

文章编号: 0253-2239(2010)05-1249-05

应用光纤分数塔尔博特效应产生重复频率 倍频的光脉冲序列

吴波 于晋龙 王争 韩丙辰 罗俊 郭精忠 王菊 杨恩泽

(天津大学电子信息工程学院, 天津 300072)

摘要 提出了一种基于光纤分数塔尔博特(Talbot)效应的光脉冲序列的倍频方法,介绍了 Talbot 效应的基本原理;应用自制的可调色散补偿器,将光纤锁模激光器产生的重复频率为 10 GHz、脉宽约 2.8 ps 的窄脉冲序列倍频到重复频率为 20,40 和 50 GHz 的脉冲序列,也将重复频率 5 GHz 的窄脉冲序列经 8 倍频变换得到 40 GHz 的脉冲序列;通过分析窄脉冲序列的频谱,指出了实验中倍频得到的 40 GHz 和 50 GHz 脉冲质量下降的原因,提出了相应的优化措施。

关键词 光通信;塔尔博特(Talbot)效应;重复频率倍频

中图分类号 TN929.11 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201030005.1249

Optical Pulse Trains with Multiplied Repetition Frequency Based on Fractional Talbot Effect in Fiber

Wu Bo Yu Jinlong Wang Zheng Han Bingchen Luo Jun

Guo Jingzhong Wang Ju Yang Enze

(School of Electronic and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract The optical pulse trains with multiplied repetition frequency is generated by fractional Talbot effect in optical fiber. The principles of Talbot and fractional Talbot effects in fiber are analyzed. The 20, 40 and 50 GHz optical pulse trains are obtained from the original pulse with 2.8 ps width at 10 GHz repetition frequency. An optical pulse at 40 GHz repetition frequency is also produced by upshifting the repetition frequency of 5 GHz pulse. The degradation of 40 GHz and 50 GHz pulse trains is discussed by spectrum analysis of pulse and some improvement methods are proposed.

Key words optical communication; talbot effect; repetition frequency multiplication

1 引言

宽带光载微波(RoF)无线接入技术、基于光相控阵雷达系统的发射和接收都需要进行从“中频-射频、射频-中频”的频率变换技术,直接在光域中对微波信号进行上行、下行频率变换,能够克服电域频率变换多寄生信号、低工作频率的缺点^[1];尽管光域上的信号频率变换的损耗比较高,但是可以通过高功率放大器(HPA)对射频信号放大。文献[2]报道了利用全光处理的方法产生高频低噪声微波源;文献[3]报道了一种基于半导体光放大器(SOA)中交叉偏振调制(XPolM)的全光微分器,实验得到了重

复频率为 20 GHz 的光脉冲序列,此种全光信号处理技术亦有相关理论报道^[4];文献[5,6]报道了基于光纤塔尔博特(Talbot)效应的脉冲序列倍频理论。本文提出了一种基于光纤中分数 Talbot 效应的对光脉冲序列重复频率的倍频技术,能够通过色散管理的方法在光域便捷地实现微波的倍频。

2 理论分析

图 1 所示为宽带无线接入网中应用基于 Talbot 效应的对光脉冲序列重复频率的倍频技术实现微波上变频的示意图,图中 IM 为强度调制,

收稿日期: 2009-05-20; 收到修改稿日期: 2009-06-29

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60736035)资助课题。

作者简介: 吴波(1983—),男,博士研究生,主要从事光子微波技术方面的研究。E-mail: wubo314@163.com

导师简介: 于晋龙(1969—),男,博士,教授,主要从事高速光纤通信方面的研究。E-mail: yujinlong@tju.edu.cn

EDFA 为掺铒光纤放大器, O/E 为光电转换系统。它的最大特点是能够利用中心站的脉冲源以无源方

式在基站接入端实现上变频。

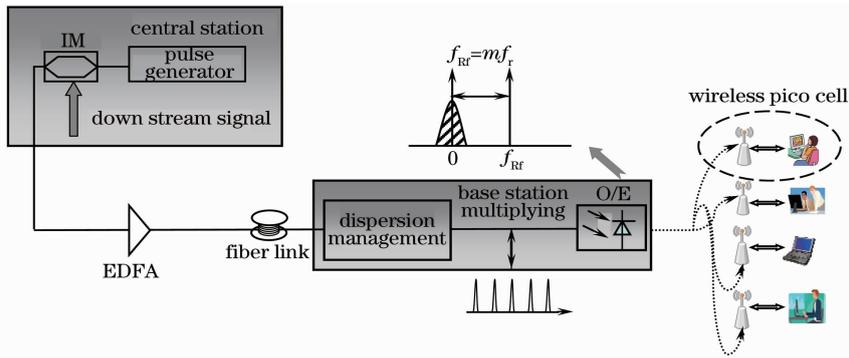


图 1 应用分数 Talbot 脉冲倍频实现微波上变频的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of microwave frequency upshifting based on fractional Talbot effect

当单色平面波照射周期性结构的物体时,在距离周期性的物体后面的平面上呈现周期性的图案,这种现象最早由 Talbot 于 1836 年发现,称为 Talbot 效应^[7]。瑞利于 1881 年解释了在平面上成的像是物体的自成像,而成像距离表示为: $L = na^2/\lambda$, 其中 a 是物体周期(如光栅的间隔), λ 为照射光波的波长, n 是正整数。当距离 L 发生变化的时候,若 $L_0 = a^2/m\lambda$, m 是正整数时,在平面上会看到物体的像变密 m 倍,这种现象叫做分数 Talbot 效应。这种周期性结构的自成像现象在光纤中传输光

脉冲时同样也能观测到,只不过原来的空间周期变成了光脉冲在时间上的重复周期。

光纤锁模激光器产生的光脉冲序列是由光载频、调制后的一次谐波以及高次谐波叠加而成,这些频率分量有固定的相位关系,脉冲光场可表示为^[8]

$$E(t) = \exp(j2\pi f_0 t) \sum |A_n| \exp(j2\pi n f_r t + \phi_n), \quad (1)$$

式中 f_0 是光载频, $|A_n|$ 是调制脉冲序列复振幅的 n 次谐波分量的幅度, f_r 是脉冲序列的重复频率, ϕ_n 是调制脉冲序列复振幅的 n 次谐波的初相。图 2 给出了脉冲光源谱图和时域波形的示意图^[5~8]。

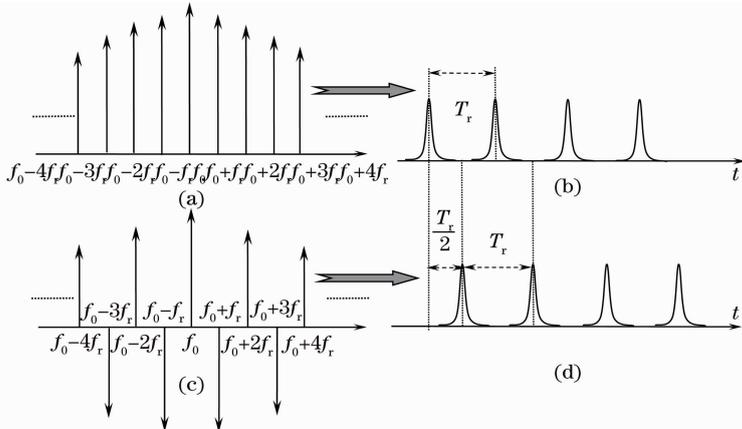


图 2 光脉冲的频谱,时域波形示意图。(a)奇偶谐波同相谱;(b)奇偶谐波同相时的波形;(c)奇偶谐波反相谱;(d)奇偶谐波反相时的波形

Fig. 2 Diagram of pulses' spectrum and waveform. (a) spectrum, (b) waveform when even and odd harmonic are in phase; (c) spectrum, (d) waveform when even and odd harmonic are out of phase

在光纤中,由于纵向的光传输常数 β 是光频率 ω 的函数,将其在脉冲中心载频点 ω_0 展开成泰勒级数得到^[9]

$$\beta(\omega) = \beta_0 + \beta_1(\omega - \omega_0) + \beta_2(\omega - \omega_0)^2/2 + \Lambda(\omega), \quad (2)$$

式中线性相移 $\beta_1(\omega - \omega_0)$ 是保证脉冲无失真传输所

要求的,今后不再考虑;二阶项 $\beta_2(\omega - \omega_0)^2/2$ 表示频率差为 $(\omega - \omega_0)$ 的群速度色散, β_2 称为群速度色散参量,它将导致波形失真, $\Lambda(\omega)$ 为高阶无穷小量可以忽略。考虑相邻的两个频率分量在单位距离上的附加相差

$$\Delta\phi = \beta_2(\omega_2 - \omega_1)^2 L/2 = 2\beta_2\pi^2 f_r^2 L. \quad (3)$$

对于所考虑的波长范围内传输损耗的差异可忽略, 因此, 如果相邻边带相差 $\Delta\phi = 2p\pi$, p 是正整数, 则脉冲在传输 L 距离后与传输之前完全一样, 于是得到脉冲序列无失真再现的条件为

$$\Delta\phi = 2\beta_2\pi^2 f_r^2 L = 2p\pi, \quad (4)$$

则 $L = \frac{p}{\pi\beta_2 f_r^2}$, 结合 $\beta_2 = \frac{\lambda^2}{2\pi c} D$, 得到 $L = \frac{2c}{D\lambda^2 f_r^2} p$,

所以最小的距离为 $p = 1$ 时, $L = \frac{2c}{D\lambda^2 f_r^2}$, 其中 c 为真空中光速, D 是光纤色散系数, λ 是载波波长; 而相邻两个边带的反相时, 即 $\Delta\phi = 2\beta_2\pi^2 f_r^2 L = (2p - 1)\pi$

时, 得到 $L = \frac{c}{D\lambda^2 f_r^2} (2p - 1)$, 如图 2(c) 所示, 此时

各个高次谐波分量叠加一起形成的脉冲形状保持不变, 只是叠加出现的峰值位置在时间轴上有半个周期的平移, 如图 2(d) 所示, 脉冲移位 $T_r/2$; 当 $p = 1$ 时, 得到保持脉冲形状和重复频率不变的最小距离, 称为成为 Talbot 距离, 表示为

$$L_{\text{Tal}} = c/D\lambda^2 f_r^2. \quad (5)$$

同理便可以比较容易地理解分数 Talbot 效应, 距离当 $L = L_{\text{Tal}}/m$ 时, 相邻两个边带的附加相差 $\Delta\phi = 2\beta_2\pi^2 f_r^2 L_{\text{Tal}}/m = \pi/m$, 所以只有在调制频率的 m 次谐波 $f = f_0 \pm mf_r$ 的上下边带处, 上下边带相差为

$\Delta\phi = \frac{\pi}{m} \times 2m = 2\pi$, 它们的高次谐波 $f = f_0 \pm$

$(ms)f_r$, s 为正整数, 亦能稳定存在并对脉冲序列的形成起主要作用; 而其他的谐波分量由于上下两个边带没有完全同相, 这些谐波分量对脉冲序列的形成贡献较小, 并且对于高倍频 ($m > 2$) 而言, 在光谱宽度不变的前提下, 调制频率的高次谐波分量由于叠加次数不够, 也不能形成窄脉冲, 以下会结合二倍频和四倍频实验重点分析这种现象的原因。

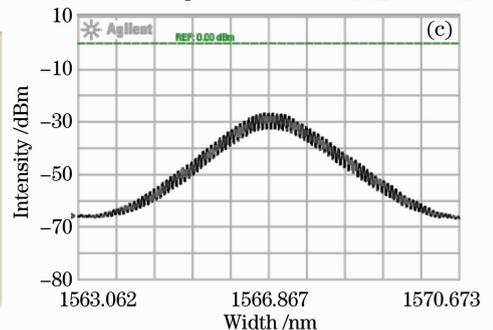
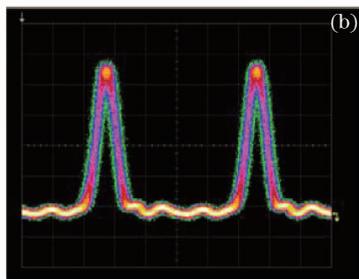
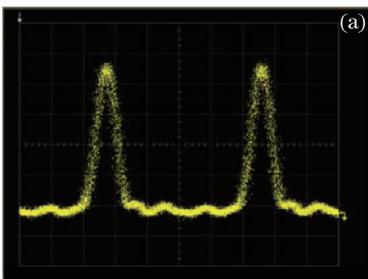


图 4 重复频率 10 GHz 的窄脉冲光源。(a) 时域波形; (b) 波形眼图; (c) 脉冲光谱图

Fig. 4 Short optical pulses at 10 GHz repetition frequency. (a) waveform of pulse; (b) eye diagram of the waveform; (c) spectrum of the pulse

3 实验结果及其实验分析

实验采用了 Agilent E8257D 信号源 (SG), CAIMAR OPTCOM 公司的高速皮秒光纤激光器 (MLFL), 自制的可调色度色散模块 (Tunable chromatic dispersion compensator) 补偿范围为 $-80 \sim 43$ ps/nm, Agilent 50 GHz 光电示波器 86100A, Agilent 光谱分析仪 86142B, 掺铒光纤放大器 (EDFA: 饱和输出功率 17 dBm)。实验结构图如图 3 所示, 图中 MLFL 为光纤锁模激光器, Signal Generator 为信号发生器, SMF 为单模光纤, OSA 为光谱分析仪, TCDC 为可调色散补偿计, OSC 为光电示波器; 窄脉冲光源产生的重复频率为 10 GHz, 脉宽约为 2.8 ps 的窄脉冲序列, 如图 4 所示, 图 4(a)、(b) 分别为脉冲的波形图, 图 4(c) 光谱的 3 dB 宽度约为 1.262 nm。

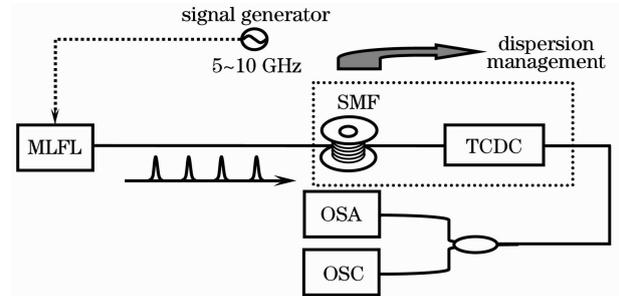


图 3 脉冲倍频实验结构图

Fig. 3 Experimental setup of multiplication of optical pulse stream

由理论分析知, 光脉冲的二倍频需要光纤的长度为 $L = L_{\text{Tal}}/2 = c/2D\lambda^2 f_r^2$, 实验采用的主要是单模光纤, 色散系数为 17 ps/(nm·km), 采用光纤激光器的波长为 1566.78 nm, 脉冲源初始重复频率为 10 GHz, 则算出单模光纤长度为 35.9 km, 实验采用 34.194 km 的单模光纤, 可调色度色散补偿模块 (TCDC) 的取值为 +30 ps/nm, 与理论色散值基本

吻合,得到重复频率为 20 GHz 的脉冲序列,如图 5(a)、(b)所示;同理,光脉冲四倍频所需的单模光纤长度为 18 km,实验采用了单模光纤 20 km, TCDC 取值 -56 ps/nm,重复频率 40 GHz 的波形如图 5(c)、(d)所示;实验还采用单模 20 km 加色散补偿光纤(DCF: 1.5 km,色散系数: -87 ps/nm),

TCDC 取值 -40 ps/nm 得到了 5 倍频 50 GHz 的光信号,如图 6(a)所示;另外,通过调整脉冲源得到重复频率为 5 GHz 的窄脉冲,采用单模光纤长度 34.194 km, TCDC 取值 $+43$ ps/nm,得到八倍频 40 GHz 的脉冲,如图 6(b)、(c)所示。

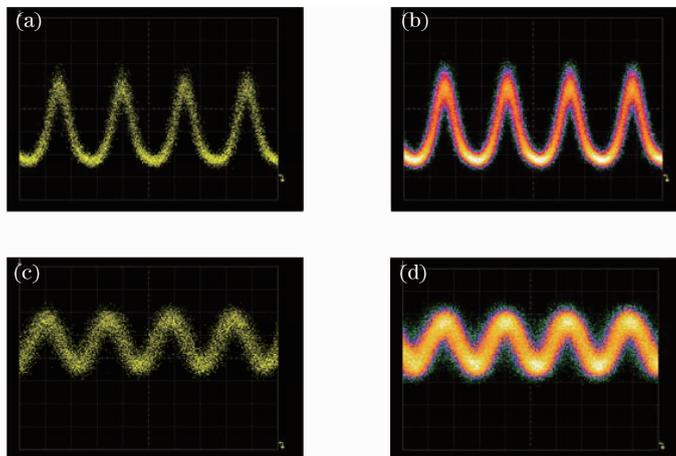


图 5 二倍频和四倍频光脉冲波形图。(a)20 GHz 光脉冲;(b)20 GHz 光脉冲眼图模式;
(c)40 GHz 光脉冲;(d)40 GHz 光脉冲眼图模式

Fig. 5 Waveform of repetition-frequency doubled and quadrupled pulse. (a) 20 GHz pulse;
(b) eye diagram of 20 GHz pulse; (c) 40 GHz pulse; (d) eye diagram of 40 GHz pulse

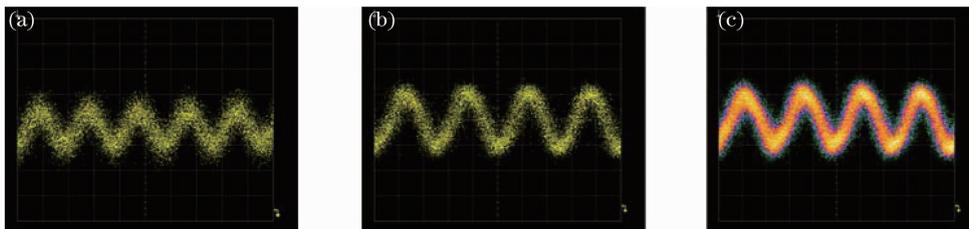


图 6 五倍频和八倍频脉冲。(a) 50 GHz 脉冲;(b)8 倍频 40 GHz 脉冲;(c)8 倍频 40 GHz 脉冲眼图模式

Fig. 6 Optical pulses at quintupled and octupled repetition frequency. (a) 50 GHz pulse;
(b) 40 GHz pulse by octupling 5 GHz; (c) eye diagram of 40 GHz pulse by octupling 5 GHz

将二倍频过程和四倍频过程作为比较来进一步说明倍频原理和分析实验结果。对于脉冲的二倍频而言,由上面分析可知,调制频率奇数次谐波的上下边带相位相差 π ,如图 7(a)所示;这些奇数次谐波不满足谐振条件,不参与脉冲序列的构成,所以 20 GHz 重复频率的脉冲完全由 20 GHz 及其更高次的谐波叠加产生,在示波器上看到的脉冲的直流分量(底座)非常弱,如图 7(b)所示。在考虑实验中的光纤长度没有提供精确色散值以及光纤色散斜率存在的情况下,可以认为这种底座可以通过进一步优化而被完全抑制。在脉冲 4 倍频的过程中,由于只有 40 GHz 和调制频率更高次的谐波分量处 ($4n$ 阶谐波)的上下边带同相,而 10 GHz 和 30 GHz 谐波的上下边带有一定的相差,分别记为 2θ 和 2α , 如

图 7(c)所示,所以只有重复频率 40 GHz 的脉冲能够稳定存在,但是可以看到 40 GHz 的脉冲质量不如二倍频时 20 GHz 的脉冲,有比较大的脉冲底座,如图 7(d)所示,原因有两个:首先,要形成 40 GHz 的窄脉冲需要更多的高次谐波分量进行叠加,由于光谱宽度的限制,频带内 40 GHz 的分量相对于原来 10 GHz 脉冲要少,所以高次分量叠加的次数少,不能形成理想的脉冲;其次,所有频率为 $(2n-1)\times 10$ GHz 的高次谐波处上下两个边带没有完全反相,会叠加在时域上,但是由于幅度很小,所以只是参与构成脉冲底座。为了进一步改善脉冲质量必须采用增大光谱宽度的办法,使得信号的叠加更加充分以形成高质量的窄脉冲。另外,对长距离光纤传输导致的啁啾需要作进一步的补偿措施。

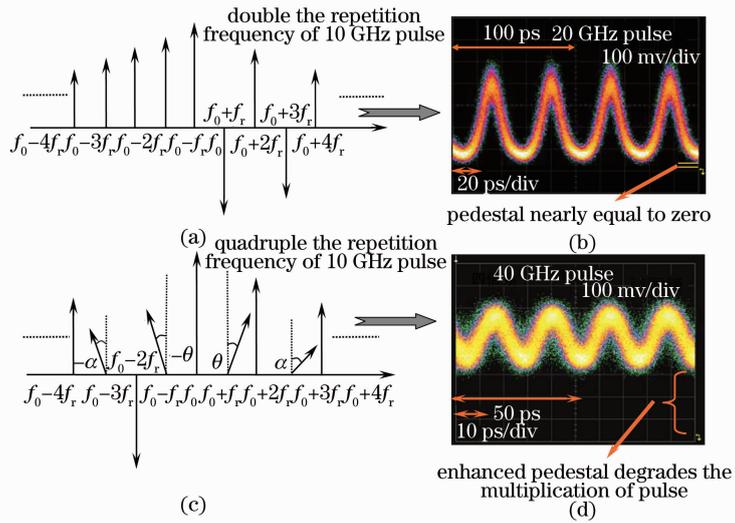


图 7 脉冲二倍频和四倍频的原理和实验结果分析。(a)脉冲二倍频谱图；(b)二倍频波形图；
(c)脉冲四倍频谱图；(d)四倍频波形图

Fig. 7 Principle and experimental result analysis on frequency doubling and octupling the original pulse. (a) spectrum of doubling the pulse repetition frequency; (b) waveform of 20 GHz pulse; (c) spectrum of quadrupling the pulse repetition frequency; (d) waveform of 40 GHz pulse

4 结 论

提出了一种基于光纤中分数 Talbot 效应的对光脉冲序列的重复频率的倍频技术,可以在光域中直接对微波信号进行上变频,通过对脉冲序列所对应的频谱边带的相差与群速度色散值的关系的理论分析,得出对光纤长度的要求,并结合系统实验把初始锁模激光器脉宽 2.8 ps,重复频率 10 GHz 的脉冲序列倍频到重复频率 20,40 和 50 GHz 的光脉冲序列(或者正弦信号),总结实验结果,分析了光谱宽度等参数对倍频脉冲质量的影响,并提出了系统优化的措施。

参 考 文 献

- 1 Cabon Beatrice, Le Guennec Yannis, Lourdiane Mounia. Photonic mixing in RF modulated optical links[C]. *Lasers and Electro-Optics Society, 19th Annual Meeting of the IEEE*, 2006, 408~409
- 2 Jiang Yang, Yu Jinlong, Wang Yaotian. A novel scheme dual-loop optoelectronic oscillator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 919~922
江 阳,于晋龙,王耀天.一种新型的双环路光电振荡器[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 919~922
- 3 Li Zhengyong, Wu Chongqing. All-optical differentiator and high-speed pulse generation based on cross-polarization

- modulation in a semiconductor optical amplifier[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(6): 830~832
- 4 Li Zhengyong, Wu Chongqing, Dong Hui *et al.*. Matrix analysis for polarization rotation of semiconductor optical amplifiers with related application [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 842~845
李政勇,吴重庆,董 辉等.半导体光放大器偏振旋转效应的矩阵分析及应用[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 842~845
- 5 J. Caraquitena. Repetition-rate multiplication of an electrooptic pulse source using the temporal talbot effect; a theoretical analysis[J]. *IEEE. Photonic. Technol. Lett.*, 2008, **20**(8): 647~649
- 6 Zhengqing Pan , Qing Ye, Haiwen Cai. Millimeter-wave modulated optical pulse generated by pulse repetition rate multiplication and temporal Talbot effect[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(9): 634~637
- 7 Chen Ran, Guo Yongkang. New development of Talbot effect research[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 1996, **33**(8): 8~13
陈 然,郭永康. Talbot 效应研究新进展[J]. *激光与光电子学进展*, 1996, **33**(8): 8~13
- 8 Shin Arahira, Satoko Kutsuzawa, Yasuhiro Matsui. Repetition-frequency multiplication of mode-locked pulses using fiber dispersion[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(3): 405~410
- 9 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics & Application of Nonlinear Fiber Optics*[M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong *et al.*. Transl • Third edition, Beijing: House of Electronics Industry, 2002, **29**
G. P. Agrawal. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 贾东方 余震虹等译. 第三版,北京:电子工业出版社, 2002, **29**