

## STUDIO DELLA DINAMICA DEL GUADAGNO NEGLI AMPLIFICATORI IN FIBRA: STATO DELL'ARTE E PROSPETTIVE

A. Bononi, L. Poti, G. Ghizzoni, A. Cucinotta, S. Selleri, L. Vincetti, M. Zoboli

Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione - Università di Parma

Parco Area delle Scienze 181A, I-43100 Parma, Italia

*The state of the art in modeling gain dynamics in stabilized/unstabilized doped-fiber amplifiers and perspectives on future modeling developments are presented.*

### 1. Introduzione

Lo sviluppo di reti ottiche trasparenti ad instradamento di lunghezza d'onda pone nuovi problemi di progetto per gli amplificatori ai nodi e lungo i canali di collegamento tra nodi. In particolare, le operazioni di inserzione e di prelievo di canali su varie lunghezze d'onda provocano repentine variazioni di potenza in ingresso alle linee amplificate, con conseguenti transitori dei livelli di potenza dei canali in transito [1]. Si presenta quindi la necessità di disporre di modelli per lo studio del comportamento dinamico degli amplificatori ottici.

Lo studio sistemistico dei transitori negli amplificatori in fibra ha recentemente avuto un impulso grazie ad una drastica semplificazione delle *rate equations* proposta da Sun [2]. Il modello analitico di Sun è basato sull'ipotesi di allargamento omogeneo del guadagno, modello a due livelli per gli ioni droganti, e trascura le perdite di background, l'assorbimento da stato eccitato e l'up-conversion, e la saturazione indotta dal rumore di emissione spontanea (ASE) nell'amplificatore. Tale modello è stato formalizzato in chiave sistemistica in [3], dove è stata messa in luce l'interpretazione dell'amplificatore quale sistema nonlineare a più ingressi e uscite con una sola variabile di stato che ne determina completamente la dinamica, il "reservoir", ossia il numero totale di ioni eccitati nella fibra. Il modello di Sun può essere esteso in vari modi, ad esempio includendo l'effetto della saturazione dell'ASE [4], [5]. Inoltre il modello a due livelli, e quindi ad una variabile di stato, può essere esteso a tre livelli, due variabili di stato [6].

La principale limitazione del modello analitico consiste nella trattazione approssimata dell'ASE la cui variazione lungo la direzione di propagazione viene trascurata [4]. Anche gli effetti di anisotropia dell'erbio e quelli di interazione ione-ione, importanti in fibre ad alta concentrazione di drogante [7], vengono trascurati.

L'approccio numerico permette di superare queste limitazioni tramite l'integrazione delle *population rate equations* e delle *propagation rate equations* nella loro formulazione esatta. Ciò consente di considerare la variazione lungo la direzione di propagazione sia dell'ASE co-propagante che dell'ASE contro-propagante. Inoltre gli effetti di interazione tra ioni possono essere valutati mediante alcune semplici modifiche delle *population rate equations* [8]. Anche gli effetti dell'anisotropia dell'erbio possono essere considerati riscrivendo in forma matriciale le *rate equations* [9].

In questo lavoro vengono presentati alcuni importanti risultati connessi con l'approccio analitico del problema dei transitori ed alcuni aspetti introduttivi riguardanti l'impostazione dell'approccio numerico al problema.

### 2. Modello analitico a singola variabile di stato

La semplicità del modello a singola variabile di stato permette lo studio analitico dei transitori e del progetto di amplificatori con gain clamping [10], [11] e la veloce simulazione di lunghe catene di amplificatori, sia stabilizzati che non [6], [12].

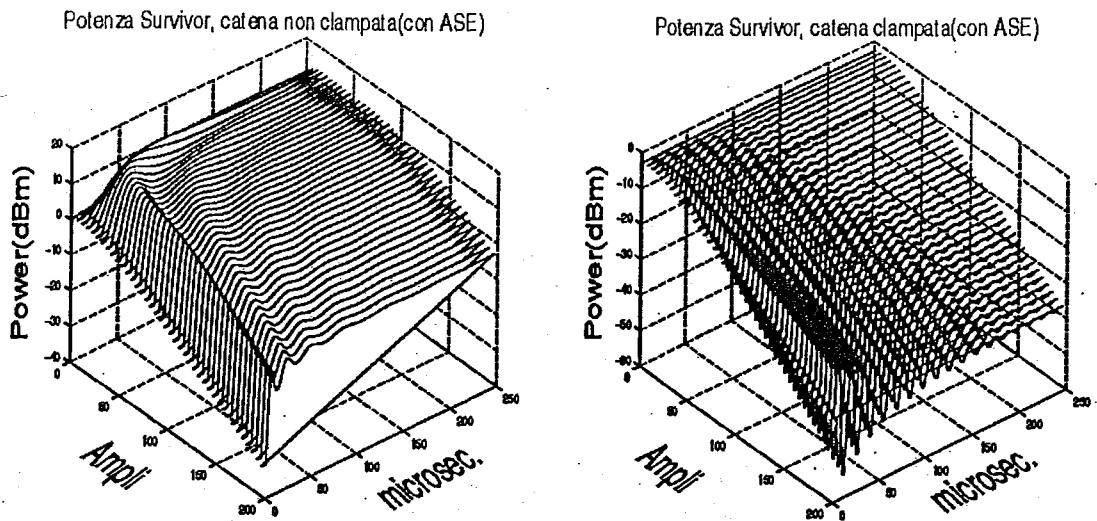


Fig. 1. Potenza del canale sopravvissuto lungo una catena di 200 amplificatori in un drop di 15 su 16 canali. Sinistra: EDFA standard. Destra: EDFA gain-clamped.

Per esempio, la Fig.1 mostra la potenza del canale che sopravvive nel transitorio di drop di 15 su 16 canali, in funzione del tempo e della posizione dell'amplificatore lungo la catena. I 16 canali vanno da 1544 a 1559 nm, con 1 nm di spaziatura, e la potenza per canale di ingresso alla catena è di -10 dBm. Gli amplificatori in fibra drogata all'erbio (EDFA) hanno una pompa copropagante a 980 nm, di potenza 18.4 dBm. Ogni EDFA ha una lunghezza di 14.7 m. La pompa nel caso di amplificatori gain-clamped è di 19.4 dBm. Il loss interamplificatore è di circa 13 dB. A sinistra sono riportati i transitori per amplificatori non stabilizzati, a destra per quelli stabilizzati con gain-clamping, con il laser non propagato. In entrambi i casi l'ASE è incluso nel modello. Nel caso non stabilizzato, si notano dapprima le due situazioni a regime, prima e dopo il transitorio. Prima della transizione sono presenti 16/16 canali, e il canale mostrato ha potenza decrescente lungo la catena. Dopo la transizione rimane un canale, la cui potenza al prossimo equilibrio aumenta velocemente lungo la catena fino a stabilizzarsi al valore per cui il guadagno egualia le perdite. La curva nel tempo è una esponenziale in corrispondenza del primo amplificatore, mentre per i restanti presenta un numero di oscillazioni che aumenta con la posizione dell'amplificatore lungo la catena. Dopo una sovraelongazione iniziale il valore si assesta a quello di regime. Si nota che la linea immaginaria che unisce i valori di cima ai vari amplificatori segue il profilo decrescente dell'equilibrio precedente al drop, benché il tasso di decrescita sia inferiore, cosicché l'ampiezza delle oscillazioni aumenta lungo la catena. Si è verificato che in catene non stabilizzate le simulazioni con e senza ASE danno risultati fortemente differenti, mentre l'ASE si può trascurare in catene con gain-clamping. Nel grafico a destra in Fig. 1 (caso stabilizzato) le due situazioni a regime sono identiche, a causa dell'effetto di gain-clamping. Si notino le oscillazioni nel tempo ai vari amplificatori lungo la catena, in cui le sovraelongazioni divengono sempre più grandi rispetto ai valori a regime, e quindi i transitori durano sempre di più.

Il modello a singola variabile di stato consente, inoltre, di ottenere previsioni analitiche su metodi di misura di laboratorio, come ad esempio nello studio del canale equivalente. In [13] i transitori di add/drop in un pettine a multiplazione di lunghezza d'onda (WDM) sono riprodotti in laboratorio mediante l'impiego di due soli canali, quello sopravvissuto e quello equivalente. La potenza del canale equivalente ha forma d'onda a gradino, con una discontinuità all'istante di add (drop). La scelta della variazione di potenza del canale equivalente e della sua lunghezza d'onda è tutt'altro che banale, e una scelta errata porta in generale a transitori

ben diversi da quelli "veri" indotti dal pettine WDM. Il modello a singola variabile di stato permette di identificare i parametri ottimi del canale equivalente sia per il singolo amplificatore, che per catene di amplificatori.

### 3. Modello numerico

Il modello analitico consente rapide valutazioni di sistema per il dimensionamento di massima degli amplificatori in reti ottiche trasparenti. La sua semplicità è tuttavia un punto di debolezza quando si tratta di dimensionare il sistema con precisione, e sono quindi necessari strumenti più sofisticati, che non trascurino gli importanti effetti citati precedentemente.

I modelli numerici sviluppati per lo studio di amplificatori ottici e laser in regime stazionario [8], [14], [15] possono essere estesi per l'analisi del comportamento dinamico di amplificatori ottici e laser in fibra.

Secondo il modello spettrale dell'amplificatore ottico [16] una fibra è completamente caratterizzata noti i seguenti parametri facilmente misurabili: il coefficiente di assorbimento, il coefficiente di guadagno, il parametro di saturazione e le perdite di background. Il comportamento dinamico dell'amplificatore è descritto dalla *population rate equations* e dalle *propagation rate equations*. In particolare, nelle prime, a differenza di quanto accade in regime stazionario, le derivate rispetto al tempo sono non nulle. Si ottengono quindi due set di equazioni alle derivate parziali accoppiate tra loro. Per la risoluzione di questo complesso sistema di equazioni si può procedere nel modo seguente: ad ogni istante di tempo  $t$  le equazioni di propagazione possono essere integrate lungo tutta la lunghezza dell'amplificatore. Come condizione iniziale si può considerare la popolazione dei livelli energetici allo stato stazionario, ottenuta imponendo che le derivate temporali siano uguali a zero. Questo valore è successivamente utilizzato per calcolare le potenze di segnale, di pompa e dell'ASE lungo la fibra drogata. Le potenze così ottenute sono, a loro volta, utilizzate per valutare l'inversione di popolazione nell'istante di tempo successivo  $t = t + \Delta t$ . Il processo descritto continua per tutto il periodo di osservazione considerato. Risultati relativi verranno mostrati in sede di presentazione.

Infine, per avere informazioni sulla fase dei segnali che si propagano nella fibra drogata è necessario sviluppare un modello in termini di campo elettromagnetico anziché in termini di potenza o intensità. Questo può essere fatto utilizzando il Beam Propagation Method spaziale [17] e studiando l'evoluzione del campo elettromagnetico in un mezzo con costante dielettrica complessa [18]. In particolare, la parte immaginaria della costante dielettrica descrive l'effetto del guadagno [19] e dipende dal livello di inversione della popolazione, mentre la parte reale permette di descrivere gli effetti non lineari che si hanno negli EDFA [20]. Questo approccio fornisce informazioni, oltre che sulla fase dei campi, sul comportamento delle diverse polarizzazioni dei segnali. Chiaramente la maggiore complessità ed accuratezza del modello comporta un notevole incremento dei tempi di calcolo, limitazione che può essere accettata nell'ambito della maggiore precisione richiesta rispetto ai modelli in termini di potenza.

### 4. Conclusioni

Lo sviluppo di reti ottiche ad instradamento di lunghezza d'onda comporta la necessità di disporre di modelli analitici e numerici per lo studio del comportamento dinamico degli amplificatori ottici. A partire dal modello analitico a singola variabile di stato, se ne sono messi in luce pregi e limiti, indicando le possibili estensioni future tramite approcci numerici che consentono di ottenere risultati più accurati.

## Bibliografia

- [1] A. K. Srivastava, J. L. Zyskind, J. W. Sulhoff, "EDFA transient response to channel loss in WDM transmission system", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol.9, pag.386-388, marzo 1997.
- [2] Y. Sun, J. L. Zyskind, A. K. Srivastava, "Average inversion level, modeling, and physics of erbium-doped fiber amplifiers", *J. Sel. Areas Quantum Electron.*, vol.3, pag.991-1007, agosto 1997.
- [3] A. Bononi, L. A. Rusch, "Doped fiber amplifier dynamics: a system perspective", *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol.16, pag.945-956, maggio 1998.
- [4] T. Georges, E. Delevaque, "Analytic modeling of high-gain erbium-doped fiber amplifiers", *Opt. Lett.*, vol.17, pag.1113-1115, agosto 1992.
- [5] A. Bononi, L. Barbieri, L. A. Rusch, "Using SPICE to simulate gain dynamics in doped-fiber amplifier chains", presented at OFC '98, San Jose, CA, workshop 204 "Transmission modeling simulation tools", 23 febbraio 1998.
- [6] A. Mecozzi, D. Marcenac, "Theory of optical amplifier chains", *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol.16, pag.745-756, maggio 1998.
- [7] P. Myslinski, D. Nguyen, J. Chrostowski, "Effects of concentration on the performance of erbium-doped fiber amplifiers", *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol.15, pag.112-120, gennaio 1997.
- [8] F. Di Pasquale, M. Zoboli, M. Federighi, I. Massarek, "Finite-element modeling of silica waveguide amplifiers with high erbium concentration", *IEEE J. Quantum Electronics*, vol.30, pag.1277-1282, maggio 1994.
- [9] J. Wagener, D. G. Falquier, M. J. F. Digonnet, H. J. Shaw, "A Mueller matrix formalism for modeling polarization effects in erbium-doped fiber", *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol.16, pag.200-206, febbraio 1998.
- [10] S. R. Chinn, "Simplified modeling of transients in gain-clamped erbium-doped amplifiers", *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol.16, pag.1095-1100, giugno 1998.
- [11] A. Bononi, "Design of Gain-clamped doped-fiber amplifiers for optimal dynamic performance", in *Proc. IEEE ICC'99*, paper S43.6, Vancouver, Canada, giugno 1999.
- [12] D. H. Richards, M. A. Ali, J. L. Jackel, "A theoretical investigation of dynamic automatic gain control in multichannel EDFA's and EDFA cascades", *IEEE J. Sel. Areas Quantum Electron.*, vol.3, pag.1027-1036, agosto 1997.
- [13] L. Potì, A. Bogoni, R. Magri, M. Costantini, C. Francia, A. Bononi, "Measurement of EDFA gain transients caused by the Add/Drop of several WDM channels by using a single equivalent channel", in Final Report of European Community sponsored INCO-DC project No. 950959 "DAWRON", pag. 2.165-2.171.
- [14] A. Cucinotta, S. Dallargine, S. Selleri, C. Zilioli, M. Zoboli, "Modeling of erbium doped fiber ring laser", *Optics Communications*, vol.141, pag.21-24, agosto 1997.
- [15] A. Cucinotta, S. Selleri, L. Vincetti, M. Zoboli, "Numerical and experimental analysis of erbium doped fiber linear cavity lasers", *Optics Communications*, vol.156, pag.264-270, novembre 1998.
- [16] C.R. Giles, E. Desurvire, "Modeling erbium-doped fiber amplifiers", *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 9, pag. 271-283, febbraio 1991
- [17] F. Caccavale, F. Segato, I. Mansour, "A numerical study of erbium doped active LiNbO<sub>3</sub> waveguides by the beam propagation method", vol.15, pag. 2294-2300, dicembre 1997.
- [18] E. Desurvire, "Study of the complex atomic susceptibility of erbium-doped fiber amplifiers", *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol.8, pag.1517-1527, ottobre 1990.
- [19] A. Cucinotta, S. Selleri, L. Vincetti, M. Zoboli, "Active Nonlinear Integrated Optical Devices: a Numerical Analysis", sottoposto per la pubblicazione su *Optical and Quantum Electronics*.
- [20] M. Janos, S.C. Guy, "Signal-induced refractive index changes in erbium-doped fiber amplifiers", *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol.16, pag. 542-548, aprile 1998.