

时隙交织信道的四波混频均衡再生

袁 浩 武保剑 周星宇 文 峰

(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 给出了适用于多波长再生的数据抽运简并四波混频(FWM)耦合模方程组,提出了时隙交织波长信道再生的准相位匹配均衡方法。从优化设计简并 FWM 相位失配因子入手,针对实验室已有的光纤,实现了 4 个固定波长信道的均衡再生;通过设计光纤参数,在一定带宽范围内可实现任意 4 个波长的均衡再生。计算结果表明,再生输出信号的脉冲峰值功率、消光比(ER)和 Q 值之间的差异分别不超过 0.25 dB、0.42 dB 和 1.5。

关键词 光纤光学;全光再生;四波混频;相位失配;均衡再生

中图分类号 O437.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0206002

Equalization and Regeneration of Four-Wave Mixing for Time-Interleaved Channel

Yuan Hao Wu Baojian Zhou Xingyu Wen Feng

(Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications, Ministry of Education, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China)

Abstract The coupled-mode equations based on data-pump degenerate four-wave mixing (FWM) are presented for multi-wavelength regeneration. The equalization method using quasi-phase-matching is put forward for time-interleaved wavelength channel regeneration. Starting from optimizing the phase-mismatch factors of degenerate FWM, the equalization and regeneration of fixed or arbitrary four wavelengths are realized by the optimization of wavelength distribution or the fiber parameters, respectively. The calculations show that the variations of output peak power, extinction ratio (ER) and Q factor for the equalized channels are less than 0.25 dB, 0.42 dB and 1.5, respectively.

Key words fiber optics; all-optical regeneration; four-wave mixing; phase mismatch; equalized regeneration

OCIS codes 060.1155; 060.2330; 070.4340; 190.4380

1 引 言

利用光纤中超快非线性效应可以实现高速信号的全光再生,从而直接在光域改善信号质量。目前,单通道的全光再生系统研究已经日趋成熟^[1-3],其中,数据抽运的四波混频(FWM)再生结构可以有效抑制“0”与“1”的噪声^[4-5]。为了发掘光域多个波长并行处理的优势,多波长再生技术成为研究热点^[6-7],信道间串扰和信道再生均衡成为两个必需考虑的关键问题。一般采用偏振复用、时隙交织和双向对传等技术^[8-9]来抑制简并 FWM 再生方案中非简并 FWM 和交叉相位调制(XPM)等引起的信

道串扰,实现多波长再生^[10]。然而,基于 FWM 多波长再生的各个信道的输入输出功率转移函数(PTF)通常有较大差异^[11],即信道再生性能不均衡。在长距离波分复用(WDM)系统应用中,信道再生的不均衡会劣化系统的动态范围和接收机灵敏度^[12]。就全光再生器设计而言,均衡再生是指当输入光信号的功率和信号质量相同时,不同波长的再生信号功率和信号质量应保持基本一致。目前,在一定带宽范围内已实现可调谐的单波长全光再生器 PTF 的一致性^[13],但对多波长再生的均衡性研究还很少。

本文给出了计及抽运消耗的 FWM 耦合模方程

收稿日期: 2013-07-26; **收到修改稿日期**: 2013-09-09

基金项目: 国家 973 计划(2011CB301703)、国家自然科学基金(61271166)、国家 863 计划(2012AA011304)

作者简介: 袁 浩(1989—),男,硕士研究生,主要从事全光再生方面的研究。E-mail: haoyuan_1989@163.com

导师简介: 武保剑(1970—),男,博士,教授,主要从事光纤通信方面的研究。E-mail: bjwu@uestc.edu.cn(通信联系人)

(中国光学学会会员号: s040111641s)

组,采用分步傅里叶算法^[14]计算了时隙交织波长信道的再生闲频光功率。提出通过优化 FWM 相位失配因子实现信道再生均衡的方法。在给定光纤参数下,适当选择信号波长实现了 4 个波长的均衡再生,通过优化设计高非线性光纤的色散参数,在指定带宽范围内实现了任意 4 个波长的均衡再生。

2 简并 FWM 耦合模方程

FWM 多波长再生的光谱示意图如图 1 所示, λ_{1j} 表示输入数据抽运信道 CH_j ($j = 1 \sim 8$) 的光波长, λ_3 和 λ_{4j} 分别为探测光波长和相应的再生信号波长。在各向同性光纤中沿正 z 方向传播的线偏振导波光,其电场可以表示为

$$E = \frac{1}{2} \sum_l F_l(x, y) A_l(z, t) \exp[i(\beta_{0l}z - \omega_l t)] + c. c., \quad (1)$$

式中 $l = 1, 3, 4$ 分别表示四波混频的抽运光、探测光和闲频光, $F_l(x, y)$ 和 $A_l(z, t)$ 分别表示横向和纵向的电场分布, β_{0l} 是相应的传播常数, ω_l 为光载波角频率, $c. c.$ 为常数。将(1)式代入麦克斯韦波动方程,并根据导波光耦合模理论,将非线性效应作为微扰[包括自相位调制(SPM)、XPM 以及 FWM]^[15],可得直角坐标系下导波光复振幅分量 $A_l(z, t)$ 满足的耦合模方程:

$$\frac{\partial A_l}{\partial z} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{i^{n-1} \beta_{0l}^{(n)}}{n!} \frac{\partial^n A_l}{\partial t^n} + \frac{\alpha}{2} A_l = R_l, \quad (2)$$

$$R_1 = i\gamma |A_1|^2 A_1 + i\gamma(2|A_3|^2 A_1 + 2|A_4|^2 A_1) + i\gamma 2A_3 A_4 A_1^* \exp(i\Delta k z), \quad (3)$$

$$R_l = i\gamma |A_l|^2 A_l + i\gamma(2|A_3|^2 A_l + 2|A_4|^2 A_l) + i\gamma A_1^2 A_{7-l}^* \exp(-i\Delta k z), \quad l = 3, 4, \quad (4)$$

式中 α 和 γ 分别为光纤的损耗系数和非线性系数, $\Delta k = \beta_{03} + \beta_{04} - 2\beta_{01}$ 为 FWM 的相位失配。(3)式和(4)式右边第一项代表 SPM 项,第二项代表 XPM 项,第三项代表 FWM 项。

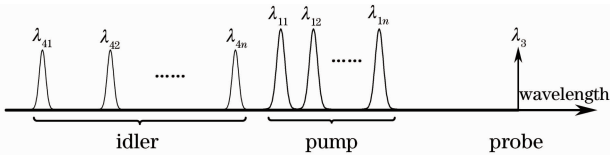


图 1 多波长再生光谱示意图

Fig. 1 Spectrum of multi-wavelength regeneration

对于图 1 所示的时隙交织多波长再生情形,当几个抽运脉冲的载频间隔不大时,可将它们的复包络 A_{1j} 用统一的复包络形式表示为^[16]

$$A_1(0, t) = \sum_{j=1}^n A_{1j}(0, t) \exp(-i\Delta\omega_{1j}t), \quad (5)$$

式中 $\Delta\omega_{1j} = \omega_{1j} - \omega_1$, ω_{1j} 为相应的抽运光载波角频率, ω_1 为多波长抽运光(波带)的中心参考角频率。根据(2)~(5)式,采用分步傅里叶算法可以计算时隙交织信道多波长 FWM 的再生性能。

由 FWM 耦合模方程可知,当光波长选择在零色散波长附近时,光脉冲的走离和色散展宽影响较弱,此时多信道再生性能主要取决于 FWM 准相位匹配的情况。图 1 中再生信道 j 的相位失配 Δk_j 可以表示为

$$\Delta k_j = -D_{1j} 2\pi c \left(\frac{\lambda_{1j}}{\lambda_3} - 1 \right)^2 - \pi c \left(D_{1j} + \lambda_{1j} S_{1j} + \frac{1}{6} \lambda_{1j}^2 \frac{dS_{1j}}{d\lambda} \right) \cdot \left(\frac{\lambda_{1j}}{\lambda_3} - 1 \right)^4, \quad (6)$$

式中 c 为光速, D_{1j} 、 S_{1j} 分别表示抽运光 λ_{1j} 处的色散系数和色散斜率。显然,相位失配因子是 λ_{1j} 和 λ_3 的函数。

3 多信道再生的准相位匹配均衡方法

3.1 优化再生信道波长分布

当光纤的色散参数给定时,根据(6)式可优化再生信道的波长配置,实现准相位匹配。若已知某参考波长 λ_r 处的色散系数 D_r 和色散斜率 S_r ,则抽运光 λ_{1j} 处的色散系数 D_{1j} 和色散斜率 S_{1j} 可泰勒展开为

$$D_{1j} = D_r + (\lambda_{1j} - \lambda_r) S_r + \frac{1}{2} (\lambda_{1j} - \lambda_r)^2 \frac{dS_r}{d\lambda}, \quad (7)$$

$$S_{1j} = S_r + (\lambda_{1j} - \lambda_r) \frac{dS_r}{d\lambda}, \quad (8)$$

$$\frac{dS_{1j}}{d\lambda} = \frac{dS_r}{d\lambda}. \quad (9)$$

当探测光及各个抽运光的波长间隔选定后,根据(6)式通过优化选择探测光波长可使再生信道处于准相位匹配状态,从而实现各信道的均衡再生。这种分析方法可用于评价商用非线性光纤所容纳的均衡再生信道分布情况。

在时隙交织多波长信号再生中,信号的再生性能依赖于相邻信道的时隙间隔(脉冲相对时延)大小,合理地选择时隙间隔和信号占空比,可以显著降低时域交叠带来的串扰^[9-10]。本文计算中,按照图 1 所示的光谱结构,选择相邻抽运光之间的波长间隔均为 1.2 nm(150 GHz),探测光与最近的抽运光之间波长间隔约 4.8 nm(600 GHz),信号的数据速率为 10 Gb/s,占空比取 0.1,相邻信道时隙间隔 25 ps,此时时域交叠引起的信道串扰很小。以实验室的高非线性光纤

(HNLF)为例(光纤参数如表 1 所示),计算了 4 个信道的相位失配因子随探测光波长的变化曲线,如图 2 所示,优化的探测光频率在 191.4 THz 附近,此时的抽运光频率分别为 192.45 THz (1557.8 nm, CH₁), 192.3 THz(1559 nm, CH₂), 192.15 THz(1560.2 nm, CH₃), 192 THz(1561.4 nm, CH₄)。由(2)、(5)和(6)式计算得到的 PTF 如图 3 所示,4 个再生信道的 PTF 曲线基本一致,可实现消光比提升和饱和输出功率的性能均衡。计算可知,当抽运波长在 1550~1560 nm 之间变化时,两个抽运波长之间最大的走离约为 0.2 ps/km。因此,色散走离因素对 FWM 再生性能的影响远小于相位失配的影响。

图 4 给出 4 路独立的伪随机序列(长度 $2^{10}-1$)

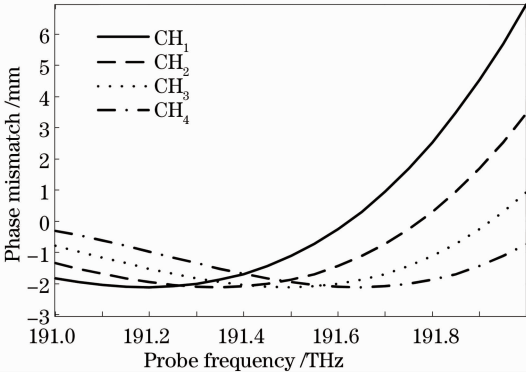


图 2 相位失配随探测光波长变化关系

Fig. 2 Phase mismatch with the change of light wavelength for probe

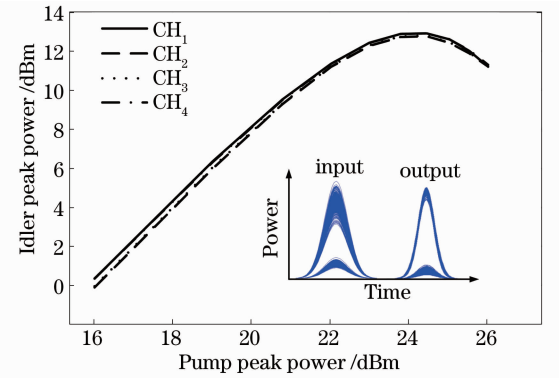
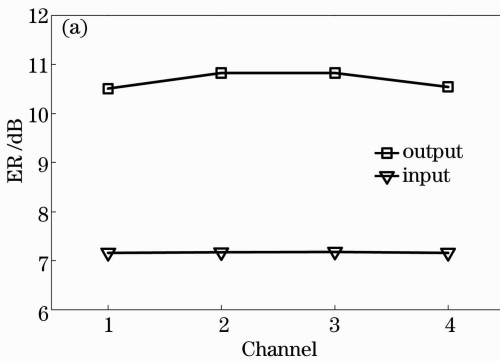


图 3 再生信道的功率转移函数

Fig. 3 Power transfer functions of the regenerated channels

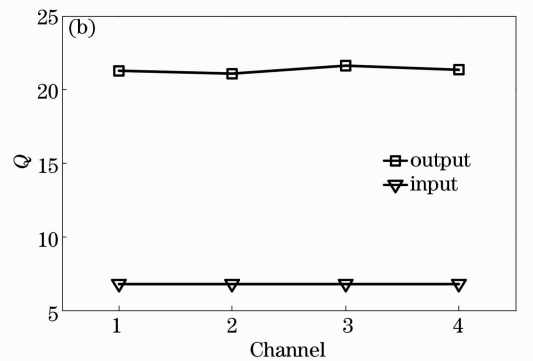


图 4 输入输出的信号质量。(a)消光比;(b) Q 值

Fig. 4 Signal qualities of input and output signals. (a) ER; (b) Q

3.2 优化设计光纤色散参数

通过优化设计光纤的色散参数,在准相位匹配下可实现一定带宽范围内任意多波长信号的再生。考虑波长间隔为 150 GHz 的 8 个数据抽运波长 ($\lambda_{11} \sim \lambda_{18}$) 的情形。根据(6)式可得到相位失配因子 Δk_j ($j=1 \sim 8$) 的表达式为

经各信道再生后的信号质量[包括消光比(ER)和 Q 值],计算中输入光信号“1”码和“0”码的峰值光功率分别为 260、50 mW,输入 ER 和 Q 值分别为 7.16 dB 和 6.8。4 个再生信道输出信号的峰值功率、ER 以及 Q 值分别相差 0.14 dB、0.33 dB、0.56。可见,在相同的输入功率和信号质量条件下,优化波长配置可实现同向时隙交织信道的均衡再生。

表 1 高非线性光纤参数

Table 1 Parameters of highly nonlinear fiber

Parameter	Value
Attenuation / (dB/km)	0.9
Zero dispersion wavelength / nm	1556
Zero dispersion slope / [ps/(nm ² ·km)]	0.0168
Nonlinearity coefficient / (W ⁻¹ /km)	12
Fiber length / m	1000

$$\begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_8 & b_8 & c_8 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} D_{11} \\ S_{11} \\ \frac{dS_{11}}{d\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta k_1 \\ \Delta k_2 \\ \vdots \\ \Delta k_8 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中,

$$a_j = -2\pi c \left(\frac{\lambda_{1j}}{\lambda_3} - 1 \right)^2 - \pi c \left(\frac{\lambda_{1j}}{\lambda_3} - 1 \right)^4, \quad (11)$$

$$b_j = -2\pi c (\lambda_{1j} - \lambda_{11}) \left(\frac{\lambda_{1j}}{\lambda_3} - 1 \right)^2 - \pi c (\lambda_{1j} - \lambda_{11}) \left(\frac{\lambda_{1j}}{\lambda_3} - 1 \right)^4 - \pi c \lambda_{1j} \left(\frac{\lambda_{1j}}{\lambda_3} - 1 \right)^4, \quad (12)$$

$$c_j = -\pi c (\lambda_{1j} - \lambda_{11})^2 \left(\frac{\lambda_{1j}}{\lambda_3} - 1 \right)^2 - \frac{1}{2} \pi c (\lambda_{1j} - \lambda_{11})^2 \left(\frac{\lambda_{1j}}{\lambda_3} - 1 \right)^4 - \pi c \lambda_{1j} (\lambda_{1j} - \lambda_{11}) \left(\frac{\lambda_{1j}}{\lambda_3} - 1 \right)^4 - \frac{1}{6} \pi c \lambda_{1j}^2 \left(\frac{\lambda_{1j}}{\lambda_3} - 1 \right)^4. \quad (13)$$

D_{11} 、 S_{11} 分别表示抽运光 λ_{11} 处的色散系数和色散斜率。当实现这 8 个信道的准相位匹配后,可采用最小二乘法求得光纤的色散参数。

在 193.3~192.25 THz 内选择 8 个波长,探测光频率为 191.05 THz,它与最近的抽运波长相距 1.2 THz,以确保再生信号频谱与抽运光不交叠。若取相位失配 Δk_j ($j=1\sim 8$) 均为 -2×10^{-3} ,参考波长为 193.3 THz,根据(10)式可求得色散参数的最小二乘解为: $D=6.7795 \times 10^{-3}$ ps/(nm·km), $S=1.8071 \times 10^{-3}$ ps/(nm²·km), $dS/d\lambda=1.7897 \times 10^{-21}$ ps/(nm³·km)。这 8 个信道的 PTF 如图 5 所示,计算中光纤的其他参数取自表 1。由图 5 可以看出,优化色散设计之后,8 个信道的 PTF 曲线基本重合,由于时隙交织信道数会受到光脉冲信号占空比以及脉冲走离大小的限制,从 8 个波长中任意选择 4 个波长信道来计算同向时隙交织再生的性能,即实现 4×10 Gb/s 时隙交织信道的均衡再生。

有 0.25 dB;相比之下,奇数信道组合方式下 Q 值的偏差最大, Q 值为 20.75 ± 0.75 。计算还表明,四种信道组合方式下的输出再生信号脉冲峰值功率只有 ± 0.12 dB 的波动。可见,这种优化方法不但能够实现多波长再生器的均衡设计,也可以用于波长可调的单信道再生器均衡设计。

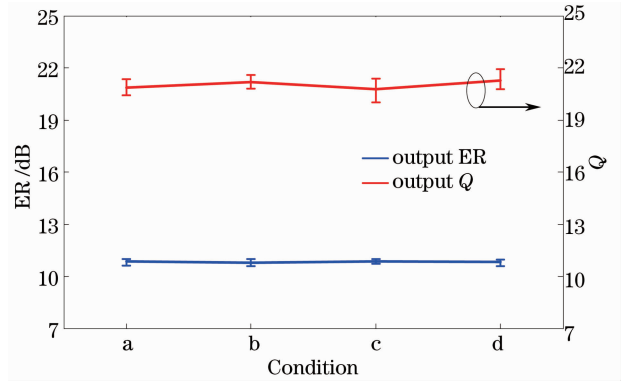


图 6 再生信号的 ER 和 Q 值

Fig. 6 ER and Q of the regenerated signals

4 结 论

利用简并 FWM 的耦合模方程和分步傅里叶算法,数值计算了时隙交织四波长信道的再生性能,提出了实现多波长信道再生的准相位匹配均衡方法。针对不同情况,分别进行了两种均衡再生计算:1)针对已知光纤色散参数,如何优化波长配置;2)通过优化设计光纤色散参数,如何实现多个波长范围内任意信道的时隙交织均衡再生。通过计算再生信道的 PTF 以及输出信号 ER 和 Q 值变化,验证了准相位匹配均衡方法的有效性。总之,准相位匹配均衡方法能够用于时隙交织多波长再生器的优化设计,从而改善 WDM 信道的均衡再生性能。

参 考 文 献

- 1 M Matsumoto. Fiber-based all-optical signal regeneration [J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2012, 18(2): 738–752.
- 2 An Junge, Wu Baojian, Li Zhi, *et al.*. Influence of fiber loss on optical parametric process with pump depletion [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 0619001.

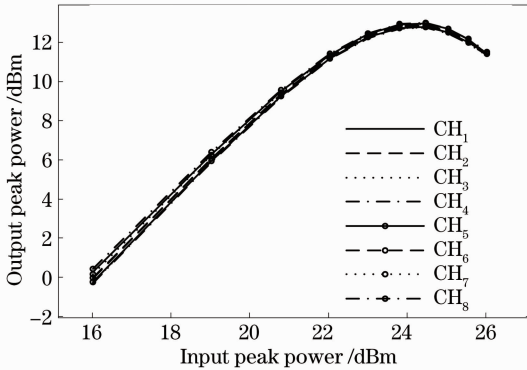


图 5 8 个再生信道的功率转移函数

Fig. 5 Power transfer functions of eight regenerated channels

图 6 给出了四种信道组合下 4 个再生输出信号 ER 和 Q 值的均值及其最大偏差,光信号输入条件与 3.1 节中的取值相同。其中,四种信道组合方式分别为:a)前四个信道,b)后四个信道,c)奇数信道,d)偶数信道。由图 6 可以看出,四种信道组合方式下,输出信号 ER 基本稳定在 10.8 dB,最大偏差只

- 安俊鸽, 武保剑, 李 智, 等. 光纤损耗对抽运消耗光纤参变过程的影响分析[J]. 光学学报, 2012, 32(6): 0619001.
- 3 Wang Lujun, Yan Lianshan, Guo Yinghui, *et al.*. Optical logic gate based on four-wave mixing in subwavelength metallic waveguide [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0419002.
王鲁俊, 闫连山, 郭迎辉, 等. 基于微纳波导四波混频效应的全光逻辑实现[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0419002.
- 4 Heng Zhou, Kun Qiu, Fengfeng Tian. Optimized all-optical amplitude reshaping by exploiting nonlinear phase shift in fiber for degenerated FWM [J]. Chin Opt Lett, 2012, 10(5): 050601.
- 5 A Bogris, D Syvridis. Regenerative properties of a pump-modulated four-wave mixing scheme in dispersion-shifted fibers [J]. J Lightwave Technol, 2003, 21(9): 1892–1902.
- 6 M Vasilyev, T I Lakoba, P G Patki. Multi-wavelength all-optical regeneration [C]. Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference, 2008. OWK3.
- 7 Meng Tianhui, Yu Jinlong, Wang Ju, *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.
- 8 P G Patki, M Vasilyev, T I Lakoba. Multichannel all-optical regeneration [C]. Photonics Society Summer Topical Meeting Series, 2010. 172–173.
- 9 X Y Zhou, B J Wu, F Wen, *et al.*. Investigation of crosstalk suppression techniques for multi-wavelength regeneration based on data-pump FWM [J]. Opt Commun, 2013, 308(1): 1–6.
- 10 N S M Shah, M Matsumoto. 2R regeneration of time-interleaved multiwavelength signals based on higher order four-wave mixing in a fiber [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2010, 22(1): 27–29.
- 11 Yan Ziheng, Yu Jinlong, Wang Ju, *et al.*. 4×40 Gb/s multi-wavelength all-optical 3R regeneration using data-pumped FOPA [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(10): 1005003.
颜子恒, 于晋龙, 王 菊, 等. 基于数据抽运的光纤光参量放大的 4×40 Gb/s 多波长全光 3R 再生实验研究[J]. 中国激光, 2011, 38(10): 1005003.
- 12 O K Tonguz, F A Flood. Gain equalization of EDFA cascades [J]. J Lightwave Technol, 1997, 15(10): 1832–1841.
- 13 M Gao, J Kurumida, S Namiki. Wavelength-tunable optical parametric regenerator [J]. Opt Lett, 2010, 35(20): 3468–3470.
- 14 O V Sinkin, R Holzlöhner, J Zweck, *et al.*. Optimization of the split-step Fourier method in modeling optical-fiber communications systems [J]. J Lightwave Technol, 2003, 21(1): 61–68.
- 15 F Wen, B J Wu, S B Li, *et al.*. Magneto-optic four-wave mixing in fibers: theory and experiment [C]. Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference, 2013. JTh2A.16.
- 16 E A Golovchenko, A N Pilipetskii. Unified analysis of four-photon mixing, modulational instability, and stimulated Raman scattering under various polarization conditions in fibers [J]. J Opt Soc Am B, 1994, 11(1): 92–101.

栏目编辑：王晓球