

# 基于多波长激光器的带通微波光子滤波器设计

杨秀峰 彭磊\* 童峥嵘 曹晔 杨寅飞

(天津理工大学薄膜电子与通信器件实验室, 天津 300384)

**摘要** 提出了一种基于多波长光纤激光器的可调谐的带通微波光子滤波器。它以可调谐多波长光纤激光器作为光源,将相位调制器和色散器件相结合,通过在普通单模光纤中相位调制到强度调制的转换效应消除了低频谐振峰实现了带通微波光子滤波器。利用双折射光纤环镜输出谱中的一个窗口对多波长激光信号频谱进行加窗处理,使微波光子滤波器的边瓣抑制比提高了约 11 dB。通过调节多波长光纤激光器中的偏振控制器可以使输出多波长激光信号的相邻波长间隔得到调节,从而结合普通单模光纤的色散延时作用可以使微波光子滤波器的通带中心频率在 7.66 GHz 范围内调谐。

**关键词** 光通信;微波光子带通滤波器;高边瓣抑制比;双折射光纤环镜;多波长光纤激光器

**中图分类号** O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0206004

## Design of Tunable Bandpass Photonic Microwave Filter Based on Multi-Wavelength Fiber Laser

Yang Xiufeng Peng Lei Tong Zhengrong Cao Ye Yang Yinfei

(Key Laboratory of Film Electronics and Communication Devices, Tianjin University of Technology,  
Tianjin 300384, China)

**Abstract** A tunable bandpass microwave photonic filter (MPF) based on multi-wavelength fiber laser (MWFL) which is used as the light source is proposed and demonstrated. The combination of the phase modulator and the dispersion devices convert the phase modulation to intensity modulation in the ordinary single-mode fiber, and it eliminates the low-frequency resonant peak thus a new bandpass filter is realized. By using one of the birefringent fiber loop mirror output windows for the apodization of the multi-wavelength signal, the main lobe to sidelobe suppression ratio of the MPF is raised about 11 dB. The wavelength interval of the MWFL can be adjusted by tuning the polarization controllers (PC) in it. The time delay between adjacent wavelengths is changed when the laser signal passes through the ordinary single-mode fiber because of the dispersion in it thus the central frequency of the band pass MPF is tuned within 7.66 GHz.

**Key words** optical communications; bandpass microwave photonic filter (MPF); high main lobe to sidelobe suppression ratio; birefringent fiber loop mirror; multi-wavelength fiber laser

**OCIS codes** 120.2440; 070.4560; 070.2615; 070.1170; 060.5625

## 1 引 言

光域上的微波信号处理技术由于具有电磁环境兼容性好、体积小、重量轻和工作带宽较宽等优势,在微波/毫米波光纤系统中有着潜在的应用价值,从而引起了众多研究者的兴趣。微波光子滤波器可以用两种方法<sup>[1,2]</sup>实现:1)相干方式;2)非相干方式。

由于光相位容易受周围环境的影响,控制比较困难,目前的微波光子信号处理普遍采用非相干方式来实现<sup>[3]</sup>。然而非相干滤波系统是信号的光强叠加,滤波器的抽头系数为正,这使得微波光子滤波器在功能上具有很大的局限性<sup>[4]</sup>。带通和高通滤波器都很难用正系数的光学抽头来实现,大大限制了滤波器

收稿日期: 2011-07-15; 收到修改稿日期: 2011-09-19

基金项目: 国家自然科学基金(61107052)和天津市自然科学基金(11JCYBJC00100)资助课题。

作者简介: 杨秀峰(1964—),女,博士,教授,主要从事慢光、光纤激光器和光传感技术等方面的研究。

E-mail: yangxfbee@163.com

\* 通信联系人。E-mail: p-l100@163.com

传输函数。目前各国的研究工作主要集中在设计新型滤波器结构以实现负和复抽头系数、 $Q$ 值更高的频率响应、可调性、可重构和更大的动态范围等。所有这些研究都还处于基础研究阶段,许多关键技术问题尚待解决。实现微波光子滤波器往往需要利用激光器阵列<sup>[5~8]</sup>或者利用光谱切割宽带光源<sup>[9~11]</sup>,而前者的成本非常高昂,后者虽然降低了成本但是由于引入了过多的系统噪声而降低了滤波器的性能。近年来也有人利用多波长激光器作为光源<sup>[12~14]</sup>,但由于多波长激光器输出谱形不理想且不容易控制而造成微波光子滤波器的边瓣抑制比(MSR)不高。

本文提出的基于多波长光纤激光器的可调谐微波光子带通滤波器利用可调谐多波长光纤激光器作为光源,通过调节其波长间隔实现微波光子滤波器自由频谱范围(FSR)的调谐。同时,还引入了一个双折射光纤环境对从光源出来的多波长激光进行功率切趾,这样可以大幅度提高微波光子滤波器的边瓣抑制比。

## 2 实验装置和原理

实验装置如图 1 所示,由三部分组成。通过可调谐多波长光纤激光器图 1(a)来产生多波长激光信号,通过调节其中的偏振控制器来实现波长间隔以及波长范围的调节;然后多波长激光信号进入双折射光纤环路图 1(b),通过调节双折射光纤环境中的偏振控制器可以实现多波长激光和双折射光纤环境波长的匹配,从而实现对多波长激光信号的整形。经整形之后的多波长激光信号进入相位调制器,经过射频信号的调制后被送入作为色散器件的 20 km 的普通单模光纤,实现相位调制到强度调制(PM-IM)的转换,然后经过光电探测器后得到经过滤波处理后的射频信号。本文通过调节偏振控制器调节多波长激光器的波长间隔实现微波光子滤波器通带中心频率的调谐,利用双折射光纤环境对激光信号的切趾增大了滤波器的 MSR;利用相位调制器和色散器件实现 PM-IM 转换可以实现滤波器的负系数抽头,从而实现带通滤波。

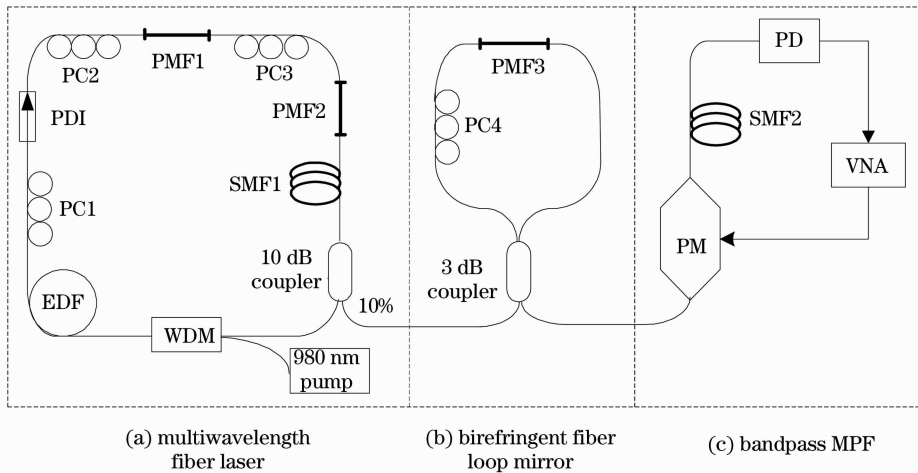


图 1 基于多波长光纤激光器的可调谐微波光子带通滤波器结构示意图

Fig. 1 Structure of tunable bandpass MPF based on multi-wavelength fiber laser

图 1(a)是基于非线性偏振旋转效应的多波长光纤激光器的实验结构图。该激光器主要包括掺铒光纤(EDF)、保偏光纤(PMF)、偏振控制器(PC)和偏振相关隔离器(PDI)等部分。其中长度为 11 m、掺杂浓度为  $4 \times 10^{-4}$  的掺铒光纤作为增益介质,长度分别为 11 m 和 4 m 的双折射系数为  $5.1 \times 10^{-4}$  的 PMF 通过调节偏振控制器 PC3 来改变腔内的有效双折射强度,长度为 4.1 km 的单模光纤(SMF1)则用来增加光纤的非线性偏振旋转效应,两个偏振控制器(PC1 和 PC2)和一个偏振相关隔离器用来改

变激光腔内的偏振态并且保证激光单向运转。波长为 980 nm 的激光经过 980/1550 波分复用器(WDM)进入掺铒光纤,激光在环形腔内顺时针单向运转,最后由一个 10:90 的耦合器(Coupler)的 10% 端口输出。归一化的激光器输出光谱图如图 2(a)实线所示。

图 1 中间部分是由保偏光纤,偏振控制器,3 dB 耦合器所组成的双折射光纤环境,实验测得其归一化传输函数如图 2(a)中虚线所示。通过调节偏振控制器(PC4)可以控制传输函数的左右移动,从而

实现与多波长激光器输出的匹配。当双折射光纤环境与多波长光纤激光器波长匹配时,相当于双折射光纤环境对多波长激光信号进行了加窗,如图 2(b)所示。加窗后的激光信号进入相位调制器(PM),经过从矢量网络分析仪(VNA)出来的射频信号的调制,

输出到长度为 10 km,色散系数为 17 ps/(nm·km)的普通单模光纤(SMF2)中,普通单模光纤的另一端接光电探测器(PD),从光电探测器出来的射频信号注入到矢量网络分析仪的输入端进行测量。

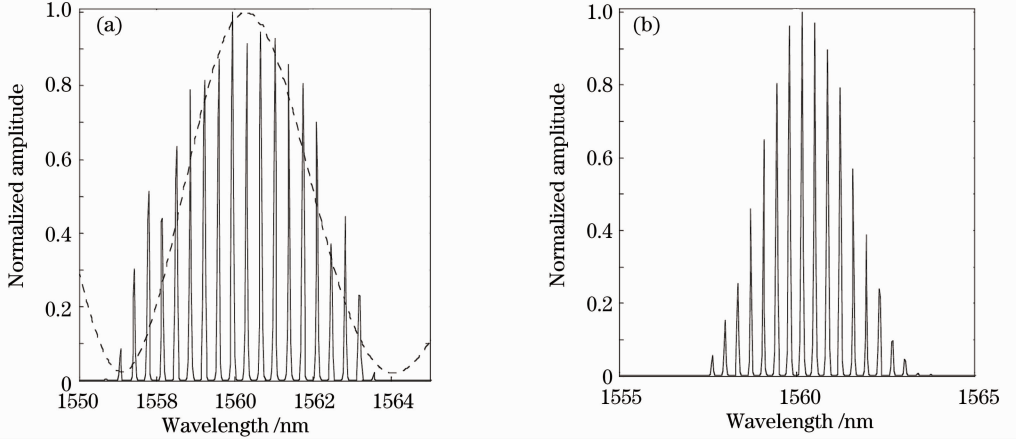


图 2 (a) 归一化的多波长激光器输出光谱(实线)及双折射光纤环境传输函数(虚线);(b) 加窗后的激光信号  
Fig. 2 (a) Normalized multi-wavelength laser output spectrum (solid line) and transfer function of the birefringent fiber loop mirror (dotted line); (b) laser signal after windowing

该微波光子带通滤波器的传输函数<sup>[15]</sup>可以表示为

$$H(\omega) = \underbrace{\cos\left(\frac{\pi \bar{D}_n L \bar{\lambda}_n^2 f_m^2}{c} + \frac{1}{2} \pi\right)}_{H_1(\omega)} \underbrace{\sum_{n=1}^N P_n \exp[j2\pi f_m (n-1)T]}_{H_2(\omega)}, \quad (1)$$

式中  $H_1(\omega)$  是由色散引入的频率响应,  $H_2(\omega)$  是典型的横向低通微波光子滤波器, 其自由频谱范围(FSR)为  $1/T$ , 其中  $T$  为两个相邻抽头之间的延迟,  $N$  为多波长激光器的波长数,  $P_n$  为多波长激光器各波长处的归一化功率值,  $L$  为作为色散器件的单模光纤的长度,  $\bar{D}_n L$  为经过色散后形成的平均累计色

散,  $\bar{\lambda}_n$  为多波长激光器输出的平均波长。

### 3 实验结果与分析

当多波长激光器输出波长数为 16, 波长间隔为 0.36 nm 时, 对激光器输出信号进行加窗处理之后得到的微波光子带通滤波器频率响应图形如图 3(a) 所

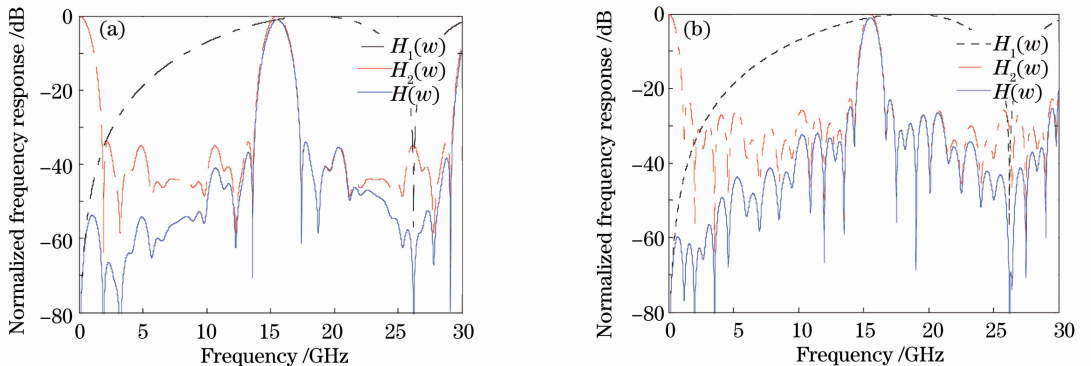


图 3 对激光输出信号加窗(a)与不加窗(b)的微波光子滤波器响应  
Fig. 3 Response of MPF when laser output signal is windowed (a) and not windowed (b)

示,它的 MSR 为 33 dB,3 dB 带宽为 1331 MHz。图 3(b)为激光器输出信号直接加到相位调制器上时得到的微波光子带通滤波器频率响应图形,MSR 为 22 dB,3 dB 带宽为 972 MHz。可以看出,经加窗之后滤波器的 MSR 提高了 11 dB,而 3 dB 带宽加宽了 359 MHz。

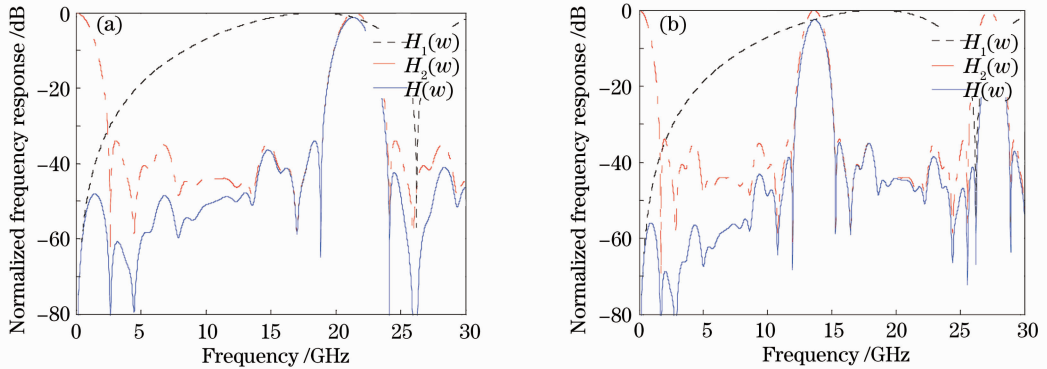


图 4 相邻波长间隔分别为 0.26 nm (a)和 0.41 nm (b)时微波光子滤波器响应

Fig. 4 Response of MPF when adjacent wavelength interval is 0.26 nm (a) and 0.41 nm (b)

通过理论分析和实验结果可以发现本文所设计的微波光子带通滤波器具有很好的特性,通过改变多波长光纤激光器输出的波长间隔可以使得滤波器通带中心频率在 7.66 GHz 范围内连续调节;通过对多波长激光信号的切趾可以使得滤波器的 MSR 提高达 11 dB。

## 4 结 论

设计了一种基于多波长光纤激光器的可调谐微波光子带通滤波器,滤波器的 FSR 可通过改变多波长激光器的波长间隔实现连续调谐,通过对多波长激光信号进行切趾提高了滤波器的 MSR,通过 PM-IM 转换实现了带通滤波。相对于利用激光器阵列作为光源的微波光子滤波器来说,大大降低了成本,具有很高的实际应用价值。

## 参 考 文 献

- 1 K. Jackson, S. Newton, B. Moslehi *et al.*. Optical fiber delay-line signal processing[J]. *IEEE Microwave Theory Technology*, 1985, **33**(3): 193~209
- 2 B. Moslehi. Fiber-optic filters employing optical amplifiers to provide design flexibility [J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(3): 226~228
- 3 Ehsan Hamidi, Daniel E. Leaird, Andrew M. Weiner. Tunable programmable microwave photonic filters based on an optical frequency comb [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, 2010, **58**(11): 3269~3278
- 4 Haiyan Ou, Chenhui Ye, Kun Zhu *et al.*. Millimeter-wave

通过调节 PC3 可以改变激光器输出的多波长激光信号相邻波长间隔,可使波长间隔在 0.26~0.41 nm 之间连续可调,从而实现带通滤波器的中心频率调谐,如图 4 所示。可以看出,通过调节多波长激光器,微波光子滤波器通带的中心频率移动了 7.66 GHz,且在这 7.66 GHz 内是连续可调的。

harmonic signal generation and distribution using a tunable single-resonance microwave photonic filter[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2010, **28**(16): 2337~2342

- 5 D. Pastor, J. Capmany, B. Ortega *et al.*. Reconfigurable RF photonic filter with negative coefficients and flat-top resonances using phase inversion is a newly designed 2×1 integrated Mach-Zehnder modulator [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(9): 2126~2128
- 6 E. H. W. Chan, R. A. Minasian. Multiple-tap, tunable microwave photonic interference mitigation filter [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2011, **29**(8): 1069~1076
- 7 T. X. H. Huang, X. Yi, R. A. Minasian. Microwave photonic filters with programmable bipolar coefficients based on  $\pi$ -phase inversion of DSB sidebands [J]. *Electron. Lett.*, 2010, **46**(24): 1609~1610
- 8 B. Vidal, J. L. Corral, J. Marti. Multi-tap all-optical microwave filter with negative coefficients based on multiple optical carriers and dispersive media[C]. International Topical Meeting on Microwave Photonics, Centro de Tecnología Nanofotónica, Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia (Spain), 2005, **12-14**: 201~204
- 9 Yan Gao, Liang Dou, Anshi Xu *et al.*. Novel tunable microwave photonic notch filter using a 3×3 coupler based Sagnac loop[C]. Nano-Optoelectronics Workshop, 2007, 152~153
- 10 Yi X. Huang, T. X. H. R. A. Minasian. Microwave photonic filter with tunability, reconfigurability and bipolar taps [J]. *Electron. Lett.*, 2009, **45**(16): 840~841
- 11 Hongyan Fu, Wei Zhang, Chengbo Mou *et al.*. High-frequency fiber Bragg grating sensing interrogation system using Sagnac-loop-based microwave photonic filtering [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(8): 519~521
- 12 L. R. Chen, V. Page. Tunable photonic microwave filter using semiconductor fibre laser [J]. *Electron. Lett.*, 2005, **41**(21):

1183~1184

13 Xinhuan Feng, C. Lu , H. Y. Tam *et al.*. Reconfigurable microwave photonic filter using multiwavelength erbium-doped fiber laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(17): 1334~1336

14 Byung-Min Jung, Min-Ho Park, Hyoung-Jun Kim *et al.*.

Microwave photonic filter based on fiber-optic delay line [C]. International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology, Gwangju, South Korea, 2010. 518~520

15 Fei Zeng, Member, Jianping Yao. Investigation of phase-modulator-based all-optical bandpass microwave filter [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(4): 1721~1728

栏目编辑:谢 婧