

引用本文:赵丽娟,刘子义,黄梓朦,等. Φ -OTDR外差相干探测解调方法性能比较[J].光通信技术,2026,50(4):39-44.

Φ -OTDR外差相干探测解调方法性能比较

赵丽娟^{1,2},刘子义²,黄梓朦²,徐志钮^{2*},马家骏³,代泽荟³,李冠良⁴

(1. 华北电力大学 燕赵电力实验室,河北 保定 071003;2. 华北电力大学 电气与电子工程学院,河北 保定 071003;3. 内蒙古电力(集团)有限责任公司 鄂尔多斯供电公司,内蒙古 鄂尔多斯 017000;4. 国网山西省电力公司 电力科学研究院,太原 030001)

摘要:针对相位敏感光时域反射仪(Φ -OTDR)外差相干探测中解调方法的选择问题,构建瑞利后向散射及扰动信号模型,引入平衡探测器噪声,从信噪比、扰动类型、扰动频率及探测距离四方面系统比较IQ解调与Hilbert解调的性能。试验结果表明:信噪比 ≥ 35 dB时二者均可无失真解调;低于35 dB时IQ解调抗噪性更优;不同扰动波形下IQ解调失真度更低、稳定性更好;200~2 000 Hz范围内二者均能稳定解调;系统参数一定时,IQ解调最大有效探测距离达12.7 km,较Hilbert解调提升约53.01%。

关键词: 光纤传感;相位敏感光时域反射仪;同相/正交解调;Hilbert解调;外差相干探测

中图分类号: TN915 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2026)04-0039-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.04.006

Comparison of demodulation methods for Φ -OTDR heterodyne coherent detection

ZHAO Lijuan^{1,2}, LIU Ziyi², HUANG Zimeng², XU Zhiniu^{2*}, MA Jiajun³, DAI Zehui³, LI Guanliang⁴

(1. Yanzhao Electric Power Laboratory, North China Electric Power University, Baoding Hebei 071003, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding Hebei 071003, China;

3. Ordos Power Supply Company, Inner Mongolia Power (Group) Co., Ltd., Ordos Inner Mongolia 017000, China;

4. Electric Power Research Institute of State Grid Shanxi Electric Power Company, Taiyuan 030001, China)

Abstract: Aiming at the selection of demodulation methods for heterodyne coherent detection in phase-sensitive optical time-domain reflectometer(Φ -OTDR) systems, a Rayleigh backscattering and disturbance signal model is constructed with balanced photodetector noise incorporated. The performances of IQ demodulation and Hilbert demodulation are systematically compared in terms of signal-to-noise ratio, disturbance waveform, disturbance frequency, and detection distance. Experimental results show that both methods can achieve distortion-free demodulation when $\text{SNR} \geq 35$ dB, when $\text{SNR} < 35$ dB, IQ demodulation exhibits better noise immunity. Under different disturbance waveforms, IQ demodulation achieves lower distortion and better stability. Both methods can stably demodulate disturbances in the frequency range of 200~2 000 Hz. Under fixed system parameters, the maximum effective detection distance of IQ demodulation reaches 12.7 km, which is approximately 53.01% longer than that of Hilbert demodulation.

Key words: optical fiber sensing, phase-sensitive optical time domain reflectometry, in-phase/quadrature demodulation, Hilbert demodulation, heterodyne coherent detection

收稿日期:2025-09-28。

基金项目:国家自然科学基金项目(62171185、62273146)资助;河北省省级科技计划资助项目(SZX2020034)资助。

作者简介:赵丽娟(1981—),女,河北保定人,博士,教授,博士研究生导师,河北省“三三三人才工程”第三层次人选,《光通信技术》编委、《半导体光电》青年编委、保定市“燕赵英才”。主要研究方向为光纤传感与通信技术。主持国家级及省部级科研项目5项,获省部级科技进步奖3项。

***通信作者:**徐志钮(1979—),男,博士,教授,主要从事分布式光纤传感及其电气设备状态监测与故障诊断研究。



0 引言

分布式光纤传感(DOFS)技术^[1-2]是一种以光纤同时作为传输媒介与敏感元件的连续分布式传感方法。与传统点式传感器不同,DOFS将光纤沿线每一位置均视为独立传感点,因而具备远距离覆盖、低成本、部署灵活及环境适应性强等优势,已广泛应用于基础设施安全监测^[3]、周界安防^[4-5]、输电线路地震监测^[6]等领域。

相位敏感光时域反射仪(Φ -OTDR)^[7]作为 DOFS

赵丽娟,刘子义,黄梓朦,等:Φ-OTDR外差相干探测解调方法性能比较

技术的典型代表,凭借其对动态扰动的高灵敏感知能力,在分布式传感系统中具有重要的研究与应用价值。Φ-OTDR系统一般分为直接探测和相干探测两类结构,其中相干探测又可细分为零差相干探测与外差相干探测。直接探测型系统受限于较低的信噪比(SNR)与有限的探测距离,而零差相干探测易受低频噪声干扰,稳定性较差;相比之下,外差相干探测结构具备更强的综合性能,因而被广泛应用于高性能Φ-OTDR系统中^[8-9]。在外差相干探测架构中,常用的解调方法主要包括IQ解调^[10-11]与Hilbert解调^[12-13]:IQ解调具有较高的SNR与灵敏度,但本地光与瑞利散射光之间偏振态的不稳定可能导致解调精度下降^[14];Hilbert解调方法结构相对简单,但在低通滤波过程中难以有效抑制慢变噪声分量,抗噪性能相对较弱^[15]。目前,针对2种解调方法在性能方面的系统性比较研究仍较为缺乏。为探究上述2种解调方法的性能差异,本文基于Matlab搭建Φ-OTDR外差相干探测解调仿真模型,对比IQ解调与Hilbert解调2种解调方法性能。

1 外差相干探测系统及解调方法

1.1 外差相干探测系统

外差相干探测系统结构框图如图1所示。其工作原理如下:窄线宽激光器(NLL)发出的连续光经耦合器(OC)分为2路:一路作为本地参考光 $E_L(t)$;另一路作为探测光,经声光调制器(AOM)调制为具有频移的光脉冲信号,并由掺铒光纤放大器(EDFA)进行功率放大后,通过环形器(CIR)注入传感光纤。光纤上缠绕的压电陶瓷(PZT)施加扰动后,产生携带扰动信息的后向瑞利散射(RBS)信号 $E_{RBS}(t)$ 。该散射信号返回至OC与本地参考光发生相干混频,输出至平衡光电探测器(BPD)。基于BPD的平方律响应特性及差分运算机制,高频载波项(ω_0 及 $2\omega_0$)因超出探测器带宽而被滤除,同时共模噪声与直流分量被抑制。经滤波处

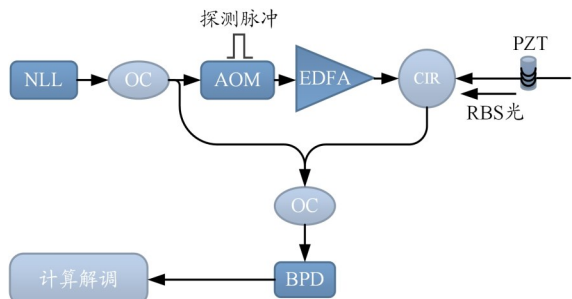


图1 外差相干探测系统结构框图

理后,得到的拍频信号 $V(t)$ 的表达式为

$$V(t) = A_0 A_s(t) \cos(\Delta\omega t + \varphi(t)) \quad (1)$$

式中: t 为光在光纤中的传播时间, A_0 、 $\Delta\omega$ 分别为本地光的幅值、AOM的频移量, $A_s(t)$ 与 $\varphi(t)$ 分别为由扰动引起的信号幅值变化量与相位变化量,通过解调出 $A_s(t)$ 、 $\varphi(t)$ 来获取扰动信息。

1.2 Hilbert解调

Hilbert解调原理相对简洁,其核心在于通过构建解析信号实现相位信息的提取。Hilbert解调原理框图如图2所示。对BPD输出的拍频信号 $V(t)$ 进行Hilbert解调,得到与原信号相位正交(相差 $\pi/2$)的分量 $H(t)$;由 $V(t)$ 与 $H(t)$ 构成复解析信号,通过反正切运算提取 $\varphi(t)$ 。

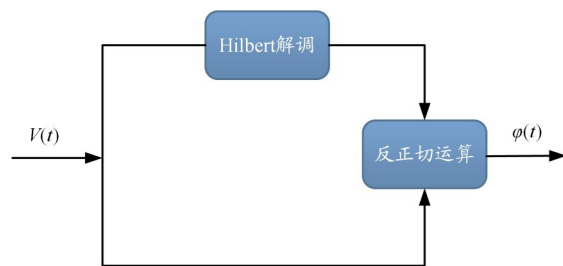


图2 Hilbert解调原理框图

正交分量 $H(t)$ 可表示为

$$H(t) = A_0 A_s(t) \sin(\Delta\omega t + \varphi(t)) \quad (2)$$

$\varphi(t)$ 可表示为

$$\varphi(t) = \arctan\left(\frac{H(t)}{V(t)}\right) + 2k\pi \quad (3)$$

式中: k 为任意整数。

1.3 IQ解调

IQ解调通过构造正交分量提取信号中的相位扰动信息^[19],其原理框图如图3所示。具体解调流程如下:首先,将BPD输出的拍频信号 $V(t)$ 分别与频率等于AOM频移量 $\Delta\omega$ 的2组正交本振信号相乘,生成同相分量 $I(t)$ 与正交分量 $Q(t)$;其次,对I/Q分量进行低通滤波(LPF),滤除频率为 $2\Delta\omega$ 的高频交叉项,保留携带扰动信息的基带信号,其表达式分别为

$$I(t) = \frac{1}{2} A_0 A_s(t) \cos(\varphi(t)) \quad (4)$$

$$Q(t) = -\frac{1}{2} A_0 A_s(t) \sin(\varphi(t)) \quad (5)$$

最后,对滤波后的I/Q分量进行反正切运算,解调出包含外界扰动信息的 $\varphi(t)$ ^[20-21]为

$$\varphi(t) = \arctan\left(-\frac{Q(t)}{I(t)}\right) + 2k\pi \quad (6)$$

对比式(3)与式(6)可知,Hilbert解调与IQ解调均

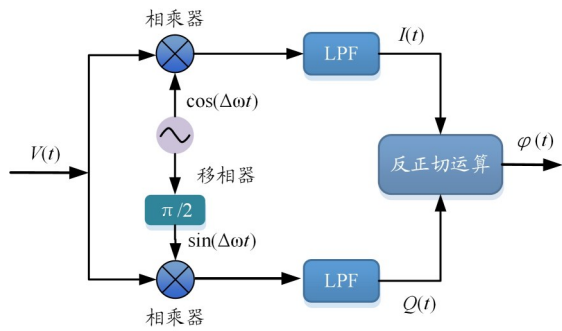


图3 IQ解调原理框图

需构建正交分量并通过反正切函数提取瞬时相位。然而,该过程易引发相位卷绕现象^[23]。为恢复真实的连续相位变化,本文采用文献[24]提出的相位解卷绕算法进行后处理。

2 Φ -OTDR 仿真模型及实验验证

2.1 仿真模型

为对比分析IQ解调与Hilbert解调在不同条件下的性能表现,本文基于Matlab搭建了 Φ -OTDR外差相干探测系统仿真模型,用于生成RBS信号,并开展系统性仿真分析。仿真光路结构参见图1,本文实验参数依据文献[25-28]设定如下:采样率为1 000 MHz,激光器中心波长 $\lambda=1\,550\text{ nm}$,AOM频移量 $\Delta f=80\text{ MHz}$,脉冲重复频率 $f_e=20\text{ kHz}$,脉冲宽度 $W=100\text{ ns}$,传感光纤长度 $L=1\,000\text{ m}$,瑞利散射系数 $\alpha_s=0.15\text{ dB/km}$,光纤传输损耗 $\alpha=0.2\text{ dB/km}$ 。

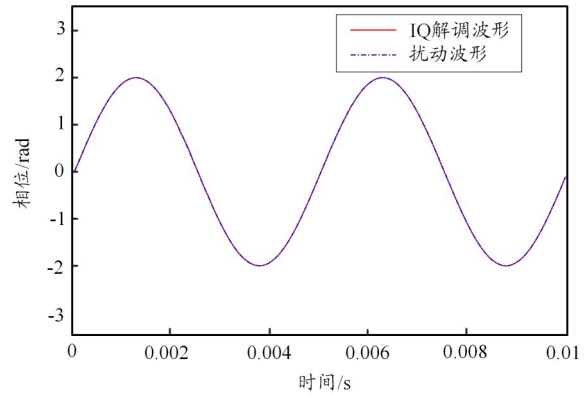
为更真实地反映系统性能,在BPD输出端引入散粒噪声与热噪声。二者均为互不相关的加性高斯白噪声,其总和服从均值 $\mu=0$ 、标准差 $\sigma=0.01$ 的正态分布^[29]。在距光纤入射端800 m处施加频率为200 Hz、幅值为2 rad的正弦相位扰动信号,即 $\varphi(t)=2\sin(2\pi\times 200t)$,仿真时长设为0.01 s。

为定量比较2种解调方法的性能,本文引入波形失真度 D ^[30]作为评价指标,其表达式为

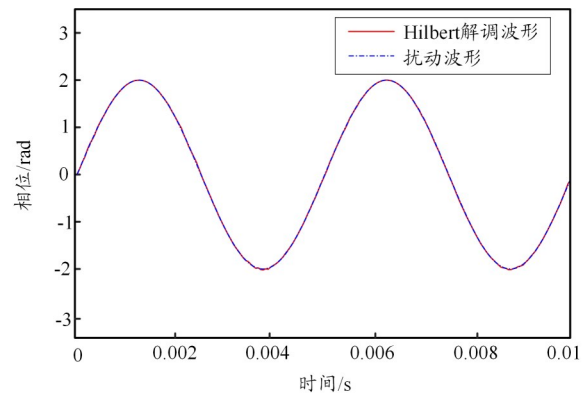
$$D = 1 - \left| \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{A_i - \mu_A}{\sigma_A} \right) \left(\frac{B_i - \mu_B}{\sigma_B} \right) \right| \quad (7)$$

式中: A_i 与 B_i 分别为序列A和B中元素,扰动信号 $A=[A_1, A_2, \dots, A_N]$ 与解调信号 $B=[B_1, B_2, \dots, B_N]$ 分别为2个长度为N的序列, μ_A 与 σ_A 分别为序列A的均值和标准差, μ_B 与 σ_B 分别为序列B的均值和标准差。 $D=0$ 时表示无失真, D 值越大表明2种波形差异越显著,解调效果越差。

分别采用IQ解调与Hilbert解调2种解调方法对仿真信号进行处理,所得解调波形如图4所示。可以看出,在0.01 s的仿真时长内,2种方法均呈现出2个完整周期的正弦波形,幅值为2 rad,与施加的扰动信号参数一致。根据式(7)计算,IQ解调与Hilbert解调的波形失真度分别为 0.13×10^{-4} 与 1.27×10^{-4} ,表明2种解调方法均能较为准确地恢复扰动波形;其中Hilbert解调因受BPD噪声影响,失真度略高于IQ解调。



(a) IQ解调波形



(b) Hilbert解调波形

图4 IQ解调与Hilbert解调波形

2.2 实验验证

为进一步验证仿真结论的可靠性,本文开展了实验验证。实验中,将2.1 km传感光纤尾端缠绕于PZT上,对PZT施加幅值为0.5 V、频率为200 Hz的正弦驱动电压;通过调节EDFA驱动电流至110.4 mA和80 mA,获取2组不同SNR的RBS信号,其余实验参数与2.1节仿真设置保持一致。针对同一组采集数据,分别采用IQ解调与Hilbert解调2种解调方法进行解调处理。

根据式(7)计算波形失真度,当EDFA电流为110.4 mA时,IQ解调与Hilbert解调的波形失真度分别为 2.23×10^{-4} 、 6.94×10^{-4} ;当电流降至80 mA时,2种方法的失真度分别增至 7.22×10^{-4} 和 16.16×10^{-4} 。结果表

赵丽娟, 刘子义, 黄梓朦, 等: Φ -OTDR 外差相干探测解调方法性能比较

明, 在不同 SNR 条件下, IQ 解调的波形失真度均显著低于 Hilbert 解调, 实验结论与仿真分析一致。与理想仿真环境相比, 实验波形除受 BPD 固有噪声影响外, 还可能受到环境振动、温度漂移等外部干扰, 导致解调性能进一步下降。

2.2.1 SNR 对解调性能的影响

解调方法对 SNR 的灵敏度直接决定了系统检测微弱信号的能力与可靠性。为探究 SNR 对 2 种解调方法性能的影响, 本文在光纤中施加频率为 500 Hz 的正弦扰动信号, 并采用相同仿真模型生成 RBS 信号。通过调节噪声功率^[31]构建不同 SNR 条件, 对比分析 IQ 解调与 Hilbert 解调的性能差异, 波形失真度随 SNR 的变化曲线如图 5 所示。

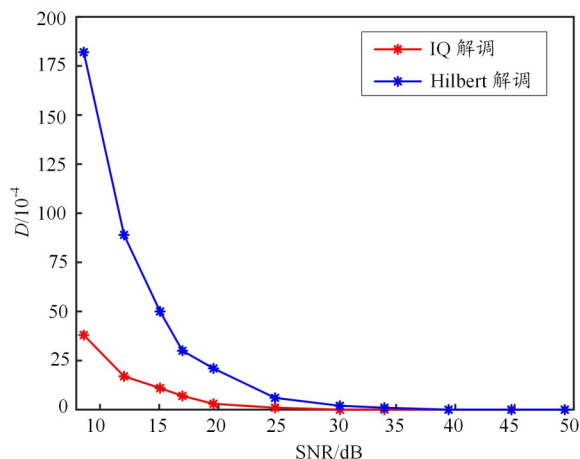


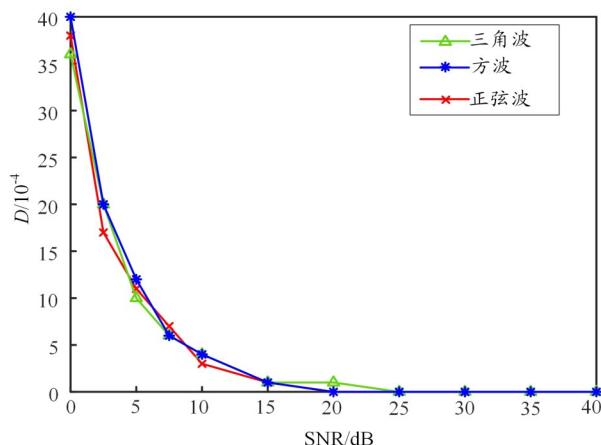
图 5 不同 SNR 下 2 种解调方法的波形失真度变化曲线

由图 5 可知, 2 种解调方法的波形失真度均随 SNR 增加呈下降趋势; 当 $\text{SNR} \geq 35 \text{ dB}$ 时, IQ 与 Hilbert 解调的失真度均趋近于零, 能高精度恢复扰动波形。造成二者抗噪性能差异的主要原因在于: IQ 解调通过构造正交本振信号并与原始信号相干混频, 可有效抑制宽带噪声干扰; 而 Hilbert 解调在解析信号构建过程中, 其低通滤波环节难以完全滤除慢变噪声分量^[13], 因而抗噪性能相对较弱。综上所述, 在高 SNR ($\geq 35 \text{ dB}$) 环境下, 2 种方法均可准确还原扰动信息; 而在较低 SNR ($< 35 \text{ dB}$) 条件下, IQ 解调展现出更强的鲁棒性, Hilbert 解调更易受噪声干扰, 导致解调精度显著下降。

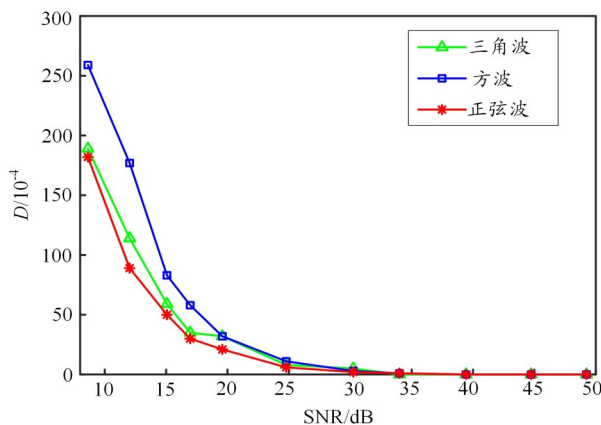
2.2.2 外界扰动类型对解调性能的影响

外界扰动的强度通常具有随机性, 不同类型的外界扰动产生的信号在时域或频域特征上存在显著差异, 解调方法对不同特征信号的适应性直接影响系统在各应用场景下的有效性。为探究 2 种解调方法对不同波形扰动的适应性, 本文分别向光纤施加幅值为 2 rad、频率为 500 Hz 的正弦波、三角波与方波扰动, 对比分

析不同扰动波形对解调结果的影响。不同扰动波形下解调方法的波形失真度如图 6 所示。



(a) IQ 解调失真度波形



(b) Hilbert 解调失真度波形

图 6 不同扰动波形下 2 种解调方法的失真度

由图 6 可知, 对于不同扰动波形, Hilbert 解调表现出较强的波形敏感性, 其解调性能由高到低依次为: 正弦波、三角波、方波; 相比之下, IQ 解调在不同波形下的性能波动较小, 解调效果更为稳定。造成上述差异的主要原因在于: Hilbert 解调的实现依赖于信号的局部平稳性与窄带特性, 在噪声干扰下对瞬时相位的估计易产生较大误差; 而 IQ 解调通过正交本振信号直接提取同相(I)与正交(Q)分量, 受信号具体波形特征的影响较小。综上所述, 在任意扰动波形下, IQ 解调的波形失真度始终低于 Hilbert 解调, 且对扰动波形类型不敏感; 而 Hilbert 解调在不同波形下的解调性能存在显著差异, 抗干扰能力相对较弱。另外, 无论施加何种波形扰动, 2 种解调方法均能准确恢复扰动信号的基本形态。

2.2.3 扰动频率对解调性能的影响

在 Φ -OTDR 系统应用中, 通常需针对特定频率扰动事件进行检测, 因此分析解调方法在不同频带的性能一致性至关重要。为探究 2 种解调方法对不同频率扰动信号的适应性, 本文在 200~2 000 Hz 设置多组扰动频率测试, 并采用相同仿真模型生成 RBS 信号。不同扰动频率下 2 种解调方法的波形失真度如图 7 所示。

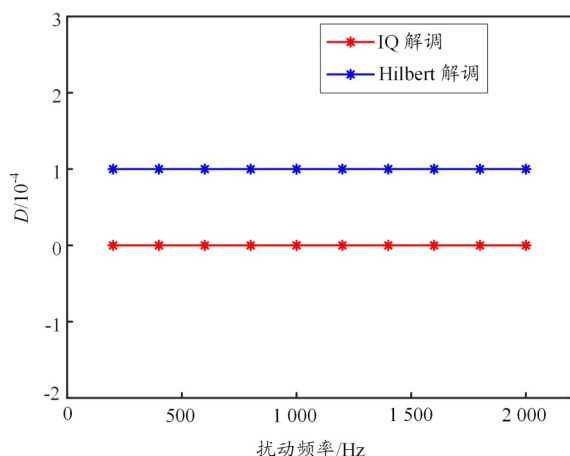


图 7 不同扰动频率下 IQ 解调与 Hilbert 解调的波形失真度

由图 7 可知, 在 200~2 000 Hz 频率范围内, IQ 解调与 Hilbert 解调的波形失真度均与扰动频率无显著相关性, 其均值分别为 0.13×10^{-4} 和 1.27×10^{-4} 。该结果同样表明 IQ 解调性能优于 Hilbert 解调, 与前文仿真及实验结论一致。综上所述, 2 种解调方法均能稳定恢复不同频率的扰动信号, 其解调性能对扰动频率变化不敏感, 具备良好的频带适应性。

2.2.4 探测距离对解调性能的影响

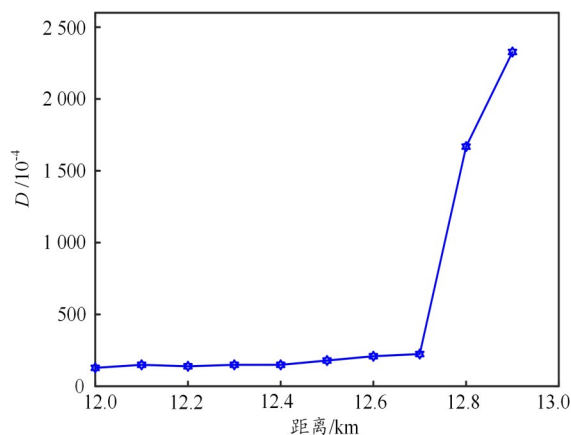
随着光信号在光纤中传输, 受光纤固有损耗影响, 其强度呈指数衰减。当传输距离超过一定阈值时, RBS 信号可能被噪声掩盖^[32], 导致 SNR 显著下降并引发解调波形畸变。此时对应的最大传输距离即为该解调方法可实现的最远有效探测距离。由于 IQ 解调与 Hilbert 解调对噪声的敏感程度不同, 二者在同一探测系统中的有效探测距离可能存在差异。

为直观对比 2 种解调方法在相同条件下的最大探测距离, 本文采用 2.1 节所述仿真模型, 在光纤尾端施加扰动信号, 并逐步增加光纤长度 (测试间隔设为 1 km), 直至解调波形出现严重失真, 2 种解调方法的波形失真度如表 1 所示。

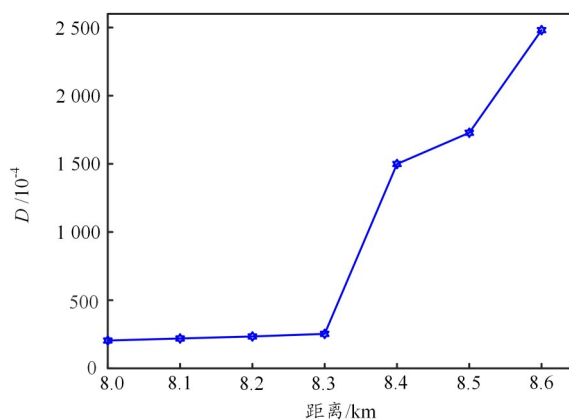
由表 1 可知, IQ 解调与 Hilbert 解调的波形失真度分别在 12~13 km 与 8~9 km 区间出现显著跃升。为精确定位 2 种解调方法的最远有效探测距离, 本文在上述区间将测试步长缩短至 100 m, 结果如图 8 所示。测

表 1 2 种解调方法的波形失真度

扰动位置/km	失真度/ 10^{-4}	
	IQ 解调	Hilbert 解调
1	0.3	5
2	0.6	7.9
3	1.1	18
4	1.7	37
5	2.4	61
6	4.9	133
7	6.2	135
8	13	204
9	23	2 485
10	34	7 244
11	61	6 461
12	128	9 455
13	2 920	9 816



(a) 12~13 km 范围 IQ 解调波形失真度



(b) 8~9 km 范围 Hilbert 解调波形失真度

图 8 探测距离仿真结果

试表明, IQ 解调在 12.7 km 处出现类似性能拐点, 失真度达 224.31×10^{-4} , 标志着其解调能力的临界阈值, 而 Hilbert 解调在 8.3 km 处出现性能拐点, 失真度达 253.33×10^{-4} 。综合对比可知, 该实验条件下 IQ 解调

赵丽娟,刘子义,黄梓朦,等: Φ -OTDR外差相干探测解调方法性能比较

最远有效探测距离为12.7 km,较Hilbert解调的8.3 km提升约53.01%。因此,在长距离分布式光纤传感中,IQ解调具有更优的稳定性与抗噪鲁棒性,更适用于高性能 Φ -OTDR系统。

3 结束语

本文构建了 Φ -OTDR系统仿真模型,并通过实验验证了其有效性。在此基础上,从SNR、扰动波形类型、扰动频率及探测距离4个方面比较了IQ解调与Hilbert解调性能差异。结果表明:随SNR提升,2种方法失真度均下降;SNR ≥ 35 dB时均可高精度解调;SNR < 35 dB时IQ解调抗噪鲁棒性更优。针对不同扰动波形,IQ解调性能波动小;Hilbert解调失真度由高到低依次为方波、三角波、正弦波。在200~2 000 Hz扰动频率范围内,2种方法均能稳定恢复信号,频带适应性良好。固定参数下,IQ解调最远有效探测距离为12.7 km,较Hilbert解调8.3 km提升约53.01%。综上所述,长距离DOFS应用中,IQ解调在抗噪、波形适应、频带响应及远距离探测方面均优于Hilbert解调,更适用于复杂环境高精度 Φ -OTDR系统。

参考文献:

- [1] 杨苏凡,张春熹,王夏霄. 基于SOA光纤环形激光器的分布式声传感系统[J]. 光通信技术,2024,48(1):18-22.
- [2] 饶云江. 长距离分布式光纤传感技术研究进展[J]. 物理学报,2017,66(7):139-157.
- [3] Zhou Xiao, Wang Feng, Yang Chengyu, et al. Hybrid distributed optical fiber sensor for the multi-parameter measurements[J]. Sensors, 2023, 23(16):7116-1-7116-40.
- [4] 尚秋峰,樊小凯. 基于CVMD和DBO-SVM的光纤周界安防信号识别方法[J]. 半导体光电,2024,45(1):159-166.
- [5] Shi Yi, Chen Jiewei, Dai Shangwei, et al. Φ -OTDR event recognition system based on valuable data selection[J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 42(2):961-969.
- [6] 张楚谦,李龙云,刘春堂,等. 基于分布式光传感的输电线路地震信号分析[J]. 光通信技术,2021,45(3):32-36.
- [7] 赵航航,张明红,范敏,等. 分布式光纤多参数融合传感系统研究[J]. 半导体光电,2024,45(6):1024-1030.
- [8] 孙琪真,李豪,范存政,等. 基于散射增强光纤的分布式声波传感研究进展[J]. 激光与光电子学进展,2022,59(21):9-26.
- [9] 宋雪玲,彭飞. 基于 Φ -OTDR的分布式光纤声波传感系统性能改进研究[J]. 半导体光电,2023,44(4):609-615.
- [10] Wang Zinan, Zhang Li, Wang Song, et al. Coherent Φ -OTDR based on I/Q demodulation and homodyne detection[J]. Optics Express, 2016, 24(2):853-858.
- [11] Wu Yuqing, Gan Jiulin, Li Qingyu, et al. Distributed fiber voice sensor based on phase-sensitive optical time-domain reflectometry[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(6):1-10.

- [12] Fan Xinyu, Yang Guangyao, Wang Shuai, et al. Distributed fiber-optic vibration sensing based on phase extraction from optical reflectometry[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(16):3281-3288.
- [13] Yang Guangyao, Fan Xingyu, Wang Shuai, et al. Long-range distributed vibration sensing based on phase extraction from phase-sensitive OTDR[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(3):1-12.
- [14] Shang Ying, Yang Yuanhong, Wang Chen, et al. Optical fiber distributed acoustic sensing based on the self-interference of Rayleigh backscattering[J]. Measurement, 2016, 79:222-227.
- [15] 张旭苹,丁哲文,洪瑞,等. 相位敏感光时域反射分布式光纤传感技术[J]. 光学学报,2021,41(1):100-114.
- [16] 陈益壮. 基于外差相干探测型 Φ -OTDR振动信号解调系统研究[D]. 南京:南京邮电大学,2023.
- [17] 姚国珍,李炳峰,谷元宇. 基于PE-CEEMD-SVD的 Φ -OTDR信号降噪方法[J]. 半导体光电,2024,45(4):662-668.
- [18] Pan Zhengqing, Liang Kezhen, Ye Qing, et al. Phase-sensitive OTDR system based on digital coherent detection[C]//2011 Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition(ACP), November 13-16, 2011, Shanghai, China. New York:IEEE Press, 2011:1-6.
- [19] Li Yujiao, Cao Xiaomin, Ni Wenhao, et al. A deep learning model enabled multi-event recognition for distributed optical fiber sensing[J]. Science China Technological Sciences, 2024, 67(3):291-307.
- [20] 张驰,邹宁睦,宋金玉,等. Φ -OTDR系统的数字信号处理及应用[J]. 光电工程,2023,50(2):3-21.
- [21] 樊迎瑞,王宇,张硕,等. 移频双脉冲调制相位敏感光时域反射传感技术[J]. 光学技术,2025,51(4):497-503.
- [22] 贺梦婷,庞拂飞,梅烜玮,等. 基于IQ解调的相位敏感OTDR的研究[J]. 光通信技术,2016,40(9):23-26.
- [23] 于森,孙铭阳,张耀鲁,等. 相位敏感光时域反射系统相位模糊及解卷绕[J]. 红外与激光工程,2021,50(5):229-236.
- [24] 孙健晖. 基于相位解调 Φ -OTDR的二维相位解卷绕算法研究[D]. 成都:电子科技大学,2024.
- [25] Yu Feihong, Liu Shuaiqi, Shao Liyang, et al. Ultra-low sampling resolution technique for heterodyne phase-OTDR based distributed acoustic sensing[J]. Optics Letters, 2022, 47(14):3379-3382.
- [26] 王旭,刘珉含,于森,等. 相位敏感光时域反射系统数字正交解调方法分析及改进研究[J]. 中国激光,2017,44(12):275-281.
- [27] 张振鹤,刘丰年,张国敬,等. IQ解调低通滤波器截止频率变化对 Φ -OTDR系统性能的影响[J]. 光通信技术,2025,49(2):34-39.
- [28] 张倩. 相位敏感光时域反射仪关键技术研究[D]. 北京:北京邮电大学,2025.
- [29] Kim J, Johnson W B, Kanakaraju S, et al. Demonstration of balanced coherent detection using polymer optical waveguide integrated distributed traveling-wave photodetectors[J]. Optics Express, 2009, 17(22):20242-20248.
- [30] 赵丽娟,张旭哲,徐志钮,等. 分布式声波传感系统中IQ解调方法的影响因素[J]. 光学学报,2023,43(14):284-299.
- [31] 熊兴隆,冯磊,刘佳,等. 基于改进变分模态分解的 Φ -OTDR信号去噪方法[J]. 半导体光电,2020,41(3):400-405.
- [32] 殷光耀. 基于FPGA的分布式光纤声波传感系统的性能提升方法研究[D]. 长春:吉林大学,2022.