

基于啾啾 FBG 的三角形光脉冲发生器的优化设计

张岩,裴丽,王一群,黄琳,刘超

(北京交通大学 光波技术研究所,北京 100044)

摘要: 提出了利用啾啾光纤布拉格光栅(FBG)和马赫增德尔调制器产生三角形光脉冲的优化方案。方案采用 FBG 模拟单模光纤的色散特性,结合光载波抑制调制产生了三角形光脉冲,并通过仿真分析,选择 FBG 的长度、调制深度、适当的折射率切趾函数对三角形光脉冲的线性特征进行了优化。仿真结果表明,在同一啾啾系数下,产生的三角形光脉冲的失真程度随啾啾光纤光栅的调制深度增大而增大,光栅长度、折射率切趾函数对三角形光脉冲的影响也比较明显。与现有系统相比,由于将 FBG 引入系统,省去长距离的光纤,优化方案系统结构更为简单,三角形光脉冲线性特征更好。

关键词: 三角形光脉冲; 啾啾光纤光栅; 色散; 光载波抑制调制

中图分类号: TN929.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)04-1306-05

Optimization of optical triangular pulses generator based on chirped fiber Bragg grating

Zhang Yan, Pei Li, Wang Yiqun, Huang Lin, Liu Chao

(Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: An optimized scheme was proposed to generate optical triangular pulses by using chirped fiber Bragg grating (FBG) and Mach-Zehnder modulator. Optical triangular pulses were obtained based on dispersion character of standard single-mode fiber substituted for a chirped FBG combined with optical carrier suppression modulation. The obtained triangular pulses' linear feature was optimized by simulation analysis of length, modulation index, and appropriate apodization of FBG. The simulation results indicate that the distortion of finally generated triangular pulses increase with the modulation index's raising under the same chirp coefficient. The length of fiber grating and the apodization also have an obvious impact on the triangular pulses. Compared with the present generator, the proposed system has distinct advantages of simple configuration and the triangular pulses have better linear characteristic own to the small size chirped fiber grating replacing the long distance optical fiber.

Key words: optical triangular pulses; chirped fiber grating; dispersion; optical carrier suppression modulation

收稿日期:2014-08-22; 修订日期:2014-09-19

基金项目:国家自然科学基金(61275076)

作者简介:张岩(1990-),男,硕士生,主要从事微波光子学方面的研究。Email:l2120190@bjtu.edu.cn

导师简介:裴丽(1970-),女,教授,博士生导师,主要从事光纤通信、ROF、光纤传感等方面的研究。Email:lipei@bjtu.edu.cn

0 引 言

周期性三角形光脉冲,是一种周期性且在时域范围内具有线性强度上升沿与下降沿的特殊光脉冲。光脉冲的光强度上升沿与下降沿分别对应两个相反的频率啁啾,且它们的绝对值相等。利用这种时域特性,结合光学非线性效应,三角形光脉冲可实现高效全光波长转换^[1]、光时分复用到波分复用的全光转换^[2]、光信号时域和频域拷贝和脉冲压缩^[3]等功能。

近年来,国际上相继报道了一系列三角形光脉冲光子发生器的研究成果。利用保偏光纤、偏振控制器和起偏器作为频谱整形单元,结合 FTTM,可以获得三角形光脉冲^[4]。利用射频调制产生类似锁模激光器(MLL)的梳状谱,通过调节射频调制深度、电相位差及调制器偏置点,进而改变梳状谱各曲线的幅度和相位,最终可以产生包括三角形、锯齿形、平顶形和正弦形等多种时域形状的脉冲^[5]。基于光载波抑制调制,利用光纤色散所致的射频功率衰落效应^[6]以及偏振复用的特性^[7],可以实现光强度表达式向三角形傅里叶级数的有效逼近,最终可以获得形态稳定的周期性三角形光脉冲。

文中基于光载波抑制调制,利用光纤光栅代替单模光纤引入色散,对三角形光脉冲发生器进行优化,通过选择啁啾光纤布拉格光栅(Chirped FBG)的调制深度 δn ,光栅长度 L ,啁啾系数 C ,适当的折射率切趾函数,得到时域波形较好的周期性三角形光脉冲。这样,啁啾光纤光栅替代光纤引入系统,省去了长距离的光纤,使得三角形光脉冲发生器结构更为简单,进一步提升了实用价值。

1 啁啾光纤光栅应用于三角形光脉冲发生器的理论分析

通常的单模光纤约在 $\lambda_D=1\ 310\ \text{nm}$ 处色散为零,常用的光通信波长 $1\ 550\ \text{nm}$ 处于反常色散区。根据公式(1)可以看出,光栅的周期较大时,对应的谐振波长较大。

$$\lambda=2n_{\text{eff}}\Lambda_0(1+cz) \quad (1)$$

因此,若使信号光从啁啾光纤光栅周期大的一

端入射,利用光栅的反射特性,使得红移分量经过较短的距离就能被反射,而蓝移分量要经历较远的距离才能被反射,即不同频率的入射光在不同光栅处反射,具有不同的时延^[8]。这是啁啾光纤光栅补偿光纤色散的基本原理。显然,当使用啁啾光纤光栅来模拟光纤的正色散时,光信号应该从光纤光栅周期小的一端入射。这样红移分量比蓝移分量经历的时间长,起到引入正色散的效果。

当 $\beta_2 z + \varphi_2 = 0$ 时,脉冲在光纤中产生的色散可以通过啁啾光纤光栅得到完全补偿,脉冲恢复原状^[9-10]。若光从光栅周期小的一端入射,模拟光纤的正色散,此时应有 $\varphi_2 = \beta_2 z$,式中 φ_2 是啁啾光纤光栅的总色散, β_2 是光纤的二阶色散系数, z 是光纤的长度。

参考文献[6]巧妙地选择射频调制系数 m ,单模光纤的二阶色散系数 β_2 以及长度 L_f ,对光强度表达式向典型三角形脉冲串函数的傅里叶级数展开进行有效逼近,最终获得了形态稳定的周期性三角形光脉冲串。如图 1 所示,将单模光纤换成啁啾光纤光栅实现色散的引入,这里有 $D_g L_g = D_f L_f$,其中 $D_f = -(2\pi c/\lambda^2)\beta_2$,可以得到光栅色散的传递函数^[11-12]:

$$H(\omega) = \exp\left[-j \frac{\lambda_0^2 D_g L_g}{4\pi c} (\omega - \omega_0)^2\right] \quad (2)$$

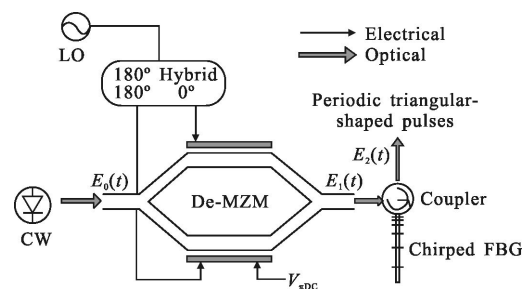


图 1 三角形光脉冲发生器原理图

Fig.1 Schematic of triangular-shaped pulses generator

用 Optisystem^[13]对参考文献[6]和图 1 的系统分别进行仿真,设置参数 $\Omega=10\ \text{GHz}$, $\varepsilon_r=25\ \text{dB}$, $V_{\text{mRF}} = V_{\text{mDC}} = 4\ \text{V}$, $V_{\text{bias}} = 4\ \text{V}$, $D_f = 16.75\ \text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$, $L_f = 23.28\ \text{km}$,啁啾光纤光栅正色散系数 $D_g L_g = 390\ \text{ps}/\text{nm}$ 。得到时域三角形脉冲串如图 2(a)、(b)所示,可以发现,用啁啾光纤光栅替换单模光纤后,与用光纤引入色散得到的三角形脉冲波形一致。

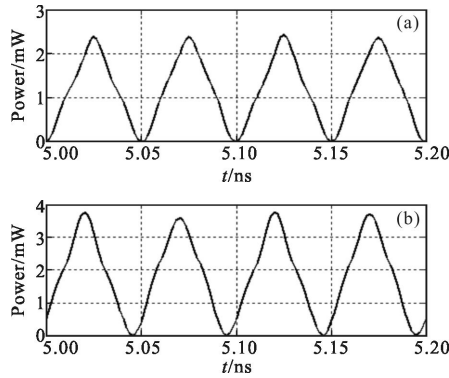


图 2 光纤引入色散后产生三角形脉冲序列(a)和啁啾光纤光栅引入色散后产生三角形脉冲序列(b)

Fig.2 Triangular pulses generated by introduced dispersion of fiber (a), chirped fiber grating (b)

2 啁啾光纤光栅性能参数的选择

光纤光栅的色散系数定义为 $D_g = \Delta T / (L_g \Delta \lambda)$, 光在光栅中传输一个来回的时间 $\Delta T = 2L_g n_{eff} / c$, $\Delta \lambda$ 为光栅波长带宽, 则色散系数为:

$$D_g = 2n_{eff} / c \Delta \lambda \quad (3)$$

啁啾光纤光栅的折射率调制周期沿光纤轴向(z 向)为非均匀分布, 一般可以表示为:

$$\Lambda(z) = \Lambda_0 + f(z) \quad (4)$$

式中: $f(z)$ 表示光纤光栅的 Chirp 函数。文中取 $f(z)$ 为线性函数, 光栅色散系数 $D_g L_g = 390 \text{ ps/nm}$, $n_{eff} \approx n_{co} = 1.46$, $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。因此, $\Delta \lambda$ 和 L_g 的比值固定, 即 Chirp 系数 $C = 0.25 \text{ nm/cm}$ 。

如图 3 所示为长度 L 取 4 cm, 8 cm, 12 cm 时啁啾光纤光栅的反射谱和时延曲线。图中曲线计算时所采用光栅的调制深度 $\delta n = 0.0002$ 。由图 3(a)、(b) 可以看出, 对于调制深度和周期相同的啁啾光纤光栅, L 越大, 光栅反射谱的带宽越大, 反射带宽内时延曲线的斜率不变, 时延抖动基本不变。如图 3(c) 所示, 当啁啾光纤光栅的反射谱宽度大于要滤出的正负 7 阶频谱范围时, 产生的三角波波形基本不受影响。但是, 当长度 $L(4 \text{ cm})$ 较短时, 三角波波形较窄, 在 3 dB 带宽处向内“凹”, 两条边的切线斜率波动较大。当长度 $L(12 \text{ cm})$ 较长时, 三角形脉冲波形由窄变宽, 两条边的切线斜率在 3 dB 带宽附近波动较小。因此, 随着长度 L 的增大, 三角形脉冲波形逐渐变宽, 具有越来越好的线性特征。在制备三角形光脉冲发生器时应尽量选择长度较大的啁啾光纤光栅。

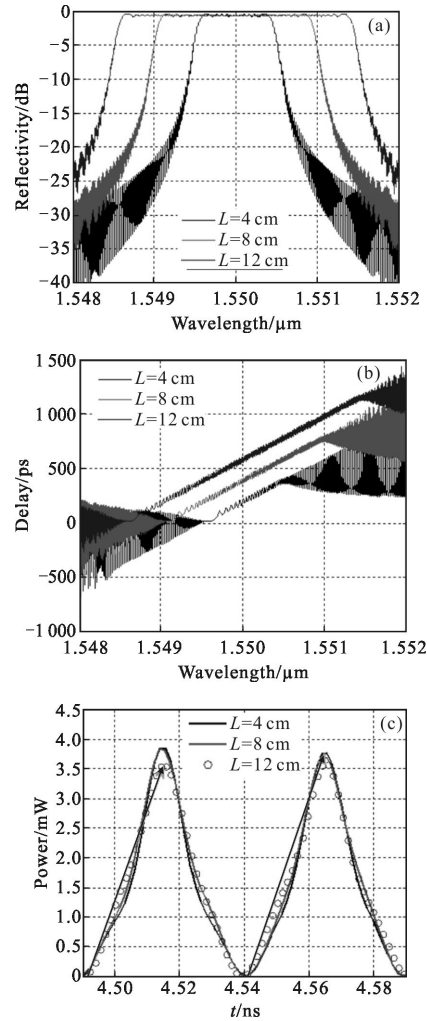


图 3 不同啁啾光纤光栅长度的反射谱(a), 时延曲线(b), 生成三角形脉冲序列(c)

Fig.3 Reflectivity(a), delay (b) and triangular-shaped pulses generated (c) with different chirped FBG length

如图 4 所示, 4(a) 为当光栅的调制深度 δn 取不同值时, 对应的啁啾光纤光栅反射谱。可以看出随着调制深度 δn 的增大, 光栅的反射率及反射带宽均增大。图 4(b)、(c) 表明随着调制深度 δn 的增大, 光栅的时延曲线振荡增大, 虽然时延曲线的整体斜率并不发生变化, 但光栅的时延振荡越大, 最终产生的三角波失真越为严重, 表现为图 4(c) 中三角形脉冲波形随调制深度的增大, 左侧向外“凸”, 右侧向里“凹”。由此可见, 调制深度 δn 的变化对啁啾光纤光栅色散波动的影响比较大, 由于系统要通过获取准确的色散值来产生波形较好的三角形光脉冲, 因此, 稳定的色散值是保持系统性能的关键, 在制备三角形光脉冲发生器时, 在啁啾光纤光栅弱调制范围内, 应尽量选择

较小的调制深度 δn 。图 4 中所采用的参数为: I $\delta n=0.0001$, II $\delta n=0.0002$, III $\delta n=0.0003$, IV $\delta n=0.0005$ 。光栅长度 $L=8\text{ cm}$ 。

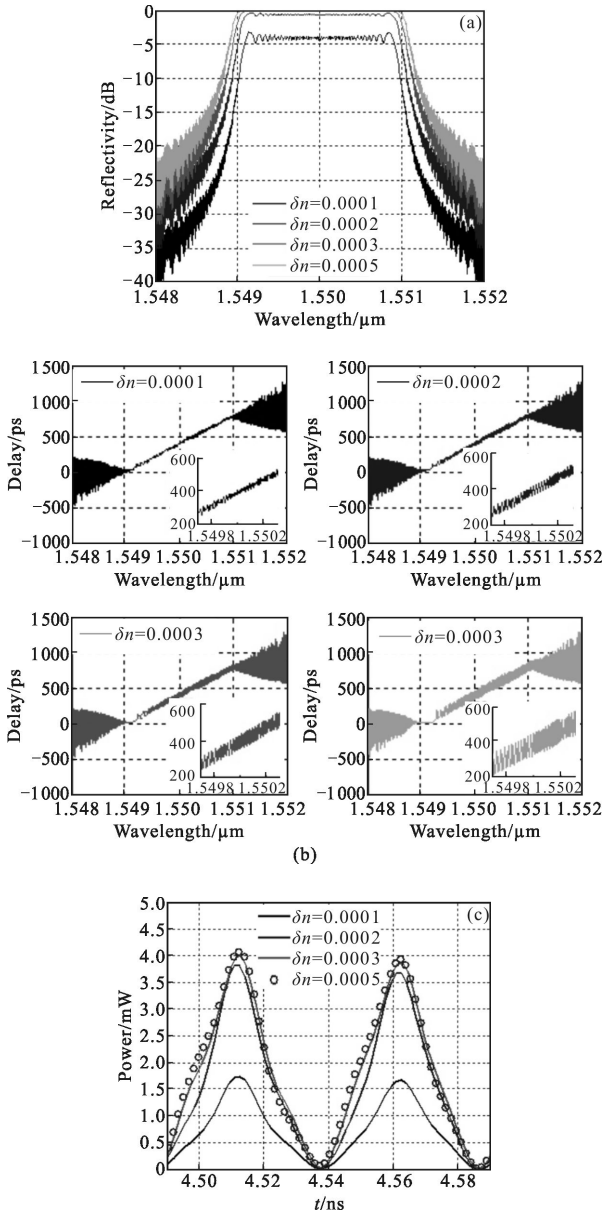


图 4 不同调制深度 δn 的啁啾光纤光栅反射谱(a),时延曲线(b),生成三角形脉冲序列(c)

Fig.4 Chirped fiber grating reflectivity(a), delay(b), triangular pulses generated(c) with different modulation index δn

所谓切趾是指使光栅的折射率调制深度 δn 沿光栅轴向按一定切趾函数由两端到中间逐渐变大。汉明函数和高斯函数是常用的两种切趾函数,其表达式分别为:

$$\text{汉明} \quad f_H(z) = \frac{1 + H \cos(2\pi z/L)}{1 + H} \quad (5)$$

$$\text{高斯} \quad f_G(z) = \exp[-G(z/L)^{2m}] \quad (6)$$

式中: L 为光栅长度; H 和 G 为常量,可根据需要进行改变。在数学上,若切趾函数为 $f(z)$,则切趾后, $\delta n_1 = \delta n_0 f(z)$ 。

折射率切趾函数不但可以有效的降低光纤光栅反射谱的边峰值,而且可以有效的减小时延曲线的振荡。与对称切趾相比,利用左移非对称切趾可同时获得较宽的反射谱带宽和较小的时延纹波。此外,与仅用汉明函数的非对称切趾相比,左端超高斯函数、右端汉明函数的非对称切趾可获得更好的优化效果^[14]。采用如图 5 的切趾函数(切趾比例 60%)对啁啾光纤光栅进行切趾,可以得到图 6 中光栅的反射谱和时延曲线。

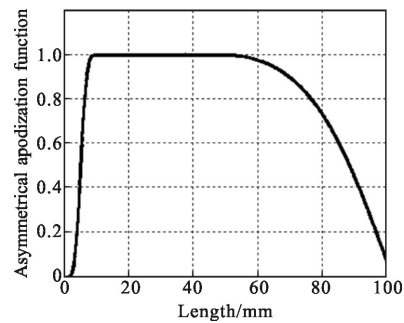


图 5 切趾比例 60% 的左移切趾函数(左高斯函数,右汉明函数)
Fig.5 Left-shifted apodization function with ratio of 60% (left-Gaussian, right-Hamming)

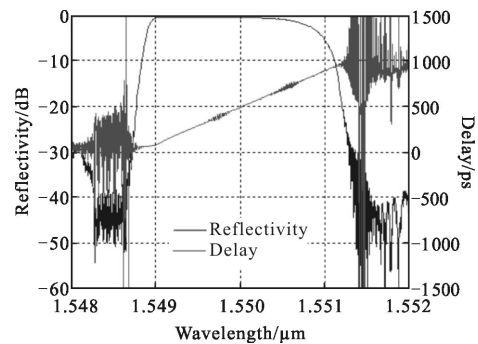


图 6 采用左移切趾函数之后啁啾光纤光栅的反射谱和时延曲线
Fig.6 Reflectivity and delay of chirped FBG with left-shifted apodization function

最终啁啾光纤光栅选择 $C=0.25\text{ nm/cm}$, $L=10\text{ cm}$, $\delta n=0.0002$, 60%切趾比例的左移切趾函数,得到性能较好的三角形光脉冲,如图 7(a)所示,波形周期 $T=0.05\text{ ns}$,对应频率 $\Omega=2f_{\text{Rf}}=20\text{ GHz}$ 。如图 7(b)所示,把一个周期的三角形光脉冲波形放大后与理想三角形

波进行比较发现,虽然波形在上升沿和下降沿的始端和末端线性较差,但是在中心带宽的 90%以内均有较好的线性特征。

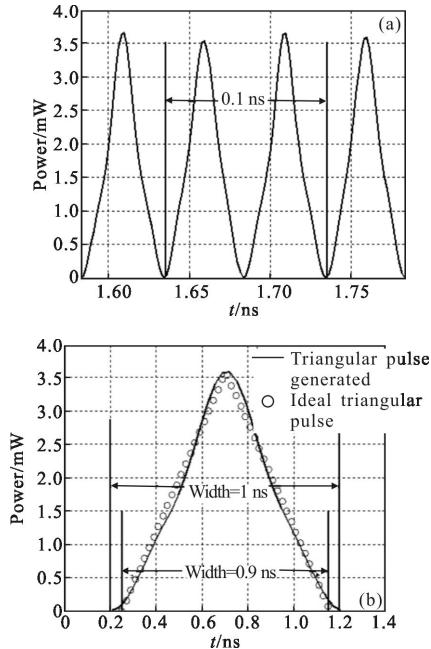


图 7 参数优化后产生的三角光脉冲序列(a)和产生的三角形光脉冲与理想三角形波形的对比图(b)

Fig.7 Triangular pulses train with optimized parameter (a) and comparison diagram between generated and ideal triangular wave (b)

3 结论

综上所述,利用啁啾光纤光栅模拟长距离光纤的色散引入三角形光脉冲发生器为三角形光脉冲的产生提供了一种更为实用的优化方案。啁啾光纤光栅入射光所对应要求的色散值是生成较好波形的关键。通过仿真,讨论了在 Chirp 系数一定的情况下,啁啾光纤光栅长度 L 、调制深度 δn 、折射率切趾函数对啁啾光纤光栅色散值稳定的影响,发现要兼顾光栅反射谱带宽、平顶震荡和时延曲线震荡,应选择较大的长度 L 、较合适的切趾函数。光栅色散随调制深度 δn 的增大扰动较大,应在弱调制范围内尽量选择较小的调制深度 δn 。另外,通过使用色散可调谐光纤光栅可以得到频率可调谐的三角形光脉冲,但还有待于进一步研究。

参考文献:

[1] Parmigiani F, Ibsen M, Ng T T, et al. Efficient optical

wavelength conversion using triangular pulses generated using a superstructured fiber Bragg grating [C]//Optical Fiber Communication Conference, 2008: OMP3.

- [2] Bhamber R S, Latkin A I, Boscolo S, et al. All-optical TDM to WDM signal conversion and partial regeneration using XPM with triangular pulses [C]//the 34th European Conference on Optical Communication (ECOC 2008), 2008, p.Th.1.B.2.
- [3] Latkin A I, Boscolo S, Bhamber R S, et al. Optical frequency conversion, pulse compression and signal copying using triangular pulses [C]//the 34th European Conference on Optical Communication (ECOC 2008), 2008, p.Mo.3.F.4.
- [4] Ye J, Yan L, Pan W, et al. Photonic generation of triangular-shaped pulses based on frequency-to-time conversion[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(8): 1458-1460.
- [5] Dai B, Gao Z, Wang X, et al. Versatile waveform generation using single-stage dual-drive Mach-Zehnder modulator [J]. *Electronics Letters*, 2011, 47(5): 336-338.
- [6] Li J, Zhang X, Hraimel B, et al. Performance analysis of a photonic-assisted periodic triangular-shaped pulses generator[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(11): 1617-1624.
- [7] Li J, Ning T, Pei L, et al. Photonic-assisted periodic triangular-shaped pulses generation with tunable repetition rate[J]. *Photonics Technology Letters*, 2013, 25(10): 952-954.
- [8] Shu Xuewen, Fan Yongchang, Huang Dexiu, et al. Study on dispersion compensation with chirped fiber gratings[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1999, 28(1): 50-53. (in Chinese)
- [9] Agrawal Govind P. Nonlinear Fiber Optics, Fourth Edition & Application of Nonlinear Fiber Optics, Second Edition [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. (in Chinese)
- [10] Erdogan T. Fiber grating spectra [J]. *Lightwave Technology*, 1997, 15(8): 1277-1294.
- [11] Meslener G. Chromatic dispersion induced distortion of modulated monochromatic light employing direct detection [J]. *Quantum Electronics*, 1984, 20(10): 1208-1216.
- [12] Gliese U, Norskov S, Nielsen T N. Chromatic dispersion in fiber-optic microwave and millimeter-wave links [J]. *Microwave Theory and Techniques*, 1996, 44(10): 1716-1724.
- [13] Tao L, Jian R, Xiaochun Z. OFDM-ROF system simulation based on OptiSystem [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(6): 032. (in Chinese)
- [14] Lin W, Fengping Y, Yifan L. Optimization of chirped fiber Bragg gratings by asymmetrically apodization method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(4): 587. (in Chinese)