

DAS 系统中微分交叉相乘与反正切解调算法研究

张峰¹, 蒋宇¹, 隋翔², 乔晓晗², 尚盈², 赵文安², 吕京生², 王晨^{2*}

(1.中海油服油田技术研究院,河北 三河 065201; 2.齐鲁工业大学(山东省科学院) 激光研究所,山东 济南 250353)

摘要:基于相干光时域反射计(coherent optical time-domain reflectometry, COTDR)的分布式声波传感(distributed acoustic sensing, DAS)系统,通过对光纤中后向瑞利散射光信号的相位信息进行解调,可以获取沿光纤长度方向的振动信息。相位解调算法是DAS系统进行相位提取的关键技术,不同的解调算法对解调结果有不同的影响。针对微分交叉相乘(differential cross-multiplying, DCM)和反正切(Arctan)两种同相正交(in-phase quadrature, IQ)解调算法对解调结果的影响进行了研究探讨,首先对DCM算法和Arctan算法进行了理论分析与数值仿真,随后通过搭建基于COTDR的DAS系统采集数据,分别使用两种算法进行处理并对比分析。实验结果表明,两种算法得到的解调信号峰值相差0.04 rad,且存在0.01 rad的相移。此外,基于两种算法不同的特性,对两种算法的使用场景提出了建议。

关键词:光纤传感器;分布式光纤传感;分布式声波传感;相干光时域反射计;相位解调;振动传感

中图分类号:TP212 文献标志码:A 文章编号:1002-4026(2025)06-0107-08

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



Research on differential cross-multiplying and arctangent demodulation algorithms in DAS systems

ZHANG Feng¹, JIANG Yu¹, SUI Xiang², QIAO Xiaohan², SHANG Ying²,
ZHAO Wen'an², LÜ Jingsheng², WANG Chen^{2*}

(1. China Oilfield Services Limited, Sanhe 065201, China; 2. Laser Research Institute, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan 250353, China)

Abstract: Distributed acoustic sensing (DAS) systems based on coherent optical time-domain reflectometry (COTDR) can obtain vibration information along the fiber length by demodulating the phase information from the backscattered Rayleigh signal in optical fibers. The phase demodulation algorithm is a key technology for phase extraction in DAS systems, and different algorithms exert varying effects on the demodulation results. This study investigates the impacts of two in-phase quadrature (IQ) demodulation algorithms, i. e., differential cross-multiplying (DCM) and arctangent (Arctan), on the demodulation results. First, a theoretical analysis and numerical simulations based on DCM and Arctan are conducted. Subsequently, a COTDR-based DAS system is constructed to collect data, which are processed and

收稿日期:2024-11-21 修回日期:2025-03-05

作者简介:张峰(1985—),硕士,工程师,研究方向为仪器仪表工程。E-mail: zhangfeng25@cosl.com.cn

* 通信作者,王晨,研究员,研究方向为分布式光纤传感器、声波还原。E-mail: jgwangchen@163.com, Tel:13287749092

analyzed using both algorithms. Experimental results indicate that the peak values of the demodulated signals obtained using the two algorithms differ by 0.04 rad, with an observed phase shift of 0.01 rad. In addition, based on the different characteristics of the two algorithms, recommendations for their application scenarios are provided.

Key words : optical fiber sensor; distributed optical fiber sensing; distributed acoustic sensing; coherent optical time-domain reflectometry; phase demodulation; vibration sensing

基于相干光时域反射计 (coherent optical time-domain reflectometry, COTDR) 的光纤分布式声波传感 (distributed acoustic sensing, DAS) 系统使用光纤作为传感器和信号传输媒介,集“传”与“感”于一体,不仅自身作为传输媒介天然完成组网,还可以测量传感光纤上任意位置的声波信息,实现全分布式的测量^[1]。同时,由于光纤传感器具有抗腐蚀、耐高温高压、成本低、灵敏度高、抗电磁干扰和长距离连续探测等优点,已经广泛应用于建筑结构健康监测^[2]、周界安防^[3]、管道泄漏^[4-5]、油气勘探^[6]等领域。

在 DAS 系统中,光纤中后向散射光的相位信息与外界扰动信号成正相关,通过对采集到的后向瑞利散射信号进行相位解调^[7],就可以实现对扰动信息强度与位置的重构。作为 DAS 数据处理的核心步骤,研究者们提出了相位载波调制解调^[8]、3×3 耦合器解调^[9]、同相正交 (in-phase quadrature, IQ) 解调^[10]等解调技术,其中 IQ 解调技术由于具有抗噪性能好,解调精度高,设备复杂度低等优势备受国内外学者关注。IQ 解调算法主要分为微分交叉相乘 (differential cross-multiplying, DCM) 算法和反正切 (Arctan) 算法,两种算法通过不同的方式对 DAS 系统采集的信号进行解调。然而目前鲜有两种解调算法对 DAS 系统解调结果差异的研究。针对 DAS 系统中两种解调算法结果差异的问题,本文首先从对 DCM 算法和 Arctan 算法两种相位解调算法进行理论分析,并通过模拟仿真与实际实验,验证了两种算法的可靠性以及对 DAS 系统解调结果产生的影响,并根据两种算法差异,对两种算法的使用场景提出了建议。

1 DAS 系统工作原理

DAS 系统利用光信号中的后向瑞利散射来实现传感的传感系统,通过探测后向瑞利散射光的相位变化实现对沿光纤链路上信息的感测。系统结构如图 1 所示。

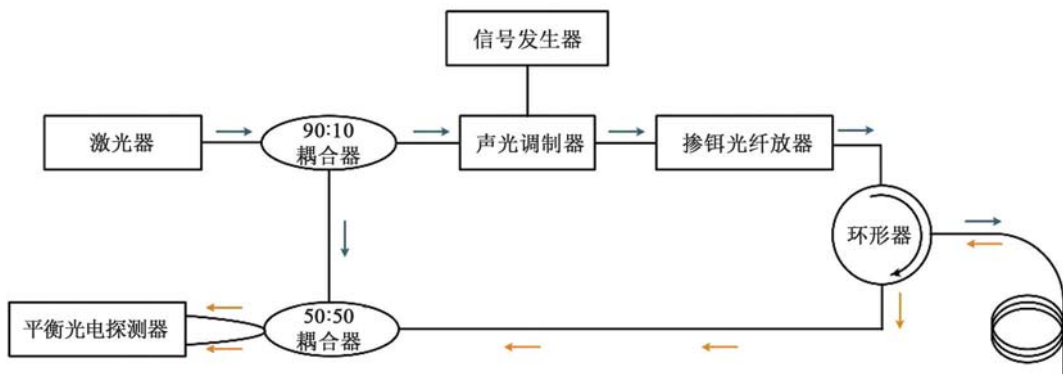


图 1 DAS 系统结构

Fig.1 Structure of the DAS system

窄线宽激光器发射的连续激光通过 90:10 的耦合器被分为探测光和本征光。探测光由声光调制器 (acousto-optic modulator, AOM) 调制成具有固定频移的脉冲光,并经掺铒光纤放大器 (erbium doped fiber amplifier, EDFA) 放大后经环形器进入待测光纤中。后向瑞利散射光经过环形器进入 50:50 耦合器与本振光进行拍频,由平衡光电探测器 (balanced photodetector, BPD) 将光信号转化为电信号。

光纤受到外界声波影响时,声波对后向瑞利散射光的相位进行调制,引起后向瑞利散射光的强度变化。DAS 系统通过对采集到的后向瑞利散射光信号的相位信息进行解调分析即可实现对外界振动信号的检测。

2 解调算法

在 DAS 系统中,IQ 解调法利用本征光与后向瑞利散射光的外差干涉信号进行解调,通常采用一维模型来描述后向瑞利散射光,后向瑞利散射光与本征光可简单表示为:

$$I_R(t) = E_R(t) \cos [2\pi(f + \Delta f)t + \varphi(t)] , \tag{1}$$

$$I_L(t) = E_L(t) \cos(2\pi f t) , \tag{2}$$

式中, $E_R(t)$ 和 $E_L(t)$ 分别表示后向瑞利散射光和本振光的振幅, f 为激光光源的中心频率, Δf 为 AOM 调制引入的频移, $\varphi(t)$ 为外界振动信号。

后向瑞利散射光与本征光拍频后的信号由 BPD 采集并将光信号转化为电信号,BPD 输出的拍频信号可以表示为:

$$I_b(t) \propto A(t) \cos [2\pi\Delta f t + \varphi(t)] , \tag{3}$$

式中, $A(t) = E_R(t)E_L(t)$,将输出信号分别与频率为 Δf 的正交信号混频,然后经过低通滤波器滤除高频信号后,得到两路正交信号 $I(t)$ 和 $Q(t)$,可表示为:

$$I(t) = \frac{1}{2}A(t) \sin[\varphi(t)] , \tag{4}$$

$$Q(t) = \frac{1}{2}A(t) \cos[\varphi(t)] . \tag{5}$$

DCM 算法流程如图 2 所示。DCM 算法通过将两路正交信号 $I(t)$ 和 $Q(t)$ 微分交叉相乘得到:

$$I = A(t)^2 \varphi'(t) . \tag{6}$$

对其进行积分处理并使用高通滤波器滤除直流相可得解调信号:

$$I \propto A(t)^2 \varphi(t) . \tag{7}$$

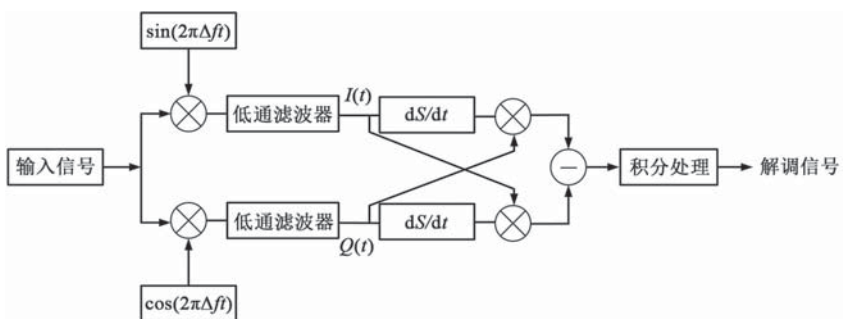


图 2 DCM 解调算法流程

Fig.2 Flowchart of the DCM demodulation algorithm

Arctan 算法通过对 $I(t)$ 和 $Q(t)$ 信号进行反正三角函数处理,对处理后信号进行解卷绕与去趋势操作解调出混频信号中包含的相位信息,解调流程如图 3 所示:

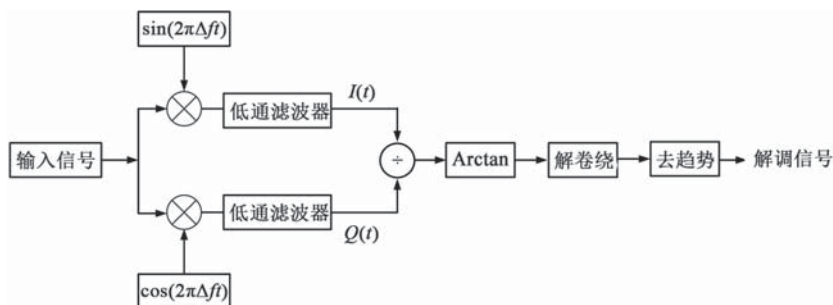


图 3 Arctan 解调算法流程

Fig.3 Flowchart of the Arctan demodulation algorithm

解调信号的幅度和相位可表示为:

$$A(t) \propto \sqrt{I^2(t) + Q^2(t)}, \quad (8)$$

$$\varphi_t(t) = \arctan [I(t)/Q(t)]. \quad (9)$$

3 仿真分析

参考公式(3)使用 LabVIEW 软件对两种算法进行模拟仿真,为方便计算,公式中各参数数值为: $A(t)=1$, 移频 $\Delta f=5$ kHz,待测信号 $\varphi(t)$ 为 200 Hz 1 V 正弦信号,模拟信号时长为 1 s,设置采样频率为 20 kHz,得到仿真待测信号与 BPD 输出信号如图 4 所示:

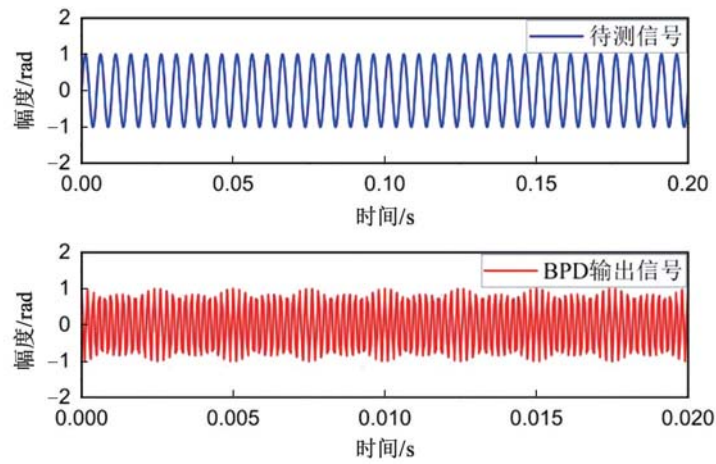


图 4 待测信号与 BPD 输出信号

Fig.4 Measured signal and BPD output signal

3.1 信号直流项

将 BPD 输出信号分别使用 DCM 与 Arctan 两种解调算法进行解调,解调信号如图 5(a)所示,DCM 与 Arctan 算法均能还原出平稳的正弦信号。解调信号频谱如图 5(b)所示,信号频谱在 200 Hz 处有明显峰值。

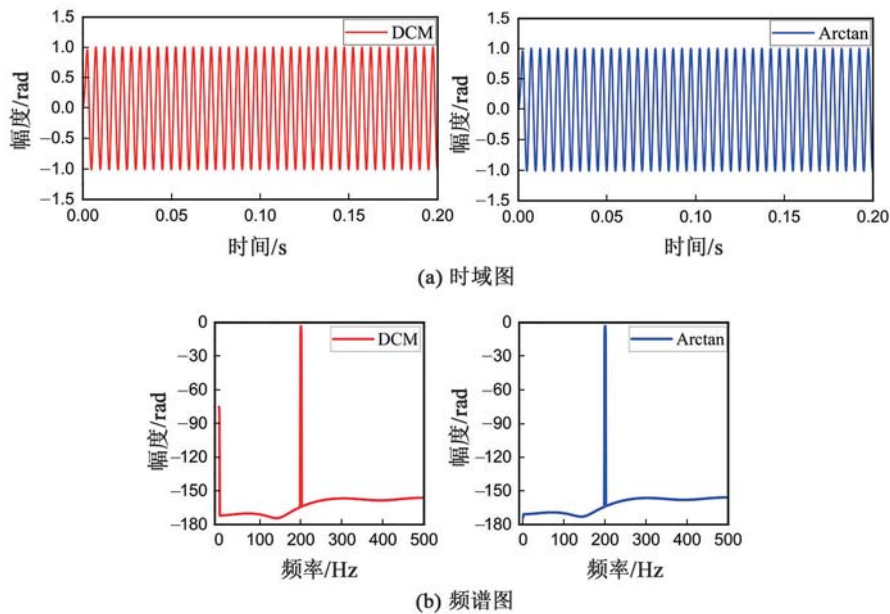


图 5 解调信号的时域图与频谱图

Fig.5 Time domain diagram and frequency spectrum of the demodulated signal

DCM 算法解调信号频谱除待测 200 Hz 信号外,还存在一个 -75 dB 左右的零频分量,而仿真参数中并未

添加零频分量,通过对 DCM 解调算法分析可知该零频分量由算法中积分过程产生。为消除该零频分量,对解调信号施加 80~1 000 Hz 一阶带通滤波器,滤波后解调信号时域图及其频谱如图 6(a)所示。图 6(b)展示了滤波后信号频谱图,可见 0 Hz 位置上零频分量消失。可见,使用滤波器可有效抑制 DCM 算法产生的零频分量。

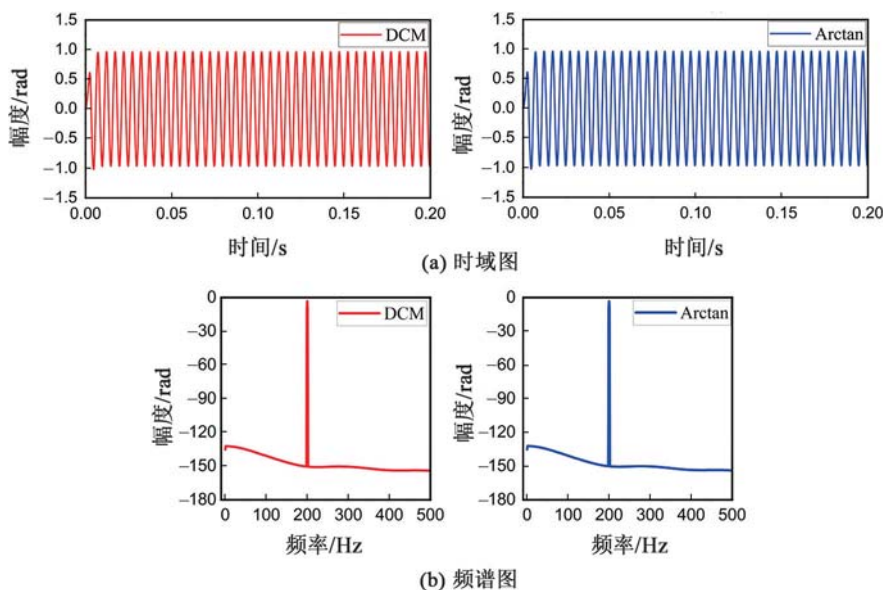


图 6 滤波后解调信号的时域图和频谱图

Fig.6 Time domain diagram and frequency spectrum of the demodulated signal after filtering

3.2 解调幅值分析

取滤波后解调时域数据,分别对两种算法的解调结果取峰值,峰值计算公式为:

$$\text{峰值} = \sqrt{2 \left(\sum_{i=1}^m X_i^2 \right) / m}, \tag{10}$$

其中, X 表示待计算的数据, i 是时间样本点数。

两种解调算法的解调信号峰值如表 1 所示。Arctan 算法解调信号峰值略大于 DCM 解调结果,两者相差约 0.002 rad,约为 Arctan 算法结果的 0.2%。

表 1 解调信号峰值

Table 1 Peak values of the demodulated signals

解调算法	峰值/rad
DCM	0.964
Arctan	0.966

3.3 初始相位

取时长为 0.2 s 的两种算法的解调信号,如图 7 所示,可见两种解调算法具有较好的时域一致性,通过计算可得两种解调信号之间相移约 0.001 rad。

4 实验结果

根据图 1 所示系统结构搭建 DAS 系统进行实验。DAS 系统内部光路如图 8(a)所示,使用中心波长为 1 550 nm 的窄线宽激光器作为光源,激光器发出的连续光经 90:10 耦合器被分成信号光和本征光。移频为 80 MHz 的 AOM 将信号光调制为 20 kHz 重频,60 ns 脉宽的探测脉冲。探测脉冲在 EDFA 中放大后,通过环形器进入传感光纤。产生的后向瑞利散射光经环形器进入耦合器中与本征光进行拍频,拍频信号由 BPD 接收并将光信号转换为电信号。通

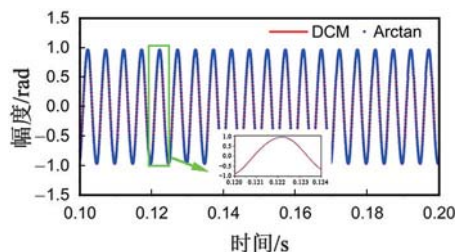


图 7 解调信号相位对比

Fig.7 Comparison of demodulate dsignal phases

过采集频率为 1×10^9 Hz 的采集卡采集 BPD 输出信号。实验中使用标准压电陶瓷 (piezoelectric transducer, PZT) 模拟振动信号, 在 PZT 上缠绕 12 m 普通单模光纤并放置在 60 m 处并在尾端连接 60 m 冗余光纤。通过信号发生器对 PZT 施加 200 Hz 1 V 正弦信号, 实验装置图见图 8(b)。

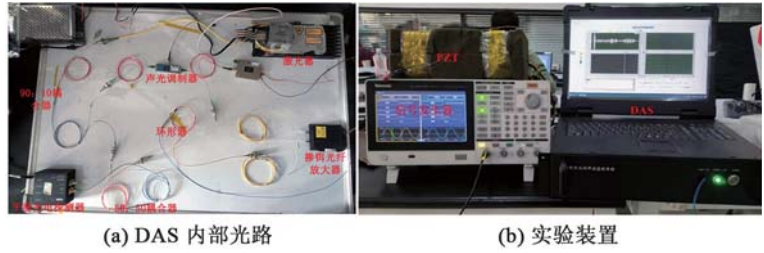


图 8 实验装置

Fig.8 Experimental device

对采集到的数据分别使用两种解调算法进行解调, 将解调信号绘制为图 9 所示的空间-强度伪三维彩色图, 传感光纤的信号区范围内信号强度变化明显。

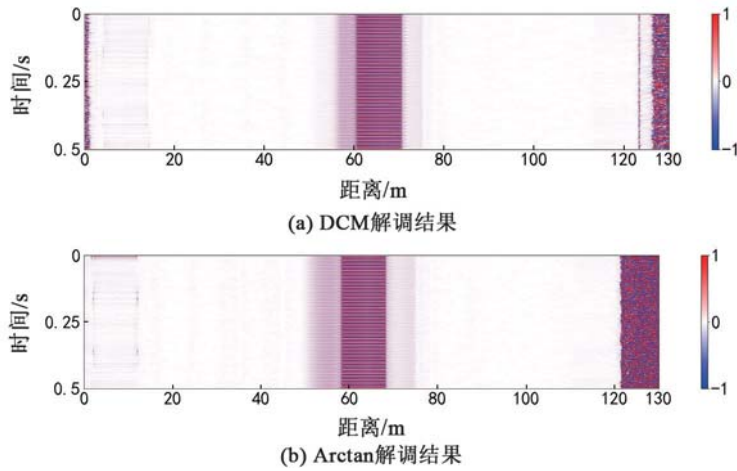


图 9 解调信号空间-强度伪三维彩色图

Fig.9 Pseudo three-dimensional color space intensity diagram of the demodulated signal

4.1 直流项分析

分别取信号区内同一位置下的解调信号进行对比, 图 10(a) 和图 10(b) 分别展示了两种解调算法的解调信号以及对应的频谱图。

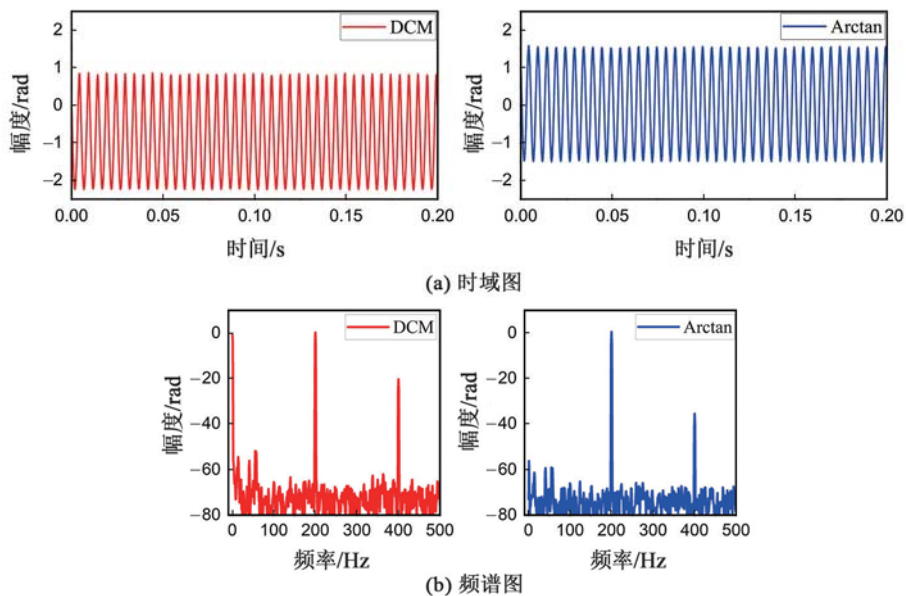


图 10 解调信号时域图和频谱图

Fig.10 Time domain diagram and frequency spectrum of the demodulated signal

由图 10(a)可以得到 DCM 解调信号的出现幅度为 -0.9 rad 的零频分量;Arctan 解调结果均值为 0 rad。由图 10(b)可以得到,两种算法解调信号得到的信噪比都在 70 dB 左右。DCM 算法解调结果在 0 Hz 处存在明显的零频分量。使用 Arctan 算法解调时,频域上也没有出现零频分量的干扰,与图 5(b)仿真结果一致。分别对两种解调结果添加 $80\sim 1\ 000$ Hz 一阶巴特沃夫带通滤波器。滤波后解调信号时域图如图 11(a)所示,对应信号频谱如 11(b)所示。DCM 数据中的零频分量得到抑制,时域信号未见明显偏移,与仿真结果图 6(b)中对零频分量的抑制效果一致。

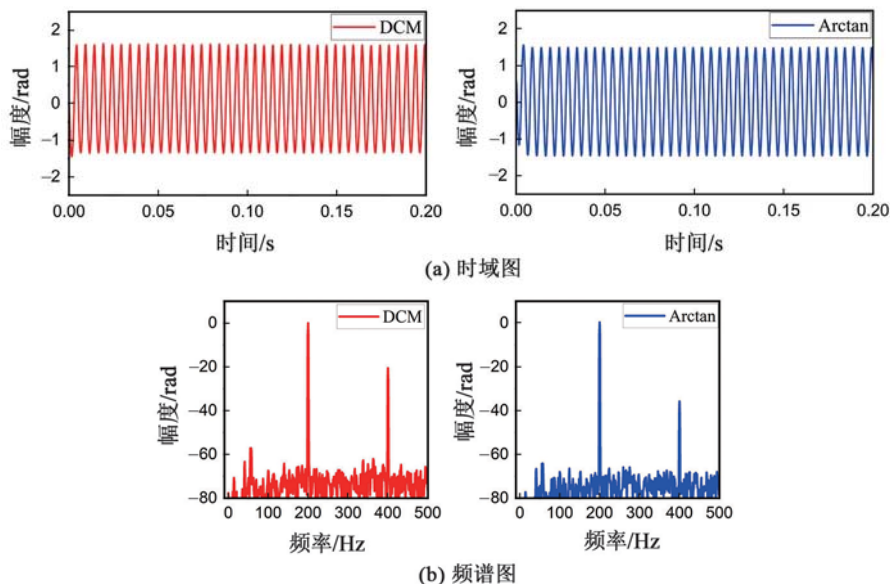


图 11 滤波后解调信号时域图和频谱图

Fig.11 Time domain diagram and frequency spectrum of the demodulated signal after filtering

4.2 解调幅值分析

对两种算法取相同位置下滤波后解调信号,并参考公式(10)计算信号峰值。结果如表 2 所示,Arctan 算法解调结果幅值略大于 DCM 解调结果,与表 1 的仿真数据结论一致。两种算法相差约 0.043 rad,约为 Arctan 算法结果的 3% 。差值增大原因为系统采集的信号为某一时刻下半个脉冲宽度内后向瑞利散射光的叠加,叠加过程中环境噪声与电噪声累积导致误差增大。

4.3 初始相位

取相同位置下两种算法解调信号,如图 12 所示。两种算法的解调结果出现明显的相位差异,这与图 7 的仿真结论一致。通过计算可得两种解调信号之间的相移约为 0.01 rad,由于环境噪声与系统自身电噪声影响,两种算法之间的相移有所增加。

表 2 解调信号峰值

Table 2 Peak values of the demodulated signals

解调算法	峰值/rad
DCM	1.421
Arctan	1.464

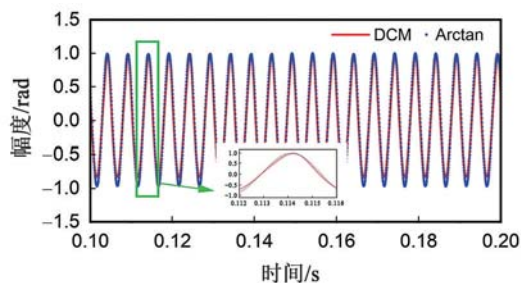


图 12 解调信号相位对比

Fig.12 Comparison of demodulated signal phases

5 结论

本文对 DAS 系统中 DCM 与 Arctan 解调算法的解调结果差异进行了仿真与实验的对比分析。实验表明

两种算法均可还原出扰动信号。Arctan 算法解调数据的峰值略大于 DCM 解调数据,实际实验结果相差约 0.04 rad,两种算法之间存在 0.01 rad 的相移,与仿真结论一致。DCM 算法解调后数据中存在零频分量,导致信号幅值范围出现偏移,影响实际解调结果,因此需要通过滤波消除解调数据中的直流项的影响,而使用 Arctan 可直接避免该零频分量影响。因此,在测量低频信号时,可使用 Arctan 进行数据解调,不需考虑额外的滤波器对于目标信号的影响,而 Arctan 算法需在解调过程中需要进行相位解卷绕与去趋势操作,导致需要更长时间解调。因此在应用中应根据实际要求考虑算法选择,并且如何改进算法从而提升算法性能是今后着力改进和研究的方向。

参考文献:

- [1] 王晨,吕公河,徐雷良,等. 基于弱光栅阵列相位载波解调的分布式井中地震勘探技术研究[J]. 石油物探,2022,61(1):78-84. DOI:10.3969/j.issn.1000-1441.2022.01.008.
- [2] PANG D D, SUI Q M, WANG M, et al. Development of high temperature acoustic emission sensing system using fiber Bragg grating[J]. Photonic Sensors, 2018, 8(1): 56-62. DOI:10.1007/s13320-017-0454-9.
- [3] 杜宜. 基于 Φ -OTDR 分布式光纤传感系统的周界安防模式识别方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023. DOI: 10.27060/d.cnki.ghbcu.2023.000077
- [4] 王辰,刘庆文,陈典,等. 基于分布式光纤声波传感的管道泄漏监测[J]. 光学学报, 2019, 39(10): 1006005. DOI:10.3788/AOS201939.1006005.
- [5] CHEN Z, ZHANG C C, SHI B, et al. Detecting gas pipeline leaks in sandy soil with fiber-optic distributed acoustic sensing[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 141: 105367. DOI:10.1016/j.tust.2023.105367.
- [6] ZHU W Q, BIONDI E, LI J X, et al. Seismic arrival-time picking on distributed acoustic sensing data using semi-supervised learning[J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 8192. DOI:10.1038/s41467-023-43355-3.
- [7] CANNON R, AMINZADEH F. Distributed acoustic sensing: State of the art [C]//SPE Digital Energy Conference. The Woodlands, Texas, USA: SPE, 2013: 163688-MS. DOI:10.2118/163688-ms.
- [8] 叶有祥,周盛华. 基于 LabVIEW 的 PGC 零差检测技术研究[J]. 光学仪器, 2018, 40(1): 19. DOI:10.3969/j.issn.1005-5630.2018.01.004.
- [9] 徐丹,黄俊斌. 基于 3×3 耦合器的零差解调技术研究[J]. 舰船电子工程, 2022, 42(12): 70-75. DOI:10.3969/j.issn.1672-9730.2022.12.016.
- [10] WANG Z N, ZHANG L, WANG S, et al. Coherent Φ -OTDR based on I/Q demodulation and homodyne detection[J]. Optics Express, 2016, 24(2): 853-858. DOI:10.1364/OE.24.000853.

