

双 M-Z 型光纤振动传感器分级互相关定位方法

申欢,白元涛,刘继红*

(西安邮电大学 电子工程学院,西安 710121)

摘要:为提高双马赫-曾德尔(M-Z)干涉型分布式光纤传感器对振动事件的定位速度,提出了一种分级互相关定位方法。首先,对双向干涉信号降采样,通过互相关运算进行初步定位;然后,原始干涉信号在初步定位结果附近进行局部互相关以获得振动事件的精确位置。实验结果表明:和传统互相关方法相比,该方法在保证定位精度的前提下,能够缩短双 M-Z 干涉型光纤振动传感器的定位时间,提高定位效率。

关键词:分布式光纤振动传感器;双马赫-曾德尔干涉仪;降采样;局部互相关

中图分类号:TP212;TN929.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2019)06-0001-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.06.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Hierarchical cross-correlation location method for dual M-Z optical fiber vibration sensors

SHEN Huan, BAI Yuantao, LIU Jihong*

(School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: In order to improve the speed of locating vibration events with dual Mach-Zehnder (M-Z) interferometer-based distributed optical fiber sensors, a hierarchical cross-correlation location method is proposed. Firstly, the bidirectional interference signals are down-sampled, and the initial event location is obtained by cross-correlation operation. Then, the local cross-correlation of the original interference signals is carried out according to the initial location result and the final location of the vibration event is determined. The experimental results show that, compared with the traditional cross-correlation method, this method can shorten the positioning time and improve the positioning efficiency of the dual M-Z interferometric fiber vibration sensor on the premise of ensuring the positioning accuracy.

Key words: distributed optical fiber vibration sensor; dual M-Z interferometer; down-sample; local cross-correlation

0 引言

分布式光纤振动传感技术能够在数十千米范围内准确定位事件位置,在石油管道泄露监测、长距离周界安防等领域具有广泛的应用前景^[1,2]。其中,双马赫-曾德尔(Mach-Zehnder, M-Z)干涉型传感结构是比较典型的一种^[3,4]。在双 M-Z 光纤振动传感系统中,一

般通过求双向干涉信号的互相关函数估计它们之间的时延,进而确定振动事件的位置^[5-7]。理论上,对于干涉信号的采样速率越高,定位越准确,但提高采样速率会造成数据量增多,利用时域互相关估计时延的耗时也大大增加,不适合用于实时性要求高的应用。虽然频域互相关法能够降低运算量,但时延估计结果与截取的干涉信号长度以及统计特性关系密切,定位稳定性较差。通过端点检测截取振动事件对应的有效干涉信号进行定位^[8,9],或者由于干涉信号通过多次逐级平均实现精确定位^[10],虽都能缩短定位时间,但运算量仍然偏大或过程较复杂。

因此,本文按照粗测与精测相结合的测量原理,在端点检测的基础上,提出一种对有效干涉信号直接降采样形成粗测信号,然后进行分级互相关估计时延的振动事件定位方法。

收稿日期:2019-01-29。

基金项目:国家自然科学基金项目(61775180)资助;陕西省科技攻关项目(2017GY-189)资助。

作者简介:申欢(1994-),女,硕士,现就读于西安邮电大学电子工程学院电子与通信工程专业,主要研究方向为干涉型分布式光纤振动传感技术,包括光纤干涉仪结构设计与优化和振动传感信号的检测、定位与特征识别。曾获得“第十四届中国研究生数学建模竞赛全国三等奖”。

*通信作者:刘继红(E-mail:ong1705@xupt.edu.cn)。



1 双 M-Z 型光纤振动传感原理

双 M-Z 型光纤振动传感系统结构如图 1 所示。窄带分布式反馈 (DFB) 激光器输出的光波经过隔离器后,由 1×2 耦合器 C_1 分成功率相等的 2 束光,其中 1 束经过 2×2 耦合器 C_2 进一步分成 2 束光后,分别进入 2 根传感光纤沿顺时针方向传播,在 2×2 耦合器 C_3 处发生干涉,干涉信号由探测器 PD_2 接收;同理,从耦合器 C_1 出来的另 1 束光依次经过耦合器 C_3 、传感光纤和耦合器 C_2 后,干涉信号由探测器 PD_1 接收。2 个探测器输出的干涉信号分别由高速数据采集卡采集后进行信号处理。

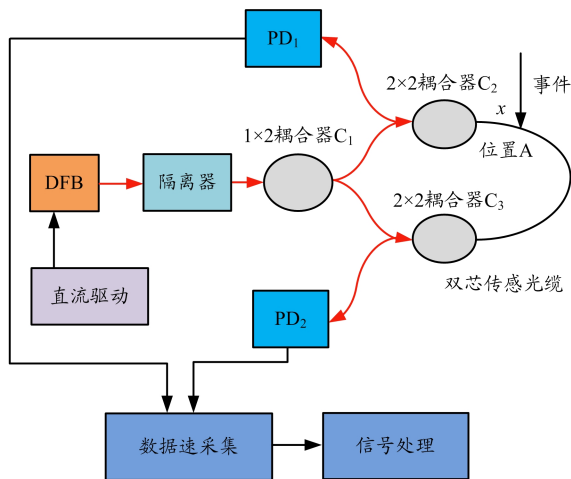


图 1 双 M-Z 型光纤振动传感系统结构原理图

假设有振动事件作用于传感光纤上 (如图 1 所示), 由于双向光信号从事件位置传播到耦合器 C_2 和 C_3 的距离不同, 因此, 可以根据 2 个干涉信号之间的时延差 τ 计算出振动事件发生的位置与耦合器 C_2 的距离 x 为:

$$x = \frac{1}{2} \left(L - \frac{c\tau}{n} \right) \quad (1)$$

其中, c 、 L 、 n 分别是真空中的光速、传感光纤长度和纤芯有效折射率。

2 分级互相关时延估计方法

2.1 互相关时延估计

由于 2 路干涉信号是受同一事件作用引起的, 且沿传感光纤 2 个方向传播的光信号经过的光路完全相同, 两者之间具有很强的相关性, 因此, 通常利用互相关运算估计 2 路干涉信号之间的时延差 τ 。假设 PD_1 和 PD_2 探测到的干涉信号分别为 $I_1(t)$ 和 $I_2(t+\tau)$, 则经过采样周期为 T_s 的模数 (A/D) 转换后, 两者的互相关函数可表示为:

$$R_s(mT_s) = \frac{1}{N_s - |m|} \sum_{a=0}^{N_s - |m| - 1} I_1(aT_s) I_2(aT_s + mT_s) \quad (2)$$

其中, N_s 表示端点检测后截取的有效干涉信号长度; m 表示互相关运算的位移量 ($m = -N_s + 1, -N_s + 2, \dots, N_s - 1$); a 表示互相关运算的区间; I_1 、 I_2 分别表示探测器 PD_1 、 PD_2 接收到的 2 路干涉信号。当互相关函数 R_s 取最大值时, $mT_s \approx \tau$ 。由式 (1)、式 (2) 可知, mT_s 逼近 τ 的程度, 即通过互相关时延估计定位的精度为干涉信号 2 个采样点之间的光纤长度 dx :

$$dx = \frac{cT_s}{2n} = \frac{c}{2nF_s} \quad (3)$$

其中, F_s 是采集卡的采样率 ($F_s = 1/T_s$), 它决定着系统的理论定位精度, 例如定位精度为 10m, 要求采样率 F_s 不低于 10MHz (假设纤芯折射率 $n = 1.5$)。此外, 为了有效抑制噪声和传感系统不稳定等因素的影响, 利用互相关估计时延时希望截取的干涉信号持续时间长一些, 即 N_s 越大越好。由式 (2) 可知, 计算自相关函数 R_s 的运算量为 $(N_s - 1)^2$ (只考虑乘法)。由此可见, 提高定位精度和缩短定位耗时两者之间存在矛盾, 这是利用互相关估计时延实现定位需要解决的一个关键问题。

2.2 分级互相关时延估计

为了克服互相关时延估计定位精度和运算量之间的矛盾, 本文给出一种分级互相关时延估计方法, 其基本工作过程如下:

①对长度为 N_s 的有效干涉信号进行 R_{dk} 倍降采样, 得到长度为 N_{dk} 的降采样信号。

②用式 (2) 计算得到 2 个降采样信号 N_{dk} 的互相关函数 $R_{dk}(mT_{dk})$, $m = -N_{dk} + 1, -N_{dk} + 2, \dots, N_{dk} - 1$, 得到与 R_{dk} 峰值对应的 m , 记为 M_{dk} , 从而计算出初步定位结果。其中, T_{dk} 表示降采样后系统的有效采样周期, M_{dk} 则表示降采样域互相关系数峰值对应的时延位数。

③计算 2 个干涉信号在 $R_{dk} \times M_{dk}$ 位置附近的互相关函数 $R_s(mT_s)$, $m = R_{dk} \times (M_{dk} - i), \dots, R_{dk} \times (M_{dk} + i)$, 其中, i 表示求局部互相关时相对 M_{dk} 的时延位数, 理论上 $i = 1$ 即可, 具体取值可根据实际系统测试确定。此时 $R_s(mT_s)$ 的最大值对应的 mT_s 就是对时延 τ 的最终估计结果。

我们通过分析上述②、③两步中的运算过程, 可得分级互相关时延估计的运算量为 $(N_{dk} - 1)^2 + (i \times R_{dk} + 1) \times (N_s - R_{dk} \times M_{dk})$, 其中, 第一、第二项分别是降采样信号互相关和原始信号局部互相关的乘法运算量。如果需要截取的干涉信号长度 N_s 比较大, 且在降采样倍数 R_{dk}

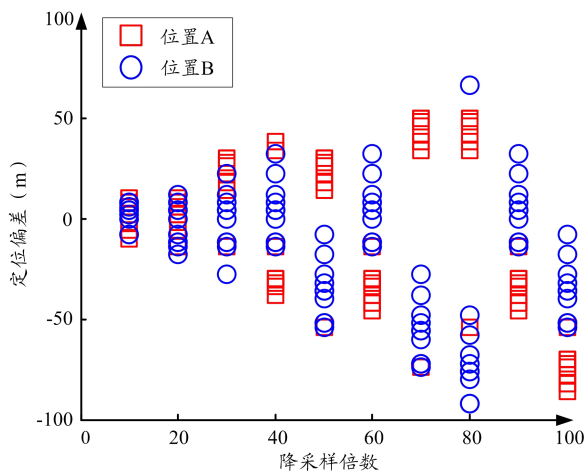
较大时仍能粗略估计时延,则分级互相关时延估计方法的运算量远小于直接计算的运算量。

3 实验结果

本文按照图 1 所示的原理搭建实验系统。在 C_1 和 C_2 、 C_1 和 C_3 之间插入偏振控制器调节入射光的偏振态,降低偏振衰落对系统稳定性的影响。光源和探测器分别选用北京康冠公司的 1550nm 窄线宽 DFB 光源模块和带宽为 200M 的模拟光电探测模块,光时域反射仪(OTDR)测量传感光纤的长度为 25.132km。实验中用 20MHz 和 50MHz 的采样频率分别采集了 2 个不同位置(记为 A 和 B)各 10 次模拟振动事件的 40 组干涉信号,把采集到的干涉信号进行事件端点检测^[9]后分别截取长度 N_s 为 10^5 和 3×10^5 的有效事件信号,并按分级互相关时延估计方法进行定位处理。

我们对 $N_s=10^5$ 的干涉信号降采样后,根据 2 个降采样信号的互相关函数估计时延,计算出的初步定位结果与直接互相关定位结果的差值如图 2 所示。可以看出,随着降采样倍数 R_{dk} 的增大,相当于有效采样频率降低,由式(3)可知定位精度下降,同时计算互相关函数的干涉信号长度也随之变短,振动事件特征信息减少,综合作用使得初步定位的偏差也呈现增大的趋势。虽然位置 A 和位置 B 处事件的初步定位偏差在同一降采样倍数 R_{dk} 下不完全相同,但与直接互相关定位结果的偏离程度在总体上是相似的。对于 $N_s=3 \times 10^5$ 的干涉信号,其初步定位结果随降采样倍数 R_{dk} 的变化特征与图 2 所示类似,这里不再赘述。

在降采样初步定位结果的基础上,本文按照分级互相关时延估计方法再进行局部互相关定位,当取 $i=1$ 时,利用分级互相关时延估计获得的定位结果与直

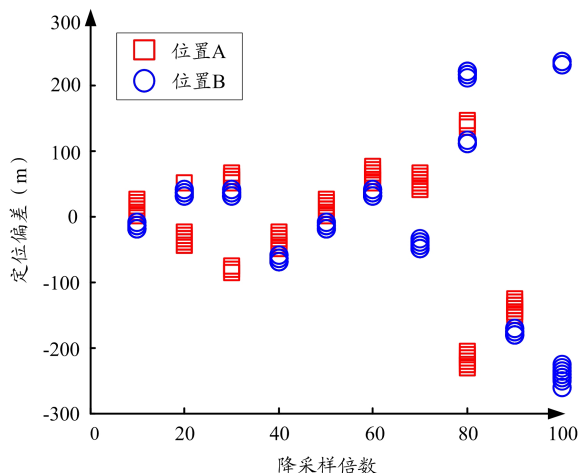


(b) 采样频率为 50MHz

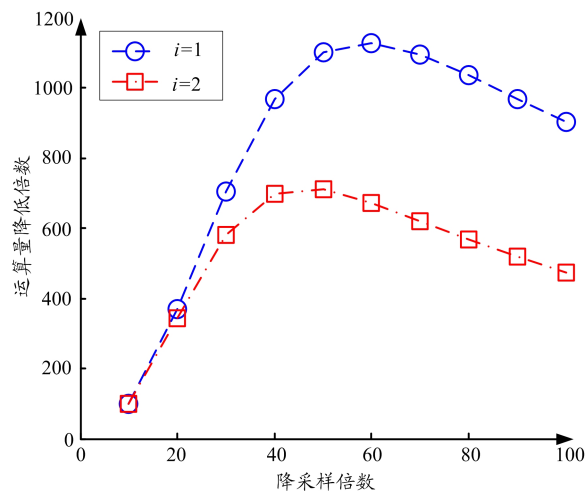
图 2 降采样初步定位的偏差

接互相关相同,只是运算量显著减少。

在不同干涉信号长度下,分级互相关时延估计方法的运算量降低倍数情况如图 3 所示。运算量降低倍数,即直接互相关运算量 $(N_s-1)^2$ 和分级互相关运算量 $(N_{dk}-1)^2 + (i \times R_{dk} + 1) \times (N_s - R_{dk} \times M_{dk})$ 的比值。由于 M_{dk} 的取值与具体事件位置相关,这里取最差情况 $M_{dk}=0$ 。从图 3 中可以看出,虽然分级互相关能够降低运算量,但效率与干涉信号的长度以及降采样倍数有关。对于同一信号长度,降采样倍数的增大减小了降采样后初步定位时延估计的运算量,但部分相关时延估计的运算量由于搜索范围增大,运算量随之也增大,因此,存在最佳降采样倍数。当 $N_s=10^5$ 时, $i=1$ 和 2 对应的最佳降采样倍数 R_{dk} 分别为 60 和 50(如图 3(a)所示);而当 $N_s=3 \times 10^5$ 时, $i=1$ 和 $i=2$ 对应的最佳降采样倍数 R_{dk} 分别为 80 和 70(如图 3(b)所示)。因此,适当地截取更长



(a) 采样频率为 20MHz



(a) 干涉信号长度 $N_s=10^5$

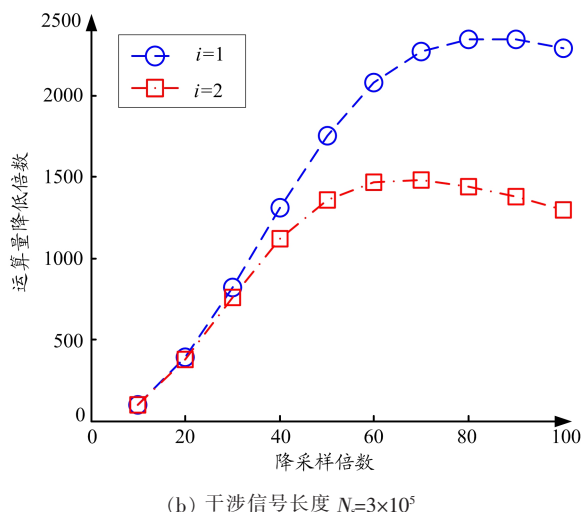


图 3 分级互相关时延估计方法的效率运算量降低信数情况

的振动事件干涉信号,并同时增大降采样倍数,在定位耗时代价较小的情况下,则有可能改善定位精度。

4 结束语

本文基于分级互相关估计时延的定位方法通过降采样,采用更短的干涉信号执行互相关运算,完成初步定位;再用原始干涉信号在初步定位结果附近做局部互相关运算估计时延,确定入侵事件的精确位置。实验结果表明:在与传统直接互相关算法定位精度相同的前提下,双 M-Z 型光纤振动传感器使用分级互相关定位方法能够显著减少运算量,当干涉信号长度 $N_s=10^5$ 时,选择优化的降采样倍数,其运算量可以

降低 10^3 倍 ($i=1$) 以上,提高了双 M-Z 干涉型光纤振动传感器的定位效率。

参考文献:

- [1] SUN Qingquan, HU Fei. Human movement modeling and activity perception based on fiber-optic sensing system [J]. IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 2017, 44(6): 743-754.
- [2] 周琰,靳世久,曾周末,等. 分布式光纤管道安全检测定位技术研究 [J]. 光电子·激光, 2008, 19(7): 922-924.
- [3] CHEN Qingming, JIN Chao, BAO Yuan, et al. A distributed fiber vibration sensor utilizing dispersion induced walk-off effect in a unidirectional Mach-Zehnder interferometer[J]. Optics Express, 2014, 22(3): 2167-2173.
- [4] MA Chunyu, LIU Tiegeng, LIU Kun, et al. Long-range distributed fiber vibration sensor using an asymmetric dual Mach-Zehnder interferometers [J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(9): 2235-2239.
- [5] WU Yuan, BIAN Pang, JIA Bo. Fiber optic line-based sensor employing time delay estimation for disturbance detection and location [J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 35(5): 1032-1037.
- [6] 杨顺智,张智勇,邵理阳,等. 基于二次相关算法的双 M-Z 光纤传感器的定位方法[J]. 光子学报, 2017, 46(7): 1-6.
- [7] 谢尚然,邹琪琳,屠亦军,等. 长距离双 M-Z 干涉型振动传感器实时定位算法研究[J]. 光电子激光, 2009, 20(8): 1020-1025.
- [8] LIU Kun, TIAN Miao, JIANG Junfeng, et al. An improved positioning algorithm in a long-range asymmetric perimeter security system[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(22): 5278-5283.
- [9] HUANG Xiangdong, WANG Yuedong, LIU Kun, et al. High-efficiency endpoint detection in optical fiber perimeter security [J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(21): 5049-5055.
- [10] 蔡文川,李丹勇,闫高健,等. 基于多均值周期的分布式光纤振动传感定位方法[P]. 中国:CN108225542A. 2018-06-29.

征稿启事

本刊以报道世界光通信前沿技术、刊登高质量光通信技术论文为办刊宗旨,注重学术性、专业性和知识性。本刊经国家新闻出版总署批准,国内外公开发行,被《中国学术期刊(光盘版)》、《中国核心期刊(遴选)数据库》等全文收录的中文核心期刊。欢迎广大作者积极撰写论文,踊跃投稿!《光通信技术》国内统一连续出版物号:CN 45-1160/TN,国际标准连续出版物号:ISSN 1002-5561,邮发代号:48-126。《光通信技术》栏目设置:光网络、光器件、光系统传输、无线光通信、光通信工程、光纤光缆等。

本刊采用电子邮箱投稿,文中出现的公式必须是经过作者验证的,且不超过 5 个。文中的图、表应清晰。来稿文责自负,稿件内容不得抄袭或重复发表,本刊对来稿有权作技术性和文字性修改。自收稿之日起,本刊三周内电子邮件回复作者审稿结果(退稿、修改或录用)。

投稿邮箱:OPTICAL263@163.com(主),GTXJS@sina.com(备)。

《光通信技术》编辑部