

引用本文:董小卫,田志华,李佳琦,等.基于时分复用光纤检波器阵列的延时参数测量方法[J].光通信技术,2025,49(4):97-100.

基于时分复用光纤检波器阵列的延时参数测量方法

董小卫¹,田志华¹,李佳琦¹,刘飞²,马俊修¹,李一强¹,汪志¹

(1.中国石油新疆油田分公司采油工艺研究院,新疆克拉玛依834000;2.北京科技大学计算机与通信工程学院,北京100083)

摘要:为提高时分复用光纤检波器阵列中延时参数的测量精度与效率,提出一种基于时分复用光纤检波器阵列的延时参数测量方法。该方法通过构建数据矩阵提取方差向量,利用脉冲模板函数进行相关运算,识别干涉脉冲的位置,从而计算延时参数。实验采用8时分复用阵列,在不同信噪比(SNR)条件下验证了方法的可靠性。实验结果表明:当SNR高于12 dB时,测量正确率达100%;SNR降至7 dB时,成功率仍超过98%;即使在-3 dB的极低信噪比下,仍能保持65%以上的正确率。

关键词:时分复用;光纤检波器;延时参数;方差向量;脉冲模板函数

中图分类号:TN247 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2025)04-0097-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.04.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Time delay parameter measurement method based on time-division multiplexed fiber optic detector array

DONG Xiaowei¹, TIAN Zhihua¹, LI Jiaqi¹, LIU Fei², MA Junxiu¹, LI Yiqiang¹, WANG Zhi¹

(1. Oil Production Technology Research Institute, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay Xinjiang 834000, China;

2. School of Computer and Communication Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: To improve the measurement accuracy and efficiency of time delay parameters in time-division multiplexed fiber optic detector arrays, a time delay parameter measurement method based on a time-division multiplexed fiber optic detector array is proposed. This method constructs a data matrix to extract variance vectors, performs correlation operations using a pulse template function, identifies the positions of interference pulses, and thereby calculates the time delay parameters. Experiments were conducted on an 8-channel time-division multiplexed array to verify the method's reliability under different signal-to-noise ratio (SNR) conditions. The results show that when the SNR is above 12 dB, the measurement accuracy reaches 100%. When the SNR drops to 7 dB, the success rate remains over 98%. Even at an extremely low SNR of -3 dB, the method maintains a correct rate above 65%.

Key words: time-division multiplexing, fiber optic detector, delay parameter, variance vector, pulse template function

0 引言

微地震监测已成为地球物理普查和能源工业开采的有效手段^[1-2]。自20世纪90年代以来,随着光纤技术的进步,干涉型光纤检波器取得了显著进展^[3]。这类检波器具有高灵敏度、宽频带、抗电磁干扰和易于

复用等优势^[4],能够实现地震信号的高保真采集^[5]。

为优化资源利用,通常需要采用复用技术构建多检波器传感网络^[6]。于是,基于光波的不同物理特性,研究人员开发了空分复用、波分复用和时分复用等方案^[7]。其中,时分复用方案在系统性价比、检波器性能和阵列增益之间实现了良好平衡^[8]。该方案通过将连续光调制为脉冲光,并利用阵列中各检波器返回脉冲的时间差来重构干涉信号^[9]。此外,时分复用还可与其它复用技术结合,构建更大规模的检波器阵列^[10]。典型的时分复用结构^[11]包括:传统梯状型结构^[12]、In-line Michelson结构^[13],以及由光纤布喇格光栅(FBG)构成的法布里-珀罗(F-P)腔结构^[14]。其中,In-line Michelson结构因结构简单而广泛应用^[15],但阵列中各检波器

收稿日期:2024-10-08。

基金项目:中国石油天然气股份有限公司项目(2023ZZ24YJ06)资助。

作者简介:董小卫(1985—),男,陕西咸阳人,硕士,高级工程师,现就职于中国石油新疆油田分公司采油工艺研究院。主要研究方向为光纤微地震检波器、信号与信息处理,曾荣获省部级技术发明成果二等奖2项。



董小卫,田志华,李佳琦,等:基于时分复用光纤检波器阵列的延时参数测量方法

返回脉冲的识别仍需深入研究。王兆芳等人^[16]研究了时分复用阵列的串扰问题,但其假设各检波器的延时参数相同,这一条件在实际应用中往往难以满足。王建飞等人^[17]提出的测量方法虽精确度高,但设备复杂昂贵。

针对上述问题,本文在外差式光纤微地震监测系统的基础上,提出一种基于时分复用光纤检波器阵列的延时参数测量方法,并使用不同信噪比的原始数据验证该方法的可靠性。

1 基于时分复用光纤检波器阵列监测系统

1.1 监测系统结构设计

基于时分复用的光纤检波器监测系统整体结构^[12-13]如图1所示。光源发出的连续光在脉冲发生器控制下通过集成光开关(IOS)调制为脉冲光(时间宽度为 w ,重复频率为 f_{rep})。随后,这些脉冲光经过一个50:50耦合器(C_1)进入马赫-曾德尔干涉仪(MZI)的两臂。2个声光调制器(AOM)不仅对脉冲光进行调制,还分别将光信号移频至 f_1 、 f_2 。此外,移频量为 f_2 的脉冲光还需通过一段长度为 $2\Delta L$ 的延时光纤,使得2束光在通过 C_2 后形成具有特定时间差 τ 的脉冲对。生成的外差脉冲对通过环形器被注入到检波器^[14],该检波器检测由外界震动引起的脉冲干涉信号。这些信号依次通过环形器的三端口到达掺铒光纤放大器(EDFA)、滤波器、探测器及数/模转换器(ADC)。最终,信号经由后端信号处理平台现场可编程门阵列(FPGA)解调^[15],从而获取检波器上接收到的震动信息。

1.2 检波器阵列光路结构

本文采用基于In-line Michelson结构的时分复用方案,将图1中的单一检波器替换为检波器阵列,如图2所示。该阵列主要由以下三部分组成:1) N 个分光比各异的耦合器^[16];2) $N+1$ 个用于抑制偏振衰落效应的法拉第旋镜(FRM)反射单元^[17];3) N 段长度略大于 ΔL 的光纤(需确保各检波器中参考臂与传感臂的光程

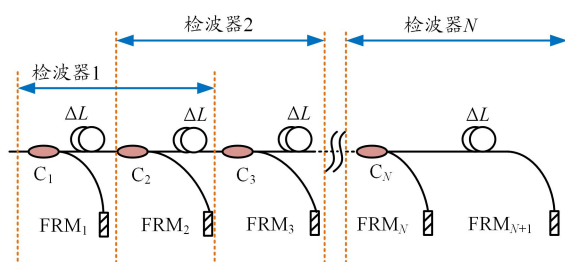


图2 检波器阵列光路结构示意图

差严格保持为 ΔL ,以形成稳定的干涉信号)。

从结构组成来看,除末级检波器外,每个检波单元均由一个耦合器、连接在该耦合器输出端的FRM、一段延时光纤以及相邻下一级耦合器所接的FRM共同组成^[18]。末级检波器则仅包含1个耦合器及其配套的FRM。除首尾2个独立使用的FRM外,其余FRM均被设计为相邻2个检波单元所共享。

1.3 检波器阵列返回的光脉冲序列

从检波器阵列返回的光脉冲序列如图3所示。该序列包含 $N+2$ 个光脉冲,以频率 f_{rep} 周期性出现。其中,首尾2个脉冲分别由AOM移频至 f_1 和 f_2 ,其强度保持稳定;中间 N 个脉冲则为携带干涉信息的波动信号。在信号处理过程中,首先需将电信号按照不同的延时时间进行分选,从而分离出各检波器对应的干涉

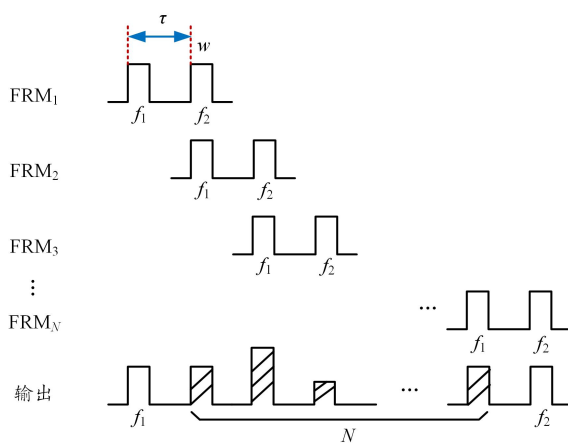


图3 检波器阵列返回的光脉冲序列示意图

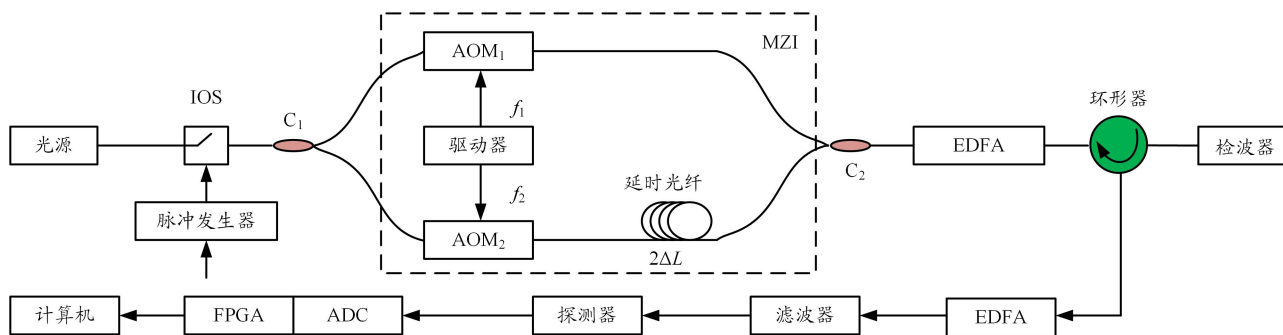


图1 系统结构设计框架

脉冲。随后,对每个独立的干涉信号分别进行解调处理,最终提取出各检波器的相位信息。

2 延时参数测量

在解时分复用脉冲序列时,首先需精确测量光脉冲序列的延时参数^[19],即图4中各相邻干涉脉冲的时间间隔 $q_0 \sim q_{N-1}$ 。这些延时参数作为各检波器在光脉冲序列中的位置标识,其测量精度直接影响解时分操作的准确性。传统方法采用人工测定方式获取延时参数,但由于干涉信号强度存在随机涨落特性,操作时需筛选合适的信号片段进行测量。这种方法不仅效率较低、操作流程繁琐,而且容易受到脉冲序列中噪声的干扰,导致参数提取出现偏差。

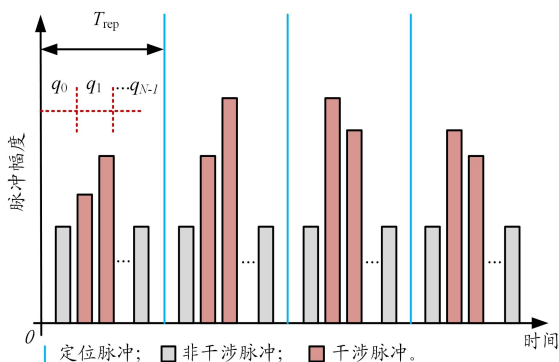


图4 解时分过程示意图

本文提出一种基于信号方差特征的延时参数自动提取方法,利用干涉信号方差显著高于噪声方差的特点^[20],通过方差分析和脉冲模板匹配实现检波器位置的精确识别^[21]。该方法的具体实施流程如下:

1) 基准脉冲定位:系统通过引入高幅值定位脉冲作为时间基准,该脉冲与脉冲发生器的触发信号同步。在原始信号中,定位脉冲的幅值显著高于光脉冲序列,采用峰值检测算法即可准确识别首个定位脉冲的位置。

2) 数据矩阵构建:以首个定位脉冲为基准,按照已知的重复周期 T_{rep} ($T_{\text{rep}}=1/f_{\text{rep}}$)将原始信号划分为 $m \times n$ 维数据矩阵 $\mathbf{A}$ 。其中, m 表示单个周期内的采样点数, n 为周期总数(建议 $n \geq 20$ 以保证统计可靠性)。矩阵的行向量 $\mathbf{a}_i$ ($i=0,1,\dots,m-1$)表示各周期内相同时间位置的信号采样值。

3) 方差特征提取:计算各行的方差值,构建方差向量 $\mathbf{c}$,其元素 $c_i=V(\mathbf{a}_i)$ 。其中, $V(\cdot)$ 表示方差。该向量反映了信号在时间轴上的能量分布特征。

4) 脉冲模板匹配:基于光脉冲的时域特性构建数

字模板函数 h 。 h 中元素 h_l 的表达式为

$$h_l = \begin{cases} \frac{1}{T_r}, & 0 \leq l < T_r \\ 1, & T_r \leq l < T-T_r \\ \frac{T-l}{T_r}, & T-T_r \leq l \leq T \end{cases} \quad (1)$$

其中, l 表示脉冲时间变量的离散化值, T 、 T_r 、 T_f 分别为脉冲宽度、上升时间和下降时间的离散化值。

5) 相关运算处理:通过滑动相关计算得到匹配度向量 $\mathbf{d}_i$,其表达式为

$$\mathbf{d}_i = \sum_{l=0}^T c_{(i+l)} h_l \quad (2)$$

6) 特征峰值检测:识别匹配度向量 $\mathbf{d}_i$ 中前 N 个显著极大值点,将其索引按升序排列为位置向量 $\mathbf{p}$ 。

7) 延时参数计算:对 $\mathbf{p}$ 求差分,可得到 $N-1$ 个延时参数值,第一个延时参数为 $p_0+R(T/2)$,则时间间隔 q_k 的表达式为

$$q_k = \begin{cases} p_0+R(T/2), & k=0 \\ p_k-p_{k-1}, & 1 \leq k \leq N-1 \end{cases} \quad (3)$$

其中, $R(\cdot)$ 表示四舍五入操作, p_k 表示第 k 个延时参数的位置向量。

3 实验结果分析

为分析所提延时参数测量方法的效果,本文选取实际应用中8时分复用阵列的一段原始信号进行测试。该8时分复用检波器阵列采用NKT E15激光器(线宽约为100 Hz),调制脉冲宽度约为160 ns,脉冲重复频率为200 kHz(脉冲重复周期为5 μ s)。通过逐步增大高斯白噪声的功率^[23]加入不同幅度噪声,降低原始信号的信噪比。此处信噪比定义为

$$S=10\lg \frac{E(V(\mathbf{a}_{\text{signal}}))}{E(V(\mathbf{a}_{\text{noise}}))} \quad (4)$$

其中, $\mathbf{a}_{\text{signal}}$ 为 $\mathbf{a}_i$ 中对应干涉信号的向量, $\mathbf{a}_{\text{noise}}$ 为 $\mathbf{a}_i$ 中对应噪声的向量, $E(\cdot)$ 表示求随机变量的均值。

在每种信噪比条件下计算500次延时参数,对比结果与准确值(无噪声干扰时手动测量值)。若出现1个及以上延时参数值与准确值的偏差超过 $w/4$,则认为本次计算失败,否则视为成功。

不同信噪比条件下延时参数测量方法的成功率统计情况如图5所示。可以看出,当信噪比高于12 dB时,正确率达100%;信噪比降至7 dB时,成功率仍高于98%;即使信噪比低至-3 dB(干涉信号被噪声掩盖),仍有65%的成功率,表明所提方法的鲁棒性强。

董小卫,田志华,李佳琦,等:基于时分复用光纤检波器阵列的延时参数测量方法

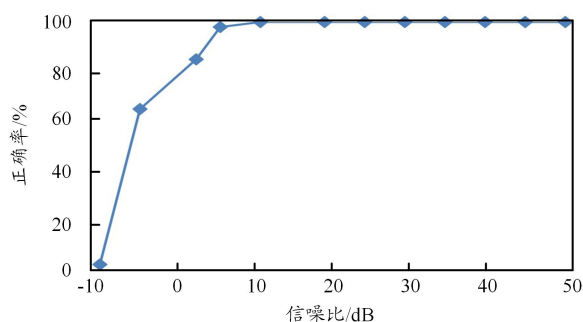


图5 不同信噪比条件下延时参数测量方法正确率统计

4 结束语

针对 In-line Michelson 结构时分复用光纤检波器阵列,本文提出一种返回脉冲延时参数测量方法。该方法通过提取干涉脉冲与背景脉冲的差异性特征,采用方差向量作为各检波器信号的定位标识,并引入脉冲模板函数对方差向量进行平滑处理以抑制噪声干扰,最终通过求解相关系数向量的极大值点确定延时参数。基于不同信噪比原始数据的实验结果表明:在信噪比高于 12 dB 时,方法正确率达 100%;信噪比降至 7 dB 时,成功率仍保持 98% 以上;即使在 -3 dB 的极低信噪比条件下,仍能维持 65% 以上的正确率,表明所提方法的鲁棒性强。

参考文献:

- [1] 刘博,梁雪莉,容娇君,等.非常规油气层压裂微地震监测技术及应用[J].石油地质与工程,2016,30(1):142-145.
- [2] 苟量,张少华,余刚,等.光纤地球物理技术的发展现状与展望[J].石油物探,2022,61(1):15-31.
- [3] 吕公河.地震勘探中振动问题分析[J].石油物探,2002,41(2):154-157.
- [4] CRANCH G A, NASH P J. Large-scale multiplexing of interferometric fiber-optic sensors using TDM and DWDM[J]. Journal of Lightwave Technology, 2001, 19(5): 687-699.
- [5] 程坤,张文涛,黄稳柱,等.高分辨率光纤时分复用静态应变传感技术[J].中国激光,2023,50(5):135-142.
- [6] 李鹏,柏楠,陆星.干涉型光纤传感器相位解调技术研究[J].导航定位与授时,2020,7(3):9-14.
- [7] LIAO Y, AUSTIN E, NASH P J, et al. Phase sensitivity characterization in fiber-optic sensor systems using amplifiers and TDM[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(10): 1645-1653.
- [8] LO Y L, XU S H. New sensing mechanisms using an optical time domain reflectometry with fiber Bragg gratings[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2007, 136(1): 238-243.
- [9] CHENG Z L, ZHAO J L, ZHOU W M, et al. A vibration sensor on fiber Bragg grating Fabry-Perot cavity[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(1): 47-52.
- [10] DE F, JOLYON M. Optical crosstalk and performance in time division multiplexed derivative sensing techniques[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(18): 10615-10624.
- [11] LI S P, QING T, FU J B, et al. High-accuracy optical fiber transfer delay measurement using fiber-optic microwave interferometry[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(2): 627-632.
- [12] 区坚海,徐恺,周悦,等.干涉型光纤传感器光正交外差解调技术研究[J].光电工程,2012,39(4):108-113.
- [13] LIU F, XIE S R, ZHANG M, et al. Downhole microseismic monitoring using time-division multiplexed fiber-optic accelerometer array [J]. IEEE Access, 2020, 8: 120104-120113.
- [14] 董小卫,谢斌,刘飞,等.顺变柱体式光纤微地震检波器研制及实验[J].西安石油大学学报(自然科学版),2023,38(1):52-58.
- [15] 巩鑫,华灯鑫,李仕春,等.时分复用光纤光栅传感系统的高速采集技术研究[J].西安理工大学学报,2014,30(3):293-298.
- [16] 王兆芳,卜胜利,苏德龙,等.分光比可调的光子晶体光纤耦合器[J].光学学报,2017,37(3):177-183.
- [17] 王建飞,王潇,罗洪,等.基于法拉第旋镜的干涉型光纤传感系统偏振相位噪声特性研究[J].物理学报,2012,61(15):111-120.
- [18] 王璐,李辉栋,乔学光.基于轴承式杠杆机构的光纤光栅高频地震检波器设计[J].光通信技术,2024,48(2):78-83.
- [19] 董小卫,刘帅,汪志,等.井下光纤微地震监测系统设计与应用[J].应用光学,2022,43(1):171-178.
- [20] 王英杰,邓大鹏,代晓媛.干涉型光纤传感系统的信号处理[J].光通信技术,2013,37(12):25-28.
- [21] 王为,张宝菊,尹晓慧.光纤光栅型平面冲击信号方向识别的小波包分析[J].激光与红外,2011,41(12):1392-1395.
- [22] 陆瑶.基于块脉冲函数运算矩阵的分数阶系统辨识[J].科学技术创新,2017(29):64-65.
- [23] 孙洪达,冯宇.存在有界功率扰动和高斯白噪声的滤波算法[J].系统科学与数学,2022,42(12):3163-3172.