



核事故应急用智能化放射性监测系统研究

王泽宇 梁大戩 汤晓斌 龚频 王鹏

南京航空航天大学

摘要: 针对核与辐射事故的环境放射性应急监测需求,应用人工智能技术研发了基于无人机和海洋浮标的放射性监测装备。无人机机载放射性监测系统采用数字化、模块化设计。搭载小型高灵敏 γ 探测单元、放射性气溶胶采集与测量装置和快速 γ 射线成像单元等,在保证快速高精度测量和系统稳定性的基础上,将无人机机载放射性监测载荷的整体质量减少到 5 kg 以内。机载 γ 成像单元采用基于人工神经网络的编码孔径成像算法,提高了信噪比及定位精度,实现无人机短时间测量条件下的大视场、高分辨成像,实验证明只需两分钟即可对距离 1.2 米远的 ^{57}Co 放射源 ($5 \times 10^4 \text{ Bq}$) 进行成像,成像视场角可达到 $60^\circ \times 60^\circ$,角分辨率小于 4.5° 。海洋浮标放射性监测系统采用双 GM 管自动切换技术,实现剂量率测量冗余设计,扩展水体剂量率测量范围。放射性核素识别采用 SNIP、反卷积和神经网络等算法对低计数率能谱进行特征提取,结果显示原始能谱与 SNIP 处理能谱训练的 MLP 模型整体识别准确率分别为 89.96% 和 94.5%,该算法对核素特征峰起到了特征增强效果,能够有效解决海水中低活度、多种混合放射性核素测量的难题。本系统可用于核事故后环境应急监测及常规辐射环境预警监测,在核应急监测领域中有广阔的应用前景。

一、引言

核安全是国家安全的重要组成部分,随着核技术产业的快速发展,辐射事故的应急监测技术面临更多挑战。核应急监测是保障核安全的重要手段,在核电事故应急、丢失放射源搜寻、涉核企业生产

环境监控等方面发挥着重要作用。

近年来,人工智能、云计算等新兴技术及装备的快速发展对传统辐射监测技术带来了巨大的提升。基于无人机的辐射监测系统机动性好、应急响应快,但存在载重与续航限制。执行测量任务时,轻量化

机载伽马相机的设计会大大降低伽马射线成像的信噪比，而飞行测量带来的数据采集时间短、悬停振动等问题会进一步降低射线成像质量。基于海洋原位测量的海水放射性在线监测技术，是近年来出现的一种比较新的放射性监测技术。由于海洋环境的复杂性和海上监测活动的特殊性，简单地将实验室环境或陆地环境使用的商用放射性探测设备集成到海上平台，无法得到正确的监测结果。尤其核电厂放射性污水中含有复杂的放射性核素种类，这些放射性核素被大量海水稀释后活度浓度非常低，接近自然海洋环境本底，使用常规能谱分析技术难以进行放射性核素种类的精准鉴别。

本研究结合人工智能技术与无人机和海洋浮标研发了新一代的放射性监测装备。研制完成具有自主知识产权的“无人机机载放射性监测系统”软硬件，实现了剂量率精确测量、核素快速识别、放射性热点快速成像与定位等功能。应用基于人工神经网络的编码孔径成像方法，解决了将传统的放射性热点成像和定位技术直接应用于无人机造成成像质量和定位精度大幅下降的问题。提出了基于人工神经网络算法的海水中低活度、多种类混合放射性核素的精确鉴别技术，研制出新一代海洋

放射性污染在线监测预警装备。

二、核应急监测系统介绍

核事故应急用智能化放射性监测系统包含“无人机机载放射性监测装备”与“海洋放射性在线监测装备”。航测数据与海洋测量数据可实时传输至终端信息处理平台，用于核事故后环境应急监测及常规辐射环境预警监测。

（一）无人机机载放射性监测系统

机载放射性监测系统采用六旋翼载重平台，搭载小型高灵敏 γ 探测单元、快速 γ 射线成像单元、放射性气溶胶采集与测量装置、无线数据传输模块、GPS、光学相机等。整机采用模块化设计，监测载荷可根据测量任务任意搭配。整机外壳采用 3D 打印一体成型，内部由高强度碳纤维作为支撑结构，同时采用了避震设计，尽量减小飞行对探测系统造成的误差影响。系统控制采用嵌入式 ARM 低功耗芯片，整机功耗小于 20W，质量小于 5kg。



图 1 无人机监测装备示意图

(二) 海洋放射性在线监测系统

海洋放射性污染在线监测系统由浮标平台、高灵敏水下 γ 放射性测量装置、水面剂量率监测单元、气象监测单元和无线数据传输模块等组成,具有水下 γ 能谱测量、环境剂量率监测、快速核素识别、低下限活度浓度测量等多种功能。其中 γ 谱仪采用 3×3 英寸NaI(Tl)探测器,搭配基于STM32的高速数据采集卡,实现海洋 γ 能谱的实时快速测量。剂量率监测单元采用双GM管自动切换技术,实现剂量率测量冗余设计,扩展环境剂量率测量范围。传感器测量数据通过232/485协议传输至核心工控机,数据经打包处理后由4G模块通过网络传输至工作站,供科研人员进行分析。

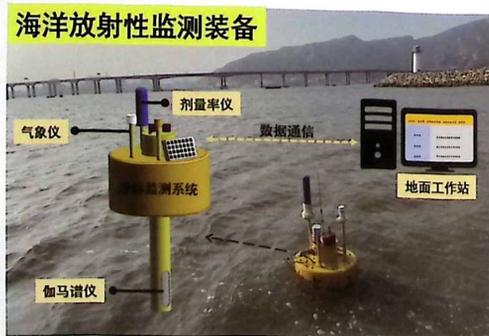


图2 海洋放射性在线监测装备示意图

三、机载成像算法

(一) 基于人工神经网络的编码孔径成像算法

编码孔径成像是将具有一定序列的码

板放置于探测器前方,射线通过编码孔板上的小孔后形成不同的图案,然后通过重建方法对所探测到射线的数据进行图像重建,进而准确定位放射源的位置。

针对核事故应急的需求,机载编码孔径伽马相机需要趋向于小型化、轻量化,因此如何在小型化的基础上保障相机关键性能参数成为了亟待解决的问题。本研究提出了基于反向传播神经网络(BPNN)的随机编码成像算法,该方法以随机编码为基础,编码阵列开孔率、大小等不受限制,可以在不改变探测器阵列大小的基础上提升相机视野。图像重建过程中,BPNN对模拟出的大量成像样本数据进行学习,将探测数据进行一维化后作为训练输入,射线入射方向所在位置作为标签来进行训练获得编码图像和放射源方位信息之间的对应关系,从而直接根据编码图像获取放射源方位信息,并反复调试网络参数以完成训练,最终利用训练好的网络完成实验。图3为将BPNN重建算法应用于成像的流程图。

(二) 算法性能测试实验设置

实验测试选用单像素大小为 $1.6\times 1.6\times 2\text{ mm}^3$ 的 32×32 阶钨(19.35 g/cm^3)编码准直器,探测器为像素大小为 $1.5\times 1.5\times 5\text{ mm}^3$ 的 16×16 阶碲锌镉探

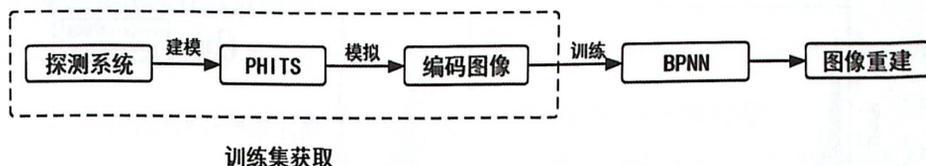


图3 将BPNN用于编码孔径图像重建的流程图

探测器阵列（像素间隔 1 mm），编码准直器元素与探测器元素在空间位置上相对应，探测器平面距编码板距离 D 为 26 mm。实验测试用源为 ^{57}Co (5×10^4 Bq)，点源放置于距探测器平面距离 L 为 1.2 m。编码孔径相机成像示意图如图 4 所示，其中 S 为编码板的长度， x 为探测器阵列的长度， d 为编码板单个像素的长度， θ 为视场角。

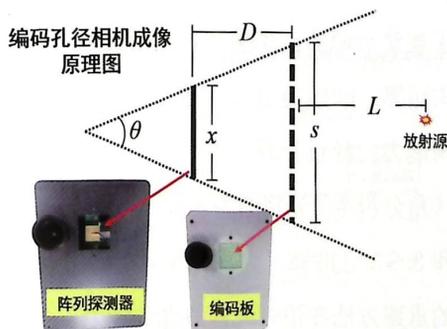


图4 编码孔径相机成像原理图

四、快速核素识别算法

（一）能谱预处理

多层感知机 (MLP) 为最基本的人工神经网络模型。单层感知机的输出层，作为下一个单层感知机的输入层，不断向前计

算，直至到网络最后一层，并记为多层感知机的输出层，输出层输出结果即为整个多层感知机的输出。已有工作表明，人工神经网络对核素识别有明显的提升，对能谱的特征处理能够进一步提高核素识别准确率。

海洋环境实测 γ 能谱中包含环境本底、康普顿散射等干扰，且放射性活度微弱，因此微弱能峰的信号优化处理是提高核素识别准确率的重要一环。在进行核素识别前需要对能谱全谱进行特征处理。SNIP 算法是常用的全谱本底扣除方法，具有计算简单、特征参数少的优势，且能够有效剔除康普顿散射对谱峰计数的影响。基于扣除本底后的离散信号特征，本研究提出利用高斯卷积滤波的方法对扣除能谱进行滤波处理。经滤波处理后的能谱，特征峰信息更为突出，噪声部分形成与原始谱相近的低能段峰和康普顿平台，因此可以经过多次循环迭代的方法对 γ 能谱进行处理。通过背景扣除和卷积的迭代计算可以将能谱向量稀疏化，剔除能谱无关计

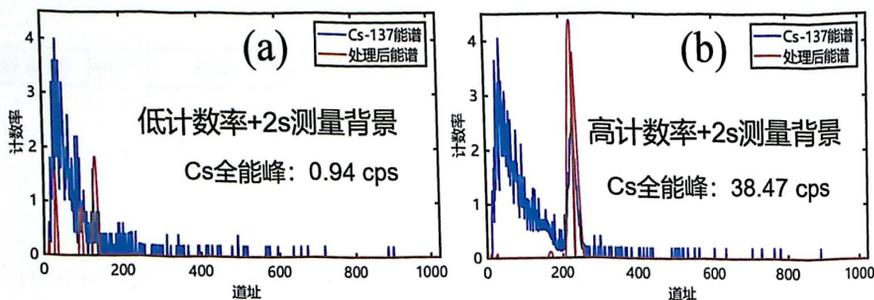


图5 算法处理前后的能谱对比

数信息，有利于下一步的能谱核素分析。

(二) 能谱特征稀疏化测试

为测试算法效果，选取不同测量时间的 ^{137}Cs 能谱作为原始样本，进行算法可行性分析测试。选择能谱中200至230道为 ^{137}Cs 特征峰感兴趣区域。算法能谱稀疏化效果与峰区计数率和测量时间有关，不同测量时间得到的(a)(b)能谱中 ^{137}Cs 特征峰峰区计数率分别为0.94和38.47 cps。结果表明，探测时间越长，能谱涨落和噪声干扰越小，能谱稀疏化结果越接近理想能谱，对所需识别特征峰的峰区计数要求越低。因此，该算法可以通过能谱向量稀疏化处理，保留有效能谱特征，增强特征峰在能谱中的计数占比，同时将非识别特征计数置零，从而抑制噪声和背景干扰，有利于提高核素识别准确率，可以用于海洋放射性核素识别任务中。

五、实验结论分析

(一) 编码孔径成像结果分析

根据算法性能测试实验设置的实验条件，进行了放射源的伽马成像实验。成像视野为方形，放射源置于视野中心位置。表1数据展示了相比于传统修正的均匀冗余阵列(MURA)方法，基于随机编码的编码孔径相机可以被构造具有更大视野，对于提高探测效率具有积极意义。图6展示了重建点源的点扩展函数，对比传统的相关运算，BPNN重建显现出了更好的噪声抑制能力，经过计算，点扩散函数的半高宽(角分辨率)分别约为 4.6° (相关运算)和 3.9° (BPNN)。图7展示了基于BPNN的重建方法在短时间内成像的能力。

实验证明，基于随机编码和BPNN解码的射线成像技术相比较传统方法有更优异的性能，编码阵列大小突破了传统MURA的限制，在不改变探测器体积的情况下扩大成像视野，实现了无人机短时间测量条件下的大视场、高分辨成像。

(二) 核素识别结果分析

实验选取 4 种放射源验证算法与神经网络结合核素识别效果, 分别为 ^{238}Pu 、 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{131}I 。选用原始能谱和经算法处理后能谱作为数据集, 样本容量都为 7000 个训练样本和 1000 个测试样本, 且样本均为 10s 内快速测量能谱。核素识别结果如表 2 所示。

由于 ^{238}Pu 的能量较小, 在能谱中与

低能本底发生重叠, 对于低计数 ^{238}Pu 能谱经算法处理后会导其信息丢失, 从而降低了识别准确率。而对于 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{131}I 三种放射源, 算法处理能谱训练对识别准确率有明显的提高, 表明算法对三种核素特征峰起到了特征增强效果。原始能谱与处理能谱训练的 MLP 模型整体识别准确率分别为 89.96% 和 94.5%。

六、结论

研制了基于无人机和海洋浮标的放射性监测装备, 结合人工智能技术解决了目前放射性监测装备存在的问题。提出的基于人工神经网络的编码孔径成像算法提高了信噪比, 实现了无人机短时间测量条件下的大视场、高分辨成像; 提出的基于人工神经网络的核素识别算法, 实现了对核素特征峰的特征增强效果, 有效解决了海水中低活度、多种混合放射性核素测量的难题。该系统在核应急监测领域中有广阔的应用前景。

表 1 不同编码算法比较

编码阵列	视场	角分辨率
25×25-MURA	15.4°×15.4°	4.6°
32×32-随机编码	60.0°×60.0°	3.85°

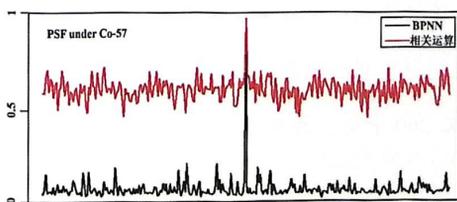


图 6 重建点源的点扩散函数

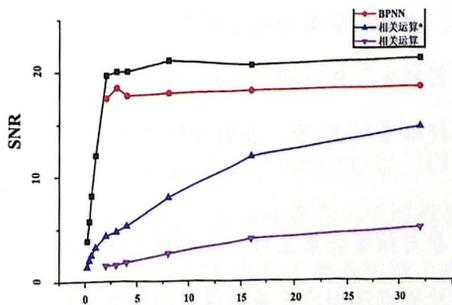


图 7 重建图像信噪比随时间变化趋势

表 2 核素识别结果

数据集	^{238}Pu	^{60}Co	^{137}Cs	^{131}I	准确率
原始能谱数据集	94.1%	85.8%	87.9%	92.1%	89.96%
算法处理能谱数据集	89.7%	98.1%	93.9%	96.1%	94.5%



作者简介

王泽宇, 博士研究生, 主要从事面向航空航天、环境监测、核应急、医学等领域的“辐射探测方法与核仪器研发”相关研究工作。参与国家级、省部级科研项目 10 余项; 发表 SCI、EI 等学术论文 10 余篇, 授权发明专利 9 项。科研成果获国防科技进步奖二等奖 1 项, 中国辐射防护学会科学技术奖一等奖 2 项, 南京航空航天大学科学技术奖一等奖 2 项等。

梁大戩, 博士研究生, 主要从事辐射探测方法与核仪器研发工作, 以及深度学习方法在能谱分析中的应用研究。在工程应用方面, 开发集成先进能谱分析算法, 针对多种核辐射监测系统, 开发嵌入式程序与应用软件。发表 SCI、EI 学术论文 10 余篇; 申请发明专利 8 项; 获国防科学进步奖二等奖、中国辐射防护学会科学技术奖一等奖等。

汤晓斌, 南京航空航天大学教授、博导, 核科学与技术学科带头人。现任工信部先进核技术与辐射防护重点实验室主任等职。兼任中国核工业教育学会副理事长等。研究方向聚焦核技术应用与防护, 包括空间核能源、材料辐照效应、辐射探测等。主持国家级及省部级项目 80 余项, 发表 SCI 论文 260 余篇, 授权专利 80 余项, 获国防科技进步一等奖等多项奖励。

龚频, 副教授, 现任南京航空航天大学核科学与技术系副主任, 中国核工业教育学会产教融合分会委员, 江苏省核学会理事等。主要从事面向航空航天、环境监测、核应急、医学等领域的“辐射探测方法与核仪器研发”相关研究工作。主持国家级及省部级项目 30 余项, 发表 SCI 论文 30 余篇, 授权专利 23 项, 获国防科技进步二等奖等多项奖励。

王鹏, 副教授, 现任南京理工大学辐射防护与核安全系主任, 主要研究方向围绕环境辐射探测技术、污染检测技术、核素富集处置以及相应设备的设计与研发等研究工作。先后主持国家自然科学基金、中国博士后面、江苏省环保科研基金项目 6 项。获得中国辐射防护学会科学技术一等奖, 国防科技进步奖二等奖。在 Nature Communications, NIMA 等期刊发表 SCI 论文 20 余篇。