

高带外抑制比微波光子滤波器研究进展

李元栋^{1,2}, 王荣¹, 蒲涛^{1*}, 朱华涛¹, 郑吉林¹, 胡猛²¹中国人民解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210093;²镇江船艇学院动力指挥系, 江苏 镇江 212003

摘要 为了拓宽微波光子滤波器应用,综述了基于非相干和相干体制来提高微波光子滤波器带外抑制比的现有方案,分析了各方案的优缺点;利用载波抑制的单边带调制外腔光注入分布反馈式(DFB)激光器的方式实现了单通道微波光子滤波,该方法消除了DFB腔内的四波混频效应,将单通道微波光子滤波器的带外抑制比由原来的20 dB提高至32.3 dB,最后探讨了进一步提高带外抑制比的途径。

关键词 光通信;微波光子滤波器;带外抑制比;光注入

中图分类号 TN713

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.020005

Review on High Out-of-Band Suppression Ratio of Microwave Photonic Filter

Li Yuandong^{1,2}, Wang Rong¹, Pu Tao¹, Zhu Huatao¹, Zheng Jilin¹, Hu Meng²¹ College of Communications Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210093, China;² Department of Power Command, Zhenjiang Watercraft College, Zhenjiang, Jiangsu 212003, China

Abstract In order to broaden applications of microwave photonic filter (MPF), we review existing techniques to improve the out-of-band suppression ratio of the MPF implemented in incoherent or coherent operational regime. A single bandpass MPF is proposed based on carrier-suppressed single sideband (CS-SSB) injected distributed feedback (DFB) laser. Four-wave mixing effects have been reduced through optical carrier suppression. The out-of-band suppression ratio of the single bandpass MPF increases from 20 dB to 32.3 dB. The methods to improve the out-of-band suppression ratio of the MPF are discussed.

Key words optical communications; microwave photonic filter; out-of-band suppression ratio; optical injection

OCIS codes 060.5625; 060.2360; 070.1170

1 引言

滤波是信号处理的关键环节之一,滤波器性能优劣直接决定后续信号的处理难度。如宽带数字信道化接收机作为唯一实用且满足未来电子战需求的接收机技术^[1],若将其前端模拟带通滤波器的带外抑制比提高30 dB,则后续模数转换器(ADC)的采样位数可降低约5 bit,有效降低了后续数字信号处

理(DSP)难度和整机成本。微波滤波器虽带外抑制比高,但受电子瓶颈限制,难以满足毫米波段(30~300 GHz)的应用,而光子辅助微波滤波器(简称“微波光子滤波器”,MPF)却无此限制。此外,微波光子滤波器还具有采样速率高、带宽大、损耗低、重量轻、抗电磁干扰及灵活可重构等固有优势,有望替代微波滤波器。微波光子滤波器分为非相干和相干两类^[2]。其中非相干体制基于时延线结构,采用离散

收稿日期: 2017-07-07; 收到修改稿日期: 2017-08-14

基金项目: 国家自然科学基金(61475193, 61504170, 61671306, 61174199)、江苏省自然科学基金(BK20140069)

作者简介: 李元栋(1985—),男,博士研究生,讲师,主要从事微波光子信号处理方面研究。E-mail: yuandong115@163.com

导师简介: 王荣(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤通信、电磁场与微波技术等方面研究。

E-mail: wr_njice@163.com

* 通信联系人。E-mail: nj_putao@163.com

数字化滤波器技术,多个抽头由频谱切割宽谱光源或激光器阵列等方式获得,相邻抽头间时延由调制信号经过不同长度线性色散介质获得,抽头间时延大于光源相干时间,滤波器性能稳定对环境变化不敏感,频谱响应呈多通带;相干体制使用单光源、基于相位调制到强度调制(PM-IM)转换技术实现,本质属于频谱映射,频谱响应呈单通带,即光滤波器向微波滤波器映射,微波滤波器性质完全取决于光滤波器,故研制高性能光滤波器至关重要。常用光滤波器有无源和有源两种,无源光滤波器有微环腔、光纤布拉格光栅(FBG)、相移光纤布拉格光栅(PS-FBG)等,有源光滤波器有受激布里渊散射(SBS)放大器、半导体光放大器(SOA)等。此外,微波光子滤波器频率响应有带通和带陷两类,为叙述方便,本文将带通滤波器带外抑制比和带陷滤波器陷带深度统称带外抑制比。目前限制微波光子滤波器实际应用的一个重要因素是大多数微波光子滤波器带外抑制比低于 40 dB,无法满足实际需求,因此迫切需要研制高带外抑制比微波光子滤波器。为此,本文综述了现有的高抑制比微波光子滤波器实现方案并分析了各自的优缺点,结合课题组研究成果,使用载波

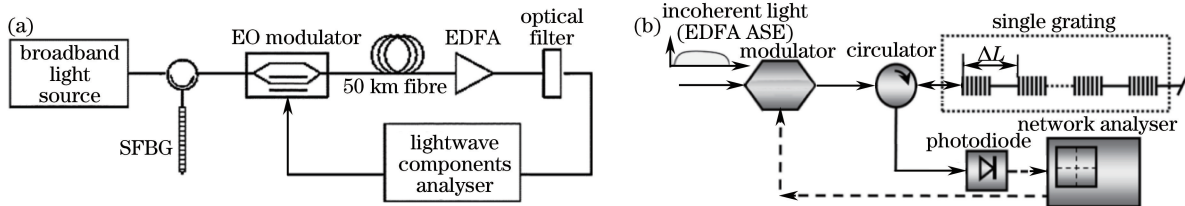
抑制单边带外腔光注入分布反馈式(DFB)激光器的方式将单通道微波光子滤波器的带外抑制比由原来的 20 dB 提高至 32.3 dB,并探讨了进一步提高带外抑制比的方法。

2 多通带高带外抑制比微波光子滤波器

非相干体制微波光子滤波器根据抽头数目分为有限(FIR)和无限(IIR)两类。

2.1 FIR 高带外抑制比微波光子滤波器

提高 FIR 微波光子滤波器带外抑制比需对有限抽头系数进行切趾处理,即人为控制有限抽头系数使其满足特定窗函数。有限抽头可通过结合多路光载波、单路色散介质或单光载波、多路色散介质结构获得。Leng 等^[3-4]基于多路光载波和单路色散介质结构,利用超结构光栅(SFBG)频谱切割宽谱光源获得多抽头,在 SFBG 内部设计多个 FBG(中心反射波长不同),FBG 的反射系数使有限抽头系数满足高斯型窗函数,FBG 间距离 ΔL 使抽头间时延大于载波光源的相干时间,分别实现 60 dB 和 40 dB 的带外抑制比,实验装置分别如图 1(a)和 1(b)所示。



EO: electro-optic; EDFA: Erbium doped fiber amplifier; ASE: amplified spontaneous emission

图 1 基于 SFBG 和高斯窗函数的(a) 24 抽头、(b) 18 抽头 FIR 高带外抑制比微波光子滤波器示意图

Fig. 1 Schematic illustrations of high out-of-band suppression ratio FIR MPF using SFBG and

Gaussian window function with (a) 24 taps and (b) 18 taps

图 1(a)中带外抑制比更高的原因是使用了一个可调谐光滤波器。理论上高斯型窗函数的带外抑制比为 60 dB,但受限于 SFBG 制造工艺,实际窗函数为非理想高斯型,带外抑制比仅为 40 dB,为实现较理想高斯型窗函数需外加可调谐光滤波器来修正有限抽头系数。有线抽头的获取方式除采用频谱切割宽谱光源外,激光器阵列或锁模激光器亦可,但成本高。SFBG 的 FIR 微波光子滤波器结构紧凑但存在光纤色散诱导衰减效应、噪声高(宽谱光源噪声大)和品质因数 Q 值低(SFBG 内部 FBG 数目少)等缺点。增加 SFBG 内部 FBG 数量可提高 Q 值,但 SFBG 生产难度增加。即使 SFBG 生产工艺过关,也会因抽头数过

多造成宽谱光源频域覆盖范围变宽,甚至超过光纤线性色散区而导致滤波器性能下降,因此增加 SFBG 内部 FBG 数量来提高滤波器 Q 值不可行。

为提高 Q 值,2010 年 Chan 等^[5]基于单光载波和多路色散介质结构,利用 Sagnac 环和光放大器形成无限抽头,但因移频器频移量和环外波长受限于元件带宽,实际形成有限抽头(频率互不相同),抽头系数呈 Kaiser 型,滤波器 Q 值为 80,带外抑制比为 70 dB,实验装置如图 2 所示,其中输入信号为射频(RF)信号。

相比 SFBG 结构,Sagnac 环结构抽头数目更多,滤波器 Q 值更高;此外因抽头间频率不同,所以采用窄线宽(150 kHz)、低噪声光源代替宽谱光源来提高

系统信噪比和滤波器带外抑制比。基于 SFBG 和 Sagnac 环结构的 FIR 滤波器都存在光纤或环路一定长度时滤波器无法调谐的通病,故当多个光载波波长确定后,只能通过改变色散介质长度实现调谐。

为实现快速重构、高 Q 值、高带外抑制比可编程 FIR 滤波器,2012 年 Supradeepa 等^[6]使用两个

锁模激光器的四波混频(FWM)效应增加抽头数目的方法来提高滤波器 Q 值;采用光滤波器对抽头系数高斯切趾来提高滤波带外抑制比;利用梳齿频率间隔控制实现滤波器快速调谐。实验获得带外抑制比大于 60 dB、40 ns 快速调谐和带宽可重构 FIR 滤波器,实验装置如图 3 所示。

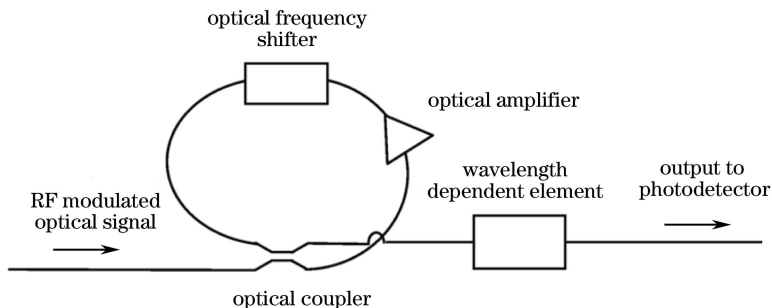


图 2 利用 Sagnac 环和 Kaiser 型窗函数实现高带外抑制比的有限抽头微波光子滤波器示意图

Fig. 2 Schematic illustration of the high out-of-band suppression ratio FIR MPF using Sagnac loop and Kaiser window function

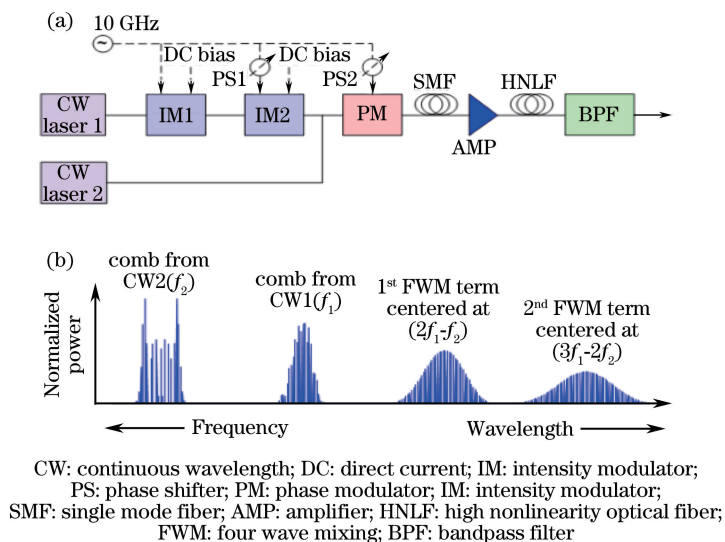


图 3 (a)利用高斯切趾宽带光梳实现高带外抑制比的有限抽头微波光子滤波器示意图;(b)级联四波混频过程描述

Fig. 3 (a) Schematic illustration of the high out-of-band suppression ratio FIR MPF using the Gaussian apodized broadband combs; (b) depiction of the cascaded FWM process

2.2 IIR 高带外抑制比带通微波光子滤波器

对 IIR 滤波器,切趾方式不可行,需研制一种高阶滤波器来提高带外抑制比。最初想通过级联一阶 IIR 滤波器来实现高阶滤波,但实际不可行,因为级联 IIR 滤波器的传输函数并不直接等于单个 IIR 滤波器传输函数的乘积,因此电信号端到端的线性关系不能保证。此外,级联结构存在干涉效应,即存在两个或多个信号虽经过不同路径但同时到达光电探测器(PD)的情况,因此级联系统对外界环境变化十分敏感,稳定性差,且不能通过使用窄线宽光源来消除干涉效应。2007 年 Chan 等^[7]利用 Sagnac 环和

FBG 组实现了带外抑制比为 50 dB、Q 值为 100 的三阶 IIR 滤波,该滤波器的实验装置如图 4 所示。

该三阶滤波器无限个抽头之间不相干,但每个抽头内部由顺时针和逆时针两种成分构成,它们相干但不受外界环境影响,这是因为外界环境变化对顺时针和逆时针传输成分的影响相同。但当环路长度和 FBG 选定后,抽头间延时确定,滤波器无法调谐。

为实现灵活重构且消除抽头内部干涉效应,Chan^[8-9]利用不同的级联结构获得了超过 60 dB 的高阶 IIR 滤波器,实验装置如图 5 所示。

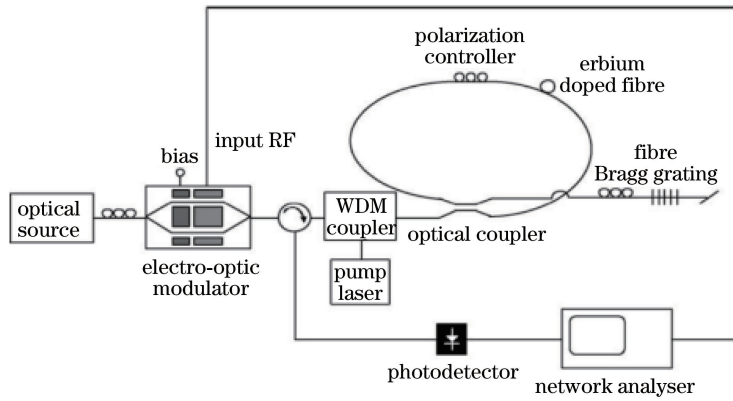
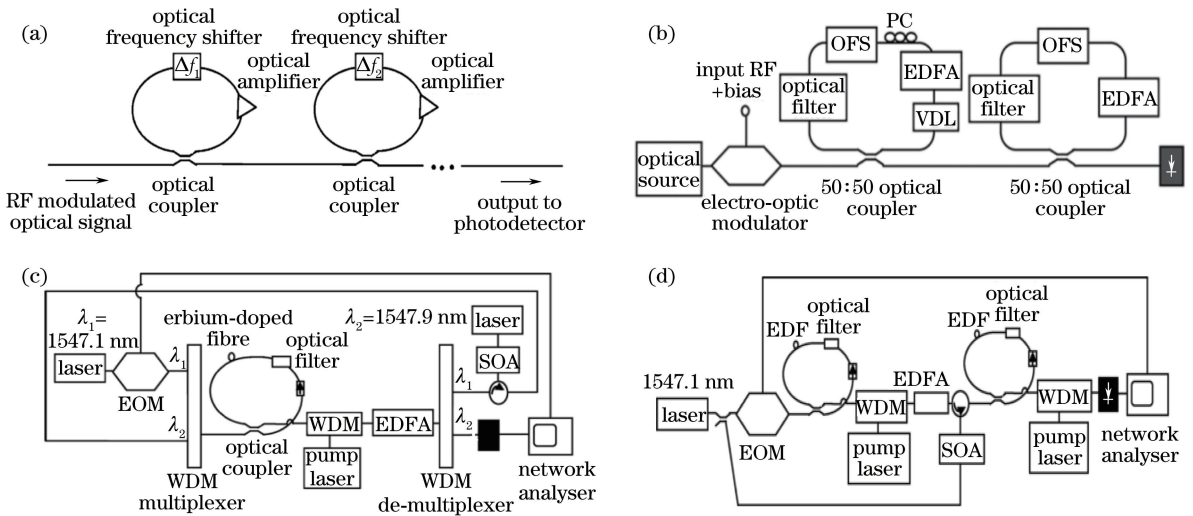


图 4 基于抽头内部组成成分的干涉效应的三阶无限抽头滤波器示意图

Fig. 4 Schematic illustrations of the 3rd IIR MPF based on the interference effect between the compositions of the tap

OFS: optical fiber sensor; PC: polarization controller; VDL: variable light delay line; SOA: semiconductor optical amplifier

图 5 4 种级联结构的高阶滤波器示意图

Fig. 5 Four schematic illustrations of cascade configurations of high order IIR MPF

3 单通带高带外抑制比微波光子滤波器

非相干技术微波光子滤波器频谱响应呈多通带特性,为实现单通带,可采用相干技术。单通带微波光子滤波器提高带外抑制比的方法有相减(电域、光域)法和频谱映射两种。

3.1 基于相减方式获得高带外抑制比单通带微波光子滤波器

基于相减方式提高带外抑制比的原理如下:两个中心波长增益略有不同而其他特征几乎相同的单通带滤波器在电域或光域相减,从而获得高带外抑制比。2002年 Chan 等^[10]利用电域相减方

式获得 40 dB 带外抑制比;2011年 Yu 等^[11]基于法布里-珀罗半导体放大器(FP-SOA),利用光域相减方式获得 34.3 dB 带外抑制比,实验装置如图 6 所示。

电域相减非全光系统存在电子瓶颈。光域相减中光载波须严格处于两相邻 FP-SOA 分立增益谱中间,否则频率响应呈双通带。其原因是 FP-SOA 增益谱结合了法布里-珀罗(F-P)标准具和 SOA 的特点,增益谱分立(驻波条件)而其包络满足 SOA 增益谱曲线,即相邻分立增益峰峰值略有差别。为提高光域相减的灵活性和带外抑制比,2016年 Fan 等^[12]在原有方案基础上增加一路光载波,两路各自形成单通带滤波器,精细调节可调谐半导体激光器(TLS1 和 TLS2)的波长使其分别位于 FP-SOA

特定分立增益谱的±1阶边带位置,最终获得的两单通带微波光子滤波器在中心频点处相加,其他频率处相减,从而获得76.3 dB的带外抑制比且实现4~16 GHz调谐范围,如图7所示。

率处相减,从而获得76.3 dB的带外抑制比且实现4~16 GHz调谐范围,如图7所示。

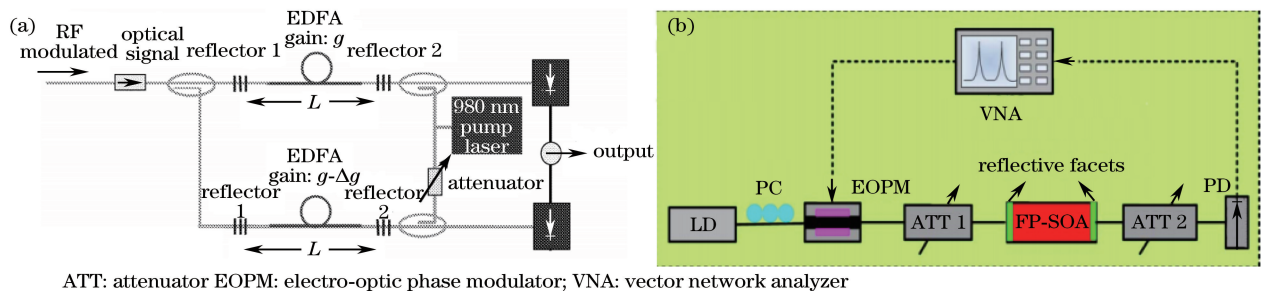


图6 基于相减方式的高带外抑制比单通带微波光子滤波器示意图。(a)电域内相减;(b)光域内相减

Fig. 6 Schematic illustrations of high out-of-band suppression ratio single bandpass MPF using subtractive in (a) electric and (b) optical domains

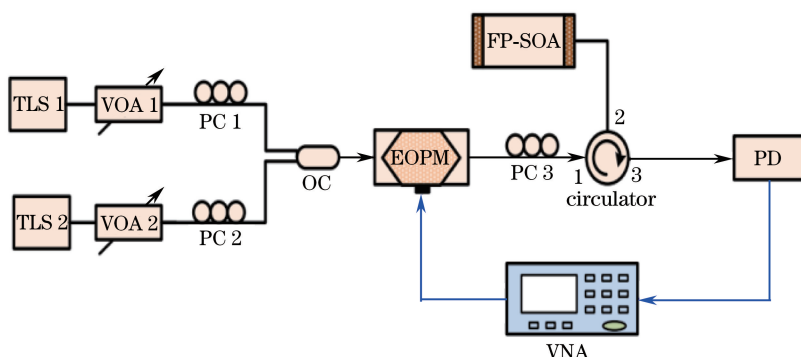


图7 改进版光域相减实现高带外抑制比的单通带微波光子滤波器示意图

Fig. 7 Schematic illustration of high out-of-band suppression ratio single bandpass MPF using modified subtraction in optical domain

3.2 基于频谱映射方式的高带外抑制比单通带微波光子滤波器

频谱映射机制的关键是高带外抑制比光滤波器。2015年Ge等^[13]利用无源光滤波器(利奥光滤波器)、2017年李培轩^[14]利用有源光滤波[受激布里

渊散射(SBS)增益谱]基于频谱映射机制分别实现60 dB和80 dB(目前的世界纪录)带外抑制比的单通带微波光子滤波器,实验装置如图8所示。

图8(a)中带外抑制比高的原因是利用SOA偏振推拉效应实现了理想单边带调制。图8(b)中带

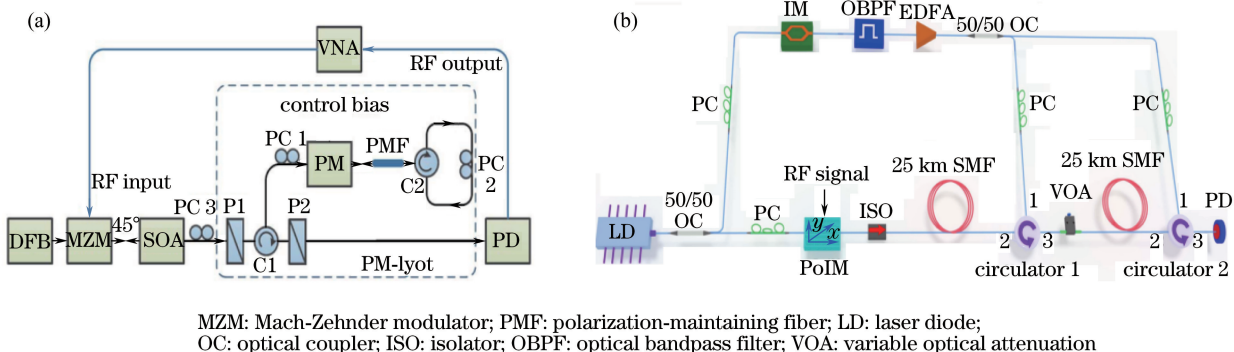


图8 基于不同光滤波器频谱映射机制实现高带外抑制比的单通带微波光子滤波器示意图。

(a)无源利奥光滤波器;(b)有源SBS增益谱光滤波器

Fig. 8 Schematic illustration of high out-of-band suppression ratio single bandpass MPF using (a) passive Lyot optical filter and (b) active optical SBS gain spectrum filter based on spectrum mapping approaches

外抑制比高的原因有两个。1) 链路噪声小。因为偏振调制器输出的光载波与 ± 1 阶边带偏振态垂直,只有落入SBS增益谱范围内的边带信号才能被放大,且边带信号的偏振态被纠正至与光载波平行(SBS增益谱具有偏振推拉效应)并差拍出信号,而其他未被放大的边带其偏振态和光载波垂直差拍不出任何信号,因此系统噪声底较低。2) 增益较大。系统采用SBS级联抽运方式,能有效补偿链路插入损耗,并且通过精确控制SBS增益谱大小来精细调整被放大边带的偏振态。

4 高带外抑制比带陷微波光子滤波器

除带通滤波器外,特殊场合也需要带陷滤波器,其实现方式主要有3类,如图9所示^[15]。图9(a)为传统频谱映射方式,利用单边带(SSB)和双边带(DSB)光带陷滤波器实现,陷波深度最小,即(d)中

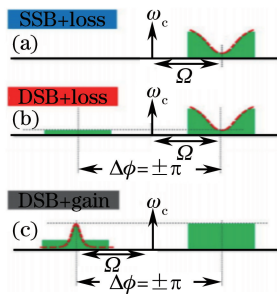


图9 带陷微波光子滤波器3种方案及其理论陷波深度

Fig. 9 Three schemes of notch MPF and theory of notch depth

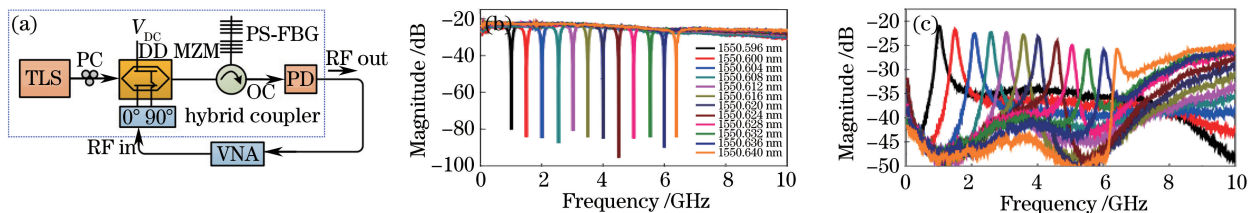
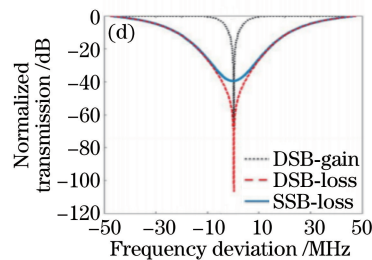


图10 (a)带通带陷开关切换的微波光子滤波器示意图;(b)带陷滤波器的频谱响应;(c)带通滤波器的频谱响应

Fig. 10 (a) Schematic illustration of on-off between bandpass and notch MPFs;

(b) spectral respons of the notch MPF; (c) spectral response of bandpass MPF

5 外腔光注入DFB激光器高带外抑制比单通带微波光子滤波器

DFB激光器具有波长选择和放大特性,2015年本课题组利用强度调制的双边带外腔光注入DFB激光器,实现单通带微波光子滤波^[18],但受直流偏置电压漂移和DFB腔内FWM影响,带外抑制比仅20 dB。改进装置结构,将光载波经过50:50分束器分成上下支路:上支路用相位调制器(PM)和光滤波器来实现抑制载波的单边带调制(CS-SSB),即光滤

波器(OF)将光载波和+1阶边带滤除,只剩-1阶边带注入DFB激光器并被放大;下支路光载波直接传输至PD,并和上支路被放大的-1阶边带差拍形成单通带微波光子滤波器,实验系统装置如图11(a)所示^[19]。调节TLS(主激光器)波长使得主从激光器失谐频率在-38~39 GHz间变化,从而获得不同中心频率(9~39 GHz)的单通带微波光子滤波器,如图11(b)可知:1) 当失谐频率在-1~8 GHz时存在一段混沌区域[图11(b)红色实线圈所示],

蓝色实线;图9(b)和(c)基于桥T思想。桥T思想是指利用增益(gain)或者损耗(loss)方式使DSB(± 1 阶边带的幅度和相位都不等)调制在特殊频点处,两边带幅度相等、相位相反,从而形成带陷滤波器。其中图9(b)基于桥T损耗思想,利用DSB和SBS损耗谱实现,陷波深度居中,即(d)中红色虚线;图9(c)基于桥T增益思想,利用DSB和SBS增益谱实现,陷波深度最深,即(d)中黑色虚线。

实验结果符合理论值^[16],DSB-gain方式的陷波深度最大,DSB-loss方式次之,SSB-loss方式最小,基于桥T思想的陷波深度都大于60 dB。为提高灵活性,2015年Han等^[17]利用PS-FBG和单个双驱动马赫-曾德尔调制器(DDMZM,用于调节其直流偏置电压)实现了滤波器频率响应在带通和带陷间的开关切换,其中陷波深度大于55 dB(桥T思想),如图10所示。

原因是此时光载波没有被光滤波器完全滤除;2) 正负失谐时频谱响应对称,滤波器频谱响应均匀;3) 当失谐频率为 14.3 GHz 时,滤波器的带外抑制比为 32.3 dB。

相比强度调制的双边带外腔光注入方案,该方案不受直流偏置漂移和 FWM 效应影响,因此带外抑制比更高、频谱响应曲线更对称。原因如下:

1) FWM 效应产生的频率共轭项也有频率选择和放大特性,滤波器带外抑制比等于 DFB 增益峰减去频率共轭项增益峰,所以消除 FWM 可提高带外抑制比;2) 光载波和 +1 阶边带被滤除后,注入 DFB 的光子数减少,其增益谱线型所受的影响减小,从而使滤波器频谱响应更接近 DFB 增益谱,左右对称。以

前的方案由于强注入,注入光子影响 DFB 增益谱使得滤波器频谱响应左右不对称。该注入方案结构简单,实验操作容易,调谐范围大(理论上无限),且其带外抑制比还能进一步提高。文献[20]指出:DFB 工作电流越大,其增益峰越高,从而滤波器带外抑制比越高;腔长越长,3 dB 谱宽越窄即滤波器形状因子更好,Q 值更高。实验时为保护 PD 并未将 DFB 工作电流调到最大,但可观察到滤波器带外抑制比随 DFB 工作电流的增加而提高的现象。文献[21]指出 DFB 腔长越长,增益峰越高;DFB 输出腔面反射率越高,增益峰越高。因此,加大 DFB 工作电流并优选 DFB(长腔、高反射率输出腔镜面)可进一步提高滤波器带外抑制比和 Q 值。

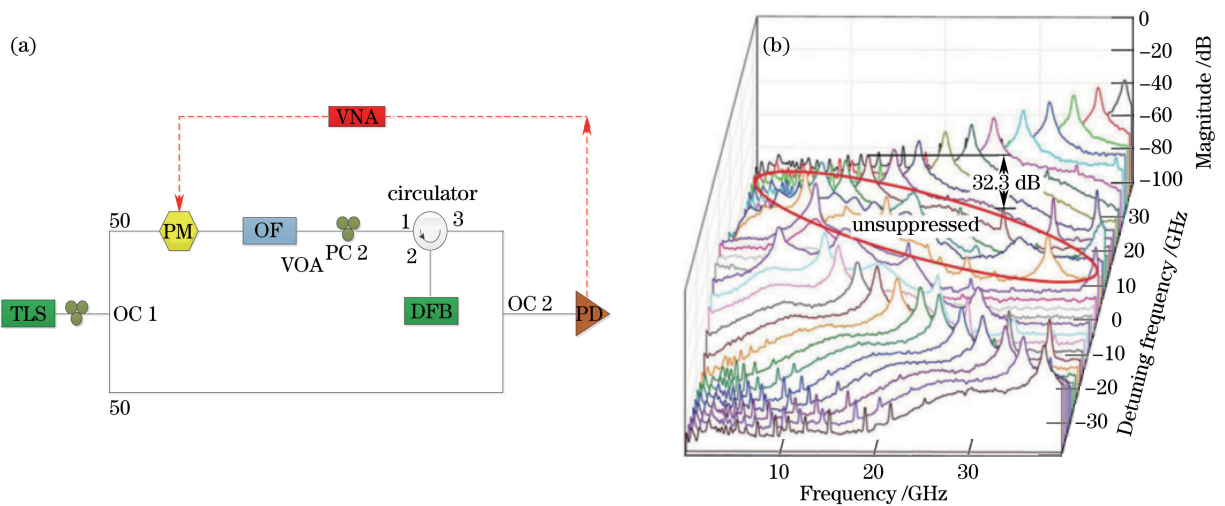


图 11 基于载波抑制的单边带外腔光注入 DFB 激光器的单通带微波光子滤波器。(a) 系统图;(b) 在不同失谐频率下的光谱响应

Fig. 11 (a) Schematic illustration of a single bandpass MPF based on carrier-suppressed single sideband injected DFB laser and (b) spectral responses under different detuning frequencies

6 结 论

提高微波光子滤波器带外抑制比是其面向实际应用的重要工作之一。经多年研究,基于光纤时延线的多通带微波光子滤波器(FIR、IIR)可通过切趾有限抽头、构建高阶滤波器来提高带外抑制比。由于带外抑制比和抽头数目、抽头系数有直接关系,为获得高带外抑制比,需要众多抽头且须控制抽头系数,实际操作困难,调谐困难且无法光集成。而单通带和带陷微波光子滤波器多采用电域或光域相减、高带外抑制比光滤波器频谱映射和桥 T 思想提高带外抑制比,调谐相对容易,结构相对简单,符合光集成的发展趋势。此外,相比无源光滤波器,基于有源光滤波器的单通带微波光子滤波器具有频率选择和放大特性,可补偿链路损耗,避免使用光放大器,

因此基于有源光滤波器频谱映射的单通带高带外抑制比微波光子滤波器是未来光集成技术重要的发展方向,且目前微波光子滤波器带外抑制比的世界纪录也由有源腔(SBS 效应)获得。相比布里渊效应,基于 DFB 有源腔的微波光子滤波器结构更加简单,调谐范围非常大(理论上无限),可通过增加工作电流、优选激光器(腔长和输出腔镜反射率)参数、腔内集成光栅等方式压窄增益谱谱宽来提高增益谱峰值,因此基于 DFB 的高带外抑制比微波光子滤波器同样值得期待。

参 考 文 献

- [1] Gong S X, Wei X Z, Li X, *et al.* Review of wideband digital channelized receivers [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(5): 949-959.

- 龚仕仙, 魏玺章, 黎湘, 等. 宽带数字信道化接收机综述[J]. 电子学报, 2013, 41(5): 949-959.
- [2] Yao J P. Photonics to the rescue: a fresh look at microwave photonic filters [J]. IEEE Microwave Magazine, 2015, 16(8): 46-60.
- [3] Popov M, Fonjallaz P Y, Gunnarsson O, *et al.* Compact microwave photonic transversal filter with 40 dB sidelobe suppression [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(3): 663-665.
- [4] Leng J S, Zhang W, Williams J A R, *et al.* Optimization of superstructured fiber Bragg gratings for microwave photonic filters response[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(7): 1736-1738.
- [5] Chan E H W, Minasian R A, Zhou Y, *et al.* Coherence-free high-resolution RF/microwave photonic bandpass filter with high skirt selectivity and high stopband attenuation[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(11): 1646-1651.
- [6] Supradeepa V R, Long C M, Rui W, *et al.* Comb-based radio frequency photonic filters with filters with rapid tunability and high selectivity [J]. Nature Photonics, 2011, 6(3): 186-194.
- [7] Chan E H W, Minasian R A. Reflective amplified recirculating delay line bandpass filter[J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(6): 1441-1446.
- [8] Chan E H W. Cascaded multiple infinite impulse response optical delay line signal processor without coherent interference [J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(9): 1401-1406.
- [9] Chan E H W. High-order infinite impulse response microwave photonic filters[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(12): 1775-1782.
- [10] Chan E H W, Alameh K E, Minasian R A, *et al.* Photonic bandpass filters with high skirt selectivity and stopband attenuation[J]. Journal of Lightwave Technology, 2002, 20(10): 1962-1967.
- [11] Yu Y, Dong J, Xu E, *et al.* Single passband microwave photonic filter with continuous wideband tunability based on electro-optic phase modulator and Fabry-Pérot semiconductor optical amplifier [J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(23): 3542-3550.
- [12] Fan J, Yu Y, Tang H, *et al.* Tunable bandpass microwave photonic filter with ultrahigh stopband attenuation and skirt selectivity[J]. Optics Express, 2016, 24(16): 18655-18663.
- [13] Ge J, Feng H, Scott G, *et al.* High-speed tunable microwave photonic notch filter based on phase modulator incorporated Lyot filter [J]. Optics Letters, 2015, 40(1): 48-51.
- [14] Li P, Zou X, Pan W, *et al.* Tunable photonic radio-frequency filter with a record high out-of-band rejection [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2017, 65(11): 4502-4512.
- [15] Marpaung D, Morrison B, Pant R, *et al.* Frequency agile microwave photonic notch filter with anomalously-high stopband rejection [J]. Optics Letters, 2013, 38(21): 4300-4304.
- [16] Marpaung D, Morrison B, Pant R, *et al.* Si₃N₄ ring resonator-based microwave photonic notch filter with an ultrahigh peak rejection [J]. Optics Express, 2013, 21(20): 23286-23294.
- [17] Han X, Yao J. Bandstop-to-bandpass microwave photonic filter using a phase-shifted fiber Bragg grating[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(24): 5133-5139.
- [18] Xiong J, Wang R, Pu T, *et al.* A novel approach to realizing a widely tunable single passband microwave photonic filter based on optical injection[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2015, 21(6): 171-176.
- [19] Zhu H, Wang R, Xiang P, *et al.* Microwave photonic bandpass filter based on carrier-suppressed single sideband injected distributed feedback laser[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(3): 5501612.
- [20] Choa F S, Koch T L. Static and dynamical characteristics of narrow-band tunable resonant amplifiers as active filters and receivers [J]. Journal of Lightwave Technology, 1991, 9(1): 73-83.
- [21] Magari K, Kawaguchi H, Oe K, *et al.* Optical narrow-band filters using optical amplification with distributed feedback [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1988, 24(11): 2178-2190.
- [22] Buczek C J, Freiberg R J, Skolnick M L. Laser injection locking[J]. Proceedings of the IEEE, 1973, 61(10): 1411-1431.