

基于光子计数激光雷达的运动小目标测距测速系统

刘芳华^{1,2}, 贺岩^{1*}, 罗远¹, 贾文武⁴, 曹丽君⁵, 李琳琳⁵, 李凯鹏^{1,2}, 陈勇强^{1,2}, 郭守川^{1,3}, 陈卫标¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光传输与探测技术重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049;

³上海科技大学物质科学与技术学院, 上海 201210;

⁴中国华阴兵器试验中心, 陕西 华阴 714200;

⁵航天东方红卫星有限公司, 北京 100094;

摘要 针对运动小目标的测距需求,设计一种适用于运动小目标高速测距的小型化激光雷达系统,测距系统采用光子计数技术,可以减小对激光单脉冲能量和望远镜口径的需求,降低系统的体积、质量和功耗,并基于光纤激光器高重频的特点实现高速率的测距。理论分析和实验测试结果表明,在大气能见度为 7 km 的环境下,该激光测距系统对反射的截面积为 0.1 m^2 和反射率为 0.6 的小目标,最大作用距离可达 5446.3 m,测距准确度为 0.161 m。将测距系统安装在经纬仪平台上,可以实现对运动无人机的跟踪和测距,采用无迹卡尔曼滤波算法可以实时获得目标的距离和速度,测距偏差在 0.11 m 以内,速度偏差在 0.5 m/s 以内。

关键词 遥感; 激光测距; 光子计数; 激光雷达; 无迹卡尔曼滤波

中图分类号 TN958.98

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1310001

1 引言

激光测距雷达主要根据飞行时间来实现目标测距,具有测距精度高、作用距离远和测距速率快等特点,广泛应用在远距离测距^[1]、三维成像^[2]、地形测绘^[3]、风场探测^[4]和气溶胶探测^[5]等领域。近年来,随着无人机技术的发展,远距离小目标的识别和测距成为防卫的重要需求之一。目前,针对无人机和海上小船等非合作目标^[6],瑞典国防研究局提出了一种脉冲式全波形采样的激光测距雷达系统,该系统采用具有低重复频率和高峰值功率的激光器以及具有大口径的接收望远镜来提高探测信噪比,可以用于识别目标轮廓和测距。南京电子技术研究所设计了一种基于时间相关的光子计数(TCSPC)测距技术的激光雷达系统^[7],并采用强卡尔曼滤波算法对原始点云数据进行处理,实现了对海上货船的跟踪和测距。由于该系统采用了超导纳米线探测器和固态激光器(重复频率为 1 Hz,波长为 1064 nm),

所以需要大体积的冷却设备,为此系统总的体积和质量都很庞大,并且测距速率慢,不利于高速目标的测距。为了实现对远距离非合作运动小目标的跟踪,可将激光测距机安装在经纬仪平台上以实现对目标的快速追踪和测距。对于远距离小目标的测距场景,激光雷达系统往往需要大的激光脉冲能量以及接收口径,但这将会导致系统的体积庞大,功耗非常高,而且不适用于经纬仪平台。使用具有光子计数体制的激光雷达系统中的单光子探测器来检测光子信号,具有极高的探测灵敏度,能够以较低的脉冲能量来实现远距离目标的测距,并降低了系统对功耗和接收口径的需求。

本文设计一种基于光子计数技术的高速测距激光雷达系统,该系统满足经纬仪平台对激光测距系统小型化和轻量化的要求,并详细介绍其设计原理及组成部分。将激光测距雷达系统安装在经纬仪平台上,开展系统的测距精度和作用距离实验,采用无迹卡尔曼滤波算法对回波信号进行处理,实现运动

收稿日期: 2020-12-02; 修回日期: 2020-12-29; 录用日期: 2021-01-20

通信作者: *heyang@siom.ac.cn

小目标的距离和速度的实时获取。

2 光子计数激光测距的理论分析

对于基于光子计数体制的激光测距雷达系统,激光脉冲照射到目标后发生反射,回波光光子经过接收光学系统后被单光子探测器响应。依据小目标探测的激光雷达方程,产生的平均光电子数 N_{sig} 可表示为^[8]

$$N_{sig} = \eta_{atm}^2 \eta_r \eta_t \eta_q \frac{E_i \lambda \rho A_t \cos \theta_i}{hc} \frac{A_r}{\Omega_i R^2} \frac{A_r}{\pi R^2}, \quad (1)$$

式中: η_{atm} 为单程大气的透过率; η_r 为系统接收的光学效率; η_t 为激光发射的光学效率; η_q 为探测器的光子探测概率; E_i 为激光的单脉冲能量; λ 为激光波长; c 为真空中光速; h 为普朗克常数; ρ 为目标反射率; A_t 为目标反射的截面积; A_r 为望远镜的接收面积; Ω_i 为激光发射的立体角; R 为目标距离; θ_i 为激光发射角。 η_{atm} 的经验公式为^[9]

$$\eta_{atm} = \exp(-k \cdot R), \quad (2)$$

其中

$$k = \frac{3.192}{D} \left(\frac{\lambda}{550} \right)^{-q}, \quad (3)$$

$$q = \begin{cases} 1.6, & D \geq 50 \\ 1.3, & 6 \leq D < 50 \\ 0.16D + 0.34, & D < 6 \end{cases}, \quad (4)$$

式中: D 为大气能见度。

光子计数激光雷达系统的噪声来源主要是背景光噪声及探测器的暗计数,其中单个时域门宽 Δt 的平均背景光噪声 N_b 可表示为

$$N_b = \rho E_\lambda A_r \eta_r \eta_{atm} \Delta \lambda \Delta t \frac{\pi \theta_r^2}{4} \frac{\lambda}{hc} \cos \theta_{sun}, \quad (5)$$

式中: $\Delta \lambda$ 为接收光学滤光片的带宽; θ_r 为接收视场角; θ_{sun} 为太阳光线和目标表面法向的夹角; E_λ 为太阳背景光辐照度,对于波长为 1545 nm 的光, E_λ 值为 0.249 W/(m² · nm)。由于采集探测器暗计数和背景光噪声是两个相互独立的随机过程,因此系统总的噪声光子数为二者叠加表示,表达式为

$$N_{nos} = N_b + N_d \Delta t, \quad (6)$$

式中: N_d 为探测器的暗计数。

对于小目标的精确测距,探测信噪比和测距精度是激光雷达系统的重要性能指标,其中信噪比的计算公式为

$$R_{SNR} = \frac{N_{sig}}{\sqrt{N_{sig} + N_b + (N_d \Delta t)^2}}. \quad (7)$$

系统的测距精度可表示为

$$\sigma_d = \frac{c \Delta t}{2R_{SNR}}. \quad (8)$$

3 系统设计

高速测距系统主要由激光发射模块、接收光学模块、电源模块、单光子探测模块 (SPDM) 和主控模块 (FPGA, Field Programmable Gata Array) 组成,系统结构如图 1 所示,其中 LvTTL 为低压晶体管-晶体管逻辑电路,RS232 和 RS422 分别为串行通讯标准 232 和 422,PC 为上位机,GPS 为全球定位系统,UDP 为用户数据报协议。上位机通过网口与主控模块通信,可设置系统的内部参数及发送测距指令。主控模块控制激光器出光,并通过时序来同步控制 SPDM 的启动。激光回波光信号经过接收

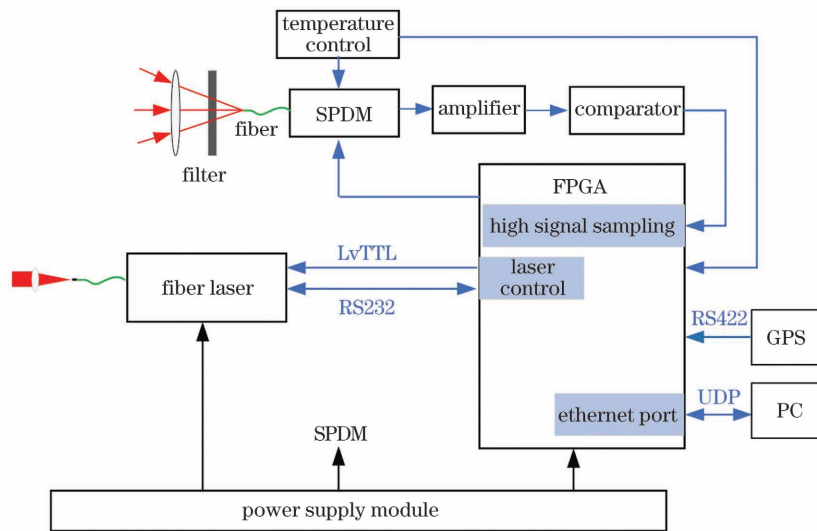


图 1 高速测距系统的结构

Fig. 1 Structure of high speed ranging system

光学模块后耦合到多模光纤中,光信号被 SPDM 探测并转换成电信号,电信号经过放大器和比较器后由主控模块来高速采样接收,其采样频率为 400 MHz,可记录与时间相关的激光脉冲回波光子信号序列,同时标记由外部 422 接口输入的 GPS 同步时间,便于后续数据的处理和分析。最后,主控模块对多个脉冲的回波光子序列进行累加,输出距离回波信号后经过 UDP 通信并由上位机进行实时显示,使用上位机将信号存储成点云数据。

测距系统使用小体积的光纤激光器作为发射光源,采用传导散热的方式进一步减小了激光发射模块的质量和空间,使测距系统的小型化和轻量化变得可行。为了满足系统对运动小目标的探测能力,对激光器的单脉冲能量和重复频率都有较高的要求。由于光纤激光器的峰值功率一般比固态激光器低很多,因此激光器的参数设计需要在单脉冲能量和激光脉冲宽度作平衡取舍。若单脉冲能量不够则需要累加计时的脉冲数越多,这不利于运动目标的测距;若脉冲宽度越宽则测距精度越低。最终选取光纤激光器的波长为 1545.3 nm,重复频率为 25 kHz,脉冲宽度为 6 ns,单脉冲能量为 80 μ J。此外,设计的激光发散角为 1 mrad,这可以使激光测距系统具有较大的视场,从而满足对运动目标测距的需求。

测距系统的单光子探测器采用 InGaAs 型雪崩光电二极管(APD),使用半导体制冷器(TEC)将温度冷却到 240 K。该探测器在波长为 1545 nm 处的探测效率为 15%,暗计数率为 30 kHz。主控模块采集到探测器的信号后,累加第 1~250 个激光脉冲回波光子序列后输出一个测距值,累加第 251~500 个激光脉冲回波光子序列后输出第二个测距值,以此类推,可实现 100 Hz 暗计数率的测距值上传。

依据方案设计,激光雷达测距系统的整体视图如图 2 所示。激光雷达测距系统的性能参数如表 1 所示,光束发散角和接收视场发散角分别设为 1.0 mrad 和 1.2 mrad。当大气能见度为 7 km 时,针对反射



图 2 激光测距系统的整体视图

Fig. 2 Overall view of laser ranging lidar

表 1 系统的主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of system

System	Parameter	Value
Transmitter	Pulse repetition frequency /kHz	25
	Wavelength /nm	1545.3
	Pulse width /ns	6
	Pulse energy / μ J	80
	Divergence angle /mrad	1
Receiver	Receiver aperture /mm	23
	Receiver field of view /mrad	1.2
	Optical filter bandpass /nm	1
	Optical throughput efficiency /%	60
	Detector efficiency /%	15
Lidar	Data updating rate /Hz	100
	Weight /kg	9.2
	Size /mm	390 \times 184 \times 150

的截面积为 0.1 m² 和反射率为 0.6 的小目标,依据表 1 的系统参数并联立(1)~(8)式,可以求得系统的信噪比和测距精度随探测距离的变化关系,结果如图 3 和图 4 所示。从图 3 和图 4 可以看到,当目标距离为 5.6 km 时,测距系统的信噪比为 5.9 dB,达到了测距系统的极限工作状态。因此针对上述探

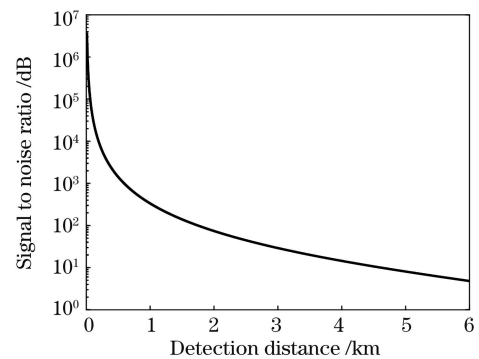


图 3 信噪比与探测距离的关系

Fig. 3 Relationship between signal to noise ratio and detection distance

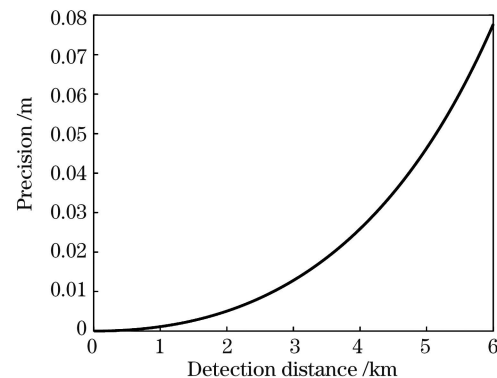


图 4 测距精度与探测距离的关系

Fig. 4 Relationship between ranging accuracy and detection distance

测条件,由系统的理论最大作用距离为 5.6 km 和测距精度为 0.064 m 可得,最终设计的测距系统的质量为 9.2 kg,长宽高分别为 390,184,150 mm,实现了系统的小型轻量化。

4 实验结果及分析

4.1 系统作用距离

在室外环境中,为了模拟小目标的测距场景,定制了边长为 25 cm 的正方形标准反射率靶板,其对 1545 nm 波段光的反射率为 0.99,因此等效的散射截面积为 0.062 m²,故可以与反射的截面积为 0.1 m² 和反射率为 0.6 的小目标近似等效。将测距机安装在经纬仪平台上,利用平台的可见光及红外观测系统将测距机对准靶板并进行高速测距。

激光测距机的最大作用距离实验选取的时间为下午 5 点,天气为阴天,气象观测站测得当天的大气能见度为 7 km。将靶板放置在距离测距机约为 5 km 的位置,使用经纬仪将测距机对准靶板,设置测距机的激光功率为 1.42 W,读取测距机累加的回波数据后绘制光子计数随距离的变换关系,如图 5 所示。从图 5 可以看到,激光测距机测得与靶板的距离为 5017.56 m。

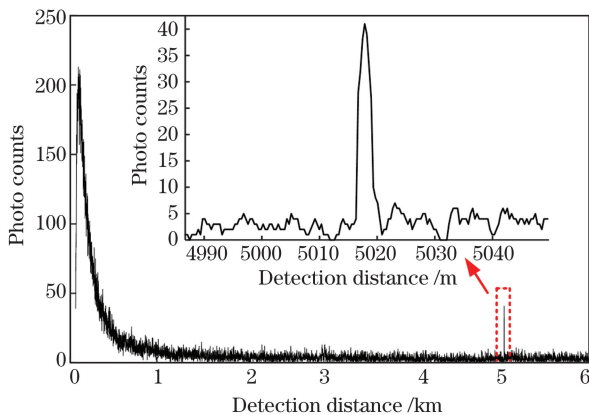


图 5 与时间相关的单光子计数曲线及其局部放大图
Fig. 5 Time-dependent single-photon counting curve and its local magnification

通过统计计算 100 次的测距结果,可以求得单个计时门宽的信号平均光子数为 0.152 个,单个计时门宽的噪声平均光子数为 0.016 个,由(7)式计算得到累加 250 个激光脉冲后的测距信噪比为 5.86 dB,这达到了测距系统比较极限的工作状态。由于该系统的激光脉冲宽度大于计数时钟分辨率,因此目标反射的回波光子的到达时刻概率分布与激光脉冲波形相似。由于激光光斑呈高斯分布,因此采用高斯拟合的方法对累加后的激光回波波形进行拟合

处理,可拟合出更接近实际峰值的位置。由上述方法求得 300 次的测距结果如图 6 所示,计算多次测距的方均根值来评估系统的测距精度,表达式为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{K-1} \sum_{i=1}^K (d_i - \bar{d})^2}, \quad (9)$$

式中: K 为目标距离的测量次数; d_i 为第 i 次测量的目标距离值; \bar{d} 为测量目标距离的平均值。由(9)式求得系统的测距精度为 0.165 m。

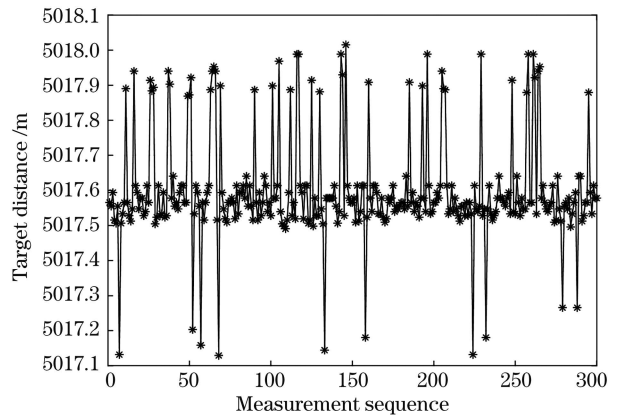


图 6 激光测距的实验结果

Fig. 6 Experimental results of laser ranging

由于测试实验的激光功率只有 1.42 W,而激光器的最大功率为 2 W,通过消光比方法计算可得系统在 7 km 的大气能见度下,对于反射的截面积为 0.1 m² 和反射率为 0.6 的小目标,最大的作用距离为 5446.3 m,与第 3 节的理论仿真结果接近。

4.2 系统的测距精度及准确度

为了评估系统的测距精度与测距准确度,在测试场地选取了 A、B、C、D 和 E 5 个位置,如图 7 所示。以经纬仪平台为原点,标定上述 5 个位置的空间三维坐标,其中 B 处为一根垂直于地面的铁杆,



图 7 测试选取的 5 个目标位置

Fig. 7 Test selected five target locations

铁杆顶部的三维坐标已知。将标准反射率板的高度设为 2 m,垂直放置在 A、C、D 和 E 的位置处。由于经纬仪平台上测距仪的三维坐标已知,故测距仪与靶板的真实距离可以由空间关系计算得到。使用经纬仪平台来控制测距机以测得靶板在 A、C、D 和 E

4 个位置的距离及铁杆顶部距离,同样采用高斯拟合合法拟合目标回波信号的峰值点位置,分别利用(7)式和(10)式求得测距 100 次后的信噪比和测距精度,由激光测距平均值减去目标真实距离值的测距偏差来评估测距准确度,所得结果如表 2 所示。

表 2 靶板在不同位置处的测距结果

Table 2 Ranging results of target plate at different positions

Position	Actual distance /m	Laser ranging /m	Accuracy /m	SNR /dB	Precision (theory) /m	Precision (experiment) /m
A	2434.858	2434.862	0.004	19.16	0.020	0.043
B	3806.606	3806.767	0.161	5.56	0.067	0.119
C	4870.092	4869.982	0.110	5.63	0.067	0.085
D	4815.215	4815.256	0.041	5.82	0.064	0.096
E	4848.542	4848.602	0.060	5.19	0.072	0.093

从表 2 可以看到,测距过程中的信噪比会影响系统的测距精度,当信噪比越高时,系统的测距精度越高;在测试点 A 的过程中,激光输出功率设为 0.625 W,由于其与靶板的距离近,测距过程中信噪比非常高,达到 19.16 dB,测距精度可达 0.043 m;在测试点 B 的过程中,激光输出功率设为 1.42 W,由于铁杆的等效散射截面远小于靶板,虽然激光的输出功率高,但是信噪比仍然只有 5.56 dB,基本达到系统的极限工作状态;在测试点 C、D 和 E 的过程中,设置的激光功率为 1.09 W,实验的信噪比与 B 点相差较小,由于 B 点处是一个固定的铁杆,目标表面是圆弧状,而 C、D 和 E 处放置的是平面靶板,因此 C、D 和 E 处的测距准确度和精度高于 B 点。

在高信噪比的条件下,系统具有很高的测距准确度和测距精度,在低信噪比的条件下,系统实测的测距准确度为 0.161 m。

为了验证测距系统对低速运动小目标的测距能力,采用大疆无人机(UAV)作为测试过程中的运动目标。首先使无人机悬停在空中,由经纬仪锁定无人机目标后,控制无人机先进行加速运动,然后再进行减速运动,最后悬停。设置激光器的功率为 0.625 W,无人机的径向起始距离为 972.53 m,整个测试阶段的测距平均信噪比为 20.2 dB。原始回波光子数分布曲线的峰值即为目标距离,由于无人机的运动速度慢,而系统的测距速率很高,值为 100 Hz,因此目标的距离值呈阶跃变化,如图 8(a)所示。采用高斯

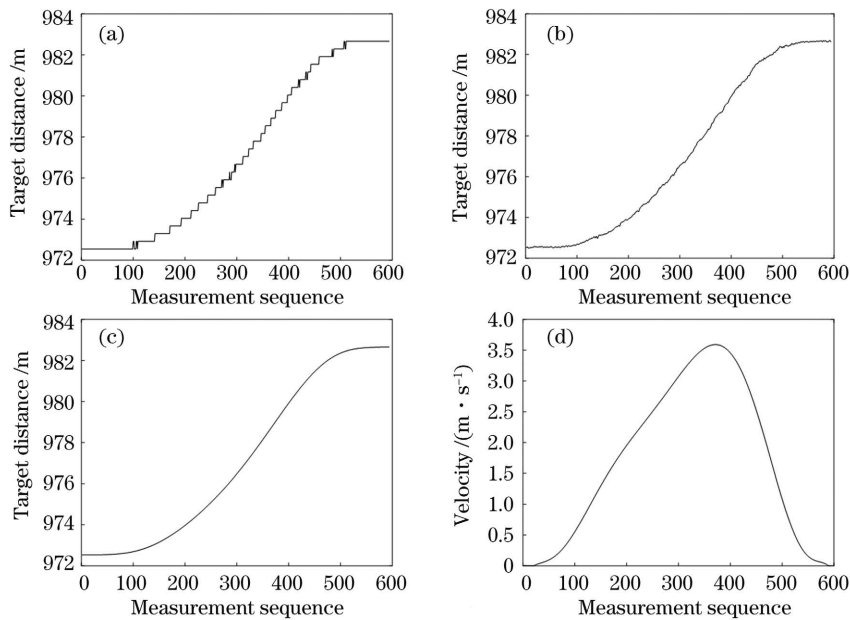


图 8 运动无人机测距实验的结果。(a)原始结果;(b)高斯拟合后结果;(c)多项式拟合处理结果;(d)速度

Fig. 8 Results of mobile UAV ranging experiment. (a) Original result; (b) Gaussian fitting result; (c) polynomial fitting processing result; (d) velocity

拟合的方法对每 250 个激光脉冲累加后的回波光光子数分布曲线进行重新拟合,得到新的峰值并作为目标的距离值,目标距离随时间的变化曲线如图 8(b) 所示。采用多项式拟合方法对图 8(b) 进行平滑处理,得到结果如图 8(c) 所示,对多项式拟合的数据进行求导处理,得到目标的径向实时速度曲线如图 8(d) 所示,多项式拟合结果基本反映了无人机的实际距离和速度值。

从图 8(b) 可以看到,由于无人机的运动过程是复杂的机动过程,并且激光回波信号存在抖动,因此高斯拟合后的目标距离存在抖动,无法实时获得目标的运动速度。采用多项式拟合的方法虽然可以比较精确地获得目标的距离和速度,但是容易受到突变噪声的影响,比如目标跟踪丢失一段时间的情形,并且不能实时获得目标的距离和速度。无迹卡尔曼滤波(Unscented Kalman Filter, UKF)算法作为一种非线性卡尔曼滤波算法,使用无迹变换(Unscented Transform, UT)来处理均值和协方差非线性传递的问题,不仅不需要对非线性函数进行近似,而且没有忽略非线性函数的高阶项,因此在对非线性分布的统计量估计方面具有较高的计算精度,且计算运行的速度很快,非常适用于对运动目标的实时跟踪和估计。

实验采用无迹卡尔曼滤波算法^[10]来实现状态更新,可以获得无人机精确的实时位置及速度信息。对于不同时刻 k , 目标的运动状态方程可表示为

$$\mathbf{X}_k = f(\mathbf{X}_{k-1}) + \mathbf{W}_k, \quad (10)$$

式中: \mathbf{X}_k 和 \mathbf{X}_{k-1} 为不同时刻的 n 维状态矩阵; f 为非线性状态方程函数; \mathbf{W}_k 为 k 时刻的 n 维过程噪声矩阵,并具有 n 维协方差矩阵 \mathbf{Q}_k 。

目标运动的观测方程可表示为

$$\mathbf{Z}_k = h(\mathbf{X}_k) + \mathbf{V}_k, \quad (11)$$

式中: \mathbf{Z}_k 为 k 时刻的 n 维观测矩阵; h 为非线性观测方程函数; \mathbf{V}_k 为 k 时刻的 n 维过程噪声矩阵,并具有 n 维协方差矩阵 \mathbf{R}_k 。

将系统在 $k-1$ 时刻的状态估计值 $\hat{\mathbf{X}}_{k-1}$ 和协方差 \mathbf{P}_{k-1} 进行 UT 处理,可以得到 $2n+1$ 个 Sigma 采样点,表达式

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{k-1}^0 = \hat{\mathbf{X}}_{k-1} \\ \mathbf{X}_{k-1}^i = \hat{\mathbf{X}}_{k-1} + \sqrt{(n+\alpha)\mathbf{P}_{k-1}}, \\ \quad i = 1, \dots, n \\ \mathbf{X}_{k-1}^j = \hat{\mathbf{X}}_{k-1} - \sqrt{(n+\alpha)\mathbf{P}_{k-1}}, \\ \quad j = n+1, \dots, 2n \end{cases}, \quad (12)$$

式中: α 为尺度因子。

将 $2n+1$ 个 Sigma 采样点代入非线性状态函数 f 中,计算得到 Sigma 点集的预测值为

$$\mathbf{X}_{k|k-1}^l = f(\mathbf{X}_{k-1}^l), l = 0, 1, \dots, 2n. \quad (13)$$

为了得到系统状态的预测值和协方差矩阵,将(13)式求得的 Sigma 点集的预测值代入

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} &= \sum_{l=0}^{2n} \omega^l \mathbf{X}_{k|k-1}^l, \\ \mathbf{P}_{k|k-1} &= \\ &\sum_{l=0}^{2n} \omega^l (\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} - \mathbf{X}_{k|k-1}^l) (\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} - \mathbf{X}_{k|k-1}^l)^T + \mathbf{Q}, \end{aligned} \quad (15)$$

中即可得到。式中: ω^l 为采样点的权值,表达式为

$$\omega^l = \begin{cases} \frac{\alpha}{n+\alpha}, & l = 0 \\ \frac{1}{2(n+\alpha)}, & l = 1, \dots, 2n \end{cases}. \quad (16)$$

将计算得到的系统状态预测值 $\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}$ 和协方差矩阵 $\mathbf{P}_{k|k-1}$ 再次进行 UT 处理,产生的预测 Sigma 点集为

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{k|k-1}^0 = \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} \\ \mathbf{X}_{k|k-1}^i = \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} + \sqrt{(n+\alpha)\mathbf{P}_{k|k-1}}, \\ \quad i = 1, \dots, n \\ \mathbf{X}_{k|k-1}^j = \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} - \sqrt{(n+\alpha)\mathbf{P}_{k|k-1}}, \\ \quad j = n+1, \dots, 2n \end{cases}. \quad (17)$$

将(17)式预测的 Sigma 点集代入非线性观测函数 h 中,得到预测的观测值为

$$\mathbf{Z}_{k|k-1}^i = h(\mathbf{X}_{k|k-1}^i), i = 0, 1, \dots, 2n. \quad (18)$$

再通过加权求和得到系统预测的测量值及协方差,可表示为

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{Z}}_k = \sum_{l=0}^{2n} \omega^l \mathbf{Z}_{k|k-1}^l \\ \mathbf{P}_{z_k z_k} = \sum_{l=0}^{2n} \omega^l (\mathbf{Z}_{k|k-1}^l - \hat{\mathbf{Z}}_k) (\mathbf{Z}_{k|k-1}^l - \hat{\mathbf{Z}}_k)^T + \mathbf{R}. \\ \mathbf{P}_{x_k z_k} = \sum_{l=0}^{2n} \omega^l (\mathbf{X}_{k|k-1}^l - \hat{\mathbf{X}}_k) (\mathbf{Z}_{k|k-1}^l - \hat{\mathbf{Z}}_k)^T \end{cases} \quad (19)$$

增益矩阵计算公式为

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{x_k z_k} \mathbf{P}_{z_k z_k}^{-1}. \quad (20)$$

最后,更新后系统的状态估计值和协方差矩阵,可表示为

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{X}}_k = \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k (\mathbf{Z}_k - \hat{\mathbf{Z}}_{k|k-1}) \\ \mathbf{P}_k = \mathbf{P}_{k|k-1} - \mathbf{K}_k \mathbf{P}_{z_k z_k} \mathbf{K}_k^T \end{cases}. \quad (21)$$

相对于激光测距平台,无人机在径向上的运动轨迹可以使用变加速直线运动的模型来估计,表达式为

$$r = r_0 + vt + a_1 t^2 + a_2 t^3, \quad (22)$$

式中: r_0 为初始的径向距离; v 为径向速度; a_1 为径向加速度; a_2 为径向加加速度; t 为运动时间。综上,可以设置 4 维状态的 UKF 跟踪算法,状态量分别为无人机的径向距离、径向速度、径向加速度和径向加加速度。激光雷达系统的测距输出频率为 100 Hz,因此系统的采样时间设为 0.01 s。通过将高斯拟合后的目标距离值作为算法的观测值输入,目标的初始径向距离设为 972.5 m,初始径向速度、初始径向加速度和径向加加速度均设为 0。

以多项式的拟合结果作为无人机的真实距离和速度的参考值,可用来对比和评判 UKF 算法的好坏。由 UKF 算法计算得到目标的实时运动轨迹与多项式的拟合结果如图 9(a)所示,实线为 UKF 算法所得的结果,方块线为多项式的拟合结果,二者的测距偏差绝对值如图 9(b)所示。从图 9(b)可以看到,最大测距偏差小于 0.11 m。由 UKF 算法计算得到目标的实时速度以及由多项式拟合结果得到的无人机速度如图 9(c)所示,方块线为 UKF 算法所得的结果,实线为多项式拟合求导后的结果,二者的测速偏差绝对值如图 9(d)所示。从图 9(d)可以看到,最大测速偏差小于 0.5 m/s。

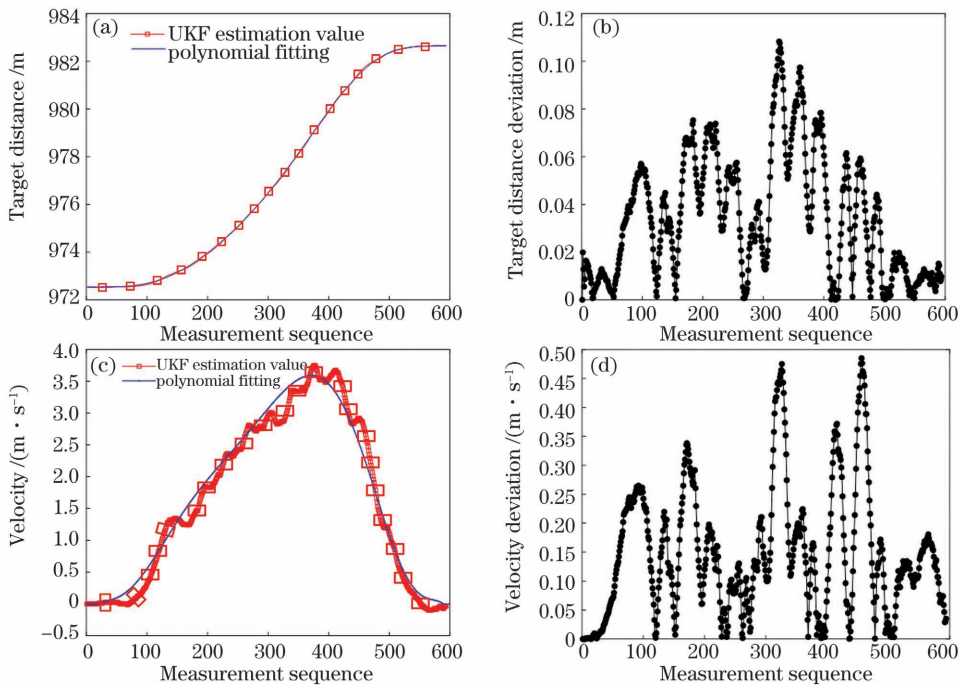


图 9 无人机测距实验 UKF 算法的处理结果。(a)UKF 算法与多项式拟合的测距值;(b)UKF 算法与多项式拟合方法的测距偏差;(c)UKF 算法与多项式拟合的测速值;(d)UKF 算法与多项式拟合方法的测速偏差

Fig. 9 UAVs ranging experiment UKF algorithm processing results. (a) Ranging values between UKF algorithm and polynomial fitting; (b) ranging deviation between UKF algorithm and polynomial fitting method; (c) velocity measurement values between UKF algorithm and polynomial fitting; (d) velocity measurement deviation between UKF algorithm and polynomial fitting method

5 结 论

针对运动小目标的测距需求,提出一种基于光子计数技术且小型轻量化的激光雷达系统,激光雷达系统的测距速率可达 100 Hz,可以安装在经纬仪平台上实现对无人机等非合作运动小目标的测距。测试过程中,使用标准反射率靶板等效模拟反射的截面积为 0.1 m^2 和反射率为 0.6 的小目标,通过靶板在不同位置下的测距实验,结果表明在大气能见

度为 7 km 的环境下,该激光测距系统对小目标的最大作用距离为 5446.3 m,系统的测距准确度为 0.161 m。将测距激光雷达安装在经纬仪平台上,实现对运动无人机的追踪和测距。实验结果表明,采用高斯拟合法对回波点进行拟合,可以获得更精确的单次测距值;采用 UKF 算法来实时处理测距值可以准确地实现对无人机等运动目标的高速测距和测速,实时测距偏差在 0.11 m 以内,实时测速偏差在 0.5 m/s 以内,因此基于光子计数激光雷达

的运动目标测距测速系统具有可实用性。

参 考 文 献

- [1] Du B, Pang C, Wu D, et al. High-speed photon-counting laser ranging for broad range of distances [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 4198.
- [2] Liu D Q, Zhang J, Jin J C. Adaptive grid representation method for unmanned surface vehicle obstacle based on three-dimensional lidar[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0110002.
刘德庆, 张杰, 金久才. 基于三维激光雷达的无人船障碍物自适应栅格表达方法 [J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 0110002.
- [3] Neuenschwander A, Pitts K. The ATL08 land and vegetation product for the ICESat-2 Mission [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 221: 247-259.
- [4] Yuan L C, Liu H, Liu J Q, et al. Wind vector estimation of coherent Doppler wind lidar based on genetic algorithm [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(8): 0810004.
原禄城, 刘恒, 刘继桥, 等. 基于遗传算法的相干多普勒测风激光雷达风场反演方法 [J]. *中国激光*, 2020, 47(8): 0810004.
- [5] Xu J J, Bu L B, Liu J Q, et al. Airborne high-spectral-resolution lidar for atmospheric aerosol detection[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(7): 0710003.
- [6] Steinvall O, Tulldahl M. Laser range profiling for small target recognition [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 56(3): 031206.
- [7] Wu C, Xing W G, Feng Z J, et al. Moving target tracking in marine aerosol environment with single photon lidar system [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 127(10): 105967.
- [8] Luo Y, He Y, Geng L M, et al. Long-distance laser ranging lidar based on photon counting technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(5): 0514001.
罗远, 贺岩, 耿立明, 等. 基于光子计数技术的远程测距激光雷达 [J]. *中国激光*, 2016, 43(5): 0514001.
- [9] Chen F F, Geng R, Lü Y. Research on the transmittance model of laser infrared atmospheric transmission [J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(6): 496-501.
陈芳芳, 耿蕊, 吕勇. 激光红外大气传输透过率模型研究 [J]. *红外技术*, 2015, 37(6): 496-501.
- [10] Huang X P, Wang Y. The theory and application of Kalman filter: MATLAB simulation [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2015.
黄小平, 王岩. 卡尔曼滤波原理及应用: MATLAB 仿真 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.

Moving Target Distance and Velocity Measurement System Based on Photo-Counting Lidar

Liu Fanghua^{1,2}, He Yan^{1*}, Luo Yuan¹, Jia Wenwu⁴, Cao Lijun⁵, Li Linlin⁵, Li Kaipeng^{1,2},
Chen Yongqiang^{1,2}, Guo Shouchuan^{1,3}, Chen Weibiao¹

¹ Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

² Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³ School of Physical and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China;

⁴ Weapons Testing Center, Huayin, Shaanxi 714200, China;

⁵ Aerospace Dongfanghong Satellite Company Limited, Beijing 100094, China

Abstract

Objective With the development of unmanned aerial vehicle(UAV) technology, the identification and ranging of small targets at long ranges have become an essential defense requirement. The Swedish defense research agency investigates a linear detected laser range lidar for target recognition and classification, such as small boats at sea and small UAV. However, to measure a small target at long range, the linear detected lidar requires a high-power laser so that the system will be very huge and harmful to the eyes. Alternatively, the time-correlated single photo-

counting(TCSPC) technique has emerged as a candidate technology for lidar systems due to its high-sensitivity and excellent range resolution. The use of high-sensitivity single-photon detectors means that low average optical power levels and receive aperture can be used, even at long distances. In this study, we propose a photo-counting lidar, which can install on the theodolite platform to real-time obtain the distance and speed of a small moving target at long-rang.

Methods The light source of lidar is a fiber laser at 1545.3 nm, and the pulse width is 6 ns. The laser single pulse energy is 80 μJ , and the repetition frequency is 25 kHz. To track the small moving target more easily and steadily, the divergence angle of the laser beam and receiver field of view is set to 1.0 and 1.2 mrad, respectively. The InGaAs/InP avalanche photodiodes, which is Peltier cooled to 240 K, is adopted as the single-photon detector. The detection efficiency is 15% at 1545 nm, and the dark count rate is 30 kHz. A 1 nm bandpass filter is selected to reduce the solar background noise. The lidar export a distance of the target by accumulating every 250-laser echo signal collected using the field-programmable gate array(FPGA) with a sampling rate of 400 MHz. Thus, the distance update rate is 100 Hz. However, the laser pulse width is wider than the echo signal-sampling resolution. Therefore, a Gaussian-fitting method is used to deal with the accumulated echo signal so that it can find the exact target distance. During the outfield test, a 0.99 reflectivity square target plate with a side length of 25 cm is designed so that it can be equivalent to a small target with a reflection cross-sectional area of 0.1 m^2 and reflectivity of 0.6. The target plate is placed in five places with a known distance. The accuracy and precision of lidar are tested using lidar to range the five targets. Afterward, the target plate is placed 5 km away to test the lidar maximum range. Finally, the non-cooperative moving target ranging ability of the lidar is verified, the lidar system is installed on the theodolite platform for tracking and ranging a moving UAV fabricated by DJI corporation. The unscented Kalman filter algorithm is used to obtain the distance and velocity of UAV in real-time.

Results and Discussions During the entire outside experiment, the atmospheric visibility is 7 km. The target plate is detected at a distance of 5017.56 m (Fig. 5) with the detected single-to-noise (SNR) of 5.86 dB. The precision is 0.165 m. The laser power is 1.42 W with a maximum power of 2 W. The maximum range is 5446.3 m through the extinction method. The lidar accuracy is 0.161 m when the detected SNR is around 6 dB (Table 2). Besides, the lidar system has tracked the moving UAV with a starting distance of 972.53 m (Fig. 8(a)). The laser power is 0.625 W, and the detected SNR is 20.2 dB during the tracing experiment. The Gaussian-fitting result shows that the distance is jittered so that it cannot calculate the velocity in real-time (Fig. 8(b)). Thus, the polynomial fitting approach is used to smooth the distance obtained from a Gaussian-fitting method so that the speed of UAV can be precisely calculated by differentiating the polynomial fitting result (Figs. 8(c) and (d)). The distance and speed of the UAV are obtained using the unscented Kalman filter algorithm in real-time (Fig. 9(a) and (c)). The unscented Kalman filter algorithm result, compared to the polynomial fitting approach, shows that the ranging deviation is within 0.11 m (Fig. 9(b)), and the speed deviation is within 0.5 m/s (Fig. 9(d)).

Conclusions A miniature lidar is designed, which is suitable for high-speed ranging of long-distance non-cooperative small targets. The theoretical analysis and experimental results show that the laser ranging system can achieve a maximum-detecting distance of 5446.3 m and an accuracy of 0.161 m for a small target with a reflection cross-sectional area of 0.1 m^2 and reflectivity of 0.6 when the atmospheric visibility is 7 km. The system is installed on the theodolite platform to track and range the moving UAV. The distance and velocity of the UAV are obtained using the unscented Kalman filter algorithm in real-time. The ranging and speed deviations are within 0.11 m and 0.5 m/s, respectively. The photo-counting lidar design and unscented Kalman filter algorithm proved to be feasible for small moving targets ranging.

Key words remotes sensing; laser ranging; photo counting; lidar; unscented Kalman filter

OCIS codes 280.3640; 280.3400