

基于先验信噪比估计的超宽带穿墙雷达呼吸信号检测算法研究

潘俊^{①②③} 叶盛波^{①②} 史城^{①②③} 倪志康^{①②③} 郑之杰^{①②③} 方广有^{*①②③}

^①(中国科学院空天信息创新研究院 北京 100094)

^②(中国科学院电磁辐射与探测技术重点实验室 北京 100094)

^③(中国科学院大学电子电气与通信工程学院 北京 100049)

摘要: 废墟下呼吸信号的检测对地震救援具有重要意义。在实际中,障碍物(如墙体)后的人体呼吸信号会被环境中的噪声所掩盖。如何提升穿墙呼吸信号的信噪比(SNR)仍是一项具有挑战性的工作。该文提出一种基于先验信噪比估计的检测算法,用于增强穿墙弱呼吸信号的输出SNR。该算法在谱减法中典型的决策导向(DD)算法基础上加入了自适应权重因子,通过降低先验信噪比的估计误差来进一步消除残余随机噪声。通过仿真和实验验证了所提出算法的性能。与传统的快速傅里叶变换(FFT)、奇异值分解(SVD)和DD检测算法相比,所提出的呼吸检测算法的输出SNR有所提高。

关键词: 穿墙雷达; 超宽带; 呼吸检测; 先验信噪比

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2022)04-1241-08

DOI: 10.11999/JEIT211042

Study on Respiration Signal Detection Algorithm of Ultra-WideBand Through-wall Radar Based on A Priori Signal-to-Noise Ratio Estimation

PAN Jun^{①②③} YE Shengbo^{①②} SHI Cheng^{①②③} NI Zhikang^{①②③}

ZHENG Zhijie^{①②③} FANG Guangyou^{①②③}

^①(Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

^②(Key Laboratory of Electromagnetic Radiation and Sensing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

^③(School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The detection of respiration signal under the ruins is of great significance to earthquake rescue. In reality, the human respiration signal behind the obstacle (such as walls) will be masked by noise in the environment. How to improve the Signal-to-Noise Ratio (SNR) of the through-wall respiration signal is still a challenging task. A detection algorithm based on a priori SNR estimation for enhancing the output SNR of the weak through-wall respiration signal is proposed in this paper. Based on the typical Decision-Directed (DD) algorithm of spectral subtraction methods, an adaptive weighting factor is added in the proposed algorithm to eliminate further the residual random noise by reducing the estimation error of the a priori SNR. The performance of the proposed algorithm is investigated through simulation and experimental verification. The output SNR of the proposed respiration detection algorithm is improved compared with the traditional Fast Fourier Transform (FFT), Singular Value Decomposition (SVD), and DD detection algorithm.

Key words: Through-wall radar; Ultra-WideBand(UWB); Respiration detection; A priori Signal-to-Noise Ratio(SNR)

收稿日期: 2021-09-27; 改回日期: 2021-12-27; 网络出版: 2022-01-23

*通信作者: 方广有 gyfang@mail.ie.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61827803), 科技部重点研发计划(2018YFC0810200)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61827803), The Key R&D Program of the Ministry of Science and Technology (2018YFC0810200)

1 引言

对地震和其他自然灾害摧毁的建筑物中被困人员的检测是一项重要的任务。因此,近年来穿透式呼吸检测设备得到了广泛的研究。超宽带(Ultra-WideBand, UWB)雷达由于其优良的穿透性能和距离向分辨能力,在穿墙目标检测中得到了广泛的应用^[1-4]。在呼吸信号的检测中,很多学者分析了影响呼吸信号检测的因素。他们设计了各种雷达样机并提出了许多改进的检测算法来检测障碍物后的人体呼吸^[5,6]。最大的挑战是如何提升低信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)环境下的检测性能。在实际应用中,由于人体胸腔反射较弱以及障碍物引起的信号衰减较大,雷达获取的人体呼吸信号的SNR较低。如何提升穿墙弱呼吸信号的SNR具有重要意义。

时频域信号处理方法有利于低SNR环境下目标的增强和提取^[7]。当采用时频域方法增强呼吸信号时,由雷达A-Scans组成的时域矩阵沿慢时间进行快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)转换为频域-距离矩阵。由于呼吸信号具备良好的周期性,它可以在频率-距离矩阵中更好地突出显示。之前已有学者提出了许多用于检测穿墙弱呼吸信号的时频域方法。Schleicher等人^[8]组装了一个基于FFT的UWB雷达设备来监测呼吸信号。但是传统的FFT方法难以消除环境噪声。有学者提出利用经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)、变分模态分解(Variational Mode Decomposition, VMD)、小波变换(Wavelet Transform, WT)等算法对穿墙雷达呼吸信号进行处理分析^[9-11]。结果表明,VMD算法的提取效果最好,但算法参数需要针对性设置,适应性弱;EMD算法效果稍次,但其适用性强;WT算法对噪声的抑制效果好,适用于信号去噪。在这些工作中,EMD, VMD和WT等算法只对固定距离处对应的慢时间信号进行分析,因此需要事先提取目标的距离信息,不适用于未知场景中目标距离和呼吸频率的同时快速提取。Harikesh等人^[5]提出采用多通道信号的互相关来提升呼吸信号的信噪比,实验结果表明多通道互相关结果优于单通道,但是系统复杂度大大提高。Nezirovic等人^[12]采用奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)处理频率-距离矩阵来检测废墟低SNR环境下的弱呼吸信号。SVD可以有效地消除杂波和噪声,但SVD的缺点是难以区分呼吸信号子空间和噪声信号子空间。该方法假设频率-距离矩阵中的弱呼吸信号集中在较大的奇异值上。但是,部分噪声也会残留在这些较大的奇异值中,这

将导致很难去除与呼吸信号相同频段的噪声。根据现有的研究方法,有必要提出一种具有高输出SNR的实时弱呼吸信号检测算法。

在语音信号增强算法领域,频谱减法是一种重要的方法。而其中最为典型的当是决策导向(Decision-Directed, DD)算法,因为该算法的复杂度较低^[13]。在穿墙呼吸检测中,传统的DD算法通过建立加性噪声模型,根据估计的先验信噪比将呼吸信号与噪声区分开来。DD算法的缺点是用于估计先验信噪比的权重因子是一个固定值,这会使信噪比的估计过程无法适应噪声的变化而导致噪声残留^[14-16]。本文通过修改传统的DD算法,进一步提高了穿墙弱呼吸信号的输出信噪比。所提算法采用最小均方根误差(Minimum-Mean-Squared-Error, MMSE)计算出自适应权重因子,可以减小估计先验信噪比的误差,从而进一步去除残留随机噪声。将所提出呼吸信号检测算法与传统的FFT, SVD和DD算法进行比较,仿真和实验结果表明,所提算法能够显著消除随机噪声,提高呼吸信号的输出信噪比。

本文首先介绍穿墙呼吸信号回波模型并进行预处理;其次,给出了所提呼吸检测算法的推导过程;再次,通过仿真和实际穿墙检测结果验证了所提算法的有效性;最后,给出了本文的主要结论。

2 信号模型和预处理

2.1 穿墙呼吸信号模型

时域UWB雷达测得墙后静止人体目标的回波信号 $\hat{x}_c(t)$ 可表示为

$$\hat{x}_c(t) = \sum_{q=0}^Q \hat{u}(t - qT - \tau_r) * \hat{s}_r(t) + \sum_{q=0}^{Q-1} \sum_{i=1, i \neq r}^I \hat{u}(t - qT - \tau_i) * \hat{h}_i(t) + \hat{n}(t) \quad (1)$$

其中,“*”表示卷积运算, $\hat{u}(t)$ 是雷达的发射信号, t 是快时间, T 是脉冲重复时间, q 表示慢时采样索引, $q = 0, 1, \dots, Q$ 。 $\hat{s}_r(t)$ 表示人体对发射信号的响应函数, $\hat{h}_i(t)$ 为其他固定目标对雷达信号的散射响应函数。 τ_r 和 τ_i 分别表示人体目标和第 $i(i = 0, 1, \dots, I)$ 个固定目标的回波时延, $\hat{n}(t)$ 是环境中的噪声干扰。

雷达回波信号通常被离散化,并沿着快时间和慢时间两个维度排列成2维矩阵

$$\hat{\mathbf{X}}_c(p, q) = \hat{\mathbf{S}}(p, q) + \hat{\mathbf{H}}(p, q) + \hat{\mathbf{N}}(p, q) \quad (2)$$

其中, $p = 0, 1, \dots, P - 1$ 表示快时间采样索引。式(2)中的 $\hat{\mathbf{X}}_c$, $\hat{\mathbf{S}}$, $\hat{\mathbf{H}}$ 和 $\hat{\mathbf{N}}$ 是式(1)中各项的2维离散矩阵表示。

2.2 信号预处理

在进行穿墙呼吸信号检测之前需要经过信号预处理。该过程是穿墙呼吸信号检测中必不可少的步骤, 信号预处理能有效消除环境杂波并与后续呼吸信号检测算法共同改善呼吸信号的输出信噪比。本文采用的预处理方法在图1的流程图给出, 主要包括4个步骤: 自适应背景减法(Adaptive Background Subtraction, ABS)、线性趋势抑制(Linear Trend Suppression, LTS)、距离向滤波和自适应归一化。ABS方法可以用来去除固定背景, 因此矩阵分量 $\hat{\mathbf{H}}$ 可以被去除^[17]。由于温度等因素的影响, 雷达回波通常在慢时间维度上包含不稳定的杂波和线性趋势。LTS可以有效补偿这种线性趋势, 补偿过程可以表示为^[12]

$$\hat{\mathbf{X}}^T = \hat{\mathbf{X}}_e^T - \mathbf{l}(\mathbf{l}^T \mathbf{l})^{-1} \mathbf{l}^T \cdot \hat{\mathbf{X}}_e^T \quad (3)$$

其中, $\mathbf{l} = [\mathbf{q}/Q \ \mathbf{1}_Q]$, $\mathbf{q} = [0, 1, \dots, Q-1]^T$ 。 $\mathbf{1}_Q$ 是 $Q \times 1$ 的单位向量。“T”是转置操作, $\hat{\mathbf{X}}$ 是抑制线性趋势和去除背景后的信号矩阵。

回波信号包含除所需频段以外的低频和高频噪声, 可以在快时间维度上使用带通滤波器来消除低频和高频噪声的影响。此外, 由于障碍物造成的衰减, 人体呼吸信号极其微弱, 采用自适应归一化方法来实现弱目标响应的增强^[18]。

3 所提出呼吸信号检测算法

第2节信号预处理后的回波信号矩阵为 $\hat{\mathbf{X}}$ 。固定快时间采样索引 p , 可以从 $\hat{\mathbf{X}}$ 中提取慢时间信号 $\hat{\mathbf{x}}_p(\mathbf{q})$ 。由呼吸信号 $\hat{\mathbf{s}}_p(\mathbf{q})$ 和噪声信号 $\hat{\mathbf{n}}_p(\mathbf{q})$ 组成的, 可以表示为

$$\hat{\mathbf{x}}_p(\mathbf{q}) = \hat{\mathbf{s}}_p(\mathbf{q}) + \hat{\mathbf{n}}_p(\mathbf{q}) \quad (4)$$

时域信号矩阵 $\hat{\mathbf{X}}$ 可以通过在慢时间维度做FFT转换为频域-距离矩阵^[14,15]

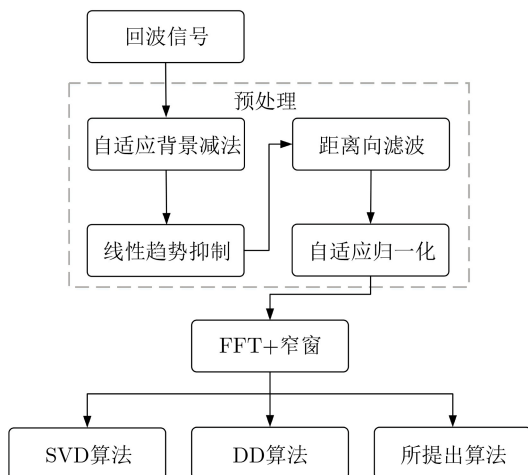


图1 呼吸检测算法的信号处理流程图

$$|\mathbf{X}(p, k)| = \frac{\sqrt{|\mathbf{S}(p, k)|^2 + |\mathbf{N}(p, k)|^2 + 2|\mathbf{S}(p, k)||\mathbf{N}(p, k)| \cos \alpha(p, k)}}{\quad} \quad (5)$$

其中, \mathbf{X} , \mathbf{S} 和 \mathbf{N} 分别是时域信号矩阵 $\hat{\mathbf{X}}$, $\hat{\mathbf{S}}$ 和 $\hat{\mathbf{N}}$ 沿慢时间做FFT后的频率-距离矩阵结果。 $\alpha(p, k)$ 是 $\mathbf{S}(p, k)$ 和 $\mathbf{N}(p, k)$ 之间的矢量夹角。 k 是频率维度的索引, $k = 1, 2, \dots, K$ 。根据人体呼吸的频率范围, 将频率限制在一个窄窗内, 该步骤在图1给出。后验信噪比 $\text{SNR}_{\text{post}}(p, k)$ 和先验信噪比 $\text{SNR}_{\text{prio}}(p, k)$ 可以定义为

$$\text{SNR}_{\text{post}}(p, k) = \frac{|\mathbf{X}(p, k)|^2}{|\mathbf{N}(p, k)|^2} \quad (6)$$

$$\text{SNR}_{\text{prio}}(p, k) = \frac{|\mathbf{S}(p, k)|^2}{|\mathbf{N}(p, k)|^2} \quad (7)$$

将式(5)和式(7)代入式(6)可得 $\text{SNR}_{\text{post}}(p, k)$ 的表达式为

$$\text{SNR}_{\text{post}}(p, k) = 1 + \text{SNR}_{\text{prio}}(p, k) + 2\sqrt{\text{SNR}_{\text{prio}}(p, k)} \cos \alpha(p, k) \quad (8)$$

谱增益 $\mathbf{G}(p, k)$ 可以通过式(9)的函数定义

$$\mathbf{G}(p, k) = \sqrt{\frac{\text{SNR}_{\text{prio}}(p, k)}{\text{SNR}_{\text{post}}(p, k)}} \quad (9)$$

通过仿真数据计算可知噪声与呼吸信号的内积近似为0, 因此可以假设噪声与呼吸信号是正交的。那么 $\alpha(p, k)$ 是一个常数 $\pi/2$, 谱增益可以重新定义为^[14]

$$\mathbf{G}(p, k) = \sqrt{\frac{\text{SNR}_{\text{prio}}(p, k)}{1 + \text{SNR}_{\text{prio}}(p, k)}} \quad (10)$$

根据式(6)、式(7)和式(10), 呼吸信号的谱可以通过谱增益 $\mathbf{G}(p, k)$ 和接收信号 $\mathbf{X}(p, k)$ 得到

$$|\mathbf{S}(p, k)| = \mathbf{G}(p, k) |\mathbf{X}(p, k)| \quad (11)$$

根据式(10)和式(11), 只要求得先验信噪比 $\text{SNR}_{\text{prio}}(p, k)$ 的值, 就可以得到呼吸信号的谱 $\mathbf{S}(p, k)$ 。在传统的DD算法中, 先验信噪比的估计值 $\hat{\text{SNR}}_{\text{prio}}(p, k)$ 可以通过式(12)求得^[13]

$$\hat{\text{SNR}}_{\text{prio}}(p, k) = \beta \frac{|\mathbf{S}(p-1, k)|^2}{|\mathbf{N}(p-1, k)|^2} + (1-\beta)P[\text{SNR}_{\text{post}}(p, k) - 1] \quad (12)$$

其中, $P[\cdot]$ 表示半波整流, β 是估计先验信噪比的权重参数, $\mathbf{S}(p-1, k)$ 是快时间索引 $p-1$ 对应的估计慢时间谱, $\mathbf{N}(p-1, k)$ 是快时间索引 $p-1$ 对应的估计噪声谱分量。估计的先验信噪比 $\hat{\text{SNR}}_{\text{prio}}(p, k)$ 由权重 β 控制。

通常, β 是接近1的固定值, 例如0.98。固定的 β 很难应用于各种未知的嘈杂穿墙环境。当信号的

组成成分发生很大变化时,比如快时间维度中的随机噪声发生跳变,则有 $\text{SNR}_{\text{post}}(p, k) \gg \text{SNR}_{\text{post}}(p-1, k)$,其中 $\text{SNR}_{\text{post}}(p-1, k)$ 是快时间索引 $p-1$ 对应的后验信噪比。由于估计的先验信噪比 $\hat{\text{SNR}}_{\text{prio}}(p, k)$ 包含先前信噪比的98%,因此 $\hat{\text{SNR}}_{\text{prio}}(p, k)$ 无法快速响应噪声跳变。估计的先验信噪比会出现较大的误差并产生残留的噪声。因此,这里提出了一种采用自适应权重来计算估计先验信噪比的方法,式(12)可以重新表示为

$$\begin{aligned} \hat{\text{SNR}}_{\text{prio}}(p, k) &= \beta_{p,k} \tilde{\text{SNR}}_{\text{prio}}(p-1, k) \\ &+ (1 - \beta_{p,k}) P[\text{SNR}_{\text{post}}(p, k) - 1] \end{aligned} \quad (13)$$

其中, $\tilde{\text{SNR}}_{\text{prio}}(p-1, k) = |\mathbf{S}(p-1, k)|^2 / |\mathbf{N}(p-1, k)|^2$,为快时间索引 $p-1$ 对应的估计先验信噪比, $\beta_{p,k}$ 是自适应权重。

式(13)给出的估计 $\hat{\text{SNR}}_{\text{prio}}(p, k)$ 应尽可能接近先验信噪比 $\text{SNR}_{\text{prio}}(p, k)$,二者之间的误差为 J_β 。本文使用MMSE估计器来最小化 J_β

$$J_\beta = E\{[\hat{\text{SNR}}_{\text{prio}}(p, k) - \text{SNR}_{\text{prio}}(p, k)]^2 \cdot |\tilde{\text{SNR}}_{\text{prio}}(p-1, k)\} \quad (14)$$

假设呼吸信号和噪声信号谱是统计独立的零均值复高斯随机变量^[16]。此外,呼吸信号谱 $\mathbf{S}(p, k)$ 和噪声谱 $\mathbf{N}(p, k)$ 满足关系为

$$E\{|\mathbf{S}(p, k)|^4\} / |\mathbf{N}(p, k)|^4 = 2\text{SNR}_{\text{prio}}^2(p, k) \quad (15)$$

则有

$$\begin{aligned} E\{[\text{SNR}_{\text{post}}(p, k) - 1]^2\} \\ = 2\text{SNR}_{\text{prio}}^2(p, k) + 2\text{SNR}_{\text{post}}(p, k) + 1 \end{aligned} \quad (16)$$

结合式(13)一式(16), J_β 可以表示为

$$\begin{aligned} J_\beta &= \beta_{p,k}^2 [\tilde{\text{SNR}}_{\text{prio}}(p-1, k) - \text{SNR}_{\text{prio}}(p, k)]^2 \\ &+ (1 - \beta_{p,k})^2 [\text{SNR}_{\text{prio}}(p, k) + 1]^2 \end{aligned} \quad (17)$$

为得到 J_β 的最优解,可以设置 $\partial J_\beta / \partial \beta_{p,k}$ 等于0,得到 $\beta_{p,k}$ 的最优解为

$$\beta_{p,k} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\text{SNR}_{\text{prio}}(p, k) - \tilde{\text{SNR}}_{\text{prio}}(p-1, k)}{\text{SNR}_{\text{prio}}(p, k) + 1} \right)^2} \quad (18)$$

由于 $\text{SNR}_{\text{prio}}(p, k)$ 是未知的,所需的结果不能直接由式(18)求解。设估计量 $\tilde{\text{SNR}}_{\text{prio}}(p, k) = P[\text{SNR}_{\text{post}}(p, k) - 1]$,根据近似关系, $E\{\tilde{\text{SNR}}_{\text{prio}}(p, k)\} \cong \text{SNR}_{\text{prio}}(p, k)$,可以用 $\tilde{\text{SNR}}_{\text{prio}}(p, k)$ 替代式(18)中的 $\text{SNR}_{\text{prio}}(p, k)$ 来获得 $\beta_{p,k}$ 的近似值。如果快速时间维度中的噪声谱呈现均匀变化,则 $\beta_{p,k}$ 将获得接近1的值。对于任何跳变情况, $\beta_{p,k}$ 都会出现一个较小的值。因此,具有自适应变化能力的 $\beta_{p,k}$ 可以应对不同的噪声环境。

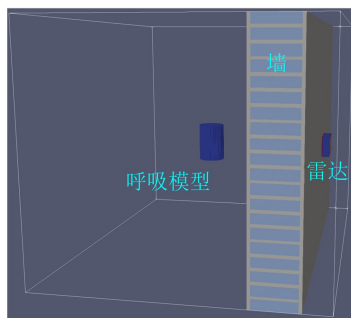
4 仿真与实验结果

4.1 仿真结果

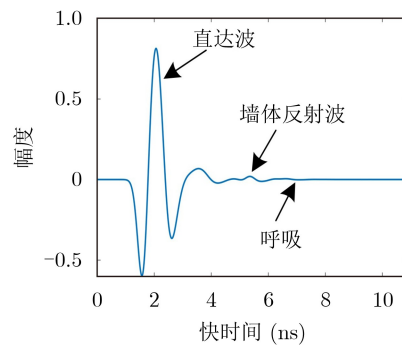
仿真和实验结果验证了所提呼吸信号检测算法的高输出信噪比性能和高效率。所提算法是在配备64位3.60 GHz CPU的计算机上通过MATLAB代码实现的。

如图2(a)所示,使用gprMax仿真软件来模拟人体呼吸模型^[19]。墙厚为24 cm,相对介电常数 $\epsilon_r = 6$ 、电导率 $\sigma = 0.01 \text{ Sm}^{-1}$ 和磁导率 $\mu_1 = 1$ 。仿真模型采用偶极子天线,雷达发射中心频率为500 MHz的脉冲信号。人体胸部可以用一个金属圆柱体来模拟,圆柱体的半径由频率为0.18 Hz的正弦波调制。圆柱体中心与天线的距离为0.43 m。在模型仿真过程中,高斯白噪声作为外部噪声加入。雷达接收到的回波信号如图2(b)所示。呼吸信号被直达波和墙体反射波完全遮蔽。在仿真数据中,接收数据矩阵在快时间和慢时间的维度分别为3338和256。

图3给出了在4 dB输入SNR下,经传统FFT算法、SVD算法、DD算法和所提算法处理后的频率-距离结果。在FFT算法处理结果中,呼吸信号被噪声掩盖。经SVD检测算法处理后,大部分噪声被



(a) 仿真场景



(b) 回波信号

图2 仿真模型

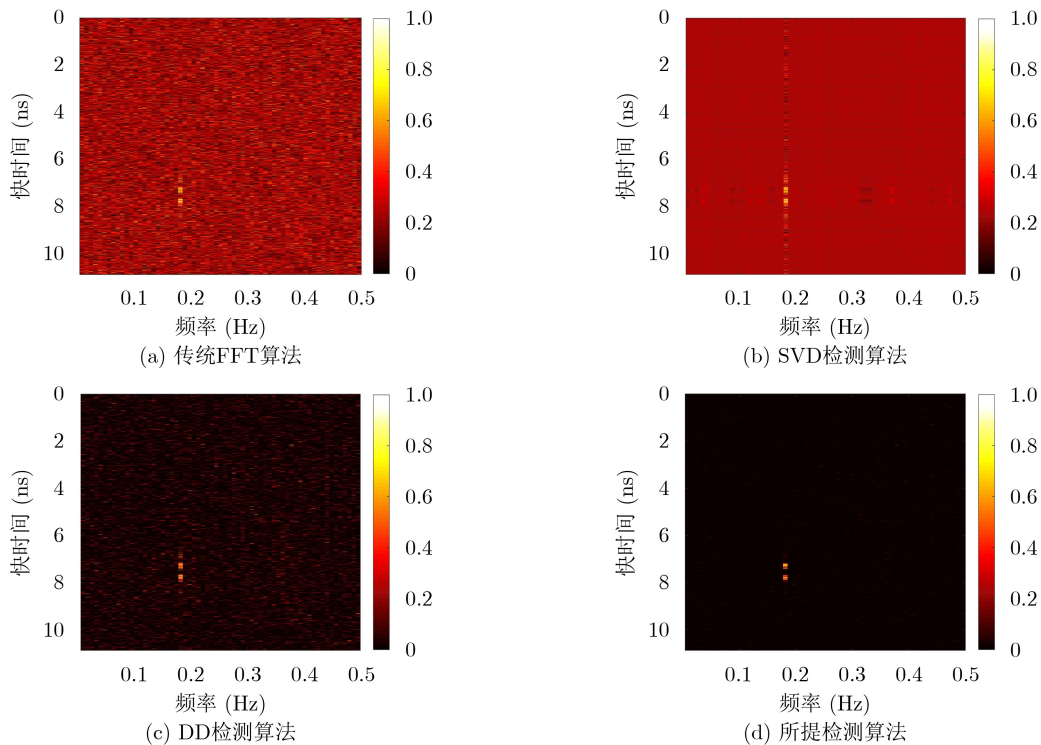


图3 各算法的频率-距离结果

去除, 但与呼吸信号相同频段的噪声仍然存在, 这会导致距离向的目标模糊。与SVD算法相比, DD算法可以滤除与呼吸信号相同频段的噪声。然而, 由于DD算法的估计参数是固定的, 呼吸信号周围仍然存在难以去除的噪声。和DD算法相比, 所提出的呼吸信号检测算法可以进一步消除残留噪声, 呼吸信号的距离和频率清晰可见。在算法复杂度方

面, FFT, SVD和DD算法所需的处理时间分别为0.21 s, 1.82 s和0.98 s。所提呼吸检测算法耗时1.33 s, 满足生命检测的实时性要求。

根据检测结果的频率-距离图, 采用内窗和外窗的能量来计算目标的信噪比。内矩形窗是用于圈出目标所在区域, 外矩形窗的作用是圈出目标附近范围的噪声。定义呼吸信号的输出信噪比 SNR_{out} 为^[20]

$$SNR_{out} = 20 \lg \left\{ \frac{\sum_{p=p_r-I_p}^{p_r+I_p} \sum_{k=k_r-I_k}^{k_r+I_k} |S(p, k)|}{(2I_p+1)(2I_k+1)} \right\} \quad (19)$$

$$\left\{ \frac{\sum_{p=p_r-O_p}^{p_r+O_p} \sum_{k=k_r-O_k}^{k_r+O_k} |S(p, k)| - \sum_{p=p_r-I_p}^{p_r+I_p} \sum_{k=k_r-I_k}^{k_r+I_k} |S(p, k)|}{(2O_p+1)(2O_k+1) - (2I_p+1)(2I_k+1)} \right\}$$

其中, p_r 和 k_r 是频率-距离矩阵 $|S(p, k)|$ 中目标所在位置的索引。 $(2I_p+1)$ 和 $(2I_k+1)$ 分别是内矩形窗的长度和宽度, $(2O_p+1)$ 和 $(2O_k+1)$ 是外矩形窗的长度和宽度。根据接收数据矩阵在快时间和慢时间的维度, 内矩形窗和外矩形窗参数分别设置为 $L_p=60, L_k=1, O_p=120, O_k=2$ 。

图4给出了4种算法在不同输入SNR下的输出SNR结果。无论在低或高的输入SNR下, 所提检测算法的输出SNR至少比SVD算法高9 dB。当输入SNR小于13 dB时, DD算法的输出SNR至少比所提算法低5 dB。当输入SNR大于13 dB时, DD算

法的输出SNR接近于所提算法, 但始终低于所提算法。

固定输入SNR为4 dB, 不同墙体厚度下呼吸检测的输出SNR结果如表1所示。经过FFT算法处理后, 呼吸信号输出SNR随着墙厚的增加呈线性下降。在不同墙厚下, 所提算法的输出SNR至少比SVD算法高13.3 dB, 比DD算法至少高6.49 dB。

4.2 实验结果

图5是穿墙呼吸检测的实验场景。使用的UWB雷达包含两个天线, 封装在一个45 cm×22 cm×45 cm的盒子中, 通过WiFi进行数据传输。雷达参

数见表2。为满足紧急救援的实时性要求，呼吸检测采用512道回波数据。实验场地为体育馆，墙体厚度为37 cm。墙后有两个静止的人体目标，距离分别为7 m和10 m。在进行人体目标检测之前，信标仪已被用于校准雷达的距离和频率误差^[4]。

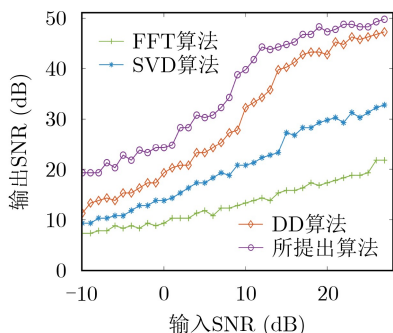


图4 不同输入SNR下4种算法的输出SNR

实验数据矩阵的快时间和慢时间维度分别为2455和313。图6给出了穿墙呼吸信号经过4种检测算法处理后的频率-距离检测结果。FFT算法处理后的结果如图6(a)所示，呼吸信号淹没在噪声中。经SVD算法检测后的结果如图6(b)所示，大部分噪声可以去除，但与呼吸信号同频段的噪声仍然无法消除。图6(c)是经过DD算法处理后的结果，与呼

表1 不同墙体厚度下的输出SNR (dB)

	墙厚(m)		
	0.12	0.24	0.37
FFT算法	12.13	11.10	10.06
SVD算法	18.97	17.28	14.37
DD算法	26.34	23.30	18.41
所提算法	32.83	30.80	27.67

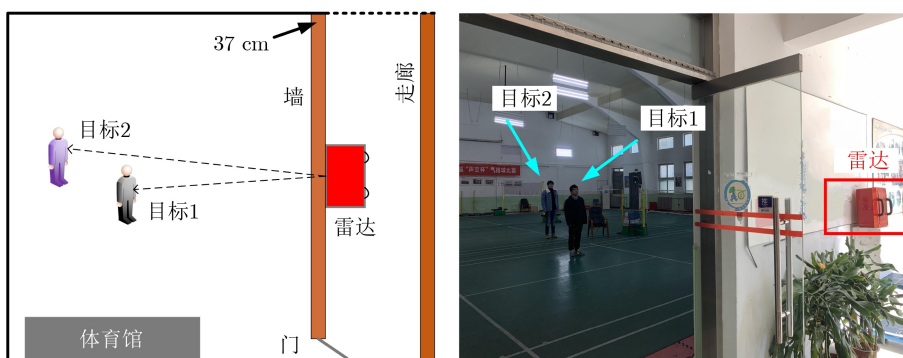


图5 穿墙人体呼吸检测实验场景

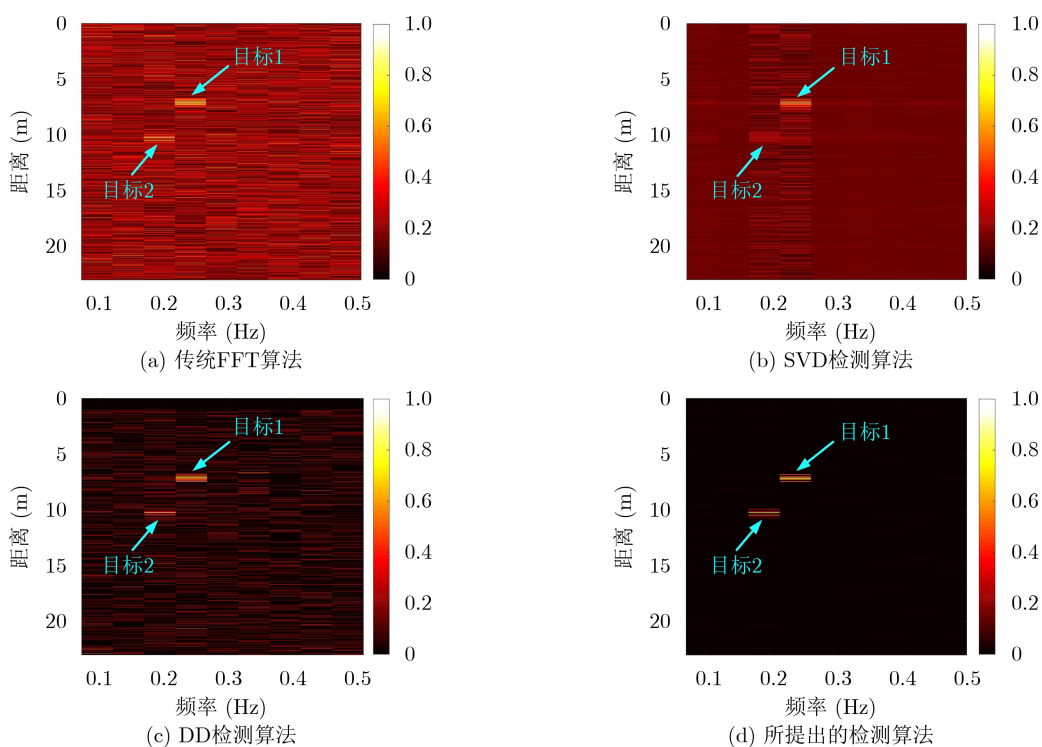


图6 各算法的实验结果

表2 UWB雷达参数

参数	参数值
信号模式	高斯脉冲
中心频率	500 MHz
带宽	500 MHz
瞬时功率	26 dBm
快时间等效采样率	16 GHz
慢时间采样率	13 Hz

吸信号同频段的噪声被抑制, 但频率-距离图像中仍有残留噪声。经所提出算法检测后的结果如图6(d)所示, 与DD算法相比, 噪声得到进一步消除, 呼吸信号清晰可见。

图7分别给出了呼吸信号在频率和距离维度上的投影结果。在SVD算法中, 与目标相同频段的噪声没有被消除, 导致目标2被噪声掩盖, 在频率投影中难以识别。与SVD算法相比, DD算法在频率维度投影结果中可以将两个目标分开, 但噪声幅度仍然较高。所提出的算法在两个维度上都具有最低

表3 两个静止目标的输出SNR (dB)

	目标	
	目标1	目标2
FFT算法	9.37	7.49
SVD算法	10.30	8.73
DD算法	14.89	12.39
所提算法	21.68	18.73

的投影噪声强度, 目标的频率和距离清晰可见。目标1的实测距离为7 m, 呼吸频率为0.22 Hz, 目标2的实测距离为10 m, 呼吸频率为0.18 Hz。

实验数据中目标的输出信噪比可通过式(19)求解, 内外矩形窗的参数和仿真数据相同。根据5组实验的平均值, 4种算法得到的两个目标的输出SNR如表3所示。经过所提出算法处理后, 目标1的输出SNR为21.68 dB, 比SVD算法高11.38 dB, 比DD算法高6.79 dB。目标2的输出SNR为18.73 dB, 比SVD高10.00 dB, 比DD算法高6.34 dB。实验结果进一步验证了所提算法的优越性。

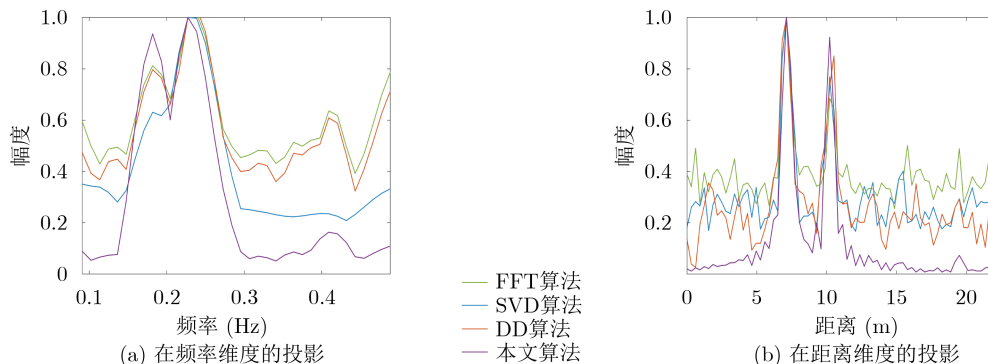


图7 频率-距离图像的投影结果

5 结束语

本文提出一种基于先验信噪比估计的穿墙呼吸信号检测算法。通过MMSE计算自适应估计因子以降低先验信噪比的估计误差, 进一步消除了残余随机噪声。在相同条件下, gprMax仿真和实验穿墙数据结果表明, 与SVD算法相比, 本文算法能够去除与呼吸信号相同频段的噪声。与传统DD算法相比, 本文算法能够进一步去除残留随机噪声。此外, 所提算法还对低输入信噪比和不同的墙厚具有鲁棒性。本文算法的计算时间为1.33 s, 可以满足实际应用的要求。

参考文献

[1] 晋良念, 欧阳缙, 周丽军. UWB MIMO穿墙雷达的阵列设计和成像方法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(7): 1574-1580. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.01113.

JIN Liangnian, OUYANG Shan, and ZHOU Lijun. Array design and imaging method for ultra-wideband multiple-input multiple-output through-the-wall radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(7): 1574-1580. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.01113.

[2] 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.

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.

[3] 李志, 金添, 周智敏. 超宽带虚拟孔径雷达非正交旁瓣抑制方法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(12): 2934-2941. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.00720.

LI Zhi, JIN Tian, and ZHOU Zhimin. Non-orthogonal

- Sidelobes reduction for virtual aperture UWB radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(12): 2934–2941. doi: [10.3724/SP.J.1146.2012.00720](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2012.00720).
- [4] YAN Kun, WU Shiyou, 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] 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).
- [6] 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).
- [7] CAI Jiajia, ZHOU Hao, HUANG Weimin, *et al.* Ship detection and direction finding based on time-frequency analysis for compact HF radar[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2021, 18(1): 72–76. doi: [10.1109/LGRS.2020.2967387](https://doi.org/10.1109/LGRS.2020.2967387).
- [8] SCHLEICHER B, NASR I, TRASSER A, *et al.* IR-UWB radar demonstrator for ultra-fine movement detection and vital-sign monitoring[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2013, 61(5): 2076–2085. doi: [10.1109/TMTT.2013.2252185](https://doi.org/10.1109/TMTT.2013.2252185).
- [9] 瑞泽, 熊明耀, 梁步阁. 穿墙雷达呼吸信号提取算法研究[J]. *电子技术*, 2021, 50(7): 106–108.
RUI Ze, XIONG Mingyao, and LIANG Buge. Study on algorithm of breathing signal extraction for through wall radar[J]. *Electronic Technology*, 2021, 50(7): 106–108.
- [10] LI Jing, LIU Lanbo, ZENG Zhaofa, *et al.* Advanced signal processing for vital sign extraction with applications in UWB radar detection of trapped victims in complex environments[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(3): 783–791. doi: [10.1109/JSTARS.2013.2259801](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2013.2259801).
- [11] WANG Kun, ZENG Zhaofa, and SUN Jiguang. Through-wall detection of the moving paths and vital signs of human beings[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2019, 16(5): 717–721. doi: [10.1109/LGRS.2018.2881311](https://doi.org/10.1109/LGRS.2018.2881311).
- [12] NEZIROVIC A, YAROVY A G, and LIGTHART L P. Signal processing for improved detection of trapped victims using UWB radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(4): 2005–2014. doi: [10.1109/TGRS.2009.2036840](https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2036840).
- [13] BOLL S. Suppression of acoustic noise in speech using spectral subtraction[J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1979, 27(2): 113–120. doi: [10.1109/TASSP.1979.1163209](https://doi.org/10.1109/TASSP.1979.1163209).
- [14] PLAPOUS C, MARRO C, and SCALART P. Improved signal-to-noise ratio estimation for speech enhancement[J]. *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 2006, 14(6): 2098–2108. doi: [10.1109/TASL.2006.872621](https://doi.org/10.1109/TASL.2006.872621).
- [15] ALAM M, O'SHAUGHN ESSY D, and SELOUANI S. Speech enhancement based on novel two-step a priori SNR estimators[C]. INTERSPEECH 2008, 9th Annual Conference of the International Speech Communication Association, Brisbane, Australia, 2008, 22–26.
- [16] SIM B L, TONG Y C, CHANG J S, *et al.* A parametric formulation of the generalized spectral subtraction method[J]. *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, 1998, 6(4): 328–337. doi: [10.1109/89.701361](https://doi.org/10.1109/89.701361).
- [17] SHI Cheng, NI Zhikang, PAN Jun, *et al.* A method for reducing timing jitter's impact in through-wall human detection by ultra-wideband impulse radar[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(18): 3577. doi: [10.3390/rs13183577](https://doi.org/10.3390/rs13183577).
- [18] ROVNÁKOVÁ J and KOCUR D. Weak signal enhancement in radar signal processing[C]. 20th International Conference Radioelektronika 2010, Brno, Czech Republic, 2010: 1–4. doi: [10.1109/RADIOELEK.2010.5478571](https://doi.org/10.1109/RADIOELEK.2010.5478571).
- [19] WARREN C, GIANOPOULOS A, and GIANNAKIS I. GprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for ground penetrating radar[J]. *Computer Physics Communications*, 2016, 209: 163–170. doi: [10.1016/j.cpc.2016.08.020](https://doi.org/10.1016/j.cpc.2016.08.020).
- [20] WU Shiyou, TAN Kai, XIA Zhenghuan, *et al.* Improved human respiration detection method via ultra-wideband radar in through-wall or other similar conditions[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2016, 10(3): 468–476. doi: [10.1049/iet-rsn.2015.0159](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2015.0159).
- 潘俊: 男, 1994年生, 博士生, 研究方向为穿墙雷达目标检测与成像方法。
- 叶盛波: 男, 1983年生, 研究员, 硕士生导师, 研究方向为超宽带雷达系统设计与微波信号处理与成像算法。
- 史城: 男, 1994年生, 博士生, 研究方向为超宽带雷达系统和信号处理技术。
- 倪志康: 男, 1995年生, 博士生, 研究方向为探地雷达信号处理和机器学习。
- 郑之杰: 男, 1997年生, 博士生, 研究方向为穿墙人体姿态估计和活动识别、深度学习和跨模态学习。
- 方广有: 男, 1963年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为超宽带雷达成像理论与方法、探地雷达技术、地下资源电磁勘探技术、月球/火星探测雷达技术、超宽带天线理论与技术、左手材料、THz成像技术等。