

基于布里渊处理的微波光子学系统研究进展

郭勇 邱琪 王智勇

电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054

摘要 概述了光纤中受激布里渊散射(SBS)和基于布里渊处理(BP)的微波光子学(MWP)系统的原理。基于布里渊选择放大(BSA)和布里渊选择抑制(BSS),深入分析了BP在光学产生微波信号、微波信号的光学上/下变频及倍频、MWP复值系数与单响应滤波和MWP相移等系统中的应用,研究了BP在改善光载无线通信(RoF)系统链路性能中的应用。讨论了这些BP应用系统的优势和不足,提出了改进方案,展望了BP在MWP和集成微波光子学(IMWP)中的发展趋势和应用前景。

关键词 微波光子学;集成微波光子学;布里渊处理;微波光子学信号处理;光载无线通信

中图分类号 O437.2; TN929.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.050001

Recent Advances in Microwave Photonics Systems Based on Brillouin Processing

Guo Yong Qiu Qi Wang Zhiyong

School of Opto-Electronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China

Abstract Principles of stimulated Brillouin scattering (SBS) and microwave photonics(MWP) system based on Brillouin processing (BP) in optical fiber are summarized. Based on Brillouin-selective amplification (BSA) and Brillouin-selective suppression (BSS), some applications of BP are deeply analyzed, such as optical generation of microwave signals, photonic frequency upconversion/downconversion and frequency multiplication of microwave signals, MWP complex-valued coefficients and single response filter, MWP phase shifter, and link performance improvement in radio-over-fiber (RoF) system. Advantages and disadvantages of BP in these applications are discussed, and some potential improvement projects are presented. Development trends and application prospects of BP in MWP and integrated microwave photonics (IMWP) are discussed.

Key words microwave photonics; integrated microwave photonics; Brillouin processing; microwave photonics signal processing; radio over fiber

OCIS codes 290.5900; 070.1170; 350.4010; 250.4390; 230.1150

1 引言

光电子系统的低损耗、超宽带、抗电磁干扰优势对微波信号的产生、传输、处理和分析具有吸引力,而大容量光通信系统的发展也离不开微波技术在光发射/接收机中的应用,上述两种趋势促成微波光子学(MWP)这一新兴研究领域的发展。MWP是对工作在微波频率的光子器件以及在微波和光电子系统中的应用进行研究的一门交叉学科^[1],从技术应用角度其研究内容包括:光生微波信号、光生超宽带(UWB)信号、微波信号的光学处理(滤波、变频和相移等)、光载无线通信(RoF)系统、光控相控阵天线等,射频、微波或者毫米波统称为微波。

光纤中的受激布里渊散射(SBS)具有低阈值、方向性和窄带特性,其产生的增益谱和衰减谱是天然的带通和陷波滤波器,合理选择抽运光与斯托克斯(Stokes)光,可以实现众多MWP系统应用,基于SBS的布里渊

收稿日期: 2014-10-17; 收到修改稿日期: 2014-12-24; 网络出版日期: 2015-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(61271030)

作者简介: 郭勇(1981—),男,博士研究生,主要从事微波光子学和光纤传感等方面的研究。

E-mail: robinfit01@163.com

导师简介: 邱琪(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事光通信、微波光子学、激光技术及应用等方面的研究。

E-mail: qqiu@uestc.edu.cn(通信联系人)

处理(BP)技术在MWP领域得到了广泛的应用^[2-3]。研究基于BP的MWP链路系统具有重要意义,其优点体现在:与传统电学传输系统相比具有体积小、重量轻、低损耗和色散、抗电磁干扰、可调谐、可重构、高数据容量等特点;与传统MWP系统^[4-6]相比,基于BP的MWP链路系统结构更加紧凑,可以构建多种应用,如光生微波信号、微波信号变频、MWP滤波器、MWP相移器和提升RoF链路性能等,最显著的优势在于疏系脊形波导中可以实现BP,有助于将前述分立的基于BP的MWP器件和系统集成到光集成电路(PIC)中,这顺应了MWP的发展趋势,是第二代MWP即集成微波光子学(IMWP)的重要研究内容。SBS和BP是构建基于BP的MWP系统的基础,接下来将进行分析和讨论。

2 SBS基本原理和基于BP的MWP系统

光纤中的SBS是抽运光和Stokes光通过声波进行的非线性相互作用^[7],抽运光通过电致伸缩效应产生声波,在声波疏密交替区域发生介质折射率周期性调制,抽运引起的折射率光栅通过布拉格衍射散射抽运光,由于多普勒效应与以声速移动的光栅有关,散射光产生了频率下移。在单模光纤中,假定SBS发生在后向,布里渊(Brillouin)频移可表示为 $v_B = 2nv_A/\lambda_p$,其中 n 为抽运波长 λ_p 处的折射率, v_A 为光纤中的声速。对于石英光纤,取 $n = 1.45$, $v_A = 5.96$ km/s,在 $\lambda_p = 1.55$ μm 附近, $v_B \approx 11.1$ GHz, Brillouin增益谱呈洛伦兹线型,半峰全宽(FWHM)约为30 MHz。

在光纤中,SBS除了产生频率下移的Stokes光,还将产生频率上移的反斯托克斯(anti-Stokes)光。频率下移的Stokes光经历放大(增益),而频率上移的anti-Stokes光经历吸收(衰减)。光纤的SBS Stokes光增益谱传递函数可表示为

$$H_S(\omega) = \exp[g_{\text{SBS}}(\omega - \Omega_B)] \exp[j\phi_{\text{SBS}}(\omega - \Omega_B)], \quad (1)$$

而anti-Stokes光衰减谱传递函数可表示为

$$H_{\text{AS}}(\omega) = \exp[-g_{\text{SBS}}(\omega + \Omega_B)] \exp[-j\phi_{\text{SBS}}(\omega + \Omega_B)], \quad (2)$$

式中 $g_{\text{SBS}}(\omega) = \frac{G\omega_B^2}{8\omega^2 + 2\omega_B^2}$, $\phi_{\text{SBS}}(\omega) = \frac{G\omega\omega_B}{4\omega^2 + \omega_B^2}$, $\Omega_B = 2\pi\nu_B$ 是角 Brillouin 频移, $G = G_0L_{\text{eff}}$ 是 Brillouin 增益谱峰值(G_0)与有效光纤长度(L_{eff})的乘积, $\omega_B = 2\pi\Delta\nu_B$, $\Delta\nu_B$ 是 Brillouin 增益谱的 FWHM。图1为BP技术示意图, BP包含基于(1)式的布里渊选择放大(BSA)和基于(2)式的布里渊选择抑制(BSS)两种技术。BSA和BSS是基于BP的MWP系统的技术基础。

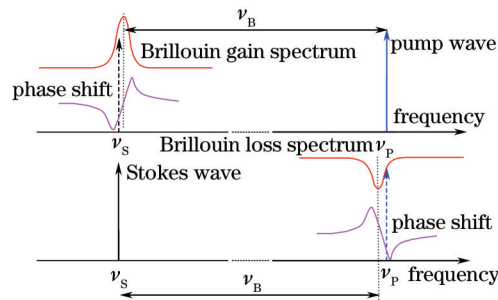


图1 BP技术示意图

Fig.1 Schematic diagram of BP technique

基于光纤的MWP系统除了具有低损耗、抗电磁干扰、超宽带等特性,还拥有传统电学微波系统难以实现的快速调谐和可重构能力^[8]。图2为基于BP的MWP系统拓扑结构图。输入的微波信号来自微波信号源、单个天线或者天线阵列,微波信号通过电光调制器调制激光器产生的光信号,光作为载波将微波信号频谱频移到光域。载有微波信号的光信号由光器件构成的BP光学系统进行处理,光学系统的传递函数为 $H(\omega)$,经BP后的边带在光探测器端与光载波拍频后重新恢复出经过处理后的微波信号,由微波接收机接收或由天线进行中继传输。合理设计BP光学系统就能实现光生微波信号、微波信号的变频、滤波、相移以及RoF系统的链路性能改善等应用。

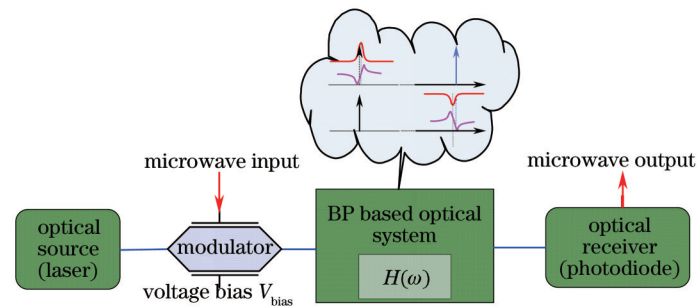


图2 基于BP的MWP系统通用参考模型

Fig.2 Generic reference model of BP based MWP system

3 BP在MWP系统中的应用进展

3.1 BP在光生微波信号及微波信号变频中的应用

在通信或雷达应用中,传统电学微波振荡器包含:二极管振荡器(如IMPATT和Gunn二极管等)、三极管振荡器、石英晶体振荡器、电子管(如行波管、速调管、磁控管等)和频率可调谐振荡器(如YIG振荡器)等,虽然它们各具特色,但是产生的微波信号在电缆、电磁波导或者大气中很难长距离传输,而且频率调谐范围有限。全光产生微波信号的方法与RoF系统兼容,一般有直接探测法(直调和外调)、外差探测法(如模式锁定、注入锁定和光学相位锁定等),将BP应用于微波信号产生的优点如引言所述。Yao^[9]最早将BSA技术应用到Brillouin光电振荡器(OEO)中,原理是将光探测器产生的白噪声调制光信号,利用BSA光调制器输出的边带信号,此边带信号(满足Brillouin频移)与光载波拍频产生微波信号,优点是BSA为OEO提供了必要的增益,可产生高频、高谱纯度和可调谐的微波信号源,缺点是环路的稳定性直接影响微波信号的频率稳定性,需克服温度、振动等的负面影响。BSA还可以用于全光三角形微波脉冲信号发生^[10],将微波载波信号的产生扩展到了任意波形发生(AWG)应用范围,但是产生波形和目标波形间的误差较大,还需要进一步完善。

传统电学一般使用倍频、分频链路实现变频,这不仅要求基频具有极高的谱纯度和噪声性能,而且基频存在能量损耗问题,而传统光学调制器级联的办法实现变频又不可避免地存在高损耗问题,利用BSA实现微波信号变频是一种经济有效的方式,这里的变频泛指上/下变频和倍频。为克服Brillouin增益谱宽较窄的缺陷,将单音信号和待变频的微波信号一同加载到电光调制器的电输入端,利用BSA单音信号的下边带,放大后的单音信号下边带与微波信号上/下边带在光探测器端拍频即可实现微波信号的上/下变频^[11],其优点是可有效避免光探测器的饱和问题,克服BSA增益饱和时的非线性、抑制高自发辐射噪声,并改善MWP链路中光纤色散引起的信号衰落问题。Schneider等^[12]利用双抽运同时BSA调制信号的两个边带,将选择放大的3、4、5阶双边带加载到光电探测器端产生6、8、10倍频微波信号,其优点是两个边带来自同一光源,相比于两个独立光源外差的办法,更有助于抑制相位噪声,有利于产生低相噪、稳定的微波倍频信号。Li等^[13]借助BSS技术实现微波信号12倍频得到太赫兹(THz)信号源,此系统虽然结构复杂,但是产生的微波信号可在48~132 GHz范围内调谐,此调谐范围是传统电学和光学方法难以实现的。需要注意的是,使用多光源方案时需要严格控制光源的稳定性,而采用单光源方案将有助于信号源性能的改善。

3.2 BP在MWP复值系数和单响应滤波器中的应用

微波信号的光子学滤波处理是MWP中的重要课题,早在1976年,Wilner等^[14]就注意到光纤的低损耗和高调制带宽特性是宽带延时线的理想选择。1980~1990年间,斯坦福大学的学者利用单模光纤作为延时介质开展了光学格型滤波器的大量理论和实验研究^[15],需要强调的是此类滤波器基于相干结构,相位引起的强度噪声严重限制它的性能。20世纪80年代末,光放大器的出现,光学器件(可调耦合器、光调制器、电光开关等)的发展和先进的光纤光学仪器设备促成更多灵活多样的滤波器结构的出现。在这些结构中,大部分使用光纤作为延时介质,而各种光纤光栅等新器件的出现为MWP滤波器的研究注入新活力^[16-17]。由于仅含正抽头系数的滤波器总是在零频点处存在低通响应,直流分量无法滤除,所以对含有负系数的滤波器开展了研究工作^[18]。复值系数滤波器具有在不改变滤波器形状和自由光谱范围(FSR)的情况下实现调谐,也是一个重要的研究方向^[19]。单响应滤波器具有频率响应非周期的特点,更具有实际应用价值^[20]。

相比于上述滤波器设计,利用BP实现MWP滤波器设计将使系统结构紧凑且节约成本,因为实现BSA的增益谱具有天然的带通滤波特性,Loayssa等^[21]实现了两抽头复值系数MWP滤波器,增加光源个数并控制相移易于实现多抽头复系数滤波器。Vidal等^[22]提出基于BSA的单响应滤波器,该滤波器有宽调谐范围、可重构和高Q值等优点。Hu等^[23]设计了基于BSA的20 GHz超宽范围连续调谐的单响应MWP滤波器,如此大范围的调谐用电学或者其它全光的办法是很难实现的。但是,基于BSA实现的都是窄带滤波器,针对宽带应用如何设计宽带滤波器需要进一步深入研究。

3.3 BP在MWP相移器中的应用

近年来,光子学技术在相控阵列天线中的应用愈发受到关注。光反馈阵列具备工作带宽大、可实现天线拉远、不受电磁干扰、极好的隔离和尺寸小、质量轻等潜在优势。波束形成系统可以基于时延或者相位控制。微波相移器是雷达、卫星通信和无线网络等具有窄瞬时带宽系统的关键器件。某些应用场合,相移器需要操作在宽频率范围,且需要快速响应时间和极高的调谐精度,基于光子学的微波相移器具有实现这些需求的潜力。在波束形成网络中,在不限制波束角个数的情况下,MWP相移器使工作在宽频率范围、连续和灵活的波束形成得以实现。此外,在雷达滤波应用中,可调谐MWP陷波滤波器利用相移可实现背景杂波跟踪,这与现代光控雷达系统相兼容,可降低对超高精度模数转换器的需求。

MWP相移器一般基于延时线、外差混频、矢量或它们的组合等方法实现,可以克服传统电学相移器体积大、工作频率低、线性度差等缺点。保持3.2节介绍的滤波器的幅频特性恒定,相频特变化即实现相移操作,Loayssa等^[24]利用BSA和单边带调制技术实现了MWP相移器,此相移器的优点是具备18 GHz带宽和全360°移相调谐能力,缺点是单边带调制的不完美导致微波功率和移相角度存在纹波抖动,将该相移器应用于光学相控阵列天线的波束形成,可实现5阵元波束控制系统^[25]。Li等^[26]利用BP实现输入微波频率为18 GHz时全360°相移控制,分别将抑制载波双边带调制的上下两个边带作为抽运光和Stokes光,光载波同时经历BSA和BSS,导致光载波的幅度几乎不变,而相位经历两倍变化,在光探测器端拍频后实现微波信号相移。此方案的缺陷是输入微波信号的频率必须大于Brillouin线宽,且不能等于两倍Brillouin频移。

3.4 BP在改善RoF系统链路性能中的应用

模拟MWP链路的品质因数包括:增益、噪声系数(NF)、交调失真(IMD)、截断点(IP)、无寄生动态范围(SFDR)等。增益反映链路损耗;由NF表征的噪声限制了最小可探测信号功率;IMD和IP体现链路对非线性失真的容忍度,非线性失真限制最大发射功率;SFDR包含噪声与非线性的影响,在宽带下优化MWP链路的SFDR是MWP的终极追求。一般将RoF链路分为强度/频率/相位调制直接探测(IM/FM/PM-DD)三种形式,例如在基于马赫曾德尔调制器(MZM)的IM-DD链路中,残留的光载波不仅饱和光探测器或光放大器,对传输链路引入非线性,而且对探测器端接收信号引入强度噪声与散粒噪声,为改善链路性能需要消除载波引入的噪声并线性化传输链路。

一般,利用载波抑制消除载波引入噪声的方法包括:小信号偏置MZM、基于光学滤波器的载波滤除和基于BSS的载波抑制等;而线性化链路的技术有电学预失真、设计线性调制器等,相比载波抑制的办法线性化方案实现起来更复杂。BSS具有窄带衰减谱且不受载波漂移的影响,是优良的载波滤波器,将其应用于载波抑制中具有优势。Goldstein等^[27]运用BSS进行载波抑制,实现40 dB光载波衰减,文中并没有对载波抑制如何改善链路的品质因数做更详细的分析。Liu等^[28]首先量化了载波抑制与链路性能之间的关系,结合分析调制指数,研究了IM-DD MWP链路的性能改善途径;接着利用BSS技术,理论计算和实验验证了针对链路增益、NF和SFDR的最优载波抑制率(x)和最佳载波一阶边带比(CSR);最后得出结论,当调制指数足够小时,链路增益、NF和SFDR参数可通过恰当选择 x 达到最佳值。上述两种方案的缺点是使用了环形Brillouin再注入结构(如图3所示),产生的高阶Stokes波将调制后的高次谐波一并放大,这就加大了谐波失真限制了BSS在此类方案中的应用,抑制高阶Stokes波将有更大的性能提升空间。

4 BP在MWP应用中的发展趋势

第二代MWP-IMWP旨在将前述分立的MWP器件和系统集成到PIC中,有助于降低现有MWP器件和系统的体积、重量、成本和功耗,并增加稳定性和可靠性^[29-30]。有4种平台常用于实现IMWP器件和系统,分别是:磷化铟(InP)、二氧化硅(SiO₂)平面光路(PLCs)、绝缘体上硅(SOI)和Si₃N₄/SiO₂(TriPleX™)。InP平台与

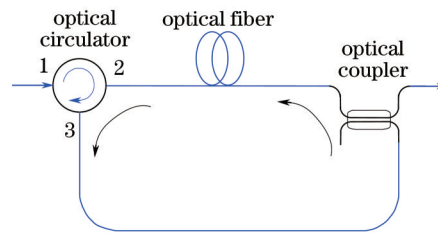


图3 Brillouin再注入结构

Fig.3 Brillouin re-injection structure

生俱来支持光传输、放大、调制、探测、可调衰减和切换,但光在 InP 无源光波导中传输的损耗比基于 SiO₂ 或硅(Si)光波导中的大,需要额外加入具有光增益的有源器件,InP 平台可用于设计 MWP 滤波器和单片集成光锁相环等。SiO₂ PLCs 具备极佳的光学特性和量产能力,已广泛应用于波分复用传输和光纤到户系统,基于 SiO₂ 的光波导虽然传输损耗低,但其折射率对比亦低,大的弯曲半径导致大的 PIC 芯片尺寸,限制了它的应用,人们正努力增加其折射率对比,进而减小芯片尺寸,基于 SiO₂ PLCs 的设计有延时线、鉴频器、AWG 等。Si 光子学是近年来快速发展的光子学技术之一,这一技术发展的原始推动力源自其与成熟的 Si 集成电路制造相兼容;高品质的 SOI 波导光路可以将光很好地限制在 Si 与 SiO₂ 之间,这有利于光子器件的小型化与大规模集成,SOI 波导技术主要应用于结合无源波导的大尺寸单片集成、调制器、探测器和光源等,但在 1550 nm 波段,Si 不是制造光电调制器和探测器的合适材料。TriPleX™ 是基于 Si₃N₄ 波导层(多层)和由 SiO₂ 填充并封装为包层的一种组合波导技术,Si₃N₄ 和 SiO₂ 层可由与互补金属氧化物半导体(CMOS)兼容的标准化工业低压化学气相沉积(LPCVD)设备低成本批量生产, TriPleX™ 技术已在波束形成、光鉴频器、UWB 脉冲整形和 MWP 滤波器等中得到广泛应用。除了上述 4 种平台,砷化镓(GaAs)、铌酸锂(LiNbO₃)、聚合物和硫系玻璃等材料亦可应用到 IMWP。

Pant 等^[31-33]在硫系玻璃脊形波导上实现了片上 SBS(如图 4 所示),光和声模被限制在硫系脊形波导内部,测量得到的 Brillouin 频移约为 7.7 GHz, Brillouin 增益谱的 FWHM 为 34 MHz,并成功实现了基于片上 BP 的 IMWP 滤波器和相移器等应用。遗憾的是由于技术的复杂性,目前的大部分集成应用都是对子系统有选择的部分集成, MWP 器件和系统的全 PIC 实现(IMWP 实现)是未来 MWP 商业化的有效途径。此外, BP 还将在 MWP 和 IMWP 光计算、光模数转换(ADC)、微波频率测量和谱分析等应用中扮演重要角色。

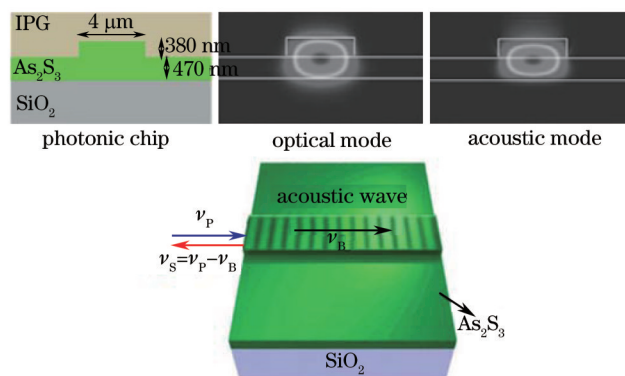


图4 片上 Brillouin 散射原理

Fig.4 Schematic of on-chip stimulated Brillouin scattering

5 结 论

SBS 是光纤中的一种重要非线性效应,在 Brillouin 光纤激光器、Brillouin 光纤放大器、分布式光纤传感系统、MWP 和 IMWP 器件和系统中有着广泛的实际应用。在基于 BP 的光生微波信号和微波信号变频应用中,由于 Brillouin 频移有限,可以借助调制或者 Brillouin 再注入结构产生高阶 Stokes 波的办法使产生的微波信号频率进一步提高。基于 BP 的滤波器具有高 Q 值、单通带优势,但是窄通带限制其进行宽带微波信号滤波处理,如何增大滤波器带宽是需要进一步研究的课题,采用宽带抽运、多个抽运产生多个增益谱叠加都是有效展宽滤波器通带的办法。基于 BP 的 MWP 相移器需要考虑如何实现宽频率范围连续高精度移相并

克服微波信号功率和移相角度抖动。将BP应用到提升RoF系统链路性能中,需要克服高阶Stokes波导致的高次谐波失真,可设计方案抑制高阶Stokes波进行改进。在基于片上BP实现的IMWP应用中,如何提高SBS的增益,高效利用行波几何尺寸和腔配置都是关键考虑因素。由于BP对温度和应力敏感,需严格控制系统的温度稳定性和抗震性能,此外还要严格控制光源的频率稳定性。可以预期,光电子、光电集成、微纳加工等技术的深入发展,将进一步推动微波与光子学技术的不断融合,BP将在MWP和IMWP领域展现出更加美好和广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 1 J Capmany, D Novak. Microwave photonics combines two worlds[J]. *Nat Photon*, 2007, 1(6): 319-330.
- 2 Jiang Yang, Yu Jinlong, Hu Lin. Application of stimulated Brillouin scattering for microwave photonic signals[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, 45(3): 44-49.
江 阳, 于晋龙, 胡 林. 受激布里渊散射在微波光子信号中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, 45(3): 44-49.
- 3 Shen Ying, Wang Rong, Pu Tao. A novel technique to generate high-frequency microwave signal based on high-order stimulated Brillouin scattering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(6): 1571-1575.
沈 颖, 王 荣, 蒲 涛. 基于高阶受激布里渊散射的高频微波信号产生技术[J]. *光学学报*, 2010, 30(6): 1571-1575.
- 4 Zheng Xin, Wang Yi, Lu Chunyan, *et al.*. A microwave photonic phase shifter based on dual-parallel Mach-Zehnder modulator modulation sideband filtering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 1223003.
郑 鑫, 王 翌, 卢春燕, 等. 基于双通道马赫曾德尔调制器调制边带滤波的微波光子移相器[J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 1223003.
- 5 Zhu Hailing, Pan Wei, Chen Jixin, *et al.*. Frequency multiplied microwave signal generation based on single passband microwave photonic filtering[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0105003.
朱海玲, 潘 炜, 陈吉欣, 等. 基于单通带微波光子滤波的多倍频微波信号产生[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0105003.
- 6 Zhang Lili, Tong Zhengrong, Cao Ye, *et al.*. Microwave photonic bandpass filter based on multi-wavelength fiber lasers and cascaded dispersion devices[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0205004.
张丽丽, 童峥嵘, 曹 晔, 等. 基于多波长光纤激光器和色散器件级联的微波光子带通滤波器[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0205004.
- 7 R W Boyd. *Nonlinear Optics*[M]. 3rd Edition. Burlington: Academic Press, 2008: 429-471.
- 8 J Capmany, J Mora, I Gasulla, *et al.*. Microwave photonic signal processing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(4): 571-586.
- 9 X S Yao. High-quality microwave signal generation by use of Brillouin scattering in optical fibers[J]. *Opt Lett*, 1997, 22(17): 1329-1331.
- 10 X Liu, W Pan, X Zou, *et al.*. Photonic generation of triangular-shaped microwave pulses using SBS-based optical carrier processing[J]. *J Lightwave Technol*, 2014, 32(20): 3797-3802.
- 11 X S Yao. Brillouin selective sideband amplification of microwave photonic signals[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1998, 10(1): 138-140.
- 12 T Schneider, M Junker, D Hannover. Generation of millimetre-wave signals by stimulated Brillouin scattering for radio over fibre systems[J]. *Electronics Letters*, 2004, 40(23): 1500-1502.
- 13 Li Wangzhe, Yao Jianping. Microwave and terahertz generation based on photonically assisted microwave frequency twelvetupling with large tunability[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2010, 2(6): 954-959.
- 14 K Wilner, A P van den Heuvel. Fiber-optic delay lines for microwave signal processing[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1976, 64(5): 805-807.
- 15 B Moslehi, J W Goodman, M Tur, *et al.*. Fiber-optic lattice signal processing[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1984, 72(7): 909-930.
- 16 R A Minasian. Photonic signal processing of microwave signals[J]. *IEEE Microwave Theory and Techniques, Transactions on*, 2006, 54(2): 832-846.
- 17 Yao Jianping. Photonic microwave bandpass filters[C]. 2nd International Conference on Access Networks and Workshops, 207: 259-266.
- 18 Y Yan, S R Blais, J Yao. Tunable photonic microwave bandpass filter with negative coefficients implemented using an optical phase modulator and chirped fiber Bragg gratings[J]. *J Lightwave Technol*, 2007, 25(11): 3283-3288.

- 19 Li Xiang, Dong Jianji, Yu Yuan, *et al.*. A tunable microwave photonic filter based on an all-optical differentiator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(5): 308-310.
- 20 X H Thomas, X Yi, R A Minasian, *et al.*. Single passband microwave photonic filter using continuous-time impulse response[J]. Opt Express, 2011, 19(7): 6231-6242.
- 21 A Loayssa, J Capmany, M Sagues, *et al.*. Demonstration of incoherent microwave photonic filters with all-optical complex coefficients[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(16): 1744-1746.
- 22 B Vidal, M A Piqueras, J Martí. Tunable and reconfigurable photonic microwave filter based on stimulated Brillouin scattering[J]. Opt Lett, 2007, 32(1): 23-25.
- 23 Hu Shuling, Li Liwei, Yi Xiaoke. Ultraflat widely tuned single bandpass filter based on stimulated Brillouin scattering[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(14): 1466-1469.
- 24 A Loayssa, F J Lahoz. Broad-band RF photonic phase shifter based on stimulated Brillouin scattering and single-sideband modulation[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(1-4): 208-210.
- 25 M Sagues, A Loayssa. Optical beamforming for phased array antennas using stimulated Brillouin scattering[C]. International Topical Meeting on Microwave Photonics, 2009: 1-4.
- 26 Li Wei, Zhu Ninghua, Wang Lixian. Photonic phase shifter based on wavelength dependence of Brillouin frequency shift[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(14): 1013-1015.
- 27 S Tonda-Goldstein, D Dolfi, J P Huignard, *et al.*. Stimulated Brillouin scattering for microwave signal modulation depth increase in optical links[J]. Electronics Letters, 2000, 36(11): 944-946.
- 28 Liu Lan, Zheng Shilie, Zhang Xianmin, *et al.*. Performances improvement in radio over fiber link through carrier suppression using stimulated Brillouin scattering[J]. Opt Express, 2010, 18(11): 11827-11837.
- 29 D Marpaung, C Roeloffzen, R Heideman, *et al.*. Integrated microwave photonics[J]. Laser & Photonics Reviews, 2013, 7(4): 506-538.
- 30 Zou Pin, Han Xiuyou, Wang Yu, *et al.*. Study on a tunable radio frequency filter based on integrated optical waveguide[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(10): 1013001.
邹品, 韩秀友, 王瑜, 等. 可调谐集成光波导射频滤波器研究[J]. 光学学报, 2013, 33(10): 1013001.
- 31 R Pant, C G Poulton, Duk-Yong Choi, *et al.*. On-chip stimulated Brillouin scattering[J]. Opt Express, 2011, 19(9): 8285-8290.
- 32 A Byrnes, R Pant, E Li, *et al.*. Photonic chip based tunable and reconfigurable narrowband microwave photonic filter using stimulated Brillouin scattering[J]. Opt Express, 2012, 20(17): 18836-18845.
- 33 M Pagani, D Marpaung, Duk-Yong Choi, *et al.*. On-chip wideband tunable RF photonic phase shifter based on stimulated Brillouin scattering[C]. 2014 OptoElectronics and Communication Conference and Australian Conference on Optical Fibre Technology, 2014: 192-194.

栏目编辑: 史敏