

基于步进频连续波的远程三维穿墙成像方法研究

于怡然, 韩顺利*, 郝泽宇, 高天丰, 刘逸璇

中国电子科技集团公司第四十一研究所电子测试技术重点实验室, 山东 青岛

收稿日期: 2025年11月12日; 录用日期: 2025年12月15日; 发布日期: 2025年12月23日

摘要

步进频连续波以其高分辨率和高灵敏度在穿墙成像领域表现出色。针对墙后目标信噪比过低的问题, 该文通过32端口矢量网络分析仪作为信号收发装置, 构建了一套MIMO架构的步进频连续波远程三维穿墙成像系统, 提出了一种适用于强杂散环境的叠加采样信号提取算法, 利用不同时刻多个独立的接收信号叠加降噪, 有效抑制系统噪声和多径干扰, 突出墙后隐藏目标的微弱信号特征, 解决墙后目标信号易被噪声所淹没的问题; 同时, 通过对超宽带对数周期天线准确的相位中心估计和幅度相位误差校准, 进一步提升了成像的质量和准确度。实测数据结果证明该系统可以通过远程探测的方式对墙后的人体目标进行三维成像。

关键词

穿墙成像, 步进频连续波, 32端口矢量网络分析仪, 叠加采样

Research on Standoff 3D Through-Wall Imaging Method Based on Stepped Frequency Continuous Wave

Yiran Yu, Shunli Han*, Zeyu Hao, Tianfeng Gao, Yixuan Liu

Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, The 41st Institute of CETC, Qingdao Shandong

Received: November 12, 2025; accepted: December 15, 2025; published: December 23, 2025

Abstract

The stepped frequency continuous wave technology excels in wall-penetrating imaging with its high

*通讯作者。

文章引用: 于怡然, 韩顺利, 郝泽宇, 高天丰, 刘逸璇. 基于步进频连续波的远程三维穿墙成像方法研究[J]. 计算机科学与应用, 2025, 15(12): 326-339. DOI: 10.12677/csa.2025.1512347

resolution and sensitivity. In response to the low signal-to-noise ratio of targets behind walls, a 32-port vector network analyzer is utilized as the signal transmitter and receiver device to establish a MIMO-structured stepped frequency continuous wave standoff 3D through-wall imaging system in this paper. The proposed superimposed sampling signal extraction algorithm is suitable for strong cluttered environments. This algorithm leverages the summation and noise reduction of multiple independent received signals at different time points to effectively suppress system noise and multipath interference. Besides, it highlights faint signal characteristics of targets hidden behind walls and mitigates the issue of target signals being overwhelmed by noise easily. Additionally, the imaging quality and accuracy were further enhanced by accurately estimating the phase center of ultra-wideband logarithmic periodic antennas and calibrating amplitude-phase errors. Experimental data confirms that this system is capable of producing 3D images of human targets behind walls using stand-off detection methods.

Keywords

Through-Wall Imaging, Stepped Frequency Continuous Wave, 32-Port Vector Network Analyzer, Superposition Sampling

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

穿墙成像系统利用微波信号穿透墙体等障碍物，对墙后静态目标、建筑物布局、室内人员的姿态、运动轨迹及生命特征实现探测与成像。与传统的安防监控系统相比，穿墙成像系统可以在不需要安装摄像头或传感器的情况下实现对人员活动的监控，具有更高的隐私保护性[1]。

信号体制对穿墙成像系统的探测性能和应用具有重要影响，合理的信号体制选择是穿墙成像系统性能优化的关键所在。根据波形、调制方式、持续时间等不同，信号体制可分为脉冲多普勒(Pulse Doppler, PD)、线性调频脉冲(Linear Frequency Modulation, LFM)、调频连续波(Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW)、步进频连续波(Stepped Frequency Continuous Wave, SFCW)等。其中步进频连续波的发展相对较晚，但凭借其独有的灵活性，既可以选择足够长的时间来积累能量，获得足够大的有效带宽提高距离分辨率，又能借助较小的瞬时带宽降低系统的噪声系数，从而提高探测灵敏度，已成为现代穿墙成像系统中更可行的选择[2]-[7]。矢量网络分析仪(Vector Network Analyzers, VNA)作为最常见的步进频连续波仪器，可以通过测量和分析微波信号在障碍物中的传播特性，如衰减、相位变化、散射等，来获取障碍物的特性信息，在多项研究中都采用 VNA 搭建穿墙成像系统原型[8]-[10]。成像算法是穿墙成像系统实现高分辨率成像的关键所在，后向投影(Back Projection, BP)算法是一种在时域直接对回波数据进行成像处理的算法，通过确定待成像场景的距离历程即可对任意模式、任意几何模型下获取的数据进行成像处理，是目前穿墙成像系统常采用的成像算法之一[11]-[13]。

目前大部分的相关研究为了最大程度的减少障碍物对微波信号的干扰(包含绕射、衰减、色散、相位畸变、多径传输等)，往往采用天线紧靠墙壁的方式对墙后目标进行探测，其视野和探测范围受到墙壁的限制[14][15]。远程部署方式的二维穿墙成像系统也正在被研究和探索[9][11]，以克服贴墙穿墙成像的局限性，提供更广泛和全面的目标探测能力，但需要克服更多的障碍物和多路径干扰等问题。本文借助 32 端口 VNA 构建 MIMO 架构的步进频连续波远程三维穿墙成像系统，对遮蔽空间下的隐藏目标体进行成

像。本文的主要研究工作及创新点如下：

- (1) 本文提出一种适用于强杂散环境的叠加采样信号提取方法，通过多时刻独立接收的信号叠加降噪，有效抑制系统噪声和多径干扰，突出墙后隐藏目标的微弱信号特征。通过该方法可以在目标信号被噪声淹没的情况下对目标信号进行有效提取和信息重建。
- (2) 本文通过对超宽带对数周期天线准确的相位中心估计和幅度相位误差校准，补偿由天线特性导致的群时延色散，显著提高频域反射测量精度，从而提高目标定位的准确性和成像质量。实测数据表明本文所提的方法能够在隔墙 6 米远的位置对墙后多个静止人体目标进行成像。

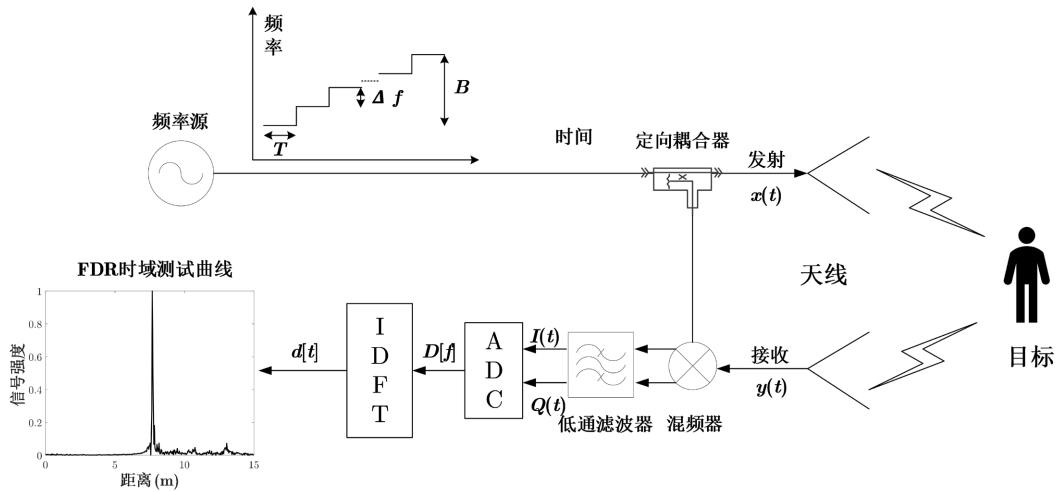


Figure 1. SFCW signal processing block diagram

图 1. SFCW 信号处理框图

2. SFCW 信号建模

SFCW 信号处理框图如图 1 所示，发射的步进频率信号 $x(t)$ 的扩展时间波形可以表示为 N 个步进频脉冲的连续序列。序列中的每个脉冲的持续时间为 t_0 ，脉冲重复周期为 T_0 秒，载波频率从频率下限 f_0 开始以 Δf 为步长从一个脉冲步进到另一个脉冲。假设序列中每个步进频脉冲的幅度和相位对于所有频率都是恒定的，SFCW 发射波形 $x(t)$ 可以表示为[16][17]：

$$x(t) = \sum_{i=0}^{N-1} \operatorname{Re} \left\{ e^{j2\pi(f_0+i\Delta f)t} \right\} \operatorname{rect} \left(\frac{t-iT_0-t_0/2}{T_0} \right) \quad (1)$$

发射信号在发射前会先经过定向耦合器分离出来一部分作为参考信号 $I_{ref}(t) + jQ_{ref}(t)$ 进入到混频器中，其复数形式可以表示为：

$$I_{ref}(t) + jQ_{ref}(t) = 2 \sum_{i=0}^{N-1} e^{-j2\pi(f_0+i\Delta f)t} \operatorname{rect} \left(\frac{t-iT_0-t_0/2}{T_0} \right) \quad (2)$$

另一部分通过天线传输到目标又反射回来，假设传输信号经过一个反射系数为 $\Gamma = |\Gamma| e^{j\phi}$ 的单点目标反射回来，传输时延为 τ ，来自该单点目标的接收信号 $y(t)$ 可以表示为：

$$y(t) = \sum_{i=0}^{N-1} \operatorname{Re} \left\{ |\Gamma| e^{j\phi} e^{j2\pi(f_0+i\Delta f)(t-\tau)} \right\} \operatorname{rect} \left(\frac{t-\tau-iT_0-t_0/2}{T_0} \right) \quad (3)$$

接收信号与参考信号通过混频器和低通滤波器后被下变频为中频信号 $I(t) + jQ(t)$ ：

$$I(t) + jQ(t) = \sum_{i=0}^{N-1} |\Gamma| e^{j\phi} e^{-j2\pi(f_0+i\Delta f)\tau} \text{rect}\left(\frac{t-iT_0-t_0/2}{T_0}\right) \quad (4)$$

中频信号经过 ADC 采样变成数字信号，其频域离散形式可以表示为：

$$H[f] = |\Gamma| e^{j\phi} e^{-j2\pi f_c \tau} \text{rect}\left(\frac{f-f_c}{B}\right) \quad (5)$$

其中， $f = f_0, f_0 + \Delta f, \dots, f_0 + (N-1)\Delta f$ ， f_c 为中频信号的中心频率， $B = (N-1)\Delta f$ 为 SFCW 信号的等效带宽。使用离散傅里叶逆变换(Invert Discrete Fourier Transform, IDFT)将频域函数 $H[f]$ 变换到时域 $h[t]$ ：

$$h[t] = \text{IDFT}\{H[f]\} = |\Gamma| e^{j\phi} e^{j2\pi f_c(t-\tau)} B \text{sinc}(B(t-\tau)) \quad (6)$$

其中， $t = 0, 1/2B, \dots, (N-1)/2B$ 表示快时间采样点，其结果是一个包含目标反射系数和延迟时间的合成时间剖面。IDFT 算法常被用于脉冲压缩滤波器中，它压缩公式(3)中接收到的时间波形 $y(t)$ ，以形成公式(6)中的高分辨率合成时间波形 $h[t]$ 。对于多个目标，IDFT 通过将每个目标的反射信号相干地求和到合成轮廓中各自的时间段中来压缩反射时间波形。该项技术也可以称为频域反射测量技术(Frequency Domain Reflectometry, FDR)，得到的结果也可以称为 FDR 曲线[18][19]。FDR 曲线中包含有两个最主要的特征，分别是最大不模糊距离 R_{\max} 和距离分辨率 ΔR ：

$$R_{\max} = \frac{c}{2\Delta f} = \frac{cN_{\text{point}}}{2(f_{\text{stop}} - f_{\text{start}})} \quad (7)$$

$$\Delta R = \frac{c}{2B} = \frac{c}{2(f_{\text{stop}} - f_{\text{start}})} \quad (8)$$

其中 c 表示微波信号在空间内的传播速度， B 表示的是 SFCW 信号的扫宽， f_{start} 、 f_{stop} 、 N_{point} 是 VNA 中的参数，分别表示起始频率、终止频率和扫描点数。为了便于展示，会将时域信息换算成距离信息，图 2 显示了同一场景不同参数下的 FDR 曲线，可以灵活地配置频率范围和扫描点数适配不同的探测场景。

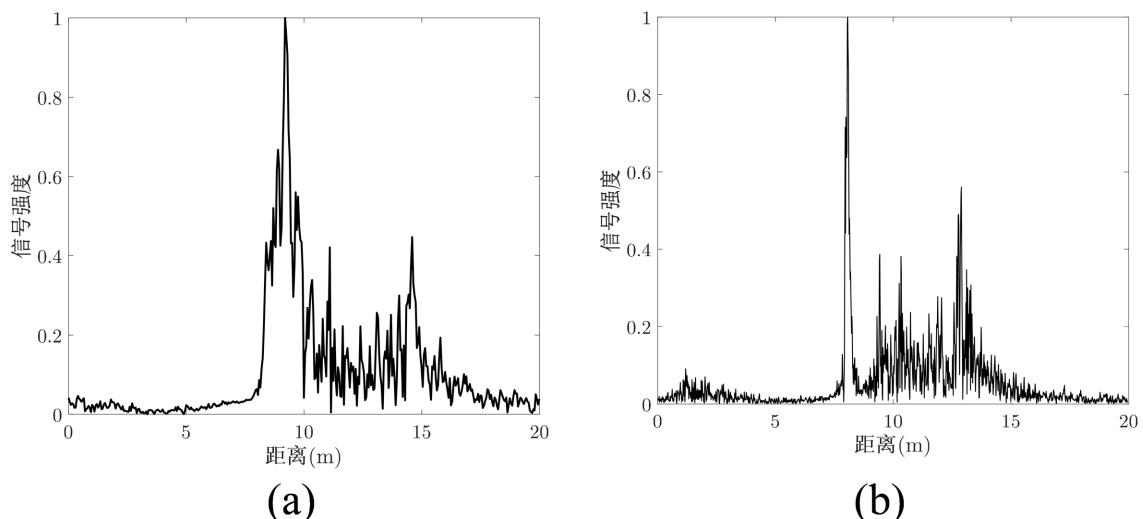


Figure 2. FDR curves under different parameters. (a) Frequency range: 1 GHz~4 GHz, Points: 401; (b) Frequency range: 5 GHz~15 GHz, Points: 1501

图 2. 不同参数下的 FDR 曲线。(a) 频率范围：1 GHz~4 GHz，扫描点数：401；(b) 频率范围：5 GHz~15 GHz，扫描点数：1501

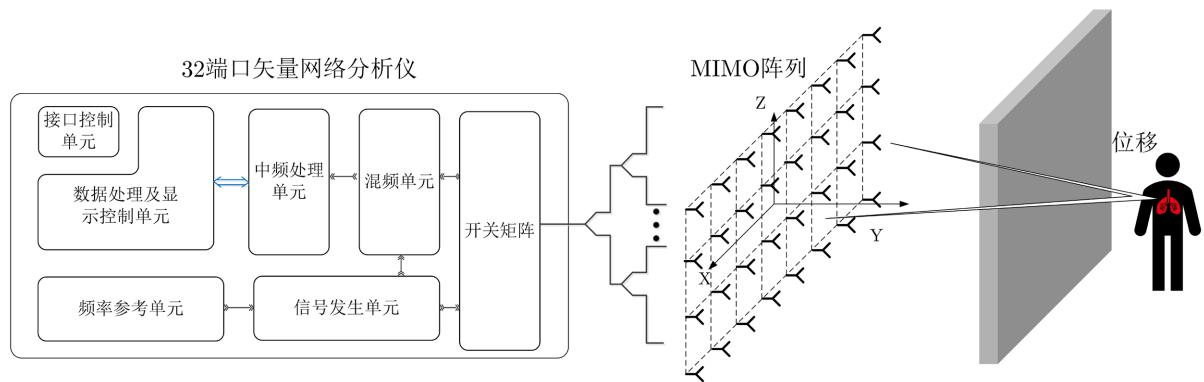


Figure 3. MIMO-structured stepped frequency continuous wave standoff 3D through-wall imaging system
图 3. MIMO 架构的步进频连续波远程三维穿墙成像系统

3. 遮蔽空间人体目标成像

3.1. 强杂散环境下隐藏目标信号提取

MIMO 架构的步进频连续波远程三维穿墙成像系统示意图如图 3 所示, 第 m 个接收天线, 第 n 个接收天线的回波模型可以表示为[20]-[22]:

$$h_{m,n}[t] = s_{m,n}[t] + d_{m,n}[t] + \delta_{m,n}[t] \quad (9)$$

其中, $s_{m,n}[t]$ 表示的是由天线耦合、静态障碍物等产生的静态信号分量, $d_{m,n}[t]$ 表示的是由人体目标活动产生的动态信号分量, $\delta_{m,n}[t]$ 表示测量过程中产生的随机噪声。

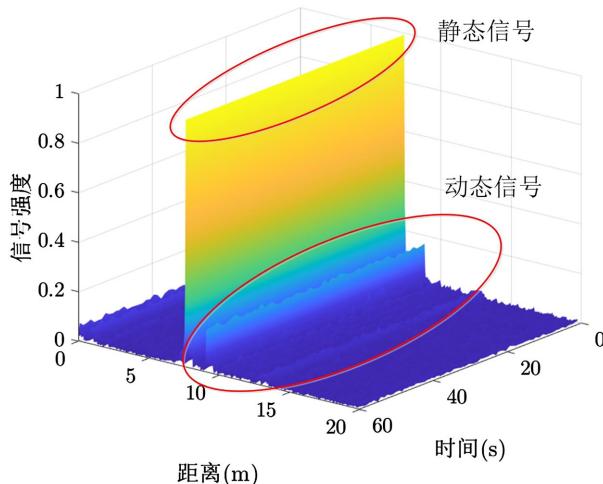


Figure 4. 3D plot of FDR data matrix
图 4. FDR 数据矩阵三维图

当人在室内环境来回走动时, 会导致反射路径的长度发生剧烈变化, 反应在 FDR 曲线中会产生明显的波动, 图 4 是两个目标在室内活动时采集了 60 秒的 FDR 数据矩阵, 从图中可以看出采集到的原始回波数据不仅包含被探测人体目标的生命体征, 还包含大量的静态背景干扰, 并且人体目标的生命体征是叠加在静态背景干扰上的。目前最常用的目标信号提取算法为背景相消[15], 该算法通常将回波信号在慢时间方向上的平均值作为背景的估计, 然后在当前测试的回波数据中减去背景信息, 目标是表征和减去时不变背景的 FDR 曲线, 只保留人在场时产生的特定 FDR 曲线, 结果如图 5 所示, 静态信号被滤除,

只保留了人体目标动态信号。实现过程如下：

$$h'_{m,n}[t] = h_{m,n}[t] - \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} h_{m,n}[kT + t] \quad (10)$$

其中， $h'_{m,n}[t]$ 表示背景相消后的 FDR 曲线， T 表示采样周期， $k = 0, 1, \dots, K-1$ 表示慢时间采样点数， $t = 0, 1/2B, \dots, (n-1)/2B$ 表示快时间采样点数。

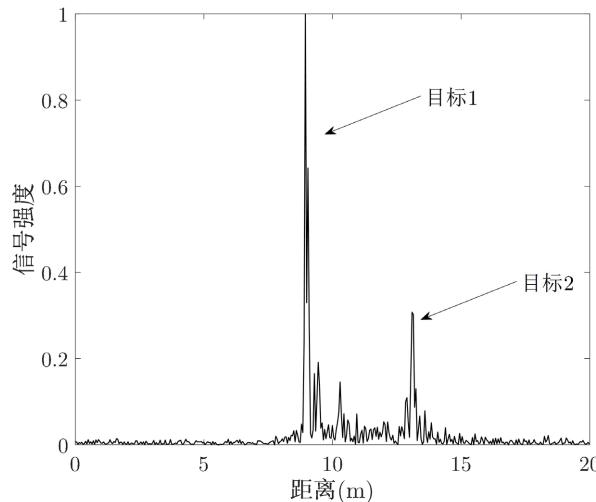


Figure 5. Resultant image after background subtraction
图 5. 背景相消结果图

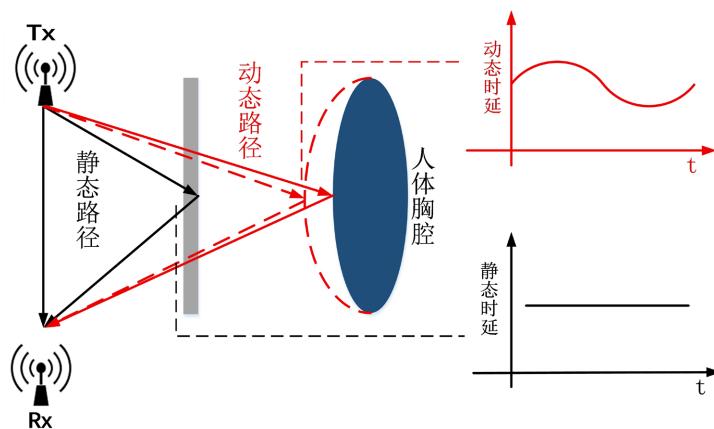


Figure 6. Delay variation diagram under different paths
图 6. 不同路径下的时延变化图

但这种方法只是消除了 FDR 曲线中的静态信号分量，并没有考虑到系统随机噪声的影响。在远距离或非视距等场景下，由于墙壁等障碍物存在的原因，信号会经历多次反射与穿墙折射后到达接收端，目标信号较弱，在随机噪声不变的基础上，较远处目标的反射信号会被噪声信号淹没，使得目标信号难以被探测。由公式(6)可知动态信号分量为：

$$d_{m,n}[t] = \sum_{l=1}^L \Gamma_{m,n,l} e^{j2\pi f_c(t-\tau_{m,n,l})} B s \text{sinc}\left(B(t-\tau_{m,n,l})\right) \quad (11)$$

其中信号 $\tau_{m,n,l}$ 表示为第 m 个接收天线，第 n 个接收天线，第 l 条路径下的传输时延。信号在传播过程中

会经历多条不同的静态路径和动态路径，若不考虑人体目标移动，人体生理体征微动可近似为几组简谐振动，传输时延的变化如图 6 所示。 L 表示由人体目标产生的动态路径个数，不同路径下的传输时延 $\tau_{m,n,l}$ 可表示为[14] [15]：

$$\tau_{m,n,l}(kT+t) = \frac{2[b_{m,n,l} + A_l \sin[2\pi f_l(kT+t)] + \text{res}(kT+t)]}{c} \quad (12)$$

其中， $b_{m,n,l}$ 表示的是收发天线到人体胸腔振动中心的距离， A_l 表示的是人体呼吸微动幅度， f_l 表示的是人体呼吸频率， $\text{res}(kT+t)$ 表示除呼吸心跳外其它人体微动引起的距离变化。面对墙后的静止人体目标，其动态信号分量主要是由人体呼吸以及轻微晃动引起的，当通过背景相消算法提取的目标信号强度小于噪声基底时 $d_{m,n}[t] < \delta_{m,n}[t]$ ，信号会被噪声淹没。

因此信噪比是决定成像性能的关键。如果能提高信噪比，则可以提高穿墙成像能力。这里我们借鉴了分集的思想，利用不同时刻多个独立的接收信号叠加降噪，叠加信号越多，信噪比越高，更易提取出目标信号。

$$D_{m,n}[t] = \sum_{k=0}^{K-1} \frac{\left(h_{m,n}[kT+t] - \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} h_{m,n}[kT+t] \right)^2}{K-1} \quad (13)$$

其中， $D_{m,n}[t]$ 表示叠加采样得到的 FDR 曲线，随着样本个数 k 的增加，所有样本的平均值将收敛于期望。而测量噪声 $\delta_{m,n}[t]$ 服从加性高斯白分布，均值为零，方差为 $\sigma^2(t)$ 。因此用于组合的数据点越多，噪声水平越低。分别采用两种算法对墙后的两个人体目标的 10 次采样数据进行处理，结果如图 7(b) 所示，叠加采样算法得到的谱峰更加清晰，能够更加有效地提取到墙后的静止人体目标的呼吸信号。

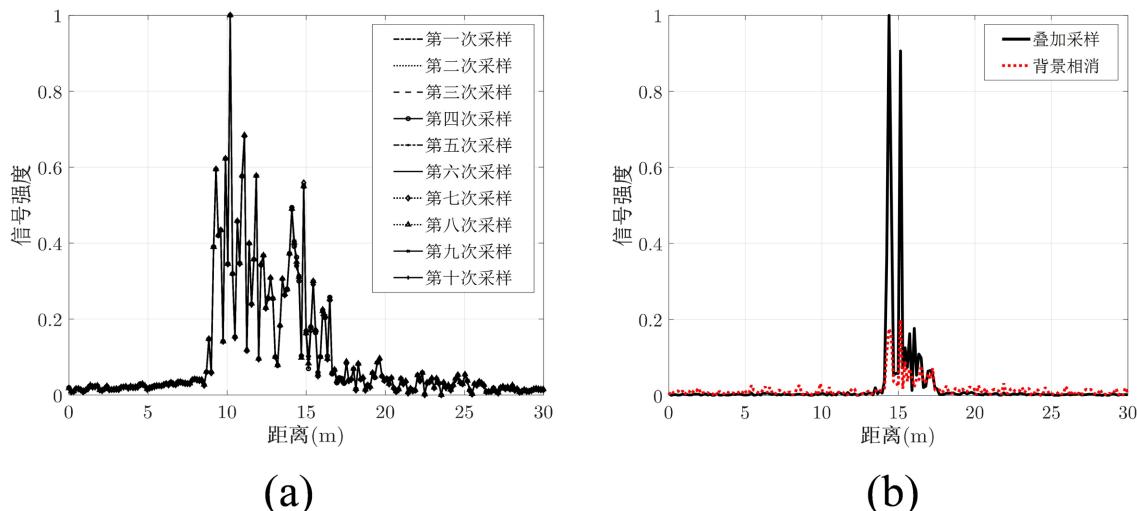


Figure 7. Comparison of results between Superposition Sampling and Background Subtraction under ten sampling. (a) Ten sampling results; (b) Comparison between two algorithms

图 7. 十次采样下背景相消与叠加采样结果对比。(a) 十次采样结果；(b) 两种算法结果对比

3.2. MIMO BP 成像及校准算法

MIMO BP 成像算法的基本原理是利用 MIMO 技术和反投影算法实现对目标的定位和成像。通过利用多个发射和接收天线以及相应的信号处理和数据重构方法，可以获得高分辨率和准确的目标成像结果。在算法中成像区域被划分为离散的像素点网格，每个像素点代表成像区域中的一个位置，通过测量接收

到的波束来估计该位置上的目标回波能量。像素点的数量通常由成像区域的分辨率决定，分辨率越高，需要更多的像素点来表示区域。具体而言：

$$I_{\text{BP}}(x, y, z) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M D_{m,n} \left[t - \frac{R_{m,n}(x, y, z)}{c} \right] \quad (14)$$

其中， $R_{m,n}(x, y, z)$ 为像素点 $P(x, y, z)$ 到第 m 个发射天线、第 n 个接收天线的距离，可表示为：

$$R_{m,n}(x, y, z) = \sqrt{(x - x_{T_m})^2 + (y - y_{T_m})^2 + (z - z_{T_m})^2} + \sqrt{(x - x_{R_n})^2 + (y - y_{R_n})^2 + (z - z_{R_n})^2} \quad (15)$$

BP 算法实现的基本过程是以成像区域内的每一个像素点为遍历单位，根据每一个像素点对应的积累曲线找出其在回波矩阵中的回波，相干累加后即为该像素的能量值。

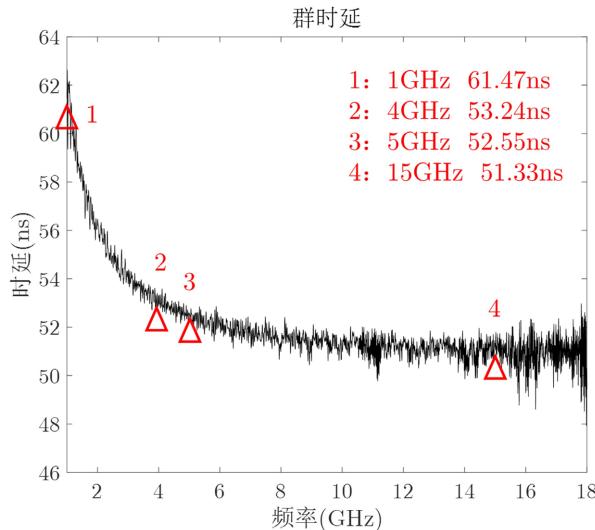


Figure 8. The results of antenna group delay measurements
图 8. 天线群时延测量结果

由第 2 节的推导可知，带宽越大，距离分辨率越高。但随着频率从低到高，辐射区从长振子区向短振子区移动，导致低频分量和高频分量在工作时走过的电距离不等，造成结构色散。天线群时延可以近似反馈相位中心的变化情况，对于发射信号来说，不同波长的信号分量从不同长度的振子辐射出去，即长振子辐射低频信号，短振子辐射高频信号，因此低频分量的群时延比高频分量大。**图 8** 是通过 VNA 测量得到的超宽带对数周期天线 1 GHz~18 GHz 的群时延，在整个高频频段内(5 GHz~15 GHz)，差值在 1 ns 左右，群时延近乎可以被视为平坦的直线，而低频段(1 GHz~4 GHz)差值超过 8 ns，存在很强的色散特性，严重影响了成像质量。**图 2** 是同一环境下不同频段测试得到的 FDR 曲线，可以看出 1 GHz~4 GHz 的频率范围内由于天线群时延的色散，不同频率成分的信号会在距离维度上发生错位，导致模糊峰的宽度增加，而 5 GHz~15 GHz 的频率范围内能较为清晰的呈现出四个峰。

但对于穿墙雷达来说，低频信号相对于高频信号具有更好的穿透能力，并且复杂环境中的多路径传播效应相对较小，能够更好地抵抗多路径传播引起的干扰和衰减，提供更稳定和可靠的成像结果。因此在实际应用中我们采用了 1 GHz~4 GHz 这个频段对墙后目标进行成像，值得注意的是天线群时延的色散部分具有不随天线间隔变化的特性，可以通过校准补偿方法来纠正群时延，确保接收到的信号能够准确地定位目标位置。

选择一块铁板作为理想参考目标，实际测量的中频信号 $H_{\text{meas}}[f]$ 会受到天线失配和群时延色散的

影响:

$$H_{\text{meas}}[f] = m[f]H[f]e^{j\phi[f]} \quad (16)$$

其中 $m[f]$ 表示由阻抗不匹配导致的信号失真, $\phi[f]$ 表示天线相位中心随频率变化产生的相位噪声, $m[f]$ 和 $\phi[f]$ 都取决于天线本身。为了计算校准因子 $c[f]$, 首先要计算出理想的中频信号, 假设系统通过线缆传输至馈电点再到天线开口端的时延为 τ_a , 那么理想的中频信号可以表示为 $e^{-j2\pi f\tau_a}$, 则校准因子 $c[f]$ 就可以表示为:

$$c[f] = \frac{1}{m[f]H[f]e^{j\phi[f]}} = \frac{1}{m[f]}e^{-j\phi[f]+j2\pi f\tau_a} \quad (17)$$

将校准因子应用于测量的中频信号, 可以校正信号的幅度和相位响应差异, 以补偿由于天线失配和群时延色散引起的信号畸变; 同时也消除了由系统和线缆带来的时延误差, 将初始位置校准在了天线开口端面处。

$$\begin{aligned} H_{\text{meas,cal}}[f] &= H_{\text{meas}}[f] \cdot c[f] \\ &= \cancel{m[f]}H[f]e^{j\phi[f]} \cdot \frac{1}{\cancel{m[f]}}e^{-j\phi[f]}e^{j2\pi f\tau_a} \\ &= H[f] \cdot e^{j2\pi f\tau_a} \end{aligned} \quad (18)$$

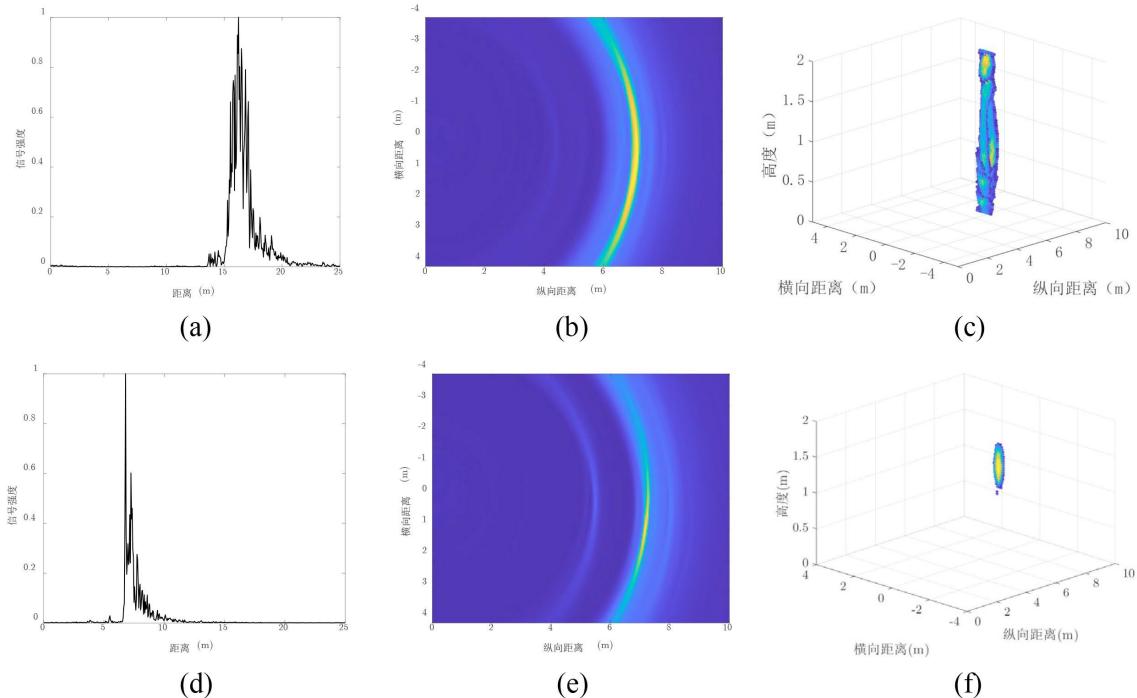


Figure 9. The FDR curves and imaging results before and after calibration. (a) FDR curve before calibration; (b) 2D imaging results before calibration; (c) 3D imaging results before calibration; (d) FDR curve after calibration; (e) 2D imaging results after calibration; (f) 3D imaging results after calibration

图 9. 校准前后的 FDR 曲线以及成像结果图。(a) 校准前 FDR 曲线; (b) 校准前二维成像结果; (c) 校准前三维成像结果; (d) 校准后 FDR 曲线; (e) 校准后二维成像结果; (f) 校准后三维成像结果

在进行成像计算时, 如果不考虑这个由系统和线缆带来的时延误差, 就会导致成像结果的空间偏移, 即成像结果不准确。因此, 在后向投影算法中, 通常需要通过减去线缆长度(对应的传输时延)来校准信号

的到达时间，但这种方法并不能消除天线本身造成结构色散，测量结果如图 9(a)、图 9(b)、图 9(c)所示。相较于校准前，校准后的 FDR 曲线能够清晰地显示出各个反射位置的谱峰，并校正信号的传输时延，使得信号的到达时间与实际反射位置相对应，从而在算法中无需对传输时延误差进行处理，如图 9(d)所示。从二维及三维成像结果图 9(e)、图 9(f)中也可以看出校准后的成像结果更为聚焦，减轻了天线之间的相互干扰和色散引起的拖尾效应，提高了定位精度。

4. 实验验证

为了验证所提出的方法并研究算法的性能，我们在真实场景中进行了一系列实验。实验包括对多个对象在不同障碍物下的透视成像结果。

4.1. 系统描述

硬件系统：该系统的核心为 32 端口矢量网络分析仪，如图 10(a)所示，能够实现 10 MHz~20 GHz 频率范围内的 32 个端口共计 1024 个通道的 S 参数快速测量。整机采用一体化开关矩阵控制的方法，显著缩短了网络仪信号传输通路，进而减小信号通路中由半钢电缆引起的插入损耗，为墙后目标成像提供了最大的动态范围和灵敏度。

天线阵列：天线阵列是由 32 个超宽带对数周期天线构成的矩形阵列(4 行 8 列)，面阵大小为 1.6 m × 1.4 m，通过 32 根 3.5 mm 低损稳相线缆连接至 32 端口 VNA，如图 10(b)所示。在不同频段，建筑材料的穿透特性各不相同，该天线频率范围覆盖 680 MHz~18 GHz，宽频带可以利用最有利的频段进行探测，能够最大程度拓展穿墙成像系统的应用场景和任务。

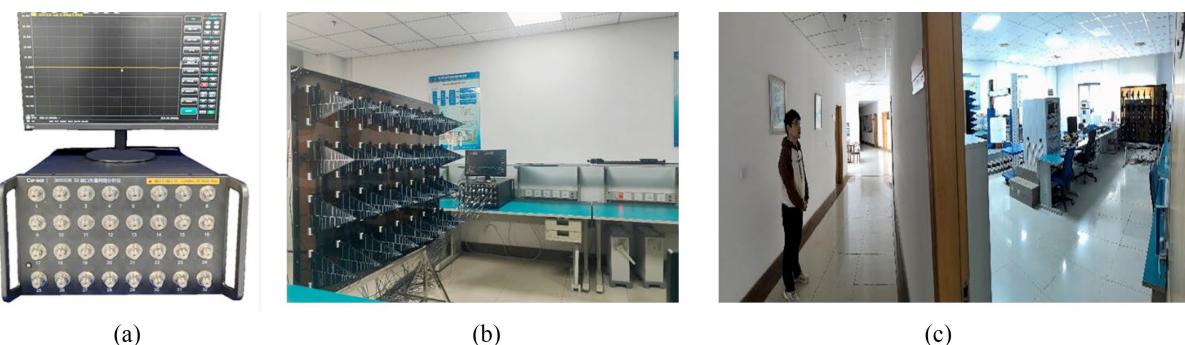


Figure 10. System specification. (a) 32 port VNA; (b) antenna array; (c) experimental scene
图 10. 系统描述。(a) 32 端口矢量网络分析仪；(b) 天线阵列；(c) 实验场景

4.2. 实验场景及参数设置

我们在复杂的多径环境下搭建了实验平台，如图 10(c)所示，面阵距离墙壁有近 6 米，并且中间还存在有调试桌、办公椅、柜子等障碍物。成像目标就位于墙壁后面的走廊处，数据采集过程中人体全程保持静止，保持正常呼吸，周围环境无明显干扰。成像系统的参数如表 1 所示，为了同时满足穿透能力和人体探测的需要，频率范围我们设置在了 1 GHz~4 GHz，带宽为 3 GHz。

Table 1. Imaging system operating parameters settings
表 1. 成像系统工作参数设置

参数	数值
天线阵列	32 × 32 (MIMO)

续表

天线横向间距	20 cm
天线纵向间距	31.4 cm
频率范围	1 GHz~4 GHz
中频带宽	1 kHz
快时间采样点数	501
慢时间采样道数	1024
天线距墙距离	6 m
走廊宽度	2 m
墙体厚度	15 cm
墙体材料	砖、水泥

4.3. 穿墙成像结果

为了评估 MIMO 架构的步进频连续波远程三维穿墙成像系统的穿墙性能和所提出的叠加采样算法的有效性，我们进行了不同场景的对比实验。首先，我们在 15 厘米厚的墙壁后的走廊区域进行了针对单个目标的成像实验，结果如图 11 所示，两种算法的图像都与墙后的人体目标相似，其中背景相消算法得到的人体成像结果存在伪影，这是由于墙壁会导致信号较大的衰减和失真，使得人体的散射回波信号明显减弱，并且墙壁内的气隙会导致额外的传播路径失真，使得人体成像图像更加杂乱。而叠加采样算法得到的人体成像结果更为清晰，具有更高的信噪比，从 FDR 曲线中可以看出叠加采样算法能够更加有效地抑制干扰信号和噪声，准确地将目标物体从背景中分离，从而获得更清晰的成像结果。

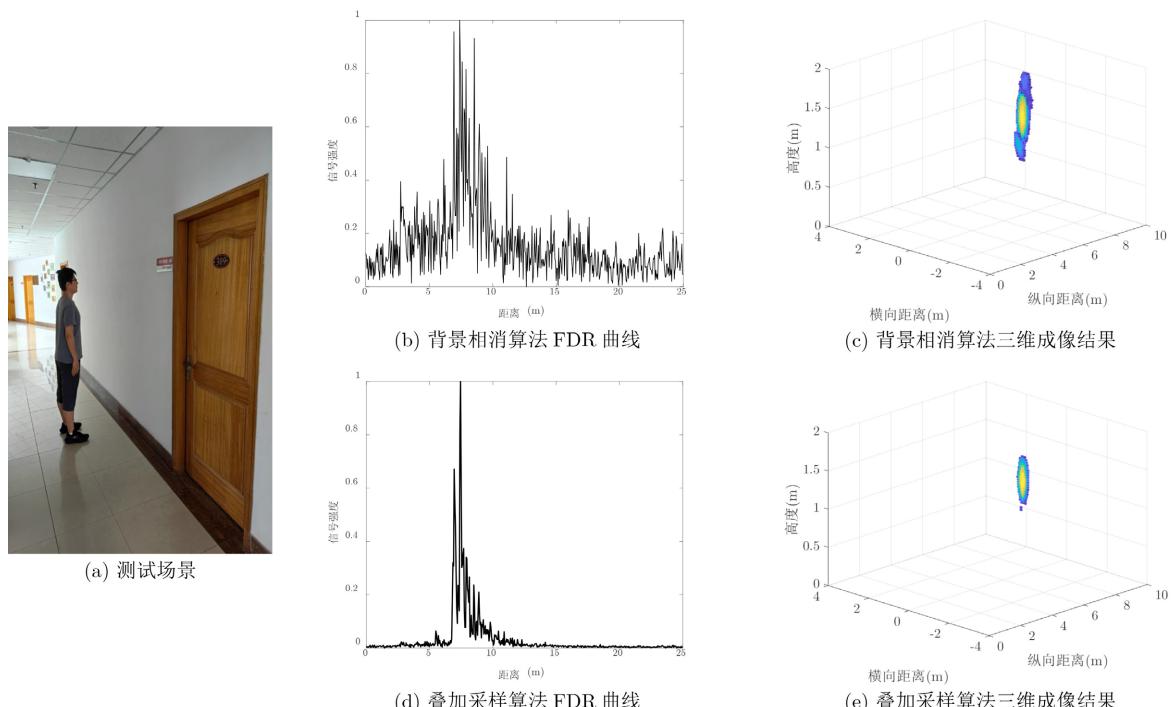


Figure 11. Scenario of a single person behind the wall and 3D imaging result
图 11. 墙后单目标测试场景以及成像结果图

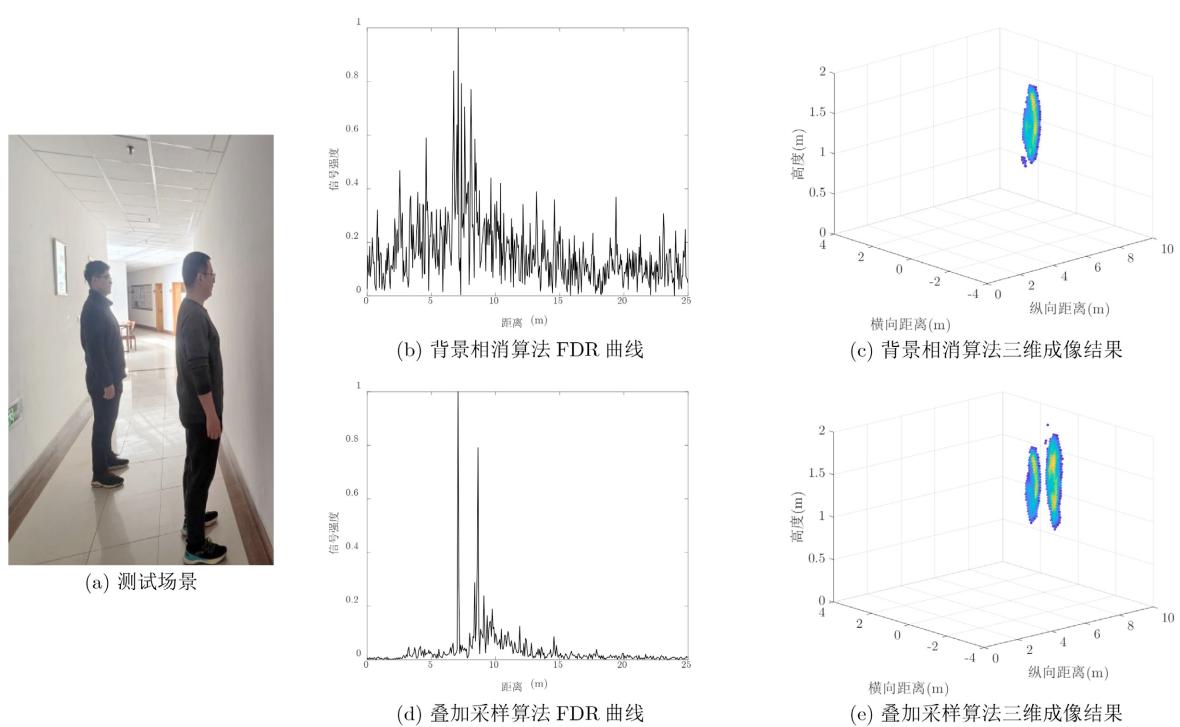


Figure 12. Scenario of a two person behind the wall and 3D imaging result
图 12. 墙后双目标测试场景以及成像结果图

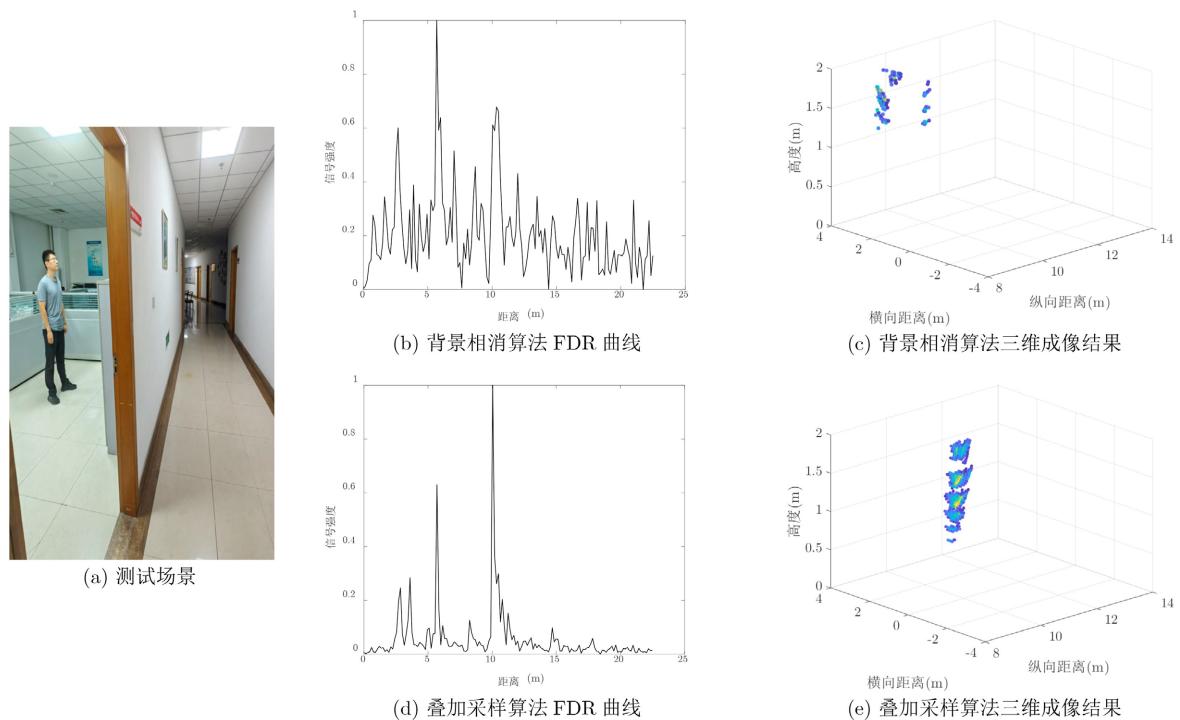


Figure 13. Scenario of a single person behind two walls and 3D imaging result
图 13. 两堵墙后单目标测试场景以及成像结果图

其次，我们在走廊区域进行了多目标的成像实验，结果如图 12 所示，从成像结果中可以看出背景相

消算法只能识别到一个目标，而叠加采样算法可以较为准确地区分出两个目标的位置和高度特征。由 FDR 曲线中可以看出，背景相消算法对于多目标、多路径传播的复杂情况下，无法很好地区分目标和背景之间的差异，导致识别和分离困难。而叠加采样算法能够利用多个独立的接收信号叠加降噪，提高目标的定位精度，从而准确地区分出多个目标。

最后，为了进一步评估该成像系统的极限性能，我们进行了两堵墙的穿墙成像实验，结果如图 13 所示。在这里测试频率范围我们修改为 1 GHz~2 GHz，这是由于较高的频率难以有效穿透墙壁的同时会引入更多高频噪声，降低频率范围有助于增强信号的强度和稳定性。在这种情况下背景相消算法提取的目标信号强度远小于噪声基底，信号会被噪声淹没难以进行有效成像。而叠加采样算法可以在 10 米处的位置识别到两堵墙后人体目标，但值得注意的是图 13(d) 中 0~10 米之间还有额外的 3 道噪声信号，其来源可能有很多，例如系统噪声、环境干扰、校准偏差或线缆接触点连接不良等，只有当信噪比远高于这些噪声信号时，成像系统才能获得较为精确的成像结果。如图 13(e) 所示，成像结果能够较为精确地反映出人体目标的实际位置，但由于信噪比与噪声之间的差异较小，成像结果模糊失真。

5. 结语

穿墙成像技术作为一种新兴的非侵入性成像技术，凭借其穿透障碍物、隐私保护等特点，在安防监控、搜救救援、地下勘探等领域展现出广阔的应用场景。本文提出了一种基于步进频连续波的远程三维穿墙成像方法，主要解决了墙后目标信号信噪比低以及测量精度差的问题。所提方法能够从杂乱的回波信号中成功提取并重建目标信息，大大提高了穿墙成像系统在强杂散环境下对隐藏目标的检测能力。未来随着进一步优化与应用，将能够给相关领域带来更多使用价值。

基金项目

国家自然科学基金“叶企孙”科学基金(U2341210)，泰山学者工程专项经费资助。

参考文献

- [1] Cheraghinia, M., Shahid, A., Luchie, S., et al. (2025) A Comprehensive Overview on UWB Radar: Applications, Standards, Signal Processing Techniques, Datasets, Radio Chips, Trends and Future Research Directions. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, **27**, 2283-2324.
- [2] Işıker, H. and Özdemir, C. (2020) Adaptation of Stepped Frequency Continuous Waveform to Range-Doppler Algorithm for SAR Signal Processing. *Digital Signal Processing*, **106**, Article ID: 102826. <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2020.102826>
- [3] Sun, Y.P., Cui, Z. and Qu, L.L. (2015) A CS and SFCW Based Reconstruction Algorithm for Through-the-Wall Radar Imaging. *Journal of Electrical and Electronic Engineering*, **3**, 165-169. <https://doi.org/10.11648/j.jeee.20150305.21>
- [4] Kadaba, D.V., Bachina, K., Subhan, S., et al. (2013) Real-Time Through-Wall Imaging Using SFCW Radar System. *9th International Radar Symposium India*, Bangalore, 10-14 December 2013, 1-6.
- [5] Eide, E., Linford, N., Persico, R. and Sala, J. (2019) Advanced SFCW GPR Systems. In: Persico, R., Piro, S. and Linford, N., Eds., *Innovation in Near-Surface Geophysics*, Elsevier, 253-285. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-812429-1.00008-8>
- [6] Kozlov, R., Gavrilov, K., Shevgunov, T. and Kirdyashkin, V. (2022) Stepped-Frequency Continuous-Wave Signal Processing Method for Human Detection Using Radars for Sensing Rooms through the Wall. *Inventions*, **7**, Article No. 79. <https://doi.org/10.3390/inventions7030079>
- [7] Šipoš, D. and Gleich, D. (2021) SFCW Radar with an Integrated Static Target Echo Cancellation System. *Sensors*, **21**, Article No. 5829. <https://doi.org/10.3390/s21175829>
- [8] Pramudita, A.A., Praktika, T.O. and Jannah, S. (2021) Radar Modeling Experiment Using Vector Network Analyzer. *2020 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, Osaka, 25-28 January 2021, 99-100. <https://doi.org/10.23919/isap47053.2021.9391495>
- [9] Peabody, J.E., Charvat, G.L., Goodwin, J., et al. (2012) Through-Wall Imaging Radar. *Lincoln Laboratory Journal*, **19**,

62-72.

- [10] 胡志鹏. 超宽带 MIMO 雷达系统设计与穿墙成像方法研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [11] Boudamouz, B., Millot, P. and Pichot, C. (2013) Through the Wall Radar Imaging with MIMO Beamforming Processing—Simulation and Experimental Results. *American Journal of Remote Sensing*, **1**, 7-12. <https://doi.org/10.11648/j.ajrs.20130101.12>
- [12] Buhari, M.D., Tian, G.Y. and Tiwari, R. (2019) Microwave-Based SAR Technique for Pipeline Inspection Using Auto-focus Range-Doppler Algorithm. *IEEE Sensors Journal*, **19**, 1777-1787. <https://doi.org/10.1109/jsen.2018.2879348>
- [13] da Silva, F.C.S., Kos, A.B., Antonucci, G.E., Coder, J.B., Nelson, C.W. and Hati, A. (2021) Continuous-Capture Microwave Imaging. *Nature Communications*, **12**, 1-8. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24219-0>
- [14] Noon, D.A. (1996) Stepped-Frequency Radar Design and Signal Processing Enhances Ground Penetrating Radar Performance. Ph.D. Dissertation, The University of Queensland.
- [15] 曹凌霄. 穿墙雷达三维透视成像技术研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [16] RIGOL. FDR 与 TDR 技术的差别及优化[Z/OL]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/404214117>, 2025-09-12.
- [17] 甘秉鸿. 基于矢量网络分析仪的时域测量技术 TDR [Z/OL]. <http://voi-tech.com/bookpic/202082515373119038.pdf>, 2025-09-12.
- [18] Shi, D., Liang, F., Qiao, J., Wang, Y., Zhu, Y., Lv, H., et al. (2023) A Novel Non-Contact Detection and Identification Method for the Post-Disaster Compression State of Injured Individuals Using UWB Bio-Radar. *Bioengineering*, **10**, Article No. 905. <https://doi.org/10.3390/bioengineering10080905>
- [19] Chen, W., Yang, H., Bi, X., Zheng, R., Zhang, F., Bao, P., et al. (2023) Environment-Aware Multi-Person Tracking in Indoor Environments with Mmwave Radars. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, **7**, 1-29. <https://doi.org/10.1145/3610902>
- [20] Chang, Z., Zhang, F., Xiong, J., Chen, W. and Zhang, D. (2024) MSense: Boosting Wireless Sensing Capability under Motion Interference. *Proceedings of the 30th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, Washington DC, 18-22 November 2024, 108-123. <https://doi.org/10.1145/3636534.3649350>
- [21] Li, Z., Jin, T., Dai, Y. and Song, Y. (2021) Through-Wall Multi-Subject Localization and Vital Signs Monitoring Using UWB MIMO Imaging Radar. *Remote Sensing*, **13**, Article No. 2905. <https://doi.org/10.3390/rs13152905>
- [22] 梁福来, 李浩楠, 邱富贵, 等. UWB MIMO 生物雷达多静止人体目标成像方法研究[J]. 雷达学报, 2016, 5(5): 470-476.