

摘要

基于 Φ -OTDR 的分布式光纤振动传感技术的研究

光纤传感技术近些年取得了飞速的发展,利用光纤作为传感和传输介质,可以实现对于整条光纤上物理量的测量。本文对基于 Φ -OTDR 的分布式光纤振动传感系统进行了研究,其具有成本较低、抗电磁干扰、耐腐蚀、耐高温等优点,在资源勘探、石油和天然气管道安全监测、微弱水声信号检测、威胁分类、周界安防、列车实时定位、军事国防等领域都有着广泛的应用。振动信号定位和相位解调技术对于本系统来说是必不可少的,其中正交解调方法是常用的相位解调方法之一,将其利用计算机实现,可以降低系统的硬件成本,且结构更加简单。本文对定位算法和相位解调算法进行了详细的研究,所搭建的 Φ -OTDR 系统具有很高的定位信噪比和很大的信号解调范围,定位信噪比最高能达到 26.3dB,最低可以实现对于 1 μ Hz 振动信号的定位,同时能实现对于 5-2500Hz 振动信号波形的还原,振动信号强度与相位变化幅值具有良好的线性关系,线性拟合系数为 0.9974。

本文的主要工作内容如下:

1. 本文介绍了几种常见的分布式光纤振动传感系统,并重点阐述了基于 Φ -OTDR 分布式光纤振动传感系统的研究进展、应用及前景。

2. 详细介绍了瑞利散射的原理。利用公式推导对光纤振动传感机理进行了详细的分析。介绍了 OTDR 的原理后,在其基础上通过建立背向瑞利散射光的数学模型对 Φ -OTDR 系统的工作原理进行了阐述,说明了 Φ -OTDR 系统的主要参数及相应的优化方法。

3. 搭建了基于 Φ -OTDR 的分布式光纤振动传感系统,介绍了系统选用的一些关键器材。利用数字正交解调算法得到一对正交信号,之后采用反正切算法获取相位信息,对正交解调后反正切结果的值域扩展的具体操作进行了阐述,理论分析了进行两次相位解卷绕的过程以及必要性。

4. 介绍了利用 LabVIEW 对于采集卡的配置,移动平均和移动差分定位算法以及后续的相位解调算法的实现过程,对相应的实验结果进行了阐述。采用消除初相干扰的方法来消除系统中的激光器和声光调制器的相位噪声。提出了重定位方法,利用振动位置相位差曲线峰后的相位变化进行振动波形的还原。将任意波

形发生器驱动的压电陶瓷加载到传感光纤尾端来模拟外界振动,通过实验实现了不同频率振动信号的定位与波形还原,说明了相位提取过程进行两次相位解卷绕的必要性,验证了相位变化的幅值与压电陶瓷施加的电压之间的线性关系。利用 LabVIEW 中的“生产者/消费者”的设计模式实现了振动信号的实时定位,搭建了上位机界面。

关键词:

光纤传感, 数字正交解调, 振动定位, 相位提取, LabVIEW 编程

Abstract

Research on Phase Sensitive Time Domain Reflection Distributed Optical Fiber Vibration Sensing Technology

Optical fiber sensing technology has achieved rapid development in recent years. The use of optical fiber as a sensing and transmission medium can realize the measurement of physical quantities on the entire optical fiber. In this paper, the distributed optical fiber vibration sensing system based on Φ -OTDR are studied, which has lower cost, electromagnetic interference resistance, corrosion resistance, high temperature resistant, etc. It has a wide range of applications in resource exploration, oil and gas pipeline safety monitoring, weak acoustic signal detection, classification, perimeter security threat, train real-time positioning, military defense, and other fields. Vibration signal positioning and phase demodulation technology are indispensable for this system, among which the quadrature demodulation method is one of the commonly used phase demodulation methods, which can reduce the hardware cost of the system by using a computer, and the structure is simpler. In this paper, the positioning algorithm and phase demodulation algorithm have been studied in detail. The Φ -OTDR system built has a high positioning signal-to-noise ratio and a large signal demodulation range. The highest positioning signal-to-noise ratio can reach 26.3dB, and the lowest it can realize the positioning of 1 μ Hz vibration signals. At the same time, it can realize the restoration of 5-2500Hz vibration signal waveform. The vibration signal intensity has a good linear relationship with the phase change amplitude, and the linear fitting coefficient is 0.9974.

The main contents of this paper are as follows:

1. This article introduces several common distributed optical fiber vibration sensing systems, and focuses on the research progress, application and prospects of distributed optical fiber vibration sensing systems based on Φ -OTDR.
2. The principle of Rayleigh scattering is introduced in detail. The mechanism of optical fiber vibration sensing is analyzed in detail by formula derivation. After introducing the principle of OTDR, on the basis of its principle, through the

establishment of the mathematical model of Rayleigh backscattering light the principle of Φ -OTDR system are introduced, and the main parameters of the Φ -OTDR system and the corresponding optimization methods are explained.

3. A distributed optical fiber vibration sensing system based on Φ -OTDR was built, and some key equipment selected for the system is introduced. The digital quadrature demodulation algorithm is used to obtain a pair of orthogonal signals, and then the arc tangent algorithm is used to obtain the phase information. The specific operation of the range expansion of the arc tangent result after orthogonal demodulation is explained, and the process and necessity of two phase unwrapping are theoretically analyzed.

4. Introduced the use of LabVIEW, including the configuration of the acquisition card, the moving average and moving differential positioning algorithm and the implementation process of the subsequent phase demodulation algorithm, and the corresponding experimental results were explained. Use the method of eliminating the initial phase interference to eliminate the phase noise of the laser and the acousto-optic modulator in the system. A relocation method is proposed, which is to use the phase change after the peak of the phase difference curve of the vibration position to restore the vibration waveform. The piezoelectric ceramics driven by the arbitrary waveform generator are loaded on the end of the sensing fiber to simulate external vibration. Through experiments, the positioning and waveform restoration of vibration signals at different frequencies have been realized, and the necessity of two phase unwrapping in the phase extraction process is explained. The linear relationship between the amplitude of the phase change and the voltage applied by the piezoelectric ceramic is verified. The "producer/consumer" design pattern in LabVIEW is used to realize the real-time positioning of the vibration signal and build the host computer interface.

Key words:

Optical fiber sensing, digital quadrature demodulation, vibration positioning, phase extraction, LabVIEW programming

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 基于干涉技术的分布式光纤振动传感系统	2
1.2.1 Michelson 干涉仪	2
1.2.2 Mach-Zehnder 干涉仪	2
1.2.3 Sagnac 干涉仪	3
1.3 基于瑞利散射的分布式光纤振动传感系统	3
1.3.1 光时域反射系统	3
1.3.2 偏振光时域反射系统	4
1.3.3 光频域反射系统	5
1.3.4 相位敏感光时域反射系统	5
1.4 Φ -OTDR 的国内外研究现状和发展	7
1.5 研究背景及意义	8
1.6 主要研究内容	9
第 2 章 Φ -OTDR 分布式光纤振动传感系统基本原理	11
2.1 光纤中的瑞利散射	11
2.2 光纤振动传感机理分析	12
2.2.1 光纤应变效应	13
2.2.2 光纤弹光效应	13
2.2.3 光纤泊松效应	14

2.3 Φ -OTDR 系统的基本原理	14
2.3.1 OTDR 原理.....	14
2.3.2 Φ -OTDR 原理.....	15
2.4 Φ -OTDR 系统的主要参数	17
2.4.1 空间分辨率.....	17
2.4.2 灵敏度	17
2.4.3 频率响应范围.....	18
2.4.4 动态范围.....	18
2.5 本章小结	19
第 3 章 分布式光纤振动传感的系统设计	20
3.1 系统的总体结构.....	20
3.2 数字正交解调方法.....	22
3.3 相位提取方法.....	23
3.3.1 微分-交叉相乘算法.....	23
3.3.2 反正切算法.....	25
3.3.3 相位解卷绕.....	25
3.4 扰动信号定位方法.....	26
3.4.1 差分定位方法.....	26
3.4.2 连续平均差值法.....	27
3.4.3 移动平均和移动差分法	28
3.5 系统关键器件及简介	29
3.5.1 激光器	29

3.5.2 光纤放大器.....	29
3.5.3 声光调制器.....	30
3.5.4 压电陶瓷.....	31
3.5.5 微弱光相干接收模块.....	31
3.5.6 数据采集卡.....	33
3.6 本章小结.....	34
第4章 基于LabVIEW的实验结果与讨论.....	35
4.1 采集卡的配置及信号采集.....	35
4.2 静态定位.....	37
4.3 相位提取.....	38
4.3.1 反正切值域扩展.....	38
4.3.2 相位解卷绕.....	39
4.3.3 消除初相干扰.....	40
4.3.4 重定位.....	42
4.4 动态定位.....	47
4.5 本章小结.....	49
第5章 结论.....	51
5.1 工作总结.....	51
5.2 后续工作展望.....	52
参考文献.....	54
作者简介及科研成果.....	60
致谢.....	61

第 1 章 绪论

1.1 引言

早在 1966 年 7 月，华裔科学家高锟发表了一篇对光纤传输在未来发展状况预测的文章，该篇文章介绍了引起光纤传输损耗的主要原因，说明了可以实现 20dB/km 的光纤传输损耗，并提出了可以将这样的光纤应用于通信领域。基于前面高锟提出的理论，在 1970 年美国康宁公司成功地研制出了 20dB/km 传输损耗的光纤，证明了光纤通信的可能性。随着人们的不断研究，在 1972 年，光纤的传输损耗成功地降低到了 4dB/km。此后，随着研究技术的不断进步，光纤的传输损耗也在不断的下降，光纤传感技术得到了飞速的发展，并且一直处于传感器技术发展的前沿领域。

自从研制出低损耗的光纤，光纤传感技术在世界各地引起了广泛的关注。我国对光纤传感技术的研究进行了很大的投入，为此创立了许多国家级的重大科技研发项目。通过科研人员不断的研究，我国在光纤传感领域取得了飞速的进展，给人们的生活带来许多便利。因为光纤传感技术独特的优势，光纤传感技术出现在了人们日常生活中的方方面面^[1,2]。其优势具体体现在：

1. 耐高温、高压，抗电磁干扰，在恶劣的环境中仍能保持良好的性能，适应范围广，可应用于一些特殊的场合，例如高温井中、高压电网附近等。

2. 可以实现分布式传感，光纤集传感与传输为一体，光纤上的每一点都可作为传感器感知外界信息，空间采样密度高，而传统的电子传感器不能实现分布式部署。

3. 重量轻，易弯曲，可根据不同使用场合将光纤制成任意形状，因此可以广泛地应用于航空航天领域。

4. 可实现长距离传输，成本低，部署效率高。测井用的传统的井中地震采集仪器无法满足全井段覆盖等较高的要求，而且电子检波器级数的瓶颈愈发的明显，急需一种具有替代性的高密度、长探测距离的采样设备。因此空间采样密度能够达到数万级的分布式光纤传感技术就成为了一个新的突破口，光纤可以在井中大规模的长期布设，而且布设之后不占井施工，井下安全系数高。

5. 灵敏度高，动态范围大。光纤传感器的动态范围调制起来十分的灵活，因为其采集卡的采样频率以及光调制器的重复频率密切相关，而传统的地震

检波器受限于自身的结构，不能够实现宽频带的动态范围。

正是由于光纤传感具有以上这些优点，其在石油和天然气管道安全监测、地球物理测量、桥梁、大型建筑等土木工程健康监测、军事、国防、航空航天以及过程控制系统等领域中得到了重视和广泛应用^[3-15]。

1.2 基于干涉技术的分布式光纤振动传感系统

基于干涉技术的分布式光纤传感系统具有成本低、检测信号灵敏度高的优点，引起了研究人员的注意。该系统利用外界振动信号对光纤中的光波进行相位调制，通过检测光纤中返回的光信号的相位变化情况来实现对外界振动信号的探测。下面介绍几种常见的干涉型光纤传感器。

1.2.1 Michelson 干涉仪

Michelson 光纤干涉型振动传感器^[16-18]结构如图 1.1 所示。

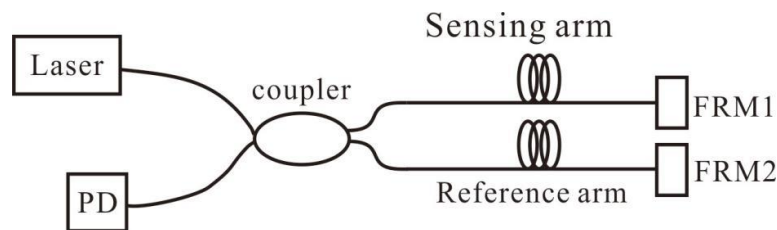


图 1.1 Michelson 光纤干涉型振动传感器结构图

激光器 (Laser) 发射的光被 2×2 的 3dB 光纤耦合器 (coupler) 分成两束强度相同的光，随后各自传输到系统的信号臂和参考臂，经过光纤尾端的法拉第旋光反射镜 (FRM) 反射后，经由光纤再回到耦合器进行光信号的干涉。信号臂在受到外界扰动影响的情况下，会改变传感光纤中的背向瑞利散射光的相位，从而引起信号臂和参考臂形成的干涉条纹的光强随之发生变化。通过检测相位或者光强的变化，能够实现对于振动点的定位。然而这种技术受外界扰动影响大，很难实现对于多点振动的同时测量，因此应用不是很广泛。

1.2.2 Mach-Zehnder 干涉仪

Mach-Zehnder 光纤干涉型振动传感器^[19,20]结构如图 1.2 所示。

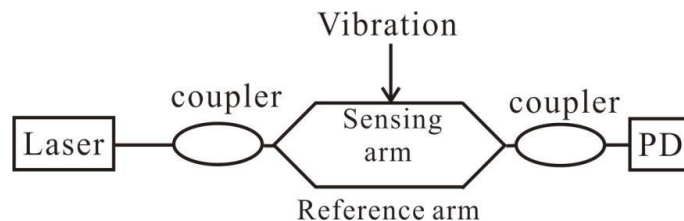


图 1.2 Mach-Zehnder 光纤干涉型振动传感器结构图

激光器发出的激光经过 50:50 的光纤耦合器后分成两路，随后各自进入到长度一致的由两根单模光纤所构成的信号臂和参考臂中。使信号臂和参考臂的尾端聚集到一块，利用光电探测器（PD）探测这两束光在尾端发生干涉所产生的信号。该传感器工作时，为了使光程不发生变化，需使参考臂屏蔽外界信号，而信号臂感知外界振动，振动信号将改变光纤的折射率，进而引起传输光相位的变化，最终导致两根光纤中传输光的相位差发生变化。因为这种结构具有一定的局限性，只能感知外界的振动信号却不能实现对外界振动信号的定位，因此其应用受到了限制。

1.2.3 Sagnac 干涉仪

Sagnac 光纤干涉型振动传感器^[21,22]结构如图 1.3 所示。

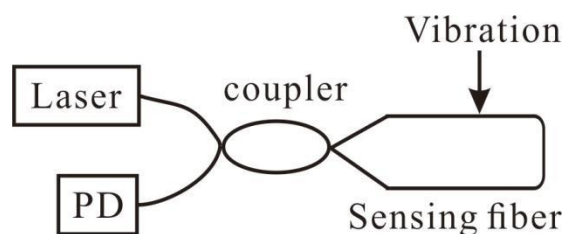


图 1.3 Sagnac 光纤干涉型振动传感器结构图

由 50:50 的光纤耦合器将激光器发出的激光分成两路，各自沿着环形光纤进行传播。随后，来自不同方向的两束光在 50:50 光纤耦合器处发生干涉，最终产生的干涉信号由光电探测器探测。外界振动会引起光纤中传输光相位的变化，顺时针和逆时针传播的两束光的相位差大小与扰动发生的位置、光波相位的变化速率成正比，以此来确定外界扰动的位置。但由于这种结构对缓慢变化的振动不敏感，因此其应用受到了限制。

1.3 基于瑞利散射的分布式光纤振动传感系统

自从低损耗光纤问世后，光纤中的瑞利散射效应就引起了人们的广泛关注，瑞利散射作为传输光散射占比最高的部分，利用其进行振动检测得到了广泛研究。

1.3.1 光时域反射系统

瑞利散射最早应用在基于光时域反射（OTDR）技术的分布式光纤传感领域，该技术能够对沿着光纤链路范围的外界振动信号进行远距离的监测，最早在 1976 年由 Barnoski^[23]提出。如图 1.4 是 OTDR 的系统结构图。

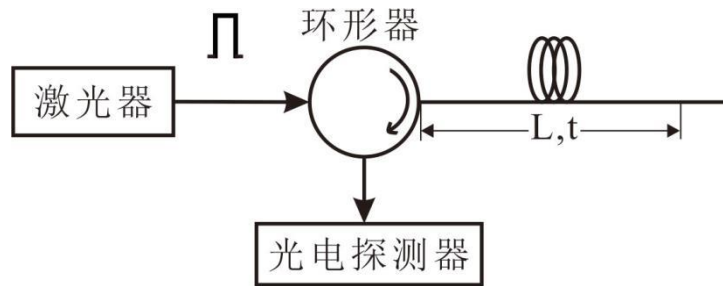


图 1.4 OTDR 的系统结构图

非相干光脉冲由激光器发射后经过环形器进入到传感光纤，由于光纤介质的不均匀性和高功率激光对传输介质的影响，其在传播的过程中会不断地产生背向瑞利散射光，由光电探测器接收通过环形器后携带有外界振动信息的背向瑞利散射光^[24, 25]，最后由数据采集卡进行采集并传输给上位机进行数据处理。光纤上每一点都会返回背向瑞利散射光，因此光纤上每个位置都有自己对应的背向瑞利散射光强，光强信息可以反映出光纤链路的信息分布情况。当光纤链路中某点处存在损耗、衰减、断点或振动时，该点产生的背向瑞利散射光的光强将随之变化，测量同一光缆端部的背向瑞利散射光强度，通过公式(1.1)即可确定上述振动事件位于光纤链路中的位置。

$$L = \frac{vt}{2n} \dots\dots\dots (1.1)$$

其中 L 为某一时刻探测的背向瑞利散射光对应光纤的位置，t 为光脉冲传输到 L 处产生的背向瑞利散射光返回到光纤首端所用的时间，v 为光在真空中的速度，n 为光纤纤芯的折射率。以此来实现光纤的长距离分布式测量。

1.3.2 偏振光时域反射系统

偏振是光波所具有的重要特征之一，利用光的偏振效应也可以实现光纤的传感。基于偏振效应的偏振光时域反射仪(POTDR)最早在 1980 年由 Rogers^[26]提出。其传感原理是，传感光纤的双折射会在感知到外部干扰时发生变化，进而改变光纤中传输光的偏振态，通过探测光波偏振态的变化就可以实现对外界扰动的监测。由于光波前后的偏振态是相关的，当光纤上某一点被外界干扰时，该点及后面所有点光波的偏振态都会受到影响。所以，施加在光纤前面的扰动事件产生的信号通常会覆盖后面的，这种情况将会导致这一系统只能识别和定位系统中最前端位置的扰动。如图 1.5 是 POTDR 的系统结构图。

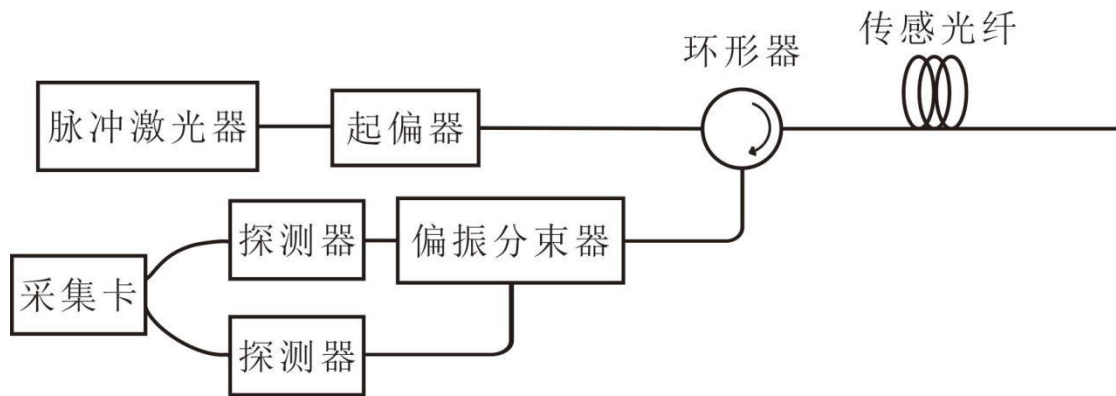


图 1.5 POTDR 的系统结构图

1.3.3 光频域反射系统

OTDR 通常用于远距离的光纤传感，空间分辨率主要由探测光脉冲的脉冲宽度决定，因此在一定程度上受到了限制。然而光频域反射仪（OFDR）可以实现更高的空间分辨率，解决了空间分辨率和测量距离之间的矛盾，同时拥有很高的测量灵敏度^[27]。在 1981 年，Eickhoff^[28]等人提出了基于背向瑞利散射的 OFDR 方法。图 1.6 是 OFDR 的系统结构图。系统由可调谐激光的光源在无调频情况下进行线性扫频，发出的光经过耦合器后分成两个部分，其中一部分作为信号光进入传感光纤用来产生背向瑞利散射光，另一部分作为参考光，背向瑞利散射光与由法拉第旋光镜反射回来的光在耦合器发生干涉，由光电探测器进行转换，数据采集卡对转换后的电信号进行采集，最终对采集到的信号进行傅里叶变换。当光纤感知到外界的振动信号时，产生的拍频信号的频率和传感光纤上振动点的位置成正比，以此来实现光纤传感。

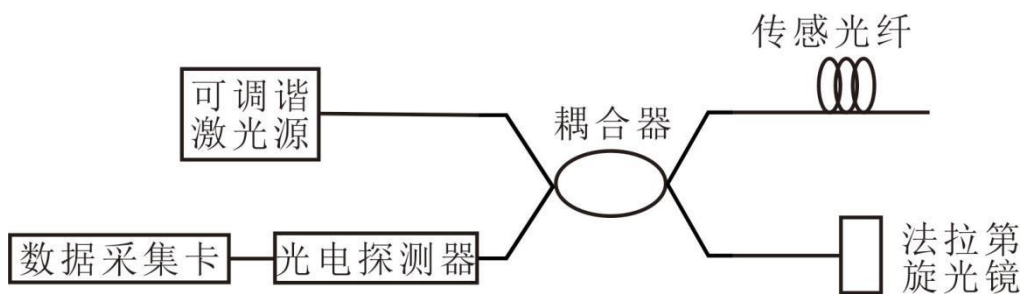


图 1.6 OFDR 的系统结构图

1.3.4 相位敏感光时域反射系统

通过对 OTDR 进行改进，得到了相位敏感光时域反射计（ Φ -OTDR），瑞利散射信号的相位相比于光强和偏振态，对外界振动更加敏感。 Φ -OTDR 通过对窄线宽的脉冲光在传感光纤中产生的背向瑞利散射信号进行解调，从而实现光纤的

分布式振动传感，具有探测灵敏度高、距离远、响应速度快等优点。因此 Φ -OTDR 技术是目前众多传感技术中的一个热门的研究方向，在日常生活中的许多方面都有着广泛的应用。

Φ -OTDR 主要有两种系统结构，一种是在 1993 年由 Taylor 等人提出^[29]直接探测的系统结构，另一种是在 2010 年由 Yuelan Lu 等人^[30]提出的相干探测的系统结构。如图 1.7 是 Φ -OTDR 直接探测的系统结构图，其结构和解调方法都非常简单，但信噪比较低，不适合长距离的振动信号探测。直接探测 Φ -OTDR 系统利用窄线宽激光器发射中心频率稳定的单色光，经过掺铒光纤放大器放大光信号并利用声光调制器得到脉冲光，经由环形器的一个端口传入光纤，返回的背向瑞利散射信号由光电探测器探测，将光信号转换成电信号后由数据采集卡采集后续传输到上位机进行数据处理。

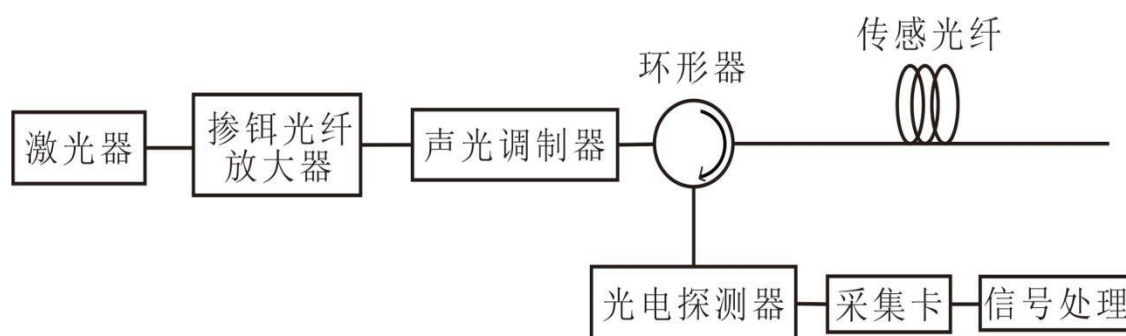


图 1.7 Φ -OTDR 直接探测系统结构图

如图 1.8 是 Φ -OTDR 相干探测的系统结构图。相干探测比直接探测信噪比更高^[31-34]。该系统由窄线宽低频率漂移的激光器发射出具有高相干性的光源，经过耦合器分成信号光和参考光两部分，其中信号光由声光调制器进行调制，得到的脉冲光经环形器传进光纤，之后光纤中的背向瑞利散射光与参考光在另一耦合器进行拍频，后续经过信号的解调得到背向瑞利散射光的强度和相位信息，从而得到振动信号的振动位置和频率信息。由于 Φ -OTDR 具有结构简单，同时能实现多点振动信号的定位，以及适用于长距离的扰动检测的优点，得到了科研人员广泛的关注与研究。

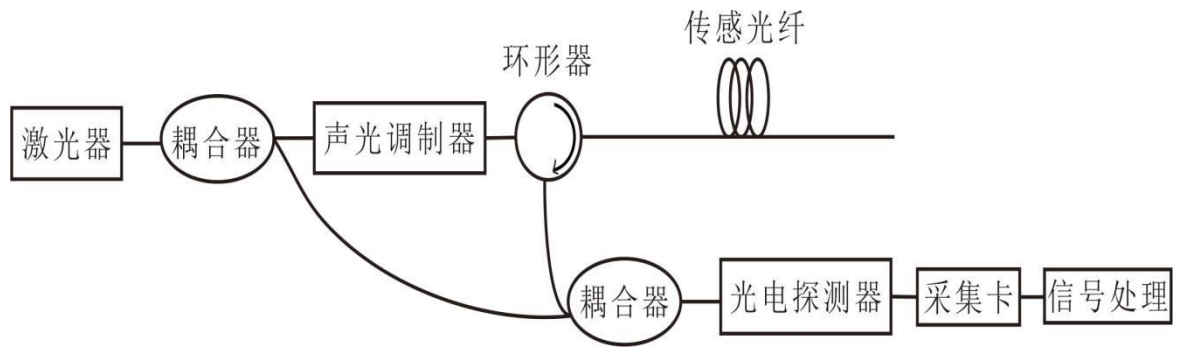


图 1.8 Φ -OTDR 相干探测系统结构图

1.4 Φ -OTDR 的国内外研究现状

1993 年, 美国的 H.F.Taylor 等人^[29]发表了一篇关于 Φ -OTDR 的专利, 他们放弃了使用传统的光源, 而是利用具有高相干性的窄线宽光源, 采用直接探测的系统结构, 实现了对外界振动的高灵敏度测量。

2005 年, J.C.Juarez 等人^[35]基于 Φ -OTDR 技术, 利用窄线宽低频率漂移的激光器作为光源, 用有振动的瑞利曲线叠加后的结果与没有振动的瑞利曲线相减实现对外界振动的探测, 在 14km 的光纤上, 实现了 1000m 的空间分辨率。但是这种定位方法十分简单, 没有对采集到的信号进行去噪处理, 所以定位信噪比不高。

为了提高振动定位的信噪比和系统的频率响应范围。2010 年, 渥太华大学的 Yuelan Lu^[30]等人利用外差探测结合移动平均和移动差分的方法实现了空间分辨率为 5m, 最高响应频率为 1kHz, 信噪比可达 6.5dB 的多点振动检测。

当传统的探测结构不能够实现更远距离的传感时, 合理地运用放大技术来增大背向瑞利散射信号的强度成为了可行的方案。2013 年, A. Masoudi 等人^[36]将掺铒光纤放大技术和相位解调技术应用到 Φ -OTDR 当中, 采用交叉相乘和微分解调的方法克服了信号衰减的问题, 在 1 公里的传感光纤上实现了 500-5000Hz 频段, 空间分辨率为 2m 的振动探测。

由于瑞利散射信号强度会受到受激布里渊散射的影响, 从而会降低分布式光纤声传感系统的探测距离, 为了解决这一问题, 2014 年, Fei Peng 等人^[37]提出了一种超长 Φ -OTDR, 利用拉曼放大技术, 极大的提高了 Φ -OTDR 系统的振动监测范围。在 128 km 的传感光纤上实现了空间分辨率为 15m 的高灵敏度入侵检测。

2015 年, Hugo F. Martins 等人^[38]将超长拉曼光纤激光器腔运用到 Φ -OTDR 当

中,运用受激拉曼放大技术对信号光进行放大,在125公里的传感光纤上实现了频率响应为380Hz,空间分辨率为10m,平均信噪比为8dB的振动探测。

2016年,D. Lida等人^[39]利用 Φ -OTDR中的频率编码脉冲序列实现了高频响应的全分布振动传感。在5km的传感光纤上实现了频率响应为80kHz,空间分辨率为20m的振动探测。

为了提高直接探测结构的分布式光纤声传感系统的频率响应,2017年,Guangyao Yang等人^[40]首次将频分复用(FDM)技术应用到直接探测结构的 Φ -OTDR系统当中,利用频率步进扫频激光光源和双探测脉冲方案在10km的光纤上探测到了40kHz的信号,首次突破了直接探测系统探测距离和响应频率的矛盾,实现了对6kHz振动的探测,信噪比为18dB。

2018年,J. Jason等人^[41]利用具有增加瑞利散射特性的掺氮的单模光纤与普通单模光纤对振动进行定位和频率表征,实验结果表明增加瑞利散射特性的掺氮的单模光纤能检测到普通单模光纤无法检测到的信号水平,而不需要使用去噪方法,振动检测和声学检测信噪比分别提高了7dB和3dB。

为了避免衰落问题,打破 Φ -OTDR在空间分辨率和传感距离之间的矛盾,2019年,Dian Chen等人^[42]采用了啁啾脉冲和非匹配滤波的方法,并采用瑞利干涉图法来定量解调沿整个传感光纤的应变分布,在10公里的传感光纤上实现了频率响应为5kHz,空间分辨率为2m,信噪比为35dB的振动探测。

为了进一步增加分布式光纤声传感系统的响应带宽,2020年,Ji Xiong等人^[43]利用正负频复用和频分复用技术相结合,打破了感知距离和扫描速率之间固有的矛盾,在103km的传感光纤上实现21.6kHz的扫描速率,应变分辨率为97p ϵ /pHz,空间分辨率为9.3m的振动探测。

1.5 研究背景及意义

当今世界经济发展速度迅猛,人们对石油等一系列矿产资源的消耗越来越大,对外依赖加重,能源安全成为了必须重视的问题,因此如何有效地增加资源勘探开发力度,开辟一种新的技术来降低资源的勘探成本至关重要。传统地震检波器具有勘探成本较高、抗干扰能力弱、工程实施方案复杂等缺点,严重限制了勘探开发的进一步发展。因此研究一种新型的地震检波器进行油田勘探开发,对我国能源安全具有重大意义。基于 Φ -OTDR的分布式光纤振动传感系统相比于传统

的地震检波器具有工程部署快捷,可实现全井覆盖,成本较低、抗电磁干扰、耐腐蚀、耐高温等优点,利用光纤作为传感器,可以实现一次性全井段采集^[44,45]。此外,基于 Φ -OTDR 的分布式光纤振动传感系统在石油和天然气管道安全监测、微弱水声信号检测、威胁分类、周界安防、列车实时定位、军事国防等领域也都有着广泛应用。

本文对基于 Φ -OTDR 的分布式光纤振动传感技术进行了研究,对基于 Φ -OTDR 的分布式光纤传感系统进行了搭建,实现对光纤中背向瑞利散射信号的解调,对外界扰动进行定位和波形还原,获得外界扰动的强度和频率信息,为我国石油等矿产资源的勘探开发提供一种可靠的、具有巨大应用潜力的新方法,对我国的资源勘探开发有重大的意义。

1.6 主要研究内容

本文搭建了基于 Φ -OTDR 的分布式光纤传感系统,介绍了数字正交解调算法以及振动定位方法,利用 LabVIEW 编程实现振动信号的定位、反正切的值域扩展以及两次相位解卷绕,从而实现振动信号波形的还原。本论文的主要内容如下:

第 1 章绪论,简要地介绍了光纤传感的发展历史,光纤传感在长距离分布式应变监测方面有着得天独厚的优势,在生活中的方方面面都有广泛的应用;简述了几种分布式光纤振动传感系统;随后介绍了 Φ -OTDR 的国内外研究现状;最后介绍了本文的研究背景及研究意义。

第 2 章介绍了光纤中的瑞利散射机理及其产生的原因;详细分析了光纤振动传感机理,并用公式进行了理论推导;随后介绍了 OTDR 的基本原理,接着在其基础上引出了 Φ -OTDR 的基本原理,通过建立背向瑞利散射光的离散反射镜模型详细的描述了传输光在光纤中的物理过程;最后介绍了 Φ -OTDR 系统的主要性能参数。

第 3 章详细介绍了分布式光纤声传感系统的设计;理论分析了数字正交解调方法,并对其过程进行了公式推导;详细分析了相位提取方法,具体说明了反正切的值域扩展方法和两次相位解卷绕方法;随后介绍了几种常用的扰动信号定位方法,分析了几种方法的优缺点;最后对本实验选用的关键器件的参数进行了介绍。

第 4 章详细介绍了基于 Φ -OTDR 的分布式光纤声传感的实验研究，利用 LabVIEW 进行系统软件部分的编程；基于实验结果展示了值域扩展以及两次相位解卷绕；提出了消除初相干扰降低激光器和声光调制器的相位噪声，为了解决相位错乱现象，利用扰动点附近相邻点相位差曲线峰值后的点进行振动信号波形的还原；实验验证了系统的相位变化与外界扰动幅值之间的线性关系；最后利用 LabVIEW 中的“生产者/消费者”模式，搭建了实时监测光纤振动的上位机界面，实现了对于振动信号的动态定位功能。

第 5 章对本文的主要研究内容以及结果进行了总结，介绍了目前系统仍存在的不足，对后续的工作研究提出了相应的建议。

第 2 章 Φ -OTDR 分布式光纤振动传感系统基本原理

本章主要分析了 Φ -OTDR 系统的基本原理，首先介绍了光纤中瑞利散射产生的机理，随后对光纤振动传感机理进行了阐述，接着介绍了 OTDR 的基本原理，在其基础上，通过建立离散的数学模型对 Φ -OTDR 基本原理进行了详细的分析，最后对 Φ -OTDR 系统的主要参数进行了介绍。

2.1 光纤中的瑞利散射

自从 19 世纪以来人们就开始了对于光的散射研究，入射光与微观粒子不断地撞击就出现了光的散射。当光通过不均匀介质时会向四面八方传播，由于光纤中杂质的存在，光纤是不均匀的，因此会导致在光纤中传输的部分光偏离原来的方向分散传播，发生散射。其中，瑞利散射、拉曼散射和布里渊散射是光纤中最主要的散射形式^[46-48]。

光纤中这三种散射所对应的波长和强度之间的关系如图 2.1 所示^[49-51]。可以看出瑞利散射光的光强在三种散射光中的峰值最高，85% 的传输光散射损耗是由瑞利散射引起的，剩下的 15% 是由拉曼散射和布里渊散射引起的。瑞利散射光的光强比拉曼散射和布里渊散射更高，因此这也是本实验选择对基于瑞利散射的光纤传感系统进行研究的原因之一。

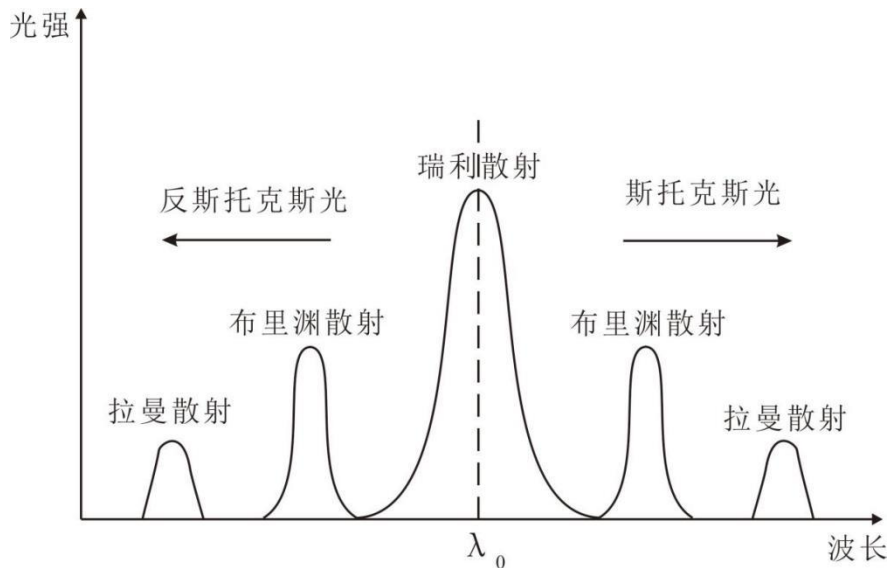


图 2.1 光纤中的散射光谱图

由于热扰动会对光纤的制作过程产生影响，光纤中的原子被压缩的情况各不相同，从而使光纤的折射率分布不均^[52]。同时，光纤的折射率分布不均还受

到光纤中化学物质浓度不均的影响。正是由于种种因素使得光纤折射率分布不均匀，从而导致了光纤中瑞利散射效应的发生。根据在散射过程中光子能量的变化情况又分为弹性散射和非弹性散射，其中光子的能量没有交换的称之为弹性散射，例如瑞利散射^[53]，而光子的能量发生变化的称之为非弹性散射，例如布里渊散射和拉曼散射。瑞利散射过程中没有能量交换，光子只改变运动方向，波长不变，是生活中十分常见的一种光学现象，又称“分子散射”。光纤中瑞利散射光的示意图如 2.2 所示。

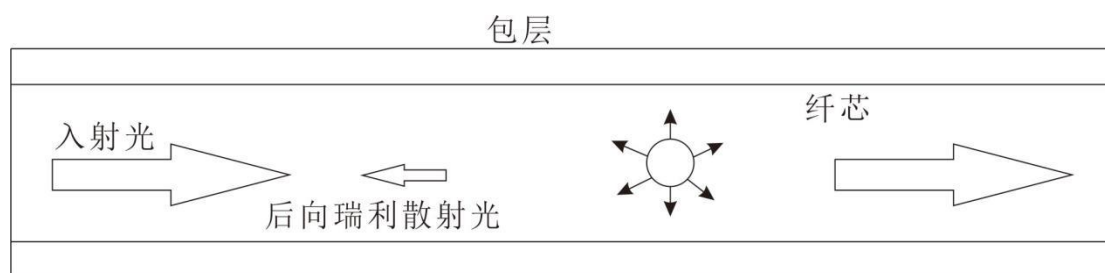


图 2.2 瑞利散射光示意图

瑞利散射光与入射光波长相同^[54]。当入射光波长远大于瑞利散射的粒子尺度时，散射光的波长不会随着散射效应的发生而出现相应的变化，不同强度的散射光分布在光纤的各个方向上，该强度 I 同入射光的波长 λ 具有如下关系式，即：

$$I = \frac{K}{\lambda^4} \dots\dots\dots (2.1)$$

瑞利散射光的光强还与散射角度有关，可以表示为：

$$I(\theta) = I_0(1 + \cos^2\theta) \dots\dots\dots (2.2)$$

其中， θ 是入射光与不同方向散射光之间的夹角， I_0 是 $\theta=\pi/2$ 时的光强大小。

2.2 光纤振动传感机理分析

光纤受到外界振动作用时，位于振动区域处光纤的长度、纤芯折射率 n 以及直径均会受到影响，从而会改变光纤中传输光的相位，外界振动信息可以通过对采集到的相位信息进行解调来获取。假设初始相位为零的光波在长度为 L 的光纤上进行传输后的相位变为：

$$\Phi = \frac{2\pi L}{\lambda} = \beta L \dots\dots\dots (2.3)$$

其中 $\lambda=\lambda_0/n$ 为光波长， β 为光纤中光的传播常数^[55]。

当光纤感知到外界振动时，其中相位的变化可以通过以下公式表示为^[56]：

$$\Delta\Phi = \beta\Delta L + \Delta\beta L = \beta L \left(\frac{\Delta L}{L}\right) + \left(\frac{\partial\beta}{\partial n}\right)\Delta n + \left(\frac{\partial\beta}{\partial a}\right)\Delta a \dots\dots\dots (2.4)$$

其中 a 为光纤的纤芯直径。式中的三项分别为光纤的长度、折射率和纤芯直径变化引起的相位变化，其中光纤纤芯直径引起的相位变化量相比于前两项小得多，一般情况下可以忽略不计^[57, 58]。

2.2.1 光纤应变效应

作用在传感光纤上的外界扰动会使光纤受到机械应力的影响，其产生的轴向作用力会使光纤的长度发生变化，进而导致光纤中传输光的相位发生变化，传感光纤中传输光的相位变化量与光纤的长度变化成正比，其表达式为：

$$\Delta\Phi_1 = \beta L \frac{\Delta L}{L} \dots\dots\dots (2.5)$$

2.2.2 光纤弹光效应

外界振动引起的机械应力作用到传感光纤上，会使光纤的纤芯折射率受到影响，在此情况下光纤中传输光的相位会随之发生变化，根据弹性力学原理，光纤折射率的变化 $\Delta B_i = \Delta \left(\frac{1}{n_i}\right)^2$ 与对应的应变 ε_i 之间的关系表达式为：

$$\begin{bmatrix} \Delta B_1 \\ \Delta B_2 \\ \Delta B_3 \\ \Delta B_4 \\ \Delta B_5 \\ \Delta B_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{12} & 0 & 0 & 0 \\ P_{12} & P_{11} & P_{12} & 0 & 0 & 0 \\ P_{12} & P_{12} & P_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.6)$$

其中， P_{11} 、 P_{22} 和 P_{44} 为光纤的弹光系数， ε_1 和 ε_2 两者相等，为光纤的横向应变， ε_3 为光纤的纵向应变，这些参数有如下关系表达式：

$$P_{44} = 1/2(P_{11} - P_{12}) \dots\dots\dots (2.7)$$

$$\Delta B_1 = -\frac{2}{n_1^3} \Delta n_1 \dots\dots\dots (2.8)$$

$$\Delta B_2 = -\frac{2}{n_2^3} \Delta n_2 \dots\dots\dots (2.9)$$

$$\Delta B_3 = -\frac{2}{n_3^3} \Delta n_3 \dots\dots\dots (2.10)$$

$$\Delta B_4 = \Delta B_5 = \Delta B_6 = 0 \dots\dots\dots (2.11)$$

假设 $n_1=n_2=n_3=n$ ，由以上公式可得折射率的变化可以表示为：

$$\Delta n_1 = -\frac{1}{2}n^3[(P_{11} + P_{12})\varepsilon_1 + P_{12}\varepsilon_3] \dots\dots\dots (2.12)$$

$$\Delta n_2 = -\frac{1}{2}n^3[(P_{11} + P_{12})\varepsilon_1 + P_{12}\varepsilon_3] \dots\dots\dots (2.13)$$

$$\Delta n_3 = -\frac{1}{2}n^3(2P_{12}\varepsilon_1 + P_{11}\varepsilon_3) \dots\dots\dots (2.14)$$

传感光纤为单模光纤，光纤中的传输光传播过程中，只有横向偏振态是有效的，因此只有横向折射率发生改变才会使光纤中传输光的相位发生变化，则外界扰动引起的相位变化可以表示为：

$$\Delta\Phi_2 = \frac{2\pi}{\lambda_0}\Delta nL = \frac{2\pi}{\lambda_0}\left\{-\frac{1}{2}n^3[(P_{11} + P_{12})\varepsilon_1 + P_{12}\varepsilon_3]\right\}L \dots\dots\dots (2.15)$$

则当光纤感知到外界振动时，由应变效应和光弹效应一起造成的光波的相位变化可以表示为：

$$\Delta\Phi = \Delta\Phi_1 + \Delta\Phi_2 = \beta L \frac{\Delta L}{L} + \frac{2\pi}{\lambda_0}\left\{-\frac{1}{2}n^3[(P_{11} + P_{12})\varepsilon_1 + P_{12}\varepsilon_3]\right\}L \dots\dots (2.16)$$

2.2.3 光纤泊松效应

外界振动引起的机械应力作用到传感光纤上，会使光纤的纤芯直径受到影响，在此情况下，光纤中光的相位会随之发生改变，传感光纤中传输光的相位变化量与光纤的纤芯径向变化量成正比。由弹性力学可知，泊松比是反应材料横向变形的常数，可以表示为^[59]：

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta d}{d} \dots\dots\dots (2.17)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\Delta l}{l} \dots\dots\dots (2.18)$$

$$\mu = \left|\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_3}\right| \dots\dots\dots (2.19)$$

其中， ε_1 为横向应变， ε_3 为纵向应变， μ 为泊松比。

横向应变增量与反向应变增量之间成反向关系，可以表示为：

$$\varepsilon_1 = -\mu\varepsilon_3 \dots\dots\dots (2.20)$$

泊松效应引起的传感光纤中传输光波的相位变化可以表示为：

$$\Delta\Phi_d = \frac{\pi L}{2\lambda^2} \left(\frac{\lambda}{d}\right)^3 \left(\frac{4d^2}{4d^2 - \lambda^2}\right)^{\frac{1}{2}} \Delta d \dots\dots\dots (2.21)$$

其中， λ 为光波长， d 、 L 、 Δd 分别为光纤的直径、长度和直径的径向变化量。

2.3 Φ -OTDR 系统的基本原理

2.3.1 OTDR 原理

光时域反射（OTDR）技术是 Φ -OTDR 的基础，早在 20 世纪 70 年代就已经发明了 OTDR 技术，利用该技术可以实现对于光纤链路上衰减、缺陷以及失效等事件的测量^[60]。该技术最初只适用于多模光纤，后续随着研究的深入，该技术

同样可以适用于单模光纤。利用激光器向传感光纤中发射脉冲光，其在传输的过程中会不断地生成背向瑞利散射信号，利用光电探测器在脉冲光输入端接收背向瑞利散射信号，将光信号转换成电信号，最后通过信号解调方法可以得到光纤上每一点的信息。

假设 P_0 为系统输入脉冲的光功率，光脉冲输入端的背向瑞利散射的功率为 P_S ，可以将其表示为：

$$P_S = \frac{v_g}{2} P_0 S \alpha_s W \dots\dots\dots (2.22)$$

其中 v_g 为传输光的群速度，公式中加入了 1/2 项来处理系统中的耦合器引入的损耗， S 为光的背向散射捕获率， α_s 为光纤衰减系数中的散射分量， W 为系统中输入脉冲光的脉冲宽度。

其中光波的背向散射捕获率 S 可以表示如下：

$$S = 0.25(NA/n_0)^2 \dots\dots\dots (2.23)$$

其中 NA 为光纤的数值孔径，其值越大，光纤对于光的接收效果越好， n_0 为光纤纤芯的折射率。

脉冲光在光纤中传播会有一定程度的衰减，其衰减系数为 α ，则在光纤上位置 L 处脉冲光经过衰减后得到的峰值功率可以表示为：

$$P_L = P_0 e^{-\alpha L} \dots\dots\dots (2.24)$$

位于光纤 L 处的背向散射功率可根据其与前向传输的功率关系表示为：

$$P_R(L) = \frac{v_g}{2} P_0 e^{-\alpha L} S \alpha_s W \dots\dots\dots (2.25)$$

当 L 位置处的背向瑞利散射光进入到光电探测器后，探测到的光功率为：

$$P_R(L) = \frac{v_g}{2} P_0 e^{-2\alpha L} S \alpha_s W \dots\dots\dots (2.26)$$

由以上的公式可以得知，系统探测到的背向瑞利散射曲线具有不断下降的趋势，正是光在光纤中传输会有损耗的体现。当光纤链路中某处存在损耗、衰减、断点或振动时，前向传输衰减系数迅速变大，进而导致背向瑞利散射曲线在前述的事件点的位置出现非常明显的跌落。利用第一章的公式 (1.1) 即可确定上述事件在光纤链路中的位置。

2.3.2 Φ -OTDR 原理

OTDR 系统直接应用于光纤传感领域灵敏度比较低，经过研究人员多年的研

究，各种基于 OTDR 原理衍生出来的分布式光纤传感技术也相继出现。其中 Φ -OTDR 系统在 OTDR 的基础上进行改进，对外界扰动事件的探测具有更高的灵敏度，其采用能产生相干性非常高的、线宽窄、频率漂移低的激光器作为光源，探测传感光纤中光脉冲范围内产生的背向瑞利散射光的相干叠加，能够实现对于更微弱扰动信号的检测，从而使系统具有更高的探测灵敏度。当光纤感知到外界扰动时，振动点处的携带有振动信息的背向瑞利散射光的相位会产生变化。相位的变化最终会导致背向瑞利散射光的光强发生变化，根据光强的变化情况，结合扰动定位算法可以实现对于扰动信号的定位，利用相位解调算法可以实现对于振动信号波形的还原。

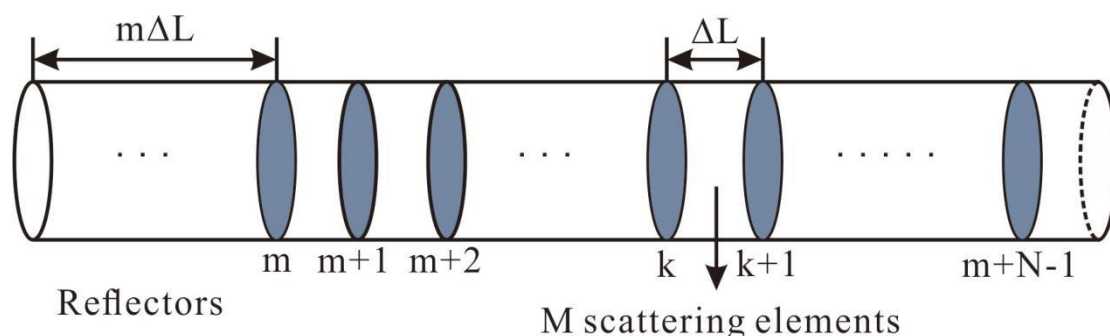


图 2.3 离散反射镜模型

为了能够更直观的了解 Φ -OTDR 系统的工作原理，建立了背向瑞利散射光的数学模型来描述光纤中的物理过程，如图 2.3 所示。假设将长度为 L 的光纤以每段为 $\Delta L = L/N$ 的距离平均分成 N 小段，并且每一小段都由 M 个反射镜组成，其中 ΔL 的长度等于光脉冲的宽度。传感光纤中光脉冲产生背向瑞利散射光的过程可以看作由 N 个离散的反射镜组成，脉冲光到达每个反射镜都会返回一部分反射光，一共经过 N 个反射镜反射，每段反射镜反射回来的背向瑞利散射光幅度和相位都是不确定的，但它们都有相同的偏振态，这些反射镜中的每一个都可以认为是每个小间隔 ΔL 中的随机散射的矢量叠加^[61]。第 k 段内背向瑞利散射体的场矢量和可表示为：

$$r_k \exp(j\Phi_k) = \sum_{i=1}^M a_i \exp(j\Omega_i) \dots \dots \dots (2.27)$$

其中， r_k 和 Φ_k 分别为在光脉冲宽度内第 k 段光纤上散射体的幅值和相位和， a_i 和 Ω_i 分别为每一小段 ΔL 范围内第 i 个背向瑞利散射体的幅值和相位值。假设 r_k 、 Φ_k 、 a_i 以及 Ω_i 都是随机变量，为了使后续的研究更简单，假设 a_i 和 Ω_i 相互独立，并且 Ω_i 在 $(-\pi, \pi)$ 区间内是均匀分布的。背向瑞利散射光的幅度和相位的概率

密度函数可以分别表示为:

$$P(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp(-r^2/2\sigma^2) \quad r > 0 \dots\dots\dots (2.28)$$

$$P(\Phi) = \frac{1}{2\pi} \quad -\pi < \Phi < \pi \dots\dots\dots (2.29)$$

上式中 σ^2 是概率最大的反射率, r 属于正态分布, Φ 属于均匀分布。在光纤 $m\Delta L$ 处的背向瑞利散射光相干叠加后的结果可表示为:

$$E_b(m\Delta L) = E_0 \sum_{k=m}^{m+N+1} P_k r_k \exp j(\theta_k + \Phi_k) \exp(-\alpha k \Delta L) \dots\dots\dots (2.30)$$

其中, E_0 为入射光脉冲的初始光强, P_k 、 r_k 、 Φ_k 分别为第 k 个背向瑞利散射体的偏振态、反射率和初始相位, 全部都服从随机分布, θ_k 为外界扰动所引起的第 k 个背向散射体的相位变化。通过分析上述探测到的背向瑞利散射相干叠加的光强变化, 就能够实现对于外界扰动引起传感光纤变化的探测。

2.4 Φ -OTDR 系统的主要参数

2.4.1 空间分辨率

空间分辨率是判断 Φ -OTDR 系统对于入侵检测能力的一个十分重要的性能指标^[62], 反映了分布式光纤传感系统对于扰动事件的定位精度。它指的是系统可以区分光纤上相邻两个扰动事件的最短距离, 一般用外界扰动引起散射功率的 10%~90% 变化曲线所对应的传感光纤的长度来表示。理论上, 系统的空间分辨率主要受光脉冲信号宽度的影响, 理想情况下的空间分辨率 ΔZ 可以表示为^[63]:

$$\Delta Z = cT_p/2n_g \dots\dots\dots (2.31)$$

其中 c 为光在真空中的传播速度, T_p 为光脉冲信号的脉冲宽度, n_g 为光纤纤芯的折射率, 通常取 1.5。假设系统采用的光脉冲信号的脉冲宽度为 100ns, 则理论上系统能够实现 10m 的空间分辨率。系统的空间分辨率有许多影响因素, 其中包括采集卡的采样率、光电探测器的频率响应范围和响应速度。因此, 为了使系统的空间分辨率足够大, 在降低光脉冲宽度的同时, 还需要采用频率响应范围大、响应速度尽量快的光电探测器和采样率高的采集卡。

2.4.2 灵敏度

灵敏度是衡量系统对于微弱的扰动事件检测能力的核心指标, 系统的灵敏度越高说明系统的性能越好。系统的灵敏度与激光器光源的线宽成反比, Φ -OTDR 利用窄线宽激光器, 光源能发出线宽非常窄的光, 因此 Φ -OTDR 系统相比于传

统的 OTDR 系统有更高的探测灵敏度。

2.4.3 频率响应范围

Φ -OTDR 系统不仅需要得到扰动信号的位置信息,得到扰动信号的频率信息同样重要。 Φ -OTDR 系统为了避免不同光脉冲所产生的背向瑞利散射信号之间发生干涉从而影响后续的探测,在一个探测周期内只允许传感光纤中有一个光脉冲,只有当这个光脉冲在光纤尾端产生的背向瑞利散射信号被光电探测器接收后,才允许向光纤中发射下一个光脉冲信号。

一个光脉冲在长度为 L 的传感光纤中传输,一直到光纤尾端产生的背向瑞利散射信号被光电探测器接收,所用的时间为 $t_p = 2L/v_g$, 其中 v_g 为光在光纤中的传播速度。两个脉冲之间的发射间隔应该大于等于 t_p , 光脉冲的最大重复频率为 $f_p = 1/t_p = v_g/2L$, 系统的最大频率响应为 $f_{max} = f_p/2$ 。可以得出系统的频率响应范围受到光纤长度的制约,在长距离探测中,随着传输距离的增加,探测到的背向瑞利散射光的信号强度也会随之减弱,同时由于激光器的频率漂移、偏振衰落以及光电探测器的电磁噪声的影响,导致背向瑞利散射信号随机波动。为了减小随机噪声对探测的影响,一般采用对信号进行相加取平均值的方法来进行简单的去噪处理,但是这样会使系统的频率响应范围变小。假设对采集到的瑞利散射信号进行 N 次平均处理,则系统的频率响应范围会降为 f_{max}/N 。因此,系统的频率响应范围主要由光纤长度和信号处理方法决定。

2.4.4 动态范围

动态范围表示的是初始背向瑞利散射光功率与噪声功率的差值^[64]。系统的最大可测量距离与动态范围密切相关,两者成正比例关系,动态范围越大,系统所能探测到的距离越长。动态范围在理想状态下的公式如下:

$$R = \frac{1}{2} \times 10 \lg \left[\frac{P_s(0)}{P_n} \right] = 5 \lg \left[\frac{P_0 \tau \eta}{P_n} \right] \dots \dots \dots (2.32)$$

其中 P_0 为入纤光功率, P_n 为接收灵敏度, τ 为光脉冲宽度, η 为后向散射因子,这里只计算单程的动态范围,所以公式中引入了 $1/2$ 。为了便于对光电探测器探测后的电信号进行处理,实际动态范围的计算公式为:

$$R = \frac{1}{2} [P_0 - P_D - (L + C) + SNR] \dots \dots \dots (2.33)$$

其中 P_D 为光电探测器能够检测到的最小光功率; L 是光纤中传输光所引起的损

耗； C 为光环形器和光接收部分的损耗； SNR 为数据采集卡采集到的电信号经过算法处理后得到的更好的信噪比。

从上面的公式可以看出，提高系统动态范围主要有三种途径：

1) 提高系统的入纤光功率。入纤光功率与探测脉冲的宽度和峰值功率有关。入纤光功率会随着系统注入脉冲宽度的变大而变大，但脉冲宽度的变大会使系统的空间分辨率下降，因此需要根据需求选择合适的探测脉冲宽度；其次可以提高探测脉冲的峰值功率，但探测脉冲的峰值功率并不能一味的变大，过大的峰值功率会导致探测到的信号不准确，合理的峰值功率才能提升系统的性能，因此需要针对具体情况的不同选择相应大小的峰值功率。

2) 提高光电探测器的探测灵敏度。光电探测器越灵敏，系统对微弱信号的检测水平就越高，对提高系统动态范围有很大改善。

3) 提高系统的信噪比。系统探测信噪比会受到诸多因素的影响，例如激光器的频率漂移、外界噪声的干扰以及电学器件的电噪声等带来的测量误差；另外在数据处理阶段采取有效的信号处理技术也能够使系统的信噪比有一定的提升。

2.5 本章小结

本章详细介绍了光的散射及其分类，重点分析了瑞利散射光的特性；对光纤振动传感机理进行了分析，包括光纤的应变效应、弹光效应以及泊松效应对光纤中传输光的影响。随后在分析 OTDR 原理的基础上，通过建立光纤的离散反射镜模型阐述了 Φ -OTDR 系统的工作原理。最后详细介绍了 Φ -OTDR 系统的主要参数以及如何提高 Φ -OTDR 的系统性能，为后续的系统设计以及传感实验提供了理论支持。

第 3 章 分布式光纤振动传感的系统设计

第二章对基于 Φ -OTDR 系统的理论基础进行了分析，其在 OTDR 的基础上进行改造，利用超窄线宽的激光光源进行振动探测，可以实现对于长距离微弱信号的测量，能够得到振动的幅值和相位信息。

将数字正交解调和相位提取方法应用在基于 Φ -OTDR 相干探测结构的系统中，能实现对于振动信号幅值和相位信息的获取，使系统结构更加简单，降低了系统的硬件成本。本章搭建了基于 Φ -OTDR 相干探测结构的系统，介绍了其硬件选型，对数字正交解调方法和相位提取方法进行分析和研究。利用反正切方法实现相位解调，对反正切的值域扩展以及对后续的两次相位解卷绕进行研究。

3.1 系统的总体结构

典型的 Φ -OTDR 主要有两种系统结构，一种是直接探测的系统结构，另一种是相干探测的系统结构。直接探测的系统结构更加简单，直接利用背向瑞利散射光的强度变化来实现振动的定位，这种结构虽然能够检测到振动的发生以及振动的位置，但由于接收到的光信号频率极高，不能实现对于相位信息的提取。而相干探测的系统结构利用光纤中返回的信号光与本振光进行干涉叠加产生的拍频信号进行探测，并通过后续的一系列解调算法能得到携带有振动信号的背向瑞利散射光的幅值和相位信息，从而实现振动信号的定位和波形的还原，具有更大的动态检测范围和更高的信噪比。

基于前面所述的理论基础，搭建了如图 3.1 所示的基于 Φ -OTDR 的分布式光纤振动传感系统，该系统采用外差式的相干探测方案，可以将待测信号调制到高频载波上，远离低频噪声带来的干扰，同时还可以将振动信号引起的光相位变化带到差频信号中，极大地提高了系统的工作频带和动态范围。系统采用低频率漂移、窄线宽的激光光源 (Laser)，发射出的光经过隔离器 (Isolator) 后被光纤耦合器 OC1 分成两部分，其中 99% 的一路作为信号光，1% 的一路作为本振光。信号光经过声光调制器 (AOM)，在驱动器 (Driver) 的驱动下，将激光器发射的连续光调制成带有 Δf 频移的脉冲光。随后用掺铒光纤放大器 (EDFA) 进行光信号的放大，但 EDFA 放大信号的同时会产生自发辐射噪声，因此需要在放大光信号后使其通过一个四端口的环形器 (Cir.) 进入光纤布拉格光栅 (FBG) 进行滤波，去除自发辐射噪声后再通过环形器的另一个端口进入传感光纤，用任意波形

发生器 (AWG) 输出信号来控制压电陶瓷 (PZT) 振动, 从而模拟外界振动事件, 随后光纤中返回的携带有振动信息的背向瑞利散射光与本振光在光纤耦合器 OC2 发生干涉, 由微弱光相干接收模块 (CRM) 接收, 将光信号放大后转换成电信号, 随后由数据采集卡 (DAQ) 对电信号进行采集, 最后由上位机进行接收和处理。

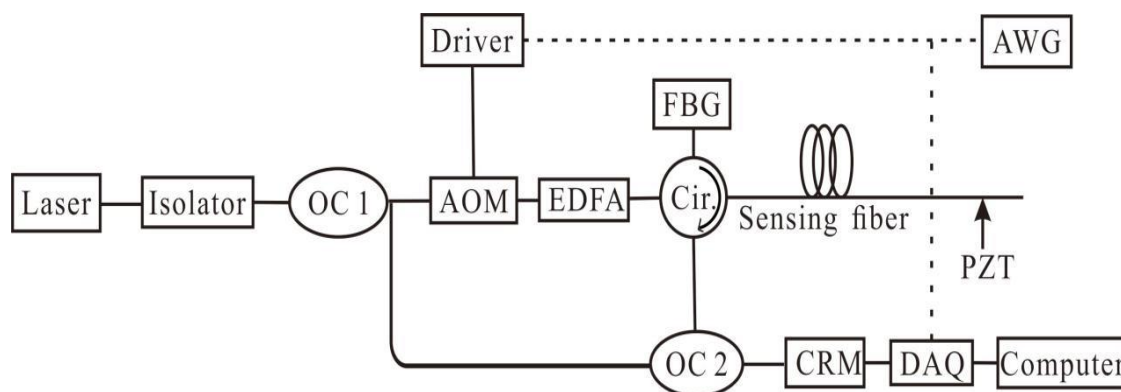


图 3.1 基于 Φ -OTDR 分布式光纤振动传感系统结构图

上述系统中的信号光与本振光的光场强度分别可以表示为:

$$E_s(t) = A_s \cos(\omega_s t + \varphi(t)) \dots\dots\dots (3.1)$$

$$E_o(t) = A_o \cos(\omega_o t + \varphi_o) \dots\dots\dots (3.2)$$

式中 A_s 和 A_o 分别是信号光和本振光光场的幅值, $\varphi(t)$ 和 φ_o 分别为信号光的相位和本振光的初始相位。

信号光与本振光在 OC2 发生干涉, 经过 CRM 接收后得到的拍频信号形成的光场可以表示为:

$$\begin{aligned} I(t) &= [E_s(t) + E_o(t)]^2 \\ &= [A_s \cos(\omega_s t + \varphi(t)) + A_o \cos(\omega_o t + \varphi_o)]^2 \\ &= A_s^2 \cos^2(\omega_s t + \varphi(t)) + A_o^2 \cos^2(\omega_o t + \varphi_o) \dots\dots\dots (3.3) \\ &\quad + 2A_s A_o \cos(\omega_s t + \varphi(t)) \cos(\omega_o t + \varphi_o) \end{aligned}$$

将上述公式进行三角函数变换后可得:

$$\begin{aligned} I(t) &= \frac{A_s^2}{2} + \frac{A_o^2}{2} + \\ &\quad \frac{1}{2[A_s^2 \cos^2(2\omega_s t + 2\varphi(t)) + A_o^2 \cos^2(2\omega_o t + 2\varphi_o)]} + \dots\dots\dots (3.4) \\ &\quad A_s A_o \cos[(\omega_s + \omega_o)t + \varphi(t) + \varphi_o] + \end{aligned}$$

$$A_s A_0 \cos[(\omega_s - \omega_o)t + \varphi(t) - \varphi_o]$$

系统中的 CRM 会滤除上式中作为光强直流分量的前两项，而第三项和第四项的频率在光频量级（ 10^{14}Hz ），系统的 CRM 的最高频率响应为 10^8Hz ，因此第三项和第四项并不会被检测出来，第五项为和频项，可以通过后续上位机的带通滤波器进行滤除，第六项为差频项，即我们所需要的携带外界振动信息的拍频项，最后经过 CRM 进行探测后，输出功率可以表示为：

$$P_{CRM} \propto A_s A_0 \cos[(\omega_s - \omega_o)t + \varphi(t) - \varphi_o] \dots\dots\dots (3.5)$$

由 CRM 模块输出的电信号经过采集卡的采集，可以将其表示为：

$$S(n) \propto A_s A_0 \cos[\Delta\omega_n n + \varphi_s(n)] \quad n = 1, 2, 3 \dots N \dots\dots\dots (3.6)$$

其中 $\Delta\omega_n = 2\pi\Delta f/f_s$ ， f_s 为采集卡的采样率， $\varphi_s(n) = \varphi(n) - \varphi_o$ 为外界扰动信号的相位， n 为采样点的序号， N 为总的采样点数，由数据采集卡将采集的数字信号传递给计算机进行后续的振动信号定位和波形还原。如图 3.2 为系统所采集到的一组背向瑞利散射信号。

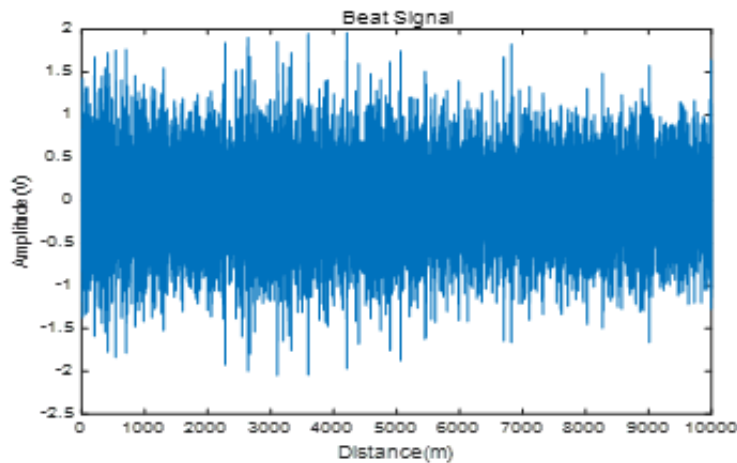


图 3.2 一组背向瑞利散射信号

3.2 数字正交解调方法

数字正交解调算法^[65-67]是将采集到的数字信号 $s(n)$ 分别与计算机产生的同频的一对正交信号 $\cos(\Delta\omega_n n)$ 和 $\sin(\Delta\omega_n n)$ 交叉相乘，再通过低通滤波器滤除和频信号，最终得到一对正交的差频信号 I 和 Q^[68]。数字正交解调流程图如图 3.3 所示。

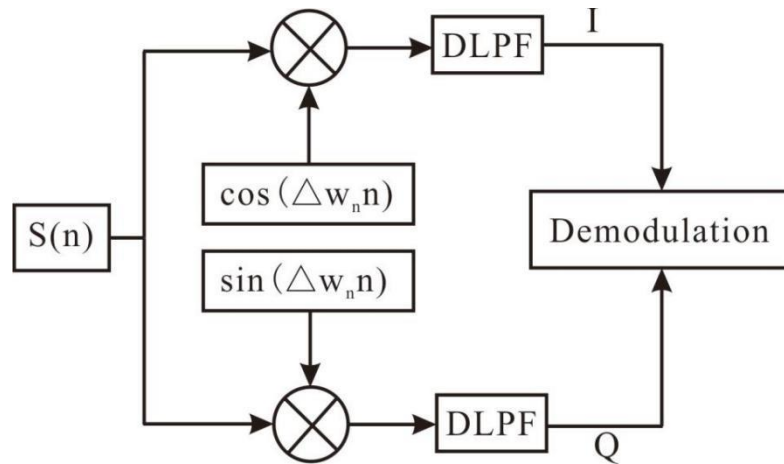


图 3.3 数字正交解调流程图

经过以上运算得到的正交的 I 和 Q 信号可以表示为：

$$Y_I = S(n) \times \cos(\Delta\omega_n n) = \frac{1}{2} E_S(n) E_O(n) \left(\cos(2\Delta\omega_n n + \varphi_s(n)) + \cos\varphi_s(n) \right) \quad (3.7)$$

$$Y_Q = S(n) \times \sin(\Delta\omega_n n) = \frac{1}{2} E_S(n) E_O(n) \left(\sin(2\Delta\omega_n n + \varphi_s(n)) - \sin\varphi_s(n) \right) \quad (3.8)$$

从上式可以看出，I、Q 信号中的和频项 $\cos(2\Delta\omega_n n + \varphi_s(n))$ 和 $\sin(2\Delta\omega_n n + \varphi_s(n))$ 中的频率为 AOM 移频的二倍，通过低通滤波器滤除二倍频即可得到含有外界扰动信息的 $\cos\varphi_s(n)$ 和 $\sin\varphi_s(n)$ 。I 和 Q 与 $\cos\varphi_s(n)$ 和 $\sin\varphi_s(n)$ 有如下关系：

$$I \propto E_S(n) E_O(n) \cos\varphi_s(n) \dots\dots\dots (3.9)$$

$$Q \propto E_S(n) E_O(n) \sin\varphi_s(n) \dots\dots\dots (3.10)$$

进而可以得到 S(n) 的振幅信息，可以表示为：

$$E_S(n) E_O(n) \propto \sqrt{I^2 + Q^2} \dots\dots\dots (3.11)$$

3.3 相位提取方法

获取了如公式(3.9)和(3.10)的一对正交信号之后，还需要利用正交信号解调方法从公式中提取出待测外界扰动信号 $\varphi_s(n)$ 。下面介绍两种常用的正交信号解调算法。

3.3.1 微分-交叉相乘算法

微分-交叉相乘算法广泛的应用在模拟正交解调系统当中，通过将正交信号 V_I 和 V_Q 分别进行求微分操作，将微分后的结果与 V_I 和 V_Q 进行交叉相乘的操作，然后将相乘结果相减后求积分即可得到待测的外界扰动的相位信息 $\varphi_s(t)$ 。如图 3.4 是微分-交叉相乘算法的流程图：

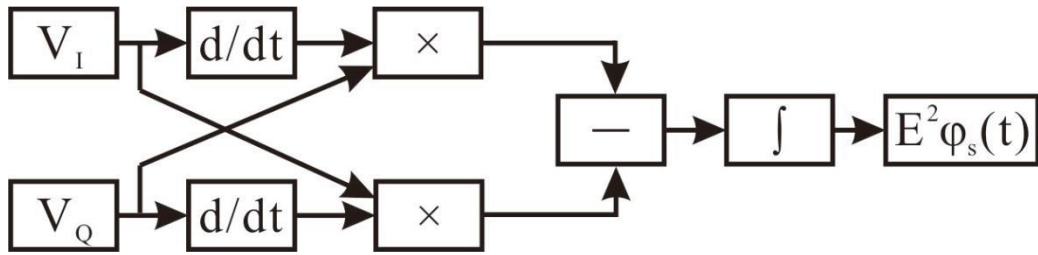


图 3.4 微分-交叉相乘算法的流程图

正交解调后生成的一对正交信号可以表示为：

$$V_I = E \cos[\varphi_s(t)] \dots\dots\dots (3.12)$$

$$V_Q = -E \sin[\varphi_s(t)] \dots\dots\dots (3.13)$$

图 3.4 的过程可以表示为：

对上述两式进行求微分操作，得到：

$$\frac{d}{dt} V_I = -E \sin[\varphi_s(t)] \frac{d[\varphi_s(t)]}{dt} \dots\dots\dots (3.14)$$

$$\frac{d}{dt} V_Q = -E \cos[\varphi_s(t)] \frac{d[\varphi_s(t)]}{dt} \dots\dots\dots (3.15)$$

随后将微分后的结果与微分前的结果交叉相乘，得到：

$$V_Q \frac{d}{dt} V_I = E^2 \sin^2[\varphi_s(t)] \frac{d[\varphi_s(t)]}{dt} \dots\dots\dots (3.16)$$

$$V_I \frac{d}{dt} V_Q = -E^2 \cos^2[\varphi_s(t)] \frac{d[\varphi_s(t)]}{dt} \dots\dots\dots (3.17)$$

随后利用公式 (3.16) 减去公式 (3.17)，得到：

$$V_Q \frac{d}{dt} V_I - V_I \frac{d}{dt} V_Q = E^2 \frac{d[\varphi_s(t)]}{dt} \dots\dots\dots (3.18)$$

随后对公式 (3.18) 进行求积分操作，得到：

$$\int E^2 \frac{d[\varphi_s(t)]}{dt} = E^2 \varphi_s(t) \dots\dots\dots (3.19)$$

公式 (3.19) 中的系数 E^2 可以通过对公式 (3.12) 和公式 (3.13) 进行平方相加开根号运算获得，之后去掉该系数就能得到待测的外界扰动信息 $\varphi_s(t)$ 。

微分-交叉相乘算法中微分器和积分器的选择非常重要^[69]，微分器和积分器是数字解调系统中数字滤波器的特殊形式。滤波器滤波后得到的结果会随着其阶数的增大而变好，也即阶数越大，微分和积分得到的结果精度越高，但是增大阶数会增大系统的运算量，从而降低系统的运算速度，因此在实际的数字解调系统当中，通常采用低阶近似的方法来实现数值的微分和积分运算，即通过牺牲系统的运算精度来提高系统的运算速度。

3.3.2 反正切算法

除了上述的微分-交叉相乘算法，还可以利用反正切算法实现对振动信号的相位解调。反正切算法在得到高的运算精度的同时还能降低系统的运算量，因此本实验最终选用反正切算法实现振动信号相位的解调，下面是对反正切算法详细的介绍。

通过对公式（3.9）和公式（3.10）进行反正切处理，可得到如下公式：

$$\varphi_s(n) = -\arctan\left(\frac{Q}{I} + 2k\pi\right) \dots\dots\dots (3.20)$$

其中 k 为整数。外界振动作用在光纤上将引起背瑞利散射光在扰动位置处的相位变化，进而引起背向瑞利散射光的幅值在扰动位置处的变化，利用幅值信息结合扰动定位算法即可得到扰动的位置，同时利用相位提取算法得到的相位信息可以实现对于扰动强度和频率的获取。



图 3.5 相位提取方法流程图

利用反正切方法实现相位提取的流程图如图 3.5 所示。其中反正切函数的值域限定在 $(-\pi/2, \pi/2)$ 之间，而实际外界扰动的振幅可能超过这个区间，这时反正切之后得到的结果将是错误的。因此如果想得到正确的振动信号的相位信息，首先需要对反正切的结果进行值域扩展，将 $\varphi_s(n)$ 的值域扩展到 $(-\pi, \pi)$ 区间，可以根据 I 和 Q 的符号对反正切得到的结果进行相应的操作，如表 3.1 所示。

表 3.1 反正切值域扩展

I	Q	$\varphi_s(n)$
+	-	$\arctan(-Q/I)$
+	+	$\arctan(-Q/I)$
-	+	$\arctan(-Q/I) - \pi$
-	-	$\arctan(-Q/I) + \pi$

3.3.3 相位解卷绕

通过以上的判断准则，求得反正切数值的同时再根据 I 和 Q 的正负来进行相应的操作，即可实现值域从 $(-\pi/2, \pi/2)$ 到 $(-\pi, \pi)$ 的扩展。但仅用这种方法，相位解调结果仍限定在 $(-\pi, \pi)$ 区间内，一旦实际的相位值超出这个区间范围，相位

解调结果将出现从 $-\pi$ 到 π 或是 π 到 $-\pi$ 的突变,会导致相位曲线不再连续,即出现相位卷绕的情况。为了解决相位卷绕对相位解调的影响,就需要进行相位解卷绕处理来消除这种相位的跳变现象。相位解卷绕是通过对相邻的两个相位点差值的绝对值与解卷绕的阈值进行比较,如果相邻相位点差值的绝对值大于解卷绕阈值,需要进行解卷绕处理,否则不需要进行相位解卷绕处理。通常将解卷绕阈值设置成 π ,假设采集的背向瑞利散射曲线经过反正切值域扩展后得到的某一条曲线为 $\varphi_i(n)$,其中 i 表示第 i 条曲线, n 表示第 i 条曲线上的第 n 个采样点,从曲线的第一个点开始,逐一对相邻位置的相位差的绝对值 $|\varphi_i(n+1) - \varphi_i(n)|$ 与解卷绕阈值 π 进行比较,如果绝对值大于 π ,进一步判断 $\varphi_i(n+1) - \varphi_i(n)$ 与 π 的关系,如果其差值大于 π ,则从第 $n+1$ 个点开始之后的每一个点的相位值都减去 2π ;如果其差值小于 $-\pi$,则从第 $n+1$ 个点开始之后的每一个点的相位值都加上 2π 。通过以上的处理即可实现一次相位解卷绕,对于每条背向瑞利散射曲线都进行上述同样的操作即可实现空间上的解卷绕操作。而还原振动波形时需多次提取不同曲线同一位置的相位点,同一位置的相位解调结果也会出现相位卷绕的情况,因此还需对这些点进行相位解卷绕处理,即时间上的解卷绕。即对 $|\varphi_{i+1}(n) - \varphi_i(n)|$ 与解卷绕阈值 π 进行比较,之后重复空间上的解卷绕的方法,其中 $\varphi_{i+1}(n)$ 为第 $i+1$ 条曲线上的第 n 个采样点, $\varphi_i(n)$ 为第 i 条曲线上的第 n 个采样点。

3.4 扰动信号定位方法

3.4.1 差分定位方法

外界扰动信号作用在传感光纤上会引起光纤折射率发生变化,进而导致背向瑞利散射光的光强变化,而且振动所在区域光强的变化要比没有振动的区域光强的变化更明显,因此可以利用光强变化来实现振动定位。利用有振动时采集到的原始背向瑞利散射曲线与没有振动时的采集到的原始背向瑞利散射曲线做差,可以得到一个具有局部峰值的曲线,这个峰值的位置即是外界扰动所在的位置,如图3.6所示。

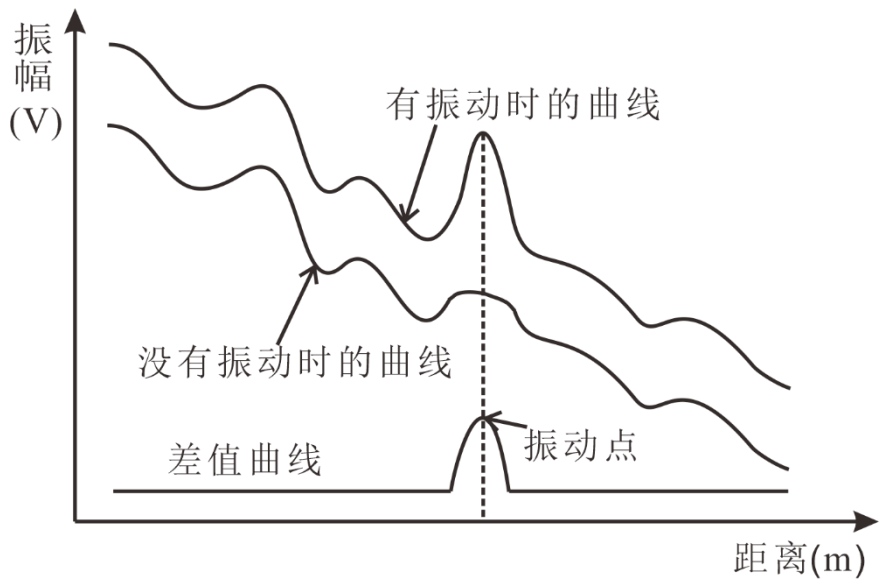


图 3.6 差分定位原理图

该方法的差分的间隔可以设置为 1，即可以对相邻光脉冲产生的背向瑞利散射信号做差；差分的间隔也可以大于 1，即可以对相隔几个周期的光脉冲产生的背向瑞利散射信号做差。差分定位方法的公式可以表示为：

$$r(i) = abs[z(i) - z(i - m)] \dots \dots \dots (3.21)$$

其中， $r(i)$ 表示第 i 条差分曲线， $z(i)$ 表示系统所采集到的第 i 条原始的背向瑞利散射曲线， m 表示差分间隔。由于相邻两个光脉冲产生的背向瑞利散射信号非常相似，如果直接对其做差分相减定位，得到的定位曲线的信噪比很低，因此通常选取的差分间隔都大于 1。差分间隔的选取不能过大也不能过小，间隔过大会导致没有振动位置处的信号也有较大差距，导致定位信噪比低；差分间隔过小会导致两条曲线过于相似，也会导致定位信噪比低。因此，差分间隔的选取要根据实际系统的采样率、系统的传感距离等因素综合考虑。这种定位方法只是简单的对信号进行差值处理，虽然简便，但没有进行去噪处理，因此对于振动信号定位的信噪比不高。

3.4.2 连续平均差值法

基于 Φ -OTDR 分布式光纤振动传感系统中的背向瑞利散射信号极其微弱，如果不进行去噪处理的话，采集到的背向瑞利散射信号非常容易淹没在噪声中，导致系统的定位信噪比很低。因此可以采用简单的直接平均法来提高系统的定位信噪比，直接平均法的原理是每个发射的光脉冲都会产生一条背向瑞利散射曲线，通过将多次测量的 N 组背向瑞利散射信号进行累加和平均处理，就能够实现定

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/215032110104011241>