

单通带微波光子滤波器泵浦响应性能研究

姜凌珂, 张 琪, 潘林兵, 董 玮, 张歆东, 阮圣平

(1. 吉林大学集成光电子学国家重点联合实验室, 吉林长春 130012; 2. 吉林大学电子科学与工程学院, 吉林长春 130012)

摘 要: 基于受激布里渊散射效应和相位调制技术, 实现了可调谐单通带微波光子滤波. 单泵浦信号时, 滤波器的频率调谐范围为 0.5 GHz ~ 18.3 GHz. 采用一个激光器, 通过外加在强度调制器上的微波信号强度调制得到泵浦信号时, 滤波系统的稳定性优于两个激光器分别作光载波和泵浦信号的系统. 当采用频率间隔为布里渊频移两倍的双泵浦信号时, 滤波器的频率调谐范围为 0.9 GHz ~ 31.3 GHz.

关键词: 微波光子滤波器; 受激布里渊散射; 相位调制; 单通带

中图分类号: TN29 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2017)07-1620-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.07.011

The Study on the Pump Response Performance of Single Passband Microwave Photonic Filter

JIANG Ling-ke, ZHANG Qi, PAN Lin-bing, DONG Wei, ZHANG Xin-dong, RUAN Sheng-ping

(1. State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China;

2. College of Electronic Science & Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China)

Abstract: A tunable single-passband microwave optical filter is realized based on the stimulated Brillouin scattering and phase modulation. When only one pump signal is introduced, the tuning range of the filter is 0.5 to 18.3 GHz. When only one laser is used, and pump signal is achieved by intensity modulation of the microwave signal added at intensity modulator, the stability of the filter system is better than that of the system with two lasers used as light carrier and pump signal respectively. When introducing two pump signals whose frequency interval equals the two times as large as the stimulated Brillouin frequency shift, the tuning range of the filter is 0.9 to 31.3 GHz.

Key words: microwave photonic filter; stimulated Brillouin scattering; phase modulation; single passband

1 引言

与传统在电域中处理微波信号的方法相比, 利用光子学方法对微波信号进行滤波具有抗电磁干扰、中心频率可调谐、带宽可重构、损耗低等优势^[1-8]. 早期微波光子滤波器输出频谱有周期性, 周期性的输出降低了可用信道带宽, 增加了信号串扰, 而受激布里渊散射效应和相位调制相结合的滤波方法可以消除基带共振响应, 克服周期性^[9-11]. 由于受激布里渊散射效应还具有带宽窄、光功率阈值低等特点, 因此, 基于受激布里渊散射效应的可调谐单通带微波光子滤波器被广泛研究, 而泵浦信号的个数对滤波器频率调谐范围的影响也是一个研究热点^[12-15].

本文搭建了基于受激布里渊散射效应的可调谐微

波光子滤波器系统, 分析了泵浦光功率对 3dB 带宽和带外抑制比的影响, 研究了不同泵浦信号时滤波器的频率调谐范围以及频率响应的稳定性.

2 工作原理与数值计算

图 1 为可调谐微波光子滤波器的基本系统框图. 激光器输出的光载波被矢量网络分析仪输出的扫频微波信号在相位调制器中进行调制, 调制后的信号经隔离器输入到高非线性光纤中, 作为受激布里渊散射效应的信号光, 即斯托克斯光; 泵浦信号经环形器进入高非线性光纤中, 与斯托克斯光相向传输并发生受激布里渊散射效应. 经受激布里渊散射效应处理的信号再经环形器进入到探测器中进行光电转换, 转换后的电信号进入到矢量网络分析仪中测量. 在图 1 所示的系统中, 泵浦信号的数量可

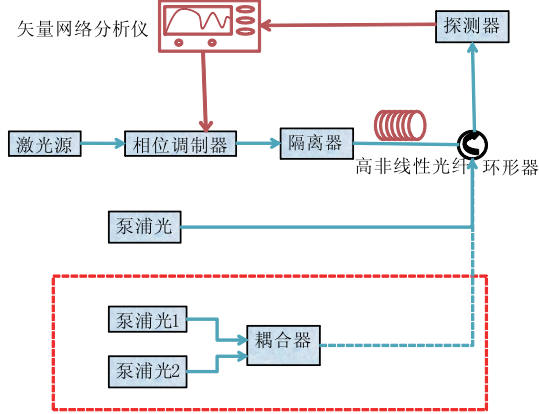


图1 可调谐微波光子滤波器系统框图

以是单个,也可以是两个;泵浦信号可以由激光器直接提供,也可以通过调制的方式产生。

2.1 单泵浦信号的可调谐滤波器

2.1.1 工作原理

根据图1,当采用单个泵浦信号时,滤波器的频谱处理过程如图2所示。 f_c 为光载波频率, f_m 为矢量网络分析仪发射的某一频率的微波信号,那么对于小信号调制而言,忽略高阶边带影响,经相位调制器输出的一阶上边带为 $f_c + f_m$,一阶下边带为 $f_c - f_m$ 。 f_p 为泵浦光频率, ν_B 为布里渊频移。泵浦信号 f_p 在间隔为 ν_B 的下频率处产生增益,在同样频率间隔的上频率处产生损耗。当泵浦光与一阶上边带的频率差 $f_p - (f_c + f_m)$ 为 ν_B ,即 $f_p - \nu_B = f_c + f_m$ 时,打破了对应频率处的相位调制器输出的一阶上、下边带的幅度平衡,因此在中心频率为 f_m 和 $f_m + 2\nu_B$ 处会有相应的通带输出,这样就实现了滤波器的可调谐滤波功能,调谐范围为 $2\nu_B$ 。

$$E_m(t) = E_0 \exp(j2\pi f_c t) \left\{ J_0(m) + J_1(m) \exp \left[\begin{array}{l} \left\{ g[(f_p - \nu_B) - (f_c + f_m)] + \right. \\ \left. \alpha[(f_p + \nu_B) - (f_c + f_m)] \right\} L \\ \left. + j \left(2\pi f_m t + \frac{\pi}{2} \right) \right] \right\} - J_1(m) \exp \left[j \left(-2\pi f_m t - \frac{\pi}{2} \right) \right] \quad (2)$$

经受激布里渊散射效应处理之后,输入到探测器的光功率如式(3):

$$P = 2E_0^2 J_0(m) J_1(m) \left\{ G(f_m) A(f_m) \cos \left[2\pi f_m t + \frac{\pi}{2} + \varphi_g(f_m) + \varphi_\alpha(f_m) \right] - \cos \left(2\pi f_m t + \frac{\pi}{2} \right) \right\} \quad (3)$$

其中, $G(f_m)$, $A(f_m)$, $\varphi_g(f_m)$, $\varphi_\alpha(f_m)$,分别如式(4)~(7)所示。

$$\begin{aligned} G(f_m) &= \exp \{ \operatorname{Re} [g[(f_p - \nu_B) - (f_c + f_m)]] L \} \\ &= \exp \left[\frac{g_B I_p L}{2} \frac{(\Delta\nu_B/2)^2}{[(f_p - \nu_B) - (f_c + f_m)]^2 + (\Delta\nu_B/2)^2} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} A(f_m) &= \exp \{ \operatorname{Re} [\alpha[(f_p + \nu_B) - (f_c + f_m)]] L \} \\ &= \exp \left[-\frac{g_B I_p L}{2} \frac{(\Delta\nu_B/2)^2}{[(f_p + \nu_B) - (f_c + f_m)]^2 + (\Delta\nu_B/2)^2} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

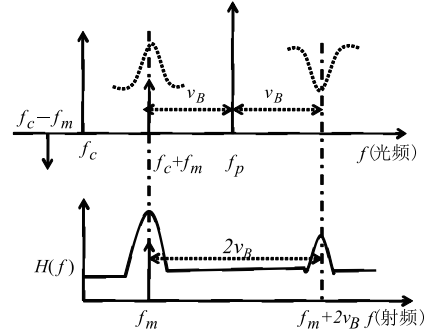


图2 单泵浦信号时滤波器的频谱处理示意图

2.1.2 理论计算

布里渊增益函数 $g(f)$ 和布里渊损耗函数 $\alpha(f)$ 可以表示为^[15]:

$$\begin{cases} g(f) = \frac{g_B I_p}{2} \frac{(\Delta\nu_B/2)^2}{f^2 + (\Delta\nu_B/2)^2} + j \frac{g_B I_p}{4} \frac{\Delta\nu_B f}{f^2 + (\Delta\nu_B/2)^2} \\ \alpha(f) = -\frac{g_B I_p}{2} \frac{(\Delta\nu_B/2)^2}{f^2 + (\Delta\nu_B/2)^2} - j \frac{g_B I_p}{4} \frac{\Delta\nu_B f}{f^2 + (\Delta\nu_B/2)^2} \end{cases} \quad (1)$$

其中 $I_p = P_p/A_{\text{eff}}$ 为泵浦光强度(P_p 为泵浦信号功率, A_{eff} 为光纤有效模场面积); $\Delta\nu_B$ 是布里渊线宽; g_B 是峰值增益系数; f 指布里渊增益谱或损耗谱上的某一频率点与布里渊增益中心或损耗中心的频率的偏差。

在图1所示的滤波系统中,经过受激布里渊散射效应处理后,相位调制器输出的光场可用式(2)表示,其中 E_0 为光场振动幅度, $J_k(m)$ 为一类 k 阶贝塞尔函数, $J_{-k}(m) = (-1)^k J_k(m)$ 。小信号调制时, $n=0$ 和 1 , m 为相位调制系数, L 为光纤长度。

$$\begin{aligned} \varphi_g(f_m) &= \operatorname{Im} [g[(f_p - \nu_B) - (f_c + f_m)]] L \\ &= \frac{g_B I_p L}{4} \frac{\Delta\nu_B [(f_p - \nu_B) - (f_c + f_m)]}{[(f_p - \nu_B) - (f_c + f_m)]^2 + (\Delta\nu_B/2)^2} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \varphi_\alpha(f_m) &= \operatorname{Im} [\alpha[(f_p + \nu_B) - (f_c + f_m)]] L \\ &= -\frac{g_B I_p L}{4} \frac{\Delta\nu_B [(f_p + \nu_B) - (f_c + f_m)]}{[(f_p + \nu_B) - (f_c + f_m)]^2 + (\Delta\nu_B/2)^2} \end{aligned} \quad (7)$$

探测到的微波信号的强度可用式(8)表示。

$$E_{RF}(t) = \Re \times P \propto \left\{ G(f_m)A(f_m) \cos \left[2\pi f_m t + \frac{\pi}{2} + \varphi_g(f_m) + \varphi_\alpha(f_m) \right] - \cos \left(2\pi f_m t + \frac{\pi}{2} \right) \right\} \quad (8)$$

其中 \Re 为探测器对光功率的响应度. 由此可得到滤波器的传输函数如式(9)所示.

$$|H(f)| = \frac{P_{RF-out}}{P_{RF-in}} \propto 1 + G(f_m)^2 A(f_m)^2 - 2G(f_m)A(f_m) \cos[\varphi_g(f_m) + \varphi_\alpha(f_m)] \quad (9)$$

2.1.3 数值仿真

设定光纤的布里渊增益线宽为 $\Delta v_B = 40\text{MHz}$, 布里渊频移 $v_B = 10\text{GHz}$, 增益峰值为 5dB, 光载波的波长为 1550nm, 设定通带中心位置为 5GHz, 如图 3 所示, 同时在距离 $2v_B$ 的频率 25GHz 处有一个干扰通带. 为避免这个通带的影响, 需要限定该单通带微波光子滤波器可用的调谐范围为 20GHz, 即受激布里渊频移量的 2 倍.

对于单泵浦信号的滤波器, 除了可以用激光源直接提供泵浦信号外, 也可以用调制信号作为泵浦信号, 系统如图 4 所示. 信号源的频率决定滤波器通带中心频率, 滤波器通带中心频率 = 信号源频率 - 布里渊频移 v_B . 而在一定范围内, 信号源幅度越大, 通带峰值越高. 该系统频率的调谐范围仍为受激布里渊频移量的 2 倍.

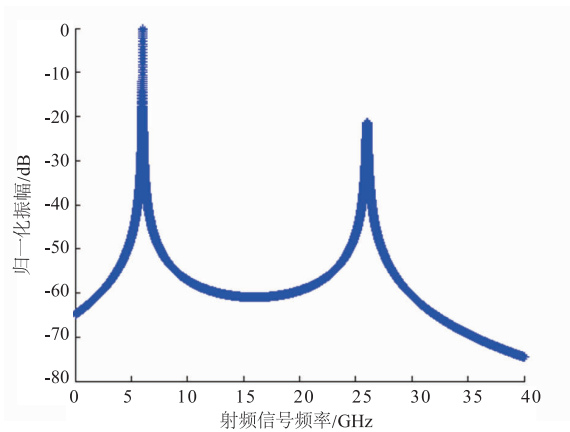


图3 单泵浦信号时滤波器的输出

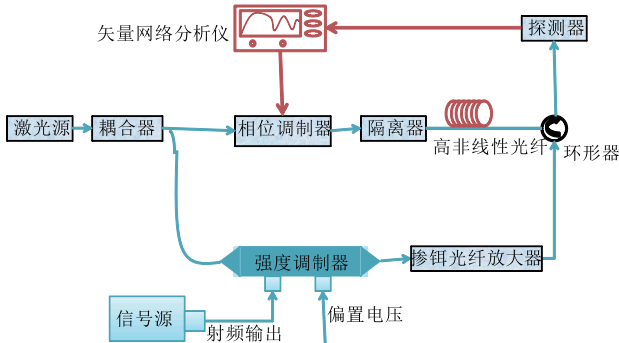


图4 调制信号作为泵浦信号的滤波器系统

2.2 双泵浦信号的宽频率可调谐滤波器

在图 1 中, 当引入两个频率间隔为 $2v_B$ 的泵浦信号

时, 频谱处理过程如图 5 所示. 由于两个泵浦信号频率间隔为 $2v_B$, 因此, 频率较低的泵浦信号引起的损耗谱与频率较高的泵浦信号引起的增益谱相互抵消, 仅剩下低频率泵浦信号引起的增益谱和高频率泵浦信号引起的损耗谱, 因此增益谱与损耗谱的频率间隔为 $4v_B$, 即滤波器的频率调谐范围为 $4v_B$.

此时滤波器系统的传输函数如式(10)所示.

$$|H(f_m)| = 1 + \prod_{k=1}^2 G_k(f_m)^2 A_k(f_m)^2 - 2 \left[\prod_{k=1}^2 G_k(f_m) A_k(f_m) \right] \cdot \cos \left\{ \sum_{k=1}^2 [\varphi_{gk}(f_m) + \varphi_{\alpha k}(f_m)] \right\} \quad (10)$$

设定布里渊增益线宽为 $\Delta v_B = 40\text{MHz}$, 布里渊频移 $v_B = 10\text{GHz}$, 增益峰值为 5dB, 光载波的波长为 1550nm, 通带中心位置为 5GHz, 得到如图 6 所示的频率响应, 对比图 3 和图 6, 可以看出, 当采用两个泵浦信号时, 滤波器的频率调谐范围增加了 2 倍.

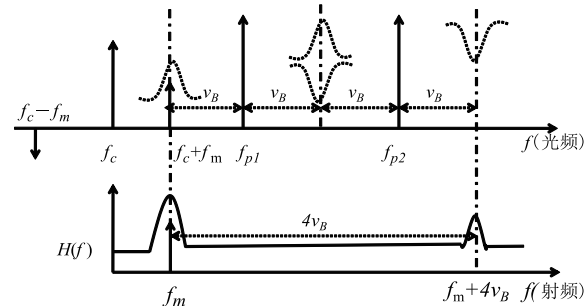


图5 双泵浦信号时滤波器频谱处理示意图

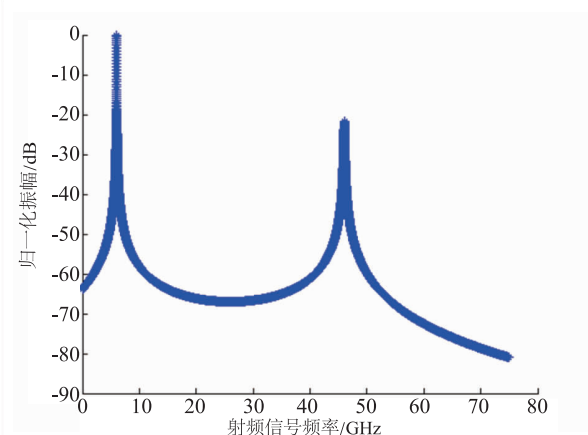


图6 双泵浦信号时滤波器的输出

3 实验结果与分析

3.1 高非线性光纤受激布里渊频移量的测试

实验中用到的高非线性光纤的主要参数:长度为 1km,在波长为 1550nm 时的模场直径为 $4.07\mu\text{m}$,色散系数为 $-0.249\text{ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$. 而要使滤波器性能变好,就需要较长的光纤以及较小的光纤模场直径. 由于选用的光纤的色散数值非常小,所以色散对滤波器性能的影响忽略不计.

高非线性光纤的受激布里渊频移测试方法中,信号光的产生如图 1 中上支路所示,网络分析仪扫频输出信号,加载到相位调制器上调制之后作为信号光,将激光源发出的光信号经耦合器分出一个支路作为泵浦光,通过环形器进入到高非线性光纤中,二者在光纤中发生受激布里渊散射效应,网络分析仪上会显示出增益谱曲线.

从实验结果得出,受激布里渊频移与泵浦光波长有关,而布里渊增益谱线宽及带外抑制比均与泵浦光功率有关. 图 7 和图 8 分别是实验验证出来的增益谱线宽和带外抑制比随泵浦光功率的变化情况,泵浦光功率越高,布里渊增益谱线宽越小,带外抑制比越大. 图 9 为不同泵浦光波长时的布里渊增益谱,当泵浦光波长为 1550nm 时,布里渊增益谱峰值中心为 9.2GHz,即受激布里渊频移为 9.2GHz.

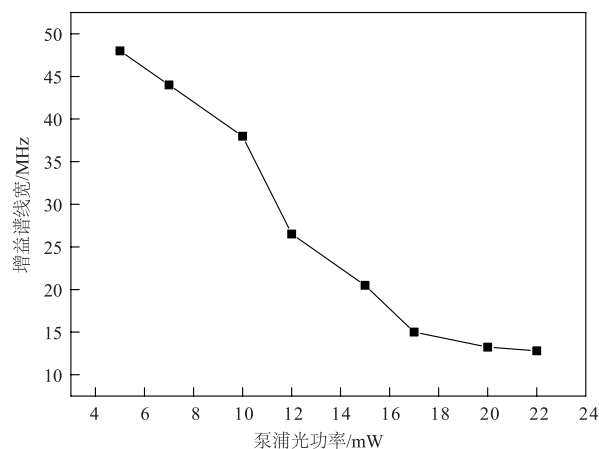


图7 增益谱线宽随泵浦光功率的变化

3.2 单泵浦信号的可调谐滤波器

3.2.1 激光源直接提供泵浦信号的滤波器

图 10 为光载波波长为 1550nm,泵浦光波长为 1549.940nm 时,矢量网络分析仪显示出来的滤波器系统的频率响应. 低频率通带为布里渊增益谱对上边带放大形成的,峰值中心频率为 2.1GHz,右侧高频通带为损耗谱对应的干扰通带,峰值中心频率为 20.5GHz,二者频率间隔为 18.4GHz,约为布里渊频移的 2 倍. 图

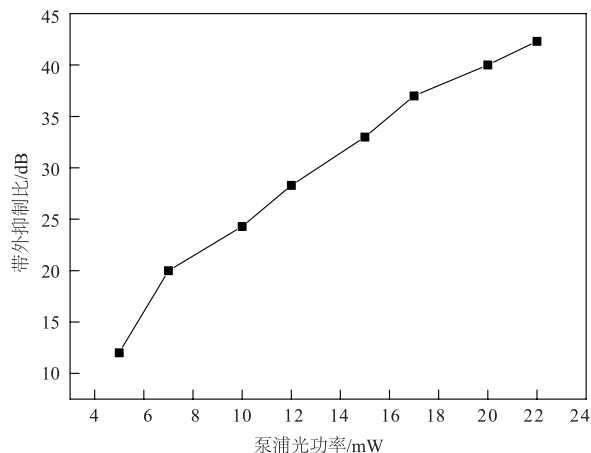


图8 带外抑制比随泵浦光功率的变化

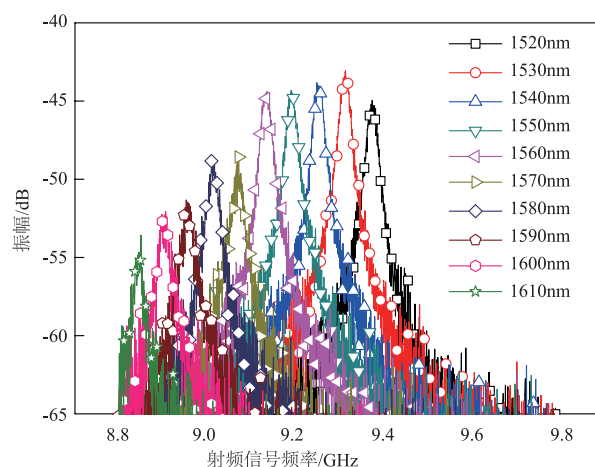


图9 不同泵浦光波长时的布里渊增益谱

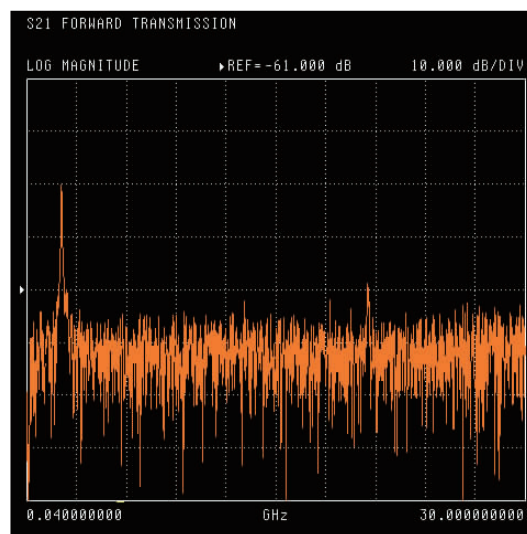


图10 激光为泵浦时滤波器的频率响应

11 为滤波器的频率调谐结果,泵浦光波长从 1549.958nm ~ 1549.805nm 变化时,滤波器的通带频率从 0.5GHz ~ 18.3GHz,滤波器频率调谐范围约为布里

渊频移的 2 倍.

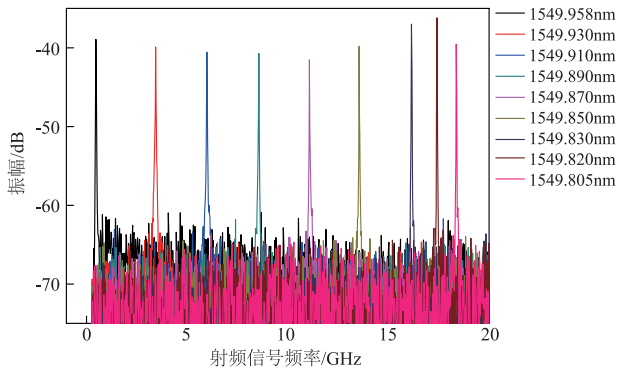


图11 激光为泵浦时滤波器频率调谐

3.2.2 调制信号作为泵浦信号的滤波器

在图 4 中, 设定光载波波长为 1550nm, 调制器工作在载波抑制的双边带状态, 信号源输出频率为 12GHz, 功率为 20dBm 时, 可以得到图 12 所示的频率响应. 图 13 为信号源频率在 10GHz ~ 25GHz 变化时, 滤波器的通带中心频率调谐情况, 由于所用强度调制器的带宽限制, 该系统调谐范围为 0.8GHz ~ 15.8GHz.

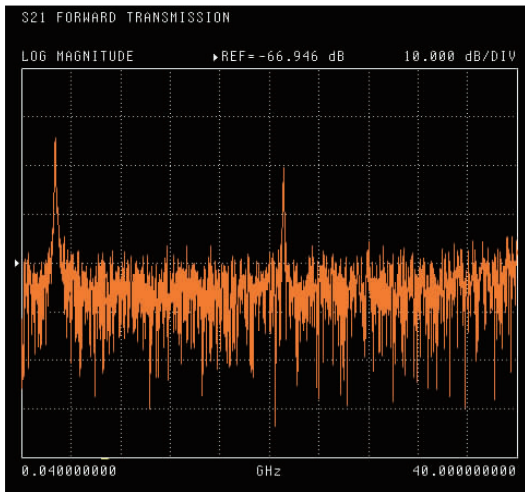


图12 调制产生单泵浦时滤波器的频率响应

3.2.3 两种单泵浦信号的滤波器稳定性对比

图 14 为激光源直接作泵浦和调制信号作泵浦时滤波器系统通带中心频率和振幅随时间变化情况, 二者均为测试 30 分钟的结果. 从图 14 可以看出, 用激光源作泵浦时, 通带中心频率偏移约 1.7GHz, 幅度的波动最大值为 10dB, 这主要是因为斯托克斯光和泵浦光由两个激光器提供, 两个激光器的频率波动不一致而导致滤波器输出的频率和幅度均有很大的波动; 而调制信号做泵浦时, 虽然也有偏移, 但中心频率偏移很小, 且幅度上下浮动不超过 1dB, 这是由于斯托克斯光和泵浦光是采用同一

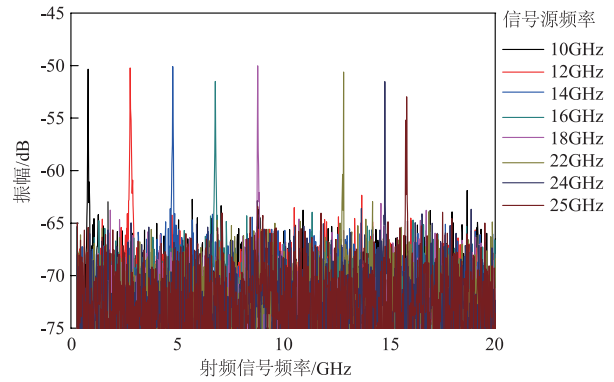
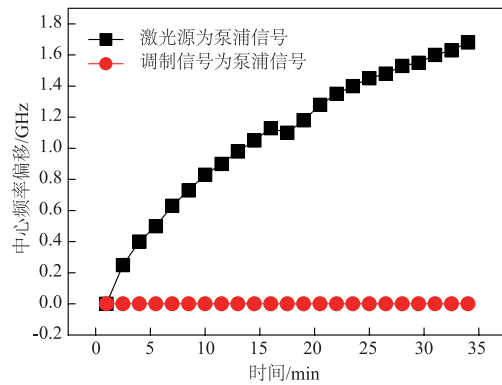
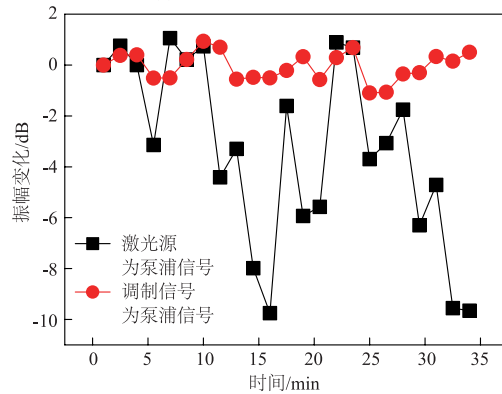


图13 调制产生单泵浦时滤波器频率调谐



(a) 中心频率随时间的偏移



(b) 振幅随时间的偏移

图14 两种单泵浦信号的滤波器系统稳定性测试

个激光器然后经调制产生的, 即使激光器输出频率有波动, 泵浦光和斯托克斯光也是一致的, 因此, 滤波器的输出稳定性更好.

3.3 双泵浦信号的可调谐滤波器

若图 1 中的泵浦光 1 的波长为 1551.189nm, 泵浦光 2 的波长为 1551.041nm, 光载波波长为 1550.500nm 时, 可以得到图 15 所示的双泵浦信号时滤波器频率响应. 图 16 为双泵浦信号时滤波器的频率调谐结果, 波长范围 1550.438nm ~ 1550.655nm, 频率调谐范围为 0.9GHz ~ 31.3GHz. 由于实验中使用的相位调制器的带宽为 32GHz, 因此系统调谐范围并没

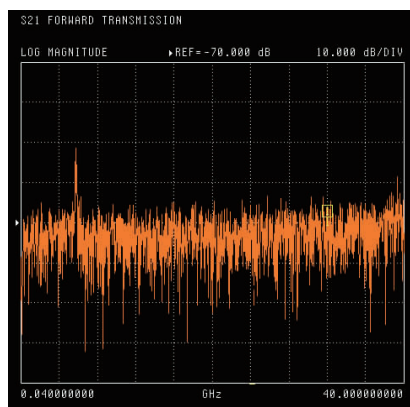


图15 双泵浦时滤波器频率响应

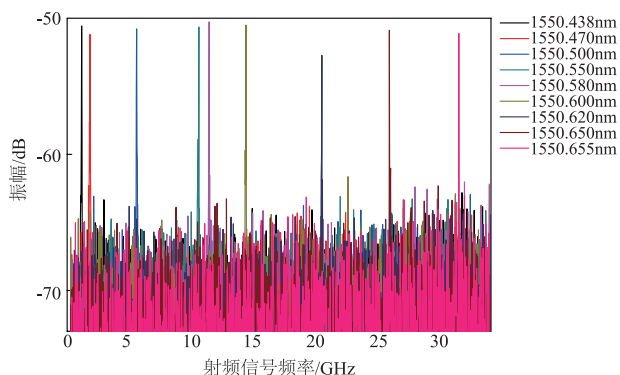


图16 双泵浦时滤波器中心频率的调谐

有达到 $4v_B$,但也已经超过了 $2v_B$,验证了理论设计的正确性。

4 结论

建立了基于单泵浦和双泵浦信号的微波光子滤波器的传输函数,理论分析表明,单泵浦信号时,滤波器的频率调谐范围为布里渊频移量的 2 倍,双泵浦信号时,滤波器的频率调谐范围为布里渊频移量的 4 倍.实验测试了单泵浦信号时滤波器的频率调谐范围为 $0.5\text{GHz} \sim 18.3\text{GHz}$,双泵浦信号时滤波器的频率调谐范围为 $0.9\text{GHz} \sim 31.3\text{GHz}$,且调制产生泵浦信号的系统稳定性优于激光器提供泵浦信号的系统。

参考文献

- [1] 沈一春,章献民,陈抗生. 基于窄带光纤光栅的微波载波单边带调制[J]. 电子学报,2005,33(5):871-874. SHEN Yi-chun, ZHANG Xian-min, CHEN Kang-sheng. Narrow band fiber bragg grating based single sideband microwave modulation [J]. Acta Electronica Sinica,2005,33(5):871-874. (in Chinese)
- [2] 刘镇清. 粗晶材料超声检测信号模型及其通过窄带滤波

器分析[J]. 电子学报,2002,30(4):598-600.

- LIU Zhen-qing. An ultra sonic testing model for large grained materials and its output properties of narrowband filter [J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(4): 598-600. (in Chinese)
- [3] 杨春玲,倪晋麟,刘国岁,郑全战. 转换坐标卡尔曼滤波器的雷达目标跟踪[J]. 电子学报,1999,27(3):121-123. YANG Chun-ling, NI Jin-lin, LIU Guo-sui, ZHENG Quan-zhan. Converted measurement KF for radar target tracking [J]. Acta Electronica Sinica,1999,27(3):121-123. (in Chinese)
- [4] 苏畅,徐守义,王承训,王晔. 一种应用于探地雷达信号处理的自适应脉冲压缩滤波器[J]. 电子学报,1996,24(9):116-118. SU Chang, XU Shou-yi, WANG Cheng-xun, WANG Ye. An adaptive pulse compressing filter applied to signal processing of the subsurface radar [J]. Acta Electronica Sinica,1996,24(9):116-118. (in Chinese)
- [5] CAPMANY J, ORTEGA B, PASTOR D. A tutorial on microwave photonic filters [J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(1): 201-227.
- [6] YAO J P. Microwave photonics [J]. Lightwave Technology, 2009, 27(3): 314-335.
- [7] CAPMANY J, NOVAK D. Microwave photonics combines two worlds [J]. Nature Photonics, 2007, 1: 319-330.
- [8] 郭静,吴奎,肖永川,等. 宽调谐范围的单通带微波光子滤波器的研究[J]. 光电子:激光,2014,25(7):1274-1278. GUO Jing, WU Kui, XIAO Yong-chuan, et al. The study of an ultrawide tunable range single passband microwave photonic filter [J]. Journal of Optoelectronics; Laser, 2014, 25(7): 1274-1278. (in Chinese)
- [9] ZHOU Bo, ZHANG Han-yi, ZHENG Xiao-ping, et al. Microwave photonics developments [J]. Laser and Infrared, 2006, 36(2): 81-84.
- [10] CAPMANY J, et al. Microwave photonic signal processing [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(4): 571-583.
- [11] FENG X H, CAO Y, LI Z H, et al. Widely tunable single bandpass microwave photonic filter based on phase modulation and stimulated brillouin scattering [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(17): 1097-1099.
- [12] YI X, MINASIAN R A. Microwave photonic filter with single bandpass response [J] Electronics Letters, 2009, 45(7): 362-363.
- [13] ZENG F, YAO J P. Investigation of phase-modulator-based all-optical bandpass microwave filter [J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(4): 1113-1117.
- [14] CHEN Tong, et al. Single passband microwave photonic filter with wideband tunability and adjustable bandwidth [J]. Optics Letters, 2012, 37(22): 4699-4701.

- [15] ZHANG W W, MINASIAN R A. Switchable and tunable microwave photonic Brillouin-based filter [J]. IEEE Pho-

tonics Journal, 2012, 4(5): 1443 - 1455.

作者简介



姜凌珂 女, 1993 年 1 月出生, 吉林辽源人, 现为吉林大学电子科学与工程学院集成电路工程专业的硕士研究生, 主要从事微波信号的光子学处理方面的研究.

E-mail: 657493982@qq.com



张琪 女, 1987 年 6 月出生, 吉林敦化人, 现为吉林大学电子科学与工程学院电路与系统专业的博士研究生, 主要从事微波光子学方面的研究.

E-mail: qizhang15@mail.jlu.edu.cn



潘林兵 男, 1990 年 9 月出生, 安徽怀宁人, 现为吉林大学电子科学与工程学院电路与系统专业的硕士研究生, 主要从事微波光子学方面的研究.

E-mail: 1101885421@qq.com



董玮(通讯作者) 女, 1973 年 2 月出生, 黑龙江富锦人, 现为吉林大学电子科学与工程学院教授、博导, 主要从事微波光子学方面的研究.

E-mail: dongw@mail.jlu.edu.cn