

基于受激布里渊散射效应的微波光子下变频系统

李强, 都聪, 李想, 王迪, 董玮*

吉林大学电子科学与工程学院集成光电子学国家重点实验室, 吉林 长春 130012

摘要 提出一种基于受激布里渊散射效应的微波光子下变频系统。在此系统中, 为了将高频率的射频信号转换成低频率的中频信号, 引入一个本振信号并将其和射频信号分别通入到双平行马赫-曾德尔调制器两臂的两个子马赫-曾德尔调制器中, 利用受激布里渊散射效应增益谱过滤出由射频信号与本振信号调制后产生的两个+1阶边带, 之后这两个边带将会在光电探测器中拍频, 得到中频信号。同时, 该中频信号的相位可以通过调整双平行马赫-曾德尔调制器中母马赫-曾德尔调制器的偏置电压来改变。当下变频的射频信号频率为 10.73 GHz 时, 最终可获得 20~40 MHz 范围内任意频率的信号, 且其相位可在 $0^\circ\sim 360^\circ$ 之间线性变换。

关键词 微波光子; 下变频; 受激布里渊散射; 双平行马赫-曾德尔调制器; 相位可调

中图分类号 TN913.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0701006

Microwave Photonic Down-Conversion System Based on Stimulated Brillouin Scattering Effect

Li Qiang, Du Cong, Li Xiang, Wang Di, Dong Wei*

State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science & Engineering,
Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China

Abstract This study presents a microwave photonic down-conversion system based on the stimulated Brillouin scattering. In this system, a local oscillator signal and radio frequency signal are introduced into two sub-Mach-Zehnder modulators of the dual-parallel Mach-Zehnder modulator to convert a high-frequency radio frequency signal to an intermediate frequency signal. Further, the gain spectrum of the stimulated Brillouin scattering effect is used to retain the two +1-order sidebands generated by the radio frequency and local oscillator signals. These two sidebands are then transmitted to a photodetector for beating, and an intermediate frequency signal is produced. Simultaneously, the phase of the intermediate frequency signal can be changed by adjusting the bias voltage of the parent Mach-Zehnder modulator in the dual-parallel Mach-Zehnder modulator. The frequency of the down-converted radio frequency signal is 10.73 GHz, which can be converted to a signal having any frequency in the range of 20-40 MHz and whose phase can be linearly transformed from 0° to 360° .

Key words microwave photon; down-conversion; stimulated Brillouin scattering; dual-parallel Mach-Zehnder modulator; adjustable phase

OCIS codes 250.4110; 250.4390; 250.4745

1 引 言

微波光子学是近些年来快速发展的一门学科, 利用这项技术, 可以解决一些在传统电子通信中难以解决的或者无法解决的问题。下变频是将高频信号转换为低频率信号的一种方法, 传统的下变频方法是利用电混频器, 但是这种方法有很多缺

点^[1-5], 例如, 信号的可操作带宽较窄, 转换效率低等。通常情况下, 传统的微波混频器可将高频射频信号(RF)转换成中频信号(IF), 但是这种方法具有插入损耗大、带宽较窄、干扰信号强等缺点^[6]。微波光子下变频系统具有超宽带、高隔离度和抗电磁干扰能力强等优点, 是电学领域上述难题的有效解决方式之一^[7-9]。最近几年出现的基于微波光子链路

收稿日期: 2019-01-15; 修回日期: 2019-03-19; 录用日期: 2019-03-29

基金项目: 国家自然科学基金(61875070)、吉林省科技发展计划(20160519010JH, 20170204006GX, 20180201032GX)

* E-mail: dongw@jlu.edu.cn

的混频器方案是利用两个级联的马赫-曾德尔调制器(MZM)实现下变频,其特征为射频信号与本振信号(LO)之间的隔离度较高^[10]。除了微波下变频外,用于操纵射频信号相位的微波光子移相器也被广泛用于高频信号的处理。与传统的微波移相器相比,微波光子移相器具有带宽大、分辨率高、相移范围大等特点^[11-13]。已有研究中使用的微波光子系统使用独立的子系统来分别处理射频信号的频率和相位。然而,在实际应用中频率和相位的处理需要同时进行,以降低系统的复杂程度与构建难度,从而减少使用器件本身的损耗,提高转换效率^[14-15]。

本文构建了一种利用受激布里渊散射(SBS)效应和双平行马赫-曾德尔调制器(DPMZM)以同时达到对射频信号的频率和相位同时操作的下变频系统。在此系统中,DPMZM可以同时接入两个电信号来避免信号传输过程中的损耗,并且可以通过改变DPMZM中母MZM的电压来调整最后得到的中频信号相位。SBS效应的损耗谱可以有效抑制调制后信号中的干扰成分,增益谱可以放大所需的信号成分,从而达到滤波效果。

2 系统原理与公式推导

2.1 系统原理

基于SBS效应的微波光子下变频系统的结构如图1所示。从激光源发出的连续光经过光耦合器后被分成两路:下支路的光信号被掺铒光纤放大器(EDFA)放大后达到SBS效应阈值,从环形器的1口进入,并从2口输出到单模光纤中,作为SBS效应的抽运光;上支路的光信号进入到DPMZM中,并在DPMZM中被本振信号与射频信号调制。在母MZM的上、下两臂各嵌入一个子MZM组成DPMZM,本振信号与射频信号分别输入到这两个相同的子MZM中,并通过直流电压(DC)控制这两个子MZM,使两个子MZM都工作在最小传输点,从而完成抑制载波的双边带调制。此时其输出光谱如图2(a)所示,其中居中的黑色实线为载波,两边的黑色实线代表本振信号的调制边带,黑色虚线代表射频信号的调制边带, f_0 、 f_{LO} 与 f_{RF} 分别为载波、本振信号与射频信号的频率。

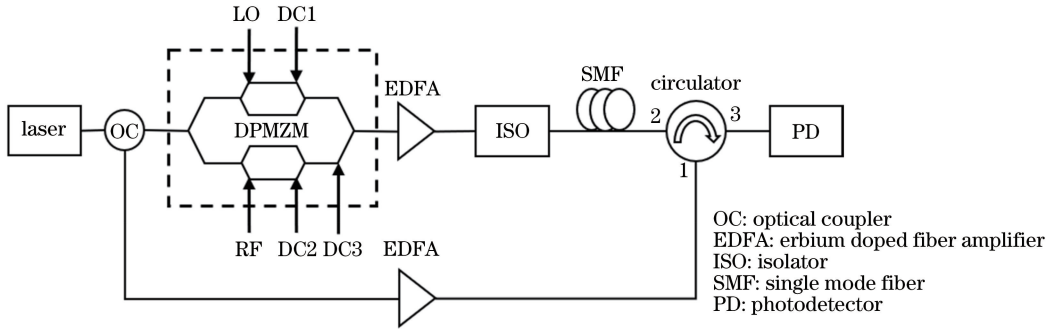


图1 下变频系统结构示意图

Fig. 1 Schematic of down-conversion system

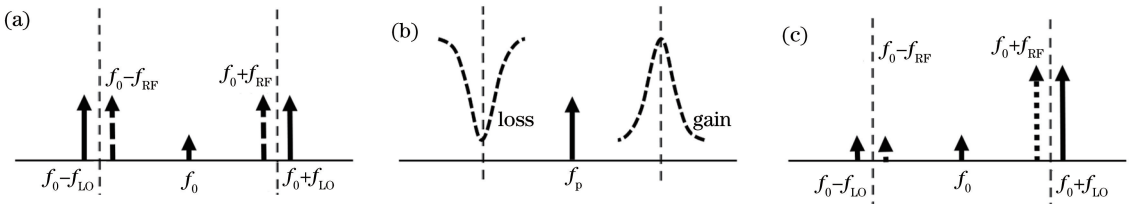


图2 SBS效应频谱处理图。(a)抑制载波的双边带调制; (b)抽运光以及SBS增益谱与损耗谱;(c)SBS效应处理结果

Fig. 2 Frequency spectrum processing of SBS effect. (a) Double-sideband modulation with suppressed carrier; (b) gain and loss spectra of pumping laser and SBS; (c) final spectrum after SBS effect

由于调制产生的二阶边带较小,不会对实验结果造成影响,图2(a)中只画出调制后信号的 ± 1 阶边带。调制后的信号经EDFA放大后通过隔离器

进入单模光纤,并与下支路的抽运光相遇产生SBS效应。抽运光以及SBS增益谱与损耗谱如图2(b)所示,其中 f_p 为抽运光的频率。利用光纤中的SBS

效应增益谱放大调制信号的+1阶边带,也就是本振信号与射频信号的+1阶边带,同时SBS损耗谱抑制其-1阶边带,频谱处理结果如图2(c)所示。在单模光纤中完成SBS效应的信号经环形器的2口输入,由3口输出到光电探测器(PD)中进行拍频,最终得到中频信号,中频信号的频率为本振信号与射频信号的频率之差。

2.2 公式推导

从DPMZM中完成抑制载波的双边带调制信号的表达式为^[16]

$$E_{\text{DPMZM}}(t) = -\frac{1}{2}\sqrt{E_0}e^{j2\pi f_0 t} \{ \sin[m_{\text{LO}} \cos(2\pi f_{\text{LO}} t)] + \sin[m_{\text{RF}} \cos(2\pi f_{\text{RF}} t)] \exp(j\theta) \}, \quad (1)$$

式中: t 为时间; E_0 为输入光振幅; f_0 为载波信号的频率; f_{LO} 为本振信号的频率; f_{RF} 为射频信号的频率; $\theta = \pi V_{\text{DC3}}/V_\pi$ 为母MZM两臂的相位差,其中 V_π 为子MZM及母MZM的半波电压, V_{DC3} 为母MZM的偏置电压; m_{LO} 与 m_{RF} 分别为本振信号与射频信号的调制深度。

$$m_{\text{LO}} = \pi \frac{V_{\text{LO}}}{V_\pi}, \quad (2)$$

$$m_{\text{RF}} = \pi \frac{V_{\text{RF}}}{V_\pi}, \quad (3)$$

式中: V_{LO} 为本振信号电压; V_{RF} 为射频信号电压。

为了使两个子MZM工作在最小传输点,此时这两个子MZM的直流偏压应符合 $V_{\text{DC1}} = V_{\text{DC1}} = V_\pi$ 。根据雅克比-安格尔等式,(1)式可写为

$$E_{\text{DPMZM}}(t) = \frac{1}{2}\sqrt{E_0} \exp(j2\pi f_0 t) \cdot \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n-1}(m_{\text{LO}}) \{ \exp[j(2n-1)2\pi f_{\text{LO}} t] + \exp[-j(2n-1)2\pi f_{\text{LO}} t] \} + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n-1}(m_{\text{RF}}) \{ \exp[j(2n-1)2\pi f_{\text{RF}} t] + \exp[-j(2n-1)2\pi f_{\text{RF}} t] \} \exp(j\theta) \right\}, \quad (4)$$

式中: $J_n(\cdot)$ 为第一类 n 阶贝塞尔函数。

SBS效应的增益与损耗的表达式分别为^[17]

$$g(f) = \frac{g_0}{2} \frac{(\Delta v_{\text{B}}/2)^2}{f^2 + (\Delta v_{\text{B}}/2)^2} + j \frac{g_0}{4} \frac{\Delta v_{\text{B}} f}{f^2 + (\Delta v_{\text{B}}/2)^2}, \quad (5)$$

$$a(f) = -\frac{g_0}{2} \frac{(\Delta v_{\text{B}}/2)^2}{f^2 + (\Delta v_{\text{B}}/2)^2} - j \frac{g_0}{4} \frac{\Delta v_{\text{B}} f}{f^2 + (\Delta v_{\text{B}}/2)^2}, \quad (6)$$

式中: g_0 为线中心增益系数, $g_0 = g_{\text{B}} I_{\text{P}} L_{\text{eff}}/A_{\text{eff}}$,其中 g_{B} 为中心增益系数, I_{P} 为抽运光功率, L_{eff} 为有效光纤长度, A_{eff} 为有效模式区域; v_{B} 为布里渊频移, Δv_{B} 为布里渊线宽; f 为增益或损耗谱上某个频率点与增益谱或损耗谱的中心频率差。将 $m_{\text{LO}} = \alpha$, $m_{\text{RF}} = \beta$ 代入到(4)式中,得到SBS效应后的输出光谱表达式为

$$E_{\text{out}}(t) = E_0 \exp(j2\pi f_0 t) \{ J_1(\alpha) \exp\{g[(f_{\text{P}} - v_{\text{B}}) - (f_0 - f_{\text{LO}})] + j2\pi f_{\text{LO}} t\} - J_1(\alpha) \exp\{a[(f_{\text{P}} + v_{\text{B}}) - (f_0 + f_{\text{LO}})] - j2\pi f_{\text{LO}} t\} + J_1(\beta) \exp\{g[(f_{\text{P}} - v_{\text{B}}) - (f_0 - f_{\text{RF}})] + j(2\pi f_{\text{RF}} t + \theta)\} - J_1(\beta) \exp\{a[(f_{\text{P}} + v_{\text{B}}) - (f_0 + f_{\text{RF}})] - j(2\pi f_{\text{RF}} t + \theta)\} \}, \quad (7)$$

式中: f_{P} 为抽运光的频率。最后得到PD转换之后的中频信号的电场及其相位表达式分别为

$$E_{\text{IF}}(t) = J_1(\alpha) J_1(\beta) G_{\text{LO}} G_{\text{RF}} \cos[(2\pi f_{\text{LO}} - 2\pi f_{\text{RF}})t + \theta + \varphi_{\text{gLO}} - \varphi_{\text{gRF}}] + J_1(\alpha) J_1(\beta) A_{\text{LO}} A_{\text{RF}} \cos[-(2\pi f_{\text{LO}} + 2\pi f_{\text{RF}})t - \theta + \varphi_{\text{aLO}} - \varphi_{\text{aRF}}], \quad (8)$$

$$\theta_{\text{IF}} = \theta + \varphi_{\text{gLO}} - \varphi_{\text{gRF}} = \frac{\pi V_{\text{DC3}}}{V_\pi} \frac{180^\circ}{\pi} + \varphi_{\text{gLO}} - \varphi_{\text{gRF}}, \quad (9)$$

式中: G_{LO} 与 A_{LO} 分别为增益谱与损耗谱对本振信号边带的增益和损耗; G_{RF} 与 A_{RF} 分别为增益谱与损耗谱对射频信号边带的增益和损耗; φ_{gLO} 与 φ_{aLO} 分别为增益谱与损耗谱为本振信号边带引入的相位; φ_{gRF} 与 φ_{aRF} 分别为增益谱与损耗谱为射频信号边带引入的相位。

$$G_{\text{LO}} = \exp\left[\frac{g_0}{2} \frac{(\Delta v_{\text{B}}/2)^2}{(f_{\text{LO}} - v_{\text{B}})^2 + (\Delta v_{\text{B}}/2)^2}\right], \quad (10)$$

$$A_{\text{LO}} = \exp\left[-\frac{g_0}{2} \frac{(\Delta v_{\text{B}}/2)^2}{(f_{\text{LO}} - v_{\text{B}})^2 + (\Delta v_{\text{B}}/2)^2}\right], \quad (11)$$

$$\varphi_{\text{gLO}} = \frac{g_0}{4} \frac{\Delta v_{\text{B}}(f_{\text{LO}} - v_{\text{B}})/2}{(f_{\text{LO}} - v_{\text{B}})^2 + (\Delta v_{\text{B}}/2)^2}, \quad (12)$$

$$\varphi_{\text{aLO}} = -\frac{g_0}{4} \frac{\Delta v_{\text{B}}(f_{\text{LO}} - v_{\text{B}})/2}{(f_{\text{LO}} - v_{\text{B}})^2 + (\Delta v_{\text{B}}/2)^2}, \quad (13)$$

$$G_{RF} = \exp \left[\frac{g_0}{2} \frac{(\Delta\nu_B/2)^2}{(f_{RF} - \nu_B)^2 + (\Delta\nu_B/2)^2} \right], \quad (14)$$

$$A_{RF} = \exp \left[-\frac{g_0}{2} \frac{(\Delta\nu_B/2)^2}{(f_{RF} - \nu_B)^2 + (\Delta\nu_B/2)^2} \right], \quad (15)$$

$$\varphi_{gRF} = \frac{g_0}{4} \frac{\Delta\nu_B(f_{RF} - \nu_B)/2}{(f_{RF} - \nu_B)^2 + (\Delta\nu_B/2)^2}, \quad (16)$$

$$\varphi_{aLO} = -\frac{g_0}{4} \frac{\Delta\nu_B(f_{RF} - \nu_B)/2}{(f_{RF} - \nu_B)^2 + (\Delta\nu_B/2)^2}. \quad (17)$$

从(8)式和(9)式可以看出, 高频的射频信号已经转换为低频率的中频信号, 且中频信号相位与 V_{DC3} 成正比, 这从理论上证明了本系统可以同时实现射频信号的下变频和相位变换。值得注意的是, 本振信号与射频信号的差值不应超过布里渊线宽, 所得到的中频信号的频率范围为 $20 \text{ MHz} \sim \Delta\nu_B$ 。对于不同类型的光纤, 其布里渊线宽有所不同, 利用此方法得到的中频信号的频率范围也会有所不同。

3 系统性能验证

按照图 1 所示的结构搭建系统进行实验验证, 采用的单模光纤的长度为 14 km , 受激布里渊频移约为 10.75 GHz , 布里渊线宽约为 40 MHz , 将中心波长为 1549.58 nm 的连续光 (santec TSL-510, Japan) 作为载波, 射频信号的频率为 10.73 GHz (KEYSIGHT M8196A, China), 功率为 -19.96 dBm , 经电放大器 (CETC AV80212, China) 放大后功率为 0.8 dBm , 本振信号的频率为 10.75 GHz (KEYSIGHT E8257D, China), 功率为 10 dBm , DPMZM (PHOTLINE MXIQ-LN-40, France) 两臂的子 MZM 以及母 MZM 的电压均为其半波电压, 即 3.5 V 。此时, DPMZM 工作在抑制载波的双边带调制状态, 其光谱图由光谱分析仪 (YOKOGAWA AQ6370D, Japan) 检测, 如图 3 所示; 经 SBS 效应处理后的信号同样由光谱分析仪检测, 如图 4 所示。

从图 4 可以看出, 在经过 SBS 效应处理之后的信号中, $+1$ 阶边带被加强, -1 阶边带被抑制, 利用 SBS 效应对信号进行选择性与衰减, 相当于完成一次滤波, 射频信号与本振信号的 $+1$ 阶边带被保留下来。最后信号进入到光电探测器 (CONQUER KG-PD-50G-A-FC, China) 中完成拍频, 输出中频信号。因为 2 阶边带的功率较小, 无法被光电探测器识别, 可以忽略。

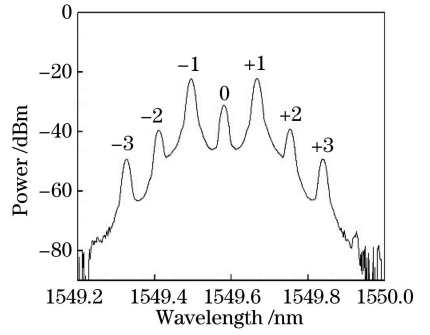


图 3 抑制载波的双边带调制光谱
Fig. 3 Spectrum of double-sideband modulation with suppressed carrier

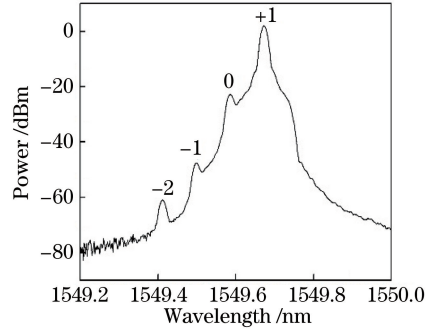


图 4 SBS 效应处理后的信号光谱
Fig. 4 Signal spectrum after SBS effect

在光电探测器后利用频谱分析仪 (KEYSIGHT N9010A, China) 进行信号检测, 得到中频信号输出频率为 20 MHz 时的频谱如图 5 所示, 其相位曲线如图 6 所示。只需调整本振信号与射频信号的差值, 便可得到不同频率的中频信号, 本研究得到的下变频的中频信号范围为 $20 \sim 40 \text{ MHz}$ 。将射频信号频率保持为 10.73 GHz , 本振信号频率分别调整为 10.76 GHz 和 10.77 GHz 时, 对应产生的中频信号的频率分别为 30 MHz 和 40 MHz , 如图 7 和图 8 所示。

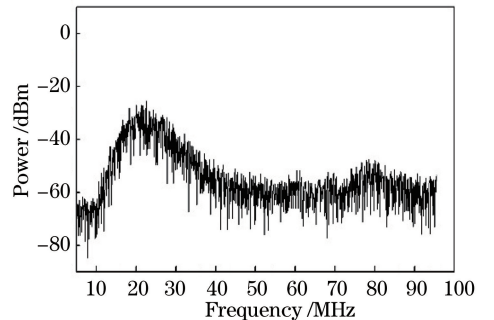


图 5 频率为 20 MHz 时中频信号的频谱图
Fig. 5 Frequency spectrum of intermediate frequency signal with frequency of 20 MHz

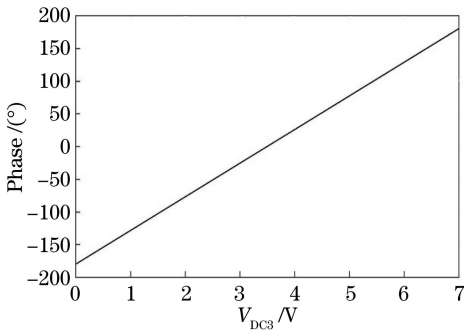


图 6 频率为 20 MHz 时中频信号的相位曲线

Fig. 6 Phase curve of IF intermediate frequency signal with frequency of 20 MHz

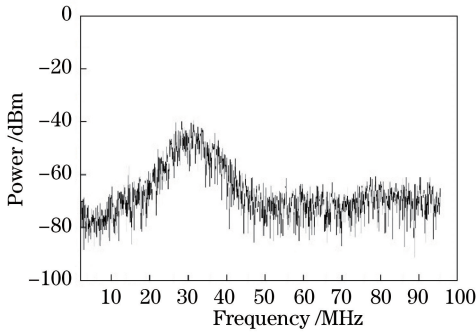


图 7 频率为 30 MHz 时中频信号频谱图

Fig. 7 Frequency spectrum of intermediate frequency signal with frequency of 30 MHz

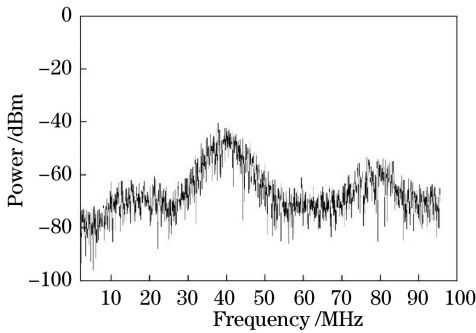


图 8 频率为 40 MHz 时中频信号频谱图

Fig. 8 Frequency spectrum of intermediate frequency signal with frequency of 40 MHz

4 结 论

提出一种使用 DPMZM 和 SBS 效应实现微波信号下变频的方法,完成了下变频系统的理论计算与实验,系统可以实现将高频的射频信号转换成低频率的中频信号,且可以使用不同种类的光纤来调整中频信号的输出频率范围,输出信号的相位也可通过改变 DPMZM 中母 MZM 的偏置电压实现从 0° 到 360° 的线性调整。该方案具有结构简单,输

出信号相位可调等特点,在微波通信领域具有良好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Capmany J, Novak D. Microwave photonics combines two worlds[J]. Nature Photonics, 2007, 1(6): 319-330.
- [2] Seeds A J, Williams K J. Microwave photonics[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(12): 4628-4641.
- [3] Yao J P. Microwave photonics [J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(3): 314-335.
- [4] Coward J F, Chalfant C H, Chang P H. A photonic integrated-optic RF phase shifter for phased array antenna beam-forming applications [J]. Journal of Lightwave Technology, 1993, 11(12): 2201-2205.
- [5] Minasian R A, Chan E H W, Yi X. Microwave photonic signal processing [J]. Optics Express, 2013, 21(19): 22918-22936.
- [6] Minasian R A. Photonic signal processing of microwave signals [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(2): 832-846.
- [7] Tang Z Z, Zhang F Z, Pan S L. Photonic microwave downconverter based on an optoelectronic oscillator using a single dual-drive Mach-Zehnder modulator [J]. Optics Express, 2014, 22(1): 305-310.
- [8] Gao Y S, Wen A J, Zhang H X, *et al.* An efficient photonic mixer with frequency doubling based on a dual-parallel MZM [J]. Optics Communications, 2014, 321: 11-15.
- [9] Wang Y X, Li J N, Wang D Y, *et al.* Ultra-wideband microwave photonic frequency downconverter based on carrier-suppressed single-sideband modulation [J]. Optics Communications, 2018, 410: 799-804.
- [10] Gopalakrishnan G K, Moeller R P, Howerton M M, *et al.* A low-loss downconverting analog fiber-optic link [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1995, 43(9): 2318-2323.
- [11] Zhang Y M, Pan S L. Frequency-multiplying microwave photonic phase shifter for independent multichannel phase shifting [J]. Optics Letters, 2016, 41(6): 1261-1264.
- [12] Jiang T W, Yu S, Wu R H, *et al.* Photonic downconversion with tunable wideband phase shift [J]. Optics Letters, 2016, 41(11): 2640-2643.
- [13] Zhang J L, Chan E, Wang X D, *et al.* Broadband microwave photonic sub harmonic downconverter with phase shifting ability [J]. IEEE Photonics

- Journal, 2017, 9(3): 5501910.
- [14] Xu Y M, Pan W, Lu B, *et al.* Multi-stopband microwave photonic filter based on stimulated Brillouin scattering [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(11): 1106004.
徐翌明, 潘炜, 卢冰, 等. 基于受激布里渊散射的多阻带微波光子滤波器 [J]. 中国激光, 2018, 45(11): 1106004.
- [15] Zhang C, Yu W F, Li Z L, *et al.* Numerical study on scattering properties for the stimulated Brillouin scattering fiber [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0319005.
- 张聪, 余文峰, 李正林, 等. 光纤受激布里渊散射的散射特性数值研究 [J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0319005.
- [16] Wang Y X, Li J N, Zhou T, *et al.* All-optical microwave photonic downconverter with tunable phase shift [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(6): 5503408.
- [17] Xiao Y C, Guo J, Wu K, *et al.* Multiple microwave frequencies measurement based on stimulated Brillouin scattering with improved measurement range [J]. Optics Express, 2013, 21(26): 31740-31750.