

## 基于大调制中心频率的布里渊光相关域反射技术

江岳凯<sup>1</sup>, 路元刚<sup>1\*</sup>, 姚雨果<sup>2</sup>, 张伍军<sup>1</sup>, 赫崇君<sup>1</sup>, 梁璐璐<sup>1</sup><sup>1</sup>南京航空航天大学空间光电探测与感知工信部重点实验室, 江苏 南京 211106;<sup>2</sup>常熟理工学院电气与自动化工程学院, 江苏 常熟 215506

**摘要** 为了提高分布式光纤温度传感的空间分辨率,提出了一种基于大调制中心频率的外调制布里渊光相关域反射(BOCDR)新技术。笔者发现了外调制BOCDR系统中的拍频谱噪声,分析了该噪声的起因以及其对被测信号混叠的影响,并据此发现使用较大的调制中心频率可以抑制拍频谱噪声对布里渊散射信号混叠的影响,从而获得较高的空间分辨率及较大的温度测量范围。利用所提出的基于大调制中心频率的BOCDR新技术,在一个验证实验中,使用一段长为17.2 m的G657光纤实现了连续分布式测量。实验结果表明,外调制BOCDR系统的空间分辨率为11.6 cm,温度的测量不确定度为0.26 °C,测量不确定度比同类系统低一个数量级。

**关键词** 光纤光学; 光纤传感器; 分布式传感; 温度传感; 布里渊光相关域反射; 高空间分辨率

中图分类号 TN247

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230529

## 1 引言

温度是一个非常重要的环境参量,对它的传感监测在航空航天、能源、电力、交通、通信等领域都有着非常广泛的需求。因光纤具有抗电磁干扰、体积小、质量轻等优点,基于光纤传感技术的温度传感已有较多研究与应用。目前的分立式光纤温度传感技术包括基于光纤布拉格光栅(FBG)的温度传感技术<sup>[1-2]</sup>、基于光学微腔的温度传感技术<sup>[3]</sup>、基于法布里-珀罗干涉仪的温度传感技术(FPI)<sup>[4]</sup>、基于马赫-曾德尔干涉仪(MZI)的温度传感技术<sup>[5]</sup>等。很多应用场景中需要对某一区域进行连续分布式的高空间分辨率温度监测,这就需要分布式测温光纤传感技术。目前可实现温度连续分布式监测的光纤传感技术主要包括基于拉曼散射的分布式光纤传感技术和基于布里渊散射的分布式光纤传感技术。基于拉曼散射的分布式光纤传感技术具有温度测量灵敏度高、耐高压和强磁场等优点。拉曼散射效应仅对温度敏感,克服了温度和应变交叉敏感的问题,因此基于拉曼散射的分布式光纤传感技术可凭借其高灵敏度测温的优势应用在油田、桥梁、建筑及电力等领域<sup>[6-7]</sup>。但基于拉曼散射的分布式光纤传感技术存在信号光强度较弱、传感距离较短的问题<sup>[8]</sup>。基于布里渊散射的分布式光纤传感技术在温度测量方面具有空间分辨率高、测量速度快和更经济等优点<sup>[9-10]</sup>。基于布里渊散射的分布式传感技术存在温度与应变的交叉敏感问题,但可以通过同时测量布里渊散射谱的两

个参量等方法解决。在同一泵浦光作用下,待测光纤中产生的布里渊散射信号强度比拉曼散射信号强度高约30 dBm<sup>[11]</sup>,可实现更长距离的分布式温度传感。基于布里渊散射的相关域分布式光纤传感技术分为布里渊光相关域反射(BOCDR)技术<sup>[12-13]</sup>和布里渊光相关域分析(BOCDA)技术<sup>[14-15]</sup>,其中BOCDR技术以其单端测量的优势更受学术界和产业界青睐。对光源进行直接调制的内调制BOCDR技术最早由Mizuno等<sup>[12]</sup>于2008年提出,之后,Mizuno课题组在此基础上又发展了基于斜坡辅助的快速测量BOCDR技术<sup>[16-17]</sup>。为了解决内调制BOCDR存在的测量空间分辨率波动、需要高频大振幅调制的激光光源等问题,Noda等<sup>[18]</sup>在2019年提出了对光源进行外部调制的外调制BOCDR技术。但外调制光源系统输出光中存在较难被滤除的0阶调制光,当调制幅度超过一定值时,其瑞利散射与本地参考光相拍会引发频谱混叠,严重制约了外调制BOCDR系统的空间分辨率。

为了解决外调制BOCDR系统中采集信号的频谱混叠问题,笔者在分析频谱混叠产生原因的基础上,提出一种基于大调制中心频率的外调制BOCDR新技术,该技术可有效避免BOCDR系统中采集信号的频谱混叠,实现高空间分辨率的温度传感。需要说明的是,该技术也可用于高空间分辨率的应变传感,而本文只呈现了温度传感结果。在验证实验中,笔者使用一段长为17.2 m的G657光纤实现了连续分布式测量,测量空间分辨率为11.6 cm,温度的测量不确定度为

收稿日期: 2023-02-15; 修回日期: 2023-03-03; 录用日期: 2023-03-22; 网络首发日期: 2023-04-06

基金项目: 国家自然科学基金(62175105, 61875086)、江苏省高等学校基础学科(自然科学)研究面上项目(21KJD510002)

通信作者: \*luyg@nuaa.edu.cn

0.26 °C, 证明了所提方法的有效性。

## 2 原理

外调制 BOCDR 系统示意图如图 1 所示。利用函数发生器 (FG) 产生一个频率为  $f_m$  的信号, 将该信号作为电压控制振荡器 (VCO) 的输入。  $f_m$  作为光源系统的调制频率, 通常在 kHz 或 MHz 量级。接着, 电压控制振荡器会输出一个频率随时间呈正弦变化的射频信号, 其频率可表示为

$$f_{RF}(t) = f_c + \Delta f \sin(2\pi f_m t), \quad (1)$$

式中:  $f_c$  是调制中心频率;  $\Delta f$  是调制幅度;  $t$  为时间。该射频信号作为电光调制器 (EOM) 的射频输入, 对频率为  $f_i$  的连续激光器的输出光进行调制。调制光源输出的信号包含多个频率成分, 可表示为  $f_i + kf_{RF}(t)$ , 其中  $k$  为表示调制信号阶数的整数。一般情况下希望仅有 +1 阶或 -1 阶调制光信号 (即  $k=+1$  或  $k=-1$ ) 注入到待测光纤 (FUT), 作为泵浦光产生后向自发布里渊散射的斯托克斯光。若选择 -1 阶调制光信号作为调制光源的输出光, 则其频率可表示为

$$f(t) = f_i - f_{RF}(t) = f_i - f_c - \Delta f \sin(2\pi f_m t). \quad (2)$$

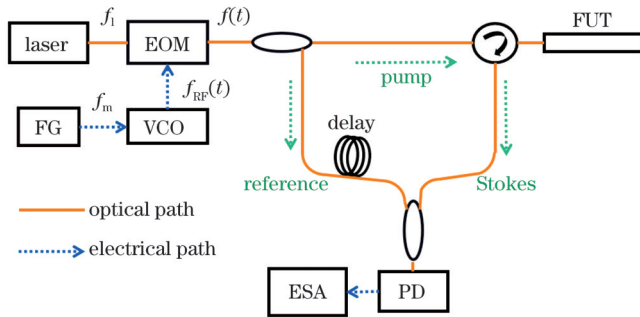


图 1 外调制 BOCDR 系统示意图

Fig. 1 Schematic of BOCDR system based on external modulation

调制光源的输出光分为两路, 其中一路作为参考光, 通过一段延迟光纤。调制光源的另一路输出光作为泵浦光, 进一步放大后经环形器注入到待测光纤中。待测光纤中的后向布里渊散射斯托克斯光携带着温度信息, 其与参考光相拍后通过光电探测器 (PD) 完成光电转换, 转换的结果由频谱仪 (ESA) 采集。在参考光路中, 延迟光纤的作用是控制相关峰的阶数。选择较高阶数的相关峰能够实现对相关峰移动的“增敏”。之后, 以一定步长改变函数发生器输出信号的频率即可实现相关峰的移动, 实现高空间分辨率的分布式温度传感<sup>[18]</sup>。BOCD 系统的探测距离<sup>[12]</sup>可表示为

$$d_m = \frac{v_g}{2f_m}, \quad (3)$$

式中:  $v_g$  是光在光纤中的群速度。由式 (3) 可知, 为了增大探测距离, 一般使调制频率  $f_m$  尽可能小。BOCD 系统的空间分辨率<sup>[12]</sup>可表示为

$$\Delta z = \frac{v_g \cdot \Delta \nu_B}{2\pi f_m \Delta f}, \quad (4)$$

式中:  $\Delta \nu_B$  是布里渊增益谱的线宽。由式 (4) 可知, 为了提高测量的空间分辨率, 应使调制频率  $f_m$  和调制幅度  $\Delta f$  尽可能大。但由式 (3) 可知较大的  $f_m$  会减小探测距离, 所以应主要从增大  $\Delta f$  的角度来提高测量空间分辨率。但如本文后续所讨论的那样, 现有外调制 BOCDR 技术中仅通过增大  $\Delta f$  会带来信号频谱混叠的问题, 因此需要找到解决这一问题的新方法。

在外调制 BOCDR 测温系统中, 布里渊频移随温度的变化可表示为

$$\Delta f_B = C_T \cdot \Delta T, \quad (5)$$

式中:  $\Delta T$  表示温度变化量;  $\Delta f_B$  是布里渊频移的改变量;  $C_T$  是布里渊频移-温度系数。布里渊频移-温度系数表征光纤中利用布里渊频移进行温度测量的灵敏度, 传感光纤为石英光纤时,  $C_T$  值一般约为 1 MHz/°C<sup>[19-20]</sup>。

如前所述, 一般情况下希望仅有单一频率的调制光 [如式 (2) 所描述的 -1 阶调制光] 注入到被测光纤中, 因此, 需要控制光调制器的直流电压同时需要使用光滤波器滤除其他频率成分。因需要设置较大的调制幅度  $\Delta f$  以获得高空间分辨率, 所以需要选择带宽较大的光带通滤波器, 并使用掺铒光纤放大器 (EDFA) 放大功率。在实验中发现, 由于滤波器通带的不平坦以及掺铒光纤放大器放大不均匀等问题, 注入到被测光纤中的泵浦光中会存在少量频率为  $f_i$  的 0 阶信号, 其功率约为 -1 阶调制光的 3%~5%。如图 2(a) 所示, 在参考光路中, 除了存在中心频率为  $f_i - f_c$  的 -1 阶调制信号外, 还存在频率为  $f_i$  的 0 阶信号。-1 阶调制光作为参考光的主要成分, 其 3 dB 线宽约为调制幅度  $\Delta f$  的 2 倍。被测光纤中的散射光主要包括中心频率为  $f_i - f_c - f_B$ 、线宽为  $2\Delta f$  的布里渊散射光, 中心频率为  $f_i - f_c$ 、线宽为  $2\Delta f$  的瑞利散射光, 以及中心频率为  $f_i$  的线宽较窄且与激光器线宽相等的瑞利散射光。  $f_B$  为布里渊频移, 对于石英光纤来说, 其布里渊频移的范围一般为 10~12 GHz。值得说明的是, 即使在进入光电探测器前会使用滤波器试图滤除后两种被视为噪声的瑞利散射光, 但由于瑞利散射光比布里渊散射光的功率高约 2 个数量级, 受掺铒光纤放大器的影响和滤波器的性能限制, 进入光电探测器的散射光中还包含中心频率为  $f_i - f_c$  的瑞利散射光 (经滤波后中心频率为  $f_i$  的瑞利散射光的功率较小, 可以忽略)。参考光与经过滤波后的散射信号相拍, 拍频谱如图 2(b) 所示。中心频率为  $f_B$ 、线宽为  $4\Delta f$  的拍频信号是中心频率为  $f_i - f_c - f_B$  的布里渊散射信号与中心频率为  $f_i - f_c$  的参考光相拍的结果, 中心频率为  $f_c$ 、线宽为  $2\Delta f$  的拍频信号是中心频率为  $f_i - f_c$  的瑞利散射信号与中心频率为  $f_i$  的参考光相拍的结果。另外, 主要由中心频率为  $f_i - f_c$  的参考光与中

心频率为  $f_i - f_c$  的瑞利散射信号相拍产生的较强的直流信号 (近似零频), 因对中心频率为  $f_b$  和  $f_c$  的拍频信号影响较小, 未在图 2(b) 中绘制出。

由图 2(b) 可知, 中心频率为  $f_b$  的拍频信号对应着携带待测温度信息的布里渊散射信号, 而中心频率为  $f_c$  的拍频信号与布里渊散射信号无关, 被称为拍频谱噪声。当调制幅度  $\Delta f$  较小时, 该噪声不会与中心频率为  $f_b$  的拍频信号混叠。但是, 由前述对式 (4) 的分析可知, 为了提高测量的空间分辨率, 一般选择较大的调制幅度  $\Delta f$ 。当调制幅度  $\Delta f$  较大时, 中心频率为  $f_c$  的拍频噪声会与中心频率为  $f_b$  的拍频信号混叠, 如图 2(c) 所示。

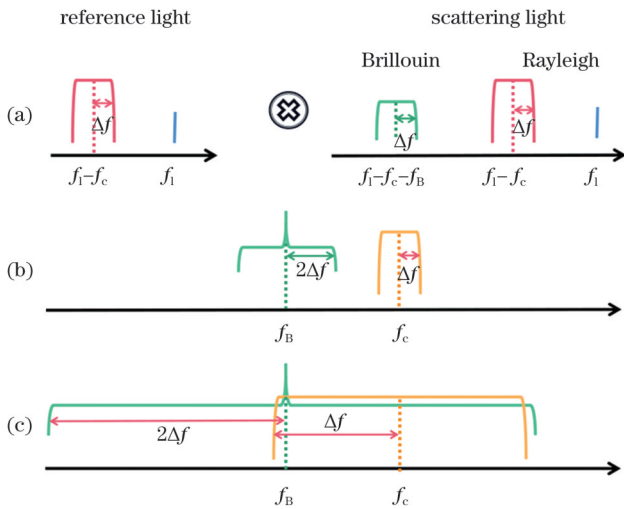


图 2 拍频谱噪声与布里渊信号混叠原因分析示意图  
Fig. 2 Schematics of cause analysis of aliasing between beat spectrum noise and Brillouin signal

由图 2(c) 和图 2(b) 可知, 为了避免拍频谱噪声引起信号混叠, 调制幅度  $\Delta f$  应有上限, 且应满足

$$\Delta f \leq \frac{f_c - f_b}{3} \quad (6)$$

由式 (6) 可知, 若待测传感光纤的最大布里渊频移为  $f_{B_{max}}$ , 则调制中心频率  $f_c$  应满足

$$f_c \geq 3\Delta f + f_{B_{max}} \quad (7)$$

由式 (7) 可知, 为了获得更大的调制幅度  $\Delta f$ , 同时为了获得较大的温度传感范围 (传感光纤温度越高  $f_{B_{max}}$  越大), 需要较大的调制中心频率。因此, 笔者提出了基于大调制中心频率的外调制 BOCDR 系统, 以获得较高的空间分辨率及较大的温度测量范围。

依据以上理论分析, 可以给出特定探测距离和空间分辨率下调制中心频率的大小。假定  $v_g = 2.07 \times 10^8$  m/s, 布里渊增益谱线宽  $\Delta\nu_B = 35$  MHz, 由式 (3) 可知若要获得一个探测距离超过 15 m 的传感系统, 则系统的调制频率  $f_m$  需要约小于 7 MHz。再由式 (4) 可知, 当需要获得 15 cm 以内的系统空间分辨率时, 系统的调制幅度  $\Delta f$  需要大于 1.1 GHz。若取  $f_{B_{max}}$  为典型值 11 GHz, 则由式 (7) 可知调制中心频率  $f_c$  应大于 14.3 GHz。

### 3 实验结果与讨论

如图 3 所示, 激光器输出频率为  $f_l$  (对应中心波长为 1549.912 nm) 且功率约为 11 dBm 的窄线宽连续光, 光通过隔离器 (ISO) 和偏振控制器 (PC) 后被电光调制器调制。调制前, 函数发生器 (FG) 输出一个频率为  $f_m$  的信号, 驱动电压控制振荡器 (VCO) 后输出频率为  $f_{RF}(t)$  的射频信号。射频信号注入电光调制器的射频输入端, 输出频率为  $f(t)$  的调制信号。控制函数发生器的输出电压, 调制电信号的幅度为 1.25 GHz、中心频率为 14.7 GHz。

通过连续改变函数发生器的输出频率  $f_m$  (6.0400 ~ 6.0490 MHz, 步长为 0.25 kHz) 可以实现分布式测量。电光调制器输出的调制光信号的功率较小, 经 EDFA1 后放大至 12 dBm 左右, 之后利用光纤型带通滤波器滤除放大器带来的自发辐射噪声, 保留 -1 阶调制光, 其中心波长为 1550.004 nm。之后, 调制光通过耦合器分光, 其中的一部分作为参考光通过扰偏器 (PSCR) 和延迟线, 另一部分则被 EDFA2 进一步放大至 27 dBm, 作为系统探测的泵浦光。在参考光路中, 扰偏器能够通过改变参考光的偏振状态来消除光纤双折射引起的拍频信号功率迹线波动。选择长约为 2 km 的延迟光纤能够提高系统相关峰的阶数, 实现相关峰移动的“增敏”。泵浦光通过环行器后, 注入待测光纤。待测光纤中的后向布里渊散射信号强度约为瑞利噪声的 1/100, 其经过 EDFA3 和 EDFA4 的两次放大作用, 同时使用两个中心波长均为 1550.088 nm、3 dB 带宽均为 10 GHz 的光纤滤波器对布里渊信号进行放大。功率增强后的布里渊信号与参考光在耦合器相拍, 相拍的结果被光电探测器 (PD) 探测, 之后用频谱分析仪进行采集和分析。

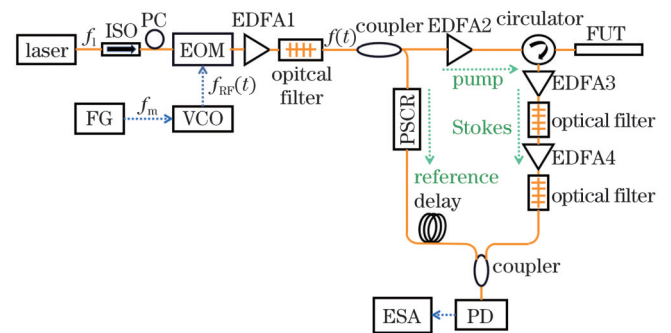


图 3 基于大调制中心频率的外调制 BOCDR 系统示意图  
Fig. 3 Schematic of external modulation BOCDR system based on large modulated center frequency

被测传感光纤为 G657 光纤, 如图 4 所示, 光纤总长度为 17.2 m。被测光纤左端与环行器相连, 在距离连接点 12.1 m 处有一段长为 0.6 m 的水浴加热段。被测光纤末端弯曲缠绕, 以抑制菲涅耳反射噪声。在室温约为 22 °C 的情况下, 将加热段温度分别设置成 25、

30、40、50、60 °C。利用图 3 所示的实验装置,在水浴箱中光纤保持松弛的情况下,测量获得 5 个不同温度对应的布里渊频移,测量结果如图 5 所示。测量位置处的信号进行 1000 次累加平均以提高信噪比。对图 5 中的测量数据进行线性拟合,可以得到该被测光纤的布里渊频移-温度系数为 1.15 MHz/°C。拟合的相关系数  $R^2$  接近 1,表明线性拟合结果较好。



图 4 被测传感光纤示意图

Fig. 4 Schematic of the fiber under test

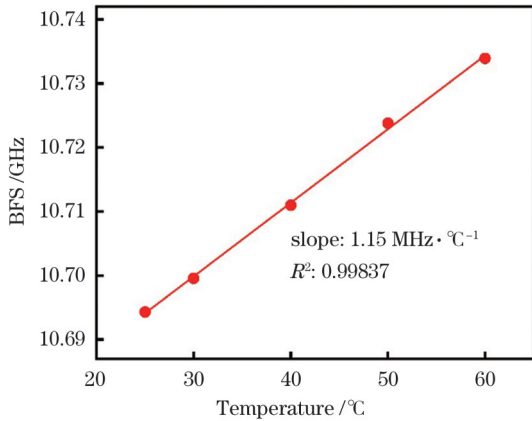


图 5 被测光纤的布里渊频移-温度系数标定

Fig. 5 Brillouin frequency shift (BFS)-temperature coefficient calibration of the fiber under test

在温度测量的验证实验中,将水浴箱温度改变为 46.8 °C(使用热电偶测量得出),使用图 3 所示实验装置测量传感光纤上的温度分布。利用式(3)、(4)计算可知,此时系统的理论探测距离约为 17.5 m,理论空间分辨率约为 13 cm。在测量中,利用频谱仪获取布里渊散射谱时采用了 1000 次的累加平均,测量时频谱仪设置的频率分辨率为 0.01 MHz(频谱仪在 10~11 GHz 频率测量范围内的频率测量精度为 3 kHz)。同时,在直接测量结果中减去了频谱仪的基底噪声,以部分消除测量设备引入的测量误差。另外,针对系统测量过程中由环境变化等产生的信号功率抖动的问题,将减去基底噪声的结果进行了归一化处理,以消除功率抖动。对处理后的结果进行洛伦兹拟合,即可得到布里渊频移值。由于提出并采用了基于大调制中心频率的 BOC DR 系统,能够消除拍频谱噪声,在进行洛伦兹拟合时可有效提高拟合结果的准确性。将加热段附近测量的信号处理结果绘制成三维布里渊增益谱分布图,如图 6 所示,可明显观察到布里渊频移的变化。

对减去基底噪声后并归一化后的结果进行洛伦兹拟合,提取出布里渊频移,布里渊频移分布如图 7 所示。按照空间分辨率的常用定义,BOC DR 系统的实

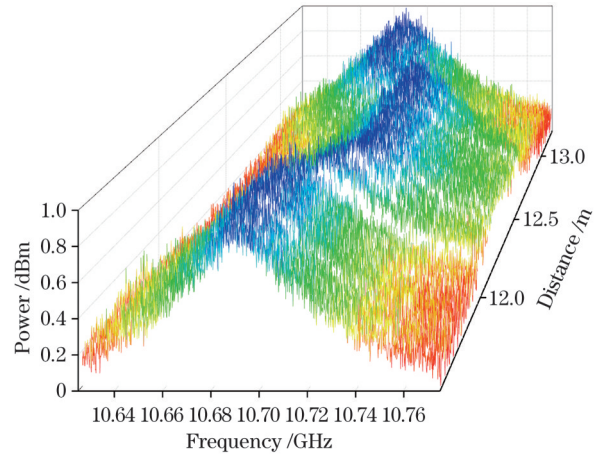


图 6 包含 46.8 °C 加热段的光纤的布里渊增益谱三维图形

Fig. 6 Three-dimensional figure of Brillouin gain spectrum of optical fiber with 46.8 °C heating section

验空间分辨率可以用上升沿和下降沿 10%~90% 所对应的光纤长度的平均值来表示<sup>[15]</sup>。在上升沿,计算得到布里渊频移从 10% 幅度到 90% 幅度变化的距离为 11.5 cm。同时,在下降沿,计算得到布里渊频移从 90% 幅度到 10% 幅度变化的距离为 11.7 cm。由此,认为该系统测量的空间分辨率为 11.6 cm。同时,加热段的平均布里渊频移为 10.71899 GHz,对应测量的温度为  $(46.64 \pm 0.17)$  °C。之后,将温度升至 57.7 °C,测量得到加热段的平均布里渊频移为 10.73160 GHz,对应测量的温度为  $(57.57 \pm 0.26)$  °C。

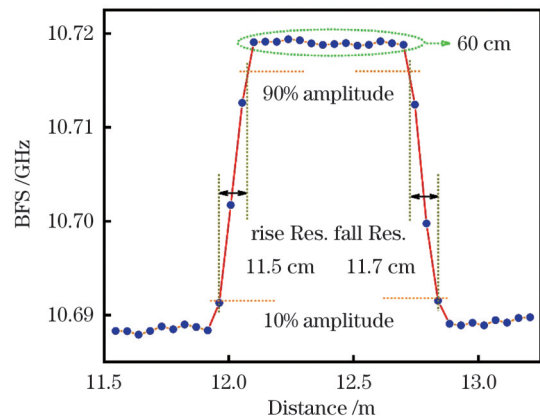


图 7 加热到 46.8 °C 时的光纤布里渊频移分布图

Fig. 7 Distribution of Brillouin frequency shift when the fiber is heated to 46.8 °C

笔者计算温度测量不确定度的公式来源于国家标准 GB/T 27418—2017《测量不确定度评价和表示》,具体为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_{Bi} - \bar{f}_B)^2}{n-1}}, \quad (8)$$

式中:  $f_{Bi}$  和  $\bar{f}_B$  分别表示第  $i$  次测量的布里渊频移测量值与多次测量的平均值;  $n$  为测量次数;  $\sigma$  为温度测量的不确定度。利用式(8)对加热温度设置为 46.8 °C 与

57.7 °C 时测量的布里渊频移进行计算,根据 14 次实验测量的结果,分别得到温度的测量不确定度为 0.17 °C 和 0.26 °C。取两次温度测量时数值较大的温度测量不确定度作为本文方法的测量不确定度<sup>[21-22]</sup>,为 0.26 °C。

将本文的实验结果与已有的 BOCDR 系统的性能参数进行对比,结果如表 1 所示。总体而言,本文系统的空间分辨率较高,并且测量不确定度比同类系统低一个数量级。

表 1 典型 BOCDR 系统的传感性能  
Table 1 Sensing performances of typical BOCDR systems

System	Spatial resolution /cm	Measurement uncertainty
Double-modulation <sup>[13]</sup>	27	15 MHz
Temporal gating <sup>[23]</sup>	66	5 MHz
Chirp modulation <sup>[24]</sup>	80	
Lock-in detection <sup>[21]</sup>	20	
This paper	11.6	0.30 MHz (0.26 °C)

## 4 结 论

提出了一种基于大调制中心频率的外调制 BOCDR 新技术,该技术可抑制信号的频谱混叠,实现高空间分辨率的分布式温度传感。笔者发现了外调制 BOCDR 系统中的拍频谱噪声,并分析了其起因及其对被测信号混叠的影响。根据 BOCDR 系统的探测距离和空间分辨率需求,确定了调制中心频率的大小,较大的调制中心频率可以抑制拍频谱噪声对布里渊散射信号的混叠影响,从而获得较高的空间分辨率及较大的温度测量范围。在一个验证实验中,笔者成功地对一段长为 17.2 m 的 G657 光纤实现了空间分辨率为 11.6 cm 的温度分布式传感,温度测量不确定度为 0.26 °C。所设计的外调制 BOCDR 系统不仅具有较高的空间分辨率,而且其测量不确定度比同类系统低一个数量级。

## 参 考 文 献

- [1] Rao Y J. In-fibre Bragg grating sensors[J]. *Measurement Science and Technology*, 1997, 8(4): 355-375.
- [2] Hill K O, Meltz G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(8): 1263-1276.
- [3] Hou Y F, Wang J, Wang X, et al. Simultaneous measurement of pressure and temperature in seawater with PDMS sealed microfiber Mach-Zehnder interferometer[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(22): 6412-6421.
- [4] Silva S, Coelho L, Frazão O. An all-fiber Fabry-Pérot interferometer for pressure sensing in different gaseous environments[J]. *Measurement*, 2014, 47: 418-421.
- [5] Lei X Q, Dong X P, Lu C X, et al. Underwater pressure and temperature sensor based on a special dual-mode optical fiber[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 146463-146471.
- [6] 刘铁根, 于哲, 江俊峰, 等. 分立式与分布式光纤传感关键技术研究进展[J]. *物理学报*, 2017, 66(7): 070705.  
Liu T G, Yu Z, Jiang J F, et al. Advances of some critical technologies in discrete and distributed optical fiber sensing research [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(7): 070705.
- [7] 孙苗, 杨爽, 汤玉泉, 等. 基于拉曼散射光动态校准的分布式光纤温度传感系统[J]. *物理学报*, 2022, 71(20): 200701.  
Sun M, Yang S, Tang Y Q, et al. Distributed fiber optic temperature sensor based on dynamic calibration of Raman Stokes backscattering light intensity[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(20): 200701.
- [8] Ashry I, Mao Y, Wang B W, et al. A review of distributed fiber-optic sensing in the oil and gas industry[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(5): 1407-1431.
- [9] Mizuno Y, Lee H, Nakamura K. Recent advances in Brillouin optical correlation-domain reflectometry[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(10): 1845.
- [10] 尉婷, 龙万江, 吴冰冰, 等. 油气管道分布式光纤布里渊散射应变的仿真研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(21): 2106003.  
Wei T, Long W J, Wu B B, et al. Simulation research on distributed optical fiber Brillouin scattering strain in oil and gas pipelines[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(21): 2106003.
- [11] Agrawal G. *Nonlinear fiber optics*[M]. New York: Academic Press, 2013.
- [12] Mizuno Y, Zou W W, He Z Y, et al. Proposal of Brillouin optical correlation-domain reflectometry (BOCDR) [J]. *Optics Express*, 2008, 16(16): 12148-12153.
- [13] Mizuno Y, He Z Y, Hotate K. Measurement range enlargement in Brillouin optical correlation-domain reflectometry based on double-modulation scheme[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7503: 1141-1144.
- [14] 胡鑫鑫, 王亚辉, 赵乐, 等. 布里渊光相干域分析技术研究进展[J]. *中国激光*, 2021, 48(1): 0100001.  
Hu X X, Wang Y H, Zhao L, et al. Research progress in Brillouin optical correlation domain analysis technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(1): 0100001.
- [15] Wang Y H, Zhang M J, Zhang J Z, et al. Millimeter-level-spatial-resolution Brillouin optical correlation-domain analysis based on broadband chaotic laser[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(15): 3706-3712.
- [16] Lee H, Hayashi N, Mizuno Y, et al. Slope-assisted Brillouin optical correlation-domain reflectometry: proof of concept[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(3): 6802807.
- [17] Lee H, Hayashi N, Mizuno Y, et al. Operation of slope-assisted Brillouin optical correlation-domain reflectometry: comparison of system output with actual frequency shift distribution[J]. *Optics Express*, 2016, 24(25): 29190-29197.
- [18] Noda K, Lee H, Mizuno Y, et al. First demonstration of Brillouin optical correlation-domain reflectometry based on external modulation scheme[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2019, 58(6): 068004.
- [19] Bao X Y, Chen L. Recent progress in Brillouin scattering based fiber sensors[J]. *Sensors*, 2011, 11(4): 4152-4187.
- [20] Parker T R, Farhadiroushan M, Handerek V A, et al. Temperature and strain dependence of the power level and frequency of spontaneous Brillouin scattering in optical fibers[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(11): 787-789.
- [21] Yao Y G, Kishi M, Hotate K. Brillouin optical correlation domain reflectometry with lock-in detection scheme[J]. *Applied Physics Express*, 2016, 9(7): 072501.
- [22] Zhang Z L, Lu Y G, Peng J Q, et al. Simultaneous measurement of temperature and acoustic impedance based on forward Brillouin scattering in LEAF[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(7): 1776-1779.
- [23] Mizuno Y, He Z Y, Hotate K. Measurement range enlargement in Brillouin optical correlation-domain reflectometry based on temporal gating scheme[J]. *Optics Express*, 2009, 17(11): 9040-9046.
- [24] Noda K, Lee H, Nakamura K, et al. Measurement range enlargement in Brillouin optical correlation-domain reflectometry based on chirp modulation scheme[J]. *Applied Physics Express*, 2020, 13(8): 082003.

# Brillouin Optical Correlation-Domain Reflectometry Based on Large Modulation Center Frequency

Jiang Yuekai<sup>1</sup>, Lu Yuangang<sup>1\*</sup>, Yao Yuguo<sup>2</sup>, Zhang Wujun<sup>1</sup>, He Chongjun<sup>1</sup>, Liang Lulu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>The Key Laboratory of Space Photoelectric Detection and Perception of Ministry of Industry and Information Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, Jiangsu, China;

<sup>2</sup>College of Electrical and Automation Engineering, Changshu Institute of Technology, Changshu 215506, Jiangsu, China

## Abstract

**Objective** Optical fiber sensors have a wide range of applications in aerospace, energy, electric power, transportation, and communications because of their advantage such as anti-electromagnetic interference, small size, and low weight. Traditional temperature sensing technologies based on fiber gratings, optical microcavities, Fabry-Perot interferometers, and Mach-Zehnder interferometers cannot achieve distributed measurements. Distributed fiber optic sensing technologies based on Raman scattering are incapable of achieving long-distance sensing. Therefore, a large amount of research has focused on Brillouin-scattering-based fiber sensing. Brillouin optical correlation-domain reflectometry (BOCDR) based on external modulation, can achieve distributed sensing with high spatial resolution and solve the problems of measuring spatial resolution fluctuations and laser sources that require high-frequency and large-amplitude modulation in BOCDR based on internal modulation. However, a spectrum aliasing problem in BOCDR based on external modulation affects the sensing system's spatial resolution. In this study, we report an external modulation BOCDR system with a large modulation center frequency to overcome signal noise aliasing and achieve temperature sensing with a high spatial resolution.

**Methods** In this study, we first constructed a light source system for BOCDR based on external modulation, which consists of a function generator, a voltage-controlled oscillator, an electro-optic modulator, a laser source, an erbium-doped fiber amplifier, and an optical bandpass filter. During the measurement process, the Brillouin gain spectrum was obtained by continuously changing the modulation frequency, and the temperature information was demodulated from the measurement results. The different frequency components of the reference and Stokes light in the BOCDR system based on external modulation were compared (Fig. 2), and the impact of beat spectrum noise was analyzed. The modulation center frequency influences the sensing system's spatial resolution and dynamic measurement range. Subsequently, a novel external modulation BOCDR based on a large modulation center frequency was proposed (Fig. 3). For example, the modulation center frequency was set higher than 14.3 GHz to eliminate the impact of beat spectrum noise and obtain a spatial resolution of 15 cm.

**Results and Discussions** At a room temperature of approximately 22 °C, a 0.6 m length heating section in 17.2 m sensing fiber was heated to 25, 30, 40, 50, and 60 °C, and the Brillouin frequency shifts (BFSs) of the heated section corresponding to five different temperatures were measured. By linear fitting, the BFS temperature coefficient of the fiber under test is 1.15 MHz/°C (Fig. 5). In a verification experiment of temperature measurement, the temperature of the 0.6 m-length fiber was heated to 46.8 °C by using a water bath, and the distribution of the Brillouin gain spectrum was measured (Fig. 6). Lorentz fitting was performed to extract the BFS (Fig. 7) after subtracting the lowest noise and normalizing the results. From the BFS distribution of the sensing fiber, the spatial resolution of the system is calculated as 11.6 cm, and the measured result of the heated fiber is  $(46.64 \pm 0.17)$  °C. When the 0.6 m length fiber is heated to 57.7 °C, the measured result is  $(57.57 \pm 0.26)$  °C. Compared with the sensing performances of four reported typical BOCDR systems, the proposed BOCDR system has a high spatial resolution and low measurement uncertainty. The measurement uncertainty of the proposed system is one order of magnitude lower than that in the other four reported BOCDR systems (Table 1). Therefore, the proposed BOCDR system with a significant modulation center frequency can achieve temperature-distributed sensing with high spatial resolution and measurement accuracy.

**Conclusions** This study proposes a new BOCDR based on external modulation with a large modulation center frequency, which can suppress the spectrum aliasing of signals and achieve distributed temperature sensing with a high spatial resolution. The proposed method has a high spatial resolution, and its measurement uncertainty is one order of magnitude lower than similar methods. The causes of beat noise in BOCDR based on external modulation and its impact on the Brillouin scattering signal were analyzed. According to the measurement range and spatial resolution requirements in the BOCDR system based on external modulation, the magnitude of the modulation center frequency is calculated and determined. A larger modulation center frequency can suppress the aliasing effect of beat spectrum noise on the Brillouin scattering signal, resulting in a higher spatial resolution and larger temperature measurement range. In a verification experiment, we successfully implemented temperature-distributed sensing with a spatial resolution of 11.6 cm on a 17.2 m long G657 optical fiber, with an uncertainty of 0.26 °C for temperature measurement.

**Key words** fiber optics; optical fiber sensor; distributed sensing; temperature sensing; Brillouin optical correlation-domain reflectometry; high spatial resolution