

基于运动状态自适应感知的相控阵雷达轨迹跟踪与体征监测研究

周宏伟^① 张东恒^{*①} 耿瑞旭^① 李嘉木^① 陈彦^①

^①(中国科学技术大学网络空间安全学院 合肥 230026)

摘要: 随着人口老龄化趋势加剧,居家养老安全与慢性病监护的需求日益凸显,基于雷达的室内人体轨迹跟踪与生命体征监测技术备受关注。现有研究多采用多输入多输出(MIMO)体制,存在信噪比较低和数据量冗余的局限。与此相比,相控阵雷达凭借更高的信噪比和更少的数据量,在复杂室内环境中表现出更强的感知鲁棒性。然而,现有室内感知系统应用相控阵雷达时存在两方面局限:一是传统相控阵波束调度策略在跟踪室内近距离高机动人体时易丢失目标;二是难以同步实现轨迹跟踪与生命体征同时监测,且缺乏基于目标运动状态的自适应切换机制。针对以上问题,该文首先分析了MIMO雷达与相控阵雷达的差异以及不同波束调度策略跟踪室内人体轨迹的平均重访时间性能,并提出一种基于相控阵雷达的人体运动状态自适应实时监测方案。该方案根据人体运动状态自适应切换工作模式:在运动状态下,设计了“粗扫-自适应精扫-和差波束测角”策略实时跟踪人体轨迹;在静止状态下,切换至体征监测模式提取呼吸与心跳信息。实验结果表明,该方案能够在室内实现稳定轨迹跟踪与可靠生命体征监测,为室内智能健康监护奠定了基础。

关键词: 相控阵雷达; 轨迹跟踪; 生命体征监测; 任务调度; 居家健康

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2026)x-0001-18

DOI: 10.12000/JR26032

CSTR: 32380.14.JR26032

引用格式: 周宏伟,张东恒,耿瑞旭,等.基于运动状态自适应感知的相控阵雷达轨迹跟踪与体征监测研究[J].雷达学报(中英文),待出版. doi: 10.12000/JR26032.

Reference format: ZHOU Hongwei, ZHANG Dongheng, GENG Ruixu, *et al.* Phased array radar trajectory tracking and vital signs monitoring based on adaptive motion state sensing[J]. *Journal of Radars*, in press. doi: 10.12000/JR26032.

Phased Array Radar Trajectory Tracking and Vital Signs Monitoring Based on Adaptive Motion State Sensing

ZHOU Hongwei^① ZHANG Dongheng^{*①} GENG Ruixu^①
LI Jiamu^① CHEN Yan^①

^①(School of Cyber Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: With the rapid aging of the population, the rising demand for home-based care and chronic disease monitoring in older adults has increased interest in radar-based technologies for indoor human trajectory tracking and vital sign detection. Existing studies mainly use multiple-input multiple-output (MIMO) systems, which face limitations such as low signal-to-noise ratio (SNR) and data redundancy. In contrast, phased array radars offer better sensing reliability in complex indoor environments, thanks to higher SNR and lower data

收稿日期: 2026-01-28; 改回日期: ; 网络出版: 2026-xx-xx

*通信作者: 张东恒 dongheng@ustc.edu.cn *Corresponding Author: ZHANG Dongheng, dongheng@ustc.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(62201542), 中央高校基本科研业务费专项资金

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (62201542), The Fundamental Research Funds for the Central Universities

责任编辑: 贾勇 Corresponding Editor: JIA Yong

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License

(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

volume. However, current indoor sensing systems encounter two main challenges when applying phased array radars. First, traditional beam scheduling strategies often lose targets when tracking close-range, highly maneuverable humans. Second, achieving simultaneous trajectory tracking and real-time vital sign detection remains difficult without adaptive switching mechanisms based on target movement. To address these issues, this paper first compares MIMO and phased array radars, along with the average revisit time of different beam-scheduling strategies for tracking indoor human movements. It also proposes an adaptive real-time monitoring system for human motion states based on phased array radar. This system dynamically switches modes based on human movement: during motion, it employs a strategy combining coarse scanning, adaptive fine scanning, and sum-and-difference beam angle measurement for real-time trajectory tracking; when stationary, it shifts to a vital sign monitoring mode to capture respiration and heartbeat signals. Experimental results show that the proposed system provides stable indoor trajectory tracking and reliable vital sign monitoring, laying the groundwork for home-based smart health monitoring systems.

Key words: Phased array radar; Trajectory tracking; Vital signs monitoring; Task scheduling; Home Healthcare

1 引言

全球性的人口老龄化对养老服务提出了升级转型的新要求,其中智慧居家养老成为广泛关注的焦点^[1]。在老年人健康中,以步态轨迹为代表的运动表现,和以心脏、呼吸系统为代表的体征表现,与重大疾病和死亡率的关系尤为密切^[2-4]。为保障被监护人员的生命安全,迫切需要实现对运动轨迹和生命体征的实时同步监测。

常用的监测方式中,光学摄像头面临隐私泄露风险,接触式传感器佩戴舒适性差、用户依从性低。而基于无线信号的雷达技术凭借其非接触、全天候等优势,应用场景更加广泛^[5]。尽管雷达技术优势明显,但不同体制的雷达在室内复杂环境下存在显著差异。现有的研究多数基于多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)体制^[6-10]。然而, MIMO雷达在信噪比与数据处理效率方面较相控阵存在一定的局限性: (1)传统的MIMO雷达发射端发射宽波束,能量被迫分散,在杂乱的室内场景中信噪比、抗干扰等性能会受到严重影响。而相控阵雷达通过硬件波束赋形在目标方向聚焦,具有更高的信噪比增益。且随着阵元数增加,相控阵雷达优势更加明显^[11]。(2)另一方面, MIMO雷达需要先接收大量数据再统一数字信号处理,计算资源消耗较大。而相控阵雷达在硬件上就能完成移相和合成,有效缓解了数字信号处理的计算压力,更适用于实时监测。

尽管相控阵雷达在信噪比和数据处理效率方面存在一定优势,但将其应用于室内人体监护仍面临波束资源调度与多任务协同的挑战: (1)目前基于雷达的人体轨迹跟踪多依赖于MIMO体制^[12-19],其全空域同时覆盖的特性无法为单波束扫描的相控阵雷达提供直接参考。同时,现有的相控阵雷达人体

探测研究大多局限于离散的位置定位,例如通过分析多普勒回波电压强度^[20]、时域统计特征比值^[21,22]或频域峰值^[23]实现区域、角度或距离的单次判别,缺乏对连续运动轨迹的构建。而室内运动人体具有距离近、角速度大且运动状态复杂的特点,连续的轨迹跟踪任务对相控阵雷达的波束调度与搜索、跟踪资源的分配提出了严苛要求^[24,25]。传统相控阵波束调度策略难以平衡这一矛盾:搜索资源过多,如“边跟踪边搜索”(Track While Search, TWS),导致反应速度慢,跟踪更新率低^[26,27]。而即便增多跟踪资源,如“搜索加跟踪”(Track And Search, TAS),对于近距离移动的人体,跟踪链也很容易频繁断裂^[28,29],导致重访时间显著增加。(2)目前基于相控阵雷达的人体探测未同时兼顾静止时生命体征和运动时轨迹跟踪的探测,大多都侧重于仅用相控阵雷达探测人体生命体征^[20-23,30-33]。然而在实际室内监护任务中,人体运动状态复杂(主要包含静止和运动两种状态),且轨迹跟踪和体征监测对于相控阵雷达在波束调度策略、波束驻留时间和处理方法等方面有明显区别,需要依托两种不同的工作模式加以实现。因此,如何自适应切换两种模式实现连续稳健的监测,也是亟待解决的关键问题。

为了解决上述问题,本文首先分析了MIMO雷达与相控阵雷达的差异以及不同波束调度策略跟踪室内人体轨迹的平均重访时间性能,并创新性地提出了一种基于相控阵雷达的人体运动状态自适应实时监测方案。该方案使用相控阵雷达,结合角度距离图的幅度差分和目标位置的相位差分判别目标运动状态,并根据运动状态自适应切换两种监测模式:在人体运动时,设计了“粗扫-自适应精扫-和差波束测角”(Coarse Scan-Adaptive Fine Scan-Sum and Difference Beam Angle measurement, CASD)波束调度策略更适用于室内人体轨迹跟踪;

在人体静止时，转换为体征监测模式获取呼吸与心跳信息。在此基础上，本文进一步探究了多人场景下的轨迹跟踪和体征监测方案。

本文主要贡献点如下：

(1) 分析了MIMO雷达与相控阵雷达的差异，并通过理论推导和仿真实验证明了相控阵雷达在信噪比和数据处理效率方面优于MIMO雷达。

(2) 分析了现有波束调度策略在室内人体轨迹跟踪任务中的局限性，设计了“粗扫-自适应精扫-和差波束测角”策略，在跟踪室内近距离、高角速度人体时更具优势。

(3) 创新性地提出一套使用相控阵雷达自适应实时监测人体运动轨迹和生命体征的方案。实验结果表明，该方案能够在室内实现稳定轨迹跟踪与可靠生命体征监测。

2 相控阵雷达与MIMO雷达的信噪比对比

本节重点讨论相控阵雷达与MIMO雷达的信噪比。为了公平对比，两者均采用 N 发 M 收的机制。

2.1 相控阵雷达信噪比推导

相控阵雷达通过改变每一天线单元信号的相位与幅度，可以实现天线波束的快速扫描与形状变化^[34]。图1所示是一个简化的线性相控阵雷达工作原理图。以ADI公司的CN0566相控阵设备为例：发射时，发射机输出信号，经移相器和功率放大器元件送至 N 个天线单元，向空中辐射，使天线波束指向预定方向；接收时， M 个天线单元收到的回波信号，通过低噪声放大器和移相器等元件，送至接收机。发射和接收的转换依靠收发开关实现。

发射信号时，设 $\tilde{s}(t) = 1$ 为单位幅度，每个天线单元发射的射频信号为

$$s(t) = \tilde{s}(t) e^{j\omega t} \quad (1)$$

为了将波束指向 θ_0 ，第 n 个发射阵元附加相移

权重 $W_{Tn} = e^{-jkx_{Tn} \sin \theta_0}$ 。第 n 个天线发射的信号 $S_{Tx,n}(t)$ 为

$$S_{Tx,n}(t) = \sqrt{P_t} e^{j\omega t} e^{-jkx_{Tn} \sin \theta_0} \quad (2)$$

其中， P_t 是单阵元发射功率， x_{Tn} 是第 n 发射阵元的位置。

所有 N 路信号在空间传播，到达目标处。目标处接收到的合成信号 $S_{target}(t)$ 是 N 路信号的叠加：

$$S_{target}(t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi R^2}} \sum_{n=0}^{N-1} S_{Tx,n} \left(t - \frac{R - x_{Tn} \sin \theta}{c} \right) \quad (3)$$

其中， c 是光速， R 是雷达与目标间距离， θ 是目标方位角。

忽略包络时延差异，主要关注相位项：

$$S_{target}(t) \propto \sqrt{P_t} e^{j(\omega t - kR)} \sum_{n=0}^{N-1} e^{jkx_{Tn}(\sin \theta - \sin \theta_0)} \quad (4)$$

根据式(4)可知，当发射端波束指向角度等于目标实际角度($\theta = \theta_0$)时，求和项 $\sum e^{j0} = N$ ，此时在目标处获得了 N 倍的幅度增益。

引入幅度衰减系数 α 和噪声项 $n_m(t)$ ，第 m 个通道的接收信号 $S_{Rx,m}(t)$ 为

$$S_{Rx,m}(t) = \alpha \sqrt{P_t} e^{j(\omega t - 2kR)} \sum_{n=0}^{N-1} e^{jkx_{Tn}(\sin \theta - \sin \theta_0)} \cdot e^{jkx_{Rm} \sin \theta} + n_m(t) \quad (5)$$

其中， x_{Rm} 是第 m 接收阵元的位置。

接收端同样经过移相器对 M 个通道进行加权求和，权重 $W_{Rm} = e^{-jkx_{Rm} \sin \theta_0}$ ：

$$\begin{aligned} y_{PA}(t) &= \sum_{m=0}^{M-1} S_{Rx,m}(t) W_{Rm} \\ &= \alpha \sqrt{P_t} e^{j(\omega t - 2kR)} \sum_{n=0}^{N-1} e^{jkx_{Tn}(\sin \theta - \sin \theta_0)} \\ &\quad \cdot \sum_{m=0}^{M-1} e^{jkx_{Rm}(\sin \theta - \sin \theta_0)} + \sum_{m=0}^{M-1} n_m(t) W_{Rm} \end{aligned} \quad (6)$$

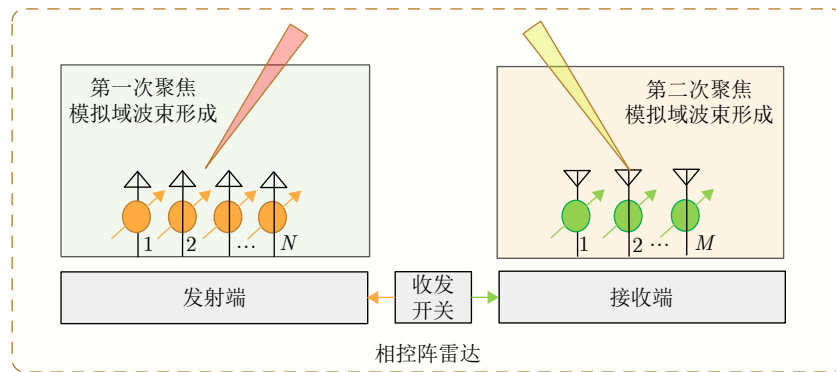


图 1 相控阵雷达原理图

Fig. 1 Schematic diagram of phased array radar

相控阵雷达最终获得信号可以分为信号分量 S_{PA} 和噪声分量 N_{PA} :

信号分量 S_{PA} :

$$S_{PA} = \alpha \sqrt{P_t} e^{j(\omega t - 2kR)} \sum_{n=0}^{N-1} e^{jkx_{Tn}(\sin \theta - \sin \theta_0)} \cdot \sum_{m=0}^{M-1} e^{jkx_{Rm}(\sin \theta - \sin \theta_0)} \quad (7)$$

当发射端和接收端移相器指向角度都等于目标实际角度($\theta = \theta_0$)时, 信号分量功率:

$$P_{sig}^{PA} = |S_{PA}|^2 = \alpha^2 P_t N^2 M^2 \quad (8)$$

由于 $n_m(t)$ 互不相关, 总噪声功率等于方差之和。在 $|W_{Rm}|^2 = 1$ 且单通道热噪声功率为 P_n 时, 总噪声分量功率:

$$P_{noise}^{PA} = M P_n \quad (9)$$

相控阵雷达最终信噪比公式:

$$SNR_{PA} = \frac{P_{sig}^{PA}}{P_{noise}^{PA}} = \frac{\alpha^2 P_t N^2 M^2}{M P_n} \quad (10)$$

又有

$$\alpha = \sqrt{\frac{G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4}} \quad (11)$$

其中, G 为天线增益, σ 为雷达散射截面积。

把 α 代入, 可以得到

$$SNR_{PA} = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \cdot \frac{N^2 M}{P_n} \quad (12)$$

2.2 MIMO 雷达信噪比推导

单发单收的 SISO (Single-Input Single-Output) 雷达因缺乏空间自由度而无法分辨目标角度, 为了感知目标空域特征, 需采用多天线阵列获得角度信息。而如果只在一端(发射端或接收端)增加天线数

量, SIMO (Single-Input Multiple-Output) 系统和 MISO (Multiple-Input Single-Output) 系统的角度分辨率只能线性增加。MIMO 雷达在发射端和接收端同时配置多个天线, 使得角度分辨率倍数增加, 用少数天线就能获得较高精度。但是通道域的节省, 意味着在其他域需要做出补偿。典型的有时分多址的 TDM-MIMO (Time Division Multiplexing MIMO), 码分多址的 CDM-MIMO (Code Division Multiplexing MIMO), 频分多址的 FDM-MIMO (Frequency Division Multiplexing MIMO), 分别在时域、码域、频域做了复用区分。

相控阵雷达与 MIMO 雷达的核心区别, 是相控阵雷达分别在发射和接收时对目标方向做了实际的聚焦, 形成窄波束; 而 MIMO 雷达只在接收时聚焦, 对于发射, 只能从宽波束中提取。MIMO 雷达工作原理如图 2 所示。下面对 MIMO 雷达的信噪比进行详细推导:

以 TDM-MIMO 为例, 发射端各天线单元分时轮流发射, 接收端通过数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)进行波束形成。一个周期内, 第 n 个时隙只有第 n 个天线发射:

$$S_{Tx,n}(t) = \sqrt{P_t} e^{j\omega t} \quad (13)$$

到达目标处的信号:

$$S_{target}(t) \propto \sqrt{P_t} e^{j(\omega t - kR)} e^{jkx_{Tn} \sin \theta} \quad (14)$$

在第 n 个时隙, 第 m 个接收天线收到的原始数据 $S_{Rx,n,m}(t)$: ($n_{n,m}(t)$ 是噪声)

$$S_{Rx,n,m}(t) = \alpha \sqrt{P_t} e^{j(\omega t - 2kR)} e^{jkx_{Tn} \sin \theta} e^{jkx_{Rm} \sin \theta} + n_{n,m}(t) \quad (15)$$

在 DSP 中, 我们对采集到的 $N \times M$ 个数据进行全相干积累, 补偿权重: $W_{Tn} = e^{-jkx_{Tn} \sin \theta_0}$, $W_{Rm} = e^{-jkx_{Rm} \sin \theta_0}$:

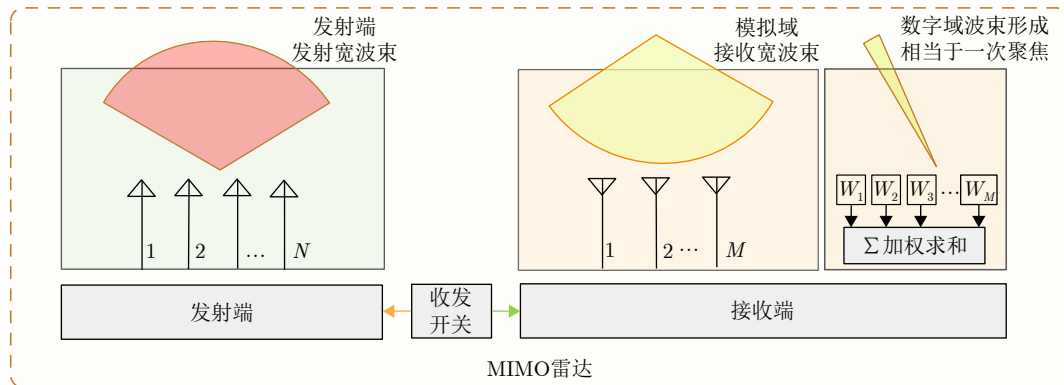


图 2 MIMO 雷达原理图

Fig. 2 Schematic diagram of MIMO radar

$$\begin{aligned}
y_{\text{MIMO}}(t) &= \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} S_{\text{Rx},n,m}(t) W_{\text{Tn}} W_{\text{Rm}} \\
&= \alpha \sqrt{P_t} e^{j(\omega t - 2kR)} \sum_{n=0}^{N-1} e^{jkx_{\text{Tn}}(\sin \theta - \sin \theta_0)} \\
&\quad \cdot \sum_{m=0}^{M-1} e^{jkx_{\text{Rm}}(\sin \theta - \sin \theta_0)} \\
&\quad + \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} n_{n,m}(t) W_{\text{Tn}} W_{\text{Rm}} \quad (16)
\end{aligned}$$

当 $\theta = \theta_0$ 时, 信号分量:

$$S_{\text{MIMO}} = \alpha \sqrt{P_t} e^{j(\omega t - 2kR)} NM \quad (17)$$

信号分量功率:

$$P_{\text{sig}}^{\text{MIMO}} = |S_{\text{MIMO}}|^2 = \alpha^2 P_t N^2 M^2 \quad (18)$$

由于累加了 N 个不同时刻的噪声, 总共有 $N * M$ 个独立的噪声样本, 噪声分量功率:

$$P_{\text{noise}}^{\text{MIMO}} = NMP_n \quad (19)$$

MIMO 最终信噪比公式:

$$\text{SNR}_{\text{MIMO}} = \frac{P_{\text{sig}}^{\text{MIMO}}}{P_{\text{noise}}^{\text{MIMO}}} = \frac{\alpha^2 P_t N^2 M^2}{NMP_n} \quad (20)$$

把 α 代入, 可以得到:

$$\text{SNR}_{\text{MIMO}} = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \cdot \frac{NM}{P_n} \quad (21)$$

2.3 相控阵与 MIMO 雷达信噪比与数据量对比分析

由上述推导可以发现, 相控阵雷达与 MIMO 雷达信噪比比值为 N :

$$\frac{\text{SNR}_{\text{PA}}}{\text{SNR}_{\text{MIMO}}} = N \quad (22)$$

MIMO 雷达发射正交波形使能量分散在空域中, 而相控阵雷达通过发射端的相干波束形成, 获得了 N 倍的信号增益。该差异在模数转换 (Analog-to-Digital Converter, ADC) 阶段体现得尤为明显: 相控阵雷达凭借“先射频合成、后 ADC 采样”的机制, 使目标回波在进入 ADC 前便获得了阵列增益, 从而有效克服了量化噪声; 而 MIMO 雷达各阵元独立采样, 单通道接收的微弱信号极易低于 ADC 的量化下限而被淹没。为直观验证上述理论推导, 设定发射阵元与接收阵元数相等: $N = M = 8$, 对典型人体目标 (假设人体雷达截面积 $\text{RCS} = 1 \text{ m}^2$) 在室内 $1 \sim 10 \text{ m}$ 范围内的回波信噪比进行仿真分析。仿真结果如图 3 所示, 相控阵雷达接收信噪比稳定高于 MIMO 雷达。

另一方面, MIMO 雷达相较于相控阵雷达, 数

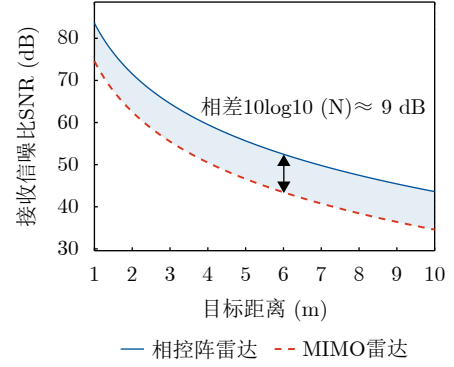


图 3 相控阵雷达与 MIMO 雷达信噪比仿真对比 (收发天线阵元数为 8)

Fig. 3 Simulation comparison of signal-to-noise ratio between two radar

据量显著增加。相控阵雷达在模拟域完成 M 个接收通道波束合成:

$$y_{\text{PA}}(t) = \sum_{m=0}^{M-1} S_{\text{Rx},m}(t) W_{\text{Rm}} \quad (23)$$

而 MIMO 雷达需要在数字域处理 N 个发射天线和 M 个接收天线的信号:

$$y_{\text{MIMO}}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} S_{\text{Rx},n,m}(t) W_{\text{Tn}} W_{\text{Rm}} \quad (24)$$

设定采样点数为 K (距离维), 脉冲数为 L (多普勒维), 相控阵雷达接收端硬件一般会直接将 M 个接收通道合成为 1 路后送入 ADC 采样, 因此其数据量比 MIMO 雷达少 $N \times M$ 倍, 更适用于实时监测:

$$\frac{\text{Data}_{\text{MIMO}}}{\text{Data}_{\text{PA}}} = \frac{NM \cdot K \cdot L}{1 \cdot K \cdot L} = NM \quad (25)$$

仿真设定距离维采样点数 $K = 1024$, 多普勒维脉冲数 $L = 256$, 发射和接收天线数相等 $N = M$ 。数据量的差异主要体现在数字信号处理环节的内存占用与算法执行时间。如图 4(a) 所示, 相控阵雷达硬件直接对 M 个接收通道在硬件上进行合成, 其数据量在不同天线阵列规模下均保持恒定。而 MIMO 雷达需先采集所有数据再统一处理, 其数据量随天线单元数急剧增长。如图 4(b) 所示, 对这两种体制雷达的接收数据执行了标准的距离-多普勒二维 FFT 处理, 相控阵的实时处理时间始终在毫秒级, 而 MIMO 雷达处理时间随天线规模显著增加。

3 CASD 波束调度策略

前文分析表明, 相控阵雷达相比 MIMO 雷达, 具有信噪比与数据处理效率方面的优势。然而室内人体距离雷达很近、角速度变化剧烈, 这对波束调度提出了严苛挑战。本节首先分析传统波束调度策

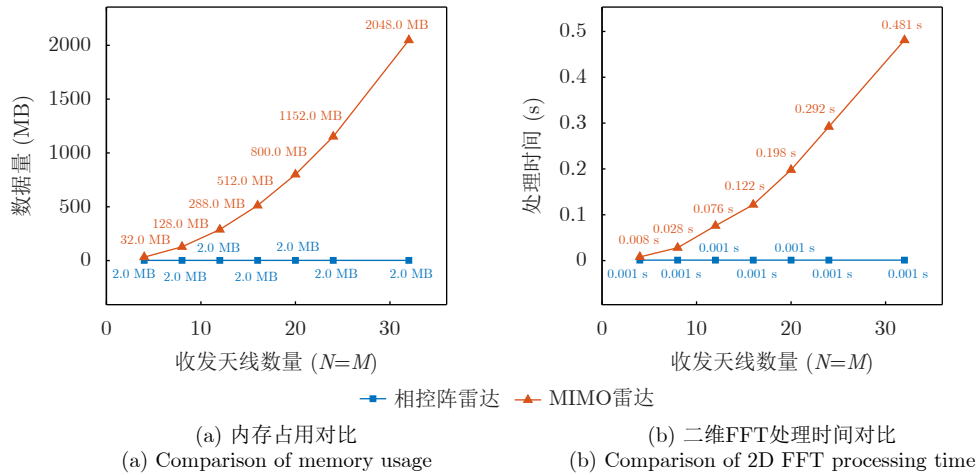


图 4 相控阵雷达与MIMO雷达数据量仿真对比
Fig. 4 Simulation comparison of data volume between two radar

略的局限性, 进而提出了“粗扫-自适应精扫-和差波束测角”(CASD)的跟踪策略。随后建立平均重访时间模型, 从理论推导和仿真实验两方面, 论述了CASD策略更适用于室内人体跟踪。

3.1 传统波束调度策略的不足

相控阵雷达在发现目标之后, 不仅要对该目标进行跟踪, 同时还要继续对整个监视区域持续搜索, 其关键是搜索资源与跟踪资源的争夺。然而相控阵雷达一般用于室外开阔环境, 传统的波束调度策略对于室内人体探测会有一些的局限性。

搜索是为了在大范围空域中发现目标。把资源全部分配给搜索模式, 一种经典策略是边搜索边跟踪(Track While Search, TWS), 如图5, 搜索时天线波束在空域重复扫描。目标跟踪完全依靠搜索结果, 更新速率低, 不能平滑跟踪人体轨迹。

跟踪是为了在小范围空域内定位目标。为了把一部分资源用于跟踪, 经典的策略是搜索加跟踪(Track And Search, TAS), 如图6。这种策略把跟踪时间安插在搜索时间内, 当进入跟踪时间片时,

必须暂时中断搜索过程, 将天线波束指向跟踪目标。不同于室外开阔环境对远距离目标的探测, 在室内跟踪时, 探测距离明显缩短, 人体角速率较高且运动状态复杂, 容易造成失跟导致跟踪链断裂。

3.2 CASD策略介绍

为了使跟踪轨迹更加平滑连续, 本文创新性地设计了一种“粗扫-自适应精扫-和差波束测角”

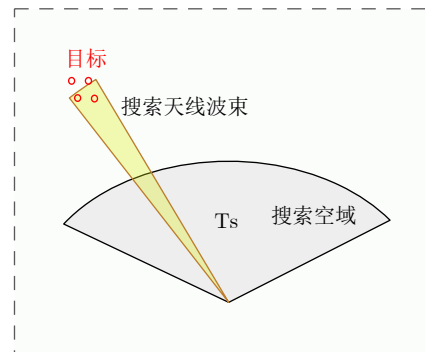


图 5 边搜索边跟踪工作原理图
Fig. 5 Working principle diagram of TWS

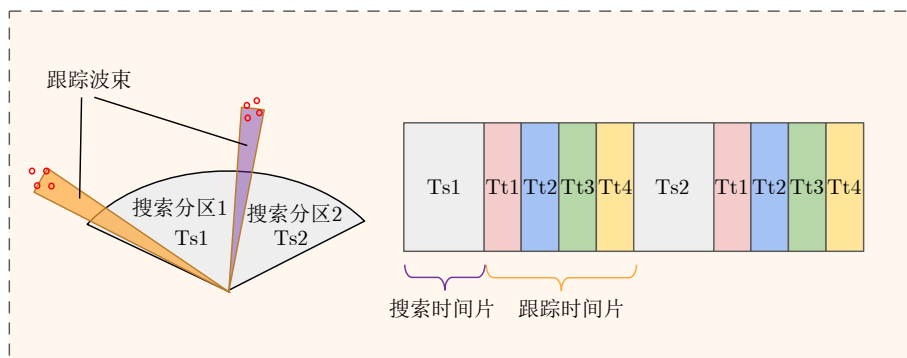


图 6 搜索加跟踪工作原理图
Fig. 6 Working principle diagram of TAS

(CASD)波束调度策略,该策略将“粗扫”(搜索资源)作为实时先验机制,引导“精扫”(跟踪资源)动态划定有效作业范围,实现了搜索与跟踪资源的有效共享。具体而言,每个扫描周期先进行粗粒度全局搜索,再依据搜索结果调整细粒度跟踪角度范围,最后采用和差波束实现精确测角。同时,每轮扫描后仍然可以通过卡尔曼滤波等轨迹关联算法对探测结果关联优化,进一步提升轨迹的平滑度。一方面,相较于仅依靠局部信息跟踪的传统调度策略,CASD通过全局搜索调整跟踪范围,能够有效缓解失跟情况。另一方面,大范围的粗粒度搜索和小范围的细粒度跟踪显著缩短了扫描周期,细粒度的精细化扫描又使和差波束测角工作在线性区有效范围,能够兼顾跟踪采样率和探测精度。其工作流程具体如下:

如图7所示,在一个扫描周期 T 内,总的波束扫描角度集合 Θ_{total} 由粗粒度搜索角度集合 Θ_{search} 和自适应细粒度跟踪角度集合 Θ_{track} 两个子集构成:

$$\Theta_{\text{total}} = \Theta_{\text{search}} \cup \Theta_{\text{track}} \quad (26)$$

搜索时,以稀疏的波束密度快速覆盖整个视场,设定粗扫的步进角度为 $\Delta\theta_{\text{search}}$,粗粒度搜索角度集合为

$$\Theta_{\text{search}} = \{\theta_i | \theta_i = i \cdot \Delta\theta_{\text{search}}, i \in \{-N_{\text{search}}, \dots, 0, \dots, N_{\text{search}}\}\} \quad (27)$$

设 $A(\theta)$ 为雷达波束指向角度 θ 时接收到的回波幅度。粗扫后,通过峰值确定目标所在的粗略方位:

$$\theta_{\text{peak_search}} = \operatorname{argmax}_{\theta \in \Theta_{\text{search}}} A(\theta) \quad (28)$$

以峰值为中心,自适应生成细粒度跟踪角度:

$$\Theta_{\text{track}} = \{\theta_j | \theta_j = \theta_{\text{peak_search}} + j \cdot \Delta\theta_{\text{track}}, j \in \{-N_{\text{track}}, \dots, 0, \dots, N_{\text{track}}\}\} \quad (29)$$

$\theta_{\text{peak_track}}$ 是目标所在的精细化方位:

$$\theta_{\text{peak_track}} = \operatorname{argmax}_{\theta \in \Theta_{\text{track}}} A(\theta) \quad (30)$$

最后,利用和差波束测角公式计算最终角度,设 k 为单脉冲鉴角斜率:

$$\tilde{\theta} = \theta_{\text{peak_track}} + \frac{1}{k} \cdot \operatorname{Re} \left(\frac{\Delta(\theta_{\text{peak_track}})}{\sum(\theta_{\text{peak_track}})} \right) \quad (31)$$

3.3 传统波束调度策略与CASD策略平均重访时间

3.3.1 平均重访时间公式推导

为了评估波束调度策略跟踪人体运动轨迹的性能,本文引入“平均重访时间”(Average Revisit Time, ART)作为评价指标。

在室内环境中,距离 R 较短,对于相同的人体切向速度 v_{\perp} ,角速度 ω 会非常大,因为:

$$\omega = \frac{v_{\perp}}{R} \quad (32)$$

人体以角速度 ω 运动时,单次“失跟”的概率记为 $P_{\text{Loss}}(\omega)$ 。当跟踪链断裂后,需要消耗额外的搜索资源来重新发现目标,设跟踪间隔时间为 T_{track} ,重新捕获的平均等待时间(即惩罚时间)为 T_{penalty} 。则ART可表示为

$$\begin{aligned} \text{ART} &= (1 - P_{\text{Loss}}(\omega)) T_{\text{track}} + P_{\text{Loss}}(\omega) \\ &\quad \cdot (T_{\text{track}} + T_{\text{penalty}}) \\ &= T_{\text{track}} + P_{\text{Loss}}(\omega) T_{\text{penalty}} \end{aligned} \quad (33)$$

以下是对TWS, TAS与CASD平均重访时间的分析:

(1) TWS策略中,系统并不单独分配跟踪资源,因此平均重访时间ART恒等于扫描周期,设TWS扫描全空域所需的波束数量为 N_{TWS} ,单个角度波束驻留时间为 T_0 :

$$\text{ART}_{\text{TWS}} = N_{\text{TWS}} T_0 \quad (34)$$

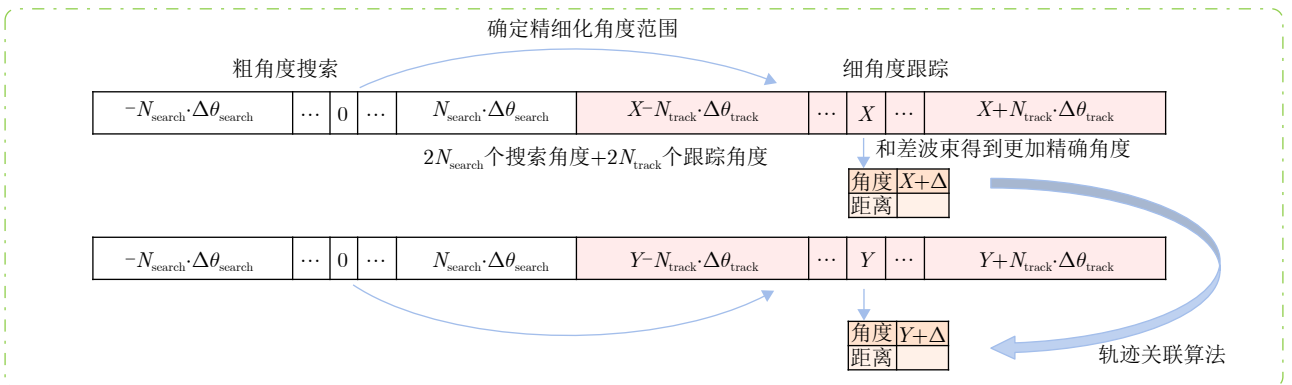


图 7 CASD 波束调度策略

Fig. 7 CASD beam scheduling strategy

(2) CASD策略每次扫描均采用“粗扫-自适应精扫”的联合模式。即使某个时间帧发生“失跟”，也能够下一轮扫描中快速找到目标，无需引入额外的搜索惩罚时间(即 $T_{\text{penalty}} = 0$)，因此平均重访时间为

$$\text{ART}_{\text{CASD}} = N_{\text{CASD}} \cdot T_0 = (N_{\text{search}} + N_{\text{track}}) T_0 \quad (35)$$

$(N_{\text{search}} + N_{\text{track}}) \ll N_{\text{TWS}}$ ，因此CASD较于TWS策略跟踪更新率更高。

(3) TAS策略将跟踪任务插入搜索时间片中。理论上，TAS策略基于目标优先级动态创建跟踪任务，但在跟踪高角速度移动的人体时，会频繁建立航迹与删除，实际工程中较难应用，因此本文分析简化后的“固定周期调度”模型，以固定的跟踪周期分配搜索和跟踪资源，即便跟踪链断裂也不需要立即进行动态任务重组，而是在下一次搜索阶段“重访”人体。设TAS的跟踪更新率为搜索更新率的 μ 倍(即在每一轮扫描周期中，包含1次全空域搜索与 μ 次跟踪)，则TAS的完整帧周期为

$$T_{\text{frame}}^{\text{TAS}} = (N_{\text{search}} + \mu \cdot N_{\text{track}}) T_0 \quad (36)$$

TAS成功跟踪的跟踪间隔时间 $T_{\text{track}}^{\text{TAS}} = T_{\text{frame}}^{\text{TAS}} / \mu$ ，跟踪失败的惩罚时间近似为： $T_{\text{penalty}} = T_{\text{frame}}^{\text{TAS}}$ ，设跟踪波束范围为 Ω_{TAS} ，失跟判据为： $\omega \cdot T_{\text{track}}^{\text{TAS}} > \Omega_{\text{TAS}} / 2$ 。由此可以得到TAS的ART解析式为

$$\text{ART}_{\text{TAS}}(\omega) = \left(\frac{N_{\text{search}}}{\mu} + N_{\text{track}} \right) T_0 + P_{\text{Loss}}(\omega) \cdot (N_{\text{search}} + \mu \cdot N_{\text{track}}) T_0 \quad (37)$$

式(37)表明TAS策略的平均重访时间存在“高更新率”和“高稳定性”的矛盾。军事战场上敌方目标与雷达相距很远，角速度低且飞行状态稳定，失跟概率 $P_{\text{Loss}}(\omega)$ 很小，因此提高跟踪采样率 μ 能更加精准地锁定目标。而对于室内近距离高角速度且运动状态复杂的人体，失跟概率 $P_{\text{Loss}}(\omega)$ 较大，增加跟踪更新率 μ 反而导致重访性能恶化。

3.3.2 几种策略的仿真分析与讨论

用计算机仿真模拟TWS, TAS与CASD策略跟踪近距离运动人体的性能。实验所用相控阵雷达波束宽度为 13° ，步进间隔通常需要小于波束宽度，因此合理假设搜索时角度间隔： $\Delta\theta_{\text{search}} = 10^\circ$ ，搜索范围 $\Theta_{\text{search}} = [-70, 70]^\circ$ 。为使和差波束工作在线性区有效范围，跟踪时角度间隔： $\Delta\theta_{\text{track}} = 5^\circ$ 。同时，为确保目标始终处于跟踪范围内，跟踪范围 Θ_{track} 基于搜索间隔 $\Delta\theta_{\text{search}}$ 适度扩展： $\Theta_{\text{track}} = 2\Delta\theta_{\text{search}} = 20^\circ$ 。TAS策略的跟踪更新率设置为： $\mu \in \{1, 2, 3, 4\}$ ，人体分别在雷达前方做类圆周、类

正弦、横向和斜向运动，3种策略的平均重访时间仿真结果如图8所示。相对雷达角速度大致有：斜向运动<类圆周运动<类正弦运动<横向运动，因此仿真实验中TAS策略的平均重访时间也大致遵从斜向运动<类圆周运动<类正弦运动<横向运动，且整体上均高于CASD策略。同时，由于横向运动和类正弦运动中人体角速度较大，TAS策略容易丢失目标，提高更新率 μ 反而导致平均重访时间增加：

$$\text{TAS}_{\mu=4}^{\text{横向运动}} > \text{TAS}_{\mu=3}^{\text{横向运动}}, \text{TAS}_{\mu=4}^{\text{类正弦运动}} > \text{TAS}_{\mu=3}^{\text{类正弦运动}}$$

由此可以得出结论：TWS重访时间最长，TAS随着更新率提高能够有效提升性能，但当人体角速度较快时，失跟风险也显著增加，而CASD能够始终保持较低的平均重访时间。此外，CASD策略在实现上也更为简洁，不涉及频繁的跟踪任务建立与消除，也不需要搜索和跟踪模式间来回切换，能够更加稳定应用于室内监测任务。

4 基于人体运动自适应实时监测方案

第3节提出的CASD策略实现了室内人体的相控阵雷达稳健跟踪。然而，如图9，完整的居家监护任务需要同时覆盖“运动时的轨迹跟踪”与“静止时的生命体征监测”。MIMO雷达具备全空域覆盖特性，可通过单一模式的数据采集与差异化的后端算法，实现轨迹跟踪与生命体征的同时监测。而对于相控阵雷达，轨迹跟踪与体征监测在波束调度、雷达参数配置和处理算法等方面有明显区别，因此需要引入两种不同的工作模式：

(1) 波束调度：轨迹跟踪模式需频繁切换波束

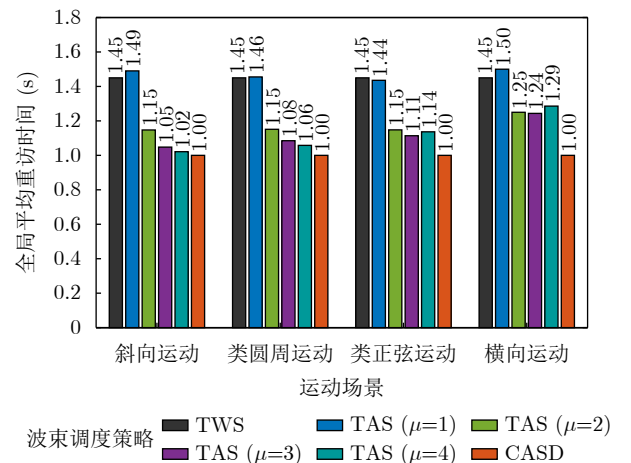


图8 TWS、各更新率TAS与CASD策略对于人体类圆周、类正弦、横向和斜向运动的平均重访时间仿真统计

Fig. 8 Simulation statistics of average revisit time for human quasi-circular, quasi-sinusoidal, lateral, and oblique motions under TWS, TAS with various update rates, and CASD strategies

以持续跟踪运动人体，例如TWS策略、TAS策略以及本文提出的CASD策略均需对波束指向进行动态控制。而体征监测模式则要求波束保持稳定，持续聚焦于目标。

(2) 雷达参数配置：轨迹跟踪模式为了保证跟踪更新率，每个角度的波束驻留时间需设定得极短(以1 s更新率，扫描全空域20个角度为例，单角度数据采集时间仅为0.05 s)。而体征监测模式下，为一次获取完整的呼吸心跳信息，波束需在目标角度长时间驻留(单次呼吸周期约2 s)。因此，相控阵雷达在执行不同任务前，需针对性地完成参数的差异化配置。

(3) 处理算法：轨迹跟踪模式通过差分凸显动目标，使用CASD策略获得人体的移动轨迹。而体

征监测模式分析人体位置处的相位变化获取呼吸心跳信息。

为了实现这两种工作模式的自适应切换，本文构建了如图10所示的基于人体运动状态自适应实时监测方案。系统启动时默认进入轨迹跟踪模式，采用CASD波束调度策略跟踪运动人体，并且每一轮扫描后，对粗角度的扫描结果计算多帧差分。差分一方面可以凸显动目标，另一方面能够对人体的运动情况进行判定。当发现连续多帧的差分都小于运动阈值，则转换为体征监测模式。在监测生命体征时，从最近一次差分大于运动阈值的探测结果中提取静止人体的角度和距离，并使相控阵波束指向该方向，收集并分析目标位置的相位变化，提取呼吸心跳波形。随后同样分析差分结果，若有值超过静止阈值，则切换为轨迹跟踪模式，否则，开启下一轮体征监测。该方案涉及的核心方法有：(1)多帧相位补偿脉冲对消；(2)轨迹跟踪；(3)呼吸心跳监测。

4.1 多帧相位补偿脉冲对消

差分可以抑制静止杂波，凸显动目标，而相位补偿脉冲对消能够拟合出相位漂移趋势，从而有效消除系统性相位漂移。尽管相位补偿脉冲对消在一定程度上导致了信号幅度的衰减，却显著提升了人体动静状态的区分度，从而为运动状态的准确判别提供了可靠依据。如图11所示，运动阈值 y_1 的设定需遵循以下逻辑：人体运动时，差分结果的最大值需超过 y_1 ；当人体静止时，差分结果的所有值均须小于 y_1 ，即

$$\max(Y_{\text{diff}}^{\text{静止}}) < y_1 < \max(Y_{\text{diff}}^{\text{运动}}) \quad (38)$$

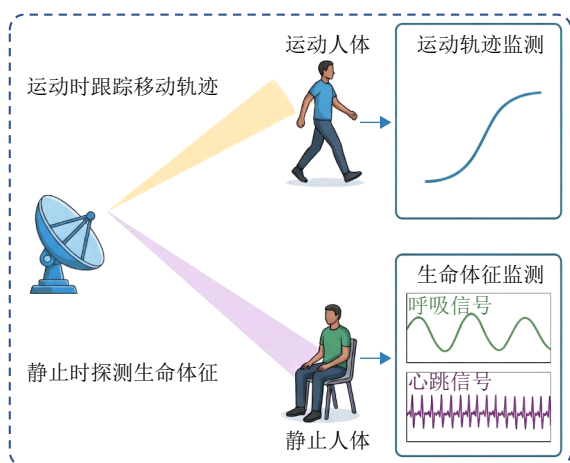


图 9 基于人体运动自适应实时监测示意图

Fig. 9 Schematic diagram of adaptive real-time monitoring based on human motion

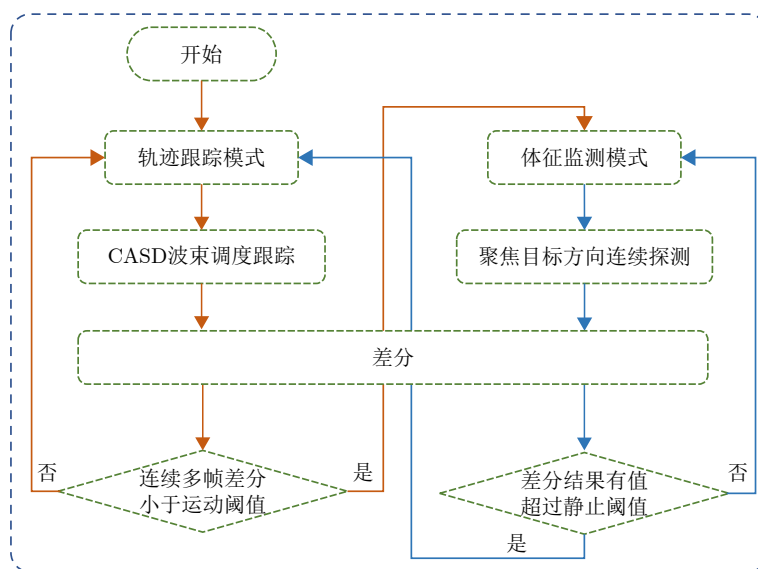


图 10 基于人体运动自适应实时监测方案

Fig. 10 Adaptive real-time monitoring scheme based on human motion

4.2 轨迹跟踪

轨迹跟踪采用前文所述的CASD策略。在每次扫描中,首先对粗扫结果做多帧相位补偿脉冲对消,计算其FFT结果,可得到粗扫范围的角度距离幅度图。用 $Y_{\text{diff}}(\theta, m)$ 表示角度 θ 、采样点 m 的多帧相位补偿脉冲对消结果,角度 θ 与距离门索引 p 的幅度 $A(\theta, p)$ 为

$$A(\theta, p) = |\text{FFT}\{Y_{\text{diff}}(\theta, m)\}| \quad (39)$$

随后通过粗扫范围内幅度峰值判断人体的粗略角度。自适应精扫阶段根据粗略角度确定精扫角度范围,并采用同样的方法通过精扫与和差波束测角确定人体精确位置。

4.3 呼吸心跳监测

当人体由运动转为静止时,从最近一次差分值大于运动阈值的探测结果中提取静止时的人体位置,记为 $(\theta_{\text{target}}, R_{\text{target}})$,并使波束指向该方向监测生命体征。为了去除毛刺和突变等信号畸变,本文先对原始复数数据进行带通滤波处理,随后执行去直流、计算相位、解缠绕、去趋势等操作,从而获取处理后相位变化序列 $\phi_{\text{processed}}$ 。

雷达工作在体征监测模式时,可通过提取相位一阶差分来实现目标运动状态的有效识别。静止阈值 y_2 同样需满足如下要求:当人体运动时,相位差分结果的最大值需超过 y_2 ,当人体静止时,差分结果的所有值均需小于 y_2 。

当人体保持静止正常呼吸时,相位变化主要由呼吸周期中肺部的充气和收缩所主导。因此可以通过处理后的相位提取呼吸信息,即

$$\Delta X_{\text{breath}}(t) \sim \phi_{\text{processed}} \quad (40)$$

文献[35]提出可利用二阶差分有效抑制低频的呼吸基线漂移,从而凸显心跳分量。微分窗口的时

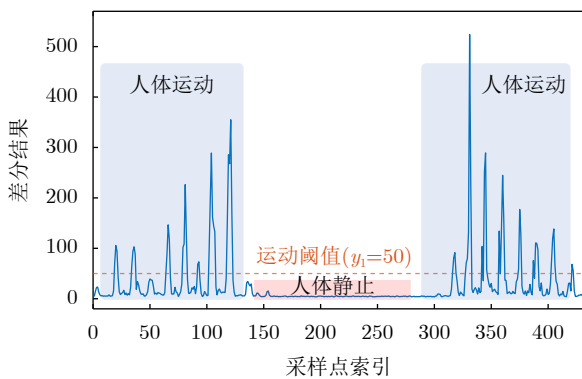


图 11 轨迹跟踪模式下,人体运动与静止时差分结果对比

Fig. 11 Comparison of differential results between human motion and stationary states in trajectory tracking mode

间跨度应匹配心脏搏动时的快速瞬态时间。设心搏瞬态时间窗口为 T_w ,系统的实际采样率为 f_s ,Savitzky-Golay多项式最小二乘拟合的平滑二阶微分系数为 c_i ($c_i = c_{-i}$)。则该多项式微分器可统一表示为

$$M = \left\lfloor \frac{T_w \cdot f_s}{2} \right\rfloor \quad (41)$$

$$\phi_{\text{diff2}}(k) = f_s^2 \sum_{i=-M}^M c_i \phi_{\text{processed}}(k+i) \quad (42)$$

因此采用该二阶差分方法可有效提取心跳信息:

$$\Delta X_{\text{heart}}(t) \sim \phi_{\text{diff2}}(k) \quad (43)$$

5 实验设置与结果

本文使用ADI公司的低成本相控阵雷达CN0566作为实验设备。该设备有8个天线单元,工作在X波段。为了节省成本和降低复杂度,该雷达采用子阵化架构,只配备了两个ADC通道,每一个ADC通道对应4个天线信号的合成。该设备发射调频连续波(Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW),采用软件定义无线电(Software Defined Radio, SDR)控制移相器相位和各个天线增益。实验场景与设备原理简化图如图12和图13所示,轨迹跟踪与体征监测模式下的各参数如表1所示。

5.1 相控阵雷达的天线校准与位置矫正

本文采用多次相对平均校准的方法对各天线的幅度相位进行校准。将发射源放置在天线阵列的正前方,此时所有通道接收到的信号在理想情况下应完全相同。幅度校准:把所有通道中的最小幅度作为参考幅度,对其他通道的幅度进行校准。相位校准:每次打开相邻的两个通道(例如通道 n 和通道 $n+1$),并给通道 $n+1$ 施加扫描相位 $[-180,180]$,当两路信号完全反相抵消时,叠加信号的幅度达到最小。由此可推出相邻两通道固有的硬件相位差。实际工作时,测量多次得到多个校准权重并平均,将

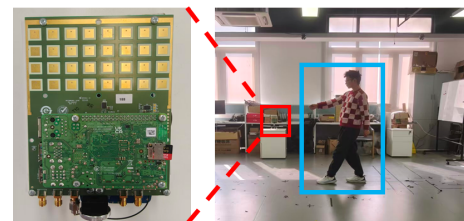


图 12 实验场景

Fig. 12 Experimental scenario

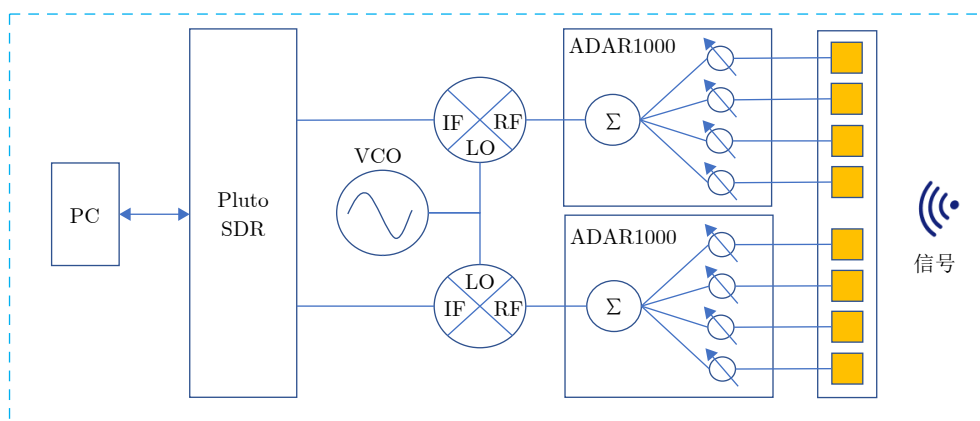


图 13 CN0566相控阵雷达原理图

Fig. 13 Schematic diagram of the CN0566 phased array radar

表 1 轨迹跟踪与体征监测模式下各参数设置

Tab. 1 Parameter settings in trajectory tracking and vital signs monitoring modes

工作模式	轨迹跟踪	体征监测
采样率	1 MHz	1 MHz
信号频率	10 GHz	10 GHz
Chirp总时间	0.5 ms	0.5 ms
上升时间	0.3 ms	0.3 ms
带宽	800MHz	800MHz
SDR增益	40 dB	40 dB
SDR中心频率	2.1 GHz	2.1 GHz
“粗扫”间隔	10°	—
“精扫”间隔	5°	—
每帧Chirp数	32	128
差分阈值	50	5

校准权重与接收到的数据相乘，即可抵消硬件带来的非理想特性。

尽管幅相校准后雷达各天线能够协同配合使波束聚焦某一方向，但雷达探测的目标位置与实际位置仍有偏差。因此采用简单的多点位置矫正。受试者分别在多点原地晃动，计算距离和角度的误差均值作为校准值，即可将探测结果矫正到正确的位置。

5.2 相控阵雷达轨迹跟踪实验结果

现有基于相控阵雷达的人体运动研究大多局限于离散目标点的定位，鲜有针对室内人体连续轨迹跟踪的深入探讨。尽管TWS和TAS等经典策略已广泛应用于航空目标，但直接移植至室内近距离、高角速度移动的人体目标时仍然面临挑战。具体而言，TWS因遍历各角度测量而耗时较长，在人体跟踪中仅能通过降低扫描精度来妥协(本文将其称

之为Coarse-TWS)。而TAS策略的性能与其更新率呈正相关。为此，本文对比了Coarse-TWS，更高更新率的TAS策略($\mu = 4$)以及本文提出的CASD策略，这三种方法的角度距离图如图14所示。图14(a)是TAS策略容易出现误判的情况，TAS跟踪范围较小，无法判定真实目标位置，在跟踪范围内可能出现多个伪影。图14(b)中的TAS策略即将失跟或已经失跟，跟踪波束来不及追赶运动人体，导致峰值出现在跟踪范围边缘。图14(c)表明TAS已完全失跟，跟踪链断裂。图14(d)是Coarse-TWS粗扫的结果，虽然能够通过差分峰值定位人体粗略位置，滤除局部干扰的影响，但探测精度较差。图14(e)中，CASD策略根据粗扫结果调整跟踪范围，使跟踪范围不受其他干扰的影响，并能够结合精扫与和差波束测角提高测量精度。

在雷达前方视场内，受试者沿着地面预设的标记(作为参考真值)，以正常速度分别做U型、横向、斜向运动。3种运动轨迹的跟踪结果如图15所示。结果表明，TAS策略在跟踪人体运动时存在明显的跟踪抖动(U型轨迹结果在参考轨迹附近波动)，以及严重的跟踪偏差(横向运动场景中跟踪结果显著偏离参考轨迹)。当人体在横向移动时，运动角速度较大，基于局部信息调整跟踪范围的TAS策略无法及时追赶目标，且容易被当前跟踪范围的噪声或伪影影响，导致跟踪结果存在很大偏差。Coarse-TWS策略的探测结果角度精度有限，因此抖动也同样较为明显。而CASD策略基于全局信息自适应调整跟踪范围，并结合精扫与和差波束测角精准获取人体位置，跟踪结果接近于参考轨迹。

5.3 相控阵雷达体征监测实验结果

为了测试相控阵雷达在生命体征监测中的性能，要求受试者分别距离雷达1 m, 3 m, 5 m原地

晃动以确定其精确位置，随后保持静止，采集呼吸心跳信息。用连接电极片的PowerLab接触式设备作为真值，实验结果如图16所示，雷达监测得到的呼吸波形清晰，心跳波形与PowerLab真值信号高度吻合。

5.4 基于人体运动状态自适应感知的轨迹跟踪与体征监测实验结果

为验证本文提出的相控阵雷达轨迹跟踪与体征监测模式的自适应切换方案，受试者在雷达前方视场内交替变换运动与静止状态。具体测试流程如下：

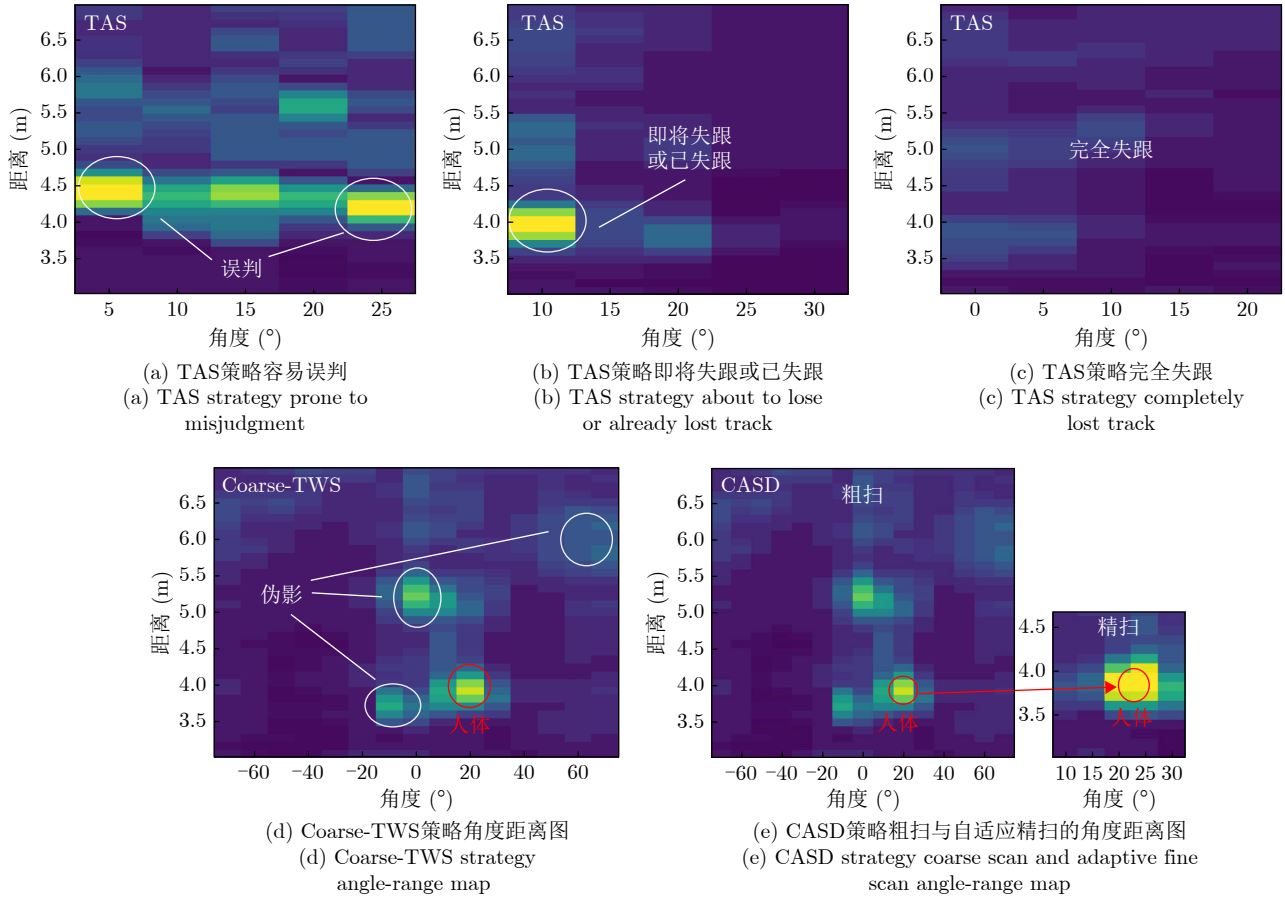
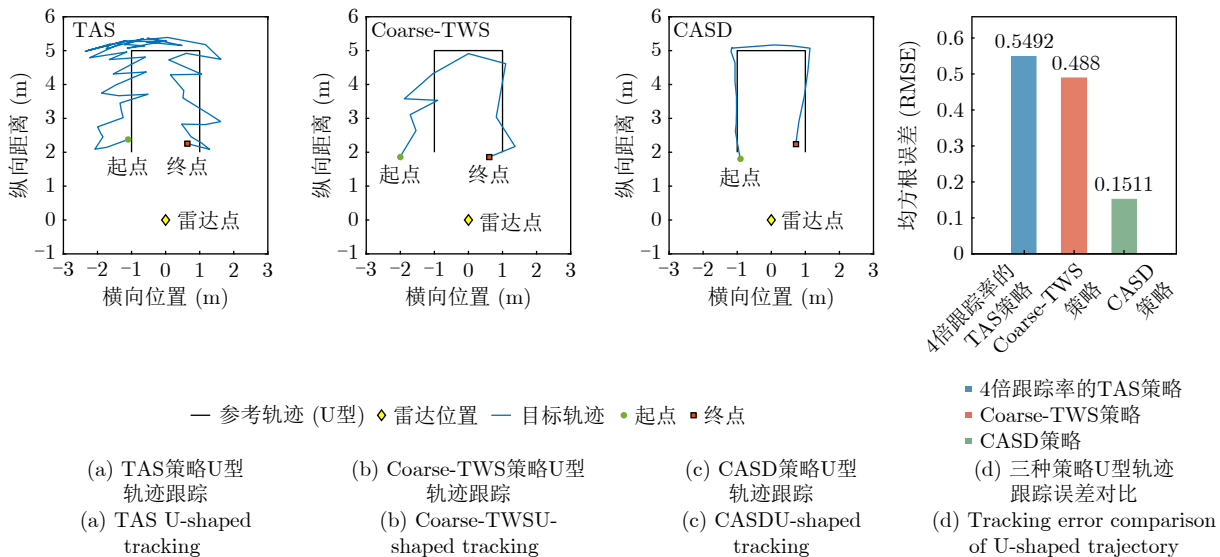


图 14 Coarse-TWS, 高更新率的TAS策略以及CASD策略探测的角度距离图

Fig. 14 Angle-Range Maps of the Coarse-TWS, high-update-rate TAS strategy, and CASD strategy



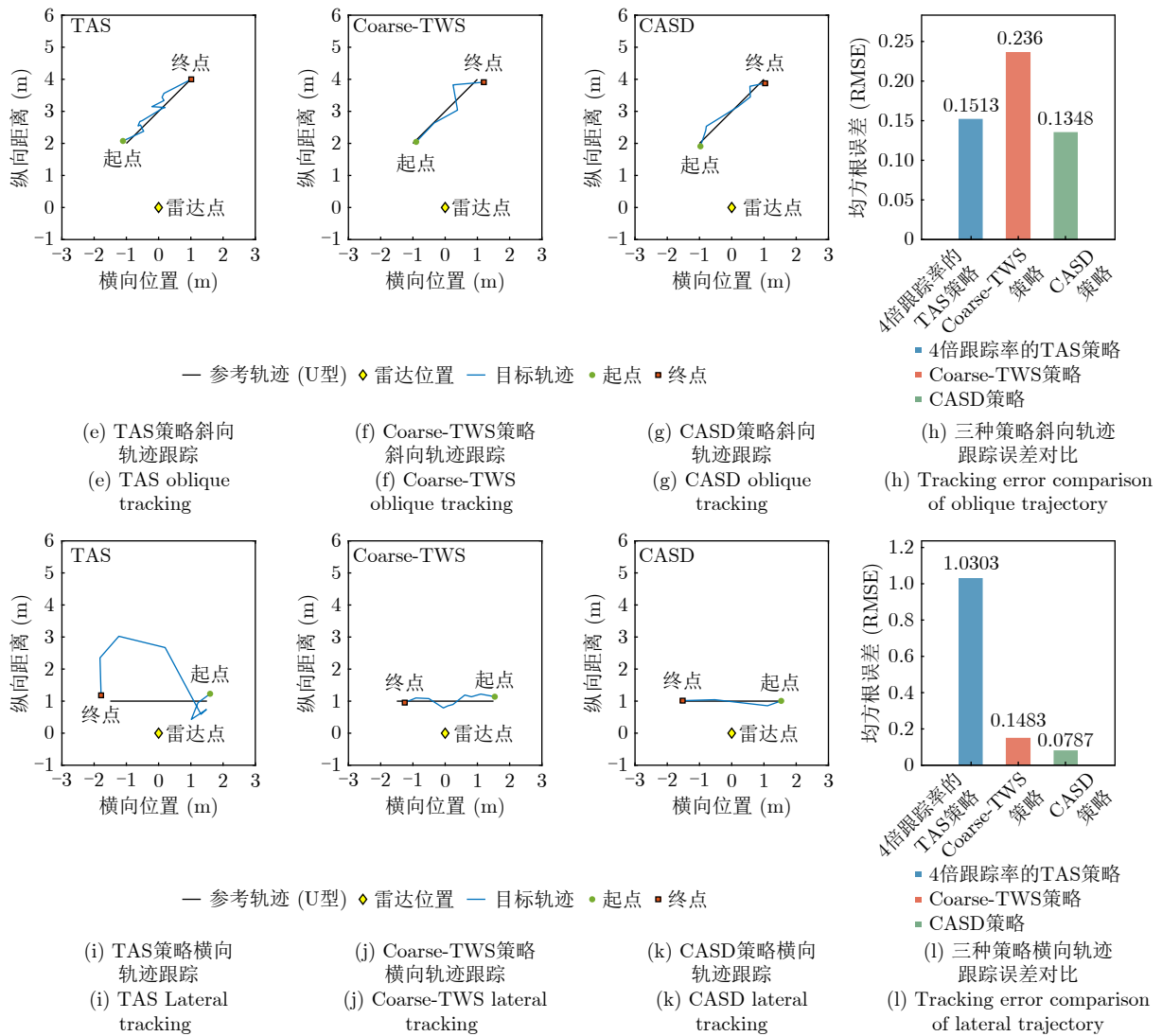


图 15 TAS 策略、Coarse-TWS 与 CASD 策略对于人体 U 型、横向、斜向运动轨迹的跟踪结果

Fig. 15 Tracking results of TAS, Coarse-TWS, and CASD strategies for human U-shaped, lateral, and oblique motion trajectories

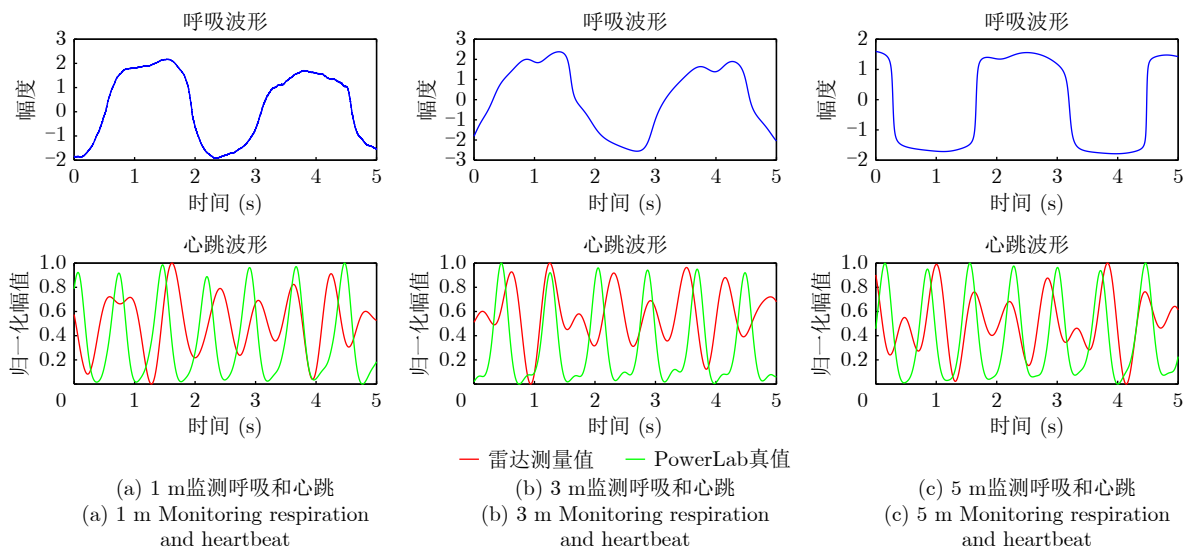


图 16 不同位置人体正常呼吸时雷达监测呼吸心跳信号与PowerLab真值对比

Fig. 16 Comparison of respiration and heartbeat signals monitored by radar with PowerLab ground truth at different locations during normal human breathing

A: 人体以正常速度做U型运动, 雷达采用CASD策略跟踪; B: 人体在静止点从运动转为静止, 并正常呼吸, 雷达切换至体征监测模式连续监测5 s左右; C: 人体从静止转为运动, 并以正常速度做横向运动, 雷达切换至轨迹跟踪模式采用CASD策略跟踪人体; D: 人体在静止点从运动转为静止, 并正常呼吸, 雷达切换至体征监测模式连续监测5s左右; E: 人体从静止转为运动, 并以正常速度做斜向运动, 雷达切换至轨迹跟踪模式采用CASD策略跟踪人体。

实验结果如图17和图18。由图17所示的差分图可以看出, 人体运动与静止的差分结果存在明显差异, 能够顺利完成轨迹跟踪与体征监测两种模式的转换。图18展示了轨迹跟踪模式下相控阵雷达探测的人体运动轨迹以及体征监测模式下的呼吸与心跳波形, 发现探测轨迹接近于参考轨迹, 呼吸与心跳

波形较为清晰, 且正常呼吸时探测的心跳波形接近于PowerLab真值。

此方案双模式切换时存在一定的过渡时延。轨迹跟踪阶段, 为了保证稳定跟踪, 需要连续多帧差

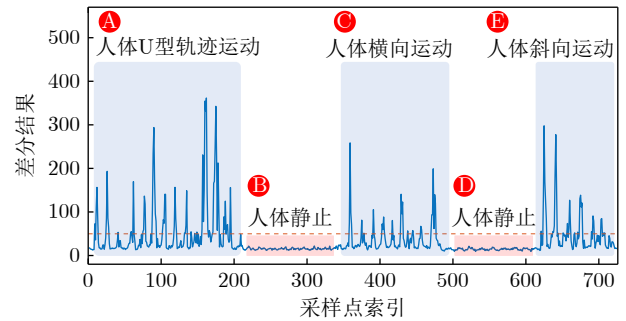
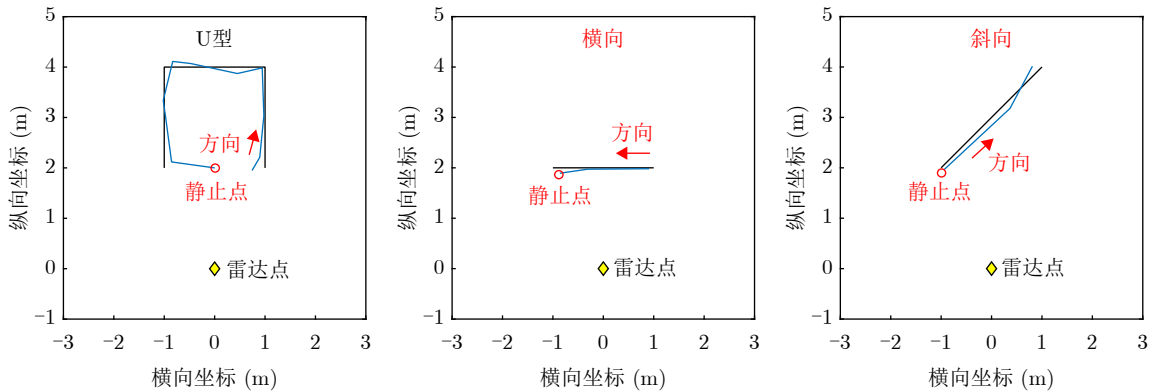


图 17 人体U型/横向/斜向运动与静止时差分结果

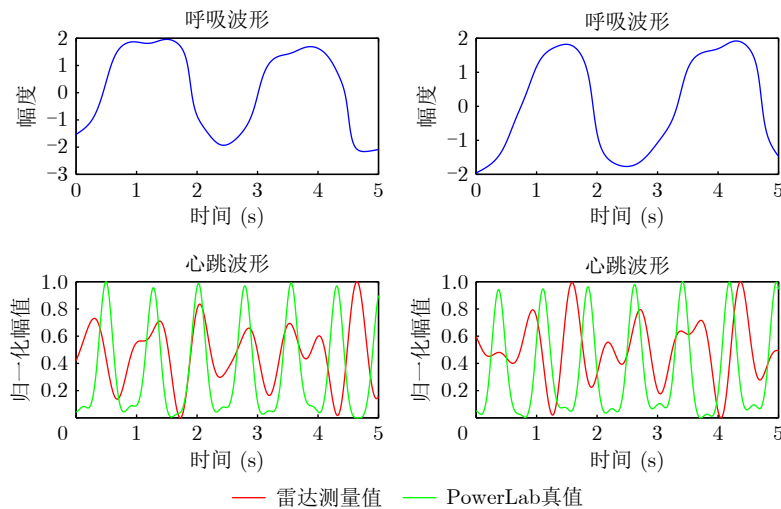
Fig. 17 Differential results during human U-shaped, lateral, and oblique motions and stationary states



(a) 人体做U型运动
(a) U-Shaped motion

(c) 人体从静止转为横向运动
(c) Stationary to lateral

(e) 人体从静止转为斜向运动
(e) Stationary to oblique



(b) 人体从U型运动转为静止
(b) U-shaped to stationary

(d) 人体从横向运动转为静止
(d) Lateral to stationary

图 18 人体U型/横向/斜向运动轨迹跟踪与静止时体征监测实验结果

Fig. 18 Experimental results of human U-shaped, lateral, and oblique motion trajectory tracking and vital signs monitoring in stationary states

分值均小于运动阈值后才进行切换。而体征监测阶段，为了获取完整的呼吸与心跳信息，设置了5s的连续采集窗口，当人体在此期间由静止转为运动时，需等待当前采集周期完毕才执行模式切换。经多次实验统计，该方案中“由运动转静止”的平均时延约为2.56 s、“由静止转运动”平均时延约为3.27 s。尽管存在上述延迟，但以上机制能够有效防止误判并保证数据的完整性，从而确保系统在多模式切换过程中的稳定与可靠。

6 多人情况下基于相控阵雷达的人体探测研究

前文主要探究了单人情况下基于相控阵雷达的运动轨迹跟踪、生命体征监测和两种工作模式的自适应切换。下面讨论多人情况下基于相控阵雷达的轨迹跟踪与生命体征监测。

6.1 多人场景下基于相控阵雷达的轨迹跟踪

跟踪多人轨迹时，仅通过峰值检测无法确定多人位置。考虑到CASD策略在单人轨迹跟踪中更有优势，下面讨论CASD策略在多人轨迹跟踪场景下的应用情况。如图19，当该策略用于多人时，可通过粗扫后施加空间掩码确定各个目标的位置，随后根据这些粗略位置自适应划定精扫范围，最终和差波束测角获得多个目标的精确位置。

然而，如图20(b)—图20(d)，这种方法会因漏检、强目标压制和多径杂波干扰等原因，导致部分帧中极易出现目标漏检，且同一精扫区域中对应的目标并不固定。因此，本文基于卡尔曼滤波与最小代价关联机制，设计了一种简单的轨迹关联算法，其流程如下：

以图20(a)所示的双人实验为例，设 k 时刻目标的卡尔曼预测位置为 $\hat{Z}_{i,k}$, $i \in \{A, B\}$ ，两个精扫区域

和差波束后得到的观测位置为 $Z_{j,k}$, $j \in \{1, 2\}$ 。设定距离阈值 γ ，定义目标 i 与量测 j 间的截断代价 $c_{i,j}$ 为如下分段函数：

$$c_{i,j} = \begin{cases} \|\hat{Z}_{i,k} - z_{j,k}\|^2, & \|\hat{Z}_{i,k} - z_{j,k}\|^2 < \gamma \\ \gamma, & \|\hat{Z}_{i,k} - z_{j,k}\|^2 \geq \gamma \end{cases} \quad (44)$$

由于两个精扫区域对应目标不固定，需评估两种可能分配方案的总代价：

$$\min(c_{A,1} + c_{B,2}, c_{A,2} + c_{B,1}) \quad (45)$$

根据分配结果对目标状态进行分类更新：

(1) 有效更新：若目标 i 分配的代价满足 $c_{i,j} < \gamma$ ，则将其作为有效测量值代入标准卡尔曼方程进行状态更新。

(2) 目标漏检：若目标 i 分配结果的代价满足 $c_{i,j} = \gamma$ ，表明当前帧该目标被漏检，则跳过量测更新步骤，直接以预测状态作为当前时刻的最优估计：

$$\hat{X}_{i,k} = \hat{X}_{i,k|k-1} \quad (46)$$

该机制有效抑制了错误观测对滤波器的干扰，使跟踪轨迹更加平滑连续。图20(e)—图20(g)是两人纵向运动探测的角度距离图。图20(h)是应用上述轨迹关联方法获取的轨迹。结果显示，该轨迹与参考轨迹高度吻合，证明了本文所提方法在相控阵雷达多人跟踪任务中的有效性。然而，受限于当前设备角度分辨率较低，当多目标间的角度间隔过近(例如双人横向运动场景)时，系统的分辨与跟踪能力仍存在一定局限，这将作为后续工作的改进方向。

6.2 多人场景下基于相控阵雷达的体征监测

得益于相控阵雷达具有较高信噪比，因此能够直接使波束指向多个目标采集其生命体征。

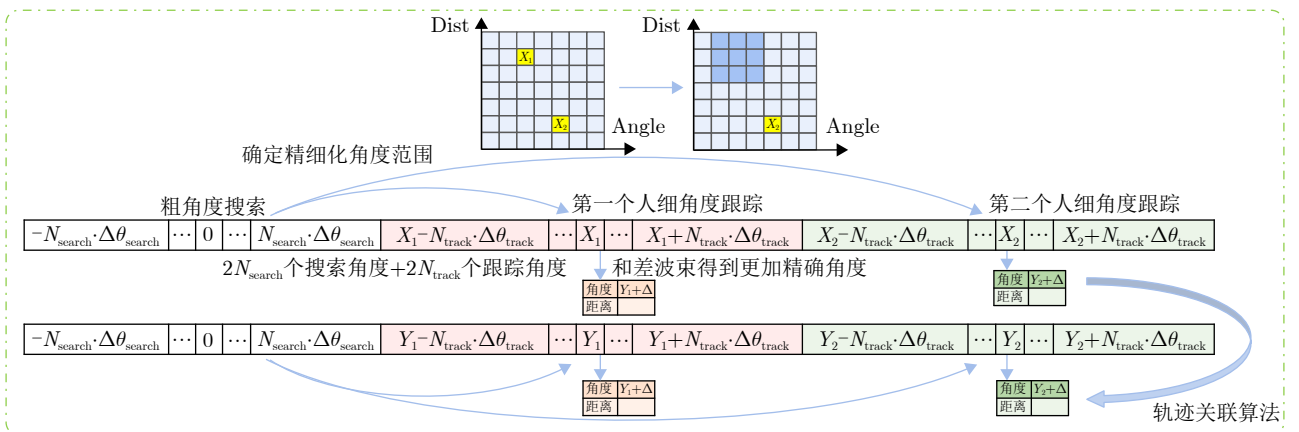


图 19 多人场景下的 CASD 策略

Fig. 19 CASD strategy in multi-person scenarios

图21(a)是相控阵雷达检测双人生命体征实验场景。一开始,两人坐在椅子上晃动,雷达记录两个人的精确位置为图21(b)。随后,两个人保持静坐并正常呼吸,雷达分别指向甲、乙所在位置提取其生命体征,两个人的呼吸心跳探测结果如图21(c)、图21(d)所示,可以发现呼吸与心跳波形清晰,雷达监测心跳信号与PowerLab真值吻合,验证了本文所用相控阵雷达能同时监测多人的生命体征。

7 结语

本文系统研究了相控阵雷达在室内人体监测中的关键技术。针对单人和多人场景,深入探讨了目标的运动轨迹与生命体征提取方法,进而提出了一种基于运动状态自适应的相控阵雷达实时监测方案。该方案结合角度距离图的幅度差分和目标位置的相位差分判别目标运动状态,并在轨迹跟踪与生命体征监测模式间自适应切换:在人体运动时,设计了

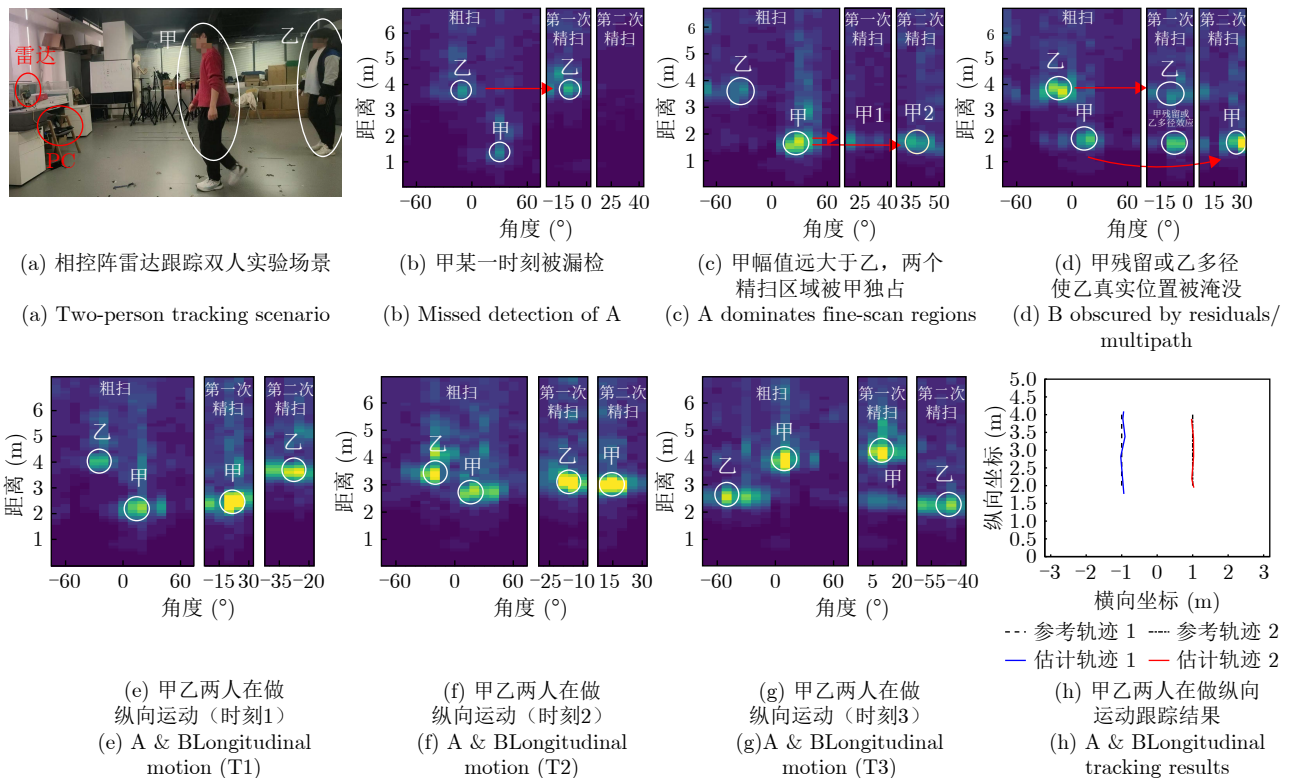


图 20 相控阵雷达同时监测多人运动轨迹实验

Fig. 20 Experiment on simultaneous multi-person trajectory tracking using phased array radar

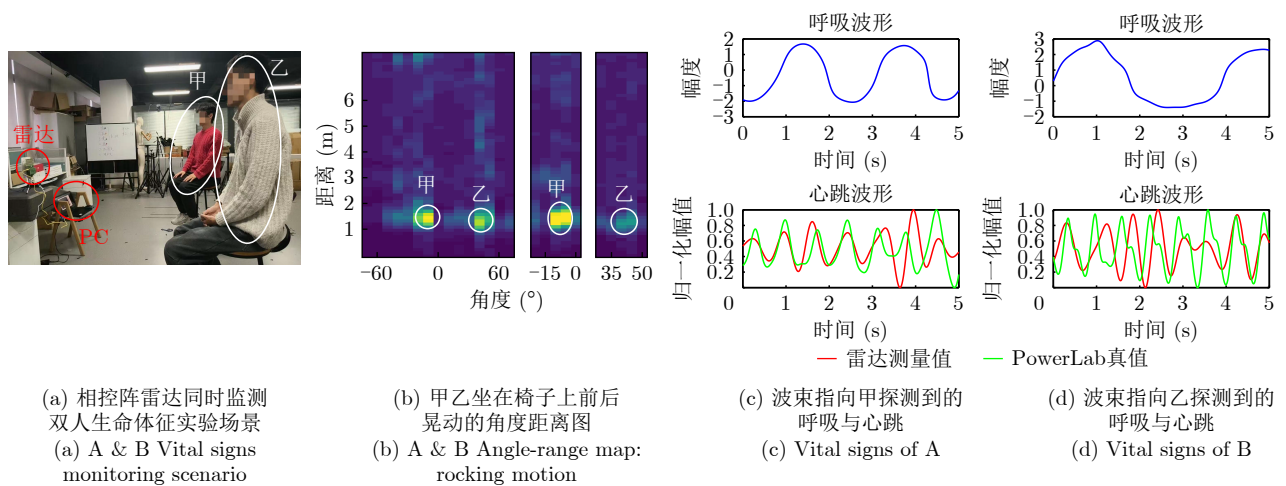


图 21 相控阵雷达同时监测多人生命体征实验

Fig. 21 Experiment on simultaneous multi-person vital signs monitoring using phased array radar

CASD策略以实现稳定的轨迹跟踪；在人体静止时，通过相位分析等算法获取清晰的呼吸心跳波形，满足居家健康监护的实际需求。实验结果验证了所提方案的有效性与鲁棒性，为相控阵雷达在智能家居健康监护等领域的推广应用奠定了基础。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

Conflict of Interests The authors declare that there is no conflict of interests

参 考 文 献

- [1] RANSING R S and RAJPUT M. Smart home for elderly care, based on wireless sensor network[C]. 2015 International Conference on Nascent Technologies in the Engineering Field, Navi Mumbai, India, 2015: 1–5. doi: [10.1109/ICNTE.2015.7029932](https://doi.org/10.1109/ICNTE.2015.7029932).
- [2] 崔雪岩, 李凤琴, 张金华, 等. 农村老年人运动障碍综合征与阈下抑郁现状及其相关性分析[J]. 护理研究, 2021, 35(12): 2106–2110. doi: [10.12102/j.issn.1009-6493.2021.12.007](https://doi.org/10.12102/j.issn.1009-6493.2021.12.007).
CUI Xueyan, LI Fengqin, ZHANG Jinhua, et al. Status quo and correlation analysis of locomotive syndrome and subthreshold depression in rural elderly[J]. *Chinese Nursing Research*, 2021, 35(12): 2106–2110. doi: [10.12102/j.issn.1009-6493.2021.12.007](https://doi.org/10.12102/j.issn.1009-6493.2021.12.007).
- [3] 张娟, 王春英. 2011-2020年我国城市居民主要疾病死亡率的时间演变趋势及其影响因素[J]. 公共卫生与预防医学, 2022, 33(3): 12–16. doi: [10.3969/j.issn.1006-2483.2022.03.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-2483.2022.03.003).
ZHANG Juan and WANG Chunying. Research on the time evolution trend and influencing factors of the mortality of major diseases of urban residents in China in 2011-2020[J]. *Journal of Public Health and Preventive Medicine*, 2022, 33(3): 12–16. doi: [10.3969/j.issn.1006-2483.2022.03.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-2483.2022.03.003).
- [4] GOLDMAN D P, CUTLER D M, SHANG Baoping, et al. The value of elderly disease prevention[J]. *Forum for Health Economics & Policy*, 2006, 9(2): 1. doi: [10.2202/1558-9544.1004](https://doi.org/10.2202/1558-9544.1004).
- [5] CHEN Jinbo, ZHANG Dongheng, WU Zhi, et al. Contactless electrocardiogram monitoring with millimeter wave radar[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2024, 23(1): 270–285. doi: [10.1109/TMC.2022.3214721](https://doi.org/10.1109/TMC.2022.3214721).
- [6] ZHANG Dongheng, HU Yang, and CHEN Yan. MTrack: Tracking multiperson moving trajectories and vital signs with radio signals[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(5): 3904–3914. doi: [10.1109/JIOT.2020.3025820](https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3025820).
- [7] WU Zhi, ZHANG Dongheng, SHANG Zixin, et al. Learning-based tracking-before-detect for unconstrained indoor human tracking using RF signal[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2025, 24(6): 4777–4793. doi: [10.1109/TMC.2025.3529501](https://doi.org/10.1109/TMC.2025.3529501).
- [8] BUYUKAKKASLAR M T, ERTURK M A, and AYDIN M A. A review on radar-based human detection techniques[J]. *Sensors*, 2024, 24(17): 5709. doi: [10.3390/s24175709](https://doi.org/10.3390/s24175709).
- [9] FIORANELLI F, LE KERNEC J, and SHAH S A. Radar for health care: Recognizing human activities and monitoring vital signs[J]. *IEEE Potentials*, 2019, 38(4): 16–23. doi: [10.1109/MPOT.2019.2906977](https://doi.org/10.1109/MPOT.2019.2906977).
- [10] MERCURI M, LORATO I R, LIU Yaohong, et al. Vital-sign monitoring and spatial tracking of multiple people using a contactless radar-based sensor[J]. *Nature Electronics*, 2019, 2(6): 252–262. doi: [10.1038/s41928-019-0258-6](https://doi.org/10.1038/s41928-019-0258-6).
- [11] HASSANIEN A and VOROBYOV S A. Phased-MIMO radar: A tradeoff between phased-array and MIMO radars[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, 58(6): 3137–3151. doi: [10.1109/TSP.2010.2043976](https://doi.org/10.1109/TSP.2010.2043976).
- [12] 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. doi: [10.1109/JSEN.2019.2914365](https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2914365).
- [13] ALMALIOGLU Y, TURAN M, LU C X, et al. Milli-RIO: Ego-motion estimation with low-cost millimetre-wave radar[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(3): 3314–3323. doi: [10.1109/JSEN.2020.3023243](https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3023243).
- [14] LI Wei, CHEN Ruizhi, WU Yuan, et al. Indoor positioning system using a single-chip millimeter wave radar[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(5): 5232–5242. doi: [10.1109/JSEN.2023.3235700](https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3235700).
- [15] XING Zhixuan, CHEN Penghui, WANG Jun, et al. Millimeter-wave radar detection and localization of a human in indoor complex environments[J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(14): 2572. doi: [10.3390/rs16142572](https://doi.org/10.3390/rs16142572).
- [16] JIANG Meiqiu, GUO Shisheng, LUO Haolan, et al. A robust target tracking method for crowded indoor environments using mmWave radar[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(9): 2425. doi: [10.3390/rs15092425](https://doi.org/10.3390/rs15092425).
- [17] ANTONUCCI A, CORRÀ M, FERRARI A, et al. Performance analysis of a 60-GHz radar for indoor positioning and tracking[C]. 2019 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Pisa, Italy, 2019: 1–7. doi: [10.1109/IPIN.2019.8911764](https://doi.org/10.1109/IPIN.2019.8911764).
- [18] SHAMSAKHR F, MACII D, PALOPOLI L, et al. A multi-target detection and position tracking algorithm based on mmWave-FMCW radar data[J]. *Measurement*, 2024, 234: 114797. doi: [10.1016/j.measurement.2024.114797](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114797).
- [19] HE Guangqiang, WU Weijie, ZHANG Hao, et al. DRMTrack: An extended distributed millimeter-wave radar framework for indoor multitarget human trajectory tracking[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2025, 12(21): 44732–44749. doi: [10.1109/JIOT.2025.3594120](https://doi.org/10.1109/JIOT.2025.3594120).
- [20] GOH H, HAN H, PARK S, et al. Localization of human motion using a 8×8 phased array antenna[J]. *The*

- Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, 2018, 67(9): 1197–1201. doi: [10.5370/KIEE.2018.67.9.1197](https://doi.org/10.5370/KIEE.2018.67.9.1197).
- [21] HALL T, NUKALA B T, STOUT C, *et al*. A phased array non-contact vital signs sensor with automatic beam steering[C]. 2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, Phoenix, USA, 2015: 1–4. doi: [10.1109/MWSYM.2015.7166973](https://doi.org/10.1109/MWSYM.2015.7166973).
- [22] HALL T, LIE D Y C, NGUYEN T Q, *et al*. Non-contact sensor for long-term continuous vital signs monitoring: A review on intelligent phased-array Doppler sensor design[J]. *Sensors*, 2017, 17(11): 2632. doi: [10.3390/s17112632](https://doi.org/10.3390/s17112632).
- [23] FANG Zhongyuan, LOU Liheng, TANG Kai, *et al*. Wide field-of-view locating and multimodal vital sign monitoring based on X-band CMOS-integrated phased-array radar sensor[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2020, 68(9): 4054–4065. doi: [10.1109/TMTT.2020.2989284](https://doi.org/10.1109/TMTT.2020.2989284).
- [24] 李纪三, 蔡文彬, 耿利祥, 等. 旋转相控阵雷达变数据率目标跟踪算法[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(3): 676–683. doi: [10.12305/j.issn.1001-506X.2021.03.10](https://doi.org/10.12305/j.issn.1001-506X.2021.03.10).
- LI Jisan, CAI Wenbin, GENG Lixiang, *et al*. Variable data rate target tracking algorithm for rotating phased array radar[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2021, 43(3): 676–683. doi: [10.12305/j.issn.1001-506X.2021.03.10](https://doi.org/10.12305/j.issn.1001-506X.2021.03.10).
- [25] 孙铭才, 张秦, 陈光陆. 动态时间窗下的相控阵雷达自适应调度算法[J]. 雷达学报, 2018, 7(3): 303–312. doi: [10.12000/JR17104](https://doi.org/10.12000/JR17104).
- SUN Mingcai, ZHANG Qin, and CHEN Guanglu. Dynamic time window adaptive scheduling algorithm for the phased array radar[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(3): 303–312. doi: [10.12000/JR17104](https://doi.org/10.12000/JR17104).
- [26] 杨晨阳, 毛士艺, 李少洪. 相控阵雷达中的TWS和TAS跟踪技术[J]. 电子学报, 1999, 27(6): 1–4,8. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.1999.06.001](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.1999.06.001).
- YANG Chenyang, MAO Shiyi, and LI Shaohong. Track-while-scan and track-and search tracking techniques in phased array radar[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1999, 27(6): 1–4,8. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.1999.06.001](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.1999.06.001).
- [27] LI Wenbo, DONG Yangyang, ZHANG Lidong, *et al*. Time domain attention mechanism based multi-functional radar working mode recognition[C]//2023 8th International Conference on Communication, Image and Signal Processing, Chengdu, China, 2023: 457–462. doi: [10.1109/CCISP59915.2023.10355860](https://doi.org/10.1109/CCISP59915.2023.10355860).
- [28] 薛锋, 张焱, 李纪三. 相控阵雷达目标跟踪机动检测算法研究[J]. 雷达与对抗, 2025, 45(2): 7–11,57. doi: [10.19341/j.cnki.1009-0401.2025.02.002](https://doi.org/10.19341/j.cnki.1009-0401.2025.02.002).
- XUE Feng, ZHANG Tian, and LI Jisan. Research on target tracking and maneuver detection algorithm for phased array radars[J]. *Radar & ECM*, 2025, 45(2): 7–11,57. doi: [10.19341/j.cnki.1009-0401.2025.02.002](https://doi.org/10.19341/j.cnki.1009-0401.2025.02.002).
- [29] 曹正林, 杨向忠, 刘卫华. 机载相控阵雷达TAS方式的实现[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(5): 1136–1139. doi: [10.3724/SP.J.1146.2008.00834](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2008.00834).
- CAO Zhenglin, YANG Xiangzhong, and LIU Weihua. Implementation of TAS method for airborne ESA radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(5): 1136–1139. doi: [10.3724/SP.J.1146.2008.00834](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2008.00834).
- [30] NOSRATI M, SHAHSAVARI S, LEE S, *et al*. A concurrent dual-beam phased-array Doppler radar using MIMO beamforming techniques for short-range vital-signs monitoring[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(4): 2390–2404. doi: [10.1109/TAP.2019.2893337](https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2893337).
- [31] XU Zhaoyi, SHI Cong, ZHANG Tianfang, *et al*. Simultaneous monitoring of multiple people's vital sign leveraging a single phased-MIMO radar[J]. *IEEE Journal of Electromagnetics, RF and Microwaves in Medicine and Biology*, 2022, 6(3): 311–320. doi: [10.1109/JERM.2022.3143431](https://doi.org/10.1109/JERM.2022.3143431).
- [32] SU W C, JUAN P H, CHIAN D M, *et al*. Human tracking and vital sign monitoring with a switched phased-array self-injection-locked radar[C]. 2020 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium, Los Angeles, USA, 2020: 659–662. doi: [10.1109/IMS30576.2020.9223889](https://doi.org/10.1109/IMS30576.2020.9223889).
- [33] HSU C Y, CHUANG C Y, WANG Fukang, *et al*. Detection of vital signs for multiple subjects by using self-injection-locked radar and mutually injection-locked beam scanning array[C]. 2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, Honolulu, USA, 2017: 991–994. doi: [10.1109/MWSYM.2017.8058756](https://doi.org/10.1109/MWSYM.2017.8058756).
- [34] 张光义. 相控阵雷达原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 25–30.
- ZHANG Guangyi. Principles of Phased Array Radar[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009: 25–30.
- [35] ZHAO Mingmin, ADIB F, and KATABI D. Emotion recognition using wireless signals[J]. *Communications of the ACM*, 2018, 61(9): 91–100. doi: [10.1145/3236621](https://doi.org/10.1145/3236621).

作者简介

周宏伟, 硕士生, 主要研究方向为无线感知。

张东恒, 副研究员, 主要研究方向为无线感知。

耿瑞旭, 博士生, 主要研究方向为毫米波雷达成像。

李嘉木, 博士生, 主要研究方向为信道建模。

陈彦, 教授, 主要研究方向为多模态感知、多媒体信号处理和数字健康。

(责任编辑: 于青)