

基于脉冲细分的多参量分布式光纤传感系统

孙抗,赵雯婧,赵来军

(河南理工大学 电气学院,河南省煤矿装备智能检测与控制重点实验室,河南 焦作 454003)

摘要:现有的分布式光纤传感系统通常只针对单一参量,当实际运行于复杂环境时,需要多种传感系统与术集成以监测多个参量。利用相敏光学时域反射仪(φ -OTDR)和布里渊光学时域反射仪(BOTDR)对不同物理参量敏感的特性,设计了一种集成的分布式光纤传感系统,并基于瑞利散射与布里渊散射信号同时传感分离检测,在单根传感光纤上实现同一调制脉冲下的振动、温度、应变多参量监测。为了在维持集成系统脉冲的同一调制下提升BOTDR空间分辨率,采用脉冲细分叠加原理分析布里渊散射信号,在不改变脉冲宽度的基础上突破声子寿命限制,提升空间分辨率。经实验验证系统表明,在50 km传感距离下,基于瑞利散射以10 m空间分辨率可实现振动定位,基于布里渊散射引入脉冲细分叠加可将空间分辨率提升至1 m检测温度与应变,且布里渊频移量与温度、应变变化具有较高的线性拟合度,实现了多参量监测。

关键词:多参量;光纤传感;脉冲细分;空间分辨率;在线监测

中图分类号:TN929.11 **文献标识码:**A

Multi-Parametric Distributed Fiber Optic Sensing System Based on Pulse Subdivision

SUN Kang, ZHAO Wenjing, ZHAO Laijun

(School of Electrical and Automation, Henan Polytechnic University, Key Laboratory of Intelligent Detection and Control of Coal Mining Equipment of Henan Province, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: Existing distributed fiber-optic sensing systems often target only a single parameter, whereas in practice, when operating in complex environments, multiple sensing systems and technologies need to be integrated to monitor various parameters. Using the characteristics of phase-sensitive optical time-domain reflectometer (φ -OTDR) and Brillouin optical time-domain reflectometer (BOTDR), which are sensitive to different physical parameters, an integrated distributed fiber-optic sensing system was designed. By employing the concurrent detection of Rayleigh and Brillouin scattering signals, various parameters such as vibration, temperature, and strain can be effectively monitored using a singular sensing fiber under a unified modulation pulse. The system relies on the concurrent detection of Rayleigh and Brillouin scattering signals to enhance the spatial resolution of BOTDR while upholding the unaltered modulation of the integrated system pulse. The Brillouin scattering signal was analyzed based on the principle of pulse subdivision superposition, which breaks through the limitations of phonon lifetime and improves spatial resolution without changing the pulse width. The system was experimentally verified to achieve vibration localization with a spatial resolution of 10 m based on Rayleigh scattering at a sensing distance of 50 km. Introducing pulse subdivision superposition based on Brillouin scattering increased the spatial resolution to 1 m for detecting temperature and strain. The Brillouin frequency shifts displayed a highly linear correlation with the changes in temperature and strain, thereby realizing the monitoring of multiple covariates.

Key words: multi-parameter; fiber optic sensing; pulse interpolation; spatial resolution; online monitoring

0 引言

光纤传感具有抗电磁干扰、低损耗和高灵敏度等优势,已被广泛用于电力监测、设施安防、油气资

源勘探、航空航天等领域。分布式光纤传感技术直接利用光纤作为传感器来感知外界参量如温度、应变和振动,对各参量状态实现光纤沿线全范围覆盖

收稿日期:2024-07-05

作者简介:孙抗(1982-),男,江苏省徐州市人,博士,教授。

的定位监测预警与实时定量检测。根据光纤中不同种类的散射光对各参量的敏感特性,主要有基于瑞利、布里渊和拉曼后向散射光学时域反射计。相位敏感的光学时域反射仪(φ -OTDR)^[1]和偏振敏感光学时域反射仪(POTDR)^[2],利用瑞利后向散射信号测量光纤所受微弱和快速的振动、偏振态变化。基于布里渊后向散射频移的布里渊光学时域反射仪(BOTDR)^[3]和布里渊光时域分析仪(BOTDA)^[4]在长距离的温度和应变分布式测量方面受到高度关注。拉曼光时域反射计(ROTDR)或拉曼分布式温度传感器(RDTS)通过检测拉曼反斯托克斯(AS)和斯托克斯(S)信号的差异来实现分布式温度测量^[5]。

上述传感器只能检测单个参量,为了有效提高传感器的集成度,提供更有价值的信息,进而对故障事件进行全面识别,通过一个传感系统实现多参量检测成为光纤传感的迫切需求。2004年南安普顿大学的 Alahbabi 等首次提出利用布里渊和拉曼散射来实现温度、应变的同时传感^[6]。由于各类散射光通常需要不同的脉冲达到系统最佳传感性能,故集成传感系统中脉冲调制仍是实际应用所面临的挑战。詹雄铿等设计并搭建了一种基于 φ -OTDR和BOTDR复合的分布式地理电缆光纤传感系统,对地理电缆的温度、振动和应变等信息进行分布式监测^[7]。但其通过双光纤传感两种不同的散射光,系统结构复杂。重庆大学的 Zhang 等按比例调制脉冲宽度与强度^[8],通过单个光电探测器提取振动、温度和应变信息,但其脉冲调制较复杂,且系统温度与应变传感的空间分辨率仍受声子寿命限制。

本文提出了一种基于 φ -OTDR与BOTDR集成的多参量分布式光纤传感系统,在同一脉冲下通过单根光纤传感对两种散射信号分别进行采集分析,从而提取光纤沿线的温度、应变与振动信号,实现多参量分布式监测。基于脉冲细分叠加原理对布里渊散射信号进行处理分析,在不改变脉宽的同时突破声子寿命限制,提升空间分辨率,实现了系统的简化且提升了传感性能。

1 多参量传感原理

1.1 φ -OTDR 原理

φ -OTDR系统使用窄线宽激光光源向传感光

纤中注入高相干光脉冲,脉冲宽度内各散射点产生的背向散射信号间发生干涉^[9],再加上光纤内折射率的不均匀性构成了散射中心,多个散射中心反射最终形成瑞利背向散射(RBS)曲线。RBS曲线呈锯齿状轮廓,因多光束干涉效应导致其探测到的信号是相干叠加的结果,进而响应外界扰动^[10]。通过对RBS信号的处理反映了光纤对应位置的后向散射功率。假设脉冲光传输到光纤始端时光强为 E_0 ,脉冲光脉宽为 w ,散射点数量为 M ,则同一脉冲下散射光强可表示为

$$E_{\text{RBS}} = \sum_{i=1}^M \lambda \exp(j\varphi_{Li}) E_0 \exp(-2\alpha L_i + j2\beta L_i - \omega t) \quad (1)$$

式中: λ 为后向瑞利散射系数; α 为光的衰减系数; β 为光传播系数; ω 为入射光角频率; φ_{Li} ($i=1,2,3,\dots$)为第 i 个散射点RBS信号相对于入射脉冲的相位差。后向散射功率可分为来自独立散射中心的光功率复和 $I_c(t)$ 与来自不同散射中心的散射波在脉冲持续时间内的干涉 $I_v(t)$ 。其中, $I_c(t)$ 对振动引起的相位变化不敏感,而 $I_v(t)$ 受相位差 φ_{ij} 的变化影响可表示为

$$I_v(t_0) = 2 \sum_{i=1}^M \sum_{j=i+1}^M a_i a_j \exp \left[-\frac{\alpha}{2} \cdot \frac{c(\tau_i + \tau_j)}{n} \right] \cos \varphi_{ij} \quad (2)$$

式中: c 为真空中光速; n 为光纤折射率; a_i 和 τ_i 分别为第 i 个散射波的振幅和时延^[11]。基于光纤振动事件期间的背向瑞利散射光信号强度将发生明显变化,将两个相邻的响应曲线进行差分,同时对信号幅度变化进行快速傅里叶变换,可以实现对振动事件的准确定位并获取有关振动的频域信息^[12]。

1.2 BOTDR 原理

由于光脉冲信号在光纤中传输损耗及声场多普勒效应影响,光纤中布里渊散射将发生频率移动且存在一定带宽,此现象为布里渊频移,有:

$$\nu_B = \frac{2nV_a}{\lambda_0} = \frac{2n\nu_0 V_a}{c} \quad (3)$$

式中: V_a 为声场速度; λ_0 和 ν_0 分别为入射光的波长和频率。由于光纤的材料特性,环境温度的变化会触发热光效应,而应变作用会引发弹光效应。在这两种效应的共同影响下,光纤的纤芯折射率和内部声场速度发生变化^[13],此时布里渊散射光的频移受温度和应变的影响可表示为

$$\begin{cases} C_{v_B, T} = \frac{dv_B}{dT} = \frac{2}{\lambda_0} \left(V_a \frac{dn}{dT} + n \frac{dV_a}{dT} \right) \\ C_{v_B, \epsilon} = \frac{dv_B}{d\epsilon} = \frac{2}{\lambda_0} \left(V_a \frac{dn}{d\epsilon} + n \frac{dV_a}{d\epsilon} \right) \end{cases} \quad (4)$$

式中 $C_{v_B, T}$ 和 $C_{v_B, \epsilon}$ 分别为布里渊频移对温度和应变的响应。由于布里渊频移对温度、应变的交叉敏感性,推导出加载温度或应变变化到光纤上时有

$$\Delta v_B = C_{v_B, T} \Delta T + C_{v_B, \epsilon} \Delta \epsilon \quad (5)$$

由式(5)可知,布里渊频移的变化量与温度、应变的变化量呈线性关系。通过动态探测各位置的布里渊散射光中心频率,实现了全光纤应变与温度变化的分布式监测。

1.3 多参量分布式光纤传感系统

振动是一个快速变化的参数,可通过 φ -OTDR 中瑞利后向散射强度的变化进行检测;而静态参数,如温度和应变可通过 BOTDR 的布里渊后向散射频移进行检测。两种传感系统均需要窄线宽激光,因此可以复用激光器、调制器和放大器,即采用同一调制脉冲。关于两种散射信号的接收采集问题,先通过耦合器分离两种信号,再采用不同的方

式分别检测。瑞利散射光强约高于布里渊散射光强 3 个数量级,因此, φ -OTDR 可忽略布里渊散射信号的影响,采用直接探测对瑞利散射信号进行采集^[14],而自发布里渊散射信号强度较弱,采用相干探测方式进行采集。

图 1 为多参量分布式光纤传感系统结构。由图可见,激光器输出连续窄线宽光源,经耦合器 1 分为两路:一路进入调制器调制为光脉冲,另一路作为 BOTDR 相干探测的参考光。光脉冲经放大器放大后再通过环形器进入光纤作为探测光。探测光在光纤中传感产生瑞利与布里渊散射信号,两种散射信号经环形器进入耦合器 3 进行分离。瑞利散射信号经滤波器滤波后直接由 APD 采集接收。布里渊散射信号与经过偏扰器的参考光在耦合器 2 中拍频,再经过宽带 PD 采集。由于散射信号较微弱,通过低噪放大器进一步放大,再将拍频信号与微波源产生的振荡信号在混频器中进行混频,并通过设置微波源的频率范围依次扫频以获得布里渊散射谱^[15]。综上,基于同一调制脉冲在单根光纤上传感,实现多参量分布式监测。

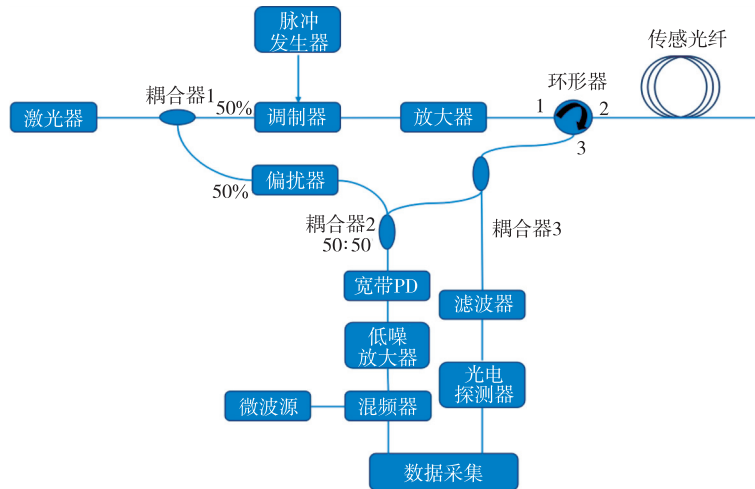


图 1 系统结构图

2 基于脉冲细分原理的空间分辨率提升

在集成的多参量传感系统中对两种光时域反射技术采用同一调制脉冲以简化系统,为提高系统的空间分辨率,通常采用窄脉宽脉冲。研究表明,受限于声子寿命,当探测脉冲宽度小于 10 ns 时,布里渊散射信号的频谱会明显展宽,导致布里渊频移量误差增大^[16]。因此,传统 BOTDR 的空间分辨率通常限制在米级,空间分辨率与脉冲宽度的关系为

$$D = c\tau/2n \quad (6)$$

式中: c 为真空中的光速; τ 为探测脉冲宽度。为了在集成系统同一调制的基础上突破 BOTDR 声子寿命限制下的空间分辨率,基于脉冲细分法对布里渊散射信号进行分析处理。脉冲细分是指一个探测脉冲可以均匀地分成 n 个脉冲宽度相同的子脉冲,这些子脉冲在光纤中传播并产生 n 个布里渊散射信号,过程如图 2 所示。

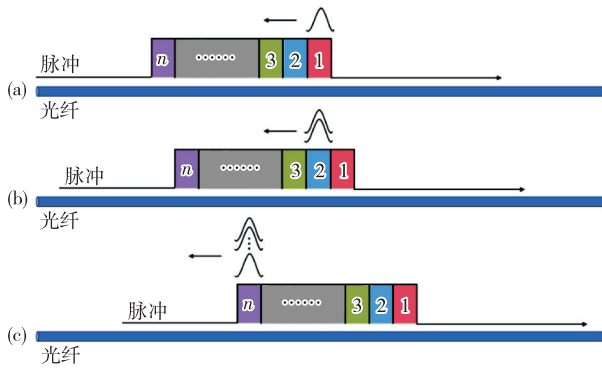


图 2 布里渊信号的脉冲细分叠加原理

由图 2(a)可见,被分为 n 段的脉冲光头部第一个子脉冲产生布里渊散射信号,由于散射信号与脉冲传输方向相反,故当脉冲继续向前传输,第一个子脉冲产生的散射信号同时向后传输,在第二个子脉冲位置处与第二子脉冲产生的布里渊信号叠加,如图 2(b)所示。其他子脉冲经历同样的过程,最终脉冲信号尾端产生的布里渊信号与前 $n-1$ 个子脉冲的散射信号叠加如图 2(c)所示。因此,在任意采样点检测到的布里渊信号都是 n 段子脉冲的叠加结果^[17]。在第 i ($i=1, 2, 3, \dots, n$) 个子脉冲位置具有洛伦兹线性谱的布里渊散射光可以考虑为

$$g_{B_i}(\nu) = \frac{g_0(\Delta\nu_B/2)^2}{(\nu - \nu_{B_i})^2 + (\Delta\nu_B/2)^2} \quad (7)$$

式中: g_0 为布里渊增益; $\Delta\nu_B$ 为谱线宽度; ν_{B_i} 为子脉冲在第 i 个位置产生的中心频率。因此,室温下光纤中实际具有洛伦兹线性谱的布里渊散射可以认为是布里渊谱的离散叠加,表示为

$$g_B(\nu) = \sum_{i=1}^n \frac{g_0(\Delta\nu_B/2)^2}{(\nu - \nu_{B_i})^2 + (\Delta\nu_B/2)^2} = \frac{g_0(\Delta\nu_B/2)^2}{(\nu - \nu_B)^2 + (\Delta\nu_B/2)^2} \quad (8)$$

若光纤长度为 D/n , 温度为 T 时,其对应的亚后向散射光中心频移将变为 $\nu_{B_{iT}}$ 。在其他光纤长度、温度不变的情况下,所得频移仍为 ν_B 。为了获得 i 位置的温度 T ,通过微分实时散射谱和标准散射谱实现脉冲细分叠加方法。在温度 T 下具有洛伦兹线性谱的实际布里渊散射表示为

$$g_{B_{iT}}(\nu) = \sum_{i=1}^n \frac{g_0(\Delta\nu_B/2)^2}{(\nu - \nu_{B_{iT}})^2 + (\Delta\nu_B/2)^2} = \frac{g_0(\Delta\nu_B/2)^2}{(\nu - \nu_{B_{iT}})^2 + (\Delta\nu_B/2)^2} \quad (9)$$

由式(8)、(9)相减可得:

$$\Delta g(\nu) = g_{B_{iT}}(\nu) - g_B(\nu) = \sum_{i=1}^n \frac{g_0(\Delta\nu_B/2)^2}{(\nu - \nu_{B_{iT}})^2 + (\Delta\nu_B/2)^2} - \frac{g_0(\Delta\nu_B/2)^2}{(\nu - \nu_B)^2 + (\Delta\nu_B/2)^2} \quad (10)$$

假设 $\Delta g(\nu) = 0$, 则有

$$\nu_{B_{iT}} = 2\nu_0 - \nu_B \quad (11)$$

式中 ν_0 为式(10)所对应的频率。因此,通过脉冲细分叠加法可以获得光纤长度 D/n 的温度 T , BOTDR 系统的空间分辨率提升至 D/n 。由式(5)可知,布里渊频移特性对于应变同样适用,因此,脉冲细分叠加法可以提升 BOTDR 系统温度与应变监测的空间分辨率。

3 仿真实验与分析

3.1 多参量传感验证

3.1.1 振动测量

基于图 1 所示实验系统在 Matlab 中仿真对瑞利散射光直接探测采集。光纤中散射中心随机分布,密度与散射率服从均匀分布,在传感光纤 $cT_s/(2n)$ 的一小段中只包含一个散射点^[18], $T_s = 5$ ns 为采样时间间隔,采样率 100 MHz,脉冲间隔 10 μ s,纤芯折射率 $n = 1.5$ 。光纤损耗系数为 0.2 dB/km,激光光源功率 20 mW,脉冲宽度 100 ns 对应空间分辨率 10 m,放大器放大倍数为 20,探测器光电转换率为 0.9。仿真中忽略光纤的非线性效应,设置在传感光纤 500 m 处添加振动信号以模拟外界振动事件,设置振动频率 1 kHz,得到 500 组后向瑞利散射信号如图 3 所示。

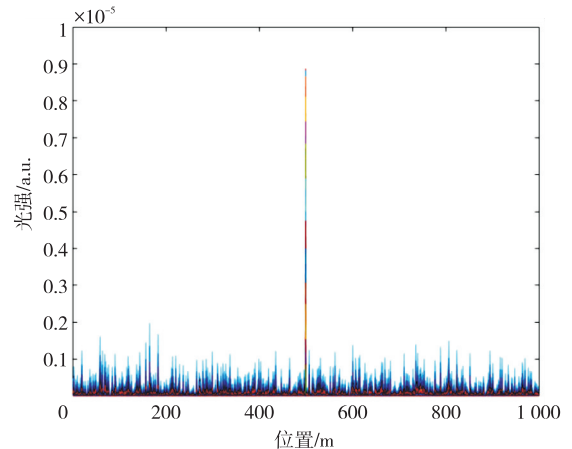


图 3 振动定位图

由图 3 可见,在 500 m 处的各组散射信号光强

明显不同于其他位置,其他位置的各组散射信号有较小的波动,其原因是在采集过程中存在噪声干扰,系统能够清晰判断出在光纤 500 m 处存在一个振动信号,与仿真实验设置振动位置相同。因此, φ -OTDR 系统对振动事件可以实现准确定位捕捉。

3.1.2 温度测量

根据布里渊散射信号的特征,通过 Matlab 进行仿真。首先将正弦波信号的频率随机分布并叠加随机相位噪声,再将多个这样的正弦波信号进行叠加形成宽带调制信号。采用宽带调制信号对周期指数信号进行幅度调制^[19],调制信号与指数信号为

$$s(t) = \cos(2\pi ft) \quad (f = 10^7 \text{ Hz}) \quad (12)$$

$$s(t) = \cos\left\{2\pi\left[f_c t - \frac{35}{b}(e^{-bt} - 1)\right]\right\} \quad (f_c = 10^7 \text{ Hz}, b = 0.001) \quad (13)$$

基于 3.1.1 节的仿真参数设置,在室温 25 °C 下分别在光纤 1 km、2 km、3 km 位置处依次递增 5 °C 以验证系统的温度测量能力,仿真光纤传感系统采集所得到的布里渊散射信号。图 4 为三维布里渊增益谱,显示了光纤温度在不同位置处等量增加时,布里渊频移曲线的分布情况。图 5 为经归一化处理后的谱图。

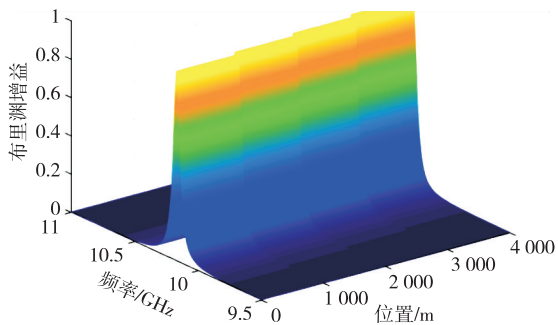


图 4 不同温度下的三维布里渊增益谱

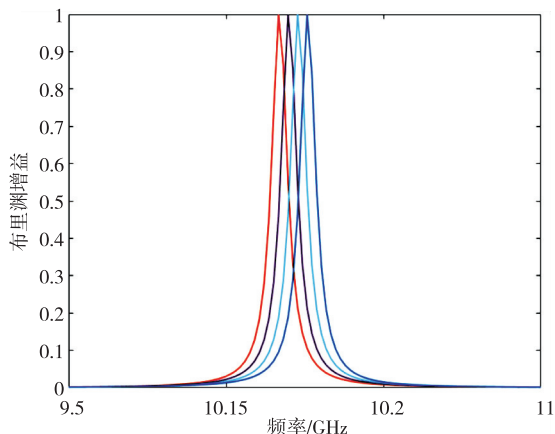


图 5 不同温度下的布里渊归一化谱图

由图 4-5 可见,在设置温度变化的 3 处位置,布

里渊散射信号的中心频率也依次变化。在传感光纤前 1 km 无温度变化时,中心频率为 10.169 5 GHz;在 1 km 处温度增加后,中心频率移动至 10.175 4 GHz;2 km 处温度再次升高,中心频率移动至 10.181 5 GHz;3 km 后移动至 10.187 4 GHz,即布里渊散射中心频率随温度上升而逐步增加。图 6 为在不同的测试温度下布里渊散射中心频率的测量结果。由图可见,曲线呈良好的线性关系,曲线斜率即布里渊频移的温度系数,为 1.19 MHz/°C。由于光纤材质的多样性,各类型光纤的温度系数也有细微差别,这属于正常现象。

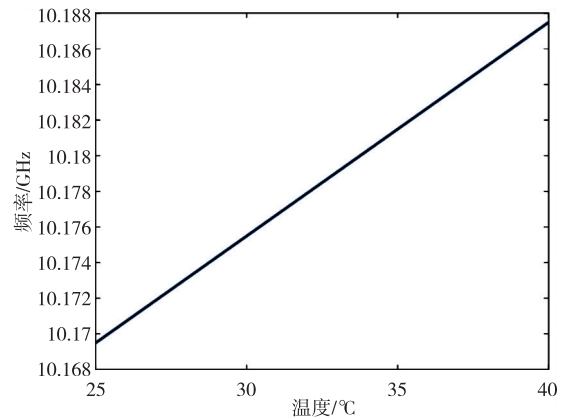


图 6 温度频率线性拟合图

3.1.3 应变测量

基于 3.1.2 节对布里渊散射信号的仿真设置,分别在光纤 1 km、2 km、3 km 位置处施加依次递增 500 $\mu\epsilon$ 的应变信号,仿真采集布里渊散射信号,拟合应变与散射信号中心频率以验证系统应变测量的线性度。由于光纤在应力作用下发生弹性形变,光纤所受应力与产生的应变之比即杨氏模量保持恒定,则光纤产生的应变与所受应力成正比^[20]。图 7 为系统仿真得到的光纤不同位置处设置等量增加应变的三维布里渊增益谱,归一化处理结果如图 8 所示。

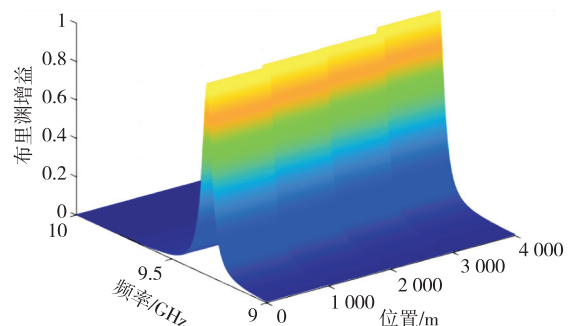


图 7 不同应变下的三维布里渊增益谱

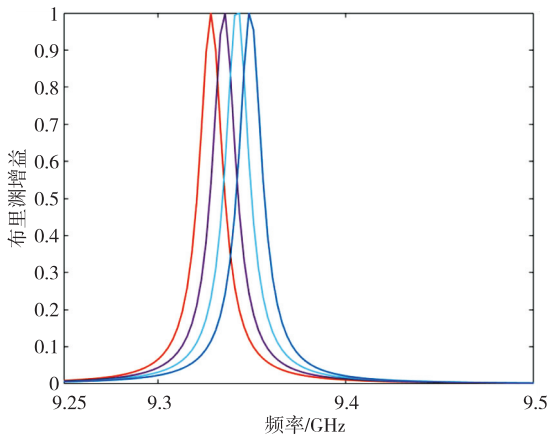


图 8 不同应变下的布里渊归一化谱图

由图 7-8 可见,在设置应变变化的 3 处位置,布里渊散射信号中心频率依次变化。在传感光纤前 1 km 无应变时,中心频率为 9.313 3 GHz;在 1 km 处应变增加,中心频率移至 9.334 2 GHz;2 km 处应变再次提高,中心频率移至 9.353 4 GHz;3 km 后移至 9.373 9 GHz,即布里渊散射中心频率随应变增加而逐步上升。应变与布里渊频移的拟合结果如图 9 所示,布里渊频移与光纤上所施加的应变呈良好的线性相关,布里渊频移的应变系数为 0.04 MHz/ $\mu\epsilon$ 。

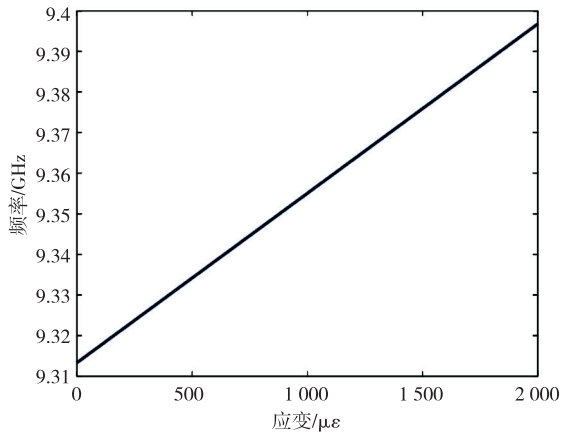


图 9 应变频率线性拟合图

3.2 基于脉冲细分法的空间分辨率提升验证

基于 3.1 节仿真实验设置,探测脉冲宽度为 100 ns,对应空间分辨率为 10 m。将 50 km 光纤末端 3 m 段由室温 20 °C 加热至 45 °C,即将加热段光纤的布里渊中心频率移动 20 MHz 来设置模拟温区。引入脉冲细分叠加,细分为 10 段,即每段空间分辨率提升至 1 m,对比细分叠加前后光纤末端布里渊频移变化曲线如图 10 所示。由图可见,细分叠加后频移变化量为 24.03 MHz,与理论值 25 MHz

相比,误差仅为 3.88%,而直接拟合的频移量为 12.93 MHz,误差达到 48.28%。误差存在的原因是温度变化的光纤段长度小于空间分辨率,而引入细分叠加在提升空间分辨率的同时实现了精确测量。

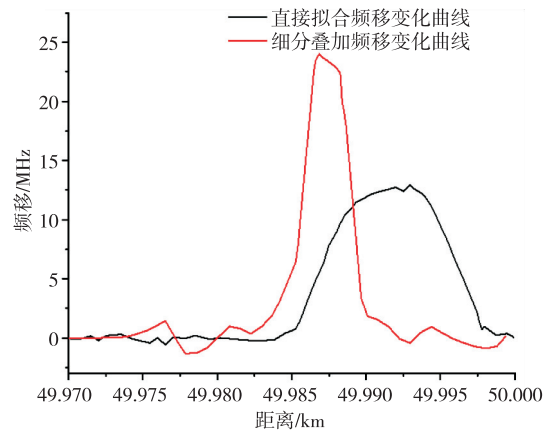


图 10 细分叠加前后频移变化曲线

4 结束语

本文设计了一种新型的分布式光纤传感系统,该系统基于 φ -OTDR 与 BOTDR 原理,在同一脉冲下利用单根光纤传感布里渊与瑞利散射信号,分别采集分析信号,实现了温度、应变与振动的多参量分布式监测。通过脉冲细分叠加原理分析布里渊散射信号,突破声子寿命限制,在不改变脉宽的同时提升空间分辨率。经验证,100 ns 脉宽在 50 km 传感距离下,引入细分叠加后空间分辨率由 10 m 提升至 1 m,布里渊频移误差由 48.28% 降至 3.88%。通过对布里渊散射光频移变化的实时监测,得到温度波动和应变变化,两者呈良好的线性关系。对瑞利背向散射光的实时监测可得到振动位置,实现温度、应变和振动 3 个参量的分布式监测。该系统集成两种光时域反射技术,结构简单且空间分辨率有所提升,线性度良好,灵敏度高,可实现多参量分布式监测。

参考文献:

[1] 张旭苹,丁哲文,洪瑞,等. 相位敏感光时域反射分布式光纤传感技术[J]. 光学学报,2021,41(01):100-114.
ZHANG X P, DING Z W, HONG R, et al. Phase-sensitive optical time-domain reflection distributed fibre-optic sensing technology[J]. Journal of Optics, 2021,41(01):100-114.

[2] XIONG B H, LUO X S, GU J, et al. A POTDR system based on dual sensing directions[J]. IEEE Photon-

- ics Journal, 2020, 12(2):1.
- [3] BASTIANINI F, SANTE R D, FALCETELLI F, et al. Optical fiber sensing cables for Brillouin-based distributed measurements[J]. *Sensors*, 2019, 19(23):5172.
- [4] 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):106001.
- [5] DU W, WEI S N, LI N, et al. Highly sensitive fiber optic enhanced Raman scattering sensor[J]. *Optics and Laser Technology*, 2024, 168:109879.
- [6] ALAHBABI M N, CHO Y T, NEWSON T P. Simultaneous distributed measurements of temperature and strain using spontaneous Raman and Brillouin scattering[C]//Santander, Spain; Second European Workshop on Optical Fibre Sensors, 2004.
- [7] 詹雄铿, 余泓圻, 李钙, 等. 基于分布式光纤传感的多参量埋地电缆检测装置研究[J]. *工业仪表与自动化装置*, 2019(2):26-29.
- ZHAN X K, YU H Q, LI G, et al. Research on multi-parameter buried cable detection device based on distributed optical fibre sensing[J]. *Industrial Instrumentation and Automation Device*, 2019(2):26-29.
- [8] ZHANG J D, ZHU T, ZHOU H, et al. High spatial resolution distributed fiber system for multi-parameter sensing based on modulated pulses[J]. *Opt. Express*, 2016, 24(24):27482-27493.
- [9] 季寿宏. 基于 φ -OTDR 的分布式光纤预警系统设计及应用[J]. *煤气与热力*, 2020, 40(5):9-14.
- JI S H. Design and application of distributed fibre optic warning system based on φ -OTDR[J]. *Gas and Heat*, 2020, 40(5):9-14.
- [10] ZHONG X, ZHANG C, LI L, et al. Influences of pulse on phase-sensitivity optical time domain reflectometer based distributed vibration sensor[J]. *Optics Communications*, 2016:3611-5.
- [11] 许萌, 杨阳, 徐磊, 等. 基于压缩感知的空间虚拟阵列波束形成技术[J]. *光学与光电技术*, 2020, 18(2):47-54.
- XU M, YANG Y, XU L, et al. Spatial virtual array beamforming technique based on compressed sensing[J]. *Optics and Photonics*, 2020, 18(2):47-54.
- [12] 苑立波, 童维军, 江山, 等. 我国光纤传感技术发展路线图[J]. *光学学报*, 2022, 42(1):0100001.
- YUAN L B, TONG W J, JIANG S, et al. Roadmap of fiber optic sensor technology in China[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(1):0100001.
- [13] 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.
- BAO Y B, SUN J Q, HUANG Q. Progress of distributed fibre-optic sensing by Brillouin optical time-domain reflectometer[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(21):21-39.
- [14] 张凯, 药炜, 原军, 等. 相位敏感 OTDR 和布里渊 OTDR 结合的双参量分布式光纤传感的研究[J]. *激光与红外*, 2021, 51(1):74-79.
- ZHANG K, YAO W, YUAN J, et al. Study of dual parametric distributed fibre optic sensing by combining phase-sensitive OTDR and Brillouin OTDR[J]. *Laser and Infrared*, 2021, 51(1):74-79.
- [15] 任娟. 具有多参量同步检测能力的融合型分布式光纤传感系统[D]. 南京: 南京大学, 2020.
- [16] 刘鑫煜, 陈理平, 陈玉明, 等. 利用信号处理技术改善布里渊光时域反射仪空间分辨率研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2024, 61(13):44-54.
- [17] LIU X Y, CHEN L P, CHEN Y M, et al. Progress in the study of improving the spatial resolution of Brillouin optical time-domain reflectometer using signal processing techniques[J]. *Advances in Lasers and Optoelectronics*, 2024, 61(13):44-54.
- [18] JIANG C, MA J, LI M, et al. A long pulse bidirectional BOTDA technology developed for strain positioning and measurement[J]. *Optics and Laser Technology*, 2021, 143(4):107361.
- [19] 赵艳夺, 王目光, 张静, 等. 高空间分辨率大带宽分布式光纤振动传感系统[J]. *光学学报*, 2022, 42(19):31-39.
- [20] 张丽娟. 基于布里渊散射的双参量分布式光纤传感系统研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2013.
- [21] 尉婷, 吴冰冰, 龙万江, 等. 支吊架结构输油管道应变仿真及光纤布里渊散射实验研究[J]. *光通信技术*, 2022, 46(6):73-76.
- YU T, WU B B, LONG W J, et al. Optical fiber Brillouin scattering experimental study and strain simulation of oil pipeline with support and hawger structure[J]. *Optical Communication Technology*, 2022, 46(6):73-76.