

基于微波光子扫频的超快光学矢量分析研究



袁 飞*, 张耀文, 张旨遥, 张尚剑, 刘 永

(电子科技大学光电科学与工程学院 成都 610054)

【摘要】 该文提出并验证了一种基于微波光子扫频的超快、高精度光学矢量分析技术方案。使用双臂驱动马赫-曾德尔电光调制器的一个射频端口加载线性调频信号, 产生宽带光学线性扫频信号, 实现待测器件频响特性的快速扫描。调制器的另一个射频端口加载单音本振微波信号, 实现扫频信号的下变频, 进而通过模数转换器实现低频数字化探测。然后利用希尔伯特变换进行信号处理后, 获得待测器件的幅频和相频响应。最后实验测试了一段长度 3 km 的非零色散位移光纤中的布里渊增益幅频和相频响应, 测量时间仅需 20 μ s, 频率分辨率可达 20 kHz。

关键词 电光调制器; 线性调频信号; 微波光子; 光学矢量分析

中图分类号 TN29 文献标志码 A doi:10.12178/1001-0548.2021034

Research on Ultra-Fast Optical Vector Analysis Based on Microwave Photonic Frequency Sweeping

YUAN Fei*, ZHANG Yao-wen, ZHANG Zhi-yao, ZHANG Shang-jian, and LIU Yong

(School of Optoelectronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract An ultra-fast and high-resolution optical vector analysis scheme has been proposed and experimentally demonstrated. In the scheme, a broadband optical frequency-sweeping signal is generated by injecting a linearly frequency-modulated signal into one radio-frequency (RF) port of a dual-drive Mach-Zehnder electro-optic modulator, which is used to achieve fast scanning of the frequency response characteristic of the device under test (DUT). A single-tone microwave signal is injected into the other RF port of the modulator to realize down-conversion of the frequency-sweeping signal. The down-converted signal is then digitized by an analog-to-digital converter, and is processed through Hilbert transform to extract the amplitude- and phase-frequency response of the DUT. In the proof-of-concept experiment, the amplitude- and phase-frequency response of the Brillouin gain in a section of non-zero dispersion shifted fiber with a length of 3 km is accurately measured, where the measurement time is only 20 μ s, and the frequency resolution reaches 20 kHz.

Key words electro-optic modulator; linearly frequency-modulated signal; microwave photonics; optical vector analysis

近年来, 光学滤波器被用于实现光信号的多维度(包括幅度、相位等)、高精细操控, 例如: 纳米颗粒检测^[1]、片上光信号处理^[2]、高灵敏度光学传感^[3]、微波光子学^[4]等, 因此亟需能够对光学滤波器多维光谱响应特性进行精细表征的光学矢量分析技术。

光干涉法^[5-6]和调制相移法^[7-8]是两种最常用的光学矢量分析方法, 均借助于激光器的波长扫描来实现光学滤波器频响的测量。然而, 由于可调谐激光器的波长稳定性和可重复性较差, 这两种方法的

频率分辨率只能达到百兆赫兹量级, 无法实现高 Q 值光学滤波器频响的精细测量^[9]。

为了提高频率分辨率, 文献 [10-15] 提出了基于微波光子技术的光学矢量分析方案。通过电光调制, 将光域内的波长扫描转至电域内进行, 借助于高精细的电谱扫描和分析技术, 已实现频率分辨率 334 Hz 的幅频和相频响应测量^[15]。然而, 目前已见报道的基于微波光子技术的光学矢量分析在测量频响时采用逐个频率点扫描的方式, 高的频率分辨率意味着要扫描更多的频率

收稿日期: 2020-12-09; 修回日期: 2021-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(61927821)

作者简介: 袁飞(1988-), 男, 博士生, 主要从事微波光子学方面的研究. Email: yuanfei_1988@163.com

点, 大大增加了测量所需的时间 (一般所需时间为数秒以上)。

本文提出了一种基于微波光子扫频的超快、高精度光学矢量分析技术方案, 并对其进行了实验。实验中, 以一段非零色散位移光纤的布里渊增益谱作为测试对象, 对其幅频和相频响应进行测量, 频率分辨率达到 20 kHz, 测量时间仅需 20 μs 。

1 方案及原理

图 1 为本文提出的基于微波光子扫频的超快、高精度光学矢量分析技术方案示意图。其工作原理简述如下: 可调谐激光二极管 (laser diode, LD) 输出直流光, 进入偏置于最小透射点的双臂驱动马赫-曾德尔电光调制器 (dual-arm-driven Mach-Zehnder electro-optic intensity modulator, DD-MZM); DD-MZM 的一个射频口输入高功率电学线性调频 (electrical linear frequency modulated, ELFM) 信号, 产生各阶调制边带, 利用光学带通滤波器 (optical bandpass filter, OBPF) 滤出高阶边带作为宽带光学线性扫频信号, 用于实现待测器件 (device under test, DUT) 频响特性的快速扫描; DD-MZM 的另一个射频口输入单音本振 (local oscillator, LO) 微波信号, 用于在光电探测时实现光学线性扫频信号的下变频; ELFM 信号和 LO 信号通过 10 M 的同步信号进行同步; 下变频后的扫频信号映射了 DUT 的频响特性, 由电子模数转换器 (analog-to-digital converter, ADC) 实现数字化, 在数字域内经过系统频响校准后, 恢复出 DUT 的幅频和相频响应。

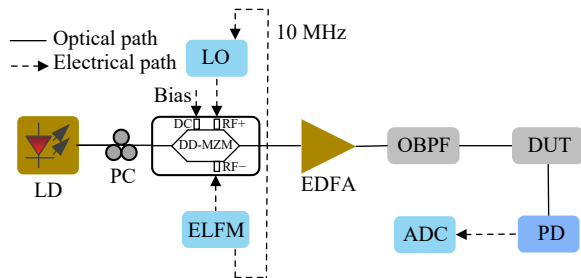


图 1 光学矢量分析技术方案示意图

可调谐 LD 输出窄线宽直流光, 其光场为:

$$E_1(t) = E_c \exp(j\omega_c t) \quad (1)$$

式中, E_c 和 ω_c 分别为直流光的振幅与角频率。DD-MZM 的两个射频口分别输入 ELFM 信号和单音 LO 信号, 调制后的光场可表示为:

$$E_2(t) = \frac{\sqrt{2}}{2} E_c \exp(j\omega_c t) \times \begin{cases} \exp[jm_1 \cos(\omega_{LO}t) + j\phi] + \\ \exp[-jm_2 \cos(\omega_0 t + \pi\gamma t^2)] \end{cases} \quad (2)$$

式中, m_1 和 m_2 分别为 LO 信号和 ELFM 信号的调制系数; ω_{LO} 为 LO 信号的角频率; ω_0 和 γ 分别为 ELFM 信号的初始角频率与啁啾率; ϕ 为直流偏置引入的相移。将 DD-MZM 的直流偏置设置在最小透射点, 即 $\phi = \pi$, 实现光载波抑制。ELFM 的调制系数 m_2 足够大, 实现谐波扫描, 扩展测量带宽。LO 为小信号, 可忽略高阶调制边带。与此同时, 设置 OBPF 的中心波长与带宽, 只保留光载波一侧的调制边带。因此, OBPF 的输出光场为:

$$E_3(t) = E_{LO}(t) + E_{ELFM}(t) \quad (3)$$

$$E_{LO}(t) = A_{LO} \exp(j\omega_c t + j\omega_{LO}t) \quad (4)$$

$$E_{ELFM}(t) = \sum_{n=1}^N A_{ELFM,n} \exp[j\omega_c t + jn(\omega_0 t + \pi\gamma t^2)] \quad (5)$$

式中, $E_{LO}(t)$ 和 $E_{ELFM}(t)$ 分别为 OBPF 通带内的 LO 和 ELFM 调制信号; N 为 OBPF 通带内 ELFM 调制信号的谐波数; A_{LO} 和 $A_{ELFM,n}$ 分别为 LO 和 ELFM 调制信号的振幅。

当 $E_3(t)$ 通过 DUT 时, 其中的 $E_{ELFM}(t)$ 快速扫描 DUT 的频响特性, DUT 的输出光场可表示为:

$$E_4(t) = A(\omega_c + \omega_{LO}) A_{LO} \times \exp[j\omega_c t + j\omega_{LO}t + j\theta(\omega_c + \omega_{LO})] + \sum_{n=1}^N A[\omega_n(t)] A_{ELFM,n} \times \exp[j\omega_c t + jn(\omega_0 t + \pi\gamma t^2) + j\theta(\omega_n(t))] \quad (6)$$

式中, $A(\omega)$ 和 $\theta(\omega)$ 分别表示 DUT 的幅频与相频响应; $\omega_n(t)$ 为第 n 阶 ELFM 调制谐波的瞬时频率。当 DUT 的频响由第 p 阶 ELFM 调制谐波扫描得到时, 通过设置单音 LO 信号的频率, 则第 p 阶 ELFM 调制谐波可与 LO 调制信号在光电探测器 (photodetector, PD) 内拍频产生相对低频的线性调频光电流信号为:

$$I(t) = A(\omega_c + \omega_{LO}) A(\omega_p(t)) A_{LO} A_{ELFM,p} \times \cos[p(\omega_0 t + \pi\gamma t^2) - \omega_{LO}t + \theta(\omega_p(t)) - \theta(\omega_c + \omega_{LO})] \quad (7)$$

从式 (7) 可以看到, 光电流 $I(t)$ 携带了 DUT 的

频响信息,通过分析 $I(t)$ 的幅度与相位,即可获得 DUT 的矢量频响特性。

需要说明的是,上述分析获得的频响特性包含了测量系统其余组件的频响信息,需要对测试结果进行校准。在校准过程中,将 OBPF 的输出端直接与 PD 相连,可获得校准光电流信号为:

$$I_{cal}(t) = A_{LO}A_{ELFM,p} \cos[p(\omega_0 t + \pi\gamma t^2) - \omega_{LO}t] \quad (8)$$

根据式 (7) 和式 (8),通过式 (9) 可获得 DUT 的频率响应:

$$H[\omega_p(t)] = \frac{I(t) + j\text{Hilbert}[I(t)]}{I_{cal}(t) + j\text{Hilbert}[I_{cal}(t)]} \quad (9)$$

式中, $\text{Hilbert}[\cdot]$ 代表希尔伯特变换。对于线性扫频光,频率分辨率为扫频光信号的带宽除以总采样点,可计算为:

$$f_{\text{resolution}} = f_{\text{bandwidth}} / (f_{\text{sample}} T) \quad (10)$$

式中, $f_{\text{bandwidth}}$ 为扫频光信号带宽; f_{sample} 为电子 ADC 采样速率; T 为 ELFM 信号周期。

2 实验结果及分析

为了验证所提出方案的可行性,以非零色散位移光纤 (non-zero dispersion-shifted optical fiber, NZ-DSF) 中的布里渊增益谱作为待测对象,对其幅频和相频响应进行了测试。图 2 为实验系统结构框图,可调谐 LD (TeraXion, PS-TNL) 输出的窄线宽直流光通过光耦合器分为两路,其中一路作为泵浦光 (功率为 7.5 dBm),由光环行器的 1 端口输入,并从 2 端口输出,从右到左进入一段长度为 3 km 的 NZ-DSF 进行传输;另一路进入 DD-MZM (EOspace, AE-DD-0VPP-40-PFA-SFA),受到单音 LO 信号和 ELFM 信号的共同调制,经 EDFA (Amonics, AED-FA-PA-30) 进行功率放大,并经过 OBPF (Santec, OTF350) 滤除短波长调制边带后,形成线性扫频信号光,与泵浦光在 NZ-DSF 中相向传输。其中,单音 LO 信号由一台微波源 (R&S, SMB 100A) 产生,频率和功率分别为 10 GHz 与 10 dBm; ELFM 信号由一台自制的线性调频源产生,扫频范围和功率分别为 5~7 GHz 和 17 dBm,扫频周期为 20 μs 。在线性扫频信号光与泵浦光对向传输过程中,位于 NZ-DSF 光纤布里渊增益谱内的信号光成分得以放大,携带 NZ-DSF 布里渊增益谱的幅频和相频特性。随后,线性扫频信号光由环形器的 3 端口输出,进入 PD (Agilent 11982A) 实现光电转换,其

输出光电流由一个带宽 2 GHz、采样率 10 GSa/s 的实时示波器 (R&S RTO1024) 进行数据采集。

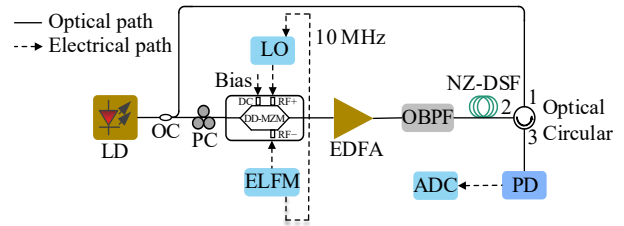


图 2 测量 NZ-DSF 布里渊增益谱的实验系统结构框图

图 3 为利用光谱仪 (YOKOGAWA AQ6370C) 测量得到的 OBPF 输出光谱,ELFM 调制信号的 -1 阶边带与 -2 阶边带得以保留。其中,ELFM 调制信号的 -2 阶边带与光载波的频率差在 -14~ -10 GHz 范围内,而 NZ-DSF 的布里渊频移量约为 -10.6 GHz^[16],因此,ELFM 调制信号的 -2 阶边带作为探测光获取了 NZ-DSF 布里渊增益谱的频响特性。由于 LO 信号频率为 10 GHz,其 -1 阶调制边带与 ELFM 调制信号的 -2 阶边带在 PD 中进行拍频,映射了布里渊增益频响的信号成分下变频到 0.6 GHz 附近,可由实时示波器实现数字采集。

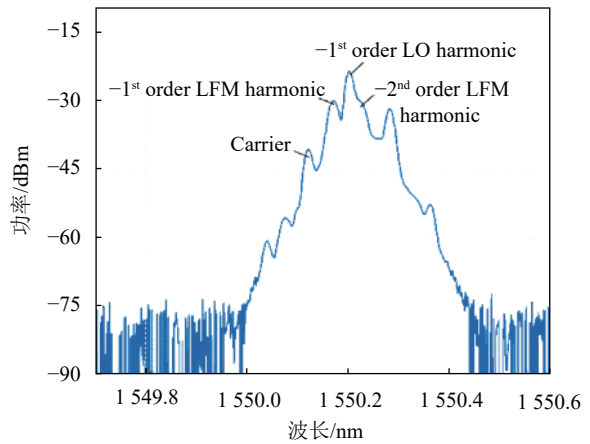
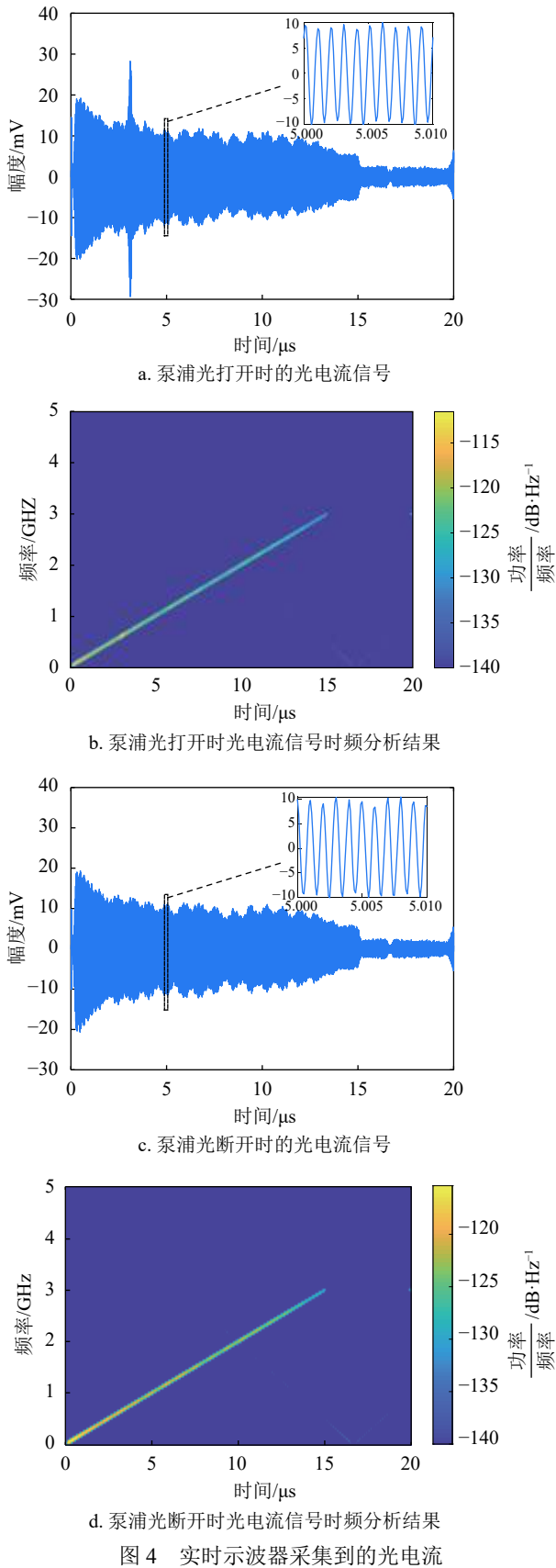


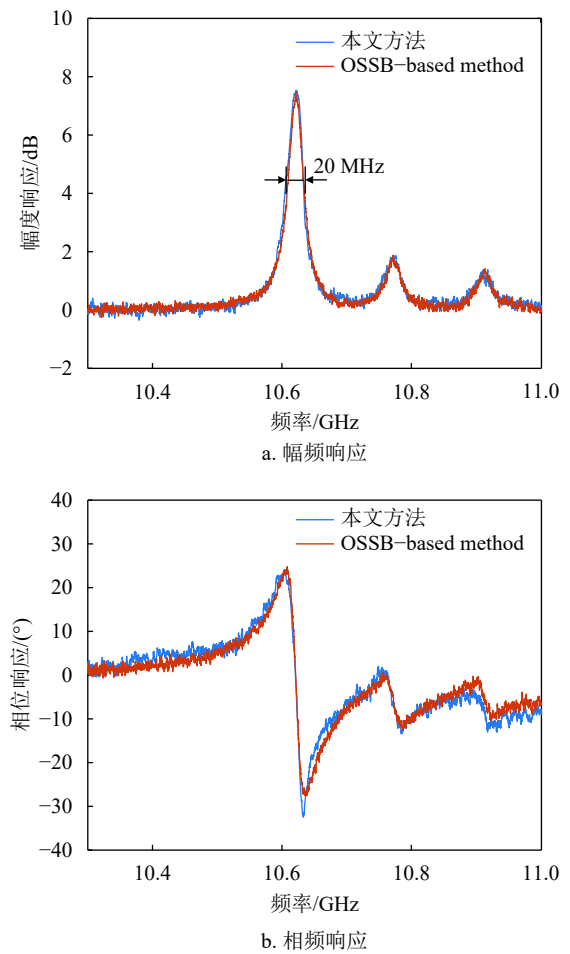
图 3 OBPF 输出光谱

图 4a 和 4c 分别给出了泵浦光接通与断开时,实时示波器采集到的线性调频光电流信号。通过对比可以看到,图 4a 中的光电流信号在 3 μs 附近通过布里渊增益被明显放大。此外,图 4b 和 4d 分别给出了图 4a 和 4c 中光电流信号的时频分析结果,扫频线性度为 0.076%。可以看出,线性调频光电流信号具有良好的线性度,保证了测量结果具有良好的时频线性对应关系。



利用图4a和4c中采集的数据, 根据式(9)计算得到NZ-DSF布里渊增益谱的幅频和相频响应,

如图5中蓝色线条所示。作为对比, 利用文献[10]中基于单边带调制的光学矢量分析方法对实验中所用的NZ-DSF布里渊增益谱进行了测试(泵浦光功率仍然为7.5 dBm), 测试结果如图5中橙色线条所示。红色线条由本方案测量得到, 蓝色线条由基于单边带调制的光学矢量分析方法测量得到。从图5中可以看到, 两种方法测试结果吻合较好, NZ-DSF有3个布里渊增益峰, 其中最高增益峰的带宽约为20 MHz, 这之前报道的结果一致^[16], 证明了本文所提出方案的可行性。



需要指出的是, 实验中单次测量时间仅为20 μs, 器件的频谱响应通过离线数据处理获得, 实际应用中配合FPGA可实时获得器件的频谱响应。此外, 由于ELFM信号具有优异的线性时频关系, 频率分辨率由式(10)决定, 在实验中, 测量分辨率可达4 GHz/(10 GS/s×20 μs)=20 kHz。与基于逐点扫描的方案相比, 本方案的信噪比略低, 并且实时信号处理增加了成本, 但是本方案可极大地提升测量效率, 最重要的是, 极短的测量时间避免了测量结

果受到环境变化和机械振动的影响。

3 结束语

本文提出了一种基于微波光子扫频的超快、高精度光学矢量分析技术方案,并进行了实验验证。该方案利用单个 DD-MZM,通过线性调频信号驱动产生宽带光学线性扫频信号,用于实现待测器件频响特性的快速扫描,并通过外加单音本振微波信号进行下变频,实现低频数字化探测,最终在数字域内利用希尔伯特变换获得待测器件的幅频和相频响应。实验中,以一段长度 3 km 的非零色散位移光纤布里渊增益谱作为测试对象,对其幅频和相频响应进行了准确测量,频率分辨率达到 20 kHz,测量时间仅需 20 μ s。本文所提出的光学矢量分析技术方案可实现光学滤波器频响特性的超快速、高精度表征,可应用于片上光信号处理、超灵敏光学传感等领域。

参 考 文 献

- [1] ZHI Yan-yan, YU Xiao-chong, GONG Qi-huang, et al. Single nanoparticle detection using optical microcavities[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(12): 1604920.
- [2] CHOUDHARY A, MORRISON B, ARYANFAR I, et al. Advanced integrated microwave signal processing with giant on-chip Brillouin gain[J]. *J Lightwave Technol*, 2017, 35(4): 846-854.
- [3] CHEW S X, YI Xiao-ke, YANG Wen-jian, et al. Optoelectronic oscillator based sensor using an on-chip sensing probe[J]. *IEEE Photonics J*, 2017, 9(2): 1-9.
- [4] YAO Jian-ping. Microwave photonics[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(3): 314-335.
- [5] VANWIGGEREN G D, MOTAMEDI A. R, BARLEY D M. Single-scan interferometric component analyzer[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2003, 15(2): 263-265.
- [6] BRIAN J S, DAWN K G, MATTHEW S W, et al. High resolution optical frequency domain reflectometry for characterization of components and assemblies[J]. *Opt Express*, 2005, 13(2): 666-674.
- [7] NIEMI T, UUSIMAA M, LUDVIGSEN H. Limitations of phase-shift method in measuring dense group delay ripple of fiber Bragg gratings[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2001, 13(12): 1334-1336.
- [8] FORTENBERRY R, SORIN W V, HERNDAY P. Improvement of group delay measurement accuracy using a two-frequency modulation phase-shift method[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2003, 15(5): 736-738.
- [9] VAHAHLA K J. Optical microcavities[J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 839-846.
- [10] TANG Zhen-zhou, PAN Shi-long, YAO Jian-ping. A high resolution optical vector network analyzer based on a wideband and wavelength-tunable optical single-sideband modulator[J]. *Opt Express*, 2012, 20(6): 6555-6560.
- [11] LI Shu-peng, QING Ting, WANG Li-hua, et al. Optical vector analyzer with time-domain analysis capability[J]. *Opt Lett*, 2021, 46(2): 186-189.
- [12] CHEN Wei, XUE Min, ZHU Dan, et al. Optical vector analysis with improved accuracy and enhanced dynamic range[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2019, 31(19): 1565-1568.
- [13] XUE Min, CHEN Wei, ZHU Dan, et al. High-resolution optical vector network analyser employing optical double-sideband modulation and optical Hilbert transform[J]. *Electron Lett*, 2019, 55(6): 337-338.
- [14] XUE Min, CHEN Wei, ZHU Bei-bei. Ultrahigh-resolution optical vector analysis for arbitrary responses using low-frequency detection[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2018, 30(17): 1523-1526.
- [15] QING Ting, LI Shu-peng, TANG Zhen-zhou, et al. Optical vector analysis with attometer resolution, 90-dB dynamic range and THz bandwidth[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 5135.
- [16] LIU Xuan, BAO Xiao-yi. Brillouin spectrum in LEAF and simultaneous temperature and strain measurement[J]. *Journal of Lightwave Technol*, 2012, 30(8): 1053-1059.

编辑 刘飞阳