

几种典型微波光子滤波器结构的综述分析

祁春慧 裴丽 郭兰 吴树强 赵瑞峰

全光网与现代通信网教育部重点实验室,

北京交通大学光波技术研究所, 100044, 北京

【摘要】 微波光子滤波器能够实现在光域内直接对射频信号的处理, 并且较易实现可调谐性和传输函数的快速重构, 从而成为微波光子学的一个重要研究内容。本文综合评述了几种典型微波光子滤波器的结构, 并分析比较了各自的功能特点和不足。

【关键词】 微波光子学 光纤光栅 滤波器

一、引言

微波光子学将微波学与光子学相结合, 它集成了微波学与光子学的优点, 在射频波和光纤之间透明转换, 微波提供了低成本可移动无线连接方式, 而光纤提供了低损宽带连接, 且不受电磁的干扰^[1]。微波光子学中关键性基本技术之一就是微波光子滤波器, 其主要目的是代替传统的方法来处理射频(RF)信号, 即利用射频信号直接调制光载波, 并在光域内直接进行处理, 该滤波器具有高紧密型, 电磁环境下的高兼容性, 体积小且易于安装等优点。近几年来, 随着人们对宽带通信容量不断增长的需求, 微波光子滤波器逐渐成为国内外众多学者研究的热点之一。从最初的利用单模光纤的延时特性到利用光纤光栅的滤波技术, 再到实现多抽头高Q值, 微波光子滤波器的调谐范围从几MHz发展到几十GHz, 动态范围约为40dB, Q值在2 GHz和10GHz大于1000, 并且实现了传输函数的快速重构^[2]。

目前国内外关于微波光子滤波器的报导很多, 大都是利用射频信号来调制光

载波并在光纤链路上进行传输,经过不同的延时后得到不同的抽头,从而实现不同的滤波响应。鉴于光纤光栅(FBG)独特的波长选择特性,近年来提出了许多基于FBG的微波光子滤波器结构。本文对几种典型微波光子滤波器的结构进行了综合评述,并分析比较了各自的功能特点和不足。

二、几种典型微波光子滤波器结构

微波光子滤波器按照提供光源不同可分为多模光源,宽带光源和激光阵列等结构;鉴于光纤光栅的优良特性,大多微波光子滤波器均充分利用了光纤光栅,按照光纤光栅不同的应用方式可分为啁啾光纤光栅,光纤光栅对,光纤光栅阵列,光纤光栅环,特殊结构的光纤光栅等结构。

2.1 不同光源的微波光子滤波器

最初构建微波光子滤波器是利用光纤的高色散延时特性,但其主要限制在于调谐性^[3],1994年提出了解决该限制的方案,即利用多模光源和高色散光纤^[4],其结构如图1所示,通过改变多模光源中不同纵向模式之间的波长分离可以实现滤波器的可调谐性。

1999年,西班牙的加尔达海纳理工大学的研究者报导了第一个传输函数重构和带通可调谐同时实现的微波光子滤波器,其基本结构如图2所示^[5~7],该结构使用激光阵列作为滤波器的光源,调制后的光信号注入到CFBG中,通过控制激光光源的输出功率,可以实现传输函数的快速重构,通过改变光载波的波长分离,滤波器的带通可以实现调谐,且调谐范围可以很容易地达到40 GHz。

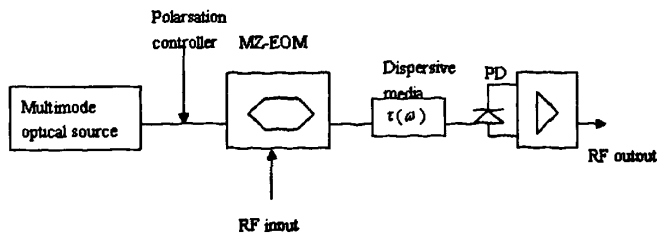


图1 利用多模光源和色散介质构成的微波光子滤波器

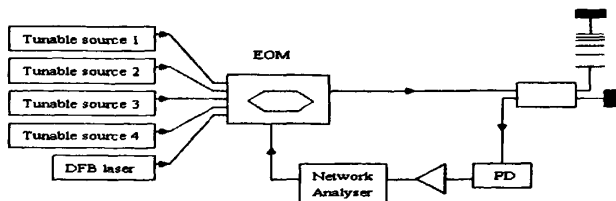


图2 利用激光阵列作为光源构成微波光子滤波器

分析以上两种结构可以发现，第一种结构虽然简单，但利用多模光源作为滤波器光源灵活性差，且该结构构成误差率大，若使用宽带CFBG代替色散光纤，误差率可以得到改善且可以得到更光滑的滤波器响应。第二种结构最大的优点是用激光阵列作为滤波器光源，从而同时实现了传输函数重构和带通可调谐特性，该结构有两方面的优点：一是可以独立地调节激光器的波长。因此适当地改变阵列的激光器中心波长，可改变延时差从而实现滤波器的调谐特性。二是激光器的输出功率可以独立快速地调节，这意味着滤波器的传输函数可以快速地重构。但是利用激光阵列必须保证相邻波长之间的延时为常数，因此其精确度难以控制，且使用了大量的光源，成本比较高。

2.2 基于FBG的不同微波光子滤波器结构

利用FBG构成微波光子滤波器的结构非常灵活，不同的构建方式有其独特的性质。

2.2.1 利用FBG阵列^[8]

可调谐激光器的输出光被外部调制经由光纤分光器送入到FBG阵列中，反射信号通过光纤环形器注入到光纤耦合器中，输出总的信号由光电检测器进行检测，并由网络分析仪监控，改变可调谐激光器的波长可以选择工作的光栅。

图3是一种可调谐的带通滤波器，优点在于利用FBG阵列来代替传统的多模光源或者多输入光源实现带通滤波，其频率响应可以实现调谐特性，且不受光源和系统的限制，但这种滤波器除了精度不易控制以外，信噪比较小，原因在于

光束的数量少, 因此可以通过增加 FBG 阵列的个数进行改进, 但这样又会增加结构的复杂度。

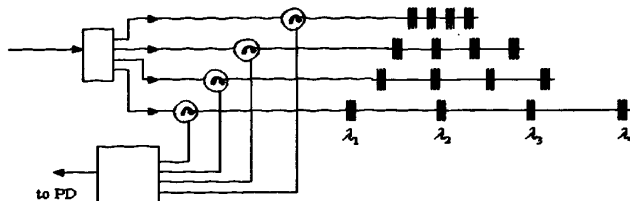


图 3 利用 FBG 阵列构成微波光子滤波器

鉴于光纤环的特殊结构, 有关研究者提出了用一对 FBG 来实现滤波特性, 其结构如图 4 所示。

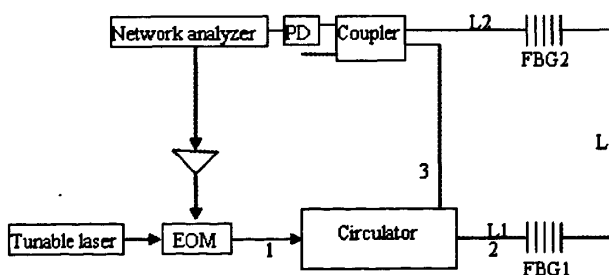


图 4 利用 FBG 对构成微波光子滤波器

从可调谐激光器中输出的单色光注入到电光调制器(EOM)中, 网络分析仪产生 RF 信号经过微波放大后进入到 EOM 中对单色光进行调制, FBG1 的反射率几乎是线性的, 反射率可以通过改变输入光的波长而改变, 而 FBG2 几乎是全反射的。FSR 可以通过改变两个光栅之间的长度而进行调谐。

该微波光子滤波器可以得到较好的边模抑制比, 但其精度同样不容易控制。

2.2.3 利用特殊结构的 FBG 构成微波光子滤波器

随着 FBG 的发展, 各种特殊结构的 FBG 相继问世, 有关研究者利用超结构光栅^[10]和高双折射^[11]光栅(Hi-Bi FBG)实现了微波光子滤波器, 其结构分别如图 5 和 6 所示。

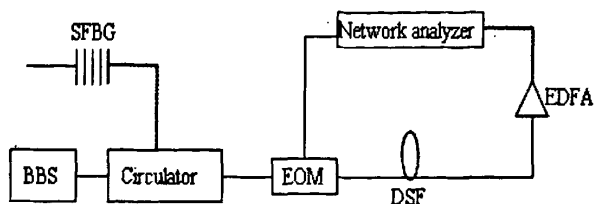


图 5 利用超结构 FBG 构成微波光子滤波器

超结构 FBG 的折射率调制是周期性间断的, 其反射谱有一组分立的反射峰。如果加入色散介质, 则不同的峰将会经历不同的时间延时, 这样的结构会产生一系列的光抽头。利用超结构 FBG 构成微波光子滤波器, 可实现带通响应, 且结构简单, 可以获得较高的反射值, 得到的光抽头可以准确设置而不会有位置误差, 但其难点在于超结构 FBG 的制作非常复杂, 不能严格保证 FBG 的反射峰幅度以中心波长对称分布, 因此需要严格的 FBG 制作工艺。

与超结构 FBG 不同, Hi-Bi FBG 以其双折射的特性可以实现调谐, RF 信号驱动 EOM, 并调制激光器的输出光, EOM 的输出光注入到波片中并经由隔离器, 耦合器耦合到含有 Hi-Bi FBG 的光纤环中, 波片是用来调节使进入到光栅中的光的两种状态保持正交, 光纤环的输出经由耦合器, 检测器进入到网络分析仪中。这是一种连续可调谐的微波光子槽形滤波器结构, 其最大优势在于可以提供两个 FSR 值。其中较大的 FSR 由光栅的平均差分群时延产生, 较小的 FSR 由光纤环干涉产生, 光纤环引起时间延迟包括两部分, 一部分来自于两臂长度的不同, 另一部分来自于啁啾光栅本身。此外该结构不受干涉问题的干扰, 是高度稳定的, 但由于结构中引入了偏振器使得结构比较复杂。

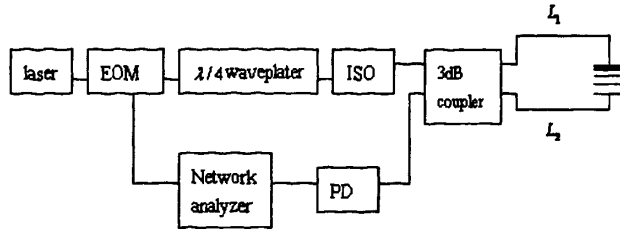


图 6 利用 Hi-Bi FBG 构成微波光子滤波器

2.2.4 高 Q 值带通滤波器^[12]

掺铒光纤的出现为实现高 Q 值的滤波器提供了可能，结构如图 7 所示。

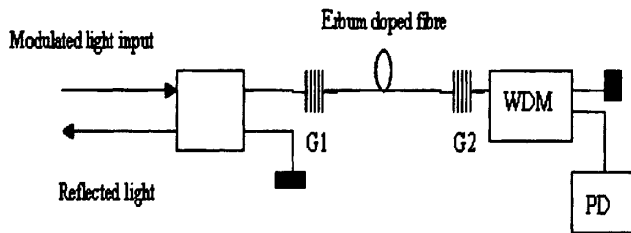


图 7 利用掺铒光纤实现高 Q 值的带通微波光子滤波器

实验结构包括有源光纤和一对 FBG，G1 的反射率为 50%，G2 的反射率为 100%，调制光进入到光栅对中，其中一半光被 G1 反射回来，而另一半经过掺铒光纤的放大后被 G2 全部反射回来，在光栅的反射中，信号返回，通过掺铒光纤放大后再次进入到 G1 中，光栅耦合近一半的信号输出，形成了脉冲响应的抽头，而被 G1 再次反射的信号再次经过掺铒放大重复过程，因此信号被光栅和光纤向前向后不停地有效反射，光纤用来补偿光的耦合输出和其他损耗。这种结构能够产生大量的抽头，并且具有信号总是传输相同的路径长度的优点。通过减小光栅之间的间隔可获得很短的时间延迟，产生微波频率。该结构在 FBG 对中引入了掺铒光纤从而实现了高 Q 值，但掺铒光纤的长度严重限制了滤波器的 FSR。

2.2.5 环形滤波器^[13]

国内浙江大学的研究者提出了两种新颖的滤波结构——可调谐 IIR 滤波器和

可调谐陷波滤波器，它们都基于光纤环和 CFBG，其 FSR 可通过改变输入光载波的波长而实现连调谐。这也是目前报导的较新的微波光子滤波器的结构。

这是一种基于耦合器和光纤环的 IIR 微波光子滤波器。网络分析仪输出的射频信号调制可调激光器的光信号，输出光注入耦合器中，耦合器的一个输入端和输出端通过光纤构成光纤环，为了实现可调谐性，在环中设置环形器，在环形器的另一端串接若干个不同工作波长的光纤光栅，改变输入光的波长可以选择工作的光栅，这样，光信号在环中走的距离不同，从而滤波器的 FSR 相应地改变。

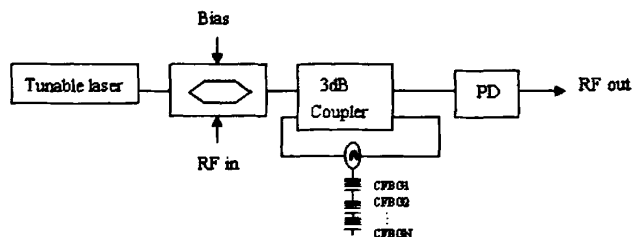


图 8 可调谐 IIR 滤波器结构

与可调谐 IIR 滤波器结构不同，可调谐的陷波滤波器在耦合器的两个输出端通过光纤连接构成环状结构，耦合器输出的两个强度相同的信号在环中沿相反方向传输，经过光栅反射后经历了不同的延时，并从耦合器的另一个输入端输出。两个抽头的光程差由相应的 CFBG 在光纤环中的位置和输入光波长决定。由于采用的是 CFBG，这个陷波滤波器的 FSR 可实现连续可调。该结构与 IIR 结构相比主要缺点是：由于有 $1/2$ 的光信号返回到原光信号的入射端，因而存在 3 dB 的光损耗；同时，为了避免光反射进可调谐激光器，还需在光路中放置隔离器。

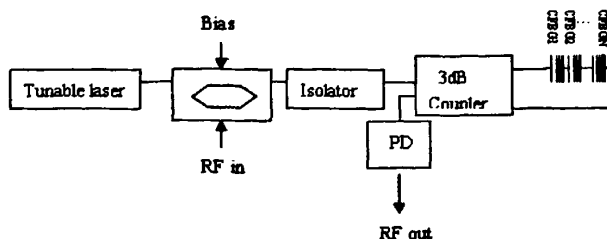


图 9 可调谐陷波滤波器结构

两种结构可以实现不同特性的滤波功能，且都可以实现调谐的功能，根据需求设计包含更多 CFBG 的滤波器，可以实现更大范围的调谐，但结构可能会更加复杂，另外可以通过控制光栅在光纤环上的位置来保证调谐的精度控制。

2.2.6 利用阵列波导光栅和光纤光栅构成的易重构微波光子滤波器^[14]

该滤波器为可重构易调谐的无限脉冲响应微波光子滤波器；利用半导体光放大器 SOA 代替宽带光源，既可以实现调谐，而且其放大克服了波导阵列光栅 AWG 的额外损耗，标准单模光纤 SMF 作为色散介质，AWG 将 SOA 的宽带光源进行分离并重新组合，每一个 AWG 的输出通道连接一光纤光栅 FBG，通过 AWG 的波峰和 FBG 的波峰重叠来对分离光进行重新组合，当两者的波长相对时，有一个最大的功率，但当对 FBG 进行微扰，如拉伸或者改变温度，则 FBG 的反射峰会漂移，这样就引起了两者的相互抵消，从而减少了分离光的功率，这样就得到了不同功率的输出光，经过 EDFA 的放大后耦合到 SMF 中得到色散延时并进行分析。

该结构可以实现多抽头的滤波器且容易实现传输函数的重构，其克服了单独使用宽带光源的灵活性，但其要求 FBG 相对于 AWG 有较窄的带宽，是集中，不能做到抽头任意地窄，这样会减少光功率的利用值，从而引起滤波器较大的噪声，限制了其实用性。

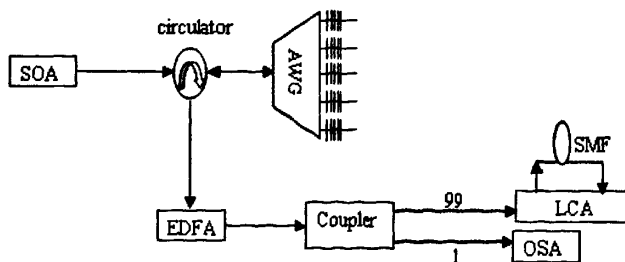


图 10 利用波导阵列光栅和光纤光栅构成的微波光子滤波器

另外在最新的报道中，有人提出了利用调制器和光偏振器来构成微波光子滤波器^[15-17]，如在文献[15]中，利用偏振调制器和光偏振器构成了多抽头任意正负系数的微波光子滤波器，而[16]中也利用偏振调制器和偏振保持光纤构成了负系数的带通微波光子滤波器，但偏振调制器的成本比较高，而且偏振态的调节校准非

常困难, 这样就不能保证滤波器的精确度以及其灵活性, 不便于实际的应用。

以上列举了几种已报导的典型的微波光子滤波器的结构, 对其进行比较发现, 由于 FBG 具有独特的波长选择特性, 因而可以更加灵巧地构建微波光子滤波器, 而在构成方式上, 利用 CFBG 代替均匀 FBG 可以实现连续的可调谐, 且结构比较简单, 另外可以利用特殊结构的 FBG 特性构成微波光子滤波器, 但其制作比较复杂, 精度难以控制, 可以考虑用均匀 FBG 来实现特殊 FBG 的特性, 从而代替特殊结构的 FBG 实现滤波功能。近几年来利用 FBG 环构成微波光子滤波器的结构屡见报导, 理论和试验都证明这种方式不仅结构简单, 而且滤波功能更完善, 如果在光纤环中加入掺铒光纤, 即可以实现高 Q 值和连续可调谐的微波光子滤波器, 相信这将是微波光子滤波器的发展趋势, 另外随着激光器的发展, 可以在光源方面再加以改进, 使得微波光子滤波器的功能更加完善, 结构更加简单, 更有利于走向实用化。

三、结束语

本文系统地介绍了微波光子滤波器的发展和各种典型的结构, 并对各种结构的优缺点做了简单的分析。

微波光子学将微波和光子技术相融合, 目前对该领域的研究方向很多, 而微波光子滤波器的研究更是之中的热点之一, 其从最初的简单的滤波功能到可调谐性, 再到高Q值^[18], 微波光子滤波器正逐步地发展成熟, 相信不久的将来, 随着微波光子滤波器走向实用化, 必将为宽带通信打开一个新的局面!

参考文献:

- [1]王齐春, 何建国. 微波光子研究动态[J]. 光电子技术, 2002, 22(4): 206-210.
- [2]JOSÉ CAPMANY, DALMA NOVAK. Microwave photonics combines two worlds[J]. nature photonics, 2007, 1: 319-330.
- [3]J. Capmany, D. Pastor, B. Ortega, S. Sales. Optical Processing of Microwave

- Signals[J]. IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, 2000:241-244.
- [4]J. Marti, F. Ramos, R. I. Laming. Photonic microwave filter employing multimode optical sources and wideband chirped fiber gratings[J]. ELECTRONICS LETTERS, 1998, 34(18):1760-1761.
- [5]D. Pastor, J. Capmany. Fibre optic tunable transversal filter using laser array and linearly chirped fiber grating[J]. ELECTRONICS LETTERS, 1998, 34(17):1684-1685.
- [6]J. Capmany, D. Pastor, B. Ortega. Experimental demonstration of tenability and transfer function reconfiguration in fiber-optic microwave filters composed of linearly chirped fiber grating fed by laser array[J]. ELECTRONICS LETTERS, 1998, 34(23):2262-2264.
- [7]J. Capmany, D. Pastor, B. Ortega. Efficient sidelobe suppression by source power apodisation in fiber optic microwave filters composed of linearly chirped fiber grating by laser array[J]. ELECTRONICS LETTERS, 1999, 35(8): 640-642.
- [8]W. Zhang, J. A. R. Williams. Fibre optic bandpass transversal filter employing fiber grating arrays[J]. ELECTRONICS LETTERS, 1999, 35(12):1010-1011.
- [9]W. Zhang, J. A. R. Williams, I. Zhang. Optical fiber grating based Fabry-Perot resonator for microwave signal processing[C]. CLEO, 2000:330-331.
- [10]B. A. L. Gwandu, W. Zhang, J. A. R. Williams. Implementation of microwave photonic filtering using a profiled superstructured fiber bragg grating and dispersive fibre 113.116.
- [11]Yandong Gong, G. Ning, H. Dong, et al.. Novel Two Simultaneous FSR Tunable Microwave Photonic Filter Using a Hi-Bi Chirped Grating in Sagnac Loop[C]. ECOC, 2005, Proceedings3:631-632.
- [12]D. B. Hunter, R. A. Minasian. High Q microwave optical filters using an

- active fiber grating pair structure[C], OFC' 97 Technical Digest, 1997:340-341.
- [13] 池 灏, 章献民, 沈林放. 基于光纤环的可调谐微波光子滤波器[J]. 光电子. 激光, 2006, 17(1):17-19.
- [14] John D. Taylor, Lawrence R. Chen, al. Simple Reconfigurable Photonic Microwave Filter Using an Arrayed Waveguide Grating and Fiber Bragg Gratings[J]. IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, 2007, 19(7):510-512.
- [15] Qing Wang, Jianping Yao. Multitap Photonic Microwave Filters With Arbitrary Positive and Negative Coefficients Using a Polarization Modulator and an Optical Polarizer[J]. IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, 2008, 20(2):78-80.
- [16] Jianping Yao, Qing Wang. Photonic Microwave Bandpass Filter With Negative Coefficients Using a Polarization Modulator[J]. IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, 2007, 19(9):644-646.
- [17] Qing Wang, Jianping Yao, al. Negative Tap Photonic Microwave Filter Based on a Mach-Zehnder Modulator and a Tunable Optical Polarizer[J]. IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, 2007, 19(21):1750-1752.
- [18] You Min Chang, Haeyang Chung, Ju Han Lee. High Q Microwave Filter Using Incoherent, Continuous-Wave Supercontinuum and Dispersion-Profiled Fiber[J]. IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, 2007, 19(24):2042-2044.

作者简介: 略

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/>