



Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου  
Σχολή Θετικών Επιστημών & Τεχνολογίας  
Τμήμα Επιστήμης & Τεχνολογίας Τηλεπικοινωνιών

*Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
Προηγμένα Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα και Δίκτυα*

*Διπλωματική Εργασία  
Παθητικά Οπτικά Δίκτυα*

*Ιωάννη Βασιλόπουλου*

*A.M:2008103*

*Επιβλέπουσα:*

*Χριστίνα-Τάνια Πολίτη*

*Επ. Καθηγήτρια*

Τρίπολη, Σεπτέμβριος 2010



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. *Ιστορική Αναδρομή*
2. *Βασικά στοιχεία οπτικών συστημάτων επικοινωνιών*
  - 2.1 *Πομπός*
  - 2.2 *Δέκτης*
  - 2.3 *Οπτικός ενισχυτής*
  - 2.4 *AWG*
3. *Κατηγορίες οπτικών δικτύων*
  - 3.1 *FTTx– Ίνα μέχρι το x*
    - 3.1.1 *Ίνα έως το σπίτι Fiber-To-The-Home (FTTH)*
      - 3.1.1.1 *Home Run*
      - 3.1.1.2 *Active Star*
    - 3.1.2 *Ίνα έως το κτίριο Fiber-To-The-Built (FTTB)*
    - 3.1.3 *Ίνα έως την καμπίνα Fiber To The Cabinet (FTTC)*
    - 3.1.4 *Βασικά πλεονεκτήματα και προϋποθέσεις σχεδιασμού PON*
4. *Αρχή λειτουργίας της τεχνολογίας WDM*
  - 4.1 *Χονδροειδής Πολυπλεξία με Διαίρεση Μήκους Κύματος (Coarse Wavelength Division Multiplexing-CWDM)*
  - 4.2 *Πυκνή Πολυπλεξία με Διαίρεση Μήκους Κύματος (Dense Wavelength Division Multiplexing DWDM)*
5. *Τεχνολογίες PON*
  - 5.1 *TDM-PON Time Division Multiplexing – Passive Optical Network*
    - 5.1.1 *APON/BPON: ATM/Broadband PON*
    - 5.1.2 *Ethernet-PON EPON*
    - 5.1.3 *Gigabit PON GPON*
  - 5.2 *Νέα Γενιά Παθητικών Οπτικών Δικτύων (NG-PON)*
    - 5.2.1 *Αρχιτεκτονική NG-PON*
6. *WDM-PON*
  - 6.1 *Αρχιτεκτονική WDM-PON*
  - 6.2 *Ιδιότητες και χαρακτηριστικά συσκευών*
    - 6.2.1 *Ιδιότητες πομπού*



6.2.1.1 Πηγή προσδιορισμένου μήκους κύματος

6.2.1.2 Πολλαπλές πηγές Μηκών Κύματος

6.2.2 Ιδιότητες δέκτη

6.3 Αρχιτεκτονικές WDM-PON

6.3.1 CPON

6.3.2 LARNET

6.3.3 RITENET

6.3.4 WDM-PON βασισμένο σε πολλαπλών βαθμίδων AWG

6.3.5 DWDM Super-PON (SPON)

6.3.6 SUCCESS-DWA PON

6.4 Πρωτόκολλα

6.4.1 MPCP προσθήκη και WDM IPACT

6.4.2 WDM-PON DBA πρωτόκολλο για SUCCESS αρχιτεκτονική

6.5 Υπηρεσίες

7. Οπτικά ενισχυμένα PON

7.1 Εισαγωγή

7.2 Ρυθμός εμφάνισης εσφαλμένων-bit

7.3 Μη ενισχυμένα δίκτυα

7.4 Μη ενισχυμένα δίκτυα με χρήση APD

7.5 Πρόσθετες συνιστώσες θορύβου των ενισχυμένων δικτύων

7.6 Αποτελέσματα ενισχυμένου PON

7.7 Γενικό Συμπεράσματα

*Βιβλιογραφία*



## **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Τα παθητικά οπτικά δίκτυα (Passive Optical Networks - PONs) θεωρούνται λύση για την παροχή δικτύων πρόσβασης υψηλής ταχύτητας. Το κέρδος κόστους που προκύπτει ως αποτέλεσμα της μείωσης στον αριθμό διεπαφών μεταξύ των κόμβων, έχει επιτρέψει την αυξανόμενη χρήση των PON που παραδίδουν την ίνα στο σπίτι (Fibre to the Home) και την ίνα στο curb. Εντούτοις, σε πολλές περιπτώσεις, η ανάγκη για υψηλό ποσοστό διάσπασης (splitting ratio) ή για εκτεταμένη προσιτότητα (reach) προσδίδει μεγάλες απώλειες οι οποίες μπορούν να αντιμετωπιστούν μόνο με ενισχυτές. Στην εργασία αυτή θα γίνει μελέτη του φυσικού στρώματος ενός τέτοιου Παθητικού Δικτύου, μέσω θεωρητικού μοντέλου που αναλύει τις λειτουργικές απαιτήσεις τόσο παθητικών όσο και ενισχυμένων συστημάτων. Η εργασία θα δώσει συμπεράσματα σχετικά με τον αριθμό των χρηστών και της απόστασης ενός τέτοιου δικτύου με και χωρίς ενισχυτή.

### **1. Ιστορική Αναδρομή**

Για πάνω από τριάντα χρόνια ο σχεδιασμός και η υλοποίηση της ίνας είχε σαν οραματισμό την παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών στους οικιακούς συνδρομητές, αλλά η άποψη αυτή μόνο πρόσφατα επικράτησε. Συγκεκριμένα, η χρήση των οπτικών ινών για την μετάδοση πληροφορίας αυξήθηκε σημαντικά την δεκαετία του 1980 με εγκατάσταση οπτικών δικτύων στα δίκτυα κορμού ανά τον κόσμο. Ο ρυθμός αυτός ανάπτυξης των οπτικών ινών συνεχίστηκε εντονότερα την δεκαετία του 1990 και αυξάνεται μέχρι και σήμερα με την ανάπτυξη και βελτίωση του σχεδιασμού πολυκάναλων οπτικών δικτύων. Ένα από παράδειγμα είναι η χρήση της ίνας στην καλωδιακή τηλεόραση, όπου η αντικατάσταση των ομοαξονικών καλωδίων με την οπτική ίνα επιφέρει σημαντική αύξηση της χωρητικότητας της μετάδοσης σε περισσότερες από μία τάξεις μεγέθους. Μας δίνεται η δυνατότητα της εξέλιξης της εικόνας video από αναλογική σε ψηφιακή με θετική συνέπεια την τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας [1]. Το βασικό μέλημα ήταν και είναι να υπάρχει από-άκρη-σε-άκρη (end-to-end) οπτική σύνδεση με τον χρήστη, η λεγόμενη FTTH (Fiber-to-the-home). Η πρώτη δοκιμαστική υλοποίηση του FTTH έγινε το 1977 στην Higashi-Ikoma κοντά στη Nara της Ιαπωνίας [2],[3] με την παροχή διαδραστικών υπηρεσιών βίντεο για σκοπούς όπως η εκπαίδευση, βίντεο σχετικά με τον προγραμματισμό της ζήτησης, καθώς και υπηρεσίες ασφάλειας και τηλεπικοινωνιών. Κατά τις αρχές της δεκαετίας του 1980 ένας αριθμός από πειραματικές υλοποιήσεις έγιναν στην Ευρώπη (Biarritz, France, Milton-Keynes



στην Αγγλία και στην BIGFON στο Βερολίνο), στην Β. Αμερική (Εlie του Καναδά), στην Ιαπωνία. Όλες τεχνικά ήταν επιτυχείς. Προς το τέλος της ίδιας δεκαετίας αρκετοί τηλεπικοινωνιακοί φορείς άρχισαν να προσθέτουν στα πλάνα τους την ανάπτυξη δικτύου FTTH. Όμως, υπήρξαν βασικά ερωτήματα και συγχρόνως προβλήματα για πολλούς, όπως ποιο το κόστος και πού μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτό το μεγάλο μέγεθος χωρητικότητας. Το βασικό αλλά και ουσιαστικό πρόβλημα εκείνη την στιγμή ήταν το οικονομικό κόστος, καθώς το κόστος ανά συνδρομητή ήταν μεγαλύτερο από το κόστος των ήδη εφαρμοσμένων τεχνολογιών, αφού έφτανε σε μερικές χιλιάδες δολάρια. Ένα άλλο σημαντικότερο πρόβλημα για εκείνη την εποχή ήταν η απαίτηση αδιάλειπτης ηλεκτρικής ισχύος σε κάθε σπίτι, ώστε να διασφαλίζεται η καλή και εγγυημένη λειτουργία του FTTH δικτύου, καθώς την τότε εποχή δεν είχαν κατασκευαστεί οι αδιάλειπτοι ενισχυτές ισχύος, με συνέπεια να μην υπάρχει διασφάλιση της σταθερής ηλεκτρικής ισχύος[2]. Τέλος, όπως ήδη αναφέρθηκε, βασικότατο πρόβλημα αποτελούσε το ότι με βάση τις τότε ανάγκες οι συνδρομητές δεν ήταν διατεθειμένοι να πληρώσουν τις προηγμένες υπηρεσίες, που προσέφερε η μεγάλη αυτή χωρητικότητα, δεδομένου ότι δεν ήταν αναγκαίες για την εποχή. Καθώς, όμως οι απαιτήσεις για μεγαλύτερο εύρος ζώνης αυξάνονταν π.χ HDTV και αυξάνονται ακόμα πιο έντονα σήμερα, συνεπώς υπάρχει αύξηση της απαίτησης για μεγαλύτερη χωρητικότητα και για μεγαλύτερες ταχύτητες, αυτό είχε και έχει σαν αποτέλεσμα την ουσιαστική στροφή για συμμετοχή αλλά και αλλαγή των δικτύων σε αμιγώς οπτικά δίκτυα FTTH. Αρχικά τα συστήματα αυτά είχαν υλοποιηθεί βασισμένα στην TDMA τεχνολογία όπου ένα μόνο μήκος κύματος χρησιμοποιείται για την μετάδοση της πληροφορίας προς όλους τους χρήστες και μέχρι στιγμής χρησιμοποιείται για τη μαζική εξάπλωση. Όμως και εδώ έχουμε περιορισμούς με αποτέλεσμα να υπάρχει και εδώ όριο στην μεταδιδόμενη-απαιτούμενη πληροφορία ή στο αριθμό των χρηστών καθώς και στο κόστος υλοποίησης. Στην εξέλιξη των PON συστημάτων μεγάλο ρόλο παίζει πλέον ότι τα τελευταία χρόνια αρχίζει να εφαρμόζεται η τεχνολογία της Πολυπλεξίας με Διαίρεση Μήκους Κύματος (Wavelength Division Multiplexing - WDM). Η τεχνολογία αυτή βασίζεται στο ότι σε κάθε οπτική ίνα το οπτικό σήμα που μεταδίδεται υφίσταται μια δεδομένη φέρουσα συχνότητα. Ως αποτέλεσμα αυτής της τεχνολογίας υπάρχει πλέον η δυνατότητα μεταδίδονται περισσότερα από ένα οπτικά σήματα διαφορετικής συχνότητας που το καθένα από αυτά μεταφέρει διαφορετικά δεδομένα έτσι αυξάνεται η συνολική μεταδιδόμενη χωρητικότητα της ίνας. Έτσι πλέον αρχίζει μια ανάπτυξη και έρευνα σχετικά με τα δίκτυα που χαρακτηρίζονται ως δίκτυα νέας γενιάς καθώς και μια ομαλή μετάβαση των υπάρχων δικτύων σε δίκτυα νέας γενιάς. Πλέον γίνεται μια εκμετάλλευση όλων



των χαρακτηριστικών και των ιδιοτήτων του μήκους κύματος είτε από την πλευρά του δέκτη είτε από την πλευρά του πομπού. Η εφαρμογή του οπτικού ενισχυτή (optical amplifiers) φέρνει μια νέα φιλοσοφία καθώς μας προσφέρει δυνατότητες ανάπτυξης και υλοποίησης των PON δικτύων καθώς η ανάγκη για υψηλό ποσοστό διάσπασης (splitting ratio) ή για εκτεταμένη προσιτότητα (reach) προσδίδει μεγάλες απώλειες οι οποίες μπορούν να αντιμετωπιστούν μόνο με ενισχυτές. Μπορεί να θεωρηθεί ως ένα από τα βασικά στοιχεία στη σχεδίαση οπτικών δικτύων αφού οι οπτικοί ενισχυτές παρέχουν την δυνατότητα να μεταφέρουν δεδομένα σε μεγάλες αποστάσεις.



## **2. Βασικά στοιχεία οπτικών συστημάτων επικοινωνιών**

Ένα οπτικό σύστημα μετάδοσης για να υλοποιηθεί πρέπει να απαρτίζεται εκτός από την οπτική ίνα που είναι το λεγόμενο τηλεπικοινωνιακό κανάλι και από άλλα δύο βασικά στοιχεία: τον πομπό και τον δέκτη καθώς και από κάποια προαιρετικά ανάλογα με την τοπολογία καθώς και με τις ανάγκες-απαιτήσεις του δικτύου, όπως ενισχυτής και AWG. Στην ενότητα αυτή θα γίνει μια αναφορά σχετικά με αυτά τα στοιχεία.

### **2.1 Πομπός**

Ο ρόλος των οπτικών πομπών είναι απλώς να μετατρέπουν το ηλεκτρικό σήμα σε οπτικό σήμα ώστε στην συνέχεια αυτό να εισέρχεται μέσα στην οπτική ίνα δηλαδή με απλά λόγια το ηλεκτρικό σήμα να γίνεται μια δέσμη φωτός κατάλληλη να μεταδοθεί μέσα στην οπτική ίνα. Τα είδη της πηγής φωτεινής δέσμης που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι, α) η Δίοδος Εκπομπής Φωτός LED (Light Emitting Diodes) και β) τα Laser ημιαγωγών. Τα γενικά πλεονεκτήματα αυτών είναι: α) μικρό μέγεθος β) υψηλή απόδοση γ) μεγάλη αξιοπιστία δ) κατάλληλη περιοχή μήκος κύματος ε) μικρή επιφάνεια εκπομπής σε σχέση με τις διαστάσεις του πυρήνα της οπτικής ίνας και στ) η δυνατότητα άμεσης διαμόρφωσης σε σχετικά υψηλές συχνότητες. Η τελευταία ιδιότητα είναι πολύ χρήσιμη γιατί εξαλείφει την ανάγκη ενός εξωτερικού διαμορφωτή σε πολλές περιπτώσεις. Η Δίοδος Εκπομπής Φωτός LED είναι μια ορθά πολωμένη επαφή p-n εκπέμπει φως μέσω αυθόρμητης εκπομπής, φαινόμενο γνωστό σαν ηλεκτροφθορισμός. Ακτινοβόλες επανασυνδέσεις ζευγών ηλεκτρονίων-οπών, δημιουργούν φως. Ένα μέρος αυτής της ποσότητας φωτός μπορεί να συζευχθεί σε μια οπτική ίνα. Το εκπεμπόμενο φως είναι σύμφωνο με σχετικά μεγάλο φασματικό εύρος (30-60nm) και μεγάλο γωνιακό εύρος. Οι LED είναι χρήσιμες για φθηνές εφαρμογές, που απαιτούν μετάδοση δεδομένων με ρυθμό 100Mb/s ή μικρότερο σε απόσταση μερικών χιλιομέτρων. Οι διατάξεις αυτές χρησιμοποιούνται συνήθως σε επικοινωνιακές εφαρμογές πολύτροπων οπτικών ινών. Παρουσιάζουν κάποια πλεονεκτήματα όπως είναι η μεγάλη διάρκεια ζωής, η μικρή ευαισθησία σε μεταβολές της θερμοκρασίας και το χαμηλό κόστος.

Τα Laser ημιαγωγών (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) εκπέμπουν φως μέσω της διεγερμένης εκπομπής. Σαν συνέπεια των βασικών διαφορών μεταξύ αυθόρμητης και διεγερμένης εκπομπής, δεν είναι μόνο ότι είναι ικανά να εκπέμπουν υψηλή ισχύ (~100mW), αλλά και πλεονεκτήματα που σχετίζονται με τη σύμφωνη φύση του εκπεμπόμενου φωτός. Η σχετικά



περιορισμένη γωνία εύρους της δέσμης εξόδου επιτρέπει υψηλή ικανότητα ζεύξης (~50%) με μονότροπες οπτικές ίνες. Το σχετικά περιορισμένο φασματικό εύρος του εκπεμπόμενου φωτός επιτρέπει τη λειτουργία σε σχετικά υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης (~10Gb/s). Τα laser ημιαγωγών διαμορφώνονται άμεσα σε υψηλές συχνότητες ως και 25GHz. [1] Οι δέσμες φωτονίων ενισχύονται με σύστημα καθρεπτών και στη συνέχεια εξέρχονται με τη μορφή εξαιρετικά εστιασμένων ακτινών. Τα Lasers μπορούν να συντονιστούν, όσον αφορά το μήκος κύματος τους, με χρήση μεθόδων συντονισμού όπως είναι ο μηχανικός συντονισμός, ο ακουστοπτικός συντονισμός, ο ηλεκτροπτικός συντονισμός και ο injection-current-based συντονισμός. Τα μηχανικά συντονισμένα Lasers μπορούν να συντονιστούν σε όλο το ωφέλιμο φάσμα (τάξεως των 100nm), αλλά ο χρόνος εναλλαγής καναλιών είναι της τάξης msec εξαιτίας των μηχανικών στοιχείων μέσω των οποίων γίνεται ο συντονισμός. Τα ακουστοπτικά Lasers συνδυάζουν μέσο εύρος και μέσο χρόνο συντονισμού (τάξεως των 10 msec). 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).[1] Περεταίρω ανάλυση για τους πομπούς γίνεται στο κεφάλαιο 6.

## 2.2 Δέκτης

Ο στόχος του δέκτη είναι να μετατρέπει το οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό και να ανακτά τις πληροφορίες που έχουν μεταδοθεί μέσω ενός οπτικού συστήματος. Το βασικό εξάρτημα είναι μια φωτοδίοδος που μετατρέπει το οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό. Η οποία με κατάλληλους καθρέπτες λαμβάνει τη δέσμη φωτός από την οπτική ίνα και συντονίζονται σε συγκεκριμένο μήκος κύματος ανάλογα με την απόσταση των καθρεπτών μεταξύ τους[1]. Οι οπτικοί δέκτες πρέπει να έχουν μεγάλη ευαισθησία, γρήγορη απόκριση, χαμηλό θόρυβο, χαμηλό κόστος και μεγάλη αξιοπιστία.[1] Περεταίρω ανάλυση για τους δέκτες γίνεται στο κεφάλαιο 6.

## 2.3 Οπτικός Ενισχυτής

Ο οπτικός ενισχυτής (optical amplifiers) μπορεί να θεωρηθεί ως ένα από τα βασικά στοιχεία στη σχεδίαση οπτικών δικτύων. Οι οπτικοί ενισχυτές παρέχουν την δυνατότητα να μεταφέρουν δεδομένα σε μεγάλες αποστάσεις (τα συστήματα οπτικών ινών περιορίζονται από την απώλεια και την διασπορά στις οπτικές ίνες). Η βασική διαφορά με τους αναγεννητές όπου παίρνουν το σήμα το μετατρέπουν σε ηλεκτρικό και στην συνέχεια σε οπτικό και το εκπέμπουν χρησιμοποιώντας στην





έξοδό του έναν πομπό. Οι αναμεταδότες γίνονται περίπλοκοι όσο το σύστημα γίνεται περίπλοκο. Ενώ ο οπτικός ενισχυτής λαμβάνουν τα οπτικά σήματα και απλώς το ενισχύουν κατά συνέπεια δεν γίνεται επεξεργασία του οπτικού σήματος όπου αυτό γίνεται στους αναμεταδότες-αναγεννητές. Οι οπτικοί ενισχυτές βασίζονται στον ίδιο μηχανισμό που χρησιμοποιείται από τα laser, απλώς ο ενισχυτής δεν είναι τίποτε άλλο από ένα laser χωρίς ανάδραση. Οι οπτικοί ενισχυτές βασίζονται στην οπτική απολαβή που πραγματοποιείται όταν ο ενισχυτής υφίσταται άντληση για να πετύχει αντιστροφή του πληθυσμού. Η οπτική απολαβή εξαρτάται από την συχνότητα του προσπίπτον φωτός και από την ένταση της τοπικής δέσμης σε οποιοδήποτε σημείο στο εσωτερικό του ενισχυτή. Ο συντελεστής απολαβής[1] αποδίδεται ως

$$g(\omega) = \frac{g_0}{1+(\omega-\omega_0)^2 T_2^2 + P/P_s} \quad (1)$$

όπου  $g_0$  είναι η μέγιστη τιμή της απολαβής,  $\omega$  είναι η οπτική συχνότητα του προσπίπτοντος σήματος,  $\omega_0$  είναι η ατομική συχνότητα μετάβασης,  $P$  είναι η οπτική ισχύς του σήματος που ενισχύεται και  $P_s$  ισχύς κόρου. Η ισχύς κόρου εξαρτάται από τις παραμέτρους του μέσου απολαβής[1].

Σχετικά τώρα με το φάσμα απολαβής και εύρος ζώνης του ενισχυτή θεωρούμε ότι  $P/P_s \ll 1$  έτσι η εξίσωση (1) γίνεται

$$g(\omega) = \frac{g_0}{1+(\omega-\omega_0)^2 T_2^2} \quad (2)$$

συνεπώς μέγιστη απολαβή υφίσταστε όταν η προσπίπτουσα συχνότητα  $\omega$  συμπίπτει με την  $\omega_0$  ατομική συχνότητα μετάβασης. Η μείωση της απολαβής για  $\omega \neq \omega_0$  καθορίζεται από το προφίλ Lorentz[22], [1]. Το φάσμα της απολαβής των πραγματικών ενισχυτών μπορεί να διαφέρει από το προφίλ Lorentz. Το εύρος ζώνης της απολαβής ορίζεται σαν το πλήρες εύρος του μισού του μεγίστου (FWHM) φάσματος απολαβής  $g(\omega)$ . Η απολαβή του ενισχυτή ή ο συντελεστής ενίσχυσης ορίζεται ως εξής

$$G = P_{out}/P_{in} \quad (3)$$

όπου  $P_{out}$  και  $P_{in}$  οι ισχύς εξόδου και εισόδου του ενισχυτή αντίστοιχα. Άλλη μια έκφραση της απολαβής του ενισχυτή είναι

$$\frac{dP}{dz} = gP \quad (4)$$



Μια γρήγορη αναφορά είναι σχετικά με την απολαβή κόρου όπου η απολαβή κόρου βασίζεται στην εξάρτηση της  $g(\omega)$  από την ισχύ βάση της εξίσωσης (1). Όταν η  $P$  γίνει συγκρίσιμη με την  $P_s$  τότε η απολαβή  $g$  μειώνεται, συνεπώς ο συντελεστής απολαβής  $G$  μειώνεται με κάθε αύξηση της ισχύος του σήματος αυτό το φαινόμενο έχει ονομαστεί ως κόρος της απολαβής. Εάν τώρα η προσπίπτουσα συχνότητα  $\omega$  συμπίπτει με την  $\omega_o$  ατομική συχνότητα μετάβασης  $\omega = \omega_o$  δηλαδή συντονίζεται με την μέγιστη απολαβή και παίρνοντας την εξίσωση (1) [1] τότε

$$\frac{dP}{dz} = \frac{g_0 P}{1 + P/P_s} \quad (5)$$

Ένα άλλο πολύ σημαντικό σημείο είναι ο θόρυβος του ενισχυτή. Οι ενισχυτές υποβαθμίζουν το λόγο σήματος-προς-θόρυβο (SNR) του ενισχυμένου σήματος λόγω της αυθόρμητης εκπομπής μετάδοσης που προσθέτει θόρυβο στο σήμα, κατά την διάρκεια της ενίσχυσης. Αυτή η υποβάθμιση του SNR μπορεί να αποδοθεί ποσοτικά μέσω της παραμέτρου  $F_n$ , που ονομάζεται δείκτης θορύβου του ενισχυτή σε αναλογία με τους ηλεκτρονικούς ενισχυτές[1]

$$F_n = \frac{(SNR)_{in}}{(SNR)_{out}} \quad (6)$$

πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι το SNR αναφέρεται στην ηλεκτρική ισχύ που υποβαθμίζεται όταν το οπτικό σήμα μετατρέπεται σε ηλεκτρικό ρεύμα. Το SNR εισόδου δίνεται από την σχέση[1]

$$(SNR)_{in} = \frac{(I)^2}{\sigma_s^2} = \frac{(RP_{in})^2}{2qRP_{in}P\Delta_f} \quad (7)$$

Όπου  $R$  αποκρισμότητα ενός φωτοανιχνευτή (για ιδανικό φωτοανιχνευτή η αποκρισμότητα είναι μονάδα) και  $\Delta_f$  το εύρος ζώνης του ανιχνευτή. Μια άλλη παράμετρος που μπορεί να αποδοθεί από τύπο είναι η φασματική πυκνότητα θορύβου αυθόρμητης μετάδοσης [1]

$$S_{sp}(v) = (G - 1)n_{sp}hv \quad (8)$$

$v$  η οπτική συχνότητα. Η παράμετρος  $n_{sp}$  ονομάζεται συντελεστής αυθόρμητης εκπομπής ή συντελεστής πληθυσμιακής αντιστροφής. Αν αγνοήσουμε όλες τις πηγές θορύβου η μεταβολή του φωτορεύματος μπορεί να αποδοθεί ως [1]

$$\sigma^2 \approx 4(RGP_{in})(RS_{sp})\Delta_f \quad (9)$$



Το SNR εξόδου σήματος δίνεται από την σχέση

$$(SNR)_{out} = \frac{(I)^2}{\sigma^2} = \frac{(RGP_{in})^2}{\sigma^2} \quad (10)$$

Οι οπτικοί ενισχυτές τύπου Erbium-doped (Erbium-doped fiber amplifiers (EDFA) είναι ελκυστικοί, καθώς λειτουργούν σε οπτικό μήκος κύματος 1.5μm, την περιοχή μήκους κύματος στην οποία ελαχιστοποιούνται οι απώλειες οπτικών ινών και συνεπώς χρησιμοποιούνται για μεγάλες αποστάσεις και είναι από τις πλέον αξιόπιστες λύσεις. [1]

#### 2.4 Κυματοδηγός δρομολόγησης πλέγματος (AWG)

Η τεχνική του πλέγματος κυματοδηγών (AWG) είναι επίσης βασισμένη στις αρχές της συμβολής του φωτός, με την ειδική ιδιότητα της περιοδικότητας που είναι η κυκλική φύση με την οποία πολλαπλές φασματικές διατάξεις δρομολογούνται προς την ίδια πόρτα εξόδου από την πόρτα εισόδου. Αυτό επιτρέπει τη χωρική επαναχρησιμοποίηση του μήκους κύματος καναλιών.[5] Η συσκευή AWG, ονομάζεται οπτικός κυματοδηγός δρομολόγησης ή κυματοδηγός δρομολόγησης πλέγματος, αποτελείται από μια σειρά κυματοδηγών -κυρτών καναλιών- με σταθερή διαφορά στο μήκος μετάδοσης. Η τεχνική AWG έχει ως βασικότερο πλεονέκτημα τη δυνατότητα σχεδιασμού, ώστε οι διαδικασίες πολύπλεξης/αποπολύπλεξης να πραγματοποιούνται ταυτόχρονα. Είναι κατάλληλη στις απαιτήσεις μεγάλου αριθμού καναλιών, ενώ εμφανίζει χαμηλότερες απώλειες παρεμβολής (insertion losses). Ένα βασικό μειονέκτημα της είναι ευαισθησία των διατάξεων της στην θερμοκρασία, καθιστώντας την έτσι ακατάλληλη για ορισμένα περιβάλλοντα. [1]



### **3. Κατηγορίες οπτικών δικτύων**

Όπως ήδη έχει προαναφερθεί, λόγω της αύξησης των αναγκών για μεγάλο εύρος ζώνης, τα δίκτυα οπτικών ινών έχουν κάνει αισθητή την παρουσία τους στην αγορά. Σε αυτή την ενότητα θα γίνει μια αναφορά σχετικά με τους τρόπους, τοπολογίες και αρχιτεκτονικές των οπτικών δικτύων.

Πριν ξεκινήσουμε να περιγράφουμε τις αρχιτεκτονικές των οπτικών δικτύων, θα κάνουμε μια γρήγορη αναφορά στα βασικά στοιχεία που λαμβάνουν μέρος στο σχεδιασμό των οπτικών δικτύων.

#### *a) Central Office (CO) – Κεντρικό γραφείο*

Κάθε ίνα τερματίζει σε ένα λεγόμενο κεντρικό γραφείο πάνω σε μια μονάδα οπτικής γραμμής τερματισμού (OLT, Optical Line Terminal), δηλαδή το CO είναι ο κεντρικός τερματικός αποδέκτης από την πλευρά του τηλεπικοινωνιακού παρόχου, όπου κάθε ίνα τερματίζει σε μια πόρτα μιας OLT. Η OLT είναι η τερματική μονάδα από την μεριά του παρόχου. Ο σχεδιασμός του CO υλοποιείται με εξοπλισμό τέτοιον, ώστε να μπορεί να εξυπηρετεί ποικίλες μορφές επιπέδων δεδομένων, όπως ATM, SONET, 100FX Fast Ethernet κ.λ.π.

#### *b) Optical Line Unit (ONU) - Οπτική τερματική μονάδα*

Η ONU είναι η οπτική τερματική μονάδα από την μεριά του χρήστη. Στην ONU γίνεται η οπτοηλεκτρονική μετατροπή καθώς και η αποπολυπλεξία του σήματος. Γενικά η μετάδοση των δεδομένων ή αλλιώς ροή ανόδου από την ONU προς τον πάροχο (upstream) γίνεται στα 1330nm, ενώ η πρόσληψη δεδομένων ή αλλιώς ροή καθόδου στα 1510nm (downstream).

#### *3.1 Fiber To The x FTTx – Ίνα μέχρι το x*

Γενικά με την ορολογία FTTx αναφερόμαστε σε οποιαδήποτε τοπολογία δικτύου, που χρησιμοποιεί οπτική ίνα για να μεταφέρει την μεταδιδόμενη πληροφορία. Το FTTx διαιρείται στις πιο κάτω υποκατηγορίες, που έχουν σχέση με το ποσοστό της συμμετοχής της οπτικής ίνας στο δίκτυο:

- a) FTTH (Fiber-To-The-Home) Ίνα έως το σπίτι
- b) FTTB (Fiber-To-The-Built) Ίνα έως το κτίριο
- c) FTTC (Fiber-To-The-Curb), FTTN (Fiber-To-The-Node) Ίνα έως την καμπίνα ή την μονάδα.

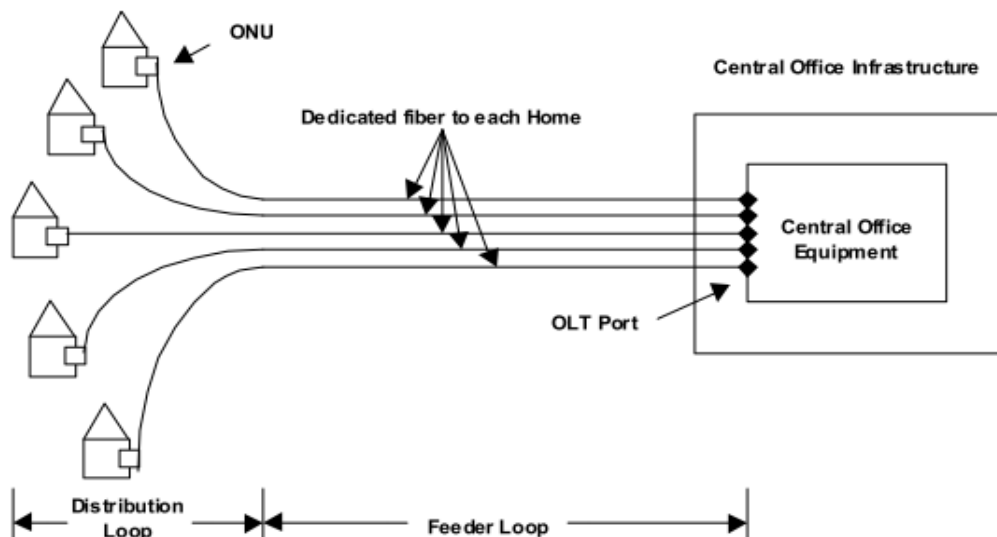


### 3.1.1 Ένα έως το σπίτι Fiber-To-The-Home (FTTH)

Η αρχιτεκτονική FTTH διαιρείται σε δύο βασικές κατηγορίες α) Αρχιτεκτονική Home Run, όπου μια ίνα είναι αφιερωμένη (dedicated) για κάθε σπίτι ή χρήστη και β) Αρχιτεκτονική Star, όπου πολλά σπίτια-χρήστες μοιράζονται μία ίνα. Αυτή η αρχιτεκτονική μπορεί να είναι ενεργή (Active Star), καθώς ενεργά στοιχεία λαμβάνουν μέρος σε αυτήν ή να είναι παθητική (Passive Star ή Passive Optical Network), αφού μόνο παθητικά στοιχεία αποτελούν την αρχιτεκτονική αυτή. Επιπροσθέτως, η αρχιτεκτονική παθητικό αστέρι μπορεί υλοποιηθεί με ένα μήκος κύματος για όλους τους χρήστες-σπίτια ή να έχει αναπτυχθεί με WDM (Wavelength Division Multiplexer) σύστημα, όπου εδώ κάθε σπίτι-χρήστης εξυπηρετείται με διαφορετικό μήκος κύματος.

#### 3.1.1.1 Αρχιτεκτονική Home Run

Η αρχιτεκτονική αυτή είναι γνωστή και ως σημείο σε σημείο (Point-to-Point), καθώς κάθε ίνα είναι αφιερωμένη σε κάθε χρήστη από το CO ως την ONU. Συνεπώς, είναι μια αρχιτεκτονική, που απαιτεί μεγάλο αριθμό ινών και πιο συγκεκριμένα όσες και οι χρήστες του κάθε δικτύου, με αποτέλεσμα να έχει πολύ μεγάλο κόστος στην υλοποίησή του, καθώς και στην αναβάθμισή του. Μια τέτοια αρχιτεκτονική φαίνεται στο σχήμα 2.1. [4]



Σχήμα 2.1. Αρχιτεκτονική Home Run [4]

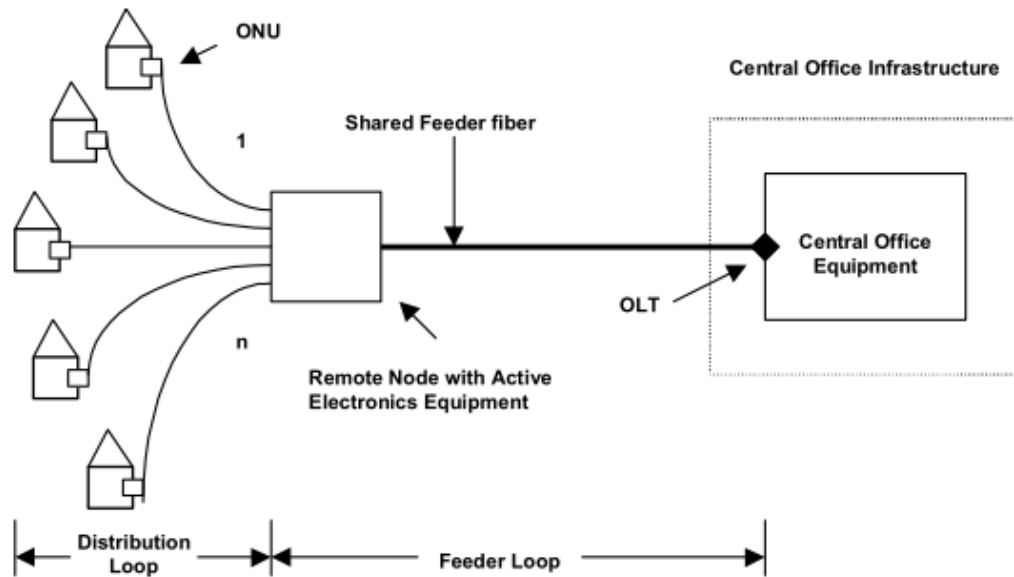


### 3.1.1.2 Αρχιτεκτονική Star

Η αρχιτεκτονική Αστέρι χωρίζεται, όπως έχει προαναφερθεί, σε δύο βασικές κατηγορίες: α) ενεργό αστέρι (active star) και β) παθητικό αστέρι (passive star). Γενικά, η αρχιτεκτονική αστέρι έχει σαν σκοπό και στοχεύει στην μείωση του συνολικού αριθμού οπτικών ινών, με αποτέλεσμα μικρότερο κόστος κατασκευής ενός τέτοιου δικτύου, καθώς και μικρότερο κόστος συντήρησης. Ένα ακόμα πλεονέκτημα είναι ο ευκολότερος τρόπος της επεκτασιμότητάς του, όταν οι ανάγκες και οι απαιτήσεις των υπηρεσιών γίνονται ολοένα πιο απαιτητικές, καθώς και όταν αυξάνεται ο αριθμός των χρηστών. Η βασική διαφορά και ιδέα της αρχιτεκτονικής αστεριού από την αρχιτεκτονική Home Run είναι ότι μεταξύ CO και χρήστη υπάρχει ένα άλλο βασικό στοιχείο, το Remote Node ή ο Splitter και η διασύνδεση μεταξύ τους υλοποιείται με μια διαμοιρασμένη ίνα-τροφοδότη (σχήμα 4.2 και σχήμα 4.3).

#### a) Active Star – Ενεργό Αστέρι

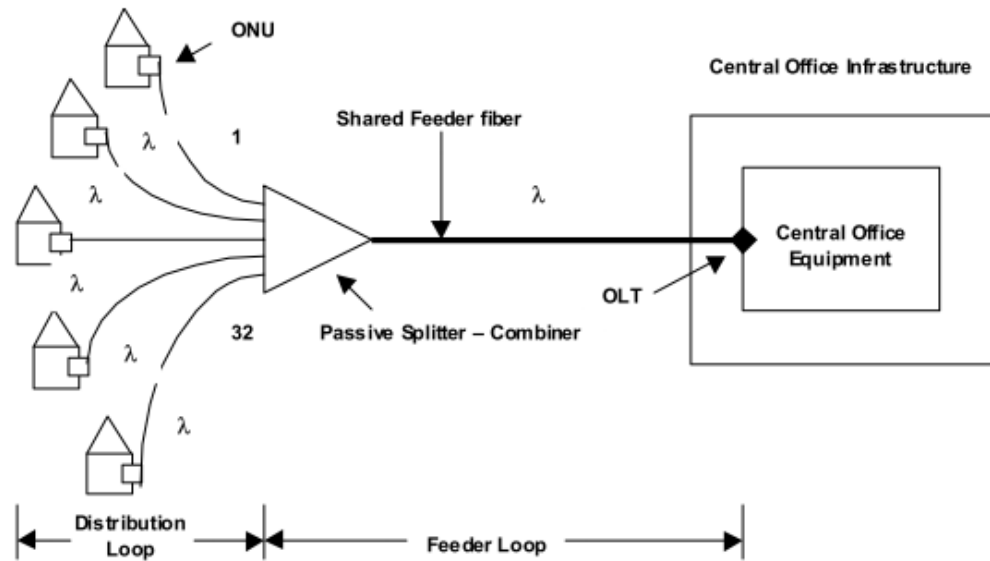
Στο ενεργό αστέρι, κάθε OLT πόρτα και η ίνα-τροφοδότης μεταξύ CO και Remote Node διαμοιράζεται από τέσσερις σε χιλιάδες σπίτια, μέσω αποκλειστικών συνδέσμων διανομής από τον απομακρυσμένο κόμβο (Remote Node). Όταν ο απομακρυσμένος κόμβος περιέχει ενεργά στοιχεία, όπως ένας πολυπλέκτης (ή διακόπτης), η αρχιτεκτονική αναφέρεται ως ένα ενεργό αστέρι, κατά συνέπεια ο απομακρυσμένος κόμβος πρέπει να τροφοδοτείται. Ο απομακρυσμένος κόμβος στο δίκτυο Ενεργό Αστέρι έχει ένα πολυπλέκτη / αποπολυπλέκτη. Οι διακόπτες στον απομακρυσμένο κόμβο είναι στον ηλεκτρικό τομέα (με τον δέκτη) και ως εκ τούτου μετατροπές OEO (Optical-Electrical-Optical) είναι αναγκαίοι. Δεδομένου ότι το εύρος ζώνης κατανέμεται σε πολλαπλά τερματικά-τελικά σημεία, η μέγιστη διαθέσιμη συνεχής χωρητικότητα κάθε σπιτιού - τόσο στη ροή ανόδου όσο και στη ροή καθόδου - είναι μικρότερη με μια αρχιτεκτονική ενεργό αστέρι από ότι με ίνα Home Run. Τυπικά, κάθε απομακρυσμένος κόμβος σε μια δραστική αρχιτεκτονική αστέρι υποστηρίζει από δεκαέξι έως χιλιάδες (ή περισσότερα) σπίτια-χρήστες.



Σχήμα 2.2. Ενεργό Αστέρι – Active Star [4]

b) Passive Star (Passive Optical Network) – Παθητικό Οπτικό Δίκτυο

Το Παθητικό Οπτικό Δίκτυο (PON) δεν έχει κανένα ενεργό ηλεκτρονικό στοιχείο (και συνεπώς δεν χρειάζεται καμία τροφοδοσία). Στον απομακρυσμένο κόμβο, ένας παθητικός διαχωριστής στέλνει πιστά αντίγραφα οπτικού σήματος καθόδου από την ίνα τροφοδοσίας πάνω στις μεμονωμένες ίνες διανομής ενώ ο ζεύκτης συνδυάζει τα οπτικά σήματα από τα μεμονωμένα σπίτια πάνω στην ίνα τροφοδότη. Η OLT και η ONU πρέπει να υποστηρίζουν ένα επιπρόσθετο μέσο ενημέρωσης πρόσβασης και το πρωτόκολλο ελέγχου το οποίο να προσδιορίζεται σε μια χρονοθυρίδα στην ONU ώστε να διαβιβάζεται η κίνηση της ροής ανόδου προς την OLT. Τα περισσότερα PON κάνουν χρήση δύο μήκων κύματος : 1310 nm για την ανοδική ροή κίνησης και 1510 nm για την καθοδική ροή κίνησης, αυτό παρέχει καλύτερη απομόνωση μεταξύ πομπών και δεκτών λέιζερ και εξαλείφει την ανάγκη για χρησιμοποίηση δαπανηρών συσκευών. Γενικός το 1550 παράθυρο nm (1530-1565 nm) είναι αχρησιμοποίητο, η χρήση του θα είναι για το WDM στο μέλλον. Πολλοί πωλητές χρησιμοποιούν πλέον το 1550 nm μήκος κύματος για την παροχή αναλογική μετάδοση βίντεο [Pesa02]. Στο θέμα της χωρητικότητας και στο PON έχουμε ακριβώς τα ίδια προβλήματα ή αλλιώς τους ίδιους περιορισμούς λόγο και εδώ της διάσπασης του εύρους ζώνης αναλογικά με των αριθμό των χρηστών. Η πιο απλή τοπολογία της αρχιτεκτονικής PON φαίνεται στο σχήμα 4.3.



Σχήμα 2.3. Παθητικό Αστέρι – Passive Star ή PON [4]

### 3.1.2 Ίνα έως το κτίριο Fiber-To-The-Built (FTTB)

Τα ακρώνυμα FTTB δηλώνουν αυτό που ήδη αναγράφεται στην επικεφαλίδα (Fiber to the Building) δηλαδή σε αυτή την αρχιτεκτονική η οπτική ίνα εκτίνεται από τον εξοπλισμό μεταγωγής δηλαδή από το Central Office (CO) ενός δικτυακού παρόχου έως το κτήριο των συνδρομητών (συγκρότημα γραφείων, πολυκατοικία, σπίτι) και η ONU τοποθετείται εσωτερικά μέσα στο κτήριο εξυπηρετώντας τους συνδρομητές του κτιρίου. Το μονοπάτι από την ONU προς τον ή τους χρήστες υλοποιείται με χρήση άλλου μέσου, όπως ομοαξονικό καλώδιο, συνεστραμμένα ζεύγη χαλκού ή ασύρματη ζεύξη. Η αρχιτεκτονική αυτή θεωρείται κατάλληλη για την εξυπηρέτηση μεγάλων επιχειρήσεων που απαιτούν μεγάλες ταχύτητες ή κτηρίων με αθρόα συγκέντρωση συνδρομητών (π.χ. εμπορικά και επαγγελματικά κέντρα). Σύγχρονος αποτελεί μια μεταβατική αρχιτεκτονική για την παροχή υπηρεσιών σε υπάρχοντα κτίρια και μπορεί να είναι συμπληρωματική ως προς την FTTN η οποία αναπτύσσεται κυρίως σε νέα κτίρια. Βέβαια, με εισαγωγή, σε δεύτερη φάση, οπτικών καλωδίων εντός του κτιρίου, η αρχιτεκτονική FTTB μπορεί να μετεξελιχθεί σε πλήρη αρχιτεκτονική FTTH.





### 3.1.3 *Ίνα έως την καμπίνα Fiber To The Cabinet (FTTC)*

Τα ακρόνυμα FTTC δηλώνουν αυτό που ήδη αναγράφεται στην επικεφαλίδα (Fiber to the Cabinet) δηλαδή σε αυτή την αρχιτεκτονική η οπτική ίνα εκτίνεται από τον εξοπλισμό μεταγωγής δηλαδή από το Central Office (CO) ενός δικτυακού παρόχου μέχρι μία καμπίνα (ONU) στο πεζοδρόμιο και εξυπηρετεί τους πελάτες της γύρω περιοχής μέσω δικτύου χαλκού, συνήθως του υπάρχοντος τοπικού βρόχου. Στην περίπτωση αυτή περιορίζει το μήκος του χαλκού σε μέχρι μερικές εκατοντάδες μέτρα, επιτρέποντας ταχύτητες πρόσβασης μέχρι μερικές δεκάδες Mb/s, π.χ. χρησιμοποιώντας συστήματα VDSL. Η λύση αυτή θεωρείται κατάλληλη για την εξυπηρέτηση μεγάλου αριθμού συνδρομητών οι οποίοι είναι συγκεντρωμένοι σε μία αστική περιοχή (π.χ. οικοδομικό τετράγωνο), με την προϋπόθεση να έχουν σχετικά μικρές απαιτήσεις ταχύτητας πρόσβασης.

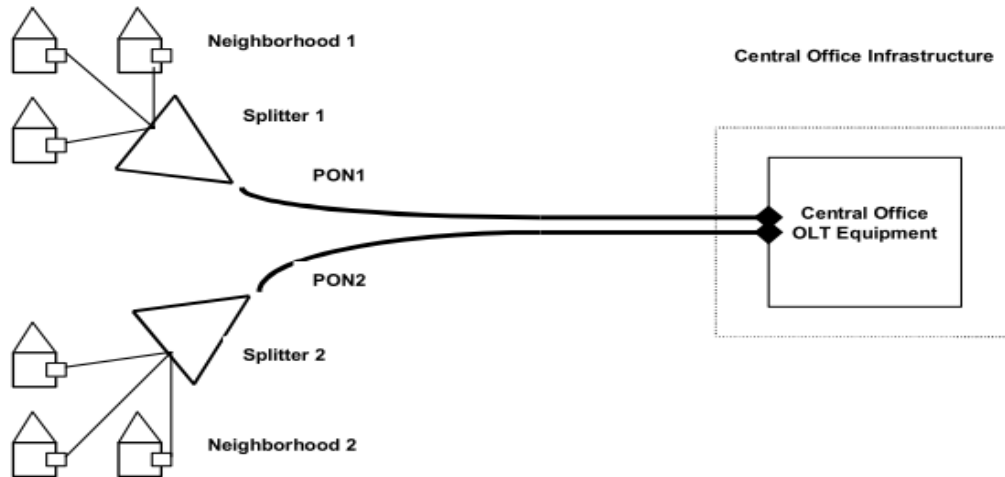
### 3.1.4 *Βασικά πλεονεκτήματα και προϋποθέσεις σχεδιασμού PON*

Τα βασικά πλεονεκτήματα της τεχνολογίας PON είναι: η εξάλειψη των οπτοηλεκτρονικών και ηλεκτρονικών στοιχείων, συνεπώς μειώνεται το βάρος και το μέγεθος μιας καμπίνας, εξαλείφονται πιθανοί κίνδυνοι που θα μπορούσαν να υπάρχουν με την υψηλή ενεργειακή πυκνότητα αναμονής μπαταριών, εξαλείφονται οι πιθανότητες να υφίσταται θόρυβος από γεννήτριες που θα χρειαζόνταν σε μια διακοπή τροφοδοσίας, εξάλειψη προβλημάτων που μπορούν να παρουσιαστούν λόγω ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών (EMI) ή ατυχημάτων που ενδέχεται να σχετίζονται με χάλκινους αγωγούς, εξαλείφει τα τρέχοντα κόστη χρήσης που συνδέονται με την κατανάλωση ενέργειας ενός ενεργού διασύνδεσης, εξαλείφει την ανάγκη για κάθε τύπο ελέγχου του περιβάλλοντος τα οποία αλλιώς μπορεί να ήταν αναγκαία, εξάλειψη των ενισχυμένων-ισχύων O-E και συναφή εξοπλισμού μειώνει σημαντικά το ποσοστό αποτυχίας του κόμβου καθώς και συναφείς δαπάνες επισκευής, δεν εξαρτάται από το εύρος ζώνης τεχνολογικά εισάγεται στο σημείο διακλάδωσης στην μονοπάτι της οπτικής ίνας, ευκολότερη διαχείριση της κίνησης είτε σε όγκο είτε σε απαιτήσεις καθώς και η ευελιξία της τοπολογίας είτε στην ανάπτυξη του δικτύου είτε στην αναβάθμιση του.[2]

Βασική προϋπόθεση στην σχεδίαση ενός δικτύου PON είναι το σημείο τοποθέτησης του διαχωριστή-διανομέα της ισχύος, συγχρόνως η ευελιξία στην τοποθέτηση του διαχωριστή είναι ένα επιπρόσθετο πλεονέκτημα δηλαδή οι διαχωριστές μπορούν να τοποθετηθούν ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε μορφολογίας της εκάστοτε περιοχής. Ένα απλό παράδειγμα είναι σε μια αγροτική περιοχή που ο διαχωριστής τοποθετείται μακριά από την OLT κοντά στο

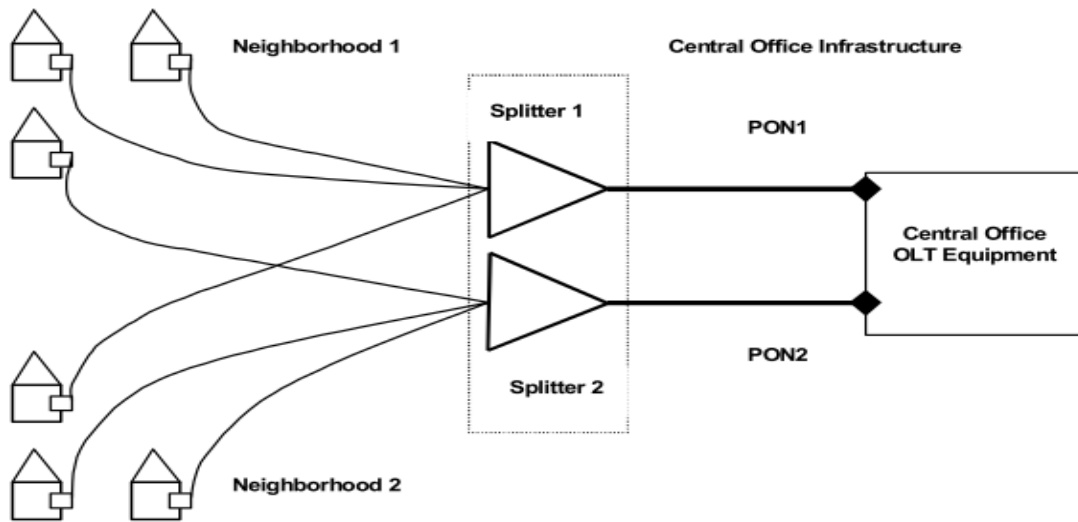


σύμπλεγμα-ομάδα των σπιτιών (σχήμα 2.4) συνεπώς το κόστος της διαμοιρασμένης οπτικής ίνας είναι μικρότερο από το κόστος εάν βρισκόμαστε σε μια αστική περιοχή που ο διαχωριστής τοποθετούταν κοντά στην OLT.



Σχήμα 2.4 [4]

Μια άλλη βασική προϋπόθεση στον σχεδιασμό του PON είναι ο αριθμός των πορτών OLT στο CO. Σε ένα cabinet PON, δύο πόρτες OLT μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο εάν ένα σπίτι από τα τριάντα δύο κάνει χρήση υπηρεσίας όπου αυτό το σύνολο των σπιτιών ορίζεται ως «γειτονιά». Είναι σαφές ότι, αν θέλουμε να συγκεντρώσουμε δύο διαιρετών σε ένα σημείο (Σχήμα 2.5), θα πρέπει το δεύτερο OLT να αναπτυχθεί μόνο όταν τα πρώτα 32 από τα 64(ή 50%) σπίτια χρειαστούν κάποια υπηρεσία. Ενώ η συγκέντρωση πολλών κατοικιών (ή διαχωριστές) σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία να οδηγήσει σε μεγαλύτερη διανομή βρόχου (και κατά συνέπεια περισσότερο μήκος ίνας των σχετικών δαπανών), θα οδηγήσει σε εξοικονόμηση πόρων από το να προ-τοποθετηθούν λιγότερες πόρτες OLT.



Σχήμα 2.5 [4]

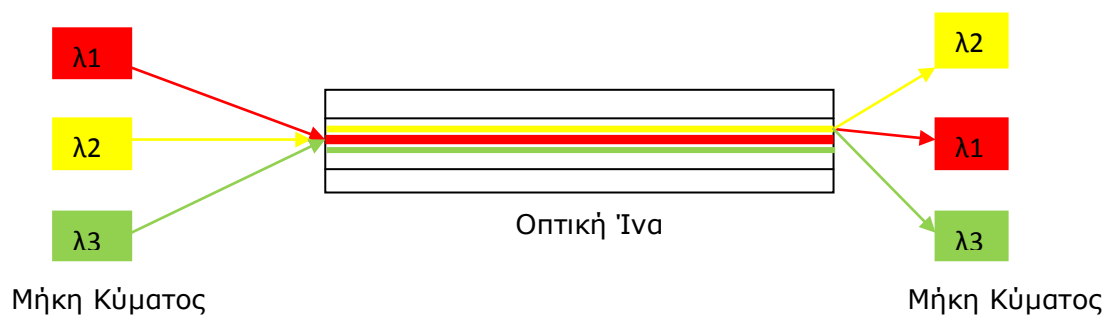
Άλλη μια στρατηγική που ενδεχομένως θα μπορούσε να μειώσει τον αριθμό των πορτών OLT που πρέπει να είναι προ-τοποθετημένες είναι ο διανομή. Συνήθως σε ένα κατανεμημένο PON 1:32 τμήματα, υπάρχει 1:8 (ή 1:4) διαχωριστής πιο κοντά στο CO, ο οποίος αναπαράγει το μεταγενέστερο σήμα για κάθε 8 (ή 4) ίνες διανομής. Καθένα από αυτά τις 8 (ή 4) ίνες διανομής, με τη σειρά του, τις τερματίζει σε 1:4 (ή 1:8) διαχωριστή. Καθένα από αυτούς τους διαχωριστές εξυπηρετεί 4 σπίτια (ή 8 κατοικίες), από εκεί με αποτέλεσμα η ίνα τροφοδοσίας και η πόρτα OLT κατανέμεται σε 32 σπίτια. Οι διαχωριστές ροής ανόδου, εάν τοποθετηθούν στο CO, επιτρέπουν στα σπίτια με διαφορετικούς διαχωριστές ροής καθόδου να μοιράζονται την ίδια θύρα OLT (έστω και χωρίς συγκέντρωση διαχωριστών). Η ανταλλαγή μεταξύ αυτών είναι σε μεγάλο βαθμό άγνωστη. Το ζητούμενο εδώ είναι πόσοι διαχωριστές θα πρέπει να ομαδοποιηθούν σε «Fiber Optimal Aggregation Point» (OFAP) και να συγκεντρώσει περισσότερο τις γνώσεις των διανέμονται διάσπαση.[4]



#### 4. Αρχή λειτουργίας της τεχνολογίας WDM

Στο δίκτυο κορμού το κύριο μέλημα ήταν και είναι η καλύτερη και βέλτιστη αξιοποίηση της ίνας ώστε να μεγιστοποιηθεί η μεταφορά δεδομένων μέσα από αυτήν. Τα τελευταία χρόνια εφαρμόζεται η τεχνολογία της Πολυπλεξίας με Διάρθρωση Μήκους Κύματος (Wavelength Division Multiplexing - WDM). Η τεχνολογία αυτή βασίστηκε στην ιδέα ότι σε κάθε οπτική ίνα το οπτικό σήμα που διαδίδεται έχει μια δεδομένη φέρουσα συχνότητα. Συνεπώς από την ίνα μπορούν να διαδοθούν περισσότερα από ένα οπτικό σήμα διαφορετικής συχνότητας που το καθένα από αυτά μεταφέρει διαφορετικά δεδομένα από τα υπόλοιπα τα οποία αποπολυπλέκονται στο σημείο λήψης. Σχήμα 4.1. [8#] Με αυτό τον τρόπο αυξάνεται η συνολική μεταδιδόμενη χωρητικότητα της ίνας. Για να υλοποιηθεί ένα δίκτυο κορμού βασισμένο στην τεχνολογία WDM χρειάζεται η ύπαρξη και συμμετοχή επιπρόσθετων εξαρτημάτων:

Οπτικοί πολυπλέκτες και άποπολυπλέκτες (optical multiplexers & demultiplexers), η λειτουργία τους είναι να συνδυάζουν τα εισερχόμενα οπτικά σήματα (αυτό γίνεται στην εκπομπή από τον λεγόμενο πολυπλέκτη) και στην λήψη να διαχωρίζουν (αποπολυπλέκουν) τα αρχικά οπτικά σήματα, τους οπτικούς πολυπλέκτες προσθαφαίρεσης (add/drop optical multiplexers) και οπτικούς διασταυρωτήρες (διασυνδετές) (optical cross-connect components).



Σχήμα 4.1 Wavelength Division Multiplexing - WDM



#### 4.1 Χονδροειδής Πολυπλεξία με Διαίρεση Μήκους Κύματος (*Coarse Wavelength Division Multiplexing-CWDM*)

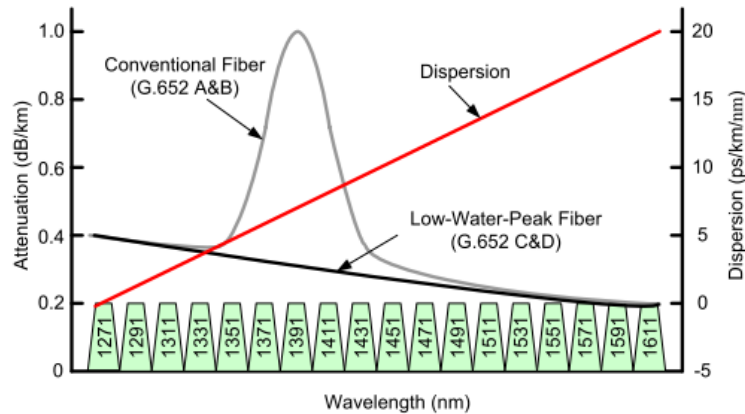
Ο όρος CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing-CWDM) Χονδροειδής Πολυπλεξία με Διαίρεση Μήκους Κύματος παραπέμπει σε μία μορφή πολυπλεξίας διαίρεσης μήκους κύματος στην οποία η απόσταση μεταξύ των φερόντων μηκών κύματος είναι στα 20nm για την περιοχή του οπτικού φάσματος 1271nm έως 1611nm και ο συνολικός αριθμός καναλιών που μπορεί να καλύψει είναι 18 κανάλια. Η τεχνολογία CWDM μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο στις μονότροπες όσο και σε πολύτροπες οπτικές ίνες. Το κόστος της τεχνολογίας CWDM είναι χαμηλότερο συγκριτικά με άλλες μορφές WDM και πιο συγκεκριμένα με το DWDM, που αναφέρεται στην επόμενη υποενότητα.

Στο σχήμα 4.2 [5] έχουμε μια συνοπτική εικόνα όλων των καναλιών για το CWDM. Το low water peak fiber, ορισμένο στα ITU G.652 C&D, μπορεί να χρησιμοποιηθεί γι' αυτό το ευρύ φάσμα της μεταφοράς, όπου στα (1370-1470)nm έχουμε την ελάχιστη εξασθένηση ισχύος ή αλλιώς την εξάλειψη απωλειών ισχύος. Η παράμετρος διασποράς στο σχήμα 4.2 αναφέρεται στη διεύρυνση σήματος και αυτός ο παράγοντας μπορεί να μειώσει την απόσταση της μεταφοράς, καθώς το ποσοστό των δεδομένων γίνεται υψηλότερο. Δεδομένου ότι η αυστηρή ρύθμιση των μηκών κύματος δεν χρειάζεται για το CWDM-PON, το θερμικό τμήμα ελέγχου (θερμοηλεκτρικό ψυγείο) δεν απαιτείται, καθιστώντας το φθηνότερο από το DWDM-PON. Επιπλέον, η συνακρόαση των καναλιών στον πολυπλέκτη δεν είναι εύκολο να εμφανιστεί στο CWDM [5]. Το συνολικό κόστος του συστήματος είναι 40% φθηνότερο για τον CWDM-PON [13].

Το πρωταρχικό μειονέκτημα του CWDM είναι ότι ο αριθμός των καναλιών είναι περιορισμένος. Ως εκ τούτου, το CWDM-PON μειονεκτεί στην επεκτασιμότητα, ειδικά όταν χρησιμοποιείται μια μονότροπη ίνα με water-peak εξασθένηση. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι ότι τα κανάλια με μικρότερα μήκη κύματος παρουσιάζουν υψηλότερες απώλειες (βλέπε σχήμα 4.2), περιορίζοντας έτσι την απόσταση μετάδοσης ή λόγου διαίρεσης. Ένα σύντομο παράδειγμα της CWDM-PON είναι η λεγόμενη «triple-play» υπηρεσία PON, όπου το κανάλι στα 1550 nm χρησιμοποιείται για προαιρετική βίντεο μετάδοση καλωδιακής τηλεόρασης, το κανάλι στα 1490 nm χρησιμοποιείται για τη ροή μετάδοσης καθόδου δεδομένων και φωνής, ενώ το κανάλι στα 1311 nm χρησιμοποιείται για τη ροή μετάδοσης ανόδου [3]. Τα κανάλια στα 1360-1480nm CWDM



χρησιμοποιούνται για επαγγελματικές υπηρεσίες, ενώ οι «tripleplay» υπηρεσίες συνήθως παρέχονται στους απλούς συνδρομητές [3].



Σχήμα 4.2 Ανάθεση συχνοτήτων για CWDM [5]

#### 4.2 Πυκνή Πολυπλεξία με Διάρθρωση Μήκους Κύματος (Dense Wavelength Division Multiplexing DWDM)

Ο όρος DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) Πυκνή Πολυπλεξία με Διάρθρωση Μήκους Κύματος παραπέμπει σε μία μορφή πολυπλεξίας διαίρεσης μήκους κύματος, στην οποία η απόσταση μεταξύ των φερόντων μηκών κύματος είναι πολύ πιο πυκνή από αυτή του CWDM. Συνεπώς, έχει μεγαλύτερο αριθμό καναλιών και αυτό επιτυγχάνεται μέσω της διαίρεσης του φάσματος σε περισσότερα μήκη κύματος. Το DWDM έχει απόσταση μήκους κύματος μικρότερη από εκείνη του CWDM, συνήθως μικρότερη από 3,2nm, γιατί το DWDM έχει αναπτυχθεί για να μεταδίδει πολλά μήκη κύματος σε μια περιορισμένη περιοχή του φάσματος κι έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν ενισχυτές ντοπαρισμένης ίνας Erbium.[5]

Η αρχιτεκτονική DWDM-PON αναμένεται να είναι πολύ χρήσιμη για την παροχή αρκετού εύρους ζώνης σε πολλούς συνδρομητές και θεωρείται ως το τελευταίο σύστημα PON. Το ITUG.692 ορίζει ένα πλέγμα λέιζερ για point-to-point WDM συστήματα, βασισμένο στα 100 GHz μήκος κύματος απόσταση με ένα κεντρικό μήκος κύματος των 193,1THz (1553,52 nm) πάνω από την περιοχή συχνότητας 196,1 THz (1528,77 nm) σε 191,7 THz (1563,86 nm ). Αυτό το διάστημα των 100 GHz έχει εφαρμοστεί σε πολλά συστήματα DWDM. Οι δίοδοι λέιζερ (LDs) και τα φίλτρα, που είναι εμπορικά διαθέσιμα σήμερα, έχουν τη δυνατότητα των 50GHz απόστασης, και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αύξηση του αριθμού των σταθμών. Επίσης, τα μήκη κύματος, που φθάνουν μέχρι 1600 nm, έχουν



χρησιμοποιηθεί στο να εκμεταλλεύονται την κυκλική ιδιότητα του AWG, έχοντας μόνο μία AWG σε έναν απομακρυσμένο κόμβο για αποπολυπλεξία και πολυπλεξία στη ροή καθόδου και ροή ανόδου αντίστοιχα. Σε μια DWDM-PON αρχιτεκτονική, το μήκος κύματος της κάθε οπτικής πηγής και το κεντρικό μήκος κύματος του WDM φίλτρου θα πρέπει να παρακολουθούνται και να ελέγχονται προσεκτικά, για να αποφευχθεί η ανεπιθύμητη παρεμβολή μεταξύ δύο παρακείμενων διαύλων. Ως εκ τούτου, το DWDM-PON κοστίζει περισσότερο από το CWDM-PON στον τομέα ανάπτυξης, δεδομένου ότι χρειάζεται συντονισμένες συσκευές μήκους κύματος και έλεγχο της θερμοκρασίας.



## 5. Τεχνολογίες PON

Σε αυτή την ενότητα θα γίνει μια αναφορά στις τεχνολογίες του παθητικού οπτικού δικτύου, καθώς και μια εκτενέστερη περιγραφή της νέας γενιάς παθητικών οπτικών δικτύων, το πώς διαμορφώνονται πλέον τα βασικά στοιχεία του δικτύου (OLT, RN και ONU) και τέλος τις αρχιτεκτονικές WDM-PON. Πριν προχωρήσουμε στην ανάλυση των τεχνολογιών αυτών, ας δούμε τους Οργανισμούς παραγωγής σχετικών προτύπων και πρωτοκόλλων:

- International Telecommunication Union (ITU-T)
- Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE)
- Άλλες κοινοπραξίες προώθησης τεχνικών προδιαγραφών στους παραπάνω οργανισμούς:

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

Οι δύο προγραφόμενες αποτελούν κοινοπραξίες τηλεπικοινωνιακών παρόχων και κατασκευαστών σχετικού εξοπλισμού

Υπάρχουν τρία δημοσιευμένα πρότυπα PON:

- ITU-T BPON (G.983) & GPON (G.984)
- IEEE EPON (802.3ah)
- Ασύμβατα με τα δίκτυα PONs υπάρχουν σε χρήση, αλλά δεν παρέχουν διαλειτουργικότητα με τα διεθνή πρότυπα.

### 5.1 TDM-PON Time Division Multiplexing – Passive Optical Network

Η TDM-PON (Time Division Multiplexing – Passive Optical Network) έχει ένα μήκος κύματος για τη ροή καθόδου δεδομένων (δύο μήκη κύματος στην περίπτωση του βίντεο επικάλυψης) και ένα για τη ροή ανόδου δεδομένων. Αυτό έχει σαν συνέπεια να περιορίζεται το μέσο εύρος ζώνης ανά χρήστη σε μερικές δεκάδες Mbps [8]. Ένα από τα βασικά μελήματα σε ένα PON δίκτυο, που χρησιμοποιεί ένα μήκος κύματος, είναι ο τρόπος μετάδοσης τόσο της κίνησης καθόδου όσο και της κίνησης ανόδου. Η μετάδοση στο TDM-PON δίκτυο βασίζεται στην τεχνική TDMA για τις ONUs στο κανάλι ανόδου, και γίνεται μόνο κατόπιν αδειών μετάδοσης που προγραμματίζονται και εκπέμπονται μέσω της ροής

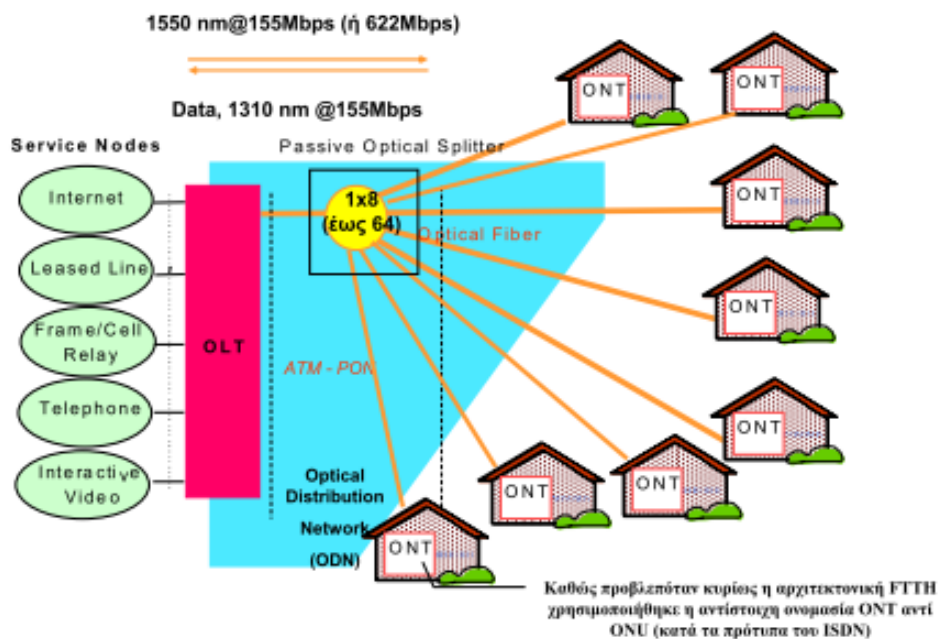


καθόδου (downstream) από τον κεντρικό ελεγκτή πρόσβασης που υλοποιείται στην OLT.[8]

Αρχικά, τα PON βασίστηκαν αποκλειστικά στην ATM τεχνολογία, ενώ η εξέλιξη οδήγησε σταδιακά στην προτυποποίηση του BPON (broadband PON) και στη συνέχεια του (Gigabit PON) EPON και GPON από την ITU.[8]

### 5.1.1 APON/BPON: ATM/Broadband PON (ITU-T G.983) [6]

Το APON βασίζεται στο ATM πρωτόκολλο, καθώς η κίνηση μεταφέρεται σε ATM cells και μπορεί να υποστηρίξει μέχρι 64 ONUs ή αλλιώς 64 χρήστες (6bit PON address). Επίσης, υποστηρίζει 4 κλάσεις, που εδώ λέγονται Traffic CONTainers και η περαιτέρω πολυπλεξη ρών σε κάθε ONT βασίζεται στο αναγνωριστικό σύνδεσης VPI/VCI, που εγκαθίσταται σε επίπεδο ATM. Το σχήμα 5.1 μας δίνει την τοπολογία ενός τέτοιου δικτύου, καθώς και ποιες υπηρεσίες μπορεί να εξυπηρετήσει το APON δίκτυο.

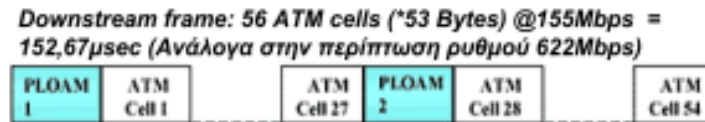


Σχήμα 5.1 APON δίκτυο [6]

Η πολυπλεξία των δεδομένων υποστηρίζεται μόνο από την τεχνολογία ATM και ορίζονται αντίστοιχα μεγέθη σχισμών μετάδοσης και τεχνικές ανάθεσης διευθύνσεων (MAC). Η τεχνική TDMA εφαρμόζεται σε χρονοθυρίδες διάρκειας 53Bytes (data payload). Η διευθύνσεις στο επίπεδο MAC αναφέρονται στο αναγνωριστικό της ONT/ONU: Transmit Enable Address/Terminal Endpoint



Address (TEA) μέχρι 64 ONT 6bit TEA. Γίνεται αντίστοιχη μεταγωγή δεδομένων (ATM) προς το δίκτυο κορμού.

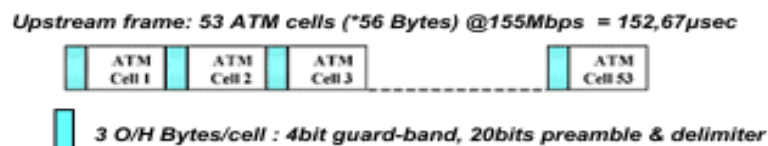


Σχήμα 5.2 Πλαίσιο Ροής Καθόδου (Downstream frame)[6]

Στο σχήμα 5.2 παρουσιάζεται η δομή του πλαισίου ροής καθόδου. Τα PLOAM cells είναι ειδικής χρήσης και χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο πολλαπλής πρόσβασης των ONT/ONU. Περιλαμβάνουν:

- 53 άδειες μετάδοσης (δες & upstream transmission frame)
- 12 ειδικά μηνύματα
- CRC και
- πληροφορία συγχρονισμού

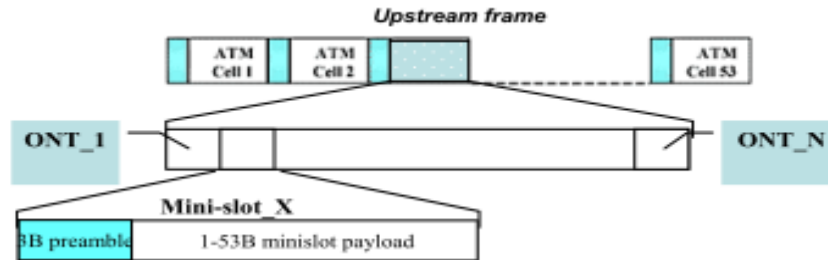
Συνεπώς, η αξιοποιήσιμη χωρητικότητα καναλιού καθόδου μειώνεται στα:  $155 * 54 / 56 = 149,97$  Mbps. Ο προγραμματισμός αδειών αφήνεται στη βούληση της κάθε υλοποίησης να χρησιμοποιεί κατάλληλο αλγόριθμο με χρήση των μηχανισμών που προβλέπει το πρότυπο.



Σχήμα 5.3 Πλαίσιο Ροή Ανόδου (Upstream frame)[6]

Στο σχήμα 5.3 παρουσιάζεται η δομή του πλαισίου ροής ανόδου. Η αξιοποιήσιμη χωρητικότητα καναλιού ανόδου (upstream) μειώνεται στα  $155 * 53 / 56 = 149,19$  Mbps. Δυναμικά ο MAC controller στο OLT μπορεί να δεσμεύει κελί (cell) στο πλαίσιο ανόδου (upstream frame) για την μετάδοση αιτήσεων για

δυναμική δέσμευση επιπλέον εύρους ζώνης με τη μέθοδο των μικροσχησμών  
Σχήμα 5.4.

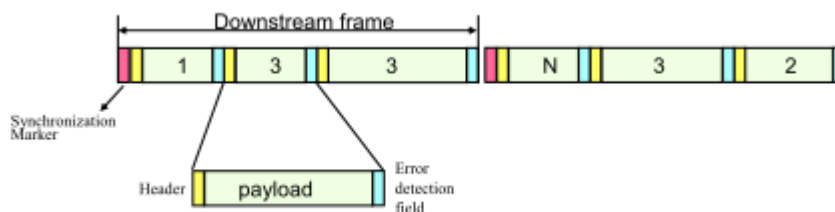


Σχήμα 5.4 [6]

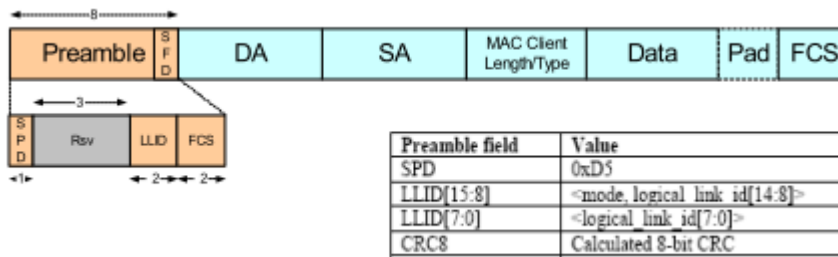
Εάν ο προγραμματισμός αδειών ήταν προκαθορισμένος στατικά στο χρόνο, αυτό θα αντιστοιχούσε σε μια υπηρεσία σταθερού ρυθμού (μισθωμένη γραμμή – leased line). Το πρότυπο προβλέπει την ειδική χρήση (κατά βούληση) σχισμών του καναλιού ανόδου για την μετάδοση αιτήσεων από συγκεκριμένες κάθε φορά ONU. Για εξοικονόμηση εύρους ζώνης χρησιμοποιείται η μέθοδος των μικροσχησμών όπου πολλαπλά ONT μπορούν να μεταδώσουν αιτήσεις στη διάρκεια μιας κανονικής σχισμής «διάρκειας» 53B Σχήμα 5.4

### 5.1.2 Ethernet-PON EPON [6]

Το πρότυπο EPON της IEEE κάνει χρήση αποκλειστικά Ethernet για την ενθυλάκωση των πακέτων δεδομένων. Η κωδικοποίηση και πλαισίωση είναι σύμφωνα με το 802.3 Standard. Είναι εύρος αναπτυγμένο στην Ιαπωνία και Κορέα. Ρυθμοί γραμμής σύμφωνα με το Ethernet standard. Μονοτροπική ίνα (Single-mode fiber). Υποστηρίζει 1 ως 16 ή 32 ONU. Οι άδειες μεταδίδονται στη ροή καθόδου (downstream) σε πλαίσια Ethernet ειδικού τύπου (GATE) και μήκους 64bytes. Στο σχήμα 5.5 φαίνεται η πλαισίωση του EPON για το κανάλι καθόδου.



Σχήμα 5.5 πλαισίωση καναλιού καθόδου (downstream frame)[6]

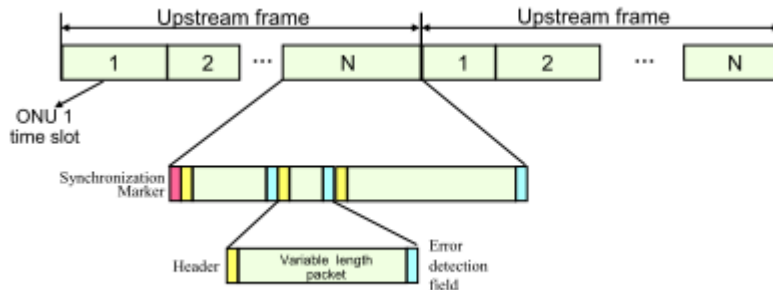


Σχήμα 5.6 τροποποιήσεις του πλαισίου Ethernet[6]

SPD: Start Packet Delimiter

- LLID: Logical Link ID (one or more per ONU)
- Για τον έλεγχο πρόσβασης στο κανάλι ανόδου, χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο MultiPoint Control

Οι ONUs μεταδίδουν ακέραια Ethernet πλαίσια σε χρόνο που τους έχει αποδοθεί. Στο σχήμα 5.7 βλέπουμε την δομή του πλαισίου ανόδου. Οι ONUs ανακοινώνουν το μήκος της ουράς δεδομένων σε πλαίσια Ethernet ειδικού τύπου (REPORT) και μήκους 64bytes.



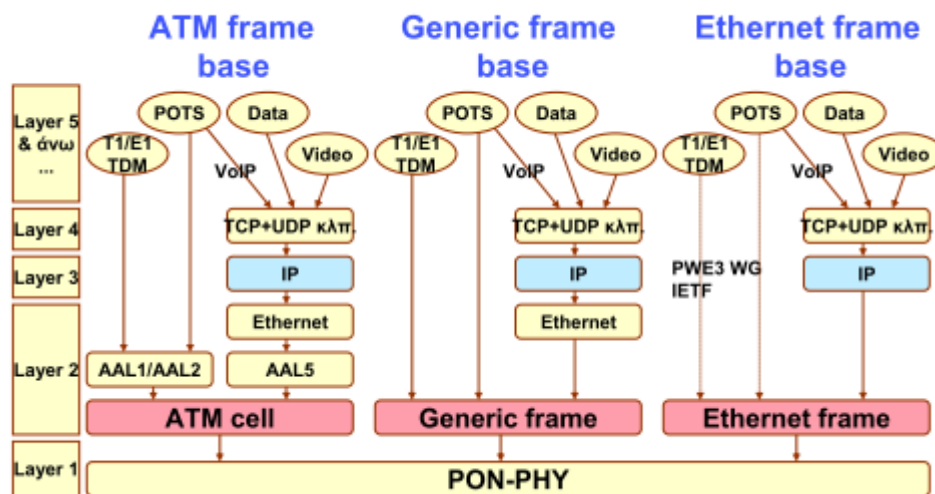
Σχήμα 5.7 δομή του πλαισίου στο Upstream κανάλι του EPON[6]

### 5.1.3 Gigabit PON (G-PON FSAN/ITU packet-based GPON (G.984.3)) [6]

Το πρότυπο GPON υποστηρίζεται από την FSAN/ITU σύμφωνα με το G.984.3 είναι εύρος ανεπτυγμένο στην Αμερική και στην Ευρώπη[7]. Έχει ρυθμό μετάδοσης Gigabit 1.24Gbps/2.48Gbps, αποτελεσματικό στη μεταφορά όλων των ειδών της κίνησης ATM/IP/TDM. Μπορεί να υποστηρίξει μέχρι 64 ONU στο φυσικό στρώμα (PMD) αλλά μέχρι 128 στο TC στρώμα. Υποστηρίζει τέσσερις κλάσεις (T-CONTs transmission container : Transmission container είναι ένα αντικείμενο, που φέρει την κυκλοφορία μέσα σε μια ONU, που αντιπροσωπεύει μια ομάδα από λογικές συνδέσεις και η διαχείρισή της γίνεται μέσω της διαχείρισης της ONU και



του καναλιού ελέγχου (OMCC), και αντιμετωπίζεται ως ενιαία οντότητα για τους σκοπούς της ανάθεσης της ροής ανόδου μετάδοσης εύρους ζώνης στο PON.) [62] Μπορεί να έχει μέχρι 4096 ουρές (κάθε ONU μπορεί να έχει οσεσδήποτε ουρές). Το εύρος ζώνης (χρόνος) αποφασίζεται ανά ουρά (προσδιορίζονται από το AllocID). Είναι Αποτελεσματικό στην υποστήριξη μεγάλης ποικιλίας εφαρμογών με διαφορετικές απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας (από μισθωμένες γραμμές μέχρι best effort) και στοχεύει στο χαμηλό κόστος εξοπλισμού.



Σχήμα 5.8 G-PON Εναλλακτικά Πρωτόκολλα (GTC) [6]

Το πρότυπο G-PON στοχεύει στην υπέρβαση των περιορισμών της τεχνολογίας BPON. Έχει μεγαλύτερες ταχύτητες (1,24 Gbps). Ικανότητα επεκτασιμότητας σε μεγαλύτερες ταχύτητες (2,5 Gbps) με συγκρίσιμη κλίμακα κόστους. Υποστήριξη δικτύων IP. Μετάβαση από πλήρως ATM σε πλήρως IP μετάδοση. Κοινή πλατφόρμα παροχής υπηρεσιών:

- Video - IPTV ή RF
- Voice - TDM ή VoIP
- Data

Είναι μια πλατφόρμα με διαλειτουργικότητα και χαμηλό κόστος λειτουργίας. Υποστηρίζει τα διεθνή πρότυπα ένα άλλο πλεονέκτημα είναι η μη ύπαρξη ενεργών στοιχείων στο δίκτυο πρόσβασης



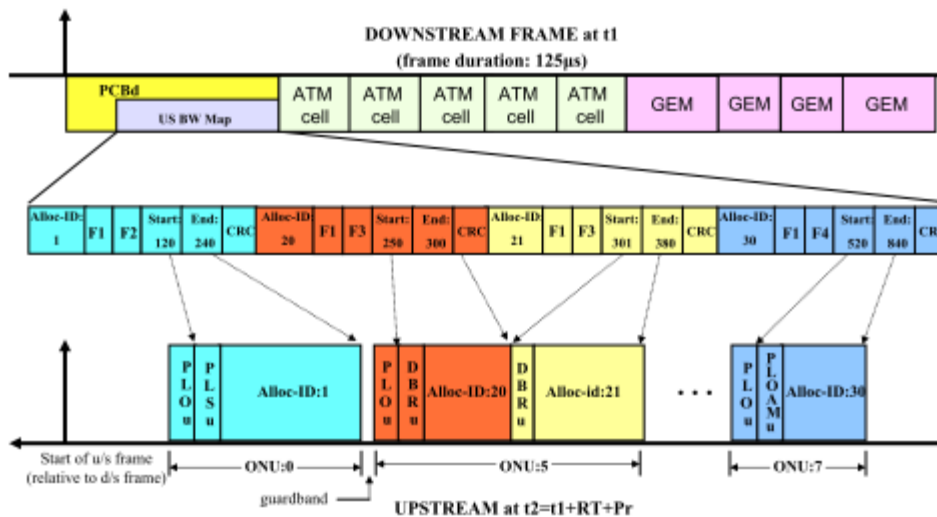
Τα Χαρακτηριστικά του G-PON είναι τα ακόλουθα: Εφαρμόζει αντίστοιχες μεθόδους πολύπλεξης με τα δίκτυα A-PON. Η πολύπλεξη των δεδομένων υποστηρίζει μεν ένα σταθερού μεγέθους πλαίσιο (μετάδοση downstream & upstream διάρκειας 125  $\mu\text{sec}$  – απαιτήσεις φωνής) αλλά μέσα σε αυτό δεν μεταδίδονται υποχρεωτικά μόνο ATM cells αλλά υποστηρίζονται και μεταβλητού μεγέθους πακέτα. Τα μεγέθη σχισμών μετάδοσης προσδιορίζονται δυναμικά ανάλογα με τις αιτήσεις μετάδοσης (εκφραζόμενες πλέον σε Bytes). Οι διευθύνσεις στο επίπεδο MAC αναφέρονται στο αναγνωριστικό της ONT. Υποστηρίζονται οι ίδιες κλάσεις υπηρεσιών με το A-PON.

Για το επίπεδο κάλυψης εκπομπής (ITU-T G.984.3 Transmission Convergence Layer) υποστηρίζονται (ταυτόχρονα) δύο μηχανισμοί:

- ATM
- GEM (GPON Encapsulation Mode)

Ένα πλαίσιο μπορεί να αποτελεί μίξη ATM ή GEM. Το GEM είναι 10% αποδοτικότερο από την τεχνική μεταφοράς ATM του B-PON για μεταφορά IP κίνησης. Το GPON επίσης δεν κάνει χρήση της κωδικοποίησης 8b/10b του EPON. Κατά συνέπεια το G-PON εξοικονομεί 20% σε σχέση με το EPON.

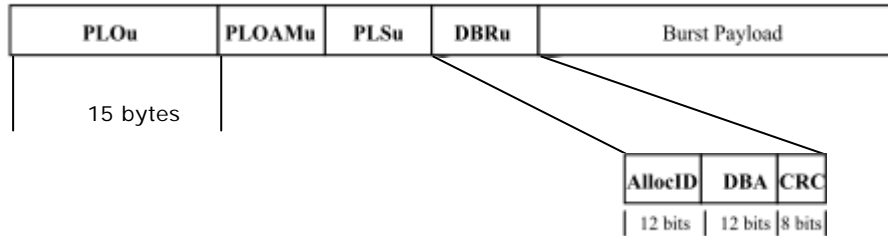
Στο σχήμα 5.9 βλέπουμε την δομή του πλαισίου στο Downstream



Σχήμα 5.9 δομή του πλαισίου στο Downstream [6]

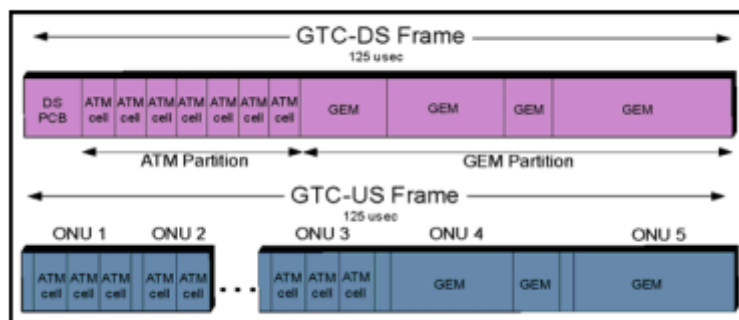


Στο σχήμα 5.10 βλέπουμε την δομή των εκρήξεων που μεταδίδονται στο Upstream



Σχήμα 5.10 δομή εκρήξεων που μεταδίδονται στο Upstream[6]

κάθε έκρηξη (burst) αποτελείται από: *PLOu* Επικεφαλίδα φυσικού στρώματος [Physical Layer Overhead (u=upstream) guard band & synchronisation preamble & delimiter], *PLOAM* Επικεφαλίδα φυσικού στρώματος λειτουργίας, διαχείρισης και συντήρησης του φυσικού επιπέδου (Physical Layer Operation & Maintenance), *PLS* αλληλουχία επιπέδου ισχύος (Power Level Sequence), *DBRu* αναφορά διανομής δυναμικού εύρου ζώνης (Dynamic Bandwidth Allocation Report) χρησιμοποιείται για την ανακοίνωση των μηκών των ουρών μετρημένων σε blocks των 48bytes. Το ωφέλιμο φορτίο - Burst Payload είναι είτε ATM cells είτε IP/Ethernet ενθυλακωμένα σε GEM πλαίσια. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε την πλαισίωση της μετάδοσης του G-PON



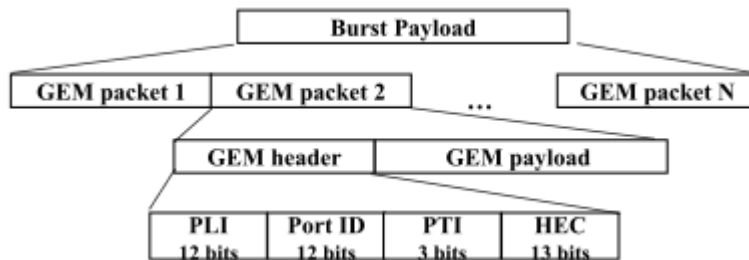
Σχήμα 5.11 Πλαισίωση μετάδοσης G-PON [6]

Το GEM (GPON Encapsulation Mode) σχήμα 5.12 επιτρέπει την κατάτμηση και επανένωση πακέτων μεταβλητού μεγέθους (χρήση πεδίων PTI και HEC –όπως στο AAL5/ATM), την πολύπλεξη περισσότερων ροών πακέτων (π.χ. Εφαρμογών, υπηρεσιών ...) με χρήση του πεδίου PortID, την απευθείας μετάδοση πάνω από





την οπτική ίνα (χωρίς 8b/10b line coding), το πεδίο Payload length indicator (PLI) μήκους 12-bit αναφέρει σε bytes το μέγεθος του τμήματος



Σχήμα 5.12 [6]

Η *ποιότητα* συνδέεται με περιοδική ανάθεση παραθύρου μετάδοσης σταθερής διάρκειας ( $B$  bits are allocated every  $T_p$  so that  $B/T_p = \text{peak rate}$ ). Ακόμα και όταν η πηγή είναι ανενεργή, αποδίδεται χρόνος συνεπώς αναποτελεσματικό. Η αποτελεσματικότητα συνδέεται με δυναμική απόδοση χρόνου κατόπιν αιτήσεως (η κίνηση βρίσκεται ήδη στην ουρά). Απαιτείται χρόνος μέχρι ο ελεγκτής να μάθει για την άφιξη ενός πακέτου και να προγραμματίσει τη μετάδοσή του.

Στον πίνακα 1 παραθέτονται συνοπτικά οι βασικοί παράμετροι και χαρακτηριστικά του του GPON.[7]

	GPON
Standard	ITU-T G.984
Downstream bit rate	1244, 2488 Mb/s
Upstream bit rate	155/622, 1244, 2488 Mb/s
DS/US wavelength	1490 ± 10 nm/1310 ± 50nm
RF overlay	1555 ± 5nm
Mean efficiency	~93 percent
Max. split	1:64
Max. reach	10/20 km (physical) 60 km (logical, due to ranging protocol)
Max. budget	15/20/25 dB
Cost per ONU link [relative]	100

Πίνακας1 [7]





## 5.2 Νέα Γενιά Παθητικών Οπτικών Δικτύων (NG-PON)

Οι σημερινές TDM-PON τεχνολογίες, που ήδη έχουν προαναφερθεί, έχουν περιορισμένο εύρος ζώνης όταν η ζήτηση των χρηστών αυξάνει την υφιστάμενη χωρητικότητα του δικτύου. Η αναβάθμιση του εύρους ζώνης των υφιστάμενων TDM-PON θα είναι μια πρόκληση, όπως το MAC πρωτόκολλο, το οποίο είναι εξαιρετικά περίπλοκο. Επίσης, τα TDM-PON έχουν μόνο ένα μήκος κύματος, ενώ τα μεταγενέστερα, δύο μήκη κύματος στην περίπτωση του βίντεο επικάλυψης και ένα μήκος κύματος για τη ροή ανόδου δεδομένων, περιορίζοντας έτσι το μέσο εύρος ζώνης ανά χρήστη σε μερικές δεκάδες Mbps. Με τον τρόπο αυτό, το διαθέσιμο εύρος ζώνης στη μονότροπη ίνα σπαταλείται. Επίσης, η δενδροειδής τοπολογία της τρέχουσας TDM-PON στερείται από τα χαρακτηριστικά της προστασίας και της αποκατάστασης. Κατά το τρέχον σενάριο για TDM-PONs, εάν περισσότεροι χρήστες πρέπει να προστεθούν, ένα εντελώς νέο PON με τη δυνατότητα εξυπηρέτησης έως και 32 χρηστών πρέπει να αναπτυχθεί και μια νέα σειρά πομποδεκτών στην πλευρά της OLT προστίθεται στο εσωτερικό της κεντρικής υπηρεσίας (CO) για την εξυπηρέτηση μερικών επιπλέον χρηστών. Αυτό σημαίνει περαιτέρω τροφοδοσία και περίπλοκη καλωδίωση, συνεπώς υπάρχει μια μεγάλη οικονομική επιβάρυνση. Όλοι αυτοί οι περιορισμοί δημιούργησαν την ανάγκη για ένα πιο ευέλικτο σχεδιασμό του δικτύου, ώστε να επιλυθούν αυτά τα βασικά προβλήματα. [8]

### *Εναλλακτικές αρχιτεκτονικές*

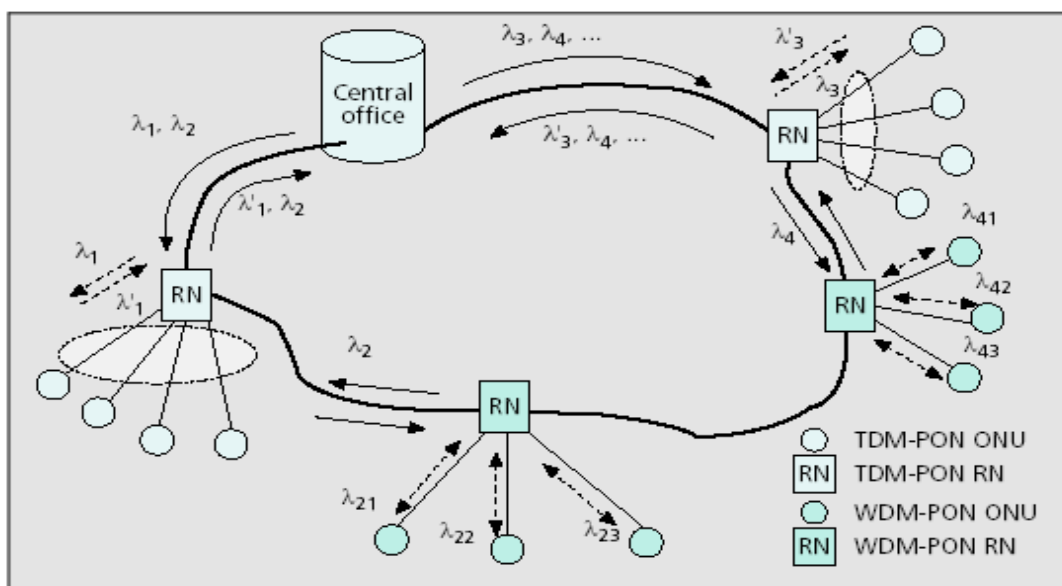
Οι εναλλακτικές αρχιτεκτονικές, ώστε να ξεπεραστούν οι παραπάνω περιορισμοί της TDM-PON, είναι PON βασισμένο σε WDM ή WDM/TDM βασισμένο σε υβριδικό PON. Το κόστος των στοιχείων WDM γρήγορα μειώνεται και η ζήτηση για εύρος ζώνης λόγω εφαρμογών συνεχίζει να αυξάνεται. Έτσι, στο μέλλον η αναβάθμιση της τρέχουσας TDM-PON με WDM-PON θα είναι αναπόφευκτη. Η τεχνολογία WDM παρέχει υψηλό βαθμό αναδιάρθρωσης και επεκτασιμότητας κι έτσι καθιστά δυνατή την αποτελεσματικότερη κατανομή των πόρων. Έτσι, το WDM-PON, εκτός από την εξάλειψη της ανάγκης για χρονική πολυπλεξία και των διαρρυθμιστικών πρωτοκόλλων, προβλέπει επίσης εικονικές διασυνδέσεις από σημείο σε σημείο με διαφανή δεδομένα και ασφάλεια [9] [10]. Η NG-PON αρχιτεκτονική χρησιμοποιεί διάφορους μηχανισμούς για την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους του συστήματος:

- a. ONUs με μη ψυχόμενα στοιχεία.

- b. Κυματοδηγοί Σχάρας Array (AWGs) χρησιμοποιούνται, ώστε να διπλασιαστεί ο αριθμός των ONUs, που υποστηρίζονται από δίκτυο βασισμένο σε διαμοιραστή ίνας.
- c. Οι OLT χρησιμοποιούν συντονισμένα λέιζερ και δέκτες, προκειμένου να μειωθεί η συνολικός αριθμός πομποδεκτών και δημιουργούν οπτικούς φορείς, επάνω στους οποίους οι ONUs μπορούν να διαμορφώνουν την κυκλοφορία της ροής ανόδου.

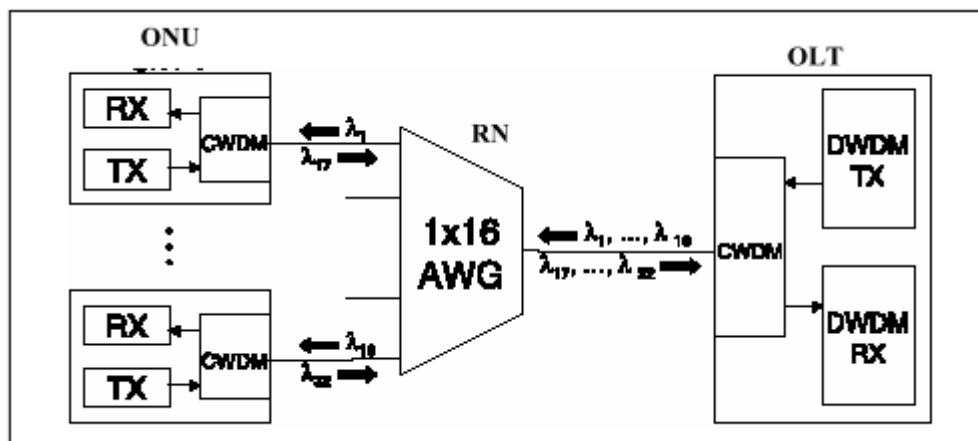
### 5.2.1 Αρχιτεκτονική NG-PON

Η συνολική αρχιτεκτονική του NG-PON, συμπεριλαμβανομένων των TDM-PON και των WDM-PON ως υποσυστήματα του, οι διαφορετικές αρχιτεκτονικές που απαρτίζουν αυτή την αρχιτεκτονική είναι η *TDM-PON ONU*, η *TDM-PON RN*, η *WDM-PON ONU* και η *WDM-PON RN* φαίνονται στο Σχήμα 5.13 [8],[61]. Η βασική τοπολογία αποτελείται από ενιαίο οπτικό δακτύλιο μονής ίνας με παθητικά αστέρια (PON), που επισυνάπτονται σε αυτήν. Οι απομακρυσμένοι κόμβοι (Remote Node) είναι τα κέντρα ενός δικτύου τύπου αστέρα, οι οποίοι συλλέγουν τα τοπικά δίκτυα (διακλαδώσεις του οπτικού δακτυλίου). Οι ONUs που συνδέονται με το RN στη δυτική πλευρά του δακτυλίου μιλούν και ακούνε τον πομποδέκτη στη δυτική πλευρά της OLT. Με τον ίδιο τρόπο οι ONUs που βρίσκονται στην ανατολική πλευρά του RN μιλούν και ακούνε τον πομποδέκτη στην ανατολική πλευρά της OLT. Σε λογικό επίπεδο, υπάρχει μία σύνδεση σημείο με σημείο μεταξύ κάθε RN και OLT. Κανένα μήκος κύματος δεν επαναχρησιμοποιείται στο δακτυλίδι συλλογής.



Σχήμα 5.13 Αρχιτεκτονική NG-PON [8],[61].

Ένα RN έχει μέσα είτε έναν παθητικό διαχωριστή ισχύος (Coupler) είτε ένα AWG [11]. Εάν ένα RN περιέχει έναν παθητικό διαμοιραστή, ένα δεσμευμένο μήκος κύματος DWDM χρησιμοποιείται για τη μετάδοση των δεδομένων στη ροή καθόδου για τις ONUs, που συνδέονται με τη RN. Αντίστοιχα, οι ONUs έχουν πομπούς, που αποτελούνται από Fabry-Perot (FP) Λείζερ, που στέλνουν τα δεδομένα ροής ανόδου με τύπο CWDM. Από την άλλη πλευρά, εάν το RN διαθέτει ένα AWG, κάθε ONU έχει το δικό του μήκος κύματος τύπου DWDM, για να επικοινωνεί με την OLT, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.14. Δεδομένου ότι η απώλεια εισόδου της AWG είναι περίπου 6dB ανεξάρτητα από τον αριθμό των πορτών, ένα AWG με περισσότερες από οκτώ θύρες μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Έτσι επιτυγχάνεται (βελτιώνεται) καλύτερος προϋπολογισμός ισχύος από ό, τι με έναν παθητικό διαμοιραστή. Κάθε RN διασυνδέει γενικά 16 έως 64 ONUs. Η κίνηση ροής ανόδου και ροής καθόδου, που ανήκουν στην ίδια ONU, μπορεί να χρησιμοποιεί ίδιο μήκος κύματος, αλλά σε διαφορετικές κατευθύνσεις από την ίδια ίνα. [8]



Σχήμα 5.14 Λειτουργική αρχιτεκτονική της NG-PON με AWG [8]

Ένα από τα οφέλη του να έχουμε μαζί CWDM, TDM βασισμένο σε αστέρι και DWDM, WDM βασισμένο σε αστέρι είναι η εξισορρόπηση της κυκλοφορίας. Τα αστέρια WDM τείνουν να εξυπηρετούν εταιρείες, ενώ τα TDM αστέρια τείνουν να εξυπηρετούν κατοικημένες περιοχές. Συντονισμένα στοιχεία χρησιμοποιούνται για τη μείωση του αριθμού των πομποδεκτών στην OLT. Τα συντονισμένα λέιζερ στην OLT δημιουργούν καθοδικά πλαίσια και συνεχόμενες εκρήξεις κυμάτων (CW), τα οποία διαμορφώνονται με τις ONUs [11] [12]. Δεν απαιτείται να υπάρχει καμία επιπλέον πηγή laser στις ONUs. Αυτή η σύνθεση έχει ως αποτέλεσμα να χρειαζόμαστε τη μισή αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ κάθε ONU και την OLT. Σε σύγκριση με την παραδοσιακή αρχιτεκτονική, που έχει δύο ίνες-δαχτυλίδι, δύο σύνολα πηγών φωτός και δύο σύνολα mux/demux συσκευών για την πλήρη



λειτουργία διπλής όψης, αυτή η αρχιτεκτονική μειώνει δραστικά το κόστος εγκατάστασης.

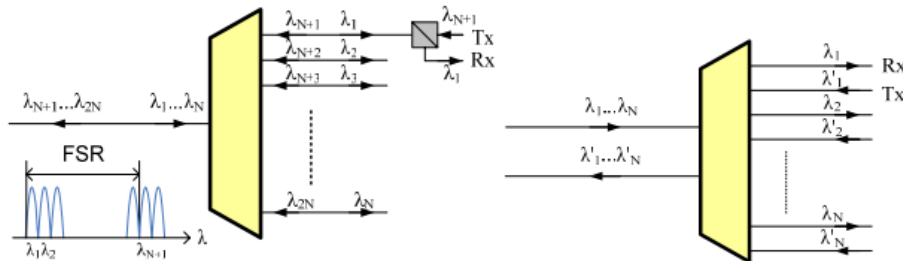
Πλέον, όπως είναι κατανοητό από τα προαναγραφόμενα, τα βασικά δομικά στοιχεία του οπτικού δικτύου επιδέχονται αλλαγές. Στις επόμενες υποενότητες του κεφαλαίου γίνεται μια γενική αναφορά των εναλλακτικών τεχνολογιών και αρχιτεκτονικών.

#### *A. Αρχή λειτουργίας του απομακρυσμένου κόμβου Remote Network unit (RN)*

Ο απομακρυσμένος κόμβος (RN) σε ένα PON μπορεί να υλοποιηθεί είτε από ένα διαχωριστή ισχύος ή από έναν παθητικό δρομολογητή μήκους κύματος. Ο διαμοιραστής ισχύος διανέμει όλα τα εισερχόμενα σήματα ομοιόμορφα σε όλες τις πόρτες εξόδου και σε κάθε ONU απαιτείται φίλτρο μήκους κύματος. Απώλεια εισαγωγής, ομοιομορφία, απώλεια επιστροφής και θερμοκρασία λειτουργίας είναι σημαντικά χαρακτηριστικά για την επιλογή του. Οι προδιαγραφές του διαχωριστή μπορεί να βρεθούν στην Telcordia GR1209 [5,32] ή GR1221 [5,33]. Παρά το γεγονός ότι ο διαιρέτης είναι απλός, χαμηλού κόστους, απαιτεί οπτικά φίλτρα με τα διαφορετικά κεντρικά μήκη κύματος στις ONUs. Επίσης, περισσότερες απώλειες σήματος εμφανίζονται με ένα διαχωριστή, παρά με έναν δρομολογητή μήκους κύματος.

Η AWG είναι μια επιτυχημένη συσκευή στη WDM βιομηχανία. Έχει χρησιμοποιηθεί σε WDM συστήματα μεγάλων αποστάσεων ως πολυπλέκτης/αποπολυπλέκτης και ως προσθέτης/αφαιρέτης πολυπλέκτης (ADM). Δρομολογεί κάθε συγκεκριμένο μήκος κύματος σε μια μοναδική θύρα εξόδου, διαχωρίζει πολλά μήκη κύματος ταυτόχρονα. Η κυκλική ιδιότητα του μήκους κύματος κάνει την AWG να χρησιμοποιείται κατά την RN τόσο ως πολυπλέκτης όσο και ως αποπολυπλέκτης την ίδια στιγμή, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.15. Όταν ο πομπός ροής ανόδου χρησιμοποιεί μήκη κύματος που διαφέρουν από την ροή καθόδου σε ακέραια πολλαπλάσια της ελεύθερης φασματικής περιοχής (FSR) του AWG, στην ίδια θύρα εξόδου AWG μπορεί να αποδοθεί τόσο η ροή ανόδου όσο και ροή καθόδου μετάδοσης, όπως μπορούμε να δούμε στο σχήμα 5.15 (α). Για τον σκοπό αυτό, ένα φίλτρο CWDM χρησιμοποιείται στην ONU για το διαχωρισμό των δύο σημάτων [5]. Όμως, αν η ροή ανόδου πρέπει να χρησιμοποιήσει το ίδιο μήκος κύματος με τη ροή καθόδου, κοινόχρηστη πηγή για παράδειγμα, τότε οι δύο διαφορετικές θύρες εξόδου θα πρέπει να αποδοθούν σε μια ONU και μια  $2 \times N$

AWG, πρέπει να χρησιμοποιούνται κατά την RN, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.15β (β).



Σχήμα 5.15 [5]

*RN based on the cyclic wavelength property of the AWG: (a) bidirectional transceiver at the ONU, and (b) unidirectional transceiver at the ONU.*

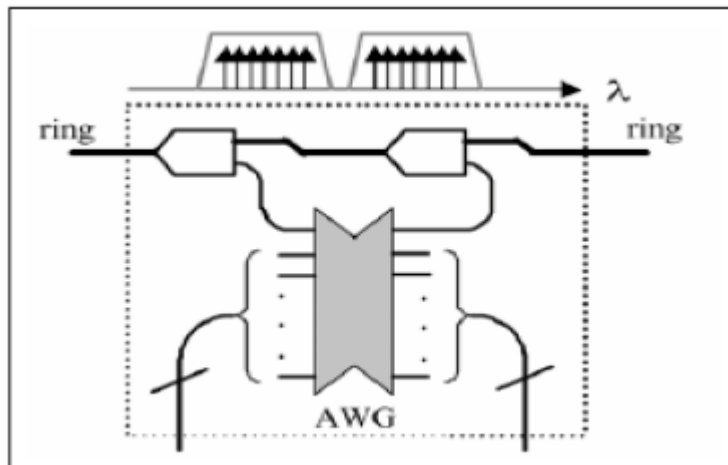
Η απώλεια παρεμβολής της AWG υπολογίζεται περίπου 4-5 dB (ανεξάρτητα από τον αριθμό των καναλιών), συνεπώς είναι πολύ μικρότερη από αυτή του οπτικού διαχωριστή, η οποία έχει υπερβολική απώλεια 0,5-1,5 dB εκτός από την (μεγάλη) 1:N απώλεια κατάτμησης. Όμως, παρ όλες αυτές τις καλές ιδιότητες, η AWG έχει απόκλιση από το κεντρικό μήκος κύματος  $\sim 0,01 \text{ nm} / ^\circ \text{C}$ . Έτσι, καθίσταται δύσκολο να χρησιμοποιηθεί ως RN ενός WDM-PON, δεδομένου ότι η RN βρίσκεται στο τραχύ περιβάλλον θερμοκρασίας, όπως από  $- 40 ^\circ \text{C}$  έως  $+ 85 ^\circ \text{C}$ . Αυτή η εξάρτηση από τη θερμοκρασία προέρχεται από την αλλαγή του δείκτη του κυματοδηγού πυριτίου, το οποίο οδηγεί σε αλλαγή του οπτικού μήκους του κυκλώματος της AWG. Όμως, πρόσφατα αναφέρθηκαν αθερμικές συσκευασίες των AWG, οι οποίες είναι κατασκευασμένες από παράγωγα υλικά, που έχουν διαφορετικό συντελεστή θερμοκρασίας από το πυρίτιο σε τμήμα του οπτικού κύματος του κυκλώματος της AWG [5,34, 35].

Υπάρχει άλλο ένα κοινό σύστημα για πολυπλεξία/αποπολυπλεξία μηκών κύματος, που ονομάζεται φίλτρο λεπτής-ταινίας ή πολλαπλά φίλτρα παρεμβολών. Με την τοποθέτηση κλιμακωτών φίλτρων στην οπτική διαδρομή, τα μήκη κύματος μπορούν να αποπολυπλέκονται, και αντιστρόφως. Κάθε φίλτρο είναι σχεδιασμένο να μεταδίδει ένα μοναδικό μήκος κύματος και παράλληλα να αντικατοπτρίζει άλλα. Αυτός ο τύπος φίλτρου είναι καλύτερος για CWDM, ενώ η AWG είναι καλή για την υλοποίηση μεγάλου αριθμού καναλιών.

Πρόσφατα, ένας νέος τύπος δρομολογητή μήκους κύματος, που ονομάζεται στοιβαγμένη σχάρα (bulk grating), έχει προταθεί για χρήση σε ένα σύστημα

DWDM. Το bulk grating βασίζεται σε στοιβαγμένου τύπου φράγματος περίθλαση και φέρεται να έχει μικρότερη απώλεια παρεμβολής των -3 dB , στενότερο διάκενο καναλιού και μεγαλύτερο αριθμό καναλιών σε σύγκριση με την AWG, για παράδειγμα, 160 κανάλια με 25 GHz διάκενο(spacing channel) [5,36]. Αλλά εξακολουθεί να υπάρχει μια διαμάχη σχετικά με το ποιο αποτελεί την καλύτερη λύση μεταξύ της AWG και του bulk grating. Η AWG έχει το προφανές πλεονέκτημα της ολοκλήρωσης με άλλες συσκευές σε λεπτές δομές, δεδομένου ότι εφαρμόζεται σε διοξείδιο του πυριτίου με βάση το κύκλωμα του οπτικού μήκους, ενώ το bulk grating έχει αναισθησία στην θερμοκρασία και μικρά διάκενα καναλιού.

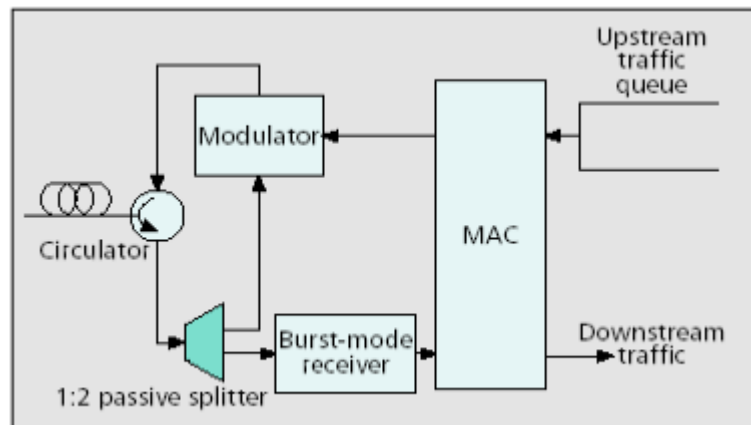
Συνοπτικά, μια βασική δομή του RN φαίνεται επίσης στο Σχήμα 5.15a. Όλες οι πόρτες, εκτός από δύο πόρτες εξόδου μιας NXN AWG, είναι συνδεδεμένες με τις ίνες διανομής, οι οποίες συνδέουν τις ONUs με το σχετικό RN. Μια ζώνη διαμοιραστή στο RN είναι μία συσκευή με τρεις πόρτες κατασκευασμένη από λεπτό φίλτρο ταινίας, που εκτελεί προσθήκη/αφαίρεση. Η πρώτη ζώνη διαμοιραστή στην αριστερή πλευρά της AWG εκτελεί προσθήκη/αφαίρεση για ONU στα δεξιά και η δεύτερη ζώνη διαμοιραστή για την δεξιά πλευρά της AWG εκτελεί /αφαίρεση για ONU στα αριστερά του. Σημειωτέον ότι οι ομάδες των μηκών κύματος πρόσθεσης/αφαίρεσης των δύο ζωνών διαμοιραστών στην RN πρέπει να είναι διαφορετικές. Λόγω αυτού, κάθε ONU έχει το δικό της αποκλειστικό μήκος κύματος και στη ροή ανόδου και στη ροή καθόδου μετάδοσης στο (πλέγμα) DWDM δίκτυο, για να επικοινωνεί με την OLT.[8]



Σχήμα 5.15a Remote Node με AWG [8]

### *B. Αρχή λειτουργίας Οπτικής τερματικής μονάδας Optical Network Unit (ONU)*

Δεδομένου ότι υπάρχουν οπτικά φίλτρα και AWGs στην οπτική διαδρομή, μια απαιτούμενη αυστηρή προδιαγραφή είναι η σταθερότητα του μήκους κύματος ανόδου. Ο πιο απλός τρόπος υλοποίησης του πομπού ONU είναι η χρήση σταθεροποιημένης πηγής λέιζερ. Ωστόσο, η επίτευξη της σταθεροποιημένης πηγής λέιζερ απαιτεί ογκώδη οπτική και ηλεκτρονική κατανάλωση ισχύος, ως εκ τούτου έχει σημαντικό αντίκτυπο στο κόστος της ανάπτυξης του δικτύου. Η άλλη προσέγγιση είναι με συντονισμένο λέιζερ στην ONU, όμως στην περίπτωση αυτή είναι αναγκαία η παρακολούθηση της λειτουργικότητας του μήκους κύματος στην OLT και τα συντονισμένα λέιζερ είναι αρκετά δαπανηρά. Η άλλη εναλλακτική προσέγγιση είναι η χρήση ενισχυτή ημιαγωγού (SOA), ως διαμορφωτή στην ONU, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.16. Με αυτό το σήμα μπορεί, επίσης, να ενισχυθεί και να αυξηθεί η απόσταση μετάδοσης. Έτσι, το NG-PON ONU δεν έχει τοπική οπτική πηγή και χρησιμοποιεί ένα SOA για τη διαμόρφωση λαμβανομένων οπτικών κυμάτων από την OLT για τη μετάδοση αυτών στην άνοδο. Οι ONUs επίσης δεν χρειάζεται να έχουν συντονισμένο δέκτη. Η AWG στο RN επιτρέπει μόνο συγκεκριμένο μήκος κύματος να φθάσει NG-PON ONU, ο δέκτης απλά πρέπει να έχει αρκετό εύρος ζώνης, για να λάβει οποιοδήποτε κανάλι διάταξης DWDM.[8]

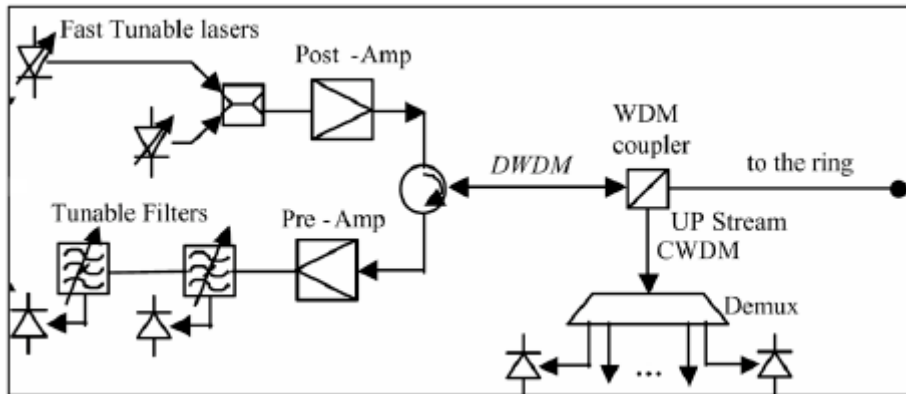


*Σχήμα 5.16 Μπλοκ διάγραμμα NG-PON ONU, με οπτικό φορέα παρεχόμενο εξωτερικά από την OLT.[8]*



### C. Αρχή λειτουργίας Οπτικής τερματικής μονάδας Optical Line Termination (OLT)

Το μπλοκ διάγραμμα της OLT φαίνεται στο σχήμα 5.17. Συντονισμένα στοιχεία, όπως γρήγορο συντονισμένο λέιζερ και συντονισμένο φίλτρο, χρησιμοποιούνται για DWDM κανάλια.



Σχήμα 5.17 Μπλοκ διάγραμμα της OLT για NG-PON[8]

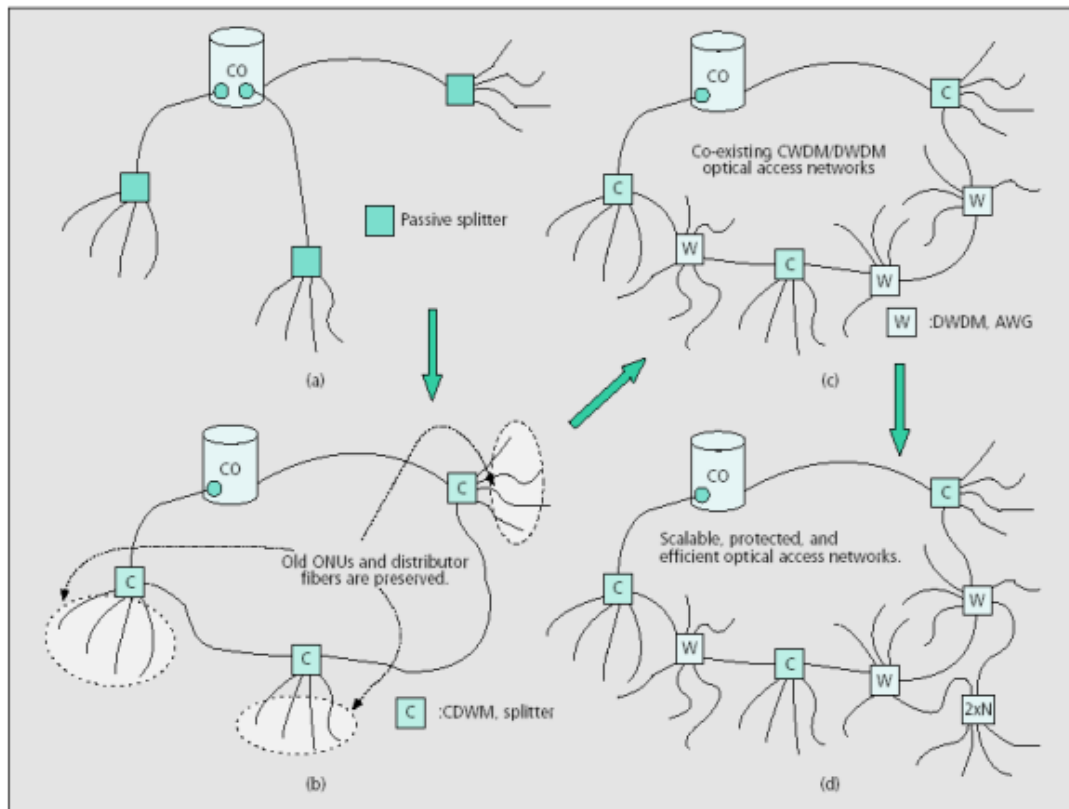
Ο μέσος όρος φορτίου του δικτύου είναι συνήθως χαμηλότερος από το φορτίο αιχμής, έτσι στατιστικά, έχουμε κέρδος στην πολυπλεξία με το διαμοιρασμό συντονισμένων στοιχείων στην OLT, γεγονός που μειώνει το συνολικό κόστος του συστήματος, με την ελαχιστοποίηση του πομποδέκτη για ένα δεδομένο αριθμό ONUs. Επίσης, επιτρέπει πολλαπλές ISP να συνυπάρχουν στο ίδιο δίκτυο. Τα οπτικά σήματα καθόδου από τους συντονισμένους πομπούς των DWDM καναλιών εισέρχονται στην πόρτα 1 του κυκλοφορητή και περνούν μέσω της πόρτας 2 του κυκλοφορητή και ζεύκτη WDM, έτσι εισέρχονται στο οπτικό δίκτυο πρόσβασης. Ο WDM ζεύκτης διαχωρίζει τα κανάλια ανόδου CWDM από τα DWDM κανάλια. Η κίνηση ανόδου σε DWDM κανάλια από το δακτύλιο περνά μέσα από την ίδια συσκευή, αλλά σε αντίστροφη σειρά και διαχωρίζεται από την κίνηση καθόδου με κυκλοφορητή. Σημειωτέο ότι για την καθοδική κίνηση χρησιμοποιούνται συντονισμένοι πομποί στην OLT και οπτικά συνεχόμενα κύματα CW διαμορφώνονται από την ONU για τα ανοδικά πλαίσιά τους.[8]

### D. Αναβάθμιση Εύρους Ζώνης Οπτικού Δικτύου Πρόσβασης

Στο σχήμα 4.14 φαίνεται το σενάριο αναβάθμισης του εύρους ζώνης του οπτικού δικτύου πρόσβασης. Το σχήμα 5.18 (α) δείχνει το υπάρχον PON δίκτυο συνδεδεμένο από το ίδιο CO. Κάθε PON έχει τη δική του καλωδίωση και η OLT είναι μέσα στο CO. Το σχήμα 5.18 (β) δείχνει το πρώτο βήμα μετάβασης της



υφιστάμενης δομής του TDM-PON δικτύου. Οι παθητικοί ζεύκτες των PONs αντικαθίστανται με RNs, που αποτελούνται από παθητικούς ζεύκτες και λεπτή ταινία φίλτρων προσθήκης/αφαίρεσης. Οι ίνες-τροφοδότες του PON αντικαθίστανται με ενιαία μονή ίνα, η οποία καθοδηγεί το RN, που εξυπηρετείται από την CO. Σημειώτέο ότι οι ίνες διανομής παραμένουν άθικτες κατά τη διάρκεια αυτής της αναβάθμισης. Από τη μεριά της ONU, η λειτουργικότητα του οπτικού δικτύου πρόσβασης είναι ακριβώς η ίδια. Μόνο ένα μικρό διάστημα διακοπής είναι αναγκαίο κατά την αναβάθμιση. Ως εκ τούτου, οι υπάρχουσες ONUs μπορούν να λειτουργήσουν ουσιαστικά το ίδιο όπως πριν, χωρίς σημαντική αναβάθμιση. Τα σχήματα 5.18 (γ) και (δ), καταδεικνύουν τη δεύτερη φάση της αναβάθμισης. Καθώς όλο και περισσότεροι χρήστες απαιτούν μεγάλο εύρος ζώνης για τις μελλοντικές ευρυζωνικές εφαρμογές, η επιλογή είναι να εισάγονται RNs με AWGs. Στην περίπτωση αυτή, υπάρχει ένα ειδικό κανάλι DWDM μεταξύ κάθε ONU και CO. Έτσι, σε γενικές γραμμές, η υβριδική αρχιτεκτονική PON αναβαθμίζει ομαλά τα οπτικά δίκτυα πρόσβασης από TDM-PON σε WDM/TDM βασισμένα σε NG-PON με οικονομικό τρόπο.[8]



Σχήμα 5.18 Φάσεις αναβάθμισης του οπτικού δικτύου [8]



## 6. WDM-PON

Τα παθητικά οπτικά δίκτυα παρείχαν μεγαλύτερο εύρος ζώνης σε σύγκριση με τα τότε εγκατεστημένα δίκτυα. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται και περιγράφεται η μετεξέλιξη των δικτύων TDM-PON σε δίκτυα WDM-PON, καθώς τα τελευταία προσφέρουν μεγαλύτερο εύρος ζώνης, μεγαλύτερο αριθμό χρηστών, που μπορεί να εξυπηρετήσει μια μονότροπη ίνα, καθώς και μεγαλύτερη απόσταση μεταφοράς δεδομένων. Γίνεται μία εκτενής περιγραφή των νέων αρχιτεκτονικών WDM-PON, καθώς αναφέρονται και τα πρωτόκολλα και οι υπηρεσίες αυτών.

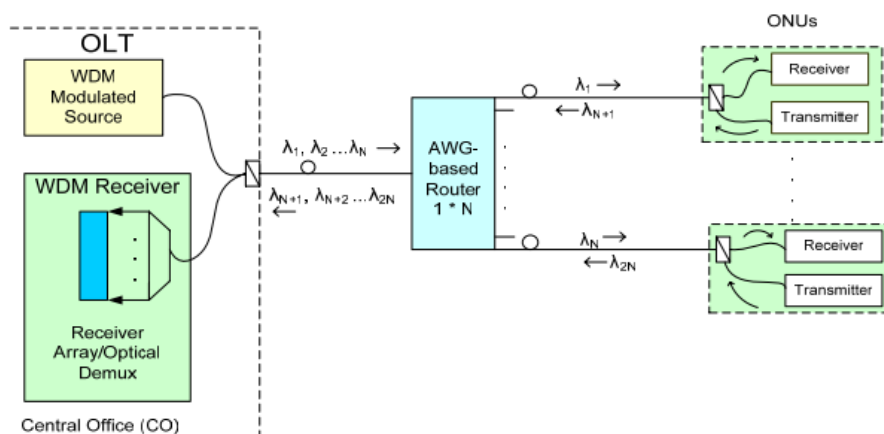
### 6.1 Αρχιτεκτονική WDM-PON

Τα παραδοσιακά PONs (TDM-PON) συνδυάζουν την υψηλή χωρητικότητα, που προσφέρουν οι οπτικές ίνες, με χαμηλό κόστος εγκατάστασης και συντήρησης μιας παθητικής υποδομής. Το οπτικό μέσο είναι κοινό με τη βοήθεια ενός παθητικού διαμοιραστή (splitter) μεταξύ όλων των συνδρομητών. Κατά συνέπεια, ο αριθμός των ONUs είναι περιορισμένος λόγω της εξασθένησης λόγω του διαμοιραστή και από το ρυθμό μετάδοσης (bit rate) των πομποδεκτών στο κεντρικό γραφείο (CO) και στις ONUs. Με τις υπάρχουσες προδιαγραφές μπορούν να εξυπηρετηθούν 32 ONUs με μέγιστη απόσταση τα 20 χλμ. από την OLT και 64 ONUs με μέγιστη απόσταση τα 10 χλμ. από την OLT. Η WDM-PON λύση προσφέρει επεκτασιμότητα, καθώς μπορεί να υποστηρίξει πολλαπλά μήκη κύματος κατά τη διάρκεια της ίδιας υποδομής οπτικών ινών, παρέχει διαφάνεια για το bit rate του καναλιού και δεν υφίσταται απώλειες ισχύος από το διαμοιρασμό.

Μια απλή προσέγγιση για την αρχιτεκτονική WDM-PON είναι να χρησιμοποιηθεί ένα ξεχωριστό κανάλι μήκους κύματος από την OLT σε κάθε ONU και για τη ροή ανόδου δεδομένων και για τη ροή καθόδου δεδομένων, σχήμα 5.1. Η προσέγγιση αυτή δημιουργεί μία σύνδεση σημείο σε σημείο ανάμεσα στο CO και κάθε ONU, η οποία διαφέρει από την τοπολογία σημείο σε πολλαπλά σημεία της συνήθους PON(TDM-PON). Στο WDM-PON του σχήματος 6.1, κάθε ONU μπορεί να λειτουργήσει από ένα ποσοστό ρυθμού μετάδοσης έως το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης του μήκους κύματος ενός καναλιού. Επιπλέον, διαφορετικά μήκη κύματος μπορούν να λειτουργούν με διαφορετικούς ρυθμούς bit, εφόσον είναι αναγκαίο. Ως εκ τούτου, οι διάφορες υπηρεσίες μπορούν να στηρίζονται πάνω στο ίδιο δίκτυο. Με άλλα λόγια, διαφορετικά σύνολα των μηκών κύματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο να υποστηρίζουν διαφορετικά, ανεξάρτητα υποδίκτυα PON, που όλα να λειτουργούν πάνω στην ίδια υποδομή οπτικών ινών.

Στην καθοδική κατεύθυνση του WDM-PON, σχήμα 6.1, τα μήκη κύματος των καναλιών δρομολογούνται από την OLT προς τις ONUs από έναν AWG δρομολογητή, ο οποίος αναπτύσσεται σε έναν «απομακρυσμένο κόμβο» (RN). Ο RN κόμβος έχει αντικαταστήσει τον παθητικό διαμοιραστή, που χρησιμοποιείται σε ένα TDM-PON. Μία πηγή πολλαπλών μηκών κύματος στην OLT χρησιμοποιείται για τη μετάδοση πολλαπλών μηκών κύματος στις διάφορες ONUs.

Η OLT για την ανοδική κατεύθυνση χρησιμοποιεί έναν WDM αποπολυπλέκτη μαζί με μια σειρά δέκτες για τη λήψη του σήματος ανόδου. Κάθε ONU είναι εξοπλισμένη με πομπό και δέκτη για λήψη και διαβίβαση του αντίστοιχου μήκους κύματος. Σε αυτό το παράδειγμα, οι ροές ανόδου και καθόδου λαμβάνουν χώρα σε διαφορετικά παράθυρα μήκους κύματος και τα παράθυρα αυτά είναι διαχωρισμένα χρησιμοποιώντας την χονδρό WDM (CWDM). Μέσα σε κάθε παράθυρο τα μήκη κύματος είναι περισσότερο διαχωρισμένα με DWDM.



Σχήμα 6.1 [5]

Η απαίτηση του WDM-PON είναι ότι θα πρέπει να είναι επεκτάσιμο σε εύρος ζώνης και στον αριθμό των χρηστών. Για την επίτευξη αυτής της απαίτησης, οι οπτικές συσκευές, που είναι απαραίτητες για την υλοποίηση αυτής της αρχιτεκτονικής, θα πρέπει να είναι οικονομικές. [5]

### 6.2 Ιδιότητες και χαρακτηριστικά συσκευών

Σε μία σχεδίαση ενός δικτύου οπτικών ινών βασισμένη σε αρχιτεκτονική WDM-PON, πρέπει να γίνει προσεκτική επιλογή σχετικά με τα κατάλληλα μήκη κύματος, καθώς και με την απόσταση μεταξύ τους, με βάση την σχετική επιλογή των συσκευών. Στο κεφάλαιο αυτό θα αναφερθούν τα υπόλοιπα βασικά χαρακτηριστικά (ιδιότητες), που είναι: α) οι ιδιότητες πομπού καθώς αρκετοί



WDM-PON πομποί με διάφορες ιδιότητες έχουν προταθεί και μπορούν να επιλεγούν, οι οποίοι συνοψίζονται σε μια υποενότητα του κεφαλαίου αυτού. Β) Οι ιδιότητες του δέκτη, οι οποίες εξαρτώνται από τις απώλειες και τα πρωτόκολλα, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη.

Το χονδροειδές WDM (CWDM)- PON και το πυκνό WDM (DWDM)- PON. Καθώς και οι ποικίλοι πολυπλέκτες και αποπολυπλέκτες που μπορούν να αναπτυχθούν στους απομακρυσμένους κόμβους (RNs) δεν είναι αναφέρονται στο κεφάλαιο αυτό αφού ήδη έχουν προαναγραφεί σε άλλα κεφάλαια.

### *6.2.1 Ιδιότητες πομπού*

Οι οπτικές πηγές είναι ταξινομημένες σε τέσσερις ομάδες, ανάλογα με τον τρόπο που δημιουργούνται τα μήκη κύματος. Αυτές είναι: (1) πηγή προσδιορισμένου μήκους κύματος, (2) πηγή πολλαπλού μήκους κύματος, (3) πηγή ελεύθερης επιλογής μήκους κύματος και (4) διαμοιρασμένη πηγή. Η πηγή πολλαπλού μήκους κύματος ισχύει μόνο για το OLT, η κοινή πηγή εφαρμόζεται στην ONU και τα υπόλοιπα δύο έχουν εφαρμογή και στις δύο.

#### *6.2.1.1 Πηγή προσδιορισμένου μήκους κύματος*

Η Πηγή προσδιορισμένου μήκους κύματος εκπέμπει ένα σταθερό μήκος κύματος από το κάθε εξάρτημα. Απαιτείται ένα κύκλωμα παρακολούθησης του μήκους κύματος και ένας ελεγκτής, για να συντονίσει την πηγή στο απαιτούμενο μήκος κύματος. Ο κοινός διανεμητής ανάδρασης (Distributed Feedback DFB), ο διανεμητής Bragg ανακλαστήρα (DBR) διόδου λείζερ, μια κάθετη-κοιλότητα επιφάνειας εκπομπής της διόδου λείζερ (Vertical Cavity Surface Emitting Laser VCSEL), και μια συντονισμένη διόδος laser μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε αυτήν την ομάδα.

##### *a) Distributed Feedback (DFB) Laser Diode (LD) (Δίοδος Laser Κατανεμημένης ανάδρασης):*

Η ανάδραση δεν δημιουργείται από τις πλευρές, αλλά κατανέμεται σε όλο το μήκος της κοιλότητας. Η επίτευξη αυτή γίνεται μέσω ενός ενσωματωμένου φράγματος διάθλασης, που οδηγεί σε μια περιοδική μεταβολή του δείκτη του τρόπου μετάδοσης. Η ανάδραση εμφανίζεται μέσω της διάθλασης Bragg, ένα φαινόμενο που προκαλεί σύζευξη των κυμάτων που διαδίδονται στην ορθή και ανάστροφη κατεύθυνση. Η επιλεκτικότητα του τρόπου μετάδοσης του μηχανισμού είναι αποτέλεσμα της συνθήκης Bragg [10]. Τα Laser ημιαγωγού, που



χρησιμοποιούν τον DFB μηχανισμό, ταξινομούνται σε δυο μεγάλες κατηγορίες στα *DFB laser* και στα *laser κατανεμημένου ανακλαστήρα*. Εάν το πλέγμα είναι έξω από την κοιλότητα, τότε το Laser ονομάζεται κατανεμημένου ανακλαστήρα Bragg (DBR) LD. Συνήθως στα Laser αυτά απαιτείται θερμοηλεκτρικό ψυγείο, λόγω πιθανής μετατόπισης του μήκους κύματος  $\sim 0,1 \text{ nm} / ^\circ \text{C}$ , ώστε να επιτυγχάνεται η σταθερή λειτουργία ως WDM πηγή. Επιπλέον, είναι αναγκαίο, ένα locker μήκος κύματος, το οποίο βοηθά την LD να κλειδώσει ακριβώς στο μήκος κύματος που απαιτείται. Η DFB LD μπορεί να διαμορφωθεί άμεσα για ένα WDM-PON, όπου η απόσταση είναι συχνά λιγότερη από 20 χιλιόμετρα. Έχει καλή υψηλή ταχύτητα διαμόρφωσης λόγω της στενής γραμμής εύρους μικρότερης από μερικά MHz. Παρ' όλα αυτά τα πλεονεκτήματα, η DFB LD θεωρείται δαπανηρή στην υλοποίηση και εφαρμογή ενός WDM-PON δικτύου, λόγω του ότι απαιτείται ένας αριθμός από DFB LDs, όπου καθένα από αυτά θα πρέπει να διαχειρίζονται χωριστά. [5]

*b) Laser εκπομπής-επιφάνειας κατακόρυφης κοιλότητας [Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser (VCSEL) Diodes]:*

Η VCSEL έχει τη δυνατότητα μαζικής παραγωγής, έτσι κρατά το κόστος χαμηλά, επειδή το σύνολο της κοιλότητας μπορεί να αναπτυχθεί με βήμα αύξησης κρυστάλλου σε ένα υπόστρωμα GaAs, γεγονός που καθιστά την κατασκευή και την δοκιμή εύκολη [6]. VCSELs με 850 nm και 1310 nm μήκη κύματος είναι διαθέσιμες στο εμπόριο και χρησιμοποιούνται ευρέως για εφαρμογές LAN. Αλλά η VCSEL σε μήκος κύματος 1550 nm βρίσκεται σε αρχικό στάδιο ανάπτυξης, λόγω των κακών οπτικών και θερμικών ιδιοτήτων του υλικού λείζερ. Αν και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως WDM-PON πηγή, μπορεί να εγκριθεί ως πηγή ροής ανόδου σε ένα σύνθετο PON (CPON). Εάν αυτή η πηγή των 1550 nm στο DWDM φάσμα γίνει σταθερή και φθηνή, θα είναι ένας ισχυρός υποψήφιος για τη δυνητική ενσωμάτωση με άλλα ηλεκτρονικά είδη. [5]

*c) Συντονισμένα Laser (Tunable Laser):*

Το WDM-PON δίκτυο απαιτεί διαφορετικά μήκη κύματος λείζερ για κάθε κανάλι του WDM-PON, έτσι πρέπει να εγκατασταθούν διαφορετικά λείζερ σε κάθε σπίτι. Αυτή η υλοποίηση είναι δαπανηρή και δεν είναι εύκολο να διατηρηθεί. Με αυτήν την έννοια, τα συντονισμένα λείζερ είναι ελκυστική λύση, εάν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διάφορα WDM κανάλια.

Ένα laser μηχανικού τύπου, που ονομάζεται επίσης εξωτερική κοιλότητα-λείζερ, υλοποιείται από εξωτερική σχάρα διάθλασης ή Fabry Perot (FP) κοιλότητα,



η οποία ελέγχεται μηχανικά. Λόγω του μεγάλου συντονισμένου φάσματος σε επίπεδο έως και 500 nm μήκους κύματος, καθώς και της καλής ακρίβειας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην εγκατάσταση οργάνων. Ωστόσο, η εξωτερική-κοιλότητα συντονισμένου λέιζερ απαιτεί έναν εξωτερικό διαμορφωτή υψηλής ταχύτητας, λόγω της μεγάλης διάρκειας της κοιλότητας. Επίσης, η έλλειψη μακροπρόθεσμης σταθερότητας δυσχεραίνει την εφαρμογή των συντονισμένων laser στις τηλεπικοινωνίες.

Ένα θερμικά συντονισμένο DFB χρησιμοποιεί την ιδιότητα αλλαγής μήκους κύματος της DFB LD, λόγω της αλλαγής του δείκτη κοιλότητας με τη θερμοκρασία. Με τη βοήθεια της βελτιστοποιημένης θερμικής σχεδίασης και της δυνατότητας ελέγχου της θερμοκρασίας σε ένα ευρύ φάσμα, η αλλαγή του μήκους κύματος στα θερμικά συντονισμένα DFB φτάνει έως και 4 nm [5],[14]. Αυτός ο χρόνος συντονισμού είναι μεγάλος, μερικές φορές έως και λίγα δευτερόλεπτα. Έτσι, αυτό το είδος της LD δεν είναι καλό για μια αρχιτεκτονική, όπου απαιτείται γρήγορη μετατροπή. Ωστόσο, αυτή η LD μπορεί να είναι χρήσιμη για WDM-PON με πομπούς με σταθερά μήκη κύματος.

Βάσει όλων των αναγραφόμενων πλεονεκτημάτων έχουμε την εμφάνιση στο εμπόριο των συντονισμένων προϊόντων πάνω σε πολλαπλά (π.χ., οκτώ) γειτονικά ITU DWDM κανάλια [5],[15],[16]. Έτσι, εξαλείφεται η ανάγκη για απόθεμα όλων των διαφορετικών μηκών κύματος του DFB LDs για κάθε WDM-PON πομπό.

Ο χρόνος συντονισμού της DFB/DBR LD μειώνεται αποτελεσματικά με την προσαρμογή της ένεσης ρεύματος σε ένα ή περισσότερα τμήματα της κοιλότητας της LD. Οι εγχυμένοι φορείς αλλάζουν τον πραγματικό δείκτη διάθλασης κατά την οπτική κοιλότητα, με αποτέλεσμα την αλλαγή μήκους κύματος. Ο χρόνος συντονισμού είναι της τάξης του nsec, ο οποίος είναι ο γρηγορότερος γνωστός μέχρι στιγμής. Δεδομένου ότι η μέγιστη μεταβολή του δείκτη είναι περίπου 1%, το μέγιστο εύρος ρύθμισης του μήκους κύματος της περιοχής του ενδιαφέροντός μας είναι περίπου 10-15 nm [5],[17]. Το μειονέκτημα αυτού του λέιζερ είναι ότι είναι ευπαθές σε λειτουργία αναπήδησης (hopping) και σε λειτουργία ανταγωνισμού [18], λόγω των πολλαπλών ηλεκτροδίων, που απαιτούνται σε μια κοιλότητα laser για την ένεση ρεύματος, η οποία υποβιβάζει την απόδοση μετάδοσης [5],[10],[17].



### 6.2.1.2 Πολλαπλές πηγές Μηκών Κύματος

Οι πηγές των μεμονωμένων μηκών κύματος δεν είναι βολικές για χρήση στην OLT ενός WDM-PON δικτύου, γιατί χρειάζονται πολλές οπτικές πηγές, ώστε να εξυπηρετήσουν όλα τα μήκη κύματος του δικτύου. Αν ένα στοιχείο μπορέσει να παράγει πολλαπλά μήκη κύματος, ταυτόχρονα, θα είναι πολύ χρήσιμο για την OLT. Αρκετά WDM κανάλια, ενσωματωμένα σε μια συμπαγή συσκευή, μπορούν να συντονιστούν ταυτόχρονα. Τρεις τύποι των εν λόγω πολλαπλών πηγών περιγράφονται παρακάτω.

#### *Laser πολλών συχνοτήτων - Multifrequency Laser (MFL):*

Μια AWG και συστοιχίες ενισχυτή έχουν ενταχθεί στην παρούσα συσκευή για την επιλογή του μήκους κύματος και την ενίσχυσή του, αντίστοιχα, [5,17,18]. Καθρέπτες στις πλευρές καθορίζουν την οπτική κοιλότητα της διόδου λέιζερ. Αν η AWG είναι συντονισμένη, αλλάζει ολόκληρο το μήκος κύματος εξόδου. Μια συσκευή που ενσωμάτωσε 18 WDM κανάλια υλοποιήθηκε με το εν λόγω καθεστώς [5,19]. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως συντονισμένη δίοδος λέιζερ με περιστροφή σε κάθε ενισχυτή. Μολονότι άμεση διαμόρφωση είναι δυνατή με αυτήν τη συσκευή, υπάρχει ένα όριο διαμόρφωσης, λόγω της μεγάλης κοιλότητας λέιζερ.

#### *Ενισχυμένο ζεύγος (Gain-Coupled) DFB LD Array:*

Ένας άλλος πιθανός τρόπος ενσωμάτωσης πολλαπλών πηγών μήκους κύματος είναι η υλοποίηση συστοιχιών DFB LD, με συνδυασμό ενός μηχανισμού ενισχυτή-σύζευξης και με την ικανότητα συντονισμού σε μια LD υπομονάδα [5,20]. Αντιστάσεις λεπτής-ταινίας εγκαθίστανται για το συντονισμό των μηκών κύματος με έλεγχο της θερμοκρασίας. Τα πλεονεκτήματα είναι το συμπαγές μέγεθος και η υψηλή ταχύτητα διαμόρφωσης. Αλλά είναι δύσκολο να διατηρηθεί με ακρίβεια το σωστό μήκος κύματος κάθε καναλιού, αφού κάθε lasing μήκους κύματος προσδιορίζεται από ανεξάρτητο φίλτρο. Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι τύποι των σαφρών είναι διαφορετικά χαραγμένοι μέσα σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα (chip), αυτό το σενάριο είναι πραγματοποιήσιμο για μικρό αριθμό καναλιών.

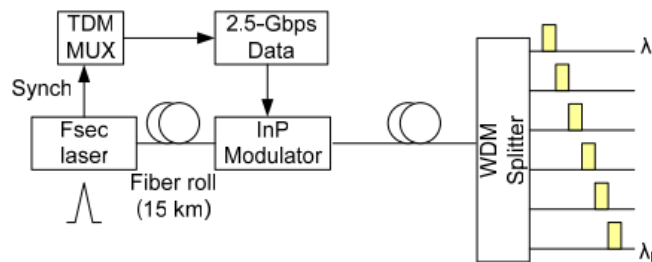
#### *Τετρισμένος Παλμός (Chirped-Pulse) WDM:*

Μια γεννήτρια πηγής σύντομου-παλμού, ακολουθούμενη από ένα ρολόι, μπορεί να λειτουργήσει ως WDM πηγή, όπως φαίνεται στο Σχήμα. 6.4 [5,21]. Ένας 100 fs Gaussian παλμός από ένα έρβιο λέιζερ ινών κλειδωμένου ρυθμού





προβλέπει 4,4 THz φασματικό εύρος ζώνης, αρκετό για 44 WDM κανάλια σε 100 GHz αποστάσεις. Ένα ρολό ίνας διασφαλίζει διασπορά παλμού, η οποία διευρύνει τον παλμό χρονικά. Αν αυτός ο παλμός διαμορφώνεται και στη συνέχεια παρέχεται σε ένα WDM διαμοιραστή (splitter), διαφορετικά κανάλια, που μεταφέρουν τις πληροφορίες τους, θα βγουν σε διαφορετικές πόρτες. Δεδομένου ότι κάθε παλμός που παράγεται χωρίζεται σε όλα τα κανάλια ONU, ο αριθμός των καναλιών περιορίζεται από το λόγο της διαμόρφωσης συχνότητας των δεδομένων προς το (για το) ρυθμό επανάληψης του λέιζερ. Ως εκ τούτου, αυτή η μέθοδος είναι καλύτερη για εφαρμογές, όπου η ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων σε κάθε κανάλι είναι μάλλον χαμηλή (ή μέτρια), αλλά απαιτούνται πολλά WDM κανάλια. Τα προβλήματα της ευθυγράμμισης του πλάτους του παλμού, του χρονικού πλάτους και της WDM ελεύθερης φασματικής περιοχής (FSR) μπορεί να είναι οι δυσκολίες που πρέπει να επιλυθούν πριν από την εμπορική βιωσιμότητα της λύσης αυτής.



Σχήμα 6.4 [5]

#### Μήκος κύματος επιλογή-ελεύθερης πηγής

Σε αυτό το είδος της πηγής, το μήκος κύματος δεν αποφασίζεται από μόνο του, αλλά από εξωτερικούς παράγοντες, όπως ένα φίλτρο ή εγχεόμενο σήμα (injection signal). Μερικές φορές, το μήκος κύματος της πηγής παρασύρεται από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, τη γήρανση, ή τη δυσλειτουργία του κυκλώματος. Η διαχείριση της κάθε ONU, της οποίας το μήκος κύματος είναι μοναδικό σε μια ομάδα PON, δεν είναι εύκολη, λόγω της δυσκολίας εξεύρεσης ακριβούς αναφοράς μήκους κύματος. Η ελεύθερης επιλογής μήκους κύματος πηγή (μήκος κύματος επιλογή-ελεύθερης πηγής - *Wavelength-Selection-Free Source*) μπορεί να βοηθήσει τις εν λόγω πηγές να λειτουργήσουν, ανεξάρτητα από το πρόβλημα συντονισμού μήκους κύματος, επειδή τα μήκη κύματος καθορίζονται λιγότερο από τους περιβαλλοντικά ευαίσθητους εξωτερικούς παράγοντες, όπως τα οπτικά φίλτρα ή τα εγχεόμενα σήματα.



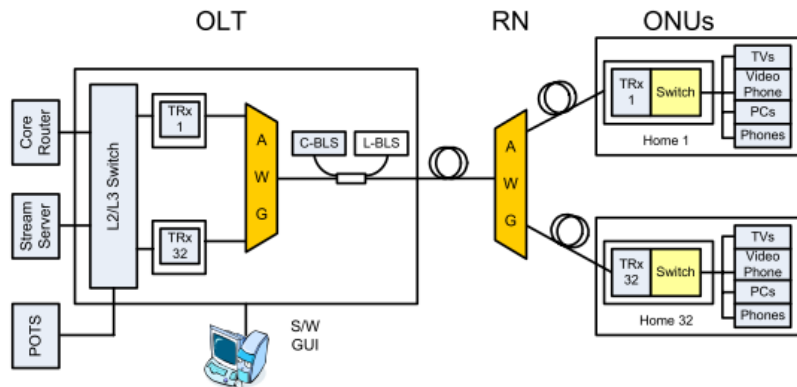


### *Τεμαχισμός φάσματος οπτικών πηγών*

Με τον τεμαχισμό του φάσματος των ευρυζωνικών οπτικών πηγών με ένα οπτικό φίλτρο στενής ζώνης, ένα μοναδικό μήκος κύματος για κάθε WDM κανάλι επιτυγχάνεται. Διάφοροι συνδυασμοί των ευρυζωνικών συνδέσεων οπτικής πηγής και φίλτρου έχουν δοκιμαστεί. Για παράδειγμα, η υπερ-φωτοβόλος δίοδος εκπομπής φωτός (LED) [23,5], EDFA [24,25,5] και FP LD [5,26] έχουν χρησιμοποιηθεί για οπτικές πηγές, ενώ τα FP και AWG φίλτρα έχουν χρησιμοποιηθεί για οπτικά φίλτρα. Δεδομένου ότι μόνο ένα στενό τμήμα του φάσματος της αρχικής πηγής χρησιμοποιείται, η πηγή αυτή στερείται συνήθως ισχύος, απαιτώντας έναν οπτικό ενισχυτή. Η μέθοδος αυτή έχει επίσης ένα όριο στην ταχύτητα διαμόρφωσης, λόγω διαφόρων πηγών θορύβου, όπως ο θόρυβος του τρόπου λειτουργίας, η ένταση του θορύβου καθώς και ο θόρυβος οπτικού κτύπου, που είναι εγγενείς ιδιότητες των πολύτροπων ή ευρυζωνικών πηγών.

### *Κλειδωμένης έκχυσης Laser:*

Ένα πολύτροπο λέιζερ, όπως η FP LD, έχει την ιδιότητα να διεγείρει μόνο έναν τρόπο, όταν ένα καλά προσαρμοσμένο εξωτερικό οπτικό σήμα εισέρχεται [5,27]. Προσεκτικός έλεγχος του δείκτη διαμόρφωσης, της πόλωσης ρεύματος του λέιζερ, και της ισχύος της εξωτερικής οπτικής διέγερσης απαιτούνται για την αύξηση της αποτελεσματικότητας της ασφάλισης [5,28]. FP LDs κλειδωμένες σε εξωτερικές εγχυμένες φέτες(κομμάτια) ραδιοφάσματος ευρυζωνικών πηγών φωτός (BLS) ήταν δοκιμασμένες για εφαρμογή εμπορικής χρήσης, όπως φαίνεται στην σχήμα 6.5 [5,29]. Αντανακλαστική επιστροφή στην μπροστινή πτυχή (μπροστινό μέρος) του λέιζερ προστίθεται για την αύξηση της αποτελεσματικότητας της έγχυσης. Το μήκος της κοιλότητας αυξάνεται, ώστε να έχει τουλάχιστον έναν τρόπο lasing εντός της ζώνης συχνοτήτων της εγχυμένης ενισχυμένης αυθόρμητης εκπομπής (ASE). Αυτή η μέθοδος παράγει 32 WDM κανάλια την ίδια στιγμή. Μία μέγιστη διαφορά ισχύος 7 dB αναφέρθηκε μεταξύ των καναλιών, καθώς το εισφερόμενο μήκος κύματος παρέκκλινε από το μήκος κύματος του lasing ή από την κορυφή της καμπύλης του FP LD. Είναι προβληματική η αύξηση του ποσοστού των δεδομένων, αλλά αυτό το λέιζερ δείχνει καλύτερη απόδοση από την πολύτροπη πηγή Spectrum-Sliced.



Σχήμα 6.5 [5]

### Διαμοιρασμένη Πηγή για ONU

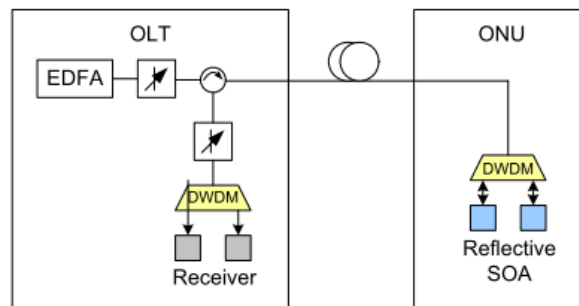
Μερικοί ερευνητές έχουν προσπαθήσει να εξαλείψουν τις οπτικές πηγές στην ONU, γιατί εγκυμονεί κινδύνους και είναι δαπανηρό να επιτρέπεται σε κάθε ONU να διαχειρίζεται το μήκος κύματος της μετάδοσης. Έστω ότι μία από αυτές παρεκκλίνει από το αντίστοιχο μήκος κύματος, τότε η απόκλιση του καναλιού μπορεί να προκαλέσει διαταραχές, όχι μόνο στην ίδια αλλά και στα παρακείμενα κανάλια. Ως λύση, έχει προταθεί όλες οι οπτικές πηγές να παρέχονται από την OLT και η ONU να διαμορφώνει τις αδιαμόρφωτες οπτικές πηγές. Μερικές φορές, ακόμη και ένα κανάλι μήκους κύματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στις δύο κατευθύνσεις, με αποτέλεσμα την αποκαλούμενη λύση κοινής-πηγής, με διαμόρφωση μόνο μιας μερικής προσωρινής περιοχής για τη ροή καθόδου δεδομένων και αφήνοντας αδιαμόρφωτη την υπόλοιπη περιοχή για τη ροή ανόδου δεδομένων. Δύο τύποι διαμορφωτών έχουν χρησιμοποιηθεί για τον σκοπό αυτό, α) εξωτερικής διαμόρφωσης και β) ημιαγωγών οπικών ενισχυτών (SOA).

Όταν το σήμα ροής καθόδου δεδομένων διαχωρίζεται στην ONU και μέρος αυτού παρέχεται σε έναν εξωτερικό διαμορφωτή, τότε το σήμα αυτό μπορεί να διαμορφωθεί σε υψηλή ταχύτητα για ροή ανόδου μετάδοσης. Μία πρόταση χρησιμοποιεί συντονισμένο λέιζερ στην OLT, το οποίο μπορεί να φθάσει σε κάθε ONU εναλλακτικά με την αλλαγή του μήκους κύματος της LD [5,30]. Μόνο το ήμισυ του χρόνου δαπανάται για τη ροή καθόδου δεδομένων και το άλλο ήμισυ στη ροή ανόδου, χρησιμοποιώντας τον εξωτερικό διαμορφωτή. Όταν η ONU λειτουργεί με αυτόν τον τρόπο, το περιθώριο ισχύος και η πόλωση, δηλαδή η κατεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου που ποικίλλει τυχαία κατά τη συνήθη οπτική ίνα, του οπτικού σήματος πρέπει να εξεταστούν, γιατί στη διαμοιρασμένη πηγή θα εμφανιστεί μετ' επιστροφής απώλεια σήματος και η έξοδος του εξωτερικού



διαμορφωτή κυμαίνεται συνήθως με την πόλωση του σήματος εισόδου. Το μειονέκτημα αυτής της πρακτικής είναι, το κόστος του διαμορφωτή σε κάθε ONU και μπορεί να αποτελέσει εμπόδιο στη χρησιμοποίησή του στην πράξη.

Στον αντίποδα, η χρήση διαμορφωτή τύπου SOA, με τον οποίο μπορεί να αντισταθμιστεί η απώλεια σήματος round-trip, έχει προταθεί για την χρήση ως κοινή πηγή, σχήμα 6.6 [5,31]. Η μη πολωμένη πηγή φασματικού κομματιού ASE (spectrum-sliced) παρέχεται στην ONU, ενισχύεται και διαμορφώνεται από την SOA και αντανακλάται πίσω στο OLT. Το κόστος της SOA παραμένει ως ένα βασικό μειονέκτημα και είναι επιτακτική ανάγκη η επίλυσή του πριν από την εμπορευματοποίηση.



Σχήμα 6.6 [5]

### 6.2.2 Ιδιότητες δέκτη

Ο δέκτης αποτελείται από ένα φωτοανιχνευτή (PD) και τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό για την ανάκτηση του σήματος. Οι κοινοί PDs είναι α) η φωτοδίοδος PIN θετικά-εγγενή-αρνητικά (Positive-Intrinsic-Negative) και η φωτοδίοδος χιονοστιβάδας (APD), οι οποίες βρίσκουν διαφορετικές εφαρμογές, ανάλογα με την απαιτούμενη ευαισθησία. Το ηλεκτρονικό μέρος, συνήθως, αποτελείται από τον προενισχυτή, τον κύριο ενισχυτή, ωρολογιακά κυκλώματα και κυκλώματα ανάκτησης δεδομένων (CDRs) και εξαρτάται από το πρωτόκολλο, που χρησιμοποιείται σε κάθε μήκος κύματος. Δεδομένου ότι κάθε μήκος κύματος μπορεί να λειτουργήσει αυτοτελώς σε WDM-PON, κάθε δέκτης μπορεί να ρυθμιστεί με διαφορετικό τρόπο.

#### Φωτοδιόδοι

Η ισχύς του οπτικού σήματος, που φτάνει σε μια ενότητα-ομάδα δεκτών, καθορίζεται από την απόσταση της μετάδοσης και τον βαθμό διαίρεσης (splitting ratio). Αν το WDM-PON χρησιμοποιείται σε μια δομή σε διάφορα στάδια, η ισχύς



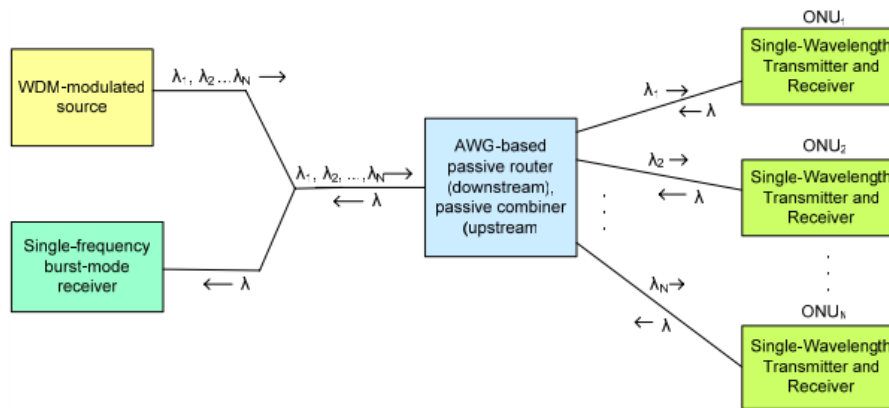
λήψης θα μικραίνει. Ως εκ τούτου, προσοχή πρέπει να δοθεί στην επιλογή της ευαισθησίας. Μία φωτοδίοδος τύπου PIN έχει πάρει την ονομασία της, επειδή αποτελείται από τις προσμείξεις τύπου P-positive και N-Negative και στην περιοχή αραίωσης έχει εισαχθεί ένα στρώμα ανόθευτου υλικού I intrinsic. Ο τύπος αυτός φωτοδίοδου είναι πολύ κοινός, λόγω της απλής του δομής, εύκολος στη χρήση κι έχει χαμηλό κόστος. Η ευαισθησία του ή η απαιτούμενη οπτική ισχύς δεν είναι καλή, γιατί δεν έχει καμία διαδικασία ενίσχυσης από μόνη της. Καθώς η απώλειες μετάδοσης μεγαλώνουν και η λαμβανόμενη οπτική ισχύς δεν ικανοποιεί την ευαισθησία του δέκτη του PIN, θα πρέπει να αντικατασταθεί με μια APD που έχει ~ 10 dB μεγαλύτερη ευαισθησία, όπου εδώ το κόστος έχει υψηλότερη τιμή. Η καλύτερη απόδοση προέρχεται από τη διαδικασία της εσωτερικής της ενίσχυσης και ονομάζεται φαινόμενο χιονοστιβάδας. Διάφοροι συνδυασμοί LDs και PDs μπορούν να ληφθούν υπόψη. Εάν χρησιμοποιείται μια OLT με υψηλή ισχύ, τότε ένα φθηνό PIN PD μπορεί να αποτελέσει τον καλύτερο υποψήφιο στην ONU. Αλλά, για την περίπτωση ροής ανόδου, το να έχουν υψηλή πηγή ισχύος σε κάθε ONU, μπορεί να θεωρηθεί αρκετά δαπανηρή. Ως εκ τούτου, το να έχει τύπο APD η OLT με χαμηλής ισχύος ONU μπορεί να είναι μια καλύτερη λύση.

#### *Ανάκτηση Κυκλωμάτων*

Το WDM-PON δίκτυο έχει διαφορετικά πρωτόκολλα ή σήματα, που σημαίνει ότι μπορούν να μεταφέρουν κάθε είδους μορφές σήματος. Διάφορα είδη πρωτοκόλλων μετάδοσης, όπως EPON, BPON, Ethernet, SONET και άλλα, μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε ένα WDM-PON ως φυσικό τους στρώμα. Οι δέκτες στην OLT και ONU θα πρέπει να πληρούν τις προδιαγραφές, που απαιτούνται από το πρωτόκολλο που εγκρίθηκε. Αν υπάρχουν πολλές ONUs του WDM-PON, που μοιράζονται ένα μήκος κύματος, χρησιμοποιώντας πολλά σημεία ελέγχου EPON πρωτοκόλλου (MPCP), πρέπει κάθε ONU να διαβιβάζει τα δεδομένα στη χρονοθυρίδα που της έχει ανατεθεί. Ο δέκτης OLT πρέπει να ανακτήσει τα στοιχεία από τα σήματα με διαφορετικά πλάτη και φάσεις (η λεγόμενη έκρηξη σημάτων) που προέρχεται από διαφορετικές ONUs, όπως ορίζεται στο IEEE 802.3ah, ενώ συνεχή κυκλώματα δεκτών χρησιμοποιούνται σε κάθε ONU, διότι η ροή καθόδου σήματος είναι συνεχής. Αλλά, σε ένα WDM-PON, όπου κάθε μοναδικό ζευγάρι OLT και ONU είναι συνδεδεμένο με ένα μήκος κύματος, ένας δέκτης καταγισμού δεν είναι πλέον αναγκαίος.

### **6.3 Αρχιτεκτονικές WDM-PON**

Πολλές αρχιτεκτονικές WDM-PON έχουν προταθεί για την παροχή επεκτασιμότητας που λείπει στα παραδοσιακά PONs. Όπως προαναφέρθηκε και όπως φαίνεται στο σχήμα 6.8, μια απλή προσέγγιση για την αύξηση της ικανότητας ενός TDM-PON είναι να οριστεί ένα ξεχωριστό κανάλι μήκους κύματος για κάθε χρήστη. Ωστόσο, η λύση αυτή προσφέρει υψηλές επιδόσεις σε υψηλό κόστος π.χ., κάθε φορά που ένας χρήστης κλείνει τη σύνδεσή του, τότε ο αντίστοιχος πομποδέκτης στην OLT είναι αδρανής και δεν θα είναι σε θέση να υποστηρίξει άλλους χρήστες, στην οποία περίπτωση ο πόρος στα αριστερά του δικτύου είναι αχρησιμοποίητος. Σε αυτή την ενότητα, θα αναθεωρηθούν ορισμένες από τις αντιπροσωπευτικές WDM -PON αρχιτεκτονικές, που έχουν προταθεί έως σήμερα.



Σχήμα 6.8 Αρχιτεκτονική CPON [5]

### 6.3.1 CPON

Για την επίλυση του περιορισμού επεκτασιμότητας των παραδοσιακών PONs, μία από τις πρώτες προτάσεις αρχιτεκτονικής WDM-PON βασίζεται στην έννοια AWG των WDM στα 1550 nm ροής καθόδου (downstream) και ένα μόνο μήκος κύματος στα 1300nm ροής ανόδου (upstream), που διαμοιράζεται μέσω του Time Division Multiple Access (TDMA). Ενώ ο προηγούμενος σχεδιασμός αυτής της αρχιτεκτονικής χρησιμοποιούσε χωριστές ίνες για upstream και downstream [5,37,38], ένας ολοκληρωμένος τύπος συσκευής προτάθηκε να πραγματοποιήσει την WDM δρομολόγηση σε ένα παράθυρο μήκους κύματος και το μήκος κύματος ανεξάρτητης ισχύος συνδυάζεται σε ένα δεύτερο παράθυρο σε μονή ίνα μέσω CWDM. Αυτή η αρχιτεκτονική έχει αναφερθεί ως το σύνθετο PON (CPON) στη βιβλιογραφία [5,39]. Το μονό μήκος κύματος, ο δέκτης καταίγισμού (burst-mode receiver), χρησιμοποιείται στην OLT για να λάβει το (upstream) σήμα ροής ανόδου. Ο burst-mode δέκτης καλείται να συγχρονιστεί με το ρολόι σημάτων των διαφορετικών ONUs εκπομπής, οι οποίες μπορεί να είναι σε διαφορετικές αποστάσεις από την OLT. Το σχήμα 6.8 δείχνει το σχεδιάγραμμα ενός CPON.

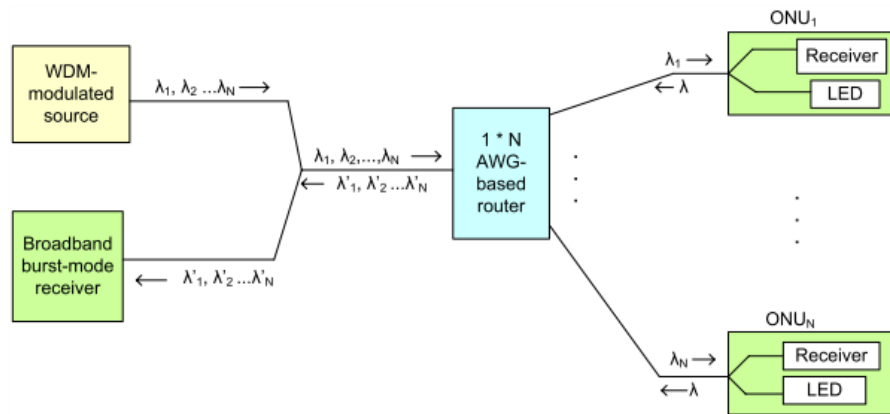


Το CPON αποφεύγει τα μειονεκτήματα του upstream WDM, αλλά περιορίζεται στο γεγονός της μιας μόνο συχνότητας λέιζερ, όπως μιας δίοδου λέιζερ καταναμημένης-ανάδρασης (DFB LD) στην ONU, μπορεί να είναι οικονομικά απαγορευτική.

### 6.3.2 LARNET

Η LARNET (τοπική πρόσβαση δρομολόγησης δικτύου) αρχιτεκτονική [5,40] επιχειρεί να αντιμετωπίσει τον περιορισμό CPON, χρησιμοποιώντας ένα ευρύ φάσμα πηγών στην ONU, όπως είναι μια ανέξοδη δίοδος εκπομπής φωτός (LED), της οποίας φάσμα είναι τεμαχισμένο σε φέτες από την AWG, βασισμένο στη δρομολόγηση σε διαφορετικές οπτικές ζώνες στην ανοδική κατεύθυνση. Το βελτιωμένο LED (edge emitting LED) εκπέμπει ένα ευρύ φάσμα μηκών κύματος, που επικεντρώνεται γύρω από ένα μήκος κύματος σε σύγκριση με το λέιζερ DFB, το οποίο εκπέμπει μόνο ένα μήκος κύματος του φωτός. Ένα πλεονέκτημα της χρήσης του βελτιωμένου LED (edge emitting LED) είναι ότι κάθε ONU μπορεί να έχει την ίδια συσκευή, σε αντίθεση με το DFB λέιζερ σε κάθε ONU.

Η αρχιτεκτονική LARNET φαίνεται στο σχήμα. 6.9. Ένα φάσμα πηγών από κάθε ONU εισάγεται σε διαφορετικές θύρες του δρομολογητή AWG. Ανάλογα με τη θύρα εισόδου, το μήκος κύματος (στοιχείο), που είναι τεμαχισμένο στην θύρα εξόδου είναι διαφορετικό. Ως εκ τούτου, στη πόρτα εξόδου, παρατηρούμε ότι υπάρχουν συνιστώσες (στοιχεία) του μήκους κύματος, που η καθεμία αντιστοιχεί σε μια πηγή εισόδου ONU. Το καθοδικό (downstream) σήμα με τα πολλαπλά μήκη κύματος συνιστώσων στο CO παράγεται από ένα multifrequency λέιζερ (MFL), το οποίο είναι συνδεδεμένο επάνω στην ίνα μετάδοσης μέσω ενός 1.3 ή 1.5μm πολυπλέκτη. Ο ευρυζωνικός δέκτης αναπτύσσεται επίσης στο CO, ο οποίος μπορεί να λάβει κάθε φασματική συνιστώσα του άκρου που εκπέμπουν LED. Στην ουσία, η OLT στο CO μπορεί να λάβει κάθε μήκος κύματος από οποιοδήποτε ONU. Η ύπαρξη ενός ενιαίου δέκτη στην OLT προϋποθέτει ότι το upstream κανάλι είναι διαμοιρασμένο μεταξύ των ONUs, χρησιμοποιώντας ένα σύστημα όπως TDMA.



Σχήμα 5.9 Αρχιτεκτονική LARNET [5,40]

Τα Edge-emitting LED είναι πολύ φθηνότερα σε σύγκριση με το DFB λέιζερ, έτσι μειώνεται το κόστος των ONU. Ο περιορισμός με την αρχιτεκτονική αυτή είναι ότι ο φασματικός τεμαχισμός σε ένα ευρύ φάσμα πηγών από AWG μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλη απώλεια ισχύος. Ως εκ τούτου, οι αποστάσεις από τις OLT στις ONU είναι σημαντικά μειωμένες στην αρχιτεκτονική LARNET.

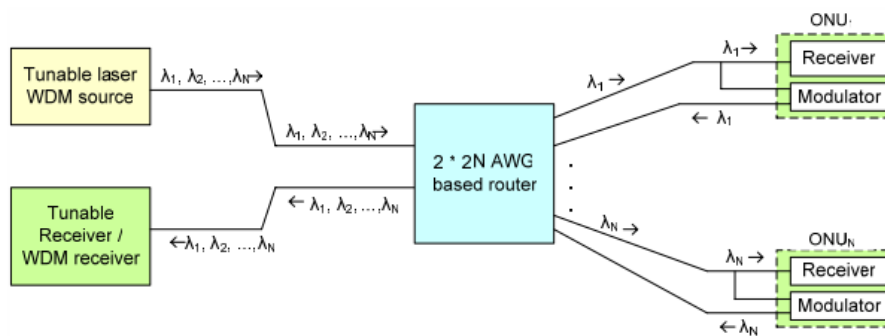
### 6.3.3 RITENET

Το RITENET (απομακρυσμένη αίτηση των τερματικών δικτύου) [5,41], στοχεύει στην αποφυγή του πομπού στην ONU, διαμορφώνοντας το downstream σήμα από την OLT και στέλνοντας το πίσω στην upstream κατεύθυνση. Στην ONU, το φως είναι χωρισμένο με παθητικό τρόπο, με ένα μέρος του φωτός να ανιχνεύεται από το δέκτη. Το υπόλοιπο είναι τροφοδοτημένο πίσω προς το CO μέσω διαμορφωτή. Το σήμα από της OLT είναι διαμοιρασμένο για downstream και upstream μέσω της κοινής χρήσης του χρόνου. Ένα βασικός δρομολογητής AWG  $2 \times 2$  χρησιμοποιείται για τη δρομολόγηση των μηκών κύματος.

Στο CO, το συντονισμένο λέιζερ του οποίου οι τρόποι ταιριάζουν με εκείνους του AWG, έχει βηματικά μήκη κύματος μέσω των καναλιών της ONU. Ως εκ τούτου, τα upstream και downstream κανάλια πρέπει να είναι διαμοιρασμένα με τις ONUs, χρησιμοποιώντας TDMA ή δυναμική κατανομή εύρους ζώνης. Εναλλακτικά, όπως έχει προταθεί σε κάποιες πρόσφατες αρχιτεκτονικές [5,42], μια σειρά από πομπούς και δέκτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην OLT. Σε αυτή την περίπτωση, η κατανομή των καναλιών δεν είναι απαραίτητη. Δεδομένου ότι το ίδιο οπτικό κανάλι χρησιμοποιείται τόσο για upstream όσο και για downstream, πρέπει να διαχωριστούν σε δύο διαφορετικές ίνες. Στο σχήμα 6.10 παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική του RITENET.



Ενώ το RITENET βοηθά στη μείωση του κόστους του τελικού τερματικού στην ONU, η απόσταση από την OLT στην ONU είναι πολύ μικρότερη, γιατί το σήμα από την OLT τώρα έχει να ταξιδέψει το διπλάσιο της απόστασης. Ο αριθμός των ινών που χρησιμοποιούνται στην αρχιτεκτονική αυτή διπλασιάζεται, διπλασιάζοντας έτσι το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης. Επίσης, στην OLT χρησιμοποιείται είτε συντονισμένο λέιζερ ή μια σειρά από πομπούς και δέκτες, που κάνει το RITENET να είναι πιο ακριβό σε σχέση με την αρχιτεκτονική CPON και LARNET. Η αρχιτεκτονική, όμως, έχει κάποια πλεονεκτήματα, όπως η διαθεσιμότητα των συμμετρικού εύρους ζώνης στις upstream και downstream κατευθύνσεις. Επίσης, το upstream σήμα δεν αντιμετωπίζει τις απώλειες φασματικού τεμαχισμού, που παρατηρήθηκαν στο LARNET.



Σχήμα 6.10 Αρχιτεκτονική RITENET [5,41]

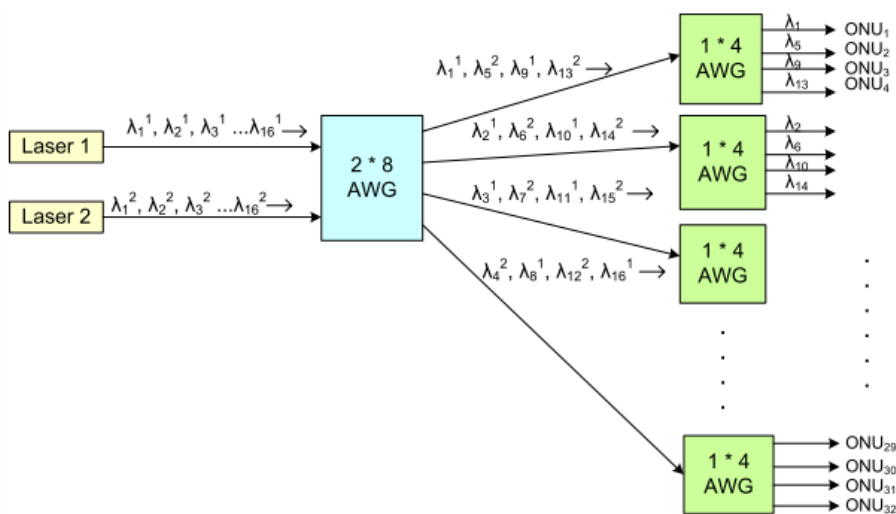
#### 6.3.4 WDM-PON βασισμένο σε πολλαπλών βαθμίδων AWG

Οι παραπάνω αρχιτεκτονικές έχουν δύο βασικούς περιορισμούς: (1) δυσκολία στην επέκταση του αριθμού των ONUs όταν το δίκτυο είναι διαρρυθμισμένο και (2) περιορισμένο αριθμό χρηστών, επειδή η τεχνολογία κατασκευής περιορίζει το μέγεθος AWG. Για να ξεπεραστούν αυτοί οι περιορισμοί, προτάθηκε μία αρχιτεκτονική πολλαπλών βαθμίδων [5,43]. Αυτή η αρχιτεκτονική, η οποία αναφέρεται πολλαπλά ως WDM-PON, εκμεταλλεύεται την περιοδική ιδιότητα δρομολόγησης του AWG, έτσι ώστε η επαναχρησιμοποίηση ενός συγκεκριμένου μήκους κύματος για περισσότερους από έναν συνδρομητή να είναι δυνατή. Αυτή η αρχιτεκτονική παρέχει επεκτασιμότητα σε εύρος ζώνης, καθώς και στον αριθμό των χρηστών, είτε με την πρόσληψη πρόσθετων μηκών κύματος στην CO είτε με επικαλυπτόμενα πολλαπλά στάδια AWGs με την αύξηση της AWG τραχύτητας σε κάθε στάδιο.





Η αρχιτεκτονική αυτή φαίνεται στο σχήμα 6.11. Δείχνει πόσες επιπλέον AWGs μπορούν να αναπτυχθούν σε κλίμακα από 8-μήκος κύματος, 8-ONU WDM-PON αρχιτεκτονική σε μια 32-μήκος κύματος, 32-ONU WDM-PON αρχιτεκτονική. Ο δείκτης του μήκους κύματος δηλώνει τον αριθμό του μήκους κύματος, ενώ ο εκθέτης δηλώνει την πηγή  $\lambda_1^2$  (π.χ.,  $\lambda_1^2$  δηλώνει μήκος κύματος 1 από laser 2). Αυτή η ιδέα έχει πολλά πλεονεκτήματα. Το κληροδότημα ONU-ONU1 προς ONU8 παραμένει ανεπηρέαστο και συνεχίζουν να χρησιμοποιούνται τα μήκη κύματος  $\lambda_1^1$  προς  $\lambda_4^1$  και  $\lambda_1^2$  για  $\lambda_4^2$ . Το κληροδότημα  $2 \times 8$  AWG καναλιών διατηρείται και 8 νέα  $1 \times 4$  AWGs κανάλια χρησιμοποιούνται για την επέκταση του δικτύου.



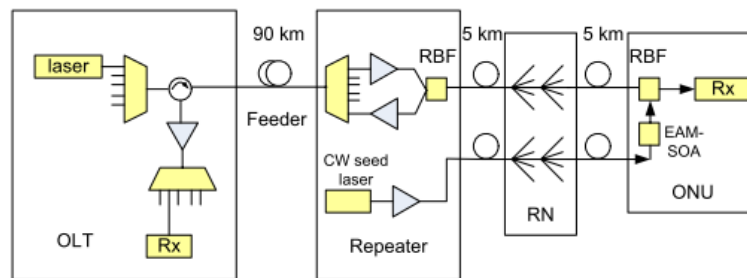
Σχήμα 6.11 Αρχιτεκτονική πολλαπλών βαθμίδων AWG [5]

### 6.3.5 DWDM Super-PON (SPON)

Το PON είναι περιορισμένο στην απόσταση μετάδοσής του και στον αριθμό των κόμβων, που μπορεί να υποστηρίξει λόγω περιορισμού της ισχύος. Για παράδειγμα, η μέγιστη απόσταση μετάδοσης της EPON είναι 20 χλμ. και ο μέγιστος αριθμός των κόμβων-χρηστών, που μπορεί να υποστηρίξει, είναι 32. Αρκετοί διαχειριστές δικτύων ενδιαφέρονται για τη διεύρυνση του φάσματος των υπηρεσιών, ενώ παρακάμπτουν τα τοπικά κέντρα, προκειμένου να μειώσουν σημαντικά τα έξοδα λειτουργίας [5,44]. Το σούπερ-PON (SPON) καλύπτει ένα φάσμα πάνω από 100 χιλιόμετρα με ένα λόγο διαχωρισμού, που φθάνει τα 2000 με τη βοήθεια οπτικών ενισχυτών (Optical Amplifier OAs) [5,45]. Οι οπτικοί ενισχυτές τοποθετούνται σε μακρινή απόσταση και μετά το πρώτο στάδιο διάσπασης. Επομένως, αυτό παρέχει αρκετή ισχύ για τον προϋπολογισμό του συστήματος. Τα οφέλη του κόστους απορρέουν όχι μόνο από την κοινή χρήση πόρων, αλλά και από την εδραίωση της

μεταγωγής κέντρων. Όμως, το μονό μήκος κύματος του SPON έχει περιορισμούς στο εύρος ζώνης, δεδομένου ότι το μήκος κύματος το διαμοιράζονται πολλές ONUs.

Μια DWDM SPON προτείνεται, ώστε να αυξηθεί το εύρος της ζώνης, παρέχοντας αρκετά μήκη κύματος και στις δύο κατευθύνσεις [5,46]. Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική φαίνεται στο σχήμα 6.12. Σε αυτό το πλαίσιο κάθε  $1 \times \text{NPON}$  διαχωριστής ισχύος χρησιμοποιεί δύο DWDM κανάλια, ένα για upstream και το άλλο για downstream. Το "μπλε" μισό (1525 nm-1543 nm) της C-band φέρει downstream κανάλια, ενώ το "κόκκινο" το ήμισυ (1547 nm-1565 nm) φέρει upstream κανάλια, τα οποία χωρίζονται σε κόκκινα χαμηλού κόστους ή μπλε φίλτρα (RBF). Η ONU χρησιμοποιεί μια κοινή πηγή. Ένας διαμορφωτής ηλεκτρικής απορρόφησης-ενισχυτής οπτικών ημιαγωγών (EAM-SOA) μπορεί να λειτουργήσει ως ένα άχρωμο ONU, που χρησιμοποιείται όχι μόνο για τη διαφοροποίηση, αλλά και για την ενίσχυση. Το επαναληπτικό κέντρο-site περιέχει λέιζερ αναπαραγωγής συνεχούς κύματος (continuous-wave seed laser CW), ακολουθούμενο από ένα ηλεκτρονικό ενισχυτή, που διανέμει μία upstream οπτική πηγή σε κάθε ONU, που βρίσκεται μέσα σε μία ομάδα διαιρέτη PON. Όλα τα upstream μήκη κύματος ενισχύονται από ένα προενισχυτή EDFA, πριν διαχωριστούν σε κάθε δέκτη στην OLT.



Σχήμα 6.12 Αρχιτεκτονική DWDM super-PON χρησιμοποιώντας άχρωμες ONUs [5]

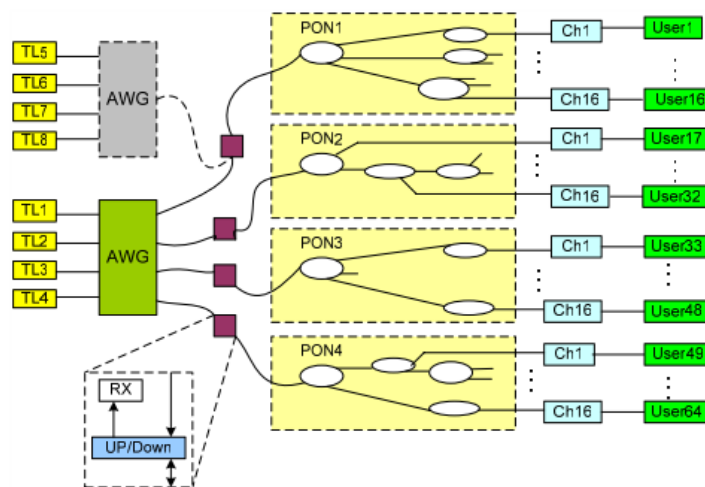
Παρόλο που αυτή η αρχιτεκτονική SPON κάνει δυνατή την εξυπηρέτηση μεγάλων αποστάσεων και φιλοξενεί πολλούς κόμβους πρόσβασης, χρησιμοποιεί ενεργά τμήματα, όπως οπτικούς ενισχυτές και πηγές αναπαραγωγής στη μέση της εγκατάστασης, με συνέπεια να απαιτεί ηλεκτρική ενέργεια και επομένως και τακτική συντήρηση. Επομένως δεν είναι παθητική, πράγμα που είναι η θεμελιώδης απαίτηση για ένα PON δίκτυο. Επομένως, η αρχιτεκτονική αυτή θα πρέπει να ανταγωνιστεί άλλες λύσεις μετρώ όσον αφορά το κόστος και την ευκολία διαχείρισης.



### 6.3.6 SUCCESS-DWA PON

Το Πανεπιστήμιο του Στάνφορντ δυναμικής πρόσβασης ανάθεσης μήκους κύματος (SUCCESS-DWA) PON αρχιτεκτονική [5,47] έχει ως στόχο να προσφέρει επεκτασιμότητα με την εισαγωγή δυναμικής κατανομής μήκους κύματος (DWA), για την παροχή κατανομής εύρους ζώνης σε πολλά φυσικά PONs. Αυτό γίνεται, ενώ ο υφιστάμενος αυθαίρετος τομέας που αναπτύσσονται τα PON παραμένει άθικτος.

Το σχήμα 6.13 δείχνει την αρχιτεκτονική του δικτύου της SUCCESS-DWA PON. Χρησιμοποιεί συντονισμένα λέιζερ (TLs) και AWG στο CO, ενώ WDM φίλτρα και δέκτες burst-mode χρησιμοποιούνται εντός των ONUs. Η Upstream και downstream κίνηση διαχωρίζεται με ένα ευρείας ζώνης WDM φίλτρο, που εδρεύει μεταξύ του AWG και το PON. Αυτή η αρχιτεκτονική προϋποθέτει ότι όλα τα μήκη κύματος από την OLT μπορούν να φτάσουν σε όλες τις ONUs όλων των επιμέρους φυσικών PONs. Η TL<sub>1</sub> μπορεί να φτάσει στο PON<sub>1</sub> μέσω AWG καναλιών (1, 5, 9, . . .). Μπορεί να φθάσει επίσης στο PON<sub>2</sub> μέσω καναλιών (2, 6, 10. . .) και το ίδιο για PON<sub>3</sub> και PON<sub>4</sub>. Έτσι, μια TL μπορεί να επικοινωνεί με όλους τους χρήστες σε μια συγκεκριμένη PON, προσδιορίζοντας το μήκος κύματος που εντάσσεται στο βασικό εύρος (passband) του χρήστη και το μήκος κύματος εξόδου της AWG προς το συγκεκριμένο PON. Η αρχιτεκτονική παρέχει επεκτασιμότητα με αρχική ανάπτυξη ενός TL και μίας AWG στο CO, η οποία εξυπηρετεί πολλούς συνδρομητές σε διαφορετικά PONs. Καθώς η ζήτηση αυξάνεται, η αρχιτεκτονική μπορεί να αναπτυχθεί-επεκταθεί με την προσθήκη περισσότερων TLs στην AWG ή με την προσθήκη άλλης AWG μαζί με περισσότερες TLs, όπως φαίνεται με τη διακεκομμένη AWG στο σχήμα 6.13.





### *Σχήμα 6.13 Αρχιτεκτονική SUCCESS-DWA PON [5]*

Η SUCCESS-DWA PON απαιτεί έναν κατάλληλο αλγόριθμο προγραμματισμού, δεδομένου ότι υπάρχει μόνο ένα TL, που μπορεί να έχει πρόσβαση σε κάθε χρήστη σε κάθε δεδομένη στιγμή και το TL είναι κοινό στοιχείο, δεδομένου ότι ο αριθμός των TLs είναι συνήθως μικρότερος από τον αριθμό των χρηστών. Το χρονοδιάγραμμα πρέπει να διατηρεί την αμεροληψία, να αποφεύγει τη σύγκρουση, και να μεγιστοποιεί τη χρήση της TLs. Μία προσέγγιση απασχολεί πολλές εικονικές ουρές εξόδου για την αποφυγή head-of-line blocking και τη μακρύτερη-πρώτη ουρά (longest-first queuing) του συστήματος ή οποιουδήποτε άλλου είδους σοφιστικό σενάριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθοριστεί η σειρά, στην οποία να εξυπηρετούνται οι ουρές. Χρειάζεται κατάλληλη εποπτεία, ώστε να αποκλειστεί το ενδεχόμενο δύο TLs να έχουν πρόσβαση στην ίδια ουρά ταυτόχρονα, εφόσον κάθε ουρά μπορεί να εξυπηρετείται από πολλές TLs. Αυτή η προσέγγιση αποφεύγει την εγγενή σύγκρουση, αλλά περιορίζει την επεκτασιμότητα για μεγάλο αριθμό χρηστών. Μια άλλη προσέγγιση απασχολεί την ουρά στους πομπούς. Τα εισερχόμενα πακέτα αποδίδονται στον πομπό με τη μικρότερη ουρά, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η καθυστέρηση. Για να διασφαλισθεί ότι δεν υπάρχουν δύο πακέτα κεφαλής στον ίδιο τελικό χρήστη αλληλεπικαλυπτόμενα σε διάφορες ουρές, ο προγραμματιστής μπορεί να παρακολουθεί τους προορισμούς του τελευταίου πακέτου στις ουρές και να αποδώσει το εισερχόμενο πακέτο στην TL ουρά, αν έχουν τον ίδιο προορισμό. Ποιότητα υπηρεσίας (QoS) μπορεί να επιτευχθεί, θέτοντας προτεραιότητες των πακέτων όταν τα αναθέτουμε στις ουρές. Τα σημαντικά χαρακτηριστικά των αρχιτεκτονικών συνοψίζονται και συγκρίνονται στον πίνακα 1.



	CPON [33]	LARNET [36]	RITENET [37]	Multi-Stage [39]	Super-PON [42]	Success-DWA [43]
Main Objective of architecture	AWG based basic system	Reduce ONU Cost	Reduce ONU Cost	Scalable PON Wide-area service	Long-distance Wide-area service	Scalable PON Throughput increment
Sharing of Fiber	Up/down shared or separate	Up/down shared	Up/down separate	Dependent on upstream option	Up/down shared	Up/down shared
Sharing of Wave-length	down	1 λ/ONU	1 λ/ONU	Dependent on upstream option	Share (TDMA)	- Shared among ONUs - Up/down shared (TDMA, dynamic allocation)
	up	Shared (TDMA)	Shared (TDMA, CSMA/CD)		Share (TDMA)	
Scalability	Poor	Poor	Poor	Good	Good	Excellent
Cost of user terminal (ONU)	Poor (DFB LD)	Good (LED)	Good	Dependent on upstream option	Poor	Poor
Cost of deployment	Good	Good	Poor	Very poor	Good	Poor
Distance (OLT-ONU)	Average	Poor	Very poor	Average	Excellent (~100 Km)	Average

Πίνακας 1 Σύγκριση των ποικίλων αρχιτεκτονικών WDM-PON [5]

#### 6.4 Πρωτόκολλα

Σε ένα WDM-PON, μία από τις σημαντικές λειτουργίες για την υψηλή απόδοση και υψηλή λειτουργικότητά του είναι ο ευφυής έλεγχος, συμπεριλαμβανομένης της παροχής υπηρεσιών σε επίπεδο συμφωνιών (Service Level Agreements SLAs). Ο ευφυής έλεγχος ενεργεί την κατανομή των πόρων μεταξύ των χρηστών, τον έλεγχο ποιότητας υπηρεσίας μεταξύ πολλών υπηρεσιών και των χρηστών, τον έλεγχο σύνδεσης, συμπεριλαμβανομένων multicasting, καθώς και το δικαίωμα πρόσβασης για την ασφαλή πρόσβαση και τον έλεγχο της βλάβης ή λαθών. Πρόσφατες μελέτες, σχετικά με τα πρωτόκολλα ελέγχου για WDM-PON, έχουν αρχίσει, πρωτόκολλα διαχείρισης του μήκους κύματος, ή του εύρους ζώνης έχουν προταθεί ως το πρώτο βήμα.

Εάν κάθε κανάλι του WDM-PON εργάζεται ανεξάρτητα από τα άλλα, τότε το σύστημα δεν χρειάζεται ένα συμπληρωματικό έλεγχο μεσαίας πρόσβασης (medium-access control MAC) πρωτοκόλλου. Αν ένα μήκος κύματος έχει ανατεθεί για μια ομάδα EPON, τότε μόνο το πρωτόκολλο MAC του συστήματος EPON χρησιμοποιείται, δεδομένου ότι αυτό το μήκος κύματος δεν έχει αλληλεπίδραση με άλλα κανάλια. Αυτή είναι μια απλή και πρακτική προσέγγιση στο αρχικό στάδιο της WDM-PON εφαρμογής, αυτή η ιδιότητα πρωτόκολλο διαφάνειας θεωρείται ως ένα από τα προτερήματα του WDM-PON. Αλλά αυτό το σύστημα μπορεί να μην χρησιμοποιήσει το εύρος ζώνης αποδοτικά, ειδικά όταν μερικά μήκη κύματος είναι υπερφορτωμένα, ενώ άλλα έχουν ένα χαμηλό φορτίο. Αν μήκη κύματος



διαμοιράζονται μεταξύ των ONUs, τότε η συνολική απόδοση μπορεί να αυξηθεί σημαντικά. Για τον σκοπό αυτό, ένα νέο πρωτόκολλο ελέγχου μήκους κύματος, ή WDM-PON πρωτόκολλο, το οποίο βοηθά να εγκαθιδρυθεί η επικοινωνία μεταξύ των OLT και των ONUs, είναι αναγκαίο. Θα ελέγχει τα συντονισμένα LDs και WDM φίλτρα. Εκτός από το βασικό πρωτόκολλο επικοινωνίας, ένας νέος αλγόριθμος δυναμικής ανάθεσης εύρους ζώνης (DBA), που αποδίδει όχι μόνο χρονοθυρίδες, αλλά και μήκος κύματος σε κάθε OLT και ONU είναι επίσης αναγκαίος. Τα πρωτόκολλα και οι αλγόριθμοι για το WDM-PON βρίσκονται σε στάδιο αρχικής μελέτης, επειδή εξαρτώνται από την αρχιτεκτονική, η οποία και αυτή βρίσκεται ακόμα σε πρώιμη φάση της μελέτης. Δύο παραδείγματα σχετικά με ζητήματα πρωτοκόλλου περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω.

#### *6.4.1 MPCP προσθήκη και WDM IPACT*

Το πρωτόκολλο ελέγχου πολλαπλών σημείων (Multiple Point Control Protocol MPCP) είναι το βασικό πρωτόκολλο MAC, που εγκρίθηκε στο EPON, το οποίο αναθέτει χρονοθυρίδες για upstream μετάδοση κάθε ONU. Η επέκταση MPCP που προτάθηκε για την αναβάθμιση EPON σε WDM-PON, αποδίδει όχι μόνο χρονοθυρίδες αλλά και μήκη κύματος σε ένα σύστημα WDM PON [5,4 Προϋποθέτει μια παράταξη σταθερών λέιζερ ή δεκτών στην OLT και είτε μια σειρά από σταθερά λέιζερ ή δέκτες είτε ένα ή περισσότερα συντονισμένα λέιζερ ή δέκτες στην ONU. Κατά τη διάρκεια της ανακάλυψης και τη διαδικασία εγγραφής, η OLT λαμβάνει πληροφορίες για κάθε ONU του πομπού ή κάθε τύπο δέκτη (συντονισμένο ή σταθερό), τον χρόνο συντονισμού-ρύθμισης και τα μήκη κύματος, χρησιμοποιώντας ένα «REGISTER\_REQUEST μήνυμα [5,48]. Με την παραλαβή του upstream μηνύματος, το OLT θα μπορούσε να παρακολουθεί την χρήση κάθε μήκους κύματος και να χρησιμοποιήσει αυτές τις πληροφορίες για τη λήψη απόφασης για κάθε αλλαγή μήκους κύματος-ανάθεση. Η πληροφορία μήκους κύματος-ανάθεσης μεταφέρεται στο μήνυμα "GATE". Το μήνυμα "receiver-configuration" έχει σταλεί από την OLT σε κάθε ONU, ώστε να αναδιαμορφωθεί το φίλτρο των ONUs. Το μήνυμα "receiver-configuration acknowledge" στέλνεται από κάθε ONU στην OLT. Ο ειδικός αλγόριθμος, που χρησιμοποιεί αποτελεσματικά μήκη κύματος στη διαδικασία αυτή, ονομάζεται WDM-IPACT, που είναι η WDM αναβάθμιση του IPACT, μίας από τις αρχικές προτάσεις για ένα πρωτόκολλο DBA στα EPONs [5,49].



#### 6.4.2 WDM-PON DBA πρωτόκολλο για SUCCESS αρχιτεκτονική

Η SUCCESS-DWA PON αρχιτεκτονική χρησιμοποιεί συντονισμένα λέιζερ στην OLT και ένα φίλτρο σε κάθε ONU, έτσι ώστε κάθε OLT να μπορεί να καταλήξει σε οποιαδήποτε ONU [5,47]. Κάθε συντονισμένο λέιζερ έχει προγραμματιστεί να επικοινωνεί με διάφορες ONUs, διασκορπισμένες σε διάφορες ομάδες ONU με άλμα μήκους κύματός της. Ένα WDM-PON DBA προτείνεται [5,50] για τον σκοπό αυτό, γεγονός που αυξάνει την απόδοση του δικτύου μας με την εξεύρεση κατάλληλου μήκους κύματος για κάθε κίνηση. Τα εισερχόμενα σήματα του backbone δικτύου χωρίζονται σε υψηλής προτεραιότητας (high Priority HP) και καλύτερης απόδοσης (Best Effort BE) κίνησης και στη συνέχεια παρέχονται στις δικές τους ουρές εξόδου, αντίστοιχα, που θα εκχωρηθούν στα κατάλληλα συντονισμένα λέιζερ. Μια δομή, όπου η κίνηση HP παρέχεται άμεσα στον προγραμματιστή μήκους κύματος, ενώ η BE κίνηση αποθηκεύεται χρονικά και παροδικά στο buffer για την εκχώρηση, προτείνεται για καλύτερη απόδοση. Στο πακέτο HP δίνεται προτεραιότητα στην εξεύρεση κατάλληλων συντονισμένων LDs, και στη συνέχεια η BE κίνηση εξάγεται από την ουρά του, όταν δεν υπάρχει εισερχόμενο πακέτο HP.

#### 6.5 Υπηρεσίες

Η σύγκλιση φωνής, δεδομένων και βίντεο σε ένα ενιαίο WDM-PON αναμένεται να μειώσει το κόστος και επίσης προάγει τη δημιουργία νέων υπηρεσιών. Το σχήμα 6.14 παρουσιάζει μια συνοπτική εξέλιξη (οδικός χάρτης) ενός ευρυζωνικού δικτύου πολλαπλών υπηρεσιών. Από την άποψη των υπηρεσιών, κατ' αρχάς υπήρξε ένα μεγάλο κύμα του Διαδικτύου, που ακολουθείται από Voice over IP (VoIP) και Virtual Private Network (VPN). Οι υπηρεσίες αυτές απαιτούν ταχεία αύξηση του εύρους ζώνης, QoS για τα πολυμέσα, και την υψηλή διαθεσιμότητα των πόρων του δικτύου. Τεχνολογίες δικτύωσης, όπως η μηχανική κίνησης και υψηλής διαθεσιμότητας μονοπάτι προστασίας, DiffServ, καθώς και πολλαπλών υπηρεσιών αναπτύχθηκαν.

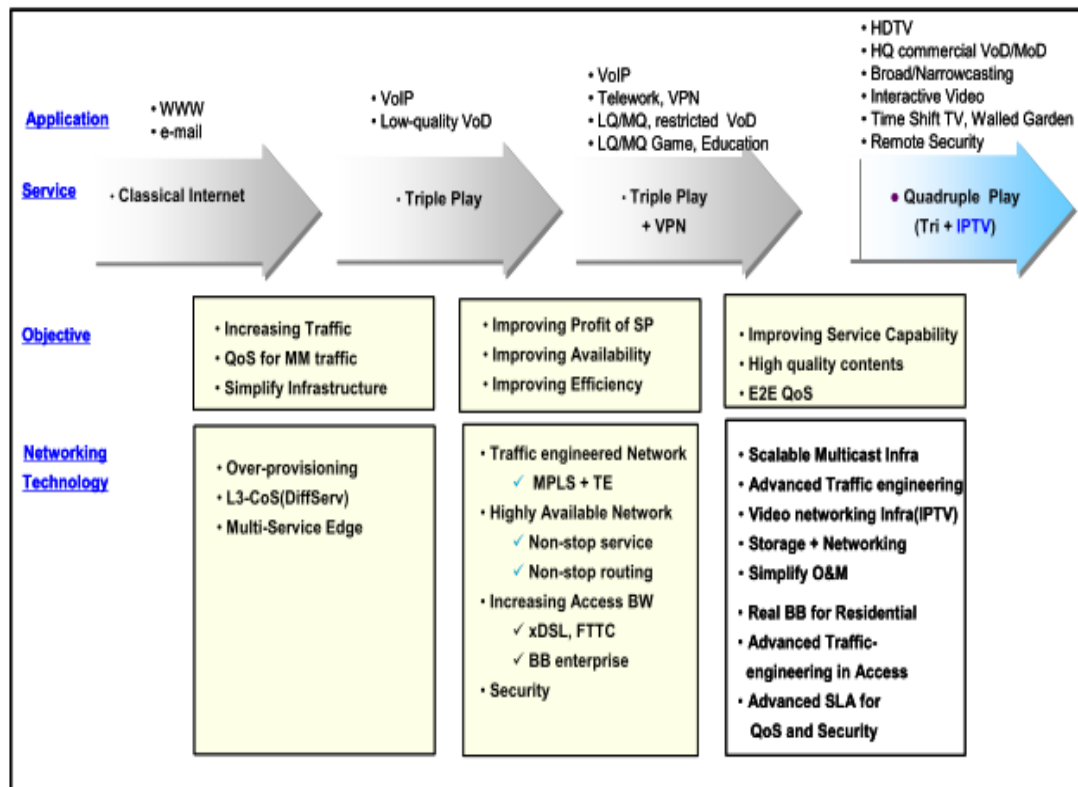
Η επόμενη γενιά υπηρεσιών αναμένεται να είναι η σύγκλιση του web και της τηλεόρασης. Θα υπάρξει ενσωμάτωση της επικοινωνίας και της μετάδοσης στο διαδίκτυο, καθώς και του προσωπικού υπολογιστή και της τηλεόρασης μέσα στον ίδιο εξοπλισμό του χρήστη. Μια υπηρεσία ραδιοτηλεοπτικών εκπομπών, όπως της καλωδιακής τηλεόρασης, μπορεί να ενσωματωθεί με βάση το Διαδίκτυο υπηρεσιών. Η ζήτηση για πολυεκπομπή με υψηλή ποιότητα και εξειδικευμένο περιεχόμενο αναμένεται επίσης να αυξηθεί. Πολλές εφαρμογές προστιθέμενης αξίας, όπως η υψηλής ποιότητας on-demand υπηρεσίες βίντεο, time-shifted





τηλεοπτικές υπηρεσίες, και δικτυακή πύλη τηλεόρασης (Walled Garden) μπορεί να δημιουργηθούν μέσω αυτής της ολοκλήρωσης. Αυτό θα προωθήσει και θα εναρμονίσει την έννοια του Digital Home.

Οι νέες αυτές υπηρεσίες θα απαιτούν αξιοπιστία, ασφάλεια, να είναι οικονομικές, και άφθονο (πιθανώς συμμετρικό) εύρος ζώνης. Ως εκ τούτου, για το δίκτυο κορμού επεκτασιμότητα του multicasting, προηγμένη κίνηση, middleware βίντεο δικτύωσης και αποθηκευτικός χώρος δικτύωσης είναι τεχνολογίες που απαιτούνται. Ομοίως, τα μελλοντικά δίκτυα πρόσβασης θα πρέπει να είναι εξοπλισμένα με την ικανότητα της τροφοδότησης ευέλικτου εύρους και των πολυμέσων multicast, με αμφίδρομη συμμετρία, γρήγορο χρόνο απόκρισης, αξιοπιστία και ασφάλεια και QoS. SLA για προσαρμοσμένα QoS και ασφάλειας είναι μια άλλη σημαντική απαίτηση. Μέχρι πρόσφατα, τα θέματα αυτά αντιμετωπιζονταν κυρίως σε δίκτυα κορμού. Ωστόσο, η άφιξη της πραγματικής σύγκλισης δίνει τη δυνατότητα πρόσβασης σε αυτές τις υπηρεσίες και το WDM-PON μπορεί να είναι η πιο ανταγωνιστική τεχνολογία πρόσβασης.



Σχήμα 6.14 Συνοπτική εξέλιξη ευρυζωνικού δικτύου πολλαπλών υπηρεσιών [5]





Ο πίνακας 2 δείχνει ένα παράδειγμα των ευρυζωνικών απαιτήσεων πρόσβασης για ένα συνηθισμένο πελάτη WDM-PON. Ένας τέτοιος πελάτης μπορεί να έχει τρεις τερματικούς σταθμούς βίντεο στο σπίτι και η οικογένεια να απαρτίζεται από τέσσερα μέλη, κατά μέσον όρο. Το δίκτυο θα μπορούσε να έχει μεγάλο φόρτο ορισμένες φορές, π.χ., 20:00-22:00 Σε ένα τυπικό σενάριο, ο πατέρας παρακολουθεί ένα αθλητικό HDTV κανάλι, όπως το ποδόσφαιρο, η μητέρα μιλάει μέσω βιντεοτηλεφώνου, η κόρη παρακολουθεί διαδραστικό μάθημα εκπαίδευσης και ο γιος παίζει ένα on-line παιχνίδι για πολλούς παίκτες. Το ελάχιστο downstream εύρος ζώνης, που απαιτείται στο δίκτυο πρόσβασης για μια τέτοια οικογένεια, θα είναι 70 Mbit/s. Επιπλέον, το ελάχιστο upstream εύρος ζώνης θα πρέπει να είναι περίπου 30% του downstream εύρους ζώνης. Επίσης, QoS χαρακτηριστικά για υπηρεσίες πολυμέσων, όπως η καθυστέρηση, jitter, και η απώλεια πρέπει να εξασφαλίζεται και η διαθεσιμότητα των 99,95 - 99,999%, θα πρέπει να είναι εξασφαλισμένη. Επιπλέον, γρήγορος χρόνος απόκρισης απαιτείται. Π.χ., το κανάλι-zapping φορά πρέπει να είναι παρόμοιο με CATV κατά τη διάρκεια ωρών αιχμής. Από την οπτική γωνία του παροχέα υπηρεσιών, το αποτελεσματικό multicast και χρησιμοποίηση εύρους ζώνης πρέπει να είναι δυνατή. Το διαθέσιμο εύρος ζώνης θα πρέπει να κατανεμηθεί δίκαια μεταξύ όλων των πελατών, διασφαλίζοντας ταυτόχρονα τη σύμβαση SLA.

Features	Requirements
Bandwidth (bps)	<ul style="list-style-type: none"><li>• BW / Subscriber</li><li>- Down: 3 x 20M(HDTV, MPEG-2) + <math>\alpha</math> = <b>70M~80M</b></li><li>- Up: 30% of Down = 20M</li></ul>
QoS guarantee for Multimedia traffic	<ul style="list-style-type: none"><li>• Real-time Voice/Video</li><li>- Latency, Jitter, Loss</li><li>- Converged user equipment</li></ul>
Security	<ul style="list-style-type: none"><li>• Authorization, authentication</li><li>• data confidentiality</li></ul>
Efficient Multicast	<ul style="list-style-type: none"><li>• Internet Group Management Protocol v3</li><li>• Efficient multicasting channel</li></ul>
Availability	<ul style="list-style-type: none"><li>• 99.95 ~ 99.999%</li></ul>
Response time	<ul style="list-style-type: none"><li>• Ex: Zapping time similar to CATV in busy hour</li><li>• Less than ~ms for remote security</li></ul>
Efficient BW utilization	<ul style="list-style-type: none"><li>• Available bandwidth should be fairly shared between customers</li></ul>

Πίνακας 2 [5]



## **7. Οπτικά ενισχυμένα PON**

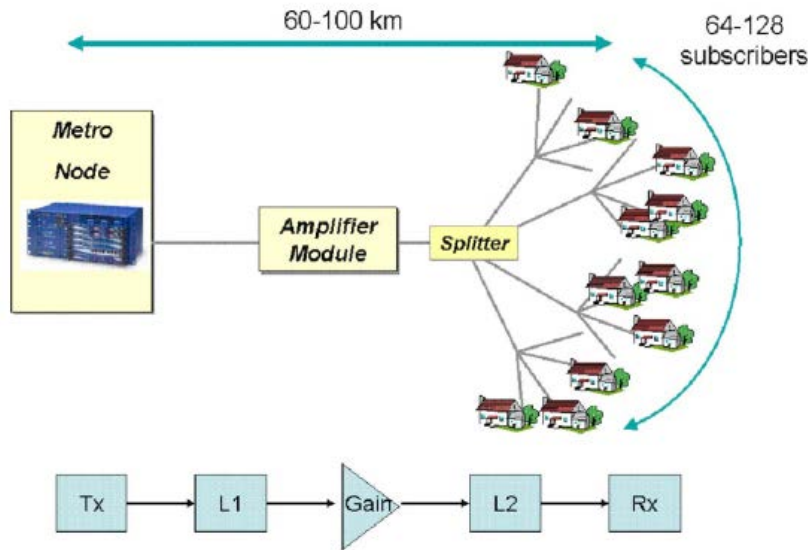
Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο σχετικά με τις απαιτήσεις χωρητικότητας, τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί απότομη αύξηση της ζήτησης για υψηλής ταχύτητας πρόσβαση σε λύσεις τόσο για τις επιχειρήσεις όσο και στην χρήση στο σπίτι. Μελλοντικά σενάρια υπηρεσιών προβλέπουν ότι η αύξηση της κίνησης θα είναι άνω του 50% ανά έτος [5,51] και θα απαιτηθεί η μείωση του κόστους στην τιμή ανά εύρος ζώνης. Μια βιώσιμη λύση είναι η μείωση του αριθμού και των εξοπλισμών (διεπαφές μεταξύ των κόμβων), στο πλαίσιο του δικτύου. Κατά συνέπεια, υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον για την πρόσβαση σε λύσεις με βάση τα παθητικά οπτικά δίκτυα (PONs) [5,51,52]. Κεντρικό ρόλο σε αυτό, ιδίως για PONs που μπορεί να καλύπτουν αποστάσεις από 100 χλμ. ή και περισσότερο, είναι η ανάγκη για ενισχυτές με τεχνολογία χαμηλού κόστους χαμηλής ισχύος. Οι οπτικοί ενισχυτές ημιαγωγών (SOAs) θα παίξουν σημαντικό ρόλο στο πλαίσιο αυτό, δεδομένου μάλιστα ότι η upstream κίνηση μπορεί να τοποθετηθεί σε 1,3 m, όπου ανταγωνίζονται τις τεχνολογίες των ενισχυτών βασισμένων σε γυαλί, όπου δεν είναι αποτελεσματικοί [5,53-56].

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια προσπάθεια τόσο πειραματικής όσο και θεωρητικής αξιολόγησης των μακρινών εκτεταμένων PONs, συμπεριλαμβανομένων SOAs. Σε αυτή την ανάλυση λήφθηκε υπόψη η επίδραση της αυθόρμητης εκπομπής ενισχυτή (Amplified Spontaneous Emission ASE). Το ASE, συνήθως μοντελοποιείται ως πηγή θορύβου Ωστόσο, στην περίπτωση των PONs, γίνεται περιορισμένο οπτικό φιλτράρισμα (το πλάτος του φίλτρου μπορεί να είναι 20 nm ή ακόμη και 40 nm), το οποίο δεν επαρκεί. Με περιορισμένα οπτικά φίλτρα στα ενισχυμένα συστήματα, η ισχύς ASE μπορεί να κάνει υψηλή την ισχύ του σήματος και, κατά συνέπεια, εισάγει ένα αντιστάθμισμα, που μπορεί να παρομοιαστεί με την απώλεια του δείκτη απόσβεσης (ER). Η επίδραση αυτή δεν περιλαμβάνεται συνήθως στο μοντέλο του συστήματος. Η παράλειψη αυτή μπορεί να οδηγήσει σε σφάλματα στην μοντελοποίηση των επιδόσεων των 5 dB ή περισσότερο.

### **7.1 Εισαγωγή**

Ένα σχηματικό ενός PON παρουσιάζεται στο σχήμα 7.1, το οποίο είναι ένα δίκτυο, αποτελούμενο από ένα μονοπάτι μετάδοσης και από ένα διαιρέτη, που

συνδέει τους χρήστες στο δίκτυο πυρήνα. Σε γενικές γραμμές, τα PONs έχουν



Σχήμα 7.1 Απλοποιημένο δίκτυο PON [63]

σχεδιαστεί για 20 km απώλειας κορμού και 32-τρόπο χρήστες απώλεια διάσπασης. Ωστόσο, σε πολλές περιπτώσεις η απώλεια του κορμού μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερη, καθώς, το ότι ο αριθμός των χρηστών του δικτύου είναι μεγαλύτερος από τον επιθυμητό, οδηγεί σε αυξημένη απώλεια (splitter). Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την ενίσχυση του σήματος, χρησιμοποιώντας ενισχυτές στο κατάλληλο στάδιο στο πλαίσιο της αρχιτεκτονικής. Η ενίσχυση πρέπει να είναι αμφίδρομη και συνεπώς οπτικές ίνες, βασισμένες σε ενισχυτικές λύσεις περιορισμένες για το backhaul (τελικός χρήστης σε κεντρικό δίκτυο), δεδομένου ότι εφαρμόζεται κατά κανόνα στα 1300 nm.

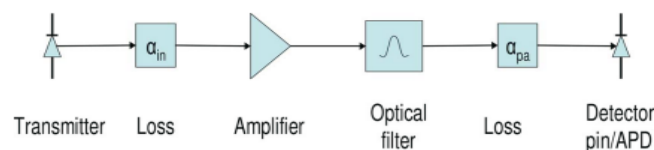
Η βέλτιστη θέση για έναν ενισχυτή σε ένα PON είναι στο σημείο εξισορρόπησης μεταξύ της απώλειας διάσπασης και της απώλειας της ίνας κορμού. Ο ενισχυτής μπορεί να χαρακτηριστεί ως ενισχυτής ισχύος, ενισχυτής γραμμής, ή προενισχυτής αμέσως πριν από ένα δέκτη. Στις περισσότερες περιπτώσεις, ο ενισχυτής είναι ιδανικά τοποθετημένος πριν από τον splitter, αλλά αυτό δεν είναι πάντα εφικτό, ανάλογα με τη διαθεσιμότητα των πηγών ενέργειας σε αυτό το σημείο. Η λειτουργία του PON μπορεί εύκολα να αναλυθεί με βάση το τυπικό γραμμικά μοντελοποιημένο σήμα, έτσι ώστε η επίδραση της θέσης του ενισχυτή μπορεί να συσχετιστεί με τον προϋπολογισμό ισχύος του συστήματος, για ένα δεδομένο ποσοστό σφάλματος bit (BER). Μέχρι σήμερα, τα πειραματικά αποτελέσματα που έχουν αναφερθεί από αυτό το είδος ανάλυσης, έχουν περιοριστεί σε pin δέκτες [5,53]. Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί μια γενική χρησιμοποίηση, που θεωρεί



δέκτες βασιζόμενους σε pin και φωτοδιόδους χιονοστιβάδας (APDs). Η τελευταία χρησιμοποιείται συνήθως για τη βελτίωση της ισχύος στο δέκτη στα PONs. Επιπλέον, το κέρδος γραμμικών χαρακτηριστικών του SOA αντισταθμίζεται, συμπεριλαμβανομένου του γεγονότος ότι το κέρδος εξαρτάται από την ισχύ εισόδου και από τη βασική αρχή του κορεσμού. Επιπλέον, δεδομένου ότι τα PONs εμπεριέχουν φίλτρα (οπτικά φίλτρα των 20 nm είναι τα πιο κοινά), η επίδραση της ASE από τον ενισχυτή πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη. Συχνά, αυτή η επίδραση της ASE αντικατοπτρίζει το θόρυβο στο δέκτη. Ωστόσο, εκτός από τη συνεισφορά του θορύβου από την ASE, ως αποτέλεσμα του περιορισμένου φιλτραρίσματος, η αυθόρμητη εκπομπή ηλεκτρονίων (ASE), η οποία η ίδια αποτελεί σημαντικό επίπεδο ενέργειας στη μετάδοση του «μηδέν», στην πραγματικότητα υποβαθμίζει το συνολικό σύστημα και ονομάζεται δείκτης απόσβεσης ή λόγος διαγραφής (extinction ratio ER). Έτσι, ο λόγος διαγραφής ER έχει αντίκτυπο στην απόδοση του δικτύου, συνεπώς πρέπει να ληφθεί υπόψη στο μοντέλο ανάπτυξης ενός δικτύου.

Τα στοιχεία ενός δικτύου PON, που πρέπει να αναλυθούν και να μελετηθούν σε κάθε τέτοιο δίκτυο, είναι τα ακόλουθα, όπως φαίνονται και στο σχήμα 7.2:

- α) ο πομπός, η ισχύς και ο δείκτης απόσβεσης ( ER)
- β) η απώλεια πριν από τον ενισχυτή (απώλεια ίνας κορμού), το κέρδος των ενισχυτών, το  $P_{sat}$  και το σχήμα θορύβου (NF)
- γ) το postamplification φιλτράρισμα
- δ) η postamplification απώλεια (splitter και απώλεια ίνας κορμού)
- ε) οι επιδόσεις δέκτη, οι πηγές θορύβου, συμπεριλαμβανομένης της εξάρτησης του κέρδους από χιονοστιβάδα
- στ) επιρροή του ASE σχετικά με τα μηδενικά στο εσωτερικό της μετάδοσης (υποβάθμιση της ER).



Σχήμα 7.2 [63]



Δεδομένου ότι οι τιμές των δεδομένων για PONs δίκτυα είναι εν γένει σχετικά χαμηλά (< 2,5 Gbits/s), η επίδραση της διασποράς δεν έχει περιληφθεί. Η αναλογία του σήματος προς το θόρυβο (SNR) στο δέκτη καθορίζει τη συνολική απόδοση του συστήματος:

$$SNR = \frac{\text{average signal power}}{\text{noise power}} = \frac{I_p^2}{\sigma_{TOT}^2} \quad (1)$$

Η ισχύς σήματος  $I_p$  είναι ανάλογη με την αποκρισιμότητα της δίοδου  $R$  και της ισχύος του σήματος, όπου  $P_{REC}$  είναι η ισχύς σήματος στο δέκτη. Ο όρος θόρυβος  $\sigma_{TOT}^2$  αντιπροσωπεύει τη συνολική ισχύ θορύβου, τόσο για το "1" και το "0" σε περίπτωση μετάδοσης.

### 7.2 Ρυθμός εμφάνισης εσφαλμένων-bit [1]

Στην υποενότητα αυτή γίνεται μια αναφορά σχετικά με το ρυθμό εσφαλμένων bit ώστε να υπάρξει μια ολοκληρωμένη εικόνα για το πώς μετρείται η απόδοση του δέκτη καθώς και η απόδοση του συστήματος.

Ρυθμός εσφαλμένων bit, ορίζεται σαν η πιθανότητα εσφαλμένης αναγνώρισης ενός bit από το κύκλωμα απόφασης του δέκτη. Στο σχήμα 7.3(a) παρουσιάζονται σχηματικά οι διακυμάνσεις του σήματος, που λαμβάνονται από το κύκλωμα απόφασης, το οποίο υφίστανται δειγματοληψία στον χρόνο απόφασης  $t_D$ , που καθορίζεται μέσω της ανάκτησης των παλμών χρονισμού. Η δειγματοληπτική τιμή  $I$  μεταβάλλεται από bit σε bit με μέση τιμή  $I_1$  ή  $I_0$ , ανάλογα με το αν το bit αντιστοιχεί στο 1 ή στο 0 της αλληλουχίας των bit. Το κύκλωμα απόφασης συγκρίνει τις τιμές αυτές με μια τιμή κατωφλίου  $I_D$  και το ονομάζει bit 1 αν  $I > I_D$  ή bit 0 αν  $I < I_D$ . Σφάλμα εμφανίζεται αν  $I < I_D$  για bit 1 λόγω του θορύβου του δέκτη. Επίσης, σφάλμα εμφανίζεται και αν  $I > I_D$  για bit 0. Η πιθανότητα σφάλματος μπορεί να οριστεί ως εξής [1]:

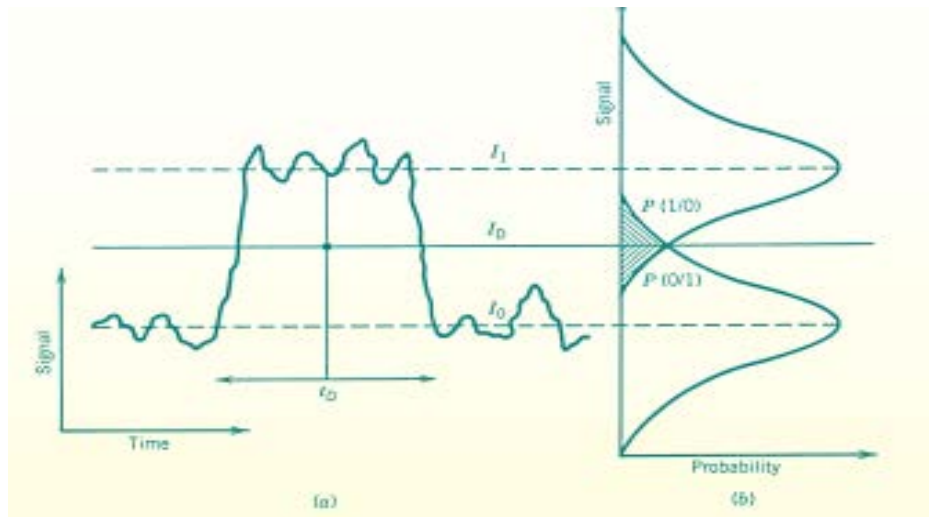
$$BER = \rho(1)P(0/1) + \rho(0)P(1/0) \quad (\alpha)$$

όπου  $\rho(1)$  και  $\rho(0)$  είναι η πιθανότητα λήψης 1 και 0 αντίστοιχα,  $P(0/1)$  είναι η πιθανότητα απόφασης 0 όταν λαμβάνεται 1 και  $P(1/0)$  είναι η πιθανότητα απόφασης 1 όταν λαμβάνεται 0. Επειδή τα bit 1 και 0 έχουν τις ίδιες πιθανότητες εμφάνισης,  $\rho(1) = \rho(0) = 1/2$  τότε το BER γίνεται:

$$BER = 1/2[P(0/1) + P(1/0)] \quad (\beta)$$



Στο σχήμα 7.3(β) φαίνεται πως οι  $P(0/1)$  και  $P(1/0)$  εξαρτώνται από τη συνάρτηση της πυκνότητας της πιθανότητας  $p(I)$  της τιμής δειγματοληψίας  $I$ . Ο συναρτησιακός τύπος της  $p(I)$  εξαρτάται από τη στατιστική της πηγής θορύβου, που ευθύνεται για τις διακυμάνσεις του ρεύματος. Ο θερμικός θόρυβος περιγράφεται από την Γκαουσιανή στατιστική με μέσο όρο μηδέν και διακύμανση  $\sigma_T^2$ . Μια συνηθισμένη προσέγγιση, ο θόρυβος βολής θεωρείται σαν τυχαία Γκαουσιανή μεταβλητή και για τους δέκτες  $p$ - $i$ - $n$  και APD (με διαφορετική διακύμανση  $\sigma_s^2$ ). Το άθροισμα των δύο τυχαίων Γκαουσιανών μεταβλητών είναι μια τυχαία Γκαουσιανή μεταβλητή, η τιμή δειγματοληψίας  $I$  έχει συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας με διακύμανση  $\sigma^2 = \sigma_s^2 + \sigma_T^2$



Σχήμα 7.3 [1]

Η μέση τιμή και η διακύμανση διαφέρουν για τα bit 1 και 0. Αν  $\sigma_1^2$  και  $\sigma_0^2$  είναι οι αντίστοιχες διακυμάνσεις, οι πιθανότητες συνθήκης δίνονται από τις σχέσεις:

$$P(0/1) = \frac{1}{\sigma_1\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{I_D} \exp\left(-\frac{(I-I_1)^2}{2\sigma_1^2}\right) dI = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{I_1-I_D}{\sigma_1\sqrt{2}}\right) \quad (\gamma)$$

$$P(0/0) = \frac{1}{\sigma_0\sqrt{2\pi}} \int_{I_D}^{\infty} \exp\left(-\frac{(I-I_0)^2}{2\sigma_0^2}\right) dI = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{I_D-I_0}{\sigma_0\sqrt{2}}\right) \quad (\delta)$$

Αντικαθιστώντας τις δυο αυτές εξισώσεις στην εξίσωση (β), το BER μορφοποιείται ως εξής:

$$BER = \frac{1}{4} \left[ \operatorname{erfc}\left(\frac{I_1-I_D}{\sigma_1\sqrt{2}}\right) + \operatorname{erfc}\left(\frac{I_D-I_0}{\sigma_0\sqrt{2}}\right) \right] \quad (\epsilon)$$



Η εξίσωση αυτή μας δείχνει ότι ο BER εξαρτάται από το κατώφλι απόφασης  $I_D$ . Η ελάχιστη τιμή εμφανίζεται όταν επιλέξουμε το  $I_D$  έτσι ώστε

$$\left(\frac{I_1 - I_D}{\sigma_1}\right) = \left(\frac{I_D - I_0}{\sigma_0}\right) \equiv Q \quad (\sigma\tau)$$

ή

$$I_D = \frac{\sigma_0 I_1 + \sigma_1 I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (\zeta)$$

Τελικός μπορούμε να πάρουμε το BER με την βέλτιστη θέση του κατωφλίου απόφασης από τις εξισώσεις (στ) και (ε) ως εξής:

$$BER = 0.5 \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \quad (\eta)$$

### 7.3 Μη ενισχυμένα δίκτυα

Είναι σκόπιμο να αξιολογηθεί η ισχύς του προϋπολογισμού του δικτύου για την υπόθεση χωρίς οπτική ενίσχυση. Σε αυτό το σενάριο, το διάγραμμα του Σχήματος 7.2 απλοποιεί την περίπτωση, όπου υπάρχει μόνο ένας πομπός, απώλεια καναλιού και δέκτης. Για την περίπτωση ενός δέκτη PIN, το SNR είναι

$$SNR = \frac{I_p^2}{\sigma_{TOT}^2} = \frac{R^2 P_{rec}^2}{2q(RP_{rec} + I_D)B + 4\left(\frac{kT}{R_L}\right)F_N B} \quad (2)$$

Ο πρώτος όρος στον παρονομαστή περιγράφει το θόρυβο βολής με συνδυασμό την ισχύ του σήματος,  $P_{rec}$ , και ρεύμα σκότους της διόδου  $I_D$ ,  $q$  είναι φορτίο ηλεκτρονίου και  $B$  είναι το εύρος ζώνης δέκτη (2,5 GHz). Ο δεύτερος όρος του παρονομαστή περιγράφει τη θερμική συνεισφορά του θορύβου, όπου  $k$  σταθερά Boltzmann  $1.38 \times 10^{-23}$  JK<sup>-1</sup>,  $T$  είναι η θερμοκρασία θορύβου (300 K), και  $R_L$  είναι η αντίσταση εισόδου. Η συνεισφορά του θορύβου από τον ενισχυτή εκφράζεται μέσω του όρου: παράγοντας θορύβου  $F_N$ . Ο θερμικός θόρυβος και το ρεύμα σκότους δεν παρουσιάζουν ενδιαφέρον, δεδομένου ότι έχουν ελάχιστη συμβολή στο συνολικό θόρυβο. Η επίδοση αυτή είναι το σημείο αναφοράς, με το οποίο θα αξιολογήσει την επίδραση του οπτικού ενισχυτή. Η εξίσωση (2) μπορεί να ξαναγραφεί ως

$$SNR = \frac{I_p^2}{\sigma_{TOT}^2} = \frac{R^2 P_{rec}^2}{2q(RP_{rec})B + i_N^2} \quad (3)$$





όπου  $i_N^2$  είναι ο τρέχον θόρυβος και συνδέεται με όλα τα ηλεκτρικά, που δημιουργούν θόρυβο, προσφέροντας έτσι ένα βολικό μηχανισμό για την αντιμετώπιση-υπολογισμό της θερμικής συνεισφοράς του θορύβου για διάφορους τύπους δεκτών. Στην παρούσα ανάλυση μια προδιαγραφή του δέκτη -24,5 dBm για BER των  $10^{-9}$  χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς.

Το SNR μπορεί να συνδέεται με το BER με

$$BER = 0.5 \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \quad (4)$$

όπου Q, που αναφέρεται ως η Q-παράγοντας, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (στ) και (ζ) και δίνεται από την σχέση:

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (5)$$

ή  $Q^2 = \text{SNR}$ , όπως εκφράζεται στην εξίσωση (1).

Ως εκ τούτου,  $i_N^2$  μπορεί να ρυθμιστεί για να παρέχει μια συγκριτική αξιολόγηση των επιδόσεων, χωρίς λεπτομερή γνώση του σχεδιασμού δέκτη μέσω προδιαγραφής απόδοσης όσον αφορά το BER και του εύρους ζώνης δεδομένων. Τυπικοί δέκτες PIN για PON ή χονδροειδείς Wavelength Division Multiplexing (CWDM) εφαρμογές έχουν ευαισθησίες μεταξύ -22 και -25 dBm σε εύρος ζώνης δέκτη της τάξεως του 2,5 Gbits / s και BER του  $10^{-10}$  (που ισοδυναμεί με  $Q^2 = 40$ ) [5,57]  $i_N^2$  και ως εκ τούτου, η θερμική συνεισφορά του θορύβου μπορεί να εκτιμηθεί από αυτό το σχεδιασμό και χρησιμοποιείται σε μεταγενέστερη ανάλυση. Πέρα από αυτό, ο λόγος διαγραφής ER του πομπού εκφράζεται ως εξής. Για τον καθορισμό του νέου ER, ως ο λόγος των ισχύων( λόγος διαγραφής) του 1 και 0,  $r_e = P_1 / P_0$ , εάν η μέση ισχύς μιας διαβίβασης είναι  $P_{ave} = (P_1 + P_0) / 2$ , τότε μπορούν να καθοριστούν περαιτέρω

$$P_0 = 2 P_{ave} \left[ \frac{1}{1+r_e} \right]$$
$$P_1 = 2 P_{ave} \left[ \frac{r_e}{1+r_e} \right] \quad (6)$$

Κατά συνέπεια, ο παράγοντας Q στο δέκτη γίνεται





$$Q = \frac{P_{AVE}}{\sigma_1^2 + \sigma_0^2} \left[ \frac{1-r_e}{1+r_e} \right]^2 \quad (7)$$

και το πέναλτι ισχύος, που συνδέεται με το λόγο διαγραφής ER, μπορεί να πιστοποιηθεί. [5,58].

#### 7.4 Μη ενισχυμένα δίκτυα με χρήση APD

Για να υπάρχει μια ολοκληρωμένη άποψη για τα μη ενισχυμένα δίκτυα PON, πρέπει να εξεταστούν οι επιδόσεις ενός τέτοιου συστήματος με APD δέκτη. Στους δέκτες APD η συνιστώσα του θερμικού θορύβου παραμένει η ίδια, διότι προέρχονται από συστατικά, που δεν είναι μέρος της διαδικασίας ενίσχυσης. Ωστόσο, ο όρος του θορύβου βολής, πρέπει να τροποποιηθεί λόγω της διαδικασίας πολλαπλασιασμού χιονοστιβάδα. Για μια APD, ο συνολικός θόρυβος βολής περιγράφεται από

$$\sigma_s^2 = 2qM^2 F_A (R P_{in} + I_D) B \quad (8)$$

όπου  $\sigma_s^2$  είναι η διακύμανση του θορύβου βολής, το M είναι το κέρδος χιονοστιβάδας, το  $I_D$  ρεύμα σκότους της APD, R είναι το κέρδος αποκρισιμότητας, B είναι το εύρος ζώνης δέκτη του και  $F_A$  είναι ο συντελεστής πλεονάζοντας θορύβου της APD. Ο συντελεστής πλεονάζοντας θορύβου σχετίζεται με τις παραμέτρους του υλικού της A.P.D. μέσω του συντελεστή ιονισμού  $k_A$ , ο οποίος λαμβάνει μια τιμή μεταξύ 0 και 1 και περιγράφεται από

$$F_A(M) = k_A M + (1 - k_A) \left( 2 - \frac{1}{M} \right) \quad (9)$$

Στην ανάλυση το  $k_A$  υποτίθεται ότι είναι 0,55 υψηλότερο από ό, τι θα μπορούσε να προβλεφθεί για τις καλύτερες APDs [5,59]. Ωστόσο, το  $k_A$  σκοπίμως εγκρίθηκε υψηλό, δεδομένου ότι οι συσκευές για PONs θα ορίζονται για μαζική παραγωγή. Μείωση της αξίας της  $k_A$  θα βελτιώσει τις επιδόσεις του συστήματος, αλλά δεν επηρεάζει σημαντικά τον υπόλοιπο σχεδιασμό. Για τον υπολογισμό του BER με APD δέκτες, η εξίσωση (2) τροποποιείται ως εξής [1]:

$$SNR = \frac{I_p^2}{\sigma_{TOT}^2} = \frac{R^2 P_{rec}^2}{2qM^2 F_A (R P_{rec} + I_D) B + 4 \left( \frac{kT}{R_L} \right) F_N B} \quad (10)$$

Ακριβείς εικόνες του παράγοντα πολλαπλασιασμού, το περισσευούμενο NF, και το ρεύμα σκότους δεν είναι πάντοτε εύκολο να ληφθούν από τα δεδομένα.



Ωστόσο, κάποιες προσεγγίσεις μπορεί να γίνουν που θα παράγουν ακριβή απόδοση αποτελεσμάτων. [5,60].

### 7.5 Πρόσθετες συνιστώσες θορύβου των ενισχυμένων δικτύων

Στην εισαγωγή του κεφαλαίου αυτού δόθηκε μια γενική περιγραφή για τα ενισχυμένα οπτικά δίκτυα. Για να υπάρχει μια ολοκληρωμένη εικόνα σχετικά με τα δίκτυα αυτά κρίνεται βασική η ανάλυση αναφορικά με τις επιπρόσθετες συνιστώσες θορύβου που λαμβάνουν χώρα στα ενισχυμένα δίκτυα.

Τα βασικά μοντέλα, που περιγράφουν την απόδοση του συστήματος, μπορούν να ενισχυθούν, λαμβάνοντας όμως υπόψη το οπτικό κέρδος και τους συναφείς όρους του θορύβου. Οι πρόσθετες συνιστώσες του θορύβου, που συνδέονται με τη διαδικασία της ενίσχυσης, μπορεί να περιγραφούν ως εξής:

$$\begin{aligned}\sigma^2_1 &= \sigma^2_T + \sigma^2_s + \sigma^2_{ASE} + \sigma^2_{S-ASE} + \sigma^2_{ASE-ASE} \\ \sigma^2_0 &= \sigma^2_T + \sigma^2_{AS} + \sigma^2_{ASE-ASE}\end{aligned}\quad (11)$$

όπου  $\sigma^2_1$ , η διακύμανση του θορύβου του 1 είναι το άθροισμα των  $\sigma^2_T$  του θερμικού θορύβου,  $\sigma^2_s$  θόρυβος βολής,  $\sigma^2_{ASE}$  είναι ο θόρυβος, που προέρχεται από τον παλμικό κτύπο της αυθόρμητης εκπομπής ηλεκτρονίων ASE,  $\sigma^2_{S-ASE}$  είναι ο θόρυβος, που προέρχεται από τον παλμικό κτύπο μεταξύ του σήματος και της ισχύος του ASE και  $\sigma^2_{ASE-ASE}$  είναι ο θόρυβος, που προέρχεται από στοιχεία του ASE. Ομοίως  $\sigma^2_0$  είναι η διακύμανση θορύβου του 0 και περιλαμβάνει  $\sigma^2_T$ ,  $\sigma^2_{ASE}$  και  $\sigma^2_{ASE-ASE}$ .

Με τη σειρά τους, κάθε ένας από αυτούς τους θορύβους μπορούν να μοντελοποιηθούν ως

$$\sigma^2_s = 2qI_p B_e = 2qRP_{rec} B_e = 2qRaGP_{rec} B_e \quad (10)$$

όπου  $q$  είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου,  $R$  είναι η αποκρισιμότητα της διόδου,  $P_{rec}$  είναι η λαμβανόμενη οπτική ισχύς και  $B_e$  είναι το εύρος ζώνης του δέκτη. Ο όρος  $G$  σχετίζεται με το κέρδος των ενισχυτών και  $a$  είναι η απώλεια postamplification (η απώλεια μεταξύ του ενισχυτή και του δέκτη). Ομοίως ο θόρυβος βολής, που προέρχεται από την αυθόρμητη εκπομπή ηλεκτρονίων ASE, είναι  $\sigma^2_{ASE} = 2qI_{ASE} B_e = 2qRP_{ASE} B_e$ , όπου  $P_{ASE}$  είναι η ισχύς της ASE στο δέκτη. Ο θόρυβος, που προέρχεται από τον παλμικό κτύπο μεταξύ του σήματος και της ισχύος του ASE, εκφράζεται ως



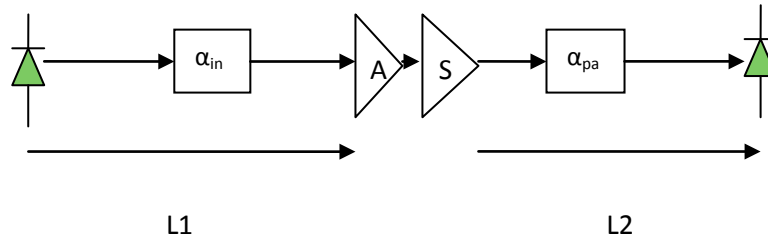
$$\sigma^2_{S-ASE} = 4R^2 G a^2 P_0 \rho_{ase} B_e = 4R^2 G a^2 P_{rec} P_{ASE}^{PSE}$$

όπου  $\rho_{ase}$ , είναι φασματικής πυκνότητας ισχύς της ASE και  $\rho_{ase} B_e = P_{ASE}^{PSE}$  είναι η ισχύς της ASE στο ηλεκτρικό εύρος ζώνης. Ο θόρυβος, που προέρχεται από στοιχεία του ASE ποσοτικοποιείται μέσω  $\sigma^2_{ASE-ASE} = 2R^2 a^2 \rho_{ASE}^2 B_o B_e = 2R^2 a^2 P_{ASE}^{PSE} P_{ASE}^{PSE}$ , όπου  $P_{ASE}^{PSE}$  είναι η ισχύς του ASE κατά το οπτικό εύρος ζώνης.

Η επιρροή της ενίσχυσης μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με εξίσωση (4), όπου το Q είναι τροποποιημένο, για να υπολογίσει τις επιπλέον συνιστώσες του θορύβου.

### 7.6 Αποτελέσματα ενισχυμένου PON

Η παραπάνω ανάλυση υλοποιήθηκε σε πρόγραμμα (matlab), ώστε να μας δώσει συμπεράσματα σχετικά με την απόδοση και τα οφέλη, όπως το κέρδος στην απόσταση (αύξηση της απόστασης), τον αριθμό των χρηστών, την αύξηση της ποσότητας κατά τη μετάδοση των δεδομένων πληροφορίας, με την χρησιμοποίηση του ενισχυτή στα δίκτυα PON, καθώς και τη βελτιστοποίηση των δικτύων PON, χρησιμοποιώντας δίκτυα νέας γενιάς σε συνδυασμό με την χρήση ενισχυτή. Στο σχήμα 7.5 αποδίδεται πολύ απλά η γενική δομή του συστήματος που μελετήθηκε και αναλύθηκε.



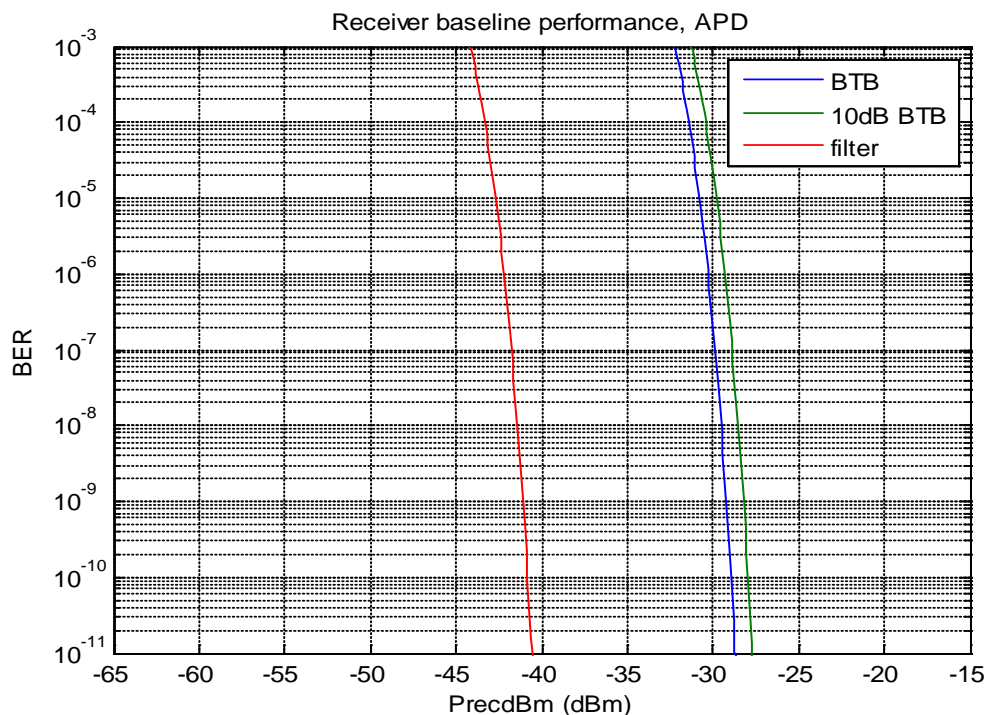
Σχήμα 7.5

Όπου  $a_{in}$  οι απώλειες που υφίσταται το σύστημα από την απόσταση μεταξύ πομπού και ενισχυτή με απώλεια 0.2dB/km και  $a_{pa}$  οι απώλειες μεταξύ splitter και δέκτη,  $A$  ο ενισχυτής του συστήματος και  $S$  ο splitter του συστήματος. Να σημειωθεί δε ότι οι απώλειες του splitter υπολογίζονται ανεξάρτητα έτσι ώστε να υπάρχει ευελιξία στον αριθμό των χρηστών που μπορεί να εξυπηρετήσει το εκάστοτε σύστημα και να υπολογίζονται οι απώλειες του εκάστοτε splitter.

Σε όλες τις μετρήσεις, που έγιναν δόθηκαν οι πιο κάτω ποσότητες στα εξής δεδομένα:



Bit rate:	(2.5 - 60) Gbit/s
Κέρδος χιονοστιβάδας (Avalanche gain):	10
P1 ισχύς εκπομπής:	5.6 mw
Λόγος διαγραφής (Extinction Ratio) :	10
Αριθμός χρηστών:	16 ή 32
Ακόρεστο κέρδος ενισχυτή:	20dB
Ισχύς κορεσμού:	13dBm
L1 Απόσταση πομπού-splitter:	25Km
L2 Απόσταση ενισχυτή-δέκτη:	25Km

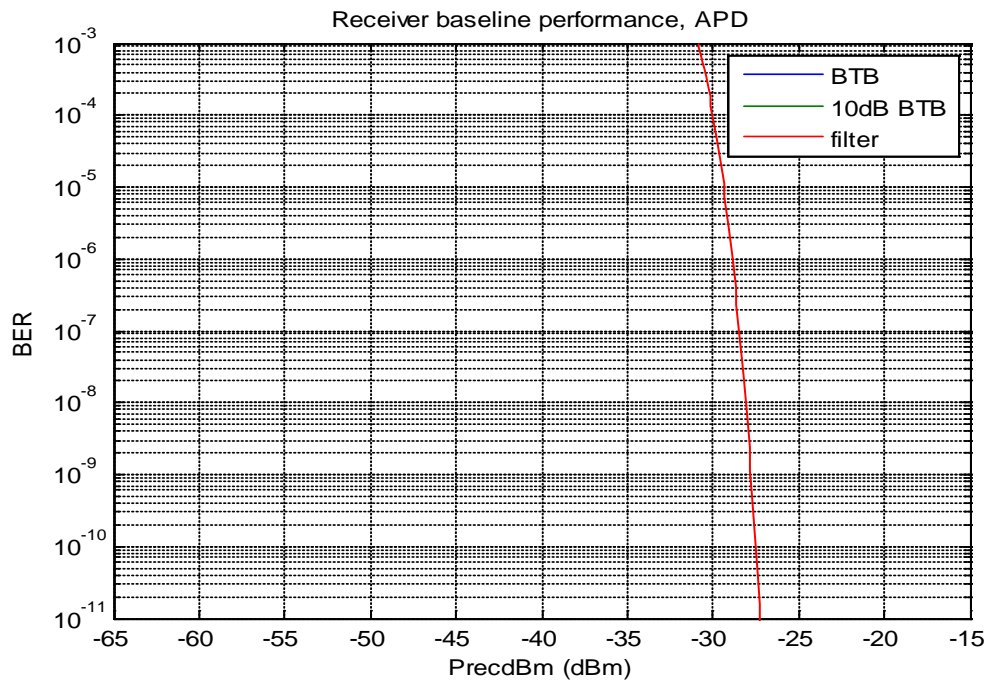


Σχήμα 7.5a bit rate 2.5Gbit/s 32 χρήστες, TDM-PON BTB, TDM-PON 10dB BTB, ενισχυμένο TDM-PON

Αρχικά, το Σχήμα 7.5a αναφέρεται σε δίκτυο TDM-PON μη ενισχυμένο και ενισχυμένο (εδώ έχουν γίνει δυο διαφορετικές μετρήσεις μια χωρίς να υπολογίσουμε το λόγο διαγραφής και η άλλη λαμβάνοντας υπόψη το λόγο διαγραφής για το μη ενισχυμένο TDM-PON), όπου η βασική και απλοϊκή δομή του

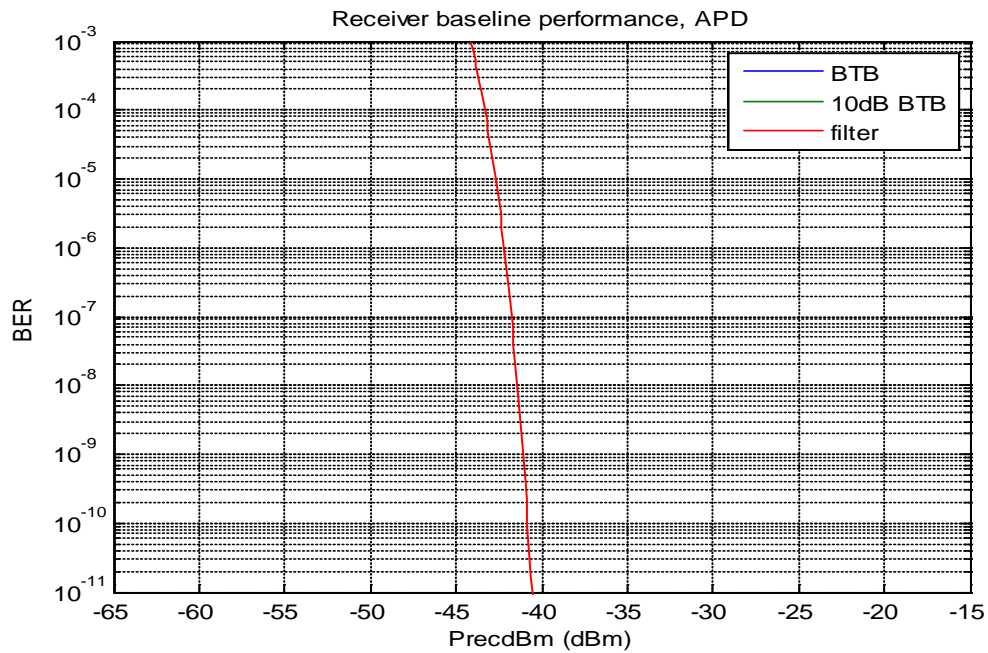


μπορούμε να την δούμε στο σχήμα 7.5, με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων 2.5 Gbit/s, για 32 χρηστές όπου μπορούμε να παρατηρήσουμε μια σειρά από ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά. Το σημείο αναφοράς είναι το back-to-back (BTB), η οποία θεωρώντας άπειρο ER είναι περίπου στα -27,2 dBm. Μια υποβάθμιση του ER στον πομπό σε 10dB παράγει ένα πέναλι περίπου της τάξης των 0,9dB. Η κλίση των δύο αυτών χαρακτηριστικών, δηλαδή, BTB και 10dB ER BTB, είναι πανομοιότυπη, εφόσον η κυρίαρχη διεργασία θορύβου, θερμικός θόρυβος, είναι ταυτόσημη και στις δύο περιπτώσεις. Η ανάλυση δείχνει επίσης μια βελτιωμένη ευαισθησία δέκτη περίπου 13 dB, όταν η APD συνδυάζεται με έναν ενισχυτή τοποθετημένο στην μέση της απόστασης (μέγιστη απόσταση 50 Km), που καλύπτει η ίνα με μέγιστο ακόρεστο κέρδος 20 dB και  $F_n$  των 7 dB, σε συνδυασμό με σχετικά στενό οπτικό φίλτρο 0,8nm βλέπε σχήμα 7.5. Συνεπώς, μας δίνει μια ευχέρεια, ώστε το κέρδος των 13dB να μπορέσουμε να το χρησιμοποιήσουμε, είτε στην αύξηση του αριθμού των χρηστών, είτε στην αύξηση της απόστασης, που πλέον μπορεί να μεταφερθούν δεδομένα μέσα στην οπτική ίνα. Θεωρητικά, ο μέγιστος αριθμός χρηστών για τον ίδιο ρυθμό μετάδοσης καθώς και το ίδιο μήκος της ίνας (bit rate 2.5 και μήκος συνολικά 50Km με τοποθετημένο ενισχυτή στην μέση της απόστασης) είναι 1024 χρήστες, δηλαδή επιτυγχάνεται μια αύξηση κοντά στο 3200%, όπου φαίνεται στο σχήμα 7.5β με σημείωση ότι η ευαισθησία του APD δέκτη είναι στα -27.25dBm για BER  $10^{-11}$ . Σημειωτέο δε ότι η μόνη χαρακτηριστική που είναι ορατή είναι μόνο η χαρακτηριστική του ενισχυμένου TDM-PON (κόκκινη καμπύλη) ενώ οι χαρακτηριστικές του TDM-PON BTB, TDM-PON 10dB BTB ( μπλε και πράσινη αντίστοιχα) δεν εμφανίζονται γιατί για έναν τέτοιο αριθμό χρηστών το BER είναι τόσο μεγάλο που πλέον βρίσκεται εκτός κλίμακας.

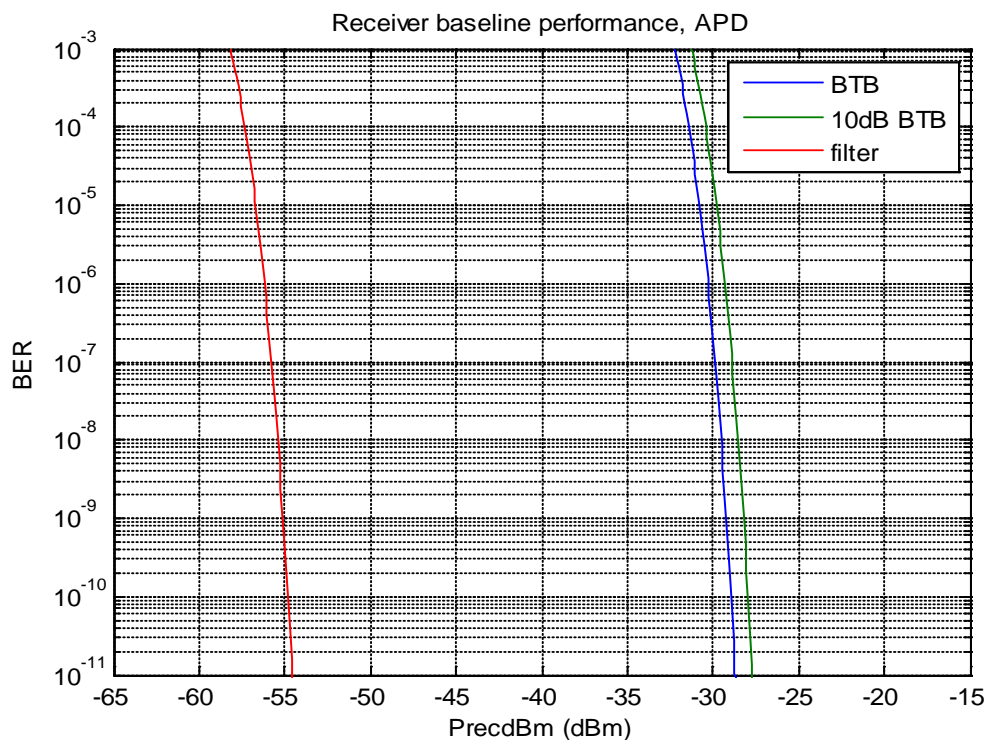


Σχήμα 7.5β bit rate 2.5Gbit/s 1024 χρήστες, TDM-PON BTB, TDM-PON 10dB BTB, ενισχυμένο TDM-PON

Το Σχήμα 7.5γ αναφέρεται σε δίκτυο TDM-PON μη ενισχυμένο και ενισχυμένο όπου η βασική του δομή είναι ίδια με τα παραπάνω συστήματα που έχουν μελετηθεί και μπορούμε να την δούμε στο σχήμα 7.5. Με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων 2.5 Gbit/s, για 32 χρήστες (να σημειωθεί δε ότι εδώ έχουν γίνει δυο διαφορετικές μετρήσεις μια χωρίς να υπολογίσουμε το λόγο διαγραφής και η άλλη λαμβάνοντας υπόψη το λόγο διαγραφής για το μη ενισχυμένο TDM-PON). Με την μόνη διαφορά ότι η ελάχιστη ευαισθησία δέκτη είναι στα -42dBm για BER  $10^{-11}$ , τότε ο μέγιστος χρηστών είναι οι 512 χρήστες δηλαδή 1600% αύξηση αριθμού χρηστών. Η μόνη χαρακτηριστική που είναι ορατή είναι μόνο η χαρακτηριστική του ενισχυμένου TDM-PON (κόκκινη) ενώ οι χαρακτηριστικές του TDM-PON BTB, TDM-PON 10dB BTB (μπλε και πράσινη αντίστοιχα) δεν εμφανίζονται γιατί για έναν τέτοιο αριθμό χρηστών τα μη ενισχυμένα δίκτυα έχουν BER τόσο μεγάλο που πλέον βρίσκεται εκτός κλίμακας.



Σχήμα 7.5y bit rate 2.5Gbit/s 512 χρήστες, TDM-PON BTB, TDM-PON 10dB BTB, ενισχυμένο TDM-PON

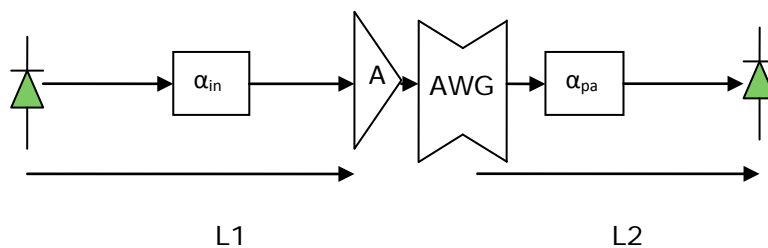


Σχήμα 7.6a bit rate 2.5Gbit/s ενισχυμένο WDM-PON, μη ενισχυμένα TDM-PON BTB, TDM-PON 10dB BTB





Το Σχήμα 7.6α αναφέρεται σε ένα ενισχυμένο δίκτυο WDM-PON και σε μη ενισχυμένο δίκτυο TDM-PON (για το TDM-PON αδίκτυο παραθέτονται δυο διαφορετικές μετρήσεις μια χωρίς να υπολογίσουμε το λόγο διαγραφής και η άλλη λαμβάνοντας υπόψη το λόγο διαγραφής για το μη ενισχυμένο TDM-PON). Ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων 2.5 Gbit/s και εδώ παρατηρήσαμε τα ίδια ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά. Πριν γίνει η ανάλυση των αποτελεσμάτων κρίνεται σημαντικό να γίνει μια σύντομη αναφορά στη σημαντική διαφορά του WDM-PON δικτύου από το δίκτυο TDM-PON. Το WDM-PON δίκτυο χρησιμοποιεί ένα ξεχωριστό κανάλι μήκους κύματος από την OLT σε κάθε ONU και για τη ροή ανόδου δεδομένων και για τη ροή καθόδου δεδομένων, εδώ το βασικό στοιχείο που αντικαταστατέ είναι ο splitter με μια AWG σχήμα 7.6. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση των απωλειών κατά το ελάχιστο, πλέον οι απώλειες κατά τον διαμοιρασμό των μηκών κύματος στις ONUs είναι 3dB. Ενώ με την χρήση splitter οι απώλειες για 32 χρήστες είναι  $\log_2(n) \cdot 3 + 2 = \text{splitter losses}$ , όπου  $n$  ο αριθμός των χρηστών στο δίκτυο όπου εδώ είναι  $n=32$ . Κρίνετε καλό να γίνει και μια ονομαστική αναφορά και στις άλλες διαφορές που έχουμε με την χρήση της AWG που ήδη έχουν προαναφερθεί στο κεφάλαιο 2 που θεωρούνται ως πλεονεκτήματα καθώς και το βασικό μειονέκτημα αυτής όπου είναι: διαδικασίες πολύπλεξης/αποπολύπλεξης πραγματοποιούνται ταυτόχρονα, εμφανίζει χαμηλότερες απώλειες παρεμβολής (insertion losses). Βασικό μειονέκτημα της είναι ευαισθησία των διατάξεων της στην θερμοκρασία, καθιστώντας την έτσι ακατάλληλη για ορισμένα περιβάλλοντα. [1]



Σχήμα 7.6 βασικό απλοποιημένο WDM-PON με ενίσχυση

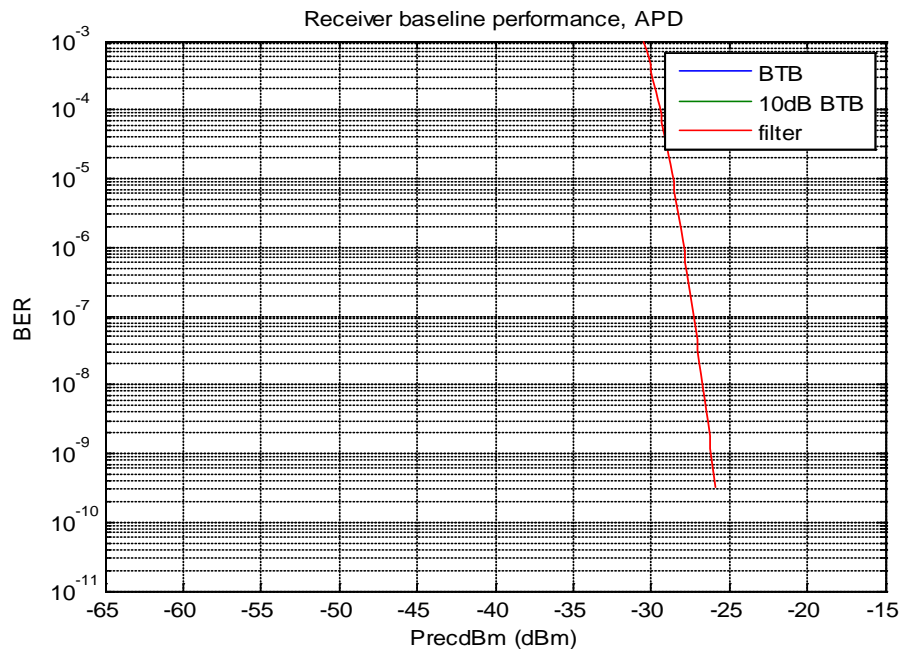
Το σημείο αναφοράς είναι το back-to-back (BTB) μη ενισχυμένης (unamplified) ευαισθησίας, η οποία με ένα άπειρο ER είναι περίπου στα -27,2 dBm. Μια υποβάθμιση του ER στον πομπό σε 10dB παράγει ένα πέναλτι περίπου της τάξης των 0,9dB με την ίδια κλήση. Η ανάλυση μας δείχνει επίσης μια ακόμα πιο βελτιωμένη ευαισθησία δέκτη περίπου 26 dB, όταν η APD συνδυάζεται με έναν ενισχυτή τοποθετημένο στην μέση της απόστασης (μέγιστη απόσταση 50 Km) που καλύπτει η ίνα με μέγιστο ακόρεστο κέρδος 20 dB και  $F_n$  των 7 dB σε συνδυασμό





με σχετικά στενό οπτικό φίλτρο 0,8nm. Συνεπώς, με την χρήση της αρχιτεκτονικής WDM-PON αποδεικνύετε ότι έχουμε ακόμα πιο βελτιωμένα αποτελέσματα κατά 26dBm, σε σύγκριση με το TDM-PON δίκτυο με χρήση ενισχυτή. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να επισημάνουμε σε αυτά τα συστήματα ότι δεν έχουμε υπολογίσει όλους τους άλλους παράγοντες όπως η διασπορά αλλά και από παράγοντες μη γραμμικών φαινομένων (SPM, XPM, FWM) που παίζουν σημαντικό ρόλο στον υπολογισμό των συστημάτων WDM-PON.

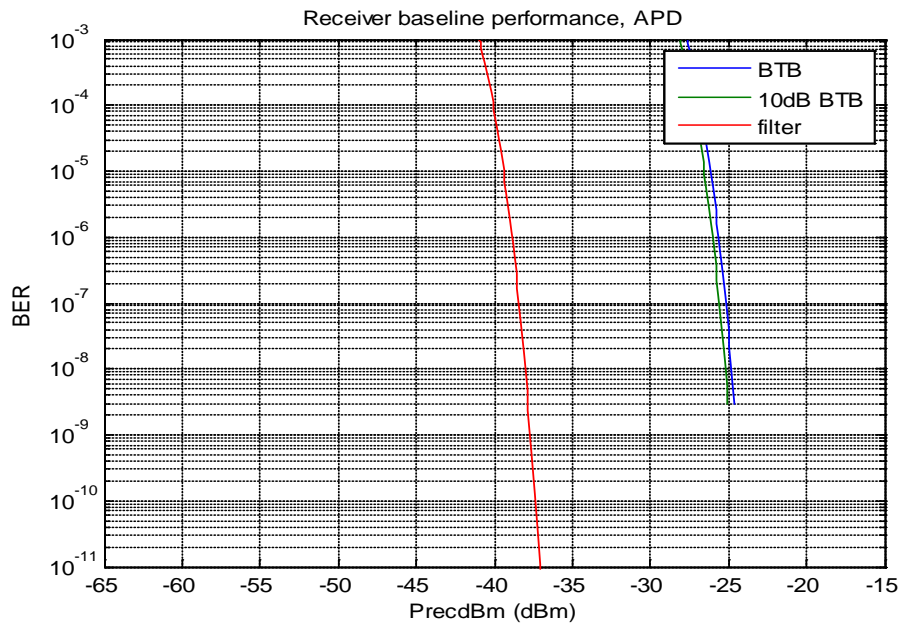
Στις επόμενες μετρήσεις θα προσπαθήσουμε να δώσουμε κάποια συμπεράσματα, σχετικά με την απόσταση που μπορούν να μεταδοθούν τα δεδομένα με την χρήση ενισχυτή σε δίκτυο WDM-PON. Το Σχήμα 7.6β αναφέρεται σε ένα ενισχυμένο δίκτυο WDM-PON και σε μη ενισχυμένο δίκτυο TDM-PON (για το TDM-PON δίκτυο παραθέτονται δυο διαφορετικές μετρήσεις μια χωρίς να υπολογίσουμε το λόγο διαγραφής και η άλλη λαμβάνοντας υπόψη το λόγο διαγραφής για το μη ενισχυμένο TDM-PON). Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων 2.5 Gbit/s και η απόσταση  $L_1=L_2=95\text{Km}$ . Σε όλα τα σχήματα εμπεριέχεται πάντα το μη ενισχυμένο δίκτυο TDM-PON ώστε να έχουμε άμεση σύγκριση με το εκάστοτε ενισχυμένο δίκτυο.



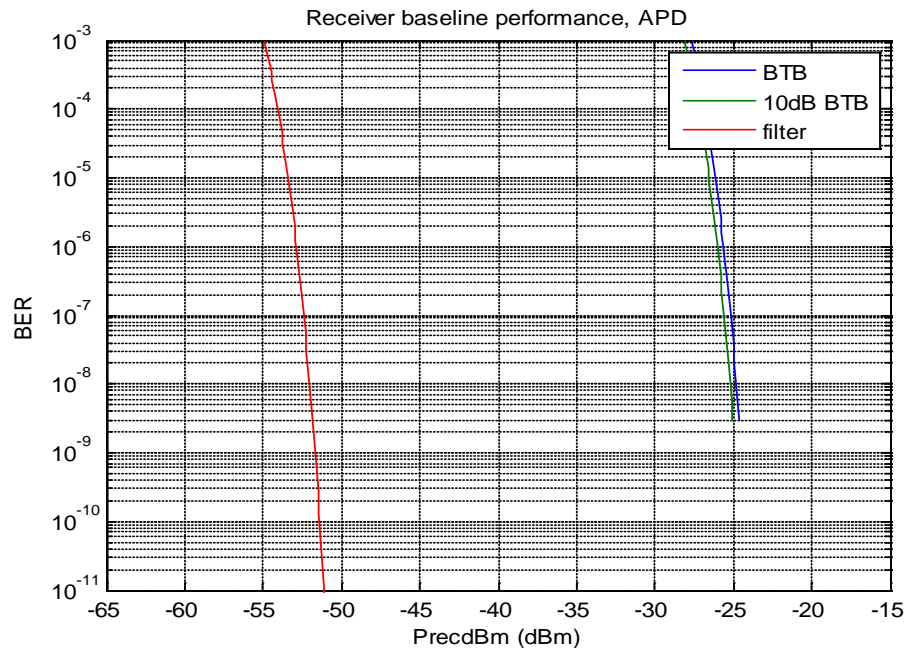
Σχήμα 7.6β bit rate 2.5Gbit/s συνολική απόσταση μετάδοσης δεδομένων 190Km για ενισχυμένο WDM-PON με χρήση AWG και μη ενισχυμένα TDM-PON BTB, TDM-PON 10dB BTB.



Η ανάλυση εδώ γίνεται για ευαισθησία APD δέκτη στα  $-27.25\text{dBm}$ . Από το σχήμα 7.6β συμπεραίνουμε ότι η μέγιστη απόσταση, που μπορούμε να μεταδώσουμε τα δεδομένα των  $2.5\text{Gbit/s}$ , είναι περίπου τα  $190\text{km}$  χωρίς να έχουμε υπερβεί το όριο του BER στα  $10^{-9}$ , δηλαδή έχουμε τιμές του BER περίπου από  $10^{-9.7}$  και πάνω αυτό συνεπάγεται ότι τα  $190\text{km}$  είναι κοντά στα όρια του ανεκτού BER για τον δέκτη. Συνεπώς, με την χρήση του ενισχυτή αυξάνεται δραματικά το μήκος της ίνας και συνεπώς μειώνεται και το κόστος δόμησης ενός δικτύου PON. Και εδώ πάλι παρατηρούμε ότι η μόνη χαρακτηριστική που είναι ορατή είναι μόνο η χαρακτηριστική του ενισχυμένου WDM-PON (κόκκινη) ενώ οι χαρακτηριστικές του TDM-PON BTB, TDM-PON 10dB BTB (μπλε και πράσινη αντίστοιχα) δεν εμφανίζονται γιατί για έναν τέτοιο αριθμό χρηστών τα μη ενισχυμένα δίκτυα έχουν BER τόσο μεγάλο που πλέον βρίσκεται εκτός κλίμακας.



Σχήμα 7.7 bit rate 10Gbit/s TDM-PON BTB, TDM-PON 10dB BTB, ενισχυμένο TDM-PON

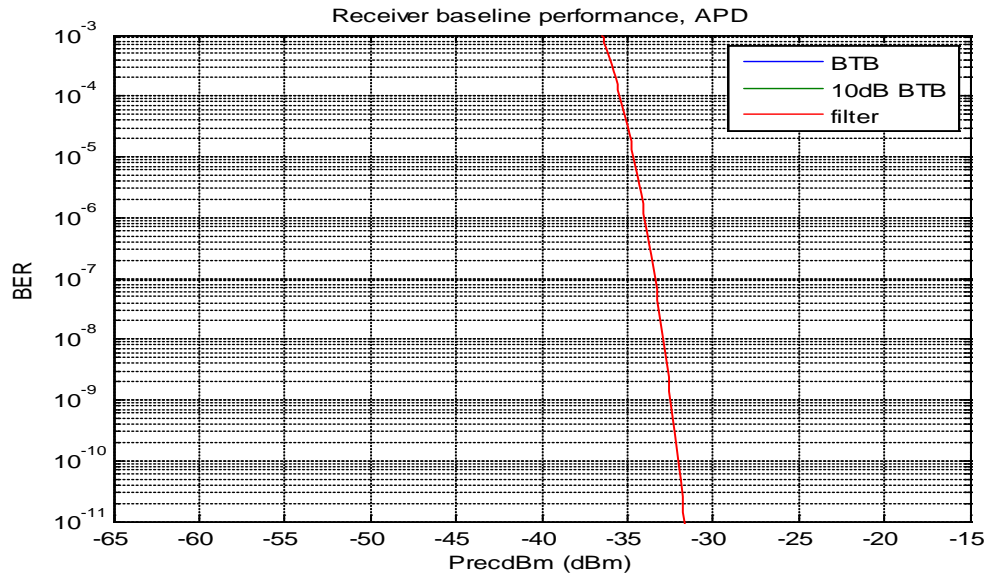


Σχήμα 7.8 bit rate 10Gbit/s ενισχυμένο WDM-PON με χρήση AWG και μη ενισχυμένα TDM-PON BTB, TDM-PON 10dB BTB.

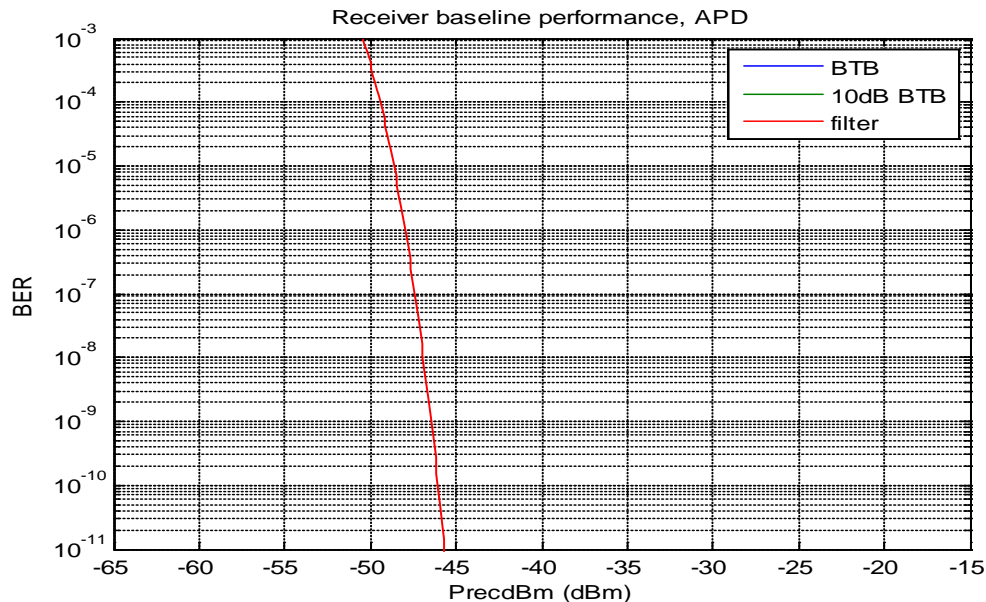
Τα Σχήματα 7.7 και 7.8 αναφέρονται σε ενισχυμένα δίκτυα TDM-PON και WDM-PON αντίστοιχα καθώς και σε μη ενισχυμένο δίκτυο TDM-PON (για το TDM-PON δίκτυο παραθέτονται δυο διαφορετικές μετρήσεις μια χωρίς να υπολογίσουμε το λόγο διαγραφής και η άλλη λαμβάνοντας υπόψη το λόγο διαγραφής για το μη ενισχυμένο TDM-PON), με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων 10 Gbit/s. Η ανάλυση μας δείχνει μια βελτιωμένη ευαισθησία δέκτη περίπου 12dB για το TDM-PON και 24dB για το WDM-PON, όταν η APD συνδυάζεται με έναν ενισχυτή τοποθετημένο στη μέση της απόστασης (μέγιστη απόσταση 50 Km) που καλύπτει η ίνα, με μέγιστο ακόρεστο κέρδος 20 dB και  $F_n$  των 7 dB, σε συνδυασμό με σχετικά στενό οπτικό φίλτρο 0,8nm. Εδώ βλέπουμε ότι το BER του δέκτη, χωρίς την ενίσχυση και στα δύο σχήματα, έχει μειωθεί σε τέτοιο επίπεδο, που πλέον είναι στα μη επιθυμητά όρια, ενώ με την χρήση του ενισχυτή χρειαζόμαστε μικρότερη ευαισθησία δέκτη ή αλλιώς στην ευαισθησία των -24.7dBm μπορούμε να έχουμε μια μεγάλη αύξηση, είτε του μήκους της ίνας, είτε του αριθμού των χρηστών ή συνδυασμό και των δύο. Τα ίδια φαινόμενα έχουμε και για ρυθμό μετάδοσης δεδομένων στα 60Gbit/s, σχήμα 7.9 και 7.10, απλώς εδώ η τιμή (βελτιστοποίηση) της ευαισθησίας μειώνεται, καθώς ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων αυξάνεται. Από την εξίσωση (10) του κεφαλαίου αυτού συμπεραίνουμε ότι με την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης το SNR υφίσταται υποβάθμιση συνεπώς και η τιμή της ευαισθησίας του δέκτη για συγκεκριμένο BER υποβαθμίζεται και αυτό. Συνεπώς, συμπεραίνουμε ότι



με την χρήση του ενισχυτή αυξάνουμε το bit rate, χωρίς να μειώνεται το BER στον δέκτη. Για ακόμα φορά το BER του δέκτη για μη ενισχυμένο δίκτυο είναι τόσο άσχημο, κακό που πλέον δεν καθίσταται δυνατόν να φανεί στα σχήματα 7.9 και 7.10.



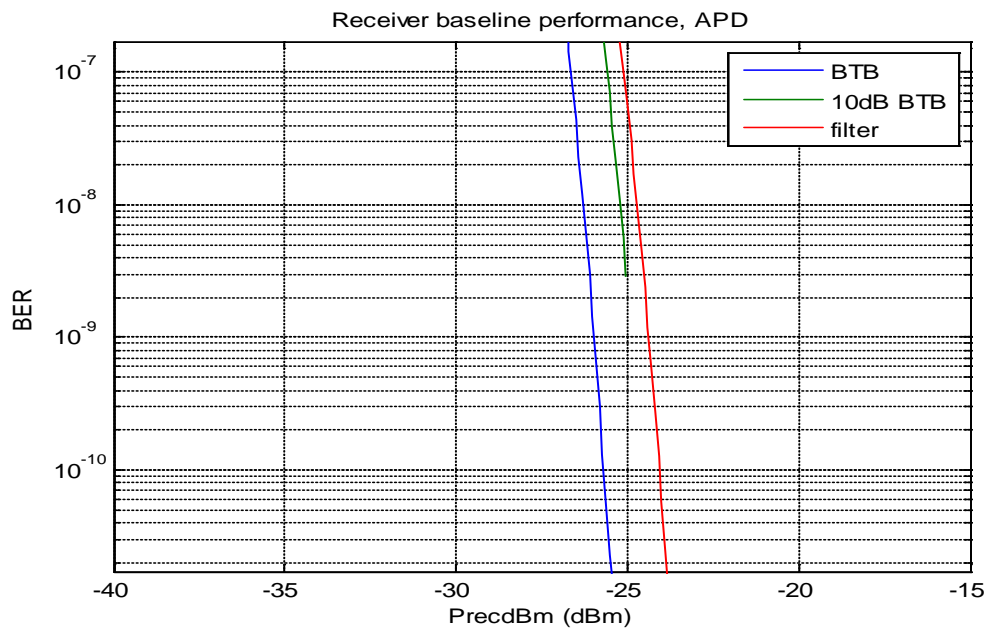
Σχήμα 7.9 bit rate 60Gbit/s TDM-PON BTB, TDM-PON 10dB BTB, ενισχυμένο TDM-PON



Σχήμα 7.10 bit rate 60Gbit/s ενισχυμένο WDM-PON με χρήση AWG και μη ενισχυμένα TDM-PON BTB, TDM-PON 10dB BTB.



Στο σχήμα 7.11 βλέπουμε έναν παράγοντα, που παίζει σημαντικό ρόλο στην απόδοση καθώς και στη μελέτη ενός δικτύου, με ενισχυτή, που είναι η χρήση του εύρους ζώνης του οπτικού φίλτρου. Εδώ όσο πιο στενό είναι το οπτικό φίλτρο, τόσο λιγότερη η υποβάθμιση της ευαισθησίας του δέκτη. γιατί το στενότερο φίλτρο εισάγει λιγότερο θόρυβο από το οπτικό φίλτρο, που έχει ευρύτερο εύρος ζώνης. Στο σχήμα 7.11 έχουμε μια υποβάθμιση της ευαισθησίας της τάξης των 0.3dB για δίκτυο TDM-PON, με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων 10 Gbit/s.



Σχήμα 7.11 bit rate 10Gbit/s, filter 20nm, TDM-PON network



## 7.7 Συμπεράσματα

Τα παραδοσιακά PONs (TDM-PON Time Division Multiplexing – Passive Optical Network) σχεδιάστηκαν ώστε να έχουν υψηλή χωρητικότητα, με χαμηλό κόστος εγκατάστασης και συντήρησης μιας παθητικής υποδομής, έχοντας ένα μήκος κύματος για τη ροή καθόδου δεδομένων (δύο μήκη κύματος στην περίπτωση του βίντεο επικάλυψης) και ένα για τη ροή ανόδου δεδομένων. Βασικό στοιχείο και σκέψη είναι ότι το οπτικό μέσο να είναι κοινό χρησιμοποιώντας έναν παθητικό διαμοιραστή (splitter) για όλους των συνδρομητές. Αυτός ο σχεδιασμός ανάπτυξης του δικτύου έχει σαν συνέπεια τον περιορισμό του αριθμού των ONUs λόγω της εξασθένησης από τον splitter και από το ρυθμό μετάδοσης (bit rate) των πομποδεκτών στο κεντρικό γραφείο (CO) και στις ONUs. Με τις προδιαγραφές αυτές ένα τέτοιο δίκτυο μπορεί να εξυπηρετήσει 32 ONUs μια σχετικά μικρή απόσταση από την OLT και ακόμα μικρότερη για 64 ONUs.

Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας WDM-PON και των αρχιτεκτονικών της δίνεται λύση στο μέλημα και ζήτημα της επεκτασιμότητας, καθώς μπορεί να υποστηρίξει πολλαπλά μήκη κύματος στην ίδια υποδομή οπτικών ινών, παρέχει διαφάνεια για το bit rate του καναλιού και δεν υφίσταται απώλειες ισχύος από το διαμοιρασμό καθώς ο splitter έχει αντικατασταθεί από μια AWG. Η απλή προσέγγιση αυτής της αρχιτεκτονικής WDM-PON είναι να χρησιμοποιείται ένα ξεχωριστό κανάλι μήκους κύματος από την OLT σε κάθε ONU και για τη ροή ανόδου δεδομένων και για τη ροή καθόδου δεδομένων. Η προσέγγιση αυτή δημιουργεί ένα σημείο σε σημείο σύνδεσης ανάμεσα στο CO και σε κάθε ONU, έτσι κάθε ONU μπορεί να λειτουργήσει από ένα ποσοστό ρυθμού μετάδοσης έως το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης του μήκους κύματος ενός καναλιού. Επιπλέον, διαφορετικά μήκη κύματος μπορούν να λειτουργούν με διαφορετικούς ρυθμούς bit, εφόσον είναι αναγκαίο. Διαφορετικά σύνολα των μηκών κύματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο να υποστηρίζουν διαφορετικά, ανεξάρτητα υποδίκτυα PON, που όλα να λειτουργούν πάνω στην ίδια υποδομή οπτικών ινών.

Εισάγοντας έτσι τώρα μέσα στα δίκτυα αυτά και την χρήση του ενισχυτή φτάνουμε σε ένα βελτιωμένο δίκτυο που πλέον σε σύγκριση με τον αρχικό σχεδιασμό ενός μη ενισχυμένου δικτύου ο ενισχυτής μας προσφέρει, ασχέτως του μειονεκτήματος της εισαγωγής θορύβου. Εισάγοντας ενισχυτή σε ένα δίκτυο TDM-PON πετυχαίνουμε μια βελτίωση στην ευαισθησία δέκτη περίπου 13 dB, όταν η APD συνδυάζεται με έναν ενισχυτή τοποθετημένο στην μέση της απόστασης (μέγιστη απόσταση 50 Km). Έτσι μας δίνεται η δυνατότητα, ώστε το κέρδος των





13dB να μπορέσουμε να το χρησιμοποιήσουμε, είτε στην αύξηση του αριθμού των χρηστών, είτε στην αύξηση της απόστασης, που πλέον μπορεί να μεταφερθούν δεδομένα μέσα στην οπτική ίνα. Θεωρητικά, ο μέγιστος αριθμός χρηστών για τον ίδιο ρυθμό μετάδοσης καθώς και το ίδιο μήκος της ίνας (bit rate 2.5 και μήκος συνολικά 50Km με τοποθετημένο ενισχυτή στην μέση της απόστασης) είναι 1024 χρήστες, δηλαδή επιτυγχάνεται μια αύξηση κοντά στο 3200%. Συμπεραίνουμε ακόμα ότι με την χρήση του ενισχυτή αυξάνουμε το bit rate, χωρίς να υποβαθμίζεται η ποιότητα του σήματος στον δέκτη για ρυθμούς μετάδοσης 10Gb/s και 60Gb/s.

Με την χρήση της αρχιτεκτονικής WDM-PON φαίνεται ότι έχουμε ακόμα πιο βελτιωμένα αποτελέσματα κατά 26dBm, σε σύγκριση με το μη ενισχυμένο δίκτυο TDM-PON όπως και για ενισχυμένο δίκτυο TDM-PON με μικρότερη διαφορά στα dBm. Έτσι μας δίνεται η δυνατότητα, του κέρδους των 26dBm να μπορέσουμε να το χρησιμοποιήσουμε, είτε στην αύξηση του αριθμού των χρηστών, είτε στην αύξηση της απόστασης. Ένα ακόμα πλεονέκτημα είναι ότι και εδώ με την χρήση του ενισχυτή αυξάνουμε το bit rate, χωρίς να υποβαθμίζεται η ποιότητα του σήματος στον δέκτη για ρυθμούς μετάδοσης 10Gb/s και 60Gb/s.

Εδώ θα πρέπει να τονίσει κανείς ότι το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε λαμβάνει υποψία του μόνο την επιρροή των απωλειών και της ενίσχυσης. Για να μελετήσει κανείς σωστά και να είναι ακριβής για τα συμπεράσματα θα πρέπει να χρησιμοποιήσει ένα ακριβές μοντέλο για τη μετάδοση στην ίνα (μη γραμμικότητες και διασπορά) καθώς και ένα ακριβές μοντέλο για τον ενισχυτή.

Ως γενικό συμπέρασμα σε σχέση με την χρήση του ενισχυτή καταλήγουμε ότι, εάν και έχουμε εισαγωγή θορύβου, που έχει προαναφερθεί, τα πλεονεκτήματα που έχουμε από την χρησιμοποίηση του στο PON δίκτυο είναι προφανή και σημαντικά, τόσο, που πλέον καθιστούν την εφαρμογή του σημαντική, ώστε να βελτιστοποιήσουν είτε την απόδοση στις εφαρμογές που απαιτούνται, είτε να διαμορφώσουν μια καινούργια δομή δικτύων, που θα ξεφεύγει από την κλασική δομή του PON δικτύου και σε συνδυασμό με τις ήδη προαναφερόμενες αρχιτεκτονικές να μειώσουν δραματικά και ουσιαστικά το κόστος υλοποίησης και εφαρμογής του, ώστε πλέον να γίνουν ένα σοβαρός και υπολογίσιμος και συνάμα αδιαφιλονίκητος παίκτης στην ανάπτυξη δικτύων, που απαιτούν μεγάλο όγκο δεδομένων, σε συνδυασμό με την ταχύτερη μετάδοσή τους.



### **Βιβλιογραφία**

- [1] Συστήματα επικοινωνιών με οπτικές ίνες (Govind P. Agrawal)
- [2] Fiber-to-the-home: 1977-2007 (Paul W. Shumate)
- [3] M. Kawata, "Hi-OVIS (Higashi Ikoma optical visual information System) development project," in Proc. Integ. Optics and Optical Commun. (IOOC'77), 1977, pp. 467-471.
- [4] Towards Technologically and Competitively Neutral Fiber to the Home (FTTH) Infrastructure (Anupam Banerjee, Marvin Sirbu)
- [5] Wavelength-division-multiplexed passive optical network (WDM-PON) technologies for broadband access: a review [Invited] (Amitabha Banerjee, Youngil Park, Frederick Clarke and Huan Song, Sunhee Yang, Glen Kramer, Kwangjoon Kim, Biswanath Mukherjee)
- [6] Διάλεξη 3 του μαθήματος Δίκτυα Οπτικών Ινών Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου (Χριστίνα-Τάνια Πολίτη)
- [7] PON in Adolescence: From TDMA to WDM-PON (Klaus Grobe and Jorg-Peter Elbers, ADVA AG Optical Networking)
- [8] Analysis of Next Generation PON Architecture for Optical Broadband Access Networks, Manish Choudhary and Bipin Kumar Centre For Development of Telematics, Delhi
- [9] C.Assi,Y.Ye,S.Dixit and M.Ali, "Dynamic bandwidth allocation for quality of services over Ethernet PONs," IEEE J. Select Areas Commun., vol.21, pp1467-1477,Nov2003.
- [10] G.Agarwal, Fiber-optic Commun.Syst, 2nd ed. New York: Wiley Interscience, 1997.
- [11] I.Van de voorde and C. Van der plas, "Full service optical access networks: ATM transport on passive optical networks," IEEE Commun. Mag., vol.35, pp.70-75, Apr.1997.
- [12] G.Kramer, B.Mukherjee and G.Pesavento, "IPACT: A dynamic protocol for Ethernet PON (EPON)," IEEE Commun. Mag., vol.40, pp74-80, Feb 2002.





- [13] J. George, "Designing passive optical networks for cost effective triple play support," in Proceedings of FTTH conference, Orlando, Florida, 4-6 October 2004.
- [14] T. Kimoto, T. Shinagawa, T. Mukaihara, H. Nasu, S. Tamura, T. Numura, and A. Kasukawa, "Highly reliable 40-mW 25-GHz  $\times$  20-ch thermally tunable DFB laser module, integrated with wavelength monitor," *Furukawa Rev.* 24, 1–5 (2003).
- [15] <http://www.aznacorp.com/>
- [16] <http://www.bookham.com/>
- [17] J. Hong, H. Kim, and T. Makino, "Enhanced wavelength tuning range in two-section complex-coupled DFB lasers by alternating gain and loss coupling," *J. Lightwave Technol.* 16, 1323–1328 (1998).
- [18] M. Zirngibl, C. H. Joyner, L. W. Stulz, U. Koren, M.-D. Chien, M.G. Young, and B. I. Miller, "Digitally tunable laser based on the integration of a waveguide grating multiplexer and an optical amplifier," *IEEE Photon. Technol. Lett.* 6, 516–518 (1994).
- [19] M. Zirngibl, C. H. Joyner, C. R. Doerr, L. W. Stulz, and H. M. Presby, "An 18-channel multi-frequency laser," *IEEE Photon. Technol. Lett.* 8, 870–872 (1996).
- [20] T. Makino, G. P. Li, A. Sarangan, and W. Huang, "Multiwavelength gain-coupled MQW DFB laser array with fine tunability," in *Optical Fiber Communication Conference, Vol. 2 of OSA Technical Digest Series* (Optical Society of America, 1996), paper FB1.
- [21] M. C. Nuss, W. H. Knox, and U. Koren, "Scalable 32 channel chirped-pulse WDM source," *IEEE Electron. Lett.* 32, 1311–1312 (1996).
- [22] A. E. Siegman, *Lasers*, University Science Books, Mill Valley, CA, 1986
- [23] K. Liou, U. Koren, E. C. Burrows, J. L. Zyskind, and K. Dreyer, "A WDM access system architecture based on spectral slicing of an amplified LED and delay-line multiplexing and encoding of eight wavelength channels for 64 subscribers," *IEEE Photon. Technol. Lett.* 9, 517–519 (1997).
- [24] W.T. Holloway, A. J. Keating, and D. D. Sampson, "Multiwavelength source for spectrum-sliced WDM access networks and LANS," *IEEE Photon. Technol. Lett.* 9, 1014–1016 (1997).



- [25] D. K. Jung, C. J. Youn, H. G. Woo, and Y. C. Chung, "Spectrum-sliced bidirectional WDM PON," <http://ieeexplore.ieee.org>.
- [26] S. L. Woodward, P. P. Reichmann, and N. C. Frigo, "A spectrally sliced PON employing Fabry-Perot lasers," *IEEE Photon. Technol. Lett.* 10, 1337–1339 (1998).
- [27] H. Sanjoh, H. Yasaka, Y. Sakai, K. Sato, H. Ishii, and Y. Yoshikuni, "Multiwavelength light source with precise frequency spacing using mode-locked semiconductor laser and arrayed waveguide grating filter," *IEEE Photon. Technol. Lett.* 9, 818–820 (1997).
- [28] F. An, K. S. Kim, Y. Huseh, M. Rogge, W. Shaw, and L. Kazovsky, "Evolution, challenges and enabling technologies for future WDM-based optical access networks," presented at the 2<sup>nd</sup> Symposium on Photonics, Networking, and Computing, Cary, North Carolina, 26–30 September 2003.
- [29] S. J. Park, C. H. Lee, K. T. Jeong, H. J. Park, J. G. Ahn, and K. H. Song, "Fiber-to-the-home services based on WDM passive optical network," *J. Lightwave Technol.* 22, 2582–2590 (2004).
- [30] N. J. Frigo, P. P. Iannone, P. D. Magill, T. E. Darcie, M. M. Downs, B. N. Desai, U. Koren, T. L. Koch, C. Dragone, H. M. Presby, and G. E. Bodeep, "A wavelength-division multiplexed passive optical network with cost-shared components," *IEEE Photon. Technol. Lett.* 6, 1365–1367 (1994).
- [31] P. Healey, P. Townsend, C. Ford, L. Johnston, P. Townley, I. Lealman, L. Rivers, S. Perrin, and R. Moore, "Spectral slicing WDM-PON using wavelength-seeded reflective SOAs," *IEE Electron. © 2005 Optical Society of America JON* 7837 November 2005 / Vol. 4, No. 11 / *JOURNAL OF OPTICAL NETWORKING* 757 Lett. 37, 1181–1182 (2001).
- [32] GR-1209-CORE for passive fiber optic components.
- [33] GR-1221-CORE for passive fiber optic component reliability.
- [34] J. Hasegawa and K. Nara, "Ultra low loss athermal AWG module with a large number of channels," *Furukawa Rev.* 26 (Furukawa, 2004).
- [35] <http://www.gemfirecorp.com>.
- [36] P. Rigby, "Lightchip launches AWG killer," <http://www.lightreading.com>.



- [37] N. Kashima, "Upgrade of passive optical subscriber network," *J. Lightwave Technol.* 9, 113–119 (1991).
- [38] Y. K. Lin and D. R. Spears, "Passive optical subscriber loops with multi-access," *J. Lightwave Technol.* 7, 1769–1777 (1989).
- [39] R. D. Feldman, E. E. Harstead, S. Jiang, T. H. Wood, and M. Zirngibl, "An evaluation of architectures incorporating wavelength division multiplexing broadband fiber access," *J. Lightwave Technol.* 16, 1546–1558 (1998).
- [40] M. Zirngibl, C. H. Joyner, L. W. Stulz, C. Dragone, H. M. Presby, and I. P. Kaminow, "LARNET, a local access router network," *IEEE Photon. Technol. Lett.* 7, 215–217 (1995).
- [41] N. J. Frigo, P. D. Magill, T. E. Darcie, P. P. Iannone, M. M. Downs, B. N. Desai, U. Koren, T. L. Koch, C. Dragone, and H. M. Presby, "RITENet: a passive optical network architecture based on the remote interrogation of terminal equipment," <http://ieeexplore.ieee.org> (1994).
- [42] J. Kani, M. Teshima, K. Akimoto, N. Takachio, S. Suzuki, K. Iwatsuki, and M. Ishii, "A WDM based optical access network for wide-area gigabit access services," *IEEE Opt. Commun. Mag.* 41, S43–S48 (2003).
- [43] G. Mayer, M. Martinelli, A. Pattavina, and E. Salvadori, "Design and cost performance of the multistage WDM PON access networks," *J. Lightwave Technol.* 18, 121–142 (2000).
- [44] J. D. Angelopoulos, E. K. Fragoulopoulos, and I. S. Venieris, "Comparison of traffic control issues between regular PONs and super-PONs," in *9th Mediterranean Electrotechnical Conference (IEEE, 1998)*, Vol. 2, pp. 769–773.
- [45] J. D. Angelopoulos, N. I. Lepidas, E. K. Fragoulopoulos, and I. S. Venieris, "TDMA multiplexing of ATM cells in a residential access SuperPON," *IEEE J. Select. Areas Commun.* 16, 1123–1133 (1998).
- [46] G. Talli and P. D. Townsend, "Feasibility demonstration of 100 km reach DWDM superPON with upstream bit rates of 2.5 Gb/s and 10 Gb/s," presented at the *Optical Fiber Communication Conference, Anaheim, California, 6-11 March 2005*.



- [47] F. An, K. S. Kim, D. Gutierrez, S. Yam, E. Hu, K. Shrikhande, and L. G. Kazovski, "SUCCESS: a next-generation hybrid WDM/TDM optical access network architecture," *J. Lightwave Technol.* 22, 2557–2569 (2004).
- [48] M. McGarry, M. Maier, and M. Reisslein, "An evolutionary WDM upgrade for EPONs," Technical Report (Arizona State University, 2005).
- [49] G. Kramer, B. Mukherjee, and G. Pesavento, "IPACT: a dynamic protocol for an Ethernet PON (EPON)," *IEEE Commun. Mag.* 40(2), 74–80 (2002).
- [50] Y. Hsueh, M. Rogge, W. Shaw, S. Yamamoto, and L. Kazovsky, "Quality of service support over SUCCESS-DWA: a highly evolutionary and cost-effective optical access network," presented at the Optical Fiber Communication Conference, Anaheim, California, 6–11 March 2005.
- [51] R.P.Davey and D. B. Payne., "The future of optical transmission in access and metro networks—an operator's view," in 31st European Conference on Optical Communication(IEEE, 2005), pp. 53–56.
- [52] J.R. Stern, "Optical wideband subscriber loops and local area networks in the UK," in Proceedings of ICC, Amsterdam, May 14–17, 1984.
- [53] L. Spiekman, D. Piehler, P. Iannone, K. Reichmann, and H. Lee, "Semiconductor optical amplifiers for FTTx," in 9th International Conference on Transparent Optical Networks (IEEE, 2007), pp. 48–50.
- [54] R. P. Davey, P. Healey, I. Hope, P. Watkinson, D. B. Payne, O. Marmur, J. Ruhmann, and Y. Zuiderveld, "DWDM reach extension of a GPON to 135 km," *J. Lightwave Technol.* 24, 29–31 (2006).
- [55] N. Suzkuki and J. Nakagawa, "First demonstration of full burst optical amplified GE-PON uplink with extended system budget of up to 128 ONU splits and 58 km reach," in 31st European Conference on Optical Communication(IEEE, 2005), pp. 141–142.
- [56] P. Townsend, P. Healey, C. Ford, L. Johnston, P. Townley, I. Lealman, L. Rivers, S. Perrin, and R. Moore, "Reflective SOAs for spectrally sliced WDM-PONs," in Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, A. Sawchuk, ed., Vol. 70 of OSA Trends in Optics and Photonics (Optical Society of America, 2002), pp. 352–353.
- [57] [http://www.oplink.com/pdf/TRXAG1M\\_SM\\_MR.pdf](http://www.oplink.com/pdf/TRXAG1M_SM_MR.pdf).



[58] Application Note HFAN-2.2.0, "Extinction ratio and power penalty," [http://www.maximic.com/appnotes.cfm/an\\_pk/596](http://www.maximic.com/appnotes.cfm/an_pk/596).

[59] G. S. Kinsey, J. C. Campbell, and A. G. Dentai, "Waveguide avalanche photodiode operating at 1.55  $\mu\text{m}$  with a gain-bandwidth product of 320 GHz," IEEE Photon. Technol. Lett. 13, 842–845 (2001).

[60] PTB3J88–5638 data sheet, <http://www.neophotonics.com/index/index.php>.

[61] Fu-Tai An, K.S.Kim, D.Guiterrez, S.Yam, E.Hu, K.Shrikhande and L.G. Kazovsky, "SUCCESS: A Next generation hybrid WDM/TDM optical access network architecture." J.Lightwave, vol-23, pp 2557-2569.

[62] ITU-T G.984.3 TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): Transmission convergence layer specification (03/2008)

[63] Optically amplified passive optical networks: a power budget analysis C. Michie, A. E. Kelly, J. McGeough, S. Karagiannopoulos and I. Andonovic