

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BOLOGNA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA DELLE

TELECOMUNICAZIONI

ATTIVITA' DI TIROCINIO CURRICULARE

SVOLTA PRESSO il

Dipartimento di Elettronica, Informatica e Sistemistica (DEIS)

“CONFRONTO DELLE PRESTAZIONI DI SISTEMI OTTICI

BASATI RISPETTIVAMENTE SULLA MODULAZIONE

ANALOGICA E SULLA MODULAZIONE DIGITALE DELLA

SORGENTE LASER, CON PARTICOLARE RIFERIMENTO

ALL'APPLICAZIONE DELLA REMOTIZZAZIONE DI ANTENNE

AD USO RADIOASTRONOMICO”

Tutore universitario: Prof. Paolo Bassi

Studente: Alice Masini

Referente struttura ospitante: Prof. Giovanni Tartarini

Anno accademico 2005/2006

SOMMARIO

Introduzione	pag.1
Capitolo 1 : La stazione radiastronomica di Medicina	pag. 2
Capitolo 2: I progetti SKA e LOFAR	pag. 5
Capitolo 3: Up-grade della Croce del Nord	pag. 7
Capitolo 4: Caratterizzazione del link ottico digitale	pag. 11
4.1	Definizione delle specifiche del problema
4.2	La fonte ottica
4.2.1	<i>Laser a feedback distribuito DFB</i>
4.2.2	<i>Laser ad emissione superficiale VCSEL</i>
4.3	La modulazione digitale
4.3.1	<i>Modulazione esterna</i>
4.4	Il mezzo trasmissivo: la fibra ottica
4.5	Il fotorivelatore
4.6	Conclusioni
Capitolo 5: Reti locali e reti geografiche per sistemi in fibra ottica: ETHERNET e SONET	pag. 19
Capitolo 6: Breve descrizione del link analogico e confronto con il link digitale	pag. 21
Capitolo 7: Verifica delle prestazioni dei dispositivi considerati attraverso simulazioni con Optsim	pag 23
7.1	Simulazioni per link ottici digitali
7.2	Simulazioni per link ottici analogici

INTRODUZIONE

Questa attività di tirocinio si svolge nell'ambito della ricerca di soluzioni migliorative da applicare al collegamento di discesa d'antenna presso la Croce del Nord, il grande interferometro a croce del Radiotelescopio di Medicina. Lo scopo di questo studio è di valutare la possibilità di sostituire il vecchio collegamento in cavo coassiale con uno di tipo ottico, analogico o digitale, così da rendere la Croce del Nord utilizzabile come "test" per la realizzazione dei più importanti progetti di array di antenne ora allo studio: SKA e LOFAR.

Nella seguente relazione, in seguito ad una breve descrizione del centro radio astronomico e dei due progetti sopra citati, verranno presentate diverse tipologie di collegamento ottico digitale (link assemblati partendo dai singoli componenti e link già strutturati secondo standard internazionali), accennando ad una breve descrizione delle diverse sorgenti laser utilizzabili per questo scopo e alle possibili tecniche di modulazione.

Infine sarà mostrato il confronto tra collegamenti ottici digitali e collegamenti ottici analogici in termini di prestazioni e costi, con relative conclusioni sulla possibilità di implementare gli uni o gli altri nella catena di trasferimento dati della Croce del Nord.

CAPITOLO 1

LA STAZIONE RADIO-ASTRONOMICA DI MEDICINA



Fig. 1 Stazione radio-astronomica di Medicina

Il radiotelescopio è uno strumento in grado di ricevere onde elettromagnetiche emesse da una sorgente radio-astronomica ad una lunghezza d'onda compresa tra alcuni centimetri e diversi metri (Spettro radio).

Il vantaggio nello studiare i corpi celesti sotto il punto di vista delle emissioni radio, rispetto all'analisi prettamente ottica, sta nella possibilità di osservare gli oggetti di studio tanto di giorno come di notte, in quanto il Sole non varia la sua influenza sulle osservazioni radio-astronomiche in modo significativo nell'arco delle 24 ore, contrariamente a quanto accade per le osservazioni telescopiche. Inoltre, grazie a questo tipo di osservazioni, è possibile studiare fenomeni specifici legati alle emissioni radio.

L'antenna interferometrica Croce del Nord lavora in una banda larga circa 2,5 MHz, centrata alla frequenza di 408 MHz ($\lambda = 73.5$ cm), banda che è strettamente dedicata alle osservazioni radio-astronomiche, per cui nessun altro ente, centro o struttura può emettere segnale a quelle determinate frequenze, in quanto questo creerebbe rumore e interferenze tali da deteriorare i deboli segnali provenienti dallo spazio.



Fig.2 Ramo Est-Ovest



Fig.3 Ramo Nord-Sud

La Croce del Nord è un radiotelescopio di transito, ossia riceve le radiazioni elettromagnetiche di una sorgente solo quando questa transita, secondo il suo moto apparente, sul meridiano celeste del luogo di osservazione; è costituita di due rami, disposti secondo una T, in direzione N-S e E-O. Il ramo E-O è costituito di un'unica antenna, con uno specchio di forma cilindrico-parabolica, lungo 564 m e largo 35 m, inclinabile da -30° a 90° . L'asse di rotazione è parallelo a quello focale dell'antenna e in prossimità di questo sono posti i 1536 sensori. Il ramo N-S è costituito di 64 antenne di forma cilindrico-parabolica, di lunghezza 23.5 m e larghezza 7.5 m, disposte parallelamente tra loro. Sull'asse focale di ciascuna antenna sono

collocati, a 1,84 m dal vertice dello specchio (costituito da fili di acciaio posti alla distanza di 2 cm), 64 sensori (dipoli a mezz'onda), per un totale di 4096 dipoli lungo tutta la schiera. E sarà proprio su questa schiera che verrà iniziata l'opera di ammodernamento delle discese d'antenna.

Altro fondamentale strumento del centro radio-astronomico di Medicina è la parabola di 32 m di diametro: questa può essere orientata in ogni direzione e può, quindi, inseguire la sorgente di interesse in tutto il suo movimento di transito. La parabola è utilizzata, insieme alla sua gemella di Noto, in Sicilia, per le osservazioni della rete europea VLBI (Very Long Baseline Interferometry), per analisi in ambito geodinamico, per effettuare misure spettroscopiche in altri molteplici campi e, infine, per la ricerca di eventuali segnali di provenienza extraterrestre, e pertanto segnali modulati, nell'ambito del progetto S.E.T.I. (Search for Extra Terrestrial Intelligence)



Fig.3 Parabola

CAPITOLO 2

I PROGETTI LOFAR E SKA

LOFAR (acronimo di **LOW** Frequency **AR**ray) è un potente radiotelescopio di nuova generazione, ancora in costruzione nei Paesi Bassi, che effettua osservazioni radio-astronomiche in due bande a bassa frequenza (una estesa da 30 a 80 MHz, l'altra da 120 a 240 MHz); i dati raccolti tramite queste osservazioni permetteranno di studiare l'universo nella sua fase iniziale di evoluzione. Inoltre su queste antenne saranno installati sensori geofonici, metereologici e sensori per l'agricoltura, dimostrando come ormai la radioastronomia può collaborare con moltissimi altri campi per fornire sempre migliori servizi.



Fig. 1 Struttura di un'antenna LOFAR

La struttura di LOFAR è caratterizzata dalla presenza di un elevato numero di antenne di piccole dimensioni, in grado di puntare in più punti della volta celeste; il segnale ricevuto dalle antenne viene subito digitalizzato ed inviato, attraverso un collegamento a larghissima banda, ad un elaboratore, capace di riprodurre le immagini radio praticamente in tempo reale.

SKA è l'acronimo di "Square Kilometer Array", e indica il progetto di costruzione del più grande radiotelescopio del mondo; si tratta di uno strumento "virtuale", in grado di fornire le stesse prestazioni di un radiotelescopio di dimensioni enormi (si parla di un'area colletttrice di circa 1 milione di metri quadrati). Per raggiungere questo scopo si è pensato di dislocare diverse schiere di antenne in un territorio di vaste dimensioni, sfruttando il fatto che il potere risolvente dello specchio non è più, in questo caso, legato al diametro dello specchio stesso, bensì alla distanza massima tra le varie strutture coinvolte nel progetto.

Dati gli enormi sforzi scientifici ed economici richiesti da questo imponente progetto, è stato istituito un consorzio internazionale, suddiviso in commissioni, che si dedica alla ricerca delle tecnologie più adatte da implementare per la realizzazione di SKA. Tra gli stati membri di questo

consorzio, assieme a Stati Uniti, Paesi Bassi, Australia, Inghilterra..., si pone anche l'Italia, con l'idea di utilizzare la Croce del Nord come *dimostratore*, ossia come "test" in dimensioni ridotte, di SKA. Questa opera di analisi e sperimentazione dovrebbe continuare fino al 2009; dopodichè, scelte le opportune tecnologie, nel 2012 dovrebbero iniziare i lavori di costruzione, che dovrebbero permettere l'inizio delle osservazioni nel 2015, fino a raggiungere una piena operatività nel 2020. Diversi sono gli stati candidati ad ospitare la struttura SKA, anche se il luogo più adatto sembra essere l'Australia, geograficamente favorevole e con vastissimi territori poco popolati, che rendono lo spettro radio abbastanza sgombro da interferenze di tipo terrestre.

La banda di osservazione prevista per SKA è molto estesa: si estende tra 0,1 GHz e 25 GHz; per questo motivo è stata suddivisa in due sottobande: 0,1-2,5 GHz e 2,5-25 GHz.

Diverse sono le scelte che si possono fare, per ciascuna di queste due sottobande, per quanto riguarda le antenne da installare: per la banda più bassa sono favorite le antenne cilindrico-paraboliche o gli array di antenne ad apertura planare, mentre per la banda più alta sembrano più adatte delle piccole parabole.

Come già accennato prima, il Radiotelescopio di Medicina è entrato a far parte del consorzio internazionale legato a SKA proprio con la volontà di utilizzare la Croce come dimostratore; essa infatti mostra tutte le caratteristiche adatte per questo scopo: ha un'area collettrice di circa 30000 m², addirittura più grande di quella prevista per una singola stazione del nuovo radiotelescopio, e dispone di circa 6000 dipoli, che permettono di sperimentare nuove tecniche di interferometria su un notevole numero di ricevitori.

L'opera di ammodernamento della Croce è stata suddivisa in 3 parti:

- 1) **BEST-1:** prevede la re-ingegnerizzazione di un solo cilindro parabolico del ramo N-S della Croce del Nord, attraverso l'installazione di quattro Front End sulla linea focale (1 ogni 16 dipoli) collegati mediante link ottici analogici alla sala di elaborazione dati, dove il segnale viene convertito ad una frequenza di 30 MHz, digitalizzato e filtrato tramite un poly-phase filter bank implementato grazie a una FPGA. L'elaborazione dei dati così ottenuti avverrà in un cluster di PC. In questo modo sarà possibile testare tecniche di beamforming e mitigazione delle interferenze. La parte analogica di questa fase è già stata installata ed è funzionante, mentre la parte digitale è ancora in fase di studio.
- 2) **BEST-2:** prevede l'estensione del progetto a 8 cilindri parabolici del ramo N-S per un totale di 32 ricevitori installati.
- 3) **BEST-3:** prevede l'installazione di 4 ricevitori su 48 cilindri del ramo N-S e di 4 ricevitori su 6 segmenti del ramo Est/Ovest, per un totale di $4 \times 48 + 6 \times 4 = 216$ ricevitori.

CAPITOLO 3

UP-GRADE DELLA CROCE DEL NORD

La volontà di utilizzare la Croce del Nord come dimostratore per SKA solleva il problema dell'ammmodernamento della struttura; in questa relazione la nostra attenzione si concentra sul ramo N-S, anche se il tutto verrà esteso anche al ramo E-O.

Infatti attualmente il collegamento di discesa d'antenna è effettuato completamente attraverso cavi coassiali; i segnali vengono inviati, a gruppi di 8, alle cabine dove vengono rifasati, amplificati da un LNA, filtrati mediante un filtro passa banda centrato alla frequenza di 408 MHz e poi convertiti in segnali a bassa frequenza, in una banda che si estende fino a circa 30 MHz. A questo punto il segnale proveniente da ogni cabina viene allineato temporalmente agli altri e viene inviato, sempre attraverso cavi coassiali, alla sala di elaborazione, dove avviene il signal-processing.

La prima ipotesi di ammodernamento, che però attualmente non è tenuta in considerazione, prevedeva il trasferimento del segnale in parte attraverso cavo coassiale, in parte mediante fibra ottica.

Il segnale doveva essere amplificato dal LNA e filtrato dal filtro passa banda direttamente sull'antenna, per poi essere trasferito via coassiale alla cabina.

Qui il segnale doveva essere corretto in ampiezza e fase, sommato al segnale dell'antenna successiva per ridurre il "field of view" e separato in due vie, una in fase e una in quadratura.

A questo punto il segnale veniva trasferito in banda base attraverso 2 mixer e un segnale di oscillatore locale di frequenza pari a 408 MHz. Per ciascuna via il segnale doveva essere poi digitalizzato per mezzo di un convertitore A/D; i dati, dopo essere stati formattati tramite un Ethernet Formatter, dovevano essere inviati attraverso fibra ottica e mediante transceivers ottici alla sala di elaborazione.

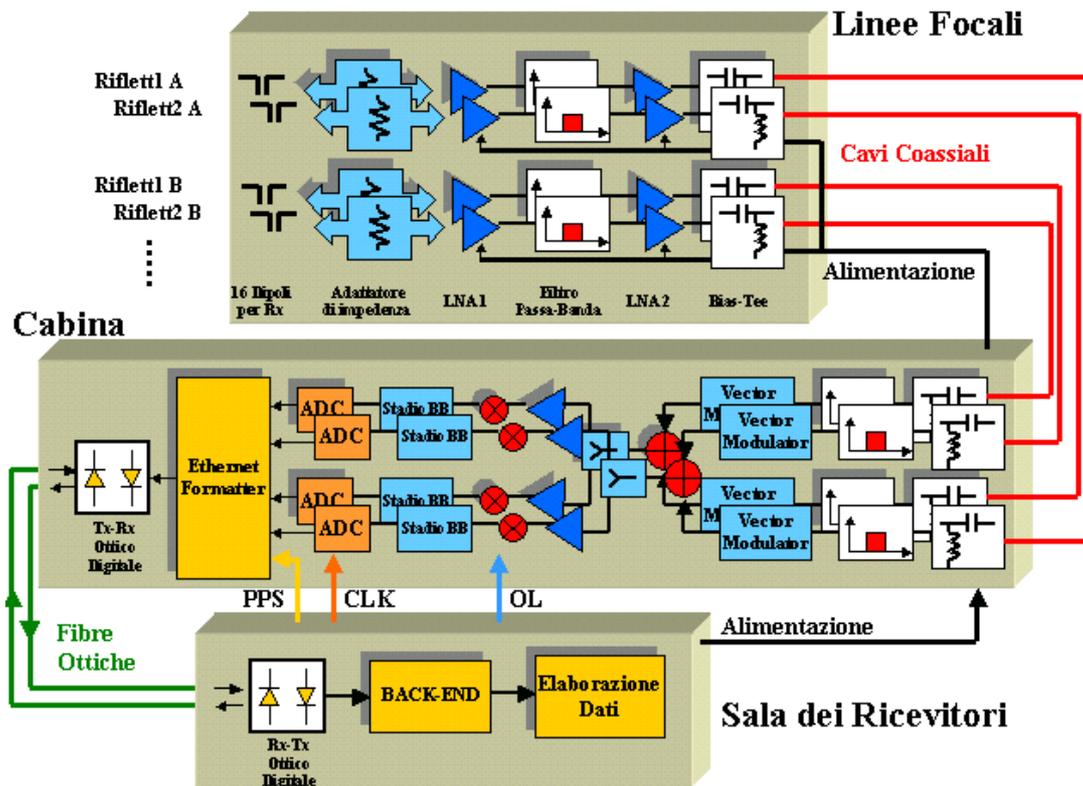


Fig.1 Configurazione della prima ipotesi del link di discesa d'antenna

L'altra ipotesi di progetto, si pone l'obiettivo di eliminare tutta l'elettronica nelle cabine, che deve essere trasferita all'interno della sala di elaborazione, e di realizzare tutti i collegamenti mediante fibra ottica; per realizzare questa configurazione sono possibili due vie:

- 1) LINK OTTICO ANALOGICO: il segnale viene convertito da elettrico ad ottico direttamente sull'antenna, dopodichè, dopo aver oltrepassato un primo stadio amplificatore e uno di filtraggio, viene inviato attraverso fibra, fino alla sala dei ricevitori, dove viene riconvertito in elettrico e poi elaborato;
- 2) LINK OTTICO DIGITALE: il segnale, prima di essere convertito da elettrico ad ottico, viene digitalizzato, amplificato e filtrato all'altezza del sensore e infine viene inviato alla sala dei ricevitori per essere elaborato.

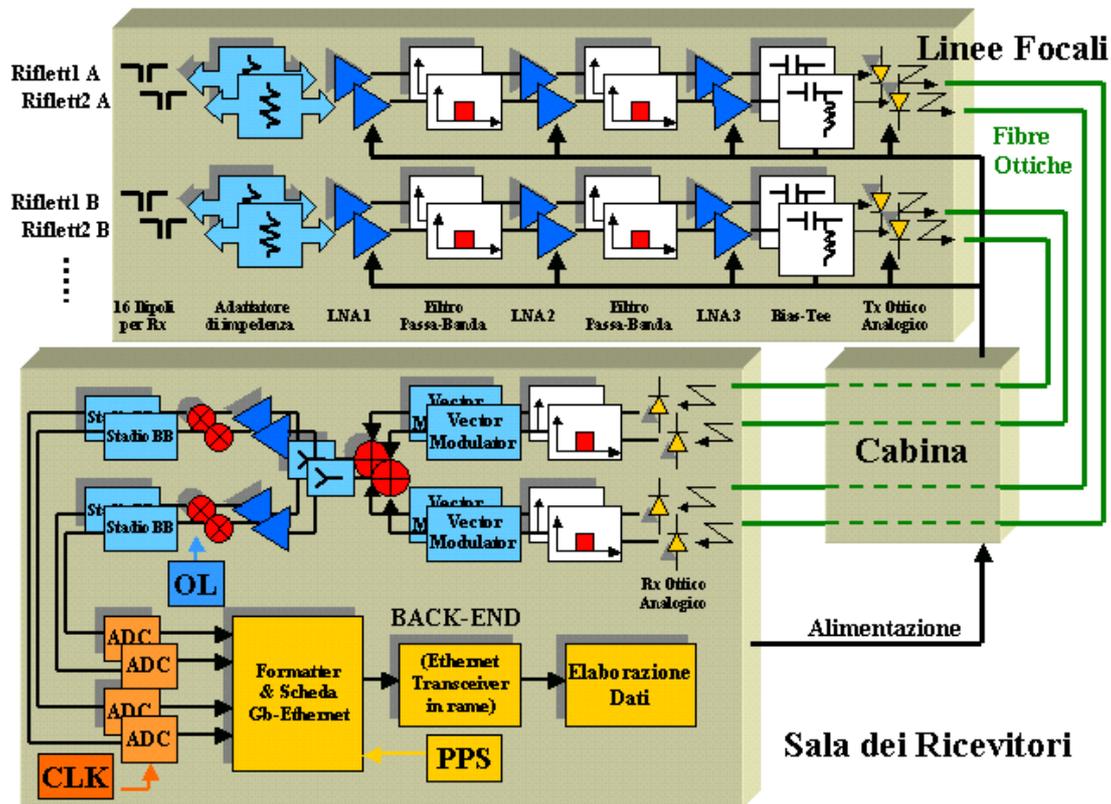


Fig.2 Nuova configurazione interamente in fibra ottica e con cabine “trasparenti”.

Dalla nuova configurazione si possono ottenere differenti vantaggi: innanzitutto il trasferimento dell’elettronica da un ambiente esterno (caratterizzato da sbalzi di temperatura e umidità) ad una sala controllata in temperatura migliora notevolmente la qualità delle elaborazioni sul segnale, così come aumenta il tempo di vita degli strumenti, che subiscono un deterioramento più lento; inoltre in caso di guasto risulta molto più semplice la sostituzione dell’elemento compromesso, con relativi costi di manutenzione inferiori.

Inoltre, per quanto riguarda il link analogico, verrebbe meno la necessità di trasportare fino alla cabina tutti i segnali di controllo e sincronismo, cosa che garantirebbe grande stabilità e controllabilità, indispensabili per segnali di questo tipo, mentre d’altro canto il link digitale permetterebbe una prima elaborazione del segnale direttamente sull’antenna, favorendo, ad esempio, l’analisi del beamforming.

Infine l’utilizzo della fibra ottica permetterebbe di utilizzare link a larghissima banda e con attenuazioni relativamente molto più basse rispetto a quelle introdotte dal cavo coassiale, e in più garantirebbe immunità totale ai disturbi elettromagnetici naturali (scariche elettriche durante i temporali) ed artificiali.

L'attenzione di questa relazione si pone nell'analisi della modalità con link digitale, per mezzo dello studio dei suoi componenti principali e maggiormente influenti nella valutazione delle prestazioni e dei costi.

CAPITOLO 4

CARATTERIZZAZIONE DEL LINK OTTICO DIGITALE

4.1 DEFINIZIONE DELLE SPECIFICHE DEL PROBLEMA

L'opera di up-grade della Croce del Nord riguarda all'incirca 350 sistemi di ricezione, caratterizzati da una grande ampiezza di banda analogica (16 MHz); la conversione da analogico a digitale deve poter permettere il raggiungimento di elevate velocità di trasmissione (dell'ordine di 10 Gbps), data la grandissima quantità di dati da trasferire. Inoltre il link deve snodarsi su distanze che variano tra i 700 m e i 5 Km, al limite delle quali la trasmissione e la rivelazione devono garantire una tasso di errore per bit (BER) di circa 10^{-12} .

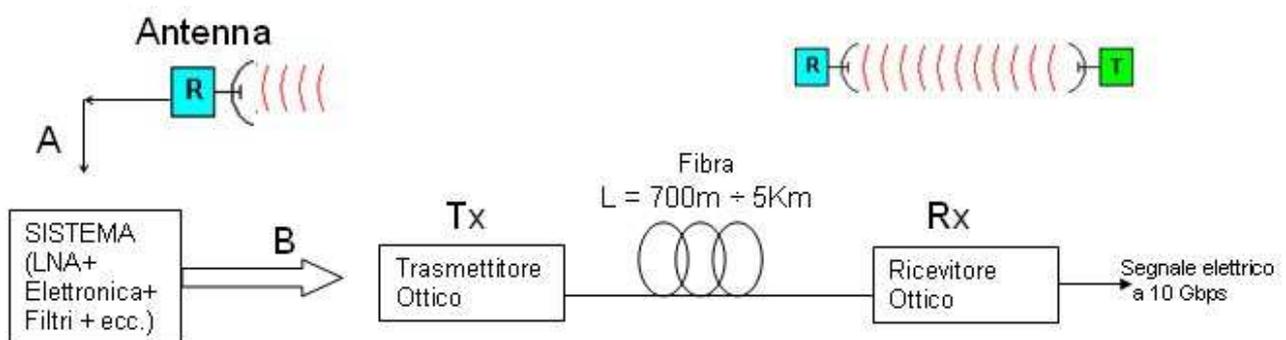


Fig.1 Link ottico digitale

4.2 LA FONTE OTTICA

Inizialmente sono state considerate tutte le possibili fonti ottiche, arrivando alla conclusione, praticamente immediata, che data l'elevata velocità e le distanze richieste è necessario l'utilizzo di fonti laser in seconda o in terza finestra, così da abbattere l'attenuazione, e, attraverso l'uso di fibre ottiche monomodo, ridurre quanto più possibile il fenomeno della dispersione.

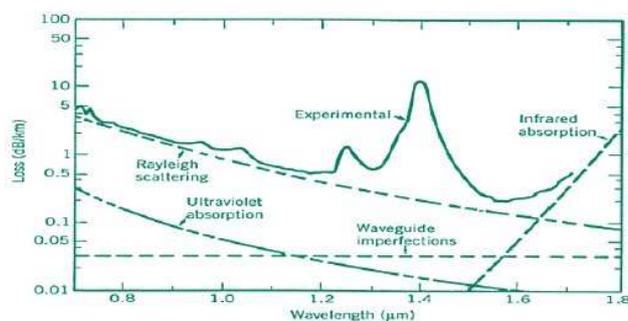


Fig.2 Finestre di assorbimento della radiazione ottica

Per questo è stata subito scartata l'ipotesi di utilizzare laser del tipo Fabry-Perot, troppo blandi in prestazioni per i nostri scopi.

Molto interessanti si sono rivelate, invece, altre due categorie di laser: DFB e VCSEL.

4.2.1 Laser a feedback distribuito DFB

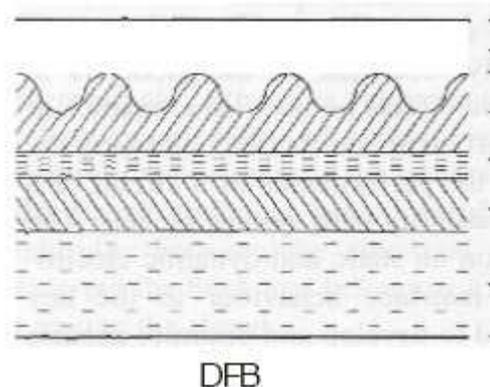


Fig.3 Ripple dello strato attivo in un laser di tipo DFB

Un laser DFB è un laser *edge-emitting*, ossia ad emissione laterale, caratterizzato da una cavità risonante e un'area attiva spazialmente distribuite; in queste strutture, quindi, vengono realizzate delle “corrugazioni” per mezzo di una variazione periodica dell'indice di rifrazione.

Questo permette di ottenere una maggiore stabilità della lunghezza d'onda rispetto ad un laser Fabry-Perot; infatti un laser DFB presenta uno spettro praticamente monomodale (la differenza tra riga centrale e righe secondarie è $>$ di 35 dB). Pertanto un laser DFB con riga di emissione centrata alla lunghezza d'onda di 1310 o 1550 nm (rispettivamente in 2° e 3° finestra) potrebbe sembrare la fonte ottica migliore per il sistema che stiamo considerando, se non fosse che da un'indagine di mercato (vedi tabella in allegato a fine relazione) è risultato che i laser DFB sono estremamente costosi (prezzo indicativo di 550 euro al pezzo per un lotto di 1000 pezzi).

L'elevato prezzo di questi laser è dovuto al fatto che non sono testabili quando sono ancora in wafer, ma devono essere prima tagliati e poi testati uno ad uno per verificarne le corrette prestazioni.

D'altra parte però questi laser, oltre al vantaggio di essere monomodali, sono dispositivi che ben si prestano ad una modulazione diretta, quindi integrata all'interno del dispositivo di controllo del laser, che risulta pertanto più semplice da gestire, meno ingombrante e più economica. Questo tipo di modulazione però è consentita per velocità fino a 2.5 Gbps, pertanto in ogni caso sarebbe necessario adottare una modulazione esterna.

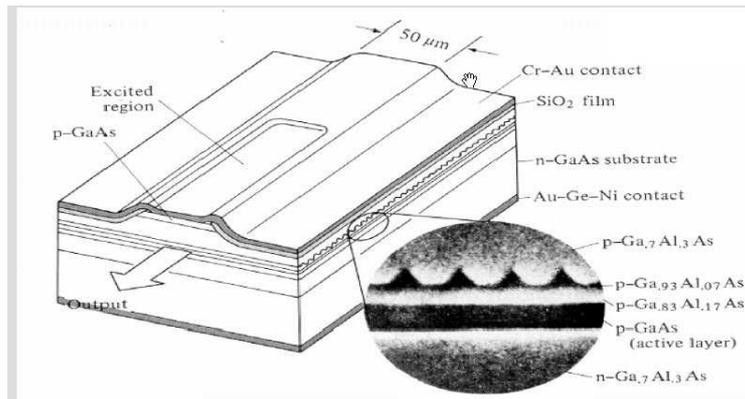


Fig. 2 Particolare dell'area attiva di un DFB

4.2 Laser ad emissione superficiale VCSEL

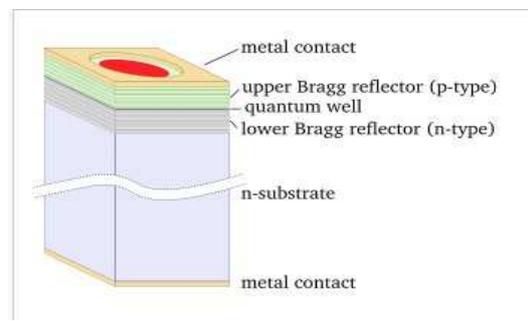


Fig.3 Struttura di un VCSEL

Altro dispositivo che sta attirando sempre più l'interesse della comunità scientifica e che sembra essere la fonte ottica del futuro è il **laser a cavità verticale e ad emissione superficiale VCSEL** (*Vertical Cavity Surface-Emitting Laser*).

Un VCSEL è costituito da una serie di specchi di Bragg verticali ad altissima riflessione, fra i quali vi sono diversi strati di materiale semiconduttore (area attiva -quantum well-) che generano il fascio di luce, emesso in direzione verticale e perpendicolare all'area attiva, oltre la superficie del semiconduttore.

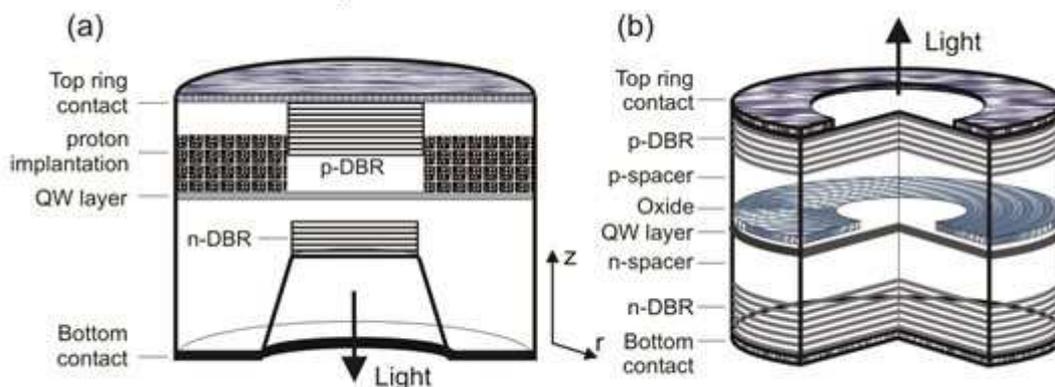


Fig.4 a) VCSEL con emissione della luce verso il basso

b) VCSEL con emissione della luce verso l'alto

Il vantaggio più evidente che hanno i VCSEL rispetto ai laser di tipo DFB è il costo: essendo il raggio emesso dai VCSEL perpendicolare all'area attiva, il test dei dispositivi si può fare direttamente sul wafer, senza l'obbligo del taglio di ciascuno, come accadeva per i DFB, riducendo in modo drastico i costi di fabbricazione; inoltre essendo l'area attiva protetta dagli specchi, questa non è interfacciata direttamente con l'esterno, per cui è possibile sostituire il packaging in ceramica caratteristico dei DFB (che ricordiamo avere l'area attiva direttamente esposta all'aria), con altri materiali meno ingombranti e costosi.

Sempre per questo motivo i VCSEL, non avendo parti attive esposte, sono molto più affidabili e tendono ad avere tempi di vita molto più lunghi dei classici DFB.

D'altra parte però i VCSEL hanno un'estrema dipendenza dalla temperatura, che influisce notevolmente sulla relazione corrente di soglia-potenza emessa; infatti all'aumentare della temperatura il laser si deteriora molto velocemente, per cui per mantenere lo stesso livello di potenza ottica in uscita è necessario il pompaggio di sempre più elevati livelli di corrente.

A complicare le cose si aggiunge il fatto che l'aumento di temperatura può provocare, nei VCSEL a singolo modo longitudinale, uno shift della lunghezza d'onda di emissione, con conseguente allargamento dello spettro di emissione del laser.

Per questo si rendono necessari nei VCSEL sistemi di controllo della temperatura, che prevedono refrigeratori termo-elettrici basati su meccanismi di feed-back.

Nonostante i notevoli vantaggi dei VCSEL, la tecnologia è riuscita a produrre in larga scala solamente VCSEL in prima finestra, anche se VCSEL in seconda finestra saranno sul mercato, si spera, a partire dal 2008, mentre VCSEL in terza finestra sono ancora allo studio. Questo perché lo strato di tipo p assorbe molto di più la luce alle lunghezze d'onda di 1300-1550 nm rispetto alla lunghezza d'onda di 850 nm, e risulta molto difficile progettare strutture con basso grado di assorbimento ma che possano comunque funzionare come laser.

Nonostante tutto, diverse sono le case produttrici di VCSEL che abbiamo contattato (Vertilas, Alight) e sembra che siano tutte indirizzate a produrre in tempi brevi sistemi VCSEL modulabili a 10 Gbps.

4.2 LA MODULAZIONE DIGITALE

Il modulatore ottico è quello strumento che permette di imprimere sulla portante ottica l'informazione che si vuole trasmettere; possiamo considerare 2 tipi di modulazione:

- MODULAZIONE DIRETTA: la corrente di pilotaggio del laser è modulata, tra 2 livelli, direttamente dal segnale che si desidera trasmettere; è molto più semplice ed economica della modulazione esterna, ma introduce distorsione e *chirp*, ossia una modulazione di

frequenza spuria, generata dall'interferenza tra fotoni e portatori all'interno del laser. Inoltre è adatta per modulare laser in sistemi digitali fino a 2 Gbps.

- MODULAZIONE ESTERNA: l'informazione è impressa sulla portante ottica mediante un dispositivo esterno.

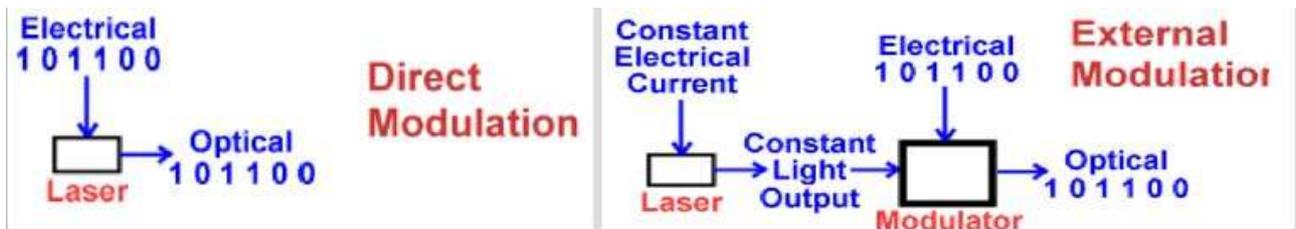


Fig.5 Schema riassuntivo di modulazione diretta (sulla sinistra) ed esterna (sulla destra)

4.3.1 Modulazione esterna

La modulazione esterna, più complessa e costosa di quella interna, è migliore in termini di prestazioni, in quanto limita al minimo gli effetti dovuti alla distorsione. Viene realizzata imprimendo sulla portante ottica di un laser CW (ad onda continua) una modulazione di ampiezza, mediante un modulatore esterno. Due sono le classi principali di modulatori esterni per sistemi digitali:

- 1) MODULATORE MACH-ZEHNDER:

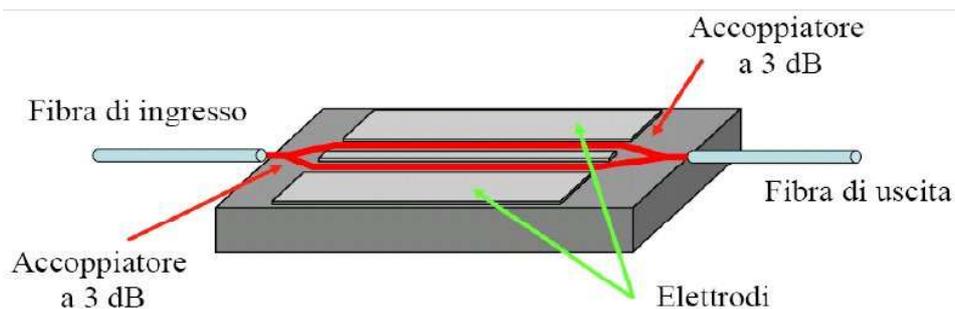


Fig.6 Modulatore Mach-Zehnder

È un modulatore di tipo elettro-ottico, ossia che sfrutta l'effetto elettro-ottico lineare per cui le caratteristiche dielettriche, ad esempio l'indice di rifrazione, di alcuni materiali (come il Niobato di Litio, LiNbO_3), possono essere modificate dalla presenza di un campo elettrico.

Funzionamento: il modulatore Mach-Zehnder è costituito di un ingresso, accoppiato ad una fibra ottica, che si “sdoppia” in due bracci a forma di Y, costituiti da cristalli di LiNbO_3 . La potenza in

ingresso viene suddivisa in due parti uguali, una per ogni braccio; se non viene applicato nessun campo elettrico al cristallo, i due raggi che attraversano il dispositivo sono in fase, per cui all'uscita del modulatore si ritrova la stessa ampiezza di segnale dell'ingresso (condizione di ON). Quando, invece, viene applicata una opportuna tensione, il cristallo cambia il suo indice di rifrazione in modo tale che il raggio che attraversa il braccio su cui è applicato il campo risulti sfasato di π ; in questo caso all'uscita del modulatore avremo potenza 0, ottenendo la condizione di OFF.

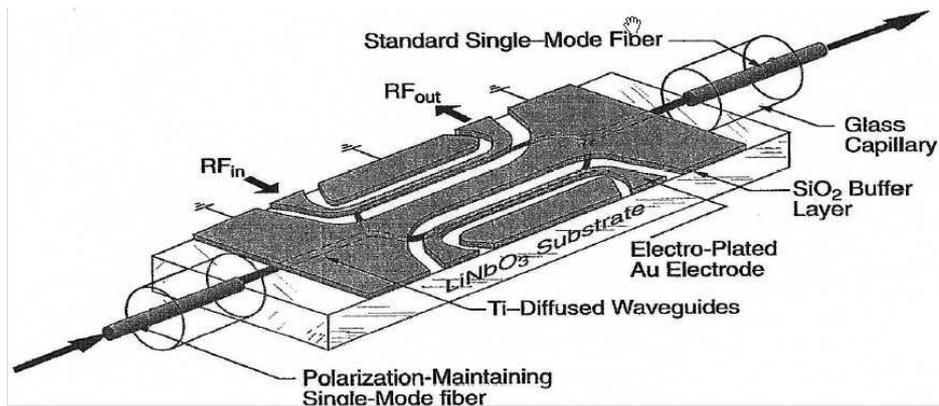


Fig.6 Struttura di un modulatore Mach-Zehnder

2) MODULATORE AD ELETTROASSORBIMENTO:

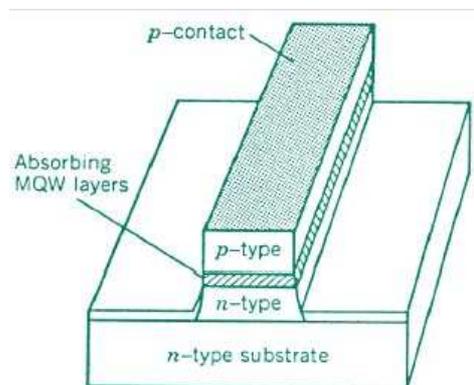


Fig.7 Struttura simile ad un laser del modulatore EAM

Più complesso del modulatore Mach-Zehnder, basa il suo funzionamento sulla capacità del semiconduttore di assorbire i portatori in relazione al voltaggio che gli viene applicato. Se non viene applicata tensione il dispositivo è completamente trasparente, altrimenti manifesta la sua capacità di assorbimento, generando così una vera modulazione di intensità.

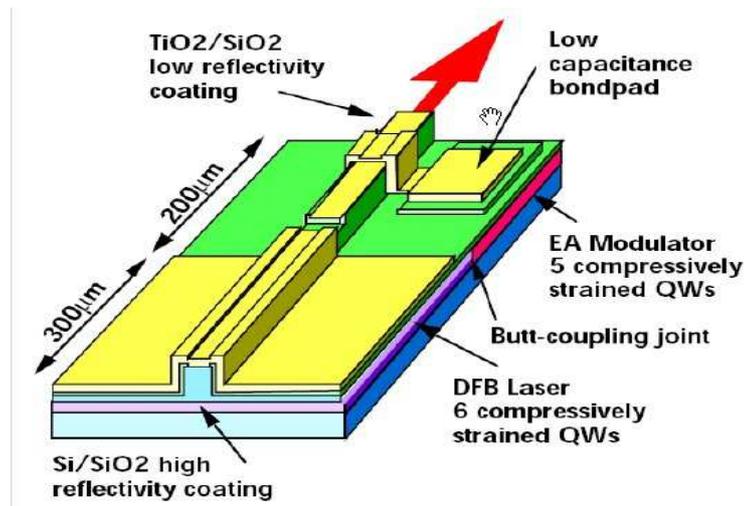


Fig.8 Modulatore EAM

4.3 IL MEZZO TRASMISSIVO: LA FIBRA OTTICA

Come già accennato in precedenza l'unica soluzione possibile per il mezzo di trasmissione appare la fibra di tipo monomodo, più vantaggiosa in termini di prestazioni, ma molto più costosa rispetto a qualunque altro tipo di fibra; indagini di mercato hanno rivelato che la fibra più economica e che sta avendo sempre maggiori incrementi in termini di prestazioni è la fibra in plastica. Purtroppo però questa non è in grado di soddisfare le specifiche del link allo studio, in quanto, a causa soprattutto della caratteristica di multimodalità e dell'altissimo valore di dispersione per effetto Rayleigh, può sostenere lunghezze fino ad un massimo di qualche centinaio di metri.

4.4 IL FOTORIVELATORE

Per ciò che riguarda il sistema di ricezione, non è stato difficile trovare sistemi di ricezione con buone prestazioni (ridotta corrente di buio, bassa potenza dissipata, responsivity attorno a valori di 0,7-0,8 A/W, sensitivity di circa -15 dBm), valide grossomodo per ogni dispositivo analizzato.

4.5 CONCLUSIONI

Di fronte ai risultati dell'indagine di mercato e all'analisi dei dispositivi che potrebbero concorrere alla realizzazione del link possiamo osservare che:

- 1) la fonte ottica migliore sarebbe un laser di tipo DFB, che però risulta essere eccessivamente costoso, considerando il volume di acquisto;
- 2) soluzione alternativa potrebbe essere rappresentata dai VCSEL, ma purtroppo non sono ancora disponibili VCSEL nelle finestre di lavoro di nostro interesse; nonostante tutto, siccome alcune aziende (già citate in questa relazione) stanno progettando VCSEL in 2° e 3°

finestra, non è da escludere una futura collaborazione con queste nello svolgimento di test in campo reale di questi dispositivi;

- 3) fibra e fotorivelatore rappresentano un problema secondario, in quanto i loro costi, seppur elevati, rimangono comunque inferiori a quelli di riferimento per laser e modulatori.

Pertanto si rivela necessario pensare ad una alternativa alla costruzione del link partendo dai singoli componenti; per questo si è pensato anche alla possibilità di ottenere link già pronti e strutturati secondo standard internazionali: ETHERNET e SONET.

CAPITOLO 5

RETI LOCALI E RETI GEOGRAFICHE PER SISTEMI IN FIBRA OTTICA: GB-ETHERNET E SDH-SONET

Soluzione alternativa alla creazione del collegamento partendo dall'assemblaggio dei singoli componenti si può trovare in link già pre-strutturati per lavorare in reti regolate da standard internazionali.

Dalla ricerca di mercato effettuata è risultato che sono principalmente due gli standard che regolano le trasmissioni ottiche ad alta velocità: Gb-Ethernet per le reti di area locale, SDH-Sonet per le reti geografiche.

All'interno dello standard Gb-Ethernet si differenziano due sottogruppi di standard: 1000BASE-SX e 1000BASE-LX; il primo si occupa di reti con dispositivi che lavorano alla lunghezza d'onda di 850 nm, pertanto sicuramente non potrà essere lo standard del collegamento in questione. Il 1000BASE-LX, invece, permette l'uso di laser a grandi lunghezze d'onda (1300-1500 nm), che, grazie anche a fibre monomodo, consentono di raggiungere distanze fino a qualche Km.

Gli standard SDH-SONET si occupano di reti che si estendono su un raggio più ampio e che implementano sistemi più complicati di quelli previsti per gli standard Ethernet, ad esempio sistemi WDM o DWDM per trasportare più portanti ottiche a diversa frequenza sulla stessa fibra monomodo, così da moltiplicare esponenzialmente i canali disponibili per la trasmissione.

I link proposti da Avanex, Mitsubishi e Microelit sono compatibili sia con Ethernet sia con Sonet, mentre Sumitomo fornisce transceivers adattabili solamente a Gb-Ethernet; California Scientific commercializza soltanto collegamenti per effettuare test in laboratorio e per questo, pur essendo di buonissime prestazioni, non possono essere tenuti in considerazione al fine della realizzazione di questo progetto, in quanto estremamente costosi (prezzo richiesto ~ 5000 dollari per link).

Le altre soluzioni proposte risolvono in parte il problema della progettazione dell'elettronica da associare al dispositivo trasmettitore e ricevitore (mancherebbero il convertitore A/D, il formattatore di trame, la generazione del sincronismo...), ma risultano comunque poco convenienti dal punto di vista economico. Avanex propone due formule alternative:

- 1) una coppia TX e RX, con ottime prestazioni, forse anche eccessive per lo scopo a cui è dedicato il progetto, in quanto questi dispositivi implementano la tecnica WDM, ma

- sicuramente molto meno allettanti dal punto di vista economico: ~2000 euro per il modulo trasmettitore e ~1000 euro per quello ricevitore (quantità richieste: circa 500 pezzi);
- 2) un modulo transceiver XFP (Power Port) che integra nello stesso package trasmettitore a 1550 nm e ricevitore, al prezzo di circa 1300 euro per una commessa di 500 pezzi; questa soluzione però non è assolutamente conveniente in quanto, essendo il collegamento in questione unidirezionale, il ricevitore all'interno del dispositivo Power Port rimarrebbe completamente inutilizzato.

Anche Mitsibishi, Sumitomo e Microelit propongono soluzioni in forma di TX e RX integrati, MF-10 KSXA e MF-10 KWXB per Avanex, SXP 3101 LX per Sumitomo e RTX226-001 per Microelit, di buone prestazioni (il secondo Avanex implementa anche la tecnica DWDM) ma impensabili per il motivo precedentemente illustrato.

CAPITOLO 6

BREVE DESCRIZIONE DEL LINK ANALOGICO E CONFRONTO CON IL LINK DIGITALE

L'applicazione del link analogico nell'ambito dell'opera di up-grade della Croce del Nord prevede, esattamente come il link digitale, di eliminare completamente la necessità di trasferire dati tramite cavo coassiale, in favore dell'utilizzo della sola fibra ottica, con tutti i vantaggi elencati nel cap. 3. Così come avviene per il link digitale, anche nel link analogico il blocco più delicato, che richiede più attenzione nella sua progettazione, è il dispositivo trasmettitore; questo contiene il laser e tutta la parte elettronica adibita al suo controllo (circuito di polarizzazione e loop per il controllo di potenza); il segnale a radiofrequenza ricevuto dalle antenne va a modulare il laser secondo una modulazione diretta, variando la corrente di iniezione del laser, e quindi la potenza emessa, che viene trasmessa, attraverso la fibra, fino alla sala dei ricevitori. Qui il fotorivelatore, rivelando l'intensità di potenza ottica, è in grado di ricostruire la forma d'onda a RF, permettendone così la sua analisi.

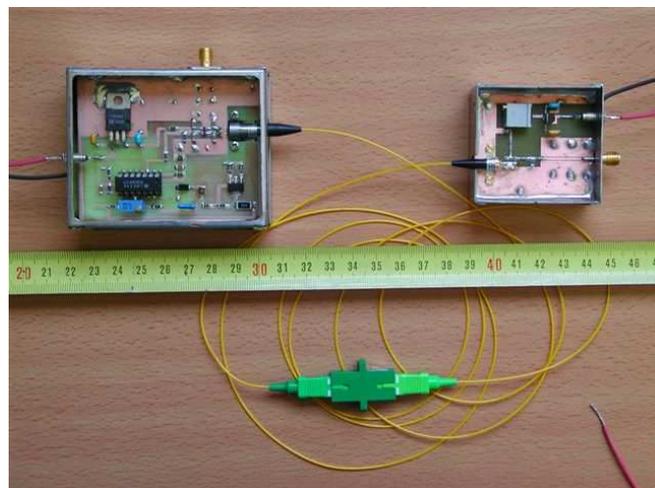


Fig.1 Link ottico realizzato nell'ambito di una tesi svolta al Radiotelescopio di Medicina

Il vantaggio dell'utilizzo di un link analogico invece di un link digitale sta nel fatto che l'elettronica necessaria per trasferire il segnale dall'antenna alla sala dei ricevitori è inferiore rispetto a quella necessaria per avere un collegamento in digitale. Nel caso analogico, infatti, sull'antenna non sono necessari convertitori A/D, formattori di trame e, soprattutto, non è necessario trasferire nessun segnale di sincronismo, che generalmente crea non pochi problemi nella realizzazione di un link digitale. Per questo al di là del circuito trasmettitore e di una parte di front-end necessaria a filtrare e a dare una prima amplificazione al segnale a radiofrequenza (che giunge dallo spazio debolissimo),

non è necessario nessun altro componente elettronico all'altezza dell'antenna; il tutto è, infatti, spostato all'interno della sala dei ricevitori, in ambiente di facile accesso e controllato in umidità e temperatura.

Quindi, poiché dall'analisi delle prestazioni dei dispositivi per costituire il link digitale non è emerso nessun grande vantaggio rispetto al link analogico, e siccome i prezzi di un link digitale con queste prestazioni risultano ancora eccessivi per il progetto in questione, si può dedurre che la strada migliore da percorrere per realizzare l'up-grade della Croce del Nord sia quella analogica.

CAPITOLO 7

VERIFICA DELLE PRESTAZIONI DEI DISPOSITIVI CONSIDERATI ATTRAVERSO SIMULAZIONI CON OPTSIM.

Per verificare le prestazioni dei dispositivi, in particolar modo delle sorgenti ottiche, è stato utilizzato il software Optsim, ideato per simulare il comportamento di un qualunque collegamento ottico, analogico o digitale.

7.1 SIMULAZIONI PER LINK OTTICI DIGITALI

In questo caso abbiamo utilizzato come test per i collegamenti ottici digitali i laser DFB Avanex, Mitsubishi e Hamamatsu, mentre purtroppo non è stato possibile fare simulazioni attendibili sui VCSEL, in quanto Optsim non permette la modifica delle caratteristiche del suo modello per questo tipo di laser ; per ciascuno dei DFB considerati è stato creato un link su modello di quello che deve essere effettivamente realizzato sulla Croce del Nord (lunghezze tra i 700 m e i 5 Km, velocità di 10 Gbps..). Per ottenere nella simulazione un laser che fosse del tutto simile ad uno reale è stato scelto, come modello, il laser di tipo Rate Equations ⁽¹⁾, nella cui tabella descrittiva sono state di volta in volta inserite le caratteristiche specificate nei data-sheets.

Inoltre tutte le simulazioni sono state fatte presupponendo una modulazione esterna : sono stati scelti i modelli di modulatore lineare e modulatore Mach-Zender ⁽¹⁾.

Di seguito vengono proposti diagrammi dei link e i grafici ottenuti.

(1) Vedi manuale di Optsim

LASER AVANEX 03045-01 1915 LM

Parameter	Value	Units	Range
Test frequency	193.414489032	THz	(0, Inf)
Test wavelength	1550.0	nm	(0, Inf)
Insert Test Current Value	80	mA	[0, Inf)
Threshold Current	20.0	mA	
Linear Output Power	1.0	mW	
P-I Slope	0.01667	mW/mA	
Turn-On Delay	0.145	ns	
Relaxation Oscillation Peak Freq...	8.78264	GHz	
Relaxation Oscillation Peak Over...	36.98724	dB	

Quasi-static Frequency Chirp Ab...	0.06155	GHz/mA	
Linewidth	1.10706	MHz	
Start Frequency	0.1	GHz	[0, Inf)
Stop Frequency	9	GHz	(0,1, 1,0e+32]
Average RIN	-130.0091	dB/Hz	

Fig.1 Caratteristiche del laser Avanex 1915 LM

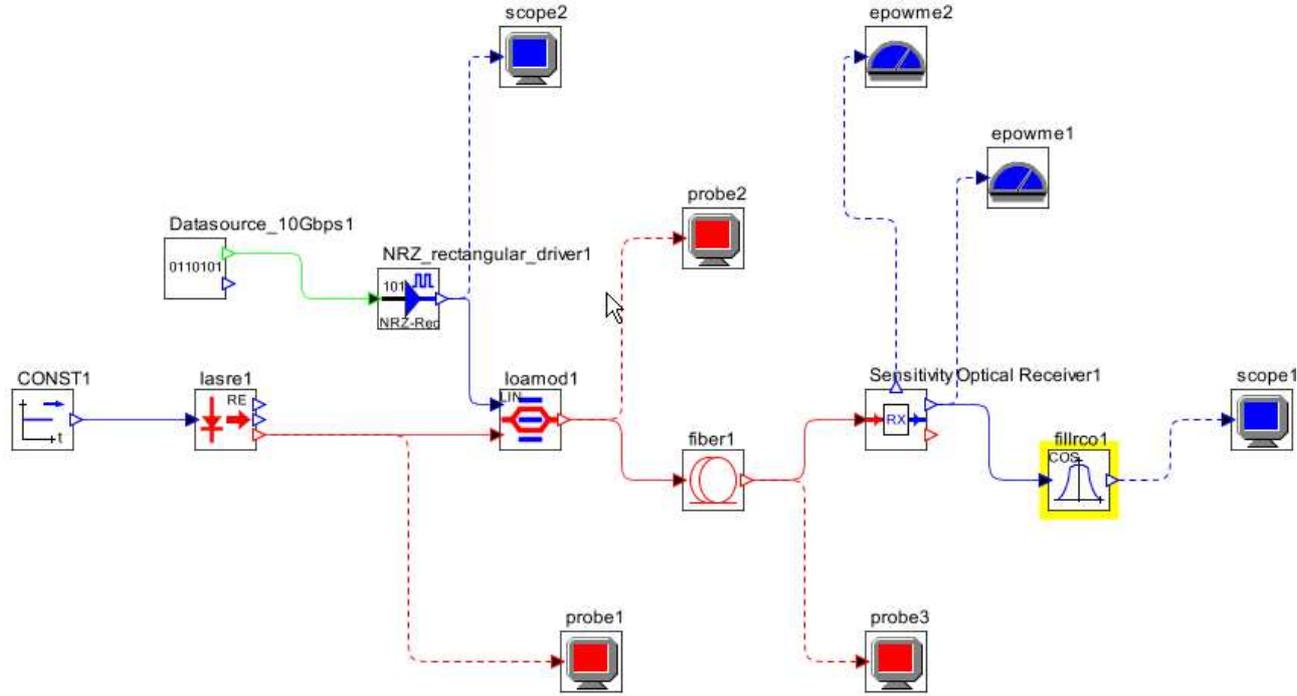


Fig.2 Schema del link ottico digitale che implementa il laser 1915 LM e modulatore lineare

In seguito è stata lanciata una simulazione facendo variare la corrente di controllo del laser (in mA):

Run #	Param 1
Parameter	amp
Run 1	0,015
Run 2	0,02
Run 3	0,03
Run 4	0,04
Run 5	0,05
Run 6	0,06
Run 7	0,07
Run 8	0,08

Per verificare le prestazioni del laser è stato valutato il diagramma ad occhio del sistema in tutti gli 8 passi dello scan:

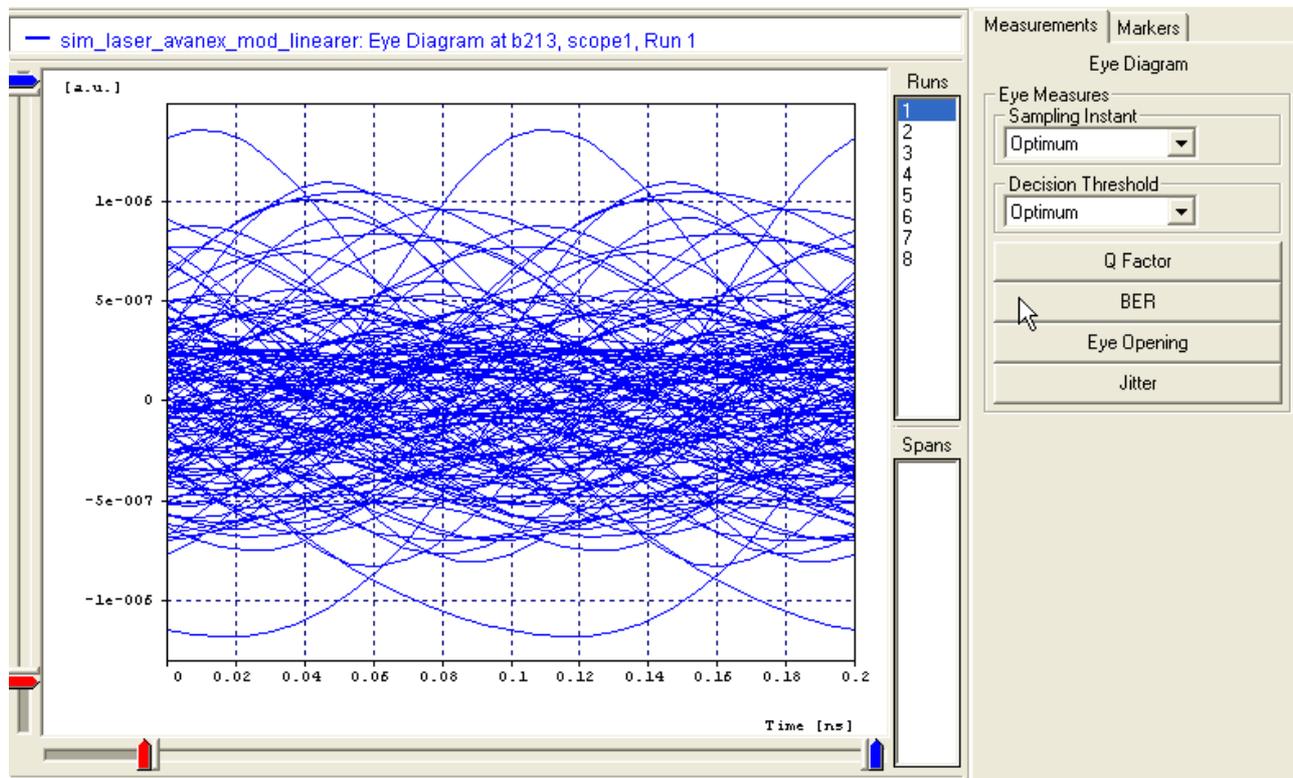


Fig.3 Diagramma ad occhio al passo 1

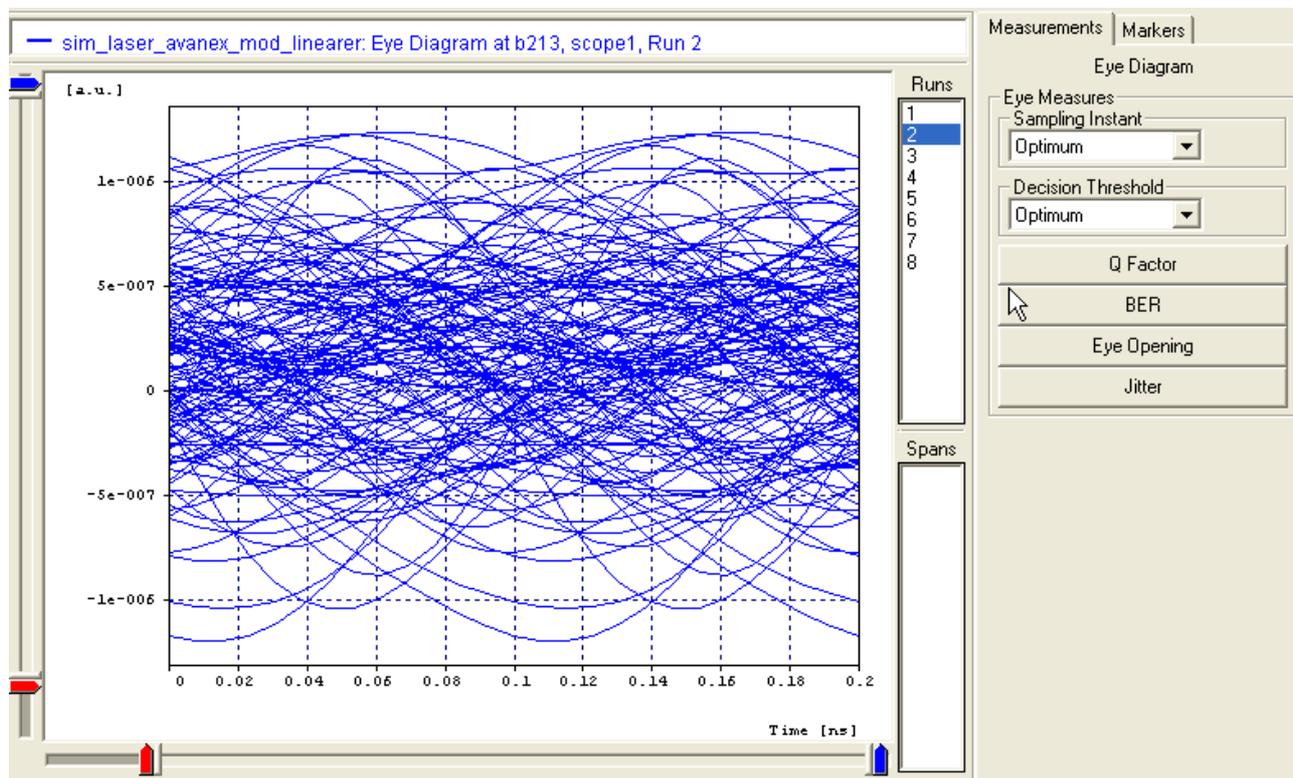


Fig.4 Diagramma ad occhio al passo 2

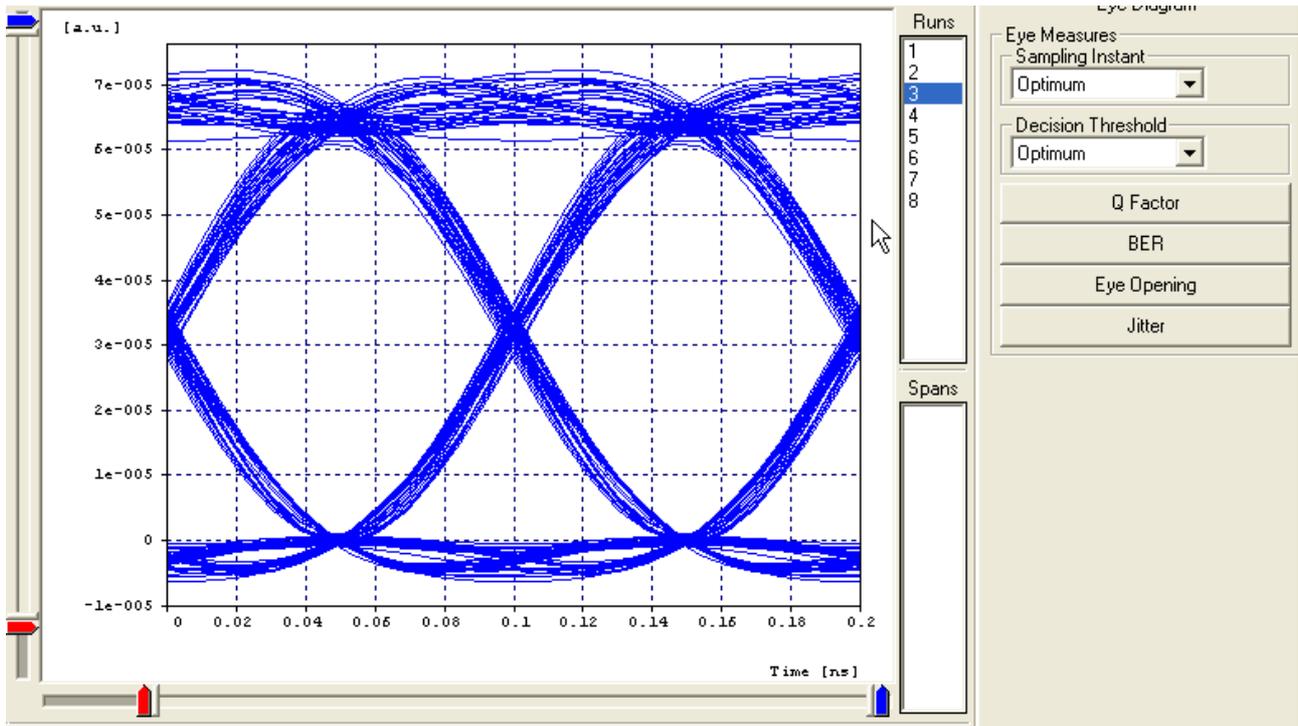


Fig.5 Diagramma ad occhio al passo3

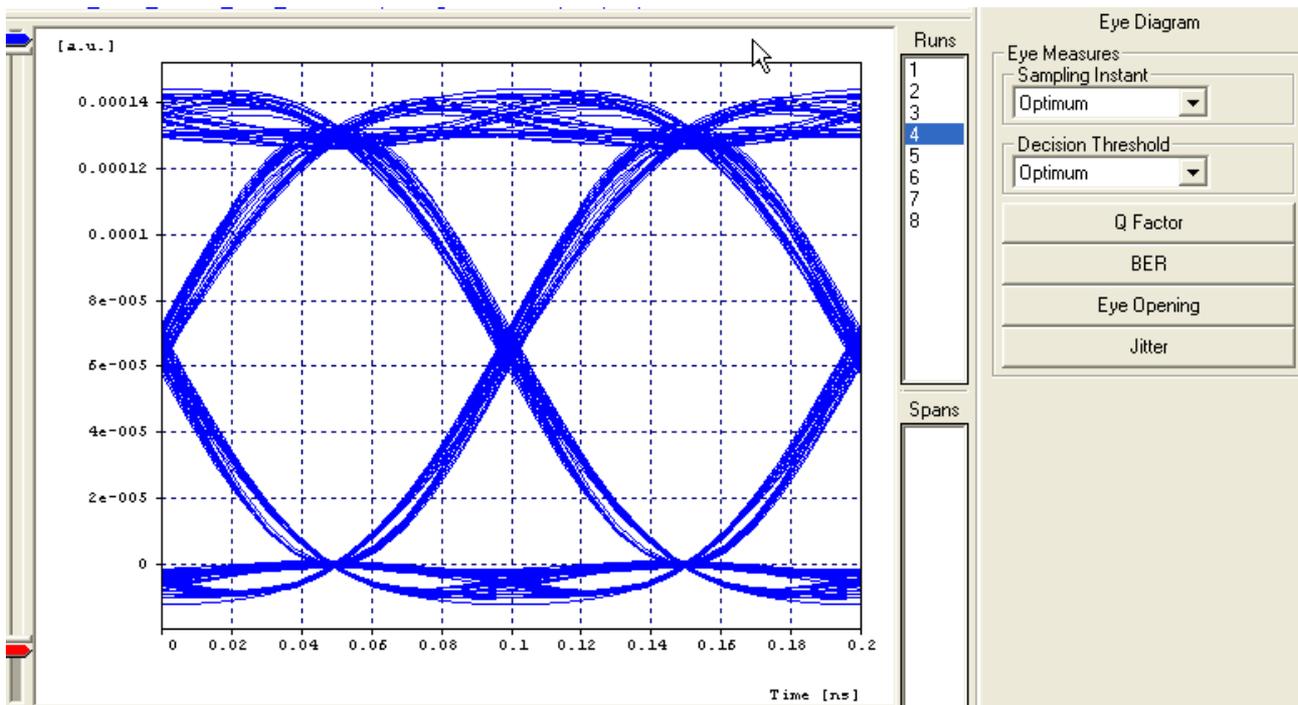


Fig.6 Diagramma ad occhio al passo 4

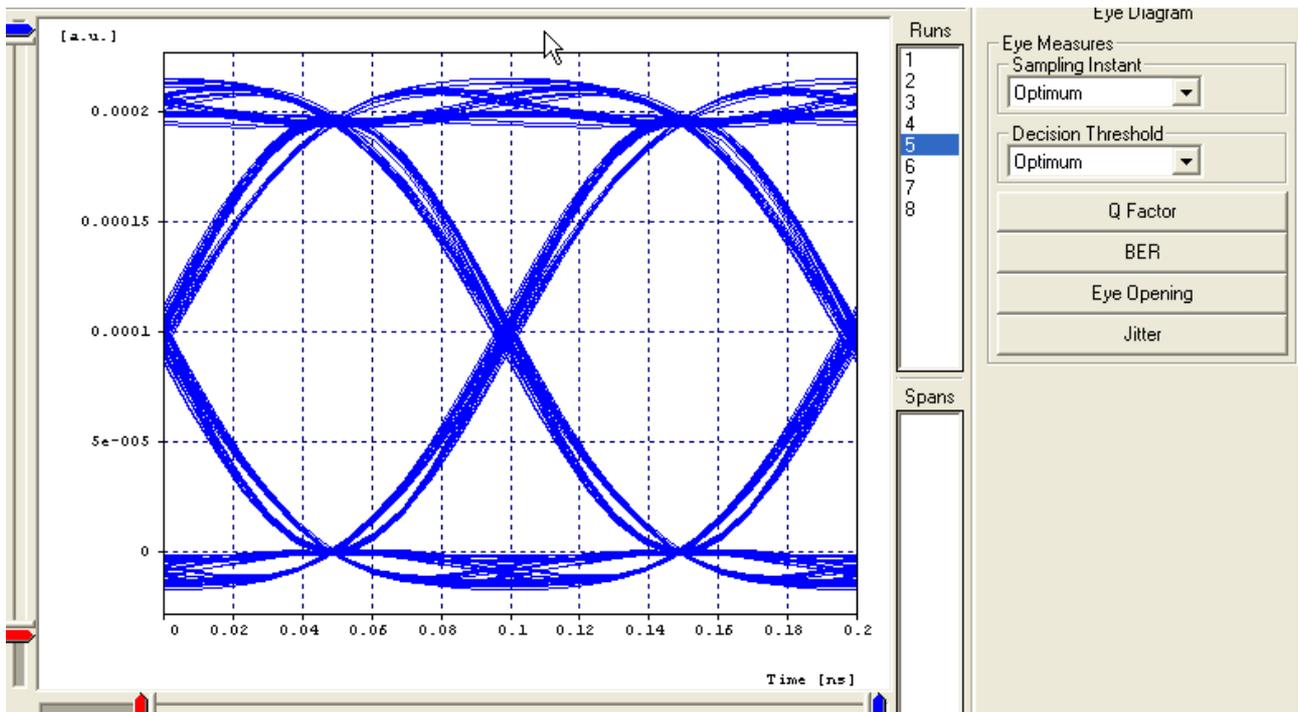


Fig.7 Diagramma ad occhio al passo 5

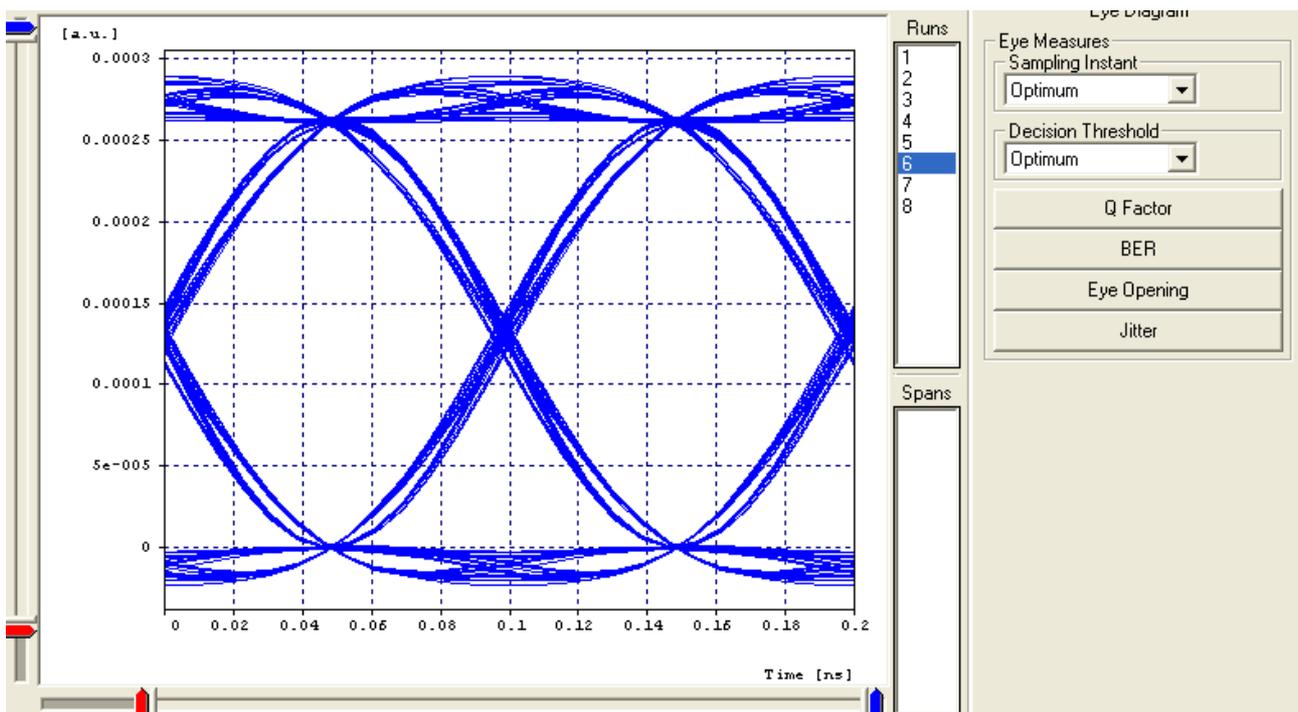


Fig.8 Diagramma ad occhio al passo 6

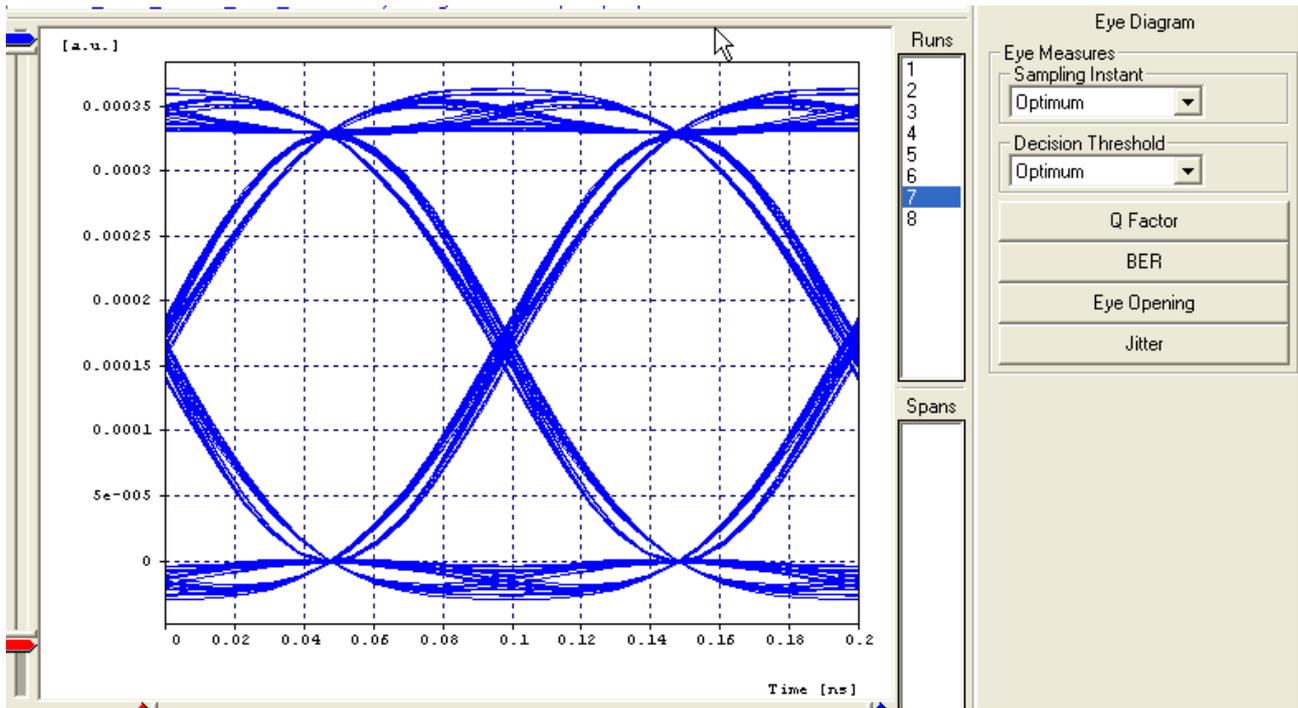


Fig.9 Diagramma ad occhio al passo 7

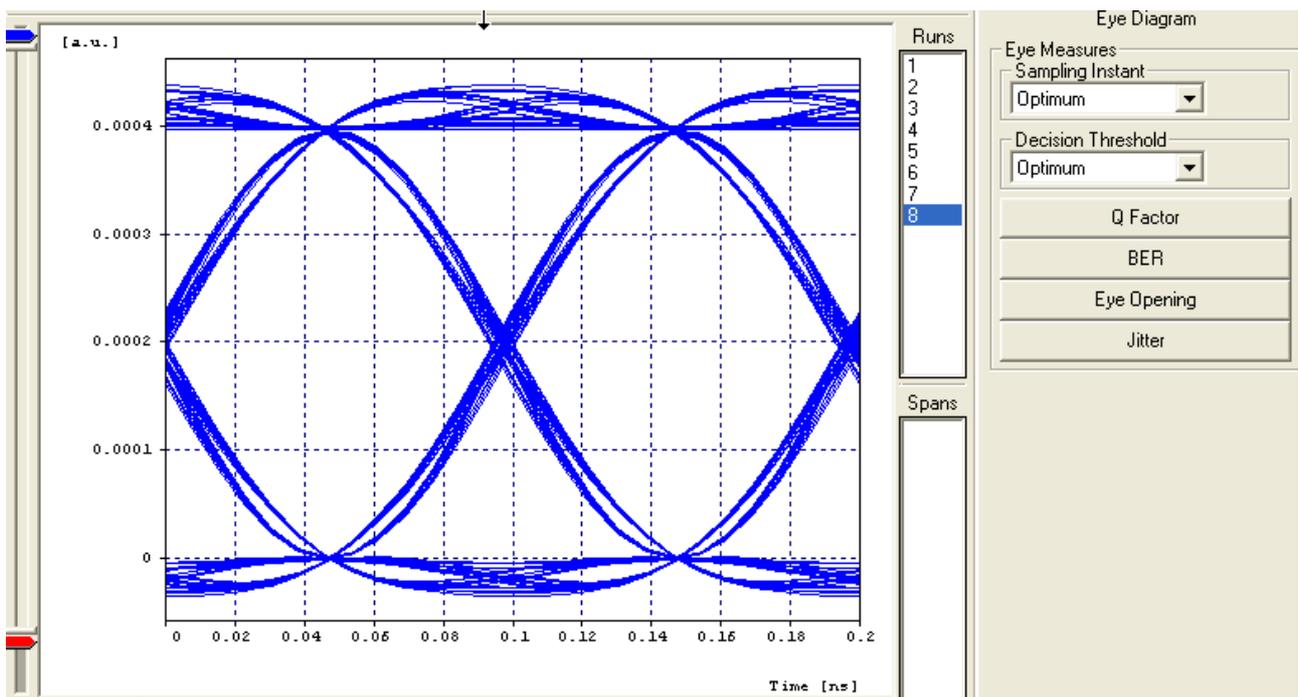


Fig.10 Diagramma ad occhio al passo 8

Si può vedere, come d'altra parte ci si aspettava, che fino al raggiungimento della corrente di soglia il diagramma ad occhio si presenta molto "chiuso", con molte sovrapposizioni; non appena oltrepassato questo valore la rivelazione dei simboli 1 e 0 diventa decisamente più chiara.

La simulazione è stata fatta anche utilizzando un modulatore di tipo Mach-Zender e si può osservare che le prestazioni peggiorano leggermente, in conseguenza del fatto che il modello del modulatore Mach-Zender è più vicino alla realtà di quanto non lo sia quello lineare; come esempio vengono riportati i diagrammi ad occhio al passo 3 e al passo 7:

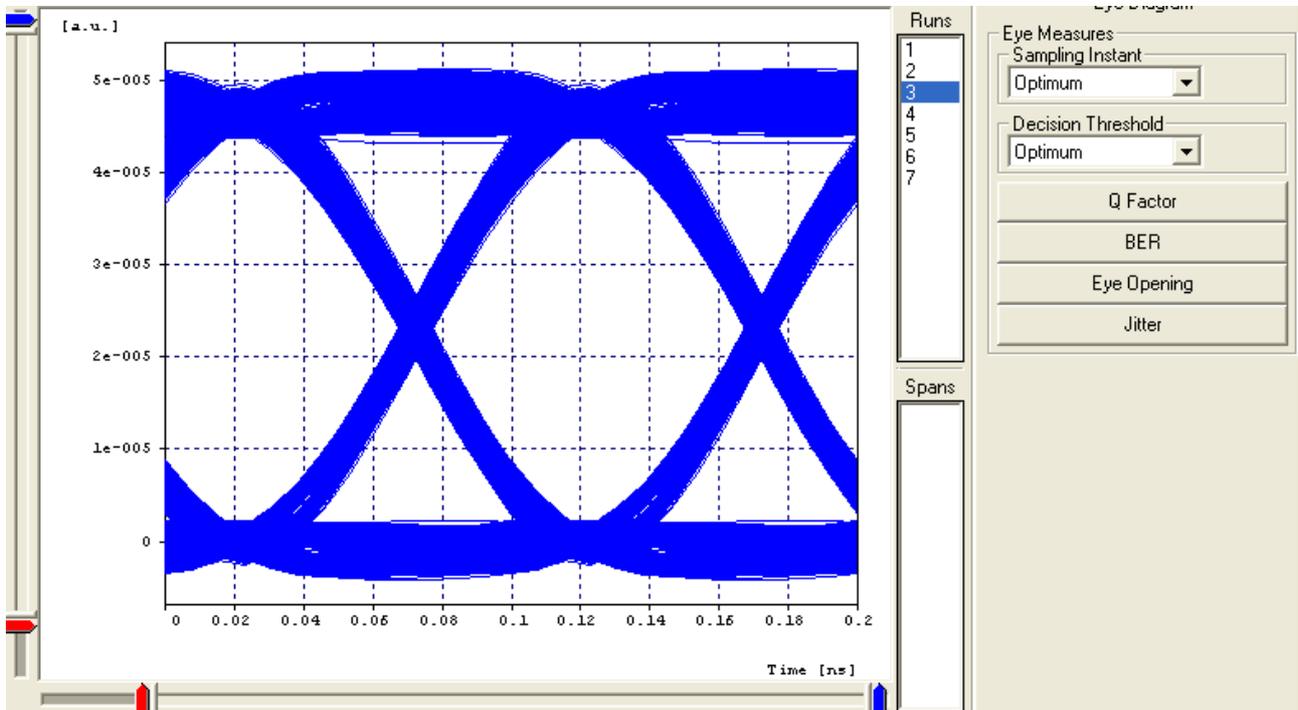


Fig.11 Diagramma ad occhio al passo 3

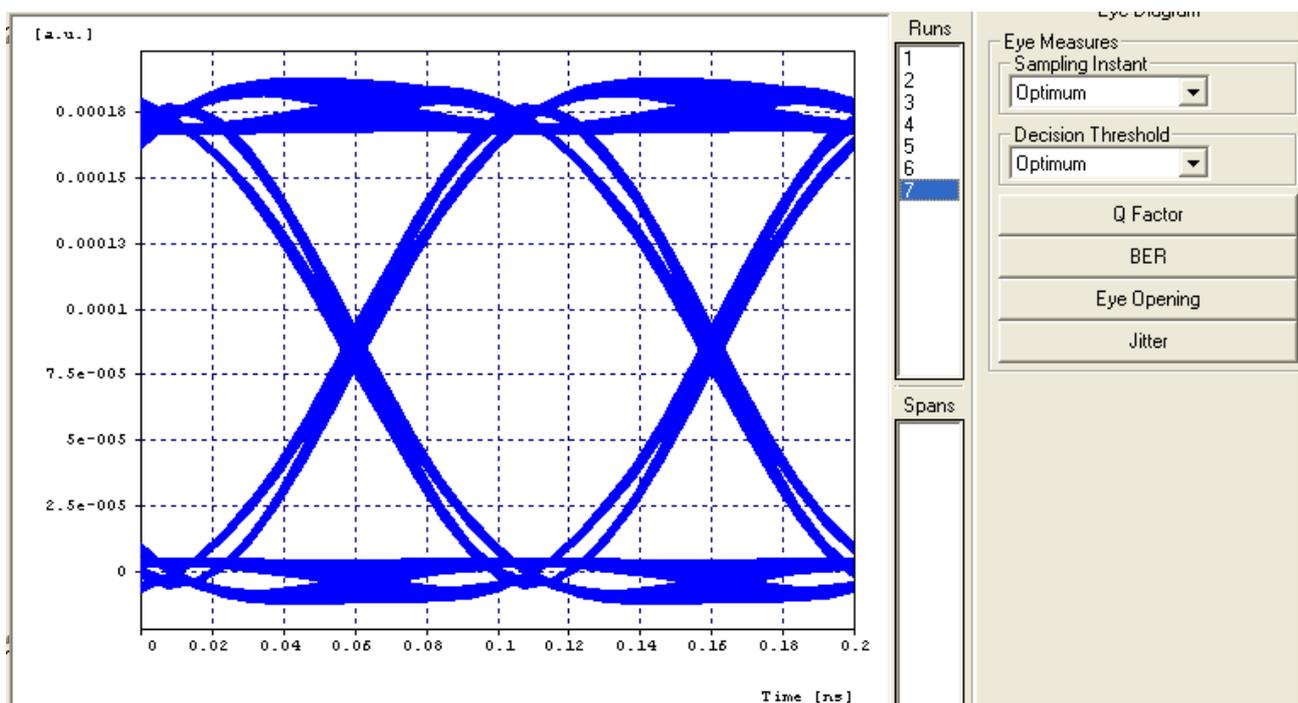


Fig.12 Diagramma ad occhio al passo 7

LASER HAMAMATSU L9444-14

Parameter	Value	Units	Range
Test frequency	193.414489032	THz	(0, Inf)
Test wavelength	1550.0	nm	(0, Inf)
Insert Test Current Value	48.1987696754	mA	[0, Inf)
Threshold Current	10.0	mA	
Linear Output Power	2.0	mW	
P-I Slope	0.05236	mW/mA	
Turn-On Delay	0.189	ns	
Relaxation Oscillation Peak Freq...	15.1974	GHz	
Relaxation Oscillation Peak Over...	7.78542	dB	
Quasi-static Frequency Chirp Ab...	0.83594	GHz/mA	
Linewidth	0.81348	MHz	
Start Frequency	0	GHz	[0, Inf)
Stop Frequency	9.10700282587	GHz	(0,0, 1,0e+32]
Average RIN	-159.21366	dB/Hz	

Fig.13 Caratteristiche del laser Hamamatsu L9444-14

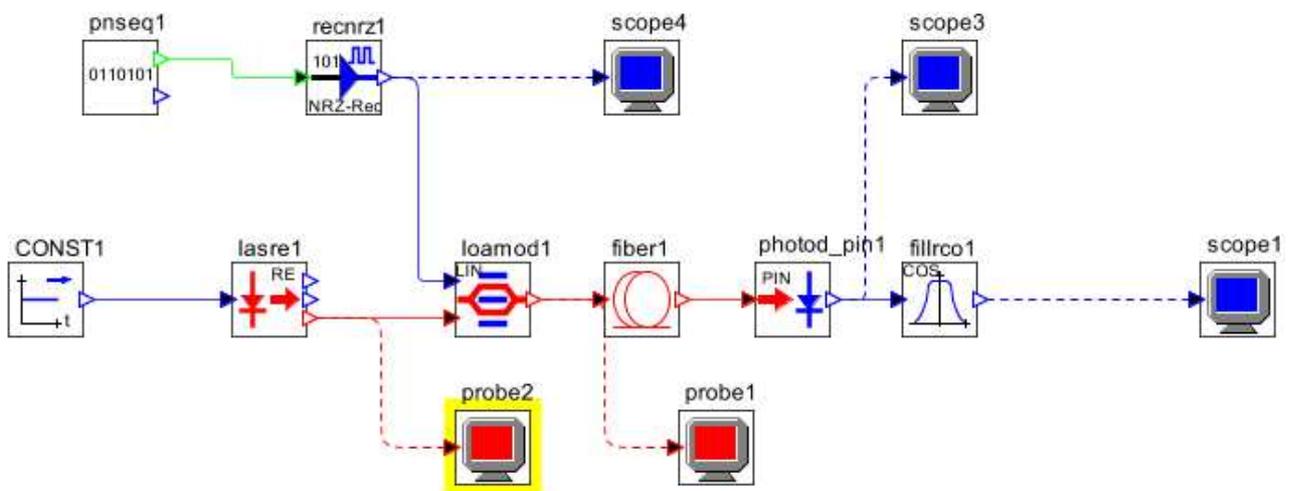


Fig.14 Schema del link ottico digitale che implementa il laser L9444-14 e modulatore lineare

Anche in questo caso viene fatta variare la corrente di polarizzazione del laser (in mA):

Run #	Param 1
Parameter	bias
Run 1	0,015
Run 2	0,025
Run 3	0,03
Run 4	0,04
Run 5	0,05

Verifichiamo le prestazioni del laser mediante i diagrammi ad occhio dei passi 3 4 5 (ampiamente sopra soglia):

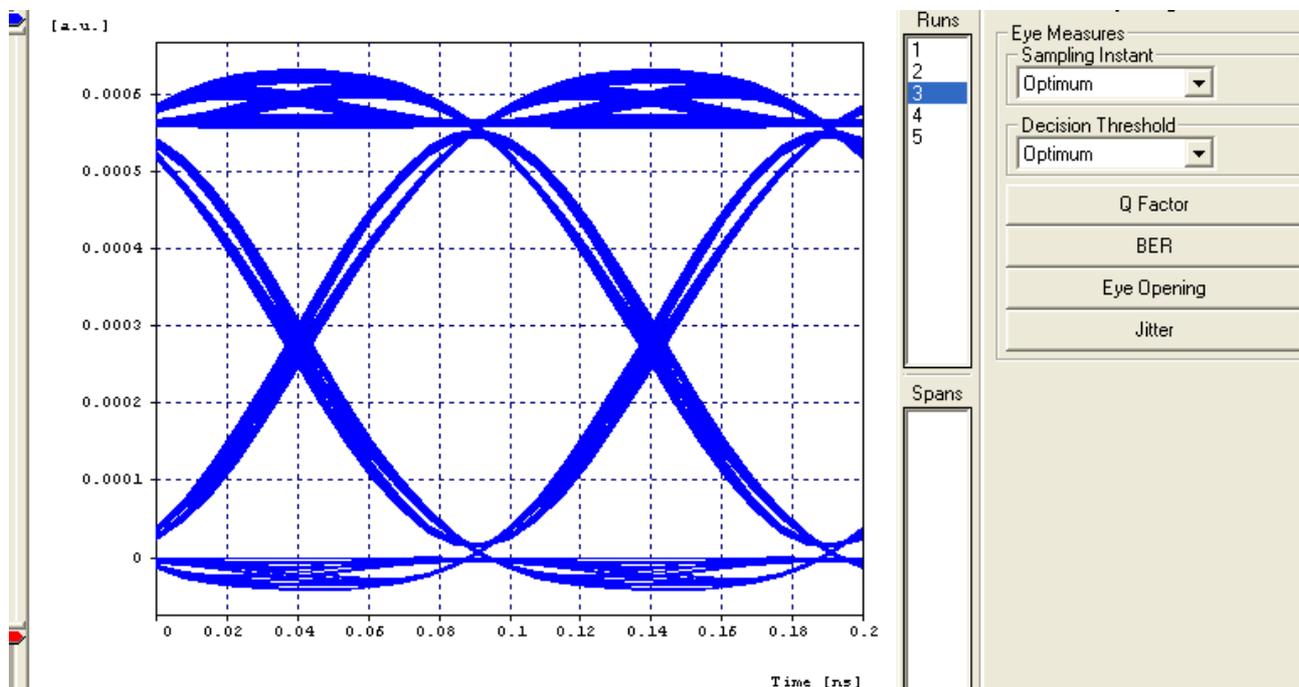


Fig.15 Diagramma ad occhio al passo 3

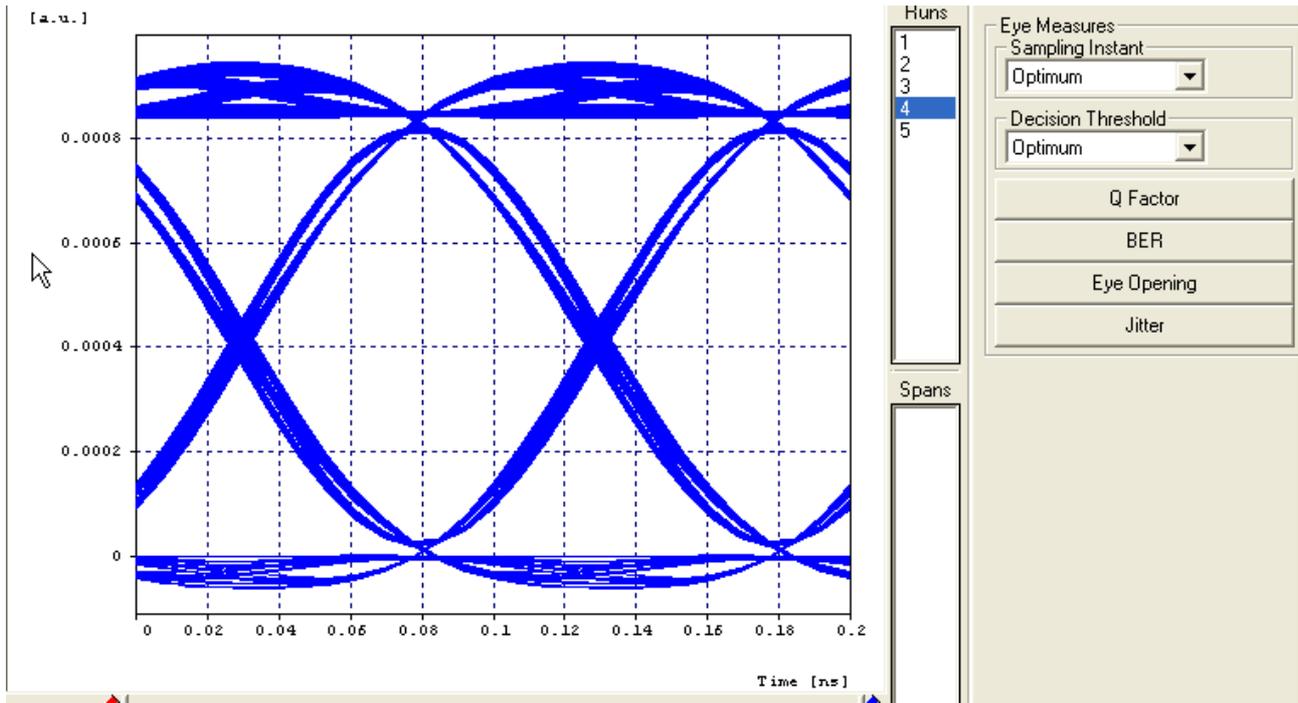


Fig.16 Diagramma ad occhio al passo 4

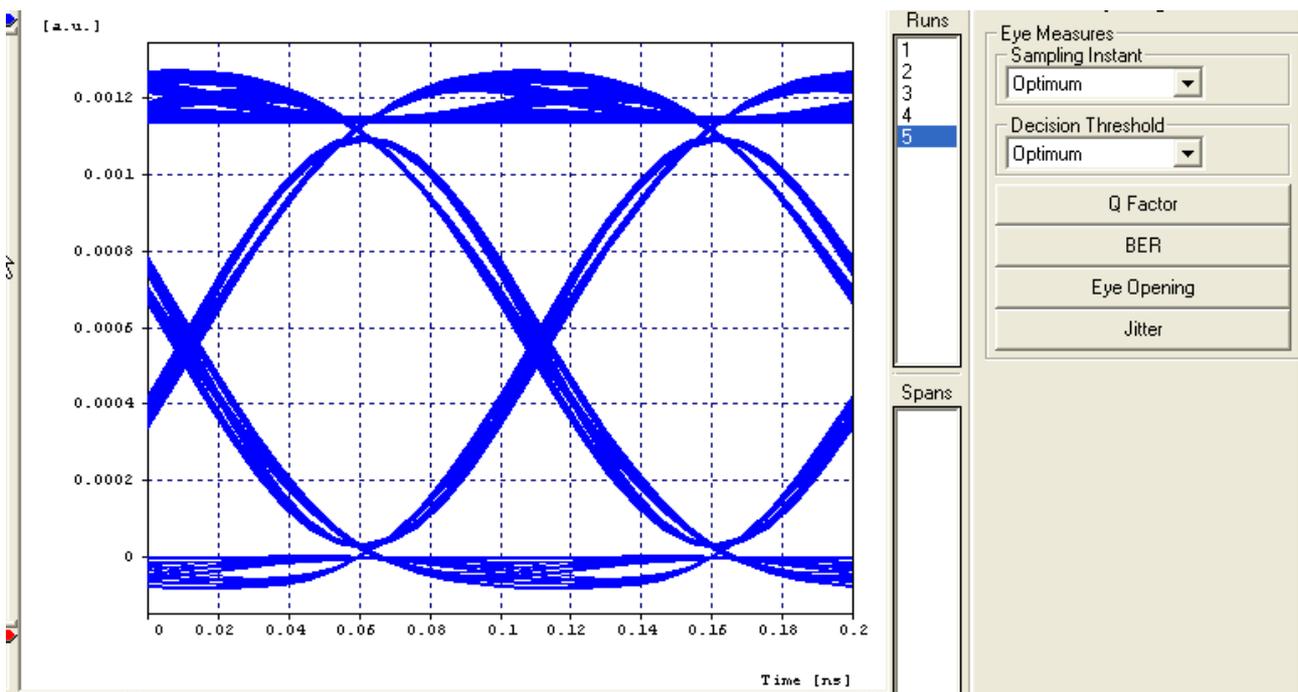


Fig.17 Diagramma ad occhio al passo 5

LASER MITSUBISHI FU-653SEA-x-1M2F

lasre1			
Parameter	Value	Units	Range
Test frequency	193.414489032	THz	(0, Inf)
Test wavelength	1550.0	nm	(0, Inf)
Insert Test Current Value	48.1987696754	mA	[0, Inf)
Threshold Current	20.0	mA	
Linear Output Power	6.79485	mW	
P-I Slope	0.24096	mW/mA	
Turn-On Delay	0.451	ns	
Relaxation Oscillation Peak Freq...	8.3712	GHz	
Relaxation Oscillation Peak Over...	23.66388	dB	
Quasi-static Frequency Chirp Ab...	0.13754	GHz/mA	
Linewidth	3.89883	MHz	
Start Frequency	0	GHz	[0, Inf)
Stop Frequency	10	GHz	(0,0, 1,0e+32]
Average RIN	-134.98036	dB/Hz	

Fig.18 Caratteristiche del laser Mitsubishi FU-653SEA-x-1M2F

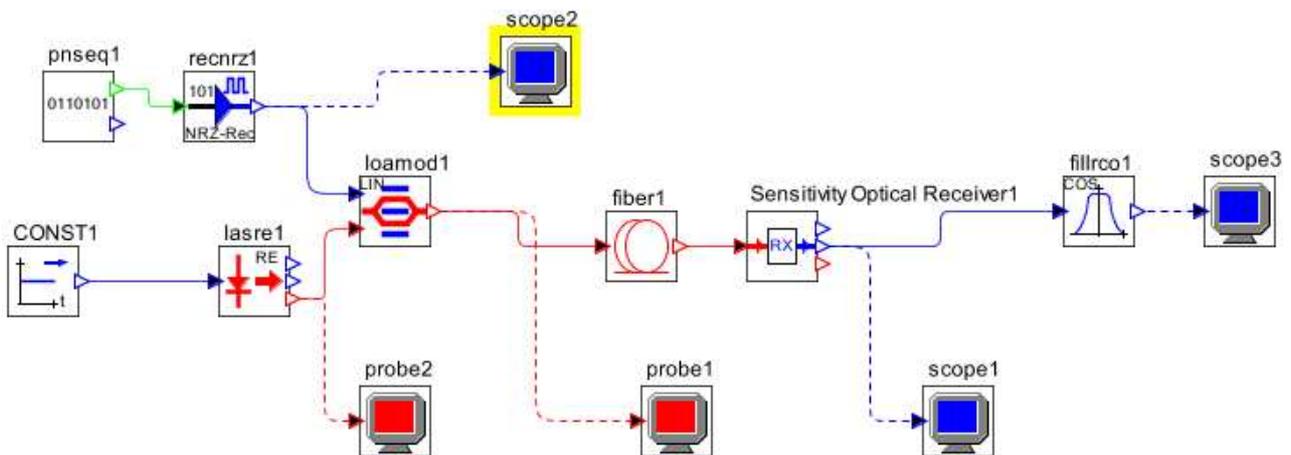


Fig.19 Schema del link ottico digitale che implementa il laser Mitsubishi FU-653SEA-x-1M2F

Fatto lo scan della corrente di pilotaggio del laser, si ottengono i seguenti risultati:

Parameter	bias
Run 1	0,015
Run 2	0,02
Run 3	0,03
Run 4	0,04
Run 5	0,05

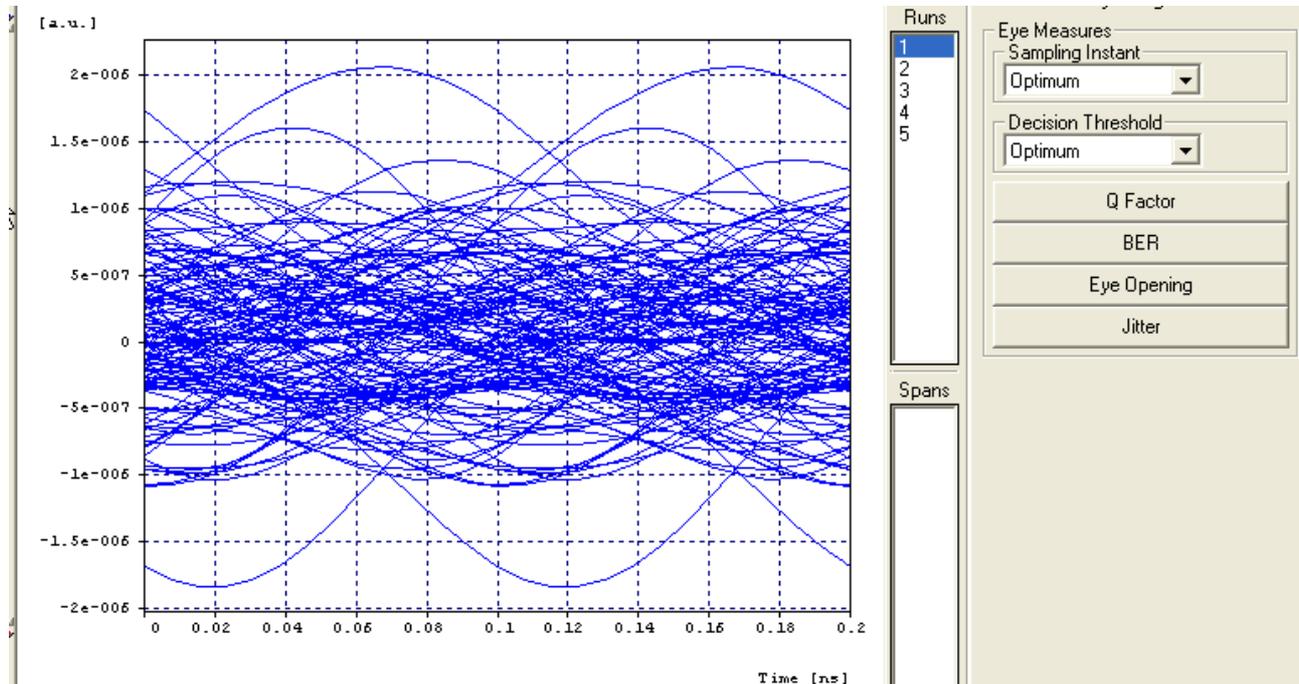


Fig.20 Diagramma ad occhio al passo 1

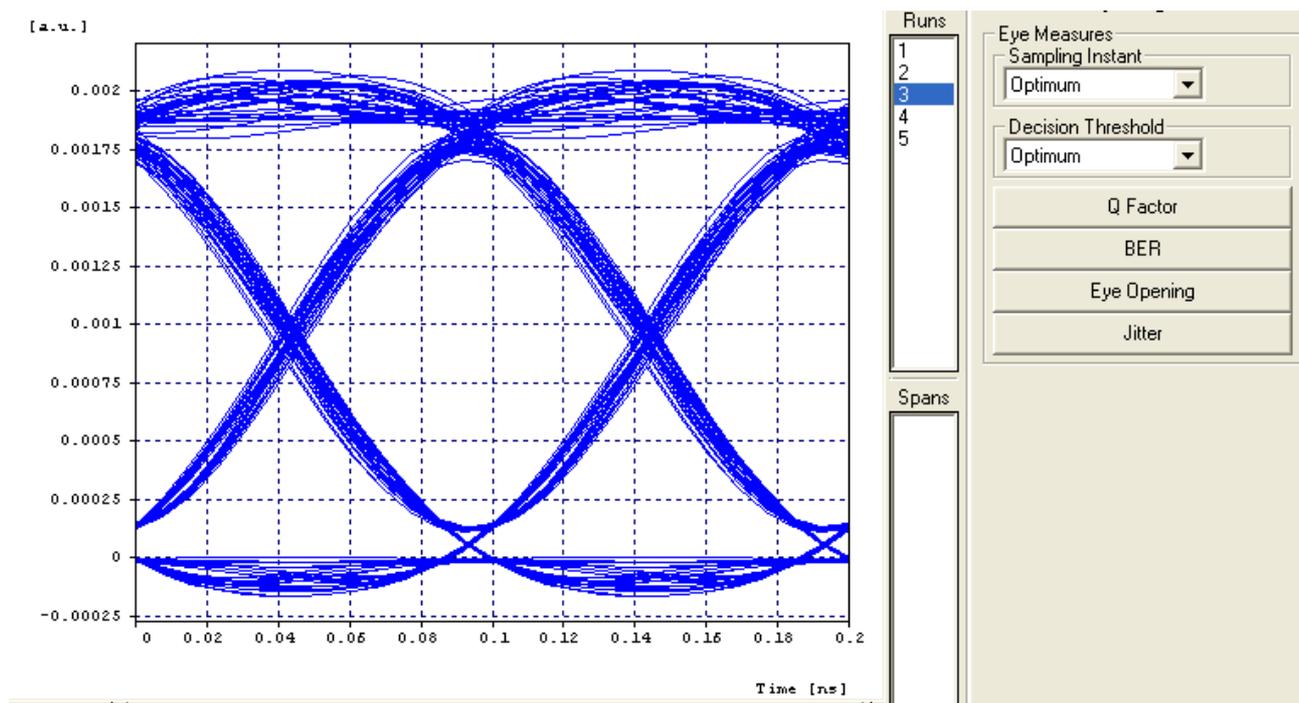


Fig.21 Diagramma ad occhio al passo 3

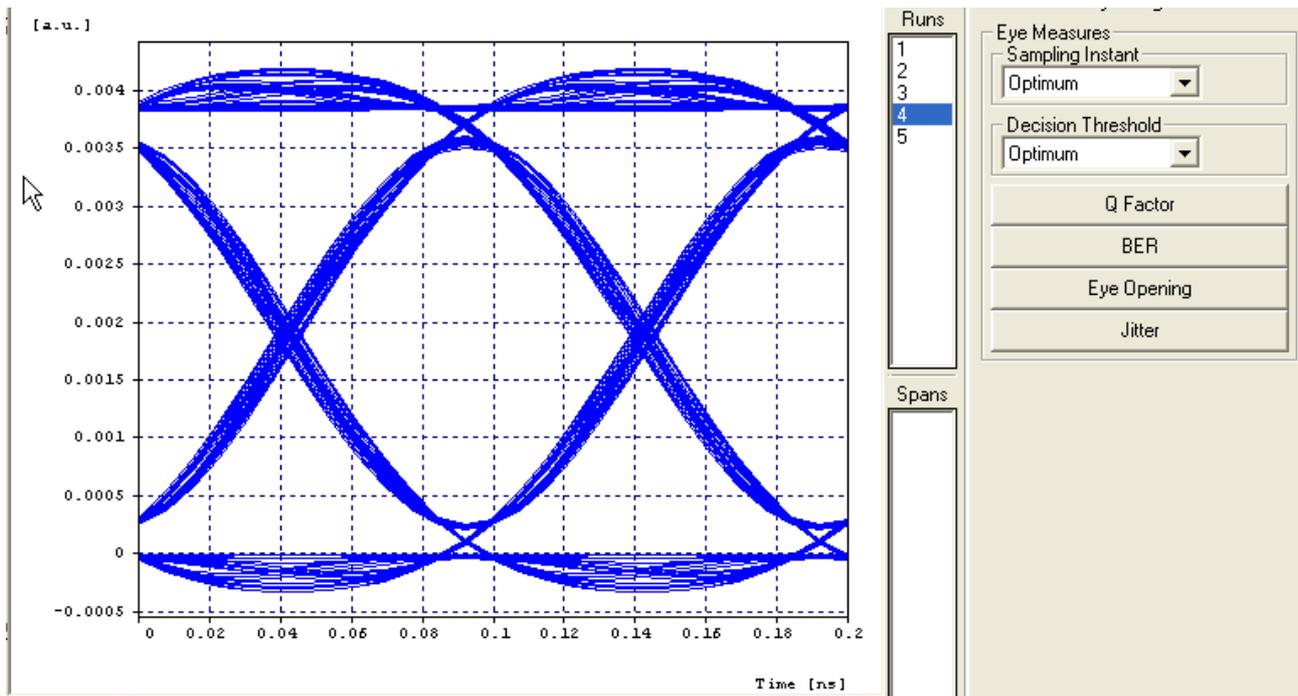


Fig.22 Diagramma ad occhio al passo 4

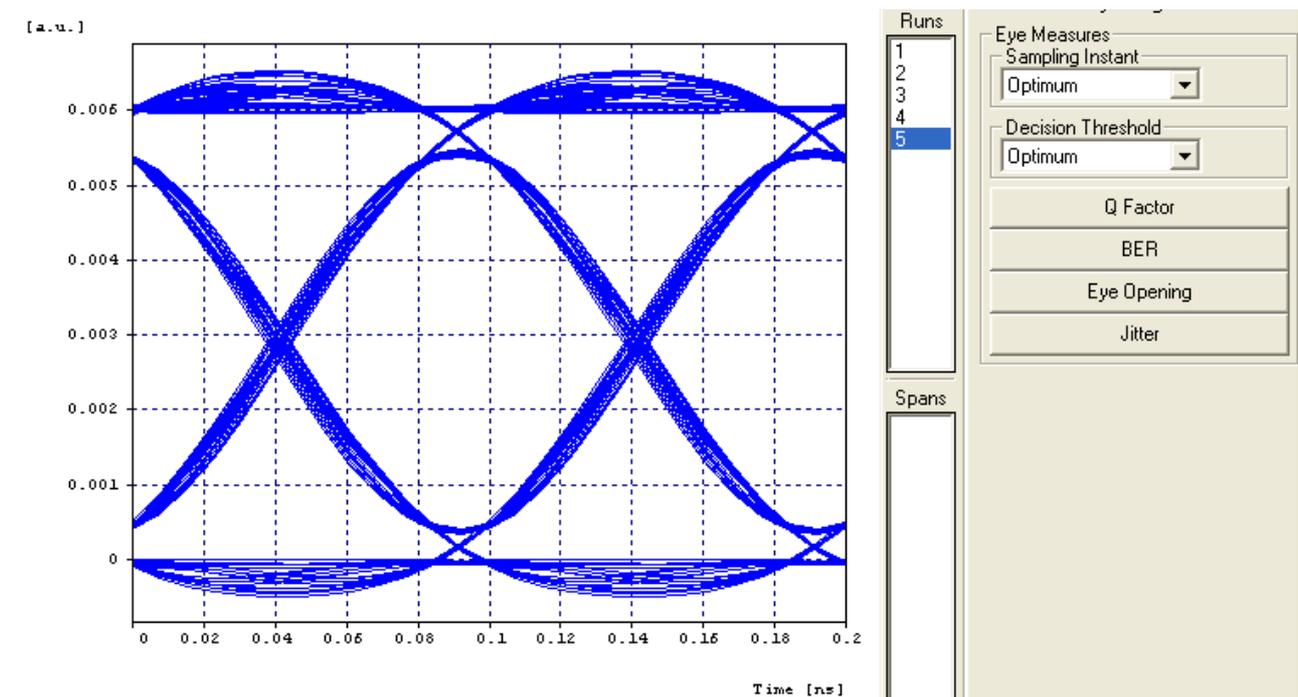


Fig.23 Diagramma ad occhio al passo 5

Confrontando i diagrammi ad occhio di ciascun collegamento si può osservare che il collegamento che utilizza il laser Avanex è quello di migliori prestazioni; esso infatti presenta l'occhio più definito e aperto, indice del fatto che i simboli 1 e 0 rimangono ben separati. Gli altri 2 collegamenti, pur essendo leggermente inferiori, mostrano comunque che i dispositivi Hamamatsu e Mitsubishi sono di ottimo livello.

7.2 SIMULAZIONI PER LINK OTTICI ANALOGICI

Per completare il quadro delle possibilità offerte per la costruzione del link di discesa d'antenna è bene osservare anche la simulazione di un link analogico, caratterizzato da un laser DFB e da una modulazione diretta. Per questa simulazione è stato scelto un laser di tipo Rate Equations, che più si avvicina ad un laser reale.

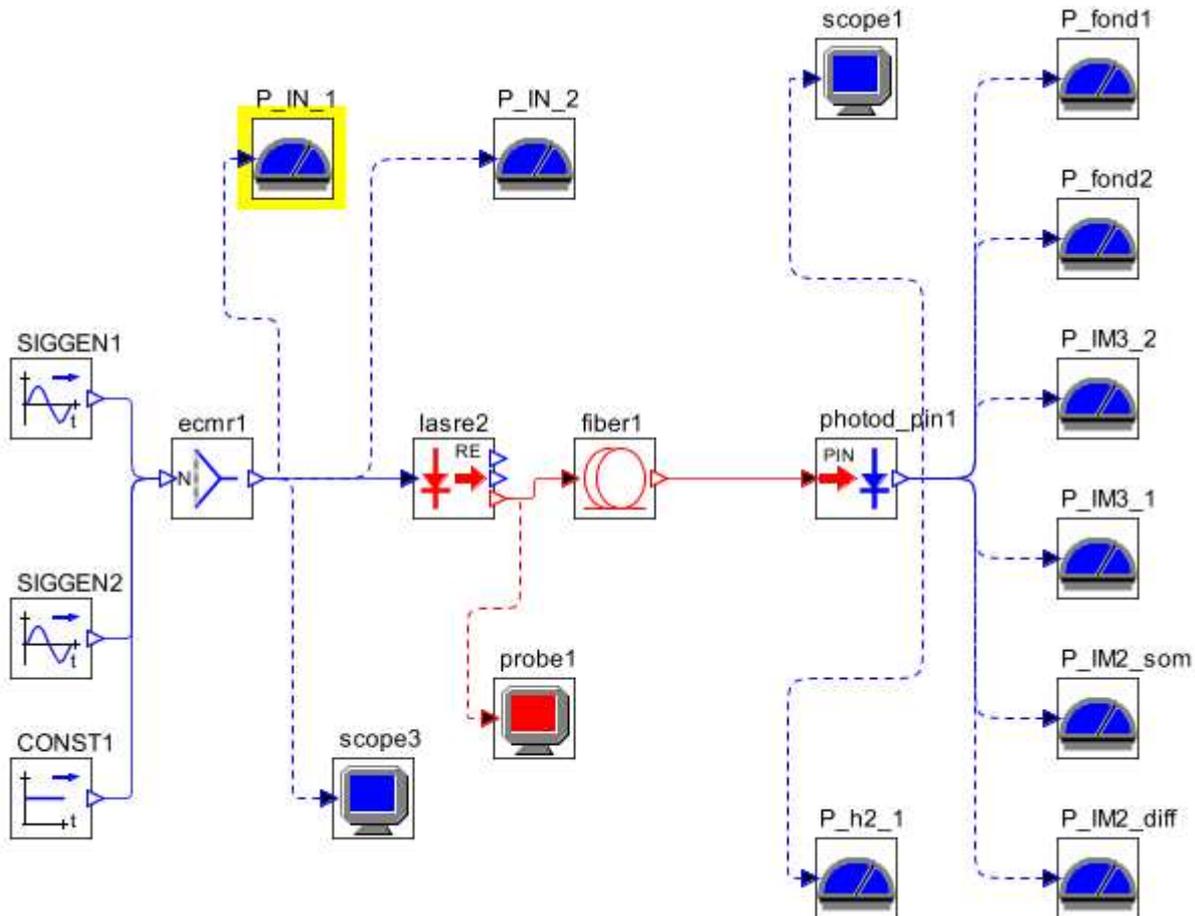


Fig.24 Schema di un collegamento analogico

Per poter valutare meglio i fenomeni di intermodulazione di secondo e terzo ordine si è deciso di modulare il laser mediante la sovrapposizione di due segnali sinusoidali, uno alla frequenza di 1 GHz, l'altro alla frequenza di 1,3 Ghz.

Inoltre per meglio valutare il collegamento è stato fatto uno scan della lunghezza del link, che viene fatta variare tra i 700m e i 5 Km, come previsto dalle specifiche di progetto.

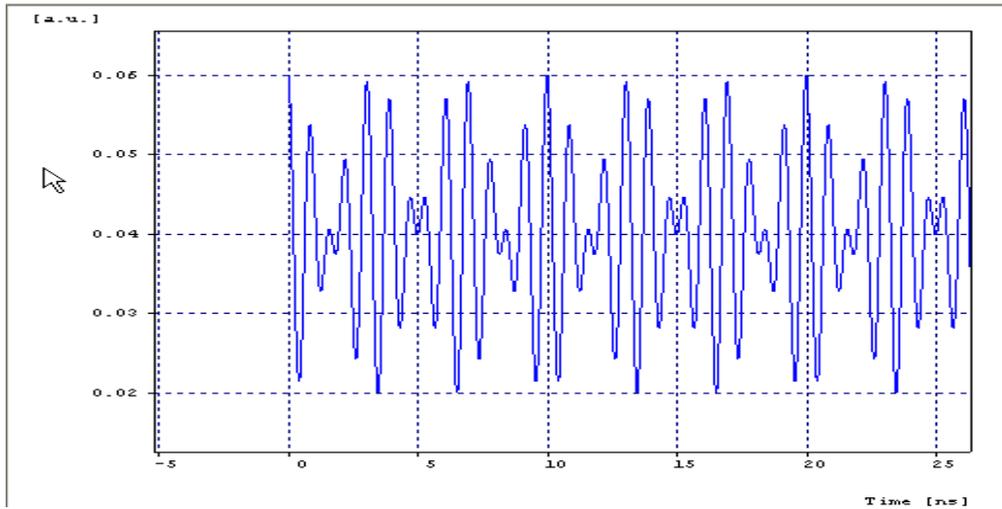


Fig.25 Sovrapposizione delle 2 forme d'onda sinusoidali

Per effettuare le operazioni matematiche necessarie ad ottenere le curve caratteristiche dei prodotti di intermodulazione, delle armoniche superiori etc., è stata utilizzata una funzione speciale di MathLab, *PostProc*, che prende in ingresso tutti i dati relativi alle sinusoidi (frequenza, armoniche del secondo ordine, intermodulazioni del secondo e del terzo ordine) e genera le curve di interesse. Di seguito vengono riportati i grafici ottenuti:

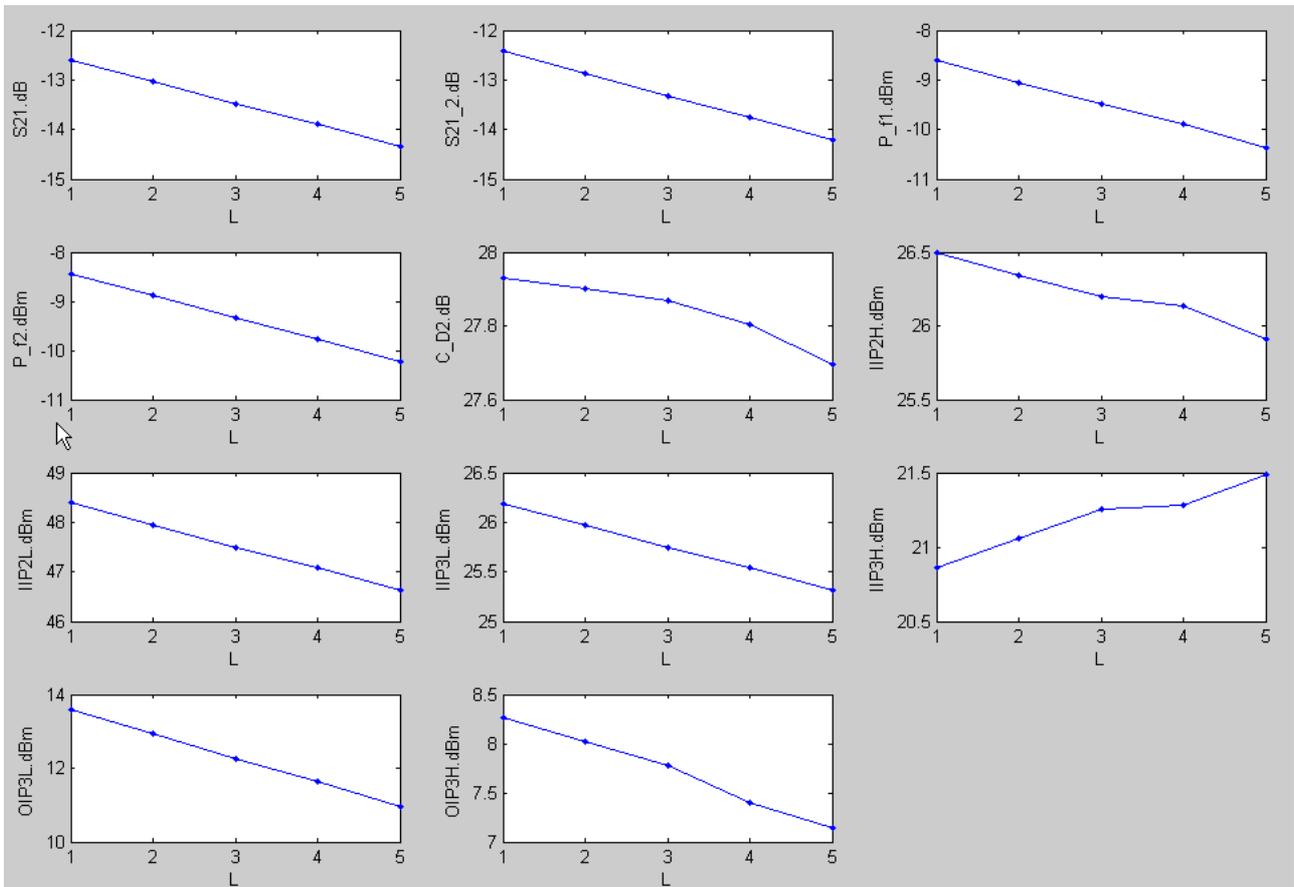


Fig. 26 Curve caratteristiche dei prodotti di intermodulazione e delle armoniche del second'ordine

- 1) S21. e S21.2 rappresentano i guadagni legati rispettivamente alla potenza generata dal laser per effetto della prima sinusoide e della seconda (N.B. i guadagni sono sempre negativi in quanto il link ottico utilizza un ricevitore passivo);
- 2) P_f1 e P_f2 rappresentano le potenze legate rispettivamente alla prima sinusoide e alla seconda, in uscita dal ricevitore ottico;
- 3) C_D2 rappresenta il rapporto tra la potenza generata dalla fondamentale e la potenza generata dalla prima armonica superiore; più questo valore si mantiene elevato, maggiori saranno le prestazioni del sistema, in quanto prevale in modo determinante la fondamentale sull'armonica, che costituisce interferenza;
- 4) IIP2_H e IIP2_L sono i prodotti di intermodulazione del second'ordine; in particolare IIP2_H fa riferimento alla frequenza f_2+f_1 , mentre IIP2_L fa riferimento alla frequenza f_2-f_1 ;
- 5) IIP3_H e IIP3_L sono i prodotti di intermodulazione del terzo ordine, in particolare IIP3_H fa riferimento alla frequenza $2*f_2-f_1$ mentre IIP3_L fa riferimento alla frequenza $2*f_1-f_2$;
- 6) OP3_L e OP3_H sono le armoniche superiori riferite rispettivamente alla f_1 e alla f_2 .

Tutte quante queste grandezze mostrano, in simulazione, comportamenti molto simili a quello che ci si aspetterebbe nella realtà, ossia diminuiscono le prestazioni all'aumentare della lunghezza. E' infatti naturale attendersi che per collegamenti a maggiore distanza i valori di intercetta calino, con conseguente diminuzione della dinamica d'ampiezza libera da spurie.

Soltanto la curva IIP3_H ha un andamento in crescita (seppur in un intervallo molto ristretto) all'aumentare della lunghezza del collegamento, fatto che ci mostra come sia complicato prevedere ed intuire i comportamenti delle armoniche superiori di intermodulazione, che, anche per questo, è sempre bene tenere sopresse quanto più possibile.

LINK COMPLETI		Lunghezza Onda	fibra	caratteristiche in potenza		dispersione	λ	Perdite di ritorno	Extinction ratio	connettori	Contatti	Prezzi
California scientific D-130	LASER DFB con modulatore esterno adattamento realizzato	1290-1330 nm II finestra	monomodo 9 μm	-1 / +4 dBm			0,04 nm	min 10- max 3,5 dB	8 dB		Mike Ansari ansar@californiascientific.com	5K dollari per 500 link
California scientific P-130	FOTORIVELATORE adattamento realizzato	950-1390 nm I-II finestra	monomodo	sensitivity -15 dBm								
Avanex 1965 SDH TX	LASER EA sistema di tx completo (driver, modulatore controllo in temperatura) già adattato a std SDH, SONET Sistema DWDM	1550 nm III finestra	monomodo	-3/ 2 dBm dissipazione: 3W		-500/1600 ps/nm	1 nm		8,2dB	FC/PC, SC/PC, LC/PC, MU	Antonio Bove Antonio_Bove@avanex.com	per 500 pezzi: TX: 2K euro RX: 1K euro
Avanex 1965 SDH RX	FOTORIVELATORE sistema di rx completo complementare di SDH TX	1550 nm III finestra	monomodo	dissipazione 1,5 -2 mW sensitivity -18/-14 dBm						FC/PC, SC/PC, MU/SPC		
Avanex Power Port 2040 TRX	MODULO INTEGRATO TX E RX (LASER EML) (PIN-PREAMP DETECTOR) XFP transceiver con tecnica TDM	1550 nm III finestra	monomodo	Pottica emessa: -1/2dBm dissipazione: 5W sensitivity: -14 dBm		800 ps/nm --> 2 dB perdita			8,2 dB		vedi sopra	per 500 pezzi 1300 euro
Mitsubishi MF-10 KSXA	MODULO INTEGRATO TX E RX (LASER DFB fino a 10 Km LASER EM fino a 40 Km) (PIN/APD-PREAMP DETECTOR) XFP package	DFB: 1310 nm EM: 1550 nm	monomodo								preliminare contatti: m.bianchi@celte-srl.com Paolo.Agazzi@meg.mee.com Marcello Bianchi Paolo Agazzi	
Mitsubishi MF-10 KWXB	MODULO INTEGRATO TX E RX (LASER DFB con EA modulator) (APD+TIA RECEIVER) sistemi DWDM											
Sumitomo SXP3101LX	10 Gb OPTICAL TRANSCEIVER TX: laser DFB RX: PIN SISTEMI NON ADATTATI	1310 nm	monomodo	Po emessa: -8,2/ 0,5 dBm RIN : -128 dB/Hz SMSR: 30 dB sensitivity: -12,6 dBm		3,2 dB perdita			3,5 dB	LC	contatti: photonics@sumielectric.com	
TRASMETTITORI	tipo	lunghezza Onda	fibra	caratteristiche in potenza	SMSR	dispersione	RIN	perdite di ritorno	extinction ratio	connetton		
Hamamatsu L9444-14	LASER DFB TOSA package	1310 nm II finestra	monomodo	Pottica emessa 2mW	min 30 dB						contatti: portaluppi@hamamatsu.it Portaluppi Lorezo	
Mitsubishi X1-M6F	LASER DFB +EA MODULATOR già adattato	1550 nm III finestra	monomodo	Pottica emessa 2 dBm uscita pigtail	40 dB	1600 ps/nm (2 dB perdita)	-135 dB/Hz	5/ 15 dB	10 dB	FC/PC, SC/PC		
Mitsubishi X1-M2F	LASER DFB+EA MODULATOR già adattato	1550 nm III finestra	monomodo	Pottica emessa: -1 dBm uscita pigtail	40 dB	2 dB perdita	-135 dB/Hz	5/ 15 dB	10 dB	FC/PC, SC/PC		
Avanex 1915 LM	LASER DFB+EA+IL MODULATOR butterfly package, già adattato sistemi SONET SDH	1550 nm III finestra	monomodo	Pottica emessa: -3,5/ 0 dB	40 dB	1600 ps/nm	-130 dB/Hz	7/10 dB				per 1000 pezzi 550 euro ciascuno
Luminento C13 10DFB	LASER DFB TOSA package	1310 nm II finestra	monomodo	Pottica emessa: 0,3/0,8 mW	35 dB		-130 dB/Hz			SC,LC		
California scientific D150	LASER DFB modulazione esterna, già adattato SMA	1550 nm III finestra	monomodo	Pottica emessa: -1/4 dBm	min 30 dB			10 dB	8 dB	FC/PC		
California scientific D130	LASER DFB EA modulator, giàadattato	1310 nm II finestra	monomodo	Pottica emessa: -1/4 dBm	min 30 dB			10 dB	8 dB	FC/PC		
Archcom AC3430	LASER FABRY PEROT TOSA package	1310 nm II finestra		Pottica emessa: -0,5 dBm					7 dB	LC	contatti: Daniel Jimenez <djimenez@archcomtech.com>	
Oepic LCF11	LASER FABRY PEROT	1310 nm II finestra		Pottica emessa: 0,5 dBm					7 dB			
OKI OL 3315 L	LASER DFB butterfly package	1310 nm II finestra	monomodo	Pottica emessa: 1mW	min 30 dB						contatti: Rodolfo Donzelli, Paolo Corbetta rodolfo.donzelli@consystem.it paolo.corbetta@consystem.com contatti: Martin Grabherr martin.grabherr@ulm-fotonics.de	
UML FOTONICS	VCSEL	850 nm I finestra		Pottica emessa: 1mW			-130 dB/Hz					
Advanced optical components HFE 6x-9x Applied Optoelectronics	VCSEL	850 nm I finestra		Pottica emessa: 0,6 mW			-130 dB/Hz					
VERTILAS	LASER DFB specificamente ideato per 10G Ethernet e applicazioni WWDM	1310 nm II finestra	monomodo	Pottica emessa: 2 mW	40 dB		-130 dB/Hz					
California scientific V126	VCSEL SONET, SDH, XFP, SFP, X2, XPAK	1550 nm III finestra	monomodo	Pottica emessa: 1mW	40 dB							
	VCSEL	850 nm I finestra		Pottica emessa: 1 mW					4,5 dB			
NOTA:	Beam Express è allo studio di VcseI in 2 finestra contatti: jean-claude.charlier@beamexpress.com											
FOTORIVELATORI	NEP	lunghezza onda	Id	Responsivity	Pdissipata	Sensitivity						
Kyosemi KPDE10G-V1		1550nm	10 pA	0,8 A/W								
Oepic PT 6233		1310 nm	2 nA		175 mW	-15 dBm						
AXT optoelectronics PX CT11		850 nm	0,1 nA	0,63 A/W								
Advanced optical components HFD 6X 80	40 micro W	850 nm		0,5 A/W								