

新型多抽头复系数微波光子滤波器

严 艺¹, 廖同庆^{1*}, 吕晓光¹, 蒋铁珍¹, 蔡培君²

(1. 安徽大学 电子信息工程学院, 安徽 合肥 230601; 2. 安徽大学江淮学院, 安徽 合肥 230039)

摘 要: 基于受激布里渊散射(SBS)和可调谐多波长光纤激光器,设计了一款基于新型多抽头的复系数微波光子滤波器。该滤波器由 SBS 效应引入一个相移量实现复系数,通过调节 SBS 的泵浦光功率控制相移量的大小,进而实现滤波器的中心频率连续可调谐。实验研究了基于高掺杂铒纤的可调谐多波长光纤激光器,得到了波长间隔为 0.338 nm 的多达 16 个激光信号的稳定输出。以实验数据为抽头光源,仿真研究了 SBS 增益介质长度、抽头光源的数目和波长间隔对该款微波光子滤波器性能的影响。

关键词: 复系数微波光子滤波器; 多波长光纤激光器; 受激布里渊散射; 相移

中图分类号: TN24 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0120001

Novel multitap complex coefficient microwave photonic filter

Yan Yi¹, Liao Tongqing^{1*}, Lv Xiaoguang¹, Jiang Tiezhen¹, Cai Peijun²

(1. School of Electronics and Information Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China;

2. Jianghuai College of Anhui University, Hefei 230039, China)

Abstract: A kind of multitap complex coefficient microwave photonic filter was proposed based on novel tunable multi-wavelength fiber laser and stimulated Brillouin scattering (SBS). The complex coefficient was realized based on a phase shift introduced by SBS. The phase shift was controlled by adjusting the pump power of SBS, and so the center frequency of the filter was adjusted continuously. 16 laser signals with wavelength intervals of 0.338 nm were obtained based on a tunable multi-wavelength high erbium doped fiber laser in experiment. And then, the influence on this filter by the length of SBS gain medium, the number of the taps and the wavelength interval were researched by simulation.

Key words: complex coefficient microwave photonic filter; multi-wavelength fiber laser; stimulated Brillouin scattering; phase shift

收稿日期: 2018-08-05; 修订日期: 2018-09-03

基金项目: 安徽省高等学校自然科学研究重大项目(KJ2015ZD04, KJ2017A790); 安徽省自然科学基金项目(1608085MF135)

作者简介: 严艺(1993-), 男, 硕士生, 主要从事现代光通信方面的研究。Email: m15357088389@163.com

导师简介: 廖同庆(1976-), 男, 教授, 博士, 主要从事现代光通信方面的研究。Email: t.liao@ahu.edu.cn

0 引言

相比于传统的电子滤波器处理微波信号的方法,微波光子滤波器能在光域上实现对微波信号的处理,该滤波器损耗低、带宽大、体积小,并且具有很好的抗电磁干扰能力^[1]。正系数的微波光子滤波器只能实现低通滤波,而负系数和复系数的微波光子滤波器能够实现带通滤波^[2-3]。复系数滤波器不仅能够实现中心频率的连续可调谐,而且还能使频率响应特性保持不变,因此复系数微波光子滤波器是微波光子学的研究热点^[4-5]。

近年来,为了实现微波光子滤波器的复系数,提出了很多相移技术:如矢量和技术、基于偏振调制器的移相器、基于双驱动平行马赫-曾德尔 (Mach-Zehnder, MZ) 调制器构成的移相器、受激布里渊散射等^[6-9]。2011年 M.Li 等提出了基于矢量和技术的微波光子移相器,通过改变两个通道的振幅来实现相移,但是存在可控相移范围小的问题^[7]。2013年 C. Zhang 提出了一种复系数的可调谐微波光子滤波器,该方案将单个激光源与偏振调制相结合,使用偏振调制器生成两个正交偏振态的反相微波信号,组合成一个特定的偏振态,过滤掉一个边带之后引入特定相移,但需要高速的偏振调制器来实现快速的

相位调谐^[8]。2016年 W.S.Zhai 等基于双驱动平行 MZ 调制器实现移相器,通过调节调制器的偏置电压实现了 360°相移变化,缺点是需要较高的驱动信号^[9]。与其他方法相比,利用受激布里渊增益的窄带特性实现的移相器所产生的复系数易于控制,且阈值较低,因而备受科研学者们的关注。

实现多抽头的复系数微波光子滤波器有利于提高滤波器的 Q 值,使其具有良好的频率选择特性。传统的多波长光源主要是光谱切割宽带光源或激光阵列^[10-12]。利用光谱切割宽带光源作为抽头光源会对滤波器引入噪声,影响滤波器的性能,而激光阵列作为抽头光源会导致滤波器的成本陡增。文中使用基于高掺杂铒纤的可调谐多波长光纤激光器得到不同抽头数目和波长间隔的激光信号,以此激光信号为抽头光源,基于 SBS 实现中心频率连续可调谐,并研究了 SBS 增益介质长度、抽头光源的波长间隔和抽头数目对滤波器特性的影响。

1 实验结构与原理分析

该滤波器由两部分组成,具体结构如图 1 所示。图 1(a)为基于高掺杂铒纤的多波长光纤激光器,该激光器的输出激光信号进入图 1(b)所示的 SBS 移相器实现复系数。

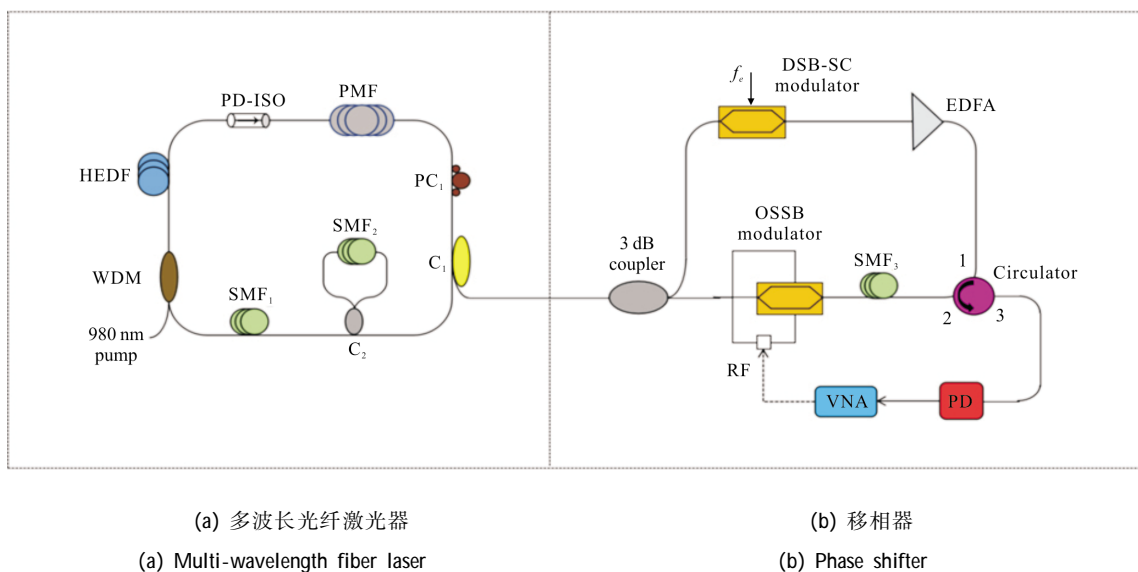


图 1 多抽头复系数微波光子滤波器结构图

Fig.1 Structure of multi-tap complex coefficient microwave photonic filter

图 1(a)所示的激光器主要包括波分复用器(WDM)、高掺杂饵纤(HEDF)、偏振相关隔离器(PD-ISO)、保偏光纤(PMF)、偏振控制器(PC₁)、耦合器(C₁、C₂)和单模光纤(SMF₁、SMF₂)。图 1(b)所示的相移单元由 3 dB 耦合器(3 dB Coupler)、双边带载波抑制调制器(DSB-SC Modulator)、掺饵光纤放大器(EDFA)、光学单边带调制器(OSSB Modulator)、单模光纤(SMF₃)、环形器(Circulator)、光电探测器(PD)和矢量网络分析仪(VNA)组成。多波长激光信号经 3 dB 耦合器后被分成两部分,下支路的激光信号经单边带调制器调制后进入 SMF₃,利用光纤的色散效应实现滤波器的基本延时。上支路的激光信号经 DSB-SC 调制器调制后,产生抑制载波双边带信号。DSB-SC 调制器的驱动频率接近光纤中的布里渊频移。DSB-SC 信号的上边带和下边带作为泵浦光经环形器进入 SMF₃中,与 OSSB 调制的载波在 SMF₃中产生布里渊效应。由于 SBS 增益带宽很窄,使得仅在光载波处引入相移量,经 SBS 效应处理的信号经光电探测器后将相移量转移到射频信号上,从而实现滤波器的复系数。

对于多波长光源,令 OSSB 调制器驱动信号的电场强度为 $E_{rf}(t)=e^{j2\pi f_{rf}t}$, f_{rf} 为驱动信号的中心频率,则基于 SBS 效应的复系数微波光子滤波器的频率响应函数为^[13]:

$$H(f_{rf}) = \sum_{m=0}^{N-1} P_m e^{jm\varphi} e^{-j2\pi f_{rf} m\tau} = \sum_{m=0}^{N-1} P_m e^{jm2\pi\tau(\frac{\varphi}{2\pi\tau} - f_{rf})} \quad (1)$$

式中: N 为抽头光源数目; P_m 为各个光载波的功率值; φ 为 SBS 引入的相移量; $\tau=DL\Delta\lambda$ 为基本延时时间, D 和 L 分别为 SMF₃的色散系数和长度, $\Delta\lambda$ 为多波长激光器的波长间隔。由公式(1)可以看出滤波器的频率响应特性受 SBS 增益介质长度、抽头光源数目和波长间隔影响;滤波器通带中心频率的位置由 $\varphi/2\pi\tau$ 和 f_{rf} 共同决定,通过调节 φ 即可调节滤波器的中心频率。

2 仿真及结果

2.1 SBS 增益介质长度对相移量及自由频谱范围的影响

由前文可知,调节相移量 φ 可以实现滤波器的中心频率连续可调,其具体关系如公式(2)所示^[14]:

$$\varphi = g_{B0} \cdot \frac{L_{eff}}{A_{eff}} \cdot (P_{P1} \cdot \left[\frac{\frac{\Delta\omega}{\Gamma_B}}{1 + \frac{4\Delta\omega^2}{\Gamma_B^2}} - \frac{\frac{\Delta\omega + \omega_{RF}}{\Gamma_B}}{1 + \frac{4(\Delta\omega + \omega_{RF})^2}{\Gamma_B^2}} \right] + P_{P2} \cdot \left[\frac{\frac{\Delta\omega}{\Gamma_B}}{1 + \frac{4\Delta\omega^2}{\Gamma_B^2}} - \frac{\frac{\Delta\omega - \omega_{RF}}{\Gamma_B}}{1 + \frac{4(\Delta\omega - \omega_{RF})^2}{\Gamma_B^2}} + \frac{\frac{2\Omega_B + \Delta\omega - \omega_{RF}}{\Gamma_B}}{1 + \frac{4(2\Omega_B + \Delta\omega - \omega_{RF})^2}{\Gamma_B^2}} \right]) \quad (2)$$

式中: g_{B0} 为光纤中布里渊增益峰值; L_{eff} 为 SMF₃的有效长度; A_{eff} 为光纤纤芯有效作用面积; Γ_B 为 3 dB 本征布里渊增益带宽; Ω_B 为布里渊频移; ω_{RF} 为射频信号频率; P_{P1} 和 P_{P2} 分别为抑制载波双边带信号(泵浦光)的上下边带光功率; $\Delta\omega = \omega_0 - \omega_{P1} + \Omega_B$ 是上边带信号 P_1 和频率为 ω_0 的光载波之间的频率差相对于布里渊频移的失谐参量。当泵浦光功率 $P_{P1}=P_{P2}=P_P$ 时,信号光载波所受的增益和损耗的幅度谱正好相互抵消,相位谱叠加,最终只在光载波中心频率处引入一个相移量 φ 。在泵浦光功率一定的情况下,改变 SMF₃长度,相移量随着 SMF₃长度的增大而增大。

对于自由频谱范围(FSR), $FSR = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{DL\Delta\lambda}$,因此

可以通过控制 SMF₃的长度和多波长激光器的波长间隔 $\Delta\lambda$ 调节微波光子滤波器的 FSR。因此,在波长间隔 $\Delta\lambda$ 一定的情况下,FSR 随着 SMF₃长度的增大而减小。

设定泵浦光功率为 1.7 mW,波长间隔 $\Delta\lambda$ 为 0.3 nm, SMF₃长度分别为 5、10、15 km 时,滤波器的响应如图 2 所示。从图中可以看出,当光纤长度为 10 km 时,相移量具有良好的调谐范围,且滤波器具有较大的 FSR。

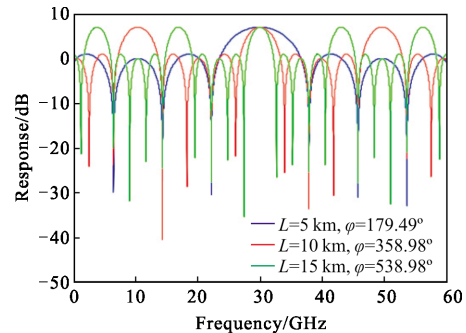


图 2 不同 SMF₃ 长度时滤波器的响应

Fig.2 Response of the filter with different length of SMF₃

2.2 波长间隔对自由频谱范围的影响

在 SMF₃长度为 10 km 的情况下,分别设定波长

间隔 $\Delta\lambda$ 为 0.3、0.4、0.5 nm，对应的滤波器响应如图 3 所示。可以看到，当 $\Delta\lambda$ 从 0.5 nm 减小至 0.3 nm，FSR 从 11.7 GHz 增大至 19.6 GHz。

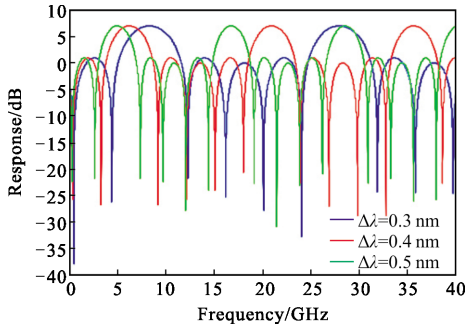


图 3 不同波长间隔时微波光子滤波器响应

Fig.3 Response of microwave photonic filters with different wavelength interval

2.3 抽头数量对 Q 值的影响

为了分析抽头数量对滤波器频率响应的影响，设定抽头数分别为 12、15、18，其中抽头权值全设为 1。通过图 4 可以发现，随着抽头数的增多，滤波器的 FSR 没有发生变化，而通带的 3 dB 带宽会减小，从而使 Q 值增大。

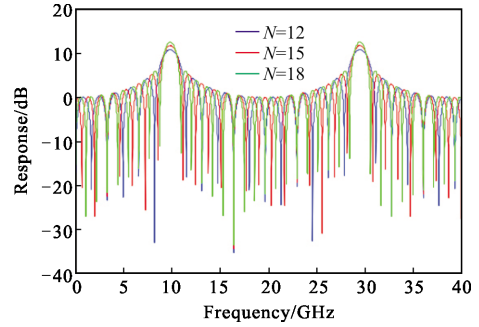


图 4 不同抽头数量时微波光子滤波器响应

Fig.4 Response of microwave photonic filters with different number of the taps

3 抽头光源实验

搭建如图 1 (a) 所示的多波长激光器实验系统，长度为 62 cm 的高掺杂掺铒光纤作为增益介质，在 1530 nm 处其吸收系数为 80 ± 8 dB/m。调节 980 nm 泵浦源使其功率分别为 300、400、500 mW，得到如图 5(a)、(b)、(c) 所示的三种多波长激光信号。其中中心波长分别位于 1559.7、1559.6、1559.8 nm 处，波长个数分别为 14、15、16，波长间隔分别为 0.342、0.34、0.338 nm。

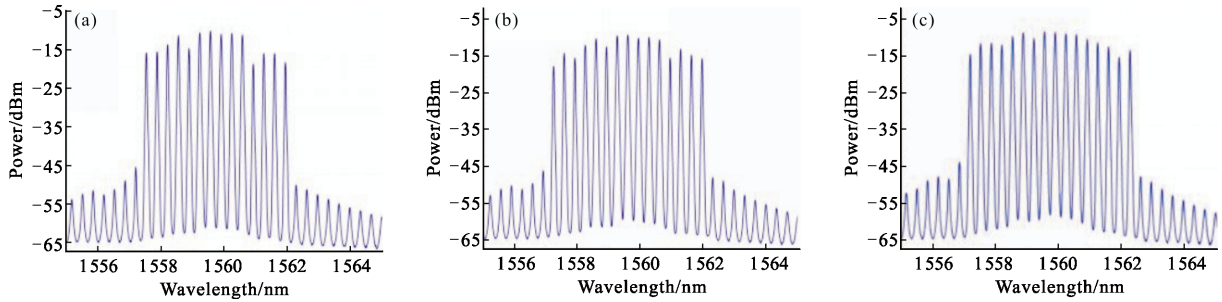


图 5 多波长激光信号

Fig.5 Multi-wavelength laser signal

4 基于抽头光源的滤波器特性仿真

4.1 响应特性

上述三种抽头光源输入到图 1(b)，其中 SMF_3 的长度为 10 km，色散系数为 17 ps/nm·km，微波光子滤波器的频率响应如图 6 所示，具体参数如表 1 所示。

从表 1 中可以看出，滤波器响应特性的规律与仿真结果完全一致，波长间隔为 0.338 nm 的 16 个多波长激光信号作为抽头光源时，微波光子滤波器具有更好的 FSR 及 Q 值。

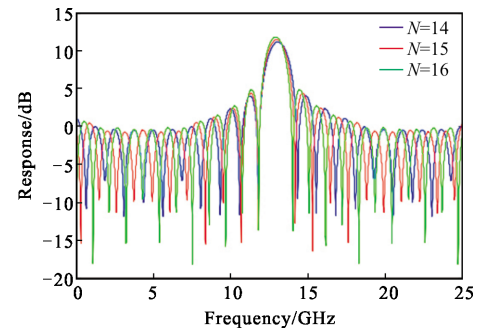


图 6 不同抽头光源时微波光子滤波器响应

Fig.6 Response of microwave photonic filters with different tap light sources

表 1 不同抽头光源时微波光子滤波器的响应参数
Tab.1 Response parameters of microwave photonic filters with different tap light sources

N	14	15	16
$\Delta\lambda/\text{nm}$	0.342	0.34	0.338
MSSR/dB	7.10	7.07	6.95
3 dB/GHz	1.53	1.42	1.31
FSR/GHz	17.4	17.3	17.2
Q	11.37	12.18	13.12

4.2 可调谐性

利用实验得到的 16 个多波长激光信号作为抽头光源,根据公式(2),固定失谐参量 $\Delta\omega$ 为 $\Gamma_B/2$,当 SBS 效应的初始泵浦光功率从 -12 dBm 增长至 2.47 dBm,即可完成该滤波器的 360° 相移变化。

如图 7 所示,滤波器在整个 FSR 内连续调谐的过程中,其通带形状及通带带宽始终保持不变。

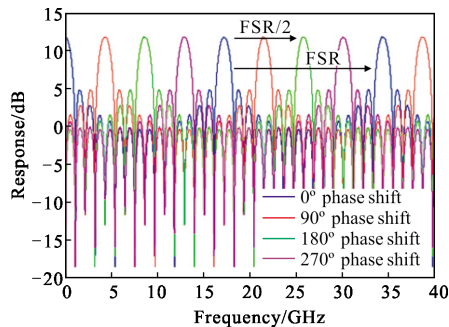


图 7 复系数微波光子滤波器的可调谐性

Fig.7 Tunability of complex coefficient microwave photonic filter

5 结论

设计了一款基于高掺杂饵纤的可调谐多波长光纤激光器,通过调节泵浦功率即可实现对输出激光信号的调谐,在泵浦功率分别为 300、400、500 mW 时,得到了中心波长分别位于 1 559.7、1 559.6、1 559.8 nm 处,波长个数分别为 14、15、16,波长间隔分别为 0.342、0.34、0.338 nm 的稳定输出信号。以该激光器输出的可调谐信号为抽头光源,仿真研究了一款基于 SBS 效应的多抽头复系数微波光子滤波器。研究表明;以波长间隔为 0.338 nm 的 16 个激光信号为抽头光源,SBS 增益介质长度为 10 km

时,滤波器的性能最好,其主旁瓣抑制比为 6.95 dB,FSR 为 17.2 GHz,Q 值为 13.12;当泵浦功率从 -12 dBm 调节至 2.47 dBm 时,即可实现该滤波器在整个 FSR 内连续调谐。

参考文献:

- [1] He Chao, Liao Tongqing, Wu Sheng, et al. Tunable narrow bandwidth negative coefficient microwave photonic filter [J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(9): 0920003. (in Chinese)
- [2] Li Tao, Wang Yuzhuo, Wang Xudong, et al. Novel switchable microwave photonic filter based on stimulated Brillouin scattering [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(8): 0820002. (in Chinese)
- [3] Wang W T, Liu J G, Mei H K, et al. Microwave photonic filter with complex coefficient based on optical carrier phase shift utilizing two stimulated Brillouin scattering pumps [J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(1): 1-8.
- [4] Li W, Zhu N H, Wang L X. Continuously tunable microwave photonic notch filter with a complex coefficient [J]. IEEE Photonics Journal, 2011, 3(3): 462-467.
- [5] Zhu Yongxiang, Lu Qisheng. Anti-Stokes scattering of Stokes light and slow light in stimulated Brillouin scattering [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19 (2): 487-492. (in Chinese)
- [6] Xiao Yongchuan, Qu Pengfei, Zhou Jingran, et al. Integrated vector sum microwave photonic phase shifter based on asymmetric Mach-Zendner structure in SOI [J]. Chinese Optics, 2011, 4(4): 418-422. (in Chinese)
- [7] Li M, Yao J P, Shahoei H. Continuously tunable time delay using an optically pumped linear chirped fiber Bragg grating [J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(10): 1465-1472.
- [8] Zhang C, Yan L S, Pan W, et al. A tunable microwave photonic filter with a complex coefficient based on polarization modulation [J]. IEEE Photonics Journal, 2013, 5(5): 5501606-5501608.
- [9] Zhai W S, Gao X L, Xu W J, et al. Microwave photonic phase shifter with spectral separation processing using a linear chirped fiber Bragg grating [J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(4): 16-19.
- [10] Ding Xiangdong, He Wei, Yao Qifeng, et al. Switchable

- erbium-doped fiber laser utilizing tunable Mach-Zehnder filter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(10): 1005006. (in Chinese)
- [11] Hao Mingming, Qin Li, Zhu Hongbo, et al. High power 976 nm fiber coupled module based on diode laser short bars [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(4): 895-903. (in Chinese)
- [12] Liu Liang, Cui Junwei, Li Wenjing, et al. Yb^{3+} -doped double-clad quasi-continuous wave fiber laser pumped by laser diode[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(6): 663-670. (in Chinese)
- [13] Zhang Y M, Pan S L. Tunable multiband microwave photonic filter with all complex coefficients [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(5): 802-804.
- [14] Yang Q H. Basic research on broadband photonic microwave phase shifter based on stimulated Brillouin scattering [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016. (in Chinese)