

# 基于微波传感器的非接触式人体体征监测系统设计

李雨泽, 房才辛, 时翔\*

常州工学院计算机信息工程学院, 江苏 常州

收稿日期: 2023年5月10日; 录用日期: 2023年6月8日; 发布日期: 2023年6月14日

## 摘要

本文基于微波探测的原理与方法, 建立了人体的心跳和呼吸两个主要生命体征与微波雷达传感器信号之间的科学联系, 设计了一种基于微波传感器的人体体征监测系统, 能够对人体进行非接触式人体生命体征测量, 对于诸如无法接触式监测的严重烧伤病人、地震灾害时瓦砾下掩埋的生还者等, 提供连续、实时的高效监测。

## 关键词

微波传感器, 雷达信号, 人体生命体征, 非接触式

## Design of a Non-Contact Human Sign Monitoring System Based on Microwave Sensors

Yuze Li, Caixin Fang, Xiang Shi\*

School of Computer Science and Information Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou Jiangsu

Received: May 10<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jun. 8<sup>th</sup>, 2023; published: Jun. 14<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

In this paper, based on the principle and method of microwave detection, the scientific relationship between the two main vital signs of human heartbeat and respiration and the signal of microwave radar sensors is established, and a human sign monitoring system based on microwave sensor is de-

\*通讯作者。

signed, which can measure the human vital signs in a non-contact way, and provide continuous and real-time efficient monitoring for severe burn patients who cannot be monitored by contact, survivors buried under rubble during earthquake disasters, etc.

## Keywords

Microwave Sensors, Radar Signal, Human Vital Signs, Non-Contact Type

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

微波雷达传感器在物体距离、大小的检测中可以提供厘米甚至毫米级别的精度，并能够捕捉微弱的振动或颤动，成为人类生命体征信号，如呼吸、心跳等的理想且先进的传感技术[1] [2] [3] [4]。值得一提的是，由于微波能够穿透一定厚度的人体衣物或人造预制水泥板等，微波雷达传感器能够实现非接触式的连续呼吸和心跳的测量与监控，对于医生、搜救人员和患者、遇难者而言，都比较方便。随着半导体技术的发展，微波雷达传感器芯片技术越来越成熟，国产化程度也越来越高，但大多集中在智能楼宇照明、智能交通等通用领域。最近几年，24 GHz、60 GHz 以及 77 GHz 高度集成雷达芯片的相关应用越来越多，如小米米家的毫米波雷达人体存在传感器等产品，但只局限于人体的存在状态，如有无、动静的监控。更精密地应用于临床医护、灾区搜救的人体生命体征非接触式监测的微波传感器技术，还有待进一步的研究与开发[1]-[10]。

本设计旨在利用微波雷达传感器，进行非接触式人体生命体征监测技术的研究。将该技术应用在一些特殊情况，如无法接触式心律监控的严重烧伤病人、地震灾害时瓦砾下掩埋的生还者等的生命探测等情境中，能够可靠、持续地进行非接触式人体生命体征的探测。

## 2. 工作原理

### 2.1. 微波特性分析

微波受物质的影响能力，是由物质的介质损耗因数决定的。介质损耗因数大，则物质的吸收能力就强，与之相反，介质损耗因数小，那么它的吸收微波的能力也就弱。不同物质的损耗因数是不同的，水分子属于极性分子，其介电常数比较大，介质损耗因数也大，所以对微波表现出较强的吸收能力。但是碳水化合物、蛋白质等的介电常数比较小，所以对微波的吸收能力与水相比就小得多。对于人体衣物或人造预制板(水泥板、瓦砾等)等，由于其非有机物的特性，使该类物质水分子含量少，其机制损耗因数较小，因而微波能够以损耗较少功率的代价，进入介质内部，或穿透介质[5] [6] [7]。

本文基于微波的这种穿透特性，设计一种微波雷达传感器，能够穿透人体衣物或人造预制板等，实现非接触式人体呼吸、心跳的实时监测。

### 2.2. 雷达工作原理

微波雷达传感器通常工作于两种工作体制，连续波体制和脉冲体制。基于人体心跳和呼吸的微动特征，连续波体制的多普勒雷达能够实现该类微动的速度和幅度的探测。由于并非是同时对多个目标监测，

即辨别间隔不同的各个目标，所以精度更高的调频连续波技术在本文中并未采用，而仅采用非调频的连续波技术。

微波测量速度的原理是当电磁波快要接近物体时，反射之后的电磁波的频率就会比原先的大很多，产生一个差值，这个原理称作多普勒效应。雷达发射机发射出去的微波频率，和物体反射回来后的微波频率之间的差值，与被测物速度与雷达速度之间是一种线性关系。这种频率差值又被成为多普勒频移，测量物体速度的公式如下：

$$f_d = \frac{2v_r}{\lambda} \quad (1)$$

式中， $f_d$  为被测物体的多普勒频移； $v_r$  为物体与电磁波接近或远离时的速度； $\lambda$  为电磁波的波长。

事实上，微波雷达传感器还可以进行距离分辨，这种参数多是基于物体相距离的时间差来计算。这个时间差的定义范围大致是雷达发射机发射出去的微波被物体反射回来之后，整个过程所花费的时间。具体的公式如下：

$$\tau = \frac{2R}{c} \quad (2)$$

式中， $\tau$  表示微波从发射到反射回雷达的时间； $R$  代表雷达与探测物之间的距离； $c$  表示微波的传播速度，在自由空间中，通常等于光速。

想要提高微波雷达的角度分辨率，可以选择天线性能中天线波束角偏向较窄的一类，也就是大口径的天线或更高频率的微波。对非接触式人体生命体征的监测应用来说，只要是天线波束的范围基本覆盖人体区域，从成本和实用性上考虑，并不需要提供更高角度分辨率的雷达[7]。

### 2.3. 雷达信号分析

对于连续波体制的多普勒雷达来说，通常假定雷达的天线波束照射范围略大于目标体积(或投影面)，发射信号  $s(t)$  可以用式(3)来表示[8]：

$$s(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi) \quad (3)$$

式中， $A$  为发射微波的信号幅度值； $\omega$  为信号角频率； $\varphi$  为信号相位； $t$  为时间变量。

经过反射再回来的电磁波表示为  $s_r(t)$ ，可用式(4)来表示：

$$s_r(t) = kA \cos[\omega_0(t - t_r) + \varphi] \quad (4)$$

式中， $k$  为探测目标对入射微波信号的反射加权，通常与目标的大小、反射率、外形结构相关； $t_r$  为时间变量的变化。

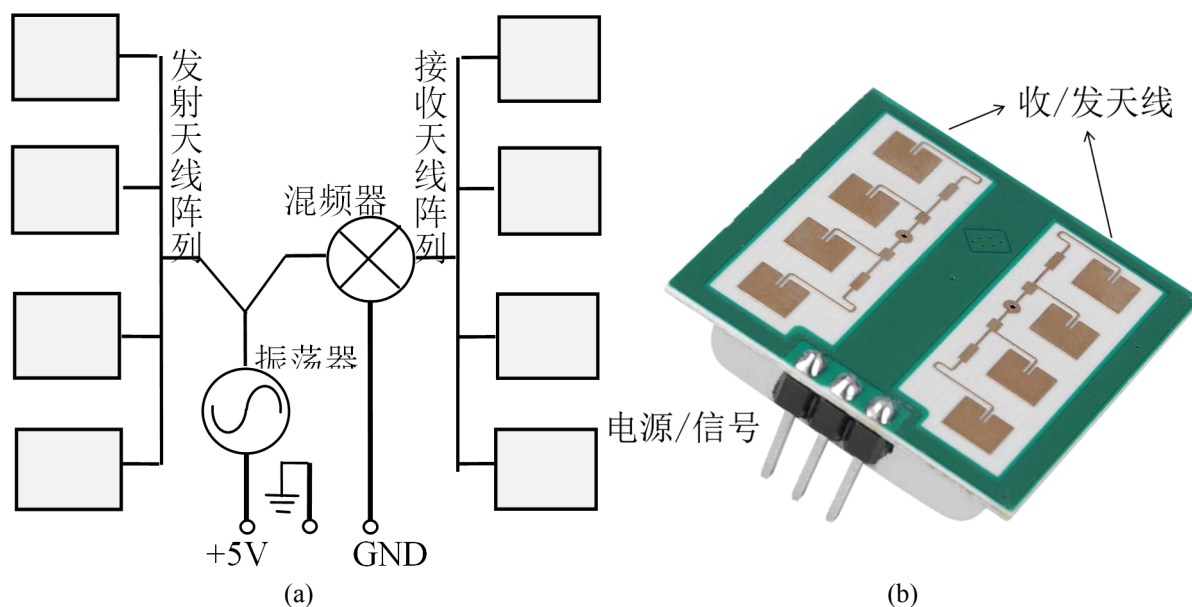
从入射信号(3)式的表达和反射信号(4)式的表达中可以看出，除在(1)式中讨论的因目标运动速度导致的频率变化外，反射信号幅度值的大小与目标的大小、外形、性质、距离等密切相关，反射信号相位值的变化，则与目标的方位等因素相关。通过对微波雷达传感器入射与反射信号的分析，通过信号处理，特别是傅里叶变换的形式，可以从时域和频域两方面，建立起微波雷达信号与人体生命体征之间的科学联系。

## 3. 微波雷达传感器系统设计

一个典型的微波多普勒雷达由收发前端、雷达天线、雷达中频电路组成。振荡器、混频器以及微带功分电路组成微波收发前端。1 × 4 个单元组成的发射天线阵列和接收天线阵列组成微波雷达收发天线。天线采用发射和接收天线分置，以增加隔离度，减少收发前端电路的复杂性。收发前端与雷达天线共属射频电路，进行共面设计，并单独通过高频电路板如罗杰斯板进行加工制作。收发前端与雷达天线的共

面, 可有效地减小微波电路的射频链路损耗, 以提高功率效率。天线阵列采用泰勒算法对天线方向图进行低副瓣综合, 具有优于 $-15$  dB 的副瓣抑制比, 使微波雷达传感器不容易受目标附近移动杂目标的干扰, 提高雷达的探测性能。收发前端输出雷达中频(IF), IF 信号进入雷达中频电路, 进行信号的采集、处理以及目标特性的识别。雷达中频电路和前端电路分开制作, 并隔离集成, 以使高频信号与中频信号分开, 提高探测的灵敏度。

### 3.1. 收发前端设计

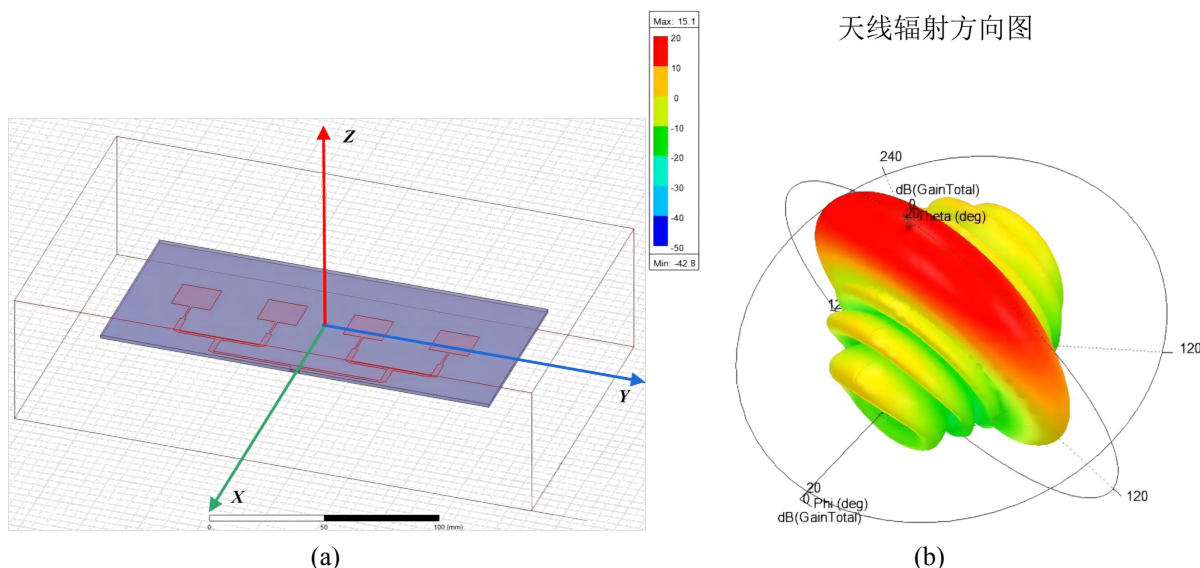


**Figure 1.** System block diagram (a) and physical diagram (b) of microwave radar sensor front end and antenna integration  
**图 1.** 微波雷达传感器前端及天线集成的系统框图(a)与实物图(b)

如图 1 所示, 微波收发前端主要由微波振荡器芯片、微波混频器芯片以及微带功分电路组成平面电路。+5 V 供电的微波振荡器输出 24 GHz 微波信号, 通过微带功分器一分为二。一路直接进入发射天线阵列, 向探测目标发射出去。不加微波功率放大器芯片的原因是因为即使是非接触式的探测, 10 mW 级的微波信号输出功率也足够获得信号处理所需的目标信号信噪比。当然, 当非接触式的探测距离要求更远时, 可以在发射天线阵列的后端增加微波功率放大器芯片进行功率放大后, 再进入发射天线发射出去。另一路作为本振信号, 进入微波混频器, 与接收天线阵列输入到混频器的射频信号进行直接混频, 输出 IF 信号。输出的 IF 信号中, 包含目标反射的信号幅度、相位及频率信息, 能够通过雷达中频电路进行处理, 进行目标特性的识别。

### 3.2. 雷达天线设计

微波雷达传感器的天线采取收发分离的方式, 发射天线阵列与接收天线阵列结构和特性相同, 均采用  $1 \times 4$  单元的天线阵元形式, 如图 2(a)所示。 $1 \times 4$  单元的天线阵元形式能够在方位面上提供较宽的波束角度, 从而在俯仰面上提供较窄的波束角度。 $1 \times 4$  单元的天线阵元在 24GHz 的工作频率上, 基于图 2(a)设计的  $1 \times 4$  单元的天线阵元经电磁仿真软件 HFSS 计算后, 其天线辐射方向图的仿真图形如图 2(b)所示。从图 2(b)可以看出, 天线主瓣呈扁球体状, 方位面即图 2(a)的  $xoz$  平面, 具有较大的主瓣, 俯仰面即图 2(a)的  $yozy$  平面, 具有较小的主瓣方向, 主瓣最大增益达到 20 dB, 天线旁瓣相差较大。



**Figure 2.** (a) Antenna geometry and (b) antenna radiation pattern

**图 2.** (a) 天线几何机构与(b) 天线辐射方向图

如表 1 所示, 为天线波束宽度与副瓣电平值。在方位面上天线的-3 dB 波束宽度为  $80^\circ$  角, 俯仰面上天线的-3 dB 波束宽度为  $30^\circ$  角。方位面上副瓣较小, 忽略不计, 俯仰面上的第一副瓣电平为-15 dB。

**Table 1.** Antenna beam width (-3 dB) and side lobe level

**表 1.** 天线波束宽度(-3 dB)与副瓣电平

波束宽度(-3 dB)	方位面	80	度( $^\circ$ )
	俯仰面	30	度( $^\circ$ )
副瓣电平	方位面	\	dB
	俯仰面	-15	dB

### 3.3. 雷达中频电路设计

雷达中频电路的设计与制作与前端电路、雷达天线分开, 以减少射频与低频电路之间的串扰。电路主要分为下述电路模块。

**带状滤波器组电路。**雷达中频输出信号的输出实际来自人体呼吸、心跳等不同目标的回波信号, 即雷达回波信号的多普勒频率不同, 因而采用带状滤波器组实现对不同频率回波信号的分离、滤除噪声及杂波信号。在本设计中, 先期采用多级 LC 滤波组实现, 后期采用梳状滤波器集成电路 SAA4961 实现。

低频放大器采用宽带运算放大器芯片 AD841, 进行低增益、低噪声系数的预先放大后, 再采用 OP07 低频放大器(双运放)芯片 2 片, 以实现 4 级放大, 获得总电压增益超过 10000 倍的放大信号。

数字信号处理电路主要采用数字信号处理器芯片 TMS320F206, 进行模拟信号的数字采样及傅里叶变换, 并分析信号的频谱特性, 提取信号的频谱特征信号。

## 4. 系统测试与分析

完成上述微波雷达前端、天线、雷达中频电路的全系统集成后, 进行下述实验测试。

首先进行微波对人体遮盖物的穿透能力的测试研究, 遮盖物样本包括人体衣物、纸箱纸板、帆布书包、水泥预制板、微波吸波材料、金属板。

最后进行静止人体的非接触式微波探测，根据所测信号，进行人体呼吸、心跳的实际值与雷达信号之间的关联研究。

#### 4.1. 穿透性测试

如图 3 所示，微波信号源向外发射微波，微波功率计通过功率探头接收微波。二者之间，分别放置人体衣物、纸箱纸板、帆布书包、水泥预制板、微波吸波材料、金属板，根据微波功率计接收的信号功率，进行各类掩盖层微波穿透性的研究。

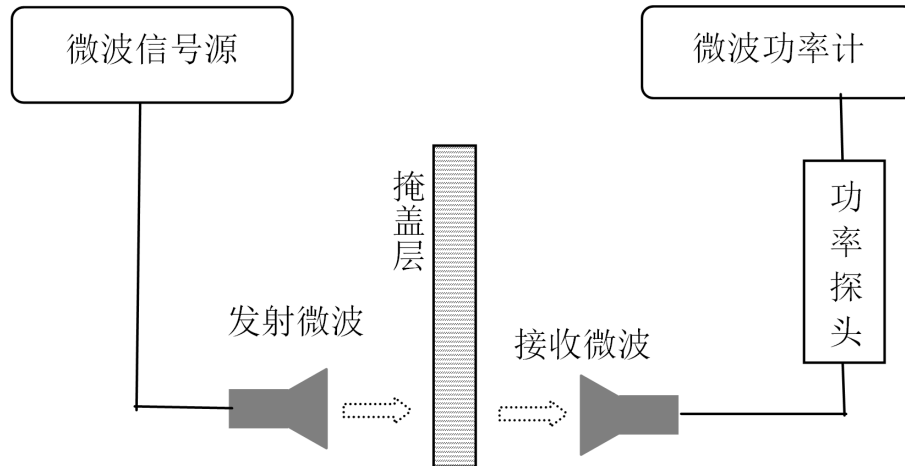


Figure 3. Microwave radar sensors detect human vital signs under the cover  
图 3. 微波雷达传感器探测掩盖物下的人体生命体征

Table 2. Attenuation of microwave by various masking layers  
表 2. 各种掩盖层对微波的衰减

实验对象	无	单件布衣	纸箱纸板	帆布书包	水泥板	吸波材料	铁片
接收功率(dBm)	-28.20	-28.20	-28.20	-28.70	-29.60	-40.37	-44.22
衰减(dB)	0	0	0	0.5	1.4	12.17	16.02

实测数据如表 2 所示，从数据里面可以看出，单件布衣、书包与纸板这样的实验材料的数据相对于没有掩盖物时，是几乎没有变化的，这就表示这类物质对微波的损耗可以忽略不计。而水泥预制板则有了 1.4 dB 的损耗，但对于微波雷达传感器探测灵敏度来说，并没有受到大的影响。

吸波材料显示的数据是 -40.37 dBm，与无材料时的数据相比，有了 12.17 dB 明显的衰减，吸波材料明显对微波具有强烈的吸收作用。最后的铁片实验，则基本完全将微波全反射回去了。

根据以上的测试数据，从微波的穿透性上，可以为基于微波传感器的人体体征监测系统，对人体进行非接触式人体生命体征测量，提供良好的理论和实测依据。

#### 4.2. 人体生命体征的测试

人体生命体征的测试主要是通过微波雷达传感器进行人体心跳和呼吸的测试，根据测试所产生的时域波形图以及频域波形图，与人体心跳和呼吸的实测数据进行比较，进行雷达信号与人体心跳和呼吸真实值之间的比较。人体心跳和呼吸的实测数据通过实验者自行测试脉搏和协助人员对呼吸数目进行观测计数得到。

图 4 所示为人体心跳的时域和频率波形图，在心跳时域波形图中，较明显地看出高频率、大幅度信

号周期性地出现,其周期性经测试与人体实测心跳(脉搏)频率一致。但频域信号显示出较多的频谱线,需要进一步进行分析,才能确定频谱与心跳之间的科学关联。

图5所示为人体呼吸的时域和频率波形图,在呼吸的时域波形图中,同样可以较明显地看出高频率、大幅度信号周期性地出现,其周期性经测试与人体实测呼吸(协助人员计数)频率一致。其频域信号出现单根较明显的谱线,经计算,其谱线基本与人体呼吸时胸腔运动所产生的多普勒频率增量一致。

从上述系统测试的结果来看,运用微波雷达传感器探测的方法,在一些无法通过直接接触人体进行生命体征监测的特殊情况下,例如无法接触式心律监控的严重烧伤病人、地震灾害时瓦砾下掩埋的生还者等的生命探测等,能够有效并准确地进行非接触式人体生命体征的探测,实施人员搜救或患者全天候的监控。

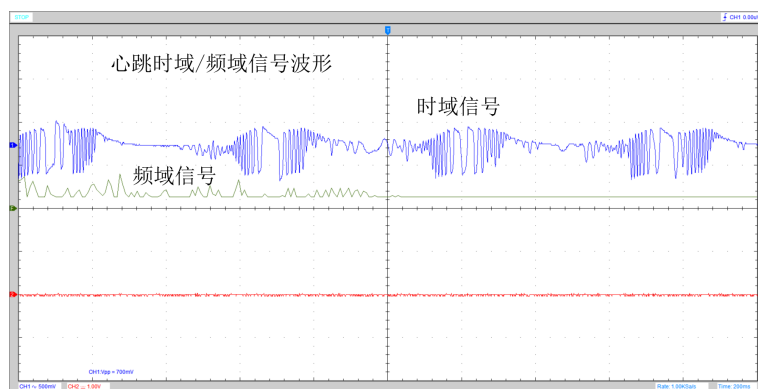


Figure 4. Time domain and frequency domain signal waveform of human heartbeat

图4. 人体心跳的时域与频域信号波形

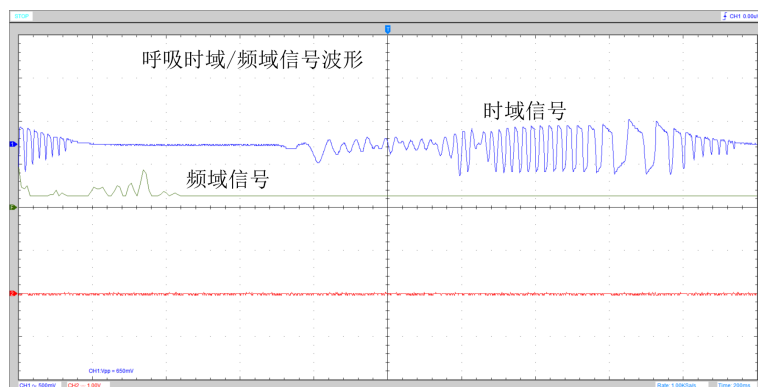


Figure 5. Time domain and frequency domain signal waveform of human respiration

图5. 人体呼吸的时域与频域信号波形

从上述的系统测试与分析结果,可以得出的结论是:

1) 运用微波雷达探测的方法,能够穿透人体衣物、人造水泥预制板等非含水性物质,进行人体衣物遮盖下或瓦砾遮盖下的人体探测;

2) 运用微波雷达传感器进行非接触式的人体生命体征监测,无论是时域信号,还是频域信号,都富含人体呼吸、心跳的起伏幅度、微动频率等信息,在进一步提高雷达探测精度和进行充分的样本测试与分析的基础上,能够开发出应用于医疗监护、灾区搜救等重要领域的非接触式人体生命体征监测的微波雷达传感器产品。

## 5. 结束语

本文运用微波雷达传感器, 对人体的生命体征进行探测, 在人体的心跳和呼吸两个方面, 建立这两个人体生命主要体征与微波雷达信号之间的科学联系。通过人体衣物、瓦砾、墙壁等遮盖物的微波衰减模拟测试, 以及人体心跳和呼吸的微波雷达传感器实际测试, 得出的结论表明, 通过微波雷达传感器进行人体生命体征的非接触式监测的技术和方法, 切实可行。本文的研究为严重表皮烧伤的人体、瓦砾掩埋下的人体等无法直接接触人体的真实情况下的非接触探测提供了良好、可行的测试方法和技术的支

## 基金项目

江苏省大学生创新创业训练计划项目(项目编号: 202211055042Y); 常州工学院教学改革研究项目(项目编号: xxjk2022-3); 常州工学院“课程思政”建设项目(项目编号: 30120300100-22-kfk01, 30120300100-jxtd03)。

## 参考文献

- [1] 马萌恩. 毫米波雷达非接触生命体征检测技术研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 国防科技大学, 2020.
- [2] 景会成, 白英杰, 曾凯, 赵欣, 白世平. 基于 77 GHz 毫米波雷达感知的生命体征检测方法[J]. 电子测量技术, 2022, 45(22): 55-63.
- [3] 张桂源. 毫米波雷达非接触式生命体征探测方法研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [4] 周佳丰, 刘永泽. 基于 VMD 的 FMCW 毫米波雷达胸壁微动检测[J]. 现代电子技术, 2022, 45(21): 43-49.
- [5] 琚泽东, 黄晓红. 基于毫米波雷达的动态目标生命体征检测研究[J]. 电子测量技术, 2022, 45(16): 27-33.
- [6] 水玉柱. 毫米波雷达多人体目标生命信号检测技术研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆邮电大学, 2022.
- [7] 郭婧. 基于 FMCW 雷达的呼吸及心跳检测研究[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2022.
- [8] 周佳丰. 胸壁微动毫米波雷达信号特征提取与分离技术研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2022.
- [9] 陈云飞. FMCW 毫米波体征检测雷达研究与设计[D]: [硕士学位论文]. 成都: 四川师范大学, 2022.
- [10] 薛毅松. 基于毫米波雷达的非接触式健康监测系统研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2022.