

# VALUTAZIONE ESATTA DEL BER PER DPSK E OOK E CONFRONTO CON L'APPROSSIMAZIONE GAUSSIANA IN SISTEMI TERRESTRI A 40 Gb/s

Paolo Serena, Alberto Bononi

Dipartimento di ingegneria dell'informazione, Università degli Studi di Parma, viale delle  
Scienze 181 A, 43100 Parma - Italy

Tel: + 39 0521 905750. Fax: + 39 0521 905758. E-mail: [serena@tlc.unipr.it](mailto:serena@tlc.unipr.it),  
[bononi@tlc.unipr.it](mailto:bononi@tlc.unipr.it)

Sébastien Bigo, Stéphanie Lanne, Karine Waksman

Alcatel, Research & Innovation. Route de Nozay. F-91461 Marcoussis Cedex - France

Tel: + 33 1 69 631478. Fax: + 33 1 69 631865. E-mail: [sebastien.bigo@alcatel.fr](mailto:sebastien.bigo@alcatel.fr),  
[stephanie.lanne@alcatel.fr](mailto:stephanie.lanne@alcatel.fr), [karine.waksman@ms.alcatel.fr](mailto:karine.waksman@ms.alcatel.fr)

## Abstract:

*Self-phase modulation distortion is investigated for DPSK and OOK formats at 40 Gb/s by comparing the exact BER with the Gaussian approximation. While the Gaussian approximation is always reliable for OOK, it can be applied to DPSK only at large transmitted powers.*

## Introduzione

Recentemente Forestieri [1] ha proposto un metodo esatto di valutazione del tasso d'errore (BER) in sistemi ottici con modulazione on-off keying (OOK), che tiene conto delle statistiche non gaussiane della variabile di decisione e tratta correttamente l'intersimbolo (ISI) introdotto dai vari filtri di sistema, in particolare quello ottico, il cui effetto risulta critico nei sistemi a multiplazione di lunghezza d'onda a spaziatura ridotta (DWDM).

È stato altresì dimostrato [2] come l'approssimazione gaussiana (GA) può essere opportunamente riformulata in modo da riprodurre quasi esattamente il BER per il formato di modulazione OOK, sia con impulsi di supporto non-return-to-zero (NRZ) che return-to-zero (RZ). Tuttavia la GA non risulta applicabile a nuovi formati di modulazione, quali il Differential Phase Shift Keying (DPSK) ottico, dando stime completamente inattendibili del BER [3, 4]. In questo lavoro verranno confrontate le prestazioni di un singolo canale ottico a 40 Gb/s con formati di modulazione RZ-DPSK, NRZ-DPSK, RZ-OOK, NRZ-OOK in sistemi ottici terrestri a lunga distanza con management della dispersione cromatica, mediante opportuna estensione del metodo Forestieri al formato DPSK, e verrà verificata l'accuratezza dell'approssimazione gaussiana.

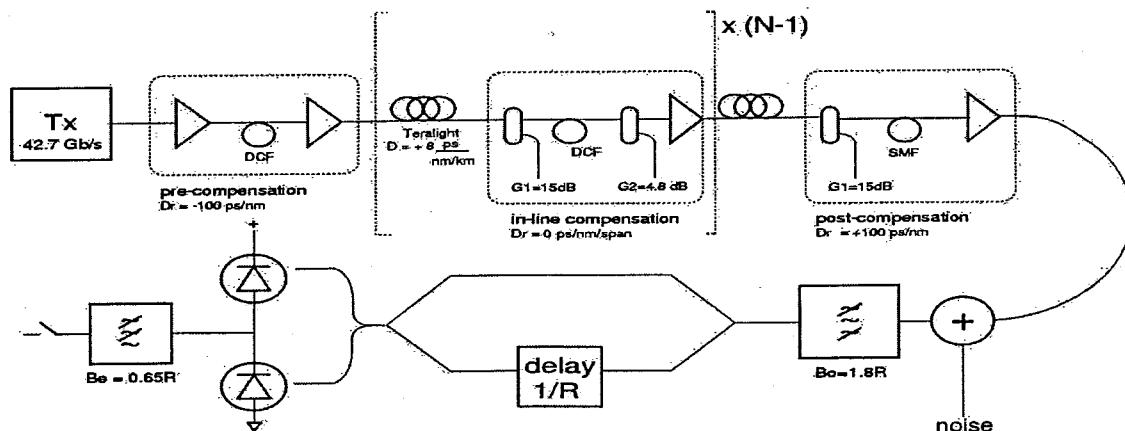


Fig. 1 Modello del sistema a lunga distanza con ricevitore DPSK a interferometro.

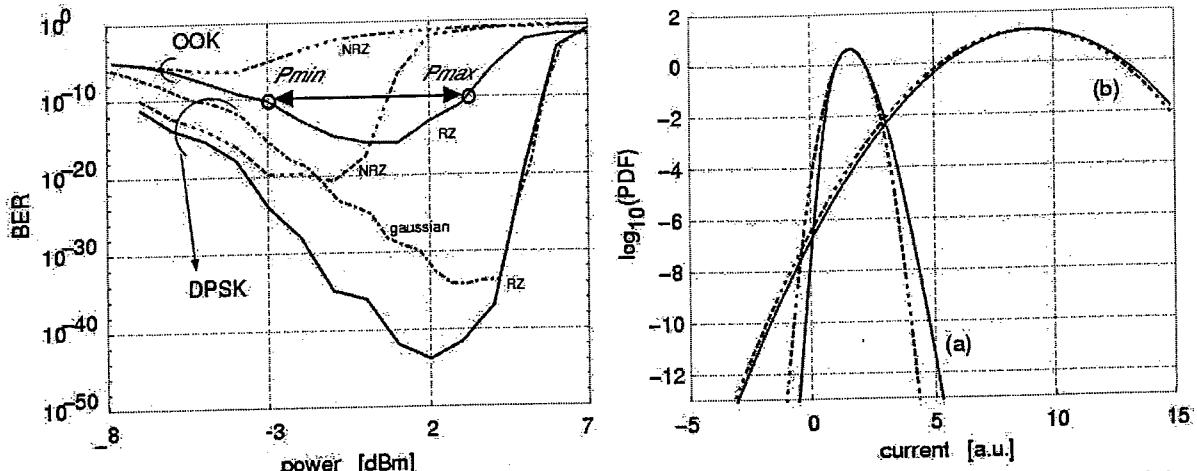


Fig.2 Sinistra: BER vs. Potenza media trasmessa per DPSK e OOK con impulsi di supporto NRZ e RZ dopo 20 tratte. Destra: PDF condizionata del peggior "1" per RZ-DPSK, valutata a  $P_{\min}$  (a), e  $P_{\max}$  (b), mediante il metodo esatto (linea intera) e mediante appr. gaussiana (tratto).

Si è scelto il metodo Forestieri [1], invece di altri metodi simili usati in letteratura [4], in quanto permette di evitare completamente la complessità del calcolo delle funzioni della base di Karhunen-Loéve.

La capacità di calcolare esattamente l'intersimbolo rende tale metodo lo strumento più appropriato per la valutazione del BER in presenza di forti distorsioni sia lineari (dovute a filtraggio stretto) che nonlineari (dovute alla propagazione in fibra). Mentre i lavori finora presenti in letteratura forniscono un raffronto tra i formati di modulazione sopra citati basato sulla penalty nella chiusura dell'occhio, o mediante l'uso della GA, il presente lavoro fornisce per la prima volta un raffronto basato sulla valutazione esatta del BER, e quantifica l'affidabilità della GA.

### Modello di sistema

Abbiamo verificato le prestazioni del formato DPSK per singolo canale su sistema terrestre a 40 Gb/s, e le abbiamo confrontate alle prestazioni del formato OOK. La Fig. 1 mostra il diagramma a blocchi del sistema simulato con ricevitore bilanciato DPSK. Il sistema è composto da N tratte identiche da 100 km di fibra Teralight<sup>TM</sup> ciascuna, con compensazione perfetta di ogni tratta mediante fibra di compensazione (DCF).

Prima della trasmissione, una fibra di pre-compensazione fornisce al segnale un pre-chirp di  $D_R = -100$  ps/nm. Si sono propagati  $2^6 - 1$  bit, ottenuti da una sequenza pseudo-casuale (PRBS), con il metodo split-step Fourier (SSFM), usando impulsi con 50% di duty cycle nel caso di formato RZ. Si è poi utilizzata una fibra di post-compensazione per riportare la dispersione totale residua a 0 ps/nm, valore molto vicino all'ottimo per impulsi RZ [5].

Ogni tratta è amplificata con amplificazione ibrida erbio-Raman: una prima pompa Raman contropropagante nella Teralight<sup>TM</sup> fornisce un guadagno on-off di  $G = 15$  dB, mentre una seconda pompa Raman contropropagata nella DCF recupera esattamente le perdite di compensazione. Lo stadio finale all'erbio recupera esattamente le perdite di linea, riportando la potenza al valore di lancio.

Il rumore di emissione spontanea (ASE) totale ricevuto, assunto bianco sullo spettro del segnale, nell'algoritmo di valutazione della BER viene sommato nel ricevitore al segnale propagato con lo SSFM, prima del filtraggio ottico passabanda.

Per il formato OOK si usa un ricevitore standard, e si assume un rapporto di estinzione infinito in trasmissione. Per tutti i formati di modulazione usati, il filtro ottico passabanda è un Butterworth del terzo ordine, di banda  $B_o = 1.8R$ , un valore a metà via tra quella del filtro adattato all'impulso NRZ e quella adattata all'RZ. Il filtro elettrico passabasso è sempre un Butterworth del secondo ordine, con banda  $B_e = 0.65R$ .

## Risultati

La Fig. 2 (sinistra) mostra il BER valutato dopo  $N=20$  tratte per tutti e quattro i formati di modulazione in oggetto, in funzione della potenza media trasmessa in fibra, usando una cifra di  $F=0$  dB per tratta, valore fissato essenzialmente dalla amplificazione Raman nella Teralight™. Dalla figura notiamo l'usuale decrescita del BER con rapporti segnale rumore crescenti, seguita da una decrescita del BER provocata dalle distorsioni dovute all'automodulazione di fase (SPM). Fissato un valore di riferimento  $BER=10^{-10}$ , possono esistere un valore minimo di potenza ( $P_{min}$ ) ed uno massimo ( $P_{max}$ ) tali che il BER resta al di sotto del BER di riferimento per potenze trasmesse comprese tra  $P_{min}$  e  $P_{max}$ .

Dalla figura si nota che il formato NRZ-OOK non può funzionare al di sotto del BER di riferimento per alcun valore della potenza trasmessa, mentre l'RZ-DPSK [6] ha un ampiissimo intervallo di 12 dB di potenze trasmissibili, da  $P_{min}=-7$  dBm fino a  $P_{max}=5$  dBm, il che suggerisce come tale formato di modulazione può sopportare ben maggiori distanze massime di trasmissione. In motivo di tale robustezza è legato al fatto che l'impulso di supporto del formato RZ-DPSK è modellato in modo da non presentare energia in prossimità di salti di fase del campo ottico dovuti alla modulazione DPSK; tale assenza di energia evita completamente la conversione tra intensità e fase (PM-IM) indotta dalla dispersione della velocità di gruppo (GVD), che come noto penalizza pesantemente il formato NRZ-DPSK.

Come verifica dell'affidabilità della approssimazione gaussiana per il DPSK, in Fig. 2(sinistra) si è anche riportato il BER ottenuto con la GA per il formato RZ-DPSK. Nel calcolare la GA, abbiamo dovuto valutare numericamente il valore esatto della media e della varianza della variabile di decisione [2], il che porta il tempo di valutazione numerica della GA vicino a quello del metodo esatto di Forestieri. Dalla figura si nota chiaramente che a basse potenze (cioè in regime di propagazione lineare) la GA sbaglia di 2-3 dB [4], mentre essa diventa estremamente accurata a gradi potenze trasmesse, quando l'intersimbolo prodotto dal SPM è grande.

Per verificare questo risultato più approfonditamente, in Fig. 2(destra) si mostra la densità di probabilità (PDF) della variabile di decisione condizionata al bit peggiore, quello che maggiormente chiude l'occhio, nell' RZ-DPSK, ottenuta sia con il metodo esatto (linea intera) che con la GA (tratto), per  $P_{min}$  (curve (a)) e  $P_{max}$  (curve (b)). Si nota che a grandi potenze ( $P_{max}$ ) la asimmetria della PDF esatta attorno alla media è molto meno marcata, poiché la varianza è molto maggiore, cosicché tale PDF approssima molto meglio la PDF gaussiana, che è simmetrica attorno alla media. A valori bassi di potenza, invece, la PDF gaussiana sovrastima sempre la PDF esatta, fortemente asimmetrica, soprattutto attorno al valore della soglia ottima, e questo sia per gli zeri che per gli uno logici.

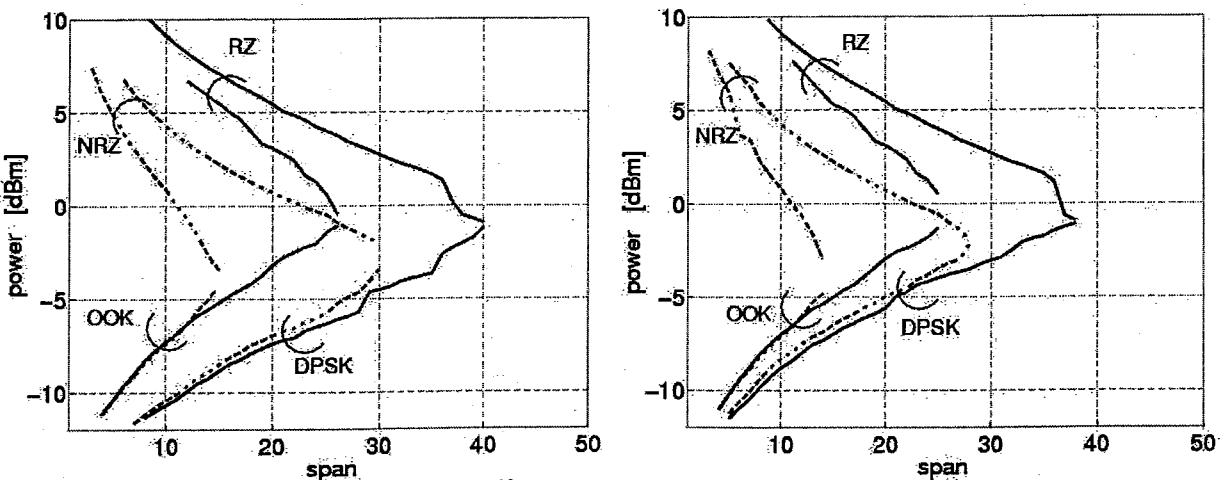


Fig. 3  $P_{min}$  e  $P_{max}$  @  $BER=10^{-10}$  vs. Numero di tratte N per formati DPSK e OOK con supporto NRZ e RZ. Grafici a sinistra: metodo Forestieri. Grafici a destra: approssimazione gaussiana.

Questo fenomeno non avviene invece per la OOK, dove la sovrastima della PDF per gli uno viene controbilanciata da una sottostima della PDF per gli zeri [3], il che giustifica il fatto che la GA predice correttamente il valore di BER esatta, sottostimando però in modo evidente il valore della soglia ottima.

La Fig. 3 (sinistra) mostra i valori  $P_{\max}$  e  $P_{\min}$  a  $\text{BER}=10^{-10}$  ottenuti tramite il metodo Forestieri. I grafici sono in funzione del numero di tratte (100 km/tratta) per i differenti tipi di formati di modulazione in esame. Nella figura, al crescere delle tratte,  $P_{\max}$  e  $P_{\min}$  si avvicinano, e il comportamento asintotico di tali grafici si può interpretare come segue. Quando  $P_{\min}$  è fissata solamente dal livello di ASE, al valore di OSNR che fornisce  $\text{BER}=10^{-10}$ , essa cresce linearmente con  $N$  a causa dell'incremento lineare in  $N$  della densità spettrale di potenza dell'ASE al ricevitore. Analogamente, quando  $P_{\max}$  è fissata solamente dal SPM, essa decresce quasi come  $1/N$  in modo da mantenere costante la rotazione di fase nonlineare indotta dal SPM. Quando, al crescere del numero di tratte,  $P_{\max}$  e  $P_{\min}$  tendono a convergere, i ragionamenti precedenti non sono più applicabili in quanto sia l'ASE che il SPM contribuiscono in modo comparabile a determinare il BER. Notiamo anche che le curve di  $P_{\max}$ , sia per RZ-OOK che per RZ-DPSK tendono a sovrapporsi per grandi valori di  $P_{\max}$ , e la stessa cosa accade per i formati NRZ-OOK e NRZ-DPSK, cosicché ne inferiamo che il limite asintotico di  $P_{\max}$  è fissato dalla forma dell'impulso di supporto. Similmente, con la nostra scelta della banda del filtro ottico posta a metà strada tra l'ottimo per l'NRZ e quella per l'RZ in regime lineare, il limite asintotico per  $P_{\min}$  è fissato solamente dal formato di modulazione.

In Fig. 3 (destra) si mostrano anche per confronto i valori di  $P_{\max}$  e  $P_{\min}$  ottenuti con la GA. Si nota che le curve per l'OOK coincidono essenzialmente con quelle in Fig. 3 (sinistra), come ci si aspettava, mentre le curve per il DPSK differiscono solo nei valori di  $P_{\min}$ . Questo significa che, ragionando solo sulla GA, si trarrebbero conclusioni pessimistiche sulla massima distanza di propagazione per il formato DPSK.

## Conclusioni

Estendendo al formato DPSK un nuovo metodo di valutazione esatto del BER, che tiene correttamente in conto le statistiche non gaussiane della variabile di decisione e tratta correttamente l'intersimbolo, in questo lavoro si sono raffrontate le prestazioni dei formati di modulazione DPSK ed OOK con impulso di supporto NRZ o RZ in un sistema di telecomunicazione ottico a lunga distanza a 40 Gb/s in presenza di distorsione dovuta a SPM/GVD. Si è mostrato che la approssimazione gaussiana funziona anche per il formato DPSK, ma solo a grandi potenze trasmesse in fibra, quando l'intersimbolo derivante dalla propagazione nonlineare è considerevole.

## Riferimenti

- [1]. E. Forestieri, "Evaluating the Error Probability in Lightwave Systems with Chromatic Dispersion, Arbitrary Pulse Shape and Pre- and Postdetection Filtering", *J. Lightwave Technol.*, vol. 18, No. 11, Nov. 2000
- [2]. J. L. Rebola and A. V. T. Cartaxo, "Power penalty assesment in optically preamplified receivers with arbitrary optical filtering and signal-dependent noise dominance", *J. Lightwave Technol.*, vol. 20, No. 3, Mar. 2002
- [3]. P. A. Humblet and M. Azizoglu, "On the bit error rate of lightwave systems with optical amplifiers", *J. Lightwave. Technol.*, vol. 9, No 11, Nov. 1991
- [4]. P. J. Winzer and S. Chandrasekhar, "Influence of optical filtering on return-to-zero differential phase shift keying (RZ-DPSK)", *in Proc. ECOC'02*, paper 9.6.7, 2002
- [5]. O. Vassilieva, T. Hoshida, S. Choudhary, G. Castanon, H. Kuwahara, T. Terahara and H. Onaka, "Numerical comparison of NRZ, CS-RZ and IM-DPSK formats in 43 Gbit/s WDM transmission", *in Proc. LEOS'01*, ThC2, 2001
- [6]. T. Miyano, M. Fukutoku, K. Hattori and H. Ono, "Suppression of degradation induced by SPM/XPM+GVD in WDM transmission using a bit-synchronous intensity modulated DPSK signal", *in Proc. OECC'00*, paper 14D3-3, 2000