

一、 成果名称

压埋生命体目标雷达式精准探测与定位技术研究及应用

二、 成果简介

第一完成人张杨为空军军医大学军事生物医学工程学系副教授，空军军医大学军事医学创新中心研究员，军事医学科研特区流动 PI，硕士研究生导师，美国得克萨斯理工大学计算机科学系访问学者（2013.1-2014.1），空军高层科技人才（2020），军队优秀专业技术人才岗位津贴获得者（2021），全军卫生装备学专业委员会分会委员，四次获得空军军医大学军事医学人才扶持基金资助（2011，2015，2019，2022）。

研究团队长期从事生命探测雷达和压埋生命体目标雷达式精准探测与定位技术研究，生命探测雷达是一种融合雷达、生物医学工程、电子信息等技术的新型雷达，可非接触、穿透厚废墟等介质检测人体呼吸、心动、脉搏等生命信号的新型雷达，主要用于地震、矿难、塌方、雪崩等灾害发生后，失踪压埋人员的探测定位。项目组在该研究领域相继获得国家重点研发计划及国家科技支撑计划课题 2 项、国家自然科学基金面上及青年项目 5 项，陕西省重点研发计划、陕西省自然科学基金基础研究计划课

题等 7 项；围绕压埋人员精准探测识别和定位在国际权威期刊 IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing、IEEE Microwave Magazine、IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques、Remote Sensing、Measurement、Sensors and Actuators A: Physical 等发表 SCI 论文 25 篇，其中一区或顶刊 4 篇。多次在国际和全国学术大会作受邀报告。2019 年，第一完成人受著名杂志 IEEE Microwave Magazine 邀请撰写了名为“Bioradar Technology: Recent Research and Advancements”的综述，阐述了生物雷达的概念、原理、分类、应用及未来发展趋势，重点介绍了本项目组在生命探测雷达领域所做的工作和取得的最新研究进展，受到了客座编辑 Roberto Gómez-García 和 José-María Muñoz-Ferreras 两位教授的高度评价。研究成果获得授权国家发明专利 15 项、国际发明专利 3 项（美国），登记软件著作权 7 项，获批中国消防协会行业标准 1 项。主要完成人取得的学术成果为地震等灾后救援领域中的压埋伤员精准探测、识别和定位技术进步及装备研制做出重要贡献，分别解决了多目标一维距离向辨识、二维定位精准探测问题、人与动物智能区分和伤员生命状态识别问题，为精准探测与定位提供了更准确和丰富的信息，可用于指导灾后科学救援、精准救援。相关技术及实物成果在地震、消防、部队医院等多家机构进行了示范应用，取得了良好的学术价值和社会效益。主要学术创新点如下：

1. 提出了基于相关系数谱图的多目标一维距离向辨识技术，有效提高了单通道雷达多目标一维距离向目标识别的准确率，解决了多目标探测易漏判问题。

针对单通道生命探测雷达对多个人体目标探测识别时容易漏判的问题，根据同一人体目标自身呼吸信号相关性高而不同目标之间、目标与噪声之间信号相关性低的特点，提出了一种在距离向上对不同距离的慢时间信号分别求取相关系数，再利用得到的相关系数谱图结合图像处理技术实现多个人体目标的距离向辨识和一维测距。相比于传统的基于能量谱图或信息熵谱图的多目标距离向辨识方法，该技术有效提高了单通道雷达多目标一维距离向目标识别的准确率，降低了漏判率，为后续基于多通道生命探测雷达平台的多目标二维定位算法的性能提升作出贡献。部分研究结果发表在《IEEE T GEOSCI REMOTE》(2020)，《SENSORS》(2017, 2016)，《IEEE GEOSCI REMOTE S》(2015)，获发明专利 5 项，取得代表性知识产权 4 (2018)。

2. 提出了一种基于生物特征识别和目标匹配的压埋多目标二维定位技术，解决了压埋人员多目标定位中的“重影”和“散焦”的难题，大幅提高了多目标二维定位精度。

针对多目标定位中“重影”干扰和难以聚焦的问题，项目组基于 SIMO(单输入多输出)雷达平台，

在多信息生物特征识别的基础上，提出了一种先通过截尾水平检测器-恒虚警率（CMLD-CFAR）方法在通道内实现目标的粗检测；再通过求取通道间各目标信号的相关系数来精细确定真实目标数并实现目标匹配；最后采用反向投影（BP）方法实现多目标的二维定位。该方法提高了定位的准确性和自动化程度，同时降低了雷达系统的成本和复杂性，已成功应用于相关的二维定位生命探测雷达装备中。在此基础上，2016年项目组研制出世界首台主动便携式多自由度折叠臂的 II-型多目标生命探测雷达，实现了穿透复杂废墟条件下的多方位、多目标探测和定位，且具备意识淡漠人员的探测能力，相关技术及装备提升了对深埋人员探测识别的准确性和可靠性，有效提高搜救效率、缩短搜救时间。多目标生命探测雷达的研制成功标志着我国生命探测雷达研究在关键技术和实物装备方面都迈上了新台阶，也标志着我国在该领域的研究达到了国际领先水平。IEEE Fellow、IEEE T MICROW THEORY 杂志前主编 Jenshan Lin 教授来我们实验室访问期间参观了我们研制的多目标雷达后评价“这是生命探测雷达领域最早的多目标探测定位装备”。部分研究结果发表在《SENSOR ACTUAT A-PHYS》（2021），《IEEE T MICROW THEORY》（2021），《MEASUREMENT》（2022），获批发明专利 4 项，取得代表性知识产权 1（国际专利：美国，2022）和 3（2020）。

3. 提出了基于人工智能（机器学习、基于注意力机制的神经网络）的系列人与动物区分识别技术，有效降低了压埋人员探测识别中的误判率，有助于科学精准施救，可有效节约灾后救援资源。

针对灾后救援中，废墟压埋的生命体有可能是家禽、家畜或宠物的问题，项目组进行了穿透条件下的人与动物区分研究。提出了一种基于多生物特征-支持向量机的人与动物区分方法，先提取能量、频率、小波熵和相关系数等 19 个判别特征，再通过递归特征消除算法对特征进行排序，筛选出得分靠前的八个特征构建最优支持向量机（SVM）模型。项目组还提出了一种新的基于超宽带雷达的多尺度残差注意力网络，分析了慢时间维度对分类性能的影响，通过结合两种尺寸的剩余注意力学习机制产生了最佳的输入大小，实现了在穿透条件下区分静止人类、狗、猫、兔子和无目标数据的五分类目标，与三种最先进的神经网络相比，该方法的性能得到提升。以上系列人与动物区分方法可有效区分人与猪、犬等主要家畜和鸡、鸭等主要家禽，降低了压埋人员探测识别中的动物干扰引起的误判问题。部分研究结果发表在《REMOTE SENS》（2019），《EURASIP J ADV SIG PR》（2021），获批发明专利 1 项，取得代表性知识产权 2（国际专利：美国，2022）。

4. 进行了挤压、受伤、惊吓、禁水食等特殊情况下的压埋目标检测和状态识别技术研究，取得

了突破，为复杂灾害现场受困伤员的状态识别提供理论基础。

对禁水禁食、受伤失血、惊吓恐惧、挤压密闭等四种典型受困状态下的生命体征变化规律进行了探索研究，首次发现了受困目标在耗竭期内生命探测雷达监测的呼吸波形从近似正弦波（正常期）变为“M”波的变化规律，并通过心肺等组织的病理切片染色研究揭示了“M”波出现背后的病理学原因，“M”波的出现可作为受困伤员从耗竭期向濒死期过渡的标志特征。项目组采用人体仿真组织、基于“鼓式”舵机结构的生命体征模拟技术等研制出首台可模拟不同生命状态下呼吸、心跳的受困人员生命体征模拟系统（受国家重点研发计划课题“受困人员生命信号特征研究与生命体征模拟系统研制”资助，2018YFC0810201）。相关技术及实物成果在军队医院、地震、消防等部门 9 家单位进行了示范应用，展现了优异性能，受到了应用方好评，取得了良好的军事社会效益。相关研究成果揭示了生命体征变化规律医学与电磁学信号的映射关系及映射机理，为复杂灾害现场受困伤员的快速寻找和状态识别提供理论基础，为压埋伤员伤情研判提供技术支撑，为科学制定救援优先策略并提前准备急救药械支持提供指导，使灾后救援现场“搜—救—治”链条更加科学、精准，可挽救更多生命。部分研究结果发表在《IEEE T MICROW THEORY》(2021),《FRONT CARDIOVASC MED》(2022),《BIOENGINEERING》

(2023), 获批行业标准 1 项, 获得登记软件著作权 5 项, 获批发明专利 3 项。

三、完成单位

中国人民解放军空军军医大学

四、完成人

姓 名	排 名
张 杨	1
王健琪	2
梁福来	3
吕 昊	4
祁富贵	5
于 霄	6
马洋洋	7
薛慧君	8
焦 腾	9

五、完成人合作关系情况

序号	合作方式	合作关系人及排名	合作时间	合作成果
1	课题完成	张 杨/1	2015-2023	所有成果完成人
2	课题指导与合作	王健琪/2	2015-2023	IEEE MICROW MAG, 2019; IEEE TGRS, 2015; US11435470B2, 2022; US11525889B2, 2022;
3	专利、论文	梁福来/3	2015-2023	MEASUREMENT, 2022; 201811171791.9, 2020; 201610460405.2, 2018
4	专 利	吕 昊/4	2015-2023	201811231260.4, 2021; 201610876799.X, 2019; 201310370706.2, 2017
5	论文合著	祁富贵/5	2015-2023	IEEE TGRS, 2020; IEEE TMTT 2021
6	论文合著	于 霄/6	2015-2023	PROG ELECTROMAGN RES M, 2021; INT J REMOTE SENS, 2015
7	论文合著	马洋洋/7	2017-2021	REMOTE SENS, 2019; EURASIP J ADV SIG PR, 2021
8	论文合著	薛慧君/8	2015-2023	SENSORS, 2016; MICROW OPT TECHN LET, 2019
9	专 利	焦 腾/9	2015-2023	201210496275.X, 2015

六、 主要知识产权（标准、规范）目录

序号	知识产权类别	知识产权名称	国家（地区）	授权号（批准号）	授权日期	证书编号	权利人	发明人
1	国际发明专利	Multi-target Life Detection Method based on Radar Signal and Detection Radar	美国	US11435470B2	2022. 09. 06	US11435470B2	中国人民解放军空军军医大学	张杨、王健琪、梁福来、吕昊、张自启、李钊、薛慧君
2	国际发明专利	Non-contact Method for Detecting and Distinguishing Human and Animal based on IR-UWB Bio-radar Signal	美国	US11525889B2	2022. 12. 13	US11525889B2	中国人民解放军空军军医大学	张杨、王健琪、梁福来、李钊、吕昊、张自启、于霄、薛慧君、焦腾
3	发明专利	一种基于雷达信号的多目标生命探测方法及探测雷达	中国	ZL201811194565. 2	2020. 06. 09	3832658	中国人民解放军第四军医大学	张杨，王健琪，张自启，吕昊，薛慧君，祁富贵
4	发明专利	一种 UWB 冲击生物雷达多人目标距离向分离辨识方法	中国	ZL201610339004. 1	2018. 03. 20	2850412	中国人民解放军第四军医大学	张杨，王健琪，张洋，吕昊，于霄，焦腾，李钊，梁福来，路国华，张华，薛慧君

七、 代表性论文专著目录

序号	论文专著名称	刊名	发表时间	年卷页码（xx 年 xx 卷 xx 页）	作者	通讯作者（含共同作者）	第一作者（含共同作者）	国内作者（中文名）	他引总次数	检索数据库	参与人（成果完成人）	知识产权是否归国内所有
1	Bioradar Technology: Recent Research and Advancements	IEEE Microwave Magazine	2019. 08	2019 年 20 (8) 卷 58-73 页	Yang Zhang, Fugui Qi, Hao Lv, Fulai Liang,	Jianqi Wang	Yang Zhang	张杨，祁富贵，吕昊，梁福来，王健琪	42	Web of Science	张杨 王健琪	是

					Jianqi Wang							
2	An Interference Suppression Technique for Life Detection Using 5.75- and 35-GHz Dual-Frequency Continuous-Wave Radar	IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters	2015.03	2015 年 12(3)卷 482-486 页	Yang Zhang, Teng Jiao, Hao Lv, Sheng Li, Changzhi Li, Guohua Lu, Xiao Yu, Zhao Li, Jianqi Wang	Yang Zhang	Yang Zhang	张杨, 焦腾, 吕昊, 李盛, 李长志, 路国华, 于霄, 李钊, 王健琪	20	Web of Science	张杨	是
3	A Coarse-to-Fine Detection and Localization Method for Multiple Human Subjects under Through-wall Condition Using a New Telescopic SIMO UWB Radar	Sensors and Actuators A: Physical	2021.12	2021 年 332 卷 1-12 页	Yang Zhang, Yangyang Ma, Xiao Yu, Pengfei Wang1, Hao Lv1, Fulai Liang1, Zhao Lil, Jianqi Wang	Jianqi Wang	Yang Zhang, Yangyang Ma, Xiao Yu	张杨, 马洋洋, 于霄, 王鹏飞, 吕昊, 梁福来, 李钊, 王健琪	7	Web of Science	张杨 王健琪	是
4	An Accurate Method to Distinguish Between Stationary Human and Dog targets Under Through-Wall Condition Using UWB Radar	Remote Sensing	2019.11	2019 年 11(21)卷 1-21 页	Yangyang Ma, Fulai Liang, Pengfei Wang, Hao Lv, Xiao Yu, Yang Zhang* and Jianqi Wang	Jianqi Wang Yang Zhang	Yangyang Ma	马洋洋, 梁福来, 王鹏飞, 吕昊, 于霄, 张杨, 王健琪	16	Web of Science	张杨 马洋洋 王健琪	是
5	Through-the-wall High-dimensional Imaging of Human	Measurement	2022.05	2022 年 195 卷	Fulai Liang, Hao Lou, Yang	Jianqi Wang Zhao Li	Fulai Liang	梁福来, 娄昊, 张杨, 吕昊, 于霄,	7	Web of Science	梁福来 王健琪	是

	Vital Signs by Combining Multiple Enhancement Algorithms Using Portable LFMCW-MIMO Radar			1-15 页	Zhang, Hao Lv, Xiao Yu, Qiang An, Zhao Li, Jianqi Wang			安强, 李钊, 王健琪				
6	Vital Sign Detection in Any Orientation Using a Distributed Radar Network via Modified Independent Component Analysis	IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques	2021.11	2021 年 69(11)卷 4774-4790 页	Wei Ren, Fugui Qi, Farnaz Foroughian, Tsotne Kvelashvili, Quanhua Liu, Ozlem Kilic, Teng Long, Aly E. Fathy	Fugui Qi	Wei Ren	任伟, 祁富贵, 刘泉华, 龙腾	13	Web of Science	祁富贵	是