

文章编号: 0258-7025(2008)Supplement2-0250-04

# 基于重构等效啁啾超结构光纤光栅的可调谐微波光子滤波器的仿真研究

郑吉林<sup>1</sup> 王 荣<sup>1</sup> 李玉权<sup>1</sup> 蒲 涛<sup>1</sup> 郭 虹<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007; <sup>2</sup> 沈阳军区军训器材研究所, 辽宁 沈阳 110035)

**摘要** 提出了一种新型的基于重构等效啁啾(REC)超结构光纤光栅的可调谐微波光子滤波器的结构。根据 REC 技术,利用同一块均匀相位掩模板可以灵活地设计制作出具有不同斜率的线性群时延的光纤光栅。作为有限冲击响应(FIR)滤波器的抽头延时单元,不同光纤光栅之间群时延的差值决定了滤波器的自由频程(FSR)。通过改变可调谐激光器的输出波长来选择不同的抽头间时延差从而达到调谐 FSR 目的。仿真结果表明,该滤波器可以实现中心频率从 21 GHz 到 33 GHz 的连续可调。事实上,由于 REC 技术的灵活性,在理论上对于任意给定的频段和调谐范围,这种新型的滤波器结构都能够实现。

**关键词** 光栅;微波光子滤波器;超结构光纤光栅;重构等效啁啾;调谐

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL200835s2.0250

## Simulation Research on Tunable Photonic Microwave Filter Based on Reconstruction Equivalent Chirp Superstructure Fiber Bragg Grating

Zheng Jilin<sup>1</sup> Wang Rong<sup>1</sup> Li Yuquan<sup>1</sup> Pu Tao<sup>1</sup> Guo Hong<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China  
<sup>2</sup> Researching Institute of Military Training Equipment, Shenyang Military Command, Shenyang, Liaoning 110035, China

**Abstract** A novel tunable photonic microwave filter based on reconstruction equivalent chirp (REC) superstructure fiber Bragg grating (SFBG) is proposed. SFBGs with different slope of group time delay can be neatly designed and fabricated using a uniform phase mask according to the REC technology. As basic time delay among taps of FIR filter, the differential group delay among SFBGs determine the free spectral range (FSR) of the filter. Thus a tunable FSR can be realized by tuning the wavelength of the tunable laser source (TLS) which determine the time-delay difference. The simulation result shows that the FSR can be continuously tuned from 21 GHz to 33 GHz. In fact, this novel tunable filter can be realized in terms of any given frequency band and tuning range in theory due to the flexibility of the REC technology.

**Key words** gratings; photonic microwave filter; superstructure fiber Bragg grating; reconstruction equivalent chirp; tunable

## 1 引 言

微波光子滤波器从本质上来讲是一种光子系统,它的目标在于提供等效于或者优于传统微波滤波器对微波信号进行处理的功能。由于微波光子滤波器是把微波信号调制在光域并在光域进行微波信号处理,因此它注定具有较之电域而言光域所固有的优势:低插损、高带宽、不受电磁干扰、易调谐、可重构<sup>[1~8]</sup>等。目前有些技术已经被提出来用于实现微波光子滤波器的可调性。这些技术可以归类为 3 种:

基于开关延迟线<sup>[5]</sup>;基于可调光源并结合光域色散器件<sup>[6,7]</sup>;基于可调谐的光域色散器件<sup>[8]</sup>等。近年来,结构紧凑、功能灵活的光纤光栅由于其在光域灵活的信号处理能力而在微波光子处理领域也越来越受到关注<sup>[7,9~11]</sup>。由于啁啾光纤光栅能够对不同波长的光信号进行不同的延时,这也为形成有限冲击响应(FIR)滤波器的抽头延时具备了基本条件。如果使用可调谐激光器选择不同的输出波长以改变抽头间的时延差就可以非常容易地调谐滤波器的自由频程

**基金项目**: 国家自然科学基金(60502003)和江苏省自然科学基金(BK2007501)资助课题。

**作者简介**: 郑吉林(1982—),男,博士研究生,主要从事光码分多址和光器件等方面的研究。E-mail: zhengjilins@126.com

**导师简介**: 王 荣(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事光电子学和光网络等方面的研究。E-mail: wr-njice@163.com

(FSR)。然而制作不同的啁啾光纤光栅需要相应不同的啁啾相位掩模板,这无疑带来了高昂的成本。如果利用重构等效啁啾<sup>[12]</sup>的方法,仅需一块均匀相位掩模板就能制作出具有不同斜率的线性群时延的光纤光栅,这不仅节约了成本,还带来设计上的灵活性。

本文在介绍重构等效啁啾超结构光纤光栅原理的基础上,提出了一种可调谐微波光子滤波器的结构,通过商业仿真软件对该设想进行了仿真验证,仿真结果证明了该设想的可行性。

## 2 原理

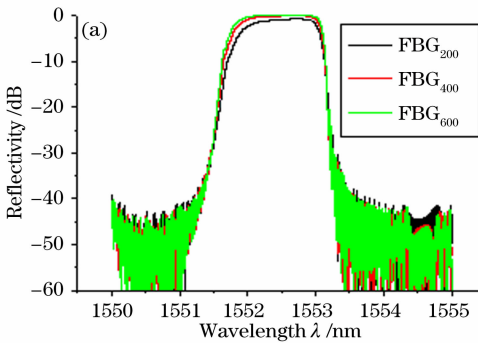
重构等效啁啾超结构光纤光栅的原理是对采样光栅(SBG)的采样周期进行调制,使 SBG 的某一级信道产生目标响应,其意义在于将光栅周期的变化转换为采样周期的变化,不仅降低工艺要求还带来了设计的灵活性。等效重构啁啾超结构光纤光栅折射率表达式为

$$\Delta n(z) = \frac{1}{2}S(z)\exp\left[j\frac{2\pi z}{\Lambda} + j\varphi(z)\right] + c. c., \quad (1)$$

$$S(z) = A(z) \times s_0[z + f(z)], \quad (2)$$

式中  $s_0(z)$  是周期为  $P$  的周期函数,  $A(z)$  是该采样函数  $S(z)$  的切趾,  $f(z)$  是对原周期函数的相位调制,  $\Lambda$  为光栅周期,  $\varphi(z)$  表示相位模板给 SBG 带来的相位调制。对  $\Delta n(z)$  进行傅里叶级数展开,考虑第  $m$  级子 FBG,有

$$\Delta n_m(z) = \frac{1}{2}F_m A(z) \times \exp\left[j\frac{2m\pi f(z)}{P} + j\varphi(z)\right] \times \exp\left[j\frac{2\pi z}{\Lambda} + j\frac{2m\pi z}{P}\right] + c. c., \quad (3)$$



如果这级子 FBG 与某个种子 FBG 是等效的,先令种子 FBG 的折射率表达式为

$$\Delta n_s(z) = \frac{1}{2}A_s(z)\exp[j\varphi_s(z)]\exp\left[j\frac{2\pi z}{\Lambda_s}\right] + c. c., \quad (4)$$

那么参数之间的对应关系为

$$\begin{aligned} A(z) &= A_s(z)/F_m, \\ f(z) &= \frac{\varphi_s(z) - \varphi(z)}{2\pi} \frac{P}{m}, \\ P &= m\Lambda^2/(\Lambda - \Lambda_s), \end{aligned} \quad (5)$$

这样就可以根据所要求的目标响应运用任何一种重构算法(本文采用傅里叶变换法)得到种子 FBG 的结构参数,然后根据(5)式得出等效重构啁啾超结构光纤光栅的结构参数,那么在  $m$  级信道响应上就可以得到目标响应特性。具体过程如图 1<sup>[13]</sup>所示。

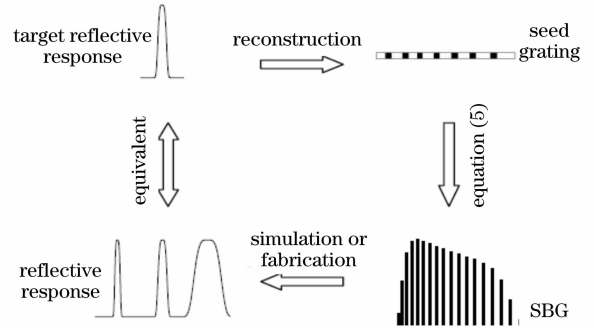


图 1 重构等效啁啾过程

Fig. 1 Process of REC

图 2 为采用重构等效啁啾方法仿真得到的累积色散分别为 200 ps/nm, 400 ps/nm, 600 ps/nm 的群时延特性的光纤光栅的反射谱。

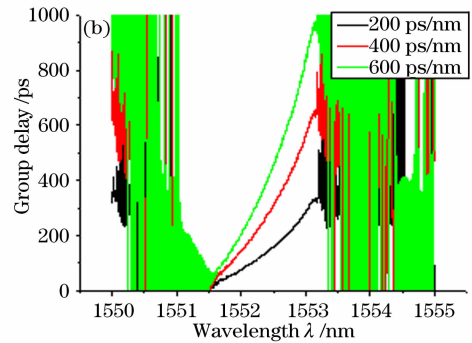


图 2 重构等效啁啾得到的不同群时延特性的光纤光栅反射谱。(a)反射率;(b)群时延

Fig. 2 Reflection spectrum of REC based SFBGs with different group delay. (a) reflectivity; (b) group delay

## 3 可调谐微波光子滤波器的设计及仿真结果

基于重构等效啁啾超结构光纤光栅的可调谐微

波光子滤波器的组成如图 3 所示。图中共采用 9 个光纤光栅即 9 个抽头,在通带内(设计成 1 nm),每个光纤光栅的群时延特性分别为 100 ps/nm, 200 ps/nm, 300 ps/nm, 400 ps/nm, 500 ps/nm,

600 ps/nm, 700 ps/nm, 800 ps/nm, 900 ps/nm。被射频调制过的光载波经 1:9 的耦合器分路到不同的抽头单元, 每个分路上的可调谐光衰减器 (TOA) 用来调整抽头系数的大小。这样由于群时延特性的不同每个抽头到达光电检测器 (PD) 存在时延差 ( $\tau$ ), 根据有限冲击响应滤波器的特性, 正是这个时延差决定了滤波器的自由频程 FSR ( $FSR=1/\tau$ ), 即决定了带通滤波器的中心频率, 由于时延差由光载波的

波长决定, 这就意味着光载波的波长决定了带通滤波器的中心频率。那么通过调整光载波的中心波长, 使用可调谐激光器 TLS, 可以连续改变抽头的时延差值, 从而达到连续调谐微波光子滤波器的功能。由于抽头系数权值的包络决定了滤波器频响的形状, 因此可以通过调整每个抽头上的可调谐光衰减器来调整所需的频响形状, 本文采用抽头系数的包络是高斯 (Gauss) 形的。

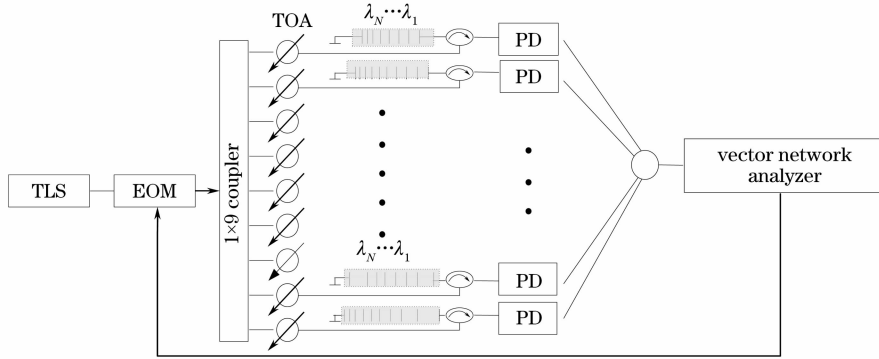


图 3 微波光子滤波器的原理验证图

Fig. 3 Principle of photonic microwave filter

对于这样一个 FIR 滤波器, 经光电检测后光电流的数学表达式为

$$I_o(t) = \mathcal{R} \frac{P_i}{9} \cdot \sum_{r=0}^{r=8} [ |a_r| S_i(t - r\tau) ], \quad (6)$$

式中  $\mathcal{R}$  为光电检测器的响应度,  $P_i (i = 0 \sim 8)$  为均值序列, 是激光器的各个分路输出功率,  $a_r$  为各个抽

头的权值与衰减器值有关, 文中设计成 Gauss 形。  $S_i(t)$  为输入的射频信号。相邻抽头间的时延差值  $\tau$  为 (单位 ps)

$$\tau = D_2(\lambda) - D_1(\lambda) = D_3(\lambda) - D_2(\lambda) = \dots = D_9(\lambda) - D_8(\lambda) = 100 \cdot (\lambda - \lambda_0), \quad (7)$$

其中  $\lambda$  为可调谐激光器的输出光波长,  $\lambda_0$  为光纤光

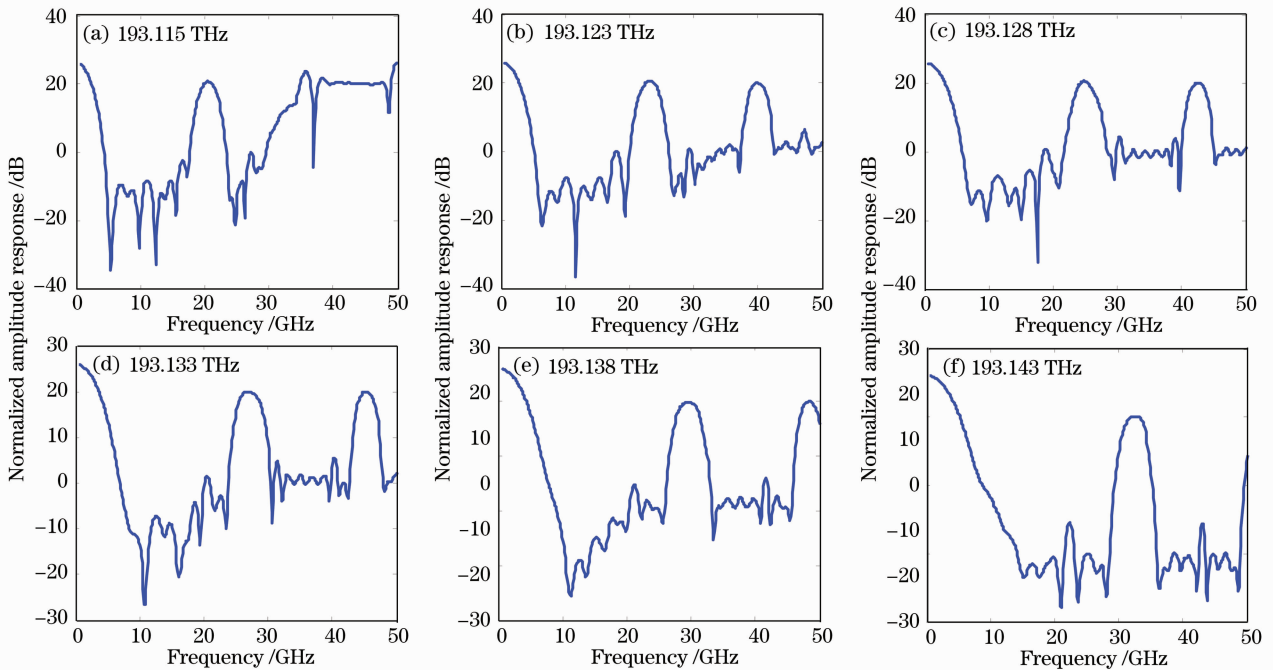


图 4 滤波器在不同输入光频率下的频响特性

Fig. 4 Frequency response of proposed filter with different optical carrier frequency

栅通带左边缘的波长点。由(7)式可以看出,各抽头间的时延差完全由激光器的波长所决定,改变光载波波长将会导致该 FIR 滤波器抽头间时延差的改变从而改变 FSR,图 4 是根据图 3 的原理及参数利用商业仿真软件得到的一组仿真结果,可以看到,随着激光器输出波长的改变,该滤波器的通带频率实现了从 21 GHz 到 33 GHz 的连续可调。在调谐过程中,带通滤波器的通带频响形状几乎没有改变,由于抽头系数采用了 Gauss 形的包络,滤波器频响比较平滑,3 dB 带宽约为 2.2 GHz,边带抑制比大约为 20 dB。事实上,由于 REC 技术的灵活性,还可以设计更多的抽头来改善滤波器的 Q 值、边带抑制比、调谐范围等特性,进一步地,如果将电光调制换成是单边带(SSB)调制将会进一步改善频响特性。例如由于本文采用传统双边带调制导致的载波抑制效应(CSE)会使可调谐范围不能太大,而采用单边带调制将会克服这一问题。

## 4 结 论

提出了基于重构等效啁啾超结构光纤光栅的可调微波光子滤波器的设想,由于重构等效啁啾(REC)的运用使得能够仅仅通过一个均匀相位掩模板灵活地制作具有不同斜率的线性群时延的光纤光栅,这些光纤光栅能够很好地满足作为 FIR 滤波器抽头时延的需要。仿真结果证明了该设想的可行性。因此这种新型的可调谐微波光子滤波器具有成本低廉、设计灵活的优势。滤波器频响特性的进一步改进与完善将在下一步工作中研究。

## 参 考 文 献

- 1 J. Capmany, B. Ortega, D. Pastor *et al.*. Discrete-time optical processing of microwave signals. [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(2): 702~723
- 2 J. Capmany, D. Pastor, B. Ortega *et al.*. Photonic processing of microwave signal [J]. *Proc. Inst. Elect. Eng. Optoelectron.*, 2005, **152**(6): 299~320
- 3 A. J. Seeds. Microwave photonics [J]. *IEEE Trans. Microw. Theory Technol.*, 2002, **50**(3): 877~887
- 4 J. Capmany, J. Mora, B. Ortega *et al.*. Microwave photonic filters using low-cost sources featuring tunability, reconfigurability and negative coefficients [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**: 1412~1417
- 5 B. Vidal, V. Polo, J. L. Corral *et al.*. Photonic microwave filter with tuning and reconfiguration capabilities using optical switches and dispersive media [J]. *Electron. Lett.*, 2003, **39**: 547
- 6 D. Norton, S. Johns, C. Keefer *et al.*. Tunable microwave filter using high dispersion fiber time delays [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(7): 831~832
- 7 J. Capmany, D. Pastor, B. Ortega. New and flexible fiber-optic delay-line filters using chirped fiber Bragg gratings and laser arrays [J]. *IEEE Trans. Microw. Theory Technol.*, 1999, **47**(7): 1321~1326
- 8 J. Mora, B. Ortega, A. Diez *et al.*. Highly tunable optically switched time delay line for transversal filtering [J]. *Electron. Lett.*, 2003, **39**: 1799~1800
- 9 Sebastien R. Blais, Jianping Yao. Tunable photonic microwave filter using a superstructured FBG with two reflection bands having complementary chirps [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(3): 199~201
- 10 Mikhail Popov, Pierre-Yves Fojallaz, Ola Gunnarsson. Compact microwave photonic transversal filter with 40-dB sidelobe suppression [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(3): 663~665
- 11 J. S. Leng, W. Zhang, J. A. R. Williams. Optimization of superstructured fiber Bragg gratings for microwave photonic filters response [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(7): 1736~1738
- 12 Yitang Dai, Xiangfei Chen, Li Xia *et al.*. Sampled Bragg grating with desired response in one channel by use of a reconstruction algorithm and equivalent chirp [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(12): 1333~1335
- 13 Dai Yitang. Research and application on novel fiber Bragg grating [D]. Beijing: Tsinghua University, 2006. 35  
戴一堂. 新型光纤布拉格光栅的研究与应用 [D]. 北京: 清华大学, 2006. 35