

Οπτικό Διαδίκτυο

Εισαγωγή - Γιατί χρησιμοποιούμε οπτικές ίνες;

Η τεχνολογία των φωτονικών επικοινωνιών είναι καινούργια και έχει σκοπό να αντικαταστήσει το ηλεκτρικό ρεύμα με φως, σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών. Οι μηχανικοί των οπτικών επικοινωνιών, ασχολούνται, κυρίως, με τις ιδιότητες του φωτός, ορατού ή μη, και τις λύσεις που μπορεί αυτό να δώσει σε πραγματικές εφαρμογές. Την τελευταία δεκαετία, σημειώθηκε έκρηξη στον τομέα αυτό. Οι εταιρείες, τα Πανεπιστήμια και οι κυβερνήσεις, επενδύουν μεγάλα ποσά χρήματος στην νέα αυτή τεχνολογία, αναζητώντας καινοτόμες λύσεις, όσον αφορά την βελτίωση της υπάρχουσας υποδομής των τηλεπικοινωνιακών δικτύων. Η τελείως νέα άποψη που εισάγουν οι φωτονικές επικοινωνίες πάνω στα καλωδιακά δίκτυα, μοιάζει επαρκής για να αλλάξει δραστικά τον τρόπο με τον οποίο επικοινωνούν οι άνθρωποι.

Από την αρχή της δεκαετίας του '90, η ανάγκη για εγκατάσταση οπτικών ινών συνεχώς αυξάνει, με μία τάση να φτάσει τα 400 εκατομμύρια χιλιόμετρα [1] τα επόμενα χρόνια. Ακόμα και οι πιο συντηρητικές αναλύσεις, προβλέπουν ότι κατά το 2004, το συνολικό μήκος των εγκατεστημένων ινών, θα είναι 150 εκατομμύρια χιλιόμετρα, αριθμός που επαρκεί για την κύκλωση

της γης, περισσότερο από 3.700 φορές. Το έντονο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη της οπτικής τεχνολογίας για τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές, οφείλεται στις φυσικές ιδιότητες της οπτικής ίνας.

Αυτό το κομμάτι από γυαλί έχει την ικανότητα να μεταφέρει τεράστια ποσά πληροφορίας. Μία οπτική ίνα, έχει δυναμική χωρητικότητα 25.000 GHz, η οποία είναι περίπου δέκα φορές μεγαλύτερη από αυτή των τηλεφωνικών γραμμών. Ο αριθμός αυτός είναι ισοδύναμος με το σύνολο των τηλεφωνικών κλήσεων στις ΗΠΑ, την ώρα αιχμής [2]. Αυτή είναι πράγματι μία τεράστια ποσότητα χωρητικότητας, που μπορούν να αποκτήσουν τα μελλοντικά φωτονικά δίκτυα. Ωστόσο, σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να ισχυριστεί κανείς, ότι αποτελεί μια πλεονάζουσα πολυτέλεια.

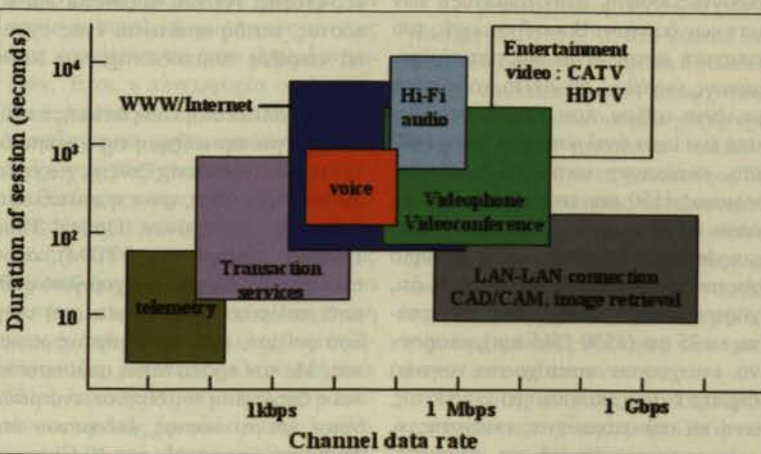
Τα τελευταία χρόνια έχει εκδηλωθεί μία τρομακτική αύξηση της χρήσης των δικτύων. Το Διαδίκτυο (Internet), που είναι το δίκτυο υπολογιστών με την μεγαλύτερη υποδομή, βρίσκεται μπροστά σε μια εκρηκτική εξέλιξη. Οι στατιστικές δείχνουν ότι περισσότεροι από 300 εκατομμύρια άνθρωποι, είναι τώρα χρήστες του, τη στιγμή που δύο χρόνια πριν, ο αριθμός αυτός δεν ήταν ούτε το ένα τρίτο από τον σημερινό. Εκτιμάται ότι κατά το 2005, οι χρήστες θα έχουν φτάσει τα 700 εκατομμύρια. Η κατά-

σταση αυτή έχει ως αποτέλεσμα, να έχει μετατραπεί το Internet σε μία τεράστια βάση δεδομένων, όπου εκατομμύρια χρήστες παρέχουν και παίρνουν τεράστια ποσά πληροφορίας.

Οι σύγχρονες τηλεπικοινωνίες εξελίσσονται προς την κατεύθυνση όπου θα παρέχουν μία περισσότερο τεχνολογικά προηγμένη αλλά και ταυτόχρονα, πιο φυσική μορφή επικοινωνίας. Έτσι, ενώ μερικά χρόνια πριν η τηλεφωνία ήταν η μόνη υπηρεσία που παρείχε ένα δίκτυο, η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών έθεσε νέες προκλήσεις στην τεχνολογία των επικοινωνιών. Σήμερα, υπάρχει η ανάγκη για έναν πιο εξελιγμένο δικτυακό παροχέα υπηρεσιών, ικανό να διαχειρίζεται ένα ποικίλο σύνολο, από αυτό που ονομάζεται "ευρυζωνικές υπηρεσίες" (Σχήμα 1). Ο όρος αυτός περιλαμβάνει καινούριες εικόνα (video) και ήχο, όπως το εικονοτηλέφωνο (videophone) και η εικονοδιάσκεψη (video-conference) ή η διανομή HDTV (High Definition TV) και CATV (Cable TV), καθώς και άλλες υπηρεσίες δεδομένων υψηλής ταχύτητας. Οι υπηρεσίες αυτές ονομάζονται ευρυζωνικές, επειδή η τιμή του συσχετιζόμενου εύρους ζώνης αλλά και της κατανομής του χρόνου εξυπηρέτησης, είναι πολύ μεγάλη. Για παράδειγμα οι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων για εφαρμογές Web, κυμαίνονται από μερικά Kb/s μέχρι 1 Mb/s ενώ η αντίστοιχη διάρκεια, μπορεί να είναι μεγαλύτερη από 1 ώρα. Επίσης άλλες εφαρμογές, όπως η εικονοτηλεφωνία και η εικονοδιάσκεψη, μπορεί να διαρκέσουν από μερικά λεπτά μέχρι 1 ώρα, ενώ οι απαιτήσεις μέγιστης χωρητικότητας, μπορούν να φτάσουν τα 10 Mb/s. Επιπλέον, οι εφαρμογές όπως CATV ή HDTV, μπορεί να απαιτούν ακόμα περισσότερο εύρος ζώνης. Έτσι, για μία απλή διανομή HDTV, χρειάζεται οπωσδήποτε μια χωρητικότητα καναλιού μεταξύ 150 Mb/s και 2 Gb/s, ενώ η αντίστοιχη διάρκεια, μπορεί να είναι μεγαλύτερη από 2 ώρες. Σε σύγκριση με την τυπική χωρητικότητα 64 Kb/s, που χρειάζεται για την μετάδοση φωνής στην τηλεφωνία, είναι προφανές ότι οι

των
Ηρακλή
Αβραμόπουλου,
επίκ. καθηγητή,
Δρ. Αλέξανδρου
Σταυδά,
επιστ. συνεργάτη,
Δρ. Κυριάκου
Ζωηρού,
Κυριάκου Βλάχου,
Μάριου Καλύβα,
Χρήστου Μπιντζα,
Γιώργου
Θεοφιλόπουλου,
Χαράλαμπου
Σκούφη,
Υποψηφίων
διδασκτόρων
Κώστα
Γιαννόπουλου,
Στέλιου Συγγέτου,
Νίκου Πλέρου,
Διπλ. ΗΜΜΥ
Γιώργου
Καλογεράκη
(Τμ. ΗΜΜΥ,
εργαστήριο
Φωτονικών
Επικοινωνιών)

ΠΥΡΦΟΡΟΣ 2001



Σχήμα 1 : Κατανομή του απαιτούμενου εύρους ζώνης και της διάρκειας για διάφορους τύπους τηλεπικοινωνιακών εφαρμογών.

εφαρμογές πολυμέσων, συντελούν στην τρομακτική αύξηση της κίνησης στα σημερινά δίκτυα. Για τον λόγο αυτό, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί ένα φυσικό μέσο υψηλής χωρητικότητας, ικανό να χωρέσει αυτά τα μεγάλα ποσά δεδομένων, σε μία ευρεία ζώνη. Η οπτική ίνα έχει ήδη καταστεί η εναλλακτική τεχνολογία ως προς τα ασύρματα συστήματα μετάδοσης, καθώς και αυτά με χαλκό και αναμένεται να δημιουργήσει νέες προοπτικές, όσον αφορά την σχεδίαση των μελλοντικών δικτύων επικοινωνιών. Αυτό οφείλεται, όχι μόνο στο τεράστιο εύρος ζώνης, αλλά και στις άλλες εγγενείς φυσικές της ιδιότητες, που εξασφαλίζουν την αξιόπιστη μετάδοση μεγάλων ποσοτήτων πληροφορίας [1-2].

Η διηλεκτρική φύση μίας οπτικής ίνας και το γεγονός ότι μεταφέρει φως αντί ηλεκτρικό ρεύμα, είναι οι κυριότεροι παράγοντες που εξασφαλίζουν ανώτερη απόδοση μετάδοσης. Όταν το οπτικό σήμα μεταδίδεται μέσω της ίνας, συγκεντρώνεται στην περιοχή διάδοσης του πυρήνα της, ενώ τα άλλα περιβάλλοντα στρώματα την προστατεύουν, ανακλώντας τις εξωτερικές ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει όταν διαδίδεται ένα ραδιοσήμα στην ατμόσφαιρα, γιατί στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχει διηλεκτρικό κάλυμμα για να προστατεύσει τα μεταδιδόμενα μικροκύματα. Έτσι, είναι πολύ ευάλωτα στις καιρικές παρεμβολές καθώς και στις τυχαίες αλληλεπιδράσεις με άλλα ραδιοσημάτια που συνυπάρχουν στην ατμόσφαιρα.

Αυτή η ατρωσία συνεπάγεται σημαντικά κέρδη για το δίκτυο. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι ο ρυθμός λαθών των bits, μπορεί να οδηγηθεί σε τυχαία χαμηλά επίπεδα. Η παράμετρος αυτή είναι μεγάλης σημασίας για ένα σύστημα το οποίο πρέπει να υποστηρίξει διαδραστικές εφαρμογές πολυμέσων (Interactive Multimedia). Για την περίπτωση αυτή χρειάζεται ένα δίκτυο ικανό να μεταγεί στιγμιαία και γρήγορα τις μεγάλες ριπές των δεδομένων, που αντιστοιχούν στις εφαρμογές εικόνας και ήχου. Αν λοιπόν συμβεί κάποιο λάθος, που μπορεί να καταστρέψει ένα μεγάλο μέρος της μεταδιδόμενης πληροφορίας, τότε για

να ανταποκριθεί το δίκτυο άμεσα, πρέπει να διευθετηθεί η επαναμετάδοση των αλλοιωμένων δεδομένων. Αυτή η διαδικασία όμως, προκαλεί εκτεταμένες καθυστερήσεις, που με την σειρά τους, δεν επιτρέπουν να λάβει χώρα οποιαδήποτε διαδραστική εφαρμογή.

Τεχνολογίες μετάδοσης δεδομένων στα φωτονικά δίκτυα - - οπτική πολυπλεξία.

Παρά το τεράστιο εύρος ζώνης των οπτικών ινών, το 1997 σημειώθηκε εξάντληση ίνας (fiber exhaustion), δηλαδή, οι ήδη εγκατεστημένες συνδέσεις, δεν επαρκούσαν να καλύψουν την τηλεπικοινωνιακή κίνηση. Το γεγονός αυτό ανάγκασε τους τηλεπικοινωνιακούς φορείς να στραφούν στην οικονομική λύση της οπτικής πολυπλεξίας, η οποία διακρίνεται σε πολυπλεξία μήκους κύματος και χρόνου. Η πολυπλεξία μήκους κύματος (Wavelength Division Multiplexing-WDM), είναι παρόμοια με την FDM, η οποία έχει χρησιμοποιηθεί κατά κόρον στα ραδιοσημάτια, και βασίζεται στην ταυτόχρονη μετάδοση δεδομένων, σε πολλαπλά φέροντα μήκη κύματος μέσα σε μία ίνα. Η ευρεία χρήση της τεχνικής αυτής, κατέστη δυνατή, χάρη στην ωρίμανση της σχετικής τεχνολογίας και των αντίστοιχων δομοστοιχείων, ιδιαίτερα των ενισχυτών με ίνα προσμείζων ερβίου (Erbium Doped Fiber Amplifiers-EDFAs) [1-2]. Οι ενισχυτές αυτοί, αποτέλεσαν σταθμό στην εξέλιξη των ινοοπτικών συστημάτων μετάδοσης, δίδοντας ώθηση, στην ανάπτυξη των οπτικών δικτύων. Βασικό στοιχείο του ενισχυτή αυτού είναι μια οπτική ίνα, μήκους, συνήθως, 50-200 m, νοθευμένη με ιόντα ερβίου, που όταν διεγερθούν από ένα laser άντλησης στα 980 ή 1480 nm, εκπέμπουν ακτινοβολία μήκους κύματος 1550 nm, στο σημείο δηλαδή όπου οι οπτικές ίνες προκαλούν την μικρότερη εξασθένιση. Το κύριο χαρακτηριστικό των EDFAs είναι ότι, χάρη στο εύρος ζώνης τους, που φτάνει τα 35 nm (1530-1565 nm), μπορούν να ενισχύσουν ταυτόχρονα, οπτικά σήματα διαφορετικού μήκους κύματος, αντί να απαιτείται ένας ενισχυτής, ή, στην χειρότερη περίπτωση, ένας ηλεκτρονικός επαναλήπτης, για το καθένα. Επιπλέον, οι EDFAs είναι διαφα-

νείς στους ρυθμούς μετάδοσης και στα σχήματα διαμόρφωσης, πράγμα που σημαίνει ότι ένα σύστημα οπτικών επικοινωνιών μπορεί να αναβαθμιστεί ως προς την ταχύτητά του αλλάζοντας μόνο τον εξοπλισμό στον πομπού και στον δέκτη. Σε αντίθεση, η αναβάθμιση ενός συστήματος με αναγεννητές, θα απαιτούσε την εξ'ολοκλήρου αντικατάστασή τους. Τα χαρακτηριστικά αυτά, σε συνδυασμό με την απλότητά τους, τόσο στην κατασκευή όσο και στην εισαγωγή τους σε μία ζεύξη, την απολαφή που φτάνει ακόμα και τα 50 dB και είναι ανεξάρτητη της πόλωσης, τον χαμηλό συντελεστή θορύβου, καθώς και την ανασθησία σε φαινόμενα διαφωνίας (crosstalk), καθιστούν την χρήση των EDFAs πολύ σημαντική, τόσο για την βελτίωση των επιδόσεων μίας ζεύξης WDM όσο και για τη μείωση του κόστους της. Με την χρήση των ενισχυτών αυτών, έχουν υλοποιηθεί και εγκατασταθεί ινοοπτικά συστήματα 32 καναλιών, ρυθμού 10 Gb/s (STM-64) το καθένα. Παρά όμως την ευρεία χρήση της τεχνικής WDM, υπάρχουν ορισμένα προβλήματα που περιορίζουν την χωρητικότητα και την μέγιστη απόσταση διάδοσης χωρίς επανάληψη, όπως τα διάφορα μη γραμμικά φαινόμενα και το γεγονός ότι τα δομοστοιχεία που χρησιμοποιούνται δεν είναι ιδανικά. Επιπλέον, καθώς αυξάνεται ο αριθμός των καναλιών για την αύξηση της χωρητικότητας, δυσχεραίνεται η παρακολούθηση και διαχείριση του δικτύου, ιδιαίτερα όταν αυτό περιλαμβάνει πολυσυμμετρικές ζεύξεις. Ακόμα, αυξάνεται και το κόστος, επειδή απαιτείται ένας σχετικά ακριβός πομποδέκτης για κάθε κανάλι.

Η εναλλακτική λύση οπτικής πολυπλεξίας, για την αύξηση της χωρητικότητας μίας ινοοπτικής ζεύξης, χωρίς τα προβλήματα αυτά, είναι η πολυπλεξία στο πεδίο του χρόνου (Optical Time Division Multiplexing-OTDM), όπου πολλές ροές δεδομένων χαμηλού ρυθμού, πολυπλέκονται σε μία ροή υψηλού ρυθμού, ενός μόνο μήκους κύματος. Με τον τρόπο αυτό, απλοποιείται η διαχείριση του δικτύου, ενώ μειώνεται και το κόστος, δεδομένου ότι, πρακτικά ένα κανάλι των 40 Gb/s, για παράδειγμα, κοστίζει λιγότερο από 4 κανάλια των 10 Gb/s το καθένα.

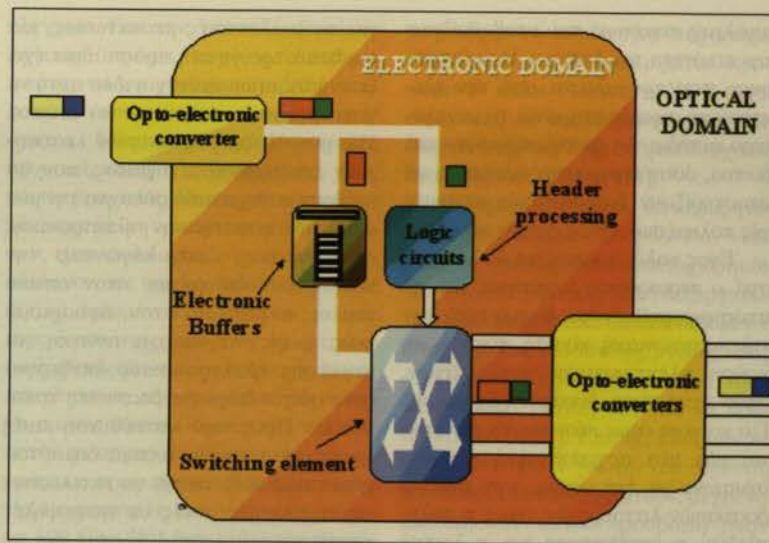
Η βέλτιστη, λοιπόν, λύση για την αύξηση της χωρητικότητας μιάς ιννοπτικής ζεύξης, είναι ο συνδυασμός των πλεονεκτημάτων των τεχνικών WDM και OTDM, δηλαδή λίγα κανάλια ρυθμού άνω των 10 Gb/s το καθένα. Αυτό όμως δεν είναι εύκολο να γίνει, επειδή η τεχνική OTDM βασίζεται σε τεχνολογία που είναι λιγότερο ώριμη, σε σχέση με αυτή της WDM. Έτσι, το Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών (ΕΦΕ) του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, διεξάγει στο πλαίσιο των δραστηριοτήτων του, έρευνα προς την κατεύθυνση ανάπτυξης και ωρίμανσης της τεχνολογίας OTDM, ώστε να καταστεί δυνατή η εκμετάλλευση της τεχνικής αυτής, σε πραγματικά ιννοπτικά δίκτυα.

Πρέπει να σημειωθεί ότι, οι τεχνικές TDM και WDM, δεν είναι ανταγωνιστικές η μία ως προς την άλλη, αλλά συμπληρωματικές και ότι, οι σχεδιαστές δικτύων, προσπαθούν, κάθε φορά, να επιλέξουν τον βέλτιστο συνδυασμό τους, σύμφωνα πάντα με τις λειτουργικές απαιτήσεις και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, του υπό ανάπτυξη ιννοπτικού δικτύου. Έτσι, χάρη στον αποτελεσματικό συνδυασμό των δύο τεχνικών, έχουν επιτευχθεί σήμερα συνολικές ταχύτητες μετάδοσης άνω των Tb/s [3].

Τεχνολογίες μεταγωγής πακέτου σε φυσικό επίπεδο.

Οι τεχνολογίες μετάδοσης WDM και OTDM, ορίζουν τον τρόπο με τον οποίο η συνολική χωρητικότητα μιας ίνας μοιράζεται σε έναν αριθμό καναλιών. Έτσι, η πληροφορία οργανώνεται και μεταδίδεται σε καθένα από τα κανάλια αυτά, χρησιμοποιώντας μεταγωγή πακέτου (packet switching).

Υπάρχουν ορισμένες βασικές λειτουργίες που γίνονται όταν ένα οπτικό πακέτο εισέρχεται σε έναν κόμβο ενός οπτικού δικτύου (Σχήμα 2). Αρχικά το πακέτο μετατρέπεται σε ηλεκτρονική μορφή από τις κατάλληλες οπτοηλεκτρονικές διατάξεις. Οποιοδήποτε άλλες λειτουργίες, συμπεριλαμβανομένων αυτών της δρομολόγησης, λαμβάνουν χώρα στο ηλεκτρονικό πεδίο. Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιούνται τόσο τα κατάλληλα λογικά κυκλώματα



Σχήμα 2 : Οπτοηλεκτρονικές μετατροπές στα σύγχρονα μεταγωγικά κέντρα.

όσο και ηλεκτρονικοί αποθηκευτές. Οι αποθηκευτές αυτοί, αποθηκεύουν τα εισερχόμενα πακέτα, ενώ η επικεφαλίδα τους, που περιέχει την πληροφορία δρομολόγησης, υφίσταται επεξεργασία. Στη συνέχεια, οι ροές των πακέτων μέταγονται στον σωστό προορισμό από κατάλληλα για τον σκοπό αυτό στοιχεία μεταγωγής, τα οποία ελέγχονται από το κύκλωμα επεξεργασίας της επικεφαλίδας. Τέλος, ύστερα από ορισμένες διαδικασίες ενθυλάκωσης (encapsulation), που λαμβάνουν χώρα στα χαμηλότερα επίπεδα των κόμβων, οι ροές αυτές επαναμετατρέπονται σε οπτικό σήμα και διαδίδονται στην οπτική ζεύξη.

Το γεγονός ότι η οπτική τεχνολογία έχει εισέλθει μόνο στο φυσικό επίπεδο του δικτύου, επιτρέπει την απευθείας επέκταση των υπάρχοντων δικτύων στον οπτικό τομέα χωρίς τροποποιήσεις στα ανώτερα επίπεδα. Ωστόσο, μια τέτοια αρχιτεκτονική, δεν εκμεταλλεύεται πλήρως τα πλεονεκτήματα που παρέχονται από τα οπτικά δίκτυα. Αυτό οφείλεται στους περιορισμούς που επιβάλλονται από τα ηλεκτρονικά κυκλώματα και που αποδίδονται στις φυσικές ιδιότητες των ημιαγωγών που τα αποτελούν.

Παρά την ανάπτυξη ηλεκτρονικών συστημάτων ταχύτητας 40 Gb/s, που επίκειται να διατεθούν εμπορικά, η ταχύτητα αυτή είναι οριακή, δεδομένου ότι προσεγγίζονται ορισμένα

τεχνολογικά όρια, που σχετίζονται με τις διαδικασίες ολοκλήρωσης, λιθογραφίας, ψύξης, παροχής ισχύος, διασύνδεσης και συσκευασίας. Επιπρόσθετα, ο βαθμός πολυπλοκότητας αλλά και το κόστος στις ταχύτητες αυτές, είναι ιδιαίτερα υψηλά. Από την άλλη πλευρά, η τεχνολογία μετάδοσης στις φωτονικές επικοινωνίες, είναι ήδη εμπορικά διαθέσιμη στην διπλάσια ταχύτητα, ενώ σε ερευνητικό επίπεδο, έχουν εκτελεστεί με επιτυχία πλήθος πειραμάτων πάνω από τα 100 Gb/s [1]. Αντίθετα, είναι εξαιρετικά δύσκολο για τα ηλεκτρονικά συστήματα, να υποστηρίξουν αυτούς τους ρυθμούς bit οπτικής μετάδοσης στο εγγύς μέλλον, γεγονός που έχει αναγκάσει τους ειδικούς των δικτύων, να εξετάσουν την δυνατότητα εκτέλεσης των αντίστοιχων ηλεκτρονικών λειτουργιών, με αμγώς οπτικό τρόπο.

Πράγματι, στους κόμβους λαμβάνει χώρα αυτό που ονομάζουμε "ηλεκτρονική συμφόρηση" (electronic bottleneck). Κάθε κόμβος πρέπει να επεξεργαστεί, όχι μόνο τα δικά του δεδομένα αλλά επίσης, τα εισερχόμενα από γειτονικούς κόμβους. Αφού όλη η ενθυλάκωση και η διαδικασία δρομολόγησης γίνονται πακέτο προς πακέτο, επιβάλλεται μεγάλο υπολογιστικό φορτίο στους ηλεκτρονικούς αποθηκευτές και στα λογικά κυκλώματα (Σχήμα 3). Ως αποτέλεσμα, εισάγονται σημαντικές καθυστερήσεις και προκαλούνται

απώλειες πακέτων, που υποβαθμίζουν την ποιότητα του δικτύου. Η καθυστέρηση που προκαλείται από την ηλεκτρονική συμφόρηση, είναι το μεγαλύτερο εμπόδιο για τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, όσον αφορά την απαίτηση να υποστηρίζουν διαδραστικές εφαρμογές πολυμέσων, όπως εικόνα και ήχο.

Ένας καλός τρόπος για να ξεπεραστεί ο περιορισμός ταχύτητας και να αποσυμφορηθούν τα δίκτυα από την τηλεπικοινωνιακή κίνηση, είναι η μη χρήση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, όπου αυτό είναι δυνατόν (Σχήμα 4). Για να γίνει όμως κάτι τέτοιο, απαιτείται μία νέα αρχιτεκτονική κόμβων, σύμφωνα με την οποία, ένα σύνολο δικτυακών λειτουργιών, όπως η πολυπλεξία, η αποθήκευση και η λογική επεξεργασία, θα γίνεται στο οπτικό επίπεδο. Αυτό θα επιτρέπει την δρομολόγηση των πακέτων αμιγώς οπτικά, χωρίς την ανάγκη να προηγηθεί η αποσυναρμολόγηση των πακέτων ή η διαδικασία ενθυλάκωσης, αποφεύγοντας έτσι, ένα σημαντικό υπολογιστικό φορτίο, που διαφορετικά θα έπρεπε να υποστούν τα ηλεκτρονικά κυκλώματα.

Τι είναι τα αμιγώς οπτικά δίκτυα;

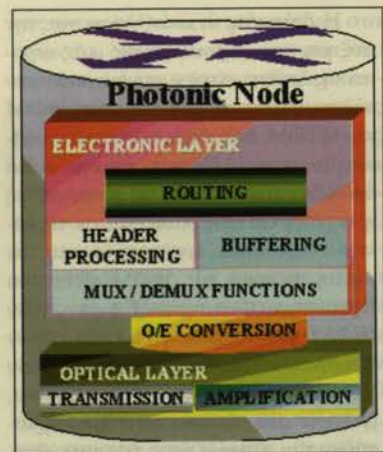
Ένα δίκτυο στο οποίο όχι μόνο η μετάδοση αλλά και η μεταγωγή γίνεται οπτικά, ονομάζεται αμιγώς οπτικό (all-optical). Το δίκτυο αυτό, εισάγει την τεχνολογία τρίτης γενιάς των φωτονικών επικοινωνιών στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα. Στο επίπεδο μετάδοσης αυτό έχει γίνει μερικώς, χάρη στην εμπορική διάθεση των ενισχυτών με ίνα προσμείξεων ερβίου, γεγονός που επιτρέπει την αποφυγή της ηλεκτρονικής αναγέννησης του διαδιδόμενου σήματος, η οποία παλαιότερα χρειαζόταν κάθε 50 Km. Πα'όλα αυτά, ακόμα και σε μεγαλύτερες αποστάσεις, χρειάζεται, πάλι, αμιγώς οπτική αναγέννηση. Αυτό οφείλεται στα διάφορα μη γραμμικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα και προκαλούν σημαντική παραμόρφωση του σήματος. Η λειτουργία αυτή μπορεί να γίνει από ένα οπτικό κύκλωμα εκτέλεσης δυαδικής λογικής.

Από την άλλη μεριά, η τεχνολογία μεταγωγής στα οπτικά δίκτυα, βασίζεται ακόμα στις ηλεκτρονικές διατάξεις. Δεδομένου ότι τα αμιγώς οπτικά δίκτυα είναι μία ελλυσιτική πρόκληση

για τις μελλοντικές επικοινωνίες, μία τεράστια ερευνητική προσπάθεια έχει ξεκινήσει, προκειμένου η ιδέα αυτή να γίνει πραγματικότητα. Αυτό απαιτεί ένα σύνολο αμιγώς οπτικών λειτουργιών επεξεργασίας, σήματος, που θα παίξουν καθοριστικό ρόλο για την μείωση των απαιτήσεων ηλεκτρονικής επεξεργασίας δρομολογώντας την κίνηση των δεδομένων στον οπτικό τομέα, απευθείας στον προορισμό τους, χωρίς να υπάρχει ανάγκη για μεγάλους ηλεκτρονικούς επεξεργαστές στις ενδιάμεσες δικτυακές τοποθεσίες. Προς την κατεύθυνση αυτή χρειάζονται αμιγώς οπτικά δομοστοιχεία (modules), ικανά να εκτελέσουν τις λειτουργίες αυτές σε υπερυψηλές ταχύτητες, με χαμηλό κόστος και με υψηλότερη απόδοση, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα ηλεκτρονικά κυκλώματα. Τα δομοστοιχεία αυτά, τα οποία πρέπει να μπορούν να ολοκληρωθούν εύκολα σε πιο σύνθετα υποσυστήματα, για την εκτέλεση των απαραίτητων για την οπτική μεταγωγή λειτουργιών, διακρίνονται σε παροχής οπτικής ισχύος και κέρδους, οπτικής ψηφιακής πύλης και οπτικής μνήμης.

Τεχνολογία αμιγώς οπτικών κυκλωμάτων.

Για την παροχή οπτικής ισχύος, δηλαδή την παραγωγή οπτικών παλμών, μπορούν να χρησιμοποιηθούν πλήρως συσκευασμένα εμπορικά διαθέσιμα διοδικά laser κατανεμημένης ανάδρασης (Distributed Feedback-DFB), που χαρακτηρίζονται από στενό χρονικό και φασματικό εύρος, ευκολία στην διαμόρφωση και σχετικά χαμηλό κόστος, που επιτρέπει την χρήση τους σε τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές [1-2]. Τα laser αυτά αντιστοιχούν στις πηγές τάσης ή ρεύματος που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρονικά κυκλώματα. Καθώς αυξάνει, όμως, ο ρυθμός λειτουργίας των πυλών, απαιτούνται παλμοί εξαιρετικά στενού εύρους, οι οποίοι δεν μπορούν να παρασχεθούν από τα διαθέσιμα DFBs. Για τον λόγο αυτό, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από το ΕΦΕ, ένα ινοοπτικό laser δακτυλίου, βασισμένο στο κέρδος και την διαμόρφωση που παρέχεται από έναν Οπτικό Ενισχυτή Ημιαγωγού (Semiconductor Optical Amplifier-SOA) [4]. Το laser αυτό, όχι



Σχήμα 3 : Στα σημερινά φωτονικά δίκτυα οι λειτουργίες μεταγωγής πακέτου γίνονται στο ηλεκτρονικό επίπεδο.

μόνο παράγγαγε ευσταθείς παλμούς εύρους 2,5 ps στα 40 GHz [5] αλλά αποτέλεσε την πλατφόρμα για την υλοποίηση ορισμένων σημαντικών υποσυστημάτων όπως : α) πολυκυματική πηγή 10 καναλιών 30 GHz το καθένα [6] η οποία μπορεί να μειώσει το κόστος σε ένα ινοοπτικό σύστημα, δεδομένου ότι δεν απαιτείται ένας ακριβός πομπός για κάθε κανάλι, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την τροφοδοσία και συγχρονισμό των πυλών, που αποτελούν ένα σύνθετο αμιγώς οπτικό κύκλωμα, β) διάταξη οπτικού πολλαπλασιασμού ρολογιού μέχρι τα 35 GHz από RF εξαρτήματα χαμηλής συχνότητας (5 GHz) [7], για την οδήγηση του τοπικού ρολογιού κάθε πύλης σε ένα κύκλωμα και γ) διάταξη ανάκτησης ρολογιού στα 30 Gb/s [8] τόσο για την τροφοδοσία των πυλών, όσο και για τον συγχρονισμό δύο ψευδοτυχαίων δυαδικών ακολουθιών στον πομπό και τον δέκτη ενός διαγνωστικού οργάνου μέτρησης του ρυθμού λαθών των bits (Bit Error Rate Tester-BERT).

Τα δομοστοιχεία παροχής κέρδους διακρίνονται σε EDFAs και SOAs. Οι πρώτοι χρησιμοποιούνται για την κατάλληλη ενίσχυση των σημάτων πριν εισέλθουν στις πύλες αλλά και στα διαγνωστικά όργανα. Οι SOAs ελέγχονται ηλεκτρικά και χάρη στην γρήγορη απόκριση των δυναμικών τους χαρακτηριστικών, παίζουν τον

ρόλο του μη γραμμικού στοιχείου στις οπτικές πύλες, κατ'αναλογία με τον διαφορικό τελεστικό ενισχυτή στις ηλεκτρονικές πύλες. Συνήθως, χρησιμοποιούνται SOAs οδούντος κύματος (Travelling Wave) από ενεργό υλικό InGaAsP σε υπόστρωμα InP και με χρόνο ανάκτησης κέρδους, της τάξης των 100 ps ή μικρότερο [1-2].

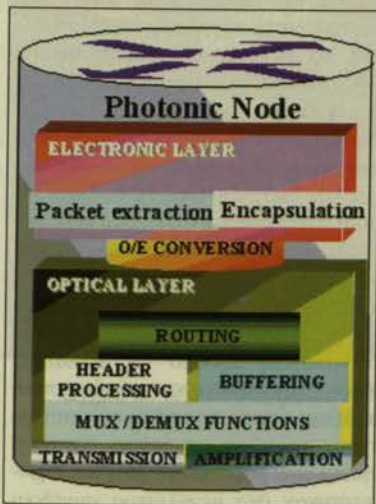
Το κύριο δομοστοιχείο όμως, είναι οι αμγώς οπτικές πύλες, οι οποίες παίζουν τον ρόλο των transistors, για την εκτέλεση Boolean λογικής. Οι πύλες αυτές είναι απαραίτητες για την ανάπτυξη αμγώς οπτικών δικτύων, στα οποία η πληροφορία παραμένει από άκρη σε άκρη σε οπτική μορφή, χωρίς οπτοηλεκτρικές μετατροπές, έτσι ώστε, να γίνει πλήρης εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων της οπτικής ίνας. Επίσης, χρειάζονται για την διαπαφή (interface), μεταξύ του χαμηλού διαύλου των χρηστών χαμηλής ταχύτητας και του οπτικού διαύλου υπερυψηλής ταχύτητας, μέσω της εκτέλεσης ενός συνόλου δικτυακών λειτουργιών και οπτικής επεξεργασίας, όπως είναι η αποπολυπλεξία, η αναγέννηση, η αποθήκευση και η μετατροπή ρυθμού. Η λειτουργία των αμγώς οπτικών πυλών βασίζεται, όπως και στις ηλεκτρονικές πύλες, στην εκμετάλλευση μιάς μη γραμμικότητας, γυαλιού ή ημιαγωγού, που προκαλεί ολίσθηση φάσης σε ένα οπτικό εισερχόμενο σήμα πληροφορίας υπό την επίδραση ενός σήματος

ελέγχου. Για την επίτευξη Boolean λογικής, πρέπει αυτή η ολίσθηση φάσης, να αναχθεί σε μεταβολή πλάτους. Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιούνται διάφορες συμβολομετρικές αρχιτεκτονικές είτε βρόχου είτε ενός μόνου βραχίονα. Ιδιαίτερα, τα συμβολόμετρα με μη γραμμικότητα ημιαγωγού, είναι πολύ υποσχόμενα για εκμετάλλευση σε πραγματικά ιννοοπτικά δίκτυα, δεδομένου ότι χάρη στις μικρές τους διαστάσεις, μπορούν να ολοκληρωθούν υβριδικά αλλά και να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές ανάδρασης. Οι αμγώς οπτικοί διακόπτες, πλεονεκτούν σε σύγκριση με τους ηλεκτρονικούς, ως προς την ευκολία επέκτασης της ταχύτητας λειτουργίας τους (σήμερα 100 Gb/s [9]), την καλύτερη θερμική συμπεριφορά, λόγω της χρήσης φωτονίων και όχι ηλεκτρονίων και την μεγαλύτερη λογική δυναμική, που επιτρέπει την αντικατάσταση πολλών ηλεκτρονικών πυλών, από μία μόνο οπτική πύλη, δηλαδή πρακτικά την μείωση της πολυπλοκότητας και του κόστους των πιο σύνθετων κυκλωμάτων. Στο ΕΦΕ έχουν επιδειχθεί με επιτυχία οι Boolean λειτουργίες AND (Αποπολυπλεξία) και XOR, ξεκινώντας από τα 2.5 GHz και προχωρώντας στα 5 GHz [10], 10 GHz και 10 Gb/s [11] με το συμβολόμετρο βρόχου Sagnac, ενώ χρησιμοποιώντας στη συνέχεια το συμβολόμετρο ενός βραχίονα UNI (Ultrafast Nonlinear Interferometer [9]) στα 20 GHz, 20 Gb/s [12] και 40 GHz [13]. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι λειτουργίες AND και XOR είναι κρίσιμες σε ένα αμγώς οπτικό δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα, με την λειτουργία AND, γίνεται η αποπολυπλεξία δεδομένων χαμηλού ρυθμού από τα δεδομένα υπερυψηλής ταχύτητας, έτσι ώστε, να είναι δυνατή η περαιτέρω επεξεργασία τους από τα ηλεκτρονικά όργανα. Επιπρόσθετα, η λειτουργία XOR είναι απαραίτητη για την αναγνώριση διεύθυνσης και επικεφαλίδας (address & header recognition) ενός πακέτου, που εισέρχεται σε έναν οπτικό κόμβο, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως κύκλωμα σύγκρισης. Για παράδειγμα, η επικεφαλίδα ενός πακέτου, μπορεί να συγκριθεί XOR με μία τοπική διεύθυνση και ανάλογα με το αποτέλεσμα που προκύπτει, το πακέτο αυτό, κρατείται στον

συγκεκριμένο κόμβο για περαιτέρω επεξεργασία ή δρομολογείται προς κάποιον άλλο. Ακόμα, η XOR είναι σημαντική για την υλοποίηση μιάς αμγώς οπτικής γεννήτριας ψευδοτυχαίας δυαδικής ακολουθίας [14].

Οι αμγώς οπτικοί καταχωρητές ολίσθησης, παίζουν τον ρόλο των αντίστοιχων ηλεκτρονικών καταχωρητών για την αποθήκευση και επεξεργασία των ακολουθιών από οπτικά δεδομένα, είναι δηλαδή, ιννοοπτικές μνήμες, στις οποίες μία πληροφορία μπορεί, τόσο να εγγραφεί (write) όσο και να προσπελαστεί (read). Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποθήκευση των δεδομένων των χρηστών, μέχρι να αποκτήσουν αυτοί πρόσβαση στον δίαυλο μετάδοσης ή να αποπολυπλεχθούν τα δεδομένα. Επιπλέον, οι καταχωρητές αυτοί είναι απαραίτητοι, σε συνδυασμό με μία πύλη XOR, για την υλοποίηση μιάς γεννήτριας παραγωγής ψευδοτυχαίων δυαδικών ακολουθιών. Οι ακολουθίες αυτές που παράγονται με αμγώς οπτικό τρόπο, έχουν το πλεονέκτημα ότι το μήκος τους μπορεί να γίνει εξαιρετικά μεγάλο και πολύ μεγαλύτερο από αυτό μιάς τυποποιημένης κατά ITU-T PRBS, αυξάνοντας απλώς το συνολικό μήκος της ίνας του καταχωρητή χωρίς περαιτέρω κόστος. Χάρη στα τεράστια αυτά μήκη οι αμγώς οπτικές PRBS, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την υλοποίηση ασφαλών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων κρυπτογραφίας στο φυσικό επίπεδο, όπου θα είναι εξαιρετικά δύσκολο και χρονοβόρο, για κάποιον ανεπιθύμητο τρίτο, να προσβάλει το σύστημα.

Η υλοποίηση ενός αμγώς οπτικού καταχωρητή ολίσθησης, βασίζεται στις αμγώς οπτικές πύλες AND (με αναστροφή) ή XOR σε διαταξη ανάδρασης, ενώ τα κελιά μνήμης (Flip Flops) που αντιστοιχούν σε έναν ηλεκτρονικό καταχωρητή, παρέχονται από την καθυστέρηση που προκαλεί το μήκος της οπτικής ίνας καθεαυτής. Στο ΕΦΕ έχουν υλοποιηθεί αμγώς οπτικοί καταχωρητές ολίσθησης στα 10 GHz, 20 GHz και 20 Gb/s [15], που μπορούσαν να αποθηκεύσουν ευσταθώς μία σχηματομορφή (pattern) πακέτου, για πολλές ώρες, χωρίς αλλοίωση του περιεχομένου της.



Σχήμα 4 : Σε ένα αμγώς οπτικό δίκτυο όλες οι λειτουργίες μεταγωγής πακέτου θα γίνονται στο οπτικό επίπεδο.

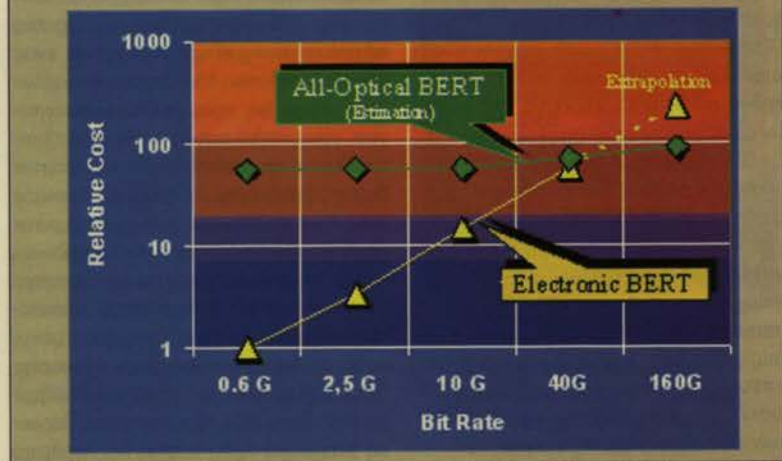
Βιομηχανική σημασία.

Τα μέχρι τώρα αποτελέσματα που έχουν προκύψει από την διεξαγωγή έρευνας και πειραμάτων στο ΕΦΕ είναι πολύ σημαντικά για την ανάπτυξη αμγώς οπτικών συστημάτων διάγνωσης και κρυπτογραφίας υπερυψηλής ταχύτητας με λειτουργικά και οικονομικά πλεονεκτήματα ως προς τα αντίστοιχα ηλεκτρονικά. Αυτό γίνεται κατανοητό, δεδομένου ότι το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη αμγώς οπτικών διακοπών, δεν περιορίζεται μόνο στις ερευνητικές ομάδες αλλά υπάρχει έντονο και από την πλευρά των εταιριών και οργανισμών που δραστηριοποιούνται στον χώρο των φωτονικών επικοινωνιών. Οι φορείς αυτοί επενδύουν συνεχώς για την αναβάθμιση της δικτυακής τους υποδομής και την βελτίωση των παρεχόμενων ευρυζωνικών υπηρεσιών τους, ώστε να εκμεταλλευτούν στο έπακρο τα πλεονεκτήματα των ινοοπτικών συστημάτων υπερυψηλής ταχύτητας. Με τον τρόπο αυτό, έχει δημιουργηθεί μία ταχέως αναπτυσσόμενη αγορά, που περιλαμβάνει τους κατασκευαστές των φωτονικών δομοστοιχείων, τους παροχείς υπηρεσιών καθώς και τους κατασκευαστές ηλεκτρονικού τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού επεξεργασίας σήματος, μέτρησης, διάγνωσης και κωδικοποίησης/κρυπτογραφίας.

Ωστόσο, ο εμπορικά διαθέσιμος ηλεκτρονικός εξοπλισμός, μειονεκτεί σε απόδοση και είναι ιδιαίτερα ακριβός. Για παράδειγμα, ο πιο σύγχρονος μετρητής του ρυθμού λαθών των δυφίων (Bit Error Rate Tester-BERT) λειτουργεί μέχρι τα 12,5 Gb/s και κοστίζει περίπου 140 εκατομμύρια. Συγχρόνως, το κόστος των ηλεκτρονικών λύσεων αυξάνει εκθετικά με τον ρυθμό λειτουργίας, ενώ το κόστος των αντίστοιχων οπτικών, έχει πιο ασθενή εξάρτηση, δεδομένου ότι είναι διαφανή στον ρυθμό αυτό. Έτσι, οι προβλέψεις εκτιμούν ότι πάνω από τα 40 Gb/s, το κόστος των οπτικών θα είναι συγκρίσιμο και, ίσως, φτηνότερο από αυτό των ηλεκτρονικών, αποτελώντας μία εναλλακτική ή και καλύτερη λύση (Σχήμα 5).

Μελλοντικός στόχος και φιλοδοξία του ΕΦΕ, είναι η ολοκλήρωση των υποσυστημάτων και των φωτονικών δομοστοιχείων, που απαιτούνται για

Cost Evolution of Electronic BER Measurement



Σχήμα 5 : Συγκριτικό διάγραμμα εξέλιξης του σχετικού κόστους για ηλεκτρονικούς και οπτικούς μετρητές λαθών bits σε συνάρτηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων.

την υλοποίηση ενός αμγώς οπτικού BERT. Το διαγνωστικό αυτό όργανο, θα αποτελείται από έναν πομπό και έναν δέκτη. Στον πομπό θα παράγεται μία ψευδοτυχαία δυαδική ακολουθία, από έναν αμγώς οπτικό καταχωρητή ολίσθησης με ανάδραση XOR. Στον δέκτη, ένα κύκλωμα ανάκτησης ρολογιού, υλοποιημένο με βάση την πλατφόρμα του ινοοπτικού laser που αναφέρθηκε, θα ανακτά ένα σήμα ρολογιού, το οποίο θα οδηγεί έναν δεύτερο αμγώς καταχωρητή ολίσθησης με ανάδραση XOR, για την παραγωγή της ίδιας και συγχρονισμένης με αυτή του πομπού, ψευδοτυχαίας ακολουθίας. Η λαμβανόμενη PRBS, θα συγκρίνεται με την τοπικά διαθέσιμη PRBS, χρησιμοποιώντας μία αμγώς οπτική πύλη XOR και τα λάθη που θα προκύπτουν, θα αποθηκεύονται σε έναν μετρητή λαθών, δηλαδή μια ινοοπτική μνήμη, απ' όπου θα είναι δυνατή η περαιτέρω ανάλυσή τους, χρησιμοποιώντας κατάλληλες τεχνικές δειγματοληψίας (Σχήμα 6).

Επίλογος.

Η Κοινωνία των Πληροφοριών όπου ζούμε σήμερα, χαρακτηρίζεται από συνεχή αύξηση των αναγκών για μεγαλύτερο εύρος ζώνης και κατεπείκτα υψηλότερες ταχύτητες επικοινωνίας. Το ΕΦΕ, έχοντας ως έμπνευ-

ση και κίνητρο τις ανάγκες αυτές, έχει σκοπό την διεξαγωγή και την προώθηση της έρευνας, για την ανάπτυξη γρήγορων, αξιόπιστων και ασφαλών ινοοπτικών δικτύων, τα οποία να μπορούν να υποστηρίξουν πληθώρα υπηρεσιών ευρέος φάσματος, κάθε χρονική στιγμή, σε οποιοδήποτε σημείο και με το μικρότερο δυνατόν κόστος. Στο πλαίσιο αυτό, το ΕΦΕ σχεδιάζει, πειραματίζεται και παρέχει πρωτοποριακές ολοκληρωμένες λύσεις, για την ικανοποίηση των υψηλών απαιτήσεων που επιβάλλουν οι σύγχρονες τηλεπικοινωνίες. Τα ερευνητικά ενδιαφέροντα του ΕΦΕ, εστιάζονται στην ανάπτυξη και εκμετάλλευση των αρχών και τεχνολογιών, που απαιτούνται στο φυσικό υπόστρωμα των φωτονικών δικτύων. Για την επίτευξη των στόχων του το ΕΦΕ στελεχώνεται από ικανό και υψηλής κατάρτισης προσωπικό, με μακροπρόθεσμο κέρδος, την δημιουργία ενός πυρήνα ινοοπτικών μηχανικών, που μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στην τεχνολογική πρόοδο της Ελλάδας. Χάρη στην επίμονη και μεθοδική προσπάθεια του προσωπικού αυτού, έχουν προκύψει σημαντικά αποτελέσματα, που παρουσιάστηκαν και δημοσιεύτηκαν στα μεγαλύτερα συνέδρια και περιοδικά, αντίστοιχα, των οπτικών επικοινωνιών, καταστάοντας έτσι, το ΕΦΕ, ένα από τα καλύτερα στον

κόσμο στον τομέα του. Επίσης, έχει αποκτηθεί σημαντική εμπειρία και τεχνογνωσία στην πειραματική δοκιμή και ενσωμάτωση υποσυστημάτων και συστημάτων, καθώς επίσης και στον θεωρητικό σχεδιασμό και εξομείωση ινσοπτικών δομοστοιχείων, συστημάτων και δικτύων. Με τον τρόπο αυτό, το ΕΦΕ βρίσκεται στην τεχνολογική αιχμή της Κοινωνίας των Πληροφοριών, συμμετέχοντας ενεργά, στον καθορισμό των παγκόσμιων εξελίξεων που συντελούνται στον ραγδαία αναπτυσσόμενο τομέα των οπτικών επικοινωνιών.

Αναφορές.

[1] R. Ramaswami and K.N. Sivarajan, "Optical Networks: A practical perspective", Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, 1998.

[2] P.E. Green, "Δίκτυα Οπτικών Ινών", Παπασωτηρίου, 1994.

[3] S. Kawanishi, H. Takara, K. Uchiyama, I. Shake and K. Mori, "3 Tbit/s (160 Gbit/s X 19 channels) Optical TDM and WDM Transmission Experiment", Electronics Letters, Vol. 35, No. 10, pp. 826-827, 1999.

[4] K. Zoiros, T. Stathopoulos, K. Vlachos, T. Houbavlis, T. Papakyriakopoulos, A. Hatziefremidis and H. Avramopoulos, "Experimental and Theoretical Studies of a High Repetition Rate Fiber Laser, Mode-Locked by External Optical Modulation", Optics Communications, Vol. 180, pp. 301-315, 2000.

[5] K. Zoiros, K. Vlachos, T. Stathopoulos, C. Bintjas and H. Avramopoulos, "40 GHz Mode-Locked SOA Fiber Ring Laser with 20 nm Tuning Range", OFC'2000 Tech. Dig., TuR3, pp. 254-256, Baltimore, USA, 2000.

[6] K. Vlachos, K. Zoiros, T. Houbavlis and H. Avramopoulos, "10x30 GHz Pulse Train Generation from Semiconductor Amplifier Fiber Ring Laser", IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 12, No.1, pp. 25-27, 2000.

[7] T. Papakyriakopoulos, K. Vlachos, A. Hatziefremidis and H. Avramopoulos, "Optical Clock Repetition-Rate Multiplier for High-Speed Digital Optical Logic Circuits", Optics

Letters, Vol. 24, No. 11, pp. 717-719, 1999.

[8] K. Vlachos, G. Theofilopoulos, A. Hatziefremidis and H. Avramopoulos, "30 Gb/s All-Optical Clock Recovery Circuit", IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 12, No. 6, pp. 705-707, 2000.

[9] K.L. Hall and K.A. Rauschenbach, "100-Gbit/s bitwise logic", Optics Letters, Vol. 23, No. 16, pp. 1271-1273, 1998.

[10] T. Houbavlis, K. Zoiros, K. Vlachos, T. Papakyriakopoulos, H. Avramopoulos, F. Girardin, G. Guekos, R. Dall' Ara, S. Hansmann and H. Burkhard, "All-Optical XOR in a Semiconductor Optical Amplifier Fiber Sagnac Gate", IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 11, No. 3, pp. 334-336, 1999.

[11] T. Houbavlis, K. Zoiros, A. Hatziefremidis, H. Avramopoulos, L. Occhi, G. Guekos, S. Hansmann, H. Burkhard and R. Dall' Ara, "10 Gb/s All-Optical Boolean XOR with SOA Fiber Sagnac Gate", Electronics Letters, Vol. 35, No. 19, pp. 1650-1652, 1999.

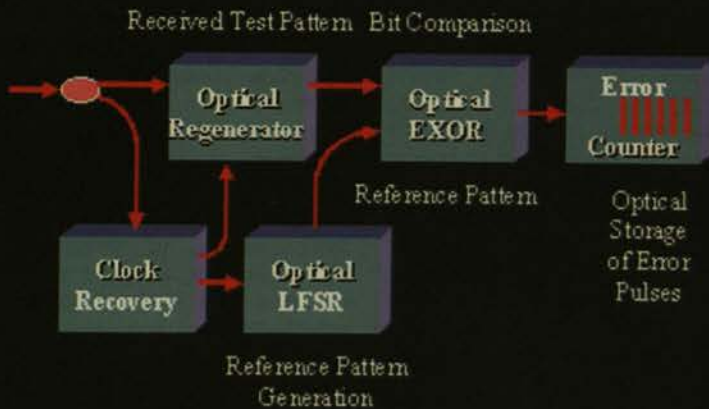
[12] C. Bintjas, M. Kalyvas, G. Theofilopoulos, T. Stathopoulos, H. Avramopoulos, L. Occhi, L. Schares, G. Guekos, S. Hansmann and R. Dall' Ara, "20 Gb/s All-Optical XOR with UNI Gate", IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 12, No. 7, pp. 834-836, 2000.

[13] G. Theophilopoulos, K. Yiannopoulos, M. Kalyvas, C. Bintjas, G. Kalogerakis and H. Avramopoulos, "40 GHz All-Optical XOR with UNI Gate", accepted for oral presentation at OFC'2001, Anaheim, California.

[14] S.W. Golomb, "Shift Register Sequences", San Francisco, CA: Holden-Day, 1967.

[15] M. Kalyvas, C. Bintjas, K. Zoiros, T. Houbavlis, H. Avramopoulos, L. Occhi, L. Schares, G. Guekos, S. Hansmann and R. Dall' Ara, "All-Optical Write/Read Memory for 20 Gb/s Data Packets", Electronics Letters, Vol. 36, No.12, pp. 1050-1052, 2000.

Optical BERT Receiver Functions



Σχήμα 6 : Μπλοκ διάγραμμα του δέκτη ενός αμιγώς οπτικού μετρητή λαθών bits (BERT).