

文章编号:1004-9037(2014)06-0949-08

超高 Q 微波光子滤波器的研究进展

陈鹏宇¹ 刘 洁² 程凌浩³ 李朝辉³ 吕 超⁴ 余思远¹

(1. 中山大学物理工程与技术学院, 广州, 510275; 2. 中山大学移动信息工程学院, 珠海, 519082;
3. 暨南大学光子技术研究所, 广州, 510632; 4. 香港理工大学电子及资讯工程系, 香港, 999077)

摘要:微波光子滤波器是一种具有射频滤波功能的光学子系统。相对于普通的电域射频滤波器件,微波光子滤波器具有高带宽、低损耗以及不受电磁干扰影响等优点。 Q (即品质因数)是衡量带通滤波器性能的主要参数之一,其大小反映了滤波器的频率选择特性。已报道的各种提高微波光子滤波器 Q 的方法中,基于多级滤波器级联的结构能够显著提高滤波器的 Q ,因而得到广泛关注。本文以超高 Q 为主线,综述了基于级联结构的微波光子滤波器的研究进展,并对微波光子滤波器的下一步研究进行了展望。

关键词:微波光子;滤波器; Q 值;无限冲激响应;有限冲激响应;游标效应

中图分类号:TN713.1

文献标志码:A

Research Progress of Ultrahigh-Q Microwave Photonic Filters

Chen Pengyu¹, Liu Jie², Cheng Linghao³, Li Zhaohui³, Lü Chao⁴, Yu Siyuan¹

(1. School of Physics and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou, 510275, China;

2. School of Mobile Information Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai, 519082, China;

3. Institute of Photonics Technology, Jinan University, Guangzhou, 510632, China;

4. Department of Electronic and Information Engineering, Hong Kong Polytechnic University,

Hung Hom, Kowloon, 999077, Hong Kong, China)

Abstract: Microwave photonic filters, which have attracted great research interest in the past few decades, are photonic subsystems carrying out functions of radio frequency (RF) filtering. Their advantages mainly include high bandwidth, low insertion loss, immunity to electromagnetic interference, etc. Quality factor (Q) value, which determines the performance of the frequency selectivity, is one of the most desired features of microwave photonic filters. Among various structures proposed so far to improve Q values of microwave photonic filters, multi-stage filters with cascaded structures have attracted lots of interests, which can increase the Q values greatly. The newly proposed structures on ultrahigh- Q IIR microwave photonic filters with architectures of cascaded multi-stage filters are reviewed. Future directions of research in this area are also discussed.

Key words: microwave photonics; filters; Q value; infinite impulse response; finite impulse response; vernier effect

引 言

近年来,利用光子学技术对微波信号进行处理正在引起广泛的兴趣,并因此衍生出新的学科——微波光子学。微波光子滤波器作为微波光子信号

处理系统的核心器件,已在光载射频系统和光相控天线阵列中发挥着重要的作用,并于近年来被广泛研究^[1-5]。相对于传统的微波滤波器件在电域内实现信号滤波,微波光子滤波器则利用光纤等光器件构成的子系统在光域内实现信号滤波。由于光纤等光波导器件具有高带宽、低延迟等特点,因此基于宽带延迟线原理^[6-9]实现的微波光子滤波器具有

较高的工作带宽;微波光子滤波器的工作频段通常由光学元件对光信号的时延决定^[10-14],通过调节光时延就可以实现中心频率的选择,因此具有较高的频率可调节性;而随着先进光纤器件、可编程光滤波器等的发展,大大提高了微波光子滤波器结构的灵活性及可控性^[15-18],从而使其具有较高的可重构性;此外,不同于电域微波滤波器,微波光子滤波器系统结构主要由光器件组成,对电磁干扰不敏感,因此微波光子滤波器具有较高的抗电磁干扰特性。基于以上特点,尽管微波光子滤波器的实现需要引入光电器件,它的可调谐和可重构能力要远远强于电子滤波器,实际上节约了硬件成本,因而具有较高的吸引力和研究价值。

衡量微波光子滤波器性能的参数有很多,主要包括插入损耗、通带纹波、阻带抑制比、形状因子以及品质因数(即 Q)等^[19]。其中 Q 的大小反映了滤波器的频率选择特性,是衡量滤波器性能的一个重要标准。近年来,在如何提高微波光子滤波器的 Q 方面,已经开展了诸多研究:对于有限冲激响应(Finite impulse response, FIR)微波光子滤波器,往往需要通过增加信号路数来提高抽头数,从而提高 Q ,这在一定程度上造成了成本的增加以及可靠性的下降。目前,已报道的 FIR 滤波器的最高 Q 为 256^[20]。相对于 FIR 滤波器,无限冲激响应(Infinite impulse response, IIR)微波光子滤波器通常具有反馈环路,应用少量的元器件即可实现较多的抽头数和较高 Q 。对于单阶 FIR 滤波器 Q 的提高,需要提高反馈环路的增益使其尽可能接近于 1。通过在环路中引入光纤放大器可以使得 IIR 滤波器的 Q 提高到 300 左右^[21]。由于受到光放大器自发辐射噪声、光源相干长度等的影响,单级 IIR 滤波器的 Q 很难再得到有效的提高。多级滤波器级联的结构可使自由光谱范围(Free spectral range, FSR)得到大大提高,进而提高 Q 。已报道的目前 Q 在 1 000 以上的微波光子滤波器结构大部分为多级滤波器结构^[22-25]。

由于已报道的文献已经对单级高 Q 微波光子滤波器进行了相关总结分析^[26],本文着重对基于多级滤波器结构的超高 Q 微波光子滤波器进行总结,并针对多级滤波器结构中遇到的相关问题给出一定分析。

1 微波光子滤波器概述

1.1 工作原理

类似于数字滤波器,微波光子滤波器根据抽头

数值是有限个数还是无限个数分为 FIR 滤波器和 IIR 滤波器。如图 1 所示,滤波器的时域表达式为

$$\sum_{m=0}^M a_m x(t-mT) + \sum_{n=1}^N b_n y(t-nT) = y(t) \quad (1)$$

式中: b_n 全为零则为 FIR 滤波器, b_n 不全为零,则为 IIR 滤波器。由此可见,IIR 滤波器具有反馈环路。

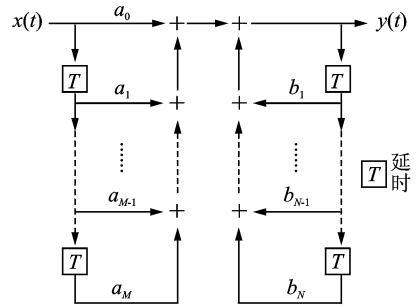


图 1 微波光子滤波器原理结构示意图

Fig. 1 Principle and structure diagram of microwave photonic filter

对式(1)的时域内的滤波器响应做傅里叶变换,可得到滤波器的频率响应为

$$H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} = \frac{\sum_{m=0}^M a_m e^{-jm\omega T}}{1 - \sum_{n=1}^N b_n e^{-jn\omega T}} \quad (2)$$

式中: $\omega = 2\pi f$ 。由式(2)可得,滤波器频率响应关于 f 呈周期性变化,这个周期称为自由光谱范围,其大小为时域响应周期 T 的倒数。

在具体实现上,如图 2 所示,微波光子滤波器通常需要通过光电调制器进行强度调制,将微波信号加载到光载波上形成光信号。然后将光信号进行分路,分路后的光信号经过不同路径,利用光时延器件对各路进行延时,保证相邻两路光信号之间具有等间隔的时延。延时后的各路光信号合路叠加之后,被光电探测器探测转化为电信号。这里需要注意的是,为了满足各路加载的微波信号最终实现稳定的线性叠加,合路后的光信号必须为光强度叠加,即相邻两路的光信号非相干,这也就意味着相邻两路光信号的时延必须大于光载波的相干长度。经过光电转换后,各路延时微波信号之间形成干涉,满足干涉相长条件的频率通过,而其他频率则被阻隔,最终实现滤波器的频率选择。

1.2 Q 的定义

Q 又称品质因数,反映了微波光子滤波器的频率选择特性,定义如下

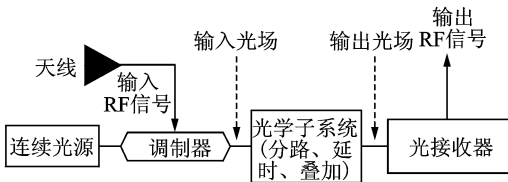


图 2 微波光子滤波器系统结构图

Fig. 2 Microwave photonic filtering system

$$Q = \frac{FSR}{FWHM} \quad (3)$$

式中:FSR 为滤波器幅频响应函数 $H(f)$ 的周期。FWHM 表示在谐振处的半高全宽或 3 dB 带宽,即谐振频率处的 $H(f)$ 幅度下降一半时所对应的频谱宽度。显然,FSR 越大,FWHM 越小,滤波器的频率响应曲线越陡峭,频率的选择特性越好。

1.3 级联滤波器实现高 Q 的原理

考虑将两个非相干的微波光子滤波器的光信号处理部分级联,如图 3 所示,由 Capmany J 在文献[27]中的推导可知,只有级联后的两光信号不发生干涉时,才能保证最后的电信号为两个滤波器传输函数的乘积,此时才可认为光学级联等同于电学级联。

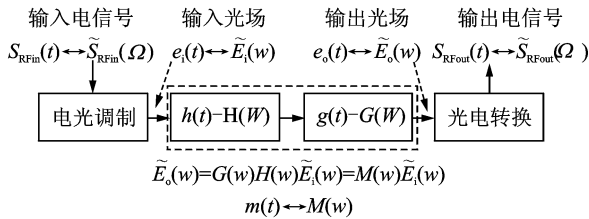


图 3 级联滤波器原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of a cascaded filter

对于图 3 所示的级联滤波器,假设级联后两光信号满足非相干的条件。从光域内考虑,设各个滤波器的脉冲响应为

$$h(t) = \sum_{r=0}^{M-1} h_r \delta(t - rT) \quad h_r \in C \quad (4)$$

$$g(t) = \sum_{s=0}^{N-1} g_s \delta(t - sT) \quad g_s \in C \quad (5)$$

则级联后的滤波器响应为两者的卷积

$$h(t) * g(t) = \sum_{s=0}^{N-1} \sum_{r=0}^{M-1} h_r g_s \delta(t - (r+s)T) \quad (6)$$

对式(6)做变量代换,令 $r+s=k, s=v$,则可以得到

$$m(t) = h(t) * g(t) = \sum_{k=0}^{M+N-2} \sum_{v=0}^k h_{k-v} g_v \delta(t - kT) = \sum_{k=0}^{M+N-2} m_k \delta(t - kT) \quad (7)$$

做出上述变量代换后,不难看到级联滤波器的脉冲响应中的每一项抽头系数,可以看作是由受 $g(t)$ 抽头加权后的 $h(t)$ 的各抽头系数得到的。从物理上理解, $g(t)$ 中的每一项都对 $h(t)$ 中的脉冲响应产生一个延迟,简单示意图如图 4 所示。

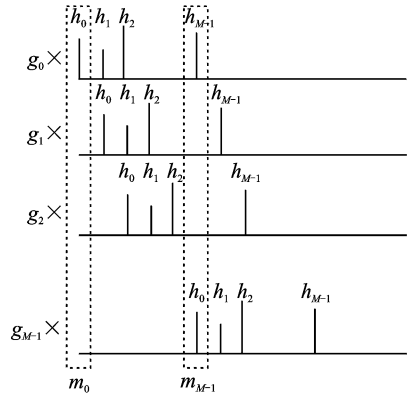


图 4 对式(7)的图示

Fig. 4 Graphical interpretation of (7)

通过调节 $g(t)$ 的各项抽头延迟来对 $h(t)$ 的脉冲响应进行调制,最终得到级联后的滤波器响应,并恢复出电信号。

由 Q 的定义知道,要提高 Q ,可以通过增加 FSR 或者减小 FWHM 来实现。

对于级联滤波器,可通过调节每个环路中的光可调延迟线,使得各个环路的自由光谱范围得以匹配,最终可实现级联滤波器的 FSR 是各单环路滤波器 FSR 的最小公倍数。

考虑一个双环路的级联滤波器。如图 5(a) 所示,环路 1 和环路 2 的滤波器响应各自对应一个 FSR,将它们级联后,根据游标效应,两环路的滤波器响应只有在频率上重叠的透射峰才会被选出,而其余的透射峰则会被压制,如图 5(b) 所示。这样,级联后的滤波器的 FSR 便是前面所有单个环路滤波器 FSR 最小公倍数,相对于单个环路滤波器的 FSR,级联滤波器的 FSR 有所增加。与此同时,级联滤波器的响应曲线由于透射峰前后沿被削尖而使得 FWHM 相比于单环路滤波器的 FWHM 会更小。FSR 的增加和 FWHM 的减小,使得级联滤波器中的超高 Q 得以实现。

1.4 级联结构微波光子滤波器常见问题

由 1.2 节的描述可知,只有满足光信号之间非相干的条件,才能最终实现微波光子滤波器在电域内的级联。对于全光级联结构,如何避免光信号间的干涉(及相干)十分重要。尤其对于 IIR 滤波器,

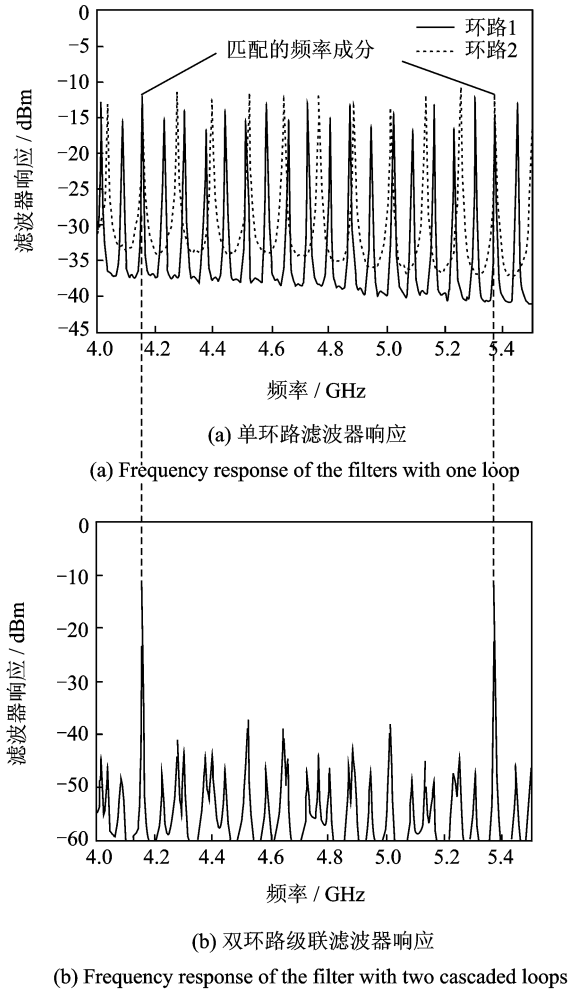


图 5 单环路滤波器及双环路级联滤波器的频率响应
Fig. 5 Frequency response of filters with one loop and filter with two cascaded loops

由于存在反馈环路,不仅要保证单级反馈环路的长度大于光源的相干长度,避免环路内信号干涉;对于级联结构,还需要避免多级反馈环路之间的光信号干涉。

光电级联结构的微波光子滤波器,在一定程度上可以缓和光信号的干涉问题。但是,对于光电转换器件的线性度需要有较高的要求,以满足光、电信号之间的线性转换,从而提高滤波器性能。

系统增益也是级联结构微波光子滤波器设计中需要考虑的重要问题之一。尽管通过级联的手段,有利于滤波器实现高 Q ,但这并不意味着单纯地通过增加级联次数便可实现 Q 的无限增加。因为在级联的同时,滤波器各抽头上信号的损耗也在增加,如果信号的功率低于探测器的分辨功率,则会导致信号难以分辨,从而导致抽头数目的减少,这并不利于提高 Q 。因此,需要在滤波器结构中引

入有源器件以保证信号的增益。

2 基于级联结构的超高 Q 微波光子滤波器

2.1 基于全光级联的超高 Q 微波光子滤波器

级联滤波器需要考虑到相干问题,即级联的延迟线之间必须无相干串扰,那么这就需要激光的相干长度小于延迟环路的长度,而 You Ningsi 和 Minasian R A^[28] 用全光级联的手段,基于有源滤波和无源滤波的混合,实现了相比于传统单个滤波器具有更高的 Q 以及更高的操作频率,且这种方法能较好地避免相干串扰问题。有源滤波部分采用半反射及全反射光纤布拉格光栅组成的类 FP 腔结构,实现了更窄的 3 dB 响应带宽,而无源滤波部分则消除了峰间串扰,且可滤出滤波器频率整数倍的频率。它减少了有缘延迟线激光阈值的限制,且使得处理器有更高的增益。用这种方法使滤波器实现了高达 801 的 Q 。

同样地,为了解决相干串扰问题,且实现更高的 Q , Xu Enming 和 Zhang Xinliang^[23] 等人提出了一种基于波长转换的 IIR 微波光子滤波器,如图 6 所示,它由 2 个级联的环路滤波器组成。第 1 个环路由掺铒光纤放大器、可调带通滤波器、50 : 50 光耦合器及光可调延迟线组成,环路前加衰减器可对输入功率进行调节。环路 1 的输出经过另一掺铒放大器和衰减器后进入环路 2,环路 2 由一个半导体光放大器 (Semiconductor optical amplifier, SOA),带通滤波器,50 : 50 光耦合器和 10 : 90 光耦合器组成。由于交叉增益调制效应,SOA 的自发辐射噪声 (Amplified spontaneous emission, ASE) 谱会受到泵浦信号的反相调制,从而将泵浦信号的信息反相复制到整个 ASE 谱中。环路 2 中带通滤波器的中心波长与泵浦信号的中心波长略有差别,它可以在一定波长范围内提取复制整个 ASE 谱上的信号,从而可以实现光信号的波长转换。在环路 2 中实现的波长转换可以避免不同反馈环路之间的光信号相干串扰,使得环路级联结构得以稳定工作。通过仔细调节两个环路的长度(即改变两个级联滤波器的 FSR),基于游标效应,可以大大增加级联结构的 FSR,从而实现较高的 Q 。

总体来说,这种结构最大的特点就是通过对环路 2 中 SOA 的 ASE 谱进行交叉增益调制,实现波长转变进而使滤波器具有稳定的传输特性。相比

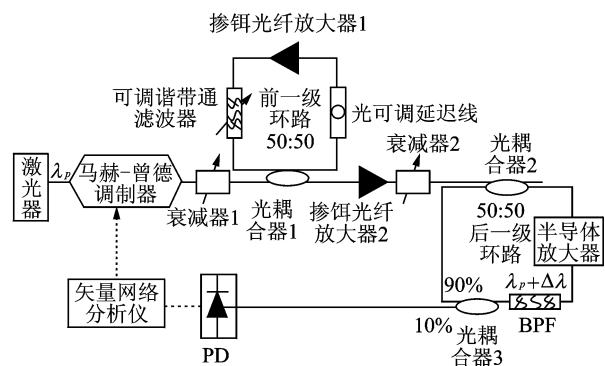


图 6 提出的系统结构图

Fig. 6 Proposed experiment setup

于单个 IIR 滤波器,这种级联滤波器的 FSR 和 Q 值有很大的提高。通过调节环路中的光可调延迟线,可对滤波器的 FSR 进行调节。该实验中实现了 Q 高达 3 338 的 IIR 微波光子滤波器。不过,该结构仍然具有一定的局限性,由于两个级联的环路为全光反馈环路,为了实现稳定的传输特性,需要每个反馈环路的长度大于光源的相干长度,这在一定程度上限制了单环路滤波器的 FSR,进而限制了级联结构滤波器的 FSR 和 Q。

2.2 基于光电级联的超高 Q 微波光子滤波器

Ortega B 等人^[22]提到一种基于循环腔和可调电光调制器的微波光子滤波器,该滤波器的 Q 达到 3 000 以上,这基于光电级联的方法实现。滤波器结构如图 7 所示。线性控制配接器的作用是为了保证信号的线性度,它可以由矢量网络分析仪 (Vector network analyzer, VNA) 和光电探测器组成。VNA 发射出微波信号先在电域内进行滤波,经电光调制器进行调制后,再进入基于光纤布拉格光栅的循环腔结构,在光域内进行滤波。2 个 FBG 相当于一个 FP 腔,调制后的信号光在其中来回反射。具体地,50%FBG 实现分波与合波的功能,每次经过 50%FBG 的信号光都会有一部分透射,一部分反射,反射回来的光继续在腔内振荡,在前一次的基础上部分输出,部分反射,如此循环往复下去,则产生多路微波信号。相邻两路的微波信号的延迟则是光在 2 个 FBG 之间往返一次的时间。掺铒光纤放大器 (Erbium-doped fiber amplifier, EDFA) 在这里起到的作用是弥补 FBG 对信号的透射损耗,而另一全反射 FBG 则是为了消除 EDFA 的放大自发辐射噪声。

得到的滤波器响应幅值曲线如图 8 所示。在图 8(a)中,实线部分为光学滤波器的响应曲线,虚

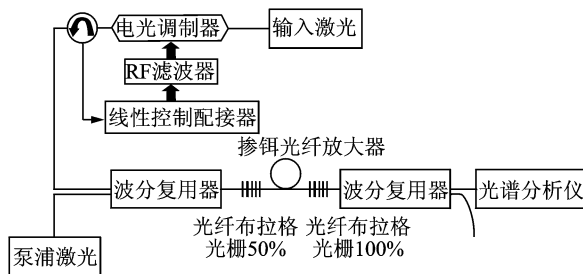
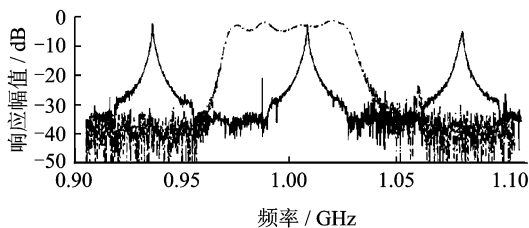


图 7 光电级联的超高 Q 微波光子滤波器

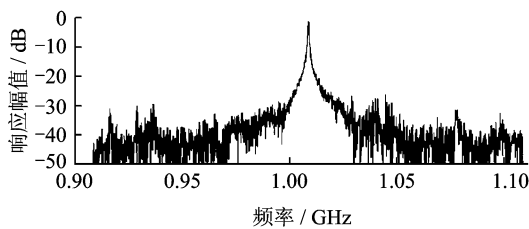
Fig. 7 Ultrahigh-Q microwave photonic filter through an hybrid optoelectronic approach

线部分为电学滤波器的响应曲线。通过对电学滤波器进行设计,例如中心频率和带宽,可使得透射窗口只允许光学滤波器的一个透射峰通过。图 8(b)是滤波器级联后滤波器总的响应幅值曲线,电学滤波器主要起到选择峰值的作用。只让光学滤波器的一个透射峰通过,既提高了 Q,又实现了单通带的滤波。



(a) 光学滤波器与电学滤波器的响应幅值曲线

(a) Response of an optical transversal filter (solid line) and an electrical filter (dashed line)



(b) 图7系统中滤波器的响应幅值曲线

(b) Response of system in Fig. 7

图 8 单个光学与电学滤波器以及图 7 系统滤波器的响应幅值曲线

Fig. 8 Response of an optical transversal filter, an electrical filter and system in Fig. 7

2.3 基于光电反馈环路的超高 Q 微波光子滤波器

Cheng Linghao^[24]等人提出了一种基于光电反馈环路的 IIR 微波光子滤波器。由于在反馈环路中既存在光信号又存在电信号,所以该滤波器不需要考虑激光器的相干长度,因此可以降低反馈环

路的长度,从而提高 IIR 滤波器的 FSR,进而提高其 Q 。本文提出的 IIR 微波光子滤波器结构如图 9 所示。首先,从网络分析仪发射出的微波信号通过第一个电光调制器(EOM1)调制到光载波上;之后,产生的光信号经过第二个电光调制器(EOM2),被光电探测器探测后转换成电信号后,再去驱动 EOM2,这样就形成了一个光电反馈环路。

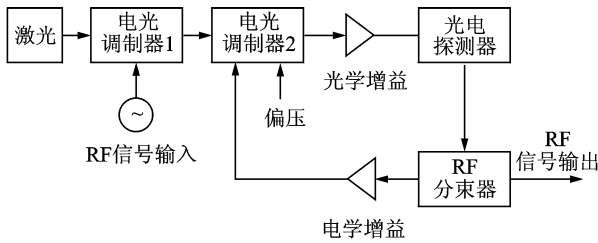


图 9 本文提出的 IIR 微波光子滤波器结构示意图
Fig. 9 Structure schematic diagram of the proposed IIR microwave photonic filter

该滤波器的功率响应表示如下

$$R_m = \left| \frac{1}{1 - \eta \exp(-j\omega_r T)} \right|^2 = \frac{1}{(1 + \eta^2) - 2\eta \cos(\omega_r T)} \quad (8)$$

式中: ω_r 为 RF 信号的频率, η 为光电反馈环路的反馈效率,而 T 为光信号在环路中的传输时间(其倒数为滤波器的 FSR)。

图 10 给出了一个 FSR 范围内滤波器的频率响应与光电反馈环路反馈效率的关系(注:EOM2 光电响应度为负值时,反馈效率也为负值)。从图中可以看到,随着 $|\eta|$ 的增加,滤波器的衰减率和选择特性也会增加。因此,频率的选择特性可以通过调节环路的增益、输入光功率以及光电转换效率来进行调谐。

在文献[24]的实验系统中,EOM2 可以采用马赫-曾德调制器,通过改变马赫-曾德调制器的偏压点便可改变反馈效率 η 的正负。基于这种特性,滤波器具有可重构性且滤波器响应的通带和阻带可以快速地相互变换。此外,改变滤波器的环路长度可以对 FSR 数值进行调谐,减小环路长度可以得到更宽的自由光谱范围,同时滤波器呈现出更高的衰减率以及频率选择特性。

根据文献[24]中的理论分析,增加环路的反馈效率可以提高单级滤波器的频率选择特性。而对于双级环路结构,环路中的功率预算更为重要。为了提高各个环路中的反馈效率,环路中采用了高增

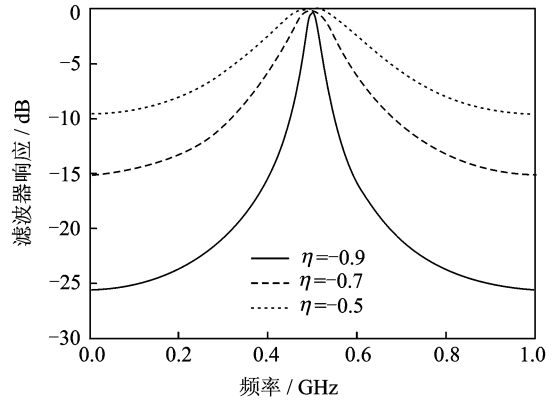


图 10 计算得到的频率响应与反馈效率(负值)的关系曲线^[24]

Fig. 10 Calculated frequency response of proposed photonic microwave filter for several values of η (negative), feedback efficiency^[24]

益三级射频放大器(Centellax UA0L30VM)、具有高光电转换效率的 PIN-TIA 探测器(转换效率约为 0.8 A/W)以及具有较低半波电压的马赫-曾德调制器(半波电压约为 3.5 V)等器件。各个环路中均没有插入掺铒光纤放大器,主要是因为这会增加环路的长度从而减小单环路滤波器的自由光谱范围。另外,为了减小放大或调制中带来的非线性畸变,实验中用到的调制器和 RF 放大器均具有很高的线性度。

上述提到的单级反馈结构的微波光子滤波器的设计,利用了光电反馈环路解决了光学相干干扰的问题,但仍然具有有限的 FSR,这在一定程度上限制了滤波器的 Q 。文献[25]提出了一种基于游标效应的双级联光电反馈环路结构,最终实现了 Q 高达 4 895 的 IIR 微波光子滤波器,这是目前报道过的 IIR 微波光子滤波器 Q 的最高值。

在文献[25]的实验中,由级联实现高 Q 值的原理可知,环路 1 的 FSR 约为环路 2 的 FSR 的 10/17,也就是说,环路 1 中每 17 个峰中的 1 个会与环路 2 中每 10 个峰中的 1 个匹配,从而使级联滤波器中匹配的峰得到增强,而其余的峰受到压制。这样,级联滤波器的自由光谱范围就会增加。同时,级联滤波器相比于单环路滤波器中的 3 dB 频率响应带宽会更小。自由光谱范围的增加和 3 dB 带宽的减小,使得级联滤波器中的超高 Q 得以实现。

图 11 给出了实验测得的双级联光电反馈环路微波光子滤波器的频率响应。该滤波器的自由光谱范围和 3 dB 带宽分别为 1.22 GHz 和 249 kHz,

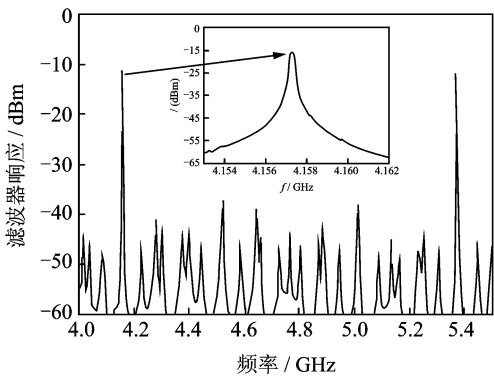


图 11 双级联光电反馈环路微波光子滤波器的频率响应^[25]

Fig. 11 Frequency response of the IIR filter with two cascaded loops^[25]

可实现高达 4 895 的超高 Q 。由于实验中的光电反馈环路具有较短的长度,光延迟线在有限范围内的调节可以容易地改变单环路滤波器中的自由光谱范围。因此,通过调整双环路级联光电反馈环路的长度可以实现级联滤波器不同的自由光谱范围和 Q 的调节,这在文献[25]中均已得到实现。

3 结束语

本文对超高 Q 的微波光子滤波器进行了总结,并着重对级联结构实现高 Q 的滤波器进行分析。用全光级联的手段,基于有源滤波和无源滤波的混合,在实验中已实现 801 的 Q 。而利用基于游标效应的双级联反馈环路结构,采用波长转换的方法,则实现了 Q 高达 3 338 的 IIR 微波光子滤波器。基于波长转换的超高 Q 的 IIR 微波光子滤波器结构最大的特点就是通过对后环路中 SOA 的 ASE 谱进行交叉增益调制实现波长转变进而使滤波器具有稳定的传输特性,相比于单个 IIR 滤波器,这种级联滤波器的 FSR 和 Q 有很大的提高。采用光电级联的手段,设计出基于循环腔和可调电光调制器结构的微波光子滤波器,则利用电学滤波器对光学滤波器的进行单个透射峰的选择,在实现单通带滤波的同时实现了超过 3 000 的 Q 。另外,本文中提到的基于游标效应的双级联反馈环路结构实现超高 Q 的手段中,为了避免光信号之间的相干串扰,同时实现超高 Q ,总结了一种利用游标效应,基于光电转换结构的 IIR 微波光子滤波器,它实现了高达 4 895 的 Q 。相比于波长转换的方法,这种基于光电转换的超高 Q 值 IIR 微波光子滤波器结构则通过在反馈环路中采用电光调制器、光电探测器来分别实现信号的电光、光电转换,进

而实现闭合的环路,不仅避免了级联环路间的信号相干串扰,也避免了单个环路中因环路长度小于光源相干长度而引起的相干串扰。

尽管经过了几十年的研究与发展,微波光子滤波器技术取得了很大的进展,但是在实际应用中仍然存在着很大的困难,例如:各种光电器件的非线性给系统所带来的损伤、成本高、体积大、稳定性差、灵活性差等问题。因此,除了提高滤波器本身的波长选择特性(即高 Q)之外,研究高性能、高灵活性、高可控性、高稳定性的新型光子器件,以实现微波/毫米波信号的自适应操控与矢量信号处理将是未来微波光子滤波器的主要发展方向之一。

参考文献:

- [1] Capmany J, Mora J, Gasulla I, et al. Microwave Photonic signal processing[J]. J Lightwave Technol. 2013,31(4), 571-586.
- [2] Yao Jianping. Microwave photonics[J]. J Lightwave Technol, 2009,27(3), 314-335.
- [3] Minasian R A. Photonic signal processing of microwave signals[J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2006,54(2), 832-846.
- [4] Capmany J, Novak D. Microwave photonics combines two worlds[J]. Nature Photon. 2007(1): 319-330.
- [5] Capmany J, Ortega B, Pastor D. A tutorial on microwave photonic filters[J]. J Lightwave Technol, 2006,24:201.
- [6] Jackson K P, Newton S A, Moslehi B, et al. Optical fiber delay-Line signal processing [J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1985, MTT-33(3): 193-208.
- [7] Wilner K, Van Den Heuvel A P. Fiber optic delay lines for microwave signal processing[J]. Proceedings of the IEEE, 1976, 64(5):805-807.
- [8] Capmany J, Caschn J. Synthesis of fiber-optic delay line filters[J]. J lightwave technol, 1995, 13(10) : 2003-2012.
- [9] Polo V, Ramos F, Marti J, et al. Synthesis of photonic microwave filters based on external optical modulators and wide-band chirped fiber gratings[J]. J Lightw Technol, 2000,18(2): 213-220.
- [10] Hunter D B, Minasian R A, Krug P A. Tunable optical transversal filter based on chirped gratings[J]. Electron Lett, 1995, 31(25): 2205-2207.
- [11] Pastor D, Capmany J. Fiber optic tunable transversal filter using laser array and linearly chirped fibre grating[J]. Electron Lett, 1998,34(17):1684-1685.
- [12] Delgado-Pinar M, Mora J, Diez A, et al. Tunable and reconfigurable microwave filter by use of a

- Bragg-grating-based acousto-optic superlattice modulator[J]. *Opt Lett*, 2005,30(1):8-10.
- [13] Vidal B, Polo V. Photonic tunable microwave transversal filter based on optical switches and fiber dispersion[J]. *IEEE MTT-3 Microwave Symposium Digest*, 2003,2:1399-1402.
- [14] Ortigosa-Blanch A, Mora J, Capmany J, et al. Tunable radio-frequency photonic filter based on an actively mode-locked fiber[J]. *Laser Opt Lett*, 2002, 31(6):709-711
- [15] Moslehi B. Fiber-optic filters employing optical amplifiers to provide design flexibility [J]. *Electron Lett*, 1992,28(3):226-228
- [16] Capmany J, Cascon J. Optical programmable transversal filter using fiber amplifiers[J]. *Electron Lett*, 1992,28(13):1245-1246.
- [17] Capmany J, Mora J, Ortega B, et al. Microwave photonic filters using low-cost sources featuring tunability, reconfigurability and negative coefficients [J]. *Opti Express*,2005,13(5):1412-1417.
- [18] Capmany J, Mora J, Pastor D, et al. High-quality online-reconfigurable microwave photonic transversal filter with positive and negative coefficients [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2005, 17 (12): 2730-2732.
- [19] 周俐娜. 高 Q 值微波光子学滤波器的理论和实验研究 [D]. 武汉:华中科技大学,2010.
Zhou Lina. Theoretical and experimental researches on high-Q microwave photonic filters [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2010.
- [20] Wang C C. High-frequency narrow-band single-mode fiber-optic transversal filters[J]. *J Light Technol*, 1987,LT-5(1):77-81
- [21] Hunter D B, Minasian R A. Photonic signal processing of microwave signals using an active-fiber Bragg-grating-pair structure[J]. *IEEE Trans Microwave Theory Tech*, 1997, 45(8):1463-1466.
- [22] Ortega B, Mora J, Capmany J, et al. Highly selective microwave photonic filters based on active optical recirculating cavity and tuned modulator hybrid structure[J]. *Electron Lett*, 2005,41: 1133-1135.
- [23] Xu Enming, Zhang Xinliang, Zhou Lina, et al. Ultrahigh-Q microwave photonic filter with Vernier effect and wavelength conversion in a cascaded pair of active loops[J]. *Opt Lett*,2010,35:1242-1244.
- [24] Cheng Linghao, Aditya S. A novel photonic microwave filter with infinite impulse response[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2007,19: 1439-1441.
- [25] Liu Jie, Guo Nan, Li Zhaohui, et al. Ultrahigh-Q microwave photonic filter with tunable Q value utilizing cascaded optical-electrical feedback loops [J]. *Opt Lett*,2013,38: 4304-4307.
- [26] 安丽婧,裴丽,祁春慧,等. 高品质因数的微波光子滤波器分析[J]. *光电技术应用*,2010,25(4):42-45,49.
An Lijing,Pei Li,Qi Chunhui,et al. Analysis of high Q microwave optic filter[J]. *Electro-Optic Technology Application*,2010,25(4):42-45,49.
- [27] Capmany J. On the cascade of incoherent discrete-time microwave photonic filters[J]. *J Lightw Technol*, 2006, 24(7):2564-2578.
- [28] You Ningsi, Minasian R A. A novel high-optical microwave processor using hybrid delay-line filters[J]. *IEEE Trans Actions on Microwave Theory Tech*, 1999, 47(7):1304-1308.

作者简介:陈鹏宇(1993-),男,硕士研究生,研究方向:微波光子技术,光学旋涡技术,Email: superhc8@163.com;刘洁(1985-)女,讲师,研究方向:微波光子技术,数字信号处理;程凌浩(1977-),男,副教授,硕士生导师,研究方向:光纤传感技术,光通信技术,微波光子技术;李朝晖(1975-),男,教授,博士生导师,研究方向:光纤通信系统,光电检测系统,微波光子技术;吕超(1963-),男,教授,博士生导师,研究方向:光纤通信技术、光纤传感技术;余思远(1963-),男,教授,博士生导师,研究方向:半导体光电子器件、光电子材料、微纳加工技术、集成光学与集成光子器件技术、光信息系统/网络应用技术。