

基于稳健波束形成的超宽带穿墙成像方法

晋良念¹, 欧阳缮², 谢跃雷², 肖海林²

(1. 西安电子科技大学电子工程学院, 陕西 西安 710071;

2. 桂林电子科技大学信息与通信学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 针对现有超宽带穿墙雷达时域波束成像分辨率低、旁瓣高以及干扰抑制能力弱等问题, 提出利用稳健 Capon 波束形成对目标成像的方法。该方法基于目标回波模型首先补偿近场扩散损耗、墙体传播损耗和折射效应, 实现天线阵列接收数据的配准, 利用稳健 Capon 波束成像得到良好的成像分辨率和更好的干扰抑制能力。利用时域有限差分(finite-difference time domain, FDTD)数值仿真和实验数据实现了隐藏目标的二维成像, 验证了该方法的有效性。

关键词: 超宽带雷达; 穿墙成像; 稳健 Capon 波束形成; 目标回波模型

中图分类号: TN 911

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2011.01.42

Ultra-wideband through-the-wall imaging based on robust adaptive beamforming

JIN Liang-nian¹, OUYANG Shan², XIE Yue-lei², XIAO Hai-lin²

(1. School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: The existing time-domain beamforming imaging methods for ultra-wideband (UWB) through-the-wall radar suffer from low-resolution, high sidelobe levels and poor interference suppression capabilities. In order to solve the problems, the data-adaptive robust Capon beamformer (RCB) method is proposed for through-the-wall imaging applications. The received signals from all channels are alligned by compensating for geometric attenuation, wall propagation attenuation and refraction effects. Then the RCB imaging method is applied to achieve much better resolution and much better interference suppression capabilities. The effectiveness of the proposed method is demonstrated by achieving two dimensional images of hidden targets based on FDTD numerical simulations and the experimentally measured data.

Keywords: ultra-wideband (UWB) radar; through-the-wall imaging; robust Capon beamformer (RCB); target echo model

0 引言

超宽带穿墙雷达是一种能够穿透非金属墙壁, 对墙壁后面隐藏的可疑目标进行探测、定位和跟踪的新型雷达, 可广泛应用于城市巷战、反恐斗争、警戒、安检、灾害救援等领域。近几年, 国内外许多机构都对穿墙成像雷达进行了广泛而深入的研究^[1-2]。

采用合适的成像算法对目标进行精确定位是雷达系统设计的关键。时域波束形成是穿墙雷达常用的重建方法^[3-4], 这种简单的延时-求和(delay-and-sum, DAS)波束形成过程利用较少的先验信息就能够快速而简单地实现目

标成像。DAS虽然计算简单、容易实现, 但是空间分辨率较低、干扰抑制能力较弱。而基于数据的 Capon 波束形成算法却具有更高的空间分辨率和较强的干扰抑制能力, 它通过自适应地选择加权矢量, 在保持期望方向增益不变的条件下使阵列输出功率最小化, 达到抑制干扰和噪声的目的。该算法在医学微波成像中已取得了很好的应用效果^[5]。

由于墙体的存在, 电磁波将产生反射、折射和衰减等现象。本文首先建立穿墙目标回波模型, 然后基于回波模型补偿传播损耗和时延, 实现天线阵列接收数据的配准。由于墙体介质的非均匀性、目标散射特性的方向性以及复杂

收稿日期: 2009-12-31; 修回日期: 2010-07-06。

基金项目: 国家自然科学基金(60572054); 教育部留学回国人员基金; 广西科学技术研究与技术开发项目(05112001-7A)资助课题

作者简介: 晋良念(1974-), 男, 副教授, 博士研究生, 主要研究方向为阵列信号处理、超宽带雷达动目标检测。

E-mail: jinglingling5653@sina.com.cn

环境下的多径干扰等都会引起阵元通道间存在不同程度的相位偏差和幅度偏差,因此本文从稳健 Capon 波束形成^[6-7]角度来考虑目标成像问题。通过校正导向矢量,使导向矢量与阵列通道目标回波数据的协方差矩阵相匹配,达到目标后向散射功率的稳健估计的目的。经过仿真数据和实验数据验证,本方法的成像效果明显优于 DAS。

1 目标回波模型及预处理

1.1 目标回波模型

电磁传播模型如图 1 所示。墙体为水平层状媒质,厚度为 d ,电导率为 σ ,相对介电常数为 ϵ_r 。系统采用一发多收,发射天线位于 \mathbf{r}_0 ,均匀接收线阵位于 $\mathbf{r}_i (i=1,2,\dots,N)$ 。假设在所有接收阵元的视线方向上,目标极化散射特性保持一致,则接收阵元 \mathbf{r}_i 的目标回波信号为

$$s(t, \mathbf{r}_i) = \iint_V \sigma(x, z) \frac{a(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_s)}{16\pi^2 R(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_s) R(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_s)} \cdot FT_i^{-1} [S(k) e^{-jk(R(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_s) + R(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_s))} T(k, \mathbf{r}_0, \mathbf{r}_s) T(k, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_s)] dx dz \quad (1)$$

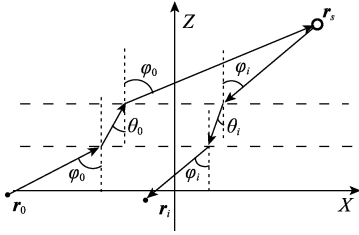


图 1 电磁传播模型

式中, $FT_i^{-1}[\cdot]$ 表示对 t 的一维逆傅里叶变换算子; $\sigma(x, z)$ 表示目标散射函数; $a(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_s)$ 表示天线特性影响因子; $S(k)$ 为发射信号频谱在快时间域上的表示, $k = \omega/c$, ω 是电磁波频率, c 是自由空间传播速度; $R(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_s)$ 和 $R(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_s)$ 表示发射天线到目标和接收天线到目标在自由空间中所经历的传播距离; $T(k, \mathbf{r}_0, \mathbf{r}_s)$ 和 $T(k, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_s)$ 分别表示发射天线到目标和接收天线到目标所经历的墙体透射系数。透射系数与电磁波的入射角、极化方式、墙体厚度和墙体材料的电参数有关,具体形式为^[8]

$$\begin{cases} T(k, \mathbf{r}_0, \mathbf{r}_s) = \frac{(1 - \Gamma_{01}^2) \exp(-j\gamma d / \cos \theta_0)}{1 - \Gamma_{01}^2 \exp(-j2\gamma d / \cos \theta_0)} \\ T(k, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_s) = \frac{(1 - \Gamma_{01}^2) \exp(-j\gamma d / \cos \theta_i)}{1 - \Gamma_{01}^2 \exp(-j2\gamma d / \cos \theta_i)} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\gamma = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \tilde{\epsilon}_r}$ 表示电磁波在墙体中的传播常数; $\tilde{\epsilon}_r = \epsilon_r - j\sigma/\omega\epsilon_0$ 表示相对复介电常数; $\Gamma_{01} = (Z_1 - Z_0)/(Z_1 + Z_0)$ 表示从空气斜射进入墙体交界面的反射系数。在水平极化下, $Z_0 = \eta_0 \cos \varphi_i$, $Z_1 = \eta_1 \cos \theta_i$; 在垂直极化下, $Z_0 = \eta_0 / \cos \varphi_i$, $Z_1 = \eta_1 / \cos \theta_i$; η_0 和 η_1 是空气和墙体的本征阻抗, $\eta_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$, $\eta_1 = \sqrt{\mu_0/(\epsilon_0 \tilde{\epsilon}_r)}$, μ_0 是自由空间的磁导率, ϵ_0 是自由空间的介电常数。式(1)的观测回波模型建立了目标回波集合 $[s(t, \mathbf{r}_i)]_{i=1}^N$ 与目标散射特性之间的关系,并在此关系中揭示了墙体对电磁传播特性的影响。

1.2 预处理

波束形成成像是对各通道的目标回波进行补偿,相加后在某一方向上获得最大功率的阵列输出。针对像点 \mathbf{r} , 将各接收通道的回波信号施加时延补偿、墙体传播损耗补偿以及近场扩散损耗补偿保证阵列接收数据配准,则补偿后第 i 个接收通道信号变为

$$y_i(\mathbf{r}, t) = R(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}) R(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}) FT_i^{-1} [FT_i[s(t, \mathbf{r}_i)] \cdot \exp\{jk[R(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}) + R(\mathbf{r}_0, \mathbf{r})]\} C(k, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}) e^{jv}] \quad (3)$$

式中, $FT_i[\cdot]$ 表示对 t 的一维傅里叶变换算子; $C(k, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}) = [T(k, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}) T(k, \mathbf{r}_0, \mathbf{r})]^{-1}$ 表示墙体传播补偿因子; $R(\mathbf{r}_0, \mathbf{r})$ 和 $R(\mathbf{r}_i, \mathbf{r})$ 表示像点 \mathbf{r} 到发射天线和接收天线所经历的在自由空间中的传播距离,用于补偿近场球面波的扩散损耗; $\exp\{jk[R(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}) + R(\mathbf{r}_0, \mathbf{r})]\}$ 表示时延补偿因子,用于补偿自由空间的传播时延; v 表示附加的参考时延,保证数据补偿后的因果性,其值高于成像区域中任一像点到发射天线和接收天线的时延总和。将式(3)进行离散,并把所有通道信号表示成矢量,则第 m 个时刻数据模型为

$$\mathbf{y}(\mathbf{r}, m) = \mathbf{a}s(\mathbf{r}, m) + \mathbf{e}(\mathbf{r}, m) \quad (4)$$

式中, $\mathbf{y}(\mathbf{r}, m)$ 为接收信号矢量; $s(\mathbf{r}, m)$ 为像点的后向散射信号; $\mathbf{e}(\mathbf{r}, m)$ 为噪声和剩余干扰量; \mathbf{a} 为阵列导向矢量; $m = -M \sim M$, 与 \mathbf{r} 到各阵元的近似传播时延的前后时刻对应。由于墙体介质的非均匀性、目标散射的方向性以及阵元位置的细小偏差等都会引起目标回波产生不同程度的时延畸变和幅度畸变,即使经过前面的预处理偏差依然存在, \mathbf{a} 近似等于 $\bar{\mathbf{a}} = [1, \dots, 1]_{N \times 1}^T$ 。为了消除这些偏差,将 \mathbf{a} 约束于以 $\bar{\mathbf{a}}$ 为中心的球形不确定集合中。

2 稳健 Capon 波束形成成像

对二维成像区域逐点扫描完成图像重建,主要任务是估计像点 \mathbf{r} 的目标回波信号功率 σ_s^2 。这里, \mathbf{a} 和 σ_s^2 为未知量,都需要估计。为了更好地估计 σ_s^2 , 首先估计实际导向矢量,然后利用估计的导向矢量进行自适应波束形成,得到最优加权矢量的一个简单闭式解。基于预处理目标回波,稳健 Capon 波束形成 (robust Capon beamformer, RCB) 成像方法的优化问题表示为^[6]

$$\max_{\sigma_s^2, \mathbf{a}} \sigma_s^2 \text{ s. t. } \hat{\mathbf{R}} - \sigma_s^2 \mathbf{a}\mathbf{a}^* \geq 0, \|\mathbf{a} - \bar{\mathbf{a}}\|^2 = \epsilon \quad (5)$$

式中, σ_s^2 为待估计的目标回波功率; ϵ 为导向矢量误差模的上限,满足 $\epsilon < \|\bar{\mathbf{a}}\|^2$; $\hat{\mathbf{R}}$ 为统计协方差矩阵,可用样本协方差矩阵估计,即 $\hat{\mathbf{R}} = \sum_{m=-M}^M \mathbf{y}(\mathbf{r}, m) \mathbf{y}^T(\mathbf{r}, m) / 2M$ 。为了改善 Capon 谱估计性能,将 $\hat{\mathbf{R}}$ 记为 $\hat{\mathbf{R}}_1$, 采用平滑协方差矩阵 $\hat{\mathbf{R}} = (\hat{\mathbf{R}}_1 + \mathbf{G}\hat{\mathbf{R}}_1^T\mathbf{G})/2$, 其中 \mathbf{G} 为转换矩阵,其次对角元素为 1,其余为 0。解式(5),得到期望信号导向矢量的估计表达式为

$$\hat{\mathbf{a}}_0 = (\lambda^{-1} \hat{\mathbf{R}}^{-1} + \mathbf{I})^{-1} \bar{\mathbf{a}} \quad (6)$$

用 $\hat{\mathbf{a}}_0$ 替换标准 Capon 波束形成权值表达式中的期望信号导向矢量,得到 RCB 权值为

$$\hat{\mathbf{w}}_0 = (\hat{\mathbf{R}} + \lambda^{-1} \mathbf{I})^{-1} \hat{\mathbf{a}} / \hat{\mathbf{a}}^T (\hat{\mathbf{R}} + \lambda^{-1} \mathbf{I})^{-1} \hat{\mathbf{R}} (\hat{\mathbf{R}} + \lambda^{-1} \mathbf{I})^{-1} \hat{\mathbf{a}} \quad (7)$$

再利用估计的权值,得到估计的信号功率为

$$\hat{\sigma}_s^2 = \hat{\mathbf{w}}_0^T \hat{\mathbf{R}} \hat{\mathbf{w}}_0 = 1 / (\hat{\mathbf{a}}_0^T \hat{\mathbf{R}}^{-1} \hat{\mathbf{a}}_0) \quad (8)$$

观察式(5)中的约束函数,存在 σ^2 和 \mathbf{a} 两个未知量,所以求解时存在比例模糊问题。这种比例模糊对所有像点的目标回波功率估计影响较大,必须消除。一种简单有效的解决办法是将 $\hat{\mathbf{a}}_0$ 进行归一化。对应地,信号功率估计值,即 \mathbf{r} 的像值修正为

$$I(\mathbf{r}) = \|\hat{\mathbf{a}}_0\|^2 / (N \hat{\mathbf{a}}_0^T \hat{\mathbf{R}}^{-1} \hat{\mathbf{a}}_0) \quad (9)$$

根据超宽带脉冲特性,目标回波持续时间短,取传播时延前后的有限样本相当于加窗,能够有效地抑制其他像点的回波干扰。由此,空间相关矩阵主要由目标信号子空间和噪声子空间组成。经过推导, $\hat{\mathbf{w}}_0$ 的对角加载因子 λ^{-1} 的近似解析式为

$$\frac{1}{\lambda} \approx \frac{(\sigma_n^2 + \sigma_s^2 \|\hat{\mathbf{a}}_n\|)^2}{\|\mathbf{a}_n\| \sqrt{\epsilon} - 1} \quad (10)$$

式中, σ_s^2 为目标信号功率; σ_n^2 为噪声功率; $\|\mathbf{a}_n\| = \mathbf{U}_n^H \mathbf{a}$ 为实际期望信号导向矢量在噪声子空间上投影的模值; $\|\hat{\mathbf{a}}_n\| = \mathbf{U}_n^H \hat{\mathbf{a}}$ 为预设导向矢量在噪声子空间上投影的模值,其中 $\mathbf{U}_n = [\mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_N]$ 为 $\hat{\mathbf{R}}$ 特征值分解的噪声子空间特征向量。式(10)表明,对角加载因子与 ϵ 变化趋势一致,即 ϵ 越大, λ^{-1} 越大。当 ϵ 趋于 $\|\mathbf{a}_n\|^2$ 时, λ^{-1} 趋于无穷大,此时算法变成普通波束;当 ϵ 等于 0 时, λ^{-1} 变成 0,此时算法变成标准 Capon 波束。这表明 ϵ 对像值估计的精度影响很大,取值过大或过小都会导致精度急剧下降,这就要求 ϵ 应在合理范围内取值。考虑到天线阵列接收数据经过补偿后,导向矢量失配误差相对较小,为了获得良好的分辨率和较强的干扰抑制能力, ϵ 取值稍小一些。另外,将式(6)和式(10)代入式(9),经化简可得^[7]

$$I(\mathbf{r}) \approx (\sigma_n^2 + \sigma_s^2 \|\mathbf{a}_n\|^2) / N \quad (11)$$

式(11)表明,对于高信噪比的像点 \mathbf{r} , $I(\mathbf{r})$ 接近真实值 σ_s^2 ,且与 ϵ 无关;对于无目标回波的像点 \mathbf{r} , $I(\mathbf{r}) \approx \sigma_n^2 / N$ 。可以看出,只要 ϵ 在合理范围内取值,即使阵列通道间数据存在失配误差,稳健波束仍然能够获得很高的估计精度。这将在后面的仿真和实验结果中得到验证。

3 仿真与实验结果分析

3.1 仿真结果

发射信号为一阶微分高斯脉冲,中心时刻为 1.5 ns,有效持续时间为 0.5 ns。有均匀介质墙体、非均匀介质墙体和房间三种场景,其时域有限差分 (finite-difference time domain, FDTD) 模型如图 2 和图 3 所示,各种墙体参数如表 1 所示。表 1 中, $N(\cdot, \cdot)$ 代表高斯分布。发射天线位于方位向中心,接收阵元向两侧均匀分布,阵元数为 13,间距为 8 cm,且距离墙壁为 0.3 m。模拟人体目标放置在 (0 m, 3 m) 处,大小为 20 cm × 20 cm,介电系数为 10,电导

率为 4。FDTD 网格单元尺寸为 0.4 mm,时间步长取 8 ps,采样时窗为 40 ns,采样间隔为 40 ps,采样点数为 1 001。

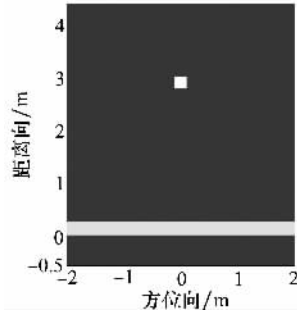


图 2 穿透墙体的 FDTD 模型

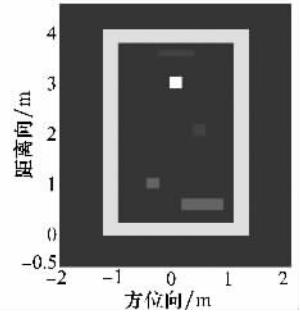


图 3 房间的 FDTD 模型

表 1 墙体的参数设置

墙体类型	d/m	$\epsilon_r/(\text{F}/\text{m})$	$\sigma/(\text{S}/\text{m})$
均匀介质墙体	0.30	7	0
非均匀介质墙体 1	0.25	$N(5, 0.25)$	0
非均匀介质墙体 2	0.25	$N(5, 0.5)$	0
房间 1 的墙体	0.25	7	0.001
房间 2 的墙体	0.25	7	0.02

将成像区域的方位向和距离向的像素间隔设为 2 cm。对仿真产生的接收数据加入一定强度的高斯白噪声,然后对同一数据分别采用 DAS^[3-4]、标准 Capon 波束和 RCB 成像。所有成像显示的动态范围设为 20dB,并利用目标杂波比(target clutter ratio, TCR)比较成像效果^[2]。仿真中, ϵ 取 0.1 N, $M=41$ 。图 4~图 6 分别给出了隐藏在均匀墙体后和房间 1 及房间 2 内的目标成像。仿真中,SNR 分别为 -10 dB、-6.5 dB 和 -13.5 dB。在图 4(a)~图 6(a)中, DAS 波束成像的分辨率低,旁瓣高,图像杂波大,目标轮廓模糊。在图 4(b)~图 6(b)中,标准 Capon 波束成像效果非常差。无论哪种场景,目标都无法辨认,这说明各种穿墙环境都会引起实际导向矢量与期望导向矢量不匹配,使得标准 Capon 波束成像效果非常差。在图 4(c)~图 6(c)中,RCB 成像分辨率提高,旁瓣降低,对比度增强,目标轮廓明显。

表 2 给出了不同场景的目标成像的 TCR 值,每个 TCR 值都是经过 100 次仿真后取平均得到的。可以看出,RCB 成像的 TCR 都高于 DAS 波束成像,对于均匀介质墙体的成像提高了近 20 dB,非均匀墙体提高了近 18 dB,房间 1 提高了近 13 dB,房间 2 提高了近 17 dB。从表 2 还可以看出,在墙体厚度较小的情况下,无论是均匀墙体的房间还是非均匀墙体的房间,成像的 TCR 值相差较小。由此可知,影响房间内目标成像的主要因素是多径杂波干扰,并非墙体非均匀性。最后,讨论导向矢量误差 ϵ 对成像的影响。针对房间 1,表 3 给出了 RCB 成像的 TCR 值。从表中可知,当 ϵ 在合理范围内取值时,TCR 值变化不大,成像效果不受影响。但是,当 ϵ 取值过大或过小时,TCR 值变化很大,尤

其是 ϵ 接近 0 值时 TCR 急剧下降,该现象与前面的分析结论是一致的。从以上结果可以看出,只要 ϵ 在合理范围内

取值,对于存在不同失配误差的各种场景,考虑导向矢量误差的 RCB 成像都优于 DAS 和标准 Capon 波束。

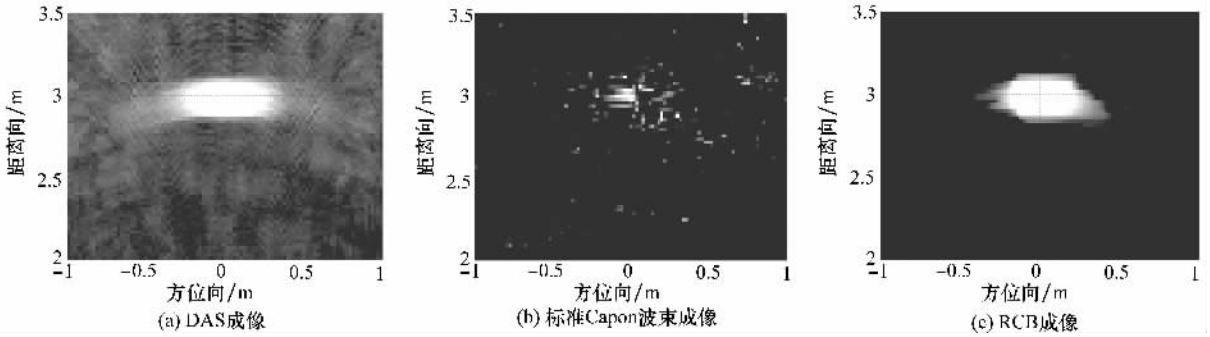


图 4 穿透均匀介质墙体的目标成像结果

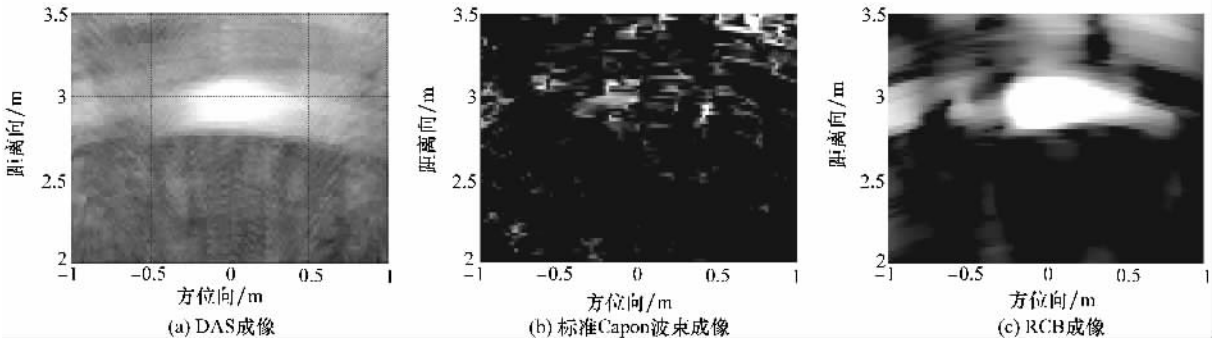


图 5 房间 1 的目标成像结果

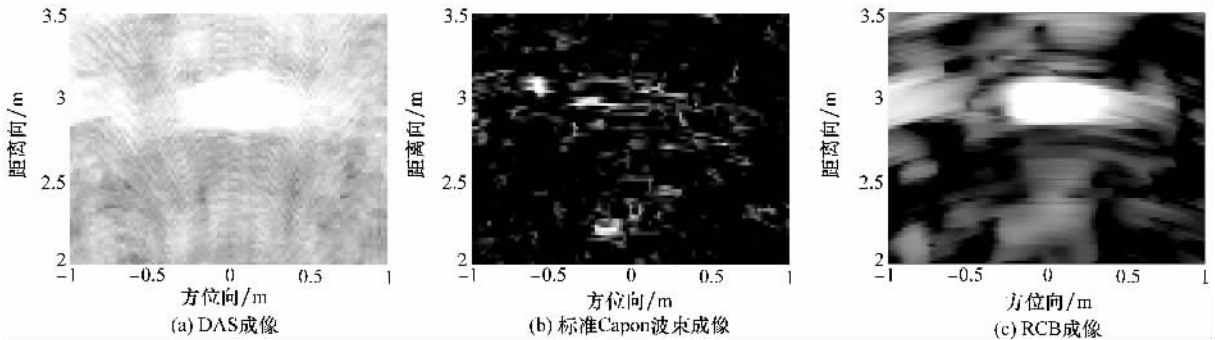


图 6 房间 2 的目标成像结果

表 2 成像的 TCR 值比较

成像算法	墙体 1	墙体 2	墙体 3	墙体 4	墙体 5
DAS 成像	29.11	29.9	30.0	17.9	8.8
RCB 成像	49.09	48.25	48.35	29.7	23.2

dB

表 3 不同导向矢量误差下成像的 TCR 值比较

ϵ	0.1	0.8	1.3	2	5
RCB 成像	5.6	25.2	28.9	27.8	18.9

dB

3.2 实测数据结果

本节采用美国维拉诺瓦大学雷达成像实验室的步进频宽带合成孔径穿墙雷达系统的实验数据^[9]。由于步进变频雷达接收到的回波数据为一系列步进频率复信号,所以需要对这些频域数据进行逆傅里叶压缩处理变换到时域。在

变换过程中,采用 Hamming 加窗,并通过补零将 201 点频域数据扩展到 $4\ 096 \times 2$ 点实现线性内插,使时间轴变密,得到等效的时间间隔为 24.4 ps。

下面对不同高度 Y 的二维目标进行成像。水平极化的收发天线沿着 X 轴合成孔径,合成阵列长度为 1.51 m,阵元间隔为 2.2 cm,阵元数为 69。RCB 的 $\epsilon=0.2N, M=91$ 。图 7 为 $Y=0.84$ m, $SNR=-8$ dB 的目标成像结果,其 TCR 值分别为 28.3 dB 和 36.6 dB。图 8 为 $Y=1.04$ m, $SNR=-6.9$ dB 的成像结果,其 TCR 值分别为 33.7 dB 和 39.7 dB。从图 7、图 8 可以看出,RCB 成像分辨率和成像对比度都优于 DAS,不仅能够有效地分辨多个反射目标,而且目标轮廓也很明显。

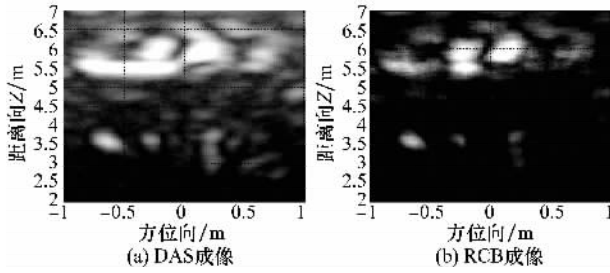


图 7 Y=0.81 m 的目标成像结果

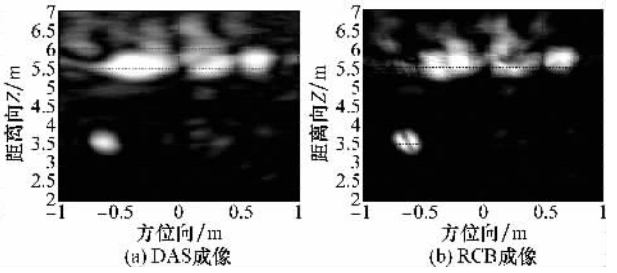


图 8 Y=1.04 m 的目标成像结果

4 结 论

针对穿墙雷达应用环境,提出了稳健 Capon 波束成像方法。利用 FDTD 数值仿真和实验数据实现了隐藏目标的二维成像,并与 DAS 波束和标准 Capon 波束成像进行了比较。结果表明,考虑导向矢量误差的稳健 Capon 波束成像都优于 DAS 和标准 Capon 波束,不仅得到良好的分辨率和更好的干扰抑制能力,而且具有很强的稳健性,结果验证了该方法的有效性。另外,针对各种穿墙环境,墙体内部的多次反射都造成了虚假目标的出现,这在一定程度上影响了弱散射目标的成像。因此,如何消除墙体多次反射造成的虚假目标还有待进一步研究。

参 考 文 献:

[1] 黄琼,陈洁,方广有,等. 一种快速超宽带穿墙雷达成像算法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(8):2001 - 2005. (Huang Q, Chen J, Fang G Y, et al. A fast imaging algorithm for UWB through-wall radar [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(8):2001 - 2005.)

[2] Yoon Y, Amin M G. Spatial filtering for wall-clutter mitigation in through-the-wall radar imaging[J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(9):3192 - 3208.

[3] Ahamd F, Zhang Y M, Amin M G. Three-dimensional wide-band beamforming for imaging through a single wall[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, 5(2):176 - 179.

[4] Dehmollaian M, Sarabandi K. Through-the-wall imaging using differential SAR[J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(5):1289 - 1296.

[5] Xie Yao, Guo Bin, Li Jian, et al. Adaptive and robust methods of reconstruction (ARMOR) for thermo-acoustioc tomography [J]. *IEEE Trans. on Biomedical Engineering*, 2008, 55(12):2741 - 2752.

[6] Li Jian, Stoica P. On robust capon beamforming and diagonal loading[J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2003, 51(7):1702 - 1715.

[7] 戴凌燕,王永良,李荣锋,等. 基于不确定集的稳健 Capon 波束形成算法性能分析[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(12):2931 - 2936. (Dai L Y, Wang Y L, Li R F, et al. Performance analysis of robust Capon beamforming based on uncertainty set [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(12):2931 - 2936.)

[8] Huang Y, Nakhkash M. Characterisation of layered dielectric medium using reflection coefficient [J]. *Electronics Letters*, 1998, 34(12):1207 - 1208.

[9] Ahamd F, Amin M G. Experiments on wideband through the wall imaging[EB/OL]. [2009 - 12 - 10]. [http://www. engineering. villanova. edu/cac/TWRI-experiments](http://www.engineering.villanova.edu/cac/TWRI-experiments).