

doi: 10.3788/gzxb20154410.1006004

基于高斯白噪声调制的布里渊光相干 反射温度传感器

柴晶^{1,2}, 张明江^{1,2}, 刘毅^{1,2}, 张永宁^{1,2}, 刘慧^{1,2}, 李云亭^{1,2}

(1 太原理工大学 新型传感器与智能控制教育部与山西省重点实验室, 太原 030024)

(2 太原理工大学 物理与光电工程学院 光电工程研究所, 太原 030024)

摘 要:根据光纤布里渊频移量随温度变化的特性,提出一种基于布里渊光相干反射技术的分布式光纤温度传感器.利用噪声信号的无周期特性,采用高斯白噪声信号对系统的光源进行电流调制,克服了现有布里渊光相干反射技术无法同时兼顾传感距离和空间分辨率的问题.实验研究表明,该传感器在 253m 的普通单模光纤上实现了分布式温度测量,获得了 54.6cm 的空间分辨率和 $\pm 1.07^\circ\text{C}$ 的温度测量准确度.

关键词:光纤传感器;布里渊散射;高斯噪声;调制;温度传感

中图分类号:TP212.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)10-1006004-5

Distributed Temperature Sensor with Brillouin Optical Correlation Reflectometry Based on White Gaussian Noise Modulation

CHAI Jing^{1,2}, ZHANG Ming-jiang^{1,2}, LIU Yi^{1,2}, ZHANG Yong-ning^{1,2}, LIU Hui^{1,2}, LI Yun-ting^{1,2}

(1 Key Lab of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education and Shanxi Province, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

(2 College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: A scheme to measure the temperature distribution based on Brillouin optical correlation reflectometry was proposed according to the dependence of the Brillouin frequency shift on the temperature in the optical fiber. The white Gaussian noise signal was utilized to modulate the laser because of the non-periodicity of the noise, which could resolve the problem of the trade-off between the measurement range and the spatial resolution existed in conventional Brillouin optical correlation reflectometry systems. The experiment of temperature measurement was demonstrated in 253 m standard single-mode optical fiber, with spatial resolution of 54.6 cm and temperature accuracy of $\pm 1.07^\circ\text{C}$.

Key words: Optical sensors; Brillouin scattering; Gaussian noise; Modulation; Temperature sensor

OCIS Codes: 060.2370; 060.4080; 290.5830; 030.1640

0 引言

基于布里渊散射的分布式光纤传感技术,可以对光纤的温度和应变信息进行连续的分布式测量,在民用工程和结构健康监测等方面有重要的应用价值,受到越来越多的关注^[1].目前,基于布里渊散射的分布式

光纤传感技术主要有布里渊光时域反射(Brillouin Optical Time Domain Reflectometry, BOTDR)技术^[2-4]、布里渊光时域分析(Brillouin Optical Time Domain Analysis, BOTDA)技术^[5-7]、布里渊光相关域反射(Brillouin Optical Correlation Domain Reflectometry, BOCDR)技术^[8-9]与布里渊光相关域分

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61227016, 61377089)、山西省高等学校优秀青年学术带头人支持计划(No. 20121fjyt08)和燃气管网数字化系统开发与示范项目(No. MQ2014-09)资助

第一作者:柴晶(1989—),女,硕士研究生,主要研究方向为分布式光纤传感技术. Email: chajing1989@yeah.net

导师(通讯作者):张明江(1976—),男,副教授,博士,主要研究方向为光纤传感技术、半导体激光器的非线性动力学特性及其应用等. Email: zhangmingjiang@tyut.edu.cn

收稿日期:2015-04-22; **录用日期:**2015-06-29

<http://www.photon.ac.cn>

析技术(Brillain Optical Correlation Domain analysis, BOCDA)技术^[10-11].

基于 BOTDR 和 BOTDA 的光纤传感技术测量距离较远,但采用脉冲光作为泵浦光,受到光纤中声学声子寿命的限制,空间分辨率难以突破 1m^[12]. 尽管国内外研究学者提出基于双脉冲的 BOTDR 技术^[3]、基于等效脉冲光拟合法的 BOTDR 技术^[4]、基于差分脉冲对的 BOTDA 传感技术^[6]以及基于暗脉冲的 BOTDA 传感系统^[7]来解决时域系统空间分辨率受限的问题,但这些系统结构复杂,操作不便. 而基于 BOCDR 和 BOCDA 的光纤传感技术采用连续光作为泵浦光,其空间分辨率可达到 cm 量级,但其传感距离受限. 采用由伪随机相位编码的 BOCDA 传感系统^[13]并利用放大的自发辐射源作为 BOCDA 系统光源^[14]可以解决 BOCDA 技术传感距离受限的问题,但 BOCDA 技术需要双端入射,当光纤中存在断点时,系统无法实现测量^[15].

本文提出一种基于高斯白噪声调制的布里渊光相干反射技术,利用噪声信号的无周期特性,使得待测光纤中只产生一个相关峰,解决了现有 BOCDR 技术无法同时兼顾传感距离和空间分辨率的问题,在实现高精度测量的前提下可提高传感测量距离.

1 原理和系统

1.1 传感原理

基于布里渊散射的分布式光纤传感技术利用光纤中的布里渊频移量受光纤自身参量影响的特性,通过测量光纤中的布里渊频移量来获知光纤中的温度和应变信息^[16],从而实现对光纤温度和应变的分布式测量. 光纤中的布里渊频移和光纤温度与应变的关系为

$$\nu_B - \nu_0 = C_T \Delta T + C_\epsilon \Delta \epsilon \quad (1)$$

式中, $(\nu_B - \nu_0)$ 为光纤布里渊频移的变化量, ΔT 、 $\Delta \epsilon$ 分别为温度与应变的变化量, C_T 、 C_ϵ 分别为布里渊频移的温度与应变系数. 通过实验测量布里渊频移的温度系数与应变系数即可解调出光纤的温度与应变信息.

基于高斯白噪声调制的布里渊光相干反射技术采用高斯白噪声信号对激光光源进行频率调制,频率调制之后的光进入待测光纤后会产生相关峰,由于高斯白噪声信号具有无周期性,在待测光纤中只会产生一个相关峰,当该相关峰对应的泵浦光光程与参考光光程相差为零时,泵浦光与参考光的相干拍频信号幅值最大,该拍频信号携带待测光纤相关峰所在位置处的温度与应变信息,通过检测此拍频信号即可获得该相关峰位置处的布里渊频移量,进而实现对光纤温度与应变的检测. 在参考光一路加入可变光延迟线,通过调节光延迟线改变参考光一路的光程,使此单一相关峰在待测光纤中通过扫描实现定位,从而实现分布式

测量.

1.2 传感系统

图 1(a)为基于高斯白噪声调制的布里渊光相干反射技术的系统装置图. 实验中采用普通的单模光纤作为传感光纤,光纤长度为 253 m,中间的 9 m 光纤放置于恒温箱中,其余部分被放置在实验台上,实验室的温度约为 23.6 °C,传感光纤结构图如图 1(b).

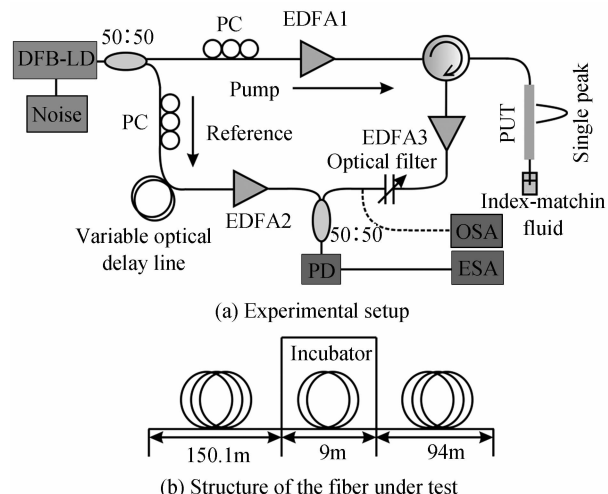


图 1 基于高斯白噪声调制的 BOCDR 系统的实验装置以及传感光纤结构

Fig. 1 Experimental setup and structure of the fiber under test in the BOCDR system based on white Gaussian noise modulation

采用中心波长为 1 550 nm 的分布式反馈半导体(Distributed Feedback, DFB)激光器作为激光光源, 20 MHz 的任意波形发生器作为噪声信号源. 噪声信号源与 DFB 激光器通过阻抗为 50Ω 的同轴电缆连接. 被调制之后的激光信号经过 50 : 50 的光纤耦合器分为两路,一路作为泵浦光,另一路作为参考光. 泵浦光经过偏振控制器后被高功率的掺铒光纤放大器放大,放大之后的泵浦光经过光环行器进入待测光纤(Fiber Under Test, FUT),为了抑制光纤末端的菲涅尔反射,在待测光纤末端加入折射率匹配液. 泵浦光在待测光纤中发生布里渊散射效应,产生的后向斯托克斯光经光环行器输出. 微弱的斯托克斯光经过掺铒光纤放大器放大后由可调谐滤波器滤除其中混杂的瑞利散射光及放大器的自发辐射噪声,之后输入到另一个 50 : 50 的光纤耦合器. 参考光经过偏振控制器后,由一个高精度、长距离调谐的可变光延迟线调节其光程. 实验中,可变光延迟线由一个延迟范围为 20 km、准确度为 5 m 的可编程光延迟发生仪和一个延迟范围为 16 cm、准确度为 0.03 mm 的微型电动可调光延迟线串联使用,以便满足实验所需的长距离、高空间分辨率测量要求. 为了使参考光能与滤波后的斯托克斯光产生强的相干拍频信号,需要使用掺铒光纤放大器放大参考光,放大后的参考光同样输入到 50 : 50 的光纤耦合器. 参

考光与斯托克斯光在 50:50 的光纤耦合器中发生相干拍频,产生的拍频信号由光电探测器转化为电信号,同时由带宽为 26.5 GHz 的频谱仪接收此信号,并进行平均处理来抑制噪声,进而得到布里渊增益谱(Brillouin Gain Spectrum, BGS),测量布里渊增益谱的中心峰值,即可得到布里渊频移量(Brillouin Frequency Shift, BFS). 调节参考光一路的可变光延迟线,使相关峰在待测光纤中进行扫描,获得不同位置处的布里渊增益谱及相应的布里渊频移,进而实现光纤温度的分布式测量.

1.3 系统性能分析

基于高斯白噪声调制的 BOC DR 技术利用泵浦光在待测光纤中发生布里渊散射效应产生的斯托克斯光与参考光进行相干拍频的方法来实现布里渊频移量的测量,因此,系统的空间分辨率完全取决于斯托克斯光与参考光的相干长度,即经高斯白噪声信号调制之后的光源的相干长度,即反比于经高斯白噪声调制之后的光源的线宽. 系统的空间分辨率为

$$\Delta z = L_c = \frac{c}{n\pi\Delta\nu} \quad (2)$$

式中 L_c 为光源的相干长度, n 为光纤的折射率, c 为真空中的光速, $\Delta\nu$ 为经高斯白噪声调制之后的光源线宽. 通过改变光源的线宽,即可实现光源相干长度的可调谐,从而实现高空间分辨率测量.

光源的调制深度和所使用的噪声源的带宽都会影响光源的线宽,光源的调制深度越大,带宽越宽,激光光源的线宽越大,相干长度越短. 但由于实验条件的限制,无法获得不同带宽的具有良好无周期特性的噪声信号,实验中仅研究了同一噪声带宽下不同调制深度对光源线宽的影响,采用的高斯白噪声源带宽为 20 MHz. 通过延迟自外差法测量经调制后的光源线宽,并根据式(2)计算出不同调制深度下的光源相干长度. 图 2 为光源的调制强度从 -22 dBm 变化到 -2 dBm 时的光源线宽及相干长度的变化曲线.

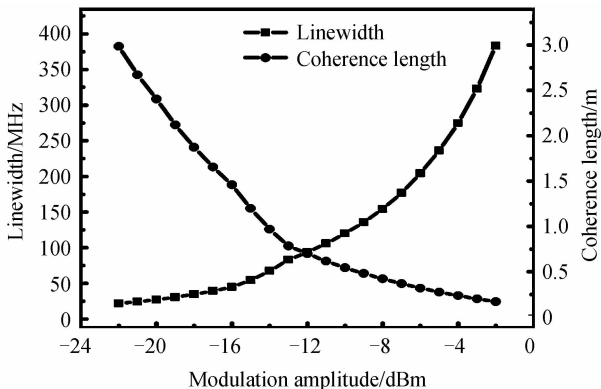


图 2 调制强度改变时,光源线宽与相干长度的变化
Fig. 2 Linewidth and coherence length of the laser diode
实验中采用的高斯白噪声信号的强度为

-10 dBm,即光源的调制强度为 -10 dBm. 图 3(a)和 (b)分别为 20 MHz 的任意波形发生器出射的高斯白噪声信号的时序和频谱. 由时序可知,该高斯白噪声信号具有很好的无周期特性,从频谱中可以看出高斯白噪声信号的带宽为 20 MHz,与实验中使用的高斯白噪声信号相一致.

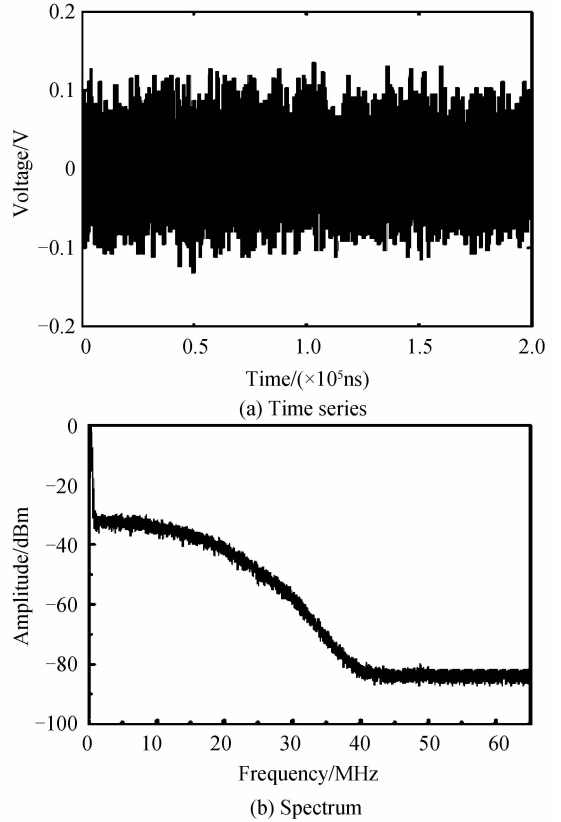


图 3 高斯白噪声信号的时序和频谱
Fig. 3 Time series and spectrum of utilized white Gaussian noise signal

2 实验结果

图 4 为实验过程中所获得的信号光谱图,从左到右对应的信号分别为反斯托克斯光、瑞利散射光和斯托克斯光. 图中(a)为入射到 FUT 的光功率为 26 dBm 时的后向散射光光谱,可以看到,此光谱成份中包含反

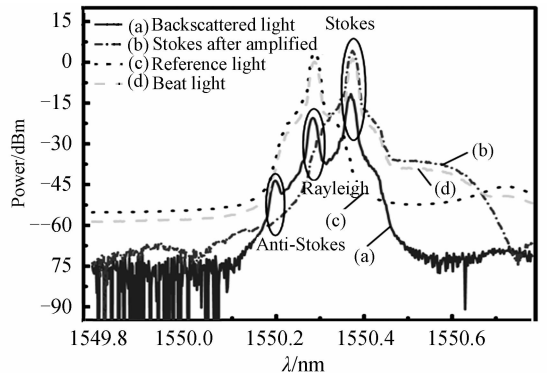


图 4 实验过程中不同信号的光谱图
Fig. 4 Optical spectra of different signals

斯托克斯光、瑞利散射光以及斯托克斯光。(b)为经放大和滤波之后的后向散射光光谱,此时光谱成份中只有斯托克斯光,而瑞利散射光和反斯托克斯光都被抑制。(c)为被放大之后的参考光光谱,中心波长与瑞利散射光相等,且强度与斯托克斯光的强度相当,以获得较高信噪比的相干拍频信号。(d)为斯托克斯光与参考光的拍频信号的光谱,图中两峰值处的强度相当,频率相差为布里渊频移。

调整参考光一路的可变光延迟线,使得参考光的光程与放置于恒温箱的 9m 光纤某一位置处产生的散射光光程相等,即将待测点定位于恒温箱内的某一位置处。改变恒温箱内的温度,从 20℃ 到 45℃,以 5℃ 的间隔改变进行测温实验。图 5(a)为测得的不同温度下的布里渊增益谱,可以看出,随着温度的升高,布里渊增益谱朝着更高频率的方向偏移。从布里渊增益谱中获得不同温度下的布里渊频移,并进行拟合,所得结果如图 5(b)。由图可知,随温度的升高布里渊频移量线性增大,且拟合曲线的斜率为 1.12 MHz/℃,即实验测得的温度系数为 1.12 MHz/℃,同时,拟合曲线的拟合系数为 0.997,接近于 1,表明布里渊频移量与温度的变化有极好的线性关系,实验结果与理论分析相一致。

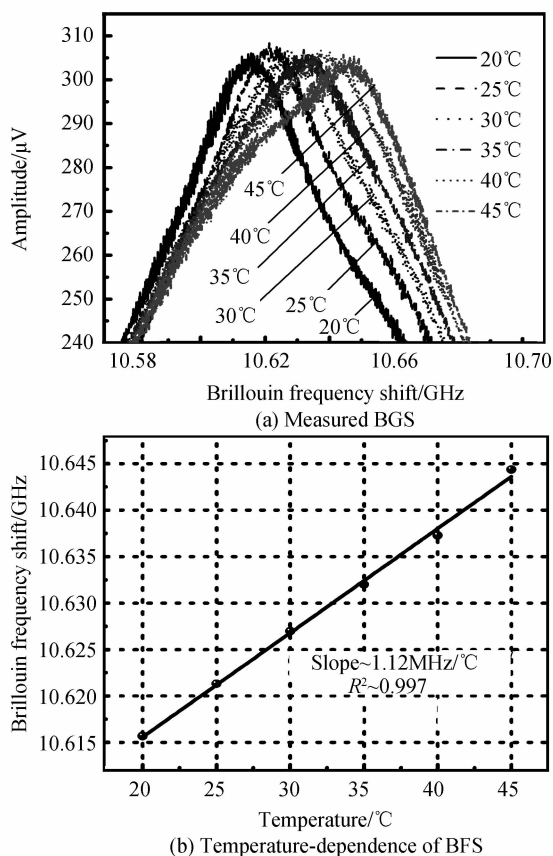


图 5 不同温度下的布里渊增益谱以及布里渊频移量与温度的关系曲线

Fig. 5 Measured BGS at different temperatures and temperature-dependence of BFS

之后,保持恒温箱的温度在 50℃ 不变,连续调节参考一路的可变光延迟线,使得相关峰在待测光纤不同位置处进行扫描,从而获得整根光纤上不同位置处的布里渊增益谱,实现温度的分布式测量。图 6(a)为测得的待测光纤不同位置处布里渊增益谱分布的三维图,对应的二维图如图 6(b)。图中恒温箱内 9 m 光纤的频移量与恒温箱外两侧光纤的频移量具有明显差别,恒温箱内外的频移量大约相差 27 MHz,这与恒温箱内外的光纤温度差(26.4℃)基本对应,通过计算可得该系统的测温准确度为 $\pm 1.07^\circ\text{C}$,与其他的分布式光纤传感器如 BOTDR^[2] 相比,测温准确度明显提高。

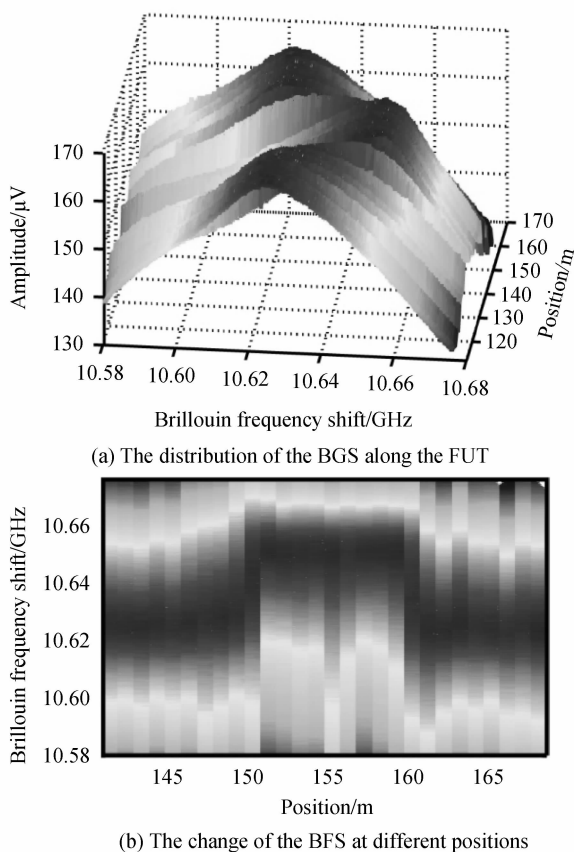


图 6 待测光纤不同位置处的布里渊增益谱分布和不同位置处的布里渊频移变化曲线

Fig. 6 The distribution of the BGS along the FUT and the changes of the BFS at different positions

定义该系统的空间分辨率为布里渊频移量从峰值的 90% 下降到 10% 对应的光纤长度^[17]。对图 6 中恒温箱内及其附近位置处光纤的布里渊增益谱数据进行分析,得到如图 7 所示的不同位置处的布里渊频移量,插图为实验中所获得的系统空间分辨率,对应长度为 54.6 cm,测量的空间分辨率与计算所得的 54.5 cm 的相干长度很接近。因此,相比于采用传统 BOCDR 技术在 100 m 的光纤长度上获得的 50 cm 的分辨率^[9],该方案在温度传感时所能达到的测量空间分辨率相对较高。

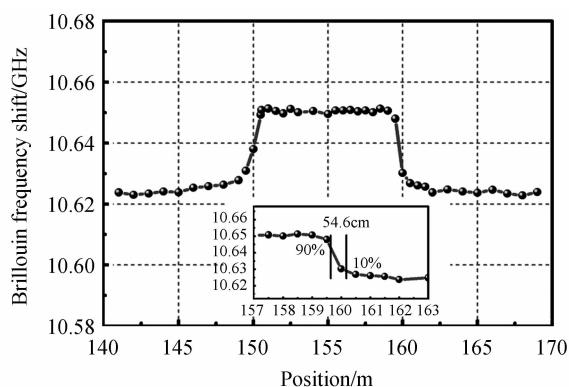


图7 调制强度为 -10 Bm 时获得的空间分辨率(0.546 m)
Fig.7 Evaluation of the spatial resolution based on white Gaussian noise modulation (0.546 m)

3 结论

本文提出了采用高斯白噪声信号对光源进行频率调制的 BOCDR 技术,在理论上解决了周期性的相关峰对测量距离的限制,实现长距离、高准确度的分布式光纤传感测量.基于高斯白噪声调制的 BOCDR 技术实现了 253 m 光纤长度上的分布式温度测量,获得了 $\pm 1.07^\circ\text{C}$ 的测温准确度和 54.6 cm 的空间分辨率.如果采用高带宽的噪声信号和更大的调制深度,将会获得更高的空间分辨率.相比于其他的光纤传感系统,该方案装置简单、成本较低、测量时间较短.

参考文献

- [1] BAO X, CHEN L. Recent progress in Brillouin scattering based fiber sensors [J]. *Sensors*, 2011, **11**(4): 4152-4187.
- [2] KURASHIMA T, HORIGUCHI T, IZUMITA H, *et al.* Brillouin optical-fiber time domain reflectometry [J]. *IEICE Transactions Communication*, 1993, **E76-B**(4): 382-390.
- [3] KOYAMADA Y, SAKAIRI Y, TAKEUCHI N, *et al.* Novel technique to improve spatial resolution in Brillouin optical time-domain reflectometry [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, **19**(23): 1910-1912.
- [4] WANG Feng, ZHANG Xu-ping, LU Yuan-gang, *et al.* Improvement of spatial resolution for strain measurement with Brillouin optical time-domain reflectometry by fitting method based on equivalent optical pulse [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 43-49.
王峰, 张旭苹, 路元刚, 等. 提高布里渊光时域反射仪测量空间分辨力的等效脉冲光拟合法 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 43-49.
- [5] HORIGUCHI T, TATEDA M. BOTDA-nondestructive measurement of single-mode optical fiber attenuation

- characteristics using Brillouin interaction: theory [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1989, **7**(8): 1170-1176.
- [6] LI W, BAO X, LI Y, *et al.* Differential pulse-width pair BOTDA for high spatial resolution sensing [J]. *Optics Express*, 2008, **16**(26): 21616-21625.
- [7] LIU Lei, ZHANG Zhi-guo, ZHANG Min, *et al.* Dark-pulse Brillouin optical time domain analyzer for km-range detection with only one fiber section [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(7): 998-1002.
刘磊, 张治国, 张民, 等. 一种基于暗脉冲光布里渊光时域分析仪的延长传感距离的方法 [J]. *光子学报*, 2011, **40**(7): 998-1002.
- [8] MIZUNO Y, HE Z, HOTATE K. One-end-access high-speed distributed strain measurement with 13-mm spatial resolution based on Brillouin optical correlation-domain reflectometry [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, **21**(7): 474-476.
- [9] MIZUNO Y, ZOU W, HE Z, *et al.* Proposal of Brillouin optical correlation-domain reflectometry [J]. *Optics Express*, 2008, **16**(16): 12148-12153.
- [10] HOTATE K, HASEGAWA T. Measurement of Brillouin gain spectrum distribution along an optical fiber using a correlation-based technique-proposal, experiment and simulation [J]. *IEICE Transactions Electronics*, 2000, **E83-C**(3): 405-412.
- [11] SONG K Y, HE Z, HOTATE K. Distributed strain measurement with millimeter-order spatial resolution based on Brillouin optical correlation domain analysis [J]. *Optics Letters*, 2006, **31**(7): 2526-2528.
- [12] FELLAY A, THEVENA L, FACCHINI M, *et al.* Distributed sensing using stimulated Brillouin scattering: towards ultimate resolution [C]. Proceedings of International Conference on Optical Fiber Sensors, 1997, **16**: 324-327.
- [13] ZADOK A, ANTMAN Y, PRIMROV N, *et al.* Random-access distributed fiber sensing [J]. *Laser Photonics Reviews*, 2012, **6**(5): L1-L5.
- [14] COHEN R, LONDON Y, ANTMAN Y, *et al.* Brillouin optical correlation domain analysis with 4 millimeter resolution based on amplified spontaneous emission [J]. *Optics Express*, 2014, **22**(10): 12070-12078.
- [15] MIZUNO Y, HE Z, HOTATE K. Measurement range enlargement in Brillouin optical correlation-domain reflectometry based on temporal gating scheme [J]. *Optics Express*, 2009, **17**(11): 9040-9046.
- [16] BOYD R W. Nonlinear optics [M]. 3rd ed. Burlington: Academic Press, 2008.
- [17] LI Y, BAO X, DONG Y, *et al.* A novel distributed Brillouin sensor based on optical differential parametric amplification [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, **28**(18): 2621-2626.