

## 基于分布式穿墙雷达的多目标自动检测方法

梁啸<sup>①②③</sup> 叶盛波<sup>①②</sup> 宋晨阳<sup>①②③</sup> 袁玉冰<sup>①②③</sup> 张群英<sup>①②</sup>  
刘小军<sup>\*①②③</sup> 姜和俊<sup>\*④</sup> 李红<sup>④</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院空天信息创新研究院 北京 100094)

<sup>②</sup>(中国科学院电磁辐射与探测技术重点实验室 北京 100094)

<sup>③</sup>(中国科学院大学电子电气与通信工程学院 北京 100049)

<sup>④</sup>(近地面探测技术重点实验室 江苏 无锡 214035)

**摘要:** 超宽带雷达具有抗干扰能力强、穿透性强等特点,被广泛应用于穿墙人体目标探测。单发单收雷达具有体积小、重量轻的优势,但是无法实现目标的二维定位。MIMO阵列雷达能够实现对于目标的定位,但是存在着体积与分辨率之间的相互制约,同时运算时间较长。该文基于分布式穿墙雷达,提出了一种基于分布式雷达的多目标自动检测方法。首先,对回波信号进行时域预处理、时频转换等,基于恒虚警检测的目标距离测量方法获取目标候选距离单元,使用滤波矩阵进行候选信号增强;基于生命信息对增强后信号进行关联,实现目标匹配;最后使用定位模块来实现雷达位置自确定,进而实现生命目标位置的快速、自动检测。为了避免偶发误差对最终定位结果的影响,该文使用定位场景剖分的方法实现穿墙场景下的生命目标二维定位。实验结果表明,该文所提方法可以实现穿墙场景下多目标的检测定位,在实测数据中运算时间为0.95 s,优于其他对比方法4倍以上。

**关键词:** 穿墙雷达; 分布式雷达; 无线组网; 信号增强; 目标检测; 目标匹配; 联合定位

中图分类号: TN953

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2024)x-0001-16

DOI: 10.12000/JR24127

**引用格式:** 梁啸,叶盛波,宋晨阳,等. 基于分布式穿墙雷达的多目标自动检测方法[J]. 雷达学报(中英文),待出版. doi: 10.12000/JR24127.

**Reference format:** LIANG Xiao, YE Shengbo, SONG Chenyang, *et al.* Automatic multitarget detection method based on distributed through-wall radar[J]. *Journal of Radars*, in press. doi: 10.12000/JR24127.

## Automatic Multitarget Detection Method Based on Distributed Through-Wall Radar

LIANG Xiao<sup>①②③</sup> YE Shengbo<sup>①②</sup> SONG Chenyang<sup>①②③</sup> YUAN Yubing<sup>①②③</sup>  
ZHANG Qunying<sup>①②</sup> LIU Xiaojun<sup>\*①②③</sup> JIANG Hejun<sup>\*④</sup> LI Hong<sup>④</sup>

<sup>①</sup>(Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

<sup>②</sup>(Key Laboratory of Electromagnetic Radiation and Sensing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

<sup>③</sup>(School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

<sup>④</sup>(Science and Technology on Near-surface Detection Laboratory, Wuxi 214035, China)

收稿日期: 2024-06-20; 改回日期: 2024-09-03; 网络出版: 2024-xx-xx

\*通信作者: 刘小军 lxjdr@mail.ie.ac.cn; 姜和俊 jhj68@126.com

\*Corresponding Authors: LIU Xiaojun, lxjdr@mail.ie.ac.cn; JIANG Hejun, jhj68@126.com

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFC3011503), 近地面探测技术重点实验室基金(6142414220710)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (2023YFC3011503), Science and Technology on Near-surface Detection Laboratory Foundation Items (6142414220710)

责任主编: 崔国龙 Corresponding Editor: CUI Guolong

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License

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

**Abstract:** Ultra-WideBand (UWB) radar exhibits strong antijamming capabilities and high penetrability, making it widely used for through-wall human-target detection. Although single-transmitter, single-receiver radar offers the advantages of a compact size and lightweight design, it cannot achieve Two-Dimensional (2D) target localization. Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) array radar can localize targets but faces a trade-off between size and resolution and involves longer computation durations. This paper proposes an automatic multitarget detection method based on distributed through-wall radar. First, the echo signal is preprocessed in the time domain and then transformed into the time-frequency domain. Target candidate distance cells are identified using a constant false alarm rate detection method, and candidate signals are enhanced using a filtering matrix. The enhanced signals are then correlated based on vital information, such as breathing, to achieve target matching. Finally, a positioning module is employed to determine the radar's location, enabling rapid and automatic detection of the target's location. To mitigate the effect of occasional errors on the final positioning results, a scene segmentation method is used to achieve 2D localization of human targets in through-wall scenarios. Experimental results demonstrate that the proposed method can successfully detect and localize multiple targets in through-wall scenarios, with a computation duration of 0.95 s based on the measured data. In particular, the method is over four times faster than other methods.

**Key words:** Through-wall radar; Distributed radar; Wireless networking; Signal enhancement; Target detection; Target matching; Federated targeting

## 1 引言

超宽带(Ultra-WideBand, UWB)雷达有着抗干扰能力强、穿透性强的特点,距离分辨率高于传统体制雷达,被应用于地下探测、穿透成像、灾后救生、反恐等领域<sup>[1-4]</sup>。UWB雷达有着包括脉冲雷达、伪随机编码雷达、步进频雷达和调频连续波雷达在内的多种体制<sup>[5]</sup>。其中,脉冲雷达以其结构简单、成本低等优势,得到了广泛应用,它可以穿透常见材料(如布、墙壁、碎石和非金属障碍物)检测呼吸、心跳和微动等人体生命体征。通过选择合适频段,UWB穿墙雷达可以在非视线情况下,穿透障碍物通过检测上述生命体征引起的多普勒效应来检测人类目标<sup>[6]</sup>。

在实际的探测中,由于不规则障碍物(碎片、砾石等)的强烈反射遮挡、穿透介质传播损耗以及人类目标的反射弱等因素,雷达接收的回波信号中生命信号的信噪比会降低,生命信号的提取难度增大,为此研究人员进行了探索,提出了各种雷达信号杂波抑制算法,如消除静止杂波的相邻相减法。进行时频转换,将生命信号转换到频域,有效地增强生命信号<sup>[7,8]</sup>。Xu等人<sup>[9]</sup>提出了一种利用高阶累积量抑制噪声的呼吸检测方法。目前的穿墙雷达按使用状态可以分为一维、二维、三维雷达<sup>[3]</sup>。其中一维雷达,只能获得目标的径向速度和距离信息<sup>[10]</sup>,无法获得目标的二维(距离和方位)定位,上述方法都是针对于单通道雷达信号进行的处理;二维、三维雷达可以实现目标的定位,但是随着获取信息的增多,出现了体积增大、结构复杂,不易携带的难

题,限制了其应用场景。分布式雷达利用多台雷达进行探测,一方面单台雷达体积小,质量轻,便携性好;另一方面,分布式雷达可以灵活改变定位基线长度,提高目标的定位精度<sup>[11]</sup>。

国内外研究人员对分布式穿墙雷达进行了大量的研究<sup>[11-14]</sup>,在运动目标探测中,其回波能量强,不同时刻回波中目标位置变化明显,检测方法与静止目标有较大不同。对于静止目标检测而言,主要通过检测人体目标的呼吸反应的能量来识别人体,正如前文所说,在实际探测中,雷达回波中生命信号信噪比低,静止目标的检测难度大。Zhang等人<sup>[12]</sup>基于生命信号的周期性,实现了互相关的生命信号定位。Kocur等人<sup>[13]</sup>使用两台一发两收的穿墙雷达实现了复杂环境下的高精度运动人体跟踪。Jia等人<sup>[14]</sup>基于双站步进频雷达,利用相关系数矩阵,实现了多个静止人体目标的检测。史城等人<sup>[11]</sup>使用频域乘法来代替互相关运算,减少算法的运行时间。但是,上述方法均对整个信号矩阵进行处理,运算量大,同时仅仅依靠相关系数矩阵难以完全检测到信噪比较低的弱目标。本文针对目前分布式雷达生命信号检测中,多静止目标匹配难,检测过程中运算量大的问题进行研究。

本文采用两台雷达同时进行生命信号探测,提出了一种基于分布式雷达的多目标自动检测方法,在对雷达回波进行预处理后,利用傅里叶变换与频率截取,增大生命信号在所有能量中的比重,在频率维度将频率距离矩阵进行累加,获得一维距离向量,进行后续检测,主要内容如下:

(1)基于恒虚警检测的目标距离估计。使用恒

虚警率(Constant False Alarm Rate, CFAR)检测方法, 实现候选生命信号位置的获取;

(2)基于滤波矩阵的生命信号增强。生命目标在雷达的检测回波中, 存在着距离维度上的扩散, 同时弱目标会被噪声信号掩盖, 文中将第(1)步中候选距离单元信号进行提取, 将其分类为噪声信号和生命信号, 使用拉格朗日乘子法, 在保持生命信号失真接近0的同时, 最小化剩余噪声, 实现生命信号的增强, 提高目标之间的匹配精度;

(3)基于生命信息的信号关联。依据相同目标的微动信号在不同观测点的相关性较强, 生命信号与噪声信号、不同的目标之间的相关性较弱的原理, 实现生命信号的关联定位。同时本步骤中, 将预提取结果形成新的数据矩阵, 加速后续运算;

(4)基于定位模块的雷达位置自确定。在实际探测中, 不同雷达之间的位置确定十分重要, 本文中UWB模块安装在雷达上方, 通过实现模块之间的测距, 构建定位模块三角形, 实现二维空间中雷达之间相对位置关系确定, 为后续定位提供雷达位置;

(5)基于最优化结果的目标定位。采用了定位区域剖分的方式, 进行最后的目标位置求解, 避免了单一通道雷达测距结果误差时, 无法完成目标定位的问题。

## 2 定位原理

当穿墙雷达用于对障碍物后静止生命目标进行检测时, 发射信号接触目标后产生回波被雷达接收, 通过对回波信息进行处理可获取目标相距雷达距离、速度等信息。其中, 单发单收的雷达只能获取目标与雷达之间的距离与径向速度信息, 在生命探测中, 目标与雷达之间的距离可以被表示为 $R$ ,  $R = vT/2$ , 其中,  $v$ 为电磁波传播速度,  $T$ 是电磁波发射信号与接收信号之间时间差。

由于单发单收雷达无法实现目标的定位功能, 当采用分布式多台单发单收雷达时, 可以进行穿墙生命信号联合定位。一种方法是使用三角定位的原理进行目标位置求解。联合定位方程组可以写为

$$\begin{cases} (x_1 - \bar{x})^2 + (y_1 - \bar{y})^2 = R_1^2 \\ (x_2 - \bar{x})^2 + (y_2 - \bar{y})^2 = R_2^2 \\ \dots \\ (x_N - \bar{x})^2 + (y_N - \bar{y})^2 = R_N^2 \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $(\bar{x}, \bar{y})$ 就是本文需要求解的目标坐标值,  $(x_i, y_i)$ 代表第 $i$ 台雷达的坐标,  $i \in \text{Num}$ ,  $\text{Num}$ 表示雷达总数, 当场景中只存在一个目标时,  $R_i$ 代表目标到各个雷达之间的距离, 由于目标位于雷达的前

方, 因此当 $\text{Num} = 2$ 时, 可以求出目标的位置, 当 $\text{Num} > 2$ 时, 式(1)为超定方程组, 可以通过优化的方法进行求解。当目标个数超过1个时,  $R_i$ 发生变化, 当场景中存在 $Kn$ 个目标时,  $R_i \Rightarrow R_{i, kn}$ ,  $kn = 1, 2, \dots, Kn$ , 由于组合情况的发生, 需要增加雷达个数才能完成目标定位。同时在实际探测中, 墙后生命目标的个数往往是未知的, 当某个通道中出现虚假目标时, 不可避免地会对最终结果产生影响。

## 3 信号模型

穿墙雷达通过检测由呼吸和心跳引起的体表非平稳和准周期运动特征来进行静止人体目标探测。即提取接收波形中细微差异来测量生理信号。然而, 在实际应用中, 由于介质的衰减较大, 幅度较小的心跳运动被遮掩, 难以被雷达检测。因此, 本研究中生命信号检测只针对于呼吸运动而言。将呼吸运动近似正弦运动<sup>[15]</sup>, 人体胸部到雷达之间的距离 $d(t)$ 可以被描述为

$$d(t) = d_0 + d_r \sin(2\pi f_r t) \quad (2)$$

其中, 雷达到人体目标距离为 $d_0$ , 呼吸信号的振幅为 $d_r$ , 频率为 $f_r$ 。此外, 超宽带雷达接收到的回波信号是人和其他静止目标反射的信号以及杂波噪声成分的总和。假设除人体微动外, 所有目标都是静止的, 则雷达的脉冲响应可表示为

$$h(\tau, t) = a_v \delta(\tau - \tau_v(t)) + \sum_i a_i \delta(\tau - \tau_i) \quad (3)$$

其中,  $\tau$ 表示电磁波传播的快时间, 代表距离信息;  $\sum_i a_i \delta(\tau - \tau_i)$ 对应于静止目标;  $a_i$ 和 $\tau_i$ 分别对应于第 $i$ 个静止目标的振幅和快时间传播时延;  $a_v \delta(\tau - \tau_v(t))$ 表示人体微动回波;  $t$ 是接收回波的慢时间;  $a_v$ 和 $\tau_v(t)$ 表示慢时间时人体目标的振幅和在 $t$ 时刻引起的快时间传播时延。因此有

$$\begin{aligned} \tau_v(t) &= \frac{2d(t)}{v} = \frac{2d_0}{v} + \frac{2d_r \sin(2\pi f_r t)}{v} \\ &= \tau_0 + \tau_r \sin(2\pi f_r t) \end{aligned} \quad (4)$$

其中, 相应的 $v$ 表示电磁波传播速度,  $\tau_0 = 2d_0(t)/v$ 和 $\tau_r(t) = 2d_r(t)/v$ 。

对于脉冲雷达, 使用 $\text{sf}(\tau)$ 表示发射脉冲信号。因此, 接收信号 $\hat{x}(t)$ 可表示为

$$\begin{aligned} \hat{x}(\tau, t) &= \text{sf}(\tau) * h(\tau, t) \\ &= a_v \text{sf}(\tau - \tau_v(t)) + \sum_i a_i \text{sf}(\tau - \tau_i) \end{aligned} \quad (5)$$

接收信号的慢时间 $t$ 是离散的。将脉冲重复时间表示为 $T_{\text{sf}}$ , 则有 $t = kT_{\text{sf}}$ ,  $k = 0, 1, \dots, K - 1$ 。快

速时间的采样间隔可表示为 $\delta_{sf}$ 。离散信号可以进一步表示为大小为 $J \times K$  ( $j = 0, 1, \dots, J$ )的二维矩阵。同时,在本文中,考虑到最终接收到的回波矩阵并不是理想的距离-时间雷达回波矩阵,它并不只携带生命信息和静止目标,还包含噪声干扰。原始雷达回波可写为

$$\hat{\mathbf{X}}(j, k) = \hat{\mathbf{S}}(j, k) + \hat{\mathbf{C}}(j, k) + \hat{\mathbf{G}}(j, k) \quad (6)$$

其中,  $\hat{\mathbf{X}}(j, k)$ ,  $\hat{\mathbf{S}}(j, k)$ ,  $\hat{\mathbf{C}}(j, k)$ 和 $\hat{\mathbf{G}}(j, k)$ 分别表示雷达接收到的回波矩阵、生命信号回波矩阵、静止目标回波矩阵、噪声干扰矩阵。图1(a)展示了穿墙脉冲雷达采集的回波矩阵,其中被测目标位于7.5 m处,从图1(a)中可以看出,人体目标的生命信号被淹没在墙体直达波、杂波和噪声中,为了更好地展示数据中的信息,本文将进行时域预处理后的信号展示在图1(b)中,从中可以看出在距离约7.5 m处有信号的波动,可在后续处理中继续进行目标的检测。

## 4 本文所提方法

### (1) 雷达信号预处理

本文所提的人体目标检测方法流程如图2所示。其中,左侧为本文所使用的预处理流程,主要包括时域和频域两部分预处理,其中时域预处理为自适应背景减除法(Adaptive Background Subtraction, ABS)<sup>[16]</sup>、距离向滤波、自适应归一化;频域预处理为时频转换、加窗截取。信号预处理能有效消除环境杂波并与后续算法共同改善呼吸信号的输出信噪比。

呼吸信号通常会被背景信号掩盖,因此需要从接收到的数据中去除背景。由于人体微动、呼吸运动的频率低,使用传统的背景消除法容易将生命信号等同静态杂波去除,因此采用自适应背景减除

法,在有效避免去除呼吸运动的同时,去除固定背景。在回波信号中,不仅包括所需频段的信号,还包括所需频段以外的噪声,通过在快时间维度上使用带通滤波器,消除低频和高频噪声,提升信号信噪比。由于随着目标位置的远离,回波信号中的能量越弱,因此使用自适应归一化方法,对远处目标进行增强。处理后信号为

$$\mathbf{X}(j, k) = \mathbf{S}(j, k) + \mathbf{V}(j, k) \quad (7)$$

其中,  $\mathbf{X}(j, k)$ 表示预处理之后的回波信号矩阵,  $\mathbf{S}(j, k)$ 表示预处理后生命信号回波矩阵,  $\mathbf{V}(j, k)$ 表示噪声干扰矩阵。在进行上述处理后,对预处理后信号 $\mathbf{X}(j, k)$ 沿慢时间方向进行傅里叶变换即时频转换,获取频率-距离矩阵,并对转换结果进行加窗截取,结果为

$$\mathbf{X}(j, k_f) = \mathbf{S}(j, k_f) + \mathbf{V}(j, k_f) \quad (8)$$

其中,  $k_f = 1, 2, \dots, K_f$ ,  $K_f$ 为慢时间采样频率。由已知信息可得,人体生命信号主要能量集中在0.1~0.5 Hz频段数据,因此加窗处理中截取频域-距离矩阵中该频段数据。

### (2) 分布式穿墙雷达的多目标自动检测方法

现有生命信号检测方法大都是对预处理后回波进行快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)获取频率距离矩阵,然后对矩阵中进行人类目标距离和频率的提取。然而,当检测场景中存在多个人类目标时,基于FFT的检测方法存在两个明显的问题,一是对弱目标的检测缺失,强目标会掩盖弱目标的检测;二是在雷达之间难以实现对不同目标的配对,无法实现目标定位。在文献[11-14]中,基于多种基础提出了生命信号的相关匹配,进而实现生命信号定位的方案。但是上述方法均需对回波信号矩阵进行处理,并生成二维矩阵的关联结果,目标

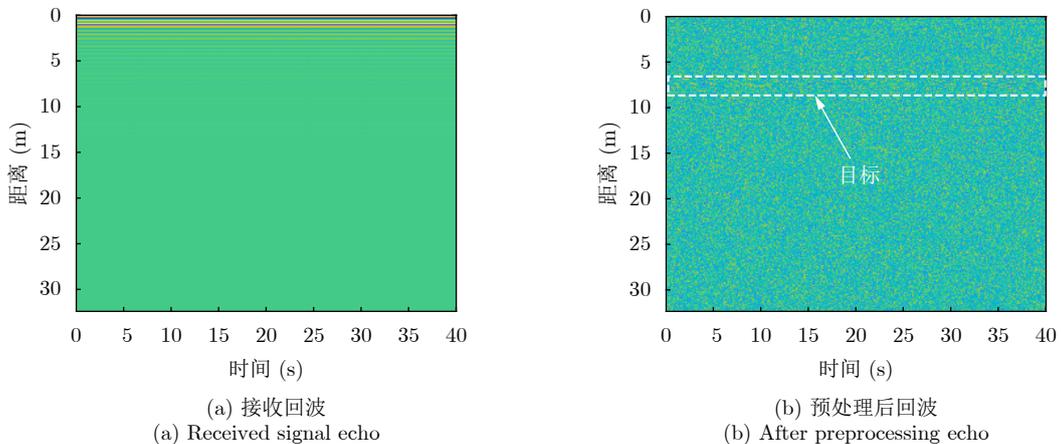


图1 雷达回波矩阵

Fig. 1 The radar echo matrix

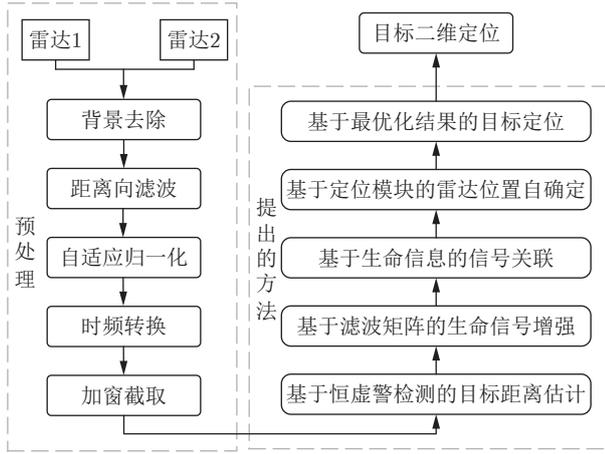


图 2 处理步骤流程图

Fig. 2 Flow chart of processing steps

提取的运算复杂度高。本文提出了多目标自动检测关联匹配方法, 实现快速准确的生命信号定位, 具体步骤如图2右侧所示。

#### A. 基于恒虚警检测的目标距离估计

将雷达信号预处理中, 截取的结果矩阵  $\mathbf{X}(j, k_t)$  沿慢时间进行累积, 获取一维距离向量, 降低后续处理运算时间和难度。对该向量进行一维的恒虚警 (Constant False Alarm Rate, CFAR) 检测, 提取出满足条件的信号位置, 并标记为生命信号预提取位置<sup>[17]</sup>。在提取结果中, 存在虚警问题, 结果中不只包含生命信号所在位置, 同时也存在噪声等因素导致的虚假目标, 为了能够有效地提高检测的准确性, 需要进行生命信号增强与生命信号关联, 依据生命信号的相似性与能量在频域的集中性进行虚假目标的去除。为了清晰地进行表达, 记录在这一步共提取目标  $P$  个及其位置。

#### B. 基于滤波矩阵的生命信号增强

将上一步“基于恒虚警检测的目标距离估计”中预提取的  $P$  个目标所对应的位置在信号矩阵  $\mathbf{X}(j, k)$  中所对应行信号进行增强, 由于生命目标的回波会扩散到多个距离单元中, 为了清晰地描述这一现象, 以所获取位置为中心, 选中上下的距离单元, 共同组成距离窗, 整个距离窗被视作该被预提取的生命信号, 记录每个距离窗为  $\text{Win}_p$ ,  $p = 1, 2, \dots, P$ , 每个  $\text{Win}_p$  均为  $N \times k$  的信号矩阵。为了更加准确地跟踪与发现目标, 所选取的计算距离窗所包含的距离单元数应该大于理论上单个目标物理范围的距离单元数, 将上一步中所有的生命信号预提取信号, 均生成对应的距离箱并进行信号增强。

在选定距离窗中不同距离的回波信号中均存在相同的生命信号成分, 同时在噪声存在的情况下, 生命信号的特征并不突出, 为了进一步增强, 将某

个距离窗内的信号进行单独处理, 此时假定该距离窗的距离维宽度为  $N$ , 那么对每行信号均有

$$y_n(k) = x_n(k) + v_n(k), \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

其中,  $y_n(k)$  代表当前距离窗中信号,  $x_n(k)$  表示生命信号,  $v_n(k)$  代表噪声信号, 假定生命信号分量与噪声分量是不相关的, 即  $\xi \{x_n(k), v_n(k-l)\} = 0, \forall l, m, n$ , 其中  $\xi \{*, *\}$  表示期望运算符, 使用所有行的信号来共同预测当前距离窗内的生命信号, 进而恢复出本距离窗中真实的生命信号分量, 可得

$$\mathbf{y}_n(k) = [y_n(k), y_n(k-1), \dots, y_n(k-L+1)]^T \quad (10)$$

$$\mathbf{x}_n(k) = [x_n(k), x_n(k-1), \dots, x_n(k-L+1)]^T \quad (11)$$

$$\mathbf{v}_n(k) = [v_n(k), v_n(k-1), \dots, v_n(k-L+1)]^T \quad (12)$$

其中,  $L$  是滤波器长度, 设  $\mathbf{W}$  是滤波器矩阵,  $(\cdot)^T$  表示矩阵转置, 因此输出信号可以表述为

$$\mathbf{z}(k) = \mathbf{W}\mathbf{Y}(k) = \mathbf{W}[\mathbf{X}(k) + \mathbf{V}(k)] \quad (13)$$

其中,  $\mathbf{w}_k$  是  $L \times L$  的矩阵,  $\mathbf{Y}(k)$ ,  $\mathbf{X}(k)$  和  $\mathbf{V}(k)$  是长度为  $N \times L$  的列向量。

$$\mathbf{Y}(k) = [\mathbf{y}_1^T \mathbf{y}_2^T \dots \mathbf{y}_n^T]^T \quad (14)$$

$$\mathbf{X}(k) = [\mathbf{x}_1^T \mathbf{x}_2^T \dots \mathbf{x}_n^T]^T \quad (15)$$

$$\mathbf{V}(k) = [\mathbf{v}_1^T \mathbf{v}_2^T \dots \mathbf{v}_n^T]^T \quad (16)$$

$$\mathbf{W}(k) = [\mathbf{w}_1^T \mathbf{w}_2^T \dots \mathbf{w}_n^T]^T \quad (17)$$

其中,  $\mathbf{w}(k)$ ,  $k=1, 2, \dots, N$  是  $L \times NL$  的矩阵, 因此,  $\mathbf{W}$  的大小为  $L \times NL$ 。  $\mathbf{Y}(k)$ ,  $\mathbf{X}(k)$  和  $\mathbf{V}(k)$  是长度为  $N \times L$  的列向量。令  $\mathbf{Q} = [\mathbf{I}_{L \times L} \ \mathbf{0}_{L \times L} \ \dots \ \mathbf{0}_{L \times L}]$ , 其中  $\mathbf{I}_{L \times L}$  是单位矩阵, 因此  $\mathbf{Q}$  是一个大小为  $L \times NL$  的矩阵。此时定义估计信号的误差向量为

$$\begin{aligned} e(k) &= z(k) - x_1(k) \\ &= \mathbf{W}\mathbf{X}(k) + \mathbf{W}\mathbf{V}(k) - x_1(k) \\ &= (\mathbf{W} - \mathbf{Q})\mathbf{X}(k) + \mathbf{W}\mathbf{V}(k) \\ &= e_x(k) + e_v(k) \end{aligned} \quad (18)$$

其中,  $e_x(k) = (\mathbf{W} - \mathbf{Q})\mathbf{X}(k)$  是变换过程中引起的生命信号失真,  $e_v(k) = \mathbf{W}\mathbf{V}(k)$  是残余噪声, 从中可以从数学上进行推导, 求得具有子空间技术的最优滤波器, 在保持生命信号失真接近于 0 的同时, 最小化剩余噪声<sup>[18]</sup>。即

$$\min J_x(\mathbf{W}) \quad \text{s.t.} \quad J_v(\mathbf{W}) < L\sigma^2 \quad (19)$$

其中,

$$J_x(\mathbf{W}) \triangleq \text{tr} \left\{ E \left[ e_x(k) e_x^T(k) \right] \right\} \quad (20)$$

$$J_v(\mathbf{W}) \triangleq \text{tr} \left\{ E \left[ e_v(k) e_v^T(k) \right] \right\} \quad (21)$$

使用拉格朗日乘子 $\mu$ 来将约束与代价函数进行统一, 可得

$$\mathbf{W}_{\text{sub}} = \underset{\mathbf{W}}{\operatorname{argmin}} \mathcal{L}(\mathbf{W}, \mu) \quad (22)$$

其中,

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(\mathbf{W}, \mu) &= J_x(\mathbf{W}) + \mu \left[ J_v(\mathbf{W}) - L\sigma^2 \right] \\ &= \operatorname{tr} \left\{ E \left[ e_x(k) e_x^T(k) \right] \right\} \\ &\quad + \mu \left[ \operatorname{tr} \left\{ E \left[ e_v(k) e_v^T(k) \right] \right\} - L\sigma^2 \right] \end{aligned} \quad (23)$$

对其进行求解, 最优滤波器的结果为

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_{\text{sub}}^T &= (\mathbf{R}_{xx} + \mu \mathbf{R}_{vv})^{-1} \mathbf{R}_{xx} \mathbf{Q}^T \\ &= \left[ \mathbf{R}_{yy} + (\mu - 1) \mathbf{R}_{vv} \right]^{-1} \left[ \mathbf{R}_{yy} - \mathbf{R}_{vv} \right] \mathbf{Q}^T \end{aligned} \quad (24)$$

其中,  $\mathbf{R}_{xx} = E[X(k)X(k)^T]$ 是大小为 $NL \times NL$ 的当前距离窗中生命信号相关矩阵,  $\mathbf{R}_{yy} = E[Y(k)Y(k)^T]$ 是大小为 $NL \times NL$ 的当前距离窗中回波信号的相关矩阵,  $\mathbf{R}_{vv} = E[V(k)V(k)^T]$ 大小为 $NL \times NL$ 的噪声相关矩阵, 由式(24)可知, 求得最有滤波器需要已知回波信号的相关矩阵 $\mathbf{R}_{yy}$ 和噪声相关矩阵 $\mathbf{R}_{vv}$ , 可以使用雷达检测能力范围之外的回波信号作为噪声相关矩阵的估计元。

当求得最优滤波器结果后, 即可对当前距离窗信号进行增强, 即使用当前距离窗 $\text{Win}_p$ 与最优滤波器 $\mathbf{W}_{\text{sub}}^T$ 进行运算, 获取生命信号向量。为了能够更好地表现信号, 所使用的增强为 $[N/2]$ 行信号, 其中 $[\cdot]$ 表示进行向下取整。

进一步对每一个所提取的距离窗均进行计算, 逐一生成结果向量。其中结果向量由计算得到的最优滤波器 $\mathbf{W}_{\text{sub}}^T$ 与上一步获取的预提取信号进行乘法运算, 得到输出的结果向量。

### C. 基于生命信息的信号关联

目标关联是数据融合中最重要的问题之一。当目标个数大于雷达个数时, 由于距离组合的存在, 无法完成生命信号的定位。实现目标关联后, 目标被一一分离匹配, 实现了双通道多生命信号的定位。

依据同一个人体的微动信号在不同观测点表现出较强的相关性, 生命信号与噪声信号、不同的目标之间的相关性则较弱的原理。在上文中检测结果中有 $P$ 个目标, 按照距离排序, 在两个视角中距离维度依次可以被表示为 $k_1^1, k_2^1, \dots, k_P^1 \in J$ 和 $k_1^2, k_2^2, \dots, k_P^2 \in J$ , 为了方便进行表示, 将上一步中进行增强后的生命信号结果取出, 组成新的目标回波矩阵:

$$\mathbf{R}^1(p, n) = \mathbf{X}_1(k_p^1, k), \quad p = 1, 2, \dots, P \quad (25)$$

$$\mathbf{R}^2(p, n) = \mathbf{X}_2(k_p^2, k), \quad p = 1, 2, \dots, P \quad (26)$$

其中,  $\mathbf{X}_1(k_p^1, k)$ 与 $\mathbf{X}_2(k_p^2, k)$ 分别代表两个雷达预处理之后的回波信号矩阵, 令矩阵 $\mathbf{R}^1(p, n)$ 中第 $p$ 行为 $\mathbf{r}_p^1(n)$ , 代表第 $p$ 个目标的回波信号, 同理令矩阵 $\mathbf{R}^2(p, n)$ 中的第 $p$ 行为 $\mathbf{r}_p^2(n)$ , 代表第 $p$ 个目标的回波信号, 上述步骤后新生成的目标回波矩阵为 $P \times K$ , 通常 $P \ll J$ , 为后续计算通道信号之间相关性降低了运算的时间。定义各个通道之间信号的相关性, 例如第1个通道的第 $i$ 个目标, 和第2个通道的第 $j$ 个目标的相关性定义为

$$\begin{aligned} \operatorname{cov}(\mathbf{r}_i^1(m), \mathbf{r}_j^2(m)) &= \\ &= \frac{\left| \sum_{m=1}^M \mathbf{r}_i^1(m) \mathbf{r}_j^2(m) \right|}{\sqrt{\sum_{m=1}^M (\mathbf{r}_i^1(m))^2} \sqrt{\sum_{m=1}^M (\mathbf{r}_j^2(m))^2}}, \quad 1 \leq i, j \leq P \end{aligned} \quad (27)$$

将 $\operatorname{cov}(\mathbf{r}_i^1(m), \mathbf{r}_j^2(m))$ 简记为 $c_{ij}$ ,  $(\cdot)$ 表示共轭, 因此可以得到目标回波的相关矩阵:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{11} & \cdots & c_{1P} \\ c_{21} & c_{11} & \cdots & c_{2P} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{P1} & c_{P1} & \cdots & c_{PP} \end{bmatrix} \quad (28)$$

步骤1 求解当前相关矩阵中最值, 判断当前最值 $c_{ij}$ 是否满足阈值条件, 如果满足, 则获取当前矩阵中最大值所对应的位置, 进入步骤2; 如不满足阈值条件则进入步骤3;

$$\begin{aligned} (i, j) &= \arg \max_{i, j} c_{ij} \\ &= \arg \max_{i, j} (\mathbf{C}), \quad i, j \in 1, \dots, P \end{aligned} \quad (29)$$

步骤2 在相关矩阵中, 去除第1步中选出的最值所在行、列的数据, 返回第1步;

步骤3 获取匹配结果。

其中, 为了增加阈值选取的鲁棒性, 文中在阈值选取之前, 使用步骤1和步骤2将所有的相关性最值进行获取, 而后使用聚类方法, 将其分为两类, 值较大的一组为第1类, 其中阈值可设置为第1类中最小值与第2类中最大值的均值, 在本文实验场景中, 阈值 $\delta$ 设置为0.55。

在下文中对本节内容进行表示, 如表1所示。

### D. 基于定位模块的雷达位置自确定

雷达位置确定与目标位置求解, 使用UWB定位模块进行雷达之间距离测量, 为接下来进行人体目标定位提供支撑。

为了能够方便地完成各个雷达位置的位置确定, 在雷达上加装了UWB测距模块, 如图3所示。该模块分为基站模块与标签模块, 可以实时进行基站与

表 1 基于生命信息的信号关联处理流程

Tab. 1 The signal correlations based on vital information

输入: 两个雷达预处理后的回波信号矩阵  $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2$ , 检测结果中  $P$  个目标对应的距离结果  $k_1^1, k_2^1, \dots, k_P^1 \in J$  和  $k_1^2, k_2^2, \dots, k_P^2 \in J$

1. 获取  $\mathbf{R}^1(p, n) = \mathbf{X}_1(k_p^1, k)$ 、 $\mathbf{R}^2(p, n) = \mathbf{X}_2(k_p^2, k)$ , 将对应行标记为  $\mathbf{r}_p^1(n)$  与  $\mathbf{r}_p^2(n)$
2. 求解相关性

$$\text{cov}(\mathbf{r}_i^1(m), \mathbf{r}_j^2(m)) = \frac{\left| \sum_{m=1}^M \mathbf{r}_i^1(m) (\mathbf{r}_j^2(m))^* \right|}{\sqrt{\sum_{m=1}^M (\mathbf{r}_i^1(m))^2} \sqrt{\sum_{m=1}^M (\mathbf{r}_j^2(m))^2}}, \quad 1 \leq i, j \leq P$$

$\text{cov}(\mathbf{r}_i^1(m), \mathbf{r}_j^2(m))$  为  $c_{ij}$ , 得到相关矩阵  $\mathbf{C}$

3. 迭代进行目标的关联问题的求解, 直至当前值不满足阈值  $\delta = 0.55$ :

(1) 获取  $c_{ij}$ , 当  $c_{ij} > \delta$  继续, 否则进入步骤4

$$(i, j) = \arg \max_{i, j} c_{ij}$$

$$= \arg \max_{i, j} (\mathbf{C}), \quad i, j \in 1, 2, \dots, P$$

(2) 去除  $\mathbf{C}$  中  $i, j$  列数据, 并进行记录, 返回(1);

4. 输出步骤3中获取的  $i, j$  结果, 即为匹配结果。

标签之间的测距, 详情在两台雷达上放置该模块, 在雷达工作期间进行距离测量, 当标签与基站相距  $0.5 \sim 10.0$  m 时, 瞬时测距误差小于 2 cm。由于在雷达工作期间保持静止, 因此测量距离值可进行加和求平均降低误差, UWB测距误差进一步降低, 经过多次实验可得, 测距误差小于 1 cm。以测距模块基站为坐标原点, 测距标签间连线为  $Y$  轴, 测距基站指向测距标签且与  $Y$  轴垂直方向为  $X$  轴正方向, 建立坐标系。坐标轴建立之后, 可获得雷达2在坐标系中位置。

由于雷达位于同一平面上, 因此使用3个UWB定位模块, 在安装模块时确定距离  $h$ , 测量结果为  $h=23$  cm, 实验中获得测量距离  $d_1, d_2$ , 详见图3, 即可计算雷达1到雷达2之间的距离。记  $d_1$  边与  $h$  形成三角形内角为  $\theta_1$ ,  $d_2$  形成内角为  $\theta_2$ , 可得

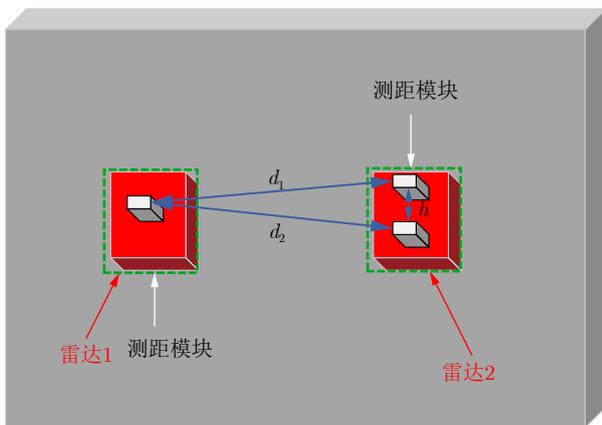


图 3 测距模块定位示意图

Fig. 3 The positioning diagram of the UWB module

$$\cos \theta_2 = \frac{h^2 + d_2^2 - d_1^2}{2hd_2} \quad (30)$$

$$\cos \theta_1 = \frac{h^2 + d_1^2 - d_2^2}{2hd_1} \quad (31)$$

雷达2的位置  $(X_a, Y_a)$  具体计算结果如下:

$$Y_a = d_2 \times \sqrt{1 - (\cos \theta_2)^2} \quad (32)$$

$$X_a = \begin{cases} \sqrt{d_2^2 - Y_a^2} - \frac{h}{2}, & \cos \theta_2 > 0, \cos \theta_1 > 0 \\ -\sqrt{d_2^2 - Y_a^2} - \frac{h}{2}, & \cos \theta_2 > 0, \cos \theta_1 < 0 \\ \sqrt{d_2^2 - Y_a^2} + \frac{h}{2}, & \cos \theta_2 < 0, \cos \theta_1 > 0 \end{cases} \quad (33)$$

使用UWB模块进行实际测量, 结果值如表2所示, 其中UWB测距模块的保留精度为厘米。

#### E. 基于最优化结果的目标定位

在A—D步骤完成后, 实现了目标之间的关联与每通道测距, 当某一通道对目标测距结果出现误差时, 即两台雷达测量相同目标时测距结果之间差值大于雷达之间间距, 会导致三角定位结果无解, 为了解决该问题, 本文采用了定位区域剖分的方

表 2 UWB测距模块测距定位结果(m)

Tab. 2 UWB ranging module ranging and positioning results (m)

类别	真实距离	测量距离	误差值
标签1	1.56	1.55	0.01
标签2	1.56	1.56	0
坐标中 $X_a$	1.50	1.55	-0.05
坐标中 $Y_a$	0	-0.05	0.05

式,进行最后的目标位置求解,计算每个网格点到两台雷达的距离之和,与两台雷达测量相同目标时测距结果作差,最小值点即为定位结果值。为了更好地说明方法的有效性,使用仿真和实验数据进行验证。

## 5 实验结果分析

### 5.1 仿真结果分析

图4是穿墙呼吸检测的实验场景。本文使用GprMax仿真软件来模拟人体呼吸模型,其中,墙体厚度为37 cm,相对介电常数 $\epsilon_r = 6$ ,电导率 $\sigma = 0.01 \text{ Sm}^{-1}$ 和磁导率 $\mu_1 = 1$ 。雷达发射中心频率为1 GHz的脉冲信号。人体呼吸信号使用金属圆柱体进行模拟,其中圆柱体半径使用正弦波进行调制。在仿真数据中加入高斯白噪声,实验场景中有两个静止的目标,如图4设立坐标系,两个金属圆柱体坐标依次为(0.1,1.6)和(1.1,2.1)。

图5给出了时域预处理后的时域结果图,从图5可以看出,目标1的信号较为明显,后面两个目标几乎无法被发现。图6为经过恒虚警检测的目标距

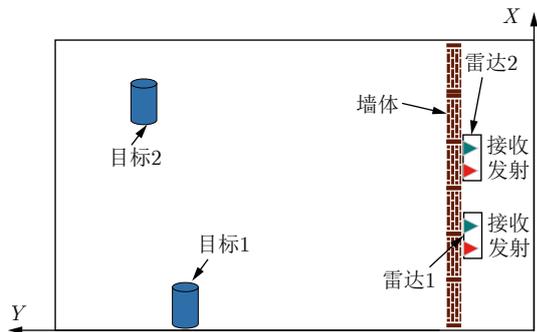


图4 仿真实验场景

Fig. 4 The simulation experiment scenario

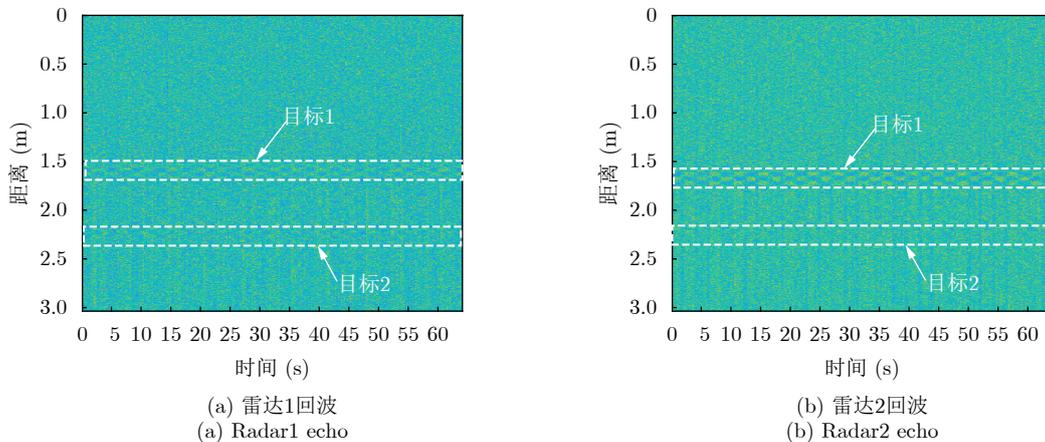


图5 时域预处理结果图

Fig. 5 Plot of time domain preprocessing results

离估计的结果图,其中经过CFAR检测后不仅成功地将目标位置进行了提取,一些虚假目标的位置也被提取,经过后续步骤“基于生命信息的信号关联”处理之后,可以得到检测结果的真实性,结果被绘制在图6(b)中。图7为进行基于滤波矩阵的信号增强进行生命信号增强前后的距离窗中第 $[N/2]$ 行数据结果,可以看出,增强后噪声得到了抑制,生命信号的频率特性被凸显。计算增强前后的相同目标回波相关性,从表3可以看出,经过增强之后的回波相关性得到提升。为了能够分析在不同信噪比情况下的算法性能,本文在仿真信号中添加不同信噪比的噪声,进行定位精度的测量,噪声的具体定位结果数据见表4,并将最终的定位结果误差表进行展示,从中可以看出,前方较强目标定位结果误差均在0.10 m以内,后方较弱目标误差较大,但也均在0.15 m以内。

### 5.2 实验结果分析

图8是穿墙呼吸检测的实验场景。本文使用两台参数相同、工作状态一致的收发穿墙雷达进行实验。实验场地为羽毛球馆,墙体厚度为37 cm。实验分为两组,其中第1组实验场景中有3个静止的目标,位置依次是(-1 m, 6 m)、(2 m, 5 m)和(1 m, 7.5 m),如图8(a)所示;在第2组实验场景中有两名志愿者,他们在所建立坐标系中坐标为(-1 m, 7 m), (1 m, 5 m),如图8(b)所示,其中每组实验均采集2 min数据,同时所选取进行处理的数据时长控制在40 s以内,因此本文以20 s长度为滑动窗口大小,将每组实验数据分为9组,均使用本文所提算法进行处理,最终输出的定位结果为不同数据的平均值。

首先本文中以3个目标实验为示例数据,进行逐步骤结果展示,图9给出了时域预处理后的时域

结果图，从图9可以看出，目标1的信号较为明显，后面两个目标几乎无法被发现。图10为经过恒虚警检测的目标距离估计结果，经过CFAR检测后不仅成功地将目标位置进行了提取，一些虚假目标的位置也被提取，经过后续步骤“基于生命信息的信号关联”处理之后，可以得到检测结果的真实性，结果被绘制在图10(b)中。图11为进行基于滤波矩阵

的信号增强进行生命信号增强前后的距离窗中第  $[N/2]$  行数据结果，可以看出，增强后噪声得到了抑制，生命信号的频率特性被凸显。计算增强前后的相同目标回波相关性，从表5可以看出，经过增强之后的回波相关性得到了很大的提升。定位结果数据见表6，符合对定位精度的要求，成功实现了分布式雷达多生命信号定位。

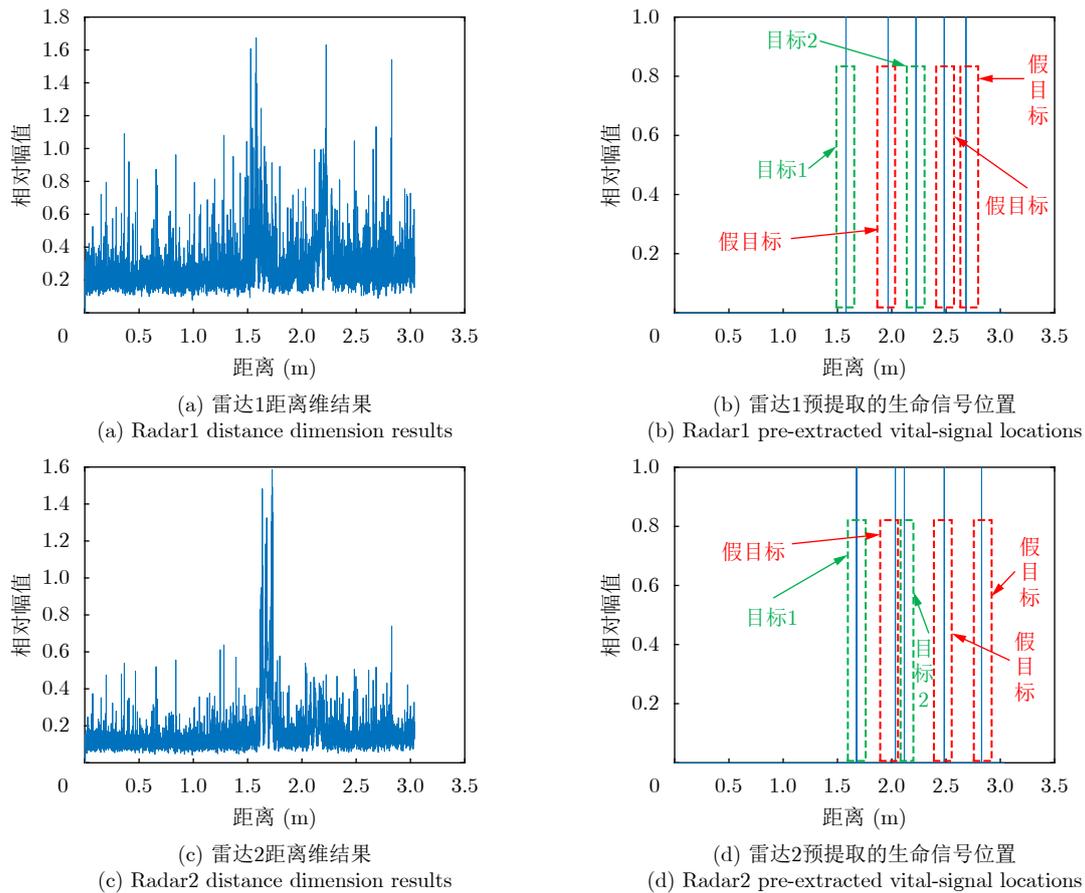
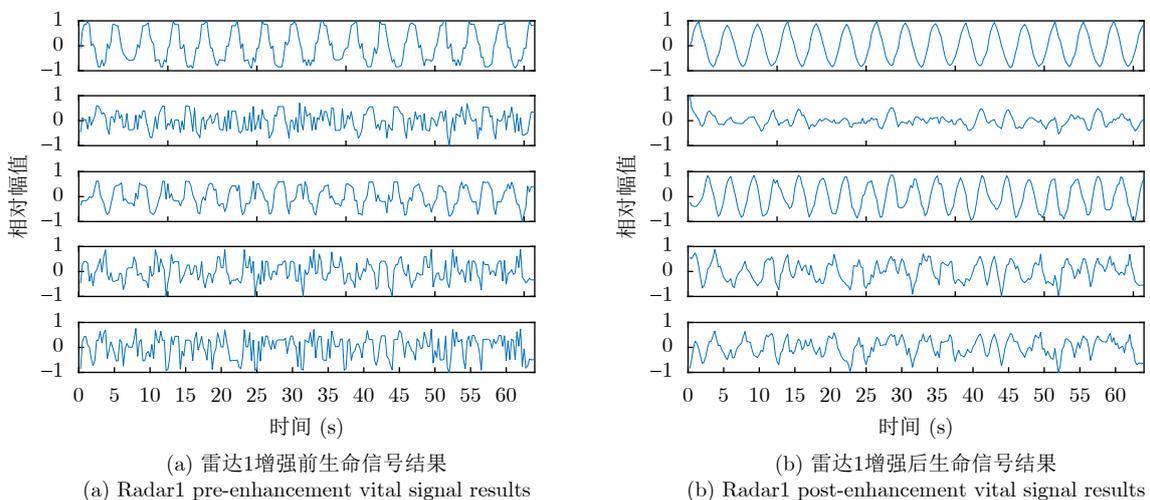


图 6 基于恒虚警检测的目标距离估计结果图

Fig. 6 The target distance estimation results based on constant false alarm detection



(a) Radar1 pre-enhancement vital signal results

(b) Radar1 post-enhancement vital signal results

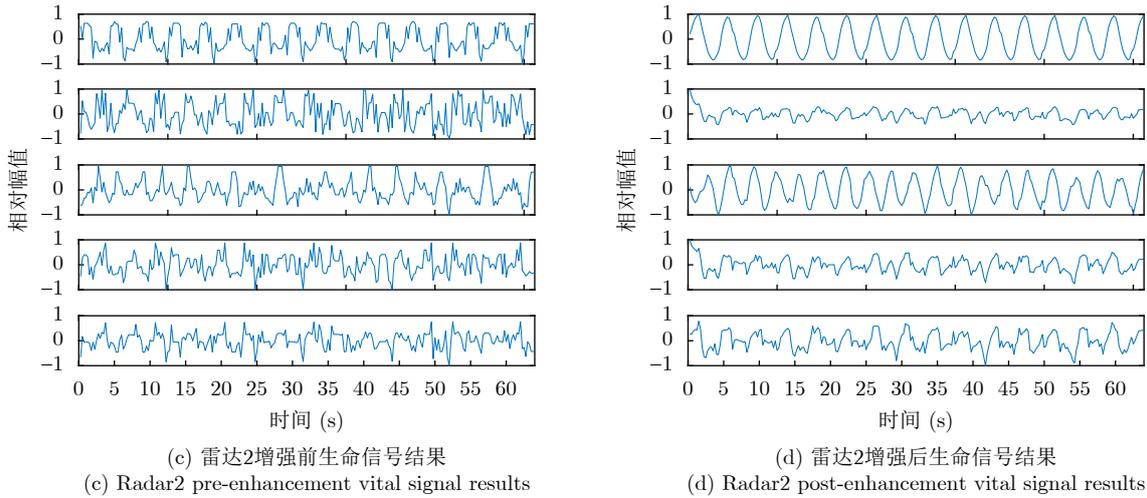


图7 基于滤波矩阵的信号增强前后结果图, 每幅子图中从上到下为距离排序

Fig. 7 Before and after result plots of signal enhancement based on filter matrix. Each subplot is sorted by distance from top to bottom in each subplot

表3 仿真实验中两通道中相同目标增强前后相关性

Tab. 3 In the simulation experiment, the correlation before and after enhancement of the same target in both channels

类别	增强前	增强后	增强百分比(%)
目标1	0.78	0.98	25.6
目标2	0.65	0.91	40.0

与其他方法进行对比, 在本文数据中, 其他方法也实现了正确的目标检测, 相比较于使用慢时间互相关的算法<sup>[4]</sup>, 和使用频域乘法代替慢时间的互相关方法<sup>[11]</sup>, 本文所提方法减小了运算量, 在计算机配置AMD Ryzen5处理器和32 GB内存的平台

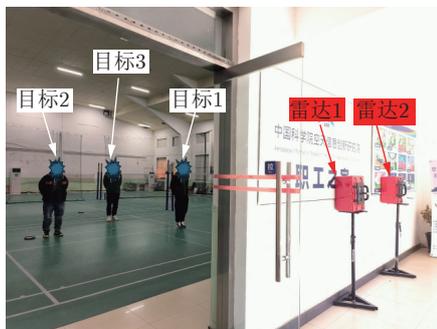
上, 运算时间为0.95 s, 满足数据实时处理的要求, 对比结果见表6。

实验2的处理结果放置下文中, 图12给出了经过步骤背景去除、距离向滤波、自适应归一化后的时域结果图, 从图12可以看出, 目标1的信号较为明显, 后面两个目标几乎无法被发现。图13为经过恒虚警检测的目标距离估计结果, 经过CFAR检测后不仅成功地将目标位置进行了提取, 一些虚假目标的位置也被提取, 经过后续步骤“基于生命信息的信号关联”处理之后, 可以得到检测结果的真实性, 结果被绘制在图13(b)中。图14为进行基于滤

表4 不同信噪比下的定位结果误差(m)

Tab. 4 The error of localization of results under different SNRs (m)

类别	-10 dB	-8 dB	-6 dB	-4 dB	-2 dB	0 dB	2 dB	4 dB	6 dB	8 dB	10 dB	12 dB	14 dB
目标1	0.08	0.08	0.05	0.09	0.05	0.07	0.09	0.07	0.07	0.05	0.09	0.10	0.07
目标2	0.11	0.13	0.15	0.10	0.08	0.14	0.15	0.10	0.14	0.10	0.12	0.10	0.10



(a) 实验1  
(a) Experiment1



(b) 实验2  
(b) Experiment2

图8 实验场景

Fig. 8 Experimental scenario

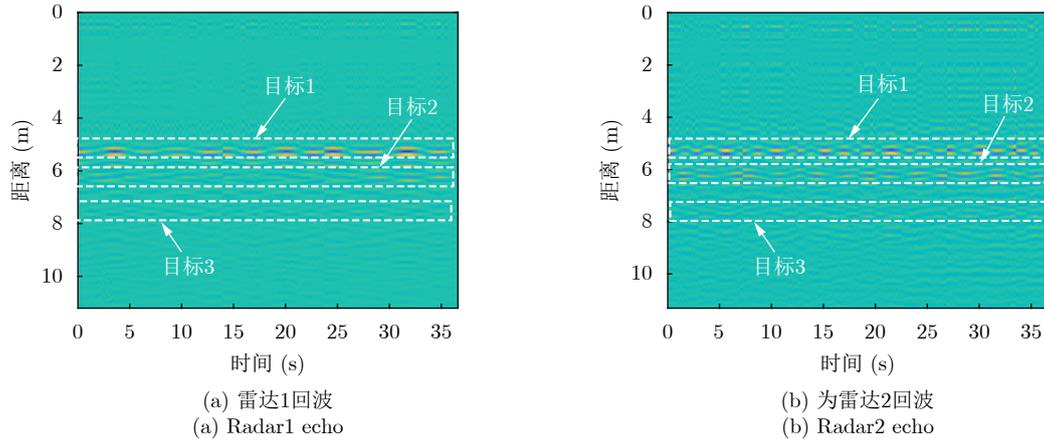


图 9 实验1时域预处理结果图

Fig. 9 The time-domain preprocessing result plots in experiment1

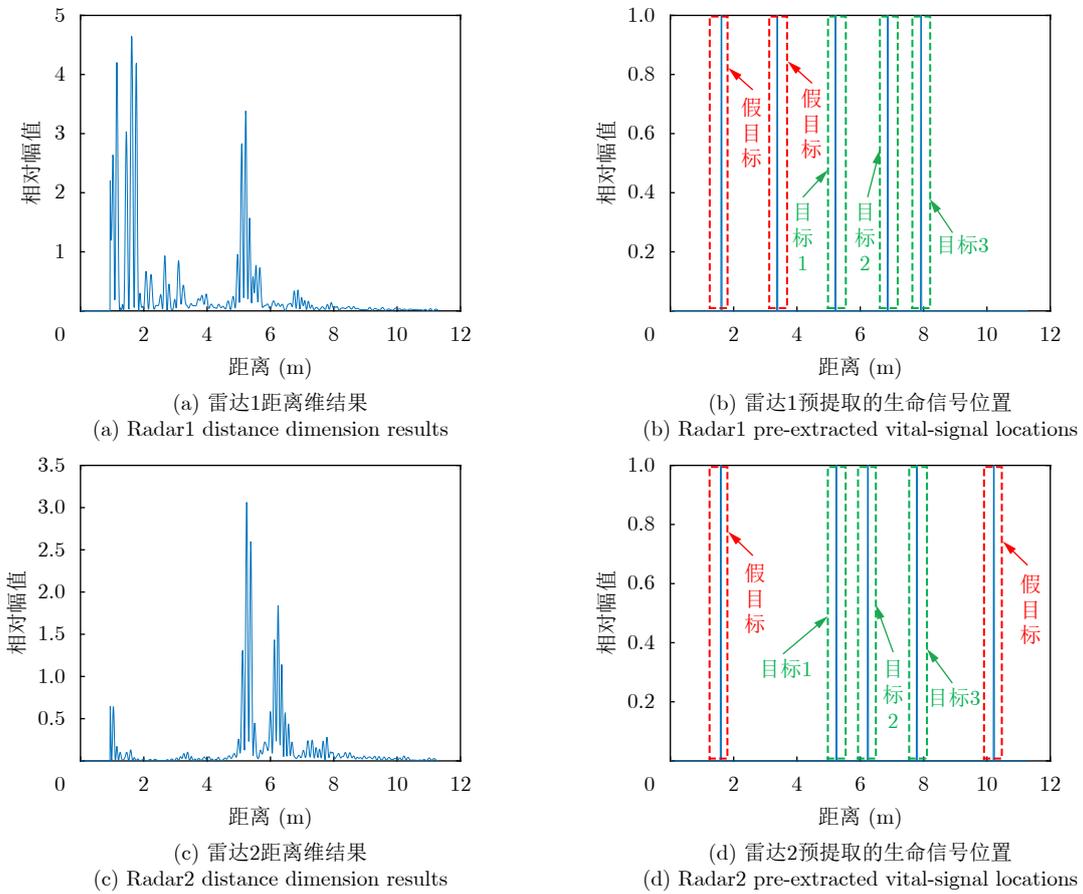


图 10 实验1中基于恒虚警检测的目标距离估计结果图

Fig. 10 The target distance estimation results based on constant false alarm detection in experiment1

波矩阵的信号增强进行生命信号增强前后的距离窗中第  $[N/2]$  行数据结果，可以看出，增强后噪声得到了抑制，生命信号的频率特性被凸显。计算增强前后的相同目标回波相关性，在中进行展示，从表7可以看出，经过增强之后的回波相关性得到了提升。定位结果数据见表8，成功实现了分布式雷达多生命信号定位。

## 6 讨论

在实际的目标检测场景中，还存在如人体微动周期在检测阶段发生明显变化、空间中非人体目标(假目标或背景)也存在随机微抖动情况。本文所使用的分布式穿墙雷达，按照提前设定好的时间片进行分时工作，在避免雷达间相互干扰的前提下，两台雷达在相邻时间节点所探测到的目标信息一致性

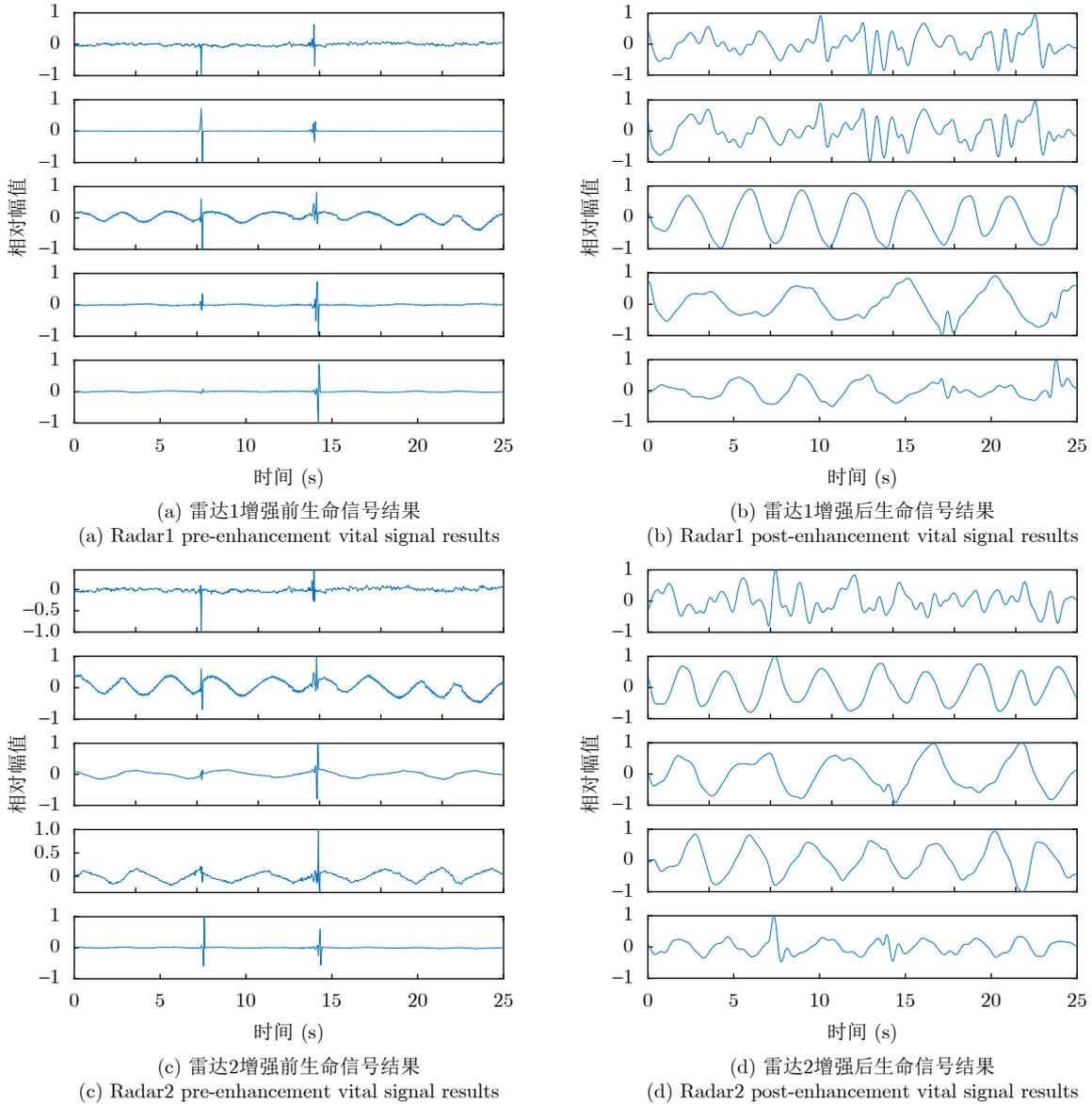


图 11 实验1中基于滤波矩阵的信号增强前后结果图(每幅子图中从上到下为距离排序)

Fig. 11 Before and after result plots of signal enhancement based on filter matrix (Each subplot is sorted by distance from top to bottom in each subplot in experiment1)

表 5 实验1中两通道中相同目标增强前后相关性

Tab. 5 In the experiment 1, The correlation before and after enhancement of the same target in both channels

类别	增强前	增强后	增强百分比(%)
目标1	0.49	0.69	40.8
目标2	0.41	0.61	48.8
目标3	0.32	0.56	75.0

高。因此，当人体目标微动周期发生明显变化时，其相关性仍然很高，论文中所提的方法有效；当非人体目标存在随机微抖动时，单从不同雷达回波信号的相关性难以进行判断，又因为人体目标的微动频率往往位于0.1~0.5 Hz，因此，可以在“B. 基于

滤波矩阵的生命信号增强”，加入对增加对增强后信号频率的筛选工作，去除非人体目标发生的随机微抖动。当墙体内多次反射形成的目标多径与远距离弱目标位于相同距离时，如果二者的呼吸心跳周期接近，会产生生命信号的混叠，造成后续检测的虚警或漏检，该问题在物理上难解，如何解决该问题是穿墙生命信号检测的难题之一。

当目标在实际探测过程中发生位移时，直接进行静止目标的检测是有难度的，当目标的位移距离较短，运动距离不超过半个身位时，所提方法以所获取位置为中心，选中上下的距离单元，共同组成距离窗，对一定距离单元进行信号增强，因此所提方法能够直接实现目标的定位。当目标运动距离较

表 6 不同算法的运行时间、定位结果和平均定位精度对比

Tab. 6 Comparison of running time, localization results and average localization accuracy of different algorithms

方法	类别				
	目标1 (m)	目标2 (m)	目标3 (m)	平均定位误差(m)	平均运算时间(s)
文献[14]方法	(-1.03,5.91)	(1.85,5.09)	(1.07,7.66)	0.15	19.14
文献[11]方法	(-1.02,5.92)	(1.91,5.14)	(1.05,7.57)	0.12	4.19
所提方法	(1.05,7.57)	(1.88,5.12)	(1.07,7.59)	0.12	0.95

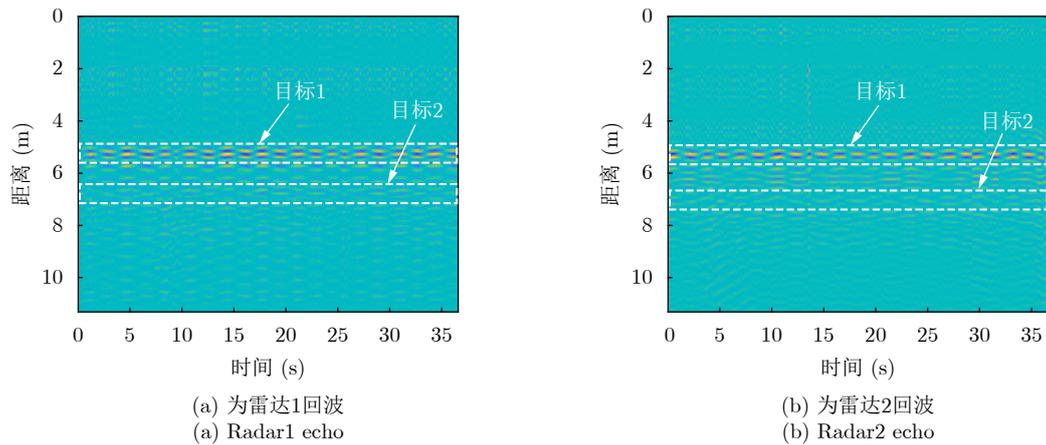


图 12 实验2中时域预处理结果图

Fig. 12 The time-domain preprocessing result plots in experiment2

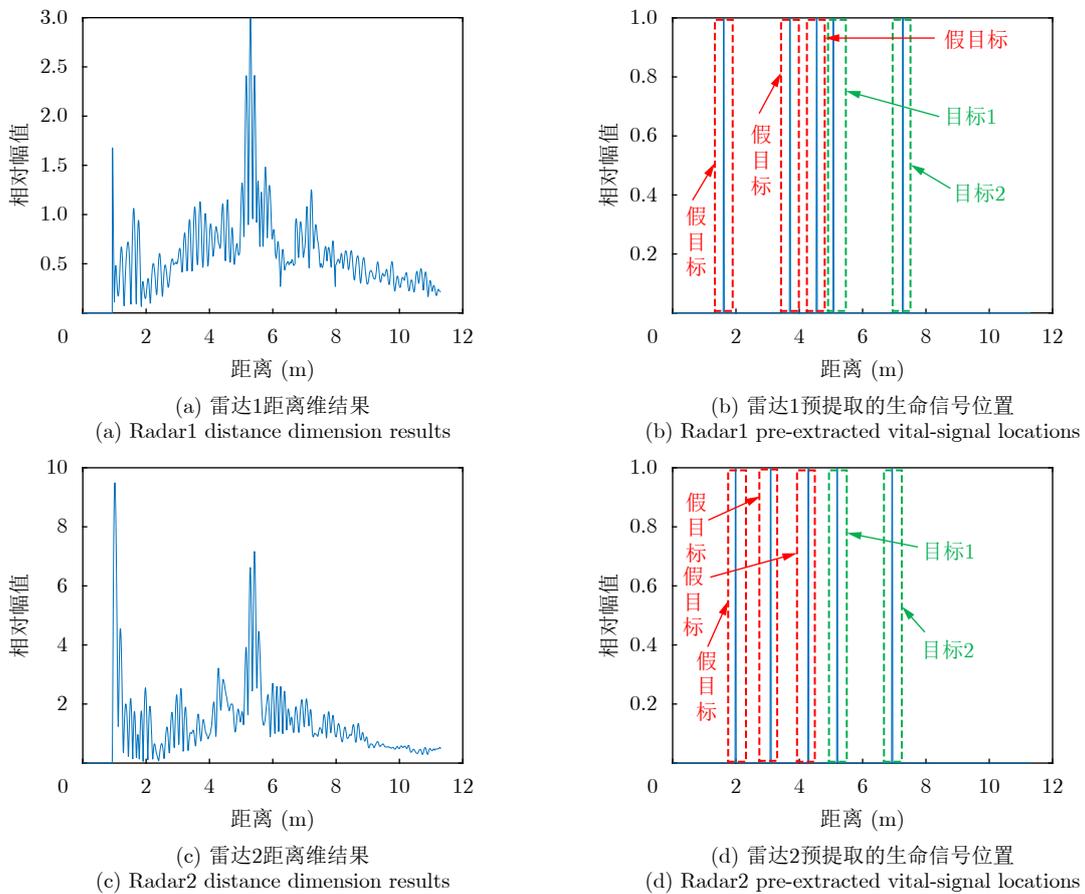


图 13 实验2中基于恒虚警检测的目标距离估计结果图

Fig. 13 The target distance estimation results based on constant false alarm detection in experiment2

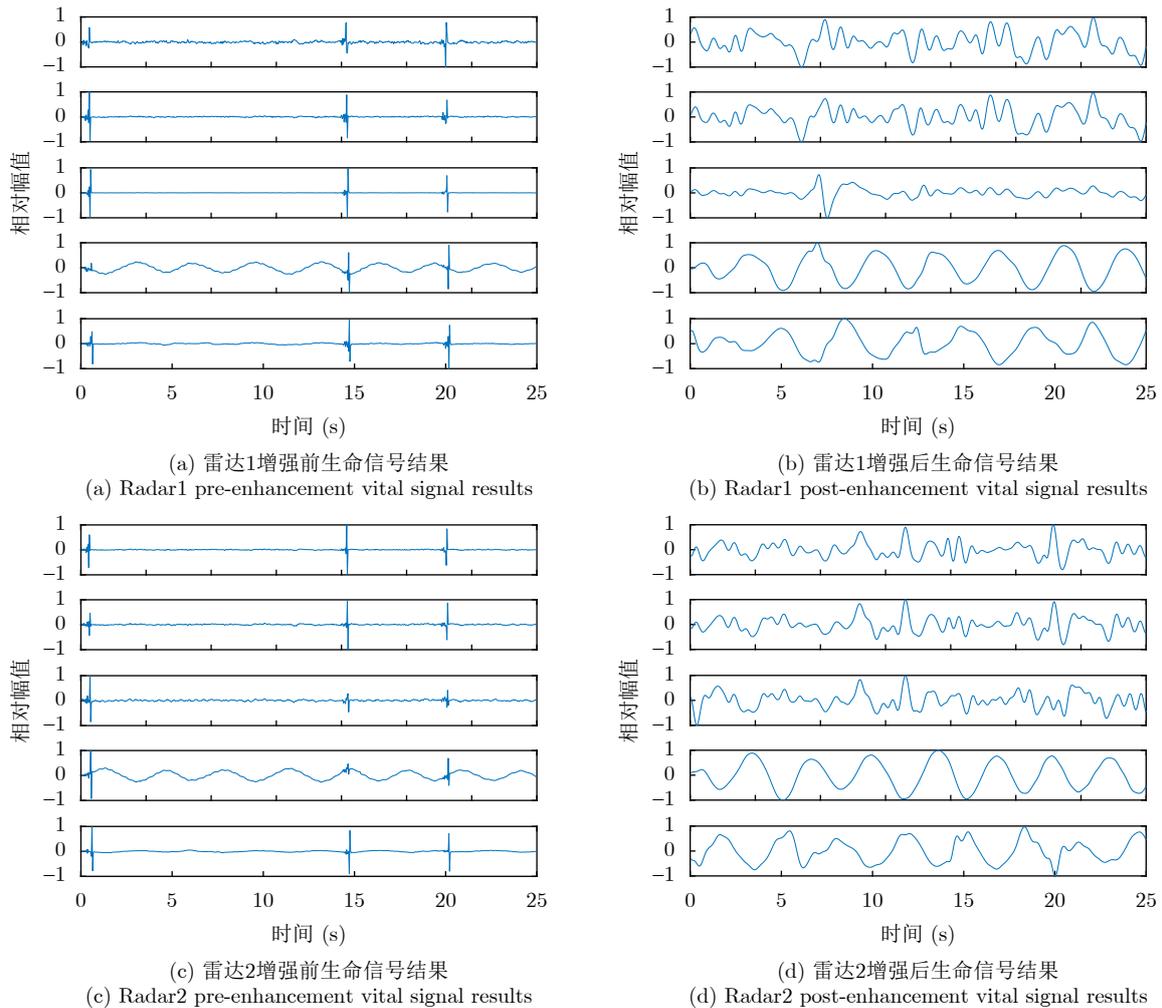


图 14 实验2中基于滤波矩阵的信号增强前后结果图(每幅子图中从上到下为距离排序)

Fig. 14 Before and after result plots of signal enhancement based on filter matrix (each subplot is sorted by distance from top to bottom in each subplot in experiment2)

表 7 两通道中相同目标增强前后相关性

Tab. 7 Correlation before and after enhancement of the same target in both channels

类别	增强前	增强后	增强百分比(%)
目标1	0.59	0.79	33.9
目标2	0.50	0.71	42.0

表 8 双目标定位结果示意表(m)

Tab. 8 The table of results of dual-targeting (m)

类别	真实坐标	定位坐标	定位误差
目标1	(-1.00,7.00)	(-1.08,6.90)	0.13
目标2	(1.00,5.00)	(0.96,5.06)	0.07

大时，在频率-距离结果图中，会在多个位置处出现该目标的结果，之前文献所提方法中，当目标发生位移时，在原始位置和新位置均会出现目标结果，难以实现对目标的区分与合并，实现相同目标的跟踪定位。在本文所提方法中，当目标发生较大位移时，同样会出现多个结果值点。在第4节，“D. 基于滤波矩阵的生命信号增强”中，可以获取预提取目标的增强前、后信号结果，借助这一结果，能够从中观察到，属于不同当距离窗的目标所具备的生命信号的时间特征，当两个距离的生命信

号体征表现在时间上相互独立，且有体征的时段其体征类似时，或可以帮助我们确定不同检测结果是否为同一目标，实现对于目标的跟踪定位。在目前的研究中，对于目标有较大位移的情况，适合使用运动目标探测的方法进行，这也是本文在未来工作中的研究问题之一。

当雷达天线位于不同位置时，其收发信号穿透墙体折射过程中造成的距离偏移也有一定差异。一方面本文所提方法中，两台雷达均安装UWB测距模块。在进行实际测量时，保持两台雷达位于相同墙面，单台雷达的收发天线位于同一水平或垂直面，

在第4节“D. 基于定位模块的雷达位置自确定”步骤,使用三角定位方法,计算获取精确的雷达间相对位置关系,保证两台雷达在进行探测时,探测姿态相近,穿透墙体类似,避免由于雷达姿态不同带来的雷达天线穿透墙体时发生折射过程中所带来的距离偏移不同;另一方面,当目标位于不同位置时,雷达信号探测不同目标,回波信号中所带来的时间差距不同,可以通过使用墙体补偿的方法来进行进一步校正雷达信号穿透墙体过程中折射所带来的影响。

## 7 结语

基于分布式穿墙雷达,本文提出了一种适用于穿墙场景下多目标自动检测定位方法。根据雷达回波中,人体生命信号在距离维度上存在扩散现象。基于恒虚警检测的目标距离测量方法获取目标候选距离单元,使用滤波矩阵进行候选信号增强;给予生命信息对增强后信号进行关联,依据关联结果实现生命信号匹配,使用定位模块来实现雷达位置自确定;使用定位场景剖分的方法实现穿墙场景下的生命目标二维定位,避免偶发误差带来的影响。所提方法降低了运算复杂度,加快运算,可以满足实际应用的要求。当两目标距离较近时墙内反射引起近距离目标的多径现象会对远距离目标检测产生影响,二者微动周期接近时,该场景在物理上难解,在接下来工作中将探究在该场景下能否实现目标的检测定位,同时将进行更多数量雷达信号融合方法的研究,实现目标的三维定位。

**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] 杨望笑, 窦银科, 粮时楠, 等. 基于改进剥层法的南极冰盖密度反演算法[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(4): 1311–1317. doi: [10.11999/JEIT210410](https://doi.org/10.11999/JEIT210410).  
YANG Wangxiao, DOU Yinke, LANG Shinan, *et al.* Antarctic ice sheet density inversion algorithm based on improved layer stripping method[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44(4): 1311–1317. doi: [10.11999/JEIT210410](https://doi.org/10.11999/JEIT210410).
- [2] 金添, 宋勇平. 穿墙雷达人体目标探测技术综述[J]. 电波科学学报, 2020, 35(4): 486–495. doi: [10.13443/j.cjors.2020040804](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2020040804).  
JIN Tian and SONG Yongping. Review on human target detection using through-wall radar[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2020, 35(4): 486–495. doi: [10.13443/j.cjors.2020040804](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2020040804).
- [3] 刘新, 阎焜, 杨光耀, 等. UWB-MIMO穿墙雷达三维成像与运动补偿算法研究[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(9): 2253–2260. doi: [10.11999/JEIT190356](https://doi.org/10.11999/JEIT190356).  
LIU Xin, YAN Kun, YANG Guangyao, *et al.* Study on 3D imaging and motion compensation algorithm for UWB-MIMO through-wall radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(9): 2253–2260. doi: [10.11999/JEIT190356](https://doi.org/10.11999/JEIT190356).
- [4] YAN Kun, WU Shiyong, and FANG Guangyou. Detection of quasi-static trapped human being using mono-static UWB life-detection radar[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(7): 3129. doi: [10.3390/app11073129](https://doi.org/10.3390/app11073129).
- [5] LIANG Xiao, PAN Jun, ZHENG Zhijie, *et al.* Enhancement of vital signals for UWB through-wall radar using nonconvex regularization[J]. *Remote Sensing Letters*, 2023, 14(4): 392–401. doi: [10.1080/2150704X.2023.2204197](https://doi.org/10.1080/2150704X.2023.2204197).
- [6] HARIKESH, CHAUHAN S S, BASU A, *et al.* Through the wall human subject localization and respiration rate detection using multichannel Doppler radar[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(2): 1510–1518. doi: [10.1109/JSEN.2020.3016755](https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3016755).
- [7] PAN Jun, YE Shengbo, NI Zhikang, *et al.* Enhancement of vital signals based on low-rank, sparse representation for UWB through-wall radar[J]. *Remote Sensing Letters*, 2022, 13(1): 98–106. doi: [10.1080/2150704X.2021.1995069](https://doi.org/10.1080/2150704X.2021.1995069).
- [8] ROHMAN B P A, ANDRA M B, and NISHIMOTO M. Through-the-wall human respiration detection using UWB impulse radar on hovering drone[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14: 6572–6584. doi: [10.1109/JSTARS.2021.3087668](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3087668).
- [9] XU Yanyun, DAI Shun, WU Shiyong, *et al.* 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. doi: [10.1109/TGRS.2011.2164928](https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2164928).
- [10] LIANG Xiao, PAN Jun, ZHENG Zhijie, *et al.* Enhancement of vital signals for UWB through-wall radar using nonconvex regularization[J]. *Remote Sensing Letters*, 2023, 14(4): 392–401. doi: [10.1080/2150704X.2023.2204197](https://doi.org/10.1080/2150704X.2023.2204197). (查阅网上资料,本条文献与第5条文献重复,请确认).
- [11] 史城, 叶盛波, 潘俊, 等. 一种基于分布式穿墙雷达的复杂条件下人体目标检测方法[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(4): 1193–1202. doi: [10.11999/JEIT211203](https://doi.org/10.11999/JEIT211203).  
SHI Cheng, YE Shengbo, PAN Jun, *et al.* A human target detection method under complex conditions by distributed through-wall radar system[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44(4): 1193–1202. doi: [10.11999/JEIT211203](https://doi.org/10.11999/JEIT211203).

- [12] ZHANG Yang, CHEN Fuming, XUE Huijun, *et al.* Detection and identification of multiple stationary human targets via bio-radar based on the cross-correlation method[J]. *Sensors*, 2016, 16(11): 1793. doi: [10.3390/s16111793](https://doi.org/10.3390/s16111793).
- [13] KOCUR D, ŠVECOVÁ M, and ROVŇÁKOVÁ J. Through-the-wall localization of a moving target by two independent ultra wideband (UWB) radar systems[J]. *Sensors*, 2013, 13(9): 11969–11997. doi: [10.3390/s130911969](https://doi.org/10.3390/s130911969).
- [14] JIA Yong, GUO Yong, YAN Chao, *et al.* Detection and localization for multiple stationary human targets based on cross-correlation of dual-station SFCW radars[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(12): 1428. doi: [10.3390/rs11121428](https://doi.org/10.3390/rs11121428).
- [15] NAHAR S, PHAN T, QUAIYUM F, *et al.* An electromagnetic model of human vital signs detection and its experimental validation[J]. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 2018, 8(2): 338–349. doi: [10.1109/JETCAS.2018.2811339](https://doi.org/10.1109/JETCAS.2018.2811339).
- [16] ZETIK R, CRABBE S, KRAJNAK J, *et al.* Detection and localization of persons behind obstacles using M-sequence through-the-wall radar[C]. Conference on Sensors, and Command, Control, Communications, and Intelligence, Orlando (Kissimmee), USA, 2006: 62010I. doi: [10.1117/12.667989](https://doi.org/10.1117/12.667989).
- [17] XU Yanyun, WU Shiyong, CHEN Chao, *et al.* A novel method for automatic detection of trapped victims by ultrawideband radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(8): 3132–3142. doi: [10.1109/TGRS.2011.2178248](https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2178248).
- [18] 肖强, 曾庆宁, 王瑶, 等. 基于MGSC与改进维纳滤波的麦克风阵列语音增强[J]. *声学技术*, 2017, 36(6): 567–573. doi: [10.16300/j.cnki.1000-3630.2017.06.012](https://doi.org/10.16300/j.cnki.1000-3630.2017.06.012).
- XIAO Qiang, ZENG Qingning, WANG Yao, *et al.* Speech enhancement of microphone array based on MGSC and improved Wiener filter[J]. *Technical Acoustics*, 2017, 36(6): 567–573. doi: [10.16300/j.cnki.1000-3630.2017.06.012](https://doi.org/10.16300/j.cnki.1000-3630.2017.06.012).

### 作者简介

梁 啸, 博士生, 主要研究方向为超宽带穿墙雷达生命信号检测、生命信号增强技术等。

叶盛波, 博士, 研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为超宽带探地雷达、穿墙三维成像雷达等技术。

宋晨阳, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为超宽带雷达、新材料天线、天线阵列去耦及射频识别技术等。

袁玉冰, 博士生, 主要研究方向为超宽带雷达信号处理、穿墙三维成像技术等。

张群英, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为微波探测新方法研究、超宽带雷达系统、雷达信号处理。

刘小军, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为超宽带雷达技术、信号与信息处理。

姜和俊, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为爆炸物探测技术和发展。

李 红, 硕士, 工程师, 主要研究方向为爆炸物探测技术和发展。

(责任编辑: 高山流水)