光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.04.026

基于激光检测的无人机探测系统与实验

陈　实，杨　帆*，王梓任

（电子科技大学 信息与通信工程学院，成都 611731）

摘　要： 现有的无人机探测通常采用以雷达扫描为主，辅以其他传感器探测的方式。但是，目前使用雷达探测的成本较高，而激光器作为一种低成本、低功耗的器件已受到人们广泛关注。以激光为载体，结合无线光通信中的捕获、瞄准、跟踪（APT）系统，设计并实现了一种基于激光探测技术的无人机扫描定位系统，并以气球模拟无人机目标的测试方式，测试了该系统的定位精度和效率。扫描试验结果表明：在激光发射器平均功率小于 40 mW 的情况下，该系统对目标的捕获定位能达到较高的精度，误差在 5%以内，最大可探测范围为 45 m。

关键词： 无人机；APT 技术；脉冲激光测距；激光扫描；目标检测

中图分类号： TN959.11　**文章编号：** 1001－5868(2020)04－0587－05

UAV Detection System and Experiment Based on Laser Detection

CHEN Shi，YANG Fan，WANG Ziren

（School of Information and Communication Engineering，University of Electronic Science and Technology of China，Chengdu 611731，CHN）

Abstract： Existing unmanned aerial vehicle (UAV) detection mainly applies radar scanning as the main detection method and other sensors as the supplement，but the cost of radar is relatively high. As the device with low cost and low power，the laser has received widespread attention. In this paper，using the laser as a carrier and combining with the acquisition，pointing，tracking (APT) system in wireless optical communication，a UAV scanning positioning system based on laser detection technology was designed and implemented. The positioning accuracy of the system was tested by using a balloon test method. The scanning test results show that when the average power of the laser transmitter is less than 40 mW，the target can be captured and positioned with a high accuracy with an error of lower than 5%，and the maximum detectable range is 45 m.

Key words： UAV；APT；pulse laser ranging；laser scanning；target detection

0　引言

无人直升机、无人多旋翼飞行器等民用无人机日益普及，但受无人机超低空飞行环境以及地面高大建筑物遮挡的影响，地面雷达很难对无人机进行精准探测预警。且探测时易将其与鸟类目标混淆，对无人机非法入侵的探测日渐成为军方和政府部门必须面对的棘手问题[1]。民用无人机体积小、成本低、方便携带、易操作，且获取途径多，容易被不法分子利用来投放生化毒剂、运载易燃易爆物品、运输毒品、散播各种危险舆论传单等，很可能对重大活动、重点区域的安保工作造成严重威胁。

目前，对于飞行目标的探测主要有雷达探测、无线电探测与光电探测三种方式。如瑞典萨博公司研发的长颈鹿 AMB 雷达，采用新式雷达探测，能发现 RCS 大于 0.001 m^2 的空中目标[2]。德国安诺尼公

收稿日期：2020－04－08.

基金项目：四川省科技计划项目(2019YFG0119)；国家自然科学基金委员会-中国民用航空局民航联合研究基金项目(U1633129)).

* **通信作者：**杨　帆 **E-mail：** yangf_byr@uestc.edu.cn

司推出的无人机侦测系统，能够对无人机电磁发射的信号方向进行实时测量，系统频率覆盖 9 kHz～20 GHz，能检测多种复杂环境下的无人机信号[3]。美国诺格公司的“毒液”反无人机系统则采用轻型激光指示/测距仪(LLDR)，能在昼夜及模糊可视环境下识别、锁定、跟踪低飞的小型无人机[4]。除此之外，还有以色列的“无人机穹”[5]、美国的 Drone Tracker[6]等系统采用多种探测手段结合的方式检测无人机。对比国外的无人机检测技术，我国较具代表性的民用侦测系统则是 2017 年广州海格亚华防务科技有限公司研制的“苍擒”系统[7]。

上述无人机检测系统的使用成本均较高，多应用于重要地段的无人机侦测，对于一般的露天广场等适用性低；同时，这些检测系统都有完整的检测体系，对于已有的地面雷达性能提升而言，功能重复过多、花费过高。

激光器作为一种低成本、低功耗器件，被广泛应用于众多领域的测量工作。其中，由于脉冲激光峰值功率高、发散角较小、脉冲持续时间短，脉冲激光测距在探测距离和测量精度上具有显著优势[8]。本文结合之前对于激光扫描的研究成果，提出了一种激光探测无人机技术，利用大气光束的捕获、瞄准、追踪(Acquisition，Pointing and Tracking，APT)技术，实现对无人机的航迹测量与定位，完成对无人机等低慢小目标的捕获，为地面雷达的无人机预警或露天广场等小范围场所的无人机有效拦截提供数据支持。

1 系统模型

本系统采用激光脉冲测距的方法完成系统与目标之间的距离测量，在距离测量的基础之上，结合角度测量，完成对目标的位置测量和速度估计。同时，采用空间激光通信中常用的 APT 技术，将激光束照射到被测目标后的反射光作为 APT 系统中的信标光束，通过指向捕获、对准，使激光测距模块发射的激光脉冲能实时照射到被测目标上，实现对目标的检测。

探测系统总体框架如图 1 所示，主要包括：(1)由角度测量、激光发射接收器和相应的光学模组组成的激光测量部分；(2)由光斑检测单元和伺服转台组成的扫描跟踪部分；(3)由微处理器和显示电路组成的数据处理显示模块。

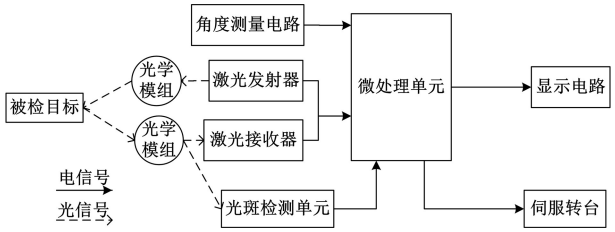


图 1 系统总体结构框图

2 基于激光的捕获与测距

2.1 扫描跟踪

在无线激光通信中，APT 系统的任务是实现光链路的建立，并在链路建立后保持光束方向的相对稳定，以保证通信的实现[9]。在无人机目标的激光探测应用中，APT 系统的工作流程主要分为三个阶段：目标初始捕获阶段、目标对准阶段以及目标跟踪阶段。APT 系统的工作流程如图 2 所示。

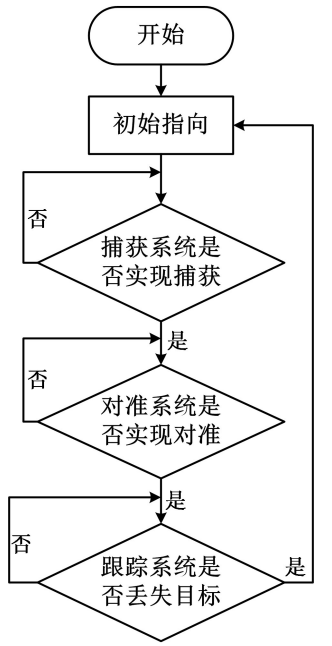


图 2 APT 系统工作流程

在本系统的扫描跟踪部分中，光斑检测模块采用空间激光通信中常用的四象限光电探测器构成光斑检测模块，伺服转台选用由舵机控制的 2 自由度云台作为跟踪捕获系统的伺服转台。光斑检测模块将采集到的光斑位置信息传输给微处理器，微处理器通过控制信号控制伺服转台，从而改变激光系统的倾角与方位角，以此完成激光对目标的对准与跟踪。扫描跟踪系统的工作流程如图 3 所示。

扫描系统从零位置开始，在微处理器的控制下，对水平面 108°角、垂直面 54°的前方目标区域进行

矩形扫描，直到光斑检测单元接收到反射光信号后，完成捕获。微处理器调整伺服转台对准目标，进入跟踪阶段，光斑检测单元测得脱靶数据并将其发送给微处理器，经过数据处理控制伺服转台实现对目标的跟踪。并且由光斑检测单元检测是否丢失目标，若丢失目标则发送一个信号反馈给微处理器，系统回到初始状态重新捕获目标。

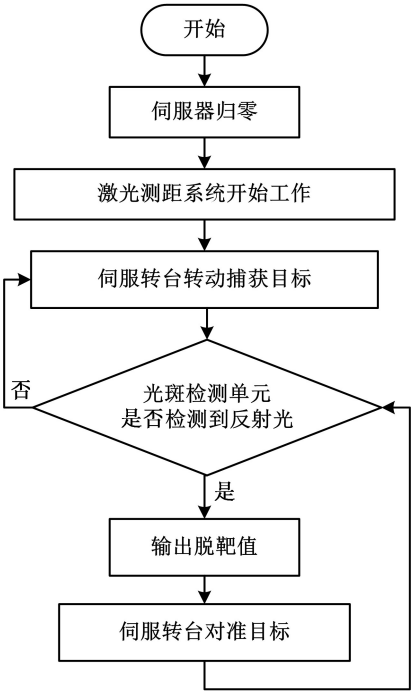


图 3　捕获跟踪流程图

2.2　激光测距及定位

本系统激光测距采用脉冲法，其基本原理为：测距系统工作时，首先发射一束特定的脉冲激光，经大气传输后到达目标表面产生反射回波，接收器接收到反射回波，最后通过测量回波信号的时间间隔，获得目标的距离 l[10]：

$$l=(c\times t)/2 \tag{1}$$

其中，c 为真空中的光速，t 为激光脉冲到达目标并被反射回接收器的时间。本系统在激光测距的同时，利用角度测量电路获得该时刻的激光发生器的方位角和仰角，达到目标定位的目的；同时，综合短时间内的多次定位结果，计算出低慢小目标的大概速度。

如图 4 中所示，O 点为探测器所在地；P_1 为目标初始点；P_2，P_3 分别为进行第一次和第二次激光测距接收到反射信号目标所在位置点。开始时，系统发射一次激光脉冲信号，角度测量电路测得目标位于 P_1 点的倾角 α_1 和方位角 β_1，此后系统跟进目标，当目标运动到 P_2 位置时，系统激光接收器接收到目标反射的激光脉冲信号，测得脉冲激光往返的总时间 t_1，完成该次测量。之后以同样的方法继续测量 P_2 和 P_3 两点的数据。经式(1)运算后，进行三角计算则可得到目标 P_i 对于原点 O 的坐标。

$$\begin{cases} x_i=l_i\times\cos\alpha_i\times\cos\beta_i \\ y_i=l_i\times\cos\alpha_i\times\sin\beta_i \\ z_i=l_i\times\sin\alpha_i \end{cases} \tag{2}$$

其中，(x_i,y_i,z_i) 为 P_i 相对于原点 O 的坐标，l_i 为激光测距测得的 P_i 与原点 O 的直线距离，α_i 为直线 OP_i 与 xOy 平面的夹角，β_i 为直线 OP_i 在 xOy 面上的投影与 x 正半轴的夹角。

$$\begin{aligned} l_{12}&=\sqrt{(x_1-x_2)^2+(y_1-y_2)^2+(z_1-z_2)^2} \\ l_{23}&=\sqrt{(x_2-x_3)^2+(y_2-y_3)^2+(z_2-z_3)^2} \end{aligned} \tag{3}$$

l_{12} 为 P_1，P_2 的距离；l_{23} 为 P_2，P_3 的距离。因为目标从 P_1 点到 P_2 点和从 P_2 点到 P_3 点的时间间隔 t_1 和 t_2 很短，故可以将目标经过 P_1 和 P_2 点以及 P_2 和 P_3 点的平均速度近似视为目标的瞬时速度：

$$\begin{aligned} v_{12}&=l_{12}/t_1 \\ v_{23}&=l_{23}/t_2 \end{aligned} \tag{4}$$

对 v_{12} 和 v_{23} 求均值可得到目标经过 P_1，P_2，P_3 的速度：

$$v=(v_{12}+v_{23})/2 \tag{5}$$

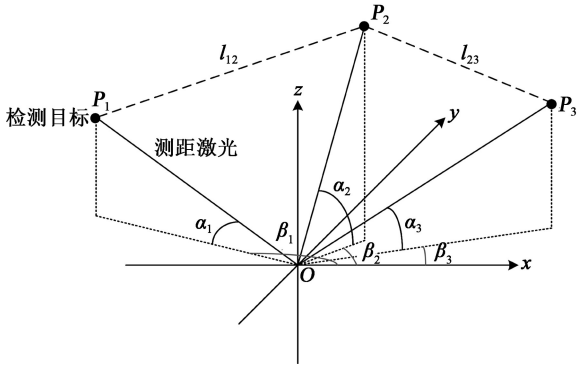


图 4　激光测量与定位系统测量原理图

3　试验论证

3.1　试验系统和场地

激光探测系统包括 STM32F407 微处理器、激光测距模块、伺服转台、光斑检测模块、LCD 显示屏和矩阵键盘。激光测距板和光斑检测模块位于伺服转台上。激光测距模块采用串口与 32 位微处理器通信。扫描捕获完成时，LCD 显示屏显示激光测距

板测得的位置信息与测距结果。

本测试采用游乐园中常见的氢气球作为检测目标。检测目标与系统的距离采用科麦思手持激光测距仪(测量精度±1 mm)的检测距离作为真实的参考距离。测试时为了避免自然光和周围的环境对测量造成干扰,选择空旷的地点和阴天进行测量。

3.2 系统测试

本次试验共测量10组数据,每组数据中的检测目标与探测系统的距离均不相等;每组数据共测量10次,同组不同次测量时,检测目标位置不同,但与系统距离相等。记录每组的捕获情况、定位数值以及定位耗时。10组数据测试完成后,人为地将测量系统对准目标反光板进行捕获,测试系统的最大测量距离。结果如表1和图5~6所示。

表1 检测情况

实际距离/m	捕获率/%	测量距离/m	误差/%
1.0	100	1.045	4.30
2.5	100	2.558	2.32
5.0	90	5.104	2.08
7.5	90	7.651	2.01
10.0	80	10.150	1.50
15.0	60	15.198	1.31
17.5	40	17.692	1.10
20.0	20	20.196	0.98
22.5	10	22.671	0.76
25.0	10	25.463	1.85

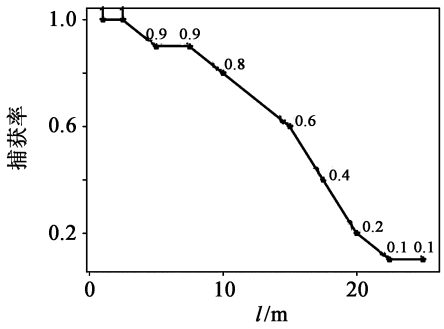


图5 捕获率与距离关系图

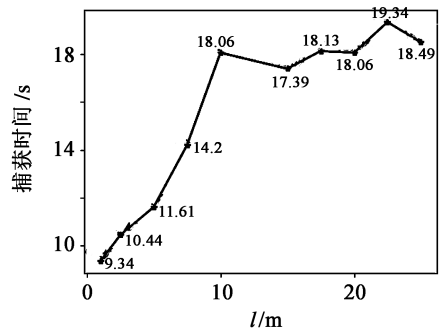


图6 平均捕获时间与距离关系图

经人为对准得到探测系统可探测的最大距离约为45 m,对比10组测得的距离数据与误差可知,激光测距仪测得的距离误差在±5%以内;当系统与目标距离在7.5 m内时,捕获概率在90%以上,平均捕获时间在15 s以内。

3.3 结果分析与改进

3.3.1 测距分析

表1中的距离测量值均大于实际值,分析认为这是由于测量距离最远仅为25 m,被检目标气球为一个弧面,并不能视为一个质点,实验所设置的实际距离是系统到目标中心部位的距离,系统定位时并未对准被测气球中心部位,而是对准了气球的边缘,导致测得的数据较实际值偏大。

其次,对系统最大探测距离进行分析。参照激光测距发射功率与接收功率关系,可知脉冲激光最大探测距离 l_{max} 为[11]

$$l_{max}=\sqrt{\frac{P_t\rho T^2\eta A_r}{\pi P_{rmin}}} \tag{6}$$

其中,P_t 为激光发射峰值功率,ρ 为目标反射率,η 为光学系统效率,A_r 为接收光学有效面积,T 为大气透过率,P_{rmin} 为最小可探测功率。由此可见,l_{max} 与 $\sqrt{P_t}$ 成正比。在真实的激光系统中,激光平均功率可达400~600 W,结合之前的实验结果,在其他参数基本不变的情况下,根据式(6)的正比关系,可估算出最大探测距离范围约为4.5~5.5 km。

3.3.2 捕获分析

从捕获时间与距离关系可以看出,当距离小于10 m时,时间与距离正相关;当距离大于10 m后,平均检测时间趋于稳定。这是由于当目标距离系统较近时,目标覆盖多个光栅扫描中的点,完成捕获的时间较短。随着距离的增加,目标只覆盖了光栅检测中的一个点,捕获所用时间大致相同。

由于系统采用矩形光栅步进扫描,可知其将空间分为正方形区域,边长 l_a 为

$$l_a=2l\sin\frac{\Delta\theta}{2} \tag{7}$$

其中,l 为目标与激光发射器的距离,$\Delta\theta$ 为舵机扫描角度步进值,实验中约为9°。

在远处时,扫描覆盖面仅为正方形四角的扇形。所以可知目标中心距离正方形四角距离为 r_1 时,无法被探测到:

$$r_1=\frac{d_1+d_2}{2} \tag{8}$$

式中，d_1 为目标探测面直径，实验采用气球模拟 $RCS=0.01\ m^2$ 无人机目标，其 d_1 约为 0.127 m，d_2 为 l 处光斑直径。

所以，由式(7)～(8)可知，距离 l 与探测概率 p 的关系为

$$p=\frac{\pi r_1^2}{l_a^2}=\pi\left[\frac{d_1+d_2}{4l\sin(\Delta\theta/2)}\right]^2 \tag{9}$$

计算可知，在 l 大于 15 m 后，扫描覆盖率小于 10%，这与实验中 15 m 后捕获率不佳的结果相吻合。因此，若降低步进角，采用多激光协同扫描，则可在捕获时间不增加的情况下提高捕获率。

4　结束语

本文针对无人机目标检测，提出了一种基于激光扫描跟踪的检测系统。该系统将激光测距与 APT 技术相结合，为解决无人机等低慢小目标雷达难以检测的问题提供了一种思路。同时还对该系统的检测性能进行了实地测试，结果表明，系统在激光平均功率小于 40 mW 时，对 7.5 m 范围内目标的捕获概率达 90%，定位误差在 5%以内，最远检测距离约为 45 m。

参考文献：

[1] 张建伟，郭会明. 低空慢速小目标拦截系统研究[J]. 计算机工程与设计，2012，33(7)：2874-2878.
Zhang Jianwei，Guo Huiming. Net cast interception system research aimed at low small slow target [J]. Computer Engineering and Design，2012，33(7)：2874-2878.

[2] 石红梅，谭　晃. 国外无人机监管及反制技术最新发展概况[J]. 中国安防，2016(4)：100-105.
Shi Hongmei，Tan Huang. Overview of the latest developments in foreign UAV regulatory and countermeasure technologies[J]. China Security & Protection，2016(4)：100-105.

[3] 罗　斌，黄宇超，周　昊. 国外反无人机系统发展现状综述[J]. 飞航导弹，2017(9)：24-28.
Luo Bin，Huang Yuchao，Zhou Hao. Overview of the development status of anti-UAV systems abroad [J]. Aerodynamic Missile J.，2017(9)：24-28.

[4] 李明明，卞伟伟，甄亚欣. 国外“低慢小”航空器防控装备发展现状分析[J]. 飞航导弹，2017(1)：62-70.
Li Mingming，Bian Weiwei，Zhen Yaxin，Analysis on the development status of foreign "Low Slow Small" aircraft prevention and control equipment[J]. Aerodynamic Missile J.，2017(1)：62-70.

[5] 李　方. 国外反微小型无人机电子装备发展分析[J]. 军民两用技术与产品，2019(8)：22-26.
Li Fang. Analysis of the development of foreign anti-mini-small UAV electronic equipment [J]. Dual Use Technologies & Products，2019(8)：22-26.

[6] 张　静，张　科，王靖宇，等. 低空反无人机技术现状与发展趋势[J]. 航空工程进展，2018，9(1)：1-8，34.
Zhang Jing，Zhang Ke，Wang Jingyu，et al. A survey on anti-UAV technology and its future trend [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering，2018，9(1)：1-8，34.

[7] W. HK. 全国机场首个无人机防御系统投入试运行[J]. 军民两用技术与产品，2017(23)：20.
W. HK. National airport's first UAV defense system put into trial operation[J]. Dual Use Technologies & Products，2017(23)：20.

[8] 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)：260-267.
Xie Gengcheng，Ye Yidong，Li Jianming，et al. Echo characteristics and range error for pulse laser ranging [J]. Chinese J. of Lasers，2018，45(6)：260-267.

[9] 刘瑞雄，张　涛. 自由空间激光通信中的 APT 技术分析[J]. 现代电子技术，2010，33(7)：102-103.
Liu Ruixiong，Zhang Tao. Analysis of APT technology used in free-space laser communication [J]. Modern Electronics Technique，2010，33(7)：102-103.

[10] Hai Y，Li Y，Ma X H，et al. Optical system design for small size laser ranging[C]// Proc. IEEE 2015 Inter. Conf. on Optoelectronics and Microelectronics，2015：115-118.

[11] 王晓冬. 高频脉冲激光测距接收系统设计[D]. 南京：南京理工大学，2009.
Wang Xiaodong. Design of high frequency pulse laser ranging receiving system[D]. Nanjing：Nanjing University of Science and Technology，2009.

作者简介：

陈　实(1997－)，男，四川人，硕士研究生，主要研究方向为无线光通信、5G 关键技术；

杨　帆(1982－)，男，重庆人，博士，副教授、硕士生导师，主要研究方向为水下 AUV 通信、智能电网、5G 关键技术、无人机通信，以及室内定位等。