

基于SBS的通带可变微波光子滤波器

张爱玲,纪颖,陈冰雪

(天津理工大学 教育部通信器件与技术工程研究中心,天津市薄膜电子与通信器件重点实验室,天津 300384)

摘要:提出并分析了一种大范围可调谐的通带可变微波光子滤波器。它基于受激布里渊散射(SBS)效应并使用2个调制器与1个光纤布喇格光栅生成泵浦信号。通过分别调节这2个调制器的调制频率,可得双通带滤波器和通带间隔可变的四通带滤波器,并实现滤波器中心频率的大范围连续可调谐,而在整个调谐过程中,滤波器的3 dB带宽保持不变。仿真分析了不同调制信号对滤波器通带及中心频率的影响,以及滤波器的带宽与泵浦的功率和SBS增益介质长度的关系。

关键词:微波光子滤波器;微波光子学;光信号处理;受激布里渊散射;可变通带

中图分类号:TN713.5

文献标识码:A

A Variable Passband Microwave Photonic Filter Based on Stimulated Brillouin Scattering

ZHANG Ailing, JI Ying, CHEN Bingxue

(Communications Devices and Technology Engineering Research Center of EMC, Key Lab. of Film Electronics and Communication Devices of Tianjin, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: A variable microwave photonic filter with wide tuning range is presented and analyzed theoretically. It is based on the stimulated Brillouin scattering (SBS) and uses two modulators to generate pump signal. By adjusting the modulation frequency of the two modulators separately, a four-passband filter with switchable passband interval and dual-passband filter can be realized, and the center frequency of filter can be continuously tuned within a wide tuning range. Meanwhile, the 3 dB bandwidth of the filter remains unchanged. The effects of different modulation signals on the passband and the center frequency of the filter are simulated analyzed, as well as the relationship among the bandwidth and the pump power and the length of SBS gain medium.

Key words: microwave photonic filters; microwave photonics; photonic signal processing; stimulated Brillouin scattering; variable passband

0 引言

微波光子学是研究微波和光波相互作用的交叉领域,融合了光子学和微波学两门学科的优势^[1],近年来得到了快速的发展。微波光子滤波器(MPF)在毫米波通信、高性能雷达、光载无线通信系统和无线局域网络^[2]中具有广泛的应用。与传统电子滤波器相比,微波光子滤波器具有带宽大,损耗低,体积小,抗电磁干扰,可调谐及可重构等优势,因而备受关注^[3]。

由于频谱窄且阈值功率低^[4-6],受激布里渊散射(SBS)已成为实现高分辨率微波光子滤波器的一个有效方法。目前已报道了多种基于SBS效应的微

波光子滤波器结构^[7-10]。2011年,张薇薇使用单个光源,利用相位调制后的信号与2个泵浦信号的SBS效应实现了滤波器中心频率可调谐,获得了20 GHz的调谐范围^[7],但结构要求泵浦信号和调制信号间有一个固定的频率差值。2012年,陶瑞臣引入外部光源作为布里渊泵浦信号来消除这种限制^[9],虽然该方案实现了较宽的调谐范围,但2个独立光源引入了射频(RF)滤波响应的不稳定性。2013年,肖永川使用单个光源,获得了40 GHz的调谐范围^[10],但结构要求2个泵浦信号的频率差值为布里渊频移值。

本文提出了一种基于SBS效应的大范围可调

收稿日期:2016-05-13

基金项目:新世纪优秀人才基金资助项目(NCET-07-0611);国家自然科学基金应急管理基金资助项目(11444001)

作者简介:张爱玲(1973-),女,山东日照人,教授,博士,主要从事光纤通信技术方面的研究。E-mail: Serena153@163.com。纪颖(1991-),女,河南商丘人,硕士生,主要从事微波光子滤波器方面的研究。E-mail: a_heart@126.com。

谐的通带可变微波光子滤波器。泵浦信号与光信号来自同一个光源,通过分别调节生成泵浦的2个调制器的调制频率,可得到双通带滤波器和通带间隔可变的四通带滤波器,并可实现滤波器中心频率的大范围连续可调谐,而在整个调谐过程中,滤波器的3 dB带宽保持不变。仿真分析了不同调制信号对滤波器通带间隔、通带中心频率的影响,以及3 dB带宽与泵浦功率、光纤长度之间的关系。

1 结构与原理

1.1 结构模型

图1为基于SBS的可调谐通带可变MPF的结构示意图。激光器(LD)发出来的频率为 f_c 的信号光经3 dB耦合器分成两路,分别进入上、下两臂。上臂由一个相位调制器(PM)和一段色散位移光纤(DSF)组成。信号经PM1调制后进入DSF,其中射频信号的频率为 f_m 。在下臂中,信号光进入PM2,经频率为 f_p 的RF信号调制后通过光环行器2(Cir2)的2端口进入光纤布喇格光栅(FBG),经FBG反射后的信号由Cir2的3端口输出,再经掺铒光纤放大器(EDFA)放大后进入强度调制器(IM)。接着信号进入一个差分延时(DGD)组件,通过调节偏振控制器(PC)PC3,PC4和起偏器,信号中的 $f_c + f_p$ 被抑制^[11]。余下的2个边带信号($f_{p1} = f_c + f_p - f$, $f_{p2} = f_c + f_p + f$)作为SBS泵浦从反方向经光环行器1(Cir1)进入DSF。发生在DSF中的SBS效应打破了经PM1调制后的信号中载波和边带间的平衡,因此得到了RF响应。光电探测器(PD)把光信号转换为电信号后,输入矢量网络分析仪(VNA)测量信号的电谱特性。结构中的隔离器(ISO)用来消除经过DSF后的泵浦波。每个调制器前的PC用来调节输入调制器的信号的偏振状态。泵浦信号与光信号来自同一个光源,消除了频率的不稳定因素,最终获得了稳定的RF响应。

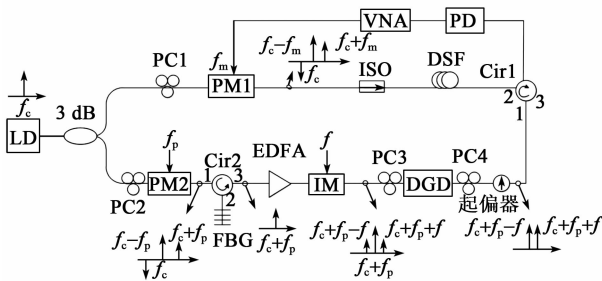


图1 基于SBS的可变通带微波光子滤波器的结构模型图

1.2 工作原理

图2为MPF的工作原理。每个泵浦均在距离泵浦频率 f_B 的位置引入增益和损耗。滤波器射频幅度响应由射频输出功率决定,即^[10]

$$|H(f_s)|^2 = \frac{P_{\text{RFout}}}{P_{\text{RFin}}} \propto 1 + \frac{G_1^2(f_{s1})A_1^2(f_{s1})G_2^2(f_{s2})A_2^2(f_{s2}) - 2G_1(f_{s1})A_1(f_{s1}) \cdot G_2(f_{s2})A_2(f_{s2}) \cdot \cos(\phi_{g1}(f_{s1}) + \phi_{a1}(f_{s1}) + \phi_{g2}(f_{s2}) + \phi_{a2}(f_{s2}))}{1} \quad (1)$$

其中

$$Q_n(f_{sn}) = \exp\left[\frac{g_0 I_n L}{2} \frac{(\Gamma_B/2)^2}{f_{sn}^2 + (\Gamma_B/2)^2}\right] \quad (2)$$

$$A_n(f_{sn}) = \exp\left[-\frac{g_0 I_n L}{2} \frac{(\Gamma_B/2)^2}{f_{sn}^2 + (\Gamma_B/2)^2}\right] \quad (3)$$

$$\phi_{gn}(f_{sn}) = \frac{g_0 I_n L}{4} \frac{\Gamma_B f_{sn}}{f_{sn}^2 + (\Gamma_B/2)^2} \quad (4)$$

$$\phi_{an}(f_{sn}) = -\frac{g_0 I_n L}{4} \frac{\Gamma_B f_{sn}}{f_{sn}^2 + (\Gamma_B/2)^2} \quad (5)$$

式中: $G_n(f_{sn})$ 为增益幅度; $\phi_{gn}(f_{sn})$ 为增益相位; $A_n(f_{sn})$ 为损耗幅度; $\phi_{an}(f_{sn})$ 为损耗相位; g_0 为线性增益系数; I 为泵浦强度; L 为光纤长度; Γ_B 为光纤的布里渊线宽。 $n=1$ 时, $f_{s1} = f_p - f - f_B - f_m$; $n=2$ 时, $f_{s2} = f_p + f - f_B - f_m$ 。

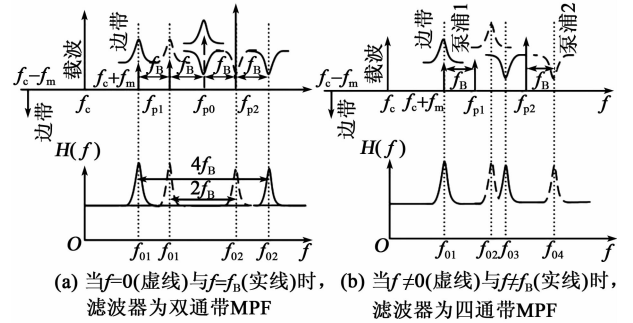


图2 MPF的工作原理

由式(2)、(4)可知,增益幅度 $G_n(f_{sn})$ 和增益相位 $\phi_{gn}(f_{sn})$ 在 $f_{01} = f_p - f - f_B$ 和 $f_{02} = f_p + f - f_B$ 处获得最大值;由式(3)、(5)可知,损耗幅度 $A_n(f_{sn})$ 和损耗相位 $\phi_{an}(f_{sn})$ 在 $f_{03} = f_p - f + f_B$ 和 $f_{04} = f_p + f + f_B$ 处获得最大值。

当IM的调制信号为0($f=0$)时,通过调节起偏器,可得到单个泵浦 f_{p0} 。由于SBS增益和损耗同时存在,所以最终将产生2个间隔为 $2f_B$ 的通带,(见图2(a)中虚线)。

当IM的调制信号为 f_B ($f=f_B$)时,存在2个差值为 $2f_B$ 的泵浦信号。其中第一个泵浦的损耗与第二个泵浦的增益完全抵消,故在频率 $f_c + f_p$ 的位

置没有通带存在。因此最终将会产生两个间隔为 $4f_B$ 的通带(见图 2(a)中实线)。

如图 2(b)所示,当 $f \neq 0$ 且 $f \neq f_B$ 时,滤波器有 4 个通带,且 4 个通带的中心频率的关系为

$$f_{02} - f_{01} = f_{04} - f_{03} = 2f \quad (6)$$

$$f_{03} - f_{01} = f_{04} - f_{02} = 2f_B \quad (7)$$

通过调节 f 可改变第一、二个通带间的间隔及第三、四个通带间的间隔。在调节 f 的过程中,第一、三个通带间的间隔及第二、四个通带间的间隔保持不变。

斯托克斯场的单通强度增益^[11-13]为

$$G = g_0 IL = \frac{g_0}{S} PL_{\text{eff}} \quad (8)$$

式中: S 为有效声光面积; P 为进入 SBS 介质的泵浦的功率; L_{eff} 为 SBS 增益介质的有效长度,且^[14]

$$L_{\text{eff}} = \frac{1}{\alpha} (1 - e^{-\alpha L}) \quad (9)$$

式中 α 为介质的衰减系数。

在高泵浦($G \gg 1$)的情况下,滤波器带宽^[15]为

$$\Delta\omega = \Gamma_B \left[\frac{\ln 2}{G} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

由式(8)~(10)可知,滤波器的带宽与布里渊线宽、光纤有效长度及泵浦光强度有关,而与 f 、 f_p 无关。因此,在调整滤波器中心频率与通带间隔的过程中,滤波器的带宽保持不变。

2 仿真结果及分析

根据式(1)中的传输函数对所提出的 MPF 进行仿真。在仿真中选用参数 $\Gamma_B = 30$ MHz, $f_B = 11$ GHz, 折射系数 $n = 1.47$ 的 DSF 作为 SBS 增益介质。当 PM2 的调制信号设为 30 GHz 时,所得频率响应如图 3 所示。

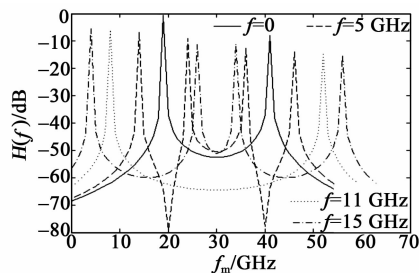


图 3 $f_p = 30$ GHz 时的可变通带 MPF 的频率响应

由图 3 可知,通过调节 f 可改变滤波器的通带数目。当 $f = 0$ 和 $f = 11$ GHz 时,滤波器是有固定通带间隔的双通带滤波器。其中当 $f = 0$ 时,滤波器结构中仅有一个泵浦信号,最后生成的 2 个通带

之间的间隔为 22 GHz(见图 3 中实线)。当 $f = 11$ GHz 时,滤波器结构中产生两个频率相差 22 GHz 的泵浦信号,其中第一个泵浦的损耗与第二个泵浦的增益完全抵消,所以 2 个通带间的间隔扩大了 2 倍,变为 44 GHz(见图 3 中虚线)。当 f 取其他值时,滤波器具有可变通带(见图 3),4 个通带间的间隔随着 f 的变化而变化。

为更直观地描述 f 的变化对通带间隔的影响,选取 $f_p = 30$ GHz,对微波光子滤波器的中心频率与 f 间的关系进行了仿真分析,结果如图 4 所示。

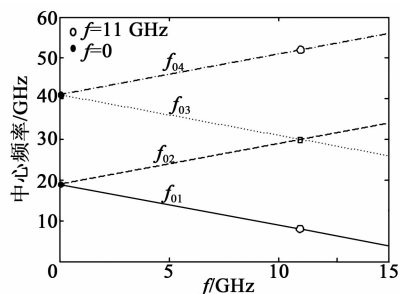


图 4 $f_p = 30$ GHz 时 MPF 的中心频率与 f 间的关系

由图 4 可看出,当 f_p 保持不变时,随着 f 从 0~15 GHz 逐渐增大, f_{01} 和 f_{03} 逐渐减小,而 f_{02} 和 f_{04} 逐渐增大。与此同时, $f_{02} - f_{01}$ 及 $f_{04} - f_{03}$ 逐渐增大。在 f 变化的整个过程中, $f_{03} - f_{01}$ 及 $f_{04} - f_{02}$ 始终保持不变,为 22 GHz。

图 4 中,当 $f = 0$ 、 $f = 11$ GHz 时,滤波器有 2 个通带的情况。当 $f = 11$ GHz 时,第一个泵浦的损耗与第二个泵浦的增益完全抵消(见图 4 中方形), $f = f_p$,即 $f = 30$ GHz 处无通带情况。

当 $f = 3$ GHz, f_p 分别取 25 GHz、35 GHz、70 GHz 时,可调谐微波光子滤波器的归一化频率响应如图 5 所示。通过调节 f_p ,实现了四通带滤波器中心频率的大范围可调谐。由图可看出,随着 f_p 的增大,通带的中心频率也逐渐增大,滤波器的射频响应向着高频方向漂移。

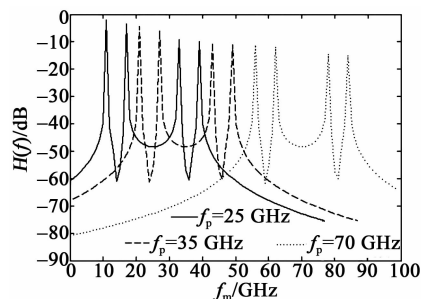


图 5 当 $f = 3$ GHz 时,大范围可调谐滤波器的频率响应

为了进一步分析 f_p 与 MPF 通带中心频率之间的关系,选取 $f=3$ GHz、13 GHz,对滤波器的可调谐性进行了相应的仿真分析,结果如图 6 所示。由图可看出,四通带滤波器在整个范围内是连续可调的,且在调节 f_p 的过程中,通带间的间隔始终保持不变。当 f 选取不同值时,线的斜率保持不变,这意味着滤波器的可调谐性不受 f 变化的影响。

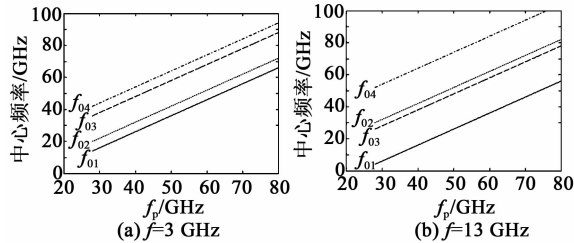


图6 滤波器中心频率的可调谐性

结合式(8)~(10)可得滤波器的 3 dB 带宽与光纤长度及泵浦功率间的关系,如图 7 所示。由图 7(a)可看出,随着泵浦功率的增加,滤波器的 3 dB 带宽逐渐减小。当泵浦功率为 2 dBm,光纤长度取 20 m 时,滤波器的 3 dB 带宽为 87.68 MHz。由图 7(b)可看出,随着光纤长度的增加,滤波器的 3 dB 带宽逐渐减小。当泵浦功率为 1 dBm,光纤长度取 50 m 时,滤波器的 3 dB 带宽为 55.53 MHz。此外,随着泵浦功率或光纤长度的增加,3 dB 带宽均逐渐趋于一个常数。

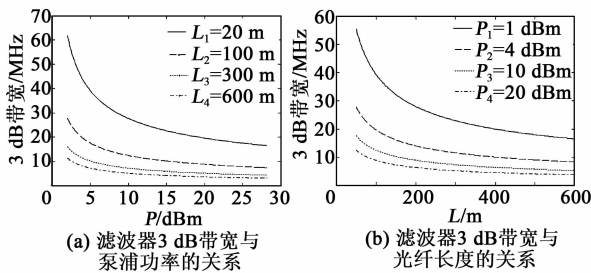


图7 滤波器 3 dB 带宽与泵浦功率、光纤长度的关系

3 结束语

文中提出并分析了一种大范围可调谐的通带可变微波光子滤波器。它基于受激布里渊散射(SBS)效应并使用单一光源生成泵浦信号与光信号。通过分别调节生成泵浦的两个调制器的调制频率,可以得到双通带滤波器和通带间隔可变的四通带滤波器,同时可实现滤波器中心频率的大范围连续可调谐;在整个调谐过程中,滤波器的 3 dB 带宽保持不变。滤波器的带宽可通过改变泵浦的功率和色散位移光纤(DSF)的长度得到调节。

参考文献:

- [1] CAPMANY J, ORTEGA B, PASTOR D. A tutorial on microwave photonic filters [J]. *Light Technol*, 2006, 24(1): 201-229.
- [2] MINASIAN R A. Photonic signal processing of microwave signals [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2006, 54(2): 832-846.
- [3] YAO J P. Microwave photonics [J]. *Lightw Technol*, 2009, 27(3): 314-335.
- [4] LOAYSSA A, BENITO D, GARDE M J. Applications of optical carrier Brillouin processing to microwave photonics [J]. *Opt Fiber Technol*, 2002, 8(1): 24-42.
- [5] SAGUES M, LOAYSSA A, CAPMANY J. Multitap complex-coefficient incoherent microwave photonic filters based on stimulated Brillouin scattering [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2007, 19(16): 1194-1196.
- [6] SANCHO J, CHIN S, SAGUES M, et al. Dynamic microwave photonic filter using separate carrier tuning based on stimulated Brillouin scattering in fibers [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2010, 22(23): 1753-1755.
- [7] ZHANG W W, MINASIAN R A. Widely tunable single-passband microwave photonic filter based on stimulated Brillouin scattering [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2011, 23(23): 1775-1777.
- [8] ZHANG W W, MINASIAN R A. Switchable and tunable microwave photonic Brillouin-based filter [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4(5): 1443-1455.
- [9] TAO R C, FENG X, CAO Y, et al. Widely tunable single Bandpass microwave photonic filter based on phase modulation and stimulated Brillouin scattering [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2012, 24(13): 1097-1099.
- [10] XIAO Y, GUO J, WU K, et al. An ultrawide tunable range single passband microwave photonic filter based on stimulated Brillouin scattering [J]. *Opt Exp*, 2013, 21(3): 2718-2726.
- [11] YU X, ZHANG H, ZHENG X. High carrier suppression double sideband modulation using polarization state rotation filter and optical external modulator [J]. *Opt Commun*, 2006, 267(1): 83-87.
- [12] ROBRRT W. BOYD, KSZIMIERZ R. Noise initiation of stimulated Brillouin scattering [J]. *Phys Rev Lett*, 1990, 42(9): 5514-5521.
- [13] GAETA A L, BOYD R W. Stochastic dynamics of stimulated Brillouin scattering in an optical fiber [J]. *Phys Rev A*, 1991, 44(5): 3205-3209.
- [14] PAGNI M, MARPAUNG D, EGGLETT B J. Ultra-wideband microwave photonic phase shifter with configurable amplitude response [J]. *Opt Lett Opt Lett*, 2014, 39(20): 5854-5857.
- [15] HAN X, WANG L, SHAO Y, et al. Filtering properties of the tunable microwave photonic filter with stimulated Brillouin scattering [J]. *Opt Eng*, 2014, 53(6): 166110.