

全新布里渊散射可切换微波光子滤波器

李 涛,王宇焯,王旭东,冯新焕,关柏鸥

(暨南大学 光子技术研究所 广东省光纤传感与通信技术重点实验室,广东 广州 510623)

摘要: 提出了一个新的基于布里渊散射效应的微波光子滤波器。该滤波器可通过调谐系统中光滤波器的中心波长,实现高解析度带通滤波器与陷波滤波器之间的灵活切换,并且通过调谐产生受激布里渊散射的泵浦光的波长可实现滤波器通带或阻带的中心频率在很大频率范围内连续调谐。该滤波器为全光结构,因此具有非常大的调谐范围(调谐上限仅受限于试验中使用的矢量网络分析仪的显示频率上限)。系统中采用相位调制器,因此没有偏置电压漂移问题。实验结果展示了一个带通与陷波滤可灵活切换的高解析度微波光子滤波器,并且通带和阻带的中心频率在 9~26.5 GHz 范围内连续可调谐,其中带通滤波器的通带具有极窄 3 dB 带宽,约 28 MHz(由光纤本身布里渊增益区线宽所决定)。

关键词: 微波光子; 滤波器; 布里渊散射

中图分类号: TN911.74 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0820002

Novel switchable microwave photonic filter based on stimulated Brillouin scattering

Li Tao, Wang Yuzhuo, Wang Xudong, Feng Xinhuan, Guan Bai'ou

(Guangdong Provincial Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications, Institute of Photonics Technology, Jinan University, Guangzhou 510623, China)

Abstract: A new microwave photonic filter based on stimulated Brillouin scattering was proposed. By tuning the center wavelength of the optical filter, the switchability between the microwave photonic bandpass filter and the microwave photonic notch filter can be obtained. The passband or the notch center frequency of the microwave photonic filter can be tuned continuously by tuning the wavelength of the pump laser. Since no electrical component was involved, the microwave photonic filter was all-optical. Therefore it can achieve a very broadband operating frequency range. The maximum measured tuning frequency range in the experiment was limited by the displaying range of the vector network analyzer. Since an optical phase modulator was used, no bias voltage was needed. Therefore, there was no bias voltage drift problem. Experimental results demonstrate a switchable and continuously tunable microwave photonic filter with a broadband operating frequency range from 9–26.5 GHz. The bandpass filter has a narrow 3 dB bandwidth up to 28 MHz, which is limited by the optical fiber Brillouin gain linewidth.

Key words: microwave photonic; filter; stimulated Brillouin scattering

收稿日期:2015-12-05; 修订日期:2016-01-17

基金项目:国家自然科学基金(61475065,61501205);广东省自然科学基金(2014A030310419,2015A030313322)

作者简介:李涛(1989-),男,硕士生,主要从事微波光子信号处理技术方面的研究。Email:hologra_lee@163.com

通讯作者:王旭东(1983-),男,讲师,博士,主要从事微波光子信号处理技术方面的研究。Email:txudong.wang@email.jnu.edu.cn

导师简介:冯新焕(1974-),女,教授,博士,主要从事光纤有源、无源器件、微波光子信号处理技术方面的研究。

Email:exhfeng@gmail.com

0 引言

微波光子信号处理技术是指将微波信号调制到光域上进行处理的技术, 因为其具有极高的时间带宽积容量和天然的抗电磁干扰特性, 近年来受到越来越多的关注^[1]。

微波光子滤波器是在光域上实现微波信号的滤波处理, 是微波光子技术中的一种非常重要的应用。许多微波光子滤波器技术已经被提出^[2-4], 这些技术在高频宽带信号处理上有着天然的优势。另外, 微波光子滤波器与传统电学滤波器相比, 如 RC 滤波器、LC 滤波器、微带线滤波器等, 其可重构性有着巨大提高。在设计微波光子滤波器时, 如何提高滤波器的解析度是一个重要的挑战。光纤中的布里渊散射 (Stimulated Brillouin Scattering, SBS) 因其带宽极窄的增益和损耗光谱, 已在光纤传感等领域中得到广泛应用^[5-7], 可被应用于实现高解析度的微波光子滤波器中。许多基于布里渊散射的微波光子滤波技术已经被提出^[8-13]。然而在这些技术中, 往往只能实现单一的高解析度带通或者陷波滤波器。高解析度带通和陷波滤波器切换功能的实现, 将会使其在实际应用中具有更高的灵活性。参考文献[14]中提出了一种基于布里渊散射的可切换微波光子滤波器。滤波器使用双驱动马赫曾德调制器 (Dual-Drive Mach-Zehnder Modulator, DDMZM), 并且通过改变调制器的偏置电压, 实现高解析度带通与陷波滤波器间的切换。然而该系统中需要一个 90° 的耦合电桥, 电桥作为一个传统电学设备, 工作频率上限极大地限制了整个微波光子滤波器的中心频率调节范围。

文中提出了一种新型的基于布里渊散射的可切换微波光子滤波器。该滤波器具有全光结构, 因而其中心频率调谐范围不受电设备所限制, 可工作在毫米波范围内。滤波器中使用相位调制器, 因而可以避免偏置电压漂移问题。通过调节系统中可调谐光滤波器的中心波长, 可实现高解析度带通与陷波滤波器之间的切换。实验验证了一个具有 9~26.5 GHz 工作带宽、可实现高解析度带通与陷波任意切换、并且通带或阻带的中心频率任意可调谐的微波光子滤波器。

1 拓扑结构与工作原理

新型微波光子滤波器的拓扑结构图如图 1 所

示。一个输出波长为 λ_1 的连续光激光器作为载波光源, 经过相位调制器后, 产生一个双边带相位调制信号。被调光信号经过一个光滤波器和一个光隔离器后, 进入一段光纤中, 并由光环行器的 2 口输入, 3 口输出, 最后进入光电探测器。另一个输出波长为 λ_2 的连续光激光器作为泵浦光源, 由光环行器的 1 口输入, 2 口输出, 进入到长光纤中。由于光纤的非线性, 会在泵浦光的反向产生布里渊散射。此时, 会在距离泵浦波长 λ_2 左右布里渊频移处 f_{SBS} (大约为 11 GHz), 分别产生一个布里渊增益区和一个布里渊损耗区。增益区和损耗区的线宽大约为 30 MHz。此时, 相位调制信号在增益区内的强度会发生变化, 因此, 当经过布里渊增益区和损耗区的相位调制信号进入到光电探测器中进行拍频时, 通过调节带通光滤波器的中心波长, 一个可切换为带通或者陷波的高解析度微波光子滤波器便可以实现。

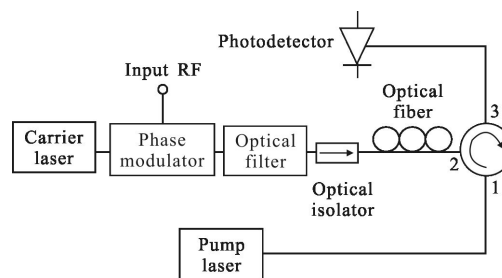


图 1 微波光子滤波器拓扑结构图

Fig.1 Topology structure of the microwave photonic filter

如图 2 所示, 当相位调制信号的载波和边带都在光带通滤波器的通带内时, 相位调制信号具有幅

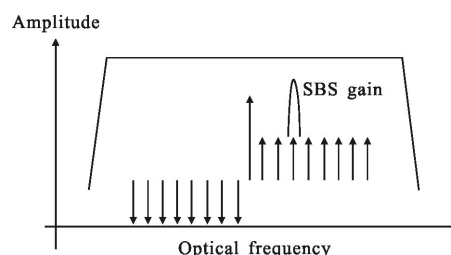


图 2 微波光子带通滤波器的光谱图

Fig.2 Optical spectrum of the microwave photonic bandpass filter

值相等、相位相反的左右两个边带。需要指出的是相位调制信号的载波与两个边带在光电探测器中分别进行拍频时, 由于右边带跟载波拍频项与载波跟左

边带拍频项的幅值相等相位相反，所以两项电场叠加相互抵消，不会产生一阶射频信号。当其中一个边带，例如右边带，通过布里渊增益区时，布里渊增益线宽内的边带会被放大。当信号在光电探测器中进行拍频时，会产生增益谱内的边带与载波的拍频项，一个高解析度的微波光子带通滤波器便会产生。

当调谐光带通滤波器的中心波长，滤掉相位调制信号的一个边带，例如右边带时，双边带的相位调制信号被转变成单边带强度调制信号，如图 3 所示。此时，单边带强度调制信号在光电探测器中只有载波与左边带的拍频项，是一个微波光子全通滤波器。当左边带通过布里渊损耗区时，布里渊损耗谱线宽内的边带幅值会被衰减，所以布里渊损耗区内的左边带与载波拍频产生信号能量极低，接近系统底噪，于是微波光子全通滤波器变为高解析度的微波光子陷波滤波器。需要指出的是，微波光子滤波器通带或阻带的中心频率取决于布里渊增益区或布里渊损耗区的位置，而增益区和损耗区的位置可通过泵浦光的波长进行调谐，所以，通过使用一台连续可调谐激光器作为泵浦光，便可对微波光子滤波器的通带和阻带的中心频率进行连续可调谐，而微波光子滤波器的可切换性是通过调谐光滤波器的中心波长来实现的。

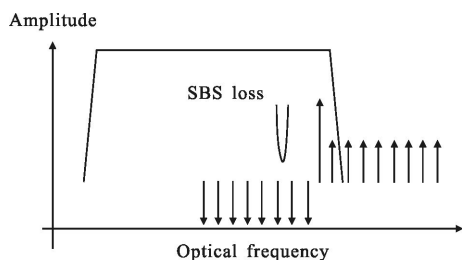


图 3 微波光子陷波滤波器的光谱图

Fig.3 Optical spectrum of the microwave photonic notch filter

2 理论分析

当相位调制信号在光滤波器的通带内，并且右边带被布里渊增益区放大时，进入到光电探测器中的电场表达式为：

$$E_B \propto E_{in} [J_0(\beta_{RF}) e^{j\omega_c t} - J_1(\beta_{RF}) e^{j(\omega_c - \omega_{RF})t} + J_1(\beta_{RF}) e^{g(f_c - f_{RF})} e^{j(\omega_c + \omega_{RF})t}] \quad (1)$$

式中： E_{in} 为输入到相位调制器中的电场强度； ω_c 和

ω_{RF} 分别为光载波和输入射频信号的角频率； $J_m(x)$ 为第一类 m 阶贝塞尔方程， $\beta_{RF} = \pi V_{RF} / V_\pi$ 为射频信号的调制系数； V_{RF} 为输入射频信号的电压幅值； V_π 为相位调制器的切换电压； L 为用来产生布里渊散射的光纤长度。布里渊增益谱的表达式为：

$$g(f_c + f_{RF}) = \frac{g_0 I}{2} \frac{(\gamma_B/2)^2}{(-f_p + f_c + f_{SBS} + f_{RF})^2 + (\gamma_B/2)^2} + \frac{jg_0 I}{4} \frac{\gamma_B(-f_p + f_{SBS} + f_{RF} + f_c)^2}{(-f_p + f_c + f_{SBS} + f_{RF})^2 + (\gamma_B/2)^2} \quad (2)$$

式中： f_p 和 I 分别为泵浦光的频率和强度； g_0 和 γ_B 分别为光纤中心增益系数和布里渊线宽。通过计算输出光能量中射频信号一阶频率项，可得出最终微波光子带通滤波器的传输方程为：

$$H(f_{RF}) \propto [G(f_{RF}) - 1]^2 \quad (3)$$

其中

$$G(f_{RF}) = e^{\frac{g_0 I L}{2} \frac{(\gamma_B/2)^2}{(-f_p + f_c + f_{SBS} + f_{RF})^2 + (\gamma_B/2)^2}} \quad (4)$$

由公式(3)可看出，此时微波光子滤波器为带通滤波器。

当光滤波器滤掉双边带相位调制信号的右边带时，相位调制信号转变为单边带强度调制信号。当左边带在布里渊损耗区衰减时，进入到光电探测器中的电场表达式为：

$$E_B \propto E_{in} [J_0(\beta_{RF}) e^{j\omega_c t} - J_1(\beta_{RF}) e^{\alpha(f_c - f_{RF})} e^{j(\omega_c - \omega_{RF})t}] \quad (5)$$

其中布里渊损耗谱的表达式为：

$$\alpha(f_c - f_{RF}) = -\frac{g_0 I}{2} \frac{(\gamma_B/2)^2}{(-f_p + f_c - f_{SBS} - f_{RF})^2 + (\gamma_B/2)^2} - \frac{jg_0 I}{4} \frac{\gamma_B(-f_p - f_{SBS} - f_{RF} + f_c)^2}{(-f_p + f_c - f_{SBS} - f_{RF})^2 + (\gamma_B/2)^2} \quad (6)$$

此时，微波光子滤波器的传输方程为：

$$H(f_{RF}) \propto [A(f_{RF})]^2 \quad (7)$$

其中

$$A(f_{RF}) = e^{-\frac{g_0 I L}{2} \frac{(\gamma_B/2)^2}{(-f_p + f_c - f_{SBS} - f_{RF})^2 + (\gamma_B/2)^2}} \quad (8)$$

由公式(7)可看出，此时微波光子滤波器为陷波滤波器。

3 实验结果

根据图1的拓扑结构，设计了基于布里渊散射的可切换微波光子滤波器的实验。实验中使用两台同一型号的窄线宽可调谐激光器分别作为正向载波光源和反向泵浦光源，从而尽可能地使载波光源和

泵浦光源具有同样的谱形以及相位特性。其中光载波的波长为 1 550 nm。光载波经过一个偏振控制器后进入一个 40 GHz 带宽的相位调制器。偏振控制器用来控制光载波进入调制器的偏振态, 确保相位调制器工作在最大效率。泵浦光由环形器的 1 口输入, 2 口输出, 进入一段高非线性色散位移光纤, 产生布里渊增益区和损耗区。相位调制信号的边带在布里渊增益区被放大或在布里渊损耗区被衰减后, 输入到 50 GHz 带宽的光电探测器中, 最终由一台 26.5 GHz 带宽的网络分析仪显示输出信号的频率响应。

首先, 调谐光滤波器的中心波长, 使调制器在双边带相位调制的工作状态下。调谐泵浦光的波长, 使泵浦光波长为 1 549.851 nm 时, 布里渊的增益区落在相位调制信号的右边带上, 此时得到了一个高解析度的微波光子带通滤波器, 滤波器的中心频率由泵浦光(1 549.851 nm)和载波(1 550 nm)的频率差以及光纤本身布里渊频移量(10.7 GHz)决定, 为 9.01 GHz, 如图 4(a)所示。从图 4(a)中还可以看出, 当泵浦光

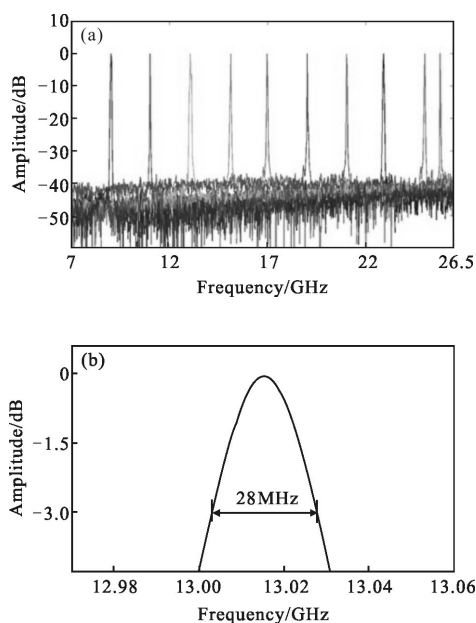


图 4 (a)微波光子带通滤波器的频率响应,(b)通带 3 dB 带宽

Fig.4 (a) Frequency response of the microwave photonic bandpass filter, (b) 3 dB bandwidth of the passband

波长从 1 549.851 nm 分别调谐到 1 549.835、1 549.819、1 549.803、1 549.787、1 549.771、1 549.755、1 549.739、1 549.723、1 549.715 nm 时, 带通滤波器的中心频率由 9.01 GHz 分别改变为 11、13.02、15.11、16.97、19.02、

21.02、22.9、25.01、25.8 GHz。在调谐过程中, 带通滤波器的抑制比始终可以保持在 40 dB 以上。由于泵浦光的波长可在 1 530~1 565 nm 范围内连续调谐, 所以带通滤波器的中心频率也能在 9~26.5 GHz 范围内连续调谐。图 4(b)显示了带通滤波器的 3 dB 带宽为 28 MHz, 与光纤的布里渊增益谱线宽一致。

之后, 调谐光滤波器的中心波长, 滤掉相位调制信号的右边带, 使调制器在单边带强度调制的工作状态下。由于光滤波器强度响应下降沿的倾斜度有限, 很难滤掉低频的右边带。实验发现当输入射频信号大于 9 GHz 时, 调制器具有理想的单边带调制工作状态。适当的调谐泵浦光的波长, 使布里渊的损耗区落在调制信号的左边带上, 此时便得到了一个高解析度的微波光子陷波滤波器, 如图 5 所示。陷波频率同样可以通过调谐泵浦光的波长进行连续调谐。在调谐过程中, 陷波滤波器的通带波动小于 1 dB, 陷波深度大于 40 dB。

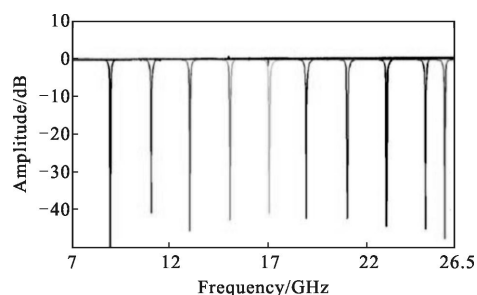


图 5 微波光子陷波滤波器的频率响应

Fig.5 Frequency response of the microwave photonic notch filter

4 结 论

文中提出一个新颖的基于布里渊散射的微波光子滤波器。通过调谐光滤波器的中心波长, 可以实现高解析度带通滤波器与陷波滤波器之间的切换, 同时通带与阻带的中心频率可连续调谐。文中给出了详细的工作原理与完整的理论分析。最后实验验证了一个中心频率调谐范围为 9~26.5 GHz, 3 dB 带宽 28 MHz (切换为带通滤波器情况下), 抑制比大于 40 dB 可实现带通与陷波灵活切换的超高解析度微波光子滤波器, 且该滤波器通带或阻带中心频率连续可调谐, 其中中心频率调节范围的下限受限于试验中所使用的光学滤波器的边沿边缘形状, 上限由实验所使用矢量网络分析仪显示范围决定, 3 dB 带

宽由光纤本身布里渊增益区形状决定, 随着动态布里渊光栅等技术的提出与发展这一指标还有着很大的改进空间。

参考文献:

- [1] Minasian R, Chan E, Yi Xiaoke. Microwave photonic signal processing [J]. *Optics Express*, 2013, 21(19): 22918–22936.
- [2] Zhang Baoge, Li Biqu, Lu Yan. Asymmetric Mach-Zehnder interleave with different output spectral bandwidths [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18 (10): 2150–2156. (in Chinese)
章宝歌, 李碧琦, 鲁彦. 非对称马赫-曾德尔干涉仪型不等宽带光学梳状滤波器 [J]. 光学 精密工程, 2010, 18(10): 2150–2156.
- [3] Zhang Chunlei, Xiang Yang, Yu Changsong. Development of pinhole filter in high precision interferometer [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 952–957. (in Chinese)
张春雷, 向阳, 于长淞. 高精度干涉仪针孔空间滤波器研制[J]. 中国光学, 2013, 6(6): 952–957.
- [4] Wang Wei, Zhang Aihua, Yang Keng, et al. Design of ultra-compact microwave photonic filter based on SOI microring resonators [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42 (8): 2162–2166. (in Chinese)
王巍, 张爱华, 杨铿, 等. 基于微环谐振器的超紧凑微波光子滤波器设计[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(8): 2162–2166.
- [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): 487–493. (in Chinese)
朱永祥, 陆启生. 受激布里渊散射中 Stokes 光的反 Stokes 散射与慢光效应 [J]. 光学 精密工程, 2011, 19 (2): 487–493.
- [6] Liang Hao, Zhang Xuping, Lu Yuangang. Design and implementation of spontaneous Brillouin scattering based double-trace distributed optical fiber sensor [J]. *Chinese Optics*, 2009, 2(1): 60–64. (in Chinese)
梁浩, 张旭苹, 路元刚. 基于自发布里渊散射的双路分布式光纤传感器设计与实现[J]. 中国光学, 2009, 2(1): 60–64.
- [7] Huang Minshuang, Huang Junfen. Brillouin ring frequency shifter based on photonic crystal fiber [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2125–2129. (in Chinese)
黄民双, 黄军芬. 布里渊光子晶体光纤环形移频器 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 2125–2129.
- [8] Zhang Weiwei, Minasian R. Ultrawide tunable microwave photonic notch filter based on stimulated Brillouin scattering [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, 25(8): 2168–2174.
- [9] Marpaung D, Morrison B, Pant R, et al. Frequency agile microwave photonic notch filter with anomalously high stopband rejection [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(21): 4300–4303.
- [10] Zadok A, Eyal A, Tur M. Gigahertz-wide optically reconfigurable filters using stimulated Brillouin scattering [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(1): 2168–2174.
- [11] Li Wei, Wang Lixian, Zhu Ninghua. All-optical microwave photonic single-passband filter based on polarization control through stimulated Brillouin scattering [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(4): 5501411.
- [12] Vidal B, Piqueras M, Marti J. Tunable and reconfigurable photonic microwave filter based on stimulated Brillouin scattering [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(1): 23–25.
- [13] Zhang Weiwei, Minasian R. Widely tunable single-passband microwave photonic filter based on stimulated Brillouin scattering [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23 (23): 1775–1777.
- [14] Zhang Weiwei, Minasian R. Switchable and tunable microwave photonic Brillouin-based filter [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4(5): 1443–1445.