

## 调幅扫频激光测距同相频率鉴频方法

潘映伶 纪荣祎 董登峰 李佳蒙 周维虎

### In-phase frequency detection method for frequency-sweep amplitude-modulation laser ranging

PAN Ying-ling, JI Rong-yi, DONG Deng-feng, LI Jia-meng, ZHOU Wei-hu

引用本文:

潘映伶, 纪荣祎, 董登峰, 李佳蒙, 周维虎. 调幅扫频激光测距同相频率鉴频方法[J]. 中国光学, 优先发表. doi: 10.37188/CO.2025-0159

PAN Ying-ling, JI Rong-yi, DONG Deng-feng, LI Jia-meng, ZHOU Wei-hu. In-phase frequency detection method for frequency-sweep amplitude-modulation laser ranging[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.37188/CO.2025-0159

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0159>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 太极计划星间激光通信测距的伪随机码选取

Pseudo-random code selection for inter-satellite laser ranging and data communication in the Taiji program

中国光学 (中英文). 2025, 18(3): 547 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0033>

#### 高精度倒装焊机光学对位系统研制及算法研究

Development and algorithm research of optical alignment system for a high precision flip chip bonder

中国光学 (中英文). 2023, 16(3): 587 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0101>

#### 太极计划中的星间激光测距地面电子学验证

Ground electronics verification of inter-satellites laser ranging in the Taiji program

中国光学 (中英文). 2023, 16(4): 765 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0041>

#### 基于互补集合经验模态分解结合希尔伯特变换的光频扫描干涉信号相位提取方法

Phase-extracting method of optical frequency scanning interference signals based on the CEEMD-HT algorithm

中国光学 (中英文). 2023, 16(3): 682 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0173>

#### 调制转移光谱对激光频率起伏分辨率的影响因素分析及优化方法

The influence factors and optimization of modulation transfer spectroscopy for laser frequency discrimination

中国光学 (中英文). 2024, 17(4): 801 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0191>

#### 基于FPGA的PDH激光稳频数字化实现

Digital implementation of PDH laser frequency stabilization system based on FPGA

中国光学 (中英文). 2025, 18(3): 557 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0080>

文章编号 2097-1842(xxxx)x-0001-11

## 调幅扫频激光测距同相频率鉴频方法

潘映伶<sup>1,2</sup>, 纪荣祎<sup>1,2\*</sup>, 董登峰<sup>1,2</sup>, 李佳蒙<sup>1,2</sup>, 周维虎<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院微电子研究所, 北京 100094;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 调幅扫频激光测距是一种通过确定同相频率以实现待测距离求解的测距方法, 具备高测量精度及低系统复杂度的特点。针对含同相频率信息采样波形的信噪比不佳, 同相频率求解准确度受限等问题, 提出基于奇异谱分析结合局部抛物线拟合 (SSA-LPF) 的鉴频方法。首先介绍调幅扫频激光测距的原理以及分析测距精度依赖于同相频率的准确求解; 仿真对比相同采样波形经 SSA 法滤波后摇摆法、抛物线拟合、三阶及四阶拟合最小二乘法对同相频率求解准确性的差异, 验证了抛物线拟合法求解同相频率精度相较于摇摆法平均绝对偏差提升 95.7%, 相较于其他最小二乘法拟合方法提升 65.6%; 搭建测距系统实测分析, 实验结果表明, SSA-LPF 法在不同距离及不同扫频步长下测距均方差优于 30  $\mu\text{m}$ ; 调幅扫频激光测距采用 SSA-LPF 鉴频法可以提升测距效率同时保障测距精度。

**关键词:** 激光测距; 调幅扫频; 极值检测; 奇异谱分析; 局部抛物线拟合

中图分类号: TH741; TN249

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2025-0159

CSTR: 32171.14.CO.2025-0159

## In-phase frequency detection method for frequency-sweep amplitude-modulation laser ranging

PAN Ying-ling<sup>1,2</sup>, JI Rong-yi<sup>1,2\*</sup>, DONG Deng-feng<sup>1,2</sup>, LI Jia-meng<sup>1,2</sup>, ZHOU Wei-hu<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Microelectronics Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

\* Corresponding author, E-mail: jirongyi@ime.ac.cn

**Abstract:** Frequency-sweep Amplitude-modulation Laser Ranging (FSAMLR) is a ranging method that determines the target distance by solving for the in-phase frequency, characterized by high measurement accuracy and low system complexity. To address issues such as the low signal-to-noise ratio in sampled waveforms containing in-phase frequencies and the resulting limitations in solving accuracy, a method based on Singular Spectrum Analysis combined with Local Parabolic Fitting (SSA-LPF) is proposed. The principle of FSAMLR is outlined, emphasizing that ranging accuracy depends on the precision of the in-phase frequencies. Subsequently, simulations compare the solving accuracy of in-phase frequencies among the swing method, parabolic fitting, cubic fitting, and quartic fitting, using identical sampled waveforms filtered via the SSA method. Parabolic fitting is verified to enhance solution accuracy. Simulation results demonstrate that parabolic fitting achieves a 95.7% reduction in mean absolute deviation relative to the swing method and a 65.6%

收稿日期: 2025-12-18; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No. 2023YFB3407901)

Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2023YFB3407901)

improvement over other least-squares fitting methods. Experimental analysis indicates that the SSA-LPF method yields a ranging standard deviation below 30  $\mu\text{m}$  across varying distances and sweep steps. Adopting the SSA-LPF method in FSAMLRL enhances ranging efficiency while maintaining high ranging accuracy.

**Key words:** laser ranging; frequency-sweep amplitude-modulation; extreme detection; singular spectrum analysis; local parabolic fitting

## 1 引言

激光测距是大尺寸精密测量中的关键支撑技术,为高端零部件装配、测量及精度溯源提供了保障,随着日益增长的制造精度需求,对激光测距的测程和测量精度提出了新的挑战<sup>[1-3]</sup>。工业成熟度较高的测距方法主要是经典相位测距法和偏振扫频激光测距法。其中经典相位测距法会存在幅相误差、测尺拼接误差等多来源误差<sup>[4-5]</sup>。偏振扫频测距法精度较高,但其系统所需的偏振调制器工艺复杂,制备难度较高,且系统测量精度和偏振状态强相关,光路结构系统较为复杂,兼容性较低<sup>[6-8]</sup>。本文提出一种调幅扫频激光测距 (Frequency-sweep Amplitude-modulation Laser Ranging FSAMLRL) 方法,具备高测量精度和低系统复杂度。其测距原理借鉴菲索-旋转齿轮法光速测量原理,与偏振扫频测距法类似,结合了经典相位测距法优势,系统简单成本低,无需高性能偏振调制器,测量系统与偏振态无关;且系统不存在模糊距离,不会存在多测尺拼接误差;该方法通过改变调制频率以保障参考路及测量路维持同相位差值,建立频率与探测信号幅值的对应的积分幅值 (Integral Amplitude IA) 波形,检测波形极小值对应的同相频率值 (In-phase Frequency IPF) 以求解待测距离<sup>[9]</sup>。

调幅扫频激光测距的积分幅值波形与偏振扫频激光测距获取的电压幅值波形均类似正弦波形,针对偏振扫频激光测距极小值对应的同相频率求解已有学者自 2014 年起开展了相关研究,天津大学提出采用摇摆法间接测量电压幅值波形极小值,该方法具备测量实时性,但测距系统需要对光信号进行二次调制,由于偏振调制器两次调制的不对称性会导致幅值波形不对称,测量存在误差<sup>[6,10]</sup>。2023 年微电子所提出了一种改进的移动最小二乘法,通过快速划分极值点所在区域,对局部极值点完成拟合,验证了对波形局部极值拟合

可以提升拟合精度和拟合效率,实现了 0.111 mm 的距离测量均方差,但需动态求解系数矩阵,计算数据量较大<sup>[11]</sup>。同年常州大学基于滑动均值滤波对幅值波形完成去噪,再采用梯度下降法完成极值点搜索,拟合波形基于四项式拟合,且收敛步长不具备普适性,该方法实现了 0.6 mm 的测距均方差<sup>[12]</sup>。2024 年常州大学提出一种增强微分算法,将极值点求解转化为过零点求解,该方法实现了 6.8  $\mu\text{m}$  的测距重复性,但系统零点探测最优参数需实验检验,系统复杂度较高<sup>[13]</sup>。以上偏振扫频激光测距极小值求解方法表明采用摇摆法和最小二乘法拟合求解极小值在距离值实时求解方面具备优势;幅值波形的去噪预处理可提升波形拟合的准确度同时减小局部最优解误差;但上述求解方法涉及参数较多,且参数不具备普适性,不利于系统稳定性和测距效率的提升。

调幅扫频激光测距与偏振扫频调制不同,不存在因调制器二次调制导致的信号波形变形问题<sup>[14-15]</sup>。积分幅值波形呈正弦波,极小值两侧波形具有较优对称性,但由于多次光电转换导致波形信噪比不佳,极小值处波形光滑度受限,导致同相频率求解不准,影响测距精度。针对上述问题,本文提出一种奇异谱分析结合局部抛物线拟合 (Singular Spectrum Analysis-Local Parabolic Fitting SSA-LPF) 的同相频率鉴频方法。采用奇异谱分析方法无需先验噪声模型即可对波形完成滤波,结合局部抛物线拟合平衡计算效率及数值稳定性<sup>[11,16]</sup>。与偏振扫频鉴频常用的摇摆法 (Swing Method)、最小二乘法三阶拟合 (Cubic fitting) 及四阶拟合 (Quartic fitting) 对比,仿真及实测验证采用 SSA-LPF 法对同相频率鉴频性能最优;仿真中测距平均绝对偏差 (Mean absolute deviation MAD) 相较于摇摆法提升 95.7%,相较于最小二乘法三阶及四阶拟合方法提升 65.6%;实测中所提方法测距均方差在不同待测距离及不同扫频步长下优于 30  $\mu\text{m}$ 。

## 2 基本原理

### 2.1 调幅扫频激光测距原理

调幅扫频激光测距系统如图 1 所示, 调幅激光信号经由分束器分为参考及测量两路信号, 两路信号经由探测器完成光电转换经鉴频处理以求解待测距离。

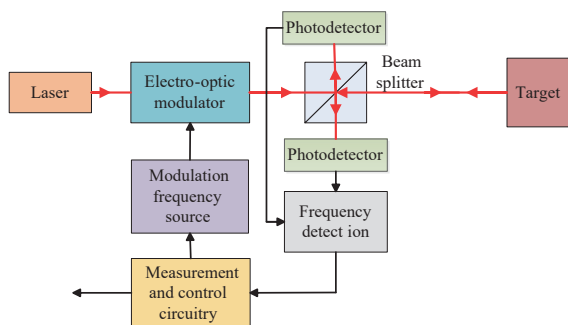


图 1 调幅扫频激光测距系统示意图

Fig. 1 FSAMLR system block diagram

待测距离为  $D$  时, 改变调制频率为  $f_1$  和  $f_2$ , 此时测量和参考两路信号相位差值保持为零值, 待测距离分别对应该调制频率下的  $N_1$  和  $N_2$  个测尺, 测量路和参考路的幅值之差在采样时间内积分值—积分幅值最小, 通过公式 (1) 可建立调制频率与积分幅值对应波形, 求解相邻极小值实现同相频率的求解, 进而根据公式 (2) 求解待测距离。

$$I = \int_0^T [A_1 \sin(2\pi f t + \varphi) - A_2 \sin(2\pi f t)]^2 dt, \quad (1)$$

式中  $I$  为积分幅值,  $A_1$  和  $A_2$  分别为测量路和参考路幅值,  $f$  为调制频率,  $\varphi$  为参考路和测量路相位差值,  $T$  为采样周期。

图 2 为不同待测距离积分幅值和调制频率对应波形, 从图中可得积分幅值波形以正弦波展开, 随着调制频率的变化, 积分幅值极小值对应的同相频率依次出现, 可通过相邻同相频率求解待测距离, 如公式 (2) 所示。

$$\begin{cases} D = \frac{1}{2} \times \frac{c}{f_1} \times N_1 \\ D = \frac{1}{2} \times \frac{c}{f_2} \times N_2 \Rightarrow D = \frac{1}{2} \times \left[ \frac{f_1}{f_2 - f_1} \right] \times \frac{c}{f_1} \\ N_2 = N_1 + 1 \end{cases}, \quad (2)$$

式中  $D$  表示待测距离,  $f_1$  和  $f_2$  表示相邻同相频率,

$N_1$  和  $N_2$  表示待测距离对应同相频率测尺的整倍数,  $c$  表示光速,  $[]$  表示取整运算。

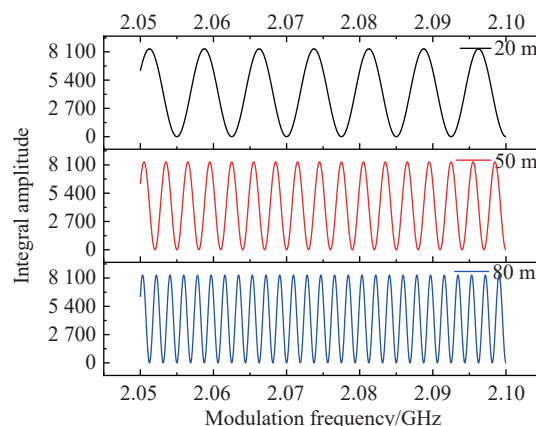


图 2 不同距离积分幅值波形

Fig. 2 Integral amplitude waveforms at varying distances

进一步分析测距系统的精度, 公式 (2) 中第一个公式对同相频率  $f_1$  求导后, 再联立求导前的公式可得系统测距精度与同相频率稳定度相关, 如公式 (3) 所示。同相频率的准确度一方面取决于调制信号源的稳定度, 另一方面由同相频率的解算准确度决定。信号对于测量及参考两路的频率稳定度属于共模参数, 且目前的成熟的调制信号源均可以保持较高的频率稳定度; 因此系统测距精度主要依赖于同相频率的准确求解<sup>[6, 11]</sup>。

$$\begin{cases} D = \frac{1}{2} \times \frac{c}{f_1} \times N_1 \\ \Delta D = -\frac{1}{2} \times \frac{c}{f_1^2} \times N_1 \times \Delta f_1 \end{cases} \Rightarrow \frac{\Delta D}{D} = -\frac{\Delta f_1}{f_1}, \quad (3)$$

### 2.2 奇异谱分析结合局部抛物线拟合方法

本论文提出一种奇异谱分析结合局部抛物线拟合 (SSA-LPF) 的调幅扫频激光测距同相频率鉴频方法, 通过奇异谱分析对波形进行滤波预处理, 在对阈值范围内的积分幅值波形采用局部抛物线拟合求解幅值极小值进而实现同相频率的鉴频。

2017 年天津大学采用奇异谱分析方法提升了双光梳测距精度, 从含有有色噪声的信号中提取距离信号, 实现 13 倍的精度提升, 有效证明了该方法无需先验随机噪声模型, 即可实现有效信息的提取<sup>[16]</sup>。

奇异谱分析方法分为数据内嵌、奇异值分解、对角平均和分组重建四个步骤。对初始数据集选定时间嵌入窗口, 长度为  $L$ , 对初始数据集

$Y_N$  进行延迟坐标映射, 获取的  $N-L+1$  个时滞向量组成轨迹矩阵  $\mathbf{X}$ , 轨迹矩阵如公式 (4) 所示。

$$\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_{N-L+1}) = \begin{pmatrix} Y_1 & Y_2 & Y_3 & \cdots & Y_{N-L+1} \\ Y_2 & Y_3 & Y_4 & \cdots & Y_{N-L+2} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ Y_L & Y_{L+1} & Y_{L+2} & \cdots & Y_N \end{pmatrix}, \quad (4)$$

完成数据内嵌后对轨迹矩阵  $\mathbf{X}$  进行奇异值分解, 分解后的轨迹矩阵如公式 (5) 所示。

$$\mathbf{X} = \sum_{i=1}^d \mathbf{X}_i = \sum_{i=1}^d \mathbf{u}_i \sigma_i \mathbf{v}_i^T, \quad (5)$$

式中  $d$  为奇异值个数,  $\mathbf{X}_i$  为轨迹矩阵的第  $i$  个奇异值分量,  $\mathbf{u}_i$  及  $\mathbf{v}_i$  分别为左奇异向量和右奇异向量,  $\sigma_i$  为奇异值。

将奇异值  $\sigma_i$  以降序排列, 选取高能量的奇异值对信号进行重建, 即可实现原始信号与噪声的分离<sup>[17]</sup>。SSA 方法的去噪性能主要由窗口长度和重构信号所需的奇异值决定, 一般窗口长度在信号长度的  $1/3 \sim 1/2$  之内取值以避免窗口长度过大导致的奇异值衰减缓慢难以区分, 窗口长度过小则会导致滤波受异常值影响大, 无法有效过滤随机噪声<sup>[18]</sup>。因调幅扫频测距系统的噪声统计性能位置, 固定能量阈值去噪缺乏普适性, 因此在窗口长度确定之后, 采用奇异谱拐点法重构信号, 通过累计能量比例  $P(r)$  的曲率极值或一阶差分突降点确定拐点  $r^*$ , 前  $r^*$  个分量为信号, 剩余分量以随机噪声为主, 拐点的求解由公式 (6) 所示。由前  $r^*$  个奇异值分量对信号完成重构即可完成信号去噪<sup>[19]</sup>。

$$\begin{cases} P(r) = \frac{\sum_{i=1}^r \sigma_i^2}{\sum_{i=1}^L \sigma_i^2} (r = 1, 2, \dots, L) \\ \left. \frac{d^2 P(r)}{dr^2} \right|_{r=r^*} \approx 0 \text{ 且 } \left. \frac{dP(r)}{dr} \right|_{r=r^*} \ll \left. \frac{dP(r)}{dr} \right|_{r < r^*} \end{cases}, \quad (6)$$

对积分幅值波形的幅值最低点求解时不需要对全域波形进行处理, 仅需要选取阈值范围内的局部数据求解。采用局部数据时, 采用摇摆法求解极小值时可以提升求解效率; 采用最小二乘法可避免全域波形的误差导致拟合的复杂性带来的误差。含有同相频率的局部积分幅值波形具备对

称性, 呈类似抛物线的形状, 因此理论上采用抛物线拟合方法最具优势, 可保障调幅测距系统的同相频率鉴频效率及鉴频精度。在实际测量中由于信噪比或采样抖动等影响导致积分幅值波形不呈理想状态, 首先采用 SSA 方法对局部积分幅值波形完成去噪, 再采用摇摆法和最小二乘法拟合对滤波前后的积分幅值波形进行极小值求解, 对比 SSA 滤波方法对测距性能提升效果; 同时对比两类方法对极小值求解的准确性, 其中最小二乘法采用抛物线 (二阶)、三阶及四阶拟合。仿真及实测分析不同方法对同相频率求解的准确度。

图 3 为获取积分幅值波形后基于同相频率的待测距离求解流程图。调幅扫频激光测距系统获取积分幅值波形后, 对波形首先进行阈值预选, 获取多个分段波形; 为保障尽量多的拟合数据量, 同时避免阈值超过波形均值的波形开口形状变化, 选取阈值标准为峰值的  $1/2$ 。经阈值筛选后的波形进行奇异谱分析去噪, 去噪后的波形经由摇摆法和最小二乘法进行同相频率的鉴频以获取待测距。

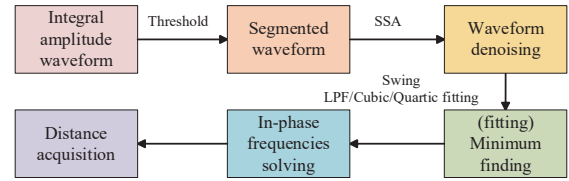


图 3 距离求解流程图

Fig. 3 Distance calculation flowchart

### 3 鉴频方法仿真分析

#### 3.1 测距系统仿真数据获取

设置扫频范围和扫频步长后, 扫频范围内每个频点  $f$  对应固定的测尺  $l$ , 结合待测距离  $D$  可以确定测量路与参考路在每个扫频频点的相位差  $\varphi$ , 如公式 (7) 所示。根据求解的相位差, 结合公式 (1) 求解积分幅值, 即可实现扫频频点与积分幅值一一对应的理论积分幅值波形。

$$\begin{cases} l = \frac{c}{2f} \\ \varphi = \left[ \frac{D}{l} \right]_{rem} \times 2\pi \end{cases} \Rightarrow \varphi = \left[ \frac{2Df}{c} \right]_{rem} \times 2\pi, \quad (7)$$

式中  $c$  为光速,  $[\ ]_{rem}$  表示取余数运算。

获取理论积分幅值波形后, 增加噪声获取含噪积分幅值波形, 对含噪波形及去噪波形采用摇摆法及最小二乘法进行同相频率求解, 求解后的同相频率与预设距离对应的理论同相频率值对比, 验证 SSA 方法去噪对测距性能提升的有效性, 同时确定最优同相频率鉴频方法。

### 3.2 奇异谱分析去噪性能仿真分析

预设待测距离为 20 m, 信号调制频率量级为 2 GHz, 扫频范围为 1985 MHz~2015 MHz, 扫频步长为 1 kHz。积分幅值波形信噪比低于 45 dB 时, 积分幅值极小值淹没在噪声信号中, 无法求解极小值对应的同相频率; 设置积分幅值波形信噪比为 45 dB 可保障波形求解距离的有效性, 且实测系统中也可以满足该信噪比要求。

以波形峰值的 1/2 作为阈值对波形数据完成局部选取, 局部波形由奇异谱分析去噪, 去噪窗口长度选为原始数据量的 1/3, 以一阶差分获取的拐点值作为数据重构参数。图 4 为含噪局部原始波形及经 SSA 方法去噪后的波形, 从图中可得, 去噪后的信号与原始波形趋势保持一致。

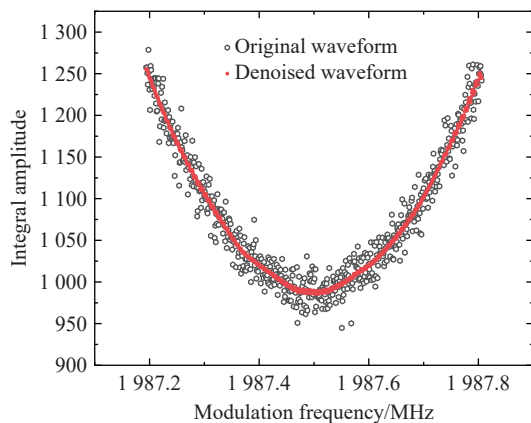


图 4 局部原始波形及去噪局部积分幅值波形

Fig. 4 Original and denoised local IA waveforms

将含噪积分幅值波形和经 SSA 方法去噪的积分幅值波形分别采用摇摆法、抛物线、三阶及四阶拟合完成鉴频, 求解鉴频的 4 个同相频率对应的 3 个待测距离值与预设距离的平均绝对偏差, 分析积分幅值波形去噪对测距性能的提升效果。

表 1 为不同鉴频方法基于含噪原始波形及 SSA 法去噪后波形求解的距离值与理论距离值的平均绝对偏差。积分幅值波形未滤波时, 摇摆法会由于局部最优解导致求解距离偏差较大; 最小二乘法拟合鉴频时, 经 SSA 法滤波后鉴频求解平

均绝对偏差相较于未滤波拟合求解减小 60% 及以上。

表 1 含噪及去噪积分幅值波形平均绝对偏差 (单位:  $\mu\text{m}$ )  
Tab. 1 MAD for noisy and denoised IA waveforms (Unit:  $\mu\text{m}$ )

方法组别	摇摆法	抛物线拟合	三阶拟合	四阶拟合
含噪波形	74956.6	6.0	16.3	15.6
去噪波形	51.6	2.2	6.4	6.3

### 3.3 不同鉴频方法仿真对比

保持预设待测距离 20 m, 扫频范围 1985 MHz~2015 MHz 不变, 基于 SSA 方法去噪后的积分幅值波形, 分析采用摇摆法、抛物线、三阶及四阶拟合方法的鉴频性能, 表 2 为不同方法求解的距离值与预设距离偏差。

表 2 不同方法求解距离值偏差 (单位:  $\mu\text{m}$ )

Tab. 2 Distance deviation across methods (Unit:  $\mu\text{m}$ )

方法组别	摇摆法	抛物线拟合	三阶拟合	四阶拟合
1	30.189	0.644	-1.791	-1.791
2	-70.175	-4.211	-14.727	-14.466
3	54.340	1.608	2.687	2.767
平均绝对偏差	51.6	2.2	6.4	6.3

从表 2 中可得, 摇摆法求解待测距离与预设距离偏差最大, 平均绝对偏差为 51.6  $\mu\text{m}$ , 最小二乘法拟合鉴频更优, 其中三阶及四阶拟合求解待测距离平均偏差相当, 分别为 6.4  $\mu\text{m}$  和 6.3  $\mu\text{m}$ , 抛物线拟合鉴频最优, 求解距离平均偏差为 2.2  $\mu\text{m}$ , 相较于摇摆法提升约 95.7%, 相较于三阶及四阶拟合鉴频提升约 65.6%。

由图 2 可得, 不同待测距离对应的相邻同相频率频差不同, 对应的扫频范围不同; 不同扫频步长下, 同样扫频范围内的扫频频点数据量不同; 另外当扫频起始频点不同时, 不同起始扫频频点的频差值小于扫频步长时, 会导致扫频获取的同相频率附近的频点频率值不同, 进而影响同相频率的准确获取; 因此需要验证在不同待测距离下、不同扫频步长下及不同扫频起始频点下, 不同鉴频方法是否具备同样的鉴频性能。

#### 3.3.1 不同待测距离

进一步验证不同待测距离下不同方法的鉴频

性能。增设待测距离为 5 m、10 m、30 m、40 m、50 m 及 60 m, 信号扫频范围、扫频步长及信噪比等参数保持不变, 每一个待测距离下积分幅值波形经相同参数的 SSA 方法滤波后, 采用不同方法求解 4 个同相频率, 对应 3 个待测距离, 对比不同鉴频方法求解的待测距离与预设距离的平均绝对偏差。

由图 5 中可得, 在不同待测距离下, 摇摆法求解的平均距离偏差分布在 10  $\mu\text{m}$ ~140  $\mu\text{m}$  内, 最小二乘法拟合求解的距离值偏差均在 10  $\mu\text{m}$  以内, 其中采用抛物线拟合法最优, 相较于三阶及四阶拟合求解的平均绝对偏差提升 50% 及以上。

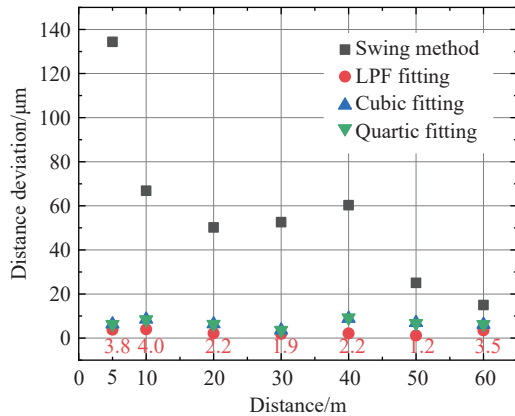


图 5 不同距离平均绝对偏差分布

Fig. 5 MAD distribution across target distances

### 3.3.2 不同扫频步长

进一步验证不同扫频步长下不同方法的鉴频性能。仿真参数预设待测距离为 20 m, 对应的理论同相频率差为 7.5 MHz, 为保证获取的扫频频点的有效数据量, 最大扫频步长设置为 10 kHz, 因此增设 10 kHz、0.5 kHz、0.2 kHz 及 0.1 kHz 的扫频步长, 信号扫频范围、待测距离及信噪比等参数保持不变, 每一个扫频步下积分幅值波形经相同参数的 SSA 方法滤波后, 采用不同方法求解 4 个同相频率, 对应 3 个待测距离, 对比不同鉴频方法求解的待测距离与预设距离的平均绝对偏差。

由图 6 中可得, 在不同扫频步长下, 摇摆法求解的距离平均绝对偏差分布约在 50  $\mu\text{m}$ ~70  $\mu\text{m}$  内, 随着扫频步长的减小偏差未出现优化趋势; 最小二乘法拟合求解的距离平均绝对偏差随着扫频步长减小而减小, 在扫频步长为 1 kHz 内可达 10  $\mu\text{m}$  内, 其中抛物线拟合法在不同扫频步长下获取的距离平均绝对偏差均最小。

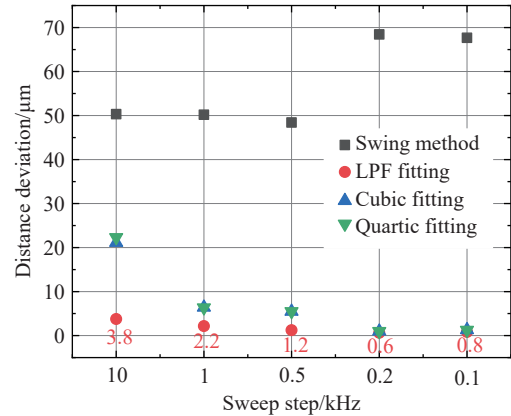


图 6 不同扫频步长平均绝对偏差分布

Fig. 6 MAD distribution under varying frequency sweep steps

### 3.3.3 不同起始扫频频点

仿真参数预设待测距离为 20 m 时, 对应的理论同相频率差为 7.5 MHz, 当扫频步长为 10 kHz 时, 设置扫频范围在 1985 MHz~2015 MHz 基础上分别偏移 8 kHz、6 kHz、4 kHz 及 2 kHz 以实现不同起始扫频频点变化, 且起始扫频频点的变化量均小于扫频步长; 积分幅值波形保持 45 dB 信噪比, SSA 法滤波参数保持一致, 仿真分析不同鉴频方法的鉴频性能。

不同起始扫频频点变化时, 一定扫频范围内的频点频率值不同; 从表 3 中数据可得, 由于摇摆法是从已获取的离散频点值中选取最接近同相频率的频点值, 不同的频率值频点会导致摇摆法求解误差增大; 而最小二乘法对已获取的频点值进行拟合求解极小值对应的同相频率, 拟合后的积分幅值波形呈连续性, 因此最小二乘法求解受起始扫频频点的影响较小; 其中抛物线拟合法的平均绝对偏差仍为最小值, 推测由于抛物线拟合预设局部积分幅值波形具备抛物线型特征, 避免了由于离散频点的不对称性导致的拟合误差。

表 3 不同起始扫频频点下求解的平均绝对偏差 (单位:  $\mu\text{m}$ )

Tab. 3 MAD versus initial sweep frequency (Unit:  $\mu\text{m}$ )

方法频偏	摇摆法	抛物线拟合	三阶拟合	四阶拟合
8 kHz	25156.2	9.6	17.4	15.2
6 kHz	50051.3	19.1	37.8	37.6
4 kHz	75035.4	6.2	33.1	35.4
2 kHz	25270.6	10.7	37.6	38.8

## 4 鉴频方法实测分析

### 4.1 调幅扫频激光测距系统搭建

为验证调幅扫频激光测距 SSA-LPF 方法求解同相频率有效且最优, 搭建调幅扫频激光测距系统, 获取实测积分幅值波形, 对同一实测波形采用摇摆法及最小二乘法进行同相频率的求解, 分析同相频率求解距离的均方差。如图 7 所示为调幅扫频激光测距系统实物图, 主要包括调制光源、收发光路及高速采样与信号解算三个部分。调制光源可输出强度调制扫频激光信号, 收发光路采用全光纤光路, 光纤反射镜模拟探测目标, 不同长度光纤模拟不同待测距离, 光信号经光电探测器转换为电信号后经由高速采样板卡完成信号的采样及信号解算, 实现积分幅值波形的获取, 对获取的积分幅值波形分别采用摇摆法和最小二乘法完成鉴频并求解待测距离。

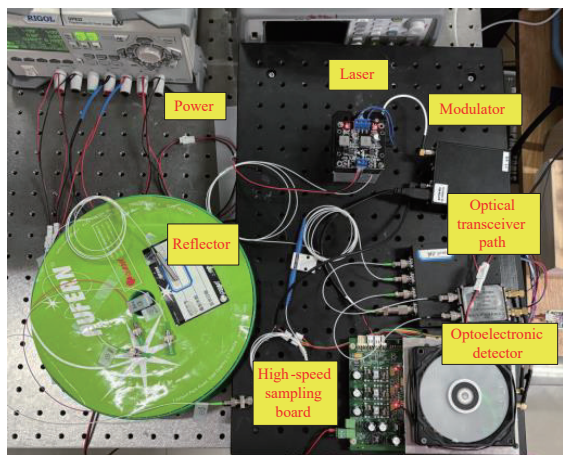


图 7 调幅扫频测距系统实物图  
Fig. 7 FSAMLR system schematic

### 4.2 不同鉴频方法实测分析

实测分析调幅扫频激光测距系统在不同待测距离及不同扫频步长下, 摇摆法和最小二乘法计算的距离及距离均方差; 实测中待测距离真值未知, 以求解距离的均方差作为不同鉴频方法的性能比对。测距系统待测距离分别在系统初始距离 (约 5 m) 及在此基础上增加约 15 m、30 m 及 45 m 待测距离 (对应增加光纤长度为 10 m、20 m

及 30 m); 扫频范围覆盖两个相邻同相频率, 扫频步长分别设置为 100 kHz、10 kHz 及 1 kHz; 获取三组特定待测距离和扫频步长下对应的实测积分幅值波形, 分析对比不同方法的鉴频性能。其中摇摆法通过对离散频率数据求解同相频率, 三组扫频数据起始频点保持一致, 若扫频步长大, 数据量小, 则会导致摇摆法三组数据求解的距离值保持不变, 此时均方差不能体现摇摆法的鉴频性能, 最小二乘法通过对离散频率数据进行拟合, 不存在扫频步长失效的问题。

图 8 为待测距离约为 20 m 时两个相邻同相频率范围内的扫频积分幅值波形及不同扫频步长对应的 120 个扫频步长的同相频率附近的积分幅值波形。其他待测距离扫频积分幅值波形与图 8 类似, 不再一一罗列。

图 9 直观展示实测均方差与不同待测距离的关系, 从图中可得当待测距离约为 5 m 时, 摇摆法与最小二乘法求解的标准差相较于其他待测距离较大, 与图 5 仿真结果不同; 当待测距离越小时, 对应的相邻同相频率频差越大, 在实际测量时, 为获取包含同相频率的积分幅值波形, 需要更大的扫频范围, 所需扫频时间更长; 极小值相邻幅值变化更为平缓, 对于包含同相频率的原始波形的拟合准确度要求更高; 推测待测距离约 5 m 时误差较大原因一是因为测量时间过长可能导致系统状态变化, 二是积分幅值波形拟合的准确度受限。

表 4 为不同实测距离, 不同鉴频方法求解的距离均方差。从表 4 中实测数据可得, 摇摆法鉴频测距的有效精度依赖于小步长扫频获取较大数据量的扫频频点, 而较多的扫频频点不利于解算效率的提升; 最小二乘法求解同相频率获取测距有效精度时受扫频步长大小的影响较小, 其中在不同待测距离及扫频步长下抛物线拟合法均方差相较于三阶及四阶拟合性能相当或更优, 验证了抛物线拟合法求解极小值的有效性, 同时抛物线拟合法涉及参数更少, 极小值解算更为简单, 对于距离解算的效率提升更具优势。

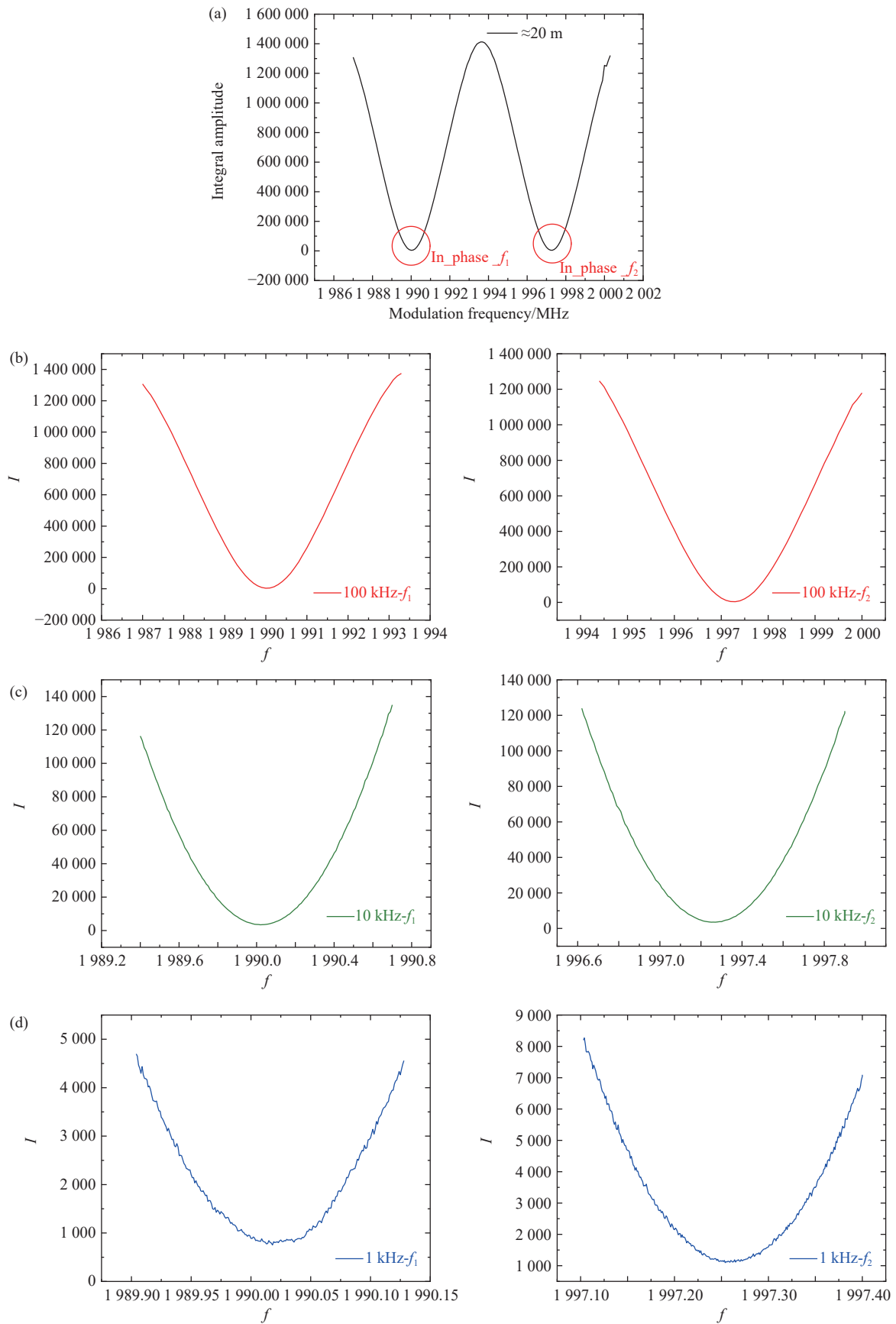


图 8 待测距离约 20 m 时积分幅值波形 (a) 两个相邻同相频率连续扫频 扫频步长 (b)100 kHz(c)10 kHz(d)1 kHz

Fig. 8 IA waveforms at 20 m target distance: (a) Two adjacent IPF continuous sweeps; (b) 100 kHz sweep step; (c) 10 kHz; (d) 1 kHz

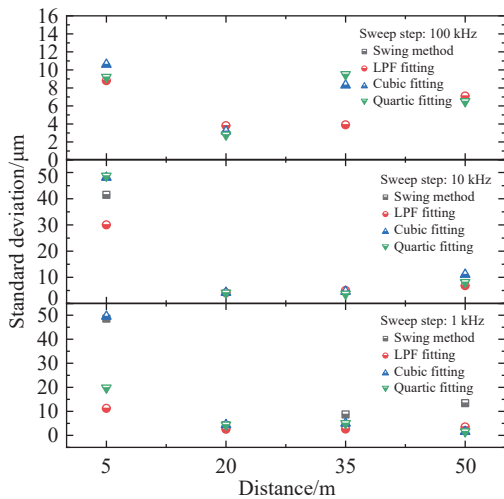


图 9 不同实测距离及扫频步长下不同方法求解距离均方差  
Fig. 9 Distance standard deviation distribution for different methods under varying distances and sweep steps

表 4 不同实测距离及扫频步长下不同方法求解距离均方差 (单位: μm)

Tab. 4 Standard deviation of distance for different methods under varying distances and sweep steps (Unit: μm)

方法扫频步长	摇摆法	抛物线拟合	三阶拟合	四阶拟合
待测距离≈5 m				
100 kHz	/	8.8	10.6	9.2
10 kHz	41.5	30.0	48.1	48.7
1 kHz	48.6	11.2	49.5	19.8
待测距离≈20 m				
100 kHz	/	3.8	3.2	2.8
10 kHz	/	4.1	4.2	4.1
1 kHz	4.2	2.5	4.4	4.4
待测距离≈35 m				
100 kHz	/	3.9	8.3	9.5
10 kHz	/	5.0	4.6	3.7

参考文献:

[1] TU Y H, LI J, RUAN H J, et al.. Time expansion of pulse echo signal implemented for laser ranging system with high precision[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2025, 74: 1001512.  
 [2] 潘映伶, 纪荣祎, 祁勤, 等. 高速高精度实时相位式激光测距系统[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(16): 2343-2351.  
 PAN Y L, JI R Y, QI Q, et al.. High-speed and high-precision real-time phase laser ranging system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2023, 31(16): 2343-2351. (in Chinese).  
 [3] 林海声, 吴志波, 郑敏, 等. 卫星激光测距系统皮秒准确度时延标定研究及应用[J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(10):

续表 4

方法扫频步长	摇摆法	抛物线拟合	三阶拟合	四阶拟合
1 kHz	8.7	2.6	5.0	5.0
待测距离≈50 m				
100 kHz	/	7.1	17.7	6.5
10 kHz	/	6.8	11.1	8.1
1 kHz	13.4	3.5	1.6	1.6

5 结 论

本文介绍了一种调幅扫频激光测距同相频率鉴频的 SSA-LPF 方法, 该方法采用奇异谱分析对信号进行滤波预处理, 结合局部抛物线拟合求解同相频率。仿真分析了在待测距离 20 m, 扫频步长 1 kHz 时摇摆法、最小二乘法抛物线拟合、三阶及四阶拟合的鉴频性能, 抛物线拟合法的绝对偏差相较于摇摆法提升约 95.7%, 相较于最小二乘三阶及四阶拟合法提升约 65.6%; 且在不同待测距离及不同扫频步长下具备同样优势。搭建了调幅扫频激光测距系统, 实测分析上述四种方法的鉴频性能, 结果表明, 摇摆法的有效精度依赖于小步长扫频, 距离求解效率受限; 最小二乘法鉴频性能受扫频步长影响较小, 抛物线拟合法在不同距离及不同扫频步长下测距均方差优于 30 μm; 性能与三阶及四阶拟合相当或更优, 且抛物线拟合法计算效率更高; 因此采用 SSA-LPF 法求解调幅扫频激光测距系统的同相频率, 可以提升测距效率同时保障测距精度。SSA 法去噪结合与波形相关的拟合方法同样可用于求解连续变化数据的极值点, 其中 SSA-LPF 法可适用于偏振扫频激光测距及调幅扫频激光测距同相频率的鉴频; 但在待测距离较小时, 同相频率对应的极小值相邻波形范围较为平缓, 抛物线拟合的准确度受限, 拟合方法有待进一步优化。

- 20230070.
- LIN H SH, WU ZH B, ZHENG M, *et al.*. Research and application of picosecond accuracy time delay calibration for satellite laser ranging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(10): 20230070. (in Chinese).
- [4] HALVERSON P G, SPERO R E. Signal processing and testing of displacement metrology gauges with picometre-scale cyclic nonlinearity[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2002, 4(6): S304-S310.
- [5] PERCHET G, LESCURE M, BOSCH T. Error analysis of phase-shift laser rangefinder with high-level signal[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1997, 62(1-3): 534-538.
- [6] 黑克非, 于晋龙, 王菊, 等. 基于二次偏振调制的变频测距方法与系统实现[J]. *物理学报*, 2014, 63(10): 100602.
- HEI K F, YU J L, WANG J, *et al.*. Variable frequency range finding technology based on double polarization modulation method and system implementation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(10): 100602. (in Chinese).
- [7] 高书苑, 石俊凯, 纪荣祎, 等. 角反射器对调制偏振光的偏振响应研究[J]. *中国激光*, 2018, 45(12): 1204005.
- GAO SH Y, SHI J K, JI R Y, *et al.*. Polarization response of retroreflector to polarization-modulated light[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(12): 1204005. (in Chinese).
- [8] 高超, 纪荣祎, 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 CH, JI R Y, GAO SH Y, *et al.*. Polarization modulation range-finding system based on waveguide phase modulator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(3): 246-255. (in Chinese).
- [9] 纪荣祎, 潘映伶, 高超, 等. 激光扫频测距装置及方法: 中国, 114646940B[P]. 2025-06-20.
- JI R Y, PAN Y L, GAO CH, *et al.*. Laser frequency sweeping distance measuring device and method: CN, 114646940B[P]. 2025-06-20. (in Chinese).
- [10] HILL D G, JEKEL R N, BUSCHE W W, *et al.*. Electro-optic distance measuring device: EP2653884A1 [P/OL]. (2012-04-16)[2025-10-14]. <https://data.epo.org/publication-server/rest/v1.2/publication-dates/20131023/patents/EP2653884NWA1/document.html>. (查阅网上资料,请核对网址与文献是否相符).
- [11] 高超, 周维虎, 高书苑, 等. 基于改进 MLS 算法的偏振调制激光测距方法实现[J]. *中国激光*, 2023, 50(14): 1404003.
- GAO CH, ZHOU W H, GAO SH Y, *et al.*. Implementation of polarization modulation laser ranging method based on improved moving least square algorithm[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(14): 1404003. (in Chinese).
- [12] 高书苑, 李明, 高超, 等. 基于梯度下降的偏振调制测距频率搜索[J]. *常州大学学报(自然科学版)*, 2023, 35(6): 52-57.
- GAO SH Y, LI M, GAO CH, *et al.*. Polarization ranging frequency search based on gradient descent method[J]. *Journal of Changzhou University (Natural Science Edition)*, 2023, 35(6): 52-57. (in Chinese).
- [13] 高书苑, 陈少飞, 李明, 等. 增强微分偏振调制测距算法实现[J]. *传感器与微系统*, 2024, 43(1): 124-127.
- GAO SH Y, CHEN SH F, LI M, *et al.*. Implementation of enhanced differential polarization modulation ranging algorithm[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2024, 43(1): 124-127. (in Chinese).
- [14] 高书苑, 黎尧, 纪荣祎, 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 SH 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. (in Chinese).
- [15] 王菊, 邵琦, 于晋龙, 等. 基于二次强度调制的激光测距系统[J]. *物理学报*, 2023, 72(22): 220601.
- WANG J, SHAO Q, YU J L, *et al.*. Laser ranging system based on double intensity modulation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2023, 72(22): 220601. (in Chinese).
- [16] 曹辉, 宋有建, 于佳禾, 等. 奇异谱分析用于提升双光梳激光测距精度[J]. *物理学报*, 2018, 67(1): 010601.
- CAO H, SONG Y J, YU J H, *et al.*. Singular spectrum analysis for precision improvement in dual-comb laser ranging[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(1): 010601. (in Chinese).
- [17] ELSNER J B, TSONIS A A. *Singular Spectrum Analysis: A New Tool in Time Series Analysis*[M]. New York: Springer, 1996: 932-942.
- [18] HASSANI H. Singular spectrum analysis: methodology and comparison[J]. *Journal of Data Science*, 2007, 5(2): 239-257.
- [19] GOLYANDINA N, ZHIGLJAVSKY A. *Singular Spectrum Analysis for Time Series*[M]. New York: Springer, 2013.

## 作者简介:



潘映伶(1994—),女,四川凉山人,2015年于西安电子科技大学获得学士学位,2018年于北京航空航天大学获得硕士学位;现为中国科学院微电子研究所工程师,中国科学院大学博士生,主要从事激光精密测量、激光测距等方面的研究。E-mail: [panyingling@ime.ac.cn](mailto:panyingling@ime.ac.cn)



纪荣祎(1984—),男,陕西富平人,副研究员。2006年于北京化工大学获得学士学位,2012年于北京理工大学获得博士学位;现为中国科学院微电子研究所副研究员,主要从事激光精密测量、激光测距等方面的研究。E-mail: [jirongyi@ime.ac.cn](mailto:jirongyi@ime.ac.cn)