

# PROGETTO DI UN EMULATORE DI DISPERSIONE DI POLARIZZAZIONE

A.Galtarossa, P.Griggio, L.Palmieri

Dipartimento di Elettronica ed Informatica, Università di Padova  
via Gradenigo, 6A, 35131 Padova  
griggio@ray.dei.unipd.it

## ABSTRACT

In this letter we investigate various Polarization Mode Dispersion Emulators (PMDE), that consist of sections of polarization-maintaining fiber with rotators or polarization scramblers at the beginning of each section. We analyze the DGD and second order PMD statistics, and the behavior of the autocorrelation function (ACF) of the Stokes output vectors. We perform numerical simulations, and demonstrate that a minimum number of waveplates is necessary to realize the correct first and second order statistics, while it is essential to use sections of variable length to avoid frequency periodicity.

## INTRODUZIONE

La dispersione dei modi di polarizzazione (PMD) si è rivelata essere, negli ultimi anni, uno dei fattori che maggiormente limitano le trasmissioni WDM ad alta velocità. Essa è dovuta al fatto che, in condizioni reali, la perfetta simmetria cilindrica della fibra ottica non esiste, per cui, a seconda della polarizzazione iniziale, il campo elettromagnetico "vede" indici di rifrazione e quindi velocità di gruppo diverse, cioè la fibra diventa un mezzo birifrangente. Le cause di questa asimmetria si possono ricondurre a difetti della fibra, come l'ellitticità del nucleo o le impurità costruttive, oppure a cause estrinseche come tensione o torsione del cavo, sforzi meccanici, gradienti di temperatura.

A causa della birifrangenza aleatoria, la polarizzazione del campo evolve sia lungo la direzione di propagazione  $z$ , sia in frequenza. In questo lavoro ci occuperemo del comportamento della fibra, per segnali a banda larga, e descriveremo analiticamente l'evoluzione della polarizzazione d'uscita in funzione della sola frequenza. La relazione fra i vettori di Stokes in ingresso e in uscita dalla fibra è dato dalla matrice  $\mathbf{R}(\omega)$ :

$$\hat{s}(\omega) = \mathbf{R}(\omega)\hat{s}_0, \quad (1)$$

dove  $\hat{s}_0$  è il vettore di Stokes di ingresso. Da qui si dimostra che esiste un vettore  $\vec{\Omega}$  (vettore di dispersione di polarizzazione) tale che [1]:

$$\frac{d\hat{s}}{d\omega} = \vec{\Omega}(\omega) \times \hat{s}(\omega). \quad (2)$$

La direzione di  $\vec{\Omega}$  individua gli stati principali di polarizzazione (PSP), ossia quelle due polarizzazioni di ingresso cui corrispondono due polarizzazioni ortogonali di uscita indipendenti dalla frequenza al primo ordine [2]. Il modulo di  $\vec{\Omega}$  è il ritardo differenziale di gruppo (DGD) accumulato dai due PSP durante la propagazione lungo tutta la fibra.

Per poter avere un comportamento statistico completo di un collegamento reale sarebbero necessari tempi di osservazione molto lunghi (anche mesi), in quanto il cavo interrato o sottomarino presenta una forte stabilità rispetto alle variazioni indotte dall'ambiente [3]. E' quindi utile poter disporre di un emulatore che consenta di studiare il comportamento statistico di un canale affetto da PMD in tempi molto più limitati. Gli emulatori di

dispersione di polarizzazione (PMDE) vengono realizzati tramite spezzoni di fibra ad alta birifrangenza collegati fra loro da rotatori o da polarization scramblers. Chiaramente, un emulatore mosso da rotatori ha il pregio di essere molto più facilmente controllabile rispetto ad uno strumento che utilizza polarization scramblers, i quali modificano in maniera non predicibile lo stato di polarizzazione.

Un PMDE deve presentare le stesse caratteristiche statistiche di una fibra reale, ovvero:

1. deve generare un DGD con comportamento statistico di tipo maxwelliano [4]:

$$f_{|\vec{\Omega}|}(x) = (32x^2/\pi^2\tau^3)e^{-(2x/\tau)^2/\pi}, \quad (3)$$

dove  $E[x] = \tau$ , per ognuna delle frequenze della banda di interesse.

2. la densità di probabilità di  $|\vec{\Omega}_\omega|$  deve essere del tipo [4]:

$$f_{|\vec{\Omega}_\omega|}(x) = (32x/\pi\tau^4)\tanh(4x/\tau^2)\operatorname{sech}(4x/\tau^2) \quad (4)$$

3. la funzione di autocorrelazione (ACF) dei vettori di Stokes di uscita dal PMDE deve rispettare la:

$$E[s_i(\omega)s_i(\omega + \Delta\omega)] = ACF(\Delta\omega) = (1/3)\exp(-(1/3)E[\Delta\tau^2]\Delta\omega^2), i = 1, 2, 3. \quad (5)$$

Questa caratteristica è molto importante nei sistemi WDM, per garantire che canali adiacenti siano statisticamente indipendenti.

In questo lavoro si cercherà di analizzare sotto quali condizioni un PMDE è in grado di realizzare le caratteristiche enumerate sopra.

## IL COMPORTAMENTO STATISTICO DI $|\vec{\Omega}|$ E DI $|\vec{\Omega}_\omega|$

In questa sezione si valuterà sotto quali condizioni un PMDE riesce a simulare il comportamento statistico del vettore di dispersione di polarizzazione caratteristico di una fibra reale. La necessità di esaminare anche  $\vec{\Omega}_\omega$  nasce dal fatto che, aumentando il bit-rate e quindi la banda, non è più possibile considerare il DGD e i PSP indipendenti dalla frequenza. Il vettore  $\vec{\Omega}$  si scriverà allora come:

$$\vec{\Omega}(\omega + \Delta\omega) = \vec{\Omega}(\omega) + \vec{\Omega}_\omega\Delta\omega. \quad (6)$$

Come anticipato nell'introduzione, le distribuzioni statistiche di  $|\vec{\Omega}|$  e  $|\vec{\Omega}_\omega|$  sono note in forma analitica chiusa, per cui è possibile fare un confronto diretto fra l'andamento teorico e i risultati numerici ottenuti da un PMDE realizzato con un numero limitato di lamine. Si consideri un PMDE avente un DGD medio pari a  $\langle DGD \rangle = 20$  ps, costruito con  $N$  lamine birifrangenti i cui ritardi sono v.a. uniformi nell'intervallo  $[\tau_n(1-K), \tau_n(1+K)]$ , dove  $\tau_n = \langle DGD \rangle c\sqrt{3\pi/8N}/\sqrt{(1+K^2/3)}$  ( $N$  è il numero di lamine), [5], e  $0 \leq K < 1$ . L'orientazione mutua delle lamine può essere modificata utilizzando rotatori o polarization scramblers (quello considerato nelle simulazioni è costituito da una sequenza di 3 lamine rispettivamente a  $\lambda/4, \lambda/2, \lambda/4$ ). Nelle figure 1 e 2 vengono riportati l'andamento delle statistiche di  $|\vec{\Omega}|$  e di  $|\vec{\Omega}_\omega|$  ottenuti variando sia il numero di lamine (3 oppure 6) che il tipo di sfasatore utilizzato (rotatori o polarization scramblers). I grafici sono stati realizzati alla frequenza di 1550 nm, ma lo stesso andamento si ottiene spostandosi ad altra frequenza.

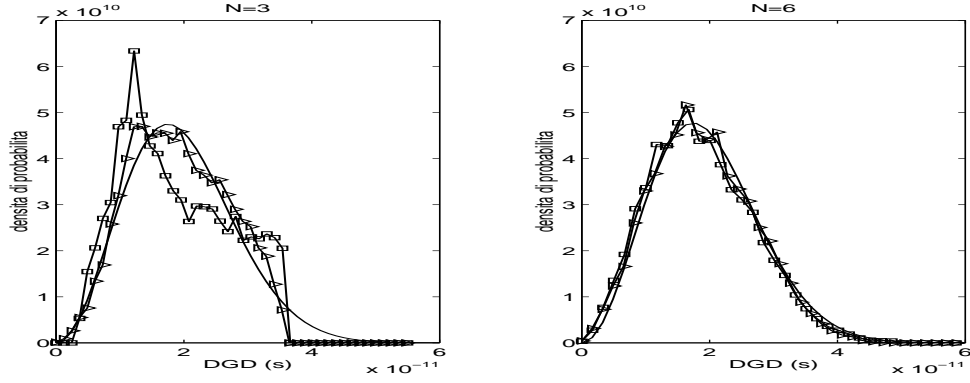


Figure 1: Andamento della densità di probabilità del DGD realizzato da un emulatore a 3 o 6 lamine con  $K = 0.2 \cdot \tau_n$ . Quadrato: con rotatori; triangolo: con polarization scramblers; linea continua: curva teorica.

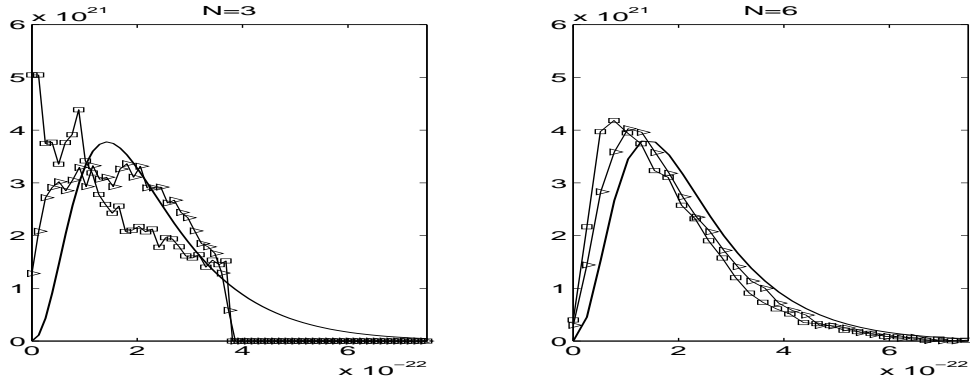


Figure 2: Andamento della densità di probabilità di  $|\vec{\Omega}_\omega|$  usando 3 oppure 6 lamine. Legenda come in figura 1.

Dalle figure 1 e 2 si nota come 3 lamine sfasate da rotatori siano assolutamente inadeguate per simulare correttamente il comportamento di una fibra. La situazione migliora di poco se gli stessi 3 spezzoni di fibra vengono collegati tra loro per mezzo di polarization scramblers, ma solo aggiungendo altre 3 lamine la statistica comincia a convergere verso l'andamento teorico.

#### L'ANDAMENTO DELLA ACF DELLE COMPONENTI DI $\hat{s}$ .

Come anticipato nell'introduzione, la ACF delle componenti dei vettori di Stokes in uscita fornisce notevoli informazioni riguardo all'indipendenza statistica fra canali adiacenti in frequenza. Dall'equazione 5, infatti, si evidenzia che i vettori di Stokes di uscita dalla fibra diventano fra loro scorrelati mano a mano che cresce lo spostamento dalla frequenza centrale. In questa sezione, si valuterà sotto quali condizioni un PMDE riesce a rispettare la ACF tipica di una fibra.

Si consideri un emulatore a 6 lamine mosso da rotatori, con  $\langle DGD \rangle = 20$  ps: per utilizzare questo strumento, ad esempio, in un sistema a 4 canali per 40 Gb/s, è necessario garantire la giusta autocorrelazione su una banda di circa 6 nm. Nella figura 3, vengono riportati gli andamenti della ACF ottenuta al variare di  $K$ : si vede come la ACF converge

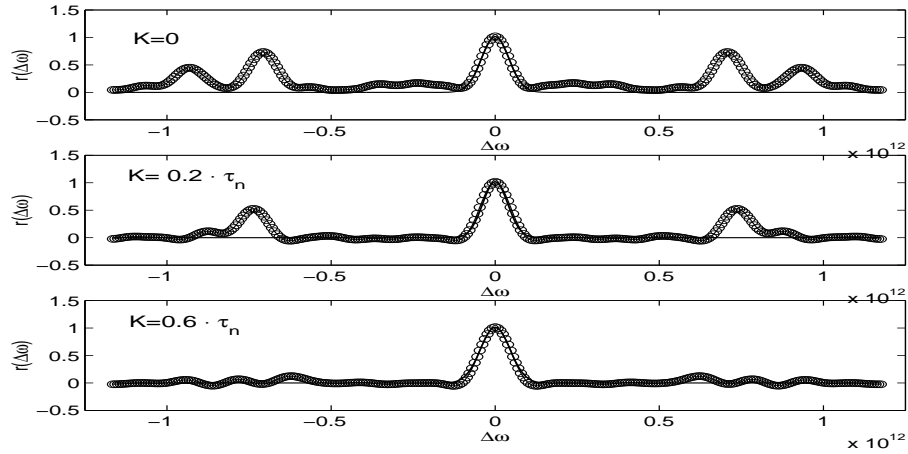


Figure 3: ACF dei vettori di Stokes in uscita. Linea continua: andamento teorico; cerchi: andamento simulato per un PMDE con 6 lamine. La lunghezza d'onda centrale è di 1552 nm.

verso la curva teorica tanto più le lunghezze delle lamine differiscono tra loro. Da questo si deduce che la configurazione più semplice, quella a lamine tutte uguali, è sicuramente da escludere, soprattutto se si prevede di usare il PMDE in un sistema multicanale.

## CONCLUSIONI

Per il progetto di un PMDE si possono utilizzare come gradi di libertà il numero delle lamine, la distribuzione dei DGD delle lamine, e il tipo di sfasatore usato, cercando un compromesso fra la complessità dello strumento e le sue prestazioni. Un emulatore a 6 lamine, con una distribuzione dei DGD uniforme in un intervallo di semiampiezza  $K = 0.6 \cdot \tau_n$ , mosso da rotatori, sembra essere la configurazione più semplice per poter simulare sufficientemente bene la PMD di una fibra.

## References

- [1] C.D.Poole, J.Nagel, 'Optical fiber telecommunications IIIa', Academic Press, San Diego, 1997.
- [2] C.D.Poole, R.E.Wagner, 'Phenomenological approach to polarization dispersion in long single mode fibers', *Electr. Lett.*, vol.22, pp.1019-1030, 1986.
- [3] O.Karlsson, J.Brentel, P.A.Andrekson, 'Long-term measurement of PMD and polarization drift in installed fibers', *J.Light.Tech.*, vol.18, pp. 941-951, 2000.
- [4] G.J.Foschini, L.E.Nelson, R.M.Jopson, H.Kogelnik, 'Probability densities of second-order polarization mode dispersion including polarization dependent chromatic fiber dispersion', *IEEE Phot.Tech.Lett.*, vol.12, pp.293-295, 2000.
- [5] C.D.Poole, D.L.Favin, 'Polarization-mode dispersion measurement based on transmission spectra through a polarizer', *J.Light.Tech.*, vol. 12, pp.917-929, 1994.