

布里渊光时域分析系统性能提高方法综述

王健健*, 李永倩

华北电力大学电子与通信工程系, 河北 保定 071003

摘要 布里渊光时域分析(BOTDA)系统的空间分辨率、传感距离、测量精度和测量时间等参数存在着相互制约的关系,如何改善 BOTDA 系统性能一直是分布式光纤传感领域的研究热点。系统传感距离及测量精度等指标均与系统信噪比密切相关,因此提高系统信噪比并兼顾空间分辨率对改善系统性能至关重要。综述了提高 BOTDA 系统性能的相关技术方法,这些技术在不同程度上延长了系统的传感距离、提高了系统的测量精度,使 BOTDA 系统能够更符合实际工程的需要。在分析了上述技术存在的问题后,对未来的研究进行了展望。

关键词 光纤光学; 分布式光纤传感; 布里渊光时域分析; 信噪比; 空间分辨率

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.110003

Review of Methods for Improving Performance of Brillouin Optical Time-Domain Analysis System

Wang Jianjian*, Li Yongqian

Department of Electronics and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China

Abstract The spatial resolution, sensing distance, measurement accuracy and measurement time of the Brillouin optical time-domain analyzer (BOTDA) are interrelated to each other. How to improve the performance of the BOTDA system has been a hot topic in the field of distributed optical fiber sensing. Because the sensing distance and measurement accuracy of the BOTDA system are closely related to the signal-to-noise ratio (SNR), the performance enhancement of the system focuses on the improvement of the SNR and the spatial resolution. The technical methods to improve the performance of the BOTDA system are reviewed. These technologies have extended the sensing distance and improved the measurement accuracy of the system, which make the BOTDA system more suitable for the practical engineering. After analyzing the existing problems, the future research directions are prospected as well.

Key words fiber optics; distributed fiber sensing; Brillouin optical time-domain analysis; signal-to-noise ratio; spatial resolution

OCIS codes 000.3860; 060.2310; 060.2330; 060.2370

1 引言

布里渊光时域分析(BOTDA)技术利用光纤中的受激布里渊散射(SBS)效应实现温度/应变等参量的分布式传感测量^[1-2]。在电力、石油及建筑等行业的大型结构健康监测和故障诊断领域,BOTDA技术已经展现出其独特的优势并得到了广泛的关注和研究。

测量精度、传感距离和空间分辨率是衡量 BOTDA 系统传感性能的重要指标,其中测量精度和传感距离均与传感系统的信噪比(SNR)密切相关。信噪比越高,测量精度越高,传感距离越长。系统空间分辨率由传感脉冲的脉宽决定,脉冲宽度越窄,空间分辨率越高。因为入射较宽的脉冲会降低系统空间分辨率,所以通常采用提高入射光峰值功率的方法来提升信噪比,而过高的入射光峰值功率

收稿日期: 2018-04-23; 修回日期: 2018-05-23; 录用日期: 2018-05-28

基金项目: 国家自然科学基金(61377088,61775057)、中央高校基本科研业务费专项资金(2017MS112)

* E-mail: ncepuwangjj@163.com

会引发抽运耗尽及调制不稳定等现象使布里渊增益谱(BGS)失真从而降低测量精度,且受光纤损耗等因素的影响,以上现象会随着传感距离的增加愈发严重。若在信号检测端通过叠加平均的方法减小噪声,则会增加系统测量时间,这将限制 BOTDA 系统在对实时性要求较高的场合的应用,而且不能从根本上改善系统信噪比。

因此,有效地提高 BOTDA 系统信噪比并兼顾空间分辨率对改善系统性能至关重要。本文综述了提高 BOTDA 系统信噪比的相关技术方法,包括放大技术、脉冲编码技术、双边带探测技术、检测技术和多波长技术,指出存在的问题并对未来的研究进行展望。

2 BOTDA 系统测量原理

图 1 为 BOTDA 系统原理图。在传感光纤两端分别注入脉冲抽运光和连续探测光,当光纤中某区域内的两束光之间的频率差在布里渊谱范围内时,将产生 SBS 效应,两束光之间发生能量转移^[3]。连续调节两束光的频率差,同时检测与抽运光产生

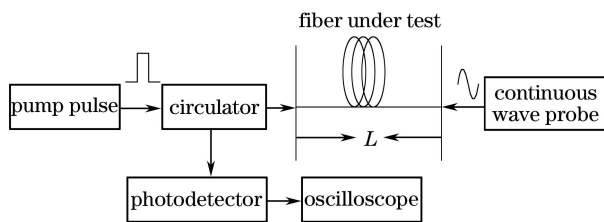


图 1 BOTDA 系统原理图

Fig. 1 Schematic of BOTDA system

SBS 效应的探测光,可以获得沿光纤分布的布里渊散射谱(BSS)。因为抽运光和探测光之间的频率差等于光纤布里渊频移(BFS)时,SBS 效应最强,连续探测光功率变化最大,所以上述过程测得的 BSS 峰值处对应的频率即为光纤 BFS。利用 BFS 与温度和应变的线性关系^[4],即可实现传感光纤上温度和应变的分布式测量。

3 提高 BOTDA 系统性能的方法

3.1 放大技术

传统的 BOTDA 系统在脉冲抽运光进入光纤前,采用掺铒光纤放大器(EDFA)将其进行预放大以提高入射抽运光功率,但因光纤衰减及调制不稳定性等因素,光纤后端的测量分辨率无法保证,传感距离受限。分布式拉曼放大技术能有效地补偿光纤损耗^[5-6],而且可以灵活地控制增益带宽和增益波段,提高光纤沿线布里渊探测光的分布均匀性,能够在不影响空间分辨率的情况下延长传感距离,实现超长距离的分布式传感测量。

光纤拉曼放大器可获得比 EDFA 更平坦的信号光功率分布及更低的噪声指数^[7],其在光纤中的作用相当于提高了几十纳米的带宽。拉曼散射光频移近似为 13 THz,比布里渊散射光频移高几个数量级,这就意味着应用波长为 1455 nm 的拉曼抽运光时,分布在 1550 nm 附近的布里渊抽运和探测光可以近似视为处于相同波长。应用光纤拉曼放大器的 BOTDA 系统通用原理图如图 2 所示。

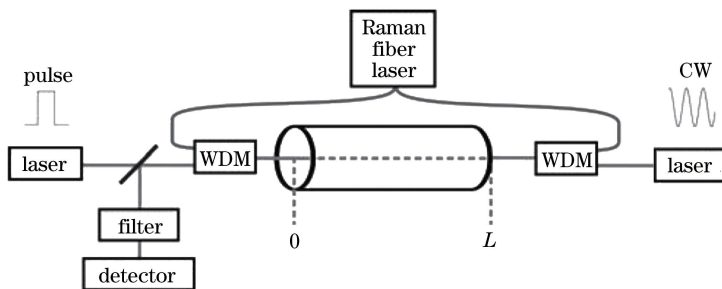


图 2 应用光纤拉曼放大器的 BOTDA 系统通用原理图^[8]

Fig. 2 General schematic of BOTDA assisted by fiber Raman amplifier^[8]

Rodriguez-Barrios 等^[8]将 BOTDA 系统中的待测光纤两端通过波分复用器(WDM)与拉曼放大器相连,分别考虑了与布里渊抽运脉冲反向、同向及在待测光纤两端进行双向拉曼放大时的系统性能改善情况。实验采用长度为 75 km 的光纤,实现了空间分辨率为 2 m,频率测量精度小于 3 MHz 的传感测

量。经放大的抽运脉冲没有明显展宽,即不影响空间分辨率,但脉冲峰值处出现失真。为避免抽运耗尽并最大化传感距离,拉曼抽运光功率、布里渊抽运光功率和连续光功率均存在最佳值。当拉曼抽运光与布里渊抽运脉冲反向时,放大效果最好。若将 BOTDA 系统中待测光纤两端先分别连接光纤布拉

格光栅(FBG),再通过 WDM 与拉曼放大器相连,可以将传感距离延长至 100 km^[9]。在待测光纤两端进行双向拉曼放大且抽运功率足够高时,两个 FBG 构成的腔体中形成二次抽运,将在光纤沿线提供平坦的放大增益和均匀的损耗补偿,相当于对布里渊抽运光和探测光进行了二阶拉曼放大。虽然 BSS 仍受相对强度噪声(RIN)的影响,但实验结果远优于传统 BOTDA 系统。Soto 等^[10]采用优化的一阶双向拉曼放大结构,结合高功率的光纤拉曼激光器和低 RIN 的法布里-珀罗激光器,将传感距离延长至 120 km,空间分辨率为 2 m,应变和温度测量精度分别为 45 $\mu\epsilon$ 和 2.1 $^{\circ}\text{C}$ 。

国内的电子科技大学饶云江课题组^[11-12]从理论和实验两方面研究了拉曼放大对传感性能的改进情况,分别实现了距离为 50 km 和 75 km 的温度传感,温度分辨率为 ± 0.6 $^{\circ}\text{C}$ 。光纤后端的布里渊增益没有急剧降低,整段光纤的测量分辨率趋于一致。为了兼顾系统空间分辨率,在采用双向拉曼放大的同时,利用开关型半导体光放大器(SOA)作为脉冲调制器^[13]。这样,脉宽较窄的布里渊抽运光功率可由 SOA 的增益进行补偿,能够在实现较高的传感精度的前提下,有效提高系统空间分辨率。在长度为 49.6 km 的光纤上实现了分布式温度传感,整段光纤的温度分辨率为 1 $^{\circ}\text{C}$,空间分辨率为 40 m。另外,针对拉曼放大 BOTDA 系统中由抽运耗尽所致的更复杂的非本地效应,他们从抽运-探测耦合方程组出发,数值分析了其对传感性能的影响和抑制方法^[14]。结果表明,探测光和拉曼抽运光输入功率是影响非本地效应的主要物理量,频分复用和时分复用技术可有效抑制非本地效应、延长传感距离及减小测量误差。

值得注意的是,拉曼放大引入的 RIN 是不能忽视的,它会使 BSS 展宽。可以设想,若能够降低 RIN,则可以进一步提高信噪比和延长传感距离。姜芸等^[15]利用 1366 nm 的光纤拉曼激光器抽运产生的 1455 nm 随机激光作为二阶分布式拉曼抽运,对 1550 nm 的布里渊抽运光和探测光进行光放大,传感原理如图 3 所示。相对于传统的拉曼放大,随机激光的反馈完全来自微弱的分布式瑞利散射,基于随机激光的放大方式使信号空间分布更加平坦,能够保证整段光纤传感精度的一致性,延长传感距离。而且这种放大方式具有较低的 RIN,有效限制了 RIN 转移带宽。

秦祖军等^[16]通过分析光纤中拉曼抽运光及布

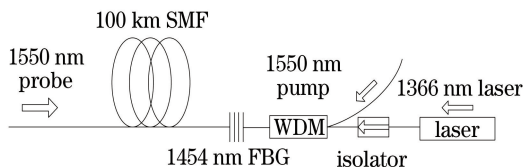


图 3 基于随机激光的分布式光纤传感原理图^[15]

Fig. 3 Schematic of distributed fiber sensing based on random laser^[15]

里渊抽运光和探测光的振幅耦合模型,进一步研究了拉曼抽运的 RIN 和布里渊慢光延迟效应对 BOTDA 传感系统的负面影响。结果表明,虽然 RIN 会降低检测信号信噪比和增加 BFS 测量不确定度,但是若 RIN 的值小于 -135 dB,其影响可忽略不计。拉曼抽运光 RIN 对 BOTDA 检测信号信噪比的影响如图 4 所示。同时,不同频率的布里渊抽运光和探测光间的慢光延迟会造成空间定位误差,使得 BSS 的三维重构产生畸变从而影响 BFS 的准确提取。

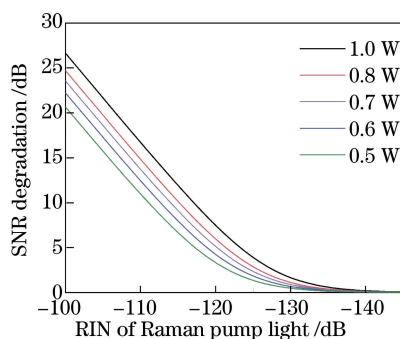


图 4 拉曼抽运光 RIN 对 BOTDA 检测信号信噪比的影响^[16]

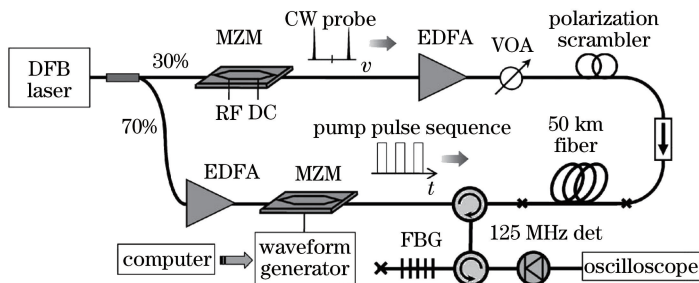
Fig. 4 SNR degradation of signal detected by BOTDA as a function of RIN level of Raman pump light^[16]

3.2 脉冲编码技术

在 BOTDA 系统中,脉冲编码通过采用不同的编码方式(如 Golay 码、Simplex 码)对系统中抽运脉冲进行调制。脉冲编码的结果是将原来的抽运单脉冲改变成为一组脉冲序列,且保持脉冲宽度不变,从而增加了注入传感光纤的光脉冲能量。因此,脉冲编码技术可以在不影响空间分辨率的基础上,提高 BOTDA 系统信噪比,延长传感距离。

3.2.1 单独编码

Soto 等^[17-19]在不改变 BOTDA 系统结构的基础上,对脉冲抽运光进行 127 bit 和 511 bit 的 Simplex 编码,使信噪比分别提高了 7.1 dB 和 10.3 dB。Simplex 编码 BOTDA 实验系统如图 5 所示,采用长度为 50 km 的光纤,被测光纤末端几乎没有抽运光耗尽和调制不稳定等现象发生,空间分辨率为 1 m,获

图 5 Simplex 编码 BOTDA 传感实验系统^[18]Fig. 5 Experimental setup for the Simplex coded-BOTDA sensor^[18]

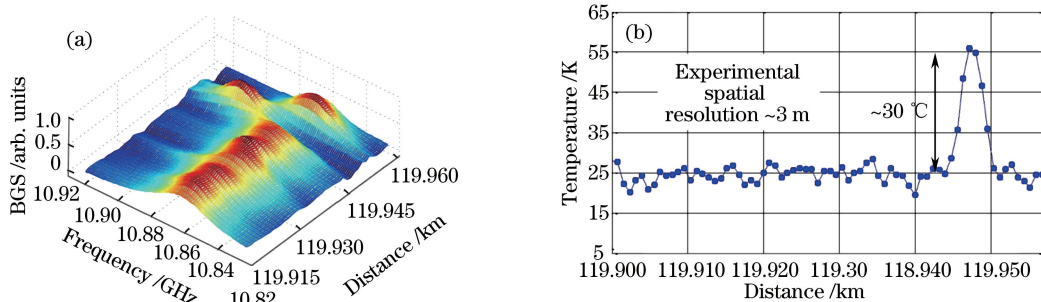
得的温度和应变测量精度可达 $2.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $44\text{ }\mu\epsilon$ 。随后,该研究组^[20-21]对脉冲抽运光进行双极性的互补相关 Golay 编码,使系统传感距离达到 100 km ,空间分辨率为 2 m 。实验结果表明,相对于已知的最佳单极性编码,双极性的 Golay 码可以获得更高的信噪比,且使抽运耗尽效应具有更好的稳健性。

在使用长脉冲序列提高信噪比的同时,需考虑动态声波激发现象对测量准确性的影响。不同编码方式的调制格式会引起不同程度的声波预激发和非均匀增益^[22],非归零格式编码会使 BGS 产生明显的失真,特别是在光纤增益谱中相邻的突变处;而低占空比的归零格式编码能够有效抑制 BGS 失真,可用于高空间分辨率、高精度的应变和温度测量。因此,应用脉冲编码技术时需要合理

优化调制格式。

3.2.2 结合放大技术的脉冲编码

光放大技术和脉冲编码技术不能简单地组合,因为慢瞬变和可能的增益饱和现象会造成编码序列失真。为了获得足够的信噪比提升量,同时避免放大器出现增益饱和现象,需要合理选择系统中 EDFA 的增益和输出饱和功率。另外,同样需要考虑编码脉冲的调制格式和占空比在解码过程中引发的声波预激发和 BGS 失真现象。Soto 等^[23]在 BOTDA 系统的接收端采用线性增益 EDFA 和 FBG,结合占空比为 25% 的 Simplex 归零编码将传感距离延长至 120 km ,实现的温度和应变测量精度分别为 $3.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $60\text{ }\mu\epsilon$,空间分辨率为 3 m ,动态范围达到 27 dB ,实验结果如图 6 所示。

图 6 采用 EDFA 的 Simplex 编码 BOTDA 系统实验验证图^[23]。(a) BGS 的测量结果;(b) 光纤沿线 BFS 的测量结果Fig. 6 Experimental validation of the Simplex coded-BOTDA assisted by EDFA^[23]. (a) Measured profile of BGS;

(b) measured profile of BFS versus distance

分布式拉曼放大和脉冲编码技术相结合也能够提高系统信噪比^[24],然而,拉曼抽运的 RIN 和编码脉冲的优化问题仍然限制了系统性能。文献^[25]在 BOTDA 系统中采用单个一阶光纤拉曼激光器,用于同时提供双向传播的拉曼抽运光,结合 127 bit 归零格式的 Simplex 编码脉冲,在 120 km 单模光纤 (SMF) 上实现了空间分辨率为 2.3 m 的分布式测量,应变和温度分辨率分别为 $52\text{ }\mu\epsilon$ 和 $2.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。相对于单脉冲 BOTDA,该方法中信噪比的提升是由

脉冲编码技术实现的,这降低了对拉曼抽运 RIN 水平的要求。

3.2.3 兼顾空间分辨率的混合编码

当脉冲宽度小于声子寿命 (10 ns) 时,布里渊增益会显著下降且 BGS 会展宽,这将影响系统信噪比和测量精度。通常情况下,BOTDA 传感系统的空间分辨率被限制在 1 m 。然而,Bao 等^[26]通过实验发现当脉宽进一步减小至小于声子寿命时,布里渊增益线宽会突然降低。随后,Lecoeuche 等^[27]从理

论上解释了这一现象,电光调制器泄露的微弱连续光起到了预抽运的作用。脉冲预抽运(PPP)BOTDA将系统空间分辨率降至亚米级,具体来说应用一个持续时间(脉宽)较长的弱脉冲和一个持续时间较短的强脉冲组成阶梯传感脉冲。弱脉冲预激发声场,为强脉冲提供布里渊增益,强脉冲宽度决定了空间分辨率,由此获得线宽很窄的BGS和较高的空间分辨率。具有相同原理的方法还包括差分脉冲对(DPP)^[28]、光差分参量放大(ODPA)^[29]和相移脉冲(PSP)^[30]技术。研究人员将脉冲编码技术与上述方法相结合,同时提高了BOTDA系统的信噪比和空间分辨率。

Liang等^[31]对比了归零和非归零格式编码在提高DPP-BOTDA系统空间分辨率和测量精度方面的效果,归零编码能够在保持BGS不展宽的同时,提高系统信噪比并延长传感距离。实验采用脉宽差为5 ns的512 bit归零编码脉冲,实现了空间分辨

率为0.5 m、应变分辨率为 $12 \mu\epsilon$ 的测量,传感距离达到50 km。Soto等^[32]在DPP-BOTDA系统中采用511 bit Simplex归零编码脉冲和线性光放大器将系统空间分辨率提高至0.25 m,传感距离延长至60 km,获得的BFS测量精度为1.2 MHz。Taki等^[33]同样采用Simplex编码并结合拉曼放大技术,在长度为93 km的光纤上实现了温度和应变精度为 1.7°C 和 $34 \mu\epsilon$ 的传感测量,空间分辨率为0.5 m。针对直接结合Golay编码和DPP技术的BOTDA系统存在信噪比降低和采样时间变长的问题,罗源等^[34]提出了一种混合编码方法,编码序列示意图如图7所示。将单位脉冲宽度分别为30 ns和40 ns的混合脉冲用于传感,一组序列包含两种脉宽,可以省略差分运算,比直接结合方式节省一半时间。实验采用25 km传感光纤,在光纤末端获得1.6 m的空间分辨率,并在相同采样次数下将系统信噪比提高了4.08 dB。

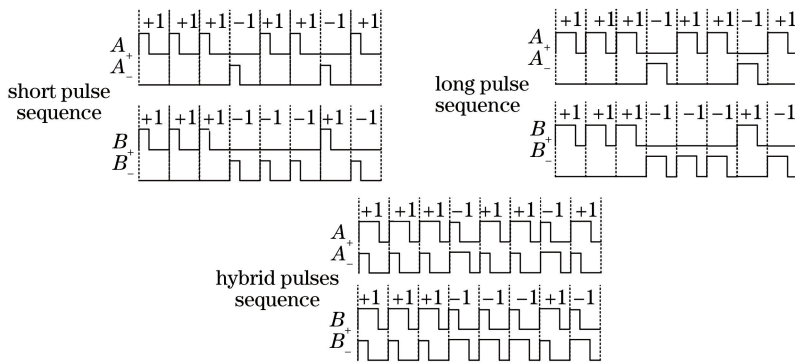


图7 常规序列及混合序列示意图^[34]

Fig. 7 Schematic of conventional sequences and hybrid sequences^[34]

Zan等^[35]详细介绍了双极性Golay互补序列的生成方式及相关特性,分析了其对PSP-BOTDA传感性能的影响。该方法增加了编码长度,从而能够进一步提高系统信噪比。然而,当编码脉冲持续时间接近或少于声子寿命时,编码脉冲的额外增益仍会使布里渊信号出现失真。为解决上述问题,该研究组^[36]又提出几乎不会引入空间分辨率误差的Walsh码进行抽运调制的方法。Walsh码由Hadamard方阵产生,包含双极性元素+1和-1。实验采用8 bit非归零格式Walsh编码,获得3 dB的信噪比改善量,且空间分辨率仅为0.1 m。采用Walsh编码的PSP-BOTDA系统BGS线宽相对较窄(仅为28 MHz),这也使得BFS的测量精度更高,BFS测量结果如图8所示。与传统BOTDA相比,采用Walsh码和双极性Golay码是基于强度调制

的,PSP-BOTDA可以去除编码脉冲序列的增益变量,仅采用由预抽运脉冲产生的布里渊增益。因此,编码PSP-BOTDA系统可以在保持高空间分辨率的同时提高信噪比,且BGS变窄,提高了BFS测量精度。Walsh码和Golay码结合^[37-39]可以充分发挥它们的优势,进一步提高BOTDA系统性能。

Sun等^[40]对PPP-BOTDA系统中阶梯脉冲进行31 bit Simplex编码,在长度为51 km的单模光纤上实现了空间分辨率为1 m、应变和温度分辨率分别为 $8 \mu\epsilon$ 和 0.4°C 的传感测量。图9以3 bit Simplex编码为例,对比了传统脉冲编码和预抽运脉冲编码的结果。与DPP-BOTDA相比,该方法使系统的测量时间减少一半。实验结果表明,预抽运Simplex编码可以在不应用拉曼放大的条件下实现长距离传感,同时能够保持高空间分辨率和测量精度。

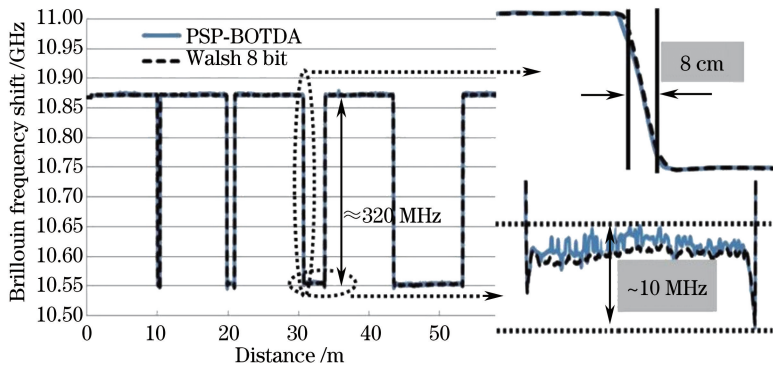
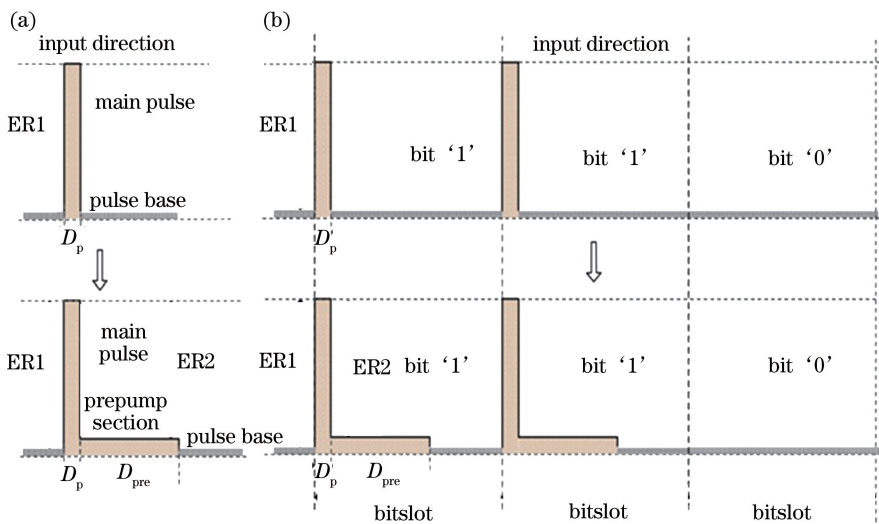
图 8 Walsh 编码及传统 PSP-BOTDA 系统 BFS 测量结果对比图^[36]

Fig. 8 Comparison in BFS distribution between measurements with Walsh code and the conventional PSP-BOTDA system^[36]

图 9 Simplex 编码预抽运脉冲示意图^[40]。(a) 传统脉冲与预抽运脉冲；

(b) 3 bit 归零格式 Simplex 编码传统脉冲和预抽运脉冲

Fig. 9 Schematic of Simplex coding pre-pumped pulse^[40]. (a) Conventional pump pulse and pre-pumped pulse;

(b) conventional pump pulse and pre-pumped pulse of 3 bit Simplex coding

3.3 双边带探测技术

由于 BOTDA 系统的传感距离主要受限于最大允许输入光功率以及抽运耗尽引发的非本地效应,研究人员提出了双边带探测技术^[41]和外差检测技术^[42]来增大系统动态范围。双边带探测是指将连续探测光调制为完全对称的两个边带信号,一个边带信号参与布里渊增益过程,另一个边带信号参与布里渊损耗过程。该方法的优势在于增益过程中抽运光功率的损耗基本上可以由损耗过程进行补偿和恢复,即避免了非本地效应的发生。

在双边带探测 BOTDA 系统的非本地效应模型^[43]中,抽运脉冲被假设为“准连续光”,通常认为在探测光功率低于 SBS 阈值时,不会引发非本地效应。实际上,抽运脉冲的光谱形状会随着探测光调制频率的变化而变化,这使得 BGS 和布里渊

损耗谱(BLS)的形状不再对称,仍会发生非本地效应,造成 BFS 的测量误差^[44]。为了突破非本地效应和 SBS 阈值的限制并最大化输入探测光功率,文献^[45]提出将连续探测光调制为与抽运光同步的三角波型信号,使光纤上任意位置处产生的 BGS 和 BLS 对抽运脉冲的所有频率成分进行补偿。在检测端只保留探测光的一个边带,且只需改变抽运脉冲和调制波的频率差就可以代替扫频操作,获得 BGS/BLS。在此基础上,Iribas 等^[46]对抽运脉冲进行移频操作(频移为 f_s),使布里渊增益和损耗过程发生在不同频率处,同时获得了频率间隔为 $2f_s$ 的 BGS 和 BLS。适当选取 f_s 并将 BGS 和 BLS 叠加,就可以使检测信号的强度增加一倍,从而提高系统信噪比。双边带探测技术信号调制及相互作用原理如图10所示。同年,他

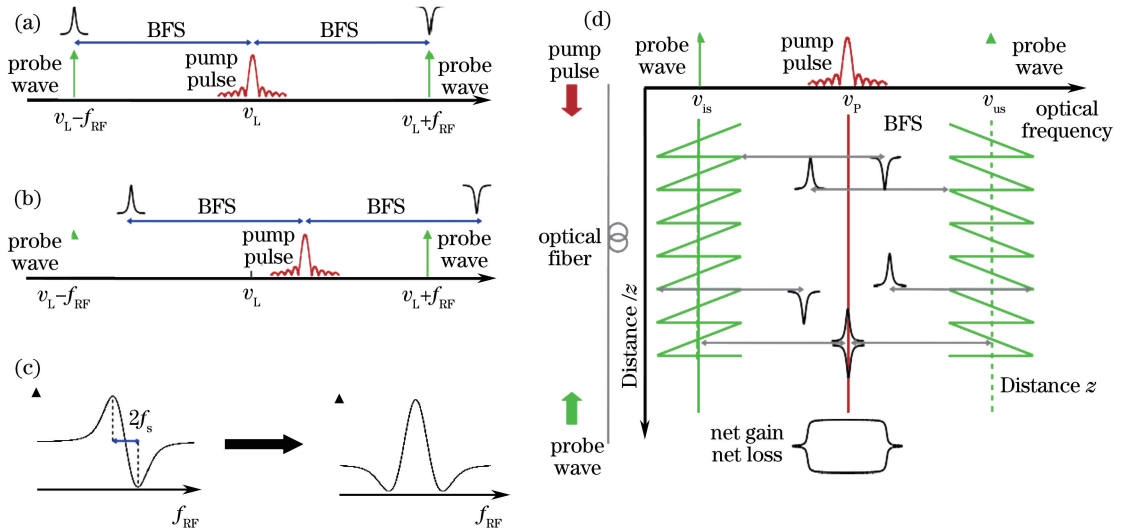


图 10 双边带探测 BOTDA 中信号相互作用及信号调制原理图^[46]。(a) 双边带探测 BOTDA 中布里渊作用原理；(b) 移频双边带探测 BOTDA 中布里渊作用原理；(c) 移频双边带探测 BOTDA 中 BGS 和 BLS 叠加结果；(d) 双边带探测 BOTDA 中信号调制原理

Fig. 10 Brillouin interaction and frequency modulation in the dual-probe BOTDA^[46]. (a) Brillouin interaction of the conventional dual-probe BOTDA; (b) Brillouin interaction of the dual-probe BOTDA with the pump shifted in frequency; (c) combination of BGS and BLS for the dual-probe BOTDA with the pump shifted in frequency; (d) frequency modulation in the dual-probe BOTDA

们又结合编码技术在长度为 164 km 的光纤环路上实现了空间分辨率为 1 m 的传感测量, BFS 测量精度为 3 MHz^[47]。文中还分析了过高的探测光功率对解码过程产生误差的影响。

3.4 检测技术

Hu 等^[48]首次提出将双探测光与相干检测技术结合的方法, 在有效减小非本地效应的同时, 提高 BOTDA 系统信噪比。实验系统如图 11 所示, 连续探测光被保偏耦合器分为两个光支路, 一路用于与脉冲抽运光产生 SBS 效应; 另一路作为本地参考光用于外差检测, 该过程中无需光滤波器就能够选择出合适的信号。在没有放大的情况下, 系统传感距离达到 72 km, 空间分辨率为 5 m, 温度测量精度为 1.8 °C。另外, 若连续探测光注入端出现断点, 该系统可快速定位断点, 类似于相干光时域反射计 (COTDR), 传感系统的稳健性得以提高。

结合双边带探测的平衡检测方法也可以用于提高 BOTDA 系统信噪比^[49]。平衡检测方法所用接收设备有两个匹配良好的光电二极管, 两束光波分别进入不同的光电二极管获得各自的光电流, 再对两个光电流作差分运算并放大光电流差进行检测, 实验系统如图 12 所示。由于 BOTDA 系统中检测的两束光分别为斯托克斯 (Stokes) 光和反斯托克斯

(Anti-Stokes) 光, 二者作差相当于信号增大一倍, 而等效噪声增量为 $\sqrt{2}$ 倍, 故可以将系统信噪比提高 $\sqrt{2}$ 倍。Zhang 等^[50]采用一阶拉曼放大, 结合平衡检测技术来提高系统信噪比, 将传感距离延长至 100 km, 空间分辨率为 5 m, 温度测量精度为 1.2 °C。与文献^[49]不同的是, 平衡检测器前端利用 FBG 来分离待检测的 Stokes 光和 Anti-Stokes 光, 文中同时讨论了关于光源和 FBG 的波长选择问题。

3.5 多波长技术

多波长技术即采用 N 个波长/频率的脉冲抽运光或连续探测光注入光纤发生作用, 每个波长/频率的光功率均低于 SBS 阈值, 而它们作用的总和相当于单个波长/频率情况的 N 倍。也就是说, 在不引发非线性效应的情况下, 多波长技术可以增大系统的信号强度, 提高系统信噪比等方面的性能。

基于频率梳和依赖于波长的抽运脉冲时间偏移原理, 多频抽运-探测光^[51-52]的方法能够提高 BOTDA 系统信噪比。为了避免谱线间的非线性交叉作用, 该方法要求不同的抽运脉冲分量及其与连续探测光作用后的光信号服从波长选择延迟原则。这样, 注入光纤中的抽运光和探测光总能量就可以超过引发非线性效应的阈值。多频抽运光调制及时间延迟原理如图 13 所示。

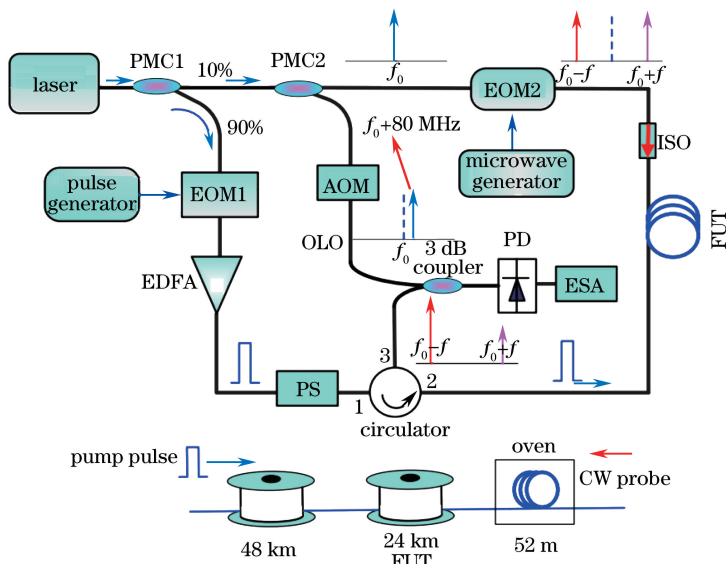


图 11 相干检测 BOTDA 实验系统^[48]

Fig. 11 Experimental setup of BOTDA based on coherent detection^[48]

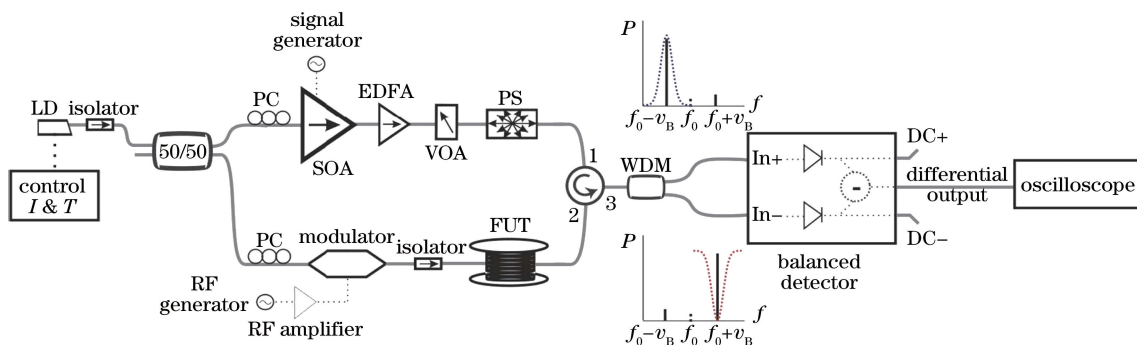


图 12 平衡检测 BOTDA 实验系统^[49]

Fig. 12 Experimental setup of BOTDA with balanced detection^[49]

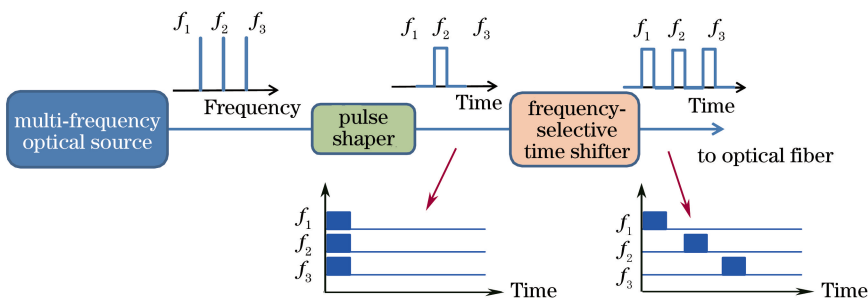
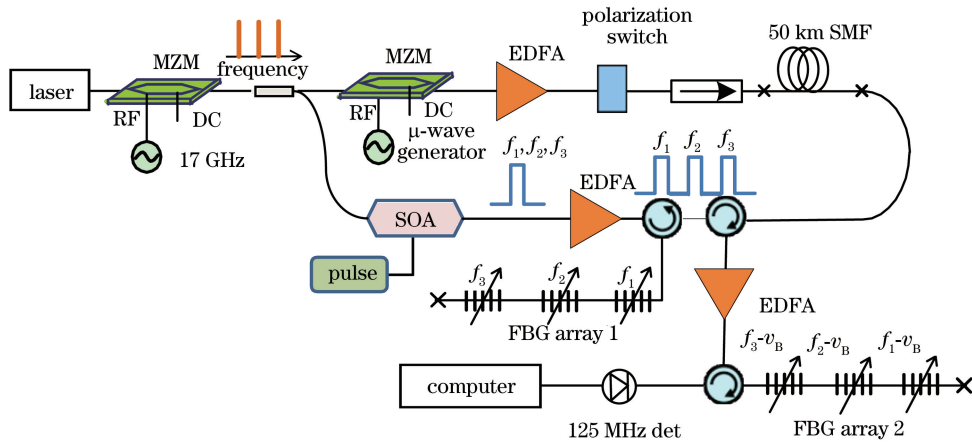


图 13 多频抽运光调制及时分复用原理图^[51]

Fig. 13 Schematic of the frequency modulation and time multiplexing of multi-frequency pump light^[51]

多频时移抽运脉冲 BOTDA 实验系统如图 14 所示。一组 FBG 阵列被放置在脉冲抽运光传输端,用于延迟不同频率的脉冲抽运光;另一组 FBG 阵列被放置在光电检测器接收端之前,用于区分携带传感信息的连续光。光电检测器接收到的时域曲线将自动按时间重新排列,最终获得对应于 N 个频率抽运-探测光作用后的等效曲线。另外,

第二组 FBG 阵列还可以滤除不需要的边带信号、EDFA 的自发辐射热噪声 (ASEN) 以及瑞利和拉曼散射信号。文献[51]采用 3 个频率的抽运-探测光作用于长度为 50 km 的标准单模光纤上,得到的信噪比提升量和 BFS 测量精度分别为 4.8 dB 和 0.6 MHz。文献[52]将传感距离延长至 100 km,空间分辨率为 1 m。

图 14 多频时移抽运脉冲 BOTDA 实验系统^[51]Fig. 14 Experimental setup for BOTDA based on multi-frequency time-shifted pump pulses^[51]

3.6 小 结

放大技术、脉冲编码技术、双边带探测技术、检测技术和多波长技术可以改善系统信噪比、延长传感距离和提高测量精度,但是仍存在以下问题:1)拉曼放大技术需要较高的拉曼抽运功率和更复杂的系统结构,同时不能忽略 RIN 的影响;2)脉冲编码技术会增加数据处理的复杂度和系统测量时间,而且需要考虑码型、码长和调制格式的选择问题;3)双边带探测技术中布里渊增益谱和损耗谱叠加时可能存在失真现象;4)多波长技术需要考虑四波混频等效应对波长数的限制。

4 结束语

BOTDA 系统已被成功应用于分布式温度测量、结构应变和振动传感等领域,如何进一步优化系统传感距离、测量精度和空间分辨率等成为研究热点。放大技术、脉冲编码技术、双边带探测技术、检测技术和多波长技术在提高系统性能方面还存在一些问题,有待于进一步深入研究。为了满足实际工程需要,可以合理权衡不同技术问题的影响,有选择地结合不同的方法来提高 BOTDA 系统传感性能。此外,也有待于继续研究 BOTDA 系统新的作用机理和新型的系统结构,如本课题组积极地开展了单端结构的瑞利 BOTDA 系统相关研究^[53-55],该系统有望成为一种新型的高性能布里渊分布式光纤传感系统。

参 考 文 献

[1] 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] Zhou Z C, Wang X L, Su R T, *et al.* Application of distributed fiber sensing in fiber lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(8): 080006.
周子超, 王小林, 粟荣涛, 等. 分布式光纤传感在光纤激光中的应用研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(8): 080006.
- [3] Boyd R W. *Nonlinear Optics* [M]. New York: Academic Press, 2007.
- [4] Kurashima T, Horiguchi T, Izumita H, *et al.* Brillouin optical-fiber time domain reflectometry [J]. *IEICE Transactions on Communications*, 1993, E76-B(4): 382-390.
- [5] Cho Y T, Alahbabi M, Gunning M J, *et al.* 50-km single-ended spontaneous-Brillouin-based distributed-temperature sensor exploiting pulsed Raman amplification [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(18): 1651-1653.
- [6] Cho Y T, Alahbabi M N, Gunning M J, *et al.* Enhanced performance of long range Brillouin intensity based temperature sensors using remote Raman amplification [J]. *Measurement Science and Technology*, 2004, 15(8): 1548-1552.
- [7] Cho Y T, Alahbabi M, Brambilla G, *et al.* Brillouin based OTDR with measurement range of 85 km using combined EDFA and Raman amplification [C]// *Conference on Laser and Electro-Optics*, May 16-21, 2004, San Francisco. New York: IEEE, 2004: 8303939.
- [8] Rodriguez-Barrios F, Martin-Lopez S, Carrasco-Sanz A, *et al.* Distributed Brillouin fiber sensor assisted by first-order Raman amplification [J]. *Journal of*

- Lightwave Technology, 2010, 28(15): 2162-2172.
- [9] Martin-Lopez S, Alcon-Camas M, Rodriguez F, *et al.* Brillouin optical time-domain analysis assisted by second-order Raman amplification[J]. Optics Express, 2010, 18(18): 18769-18778.
- [10] Soto M A, Bolognini G, Di Pasquale F. Optimization of long-range BOTDA sensors with high resolution using first-order bi-directional Raman amplification [J]. Optics Express, 2011, 19(5): 4444-4457.
- [11] Jia X H, Rao Y J, Chang L, *et al.* Enhanced sensing performance in long distance Brillouin optical time-domain analyzer based on Raman amplification: theoretical and experimental investigation[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28 (11): 1624-1630.
- [12] Zhang C, Rao Y J, Jia X H, *et al.* Brillouin optical time domain analyzer based on bidirectional Raman amplification[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(8): 5523-5527.
张超, 饶云江, 贾新鸿, 等. 基于双向拉曼放大的布里渊光时域分析系统[J]. 物理学报, 2010, 59(8): 5523-5527.
- [13] Rao Y J, Chang L, Jia X H, *et al.* Brillouin optical time domain analysis system based on Raman amplification and semiconductor optical amplifier[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2012, 41(4): 621-625.
饶云江, 袁亮, 贾新鸿, 等. 基于拉曼放大和半导体光放大的 BOTDA[J]. 电子科技大学学报, 2012, 41 (4): 621-625.
- [14] Jia X H, Rao Y J, Wang Z N, *et al.* Non-local effect in Brillouin optical time-domain analyzer based on Raman amplification [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(7): 1667-1671.
贾新鸿, 饶云江, 王子南, 等. 拉曼放大布里渊光时域分析系统非局域效应[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(7): 1667-1671.
- [15] Jiang Y, Jia X H, Wang Z N, *et al.* 100 km Brillouin optical time domain analyzer based on random distributed feedback fiber laser pumping[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2013, 24(1): 45-49.
姜芸, 贾新鸿, 王子南, 等. 基于随机分布式反馈光纤激光器的 100 km 布里渊光时域分析系统[J]. 光电子 • 激光, 2013, 24(1): 45-49.
- [16] Qin Z J, Liang G L, Zhang W T, *et al.* Negative effects of distributed Raman amplification on long distance Brillouin optical time-domain analyzer [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(s2): s206002.
- 秦祖军, 梁国令, 张文涛, 等. 分布式拉曼放大对布里渊时域分析的负面影响[J]. 光学学报, 2015, 35 (s2): s206002.
- [17] Soto M A, Bolognini G, Di Pasquale F, *et al.* Enhanced long-range distributed strain and temperature sensing using BOTDA and optical pulse coding [C] // 2009 35th European Conference on Optical Communication, September 20-24, 2009, Vienna. New York: IEEE, 2009, 2009-supplement.
- [18] Soto M A, Bolognini G, Di Pasquale F, *et al.* Simplex-coded BOTDA fiber sensor with 1 m spatial resolution over a 50 km range[J]. Optics Letters, 2010, 35(2): 259-261.
- [19] Soto M A, Bolognini G, Di Pasquale F, *et al.* Long-range Brillouin optical time-domain analysis sensor employing pulse coding techniques[J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21(9): 094024.
- [20] Soto M A, Le F S, Thévenaz L. Bipolar pulse coding for enhanced in Brillouin distributed optical fiber sensors [J]. Proceeding of SPIE, 2012, 8421: 84219Y.
- [21] Soto M A, Le F S, Thévenaz L. Bipolar optical pulse coding for performance enhancement in BOTDA sensors[J]. Optics Express, 2013, 21(14): 16390-16397.
- [22] 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.
- [23] Soto M A, Bolognini G, Di Pasquale F. Long-range Simplex-coded BOTDA sensor over 120 km distance employing optical preamplification [J]. Optics Letters, 2011, 36(2): 232-234.
- [24] Jia X H, Rao Y J, Deng K, *et al.* Experimental demonstration on 2.5-m spatial resolution and 1 °C temperature uncertainty over long-distance BOTDA with combined Raman amplification and optical pulse coding [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(7): 435-437.
- [25] Taki M, Soto M A, Di Pasquale F, *et al.* Long-range BOTDA sensing using optical pulse coding and single source bi-directional distributed Raman amplification [J]. Proceedings of IEEE Sensors, 2011: 382-385.
- [26] Bao X, Brown A, DeMerchant M, *et al.* Characterization of the Brillouin-loss spectrum of single-mode fibers by use of very short (<10-ns) pulses[J]. Optics Letters, 1999, 24(8): 510-512.
- [27] Lecoche V, Webb D J, Pannell C N, *et al.*

- Transient response in high-resolution Brillouin-based distributed sensing using probe pulses shorter than the acoustic relaxation time [J]. *Optics Letters*, 2000, 25(3): 156-158.
- [28] Li W H, Bao X Y, Li Y, *et al.* Differential pulse-width pair BOTDA for high spatial resolution sensing [J]. *Optics Express*, 2008, 16(26): 21616-21625.
- [29] Li Y, Bao X Y, Dong Y K, *et al.* A novel distributed Brillouin sensor based on optical differential parametric amplification[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(18): 2621-2626.
- [30] Horiguchi T, Muroi R, Iwasaka A, *et al.* BOTDA utilizing phase-shift pulse[J]. *The IEICE transactions on communications B*, 2008, 91 (2): 207-216.
- [31] Liang H, Li W H, Linze N, *et al.* High-resolution DPP-BOTDA over 50 km LEAF using return-to-zero coded pulses [J]. *Optics Letters*, 2010, 35 (10): 1503-1505.
- [32] Soto M A, Taki M, Bolognini G, *et al.* Optimization of a DPP-BOTDA sensor with 25 cm spatial resolution over 60 km standard single-mode fiber using Simplex codes and optical pre-amplification[J]. *Optics Express*, 2012, 20(7): 6860-6869.
- [33] Taki M, Bolognini G, Di Pasquale F. Raman-assisted DPP-BOTDA sensor employing Simplex coding with sub-meter scale spatial resolution over 93 km standard SMF[J]. *Proceeding of SPIE*, 2012, 8421: 84219M.
- [34] Luo Y, Yan L S, Shao L Y, *et al.* Golay-differential pulse hybrid coding technology based on Brillouin optical time domain analysis sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(8): 0806002.
罗源, 闫连山, 邵理阳, 等. 基于布里渊光时域分析传感系统的格雷-差分脉冲混合编码技术[J]. *光学学报*, 2016, 36(8): 0806002.
- [35] Zan M S D B, Horiguchi T. A dual Golay complementary pair of sequences for improving the performance of phase-shift pulse BOTDA fiber sensor [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30 (21): 3338-3356.
- [36] Zan M S D B, Tsumuraya T, Horiguchi T. The use of Walsh code in modulating the pump light of high spatial resolution phase-shift-pulse Brillouin optical time domain analysis with non-return-to-zero pulses [J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, 24 (9): 094025.
- [37] Zan M S D B, Yokoyama K, Horiguchi T. Combination of Walsh and Golay codes in modulating the pump light of phase-shift pulse BOTDA sensor [C]//2013 IEEE 4th International Conference on Photonics, October 28-30, 2013, Melaka, Malaysia. New York: IEEE, 2013: 160-162.
- [38] Zan M S D B, Bakar A A A, Horiguchi T. Improvement of signal-to-noise-ratio by combining Walsh and Golay codes in modulating the pump light of phase-shift pulse BOTDA fiber sensor [C]//2015 9th International Conference on Sensing Technology, December 8-10, 2015, Auckland, New Zealand. New York: IEEE, 2016: 269-273.
- [39] Zan M S D B, Bakar A A A, Horiguchi T. Analysis on the employment of dual Walsh codes in the phase-shift pulse BOTDA (PSP-BOTDA) fiber sensing technique [C] // 2016 IEEE 6th International Conference on Photonics, March 14-16, 2016, Kuching, Malaysia. New York: IEEE, 2016: 16143010.
- [40] Sun Q, Tu X B, Sun S L, *et al.* Long-range BOTDA sensor over 50 km distance employing pre-pumped Simplex coding[J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(5): 055501.
- [41] Minardo A, Bernini R, Zeni L. A simple technique for reducing pump depletion in long-range distributed Brillouin fiber sensors [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2009, 9(6): 633-634.
- [42] Zornoza A, Sagues M, Loayssa A. Self-heterodyne detection for SNR improvement and distributed phase-shift measurements in BOTDA [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(8): 1066-1072.
- [43] Thévenaz L, Mafang S F, Lin J. Effect of pulse depletion in a Brillouin optical time-domain analysis system [J]. *Optics Express*, 2013, 21(12): 14017-14035.
- [44] 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.
- [45] Ruiz-Lombera R, Urricelqui J, Sagues M, *et al.* Overcoming nonlocal effects and Brillouin threshold limitations in Brillouin optical time-domain sensors [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(6): 6803609.
- [46] Iribas H, Loayssa A, Sauser F, *et al.* Enhancement of signal-to-noise ratio in Brillouin optical time domain analyzers by dual-probe detection [J]. *Proceeding of SPIE*, 2017, 10323: 103237D.
- [47] Iribas H, Loayssa A, Sauser F, *et al.* Cyclic coding

- for Brillouin optical time-domain analyzers using probe dithering [J]. *Optics Express*, 2017, 25(8): 8787-8800.
- [48] Hu J H, Zhang X P, Yao Y G, *et al.* A BOTDA with break interrogation function over 72 km sensing length [J]. *Optics Express*, 2013, 21(1): 145-153.
- [49] Dominguez-Lopez A, Lopez-Gil A, Martin-Lopez S, *et al.* Signal-to-noise ratio improvement in BOTDA using balanced detection [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(4): 338-341.
- [50] Zhang L, Wang Z N, Li J, *et al.* Ultra-long dual-sideband BOTDA with balanced detection [J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 68: 206-210.
- [51] Soto M A, Ricchiuti A L, Zhang L, *et al.* Time and frequency pump-probe multiplexing to enhance the signal response of Brillouin optical time-domain analyzers [J]. *Optics Express*, 2014, 22(23): 28584-28595.
- [52] Lalam N, Ng W P, Dai X W. Employing wavelength diversity technique to enhance the Brillouin gain response in BOTDA system [C] // *Optical Fiber Communication Conference*, March 20-22, 2016, Anaheim, California. Washington DC: Optical Society of America, 2016: M2D. 4.
- [53] Li Y Q, Zhang L X, Li X J, *et al.* Performance improvement method of Rayleigh Brillouin optical time domain analysis system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(1): 0106001.
李永倩, 张立欣, 李晓娟, 等. 瑞利布里渊光时域分析系统传感性能的提升方法 [J]. *光学学报*, 2017, 37(1): 0106001.
- [54] Zhang L X, Li Y Q, An Q, *et al.* Temperature sensing technology based on Rayleigh Brillouin optical time domain analysis with pulse coding [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(11): 1106004.
张立欣, 李永倩, 安琪, 等. 脉冲编码瑞利布里渊光时域分析温度传感技术 [J]. *光学学报*, 2017, 37(11): 1106004.
- [55] Li Y Q, Li T, An Q, *et al.* Analytical model and simulation of pulsed pre-pump Rayleigh BOTDA system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(8): 86-93.
李永倩, 李婷, 安琪, 等. 脉冲预抽运瑞利 BOTDA 系统的解析模型与仿真 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(8): 86-93.