超宽带穿墙雷达双稳健波束互相关加权的自适应成像方法

晋良念*①②　　欧阳缮②　　肖海林②
①(西安电子科技大学电子工程学院　西安　710071)
②(桂林电子科技大学信息与通信学院　桂林　541004)

摘　要：为了改善超宽带穿墙雷达目标成像质量，论文提出双稳健波束互相关加权的自适应成像方法。该方法将基阵交替划分为两个子阵，利用双约束稳健 Capon 波束形成(DRCB)独立估计子阵波束输出信号，取其信号和的能量作为像值获得高成像分辨率和强干扰抑制能力；又因两波束的输出具有非常相似的主瓣响应和不同旁瓣响应的特点，取其互相关系数加权像值，可以减小旁瓣达到提高成像对比度的目的。时域有限差分(FDTD)数值仿真和实验数据处理结果验证了该方法的有效性。

关键词：超宽带穿墙雷达成像；双约束稳健 Capon 波束形成；互相关系数；分辨率；对比度
中图分类号：TN957.52　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1009-5896(2011)07-1644-05
DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00843

Ultrawideband Through-the-wall Radar Adaptive Imaging Approach Using Cross-correlation Weighting of Dual Robust Beamforming

Jin Liang-nian①②　　Ouyang Shan②　　Xiao Hai-ling②
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: An effective adaptive imaging method using cross-correlation weight of dual robust beamforming is proposed for UltraWideBand (UWB) through-the-wall imaging radar. Dual constrained Robust Capon Beamformings (DRCB) is applied to these 2 subarrays which get by dividing array alternately. The energy of the sum of these 2 beamformings output signals is regarded as pixel value in order to achieve higher resolution and much better interference suppression capabilities. Because these 2 beamformings have a well-correlated mainlobe response and a different or uncorrelated sidelobe response, the Cross-correlated Coefficient (CC) of two beamformings output signals is weighted for each pixel to suppress sidelobe so as to improve significantly constrast. The excellent performance of the proposed method is demonstrated by FDTD numerical simulations and the experimentally measured data results.

Key words: UltraWideBand (UWB) through-the-wall radar imaging; Dual constrained Robust Capon Beamformings (DRCB); Cross- correlated Coefficient (CC); Resolution; Constrast

1　引言

超宽带穿墙雷达成像是用来对被障碍物遮挡的区域进行成像，在城市巷战、反恐斗争、警戒、安检、灾害救援等军事和民事领域都有着广泛的应用前景。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]。其成像方法主要包括非线性逆散射[3]、线性逆散射[4]、时延补偿延时求和波束形成[5]、透射系数完全补偿波束形成[6]、时间反转[7]等。非线性逆散射和线性逆散射成像方法能够反演目标的介电特性，但是计算时间非常长，很难做到实时处理。其它成像方法计算简单，实现方便，但其空间分辨率低，干扰抑制能力弱以及成像对比度差。

鉴于此，本文提出双稳健波束互相关系数加权的自适应成像方法。由于两个波束的主瓣信号互相关性强，而来自旁瓣或其它形式的杂波信号互相关性弱，因此将基阵交替划分为两个子阵后，使用它们波束输出信号的互相关自适应加权其信号之和，能够达到顺利通过主瓣信号，大大衰减杂波信号的目的，衰减的大小与杂波分量成正比[8]。考虑到延时求和(DAS)波束的干扰抑制能力弱，且容易受到墙体建模误差的影响，本文采用 DRCB 处理两子阵波

2010-08-12收到，2011-04-18改回
国家自然科学基金(60572054)，教育部留学回国人员基金和广西科学技术研究与技术开发项目(桂科能05112001-7A)资助课题
*通信作者：晋良念　jinglingling5653@sina.com.cn

束可以提高干扰抑制能力[9]。由此看来，该方法不仅利用互相关系数(CC)自适应加权大大提高成像对比度，而且利用 DRCB 获得更好的成像分辨率和干扰抑制能力。时域有限差分(FDTD)仿真数据和实验数据处理结果验证了该方法的有效性。

2　信号模型

系统采用一发多收，发射天线位于 $\boldsymbol{r}_0$，接收天线位于 $\boldsymbol{r}_n, n=1,2,\cdots,N$，且为均匀线阵。在超宽带脉冲激励下，接收天线 $\boldsymbol{r}_n$ 接收到的目标回波频域表示为

$$E_s(\boldsymbol{r}_n,k)=\int_D G(\boldsymbol{r},\boldsymbol{r}_0,k)G(\boldsymbol{r}_n,\boldsymbol{r},k)\sigma_d(\boldsymbol{r})S(k)\mathrm{d}\boldsymbol{r}+N(k) \tag{1}$$

式中 k 为自由空间波数，D 为目标空间，$S(k)$ 为发射信号频谱，$\sigma_d(\boldsymbol{r})$ 为目标的散射系数，$N(k)$ 表示噪声和杂波项，$G(\boldsymbol{r},\boldsymbol{r}_0,k)$ 和 $G(\boldsymbol{r}_n,\boldsymbol{r},k)$ 分别为发射阵元 $\boldsymbol{r}_0$ 和接收阵元 $\boldsymbol{r}_n$ 到 $\boldsymbol{r}$ 的格林函数，即

$$\left.\begin{aligned} G(\boldsymbol{r},\boldsymbol{r}_0,k)&=T(\boldsymbol{r},\boldsymbol{r}_0,k)\frac{e^{-jk|\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}_0|}}{4\pi|\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}_0|}\\ G(\boldsymbol{r}_n,\boldsymbol{r},k)&=T(\boldsymbol{r}_n,\boldsymbol{r},k)\frac{e^{-jk|\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}_n|}}{4\pi|\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}_n|}\end{aligned}\right\} \tag{2}$$

式中 $T(\cdot)$ 为墙体的透射系数，与天线位置、天线极化模式、墙体位置、墙体结构和介电特性有关[6]。假设点目标，位置为 $\boldsymbol{r}_s$，将式(2)代入式(1)，并忽略噪声和杂波的影响，则 $\boldsymbol{r}_n$ 接收到的目标回波为

$$E_s(\boldsymbol{r}_n,t)=\mathrm{FT}_t^{-1}\left[\sigma_d(\boldsymbol{r}_s)S(k)T(\boldsymbol{r}_n,\boldsymbol{r}_s,k)\right.$$
$$\left.\cdot T(\boldsymbol{r}_0,\boldsymbol{r}_s,k)\frac{e^{-jk(|\boldsymbol{r}_s-\boldsymbol{r}_0|+|\boldsymbol{r}_s-\boldsymbol{r}_n|)}}{16\pi^2|\boldsymbol{r}_s-\boldsymbol{r}_0||\boldsymbol{r}_s-\boldsymbol{r}_n|}\right] \tag{3}$$

式中 $\mathrm{FT}_t^{-1}[\bullet]$ 为对 t 的 1 维傅里叶逆变换算子。式(3)的这种观测回波模型建立了目标回波集合 $[E_s(\boldsymbol{r}_n,t)]_{n=1}^N$ 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。

3　双稳健波束互相关加权的自适应成像方法

由于墙体的作用以及近场球面波的衰减效应，在成像之前需要对各阵元的接收信号进行补偿。根据式(3)的回波模型，补偿后 $\boldsymbol{r}_n$ 的信号变为

$$x_n(\boldsymbol{r},t)=\mathrm{FT}_t^{-1}\left[\frac{1}{C(\boldsymbol{r})}\mathrm{FT}_t\left[E_s(\boldsymbol{r}_n,t)\right]\right.$$
$$\left.\cdot\left[G(\boldsymbol{r}_n,\boldsymbol{r},k)G(\boldsymbol{r},\boldsymbol{r}_0,k)\right]^*\right]w(t) \tag{4}$$

式中 $\mathrm{FT}_t[\bullet]$ 表示对 t 的 1 维傅里叶变换算子，$\boldsymbol{r}$ 为像点位置，* 为复共轭算子，$w(t)$ 为时间窗函数，用于抑制其它像点的干扰，$C(\boldsymbol{r})=|G(\boldsymbol{r}_n,\boldsymbol{r},k)G(\boldsymbol{r}_0,\boldsymbol{r},k)|$ 为近场平衡因子，用于补偿传播损耗，$[G(\boldsymbol{r}_n,\boldsymbol{r},k)G(\boldsymbol{r},\boldsymbol{r}_0,k)]^*$ 用于补偿传播时延，保证目标信号的相干积累。可以看出，正确补偿后天线阵列的目标信号时延对齐，幅度大致相等。

天线阵列回波信号包含形成期望主瓣的目标信号和来自旁瓣的信号以及减小成像对比度的杂波信号。主瓣与旁瓣的作用大小依靠波束的主瓣幅度与旁瓣幅度的比值和主瓣中散射体与杂波区域中散射体的强度比。为了提高对比度，需要消除或最小化杂波的作用。一种有效的解决办法就是将基阵交替划分为 2 个子阵，并使用这 2 个子阵波束的点扩展函数(PSF)从杂波信号中分辨主瓣信号。由于形成两波束主瓣的目标信号非常相似，杂波信号不同，因此由此形成的两波束具有非常相似的主瓣信号和极为不同的杂波模式，这样可以利用波束之间的互相关性可以保留主瓣信号而大大抑制杂波。这样在每一个像点，如果都利用互相关系数加权其像值，则可以起到通过主瓣信号，衰减杂波信号的作用。

对于子阵 1，将各阵元的补偿信号进行离散化，通过加权求和，得到波束输出信号为

$$b_1(\boldsymbol{r},m)=\sum_{n=1}^{N_1}w_n(\boldsymbol{r})x_n(\boldsymbol{r},m)=\boldsymbol{w}_1^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{r})\boldsymbol{X}_1(\boldsymbol{r},m) \tag{5}$$

式中 $\boldsymbol{w}_1(\boldsymbol{r})=[w_1(\boldsymbol{r})\cdots w_{N_1}(\boldsymbol{r})]^{\mathrm{T}}$ 为加权矢量，$\boldsymbol{X}_1(\boldsymbol{r},m)=[x_1(\boldsymbol{r},m)\cdots x_{N_1}(\boldsymbol{r},m)]^{\mathrm{T}}$ 为阵列数据矢量，N_1 为其阵元数。若取 $\boldsymbol{w}_1=[1\cdots1]_{N_1}^{\mathrm{T}}$，则上式为 DAS 波束。如果对每个天线接收到的信号做正确的时间补偿，则在实际目标位置处阵列数据就会同相叠加，叠加后信号相对较强；在非目标位置时延补偿后由于波形的相位不能重合，叠加后的能力相互抵消，信号相对较弱。但因墙体介质的非均匀性、目标散射的方向性以及多径干扰的影响，天线阵列数据间的时延和幅度有偏差，这将严重影响 DAS 波束器性能。为了更准确地估计波束输出信号，提高互相关系数的估计精度，本文采用 DRCB。其优化问题为[9]

$$\max_{\sigma^2,\boldsymbol{a}}\sigma^2\ \text{ s.t. }\ \boldsymbol{R}_1-\sigma^2\boldsymbol{a}\boldsymbol{a}^*\geq0,\ \|\boldsymbol{a}-\bar{\boldsymbol{a}}\|^2\leq\varepsilon_1,\|\boldsymbol{a}\|^2=N_1 \tag{6}$$

式中 $\boldsymbol{R}_1=E[\boldsymbol{X}_1(\boldsymbol{r},m)\boldsymbol{X}_1^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{r},m)]$ 是统计协方差矩阵，$\boldsymbol{a}$ 为期望信号的导向矢量，$\bar{\boldsymbol{a}}$ 为预设的信号导向矢量，σ^2 为待估计的目标回波功率，ε_1 为导向矢量误差模的上限，满足 $\varepsilon_1<\|\bar{\boldsymbol{a}}\|^2$，$N_1$ 为子阵 1 的阵元数。在实际工作中，统计协方差矩阵一般用样本协方差矩阵进行估计，即 $\boldsymbol{R}_1=\sum_{m=0}^{L-1}\boldsymbol{x}(\boldsymbol{r},m)\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{r},m)/L$，其中 L 为快拍数。因阵列补偿信号时延对齐，幅度

大致相等，所以 $\bar{\boldsymbol{a}}=[1,\cdots,1]^{\mathrm{T}}$。式(6)中将 $\boldsymbol{a}$ 约束于 $\bar{\boldsymbol{a}}$ 为中心的球形不确定集合中，确保了导向矢量误差在一定范围内变化时，波束形成器仍能保持理想的性能，而将 $\boldsymbol{a}$ 进行归一化处理解决了比例模糊问题。从本质上看，DRCB 通过预先估计实际导向矢量，然后利用估计的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。解式(6)，得到期望信号导向矢量的估计表达式为

$$\hat{\boldsymbol{a}}=\left(N_1-\frac{\varepsilon_1}{2}\right)\frac{\left(\boldsymbol{R}_1^{-1}+\lambda\boldsymbol{I}\right)^{-1}\bar{\boldsymbol{a}}}{\bar{\boldsymbol{a}}^{\mathrm{H}}\left(\boldsymbol{R}_1^{-1}+\lambda\boldsymbol{I}\right)^{-1}\bar{\boldsymbol{a}}} \tag{7}$$

式(7)中的未知量 λ 可用牛顿迭代法求解。将 $\hat{\boldsymbol{a}}$ 代入 Capon 波束最优权矢量，得到 DRCB 的最优加权矢量为

$$\boldsymbol{w}_1(\boldsymbol{r})=\frac{\boldsymbol{R}_1^{-1}\hat{\boldsymbol{a}}}{\hat{\boldsymbol{a}}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{R}_1^{-1}\hat{\boldsymbol{a}}} \tag{8}$$

将式(8)代入式(5)，得到子阵 1 波束输出信号为

$$b_1(\boldsymbol{r},m)=\boldsymbol{w}_1^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{r})\boldsymbol{X}_1(\boldsymbol{r},m) \tag{9}$$

同理，得到子阵 2 波束输出信号为

$$b_2(\boldsymbol{r},m)=\boldsymbol{w}_2^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{r})\boldsymbol{X}_2(\boldsymbol{r},m) \tag{10}$$

将两子阵的稳健波束输出信号进行互相关，得到 CC 为

$$\rho(\boldsymbol{r})=\sum_{m=1}^{M}b_1(\boldsymbol{r},m)b_2(\boldsymbol{r},m) \tag{11}$$

将两波束的输出信号求和，并用 $\rho(\boldsymbol{r})$ 相乘，得到互相关加权的输出信号为

$$b_{cc}(\boldsymbol{r},m)=\rho(\boldsymbol{r})\left[b_1(\boldsymbol{r},m)+b_2(\boldsymbol{r},m)\right] \tag{12}$$

取其能量值增强图像的对比度，得到 $\boldsymbol{r}$ 的像值为

$$I(\boldsymbol{r})\triangleq\sum_{m=1}^{M}\left|b_{cc}(\boldsymbol{r},m)\right|^2 \tag{13}$$

式中 M 为取其能量所用的数据点数，与脉冲的有效时宽有关，目的是增强相干积累的能量。相对于传统的 DAS 波束形成，本文方法利用 DRCB 分别估计两波束输出信号，既可获得良好的分辨率力和较强的干扰抑制能力，又可提高互相关系数的估计精度，其处理流程如图 1 所示。

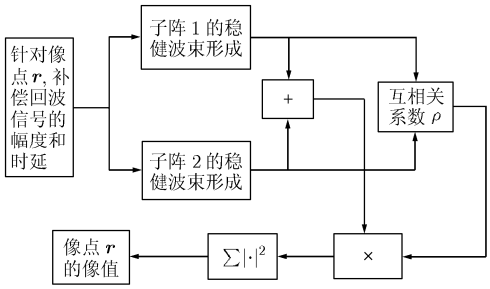


图 1 原理框图

4 仿真与实验结果分析

4.1 仿真结果

建立如图 2 的 2 维 FDTD 模型，利用 FDTD 产生仿真数据。发射信号采用一阶微分高斯脉冲，中心时刻 1.5 ns，有效宽度 0.5 ns。墙壁厚度 0.25 m，相对介电系数 7，电导率 0.001 S/m。天线由 1 个发射阵元和 11 个均匀接收线阵组成，发射阵元位于中心，接收天线沿墙壁呈直线排列，阵元间距 0.1 m，距离墙壁 0.3 m。目标中心位于(0 m, 3 m)处，大小 0.3 m×0.2 m，相对介电系数 10，电导率 4。FDTD 网格单元尺寸 0.4 mm，时间步长取 8 ps，采样时窗 40 ns，采样间隔 40 ps。目标散射信号由有目标时检测到的信号减去无目标时检测到的信号来模拟，并加入一定强度的高斯白噪声。

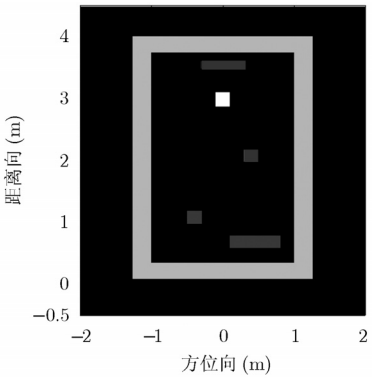
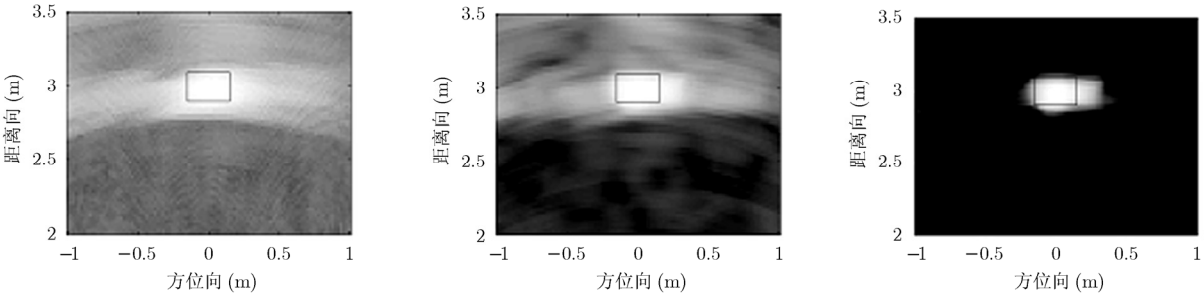


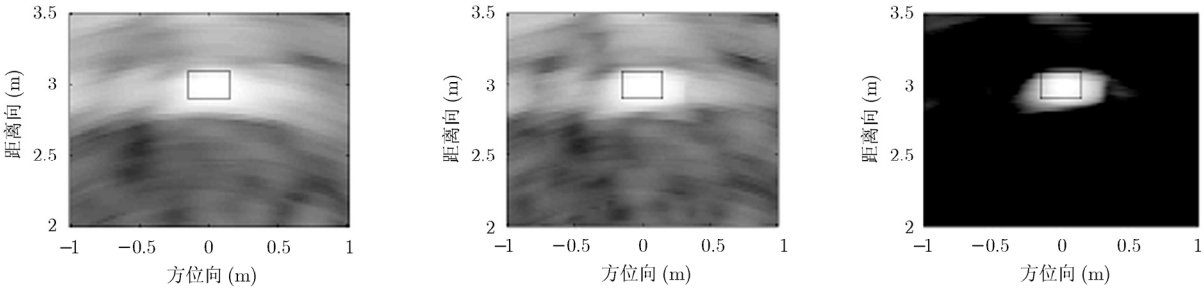
图 2 FDTD 成像模型

将成像区域的方位向和距离向的像素间隔设为 2 cm，所有成像显示的动态范围设为 30 dB。采用 DAS 波束，DRCB 以及本文方法对目标进行成像，用半最大值的宽度(Full Width at Half Maximum, FWHM)定量比较分辨率，用目标杂波比(TCR)[10]定量比较图像的对比度。FWHM 越小，分辨率越高。TCR 值越大，对比度越好，图像轮廓越明显。在下列仿真中，假设 DRCB 的参数 $\varepsilon_1=0.2N_1$，$\varepsilon_2=0.2N_2$，L=41，M=21。图 3 为 SNR=0 dB 的成像结果，图中的矩形框代表目标的真实位置。从图 3 中可以看出，DAS 成像有较宽的主瓣和较高的旁瓣，分辨率和对比度都较差；DRCB 的分辨率得到明显的提高，但其对比度并无明显改善；本文方法得益于 DRCB 和互相关系数加权的优点，其成像结果的分辨率和对比度均有较大的提高，目标像的轮廓非常清晰，其大小接近真实值。为了进一步分析 SNR 对成像的影响，图 4 给出了 SNR=−6 dB 的成像结果。可以看出，在强噪声的影响下，DAS 成像很差，目标像根本不明显，而本文方法得到的目标像轮廓依然清



(a) DAS 成像　(b) DRCB 成像　(c) 本文方法成像

图 3 SNR = 0 dB 的成像结果



(a) DAS 成像　(b) DRCB 成像　(c) 本文方法成像

图 4 SNR=−6 dB 的成像结果

晰，这表明互相关系数加权抑制旁瓣的能力明显好于 DAS 和 DRCB。为了定量比较成像的对比度，下面给出了图 3 和图 4 两种情况下的 TCR 值，每个值都是经过 100 次仿真后取平均得到的。图 3 的 TCR 值分别为 23.0 dB, 33.9 dB 和 52.1 dB，图 4 的 TCR 值分别为 26.59 dB, 30.93 dB 和 55.41 dB。可以看出，本文方法的 TCR 都高于 DAS 和 DRCB，比 DAS 高约 30 dB，比 DRCB 高约 20 dB，说明对比度有明显的提高。图 5 给出了图 3 的纵向距离 3 m 处的横向投影图。相对于其它成像方法，本文提出方法的主瓣最窄，其横向分辨率也最好，优于 DRCB 和 DAS。各成像方法的 FWHM 值分别为 0.52 m, 0.44 m 和 0.28 m。从图 5 还可以看出，本文方法成像的旁瓣最低，峰值旁瓣比比 DAS 降低了大约 30 dB，比 DRCB 降低了大约 20 dB，积分旁瓣比比 DAS 降低了大约 26 dB，比 DRCB 降低了大约 18 dB。正因为如此，成像对比度得到明显的改善。

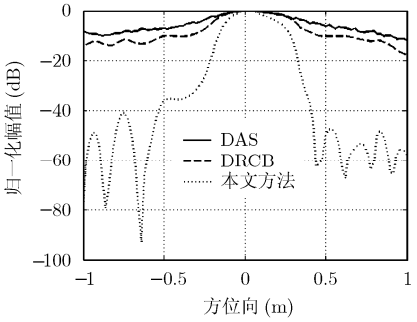


图 5 目标像的横向分辨率

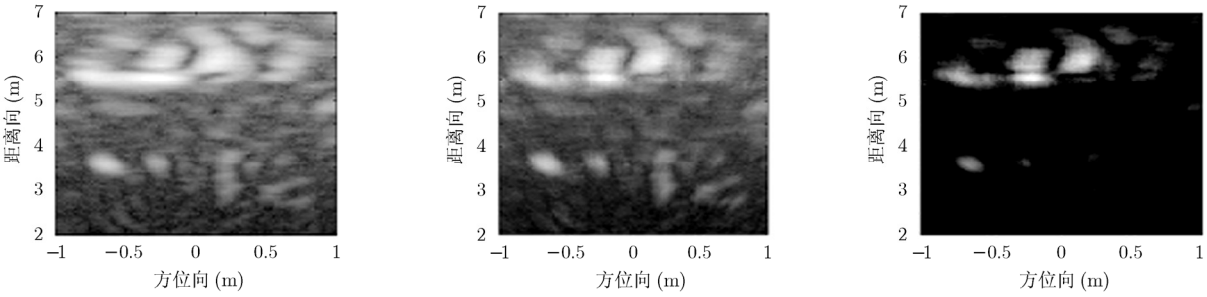
4.2 实验结果

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[11]。由于实测的步进频雷达接收到的回波数据为一系列的步进频率复信号，所以需要对这些频域数据进行逆快速傅里叶变换(IFFT)压缩处理变换到时域。在变换过程中，采用 Hamming 加窗降低频谱的泄漏，并通过补零将 201 点频域数据扩展到 8192 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。

水平极化的喇叭天线沿 X 轴合成孔径，阵元数 69，阵元间隔 2.2 cm。将基阵交替划分为 N_1=35 和 N_2=34 的两个子阵。图 6 为 Y= 0.84 m, SNR= −8 dB 的成像结果。图 7 为 Y= 1.04 m, SNR= −6.9 dB 的成像结果。仿真中，$\varepsilon_1=0.2N_1$，$\varepsilon_2=0.2N_2$，L=91，M=21。从图中可见，本文方法得到的结果其分辨率和对比度都优于 DAS，图中的各散射体可以明显分开，目标边缘清晰可见，图像质量显著提高。图 6 的 TCR 值分别为 28.3 dB, 34.6 dB 和 56.4 dB，图 7 的 TCR 值分别为 33.7 dB, 35.7 dB 和 53.4 dB。可见该方法对实际数据也是有效的。

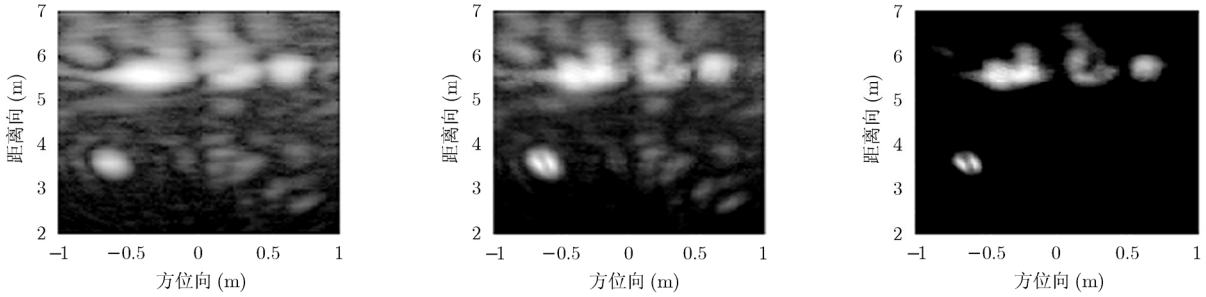
5　结束语

针对穿墙应用环境，本文提出了双稳健波束互相关加权的自适应成像方法，该方法能够同时提高成像的分辨率和对比度。利用 FDTD 数值仿真和实



(a) DAS 成像 (b) DRCB 成像 (c) 本文方法成像

图 6 Y=0.84 m 的目标成像结果



(a) DAS 成像 (b) DRCB 成像 (c) 本文方法成像

图 7 Y =1.04 m 的目标成像结果

验数据实现了隐藏目标的 2 维成像，并与 DAS 和 DRCB 成像进行了比较。结果表明，本文提出方法优于 DAS 和 DRCB，验证了有效性。然而，在实际情况下墙体是非均匀的，如多孔砖或空心砖构成的复合墙体。这种复杂墙体的内部将引起电磁波发生多次散射造成虚假目标的出现，这在一定程度上影响了弱散射目标的成像。因此，穿透复合墙体的稳健成像是下一步研究的重点。

参 考 文 献

[1] 孟升卫, 黄琼, 吴世有等. 超宽带穿墙雷达动目标跟踪成像算法研究. 仪器仪表学报, 2010, 31(3): 500–506.
Meng Sheng-wei, Huang Qiong, and Wu Shi-you, *et al.*. Research on moving target tracking and imaging algorithm for ultrawideband through-wall radar. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(3): 500–506.

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

[3] Song Lin-ping, Yu Chun, and Liu Qing-huo. Through-wall Imaging (TWI) by radar: 2-D tomographic results and analyses. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(12): 2793–2798.

[4] Raffaele S, Francesco S, and Giancarlo P, *et al.*. Three-dimensional through-wall imaging under ambiguous wall parameters. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(5): 1310–1317.

[5] Nikolic M M, Nehorai A, and Djordjevic A R. Estimating moving targets behind reinforced walls using radar. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2009, 57(11): 3530–3538.

[6] Paul C C, Burkholder R J, and Volakis J L. Adaptive CLEAN with target refocusing for thorugh-wall image improvement. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, 58(1): 155–162.

[7] Burkholder R J, Marhefka R J, and Volakis J L. Radar imaging through cinder block walls and other periodic structures. The IEEE Antennas and Propagtion Society International Symposium, San Diego, CA, 2008, 7: 1–4.

[8] Chi Hyung-seo and Jesse T Y. Sidelobe suppression in ultrasound imaging using dual apodization with cross-correlation. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Perroelectrics, and Frequency Control*, 2008, 55(10): 2198–2210.

[9] Li Jian, Stoica P, and Wang Zhi-song. Doubly constrained robust Capon beamformer. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2004, 52(9): 2407–2423.

[10] Yoon Yeo-sun and Amin M G. Spatial filtering for wall-clutter mitigration in through-the-wall radar imaging. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(9): 3192–3208.

[11] Dilsavor R, Ailes W, and Amin M G, *et al.*. Experiments on wideband through the wall imaging. Proceeding of SPIE, Algorithm for Synthetic Aperture Radar Imagery XII Conference, 2005, Vol. 5808: 196–209.

晋良念： 男，1974年生，副教授，博士生，研究方向为阵列信号处理、超宽带雷达动目标检测.

欧阳缮： 男，1960年生，教授，博士生导师，研究方向为自适应信号处理、通信信号处理及神经网络等.

肖海林： 男，1975年生，副教授，研究方向为通信信号处理、MIMO 通信.