

飞行目标脉冲激光测距的回光稳定性

谢庚承^{1,2*}, 叶一东^{1**}, 雒仲祥¹, 李建民¹

¹中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900;

²中国工程物理研究院研究生部, 北京 100088

摘要 基于脉冲激光测距原理, 推导了飞行目标激光测距回光功率的一般方程。基于目标探测跟踪系统的瞄准误差理论, 结合测距方程建立了系统准测概率的计算模型。利用 Matlab 软件仿真分析了激光发散角、系统跟踪精度、目标尺度、探测距离及系统接收口径对回光稳定性的影响。设计了一个飞行目标脉冲激光测距系统, 并根据理论分析结果确定了该系统参数, 搭建了实验平台。通过对无人机靶板目标的跟踪测距实验, 验证了系统的探测性能。通过对比不同大小靶板目标的准测概率与理论推算结果, 验证了该模型的有效性。

关键词 测量; 激光测距; 准测概率; 瞄准误差; 飞行目标; 回光稳定性

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.091207

Light Echo Stability of Pulsed Laser Ranging of Flight Targets

Xie Gengcheng^{1,2*}, Ye Yidong^{1**}, Luo Zhongxiang¹, Li Jianming¹

¹Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang, Sichuan 621900, China;

²Graduate School, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China

Abstract Based on the working principle of pulsed laser ranging, the general equation of the light echo power of laser ranging for the flight targets is derived. Based on the pointing error theory of the target detection and tracking system and the ranging equation, a computation model of the detection probability for the range system is established. The influences of the laser divergence angle, the system tracking precision, the target scale, the detection distance and the system receiving aperture on the light echo stability of pulsed laser ranging are simulated and analyzed by the Matlab simulation software. A system of pulsed laser ranging for the flight targets is designed, the system parameters are determined according to the theoretical analysis results, and the experimental platform is built. The detection performance of this system is confirmed by the tracking and ranging experiment for the unmanned aerial vehicles. The effectiveness of this model is verified by the comparison between the detection probability and the theoretical derivation one for the target boards with different sizes.

Key words measurement; laser ranging; detection probability; pointing error; flight target; light echo stability

OCIS codes 120.4820; 140.3538; 250.0040; 280.3400; 280.3640

1 引言

激光测距系统作为一种主动激光探测装备, 能够实现非合作目标的高精度测量, 在飞行目标轨迹测量中扮演着重要的角色^[1-2]。目标跟踪精度、激光发散角、目标特性及大气等诸多因素都将影响激光测距系统的探测能力。对于飞行目标的脉冲激光测距, 其中任何一个因素的变化都会导致测距回光稳

定性的变化。因此, 分析回光稳定性随各个因素的变化规律对激光测距系统的优化设计及性能评估具有重要意义。

Steinvall^[3]基于激光雷达方程, 用数值模拟的方法给出了不同大气条件下系统设计参数和目标特性对激光雷达系统作用距离的影响。李明等^[4]根据空间碎片激光测距的最小可识别回波概率, 分析了系统作用距离与有效回波概率间的关系。康民强

收稿日期: 2018-04-08; 修回日期: 2018-04-09; 录用日期: 2018-04-23

基金项目: 中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室基金(HEL2018-03)

* E-mail: xgc_caep@163.com; ** E-mail: yidongye@163.com

等^[5]设计了一种针对卫星激光测距的高重复频率皮秒脉冲激光远程测距系统。薛莉等^[6]提出了将超导纳米线单光子探测器应用于空间碎片激光测距的构想,通过建立信噪比随回波光子数的变化模型,分析了天光背景的噪声强度、探测器的暗计数率和激光器的发射重复频率等参数对信噪比的影响,以太阳光板作为目标,获得了信噪比随回波光子数变化的实验曲线。于欢欢等^[7]从远程激光测距探测成功率的角度出发,分析了望远镜口径、激光重复频率及脉冲能量与空间碎片大小及距离之间的关系。唐美荣等^[8]分析了湍流间歇性对低轨卫星、高轨卫星和月球激光测距回波光子数的影响。翟东升等^[9]综合考虑了望远镜抖动误差和大气湍流引起的光束漂移等因素,推导了卫星激光测距方程,并分析了不同限制因素对回波强度的影响。目前,在脉冲激光测距领域有大量关于空间碎片和卫星等远程激光测距理论和实验研究的文献,而关于中近程飞行目标测距的相关研究鲜有报道。

由飞行目标脉冲激光测距的原理可知,激光测距系统并非每次测量都能获得被测目标的距离信息,发出激光脉冲后可能没有目标反射回光,也可能由于回光较弱而检测不到,本文将激光测距系统每次测量获得目标距离信息的概率称为准测概率。准测概率的大小直接反映了飞行目标激光测距的回光稳定性。本文以空间小目标的激光测距方程作为基础,推导了脉冲激光测距准测概率的理论计算模型,同时分析了测距过程不同外部因素及系统参数对准测概率的影响。结合理论分析结果设计了脉冲激光测距系统,并通过无人机靶板测距实验进行了验证。

2 准测概率的理论计算模型

2.1 飞行目标的激光测距方程

设发射激光的单脉冲能量为 E_t , 脉冲宽度为 T_p , 则从测距系统发射的单个脉冲功率为 $\frac{E_t}{T_p}$, 激光以发散角 φ (全角) 经过距离 R 均匀地照射到目标处, 形成大小为 $\pi(\varphi R/2)^2$ 的光斑。考虑到瞄准误差及大气影响等因素, 只有照射到目标有效反射截面上的脉冲能量 $E_t \eta_t T_e \rho A_m \beta / [\pi T_p (\varphi R/2)^2]$ 能被目标表面反射回测距接收系统, 其中, η_t 为发射系统的光学效率, T_e 为单程大气透过率, ρ 为目标反射率, A_m 为目标反射面积, β 为目标处激光功率的衰减因子。假设目标的反射发散角为 θ_r , 接收系统的光学系统效率为 η_r , 接收系统的有效接收面积为

$A_r = \pi(D/2)^2$, 其中 D 为光学系统的接收口径, 则激光测距回光功率的表达式为

$$P_r = \frac{E_t}{T_p} \frac{\rho A_m \beta}{\pi(\varphi R/2)^2} \cdot \frac{A_r}{\pi(\theta_r R)^2} \eta_t \eta_r T_e^2, \quad (1)$$

式中 β 由目标探测跟踪系统的瞄准误差和大气湍流导致的光斑漂移决定。对于中近程飞行目标的激光测距, 大气湍流导致的光斑漂移量很小, 可以忽略不计, 这里衰减因子 β 主要考虑系统瞄准误差的影响。根据瞄准误差理论, 测距激光在目标处照射到目标表面的光功率衰减因子 $\beta(r)^{[10]}$ 可表示为

$$\beta(r) = A_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_{zeq}^2}\right), \quad (2)$$

式中 r 为瞄准误差导致的光斑偏移量, $A_0 = [\text{erf}(v)]^2$, $\omega_{zeq}^2 = \omega_z^2 \sqrt{\pi} \text{erf}(v) / [2v \exp(-v^2)]$, 其中 $\text{erf}(\cdot)$ 为高斯误差函数, $\text{erf}(x) = \int_0^x \frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp(-t^2) dt$, ω_z 为目标处光斑半径, $\omega_z =$

$$\sqrt{\omega_0^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda R}{\pi \omega_0^2}\right)^2\right]}, \omega_0 \text{ 为高斯束腰半径, 参量 } v =$$

$\sqrt{2} a / (2\omega_z)$, a 为目标半径。采用高斯分布的光束偏移模型, 假设系统的跟踪抖动为高斯分布, 且仅考虑目标探测跟踪系统的随机误差, 则由系统跟踪抖动导致的目标偏离光束中心的距离 r 为满足高斯分布的随机变量。将偏移量转化为角度 ψ 的随机变量, 则衰减因子可以表示为

$$\beta(\psi) = A_0 \exp\left[-\frac{2(\psi R)^2}{\omega_{zeq}^2}\right]. \quad (3)$$

2.2 飞行目标激光测距的瞄准概率

测距激光的束宽一般很小, 受瞄准误差的影响, 激光束并不能保证完全对准目标。对于远场为高斯分布的激光束, 瞄准偏差越大, 照射到目标上的激光能量就越小, 测距回光也就越弱。若瞄准偏差较大, 当目标回光小于测距探测器可响应的最小光功率时, 激光测距机就测量不到目标距离, 准测概率下降。因此, 除了探测电路的噪声影响之外, 瞄准误差也会影响激光测距机的准测概率。

瞄准误差包括目标探测跟踪系统的跟踪误差和激光发射光轴与跟踪轴的偏差。跟踪误差由系统的跟踪精度决定, 是一种随机误差。激光发射光轴和跟踪光轴之间的固定误差由系统装调引起, 是系统误差, 修正后可忽略。当到达探测器的激光回光功率大于探测器可响应的最小功率时, 瞄准概率 $P_a^{[11]}$ 为

$$P_a = P(|X| \leq \zeta), \quad (4)$$

式中 X 为瞄准误差, 是一个随机变量; ζ 为回光功

率等于探测器可响应的最小功率时的瞄准误差。假设系统误差修正后可忽略,目标探测跟踪系统的瞄准精度为 σ_g ,则瞄准误差可以用瞄准精度表示: $\zeta = N\sigma_g$,其中 N 为随机变量。瞄准误差 X 是满足高斯概率分布的随机变量,故瞄准概率可表示为

$$P_a = P(|X| \leq N\sigma_g) = 2\Phi(N) - 1, \quad (5)$$

式中 $\Phi(x)$ 为标准正态分布。非合作目标的探测概率 P_c 受瞄准概率和系统探测概率 P_d 的影响,探测概率由目标探测跟踪系统的特性决定,探测概率由回光探测电路的特性决定,两者是相互独立的,因此 P_c 可表示为

$$P_c = P_a \cdot P_d. \quad (6)$$

根据高斯分布的性质,由(5)、(6)式可得

$$N = \sqrt{2} \operatorname{erf}^{-1}(P_a) = \sqrt{2} \operatorname{erf}^{-1}(P_c/P_d), \quad (7)$$

式中 $\operatorname{erf}^{-1}(\cdot)$ 为高斯误差函数的反函数。

故瞄准误差可表示为

$$\zeta = \sqrt{2} \operatorname{erf}^{-1}(P_c/P_d)\sigma_g. \quad (8)$$

2.3 测距系统探测概率

在测距过程中,测距接收系统探测器接收回波脉冲并产生大量光电子,再经过光电转换将回波信号送至前置放大器。回光功率受回光探测器和放大电路噪声等因素的影响,放大电路输出的信号不是一个稳定值,其幅度和相位都是随机的。激光测距机的回光探测器输出的信号包括回光信号和噪声信号,当噪声信号幅度大于探测阈值时,出现虚警。激光测距系统的虚警概率定义为无激光回波信号时噪声的幅度大于探测阈值的概率^[12],可表示为

$$P_F = \frac{1}{2} - \int_0^{V_T} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \bar{V}_{nl}} \exp\left(-\frac{V_n^2}{2\bar{V}_{nl}^2}\right) dV_n, \quad (9)$$

式中 V_n 为放大电路输出的噪声电压, \bar{V}_{nl} 为无激光回波信号时噪声电压的均方根,探测阈值为 V_T 。根据高斯误差函数的表达式,(9)式可化简为

$$P_F = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{V_T}{\sqrt{2} \bar{V}_{nl}}\right) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{f_{\text{TNR}}}{\sqrt{2}}\right), \quad (10)$$

式中 $f_{\text{TNR}} = V_T/\bar{V}_{nl}$,简称为阈噪声比。激光测距系统的探测概率是有激光回波信号时信号与噪声之和大于探测阈值的概率。假设无信号和有信号时噪声电压的均方根之比相同,根据噪声信号的概率分布,可以得到探测概率的表达式为

$$P_d = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{V_s - V_T}{\sqrt{2} \bar{V}_{nl}}\right) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left[\frac{1}{\sqrt{2}}(f_{\text{SNR}} - f_{\text{TNR}})\right], \quad (11)$$

式中 V_s 为放大电路输出的信号电压; $f_{\text{SNR}} = V_s/\bar{V}_{nl}$,表示有激光回波信号时的电压信噪比。测距系统的灵敏度仍可用等效噪声功率 f_{NEP} ^[13]表示,其定义为当系统信噪比为1时接收信号的光功率,故信噪比也可以表示为

$$f_{\text{SNR}} = \frac{P_r}{f_{\text{NEP}}}. \quad (12)$$

将(1)式代入(12)式得

$$f_{\text{SNR}} = \frac{E_t}{T_p} \cdot \frac{\rho A_m \beta}{\pi (\varphi R/2)^2} \cdot \frac{A_r}{\pi (\theta_r R)^2} \cdot \frac{\eta_t \eta_r T_c^2}{f_{\text{NEP}}}. \quad (13)$$

将(3)式和(13)式代入(11)式,得到测距系统探测概率的表达式为

$$P_d = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left\{\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \left[\frac{E_t}{T_p} \frac{\rho A_m \beta}{\pi (\varphi R/2)^2} \frac{A_r}{\pi (\theta_r R)^2} \frac{\eta_t \eta_r T_c^2}{f_{\text{NEP}}} - f_{\text{TNR}}\right]\right\}. \quad (14)$$

衰减因子 β 是关于瞄准误差随机变量 ψ 的函数,因此(14)式得不到解析表达式,不利于探测系统探测概率的估算。为了分析测距系统各参数对探测概率的影响,将瞄准误差的表示式代入(3)式,得到衰减因子 β 为

$$\beta = A_0 \exp\left\{-\frac{2 \left[\sqrt{2} \operatorname{erf}^{-1}(P_c/P_d)\sigma_g R\right]^2}{\omega_{\text{zeq}}^2}\right\}. \quad (15)$$

由(14)、(15)式可得到探测概率的近似表达式为

$$P_c = \operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{-\omega_{\text{zeq}}^2 \ln S}}{2\sigma_g R}\right) P_d, \quad (16)$$

式中 $S = \frac{[\sqrt{2} \operatorname{erf}^{-1}(2P_d - 1) + \operatorname{erf}^{-1}(1 - 2P_F)] \cdot T_p \pi (\varphi R/2)^2 \pi (\theta_r R)^2 f_{\text{NEP}}}{E_t \rho A_m A_0 A_r \eta_t \eta_r T_c^2}$ 。

(16)式包含了影响飞行目标测概率的各种因素,除了测距系统的激光发射功率、光学系统参数、回光探测器噪声的影响之外,还包括了跟踪系统的瞄准精度、目标尺度及目标距离等因素的影响等。虚警概率、探测概率是使用者对激光测距系统的技术要求,其取值由使用者根据需求设定的接收电路探测阈值决定。系统瞄准精度由目标探测跟踪系统的性能决定。对于激光测距系统的研制者,这些参数的取值一般都是确定的。在飞行目标的轨迹测量中,研究者更关心的是有效测距范围内的测距系统的准测概率。

3 系统仿真及回光稳定性的分析

在飞行目标激光测距应用中,准测概率直接反映了飞行目标激光测距的回光稳定性,是评价激光测距系统的主要性能指标之一。激光单脉冲能量、接收系统口径、发射和接收系统效率、发射激光发散角、大气透过率、回光探测器的灵敏度、系统跟踪精度等因素均能影响激光测距系统的准测概率,理论上合理改变上述参数的取值就可以增大测距概率。

激光测距系统的发射和接收效率受到光学系统的结构、膜系效率等因素的限制,由光学系统的设计和镀膜技术水平决定,难以显著提高。增大激光发射功率可以在一定程度上提高准测概率,但是激光器发射功率越大,体积、重量和功耗也就越大,导致可靠性降低,成本增高。在使用条件较恶劣且有轻便要求的测距系统中,激光器的输出功率受到空间体积和目前技术水平的双重限制,提高的难度较大。减小测距电路和回光探测器的噪声可以直接减小测距系统的虚警概率并提高探测概率,从而提高飞行目标测距的准测概率。但这也同样受目前回光探测器灵敏度技术水平的限制,难度较大。选择合适的测距波长,在大气能见度良好的情况下测距可以增大测距激光在大气中的透过率,达到增大准测概率的目的。激光波长在系统设计初期根据使用需求确定,无法随意改变,而大气能见度和天气状况有关,不在系统参数设计的考虑范围内。因此,重点分析激光发散角、目标探测跟踪系统的跟踪精度、系统接收口径、目标尺度和目标距离对测距准测概率的影响。

基于所建立的准测概率计算模型,在 Matlab 软件平台下进行仿真,仿真参数如下。选取 1064 nm 波长的脉冲激光作为发射激光,激光发射能量为 80 mJ,激光脉冲宽度为 12 ns,发射光学系统的口

径为 0.04 m,接收光学系统的口径为 0.2 m;发射系统的光学效率为 0.9,接收系统的光学效率为 0.7,单程大气透过率为 0.6;假设目标表面为均匀漫反射,反射率为 0.2,同时假设测距系统的探测概率为 0.98,虚警概率为 0.01。

根据(16)式可以仿真得到不同条件下测距概率的变化规律,图 1 所示为目标面积 0.5 m²、目标距离为 13 km 时不同激光发散角和跟踪精度下的准测概率。可以看出,当测距系统激光发散角确定时,提高目标探测跟踪系统的跟踪精度可以有效提高准测概率。另外,当目标探测跟踪系统具有一定瞄准误差时,准测概率并未随着激光发散角的减小而线性增大,这是因为较小的激光发散角虽然能使激光在目标处具有极高的能量密度,但是跟踪误差的存在使激光照射到目标上的概率较低,从而降低了准测概率。当激光发散角增大到一定程度时,跟踪误差对准测概率的影响逐渐减小,但准测概率也随着激光发散角的增大而减小,这是因为激光发散角越大,目标处的光束能量密度越低,导致准测概率不断降低。因此,激光测距系统的激光发散角取值不是任意的,选择合适的激光发散角可以使测距系统的准测概率达到最大值。最佳发散角的取值受系统跟踪精度的影响,但二者没有固定的比例关系,最佳发散角需要根据实际情况计算得到。

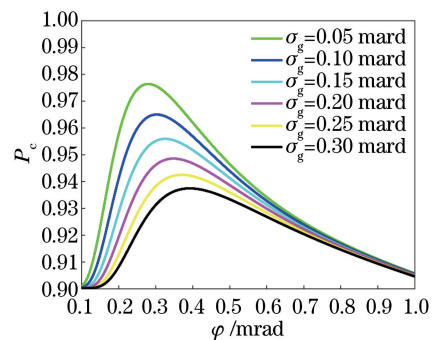


图 1 不同激光发散角和跟踪精度下的准测概率
Fig. 1 Detection probabilities under different laser divergence angles and tracking precisions

假设激光发散角为 0.3 mrad,系统跟踪精度为 0.05 mrad,通过改变目标大小与距离,仿真得到准测概率的变化规律,如图 2 所示。可以看出,当系统跟踪精度和激光发散角等参数都确定时,准测概率随着目标面积的增大而增大,最终稳定在某一概率附近。此时的目标尺寸已经足够大到可以忽略跟踪误差对准测概率的影响,该最高准测概率主要受探测系统噪声和大气等因素的限制。另外,在测距系

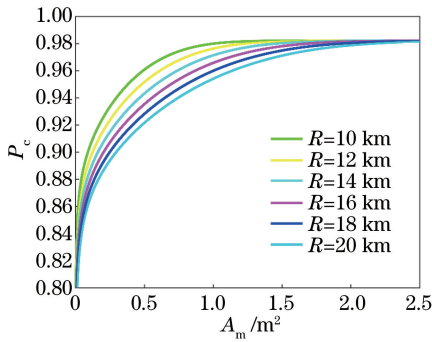


图 2 不同探测距离下目标大小对探测概率的影响
Fig. 2 Effect of target size on detection probability under different detection distances

统的有效测程内,目标距离在目标面积较小时对测距概率的影响较大;但随着目标尺寸的增大,目标距离对探测概率的影响迅速减小,此时的探测概率主要受激光发散角和跟踪精度的限制。

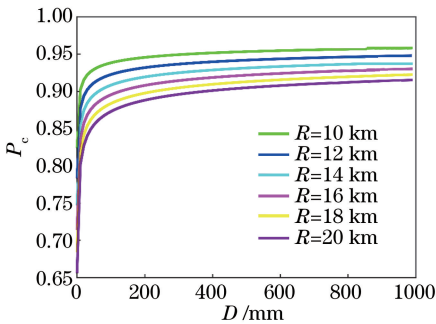


图 3 系统接收口径对探测概率的影响
Fig. 3 Effect of system receiving aperture on detection probability

在图 2 的仿真参数的基础上,取目标面积为 0.5 m^2 ,通过改变系统接收口径 D ,得到探测概率随

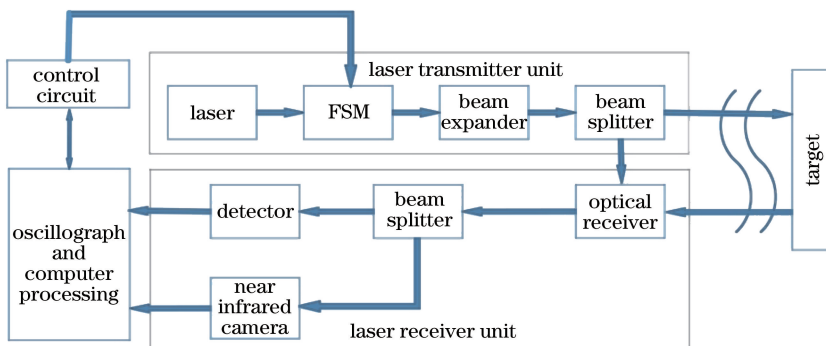


图 4 脉冲激光测距系统的示意图

Fig. 4 Schematic of pulsed laser ranging system

4.2 实验结果及数据分析

根据理论分析,设计了飞行目标脉冲激光测距实验系统,并进行测距回光稳定性的实验验证。设计并加工制作了两块大小不同的靶板来作为被测目

D 的变化规律,如图 3 所示。在一定范围内增大测距系统的接收光学口径可以显著提高探测概率,当 D 增大到一定程度时,探测概率主要受跟踪精度、激光发散角和目标大小等因素的限制而趋于稳定。因此,在设计测距系统时,在合理范围内增大系统接收口径可以提高激光测距的回光稳定性,从而提高探测概率。

4 系统参数设计及实验结果

4.1 实验系统设计

由前文分析可知,在尽可能降低系统跟踪精度时,选择合适的激光发散角可以有效增大系统的探测概率。另外,增大接收光学系统的口径可以提高激光测距系统的探测概率和测距能力,但在实际使用中,测距系统的接收口径主要受系统安装使用空间的限制,不能任意增大,因此系统在综合考虑各方面因素后确定系统参数如下。发射激光脉冲能量为 80 mJ ,脉冲宽度为 12 ns ,测距激光的发散角为 0.3 mrad ,发射光学的系统口径为 0.04 m ,接收光学系统口径为 0.2 m ;发射系统的光学效率为 0.9 ,接收系统的光学效率为 0.7 ,测距系统探测概率为 0.98 ,虚警概率为 0.01 ,系统跟踪精度为 0.05 mrad 。脉冲激光测距系统的示意图如图 4 所示,其中测距激光器采用波长为 1064 nm 的短脉冲全固态激光器,脉冲重复频率为 20 Hz ,快反镜(FSM)用于实时精确控制测距激光的发射轴,以保证激光发射轴与目标探测跟踪系统的主光轴一致并实时对准目标。测距接收系统利用雪崩光电二极管(APD)接收目标的回波脉冲。

标,并由无人机垂直悬吊两块靶板,组成的无人机靶板目标如图 5 所示,其中大面尺寸为 $2 \text{ m} \times 0.35 \text{ m}$,小面尺寸为 $1 \text{ m} \times 0.35 \text{ m}$ 。

通过目标探测跟踪系统对 13 km 处无人机靶

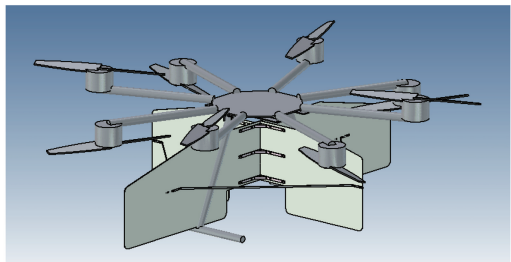


图5 无人机靶板模型

Fig. 5 Model of UAV target board

板目标进行捕获和跟踪,稳定跟踪之后打开脉冲激光测距系统并让快反镜闭环,以保证测距激光在目标跟踪过程中的瞄准精度。在实验过程中,让无人机分别以不同靶面对准激光测距系统的方向,并沿着激光照射方向的横向自由飞行。测量数据由系统后端实时传送到计算机并显示测距结果。对无人机靶板小面和大面的稳定跟踪阶段的测距结果分别如图6和图7所示。可以看出,靶板大面明显比靶板小面的误测数据要少。在该系统标定的误差范围(± 1 m)内,统计出大面和小面准确率的实验结果,分别为0.95和0.92。理论模型仿真计算出其理论准确率分别为0.96和0.94。通过对比可知,该系统对飞行目标激光测距的准确率与理论推算结果基本一致。

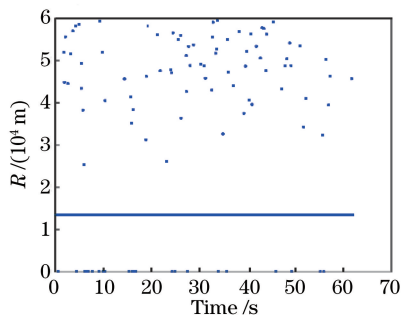


图6 靶板小面的测距结果

Fig. 6 Ranging results of small facet of target board

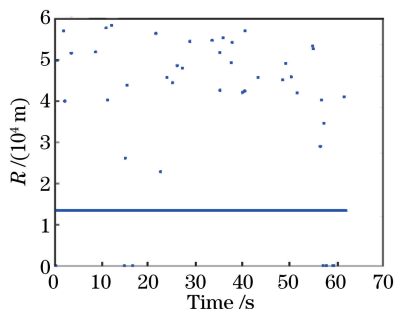


图7 靶板大面的测距结果

Fig. 7 Ranging results of large facet of target board

5 结 论

通过建立飞行目标激光测距系统的准确概率计算模型,仿真分析了激光发散角、系统跟踪精度、目标尺度、探测距离及系统接收口径对脉冲激光测距回光稳定性的影响。理论分析发现,在合理范围内适当增大激光发散角可以抑制跟踪误差对准确概率的影响,但发散角增大到一定程度时,远场光斑的功率密度下降,导致准确概率迅速减小。因此,可以根据系统跟踪精度和准确概率的需求确定系统的最佳发散角。当目标面积较小时,目标距离对测距概率的影响较大;但随着目标尺寸的增大,对准确概率产生影响的主要因素转变为发散角和跟踪精度。合理增大接收口径可以明显提高准确概率,但需要考虑系统的空间体积限制。根据理论分析结果,设计了飞行目标脉冲激光测距系统,通过该系统对无人机靶板目标进行了跟踪测距实验,验证了系统的探测性能与准确概率的理论推算结果,证明了脉冲激光测距准确概率计算模型的有效性。

参 考 文 献

- [1] Dai Y J. Laser radar technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 578-596.
戴永江. 激光雷达技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 578-596.
- [2] Xie G C, Ye Y D, Li J M, *et al.* Research on the echo characteristics of pulse laser ranging and range error[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(6): 0610001.
谢庚承, 叶一东, 李建民, 等. 脉冲激光测距回波特性及测距误差研究[J]. 中国激光, 2018, 45(6): 0610001.
- [3] Steinvall O. Laser system range calculations and the Lambert W function[J]. Applied Optics, 2009, 48(4): B1-B7.
- [4] Li M, Xue L, Huang C, *et al.* Estimation of detection range for space debris laser ranging system based on efficient echo probability[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(2): 260-267.
李明, 薛莉, 黄晨, 等. 基于有效回波概率估计空间碎片激光测距系统作用距离[J]. 光学精密工程, 2016, 24(2): 260-267.
- [5] Kang M Q, Deng Y, Wang F, *et al.* Discuss and design of picosecond laser pulse applied in long-distance ranging[J]. Laser & Optoelectronics

- Progress, 2015, 52(10): 102203.
康民强, 邓颖, 王方, 等. 皮秒脉冲激光远程测距应用探讨及系统初步设计[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(10): 102203.
- [6] Xue L, Zhai D S, Li Y Q, *et al.* Ranging capability analysis for laser ranging system using superconducting nanowire detectors[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0304001.
薛莉, 翟东升, 李语强, 等. 基于超导探测器的激光测距系统作用距离分析[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0304001.
- [7] Yu H H, Gao P Q, Shen M, *et al.* Detection capability analysis of space debris laser ranging[J]. Astronomical Research & Technology, 2016, 13(4): 416-421.
于欢欢, 高鹏骐, 沈鸣, 等. 空间碎片激光测距探测能力分析[J]. 天文研究与技术, 2016, 13(4): 416-421.
- [8] Tang M R, Li Z L, Li Y Q, *et al.* Influence of atmospheric turbulence intermittency on return photon number in laser ranging [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 0201001.
唐美荣, 李祝莲, 李语强, 等. 大气湍流间歇性对激光测距回波光子数的影响[J]. 光学学报, 2017, 37(2): 0201001.
- [9] Zhai D S, Tang R F, Li C X, *et al.* An improvement of laser ranging equation in practical use[J]. Astronomical Research & Technology, 2017, 14(1): 25-31.
翟东升, 汤儒峰, 李春晓, 等. 实测中激光测距方程的完善[J]. 天文研究与技术, 2017, 14(1): 25-31.
- [10] Farid A A, Hranilovic S. Outage capacity optimization for free-space optical links with pointing errors[J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(7): 1702-1710.
- [11] Jiang H B. Selecting optimum of signal-to-noise ratio and laser beam divergence for laser range-finder[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2003, 1(1): 31-34.
姜宏滨. 激光测距仪信噪比与激光发散角最佳值的选取[J]. 光学与光电技术, 2003, 1(1): 31-34.
- [12] Hu C S. Investigation into the high-speed pulsed laser diode 3D-imaging lidar [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005: 21-23.
胡春生. 脉冲半导体激光器高速三维成像激光雷达研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005: 21-23.
- [13] Dai Y J. The principle of lidar[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 18-19.
戴永江. 激光雷达原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 18-19.