

基于 LMS 算法和线性插值的光纤扰动定位系统

刘仁华, 罗义军

(武汉大学 电子信息学院, 武汉 430072)

摘要: 目前光纤扰动监测系统的定位算法以互相关为主, 存在定位精度低、实时性差和稳定性不够的问题。基于上述现象, 研究并运用最小均方 (LMS) 算法和线性插值原理, 设计出一种精度高、实时定位的光纤扰动定位系统。检测光路采用双马赫-曾德尔分布式干涉结构, 定位算法以两段式步长调整的 LMS 时延估计为主, 对 LMS 估计结果的差分进行线性插值能额外提高定位精度, 定位算法的实现和数据处理在 FPGA 内进行。多次光纤敲击实验表明: 系统响应时间在 0.45s 左右; 在采样率为 10MHz 的条件下, 系统定位精度达到 $\pm 6\text{m}$, 且较为稳定可靠。

关键词: 变步长 LMS; 线性插值; FPGA; 光纤扰动定位

中图分类号: TN247 文献标识码: A 文章编号: 1002-5561(2019)04-0058-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.04.013

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



Optical fiber disturbance location system based on LMS algorithm and linear interpolation

LIU Renhua, LUO Yijun

(Electronic Information School, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: At present, the positioning algorithm of optical fiber disturbance monitoring system is mainly cross-correlation, which has the problems of low positioning accuracy, poor real-time performance and insufficient stability. Based on the above phenomena, an optical fiber disturbance positioning system with high accuracy and real-time location is designed by studying and applying least mean square (LMS) algorithm and linear interpolation principle. Double Mach-Zendel distributed interference architecture is used in the detection optical path. The location algorithm is mainly based on LMS time delay estimation with two-stage step adjustment. Linear interpolation of the difference between LMS estimation results can improve positioning accuracy. The implementation of localization algorithm and data processing are carried out in the FPGA. Multiple fiber tapping experiments show that the system response time is around 0.45s. Under the condition of sampling rate of 10MHz, the system positioning accuracy reaches $\pm 6\text{m}$, which is relatively stable and reliable.

Key words: variable step size LMS; linear interpolation; FPGA; optical fiber disturbance location

0 引言

在长距离监测、周界安防和管道保护等应用场景中, 双马赫-曾德尔 (M-Z) 分布式干涉定位系统以其造价低廉、传感距离远而极受欢迎^[1]。但扰动定位算法以互相关运算为主, 目前仍存在检测精度不高、稳定性

不够和实时性差等缺陷^[2]。相比于互相关函数估计, 最小均方 (LMS) 时延估计算法具有闭环反馈结构, 能根据实际环境匹配滤波结构参数^[3]。固定步长因子的 LMS 算法无法解决收敛速度和稳态误差相互制约的矛盾, 而多数变步长方案通过构造递减函数来实现, 存在待调参数多且调节困难的问题。此外, 提高系统定位精度的手段以增大采样率为主, 但这样会导致硬件成本和数据计算量增大。

采用两段式步长调整能同时兼顾收敛速度和误差, 且参数调节方便。而通过对 LMS 估计结果的差分进行线性插值, 可以充分利用延迟点信息, 额外减小定位误差。现场可编程门阵列 (FPGA) 可以多路并行运

收稿日期: 2018-12-04。

作者简介: 刘仁华 (1992-), 男, 江西赣州人, 硕士研究生。主要研究方向是调制解调、通信信号处理、高速数据采集与传输。研究生入学至今, 先后参与横向科研项目 3 项, 现均已验收结题, 其中 2 个项目来自航天院所。



算,支持高数据吞吐率^[4],非常适合完成采集数据的处理。本文将变步长 LMS 算法和线性插值理论用于光纤扰动定位,由 FPGA 完成数据处理,提高定位系统的精度和适应性。

1 系统原理分析

1.1 双 M-Z 干涉光路

系统采用双 M-Z 光纤干涉结构,它能将与扰动位置有关的时延信息 τ 及时并准确地反映出来,光路模型如图 1 所示。

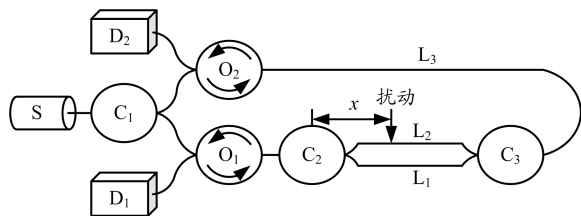


图 1 干涉光路模型

图 1 中, S 为激光源, C_1 、 C_2 、 C_3 为光耦合器, O_1 、 O_2 为环形器, L_1 、 L_2 为单模光纤, L_3 为引导光纤, D_1 、 D_2 为光电探测器。当光纤某处发生振动时,激光的相位信息会发生变化,则 2 路干涉光到达探测器 D_1 和 D_2 的传播光路会出现光程差,存在时延 τ ^[5]。假设发生入侵行为处与 C_2 相距 x ,则扰动位置可表示为^[1]:

$$x = \frac{l_1 + l_3 - c \cdot \tau / n}{2} \quad (1)$$

其中, 光纤长度 l_1 和 l_3 固定, c 为光速, n 为光纤折射率。

设采样频率为 f , 每个延迟点的定位距离 S 由相邻采样点的时长决定,它可表示为^[4]:

$$S = \frac{(1/f) \cdot c/n}{2} = \frac{c}{2nf} \quad (2)$$

1.2 LMS 时延估计算法

传统滤波器具有固定的结构参数和频率特性,难以抑制带内噪声。自适应滤波能根据实际信号的统计描述和特征,通过自适应滤波算法自动调整当前时刻的滤波器结构参数^[3],达到最优的滤波效果。自适应滤波结构如图 2 所示, $x(k)$ 为输入信号, $y(k)$ 为滤波输

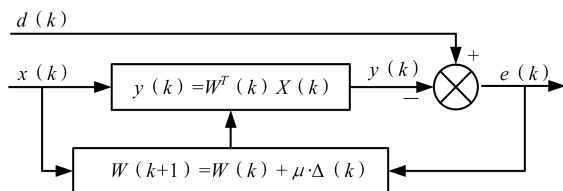


图 2 自适应滤波结构框图

出, $d(k)$ 为期望信号, $e(k)$ 为 $d(k)$ 与 $y(k)$ 之差,通过不断迭代,使下一时刻输出信号 $y(k)$ 不断逼近期望信号。 $X(k)$ 是输入向量, $W(k)$ 是滤波器抽头权向量, μ 为步长因子。LMS 自适应算法以 $e(k)$ 的方差最小为准则,根据最速下降法,得到 LMS 自适应算法如下^[6]:

$$\begin{cases} y(k) = W(k)^T X(k) \\ e(k) = d(k) - y(k) \\ W(k+1) = W(k) + 2\mu e(k) X(k) \end{cases} \quad (3)$$

当采样率 f 满足奈奎斯特定理时,探测器 D_1 的输出信号 $s(t)$ 可表示为^[7]:

$$s(t) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} s(iT) \text{sinc}[(t-iT)f] \quad (4)$$

其中, i 是整数,采样周期 $T=1/f$ 。探测器 D_2 的输出信号相对于 D_1 存在时延 τ ,则可表示为:

$$s(t-\tau) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} s(iT) \text{sinc}[(t-\tau-iT)f] \quad (5)$$

假设 τ 是整数,令 $t=nT$, $\tau=dT$, $i=n-i$,对式(5)进行变量替换得到:

$$s[(n-d)T] = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} s[(n-i)T] \text{sinc}(i-d) \quad (6)$$

式(6)表明,延迟信号 $s(n-d)$ 可以由 $s(n)$ 经过无限长的横向滤波器产生^[7]。实际情况下,有用信号 $s(t)$ 通过一个有限阶滤波器后能够精确地去估计延迟信号 $s(t-\tau)$,且有限阶滤波器的抽头系数 $w_i(n)$ 实际上是抽样函数 $\text{sinc}(i-d)$ 上等间隔的取样值,2 路信号的延迟点数可以通过最大权值所在的位置获得。

LMS 算法的收敛速度和稳态误差相互制约,两者可以由步长因子 μ 进行调节:固定的步长在保证收敛速度的前提下,稳态误差较大^[6];可变步长能最大地权衡收敛速度和稳态误差。在迭代初期,使用较大的步长可以获得较快的收敛速度;而在迭代后期,使用较小步长能避免震荡,减小系统误差。步长值 μ 应该根据滤波器阶数 N 和信号功率 P_s 来确定^[8]。

2 方案设计与实现

2.1 系统方案设计

本文设计的光纤扰动定位系统如图 3 所示,该系统主要由检测光路、光电转换、调理电路和数据处理等组成。双 M-Z 检测光路用相干光束记录光纤上入侵的扰动信号位置,光电探测器将其转换成电信号,再进行信号放大和滤波,完成模数(A/D)转换后,由 FPGA 进行数据处理,计算出扰动位置。

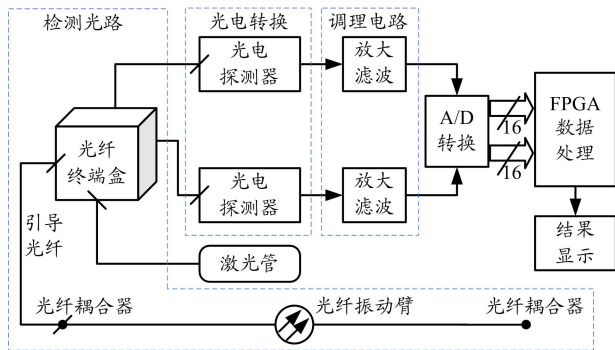


图 3 光纤扰动定位系统框图

2.2 定位算法实现

FPGA 内部的整个数据处理流程如图 4 所示,数字增益控制对 A/D 转换后的信号进行增益处理,使其在有限位宽的表示范围内动态变化最大。信号幅度相对于方差而言,计算量小,所需的观察时间短,因此以幅度为标准来定性判断扰动信号的有无。如果信号幅度连续多次超过设定的幅度阈值,则说明存在扰动信号。检测到扰动信号后,再使能 LMS 时延估计模块,计算出扰动位置,这样降低了 FPGA 功耗。

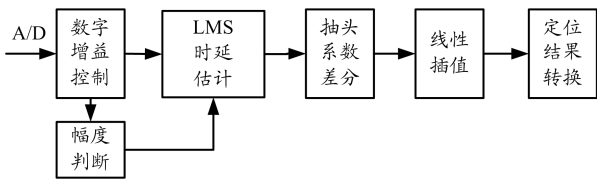


图 4 数据处理流程图

LMS 时延估计算法主要由横向滤波器、误差计算、步长因子选择和抽头权值迭代等部分组成。时延估计的距离范围由单个时延间隔对应的定位距离(理论定位精度)和滤波器阶数决定。系统设计的定位范围为 160m,理论定位精度为 10m,滤波器阶数 $N \geq 16$,考虑到后期的扩展需求,取 $N=32$ 。当要求的定位范围变大时,可以增加滤波器阶数,但这样会增加硬件资源消耗和自适应处理时间。如果定位范围很大,则可以先降低理论定位精度,粗略获得扰动的大致距离区间;再提高理论定位精度,在上述距离区间内进一步确定扰动信号的精确位置。步长因子的选择影响着 LMS 算法实现的速度和性能,采用两段式步长,同时兼顾收敛速度和收敛精度。在迭代初期,使用较大的步长值,使输出信号 $y(k)$ 能粗略按照期望信号 $d(k)$ 方向进行变化;当误差 $e(k)$ 的方差连续 3000 次小于设定的阈值时,采用较小的步长值,在保证变化趋势一致的同时,不断减小 $e(k)$ 。

由图 2 和式(3)可知,滤波输出 $y(n)$ 是输入向量 $X(n)$ 和权向量 $W(n)$ 的内积,拆成标量运算需要 N 次乘法和 $N-1$ 次加法。 $W(n)$ 更新需要 N 次乘法, N 次移位和 N 次加法。图 5 为 LMS 算法程序结构图,图 6 为 Quartus II 中 LMS 算法模块图。

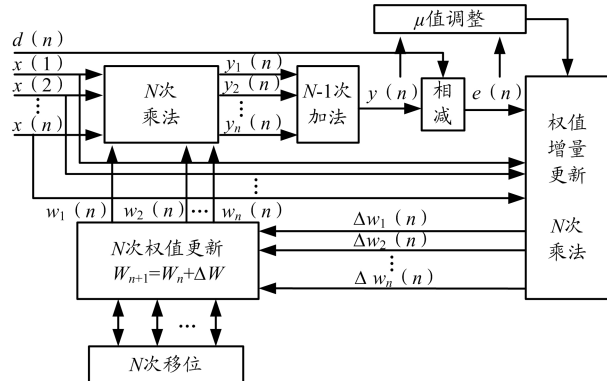


图 5 LMS 算法程序结构图

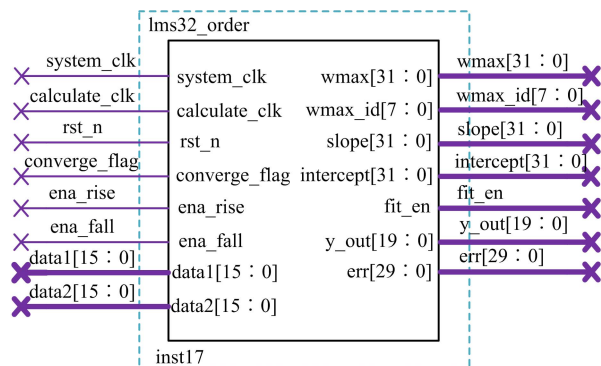


图 6 LMS 算法 verilog 模块图

由式(6)可知,信号 $s(t)$ 经过有限阶滤波器后能精确地估计它的延迟信号 $s(t-\tau)$;而 2 个光电探测器的接收信号除了到达时间存在时延 τ 外,应该完全一样。一般来说,估计出的时延为正值,故需要先观察出 2 路接收信号到达的时间先后,再用先到达的接收信号去估计后到达的接收信号。图 5 中, $x(n)$ 是先到达的探测器接收信号,期望 $d(n)$ 是存在相对时延 τ 的接收信号。

2.3 线性插值

当滤波器阶数 $N=32$ 时,抽头权值全部集中在 sinc 函数主瓣上。2 路信号时延 τ 对应于 sinc 函数取得最大值处,即函数的导数为零。由于最大抽头系数的位置 i 只能取整数,而导数为零处可能位于 2 个延迟点数之间,故估计的点数存在误差。在 sinc 函数最大值点附近,导函数近似为一条直线。通过对 LMS 估计结果的差分进行线性插值,可以充分利用延迟点信息,

减小误差。由式(7)求出相邻权系数的差值 $\Delta w_i(k)$:

$$\Delta w_i(k) = w_i(k+1) - w_i(k) \quad (7)$$

找到最大抽头系数附近 5 个点, 通过其中相距最远的 2 个点的 $\Delta w_i(k)$ 求出最大值点附近的导函数近似直线。直线斜率的求取可通过 4 等分, 即向右移 2 位实现。利用求出的直线, 在最大抽头系数前后各 1 个点之间进行 10 等分线性插值, 在插值点中找到最接近 0 处对应的延迟值。经过线性插值后, 定位精度理论值达到 2m。图 7 是线性插值算法流程图, 图 8 是相应的 verilog 模块图。

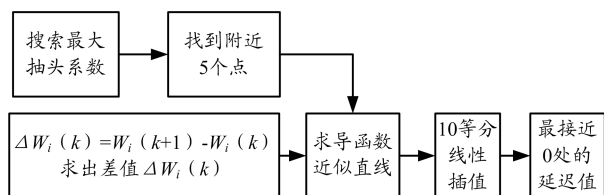


图 7 线性插值流程图

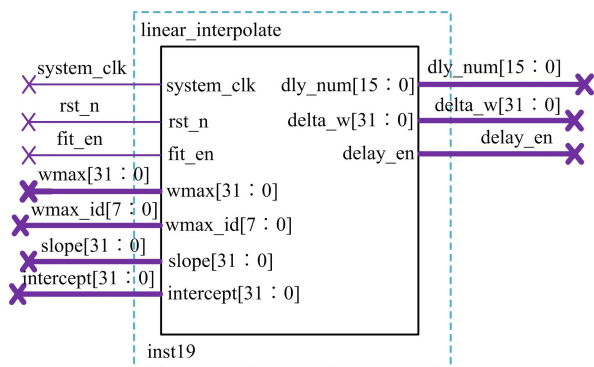


图 8 线性插值 verilog 模块图

2.4 定位结果的处理

对信号分析可知, 振动时长一般在 500ms 以上, 当数据采样率达到 10MS/s 时, 每次振动可以采集 5×10^6 个数据。而完成 LMS 迭代所需点数少于 0.5×10^6 , 一次振动时长至少能进行 8 次 LMS 时延计算。对 8 次 LMS 计算结果进行记录, 剔除其中的最大值和最小值, 然后对剩余计算结果取平均, 将该平均值作为定位的最终结果。这样能减少刮风下雨等特殊情况的影响, 增加定位结果的可靠性。

3 Simulink 仿真

为了验证设计方案的可行性, 同时确定步长因子 μ 的合适范围, 在 Simulink 上对上述方案进行仿真, 数据源采用 100m 处敲击时接收的实际振动信号。图 9 为滤波器输出信号 $y(k)$ 和期望信号 $d(k)$ 随迭代时间

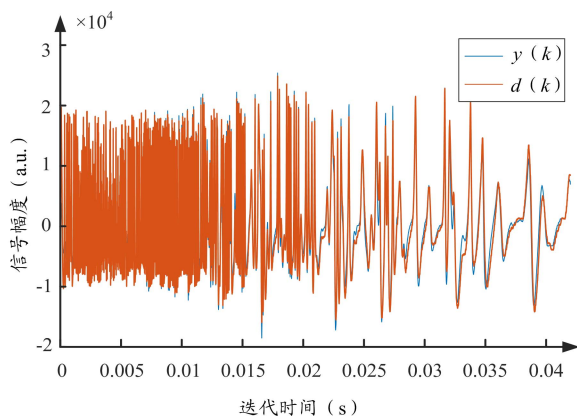


图 9 滤波输出 $y(k)$ 和期望信号 $d(k)$ 变化曲线

的变化曲线, 图 10 为误差信号 $e(k)$ 随迭代时间的变化曲线。

由图 9、图 10 可知, 随着迭代次数的增加, $y(k)$ 逐渐能随着 $d(k)$ 同步变化, 且二者误差越来越小, 趋于稳定。当步长因子 μ 在 2 个阶段分别取 10^{-5} 、 10^{-7} 数量级时, LMS 算法实现了较短的收敛时间和较小的稳态误差。

图 11 是算法收敛后, 相邻权系数差值随迭代时间的变化曲线。

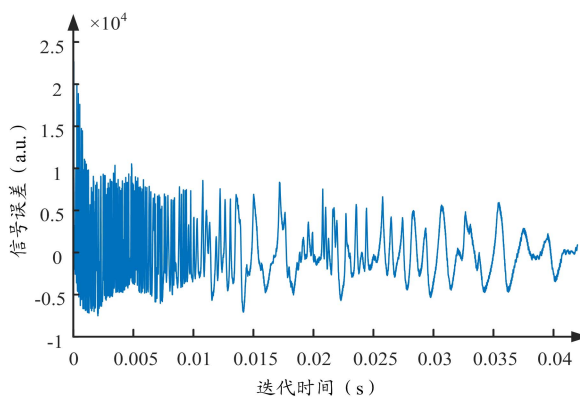


图 10 误差信号 $e(k)$ 变化曲线

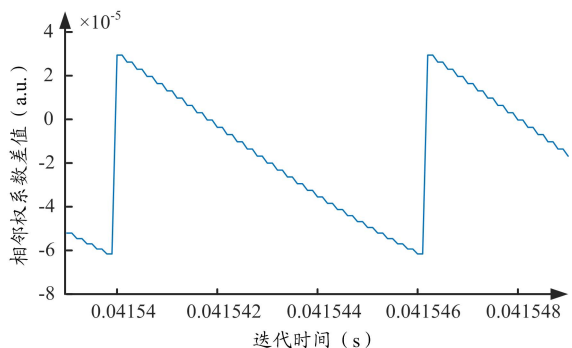


图 11 相邻权值差分结果变化曲线

4 实验结果

基于上述方案, 我们搭建了一套光纤扰动定位装置。选用波长为 1550nm、功率为 2.5mW 的连续激光器, 并采用 1.55 μ m 单模光纤, 将其捆绑于小区外围栏杆上, 光纤振动部分长 160m。光电转换器使用 PIN 激光管, 光环行器和耦合器固定于光纤终端盒中。ADC 使用 ADI 推出的双通道、16bit 量化位数、高达 125MS/s 的 AD9268。AD 采样时钟设为 40MHz, 由时钟芯片 ADF4351 提供, 可在线调节。对采样数据进行 4 倍抽取, 使得数据采集率为 10MS/s。由式(2)可知, 每个延迟点的定位距离 $S \approx 10$ m。

FPGA 完成 LMS 时延算法、线性插值等数据处理过程, 需要消耗不少的逻辑查找表、乘法器和存储器等。因此, 选用 Altera 推出的高性价比、低功耗和逻辑资源丰富的 FPGA 产品 EP4CE115F23I7, 用 Matlab 对算法进行仿真, 在 Quartus II 13.0 上完成算法移植和 Verilog 代码实现。

将光纤振动臂的一端(靠近小区入口)标记为 0 起点, 栏杆上的光纤每隔 10m 标记为一个测试点, 多次进行逐点敲击。用手、棍子和石块对光纤进行轻重不同的敲击, 以模拟不同的扰动场景。图 12 为 90m 处某次实验时 LMS 算法得出的各滤波器权值。图 13 是 100m 处 30 次敲击实验的定位结果。在 40~130m 之间进行 3 次逐点敲击, 各位置定位误差如图 14 所示。

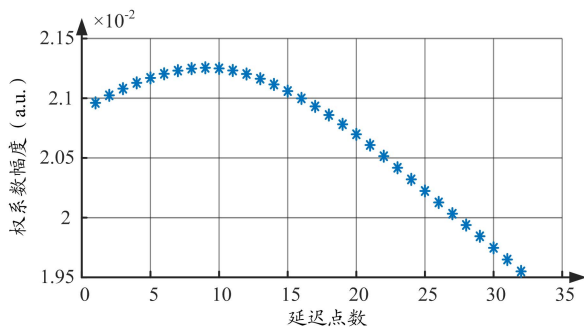


图 12 90m 处某次 LMS 估计计算结果

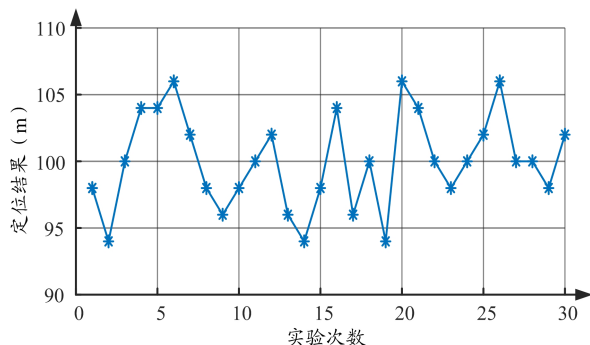


图 13 100m 处 30 次实验定位结果

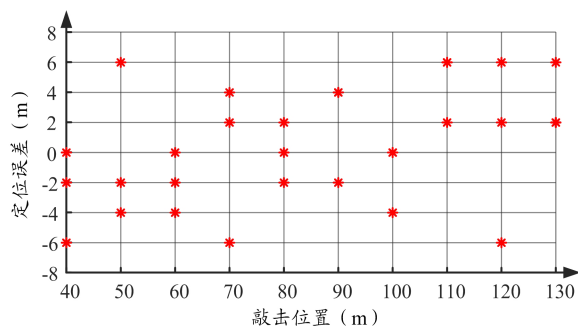


图 14 3 次逐点敲击实验定位误差

由图 13 和图 14 可知, 本系统实际定位误差为 ± 6 m, 而目前基于互相关算法的定位误差在 ± 10 m 之外。因此, 本系统通过采用 LMS 算法和线性插值相结合的方式, 实现了更高的定位精度, 且定位性能较为稳定可靠, 误报概率小。

5 结束语

本文提出了一种基于变步长 LMS 算法和线性插值的光纤扰动定位系统设计方案, 并在 FPGA 平台上进行了实现。对比于互相关定位算法, LMS 时延估计算法采用闭环反馈结构, 自动调整结构参数, 对变化环境具有自适应性。两段式步长调整实现简单, 并能明显缩短 LMS 自适应处理时间。通过对 LMS 估计结果的差分进行线性插值, 打破了采样率对定位精度的限制。测试结果表明: 采样率为 10MS/s 时, 系统精度达到 ± 6 m。在测试过程中, 狂风暴雨天气对测试结果有一定影响, 实际户外应用场景比这更为复杂, 因此后期需要增加其它传感手段进行排除, 或者通过智能算法对不同振动信号进行学习和识别。

参考文献:

- [1] 王晓峰, 王辅东, 陈焕新. 双马赫-曾德尔光纤传感系统的定位原理与算法[J]. 中国高新技术企业, 2017, 24(8): 19-20.
- [2] 韩屏, 朱阳波. 基于全光纤微振动传感器的定位系统研究[J]. 光学学报, 2015, 35(11): 79-86.
- [3] 何腊梅, 杨帆. LMS 自适应滤波在航空瞬变电磁信号去噪中的应用[J]. 物联网技术, 2018, 8(1): 30-32.
- [4] 罗义军, 方理. 基于 FPGA 的光纤振动定位系统的设计与实现[J]. 电子技术应用, 2018, 44(10): 60-63.
- [5] 崔光磊, 衣文索, 张叶浩, 等. 双马赫-曾德尔分布式光纤扰动监测系统[J]. 吉林大学学报: 信息科学版, 2017, 35(6): 590-596.
- [6] 张红梅, 韩万刚. 一种新的变步长 LMS 自适应滤波算法研究及其在应用[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(8): 1822-1830.
- [7] 乔振岳. 最小均方误差自适应时延估计算法研究[D]. 西安: 电子科技大学, 2014.
- [8] 管海清. 一种基于 LMS 自适应滤波的 CVSD 语音降噪方法[J]. 中国新通信, 2016, 18(4): 106-109.