

基于改进 MLS 算法的偏振调制激光测距方法实现

高超^{1,2}, 周维虎^{1,2*}, 高书苑³, 纪荣祎^{1,2}, 潘映伶^{1,2}¹中国科学院微电子研究所光电技术研发中心, 北京 100094;²中国科学院大学, 北京 100049;³常州大学机械与轨道交通学院, 江苏 常州 213164

摘要 为提高偏振调制激光测距方法精度, 针对采样信号存在波形变形问题, 提出了基于改进移动最小二乘 (IMLS) 算法的偏振调制激光测距方法。首先, 基于偏振调制测距原理分析了调制信号波形变形产生的原因和频率解算准确度对测距精度的影响; 然后, 提出了基于 IMLS 算法的偏振调制激光测距算法, 搭建了偏振调制激光测距系统; 最后, 分析和验证了 IMLS 算法的权函数、影响半径等参数对测距精度的影响, 并对所提算法、摇摆法、最小二乘法进行了测距精度对比分析和验证。实验结果表明: 在 11.94 m 的被测距离下, 选用正态加权函数作为权函数, 形状参数为 3, 影响半径为 500 kHz 时, 基于 IMLS 算法的偏振调制激光测距算法的误差最小, 仅为 0.111 mm, 此方法的测距精度优于摇摆法和最小二乘法。基于 IMLS 算法的测距方法适用于偏振调制测距系统, 可有效提升测距精度。

关键词 测量; 激光测距; 偏振调制; 改进移动最小二乘法; 极值检测

中图分类号 TH741

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221106

1 引言

激光测距作为典型的光学测量方法, 一直受到广泛关注, 在大科学装置建设^[1]、大型装备装配生产^[2]、六自由度机器人校准^[3]等领域中有着广泛应用, 其测量距离和测量精度不断提升。激光绝对测距主要包括飞行时间法、相位法、多波长干涉法、调频连续波法、飞秒激光频率梳法等, 上述方法的测量原理和实现手段不同, 其测距范围、测量精度和测量速度也各有不同, 需要根据实际需求选择合适的测量方法和测量仪器^[4-6]。由于激光偏振态在空间传输中不易受影响, 因此偏振调制激光测距方法在大范围空间内的全量程中都具有较高的测量精度, 比其他激光测距方法更适用于大型结构件的装配检测、地质野外基线的建设等^[7-8], 但由于技术垄断和技术封锁, 国内尚没有自主研发的偏振调制激光测距设备。国外对偏振调制激光测距技术的研究主要集中在仪器使用过程中测量误差的综合评定^[9-10], 对软硬件算法的介绍很少。国内目前主要是天津大学和中国科学院微电子研究所开展了偏振调制激光测距方法和系统的研究。天津大学 2014 年起对偏振调制激光测距原理、测距精度及摇摆法测距算法和系统实现开展了研究^[11-14], 中国科学院微电子研究所 2018 年起对偏振调制激光测距系统的误差分析、反射

器偏振响应及波导式偏振调制激光测距系统进行了研究^[15-17], 上述研究以偏振调制激光测距系统实现为主, 测距算法主要基于摇摆法实现。

偏振调制激光测距方法建立了激光偏振态、调制频率、测量距离之间的函数关系, 通过检测信号极小值点对应的调制频率解算空间距离。偏振调制信号是理论波形为余弦信号, 摇摆法基于信号对称性实现偏振调制激光测距, 但受调制器几何和物理性质、测量光传播过程中波形畸变、调制器光电特性不匹配等因素的影响, 采集信号不对称, 摇摆法解算过程中会引入误差^[18]。最小二乘法被广泛用于曲线拟合, 改进最小二乘法可消除曲线中畸变量的影响, 提高拟合精度^[19-20]。但最小二乘法利用全部数据对曲线进行完整拟合, 全局拟合极值点与局部波形极值点会存在偏差, 不完全适用于偏振调制激光测距方法。移动最小二乘 (MLS) 法是对最小二乘法的优化, 被广泛用于曲线曲面拟合^[21]、无网格近似法^[22]、物质点法^[23]等诸多工程领域的方程求解和高精度拟合。MLS 算法通过设定紧支域对曲线进行移动拟合求解, 可以有效降低最小二乘法全局拟合的局限性^[24], 满足偏振调制激光测距方法在波形信号极值点附近高精度拟合的需求, 有助于提高算法精度; 同时利用系数向量和基函数代替拟合多项式, 降低了拟合精度对多项式阶次的依赖, 有助于

收稿日期: 2022-08-05; 修回日期: 2022-08-28; 录用日期: 2022-09-07; 网络首发日期: 2022-09-17

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB1310100)、江苏省基础研究计划(自然科学基金)-青年基金项目(BK20200983)

通信作者: *zhouweihu@ime.ac.cn

提升算法速度。

本文针对偏振调制激光测距系统光电信号变形影响摇摆法精度的问题,提出了一种基于改进 MLS 算法的偏振调制激光测距实现方法,通过对局部极值的高精度拟合,提升了距离解算精度。设计并搭建了偏振调制激光测距系统,验证了影响半径、权函数等参数对算法精度的影响,并对所提算法、摇摆法、最小二乘法进行了精度对比分析和实验验证。

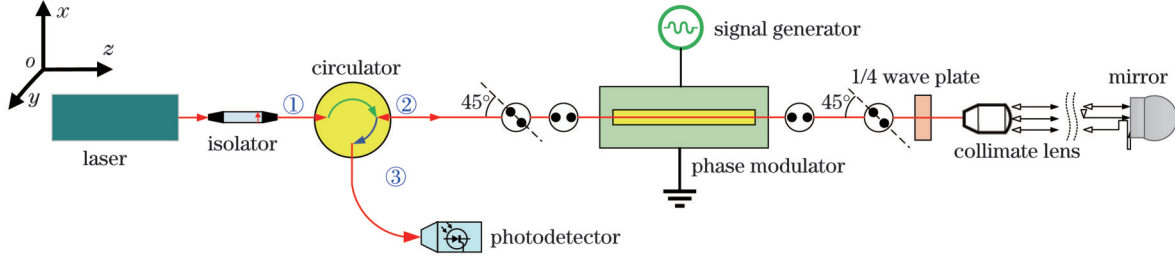


图 1 偏振调制激光测距原理图

Fig. 1 Schematic of polarization modulation laser ranging

光源输出的测量光经隔离器起偏后变为线偏振光,经环形器后与保偏光纤快轴成 45° 夹角进入相位调制器。对调制器施加调制电压,利用调制器铌酸锂晶体的线性电光效应,对测量光偏振态进行第一次调制。调制后的测量光经过 1/4 波片后在空间传输一段距

2 基本原理

2.1 波导式偏振调制激光测距工作原理

波导式偏振调制激光测距系统主要是基于光纤波导器件,其工作原理如图 1 所示,主要由激光光源、相位调制器、环形器、光电探测器等器件构成。为了实现测量光偏振态的控制,相位调制器、1/4 波片与保偏光纤快轴间接图 1 所示位置成 45° 角连接。

离,到达合作测量反射镜。反射后的测量光沿原光路返回,经过相位调制器进行第二次调制。二次调制后的测量光经环形器进入光电探测器。利用琼斯矢量表示偏振调制激光测距系统的光器件,测量光在系统内的偏振态变化为

$$\begin{bmatrix} \tilde{E}_x \\ \tilde{E}_y \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{iM \cos(\omega t + \Delta\varphi)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\beta} \end{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix} \times \\ \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\beta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{iM \cos(\omega t)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\alpha} \end{bmatrix} \frac{E_0}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: E_0 为初始线偏振光振幅; \tilde{E}_x 和 \tilde{E}_y 分别为第二次调制后相位调制器出射的测量光在 x 轴和 y 轴方向上的偏振光分量振幅, α 和 β 为调制器前、后测量光在保偏光纤内部的偏振态相位延迟量; M 为相位调制器的调制效率; $\Delta\varphi$ 为测量光在空间传输过程中的偏振态相

位变化量; $M \cos(\omega t)$ 为测量光第一次通过调制器后形成的相位延迟; $M \cos(\omega t + \Delta\varphi)$ 为二次调制形成的相位延迟; t 为时间。

光电探测器处的光强度 I 与调制信号源相位差 $\Delta\varphi$ 之间的函数关系为

$$I = \tilde{E}_x \cdot \tilde{E}_x^* + \tilde{E}_y \cdot \tilde{E}_y^* = \frac{|E_0|^2}{2} \left\{ 1 - \cos \left[M \cos(\omega t + \Delta\varphi) - M \cos(\omega t) \right] \right\}, \quad (2)$$

式中: * 表示取复共轭。

对式(2)进行三角函数分解及贝塞尔函数(J)展开,可得

$$I = \frac{|E_0|^2}{2} \left\{ 1 - J_0 \left(2M \sin \frac{\Delta\varphi}{2} \right) - \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n} \left(2M \cos \frac{\Delta\varphi}{2} \right) \cos \left(2n \sin \frac{2\omega t + \Delta\varphi}{2} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1} \left(2M \cos \frac{\Delta\varphi}{2} \right) \sin \left[(2n-1) \sin \frac{2\omega t + \Delta\varphi}{2} \right] \right\}, \quad (3)$$

式中: n 为贝塞尔函数的阶数。

式(3)表明,光强度 I 包含与相位差 $\Delta\varphi$ 相关的直流分量及以 ω 为基波的高次谐波分量。由于光电探测器积分响应速度远低于信号源调制速度,

因此滤除高次谐波分量后进行贝塞尔函数展开,可得

$$I = \frac{M^2 |E_0|^2}{2} (1 - \cos \Delta\varphi). \quad (4)$$

式(4)表明,光强度 I 与相位差 $\Delta\varphi$ 呈余弦函数关系, $\Delta\varphi$ 是测量光在空间飞行过程中产生的,因此可以进一步建立光强度 I 与飞行时间 t 的关系,偏振调制激光测距方法基于上述原理实现空间距离测量。由于光强度测量精度高于相位或时间测量精度,且光的偏振态在空间传输时不易受到干扰,因此偏振调制激光测距方法在原理上可以获得较高的测量精度。

2.2 偏振调制激光测距算法的特性分析

偏振调制激光测距算法需要依据偏振调制激光测距原理和光电信号特性实现,式(4)表明相位调制器调制效率 M 会对光强度 I 与相位差 $\Delta\varphi$ 之间的关系造成影响。受调制器工艺的影响,调制效率会随调制频率的变化而发生变化,当利用偏振调制激光测距法进行扫频调制时,受调制效率 M 影响,信号会发生变形,如图 2 所示实测信号波形,当扫频调制频率由 200~250 MHz 变为 350~400 MHz 时,信号波形发生较大变化。

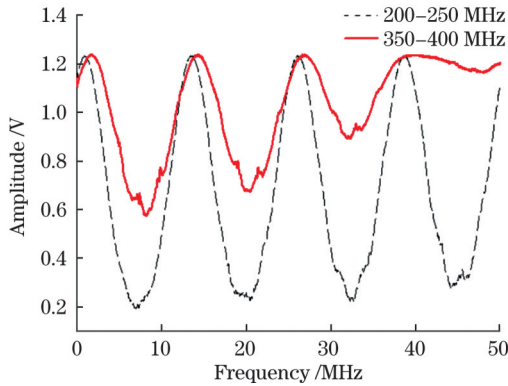


图 2 畸变波形实测图

Fig. 2 Measured distorted waveforms

为保证算法具有较高的精度,应使相位调制器工作在合适的频率区间,同时选取相位差 $\Delta\varphi=0$ 即光强最小处的调制频率进行距离解算,这样可以降低调制效率 M 对算法精度的影响。此时被测距离为半波长的整数倍,两个连续光强极小值点对应的调制频率满足

$$L = N_1 \frac{c}{2f_1} = N_2 \frac{c}{2f_2}, \quad (5)$$

式中: c 为光速; f_1, f_2 为相邻两个光强极小值点对应的调制频率, $f_1 < f_2$; N_1, N_2 为 f_1, f_2 对应的整波长数, $N_2 = N_1 + 1$ 。

联立可得空间距离与调制信号频率之间的关系为

$$L = \left[\frac{f_1}{f_2 - f_1} \right] \frac{c}{2f_1}, \quad (6)$$

式中: $[\cdot]$ 为取整运算。 $N_1 = \left[\frac{f_1}{f_2 - f_1} \right]$ 。

由式(6)可知,整波长数及测量距离 L 均与极值点频率 f_1, f_2 的测量准确性有关,为进一步分析测距精度

ΔL 与频率测量误差 Δf 之间的关系,式(5)在频率 f_1 处的偏导为

$$\frac{\partial L}{\partial f_1} = \frac{\partial \left(N_1 \frac{c}{2f_1} \right)}{\partial f_1} = -N_1 \frac{c}{2f_1^2}. \quad (7)$$

令 $f_0 = f_2 - f_1$, 利用式(5)计算可得 $f_1 = N_1 f_0$, 对式(7)进行进一步计算,可得距离相对误差为

$$\frac{\Delta L}{L} = -\frac{\Delta f_1}{N_1 f_0}, \quad (8)$$

式中: Δf_1 为极值点频率 f_1 的测量误差。

式(8)表明,偏振调制激光测距系统的测距误差 ΔL 与整波长数成反比,与极值点频率测量误差 Δf 成正比,因此极值点频率测量精度决定了偏振调制激光测距系统的距离测量精度。极值点频率误差来源主要有两个方面:一是信号源仪器的频率输出准确度,二是测距算法中的极值点频率解算准确度。以射频模拟信号发生器为例,当输出频率为 500 MHz 时,其标称频率误差为 1 Hz,具有很高的频率输出准确度。因此,提升极值频率解算准确度是提高偏振调制激光测距系统精度的关键。

摇摆法是使用较多的一种偏振调制激光测距算法,光强信号为余弦曲线,借助曲线对称性和单调性采用与斐波那契算法类似的无约束一维极值求解方法,通过多次迭代得到光强极值点频率。算法首先选定初始频率及其左右对称频率间隔 Δf 处的能量差值 ΔU , 然后以固定频率变化量 f_0 沿一个方向移动并计算 ΔU , 当频率由 f_1 变化到 f_2 且 ΔU 符号发生变化时,可判定极小值频率点 f_0 在 f_1 和 f_2 之间,缩小频率变化量 f_0 , 并反方向移动至 ΔU 符号再次发生变化,如此往复摇摆运动,直到 $\Delta U=0$ 或小于设定阈值,则认定此时频率为光能量极小值点频率 f_0 。但调制效率或测量光反射^[25]等因素造成波形信号对称性失真,影响了摇摆法的测距精度。

偏振调制波形信号符合一维多峰函数特征,利用最小二乘法拟合多项式的约束,可有效降低波形畸变对算法精度的影响,但最小二乘法拟合需要用到全波段数据,而偏振调制激光测距只关注极值点附近波形的拟合精度,因此最小二乘法在拟合效率和拟合精度上不完全适用于偏振调制激光测距系统中极小值点频率的求解。

2.3 基于改进 MLS 算法的偏振调制激光测距方法实现原理

本文提出了一种基于改进移动最小二乘 (IMLS) 法的偏振调制激光测距实现方法,IMLS 算法在移动最小二乘法基础上,快速划分局部极值点所在区域,动态调整节点权函数影响半径,通过最小化加权误差平方和,实现极值点附近曲线的高精度拟合及极值点频率的解算。

移动最小二乘法兼具加权最小二乘法和分阶段最

小二乘法的优点^[26],可同时实现分区间拟合和特殊点附近高精度拟合。MLS算法将基函数向量 $\boldsymbol{p}(x)$ 和系数向量 $\boldsymbol{a}(x)$ 相乘,利用较低阶次的基函数向量即可实现高精度拟合。拟合函数 $f(x)$ 表达式为

$$f(x) = \sum_{i=1}^m p_i(x) a_i(x) = \boldsymbol{p}^T(x) \boldsymbol{a}(x), \quad (9)$$

式中: $p_i(x)$ 为基函数向量元; $a_i(x)$ 为待定系数向量元; x 为空间坐标值; i 为基函数编号; m 为基函数个数; T 为转置。

偏振调制激光测距系统的频率-光强度曲线为一维曲线,因此选取完备一维二次多项式作为基函数向量,即 $\boldsymbol{p}(x) = (1, x, x^2)^T$ 。为提高局部拟合精度,移动最小二乘法引入权函数和紧支域,紧支域范围外权函数等于0,在紧支域范围内计算局部近似值 $f(x_i)$ 和节点值 y_i 残差的离散加权 L_2 范式:

$$J = \sum_{i=1}^n w(|x - x_i|/r) [f(x) - y_i]^2 = \sum_{i=1}^n w(x - x_i) [\boldsymbol{p}^T(x) \boldsymbol{a}(x) - y_i]^2, \quad (10)$$

式中: J 为节点处误差的加权平方和; n 为求解区域内的节点数; r 为紧支域影响半径; $w(x - x_i)$ 为节点 x_i 的权函数。式(10)用矩阵形式表示为

$$J = [\boldsymbol{P} \boldsymbol{a}(x) - \boldsymbol{Y}]^T \boldsymbol{W}(x) [\boldsymbol{P} \boldsymbol{a}(x) - \boldsymbol{Y}], \quad (11)$$

式中: $\boldsymbol{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_n)^T$; $\boldsymbol{W}(x) = \text{diag}[w_1(x), w_2(x), \dots, w_i(x), \dots, w_n(x)]$, 其中 $w_i(x) =$

$$w(x - x_i); \boldsymbol{P} = \begin{bmatrix} p_1(x_1) & p_2(x_1) & \cdots & p_m(x_1) \\ p_1(x_2) & p_2(x_2) & \cdots & p_m(x_2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_1(x_n) & p_2(x_n) & \cdots & p_m(x_n) \end{bmatrix}.$$

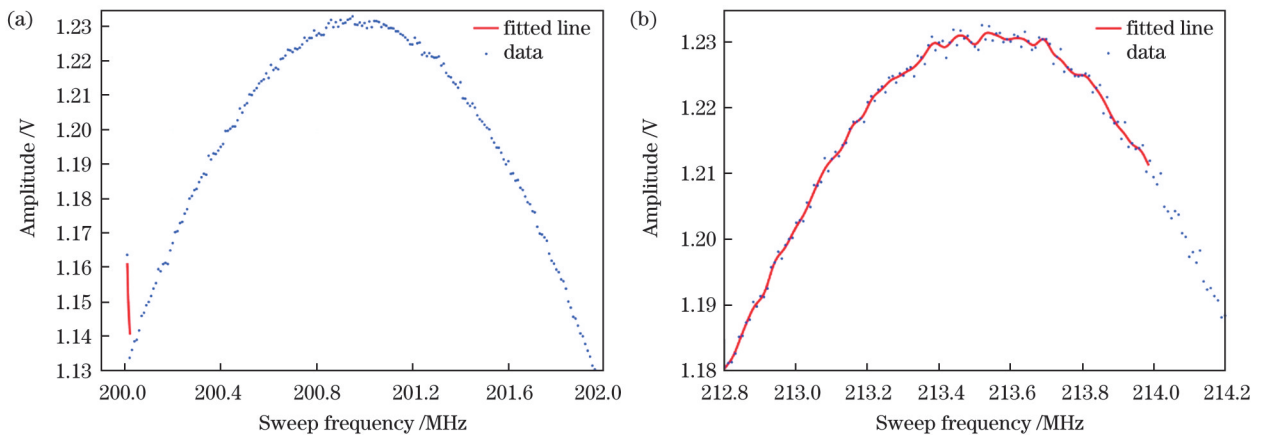


图3 影响半径为60 kHz时的波形图。(a)异常点拟合波形图;(b)顶部拟合波形图

Fig.3 Waveforms when influence radius is 60 kHz. (a) Fitting waveform for abnormal points; (b) fitting waveform for top part

IMLS算法首先采用四参数正弦波拟合算法^[27]快速划分一维多峰函数各个局部极值点所在的区间,选取权函数和拟合半径,在局部极值点区间进行MLS拟合;利用拟合得到的系数向量 $\boldsymbol{a}(x)$ 滑动求解影响半径内的极值点,建立局部极值点和拟合误差序列列表,设定

利用最小二乘法原理,在紧支域范围内进行最优解求解,得到待定系数向量 $\boldsymbol{a}(x)$ 为

$$\boldsymbol{a}(x) = \boldsymbol{A}^{-1}(x) \boldsymbol{B}(x) \boldsymbol{Y}, \quad (12)$$

式中: $\boldsymbol{A}(x) = \boldsymbol{P}^T \boldsymbol{W}(x) \boldsymbol{P}$; $\boldsymbol{B}(x) = \boldsymbol{P}^T \boldsymbol{W}(x)$ 。

通过求解系数向量 $\boldsymbol{a}(x)$,利用不同的权函数和影响半径,MLS算法可对局部曲线进行高精度拟合,但偏振调制激光测距系统无法对一维多峰函数信号的极值频率进行求解。因此本文在MLS算法的基础上,提出一种结合预处理和局部极值求解的改进MLS算法。

改进MLS算法的关键参数包括权函数和影响半径。权函数选取须要具有非负性、紧支性、单调递减性、光滑性、有限影响性等特点,以保证当基函数 $\boldsymbol{p}(x)$ 阶次较低时,拟合过程可以继承权函数的连续性,使改进MLS形状函数具有较高的连续性和相容性。由于权函数作用范围与影响半径有关,因此影响半径的选取影响算法解算精度。为保证式(12)求解过程中矩阵 $\boldsymbol{A}(x)$ 可逆,须满足在影响域内基函数向量 $\boldsymbol{p}(x)$ 的 n 个节点线性无关,即算法对影响半径有最小值要求。当以10 kHz为扫频步进进行扫频调制时,应保证影响半径不小于30 kHz。但在影响半径为60 kHz的情况下,在250~300 MHz范围内进行扫频测距实验发现,当采样数据存在异常点时,算法误判已达到停止阈值,如图3(a)所示,而且当影响半径为60 kHz时,光电探测器采集到的光能量幅值顶部的局部特征会充分拟合,出现多个接近极值点,影响峰值点频率的求解,如图3(b)所示,因此IMLS算法根据拟合精度和解算速度需求,对影响半径进行动态调整。

阈值确定极值点精确区间;在局部极值点精确区间内,动态调整影响半径,实现极值点局部曲线的高精度拟合,拟合曲线在该区间的极值点对应调制频率;按照式(6)利用相邻极值点的频率值进行测量距离解算。算法实现流程如图4所示。

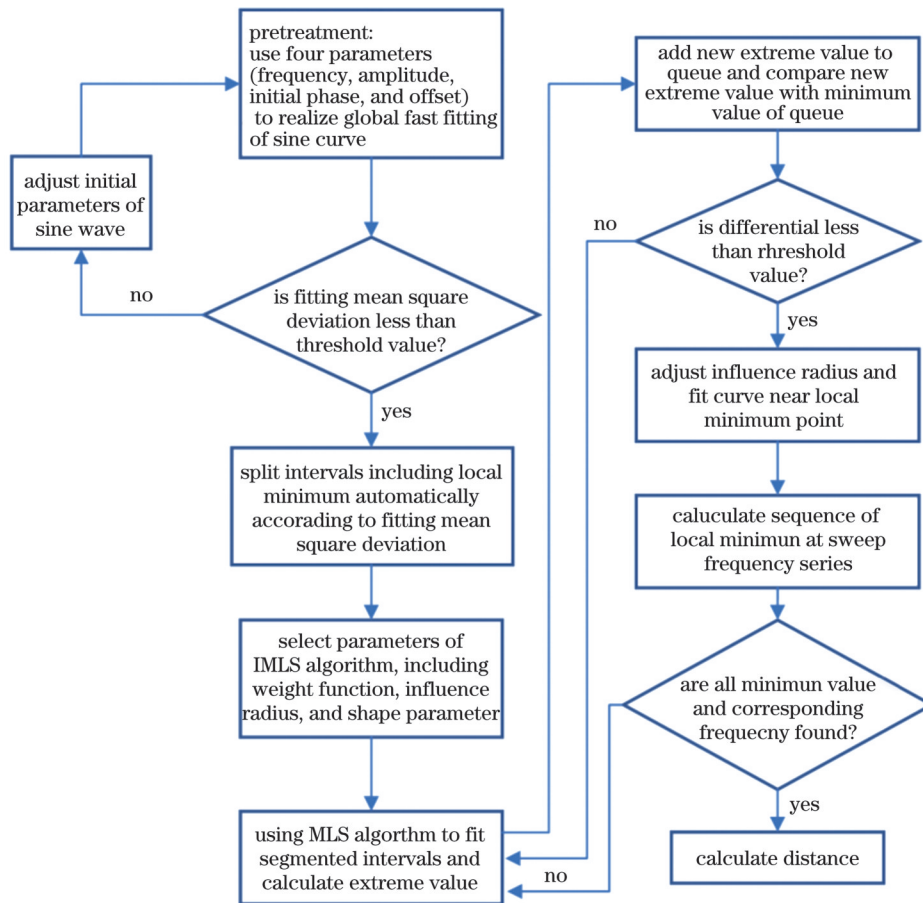


图 4 IMLS 算法实现偏振调制激光测距的流程图

Fig. 4 Flow chart of IMLS algorithm for realizing polarization modulation laser ranging

3 实验系统设计与结果分析

3.1 波导式偏振调制激光测距实验系统的设计

为验证改进 MLS 算法实现偏振调制激光测距的有效性,本文设计了偏振调制激光测距实验装置,如图 5 所示。其中,图 5(a)为依据偏振调制激光测距原理设计的光电收发模块实物图,图 5(b)为测距实验系统

的实物图。测距系统主要由光电系统、调制信号源、数据采集器与计算机构成,利用光在光纤中的传输模拟空间飞行,在测量光往返通过相位调制器时,利用调制信号源对测量光偏振态进行二次调制,数据采集器完成光电探测器光强度的转换采集,计算机控制信号源输出频率、信号源与数据采集器间的时序同步以及偏振调制激光测距算法的执行。

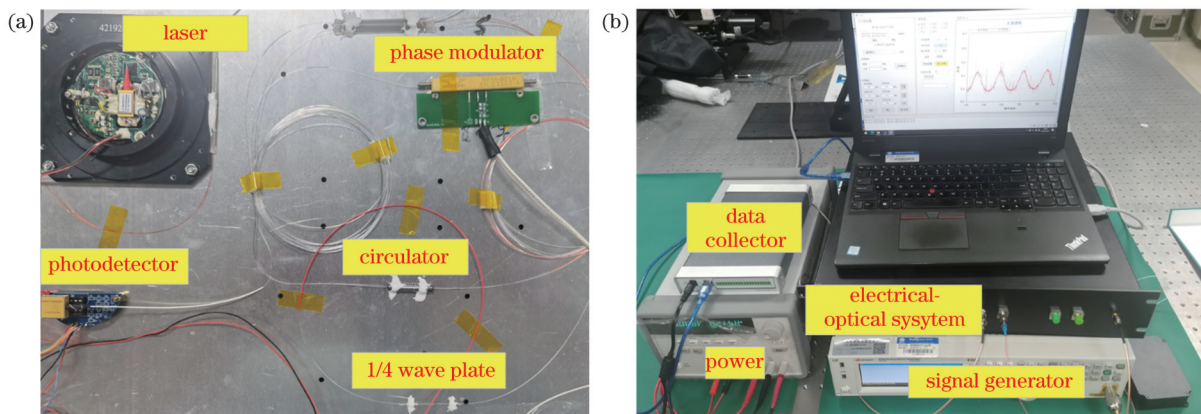


图 5 偏振调制激光测距实验的装置图。(a)光电收发模块;(b)测距实验系统的实物图

Fig.5 Device photos of polarization modulation laser ranging experiment. (a) Module of photoelectric transceiver; (b) physical picture of ranging experiment system

3.2 IMLS 算法关键参数的实验结果分析

通过对 IMLS 算法进行分析可知,影响半径同时影响权函数的作用范围和算法的解算精度,因此为了实现对二者的充分验证,首先选取固定的高斯函数作为权函数,验证不同影响半径对算法的影响,然

后再综合验证不同权函数和影响半径对算法精度的影响。

在 250~300 MHz 范围内,以 10 kHz 为扫频步进行扫频调制测距实验,分别在影响半径 60、100、150、200 kHz 下进行对比验证,实验结果如表 1 所示。

表 1 不同影响半径下的对比实验数据

Table 1 Comparative experimental data under different influence radii

| Influence radius /kHz | Distance /m | Residual error / mm | Average error /mm | Influence radius /kHz | Distance /m | Residual error / mm | Average error /mm |
|-----------------------|-------------|---------------------|-------------------|-----------------------|-------------|---------------------|-------------------|
| 60 | 11.944595 | 0.862 | 3.068 | 150 | 11.944300 | 1.346 | 0.927 |
| | 11.939131 | -4.602 | | | 11.941564 | -1.390 | |
| | 11.947472 | 3.739 | | | 11.942998 | 0.044 | |
| 100 | 11.944832 | 2.114 | 1.747 | 200 | 11.943527 | 0.258 | 0.216 |
| | 11.940098 | -2.620 | | | 11.942946 | -0.323 | |
| | 11.943224 | 0.506 | | | 11.943335 | 0.066 | |

实验结果表明,影响半径 r 取值过小会造成矩阵不可逆,或受异常信号干扰,出现解算错误,随着影响半径的增加,距离解算精度会提升,但为保证 MLS 算法的移动特性,且不过度增加算法的计算量,IMLS 算法设定影响半径不超过扫描频率范围的 1/10,并须进一步分析权函数影响后,实现 IMLS 算法综合参数的最优化。

常用权函数有高斯函数、样条函数、正态加权函数等,但算法的拟合精度并不随权函数阶次的增高而增加^[28],因此本文主要选取正态加权函数、高斯函数和三次样条函数作为权函数进行对比分析。

高斯函数为

$$w(r, \beta) = \begin{cases} \frac{\exp(-\beta^2 r^2) - \exp(-\beta^2)}{1 - \exp(-\beta^2)}, & r \leq 1 \\ 0, & r > 1 \end{cases}, (13)$$

三次样条函数为

$$w(r) = \begin{cases} \frac{2}{3} - 4r^2 + 4r^3, & r \leq \frac{1}{2} \\ \frac{4}{3} - 4r + 4r^2 - \frac{4}{3}r^3, & \frac{1}{2} < r \leq 1 \\ 0, & r > 1 \end{cases}, (14)$$

正态加权函数为

$$w(r, \sigma) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{r}{\sigma}\right)^2\right], & r \leq 1 \\ 0, & r > 1 \end{cases}, (15)$$

式中: β 为高斯函数的形状参数; σ 为正态加权函数的形状参数。

根据式(13)~(15)可知,权函数与影响半径 r 、高斯函数形状参数 β 和正态加权函数形状参数 σ 均有密切关系。为综合验证这些参数对改进 MLS 算法测距精度的影响,在 100~450 MHz 频率区间内,每 50 MHz 为 1 个区间段,以 10 kHz 为扫频步进进行扫频偏振调制,每个区间段可采集得到 4 个极值点区间,对相邻两极小值点进行距离解算,在整个扫频区间内可获得 18 个距离值,计算得到测量距离的均方差值。分别利用三种权函数及不同形状参数和影响半径进行距离解算,得到的测距误差如表 2 所示。

实验结果表明,改进 MLS 算法能够实现极值频率查找及测量距离解算,通过对影响半径、权函数、形状参数等影响因素的分析优化,以正态加权函数为权函数的距离测量最小均方差值为 0.111 mm,以高斯函数

表 2 不同 IMLS 算法参数下的对比实验结果

Table 2 Comparative experimental results under different IMLS parameters

| Weight function | Shape parameter | Influence radius /kHz | Mean square deviation /mm | Weight function | Shape parameter | Influence radius /kHz | Mean square deviation /mm |
|--------------------------|-----------------|-----------------------|---------------------------|-------------------|-----------------|-----------------------|---------------------------|
| Normal weighted function | $\sigma = 0.5$ | 100 | 8.380 | Gaussian function | $\beta = 0.5$ | 500 | 0.177 |
| | $\sigma = 0.5$ | 300 | 0.280 | | $\beta = 1.0$ | 100 | 3.844 |
| | $\sigma = 0.5$ | 500 | 0.190 | | $\beta = 1.0$ | 300 | 0.313 |
| | $\sigma = 1.0$ | 300 | 0.249 | | $\beta = 1.0$ | 500 | 0.178 |
| | $\sigma = 1.0$ | 500 | 0.349 | | $\beta = 3.0$ | 100 | 200.690 |
| | $\sigma = 3.0$ | 300 | 0.246 | | $\beta = 3.0$ | 500 | 69.684 |
| | $\sigma = 3.0$ | 500 | 0.111 | | $\beta = 5.0$ | 100 | 206.132 |
| Cubic spline function | — | 500 | 0.237 | $\beta = 5.0$ | 500 | 0.805 | |

作为权函数的距离测量最小均方差值为 0.177 mm, 以三次样条函数作为权函数的距离测量最小均方差值为 0.237 mm。

3.3 算法对比实验的结果分析

为评价本文提出的改进 MLS 算法的测距精度, 利

用摇摆法和多阶次最小二乘拟合算法对 3.2 节实验数据进行距离解算, 实验过程与 IMLS 参数对比实验相同, 实验结果为 18 次距离测量值的平均值及均方差值, 对比结果如表 3 所示。

表 3 不同算法的距离解算结果对比

Table 3 Comparison of distance calculation results of different algorithms

| Algorithm | Parameter | Distance / m | Mean square deviation / mm | Algorithm | Parameter | Distance / m | Mean square deviation / mm |
|--------------|---|--------------|----------------------------|---------------------|----------------------|--------------|----------------------------|
| IMLS | $\sigma=3, r=500$ kHz(normal weighted function) | 11.942009 | 0.111 | Least square method | Quadratic polynomial | 11.942465 | 0.669 |
| | $\beta=0.5, r=500$ kHz(Gaussian function) | 11.942172 | 0.177 | | Cubic polynomial | 11.941671 | 0.317 |
| Swing method | — | 11.942204 | 0.219 | Quartic polynomial | — | 11.941463 | 0.464 |

由表 5 可知: 当利用最小二乘法进行距离解算时, 三次多项式的测量均方差最小, 四次多项式的测量精度低于三次多项式; IMLS 算法的测量精度优于最小二乘法, 说明 IMLS 算法比最小二乘法更适合实现偏振调制激光测距方法。在相同测试条件下, IMLS 算法的测量均方差最小, 优于摇摆法和最小二乘法, 能够有效实现偏振调制激光测距算法精度的提升。

4 结 论

分析了偏振调制激光测距原理、光电信号特性以及测距算法需求, 提出了基于改进 MLS 算法的偏振调制激光测距实现方法, 介绍了算法原理和实现流程, 搭建了偏振调制激光测距实验系统, 分析比较了算法中的权函数、影响半径等关键参数对算法精度的影响, 并对所提出的 IMLS 算法、摇摆法、最小二乘法进行了对比验证实验。实验结果表明, 当选取正态加权函数作为权函数, 形状参数 $\sigma=3$, 影响半径 $r=500$ kHz 时, 所提出的 IMLS 算法的距离测量均方差值最小, 为 0.111 mm, 精度优于摇摆法和最小二乘法。实验结果验证了 IMLS 算法用于偏振调制激光测距实现的可行性和有效性, 为偏振式激光测距算法研究提供了一种新思路。

偏振调制激光测距技术在大尺寸工业测量领域有着诸多不可替代的应用, 须要进一步开展信号处理方法研究, 提升偏振调制激光测距技术的解算精度, 综合优化偏振调制激光测距系统, 形成具有自主知识产权的产品, 促进偏振调制激光测距技术的工程化应用。

参 考 文 献

[1] 王铜, 周维虎, 董岚, 等. 粒子加速器中激光跟踪仪控制网测量精度研究[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版): 1-14[2022-03-

13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1676.TN.20211108.1835.004.html>.

Wang T, Zhou W H, Dong L, et al. Research on the accuracy of control network measured by laser tracker in particle accelerator[J/OL]. Geomatics and Information Science of Wuhan University: 1-14[2022-03-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1676.TN.20211108.1835.004.html>.

[2] 朱永国, 张文博, 邓正平, 等. 基于激光跟踪仪和机器视觉的飞机翼身对接装配偏差动态综合修正[J]. 机械工程学报, 2019, 55(24): 187-196.

Zhu Y G, Zhang W B, Deng Z P, et al. Dynamic synthesis correction of deviation for aircraft wing-fuselage docking assembly based on laser tracker and machine vision[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(24): 187-196.

[3] 向民志, 范百兴, 李祥云, 等. 激光跟踪仪与机器人坐标系转换方法研究[J]. 航空制造技术, 2018, 61(S1): 98-101.

Xiang M Z, Fan B X, Li X Y, et al. Study on coordinate transformation between a laser tracker and a robot[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(S1): 98-101.

[4] 吴冠豪, 周思宇, 杨越棠, 等. 双光梳测距及其应用[J]. 中国激光, 2021, 48(15): 1504002.

Wu G H, Zhou S Y, Yang Y T, et al. Dual-comb ranging and its applications[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(15): 1504002.

[5] 贺红雨, 孙建锋, 卢智勇, 等. 基于载波相位调制的相位式激光测距外场实验[J]. 中国激光, 2021, 48(24): 2404001.

He H Y, Sun J F, Lu Z Y, et al. Outdoor experiments of phase-shift laser range finder technique based on optical carrier phase modulation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(24): 2404001.

[6] 王一帆, 徐欣, 谈宜东. 激光精密测距技术进展[J]. 航天返回与遥感, 2021, 42(6): 22-33.

Wang Y F, Xu X, Tan Y D. Laser precision ranging technology[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2021, 42(6): 22-33.

[7] Ibaraki S, Kudo T, Yano T, et al. Estimation of three-dimensional volumetric errors of machining centers by a tracking interferometer[J]. Precision Engineering, 2015, 39: 179-186.

[8] 刘智超, 张则宇, 朱建军. ME5000 测距仪校准测距基线的可行性分析[J]. 计测技术, 2013, 33(5): 63-65.

Liu Z C, Zhang Z Y, Zhu J J. Feasibility study on ME5000 distance meter for calibrating baseline length[J]. Metrology & Measurement Technology, 2013, 33(5): 63-65.

[9] Dvořák F. Calibration of electronic distance meters[D]. Prague: Czech Technical University, 2012.

- [10] Sabatke D, von Handorf R, Sullivan J. Polarization and fold mirrors in application of the Leica Absolute Distance Meter[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7461: 74610N.
- [11] 黑克非. 基于二次偏振调制的高精度绝对距离测量技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
Hei K F. Study on high-precision absolute distance measurement based on double polarization modulation method[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [12] 肖洋, 于晋龙, 王菊, 等. 二次偏振调制测距系统中调制频率与测距精度的关系[J]. 物理学报, 2016, 65(10): 100601.
Xiao Y, Yu J L, Wang J, et al. Relationship between modulation frequency and range accuracy in the double polarization modulation range finding system[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(10): 100601.
- [13] 王茜婷. 基于二次偏振调制的微波干涉激光测距系统研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
Wang Q T. Research on microwave interference laser ranging system based on double polarization modulation[D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.
- [14] 赵博雅. 面向二次调制距离测量的 FPGA 算法实现[D]. 天津: 天津大学, 2018.
Zhao B Y. FPGA algorithm realization based on double modulation laser ranging[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [15] 高书苑, 黎尧, 纪荣伟, 等. 偏振调制测距系统频率漂移误差及其补偿[J]. 光学精密工程, 2019, 27(2): 279-286.
Gao S Y, Li Y, Ji R Y, et al. Frequency drift error and its compensation in polarization modulation range-finding system[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(2): 279-286.
- [16] Gao S Y, Ji R Y, Li Y, et al. Compensation of frequency drift in frequency-sweep polarization-modulation ranging system[J]. Applied Science, 2019, 9(6): 1243.
- [17] 高超, 纪荣伟, 高书苑, 等. 波导式偏振调制测距系统[J]. 光学精密工程, 2022, 30(3): 246-255.
Gao C, Ji R Y, Gao S Y, et al. Polarization modulation range-finding system based on waveguide phase modulator[J]. Optics and Precision Engineering, 2022, 30(3): 246-255.
- [18] Luthi T, Bckem B. Electro-optic distance-measuring device: US9405007[P/OL]. 2015-03-19[2022-07-27]. <http://www.freepatentsonline.com/9405007.pdf>.
- [19] 赵恒, 陈娱欣, 续小丁, 等. 基于局部对称加权惩罚最小二乘的拉曼基线校正[J]. 中国激光, 2018, 45(12): 1211001.
Zhao H, Chen Y X, Xu X D, et al. Baseline correction for Raman spectra based on locally symmetric reweighted penalized least squares[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(12): 1211001.
- [20] 盘宏斌, 罗安, 唐杰, 等. 一种改进的基于最小二乘法的自适应谐波检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 144-151.
Pan H B, Luo A, Tang J, et al. An improved adaptive harmonic detection method based on least squares algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13): 144-151.
- [21] Zhang L, Gu T Q, Zhao J, et al. An improved moving least squares method for curve and surface fitting[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013, 2013: 159694.
- [22] 谭渝, 李小林. 非线性 Gilson-Pickering 方程的移动最小二乘近似无网格法[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2022, 39(2): 84-88.
Tan Y, Li X L. Analysis of nonlinear Gilson-Pickering equation by moving least square approximate meshless method[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2022, 39(2): 84-88.
- [23] Tran Q A, Berzins M, Soowski W. An improved moving least squares method for the Material Point Method[EB/OL]. [2022-02-05]. <https://www.sci.utah.edu/publications/Tra2019a/2019%20MPM2019%20Tran%20et%20al.%20-%20IMLS.pdf>.
- [24] 王红平, 史明. 基于改进移动最小二乘法的数据拟合[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(3): 9-13, 20.
Wang H P, Shi M. Data fitting based on improved moving least square method[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2021(3): 9-13, 20.
- [25] 蒋丽媛, 刘定权, 马冲, 等. 温度变化对金属 Ag 膜反射镜偏振特性的影响研究[J]. 中国光学, 2018, 11(4): 604-609.
Jiang L Y, Liu D Q, Ma C, et al. Influence of temperature variation on polarization characteristics of silver thin film mirror[J]. Chinese Optics, 2018, 11(4): 604-609.
- [26] Zhang H Q, Guo C X, Su X F, et al. Measurement data fitting based on moving least squares method[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015, 2015: 195023.
- [27] Handel P. Properties of the IEEE-STD-1057 four-parameter sine wave fit algorithm[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2000, 49(6): 1189-1193.
- [28] 倪慧. 移动最小二乘数据拟合中的若干问题研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2011.
Ni H. Research on some problems of moving least square method in the data fitting[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2011.

Implementation of Polarization Modulation Laser Ranging Method Based on Improved Moving Least Square Algorithm

Gao Chao^{1,2}, Zhou Weihu^{1,2*}, Gao Shuyuan³, Ji Rongyi^{1,2}, Pan Yingling^{1,2}

¹Research and Development Center of Photoelectric Technology, Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³School of Mechanical Engineering and Rail Transit, Changzhou University, Changzhou 213164, Jiangsu, China

Abstract

Objective Absolute laser ranging is widely used in scientific research and industry. Several types of absolute distance measurement methods can be used, such as the time-of-flight method, phase ranging method, multiwavelength interferometry, and dual-comb ranging. The polarization laser ranging method is a phase-ranging method that establishes the functional relationship among the laser polarization, modulation frequency, and measurement distance. As laser polarization is less susceptible to interference from environmental disturbances, the polarization laser ranging method can achieve higher precision than the phase-ranging method. Laser polarization rangefinders have an irreplaceable role in fields such as assembly and inspection of large structural parts and field baseline construction. However, owing to technological monopoly and blockades, no independently developed laser polarization rangefinders

are available in China. Research in universities and research institutes has mainly focused on system implementation and error analysis. The swing method is the only polarization laser ranging algorithm used in these studies. Waveform distortion would reduce the swing method accuracy; therefore, research on polarization laser ranging algorithms is necessary to improve ranging accuracy.

Methods Based on the principle of polarization modulation ranging, the reason for waveform distortion and the influence of the local minimum point frequency accuracy on the ranging accuracy are studied. To obtain the minimum points of the demodulated signal, the swing and least square methods for polarization laser ranging are compared. The swing method is affected by waveform distortion. The least square method is widely used in curve fitting, which can effectively reduce the influence of waveform distortion and increase the accuracy by using higher-order fitting polynomials. The least square method uses all data to fit the curve; however, the polarization laser ranging algorithm focuses solely on the local minimum ranges. In terms of fitting efficiency and accuracy, it is not completely applicable to resolve the local minimum points of the demodulated signal. The moving least square (MLS) method is an optimization algorithm of the least square method that can simultaneously realize interval fitting and high-precision fitting near special points. This is suitable for high-precision curve fitting using the local minimum range data. In this study, a polarization-ranging algorithm based on the improved moving least square (IMLS) algorithm is proposed. The algorithm flow is as follows. First, the algorithm achieves global fit and determines the intervals containing the minimum points. Second, it performs curve fitting using the MLS algorithm along the curve in one of the intervals until it finds the minimum point in this interval. Then, the influence radius is selected automatically according to the mean square deviation, and the frequency corresponding to the local minimum point is calculated. Finally, the distance is calculated using two adjacent frequency values of the local minimum points. A flowchart of the improved MLS algorithm for polarization laser ranging is shown in Fig. 4.

Results and Discussions Distance-measurement experiments are conducted to verify the accuracy of the IMLS algorithm. First, the influence of the key IMLS algorithm parameters, such as the weight function and influence radius, is tested. Thus, the influence radius is extremely important. If the value is too small, it can cause matrix singularity and fitting anomaly, as shown in Fig. 3. The experimental results listed in Table 3 indicate that the higher the influence radius, the smaller the IMSL residual error with the same weight function. However, to ensure the movement characteristics of the MLS algorithm and decrease the number of calculations, the influence radius should be less than 10% of the sweep interval. The comparison results under comprehensive parameters are listed in Table 4, and indicate that the measurement mean square deviation is subject to the common influence of both the weight functions and the influence radius. The measurement mean square deviations of the normal weighted function, cubic spline function, and Gaussian function are 0.111, 0.237, and 0.177, respectively. The comparative results of the IMLS algorithm, swing method, and least square method are presented in Table 5. When the measured distance is 11.94 m, the minimum errors of the swing method, least square method, and IMLS algorithm are 0.219, 0.317, and 0.111 mm, respectively. The accuracy of the IMLS algorithm is higher than those of the swing and least square methods.

Conclusions In this study, the IMLS method is applied to implement a polarization laser ranging algorithm. The experimental results show that the IMLS algorithm can reduce the impact of waveform distortion and improve the precision of the polarization ranging system. The IMLS algorithm has a higher precision than the swing and least square methods. The proposed IMLS algorithm is suitable for determining the polarization modulation range and provides a reference for research on polarization laser ranging algorithms.

Key words measurement; laser ranging; polarization modulation; improved moving least square method; extreme detection