

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209446

## 改善布里渊光时域反射仪空间分辨率研究进展\*

毕研钊<sup>1</sup> 曹栋<sup>1</sup> 陈映恺<sup>1</sup> 黄秋茗<sup>1</sup> 郭林峰<sup>1,2,3</sup>(1.南京信息工程大学物理与光电工程学院 南京 210044; 2.江苏省大气海洋光电探测重点实验室 南京 210044;  
3.江苏省气象光子学与光电探测国际合作联合实验室 南京 210044)

**摘要:** 在布里渊光时域反射(BOTDR)技术中,空间分辨率是一项重要的技术指标,受光纤中声学声子寿命的影响,工程领域应用的布里渊光时域反射仪空间分辨率多在1 m,可以满足大多数的工程需求。近年来,随着工程应用场景不断扩大,如特种结构形变监测、管廊精确定位等领域对布里渊光时域反射仪空间分辨率的要求也不断提高。基于BOTDR的结构,阐述了两类提高BOTDR空间分辨率的方法,并回顾了十多年来提高空间分辨率关键技术的进展。在现有的硬件比较成熟的基础上,未来提高空间分辨率的方法将改进软件处理算法、多种编码与信号处理算法相结合使用的方向发展。

**关键词:** 分布式光纤传感技术;布里渊散射;反射仪;空间分辨率

**中图分类号:** TN29 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

## Improvement of spatial resolution in Brillouin optical time domain reflectometers

Bi Yanzhao<sup>1</sup> Cao Dong<sup>1</sup> Chen Yingkai<sup>1</sup> Huang Qiuming<sup>1</sup> Guo Linfeng<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Information Science &amp; Technology, Nanjing 210044, China; 2. Jiangsu Key Laboratory for Optoelectronic Detection of Atmosphere and Ocean, Nanjing 210044, China; 3. Jiangsu International Joint Laboratory on Meteorological Photonics and Optoelectronic Detection, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** Spatial resolution is an important performance parameter in Brillouin optical time-domain reflection(BOTDR) technique. Affected by the acoustic phonon lifetime in the fiber, the spatial resolution of the Brillouin optical time domain reflectometer used in the engineering field is more than one meter, which can meet most engineering needs. With the continuous expansion of application scenarios, the requirements for the spatial resolution of Brillouin optical time domain reflectometers in fields such as special structural deformation monitoring and precise positioning of pipeline deformation are also increasing. This study introduces the structure of BOTDR and illustrates Two types of methods to improve the spatial resolution of BOTDR. Additionally, important progress in BOTDR sensing for decades are reviewed. On the basis of the relatively mature existing hardware, the method of improving the spatial resolution in the future will develop in the direction of improving the software processing algorithm and combining various signal processing algorithms.

**Keywords:** distributed optical fiber sensing technology; Brillouin scattering; reflectometer; spatial resolution

## 0 引言

1966年高锟开创性的提出了将光纤应用于通信领域的基本原理,到20世纪70年代,随着光纤通信技术的迅猛发展,兴起了一种全新的分布式光纤传感技术。相比其他类型的传感技术,分布式光纤传感技术因其使用光纤对温

度、应力等进行探测,所以具有检测距离长、抗电磁干扰、绝缘、体积小、质量轻、适应性强等优点,在工程应用领域具有显著优势,因此分布式光纤传感技术自问世起来就受到了研究者的广泛关注<sup>[1]</sup>。依据传感原理的不同分布式光纤传感可以划分为以瑞利散射光、拉曼散射光和布里渊散射光为检测对象的3种类型。其中,基于瑞利散射的分布式

收稿日期:2022-03-29

\* 基金项目:国家自然科学基金面上项目(62175113)、南京信息工程大学人才启动基金(2020r044)、江苏省重点研发计划项目(BE2022076)资助

光纤传感技术主要用于对通信光纤的性能表征和光通信线路故障定位、分布式振动测量<sup>[2]</sup>、大型结构安全健康监测<sup>[3]</sup>等领域;基于拉曼散射的分布式光纤传感技术主要应用于智能电网安全监测<sup>[4]</sup>、管道健康监测<sup>[5]</sup>、石油开采<sup>[6]</sup>等领域;基于布里渊散射的分布式光纤传感技术在结构健康监测<sup>[7-8]</sup>、光缆监测<sup>[9-10]</sup>等领域具有重要应用。

在基于布里渊散射的分布式光纤传感系统中,由于光纤中声学声子的寿命只有 10 ns(对应光在光纤中往返 1 m 的时间),当注入光纤的脉冲光宽度小于 10 ns 时,光纤中的声子激发不充分导致布里渊散射过程不能充分发生,从而使布里渊散射谱急剧展宽,布里渊频移测量误差增大,使传感精度降低,因此基于布里渊散射的光时域反射仪空间分辨率被限制在 1 m。1999 年,鲍晓毅等发现当入射光脉冲宽度小于 5 ns 时,布里渊散射谱反而开始变窄,研究者们因此得到启发,基于此现象提出了如双脉冲法、差分脉冲对法等利用组合脉冲的方法提高空间分辨率,这些方法普遍使用了长脉冲和短脉冲组成脉冲对,通过比较脉冲对之间差异或信号处理算法的方式将短脉冲包含的信息解调为空间分辨率,同时获得较为精准的布里渊频移。除了脉冲调制的方法,研究人员还在进行改良信号处理算法的研究,通过迭代细分法或四阶汉宁自卷积法等方法实现空间分辨率的提高。如今在实际工程领域的应用中,对于高空间分辨率布里渊光时域反射仪精度的需求越来越强烈,研究者们也在不断推进这方面的研究。

本文依次介绍了近期以来布里渊光时域反射仪中的各类改善空间分辨率的方法,并结合原理阐述其特点,并逐一分析方法的优势和不足并进行对比,最后对改善空间分辨率的方法进行了总结和展望。

### 1 系统原理与结构

在光纤后向散射中存在着瑞利散射(Rayleigh scattering)、布里渊散射(Brillouin scattering)和拉曼散射(Raman scattering),光纤中的散射光频谱如图 1 所示<sup>[11]</sup>。

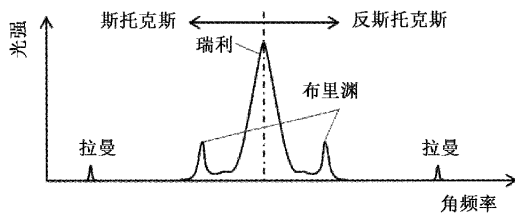


图 1 光纤中散射光频谱示意<sup>[11]</sup>

当散射光频率高于入射光的频率时,散射光为反斯托克斯光;散射光频率低于入射光频率时为斯托克斯光。布里渊散射是光纤中入射光场与介质的声学声子相互作用而发生的一种非弹性光散射现象,介质内部因为介质粒子的自发运动形成的弹性力学振动产生了一个自发的声波场,声波场使得介质的折射率呈周期率变化并以声速  $V_a$ 。在

介质内传播,射入介质的光波受到声波场影响而发生散射,这种带有频移的散射光被称为布里渊散射光。布里渊散射光的频移与声子的局部速度成正比,这取决于光纤的局部密度和张力的,最终取决于光纤的温度和应变。布里渊频移(Brillouin frequency shift, BFS)如式(1)所示<sup>[12]</sup>。

$$v_B = \frac{2nV_a}{\lambda} \tag{1}$$

式中:  $V_a$  表示光纤内声波的声速;  $n$  为纤芯折射率;  $\lambda$  表示入射光的波长。通过测量光纤每一点的布里渊频移,就可以推断出光纤点位上的温度和应力变化。

图 2 所示的是微波外差相干检测 BOTDR 系统构成示意简图,激光器输入的激光从耦合器分成两路,一路作为探测光经过脉冲调制和放大后经过环路器进入待测光纤,回返的布里渊散射光信号经过环路器进入耦合器,一路作为参考光经过偏振扰频器调制成合适的偏振态进入耦合器,两束光信号在光电探测器处相干,由于此时探测器输出的布里渊散射信号频率约 11 GHz,处理相对困难,因此将布里渊散射信号与另一路已知频率的电信号进行混频,降低到百兆赫兹级别的低频信号,最后信号处理模块对降频后的信号进行分析。而图中虚线框出的两部分对应提高 BOTDR 空间分辨率的两类方法,分别是对入射光进行调制的组合脉冲法和对回返布里渊散射信号进行优化处理的信号处理算法两种。

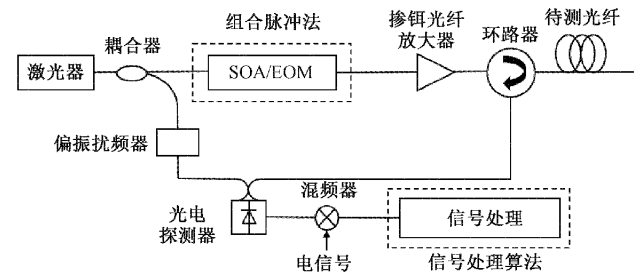


图 2 BOTDR 系统示意

### 2 组合脉冲法

从 21 世纪初开始,研究人员开始使用长短不一的脉冲组合进行提高 BOTDR 系统空间分辨率的研究,出现了双脉冲<sup>[13]</sup>、合成光谱法<sup>[14]</sup>、相移脉冲法<sup>[15]</sup>、差分交叉光谱法<sup>[16]</sup>、差分脉冲对法<sup>[17]</sup>等方法,这些方法的脉冲波形示意图如图 3 所示。组合脉冲法通过脉冲发生器控制调制器,在将激光调制成脉冲光的过程中同时调节脉冲组合的长度、间距、相位参数。在组合脉冲法中长脉冲主要起声子激发的作用,短脉冲主要起提高空间分辨率的作用,从光纤中回返的布里渊散射光信号通过信号处理等方式,还原长脉冲信号所包含的信息。

#### 2.1 双脉冲 BOTDR 法

2007 年,日本的 Koyamada 等<sup>[13]</sup>提出了双脉冲 BOTDR(double-pulse BOTDR, DP-BOTDR),在 16 m 的

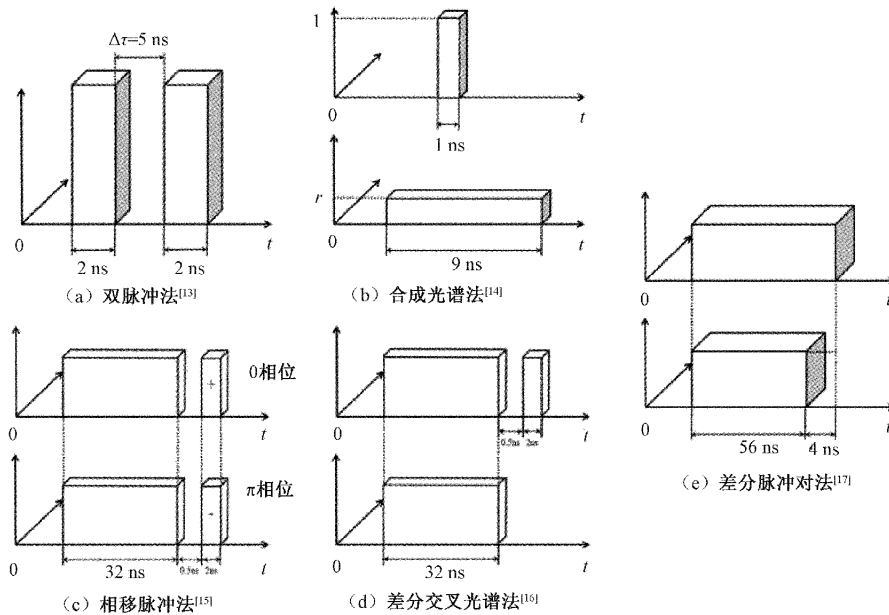


图 3 提高空间分辨率方法的脉冲示意

传感距离上实现了 0.2 m 的空间分辨率。如图 3(a)所示是实验所用的双脉冲 BOTDR 的脉冲示意图,系统的测量精度与双脉冲光的整体宽度相关,空间分辨率与单个脉冲光的宽度相关。双脉冲光的间隔设置小于声子寿命,这样在光纤中双脉冲光在同一位置上会受到了同一个光学声子的调制,产生的两个自发布里渊散射光具有相干性,因此可以通过双脉冲整体宽度探测布里渊谱。相对于单脉冲 BOTDR 系统来说,双脉冲 BOTDR 系统增加了抽运光与声子的作用时间,减少了决定系统精度的布里渊频谱的展宽,减小了误差的同时提高了空间分辨率。

但 Koyamada 的实验系统也存在着不足,系统的电学器件中存在的随机抖动会改变匹配滤波器的延时,将导致双脉冲之间的时间间隔发生变化,同时提取的两个散射光的相位发生变化,还会采集到更多非相干的散射光信号,从而进一步的更大了测量误差。2016 年盛志轩等<sup>[18]</sup>使用马赫-曾德尔光纤干涉仪产生双脉冲光,同时用保温隔振装置保护干涉仪,保证了双脉冲间隔再短时间内的稳定性,并提出利用解调出的频谱上周期振荡条纹包络的中心频率来确定布里渊散射谱的中心频率,避免了振荡条纹的移动对测量准确性的影响,降低了对实验器件性能的要求,同时便于长时间测量。

## 2.2 合成光谱 BOTDR 法

2014 年,大阪大学 Nishiguchi 等<sup>[14]</sup>提出了一种合成光谱 BOTDR(synthetic BOTDR, S-BOTDR),图 3(b)是合成光谱 BOTDR 的脉冲示意图。合成光谱是指通过不同复合低通滤波器测量的 4 种不同组合脉冲的光谱经过计算后构建的合成布里渊光谱,其中组合脉冲是具有相位差的长脉冲和短脉冲组成的,长元素是一个长脉冲或连续波,长度要设置为比声波寿命长足够多的长度( $>10$  ns),

起声子激发的作用,短元素起被声子散射的作用,长度设置为小于要达到的空间分辨率所对应的脉冲光宽度(10 ns 对应 1 m)。低通滤波器也由两个元素组成,两个元素分别与泵浦光的短脉冲或长脉冲相匹配,长短脉冲元素之间具有  $\theta$  的相位差和  $r$  的幅值比。最终通过特定权重比联合计算得到了接近洛伦兹光谱的理想光谱使 S-BOTDR 系统突破了 BOTDR 空间分辨率极限,在 40 m 的传感长度下实现了 0.1 m 的空间分辨率。

## 2.3 相移脉冲 BOTDR 法和差分交叉光谱 BOTDR 法

2016 年日本芝浦工业大学 Shibata 等<sup>[15]</sup>提出了一种相移脉冲 BOTDR (phase shift pulse BOTDR, PSP-BOTDR),利用长脉冲和具有相移调制的短脉冲,探测到 354.4 m 长度下 0.2 m 的空间分辨率。

激光器发出的两组探测脉冲,每组脉冲由长脉冲和短脉冲组成,经过调制后的两组探测脉冲长度、间隔完全相同,只有两组的短脉冲之间具有  $\pi$  的相位差,两组探测脉冲的布里渊背散射光由光学外差接收机检测,设计两个对应时间长度和时间区域的匹配矩形窗函数,将信号的两部分分别用各自的矩形窗口函数进行采样,窗口函数间隔的时间宽度分别与长脉冲和短脉冲的脉冲宽度相同,探测脉冲信号波形如图 3(c)所示。将两组采样数据相减,得到短脉冲数据之间的变量。通过短脉冲之间相位变化产生的信息,分析得到对应长度的空间分辨率。如果只使用一个短脉冲,会导致布里渊散射光的光谱展宽,致使检测精度下降,所以由长脉冲来确定布里渊散射光的光谱宽度。因此,PSP-BOTDR 可以同时实现高空间分辨率和高精度的布里渊频移测量。该团队使用间隔 0.5 ns 的 32 ns 长脉冲和 2 ns 短脉冲,实现了 354.4 m 传感长度下 20 cm 的空间分辨率。然而,PSP-BOTDR 有时在相移过程中的跃迁会

导致非位移脉冲和  $\pi$  位移脉冲之间的光强不平衡,并使布里渊散射光谱的形状发生畸变,使精确度下降。

在 2018 年,科研人员进一步优化了方案,提出了差分交叉光谱 BOTDR 法(differential cross spectrum BOTDR, DCS-BOTDR)<sup>[16]</sup>,系统探测脉冲信号如图 3(d)所示,第 1 组组合脉冲由长脉冲和短脉冲组成,而第 2 组组合脉冲只有长脉冲,省去了复杂的相位调制。与 PSP-BOTDR<sup>[18]</sup>中使用的相位调制方案相比,强度调制方案不仅容易进行调制,而且能更加稳定产生组合脉冲,克服了相位调制会使布里渊散射谱会发生畸变的问题,突破了空间分辨率限制的同时拥有较高的检测精度。研究人员将长脉冲、短间隔和短脉冲持续时间分别设置为 20 ns、0.5 ns 和 2 ns,实现了 350 m 传感距离下 0.2 m 的空间分辨率和 3.2 MHz 的布里渊频移精度。

2.4 差分脉冲对探测法

差分脉冲对探测法(differential pulse pair BOTDR, DPP-BOTDR)系统的探测脉冲如图 3(e)所示。2008 年

渥太华大学鲍晓毅教授团队首先提出了差分脉冲对 BOTDA 法<sup>[19]</sup>,利用具有不同脉冲宽度的脉冲对,获得由两个脉冲宽度和脉冲的升降时间之差决定的高空间分辨率。该方法具有布里渊增益频谱线宽窄、布里渊频移探测精度高、不需要对长光纤进行预泵浦等优点,具有很高的研究价值。近年来,也有研究者将此方法应用在了 BOTDR 光时域反射仪中,即差分脉冲对探测法,此方法与上文中所提到的差分交叉光谱技术法(DCS-BOTDR)有些类似,但差分脉冲对探测 BOTDR 的空间分辨率由前后脉冲之间的脉宽差值决定,而且只需调制两束脉冲光。

2016 年,华南理工大学的杨中民教授团队将差分脉冲对技术应用在布里渊光时域反射仪中<sup>[17]</sup>,提出了一个具有两步减法的差分脉冲对探测 BOTDR 系统,结合快速傅里叶算法(fast Fourier transform, FFT),探测到 7.8 km 传感距离下 0.4 m 的空间分辨率。图 4 所示是差分脉冲对探测法和两步减法的过程。

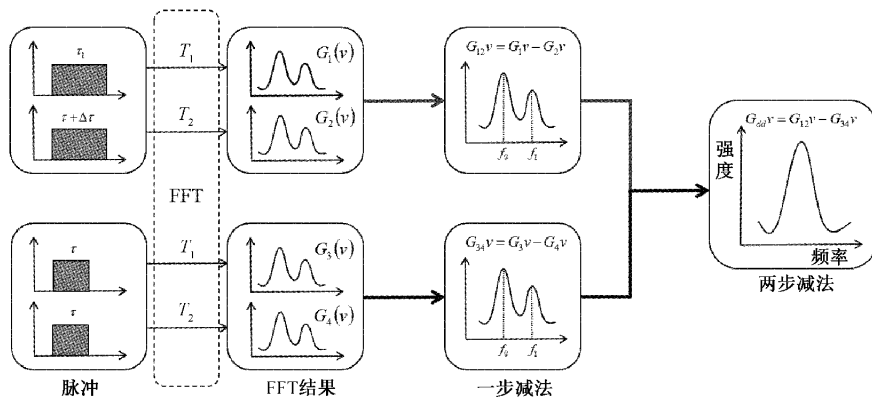


图 4 差分脉冲对探测法中两步减法的过程<sup>[17]</sup>

研究人员采用长度有  $\Delta\tau$  差距的  $\tau_1$ 、 $\tau_2$  作为探测脉冲,FFT 的时序长度同样采用长度有  $\Delta\tau$  差距的  $T_1$ 、 $T_2 = T_1 - \Delta\tau$  ( $T_1 > \tau_1$ ,  $T_2 > \tau_2$ ),长脉冲和短脉冲分别进行了不同时序长度  $T_1$  和  $T_2$  的 FFT 变换,得到 4 个布里渊光谱  $G_1(v)$ 、 $G_2(v)$ 、 $G_3(v)$ 、 $G_4(v)$ ,通过两步谱减法得到得到的微分布里渊谱如式(2)所示。

$$G_{dd}(v) = [G_1(v) - G_2(v)] - [G_3(v) - G_4(v)] \quad (2)$$

其中,  $G_{dd}(v)$  是微分布里渊光谱,一步减法与两步减法的对比如图 5 所示,利用该两步谱减法技术,加权因子  $add(x)$  突出了  $L_R = c\Delta\tau/2n$  ( $c$  为光在光纤内传播速度,  $n$  为光纤折射率)长度的半峰全宽(full width at half maxima, FWHM)的阴影区域,表明通过获得微分布里渊光谱  $G_{dd}(v)$ ,可以估计对应  $L_R$  长度光纤段上的 BFS,  $L_R$  距离下的空间分辨率由脉冲对的长度差  $\Delta\tau$  决定。同时,两步减法的加权因子  $add(x)$  比一步减法  $a_1(x)$  减少空间分辨率  $(\Delta\tau/\tau)^2$ ,所以两步减法的微分布里渊光谱的信噪比也随之提高,因此提高了系统的传感范围和测量精度。

研究团队在 7.8 km 传感距离下实现了 0.4 m 的空间分辨率。

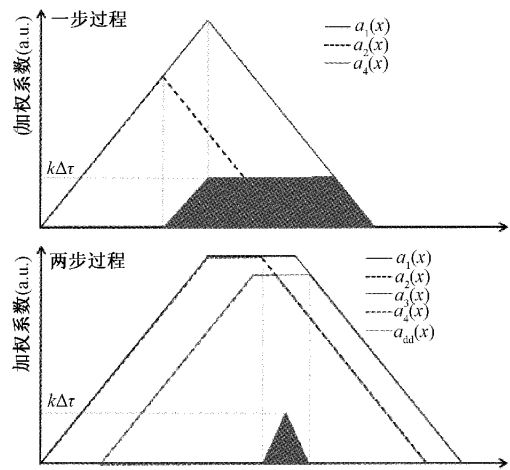


图 5 一步减法和两步减法的微分布里渊光谱的加权因子<sup>[17]</sup>



2018年,中国地质大学的余志华等利用差分脉冲对和FFT算法,在3 km的传感距离下实现了0.2 m空间分辨率<sup>[20]</sup>,并且在文中讨论了不同脉宽差和不同起落时间对空间分辨率的影响。

### 3 信号处理算法

信号处理算法是在不改变原有的BOTDR硬件的条件下,用信号处理的手段将数据进行处理从而达到提高BOTDR空间分辨率的目的,也是近年来研究者们研究的热点。

#### 3.1 迭代细分算法

2013年,南京大学的王峰等提出了一种迭代细分的信号处理算法,结合布里渊增益沿光纤的能量密度分布,探测到50 km传感距离下1.5 m的空间分辨率<sup>[21]</sup>。布里渊信号和探测脉冲在光纤中以相反的方向传输,由脉冲光产生的布里渊信号会向后传输,并与此脉冲附近的部分脉冲产生的布里渊信号重叠,而检测系统需要一个响应时间来接收布里渊信号,响应时间由光电器件如探测器、滤波器和放大器的带宽决定。所以检测到某一点的布里渊信号实际上包含了响应时间中不同位置返回的布里渊信号所携带的信息。通过结合检测系统的响应时间和探测脉冲的宽度对布里渊信号的影响,研究者同时提出了一种能量密度分布(energy density distribution, EDD),可以在加热/受力部分之前,基于已知的布里渊信号,迭代地推导出加热/应力部分周围的子布里渊信号。基于能量密度分布图和迭代细分的数据处理方法,研究者使用100 ns宽度的探测脉冲进行实验,BOTDR的检测系统的响应时间为5 ns,合计对应10.5 m的空间分辨率,将检测到的布里渊信号对应的光纤段细分为7段,每段分别对应1.5 m的空间分辨率,洛伦兹拟合分布布里渊光谱后的BFS曲线显示得到的布里渊频移与实际值误差仅有1.1 MHz,验证了算法的准确性。

#### 3.2 脉冲细分叠加法

2017年,燕山大学付兴虎教授课题组提出了与迭代细分算法十分相似的脉冲细分叠加法(pluse subdivision superposition, PSS)<sup>[22]</sup>,将探测脉冲分离为多段子脉冲,用10 ns脉冲实现了0.1 m的空间分辨率。通过分析用PSS方法得到的光谱,通过相邻位置间布里渊增益谱的差分相减并结合2 GHz速率时域信号的高采样率采集,实现了空间分辨率的提高。

#### 3.3 简化分段分析法

2021年,华中科技大学的黄强等提出了一种简化分段分析法的信号处理方法,在一阶拉曼放大的辅助下探测到78.45 km长度下0.4 m的空间分辨率<sup>[23]</sup>。与迭代细分算法<sup>[21]</sup>不同,简化分段分析法没有结合EDD,而是通过分析布里渊增益谱的叠加特性,确定温度或应变的起点由第一次出现的最大布里渊频移决定,得到准确的起始计算点。

研究者用100 ns的探测脉冲和分段布里渊增益谱分析法,在一阶拉曼放大BOTDR系统中探测到78.45 km长度下0.4 m的空间分辨率,与传统的扫频算法相比提高了检测精度,同时研究者还在无拉曼放大辅助的BOTDR系统里对算法进行了实验,探测到28.5 km长度下0.4 m的空间分辨率和5.6  $\mu\epsilon$ 的应变精度。

#### 3.4 基于二次时频变换的信号处理方法

2017年,剑桥大学的Yu等提出了基于二次时频变换的信号处理方法<sup>[24]</sup>,选取了5种二次时频变换的方法和BOTDR系统中常用的短时傅里叶变换技术(short time Fourier transform, STFT)一起进行实验,与STFT技术处理的信号相比,使用二次时频技术的Zhao-Atlas-Marks(ZAM)等方法处理的信号噪声更小,能提取到更优的空间分辨率和更好的传感精度。

#### 3.5 基于四阶HSCW-DFT的信号处理方法

2020年,长沙理工大学的唐立军教授课题组提出了一种基于四阶汉宁自卷积窗口(4th-order Hanning self-convolution window, 4th-HSCW)的信号处理方法,并将其应用于(discrete fourier transform-BOTDR, DFT-BOTDR)系统<sup>[25]</sup>。布里渊后向散射通过卷积与四阶汉宁自卷积窗口进行剖面加权,其中布里渊频谱的中心频率由加权函数决定,频谱功率集中在主叶,从而得到优化的空间分辨率。与传统的矩形窗口相比,高阶自卷积窗口具有良好的侧叶特性,进一步抑制了布里渊光谱中的光谱泄漏和DFT处理引起的栅栏效应。研究团队在脉冲宽为300 ns、采样率为625 MS/s的5 km长的传感光纤上进行了应变传感实验,此系统采用传统的矩形窗口的理论空间分辨率为43 m,由探测光脉冲宽度和DFT采样率共同作用。实验结果表明,通过提出的四阶汉宁自卷积窗口,提高了33 m空间分辨率。该传感系统在准确定位、数据分析方面具有广阔的应用前景。

## 4 方法对比

总的来说,提高空间分辨率的方法主要分为两大类:通过组合脉冲对提高空间分辨率和通过信号处理算法。本文依次对DP-BOTDR<sup>[13]</sup>、PSP-BOTDR<sup>[15]</sup>、DCS-BOTDR<sup>[16]</sup>等提高布里渊时域反射技术中空间分辨率的方法进行介绍,各类方法的特点有所区别,如表1所示。Koyamada在2007年首次提出了使用组合脉冲的方法打破声子寿命的限制,将BOTDR系统的空间分辨率提高到分米级别的探测水平,但双脉冲法<sup>[13]</sup>存在一些问题,为了保证两束脉冲光在光纤同一位置回返的散射光相干,双脉冲的间距要小于声子寿命,而双脉冲自身的宽度也很短,需要使用性能较好的脉冲调制器,而且在处理回返的散射光时,电学器件中的随机抖动和双脉冲之间的时间间隔抖动会使采集到的信号发生震荡,使系统的检测精度下降<sup>[18]</sup>。S-BOTDR<sup>[14]</sup>利用长短脉冲光谱检测达到了0.1 m的空间

分辨率,但是系统和信号处理太过于复杂,不适合用在工程领域。PSP-BOTDR<sup>[15]</sup>利用两束短脉冲之间的相位差信息,分析得到 0.2 m 的空间分辨率的同时还有较为精确的 BFS 检测精度,但在实际使用时相移过程中的跃迁会导致无位移脉冲和  $\pi$  位移脉冲之间的光强不平衡,并使布里渊谱的形状发生畸变,使精确度下降,相位调制的加入也使系统结构更加复杂。之后研究者在 PSP-BOTDR<sup>[15]</sup>的基础上改进出了无需相位调制的 DCS-BOTDR<sup>[16]</sup>系统,省去了第二组脉冲组合中的短脉冲,简化了脉冲调制过程。DPP-BOTDR<sup>[17]</sup>借鉴了 DPP-BOTDA 的设计思路,通过一长一短的两个脉冲即可实现高空间分辨率测量,脉冲调制过程简单,系统结构与主流的 BOTDR 系统接近,具有良好的应用前景,系统的不足是 BFS 检测精度不够理想,还有提升的空间。在信号处理算法层面,近年来具有代表性的是

迭代细分算法<sup>[21]</sup>,将检测到的回返布里渊信号分离成数十个子布里渊信号,最后检测到的布里渊信号分别是由每个短段产生的子布里渊信号的叠加,并结合布里渊增益沿光纤的能量密度分布,取得了很好的效果。与迭代细分算法<sup>[21]</sup>十分类似的还有脉冲细分叠加法<sup>[22]</sup>和简化分段分析法<sup>[23]</sup>,其中简化分段分析法<sup>[23]</sup>在实验中使用一阶拉曼放大的 BOTDR 系统在 78.45 km 的距离实现了亚米级别的空间分辨率。二次时频变换<sup>[24]</sup>的信号处理方法提供了一种新思路,在未来可以将多种时频变换的方法联合使用,结合各种方法的优点来同时提高空间分辨率和检测精度。近年来还有研究者提出了基于四阶 HSCW-DFT<sup>[25]</sup>的信号处理方法来提高 BOTDR 系统的空间分辨率,但使用的探测脉冲宽度过高,虽暂时不具有工程应用价值,但仍具有良好的研究前景。

表 1 各类提高空间分辨率方法及其特点

检测方法名称	简称	测量距离	空间分辨率	优点/意义
双脉冲 BOTDR 法 <sup>[13]</sup>	DP-BOTDR	16 m	0.2 m	首位利用组合脉冲对达到分米级别空间分辨率
合成光谱 BOTDR 法 <sup>[14]</sup>	S-BOTDR	40 m	0.1 m	同时提高了空间分辨率和频率分辨率
差分交叉光谱技术法 <sup>[15]</sup>	PSP-BOTDR	354.4 m	0.2 m	在较短的空间分辨率的情况下具有较高的布里渊频率精度(1.08 MHz)
相移脉冲 BOTDR 法 <sup>[16]</sup>	DCS-BOTDR	350 m	0.2 m	与 PSP-BOTDR 相比,用单一长脉冲替换掉了长脉冲+短脉冲组合,简化了调制过程
差分脉冲对探测法 <sup>[17]</sup>	DPP-BOTDR	7.8 km	0.4 m	系统与当前主流 BOTDR 产品类似,具有不错的工程应用前景,相比 DCS-BOTDR 系统又减少了一个短脉冲调制
迭代细分算法 <sup>[21]</sup>	—	50 km	1.5 m	仅通过信号处理算法将同一系统的空间分辨率提高了数倍,同时具有较高的布里渊频率精度,具有广阔的工程应用前景
脉冲细分叠加法 <sup>[22]</sup>	—	11 m	0.1 m	BFS 检测精度高
简化分段分析法 <sup>[23]</sup>	—	78.45 km	0.4 m	通过分析布里渊增益谱的叠加特性确定了温度/应变的起始位置,实现了自动化数据处理,在一阶拉曼放大系统中实现了 78.45 km 距离亚米级别的空间分辨率检测
基于二次时频变换的信号处理方法 <sup>[24]</sup>	—	—	—	提供了一种新思路,在未来可以将多种时频变换的方法联合使用,结合各种方法的优点来同时提高空间分辨率和检测精度。
基于四阶 HSCW-DFT 的信号处理方法 <sup>[25]</sup>	四阶 HSCW-DFT 法	620 m	10 m	一种新兴的信号处理方法,将空间分辨率提高了 33 m,具有研究价值

## 5 结 论

布里渊光时域反射仪经过 30 年的发展,现在已经逐步的应用到了基础结构安全监测、地质勘探等工程领域,经过研究人员的不断的研究和创新,BOTDR 系统在提高空间分辨率的前提下测量精度、测量距离也在逐步的提高,但研究人员对高空间分辨率 BOTDR 的研究依然在实

验室中继续进行,各种高空间分辨率技术的 BOTDR 还没有进入到工程领域。虽然 BOTDR 具有显著的单端检测优势,但目前,在工程领域里布里渊光时域分析仪 BOTDA 和布里渊光频率分析仪 BOFDA 的空间分辨率已经达到分米量级并具有很高的测量精度,满足了一部分的需求。另外,如果要提高系统空间分辨率势必要增添和应用高性能器件和新的算法,从而会增加成本,这也是制约空间分辨

率 BOTDR 产业化的一个原因。

考虑到工程领域需要更加简洁、有效的系统,相比信号处理算法,组合脉冲对需要使用性能更好的硬件进行多对的脉冲调制和探测,而信号处理算法则只需在软件层面对收集到的数据做进一步的分析处理,更加有利于工程应用,在 BOTDR 系统已经较为成熟的环境下,更加凸显出优化创新信号处理算法的意义。相信随着硬件和信号处理技术的提升,会出现更多提升布里渊光时域反射仪空间分辨率的方法。

### 参考文献

- [1] 包宇奔,孙军强,黄强. 布里渊光时域反射仪分布式光纤传感研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(21):21-39.
- [2] 郑来芳,张俊生,梁海坚,等. 基于时频混合特征提取算法的光纤传感信号识别研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(9):153-159.
- [3] 叶宇霄,赵新铭,吴刚,等. 分布式光纤在混凝土结构裂缝监测中的应用[J]. 土木建筑与环境工程, 2018, 40(1):24-29.
- [4] 王泽润,叶志浩,夏益辉,等. 分布式光纤测温系统分辨率影响因素研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(12):65-73.
- [5] MIRZAEI A, BAHRAMPOUR A R, TARAZ M, et al. Transient response of buried oil pipelines fiber optic leak detector based on the distributed temperature measurement[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 65: 110-122.
- [6] 于紧昌,胡传龙. 分布式光纤温度传感器在稠油开采中的应用[J]. 传感器与微系统, 2015, 34(3):158-160.
- [7] 陈刚,段洁,衣文索,等. 基于 BOTDR 散射谱的应变提取方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(1):75-81.
- [8] 谷行,白清,王清琳,等. 基于窗函数优化的布里渊光时域反射仪测温精度提升研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(1):25-31.
- [9] 单一男,马智锦,曾旭,等. 基于分布式光纤传感技术的结构变形估计方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(4):1-9.
- [10] 张中流,何宁,何斌,等. 基于分布式光纤传感技术的结构受力测量新方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(9):45-55.
- [11] 白清. BOTDR 系统性能提升关键技术研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
- [12] BAO X, CHEN L. Recent progress in brillouin scattering based fiber sensors [J]. Sensors, 2011, 11(4):4152-4187.
- [13] 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.
- [14] NISHIGUCHI K, LI C H, GUZIK A, et al. Synthetic spectrum approach for brillouin optical Time-Domain reflectometry [J]. Sensors, 2014, DOI: 10.3390/s140304731.
- [15] SHIBATA R, KASAHARA H, ELIAS L P, et al. Improving performance of phase shift pulse BOTDR[J]. Ieice Electronics Express, 2017, 14(11), DOI: 10.1587/elex.14.20170267.
- [16] ZAN M S D, MASUI Y, HORIGUCHI T. Differential cross spectrum technique for improving the spatial resolution of BOTDR sensor[C]. 2018 IEEE 7th International Conference on Photonics(ICP), 2018.
- [17] LI Q, GAN J, WU Y, et al. High spatial resolution BOTDR based on differential brillouin spectrum technique[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(14):1493-1496.
- [18] 盛志轩,潘政清,蔡海文,等. 基于双脉冲探测的亚米级空间分辨率布里渊时域反射技术[J]. 中国激光, 2016, 43(9):265-271.
- [19] 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.
- [20] YU Z, ZHANG M, DAI H, et al. Distributed optical fiber sensing with brillouin optical time domain reflectometry based on differential pulse pair [J]. Optics & Laser Technology, 2018, 105:89-93.
- [21] WANG F, ZHAN W, ZHANG X, et al. Improvement of spatial resolution for BOTDR by iterative subdivision method[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(23):3663-3667.
- [22] ZHANG Y, LI D, FU X, et al. A pluse subdivision superposition method for improving the spatial resolution in BOTDR system [J]. Optik International Journal for Light and Electron Optics, 2017:523-527.
- [23] HUANG Q, SUN J, JIAO W, et al. Improvement of performance for raman assisted BOTDR by analyzing brillouin gain spectrum[J]. Sensors, 2022, 22: 116.
- [24] YU Y, LUO L, BO L, et al. Quadratic Time-Frequency Transforms-Based brillouin optical Time-Domain reflectometry [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(20):6622-6626.
- [25] HE Q, JIANG H, WANG Z, et al. Spatial resolution enhancement of DFT-BOTDR with high-order self-convolution window [J]. Optical Fiber Technology, 2020, 57, DOI:10.1016/j.yofte.2020.102188.

### 作者简介

毕研钊, 硕士研究生, 主要研究方向为分布式光纤传感方面的研究。

E-mail: 20201249501@nuist.edu.cn

郭林峰(通信作者), 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为光纤传感技术及其应用方面的研究。

E-mail: guolf\_nj@163.com