. Παθητικά Οπτικά Δίκτυα (PONs)

### 2.1 Γενικά

Τα παθητικά οπτικά δίκτυα (PONs), είναι δίκτυα οπτικών ινών σημείου προς πολλαπλά σημεία (point to multipoint), τα οποία δε περιλαμβάνουν ενεργά στοιχεία. Δεν υπάρχει, δηλαδή, μετατροπή του σήματος από οπτικό σε ηλεκτρικό, κατά μήκος του δικτύου. Έτσι λοιπόν, τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον είναι παθητικοί διαιρέτες (passive splitters), παθητικοί ζεύκτες (passive couplers) και παθητικοί συνδυαστές (passive combiners).

Η χρήση των PONs στα δίκτυα πρόσβασης αποτελεί στις μέρες μας μονόδρομο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ικανοποιούν αποτελεσματικά την ανάγκη των σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών δικτύων για το αυξημένο εύρος ζώνης σε μεγάλες αποστάσεις, ενώ παράλληλα μειώνουν σε μεγάλο βαθμό και το κόστος ανάπτυξης, λειτουργίας και συντήρησης του δικτύου πρόσβασης.

### 2.2 Δομή

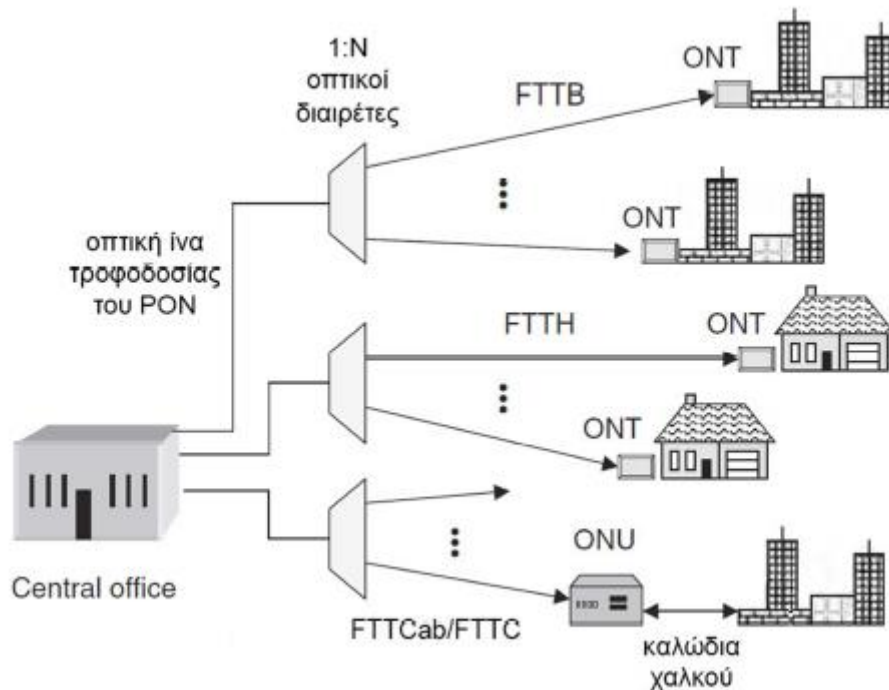
Η δομή ενός παθητικού οπτικού δικτύου ξεκινά από τον Οπτική Γραμμή Τερματισμού (Optical Line Terminal, OLT). Η OLT συναντάται στο κέντρο σύνδεσης του τηλεπικοινωνιακού παρόχου και διαχειρίζεται και τα δυο ρεύματα κίνησης κατά μήκος του Οπτικού Δικτύου Διανομής (Optical Distribution Network, ODN), σε αποστάσεις μέχρι και 20km. Για το ρεύμα καθόδου η λειτουργία του OLT, συνίσταται στο να υποδέχεται κίνηση φωνής, δεδομένων και video από το δίκτυο κορμού, ή το μητροπολιτικό δίκτυο και να την οδηγεί σε όλες τις Οπτικές Μονάδες Δικτύου (Optical Network Units, ONUs) ή τους Οπτικούς Τερματιστές Δικτύου (Optical Network Terminals, ONTs) του ODN. Αντίστοιχα και για το ρεύμα ανόδου, ο OLT υποδέχεται πολλαπλούς τύπους φωνής, δεδομένων και video από τους χρήστες του δικτύου και τους οδηγεί στους προορισμούς τους. Η κάθε OLT, είναι σχεδιασμένος έτσι ώστε να διαχειρίζεται την κίνηση σε πολλά PONs ταυτοχρόνως.

Η Οπτική Μονάδα Δικτύου (Optical Network Unit, ONU) συναντάται συνήθως στο πεζοδρόμιο (Fiber to the Curb, FTTC). Για το λόγο αυτό, ο εξοπλισμός που περιέχει μέσα της θα πρέπει να μην είναι ευάλωτος σε μεγάλες μεταβολές θερμοκρασίας. Παράλληλα, το κέλυφος της ONU, θα πρέπει να έχει αντοχή απέναντι σε τυχόν βανδαλισμούς και να μην επιτρέπει την εισχώρηση του νερού της βροχής. Επιπρόσθετα, θα πρέπει να υπάρχει παροχή ηλεκτρικής ισχύος για την ONU, μαζί με εφεδρικές μπαταρίες για περιπτώσεις διακοπής της παροχής.

Ο Οπτικός Τερματιστής Δικτύου (Optical Network Terminal, ONT), βρίσκεται στις εγκαταστάσεις του πελάτη (Fiber to the Home, FTTH – Fiber to the Building, FTTB) και του παρέχει υπηρεσίες φωνής, δεδομένων και βίντεο. Πιο συγκεκριμένα, η λειτουργία του αφορά στην παροχή μιας οπτικής σύνδεσης με το PON, από την σκοπιά της ροής ανόδου, με την μετατροπή των ηλεκτρικών σημάτων σε οπτικά. Αντίστοιχα και για τη ροή καθόδου, γίνεται η παραπάνω μετατροπή. Σε συνδυασμό με το OLT, ο ONT επιτρέπει τη δυναμική ανάθεση εύρους ζώνης (dynamic bandwidth allocation) με σκοπό την όσο το δυνατόν πιο αρμονική και αποδοτική

μετάδοση της κίνησης που καταφθάνει σε αυτόν από τους χρήστες του δικτύου. Το μέγεθος του ONT ποικίλει ανάλογα με το αν εξυπηρετεί μόνο μια οικία ή πολύ μεγαλύτερα συγκροτήματα κτιρίων.

Στη διαδρομή από το OLT μέχρι τις ONUs και τους ONTs, παρεμβάλλονται διαιρέτες και συνδυαστές για το διαχωρισμό του οπτικού σήματος σε περισσότερα ή τον συνδυασμό πολλών σημάτων σε ένα, αντίστοιχα.



Σχήμα 5. Η Αρχιτεκτονική του Παθητικού Οπτικού Δικτύου

## 2.3 Αρχιτεκτονική

Στην υλοποίηση FTTC, η οπτική ίνα φτάνει μέχρι 300m από τον πελάτη, που συνήθως τοποθετείται μια καμπίνα (ONU) και στη συνέχεια η πληροφορία μεταφέρεται μέσω του δικτύου χαλκού στο τερματικό του δικτύου. Σε μια τέτοια περίπτωση χρησιμοποιούνται δυο οπτικοί πομποδέκτες. Παρόλο που μειώνεται κατά πολύ η απόσταση που πρέπει να διανύσει η πληροφορία μέσω καλωδίων χαλκού, δεν παύει να υπάρχει η απώλεια ταχύτητας για τη διαδρομή από την καμπίνα προς τις εγκαταστάσεις του πελάτη. Να σημειωθεί, ότι σε αυτό τον τύπο αρχιτεκτονικής, απαιτείται μέσα στον περιορισμένο χώρο της καμπίνας, που συνήθως βρίσκεται στο πεζοδρόμιο, να τοποθετηθεί πολύπλοκος μετατροπέας για τη μετάβαση από το οπτικό δίκτυο στο δίκτυο χαλκού (μετατροπή οπτικού σήματος σε ηλεκτρικό). Η λύση του FTTC, μπορεί να έχει ως μειονέκτημα την απώλεια ταχύτητας μέχρι να φτάσει η πληροφορία στον συνδρομητή, αλλά υπερέρχει στο γεγονός ότι το κόστος υλοποίησής

της, είναι σχετικά μικρό, αφού το κόστος της αγοράς, τοποθέτησης και λειτουργίας της καμπίνας μοιράζεται στο μεγάλο αριθμό χρηστών που εξυπηρετεί.

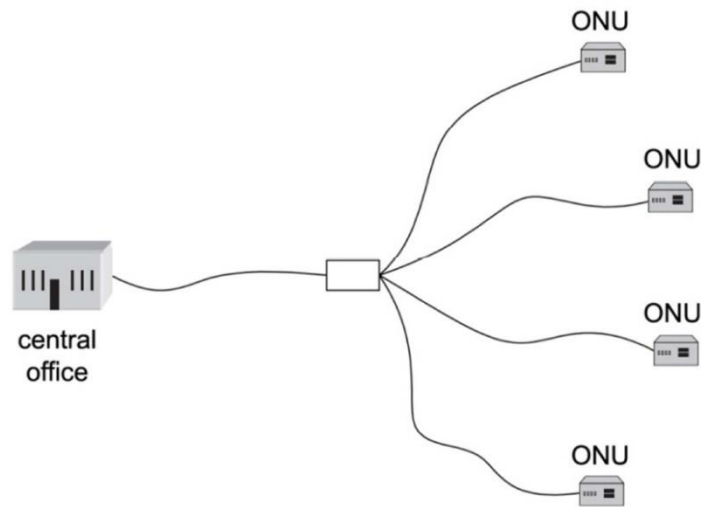
Στην υλοποίηση FTTP (Fiber to the Premises), δίνεται η δυνατότητα ανάπτυξης δικτύου μόνο με οπτικές ίνες, οι οποίες φτάνουν μέχρι τις εγκαταστάσεις του πελάτη. Συνήθως, αυτή η υλοποίηση εφαρμόζεται με δυο τρόπους. Ο πρώτος, είναι η Οπτική Ίνα στο Σπίτι (Fiber to the Home – FTTH). Εδώ η οπτική ίνα φτάνει στο χώρο διαμονής τους πελάτη, χωρίς να χρησιμοποιεί καθόλου καλώδια χαλκού. Ο δεύτερος, είναι η Οπτική Ίνα στο Κτίριο (Fiber to the Building – FTTB). Σε αυτή την περίπτωση η οπτική ίνα φτάνει μέχρι το κτίριο που στεγάζονται πολλές οικίες ή επιχειρήσεις. Από εκεί μέσω ιδιόκτητου δικτύου απλώνεται σε όλους τους χώρους του κτιρίου. Στην υλοποίηση FTTP, χρειάζεται ένα ζευγάρι οπτικών ινών (όταν η υλοποίηση περιλαμβάνει μια οπτική ίνα για κάθε ρεύμα κίνησης) για κάθε οικία (FTTH) ή κτίριο (FTTB). Απαιτούνται  $2N$  οπτικοί πομποδέκτες, όπου  $N$  ο αριθμός των τερματισμών της οπτικής ίνας. Είναι λοιπόν, μια υλοποίηση πολύπλοκη και ακριβή ως προς τη συντήρηση. Μια λύση σε αυτή την περίπτωση, που βελτιώνει το δίκτυο, αποτελεί η χρησιμοποίηση μιας οπτικής ίνας (για μεταφορά σημάτων και από τα δυο ρεύματα κίνησης) από το κέντρο σύνδεσης μέχρι το πεζοδρόμιο, στην καμπίνα του παρόχου. Από εκεί αποχωρούν οπτικές ίνες προς το κτίριο του καταναλωτή. Σε αυτή τη περίπτωση, απαιτούνται  $2N + 2$  οπτικοί πομποδέκτες, όμως το πλεονέκτημα είναι ότι υπάρχει περισσότερος χώρος μέσα στο κέντρο σύνδεσης και παράλληλα, απαιτούνται λιγότερα μέτρα οπτικής ίνας [2].

## 2.4 Τοπολογία

Παρατηρώντας ένα δίκτυο PON με φορά αυτή της ροής καθόδου, παρατηρείται ένα δίκτυο σημείου προς πολλαπλά σημεία (point to multipoint). Παρόμοια, για τη ροή ανόδου, παρατηρείται ένα δίκτυο πολλαπλών σημείων προς σημείο (multipoint to point). Τα σημεία που το σήμα διαχωρίζεται προς πολλαπλές κατευθύνσεις, ή αντίστροφα, αποτελούν τους απομακρυσμένους κόμβους του δικτύου.

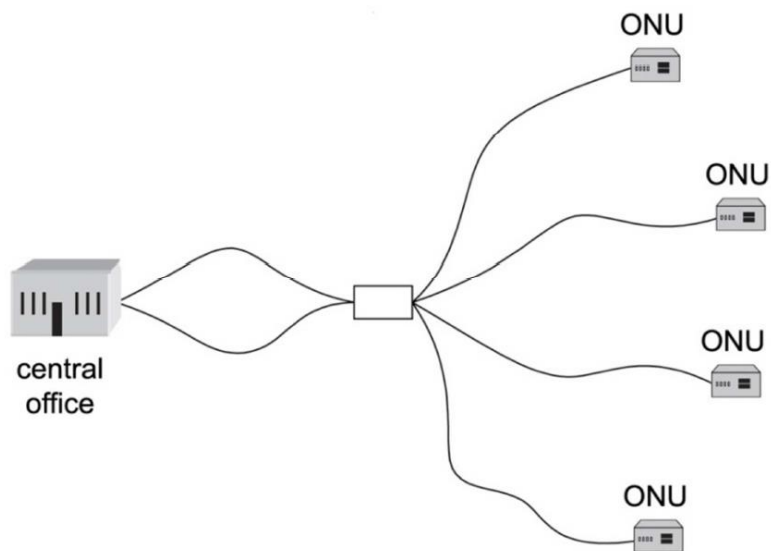
Υπάρχουν πολλές τοπολογίες point to multipoint κατάλληλες για ένα δίκτυο πρόσβασης. Ίσως, οι πιο διαδεδομένες τοπολογίες είναι η τοπολογία δέντρου, δέντρου με πλεονάζων κορμό, δακτυλίου και διαύλου [2].

Η τοπολογία δέντρου, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6, συνδυάζει τα χαρακτηριστικά των γραμμικών τοπολογιών διαύλου και αστέρα. Αποτελείται από ομάδες διαμορφωμένων τερματικών σταθμών που συνδέονται με ένα γραμμικό βασικό καλώδιο διαύλου. Αυτές οι τοπολογίες, μπορούν επίσης να αναμιχθούν.



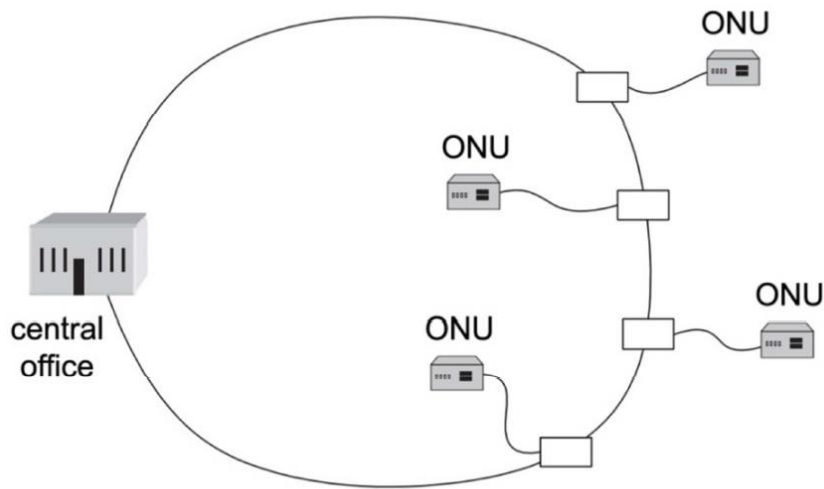
**Σχήμα 6. Τοπολογία Δέντρου**

Η τοπολογία δέντρου με πλεονάζων κορμό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7, είναι μια ειδική περίπτωση τοπολογία δέντρου, με τη διαφορά ότι αν υπάρξει πρόβλημα σε ένα από τους δύο πλεονάζοντες κορμούς, τότε η επικοινωνία θα μπορεί να επιτευχθεί μέσω του ενός. Αντίθετα, αν υπάρξει πρόβλημα και στους δύο κορμούς, δεν θα είναι δυνατή η οποιαδήποτε επικοινωνία.



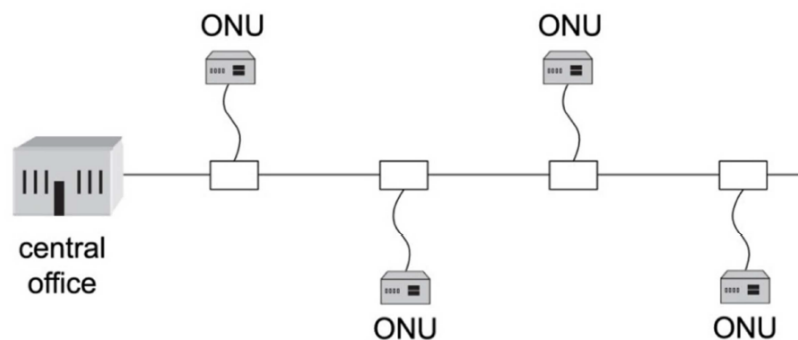
**Σχήμα 7. Τοπολογία Δέντρου με Πλεονάζων Κορμό**

Στην τοπολογία δακτυλίου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8, όλες οι συσκευές συνδέονται με μορφή ενός κλειστού βρόχου, έτσι ώστε κάθε συσκευή να συνδέεται άμεσα με δύο άλλες συσκευές, μια από κάθε πλευρά. Οι τοπολογίες δακτυλίων είναι σχετικά ακριβές και δύσκολες ως προς την εγκατάσταση, αλλά προσφέρουν υψηλό εύρος ζώνης και μπορούν να εκταθούν σε μεγάλες αποστάσεις.



**Σχήμα 8. Τοπολογία Δακτυλίου**

Στην τοπολογία διαύλου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 9, όλες οι συσκευές συνδέονται με ένα κεντρικό καλώδιο, το οποίο αποκαλείται δίαυλος ή σπονδυλική στήλη. Τα δίκτυα διαύλου είναι σχετικά ανέξοδα και εύκολα ως προς την εγκατάσταση για τα μικρά δίκτυα.

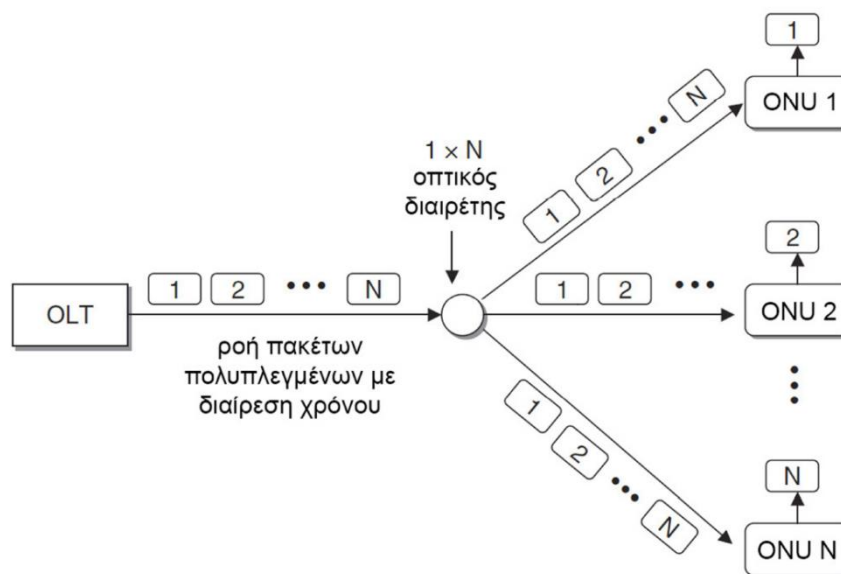


**Σχήμα 9. Τοπολογία Διαύλου**

Να σημειωθεί πως στα παθητικά οπτικά δίκτυα η τοπολογία που προτιμάται κατά κόρον είναι αυτή του δέντρου.

## 2.5 Πολυπλεξία με Διάρθρωση Χρόνου (Time Division Multiplexing)

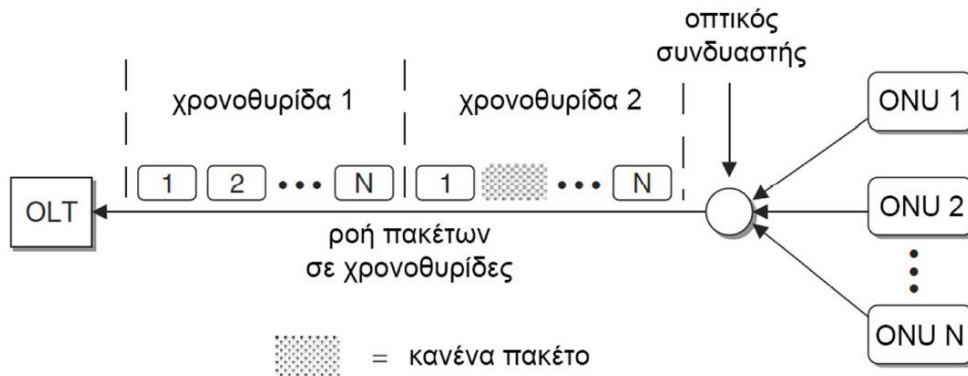
Ένα από τα δομικά χαρακτηριστικά των παθητικών οπτικών δικτύων είναι αυτό της πολυπλεξίας διαίρεσης χρόνου (Time Division Multiplexing, TDM). Τα PONs που χρησιμοποιούν αυτή τη μέθοδο πολυπλεξίας στο ρεύμα καθόδου αναφέρονται ως TDM-PONs. Όπως παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα, ο OLT χρησιμοποιεί την TDM πολυπλεξία για να συνδυάσει τις εισερχόμενες ροές φωνής και δεδομένων που προορίζονται για τους χρήστες του PON. Για παράδειγμα, αν υπάρχουν  $N$  διαφορετικές ροές πληροφοριών που εισέρχονται στο OLT, κάθε μια από τις οποίες έχει ρυθμό μετάδοσης  $M$  bits per second (bps), τότε η TDM μέθοδος τις πολυπλέκει μεταξύ τους σε διαδοχικά πλαίσια (frames) δεδομένων με ρυθμό μετάδοσης  $N \times M$  bps. Τα frames, τα οποία στο πεδίο της κεφαλίδας τους μεταφέρουν πληροφορίες για τη διεύθυνση προορισμού τους, μεταδίδονται από τον OLT προς τις διάφορες ONU με τη μορφή broadcasting. Η κάθε ONU, λαμβάνει και φιλτράρει τα δεδομένα, κρατώντας μόνο αυτά που προορίζονται για αυτή. Απαραίτητη είναι, ίσως και η εφαρμογή κρυπτογράφησης στα δεδομένα της ροής καθόδου, αφού όλες οι ONU έχουν πρόσβαση στις πληροφορίες αυτής της ροής. Η μέθοδος TDM, έχει ως σκοπό την όσο το δυνατό καλύτερη αξιοποίηση του bandwidth του μέσου μεταφοράς, μοιράζοντάς το αποτελεσματικά ανάμεσα στις ONU. Στο παρακάτω παράδειγμα πολυπλεξίας TDM τα πακέτα 1,2,...,N προορίζονται για τις αντίστοιχες ONU.



Σχήμα 10. Παράδειγμα TDM Πολυπλεξίας

## 2.6 Πολλαπλή Πρόσβαση με Διαίρεση Χρόνου (Time Division Multiple Access)

Η μεταφορά πληροφοριών στη ροή ανόδου είναι λίγο πιο πολύπλοκη διαδικασία από αυτή της ροής καθόδου και αυτό γιατί όλες οι ONU θα πρέπει να μοιραστούν το ίδιο μήκος κύματος με βάση το χρόνο. Για την αποφυγή συγκρούσεων μεταξύ των εκπομπών διαφορετικών ONU, το PON χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση χρόνου (Time Division Multiple Access – TDMA). Το επόμενο σχήμα παρουσιάζει ένα παράδειγμα TDMA πρόσβασης N ONU στο ρεύμα ανόδου ενός PON. Τα πακέτα 1,2,...,N προέρχονται από τις αντίστοιχες ONU.



**Σχήμα 11. Παράδειγμα TDMA Πρόσβασης**

Το διαθέσιμο bandwidth της ροής ανόδου διαιρείται σε χρονοθυρίδες και κατανέμεται στις ONU από το OLT με βάση τις ανάγκες της κάθε μιας. Για να αποφεύγονται οι συγκρούσεις δεδομένων προερχόμενων από διαφορετικές ONU, το PON διαθέτει μηχανισμούς που δίνουν έγκριση για μετάδοση στην κάθε ONU ξεχωριστά, σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές, έτσι ώστε ανά πάσα στιγμή τα δεδομένα που καταφθάνουν στο OLT να προέρχονται από μια και μόνο ONU. Από τη στιγμή που κάθε ONU βρίσκεται σε διαφορετικές αποστάσεις από το κέντρο σύνδεσης, ο OLT χρησιμοποιεί την τεχνική ranging για να μετρήσει τις λογικές αποστάσεις ανάμεσα στις ONU και αυτόν. Αυτό είναι απαραίτητο, ώστε κάθε ONU να ρυθμίσει τις μεταδόσεις της ανάλογα και να αποφύγει τις συγκρούσεις.

## 2.7 Πολυπλεξία με Διαίρεση Μήκους Κύματος (Wavelength Division Multiplexing, WDM)

Η πολυπλεξία με διαίρεση μήκους κύματος (WDM), αποτελεί ίσως την επικρατέστερη μέθοδο πολυπλεξίας για τα επόμενης γενιάς PON. Σε αντίθεση με την TDM μέθοδο, στη WDM χρησιμοποιούνται διαφορετικού μήκους κύματος κανάλια επικοινωνία ανάμεσα στο OLT και την εκάστοτε ONU, τόσο για τη ροή ανόδου, όσο και για τη ροή καθόδου. Έτσι λοιπόν, παρέχεται στην κάθε ONU δικό της, αφιερωμένο, μήκος κύματος το οποίο χρησιμοποιεί αποκλειστικά για την επικοινωνία της με το OLT. Με αυτή τη μέθοδο, είναι δυνατή η πλήρης εκμετάλλευση του διαθέσιμου εύρους ζώνης του φυσικού μέσου από την κάθε ONU [3], [8], [9].

## 2.8 Πλεονεκτήματα της Χρήσης PON στο Δίκτυο Πρόσβασης

Παρακάτω αναφέρονται ορισμένα από τα πλεονεκτήματα της χρήσης παθητικών οπτικών δικτύων στα δίκτυα πρόσβασης:

- Επιτρέπουν την αποδοτική λειτουργία του δικτύου σε αποστάσεις έως και 20km μεταξύ του κέντρου σύνδεσης (CO) και της ONU. Ισχυρό πλεονέκτημα σε σχέση με τα 5.5km που μπορεί να φτάσει μια γραμμή DSL με χρήση χάλκινων καλωδίων.
- Λόγω της point to multipoint μορφής τους, επιτρέπουν την παροχή υπηρεσιών μεγάλου εύρους ζώνης σε μεμονωμένους χρήστες ή μικρές επιχειρήσεις, χωρίς μεγάλη οικονομική επιβάρυνση για αυτούς. Αυτό γιατί, μέσω μιας μόνο οπτικής ίνας, είναι δυνατό να διαμοιράζεται το σήμα σε πολλαπλούς χρήστες, χωρίς μάλιστα, να υπάρχουν απώλειες στο ρυθμό μετάδοσης. Έτσι λοιπόν, εξυπηρετούνται όσο το δυνατόν περισσότεροι συνδρομητές με τη χρήστη ελάχιστου δυνατού αριθμού οπτικών ινών.
- Περιορίζουν σε σημαντικό βαθμό τη χρήση μεγάλου αριθμού καλωδίων οπτικών ινών, εξοικονομώντας χώρο, τόσο στο κέντρο σύνδεσης, όσο και στον απομακρυσμένο βρόχο του δικτύου.
- Παρέχουν μεγαλύτερο εύρος ζώνης στο δίκτυο, κάτι το οποίο μεταφράζεται σε ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων σημαντικά μεγαλύτερων από Gbit/sec.
- Μπορούν να μεταδίδουν υπηρεσίες video (broadcasting) παράλληλα με υπηρεσίες φωνής ή και δεδομένων, εκμεταλλευόμενα συγκεκριμένη περιοχή μήκους κύματος στη ροή καθόδου.
- Απαλλάσσουν τον πάροχο από το κόστος συντήρησης και λειτουργίας ενεργών στοιχείων πολυπλεξίας στα σημεία διαχωρισμού σήματος. Αντί για αυτά, χρησιμοποιούνται μικροί σε μέγεθος παθητικοί οπτικοί διαχωριστές που δεν απαιτούν παροχή ρεύματος, ενώ επίσης δεν χρειάζονται κάποια ιδιαίτερη



συντήρηση. Αυτό έχει αντίκτυπο και στο κόστος υπηρεσιών για τους τερματικούς χρήστες, το οποίο περιορίζεται σημαντικά.

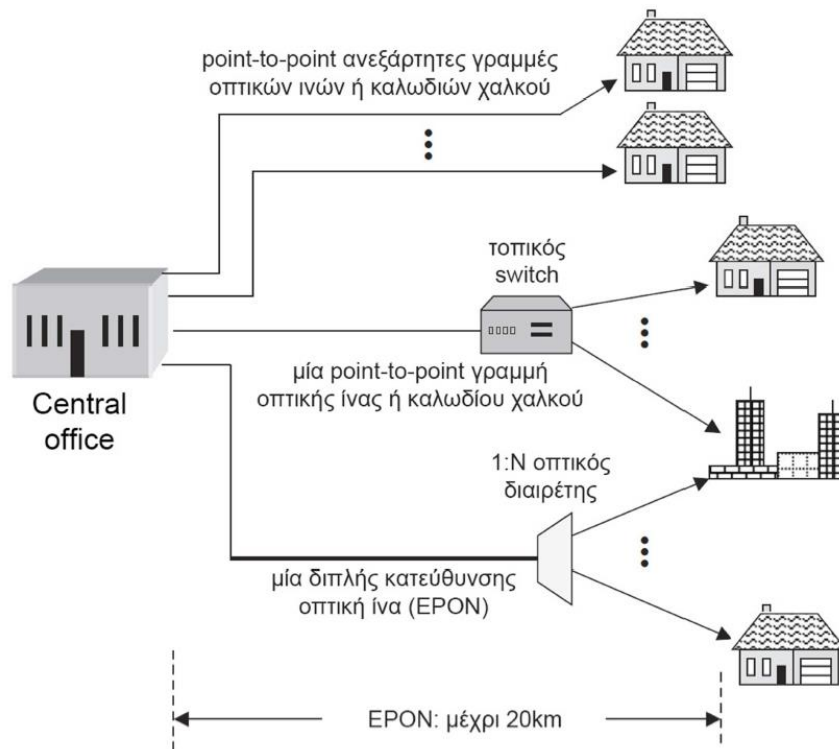
- Αφήνουν μεγάλα περιθώρια για αναβάθμιση του δικτύου στο μέλλον (δίκτυα PON νέας γενιάς) και την παροχή πρόσθετων υπηρεσιών, επιτυγχάνοντας υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων με αξιοποίηση και άλλων περιοχών μήκους κύματος.

## 2.9 Ethernet PON (EPON)

### 2.9.1 Εισαγωγή

Το Ethernet έχει εξελιχθεί στο πιο διαδεδομένο πρωτόκολλο επικοινωνίας στα τοπικά δίκτυα (LANs), ενώ έχει προεκταθεί τόσο στα μητροπολιτικά δίκτυα (MANs), όσο και στα δίκτυα ευρείας περιοχής (WANs). Η χρήση του Ethernet σαν τεχνολογία μετάδοσης στο πρώτο μίλι (Ethernet at First Mile, EFM), επιτρέπει την ανάπτυξη δικτύων πρόσβασης με IP και Ethernet δυνατότητες, που τα δεδομένα μεταφέρονται ενθυλακωμένα μέσα σε Ethernet MAC πλαίσια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αποφυγή του κόστους και της πολυπλοκότητας της μετατροπής ανάμεσα σε διαφορετικά πρωτόκολλα, σε αντίθεση με ότι συμβαίνει με τις υλοποιήσεις BPON. Επιπρόσθετα, η χρήση του Ethernet στο πρώτο μίλι, επιτρέπει στους διαχειριστές του δικτύου να εκμεταλλευτούν τα υπάρχοντα και γνώριμα σε αυτούς εργαλεία διαχείρισης και ανάλυσης του δικτύου, τα οποία έχουν σχεδιαστεί για την παρακολούθηση και έλεγχο ενός απλού δικτύου Ethernet.

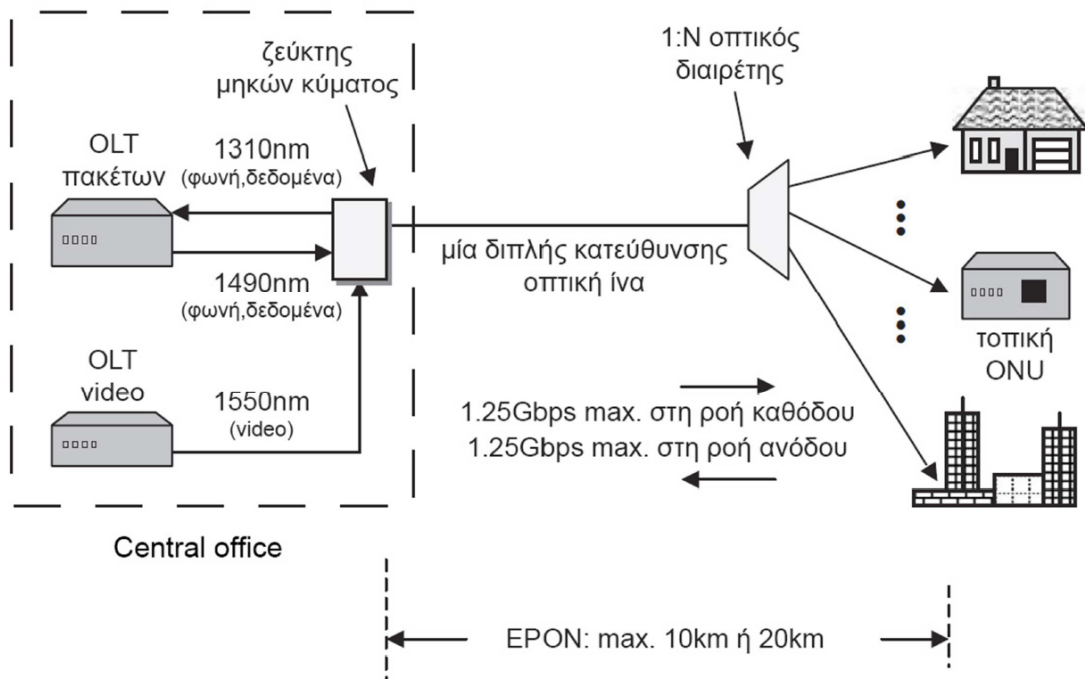
Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τρόποι για την υλοποίηση Ethernet στο πρώτο μίλι. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, ο ένας αφορά στην ανάπτυξη δικτύων EPON, ενώ οι άλλοι δύο χρησιμοποιούν point-to-point συνδέσεις, είτε μέσω χάλκινων καλωδίων, είτε μέσω οπτικών ινών, ανάμεσα στους χρήστες και στο κέντρο σύνδεσης [7].



Σχήμα 12. Υλοποιήσεις EPON

## 2.9.2 Αρχιτεκτονική EPON

Στο επόμενο σχήμα απεικονίζεται η βασική αρχιτεκτονική ενός δικτύου EPON και η δομή λειτουργίας του. Η αρχιτεκτονική ακολουθεί την τυπική αρχιτεκτονική ενός PON, όπως έχει περιγραφεί παραπάνω. Συγκεκριμένα, μια οπτική ίνα οδηγείται από το κέντρο σύνδεσης του παρόχου προς ένα οπτικό διαιρέτη. Από εκεί αποχωρούν πολλαπλές ίνες (συνήθως 64 ή 32) προς τις διάφορες ONU (ή ONT). Όπως αναφέρεται στο 802.3ah-2004 της IEEE, η μέγιστη απόσταση μετάδοσης ανάμεσα στο OLT και σε μια ONU είναι από 10km έως 20km (σε κάποιες περιπτώσεις η απόσταση μπορεί να είναι και μεγαλύτερη των 30km, στην περίπτωση των 10G-EPON). Η απόσταση αυτή εξαρτάται από το μέγεθος του οπτικού διαιρέτη (αν ο λόγος διαχωρισμού είναι 1:32 ή 1:64), αλλά και από το αν χρησιμοποιούνται οπτικά καλώδια κλάσης B (για τη μικρότερη δυνατή απόσταση), ή κλάσης C (για τη μεγαλύτερη δυνατή απόσταση). Ανεξάρτητα από τη μέγιστη απόσταση μετάδοσης, η μικρότερη δυνατή απόσταση μιας ONU από το OLT ορίζεται στο 0.5km.



**Σχήμα 13. Αρχιτεκτονική και Δομή Λειτουργίας EPON**

Όπως στα δίκτυα BPON, έτσι και στα EPON χρησιμοποιείται η περιοχή μήκους κύματος των 1490nm για τη μετάδοση κίνησης φωνής και δεδομένων στη ροή καθόδου, ενώ για τη ροή ανόδου χρησιμοποιείται η περιοχή των 1310nm. Το παράθυρο των 1550nm είναι διαθέσιμο για άλλες υπηρεσίες, όπως μετάδοσης (broadcasting) video από το OLT προς τους χρήστες.

Αφού βασίζεται στο Gigabit Ethernet πρωτόκολλο, ένα EPON δίκτυο έχει ονομαστικό ρυθμό μετάδοσης 1250Mbps, τα οποία μεταδίδονται με τη χρήση κωδικοποίησης 8B10B. Σε αυτή την κωδικοποίηση δύο επιπλέον περιττά bits ενσωματώνονται σε κάθε 8-bit μπλοκ δεδομένων, με σκοπό να παρέχουν επαρκή χρόνο για την ανάκτηση του σήματος, αλλά και να διαθέτουν υπηρεσίες παρακολούθησης λαθών στη μετάδοση. Λόγω αυτής της κωδικοποίησης, ο πραγματικός ρυθμός μετάδοσης είναι ίσο με 1Gbit/sec.

### 2.9.2.1 OLT και ONU Λειτουργίες

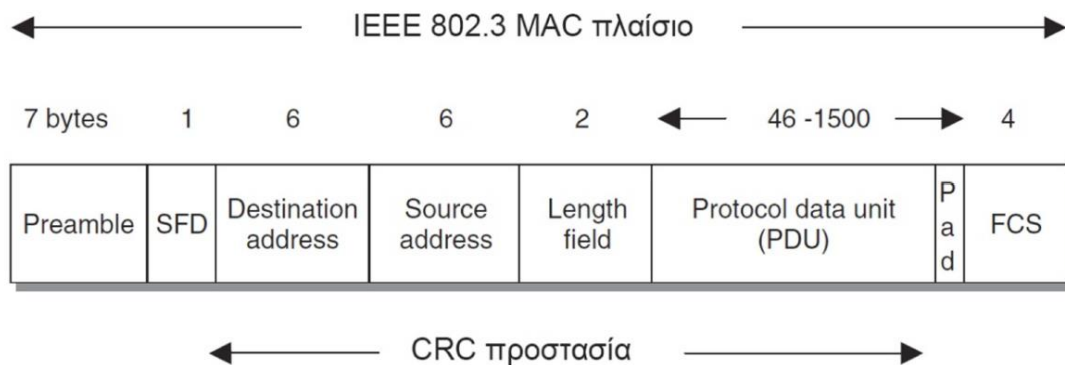
Παρόμοια με τις άλλες αρχιτεκτονικές δικτύων PON, το OLT σε ένα EPON, συμπεριφέρεται σαν ελεγκτής – διαχειριστής του δικτύου. Όλες οι επικοινωνίες συντελούνται ανάμεσα στο OLT και τις ONU, οπότε δεν υπάρχει απευθείας

επικοινωνία ανάμεσα στις ONU. Μερικές από τις βασικές λειτουργίες του OLT περιλαμβάνουν τα παρακάτω:

- Προσδιορίζει αδιαλείπτως αν υπάρχει κάποια ONU που να έχει προστεθεί ή να έχει αποχωρήσει από το δίκτυο. Αυτή η λειτουργία είναι γνωστή ως λειτουργία αναγνώρισης.
- Ελέγχει τη διαδικασία εγγραφής των νέων ONU στο δίκτυο.
- Αναθέτει διαφορετικές τιμές bandwidth στην κατεύθυνση της ροής ανόδου για την κάθε ONU ξεχωριστά.
- Πραγματοποιεί τη διαδικασία ranging για να υπολογίσει το χρόνο καθυστέρησης μετάδοσης ανάμεσα στο OLT και την εκάστοτε ONU.
- Παράγει μηνύματα με χρονοσήμανση για να συγχρονίζει τις ONU με την καθολική ώρα του EPON.

### 2.9.2.2 Ροή Κίνησης EPON

Τα δεδομένα που κινούνται μέσα σε ένα EPON δίκτυο μεταφέρονται μέσα σε Ethernet πλαίσια. Στο σχέδιο που ακολουθεί παρουσιάζεται ένα βασικό MAC Ethernet πλαίσιο, το οποίο μπορεί να ποικίλλει σε μήκος από 64 μέχρι 1518 bytes.



**Σχήμα 14. Βασικό MAC Ethernet Πλαίσιο**

Οι λειτουργίες των οκτώ πεδίων του πλαισίου είναι οι εξής:

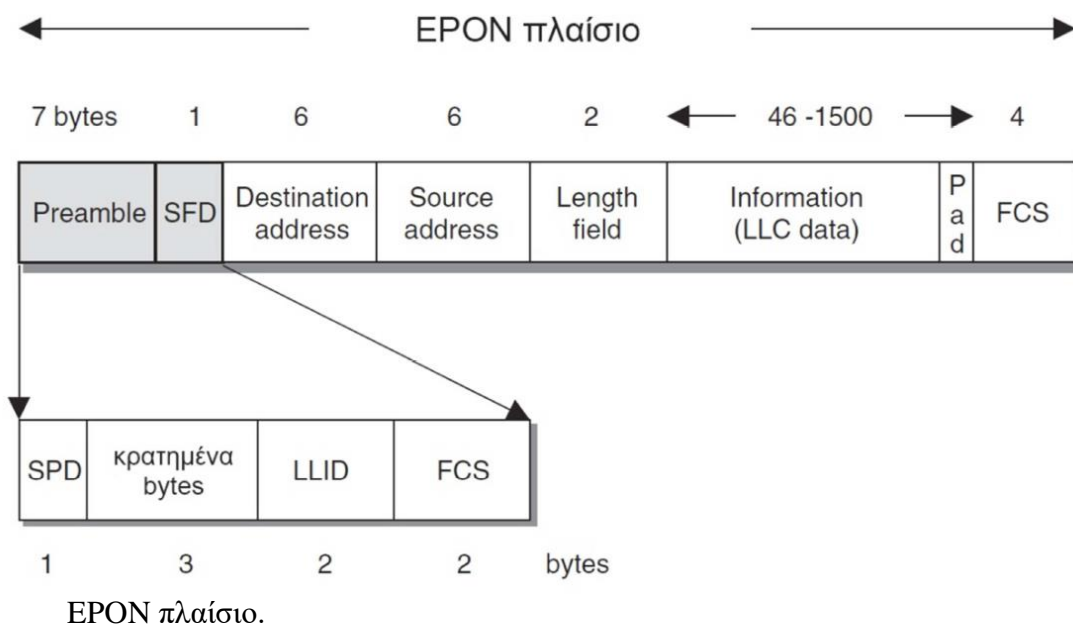
- Προοίμιο (Preamble). Το πλαίσιο ξεκινά με ένα προοίμιο μήκους 7 bytes, το οποίο επαναλαμβάνει 7 φορές το 8-bit μοτίβο 01010101 (0x55). Αυτό το μοτίβο ενημερώνει ότι ακολουθεί ένα πλαίσιο και ενεργοποιεί το δέκτη για να συγχρονιστεί με την αρχή του πλαισίου αυτού.

- Πεδίο Οριοθέτησης Έναρξης Πλαισίου (Start Frame Delimiter, SFD). Αυτό το 1-byte πεδίο έχει τη μορφή 11010101 (0xd5), που οι δυο συνεχόμενοι 1 σηματοδοτούν την έναρξη του πλαισίου. Με αυτό τον τρόπο οδηγείται ο δέκτης, ώστε να εντοπίσει το πρώτο bit του πλαισίου.
- Διεύθυνση Προορισμού (Destination Address, DA). Αυτό το 6-byte πεδίο περιέχει την φυσική διεύθυνση του επόμενου προορισμού του πακέτου. Το πρώτο bit της DA κάνει διάκριση για το αν το πλαίσιο απευθύνεται μόνο σε ένα χρήστη ή είναι εκπομπή προς πολλούς χρήστες ταυτόχρονα. Το δεύτερο bit προσδιορίζει αν η διεύθυνση προορισμού είναι μια διεύθυνση του τοπικού δικτύου ή μια παγκόσμια διεύθυνση.
- Διεύθυνση Πηγής (Source Address, SA). Αυτό το 6-byte πεδίο περιέχει τη φυσική διεύθυνση της τελευταίας συσκευής του δικτύου που προώθησε το πακέτο. Αυτή η συσκευή θα μπορούσε να είναι αυτή από την οποία ξεκίνησε τη διαδρομή του το πακέτο ή κάποιος ενδιάμεσος διακομιστής που το παρέλαβε και το προώθησε.
- Μήκος Πεδίου PDU. Αυτό το πεδίο, μήκους 2-byte, προσδιορίζει τον αριθμό των bytes του πεδίου Protocol Data Unit (PDU), το οποίο αποτελεί το πεδίο που μεταφέρει όλα τα δεδομένα προς του χρήστες. Αφού το μέγιστο επιτρεπτό μήκος ενός πλαισίου Ethernet είναι 1518 bytes, το PDU μπορεί να έχει μέγιστο μήκος τα 1512bytes.
- Protocol Data Unit (PDU). Το πεδίο PDU περιέχει δεδομένα του Logical Link Control (LLC) υποστρώματος και είναι ένα μεταβλητού μήκους πεδίο πληροφοριών. Η λειτουργία του LLC έγκειται στην παροχή διευθύνσεων και μηχανισμών ελέγχου για την ανταλλαγή δεδομένων ανάμεσα σε χρήστες του δικτύου.
- Γέμισμα (Pad). Το πεδίο γεμίματος περιέχει bytes, τα οποία προστίθενται στο τέλος του πλαισίου, έτσι ώστε να διασφαλιστεί ότι το μήκος του είναι τουλάχιστον 64 bytes. Το μήκος αυτό είναι το ελάχιστο απαραίτητο, ώστε να λειτουργεί ο μηχανισμός εντοπισμού συγκρούσεων πλαισίων.
- Frame Check Sequence (FCS). Το πεδίο αυτό περιέχει πληροφορίες για τον εντοπισμό λαθών μέσα στο πλαίσιο. Βασίζεται πάνω σε ένα 32-bit μηχανισμό CRC. Ο CRC χρησιμοποιεί τα bits των πεδίων DA, SA, μήκος PDU, PDU για να πραγματοποιήσει μια δυαδική διαίρεση στο σταθμό εκκίνησης του πλαισίου. Το αποτέλεσμα αυτής της διαίρεσης προστίθεται στο πλαίσιο και επανελέγχεται μόλις αυτό φτάσει στον προορισμό του. Αν υπάρχει διαφορά στο αποτέλεσμα, τότε έχει συμβεί κάποιο λάθος στη μετάδοση του πλαισίου, οπότε αυτό απορρίπτεται.

Σε ένα EPON, το preamble δεν είναι απαραίτητο λόγω της full-duplex φύσης λειτουργίας του δικτύου. Αυτό είναι καλό, γιατί επιτρέπει την ενσωμάτωση τις διευθύνσεις της εκάστοτε ONU μέσα στο Ethernet πλαίσιο. Έτσι, αντί να αυξάνεται το μήκος της επικεφαλίδας του Ethernet πλαισίου, ώστε ορίζεται ποια ONU είναι παραλήπτης του πλαισίου, αυτή η πληροφορία αντικαθιστά κάποια από τα bits του preamble του βασικού Ethernet πλαισίου. Αυτό, έχει ως αποτέλεσμα το μήκος ενός

EPON πλαίσιο να είναι ίσο με το μήκος ενός βασικού Ethernet πλαισίου. Το πεδίο του preamble αντικαθίσταται κατά σειρά με τα ακόλουθα, σχετικά με το EPON, πεδία:

- Ένα 1-byte πεδίο οριοθέτησης έναρξης πακέτου (Start Packet Delimiter, SPD), το οποίο περιέχει πληροφορίες συγχρονισμού. Αυτό το byte συγχρονισμού αποστέλλεται κάθε 2ms για να κρατά συγχρονισμένες τις ONU με το OLT.
- Τρία bytes κρατημένα για μελλοντική χρήση.
- Ένα 2-byte πεδίο με ονομασία Logical Link Identifier (LLID)
- Ένα 2-byte πεδίο FCS που περιέχει πληροφορίες για τον εντοπισμό λαθών στο



Σχήμα 15. EPON Πλαίσιο

Στην κατεύθυνση της ροής καθόδου, το OLT εκπέμπει Ethernet πλαίσια προς τις ONU. Αυτό είναι συμβατό με την εν γένει φύση της μετάδοσης του πρωτοκόλλου Ethernet. Η κάθε ONU λαμβάνει και φιλτράρει τα EPON πλαίσια βασιζόμενη στην ετικέτα LLID που προστίθεται στο κάθε πλαίσιο από το OLT. Για παράδειγμα, μια ONU θα απορρίψει πλαίσια που προορίζονται για άλλες ONU, καθώς επίσης και πλαίσια που η ίδια έχει εκπέμψει με μορφή broadcasting προς το δίκτυο. Όταν μια ONU στέλνει δεδομένα προς το OLT, προσθέτει στο πλαίσιο το δικό της, μοναδικό, LLID που της έχει ανατεθεί από το OLT κατά τη φάση εγγραφής της διαδικασίας ανίχνευσης νέων ONU στο δίκτυο. Να σημειωθεί ότι αυτό το LLID έχει ισχύ μόνο μέσα στο EPON, αφού η ONU αφαιρεί το LLID πριν στείλει τα πακέτα στο τελικό χρήστη.

Σε αντίθεση με το πεδίο LLID ου είναι το μοναδικό για κάθε ONU, όλες οι ONU ανταποκρίνονται στο Single Copy Broadcast (SCB) LLID. Το SCB παρέχει έναν αποδοτικό μηχανισμό στο OLT για να μεταδίδει πληροφορίες προς όλες τις ONU με τη μέθοδο broadcasting και όχι ξεχωριστά για κάθε μια.

Για την κατεύθυνση της ροής ανόδου, μια ειδική διαδικασία πρέπει να ακολουθηθεί, ώστε να αποφευχθούν οι συγκρούσεις μεταξύ πακέτων που εκπέμπονται ταυτοχρόνως από διαφορετικές ONU. Η διαδικασία αυτή ελέγχεται από το ειδικά για αυτό το σκοπό Multipoint Control Protocol (MPCP). Το πρωτόκολλο αυτό διαιτητεύει την πρόσβαση στο κανάλι επικοινωνίας ανάμεσα στο κέντρο σύνδεσης και τους χρήστες του EPON. Μια από τις λειτουργίες που εκτελεί, είναι να αναθέτει το bandwidth της ροής ανόδου δυναμικά στους διάφορους συνδρομητές του δικτύου.

### 2.9.2.3 Επίπεδα Ισχύος Οπτικής Δέσμης

Είναι στη φύση ενός PON δικτύου τα πακέτα να καταφθάνουν το OLT με εκρηκτική ροή, με αποτέλεσμα να έχουμε μεγάλες διακυμάνσεις τόσο στην ισχύ του σήματος, όσο και στη φάση του, σε διαδοχικές χρονοθυρίδες. Αυτή η μεγάλη διακύμανση συμβαίνει, γιατί είναι πολύ πιθανό διαδοχικά πακέτα να προέρχονται από διαφορετικές ONU, οι οποίες μπορεί να βρίσκονται σε σημαντικά μεγαλύτερες αποστάσεις από το OLT. Από τη στιγμή που οι τυπικοί οπτικοί δέκτες είναι σχεδιασμένοι να λαμβάνουν οπτικά σήματα με σταθερό πλάτος και φάση, δεν είναι κατάλληλοι για την μετάδοση εκρηκτικής ροής των PON. Είναι λοιπόν αναγκαία η χρήση δεκτών λήψης εκρηκτικής ροής, ώστε να προσαρμόζονται άμεσα στις διακυμάνσεις ισχύος και φάσεως του οπτικού σήματος για διαδοχικά πακέτα.

Να σημειωθεί ότι οι διακυμάνσεις στην ισχύ δεν είναι πρόβλημα για τις ONU από τη στιγμή που το σήμα σε αυτές προέρχεται μόνο από το OLT. Ωστόσο, όπως συμβαίνει και σε άλλα PON, τα laser των ONU θα πρέπει να κλείνουν όταν δεν χρησιμοποιούνται. Έτσι λοιπόν, ενώ οι ONU χρησιμοποιούν οπτικούς πομπούς εκρηκτικής ροής για το ρεύμα ανόδου, για το ρεύμα καθόδου αρκούνται σε απλούς οπτικούς δέκτες.

### 2.9.3 Λειτουργίες MPCP

Ένα EPON χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο MPCP (Multipoint Control Protocol) για να ρυθμίζει την κίνηση τόσο στη ροή καθόδου, όσο και στη ροή ανόδου. Οι διαδικασίες τις οποίες επιτελεί το MPCP, αφορούν τον αυτόματο εντοπισμό νέων ONU, την εγγραφή τους στο δίκτυο, τον μηχανισμό ranging, τον προσδιορισμό των αναγκών σε

bandwidth και την ανάθεσή του σε κάθε ONU. Για αυτό το σκοπό χρησιμοποιούνται τα ακόλουθα 64-byte μηνύματα ελέγχου [29], [30], [36], [37]:

- Τα μηνύματα GATE και REPORT χρησιμοποιούνται για την ανάθεση και απαίτηση σε bandwidth αντίστοιχα.
- Τα μηνύματα REGISTER\_REQUEST, REGISTER και REGISTER\_ACK χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή της αυτόματης ανίχνευσης ONU, την εγγραφή ONU και το μηχανισμό ranging αντίστοιχα.

### 2.9.3.1 Διαδικασία Ανίχνευσης

Ο OLT περιοδικά ανοίγει ένα χρονικό παράθυρο ανίχνευσης με σκοπό να επιτρέψει σε νέες ONU να δηλώσουν την παρουσία τους στο δίκτυο. Το παράθυρο αυτό ανοίγει με τη μετάδοση ενός μηνύματος ανίχνευσης GATE, το οποίο περιέχει πληροφορίες για το μήκος του χρονικού παραθύρου, καθώς και το χρόνο έναρξής του. Όπως είναι λογικό, οι ONU που είναι ήδη εγγεγραμμένες στο δίκτυο αγνοούν το μήνυμα ανίχνευσης GATE.

Οι ONU, που δεν έχουν εγγραφεί στο δίκτυο, ανταποκρίνονται στο μήνυμα ανίχνευσης GATE, μεταδίδοντας πίσω ένα μήνυμα REGISTER\_REQ. Το μήνυμα αυτό περιέχει τη MAC διεύθυνση της ONU, καθώς επίσης και τον αριθμό των εγκρίσεων που έχει τη δυνατότητα να λάβει από το OLT. Ένας ειδικός αλγόριθμος χρησιμοποιείται για να ελαχιστοποιηθούν οι πιθανότητες να έχουμε συγκρούσεις μηνυμάτων στην προσπάθεια πολλών ONU να εγγραφούν στο δίκτυο κατά τη διάρκεια του ίδιου χρονικού παραθύρου ανίχνευσης. Ο αλγόριθμος σε γενικές γραμμές λειτουργεί, έτσι ώστε κάθε ONU να καθυστερεί τη μετάδοσή της κατά ένα τυχαίο χρονικό διάστημα σε σχέση με την έναρξη του χρονικού παραθύρου ανίχνευσης.

Όταν το OLT λάβει το μήνυμα REGISTER\_REQ από μια ONU, της αναθέτει ένα LLID, σχετίζοντας το συγκεκριμένο LLID με τη διεύθυνση MAC της ONU. Στη συνέχεια το OLT στέλνει ένα μήνυμα REGISTER στην ONU με σκοπό να ενημερώσει για το LLID της, το χρόνο που απαιτεί ο OLT για το συγχρονισμό και να επιβεβαιώσει το μέγιστο αριθμό εγκρίσεων που μπορεί η ONU να διαχειριστεί. Ο χρόνος συγχρονισμού του OLT, είναι ο χρόνος που απαιτεί το OLT, ώστε να συγχρονιστεί με την εκρηκτική ροή του ρεύματος ανόδου της ONU. Ο χρόνος αυτός προσδιορίζεται με τη μετάδοση πολλαπλών 16-bit ομοίων πακέτων δεδομένων που στέλνει η ONU σαν μη ενεργά ζεύγη κώδικα στο ξεκίνημα της εκρηκτικής ροής.



Αφού η ONU επεξεργαστεί το μήνυμα REGISTER, στέλνει πίσω ένα μήνυμα REGISTER\_ACK σαν απάντηση σε ένα μήνυμα GATE του OLT. Τυπικά, μια ONU εγγράφεται σε χρόνο μικρότερο του ενός δευτερολέπτου.

Να σημειωθεί ότι το πρωτόκολλο διαθέτει μηχανισμούς για τη διαγραφή μιας ONU από το δίκτυο (αν π.χ. παρέλθει ένα χρονικό διάστημα χωρίς η ONU να έχει επικοινωνήσει με το OLT), καθώς επίσης και για την επανεγγραφή της.

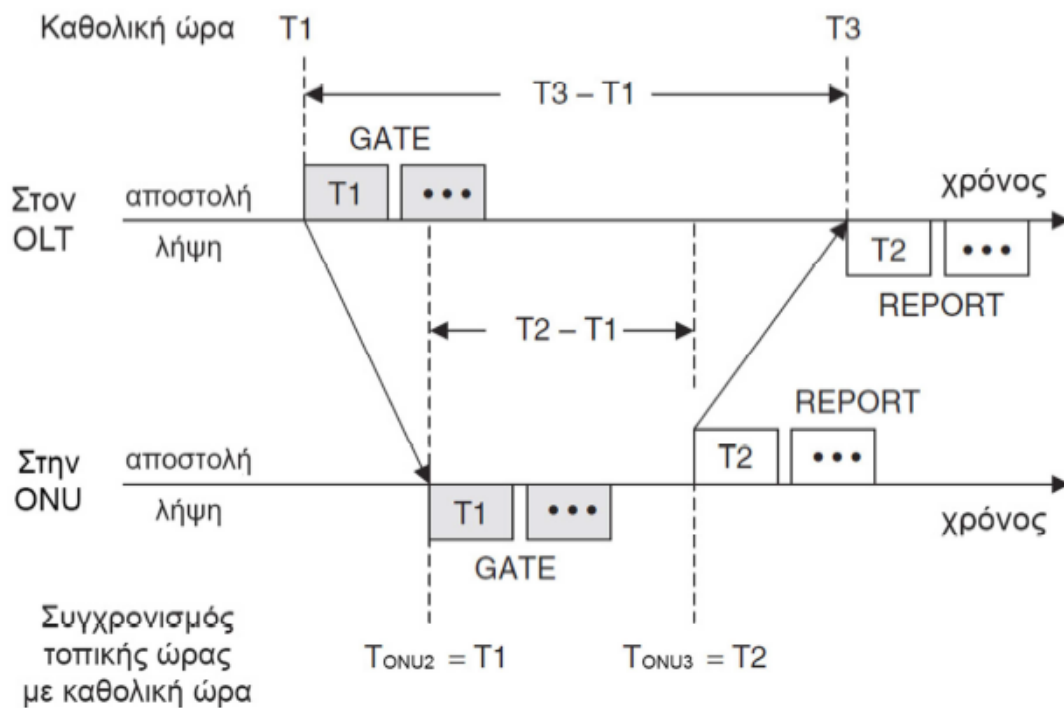
### 2.9.3.2 Ανάθεση Εύρους Ζώνης

Σε ένα δίκτυο πρόσβασης, οι χρήστες του, συνήθως, αποστέλλουν την κίνηση τους προς το δίκτυο με εκρηκτική ροή. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τα μητροπολιτικά δίκτυα ή τα δίκτυα ευρείας περιοχής, που η ροή της κίνησης συνήθως είναι σχετικά ομαλή, ως συνέπεια της συνάθροισης και αποστολής κίνησης από πολλές πηγές. Για να διαχειριστεί σωστά αυτή την κατάσταση ένα PON, το bandwidth του ρεύματος ανόδου διαιρείται σε χρονοθυρίδες. Το OLT, ελέγχει και αναθέτει αυτές τις μονάδες μέτρησης χρόνου στις διάφορες ONU, ανάλογα με τις απαιτήσεις τους σε εύρος ζώνης. Αυτές οι χρονοθυρίδες μπορούν να ανατεθούν δυναμικά, τη στιγμή που απαιτείται από την κάθε ONU ή μπορούν να κρατηθούν εξαρχής για την κάθε ONU. Χρησιμοποιώντας δυναμική ανάθεση εύρους ζώνης, κάθε κρατημένες χρονοθυρίδες ή αχρησιμοποίητα κομμάτια χρονοθυρίδων, μπορούν να κατανεμηθούν δυναμικά από το OLT προς τις ONU που τις έχουν ανάγκη.

Όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα, το πρωτόκολλο MPCP για να βοηθήσει στην ανάθεση και αναφορά του απαιτούμενου bandwidth μέσα σε ένα EPON, δημιουργεί τα μηνύματα ελέγχου GATE και REPORT, μήκους 64byte. Η ONU χρησιμοποιεί το μήνυμα REPORT ως αγγελιοφόρο απαίτησης bandwidth από το OLT. Τυπικά, αυτό γίνεται με την αναφορά της κατάστασης των ουρών αποστολής της ONU, αφού η κάθε ONU, έχει μια σειρά από buffer, που αποθηκεύονται προσωρινά τα Ethernet πλαίσια του περιμένουν για αποστολή. Ένα μήνυμα REPORT, μπορεί να αναφέρει στο OLT την κατάσταση μέχρι 8 ουρών αποστολής, με την κάθε ουρά να μπορεί να έχει πολλαπλά κατώφλια (thresholds). Μια ONU που αναφέρει την κατάσταση 8 ουρών αναμονής, μπορεί να έχει μέχρι και δυο κατώφλια για την κάθε ουρά. Αν η ONU έχει μόνο μια ουρά, τότε επιτρέπεται να αναφέρει μέχρι και 13 κατώφλια. Όταν το OLT λάβει ένα μήνυμα REPORT, τότε το προωθεί στον αλγόριθμο δυναμικής κατανομής εύρους ζώνης. Αυτός ο αλγόριθμος καταρτίζει το πρόγραμμα χρήσης της ροής ανόδου για όλες τις ONU. Όταν ο προγραμματισμός χρήσης της ροής ανόδου ολοκληρωθεί από το DBA, τότε το OLT μεταδίδει μηνύματα GATE προς τις ONU για να τους εκχωρήσει εγκρίσεις για τη χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Κάθε μήνυμα GATE μπορεί να υποστηρίξει μέχρι τέσσερις εγκρίσεις μετάδοσης δεδομένων.

### 2.9.3.3 Μηχανισμός Ranging

Για να μπορέσει μια ONU να εκπέμψει σε συγκεκριμένες χρονοθυρίδες, θα πρέπει πρώτα να συγχρονιστεί με το OLT και τις υπόλοιπες ONU. Αυτός ο συγχρονισμός επιτυγχάνεται μέσω μιας ανταλλαγής μηνυμάτων ελέγχου συγχρονισμού με χρονοσήμανση ανάμεσα στο OLT και την εκάστοτε ONU. Ως εκ τούτου, μια έγκριση για μετάδοση προς μια ONU καθορίζει επίσης την έναρξη μετάδοσης, αλλά και τη διάρκειά της για την συγκεκριμένη ONU. Κάθε ONU ενημερώνει το ρολόι της διαβάζοντας τη χρονοσήμανση που περιέχεται σε κάθε μήνυμα έγκρισης μετάδοσης που λαμβάνει. Με αυτή τη διαδικασία, κάθε ONU, αποκτά και διατηρεί συγχρονισμό με τα υπόλοιπα στοιχεία του EPON.



Σχήμα 16. Διαδικασία Συγχρονισμού OLT με ONU

Στο παραπάνω σχήμα απεικονίζεται η διαδικασία απόκτησης συγχρονισμού με το υπόλοιπο EPON. Πρώτα το OLT αποστέλλει ένα μήνυμα GATE τη χρονική στιγμή  $T_1$ , η οποία βασίζεται στο καθολικό ρολόι που βρίσκεται σε αυτό. Μια ONU λαμβάνει το μήνυμα GATE σε τοπική ώρα  $T_{ONU2}$  και επαναφέρει το ρολόι της στη χρονική στιγμή  $T_1$ . Στη συνέχεια, η ONU στέλνει ένα μήνυμα REPORT προς το

OLT, τη χρονική στιγμή  $T_{ONU3}$ , η οποία είναι η ίδια με την καθολική ώρα  $T2$ . Έτσι, η χρονοσήμανση στο μήνυμα REPORT αναφέρει τη χρονική στιγμή  $T2$ . Το OLT λαμβάνει το μήνυμα REPORT στην καθολική ώρα  $T3$ . Ο χρόνος της round-trip καθυστέρησης μπορεί τώρα να υπολογιστεί από το OLT από την παρακάτω εξίσωση:

$$RTT = (T3 - T1) - (T2 - T1) = T3 - T2$$

Η round-trip καθυστέρηση λαμβάνεται υπόψη για τον υπολογισμό της σχετικής απόστασης της ONU από το OLT και τον ορισμό του χρόνου έναρξης της εκρηκτικής ροής της ONU στο ρεύμα ανόδου.

Πολλές φορές ο χρόνος καθυστέρησης round-trip, μπορεί να παρουσιάσει απόκλιση κατά τη διάρκεια επικοινωνίας μεταξύ ONU και OLT. Όταν αυτή η απόκλιση ξεπεράσει μια προκαθορισμένη τιμή, τότε αυτή αποτυπώνεται και δηλώνεται σαν κατάσταση απόκλισης χρόνου καθυστέρησης round-trip. Η απόκλιση αυτή μπορεί να δηλωθεί, είτε από το OLT, είτε από την ONU, ανάλογα με το πιο στοιχείο του δικτύου θα εντοπίσει πρώτο.

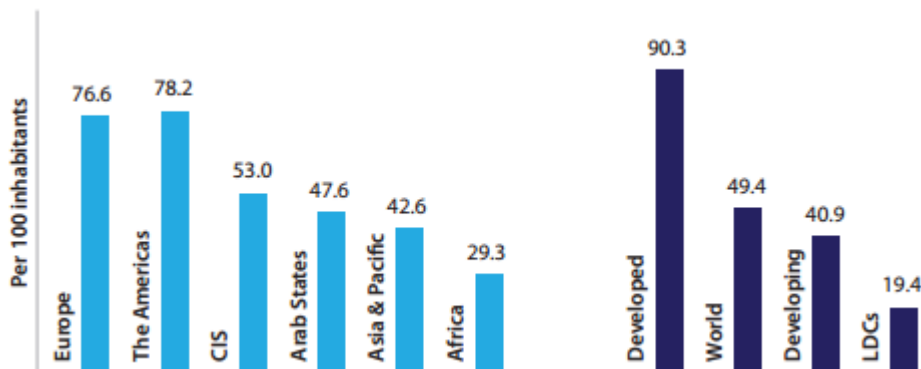
## 2.9.4 10G-EPON

Το 2006 η IEEE δημιούργησε μια ομάδα εργασίας με σκοπό τη δημιουργία ενός νέου προτύπου. Τελικώς, το 2009 εγκρίθηκε το πρότυπο 802.3av-2009 για τα δίκτυα 10G-EPON. Όπως φανερώνεται και από την ονομασία αυτών των παθητικών οπτικών δικτύων, βασίζονται στο προϋπάρχον EPON και μπορούν να υποστηρίξουν ρυθμούς μετάδοσης της τάξης των 10Gbits/sec για συμμετρική μετάδοση και των 10Gbits/sec – 1Gbits/sec για ασύμμετρη. Τα νέα αυτά δίκτυα υιοθετούν το μηχανισμό Forward Error Correction (FEC) για προστασία από λάθη στη μετάδοση και συγκεκριμένα τον αλγόριθμο Reed-Solomon (255,223) για τη μετάδοση στα 10Gbits/sec και τον Reed-Solomon (255,239) για τη μετάδοση στα 1Gbits/sec. Σε σχέση με τα απλά EPON δίκτυα που εκπέμπουν στα 1490nm για το ρεύμα καθόδου και 1310nm για το ρεύμα ανόδου, τα 10G-EPON χρησιμοποιούν την περιοχή των 1260-1280nm για το ρεύμα καθόδου και την περιοχή των 1575-1580nm για το ρεύμα ανόδου.

Τα 10G-EPON αποτελούν απόγονο των EPON και ο λόγος δημιουργίας τους είναι η αντικατάσταση των EPON με σκοπό να ανταποκρίνονται στις αυξημένες ανάγκες των συνδρομητών, όπως αυτές διαμορφώνονται με το πέρασμα των χρόνων [34] [35].

### 3. Εξέλιξη των Δικτύων Κινητών Επικοινωνιών

Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί μια εκπληκτική ανάπτυξη της βιομηχανίας της κινητής τηλεφωνίας, τόσο από άποψη τεχνολογία, όσο και από άποψη συνδρομητών. Υπήρξε μια σαφής μετάβαση από τη σταθερή στην κινητή τηλεφωνία, ιδίως μετά την αλλαγή του αιώνα. Στις μέρες μας μάλιστα, σύμφωνα με τα στοιχεία του οργανισμού International Telecommunication Union (ITU) ο αριθμός των συνδρομητών της κινητής τηλεφωνίας εκτιμάται πως είναι περίπου έξι φορές μεγαλύτερος από τον αριθμό των γραμμών σταθερής τηλεφωνίας.



**Σχήμα 17. Αριθμός Συνδρομητών Κινητής Τηλεφωνίας / Ποσοστό ανά 100 κατοίκους [31]**

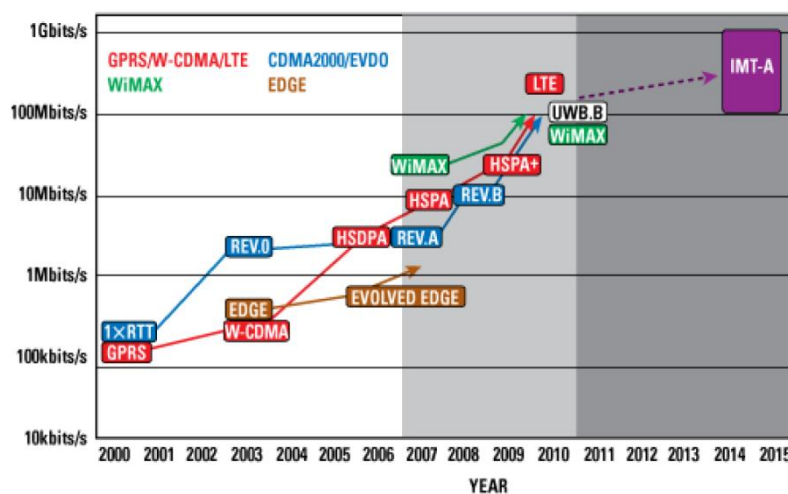
Τόσο οι πάροχοι, όσο και οι προμηθευτές κινητών δικτύων έχουν αισθανθεί τη σημασία των αποτελεσματικών δικτύων με εξίσου αποτελεσματικό σχεδιασμό. Αυτό, είχε ως αποτέλεσμα ο σχεδιασμός των δικτύων και η βελτιστοποίηση των υπηρεσιών να είναι πλέον θέματα μεγάλης σημασίας. Με την τεχνολογική πρόοδο και τη συνύπαρξη των 2G, 2.5G και 3G δικτύων, ο αντίκτυπος των υπηρεσιών στην αποτελεσματικότητα των δικτύων γίνεται ακόμα πιο κρίσιμος. Έτσι, έχουν αναπτυχθεί πολύ περισσότερα σενάρια για το σχεδιασμό όχι μόνο των 2G, αλλά και των 2.5G ή ακόμα και των 3G δικτύων. Επιπλέον, πρέπει να ληφθεί υπόψη και η διαλειτουργικότητα των δικτύων [10].

Με τον όρο 1G, γίνεται αναφορά στις αναλογικές κυψελωτές τεχνολογίες που έγιναν αρχικά διαθέσιμες στη δεκαετία του '80. Το 2G υποδηλώνει τα αρχικά ψηφιακά συστήματα, τα οποία εισήγαγαν υπηρεσίες, όπως τα σύντομα μηνύματα και τις χαμηλές ταχύτητες δεδομένων. Το CDMA2000 1xRTT και το Global Systems for Mobile Communications (GSM) είναι οι βασικές 2G τεχνολογίες, αν και το CDMA2000 1xRTT αναφέρεται μερικές φορές και ως 3G τεχνολογία, διότι πληροί την απαίτηση των 3G δικτύων για ρυθμούς μετάδοσης της τάξης των 144Kbps. Το ίδιο συμβαίνει και με το Enhanced Data for Global Evolution (EDGE). Οι τεχνολογίες 2G κατέστησαν διαθέσιμες στη δεκαετία του '90. Οι απαιτήσεις των 3G

δικτύων είχαν καθοριστεί από την ITU ως μέρος του International Mobile Telephone 2000 (IMT-2000) project, σύμφωνα με το οποίο τα ψηφιακά δίκτυα έπρεπε να παρέχουν ρυθμούς μετάδοσης ίσους με 144Kbps σε ταχέως κινούμενους χρήστες, 384Kbps σε ταχύτητες πεζών και 2Mbps σε εσωτερικούς χώρους. Το Universal Mobile Telecommunications System (UMTS), το High Speed Packet Access (HSPA) και το CDMA2000 EV-DO είναι οι κύριες 3G τεχνολογίες, αν και το WiMAX ορίστηκε και αυτό ως επίσημη 3G τεχνολογία, οι οποίες άρχισαν να αναπτύσσονται την τελευταία δεκαετία.

Οι απαιτήσεις που ορίστηκαν από την ITU για τα συστήματα International Mobile Telecommunications – Advanced (IMT-Advanced), δηλαδή τα δίκτυα τέταρτης γενιάς, περιλαμβάνουν τη λειτουργία ασύρματων καναλιών μέχρι 40MHz και εξαιρετικά υψηλή φασματική απόδοση (spectral efficiency). Η ITU συνιστά τη λειτουργία ασύρματων καναλιών μέχρι 100MHz και μέγιστη φασματική απόδοση 15bps/Hz, με αποτέλεσμα ρυθμούς μετάδοσης που θεωρητικά είναι της τάξης των 1.5Gbps. Ωστόσο, ως στόχος των δικτύων τέταρτης γενιάς σε σχέση με το ρυθμό μετάδοσης αναφέρεται συχνά το 1Gbps.

Ωστόσο, μέχρι σήμερα καμία διαθέσιμη τεχνολογία δεν ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις αυτές. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί τεχνολογίες, όπως το LTE-A και το IEEE 802.16am. Κάποιοι προσπάθησαν να θεωρήσουν τις τρέχουσες εκδόσεις του WiMAX και LTE ως 4G, αλλά αυτό είναι ακριβές μόνο στο βαθμό που αυτός ο χαρακτηρισμός αναφέρεται στη γενική προσέγγιση ή την πλατφόρμα που θα πρέπει να ενισχυθεί, ώστε να πληρούνται οι απαιτήσεις του 4G. Με το WiMAX και το HSPA να ξεπερνούν σημαντικά τις απαιτήσεις του 3G, το να συγκαταλέγονται στις τεχνολογίες 3G, σαφώς δεν είναι αντιπροσωπευτικό των ικανοτήτων τους. Όμως, δεν είναι εξίσου σωστό να καλούνται 4G. Το γεγονός ότι η κατάταξη των τεχνολογιών σε γενιές πολλές δεν αποτυπώνεται σωστά, έχει δημιουργήσει σύγχυση στην αγορά.



Σχήμα 18. Χρονολογική Εξέλιξη Δικτύων Κινητών Επικοινωνιών έως το IMT-Advanced [32]

### 3.1 Συστήματα Πρώτης Γενιάς

Το 1980 είναι η εποχή που εισάγεται η κινητή τηλεφωνία και έκτοτε οι κινητές επικοινωνίες έχουν υποστεί σημαντικές αλλαγές και τεράστια ανάπτυξη. Τα συστήματα πρώτης γενιάς χρησιμοποιούν αναλογική μετάδοση για υπηρεσίες ομιλίας. Το 1979, το πρώτο κυψελωτό σύστημα στον κόσμο, άρχισε να λειτουργεί από την Nippon Telephone & Telegraph (NTT), στο Τόκυο. Δύο χρόνια αργότερα, τα κυψελωτά συστήματα έφτασαν στην Ευρώπη. Τα δύο πιο δημοφιλή αναλογικά συστήματα, ήταν το Nordic Mobile Telephones (NMT) και το Total Access Communication Systems (TACS). Την ίδια δεκαετία κάποια ακόμα αναλογικά συστήματα εισήχθησαν σε όλη την Ευρώπη. Όλα αυτά τα συστήματα μπορούσαν να υποστηρίξουν διαπομπή (handover) και είχαν τη δυνατότητα περιαγωγής (roaming), αλλά δεν ήταν σε θέση να προσφέρουν διαλειτουργικότητα μεταξύ των χωρών. Αυτό ήταν ένα από τα μεγαλύτερα μειονεκτήματα της πρώτης γενιάς τηλεπικοινωνιακών δικτύων.

Στις ΗΠΑ, το 1982, αναπτύχθηκε το Advanced Mobile Phone System (AMPS), στο οποίο ανατέθηκε εύρος ζώνης της τάξεων των 40MHz, μέσα στο εύρος συχνοτήτων 800-900MHz, από την Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών της Αμερικής (Federal Communications Commission – FCC). Το 1988, ένα πρόσθετο εύρος ζώνης 10MHz, διατέθηκε στο AMPS, το οποίο λειτούργησε για πρώτη φορά στο Σικάγο, με μια περιοχή κάλυψης 2.100 τετραγωνικών μιλίων. Προσέφερε 832 κανάλια με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων 10Kbps. Παρότι στις πρώτες εφαρμογές του AMPS χρησιμοποιήθηκαν πολυκατευθυντικές κεραιές, στη συνέχεια έγινε αντιληπτό ότι η χρήση κατευθυντικών κεραιών θα απέφερε καλύτερα επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων στα κελιά. Στην πραγματικότητα, ο μικρότερος παράγοντας επαναχρησιμοποίησης που είχε τη δυνατότητα να προσφέρει λόγο σήματος προς παρεμβολή (Signal-to-Interference Ratio – SIR) ίσο με 18dB χρησιμοποιώντας κατευθυντικές κεραιές 120 μοιρών, υπολογίστηκε ότι είναι 7. Ως εκ τούτου, υιοθετήθηκε για το AMPS ένα μοτίβο επαναχρησιμοποίησης 7 κελιών. Οι μεταδόσεις από τους σταθμούς βάσης προς κινητά πραγματοποιούνται μέσω του forward channel, χρησιμοποιώντας τις συχνότητες στο εύρος 869-894MHz. Το reverse channel, χρησιμοποιείται για τις μεταδόσεις από τα κινητά προς το σταθμό βάσης, χρησιμοποιώντας συχνότητες μεταξύ 824-849MHz.

Τα συστήματα AMPS και TACS χρησιμοποιούν για την ασύρματη μετάδοση την τεχνική διαμόρφωσης συχνότητας (Frequency Modulation – FM). Η κίνηση πολυπλέκεται σε ένα σύστημα Frequency Division Multiple Access (FDMA) [10].

### 3.2 Συστήματα Δεύτερης Γενιάς

Τα συστήματα δεύτερης γενιάς (2G) εισήχθησαν στο τέλος της δεκαετίας του '80. Εκτός από την παραδοσιακή υπηρεσία ομιλίας, υποστηρίζονται επίσης και υπηρεσίες δεδομένων χαμηλού ρυθμού μετάδοσης. Σε σύγκριση με τα συστήματα πρώτης γενιάς, τα συστήματα δεύτερης γενιάς χρησιμοποιούν ψηφιακή τεχνολογία πολλαπλής πρόσβασης, όπως η τεχνολογία Time Division Multiple Access (TDMA) και την τεχνολογία Code Division Multiple Access (CDMA). Κατά συνέπεια, εν συγκρίσει με τα συστήματα πρώτης γενιάς, τα συστήματα δεύτερης προσφέρουν υψηλότερη φασματική απόδοση, καλύτερες υπηρεσίες δεδομένων και πιο προηγμένες υπηρεσίες περιαγωγής. Στην Ευρώπη αναπτύχθηκε το σύστημα GSM για να παρέχει ένα ενιαίο πρότυπο. Αυτό επέτρεψε την αδιάκοπη παροχή υπηρεσιών εντός της Ευρώπης μέσω της διεθνούς περιαγωγής. Το GSM, χρησιμοποιεί την τεχνολογία TDMA για την υποστήριξη πολλαπλών χρηστών πάνω από 20 χρόνια και συνεπώς βελτιώνεται, έτσι ώστε να προσφέρει συνεχώς καλύτερες υπηρεσίες στην αγορά. Νέες τεχνολογία έχουν αναπτυχθεί με βάση το αρχικό σύστημα GSM, οι οποίες οδήγησαν σε πιο προηγμένα συστήματα γνωστά και ως συστήματα 2.5G.

Στις ΗΠΑ, υπήρξαν τρεις διαφορετικές εκδόσεις συστημάτων δεύτερης γενιάς. Το πρώτο ψηφιακό σύστημα, το οποίο εισήχθη το 1991, ήταν το IS-54, ενώ μια νέα έκδοσή του που υποστηρίζει πρόσθετες υπηρεσίες (IS-136), εισήχθη το 1996. Εν τω μεταξύ, το 1993 αναπτύχθηκε το σύστημα IS-95 (CDMA One). Η επιτροπή FCC, δημοπράτησε νέο τμήμα του φάσματος στη ζώνη των 1900MHz, επιτρέποντας στο σύστημα GSM1900 να εισέλθει στην αγορά των ΗΠΑ. Τέλος, στην Ιαπωνία, ορίστηκε το 1990 το σύστημα Personal Digital Cellular (PDC).

Δεδομένου ότι τα πρώτα δίκτυα εμφανίστηκαν στις αρχές του 1991, η τεχνολογία GSM σταδιακά εξελίχθηκε, ώστε να μπορεί να υποστηρίξει τις απαιτήσεις της κίνησης των δεδομένων και των νέων υπηρεσιών που είχαν εμφανιστεί. Τα βασικά στοιχεία του συστήματος αυτού είναι το Base Station Subsystem (BSS), στο οποίο υπάρχουν τα Base Transceiver Station (BTS) και Base Station Controllers (BSC) και το Network Switching Subsystem (NSS), στο οποίο βρίσκονται τα: Mobile Switching Center (MSC), Visitor Location Register (VLR), Home Location Register (HLR), Authentication Center (AC) και Equipment Identity Register (EIR). Το δίκτυο είναι ικανό να παρέχει όλες τις βασικές υπηρεσίες έως 9.6Kbps, όπως fax, κλπ, ενώ επίσης έχει μια επέκταση για το δίκτυο σταθερής τηλεφωνίας. Ένας νέος σχεδιασμός εισήχθη στο MSC των συστημάτων δεύτερης γενιάς. Πιο συγκεκριμένα, η χρήση των BSCs απαλλάσσει το MSC από το φορτίο με το οποίο επιβαρύνεται στα συστήματα πρώτης γενιάς. Αυτός ο σχεδιασμός επιτρέπει τη σταθεροποίηση της διεπαφής μεταξύ του MSC και του BSC. Ως εκ τούτου, δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στη διαλειτουργικότητα και τη σταθεροποίηση στα συστήματα δεύτερης γενιάς, με αποτέλεσμα ο πάροχος να μπορεί να χρησιμοποιήσει διαφορετικούς κατασκευαστές για το MSC και τα BSCs. Εκτός από τις βελτιώσεις στο σχεδιασμό του MSC, εισήχθη

ο υποβοηθούμενος από το κινητό μηχανισμός μετάβασης (handoff). Λαμβάνοντας σήματα από γειτονικούς σταθμούς βάσης, ένα κινητό μπορεί να προκαλέσει μετάβαση μέσω σηματοδότησης με το δίκτυο. Η επόμενη εξέλιξη στο σύστημα GSM, ήταν η προσθήκη δύο πλατφόρμων, της Voice Mail Service (VMS) και της Short Message Service Center (SMSC). Το SMSC αποτέλεσε μεγάλη εμπορική επιτυχία, μάλιστα τόσο πολύ, έτσι ώστε σε ορισμένα δίκτυα η κίνηση των SMS να αποτελεί σημαντικό μέρος της συνολικής κίνησης. Οι «έξυπνες» υπηρεσίες έχουν παίξει σημαντικό ρόλο στο σύστημα GSM, προσφέροντας στους παρόχους τη δυνατότητα να δημιουργήσουν ένα ολόκληρο φάσμα νέων υπηρεσιών. Ένα αποτέλεσμα των «έξυπνων» υπηρεσιών είναι οι «προπληρωμένες» υπηρεσίες.

Καθώς η απαίτηση για αποστολή δεδομένων μέσω της ασύρματης διεπαφής συνεχώς αυξανόταν, νέοι κόμβοι όπως ο Servicing General Packet Radio Services (SGSN) και το Gateway GPRS (GGSN) προστέθηκαν στο υπάρχον GSM σύστημα. Οι κόμβοι αυτοί κατέστησαν δυνατή την αποστολή πακέτων δεδομένων μέσω της ασύρματης διεπαφής. Το μέρος του δικτύου το οποίο χειρίζεται τα πακέτα δεδομένων ονομάζεται κύριο δίκτυο πακέτων. Εκτός από τους κόμβους SGSN και GGSN, το κύριο δίκτυο πακέτων περιέχει επίσης τους δρομολογητές IP, τους firewall servers και τους Domain Name Servers (DNS). Αυτές οι προσθήκες δίνουν τη δυνατότητα πρόσβασης στο internet με ρυθμό μετάδοσης που φτάνει τα 150Kbps υπό καλές συνθήκες.

Η μετάβαση στη γενιά 2.5G ξεκίνησε με το General Packet Radio Service (GPRS), το οποίο είναι μια ασύρματη τεχνολογία για τα GSM δίκτυα που προσθέτει πρωτόκολλα μεταγωγής πακέτων, μικρότερο χρόνο εγκαθίδρυσης ISP συνδέσεων, καθώς και δυνατότητα χρέωσης όγκου δεδομένων που αποστέλλονται και όχι χρόνου σύνδεσης. Η μεταγωγή πακέτων είναι μια τεχνική με την οποία η πληροφορία (φωνή ή δεδομένα) αποστέλλεται διαιρεμένη σε πακέτα, το καθένα από τα οποία αποτελείται το από κάποια ελάχιστα Kbytes και αυτά στη συνέχεια δρομολογούνται από το δίκτυο σε διάφορους προορισμούς, οι οποίοι επιλέγονται με βάση κάποια συγκεκριμένα δεδομένα που βρίσκονται μέσα στο κάθε πακέτο. Η χρήση των πόρων του δικτύου έχει βελτιστοποιηθεί, καθώς οι πόροι απασχολούνται μόνο κατά τη διάρκεια χειρισμού του κάθε πακέτου. Το GPRS, υποστηρίζει ευέλικτους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, καθώς και συνεχή σύνδεση στο δίκτυο. Έτσι, αποτελεί το πιο σημαντικό βήμα προς την τρίτη γενιά τηλεπικοινωνιακών δικτύων.

Από τη στιγμή που το σύστημα υποστηρίζει υπηρεσίες φωνής και δεδομένων, παρουσιάστηκε η ανάγκη να αυξηθεί ο ρυθμός μετάδοσης. Αυτό έγινε με τη χρήση πιο εξελιγμένων μεθόδων κωδικοποίησης μέσω του διαδικτύου, αυξάνοντας έτσι το ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων έως τα 384Kbps. Η εφαρμογή του EDGE, ήταν σχετικά ανώδυνη και απαιτούσε μικρές αλλαγές στο υλικό και το λογισμικό του δικτύου, αφού χρησιμοποιείται και πάλι η ίδια TDMA δομή του πλαισίου, τα ίδια κανάλια και φορείς εύρους ζώνης 200KHz, όπως στα σημερινά δίκτυα GSM. Καθώς το EDGE εξελίσσεται συνυπάρχοντας με το 3G Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA), είναι διαθέσιμοι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων της τάξης των



2Mbps. Τα ψηφιακά κυψελωτά συστήματα δεύτερης γενιάς εξακολουθούν να κυριαρχούν στη βιομηχανία της κινητής τηλεφωνίας ακόμα και στις μέρες μας. Ωστόσο, παράλληλα, έχουν εισαχθεί στην αγορά και τα συστήματα τρίτης γενιάς των οποίων η διείσδυση έχει αρχίσει να αυξάνει σημαντικά [10].

### 3.3 Συστήματα Τρίτης Γενιάς

Στο EDGE, ήταν δυνατή η κίνηση υψηλού όγκου δεδομένων, αλλά η μετάδοση πακέτων στην ασύρματη διεπαφή εξακολουθούσε να συμπεριφέρεται όπως στην μεταγωγή κυκλώματος. Επομένως, τμήμα της απόδοσης λόγω της μεταγωγής πακέτων χανόταν εξαιτίας του περιβάλλοντος μεταγωγής κυκλώματος στην ασύρματη διεπαφή. Ένα ακόμη μειονέκτημα, ήταν πως τα πρότυπα για την ανάπτυξη των δικτύων ήταν διαφορετικά σε διάφορα μέρη του κόσμου. Ως εκ τούτου, γεννήθηκε η ανάγκη για ένα δίκτυο που παρέχει υπηρεσίες ανεξάρτητα από την πλατφόρμα που χρησιμοποιείται και του οποίου τα πρότυπα σχεδιασμού είναι ίδια σε παγκόσμιο επίπεδο. Με άλλα λόγια, γεννήθηκε η ανάγκη για την τρίτη γενιά κινητών δικτύων.

Ο οργανισμός ITU καθόρισε τις απαιτήσεις για τα δίκτυα 3G σύμφωνα με το πρότυπο IMT-2000. Το έργο αυτό το συνέχισε ο οργανισμός 3GPP καθορίζοντας ένα σύστημα που πληροί το πρότυπο IMT-2000. Στην Ευρώπη, το σύστημα αυτό είναι το UMTS. Το IMT-2000 είναι το όνομα που δόθηκε από την ITU στα συστήματα τρίτης γενιάς, ενώ CDMA2000 είναι το όνομα της αμερικάνικης παραλλαγής για τα 3G συστήματα. Η τεχνολογία για την ασύρματη διεπαφή του UMTS είναι το WCDMA. Τα κύρια συστατικά του είναι ο σταθμός βάσης ή αλλιώς NodeB, το Radio Network Controller (RNC), το Wideband CDMA Mobile Switching Center (WMSC) και οι κόμβοι SGSN/GGSN. Τα δίκτυα τρίτης γενιάς επιτρέπουν στους παρόχους να προσφέρουν ένα ευρύτερο φάσμα προηγμένων υπηρεσιών και μεγαλύτερη χωρητικότητα δικτύου μέσω της βελτιωμένης φασματικής απόδοσης. Μεταξύ των προηγμένων υπηρεσιών, είναι οι ευρυζωνικές ασύρματες φωνητικές υπηρεσίες, οι βίντεο-κλήσεις, καθώς και η ευρυζωνική μετάδοση δεδομένων. Επιπρόσθετα χαρακτηριστικά του συστήματος περιλαμβάνουν τη δυνατότητα μετάδοσης δεδομένων με την τεχνολογία HSPA, οποία είναι ικανή να προσφέρει ταχύτητες έως 14.4Mbps στο downlink και 5.8Mbps στο uplink.

Το πρώτο εμπορικό 3G δίκτυο ξεκίνησε τον Οκτώβριο του 2001 από την NTT DoCoMo στην Ιαπωνία με το όνομα FOMA και ήταν βασισμένο στην τεχνολογία WCDMA. Το δεύτερο δίκτυο που λειτούργησε ήταν από την SK Telecom στη Νότια Κορέα τον Ιανουάριο του 2002, ενώ ακολούθησε ένα ακόμη 3G δίκτυο στη Νότια Κορέα, το KTF το Μάιο του 2002. Στην Ευρώπη οι υπηρεσίες 3G ξεκίνησαν να προσφέρονται το Μάρτιο του 2003 από την εταιρεία 3 στο Ηνωμένο Βασίλειο και την Ιταλία. Στις ΗΠΑ το πρώτο 3G δίκτυο δημιουργήθηκε από την εταιρεία Monet Mobile Networks, βασισμένο στο CDMA2000, ενώ ο δεύτερος πάροχος ήταν η Verizon

Wireless τον Οκτώβριο του 2003. Το πρώτο 3G δίκτυο στο νότιο ημισφαίριο ξεκίνησε από τον Απρίλιο του 2003 από την Hutchison Telecommunications με την επωνυμία «Three», χρησιμοποιώντας την τεχνολογία UMTS. Τέλος, στην Αφρική η πρώτη υλοποίηση 3G δικτύου έγινε από την EMTEL στο Μαυρίκιο χρησιμοποιώντας το πρότυπο WCDMA.

Αξίζει να αναφερθεί ότι η εγκατάσταση των 3G δικτύων καθυστέρηση σε αρκετές χώρες, λόγω του τεράστιου κόστους που απαιτούνταν για τις άδειες φάσματος συχνοτήτων. Σε πολλές χώρες, τα δίκτυα 3G δεν χρησιμοποιούν τις ίδιες συχνότητες με τα δίκτυα δεύτερης γενιάς και επομένως οι πάροχοι κινητής τηλεφωνίας έπρεπε να υλοποιήσουν εντελώς νέα δίκτυα και να αποκτήσουν άδειες για εντελώς νέες συχνότητες. Εξαιρέση αποτελούν οι ΗΠΑ, που τα δίκτυα 3G λειτουργούν στις ίδιες συχνότητες με άλλες υπηρεσίες. Άλλες καθυστερήσεις οφείλονταν στα έξοδα αναβάθμισης του εξοπλισμού νέων συστημάτων. Τέλος, υπάρχουν χώρες, όπως η στις οποίες δεν έχουν χορηγηθεί ακόμα άδειες για 3G και επομένως δεν έχουν ακόμα ξεκινήσει την υλοποίηση δικτύων τρίτης γενιάς [10].

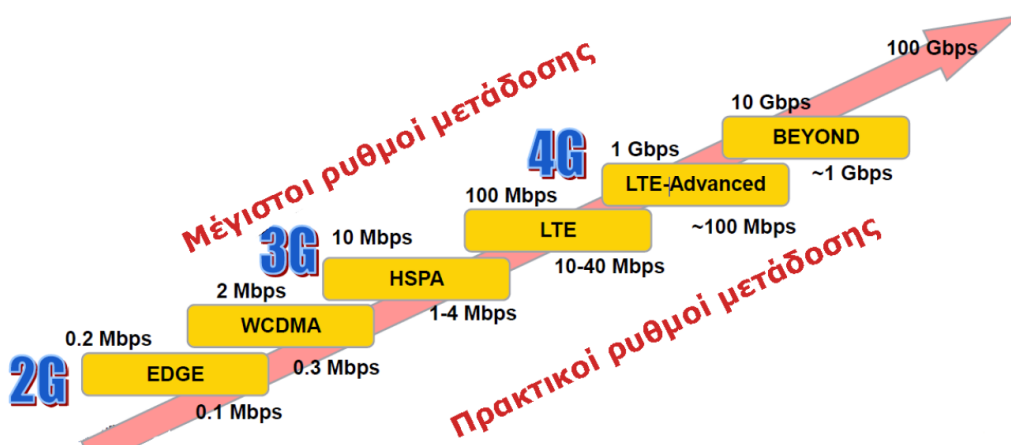
### 3.4 Συστήματα Τέταρτης Γενιάς

Η εμφάνιση νέων τεχνολογιών στα συστήματα κινητών επικοινωνιών, καθώς και η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση οδήγησε στα συστήματα κινητών επικοινωνιών τέταρτης γενιάς (4G), τα οποία συστήματα, αυξάνουν την ικανότητα εξυπηρέτησης πολλαπλών υπηρεσιών ενσωματώνοντας όλες τις ασύρματες τεχνολογίες που υπάρχουν σε μια «all-IP» πλατφόρμα. Η μετάβαση στο «all-IP» γίνεται προκειμένου να υπάρχει μια κοινή πλατφόρμα για όλες τις τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα με αποτέλεσμα ο χρήστης να έχει την ελευθερία και την ευελιξία να επιλέξει οποιαδήποτε υπηρεσία επιθυμεί με λογική ποιότητα υπηρεσίας και σε προσιτή τιμή, οποτεδήποτε και οπουδήποτε. Οι υπηρεσίες 4G ξεκίνησαν το 2010, αλλά έγιναν ευρέως διαδεδομένες από τα μέσα του 2014 και μετά [10], [11].

Σύμφωνα με τον οργανισμό ITU, τα IMT-Advanced 4G πρότυπα θα εγκαινιάσουν μια νέα εποχή κινητών ευρυζωνικών επικοινωνιών, με ταχύτερη πρόσβαση σε δεδομένα και ενισχυμένες δυνατότητες περιαγωγής. Αυτός είναι μάλιστα ο στόχος, γιατί σύμφωνα με την ITU τα ευρυζωνικά δίκτυα έχουν καταστεί ζωτικής σημασίας εθνικές υποδομές – όπως ακριβώς και τα δίκτυα μεταφοράς, ενέργειας και ύδρευσης – αλλά και με επιπτώσεις που μπορεί να είναι ακόμα πιο ισχυρές και πέρα από κάθε φιλοδοξία. Αυτές οι βασικές βελτιώσεις στον τομέα των ασύρματων ευρυζωνικών συνδέσεων μπορεί να οδηγήσουν σε κοινωνική και οικονομική ανάπτυξη, καθώς και στην επιτάχυνση της προόδου προς την επίτευξη των Αναπτυξιακών Στόχων του Ο.Η.Ε για τη χιλιετία. Οι τρέχουσες συμφωνίες σχετικά με τις απαιτήσεις όσον αφορά το IMT-Advanced είναι:

- Μέγιστος ρυθμός δεδομένων της τάξεως του 1Gbps για το downlink και 500Mbps για το uplink.
- Όσον αφορά την καθυστέρηση, ο χρόνος μετάβασης από κατάσταση αδράνειας σε κατάσταση σύνδεσης θα πρέπει να είναι μικρότερος από 100msec.
- Η μέγιστη φασματική απόδοση για το downlink θα πρέπει να είναι έως και 15bps/Hz και το uplink 6.75bps/Hz, χρησιμοποιώντας ένα σύστημα μετάδοσης 4x4 (4 κεραίες στον πομπό και 4 στον δέκτη) ή μικρότερο στο downlink και 2x4 ή μικρότερο στο uplink.
- Η μέση φασματική απόδοση των χρηστών στο downlink πρέπει να είναι 2.2bps/Hz/κελί, με τρόπο μετάδοσης MIMO 4x2, ενώ στο uplink ο στόχος για τη μέση φασματική απόδοση είναι 1.4bps/Hz/κελί με MIMO 2x4.
- Στο σενάριο με 10 χρήστες, φασματική απόδοση για τους χρήστες στα όρια των κελιών θα είναι 0.06bps/Hz στο downlink με τρόπο μετάδοσης MIMO 4x2. Στο uplink, η αντίστοιχη φασματική απόδοση πρέπει να είναι 0.03 με MIMO 2x4.
- Υποστήριξη κινητικότητας έως 350km/h.
- Το σύστημα IMT-Advanced θα υποστηρίξει κλιμακωτό εύρος ζώνης και συνάθροιση φάσματος με εύρος ζώνης μετάδοσης μεγαλύτερο από 40MHz για το downlink και το uplink.
- Συμβατότητα και διαλειτουργικότητα με τα προηγούμενα συστήματα κινητής τηλεφωνίας.

Συνοπτικά, στο Σχήμα 19, απεικονίζεται με τον καλύτερο τρόπο η εξέλιξη των κινητών δικτύων, ξεκινώντας από τη δεύτερη γενιά και καταλήγοντας στην τέταρτη και μετά. Παρουσιάζονται τόσο οι θεωρητικοί μέγιστοι, όσο και οι πραγματικοί ρυθμοί μετάδοσης που επιτυγχάνει η κάθε τεχνολογία



Σχήμα 19. Μέγιστοι και Πρακτικοί Ρυθμοί Μετάδοσης Κινητών Δικτύων Επόμενης Γενιάς [32]

## 4. Δίκτυα Τέταρτης Γενιάς – 4G (LTE)

### 4.1 Χαρακτηριστικά του LTE

Τα κύρια χαρακτηριστικά που διέπουν στη βασική έκδοση του LTE (Release 8) είναι τα παρακάτω:

- Χρήση OFDMA για καθοδική κίνηση και SC-FDMA για ανοδική.
- Απλοποιημένη αρχιτεκτονική και αποκεντρωμένη σχεδίαση.
- Χρήση του πρωτοκόλλου IP εξ' ολοκλήρου στο δίκτυο.
- Πολύ αποτελεσματική αξιοποίηση του εύρους ζώνης
- Ευελιξία στη χρήση εύρους ζώνης. Από το πρότυπο υποστηρίζονται τα: 1.4MHz, 3MHz, 5MHz, 15MHz και 20MHz.
- Μικρό χρόνο αποστολής-λήψης. Σε ιδανικές συνθήκες μετάδοσης ο χρόνος απόκρισης (latency) είναι μικρότερος από 5msec.
- Αξιοποίηση πολλαπλών κεραιών για μετάδοση πολλαπλών εισόδων-εξόδων (Multiple in – Multiple Out, MIMO)
- Χρήση συζευγμένου (paired) και μη-συζευγμένου (unpaired) φάσματος. Λειτουργία πλήρως αμφίδρομης μετάδοσης με τη χρήση διαίρεσης χρόνου (TDD) ή διαίρεση συχνότητας (FDD).
- Υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Από το πρότυπο προβλέπεται μέγιστος ρυθμός μετάδοσης 300Mbps στο downlink και 75Mbps στο uplink. Οι τιμές αυτές είναι εφικτές με τη χρήση του μέγιστου προβλεπόμενου εύρους ζώνης (20MHz) και την αξιοποίηση 4x4 MIMO.

Με την ενσωμάτωση των παρακάτω χαρακτηριστικών και βελτιώσεων δημιουργήθηκε ένα σύνολο προτύπων που είναι γνωστό ως LTE – Advanced (LTE – A). Το πρότυπο αυτό θεωρείται ένα πραγματικό πρότυπο τέταρτης γενιάς και οριστικοποιήθηκε με τη δημοσίευση της έκδοσης 10 το Μάρτιο του 2011. Τα βασικά του χαρακτηριστικά είναι τα εξής:

- Καλύτερη αξιοποίηση φάσματος.
- Παγκόσμια Περιαγωγή (Roaming).
- Ρυθμοί μετάδοσης 1Gbps για το downlink και 500Mbps για το uplink.
- Δυνατότητες πολλαπλής πρόσβασης στο uplink. Προβλέπεται η σύμπτυξη υποφερόντων SC-FDMA σε μη συνεχών τμημάτων φάσματος και τον προγραμματισμό επιλογής συχνότητας (frequency-selective scheduling) στο downlink.
- Επιτρέπει τη χρήση 8x8 MIMO για το downlink και 4x4 για το uplink.
- Οι ενδιάμεσοι κόμβοι (relay nodes) αποτελούν κόμβους χαμηλής ισχύος που διευρύνουν την κάλυψη των συμβατικών eNodeB κόμβων σε περιβάλλοντα χαμηλής κάλυψης.

- Βελτιωμένος συντονισμός διακυψελικής παρεμβολής (enhanced inter-cell interference coordination, eICIC). Με αυτή την τεχνική ελαττώνεται η παρεμβολή τόσο στα κανάλια δεδομένων, όσο και στα κανάλια ελέγχου σε ετερογενή συστήματα, αξιοποιώντας διαφορές στην ισχύ, το πεδίο της συχνότητας και του χρόνου.
- Σύμπτυξη φορέων (carrier aggregation, CA). Η τεχνική αυτή είναι ένας οικονομικός τρόπος χρήσης κατακερματισμένου φάσματος στην ίδια ή σε διαφορετικές ζώνες φάσματος. Μεγαλύτεροι ρυθμοί μετάδοσης για το χρήστη, επιτυγχάνονται με την αποστολή δεδομένων σε περισσότερους από έναν φορείς. Προβλέπεται η αξιοποίηση μέχρι και 100MHz μη συνεχούς εύρους ζώνης που προέρχονται από τη συνένωση μέχρι πέντε ανεξάρτητων φορέων με εύρος ζώνης 20MHz.
- Υποστήριξη για ετερογενή δίκτυα. Περιγράφονται οι τεχνικές προδιαγραφές για τη λειτουργία ετερογενών δικτύων που περιλαμβάνουν το συνδυασμό μεγάλων macrocells με μικρότερα κελιά.
- Αυτο-Οργανούμενα δίκτυα (Ad-Hoc Networks SON). Υπάρχουν βελτιώσεις σε SON χαρακτηριστικά στα οποία συμπεριλαμβάνονται και διεργασίες αυτοανάκτησης και επαναφοράς.

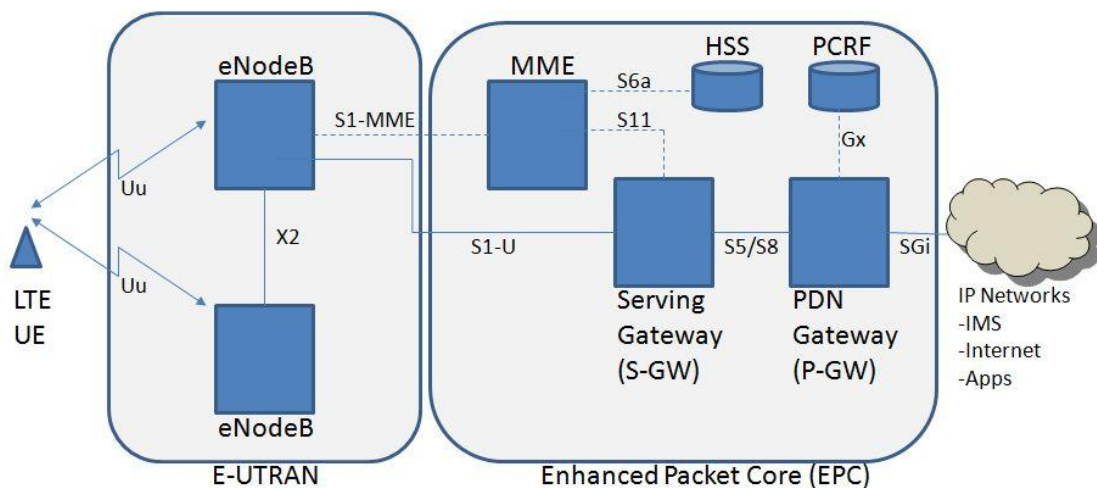
## 4.2 Αρχιτεκτονική του LTE

Σε αντίθεση με τα προγενέστερα συστήματα κινητής τηλεφωνίας που στηρίζονταν σε μετάδοση μεταγωγής κυκλώματος, το LTE είναι σχεδιασμένο, ώστε να υποστηρίζει μόνο υπηρεσίες μεταγωγής πακέτων. Ο στόχος είναι η διαφανής συνδεσιμότητα IP μεταξύ του εξοπλισμού του χρήστη (User equipment, UE) και του δικτύου πακέτων δεδομένων (packet data network, PDN). Η υπηρεσία αυτή θα πρέπει να είναι αδιάλειπτη παρά την κινητικότητα των χρηστών [17].

Για κάθε σύνδεση μεταξύ του UE και της πύλης (gateway) του PDN που αποτελεί την πύλη προς το διαδίκτυο, εγκαθίσταται ένας λογικός φορέας εξελιγμένου συστήματος πακέτου (Evolved packet system, EPS Bearer). Κάθε τέτοιος φορέας αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη ποιότητα υπηρεσίας ανάμεσα στο gateway και το UE. Οι φορείς EPS εγκαθίστανται και ελευθερώνονται ανάλογα με τις αιτούμενες εφαρμογές και υπηρεσίες.

Οι φορείς EPS εξασφαλίζουν συνδεσιμότητα IP με ένα PDN για πρόσβαση στο internet, καθώς επίσης και υπηρεσίες VoIP. Για τον ίδιο χρήστη, μπορούν να εγκατασταθούν πολλαπλοί φορείς EPS για τη σύνδεση σε διαφορετικά PDNs ή για διαφορετικές ποιότητες υπηρεσίας (QoS).

Αυτό επιτυγχάνεται από τη σύνθεση διαφορετικών οντοτήτων που επιτελούν διαφορετικούς ρόλους [12], [13]. Η συνεργασία μεταξύ των οντοτήτων λαμβάνει χώρα μέσω καθορισμένων διεπαφών. Μια πρώτη διάκριση μπορεί να γίνει ανάμεσα στις οντότητες που συγκροτούν το δίκτυο κορμού και σε αυτές που συγκροτούν το E-UTRAN. Το δεύτερο κομμάτι περιλαμβάνει, ουσιαστικά, μόνο κόμβους eNodeB, καθώς και διεπαφές που τους συνδέουν μεταξύ τους. Η χρήση καθορισμένων διεπαφών επιτρέπει το συνδυασμό εξοπλισμού από διαφορετικούς προμηθευτές και προωθεί την εξέλιξη της τεχνολογίας.



Σχήμα 20. Αρχιτεκτονική του LTE

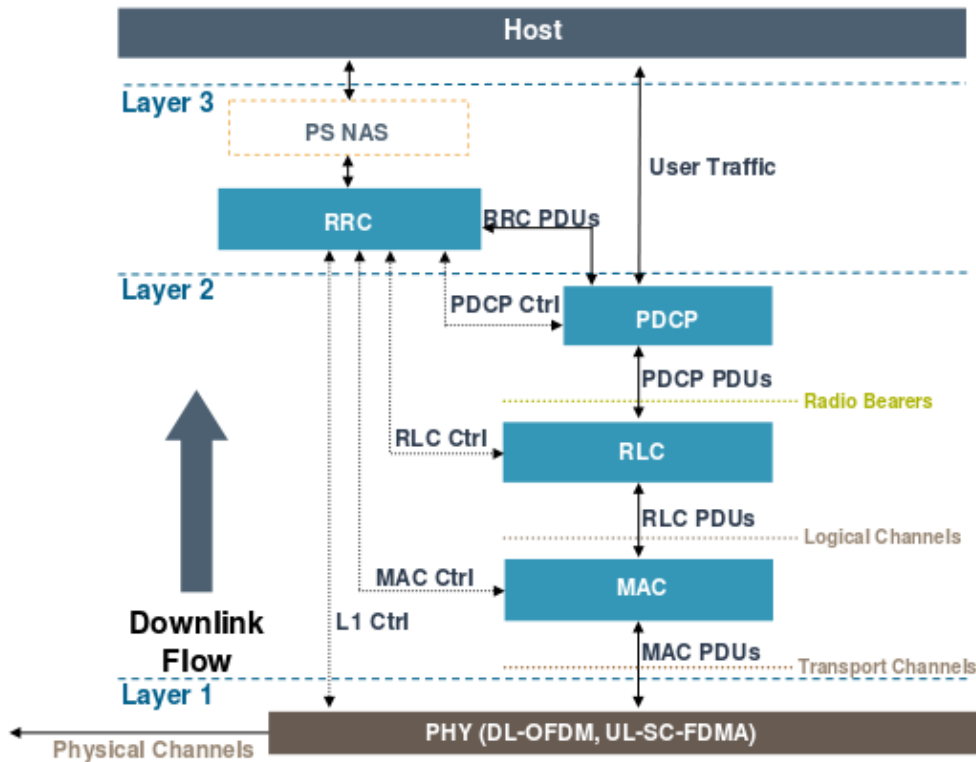
### 4.3 Διαστρωματωμένη Αρχιτεκτονική του LTE

Η διαστρωμάτωση περιλαμβάνει το φυσικό επίπεδο, το ζεύξης δεδομένων και το επίπεδο δικτύου.

Το στρώμα μη-πρόσβασης (non-access stratum, NAS), αποτελεί το υψηλότερο στρώμα του επιπέδου ελέγχου μεταξύ του UE και της MME. Οι βασικές λειτουργίες που επιτελεί, είναι η υποστήριξη της κινητικότητας των χρηστών και η υποστήριξη λειτουργιών διαχείρισης των συνεδριών, καθώς και η διατήρηση της συνδεσιμότητας IP μεταξύ του UE και του gateway προς δίκτυα πακέτων δεδομένων (PDN GW).

Το πρωτόκολλο RRC, υλοποιείται τόσο στους χρήστες, όσο και στο eNodeB και αποτελεί, επίσης, μέρος του στρώματος δικτύου. Οι βασικές τους λειτουργίες, περιλαμβάνουν τη broadcast μετάδοση που αφορά το NAS και το AS, καθώς και λειτουργίες ασφάλειας (διαχείρισης κλειδιών), κινητικότητας, εξασφάλισης ποιότητας υπηρεσιών, μετρήσεων και αναφοράς [14].

Το στρώμα ζεύξης δεδομένων, περιλαμβάνει τρία διακριτά υποστρώματα. Από αυτά, το στρώμα πρωτοκόλλου σύγκλισης πακέτων δεδομένων περιλαμβάνει μια σειρά από λειτουργίες υψηλού επιπέδου, πάνω από τις λειτουργίες ενθυλάκωσης που εδράζουν στο RLC. Στο επίπεδο του χρήστη, περιλαμβάνουν την αποκρυπτογράφηση, την αποσυμπίεση κεφαλίδων ROHC, την αρίθμηση ακολουθίας και την απόρριψη των διπλότυπων πακέτων [15]. Υπάρχει μια, μοναδική, ξεχωριστή διεργασία RLC για κάθε φορέα.



Σχήμα 21. Διαστρωμάτωση του LTE

Στο υπόστρωμα ελέγχου ασύρματης ζεύξης (Radio Link Control, RLC), επιτελείται η τμηματοποίηση και η επανασυναρμολόγηση των δεδομένων [15]. Αυτό μπορεί να γίνει βάσει τριών διαφορετικών λειτουργιών. Τη διαφανή λειτουργία, λειτουργία με επιβεβαιώσεις και λειτουργία χωρίς παρεμβάσεις. Η τμηματοποίηση περιλαμβάνει την παραλαβή μιας PDU στρώματος RLC και τη δημιουργία μιας ή περισσότερων SDU στρώματος RLC. Το μέγεθος των SDU δεν είναι σταθερό, αλλά εξαρτάται από τις συνθήκες του καναλιού. Επιπλέον παράγοντες που επηρεάζουν το μέγεθος μεταφοράς, είναι οι απαιτήσεις σε εύρος ζώνης, η απόσταση, η ισχύς και η διαμόρφωση.

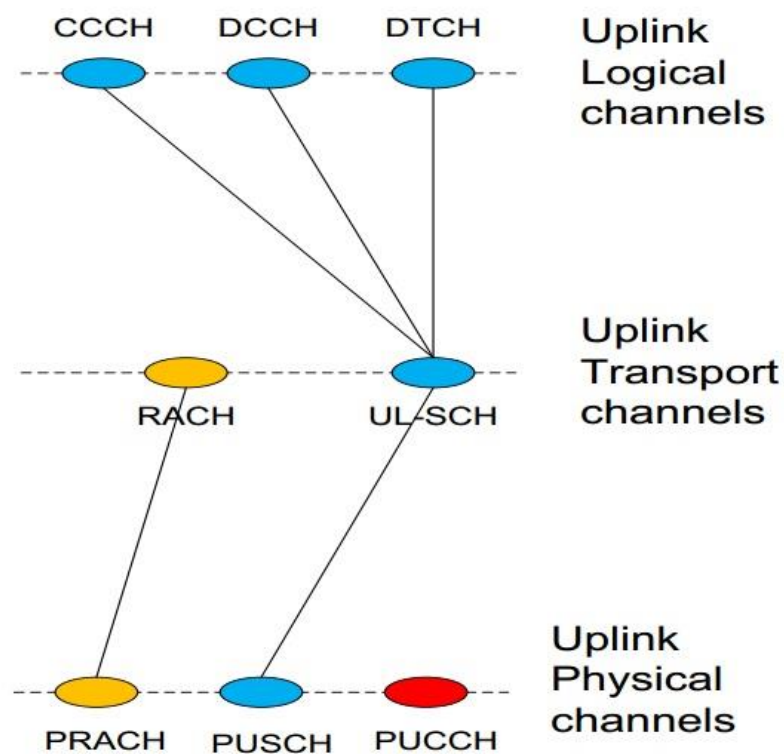
Το επίπεδο MAC, είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση των λειτουργιών HARQ. Επιπλέον, αποτελεί το σημείο σύγκλισης των καναλιών μεταφοράς και των λογικών καναλιών και είναι υπεύθυνο για την επιλογή των διαφόρων εναλλακτικών μορφών

για τα σήματα ελέγχου και την οργάνωση της διεξαγωγής μετρήσεων και την επεξεργασία τους.

Τέλος, το φυσικό επίπεδο, περιλαμβάνει την επεξεργασία των δεδομένων και τη δημιουργία του φυσικού σήματος που μεταδίδεται.

#### 4.4 Ανοδικά Κανάλια του LTE

Στο LTE ορίζονται τρεις διαφορετικοί τύποι καναλιών. Τα λογικά κανάλια, σχετίζονται με τη ροή δεδομένων από τα ανώτερα στρώματα, καθώς η αποστολή των δεδομένων από και προς αυτά, λαμβάνει χώρα μέσω των λογικών καναλιών. Τα κανάλια μεταφοράς αποτελούν ένα ενδιάμεσο επίπεδο που οι λογικές ροές συνενώνονται και υποβάλλονται στις ίδιες διεργασίες κωδικοποίησης κατά την προετοιμασία τους για μετάδοση. Τα κανάλια μεταφοράς στη συνέχεια απεικονίζονται σε φυσικά κανάλια τα οποία αντιστοιχούν άμεσα σε συγκεκριμένους πόρους στο φυσικό επίπεδο [16].



Σχήμα 22. Ανοδικά Κανάλια LTE



Τα λογικά κανάλια είναι τα εξής:

- BCCH (Broadcast Control Channel). Μέσω αυτού του καναλιού μεταδίδονται πληροφορίες ελέγχου σε όλους τους εγγεγραμμένους χρήστες.
- CCCH (Common Control Channel). Το κανάλι αυτό μεταδίδει τόσο καθοδική, όσο και ανοδική πληροφορία ελέγχου μεταξύ των χρηστών και του δικτύου. Χρησιμοποιείται για χρήστες οι οποίοι δεν έχουν εγκαταστήσει ακόμη συνδέσεις RRC με το δίκτυο.
- DCCH (Dedicated Control Channel). Αποτελεί και αυτό ένα αμφίδρομο κανάλι μετάδοσης πληροφορίας ελέγχου. Χρησιμοποιείται για χρήστες οι οποίοι έχουν εγκαταστήσει σύνδεση RRC.
- DTCH (Dedicated Traffic Channel). Το κανάλι αυτό είναι ένα σημείο προς σημείο κανάλι, που αντιστοιχίζεται σε ένα μοναδικό χρήστη για τη μεταφορά πληροφορίας σχετικά με το χρήστη. Μπορεί να είναι τόσο ανοδικό, όσο και καθοδικό.

Τα κανάλια μεταφοράς είναι τα εξής:

- BCH (Broadcast Channel). Μέσω αυτού του καναλιού μεταδίδεται πληροφορία με προκαθορισμένη μορφή σε όλη την περιοχή κάλυψης της κυψέλης.
- UL-SCH (Uplink Shared Channel). Υποστηρίζει HARQ διεργασίες και δυναμική προσαρμογή καναλιού μέσω του καθορισμού διαμόρφωσης, κωδικοποίησης και ισχύος μετάδοσης, καθώς επίσης δυναμική και ημιστατική ανάθεση πόρων.

Τα φυσικά κανάλια είναι τα εξής:

- PHICH (Physical HARQ Indication Channel). Το κανάλι αυτό μεταφέρει επιβεβαιώσεις ACK/NACK για τα ανοδικά δεδομένα. Η διαμόρφωση είναι QPSK.
- PUSCH (Physical Uplink Shared Channel). Στο κανάλι αυτό απεικονίζεται το κανάλι μεταφοράς UL-SCH. Η διαμόρφωση επιλέγεται δυναμικά ανάμεσα από QPSK, 16-QAM και 64-QAM.
- PUCCH (Physical Uplink Control Channel). Το κανάλι αυτό μεταφέρει τις HARQ επιβεβαιώσεις για την καθοδική μετάδοση. Επιπλέον, μεταφέρει τα αιτήματα προγραμματισμού μετάδοσης από τους χρήστες, καθώς και τις τιμές CQI που κωδικοποιούν την κατάσταση του καναλιού, όπως την αντλαμβάνονται οι χρήστες. Η διαμόρφωση σε αυτό το κανάλι, μπορεί να είναι είτε BPSK, είτε QPSK.

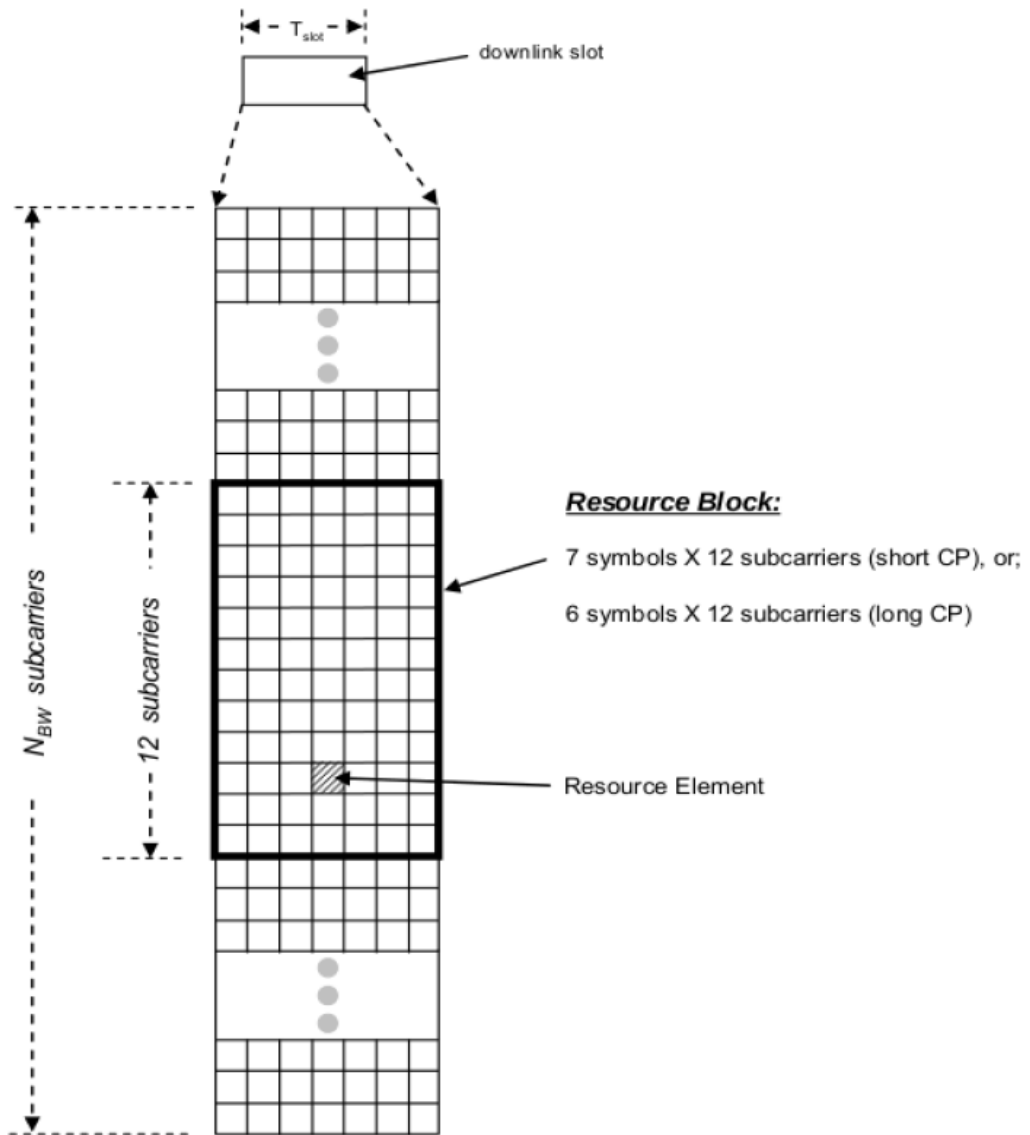
## 4.5 Φυσικό Επίπεδο στο LTE

### 4.5.1 Το Πλέγμα Πόρων για το LTE

Στο LTE χρησιμοποιείται η OFDMA ως σχήμα πολυπλεξίας τόσο για την καθοδική, όσο και για την ανοδική κίνηση [16]. Παρόλο που αυτό συνεπάγεται επιπρόσθετη πολυπλοκότητα σε σχέση με χρονοπρογραμματισμό πόρων, η τεχνική αυτή είναι μακράν αποδοτικότερη από πακετο-κεντρικές προσεγγίσεις σε σχέση με αποδοτικότητα και καθυστέρηση. Στην OFDMA, αποδίδεται ένας συγκεκριμένος αριθμός από υποφορείς για ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα. Αυτά ονομάζονται φυσικά μπλοκ πόρων (physical resource block, PRBs) και έχουν μια συνιστώσα τόσο στο πεδίο του χρόνου, όσο και στο πεδίο της συχνότητας. Η ανάθεση των πόρων γίνεται από τη λειτουργία χρονοπρογραμματισμού στους κόμβους eNodeB.

Το μεταδιδόμενο καθοδικό σήμα μπορεί να αναπαρασταθεί από ένα πλέγμα πόρων. Κάθε πλαίσιο μέσα στο πλέγμα αντιπροσωπεύει ένα μοναδικό υποφορέα για μια περίοδο συμβόλων και ονομάζεται στοιχείο πόρου (resource element). Στην περίπτωση χρήσης MIMO υπάρχει ένα ξεχωριστό πλέγμα πόρων για κάθε κεραία μετάδοσης.

Κεντρική έννοια για το φυσικό επίπεδο, είναι το πλαίσιο (frame). Τα πλαίσια στο LTE, έχουν διάρκεια 10msec και υποδιαιρούνται σε 10 υποπλαίσια με διάρκεια 1msec το καθένα. Κάθε υποπλαίσιο χωρίζεται σε δύο ίσες θυρίδες (slots) διάρκεια 0.5msec. Κάθε μια από αυτές περιέχει είτε 7 είτε 6 σύμβολα OFDM ανάλογα με το αν χρησιμοποιείται το κανονικό ή το εκτεταμένο μήκος για το κυκλικό πρόθεμα (cyclic prefix).

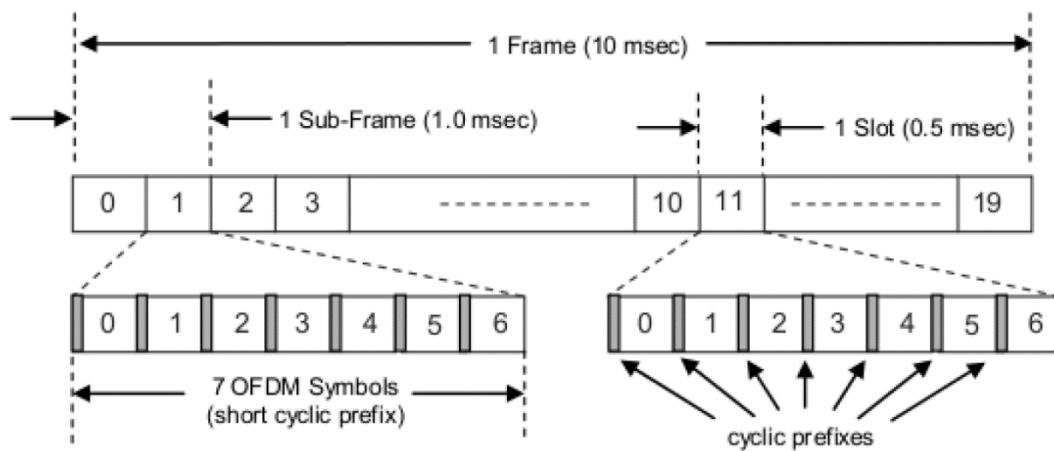


Σχήμα 23. Μπλοκ Πόρων (Resource Block)

Ο συνολικό αριθμός των διαθέσιμων υποφορέων εξαρτάται από το συνολικό εύρος ζώνης του συστήματος. Οι προδιαγραφές ορίζουν τις παραμέτρους ανάλογα με το ονομαστικό εύρος ζώνης. Ένα φυσικό μπλοκ πόρων μπορεί να θεωρηθεί ότι αντιστοιχεί σε 12 συνεχόμενους υποφορείς στο πεδίο της συχνότητας (εύρος ζώνης 15kHz) και μια θυρίδα στο πεδίο του χρόνου (ίση με 0.5msec). Αυτό αποτελεί και το μικρότερο σύνολο από πόρους που μπορεί να ανατεθεί από τον ελεγκτή χρονοπρογραμματισμού στο σταθμό βάσης.

Σε αντίθεση με πακετο-κεντρικά δίκτυα, το LTE δεν χρησιμοποιεί ένα προίμιο φυσικού στρώματος, ώστε να διευκολύνει τον προσδιορισμό της απόκλισης (offset),

την εκτίμηση του καναλιού και τον συγχρονισμό. Αντί για αυτό, ειδικά σήματα αναφοράς εμφυτεύονται μέσα στα PRBs.



Σχήμα 24. Πλαίσιο και Υποπλαίσια LTE

#### 4.5.2 Ανοδικά Σήματα Αναφοράς

Υπάρχουν δυο διαφορετικοί τύποι ανοδικών σημάτων αναφοράς. Ο πρώτος είναι τα σήματα αναφοράς αποδιαμόρφωσης (demodulation reference signals, DM-RS), που χρησιμοποιούνται για την εύρωστη αποδιαμόρφωση από τους κόμβους eNodeB. Τα σήματα αυτά πολυπλέκονται στο χρόνο με δεδομένα ανοδικής κίνησης και μεταδίδονται στο τέταρτο SC-FDMA σύμβολο για κυκλικό πρόθεμα κανονικής διάρκειας ή στο τρίτο SC-FDMA σύμβολο για κυκλικό πρόθεμα εκτεταμένης διάρκειας. Στη διάσταση της συχνότητας, το χρησιμοποιούμενο εύρος ζώνης είναι ίσο με το εύρος ζώνης των δεδομένων.

Ο δεύτερος τύπος σημάτων είναι τα σήματα αναφοράς στάθμισης (sounding reference signals, SRS), που χρησιμοποιούνται για τον χρονοπρογραμματισμό ανοδικής κίνησης που παίρνει υπόψη την κατάσταση του καναλιού, δηλαδή την εξάρτηση από τη συχνότητα. Τα σήματα DM-RS, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αυτό το σκοπό, καθώς ανατίθενται μέσα στα πλαίσια του ήδη ανατεθέντος φάσματος σε κάποιον χρήστη. Τα SRS εισάγονται ως ευρύτερα σήματα αναφοράς και τυπικά μεταδίδονται στο τελευταίο SC-FDMA σύμβολο κάθε υποπλαισίου. Καθώς δεν επιτρέπεται η μετάδοση σε αυτό το μπλοκ, η σηματοδότηση αυτή αποφέρει μια μείωση 7% στο συνολικό ανοδικό ρυθμό δεδομένων. Η επιλογή SRS είναι προαιρετική και μπορεί να προσαρμοστεί, ώστε να ελεγχθεί το επίπεδο επιβάρυνσης. Δεν μπορεί, ωστόσο να απαλειφθεί τελείως σε μια κυψέλη. Τα σήματα στάθμισης ανήκουν ταυτόχρονα σε πολλούς χρήστες στο πεδίο της συχνότητας.

Κάθε χρήστη που επιθυμεί να αποκτήσει πρόσβαση σε ένα LTE σύστημα, πρέπει να ακολουθήσει μια σειρά από στάδια συγχρονισμού με βάση τα οποία ο εξοπλισμός χρήστη μπορεί να καθορίσει το χρονισμό και το εύρος συχνοτήτων που θα επιτρέψουν την αποδιαμόρφωση του σήματος. Επιπλέον, θα πρέπει να προγραμματιστούν οι μεταδόσεις με σωστό χρονισμό και να ληφθούν οι κρίσιμες παράμετροι του συστήματος.

Υπάρχουν συνολικά τρεις διαφορετικές απαιτήσεις συγχρονισμού στο LTE:

- Η ανάκτηση του συμβόλου χρονισμού, βάσει του οποίου καθορίζεται η αρχή κάθε συμβόλου.
- Ο συγχρονισμός συχνότητας φέροντος που εξαλείφει την επίδραση σφαλμάτων συχνότητας που προκαλούνται από τη μετατόπιση Doppler.
- Ο συγχρονισμός ρολογιού δειγματοληψίας

Οι εξοπλισμοί χρήστη επιτελούν δυο διαφορετικές διεργασίες αναζήτησης κελιού. Η πρώτη αφορά στον αρχικό συγχρονισμό, ενώ η δεύτερη αφορά την ανίχνευση γειτονικών κελιών στην περίπτωση της προετοιμασίας της διαπομπής (handover). Και στις δυο περιπτώσεις ο εξοπλισμός χρήστη, χρησιμοποιεί δυο διαφορετικά σήματα που μεταδίδονται από κάθε κελί. Την πρωτεύουσα ακολουθία συγχρονισμού (primary synchronization sequence, PSS) και τη δευτερεύουσα ακολουθία συγχρονισμού (secondary synchronization sequence, SSS). Η ανίχνευση αυτών των σημάτων επιτρέπει στον εξοπλισμό χρήστη να ολοκληρώσει το συγχρονισμό στο χρόνο και τη συχνότητα και να ανακτήσει σημαντικές παραμέτρους, όπως τον αριθμό ταυτότητας του κελιού, το μήκος του κυκλικού προθέματος και τη μέθοδο πρόσβασης (FDD/TDD). Με την ολοκλήρωση αυτού του σταδίου, ο εξοπλισμός χρήστη είναι σε θέση να αποκωδικοποιήσει το PBCH (Physical Broadcast Channel) και να ανακτήσει σημαντικές πληροφορίες για το σύστημα.

Το πρωτεύον σήμα συγχρονισμού μεταδίδεται στο τελευταίο OFDM σύμβολο του πρώτου και του πέμπτου υποπλαισίου και επιτρέπει στον εξοπλισμό χρήστη να εξαγάγει το συγχρονισμό πλαισίου, ανεξάρτητα από το μήκος του κυκλικού προθέματος. Το δευτερεύον σήμα συγχρονισμού είναι το ίδιο ανεξάρτητα από τον τύπο του κυκλικού προθέματος. Ο εξοπλισμός χρήστη μπορεί να προσδιορίσει το μήκος του κυκλικού προθέματος, ελέγχοντας την απόλυτη θέση του δευτερεύοντος σήματος συγχρονισμού. Επίσης, μπορεί να καθορίσει τα σύνορα μεταξύ υποπλαισίων, καθώς το δευτερεύον σήμα συγχρονισμού εναλλάσσεται με συγκεκριμένο τρόπο μεταξύ των μεταδόσεων. Στο πεδίο της συχνότητας, τα σήματα συγχρονισμού καλύπτουν τα έξι κεντρικά μπλοκ, ανεξάρτητα από το συνολικό εύρος ζώνης, γεγονός που επιτρέπει στον εξοπλισμό χρήστη να επιτύχει το συγχρονισμό, χωρίς την εκ των προτέρων γνώση του εύρους ζώνης του καναλιού. Οι συνολικοί υποφορείς που χρησιμοποιούνται τα σήματα συγχρονισμού είναι 62 και χαρτογραφούνται εκατέρωθεν του συνεχούς υποφορέα, ο οποίος δεν χρησιμοποιείται. Έτσι απομένουν πέντε υποφορείς σε καθένα από τα δύο ακραία μπλοκ πόρων.

### 4.5.3 Καθοδικά Σήματα Αναφοράς

Πέρα από τα δεδομένα που μεταδίδονται στο πλέγμα μέσω των φυσικών καναλιών, το LTE περιλαμβάνει την εισαγωγή συμβόλων αναφοράς, σε συγκεκριμένες θέσεις στο πλέγμα χρόνου – συχνότητας που επιτρέπουν την εκτίμηση του καναλιού. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η εύρωστη αποδιαμόρφωση του σήματος από τον εξοπλισμό χρήστη. Για την καθοδική κίνηση τα σήματα αναφοράς εισάγονται στο πρώτο σύμβολο OFDM (κανονικό κυκλικό πρόθεμα) ή το τρίτο από τέλος σύμβολο OFDM (εκτεταμένο κυκλικό πρόθεμα), κάθε υποπλαισίου, ενώ στη διάσταση της συχνότητας χρησιμοποιούνται έξι υποφορείς. Επιπλέον, υπάρχει μια απόκλιση τριών υποφορέων μεταξύ των διαδοχικών συμβόλων μεταφοράς και επομένως υπάρχουν συνολικά τέσσερα σύμβολα αναφοράς σε κάθε μπλοκ πόρων (resource block).

Η εκτίμηση του καναλιού από τον εξοπλισμό χρήστη, γίνεται μέσω αριθμητικής παρεμβολής χρησιμοποιώντας πολλαπλά σήματα αναφοράς. Στην περίπτωση δυο κεραιών μετάδοσης τα σήματα αναφοράς τοποθετούνται στις δυο κεραίες με διαφοράς τριών υποφορέων στο πεδίο της συχνότητας. Για την απρόσκοπτη εκτίμηση των συνθηκών μετάδοσης, όταν μεταδίδεται ένα σήμα αναφοράς από μια κεραία, δεν πραγματοποιείται μετάδοση από καμιά άλλη στο συγκεκριμένο σημείο χρόνου – συχνότητας. Τα σύμβολα αναφοράς έχουν μιγαδικές τιμές, οι οποίες προσδιορίζονται, τόσο από τη θέση στο πλέγμα, όσο και από την ταυτότητα του κελιού. Συγκεκριμένα, υπάρχουν 510 διαφορετικές ακολουθίες σήματος που αντιστοιχούν σε 510 διαφορετικούς αριθμούς ταυτότητας κλειδιών. Τα σύμβολα αναφοράς προκύπτουν από το γινόμενο 170 διαφορετικών ψευδοτυχαίων ακολουθιών που αντιστοιχούν σε 170 ομάδες αριθμών ταυτότητας και τρεις ορθογώνιες ακολουθίες που αντιστοιχούν σε μια συγκεκριμένη ταυτότητα κελιού μέσα στην ομάδα κυψελίδων.

### 4.5.4 Ορθογωνική Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας

Η ορθογωνική πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM), αναπτύχθηκε ως τεχνική κατά τη δεκαετία του '50, αλλά βρήκε ευρεία πρακτική εφαρμογή κατά τη δεκαετία του '80, που αποτέλεσε μέρος των ευρωπαϊκών προτύπων για την ψηφιακή μετάδοση ήχου (digital audio broadcasting, DAB) και την ψηφιακή μετάδοση βίντεο (digital video broadcasting, DVB) [18]. Στα χρόνια αυτά, τροφοδοτήθηκε μια έντονη διαμάχη σχετικά με τη χρήση τεχνικών που στηρίζονται στην OFDM και των εναλλακτικών μεθόδων που βασίζονται στη μετάδοση μονού φορέα σε συνδυασμό με εξισορρόπηση στο πεδίο της συχνότητας (single carrier transmission with frequency division equalization, SCT-FDE) [19], [20]. Στα μέσα της δεκαετίας του '90, προτάθηκε η μέθοδος της ορθογωνικής διαίρεσης συχνότητας με πολλαπλή πρόσβαση (orthogonal frequency division-multiple access, OFDMA) για broadcast μετάδοση σε συστήματα

καλωδιακής τηλεόρασης [21]. Παρόλο που προτιμήθηκαν τελικά μέθοδοι SCT-FDE για το σύστημα αυτό, η εργασία αυτή αποτέλεσε το έναυσμα ενεργούς έρευνας που οδήγησε στην επίλυση κάποιων από τα μειονεκτήματα της OFDMA [22].

Τα επόμενα χρόνια, τεχνικές OFDM βρήκαν εφαρμογή σε πρότυπα ασύρματης μετάδοσης. Το πρότυπο για το WiFi (IEEE 802.11), προέβλεπε τη χρήση OFDM για μετάδοση, αλλά η πολλαπλή πρόσβαση στηρίζονταν αποκλειστικά σε πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου (time-division multiple access). Ένας αντίστοιχος συνδυασμός OFDM και TDMA, προτάθηκε και για το σταθερό WiMAX (IEEE 802.16), με τη δυνατότητα, ωστόσο της εναλλακτικής επιλογής της χρήσης SCT-FDE ή OFDMA. Αργότερα, το WiMAX Forum, εκδήλωσε την προτίμησή του για τη λύση OFDM/TDMA. Οι ίδιες επιλογές ήταν διαθέσιμες και για το πρότυπο του κινητού WiMAX, αλλά σε αυτή την περίπτωση επιλέχθηκε η λύση της OFDMA τεχνικής, οδηγώντας σε ασυμβατότητες μεταξύ του σταθερού και κινητού WiMAX.

Το επόμενο στάδιο στην εξέλιξη των τεχνικών OFDM, σημειώθηκε παράλληλα με τη δημιουργία του σχεδίου για τη σύμπραξη τρίτης γενιάς (3<sup>rd</sup> generation partnership project – 3GPP). Με την οριστικοποίηση της έκδοσης 8 του προτύπου, πραγματοποιήθηκε σε ένα τεχνολογικό άλμα εγκαταλείποντας τις μεθόδους που στηρίζονται σε OFDM/TDMA και την υιοθέτηση της OFDMA για την καθοδική κίνηση και της OFDM μονού φορέα (single carrier orthogonal frequency division multiplexing, SC-OFDM) για την ανοδική κίνηση. Η τελευταία αυτή επιλογή υπαγορεύτηκε από το χαμηλό λόγο μέγιστης προς μέσης ισχύος (peak to average power ratio, PPAR), που αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τη σχεδίαση φορητών τηλεφωνικών συσκευών.

#### **4.5.5 OFDMA**

Η ορθογωνική πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας πολλαπλής πρόσβασης (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA) αποτελεί την επιλογή για το καθοδικό κομμάτι του LTE. Παρόλο, που εμπεριέχει πολυπλοκότητα σε σχέση με το χρονοπρογραμματισμό πόρων, παρέχει πολύ καλύτερη απόδοση σε ότι αφορά αποδοτικότητα και καθυστέρηση. Στην OFDMA, ανατίθεται στους χρήστες ένας συγκεκριμένος αριθμός από υποφορείς για ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα. Αυτοί αντιστοιχούν στα μπλοκ φυσικών πόρων (PRBs) κατά την ορολογία των προτύπων του LTE. Τα PRBs περιλαμβάνουν τόσο μια χρονική συνιστώσα, όσο και μια συνιστώσα συχνότητας και η ανάθεση τους γίνεται από τη λειτουργία του χρονοπρογραμματισμού του eNodeB.

Η διάρκεια ενός πλαισίου LTE είναι 10msec. Καθένα από αυτά, περιλαμβάνει 10 υποπλάισια διάρκειας 1msec. Κάθε υποπλάισιο, διαιρείται επίσης σε δύο θυρίδες διάρκειας 0.5msec. Οι θυρίδες μπορούν να περιέχουν είτε 6 είτε 7 σύμβολα OFDM, ανάλογα με η διάρκεια του κυκλικού προθέματος. Ο συνολικός αριθμός από διαθέσιμους υποφορείς εξαρτάται από το εύρος ζώνης του συστήματος. Οι προδιαγραφές του LTE προβλέπουν τη δυνατότητα χρήσης από 1.25MHz έως 20MHz.

Το μεταδιδόμενο σήμα ανατίθεται σε διαφορετικά PRBs. Ένα PRB περιλαμβάνει 12 συνεχόμενους υποφορείς καθένας από τους οποίους αντιστοιχεί σε 15kHz φάσματος και 0.5msec στο πεδίο του χρόνου. Στο χρονικό διάστημα αυτό μπορούν να αντιστοιχούν είτε 6 είτε 6 σύμβολα OFDM, ανάλογα με το μήκος κυκλικού προθέματος που χρησιμοποιείται ως σύνορο μεταξύ των συμβόλων για την αντιμετώπιση της διασυμβολικής παρεμβολής. Σε αντίθεση με τα πακετο-κεντρικά δίκτυα, το LTE δεν χρησιμοποιεί ένα προοίμιο στο φυσικό επίπεδο, ώστε να διευκολύνεται η εκτίμηση του καναλιού ή ο συγχρονισμός, αλλά χρησιμοποιεί σήματα αναφοράς που περιλαμβάνουν πολλαπλά PRBs.

Οι απαιτήσεις για το ανοδικό κομμάτι, διαφέρουν από αυτές του καθοδικού. Για παράδειγμα, η κατανάλωση ισχύος αποτελεί ένα παράγοντα κλειδί για τα τερματικά των χρηστών. Επομένως, ο υψηλός λόγος μεταξύ μέγιστης και μέσης ισχύος (Peak to Average Power Ratio, PARP) και τα σχετικά υψηλά κέρδη ισχύος (power gains) που σχετίζονται με την τεχνολογία OFDMA, αποτελούν σημαντικά μειονεκτήματα για την καθοδική επικοινωνία. Αντίθετα, η OFDMA είναι συμβατή με τις ανάγκες αυτής. Παρόλο που η βασική αρχιτεκτονική του πομπού και του δέκτη, είναι παρόμοιες και η απόδοση σε σχέση με την προστασία από εξασθένιση πολλαπλών διαδρομών, είναι αντίστοιχη. Ο λόγος PARP είναι σημαντικά μικρότερος, καθώς η τεχνική αυτή είναι ουσιαστικά μια τεχνική μονού φορέα.

### 4.5.6 SC-OFDMA

Σε αντίθεση με την OFDMA, η SC-OFDMA εμφανίζει πολύ μικρότερο PARP, καθώς περιλαμβάνει μόνο ένα υποφορέα. Η υλοποίηση στο LTE περιλαμβάνει τη χρήση του διακριτού μετασχηματισμού Fourier (Discrete Fourier Transformation, DFT) για τη μεταφορά εξάπλωσης OFDM. Μέσω του DFT επιτυγχάνεται η πολυπλεξία ανοδικών μεταδόσεων σε συγκεκριμένα μπλοκ πόρων σύμφωνα με τον χρονοπρογραμματισμό που συντονίζεται από τον eNodeB. Σε αντίθεση με την OFDMA, τα δεδομένα παραμένουν σειριακά. Με αυτή την προσέγγιση απαιτείται ένας εξισοροπιστής κατά τη λήψη στον eNodeB, ώστε να αντιμετωπιστούν οι στρεβλώσεις που εισάγει το κανάλι. Από την άλλη, η SC-OFDMA δεν είναι τόσο ευαίσθητη σε αστάθειες συχνότητας ή στο φαινόμενο Doppler, εξαιτίας του γεγονότος ότι περιλαμβάνει ένα μοναδικό υποφορέα.



Οι υποφορείς της SC-OFDMA, μπορούν να απεικονιστούν με δυο τρόπους. Είτε τοπικά, είτε κατανεμημένα. Η περίπτωση της τοπικής ανάθεσης είναι πιο απλή και επιπλέον, μπορεί να εκμεταλλευτεί κέρδη που εξαρτώνται από τη συχνότητα μέσω χρονοπρογραμματισμού εξαρτώμενου από το κανάλι. Δηλαδή, μέσω της ανάθεσης των ανοδικών συχνοτήτων στους χρήστες, βάσει των ευνοϊκών συνθηκών διάδοσης.

#### 4.5.7 Λειτουργία TDD στο LTE

Η λειτουργία TDD στηρίζεται στη μετάδοση μικρών ριπών από ανοδικά η καθοδικά δεδομένα σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Καθώς οι περιοδικές αυτές μεταδόσεις είναι μικρές, δεν υπάρχει καμιά παρατηρήσιμη καθυστέρηση από το χρήστη. Όπως οι FDD μεταδόσεις απαιτούν μια ζώνη φρούρησης που να διαχωρίζει το ανοδικό και το καθοδικό εύρος ζώνης, η λειτουργία TDD απαιτεί την ύπαρξη χρονικής απόστασης μεταξύ καθοδικών και ανοδικών μεταδόσεων. Στο LTE αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση των ειδικών υποπλαισίων. Σε αυτά περιλαμβάνεται ένα κενό χρονικό διάστημα, η διάρκεια του οποίου μπορεί να ρυθμιστεί ανάλογα με τις συνθήκες.

Η λειτουργία TDD περιλαμβάνει 7 διαφορετικές λειτουργίες κατά τις οποίες τα υποπλάισια μήκους 1msec ανατίθενται περιοδικά σε ανοδικά, καθοδικά και ειδικά υποπλάισια [16]. Τα ειδικά υποπλάισια περιέχουν καθοδική πληροφορία ελέγχου ή και δεδομένα, ένα διάστημα φρούρησης, καθώς και ανοδικά δεδομένα. Υπάρχουν 10 διαφορετικά είδη ειδικών υποπλαισίων που προβλέπουν διαφορετικά μεγέθη πληροφορίας.

Η λειτουργία TDD είναι πιο ευέλικτη από την FDD σε περιπτώσεις που η κίνηση δεν είναι ισορροπημένη μεταξύ των δύο κατευθύνσεων. Στην περίπτωση αυτή, θα έπρεπε ιδανικά να μπορεί να ρυθμιστεί η χωρητικότητα σε κάθε κατεύθυνση. Με τη χρήση ενός TDD συστήματος, αυτό είναι δυνατό σε κάποιο βαθμό μέσω της ανάθεσης περισσότερων/λιγότερων υποπλαισίων σε κάθε κατεύθυνση. Συχνά, αυτό πρέπει να γίνεται δυναμικά, ώστε να μπορεί να επιτευχθεί η προσαρμογή του συστήματος στις κυμαινόμενες απαιτήσεις μετάδοσης.

Από την άλλη, η λειτουργία TDD έχει ένα βασικό μειονέκτημα σε σχέση με την καθυστέρηση. Είναι πιθανό, τα δεδομένα να μη μπορούν να μεταδοθούν άμεσα, ως αποτέλεσμα της πολυπλεξίας στο χρόνο μεταξύ αποστολής και λήψης. Υπεισέρχεται λοιπόν, μια πρόσθετη καθυστέρηση, της τάξης των msec που δεν υπάρχει στη λειτουργία FDD. Επιπρόσθετα, η αύξηση αυτή για το LTE περιλαμβάνει και μεγαλύτερη πολυπλοκότητα σε σχέση με την αποστολή επιβεβαιώσεων, καθώς για λειτουργία TDD είναι δυνατό επιβεβαιώσεις για διαφορετικά υποπλάισια να πρέπει να μεταδοθούν στο ίδιο υποπλάισιο.

Παράμετρος	TDD	FDD
Συζευγμένο φάσμα	Δεν απαιτεί συζευγμένο φάσμα	Απαιτεί συζευγμένο φάσμα με ικανοποιητικό διαχωρισμό
Κόστος hardware	Χαμηλότερο κόστος	Μεγαλύτερο κόστος λόγω της απαίτησης διπλέκτη (diplexer) για διαχωρισμό μεταξύ πομπού-δέκτη
Ασυμμετρία UL/DL	Μπορεί να προσαρμοστεί δυναμικά σε διαφορετικούς λόγους UL/DL	Σταθερή ανάθεση πόρων σε ανοδική και καθοδική κίνηση
Περίοδος/Φάσμα Φρούρησης	Απαιτεί χρονικό διάστημα φρούρησης	Απαιτεί φάσμα φρούρησης
Ασυνεχής μετάδοση	Απαιτεί ασυνεχή μετάδοση που μπορεί να έχει επιπτώσεις στον ενισχυτή	Χρησιμοποιεί συνεχή μετάδοση
Παρεμβολή μεταξύ θυρίδων γειτονικών καναλιών	Απαιτεί συγχρονισμό μεταξύ γειτονικών κυψελίδων ώστε να μην υπάρχει παρεμβολή	Δεν επηρεάζεται από παρεμβολή αυτού του είδους

Σχήμα 25. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Λειτουργίας TDD/FDD

Δείκτης λειτουργίας TDD	Αριθμός Υποπλαισίου									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	D	S	U	D	D	D	S	U	U	D
3	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
5	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

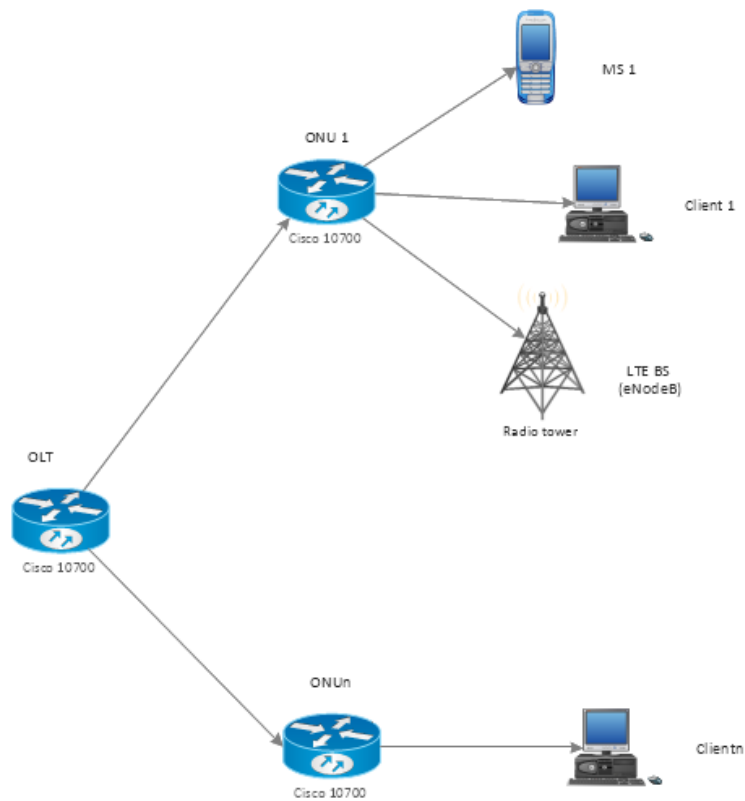
Σχήμα 26. Διαφορετικές Λειτουργίες TDD στο LTE

## 5. Υβριδικό Μοντέλο & Μηχανισμοί

### 5.1 Υβριδικό Μοντέλο

Το υβριδικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την εργασία, χρησιμοποιεί σαν δίκτυο κορμού ένα Ethernet παθητικό οπτικό δίκτυο (EPON), παράλληλα με το πρωτόκολλο κινητής επικοινωνίας, LTE. Το EPON, αποτελείται από 2 έως 20 ONUs, ενώ υπάρχει μόνο μια κεραία επικοινωνίας, ή αλλιώς ο eNodeB, που προσαρμόζεται σε μια ONU, η επιλογή της οποίας είναι τυχαία και γίνεται κατά την εκκίνηση της προσομοίωσης του μοντέλου. Παράλληλα, η ποιότητα υπηρεσιών (Quality of Service, QoS), είναι τύπου Constant BitRate (CBR).

Η τοπολογία του δικτύου φαίνεται στο Σχήμα 27.

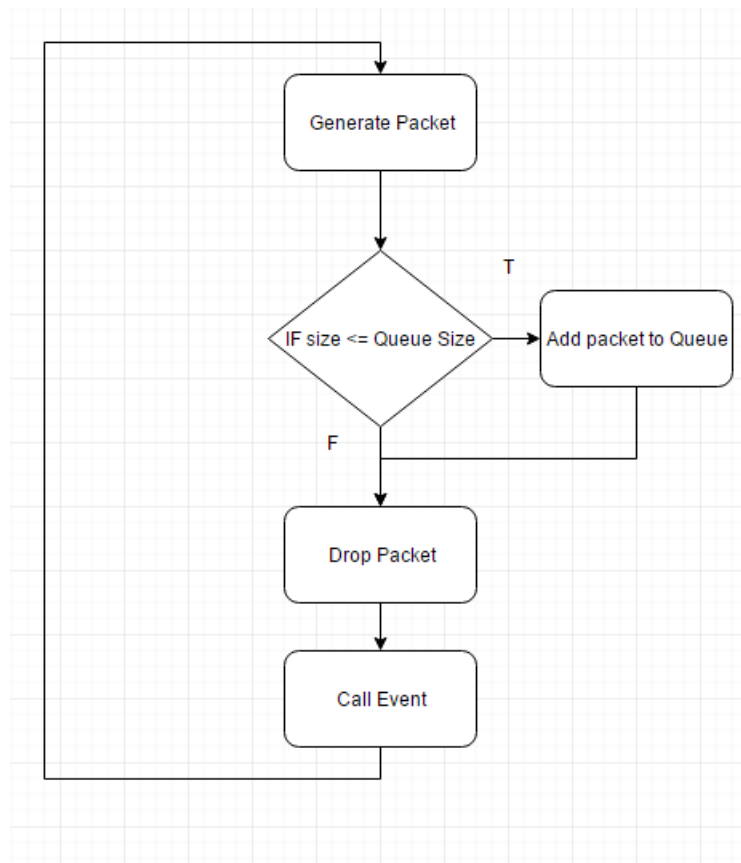


Σχήμα 27. Τοπολογία Υβριδικού Μοντέλου

Οι βασικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση είναι οι παρακάτω. Χρόνος Προσομοίωσης (Sim\_Time), Απόσταση των ONU από το OLT (Distance\_ONUs), Αριθμός ONU (ONUs), Αριθμός Mobile Client (MSs), Αριθμός Καναλιών (Channels), Μέγεθος Ουράς (Q\_Size, Qcellular\_Size, Q\_Downstream\_Size), Χρόνος Προστασίας (Guard\_Time), Μέγεθος GATE (Gate\_Size).

Η προσομοίωση του μοντέλου έγινε στο εργαλείο Matlab R2016a, ενώ ο τύπος προγραμματισμού είναι γεγονοδηγούμενος. Οι αναλύσεις αφορούν την Online λειτουργία του EPON.

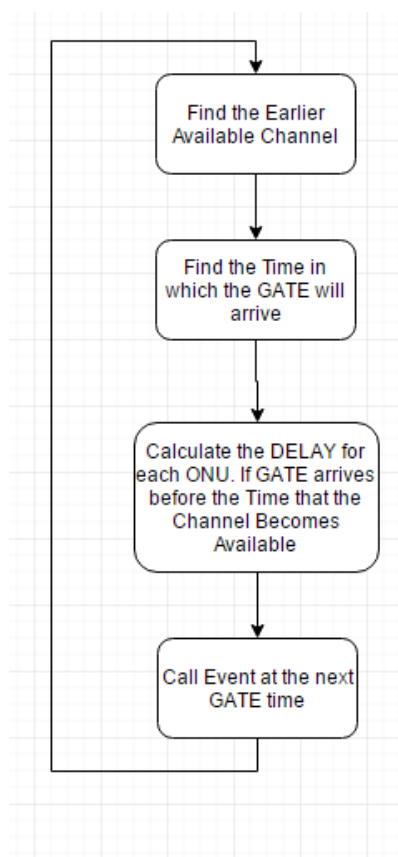
Αρχικά, τόσο οι fixed, όσο και οι mobile clients, δημιουργούν κίνηση μέσα στο δίκτυο, η οποία είναι VoIP, Media και Live. Η κίνηση αυτή αποθηκεύεται σε δυο διαφορετικές ουρές, η μια για τους fixed και η άλλη για τους mobile clients. Ως προς την αρχικοποίηση, τα γεγονότα ξεκινούν στο χρόνο μηδέν. Ενδεικτικά, το παραπάνω παρουσιάζεται στο Σχήμα 28 (VoIP, fixed).



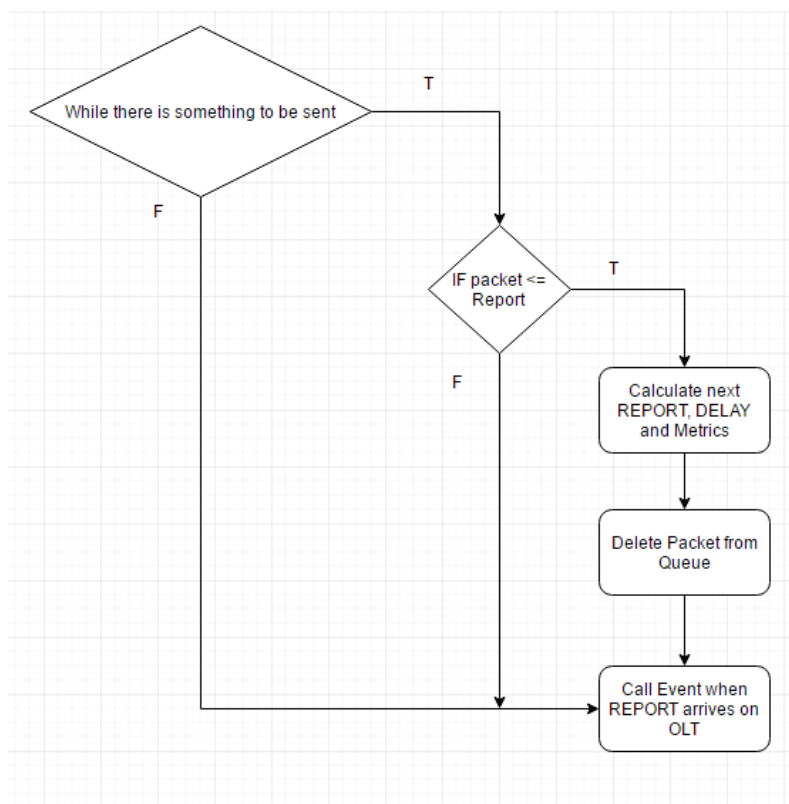
Σχήμα 28. Δημιουργία Κίνησης Fixed Clients – VoIP

Υπάρχουν και τα αντίστοιχα γεγονότα για τους υπόλοιπους τύπους κίνησης και η αντίστοιχη αποθήκευση για του mobile clients.

Στη συνέχεια, καλούνται τα γεγονότα για τη λειτουργία GATE – REPORT του EPON, των οποίων τα διαγράμματα φαίνονται στα Σχήματα 29 και 30.



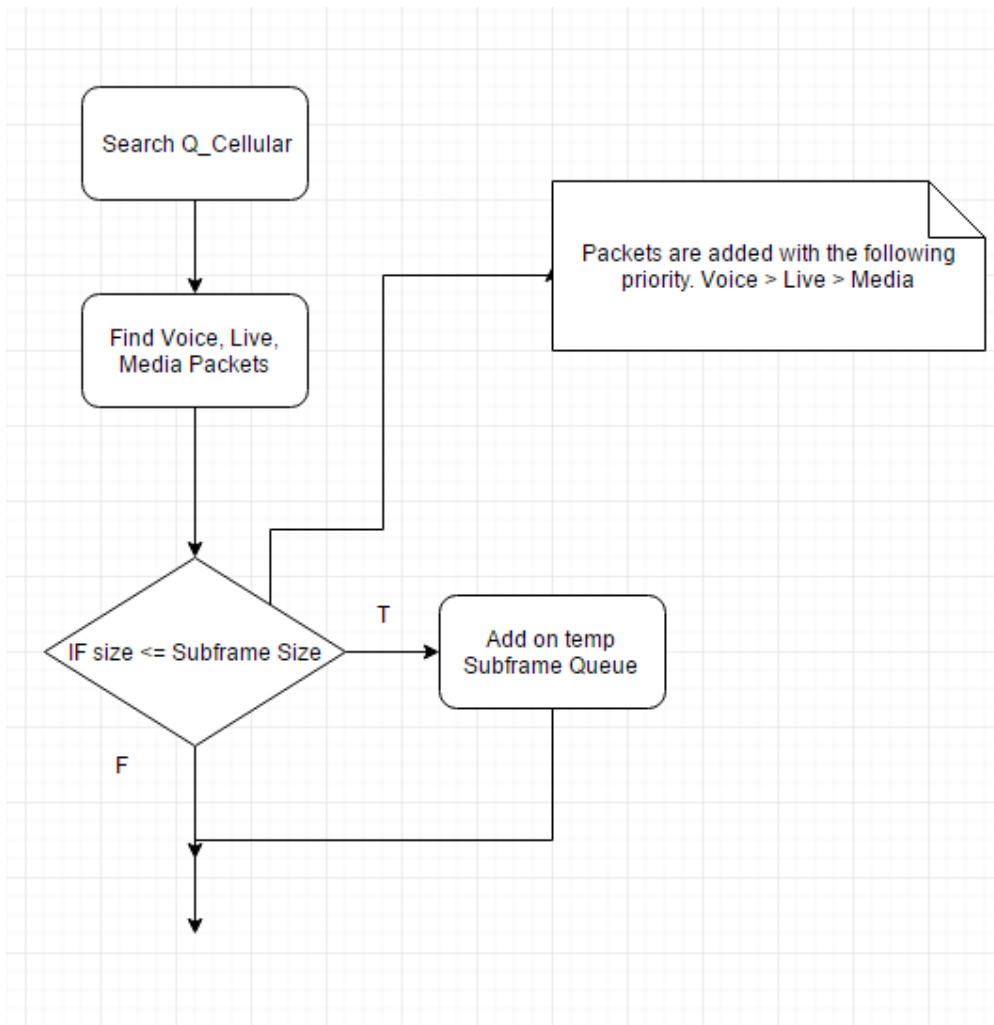
Σχήμα 29. Δημιουργία/Αποστολή Μηνύματος GATE



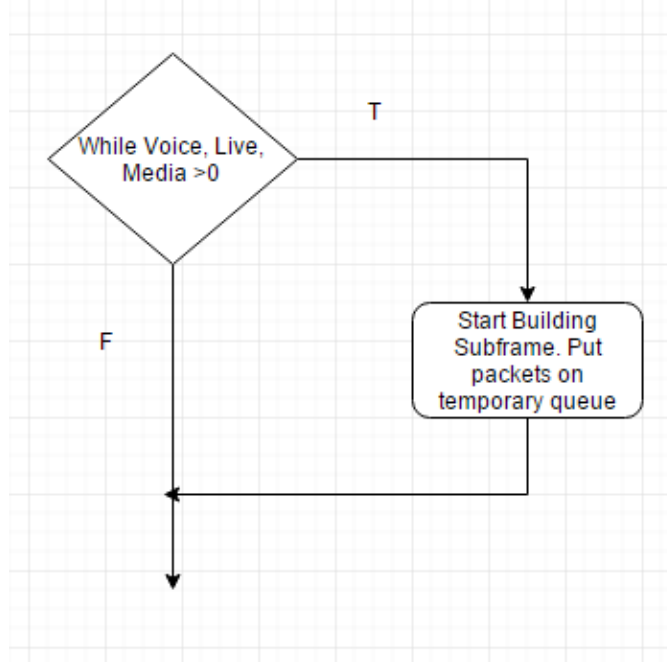
Σχήμα 30. Δημιουργία Μηνύματος REPORT

Στη συνέχεια θα γίνει ανάλυση των γεγονότων για την ανοδική και καθοδική κίνηση του LTE. Το κάθε γεγονός καλείται ανά 1msec, όσο διαρκεί το κάθε LTE υποπλαίσιο, ενώ η αρχικοποίηση γίνεται στα πρώτα 10msec, διότι το κάθε LTE πλαίσιο, διαρκεί 10msec.

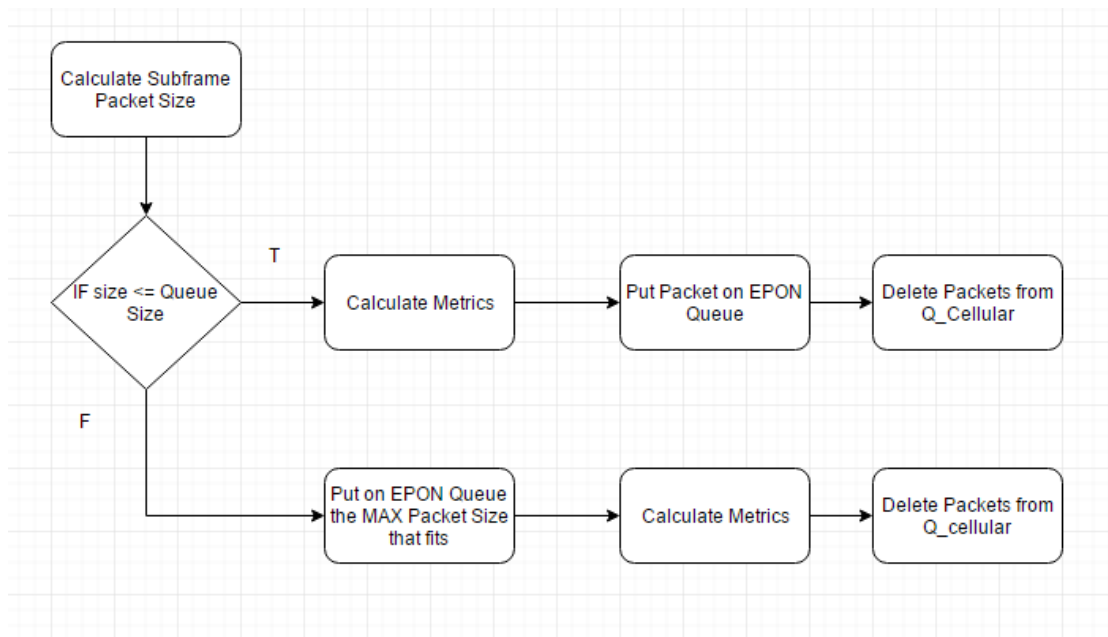
Στην ανοδική κίνηση, κάθε φορά γίνεται έλεγχος, ώστε να γνωρίζει το μοντέλο ότι βρίσκεται στο σωστό υποπλαίσιο. Στη συνέχεια, για κάθε ένα από τους Mobile Clients, υπολογίζεται ο αριθμός των πακέτων VoIP, Media, Live, των οποίων η σειρά δεν είναι τυχαία, αλλά οι προτεραιότητες που ακολουθεί το LTE. Αφού υπολογιστεί ο αριθμός, χτίζεται το υποπλαίσιο. Να σημειωθεί πως το κάθε υποπλαίσιο έχει συγκεκριμένη χωρητικότητα και αυτή καθορίζεται από το εκάστοτε configuration του LTE που χρησιμοποιείται. Τέλος, αν το υποπλαίσιο χωράει στην ουρά, τοποθετείται. Στην περίπτωση που ξεπερνάει το μέγεθος της ουράς, θα διαμορφωθεί έτσι, ώστε να μπορέσει να εξυπηρετήσει κάποια bits.



Σχήμα 31. Υπολογισμός Αριθμού Πακέτων (VoIP, Media, Live) στον Εκάστοτε Χρόνο

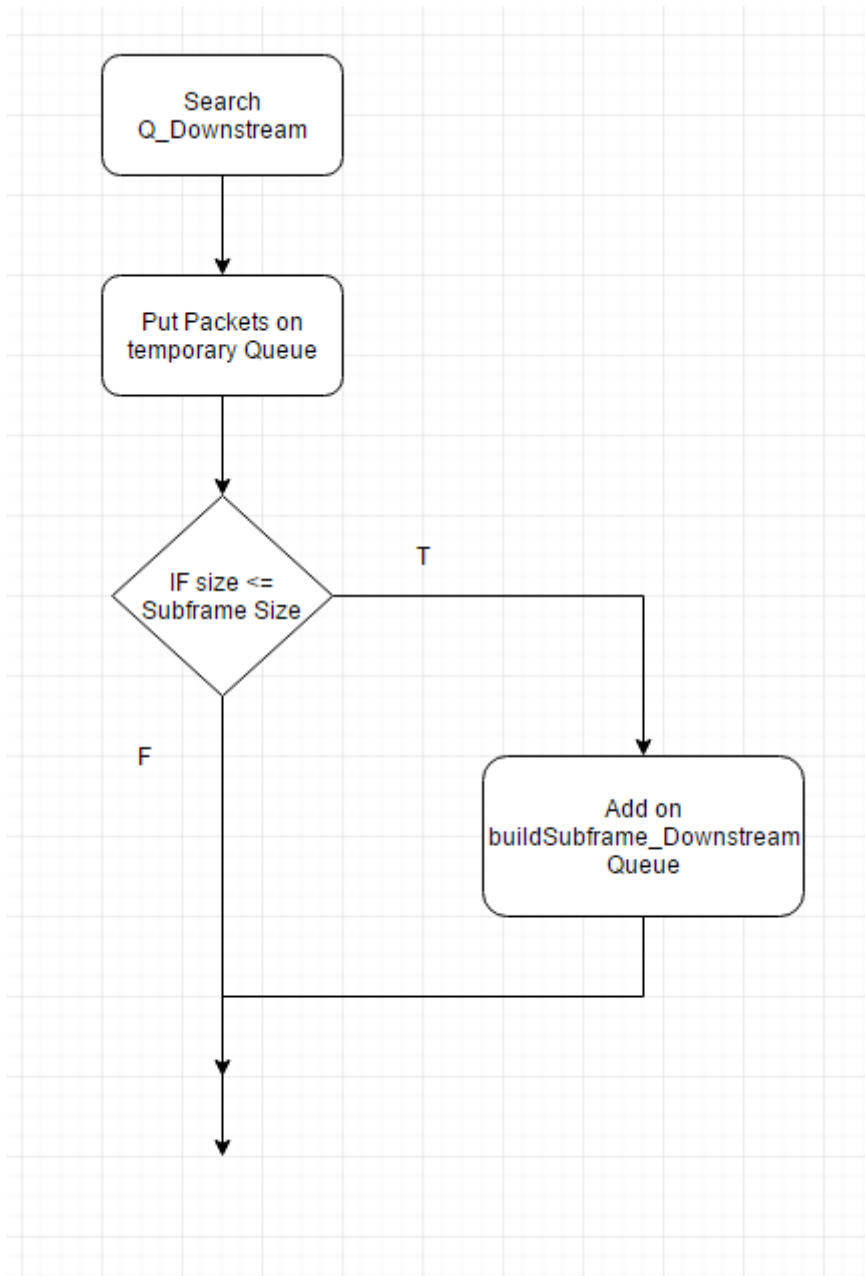


Σχήμα 32. Κατασκευή Υποπλαισίου LTE



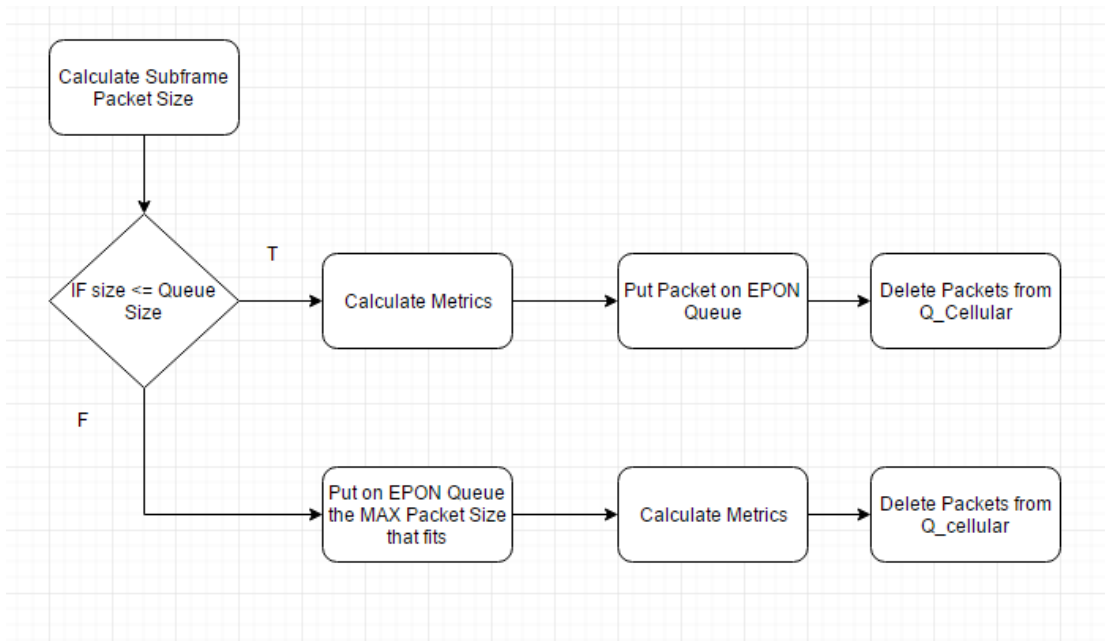
Σχήμα 33. Εισαγωγή Υποπλαισίου στην Ουρά του EPON

Στην καθοδική κίνηση τα πράγματα είναι πιο απλά. Ο eNodeB στέλνει μηνύματα προς τους Mobile Clients, τα οποία δεν είναι τύπου VoIP, Media, Live. Έτσι λοιπόν, στο γεγονός της καθοδικής κίνησης, υπολογίζεται αυτός ο αριθμός των πακέτων, κατασκευάζεται το υποπλαίσιο και με αντίστοιχη διαδικασία, όπως στην ανοδική κίνηση, τοποθετείται στην ουρά του EPON.



Σχήμα 34. Υπολογισμός Αριθμού Πακέτων (Downstream) στον Εκάστοτε Χρόνο





Σχήμα 35. Εισαγωγή Υποπλασίου στην Ουρά του EPON

Αξίζει να σημειωθεί, πως στη Matlab R2016a, η διαχείριση του LTE, είναι ιδιαίτερα απλή, καθώς το εργαλείο LTE System Toolbox, δίνει έτοιμο το LTE Frame με μια μόνο εντολή.

Variables - LTE\_UpstreamFrame.PUSCH.TrBlkSizes

LTE\_UpstreamFrame × LTE\_UpstreamFrame.PUSCH × LTE\_UpstreamFrame.PUSCH.TrBlkSizes ×

LTE\_UpstreamFrame.PUSCH.TrBlkSizes

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	21384	21384	0	0	0	21384	21384	0

Σχήμα 36. Χωρητικότητα Υποπλασίων Ανόδου

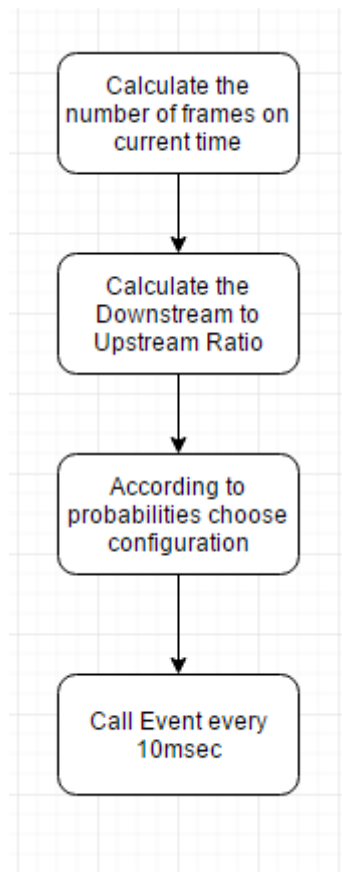
## 5.2 Μηχανισμός Εύρεσης Κατάλληλου LTE Configuration

Στο μοντέλο, έχει δημιουργηθεί ένας μηχανισμός εύρεσης κατάλληλου configuration για το LTE. Ανά 10msec, ανιχνεύεται το κατάλληλο configuration, ώστε να χρησιμοποιηθεί από τα γεγονότα ανοδικής και καθοδικής κίνησης. Το LTE αποτελείται από 7 διαφορετικά configuration. Το μοντέλο ακολουθεί λογική TDD (Time Division Duplexing). Η διαφορά των configuration μεταξύ τους, είναι ο αριθμός των ανοδικών, καθοδικών και special υποπλαισίων.

Δείκτης λειτουργίας TDD	Αριθμός Υποπλαισίου									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	D	S	U	D	D	D	S	U	U	D
3	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
5	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

Σχήμα 37. LTE Configurations – TDD Mode

Η επιλογή του κατάλληλου configuration, γίνεται με βάση το downstream to upstream ratio. Ανά 10msec, υπολογίζεται ο αριθμός των ανοδικών και καθοδικών πλαισίων που έχουν σταλεί και τέλος υπολογίζεται το ratio, ως το πηλίκο του downstream προς upstream. Η εύρεση γίνεται ως εξής. Θεωρούμε ότι τη δεδομένη στιγμή χρησιμοποιείται το configuration 1, στο οποίο τα καθοδικά υποπλαίσια είναι 4 και τα ανοδικά 4. Το ratio σε αυτή την περίπτωση είναι 1. Συνεπώς, αν και το υπολογιζόμενο ratio βγει μεταξύ αυτής της τιμής, το κατάλληλο configuration που θα επιλεγεί θα είναι το 1. Αντίστοιχα, υπολογίζονται και τα ratio για τα υπόλοιπα configuration. Η διαδικασία παρουσιάζεται στο Σχήμα 38.



**Σχήμα 38. Μηχανισμός Εύρεσης LTE Configuration**

### 5.3 Μηχανισμός Αυτόματου Μάθησης για την Εκτίμηση του Καταλληλότερου Configuration για το LTE

Τα αυτόματα μηχανικής μάθησης, είναι εργαλεία τεχνητής νοημοσύνης, που μπορούν να παρέχουν προσαρμογή στη λειτουργία συστημάτων, κατά τη διάρκεια αλλαγών, γνωστών και μη, στο περιβάλλον του συστήματος. Το αυτόματο, αλληλεπιδρά με ένα στοχαστικό περιβάλλον και προσπαθεί να μάθει την παρεχόμενη κατάσταση που προσφέρεται στο περιβάλλον, μέσω μιας διαδικασίας μάθησης. Η ανταλλαγή πληροφοριών, μεταξύ του περιβάλλοντος και του αυτόματου, είναι αμφίδρομη. Πιο συγκεκριμένα, ο μηχανισμός συμπεριφέρεται ως εξής. Διαλέγει μια συγκεκριμένη κατάσταση μεταξύ πολλών πιθανών καταστάσεων και το περιβάλλον αντιδρά σε αυτή την κατάσταση μέσω της παραγόμενης ανατροφοδότησης του μηχανισμού (feedback). Το feedback, πηγαιίνει κάθε φορά σαν όρισμα (παράμετρος) στο μηχανισμό και επεξεργάζεται, ώστε να υπολογιστεί η επόμενη κατάσταση. Η διαδικασία αυτή είναι επαναλαμβανόμενη. Ένα από τα θετικά στοιχεία της μηχανικής μάθησης, είναι η χαμηλή πολυπλοκότητα, κάτι που επιτρέπει τη γρήγορη σύγκλιση του αποτελέσματος [23], [24], [25].

Με αυτό το μηχανισμό επιτυγχάνεται το εξής. Υπάρχει δυναμική κατανομή εύρους ζώνης, στους κινητούς σταθμούς και αυτό έγκειται από το γεγονός, ότι μέσω του αυτόματου, γίνεται εκτίμηση για το κατάλληλο configuration του LTE που θα χρησιμοποιηθεί. Το καταλληλότερο configuration είναι εκείνο που έχει το μεγαλύτερο μέγεθος υποπλαισίων, δηλαδή τα περισσότερα καθαρά bits (payload) που μπορεί να εξυπηρετήσει. Επομένως, αυτός ο μηχανισμός μπορεί να ανιχνεύσει εάν το κάθε πλαίσιο χρειάζεται περισσότερο εύρος ζώνης (bandwidth) για να εξυπηρετηθεί ή όχι.

Για το μηχανισμό αυτό έχουν δημιουργηθεί δύο αλγόριθμοι. Ο πρώτος, σχετίζεται με την ανανέωση των πιθανοτήτων για τα επτά διαφορετικά configuration του LTE, ενώ ο δεύτερος, με τον υπολογισμό της παραμέτρου  $L$ , που θα εξηγηθεί παρακάτω [23].

#### Algorithm 1: Probability Updating

```

Set  $p_i = (1/m)$ 
FOR each frame  $f$ 
    Calculate the next_best_action
    FOR each action  $m$ 
        IF  $action \neq next\_best\_action$  THEN
            Set  $p_i = p_i - L$ ;
        ELSE
            Set  $p_i = p_i + L$ ;
        END IF
        Choose the maximum probability and set it to the specific
        configuration
    END FOR
END FOR
    
```

**Σχήμα 39.** Αλγόριθμος Ανανέωσης Πιθανοτήτων

Η παράμετρος  $L$ , σχετίζεται με την ταχύτητα σύγκλισης του αυτόματου. Είναι μια κρίσιμη παράμετρος, ειδικά σε ένα τόσο δυναμικό και απρόβλεπτο περιβάλλον, όπως τα ασύρματα δίκτυα πρόσβασης, υποστηρίζοντας κινητούς χρήστες. Συνεπώς, θα πρέπει να διαχειριστεί με προσοχή. Αν η παράμετρος έχει μια τιμή εξ' ορισμού, τότε η ταχύτητα σύγκλισης θα παραμένει σταθερή και δεν θα ακολουθεί τη δυναμική του περιβάλλοντος. Επιλέγοντας μια μικρή τιμή για το  $L$ , αυτό θα οδηγούσε σε επαναλαμβανόμενες λανθασμένες αποφάσεις. Για αυτό δημιουργήθηκε αλγόριθμος, ώστε ο υπολογισμός να είναι δυναμικός και ακολουθεί τον εξής κανόνα. Αύξηση ταχύτητας, όσο οι αποφάσεις του αυτόματου είναι λανθασμένες και μείωση αυτής, όσο οι αποφάσεις του αυτόματου είναι σωστές. Με αυτό τον τρόπο, οι λανθασμένες αποφάσεις διορθώνονται γρήγορα, αυξάνοντας την ταχύτητα μάθησης, ενώ οι σωστές αποφάσεις επιβραβεύονται, χαμηλώνοντας την ταχύτητα μάθησης.

Για την προσαρμογή της παραμέτρου  $L$ , σε περίπτωση λανθασμένων καταστάσεων, έχει δημιουργηθεί η παρακάτω κανονικοποιημένη συνάρτηση λαθών.

$$l(model\ error) = \frac{1}{1 - e} [1 - e^{1 - model\ error}]$$

#### Σχήμα 40. Κανονικοποιημένη Συνάρτηση Λαθών

Η τιμή  $model\_error$ , παίρνει τιμές μεταξύ  $[0,1]$ . Η τιμή 0 σημαίνει ότι η επιλογή του αυτόματου είναι σωστή.

Για την προσαρμογή της παραμέτρου, σε περίπτωση σωστών αποφάσεων, έχει δημιουργηθεί ο παρακάτω παράγοντας ορθότητας.

$$model\ correctness = \frac{Z}{W}$$

#### Σχήμα 41. Παράγοντας Ορθότητας

Ο παράγοντας αυτός παίρνει τιμές μεταξύ  $[0,1]$  και αντιπροσωπεύει την ακρίβεια του μοντέλου κατά τη διάρκεια των προηγούμενων  $W$  αποφάσεων. Για τον ίδιο λόγο με πριν ( $model\_error$ ), έχει δημιουργηθεί μια κανονικοποιημένη συνάρτηση.

$$l(model\ correctness) = \frac{1}{1 - e} [1 - e^{1 - model\ correctness}]$$

#### Σχήμα 42. Κανονικοποιημένη Συνάρτηση Ορθότητας

Στη συνέχεια φαίνεται ο δεύτερος αλγόριθμος, που σχετίζεται με τον υπολογισμό της παραμέτρου  $L$ .

Algorithm 2: Determination of the L parameter

```
Set  $L = initial\_value$ 
FOR each frame  $f$ 
    IF  $current\_action = next\_best\_action$  THEN
        SET  $L = L - Ll(model\_correctness)$ ;
    ELSE
        SET  $L = L + Ll(model\_error)$ ;
    END IF
END FOR
```

**Σχήμα 43. Αλγόριθμος Υπολογισμού Παραμέτρου  $L$**

Η παράμετρος  $initial\_value$  έχει σαν τιμή το 0.015 και αυτό ύστερα από πειράματα και προσομοιώσεις που έγιναν. Παράλληλα η παράμετρος  $W$  έχει σαν τιμή το 100.

## 6. Αποτίμηση

### 6.1 Αποτίμηση

Το περιβάλλον προσομοίωσης, είναι το εργαλείο MATLAB R2016a και οι παράμετροι του μοντέλου παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

<b>Simulation Time</b>	0.4
<b>Distance_ONUs</b>	Fixed
<b>ONUs</b>	10 – 20
<b>MSs</b>	10 – 100
<b>Channels</b>	2
<b>Q_Size</b>	10MB
<b>Qcellular_Size</b>	10MB
<b>Guard Time</b>	5μsec
<b>Transmission Rate</b>	1Gbps

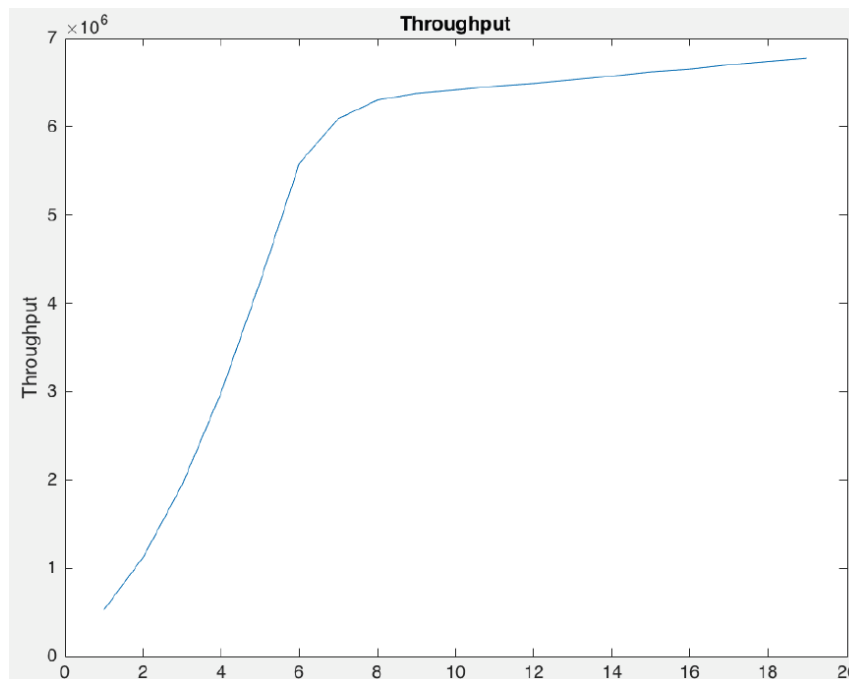
**Σχήμα 44. Παράμετροι Προσομοίωσης**

<b>R.3 TDD</b>	
Coding	16QAM
Channel Bandwidth	10MHz
Allocated Resource Blocks	50
Target Coding Rate	1/2
<b>A4-6 TDD</b>	
Coding	16QAM
Channel Bandwidth	10MHz
Allocated Resource Blocks	50
Target Coding Rate	3/4

**Σχήμα 45. Χαρακτηριστικά Κεραιών για τα Καθοδικά & Ανοδικά Κανάλια**

Παρακάτω παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα γραφήματα που προέκυψαν, ύστερα από προσομοιώσεις του μοντέλου που σχολιάστηκε για όλα τα διαφορετικά σενάρια. Να σημειωθεί πως κάτι αντίστοιχο δεν υπάρχει στην παγκόσμια βιβλιογραφία. Οι περισσότερες μελέτες, αφορούν χρονοπρογραμματισμό, ενεργειακή απόδοση, ποιότητα υπηρεσιών [26], [27], [28]. Συνεπώς, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα του μοντέλου και θα σχολιαστούν ως προς την αποδοτικότητα και στο αν θα είναι υποσχόμενα για μελλοντική επέκταση.

Αρχικά, θα παρουσιαστεί το μοντέλο στην Online μορφή του EPON.



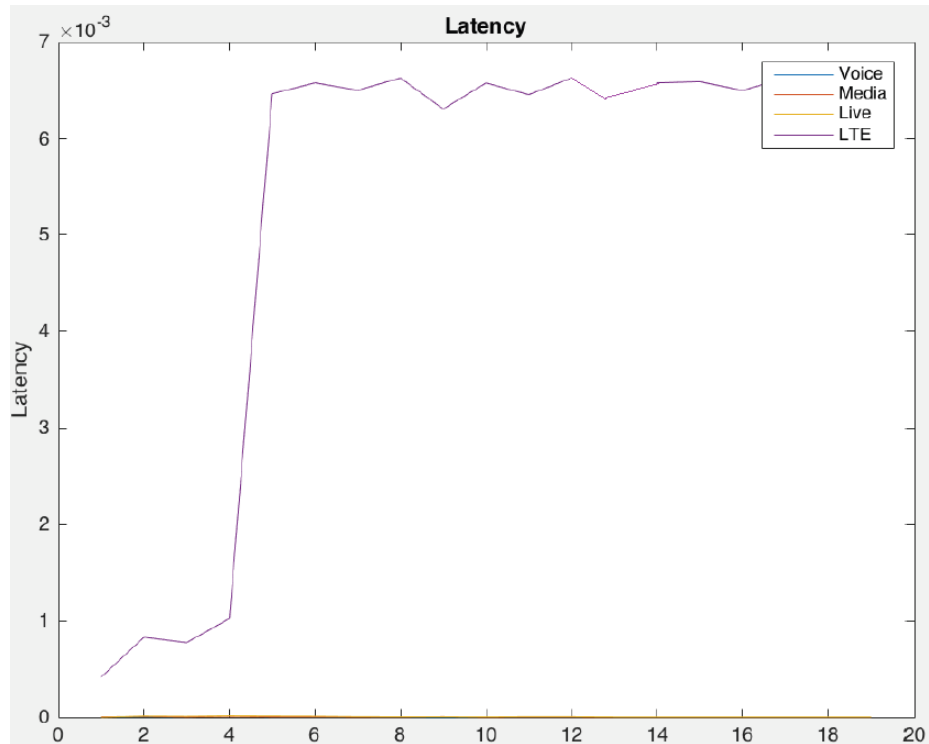
**Σχήμα 46. Throughput**

Το μοντέλο απέδωσε ρυθμαπόδοση της τάξης των 7Mbps, όπως φαίνεται στο Σχήμα 46. Από το διάγραμμα, φαίνεται πως θα μπορούσε να επιτύχει και μεγαλύτερες τιμές, αν και είναι οριακά στο να μένει σταθερό, καθώς φτάνει στο άνω όριο (threshold).

ONUs	Throughput
2	1 Mbps
3	2.5 Mbps
4	2.89 Mbps
5	3.89 Mbps
6	5.89 Mbps
7	6 Mbps
8	6.1 Mbps
9	6.15 Mbps
10	6.18 Mbps
11	6.20 Mbps
12	6.22 Mbps
13	6.24 Mbps
14	6.4 Mbps
15	6.41 Mbps
16	6.45 Mbps
17	6.5 Mbps
18	6.58 Mbps
19	6.7 Mbps
20	6.8 Mbps

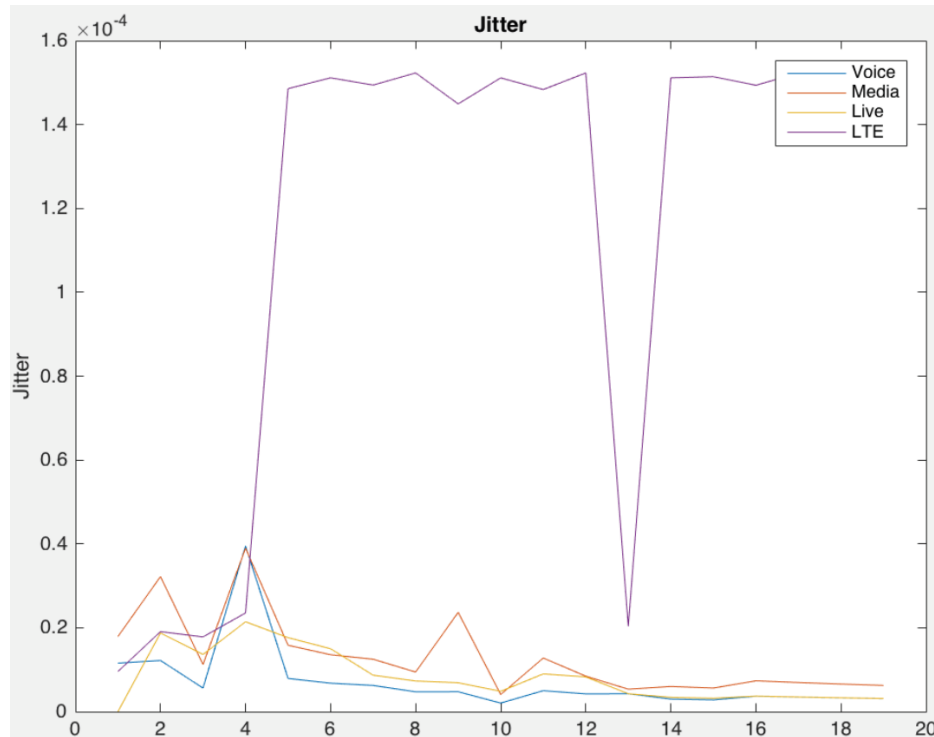
**Σχήμα 47. Τιμές Ρυθμαπόδοσης κατά την Προσομοίωση**





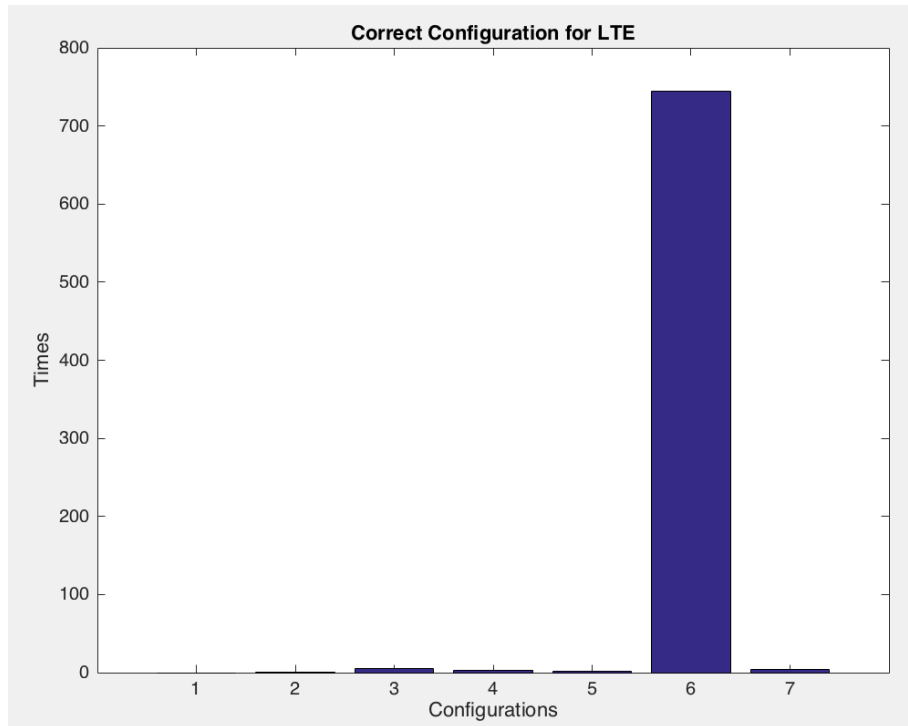
**Σχήμα 48. Latency**

Στο Σχήμα 48, φαίνεται το latency των τεσσάρων διαφορετικών κλάσεων πακέτων που προσομοιώθηκαν στο μοντέλο. Τα πακέτα VoIP, Media & Live Stream, έχουν latency σχεδόν μηδενικό και αυτό είναι το ιδανικό, καθώς τα πακέτα εξυπηρετούνται χωρίς καμία καθυστέρηση. Τα πακέτα τύπου LTE, φτάνουν στο μέγιστο, μέχρι 7msec καθυστέρηση, κάτι που είναι μέσα στα όρια του LTE, όπως έχει οριστεί. Οι κάποιες ασυνέχειες που φαίνονται στο διάγραμμα, δεν επηρεάζουν το μοντέλο, καθώς είναι μικρές και εντός φυσιολογικών επιπέδων. Ο κινητός χρήστης, δεν θα επηρεαστεί ως προς την εξυπηρέτησή του.



Σχήμα 49. Jitter

Στο Σχήμα 49, φαίνεται το jitter των τεσσάρων διαφορετικών κλάσεων πακέτων που προσομοιώθηκαν στο μοντέλο. Τα πακέτα VoIP, Media & Live Stream, έχουν κάποιες ασυνέχειες, οι οποίες όμως είναι δευτερευούσης σημασίας, καθώς βρίσκονται σε εξαιρετικά καλά επίπεδα και φυσικά, εντός ορίων. Το VoIP επιτυγχάνει jitter, με μέγιστη τιμή τα 4msec, συγκριτικά με το ανώτατό όριο των 40msec, ώστε να μπορεί να επιτευχθεί ικανοποιητική επικοινωνία. Αντίστοιχα, τα πακέτα Media & Live Stream, επιτυγχάνουν jitter με μέγιστη τιμή 4msec και 2msec αντίστοιχα. Τα πακέτα τύπου LTE, επιτυγχάνουν jitter με μέγιστη τιμή 16msec που και πάλι είναι σε πολύ καλά επίπεδα.

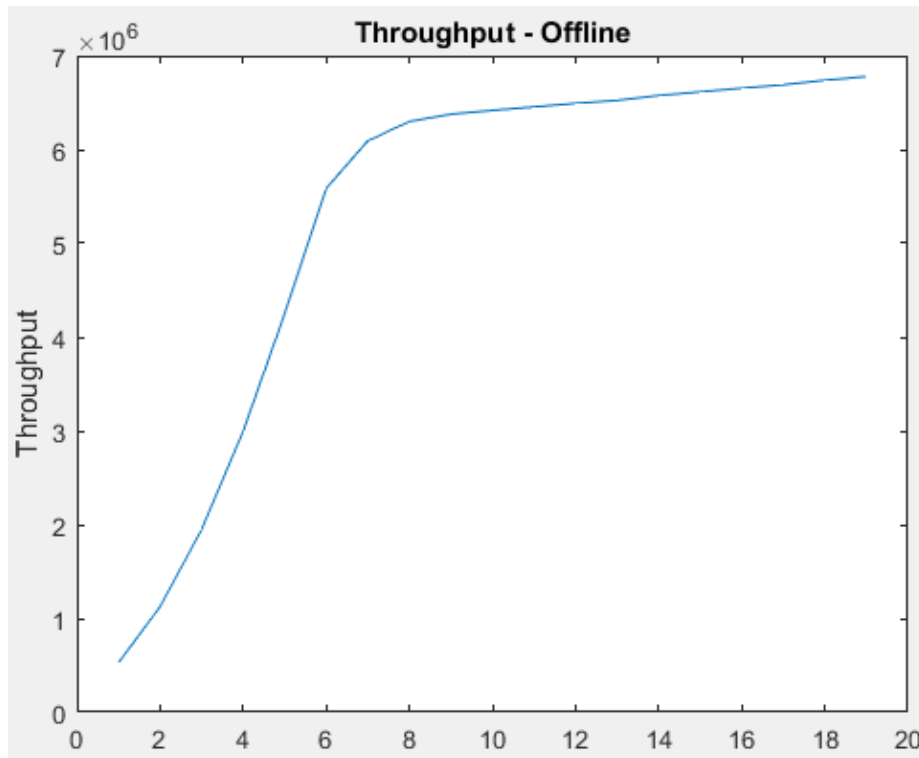


**Σχήμα 50. Καταλληλότερο Configuration για το LTE**

Στο Σχήμα 50, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πρώτου μηχανισμού, που αναλύθηκε στο κεφάλαιο 5.2. Διακρίνεται εύκολα, πως ο μηχανισμός, κατά την προσομοίωση του μοντέλου χρησιμοποιεί τα configuration 2,3,4,5,7 μέχρι τη στιγμή που κορυφώνει και συγκλίνει στο configuration 6, το οποίο είναι και το καταλληλότερο για τα δεδομένα που έχουν χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση.

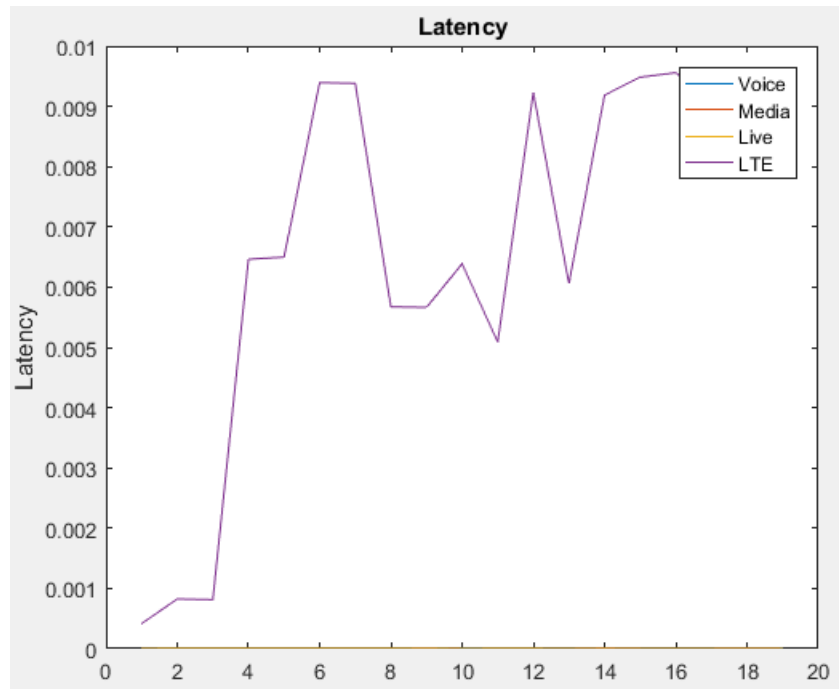
Ο μηχανισμός που αναλύεται στο κεφάλαιο 5.3, βγάζει με πιθανότητα 98% και επιβεβαιώνει τον πρώτο μηχανισμό που δείχνει ότι το καταλληλότερο configuration είναι το 6. Δηλαδή η εκτίμηση που κάνει ο μηχανισμός για τα επόμενα frame είναι και παραμένει σωστή.

Στη συνέχεια, θα παρουσιαστεί το μοντέλο στην Offline μορφή του EPON.



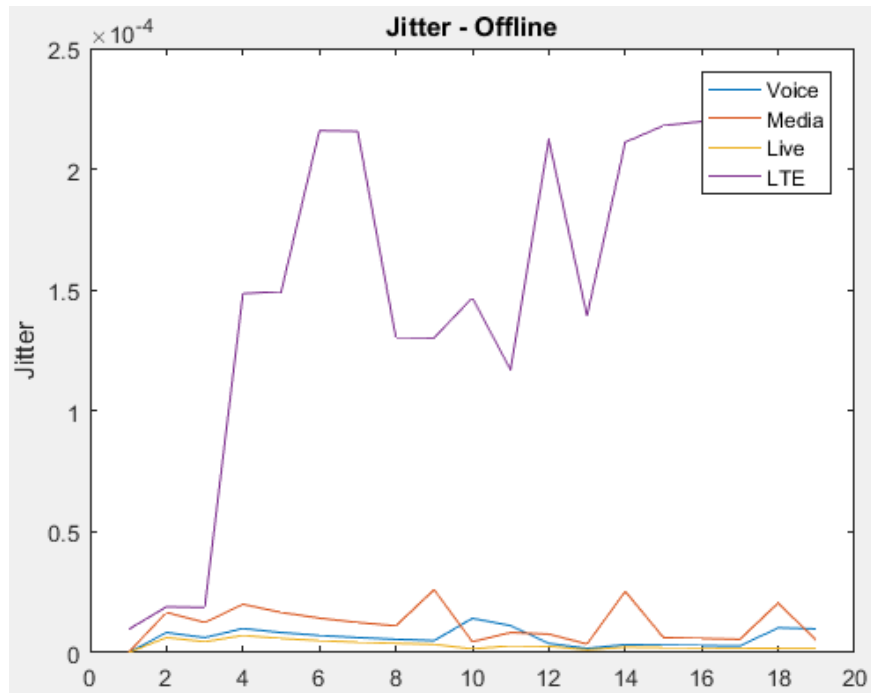
**Σχήμα 51. Throughput**

Κατ' αντιστοιχία με την Online έκδοση, το μοντέλο απέδωσε ρυθμαπόδοση της τάξης των 7Mbps, όπως φαίνεται στο Σχήμα 51. Από το διάγραμμα, φαίνεται πως θα μπορούσε να επιτύχει και μεγαλύτερες τιμές, αν και είναι οριακά στο να μένει σταθερό, καθώς φτάνει στο άνω όριο (threshold).



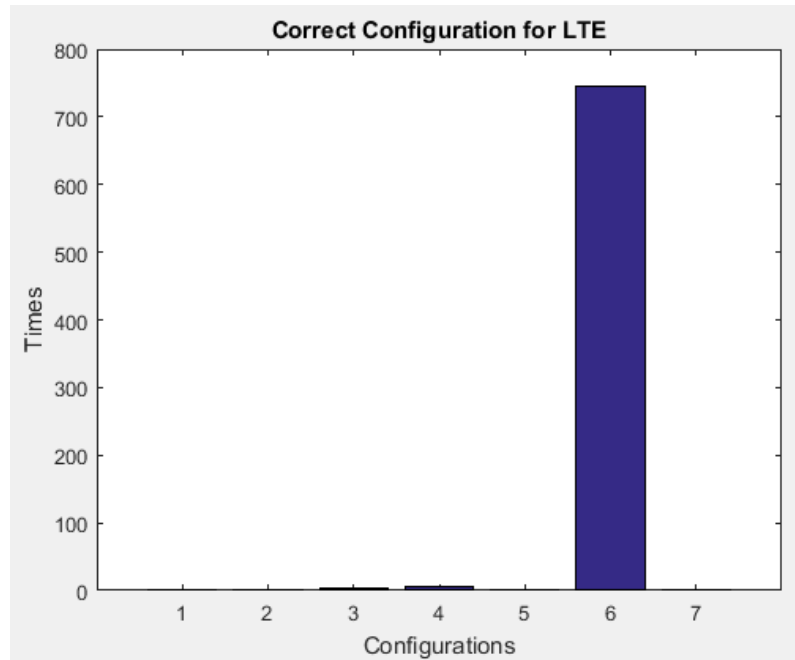
Σχήμα 52. Latency

Κατ' αντιστοιχία με την Online έκδοση, στο Σχήμα 52, φαίνεται το latency των τεσσάρων διαφορετικών κλάσεων πακέτων που προσομοιώθηκαν στο μοντέλο. Τα πακέτα VoIP, Media & Live Stream, έχουν latency σχεδόν μηδενικό και αυτό είναι το ιδανικό, καθώς τα πακέτα εξυπηρετούνται χωρίς καμία καθυστέρηση. Τα πακέτα τύπου LTE, φτάνουν στο μέγιστο, μέχρι 10msec καθυστέρηση, κάτι που είναι μέσα στα όρια του LTE, όπως έχει οριστεί, αν και ελαφρώς υψηλότερα από την Online έκδοση. Οι κάποιες ασυνέχειες που φαίνονται στο διάγραμμα, δεν επηρεάζουν το μοντέλο, καθώς είναι μικρές και εντός φυσιολογικών επιπέδων. Ο κινητός χρήστης, δεν θα επηρεαστεί ως προς την εξυπηρέτησή του.



Σχήμα 53. Jitter

Κατ' αντιστοιχία με την Online έκδοση, στο Σχήμα 53, φαίνεται το jitter των τεσσάρων διαφορετικών κλάσεων πακέτων που προσομοιώθηκαν στο μοντέλο. Τα πακέτα VoIP, Media & Live Stream, έχουν κάποιες ασυνέχειες, οι οποίες όμως είναι δευτερευούσης σημασίας, καθώς βρίσκονται σε εξαιρετικά καλά επίπεδα και φυσικά, εντός ορίων. Το VoIP επιτυγχάνει jitter, με μέγιστη τιμή τα 4msec, συγκριτικά με το ανώτατό όριο των 40msec, ώστε να μπορεί να επιτευχθεί ικανοποιητική επικοινωνία. Αντίστοιχα, τα πακέτα Media & Live Stream, επιτυγχάνουν jitter με μέγιστη τιμή 4msec και 2msec αντίστοιχα. Τα πακέτα τύπου LTE, επιτυγχάνουν jitter με μέγιστη τιμή 25msec που και πάλι είναι σε πολύ καλά επίπεδα, αν και ελαφρώς υψηλότερα από την Online έκδοση.



**Σχήμα 54. Καταλληλότερο Configuration για το LTE**

Κατ' αντιστοιχία με την Online έκδοση, στο Σχήμα 54, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πρώτου μηχανισμού, που αναλύθηκε στο κεφάλαιο 5.2. Διακρίνεται εύκολα, πως ο μηχανισμός, κατά την προσομοίωση του μοντέλου χρησιμοποιεί τα configuration 3,4 μέχρι τη στιγμή που κορυφώνει και συγκλίνει στο configuration 6, το οποίο είναι και το καταλληλότερο για τα δεδομένα που έχουν χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση.

Ο μηχανισμός που αναλύεται στο κεφάλαιο 5.3, και σε αυτή την περίπτωση βγάζει με πιθανότητα 98% και επιβεβαιώνει τον πρώτο μηχανισμό που δείχνει ότι το καταλληλότερο configuration είναι το 6. Δηλαδή η εκτίμηση που κάνει ο μηχανισμός για τα επόμενα frame είναι και παραμένει σωστή.

## **7. Συμπεράσματα – Μελλοντικές Επεκτάσεις**

### **7.1 Συμπεράσματα**

Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε, ότι τα υβριδικά οπτικά δίκτυα ασύρματης πρόσβασης, είναι αρκετά υποσχόμενα και αυτό μπορεί να επιτευχθεί με αρκετές παραλλαγές και εφαρμογές αλγορίθμων.

Στη συγκεκριμένη διπλωματική, μελετήθηκε η κατανομή εύρους ζώνης σε ένα υβριδικό EPON δίκτυο, με χρήση του LTE. Η κατανομή έγκειται στο γεγονός, ότι οι κινητοί χρήστες, μπορούν να εξυπηρετηθούν από subframes που έχουν το μεγαλύτερο μέγεθος σε bits και αυτό επιτυγχάνεται μέσω του μηχανικού αυτόματου (δεύτερος μηχανισμός), ο οποίος κάνει εκτίμηση και πρόβλεψη για το κατάλληλο configuration του LTE που θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί.

Ο μηχανισμός που χρησιμοποιήθηκε επιλέγει με 98% επιτυχία το καταλληλότερο configuration με βάση την κίνηση που χρησιμοποιείται.

Παράλληλα, για το LTE, επιλέχτηκε η λειτουργία TDD και αυτό γιατί παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα που περιλαμβάνουν μικρότερα κόστη, περισσότερη ευελιξία και καλύτερες επιδόσεις. Ακόμα, δεν είναι πάντα εφικτό να αποσταλεί η επιβεβαίωση, όταν είναι έτοιμη προς μετάδοση, καθώς μερικές φορές χρειάζεται να παρέλθει κάποιος χρόνος ως την έλευση ενός υποπλαισίου με την απαιτούμενη κατεύθυνση των δεδομένων.

Πρόσθετα, ένα μεγάλο ζήτημα, είναι η επικαιρότητα του buffer δεδομένων προς αποστολή, για την ανοδική κίνηση. Το πρόβλημα, προκύπτει από το γεγονός ότι ο eNodeB, δεν μπορεί να είναι άμεσα ενήμερος για την άφιξη των δεδομένων προς μετάδοση στον εξοπλισμό του χρήστη.

Κλείνοντας, αξίζει να τονιστεί, πως τα αποτελέσματα φαίνονται ιδιαίτερα υποσχόμενα και θα είχε μεγάλο ενδιαφέρον να εξαχθούν και να αναλυθούν, εφαρμόζοντας αυτά που αναλύονται στο επόμενο κεφάλαιο, ως μελλοντικές επεκτάσεις.



## 7.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις

Σαν μελλοντικές επεκτάσεις αυτής της διπλωματικής εργασίας, θα μπορούσαν να εξεταστούν τα ακόλουθα ερευνητικά θέματα:

- Εύρεση κατάλληλης τοποθέτησης ONU μέσα στο δίκτυο, δηλαδή την απόστασή τους από το OLT.
- Επέκταση / Αναβάθμιση του κορμού σε δίκτυο XG-PON.
- Προσθήκη περισσότερων eNodeB's στο δίκτυο. Κάθε ONU, να είναι ONU – BS.
- Μελέτη του συστήματος σε FDD λειτουργία για το LTE.
- Εισαγωγή περισσότερων τύπων κίνησης και κλάσεων υπηρεσιών, πέρα από VoIP, Media, Live.
- Οι κινητοί χρήστες, σε αυτή τη διπλωματική έχουν μια συγκεκριμένη θέση. Εισάγοντας την έννοια της κινητικότητας, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και άλλοι αλγόριθμοι για πιο ρεαλιστική μελέτη του συστήματος.
- Δεδομένου του γεγονότος ότι οι προσομοιώσεις ξεπερνούν τις 24 ώρες, η μετάβαση σε γλώσσα χαμηλότερου επιπέδου κρίνεται αναγκαία.
- Μελέτη περισσότερων μηχανισμών μηχανικής μάθησης, όπως τα Νευρωνικά Δίκτυα και οι Μηχανές Διανυσματικής Υποστήριξης (Support Vector Machines).
- Σε αυτή τη διπλωματική το πλήθος των κινητών χρηστών δεν ξεπερνά τους 100. Θα ήταν ιδανικό να γίνει μελέτη του μοντέλου με οριακές τιμές παραμέτρων για πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα.
- Εισαγωγή αλγορίθμων για να προσδώσουν στο σύστημα ενεργειακή απόδοση σε ότι αφορά τις οπτικές μονάδες δικτύου.
- Εισαγωγή μηχανισμού, ώστε οι οπτικές μονάδες δικτύου να μπαίνουν σε sleep mode.
- Σύγκριση του προτεινόμενου σχήματος με κάθε ένα από τα επτά διαφορετικά configuration.

## **Κατάλογος Σχημάτων**

- Σχήμα 1. **Εκπομπή Δέσμης Φωτός Διαμέσου Οπτικής Ύνας**
- Σχήμα 2. **Οπτικές Ύνες**
- Σχήμα 3. **Τύποι Οπτικών Ινών**
- Σχήμα 4. **Το πρόβλημα της Συμρόφησης**
- Σχήμα 5. **Η Αρχιτεκτονική του Παθητικού Οπτικού Δικτύου**
- Σχήμα 6. **Τοπολογία Δέντρου**
- Σχήμα 7. **Τοπολογία Δέντρου με Πλεονάζων Κορμό**
- Σχήμα 8. **Τοπολογία Δακτυλίου**
- Σχήμα 9. **Τοπολογία Διαύλου**
- Σχήμα 10. **Παράδειγμα TDM Πολυπλεξίας**
- Σχήμα 11. **Παράδειγμα TDM Πρόσβασης**
- Σχήμα 12. **Υλοποιήσεις EPON**
- Σχήμα 13. **Αρχιτεκτονική και Δομή Λειτουργίας EPON**
- Σχήμα 14. **Βασικό MAC Ethernet Πλαίσιο**
- Σχήμα 15. **EPON Πλαίσιο**
- Σχήμα 16. **Διαδικασία Συγχρονισμού OLT με ONU**
- Σχήμα 17. **Αριθμός Συνδρομητών Κινητής Τηλεφωνίας / Ποσοστό ανά 100 κατοίκους**
- Σχήμα 18. **Χρονολογική Εξέλιξη Δικτύων Κινητών Επικοινωνιών έως το IMT - Advanced**
- Σχήμα 19. **Μέγιστοι και Πρακτικοί Ρυθμοί Μετάδοσης Κινητών Δικτύων Επόμενης Γενιάς**
- Σχήμα 20. **Αρχιτεκτονική του LTE**
- Σχήμα 21. **Διαστρωμάτωση του LTE**
- Σχήμα 22. **Ανοδικά Κανάλια LTE**
- Σχήμα 23. **Μπλοκ Πόρων (Resource Block)**
- Σχήμα 24. **Πλαίσιο και Υποπλαίσια LTE**

- Σχήμα 25. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Λειτουργίας TDD/FDD
- Σχήμα 26. Διαφορετικές Λειτουργίες TDD στο LTE
- Σχήμα 27. Τοπολογία Υβριδικού Μοντέλου
- Σχήμα 28. Δημιουργία Κίνησης Fixed Clients - VoIP
- Σχήμα 29. Δημιουργία/Αποστολή Μηνύματος GATE
- Σχήμα 30. Δημιουργία Μηνύματος REPORT
- Σχήμα 31. Υπολογισμός Αριθμού Πακέτων (VoIP, Media, Live) στον Εκάστοτε Χρόνο
- Σχήμα 32. Κατασκευή Υποπλαισίου LTE
- Σχήμα 33. Εισαγωγή Υποπλαισίου στην Ουρά του EPON
- Σχήμα 34. Υπολογισμός Αριθμού Πακέτων (Downstream) στον Εκάστοτε Χρόνο
- Σχήμα 35. Εισαγωγή Υποπλαισίου στην Ουρά του EPON
- Σχήμα 36. Χωρητικότητα Υποπλαισίων Ανόδου
- Σχήμα 37. LTE Configurations – TDD Mode
- Σχήμα 38. Μηχανισμός Εύρεσης LTE Configuration
- Σχήμα 39. Αλγόριθμος Ανανέωσης Πιθανοτήτων
- Σχήμα 40. Κανονικοποιημένη Συνάρτηση Λαθών
- Σχήμα 41. Παράγοντας Ορθότητας
- Σχήμα 42. Κανονικοποιημένη Συνάρτηση Ορθότητας
- Σχήμα 43. Αλγόριθμος Υπολογισμού Παραμέτρου L
- Σχήμα 44. Παράμετροι Προσομοίωσης
- Σχήμα 45. Χαρακτηριστικά Κεραιών για τα Καθοδικά & Ανοδικά Κανάλια
- Σχήμα 46. Throughput
- Σχήμα 47. Τιμές Ρυθμαπόδοσης κατά την Προσομοίωση
- Σχήμα 48. Latency
- Σχήμα 49. Jitter
- Σχήμα 50. Καταλληλότερο Configuration για το LTE

Σχήμα 51. **Throughput**

Σχήμα 52. **Latency**

Σχήμα 53. **Jitter**

Σχήμα 54. **Καταλληλότερο Configuration για το LTE**

## Πίνακας Συντμήσεων

<b>PON</b>	Passive Optical Network
<b>EPON</b>	Ethernet Passive Optical Network
<b>LTE</b>	Long-Term Evolution
<b>PHY</b>	Physical
<b>DBA</b>	Dynamic Bandwidth Allocation
<b>TDM</b>	Time Division Multiplexing
<b>TDMA</b>	Time Division Multiple Access
<b>WDM</b>	Wavelength Division Multiplexing
<b>OLT</b>	Optical Line Terminal
<b>ONU</b>	Optical Network Unit
<b>MPCP</b>	Multi-Point Control Protocol
<b>G-EPON</b>	Gigabit-Ethernet Passive Optical Network
<b>OFDMA</b>	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
<b>SC-OFDMA</b>	Single Carrier Orthogonal Frequency Division Multiplexing
<b>TDD</b>	Time Division Duplexing
<b>FDD</b>	Frequency Division Duplexing
<b>ITU – T</b>	International Telecommunication Union - Telecommunication
<b>ATM - PON</b>	Asynchronous Transfer Mode – Passive Optical Network
<b>FSAN</b>	Full Service Access Network
<b>IP</b>	Internet Protocol
<b>B-PON</b>	Broadband – Passive Optical Network
<b>EFM</b>	Ethernet in First Mile
<b>OSI</b>	Open Systems Interconnection
<b>LED</b>	Light Emitting Diodes
<b>DFB</b>	Distributed-Bragg-Reflector
<b>EDFA</b>	Erbium-Doped Fiber Amplifiers
<b>ISP</b>	Internet Service Provider
<b>OAN</b>	Optical Access Network
<b>ONT</b>	Optical Network Terminals
<b>FTTC</b>	Fiber to the Curb
<b>FTTH</b>	Fiber to the Home
<b>FTTB</b>	Fiber to the Building
<b>FTTP</b>	Fiber to the Premises
<b>CO</b>	Central Office
<b>DSL</b>	Digital Subscriber Line
<b>WAN</b>	Wide Area Network
<b>LAN</b>	Local Area Network
<b>MAN</b>	Metropolitan Area Network
<b>MAC</b>	Medium Access Control
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical & Electronics Engineer

<b>SFD</b>	Start Frame Delimiter
<b>DA</b>	Destination Address
<b>SA</b>	Source Address
<b>PDU</b>	Protocol Data Unit
<b>LLC</b>	Logical Link Control
<b>FCS</b>	Frame Check Sequence
<b>CRC</b>	Cyclic Redundancy Check
<b>SPD</b>	Start Packet Delimiter
<b>LLID</b>	Logical Link Identifier
<b>SCB</b>	Single Copy Broadcast
<b>FEC</b>	Forward Error Correction
<b>GSM</b>	Global System for Mobile Communications
<b>EDGE</b>	Enhanced Data for Global Evolution
<b>IMT</b>	International Mobile Telephone
<b>UMTS</b>	Universal Mobile Telecommunications System
<b>HSPA</b>	High Speed Packet Access
<b>IMT - A</b>	International Mobile Telecommunications – Advanced
<b>LTE - A</b>	Long-Term Evolution - Advanced
<b>NTT</b>	Nippon Telephone & Telegraph
<b>WiMaX</b>	Worldwide Interoperability for Microwave Access
<b>NMT</b>	Nordic Mobile Telephones
<b>TACS</b>	Total Access Communication Systems
<b>AMPS</b>	Advanced Mobile Phone System
<b>FCC</b>	Federal Communications Commission
<b>SIR</b>	Signal-to-Interference Ration
<b>FM</b>	Frequency Modulation
<b>FDMA</b>	Frequency Division Multiple Access
<b>CDMA</b>	Code Division Multiple Access
<b>PDC</b>	Personal Digital Cellular
<b>BSS</b>	Base Station Subsystem
<b>BTS</b>	Base Transceiver Station
<b>BSC</b>	Base Station Controller
<b>NSS</b>	Network Switching Subsystem
<b>MSC</b>	Mobile Switching Center
<b>VLR</b>	Visitor Location Register
<b>HLR</b>	Home Location Register
<b>AC</b>	Authentication Center
<b>EIR</b>	Equipment Identity Register
<b>VMS</b>	Voice Mail Service
<b>SMSC</b>	Short Message Service Center
<b>SGSN</b>	Servicing General Packet Radio Services
<b>SMS</b>	Short Message Service
<b>DNS</b>	Domain Name Servers
<b>GGSN</b>	Gateway General Packet Radio Services

<b>GPRS</b>	General Packet Radio Services
<b>WCDMA</b>	Wideband Code Division Multiple Access
<b>RNC</b>	Radio Network Controller
<b>WMSC</b>	Wideband CDMA Mobile Switching Center
<b>MIMO</b>	Multiple-In Multiple-Out
<b>eICIC</b>	Enhanced Inter-Cell Interference Coordination
<b>CA</b>	Carrier Aggregation
<b>UE</b>	User Equipment
<b>PDN</b>	Packet Data Network
<b>EPS</b>	Evolved Packet System
<b>VoIP</b>	Voice Over IP
<b>QoS</b>	Quality of Service
<b>E-UTRAN</b>	Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network
<b>NAS</b>	Non-Access Stratum
<b>RRC</b>	Radio Resource Control
<b>RLC</b>	Radio Link Control
<b>ROHC</b>	Robust Header Compression
<b>HARQ</b>	Hybrid Automatic Repeat Request
<b>BCCH</b>	Broadcast Control Channel
<b>CCCH</b>	Common Control Channel
<b>DCCH</b>	Dedicated Control Channel
<b>DTCH</b>	Dedicated Traffic Channel
<b>BCH</b>	Broadcast Channel
<b>UL-SCH</b>	Uplink Shared Channel
<b>PHICH</b>	Physical HARQ Indication Channel
<b>QPSK</b>	Quadrature Phase Shift Keying
<b>PUSCH</b>	Physical Uplink Shared Channel
<b>PUCCH</b>	Physical Uplink Control Channel
<b>CQI</b>	Channel Quality Indication
<b>BPSK</b>	Binary Phase Shift Keying
<b>PRB</b>	Physical Resource Block
<b>DM-RS</b>	Demodulation Reference Signals
<b>SRS</b>	Sounding Reference Signals
<b>PSS</b>	Primary Synchronization Sequence
<b>SSS</b>	Secondary Synchronization Sequence
<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
<b>DAB</b>	Digital Audio Broadcasting
<b>SCT-FDE</b>	Single Carrier Transmission with Frequency Division Equalization
<b>PARP</b>	Peak to Average Power Ratio
<b>DFT</b>	Discrete Fourier Transformation
<b>CBR</b>	Constant BitRate

## Βιβλιογραφία

- [1] A. G. Sarigiannidis, M. Iloridou, P. Nicopolitidis, G. Papadimitriou, F-N. Pavlidou, P. G. Sarigiannidis, M. D. Louta & V. Vitsas, “Architecture and Bandwidth Allocations Schemes for Hybrid Wireless – Optical Networks”, IEEE Communications Survey & Tutorials, vol. 17, no. 1, pp. 427 – 468, September 2014.
- [2] G. P. Agrawal, “Fiber – Optic Communication Systems”, 3<sup>rd</sup> edition, Wiley – Interscience, 2002.
- [3] Y. Huang, J. Heritage & B. Mukherjee, “Connection Provisioning with Transmission Impairment Consideration in Optical WDM Networks with High – Speed Channels”, Journal of Lightwave Technology, vol. 23, no. 3, pp. 982 – 993, March 2015.
- [4] T – REC – G.9801, ITU – T, Ethernet Passive Optical Networks using OMCI, August 2013.
- [5] T – REC – G.988, ITU – T, Maintenance, May 2014.
- [6] T – REC – Q.838.1, ITU – T, Requirements & Analysis for the Management Interface of Ethernet Passive Optical Networks (EPON), October 2004.
- [7] N. Ansari & J. Zhang, “Media Access Control and Resource Allocation: For Next Generation Passive Optical Networks”, SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology, 2013.
- [8] N. Antoniadou, G. Ellinas, I. Roudas, “WDM Systems and Networks: Modeling, Simulation, Design and Engineering, Springer Science & Business Media, 2011.
- [9] G. Kramer, B. Mukherjee & A. Maislos, “IP over WDM: Building the Next Generation Optical Internet”, John Wiley & Sons Inc, January 2004.
- [10] A. R. Mishra, “Fundamentals of Cellular Network Planning and Optimisation: 2G/2.5G/3G...Evolution to 4G”, John Wiley & Sons Inc, April 2004.
- [11] Rysavy Research, “Transition to 4G: 3GPP Broadband Evolution to IMT – Advanced”, Rysavy Research, September 2010.
- [12] 3GPP TS 23.401, “Technical Specification Group Services and System Aspects; General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network”.
- [13] 3GPP TS 23.203, “Policy and charging control architecture”.
- [14] 3GPP TS 36.331, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) Radio Resource Control (RRC); Protocol specification”.



- [15] 3GPP TS 36.323, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Packet Data Convergence Protocol (PDCP) specification”.
- [16] 3GPP TS 36.211, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation”.
- [17] 3GPP TS 36.101, “LTE: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) Radio Transmission and Reception”.
- [18] M. Alard and R. Halbart-Lassal, “Principles of Modulation and Channel Coding for Digital Broadcasting for Mobile Receivers,” EBU Review, vol. 224, pp. 47– 69, August 1987.
- [19] H. Sari, G. Karam, and I. Jeanclaude, “Channel Equalization and Carrier Synchronization in OFDM systems,” Audio and Video Digital Radio Broadcasting Systems and Technique, pp. 191–202, 1994.
- [20] H. Sari, G. Karam, and I. Jeanclaude, “Transmission Techniques for Digital Terrestrial TV Broadcasting,” IEEE Communications Magazine, vol. 33, pp. 100 - 109, February 1995.
- [21] H. Sari and G. Karam, “Orthogonal frequency-division multiple access and its application to CATV networks,” European Transactions on Telecommunications, vol. 9, no. 6, pp. 507–516, November 1998.
- [22] H. Sari, “Orthogonal Frequency-Division Multiple Access with Frequency Hopping and Diversity,” in Multi-Carrier Spread-Spectrum, K. Fazel and G. P. Fettweis, Eds. Boston, MA: Springer US, pp. 57–68, 1997.
- [23] A. G. Sarigiannidis, P. Nicopolitidis, G. I. Papadimitriou, P. G. Sarigiannidis, M. D. Louta & A. S. Pomportsis, “On the Use of Learning Automata in Tuning the Channel Split Ratio of WiMAX Networks”, in IEEE Systems Journal, vol. 9, no. 3, pp. 651 – 663, October 2013.
- [24] G. I. Papadimitriou & D. G. Maritsas, “LABON: A Learning Automata – Based Optical Network”, ICC '94, August 2002.
- [25] G. I. Papadimitriou & D. G. Maritsas, “Learning Automata – Based Receiver Conflict Avoidance Algorithms for WDM Broadcast-And-Select Star Networks”, in IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 4, no. 3, pp.407 – 412, August 2002.
- [26] C. A. Astudillo, N. L. S. da Fonseca & J. F. Borin, “LTE Scheduler for LTE/TDM – EPON Integrated Networks”, in Wireless Communications and Networking Conference (WCNC '14), November 2014.
- [27] M. Giuntini, A. Valentini, F. Matera & S. Di Bartolo, “Quality of Service Management in Hybrid Optical – LTE Access Networks”, in Future Network & Mobile Summit (FutureNetw), December 2011.

- [28] B. Kantarci & H. T. Mouftah, “Towards Energy – Efficient Hybrid Fiber – Wireless Access Networks”, in 13<sup>th</sup> International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), August 2011.
- [29] M. Hajduczenia & H. J. A. da Silva, P. P. Monteiro, “EPON System Efficiency Evaluation with Extended GATE / REPORT MPCP DUs”, in 11<sup>th</sup> IEEE Symposium on Computers & Communications (ISCC), September 2006.
- [30] S. Bahtia & R. Bartos, “IPACT with Smallest Available Report First: A New DBA Algorithm for EPON”, in IEEE International Conference on Communications (ICC), August 2007.
- [31] S. Nayak, “Telecom Industry Trends for 2017 by Tejas Networks”, December 2016 [Online]. Available: <http://www.telecomlead.com/telecom-equipment/five-telecom-sector-trends-to-watch-for-in-2017-73214>.
- [32] K. E.Psannis, “Mobile Telecoms – I” [Online]. Available: <http://users.uom.gr/~kpsannis/>.
- [33] “Optical Fibres” [Online]. Available: <https://www.miniphysics.com/optical-fibres.html>.
- [34] T. Tsutsumi, Y. Saki, T. Fujiwara, H. Ou, Y. Kimura, T. Sakamoto, K – I. Suzuki, M. Kubota & A. Otaka, “Field – Measurement and Analysis of Long – Reach and High – Splitting – Ratio 10G-EPON with Optical Amplifier in Central Office, in Journal of Lightwave Technology, vol. PP, no. 99, pp. 1 – 1, December 2016.
- [35] H. Mukai, F. Tano & J. Nakagawa, “Energy Efficient 10G-EPON System”, Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC ‘13), June 2013.
- [36] Pajcin, Matavulj & Radivojevic, “MPCP Adjusting for Improving QoS in Green WDM EPON”, International Workshop on Fiber Optics in Access Network (FOAN ’16), December 2016.
- [37] S. Miyata, K – I. Baba, K. Yamaoka & H. Kinoshita, “DR – MPCP: Delayed REPORT Message for Multipoint Control Protocol in EPON”, 7th International Workshop on Reliable Networks Design and Modeling (RNDM ’15), November 2015.