

文章编号: 1672-8785(2020)10-32-05

分布式光纤振动检测方案及应用

郎金鹏 李韶光 王建国 毕宗义 盛立文 郭洪龙

(中电科仪器仪表有限公司, 山东 青岛 266555)

摘 要: 在分析网络通信安全需求的基础上, 阐述了光纤传感技术和光缆状态实时监测技术对网络通信安全的保障作用。介绍了光纤传感技术的发展历史以及具有代表性的光纤传感器, 然后介绍了分布式光纤振动传感系统的原理和工作方式, 并对该系统的解调方法进行了分析。为了获得更高的信噪比, 通过实验分析了数据解调中延迟差分对信噪比的影响。结果表明, 在一定范围内, 延迟时间与信噪比正相关。

关键词: 振动; 光纤; 安全

中图分类号: TN29 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2020.10.005

The Scheme and Application of Distributed Optical Fiber Vibration Sensing System

LANG Jin-peng, LI Shao-guang, WANG Jian-guo, BI Zong-yi, SHENG Li-wen, GUO Hong-long

(China Electronics Technology Instruments Co., Ltd., Qingdao 266555, China)

Abstract: Based on the analysis of the requirement of network communication security, the safeguard effect of optical fiber sensing and real-time monitoring technology of fiber optic cable status for network communication security is expounded. Firstly, the development history of optical fiber sensing technology and the representative optical fiber sensors are introduced, then the principle and working mode of distributed optical fiber vibration sensing system are introduced. And the demodulation method of distributed optical fiber vibration sensing system is analyzed. In order to obtain a higher SNR, the effect of delay difference on SNR in the data demodulation is analyzed through experiments. The experimental results show that the delay time is positively correlated with the SNR in a certain range.

Key words: vibration; optical fiber; safety

0 引言

进入 21 世纪以来, 信息技术不断更新换代、蓬勃发展。大到关乎国计民生的医疗、卫生和国家安防, 小到关乎衣食住行的工业、农

业和商业, 光纤通信作为各个领域信息交流与发展的载体和手段, 成为了当下社会生活和发展不可缺少的重要组成部分。网络通信安全与否直接影响国防工业、银行以及交通等重要行

收稿日期: 2020-07-25

作者简介: 郎金鹏(1991-), 男, 吉林延边人, 硕士研究生, 主要从事光纤传感及周界安防技术方面的研究。E-mail: langjinpeng@126.com

业的运行秩序。作为常用的网络信息传递载体, 光缆的健康运行状态对网络信息安全起到了重要保障作用。

对光缆产生直接物理损伤的光缆盗挖、误挖等事故时有发生。如果未能及时发现和处理, 则会给人民财产和安全带来巨大隐患。随着光纤传感技术的不断发展, 基于光纤传感的分布式传感技术不断取得突破^[1], 为维护网络安全提供了一份重要保障。

本文介绍了光纤振动传感技术的应用背景, 在确定需求背景后又介绍了光纤传感技术的应用和主要研究方向, 并对光纤振动传感检测系统的主要结构和原理进行了分析, 最后通过实验和数据分析得出了在一定范围内延迟时间与信噪比之间的对应关系。

1 分布式光纤振动监测

1.1 光纤传感技术

光纤传感技术是随着 20 世纪 70 年代光通信技术不断成熟和发展而产生的一门新技术。20 世纪 90 年代, 该技术开始不断创新突破并迎来高速发展期。它通常以光纤作为传感媒介, 利用温度、压力等外界环境的变化对光纤中传输光的强度、相位、波长和偏振态等的影响, 并通过调制解调来实现待测物理量的测量。与其他类型的传感器相比, 光纤传感器具有灵敏度高、体积小、重量轻以及抗电磁干扰等特点。美国最早将光纤传感技术应用于电力系统的在线监测, 为该技术的发展打下了良好的基础。目前, 这项技术在水听器、光纤陀螺、光纤检波器、分布式传感等方面都占有重要地位。其中, 分布式光纤传感技术应用最广, 相对也更为成熟^[2-3]。

1.2 分布式光纤振动传感

分布式光纤传感技术主要涉及分布式光纤温度传感、分布式光纤应力应变传感和分布式光纤振动传感。其中, 分布式光纤温度传感主要利用光纤的拉曼散射效应^[4], 即自发散射光的强度与光纤的温度状态有关, 而反斯托克斯拉曼散射则有明显的温度效应, 因此结合光时

域反射原理便可实现分布式温度传感。分布式光纤应力应变传感主要利用光纤的布里渊散射效应^[5], 即通过解调应力应变对布里渊频移的影响, 并结合光时域反射原理来实现分布式应力应变传感。

分布式光纤振动传感^[6]是分布式光纤周界入侵检测系统的主要原理, 主要包括干涉型和瑞利散射型^[7]两种。其中, 干涉型分布式光纤振动传感主要依据马赫-曾德尔干涉原理^[8]。当外界发生振动时, 振动位置上的光信号发生变化, 两端的干涉信号也随之发生变化。通过识别两侧干涉信号接收时间的不同来实现分布式传感。基于马赫-曾德尔干涉的分布式光纤振动传感具有传播距离远、动态范围大的特点, 但该产品只适用于振动检测和入侵识别。在光缆发生损坏断裂后, 还需要借助光时域反射计进行故障点识别。瑞利散射型分布式光纤振动检测系统主要依据光纤的瑞利散射效应。外界的物理量变化会导致光纤中传输光的相位发生改变, 此时结合光时域反射原理便可实现分布式振动传感。该方案具有定位精度高、可实现在线实时监测的特点。基于瑞利散射的分布式光纤振动检测系统主要包括直接探测型和相干探测型两种^[9-10]。

图 1 为直接探测型振动检测系统的原理框图。其中, 窄线宽激光器发出的光经过脉冲调制后射入待测光缆; 数据采集装置对经过雪崩二极管探测后的返回光进行采集。

信号光的光场表达式为

$$E_s(t) = A_s \cos(2\pi f_s t + \phi_s) \quad (1)$$

式中, A_s 、 f_s 和 ϕ_s 分别为信号光的振幅、频率和相位。经过瑞利散射返回到探测器的光强表达式为

$$\begin{aligned} I_s(t) &= E_s^2(t) = [A_s \cos(2\pi f_s t + \phi_s)]^2 \\ &= A_s^2/2 + (A_s^2/2) \cos(4\pi f_s t + 2\phi_s) \end{aligned} \quad (2)$$

可以看出, 由于理想状态下光场的振幅和频率不会发生变化, 相位是唯一变化量。传输在光纤中的光信号受到扰动后相位发生改变, 导致光的强度发生变化。返回光直接通过探测器后

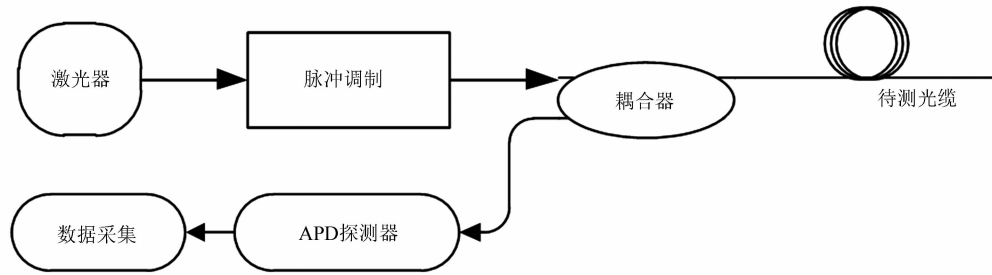


图 1 直接探测型振动检测系统的原理框图

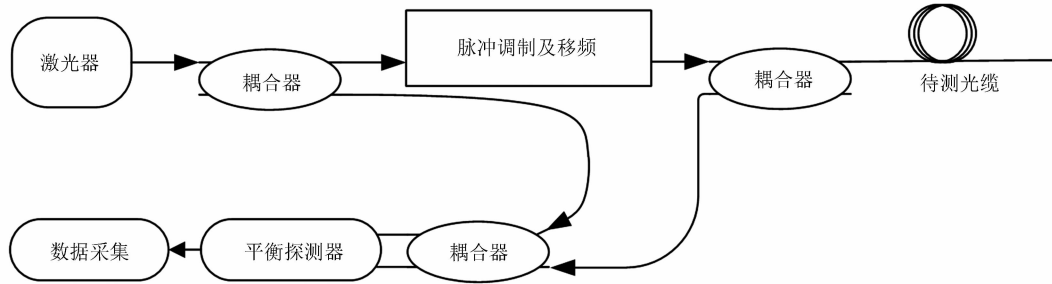


图 2 相干探测型振动检测系统的原理框图

完成数据采集。直接对强度进行解调，并利用光时域反射原理直接探测不同时间返回光的光强大小，从而实现振动识别。当光纤断裂后，光纤长度发生改变但系统本身功能不受影响。该方案不仅可以实现扰动监测，而且还可以实时测量光纤长度。

图 2 为相干探测型振动检测系统的原理框图。其中，窄线宽激光器发出的光经过脉冲调制和移频之后进入待测光缆，返回的散射光与本振光进行相干后由平衡探测器进行探测。平衡探测器探测的光信号的光场表达式为

$$E(t) = E_s(t) + E_L(t) = A_s \cos(2\pi f_s t + \phi_s) + A_L \cos(2\pi f_L t + \phi_L) \quad (3)$$

式中， E_s 和 E_L 分别为信号光和本振光的光场强度， f_s 和 f_L 分别为信号光和本振光的频率， ϕ_s 和 ϕ_L 分别为信号光和本振光的相位。

叠加后的混合光强为

$$\begin{aligned} I(t) = E^2(t) &= [A_s \cos(2\pi f_s t + \phi_s) + A_L \cos(2\pi f_L t + \phi_L)]^2 \\ &= A_s^2/2 + A_L^2/2 + 1/2 [A_s^2 \cos^2(4\pi f_s t + 2\phi_s) \\ &\quad + A_L^2 \cos^2(4\pi f_L t + 2\phi_L)] + A_s A_L \cos[2\pi(f_s + f_L)t \\ &\quad + \phi_s + \phi_L] + A_s A_L \cos[2\pi(f_s - f_L)t + \phi_s - \phi_L] \end{aligned} \quad (4)$$

由于平衡探测器的响应范围有限，并且

通常会采用带通滤波器滤除直流项，因而采集卡最终采集到的光强可以表示为

$$I(t) = \alpha A_s A_L \cos[2\pi(f_s - f_L)t + \phi_s - \phi_L] \quad (5)$$

可以看出，采集数据的强度与相位正相关，结合光时域反射原理和相位解调即可实现分布式光纤振动检测的功能。与直接探测型振动检测系统相比，相干探测型振动检测系统具有灵敏度高、动态范围大的特点。

2 数据解调

2.1 数字平均算法

基于瑞利散射的分布式振动检测系统是目前周界入侵监测系统的主流。与直接探测相比，相干探测的灵敏度更高且动态范围更大。相应的硬件成本也更高，并且解调算法也更为复杂。但无论选取哪种算法和方案，最终都需要对数据进行平均处理以去除系统噪声对测试结果的影响。

最常用的数字平均算法为连续平均算法。假设数据采集卡采集到的 N 组数据为

$$r = \{r_1, r_2, r_3, \dots, r_N\} \quad (6)$$

再假定平均次数为 M ，则全部数据可以划分为 K 组 ($K = N/M$)。每组平均后的数据为 R_i ：

$$R_i = \frac{1}{M} \sum_{l=(i-1)M+1}^{iM} r_l, I \in [1, N], i \in [1, K] \quad (7)$$

因此, 可以获得 K 组曲线:

$$R = \{R_1, R_2, R_3, \dots, R_K\} \quad (8)$$

通过计算相邻曲线的差值即可实现扰动位置的定位。但该方法严重限制了系统的检测频率。为了提高振动检测的响应频率, 提出了移动平均算法。假定平均位数为 M , N 组原始数据 $r = \{r_1, r_2, r_3, \dots, r_N\}$, 平均后的数据 $R = \{R_1, R_2, R_3, \dots, R_K\}$ ($K = N - M + 1$)。其中,

$$R_i = \frac{1}{M} \sum_{l=i}^{i+M-1} r_l, I \in [1, N - M + 1] \quad (9)$$

$$\Delta R = R_j - R_i \quad (K = J - I) \quad (10)$$

由于集合 R 中的曲线非常接近, 相邻两项作差(即 $K=1$)时, 不能很好地区分振动信号。因此, 我们可以采用延迟作差(即通过相隔 K 项作差)的方式来提高信噪比。 K 的取值直接影响系统的灵敏度。

2.2 实验分析

为了验证 K 的取值对解调结果的影响, 我们搭建了图 3 所示的直接探测实验装置。

实验过程中取一段长 1.6 km 的光纤, 在 500 m 处将 20 m 的光纤缠绕在压电陶瓷上, 并通过信号发生器给压电陶瓷一个 1 kHz 的信号, 再通过滑动平均和延迟差分对数据进行处理。 K 为 5、10、20 和 60 时的解调数据分别如图 4(a)、图 4(b)、图 4(c)和图 4(d)所示。可以看出, 当 $K=5$ 时, 信号不显现; 当适当增加 K 值时, 信噪比逐渐增加; 但当 K 从 20 增加至 60 时, 信噪比无明显变化。由此可见, 在一定范围内, K 值越大, 信噪比越高。但是

当延迟增加到一定程度时, 解调结果的增加不再明显。而由于 K 值越大, 响应频率的高频特性越差, 因而需要选取适当的延迟值以获得更高的信噪比。从图 4 中可以看出, 根据光时域反射原理, 1.6 μs 处很好地反映了被测光缆 1.6 km 的长度信息, 表明该系统在光缆的振动检测和故障定位方面具有重要作用。

综合以上数据分析可知, 在进行延迟差分时, 延迟量的选择不是越高越好。在一定范围内, 延迟量越大, 信噪比越高; 当延迟量增加到一定程度后, 信噪比变化不再明显。同时, 从图 4 中可以看出, 分布式光纤振动监测系统不仅可以实现对振动的定位, 而且还可以测量光缆长度, 从而为网络的正常运行提供物理保障。

3 结束语

本文根据网络安全的实际需求, 从通信安全方面对光缆和光纤传感进行了介绍, 并阐述了光纤传感技术的发展历史和代表产品。然后介绍了分布式光纤振动传感的原理和数据解调方案, 并通过实验验证了分布式光纤振动传感的功能以及延迟差分对数据处理的影响。结果表明, 延迟差分量直接影响了测试的动态范围, 而且分布式光纤振动传感可以实现扰动的入侵识别, 因此在维护网络通信安全方面具有重要意义。

参考文献

- [1] 刘微, 李靖. 分布式光纤光栅在管道检测中的应用 [J]. 红外, 2008, 29(7): 37-39.

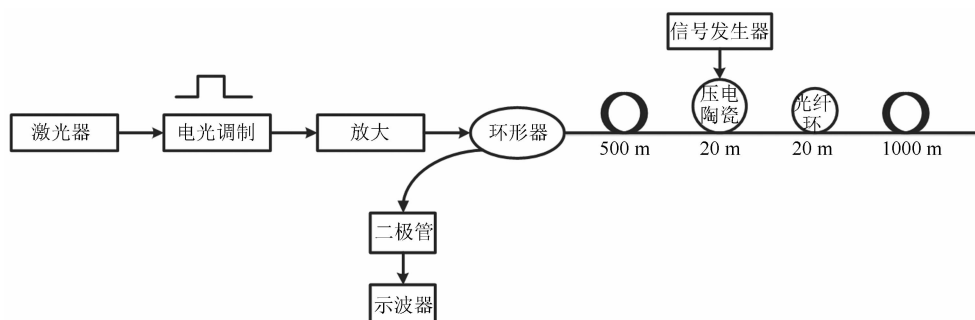


图 3 实验系统图

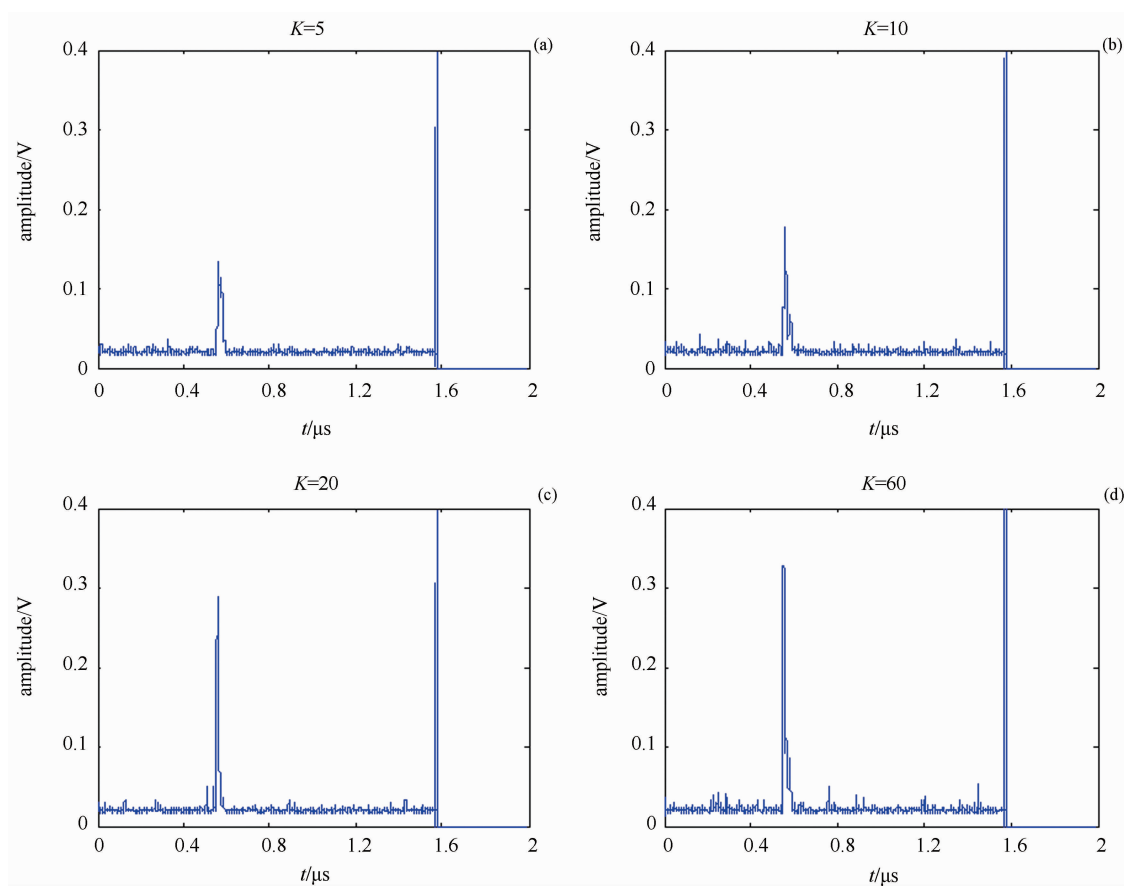


图 4 解调结果

- [2] 郎金鹏. 用于海底地震监测的光纤干涉型传感器解调方法研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [3] 郎金鹏, 常天英, 陈建冬, 等. 改进式相位生成载波调制解调方法 [J]. 光子学报, 2016, **45** (12): 12070041–12070045.
- [4] Cao D F, Shi B, Zhu H H, et al. Performance evaluation of two types of heated cables for distributed temperature sensing-based measurement of soil moisture content [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2016, **8**: 212–217.
- [5] Romeo B, Aldo M, Luigi Z. Dynamic strain measurement in optical fibers by stimulated brillouin scattering [J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(17): 2613–2615.
- [6] 王茜, 刘永智, 彭增寿. 全光纤双传感臂微振动传感器 [J]. 红外, 2007, **28**(9): 9–12.
- [7] 杨斌, 皋魏, 席刚, 等. 定位型超远全光纤周界安防系统 [J]. 激光与光电子学进展, 2011, **48**(5): 60–66.
- [8] 周正仙, 肖石林, 全芳轩. 基于 M-Z 干涉原理的定位式光纤振动传感器 [J]. 光通信研究, 2009, **34**(5): 67–70.
- [9] Liu X, JIN B Q, Bai Q, et al. Distributed fiber-optic sensors for vibration detection [J]. *Sensors*, 2016, **16**(8): 1164.
- [10] Alekseev A E, Vdovnko V S, Gorshkov B G, et al. A phase-sensitive optical time-domain reflectometer with dual-pulse phase modulated probe signal [J]. *Laser Physics*, 2014, **24**: 115106.