

DOI:10.16356/j.1005-2615.2019.01.004

无人旋翼机机载放射性监测系统研制

汤晓斌 王泽宇 龚频 高乐

(南京航空航天大学材料科学与技术学院,南京,211106)

摘要:选取 GM 管与 NaI(Tl)伽马谱仪双辐射探测器作为辐射监测单元,通过软硬件开发,将 GPS 技术、无线通信技术、核分析技术、放射源定位、剂量率绘图等功能相融合,研制出一套快速灵敏且不受地形限制的远程机载辐射监测系统。测试结果表明:所开发的无人旋翼机机载放射性监测系统在 3 km 的传输距离下可保持稳定有效的数据通信;机载监测系统的最大可探测距离满足环境辐射监测需求;系统上位机软件实时显示获取的环境辐射数据,并具有轨迹标定、剂量警报、数据查询和分析等功能,为环境辐射评估提供了依据。

关键词:无人旋翼机;远程辐射监测;GM 管;NaI(Tl)伽马谱仪;放射源定位;剂量率绘图

中图分类号:V26 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2019)01-0024-06

Development of Airborne Radioactivity Monitoring System for Unmanned Rotorcraft

TANG Xiaobin, WANG Zeyu, GONG Pin, GAO Le

(College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 211106, China)

Abstract: Two radiation detectors GM tube and NaI(Tl) gamma spectrometer are chosen as radiation monitoring units for the development of remote airborne radiation monitoring systems. GPS technology, wireless communication technology, nuclear analysis technology, radioactive source positioning, dose rate mapping and other functions are combined to develop a drone airborne radiation monitoring system. The experimental results show that the airborne radioactivity monitoring system can maintain stable and effective data communication at a transmission distance of 3 km; the maximum detectable distance of the airborne monitoring system can meet the requirements of environmental radiation monitoring. The upper computer software can display the acquired detection data intuitively, and has the functions of gamma spectra analysis and radiation field analysis, which provides a basis for environmental radiation assessment.

Key words: unmanned aerial vehicle (UAV); remote radiation monitoring; GM tube; NaI(Tl) gamma spectrometer; radioactive source localization; dose rate mapping

随着全球核技术产业的不断发展,辐射污染、放射源丢失、潜在核事故的风险也随之增加^[1-2]。与国外发达国家相比,国内的放射性监测技术相对落后,仍以使用传统固定式或便携式放射性监测设备为主。固定式监测设备可进行环境连续性放射性监测,但缺乏良好的机动性^[3-5];便携式监测设备,测量方式灵活,

但多需辐射防护人员参与,增加了人员剂量照射风险^[6-7]。除此之外,车载辐射监测设备与机载辐射监测设备也逐渐应用于事故后环境应急辐射监测,一定程度上满足了大范围快速环境应急监测任务^[8-12]。但由于使用成本高,很难用于日常环境辐射测量。

近年来伴随着无人机技术的迅猛发展,小型无

收稿日期:2018-12-30;**修订日期:**2019-01-08

作者简介:汤晓斌,男,1978年生,博士,教授,主要研究方向:核技术及应用、辐射物理与效应等,作为第一作者或通信作者发表 SCI 收录论文 110 余篇。E-mail: tangxiaobin@nuaa.edu.cn。

通信作者:王泽宇,男,硕士研究生, E-mail: wangzeyu@nuaa.edu.cn。

引用格式:汤晓斌,王泽宇,龚频,等. 无人旋翼机机载放射性监测系统研制[J]. 南京航空航天大学学报,2019,51(1): 24-29. TANG Xiaobin, WANG Zeyu, GONG Pin, GAO Le. Development of Airborne Radioactivity Monitoring System for Unmanned Rotorcraft[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(1): 24-29.

人旋翼机的商用化日趋成熟。基于小型无人旋翼机良好的机动性以及环境适应性,且能够远程操控的特点,本文提出了一种无人旋翼机机载放射性监测系统,能够有效弥补上述传统辐射监测方式存在的不足,提高环境辐射监测的效率与准确性。本系统能够用于核工业日常环境辐射监测,可对环境中的放射性进行实时、准确的测量,降低工作人员的受照剂量,此外该系统还可以应用于放射性事故中,如局部放射性泄漏监测以及搜寻丢失放射源,为核应急提供了一种新的思路。

1 测量系统介绍

无人旋翼机机载放射性监测系统由机载平台、逻辑控制单元、辐射测量单元3部分组成。机载平台提供系统动力与电源供应。逻辑控制单元负责控制命令执行与发送、数据处理与传输,主要包括嵌入式 ARM 控制模块、Compute stick 微型处理器、电源转换模块、GPS 模块、数据传输模块等。其中 ARM 模块负责系统逻辑控制与测量数据打包处理,Compute stick 微型处理器负责环境放射性测量数处理,电源转换模块负责系统各单元电力分配工作,GPS 模块负责实时地理信息获取,数传模块负责系统数据的发送与接收。辐射探测单元包括 NaI(Tl)伽马谱仪、GM 计数管双探测器系统,主要负责环境放射性剂量率与能谱的同时测量。整套监测系统预留有多个通用串行总线接口、RS232 串行通信接口、XT30 电源接口等,方便后续机载探测系统的进一步升级与完善。图 1 所示为无人旋翼机机载放射

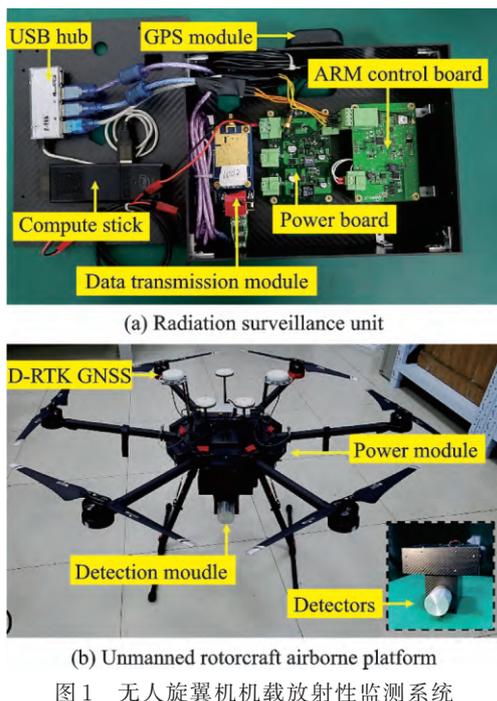


图 1 无人旋翼机机载放射性监测系统

性监测系统整体设计,整机性能参数如表 1 所示。

表 1 整机性能参数
Tab. 1 Performance parameters of the system

项目名称	性能参数
载荷总质量/kg	≤5
飞行时间/min	30
剂量率探测范围/($\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$)	0.1~10
能量范围/keV	40~3 000
探测单元能量分辨率/%	≤10 @662 keV
数字化多道分析器道数/道	1 024
无线传输距离/km	≥3;视距通信可达 15~22

2 系统控制模块设计

系统 ARM 控制模块主要负责系统逻辑控制与测量数据打包处理。控制系统核心部件为 LPC 控制芯片,具有高性能、低成本、低功耗等特点。通过 Cadence 硬件设计,实现了系统剂量率数据采集、温度数据获取、系统电压获取、地理信息获取、数传模块等外围电路的设计与制作,逐个实现了不同模块的功能。

2.1 CPU 模块硬件设计

系统核心 CPU 选择 NXP 公司的 LPC 系列芯片,该芯片内核基于 ARM Cortex-M3 处理器,工作频率为 72 MHz,内置 4 KB 的 EEPROM,满足嵌入式系统的数据存储需求。控制模块所需实现功能主要为:(1)控制 GM 管工作状态的切换;(2)实时获取地理位置信息、温度值以及 GM 管测量数据;(3)发送基于 MAESTRO 软件 SDK 的程序指令,从 Compute Stick 中获取 γ 能谱测量信息;(4)获取数据的预处理与传输。基于此,设计控制模块系统架构如图 2 所示。

LPC 芯片外围有丰富的 I/O 接口,通过开关矩阵(Switch matrix, SWM)模块可以将芯片功能动态分配到任意引脚上,合理的功能引脚分配可以避免逻辑冲突,提高系统运算效率。图 3 所示为 LPC

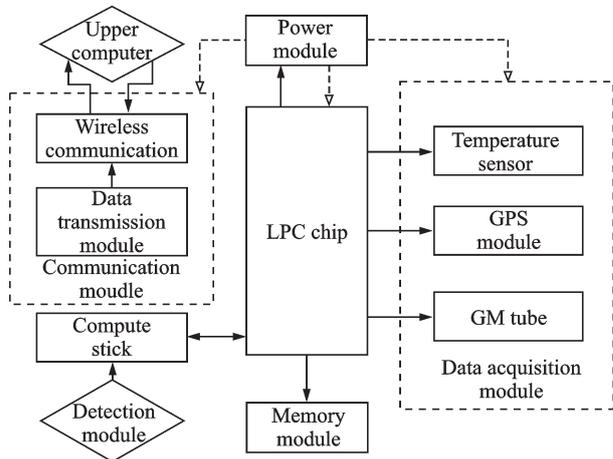


图 2 控制模块系统架构

芯片功能引脚分配设计。分配 ADC0_10 引脚连接 GM 管信号采集模块,实现脉冲计数的统计;时钟输入(Test clock input, TCK)、数据输入(Test data input, TDI)、数据输出(Test data output, TDO)、模式选择(Test mode selection input, TMS)引脚分别

连接 JTAG 电路四线接口,完成 PC 机与芯片之间的数据通信与时钟输入,以实现 ARM 程序的烧写与调试;MCU_RX0 接收引脚与 MCU_TX0 发送引脚分别连接 GPS 芯片的 TXD 和 RXD 端口,以实现 GPS 数据的获取与发送。

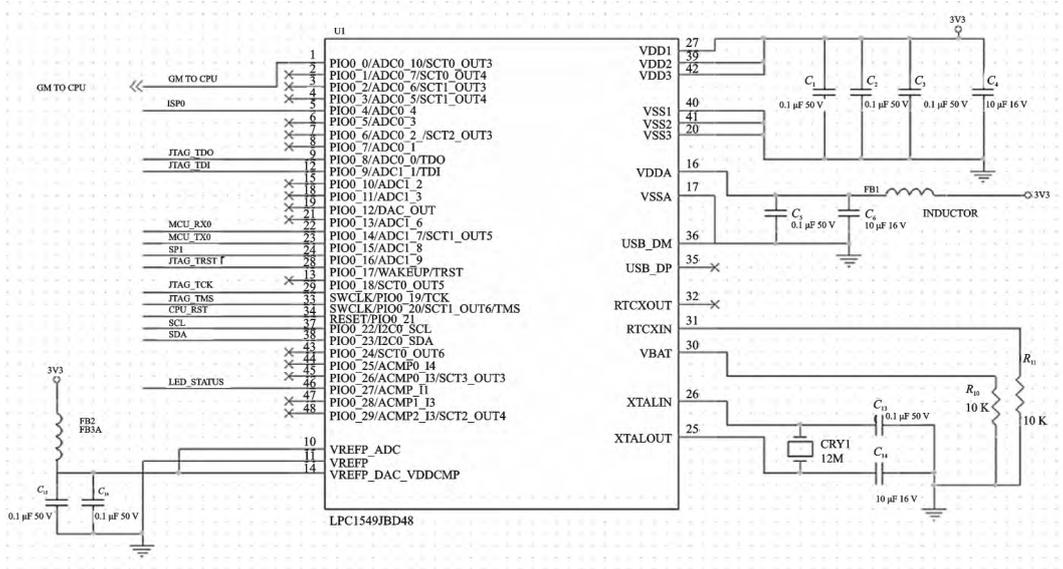


图 3 LPC 芯片功能引脚分配设计

Fig. 3 Design of LPC chip pin allocation

2.2 GM 管控制模块硬件设计

系统中 GM 管负责环境伽马计数的测量,其逻辑控制电路在 LPC 芯片外围电路设计中极其重要^[13]。GM 管信号采集电路将 GM 管输出电流信号转换成具有一定脉宽与幅值的电压信号,利用 9013 小功率三极管作为门控电路,通过基极与发射极之间的死区电压设定信号阈值 V_T ,以实现 GM 管脉冲信号的监测。

GM 计数管读出电路设计如图 4 所示。硅三极管死区电压为 0.6~0.7 V,设定信号阈值 V_T 为 0.65 V。三极管基极与发射极并联电阻 R_{37} ,使得两极间电压差 V_{be} 为零,此时三极管处于截止状态。当 GM 计数管有信号输出时,基极产生电压信号如图 5(a)所示,其值大于信号阈值 V_T ,使得基极

与发射极之间的电压差 V_{be} 大于 0,三极管导通,此时集电极由高电平转换为低电平,当电压信号消失时,集电极立刻恢复至高电平状态,在此期间,集电极产生一个由高电平到低电平再到高电平的脉冲信号,如图 5(b)所示,脉冲信号传输到 LPC 芯片引脚并由计数器记录,以此实现对核信号的计数。

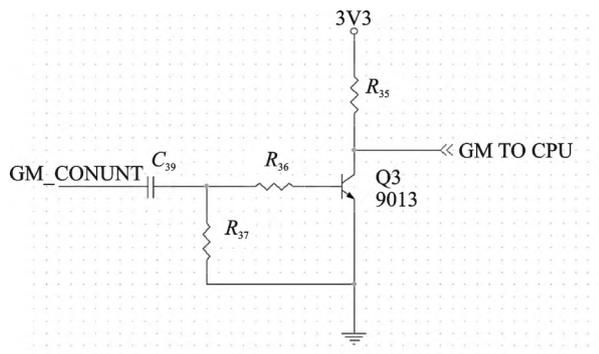
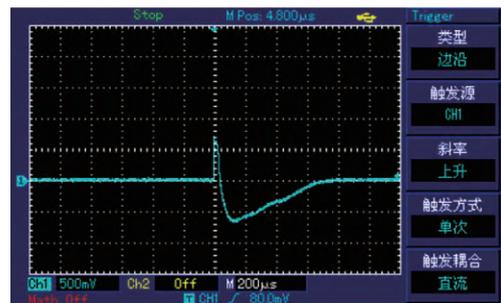
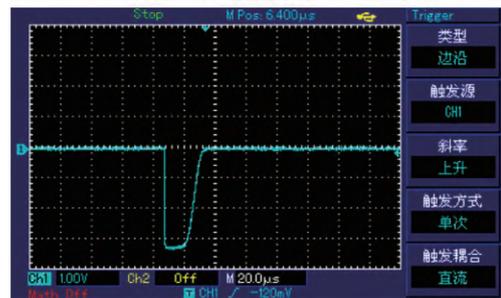


图 4 GM 管读出电路原理图

Fig. 4 Schematic diagram of GM tube readout circuit



(a) Triode base pulse signal



(b) Triode collector pulse signal

图 5 三极管基极脉冲信号和三极管集电极脉冲信号

Fig. 5 Triode base pulse signal and triode collector pulse signal

GM 计数管的工作电压需设定在坪区内,为保证最佳工作状态,选取工作电压为 500 V。系统平台提供 12 V 直流电源输入,通过 MAX641 升压型 DC/DC 转换器完成 500 V 升压转换电路的设计^[14]。GM 管升压电路原理如图 6 所示。芯片 V_{out} 引脚接 12 V 直流电流输入, V_{FB} 引脚接 R_{38} ,

R_{39}, R_{40} 分压电阻构成分压电路,其电压输出满足

$$V_o = 1.31 \frac{R_{39} + R_{40}}{R_{38}} \quad (1)$$

再经过由二极管和高压电容组成的倍压电路,使得 GM 管正极接线端的电压可以达到 500 V。

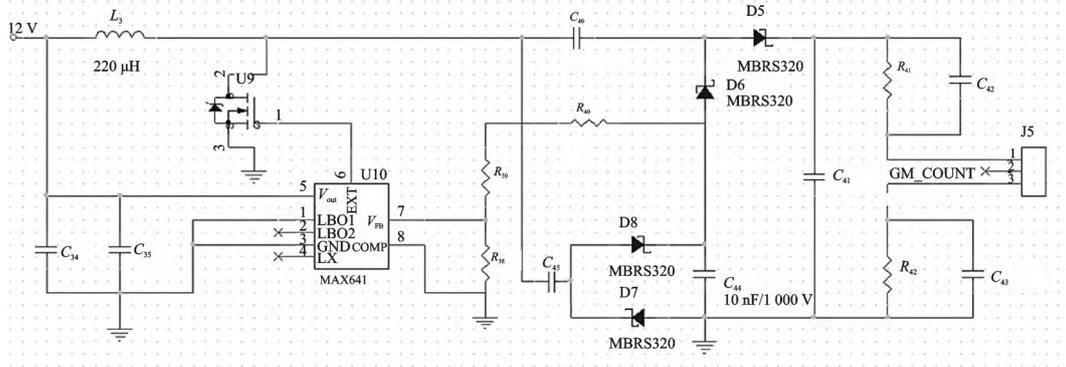


图 6 GM 管升压电路原理图

Fig. 6 Schematic diagram of GM tube step-up circuit

3 系统探测灵敏度测定

为表征无人旋翼机机载放射性监测系统整体探测性能,定义表示探测器探测远距离放射源能力的物理量:最大探测距离(Maximum detectable distance)。最大探测距离表示在探测器可以探测到放射源的情况下,两者之间存在的最大距离。最大探测距离的大小与放射源的特性(种类、活度等)以及探测器特性(晶体材质、尺寸等)有关。

实验设置如图 7 所示:放射源置于地表面一点,与放射源到探测器之间的距离相比,源自身尺寸的大小可忽略不计,因此可视为点源。射线从放射源的各个方向均匀出射,在空间形成一个球缺(除去射入地下的部分),其半径设为 r 。设定 a, b, c 三点为探测系统测量位置,其中 a 测量点距放射源距离为 L_1, b 测量点距放射源距离为 L_2, c 测量点距放射源距离为 L_3 。假设只有当测量点与放射源之间的距离 $L \leq r$ 时,放射源才可能被探测到。图中所示只有当探测器处于 a 和 b 测量点时,放射源

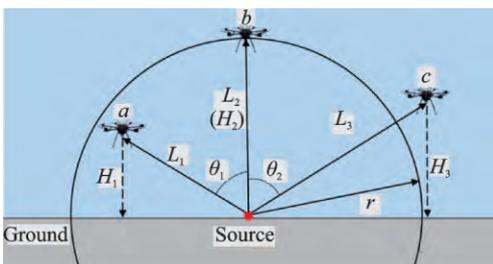


图 7 源与探测器的相对位置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the relative position of the source and detector

才可能被探测到, c 测量点不能探测到放射源信息。

本研究利用 MCNP5 软件对最大探测距离进行模拟计算,得到不同探测条件下系统最大可探测距离和源活度之间的关系。对 Co-60 和 Cs-137 两种源的计算结果进行拟合,得到源活度-最大可探测距离关系曲线,结果如图 8 所示。

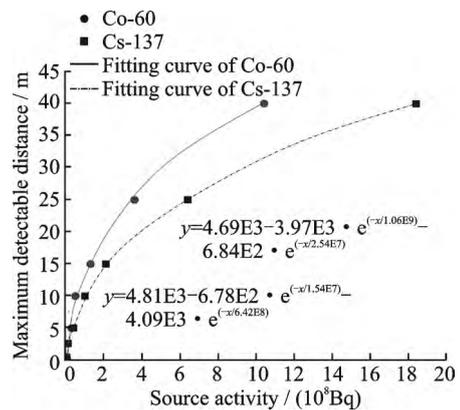


图 8 源活度-最大可探测距离关系曲线

Fig. 8 Relationship curves between source activity and the maximum detectable distance

4 实验测试

4.1 户外放射源定位分析测试

根据空间中 γ 辐射场强度与距离的平方反比规律,测量点 (x, y, z) 处的辐射强度 $I(x, y, z)$ 与放射源强度 I_0 存在以下关系

$$I(x, y, z) \propto I_0 / r^2 \quad (2)$$

本系统采用的放射源定位算法基于平方反比公式(2),在空间进行多点测量后的探测数据与探测距离应满足

$$\sigma = Std(I_1 r_1^2, I_2 r_2^2, \dots, I_n r_n^2) = 0 \quad (3)$$

即每个测量点的辐射强度乘以与放射源的距离构成的数组在统计学上标准差为零,经过多次迭代计算,当标准差值达到最小时,即可最终确定放射源所在位置。实际放射源定位实验使用活度为1 mCi实验用标准 ^{131}I 放射源,放置于水平草地上,如图9所示;探测系统位于地面上方两米处进行采样探测,每个探测点的探测时间设置为10 s。

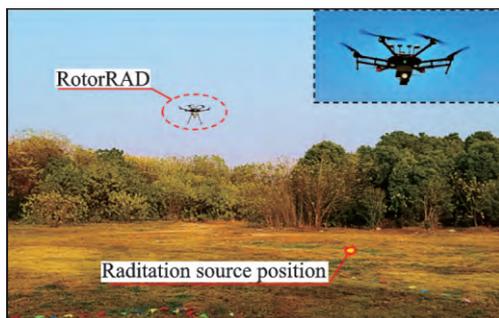


图9 放射源定位实验

Fig. 9 Radioactive source localization experiment

实验区域设定为 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$,并在该区域上方选取了10个测量点作为计算样本,迭代计算中分别针对测量点数量为6,7,8,9,10个的情况进行寻源计算,即共得到5个定位结果,实验分析结果如图10和表2所示。测量点数量从6到10时,定位误差从1.78 m缩小到0.49 m,最小定位误差为0.42 m。定位误差与场地大小的百分比小于5%,表明定位算法用于无人机机载辐射监测系统时,具有较好的实际定位能力。

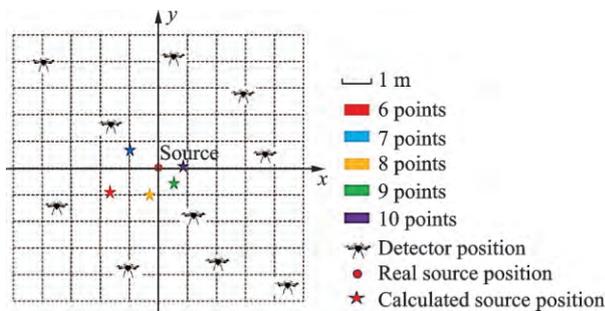


图10 实际测试结果示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the test results in the actual operation

4.2 辐射场剂量率绘图测试

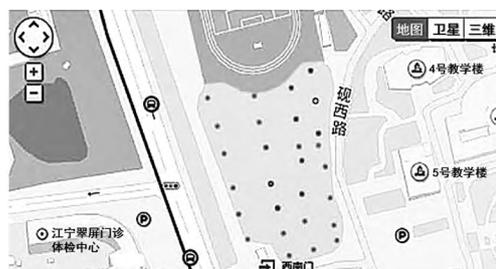
由于无人旋翼机飞行时间有限,无法对目标区域进行精确采样,本系统提出在对目标区域初略采样后采用克里金插值法对离散分布的剂量率点进行

表2 真实寻源探测结果

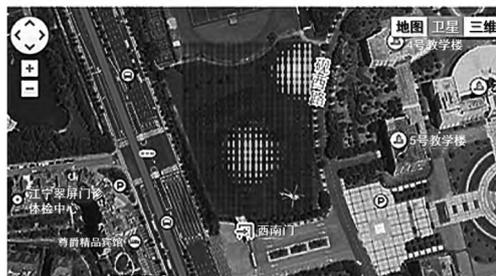
Tab. 2 Test results under actual operation

计算点数目	6	7	8	9	10
X误差/m	-1.73	-0.48	-0.17	0.41	0.33
Y误差/m	-0.42	0.38	-0.51	0.11	-0.37
距离误差/m	1.78	0.61	0.54	0.42	0.49

行差值绘图^[15]。克里金插值算法内置于上位机软件内,通过C#语言对官方数据库文件的重新编译,使其完美结合到上位机软件库中。旋翼机在执行辐射测量任务时,通过数据传输将剂量率和百度地图的经纬度数据传输到上位机软件,上位机利用克里金插值算法对数据进行迭代绘图,如图11所示。本系统能够对 $150\text{ m} \times 80\text{ m}$ 目标区域中两个放射源位置进行很好的区分,并将其热点位置与卫星地图结合,为放射源的搜寻工作提供了大力支持。



(a) Measuring points in the target area



(b) Radiation heat map of the target area

图11 无人旋翼机机载放射性监测装置测量辐射热点图

Fig. 11 Radiation heat map of unmanned rotorcraft airborne radioactivity monitoring system

5 结 论

本文介绍了一套自主研发用于辐射环境监测的无人旋翼机机载辐射监测系统,从系统构成、模块设计以及系统测试3个方面验证了系统的合理性与科学性。该系统基于小型无人旋翼机的良好机动性,结合核探测、信号处理、GPS定位、无线通信等技术实现了大范围环境放射性实时监测,并通过无线数传模块实现了机载监测系统与地面控制站的数据交互,上位机软件实时获取测量数据并处理后,显示当前测量环境的辐射热点图。此外,本系统采用了GM管和NaI(Tl)伽马谱仪两种辐射探测设备,可以同时实现环境剂量率和能谱测量;

采用寻源迭代算法对放射源进行精确定位,通过实际放射源定位实验验证了该算法的可行性;采用克里金插值算法进行剂量率绘图,勾勒出放射性环境下的热点区域,对于放射源的搜寻工作以及放射性泄漏排查都具有重要的意义。

通过各项实验测试,该机载监测系统具备真实环境辐射监测能力。对于放射源定位算法以及剂量率绘图算法的优化与完善,将在后续工作中进一步研究与测试。相信随着科学技术的不断发展,更高集成化和高精度的辐射监测系统将集成在小型无人旋翼机上,为环境辐射监测提供更为准确、高效的机载放射性监测技术。

参考文献:

- [1] 杨湘山,吕焱,李冰,等.新形势下的核安全与辐射安全对策[J].中国安全科学学报,2005,15(7):44-47.
YANG Xiangshan, LV Yan, LI Bing, et al. Current status of nuclear security and radiation safety in China and their countermeasures[J]. Chinese Journal of Safety Science, 2005, 15(7):44-47.
- [2] 夏琰君.保障核与辐射环境安全[J].环境保护,2010,2010(20):18-20.
XIA Yanjun. Safeguarding nuclear and radiation environment safety[J]. Environmental Protection, 2010, 2010(20):18-20.
- [3] 张松寿,李淑媛,李润新,等.快速放射性环境监测系统[J].核电子学与探测技术,1999(1):55-59.
ZHANG Songshou, LI Shuyuan, LI Runxin, et al. Environment monitoring system of speed radiation[J]. Nuclear Electronics and Detection Technology, 1999 (1):55-59.
- [4] 陈志岳,初志春.核电站的环境放射性监测[J].环境,2001(3):46.
CHEN Zhiyue, CHU Zhichun. Environmental radioactivity monitoring of nuclear power plants[J]. Environment, 2001(3):46.
- [5] 刘建,杨斌.秦山核电基地外围环境 γ 辐射连续监测系统[J].辐射防护,2005,25(5):296-304.
LIU Jian, YANG Bin. Real-time environmental radiation monitoring system around the Qinshan nuclear power base[J]. Radiation Protection, 2005, 25(5):296-304.
- [6] 汪清浩,贾西平,匡载斌.非铀矿地下坑道中放射性核素监测和 γ 辐射测量方法的研究及应用[J].四川有色金属,2015(3):28-30.
WANG Qinghao, JIA Xiping, KUANG Zaibin. The research and application of radionuclide monitoring and the Gamma radiation measuring methods in the tunnel of the uranium deposit[J]. Sichuan Nonferrous Metals, 2015(3):28-30.
- [7] 修正,黄顺祥,周龙.关于辐射剂量与健康效应风险评估方法的探讨[J].中国辐射卫生,2017,26(3):288-291.
XIU Zheng, HUANG Shunxiang, ZHOU Long. Discussion on risk assessment methods of radiation dose and health effects[J]. Chinese Journal of Radiation Health, 2017, 26(3):288-291.
- [8] 王南萍,裴少英,黄英,等.环境 γ 能谱测量方法研究及应用[J].辐射防护,2005,25(6):347-356.
WANG Nanping, PEI Shaoying, HUANG Ying, et al. Research on and application of methods for Gamma-ray spectrometry in environmental monitoring[J]. Radiation Protection, 2005, 25(6):347-356.
- [9] 倪卫冲,顾仁康.核应急航空监测方法[J].铀矿地质,2004,19(6):366-373.
NI Weichong, GU Renkang. Airborne monitoring method of nuclear emergency response[J]. Uranium Geology, 2004, 19(6):366-373.
- [10] 朱晓翔,陆继根,张起虹,等.田湾核电站核应急环境监测车载系统设计[J].中国辐射卫生,2009,18(2):205-206.
ZHU Xiaoxiang, LU Jigen, ZHANG Qihong, et al. The design of nuclear emergency environmental monitoring vehicle system in Tianwan nuclear power station[J]. Chinese Journal of Radiation Health, 2009, 18(2):205-206.
- [11] KURVINEN K, SMOLANDER P, PÖLLÄNEN R, et al. Design of a radiation surveillance unit for an unmanned aerial vehicle[J]. J Environ Radioact, 2005, 81(1):1-10.
- [12] PÖLLÄNEN R, TOIVONEN H, PERÄJÄRVI K, et al. Radiation surveillance using an unmanned aerial vehicle[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2009, 67(2):340-344.
- [13] WANG Peng, TANG Xiaobin, GONG Pin, et al. Design of a portable dose rate detector based on a double Geiger-Mueller counter[J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A, 2018, 879: 147-152.
- [14] MOHAMMADZADEH-SHAHIR F, BABAEI E, FARSADI M. Voltagelift technique based non-isolated boost DC-DC converter: Analysis and design[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 11(6):1083-1090.
- [15] MAKOWSKI L. Mobile sensor network for suspended particulate matter measurements using Kriging interpolation[C]//19th International Conference Computational Problems of Electrical Engineering.[S.l.]: IEEE, 2018:1-4.

(编辑:胥橙庭)