

TRASMISSIONE WDM-RZ, 4x40GBIT/S CON AMPLIFICAZIONE RAMAN

C. Schivo, A. Pizzinat, M. Santagiustina

Dipartimento di Elettronica e Informatica, Università di Padova
via Gradenigo 6/a 35131, Padova
marco.santagiustina@unipd.it

Abstract

The effects of the introduction of distributed Raman amplification in wavelength division multiplexed, optical communication systems are studied by means of numerical solutions. In particular, the eye opening penalty and bit error rate are estimated for a 4x40 Gbit/s system. The proposed numerical model includes group velocity dispersion, Kerr nonlinearity, losses, distributed Raman amplification and/or lumped amplification. Noise properties of Raman amplifiers are also estimated, in order to evaluate the performances. Raman amplification allows to decrease the mean input power of 5-6 dB guaranteeing the same BER. The best performance, however, is obtained when amplification is provided partly by Raman and partly by lumped amplifiers. In this case the transmission distance can be also increased.

INTRODUZIONE. Lo sviluppo di sistemi a moltiplicazione di lunghezza d'onda (WDM) e l'incremento della capacità di trasmissione del singolo canale (dell'ordine delle decine di Gbit/s) hanno reso gli amplificatori in fibra drogata con Erblio (EDFA) obsoleti a causa della banda di amplificazione che non è sufficientemente ampia [1]. La diffusione Raman stimolata (SRS) è una soluzione promettente del problema dell'amplificazione a larga banda, grazie anche al recente sviluppo di potenti laser di pompa a semiconduttore [2]. Lo SRS è un effetto non lineare di conversione di un segnale, alla frequenza ω_p , in uno a frequenza inferiore $\omega_s = \omega_p - \Delta\omega$. Ciò permette quindi l'amplificazione Raman distribuita (DRA) di segnali a qualsiasi lunghezza d'onda (cambiando la lunghezza d'onda della pompa), in un ampio spettro di frequenze (circa 7 THz). Inoltre il fenomeno è intrinseco della silice e quindi presente in tutti i cavi ottici. In questo contributo si presenta un'analisi teorico-numerica degli effetti dovuti alla introduzione della DRA in un sistema WDM a larga banda, in cui il segnale di pompa è contro propagante rispetto al segnale da amplificare. Tale situazione è infatti quella che presenta le migliori prestazioni in termini di rumore di emissione spontanea amplificata (ASE). Lo scopo è quello di valutare come varino le prestazioni del sistema complessivo, includendo tutti gli effetti presenti nella propagazione: la dispersione della velocità di gruppo (GVD), le perdite, l'effetto di non linearità Kerr e la miscelazione a quattro onde (FWM) [3].

MODELLO. Si è considerata una trasmissione a 4 canali WDM, con capacità del singolo canale di 40 Gbit/s, a modulazione di impulso di tipo RZ (return to zero), con impulsi Gaussiani di varia durata (5 e 8 ps). È stato simulato un sistema con compensazione periodica della dispersione cromatica (inizialmente mediante reticoli di Bragg, BG) e dell'attenuazione ogni 100 km. Le stesse simulazioni sono state ripetute considerando i due tipi di fibre ottiche attualmente più utilizzati, ovvero G.652 e G.655.

La trasmissione lungo la direzione z nella fibra ottica e' stata modellata mediante l'equazione di Schroedinger non lineare:

$$j \frac{\partial A}{\partial z} - j \frac{\Gamma(z)}{2} A - \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \gamma |A|^2 A = 0 \quad (1)$$

dove $\beta_2 = -5 \text{ ps}^2/\text{km}$ e $\gamma = 1.5 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ sono i coefficienti di GVD e non linearità per fibre G.655 (non zero dispersion), $\beta_2 = -20 \text{ ps}^2/\text{km}$ e $\gamma = 1.3 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ per fibre G.652 (a salto d'indice). Il termine $\Gamma(z) = \delta(z-L)G + \ln[G_R(z)] - \alpha$ riassume il contributo di eventuali amplificatori concentrati di guadagno G (I termine) e della DRA (II termine):

$$G_R(z) = \frac{P_s(z)}{P_s(0)\exp(-\alpha z)} = \exp\left(g_R \frac{P_p(L)}{\alpha A_{\text{eff}}} \exp(-\alpha L)(\exp(\alpha z) - 1)\right) \quad (2)$$

dove P_s, P_p sono le potenze medie del segnale e della pompa, $\alpha = 0.0576 \text{ km}^{-1}$ è il coefficiente di attenuazione (pari a 0.25 dB/km), $g_R = 0.678 \cdot 10^{-13} \text{ m/W}$ è il coefficiente di guadagno Raman, $A_{\text{eff}} = 80 \text{ } \mu\text{m}^2$ l'area efficace ed $L = 100 \text{ km}$ la lunghezza della singola tratta.

Particolarmente importante è stata la valutazione della densità spettrale di rumore ASE che si compone di due termini, uno dovuto all'amplificazione Raman [4]:

$$P_{\text{noise}}(L) = hf_s \Delta f_R \int_0^L g_R \frac{P_p(L)}{A_{\text{eff}}} \exp[-2\alpha z + g_R \frac{P_p(L)}{A_{\text{eff}}} \frac{1 - \exp(-\alpha \eta)}{\alpha}] dz \quad (3)$$

ed il secondo dal rumore degli EDFA, $P_G = hf_s N_G(G-1)B$, dove $N_G = 2$ è la cifra di rumore, G il guadagno e B la banda del segnale WDM. Utilizzando solo DRA si ottiene un miglioramento del rapporto segnale rumore (SNR) di circa 6 dB rispetto al solo EDFA.

In ricezione il segnale viene demultiplexato, mediante un filtro ottico, quindi fotorivelato e filtrato attraverso un filtro elettrico del quarto ordine. Da tale segnale si estrae il segnale di temporizzazione e vengono tracciati i diagrammi ad occhio. Infine vengono valutate la chiusura dell'occhio (EOP) e la probabilità d'errore (BER) in base ai diagrammi e attraverso le formule riportate nella referenza [5].

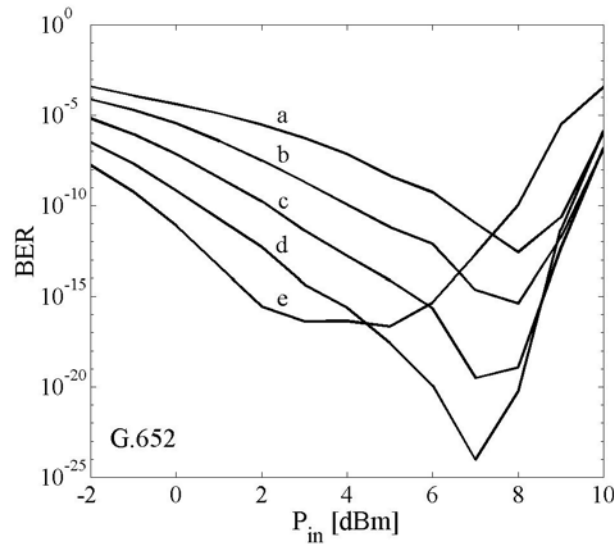


Figura 1: BER stimato al variare della potenza media in ingresso (P_{IN}), per diversi valori della potenza della pompa Raman, per le fibre G.652: a) $P_p(L)=0$ (solo EDFA), b) $P_p(L)=100\text{mW}$, c) $P_p(L)=200\text{mW}$, d) $P_p(L)=300\text{mW}$, e) $P_p(L)=395.7\text{mW}$ (solo DRA).

RISULTATI. Nel caso di trasmissione su 8 tratte di fibra G.652, la stima del BER viene presentata nella figura 1. Si è osservato che, per basse potenze medie ($P_{in} < 6$ dBm), il sistema DRA presenta un BER inferiore a 10^{-12} (sistema “error free”). D’altro canto per potenze più alte ($P_{in} > 6$ dBm) gli effetti non lineari aumentano, specie per sistemi solo DRA, dato che in questi la potenza media durante la propagazione è più alta. Le migliori prestazioni del sistema DRA nel regime lineare sono dovute al fatto che il rumore ASE è circa 6 dB inferiore rispetto al sistema con amplificatori EDFA. Per potenze elevate, invece, gli effetti non lineari iniziano ad essere preponderanti e portano ad un degrado delle prestazioni.

Cio’ è confermato dai risultati ottenuti nel caso di fibre G.655; tali fibre presentano una dispersione inferiore e quindi gli effetti non lineari di FWM si trovano esaltati dalla condizione di accordo di fase (phase matching) a valori di potenza media inferiori. Infatti, come si osserva nella figura 2, i valori di potenza media di ingresso per i quali insorgono distorsioni non lineari sono di circa $P_{in} = 0.4$ dBm; questo effetto riduce il vantaggio del sistema DRA.

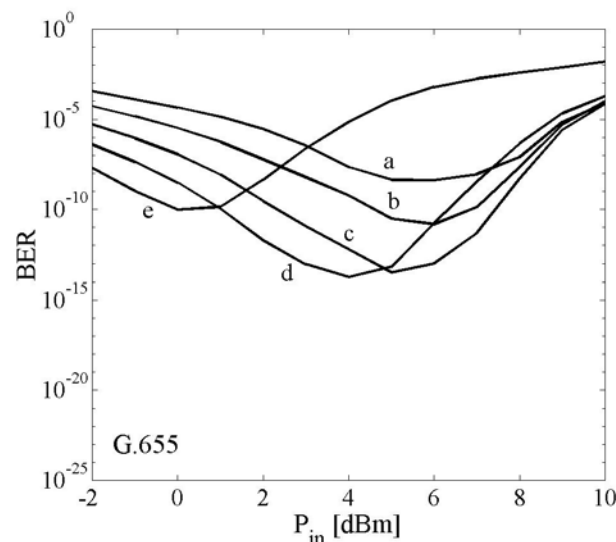


Figura 2: BER stimato al variare della potenza media in ingresso (P_{IN}), per diversi valori della potenza della pompa Raman, per le fibre G.655: i casi a), b), c), d) ed e) si riferiscono agli stessi valori di guadagno di amplificazione Raman della figura 1.

In entrambi i casi, si osserva che la soluzione migliore è quella con amplificazione di tipo misto (DRA ed EDFA) che presenta basso rumore ASE e ridotti effetti non lineari. Essa garantisce trasmissioni “error free” in un ampio intervallo di potenze medie con un punto ottimale attorno a 7 o 5 dBm, rispettivamente per le fibre G.652 e G.655. Si noti infine che per le fibre G.655 i sistemi con amplificazione ibrida sono gli unici a garantire la trasmissione error free.

Infine è stato studiato l'effetto della presenza di compensatori di dispersione cromatica, realizzati con fibre compensatrici (DCF). Tali fibre, oltre all'elevata dispersione normale per compensare la dispersione cromatica negativa della fibra di trasmissione, presentano un alto coefficiente non lineare e forti perdite. Tutto ciò è dovuto al design della fibra, che presenta un'area efficace del nucleo molto ridotta. Come si può osservare quindi dai risultati della figura 3 le prestazioni peggiorano, soprattutto per le alte potenze, ossia per i sistemi DRA.

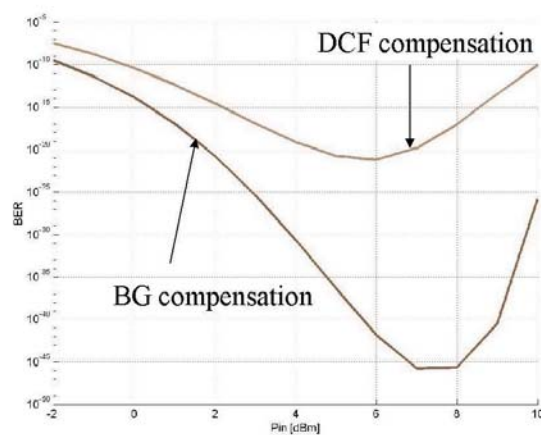


Figura 2: Confronto fra il BER stimato, al variare della potenza media in ingresso (P_{IN}), per un collegamento di 5X100km, con fibre G.652 con compensazione concentrata (BG) e distribuita (DCF).

CONCLUSIONI. In conclusione si sono comparate, mediante simulazioni numeriche, le prestazioni di un sistema WDM ad alta velocità (singolo canale a 40Gbit/s) con amplificazione concentrata, mediante amplificatori ottici in fibra drogata all'Erbio, con quelle dello stesso sistema amplificato in modo distribuito mediante l'effetto Raman. I risultati evidenziano come gli amplificatori Raman permettano un guadagno dell'ordine di 5-6 dB, dovuto alle loro migliori caratteristiche di rumore ASE. Per alte potenze tale miglioramento scompare a causa dell'incremento della distorsione non lineare. I sistemi migliori sembrano comunque quelli ibridi dove l'amplificazione è in parte Raman distribuita ed in parte concentrata. In particolare questa soluzione ibrida è l'unica a garantire la trasmissione error free fino a 800km con fibre G.655.

Infine si è studiato l'effetto dell'uso di fibre compensatrici della dispersione al posto di reticoli di Bragg. Tali fibre forniscono prestazioni inferiori a causa dell'alta non linearità e delle alte perdite.

Infine è utile ricordare che l'effetto Raman è presente in tutte le fibre, che l'amplificazione si può realizzare a qualsiasi frequenza (cambiando la frequenza della pompa) e quindi qualsiasi sistema già posato può essere migliorato con la semplice introduzione di segnali di pompa Raman.

- [1] I.P. Kaminow, T.L. Koch Eds., Optical fiber telecommunications (San Diego, Academic Press, 1997).
- [2] R. Namiki, Recent advances in Raman amplifiers, *Proc. 27th European Conference on Optical Communications*, Amsterdam, NL, 2001, We.M.21
- [3] G.P. Agrawal, Nonlinear fiber optics (San Diego, Academic Press, 1989).
- [4] J. Auyeung and A. Yariv, Spontaneous and stimulated Raman scattering in long low-loss fibers, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 14, 1978, 347-351.
- [5] G.P. Agrawal, Fiber optics communication systems (New York, Wiley, 1992).