

布里渊动态光纤光栅及其在分布式传感中的应用

朱靖 涂晓波 姚琼 孟洲

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 基于受激布里渊散射的布里渊动态光纤光栅(BDG)是近几年提出的一项新技术,相比于传统的光纤光栅,具有读写分离、位置可调、光谱可调和快速重构等优势,是光纤通信及传感领域最活跃的研究热点之一,尤其是在分布式传感领域可同时获得高空间分辨率和高测量精度,打破了传统时域系统中声子寿命的限制。从技术发展脉络综述了BDG的研究现状与最新进展,重点介绍了基于BDG的分布式光纤传感技术与应用,并就目前该领域存在的主要问题以及技术发展的主要趋势进行了探讨。

关键词 光纤光学;动态光栅;布里渊散射;分布式传感

中图分类号 TP212 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP49.100007

Brillouin Dynamic Grating and its Applications in Distributed Sensing

Zhu Jing Tu Xiaobo Yao Qiong Meng Zhou

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract Brillouin dynamic grating (BDG) based on stimulated Brillouin scattering is a new technology proposed in recent years. It is one of the hot topics in the area of fiber optic commutations and sensing due to its superiorities in separating writing and reading beams, tunability of location and spectra, and high speed reconfiguration over traditional fiber grating technique. It gains much more interest in distributed optical fiber sensing area since it overcomes the limitation of spatial resolution induced by the phonon's lifetime and it can reach a much higher sensitivity. Current status and advances achieved in BDG are summarized along the technological developing trace. Technologies and applications of BDG based on distributed optical fiber sensing technologies are introduced. Existing problems and future trends are also discussed.

Key words fiber optics; dynamic grating; Brillouin scattering; distributed optical fiber sensing

OCIS codes 060.2370; 190.5890; 050.2770

1 引言

基于布里渊散射的分布式光纤传感技术自20世纪80年代末被提出^[1]后,因其在温度、应变测量上具有精度高、测量范围大以及空间分辨率高等优势,引起了国内外的广泛关注。在传统的布里渊光时域传感系统中,减小抽运光脉冲宽度可提高空间分辨率,而当脉冲宽度小于声子寿命(约10 ns)时,由于布里渊效应的有效作用时间减少,布里渊增益减弱、增益谱展宽,最终将导致系统测量信号劣化、测量精度不高,这就决定了系统空间分辨率极限为1 m^[2]。为解决此问题,暗脉冲^[3]、脉冲预抽运^[4]、双脉冲^[5]、差分脉宽对^[6]、 π 相移脉宽对^[7]以及光学差分参量放大技术^[8]等一系列新的编码技术被相继提出。这些技术在一定程度上改善了空间分辨率,同时也提高了系统的信噪比,空间分辨率可达厘米量级,但测量精度和空间分辨率之间的矛盾并

收稿日期: 2012-06-20; 收到修改稿日期: 2012-07-04; 网络出版日期: 2012-09-10

作者简介: 朱靖(1987—),女,硕士研究生,主要从事布里渊动态光纤光栅基本特性方面的研究。

E-mail: zhujinganny@163.com

导师简介: 孟洲(1968—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事光纤器件、光纤传感以及光纤激光器方面的研究。

E-mail: zhoumeng6806@163.com(通信联系人)

没有得到解决。布里渊频域分析^[9]及相关域分析^[10,11]技术虽然很大程度上提高了空间分辨率,但结构复杂,信号解调难度大,且传感距离十分有限,应用难度大。

2008年韩国中央大学的 Kwang Yong Song^[12]首次提出布里渊动态光栅(BDG)的概念,从结构上解决了系统空间分辨率和测量精度之间的矛盾。该技术巧妙地将抽运光和探测光用不同的偏振方向分离开,使探测光与两束抽运光形成的运动光栅相互作用,可以通过控制抽运光和探测光的脉宽实现高精度测量而不影响空间分辨率^[13,14]。此外,传统的布里渊传感依赖于光纤中的布里渊频移对外界参量(温度、应变)的线性变化,难以利用单根光纤实现双参量同时传感。BDG技术引入了新的探测量-折射率频差(探测光和抽运光的频差),其大小由光纤双折射决定。实验发现^[15]它与外界参量有着线性变化关系,且随温度升高而减小,与布里渊频移温度系数符号相反,同时测量布里渊增益谱和动态光栅反射谱可以有效实现双参量传感。

作为一种新型分布式光纤传感技术,其快速构建、读写分离和光谱可控等优点吸引了数个世界著名研究小组投入其中,以日本东京大学的 Kazuo Hotate 研究组、加拿大渥太华大学 Xiaoyi Bao 研究组和瑞士洛桑联邦理工学院的 Luc Thévenaz 研究组为代表,在分布式传感、光存储、光纤延迟线和光计算等领域取得了一系列成果,显示出了巨大的发展潜力。本文在介绍 BDG 的基本原理的基础上,重点分析其在分布式布里渊传感应用中的研究现状与发展趋势。

2 BDG 的基本原理

BDG 系统的形成可分为两个阶段:BDG 的产生和读取。如图 1 所示,在第一阶段,同一偏振方向(x 方向)的两个抽运光波($\omega_1 > \omega_2$)相向传输,两光波频差为布里渊频移。在相遇位置处,两抽运光发生受激布里渊效应,高频率的光将能量转移给低频率的光,同时通过电致伸缩效应产生声波,调制介质的折射率,形成运动光栅。第二阶段,探测光波沿另一正交偏振方向(y 方向)入射,由于声波模式在高双折射光纤的两个偏振方向上无明显区别,因此对于 y 方向偏振的探测光而言,其作用相当于一个动态的反射光栅。探测光与光栅相互作用,根据其相对运动方向是同向或反向,探测光将产生后向斯托克斯(Stokes)或反 Stokes 光,当满足相位匹配条件时反射光功率达到最大。通过对探测光反射光谱进行检测,即可得到 BDG 的光谱特性。由于保偏光纤的双折射效应,对于 y 方向偏振的探测光,BDG 光谱中心频率与抽运光具有一定的频差,大小与保偏光纤的双折射成正比,称之为双折射频差。

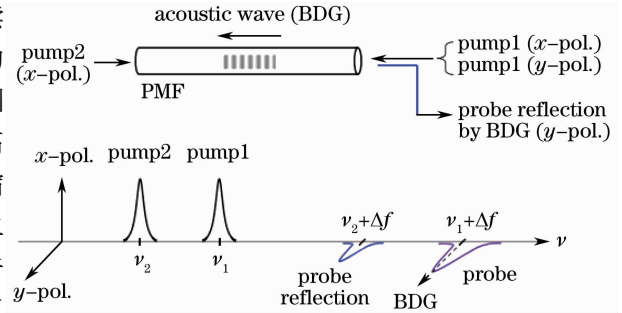


图 1 BDG 理论模型示意图

Fig. 1 Schematic of the BDG theoretic model

由动量守恒推导出双折射频差与保偏光纤折射率差的关系^[16]为

$$\Delta\nu = \frac{\Delta n}{n}\nu, \quad (1)$$

式中 ν 为 pump1 的角频率, Δn 是保偏光纤的折射率差, n 为两轴的平均折射率。对于给定的光纤,当探测光与抽运 1 的频差满足(1)式时,称其满足折射率光栅的相位匹配条件,此时探测光与光栅有效作用,反射回的探测光最强。

Kwang Yong Song 提出的最早的 BDG 系统如图 2(a)所示。采用 1550 nm 半导体激光器作为抽运光源,pump2 经微波光电移频后与 pump1 相差布里渊频移,功率分别为 630 mW 和 10 mW,沿 30 m 保偏光纤的 x 轴相向入射,相互作用形成运动光栅。固定抽运光的频差,从 y 轴注入探测光,调谐探测光的频率,用光谱仪观察反射回的谱。当探测光的频率与 pump1 相差 72.6 GHz 时,在与探测光频率相差布里渊频移处观察到了明显的反射谱,其 3 dB 带宽为 80 MHz,反射率最大可达 4%,关闭 pump1 后,反射谱消失,实验结果如图 2(b)所示。

本质上,BDG 与传统的布拉格光纤光栅类似,都是由于介质中的折射率受到调制而形成的。BDG 不仅具有普通光纤光栅体积小、重量轻、抗干扰及波长编码等优良性质,作为一种光控器件,1) BDG 的应用灵活

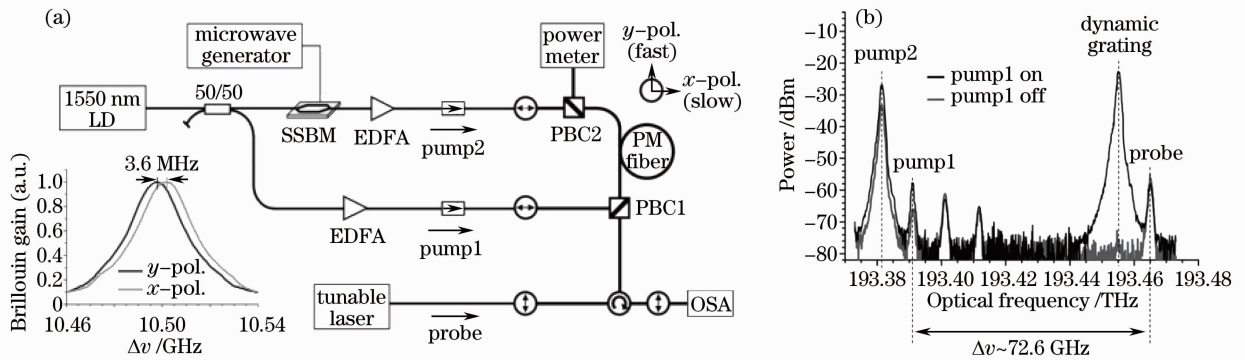


图 2 Kwang Yong Song BDG 实验。(a) BDG 测试实验系统；(b)探测到的反射谱

Fig. 2 BDG measurement by Kwang Yong Song. (a) Schematic of BDG experimental system; (b) reflective spectra monitored in the generation of dynamic grating

方便,可以光控改变光栅长度、强度等参数来调谐光栅光谱特性;2) BDG 具有瞬时性,可以根据需要在光纤中注入抽运光即可形成光栅,抽运光撤掉之后光栅很快消失;3) BDG 形成过程中,抽运光对光纤没有损伤,抽运光撤掉,光纤便恢复原样;4) 从 BDG 的形成来看,它对光纤没有特殊要求,不需要特制光纤,可以在一些不易刻写光栅的光纤场合应用;5) BDG 是通过两束光“刻写”的,克服普通光纤光栅刻写工艺复杂、刻写设备昂贵等不足。

3 BDG 基本特性研究

BDG 的光谱特性由光栅基本参数,如光栅周期、光栅长度和折射率调制深度等决定。由于 BDG 由抽运光的受激布里渊散射效应产生,光栅的光谱特性与抽运方式、抽运光特性和光纤的受激布里渊散射特性等因素密切相关,因而,BDG 的基本特性由抽运光和所用的保偏光纤性质决定。

Kwang Yong Song 测量了 BDG 的反射谱,发现其反射率和 3 dB 带宽与 FBG 十分相似,进而指出布里渊动态光纤光栅反射谱服从与弱 FBG 相似的规律^[21]。

图 3 给出了实验测得的光谱反射率和线宽与光栅长度的关系,图中曲线由弱布拉格光栅光纤(FBG)理论给出。可以看到,随光栅有效长度的增加,反射率增大,光谱线宽变窄。为提高保偏光纤中折射率分布的均匀性,Kwang Yong Song 移除了光纤的涂覆层,在 9 m 均匀保偏光纤中测得 BDG 的谱宽为 10.5 MHz^[21]。2011 年他采用均匀性较好的常规单模光纤进行实验^[22],通过严格控制光纤中抽运光和探测光的偏振态,测到了 2.4 MHz 的布里渊动态光栅光谱(BDGS)线宽。

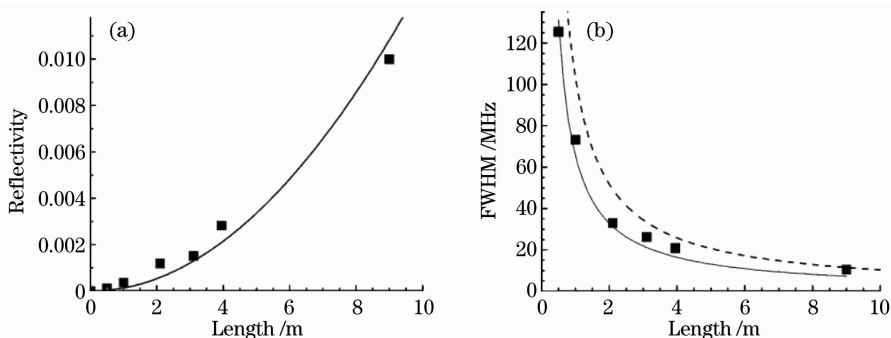


图 3 BDGS 固有光谱测试结果。(a) 光谱反射率与光栅长度的关系；(b) 光谱线宽与光栅长度的关系

Fig. 3 Measurement results of intrinsic BDGS. (a) Relation between spectral reflectivity of BDGS and fiber grating length; (b) relation between spectral width of BDGS and fiber grating length

2010 年 Xiaoyi Bao 小组^[23]也提出 BDG 的固有光谱特性与弱 FBG 一致,与自然布里渊增益线宽无关。为保证空间分辨率,同时避免保偏光纤不均匀对谱的影响,实验采用较短的抽运光(小于 6 ns)进行测试,测得的 BDGS 线宽较宽(几百兆赫兹),光谱线宽同样符合弱 FBG 规律。实验着重研究了 BDG 光谱的线型、光

栅延迟及切趾效应^[23]等特性。

日本东京大学 Kazuo Hotate 研究组^[15]研究了保偏光纤中双折射与温度和应变的关系。如图 4 中虚线所示,双折射频差与温度和应变成线性关系,其温度、应变系数分别为 $C_T^i = -55.8134 \text{ MHz}/^\circ\text{C}$, $C_\epsilon^i = 0.8995 \text{ MHz}/10^{-6}$, 比布里渊频移系数大一个数量级,故 BDG 能够实现更高精度的传感。双折射频差随应变的变化趋势与布里渊频移相同(应变系数均为正),而随温度的变化趋势与布里渊频移相反(温度系数符号相反),同时测量这两个频率即可有效地消除温度和应变的交叉敏感问题,实现双参量同时传感。

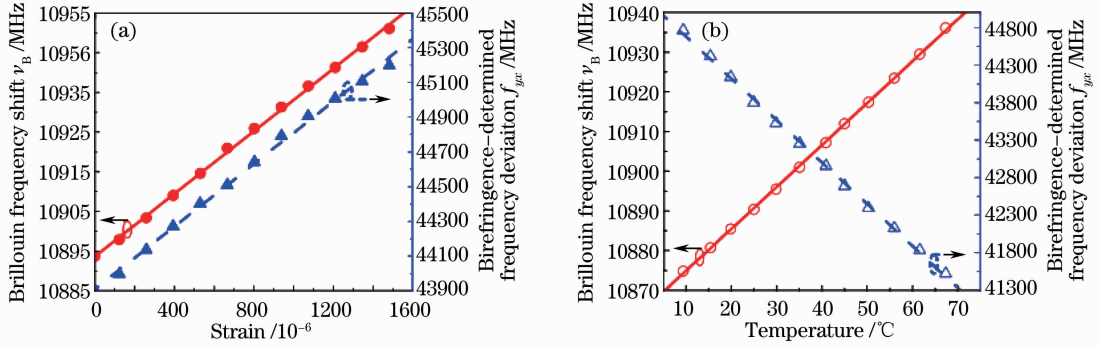


图 4 应变及温度系数测量。(a)应变;(b)温度。圆圈表示布里渊频移系数,三角表示双折射频差系数

Fig. 4 Measurements of strain and temperature coefficients. (a) Strain; (b) temperature circles denote the experimental results for Brillouin frequency shift in left vertical axes, and triangles correspond to the birefringence-determined frequency deviation in right vertical axes, respectively

4 BDG 的传感应用研究

由于保偏光纤的双折射效应,BDG 的探测光和抽运光之间有几十吉赫兹量级的频差,即双折射频差。双折射频差大小与保偏光纤的双折射大小 Δn 成正比,利用保偏光纤双折射对外界环境参数(如温度、应变)的敏感性,可以应用于传感。若结合光纤布里渊频移的传感作用,将为温度和应变双参量同时传感提供一条新的技术途径。BDG 在传感方面的研究主要有 3 个方向:高测量精度、高空间分辨率以及双参量传感。

4.1 高精度传感

加拿大渥太华大学 Xiaoyi Bao 研究小组^[13]采用 3 m 保偏光子晶体光纤作为待测光纤搭建了时域 BDG 系统,测量了沿光纤的温度分布,系统结构如图 5 所示。pump1, pump2 和探测光分别采用 2 ns、2 ns、6 ns 的脉冲,探测光相比 pump1 有 2 ns 的延迟,以保证 BDG 充分建立,从而使探测光获得最强的反射,检测从光纤上不同位置处反射回的探测光与 pump1 的频差即可得到外界温度沿光纤的分布信息。研究发现空间分辨率即 BDG 的长度,由两抽运脉宽决定,测量精度由测得的 BDGS 谱宽决定,是 BDG 本征谱和探测光谱的卷积,由此提出通过采用短抽运脉冲获得高空间分辨率,长探测脉冲获得高测量精度。该理论的提出打破了一直以来空间分辨率和测量精度之间的矛盾,为后续高精度测量提供了新思路。该系统获得了 20 cm 的空间分辨率和 $0.07 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度分辨率。由于脉宽较短,对抽运光和探测光的功率要求较高。

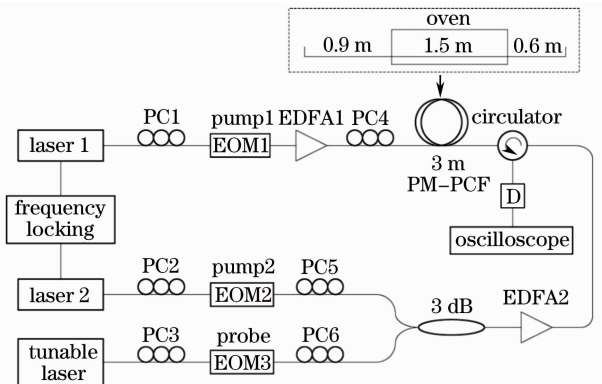


图 5 Xiaoyi Bao 时域 BDG 系统

Fig. 5 Time-domain BDG system proposed by Xiaoyi Bao

Kazuo Hotate 小组^[18]搭建的时域 BDG 系统在 100 m 保偏光纤中测得双折射频差温度系数为 $-50.9 \text{ MHz}/^\circ\text{C}$ 。由于抽运 1 采用 20 ns 的高斯型脉冲,保偏光纤双折射在分辨率范围(2 m)内不均匀,实验测得的 BDG 反射谱形状不规则,且波动较大。

4.2 高空间分辨率传感

2010年 Kwang Yong Song^[14] 提出提高空间分辨率同时保证测量精度的宽谱探测思想。传统布里渊光时域分析(BOTDA)系统为提高空间分辨率使用短脉冲抽运将导致测得的布里渊增益谱展宽,影响测量精度。BDG系统中,当探测光谱宽远大于BDG本征谱时,探测光反射回的光功率反映了BDG的强度,由两抽运间受激布里渊散射(SBS)强度决定。通过扫 pump1, pump2 之间的频差,从反射光强的变化可得出实际的布里渊增益谱。其空间分辨率决定于探测光的脉宽, BGS 谱宽决定于 pump1 的脉宽,利用短脉冲探测光和长脉冲抽运将同时获得高空间分辨率和高测量精度,且由于抽运脉宽较长,对功率要求不高。Kwang Yong Song 在时域 BDG 中采用 30 ns 的 pump1 和 1 ns 的探测光,在 105 m 保偏光纤中获得了 10 cm 的空间分辨率,测得 BGS 谱宽约 50 MHz,接近自然布里渊增益谱线宽,保证了测量精度。其后,Kwang Yong Song 与瑞士联邦理工学院的 Luc Thévenaz 研究组合作,采用增益开关技术产生脉宽仅 116 ps 的探测光,在 20 m 光纤中实现了 1.2 cm 的空间分辨率^[20]。2012年初进一步将探测光脉宽压缩到 55 ps,在 42 cm 保偏色散位移光纤中获得了 5.5 mm 的空间分辨率^[28]。该方案中,为了提高测量精度,要使用长脉冲抽运使测得的 BGS 尽量接近自然布里渊增益谱,但长脉冲抽运将导致产生的 BDG 过长,由于保偏光纤中双折射分布不均匀,将导致反射光功率波动,测得的 BGS 形状不规则,影响测量精度。

4.3 双参量传感

日本东京大学的 Weiwen Zou^[15] 首次利用 BDG 系统进行了双参量传感。如图 6 所示,通过同时测量布里渊增益谱和动态光栅反射谱,根据其温度应变系数的差异即可解算出沿光纤温度应变的变化。实验中应变和温度的精度分别达到 3×10^{-6} 和 $0.08 \text{ }^\circ\text{C}$ 。2010年 Xiaoyi Bao 小组^[24] 利用差分脉宽对的方法在时域 BDG 系统中实现了温度应变同时传感,在 6 m 保偏光纤中得到了 20 cm 空间分辨率、 9×10^{-6} 的应变分辨率和 $0.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度分辨率,测量范围提高到 14×10^{-3} 和 $700 \text{ }^\circ\text{C}$ 。同年,Weiwen Zou^[19] 利用相关 BDG 系统进行实验,给两束抽运光施加同步正弦调制,在光纤上将周期性地出现相关峰,在相关峰处满足相位匹配条件,形成稳定的局部 BDG。通过改变调制频率可以使相关峰沿光纤移动,再用另一同步调制的探测光进行探测。通过设定合适的调制频率和调制深度,同时测量布里渊频移和双折射频差,在 8 m 保偏光纤上获得 10 cm 的空间分辨率、 12×10^{-6} 的应变分辨率和 $0.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度分辨率。

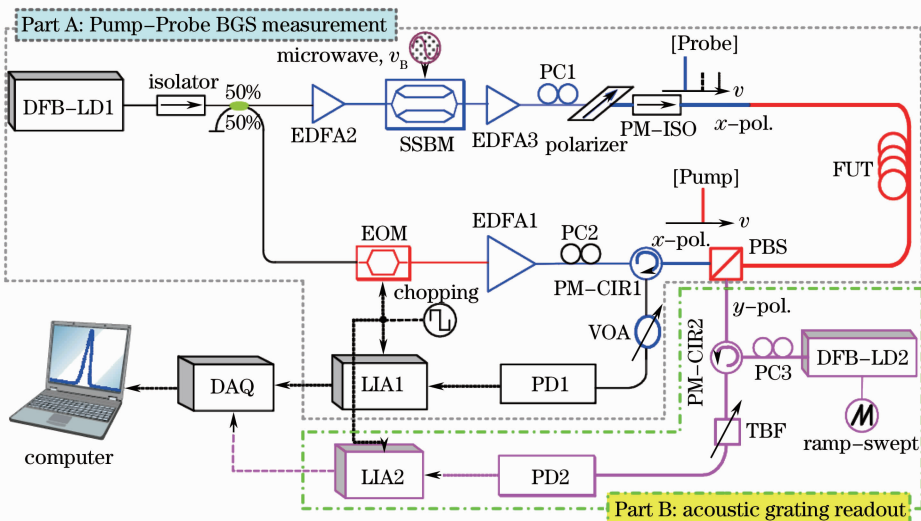


图 6 BDG 双参量传感系统

Fig. 6 Configuration of the BDG dual-parameter sensing system

5 结束语

基于 BDG 的分布式光纤传感系统具有一系列突出的优点,是分布式光纤传感中最具潜力的发展方向之一。BDG 技术提出四年多来,各研究小组进行了大量实验研究,搭建了不同的实验系统,发现了 BDG 光谱的众多特性,开发了很多领域的应用,使得 BDG 技术,尤其是基于 BDG 技术的分布式传感研究得到了快速

发展。

今后 BDG 的发展方向主要有:BDG 的测量范围亟待拓展,由于系统受保偏光纤性能、价格等影响,目前报道的最长的探测距离只有一百余米,距离分布式传感的实用化还有较大距离,如何能在标准单模光纤中实现 BDG 是今后的一个重要研究方向;对 BDG 的各项参数的精确控制还有待加强,虽然在实验中已能产生稳定的局部 BDG,但光谱特性的控制、不同位置多个 BDG 的产生等一系列应用还有待进一步研究;如何有效提高数据采集与处理速度是又一研究焦点。

基于 BDG 的分布式传感技术具有高精度、高空间分辨率、可多参量同时传感等优势,是分布式传感又一个新的发展方向。目前对 BDG 分布式光纤传感的研究还停留在实验室阶段,尽早实用化是需要深入研究和持续攻关的课题。随着对其机理研究的不断深入,该技术将在更广的舞台上发挥出它的独特优势。此外,应用其快速构建、读写分离、光谱可控等特点,BDG 在可调谐光滤波器、光开关、光纤延时线及光存储介质等方面均有着重要的应用前景^[33~41]。

参 考 文 献

- 1 T. Horiguchi, M. Tateda. Optical-fiber-attenuation investigation using stimulated Brillouin scattering between a pulse and a continuous wave[J]. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(8): 408~410
- 2 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics*[M]. 3rd ed. New York: Academic, 2001
- 3 Anthony W. Brown, Bruce G. Colpitts, Kellie Brown *et al.*. Distributed sensor based on dark-pulse Brillouin scattering [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(7): 1501~1503
- 4 L. Che-Hien, T. Tsuda, K. Kishida *et al.*. PPP-BOTDA method to achieve cm-order spatial resolution in Brillouin distributed measuring technique[J]. *IEICE Technical Report*, 2005, OFT 2005-16
- 5 Seok-Beom Cho, Jung-Ju Lee. Strain event detection using a double-pulse technique of a Brillouin scattering-based distributed optical fiber sensor[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(18): 4339~4346
- 6 W. Li, X. Bao, Y. Li *et al.*. Differential pulse-width pair BOTDA for high spatial resolution sensing[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(26): 21616~21625
- 7 L. Thevenaz, S. F. Mafang. Distributed fiber sensing using Brillouin echoes[C]. *SPIE*, 2008, **7004**: 70043N
- 8 Y. Li, L. Chen, Y. Dong *et al.*. A novel distributed Brillouin sensor based on optical differential parametric amplification [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2010, **28**(18): 2621~2626
- 9 D. Garus, T. Gogolla, K. Krebber *et al.*. Brillouin optical fiber frequency-domain analysis for distributed temperature and strain measurements[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(4): 654~662
- 10 Kazuo Hotate, Masato Tanaka. Enlargement of measurement range of optical-fiber Brillouin distributed strain sensor using correlation-based continuous-wave techniques[C]. *CLEO*, 2001. 119~120
- 11 Chen Fuchang, Hu Jiacheng, Zhang Chengtao *et al.*. Distributed Brillouin optical fiber temperature sensor based on high frequency microwave technology[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(6): 0605009
陈福昌, 胡佳成, 张承涛等. 基于高频微波技术的分布式布里渊光纤温度传感器[J]. *中国激光*, 2012, **39**(6): 0605009
- 12 K. Y. Song, W. Zou, Z. He *et al.*. All-optical dynamic grating generation based on Brillouin scattering in polarization-maintaining fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(19): 926~929
- 13 Y. Dong, X. Bao, L. Chen *et al.*. Distributed temperature sensing based on birefringence effect on transient Brillouin grating in a polarization-maintaining photonic crystal fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(17): 2590~2592
- 14 K. Y. Song, H. J. Yoon. High-resolution Brillouin optical time domain analysis based on Brillouin dynamic grating[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(1): 52~54
- 15 W. Zou, Z. He, K. Hotate *et al.*. Complete discrimination of strain and temperature using Brillouin frequency shift and birefringence in a polarization-maintaining fiber[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(3): 1248~1255
- 16 Y. Dong, L. Chen, X. Bao *et al.*. Truly distributed birefringence measurement of polarization-maintaining fibers based on transient Brillouin grating[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(2): 193~195
- 17 W. Zou, Z. He, K. Y. Song *et al.*. Correlation-based distributed measurement of a dynamic grating spectrum generated in stimulated Brillouin scattering in a polarization-maintaining optical fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(7): 1126~1128
- 18 K. Y. Song, W. Zou, Z. He *et al.*. Optical time-domain measurement of Brillouin dynamic grating spectrum in a polarization-maintaining fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(9): 1381~1383
- 19 W. Zou, Z. He, K. Hotate *et al.*. Demonstration of Brillouin distributed discrimination of strain and temperature using

- polarization-maintaining optical fiber[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2010, **22**(8): 526~528
- 20 K. Y. Song, S. Chin, N. Primerov *et al.*. Time-domain distributed fiber sensor with 1 cm spatial resolution, based on Brillouin dynamic gratings[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2010, **28**(14): 2062~2067
- 21 K. Y. Song, Hyuk Jin Yoon. Observation of narrowband intrinsic spectra of Brillouin dynamic gratings[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(17): 2958~2960
- 22 K. Y. Song. Operation of Brillouin dynamic grating in single-mode optical fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(23): 4686~4688
- 23 Y. Dong, L. Chen, X. Bao *et al.*. Characterization of the Brillouin grating spectra in a polarization-maintaining fiber[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(18): 18960~18967
- 24 Y. Dong, L. Chen, X. Bao *et al.*. High-spatial-resolution time-domain simultaneous strain and temperature sensor using Brillouin scattering and birefringence in a polarization-maintaining fiber[J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2010, **22**(18): 1364~1366
- 25 M. Santagiustina, L. Ursini. Localized dynamic Brillouin gratings permanently induced by chaotic signals[C]. in Signal Processing in Photonic Communications, OSA Technical Digest (CD), 2011, JTuB6
- 26 Weiwen Zou, Zuyuan He, Kazuo Hotate *et al.*. One-laser-based generation/detection of Brillouin dynamic grating and its application to distributed discrimination of strain and temperature[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(3): 2363~2370
- 27 D. P. Zhou, Y. Dong, L. Chen *et al.*. Four-wave mixing analysis of Brillouin dynamic grating in a polarization-maintaining fiber: theory and experiment[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(21): 20785~20798
- 28 Sanghoon Chin, Nikolay Primerov, Luc Thevenaz *et al.*. Sub-centimetre spatial resolution in distributed fibre sensing, based on dynamic Brillouin grating in optical fibers[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, **12**(1): 189~194
- 29 Y. Antman, N. Primerov, J. Sancho *et al.*. Long variable delay and distributed sensing using stationary and localized Brillouin dynamic gratings[C]. Optical Fiber Communication Conference, 2012, JW2A.24
- 30 Y. Antman, N. Primerov, J. Sancho *et al.*. Localized and stationary dynamic gratings via stimulated Brillouin scattering with phase modulated pumps[J]. *Opt. Express*, 2012, **20**(7): 7792~7806
- 31 M. Santagiustina, L. Ursin. Dynamic Brillouin gratings permanently sustained by chaotic lasers[J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(5): 893~895
- 32 Nikolay Primerov, Yair Antman, Juan Sancho *et al.*. Brillouin distributed sensing using localized and stationary dynamic gratings[C]. *SPIE*, 2012, **8439**: 843908
- 33 K. Y. Song, K. Lee, S. B. Lee *et al.*. Tunable optical delays based on Brillouin dynamic grating in optical fibers[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(12): 10344~10349
- 34 Sanghoon Chin, Nikolay Primerov, Kwang Yong Song *et al.*. True time reversal via dynamic Brillouin gratings in polarization maintaining fibers[C]. Nonlinear Photonics, Optical Society of America, 2010, NThA6
- 35 Nikolay Primerov, Sanghoon Chin, Kwang Yong Song *et al.*. Ultra wide range tunable delay line using dynamic grating reflectors in optical fibers[C]. Optical Fiber Communication Conference, Optical Society of America, 2010, OWF6
- 36 S. Chin, N. Primerov, S. Sales *et al.*. Tunable multiplication of the repetition rate of an optical pulse train using dynamic Brillouin gratings in optical fibers[C]. The European Conference on Lasers and Electro-Optics(CLEO/Europe) 2011, CD_P8
- 37 Nikolay Primerov, Sanghoon Chin, Luc Thévenaz *et al.*. All-optical calculus based on dynamic Brillouin grating reflectors in optical fibers[C]. Slow and Fast Light, Optical Society of America, 2011, SLMA3
- 38 Claudio Porzi, Sanghoon Chin, Andrea Trita *et al.*. All-Optical Self-Synchronizing Scheme for Contention Resolution in Asynchronous Optical Packet Switched Networks Using Continuously Tunable Optical Delay Line[C]. Optical Fiber Communication Conference, Optical Society of America, 2011, JWA046
- 39 Sanghoon Chin, Nikolay Primerov, Luc Thévenaz *et al.*. Movable dynamic grating-based optical delay line in polarization maintaining fibers[C]. Slow and Fast Light, Optical Society of America, 2011, SLMA2
- 40 Yair Antman, Nikolay Primerov, Juan Sancho *et al.*. Variable delay using stationary and localized Brillouin dynamic gratings[C]. *SPIE*, 2012, **8273**: 82730C
- 41 J. Sancho, N. Primerov, S. Chin *et al.*. Tunable and reconfigurable multi-tap microwave photonic filter based on dynamic Brillouin gratings in fibers[J]. *Opt. Express*, 2012, **20**(6): 6157~6162