

# 基于光纤环谐振腔的高性能微波光子滤波器

张梓平<sup>1\*</sup>, 牛晓晨<sup>1</sup>, 黄杰<sup>1</sup>, 陈硕<sup>1</sup>, 孙少华<sup>2</sup>, 刘生成<sup>2</sup>, 刘杰<sup>3</sup>

<sup>1</sup>国家电网全球能源互联网研究院有限公司电力智能传感技术及应用实验室, 北京 102209;

<sup>2</sup>国网青海省电力公司信息通信公司, 青海 西宁 810000;

<sup>3</sup>国网新疆电力有限公司信息通信公司, 新疆 乌鲁木齐 830000

**摘要** 为实现同时具备宽带可调谐、单透射峰、窄滤波带宽三大特征的高性能微波光子滤波器,设计了一种基于  $2 \times 2$  光纤耦合器的环型谐振腔,推导、仿真并实际测量了该谐振腔的输出特性,最终与普通光滤波器相结合实现了高性能微波光子滤波器。实验结果表明,该光纤环谐振腔其滤波带宽可低至 1.2 MHz,与普通可调谐光滤波器级联后可实现任意单透射峰的动态选择,通过相干探测链路实现了 40 GHz 范围内可调谐的光载射频信号。与传统非腔体微波光子滤波器相比,该方法明显降低了滤波带宽;与单一光纤环谐振腔相比,该方法能够实现任意单透射峰的动态选择。这一滤波器有望用于未来超精细光谱分析、光纤传感等领域。

**关键词** 光纤光学; 光纤环谐振腔; 微波光子学; 相干探测; 反馈控制

中图分类号 TN253; TN929.11

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2106001

## High-Performance Microwave Photonic Filter Based on Fiber Ring Resonator

Zhang Ziping<sup>1\*</sup>, Niu Xiaochen<sup>1</sup>, Huang Jie<sup>1</sup>, Chen Shuo<sup>1</sup>,  
Sun Shaohua<sup>2</sup>, Liu Shengcheng<sup>2</sup>, Liu Jie<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Electric Power Intelligent Sensing Technology and Application, Global Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd., State Grid Corporation of China, Beijing 102209, China;

<sup>2</sup>Information Communication Branch, State Grid Qinghai Electric Power Co., Ltd., Xining, Qinghai 810000, China;

<sup>3</sup>Information Communication Branch, State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang 830000, China

**Abstract** This study designed a ring resonator based on a  $2 \times 2$  fiber coupler to create a high-performance microwave photonic filter with tunable broadband, single transmission peak, and narrow filter bandwidth. The output characteristics of the resonator were deduced, simulated, and measured. The high-performance microwave photonic filter was realized by combination with an ordinary optical filter. The experimental results show that the filter bandwidth of the designed fiber ring resonator can be as low as 1.2 MHz. It can realize a dynamic selection of any single transmission peak after cascading with the common tunable optical filter. The optical RF signal can be tuned to 40 GHz through a coherent detection link. Compared to that with a traditional noncavity microwave photonic filter, the proposed resonator significantly reduces the filter bandwidth. Meanwhile, compared to the single-fiber ring resonator, the proposed resonator can realize a dynamic selection of any single transmission peak. The designed fiber ring resonator is expected to be used in ultra-fine spectral analysis and optical fiber sensing in the future.

**Key words** fiber optics; fiber ring resonator; microwave photonics; coherent detection; feedback control

**OCIS codes** 060.2340; 060.2330; 060.4510

## 1 引 言

微波光子技术是一种利用光学的方法来实现微波信号产生、传输与处理的技术,而微波光子滤波器

(MPF)则是在光域处理光载射频信号的器件。与微波滤波器相比,微波光子滤波器由于借助了光学手段,通常具有宽带可调谐和快速可重构的特点。早期的微波光子滤波器主要是非相干型的,即在光

收稿日期: 2020-06-02; 修回日期: 2020-07-03; 录用日期: 2020-07-15

基金项目: 国家电网公司科技项目(52280019000S)

\* E-mail: zhangziping@geiri.sgcc.com.cn

源部分使用多个非相干光源,干涉滤波过程只在电域发生,而延时差则是由色散介质引入所致。最初的色散介质使用的是光纤,但由于光纤产生的延时是固定的,因此极大地限制了滤波器的调谐能力<sup>[1]</sup>。Marti 等<sup>[2]</sup>提出了改进方案,即在光源部分使用多个波长可调谐的非相干光源,从而改变分别对应的传输延时,实现滤波器的可调谐性。Pastor 等<sup>[3-5]</sup>实现了第一个宽带可调谐且传输函数可重构的微波光子滤波器,其使用激光器阵列作为光源,使调制后的光信号进入啁啾光纤布拉格光栅(CFBG)中,通过控制光源的功率实现了传输函数的快速重构,通过改变光载波的波长实现了滤波器的宽带调谐。此外还有利用阵列波导光栅和光纤光栅构成的微波光子滤波器<sup>[6]</sup>,和前两个的主要区别在于用半导体光放大器和阵列波导光栅代替了多个非相干光源,并利用光纤光栅改变每个通道的光功率值。非相干性微波光子滤波器虽然能够比较容易地实现宽带调谐与快速重构,但由于信号的干涉过程均在电域发生,没有直接体现出光载波相对电载波的超高频、超宽带的优势,因此很难实现高 Q 值的滤波器。针对这个缺陷,人们提出了相干型微波光子滤波器,即在光源部分使用相干光,因干涉在光域直接发生,故这个过程一般常采用光滤波器的结构。具体的实现形式有很多,比如:有一种可调谐的陷波滤波器<sup>[7]</sup>,其中耦合器输出的两个光信号在环中沿相反方向传输,经过光栅反射后经历不同延时并发生干涉,这一滤波器相当于只有 2 个抽头的光滤波器,而光程差由 CFBG 在光纤环中的位置和光波长决定;还有一种基于光纤布拉格光栅(FBG)阵列的微波光子滤波器<sup>[8]</sup>,其调谐原理在于可通过调节入射光源的波长选择工作的光栅组(每组包含 4 个光栅,相当于 4 个抽头),而不同的光栅组由于位置不同而产生不同的延时。利用光纤环结构和一对 FBG 也可实现滤波<sup>[9]</sup>,其中一个 FBG 的反射率可随输入光波长的变化发生线性变化,而另一个 FBG 几乎是全反射的,自由光谱范围(FSR)可随两光栅间长度的变化而变化。通过在一对 FBG 中间加入增益介质——掺铒光纤可实现高 Q 值滤波器<sup>[10]</sup>,因为掺铒光纤能够补偿 FBG 的输出及其他损耗,故光在两个 FBG 之间产生稳定的震荡,这等效于产生了近乎无限个抽头。还有一种典型的基于耦合器的无源可调谐腔体滤波器<sup>[7]</sup>,其通过将耦合器的一个输入端和一个输出端相连形成环状,从而产生大量抽头,而可调谐性则通过在光纤环中加入 CFBG 实现。除此之外,人们还

可以利用调制器、光偏振器、光纤非线性效应等来构成微波光子滤波器<sup>[11-14]</sup>。

综上所述,目前主流的相干型微波光子滤波器大致可分为两种,一种是基于有限抽头、非腔体光滤波器(如光纤光栅),另一种是基于无限抽头、腔体滤波器(如光纤环)<sup>[14]</sup>。光纤光栅具有良好的可调谐性以及近似单透射/反射峰特性,但由于结构及工艺限制,通常其主峰带宽最窄只能做到 100 MHz 左右,很难再继续压缩;而光纤环具有结构优势,理论上其单峰带宽可较易达到 MHz 量级以下,但其固有的多周期滤波特性是无法回避的问题。以上问题均限制了微波光子滤波器性能的进一步提升。为此,本文将光纤环与光纤光栅相结合,实现了同时具备宽带可调谐、单透射峰、窄滤波带宽三大特征的高性能微波光子滤波器,进一步提升了滤波器性能。该滤波器有望用于未来超精细光谱接收领域,如光学传感信号的光谱特征分析。

## 2 结构原理

### 2.1 基于 2×2 光纤耦合器的环型谐振腔

本文设计的环型谐振腔由一对相同的 2×2 光纤耦合器相互连接组成。腔体封闭后,其中 7 个点处的光场分别由变量 A~G 表示,如图 1 所示。

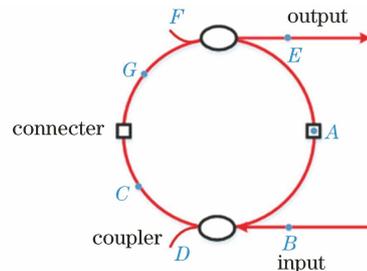


图 1 基于 2×2 光纤耦合器的环型谐振腔

Fig. 1 Ring resonator based on 2×2 fiber coupler

此时 B、D、E、F 皆可作为谐振腔的输入和输出,不妨设 B 为输入,E 为输出,它们之间满足

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} C \\ D \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{1-\kappa} & \sqrt{\kappa} \\ \sqrt{\kappa} & -\sqrt{1-\kappa} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} \\ G = r \exp[-j(\Phi + \varphi)] \cdot C \\ \begin{bmatrix} A \\ E \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{1-\kappa} & \sqrt{\kappa} \\ \sqrt{\kappa} & -\sqrt{1-\kappa} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} G \\ F \end{bmatrix} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $\kappa$  为光场从腔外向腔内耦合时的功率耦合系数(0~1); $r$  为腔内光场循环一周的传递系数(0~1); $\varphi$  为外界引入的额外相移, $\Phi = \frac{2\pi nL f}{c}$  为腔内光

场循环一周随频率  $f$  所附加的相移,  $n$  为折射率,  $L$  为腔长,  $c$  为真空中光速。令  $B=1$  且  $F=0$ , 可求出  $D$  和  $E$  的表达式为

$$\begin{cases} D = -\sqrt{1-\kappa} \cdot \frac{1-r\exp[-j(\Phi+\varphi)]}{1-(1-\kappa)r\exp[-j(\Phi+\varphi)]} \\ E = \frac{\kappa r\exp[-j(\Phi+\varphi)]}{1-(1-\kappa)r\exp[-j(\Phi+\varphi)]} \end{cases} \quad (2)$$

可以发现,  $D$  和  $E$  在形式上具有互补的特性, 而  $E$  的表达式便是本文所采用环型谐振腔的透射频率传递函数  $H_R(f)$ , 由此可进一步推导其透过率和延时特性:

$$\begin{cases} |H_R(f)|_{\text{dB}}^2 = 20 \lg |H_R(f)| \\ \tau_R(f) = -\frac{d}{2\pi df} \arctan \left\{ \frac{\text{Im}[H_R(f)]}{\text{Re}[H_R(f)]} \right\} \end{cases} \quad (3)$$

其数值仿真结果如图 2 所示, 可以发现该谐振腔实际上是一个具有多个等间距透射峰的周期性滤波器, 滤波特性呈洛伦兹型, 延时在通带内很高, 在带外迅速减小。图中的仿真参数如下:  $L=2.5 \text{ m}$ ,  $n=1.5$ ,  $\kappa=0.01$ ,  $r=0.97$ ,  $\varphi=0$ , 此时 FSR 为 80 MHz, 3 dB 带宽约 1 MHz, 计算其  $Q$  值 (FSR 与 3 dB 带宽的比值) 约为 80。其中  $n$  与  $\varphi$  为固定常数, 分别由光纤本身和耦合点/熔接点确定,  $L$ 、 $\kappa$ 、 $r$  为可变常数, 在实际搭建谐振腔时可人为选择。谐振腔的 FSR 完全取决于  $L$ , 两者之间呈反比例关系, 而  $Q$  值则取决于  $\kappa$  和  $r$ 。实际上, 在不增加腔内额外衰减的情况下,  $r$  只由光纤本身和熔接点损耗决定, 可调节范围很小, 因此  $Q$  值的调节主要依靠  $\kappa$ , 对应于现实条件下光纤耦合器的分光比。若想提高光纤环谐振腔的  $Q$  值, 需在保证  $r$  尽量小的情况下, 采用同侧耦合效率更高的光耦合器, 如分光比达到 99:1 的耦合器 (99% 的光功率需向环内耦合)。

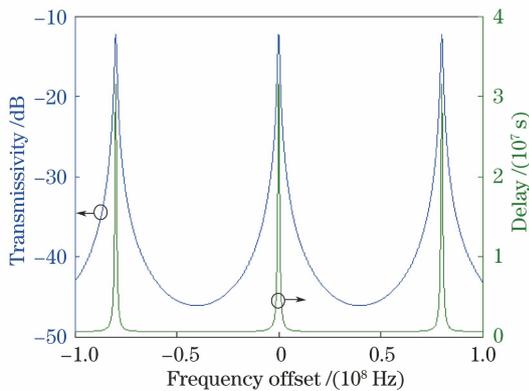


图 2 环型谐振腔的透过率及延时曲线

Fig. 2 Transmission and delay curves of ring resonator

## 2.2 高性能微波光子滤波器设计

光纤环谐振腔能够提供普通光滤波器难以实现的 MHz 量级的滤波带宽, 但是其在可调谐性以及单周期滤波方面却存在天然的劣势。为了弥补这些不足, 本文拟将谐振腔与普通可调谐带通光滤波器级联以实现窄带单透射峰的动态选择, 之后配合相干探测链路以实现高性能微波光子滤波器, 如图 3 所示。

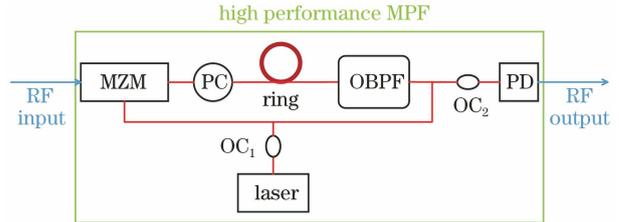


图 3 高性能微波光子滤波器

Fig. 3 High performance MPF

在光滤波器部分, 由图 2 可知, 光纤环谐振腔 (ring) 的透过率曲线可写为  $|H_R(f)|_{\text{dB}}^2 = \sum_{k=0}^{+\infty} |H'_R(f - kf_{\text{FSR}})|_{\text{dB}}^2$ , 其中  $f_{\text{FSR}}$  为谐振腔的 FSR,  $k=1, 2, \dots$ ,  $H'_R(f)$  为谐振腔的单周期频率传递函数:

$$H'_R(f) = \begin{cases} H_R(f), & 0 \leq f \leq f_{\text{FSR}} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

在谐振腔之后还需级联一个具有单透射峰、可调谐的光带通滤波器 (OBPF), 设其频率传递函数可近似写为

$$H'_B(f) \approx \begin{cases} H_B(f - f_T), & f_T - \frac{f_B^{(3\text{dB})}}{2} \leq f \leq f_T + \frac{f_B^{(3\text{dB})}}{2} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

即构建了一个中心频率位于  $f_T$  (在一定范围内可调), 3 dB 带宽为  $f_B^{(3\text{dB})}$  的单周期滤波器。为了从谐振腔的众多透射峰中选出一个, 可通过调节  $f_T$  与  $f_B^{(3\text{dB})}$  使其满足

$$|H_R(f)|_{\text{dB}}^2 \cdot |H'_B(f)|_{\text{dB}}^2 \approx \alpha |H'_R(f - kf_{\text{FSR}})|_{\text{dB}}^2 \quad (6)$$

其中  $\alpha$  为一个代表 OBPF 插入损耗的常数。为使之成立, 除了 OBPF 的 3 dB 带宽  $f_B^{(3\text{dB})}$  要满足  $f_R^{(3\text{dB})} < f_B^{(3\text{dB})} < f_{\text{FSR}}$  [其中  $f_R^{(3\text{dB})}$  为  $H'_R(f)$  的 3 dB 带宽] 条件之外, 在调节  $f_T$  时还需使得 OBPF 的透射峰中心尽量与谐振腔的一个透射峰中心重合, 以保证对称的滤波形状。在实际情况中, 由于  $f_T$  的调谐范围往往在 nm 量级, 因此总能找到很多合适的  $f_T$  与  $k$  的取值组合使 (6) 式成立。从黑盒子的

角度来讲,上述谐振腔与 OBPF 级联的过程实际上是构建一个同时具备宽带可调谐、单透射峰、窄滤波带宽三大特征的光滤波器。

在射频(RF)部分,RF 信号在马赫-曾德尔调制器(MZM)中强度调制(正交偏置)经光耦合器(OC<sub>1</sub>)分光后的本振光(Laser),光谱中会形成载波和一阶边带(高阶忽略),之后经过偏振控制器(PC)进入级联光滤波器。调节级联光滤波器的中心频率,使得其与本振光源的频率差保持在光电探测器(PD)的带宽范围内(也不能接近于0)。在这种情况下,如果输入射频信号的一个边带落入该级联光滤波器的通带范围内,则经 OC<sub>2</sub> 后与本振光进行相干探测,可恢复出该信号,否则将无信号输出,即形成了微波光子滤波器,且其调谐、带宽等特性均与级联光滤波器相同。

### 3 实验装置与测量结果

#### 3.1 光纤环谐振腔测量装置及结果

为了验证方案的可行性,需要首先测量光纤环谐振腔的透过率曲线。参照 2.1 节中设计的仿真参数实际搭建了该光纤环谐振腔,由于其滤波带宽非常窄(仅为 MHz 量级),远小于普通光滤波器的滤波带宽,无法直接用光谱仪进行观测,因此需采用微波光子学的方法进行测量,实验装置如图 4 所示。

为了保证光在谐振腔内的干涉效果,采用具有波长微调功能的窄线宽激光器作为光源。另外,在加载射频信号之前,需要调节激光器波长使其与谐

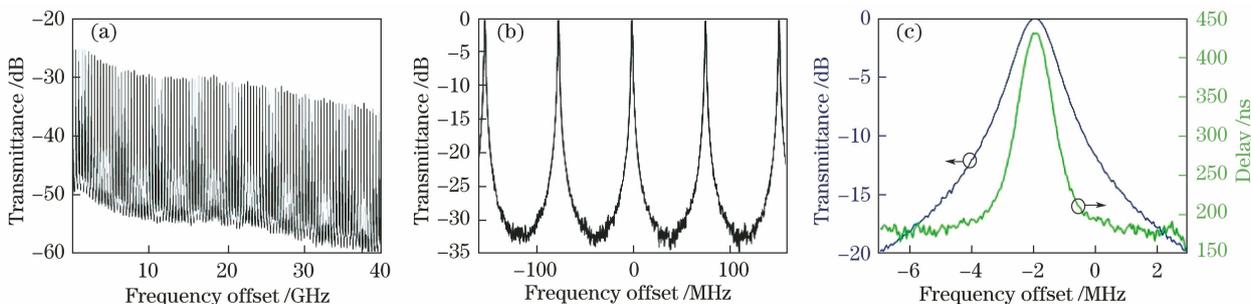


图 5 光纤环谐振腔测量结果。(a)频率范围为 40 GHz 时的透过率;(b)中心频率为 10 GHz,频率范围为 300 MHz 时的归一化透过率;(c)中心频率为 10 GHz,频率范围为 10 MHz,3 dB 带宽约为 1.2 MHz 时的归一化透过率及延时  
Fig. 5 Measurement results of fiber ring resonator. (a) Transmittance at frequency span of 40 GHz; (b) normalized transmittance at central frequency of 10 GHz, frequency span of 300 MHz; (c) normalized transmittance and delay at central frequency of 10 GHz, frequency span of 10 MHz, 3 dB bandwidth about 1.2 MHz

#### 3.2 高性能微波光子滤波器测量装置及结果

在确定了光纤环谐振腔的实际透过率曲线后,本文搭建了基于相干探测链路的高性能微波光子滤波器,结构如图 6 所示。

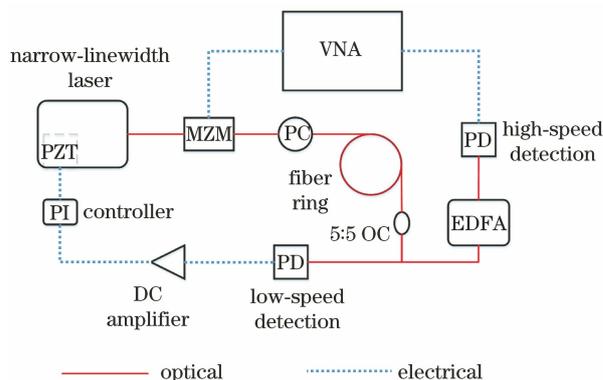


图 4 光纤环谐振腔透过率测量装置  
Fig. 4 Transmission measurement device of fiber ring resonator

振腔的某一个透射峰重合,否则测量结果将会严重变形。为了达到这个目的,本文在测量系统中加入了反馈控制器件,主要包括一个低速(不隔直)高增益的 PD、一个直流放大器与一个反馈控制器。误差信号来源于谐振腔输出的光功率,其依次经过上述反馈器件后会产生一个误差控制信号,用于控制激光器的波长,最终在反馈环闭合后实现激光器波长与谐振腔某个透射峰的长时间锁定。锁定后,采用矢量网络分析仪(VNA)来测量谐振腔极窄的带宽。VNA 输出 10 MHz~43 GHz 的扫频信号,经 MZM 调制(正交偏置)光载波,并经 PC 后进入光纤环谐振腔,其输出的一部分经掺铒光纤放大器(EDFA)放大后进入高速 PD 拍频,作为 VNA 的输入。最终的测量结果如图 5 所示。

测量装置与前文类似,这里除采用相干探测结构外,在光纤环谐振腔之后的光带通滤波器部分,本文级联使用光纤光栅与可编程光滤波器(WS)。这是因为光纤光栅实际上也是一种周期性滤波器件,其

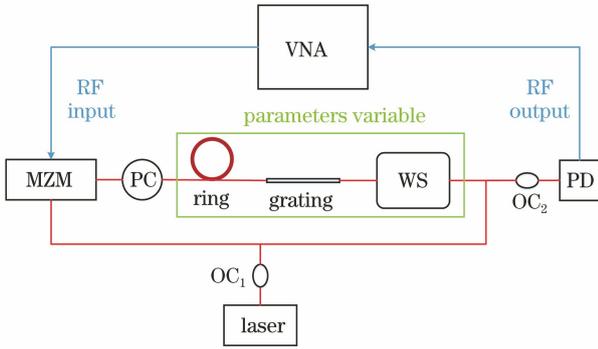


图 6 高性能微波光子滤波器透过率测量装置  
Fig. 6 High performance MPF transmittance measurement device

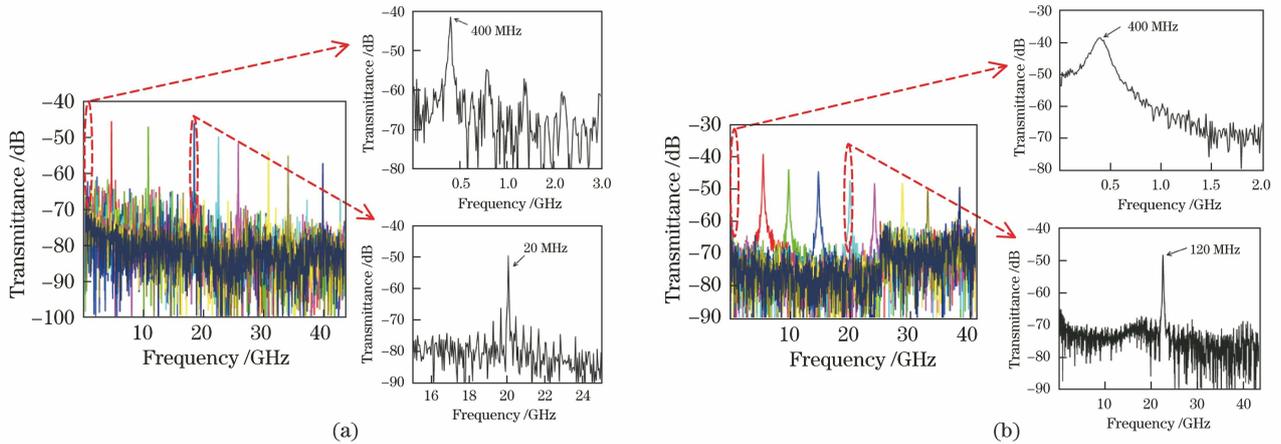


图 7 高性能微波光子滤波器测量结果。(a) 采用谐振腔、光栅、WS 级联的测量结果；(b) 采用光栅、WS 级联的测量结果  
Fig. 7 Measurement results of high performance MPFs. (a) Using cascaded resonator, grating, and WS; (b) using cascaded grating and WS

## 4 分析与讨论

在保证微波光子滤波器宽带可调谐和单透射峰的前提下,其实际带宽所能达到的最小值是本文关注的重点,而这主要取决于所使用的光纤环谐振腔的带宽。通过仿真可以发现,在保持谐振腔  $Q$  值不变的前提下,增加腔长可以使带宽等比例减小,但 FSR 也会随之减小,这将加大单透射峰选择的难度。因此对谐振腔而言,讨论其  $Q$  值更具有实际意义。 $Q$  值主要取决于所采用的光纤耦合器的分光比与腔内损耗,在选取仿真参数时本文充分考虑了在现实条件下容易获取到的  $2 \times 2$  光纤耦合器最高分光比(99:1)以及熔接时引入的最低损耗(两个熔接点共约 0.03 dB),图 2 中的仿真结果也与图 5 中实际的测量结果相吻合,说明本文中所设计的谐振腔的  $Q$  值最高能达到 80 左右。此外,为了降低后续单透射峰的选择难度,需尽量增加谐振腔的 FSR,该值完全取决于腔长。考虑到现实熔接条件

除了位于频率中心处的主透射峰之外还存在大量旁瓣,需要 WS 将这些多余的旁瓣全部滤除才可以满足(5)式的条件。此外为了满足(6)式,需要选择合适的谐振腔参数与现有光纤光栅的 3 dB 带宽配合使用。通过权衡客观条件与实验效果,本文重新设计了一个  $f_{\text{FSR}} = 400 \text{ MHz}$ ,  $f_{\text{R}}^{(3 \text{ dB})} = 20 \text{ MHz}$  的光纤环谐振腔,并选取  $f_{\text{B}}^{(3 \text{ dB})} = 120 \text{ MHz}$  的光纤光栅配合使用,测量结果如图 7 所示,其中:图 7(a)是采用谐振腔、光栅、WS 级联的测量结果(带宽为 20 MHz、单透射峰、40 GHz 内可调谐);图 7(b)是仅采用光栅、WS 级联的测量结果(120 MHz 带宽、单透射峰、40 GHz 内可调谐),可调谐性通过拉伸光栅与调节 WS 来实现。

下所能达到的最短腔长约 0.5 m,因此对应的最大 FSR 约为 400 MHz。综合以上两点,本文所能达到的最佳谐振腔参数应为  $f_{\text{FSR}} = 400 \text{ MHz}$ ,  $f_{\text{R}}^{(3 \text{ dB})} = 5 \text{ MHz}$ 。

谐振腔参数确定后,需要选择合适的光纤光栅进行单透射峰选择,以实现高性能微波光子滤波器。这里光栅的带宽是越窄越好。本文选择了现有条件下容易获得的最窄带(120 MHz)光栅,如图 7(b)所示。其和  $f_{\text{FSR}} = 400 \text{ MHz}$  的谐振腔级联后,边模抑制比可以达到 15 dB 以上,如图 7(a)所示。继续提高边模抑制比主要有两种途径:一是采用更先进的熔接技术进一步缩短光纤熔接后形成的谐振腔腔长,甚至可考虑基于光子集成技术的光学微腔;二是采用带宽更窄的单周期滤波器。此外,在射频的高频部分,由于此时调制器、探测器的效率下降以及电缆的损耗增加,微波光子滤波器的峰值响应较低频时下降明显;而在射频的低频部分,滤波器的中心频率最低可达 400 MHz 左右。

## 5 结 论

在分析现有微波光子滤波器特点以及腔体、非腔体光滤波器各自优劣势的基础上,将基于 $2 \times 2$ 光纤耦合器的环型谐振腔与光纤光栅级联,实现了同时具备宽带可调谐、单透射峰、窄滤波带宽三大特征的高性能微波光子滤波器的方法。通过理论分析、数值仿真与实验测量,首先实现了带宽约为1.2 MHz、FSR 约为 80 MHz 的超窄带腔体滤波器,之后通过改变参数并与光纤光栅级联,实现了带宽为 20 MHz(可低至 5 MHz)、单透射峰(边模抑制比 $>15$  dB)、宽带可调谐(调谐范围 $>40$  GHz)的微波光子滤波器。较之前仅采用单一腔体或非腔体滤波结构的方案,本文所实现的滤波器的性能得到明显改善。此外,反馈环路与相干微波光子链路的使用,实现了对此类极窄带光滤波器的精细稳定测量,增强了设计的可实用性。由此可见,这种性能优异、易于制作、结构简单的新型微波光子滤波器有望在未来超精细光谱分析等领域发挥重要作用。

## 参 考 文 献

- [1] Capmany J, Pastor D, Ortega B, et al. Optical processing of microwave signals[C]//International Topical Meeting on Microwave Photonics MWP 2000, September 11-13, 2000, Oxford, UK. New York: IEEE Press, 2000: 241-244.
- [2] Martí J, Ramos F, Laming R I. Photonic microwave filter employing multimode optical sources and wideband chirped fibre gratings[J]. Electronics Letters, 1998, 34(18): 1760-1761.
- [3] Pastor D, Capmany J. Fibre optic tunable transversal filter using laser array and linearly chirped fibre grating [J]. Electronics Letters, 1998, 34(17): 1684-1685.
- [4] Capmany J, Pastor D, Ortega B. Experimental demonstration of tunability and transfer function reconfiguration in fibre-optic microwave filters composed of linearly chirped fibre grating fed by laser array[J]. Electronics Letters, 1998, 34(23): 2262-2264.
- [5] Capmany J, Pastor D, Ortega B. Efficient sidelobe suppression by source power apodisation in fibre optic microwave filters composed of linearly chirped fibre grating by laser array[J]. Electronics Letters, 1999, 35(8): 640-642.
- [6] Taylor J D, Chen L R, Gu X J. Simple reconfigurable photonic microwave filter using an arrayed waveguide grating and fiber Bragg gratings [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(7): 510-512.
- [7] Chi H, Zhang X M, Shen L F. Tunable photonic microwave filters based on fibre loop[J]. Journal of Optoelectronics·laser, 2006, 17(1): 17-19.  
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.
- [8] Zhang W, Williams J A R. Fibre optic bandpass transversal filter employing fibre grating arrays [J]. Electronics Letters, 1999, 35(12): 1010-1011.
- [9] Zhang W, Williams J A R, Zhang L, et al. Optical fiber grating based Fabry-Perot resonator for microwave signal processing[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2000). Technical Digest, May 7-12, 2000, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2000: 330-331.
- [10] Hunter D B, Minasian R A. High Q microwave optical filters using an active fiber grating pair structure [C]//Proceedings of Optical Fiber Communication Conference, February 16-21, 1997, Dallas, TX, USA. New York: IEEE Press, 1997: 340-341.
- [11] Wang Q, Yao J P. 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.
- [12] Yao J P, Wang Q. Photonic microwave bandpass filter with negative coefficients using a polarization modulator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(9): 644-646.
- [13] Wang Q, Yao J P, Bull J D. 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.
- [14] Xu E M, Li F, Zhang Z X, et al. Microwave photonic filter with switched single and dual passbands[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(5): 0506003.  
徐恩明, 李凡, 张祖兴, 等. 单双通带可切换的微波光子滤波器[J]. 光学学报, 2019, 39(5): 0506003.