# 格雷编码布里渊光时域分析传感器中偏振 随机噪声影响及其抑制方法

蒋朋,闫连山\*,周银,李宗雷,张信普,何海军,潘玮,罗斌 西南交通大学信息光子与通信研究中心,四川成都 611756

**摘要** 在格雷编码布里渊光时域分析(BOTDA)传感器中,采用随机扰偏技术,不仅会在消除强偏振牵引效应时引起传感信号信噪比恶化,同时也会引入较强的偏振随机噪声(PRN)而降低传感信号的测量准确度。通过仿真分析和实验研究,证实了偏振随机噪声对传感信号的影响,并基于布里渊相移谱抑制了偏振随机噪声,实验结果表明该方法可使传感准确度提高3倍。

关键词 光通信;分布式光纤传感;布里渊光时域分析 中图分类号 TP212.1 文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0706002

## Effect and Elimination of Polarization Random Noise in Golay-Coded Brillouin Optical Time Domain Analysis Fiber Sensors

Jiang Peng, Yan Lianshan\*, Zhou Yin, Li Zonglei, Zhang Xinpu, He Haijun, Pan Wei, Luo Bin

 $Center \ for \ Information \ Science \ and \ Communications \ , \ \ Southwest \ Jiaotong \ University \ ,$ 

Chengdu, Sichuan 611756, China

**Abstract** Random polarization control in Golay-coded Brillouin optical time domain analysis (BOTDA) fiber sensors can be used to mitigate the deterioration in the signal-to-noise ratio caused by the strong pulling effect of polarization. However, a relatively strong polarization random noise (PRN) is induced, which may reduce the measurement accuracy of the sensing signal. In this study, the effect of PRN on the sensing signal was confirmed through simulation analysis and experimental verification. Furthermore, Brillouin phase shift was used to suppress PRN. Experimental results show that the sensing accuracy is enhanced threefold using the proposed method. **Key words** optical communications; distributed fiber sensing; Brillouin optical time domain analysis **OCIS codes** 060.2310; 060.2330; 060.2370

## 1 引 言

布里渊光时域分析(BOTDA),因可以实现长 距离分布式高精度传感<sup>[1]</sup>,在测量温度或者应变方 面具有独特的优势。其基本原理是当泵浦光和探测 光的频率差在布里渊频移附近时,传感信息基于泵 浦光与连续探测光之间的受激布里渊散射效应 (SBS)体现在探测光上,通过测量探测光在幅值和 相位上的变化,可以得到布里渊增益谱(BGS)或者 相移谱(BPS),最后通过拟合方法得到光纤实际的 布里渊频移(BFS),解出温度或者应变信息。 虽然 BOTDA 在长距离分布式传感上有较高的精度,但 BOTDA 传感距离延伸和测量精度提高 之间是相互制约的。这是因为光纤的固有衰减使传 感系统的信噪比(SNR)随传感距离的增加而减小, 导致在传感光纤末端的测量精度无法保证,同时受 光纤中的非线性效应以及非本地效应的制约<sup>[2-3]</sup>,单 纯地增加泵浦光和探测光的功率不能突破传感距离 的限制。因此为了保持高测量精度的同时实现更长 的传感距离,需要探索进一步提升 SNR 的方法与技 术。目前在 BOTDA 系统中提高 SNR 的方法<sup>[4-5]</sup>, 主要有光脉冲编码技术、拉曼分布式放大技术、图像

收稿日期: 2019-11-18; 修回日期: 2019-12-06; 录用日期: 2019-12-16

基金项目:国家自然科学基金重点项目(61735015)

<sup>\*</sup> E-mail: lsyan@home.swjtu.edu.cn

处理等技术,其中格雷脉冲编码技术因其能简单高效地提升 SNR 被广泛深入的研究。

最近,基于格雷脉冲编码技术的 BOTDA 中发 现了强偏振牵引效应,该效应会恶化传感信号的信 噪比<sup>[6]</sup>。虽然使用随机扰偏技术可以有效消除强偏 振牵引效应,但存在布里渊增益时域曲线测量稳定 性下降的问题<sup>[7]</sup>。本文详细分析了格雷编码 BOTDA 中采用随机扰偏技术消除强偏振牵引效应 的方案,发现偏振随机噪声是影响布里渊增益时域 曲线测量稳定性的主要因素,并提出基于布里渊相 移谱抑制偏振随机噪声的方案,最后通过实验证明 所提出的方案可以将测量准确度提高 3 倍。

#### 2 基本原理

#### 2.1 偏振随机噪声理论分析

泵浦和探测光之间 SBS 的作用效果与二者之间偏振平行度有关,可表示为<sup>[8]</sup>

$$\begin{cases} G''_{B}(z,\nu) = \gamma(z,\nu) * G_{B}(z,\nu) \\ \gamma(z,\nu) = \frac{1}{2}(1 + s \cdot p) = \\ \frac{1}{2}(1 + s_{1}p_{1} + s_{2}p_{2} + s_{3}p_{3}) \\ G_{B}(z,\nu) = p_{P}(z,\nu_{P}) \times h_{k}(\nu) = \\ p_{P}(z,\nu_{P}) \times [g_{sbs}(\nu) + i\varphi_{sbs}(\nu)] \end{cases}$$
(1)

式中: $G''_{B}$ 是含有偏振影响的布里渊增益系数; $\gamma$ 是 偏振系数; $G_{B}$ 是消除了偏振相关影响的布里渊增益 系数; $p_{p}$ 是泵浦光的功率谱; $h_{k}$ 是布里渊本征谱; $\nu_{p}$ 是泵浦光频率; $s = (s_{1}, s_{2}, s_{3}), p = (p_{1}, p_{2}, p_{3})$ 分 別是探测光和泵浦光的偏振态在庞加莱球上的矢量 表示; $g_{sbs}$ 是布里渊增益的本征谱; $\varphi_{sbs}$ 是布里渊相 移的本征谱;z是泵浦光沿光纤入射端传输的距离;  $\nu$ 是泵浦光与探测光之间的频率差;i为虚数。

在单模光纤中折射率分布不均匀,使泵浦光与 探测光在对向传输时偏振态随机变化,引起了布里 渊增益的偏振相关衰落<sup>[9]</sup>。当使用随机扰偏技术 (对泵浦光使用扰偏器随机扰偏)抑制偏振相关衰落 时,其原理可以表示为

$$\bar{\boldsymbol{\gamma}}(\boldsymbol{z},\boldsymbol{\nu}) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{1}{M} \sum_{i=1}^{M} (\boldsymbol{s}_{i} \cdot \boldsymbol{p}_{i}) \right] = \frac{1}{2} \left[ 1 + \Delta_{\epsilon}(\boldsymbol{z},\boldsymbol{\nu}) \right], -1 \leq \Delta_{\epsilon} \leq 1, \quad (2)$$

式中: $\bar{\gamma}(z,\nu)$ 是在传感光纤 z 处泵浦光与探测光频 率差为 $\nu$ 的平均偏振系数; M 是信号平均次数;  $s_i$ 与 $p_i$ 分别表示光纤 z 处第i次 SBS 作用时探测光 与泵浦光的偏振态;Δ<sub>ε</sub>是由扰偏器引起的偏振随机 波动。当信号平均次数足够多时,探测光与泵浦光 的偏振矢量布满庞加莱球,此时偏振随机波动(Δ<sub>ε</sub>) 近似为零,所以平均后的信号不受偏振态的影响,即 偏振相关衰落被消除。

随机扰偏技术对偏振相关衰落的抑制效果与信号的平均次数有关,偏振相关衰落的影响随平均次数的增加而减小。在单脉冲BOTDA传感器中往往需要作多次平均来实现高SNR测量,采用随机扰偏技术时的偏振随机波动可忽略不计。脉冲编码相对于单脉冲可大幅提高SNR,例如在256位的格雷脉冲编码BOTDA传感器中仅采用256×4次信号平均即可实现单脉冲BOTDA传感器中采用256×256=65536次平均所能实现的SNR。因此,格雷编码BOTDA传感器中的信号平均次数可远低于单脉冲BOTDA中的信号平均次数,虽然格雷编码BOTDA传感器可节约大量测量时间,但会加大偏振随机波动,从而产生较大的偏振随机噪声。

格雷自相关码( $A \ B$ )是双极性的,但光脉冲是 单极性的,所以格雷码需要转换成四组单极性的码  $A_1 \ A_2 \ B_1 \ B_2$ 在光纤中传输<sup>[10]</sup>。格雷脉冲光序列 在光纤中经过 SBS 作用后的系统响应  $H_A(z)$ 和  $H_B(z)可表示为$ 

$$\begin{cases} \boldsymbol{H}_{A}(\boldsymbol{z},\boldsymbol{\nu}) = \boldsymbol{A} \otimes [1 + \Delta_{\varepsilon}(\boldsymbol{z},\boldsymbol{\nu})]h_{k}(\boldsymbol{\nu}) + \\ [\boldsymbol{e}_{A_{1}}(\boldsymbol{z}) - \boldsymbol{e}_{A_{2}}(\boldsymbol{z})] \\ \boldsymbol{H}_{B}(\boldsymbol{z},\boldsymbol{\nu}) = \boldsymbol{B} \otimes [1 + \Delta_{\varepsilon}(\boldsymbol{z},\boldsymbol{\nu})]h_{k}(\boldsymbol{\nu}) + \\ [\boldsymbol{e}_{B_{1}}(\boldsymbol{z}) - \boldsymbol{e}_{B_{2}}(\boldsymbol{z})] \end{cases}$$
(3)

式中: $\Delta_{\epsilon}(z,\nu)$ 是在传感光纤 z 处的单脉冲偏振随 机波动; $e_{A_1}(z)$ 、 $e_{A_2}(z)$ 、 $e_{B_1}(z)$ 、 $e_{B_2}(z)$ 分别是脉冲 序列  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $B_1$ 、 $B_2$ 在光纤中传输时的白噪声;  $\Delta_{\epsilon}(z,\nu)h_k(\nu)$ 是单脉冲随机偏振噪声;运算符<sup>②</sup>是 卷积运算。通过格雷解码算法能够得到布里渊本征 谱的估计信号,可以表示为

$$\begin{cases} \bar{h}_{k}(z,\nu) = \frac{1}{2N} [\mathbf{A} \times \mathbf{H}_{A}(z,\nu) + \mathbf{B} \times \mathbf{H}_{B}(z,\nu)] = \\ [1 + \Delta_{\varepsilon}(z,\nu)] h_{k}(z,\nu) + \frac{\bar{e}(z)}{\sqrt{N}} \\ \Delta_{prn}(z,\nu) = \Delta_{\varepsilon}(z,\nu) h_{k}(z,\nu) \\ \Delta_{wn}(z) = \frac{\bar{e}(z)}{\sqrt{N}} \end{cases}$$

$$(4)$$

式中: $\bar{h}_{k}(z,\nu)$ 是布里渊本征谱在传感光纤 z 处泵 浦光与探测光频率差为 $\nu$ 的估计值; N 是编码位 数; $h_{k}(z,\nu)$ 是解码后在传感光纤 z 处的单脉冲布 里渊本征谱; $\Delta_{pm}$ 是解码后的偏振随机噪声; $\Delta_{wn}$ 是 解码后的白噪声; $\bar{e}(z)$ 是解码前的白噪声均值。从 (3)式和(4)式可知,在相同平均次数下,格雷编码 BOTDA 中解码后的白噪声被抑制为单脉冲 BOTDA 中的白噪声的 $1/\sqrt{N}$ ,而解码后的偏振随 机噪声与单脉冲 BOTDA 中的偏振随机噪声,大小 相同,这使得在格雷编码 BOTDA 传感器中偏振随 机噪声在噪声中的占比相对于单脉冲 BOTDA 传 感器大大增加。

由(1)式和(2)式可知,BGS和BPS经历了相同 的偏振随机波动,但经过深入分析后发现,同样的偏 振随机波动造成的BGS和BPS的畸变程度不同, 这种畸变即偏振随机噪声。





对于同样的偏振随机波动( $\Delta_{\epsilon}(z)$ ),在半峰全 宽( $\Delta\nu_{B}$ )范围内 BPS 上的畸变远小于 BGS,这使得 由 BPS 拟合后得到的 BFS 估计值比 BGS 更准确。 下面通过仿真进一步分析偏振随机噪声对格雷编码 BOTDA 传感器的影响。

#### 2.2 偏振随机噪声仿真分析

通过在 Matlab 软件中仿真不同噪声作用下格 雷编码 BOTDA 传感器的传感性能,分析偏振随机 噪声的噪声特性及其影响,同时验证 BPS 对偏振随 机噪声有很好的抑制作用。仿真的参数设置如下: 1)布里渊本征谱的峰值增益系数为1 m<sup>-1</sup>·W<sup>-1</sup>,扫 频范围为 10.60~10.78 GHz,频率间隔为4 MHz, BFS 为 10.684 GHz,半峰全宽为 30 MHz;2)格雷编 码光脉冲序列采用 4 组单极性互补格雷序列,每组 码编码位数为 256 位,每个码是码长为 200 ns、占空 比为 15% 的矩形 归零码;3)光纤衰减系数为 0.2 dB/km,光纤传感长度为 40 km;4)白噪声作用 下传感光纤始端的信噪比为 30 dB;5)信号的平均 次数为 256 次。

图 2(a)和(c)直观地反映了白噪声和偏振随机 噪声引起的时域曲线波动的区别,白噪声作用下时 域曲线沿光纤均匀波动,而偏振随机噪声作用下时 域曲线在光纤前端波动较大。

通过对 10 次仿真的时域曲线求取标准偏差 (STD)值就可得到时域曲线的不确定度[图 2(b)、 图 2(d) , 不确定度能够反映在传感光纤不同位置 多次测量的传感稳定性,并且 STD 值越大(噪声越 大)则传感稳定性越差。不同噪声引起的布里渊时 域曲线稳定性沿光纤的变化趋势不同:从图 2(b)可 以看出白噪声作用下,时域曲线的稳定性沿光纤是 一致的;而图 2(d)中偏振随机噪声作用下的时域曲 线的 STD 从 0~5 km 逐渐增大,5 km 左右达到最 大值,随后在 5~40 km 内逐渐减小,这与布里渊累 计增益沿光纤的变化趋势一致。同时在光纤前端 (0~20 km),偏振随机噪声引起的布里渊增益时域 曲线 STD 值(0.06%~0.1%)比白噪声引起的布里 渊时域曲线 STD 值(0.005%~0.03%)大得多,说 明在光纤前端偏振随机噪声是导致布里渊增益时域 曲线稳定性下降的主要因素。而对于布里渊相移时 域曲线,由偏振随机噪声引起的 STD 最大值仅为 0.03%,说明布里渊相移谱对偏振随机噪声有很好 的抑制作用。

布里渊时域曲线的仿真结果反映了不同噪声的 分布及区别,而噪声对 BOTDA 传感系统性能的影 响可通过 BFS 来体现。图 3(a) 白噪声作用下的 BFS 估计曲线随传感距离增加, BFS 的波动逐渐增 大,这是由传感信号的 SNR 随传感距离的增加而减 小引起的。图 3(c)偏振随机噪声作用下的 BFS 估 计曲线沿光纤近似均匀波动,这是因为累计布里渊 增益(相移)与偏振随机噪声的 SNR 为  $1/\Delta_{\epsilon}$ ,并且 偏振随机波动( $\Delta_{\epsilon}$ )在光纤不同位置是一样的。但 是在布里渊相移上的偏振随机噪声只有布里渊增益 上偏振随机噪声的 1/3, 所以图 3(c) 中布里渊相移 的 BFS 估计曲线的波动明显小于布里渊增益的 BFS 估计曲线。通过对 10 次 BFS 估计曲线求 STD 可以得到 BFS 估计误差(图 3(b)(d)), BFS 估计曲 线波动越大 BFS 估计误差越大。对比图 3(b)和(d) 中由布里渊增益谱获得的 BFS 估计误差可知,在光 纤前端偏振随机噪声引起的 BFS 估计误差更大,而 在光纤后端由白噪声引起的 BFS 估计误差大于由 偏振随机噪声引起的 BFS 估计误差。对比图 3(b) 和(d)中由布里渊相移谱得到的BFS估计误差可知,







图 3 不同噪声作用下格雷编码 BOTDA 的 BFS 仿真结果。(a)(b) 高斯白噪声作用下的 BFS 估计曲线和 BFS 估计误差; (c)(d) 偏振随机噪声作用下的 BFS 估计曲线和 BFS 估计误差

Fig. 3 Simulation results of BFS in Golay-coded BOTDA under different noises. (a)(b) BFS estimation curve and BFS estimation error with white noise; (c)(d) BFS estimation curve and BFS estimation error with polarized random noise

白噪声引起的 BFS 估计误差始终大于偏振随机噪声引起的 BFS 估计误差。

综上分析,偏振随机噪声是引起格雷编码 BOTDA的布里渊增益时域曲线在光纤前端测量不 稳定性的主要因素,并且会明显降低传感光纤前端 BFS估计的准确度,但通过测量布里渊相移谱,可 以抑制偏振随机噪声,提高 BFS估计的准确度。

### 3 实验与讨论

实验装置如图 4 所示。可调谐激光源(TLS)的 连续光被分成两部分。在上支路光波首先被大功率 掺铒光纤放大器(EDFA1)放大,然后由脉冲发生器 (pulse generator)驱动的声光调制器(AOM)产生 256 位的格雷编码泵浦光序列。每个码的脉冲宽度 和占空比分别为 30 ns(3 m 的空间分辨率)和15%, 这是为了抑制编码中的非线性效应<sup>[11]</sup>。格雷编码

泵浦光序列随后被扰偏器(PS)随机扰偏,再通过环 形器进入传感光纤与探测光发生 SBS 作用,这是为 了抑制偏振相关衰落和强偏振牵引效应。在下支路 电光调制器(EOM)产生载波抑制的双边带探测光, 扫频范围为 10.58~10.78 GHz, 扫频间隔为4 MHz。 探测光在室温下(28 ℃)注入 40 km 的光纤(BFS 约 为10.684 GHz)。探测光与格雷编码泵浦光序列发 生 SBS 作用后,送入密集波分复用器(DWDM)进行 波长选择。本研究的电信号处理过程采用了稳相的 相干探测结构,能抑制由色散和相位波动带来的不 利影响,提高相位信息的测量准确性[12-13]。本振光 (LO)和带传感信息的探测光(RF)信号通过正交 (IQ)解调后 I 路信号和 Q 路信号由示波器以 100 MSa/s采样率(1 m 的采样间隔)进行采样。采 集的数据进行 IQ 解调、解码等信号处理过程,得到 BGS和BPS,并通过拟合后计算出BFS。





#### Fig. 4 Experimental device diagram of Golay-coded BOTDA with coherent detection

图 5(a)是布里渊相移与增益的时域测量曲线的轨迹不确定度。在只受白噪声影响的光纤两端, 布里渊增益与相移的时域曲线 STD 值几乎一致,说 明布里渊相移与增益上的白噪声的大小是相近的。 同时因为布里渊增益谱受到很强的偏振随机噪声, 其时域曲线在光纤前端的测量稳定性很差(STD 波 动大)。而布里渊相移谱对偏振随机噪声有很好的 抑制作用,其时域曲线主要受白噪声的影响,所以在 有 SBS 作用的光纤位置(0~40 km)与两端无 SBS 作用的光纤位置上的 STD 值几乎一样。

图 5(b)对比了传感光纤 5.12 km 处(偏振随机 噪声最大处)测量的 BGS 和 BPS 与拟合后的 BGS 和 BPS。BGS 在半峰全宽( $\Delta\nu_B$ )范围内的测量曲线 和拟合理论曲线之间差距较大,而 BPS 的测量曲线 与拟合理论曲线几乎重合,这是由在 BGS 与 BPS 上 偏振随机噪声的大小不同引起的,最终使得拟合得到 的 BFS 估计值产生差异,从而影响传感的准确度。

图 5(c)反映了布里渊增益谱与相移谱拟合后 得到的 BFS 沿光纤分布情况。从仿真结果图 3(a) 和图 3(c)可知,在布里渊相移谱上由偏振随机噪声 引起的 BFS 的波动要小于布里渊增益谱的 BFS 波 动,而由白噪声引起的 BFS 波动对于布里渊相移谱 和增益谱相同。实验中,BFS 的波动是由白噪声与 偏振随机噪声共同决定的,故如果白噪声占主导地 位,则布里渊相移谱和增益谱的 BFS 估计曲线的波 动范围应该相似,然而若测量得到的布里渊增益谱 的 BFS 估计曲线的波动明显大于布里渊相移的估 计曲线,则说明偏振随机噪声是占主导地位。进一 步分析图 5(c)右部分 BFS 对温度热点的响应,热点 位于 39.98~39.995 km(15 m 的长度),热点温度为 40 ℃。室温下(28 ℃)光纤的 BFS 在 10.68 GHz 附近, 热点上的 BFS 在10.692 GHz附近,频差为 12 MHz, 根据温度变化与 BFS 的对应关系 1 MHz/℃,得到 温度变化 12 ℃,与实际温度变化相符合。同时布里 渊相移与增益对热点的响应情况相似,说明布里渊 相移和增益对温度的传感精度是一致的。然而他们 在传感准确度上却有明显的差异,传感准确度可以 通过多次测量 BFS 的 STD 值反映。



图 5 实验结果图。(a) 泵浦光与探测光频率差在 BFS 附近时,时域曲线轨迹不确定度;(b) 在光纤 5 km 处, 测量和拟合的 BGS 与 BPS;(c) 拟合后的 BFS 估计曲线及热点;(d) BFS 估计误差

Fig. 5 Experimental results. (a) Trace uncertainty of time domain curve when the frequency offset between pump and probe light is near BFS; (b) measured and fitted BGS and BPS at 5 km of optical fiber; (c) BFS estimation curve and hot spot after fitting; (d) BFS estimation error

图 5(d)是基于 10次 BFS 测量曲线求得 STD 的结果,反映了 BFS 的估计误差。由布里渊增益谱 得到的 BFS 估计误差值在 0~5.1 km 范围内迅速 增大到 0.6 MHz,在 5~40 km 范围内逐渐增大到 1 MHz。这是因为布里渊增益在传感光纤的近端受 到强偏振随机噪声的影响,导致拟合误差较大,最终 使 BFS 估计误差变大。然而布里渊相移谱主要受 到白噪声的影响,所以其 BFS 估计的误差曲线体现 了白噪声的特性,由于在光纤前端传感信号的 SNR 很高 导 致 BFS 估 计误差小(在光纤前端为 0.2 MHz),随传感距离的增加 SNR 下降,使 BFS 估计误差增大,这与图 3(d)仿真白噪声作用下的 BFS 估计误差的结果趋势相一致,由此说明在布里 渊相移谱上白噪声是主导噪声。比较布里渊增益谱 与相移谱的 BFS 估计误差的整体趋势,在光纤前端 两者有明显的差距,随传感距离增加两者的 BFS 误差值逐渐接近,这与图 5(a)中反映的时域曲线不确定性轨迹相一致。布里渊相移与增益的 BFS 估计误差值是由噪声引起的。与布里渊相位谱主要受白噪声的影响不同,布里渊增益谱同时受偏振随机噪声与白噪声的双重影响,因此其具有更大的 BFS 估计误差,这进一步证实,偏振随机噪声与白噪声之间的大小差异。

## 4 结 论

基于格雷编码 BOTDA 传感器中的偏振随机 噪声进行研究,理论与仿真分析了其产生机理及影 响。仿真结果表明,作用在布里渊本征谱上的偏振 随机波动引起了偏振随机噪声,且在相同平均次数 下,格雷编码 BOTDA 传感器中经过解码后的白噪 声远小于单脉冲 BOTDA 传感器中的白噪声,而在 格雷编码 BOTDA 传感器中解码后得到的偏振随 机噪声和单脉冲 BOTDA 传感器中的偏振随机噪 声大小相近,导致在格雷编码 BOTDA 传感器中偏 振随机噪声在传感光纤前端成为主导噪声。同时偏 振随机噪声会引起布里渊增益谱的畸变,增大了 BFS 的估计误差,降低了传感准确度,而布里渊相 位谱可以抑制偏振随机噪声。随后通过实验验证了 偏振随机噪声对布里渊增益谱有较强的影响,而对 布里渊相移谱的影响很小。实验结果表明,使用布 里渊相移谱在保持相同传感精度的同时将传感准确 度提高3倍,因此布里渊相移谱更适应用于格雷编 码布里渊光时域分析传感器。

#### 参考文献

- Horiguchi T, Shimizu K, Kurashima T, et al. Development of a distributed sensing technique using Brillouin scattering[J]. Journal of Lightwave Technology, 1995, 13(7): 1296-1302.
- [2] Alem M, Soto M A, Thévenaz L. Analytical model and experimental verification of the critical power for modulation instability in optical fibers[J]. Optics Express, 2015, 23(23): 29514-29532.
- [3] Dominguez-Lopez A, Angulo-Vinuesa X, Lopez-Gil A, et al. Non-local effects in dual-probe-sideband Brillouin optical time domain analysis[J]. Optics Express, 2015, 23(8): 10341-10352.
- [4] Motil A, Bergman A, Tur M. [INVITED]. State of the art of Brillouin fiber-optic distributed sensing[J]. Optics & Laser Technology, 2016, 78: 81-103.
- [5] Rao Y J. Recent progress in ultra-long distributed fiber-optic sensing [J]. Acta Physica Sinica, 2017,

66(7): 074207.

饶云江. 长距离分布式光纤传感技术研究进展[J]. 物理学报, 2017, 66(7): 074207.

- [6] Yang Z S, Li Z L, Zaslawski S, et al. Design rules for optimizing unipolar coded Brillouin optical timedomain analyzers[J]. Optics Express, 2018, 26(13): 16505-16523.
- Zhou Y, Yan L S, Li Z L, et al. Polarization division multiplexing pulse coding for eliminating the effect of polarization pulling in Golay-coded BOTDA fiber sensor
   [J]. Optics Express, 2018, 26(15): 19686-19693.
- [8] Zadok A, Zilka E, Eyal A, et al. Vector analysis of stimulated Brillouin scattering amplification in standard single-mode fibers[J]. Optics Express, 2008, 16(26): 21692-21707.
- [9] Zhu Z M, Gauthier D J, Okawachi Y, et al. Numerical study of all-optical slow-light delays via stimulated Brillouin scattering in an optical fiber[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2005, 22(11): 2378-2384.
- [10] Soto M A, Bolognini G, di Pasquale F, et al. Longrange Brillouin optical time-domain analysis sensor employing pulse coding techniques [J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21(9): 094024-094029.
- Soto M A, Bolognini G, di Pasquale F. Analysis of pulse modulation format in coded BOTDA sensors
   [J]. Optics Express, 2010, 18(14): 14878-14892.
- [12] Li Z L, Yan L S, Pan W, et al. Coherent BOTDA with Phase Modulated Probe Light and IQ Demodulation[J]. Optics Express, 2015, 23(12): 16407-16415.
- [13] Li Z L, Yan L S, Shao L Y, et al. Precise Brillouin gain and phase spectra measurements in coherent BOTDA sensor with phase fluctuation cancellation [J]. Optics Express, 2016, 24(5): 4824-4834.