

# 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

郑 鑫 王 翌 卢春燕 金晓峰 章献民 池 灏 郑史烈

(浙江大学信息与电子工程系, 浙江 杭州 310027)

**摘要** 提出了一种基于双通道马赫-曾德尔调制器(DPMZM)调制边带滤波的微波光子移相器。在双通道马赫-曾德尔调制器的结构中,在一路马赫-曾德尔干涉仪上实现抑制光载波的双边带调制输出,而在另一路马赫-曾德尔的相位调节臂上通过调节偏置电压实现光载波信号的光学移相,两路光信号经过干涉合路后由光纤布拉格光栅(FBG)滤除其中一个一阶边带,最后输入到光电探测器(PD)进行光电转换得到移相的微波信号。实验结果表明,基于 DPMZM 调制边带滤波的微波光子移相器具有传输特性稳定、输出幅度波动小的优点。该结构还具有相移调节响应速度快、应用频带宽以及移相范围大于  $360^\circ$  等特点。

**关键词** 光纤光学;光纤光栅;微波光子移相器;双通道马赫-曾德尔调制器;马赫-曾德尔干涉仪

**中图分类号** TN29 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1223003

## A Microwave Photonic Phase Shifter Based on Dual-Parallel Mach-Zehnder Modulator Modulation Sideband Filtering

Zheng Xin Wang Yi Lu Chunyan Jin Xiaofeng Zhang Xianmin Chi Hao Zheng Shilie

(Information and Electronics Engineering Department, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

**Abstract** A novel microwave photonic phase shifter based on dual-parallel Mach-Zehnder modulator (DPMZM) modulation sideband filtering is proposed. Within the structure of DPMZM, one optical path with a Mach-Zehnder modulator is adjusted to be maintained at the state of optical-carrier-suppressed double-sideband modulation, and the other optical path is used to introduce an adjustable phase shift of the optical carrier by simply controlling the direct current (DC) bias voltage. The output of DPMZM passes through a fiber Bragg grating (FBG) for filtering out one first-order sideband of the modulation. A wideband photodetector is used to convert the output of FBG to electronic microwave signal of adjustable phase shift. The experimental results show that the proposed microwave photonic phase shifter based on DPMZM modulation sideband filtering has the advantage of stable transmission characteristics with small amplitude fluctuation, fast phase tuning response, wide frequency band and a phase shift greater than  $360^\circ$ .

**Key words** fiber optics; fiber Bragg grating; microwave photonic phase shifter; dual-parallel Mach-Zehnder modulator; Mach-Zehnder interferometer

**OCIS codes** 060.3735; 280.4750; 250.7360

## 1 引 言

微波光子移相器作为光域微波信号相位处理的关键器件,主要应用于微波光子信号处理和相控阵

雷达系统,在卫星通信、移动通信、军事和航天航空等领域具有重要的应用价值<sup>[1~4]</sup>。传统的微波移相器主要是电子移相器,受到频带带宽小、抗干扰性能

**收稿日期**: 2012-05-25; **收到修改稿日期**: 2012-07-31

**基金项目**: 国家 973 计划(2012CB315703)、国家科技支撑计划(2012BAH34B03)和国家自然科学基金(60971060)资助课题。

**作者简介**: 郑 鑫(1987—),男,硕士研究生,主要从事微波光子学方面的研究。E-mail: 20931008@zju.edu.cn

**导师简介**: 金晓峰(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事微波与光子技术、高速通信与光传感等方面的研究。

E-mail: jinxf00@zju.edu.cn

差和移相范围小等限制,已经不能满足高性能雷达的迫切需求。而微波光子移相器具有频带宽、抗电磁干扰强、损耗低、重量轻和体积小等优点,正在成为各国研究热点<sup>[5]</sup>。

近年来,微波光子移相器从技术原理角度的研究主要有光学真延时技术(OTTD)<sup>[6~9]</sup>,外差混频技术<sup>[8,10,11]</sup>和矢量和技术<sup>[12~15]</sup>等。基于光学真延时技术的微波光子移相器研究出现最早,但是其结构一般由很多延时单元构成,相位的调节相对较为复杂。基于外差混频的微波光子移相器研究由于在两路干涉光路中容易引入由环境因素引起的随机相位噪声,造成微波光子移相的稳定性欠佳。基于矢量技术的微波光子移相器研究主要通过改变两路同频微波信号的振幅来实现矢量合成后的微波信号的相移,但是存在可控相移范围小、输出微波幅度波动大等问题。

本文提出了基于双通道马赫-曾德尔调制器(DPMZM)调制边带滤波的微波光子移相器。与传统的基于外差混频的微波光子移相技术相比,该方案由于其两干涉光路是在DPMZM单个集成器件中实现,因此受到的环境相位噪声影响小。实验结果表明,提出的基于DPMZM调制边带滤波的微波光子移相器具有稳定的传输特性,另外还具有输出幅度波动小、响应速度快、频带宽以及移相范围大于360°等特点。

## 2 系统结构框图及原理

所提出的基于DPMZM调制边带滤波的微波光子移相器结构如图1所示,选用窄线宽的激光器作为光源,输入至DPMZM上,在一路马赫-曾德尔干涉仪(MZI)上实现光载波抑制的双边带调制输出,而在另一路MZI的相位臂上通过调节偏置电压实现光载波信号的相位调制(PM),两光信号经干涉合路后由光纤布拉格光栅(FBG)滤除其中一个一阶边带,最后输入到光电探测器(PD)进行光电转换得

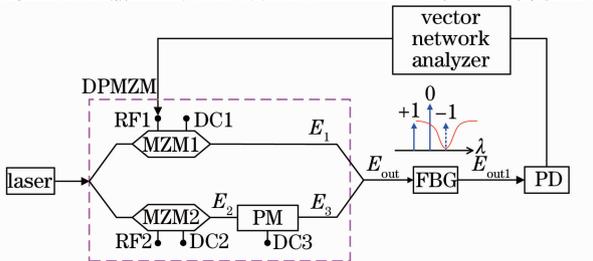


图1 系统结构框图

Fig. 1 System architecture diagram

到相位可调的微波信号。

设输入的光载波信号为  $E_0 \cos \omega_0 t$ , 其中  $E_0, \omega_0$  分别代表光载波的振幅和频率。在如图1所示的DPMZM的MZM1调制器中,输入微波信号为  $V_e \sin \omega_e t$ , 其中  $V_e, \omega_e$  分别为微波信号的振幅和频率。通过调节偏置电压DC1使MZM1上实现抑制载波的双边带调制方式输出。假定输入端微波信号幅度较小,则经MZM1调制后的输出信号  $E_1$  可忽略其高阶边带,只含有+1阶和-1阶边带

$$E_1 = -\frac{1}{\sqrt{2}} E_0 J_1(m) [\sin(\omega_0 + \omega_e)t - \sin(\omega_0 - \omega_e)t], \quad (1)$$

式中  $J_1$  为一阶贝塞尔函数,  $m = (V_e/V_{\pi 1})\pi/2$  为MZM1的调制系数,  $V_{\pi 1}$  为MZM1的半波电压。

在DPMZM下路MZM2的射频端口RF2上不调制微波信号,调节偏置端口DC2的控制电压  $V_{D2}$ , 则经MZM2后的  $E_2$  输出

$$E_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} E_0 \cos\left(\frac{\pi V_{D2}}{2V_{\pi 2}}\right) \cos \omega_0 t. \quad (2)$$

一般设置  $E_2$  输出幅度为最大,即

$$E_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} E_0 \cos \omega_0 t. \quad (3)$$

然后将  $E_2$  输入至DPMZM的上下两路间相对光学相位调节端口进行光学移相处理,则输出  $E_3$  可表示为

$$E_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} E_0 \cos(\omega_0 t + \phi_3), \quad (4)$$

式中  $\phi_3 = \frac{\pi V_{D3}}{V_{\pi 3}}$ ,  $V_{\pi 3}$  为DPMZM相位调节臂的调制半波电压。通过调节DC3的偏置电压  $V_{D3}$  即可以调节光载波信号的相位。

由此将DPMZM上下两路信号  $E_1$  和  $E_3$  相干合路后,则输出  $E_{out}$  可表示为

$$E_{out} = \frac{1}{2} E_0 \cos(\omega_0 t + \phi_3) - \frac{1}{2} E_0 J_1(m) [\sin(\omega_0 + \omega_e)t - \sin(\omega_0 - \omega_e)t]. \quad (5)$$

将上述输出信号输入至FBG滤除其中的一1阶边带,则输出  $E_{out1}$  表示为

$$E_{out1} = \frac{1}{2} E_0 \{ \cos(\omega_0 t + \phi_3) - J_1(m) \times [\sin(\omega_0 + \omega_e)t - k \sin(\omega_0 - \omega_e)t] \}, \quad (6)$$

式中  $k$  为经FBG滤波后的衰减系数,定义其对数形式  $\alpha = -20 \lg k$ 。

经PD拍频得到的微波信号  $I_{out2}$  忽略高次项,可近似表示为

$$I_{\text{out}2} = \frac{1}{4}RE_0^2 J_1(m) [\sin(\omega_c t - \phi_3) + k \sin(\omega_c t + \phi_3)], \quad (7)$$

式中  $R$  为 PD 的响应度。则微波信号的幅度  $A$  和相对相移  $\varphi$  分别表示为

$$A = \frac{1}{4}RE_0^2 J_1(m) \times \sqrt{(1+k)^2 \cos^2 \phi_3 + (k-1)^2 \sin^2 \phi_3}, \quad (8)$$

$$\varphi = \arctan \left[ \frac{(k-1) \sin \phi_3}{(k+1) \cos \phi_3} \right]. \quad (9)$$

不同频率的微波信号经 DPMZM 调制到光信号上后,FBG 对调制后的一阶边带的抑制比并不一致,主要表现在微波信号低频段其边带抑制效果欠佳,结果在调节 PM 的直流偏置电压  $V_{D3}$  改变输出微波信号相对相移  $\varphi$  的同时,微波信号的幅度  $A$  也发生了变化。

以上分析表明,通过调节 PM 的直流偏置电压  $V_{D3}$  就会相应地改变输出微波信号幅度  $A$  和相对相移  $\varphi$ 。设定 PM 的半波电压  $V_{\pi 3}$  为 4 V,利用 Matlab 仿真不同 FBG 衰减系数下微波信号幅度和相移随直流偏置电压的影响。图 2 为不同 FBG 衰减系数下 RF 信号幅度随 PM 偏置电压变化的曲线图。图 3 为不同 FBG 衰减系数下 RF 相移随 PM 偏置电压变化的曲线图。

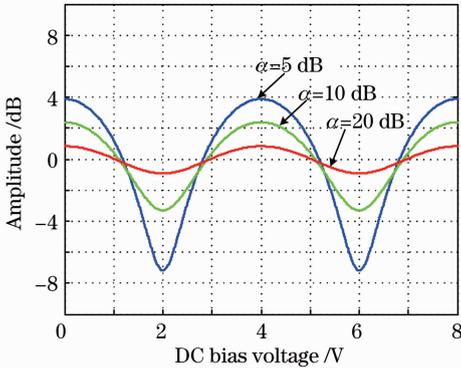


图 2 不同  $\alpha$  时 RF 信号幅度与 PM 偏置电压的关系

Fig. 2 Relation between RF amplitude and PM DC bias voltage with different  $\alpha$

由图 2、3 可见,随着 FBG 对 -1 阶边带衰减系数的不断增大,微波光子移相器的幅度变化更趋平缓,相位响应特性更趋线性。当  $\alpha \geq 20$  dB 时,相移器的性能已经趋近于设计目标。

### 3 系统微波移相结果

构建如图 1 所示的系统结构,实验所用的激光器是 Agilent 81940A 波长可调激光器,最小可调节

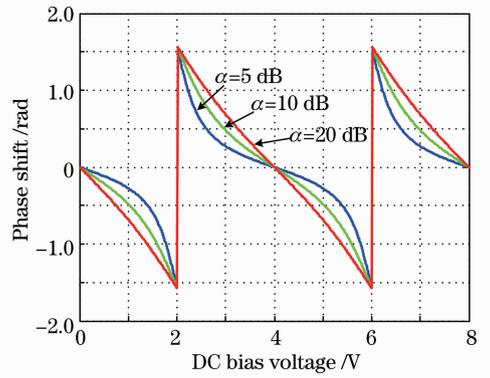


图 3 不同  $\alpha$  时 RF 相移与 PM 偏置电压的关系  
Fig. 3 Relation between RF signal phase shift and PM DC bias voltage with different  $\alpha$

波长 0.1 pm;DPMZM 采用 JDSU 公司的 DPMZM 电光调制器,模拟带宽为 12 GHz;光纤光栅中心波长为 1548.83 nm,3 dB 带宽约为 0.24 nm,最大衰减 20 dB。采用温度补偿结构进行光纤光栅的封装,封装后的温度敏感性小于 0.2 pm/°C,这样在室温条件下,光纤光栅由环境引起的随机漂移对实验的影响可以忽略不计,其归一化传输谱如图 4 所示。通过设置可调激光器工作波长在 1548.73 nm 处,与光栅中心波长相差 0.1 nm,以滤除 -1 阶调制边带。利用矢量网络分析仪 (Agilent 8720ET) 的 RF 信号输出作为 DPMZM 所需的微波调制信号,经微波光子移相系统后得到移相后的微波信号,回送至矢量网络分析仪进行系统实验测试。由于此处的 FBG 滤波产生单边带信号会导致输出的微波信号信噪比下降,所以在实验中使用的 PD 内置 30 dB 的跨阻放大器,来有效补偿滤波产生的损耗。当输入光功率为 13 dBm 时,对 DPMZM 输入 10 GHz、10 dBm 的单频信号,则能在频谱仪上 10 GHz 处得到约 -25 dBm 信号,至 5 kHz 频偏处读得相位噪声约为 -90 dBc/Hz。

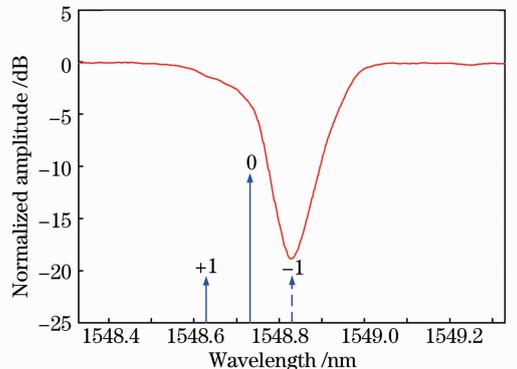


图 4 FBG 透射谱

Fig. 4 Transmission spectrum of the FBG

实验选取 1 GHz 的微波信号作为微波输入信号,分析测试经微波光子相移系统后输出的 1 GHz 微波信号的幅度和相移随 PM 偏置电压的变化情况,其结果如图 5 与图 6 所示。FBG 对 1 GHz 微波信号调制的一阶边带的衰减约为 10 dB。如图 5 所示,在实验中观察到微波幅度随偏置电压产生  $\pm 2.8$  dB 范围内的波动;同时,图 6 为 1 GHz 微波移相的结果并没有随 PM 偏置电压呈线性变化,其结果与前面 FBG 不同衰减系数的系统仿真结果相吻合。

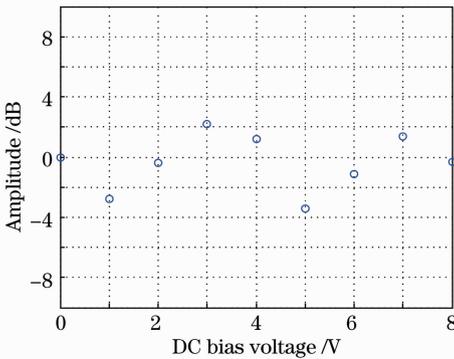


图 5 1 GHz 微波幅度随 PM 偏置电压变化曲线图  
Fig. 5 Relation between 1 GHz RF amplitude and PM DC bias voltage

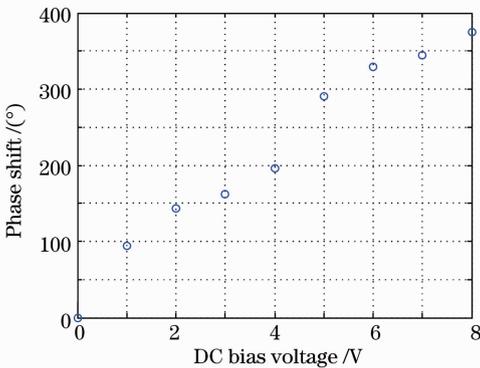


图 6 1 GHz 微波相移随 PM 偏置电压的变化曲线图  
Fig. 6 Relation between 1 GHz phase shift and PM DC bias voltage

然后选取 9 GHz 的微波信号作为输入信号,分析测试经微波相移系统移相后微波信号的幅度和相移随 PM 直流偏置电压的变化情况。实验结果如图 7 与图 8 所示。此时,FBG 对 9 GHz 微波信号的一阶调制边带大约有 20 dB 的衰减,FBG 非理想的滤波效应对微波相移的影响也相应变小。在调节偏置电压改变微波相移的过程中,微波幅度在  $\pm 0.6$  dB 范围内波动,微波移相的结果与 PM 偏置电压呈明显的线性变化,实验结果与仿真计算吻合较好。

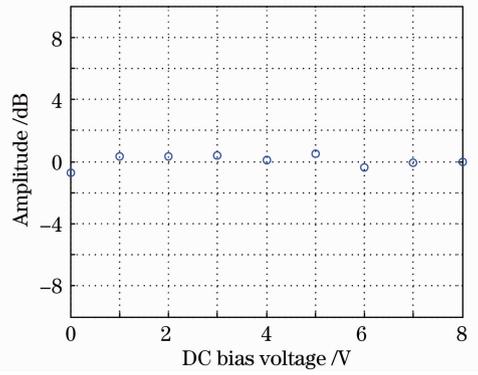


图 7 9 GHz 微波幅度随 PM 偏置电压变化曲线图  
Fig. 7 Relation between 9 GHz RF amplitude and PM DC bias voltage

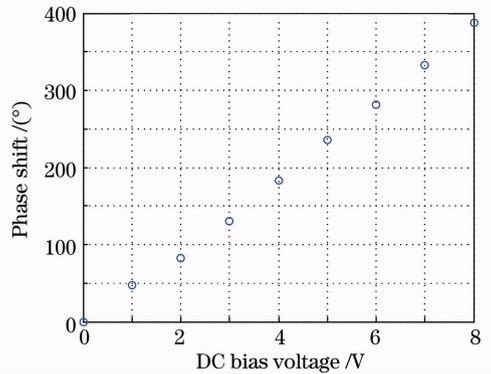


图 8 9 GHz 微波相移随 PM 偏置电压的变化曲线图  
Fig. 8 Relation between 9 GHz phase shift and PM DC bias voltage

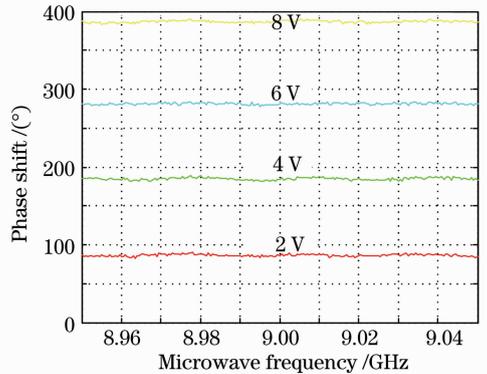


图 9 相移随 PM 偏置电压的变化曲线图  
Fig. 9 Relation between phase shift and microwave frequency with different PM DC bias voltages

实验测试了微波光子移相器在 DPMZM 的 DC3 偏置端口相位调节的响应时间,大约为 300 ns,其快速响应的特性主要是由于 DPMZM 内由光电效应实现的光学移相所决定的。图 9 为 9 GHz 频段带宽 100 MHz 的微波信号,在改变 PM 偏置电压分别为 2,4,6,8 V 时其相移变化随 PM 偏置电压调节的测试曲线,可以看出在不同频率下均取得相移平坦的结

果。本方案基于全光系统,在实际过程中微波光子移相器的带宽在低频段上受到 FBG 滤波带带效果的影响,在高频段上限制射频信号响应特性的主要因素是 DPMZM 和 PD 等器件的响应带宽,实际测得在 2~12 GHz 频率范围内微波光子移相器具有较好的移相结果。

## 4 结 论

在基于 DPMZM 调制边带滤波的微波光子移相器结构中,在一路 MZM 调制器上实现抑制光载波的双边带调制,而在另一路 MZM 输出的相位臂上通过调节偏置电压实现光载波信号的光学移相,两路光信号经过干涉合路后由 FBG 滤除其中一个一阶边带,最后由 PD 进行光电转换得到移相的微波信号。在 FBG 对一阶边带衰减量足够大的前提下,通过调节 DPMZM 上的直流偏置电压就可以线性地改变微波信号的相移且输出幅度波动小的微波。实验结果表明,基于 DPMZM 调制边带滤波的微波光子移相器具有较稳定的传输特性,且输出幅度波动小;实验结果和仿真计算的较好吻合也显示了该结构移相器具有响应速度快、频带宽以及移相范围大于 360°等特点。

## 参 考 文 献

- 1 A. Dreher, N. Niklasch, F. Klefenz *et al.*. Antenna and receiver system with digital beam forming for satellite navigation and communications [J]. *Microwave Theory and Techniques*, 2003, **51**(7): 1815~1821
- 2 Yan Aimin, Zhi Ya'nan, Sun Jianfeng *et al.*. Recent development of optical phased array scanning technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(10): 102801  
闫爱民, 职亚楠, 孙建锋等. 光学相控阵扫描技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(10): 102801
- 3 Li Hongyan, Ma Zhijian, Zhong Liyun *et al.*. A high precision synthetic method of sub-holograms in phase-shifting synthetic

- aperture digital hologram[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0509001
- 李红燕, 马志俭, 钟丽云等. 一种相移合成孔径数字全息图高精度合成方法[J]. *光学学报*, 2011, **31**(5): 0509001
- 4 Yang Xiufeng, Peng Lei, Tong Zhengrong *et al.*. Design of tunable bandpass photonic microwave filter based on multi-wavelength fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 0206004  
杨秀峰, 彭磊, 童峥嵘等. 基于多波长激光器的带通微波光子滤波器设计[J]. *光学学报*, 2012, **32**(2): 0206004
- 5 Alayn Loayssa. Broad-band RF photonic phase shifter based on stimulated Brillouin scattering and single-sideband modulation [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(1): 208~210
- 6 J. J. Lee, R. Y. Loo, S. Livingston *et al.*. Photonic wideband array antennas [J]. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, 1995, **43**(9): 966~982
- 7 J. G. Willms, A. Ouacha, L. D. Boer *et al.*. A wideband GAAS 6-bit true-time delay MMIC employing on-chip digital drivers [C]. 30th European Microwave Conference, 2000. 1~4
- 8 H. Fetterman, J. Han, H. Zhang *et al.*. Multiple output photonic RF phase shifters for optically controlled radar systems [C]. *Microwave Symposium Digest*, 2002. 1937~1940
- 9 V. Kaman, X. Z. Zheng, R. J. Helkey *et al.*. A 32-element 8-bit photonic true-time-delay system based on a 288×288 3-D MEMS optical switch [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(6): 849~851
- 10 Yi Dong, Hao He, W. S. Hu *et al.*. Photonic microwave phase shifter/modulator based on a nonlinear optical loop mirror incorporating a Mach-Zehnder interferometer [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(7): 745~747
- 11 S. S. Lee, A. H. Udupa, H. Erlig *et al.*. Demonstration of a photonic controlled RF phase shifter [J]. *IEEE Microwave and Guided Wave Lett.*, 1999, **9**(9): 357~359
- 12 J. F. Coward, Y. K. Yee, C. H. Chalfant *et al.*. A photonic integrated-optic RF phase shifter for phased array antenna beam-forming applications [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1993, **11**(12): 2201~2205
- 13 W. Vogel, M. Berroth. Liquid crystal phase shifter for optically generated RF signals [C]. *Microwave Conference*, 2002. 1~4
- 14 E. H. W. Chan, R. A. Minasian. Photonic RF phase shifter and tunable photonic RF notch filter [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(7): 2676~2682
- 15 X. Q. Sun, S. N. Fu, K. Xu *et al.*. Photonic RF phase shifter based on a vector-sum technique using stimulated Brillouin scattering in dispersion shifted fiber [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, 2010, **58**(11): 3206~3212

栏目编辑: 王晓珉