

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*, 2026, 19(3): 586–595. 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*, 2026, 19(3): 586–595. 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(2026)03-0586-10

调幅扫频激光测距同相频率鉴频方法

潘映伶^{1,2}, 纪荣祎^{1,2*}, 董登峰^{1,2}, 李佳蒙^{1,2}, 周维虎^{1,2}

(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。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, 接着分析其测距精度与同相频率求解准确度的关系。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, 结果显示采用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拟合法提升 65.6%。搭建测距系统进行实测分析, 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 μm 。以上结果表明调幅扫频激光测距采用 SSA-LPF 鉴频法可以在提升测距效率的同时保障测距精度。

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^{1,2}, JI Rong-yi^{1,2*}, DONG Deng-feng^{1,2}, LI Jia-meng^{1,2}, ZHOU Wei-hu^{1,2}

(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: 2026-01-12

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 μm 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,随着制造精度需求的日益增长,对激光测距的测程和测量精度提出了新的挑战^[1-3]。工业成熟度较高的测距方法主要有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^[4-5];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^[6-8]。鉴于此,本文提出一种调幅扫频激光测距(Frequency-sweep Amplitude-modulation Laser Ranging FSAMLRL)方法,其具备高测量精度和低系统复杂度。该方法借鉴菲索-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相对应的积分幅值(Integral Amplitude, IA)波形,通过检测波形极小值对应的同相频率值(In-phase Frequency IPF)可以求解待测距离^[9]。

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^[6,10]。2023年高超^[11]等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。同年高书苑^[12]等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,基于四项式拟合波形,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。在此基础上,2024年该课题组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 μm 的测距重复性,但系统零点探测最优参数需经实验检验,系统复杂度较高^[13]。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测距调制机制不同,不存在因调制器二次调制导致的信号波形变形问题^[14-15]。积分幅值波形呈正弦波,极小值两侧波形具有较优的对称性,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,从而使同相频率求解不准,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可平衡计算效率及数值稳定性^[11,16]。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)进行对比,以验证算法性能。

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, 再经鉴频处理以求解待测距离。

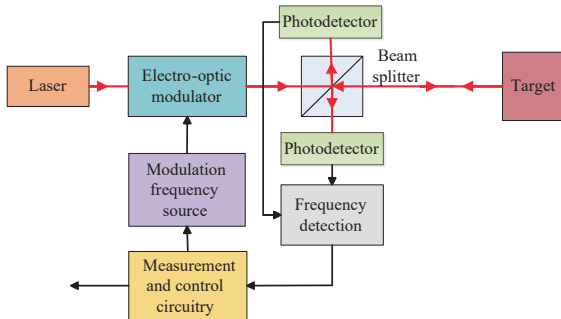


图 1 调幅扫频激光测距系统示意图

Fig. 1 Block diagram of FSAML system

待测距离一定时, 改变调制频率, 以保证此时测量路和参考路两路信号相位差值为零, 此调制频率定义为同相频率, 此时的待测距离为该调制频率对应测尺的整数倍, 即在相同采样时间内, 以参考路信号为基准, 此时测量路信号相较于参考路信号的最小二乘误差最小, 即两路信号幅值之差积分幅值最小。通过公式 (1) 可建立调制频率与积分幅值的对应波形:

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

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, φ 为参考路和测量路相位差值, T 为采样周期。

图 2 (彩图见期刊电子版) 为不同待测距离积分幅值和调制频率对应波形。

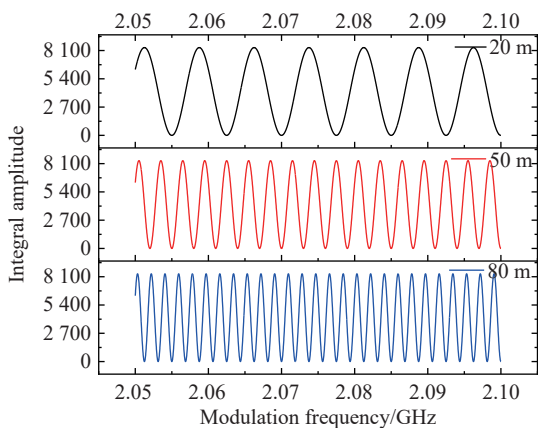


图 2 不同距离积分幅值波形

Fig. 2 Integral amplitude waveforms at varying distances

从图 2 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:

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

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。

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:

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

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。对于测量及参考两路信号, 频率稳定度属于共模参数, 目前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^[6, 11]。

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, 曹辉^[6] 等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。

奇异谱分析方法包括数据内嵌、奇异值分解、对角平均和分组重建四个步骤。对初始数据集选定长度为 L 的时间嵌入窗口, 对初始数据集 \mathbf{Y}_N 进行延迟坐标映射, 获取到由 $N-L+1$ 个时滞向量组成的轨迹矩阵 \mathbf{X} , 如公式 (4) 所示:

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

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, σ_i 为奇异值。

将奇异值 σ_i 按降序排列,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^[17]。SSA方法去噪性能主要由窗口长度和重构信号所需的奇异值决定,一般选择窗口长度为信号长度的1/3~1/2,以避免窗口长度过大导致的奇异值衰减缓慢,难以区分,窗口长度过小会导致滤波受异常值影响大,无法有效过滤随机噪声^[18]。因调幅扫频测距系统的噪声统计性能未知,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,具体为通过累计能量比例 $P(r)$ 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,拐点的求解如式(6)所示:

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

由前 r^* 个奇异值分量对信号完成重构即可完成信号去噪^[19]。

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。采用摇摆法求解局部数据极小值时可以提升求解效率;采用最小二乘法求解可避免因为全域波形误差导致的拟合复杂性及由此带来的误差。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,受信噪比或采样抖动等的影响,导致积分幅值波形不能呈理想状态。对于这一问题,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拟合法对滤波前后的积分幅值波形进行极小值求解,这样可验证SSA滤波方法对测距性能的提升效果。同时还可得到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。

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。为得到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发生变化,选取阈值标准为峰值的1/2。对经阈值筛选后的波形进行奇异谱分析去噪,对去噪后的波形利用摇摆法和最小二乘法进行同相频率的鉴频,以得到待测距离。

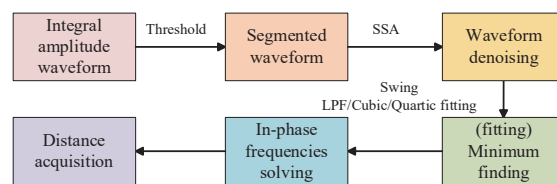


图3 距离求解流程图

Fig. 3 Flowchart of the distance calculation

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 φ ,如公式(7)所示:

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

式中 $[\]_{\text{rem}}$ 表示取余数运算。根据求解的相位差,结合公式(1)求解积分幅值,即可得到扫频频点与积分幅值一一对应的理论积分幅值波形。

获取理论积分幅值波形后,增加噪声可得到含噪积分幅值波形。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, 将求解得到的同相频率与预设距离对应的理论同相频率值进行比对, 验证 SSA 方法的有效性, 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 可确保得到有效的波形距离, 且实测系统也满足该信噪比要求。

以波形峰值的 1/2 作为阈值对波形数据完成局部选取, 利用奇异谱分析对局部波形去噪, 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(彩图见期刊电子版)为含噪局部原始波形及经 SSA 方法去噪后的波形, 从图 4 可得, 去噪后的信号与原始波形形状保持一致。

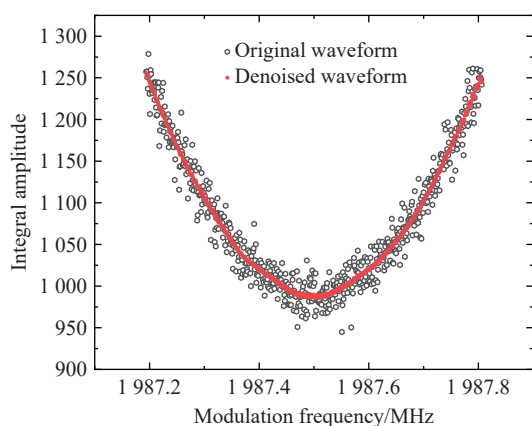


图 4 局部原始波形及去噪局部积分幅值波形

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、三阶及四阶最小二乘拟合法完成鉴频, 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 给出了不同鉴频方法基于原始含噪波形及 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。由表 1 可知, 积分幅值波形未滤波时, 采用摇摆法拟合鉴频时由于局部最优解导致求解距离偏差较大; 采用最小二乘法拟合

鉴频时, 经 SSA 法滤波后鉴频求解平均绝对偏差相较未滤波拟合求解结果减小 60% 以上。

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

组别	方法			
	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

保持预设待测距离为 20 m, 扫频范围为 1985 MHz~2015 MHz 不变, 对基于 SSA 方法去噪后的积分幅值波形, 分别采用摇摆法、抛物线、三阶及四阶拟合方法进行鉴频, 以分析鉴频性能, 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: μm)

Tab. 2 Range deviation obtained by different methods (Unit: μm)

组别	方法			
	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 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 μm 。最小二乘法拟合鉴频次优, 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 μm 和 6.3 μm 。抛物线拟合鉴频结果最优, 求解距离平均偏差为 2.2 μm , 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, 对应的扫频范围也不同。不同扫频步长下, 相同扫频范围内的扫频频点数据量不同。另外, 在扫频起始频点不同的情况下, 不同起始扫频频点的频差值小于扫频步长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、不同扫频步长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

为了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。在每一个待测距离下,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,得到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(彩图见期刊电子版)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 $10\ \mu\text{m}\sim 140\ \mu\text{m}$ 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结果最优,相较于三阶及四阶拟合求解的平均绝对偏差至少提升 50%。

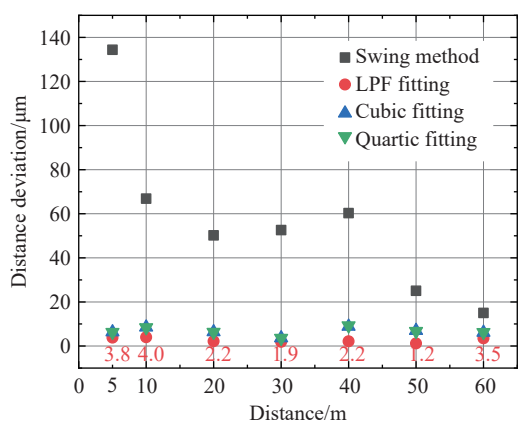


图 5 不同距离平均绝对偏差分布

Fig. 5 MAD distribution across target distances

3.3.2 不同扫频步长

为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,为保证获取有效的扫频频点数据量,最大扫频步长设置为 10 kHz,因此增设置 10 kHz、0.5 kHz、0.2 kHz 及 0.1 kHz 4 组扫频步长。信号扫频范围、待测距离及信噪比等参数保持不变。对每一个扫频步长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,由此得到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,如图 6(彩图见期刊电子版)。

由图 6 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 $50\ \mu\text{m}\sim 70\ \mu\text{m}$ 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的减小而减小,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。

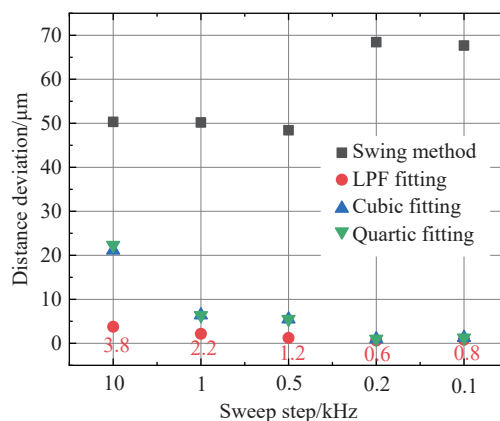


图 6 不同扫频步长平均绝对偏差分布

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,设置扫频范围为 1985 MHz~2015 MHz,在此基础上分别偏移 8 kHz、6 kHz、4 kHz 及 2 kHz 以实现不同起始扫频频点,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。

对于不同起始扫频频点,一定扫频范围内的频点频率值不同。由表 3 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: μm)

Tab. 3 MAD solved by different initial sweep frequencies (Unit: μm)

	摇摆法	抛物线拟合	三阶拟合	四阶拟合
8 kHz	25 156.2	9.6	17.4	15.2
6 kHz	50 051.3	19.1	37.8	37.6
4 kHz	75 035.4	6.2	33.1	35.4
2 kHz	25 270.6	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 方法求解同相频率的性能, 搭建调幅扫频激光测距系统, 获取实测积分幅值波形后, 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, 光纤反射镜用于模拟探测目标, 不同长度光纤用于模拟不同待测距离, 光信号经光电探测器转换为电信号后由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。

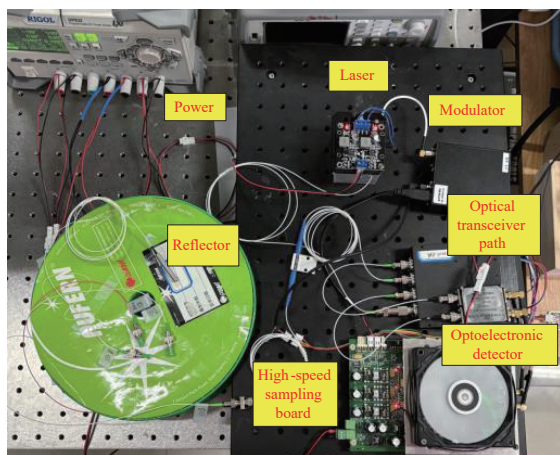


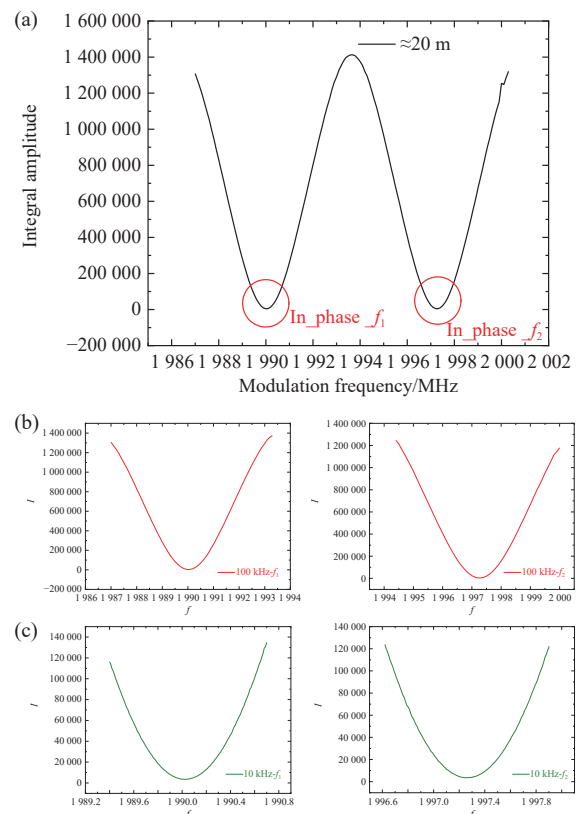
图 7 调幅扫频测距系统实物图

Fig. 7 Photograph of FSAMLR system

4.2 不同鉴频方法实测分析

在不同待测距离及不同扫频步长下, 对调幅扫频激光测距系统采用摇摆法和最小二乘法计算距离及距离均方差。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对比指标。设定待测距离初始值约为 5 m。在此基础上, 增加约 15 m、30 m 及 45 m (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 (彩图见期刊电子版) 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 个扫频频点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。



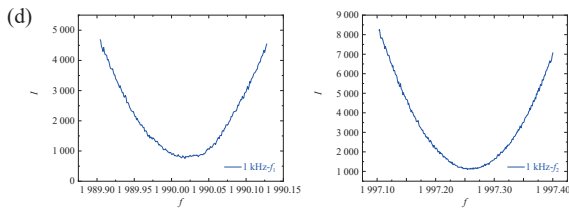


图 8 (a)待测距离约 20 m 时两个相邻同相频率连续扫频的积分幅值波形。每个同相频率在 (b) 100 kHz, (c) 10 kHz, (d) 1 kHz 扫频步长下 120 个扫频频点对应的积分幅值波形

Fig. 8 (a) IA waveform at about 20 m target distance. IA waveforms corresponding to 120 frequency points of each IPF under (b) 100 kHz, (c) 10 kHz, and (d) 1 kHz sweep step sizes

图 9(彩图见期刊电子版)直观展示了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均方差较其他待测距离大, 与图 5 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。推测待测距离约为 5 m 时误差较大的原因: 一是测量时间过长, 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。

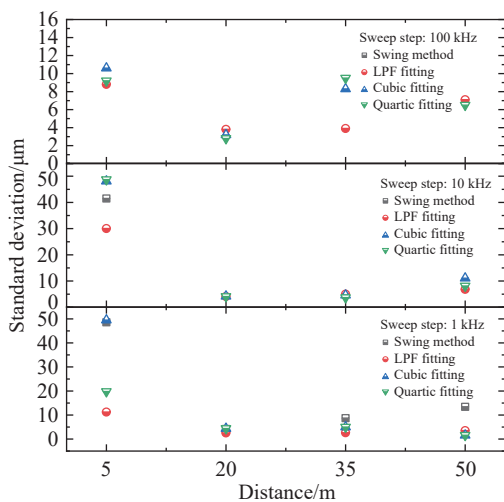


图 9 不同实测距离及扫频步长下不同方法求解距离均方差
Fig. 9 Distance standard deviation distribution for different methods under varying distances and sweep steps

表 4 为在不同实测距离下, 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的均方差相较三阶及四阶拟合法的更优, 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。

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 range for different methods under varying distances and sweep steps (Unit: μm)

扫频步长	方法			
	摇摆法	抛物线拟合	三阶拟合	四阶拟合
待测距离 \approx 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 \approx 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 \approx 35 m				
100 kHz	/	3.9	8.3	9.5
10 kHz	/	5.0	4.6	3.7
1 kHz	8.7	2.6	5.0	5.0
待测距离 \approx 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, 扫频步长为 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。结果显示:抛物线拟合法的绝对偏差较摇摆法提升约 95.7%, 较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同样具备优势。搭建了调幅扫频激光测距系统, 实测分析上述 4 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。由此可知, 采用 SSA-LPF 法求解调幅扫频激光测距系统的同相频率, 可以在提升测距效率的同时保障测距精度。采用 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。

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): 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>.
- [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,工程师,博士研究生,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研究生,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



纪荣祎(1984—),男,陕西富平人,博士,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