

基于啾啾光纤布拉格光栅的可调谐双通带微波光子滤波器

赵彪, 杜鹏飞, 沃江海*, 丛雯珊, 张钧凯, 余岚

空军预警学院一系, 湖北 武汉 430019

摘要 提出了一种基于啾啾光纤布拉格光栅(CFBG)的可调谐双通带微波光子滤波器(MPF)结构,并对该结构进行了实验验证。利用两个级联的拥有不同中心反射波长、带宽及啾啾率的 CFBGs,对已调制的光信号产生不同延时,获得了两个不同的频率通带。基于此,通过调整马赫-曾德尔干涉仪(MZI)中的可调谐光延迟线,改变 MPF 的自由频谱范围,可实现两个通带中心频率的调谐。实验中获得中心频率分别为 6.75 GHz 和 16.07 GHz 的频率通带。通过调节 MZI 两臂的臂长差,实现了 MPF 中心频率的调谐。所提出的双通带 MPF 结构简单,具有很好的可调谐性和稳定性。

关键词 光纤光学;微波光子学;可调谐双通带;微波光子滤波器;啾啾光纤布拉格光栅;马赫-曾德尔干涉仪

中图分类号 TN29

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.030605

Tunable Dual-Bandpass Microwave Photonic Filter Based on Chirped Fiber Bragg Grating

Zhao Biao, Du Pengfei, Wo Jianghai*, Cong Wenshan, Zhang Junkai, Yu Lan

No. 1 Department, Air Force Early Warning Academy, Wuhan, Hubei 430019, China

Abstract A structure of tunable dual-bandpass microwave photonic filter (MPF) based on chirped fiber Bragg grating (CFBG) is proposed and experimentally demonstrated. By using two cascaded CFBGs with different central reflection wavelengths, bandwidths and chirp parameters, and the different delays of the modulated light signal in this structure are introduced. Consequently, two different frequency passbands are realized. On this basis, by adjusting the variable optical delay line in Mach-Zehnder interferometer (MZI) to change the free spectral range of MPF, the central frequencies of the two passbands can be tuned. Two different passbands with the central frequencies of 6.75 GHz and 16.07 GHz are obtained in the experiment. By adjusting the optical path difference between the two arms of MZI, the tuning of the central frequency of MPF is achieved. The proposed dual-bandpass MPF has a simple structure and is of good tunability and stability.

Key words fiber optics; microwave photonic; tunable dual-bandpass; microwave photonic filter; chirped fiber Bragg grating; Mach-Zehnder interferometer

OCIS codes 060.3738; 060.5625

1 引言

微波光子滤波器凭借其损耗低、带宽宽、频谱可重构、中心频率可调以及抗电磁干扰能力强等优点而被广泛应用于光电振荡器(OEO)、毫米波信号光产生以及光纤无线链路(RoF)等中^[1-5]。

近年来,随着微波光子学的迅速发展^[6-9],国内外学者针对微波光子滤波器展开了广泛研究。其中,以具有单一通带的微波光子滤波器的研究最为普遍^[10-15]。为满足实际雷达、电子战等系统中对双频段和多频段的需求,越来越多的学者开始研究基于微波光子技术的多通带滤波器。其中,文献[16-

收稿日期: 2018-07-19; 修回日期: 2018-08-19; 录用日期: 2018-08-29

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61701532)、湖北省自然科学基金(2018CFB539, 2018CFB411, 2018CFB331)

* E-mail: jianghai_wo@163.com

18]提出了基于光谱切割的可调谐双通带微波光子滤波器的产生方法。Xu等^[16]利用两段不同长度的单模光纤作为延时介质,形成两个通带;Wu等^[17]利用反射型马赫-曾德尔干涉仪(MZI),形成两个不同自由频谱范围的干涉谱,经过一定长度单模光纤延时后,实现了两个通带;Xu等^[18]利用双平行MZI,同样可以带来两个不同的干涉谱以形成两个通带。尽管上述方法均能实现具有两个通带的微波光子滤波器,但由于调谐范围小导致使用受限。文献[19]利用偏振调制器对光信号进行调制,利用相移光纤光栅完成了相位调制到强度调制转化,提升了系统的稳定性并且获得了较大的调谐范围。在此基础上,文献[20-22]基于受激布里渊散射效应,有效地增大了滤波器的调谐范围。但上述几个方案利用多个激光器或光电调制器,使系统变得过于复杂,不利于实现。

本文提出了一种基于啁啾光纤布拉格光栅的可调谐双通带微波光子滤波器,该系统主要由宽带光源、MZI和两个具有不同啁啾率的啁啾光纤布拉格光栅组成。该方案仅需单个光源和调制器,因此结构简单、紧凑。由于滤波器的中心频率由调制光信号在系统中的延时以及干涉频谱的自由频谱范围所决定,因此通过调节可调光延时线改变干涉频谱的自由光谱范围,可实现双通带的频率调谐。实验中,

首先验证了基于该系统的双通带频谱响应特性。然后,通过调节可调谐光延迟线的延时,测试了其对两个通带的调谐性能。结果表明,利用该系统,不仅能实现双通带滤波特性,同时还能对产生的频带进行连续调谐。并且,可通过级联多个啁啾光纤布拉格光栅,获得更多通带数量,本方案简单灵活、易于实现。

2 基本原理

本文提出的基于啁啾光纤布拉格光栅的可调谐双通带微波光子滤波器的系统原理框图如图1所示。宽带光源(BBS)发射的光信号进入由两个完全相同的3 dB光耦合器(OC)和可调谐光延迟器(VODL)组成的非平衡MZI。MZI中的光信号将沿着上下两路传输,并在OC的输出端进行干涉,干涉后的光载波将呈梳状谱。干涉后的光谱送入相位调制器(PM)中,PM的输入信号由矢量网络分析仪(VNA)提供,经相位调制的光信号通过一个光环形器将送入两个级联的啁啾光纤布拉格光栅(CFBG1和CFBG2)以获得不同的时间延迟。光信号在经过掺铒光纤放大器(EDFA)中放大并通过一定长度的单模光纤(SMF)进一步延时以后,在光电探测器(PD)中进行光电转换。最终,输出的电信号被反馈至VNA进行分析。

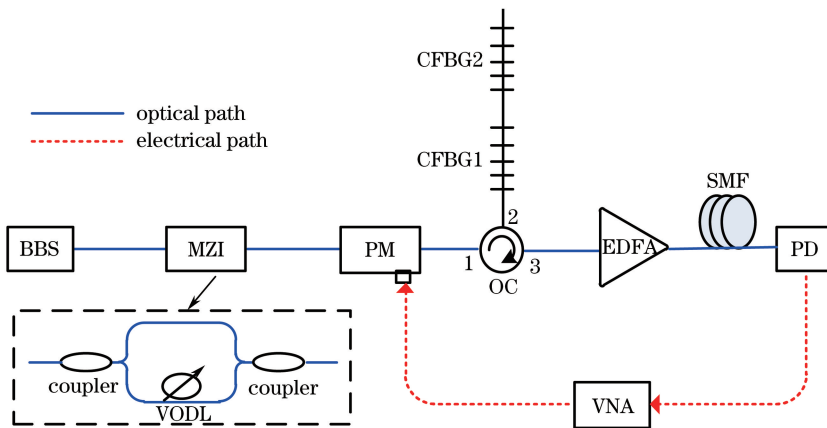


图1 基于CFBG的可调谐双通带MPF的结构

Fig. 1 Structure of tunable dual-bandpass MPF based on CFBG

根据有限冲击响应(FIR)滤波器的性质,滤波器的通带等于各抽头间延时差的倒数。而在本系统中,延时差由系统的色散和多波长光源中各光波长之间的间隔决定,具体可表示为^[23-24]

$$f = \frac{1}{D\lambda_{\text{Space}}}, \quad (1)$$

式中: D 为系统色散,包括SMF和CFBG引入的色

散,是系统总的色散值; λ_{Space} 是多波长光源的波长间隔。在本系统中, λ_{Space} 代表了干涉频谱的自由频谱范围(FSR),其可以表示为

$$\lambda_{\text{Space}} = \lambda^2 / (n_{\text{eff}} \Delta L), \quad (2)$$

式中: λ 是光源在真空中的波长; n_{eff} 和 ΔL 分别是光纤的有效折射率和MZI两个臂的长度差。由于CFBG1和CFBG2的中心反射波长和延时均不同,

据(1)式可知,当两光栅级联时,系统将产生两个通带,将(2)式代入(1)式,两个通带的中心频率可分别表示为

$$f_1 = k_1 \Delta L, \quad (3)$$

$$f_2 = k_2 \Delta L, \quad (4)$$

式中: $k_1 = n_{\text{eff}} c C_{\text{CFBG1}} / \lambda^2 (D' L_{\text{SMF}} c C_{\text{CFBG1}} + 2n_{\text{eff}})$; $k_2 = n_{\text{eff}} c C_{\text{CFBG2}} / \lambda^2 (D' L_{\text{SMF}} c C_{\text{CFBG2}} + 2n_{\text{eff}})$; D' 和 L_{SMF} 分别是 SMF 的色散系数和长度; c 为光在真空中的传播速度; C_{CFBG1} 和 C_{CFBG2} 是分别为 CFBG1 和 CFBG2 的啁啾率。对于 CFBG1 来说, C_{CFBG1} 为确定的数值,所以 k 可视为常数。因此通带的中心频率 f 与臂长差 ΔL 成正比。

由(3)和(4)式可知,不同啁啾率的 CFBG 带来的不同时间延迟,会使得系统形成两个不同的频率通带,通带的中心频率主要受 MZI 的臂长差和 CFBG 的啁啾率等参数影响。通过调节 VODL 可以改变 ΔL ,从而实现了其中心频率的同时调谐。

3 实验结果

为验证本文提出的可调谐双通带微波光子滤波器的可行性,进行实验验证,搭建的实验系统如图 1 所示,实验中,各器件的参数设置如下: BBS 由 EDFA(中心频率为 1550 nm,带宽为 40 nm)提供,所连接的 MZI,由两个 3 dB 的 OC 和 VODL 组成,初始臂长差为 0.95 cm,并可由 VODL 进行调节。MZI 作为实验中的光谱切割滤波器,将会对光信号进行滤波。PM 的半波电压为 7 V,把 VNA 的输出信号加载到 PM 的射频输入端口,通过 PM 调制光信号,已调光信号被送入级联 CFBG。CFBG1 和 CFBG2 的啁啾率分别为 0.06 GHz 和 0.2 nm/cm,反射带宽分别为 2.5 GHz 和 1.7 nm,利用两个不同的 CFBG,让已调光信号在系统中经历不同的光程,以获得两个不同的通带。延时用的 SMF 的长度为 20 km,其色散系数为 17 ps/(nm·km)。最后,光信号送入 PD 进行探测,再送入 VNA 的 2 端口测量微波光子滤波器(MPF)的频响。

图 2 为利用光谱仪测量 MZI 输出的光谱。图 2 中的插图显示了一个跨度为 2 nm 的放大光谱。如插图所示,干涉光谱的 FSR 为 0.174 nm,表明 MZI 两臂的原始长度差为 0.95 cm。

经过级联 CFBG 的反射之后,过滤出了两个独立的多波长光源,如图 3 所示。

当 MZI 两臂的长度差设置为 2.18 cm 时,利用 VNA,可以得到该 MPF 的频率响应如图 4 所示。

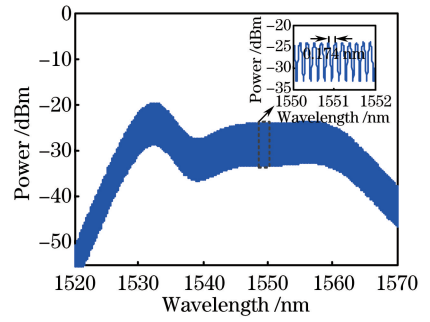


图 2 MZI 输出的光谱(内插图:放大的干涉谱的细节图)

Fig. 2 Output optical spectrum of MZI (Inset: detailed drawing of amplified interference spectrum)

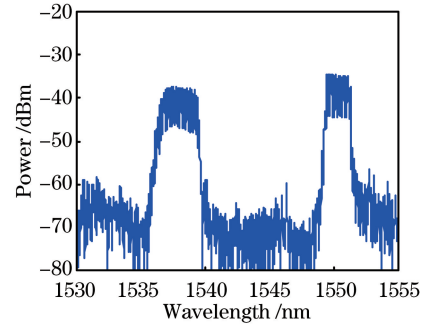


图 3 经过级联 CFBG 反射后的光谱

Fig. 3 Optical spectrum after reflection by cascaded CFBG

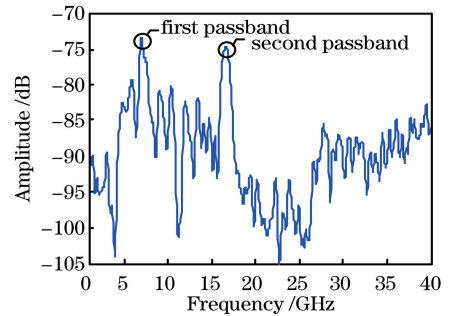


图 4 MPF 的频率响应

Fig. 4 Frequency response of MPF

由图可观察到,该 MPF 产生了两个频率通带,其中中心频率分别为 6.75 GHz 和 16.07 GHz,与(3)和(4)式的理论计算结果 6.75 GHz 和 16.03 GHz 基本相符,验证了该方法的有效性。该滤波器的通带特性主要受所用 CFBG 光谱特性的影响,为获得更优的滤波特性,可通过优化 CFBG 的反射光谱来实现。

双通带的中心频率由 MZI 的 FSR 决定,即可以通过改变 MZI 的 VODL 去调谐 MPF 的中心频率。为了研究该 MPF 的频率可调谐性,通过 VODL 将 ΔL 分别设置为 2.1、2.18、2.26 和 2.34 cm,其他参数保持不变,对应的 MPF 频率响应分别如图 5 中蓝线、红线、紫线和绿线所示。由图可

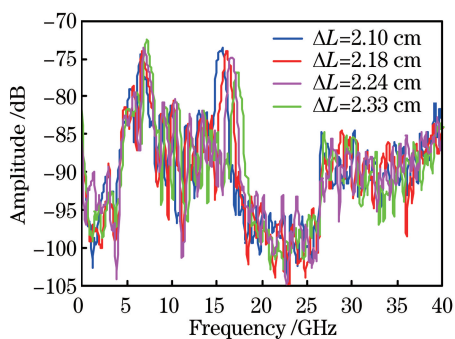


图5 不同 MZI 臂长差下的 MPF 频率响应曲线
Fig. 5 Frequency response curves of MPF with different length differences of MZI arm

观察到两个通带的中心频率分别为 6.53 GHz 和 15.49 GHz、6.75 GHz 和 16.07 GHz、6.93 GHz 和 16.56 GHz 以及 7.2 GHz 和 17.24 GHz。与 (3) 和

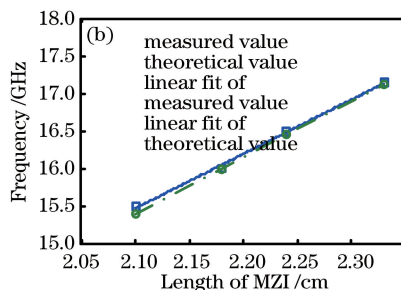
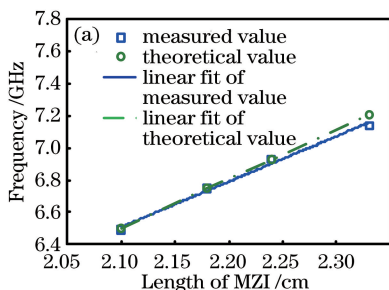


图6 双通带中心频率与 MZI 臂长差间的关系曲线。(a)通带一;(b)通带二

Fig. 6 Relationship curves between central frequency of dual-bandpass and length difference of MZI arms.

(a) First passband; (b) second passband

4 结 论

提出了一种基于级联 CFBG 的可调谐双通带微波光子滤波器。通过对干涉后的光谱进行调制,并经过两个级联的 CFBG 获得不同的时间延迟,能得到两个不同中心频率的通带,实验验证了所提方法的可行性。实验中,通过级联两个色散值不同的 CFBG,同时产生了中心频率为 6.75 GHz 和 16.07 GHz 的两个通带,其实验结果和理论值吻合;并通过 VODL,实现了对 MPF 两个通带中心频率的连续调谐。所提出的双通带微波光子滤波器容易实现,并且有很好的可调谐性和稳定性,在现代雷达、电子战和传感等领域中均显示出良好的应用潜力。

参 考 文 献

[1] Yao J P. Microwave photonics [J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(3): 314-335.
[2] Minasian R A. Photonic signal processing of microwave signals [J]. IEEE Transactions on

(4) 式的理论计算结果 6.5 GHz 和 15.44 GHz、6.75 GHz 和 16.03 GHz、7.0 GHz 和 16.61 GHz 以及 7.25 GHz 和 17.2 GHz 基本相符,验证了该 MPF 的可调谐性。可见,只需要通过 VODL 改变 ΔL ,就可以对 MPF 的两个通带的中心频率进行调谐,调谐过程灵活简单容易实现。

通带一和通带二的中心频率与 MZI 上下臂的长度差之间的关系分别如图 6(a) 和 (b) 所示,由图可观察到,中心频率的改变与臂长差之间基本呈线性关系。图 6(a) 中通带一中心频率测量值与理论值的拟合曲线的斜率分别为 2.738 GHz 和 3.125 GHz/cm,图 6(b) 中通带二中心频率测量值与理论值的拟合曲线的斜率分别为 7.167 GHz 和 7.333 GHz/cm,实验结果与理想条件下的理论计算结果基本相符。

Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(2): 832-846.

- [3] Capmany J, Mora J, Gasulla I, *et al.* Microwave photonic signal processing [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(4): 571-586.
[4] Capmany J, Ortega B, Pastor D. A tutorial on microwave photonic filters [J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(1): 201-229.
[5] Capmany J, Novak D. Microwave photonics combines two worlds [J]. Nature Photonics, 2007, 1(6): 319-330.
[6] He Y T, Jiang Y, Zi Y J, *et al.* Frequency doubled triangular waveform generation based on injection locking and time-domain synthesis [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(1): 0101005.
何禹彤, 江阳, 訾月姣, 等. 基于注入锁定和时域综合的倍频三角波产生技术 [J]. 中国激光, 2018, 45(1): 0101005.
[7] Yuan M Y, Liu B, Wang T L, *et al.* Sawtooth waveform generation based on two parallel Mach-

- Zehnder modulators [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(7): 070701.
- 袁牧野, 刘波, 王天亮, 等. 基于并联马赫-曾德尔调制器的锯齿波生成方法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(7): 070701.
- [8] Cong W S, Yu L, Wo J H, *et al.* Photonic approach of generating phase-coded signal with tunable frequency multiplication factor based on cascaded MZMs [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(4): 0432001.
- 丛雯珊, 余岚, 沃江海, 等. 基于级联 MZMs 倍频系数可调的相位编码信号光产生方法 [J]. *光学学报*, 2018, 38(4): 0432001.
- [9] Lin T, Zhao S H, Zhu Z H, *et al.* Multi-band frequency conversion scheme based on single optical frequency comb for satellite communication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(6): 0623002.
- 林涛, 赵尚弘, 朱子行, 等. 基于单光频梳的卫星通信多频段变频方法 [J]. *光学学报*, 2017, 37(6): 0623002.
- [10] Mora J, Ortega B, Diez A, *et al.* A single bandpass tunable photonic transversal filter based on a broadband optical source and a Mach-Zehnder interferometer [C] // International Topical Meeting on Microwave Photonics, 2003: 251-254.
- [11] Mora J, Ortega B, Diez A, *et al.* Photonic microwave tunable single-bandpass filter based on a Mach-Zehnder interferometer [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(7): 2500-2509.
- [12] Li W Z, Li M, Yao J P. A narrow-passband and frequency-tunable microwave photonic filter based on phase-modulation to intensity-modulation conversion using a phase-shifted fiber Bragg grating [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2012, 60(5): 1287-1296.
- [13] Wang Q, Shen Y Y, Xu E M, *et al.* A single-passband microwave photonic filter with a wide tunable range based on a chirped phase-shifted FBG [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2015, 26(7): 1248-1254.
- 王祺, 沈园园, 徐恩明, 等. 基于啁啾相移 FBG 的宽调谐单通带微波光子滤波器 [J]. *光电子·激光*, 2015, 26(7): 1248-1254.
- [14] Wang W X, Tao J, Huang L. Narrowband tunable microwave photonic filter based on Fabry-Perot laser with optical injection [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(10): 1006002.
- 王文轩, 陶继, 黄龙. 基于光注入法布里-珀罗激光器的窄带可调谐微波光子滤波器 [J]. *中国激光*, 2017, 44(10): 1006002.
- [15] Li Y D, Wang R, Pu T, *et al.* Review on high out-of-band suppression ratio of microwave photonic filter [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(2): 020005.
- 李元栋, 王荣, 蒲涛, 等. 高带外抑制比微波光子滤波器研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(2): 020005.
- [16] Xu Z W, Fu H Y, Chen H, *et al.* A tunable dual-passband microwave photonic filter based on optical slicing and dual-path fiber delay lines [J]. *Optics Communications*, 2015, 346: 10-14.
- [17] Wu R, Chen H, Zhang S W, *et al.* A switchable and tunable dual-passband microwave photonic filter [C]. *Progress in Electromagnetic Research Symposium*, 2016: 1588-1591.
- [18] Xu Z W, Fu H Y, Chen H, *et al.* Microwave photonic filter with two independently tunable passbands based on paralleled fiber Mach-Zehnder interferometers and dispersive medium [J]. *Applied Physics B*, 2015, 120(3): 557-562.
- [19] Han X Y, Xu E M, Liu W L, *et al.* Tunable dual-passband microwave photonic filter using orthogonal polarization modulation [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(20): 2209-2212.
- [20] Gao L, Zhang J J, Chen X F, *et al.* Microwave photonic filter with two independently tunable passbands using a phase modulator and an equivalent phase-shifted fiber Bragg grating [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2014, 62(2): 380-387.
- [21] Li J Q, Xiao Y C, Dong W, *et al.* Dual-band bandpass tunable microwave photonic filter based on stimulated Brillouin scattering [J]. *Optoelectronics Letters*, 2016, 12(4): 276-279.
- [22] Hu S L, Li L W, Yi X K, *et al.* Tunable dual-passband microwave photonic filter based on stimulated Brillouin scattering [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(3): 330-333.
- [23] Fu H Y, Zhu K, Ou H Y, *et al.* A tunable single-passband microwave photonic filter with positive and negative taps using a fiber Mach-Zehnder interferometer and phase modulation [J]. *Optics & Laser Technology*, 2010, 42(1): 81-84.
- [24] Lee J H, Chang Y M. Detailed theoretical and experimental study on single passband, photonic microwave FIR filter using digital micromirror device and continuous-wave supercontinuum [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(15): 2619-2628.