

基于布里渊光纤振荡器的可调谐窄带微波光子滤波器研究

游亚军 许鑫 王琳毅 冯刘艳 刘毅 耿文平 贺文君

Tunable narrowband microwave photonic filter based on brillouin fiber oscillator

YOU Ya-jun, XU Xin, WANG Lin-yi, FENG Liu-yan, LIU Yi, GENG Wen-ping, HE Wen-jun

引用本文:

游亚军, 许鑫, 王琳毅, 冯刘艳, 刘毅, 耿文平, 贺文君. 基于布里渊光纤振荡器的可调谐窄带微波光子滤波器研究[J]. *中国光学*, 2022, 15(4): 660–667. doi: 10.37188/CO.2022–0057

YOU Ya-jun, XU Xin, WANG Lin-yi, FENG Liu-yan, LIU Yi, GENG Wen-ping, HE Wen-jun. Tunable narrowband microwave photonic filter based on brillouin fiber oscillator[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(4): 660-667. doi: 10.37188/CO.2022-0057

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0057>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

光纤光栅与受激布里渊信号的耦合特性

Coupling characteristics between fiber grating and stimulated Brillouin signal

中国光学. 2017, 10(4): 484 <https://doi.org/10.3788/CO.20171004.0484>

硅光子芯片外腔窄线宽半导体激光器

Narrow linewidth external cavity semiconductor laser based on silicon photonic chip

中国光学. 2019, 12(2): 229 <https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0229>

200 Hz高重复频率SBS脉宽压缩实验研究

200 Hz high repetition frequency SBS pulse width compression experiment

中国光学. 2018, 11(5): 736 <https://doi.org/10.3788/CO.20181105.0736>

国产化掺铥光纤激光振荡器性能研究

Investigation on the performance of a homemade thulium-doped fiber laser oscillator

中国光学. 2019, 12(5): 1109 <https://doi.org/10.3788/CO.20191205.1109>

固体激光器与光纤激光器对光子晶体光纤棒耦合的分析与对比

Analysis and comparison of solid-state lasers and fiber lasers on the coupling of rod-type photonic crystal fiber

中国光学. 2018, 11(6): 958 <https://doi.org/10.3788/CO.20181106.0958>

声光偏转快调谐脉冲CO₂激光器实验研究

Experimental research on acousto-optic deflection rapid tuning pulsed CO₂ lasers

中国光学. 2019, 12(2): 355 <https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0355>

文章编号 2095-1531(2022)04-0660-08

基于布里渊光纤振荡器的可调谐 窄带微波光子滤波器研究

游亚军¹, 许鑫², 王琳毅², 冯刘艳², 刘毅^{2*}, 耿文平², 贺文君²

(1. 中北大学机电工程学院, 山西太原 030051;

2. 中北大学仪器与电子学院, 山西太原 030051)

摘要: 为了使微波光子滤波器兼具宽调谐范围与高频率选择性, 本文基于窄线宽单纵模光纤受激布里渊振荡器首次提出并验证了一种具有宽调谐范围、窄滤波带宽特性的微波光子滤波器。该滤波器的核心是腔长为 10 m 的布里渊光纤振荡器, 受激布里渊散射泵浦光与光载波信号分别由两个不同的可调谐激光器提供, 布里渊增益与光调制信号相互作用后, 利用该布里渊光纤振荡器压缩光谱线宽, 实现窄带微波光子滤波; 通过简单地改变泵浦光波长, 实现滤波器通带大范围稳定调谐。实验结果表明, 该微波光子滤波器在 0~20 GHz 的频率范围内可稳定调谐, 带外抑制比约为 20 dB, 其 3-dB 带宽和最大 Q 值分别为 6.2 kHz 和 3.222×10^6 。本文提出的单通带微波光子滤波器不仅具有目前已知的最高 Q 值, 同时具有宽可调性、高带外抑制和结构简单等优势。

关键词: 受激布里渊散射(SBS); 微波光子滤波器(MPF); 宽调谐; 带外抑制比; 窄带宽

中图分类号: TN713 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2022-0057

Tunable narrowband microwave photonic filter based on brillouin fiber oscillator

YOU Ya-jun¹, XU Xin², WANG Lin-yi², FENG Liu-yan², LIU Yi^{2*}, GENG Wen-ping², HE Wen-jun²

(1. College of Mechatronics Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China)

* Corresponding author, E-mail: liuyi28@163.com

Abstract: In order to make sure a microwave photonic filter both have wide tuning range and high frequency

收稿日期: 2022-03-29; 修订日期: 2022-05-03

基金项目: 国家重点研发计划(No. 2019YFF0301802); 山西省重点研发项目(No. 201903D121124); 中国博士后科学基金(No. 2020M682113); 中国山西省留学基金委(No. 2020-112); 山西省高等学校科技创新计划(No. 2020L0268); 山西省基础研究计划(No. 2021030212558, No. 20210302124390); 山西省研究生创新工程(No. 2021Y616)

Supported by National Key R&D Program of China (No. 2019YFF0301802); Key Research and Development Projects of Shanxi Province (No. 201903D121124); China Postdoctoral Science Foundation (No. 2020M682113); Shanxi Scholarship Council of China (No. 2020-112); Scientific and Technological Innovation Programs of Higher Education Institutions in Shanxi (No. 2020L0268); Fundamental Research Program of Shanxi Province (No. 2021030212558, No. 20210302124390); Shanxi Postgraduate Innovation Project (No. 2021Y616).

selectivity, a microwave photonic filter with a wide tuning range and narrow filter bandwidth based on a Brillouin oscillator is proposed and verified for the first time. The core of the filter is a Brillouin fiber oscillator with a cavity length of 10 m, and the stimulated Brillouin scattering pump and optical carrier signal are provided by two different tunable lasers. After the Brillouin gain spectrum interacts with the optical modulation sideband, the Brillouin fiber oscillator is used to narrow the spectral linewidth to realize narrowband microwave photonic filtering. By changing the pump wavelength, the filter passband can be tuned stably. The experimental results show that the microwave photonic filter can be stably tuned in the frequency range of 0–20 GHz. The out-of-band rejection ratio is found to be about 20 dB, and its 3-dB bandwidth and maximum Q value are 6.2 kHz and 3.222×10^6 , respectively. To the best of our knowledge, this is the highest value of a high- Q single-passband MPF reported to date. At the same time, the MPF has the advantages of wide tunability, high side mode suppression and a simple structure.

Key words: Stimulated Brillouin Scattering (SBS); Microwave Photonic Filter (MPF); wide tuning; out-of-band rejection ratio; narrow bandwidth

1 引言

微波光子滤波器(MPF)具有低损耗、大带宽及抗电磁干扰等优势,逐渐发展成为高频宽带信号控制和处理的关键技术^[1-4]。随着高纯频谱微波信号发生、高灵敏度微波光子传感以及高分辨率微波光子雷达等前沿技术领域对滤波器频率选择性要求的日益提升,窄带(kHz甚至亚kHz)可调谐MPF逐渐成为近年来微波光子技术领域研究的热点和难点^[5-6]。

到目前为止,研究人员已经提出了多种可调谐、窄带宽MPF^[7-8]。例如使用相位调制器和超结构光纤布拉格光栅(SFBG)实现的窄带、可调MPF,其3-dB带宽为143 MHz,可调谐范围为0.4~6.4 GHz^[9]。但在该方案中,SFBG的反射带宽和陷波宽度决定了频率可调范围和通带宽度,而且其制作工艺相对繁琐;2016年,Zhang等人^[10]使用基于光学注入下分布反馈半导体激光器的四波混频实现宽带可调谐MPF,3-dB带宽和带外抑制比分别为61.2 MHz和25 dB,通过改变光注入参数,实现12~40 GHz的频率调谐范围;最近报道了一种基于2×2光纤耦合器的环型谐振腔的MPF,通过相干探测链路实现了40 GHz调谐范围,相比于传统非腔体MPF,其滤波带宽可低至1.2 MHz^[11]。上述研究中,实现窄带可调谐MPF的结构大多比较复杂,且滤波带宽也大多集中在MHz量级,难以满足带宽MHz量级以下滤波带

宽应用需求。

受激布里渊散射(SBS)效应因具有窄线宽、低阈值、高增益等特点,被广泛用于制作窄带MPF^[12-16]。中国科学院半导体研究所Wang等人提出一种基于SBS效应的双通带微波光子滤波器,通过SBS的相位-强度(PM-IM)调制转换来实现MPF高频率选择性,通过直接调节微腔激光器的调制频率来实现高稳定性调谐,中心频率调谐范围为0~20 GHz,每个通带的3-dB带宽和带外抑制比分别约为38 MHz和28.5 dB^[17]。电子科技大学Li等人利用单模光纤和高非线性光纤之间的布里渊频移差,实现了固定频率间隔的双通带MPF。中心频率在0~9.644 GHz范围内可调谐,其3-dB带宽和带外抑制比分别为57 MHz和20 dB^[18]。电子科技大学Zhen等人,将光载波通过两个级联马赫-曾德尔调制器(DPMZM)来产生激发SBS的双音泵,MPF的两个通带可以通过调整施加于DPMZM的RF信号的频率来自由设置,调谐范围为0~9.644 GHz,带外抑制比和3-dB带宽分别为25 dB和55 MHz^[19]。上述方案均是通过直接利用布里渊增益选择性放大调制信号的方式完成光载微波信号处理,因此MHz量级SBS增益谱线宽决定了所构成的MPF具有同样处于MHz量级的滤波带宽,无法滤出待测信号光精细频率成分。中国科学院半导体研究所Wen等人提出一种通过外接光纤环形谐振器(FRR)实现高 Q 值($Q = f/f_{3\text{-dB}}$)MPF的方法,其调谐范围为2~16 GHz,3-dB带宽最高为(825±

125) kHz, 最大 Q 值达到 17778^[20]。随后, 该课题组利用布里渊动态光栅(BDG)提出了一种具有更高 Q 值的微波光子滤波器, 其 3-dB 带宽仅为 650 kHz, 对应的 Q 值提升至 24615^[21]。由此可见, 实现同时兼具宽调谐范围及 kHz 甚至亚 kHz 窄带的 MPF 一直是面向未来宽带无线通信、传感、高性能雷达及天文探测等领域亟需解决的关键问题。

针对以上问题, 本文提出并实验证明了一种基于窄线宽单纵模光纤受激布里渊振荡器的可调谐窄带 MPF。该 MPF 的核心信号处理单元是一个由 10 m 单模光纤构成的受激布里渊谐振腔。方案中 SBS 泵浦光与光载波信号分别由两个不同的可调谐激光器提供, 布里渊增益与光调制信号相互作用后, 利用布里渊振荡器极窄的谐振线宽极大地压缩了滤波器通带宽度, 通过简单地改变泵浦光波长, 实现滤波器通带大范围稳定调谐。本方案不仅实现了具有更高 Q 值的窄带 MPF, 而且具有宽可调性、高带外抑制及结构简单等优势。实验结果表明该 MPF 在具有超高的频率选择性的同时具有较宽的频率调谐范围, 其滤波带宽为 6.2 kHz, 带外抑制超过 20 dB, 最大 Q 值为 3.222×10^6 , 中心频率调谐范围为 0~20 GHz。

2 滤波器结构与原理

本文所设计的 MPF 窄线宽的实现, 是基于单纵模光纤受激布里渊振荡器的微波光子技术, 其基本原理是利用布里渊增益谱与光调制信号进行相互作用, 在光纤振荡腔的作用下形成窄线宽布里渊激光输出, 从而实现窄线宽滤波, 通过调节布里渊增益谱的位置, 从而实现滤波器的调谐功能。该 MPF 实验结构如图 1(彩图见期刊电子版)所示, 可调谐窄线宽 MPF 原理示意如图 2(彩图见期刊电子版)所示。激光器(TLS₁)发出的激光作为载波, 其中中心波长为 1550 nm, 对应的中心频率为 f_{c1} 。将矢量网络分析仪(VNA)产生的频率为 f_{RF} 的射频信号, 通过相位调制器(PM), 对光载波进行双边带(DSB)扫频调制, 如图 2(a)所示。然后, DSB 调制信号通过 50:50 的光耦合器(OC1)进入 10 m 长的单模光纤中。

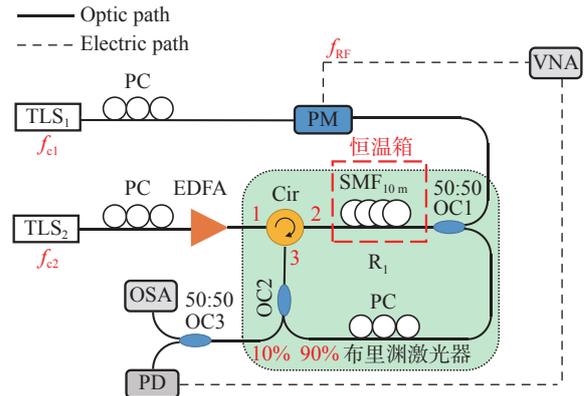


图 1 MPF 的实验装置。TLS, 可调谐激光器; PC, 偏振控制器; PM, 相位调制器; OC, 光耦合器; SMF, 单模光纤; EDFA, 掺铒光纤放大器; Cir, 光环形器; PD, 光电探测器; OSA, 光谱分析仪; VNA, 矢量网络分析仪

Fig. 1 Experimental setup of MPF. TLS, tunable laser; PC, polarization controller; PM, phase modulator; OC, optical coupler; SMF, single-mode fiber; EDFA, erbium-doped fiber amplifier; Cir, optical circulator; PD, photodetector; OSA, spectrum analyzer; VNA, vector network analyzer

可调谐激光器(TLS₂)发出的激光作为激发 SBS 的泵浦光, 其中中心频率为 f_{c2} 。泵浦光经掺铒光纤放大器(EDFA)功率放大后通过光环形器(Cir)注入 10 m 单模光纤激发 SBS。布里渊增益谱的中心频率和 3-dB 线宽分别为 $f_{c2} - f_B$ 和 Δf_B , 其中 f_B 为布里渊频移量。为了消除温度振动等环境因素对 SBS 频移量的影响, 实验过程中将激发 SBS 的单模光纤置于恒温控制系统中, 同时将整个滤波装置置于光学气浮平台上, 从而保证了实验中布里渊频移量为一固定值^[22-24]。在本实验中, f_B 约为 10.737 GHz。通过调谐 TLS₂ 激光器的波长来改变泵浦光频率 f_{c2} , 改变 SBS 增益谱中心频率的位置, 从而滤出所需频带信号, 实现 MPF 的可调谐功能, 如图 2(b)所示。在光调制信号和 SBS 增益谱相互作用过程中, 光调制信号上边带位于布里渊增益谱中的部分被 SBS 增益选择性放大, 如图 2(c)所示。混合光信号通过 Cir 的端口 3 进入环形腔 1(R₁)中进行多光束干涉作用。最后, 输出光通过 10:90 耦合器(OC2), 其中 10% 的输出光通过光电探测器(PD)和光谱分析仪(OSA)进行检测, 经过 PD 光电转换后的信号输入 VNA 测量幅频响应, 用于表征分析所提出窄带可调谐 MPF 的滤波性能。剩余 90% 的

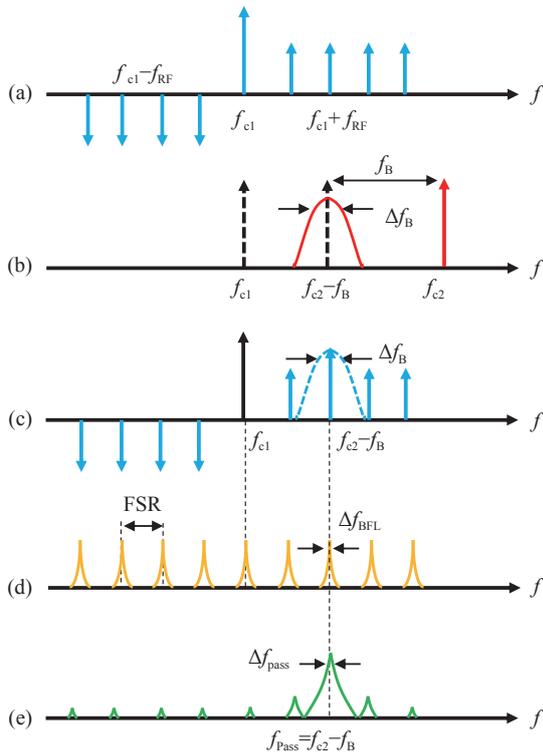


图2 可调谐窄带 MPF 原理示意图。(a)双边带扫频调制光信号光谱;(b)SBS 光谱;(c)利用 SBS 放大 DSB 调制信号上边带;(d)环形腔 R_1 的 FSR 响应;(e)MPF 滤波通带响应

Fig. 2 Illustration of tunable narrowband MPF principle. (a) Optical spectra of double sideband swept frequency modulated signal. (b) Optical spectra of SBS. (c) Amplification of the upper sideband of a DSB modulated signal using SBS gain. (d) FSR response of single-ring cavity R_1 . (e) Response of MPF

光逆时针注入 R_1 谐振腔中继续谐振。

微波光子滤波器结构中的 R_1 由环形器、两个耦合器、偏振控制器与 10 m 长的单模光纤组成(图 1 中绿色区域)。 R_1 构成布里渊光纤谐振腔中表现出周期性共振,如图 2(d)所示。窄带布里渊增益用于布里渊振荡器的天然选频与提供线宽压缩机制,斯托克斯光在谐振腔中经多次放大后获得的光谱明显窄于介质增益线宽以及泵浦线宽,如图 2(e)所示。由于 SBS 源于泵浦光和斯托克斯光的相互作用,其耦合效率会受到光束偏振态的影响,因此为了获得最大布里渊增益,通过 R_1 内的偏振控制器来调节环形腔内泵浦光和斯托克斯光的偏振方向,从而提升 SBS 耦合效率。经过布里渊振荡器谐振的输出光输入光电探测器(PD)进行拍频检测^[25]。

MPF 的中心频率可表示为:

$$f_{\text{pass}} = f_{c2} - f_B \quad (1)$$

从公式(1)可以看出,通过调谐频率 f_{c2} 就可以改变 MPF 的中心频率 f_{pass} 。

图 3 给出了基于布里渊光纤振荡器的 MPF 获得单通窄带的原理。其中 Δf_B 为 SBS 布里渊增益线宽,布里渊频移公式定义为 $f_B = 2nv_a/\lambda$, 其中, v_a 是介质中的声速, n 为光纤中有效折射率, λ 为泵浦光波长。 f_B 在当泵浦光波长为 1550 nm 时,激励的布里渊频移量为 10.737 GHz。

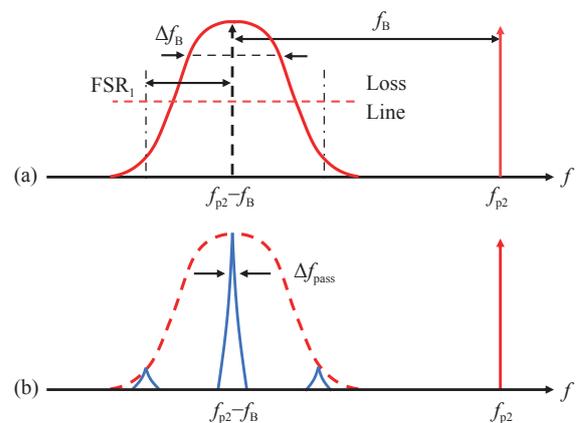


图3 (a)通过 FSR 抑制边模原理示意图;(b)基于布里渊光纤振荡器的 MPF 频率响应示意图

Fig. 3 (a) Schematic diagram of side mode suppression by FSR. (b) The response of MPF based on Brillouin fiber oscillator

其中,环形谐振腔 R_1 的有效 FSR 表示为:

$$\text{FSR} = \frac{c}{nL} \quad (2)$$

式中 L 是 R_1 的腔长, $n=1.468$, 是光纤有效折射率。因此, R_1 的 FSR 为 18.6 MHz。为了避免 MPF 的多通带,由腔长 L 确定的 FSR 不应小于布里渊增益谱的线宽。当有效 FSR 超过布里渊增益线宽且增益大于损耗时,激光模式仅在满足 R_1 谐振条件的频率下振荡。因此,具有超窄谐振线宽的布里渊振荡器可以轻易地获得高 Q 值或窄带宽单通带 MPF。

3 实验结果与讨论

图 4(彩图见期刊电子版)对比了布里渊增益和布里渊光纤振荡器输出光的频率响应。可以观察到在不构成光纤振荡器的结构中光纤的布里

渊增益 3-dB 线宽约为 9.926 MHz, 而构建布里渊振荡器后斯托克斯光在谐振器中多次放大后将获得明显窄于光纤布里渊增益线宽的光输出, 其 3-dB 带宽压窄到 6.5 kHz, 并且通过对比可以明显观察到布里渊光纤振荡器具有良好的边模抑制作用, 边模抑制比达到 26 dB。

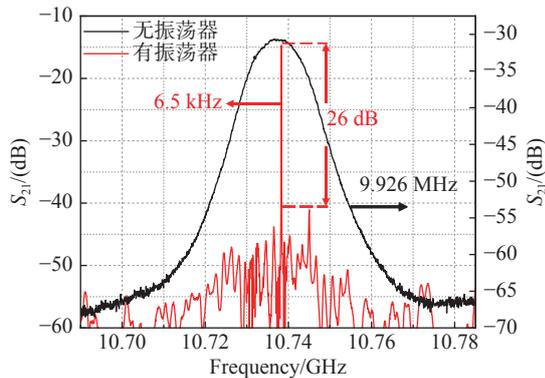


图 4 布里渊增益和布里渊光纤振荡器输出光谱对比
Fig. 4 Comparison of Brillouin gain and output light spectra of Brillouin fiber oscillator

在测量基于布里渊光线振荡器的 MPF 滤波响应之前, 分别对 TLS 泵浦光谱、布里渊振荡器输出光谱及经过耦合器 OC3 的合路输出光谱进行了测试, 测试结果对比如图 5(彩图见期刊电子版)所示。首先设置 TLS2 泵浦光的波长设置为 1550.00 nm, 其光谱如图中黑线所示。设置 ED-FA 输出功率为 29 dBm, 布里渊光线振荡器输出光谱如图中蓝线所示, 波长为 1550.08 nm, 因此, 泵浦光和 SBS 通带之间的波长差约为 0.08 nm,

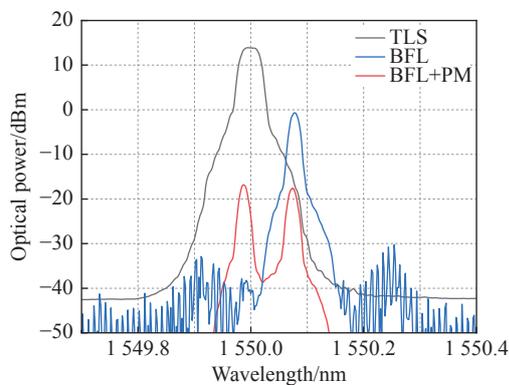


图 5 TLS 泵浦光谱、布里渊振荡器输出光谱及经过耦合器 OC3 的合路输出光谱

Fig. 5 TLS pump spectrum, Brillouin laser output spectrum and combined output spectrum through coupler OC3

对应于频域中的 10 GHz 布里渊频移量。经耦合器 OC3 的合路输出光谱如图中红线所示, 表现为双波长光谱, 其中一束为 TLS1 输出的光载波, 另一束为布里渊光纤振荡器输出光。

为了表征本方案提出的微波光子滤波器的调谐性。图 6(彩图见期刊电子版)中展示了当 ED-FA 输出泵浦光功率为 29 dBm, 波长在 1550.2320 至 1550.3920 nm 范围内变化时, MPF 的中心频率响应。从图中可以看出, 通过改变 SBS 泵浦光波长, MPF 滤波通带在 2~20 GHz 频率范围内稳定可调, 带外抑制最高超过 25 dB。值得注意的是, 根据布里渊频移量公式可知, 当激光器波长 λ 改变 0.1 pm 时, 布里渊频移量会相应改变 600 Hz。而本方案中泵浦波长每调谐 0.1 pm, 滤波器通带中心频率频移量为 12.5 MHz。因此, 泵浦波长改变引起的布里渊频移量变化对通带的调谐影响基本可以忽略。从图中可以看出, 滤波器除了主滤波通带之外, 还存在幅度较低的次通带, 这是由于单模光纤中的瑞利散射引发的自感受激布里渊散射造成的滤波作用^[18]。但是, 由于该次通带的幅度响应比主通带的幅度响应低近 30 dB, 因此基本不影响本文设计的微波光子滤波器的整体滤波性能。上述实验结果表明, 由于 SBS 泵浦光和调制光信号来自两个不同激光器, 因此只需改变 SBS 泵浦光的波长即可实现 MPF 的宽范围调谐。

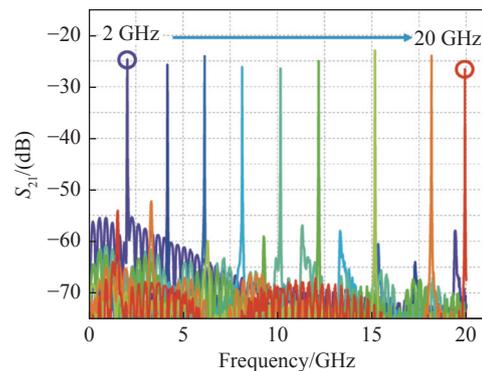


图 6 泵浦光波长在 1550.232 nm 至 1550.392 nm 之间调谐时 MPF 的频率响应

Fig. 6 The frequency response of MPF when the wavelength of the pump light is tuned from 1550.232 nm to 1550.392 nm.

为了分析本方案的窄带可调谐滤波效果, 进一步对滤波器通带宽度进行了实验测试。

图7(a)(彩图见期刊电子版)为MPF中心频率调谐响应对比图。设置EDFA输出功率为24 dBm,泵浦光初始波长为1550.214 nm。从测试结果可看出,当泵浦光的波长在1550.214 nm至1550.392 nm之间变化时,滤波器通带可以在48 MHz~19.98 GHz范围内稳定调谐。且在该频率调谐范围内,具有稳定的带外抑制比,可以实现稳定的单通带滤波效果。图7(b)(彩图见期刊电子版)是通带中心频率为19.98 GHz时30 MHz跨度展宽图,结果表明MPF的3-dB带宽最窄时仅为6.2 kHz。与文献[20]中约900 kHz的带宽相比,本方案提出的MPF具有更高的频率选择性。同时从图中可以观察到基于布里渊光纤振荡器的MPF带外抑制比超过20 dB,这是由于本方案中SBS增益谱宽度为9.9 MHz,通过式(2)得出 R_1 的FSR为18.6 MHz,谐振腔的FSR大于布里渊增益谱的线宽,因此较好地抑制了除通带以外的噪声,保证MPF在0~20 GHz可以实现单通带滤波。在19.98 GHz下,MPF最大 Q 值为 3.222×10^6 ,实验结果为现有文献报道MPF研究的最高 Q 值。

为了表征所提方案滤波性能的稳定性,图8

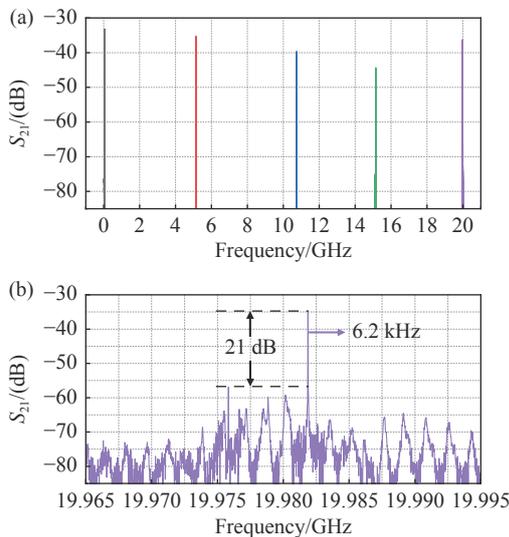


图7 当泵浦光的波长在1550.214 nm至1550.392 nm之间变化时,MPF的频率响应。(a)20 GHz跨度内的总体对比图;(b)30 MHz跨度展宽图

Fig. 7 Frequency response of MPF when the wavelength of the pump light varies from 1550.214 nm to 1550.392 nm. (a) Overall comparison diagram in 20 GHz span, (b) expanded diagram with 30 MHz span

(彩图见期刊电子版)给出了0~20 GHz调谐范围内MPF的3-dB带宽和带外抑制比变化规律。结果表明,MPF的3-dB带宽 Δf_{pass} 基本稳定,约为6.2~7.5 kHz,并且具有近20 dB的稳定带外抑制比,在调谐范围内的波动小于2.2 dB。由于SBS耦合效率与泵浦光和斯托克斯光的偏振方向密切相关,导致这种波动的原因可能源于光纤布里渊谐振腔内偏振控制器调节泵浦光和斯托克斯光的偏振匹配时产生的误差。综上所述,本文提出的MPF具有相对较宽的稳定调谐范围,并且具有kHz量级的滤波带宽,对于实现千赫兹带宽高抑制比单通带滤波具有巨大潜力。

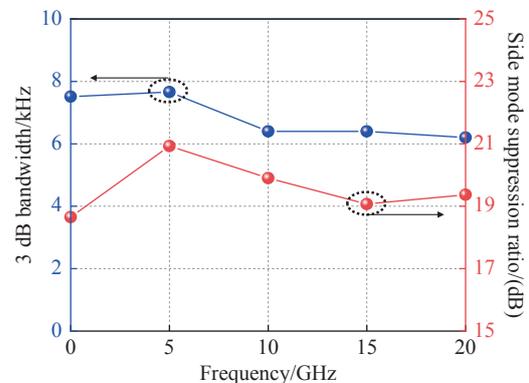


图8 不同中心频率下的3 dB带宽和边模抑制比

Fig. 8 3-dB bandwidth and side mode suppression ratio at different center frequencies

4 结 论

本文提出了一种基于SBS光纤振荡器的可调谐窄带MPF,并进行了实验验证。不同于直接利用布里渊增益完成光载微波信号处理,本文将布里渊振荡器引入到微波光子滤波结构设计中,利用布里渊斯托克斯在腔内多次放大后明显的光谱压缩特性,实现了MPF的窄带滤波,并且具有较高的带外抑制比。采用两个不同的可调谐激光器分别作为受激布里渊散射泵浦光与光载波信号,通过简单改变SBS泵浦光的波长即可实现MPF稳定调谐功能。该MPF同时具有宽可调谐、窄带宽、高带外抑制和结构简单等优势。实验结果表明,本文提出的单通带MPF最小通带带宽仅为6.2 kHz,滤波通带能够在0~20 GHz范围内连续调谐,并且拥有超过20 dB的稳定带外抑制比,最高 Q 值为 3.222×10^6 。

参考文献:

- [1] YAO J P. Microwave photonics[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(3): 314-335.
- [2] CHEN T, YI X K, LI L W, *et al.*. Single passband microwave photonic filter with wideband tunability and adjustable bandwidth[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(22): 4699-4701.
- [3] KHILO A, SPECTOR S J, GREIN M E, *et al.*. Photonic ADC: overcoming the bottleneck of electronic jitter[J]. *Optics Express*, 2012, 20(4): 4454-4469.
- [4] 陶源盛, 王兴军, 胡薇薇. 硅基微波光子滤波器的研究进展[J]. 半导体光电, 2021, 42(1): 1-10.
TAO Y SH, WANG X J, HU W W. Recent progresses of silicon integrated microwave photonic filters[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2021, 42(1): 1-10. (in Chinese)
- [5] 吴妮珊, 夏历. 基于微波光子学的准分布式光纤传感解调技术[J]. 中国光学, 2021, 14(2): 245-263.
WU N SH, XIA L. Interrogation technology for quasi-distributed optical fiber sensing systems based on microwave photonics[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(2): 245-263. (in Chinese)
- [6] 余晓畅, 许雅晴, 蔡佳辰, 等. 可调微纳滤波结构的研究进展[J]. 中国光学, 2021, 14(5): 1069-1088.
YU X CH, XU Y Q, CAI J CH, *et al.*. Progress of tunable micro-Nano filtering structures[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(5): 1069-1088. (in Chinese)
- [7] 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.
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. (in Chinese)
- [8] 胡总华, 聂奎营, 阮毅, 等. 基于色散光纤环级联结构的可调谐带通微波光子滤波器[J]. 半导体光电, 2019, 40(2): 189-192,199.
HU Z H, NIE K Y, RUAN Y, *et al.*. Bandpass-tunable microwave photonic filter based on dispersion fiber loops with cascaded structure[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2019, 40(2): 189-192,199. (in Chinese)
- [9] GAO L, CHEN X F, YAO J P. Tunable microwave photonic filter with a narrow and flat-top passband[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2013, 23(7): 362-364.
- [10] ZHANG T T, XIONG J T, ZHENG J L, *et al.*. Wideband tunable single bandpass microwave photonic filter based on FWM dynamics of optical-injected DFB laser[J]. *Electronics Letters*, 2016, 52(1): 57-59.
- [11] 张梓平, 牛晓晨, 黄杰, 等. 基于光纤环谐振腔的高性能微波光子滤波器[J]. 光学学报, 2020, 40(21): 2106001.
ZHANG Z P, NIU X CH, HUANG J, *et al.*. High-performance microwave photonic filter based on fiber ring resonator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(21): 2106001. (in Chinese)
- [12] 严艺, 廖同庆, 吕晓光, 等. 新型多抽头复系数微波光子滤波器[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(1): 0120001.
YAN Y, LIAO T Q, LU X G, *et al.*. Novel multitap complex coefficient microwave photonic filter[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(1): 0120001. (in Chinese)
- [13] 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.
- [14] JIANG H Y, YAN L SH, PAN W, *et al.*. Ultra-high speed RF filtering switch based on stimulated Brillouin scattering[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(2): 279-282.
- [15] 张卫华, 张丽丽, 曹晔. 基于受激布里渊散射的微波光子滤波器[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2014, 47(1): 55-60.
ZHANG W H, ZHANG L L, CAO Y. Microwave photons filter based on stimulated Brillouin scattering[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis*, 2014, 47(1): 55-60. (in Chinese)
- [16] 徐翌明, 潘炜, 卢冰, 等. 基于受激布里渊散射的多阻带微波光子滤波器[J]. 中国激光, 2018, 45(11): 1106004.
XU Y M, PAN W, LU B, *et al.*. Multi-stopband microwave photonic filter based on stimulated Brillouin scattering[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(11): 1106004. (in Chinese)
- [17] WANG T, XIAO J L, WU J L, *et al.*. Dual-passband microwave photonic filter based on a directly modulated microcavity laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(4): 185-188.
- [18] LI ZH K, ZHANG ZH Y, ZENG ZH, *et al.*. Tunable dual-passband microwave photonic filter with a fixed frequency interval using phase-to-intensity modulation conversion by stimulated Brillouin scattering[J]. *Applied Optics*, 2019,

- 58(8): 1961-1965.
- [19] ZENG ZH, ZHANG ZH Y, LI ZH K, *et al.*. Freely tunable dual-passband microwave photonic filter based on phase-to-intensity modulation conversion by stimulated Brillouin scattering[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(1): 5501009.
- [20] WEN H SH, LI M, LI W, *et al.*. Ultrahigh-Q and tunable single-passband microwave photonic filter based on stimulated Brillouin scattering and a fiber ring resonator[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(19): 4659-4662.
- [21] WEN H SH, XU B R, ZHAI K P, *et al.*. Ultrahigh spectral resolution single passband microwave photonic filter[J]. *Optics Express*, 2021, 29(18): 28725-28740.
- [22] KURASHIMA T, HORIGUCHI T, TATEDA M. Thermal effects of Brillouin gain spectra in single-mode fibers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1990, 2(10): 718-720.
- [23] NICATI P A, TOYAMA K, HUANG S, *et al.*. Temperature effects in a Brillouin fiber ring laser[J]. *Optics Letters*, 1993, 18(24): 2123-2125.
- [24] 刘毅, 于晋龙, 王红杰, 等. 基于反馈光纤环的可调多波长布里渊掺铒光纤激光器[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0202003.
LIU Y, YU J L, WANG H J, *et al.*. Tunable multiwavelength Brillouin-erbium fiber laser based on feedback fiber loop[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(2): 0202003. (in Chinese)
- [25] 黄海碧, 刘文杰, 孙粤辉, 等. 高超噪比宽带毫米波噪声信号光子学产生研究[J]. *中国光学*, 2022, 15(2): 251-258.
HUANG H B, LIU W J, SUN Y H, *et al.*. Photonics generation of broadband millimeter wave noise signals with high excess noise ratios[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(2): 251-258. (in Chinese)

作者简介:



游亚军(1990—), 男, 山西晋中人, 博士, 2019年于西北工业大学获得博士学位, 现为中北大学机电工程学院讲师, 主要从事铁电声光效应与微波光子器件等方面的研究。E-mail: yajunyou@nuc.edu.cn



刘毅(1984—), 男, 山西长治人, 博士, 副教授, 2014年于天津大学获得博士学位, 现为中北大学仪器与电子学院副教授, 硕士生导师, 主要从事光纤激光、光纤传感等领域基础科学问题和关键技术研究。E-mail: liuyi28@163.com