

基于掺 Er 光纤放大器的可调谐微波光子滤波器*

付宏燕, 欧海燕, 陈达如**, 肖云, 何赛灵

(浙江大学光通信联合研究中心, 现代光学仪器国家重点实验室光及电磁波研究中心, 浙江 杭州 310058)

摘要:提出了一种基于掺 Er 光纤放大器(EDFA)的光纤环结构可调谐微波光子滤波器。在光纤环结构中引入掺 Er 光纤(EDF), 通过增加泵浦功率提供增益来补偿器件损耗, 从而增加了信号的有效采样数, 大大改善了滤波器的性能。在泵浦功率为 42.7 mW 时, 实现了通带 3 dB 带宽为 0.15 MHz、Q 值为 100 和抑制比为 20 dB 的微波光子滤波器。进一步通过在光纤环结构中引入可调光纤延迟线(TODL), 实现了可调谐微波滤波器。

关键词:微波光子滤波器; 掺 Er 光纤放大器(EDFA); 光纤环; 微波信号处理; ROF(radio-over-fiber)系统

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2007)11-1307-03

Tunable Microwave Photonic Filter Based on Er-doped Fiber Amplification

FU Hong-yan, OU Hai-yan, CHEN Da-ru**, XIAO Yun, HE Sai-ling

(Center for Optical and Electromagnetic Research, State Key laboratory of Modern Optical Instrumentation, Joint Research Center of Optical Communications, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: The tunable microwave photonic filter based on a fiber ring and Er-doped fiber amplifier(EDFA) was proposed. By introducing a section of Er-doped fiber(EDF) into the fiber ring, the loss of the signal can be compensated by the EDFA gain through adjusting the pump power, which can largely increase the number of the effective sampling taps, and improve the performance of the microwave photonic filter notably. When the pump power was set to be 42.7 mW, a microwave bandpass filter with the 3 dB bandwidth of 0.15 MHz, the Q factor up to 100 and the extinction ratio up to 20 dB was achieved. By employing a tunable optical delay line in the above fiber ring, a tunable microwave photonic filter was realized through tuning the length of the optical delay line. The proposed tunable microwave photonic filter can find great applications in microwave signal processing and ROF system.

Key words: microwave photonic filter; Er-doped fiber amplifier; fiber ring; microwave signal process; radio-over-fiber (ROF) system

1 引言

与传统的微波电滤波器相比, 微波光子滤波器作为 ROF(radio-over-fiber)系统中的关键技术, 其具有工作带宽大、损耗低、电磁兼容性好、易实现可调谐和重构以及结构简单等优点, 引起了广泛的研究兴趣^[1,2]。近年, 微波光子滤波器的解决方案相继被提出^[3~5], 然而已经报道的可调谐微波光子滤波器, 由于引入了温度敏感的光纤光栅^[6], 结构复杂、稳定性差。

本文在基于光纤环的无限脉冲响应(IIR)滤波器基础上, 将掺 Er 光纤放大器(EDFA)引入环中, 得到了具有窄通带带宽、较高 Q 值和较高抑制比的低成本微波光子滤波器。并且, 结合可调光纤延迟线(TODL), 实现了自由频谱范围(FSR)可调谐的微波光子滤波器。

2 原理和结构

图 1(a)给出了一种简单的基于光纤环的微波光子滤波器结构。射频信号驱动 MZ 电光调制器, 将来自宽带光源的光调制。调制后的信号直接进入 3 dB 耦合器, 耦合器的一个输入和输出端通过光纤连接, 形成光纤环。载有微波的光信号在该光纤环中经过多次采样后, 等时间间隔地从耦合器的另一输出端输出并叠加, 从而实现了微波滤波。

该结构中, 耦合器的分光比为 1:1, 第 k 次采样的输出功率 P_k 可以表示为

$$P_k = 0.5^k P_0, k = 1, 2, \dots \quad (1)$$

其中, P_0 为入射光功率。经过上述结构输出的信号为 k 次采样的叠加, 从而可以得出该微波光子滤波器的频率响应为

收稿日期: 2006-10-05 修订日期: 2007-05-10

* 基金项目: 浙江省人才基金资助项目(R104154)

** E-mail: daru@coer.zju.edu.cn

$$H(\Omega) = \frac{\sum_{k=1}^{\infty} P_k e^{-j2\pi k \Omega L/c}}{P_0} = \frac{0.5}{1 - 0.5e^{-j2\pi \Omega L/c}} \quad (2)$$

其中: L 为光纤环的长度; n 为光纤的有效折射率; c 为真空中的光速; Ω 是射频信号的频率。滤波器的 FSR 可表示为

$$\text{FSR} = c/nL \quad (3)$$

图 1(b) 为该光纤环微波滤波器的频率响应曲线。实验中, 采用的宽带光功率为 3.637 mW, 滤波后信号直接由 PD 接收。从图可以看出, 理论计算结果和实验结果相符合。虽然上述 IIR 微波滤波器的结构简单, 但是其得到的带通滤波器的 3 dB 带宽为 16 MHz, 而 Q 值和抑制比分别为 3.1 和 5.5 dB。由于耦合器的耦合比和器件损耗问题, 使得有效的采样数量并不是很多, 极大地制约了该滤波器的性能。

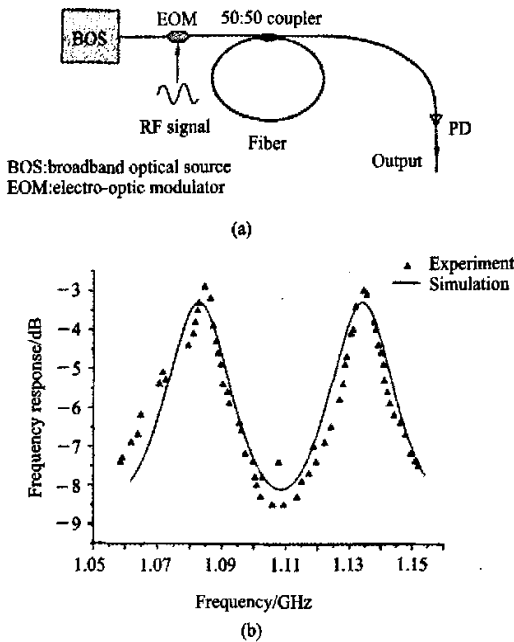


图 1 (a) 基于光纤环的微波滤波器结构图;
(b) 理论与实验得到的频率响应
Fig. 1 (a) Experimental setup and (b) measured frequency response and the simulation result of the microwave photonic filter based on a fiber ring

为了解决上述问题, 在光纤中加入了 EDFA, 通过增大泵功率, 提高 EDFA 的增益, 大大增加了信号的有效采样数, 从而改善滤波器的性能。其结构如图 2 所示。微波滤波器的频率响应可表示为

$$H(\Omega) \propto \frac{0.5}{1 - 0.5ge^{-j2\pi \Omega L/c}} \quad (4)$$

其中: g 为 EDFA 的增益, 它可以由泵浦功率来控制。当 $g \rightarrow 2$ 时, 该微波滤波器的频率响应曲线趋于尖锐, 从而能够达到较窄的带宽、高 Q 值和高抑制比。

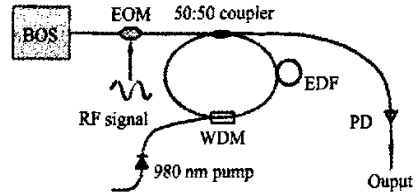


图 2 基于光纤环和 EDFA 的微波光子滤波器结构图

Fig. 2 Experimental setup of the microwave photonic filter based on a fiber ring and EDFA

在上述滤波器结构的基础上, 在光纤环中加入 TODL, 得到如图 3 所示的结构。由式 (3) 可知, 改变 TODL 的长度, 光纤环总长 L 变化, 从而可以改变微波光子滤波器的 FSR, 使得在特定的频率范围内滤波器的中心频率连续可调, 实现了可调谐的微波光子滤波器。

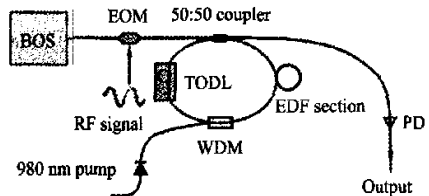


图 3 基于 EDFA 的光纤环结构可调谐微波滤波器结构图

Fig. 3 Experimental setup of the tunable microwave photonic filter based on a fiber ring and EDFA

3 实验结果和讨论

在图 2 所示滤波器结构的实验中, 宽带光功率为 3.614 mW, 在光纤环中加入了长为 1 m 的 EDF, 在保证没有达到的激光输出阈值的条件下, 采用不同的功率 (25.7、30.2 和 42.7 mW) 进行后向泵浦来改变 EDFA 的增益, 得到了一组微波滤波器的频率响应, 如图 4(a) 所示。可以看出, 随着泵浦功率的增加, 滤波器的 3 dB 带宽变窄, Q 值和抑制比都有很大提高。当泵浦功率为 42.7 mW 时, 得到的带通滤波器的 3 dB 带宽为 0.15 MHz, Q 值和抑制比分别为 100 和 20 dB。图 4(b) 为当泵浦功率为 42.7 mW 时的实验和理论计算结果的比较, 可以看出, 理论和实验结果符合得很好。

按照图 3 所示的结构, 在加有 EDFA 的光纤环中接入 TODL。此时, 宽带光功率为 3.581 mW, 泵浦光功率为 43.7 mW。调节 TODL 的相对延迟长度 (0、10、30 和 50 mm), 得到了可调谐的微波光子滤波器。

实验结果如图 5 所示。可以看到, 实验测得与理论计算相符合; TODL 引起的损耗使得同等泵浦条件下滤波器的 Q 值和抑制比都有所下降。此问题可以通过进一步增大 EDFA 增益补偿损耗来解决。

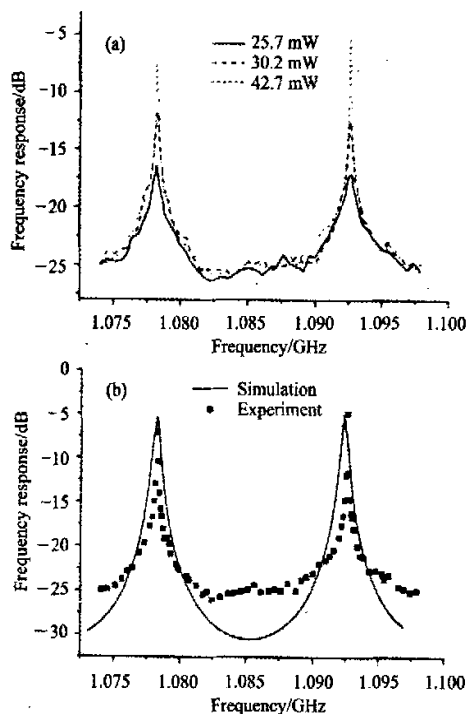


图 4 (a) 加入 EDFA 的光纤环状微波滤波器在不同泵浦功率下的频率响应;(b) 当泵浦功率为 42.7 mW 时的实验和理论计算结果

Fig. 4 (a) Measured frequency response of the fiber ring and EDFA based microwave photonic filter for different pump power; (b) Measured and simulation results for the pump power of 42.7 mW

4 结 论

在简单的光纤环微波滤波器的基础上,引入了 EDFA 来补偿器件损耗,通过增大增益来增加信号的采样数,从而大大改善了微波滤波器的性能。比较了不同泵浦功率的情况下微波滤波器的频率响应特性。在不产生激光的条件下,泵浦功率越高滤波器的 3 dB 带宽越窄, Q 值和抑制比也越好。在泵浦功率为 42.7 mW 的条件下得到滤波器的 3 dB 带宽、Q 值和抑制比分别为 0.15 MHz、100 和 20 dB。在环中接入 TODL,通过调节 TODL 长度得到 FSR 可调的微波滤波器。该微波光子滤波器结构简单、成本低,在微波信号处理和 ROF 通信系统中具有很好的应用价值和前景。

参考文献:

- [1] Jose Capmany, Beatriz Ortega, Daniel Pastor. A tutorial on microwave photonic filters[J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(1): 201-229.
- [2] CHU Hao, ZHANG Xian-ming, SHEN Ling-fang. Tunable photonic micro-

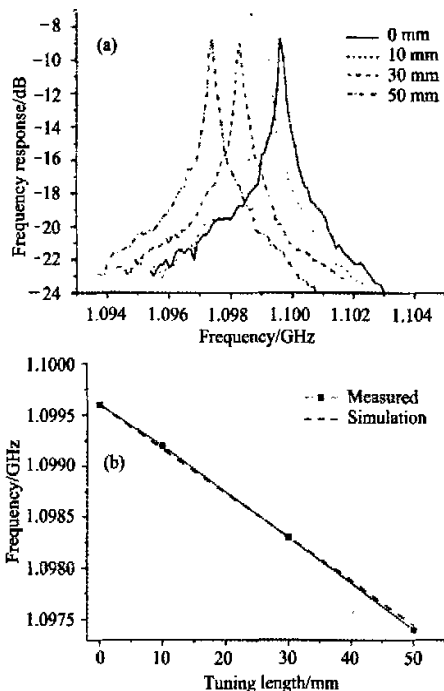


图 5 (a) 基于光纤环和 EDFA 的可调谐微波滤波器对于不同 TODL 的频率响应;(b) 实验测得和理论计算得到的滤波器相应通带中心频率与 TODL 调节长度的关系

Fig. 5 (a) Measured frequency response of the tunable microwave photonic filter when the length of the TODL is set to 0 mm, 10 mm, 30 mm and 50 mm, respectively; (b) Measured and simulation results for the relationship between the tuning length and the center frequency of the corresponding passband

wave filters based on fibre loop[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser* (光电子 • 激光), 2006, 1(17): 17-19. (in Chinese)

- [3] David B Hunter, Robert A Minasian. Photonic signal processing of microwave signals using an active-fiber Bragg-grating-pair structure [J]. *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, 1997, 45 (8): 1463-1466.
- [4] Leng J S, Zhang W, Williams J A R. Optimization of superstructured fiber Bragg gratings for microwave photonic filters response[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(7): 1736-1738.
- [5] David B Hunter, Robert A Minasian. Tunable microwave fiber-optic bandpass filters[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, 11 (7): 874-876.
- [6] ZHANG Xiao-jing, WU Zhan-jun, ZHANG Bo-ming, et al. Experimental study on cross-sensitivity of temperature and strain of fiber optic Bragg gratings[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser* (光电子 • 激光), 2005, 16(5): 566-569. (in Chinese)

作者简介:

付宏燕 (1982—), 女, 博士研究生, 主要从事微波光子滤波器、光纤光栅及 ROF 通信系统等研究。

微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立, 致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养, 是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司, 以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们推出的微波滤波器设计培训专题, 有资深工程师领衔主讲, 课程既有微波滤波器设计原理的详细解释, 也有各种仿真分析工具的实际设计应用讲解, 设计原理和设计仿真实践相结合, 向大家呈现各种结构的微波滤波器的完整设计流程。旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。



微波滤波器设计培训专题视频课程

高清视频, 专家授课, 中文讲解, 直观易学; 既有微波滤波器设计原理的详细解释, 也有像 ADS、CST、HFSS 各种仿真分析工具的实际设计应用讲解, 旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/filter/>

更多专业培训课程:

- **HFSS 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计专业培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>