

布里渊光时域反射仪实时解调算法研究

谷婧, 洪小斌, 杨智生

(北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876)

摘要: 光纤传感器由于抗干扰性强、相应迅速以及适应恶劣环境的优势, 在工程测量中得到广泛应用, 其中 BOTDR 技术由于采用单端检测方式、配置简易、数据采集迅速、系统稳定性较高等特点, 而成为当前主流的探测手段。本文基于 BOTDR 分布式光纤传感理论, 针对 BOTDR 信号特性和实时处理需求, 提出了一种基于 FPGA 的 BOTDR 信号实时解调算法, 通过短时傅里叶变换、频谱平滑与拟合寻峰技术实现了布里渊频移的精准定位。该算法实现便捷, 计算复杂度低, 既保证了实时性, 又确保了解调数据的高精度。

关键词: 通信与信息处理; BOTDR; FPGA; 实时处理

中图分类号: TN911.7; TN913.7

Research on Real-Time Demodulation Algorithm for Brillouin Optical Time Domain Reflectometer

GU Jing, HONG Xiaobin, YANG Zhisheng

(School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

Abstract: Fiber optic sensors have been widely used in engineering measurements due to their strong anti-interference capabilities, rapid response, and suitability for harsh environments. Among these, BOTDR technology has become the mainstream detection method because of its single-ended detection approach, simple configuration, rapid data acquisition, and high system stability. In this paper, based on the theory of BOTDR distributed fiber sensing and addressing the characteristics of BOTDR signals along with the requirements for real-time processing, we propose an FPGA-based real-time demodulation algorithm for BOTDR signals. The algorithm precisely locates the Brillouin frequency shift by employing short-time Fourier transform, spectral extension, and fitting-based peak search techniques. It is easy to implement and has low computational complexity, ensuring both real-time performance and high accuracy of the demodulated data.

Keywords: Communication and information processing; BOTDR; FPGA; Real-time signal processing

0 引言

1966 年, 著名物理学家高锟开创性地提出了光导纤维在通信中的基本原理^[1]; 1977 年, 美国海军研究所首次提出了光纤传感器系统计划, 光纤传感器就此诞生^[2]。光纤传感技术利用光纤作为检测元件, 当激光注入传感光纤中时, 光纤中后向散射光的特性会随着某一物理参数的变化而变化, 从而实现对目标的分布式传感检测。近年来, 光纤传感测量技术迅速发展, 已广泛运用于建筑结构健康监测^[3-5]、测温预警^[6-8]、周界安全^[9,10]等领域。

分布式传感技术可以根据光纤中不同的散射介质进行分类, 分别为: 瑞利散射、拉曼散射和布里渊散射这三类。布里渊光时域反射仪 (BOTDR) 基于布里渊散射原理进行温度和应变测量, 由于 BOTDR 只需单端测量, 结构比较简单, 实际使用比较方便, 发生光纤断裂

基金项目: 国家自然科学基金 (62375023); 国家自然科学基金 (62275028)

作者简介: 谷婧 (2000-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 光纤传感技术

通信联系人: 洪小斌 (1971-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向: 光纤传感与光纤网络. E-mail:

xbhong@bupt.edu.cn

时, 断裂点之前的光纤仍可以继续正常反馈沿线信息, 不会造成整个系统无法工作, 故成为目前使用广泛的主流探测方式^[11]。

布里渊散射信号极其微弱, 且易受到系统噪声和外部干扰的影响。在 BOTDR 分布式光纤传感系统中, 核心任务就是从这些微弱的信号中精确解调出对应的参数信息, 因此在探测过程中, 需选择合理的采集技术与信号处理方法, 以提高信噪比 (SNR) 并确保解调的准确性, 使 BOTDR 系统能够在复杂环境中稳定运行。对于实时性测量要求较高的应用场景中, 需优化 BOTDR 系统的测量时间以达到较好的实时性。在布里渊散射谱 (BS) 的重建上, 传统方式是使用频率扫描法^[12] (FS) 获取光纤沿程的三维散射谱, 而使用短时傅里叶变换法^[13] (STFT) 可以在精度需求较低且短距离探测的情况下更快速地得到 BS 数据。针对 BS 数据^[14] 的后处理, 国内外学者提出了多种优化策略: 如华北电力大学的 Zhao 基于 L-M 算法提出了一种快速初始参数估计算法, 实现了 2.2ms 的算法收敛时间^[15]; 新布伦瑞克大学的 Farahani 提出对不同 SNR 条件下的数据与理想洛伦兹曲线进行卷积的互相关算法, 无需拟合进行解调, 缩减了处理时间^[16]; 吉林大学的 Li 提出对布里渊散射数据做图像处理进行边缘检测算法, 使用 Sobel 算子增强散射谱边缘, 快速完成布里渊频移 (BFS) 的提取^[17]; 南京大学的 Wang 使用无需确定谱模型的相似度匹配法, 处理速度远远快于曲线拟合方法^[18]; 香港理工大学的 Azak 提出使用人工神经网络算法进行 BFS 提取, 在不降低测量精度的前提下提高了测量速度^[19]。

FPGA 是一种使用硬件描述语言进行编程的高速专用集成电路, 其并行计算和实时处理能力能够显著提升信号处理的速度和效率, 因此在实时信号处理与逻辑控制领域得到了广泛应用。上述后处理算法虽能有效降低 BOTDR 系统测量时间, 但基于傅里叶变换的 BOTDR 信号解码涉及大量复杂浮点运算或多次时频转换, 在 FPGA 硬件平台上难以实现实时解调。本文利用 FPGA 平台流水线并行架构的优势, 通过短时傅里叶变换对 BOTDR 信号提取信号功率包络, 并通过累加平均提高系统的信噪比, 最后结合频谱平滑和拟合寻峰算法实现对布里渊频移的精准定位。该算法复杂度低、测量延时小、系统稳定性高, 只涉及一次时频转换, 即可在 FPGA 平台上实现了对 BOTDR 信号精确且高效的实时解调处理。

1 BOTDR 信号解调

1.1 基于 STFT 的 BS 提取算法

由于自发布里渊散射信号功率较低, 直接检测难以获取有效信息, 因此 BOTDR 系统普遍采用相干探测技术, 检测到信号后通过解调提取 BS 数据。本文采用 STFT 法将时域信号转换为频域信号, 从而直接获得光纤沿程散射谱, 并通过曲线拟合提取 BFS。在信号处理领域, 将时域信号转换到频域上通常采用傅里叶变换 (FFT) 的方式, 而 FFT 只能揭示信号总体上的频率成分, 无法同时捕捉到时域信息, 特别是对于信号中的突变, FFT 往往将其误解释为由多个低频成分叠加而成的高频信号, 从而难以有效识别突变特征, 而在光纤传感过程中, BOTDR 信号可以表现出快速的瞬时变化以表征某段光纤发生了应力或温度突变。故在

75 BOTDR 处理中, 通常采用 STFT 方法, 即在时间轴上采用短时窗口将信号分段处理, 使每
段信号近似平稳, 再进行 FFT 以提取频谱信息。

窗函数的形状和宽度对 STFT 的性能有着直接的影响, 常见的窗函数包括矩形窗、汉宁
窗、汉明窗等。矩形窗具有最窄的主瓣宽度, 但其第一旁瓣衰减仅-13dB 的特性带来了较严
重的频谱泄露现象, 尤其当信号包含弱分量时, 强信号的旁瓣会完全淹没弱信号成分; 汉宁
80 窗是由三个矩形窗频谱叠加形成, 实现了-32dB 的旁瓣衰减, 显著降低了频谱泄露; 汉明窗
作为改进的余弦窗, 进行了加权系数的优化, 在主瓣宽度与汉宁窗相当的情况下, 将第一旁
瓣衰减提升至-43dB, 使其在抑制频谱泄露和保持频率分辨率之间达到更优平衡。汉明窗与
汉宁窗都属于余弦窗系, 有着较窄的主瓣与较低的旁瓣, 而汉明窗由于更优的旁瓣滚降性能,
可以更好抑制带宽噪声的频谱扩散, 故在此 BOTDR 系统中选用汉明窗做为 STFT 处理时使
85 用的窗函数。

假设 m 和 n 为整数, $g[k]$ 表示窗函数, T 为时间变量, 代表了窗口的中心位置, F 为频
率变量。离散信号 $z[k]$ 的 STFT 公式定义为^[20]:

$$STFT(mT, nF) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} z[k] g^*[kT - mT] e^{-j2\pi(nF)k} \quad (1)$$

STFT 方法与传统的扫频测量方法相比, 不需要进行多次的频谱扫描测量, 仅通过直接
90 采集时域上的信息并对其进行分段傅里叶变换, 便可以一次性解调出光纤沿程完整的布里渊
散射谱, 显著地提高了测量速度。但 STFT 方法相较于扫频方法无法实现较高的空间分辨率,
其优势体现于快速测量和实时性上, 适用于对实时性要求较高的测量场景中的快速诊断或实
时监控。为了提升 STFT 方法的空间分辨率, 在本文 BOTDR 信号实时处理设计方案中, 采
用两路延时重叠滑动的处理方法, 如图 1 所示:

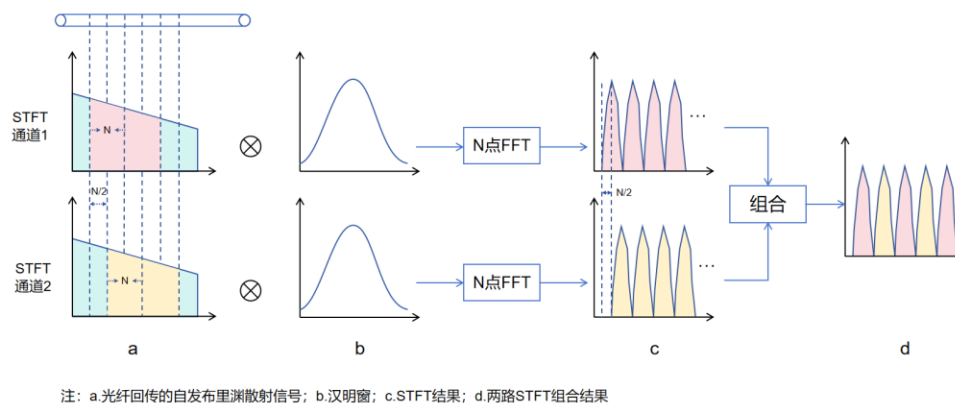


图 1 两路延时重叠滑动的 STFT 处理原理

Fig. 1 The principle of STFT processing with two-way delayed overlapping sliding

如图 1 (a) 所示将光纤回传的自发布里渊散射信号分为两路, STFT 窗长和滑动间隔都
为 N , 第一组直接处理, 第二组延时半个窗 ($N/2$) 后再处理。2 路的处理过程完全一样,
100 先乘以窗函数防止频谱泄露, 然后进行 N 点 FFT 并计算频谱包络, 如图 1 (b) 和 (c) 所
示。将 2 组输出交叉组合得到长度为原采样点数两倍的光纤沿程 BS 数据, 从而提升空间分
辨率, 如图 1 (d) 所示。

1.2 BOTDR 信号插值平滑拟合寻峰算法

在理想状态下, 布里渊增益谱的线形与洛伦兹曲线相似, 其形状反映了光纤中非线性相互作用的固有特性和衰减过程。通过对这一谱线宽度和形状的深入解析, 可以准确解调出布里渊频移。图 2 为单模光纤归一化的理想布里渊增益谱 (BGS) [21], 呈洛伦兹形状。

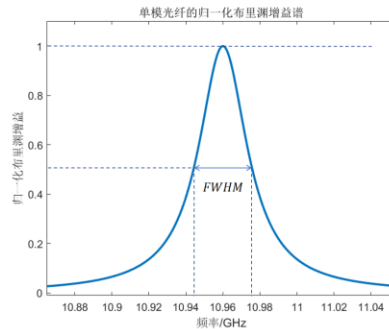


图 2 布里渊增益谱

Fig. 2 Brillouin gain spectrum

当模数变换的采样率确定时, STFT 法解调 BOTDR 信号的空间分辨率与窗口大小 N 呈反比。 N 越大, 得到的 BGS 越平滑, 解调得到的 BFS 精度越高, 但空间分辨率越差。为了实现较高的空间分辨率, 要求尽量减小 N , 从而导致每个窗口内 BS 的数据较为稀疏。图 3 是对实验系统采集的信号进行 16 点 STFT 得到的频谱轮廓不是洛伦兹形状, 难以提取 BFS。

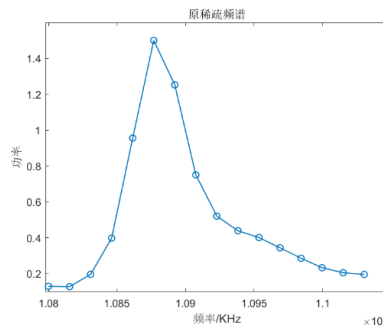


图 3 原稀疏频谱

Fig. 3 Original sparse spectrum

为了从由少量点构成的变形的 BGS 中提取 BFS, 本文采用上采样插 0 并滤波平滑的方法提高频率分辨率, 还原 BGS 轮廓。我们先分析频域上采样对时延信号的影响。设频域信号 $Y[k]$ 点数为 N , 上采样每个点插 $m-1$ 个 0, 上采样后 $X[k]$ 可表示为:

$$X[k] = \begin{cases} Y[k], & k = 0, m, 2m, \dots, (N-1)m \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (2)$$

对其做 IFFT 后时域信号为:

$$x[n'] = \frac{1}{mN} \sum_{k=0}^{127} X[k] e^{j\frac{2\pi}{mN}kn'} = \frac{1}{mN} \sum_{u=0}^{N-1} Y[u] e^{j\frac{2\pi}{N}un'} \quad (3)$$

假设未上采样的信号 $Y[k]$ 对应的时域表达为 $y[n]$, 则上式可转换为:

$$x[n'] = \frac{1}{mN} \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} y[n] e^{-j\frac{2\pi}{N}un} e^{j\frac{2\pi}{N}un'} \quad (4)$$

由洛必达公式, 设 t 为大于等于 0 的整数, 可得:

$$x[n'] = \frac{1}{m} \sum_{n=0}^{N-1} y[n] * \begin{cases} 1, n' - n = Nt \\ 0, others \end{cases} = \frac{1}{m} y[n' \bmod N] \tag{5}$$

由（5）式可知，在频域内进行上采样相当于在时域进行周期延拓，并不会改变信号本身的特征。频谱上采样结束后，在时域需将周期信号截断，相当于在频域进行卷积。而上采样、卷积平滑频谱的过程可等效于对频域进行了内插操作，增加了频谱分辨率，方便对其进行拟合以提取 BFS 信息。为了优化 BGS 插值性能，对高斯窗、矩形窗和 sinc 插值等三种滤波平滑方式进行仿真分析，如图 4，紫色点是洛伦兹样点，蓝色、红色和橙色分别为高斯窗、矩形窗和 sinc 插值平滑的结果。

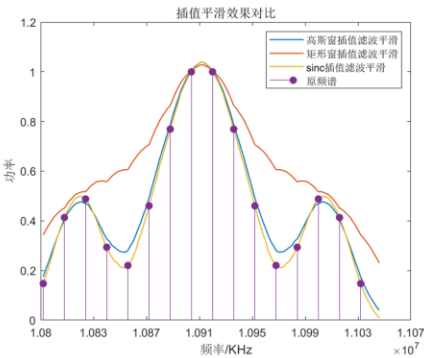


图 4 插值平滑效果对比
Fig. 4Comparison of interpolation smoothing effects

对平滑后的频谱进行拟合求中心位置点，即 BFS 值，在理想值为 10915200 的情况下，三种方式的结果如表 1 所示，高斯窗最接近理想值，这是由于高斯窗最接近洛伦兹形状，所以本文采用高斯窗作为用于平滑的窗函数。

表 1 不同滤波方式拟合结果对比
Tab. 1Comparison of fitting results of different filtering methods

滤波方式	BFS 值
高斯窗	10915231.86
短长度矩形窗	10914998.55
Sinc	10915239.48

图 5 中蓝色是对图 3 中 16 点 STFT 得到的频谱（红色）进行高斯插值平滑的效果，峰值附近比较接近标准洛伦兹形状。

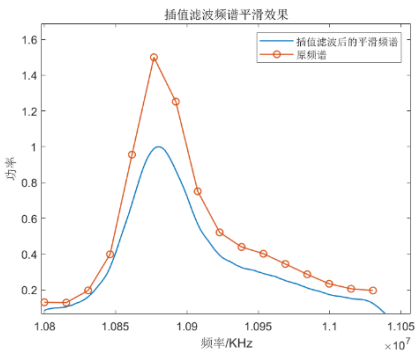


图 5 频谱平滑处理效果
Fig. 5The effect of spectrum smoothing processing

在得到平滑的频谱后，需要提取 BGS 峰值功率所对应的精确中心频率，即 BFS。由前

文分析可知，布里渊散射谱呈洛伦兹形状，通常我们可以构建洛伦兹模型或者高斯模型进行拟合，对应的拟合算法准确性较高，但计算量较大，影响了温度和应变解调的实时性^[22]。故在本文 BOTDR 实时处理系统设计中，选用二次项拟合的方式提取 BFS 信息，这种方式计算量小，算法复杂度低，适用于实时性测量系统。

设二项式拟合的系数有 a 、 b 、 c ，布里渊增益与频率的关系可近似为：

$$g_B = av^2 + bv + c \quad (6)$$

构造矩阵 V 、 G 和参数向量 K 如下：

$$V = \begin{bmatrix} v_1^2 & v_1 & 1 \\ v_2^2 & v_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ v_n^2 & v_n & 1 \end{bmatrix}; K = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}; G = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中 v_1 、 v_2 …… v_n 为图 5 中横轴的频率坐标， g_1 、 g_2 …… g_n 是频率对应的 BFS 值。参数向量可表示为：

$$K = V^+ G \quad (8)$$

V^+ 为矩阵 V 的伪逆。由 (8) 可求解出 (6) 式函数的三个系数，峰值位置（即布里渊增益谱的 BFS）为：

$$BFS = -\frac{b}{2a} \quad (9)$$

1.3 BOTDR 信号解调算法的 FPGA 设计实现

传统的处理方式在应用于高吞吐量的 BOTDR 系统时，受到处理器计算能力的限制，往往难以实现“边采集、边处理、边输出”的实时性，本文基于 FPGA 平台对 BOTDR 信号实时处理系统进行设计，解决了软件实现方式对信号实时处理带来的挑战。

信号解调在 FPGA 上的实现流程分为以下几个步骤：AD 采样、两路延时重叠滑动 STFT、累加平均降噪、频谱平滑、二项式拟合寻峰值、BFS 输出。

两路延时重叠滑动 STFT 基于 FPGA 并行处理结构进行设计，采用并行流水线优化数据处理流程，系统功能模块如图 6 所示。

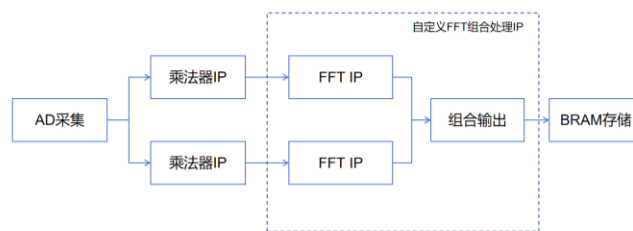


图 6 双通道窗口重叠的 STFT 处理 FPGA 系统模块

Fig. 6 Dual-channel window overlapping STFT processing FPGA system module

两路 STFT 同时进行运算，边采样、边加窗、边处理，无需对采样数据进行缓存，使 STFT 的结果实时输出。其中乘法器为信号加窗处理功能，调用了 FPGA 内部资源乘法器 IP 完成，傅里叶变换利用 FFT IP 做运算处理。

实现 (8) 式的二项式拟合需要计算频率矩阵 K 的伪逆，伪逆矩阵的求解涉及复杂的分

解算法，在硬件上实现困难，算法复杂度高。为了简化计算过程，论文建立与 BGS 频点采样密度匹配的标准化参考频率轴，通过离线计算其恒定的伪逆矩阵，将其量化为适合输入到 FPGA 内的格式，作为固定参数预存到 FPGA 的内存空间中。得到根据参考频率轴拟合出来的三个参数后，就可以根据抛物线性质计算出拟合曲线的峰值点位置，即该段光纤上所产生的布里渊频移 BFS。由于目前的 BFS 是根据参考频率轴所计算出来的，还要根据换算关系将 BFS 换算至实际的频率点位置，如图 7 所示。

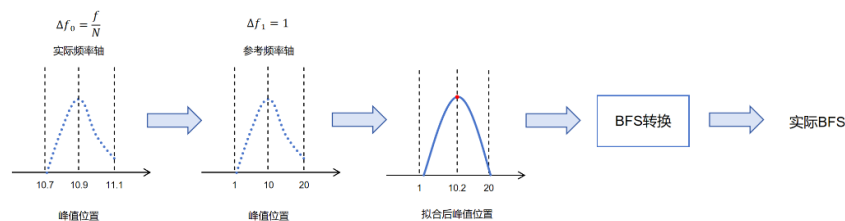


图 7 实际-参考频率轴转换示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the actual-to-reference frequency axis conversion

借助 FPGA 平台的并行处理能力，系统能够在实时性和高效性之间取得良好的平衡，实时解调出光纤沿程的准确 BFS 信息，为光纤传感和监测提供可靠的支持。

2 BOTDR 系统实验结果展示与分析

根据论文提出的 BOTDR 信号实时解调处理算法，在 FPGA+ARM 多核异构计算平台上搭建了 BOTDR 信号实时处理系统，并依托实验室搭建的 BOTDR 样机，对设计的 BOTDR 实时测量系统进行了系列测试。

系统输出为 245MHz 采样率的正交采样，等效于 490MHz 的单路 AD 采样，光纤长度为 2.007km，STFT 窗口长度设为 16 点，滑动步长为 8 点，在光纤的尾端取出 10m 光纤作为热点，浸入水浴锅中进行加热，分别从室温加热至 30.9℃、35.6℃、40.2℃、45.7℃、50.8℃、55.8℃，对不同温度下光纤沿程的 BFS 结果进行比对。不同温度下 BFS 结果曲线如图 8 所示。

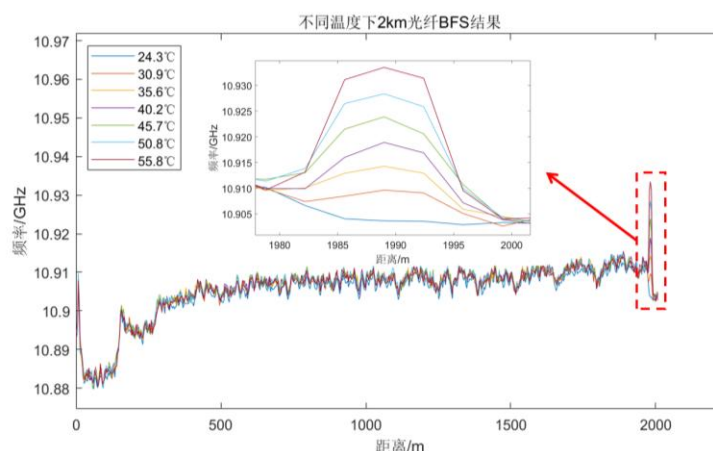


图 8 不同温度下 BFS 结果曲线

Fig. 8 The BFS result curves at different temperatures

由此可见，在不同温度下，系统成功测量出光纤尾端热点区域 BFS 变化，每上升 5℃，

200 布里渊频移约增加 5MHz。对热点区域的 BFS 与所处实际温度进行线性拟合，可以得到该光纤 BFS 随温度变化关系，如图 9 所示。

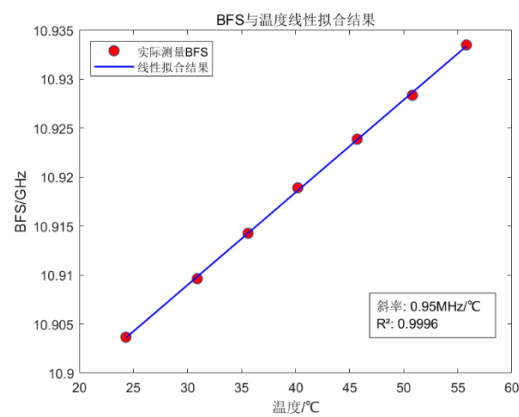


图 9BFS 与温度线性拟合结果曲线

Fig. 9The curve of the linear fitting results of BFS and temperature

205 对测量的 BFS 与温度进行拟合，得到布里渊频移变化的温度系数为 0.95MHz/°C，拟合度为 0.9996，表明布里渊频移与温度具有很好的线性关系。

为了验证算法的实时性，通过 TCP 连接的方式将解调数据实时传输到上位机进行显示，分别对不同累加次数下，同一长度的光纤进行连续 1000 组测量，需要的测量时间如表 2 所示。

210 表 2 不同累加次数同一长度的光纤测量耗时

Tab. 2 Measurement time for the same length optical fiber with different accumulation counts

累加次数/次	实验测量时间/秒	平均一次脉冲测量 时间/微妙	单脉冲数据采集时 间/微妙
2000	47.11	23.03	
3000	70.25	23.06	23
4000	93.21	23.04	

215 针对 2.007km 的测量光纤，在一次脉冲测量下光信号往返时间约为 19.68us，而在实验测试中，热点置于光纤尾部，为了保证采到光纤热点位置，每个脉冲下采集了约 23us 数据。实验测量时间包括通过以太网参数配置、FPGA 控制的 AD 采样、FPGA 进行 BFS 计算、通过以太网把结果传输到 PC 这四部分组成，在不同累加次数下数据采集消耗的时间和系统处理数据时间几乎相同，证明本系统能够实时地处理所有数据，完全满足实际测量需求。

对光纤热点部分利用热吹风机进行快速加热，在累加 1000 次的情况下，比较温度计温度变化与 BOTDR 实时处理系统光纤热点部分温度变化，温度系数使用系统之前拟合出来的系数 0.95MHz/°C。测量结果比较图如图 10 所示。

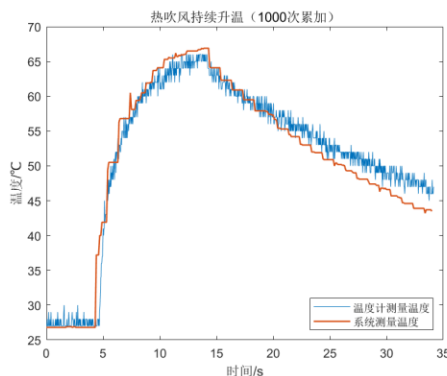


图 10 热吹风加热温度测量比较

Fig. 10 Comparison of blow dryer heating temperature measurements

从实验结果可以看出, 本文设计的 BOTDR 实时测量系统具有较好的实时性, 本文系统测量结果与温度计的测量趋势高度相似。光纤传感器与温度计对温度的响应时间略有差异, 这是由于使用热吹风进行测量, 温度计测试的是热风温度, 热风加热光纤芯子有一定的热传导时间, 同时温度计探头热容量和光纤热容量不一样, 从而引起温度变化速率的微小差异, 但整体上仍能充分体现出本文设计系统在实时测量方面的可靠性。因此, 该系统能够在实际应用中提供稳定且准确的温度监测功能。

3 结论

根据 BOTDR 信号的特性与处理需求, 本文提出并实现了一种基于 FPGA 平台实现的 BOTDR 信号实时解调处理方案, 利用短时傅里叶变换实现时频分析、通过累加降噪技术有效提高信噪比、使用频谱平滑和二项式拟合进行寻峰, 实现了对布里渊频移的精准实时定位。在 FPGA 平台上搭建系统, 通过吹风机的快速升温 and 降温实验, 验证了系统的实时性和准确性。

[参考文献] (References)

- [1] Kao K C, Hockham G A. Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies[C]//Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. IEE, 1966, 113(7): 1151-1158.
- [2] Jeff Hecht. City of Light: The Story of Fiber Optics. [M]. New York: Oxford University Press, 1999.
- [3] Milne D, Masoudi A, Ferro E, et al. An analysis of railway track behaviour based on distributed optical fibre acoustic sensing[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 142: 106769.
- [4] Zhao Y, Zhu Y, Yuan M, et al. A Laser-Based Fiber Bragg Grating Ultrasonic Sensing System for Structural Health Monitoring[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(22): 2573-2576.
- [5] 王进, 孙超, 付乔, 等. 基于 BOFDA 的地下连续墙变形监测技术研究[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(S2): 558-564.
- [6] 薄志永. 光纤测温技术在工程实际中的应用[J]. 纯碱工业, 2024, (05): 40-42.
- [7] 牛迎战, 林猛, 王立刚, 等. 分布式光纤测温技术在成品油罐区的应用[J]. 石油化工安全环保技术, 2019, 35(02): 39-41+6.
- [8] 李军, 莫志刚, 张书林. 矿用本质安全型分布式光纤测温主机设计与实现[J]. 自动化技术与应用, 2018, 37(10): 16-20.
- [9] Juarez J C, Maier E W, Choi K N, et al. Distributed fiber-optic intrusion sensor system[J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(6): 2081-2087.
- [10] Yang Z, Dong H, Zhang F, et al. Distributed Optical Fiber Sensing Event Recognition Based on Markov

- Transition Field and Knowledge Distillation[J]. IEEE Access, 2023, 11: 19362-19372.
- 255 [11] 廖毅,周会娟.布里渊分布式光纤传感技术进展及展望[J].半导体光电,2008,29(06):809-814+838.
- [12] Bai Q, Wang Q, Wang D, et al. Recent advances in Brillouin optical time domain reflectometry[J]. Sensors, 2019, 19(8): 1862.
- [13] Wang Q, Yang Z, Jin S, et al. Fast and robust post-processing algorithm for STFT-BOTDR[C]//29th International Conference On Optical Fiber Sensors, 2025. (accepted)
- 260 [14] 王磊.BOTDR 传感系统性能提升方法的研究[D].华北电力大学(北京),2023.
- [15] Zhao L, Li Y, Xu Z. A fast and high accurate initial values obtainment method for Brillouin scattering spectrum parameter estimation[J]. Sensors and actuators A: physical, 2014, 210: 141-146.
- [16] Farahani M A, Castillo-Guerra E, Colpitts B G. Accurate estimation of Brillouin frequency shift in Brillouin optical time domain analysis sensors using cross correlation[J]. Optics letters, 2011, 36(21): 4275-4277.
- 265 [17] Li J, Wang D, Wang Y, et al. A novel method of Brillouin scattering spectrum identification based on Sobel operators in optical fiber sensing system[J]. Optical and Quantum Electronics, 2018, 50: 1-8.
- [18] Wang F, Zhan W, Lu Y, et al. Determining the change of Brillouin frequency shift by using the similarity matching method[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(19): 4101-4108.
- [19] Azad A K, Wang L, Guo N, et al. Temperature sensing in BOTDA system by using artificial neural network[J]. Electronics Letters, 2015, 51(20): 1578-1580.
- 270 [20] 曹栋.布里渊光时域反射仪信号处理技术研究[D].南京: 南京信息工程大学,2023.
- [21] 李璇.微型光纤干涉仪与分布式光纤传感技术的研究[D].北京: 北京邮电大学,2021.
- [22] 官国飞,宋庆武,陈志明,等.基于布里渊散射的光纤温度和应变快速感知[J].光通信研究,2022,(01):45-51.