

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306887

用于通信成像一体化的变基准三角法测距模型*

王宇琦¹ 母一宁¹ 温冠宇² 王帅¹ 梁栋¹ 汪智¹ 王翊诚¹

(1. 长春理工大学重庆研究院 重庆 401122; 2. 中国科学院国家天文台长春人造卫星观测站 长春 130117)

摘要:为丰富空天测距成像一体化技术理论体系,本文就测距通信一体化系统中近距离的技术瓶颈,提出了一种变基准式三角法测距模型。通过详细分析中短程内高精度激光测距的主要约束,论证了传统三角法量程远端灵敏度急剧恶化的技术特征。在此基础上,基于电真空半导体复合探测器件模型体系,提出采用变基准机制可以有效地将三角法的测量量程延展至中近距离区间,进而弥补传统通信成像测距一体化系统在该工作区间的空缺。通过理论分析、数据计算、系统设计以及仿真模拟与实验,可验证该模型的正确性和有效性,其分辨率可优于千分之一量程,完全可以满足后续工程及系统化设计需求。

关键词: 复合探测;激光测距;一体化集成

中图分类号: TN209

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 510.20

Novel laser triangulation ranging model with dynamic scale for optical communication and trigger imaging of integration

Wang Yuqi¹ Mu Yining¹ Wen Guanyu² Wang Shuai¹ Liang Dong¹ Wang Zhi¹ Wang Yicheng¹

(1. Chongqing Research Institute, Changchun University of Science & Technology, Chongqing 401122,

China; 2. Changchun Satellite Observation Station, National Astronomical Observatories, Chinese

Academy of Sciences, Changchun 130117, China)

Abstract: In order to enrich the theory of space electro-optical technique, break through technical bottleneck of laser communication ranging integration in medium region, this paper proposes a laser triangulation ranging model with dynamic scale. Firstly, by analyzing main technical constraints of different high-precision laser ranging in medium region, defeats and shortages in terms of measurement accuracy of traditional triangulation method are showed and demonstrated. On this basis, based on the electric vacuum semiconductor composite detector model system, it is proposed that a dynamic scale mechanism can effectively extend the measurement range of the laser triangulation ranging in medium region, then make up for the vacancy of the above integration system in medium region. The correctness and effectiveness of the model are verified by theoretical analysis, parameter calculation, system design, simulation and experiments, the measurement resolution of the triangulation ranging model with dynamic scale proposed by this paper can reach one thousandth of measuring range, which can fully satisfy the needs of subsequent engineering and systematic design.

Keywords: complex detection; laser ranging; integration

0 引言

在空天光电探测领域,为深入探索外层空间并获取多维度探测参数,星载有效载荷对多功能光电系统的需求愈发迫切^[1-3]。此外,因平台自重与极限载荷系数的约

束,轻小型化的激光复合探测器件及系统已然成为当下的研究热点,尤其成像、测距与通信一体化技术已成为该领域突破发展壁垒的重要研究方向^[4-6]。

虽然在系统层面,关于脉冲式激光测距通信一体化的技术方案已取得明显进展。例如,早在2011年,美国便以IM/DD激光通信的测距技术^[7]完成地月间的高速

收稿日期: 2023-09-12 Received Date: 2023-09-12

* 基金项目: 重庆市自然科学基金面上项目(cstc2021jcyj-msxmX0500)、吉林省中青年科技创新创业卓越人才(团队)项目(20220508147RC)、长春市院地合作项目(21SH05)资助

通信与精准测量;而国内姜会林院士也提出了空间碎片测距、成像、通信“三合一”的技术方案,并进行关键技术分解和可行性分析^[8]。浙江大学团队在微观层面也设计出一种基于定时同步算法的分数符号测距法,以此实现星间的通信测距终端^[9];而针对空间引力波的探测需求,国内在 2022 年成功构建自由空间异步双向链路的基础上,研制了一套时间比对、激光测距通信一体化轻便系统^[10]。可见,上述研究的测距原理皆以获取脉冲光程的飞行时间差为目的,本质上属于时间飞行法(time of flight, TOFR)。虽然在实际应用中,脉冲式 TOFR 在远距离条件下优势明显,但在短距离场合系统对回波鉴别器件的时间分辨率^[11]要求也将逐渐提高。

因此,为弥补一体化系统中短距离区间的空缺,本文提出了一种适用于通信成像一体化的变基准三角法测距模型,利用电真空器件在大视场瞬时成像的优势,实现了三角法在中短距离的高精度测距、成像、通信的一体化复合功能。为全域通信测距一体化复合技术的后续研究提供理论支撑。

1 中短程高精度激光测距的主要约束

1.1 短程脉冲激光 TOFR 的主要约束

脉冲激光 TOFR(简称脉冲法)以测距信号的往返飞行时间解算待测距离,中心环节在于检测时间间隔 T 。若计数器频率为 f_0 ,真空光速为 c ,则最小量化步长 $S_{\min} = c/2f_0$ 。因此,在近程实现亚厘米量级的绝对测量精度,脉冲法时延检测分辨率需高达皮秒量级,工程实现难度较大^[12-13]。在实际系统中,脉冲法的主要精度误差来源于随机误差 σ_1 与系统误差 σ_2 。忽略难以量化的回波畸变误差后,对于呈正态分布的各类随机误差,其标准偏差为 σ 时,若置信系数 $\varepsilon = 3$,则单次测量值不超出 $\pm 3\sigma$ 的概率皆低于 1%,则脉冲法的随机误差表征为:

$$\sigma_1 = \varepsilon \sqrt{\sigma_T^2 + \sigma_D^2 + \sigma_M^2} \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_T &= \sqrt{\sigma_i^2(START) + \sigma_i^2(STOP)} = \sqrt{2 \left(\frac{c}{4\sqrt{3}f} \right)^2} \\ \sigma_D &= \frac{ct_{rise} \sqrt{1+q^2}}{2 \left(\frac{A_N}{A} \right) (1-q)} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

式中: t_{rise} 为信号上升时间, q 为信号衰减系数。其中, σ_T 为计数量化误差,来源于计数时钟与 T 起始时刻异步;而在鉴别回波抵达时刻时,区别于固定阈值比较法,基于动态调整比较阈值的恒比定时鉴别法在避免信号幅值干扰层面更优越。那么针对噪声叠加因素,尤其是白噪声,时间抖动效应误差 σ_D 可由此表征,且 t_{rise} 与 q (多为 0.2~

0.5)^[14]固定时, σ_D 随系统信噪比提高呈指数倍衰减;此外,数字电路上升沿抖动 σ_M 每导致 2 ns 时间走离误差,相应误差约为 30 cm。采取低压正射极耦合逻辑电路后, σ_M 可优化至亚厘米量级。

而系统误差表征为:

$$\sigma_2 = \Delta R_p + \Delta R_a + \Delta R_d + \Delta R_f \quad (3)$$

基于时域满足高斯分布的回波脉冲功率模型,系统接收功率动态范围千米范围内不低于 50 dB。若接收灵敏度不变,回波光功率偏移测距误差 ΔR_p 为:

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta R_p &= c \frac{\Delta T_p}{2} = c \frac{\sqrt{-2\sigma^2 \ln(\alpha)}}{2} \\ \sigma &= \sqrt{\frac{-(0.5T_{MM})^2}{2\ln(0.5)}} = 0.425T_{MM} \end{aligned} \right. \quad (4)$$

式中: T_{MM} 为回波信号半高全宽, T_p 为回波光功率变化引入的最大时间漂移量; σ 为高斯波形均方根宽度; α 为回波光功率动态范围倒数。

受大气信号环境影响,地表大气参量也将直接导致光速回波速度计量产生误差 ΔR_a , 具体关系模型如下所示:

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta R_a &= 10^{-6} \left(\int_0^S \frac{80.343f(\lambda)P}{T} dl - \int_0^S \frac{11.3e_0}{T} dl \right) \\ f(\lambda) &= 0.965 + \frac{0.0164}{\lambda^2} + \frac{0.000228}{\lambda^4} \end{aligned} \right. \quad (5)$$

式中: λ 为工作波长; S 为工作距离; P 、 T 、 e_0 分别为地表压强、温度与水蒸气压强。

因发射端与接收端导入计数器的通道不同,且区别于发射端,微弱回波信号必须进行前置放大与处理,从而两通道间引入电路与探测器响应偏差,由此导致的系统延时误差 ΔR_d 难以避免。 ΔR_d 基于系统时延的固定值存在,其通常不随目标距离而变化,经定标校正后可降低至厘米量级^[15];而时钟频率漂移误差 ΔR_f 与计数器频率稳定度 e_f (单位 ppm) 以及 S 相关: $\Delta R_f = e_f S$ 。若 e_f 取三百万分之一, $S = 5$ km 时, $\Delta R_f = 15$ mm。综上,根据式(2)、(4)整合得到相对误差为:

$$\sigma = (\sigma_1 + \sigma_2) / S \quad (6)$$

因此,由图 1 可知,在远距离范围内,TOFR 的测量误差远皆低于 0.1%。即使通过自动增益控制手段可提高回波光功率趋于饱和,此时接收天线增益带宽积不足以阻碍该系统获取较理想的相对误差参数^[16]。

然而,在短程内若想获取同样的相对误差,须大幅降低 $\sigma_1 + \sigma_2$ 。并且,因脉冲法受限于接收系统带宽与计数器时间分辨率, $\Delta R_p + \sigma_T$ 最高可达 $\sigma/2$,尤其是 ΔR_p 对降低测量误差十分关键。但实际上,系统接收端的多级电路带宽普遍不满百兆赫兹,非理想的高频回波信号易产

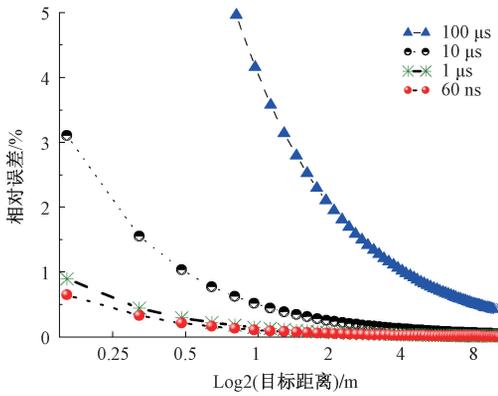


图 1 脉冲法测距相对误差与距离的关系

Fig. 1 Relationship between relative errors and ranging distance in the TOFR model

生展宽效应,设定千米量级测程的回波功率动态范围为 50 dB,若 T_{HM} 自 6 ns 展宽至 15 ns 后, ΔR_p 甚至可高达 1 m 以上。若针对性地提高系统带宽,系统信噪比随之降低,不仅 σ_d 增大,接收通道放大倍率以及系统动态响应能力均明显受限。综上,当前脉冲 TOFR 适用于远距离高速测量,却难以满足激光一体化在中短距离内的探测需求。

1.2 非近距离下相位式测距的主要约束

间接 TOF 激光测距手段主要包括干涉法与相位法。干涉法基于散射体的谐波多普勒频移原理^[17],以自相干后的干涉条纹实现测距,精度可达微米量级。但干涉法的系统复杂程度高,解算的精度均匀性较差,通常仅能测量相对距离,因此实际应用情形十分有限。

而相位测距法经信号往返的相位延迟间接获取飞行时间,可实现绝对距离测量。区别于干涉法的光信号解算,相位法基于电信号进行初相位估算,理想精度可达亚微米量级。并且,目前包含三角积分(delta-sigma)调制^[18]等方式在内的进行相位式测距与通信一体化研究已初见雏形。但在较远距离下相位法高精度测量仍存在较大局限性。

例如,相位法为保持调制信号的稳定性,普遍采用亚毫瓦量级的光源功率,而理想情况下,系统百米范围的回波光强衰减可达 30 dB,导致探测器表面入射光功率低于 1 μW。所以,接收系统通常采用具备光电子倍增和高速响应能力的雪崩二极管(APD)作为首要探测器件。为实现对微弱回波高效增益的同时保持系统高相位分辨率,APD 需工作于线性区。但由于其内部电流增益系数 M 受反向偏压调控,且回波光功率密度越小,APD 所需的最佳 M 参数越大。如图 2 可知,为实现超高内部电流增益,APD 反向电压可超过雪崩电压,造成器件进入革盖区工作^[19],从而导致重建波形后发生饱和截止失真,测

相误差大幅提高。

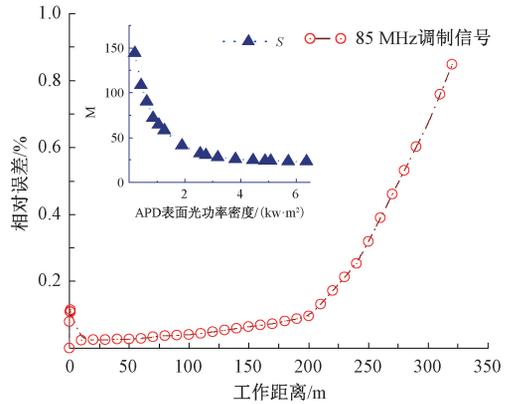


图 2 85 MHz 频率下相位法测距相对误差与距离的关系

Fig. 2 Relationship between relative error and work distance of phase-laser TOFR at 85 MHz frequency

此外,为解决相位法单一测尺的“距离模糊”问题,无论是哪种调制频率分布方式,为保证系统最大不模糊距离不低于毫米量级,高频调制信号的引入难以避免。但是,APD 的参数 M 较大且固定时,信号频率过高会导致 APD 空穴放电效应^[20]加剧,器件输出电流波前产生的时域延迟与测相误差 δ_x 有关:

$$\delta_x = A_d A_e 2\pi f_e M \delta_M \quad (7)$$

式中: A_d 、 A_e 分别为 APD 电离系数与电子增益时间, f_e 为信号调制频率。当然,除测相误差外,真实光速误差、调制频率稳定度等因素同样为阻碍相位法远距离范围内实现高精度测量的重要原因。

为拟合并且简化工作距离与相位法相对误差的对应关系,假设鉴相精度为千分之一不变,短期和瞬时的调制频率波动不计,待测距离为 U 。于待测表面边缘配置合作目标,当光斑尺寸不足以覆盖至边缘时,基于漫反射均匀反射机制的回波功率衰减系数为:

$$K = 10 \lg \left(\frac{0.5 T_U^2 \eta_f \eta_j r^2}{4U^2} \right) \quad (8)$$

当光斑无需特定瞄准可覆盖三角镜,基于点合作目标的回波功率衰减系数为:

$$K = 10 \lg \left(\frac{0.5 T_U^2 \eta_f \eta_j r^2}{3\lambda^2 U^2} \times 2e^{-3.938 \times 10^{-4} U} \right) \quad (9)$$

式中: T_U 为单程透过率, η_f 、 η_j 分别为发射端、接收端光学效率, r 为接收孔径, λ 为激光波长。基于 85 MHz 调制信号,近程范围主要考虑固定误差^[21],较远处则侧重比例误差的计量,可得相位法相对误差与对应于待测距离的变化趋势。如图 2 所示,亚米量级测程内相位法测量的相对误差因接收器件功率饱和和出现波动,随目标距离的增大,测量精度明显降低。

实际上,相位法包括接收系统的反向偏压控制与低

噪鉴相处理系统在内的相关模块设计难度大,而且相位法系统的温度敏感度高,理想状态下,其所需温控稳定性需优于毫开尔文单位,导致系统成本以及设计复杂度大幅提高。

1.3 中短程三角法测距的主要约束

激光三角法普遍应用于短距离范围内微小位移的高精度测量^[22]。基于固定系统间距,三角法以基准距离为中心,两侧最大可响应距离为总测程,因而基准距离作为决定三角法系统精确度与分辨率的关键因素之一。

如图 3 的单阶三角法结构可知,基准距离为 H ,对应于像面的参考原点。当目标与基准距离相距 S 时,像斑则相对于原点偏移 S' 。并且工作角(激光发射光轴与接收光学系统的夹角)为 α ,物距为 L ,像距为 L' ,偏转角(前端透镜组光轴与像面的夹角)为 β 。代入斯凯普夫拉格条件(Scheimpflug rule),焦距为 f 。在系统装置结构参数确定的情形下, α, β, L, L', H 为固定值。“ $S' > 0$ ”时为目标在远离基准距离的区域,可得:

$$S = K_1 + \frac{K_2}{S' + K_3} \quad (10)$$

$$\begin{cases} K_1 = \frac{-(L-f)\sin\beta}{\left(1-\frac{f}{L}\right)\sin(\alpha+\beta)} \\ K_2 = \frac{-(L-f)L'\sin\alpha \cdot \sin\beta}{\left[\left(1-\frac{f}{L}\right)\sin(\alpha+\beta)\right]^2} \\ K_3 = -\frac{L'\sin\alpha}{\left(1-\frac{f}{L}\right)\sin(\alpha+\beta)} \end{cases} \quad (11)$$

根据式(11)可知,图 4(a) 为不同 H 标定下,系统输入与输出的非线性映射关系;而输入-输出的微分增量如图 4(b) 所示。可知,远离基准距离的响应区间内,大量程下基准距离延申至越远,量程远端输入-输出特性曲线的非线性越急剧恶化,测量灵敏度可降低几十倍,间接影响回波像移量的解算准确性。

虽然,当前光电探测器像元尺寸工艺与亚像素级光斑定位技术^[23]可优化三角法的远程测量分辨率与精度,即显微领域进行高精度测距的阻碍不大。但是,对于接收前端的非短焦光学系统来说,为避免探测视场受限,增大其视场光阑十分必要。然而,视场边缘区域由此引入的像散、彗差和畸变等像差增大,导致了非均匀测量误差的大幅提高。因此,单阶基准距离标定的大量程三角法难以保持较高测量精度,尤其是测程两端成像偏差已成为制约其高精度测距的瓶颈问题。

针对以上技术瓶颈,就基准距离而言,三角法存在一定的操作空间。本研究以控制回波光斑始终位于视场中心区域为出发点,利用多阶区间距离拼接为大量程,从而

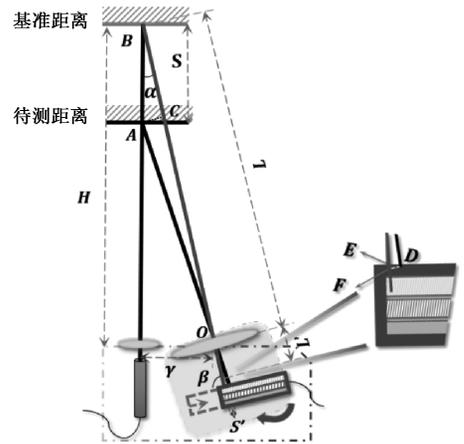


图 3 传统三角法系统结构

Fig. 3 Traditional laser triangulation ranging model

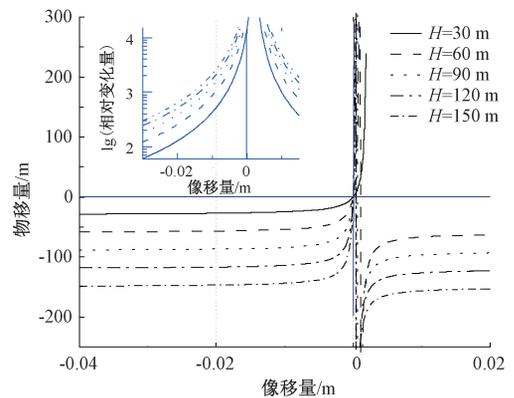


图 4 三角法系统物移量与像移量的对应曲线

Fig. 4 Curve between object and image movement in the laser triangulation ranging model

大幅降低相应非均匀误差。且区别于单像元式定位方式,辅以亚像素级细分算法优化三角法测量分辨率,可有效均衡三角法在中短距离区间对大量程与高精度的需求,相较于单一基准距离的三角法优势明显。

2 变基准式三角法复合探测系统设计与仿真

2.1 复合探测系统的基本器件结构

为了同时兼顾光电器件的视场、带宽以及增益等多方面的一体化技术需求,本文提出依托微通道板(MCP)光电倍增管(PMT)器件体系实现变基准式三角法复合探测。

如图 5 所示, MCP-PMT 通常由光阴极 A、微通道板 B、镀膜光点的阳极 C、用于成像耦合的波导光锥 D 以及成像面 E 组成。从整体层面看,漫反射回波信号经电真

空器件作用后可完成瞬时微光放大成像, 荧光屏所显示的光斑图像被波导光锥耦合至 CMOS 阵列, 由高速快门进行捕获后, 可有效避免大量背景光噪声的影响。

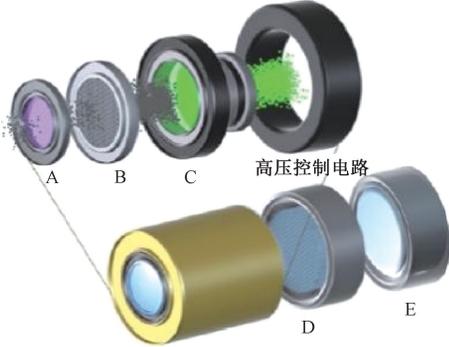


图 5 用于测距成像通信一体化的集成模型结构

Fig. 5 Integrated model applied to laser ranging imaging communication

而将波导阳极吸收的电子提取放大后, 能用作高频通信信号, 从而具备实现激光多功能一体化的条件。根据该模型的结构特性, 可表征出其完整噪声模型及电子光学传递特性: $MTF_{\text{整体系统}} = MTF_{\text{前近贴}} \cdot MTF_{\text{微通道板}} \cdot MTF_{\text{后近贴}} \cdot MTF_{\text{波导光锥}} \cdot MTF_{\text{荧光屏}}$ 。

$$\begin{cases} MTF_{\text{前近贴}} = \exp\left(-\frac{4}{7}\pi^2 L_1^2 \frac{\sigma_m}{V_1} f^2\right) \\ MTF_{\text{微通道板}} = \left| \frac{J_1(2\pi f r_c)}{\pi f r_c} \right| \\ MTF_{\text{后近贴}} = \exp\left(-\frac{1}{9}\pi^2 L_2^2 \frac{\varepsilon_m}{\phi_2} f^2\right) \\ MTF_{\text{波导光锥}} = \left| \frac{J_1(2\pi f d_R)}{\pi f d_R} \right| \\ MTF_{\text{荧光屏}} = \exp\left(-\left(\frac{f}{f_s}\right)^{n_s}\right) \end{cases} \quad (12)$$

式中: f 为空间频率 (lp/mm), L_1 、 V_1 分别为前近贴距离以及加速电压 (V), σ_m 为初电位 (V); J_1 为一阶贝塞尔函数, r_c 为 MCP 孔径直径 (μm); d_R 为波导光锥单孔直径 (μm); (f_s , n_s) 为荧光屏工艺相关的特征参数, 系统电子光学传递特性如图 6 所示。

2.2 变基准式三角法复合探测光学系统约束分析

虽然传统激光三角法为拓展景深范围, 普遍采用沙式条件约束下的系统结构布局满足系统完善成像条件, 即发射激光的轴线光束、成像透镜组主平面和像面三者的延长线相交于一点。但在实际应用中, 受像差与光圈 F 对物距变化的依赖, 系统往往无法实现其理论宣称的恒聚焦^[24]效果。为验证中短程内三角法在沙氏条件下的回波畸变急剧恶化, 在仿真模拟实验中可将激光器发射轴向光束与目标表的漫反射过程简化, 且代入 $H =$

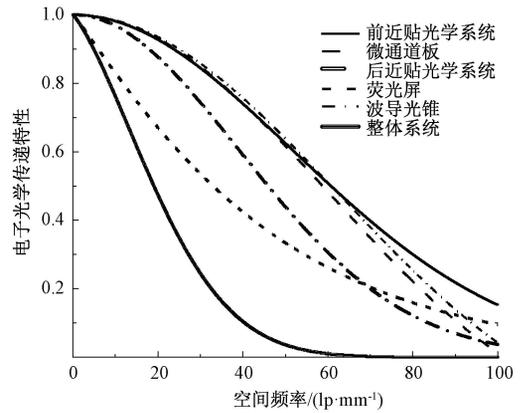


图 6 一体化集成模型的电子光学传递特性

Fig. 6 MTF of the integrated model

60 m, $S \in [50, 70]$ 等系统参数后, 如图 7 所示, 构建出全局 3D 模型及各模块细节。

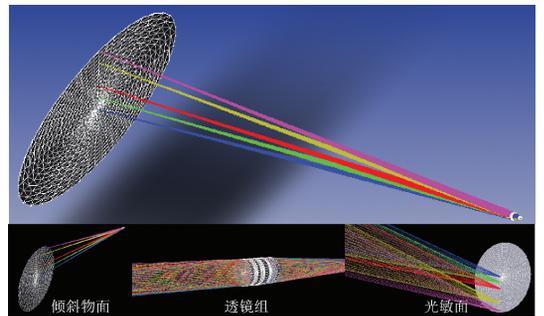


图 7 三角法测距系统的仿真

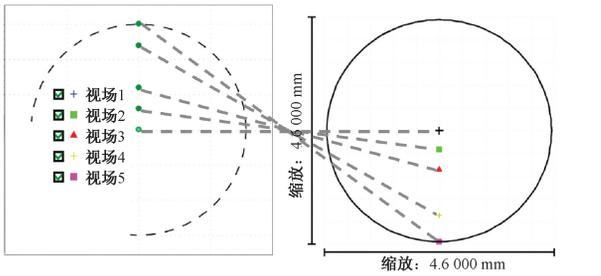
Fig. 7 Simulation of laser triangulation range system

基于三角法的输入—输出特性曲线, 验证遵循沙式条件的中短程三角法回波光迹。如图 8 待测目标位置变换时, 在像面上呈现出符合式 (10) 的光迹变化趋势。若目标沿发射端的激光轴线移动时, 像斑的中心坐标应仅在一个维度上进行变换。即像斑中心在 X 方向基本无变化, 但在 Y 方向上可鉴别出明显的坐标值偏移。可知系统整体工作原理无偏差, 继而具体分析传统沙式条件下三角法在复合探测方面的约束性。

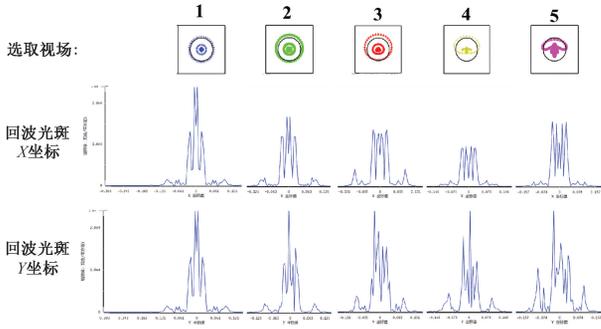
因沙式条件的约束, 系统光敏面上固有的梯形畸变与偏转角直接相关:

$$T' = \frac{f}{KT - \cos\alpha} \times \frac{\sin\alpha}{\sin\beta} \quad (13)$$

式中: K 为不同待测目标对应的理想成像放大倍率, T 为像斑未形变前的尺寸, T' 为像斑形变后的成像尺寸。由图 9 可知, 中短程内回波畸变程度并不相同, 在子午和弧矢方向上的非统一式拉伸与压缩程度明显增加。这是由于目标位移对应的理想焦面位置呈非线性变化, 但遵循



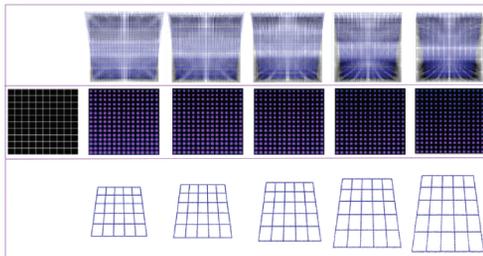
(a) 激光三角法系统的光迹追踪
(a) Ray tracing of the laser triangulation system



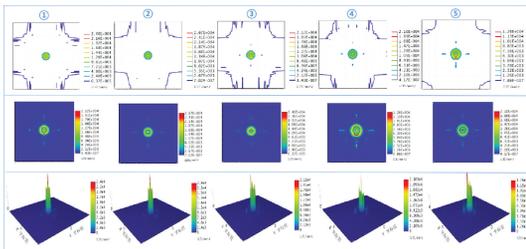
(b) 光斑中心位置变化
(b) Change of spot center position

图 8 激光三角法物象运动仿真

Fig. 8 Movement Simulation between object and image in the laser triangulation model



(a) 传统三角法系统结构的网格畸变
(a) Mesh distortion of the traditional laser triangulation



(b) 传统三角法系统结构的物理光学图

(b) Analog optical image of the traditional laser triangulation

图 9 斯凯普夫拉格条件下三角法系统的弊端

Fig. 9 Distortion of laser triangulation under Scheimpflug rule

沙式定律的合焦过程却属于单次线性拟合,所以系统景深难以覆盖大测程范围。综上,本研究的激光复合探测

系统不易沿用沙式条件结构。

基于专门化设计的一体化集成结构,三角法系统可充分利用超焦距点获取优质景深特性,即传统结构的偏转角 β 变换为 $2/\pi$ 后替换移轴式结构,从而系统鲁棒性显著提高、回波梯形畸变程度极大降低。如图 10 选取测程两端畸变与回波能量图像可见上述问题明显改善。

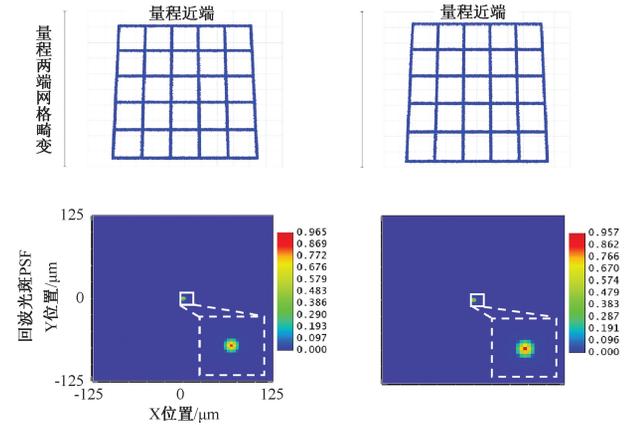


图 10 基于一体化集成模型的回波成像

Fig. 10 Analysis of imaging spot based on the integrated model

2.3 变基准式三角法系统优势分析与验证

为保证激光光斑恒入射于标靶目标表面的特定区域,本激光复合探测系统采用直射式测距原理进行工作。如图 11 所示,激光复合探测系统将脉冲信号经准直光学系统投射至前方待测目标物的表面。该系统采用变基准式三角法测距工作模式,同时需利用编码器控制接收端进行微小角度变动。

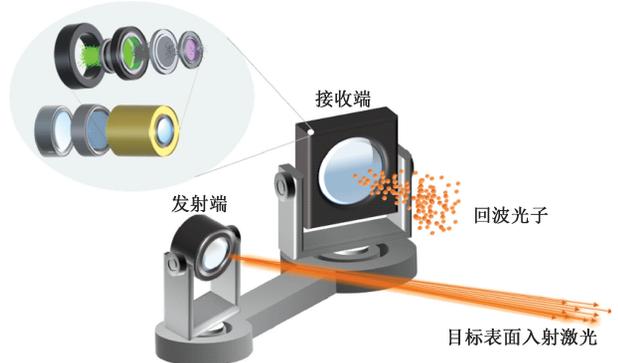


图 11 三维变基准式三角法测距模型

Fig. 11 3D model of laser triangulation with Dynamic scale

在设备间距 $\gamma = 1.04$ m 已固定的情况下,变基准式三角法选取一段中短距离 90~150 M 为总范围,转动角度 φ 与各阶基准距离的对应关系如表 1 所示(光轴像逆时针旋转为正)。对于回波像斑,变基准式机制将其始终控制在二维成像视场的中心区域,由于各阶量程内存在

重合探测区,并根据图 4 可知基准距离内侧区域的相对变化率皆小于外侧区域。因此,为获取更优异测量灵敏度的同时,保证各阶像移量与目标距离具备唯一对应关系,本研究仅选取内侧区域进行标定。

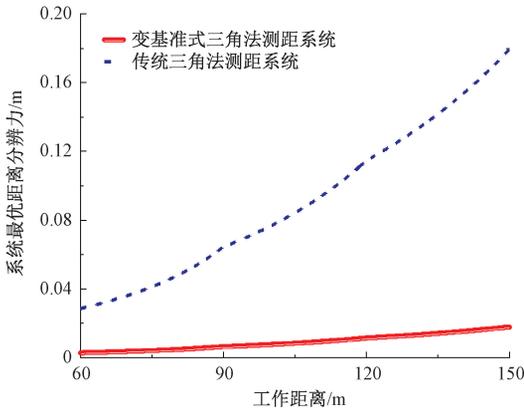


图 12 变基准式三角法系统测量分辨率
Fig. 12 Measurement resolution of the laser triangulation with dynamic scale

表 1 变基准式三角法系统的变基准参数
Table 1 Dynamic parameters of the laser triangulation with dynamic scale

阶数	区间距离/m	基准距离/m	转动角度/(°)
一阶	60~90	90	$\delta_0 = 0.667$
二阶	90~120	120	$\delta_0 = 0.167$
三阶	120~150	150	$\delta_0 = 0.267$

根据亚像素级(百分法)回波光斑定位算法,该类一体化变基准三角法测距模型测量分辨率如图 12 所示。可见,变基准式工作机制下,其测量灵敏度相较传统光斑定位法下的单阶三角法灵敏度优化明显,且整体非线性程度可有效被降低。

另外,光斑定位作为该系统进行目标距离解算的最后环节,直接影响系统测距误差的大小。因此,完成亚像素级光斑定位手段的残差分析与标定对于变基准式三角法系统误差补偿十分重要。根据该系统的回波模拟结果,信号未达多峰程度。在此基础上,基于滤波光滑预处理后的二值化图像,以固定物移间距对应的像素步长为参考,获取像斑实际坐标与定位算法提取坐标的残差 Δy 以及相应误差补偿函数,如图 13 所示。

为验证本文观点的正确性与可行性,本文依托图 5 的基本模型,设计构建了相应的验证性系统并开展了相应的验证性实验,具体测试装置、过程如下。

如图 14 所示,本文作者在长春理工大学第一教学楼楼道内进行常温理想化暗室实验。首先,如图 14(a)所示,系统发射端采用 405 nm 激光器用于避免背景光的干

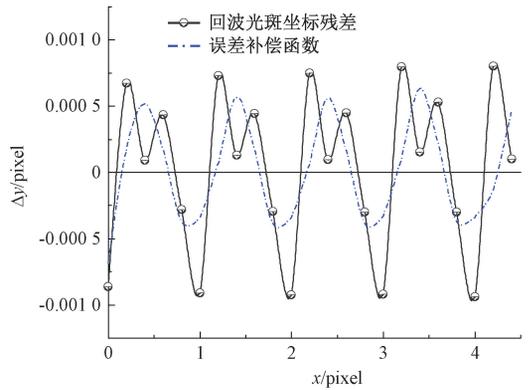


图 13 三角法的光斑定位误差与补偿函数
Fig. 13 Spot positioning error and compensation function

扰,激光百米发散角约为 2.8 mrad,并通过伺服系统进行精密机械控制。该伺服系统为蜗轮蜗杆式固定转台,采用 17 bit 绝对值编码器进行控制,理论转动角分辨率约为 $48 \mu\text{rad}$,其误差对测距误差影响不大,完全能够满足变基准系统的微小角度变化需求。另外,如图 14(b)所示,系统接收端依据 2.1 节所设计的集成模型进行搭建,测量回波通过窄带滤膜后,经自制镜头聚焦于像增强器表面,像增强器则通过波导光锥将成像效果耦合至相机,提取数字化信号后,获取光斑图像,并对光斑定位误差进行补偿优化后,分别选取各阶量程的两端进行实际测量。同时,由于实验环境处于室内暗室,系统的工作环境较为理想,气候环境、背景光以及温度等因素对细分精度的影响并不大,图像处理细分精度可达千分之三。

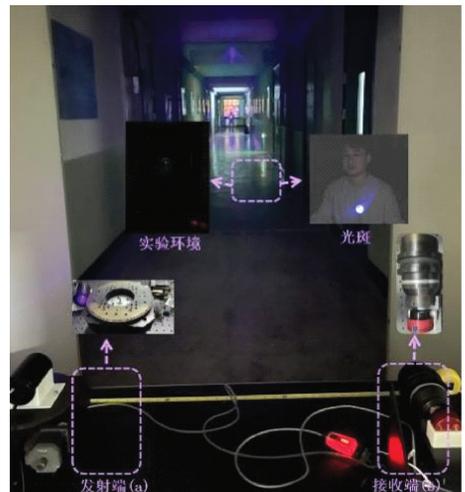


图 14 实际测量的系统结构
Fig. 14 Structure of the measurement system

但是,当系统处于复杂环境,受不可抗因素影响,系统测量精度会有所降低,且细分精度降至百分级。为进行非理想环境下的测量分析,本文则以每 0.5 m 物移量

为间隔,并依据百分之一精度进行模拟,最终多次提取与解算像移量,从而获取非理想情况下变基准式三角法系统的模拟相对误差。如图 15 所示。根据理想化暗室环境实测与复杂环境仿真数据可知,降低量程两端因像差影响引入的光斑定位误差对优化系统精度起到关键影响,即变基准式测量机制可有效降低传统单阶三角法系统的非均匀误差,且采用亚像素级细分法能够优化测量灵敏度。综上所述,变基准式三角法测距模型的相对误差可控制在 0.5% 以下,从而可为进一步实现中短距离的激光测距、成像与通信一体化系统提供理论与技术方案参考。

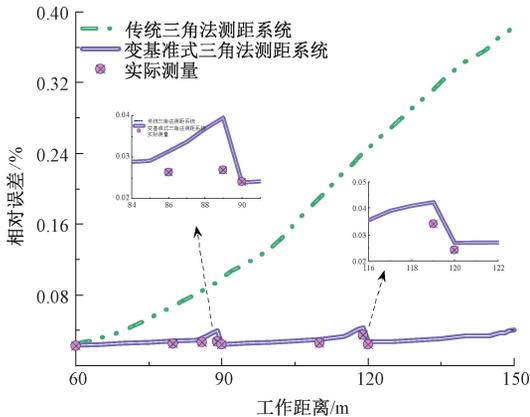


图 15 变基准式三角法系统相对误差

Fig. 15 Relative error of laser triangulation with dynamic scale

3 结 论

本文论述了中短距离范围内一体化测距方法的主要技术约束。以三角法设定基准距离时存在优化空间为依据,创新性地提出了用于通信成像一体化的变基准三角法测距机制,并构建基于激光复合探测的一体化集成模型。通过验证传统三角法在系统布局的主要约束,利用共轴集成式结构执行变基准式测距功能,经仿真与实验验证后,解析出该系统的测量分辨率最优可达 0.002%,测量相对误差低于 0.1%,为进一步满足全域复合探测与激光通信测距一体化集成提供模型支撑与方案参考。

参考文献

[1] CALZOLAIO D, CURRELI F, DUNCAN J, et al. EDRS-C - The second node of the European data relay system is in orbit-ScienceDirect[J]. Acta Astronautica, 2020, 177:537-544.

[2] YUNPENG H, KEBO L, YAN'GANG L, et al. Review on strategies of space-based optical space situational awareness [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2021, 32(5): 1152-1166.

[3] 姜会林,安岩,张雅琳,等.空间激光通信现状、发展趋势及关键技术分析[J].飞行器测控学报,2015,34(3):207-217.

JIANG H L, AN Y, ZHANG Y L, et al. Analysis of the status quo development trend and key technologies of space laser communication[J]. Journal of Space Craft TT & C Technology, 2015, 34(3): 207-217.

[4] 王雪瑶.国外空间目标探测与识别系统发展现状研究[J].航天器工程,2018,27(3):86-94.

WANG X Y. Development status research of foreign space target detection and identification systems [J]. Spacecraft Engineering, 2018, 27(3): 86-94.

[5] 彭宇,孙树志,姚博文,等.微小卫星星载综合电子系统技术综述[J].电子测量与仪器学报,2021,35(8):1-11.

PENG Y, SUN SH ZH, YAO B W, et al. Summary of the technology of integrated electronic the system on board microsatellite [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(8): 1-11.

[6] 刘向南,李英飞,向程勇,等.激光测距通信一体化技术研究及深空应用探索[J].深空探测学报,2018,5(2):147-153,167.

LIU X N, LI Y F, XIANG CH Y, et al. Study on integrated technique of laser ranging and communication and its applications in deep space [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(2): 147-153, 167.

[7] KAM A, PLICE L, GALAL K, et al. Ladee flight dynamics; Overview of mission design and operations [C]. 2015 AAS-AIAA Space Flight Mechanics Meeting, 2015.

[8] 姜会林,付强,张雅琳,等.空间碎片激光探测成像通信一体化技术探讨[J].红外与激光工程,2016,45(4):8-14.

JIANG H L, FU Q, ZHANG Y L, et al. Discussion of the laser held with polarization spectral imaging observations and communication technology for space debris [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45 (4): 8-14.

[9] TIAN Y, ZHONG J, LIN X, et al. Inter-satellite integrated laser communication/ranging link with feedback-homodyne detection and fractional symbol ranging [C]. 2019 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS). IEEE, 2019: 1-5.

[10] ZHANG Q, PANG C, WANG Y, et al. Portable system integrated with time comparison, ranging, and communication [J]. Chinese Optics Letters, 2022, 20(10): 100601.

[11] 郭杨盛,苏淑靖,吴梦香,等.皮秒级可调脉宽脉冲码

- 型生成电路设计[J]. 电子测量技术, 2022, 45(15): 14-20.
- GUO Y SH, SU SH J, WU M X, et al. Picosecond-level adjustable pulse width pulse code generation circuit design[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(15): 14-20.
- [12] 吴培鹏, 蔡文郁, 唐国栋, 等. 激光测距动态多阈值误差修正技术研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(7): 170-177.
- WU P P, CAI W Y, TANG G D, et al. Laser range measuring system based on dynamic multi-threshold error correction method[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(7): 170-177.
- [13] KURTTI S, KOSTAMOVAARA J. An integrated laser radar receiver channel utilizing a time-domain walk error compensation scheme [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(1): 146-157.
- [14] 程鹏飞. 大动态范围高精度激光测距关键技术研究[D]. 上海: 中国科学院研究生院(上海技术物理研究所), 2015.
- CHENG P F. Research of key technologies of wide dynamic range and high precision laser distance measurement[D]. Shanghai: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics), 2015.
- [15] KURTTI S, KOSTAMOVAARA J. An integrated laser radar receiver channel utilizing a time-domain walk error compensation scheme [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(1): 146-157.
- [16] ZHANG Z P, YANG F M, ZHANG H F, et al. The use of laser ranging to measure space debris[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2012, 12(2): 212.
- [17] HONG-FANG C, ZHI Z, XUE-MEI D. Compensation of nonlinear errors in laser heterodyne interferometers[J]. Optics & Precision Engineering, 2010, 21(2): 327-333.
- [18] BERSCHIED B. A circuit for low-complexity timing synchronization in ofdm systems[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2018, 66(7): 1159-1163.
- [19] MCMANAMON P F, BANKS P S, BECK J D, et al. Comparison of flash Lidar detector options [J]. Optical Engineering, 2017, 56(3): 031223.
- [20] GHOSE A, BUNZ B, WEIDE J, et al. Extraction of nonlinear parameters of dispersive avalanche photodiode using pulsed RF measurement and quasi-DC optical excitation[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2005, 53(6): 2082-2087.
- [21] 刘玉周. 基于射频光电调制的相位法测距关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- LIU Y ZH. Research of key technologies of phas shift laser range finder based on electro-optic modulator[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2016.
- [22] 王成武, 陆惠宗, 吴俊杰, 等. 激光三角法位移测量多项式拟合及误差修正[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(5): 1-8.
- WANG CH W, LU H Z, WU J J, et al. Study of polynomial fitting and error correction method for laser triangulation displacement measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(5): 1-8.
- [23] 刘红涛, 陆安江, 彭熙舜, 等. 光照不均匀下的工件图像亚像素边缘检测[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(10): 1-7.
- LIU H T, LU AN J, PENG X SH, et al. Subpixel edge detection of workpiece images under uneven illumination[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(10): 1-7.
- [24] YI Z, HERBERT G. Improvement of scheimpflug systems with freeform surfaces [J]. Applied Optics, 2018, 57(6): 1482.

作者简介



王宇琦, 2020年于东北石油大学获得学士学位, 现为长春理工大学物理学院硕士研究生, 主要研究方向为光电传感与探测技术。

E-mail: w54775477@126.com

Wang Yuqi received her B. Sc. degree from Northeast Petroleum University in 2020. She is now a M. Sc. candidate at Changchun University of Science and Technology. Her main research interests include photoelectric sensing and detection technology.



母一宁(通信作者), 教授, 博士生导师, 现任长春理工大学物理学院红外技术与系统学科方向带头人, 主要研究方向为瞬态光电子器件集成。

E-mail: myn@cust.edu.cn

Mu Yining (Corresponding author) is now a professor, doctoral supervisor and the leader of infrared technology and system discipline in School of Physics, Changchun University of Science and Technology. His main research interest includes transient optoelectronic device integration.