

基于受激布里渊散射的多阻带微波光子滤波器

徐翌明*, 潘炜, 卢冰, 于歌

西南交通大学信息科学与技术学院, 四川 成都 611756

摘要 基于受激布里渊散射效应,设计并实现了一种非周期性多阻带微波光子滤波器。采用可编程射频信号驱动电光调制器,产生可变多音抽运光,实现光边带多频同时处理。阻带个数、阻带中心频率和阻带带外抑制比均由射频信号调控。实验结果表明,该微波光子滤波器频谱响应呈非周期性,各阻带中心频率互不相干且与阻带个数无关,并可在 2~8 GHz 范围内独立调谐。阻带带外抑制比最大为 49 dB。

关键词 光通信; 滤波器; 受激布里渊散射; 微波光子滤波器; 可变阻带

中图分类号 TN29

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1106004

Multi-Stopband Microwave Photonic Filter Based on Stimulated Brillouin Scattering

Xu Yiming*, Pan Wei, Lu Bing, Yu Ge

College of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 611756, China

Abstract Based on the stimulated Brillouin scattering, a variable multi-stopband microwave photonic filter with aperiodic spectral response is designed and experimentally demonstrated. Variable multi-tone pump light is generated and the multi-frequency optical sideband is simultaneously processed by the usage of a programmable electrooptic modulator driven by the radio-frequency signal. The number of stopbands, central frequencies of stopbands and out-of-band rejections of stopbands are controlled by the radio-frequency signal. As the experimental result shows, the spectral response of this microwave photonic filter is aperiodic, and the central frequencies of all stopbands are mutually uncorrelated and irrelevant with the number of stopbands, which can be tuned within 2 GHz to 8 GHz independently. The maximum out-of-band rejection can reach to 49 dB.

Key words optical communications; filter; stimulated Brillouin scattering; microwave photonic filter; variable stopband

OCIS codes 060.4510; 120.2440; 290.5900

1 引言

在雷达通信、无线通信和电子对抗等领域的复杂环境中^[1],微波通信信号往往包含数量较多且频率不同的杂波分量^[2]。为同时完整地提升通信频段内的通信质量,可采用频率可调谐的多阻带微波光子滤波器(MPF)对通信信号进行滤波选频处理^[3-4]。

为实现可调谐多阻带 MPF,Ge 等^[5]提出采用 Lyot 环实现多通道 MPF,其相邻通带之间存在阻

带滤波特性。Xu 等^[6]采用偏振正交光和谐振环结构结合的方式实现多通道 MPF,其频谱响应可在多通带和多阻带间切换。Nickel 等^[7]基于时延 MPF 实现原理,采用纤芯偏移的少模光纤实现多阻带 MPF。基于时延原理的 MPF^[8]易于实现多阻带频谱响应,但各阻带中心频率呈周期性,调谐单一阻带中心频率难度较大^[9],在抑制杂波的同时可能会损耗通信频段的信号强度。现有文献对各阻带频率任意可变的 MPF 的介绍较少。

本文设计了一种具有非周期性频谱的多阻带

收稿日期: 2018-06-01; **修回日期:** 2018-06-21; **录用日期:** 2018-07-06

基金项目: 国家 863 计划(2015AA016903)、国家自然科学基金(61775185,61405165)、四川省国际科技合作重点项目(2018HH0002)

* **E-mail:** yimingxu_2018@163.com

MPF。采用频率、幅度、分量个数同时可变的多音抽运光产生多组布里渊增益谱和损耗谱,同时作用于类单边带探测光的一阶边带^[10],实现了各阻带中心频率在 2~8 GHz 范围内独立调谐的 MPF。该 MPF 的阻带带外抑制比最大为 49 dB,阻带个数在 1~4 范围内可变。

2 系统模型及原理

2.1 系统模型

图 1 为 MPF 系统结构示意图,该系统主要包含两个光信号产生部分。一部分用以产生受激布里渊散射(SBS)抽运光:抽运光源(PLD)产生的连续光波被送入马赫-曾德尔调制器(MZM),此过程被称为多音射频(RF)信号调制。经调制后的信号输入光环形器(OC)作为抽运光。另一部分用以产生受到 SBS 抽运调制的探测光:探测信号光源(SLD)产生与 PLD 输出光相同频率的连续光波,该光波被送入双驱动马赫-曾德尔调制器(DDMZM),受到待滤波处理的微波信号调制。经调制后的信号作为探测光输入高非线性光纤(HNLF)。由光电探测器(PD)得到滤波处理后的微波信号。

2.2 非周期多阻带实现原理

基于相干光 MPF 的实现原理^[11],采用多音 RF

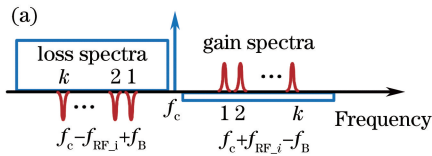


图 2 基于 SBS 效应的多阻带 MPF 原理图。(a)多频抽运;(b)基于 SBS 的多阻带频率响应

Fig. 2 Principle diagram of multiple stopbands MPF based on SBS. (a) Multi-frequency pump;

(b) spectral response with multi-stopband based on SBS

2.3 阻带带外抑制比可变原理

受到 SBS 效应影响,当探测光的负一阶边带和正一阶边带的幅度差距较大时,阻带带外抑制比减小^[15],当二者的幅度趋于相同时,阻带带外抑制比则趋近于极大值^[14]。通过改变 SBS 中增益谱和损耗谱对探测光幅值的变化量,实现阻带带外抑制比可控。当 SBS 效应未饱和时,探测光功率与抽运光功率之间呈指数正相关^[16],其关系可表示为

$$P_s(z) = P_s(0) \exp(\eta_{\text{SBS}} \gamma P_p - \alpha z), \quad (2)$$

式中: P_s 为探测光的功率; z 为探测光在光纤内传输的距离; η_{SBS} 为布里渊系数; γ 为布里渊增益系数;

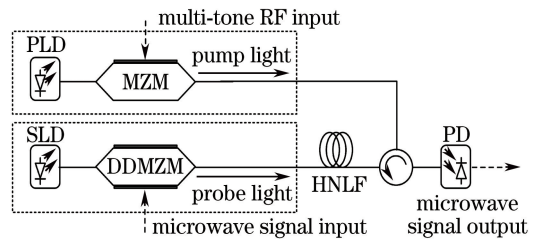


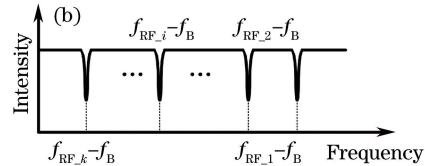
图 1 MPF 系统结构示意图

Fig. 1 Schematic of MPF structure

信号产生多频谱分量 SBS 抽运信号,实现非周期多阻带 MPF。该 MPF 的原理如图 2 所示,频率为 f_c 的光载波受到频率为 $f_{\text{RF},i}$ ($i=1,2,\dots,k$) 的多音 RF 信号调制,产生具有 k 组正负一阶边带的抑制载波的双边带(CS-DSB)抽运光^[12],当 $f_{\text{RF},i}$ 小于布里渊频移 f_B 时,CS-DSB 信号作为 SBS 抽运光在近载波处产生 k 对 SBS 增益谱和损耗谱^[13],如图 2(a)中的红色曲线所示。频率同为 f_c 的另一束光载波,被扫频微波信号调制,产生类单边带信号(QSSB),如图 2(a)中的蓝线所示。QSSB 与抽运光发生 SBS 效应后可得图 2(b)中的包含 k 个阻带的频谱响应。 $f_{\text{RF},i}$ 和对应阻带中心频率 $f_{N,i}$ 满足

$$f_{\text{RF},i} = f_B - f_{N,i}. \quad (1)$$

各阻带中心频率由一对关于 f_c 频率对称的抽运信号决定,即由一个 RF 分量的频率决定,与其他 RF 分量无关,各阻带中心频率之间无周期性关系。



P_p 为抽运光功率; α 为光纤引入的功率损耗。本文方案中抽运光为 MZM 输出信号的一阶边带,其功率 P_p 受到 RF 信号的电压调控^[16],可表示为

$$P_p = |E_p|^2 = r^2 J_1^2 \left(\pi \frac{V_{\text{RF},i}}{V_\pi} \right), \quad (3)$$

式中: E_p 为一阶边带幅度; r 为 MZM 的耦合系数; $J_1(\cdot)$ 为一阶第一类贝塞尔函数; $V_{\text{RF},i}$ ($i=1,2,\dots,k$) 为第 i 个射频分量的电压; V_π 为 MZM 的半波电压。调节 RF 信号的功率使 CS-DSB 信号中一阶边带的幅度发生改变^[17],从而抽运光的功率也随之改变,最终实现阻带带外抑制比 R_i 可调,其关系可表示为

$$R_i = 10 \lg \left[\frac{E_c \exp(-\alpha z) \times E_{\text{upper}} - E_{\text{lower}}}{E_{\text{upper}} \exp(\gamma_{\text{SBS}} \gamma_- \cdot P_p) - E_{\text{lower}} \exp(\gamma_{\text{SBS}} \gamma_+ \cdot P_p)} \right], \quad (4)$$

式中： E_c 、 E_{upper} 和 E_{lower} 分别为 DDMZM 输出的零阶、正一阶和负一阶边带的幅度^[18]； γ_- 和 γ_+ 分别为布里渊损耗、增益系数。因改变 DDMZM 的偏置电压将同时引起所有阻带带外抑制比的改变，故本方案采用 RF 功率调控单个阻带带外抑制比，以 SBS 的阈值条件限制 MZM 输出信号中高阶边带引入的抽运增益，进一步避免各阻带间的频率发生周期性变化。

3 实验结果与分析

采用可编程 RF 信号，分别观测当 RF 信号参数改变时各阻带的变化规律，具体实验包含两部分。第一部分分析频谱响应的周期性：通过增加 RF 信号中包含的频谱分量个数，改变 RF 信号中单一分量的频率，得到各阻带中心频率与对应 RF 分量频率的关系。第二部分观测阻带带外抑制比变化规律：通过保持 DDMZM 的偏置电压不变，改变 RF 分量功率，观察阻带带外抑制比变化。

3.1 非周期性多阻带实验

搭建如图 3 实验结构，采用单个可调谐激光器产生功率为 12.3 dBm，频率为 193.5 THz 的连续光波。连续光经 3 dB 耦合器分为两路。一路光波送入 MZM，被任意波形发生器(AWG)和射频放大器(EA)共同产生的 RF 信号调制，并经掺铒光纤放大器(EDFA)放大，使所有一阶边带功率满足 SBS 阈值的 CS-DSB 信号经 EDFA 放大后的光作为抽运光输入光环行器(OC) 1 口。另一路光波送入 DDMZM，被微波信号调制，产生 QSSB 信号，作为探测光经光隔离器(ISO)于 HNLf 中发生 SBS 效应。最后，PD 还原滤波处理后的微波信号。原微波信号由矢量网络分析仪(VNA)产生。90°混合耦合器将 VNA 产生的微波信号分为相位正交的两路，分别送入 DDMZM 的两个射频输入端口。两个偏振控制器(PC1, PC2)分别用于调节输入 MZM 和 DDMZM 输入光波的偏振，使调制信号功率最大。偏振控制器(PC3)用于调节抽运光和信号光之间的偏振关系，使 SBS 效应最显著。

实验中 f_B 为 9.06 GHz。因 AWG 在输出多音 RF 信号时，RF 信号频率被限制在 0~12 GHz 的范

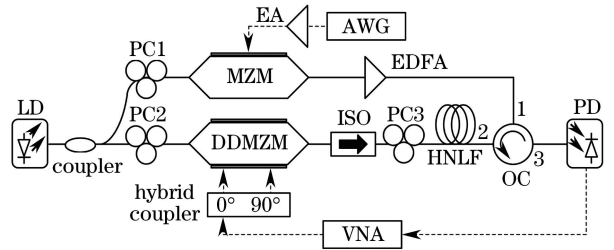


图 3 多阻带 MPF 实验结构示意图

Fig. 3 Experimental structure of multi-stopband MPF

围内，故采用(1)式的抽运方式，使阻带中心频率调谐范围最大值由 2.94 GHz 提升为 9.06 GHz。

AWG 输出的单频 RF 信号频率 f_{RF} 为 4.5 GHz 时，通过 VNA 观测得到如图 4(a) 的 MPF 频谱响应，其中阻带中心频率为 4.56 GHz，阻带带外抑制比为 48.5 dB，阻带的 6 dB 带宽约为 32.9 MHz。当 RF 信号中依次增加频率为 5.0, 5.5, 4.0 GHz 的频率分量时，可分别在图 4(a)~(c) 的基础上，增加中心频率为 4.06, 3.56, 5.06 GHz 的阻带，得如图 4(b)~(d) 所示频谱响应。结果表明，MPF 的阻带个数和 RF 信号中包含的频谱分量个数成正比。对阻带进行测量，相关结果如表 1 所示，可得阻带中心频率由对应 RF 分量频率决定，二者满足(1)式关系。且阻带的 6 dB 带宽均约为 33 MHz，与阻带个数、阻带中心频率无关。阻带谱线形状呈洛伦兹线型。

改变 AWG 的输出，产生双频谱分量 RF 信号。其中一个分量的频率保持 4.5 GHz，另一个分量的频率从 7.0~1.0 GHz 递减，得到如图 5 所示结果，阻带频率 f_{N-1} 和 f_{N-2} ，阻带抑制比 R_1 和 R_2 ，阻带的 6 dB 带宽 $f_{6\text{dB},1}$ 和 $f_{6\text{dB},2}$ 的测量结果见表 2。

图 5 和表 2 结果表明，当一个阻带的中心频率保持 4.56 GHz 不变时，另一个阻带的中心频率在 2.06~8.06 GHz 的范围内递增。两个阻带的中心频率互相独立，对单一阻带的中心频率调谐不影响另一个阻带的中心频率。阻带中心频率与阻带个数无关，可在 2~8 GHz 范围内任意调谐。RF 分量频率和阻带中心频率满足(1)式，将阻带中心频率调谐范围由 0~2.94 GHz 提升至 2~8 GHz^[19] 时，阻带带外抑制比均约为 33 dB，基本保持不变，进一步证明各阻带的滤波特性与阻带中心频率无关。

3.2 阻带带外抑制比可调实验

AWG 输出 4 频谱分量 RF 信号，频率分别为 4.0, 4.5, 5.0, 5.5 GHz，初始功率均设定为 -3 dBm，获得如图 6(a) 所示的 MPF 频谱响应。因 AWG 是

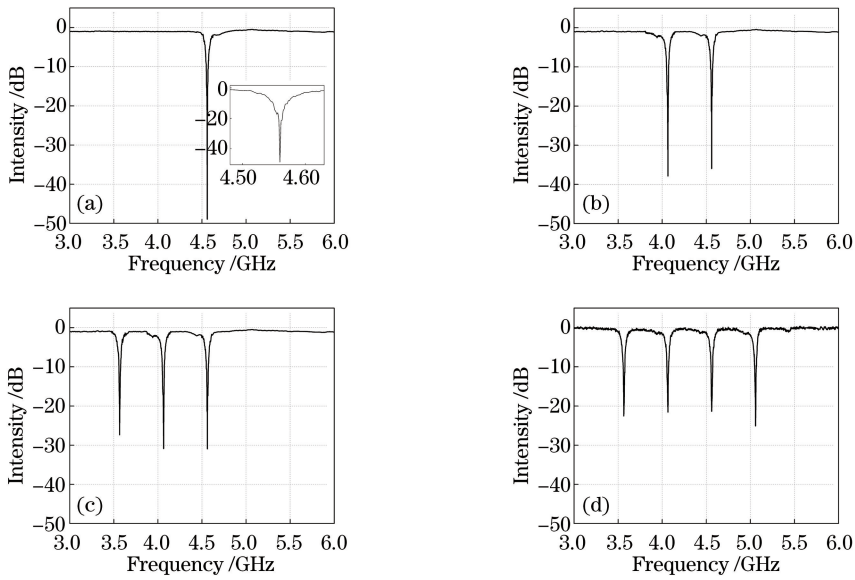


图 4 不同 RF 信号对应的系统频率响应。(a)单阻带;(b)二阻带;(c)三阻带;(d)四阻带

Fig. 4 System frequency responses with different RF signals. (a) Single stopband; (b) two stopbands; (c) three stopbands; (d) four stopbands

表 1 不同的射频信号产生的阻带

Table 1 Stopbands with different radio frequency signals

Number of stopbands	Component frequency /GHz	Stopband central frequency /GHz	Stopband rejection ratio /dB	Stopband 6 dB bandwidth /MHz
1	4.5	4.56	48.5	33.0
2	4.5	4.56	37.9	33.0
	5.0	4.06	35.9	33.0
3	4.5	4.56	30.9	32.9
	5.0	4.06	30.9	33.0
	5.5	3.56	27.4	32.9
4	4.0	5.06	25.1	32.9
	4.5	4.56	21.4	32.9
	5.0	4.06	21.6	32.6
	5.5	3.56	22.6	32.7

表 2 双 RF 信号频率改变时 MPF 的阻带

Table 2 MPF stopbands when two radio frequency components are changed

f_1 /GHz	f_{N_1} /GHz	$f_{6\text{dB}_1}$ /GHz	R_1 /dB	f_2 /GHz	f_{N_2} /GHz	$f_{6\text{dB}_2}$ /GHz	R_2 /dB
4.5	4.56	33.3	23.9	7.0	2.06	33.5	33.4
4.5	4.56	33.3	24.3	6.0	3.06	32.6	28.4
4.5	4.56	33.3	23.9	5.0	4.06	33.8	38.8
4.5	4.56	33.4	26.1	3.5	5.56	33.3	30.8
4.5	4.56	33.3	23.9	2.5	6.56	33.3	37.9
4.5	4.56	33.4	27.1	1.0	8.06	33.3	34.9

基于倍频原理产生多音信号,各个频率分量的功率相互影响,实际输出值和设定值间存在差异,且不同频段处的系统误差不同,故 4 个阻带的带外抑制比存在明显差异。在图 6(a)的基础上,将 5.5 GHz 分量的功率设定为 -2.5 dBm,得如图 6(b)所示频谱

响应。与图 6(a)相比,中心频率为 3.56 GHz 的阻带带外抑制比明显提升,其余阻带的带外抑制比均有不同程度的改变。分别基于图 6(b),将频率为 5.0 和 4.5 GHz 的 RF 分量的功率设定为 -2.5 dBm,得到图 5(c)和(d),相关数据见表 3。随

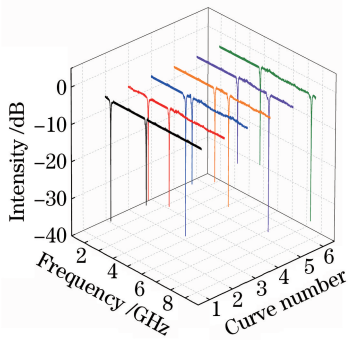


图 5 双阻带频率调谐性

Fig. 5 Frequency-tunability of double stopbands

随着 RF 分量功率提升, 对应阻带带外抑制比提升, 其余阻带带外抑制比总体呈下降趋势。

图 6 和表 3 结果表明, RF 信号功率增加导致 CS-DSB 信号的边带功率提升, 增大了抽运光功率, 从而提升了抽运增益, 减小了光边带幅值差^[20], 即调谐 RF 信号的功率可改变阻带带外抑制比。由此可知, 探测光中受到增益的负一阶边带的功率低于受到抑制的正一阶边带的功率, 故阻带带外抑制比与对应 RF 信号功率在实验中呈正相关。受限于 AWG 输出信号的总功率, 若仅改变 AWG 的设定值, 提升单个 RF 分量的功率, 将导致其余 RF 分量的功率下降, 从而使其余阻带带外抑制比下降。结合图 4 中的结果表明, 当 AWG 输出的 RF 分量个数增加时, 输出功率逐渐达到极值, 单个分量的功率逐渐降低, 表现为阻带带外抑制比与阻带个数呈负相关。

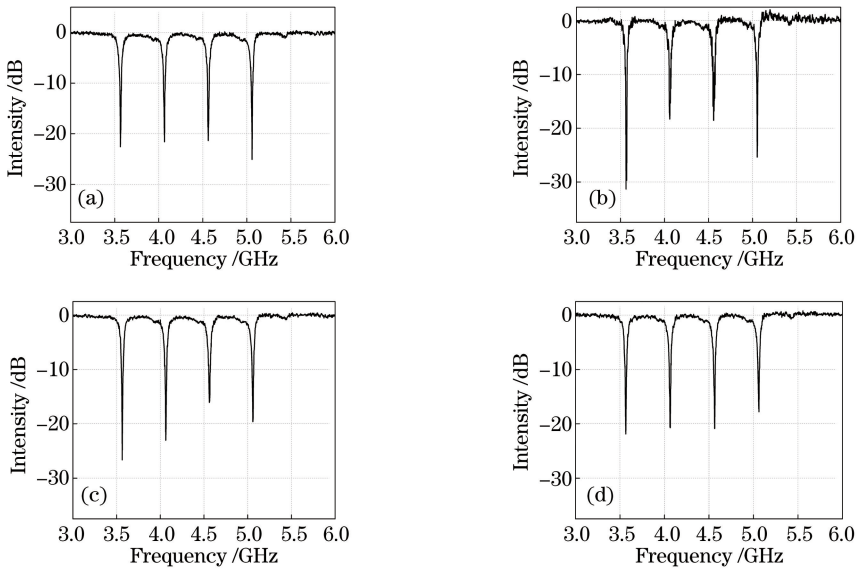


图 6 不同 RF 功率时的系统频率响应。(a) 初始频谱响应; (b) 仅提升 5.5 GHz RF 分量功率时的频谱响应; (c) 仅提升 5.0 GHz RF 分量功率时的频谱响应; (d) 仅提升 4.5 GHz RF 分量功率时的频谱响应

Fig. 6 MPF spectral responses with different powers of RF tones. (a) Original MPF spectral response; (b) spectral response only when the power of 5.5 GHz RF signal is amplified; (c) spectral response only when the power of 5.0 GHz RF signal is amplified; (d) spectral response only when the power of 4.5 GHz RF signal is amplified

表 3 不同 RF 功率时的阻带带外抑制比

Table 3 Out-of-band rejections based on different powers of RF tones

Power	Out-of-band rejection of stopband /GHz			
	Stopband 1	Stopband 2	Stopband 3	Stopband 4
For Fig. 6(a)	20.95	26.54	21.31	27.87
For Fig. 6(b)	31.32	18.30	18.55	25.36
For Fig. 6(c)	26.68	23.02	16.01	19.59
For Fig. 6(d)	21.87	20.71	20.86	17.79

为进一步探究 RF 功率和阻带带外抑制比的关系, 引入额外的射频功率放大设备增加 RF 信号功率。EA 引入增益分别为 18.0 dB、18.5 dB、19.0 dB 和 19.5 dB 时, 获得如图 7 所示的频谱响应, 相关数

据见表 4。EA 功率增益的增加使 MPF 各阻带带外抑制比均有不同程度的提升, 最大可达约 49 dB。MZM 调制信号的高阶边带受 SBS 阈值条件限制^[21], 不发生 SBS 效应。

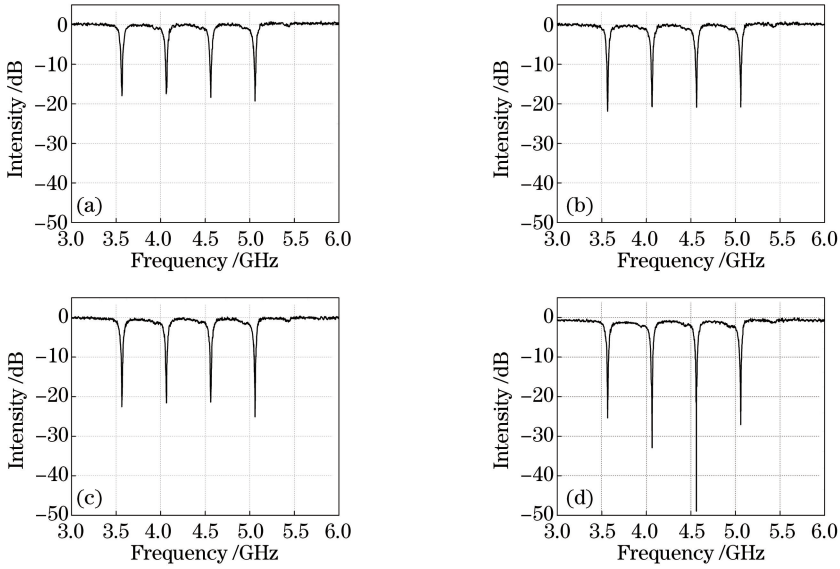


图 7 当 EA 功率增益为(a) 18.0 dB;(b) 18.5 dB;(c) 19.0 dB;(d) 19.5 dB 时系统的频率响应

Fig. 7 System spectral responses when EA gain is (a) 18.0 dB; (b) 18.5 dB; (c) 19.0 dB; (d) 19.5 dB

表 4 EA 功率增益不同时 MPF 的阻带带外抑制比

Table 4 Out-of-band rejections based on different EA power gains

EA gain /dB	Out-of-band rejection of stopband /GHz			
	Stopband 1	Stopband 2	Stopband 3	Stopband 4
18.0	17.95	17.46	18.34	19.27
18.5	21.86	20.72	20.86	20.79
19.0	22.56	21.58	21.37	25.08
19.5	25.36	32.89	48.95	27.06

图 7 和表 4 结果表明,同时提升 4 个 RF 分量功率会导致对应的 8 个抽运分量的功率同时增加,使 SBS 效应在 4 个近载波频段上对探测光增益和损耗的影响更明显。当光边带幅值趋于相等时,4 个阻带带外抑制比同时增大。进一步证实,当受到 SBS 效应的负一阶边带的功率低于对应正一阶边带的功率时,阻带的带外抑制比与对应 RF 信号的功率呈正相关。

4 结 论

基于 SBS 效应,设计并通过实验实现了一种非周期性可变多阻带 MPF。实验结果表明,该 MPF 频谱响应由 RF 信号调控,阻带个数与 RF 频率分量个数呈正比,可在 1~4 个的范围内调控。阻带中心频率与对应 RF 分量的频率呈负相关,可在 2~8 GHz 的范围调谐,各阻带中心频率互不相干且不受阻带个数影响。阻带带外抑制比与对应 RF 分量的功率呈正相关,最大阻带带外抑制比为 49 dB。阻带的 6 dB 带宽保持约 33 MHz。所研制的 MPF

可用于同时抑制复杂环境信号的多频窄带。

参 考 文 献

[1] Gopalan. Introduction to radar systems [M]. New York: McGraw-Hill, 1980: 1-5.

[2] Bogdan G, Radu V, Octavian F, *et al.* Design of multi-band microwave filter with asymmetric polygonal microstrip loops [C] // International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence, June 30-July 2, 2016, Ploiesti, Romania. New York: IEEE, 2016: 1-5.

[3] Yu Y, Li S, Zheng X, *et al.* Sidelobe suppression analysis of microwave photonic filter based on spectrum-shaped optical frequency combs [J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(6): 060601.

[4] 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.

- [5] Ge J, Feng H, Scott G, *et al.* High-speed tunable microwave photonic notch filter based on phase modulator incorporated Lyot filter [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(1): 48-51.
- [6] Xu E M, Pan S L, Li P L. Reconfigurable microwave photonic filter based on polarization modulation [J]. *Optical Engineering*, 2015, 55(3): 031120.
- [7] Nickel D V, Villarruel C, Koo K, *et al.* Few mode fiber-based microwave photonic finite impulse response filters [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(23): 5230-5236.
- [8] Wu R, Chen H, Zhang S, *et al.* A tunable multi-passband microwave photonic filter [C] // International Conference on Optical Communications and Networks, September 24-27, 2016, Hangzhou, China. New York: IEEE, 2017: 1-3.
- [9] Capmany J, Ortega B, Pastor D. A tutorial on microwave photonic filters [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(1): 201-229.
- [10] Zhang W, Minasian R A. Switchable and tunable microwave photonic Brillouin-based filter [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4(5): 1443-1455.
- [11] Minasian R A. Photonic signal processing of microwave signals [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, 2006, 54(2): 832-846.
- [12] Choudhary A, Aryanfar I, Shahnia S, *et al.* Tailoring of the Brillouin gain for on-chip widely tunable and reconfigurable broadband microwave photonic filters [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(3): 436-439.
- [13] Hu S, Li L, Yi X, *et al.* Tunable dual-passband microwave photonic filter based on stimulated Brillouin scattering [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(3): 330-333.
- [14] 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.
- [15] Han X, Yao J. Bandstop-to-bandpass microwave photonic filter using a phase-shifted fiber Bragg grating [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(24): 5133-5139.
- [16] Tang H, Yu Y, Zhang C, *et al.* Analysis of performance optimization for a microwave photonic filter based on stimulated Brillouin scattering [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(20): 4375-4383.
- [17] Bai G F, Hu L, Jiang Y, *et al.* Versatile photonic microwave waveforms generation using a dual-parallel Mach-Zehnder modulator without other dispersive elements [J]. *Optics Communications*, 2017, 396: 134-140.
- [18] Li W, Yang C W, Wang L, *et al.* Single-notch microwave photonic filter using a nonsliced ASE source and a laser diode [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(1): 1-7.
- [19] Aryanfar I, Choudhary A, Shahnia S, *et al.* Reconfigurable microwave bandstop filter based on stimulated Brillouin scattering [C] // International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP), October 31-November 3, 2016, Long Beach, CA, USA. New York: IEEE, 2016: 118-121.
- [20] Yi L, Wei W, Jaouën Y, *et al.* Polarization-independent rectangular microwave photonic filter based on stimulated Brillouin scattering [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(2): 669-675.
- [21] Li P, Pan W, Zou X, *et al.* Flexible microwave signal generation with frequency multiplication based on tunable OEO and SBS-assisted notch filter [C] // International Conference on Optical Communications and Networks, July 3-5, 2015, Nanjing, China. New York: IEEE, 2015: 1-3.