

时钟抽运光纤再生器的动态转移特性研究

卢行**, 武保剑*, 万峰, 耿勇, 邱昆

电子科技大学光纤传感与通信教育部重点实验室, 四川 成都 611731

摘要 针对放大自发辐射噪声引起的信号劣化情形,分析了时钟抽运四波混频光纤再生器的静态和动态功率转移函数(PTF)以及Q因子转移函数(QTF)三者之间的差异,揭示了消光比参数对动态PTF曲线的影响。重点研究了全光再生器的动态PTF和QTF特性,发现仿真结果与实验数据相吻合。研究表明,在给定波长配置和光纤参数下,PTF输出饱和点和QTF最佳工作点所对应的输入光功率相差1 dB,且与抽运光功率基本无关。该结论意味着通过测量动态PTF曲线可以获得最佳工作点的信息。

关键词 光纤光学; 全光再生; 四波混频; 功率转移函数; Q因子转移函数

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.090603

Research on Dynamic Transfer Characteristics of Clock-Pumped Fiber Regenerators

Lu Hang**, Wu Baojian*, Wan Feng, Geng Yong, Qiu Kun

Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communication of the Ministry of Education,
University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China

Abstract We analyze the differences of static and dynamic power transfer functions (PTFs) and Q-factor transfer function (QTF) for clock-pumped four-wave mixing (FWM) fiber regenerators with the optical signal degraded by spontaneous emission noise. The influence of extinction ratio on the dynamic PTF curve is revealed. The dynamic PTF and QTF characteristics of all-optical regenerator are studied emphatically and the simulation results are in good agreement with the experimental data. It is shown that the input optical power corresponding to the PTF's output saturation point is larger than that to the QTF's optimal operating point by 1 dB for the given wavelength configuration and optical fiber parameters. Besides, the point is basically independent of the pump optical power. This conclusion means that the optimal operating point can be derived by measurement of the corresponding dynamic PTF curves.

Key words fiber optics; all-optical regeneration; four wave mixing; power transfer function; Q-factor transfer function

OCIS codes 060.2330; 190.4370; 190.4380; 230.1150; 070.4340

1 引言

在长距离光纤通信系统中,光放大器的自发辐射噪声、群速度色散、偏振模色散和非线性效应等会影响信号交换和传输的质量^[1],使光信噪比(OSNR)、消光比(ER, R_{ER})和Q因子降低,从而限制了通信链路中掺铒光纤放大器(EDFA)的级联个数。为了延长传输距离需要进行中继再生,目前成熟的光信号处理方案仍然是光/电/光中继再生。然

而光/电/光中继数据格式不透明、应用成本高,同时存在潜在的“电子瓶颈”,难以满足超快速光信息传输和交换处理的需求。另一种解决方案是全光再生技术^[2-4],它有着电交换无法比拟的传输速度及带宽,可以应用于高速光交换节点和超快速通信系统^[5-6]。利用光判决门器件的输入/输出非线性转移特性可以实现光脉冲整形,其实现机理主要包括自相位调制(SPM)、交叉相位调制(XPM)、四波混频(FWM)等非线性物理效应^[7-9]。其中,基于FWM

收稿日期: 2018-04-08; 修回日期: 2018-04-11; 录用日期: 2018-04-18

基金项目: 国家自然科学基金(61671108,61505021)

* E-mail: bjwu@uestc.edu.cn; ** E-mail: laker_lu@163.com

的全光再生器较为灵活,不但具有光控光的波长变换特性^[10],还可实现多波长再生^[11-12]。根据抽运光的信号特征,可将 FWM 再生方案分为数据信号(DATA)、连续光(CW)或时钟信号(CLK)等抽运方案^[13],其中时钟抽运方案具有再定时功能,不但能够较好地抑制受激布里渊散射(SBS),还适合于高阶 FWM 再生^[14]。

目前,人们对再生器已有较多的研究^[15-17],一般使用静态功率转移函数(PTF)来描述其性能^[18-19]。静态 PTF 曲线描述了连续光的输出功率与输入功率之间的依赖特性。事实上,输入的待整形信号为噪声劣化后的光脉冲信号,采用静态 PTF 曲线一定程度上可以说明再生器的工作特性,但噪声会引起工作点的偏差。为此,提出利用 Q 因子转移函数(QTF)曲线来优化再生器性能^[20]。本文针对放大自发辐射(ASE)劣化信号,以时钟抽运 FWM 再生方案为例,通过仿真分析光信号的 ER 对动态 PTF 的影响,建立了静态 PTF 与动态 PTF 之间、动态 PTF 与 QTF 之间的联系。实验和仿真研究结果表明,通过实验上容易测量的动态 PTF 曲线就可以获得其最佳工作点的信息。

2 时钟抽运 FWM 再生系统

一般而言,全光再生器性能与光信号的劣化方

式密切相关,本研究以 ASE 劣化情形为例进行研究。时钟抽运 FWM 再生系统如图 1 所示,它由信号发生器、全光再生器和光接收机三部分构成。连续光经过马赫-曾德尔调制器(MZM)的两次电光调制,产生一个理想的 10 Gb/s 伪随机归零-开关键控(RZ-OOK)光信号,其光功率可由 EDFA-1 调节,ER 可通过 MZM-1 调节。ASE 噪声源由 EDFA-2 产生,经过带宽为 200 GHz 的光滤波器(OBPF)滤波后,与 RZ-OOK 光信号耦合在一起形成 ASE 劣化光信号。时钟抽运再生器主要由如下光器件单元构成:1) 匹配 EDFA-3,控制劣化信号的光功率,以适配再生器最佳工作点;2) 时钟抽运光源(高斯脉冲光经高功率放大器放大后作为抽运光),时钟信号由可编程脉冲发生器(PPG)发出,连续光经过 MZM-3 调制后产生与劣化信号同步的高斯脉冲;3) 高非线性光纤(HNLF),仿真和实验中所用的光纤参数如表 1 所示,劣化光信号与时钟抽运光在 HNLF 中发生简并 FWM;4) 解复用器或光滤波器,用于获得 FWM 闲频光作为光再生信号。劣化光信号或再生信号经过适当衰减后由光接收机接收,光接收机中的前置 EDFA-4 的作用是提提高光接收机的灵敏度,不同功率会影响误码率^[21-24],在这里接收光功率被固定在 -13 dBm。

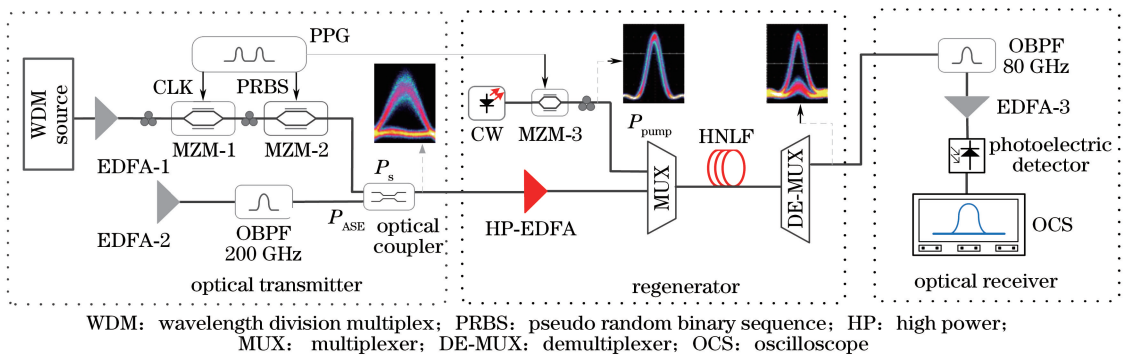


图 1 时钟抽运全光再生系统

Fig. 1 All-optical regeneration system of CLK pump

表 1 HNLF 的参数

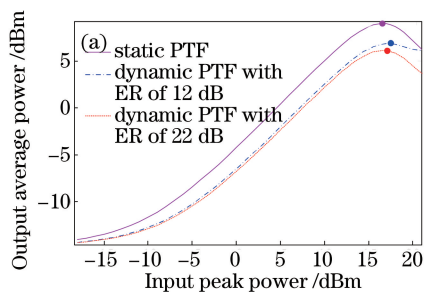
Table 1 Parameters of HNLF

Parameter	Value
Fiber length / m	501
Dispersion at 1550 nm / [ps·(nm·km) ⁻¹]	0.27
Dispersion slope at 1550 nm / (ps·nm ⁻² ·km ⁻¹)	0.007
Nonlinear coefficient / (W·km) ⁻¹	12.1

3 静态和动态 PTF 曲线

全光再生器的整形特性可以采用阶跃型的输入/输出 PTF 加以描述^[13],当输入二进制光信号的高低电平对应于输出功率的平坦区域时,该器件具有最好的噪声抑制性能。信号光为连续光或伪随机脉冲序列时,可以分别得到静态 PTF 和动态 PTF,其中动态 PTF 可采用峰值功率或平均功率表示。为此,首先仿真研究光信号 ER 对平均功率的影响。

采用 OptiSystem 仿真方法,调节 MZM-1 改变 RZ-OOK 信号光的 ER,可得到时钟抽运再生器的动态 PTF 曲线,如图 2(a)所示,其中动态 PTF 曲线的输入和输出信号分别用峰值光功率和平均光功率表示。仿真中,10 GHz 高斯脉冲时钟信号经过噪声指数(NF)为 14 的光放大器放大后作为抽运光,其波长 $\lambda_{\text{pump}}=1554.1$ nm、光功率 $P_{\text{pump}}=16.85$ dBm。10 Gb/s 的 RZ 输入信号为伪随机升余弦脉冲,其波长 $\lambda_s=1550.9$ nm、ER 为 12 dB。图 2(a)也给出了



静态 PTF 曲线,可以看出,静态和动态 PTF 曲线的输出功率均存在饱和点,它们对应的输入光功率 $P_{\text{in}}^{\text{sat}}$ 分别为 16.6 dBm 和 17 dBm,两者存在一定的差异。随着输入信号 ER 的增加,动态 PTF 的 $P_{\text{in}}^{\text{sat}}$ 逐渐减小,直到基本保持不变。由图 2(a)和(b)可知,当输入信号的 ER 为 16 dB 时,动态 PTF 的 $P_{\text{in}}^{\text{sat}}$ 为 16.6 dBm,与静态 PTF 接近一致,图 2(b)还给出了动态 PTF 的输入平均饱和功率 $\bar{P}_{\text{in}}^{\text{sat}}$ 随 ER 的变化情况。因此,动态 PTF 曲线形状与输入信号 ER 密切相关。

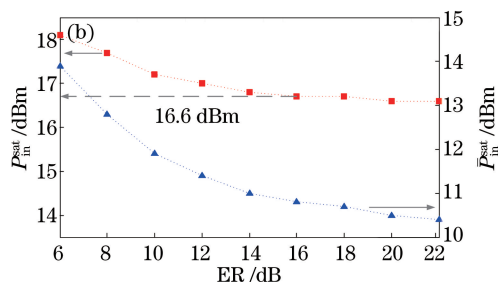


图 2 (a)静态与动态 PTF 曲线;(b)动态 PTF 饱和点随输入信号 ER 的变化

Fig. 2 (a) Static and dynamic PTF curves; (b) dependences of the saturation point of dynamic PTF on ER

保持抽运光和信号光的波长不变,在输入信号 ER 为 16 dB 情形下,图 3 给出了抽运功率分别为 15.85 dBm,16.85 dBm,17.85 dBm 时,用平均光功率表示的动态 PTF 实验曲线。图 3 给出 OptiSystem 仿真曲线,其中点为实验数据,虚线为仿真曲线,仿真输出结果中考虑了 1.2 dB 的损耗。由图 3 可以看出,仿真结果与实验数据基本吻合。仿真结果表明,抽运光功率每增加 1 dBm,与输出功率饱和点对应的输入平均光功率 $\bar{P}_{\text{in}}^{\text{sat}}$ 减小 1.5 dBm。

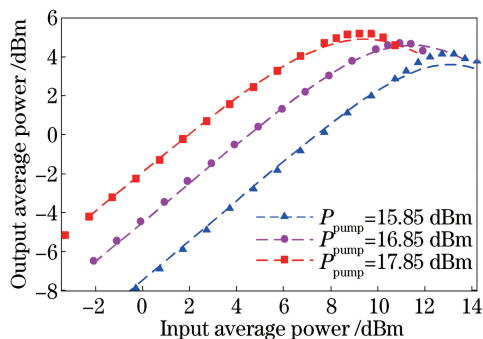


图 3 动态 PTF 实验曲线

Fig. 3 Experimental curves of dynamic PTF

4 QTF 的实验与仿真

Q 因子和 OSNR 参数分别在电域和光域上衡

量了信号劣化的程度,通过改变图 1 中 ASE 劣化光信号功率 P_{ASE} 或输入信号光功率 P_s 大小,可以得到具有不同 Q 值的劣化信号。借助光接收机的光电转换功能,可测量光信号再生前后的 Q 值,即输入/输出 Q 因子转移函数。图 4(a)和(b)分别给出了 $P_{\text{pump}}=16.85$ dBm 情形下, P_s 取不同值时的 QTF 实验和仿真曲线。可以看出,QTF 曲线依赖于 P_s ,对于给定的输入 Q 因子,QTF 曲线越靠上(输出 Q 因子越大), P_s 越接近优化值。由图 4(a)可以看出,当 $P_s=9.72$ dBm 时,在输入 Q 因子大于 13.5 dB 的测量范围内,该再生器有较好的 Q 值再生性能。图 4(c)给出了 $P_s=9.72$ dBm 时的实验数据和仿真曲线,可以看出仿真曲线与实验数据有很好的 consistency。根据图 4(b),当 P_s 取不同值时,仿真计算出最大 Q 值提升 ΔQ_m 。当 P_s 取最佳值,即 $P_s=P_s^{\text{opt}}=9.72$ dBm 时, ΔQ_m 的最佳值 $\Delta Q_m^{\text{opt}}=1.72$ dB,对应的输入信号 Q 值的最佳值 $Q_m^{\text{opt}}=15.17$ dB,此时全光再生器处于 QTF 的最佳工作点,如图 4(d)所示。为了便于比较,图 4(d)给出了相应的动态 PTF 曲线。可知,与输出功率饱和点对应的输入信号功率为 $\bar{P}_{\text{in}}^{\text{sat}}=10.72$ dBm,它与 QTF 最佳工作点对应的输入信号功率(9.72 dBm)相差 1 dB,即 $\Delta P=\bar{P}_{\text{in}}^{\text{sat}}-P_s^{\text{opt}}=1$ dB。

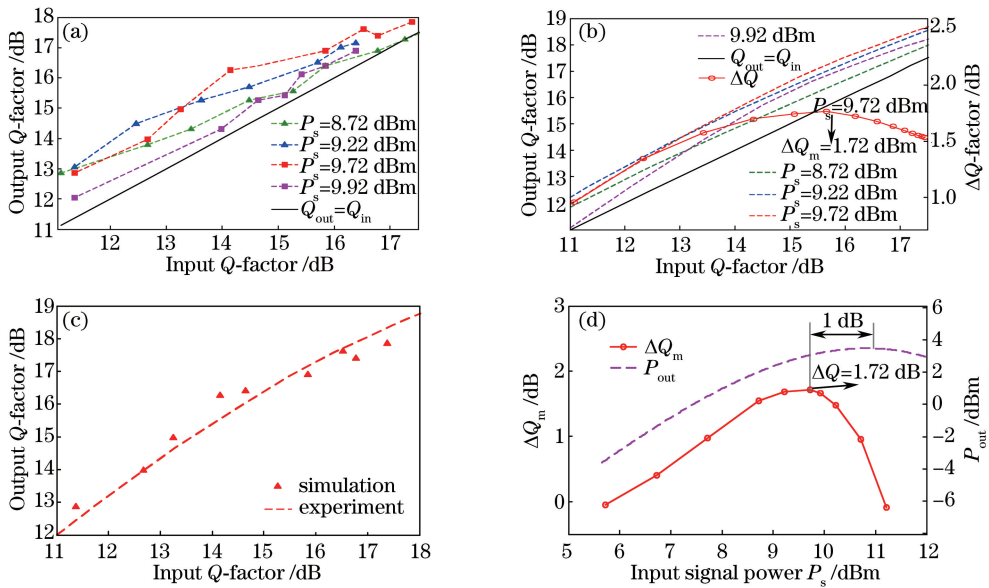


图4 QTF的实验与仿真曲线。(a) QTF实验曲线;

(b) QTF仿真曲线;(c) $P_s=9.72$ dBm时QTF仿真与实验比较;(d) QTF工作点与动态PTF饱和点比较

Fig. 4 Experimental and simulated curves of QTF. (a) Experimental QTF curves; (b) simulated QTF curves;

(c) comparison between simulated and experimental QTFs when $P_s=9.72$ dBm; (d) comparison between QTF's operating point and dynamic PTF's saturation point

上述分析表明,用光域和电域分析方法可分别得到动态PTF饱和点和QTF最佳工作点,它们所对应的输入信号光功率之差 $\Delta P=1$ dBm。但研究表明, ΔP 在一定范围内基本不随抽运光功率改变,如图5所示。对于时钟抽运全光再生器设计而言,该结论有着十分重要的现实意义,即通过测量动态PTF曲线就可以获得其最佳工作点的信息。

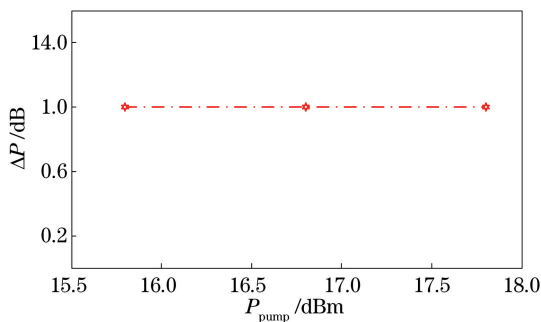


图5 动态PTF饱和点和QTF最佳工作点之间的差异

Fig. 5 Difference between dynamic PTF's saturation point and QTF's optimal operating point

5 结论

以ASE劣化信号的时钟抽运FWM再生方案为例,针对评价全光再生器特性的三个转移函数开展研究。明确了静态PTF、动态PTF以及QTF的输入信号特征,三者分别对应于无噪声的连续波、无

噪声的随机脉冲信号、噪声劣化的随机脉冲信号。重点研究了全光再生器的动态转移特性,通过仿真分析ER对动态PTF的影响,建立了动态PTF与QTF之间的联系。仿真和实验表明,时钟抽运FWM再生方案可使ASE劣化信号的Q因子最大提升1.72 dB,PTF输出饱和点和QTF最佳工作点始终相差1 dB。该结论可为时钟抽运FWM全光再生器的优化设计提供指导。

参考文献

- [1] Agrawal G P. Nonlinear fiber optics[M]. San Diego: Academic Press, 2001.
- [2] Hojfeldt S, Bischoff S, Mork J. All-optical wavelength conversion and signal regeneration using an electroabsorption modulator[J]. Journal of Lightwave Technology, 2000, 18(8): 1121-1127.
- [3] Yamashita S, Shahed M. Optical 2R regeneration using cascaded fiber four-wave mixing with suppressed spectral spread[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(9): 1064-1066.
- [4] Bogoni A, Wu X, Nuccio S R, et al. 640 Gb/s all-optical regenerator based on a periodically poled lithium niobate waveguide[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(12): 1829-1834.
- [5] Yan L S, Willner A E, Wu X X, et al. All-optical signal processing for ultrahigh speed optical systems

- and networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(24): 3760-3770.
- [6] Wabnitz S, Eggleton B J. All-optical signal processing: data communication and storage applications[M]. Berlin: Springer, 2015.
- [7] Mamyshev P V. All-optical data regeneration based on self-phase modulation effect[C] // ECOC'98 24th European Conference on Optical Communication, September 20-24, 1998, Madrid, Spain. Spain: IEEE, 1998, 1: 475-476.
- [8] Suzuki J, Tanemura T, Kikuchi K. All-optical regenerator based on XPM-induced wavelength shift in highly-nonlinear fiber at 40 Gb/s[J]. *Lasers and Electro-Optics*, 2005, 1: 300-302.
- [9] Ciaramella E, Curti F, Trillo S. All-optical signal reshaping by means of four-wave mixing in optical fibers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, 13(2): 142-144.
- [10] Qi J, Chi N, Zheng Y, *et al.* A novel method for wavelength conversion with dual-pump four-wave mixing in a semiconductor optical amplifier [J]. *Chinese Journal of Lasers B*, 2000, B9(6): 488-492.
- [11] Zhou X Y, Wu B J, Wen F, *et al.* Investigation of crosstalk suppression techniques for multi-wavelength regeneration based on data-pump FWM[J]. *Optics Communications*, 2013, 308: 1-6.
- [12] Geng Y, Wu B, Wen F, *et al.* Multi-wavelength regeneration experiments using clock-pump FWM in silicon waveguides [C] // Asia Communications and Photonics Conference, November 2-5, 2016, Wuhan, China. Washington: Optical Society of America, 2016: ATH2H.4.
- [13] Wu B J, Wen F, Zhou X Y, *et al.* All-optical regeneration technologies in optical switching nodes [J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(4): 711-717.
武保剑, 文峰, 周星宇, 等. 光交换节点中的全光再生技术研究[J]. *应用光学*, 2013, 34(4): 711-717.
- [14] Ito C, Monfils I, Cartledge J. All-optical 3R regeneration using higher-order four-wave mixing in a highly nonlinear fiber with a clock-modulated optical pump signal[C] // LEOS 2006-19th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, October 29-November 2, 2006, Montreal, Quebec, Canada. New York: IEEE, 2007: 223-224.
- [15] Ma H D, Wu B J, Wen F, *et al.* Design and development of fiber-optic parametric 2R regenerators [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0906005.
马辉栋, 武保剑, 文峰, 等. 光纤参量 2R 再生器的设计和研制[J]. *光学学报*, 2013, 33(9): 0906005.
- [16] Meng T H, Yu J L, Wang J, *et al.* 2×40 Gb/s all-optical 3R regeneration system using four-wave mixing in dispersion shifted fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8): 0806004.
孟天晖, 于晋龙, 王菊, 等. 基于色散位移光纤中四波混频效应的 2×40 Gb/s 全光 3R 再生系统[J]. *光学学报*, 2012, 32(8): 0806004.
- [17] Yuan H, Wu B J, Zhou X Y, *et al.* Equalization and regeneration of four-wave mixing for time-interleaved channel [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0206002.
袁浩, 武保剑, 周星宇, 等. 时隙交织信道的四波混频均衡再生[J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 0206002.
- [18] Hainberger R, Hoshida T, Watanabe S, *et al.* BER estimation in optical fiber transmission systems employing all-optical 2R regenerators[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(3): 746-754.
- [19] An J G, Wu B J, Zhou X Y. Assessment of performance for all-optical reshapers based on the power transfer function [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(1): 38-42.
安俊鸽, 武保剑, 周星宇. 基于功率转移函数的全光整形器性能评估[J]. *光子学报*, 2013, 42(1): 38-42.
- [20] Lu H, Wu B J, Geng Y, *et al.* Q-factor improvement of degenerate four-wave-mixing regenerators for ASE degraded signals[J]. *Optoelectronics Letters*, 2017, 13(6): 401-404.
- [21] Guo Y, Zhu S L, Kuang G H, *et al.* Demonstration of a symmetric 40 Gbit/s TWDM-PON over 40 km passive reach using 10 G burst-mode DML and EDC for upstream transmission [J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2015, 7(3): A363-A371.
- [22] Sun S, Liu D. All-optical in-band OSNR monitors based on unphase-matched four-wave mixing [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8333: 83330Y.
- [23] Lee J H, Jung D K, Kim C H, *et al.* OSNR monitoring technique using polarization-nulling method [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, 13: 88-90.
- [24] Dahdah N E, Govan D S, Jamshidifar M, *et al.* Fiber optical parametric amplifier performance in a 1-Tb/s DWDM communication system [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2012, 18(2): 950-957.