

嵌入式的分布式光纤测温系统研究

黄 健, 宋树祥, 杨 军*, 黎标幸

(广西师范大学 电子工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 针对基于喇曼散射的分布式光纤测温系统(DTS)中存在温度信号后向散射光微弱、易淹没在系统噪声下以及系统整体成本高、体积大的问题, 提出一种使用 STM32F407 模块的嵌入式的 DTS。分别在系统中采用累加平均算法、小波阈值降噪算法以及多项式插值算法来降低噪声的影响、提升系统的信噪比和消除光的色散效应。实验结果表明: 系统的整体温度解调波动范围从 3.3~5.9 °C 降到 0.3~0.8 °C; 在长约 5 km 的多模光纤中, 温度分别为 29 °C、45 °C、60 °C 和 80 °C 的环境下, 系统的解调温度波动范围在 ± 1 °C 以内, 并且系统的数据处理时间在 60 ms 左右。

关键词: 分布式光纤测温系统; 嵌入式; 小波阈值降噪; 累加平均; 多项式插值

中图分类号: TN713; TP212 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2022)03-0022-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.03.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on embedded distributed temperature sensing

HUANG Jian, SONG Shuxiang, YANG Jun*, LI Biaoxing

(College of Electronic Engineering, Guangxi Normal University, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: Aiming at the problems that the backscattered light of the temperature signal is weak, easy to be submerged under the system noise, and the overall cost of the system is high and the volume is large in the distributed temperature sensing(DTS) based on Raman scattering, an embedded DTS using STM32F407 module is proposed. The cumulative average algorithm, wavelet threshold noise reduction algorithm and polynomial interpolation algorithm are used in the system to reduce the influence of noise, improve the signal-to-noise ratio of the system and eliminate the dispersion effect of light. The experimental results show that the overall temperature demodulation fluctuation range of the system decreases from 3.3~5.9 °C to 0.3~0.8 °C; in a multimode fiber about 5 km long, the temperature is 29 °C, 45 °C, 60 °C and 80 °C respectively, the demodulation temperature fluctuation range of the system is within ± 1 °C, and the data processing time of the system is about 60 ms.

Key words: distributed temperature sensing, embedded, wavelet threshold denoising, cumulative average, polynomial interpolation

0 引言

近年来, 分布式光纤测温传感技术得到快速的发展。分布式光纤测温系统(DTS)可以对光纤沿线区域进行连续实时温度监控^[1]。光纤具有本质安全、不导

电、抗电磁干扰和抗腐蚀性等特点, 与传统的测温系统相比, DTS 被广泛应用于电力、石油、化工和航天等领域, 其应用前景更加广阔^[1-3]。

DTS 的温度光纤传感器主要分为 2 类: 基于喇曼散射和基于布里渊散射^[3-5]。其中, 布里渊散射不仅对温度物理量敏感, 对应变也较为敏感; 而喇曼散射中, 向后散射的反斯托克斯光仅对温度信号敏感, 系统整体的测量精度高^[6-8]。在基于喇曼散射的 DTS 中, 由于自发喇曼散射所发出的斯托克斯光与反斯托克斯光非常微弱, 而且所产生大量的光学噪声和电流噪声会降低系统的信噪比, 影响系统整体的测温精度和测量距离, 所以需要对系统进行降噪处理, 提升系统的信噪比^[2,7,9]。目前, 提升系统信噪比有 2 种方法: 硬件和

收稿日期: 2021-09-10。

基金项目: 广西师范大学重大科技成果转化培育项目 (2020PY002) 资助; 桂林市重点研发计划项目 (2020010329) 资助。

作者简介: 黄健(1996—), 男, 广西桂林人, 硕士研究生, 现就读于广西师范大学电子工程学院, 所学专业为电子与通信工程专业, 主要研究方向为嵌入式开发、分布式光纤传感技术。参与了广西师范大学重大科技成果转化培育项目 1 项, 桂林市重点研发计划项目 1 项, 国家自然科学基金 1 项。

* 通信作者: 杨军(1982—), 男, 工学硕士, 高级工程师, 主要研究方向为光纤传感技术。



软件。硬件方法是采取提升光源的光功率、使用性能更好的光电探测器以及脉冲编码调制脉冲光等措施;软件方法是采用各种信号处理算法,如递推最小二乘(RLS)自适应滤波算法、卡尔曼滤波以及小波阈值降噪等算法^[10-15]。其中,小波阈值降噪算法被广泛应用于DTS中。2020年,太原理工大学薛志平等人^[2]通过使用小波包去噪算法将光纤全程温度波动范围从0.65~1.15℃降至0.36~0.75℃。但是,基于喇曼散射的分布式光纤测温系统(DTS)中仍存在含有温度信号的后向散射光微弱、易淹没在系统噪声下以及系统整体成本高、体积大的问题。为此,本文提出一种基于嵌入式的DTS。

1 基于嵌入式的DTS结构

本文提出的基于嵌入式的DTS结构图如图1所示。数据采集卡发出一个电脉冲信号驱动脉冲激光器,发出的激光脉冲宽度为10 ns,脉冲重复频率为10 kHz,经过掺铒光纤放大器(EDFA)放大后峰值功率为10 W,平均功率为0 dBm;脉冲光入射到波分复用器(1450 nm/1550 nm/1660 nm)的1550 nm光端口,然后从串行通信端(COM)口射出经校准光纤射入到测温光纤里,其中向后散射的喇曼散射光分别从波分复用器的1660 nm光端口和1450 nm光端口输出斯托克斯光和反斯托克斯光到双通道光/电转换模块;将2路传感光信号进行光/电转换并多级放大后,传给采集卡进行模/数转换和数据采集,并进行2路数据的累加平均降噪处理;数据采集卡采集1路脉冲信号、2路数/模转换(AD),采样频率为100 MHz,采样精度为14位,每帧采集长度为6000个点,最后形成一帧平均数据(取10000帧的平均值)发送到STM32F407数据处理模块进行数据处理。温度传感器在校准光纤盒中探测校准光纤的温度,再把实时温度值传给STM32F407

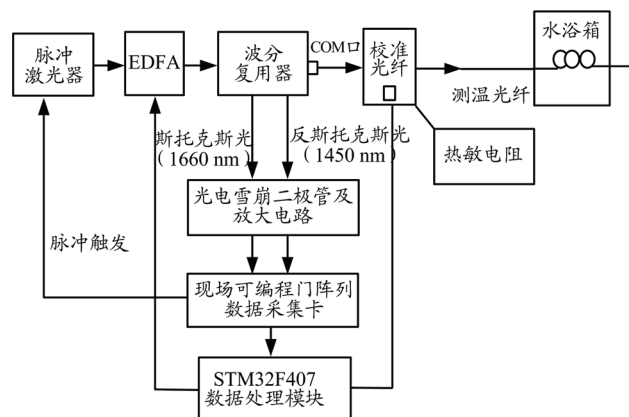


图1 基于嵌入式DTS结构图

模块,并通过温度解调算法解调出温度,测温光纤长约5 km。

2 DTS中采用的算法

2.1 累加平均算法

累加平均算法是最常见的一种滤波算法,通过对信号进行多次采集,并对其累加平均得出滤波后的信号,达到提升系统信噪比的目的^[3]。在DTS中,其单次信号采集的信噪比可以表示为

$$SNR = \frac{s}{\sigma} \quad (1)$$

其中, s 表示喇曼散射有效值, σ 表示系统噪声的有效值。累加 K 次后噪声的均根值表示为 σ_K ,求得 K 次累加后的均方值为

$$\sigma_K^2 = E\left(\sum_{i=1}^K n_i^2\right) = K\sigma^2 \quad (2)$$

信号经过 K 次累加后,喇曼信号的有效值和系统噪声的有效值可分别表示为 Ks 、 $\sqrt{K}\sigma$,因此信噪比可表示为

$$SNR^K = \frac{Ks}{\sqrt{K}\sigma} = \frac{\sqrt{K}s}{\sigma} \quad (3)$$

相比式(1)和式(3)可知,信号累加 K 次后,系统信噪比增加了 $\sqrt{K}$ 倍。但是,累加次数的增加,也会造成系统信号采集的时间和信号处理工作量的增加。因此,本文将采取10000次信号的累加平均的算法来提升系统的信噪比。

2.2 多项式插值法

由于喇曼散射所产生的斯托克斯光与反斯托克斯光波长的不同,使其在光纤中的传播速度也不同,导致在采集端同一时刻探测的信号将会来自不同光纤的不同位置,传感光纤越长,这一现象越明显^[2]。因此,本文采用多项式插值法中分段线性插值对采集到的斯托克斯光与反斯托克斯光信号进行消除光散射效应处理,使它们对应到本来的位置。

$$L_n(x) = \sum_{k=0}^n y_k l_k(x) \quad (4)$$

其中, $L_n(x)$ 为每个区间的线性函数,且 $L_k(x_k) = y_k$ 。 $l_k(x)$ 为基函数,其函数构造为

$$l_k(x) = \begin{cases} \frac{x-x_{k-1}}{x_k-x_{k-1}}, & x \in [x_{k-1}, x_k] (k=0 \text{ 时舍去}) \\ \frac{x-x_{k+1}}{x_k-x_{k+1}}, & x \in [x_k, x_{k+1}] (k=n \text{ 时舍去}) \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

通过插值算法消除色散效应,使得采集到的斯托克斯光与反斯托克斯光来自同一位置、同一时刻,这样可以提高系统的测量精度。

2.3 降噪算法的验证及选择

由于在基于喇曼散射的 DTS 中产生的斯托克斯光和反斯托克斯光十分微弱,极易被淹没在噪声中^[2,3,8],因此为了提升系统的信噪比,本文对常用的降噪算法进行验证,通过降噪后其解调温度的波动曲线来对比这些算法在 DTS 中的实用性^[10-15]。

在验证 RLS 自适应滤波算法时,设置滤波器系数为 10,遗忘因子为 0.995,正则化系数为 5,此时滤波效果最佳;在验证卡尔曼滤波算法时,设置观测误差系数 r 为 0.1,系统误差 q 为 0.01;在验证小波阈值去噪算法时,硬阈值方法能够保留更多原始信号的尖峰特征,而软阈值方法使重建信号比较光滑,因此本次实验选择软阈值函数。对于小波分解层次,其去噪效果会随分解层数的增加而变好,但是分解层次增加到 5 层后去噪效果改善不明显,反而增加了计算代价,实际应用中分解层次取 3~5 层即可;通过对比几种不同的小波函数的滤波效果得出小波函数 db05 的滤波效果最优,分解层数选择 5 层。

本文将 DTS 系统置于温度为 16.2 °C 的环境下,得出各算法降噪后解调出温度的曲线如图 2 所示,解调后的温度数据如表 1 所示。可以看出,与其它算法相比,小波阈值降噪算法的测量温度曲线的数据方差最小,解调后的温度曲线最平稳^[16-17]。采用小波阈值降噪算法后,光纤测温的温度波动范围从 3.3~5.9 °C 降低到 0.3~0.8 °C,表明经过小波阈值降噪处理后,DTS 测量的温度数据更加集中、更加平稳,可以有效抑制系统的噪声,极大地提高了整个 DTS 的测量精度和数据平稳性。

此外,空间分辨率也会影响 DTS 的整体性能,影响系统空间分辨率的因素包括探测脉冲的脉冲宽度、采集卡的采样率以及信号处理算法^[18]。本文研究上述降噪算法对脉冲宽度的影响,测试结果如图 3 所示。通过对比各算法的测试结果可知,在相同的测试条件下,采用 RLS 自适应滤波算法后其脉冲宽度会使得上升沿变高;采用卡尔曼滤波算法后脉冲宽度发生了改变,上升沿变得缓慢,坡度变小,影响了系统的空间定位精度;而采用小波阈值降噪算法后,其对光脉冲的影响较弱。因此,本文采用小波阈值降噪算法对系统的信号进行降噪处理。

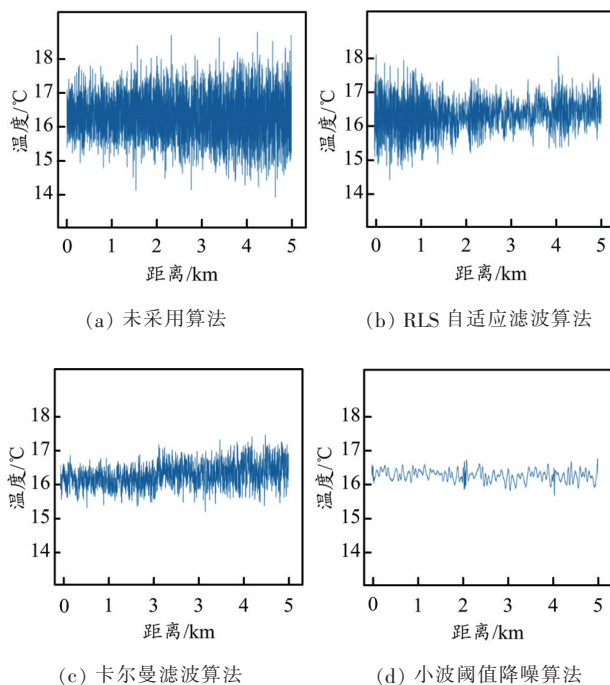


图 2 各算法解调温度曲线图

表 1 各算法解调后温度数据

算法	最大值/°C	最小值/°C	平均值/°C	方差
未采用算法	19.7	13.8	16.4	0.460
自适应滤波	18.2	15.0	16.4	0.115
卡尔曼滤波	17.1	15.2	16.2	0.069
小波阈值降	16.7	15.9	16.2	0.016

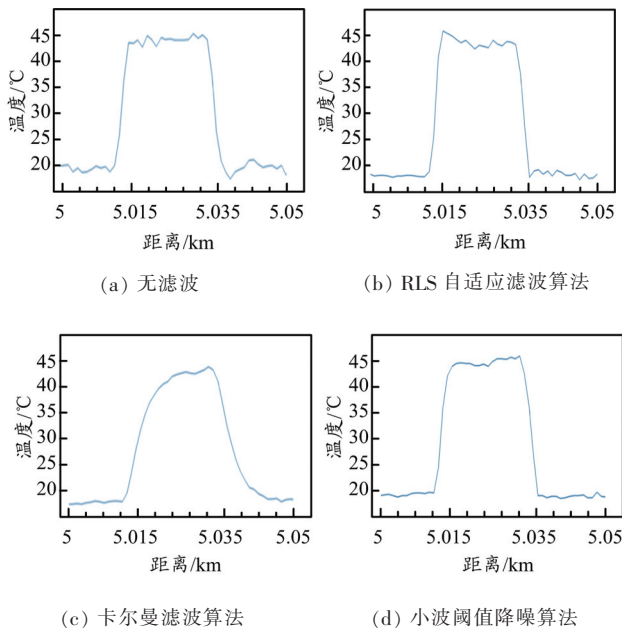


图 3 各算法静态测试点温度测试

3 实验分析

为了验证本文所提嵌入式的 DTS 的测量精度和实用性,首先在室温 29.5 ℃ 下对温度进行测量,采集一帧数据,并与降噪和用插值消除光散射效应处理之前的信号作对比。处理前、后的解调温度对比效果如图 4 所示。可以看出,通过算法处理之后的温度解调更加稳定,解调出来的温度波动范围在 ± 1 ℃ 以内;光纤与光纤的连接处会对光信号有干扰,造成温度解调的波动。

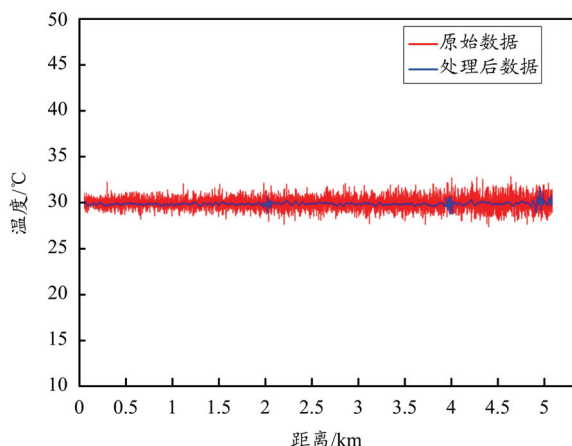


图 4 29.5 ℃ 下的温度解调曲线对比图

为了验证系统测量的重复性,依次取测温光纤上 0.008 km、2.039 km、3.997 km 和 4.98 km 处为 A 点、B 点、C 点和 D 点。在 45 ℃ 的水浴箱环境下,通过对上述 4 个点进行长时间的温度测量来验证系统测量的重复性。温度测量结果如图 5 所示。实验数据表明:上述 4 个点采集的 600 多帧数据,其测量温度波动范围在 ± 1 ℃ 以内,说明系统的温度测量重复性较好。

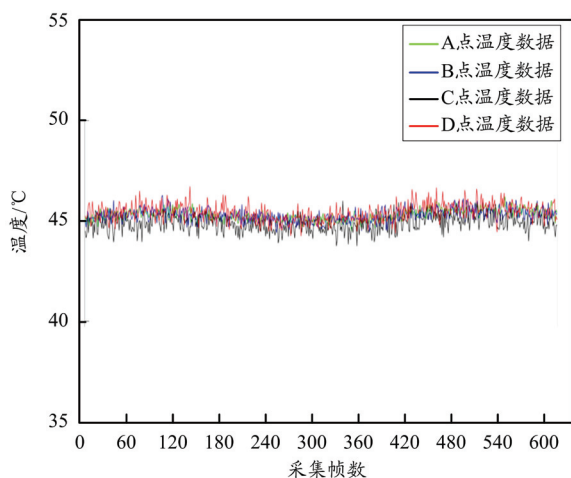


图 5 系统测量温度的稳定性

本文在大约 2.05 km 处,使用一段约为 25 m 的测温光纤,并将其放置在水浴箱里面加热至 60 ℃,通过对比使用算法前、后的温度曲线验证系统的算法是否会改变光脉冲的脉冲宽度和上升沿。使用算法前、后对比图如图 6 所示。实验数据表明:当增加小波阈值降噪算法后,不会改变其后向散射信号的带宽,上升沿也不会发生改变。

为了进一步验证系统的测量精度和测量稳定性,大约在 25 m、2.05 km、4 km、5 km 处同时使用一段环形多模光纤,将其放置在水浴箱里面,水温分别设置为 45 ℃、60 ℃ 和 80 ℃,通过测温光纤采集数据得到其温度解调数据。系统的测量温度曲线如图 7 所示。根据数据显示:在 45 ℃、60 ℃ 和 80 ℃ 的水浴箱,测量出的解调温度范围分别为 44.44~46.4 ℃、59.21~61.59 ℃ 和 79.43~81.37 ℃。

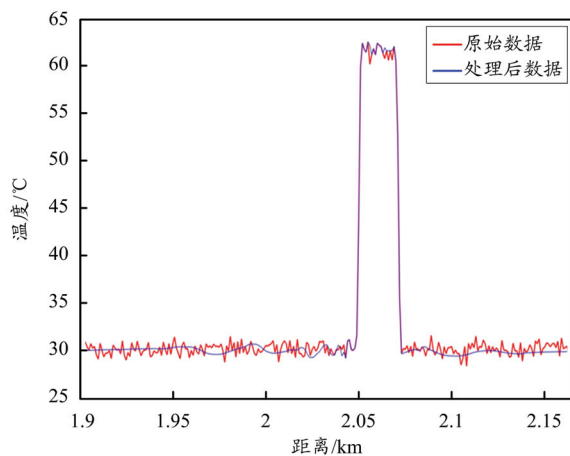


图 6 静态温度解调曲线对比图

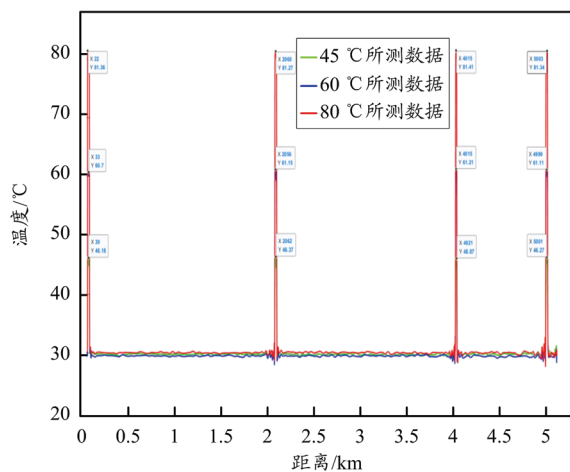


图 7 各温度下温度解调曲线

4 结束语

本文提出使用 STM32F407 嵌入式系统代替计算

黄健,宋树祥,杨军,等:嵌入式的分布式光纤测温系统研究

机作为 DTS 数据处理模块的方案,降低了整套系统的成本,使系统小型化且集成度高。该系统首先采用累加平均算法,使用 10000 次的累加平均滤波降低系统的噪声影响;然后,在 STM32F407 单片机中,加入小波阈值降噪算法对系统采集的数据进行降噪处理,加入多项式插值法消除光散射效应;最后,通过实验验证系统的测量精度和稳定性。实验数据表明:通过算法处理数据后,测量出的温度波动范围从 3.3~5.9℃降低到 0.3~0.8℃,极大地增强了系统的测量精度和数据平稳性;此外,在 29.5℃、45℃、60℃和 80℃测试环境下,系统温度波动范围在 ± 1 ℃的范围内,并且信号处理算法没有改变系统的带宽,系统的数据处理时间在 60 ms 左右。本系统的测量精度和实时性完全满足实际工程需要。

参考文献:

- [1] 王焱,江毅,马维一. 分布式光纤拉曼测温系统中解调算法的优化[J]. 光学技术,2018,44(6):646-650.
- [2] 薛志平,王东,王宇,等. 分布式光纤拉曼测温系统信噪比优化研究[J]. 传感技术学报,2020,33(1):17-21.
- [3] 陈瑞麟,万生鹏,贾鹏,等. 基于累加平均的分布式光纤拉曼测温系统[J]. 应用光学,2018,39(4):590-594.
- [4] 王星. 基于 EMD 的分布式光纤管道测温信号去噪分析[J]. 电脑与电信,2019(3):51-54.
- [5] 沈小青,杨洋,王志虎,等. 光纤测温系统实时性及分辨率优化与应用[J]. 半导体光电,2017,38(1):113-116,121.
- [6] 陈瑞麟. 分布式光纤拉曼测温系统的设计与优化[D]. 南昌:南昌航空大学,2018.
- [7] WANG D, CHENG B, JIN B, et al. Remote simultaneous measurement of liquid temperature and refractive index using fiber-optic spontaneous Raman scattering[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(22): 10513-10518.
- [8] WANG D, XUE Z, JIN B, et al. Chaotic correlation optical fiber liquid level sensor[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(3): 1023-1028.
- [9] 邹孟霖. 分布式光纤测温系统精度提高方法及其软件设计[D]. 成都:电子科技大学,2018.
- [10] 李金铸,胡兴柳,张小伟. LMS 算法在分布式光纤测温系统中的应用[J]. 电子科技,2015,28(9):19-22.
- [11] SABATIER C, LECOUCHE V, GIRARD S, et al. Distributed optical fiber sensor allowing temperature and strain discrimination in radiation environments[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2019, 66(7): 1651-1656.
- [12] 任静宜,古琳,龙盛蓉. 基于 LabVIEW 和 MATLAB 混合编程的实时自适应滤波系统[J]. 电子产品可靠性与环境试验,2020,38(1):12-17.
- [13] 韦坚,王小军,梁财海,等. 基于卡尔曼滤波的分布式光纤 Raman 测温系统[J]. 光学技术,2016,42(3):264-267.
- [14] 向进,刘波峰,李亚. 基于小波的分布式光纤测温系统中噪声信号处理研究[J]. 现代仪器,2011,17(1):47-49,44.
- [15] 刘涛,张文平,陈慧芳,等. 卡尔曼滤波在分布式拉曼光纤温度传感系统去噪中的应用[J]. 红外与激光工程,2014,43(5):1643-1647.
- [16] 张涛,刘俊,高媛,等. 卡尔曼滤波在光纤测温隧道火灾监测系统中的应用[J]. 交通科技,2020(2):101-105.
- [17] LI C, TANG J, CHENG C, et al. Simultaneously distributed temperature and dynamic strain sensing based on a hybrid ultra-weak fiber grating array[J]. Opt. Express, 2020, 28(23): 34309-34319.
- [18] LI H, LIU Q, CHEN D, et al. Centimeter spatial resolution distributed temperature sensor based on polarization-sensitive optical frequency domain reflectometry[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(8): 2594-2602.