

基于超宽带雷达的穿墙生命体征信号检测研究综述

王 月 齐庆杰 孙立峰 程会锋 张婧雯 刘英杰 马天放 仙文豪
(煤炭科学研究总院有限公司 北京 100013)

摘 要:呼吸与心跳是重要的生命体征信号,可以表示生命现象是否存在及其相关状态。准确获取倒塌掩埋空间与建筑物内部空间等复杂场景中的生命信息,在应急救援、侦查反恐等过程中发挥着巨大作用。超宽带雷达具有较强的穿透性能与抗干扰性能,能够穿透墙体等障碍物实现人体目标生命体征信号检测,已成为生命探测领域的研究热点。总结了超宽带雷达生命探测装备的国内外发展现状,包括主要研究团队和典型产品特征。梳理了基于超宽带雷达的穿墙生命体征信号检测技术整体框架,围绕回波信号去噪、回波信号增强、回波选择与距离定位以及生命信号分离与重构4部分内容进行了详细介绍与方法总结,并分析了深度学习在生命体征信号检测中的应用现状。最后,从产品与技术角度出发,对未来研究方向进行了展望。

关键词:超宽带雷达;生命探测技术与装备;雷达回波信号处理;生命体征信号提取

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Advances on through-wall vital sign signal detection based on ultra-wide band radar

Wang Yue Qi Qingjie Sun Lifeng Cheng Huifeng Zhang Jingwen Liu Yingjie Ma Tianfang Xian Wenhao
(China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: Breath and heartbeat are important vital signs, which can indicate the existence of living body and related states. Accurately acquiring life information in collapsed space and building interior plays a huge role in emergency rescue and counter-terrorism. Ultra-wide band radar has strong penetration and anti-interference performance, and can penetrate walls to detect human vital signs, which has become a research hotspot in the field of life detection. This paper summarizes the current development status of ultra-wide band radar life detection equipment at home and abroad, including the main research teams and their typical product characteristics. The overall framework of through-wall vital sign signal detection technology based on ultra-wide band radar is sorted out, and the four parts of echo signal denoising, echo signal enhancement, echo selection and distance positioning, and vital signal separation and reconstruction are introduced in detail, and the application status of deep learning in vital sign signal detection is analyzed. Finally, from the perspective of products and technology, future research directions are prospected.

Keywords: UWB; life detection technology and equipment; radar echo signal processing; vital signal extraction

0 引 言

近年来,自然因素引起的地震、滑坡灾害与人为因素导致的建筑物坍塌事故频繁发生,影响公共安全与社会稳定的暴力恐怖事件在世界范围内也时有发生,严重威胁着人民的生命财产安全与生产生活秩序。在应急救援与侦查反恐工作过程中,及时明确被困人员、人质与恐怖分子等目标的生命状态,可以有效提高搜索和救援效率,具有重要的现实意义。

呼吸与心跳是人体的两大生命体征,是评估生命活动存在与否及其质量的重要指标。穿墙生命体征信号检测是指借助于外来能量,穿透混凝土墙、砖墙、木板墙、石板墙等常见的墙体类型,同时结合多种数据分析方法,对墙后人体目标的呼吸信号与心跳信号进行自动检测的研究问题。人体结构复杂,呼吸与心跳两种生命体征信号的特征、检测方式以及处理技术,都不同于一般信号^[1]。穿墙生命体征信号检测更加面临着信号微弱、墙体影响以及复杂噪声干扰等诸多挑战。

目前,光学、声学、气味、雷达等检测技术,能够不同程度地实现生命信息搜索、探测、提取,但各自存在不足之处,在复杂场景的穿墙生命体征信号检测中表现并不突出^[1]。

超宽带(ultra wide band,UWB)雷达是指发射信号的带宽与中心频率之比 >0.25 的雷达。超宽带雷达占据了相对极宽的频率范围,距离分辨率可以达到厘米级,同时兼顾低频特点,具有较强的穿透性能,可以穿透森林、地面、墙体等非金属介质,另外还具备功耗低、抗干扰能力强、目标识别能力强等优点。由于其优异性能,基于超宽带雷达实现穿墙生命体征信号检测已成为目前的主流方法,在生命探测等领域中获得广泛研究,并形成了成熟的生命探测产品。相关技术与产品的研究和应用,使得准确获取倒塌掩埋空间与建筑物内部空间等复杂场景中的生命信息成为可能。

1 超宽带雷达生命探测装备

超宽带雷达生命探测装备发射窄电磁脉冲,通过检测回波中的呼吸、心跳信号来确认生命(是否)存在,是基于超宽带雷达的穿墙生命体征信号检测技术最具代表性的应用,主要产品有生命探测仪、穿墙雷达等,穿透厚度、探测距离是重要的性能指标。

1.1 国外发展现状

1994年斯坦福尼亚大学首次将超宽带雷达技术应用于生命探测领域^[2]。美国 Time Domain 公司在超宽带产品研发居于领先地位,于1998~2001年成功研制了 RadarVision1000、RadarVision2000 超宽带雷达,后一型号当混凝土墙体厚度为20 cm时,检测距离为20 m^[3]。此后,美国 GSSI 公司 LifeLocator 系列、英国剑桥咨询公司 Prism

系列、俄罗斯 Geotech 公司 RO 系列等产品陆续出现。以色列 Camero-Tech 公司 XaverTM 系列探测距离超过100 m,其最新产品 XaverTM-1000 除远距离探测、3D 穿墙成像等功能外,配备了基于 AI 算法的实时目标跟踪系统,可实现探测目标及其状态特征的智能识别。

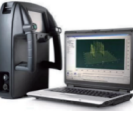
1.2 国内发展现状

2004年第四军医大学王健琪团队研制出了我国首台雷达式生命探测仪,探测距离50 m,可以穿透2 m厚砖墙检测人体呼吸信号^[4]。该团队提出了“生物雷达”概念,在基于生物雷达的非接触式生命探测领域完成多项工作。梁步阁等^[5]推动了民用微功率超宽带雷达在生命探测装备研发中的应用。金添等^[6]侧重于超宽带雷达穿透成像方向,提出了超宽带雷达穿透非金属介质成像过程中的环境建模及参数估计技术,并且针对人体目标探测、人体行为识别等问题开展了方法研究。Fang 团队^[7]在超宽带雷达回波信号处理与生命体征信号检测方面进行了多种算法的尝试和探索。电子科技大学相关研究则集中于超宽带雷达信号源、天线等硬件部分的设计与研制^[8-9]。

国内企业方面,西安必肯科技发展有限公司、湖南华诺星空电子技术有限公司、北京朗森基科技发展有限公司与湖南正申科技有限公司等成功研制了多款穿墙雷达产品,已广泛应用于消防、煤矿等应急救援场景。

国内外超宽带雷达生命探测装备如表1所示,可以看出,现有生命探测仪与穿墙雷达多采用脉冲波体制,穿透性能在10~50 cm(砖墙/混凝土)不等,探测距离在10~100 m不等,多数为二维成像,个别穿墙雷达具有三维成像功能。国产产品的探测距离、穿透性能等多项技术指标不低于甚至高于国外同类产品。

表1 典型超宽带雷达生命探测装备
Table 1 Some typical UWB radar life detection equipment

型号	产地	性能指标	外观
Radar Vision 2000 雷达生命探测仪	美国 Time Domain Corpora- tion	二维成像,显示目标定位,中心频率 2.4 GHz,带宽 0.7 GHz。混凝土墙体厚度 20 cm 时,探测距离 >20 m。	
LifeLocator 3+ 雷达生命探测仪	美国 GSSI	工作频率 270 MHz,脉冲频率范围 100~700 MHz,探测角度 $\pm 60^\circ$,可穿透常见墙体材料与建筑瓦砾,可探测 6 m 内的呼吸活动以及 10 m 内的移动目标,可持续工作时间 4 h。	
Prism 200 穿墙雷达	英国 Cambridge Consultants	三维成像,显示目标三维信息,频率范围 1.6~2.2 GHz,水平方向探测角度 $\pm 60^\circ$,垂直方向探测角度 $\pm 45^\circ$,分辨率 30 cm,穿透门、砖墙,石板以及混凝土墙体后探测范围可达 20 m。	
RO-400 GPR- Detector 穿墙雷达	俄罗斯 Geotech Company	中心频率 400 MHz,分辨率 15 cm,最大探测深度(土壤) 6 m,混凝土墙体厚度 60 cm 时,可探测 7 m 以内移动目标,砖墙厚度 35 cm 时,可探测 12 m 以内移动目标,可持续工作时间 4 h。	

续表

型号	产地	性能指标	外观
Xaver TM -800 穿墙成像系统	以色列 Camero-Tech Ltd	三维成像,显示目标三维立体动态信息,频率范围 3~10 GHz,探测角度±40°,探测距离 4/8/20 m 三种模式,分辨率 3 cm,8 m 模式垂直距离向分辨率 30 cm,可显示 3D、2D、1.5D 视图,可持续工作时间 2 h。	
SJ-6000+ 生命探测雷达	中国 西安必肯科技发展有限公司	中心频率 400 MHz,探测角度±60°,最大探测水平面积 5 200 m ² ,最大探测锥体体积 41 000 m ³ ,穿透 42 cm 砖墙,可探测 18 m 内静止生命体呼吸信号及 27 m 内运动生命体呼吸信号,定位精度厘米级,可持续工作 10 h。	
DN-IV 雷达生命探测仪	中国 湖南华诺星空电子技术有限公司	二维成像,MIMO 架构超宽带雷达,中心频率 400 MHz,探测角度±60°,最大探测水平面积 8 400 m ² ,最大探测锥体体积 84 000 m ³ ,穿透 50 cm 砖墙后,可探测到 25 m 内静止目标及 30 m 内运动目标,探测精度±10 cm。	
LSJ-M PLUS 穿墙雷达生命探测仪	中国 北京朗森基科技发展有限公司	二维成像,频率范围 1~3.5 GHz,水平方向探测角度±65°,垂直方向探测角度±50°,穿透 50 cm 砖墙后,可探测 20 m 内有生目标,分辨率 50 cm,定位精度 10 cm,可持续工作时间 8 h。	
LDR R400 二维雷达生命探测定位仪	中国 湖南正申科技有限公司	二维成像,MIMO 架构超宽带雷达,频率范围 100~2 500 MHz,探测角度±60°。	

2 超宽带雷达穿墙生命体征信号检测原理

如图 1 所示,人在呼吸心跳时带动胸廓起伏,进行周期性缓慢运动,是生命体征的可靠体现^[10]。人体具有高反射率,超宽带雷达发射脉冲穿透墙体遇到人体后被反射产生回波^[11-12],在一段时间后被天线接收。在此过程中,假设呼吸、心跳各自引起的胸廓位移与时间关系均符合正弦函数^[13],呼吸和心跳引起的胸廓运动导致的距离变化可表示为^[14]:

$$d(t) = d_0 + d_r + d_h = d_0 + A_r \sin(2\pi f_r t) \tag{1}$$

式中: d_0 为人体目标胸腔与接收天线的初始距离; d_r 表示

呼吸对距离的影响; d_h 表示心跳对距离的影响; A_r 和 A_h 分别为呼吸和心跳位移振幅; f_r 和 f_h 分别为呼吸和心跳频率。

假设检测区域中,除人体呼吸、心跳造成的运动外,均为静止目标,则超宽带雷达脉冲信号造成的响应可以表示为该区域中静态物体产生的静态信号响应与人体呼吸、心跳运动产生的动态信号响应的叠加:

$$h(t, \tau) = \sum_i \alpha_i \delta(\tau - \tau_i) + \alpha_d \delta(\tau - \tau_d(t)) \tag{2}$$

$$\tau_d(t) = \frac{2d(t)}{c} = \tau_0 + \tau_r \sin(2\pi f_r t) + \tau_h \sin(2\pi f_h t) \tag{3}$$

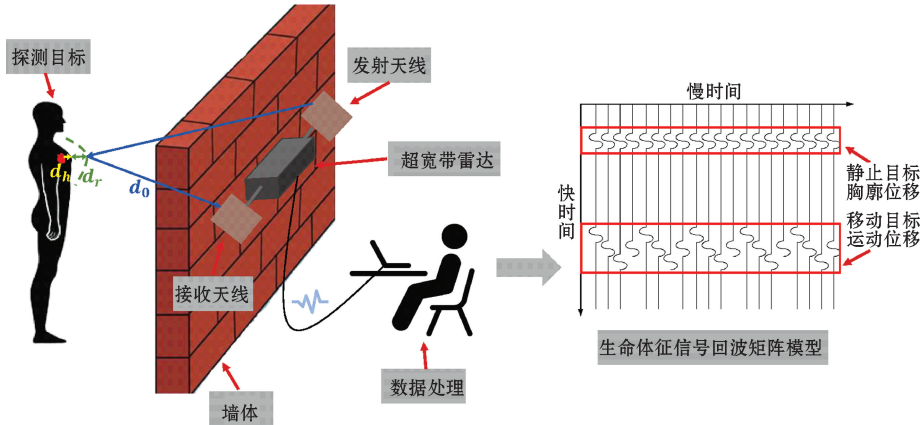


图 1 基于超宽带雷达的穿墙生命体征信号检测原理

Fig. 1 The principle of through-wall vital sign detection based on UWB radar

式中: α_d 为动态响应的幅值; τ_i 为静态的时滞; $\tau_d(t)$ 为动态响应的时滞。由式(3)可以看出, 人体呼吸、心跳运动对回波信号起到了调制作用, 导致回波信号出现时延的位置呈一定周期性变化。因此, 回波信号可以表示为发射脉冲信号与响应函数的卷积:

$$r(t, \tau) = p(t) \cdot h(t, \tau) = \sum_i \alpha_i p(\tau - \tau_i) + \alpha_d p(\tau - \tau_d(t)) \quad (4)$$

式中: $p(t)$ 为发射脉冲信号, t 表示多个脉冲的累积时间; τ 表示发射每个脉冲的采样时间。假设 T_s 为脉冲重复间隔时间, 当 $t = mT_s$ 时, 对接收信号进行采样, 可表示为:

$$r(mT_s, \tau) = \sum_i \alpha_i p(\tau - \tau_i) + \alpha_d p(\tau - \tau_d(mT_s)) \quad (5)$$

将该信号存储为 M 个离散时间序列, 存储于大小为 $N \times M$ 的二维矩阵中, 构成超宽带雷达回波数据矩阵 $\mathbf{R}$, 可以表示为:

$$\mathbf{R}_{N \times M} = r[n, m] = \sum_i \alpha_i p(n\delta_\tau - \tau_i) + \alpha_d p(n\delta_\tau - \tau_d(mT_s)) = c[n] + h[n, m] \quad (6)$$

式中: T_s 可以理解为慢时间方向上的采样间隔; δ_τ 为快时间方向上的采样间隔; m 为慢时间采样数; n 为快时间

采样数; $c[n]$ 为静止物体的回波信号分量; $h[n, m]$ 为人体呼吸与心跳生命体征信号。

根据上述推导, 理想情况下静止人体目标与移动人体目标的超宽带雷达回波矩阵模型如图1所示, 可以看出人体呼吸与心跳造成了回波信号的周期性变化。因此, 可以通过提取回波信号中的有效信息, 判断是否存在周期性变化特征, 进而实现生命体征信号检测的目的。

3 基于超宽带雷达的穿墙生命体征信号检测技术

在实际应用中回波信号不可避免的包括多种干扰杂波, 现实场景中的回波矩阵可以表示为:

$$r[n, m] = h[n, m] + c[n] + \omega[n, m] + d[m] + l[n, m] \quad (7)$$

式中: $h[n, m]$ 为待检测的生命体征; $c[n]$ 为静态背景杂波; $\omega[n, m]$ 为系统引起的白噪声; $d[m]$ 为快时直流分量; $l[n, m]$ 为振幅不稳定导致的线性趋势。因此, 通过回波信号处理过程, 去除多种杂波干扰并实现呼吸与心跳信号的准确提取, 是穿墙生命体征信号检测技术的关键。基于超宽带雷达的穿墙生命体征信号检测流程如图2所示。

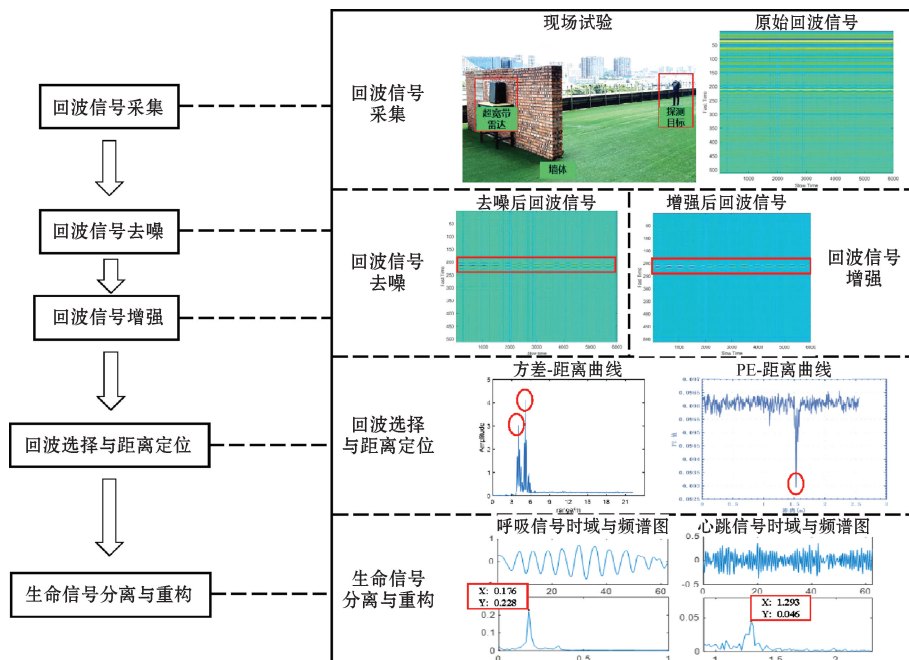


图2 基于超宽带雷达的穿墙生命体征信号检测流程

Fig. 2 The flowchart of through-wall vital sign signal detection processing

3.1 回波信号去噪

由式(7)可知, 穿墙后的实际回波信号具有较强的非平稳性, 由于在采集过程中易受到外界因素干扰, 回波信号同时也具有一定的不确定性。为实现后续呼吸、心跳等微弱生命体征信号的检测, 首先需要在保留有效信息的前

提下, 从回波信号中去除干扰杂波, 提高信噪比。

传统的雷达信号去噪方法包括脉冲相消法 (pulse cancelling)^[15] 与时间均值减法 (time mean subtraction)^[16] 两种, 基于背景杂波 $c[n]$ 大多源自人体四肢躯干与其他静止物体的多路径反射, 在快时间方向上几乎不变的特

点,前者将相邻时刻雷达接收到的信号相减去除杂波,后者通过减去不同时刻接收信号的均值来消除杂波。两种方法对静态物体产生的背景杂波效果较好^[17-18],在复杂场景下或待检测信号比较微弱时效果不理想。背景减法(background subtraction)是通过不同方法估计背景信号,从雷达数据中移除估计背景的技术^[19],核心是如何实现背景信号的准确实时估计,需要的计算量较大,在实际应用中对存储容量与处理能力要求较高。其中,累计平均背景对消法(cumulative average background cancellation)^[20]、指数对消法(exponentially weighted cancellation)^[21]、基于自适应最小均方(least mean square)算法的背景相消方法^[22]、背景矩阵减法^[23]等应用较广泛。对回波信号进行分解重构,去除其中的非主要部分是实现杂波抑制的另一种思路,主要方法包括奇异值分解(singular value decomposition, SVD)^[24-26]、主成分分析(principal component analysis, PCA)^[27-28]、经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)^[29-30]等。另外,围绕一些特殊的杂波分量的去除方法也存在相关研究。Nezirovic等^[32-33]提出了线性趋势减法(linear trend subtraction, LTS),用于解决振幅不稳定导致的线性趋势问题。Li等^[34]利用自适应杂波消除算法,实现了人体目标附近墙

壁或瓦砾反射的类呼吸杂波去除。梁福来等^[35]和王昭昶等^[36]分别针对时间抖动杂波与机械振动干扰杂波进行分析并提出了对应的抑制方法。

3.2 回波信号增强

呼吸与心跳引起的胸部振动幅度分别为10~20 mm、0.3~0.7 mm,在雷达回波信号中表现为频率分布范围在0.2~0.8 Hz、1~2.5 Hz的微弱信号^[37],在穿墙场景下人体目标的反射信号更弱,在多目标场景中,远距离目标的反射信号几乎被淹没。因此,穿墙生命体征信号检测流程中需要将信号增强纳入,提高信号幅值,突出信号特征。

雷达信号处理过程中普遍采用的是基于时变增益的增强方法,如式(8)所示。

$$r_E(\tau) = r(\tau) \cdot \omega(\tau) \tag{8}$$

式中: $r_E(\tau)$ 为增强后信号; $r(\tau)$ 为原始信号; $\omega(\tau)$ 为时变增益系数序列。增强信号可以表示为原始信号与时变增益系数序列的乘积,不同的增强算法对时变增益系数有不同的定义。常用算法为时间增益法^[38](time gain method, TG)、自动增益控制^[39](automatic gain control, AGC)和先进归一化方法^[40](advance normalization),各算法如表2所示。

表2 常用的回波信号增强算法
Table 2 Commonly used echo signal enhancement algorithms

算法名称	算法原理	时变增益	不足之处
时间增益法	基于雷达系统中信号强度随传播距离衰减的原理,将传播时间的幂函数作为时变增益。	$\omega(\tau) = \tau^k, k = 1, 2, 3, 4$	
自动增益控制	在给定的窗口内计算信号功率,将计算结果与开始设定的最大增益进行对比,生成增益掩码进而调整增益。	$\omega(t, \tau) = \begin{cases} g_{\max}, & g_{\text{norm}}(t, \tau) > g_{\max} \\ g_{\text{norm}}(t, \tau), & g_{\text{norm}}(t, \tau) \leq g_{\max} \end{cases}$ $g(t, \tau) = \frac{2d+1}{\sqrt{\sum_{k=i-d}^{i+d} r(t, \tau)^2}}, g_{\text{norm}}(t, \tau) = \frac{g(t, \tau)}{\text{ming}(t, \tau)}$	对滑动窗口尺寸 d 与最大增益 $g_{\max}$ 两个输入参数敏感性较大,鲁棒性不足。
先进归一化法	依次搜索接收信号中的极大值,并在每一个极大值区间 $(\tau_{L\max}, \tau_{N\max})$ 内对信号进行归一化处理作为时变增益。	$\omega(t, \tau) = \frac{1}{\max_{\tau \in (\tau_{L\max}, \tau_{N\max})} r(t, \tau) }$	信号增强的同时,大大增加了远距离目标反射信号中的瞬态噪声水平。

此外,部分其他算法也可以起到增强回波信号的效果。随机共振(stochastic resonance, SR)通过在一定条件下引入噪声,可以将部分噪声能量转化为信号能量,提高输出信噪比,逐渐被应用于微弱生命体征信号检测与处理领域^[41-43]。Radon-Fourier变换(Radon-Fourier transform, RFT)是一种根据目标的运动参数对距离—慢时间平面中的目标轨迹进行积分来积累目标能量的方法,可视得多普勒滤波器,能够提高信噪比,有效增强目标回波^[44-46]。Huang等^[47]利用RFT实现了基于超宽带穿墙

雷达的人体目标增强,部分研究将其应用于其他雷达领域,提升了高速运动目标与微弱目标的检测效果^[48-50]。

3.3 回波选择与距离定位

呼吸与心跳会在目标所在位置对应的距离处引起回波信号的周期性变化,造成目标区域与非目标区域的某些特征存在明显差异。合理、有效的特征可以帮助准确地选择生命体征信号在回波矩阵中的所在数据序列,进而可估计目标与雷达之间的距离,确定目标所在位置。按照使用特征的不同,将现有实现生命体征信号的回波选择与距离

定位方法分为如下3类。

1) 基于功率检测的回波选择方法

基于全局固定阈值与恒虚警率(constant false alarm rate, CFAR)检测方法是传统的确定回波信号中目标有无并且对目标进行定位的两种功率谱方法^[51]。前者阈值设置是根据已知背景杂波分布特性与虚警概率来确定的,设定后固定不变,适用性不足。后者 CFAR 检测方法的阈值可以根据背景杂波变化而自适应调整,进而确保恒定的虚警概率,其中应用普遍的有 CA-CFAR、CAGO-CFAR、OS-CFAR 等^[52],但由于 CFAR 检测通过比较滑动窗口内的功率水平来判断目标是否存在,因此当目标信号比较微弱,功率较小时,该方法失效。除此之外,以 CLEAN 算法为核心的相关研究也较多,但多用于实现移动目标检测与目标轨迹跟踪^[53-54]。因此,上述算法更加适用于非穿墙场

景下的运动目标检测,不能有效解决穿墙生命体征信号的回波选择问题。

2) 基于统计特征的回波选择方法

前期 Singh 等^[55]、蒋留兵等^[56]和 Li 等^[57]分别对回波信号进行离散傅里叶变换(DFT)与快速傅里叶变换(FFT),认为变换后峰值所在的数据序列为目标区域,但由于计算量较大,无法做到实时检测。后期,为快速有效地确定目标区域,多名学者提出基于回波矩阵中快时间维度的方差(variance)、标准差(standard deviation)、能量(energy)、标准差与峰度之比(KSD)等统计特征,突出生命体征信号与背景信号差异的方法,表3对相关研究进行了总结。除此之外,偏度(skewness)、峰度(kurtosis)、梯度(gradient)、斜率、偏度与峰度之比等也可作为特征指标^[63-65]。

表3 基于统计特征的回波选择相关研究

Table 3 Correlation research on echo selection based on statistical characteristics

相关研究	特征	计算方式	应用效果
Yan 等 ^[58]	方差	$V_j = (x_{j,1} - \overline{x_j})^2 + \dots + (x_{j,i} - \overline{x_j})^2 + (x_{j,N} - \overline{x_j})^2$ 其中, $\overline{x_j}$ 为回波矩阵中快时间维度第 j 个数据序列的平均值, $x_{j,i}$ 为该序列中第 i 个样本。	选择快时间维度方差最大的数据序列作为目标区域,后续进行 0~0.7 Hz 区间的低通滤波,实现了呼吸信号的提取与分离。
Liang 等 ^[61]	标准差	$std_j = \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_{j,i} - \overline{x_j})^2}$ 其中, $\overline{x_j}$ 为回波矩阵中快时间维度第 j 个数据序列的平均值, $x_{j,i}$ 为该序列中第 i 个样本。	提出了基于标准差的人体目标检测方法,并对检测阈值进行了分析与讨论,实验确定阈值选择 8 000 时,误检率最小为 0。
Mehran 等 ^[60]	能量	$E_j = \sum_m \sum_n (T_{m,n})^2$ 其中, m 为小波变换的尺度参数, n 为小波变换的平移参数, E_j 为回波矩阵快时间维度第 j 个数据序列小波变换后的能量大小。	根据呼吸信号特征对快时间维度的每个数据序列进行小波变换,计算变换后所有频率成分能量之和,将最大值所在数据序列作为目标区域。
吴世有等 ^[59]	能量	$\begin{cases} K_j^L(m) = \frac{ E_j^L(m) - E_{j-1}^L(m) }{E_{j-1}^L(m)} \\ K_j^R(m) = \frac{ E_j^R(m) - E_{j-1}^R(m) }{E_{j-1}^R(m)} \end{cases} \quad m = 1, \dots, N - W + 1$ 其中, W 为设定区间尺寸, E_j^L 和 E_j^R 分别为快时间维度第 j 个数据序列左右两端设定区间的能量大小, $K_j^L(m)$ 和 $K_j^R(m)$ 分别为左右两端的能量变化率。	将数据序列在快时间维度分为左右两部分,通过计算相邻数据序列之间左右两端设定区间的回波能量差值,形成能量变化率指标,从左右两端分别对各个数据序列的能量变化率求和,并将其最大值所在序列作为目标区域进而估计目标位置。
梁晓林等 ^[62]	标准差与峰度之比	$\hat{\psi}_j = \frac{\tilde{K}_j}{SD_j}$ 其中, $\tilde{K}_j$、SD_j 表示第 j 个数据序列的超额峰度与标准差。	实验数据表明目标区域的 KSD 值远大于其他区域,后续对该比值组成的一维向量 $\hat{\psi}_j$ 进行 STFT 变换可完成人体目标所在位置的估计。

3) 基于熵的回波选择方法

信息论中,熵(entropy)是用于表示信息的不确定程度的一种方法。人体目标的生命体征信号比随机噪声表现出更多的规律性,目标区域的熵值将明显低于非目标区域。Xue等^[66]提出了一种基于小波熵(wavelet entropy, WE)的多目标检测算法,通过计算回波信号小波变换后能量的熵值来判断是否存在静止目标,与功率谱等传统算法相比,在阴影区域的远距离静止目标检测与定位方面取得了更好的效果。排列熵(permutation entropy, PE)广泛应用于信号突变检测,能够有效放大时间序列的微弱变化。Yang团队^[67-68]将回波矩阵快时间方向上排列熵值最小的数据序列作为目标区域,进而实现人体目标与雷达之间的距离估计。该研究还对排列熵的参数设置进行了实验讨论,当嵌入维度为3,信号长度为80,延迟时间为1时效果最佳。

此外,相关熵(correntropy)^[69-71]、奇异熵(singular entropy)^[72]、样本熵(sample entropy)^[73]等也被应用于生命体征信号检测的相关研究。

3.4 生命信号分离与重构

穿墙生命体征信号所在的目标区域确定后,为获取准确量化的生命体征信息,需要针对目标区域在慢时间维度进行分析,实现呼吸、心跳信号的分离与重构,从而及时明确人体目标的生命状态。同时,相关的呼吸、心跳分离与重构技术也可应用于医学、运动、家居等领域的生命体征信息监测。

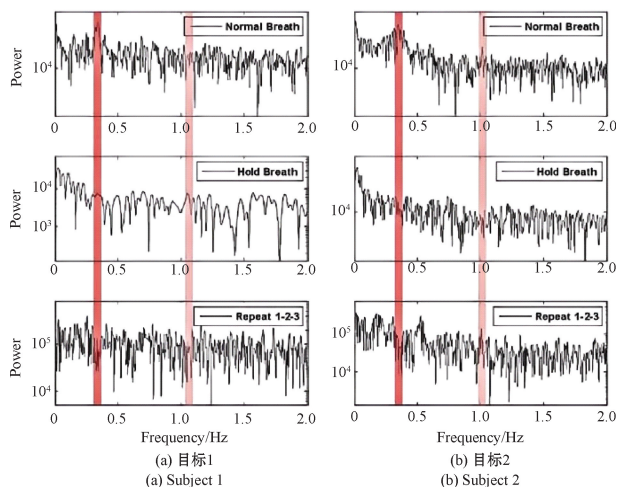
1) 基于频谱分析的分离与重构方法

相关研究表明,提取回波矩阵中目标区域的数据序列并在慢时间维度进行频谱分析,即可获得呼吸和心跳频率 f_r 和 f_h ^[74]。依据这一结论,Li等^[57]基于FFT实现了人体目标呼吸与手臂摆动特征频率的粗略估计。Xu等^[74]提出了基于高阶累积量(higher order cumulant, HOC)的生命信号检测方法,有效提高了信噪比并且减少了高次谐波,但在心跳信号检测方面稳定性不足。Liu等^[37]利用FFT对正常呼吸、憋气、重复123三种不同状态的回波信号进行了频谱分析,两个目标的实验结果如图3所示,可以确定的是3种状态下的呼吸主峰频率均在0.35 Hz附近,心跳峰值频率可能为1.0 Hz或1.1 Hz,但由于受到众多谐波的干扰,无法进一步明确。

以上研究可以说明,呼吸与心跳具有不同且不重叠的频带,因此通过频谱分析提取呼吸信号是可行的,但由于心跳信号更加微弱,且可能被呼吸的多阶谐波覆盖,需要进一步深入分析与论证^[37,20]。

2) 基于时频分析的分离与重构方法

由于FFT等传统的频域分析方法无法有效处理复杂环境下具有非平稳特征的回波信号,部分学者尝试采用时频分析的方法提取呼吸与心跳信号。希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang transform, HHT)为分析非线性、非平稳

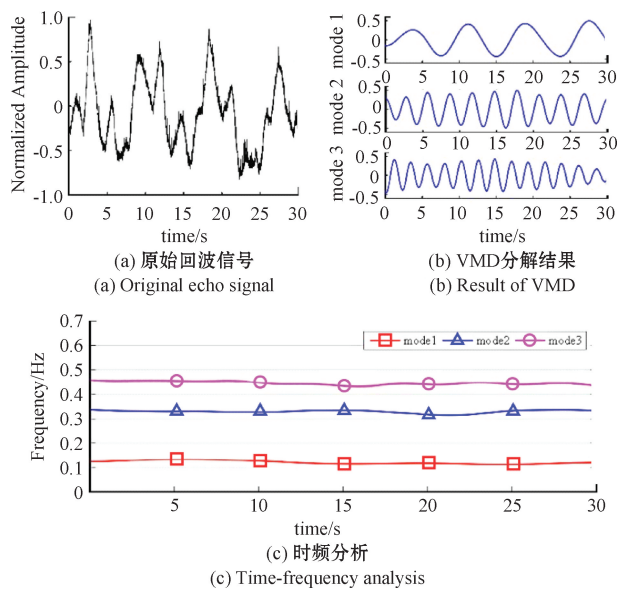
图3 FFT变换后3种状态下的功率谱图^[37]Fig. 3 The power spectra of three statuses after FFT^[37]

信号而提出,能够提取极低信噪比环境下的细微信号特征^[75]。基于这一特点,Liu等^[37,76]通过对数值模拟的呼吸信号进行HHT变换,较好地地区分了3种呼吸状态下的时频分布特征。Li等^[57]利用S变换的时频分辨率可以根据信号频率自适应变化的特点,有效提取了呼吸信号的特征频率。Hu等^[77]基于连续小波变换将去噪后的回波信号分解,并选择scale参数分别取16、12时分离重构呼吸与心跳两个信号,有效提高了重构信号的信噪比。Le等^[78-79]基于奇异谱分析(singular spectral analysis, SSA)与多元奇异谱分析(multivariate singular spectral analysis, MSSA),分别提出了在呼吸和噪声信号混合中提取心跳信号的两种方法。

3) 基于信号分解的分离与重构方法

信号分解算法中,变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)^[80]与EMD^[30]自适应地将原始信号分解为有限个固有模态函数(intrinsic mode function, IMF),然后根据其能量分布进行信号重构,进而实现信号的去噪与提取等功能。近年来,EMD与VMD等智能算法的应用为生命探测领域中呼吸、心跳信号的分离与重构开辟了新思路。

为解决多目标回波信号的叠加和干扰问题,Yan团队^[58,81]利用VMD实现了位于相同距离的墙后多个目标的呼吸信号分解,并对频率恒定、分段恒定、时变3种呼吸状态进行了实验验证。墙后1.5 m处,具有不同恒定频率的3个目标的呼吸信号分解结果如图4所示,时频分析表明3个呼吸频率约为0.12、0.34、0.45 Hz,体现了VMD算法较强的分解能力。Kakouche等^[82]将频域延迟求和法(delay and sum, DAS)与VMD算法结合,完成了探测目标胸部位移速度的估计以及呼吸心跳信号的分离,最大探测距离达到2 m,穿透25 cm钢筋混凝土墙体后最大探测距离为40 cm。此外,多项研究也通过应用VMD算法成

图4 VMD分解结果^[58]Fig. 4 The decomposition result of VMD^[58]

功实现了呼吸与心跳信号的分离,验证了其可行性^[83-85]。

为解决 VMD 算法速度和效率较低的问题,粒子群等

搜索算法被引入,实现了对 VMD 算法中分解层数和惩罚因子等参数的改进^[86]。2015 年 Dragomiretskiy 等^[87]提出二维变分模态分解(two-dimensional variational mode decomposition, 2D-VMD),将二维信号分解为多个中心频率不同的模态,具有良好的滤波特性,在图像处理过程中可以同时实现去噪与边缘特征提取。在此基础上, Zhu 等^[103]提出改进的 2D-VMD 算法,并应用于无载波超宽带雷达自动目标识别的前期数据处理中。目前,2D-VMD 算法在生命体征信号检测领域尚未应用。

不同于 VMD 算法,EMD 算法最初是作为 HHT 变换的一部分使用的。冯久超等^[88]尝试将 EMD 算法单独应用于呼吸、心跳信号的提取与分离中,在准确性和快速性等方面带来了大幅提升,推动了 EMD 的广泛应用^[89-93]。但由于模态混叠等问题,低信噪比情况下,EMD 算法抗噪声能力较差,信号分解时易受到高频噪声的不利影响,不能有效地提取心跳信号,具有一定局限性^[88]。此后,张崇超等^[94]提出了基于聚类经验模式分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)^[95],并着重对重构心跳信号的模式判别准则进行了说明,实验结果表明 EE-MD 有效消除了模态混叠问题,在提取心跳信号方面具有

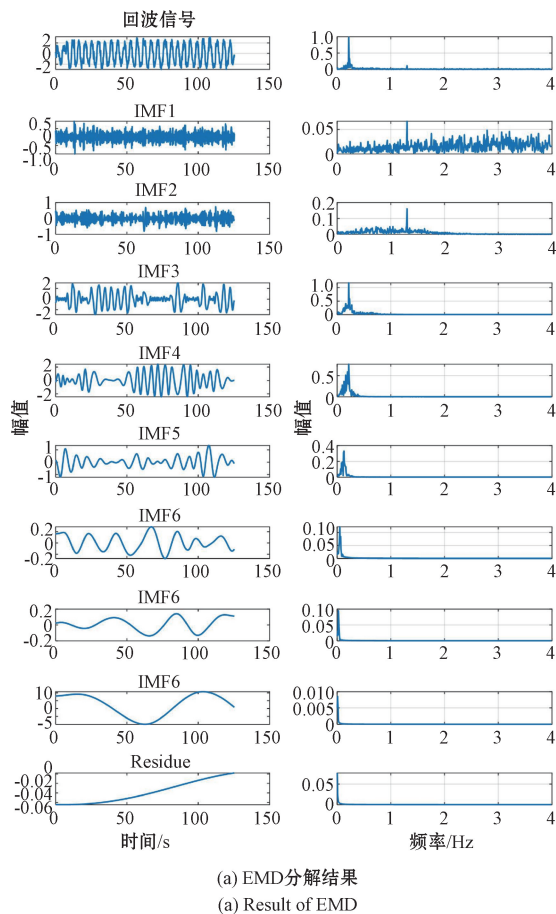
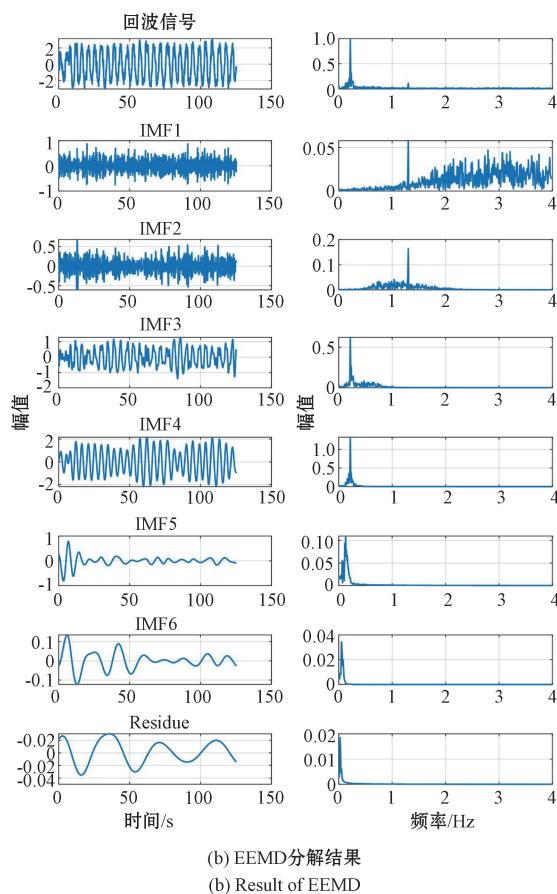
(a) EMD分解结果
(a) Result of EMD(b) EEMD分解结果
(b) Result of EEMD

图5 EMD 与 EEMD 分解结果

Fig. 5 EMD and EEMD decomposition results

更大优势,后期在多项研究中得到了成功应用^[62,67,96-97]。图5(a)、(b)分别为超宽带雷达探测获取的位于4 m处人体目标回波信号的EMD与EEMD分解结果,结合呼吸、心跳信号频率范围能够判断两结果中呼吸信号与心跳信号所在的分量相同,都是IMF3与IMF4、IMF1与IMF2,但相比之下EEMD明显地改善了IMF3与IMF4、IMF1与IMF2分量间的模式混叠以及噪声影响等问题。

另外,基于EMD与EEMD也出现了一些改进算法与应用。唐良勇等^[98]提出一种基于窗平均经验模式分解(window average EMD, WA-EMD)的生命信号分离与提取方法,利用加窗的方法计算信号局部平均值,可以实现同一距离下多目标呼吸信号的准确识别与分离。基于自适应噪声完备集合经验模式分解(complete ensemble empirical mode decomposition of adaptive noise, CEEM-DAN)^[99],刘震宇等^[100]引入相关性分析并根据相关系数选择重构呼吸、心跳信号的IMF分量,有效改善了重构信号的信噪比。Shyu等^[101-103]提出了改进的二维EEMD方法,可以有效地将微弱的心跳信号从呼吸信号中分离出来。

4 基于深度学习的生命体征信号检测

穿墙生命体征信号检测的分析过程耗时、复杂,并且很难挖掘其他信息。近年来,深度神经网络(deep neural network, DNN)在超宽带雷达人体行为感知^[104]、姿态识别^[105]等领域的广泛应用,同时也成为了生命体征信号检测领域新的研究热点^[106-108]。王亚夫等^[109]基于CNN建立了穿墙静止人体目标数量识别分类模型,4人以下的识别准确率达到100%。基于AlexNet与CNN的人员计数算法,改善了由于人体运动尺度变化、信号叠加干扰以及信号强度在距离和角度上的衰减等原因造成的错检^[110-111]。多项研究将CNN与长短期记忆人工神经网络(long short term memory, LSTM)等算法结合,基于超宽带雷达实现了睡眠状态下生命体征监测与异常情况识别^[112-113]。部分研究建立了超宽带雷达生命信号、环境噪声、干扰谐波等数据集,基于YOLOv3等算法,实现了不同信息的检测与识别^[51,114-115]。Yang等^[116-117]基于深度学习算法,实现了运动情况下心跳等信号的监测和获取。

深度学习通过建立神经网络模型,自动地提取输入数据中的深度特征,获得目标的多尺度特征表达,在上述多项研究中表现优于对比算法,取得了较高的准确度。同时,深度学习可以一次性完成回波信号处理中的单个或多个步骤任务,简化去噪、增强等预处理过程,提升算法处理速度,部分成熟算法可达到实时性的要求。因此,深度学习的应用可以在准确度、速度等方面提高生命体征信号检测过程的处理性能。此外,与固定的方法和思路相比,深度学习有能力挖掘超宽带雷达回波信号中包含的多种有用信息,可以为解决其他相关问题提供技术支撑。

5 结论与展望

穿墙生命体征信号检测技术是获取倒塌掩埋空间、建筑物内部空间等复杂场景中生命信息的有效手段,对提升应急装备性能指标,提高被困人员搜救效率,具有重要的现实意义。本文对基于超宽带雷达的穿墙生命体征信号检测相关研究进行了归纳与总结,结合现实需求与未来发展趋势,从如下4个方面对该领域今后的研究方向进行展望。

1)依赖于穿墙生命体征信号检测技术转化的生命探测仪、穿墙雷达等装备正在逐步向着小型化、轻量化方向发展,对应功能则向着智能化、可视化方向发展。未来其探测机制将更加多样,可获得丰富的多维度信息,穿透能力与穿墙后探测距离进一步提高。探测方法由单个设备探测向分布式系统探测转变,由静止探测向移动探测转变,可对大范围区域进行有效覆盖,远距离实现生命信息的快速检测,更加具有机动性。

2)目前需要依靠多种算法结合,通过多个步骤实现穿墙生命体征信号的检测,随着信号处理算法的改进与更新,今后该处理过程自适应程度更高,将逐步由多阶段向一阶段演变,提供端到端的解决方案,简化检测流程。呼吸、心跳等生命体征信号以及除此之外的人体目标回波信号中包含的其他特征信息,尚未获得有效利用,可根据医疗、健康监测、人机交互等不同场景需求,进行进一步挖掘与提取。

3)深度学习的应用使得在复杂场景中高效准确地检测生命体征信号成为可能。但其作为一种数据驱动的算法,目前可利用的数据资源有限,现有数据集多面向人体行为感知^[118-119]等领域,不同特征人群的生命体征信号回波数据集、多类别噪声回波数据集等尚未建立。除此之外,现有深度学习模型多基于图像处理等领域的成熟网络构建,今后其网络结构设计及其特征提取性能需要充分考虑生命体征信号的数据特征,更加具有针对性。

4)从技术迁移角度考虑,穿墙生命体征信号检测与故障诊断领域的振动信号分析^[120]、临床医学领域的脑电信号分析^[121]等研究内容同属于弱信号检测和提取问题,可借鉴其优势算法进行尝试。从技术应用角度考虑,可用于在智慧养老、智能家居等多种系统平台,融合图像、声音、红外等其他类型传感技术,在不同场景中发挥作用。

参考文献

- [1] 景裕,曹育森,朱明明,等.非接触式生命探测技术研究现状与发展[J].中国医疗设备,2021,36(6):1-4.
JING Y, CAO Y S, ZHU M M, et al. Research status and development of non-contact life detection technology[J]. Chinese Medical Equipment, 2021, 36(6): 1-4.
- [2] 费元春.超宽带雷达与理论技术[M].北京:国防工业

- 出版社,2010.
- FEI Y CH. Ultra Wideband Radar and Theoretical Technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.
- [3] YANG D, ZHU Z, ZHANG J, et al. The overview of human localization and vital sign signal measurement using handheld IR-UWB through-wall radar[J]. Sensors, 2021, 21(2): 402-433.
- [4] 路国华,王健琪,杨国胜,等. 生物雷达技术的研究现状[J]. 国际生物医学工程杂志,2004,27(6):368-370.
- LU G H, WANG J Q, YANG G SH, et al. Research status of biological radar technology[J]. International Journal of Biomedical Engineering, 2004, 27(6): 368-370.
- [5] 梁步阁,陈小娟,朱畅,等. 超宽带雷达实验系统中大功率纳秒级脉冲源的研制[J]. 微波学报,2005,21(1): 26-30.
- LIANG B G, CHEN X J, ZHU CH, et al. Design of high-power nano second pulsed in UWB radar test system[J]. Journal of Microwave, 2005, 21(1): 26-30.
- [6] 金添,宋勇平,崔国龙,等. 低频电磁波建筑物内部结构透视技术研究进展[J]. 雷达学报,2021,10(3): 342-359.
- JIN T, SONG Y P, CUI G L, et al. Advances on penetrating imaging of building layout technique using low frequency radio waves[J]. Journal of Radars, 2021, 10(3): 342-359.
- [7] YAN K, WU SH Y, FANG G Y. Detection of quasi-static trapped human being using mono-static UWB life-detection radar[J]. Applied Sciences, 2021, 11: 3129.
- [8] DUAN Z, L J. Non-contact detection of vital signs using a UWB radar sensor[J]. IEEE Access, 2019, 7: 36888-36895.
- [9] YANG L, YANG H, WANG Y, et al. UWB filter based on parallel-coupled microstrip lines and defected ground structure[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2013, 28(1): 21-26.
- [10] LIANG B, JIN Y, YANG D, et al. An Accelerated algorithm for detecting micro-moving objects of radar life detector of smart campus based on block data analysis[J]. IEEE Access, 2018, 6: 57994-58003.
- [11] STADERINI E M. UWB radars in medicine[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems, 2002, 1: 13-18.
- [12] BILICH C G. Bio-medical sensing using ultra wideband communications and radar technology: A feasibility study [C]. IEEE Pervasive Health Conference and Workshops, 2006, 11: 1-9.
- [13] VENKATESH S, ANDERSON C R, RIVERA N V, et al. Implementation and analysis of respiration-rate estimation using impulse-based UWB[C]. Military Communications Conference, 2005, 5: 3314-3320.
- [14] LAZARO A, GIRBAU D, VILLARINO R. Analysis of vital signs monitoring using an IR-UWB radar[J]. Progress In Electromagnetics Research, 2010, 100: 265-284.
- [15] SKOLNIK M I. Radar Handbook [M]. Second Edition. New York: McGraw-Hill, 1990.
- [16] TJORA S, EIDE E, LUNDHEIM L. Evaluation of methods for ground bounce removal in GPR utility mapping[C]. Proceedings of the Tenth International Conference on Grounds Penetrating Radar, IEEE, 2004: 379-382.
- [17] 曹杨,冯大政,水鹏朗,等. 机载多输入多输出雷达脉冲相杂波抑制方法[J]. 电子与信息学报,2013,35(3):595-600.
- CAO Y, FENG D, SHUI P L, et al. Clutter suppression of pulse-to pulse canceller in airborne MIMO radar [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(3): 595-600.
- [18] MARK A. Richards Fundamentals of Radar Signal Processing [M]. New York: McGraw-Hill Education, 2014.
- [19] ROVNAKOVA J, SVECOVA M, KOCUR M, et al. Signal processing for through wall moving target tracking by M-sequence UWB radar[C]. International Radar Symposium, 2005.
- [20] YANG D, ZHU Z, ZHANG J, et al. The overview of human localization and vital sign signal measurement using handheld IR-UWB through-wall radar[J]. Sensors, 2021, 21: 402.
- [21] ZETIK R, CRABBE S, KRAJNAK J, et al. Detection and localization of persons behind obstacles using M-Sequence through-the-wall radar [C]. Proceedings of the Defense and Security Symposium, 2006.
- [22] 贺峰,朱国富,牟妙辉,等. 超宽带穿墙雷达对人体活动目标探测的实验研究[J]. 现代雷达,2010,32(7): 29-33.
- HE F, ZHU G, MOU M, et al. Experiment study of life locomotion detection based on ultra-wideband through wall radar[J]. Modern Radar, 2010, 32(7): 29-33.
- [23] 彭建,钟景阳,白洁,等. 基于背景矩阵减法的探地雷杂波信号抑制方法研究[J]. 矿产与地质,2021,35(1):141-147.

- PENG J, ZHONG J, BAI J, et al. Study on ground penetrating radar clutter signal suppression method by background matrix subtraction[J]. Mineral Resources and Geology, 2021, 35(1): 141-147.
- [24] LIU S, QI Q, CHENG H, et al. A vital signs fast detection and extraction method of UWB impulse radar based on SVD[J]. Sensors, 2022, 22: 1177.
- [25] LIU C, SONG C, LU Q. Random noise denoising and direct wave eliminating based on SVD method for ground penetrating radar signals [J]. Journal of Applied Geophysics, 2017, 144: 125-133.
- [26] PIOUS J E, NAISHADHAM K, FATHY A E. A 1-D block processing for non-invasive detection of 2-D cardiac and respiratory rates[C]. 2018 IEEE Radar Conference, 2018: 29-32.
- [27] 戴舜,朱方,徐艳云,等.基于PCA与EMD的超宽带雷达生命信号检测算法[J].电子学报,2012,40(2): 344-349.
- DAI SH, ZHU F, XU Y Y, et al. UWB radar vital signal detection algorithm based on PCA and EMD[J]. Chinese Journal of Electronics, 2012, 40(2): 344-349.
- [28] SABUSHIMIKE D, NA S, KIM J, et al. Low-rank matrix recovery approach for clutter rejection in real-time IR-UWB radar-based moving target detection[J]. Sensors, 2016, 16: 1409-1425.
- [29] 孙权,张洋,曹阳,等.基于EMD的生物雷达回波信号噪声抑制研究[J].中国医疗设备,2014,29(8):4.
- SUN Q, ZHANG Y, CAO Y, et al. Study on noise suppression of biological radar echo signal based on EMD[J]. China Medical Devices, 2014, 29(8): 4.
- [30] HU X, JIN T. Short-range vital signs sensing based on EEMD and CWT using IR-UWB radar [J]. Sensors, 2016, 16(12): 2025.
- [31] KALMAN D. A singularly valuable decomposition: The SVD of a matrix[J]. The College Mathematics Journal, 1996, 27(1): 2-23.
- [32] NEZIROVIC A, YAROVVOY A G, LIGTHART L P. Signal processing for improved detection of trapped victims using UWB radar [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2010, 48(4): 2005-2014.
- [33] NEZIROVIC A. Stationary clutter and linear-trend suppression in impulse-radar-based respiratory motion detection[C]. 2011 IEEE International Conference on Ultra-Wideband (ICUWB), 2011: 331-335.
- [34] LI Z, LI W, LV H, et al. A novel method for respiration-like clutter cancellation in life detection by dual-frequency IR-UWB radar[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2013, 61(5): 2086-2092.
- [35] 梁福来,李钊,安强,等.脉冲式超宽带生命探测雷达时间抖动抑制[J].雷达学报,2015,4(4):439-444.
- LIANG F L, LI ZH, AN Q, et al. Suppression of time-domain jitter of impulse radio UWB radar[J]. Journal of Radars, 2015, 4(4): 439-444.
- [36] 王昭昶,王健琪,张杨,等.机械振动干扰下人体目标识别技术研究[J].医疗卫生装备,2021,42(6):21-25.
- WANG ZH Y, WANG J Q, ZHANG Y, et al. Research of human target recognition technology under mechanical vibration interference[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2021, 42(6): 21-25.
- [37] LIU L, LIU Z, BARROWES B E. Through-wall bio-radiolocation with UWB impulse radar: Observation, simulation and signal extraction[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2011, 4(4): 791-798.
- [38] BAHL V, PADMANABHAN V. RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system[C]. IEEE Computer and Communications Societies, 2000.
- [39] 保铮,邢孟道,王彤.雷达成像技术[M].北京:电子工业出版社,2005.
- BAO ZH, XING M D, WANG T. Radar Imaging Technology [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.
- [40] ROVNAKOVA J, KOCUR D. Weak signal enhancement in radar signal processing [C]. Proceedings of the 20th International Conference, 2010: 1-4.
- [41] WANG X, JIANG Z. Nonlinear enhancement of weak signals using optimization theory [C]. Mechatronics and Automation. IEEE, 2006.
- [42] 贾兰芳,王福谦,臧鹏,等.随机共振在生命信号检测中的应用[J].通信技术,2012,45(10):75-81.
- JIA L F, WANG F Q, ZANG P, et al. Application of frequency-compression stochastic resonance in weak life signal detection [J]. Communications Technology, 2012, 45(10): 75-81.
- [43] 郭山红,孙锦涛,谢仁宏.基于随机共振的穿墙探测信号检测研究[J].兵工学报,2008,29(12):1427-1431.
- GUO SH H, SUN J T, XIE R H. Research on signal processing for through-the wall surveillance based on stochastic resonance[J]. Acta Armamentarii, 2008, 29(12): 1427-1431.
- [44] XU J, YU J, PENG Y N, et al. Radon-fourier transform for radar target detection I: Generalized doppler filter bank [C]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011: 1186-1202.

- [45] XU J, YU J, PENG Y N, et al. radon-fourier transform for radar target detection II: Blind speed sidelobe suppression [C]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011; 2473-2489.
- [46] XU J, YU J, PENG Y N, et al. Radon-fourier transform for radar target detection III: Optimality and fast implementations[C]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2012; 991-1004.
- [47] HUANG Y, QIAN L. Human target enhancement based on radon fourier transform in through-wall imaging radar [C]. 2019 IEEE International Conference on Signal, Information and Data Processing (ICSIDP), 2019.
- [48] 吴兆平,符渭波,苏涛,等.基于快速 Radon-Fourier 变换的雷达高速目标检测[J].电子与信息学报,2012,34(8):1866-1871.
WU ZH P, FU W B, SU T, et al. High speed radar target detection based on fast Radon-Fourier transform[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(8): 1866-1871.
- [49] 钱李昌,许稼,孙文峰,等.基于宽带时空 Radon-Fourier 变换的高速微弱目标检测方法[J].电子与信息学报,2013,35(1): 15-23.
QIAN L CH, XU J, SUN W F, et al. Wideband time-space Radon-Fourier transform for high-speed and weak target detection[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(1): 15-23.
- [50] 林春风,黄春琳,栗毅.双基地雷达 Radon-Fourier 变换弱目标积累检测[J].雷达学报,2016,5(5): 526-530.
LIN CH F, HUANG CH L, SU Y. Target integration and detection with the Radon-Fourier transform for bistatic radar[J]. Journal of Radars, 2016, 5(5): 526-530.
- [51] 王小瑞,侯兴松,王生霄.基于 YOLOv3 网络超宽带雷达生命信号检测[J].国外电子测量技术,2019,38(6): 1-8.
WANG X R, HOU X S, WANG SH X. Research on vital signal detection of uwb radar based on YOLOv3 network[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2019, 38(6): 1-8.
- [52] LIANG X, LV T, ZHANG H, et al. Through-wall human being detection using UWB impulse radar[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2018, 2018: 46.
- [53] LIU J. Human target detection and tracking with ultra-wide band radar [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014.
- [54] NGUYEN V H, PYUN J Y. Location detection and tracking of moving targets by a 2D IR-UWB radar system[J]. Sensors, 2015, 15: 6740-6762.
- [55] SINGH S, LIANG Q, CHEN D, et al. Sense through wall human detection using UWB radar[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2011, 2011: 20.
- [56] 蒋留兵,韦洪浪,管四海,等.基于 EEMD 和 HOC 的超宽带雷达生命探测算法研究[J].现代雷达,2015,37(5): 25-30.
JIANG L B, WEI H L, GUAN S H, et al. A study on UWB vital signal detection method based on EEMD and HOC[J]. Modern Radar, 2015, 37(5): 25-30.
- [57] LI J, ZENG Z, SUN J, et al. Through-wall detection of human being's movement by UWB radar [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2012, 9(6): 1079-1083.
- [58] YAN J, HONG H, ZHAO H, et al. Through-wall multiple targets vital signs tracking based on VMD algorithm[J]. Sensors, 2016, 16(8): 1293-1304.
- [59] WU S, FANG G. Detection and tracking of moving target behind wall using UWB through-wall radar[C]. Proceedings of the 2010 International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application, 2010: 605-608.
- [60] BABOLI M, GHORASHI S A, SANIEI N, et al. A new wavelet based algorithm for estimating respiratory motion rate using UWB radar[C]. IEEE, 2009.
- [61] LIANG S D. Sense-through-wall human detection based on UWB radar sensors [J]. Signal Process, 2016, 126: 117-124.
- [62] LIANG X, ZHANG H, YE S, et al. An improved algorithm for through-wall target detection using ultra-wideband impulse radar [J]. Digital Signal Processing, 2017, 74: 72-93.
- [63] YANG S Y, QIN H B, LIANG X L, et al. Clutter elimination and harmonic suppression of non-stationary life signs for long-range and through-wall human subject detection using spectral kurtosis analysis (SKA)-based windowed fourier transform (WFT) method[J]. Applied Sciences, 2019, 9(2): 355-382.
- [64] LIANG X, ZHANG H. Remotely detectable signs of life based on impulse UWB radar [J]. Multimedia Tools and Applications, 2019, 78(8): 10583-10599.
- [65] LIANG X, DENG J. Detection of stationary human target via contactless radar networks[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing,

- 2019, 10(8): 3193-3200.
- [66] XUE H, LIU M, ZHANG Y, et al. An algorithm based wavelet entropy for shadowing effect of human detection using ultra-wideband bio-radar[J]. *Sensors*, 2017, 17(10): 2255-2268.
- [67] YANG D, ZHU Z, LIANG B. Vital sign signal extraction method based on permutation entropy and EEMD algorithm for ultra-wideband radar[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 178879-178890.
- [68] YANG D G, ZHU Z L, LIANG B G, et al. Vital sign signal extraction method based on permutation entropy and EMD algorithm for ultra-wideband radar[C]. *IEEE Xplore*, 2019.
- [69] KONG L, PRINCIPE J C. Life detection based on correntropy spectral density [C]. 2010 IEEE International Conference on Signal Processing, 2011: 168-171.
- [70] 熊丁丁, 崔国龙, 孔令讲, 等. 基于互相关熵的非高斯背景下微动参数估计方法[J]. *雷达学报*, 2017, 6(3): 300-308.
- XIONG D D, CUI G L, KONG L J, et al. Micro-motion parameter estimation in non-gaussian noise via mutual correntropy [J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(3): 300-308.
- [71] 吴若凡, 崔国龙, 郭世盛, 等. 一种基于自适应相关熵的生命探测方法[J]. *雷达科学与技术*, 2020, 18(4): 351-358.
- WU R F, CUI G L, GUO SH SH, et al. A life detection method based on adaptive correlational entropy[J]. *Radar Science and Technology*, 2020, 18(4): 351-358.
- [72] 蒋留兵, 韦洪浪, 许腾飞, 等. EEMD 生命探测雷达人体数量识别技术[J]. *电子技术应用*, 2014, 40(5): 123-125.
- JIANG L B, WEI H L, XU T F, et al. Technology of recognizing the number of the people based on EEMD life detection radar[J]. *Computer Technology and Its Applications*, 2014, 40(5): 123-125.
- [73] 郭兴明, 汤丽平. 基于小波变换和样本熵的心音识别研究[J]. *计算机应用研究*, 2010, 27(12): 4555-4557.
- GUO X M, TANG L P. Heart sound recognition based on wavelet transform and SampEn [J]. *Applications Research of Computers*, 2010, 27(12): 4555-4557.
- [74] XU Y. Vital sign detection method based on multiple higher order cumulant for ultrawideband radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(4): 1254-1265.
- [75] 王保生. 超宽带信号穿透塌方体衰减特性及生命特征检测方法研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江科技大学, 2017.
- WANG B SH. Study on attenuation characteristics of UWB signal penetrating landslide and detection method of vital features [C]. Harbin: Heilongjiang University of Science and Technology, 2017.
- [76] LIU L, LIU Z, XIE H, et al. Numerical simulation of UWB impulse radar vital sign detection at an earthquake disaster site [J]. *Ad Hoc Networks*, 2014, 13: 34-41.
- [77] HU X, JIN T. Short-range vital signs sensing based on EEMD and CWT using IR-UWB radar [J]. *Sensors*, 16(12): 2025-2043.
- [78] LE M. Heart rate extraction based on eigenvalues using UWB impulse radar remote sensing[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 303: 111689.
- [79] LE M, LE D. Multivariate singular spectral analysis for heartbeat extraction in remote sensing of UWB impulse radar [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 306: 111968.
- [80] DRAGOMIRETSKIY K, ZOSSO D. Variational mode decomposition[J]. *IEEE Transactions Signal Process*, 2014, 62: 531-544.
- [81] DING C, YAN J, LI Z, et al. Noncontact multiple targets vital sign detection based on VMD algorithm[C]. 2017 IEEE Radar Conference, 2017.
- [82] KAKOUCHE I, AZZAZ M S, MAALI A, et al. New measurement method for respiration and heartbeat estimation using IR-UWB radar[C]. 2019 6th International Conference on Image and Signal Processing and their Applications (ISPA), 2019.
- [83] DUAN Z, LIANG J. Non-contact detection of vital signs using a uwb radar sensor[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 36888-36895.
- [84] SHEN H, XU C, YANG Y, et al. Respiration and heartbeat rates measurement based on autocorrelation using IR-UWB radar [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2018, 65(10): 1470-1474.
- [85] MA S P, XUE W, CHEN K H, et al. Radar vital signs detection method based on variational mode decomposition and wavelet transform[C]. 2021 China Automation Congress (CAC), 2021.
- [86] 陆鑫, 陈志敏. 基于 PSO-VMD 算法的生命探测方法研究[J]. *空间电子技术*, 2022, 19(2): 48-54.
- LU X, CHEN ZH M. The life detection method via PSO-VMD algorithm [J]. *Space Electronic Technology*, 2022, 19(2): 48-54.
- [87] DRAGOMIRETSKIY K, ZOSSO D. Two-dimensional variational mode decomposition [C].

- International Workshop on Energy Minimization Methods in Computer Vision and Pattern Recognition. Springer, 2015: 97-208.
- [88] 冯久超,潘水洋. 基于经验模态分解的生命信号提取算法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2010, 38(10): 1-6.
FENG J CH, PAN SH Y. Extraction algorithm of vital signals based on empirical mode decomposition [J]. Journal of South China University of Technology, 2010, 38(10): 1-6.
- [89] 曹文琛,张顺生. 基于 EMD 的无载波超宽带雷达目标检测算法[J]. 雷达科学与技术, 2013, 11(3): 285-289.
CAO W CH, ZHANG SH SH. A target detection method based on EMD for carrier-free UWB radar[J]. Radar Science and Technology, 2013, 11(3): 285-289.
- [90] 戴舜,朱方,徐艳云,等. 基于 PCA 与 EMD 的超宽带雷达生命信号检测算法[J]. 电子学报, 2012, 40(2): 344-349.
DAI SH, ZHU F, XU Y Y, et al. Vital sign detection method based PCA and EMD for UWB radar[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(2): 344-349.
- [91] ZHEN Y, MA C, QI Q J, et al. Applications of TVF-EMD in vital signal detection for UWB radar[J]. Journal of Sensors, 2021, DOI: 10. 1155/2021/2136614.
- [92] ZHAO G, LIANG Q, DURRANI T S. An EMD based sense-through-foilage target detection UWB radar sensor networks[J]. IEEE Access, 2018, 6: 29254-29261.
- [93] 郭继坤,王保生,郝维来,等. 基于超宽带信号的矿井塌方体下生命特征的检测方法[J]. 黑龙江科技大学学报, 2017, 27(1): 73-76.
GUO J K, WANG B SH, HAO W L, et al. Research on the detection method of life under mine based on ultra-wideband signal [J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology, 2017, 27(1): 73-76.
- [94] 张崇超,张长春,张群英. EEMD 在超宽带雷达生命信号提取中的应用[J]. 电子测量技术, 2012, 35(4): 76-81.
ZHANG CH CH, ZHANG CH CH, ZHANG Q Y, et al. Applications of EEMD in vital signal detection for UWB radar [J]. Electronic Measurement Technology, 2012, 35(4): 76-81.
- [95] WU Z, HUANG N. Ensemble empirical mode decomposition: A noise assisted data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2008, 11(1): 40-41.
- [96] ZHANG C, ZHANG C, ZHANG Q. Applications of EEMD in vital signal detection for UWB radar[J]. Electronic Measurement Technology, 2012, 35(4): 76-80, 101.
- [97] 王亮. 基于超宽带雷达生命探测算法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
WANG L. Research on life detection algorithm based on UWB radar[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [98] 唐良勇,赵恒,张亚菊. 基于 WA-EMD 算法的脉冲式超宽带雷达多目标生命体征检测[J]. 南京理工大学学报, 2017, 41(2): 198-206.
TANG L Y, ZHAO H, ZHANG Y J. Multiple-subject vital sign detection for impulse-radio ultra-wideband radar based on WA-EMD[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2017, 41(2): 198-206.
- [99] TORRES M E, COLOMINAS M A, SCHLOTT-HAUER G, et al. A complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise[C]. IEEE International Conference on Acoustics, 2011.
- [100] 刘震宇,陈惠明,陆蔚,等. 基于改进经验模态分解的雷达生命信号检测[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(12): 171-178.
LIU ZH Y, CHEN H M, LU W, et al. Radar vital signal detection based on improved complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(12): 171-178.
- [101] SHYU K, CHIU L, LEE P, et al. Detection of breathing and heart rates in UWB radar sensor data using FVPIEF-based two-layer EEMD [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(2): 774-784.
- [102] ZHOU T, CAI G, LIN M, et al. A modified two-dimension EEMD method for breathing and heart rates monitoring via through-wall IR-UWB radar[C]. International Symposium on Medical Information and Communication Technology, 2021, 15: 41-46.
- [103] ZHU Y, ZHANG S, ZHAO H, et al. Target identification with improved 2D-VMD for carrier-free UWB radar[J]. Sensors, 2021, 21(7): 2465.
- [104] 金添,何元,李新羽,等. 超宽带雷达人体行为感知研究进展[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(4): 1147-1155.
JIN T, HE Y, LI X Y, et al. Advances in human activity sensing using ultra-wide band radar [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(4): 1147-1155.

- [105] 李俊侠,张秦,郑桂妹.超宽带雷达人体姿态识别综述[J].计算机工程与应用,2021,57(3):14-23.
LI J X, ZHANG Q, ZHENG G M. Overview of human posture recognition by ultra-wideband radar[J]. Computer Engineering and Applications, 2021, 57(3): 14-23.
- [106] 张宁,李宏军,于江涛,等.用于非接触式生命体征检测的雷达技术研究进展[J].半导体技术,2023,48(1):1-9,17.
ZHANG N, LI H, YU J, et al. Research progress of radar technology for non-contact vital sign detection [J]. Semiconductor Technology, 2023, 48(1):1-9, 17.
- [107] AHMED S, CHO S H. Machine learning for healthcare radars: Recent progresses in human vital sign measurement and activity recognition [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2024, 26(1): 461-495.
- [108] PATERNIANI G, SGRECCIA D, DAVOLI A, et al. Radar-based monitoring of vital signs: A tutorial overview [J]. Proceedings of the IEEE, 2023, 111(3): 277-317.
- [109] 王亚夫,梁步阁,杨德贵,等.基于CNN的超宽带穿墙雷达静目标数量识别技术[J].传感器与微系统,2021,40(4):19-22.
WANG Y F, LIANG B G, YANG D G, et al. Quantity identifying technology for static target of ultra-wideband through-wall radar based on CNN[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2021, 40(4): 19-22.
- [110] YANG X, YIN W, LIN Z. People counting based on CNN using IR-UWB radar[C]. 2017 IEEE/CIC International Conference on Communications in China, 2017.
- [111] BAO R, YANG Z. CNN-based regional people counting algorithm exploiting multi-scale range-time maps with an IR-UWB radar [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 99: 1-1.
- [112] KWON H, SON D, LEE D, et al. Hybrid CNN-LSTM network for real-time apnea-hypopnea event detection based on IR-UWB radar[J]. IEEE Access, 2021: 1-9.
- [113] CHOI S, YOON H. Convolutional neural networks for the real-time monitoring of vital signs based on impulse radio ultrawide-band radar during sleep[J]. Sensors, 2023, 23(6): 3116.
- [114] 王生霄,侯兴松,黑夏萌.嵌入CBAM结构的改进YOLOV3超宽带雷达生命信号检测算法[J].国外电子测量技术,2020,39(3):1-6.
WANG SH X, HOU X S, HEI X M. Improved YOLOv3 UWB radar life signal detection algorithm embedded in CBAM structure[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2020, 39(3): 1-6.
- [115] LIU S, QI Q, XIAN W, et al. An intelligent signal processing method for motional vital signs detection system based on deep learning [J]. IEEE Access, 2022, 10: 106463-106481.
- [116] YANG X, ZHANG X, DING Y, et al. Indoor activity and vital sign monitoring for moving people with multiple radar data fusion[J]. Remote Sensing, 2021, 13(18): 3791-3811.
- [117] GONÇALO G, CAROLINA G, DANIEL A, et al. Dual-radar integration for vital signs acquisition under heavy body movement using machine learning[C]. 2024 IEEE 22nd Mediterranean Electrotechnical Conference, 2024: 367-371.
- [118] 金添,宋永坤,戴永鹏,等. UWB-HA4D-1.0:超宽带雷达人体动作四维成像数据集[J]. 雷达学报,2022,11(1): 27-39.
JIN T, SONG Y K, DAI Y P, et al. UWB-HA4D-1.0: An ultra-wideband radar human activity 4D imaging dataset [J]. Journal of Radars, 2022, 11(1): 27-39.
- [119] ZHU Z, YANG D, ZHANG J, et al. A dataset of human motion status using IR-UWB through-wall radar[J]. ArXiv preprint arXiv:2008.13598, 2020.
- [120] 李舜酩,郭海东,李殿荣.振动信号处理方法综述[J].仪器仪表学报,2013,34(8):1907-1915.
LI SH M, GUO H D, LI D R. Review of vibration signal processing methods [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(8): 1907-1915.
- [121] 彭睿旻,江军,匡光涛,等.基于EEG的癫痫自动检测:综述与展望[J].自动化学报,2022,48(2): 335-350.
PENG R M, JIANG J, KUANG G T, et al. EEG-based automatic epilepsy detection: Review and outlook[J]. Acta Automatica Sinica, 2022, 48(2): 335-350.

作者简介

王月,硕士,助理研究员,主要研究方向为雷达信号处理技术、应急救援技术与装备、基于深度学习的图像识别与检测等。

E-mail:13331361815@163.com

齐庆杰(通信作者),博士,教授,博士生导师,主要研究方向为安全科学与技术、应急救援技术与装备等。

E-mail:qi_qingjie@163.com