CN 51-1346/O4 ISSN 1003-501X (印刷版) ISSN 2094-4019 (网络版)



基于参考滤波器及互相关算法的砷化镓光纤温度解调方法

毕扬,熊治富,李佳文,杨天宇,刘奂奂,万慧明,董玉明

引用本文:

毕扬, 熊治富, 李佳文, 等. 基于参考滤波器及互相关算法的砷化镓光纤温度解调方法[J]. 光电工程, 2024, **51**(9): 240143.

Bi Y, Xiong Z F, Li J W, et al. Demodulation method for GaAs optical fiber temperature sensing based on reference filter and cross-correlation algorithm[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, **51**(9): 240143.

https://doi.org/10.12086/oee.2024.240143

收稿日期: 2024-06-18; 修改日期: 2024-08-13; 录用日期: 2024-08-13

相关论文

光纤法布里--珀罗传感器的解调方法研究综述

周朕蕊,邱宗甲,李康,张国强 **光电工程 2022, 49**(6): 210411 doi: 10.12086/oee.2022.210411

用于光纤干涉传感器的高稳定PGC解调技术

肖文哲,程静,张大伟,孔勇,叶华龙,何军 光电工程 2022, **49**(3): 210368 doi: 10.12086/oee.2022.210368

基于自适应空间正则化和畸变抑制的相关滤波跟踪

王叶,刘强,卿粼波,滕奇志,何小海 **光电工程** 2021, **48**(1): 200068 doi: 10.12086/oee.2021.200068

基于核滤波器实时运动目标的抗遮挡再跟踪

汤学猛,陈志国,傅毅 光电工程 2020, **47**(1): 190279 doi: 10.12086/oee.2020.190279

更多相关论文见光电期刊集群网站



http://cn.oejournal.org/oee





Website



Article 2024 年, 第 51 卷, 第 9 期

DOI: 10.12086/oee.2024.240143

CSTR: 32245.14.oee.2024.240143

基于参考滤波器及互相关算法 的砷化镓光纤温度解调方法

毕 扬¹,熊治富¹,李佳文¹,杨天宇²,刘奂奂², 万慧明³,董玉明^{2*} ¹重庆蟠龙抽水蓄能电站有限公司,重庆401420; ²中国科学院深圳先进技术研究院,广东深圳518055; ³东方电气集团东方电机有限公司,四川德阳618000

[_	Data acquisition
	Temperature response da
Longpass filters	Double Gaussian filtering
Ľ	\Rightarrow [LPF cross-correlation]
	<u> </u>
Actual accuracy requirements	Aultiple polynomial fitting
	Û
Quadratic polynomial fitting	Temperature-wavelength response curve

摘要:本文提出了一种基于参考滤波器及互相关算法的新型砷化镓光纤温度解调方法。该方法利用二次高斯滤波方法 实现数据平滑预处理,采用长波通滤波 (LPF) 波形作为参考波形的改进型互相关算法,实现砷化镓光纤温度的解调。 基于获取的互相关运算相关系数结果,采用多次多项式拟合,进一步提高互相关算法解调精度。在-30 ℃ 至 250 ℃ 的测温范围内,该方法的波长解调误差可达到±0.0016 nm,平均温度解调误差为±0.388 ℃。相较于现有的归一化光 强解调法,采用 LPF 波形作为参考波形的互相关算法在抗噪性能上实现了 2.64 倍的提升,且较之于未使用 LPF 参考 波形的互相关算法提升了 2.08 倍。 关键词:砷化镓;高斯滤波;互相关算法

中图分类号:TK311; O241

文献标志码: A

毕扬,熊治富,李佳文,等.基于参考滤波器及互相关算法的砷化镓光纤温度解调方法 [J]. 光电工程,2024, **51**(9): 240143 Bi Y, Xiong Z F, Li J W, et al. Demodulation method for GaAs optical fiber temperature sensing based on reference filter and cross-correlation algorithm[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, **51**(9): 240143

Demodulation method for GaAs optical fiber temperature sensing based on reference filter and cross-correlation algorithm

Bi Yang¹, Xiong Zhifu¹, Li Jiawen¹, Yang Tianyu², Liu Huanhuan², Wan Huiming³, Dong Yuming^{2*}

¹State Grid Xinyuan Chongqing Panlong Pumped Storage Company Limited, Chongqing 401420, China;

² Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen, Guangdong 518055, China; ³ Dongfang Electric Machinery Company Limited, Deyang, Sichuan 618000, China

Abstract: This paper presents a new demodulation approach for optical fiber temperature sensors based on GaAs, leveraging reference filtering and a cross-correlation algorithm. It preprocesses the data through double Gaussian filtering for smoothing and implements an enhanced cross-correlation algorithm adopting a long-pass filter (LPF) waveform as the reference signal to demodulate the GaAs optical fiber temperature sensor. Using the correlated

版权所有©2024 中国科学院光电技术研究所

收稿日期: 2024-06-18; 修回日期: 2024-08-13; 录用日期: 2024-08-13

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目 (62205364);深圳市技术攻关重点项目 (JSGG20220831103402004) *通信作者: 董玉明, ym.dong@siat.ac.cn。

data from cross-correlation operations, it applies a multiple polynomial fitting strategy to further augment the precision of the cross-correlation algorithm's demodulation. Across a temperature sensing range of -30 to 250 °C, the wavelength demodulation error of this method can reach ±0.0016 nm, and the temperature demodulation accuracy is ±0.388 °C. Relative to the prevailing normalized optical intensity demodulation method, the cross-correlation algorithm employing an LPF waveform as the reference demonstrates a 2.64-fold increase in noise immunity and a 2.08-fold improvement over cross-correlation algorithms without the LPF reference waveform. Keywords: GaAs; Gaussian filtering; cross-correlation algorithm

1 引 言

光纤传感技术是以光纤作为信息的传输媒介,利 用外界环境因素的改变使得光在光纤中传播的强度、 波长、频率,相位、偏振态等光学性质发生改变,从 而利用外界物理量进行传感测量^[1-2]。光纤温度传感技 术在工业^[3-4]、生物医疗^[5-6]、环境监测^[7-8]等领域中应 用广泛,相较于传统的温度传感器,它展现出了显著 的优势:具备强大的抗电磁干扰能力,体积小、重量 轻,易于集成,且适用于各种人类无法工作的极端恶 劣环境^[9-10]。砷化镓由于其独特的半导体特性,被广 泛应用于温度传感器^[11-12]、流速传感器^[13]、压力传感 器^[14]、功率传感器^[15-16]、折射率传感器^[13]、压力传感 器^[14]、功率传感器^[15-16]、折射率传感器^[17]等高灵敏度 传感器的制作,其中包括利用砷化镓的半导体吸收特 性制作的热丝式光纤温度传感器,进一步提升了温度 测量的准确性和可靠性。

目前针对反射光谱信号常用的解调方法有强度解 调、相位解调和波长解调等,其中相位解调主要用于 干涉所引起的光谱相位变化的解调,对于半导体吸收 式砷化镓的光纤温度传感解调并不适用。在2015年, 胡昆等人提出了一种多通道自校准砷化镓吸收式光纤 温度监测系统[18],该系统利用多通道实现了多点测温, 系统测量误差为±0.5℃,但是未对解调技术进行系统 阐述。在同年, 胡昆等人提出了一种砷化镓吸收式光 纤温度传感技术的强度解调方法^[19],该方法利用反射 光谱某一固定的归一化反射光强值得到所对应的波长 值,从而根据不同温度下的漂移光谱的温度与波长值 的对应关系得出砷化镓的温度响应曲线。尽管该方法 能够达到小于 0.1 ℃ 的测量精度,但由于对应波长值 的获取易受噪声与测量方法的影响,且受光谱仪分辨 率限制,所获取某一温度对应的波长值只能得到一个 最接近结果但存在误差的值,因此该解调方法得到的 温度与波长拟合曲线结果并不准确可靠。

在 2019 年, Chen 等人提出了一种基于互相关解

调的单模光纤法布里珀罗干涉传感器^[20],利用 FPI 干 涉传感器输出的干涉光强信号与解调器发出的干涉光 强信号的互相关性实现高精度测量。互相关函数的峰 值位置会随光纤传感器的腔长变化而发生变化,从而 使得该传感器能够以 0.6 nm 的腔长分辨率检测到 ±4 µm 范围内的腔长变化,可用于强电磁干扰和远距 离环境下的温度与压力测量。该方法因为直接利用解 调光强数据与干涉光强数据进行互相关运算,并未采 取一定的降噪措施,因此在很大程度上受到数据采集 过程中的噪声影响,进一步为互相关运算带来误差, 从而影响解调结果的准确性。在 2022 年, Guo 等人 利用互相关解调实现高灵敏度的光纤低频声探测器[21], 在 20 Hz 频率的声波下能够达到 0.65 mPa 的检测限。 然而,基于波长解调的传统互相关算法所采用的参考 波长为采集的分析数据,缺少标准的参考波形,且最 大互相关系数的获取取决于实验系统的分辨率,无法 保证结果的准确性。

鉴于上述现状,本文提出了一种基于参考滤波器 及互相关算法的解调方法,通过长波通滤波(LPF)参 考光谱与不同温度下的砷化镓反射光谱的相关性,结 合多项式拟合,实现砷化镓光纤温度传感解调。该方 法采用的二次高斯滤波能够减小数据采集过程中的噪 声影响,提高算法的抗噪性能和准确性。相比于未使 用 LPF 波形的互相关算法,该算法利用同一实验数 据采集系统采集的 LPF 波形作为参考波形, 解决了 利用采集数据波形作为参考波形抗噪性能低和虚拟波 形无法反馈采集系统 (如光源、光谱仪等) 带来的误差 影响问题,同时利用多次多项式拟合的方法,保证了 最大互相关系数获取值的准确性与可靠性。与现有砷 化镓温度响应解调技术对比[19],该算法的抗噪性能可 提高 2.64 倍, 波长解调误差可达到±0.0016 nm, 平均 温度解调误差为±0.388 ℃,能够满足各种应用场景下 的高精度解调。

2 算法理论

本文采用了一种二次高斯滤波算法实现数据平滑 预处理,旨在有效减少数据采集过程中的噪声干扰。 这种方法通过两次连续的高斯滤波操作,不仅滤除了 高频噪声,还平滑了数据序列,显著增强了算法的抗 噪能力,为后续分析奠定了坚实基础。基于互相关原 理的传统光纤传感解调方式,往往采用两组采集数据 或虚拟函数进行互相关计算,缺乏统一的标准且存在 较大的误差,本文利用 LPF 波形作为标准参考波形 解决上述问题。

2.1 LPF-互相关算法

两个函数 f(x) 和 h(x) 的互相关 (cross-correlation) 可定义为

$$R_{fh}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f^*(x') h(x'+x) dx, \qquad (1)$$

或

$$R_{fh}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f^*(x' - x)h(x') dx' .$$
 (2)

互相关运算类似于卷积,其中互相关运算不需要 进行函数的翻转,这里,自变量 *x* 和积分变量 *x*'均为 实数,函数 *f*(*x*) 和 *h*(*x*)可以是实数,也可以是复数。 式(1)与式(2)完全等价,其物理意义为两个函数之 间的相似性的度量。对于实函数而言,两个函数的互 相关运算相当于两函数的曲线相对平移 1 个参变量 *x* 后形成的重叠部分与横轴所围区域的面积。其中互相 关计算公式的离散形式可以表示为

$$\hat{R}_{xy}(m) = \begin{cases} \sum_{n=0}^{N-m-1} x_{n+m} y_n^*, & m \ge 0\\ R_{yx}^*(-m), & m < 0 \end{cases}$$
(3)

其中: *x*_{n+m}、*y*_n分别为参考离散序列与采集数据离散 序列, 输出结果包括:

$$c(m) = \stackrel{\wedge}{R}(m-N)$$
, $m = 1, 2, ..., 2N-1$. (4)

根据互相关算法原理,本文中所提出的 LPF-互相关算法可由下式得出:

$$P_m(\delta\lambda) = \sum_{n=N_1}^{N_2} R_{\rm ref}(\lambda_n) R_{\rm s_2}(\lambda_n - m \cdot \delta\lambda) , \qquad (5)$$

式中: *R*_{ref}(λ)与*R*_{s₂}(λ)分别为归一化 LPF 离散参考光 谱序列和经过去噪 (平滑)、归一化处理后的离散采集 光谱序列,δ为计算光谱漂移的步长,等于光谱仪的 最小分辨率,*N*₁和*N*₂代表选定的光谱段,此处两个 离散光谱序列的序列数一般相同,可以采取补零操作。 通过计算不同漂移量*m*·δλ下的相关系数大小,可以 得到漂移序列与互相关值序列组。相比于传统光纤传 感解调算法中的互相关算法,本文提出的参考滤波器 波长解调算法利用长波通滤波器(LPF)输出的波形替 代传统采集数据作为参考波形,这一方法显著减少了 由波形干扰导致的相关系数误差,从根本上优化了数 据预处理阶段。通过与 LPF 波形的互相关运算分析, 不仅有效反馈了实验过程中由噪声及设备波动对采集 信号的潜在影响,还增强了参考波形的稳健性。由此 提升了波长解调算法的准确度与可靠性,确保了解调 结果的高精度。

2.2 算法流程原理框架

本文提出的算法流程结构如图 1 所示,其核心在 于精确捕获砷化镓温度传感器的响应。该过程从-30 至 250 ℃ 的宽温域内,以 10 ℃ 的步进进行多通道数 据采集,每个温度点收集 5 组样本,确保数据的丰富 性与可靠性。此外,在同一实验环境下获取长波通滤 波器输出的光谱 *S*_{ref},作为互相关分析的参考信号, 增强解调方法的稳健性。



图 1 砷化镓光纤温度解调方法原理图 Fig. 1 Schematic diagram of demodulation method for GaAs fiber optic temperature sensing

每组温度数据经过平均化处理,得到代表性的反射光谱数据。针对原始数据中显著影响解调精确度的特殊干扰波形,采取针对性的去噪措施,例如直接消除那些极端的噪声尖峰,进而得到初步去干扰的光谱数据 *S*₁。为进一步降低噪声背景,运用二次高斯滤波技术对 *S*₁实施深度平滑处理,得到更为真实的离散反射光谱数据 *S*₂。

为了确保互相关分析的准确性, S2 与基准光谱

S_{ref}均需经历归一化处理,转换成S[']₂与S[']_{rsf}。随后,依 据互相关算法原理(式(5)),对S[']₂与S[']_{rsf}执行互相关计 算,输出包含互相关漂移量序列与相关系数的集合C。 通过高精度的多次多项式拟合分析,特别是调整拟合 过程的步长以匹配所需解调精度,从集合C中识别出 峰值点,其对应的偏移量乘以采样间隔即得特定温度 下的波长漂移值。

最后,将不同温度下测得的波长漂移数据与对应 温度点经由二次多项式拟合,构建出砷化镓材料的温 度响应解调曲线,这一过程显著提升了温度测量的精 确度与适应性。

3 实验结果与分析

3.1 砷化镓温度响应数据实验分析

图 2 为砷化镓温度响应数据的采集实验设备图, 其中所使用的 SLED 光源 (AOETech JF8145) 3 dB 带 宽为 80 nm,输出功率为 20 mW,光谱信号通过 2×1 多 模光纤耦合器 (50:50) 和 1×3 多模光纤耦合器 (33.3: 33.3:33.3) 传输 至三个砷化镓光纤温度传感器 (GS00),砷化镓光纤探头末端的反射膜将反射光谱传 输至光开关中 (Dimension OSW6113B-FP),最后通过 自研光谱仪进行反射光谱的数据采集。其中,通过低 温干井炉 (FLUKE 9143) 和中温干井炉 (FLUKE 9103) 进行测试温度的控制,长波通滤波器的参考光谱信号 在采集不同温度下的反射光谱数据时被同时采集。

在实验中,我们运用中、低温干井炉调节待测温

度的范围,覆盖从 30 ℃ 至 250 ℃,以每 10 ℃ 为一 个步阶,通过光谱仪系统性地收集了不同温度点下晶 体的反射光谱数据。通过光开关收集三个通道下每个 温度下的反射光谱数据,每个通道的单一温度数据采 集五组,保证采集数据的完整与后期的重复性实验分 析。图 3(a) 所示的系列漂移曲线直观展现了随着温度 梯度变化,砷化镓晶体反射光谱的波长漂移情况。

为进一步提升数据质量,我们对原始光谱数据实 施了严谨的预处理步骤:首先,针对数据中的干扰成 分进行了有效剔除;接着,应用了二次高斯滤波技术, 以此强化信号并减少噪声干扰;在本研究中,我们选 择采用二次高斯滤波算法进行数据平滑预处理,主要 是基于其在去噪能力、边缘保持和平滑效果方面的综 合优势。与二次中值滤波、二次均值滤波以及二次中 值与均值滤波算法相比,二次高斯滤波不仅能够有效 去除噪声,而且更好地保留了信号的边缘信息,避免 了过度模糊。相比之下,二次中值滤波可能在去除噪 声的同时导致信号细节的损失,特别是对于连续性较 好的数据;二次均值滤波则容易造成边缘模糊,降低 信号的清晰度;而二次中值与均值滤波虽然结合了两 种方法的优点,但其算法复杂度较高,且在实际应用 中可能难以平衡去噪与边缘保持的效果。此外,其平 滑效果更符合本研究数据的特征,确保了后续数据分 析的准确性和可靠性。通过仿真实验性能对比分析, 我们确认二次高斯滤波算法在保持数据原有形状和特 征的同时,实现了更优的平滑效果,有利于文章的后





最后,完成了数据的归一化处理,确保了不同测 试条件下的可比性。这一系列处理后得到的是更为清 晰、平滑的滤波归一化波形,如图 3(b)所示。与此同 时,作为互相关算法参考基准的 LPF 输出波形也接 受了同样的处理流程,其处理后的形态展示于 图 4(a)中,确保了后续分析的准确性和一致性。

将归一化处理后的参考光谱序列与特定 60 ℃ 条 件下同样经过归一化的光谱序列,依据式 (5)进行互 相关计算,生成了展示在图 4(b)中的离散波长漂移序 列与相应的互相关系数分布图。为了精确识别出该温 度点上互相关系数最大值所对应的波长偏移量,我们 采取了多次多项式拟合方法。在此过程中,选择相关 系数区间为 (0.7,1),以确保获得最佳的拟合质量。 拟合过程中的采样间隔被设定为 0.01 个漂移量,这 一数值可根据实际所需的测量精度灵活调整。图 4(b) 呈现了经过多次多项式拟合后的曲线,通过峰值定位 方法,我们能够确切找出对应最高互相关系数的互相 关漂移量,将其与数据采集的采样间隔相乘,即可求 得在该温度下的精确波长漂移值。本文采用的多次多 项式拟合方法,能够克服单一寻峰算法受限于光谱仪 分辨率的限制,其中控制拟合精度为0.01个互相关 漂移量,得到的相关系数峰值更接近于实际值,解调 误差得到进一步降低。本文所使用的光谱仪的采样间 隔为0.16 nm,即单位互相关漂移量的波长间隔,以 0.01个单位间隔作为寻峰算法步进,使得对应的波长 漂移值的解调结果误差可低至±0.0016 nm。

在获取不同温度下的反射光谱波长漂移值后,利 用二次多项式拟合得到温度-波长对应曲线,拟合系 数为 0.9999,如图 5 所示。随着温度的升高,砷化镓 晶体反射光谱的波长漂移值越大,表明砷化镓光纤温 度传感器的温度响应存在非均匀线性关系。通过利用 标定值与拟合值的数据对比分析,得出平均温度解调误 差即精度为 0.388 ℃,均方根误差 (RMSE) 为 0.46 ℃,



图 3 不同温度下的砷化镓晶体波长漂移曲线 (缩减版)。(a) 原始光谱; (b) 滤波归一化光谱

Fig. 3 Wavelength shift curve of GaAs crystals at different temperatures (scale-down). (a) Original spectrum; (b) Filtered normalized spectrum





Fig. 4 (a) The LPF waveform after filtering and normalization processing; (b) Multi-quadratic polynomial fitting curve of cross-correlation shift number and correlation coefficient at 60 %

实现了砷化镓光纤温度传感器的高精度解调,满足了 不同测量场景下的高精度需求。



Fig. 5 Temperature-wavelength shift fitting curve

3.2 抗噪性能对比与分析

为了验证所提出的温度解调算法在抗噪声方面的 优越性,本文对 LPF-互相关算法 (简称 LPF-C) 进行 了严格的仿真分析。具体操作包括在不同信噪比 (SNR)的高斯噪声环境下应用此算法,并引入了两种 不同的滤波技术进行数据预处理:二次高斯滤波 (D-G) 与五层小波强制降噪 (FW-Force)。这些处理步骤 旨在优化数据质量,以便更准确地评估算法表现。同





SNR of 20 dB

时,我们选用归一化光强法 (NI) 和未使用 LPF 波形的传统互相关法 (TC) 作为比较基准,所有方法的抗噪性能均通过 RMSE 来量化评估。

实验设计上,我们选取了单一通道下不同温度的 反射光谱数据集,并逐步在这些数据上叠加了从3dB 至54dB,以3dB为递增步长的高斯噪声,以此模拟 实际应用中可能遇到的噪声环境,加噪反射光谱如 图6所示。随后,利用 D-G和 FW-Force 这两种滤波 方法对数据进行了平滑处理。在此基础上,分别运 用 NI、TC及 LPF-C 三种解调技术,对各个信噪比水 平下的波长漂移进行了解析。解调结果的抗噪性能差 异通过图7直观展示,清晰地揭示了在不同噪声强度 下各方法的性能对比情况,进一步验证了我们的算法 在抗噪性上的显著提升。

为了验证该算法在抗噪性能方面上的稳定性和减小随机误差,选用三个通道的砷化镓温度响应数据进行波长漂移解调,其中高斯噪声的信噪比为3dB,三种不同解调方式的 RMSE 性能指标和平均温度解调误差 (ATDE)具体数值如表1所示。



图 7 信噪比为 3 dB 至 54 dB 的高斯噪声下不同解调方法 的抗噪性能对比

Fig. 7 Comparison of noise resistance performance of different demodulation methods under Gaussian noise with SNR ratio of 3 to 54 dB

表 1 三个通道下归一化光强法 (NI)、传统互相关算法 (TC) 与 LPF 参考波形互相关算法 (LPF-C) 的 RMSE 指标参数和平均温度解调误差



Channel	CH-1	CH-2	CH-3	TDA / °C
NI	0.226123	0.208136	0.306429	0.469
TC	0.162197	0.17823	0.241403	0.408
LPF-C	0.107920	0.100972	0.115995	0.388

由图 8 可知,在反射光谱信号信噪比较低的情况 下,本文所提出的使用 LPF 波形作为参考波形的互 相关算法在 CH-1 通道中的抗噪性能最高可增强 2.64 倍。鉴于在不同通道下采集的光谱数据固有的差 异性,不同通道所体现的算法抗噪性能也会有所区别, 如 CH-2 通道中的提升幅度未见显著增长,但从整体 实验结果规律而言,应用于砷化镓光纤温度传感的解 调方法在抗噪效能上实现了显著优化。通过三个独立 通道中实施的重复性实验,实验结果进一步证实了该 方法在稳定性方面的卓越表现。



图 8 三个通道中 LPF-C 解调方法相较于 NI 与 TC 的抗噪 效能提升倍率 Fig. 8 Enhancement ratio of LPF-C's noise resistance over NI and

TC, in three channels

根据表 2 的对比分析,本研究提出的光纤温度传 感解调算法展现出了卓越的性能,不仅在平均温度解 调误差和波长解调精度上达到了较高的标准,而且在 砷化镓光纤温度解调领域展现了其独特的优势。同时 我们对算法的抗噪性能进行了深入的研究与分析,创 新性地采用了二次高斯滤波技术结合互相关参考基准 波形的策略,显著增强了算法在噪声环境中的鲁棒性。 这一改进使得我们的算法能够在各种极端高噪声干扰 条件下,依然保持稳定、准确的温度解调能力,也能 提供精准的温度测量结果,为光纤传感技术在复杂工 业环境中的应用开辟了新的可能。

综上所述,本文提出的基于参考滤波器及互相关 算法的解调方法能够实现高抗噪的砷化镓光纤温度传 感解调。在通过添加信噪比为 3 dB 至 54 dB 的高斯 噪声下,采用 LPF 波形作为参考波形的互相关算法 的抗噪性能优势显著,同时在三个通道下的重复性试 验中验证了该方法具备稳定的抗噪性能。其中以 LPF 作为参考波形的互相关算法相比于归一化光强法 抗噪性能提高至 2.64 倍,与未使用 LPF 参考波形的 互相关法算法相比提高至 2.08 倍。

4 结 论

本文创新性地提出了一种针对砷化镓光纤温度传 感解调的改进型互相关解调算法,通过引入了一种基 于多次多项式拟合的方法,实现了±0.0016 nm 的波长 解调误差,平均温度解调误差为±0.388 ℃。该方法在 宽范围的信噪比条件下,通过与现有解调技术的对比 验证,展现出了卓越的抗噪性能提升。具体而言,本 算法在低信噪比环境下的抗噪效能相对于现有的归一 化光强解调方法提升了 2.64 倍,而与未使用 LPF 参 考波形互相关算法相比,其性能增进达到了 2.08 倍, 这一改进对于提高解调算法在实际应用中的可靠性具 有重要意义。本研究不仅证实了所提算法在复杂信号 环境下的解调鲁棒性,而且为高精度砷化镓温度传感

表 2 不同解调方法的性能对比

Table 2 Performance comparison of different demodulation methods									
Ref	Year	Demodulation method	Temperature sensitivity	Temperature demodulation accuracy	Wavelength demodulation accuracy	Resolution			
[22]	2018	Wavelength demodulation	30 pm/ $^{\circ}\!\!\!\!\!\mathrm{C}$ (for test)	± 0.2 °C	3 pm	_			
[23]	2018	Fast cross correlation demodulation algorithm based on dichotomy	0.0205 ℃/µm	0.15 °C	_	0.001 °C			
	2019	Optical cross correlation	14.076 pixel/°C	—	_	0.005 °C /0.6 nm			
[24]	2023	Deep belief networks (DBNs) with ensemble learning	_	0.3% F.S.	TDE (temperature demodulation error)=0.98 ${}^\circ\!\mathrm{C}$				
This	paper	LPF-cross correlation	0.3 nm/℃	TDE=0.388 °C	1.6 pm	_			

技术的发展提供了新的技术路径。此外,本算法的应 用潜力不仅限于温度传感,还可能扩展到其他需要高 精度波长解调的领域,如光学测量、生物传感和环境 监测等。因此,本文的研究成果不仅为砷化镓光纤温 度传感技术的进步做出了贡献,也为相关领域的科学 研究和技术创新提供了宝贵的参考和启示。未来,我 们将继续探索该算法在不同应用场景下的性能优化和 适应性扩展,以推动光纤传感技术的进一步发展。

利益冲突:所有作者声明无利益冲突

参考文献

- Li T F, Ba D X, Zhou D W, et al. Recent progress in optical fiber sensing based on forward stimulated Brillouin scattering[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, **49**(9): 220021.
 李天夫, 巴德欣, 周登望, 等. 前向受激布里渊散射光纤传感研究 进展[J]. 光电工程, 2022, **49**(9): 220021.
- [2] Leal-Junior A, Avellar L, Biazi V, et al. Multifunctional flexible optical waveguide sensor: On the bioinspiration for ultrasensitive sensors development[J]. *Opto-Electron Adv*, 2022, 5(10): 210098.
- [3] Zhou Z R, Qiu Z J, Li K, et al. Review on demodulation methods for optic fiber Fabry-Perot sensors[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, **49**(6): 210411.
 周朕蕊, 邱宗甲, 李康, 等. 光纤法布里-珀罗传感器的解调方法研 究综述[J]. 光电工程, 2022, **49**(6): 210411.
- [4] Zhu C, Gerald R E, Huang J. Progress toward sapphire optical fiber sensors for high-temperature applications[J]. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2020, 69(11): 8639–8655.
- [5] Roriz P, Silva S, Frazão O, et al. Optical fiber temperature sensors and their biomedical applications[J]. Sensors, 2020, 20(7): 2113.
- [6] Zhou X, Gong P Q, Ai Y, et al. Miniature optical fiber DNA hybridization sensor with temperature compensation using a gold nanofilm-coated optical fiber[J]. *IEEE Sens J*, 2023, 23(7): 6931–6938.
- [7] Liu H J, Zhou C M, Pang Y D, et al. High-resolution optical fiber temperature sensor based on draw tower grating array[J]. *Sensors*, 2022, **22**(8): 2846.
- [8] 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.
- [9] Liu H H, Hu D J J, Sun Q Z, et al. Specialty optical fibers for advanced sensing applications[J]. *Opto-Electron Sci*, 2023, 2(2): 220025.
- [10] Xiao W Z, Cheng J, Zhang D W, et al. High stability PGC demodulation technique for fiber-optic interferometric sensor[J]. Opto-Electron Eng, 2022, 49(3): 210368. 肖文哲, 程静, 张大伟,等. 用于光纤干涉传感器的高稳定 PGC

https://doi.org/10.12086/oee.2024.240143

解调技术[J]. 光电工程, 2022, 49(3): 210368.

- [11] Chen Y C, Li J P, Guo X J, et al. On-chip high-sensitivity photonic temperature sensor based on a GaAs microresonator[J]. Opt Lett, 2020, 45(18): 5105–5108.
- [12] Kolesnikova E A, Uglov V V, Drapezo A P, et al. Study of temperature coefficient of resistance of n-InSb films On i-GaAs (100) substrate and temperature sensors based on them[J]. *High Temp Mater Processes*, 2022, **26**(3): 31–38.
- [13] Yang T Y, Zhang X Y, Liu Z Y, et al. Thermal optical fiber sensor based on GaAs film for fluid velocity measurement[J]. *IEEE Sens J*, 2024, 24(8): 12358–12365.
- [14] Calahorra Y, Husmann A, Bourdelain A, et al. Highly sensitive piezotronic pressure sensors based on undoped GaAs nanowire ensembles[J]. *J Phys D Appl Phys*, 2019, **52**(29): 294002.
- [15] Zhang Z Q, Guo Y, Li F, et al. A sandwich-type thermoelectric microwave power sensor for GaAs MMIC-compatible applications[J]. *IEEE Electron Device Lett*, 2016, **37**(12): 1639–1641.
- [16] Zhang Z Q, Gu R Q, Jiang Y F, et al. A near-zero thermoelectric RF power sensor for high dynamic range applications[J]. J Microelectromech Syst, 2024, 33(1): 9–11.
- [17] Wu J W, Yuan T T, Liu J J, et al. Terahertz metamaterial sensor with ultra-high sensitivity and tunability based on photosensitive semiconductor GaAs[J]. *IEEE Sens J*, 2022, 22(16): 15961–15966.
- [18] Hu K, Fu H N, Luo X X, et al. Multi-channels self-calibrating gallium arsenide absorption fiber optic temperature monitoring system[J]. *Chin J Lasers*, 2015, **42**(11): 1105001. 胡昆, 傅惠南, 罗星星, 等. 多通道自校准砷化镓吸收式光纤温度 监测系统[J]. 中国激光, 2015, **42**(11): 1105001.
- [19] Hu K, Dong Y M, Fu H N, et al. Demodulation method about gallium arsenide absorption fiber optic temperature sensing technology[J]. Opto-Electron Eng, 2015, 42(10): 61-66. 胡昆, 董玉明, 傅惠南, 等. 砷化镓吸收式光纤温度传感技术的解 调方法[J]. 光电工程, 2015, 42(10): 61-66.
- [20] Chen K, Wang Z L, Guo M, et al. Single-mode fiber-optic Fabry-Perot interferometry sensor based on optical cross-correlation demodulation[J]. Opt Eng, 2019, 58(2): 026106.
- [21] Guo M, Chen K, Zhang G Y, et al. High-sensitivity fiber-optic low-frequency acoustic detector based on cross-correlation demodulation[J]. J Lightwave Technol, 2022, 40(13): 4481–4488.
- [22] Zhu W S, Jiang J F, Wang J, et al. Research on wavelength demodulation method based on optical fiber Fabry-Perot tunable filter[J]. *Proc SPIE*, 2018, **10821**: 1082106.
- [23] Meng H, Li H Y, Cao Z Q. An optical fiber farby-perot temperature sensor for rapid ocean temperature measurement[J]. *Chin J Lasers*, 2018, **45**(12): 1210001. 孟华,李海洋,曹占启. 一种用于海洋温度快速测量的光纤法布里-珀罗温度传感器[J]. 中国激光, 2018, **45**(12): 1210001.
- [24] Wang L X, Liu H J, Pan Z, et al. Temperature demodulation for

optical fiber F-P sensor based on DBNs with ensemble

作者简介



毕扬 (1982-), 男, 高级工程师, 主要从事抽水 蓄能电站监测技术研究。 E-mail: 4316101@qq.com



【通信作者】董玉明(1978-),男,博士,正高 级工程师,主要从事光纤传感及光电检测技术 研究。

E-mail: ym.dong@siat.ac.cn

learning[J]. Opt Laser Technol, 2023, 162: 109275.



Demodulation method for GaAs optical fiber temperature sensing based on reference filter and cross-correlation algorithm

Bi Yang¹, Xiong Zhifu¹, Li Jiawen¹, Yang Tianyu², Liu Huanhuan², Wan Huiming³, Dong Yuming^{2*}



Schematic diagram of demodulation method for GaAs fiber optic temperature sensing

Overview: GaAs, as a unique semiconductor material, is widely used in the field of optical communication and the production of various sensors. The temperature characteristics of GaAs material play an important role, but the existing demodulation technologies for the temperature response characteristics of GaAs have problems such as low noise resistance, low precision, and low accuracy. Therefore, a high precision and noise immunity demodulation method for the temperature response of GaAs crystals is needed. This paper proposes a new demodulation approach for optical fiber temperature sensors based on GaAs, leveraging the reference filtering and a cross-correlation algorithm. The algorithm mainly consists of a double Gaussian filtering algorithm for filtering and smoothing the original collected waveform, a cross-correlation algorithm using a low-pass filter (LPF) waveform as the reference waveform, and a multi-quadratic polynomial fitting algorithm for improving the demodulation precision and accuracy. The double Gaussian filtering of this algorithm can reduce the impact of noise during data collection, enhancing the algorithm's noise resistance. Compared with cross-correlation algorithms without the LPF reference waveform, this algorithm uses the LPF waveform collected by the same experimental data acquisition system as the reference waveform, solving the problem of low noise resistance when using the collected waveform as the reference and the inability of virtual waveforms to reflect the error impact of unstable factors in the collection system, such as the light source and spectrometer. At the same time, the use of a multi-quadratic polynomial fitting method ensures the accuracy and reliability of the maximum crosscorrelation coefficient acquisition. Compared with the existing GaAs temperature response demodulation technologies, the noise resistance of this algorithm can be improved by up to 2.64 times. Meanwhile, the wavelength demodulation error of this method can reach ± 0.0016 nm, and the temperature demodulation accuracy is ± 0.388 °C with a temperature sensing range of -30 to 250 °C, meeting the high-precision demodulation requirements in various application scenarios.

Bi Y, Xiong Z F, Li J W, et al. Demodulation method for GaAs optical fiber temperature sensing based on reference filter and cross-correlation algorithm[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, **51**(9): 240143; DOI: 10.12086/oee.2024.240143

Foundation item: Project supported by National Natural Science Foundation of China (62205364), and Shenzhen Research Foundation (JSGG20220831103402004)

¹State Grid Xinyuan Chongqing Panlong Pumped Storage Company Limited, Chongqing 401420, China; ²Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen, Guangdong 518055, China; ³Dongfang Electric Machinery Company Limited, Deyang, Sichuan 618000, China

^{*} E-mail: ym.dong@siat.ac.cn