doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.07.055

联合毫米波感知与机器视觉的生猪呼吸心率同步监测方法

郭　交[1,2]　丁雨航[1]　李俊良[1]　王宇航[1]　万里平[1]

(1.西北农林科技大学机械与电子工程学院,陕西杨凌 712100;
2.陕西省农业信息感知与智能服务重点实验室,陕西杨凌 712100)

摘要:在现代畜牧业中,生猪的呼吸心率是评估其健康状态的关键指标之一。因此,开发一种非接触式、高精度的多目标生命体征监测技术对于推动畜牧业的现代化发展具有重要意义。毫米波雷达技术通过发射线性调频连续波(Linear frequency modulated continuous wave,LFMCW),能够实现极高的脉冲压缩比,从而显著提升雷达的距离分辨率和目标检测能力。针对现有方法在多目标呼吸心率同步监测能力上的不足,本文提出一种联合机器视觉与毫米波感知的多生猪目标呼吸心率同步监测方法。通过 YOLO v8 算法识别图像中的生猪目标,有效去除非生猪目标振动源,为毫米波雷达提供先验条件,进而通过 LFMCW 的相量均值相消算法和二维傅里叶变换方法进行静态目标去除和多目标回波解耦,提取回波信号后,通过带通滤波、短时傅里叶变换、周期性评估指标等方法提取目标呼吸心跳时频图并计算呼吸心率。为了验证该方法的有效性,在养殖场实际场景下进行多次实验,结果表明,该方法对生猪呼吸频率测量的平均相对误差为 4.57%,心跳频率平均相对误差为 9.26%,同步监测准确率较高且对环境中非目标振动源信号具有一定抗干扰能力。

关键词:生猪;呼吸心率监测;毫米波雷达;多目标同步监测

中图分类号:S82　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)07-0585-11　　**OSID**:

Pig Breathing and Heart Rates Synchronous Monitoring Method Using Millimeter-wave Perception and Machine Vision

GUO Jiao[1,2]　DING Yuhang[1]　LI Junliang[1]　WANG Yuhang[1]　WAN Liping[1]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
2. *Shaanxi Key Laboratory of Agricultural Information Perception and Intelligent Service*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: In modern animal husbandry, the breathing rate and heart rate of pigs are critical indicators for assessing their health status. Therefore, the development of a non-contact, high-precision multi-target vital sign monitoring technology holds significant importance for advancing the modernization of the livestock industry. Millimeter-wave radar technology, by transmitting linear frequency modulated continuous wave (LFMCW), achieves an extremely high pulse compression ratio, thereby significantly enhancing radar range resolution and target detection capabilities. To address the limitations of existing methods in synchronous multi-target breathing rate and heart rate monitoring, a synchronous multi-pig breathing rate and heart rate monitoring method was proposed, which integrated machine vision with millimeter-wave sensing. The YOLO v8 algorithm was employed to identify pig targets in images, effectively eliminating non-pig vibration sources and providing prior conditions for millimeter-wave radar. Subsequently, the phasor mean cancellation algorithm for LFMCW and two-dimensional Fourier transform method were utilized to remove static targets and decouple multi-target echoes. After extracting echo signals, time-frequency diagrams of breathing and cardiac activities were generated through bandpass filtering, short-time Fourier transform, and periodic evaluation metrics to calculate breathing rate and heart rates. To validate the effectiveness of the proposed method, multiple experiments were conducted in practical farm environments. Results demonstrated that the average relative error for breathing rate

收稿日期:2024-12-03　修回日期:2025-02-18

基金项目:陕西省重点研发计划项目(2024NC-ZDCYL-05-12)、陕西省自然科学基础研究计划项目(2025SYS-SYSZD-073)和大学生创新创业训练计划项目(X202410712019)

作者简介:郭交(1984—),男,教授,主要从事微波遥感提取地表植被信息研究,E-mail:jiao.g@163.com

measurement was 4.57%, and that for heart rate measurement was 9.26%, indicating high synchronization accuracy and notable anti-interference capabilities against non-target vibration sources in the environment.

Key words: pig; respiratory heart rate monitoring; millimeter-wave radar; multi-target synchronous monitoring

0 引言

生猪养殖业是我国畜牧业的重要组成部分[1]，在生猪养殖领域，监测生猪生命体征，特别是呼吸频率(Breathing rate, BR)和心率(Heart rate, HR)对于评估目标的健康状态具有不可替代的重要性[2-3]。这些生理信号是评估心肺功能是否正常的重要指标，它们的变化往往预示着潜在的健康问题，例如猪瘟、口蹄疫、猪繁殖与呼吸综合征等疾病都可能导致呼吸和心跳的异常，这些异常情况可能对生猪的器官和肌肉功能产生严重影响[4-6]。因此，精确地监测这些生命体征对于早期发现健康问题、指导治疗和预防疾病具有重大意义。在现代动物养殖管理中，准确测量呼吸频率和心率，已成为一项关键指标，对疾病的诊断、健康监测以及动物养殖的科学化管理发挥着重要作用[7-8]。

生猪生命体征监测设备可分为接触式和非接触式两大类。传统的监测系统多采用接触式设备，这些设备通过可穿戴传感器或粘性电极直接捕捉呼吸和心跳信号[4,8-10]。尽管这类设备在准确性上具有优势，但其会限制被监测对象的活动自由，且存在传感器脱落、移位或设备损坏等问题，此外，侵入式监测方法本身可能会对生猪的呼吸和心率产生影响，这在一定程度上限制其应用范围[11]。

为解决接触式测量方法带来的局限，研究者开始采用射频(Radio frequency, RF)信号的非接触式监测方案。现有非接触式呼吸心率监测方案包括声学[12-13]、视频图像[14-15]。基于视频图像的方法虽能进行准确监测，但受可视角度限制，对被测牲畜的朝向敏感，当被测牲畜背对设备时系统无法监测呼吸[13]。声学方法受其频率限制，距离及振动位移分辨率较低，难以实现对心跳信号的监测。

毫米波雷达技术，以其宽频带、短波长、窄波束、高分辨率以及对气候和光照条件的不敏感性，已在非接触式生命体征监测领域得到广泛应用，特别是在监测呼吸和心率等关键生理参数方面。这种非接触式雷达监测技术能够远距离监测心跳和呼吸信号，且被测目标无需长时间佩戴接触式设备，可实现呼吸心率的同步监测[16-17]。

在非接触式测量领域，毫米波雷达最初被应用于单目标微小形变测量[18]。在生命体征监测领域，毫米波雷达技术因其能够穿透衣物并在不同光照条件下工作而受到关注[19]。这种技术利用多普勒效应，通过分析人体生理活动引起的表面振动，提取心率和呼吸等生命体征[11,20-21]。此后，研究者开始探索将多目标监测技术应用于人体呼吸和心率监测[22-24]，这些研究工作为毫米波雷达在生命体征监测领域的应用提供了坚实的理论基础，但在实际应用过程中仍存在一些问题。当雷达视场内出现多个动物体时，如何准确确定监测目标数量、有效地从复杂的信号背景中提取出目标个体，以及如何实现对各个目标回波信号的有效解耦，仍是当前需要解决的关键问题。目前，常用的恒虚警率(Constant false alarm rate, CFAR)技术通过在不同噪声水平下自动调整检测阈值，以维持一个恒定的虚警率，有利于确保监测系统的稳定性和可靠性[25-27]。但在生猪呼吸和心率监测的应用场景中，雷达视场内可能同时存在生猪和工作人员，这给信号处理带来了额外的复杂性。尽管 CFAR 技术能够有效地检测出振动目标，但其在区分目标类型方面存在局限性。这是由于 CFAR 技术能够识别出存在振动的物体，但目前尚无法准确地将生猪与工作人员或其他周期性振动目标的振动信号进行区分。

针对上述问题，本文提出一种联合机器视觉与毫米波感知的多目标生猪呼吸心率监测方法。本系统通过摄像头获取图像信息，并利用 YOLO v8 算法确定目标数量和位置，进而与雷达测量结果进行匹配，从而滤除非生猪目标，以解决当雷达视场范围内存在非生猪目标振动源干扰时导致的误测量问题；在信号处理过程中采用相量均值相消算法(消除静态杂波)和二维傅里叶变换技术，分离出各目标的呼吸和心跳相位差信号。通过带通滤波、短时傅里叶变换、周期性评估等技术，精确估计出呼吸和心跳状态。以期为多目标生猪呼吸心率高精度监测提供可行方法。

1 多目标呼吸心率测量方法

使用雷达及摄像头进行数据采集时，二者被布置于同一位置，与目标的平面空间布局如图 1 所示，其中雷达覆盖范围为 -60°~60°，摄像头俯

视拍摄生猪目标。所提出的多目标呼吸心率测量算法主要包括基于视觉的多目标识别和基于信号处理的多目标回波解耦和呼吸心率提取，算法框图如图 2 所示。

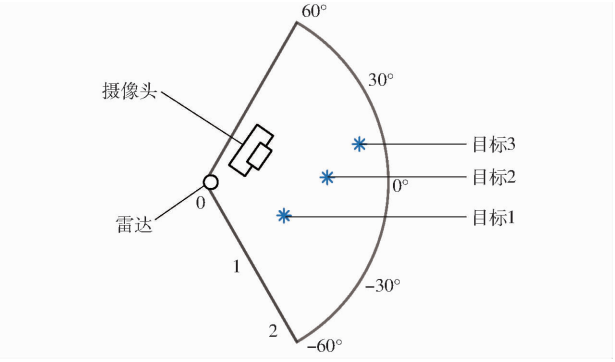

图 1　雷达与目标平面空间布局图

Fig. 1　Radar and target plane space layout

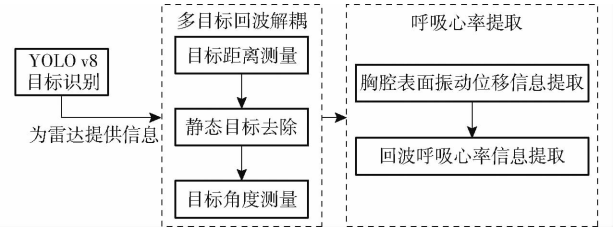

图 2　算法结构框图

Fig. 2　Block diagram of algorithm structure

1.1　YOLO v8 目标识别及定位

YOLO v8 作为深度学习领域中目标检测的杰出代表，其网络结构由主干网络(Backbone)、特征网络(Neck)和预测头输出层(Head)3 大模块构成。该算法以迅捷的处理速度、卓越的精确度以及出色的泛化能力，在众多领域内得到广泛应用[28]。因此，本研究采用 YOLO v8 系列模型针对生猪目标进行训练与识别。

本文摄像头俯视采集图像数据，使用 YOLO v8 识别生猪目标结合仿射变换的方法对目标进行真实坐标测量，从而计算目标距雷达的距离与角度。

从图像中选取 12 组特征点，实际测量其真实坐标，在图像中标注其像素坐标，从而进行仿射变换。通过最小二乘法求解透视变换矩阵，使得像素坐标与真实坐标之间的映射关系误差最小化。

识别生猪目标后，将标注框中心点像素坐标转化为真实坐标，结合预先测量好的雷达真实坐标，即可计算出生猪目标距雷达距离和角度。

在极坐标系图中以视觉定位距离与角度为中心绘制预测框，以供雷达匹配。当实验环境中存在非生猪目标振动源时，图像未能识别便不会参与匹配。当多个雷达定位目标点落于同一框中时优先匹配距离预测框中点较近的目标点。

1.2　多目标回波解耦原理

1.2.1　线性调频连续波原理

所使用的 AWR1443 默认发射初始频率为 77 GHz 的线性调频连续波(Linear frequency modulated continuous wave，LFMCW)，该频率信号能满足对毫米级形变的测量需求。控制雷达发射如图 3 所示锯齿波。

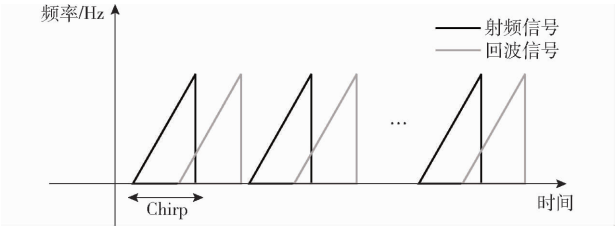

图 3　锯齿波发射信号示意图

Fig. 3　Schematic of a sawtooth wave transmitter signal

由图 3 可知，在每一个周期内信号载频在脉冲持续时间内线性增加，像这样的每一个周期信号(Chirp)扫频时间很短，可认为在该时间范围内，目标保持静止，据此对目标进行测距。

LFMCW 是一种在雷达系统中常用的信号形式，因其具有较大的时宽带宽积，能够实现高脉冲压缩比，从而提升雷达距离分辨率和目标检测能力[29]。LFMCW 发射信号时域表达式为

$$S(t)=A(t)\exp(\mathrm{j}(2\pi f_0 t+\pi K t^2+\phi_0)) \quad (1)$$

该信号瞬时频率为

$$f_{S(t)}=f_0+\frac{1}{2}Kt \quad (2)$$

式中　K——LFMCW 信号调频斜率，MHz/μs

$A(t)$——LFMCW 信号幅度

f_0——LFMCW 信号起始频率，GHz

ϕ_0——LFMCW 信号初始相位，rad

t——时间，s

由式(1)、(2)可知，在信号周期一定的前提下，LFMCW 能有效提高信号带宽，同时对于信号发射器，也有足够的条件实现高功率发射，从而提高雷达回波信噪比[30]。

1.2.2　目标距离测量方法

假设距离雷达 R_0 处存在某一被测目标，雷达发射 LFMCW 信号 $S_T(t)$，在一段时间后接受来自该目标的回波信号 $S_R(t)$，由于雷达信号速度等于光速 c，信号从发射到被接收的波程为 $2R_0$，根据线性调频波表达式以及雷达目标几何关系，发射信号与回波信号可分别表示为

$$S_T(t)=A(t)\exp(\mathrm{j}(2\pi f_0 t+\pi K t^2+\phi_0)) \quad (3)$$

$$S_R(t)=B(t)\exp\left(\mathrm{j}\left(2\pi f_0\left(t-2\frac{R_0}{c}\right)+\pi K\left(t-2\frac{R_0}{c}\right)^2+\phi_0\right)\right) \tag{4}$$

式中 $B(t)$——回波信号振幅

可见,回波时延包含距离信息,为提取出雷达与目标距离 R_0,将发射信号及回波信号共轭相乘,并滤除不含距离的高频成分,获得差拍信号 $S_B(t)$ 为

$$S_B(t)=C(t)\exp\left(\mathrm{j}\left(2\pi f_0 2\frac{R_0}{c}+2\pi Kt2\frac{R_0}{c}-\pi K\left(\frac{2R_0}{c}\right)^2\right)\right) \tag{5}$$

式中 $C(t)$——差拍信号振幅

由于平方项远小于一次项,可忽略不计,因此对于第 i 次信号周期,可得差拍信号为

$$S_B(iT+t)\approx C_i\exp\left(\mathrm{j}\left(4\pi K\frac{R_0}{c}t+4\pi f_0\frac{R_0}{c}\right)\right) \tag{6}$$

将差拍信号表达式整理为向量形式,即

$$S_B(iT+t)=C_i\exp(\mathrm{j}(2\pi f_B t+\phi_i)) \tag{7}$$

其中

$$f_B=\frac{2BR_0}{cT} \tag{8}$$

式中 f_B——差拍频率,GHz

T——LFMCW 信号周期,μs

B——LFMCW 信号带宽,GHz

ϕ_i——信号在第 i 个周期的初相,rad

在发射信号各参数已知的情况下,目标距离 R_0 与差拍频率 f_B 成正比,因此对差拍信号进行距离维快速傅里叶变换(Fast Fourier transform, FFT)后即可根据频率峰值计算出目标距离。

1.2.3 静态目标去除方法

在真实的测量环境中,金属物体往往会产生强烈的雷达回波,这可能会对测量结果造成干扰。同时,一些静止物体所反射的雷达信号也可能对测量精度产生影响。因此,为了提高测量准确性,需要有效地去除这些静态目标的回波[31]。

针对呼吸和心跳引起的胸腔表面微小振动这类微动目标,本文采用相量均值相消算法。与动目标显示(MTI)算法相比,相量均值相消算法在处理微动目标时显示出更高的灵敏度和准确性,从而能够更有效地识别和区分微动目标与静态背景[32]。

假设有 N_{Chirp} 个 Chirp,每个 Chirp 的 FFT 值为 $X_i(r)$,其中 $i=1,2,\cdots,N$,$X_i(r)$ 为关于距离 r 的函数。

首先记 N_{Chirp} 个 X_i 平均值 $\overline{X}(r)$ 为

$$\overline{X}(r)=\frac{1}{N_{Chirp}}\sum_{i=1}^{N}X_i(r) \tag{9}$$

然后从每个 Chirp 的 FFT 值中减去这个平均值,得到静态目标去除后的 FFT 值,即

$$X_i'(r)=X_i(r)-\overline{X}(r) \tag{10}$$

表示为矩阵运算,即

$$\begin{bmatrix}X_1'(r)\\X_2'(r)\\\vdots\\X_{N_{Chirp}}'(r)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}X_1(r)\\X_2(r)\\\vdots\\X_{N_{Chirp}}(r)\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}\overline{X}(r)\\\overline{X}(r)\\\vdots\\\overline{X}(r)\end{bmatrix} \tag{11}$$

本方法原理为静态目标的回波信号在连续的 Chirp 序列中保持相对稳定,减去平均值 $\overline{X}(r)$ 后基本被消除。相对地,移动目标的回波信号在不同 Chirp 之间会经历相位的变动,因此不会在处理过程中被彻底消除。

在每一个距离 r 分别对各个 Chirp 的 $X_i'(r)$ 进行求和,得到 N_{Chirp} 个 Chirp 一维 FFT 值的幅度和 $\sum|X'(r)|$,筛选其中指定数量的最高峰对应目标距离。利用这一特性,能够高效地抑制静态噪声,同时确保移动目标的关键信息得以保留。同时,此方法会抑制偶然振动产生的信号,而保留持续振动的信号。

1.2.4 目标角度测量方法

在角度测量中,如图 4 所示(*Tx* 表示发射天线,*Rx* 表示接收天线),该雷达系统天线为 3 发 4 收的均匀线阵。接收阵元间距为 d,雷达波长为 λ,目标相对于天线法线方向夹角为 θ,则相邻阵元之间接收信号的波程差为 $d\sin\theta$,由此得到对应的相位差 $\Delta\varphi$ 为

$$\Delta\varphi=\frac{2\pi d\sin\theta}{\lambda} \tag{12}$$

式(12)描述了相邻接收阵元的相位差与目标角度的关系,即通过测量出相邻阵元之间的相位差来间接解算出目标相对雷达角度。

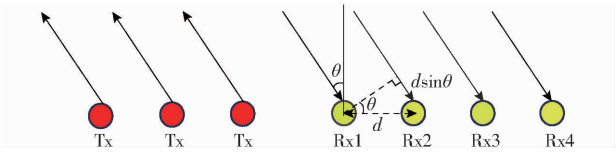

图 4 线阵信号接收示意图

Fig. 4 Schematic of line array signal reception

进而对所有接收阵元的回波信号进行 N_{fft} 点 FFT 处理,设平面波表达式为

$$y=\sin(\omega t-kx) \tag{13}$$

其中

$$k=1/\lambda$$

式中 ω——角频率,rad/s

k——波矢,mm^{-1}

则式(13)可变为

$$y=\sin\left(\omega t+2\pi\left(-\frac{1}{\lambda}\right)x\right) \tag{14}$$

其中 x 为距离，现分析四接收天线间相位差，此时 t 为定值，平面波到阵元间位移差 $\Delta x=d$，则相位差为

$$\Delta\varphi=2\pi\left(-\frac{1}{\lambda}\right)\Delta x=2\pi\left(-\frac{1}{\lambda}\right)d \tag{15}$$

四接收阵元接收回波信号进行目标距离测量后，对每个距离峰对应的四接收阵元接收的一维 FFT 信号进行 N_{FFT} 点 2 维 FFT 处理后，峰值点对应的 $-1/\lambda=(1/d)/Nk_{top}$。代入式(15)可得天线间相位差为

$$\Delta\varphi=\frac{2\pi k_{top}}{N_{FFT}} \tag{16}$$

根据式(12)可计算得到目标角度信息为

$$\theta=\arcsin\frac{\lambda\Delta\varphi}{2\pi d}=\arcsin\frac{k_{top}\lambda}{N_{FFT}d} \tag{17}$$

结合距离、角度信息便可对每一个目标进行定位，在极坐标系中绘制目标点，如果落在 1.1 节所述视觉识别定位框中，则表示对应目标；落在框外的目标点自动滤除。选定相应的距离与角度即可实现多目标回波解耦。

1.3　多目标呼吸心率测量

1.3.1　表面振动位移信息提取

呼吸、心率信息需要从目标的胸腔表面振动位移信息中提取。具有鳞状结构的毛发(如猪毛)在保温性和疏水性方面表现较差。这些毛发表面结构较为粗糙，反射率较低。毫米波雷达发射的电磁波会穿透毛发，反射自目标皮肤表面。假设距离雷达 R_0 处存在某一被测目标，其胸腔表面以位移 $x(t)$ 不断振动，如图 5 所示，雷达发射线性调频信号 $S_T(t)$，在一段时间后接收来自该目标的回波信号 $S_R(t)$。根据雷达与目标距离关系，可获得发射信号、回波信号，两种信号可分别表示为

$$S_T(t)=A(t)\exp(\mathrm{j}(2\pi f_0t+\pi Kt^2+\phi_0)) \tag{18}$$

$$S_R(t)=B(t)\exp\left(\mathrm{j}\left(2\pi f_0\left(t-2\frac{R_0+x(t)}{c}\right)+\pi K\left(t-2\frac{R_0+x(t)}{c}\right)^2+\phi_0\right)\right) \tag{19}$$

式中　$x(t)$——目标胸腔表面振动相对于平衡位置的位移

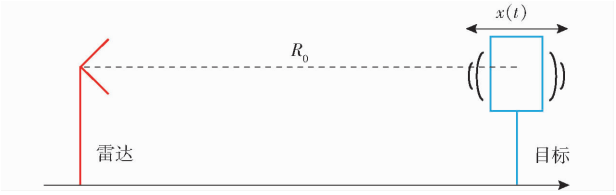

图 5　微小形变测量原理图

Fig. 5　Micro deformation measurement schematic

由式(19)发现，振动位移信息与距离信息位于同一位置，因此参照目标测距处理方法，获得第 i 次信号周期的差拍信号为

$$S_B(iT+t)\approx C_i\exp\left(\mathrm{j}\left(4\pi K\frac{R_0}{c}t+4\pi f_0\frac{R_0}{c}+4\pi\frac{f_c}{c}x(iT)\right)\right) \tag{20}$$

$$\varphi_i=4\pi\frac{R_0}{\lambda_0}+4\pi\frac{x(iT)}{\lambda_c} \tag{21}$$

式中　f_c——中心载波频率，GHz

由式(21)可知，振动位移信息与差拍信号相位存在线性关系，对该式作差分运算消除常数项，只保留振动位移信息项，得到帧间位移差为

$$\Delta x=x(iT+T)-x(T)=\frac{\lambda_c\Delta\varphi}{4\pi} \tag{22}$$

由式(22)可知，在信号扫频中心载波波长 λ_c 已知的前提下，求得差拍信号相位差，便可以求得振动位移量，又因相位信息与差拍信号虚部与实部存在以下关系

$$\varphi=\arctan\frac{\mathrm{Im}[S_B(t)]}{\mathrm{Re}[S_B(t)]} \tag{23}$$

式中　$\mathrm{Re}[\cdot]$——实部　　$\mathrm{Im}[\cdot]$——虚部

综上所述，对回波信号进行共轭相乘、低通滤波后，对差拍信号进行差分运算，即可推算出某段时间的目标振动位移信息。此外，当雷达的视场内存在多个目标时，每个目标反射的回波信号都会被雷达捕获，导致不同目标的回波信号在雷达接收端发生混叠和耦合。因此，第 i 个扫频周期的雷达基带差拍信号可简化为

$$S_B(iT+t)=\sum_{m=1}^{M}A_{m,i}(t)\exp(\mathrm{j}(2\pi f_{m,i}t+\varphi_{m,i})) \tag{24}$$

式中　M——雷达视场范围内可探测的目标分量个数

$A_{m,i}(t)$、$f_{m,i}$、$\varphi_{m,i}$——第 m 个目标分量在第 i 个扫频周期幅值、差拍频率和相位

针对多目标划分距离及角度范围，并提取对应信号实现解耦合分解，最后对各目标分量开展跨越多扫频周期的相位演变追踪，从而同步提取多目标的振动位移时域信息。

结合 1.1 节所述视觉方法获取的目标数量及坐标、距离分布信息与雷达回波距离、角度数据，可以对多个目标逐一匹配图像与回波数据，并为每一个目标分配唯一的 ID。

1.3.2 回波呼吸心率信息提取

通过上述方法对多目标回波信号解耦之后，将这些回波信号逐一处理，分别计算各个目标的呼吸频率与心率，其算法流程如图 6 所示。步骤可概括为：①从回波相位信号矩阵中获取所有目标的回波相位信号。②相位解缠绕以确保相位范围为[$-\pi$, π]，每当连续值间的相位差大于 π 时，从相位中减去 2π，当相位差小于 $-\pi$ 时，从相位中加上 2π。③对相位信号逐帧作差并以 5 帧为窗长度进行移动平均滤波，得到相位差拍信号。④使用带通滤波器将生猪呼吸和心跳的相位差信号滤波分离。⑤对滤波后信号进行短时傅里叶变换，得出心率与呼吸频率。

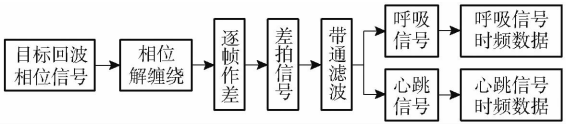

图 6 呼吸心率提取算法流程图

Fig. 6 Flowchart of respiratory heart rate extraction algorithm

经实验对比，取窗长度为 5 帧时可以有效滤除一部分噪声并较好地保留目标回波信号细节。

成年猪正常呼吸频率为 10 ~ 30 次/min，心率为 60 ~ 100 次/min。在设置带通滤波器滤波范围时还需考虑到非正常情况，故将呼吸信号滤波范围设置为 0.1 ~ 0.6 Hz，对应 6 ~ 36 次/min；将心跳信号滤波范围设置为 0.8 ~ 2.5 Hz，对应 48 ~ 150 次/min。

选用巴特沃斯滤波器，呼吸信号巴特沃斯滤波器为 4 阶、心跳信号巴特沃斯滤波器为 8 阶。其频率相应曲线如图 7 所示。

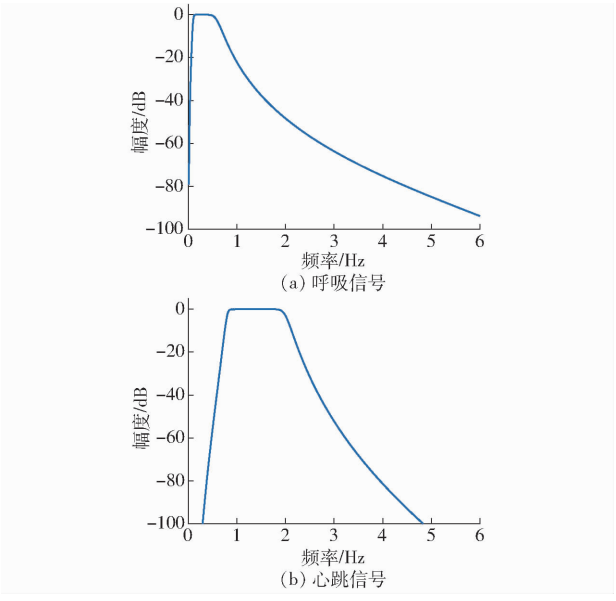

图 7 呼吸心跳带通滤波器频率响应曲线

Fig. 7 Breathing heartbeat bandpass filter frequency response curves

由于呼吸心跳信号属于非平稳信号，其频率随时间变换，为准确描述其随时间变化趋势，使用短时傅里叶变换，即

$$X(n,\omega)=\sum_{m=-\infty}^{\infty}x(m)w(n-m)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega m}\quad(n=1,2,\cdots,N)\tag{25}$$

式中 $x(m)$——输入信号，为滤波后呼吸信号或心跳信号

$w(n-m)$——窗函数

n——窗函数中心位置

N——经窗口参数最优设计后的中心位置个数

选用汉明窗，窗长度为 256。由于生猪的呼吸心跳是典型的周期性活动，因此只有周期性水平较高的时段信号才能真实反映呼吸心率情况。对短时傅里叶变换不同中心位置进行频谱分析，提出周期性水平评估指标 P_n，即

$$P_n=\frac{h_i'}{h_i''}\quad(n=1,2,\cdots,N)\tag{26}$$

式中 h_i'、h_i''——$X(n,\omega)$ 对应的最高峰、次高峰

次高峰定义为除最大值以外第二大的局部极大值，不存在第二大极大值时则以信号较小的边界值代替。用以评估该局部时间段的信号周期性。进而得到目标呼吸心率 f_{target} 计算公式为

$$f_{\mathrm{target}}=\frac{\sum_{n=1}^{N}P_i f_n}{\sum_{n=1}^{N}P_i}\tag{27}$$

式中 f_n——第 n 段时间内频率最高峰对应频率，Hz

该值越高，表征该段时间内信号的周期性较强、相对稳定、受外部干扰小。经多次实验对比，可发现此种方式计算得到的 f_{target} 相比于对 f_n 求均值计算得到的呼吸心率更为准确。

2 实验结果与分析

2.1 实验场景及参数

使用 TI 公司的 AWR1443 毫米波传感器和 DCA1000 数据采集模块。AWR1443 是 TI 公司设计的 77 GHz 毫米波传感器评估板，其包含雷达信号发射接收、回波处理等功能。DCA1000 数据采集模块为 TI 公司设计的雷达板配套设备。实验参数如表 1 所示。

在多目标实验前，进行了充分的单目标实验，选取 20 个不同的测量目标，测量次数约为 80，单目标实验测量准确性高于多目标实验。在确保单目标测

表 1　雷达参数

Tab. 1　Radar parameters

参数	数值
信号载频/GHz	77
帧周期/ms	40
单个脉冲采样点数	256
采样率/MHz	10
调频斜率/(MHz·μs^{-1})	29.982
总帧数	1 024
有效带宽/GHz	0.767

量可靠后开始进行多目标实验，多目标实验选取 15 组不同的测量目标，测量次数约为 120。多目标实验场景如图 8 所示，摄像头置于生猪目标斜上方俯视拍摄。



图 8　实验场景布置图

Fig. 8　Experimental scene layout

雷达及摄像头通过 USB 接口与便携式计算机相连，呼吸心率监测算法在 Matlab 2022b 软件上运行。其中摄像头分辨率为 1 920 像素 ×1 080 像素、帧率为 30 f/s。雷达原始数据通过便携式计算机使用 mmwave studio 软件控制雷达采集，数据格式为 bin 文件。选取 3 只生猪静卧或静立情况下进行测量。

2.2　视觉识别结果

摄像头采集的图像数据使用 YOLO v8 进行目标识别，而后进行定位。定位结果如图 9 所示。



图 9　图像目标识别结果

Fig. 9　Image target recognition results

此方法可识别出多个生猪目标及其距雷达距离和角度信息，为后续雷达信号处理提供目标个数信息。通过与雷达测得的真值进行对比分析，可以发现单纯依靠摄像头测得的距离和角度与实际值之间仍存在一定误差，其主要原因为：①尽管已进行相机标定，并尽可能地处理掉镜头畸变，但由于算法本身的局限性，在像素与真实坐标转换的过程中，不可避免地会产生一定误差。②算法生成的预测框坐标中心点并不一定能精确地落在猪只心脏位置，以及生猪在雷达测量期间有所移动。不过该误差在合理范围内，因此可以利用视觉识别后进行进一步匹配。

2.3　多目标定位结果

在真实养殖环境中，存在大量静态金属，会产生静态杂波，静态杂波滤除效果如图 10 所示。

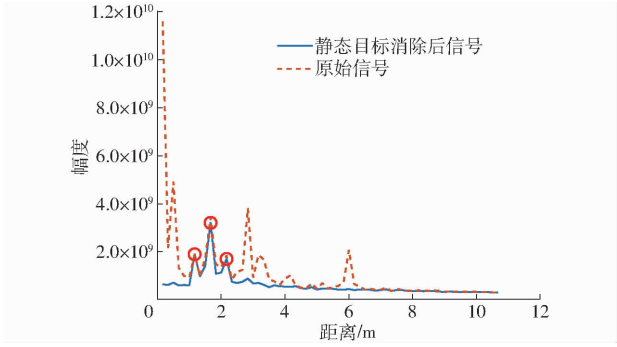

图 10　静态杂波滤除效果

Fig. 10　Static clutter filtering effect

可见直流分量、静态目标杂波被有效滤除，同时很好地保留了目标信号。在本图中同时可以得出距离测量结果，图中存在 3 个明显峰值，分别对应每个目标所在距离门。为区分每一个目标所在角度，进而对每一个距离门进行角度定位，结果如图 11 所示。距离和角度测量结果如表 2 和表 3 所示。

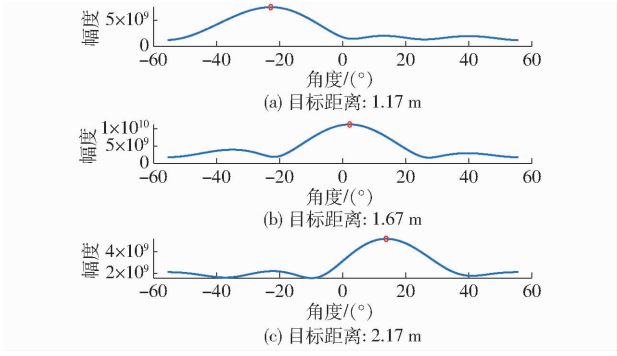

图 11　目标角度定位图

Fig. 11　Target angle positioning chart

表 2　距离测量结果

Tab. 2　Results of distance measurement

目标	真实距离/m	测量距离/m	绝对误差/m	相对误差/%
1	1.20	1.17	0.03	2.50
2	1.73	1.67	0.06	3.47
3	2.25	2.17	0.08	3.56

表 3　角度测量结果

Tab. 3　Results of angle measurement

目标	真实角度/(°)	测量角度/(°)	绝对误差/(°)	相对误差/%
1	−28.63	−22.82	5.81	20.29
2	3.58	2.24	1.34	37.43
3	16.90	13.81	3.09	18.28

由图 11 可见,3 个距离门皆有明显峰值,即为该距离下目标所在角度。结合角度与距离信息,可以对目标定位结果绘制雷达图,如图 12 所示。

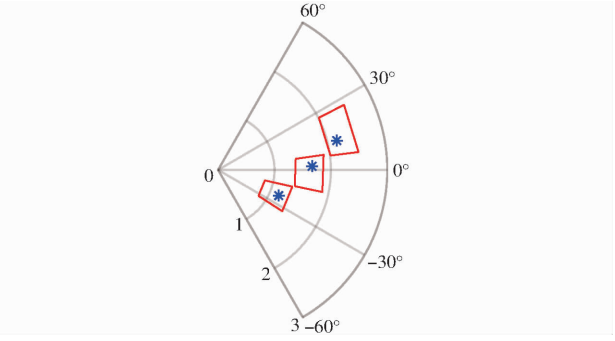

图 12 目标定位雷达图

Fig. 12 Targeting radar map

由表 2、3 可知,误差总体保持在较低水平。在多次实验中,当目标所在距离为 3 m 内,所在角度为 −30°~30°时,距离测量平均绝对误差为 0.03 m、平均相对误差为 3.2%;角度测量平均绝对误差为 3.75°。尽管如此,定位误差仍保持在较小水平,且在可接受的误差范围内,因此不会对目标回波数据的提取和分析造成显著影响。

2.4 呼吸心率测量结果

基于上述定位结果划分距离和角度单元后,对目标逐一提取时间维度的回波数据,如图 13 所示,图中纵轴表示帧间差拍位移。逐一进行带通滤波后结果如图 14 所示。

进而对目标逐一进行所述短时傅里叶变换,以单个目标 2 为例,如图 15 所示。

依据周期性评估指标的方法对每个时间段加权

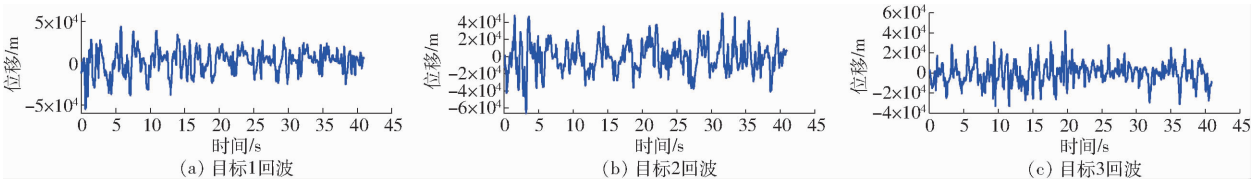

图 13 目标回波数据

Fig. 13 Target echo data

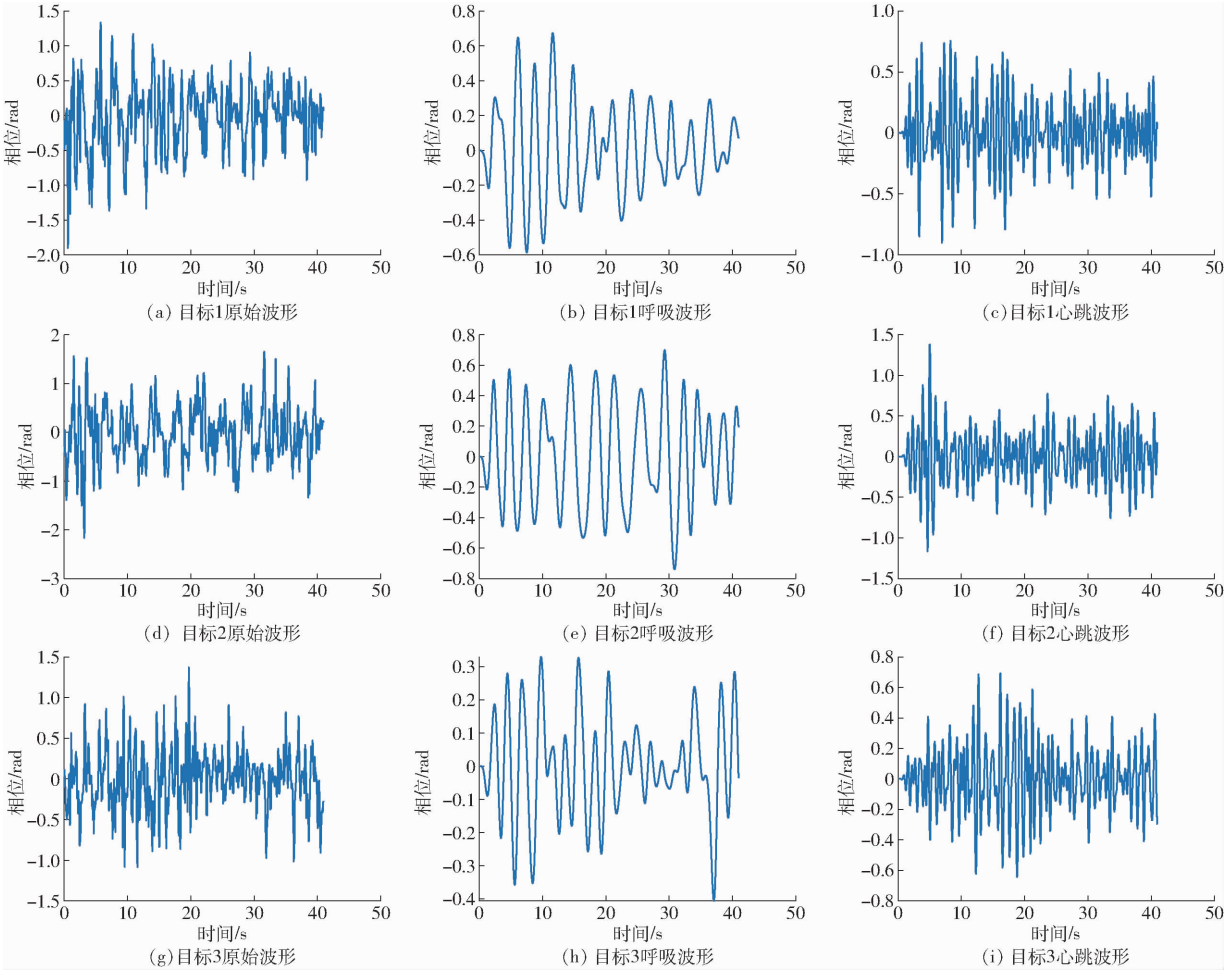

图 14 带通滤波结果

Fig. 14 Band-pass filtering results graphs

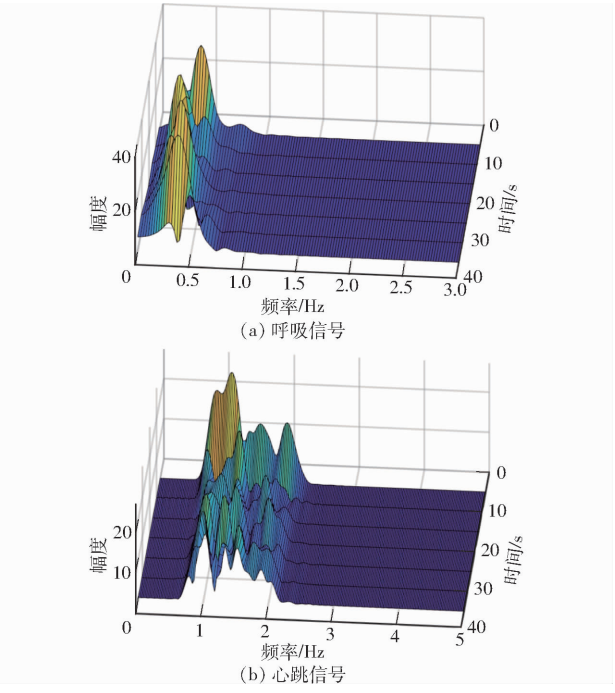

图 15　短时傅里叶变换结果时频图

Fig. 15　Time-frequency plot of short-time FT results

求均值,得到呼吸心跳频率。采用本文呼吸心率监测方法对雷达回波数据进行验证,多次实验进行一致性检验,其中各次实验中实验设备情况不变,被测目标及环境发生轻微变化。结果如表 4、5 所示,其中心跳次数真实值通过血氧饱和度和心率监测传感器测得、呼吸真实值通过人工方式测得。测量时记录呼吸心跳次数,转换为频率。由表 4、5 可知,本次实验中呼吸频率平均相对误差为 1.47%,呼吸频率最大相对误差为 2.80%;心率平均相对误差为 7.40%,心率最大相对误差为 8.88%。在不同场景下的大量实验中,呼吸心率测量平均误差略大于上述值,其中呼吸频率平均相对误差为 4.57%、心率平均相对误差为 9.26%。结果表明,本文多目标呼吸心率测量方法具有较高测量精度。

表 4　生猪呼吸频率测量结果

Tab. 4　Results of breathing rate measurements in pigs

序号	目标	本文方法/Hz	真实值/Hz	相对误差/%
1	1	0.325 5	0.316 7	2.80
	2	0.317 4	0.316 7	0.23
	3	0.321 5	0.316 7	1.51
2	1	0.317 4	0.316 7	0.23
	2	0.301 1	0.300 0	0.37
	3	0.260 4	0.266 7	2.34
3	1	0.341 8	0.350 0	2.34
	2	0.313 3	0.316 7	1.06
	3	0.293 0	0.300 0	2.34

对上述情况下 3 只生猪目标在相同条件下测量呼吸心率,测量次数为 10,与真实值获取方法进行差异分析,检验方式为双样本 t 检验,以目标 1 为例,结果如表 6、7 所示。

表 5　生猪心跳频率测量结果

Tab. 5　Results of heart rate measurements in pigs

序号	目标	本文方法/Hz	真实值/Hz	相对误差/%
1	1	1.302 1	1.366 7	4.73
	2	1.289 9	1.200 0	7.49
	3	1.062 0	1.150 0	7.65
2	1	1.293 9	1.400 0	7.58
	2	1.330 6	1.233 3	7.88
	3	1.403 8	1.300 0	7.99
3	1	1.566 6	1.466 7	6.81
	2	1.363 1	1.266 7	7.61
	3	1.078 3	1.183 3	8.88

表 6　呼吸频率测量值与真实值对比

Tab. 6　Comparison of breathing rate measurements with true values

目标	样本量/头	数据	平均值/Hz	标准差/Hz	t 值	sig 值
1	10	测量值	0.333 4	0.012 4	0.952 1	0.353 6
		真实值	0.328 3	0.011 2		

表 7　心跳频率测量值与真实值对比

Tab. 7　Comparison of heart rate measurements with true values

目标	样本量/头	数据	平均值/Hz	标准差/Hz	t 值	sig 值
1	10	测量值	1.444 9	0.095 1	1.330 8	0.199 9
		真实值	1.395 0	0.070 7		

由表 6、7 可知,sig 值大于 0.05,即测量值与真实值差异不显著。

当环境中存在其他非生猪目标振动源时,雷达借助图像数据提供的信息及静态目标去除、滤波等方法处理可以在一定程度上规避其影响,因此抗干扰能力较强。

3　结论

(1)利用毫米波雷达技术进行非接触式监测,该技术具有高分辨率、对环境不敏感等优点,能有效监测呼吸和心率。结合机器视觉(YOLO v8 算法)和毫米波感知,通过摄像头捕捉特定目标,雷达收集回波信号,实现多目标监测。信号处理技术包括相量均值相消算法和二维傅里叶变换技术,滤除静态杂波信号并对多目标回波信号进行解耦合,其后通过带通滤波、短时傅里叶变换等技术可监测生猪呼吸和心跳变化。

(2)该方法可实现对 3 只静卧或静立生猪呼吸及心率同时监测,并且对多振动物体干扰的情况鲁棒,对环境噪声具有较强的抗干扰能力。在多次实验中,呼吸、心跳频率测量平均相对误差分别为 4.57%、9.26%。表明利用毫米波感知联合机器视觉的方法实现多目标生猪呼吸心率同时监测是可行的。

参 考 文 献

[1] 沈明霞, 陈金鑫, 丁奇安, 等. 生猪自动化养殖装备与技术研究进展与展望[J]. 农业机械学报, 2022, 53(12): 1 - 19.
SHEN Mingxia, CHEN Jinxin, DING Qi'an, et al. Current situation and development trend of pig automated farming equipment application[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 1 - 19. (in Chinese)

[2] GROSSE-KLEEMAN J, WEGNER B, SPIEKERMEIER I, et al. Health monitoring of fattening pigs-use of production data, farm characteristics and on-farm examination[J]. Porcine Health Management, 2021, 7(1): 45.

[3] 曹衍, 梁灿, 桂琪, 等. 基于物联网的生猪养殖健康监测系统研究[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2023(24): 42 - 50, 146.
CAO Kan, LIANG Can, GUI Qi, et al. Research on health monitoring system of pig breeding based on internet of things[J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2023(24): 42 - 50, 146. (in Chinese)

[4] 刘艳昌, 郭宇戈, 张志霞, 等. 基于 LoRa 的生猪体征监测系统设计与实现[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(4): 66 - 71, 140.
LIU Yanchang, GUO Yuge, ZHANG Zhixia, et al. Design and implementation of pig body feature monitoring system based on LoRa[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(4): 66 - 71, 140. (in Chinese)

[5] BOETERS M, GARCIA-MORANTE B, VAN SCHAIK Gerdien, et al. The economic impact of endemic respiratory disease in pigs and related interventions—a systematic review[J]. Porcine Health Management, 2023, 9(1): 45.

[6] SALGUERO F J, FROSSARD J P, REBEL J M J, et al. Host-pathogen interactions during porcine reproductive and respiratory syndrome virus 1 infection of piglets[J]. Virus Research, 2015, 202: 135 - 143.

[7] 逯玉兰, 李广, 郝玉胜, 等. 基于 Wi - Fi 无线感知技术的猪呼吸频率监测[J]. 农业工程学报, 2019, 35(24): 183 - 190.
LU Yulan, LI Guang, HAO Yusheng, et al. Monitoring pig respiration frequency using Wi - Fi wireless sensing technology[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(24): 183 - 190. (in Chinese)

[8] ZHANG M, WANG X, FENG H, et al. Wearable internet of things enabled precision livestock farming in smart farms: a review of technical solutions for precise perception, biocompatibility, and sustainability monitoring[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 312: 127712.

[9] 贺军, 考希宾, 万红, 等. 穿戴式生理监测装置设计研究[J]. 针织工业, 2023(9): 69 - 73.
HE Jun, KAO Xibin, WAN Hong, et al. Design and research of wearable physiological monitoring device[J]. Knitting Industries, 2023(9): 69 - 73. (in Chinese)

[10] JIRKOF P, SEEBECK P. Vital signs without handling or animal prep[J]. Lab Animal, 2019, 48(5): 144 - 145.

[11] LV Wenjie, HE Wangdong, LIN Xipeng, et al. Non-contact monitoring of human vital signs using FMCW millimeter wave radar in the 120 GHz band[J]. Sensors, 2021, 21(8): 2732.

[12] WANG A, NGUYEN D, SRIDHAR A R, et al. Using smart speakers to contactlessly monitor heart rhythms[J]. Communications Biology, 2021, 4(1): 319.

[13] 王天本, 刘现涛, 李张本, 等. 基于声学冲激响应的奶山羊呼吸及反刍同步监测方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(7): 322 - 331.
WANG Tianben, LIU Xiantao, LI Zhangben, et al. Simultaneously monitoring respiration and ruminating behavior of dairy goats based on acoustic impulse response[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 322 - 331. (in Chinese)

[14] GIBSON K. Non-contact heart and respiratory rate monitoring of preterm infants based on a computer vision system: a method comparison study[J]. Pediatric Research, 2019, 86:738 - 741.

[15] RAHMAN M M, COOK J, TAEBI A. Non-contact heart vibration measurement using computer vision-based seismocardiography[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 11787.

[16] GAO Zhiqiang, ALI Luqman, WANG Cong, et al. Real-time non-contact millimeter wave radar-based vital sign detection[J]. Sensors, 2022, 22(19): 7560.

[17] WU Yingxiao, NI Haocheng, MAO Changlin, et al. Non-intrusive human vital sign detection using mmWave sensing technologies: a review[J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2024, 20(1): 16.

[18] YANG Shaoshi, HANZO L. Fifty years of MIMO detection: the road to large-scale MIMOs[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2015, 17(4): 1941 - 1988.

[19] HU Yaokun, TODA T. Remote vital signs measurement of indoor walking persons using mm-wave FMCW radar[J]. IEEE Access, 2022, 10: 78219 - 78230.

[20] ALHAZMI A K, ALANAZY M A, ALSHEHRY A H, et al. Intelligent millimeter-wave system for human activity monitoring for telemedicine[J]. Sensors, 2024, 24(1): 268.

[21] ZHAO Yuefeng, WANG Kun, GAO Jing. Accurate 77-GHz millimeter-wave radar noncontact vital sign detection using the optimized variational mode decomposition algorithm[J]. Journal of Signal Processing Systems for Signal Image and Video Technology, 2023, 95(11): 1297 - 1310.

[22] XUE Wei, WANG Rang, LIU Li, et al. Accurate multi-target vital signs detection method for FMCW radar[J].

Measurement, 2023, 223:113715.
[23] 任伟, 侯凯悦, 王刚, 等. FMCW 毫米波雷达多人呼吸检测方法[J]. 信号处理, 2021, 37(9): 1581 – 1588.
REN Wei, HOU Kaiyue, WANG Gang, et al. Multi-target respiration detection using FMCW mmwave radar[J]. Journal of Signal Processing, 2021, 37(9): 1581 – 1588. (in Chinese)
[24] 熊玉勇, 李松旭, 吴高阳, 等. 基于毫米波感知的形变及振动多点同步测量理论与方法[J]. 中国科学:技术科学, 2021, 51(9): 998 – 1010.
XIONG Yuyong, LI Songxu, WU Gaoyang, et al. Theory and method of multi-point synchronous deformation and vibration measurement based on millimeter-wave sensing[J]. Scientia Sinica Technologica, 2021, 51(9): 998 – 1010. (in Chinese)
[25] CHEN Xiaolin, LIU Kai, ZHANG Zhibo. A pointnet-based CFAR detection method for radar target detection in sea clutter [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2024, 21: 3502305.
[26] 秦天慈, 王中训, 黄勇, 等. 雷达恒虚警目标检测处理技术综述[J]. 探测与控制学报, 2023, 45(3): 1 – 11.
QIN Tianci, WANG Zhongxun, HUANG Yong, et al. Radar CFAR target detection technology review[J]. Journal of Detection & Control, 2023, 45(3): 1 – 11. (in Chinese)
[27] 郑志杰, 万显荣, 胡仕波, 等. 基于窗口参数估计的距离扩展目标 CFAR 检测[J]. 雷达科学与技术, 2022, 20(6): 614 – 622.
ZHENG Zhijie, WAN Xianrong, HU Shibo, et al. Range-extended target CFAR detection based on window parameter estimation[J]. Radar Science and Technology, 2022, 20(6): 614 – 622. (in Chinese)
[28] 罗斌, 李家超, 周亚男, 等. 基于改进 YOLO v8 轻量化稻瘟病孢子检测方法[J]. 农业机械学报, 2024, 55(11): 32 – 38.
LUO Bin, LI Jiachao, ZHOU Ya'nan, et al. Lightweight rice blast spores detection method based on improved YOLO v8[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(11): 32 – 38. (in Chinese)
[29] JIN Benzhou, ZHU Jiang, WU Qihui, et al. One-bit LFMCW radar: spectrum analysis and target detection[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2020, 56(4): 2732 – 2750.
[30] WILL C, VAISHNAV P, CHAKRABORTY A, et al. Human target detection, tracking, and classification using 24-GHz FMCW radar[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(17): 7283 – 7299.
[31] 薛金林, 程峰, 汪冰清, 等. 基于无效目标滤除的毫米波雷达农田障碍物检测方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(4): 233 – 240.
XUE Jinlin, CHENG Feng, WANG Bingqing, et al. Method for millimeter wave radar farm obstacle detection based on invalid target filtering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(4): 233 – 240. (in Chinese)
[32] TANG Bin, YANG Qi, ZHANG Ye, et al. Three-dimensional micro-motion feature extraction of the vibrating target based on multi-channel radar in the Terahertz band[J]. Sensors, 2020, 20(1): 8.

(上接第 574 页)

[25] 李文杰,闫世强,蒋莹,等.自适应确定 DBSCAN 算法参数的算法研究[J].计算机工程与应用,2019,55(5):1 – 7,148.
LI Wenjie, YAN Shiqiang, JIANG Ying, et al. Research on method of self-adaptive determination of DBSCAN algorithm parameters[J]. Computer Engineering and Applications,2019,55(5):1 – 7,148. (in Chinese)
[26] QI C R, YI Li, SU Hao, et al. PointNet + + : deep hierarchical feature learning on point sets in a metric space[J]. arXiv: 1706.02413,2017.
[27] LIU Z, LIN Y, CAO Y, et al. Swin transformer: hierarchical vision transformer using shifted windows[C]//2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV),2021:9992 – 10002.
[28] LIU Z, MAO H, WU C Y, et al. A ConvNet for the 2020s[C]//2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR),2022:11966 – 11976.
[29] YANG C, ZHANG C, YANG X, et al. Performance study of CBAM attention mechanism in convolutional neural networks at different depths[C]//2023 IEEE 18th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). IEEE,2023:1373 – 1377.
[30] QI C R, SU H, MO K, et al. PointNet: deep learning on point sets for 3D classification and segmentation[J]. arXiv:1612.00593,2016.
[31] WANG Y, SUN Y, LIU Z, et al. Dynamic graph CNN for learning on point clouds[J]. arXiv:1801.07829,2018.
[32] THOMAS H, QI C R, DESCHAUD J E, et al. KPConv: flexible and deformable convolution for point clouds[J]. arXiv: 1904.08889,2019.
[33] SHEN W, HU H, DAI B, et al. Individual identification of dairy cows based on convolutional neural networks[J]. Multimedia Tools and Applications,2020,79(21 – 22):14711 – 14724.
[34] WANG R, GAO R, LI Q, et al. An ultra-lightweight method for individual identification of cow-back pattern images in an open image set[J]. Expert Systems with Applications,2024,249:123529.