

doi:10.3788/gzxb20154405.0523001

高 Q 值跳频带通微波光子滤波器

张爱玲, 黄聪, 潘洪刚, 曹晔, 刘策

(天津理工大学 计算机与通信工程学院; 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:提出一种基于 Lyot-Sagnac 滤波器和级联结构的高品质因数跳频带通微波光子滤波器. 在该滤波系统中, 利用宽带光源和 Lyot-Sagnac 滤波器原理实现波长间隔可变的连续光载波. 利用相位调制器与单模光纤形成第一级单通带微波光子滤波器, 光纤环形谐振器作为第二级滤波结构. 经两级滤波器级联, 实现高品质因数跳频单通带微波光子滤波器. 在使用三段保偏光纤的情况下, 通过调整偏振控制器的偏振状态, 可实现滤波器中心频率在 1.012 1 GHz, 1.214 5 GHz, 1.416 9 GHz, 1.619 3 GHz, 1.821 7 GHz 之间跳跃. 由于采用了级联结构, 所设计的滤波器继承了前后两级滤波器的共同优点, 故滤波器的滤波特性良好, 品质因数最高可达 13 155.69; 主旁瓣抑制比均在 18 dB 以上, 最高达 25.51 dB. 且该装置结构简单, 调谐便利.

关键词:高品质因数; 跳频; 波长间隔; 微波光子滤波器

中图分类号: TN713.5

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)05-0523001-4

The Frequency Hopping Bandpass Microwave Photonic Filter with High Q-factor

ZHANG Ai-ling, HUANG Cong, PAN Hong-gang, CAO Ye, LIU Ce

(Tianjin key Laboratory of Film Electronics and Communication Devices, Communication Devices and Technology Engineering Research Center, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: A frequency hopping bandpass microwave photonic filter based on Lyot-sagnac filter and cascaded structure was proposed. In the filtering system, a continuous optical source with variable wavelength separation is achieved by using broadband source and Lyot-sagnac filter. The first order filter is composed of a phase modulator and a signal mode fiber. A ring resonator is cascaded to be the second order filtering structure. A frequency hopping single-bandpass microwave photonic filter with high Q-factor is achieved by cascading the two filters. In the case of choosing three sections of polarization maintaining fiber, the central frequency of the filter is hopped among 1.012 1 GHz, 1.214 5 GHz, 1.416 9 GHz, 1.619 3 GHz and 1.821 7 GHz by adjusting the polarization state of polarization controller. Since a cascaded structure is used in this article, the implementation of the filter inherited advantage of both filters. So the filter has good frequency response. The highest Q-factor is 13 155.69. Main side lobe suppression ratio varies from 18 dB to 25.51 dB. Besides, the device has simple structure and is easy to control.

Key words: High Q factor; Frequency hopping; Wavelength separation; Microwave photonic filter

OCIS Codes: 230.4110; 060.2630; 230.5750

0 引言

随着现当代通信技术在各个领域的广泛应用, 人

们对于通信容量的要求也越来越高, 传统的数字电子滤波器已经很难满足这些需求. 微波光子学是研究微波信号与光信号之间相互作用的交叉型学科, 将微波

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划(No. NCET-07-0611)、国家自然科学基金应急管理项目(No. 11444001)和天津市自然科学基金(No. 14JCYBJC16500)资助

第一作者: 张爱玲(1973—), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为光纤通信技术. Email: alzhang2012@163.com

通讯作者: 黄聪(1988—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为微波光子滤波器. Email: alzhang2012@163.com

收稿日期: 2015-01-05; **录用日期:** 2015-03-05

<http://www.photon.ac.cn>

学和光子学两门学科的优势相结合,近年来得到了快速发展.例如,微波光子相移器的设计^[1],微波光子滤波器的研究等.微波光子滤波器作为微波光子学的主要分支,通过将微波器件和光子器件的集成,在光域上实现对高频微波信号的处理.既能克服传统微波通信的缺陷,又能保留光纤通信高带宽、高采样率、低损耗^[3]和抗电磁干扰等优点.值得一提的是,可调谐特性使得微波光子滤波器的应用更加灵活.即无需改变滤波器结构,便可实现不同频率微波信号的滤波处理.这一特性使得微波光子滤波器的灵活性大大提升.

另一方面,微波光子滤波器的品质因数(Q factor, Q)和主旁瓣抑制比(Main Side lobe Suppression Ratio, MSSR)是衡量滤波器的主要性能参量.近年来,很多基于不同原理的新型方法被提出用来提高滤波器的Q值或MSSR^[3-9],如利用增加信号路数^[8]方法实现的最高Q值可达256,而利用无限脉冲响应滤波器(Infinite Impulse Response Filter, IIR)^[9]实现的最高Q值达到了325.对于这类单级滤波系统而言,Q值基本已经达到上限,不可能再大幅度增加.而在结构中引入泵浦^[6],采用有源器件和无源器件的混合级联方式,可将Q值提高到801.但是这种级联结构实现的滤波器通常是不可调谐的,在一定程度上限制了滤波器的使用.

本文采用Lyot-Sagnac环设计出连续光载波,并基于相位调制器,单模光纤与光纤环形谐振器的级联结构实现的微波光子滤波器,表现出很好的滤波特性.在满足高Q值和高主旁瓣抑制比的前提下,可实现滤波器中心频率的跳跃.在当代信息加密传输系统中,有着广泛的应用前景,研究意义深远.

1 高Q值跳频带通微波光子滤波器的结构模型和工作原理

1.1 结构模型

高Q值跳频带通微波光子滤波器的基本结构模型如图1,该系统主要由五部分组成:宽带光源和Sagnac环组成的连续光载波,相位调制器及单模光纤形成的带通滤波结构,光纤环形谐振器,光电探测器和频谱分析仪.首先,基于Lyot-Sagnac滤波器的设计原理设计了多波长光源.其基本结构如图1中虚线框中所示,主要由一个3dB耦合器、三段双折射光纤(Polarization Maintaining Fiber, PMF)和四个偏振控制器(Polarization Controller, PC)构成.通过调节PC的偏振状态可改变双折射环境内保偏光纤的有效长度.宽带光源(Broadband Optical Source, BOS)输出的光载波从耦合器1端口输入,经高双折射环切割后从耦合器端口2输出,获得不同波长间隔的多波长光载波.其次,光载波的输出端接入相位调制器(Phase Modulator, PM)并利用信号发生器(Analog Signal

Generator, ASG)加载射频信号,经相位调制器的调制作用,射频信号会被调制到光载波上,再通过后续单模光纤形成的色散延迟系统后可获得所需要的负系数抽头特性,之后再接入由耦合器的两端连接形成的光纤环形谐振器中实现二次滤波.最后经过光电探测器检测(Photoelectric Detector, PD),输入频谱分析仪(Spectrum analyzer, SA)中可观察并分析所实现滤波器的滤波特性.

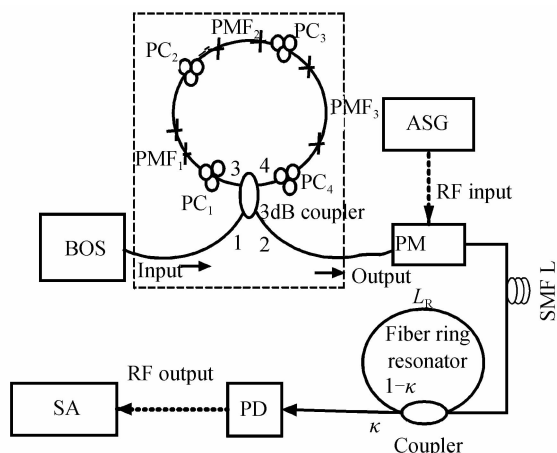


图1 高Q值跳频带通微波光子滤波器的结构模型
Fig. 1 Schematic diagram of frequency hopping bandpass microwave photonic filter with high Q factor

1.2 工作原理

通过调整偏振控制器的状态可以改变环内保偏光纤有效长度^[10] l .当选用 l_1, l_2 和 l_3 三段保偏光纤时,环内有效长度为三段保偏光纤各自长度的任意加减组合.如当保偏光纤快轴与偏振轴的夹角分别为 $+45^\circ, 0^\circ$ 和 -45° 时,环内可实现的有效长度为 $l = l_1 + 0 - l_3 = l_1 - l_3$.

设相邻两个波峰为波长间隔为 $\Delta\lambda$,为对应两波峰的频率间隔,由文献[11]中Lyot-Sagnac滤波器中波长间隔和频率间隔的表达式,有

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{\Delta n \cdot l} \leftrightarrow \Delta\omega = \frac{2\pi c}{\Delta n \cdot l} \quad (1)$$

式中, λ 为多波长光源平均波长, Δn 为双折射环境内的群双折射率, l 为环内保偏光纤的有效长度.由式(1)可知,改变保偏光纤的环内有效长度,可在耦合器的端口2输出波长间隔可变的连续光载波.

由宽带光源、强度调制器和MZ干涉仪或Sagnac环连续切割特性形成的单通带微波光子滤波器的频率响应函数公式^[12],可推知本结构中连续光载波经相位调制器调制和单模光纤组成了该系统第一级滤波结构,有

$$H_p(\Omega) = \int T(\omega) \cdot [m_1 H^*(\omega) \cdot H(\omega + \Omega) + m_2 H(\omega) \cdot H^*(\omega - \Omega)] d\omega = e^{-j[\tau(\omega_0) \Omega + L \Omega^2 / 3]} \{-j \cdot c \cdot m_1 H_1(\Omega) + j \cdot c \cdot m_2 H_2(\Omega)\} \quad (2)$$

式中, $T(\omega)$ 为光源经切割输入调制器前传输函数, $H_i(\Omega) = e^{\pm j\beta L \Omega^2 / 2} \int T(\omega) e^{-j[(\beta \Omega + \chi \Omega^2)(\omega - \omega_0) + \chi \Omega(\omega - \omega_0)^2]L} d\omega$, 且滤波器的中心频率^[12]为 $f_0 = 1/(\beta \cdot L \cdot \Delta\omega)$.

第二级滤波结构为光纤环形谐振器, 该结构由一个 2×2 的耦合器两端连接构成. 光纤环型谐振器的系统响应函数^[13]为

$$H_R(f_{RF}) = \kappa / [1 - (1 - \kappa) \exp(-j2\pi f_{RF} T_2)] \quad (3)$$

式中: k 为光纤环型谐振器耦合比, κ 越小, 环形谐振器的频率响应滤波性能^[14]越好. 该结构的延迟主要由光纤环的长度 L_R 及其折射率 n 决定 $T_2 = nL_R/c$, 则其自由光谱范围: $FSR_R = c/nL_R$.

对于该级联结构的滤波器, 只有当基于宽带光源切割及相位调制的微波光子滤波器的中心频率 f_0 与光纤环型谐振器形成的自由光谱范围各通带满足相等或呈整数 M 倍的关系时, 滤波器的主旁瓣抑制比和 Q 值才会大幅提高. 即必须满足

$$f_0 = M \cdot FSR_R \quad (M=1, 2, 3, \dots) \quad (4)$$

将式 $f_0 = 1/(\beta \cdot L \cdot \Delta\omega)$ 及 $FSR_R = c/nL_R$ 代入式(4)进一步化简可得, 光纤环型谐振器中光纤环长度与单模光纤的长度及其它相关量应满足关系式

$$L/L_R = n/(M \cdot \beta \cdot c \cdot \Delta\omega) \quad (5)$$

式中: L, L_R 分别为单模光纤长度和光纤环长度, β 为单模光纤的二阶色散.

根据级联型滤波器的传输函数是单个滤波器响应的乘积可知, 高 Q 值跳频带通微波光子滤波器结构的频率响应函数满足

$$H(f_{RF}) \propto e^{-j[\tau(\omega_0)\Omega + L\Omega^3/3]} \{ -jcm_1 H_1(\Omega) + jcm_2 H(\Omega) \} \cdot \frac{\kappa}{1 - (1 - \kappa) e^{-j2\pi f_{RF} nL_R/c}} \quad (6)$$

式中, $H_i(\Omega) = e^{\pm j\beta L \Omega^2 / 2} \int T(\omega) e^{-j[(\beta \Omega + \chi \Omega^2)(\omega - \omega_0) + \chi \Omega(\omega - \omega_0)^2]L} d\omega$

2 仿真结果及分析

由以上分析可知, 式(1)为连续光载波的波长间隔随保偏光纤有效长度的变化情况, 而式(5)为采用级联结构时前后两级滤波器中单模光纤和环形谐振器中光纤长度需满足的条件. 结合式(1)及式(5), 可得滤波器设计连续光载波中保偏光纤的有效长度, 两级联结构中单模光纤长度和光纤环形谐振器环长需要满足

$$\frac{L}{L_R} = \frac{n \cdot \Delta n \cdot l}{2\pi \cdot M \cdot c^2 \cdot \beta} \quad (M=1, 2, 3, \dots) \quad (7)$$

由式(7)分析可知, 当结构中选择采用的所有器件均确定时, 等式右边除 M 外, 其余均为定值. 又因为 M 为整数, 所以 l 的取值呈等差数列变化.

选择 $l_1 = 0.4$ m, $l_2 = 1.2$ m, $l_3 = 2$ m, 保偏光纤有效长度取 $l = l_3 = 2$ m, $l = l_1 + l_3 = 2.4$ m, $l = l_2 + l_3 - l_1 = 2.8$ m, $l = l_2 + l_3 = 3.2$ m, $l = l_1 + l_2 + l_3 = 3.6$ m

呈等差数列变化. 即利用选取的这三段保偏光纤, 通过调整偏振控制器状态可使保偏光纤有效长度在 2, 2.4, 2.8, 3.2, 3.6 m 之间变化. 又根据式(1), $\Delta n = 6.698 \times 10^{-4}$, 得到连续光载波的波长间隔分别为: 1.84 nm, 1.53 nm, 1.31 nm, 1.15 nm, 1.02 nm, 对应的频率间隔为: 1.406 THz, 1.172 THz, 1.005 GHz, 0.879 GHz, 0.781 GHz.

级联结构中, 选用高斯宽带光源, 其中心频率为 1 200.5 THz (中心波长 1 569 nm), 光源带宽为 31.4 THz, 色散参量 $\beta = 23.4$ ps²/km, 由于选用的带宽较宽, 需考虑色散斜率 χ 的影响, $\chi = 0.0625$ ps³/km. $L = 30$ km, $L_R = 101.52$ cm, $k = 0.01$, 光纤折射率 $n = 1.46$. 当连续光载波的频率间隔 $\Delta\omega$ 分别为 1.406 THz, 1.172 THz, 1.005 GHz, 0.879 GHz, 0.781 GHz 时, 光纤折射率 $n = 1.46$, 仿真得到前后两级滤波器频率响应和级联后的频率响应分别如图 2 和图 3, 其中梳状实线代表光纤环形谐振器的第二级滤

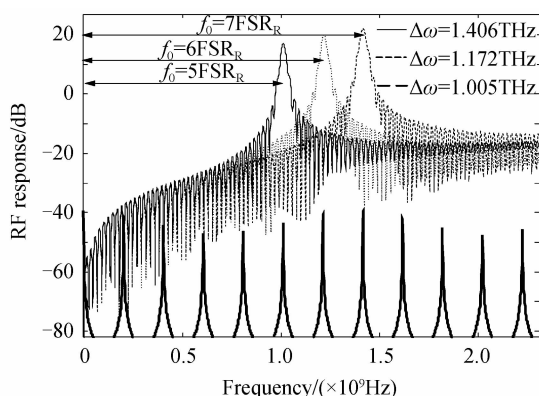


图 2 频率间隔分别为 1.406 THz, 1.172 THz, 1.005 GHz 时, 两级滤波器的频率响应
Fig. 2 The two frequency response of cascaded filters with frequency separation of 1.406 THz, 1.172 THz and 1.005 THz

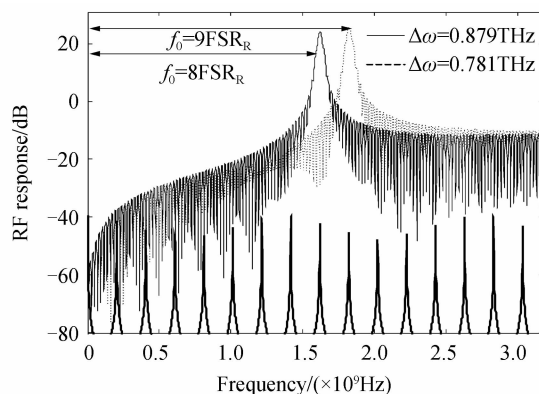


图 3 频率间隔为 0.879 THz 和 0.781 THz 时, 两级滤波器的频率响应
Fig. 3 The two frequency response of cascaded filters with frequency separation of 0.879 THz and 0.781 THz

波器频率响应, 其余各曲线表示不同频率间隔时第一

级单通带频率响应。

该仿真结果表明基于以上参量实现的基于宽带光源切割及相位调制的微波光子滤波器的中心频率 f_0 与光纤环型谐振器形成的自由光谱范围的各通带满足呈整数 M 倍的关系,且级联后滤波器的中心频率由第一级滤波器频率响应决定。

对级联后滤波器频率响应进行仿真,如图 4 所示,通过调整偏振控制状态,即所设计的整体级联滤波器可实现通带中心频率在 1.012 1 GHz,1.214 5 GHz,1.416 9 GHz,1.619 3 GHz 和 1.821 7 GHz 之间跃变。

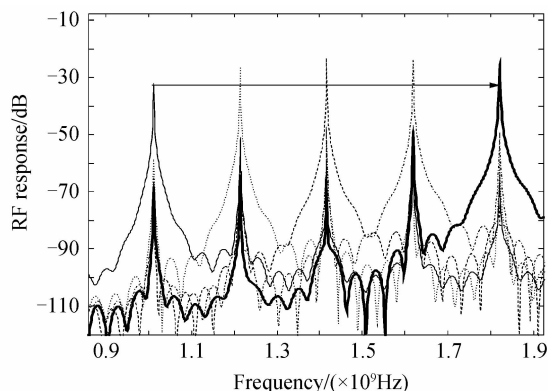


图 4 不同频率间隔下级联微波光子滤波器频率响应

Fig. 4 The center frequency response of bandpass microwave photonic filter under different frequency separation

根据仿真结果,滤波器在各中心频率的 Q 值和 MSSR 如表 1. 由表可知:所实现的滤波器在各中心频率处都表现出良好的滤波特性, Q 值最高可达 13 155.69, MSSR 最高达到了 25.51 dB. 基于该结构的滤波系统,在实际应用中,可根据目标参量需求,设计出具有特定通带频段的跳频微波光子滤波器。

表 1 滤波器各中心频率处的 Q 值和 MSSR

Table 1 The Q factor and MSSR of filter on every center frequency

Central frequency/GHz	1.012 1	1.214 5	1.416 9	1.619 3	1.821 7
Q factor	6237.88	9541.24	13155.69	11698.08	8181.70
MSSR/dB	18.96	21.8	23.4	25.51	23.78

3 结论

本文设计了一种可实现中心频率跳跃的微波光子滤波器,采用 Lyot-Sagnac 滤波器原理获得波长间隔可变的连续光载波抽头,并结合滤波器级联结构,实现了滤波器中心频率在 1.012 1 THz,1.214 5 THz,1.416 9 GHz,1.619 3 GHz,1.821 7 GHz 之间跳跃,同时在实现中心频率跳跃的各点处,滤波器的 Q 值和 MSSR 都很高,表现出良好的滤波特性. 基于该原理的

微波光子滤波器设计方法,在信息通信安全领域,展现出良好的应用前景。

参考文献

- [1] WANG Wei, YNG Li-jun Design of Silicon-on-insulator ultra-small micro-ring resonator microwave photonics phase shifter [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(6):631-636. 王巍,杨丽君. 基于绝缘硅超小微环谐振器的微波光子相移器设计[J]. *光子学报*, 2013, **42**(6):631-636.
- [2] YANG Xu-sheng, HUANG Xu-guang, XIE Jin-ling, *et al.* Investigation of generation and transmission performance of millimeter-wave based on single-sideband modulation [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2011, **22**(5):706-710.
- [3] POPOV M, FONJALLAZ P Y, GUNNARSSON O. Compact microwave photonic transverse filter with 40-dB sidelobe suppression[J]. *Photonics Technology Letters*, 2005, **17**(3): 663-665.
- [4] SONG M, LONG C M, WU R, *et al.* Reconfigurable and tunable flat-top microwave photonic filters utilizing optical frequency combs[J]. *Photonics Technology Letters*, 2011, **2**(21):1618-1620.
- [5] ZHANG Ai-ling, WU Xiao-jun. Negative coefficient band-pass microwave photonic filter with improved mainlobe-to-sidelobe suppression ratio by Sagnac interferometer[J]. *Optoelectronics Letters*, 2013, **1**(2): 108;111.
- [6] YOU Ning-si, MINASIAN A R. A novel high-Q optical microwave processor using hybrid delay-line filters [J]. *Photonics Technology Letters*, 1999, **47**(7): 1304-1308.
- [7] ZHU Kun, OU Hai-yuan, FU Hong-yan, *et al.* A simple and tunable single-bandpass microwave photonic filter of adjustable shape[J]. *Photonics Technology Letters*, 2008, **20**(23): 1917-1919.
- [8] YOU Ning-si, MINASIAN A R. Synthesis of WDM grating based optical microwave filter with arbitrary impulse response [J]. *International Topical Meeting on Microwave Photonics*, 1999, **1**(10): 223-226.
- [9] HUNTER D B, MINASIAN R A. Photonic signal processing of microwave signals using an active-fiber Bragg-grating-Pair structure[J]. *Transmission Microwave Theory Technology*, 1997, **45**(8): 1463-1466.
- [10] SOVA R M, KIM C S, KANG J U. Tunable dual-wavelength All-PM fiber ring laser[J]. *Photonics Technology Letters*, 2002, **14**(3): 287-289.
- [11] MORA J, CHEN L R. Single-bandpass microwave photonic filter with tuning and reconfiguration capabilities[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, **26**(15): 2663-2670.
- [12] MORA J, ORTEGA B, DFEZ A, *et al.* Photonic microwave tunable single-bandpass filter based on a Mach-Zehnder interferometer[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, **24**(7): 2500-2509.
- [13] FU Hong-yan, OU Hai-yan, CHEN Da-ru, *et al.* Tunable microwave photonic filter based on erbium-doped fiber amplification [J], *Journal of Optoelectronics Laser*, 2007, **18**(2): 1307-1311.
- [14] ZHANG Ai-ling, HUANG Cong, WU Xiao-jun. A band-pass microwave photonic filter based on Lyot-Sagnac filter and cascaded optical structures[J]. *Optoelectronic Letters*, 2014, **10**(1): 5-8.