

# 一种小型化、远距离、平面扫描式激光雷达避障系统

潘世光<sup>1</sup>, 尚建华<sup>1</sup>, 罗 远<sup>2</sup>, 马鸿斌<sup>1</sup>, 贺 岩<sup>2</sup>

(1. 东华大学 信息科学与技术学院, 上海 201620;

2. 中国科学院上海光学精密机械研究所 空间激光信息技术研究中心, 上海 201800)

**摘要:**基于激光雷达的无人机避障系统能够实时探测和定位前方障碍物。首先介绍了四种避障技术并对其性能进行了分析;其次,阐述了基于激光雷达的无人机避障技术的研究进展。在此基础上,针对避障系统普遍存在的重量、功耗、作用距离和数据输出率等多指标相互制约的问题,提出了一种小型化、远距离、平面扫描式激光雷达避障系统解决方案。借助高速脉冲调制、单光子测距、波形高速采样以及转镜扫描等技术,以FPGA为主控芯片,避障系统作用距离达300 m,扫描角分辨率为 $0.1^\circ$ ,为可靠获得障碍物信息提供了重要保障。

**关键词:**无人机避障;激光雷达;激光测距;FPGA

**中图分类号:** TN249

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.19358/j.issn.2096-5133.2020.05.010

**引用格式:**潘世光,尚建华,罗远,等.一种小型化、远距离、平面扫描式激光雷达避障系统[J].信息技术与网络安全,2020,39(5):46-50.

## A miniaturized, long-distance and plane scanning lidar obstacle avoidance system

Pan Shiguang<sup>1</sup>, Shang Jianhua<sup>1</sup>, Luo Yuan<sup>2</sup>, Ma Hongbin<sup>1</sup>, He Yan<sup>2</sup>

(1. School of Information Science and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China;

2. Research Center of Space Laser Information Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract:** The obstacle avoidance system for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) based on laser radar is able to realize the real-time detection and position calculation for the obstacle. In this paper, the main obstacle avoidance technologies are introduced and the corresponding characteristics are discussed and analyzed. Then, the development and the recent research progress are summarized. Considering the weight, the power consumption, the detection distance and the data transfer rate, a miniaturized, long-distance and plane scanning obstacle avoidance system is proposed based on the high-speed pulse modulation, the single photon ranging, the echo sampling and the mirror laser scanning technology. With FPGA as the main control chip, the obstacle avoidance system has a distance of 300 m and a scanning angle resolution of  $0.1^\circ$ , which can satisfy the requirement for the obstacle detection.

**Key words:** obstacle avoidance for UAV; laser radar; laser ranging; FPGA

## 0 引言

现代科技和信息技术的飞速进步,给人类的生活带来了翻天覆地的变化,越来越多的智能化、自动化、无人化的仪器和设备不断涌现。人类传统的生产和生活方式,正在逐步向智能化、无人化的模式过渡,有关无人化技术和设备的研发也得到了广泛的关注。其中,无人机是无人化智能设备的典型代表,它的出现给人们的生活带来了巨大的便利,在工业、农业、商业以及旅游业等领域均得到了广泛的应用。然而,无人机的工作环境通常较为复

杂、多变,为了灵敏、准确地感知外界环境,精确避免与障碍物发生碰撞,实现安全、高效的自主作业,配置性能优异的智能避障系统尤为重要。

### 1 无人机避障技术发展概述

良好的避障系统是确保无人机正常作业的重要前提,也是无人化设备的关键研发技术。本节首先对现有的无人机避障技术进行介绍,并分析各技术的优缺点;其次,对基于激光雷达的无人机避障技术的研究现状进行阐述;最后,针对基于激光雷达的无人机避障技术在实际应用中的不足进行

讨论。

### 1.1 无人机避障技术

无人机避障技术主要包括红外避障、超声波避障、双目视觉避障以及激光雷达避障四种。

红外避障技术是利用红外发射器发射红外光,通过发射光和回波光时间差的测量获得障碍物的距离信息,进而达到避障的目的。红外避障系统发展较为成熟,避障精度高且实现成本低,但其较依赖于障碍物的反射能力且属于单点测距,只能获得特定方向上的距离信息,且测距范围较小,因此,其避障的效率和精度有限<sup>[1]</sup>。

超声波避障技术能够在—个方向范围内利用超声波实现测距,并具有方向性好、穿透能力强、能量消耗慢、成本低、易于获得较集中的声能等特点。然而,超声波属于机械波,容易受到声波的干扰,致使无人机避障系统在某些应用场合中面临严重的干扰,严重影响了避障系统的测量精度。另外,超声波的有效距离仅为 5 m 且检测角度有限,因此,超声波避障技术不利于实现大动态范围的精确避障<sup>[2]</sup>。

双目视觉避障技术的基本工作原理是利用两个平行的摄像头进行拍摄,然后采用一系列的算法对两幅图像之间的差异(视差)进行计算,进而获得特定点的距离。双目视觉技术具有隐蔽性好、信息全面、测量束角较大、测量精度高等优势;但是,对于工作在复杂、恶劣环境下的无人机而言,其数据计算量庞大且对光敏感,因此较难完成高效可靠的避障任务<sup>[3]</sup>。

基于激光雷达的无人机避障技术的工作原理是利用激光测量障碍物的相对距离和角度信息。无人机利用激光雷达进行避障时,系统内部的光源按照一定的角度向外发射激光,当遇到障碍物时会发生反射,回波信号光经系统内部的光电探测单元接收检测;然后,通过计算光信号的飞行时间即可获得与障碍物的距离、角度等信息。按照测距方法的不同,基于激光雷达的无人机避障系统分为脉冲式激光避障和相位式激光避障两种<sup>[4]</sup>。较上述三种避障技术而言,该技术具有分辨率高、抗干扰能力强、探测距离远、适于弱光环境下探测等优势。并且,与传统的微波雷达相比,基于激光雷达系统的无人机避障技术能够提供更强大的感知能力,且避障系统的体积和质量均得到了显著优化,并逐步

在市场化产品应用方面获得了快速推广<sup>[5]</sup>。

### 1.2 基于激光雷达的无人机避障技术的研究现状

目前,将激光雷达与其他避障技术相结合的新型避障系统,逐渐成为新的避障技术研究趋势。多种避障技术手段的融合使用能够较好地规避单一避障方案的不足,有效提高避障效率。2016 年,北京理工大学的何守印<sup>[6]</sup>在四旋翼无人机的避障系统中融合了双目视觉、2D 激光雷达、超声波、机载 IMU 和 GPS 等多种感知、探测、定位、导航传感器,通过上述多种避障方案的使用为室内、室外、城市、野外等不同尺度、不同环境条件下的自主避障飞行提供了可靠保证。2017 年,长春理工大学的邴丽媛<sup>[7]</sup>综合使用超声波、激光雷达、电磁场检测以及 GPS 等多种传感器,提出了有效规避障碍物的运动策略,并在无人机电力巡线时实现了复杂环境的全方位、多角度探测和自动规避。2018 年,PAPA U<sup>[8]</sup>等人在小型旋翼 UAS 上综合使用了激光雷达技术和声呐技术,为探测和躲避障碍物应用中多技术的融合使用提供了新的思路。北京航空航天大学唐志勇研究团队则是将激光雷达避障系统与双目视觉摄像机结合在一起,采用人工势场法实现了四旋翼无人机的避障,并通过仿真实验证明了系统的可行性<sup>[9]</sup>。

### 1.3 基于激光雷达的无人机避障技术的应用限制

实际应用中,当在无人机上搭载激光雷达避障系统用以实现 300 m 甚至更远距离的测距和避障时,不仅要保证较高的测距精度和探测概率,还要具有较高的数据传输速率,这样才能使无人机实时掌控自身的飞行高度信息。然而,基于传统的激光雷达测距系统实现这一目标时,却面临着—个不可忽视的问题,即随着无人机飞行高度的提高,系统的避障性能会受到激光器的自重和功耗的限制。其次,常规的低重量、低功耗的激光测距系统往往是通过长时间测量、以牺牲输出速率为代价来满足 300 m 以上范围的测距需求的。为了满足测距精度和距离信息输出速率的要求,需要扩大系统的接收口径或提升激光器的发射功率,这将会增加激光雷达避障系统的重量和功耗,并将严重影响无人机的带载能力。

近年来,单光子激光雷达测距技术得到了快速发展,为基于激光雷达的无人机避障技术提出了新的思路。避障系统借助单光子探测器实现光电信

号的转换,进而获取障碍物的距离、角度等信息。然而,该类探测器虽然有效提升了探测灵敏度,但却无法分辨回波光光子数。因此,在对不同反射率目标测距时,基于单光子探测器的激光测距避障系统无法进行回波灰度修正,这将严重影响测距精度并会引起较大的距离误差。

2 小型化、远距离、平面扫描式激光雷达避障系统

为了满足无人机避障的实际应用需求,本文提出了一种小型化、远距离、平面扫描式激光雷达避障系统解决方案,依次介绍了系统的设计参数及信号处理中的核心算法思想。

2.1 系统解决方案

为了克服传统激光雷达避障技术在无人机应用上存在的重量、体积和功耗的限制,并在复杂地形下实现仿地飞行,无人机需要装配智能的避障系统。随着无人机飞行速度的不断提升,激光雷达避障系统还需要具备远距离探测和定位障碍物的能力,并要达到指定的探测距离和扫描角分辨率的要求,此外,还要考虑无人机对激光雷达避障系统的重量、体积和功耗的限制。因此,在激光雷达避障系统的设计实施中,需要对上述关键技术和问题进行充分考虑。

针对上述问题,本文提出的小型化、远距离、平面扫描式激光雷达避障系统结构框图如图 1 所示。该系统综合利用单光子测距技术以及高速脉冲调制、回波高速采集、转镜扫描控制和网络通信等技术,并以 FPGA 作为主控芯片实现激光发射、回波信号采集、扫描角度获取、信号处理、数据传输等功能的逻辑控制,将所得平面扫描数据传输至避障系统,进而在飞行视场内实现可靠避障。

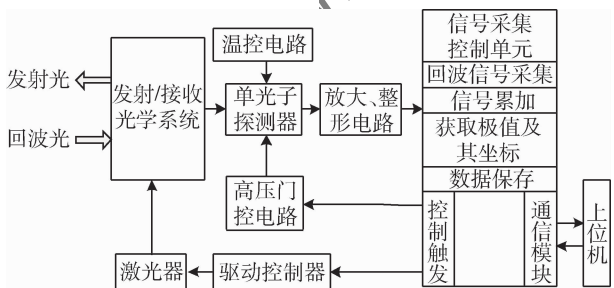


图 1 平面扫描式激光雷达避障系统结构框图

图 2 所示为平面扫描式激光雷达避障系统的工作过程。系统上电后,温控模块根据当前温度值,对核心部件进行温度控制;然后,避障系统开始自检,实时读取内部各核心部件的温度,当达到指定工作温度

之后,自检完成并向上位机上传自检结果;其次,上位机发布测距指令,避障系统按照预设工作模式开始工作,激光器按照预设重频和占空比发射工作波长为 1 064 nm 的激光脉冲,信号采集模块按照固定的时序采集信号并对信号进行累加处理,再计算获得探测距离和扫描角度等信息;与此同时,原始数据和计算所得信息通过以太网传送给上位机,并且,系统对内部参数进行实时监测和预警;最后,当收到停止测距指令时,系统执行程序关闭的操作。

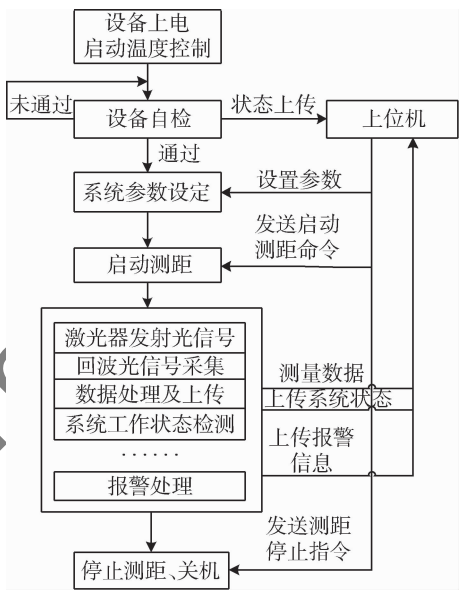


图 2 平面扫描式激光雷达避障系统工作流程图

目前,国内许多机构都在开展基于激光雷达的无人机避障技术的相关研究,在优化避障性能、减少激光雷达自重和功耗限制、提高产品竞争力等方面均有所突破。表 1 所示为北京数字绿土科技有限公司的 LiAir V 无人机激光雷达扫描系统、北京富斯德科技有限公司的超轻型无人机载激光扫描仪 miniVUX-1DL 以及本文提出的平面扫描式激光雷达避障系统的性能指标比较。

表 1 三种激光雷达避障系统的性能比较

| 类别           | 重量 /kg | 功耗 /W | 最大测距 距离/m | 角度 分辨率 / (°) | 测距 精度 /cm | 体积 /mm <sup>3</sup> |
|--------------|--------|-------|-----------|--------------|-----------|---------------------|
| LiAir V      | 约 1.03 | 20    | 260       | <0.1         | 2         | 约 100 × 60 × 50     |
| mini VUX-1DL | 约 2.4  | 40    | 200       | <0.1         | 1.5       | 232 × 111 × 123     |
| 本文系统         | 0.40   | 10    | 300       | <0.1         | 1         | 69 × 46 × 26        |

从表1可知,本文提出的小型化、远距离、平面扫描式激光雷达避障系统突破了传统激光雷达在重量、功耗、距离范围和扫描角分辨率等指标之间相互制约的限制。在系统重量、功耗不变以及目标反射率不同的情况下,该避障系统具有更高的探测灵敏度、更快的测距响应和更好的反射率分辨能力,能够有效提升测距精度、测距范围和数据输出率,较好地满足无人机安全飞行的需求。

## 2.2 信号处理算法

为了提高系统信噪比,实现灰度修正,确保不同反射率目标的测距精度,需要采取相关算法对采集到的信号进行处理。目前,提升信噪比的算法主要包括 FIR 滤波算法、小波分解算法、奇异值分解算法、自相关滤波算法,其中,自相关滤波是利用了脉冲信号之间的相关性和噪声之间的不相关性,其信噪比提升效果较其他几种方法更加优异。本节将描述该信号处理算法的实现原理,并分析参数对性能的影响。

设有效回波信号为  $s$ , 噪声信号为  $n$ , 单脉冲信号幅度为  $A$ 。将采集到的  $N$  个离散回波信号进行累加操作,累加得到的第  $j$  个信号表述如下:

$$\sum_{i=0}^{N-1} x_{ij} = \sum_{i=0}^{N-1} s_{ij} + \sum_{i=0}^{N-1} n_{ij} \quad (1)$$

其中,  $x$  代表采集到的脉冲回波信号。由于有效回波信号之间呈相关性,因此  $\sum_{i=0}^{N-1} s_{ij} = NA$ , 即  $N$  次累加可使有效信号幅度同步增加  $N$  倍。而采集信号中的噪声之间呈不相关性,累加  $N$  次的结果是一个相互抵消的过程<sup>[10]</sup>。设噪声方差为  $\sigma^2$ 、期望为  $E$ , 由统计学计算分析得  $\overline{n_j^2} = E[(\sum_{i=0}^{N-1} n_{ij})^2]$ , 将其展开近似得:

$$\overline{n_j^2} = E[(n_{0j} + n_{1j} + \cdots + n_{Nj})^2] = E\left[\sum_{i=0}^{N-1} n_{ij}^2\right] + 2E\left[\sum_{i=0}^{N-2} \sum_{k=i+1}^{N-1} n_{ij} n_{kj}\right] \quad (2)$$

基于相邻脉冲噪声信号间的不相关性,式(2)可进一步化简得到:

$$\overline{n_j^2} = E\left[\sum_{i=0}^{N-1} n_{ij}^2\right] = N\sigma^2 \quad (3)$$

综上所述,  $N$  次采集回波信号累加后第  $j$  个信号可表示为:

$$\sum_{i=0}^{N-1} x_{ij} = NA + \sqrt{N}\sigma \quad (4)$$

因此,  $N$  次累加后的系统信噪比与累加前的信噪比之间的关系为:

$$SNR_{\text{累加后}} = \frac{NA}{\sqrt{N}\sigma} = \sqrt{N} \frac{A}{\sigma} = \sqrt{N} SNR_{\text{累加前}} \quad (5)$$

从式(5)可以看出,采集到的回波信号累加  $N$  次之后,系统信噪比会相应提高  $\sqrt{N}$  倍。信噪比的提高有助于对不同反射率目标的辨别,也有助于提高系统测距精度。但是,参数值  $N$  越大,累加次数也将越多,所需的累加时间也会相应增多,这将影响系统的探测速率,因此,需根据实际应用性能需求合理选择参数  $N$ 。

## 3 结论

本文在总结无人机激光雷达避障国内外研究进展的基础上,提出了一种小型化、远距离、平面扫描式激光雷达避障系统方案,该系统旨在保证探测概率的前提下实现高灵敏测距和避障,能够有效抑制背景光的干扰。较其他激光测距避障方案而言,该系统能较好地满足功耗、体积和重量等方面的需求,尤其适用于对体积、重量要求较为苛刻的场合。针对实际避障应用,较其他方案而言,激光雷达的研制成本过高且其自重和功耗问题在一定程度上限制了其进一步发展,因此,需要结合具体需求,综合考虑系统的设计参数,并进行适当的优化。

随着科技的发展和研究的不断深入,未来基于激光雷达的无人机避障技术会继续朝着更加小型化、智能化的方向发展,多技术的融合和创新,会使该技术的功能更加全面、性能更加优异,其应用领域也会更为广阔,在不同的复杂环境下都将扮演着重要的角色。

## 参考文献

- [1] 高迪. 无人机避障雷达目标探测与跟踪算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [2] 章志诚, 杜昌平. 基于激光雷达的多旋翼飞行器实时避障系统[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(9): 117-121.
- [3] 苏东. 基于双目视觉的小型无人飞行器的导航与避障[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- [4] 周宗儒. 基于多传感器信息融合无人旋翼机自主防撞系统研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2017.
- [5] 李鑫慧, 郭蓬, 臧晨, 等. 激光雷达技术研究现状及其应用[J]. 汽车电器, 2019(5): 4-6.
- [6] 何守印. 基于多传感器融合的无人机自主避障研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [7] 邴丽媛. 基于多传感器融合的无人机自动避障技术研

- 究[D]. 长春: 长春理工大学, 2017.
- [8] PAPA U, ARIANTE G, DEL CORE G. UAS aided landing and obstacle detection through LIDAR-Sonar data[C]. Proceedings of the 5th IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace, Rome, Italy, 2018.
- [9] LI Y, HU D D, CHEN J X, et al. Research on obstacle avoidance algorithm for four-rotor UAV[C]. Proceedings of the 2018 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Automation and Control Technologies, Osaka, Japan, 2018.
- [10] 倪旭翔, 胡凯. 脉冲串互相关方法在远程激光测距中的

应用[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 128-133.

(收稿日期: 2020-02-08)

#### 作者简介:

潘世光(1995 -), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 激光雷达避障。

尚建华(1983 -), 通信作者, 女, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向: 激光遥感、激光多普勒振动测量技术。E-mail: jhshang@dh. edu. cn.

罗远(1989 -), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 激光三维成像技术和激光测距技术。

(上接第 45 页)

软件的完整性, 在对软件起到保护作用的同时, 可以对用户分时间和功能授权, 提高了授权的灵活性。

本方案还可以做一些改进, 例如增加云授权、次数授权等。还应该从不同角度进行安全防护, 从底层系统的安全性开始同软件保护技术结合起来, 保证软件的安全, 这也是接下来重点研究的内容。

#### 参考文献

- [1] 段志秀. 计算机软件的著作权保护研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [2] 余彦. 基于序列号的软件保护模型改进研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2015.
- [3] WANG X, YU H. How to break MD5 and other Hash functions[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2005, 3494: 561.
- [4] 吕述望, 苏波展, 王鹏, 等. SM4 分组密码算法综述[J]. 信息安全研究, 2016, 2(11): 995-1007.
- [5] 刘海峰, 朱婧, 曹慧. 改进 DES 子密钥使用顺序的算法研究[J]. 西南大学学报(自然科学), 2017, 39(6):

135-140.

- [6] 欧阳雪, 周寰, 邓锦洲, 等. 一种面向软件生命周期的 m 授权保护系统设计与实现[J]. 计算机工程与科学, 2013, 35(4): 59-64.
- [7] 赵舒灿. 一种软件授权与保密系统设计[J]. 电脑编程技巧与维护, 2017(10): 5-9, 17.
- [8] 李志龙. 基于非对称加密算法的软件授权方案[J]. 福建电脑, 2018, 34(9): 116-118.
- [9] 王健. 基于完整性验证和壳的软件保护技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2018.

(收稿日期: 2020-03-16)

#### 作者简介:

何永瑾(1995 -), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 工业控制软件、工控安全。

郭肖旺(1986 -), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 工业控制软件、工控安全。

赵德政(1985 -), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向: 工业控制。

# 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《信息技术与网络安全》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《信息技术与网络安全》编辑部  
中国电子信息产业集团有限公司第六研究所