

# 基于子空间技术中奇异向量分析的 穿墙雷达杂波抑制方法

郑 晨, 席晓莉, 宋忠国, 王梦蕾

(西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西西安 710048)

**摘 要:** 穿墙雷达成像中, 墙体反射杂波干扰严重, 严重影响目标成像效果. 子空间技术对回波信号矩阵进行奇异值分解后去除墙体子空间, 可以有效的抑制墙体杂波干扰, 在穿墙雷达成像中具有广泛的应用. 该文针对子空间技术中墙体与目标子空间的划分这一难题, 提出一种基于奇异向量平稳度分类的墙体子空间提取技术. 该方法利用墙体回波信号的相关特征, 根据奇异值分解后各个左奇异向量的平稳程度来精确划分墙体与目标子空间. 实验结果表明, 与现有技术相比, 该方法对墙体子空间的确定更加精准有效, 提高了穿墙雷达墙体杂波干扰抑制能力, 改善了墙后目标的成像质量.

**关键词:** 穿墙雷达; 目标探测; 奇异值分解; 子空间技术; 杂波抑制

**中图分类号:** TN957      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2019)04-0848-07

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.04.012

## A Singular Vector Stationarity Method for Clutter Mitigation in Through-the-Wall Radar Based on Subspace Method

ZHENG Chen, XI Xiao-li, SONG Zhong-guo, WANG Meng-lei

(Institute of Advanced Navigation and Electromagnetics, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

**Abstract:** In Through-the-Wall Imaging (TWI), the target image is often buried in the wall reflections and other clutter waves, and the target image cannot be obtained. Subspace technique uses the received echo matrix Singular Value Decomposition (SVD) to remove the wall subspace, it is a mature technique and has broad applications in TWI. In order to distinguish the wall subspace and the target subspace, this paper presents a new wall subspace extractive method based on the stationarity of left-singular vector. SVD is applied to the echo matrix and the left-singular vectors are used to determine the subspace belonging to the wall or the target. Compared with the traditional subspace technique, this method has a better performance in wall subspace extraction. Meanwhile, the capability of suppressing wall clutter is enhanced, and the quality of the target imaging is improved.

**Key words:** through-the-wall imaging (TWI); target detection; singular value decomposition (SVD); subspace technique; clutter mitigation

### 1 引言

穿墙雷达(Through-the-Wall Radar, TWR)通过发射电磁波穿透墙体、门或树木等非透明介质来探测后方的物体, 人体等目标, 广泛的应用于警察执法、灾后救援及反恐作战等各个领域<sup>[1-3]</sup>. 在穿墙雷达探测中, 墙体会对电磁波产生折射、反射等影响, 并且电磁波穿过墙体后会产生严重的衰减导致目标的反射信号减弱, 严

重的影响了目标的成像效果. 相比于目标的微弱回波信号, 墙体的反射波往往会强很多, 如果不加以处理, 必然会导致目标信号淹没于墙体的强回波信号中, 同时由于穿墙雷达往往工作于复杂的环境下, 环境噪声等也会干扰到对目标的探测, 因此穿墙雷达中的杂波抑制技术受到越来越多的关注<sup>[4-6]</sup>.

奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)广泛的应用于图像消噪, 信号处理等方面, 基于SVD的子

空间技术<sup>[7]</sup>在穿墙探测中具有良好的抑制强杂波能力,该方法通过对不同位置天线收到的回波信息所构成的矩阵进行奇异值分解,得到墙体子空间,目标子空间与噪声子空间.这种方法对信号处理方式简便,并且具有良好的杂波抑制能力,但是由于墙体介质以及目标数量、位置的不同,墙体子空间有时难以确定<sup>[12]</sup>,从而导致墙体杂波抑制效果变差.文献[8]表明第一个奇异值远远大于其它奇异值,可以用第一个奇异值所对应的子空间来表示墙体,但事实上回波信息经过 SVD 分解后,墙体信息除了被分解到第一个较大奇异值所对应的子空间上,在其他子空间中也会有残留,因此仅仅去除第一个子空间来抑制墙体杂波必然不合理.现有的改善方法有通过对奇异值进行加窗函数处理,提高表征目标的奇异值并抑制杂波奇异值<sup>[9]</sup>,但此种方法需要对窗函数的参数进行人为的选取,无法自适应于不同目标情况下的杂波抑制.文献[11]根据计算分解后的子空间中的信息时延来判断是否是墙体.此外 AIC 准则 (Akaike Information Criterion) 与 MDL 准则 (Minimum Description Length) 也被应用于改善子空间的划分<sup>[8,13]</sup>.

针对墙体子空间划分这一难题,本文提出一种基于 SVD 左奇异向量的墙体子空间提取方法,该方法与传统方法相比,避免了采用连续的子空间来表征墙体,对墙体子空间的确定更加的精准与方便,增强了穿墙雷达墙体杂波抑制能力,改善目标成像质量.

## 2 穿墙雷达探测模型

穿墙雷达探测中,电磁波由发射天线发出,在接收天线处会收到目标的反射波、墙体反射波、天线之间的直达波以及噪声,如图 1 所示.发射天线与接收天线沿墙体水平移动,形成合成孔径雷达探测目标并成像.电磁波的传输方向和速度取决于墙体的介电常数与墙体厚度,当收发天线移动到位置  $m$  处时,对于墙体后方的目标 P,电磁波的传播时延由下式给出<sup>[10]</sup>:

$$\tau_{m,p} = \frac{r_{m,air}}{c} + \frac{r_{m,wall}}{c/\sqrt{\varepsilon}} \quad (1)$$

式中, $r$ 为电磁波传播的距离;下标  $m$  表示收发天线移动到第  $m$  个位置;下标 air 与 wall 分别表示电磁波在自由空间和墙体内部的传播距离; $\varepsilon$  为墙体的介电常数; $c$  为光速.

接收天线收到回波信号可以表示为:

$$R_m = R_{m,wall} + R_{m,p} + R_N \quad (2)$$

式中, $R_{m,wall}$  为天线移动到第  $m$  个位置时所接收到墙体的回波信号,包括墙体的 1 次反射信号,2 次反射信号以及多次反射信号; $R_{m,p}$  为墙后目标 P 的回波信号; $R_N$  为环境噪声.

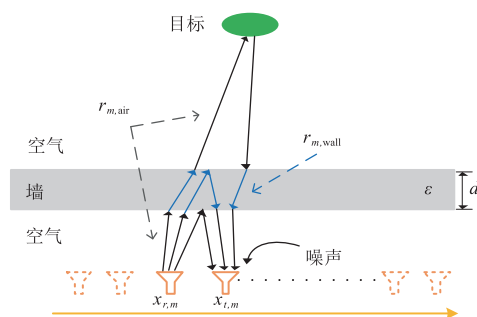


图1 穿墙雷达探测模型

对于均匀墙体,天线沿墙体水平移动,不同位置处所收到的墙体回波信号相同,共移动  $M$  个位置,即  $R_{1,wall} = R_{2,wall} = \dots = R_{M,wall}$ ,而不同位置处的目标反射回波信号时延  $\tau_{m,p}$  不同,因此回波信号也不相同.我们将天线在不同位置接收到的信号可以写成矩阵形式:

$$\Phi = \begin{bmatrix} R_1 \\ \vdots \\ R_M \end{bmatrix}_{M \times N} \quad (3)$$

式中, $R_i, i=1,2,\dots,M$  分别表示天线在不同位置处所收到的信号回波信息,其中  $M$  为天线共移动位置的次数,天线每个位置的信息数据长度为  $N$ . 因此,可以写作为一大大小为  $M \times N$  的信息矩阵.

## 3 基于奇异向量分析的杂波抑制方法

### 3.1 基于 SVD 子空间的穿墙雷达杂波抑制

穿墙雷达回波信号空间由墙体子空间,目标子空间,噪声子空间组成.对穿墙雷达天线接收到的信号矩阵  $\Phi$  经过 SVD 分解后,可以写为:

$$\Phi = USV^H = \sum_{i \in W} \sigma_i u_i v_i^H + \sum_{i \in T} \sigma_i u_i v_i^H + \sum_{i \in N} \sigma_i u_i v_i^H \quad (4)$$

式中, $\sigma_i$  为矩阵  $\Phi$  的第  $i$  个奇异值, $u_i, v_i$  分别为矩阵的左右特征向量,为列向量,上标 H 表示矩阵的共轭转置, $\sigma_i u_i v_i^H$  为所对应的第  $i$  个子空间矩阵; $W, T, N$  分别为墙体子空间,目标子空间以及噪声子空间的奇异值集合.

信号矩阵  $\Phi$  经过奇异值分解后,较大的奇异值  $\sigma_i$  所对应的子空间矩阵往往包含了矩阵的大部分信息,那些较小的奇异值  $\sigma_i$  所对应的子空间矩阵则包含了少量的矩阵信息.在穿墙雷达接收雷达波信号矩阵中,墙体反射波往往占据有主导地位,可以由较大的奇异值所对应的矩阵来描述墙体子空间,而目标回波信号则相对较弱,各天线处的噪声不具有相关性,因此可以由其余较小奇异值所对应的矩阵来描述目标子空间与噪声子空间.

相比于墙体,目标奇异值的分布规律要复杂的多,由

于目标数量、位置的不同,回波矩阵也会不同,因此奇异值分解后的奇异值大小和所对应的基向量也会不同.图2给出了没有墙体时不同目标位置下的奇异值分布情况,对于远离墙体目标,各个位置天线收到的目标回波时延相差较小,因此回波矩阵进行奇异值分解后,奇异值的分布规律比近墙目标较集中<sup>[11]</sup>.当目标数增多时,根据奇异值的分布规律来判定目标子空间相应变的难以实现.同时,当引入墙体后,目标奇异值也会相应的发生改变,我们根据文献[8]假设墙体子空间由第一个奇异值所表征,对比了在有无墙体时的目标奇异值分布规律,如图3所示.可以看出,表征目标子空间的奇异值随着墙体的引入产生了较大变化,这是因为墙体信号不仅仅被分解到了第一个基向量上,同时也被分解到了表征目标的基向量上,导致这些基向量所对应的奇异值大小发生了变化.传统的子空间技术仅仅采用第一个较大的奇异值或者估计前  $n$  个奇异值来表征墙体子空间必然会导致较大的误差,影响目标成像效果.

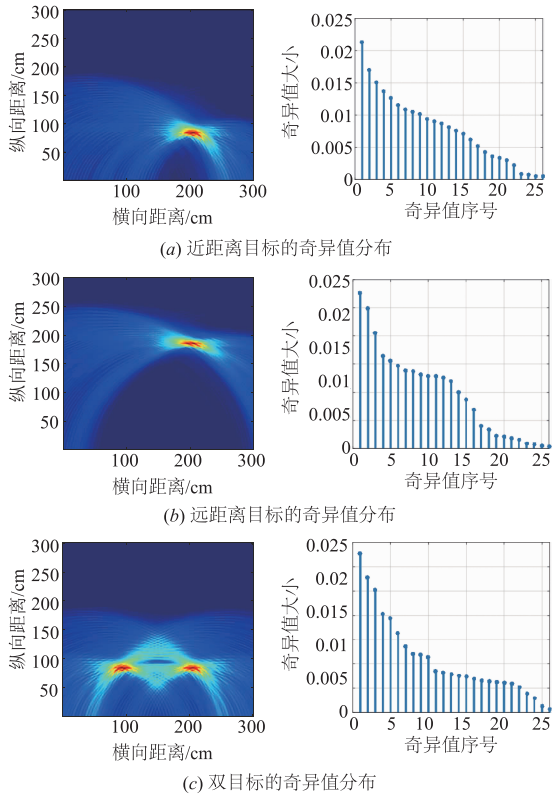


图2 无墙体时不同目标数量位置的奇异值

### 3.2 基于奇异向量的墙体子空间筛选技术

由于墙体子空间与目标子空间并非完全独立而是相互影响关联的,所以本文将式(4)重新写为如下形式:

$$\Phi = \sum_{i=1}^n \sigma_i \cdot \mathbf{u}_i \cdot \mathbf{v}_i^H = \sum_{i=1}^n \sigma_i \cdot \begin{bmatrix} u_{1,i} \\ \vdots \\ u_{M,i} \end{bmatrix}_{M \times 1} \cdot \mathbf{v}_i^H$$

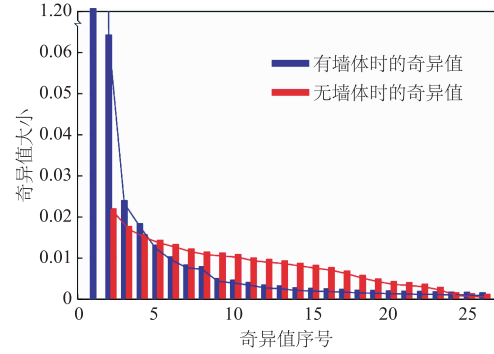


图3 墙体对目标奇异值的影响

$$= \underbrace{\begin{bmatrix} \sigma_1 \mathbf{u}_{1,1} \mathbf{v}_1^H \\ \vdots \\ \sigma_1 \mathbf{u}_{M,1} \mathbf{v}_1^H \end{bmatrix}}_{i \in W} + \underbrace{\begin{bmatrix} \sigma_2 \mathbf{u}_{1,2} \mathbf{v}_2^H \\ \vdots \\ \sigma_2 \mathbf{u}_{M,2} \mathbf{v}_2^H \end{bmatrix}}_{i \in \Theta} + \cdots + \underbrace{\begin{bmatrix} \sigma_n \mathbf{u}_{1,n} \mathbf{v}_n^H \\ \vdots \\ \sigma_n \mathbf{u}_{M,n} \mathbf{v}_n^H \end{bmatrix}}_{i \in T, N} \quad (5)$$

式中,  $n$  为奇异值的个数,  $i = 1, 2, \dots, n$ .  $W, T, N$  分别表示墙体, 目标, 噪声子空间,  $\Theta$  为同时包含有墙体信息与目标信息的子空间.

根据  $i$  所属的空间, 可以分为 3 种情况讨论:

(1) 当  $i \in W$  时, 对于均匀墙体, 天线在各个位置所接收到的墙体反射回波信号几乎相同, 设各个天线处的墙体回波信号为  $R_{m,w}$ .  $\mathbf{u}_i$  为墙体子空间  $\Phi_W$  的左奇异向量, 可由  $\Phi_W \Phi_W^H$  的特征值求出.  $\Phi_W \Phi_W^H$  可以写为:

$$\begin{aligned} (\Phi_W \Phi_W^H) &= \begin{bmatrix} R_{1,w} \\ \vdots \\ R_{M,w} \end{bmatrix} \cdot [R_{1,w}^H, R_{2,w}^H, \dots, R_{M,w}^H] \\ &= \begin{bmatrix} \sum R_{1,w} R_{1,w} & \cdots & \sum R_{1,w} R_{M,w} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \sum R_{M,w} R_{1,w} & \cdots & \sum R_{M,w} R_{M,w} \end{bmatrix} \quad (6) \end{aligned}$$

$\sum R_{i,w} R_{j,w}$  为两个天线回波信号的互相关, 表明了各回波信号间的相关性, 因为  $R_{1,w} \approx R_{2,w} \approx R_{M,w}$ , 所以可得  $\sum R_{1,w} R_{1,w} \approx \sum R_{1,w} R_{2,w} \approx \cdots \approx \sum R_{M,w} R_{M,w}$ .

对  $\Phi_W \Phi_W^H$  进行特征值分解, 即:

$$\begin{bmatrix} \sum R_{1,w} R_{1,w} & \cdots & \sum R_{1,w} R_{M,w} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \sum R_{M,w} R_{1,w} & \cdots & \sum R_{M,w} R_{M,w} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{u}_i = \lambda \cdot \mathbf{u}_i \quad (7)$$

将矩阵  $\Phi_W \Phi_W^H$  中元素重新用  $a_{ij}$  表示,  $\mathbf{u}_i$  写成列向量形式, 式(7)可以重写为:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1M} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{M1} & a_{M2} & \cdots & a_{MM} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{1,i} \\ u_{2,i} \\ \vdots \\ u_{M,i} \end{bmatrix}_{i \in W} = \lambda \cdot \begin{bmatrix} u_{1,i} \\ u_{2,i} \\ \vdots \\ u_{M,i} \end{bmatrix} \quad (8)$$

因为  $a_{11} \approx a_{12} \cdots \approx a_{1M} \cdots \approx a_{MM}$ , 可以推导出  $u_{1,i} \approx$

$u_{2,i} \approx \dots \approx u_{M,i}$ . 这个结论同样也可以由式(5)中墙体子空间矩阵各行向量  $\sigma_i u_{1,i} \mathbf{v}_i^H \approx \sigma_i u_{2,i} \mathbf{v}_i^H \approx \dots \approx \sigma_i u_{M,i} \mathbf{v}_i^H$ , 导出  $u_{1,i} \approx u_{2,i} \approx \dots \approx u_{M,i}$ .

(2) 当  $i \in T, N$  时, 由于目标相对于不同位置的天线回波时延不同, 因此子空间矩阵中各行向量也不同, 此时各天线处的目标回波  $R_{m,T}$  并不相同, 互相关后矩阵中元素  $a_{ij}$  互不相同, 所以此时对于式(8), 并不存在  $u_{1,i} \approx u_{2,i} \approx \dots \approx u_{M,i}$  这种关系.

(3) 当  $i \in \Theta$  时, 此时的回波信号  $R_{M,\Theta}$  由墙体回波与目标回波共同构成, 当目标回波占据主导地位时, 各天线处的回波信号不相同, 相关性较弱; 当墙体回波占据主导地位时, 信号主要由墙体构成, 各信号间相关性较强, 从而  $u_{1,i} \approx u_{2,i} \approx \dots \approx u_{M,i}$ . 因此可以根据  $u_{1,i}, u_{2,i}, \dots, u_{M,i}$  之间的平稳程度来判断子空间  $i$  中主要为墙体信

息还是目标信息.

定义左奇异向量  $\mathbf{u}_i = [u_{1,i}, u_{2,i}, \dots, u_{M,i}]^T$  中  $M$  个元素的方差为  $s_i^2$ , 当  $s_i^2$  小于某一阈值  $s_d$  时, 我们认为此时左奇异向量  $\mathbf{u}_i$  较平稳,  $i$  所对应的子空间主要为墙体信息, 因此划分为墙体子空间. 阈值  $s_d$  由下式计算:

$$s_d = \mu - \alpha \cdot \sigma \quad (9)$$

式中,  $\mu, \sigma$  分别为左奇异向量  $s_i^2, i = 1, 2, \dots, n$  的均值与标准差.  $\alpha$  为系数, 本文根据使成像改善因子 (Improvement Factor, IF)<sup>[11]</sup> 最大来选取  $\alpha$  值, 当  $\alpha$  等于 0 时, 阈值  $s_d$  即为  $s_i^2$  的均值.  $i$  的划分依据如下:

$$\begin{cases} i \in T, N & s_i^2 > s_d \\ i \in W & s_i^2 < s_d \end{cases} \quad (10)$$

综上所述, 本文采用的墙杂波抑制算法如图 4 所示.

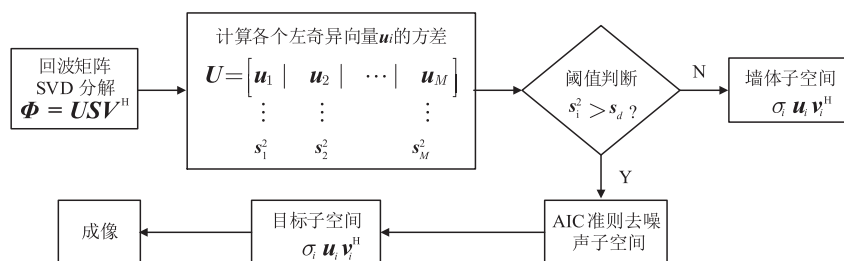


图4 墙体子空间划分技术流程图

## 4 实验验证与结果分析

### 4.1 仿真验证

在仿真验证部分, 本文采用时域有限差分 (FDTD) 技术进行雷达回波的仿真, FDTD 技术被证明是一种有效并且准确的方法, 广泛的应用于电磁仿真中<sup>[14]</sup>. 实验场景如图 5 所示, 发射天线与接收天线相距 30cm, 沿墙面水平移动 26 次, 每次 0.1m, 墙体厚 0.3m, 相对介电常数 4.5. 成像区域 3m × 5m, 每像素 1cm × 1cm. 天线  $x_{t,m}$  发射经过载波调制的 M 序列, 载波频率 1.5GHz, M 序列每周期共 1023 位, 频率 1.023GHz. 墙体后方有 6 个目标, 分别位于 P1 (1.7m, 0.3m), P2 (2.5m, 1.0m), P3 (1.0m, 2.0m), P4 (1.3m, 2.0m), P5 (1.5m, 3.0m), P6 (2.5m, 4.0m) 处.

天线在每个位置接收到的回波信号构成回波矩阵, 对回波矩阵进行 SVD 分解, 计算每个左奇异向量的方差, 如图 6 所示.

图 7 分别给出了根据方差划分后的目标子空间与墙体子空间奇异值, 可以看出, 此时墙体子空间由第 1, 2, 4, 6 个奇异值所对应的子空间所表征.

本文采用后向投影 (Back Projection, BP) 技术进行成像<sup>[15]</sup>, 结果如图 8 所示, (a) 图为未经墙体杂波抑制的成像结果, 可以看到强烈的墙体回波信息, 这种情况

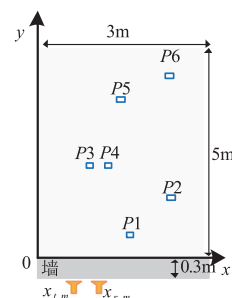


图5 实验场景模型

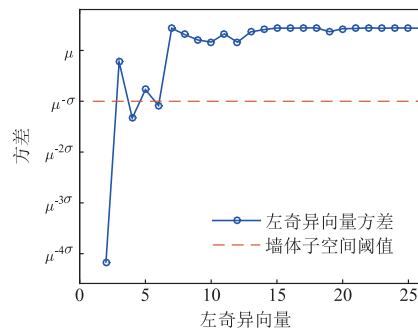


图6 左奇异向量方差

下, 目标并不可见. (b) 图为背景消去法抑制墙体杂波干扰, 背景消去法具有理想的墙体杂波抑制能力, 但是这种方法需要提前测量没有目标时的场景回波信息,

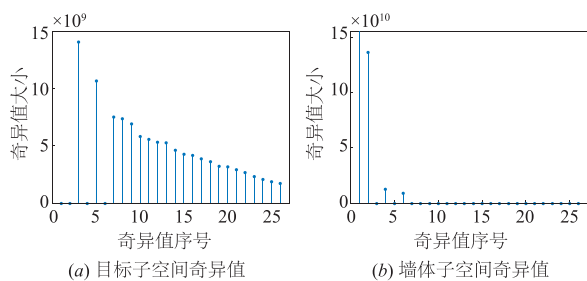


图7 目标与墙体子空间所对应的奇异值

在实际中往往难以实现。(c)图为对回波信息进行SVD分解,去除第1个子空间后的成像结果,可以看出此时目标虽然可见但是残留有部分墙体回波信息。(d)图为应用本文所提出的方法,去除第1,2,4,6个子空间后的成像结果,此时墙体杂波基本被抑制干净,目标成像清晰。

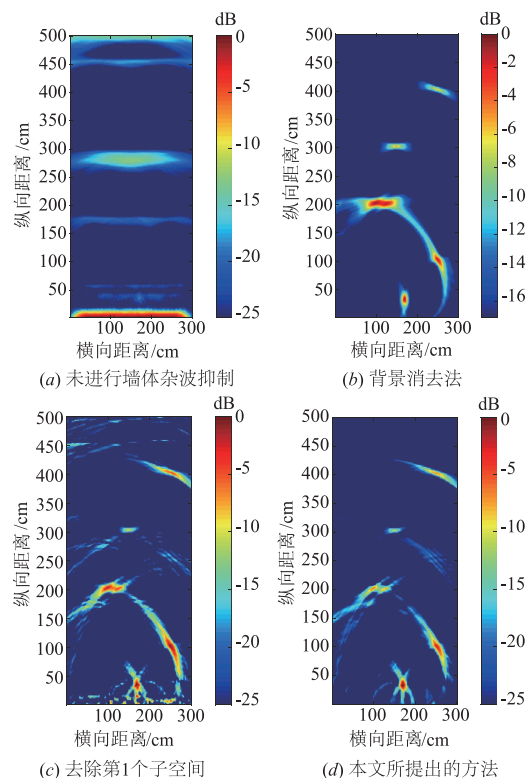


图8 目标成像结果对比

由于在去除的墙体子空间中同时也包含有少量的目标回波信息,因此在最后的成像中,目标图像的绝对亮度会减弱,但目标相对于非目标区域杂波的相对亮度会得到增强,即目标在杂波背景中会更明显.为了定量的给出经过杂波抑制后目标图像的改善情况,本文分别计算了不同成像方法下的目标图像的改善因子.改善因子IF定义为<sup>[11]</sup>:

$$IF = 10 \log_{10} \left( \frac{TCR_0}{TCR_i} \right) \quad (11)$$

其中, $TCR_0$ 为利用墙体杂波抑制技术抑制杂波后的目标杂波比(target-to-clutter ratio), $TCR_i$ 为未使用任何抑波技术的原始图像目标杂波比.图像的目标杂波比由下式计算<sup>[16]</sup>:

$$TCR = \frac{\frac{1}{N_t} \sum_{(x,y) \in A_t} |I(x,y)|^2}{\frac{1}{N_c} \sum_{(x,y) \in A_c} |I(x,y)|^2} \quad (12)$$

式中, $A_t$ 为目标区域; $A_c$ 为去除目标区域后的全部成像区域; $N_t$ 与 $N_c$ 分别为目标区域和杂波区域的成像像素点数; $I(x,y)$ 为成像区域坐标 $(x,y)$ 处的图像幅值.

我们同时对比了传统子空间技术在去除前 $n$ 个子空间后,与本文所提出方法的改善因子,如表1所示.其中背景消去法作为一种理想的杂波抑制技术拥有11.74dB的目标图像改善能力,而传统的子空间技术随着去除子空间的增多缓慢增大,当去除前5个子空间时候,改善因子达到峰值9.07dB,随后开始下降.本文所提出的方法,通过对墙体子空间的筛选,IF可以达到9.51dB,具有很好的墙体杂波抑制能力.

表1 目标图像的改善因子对比

杂波抑制技术	改善因子(IF)
背景消去法	11.74 dB
所提出的方法	9.51 dB
去除第1个子空间	5.35dB
去除前2个子空间	8.26 dB
去除前3个子空间	8.34 dB
去除前4个子空间	8.75 dB
去除前5个子空间	9.07 dB
去除前6个子空间	8.63 dB

## 4.2 实测数据验证

本文采用维拉诺瓦大学雷达成像实验室<sup>[18]</sup>的实测数据进行实验验证.实验场景如图9所示,墙体后方共有9个目标,目标参数如表2所示.采用中心频率2.5GHz,带宽1GHz的频率步进雷达对墙体后方目标进行探测,天线距离墙体1.27cm,沿墙面水平移动69次,每次移动间隔0.22m.



图9 实验场景

表 2 墙后目标参数与数量

目标	数量
7.6cm 三面反射体, RCS = -20.6 dBsm	3
15.2cm 三面反射体, RCS = -8.5 dBsm	1
30.5cm 二面反射体, RCS = 11.3 dBsm	3
15.2cm 英寸球体, RCS = -11.4 dBsm	1
12cm 宽, 51cm 高圆柱体	1

成像结果与图像改善因子分别如图 10 与表 3 所示. 图(a)为未经过杂波抑制的原始图像. 图(b)为背景消去法抑制墙体杂波, 墙体后方 9 个目标清晰可见, 具有 14.91dB 的目标图像改善能力. 图(c)为采用穿墙成像增强技术<sup>[8]</sup>对回波信息进行 SVD 分解, 去除第 1 个子空间与噪声子空间后的成像结果, 图中仅可见几个雷达散射截面较大的目标图像, 具有 6.18dB 的图像改

善能力. 图(d)为利用 Qtsu 方法和 AIC 准则分别确定墙体与噪声子空间, 将原始矩阵投影到墙体正交子空间与噪声正交子空间后所得到的图像<sup>[13]</sup>, 图中有较多的杂波残留, 具有 9.62dB 的图像改善能力. 图(e)为应用文献[17]中的方法, 所得到的图像, 图像改善能力 11.59dB, 具有优良的成像效果. 文献[13]与[17]对回波信号进行了平均消去的预处理, 在一定程度上造成了目标信号的减弱. 图(f)为应用本文所提出的方法, 去除第 1, 2, 3, 5 个子空间与噪声子空间后的成像结果, 相比于图(e), 个别目标更加清晰, 并且近墙体处的杂波抑制更加干净, 此时墙体杂波基本被抑制干净, 具有 12.16dB 的图像改善能力. 因此, 相比于其它方法, 本文提出的方法具有优良的杂波抑制能力.

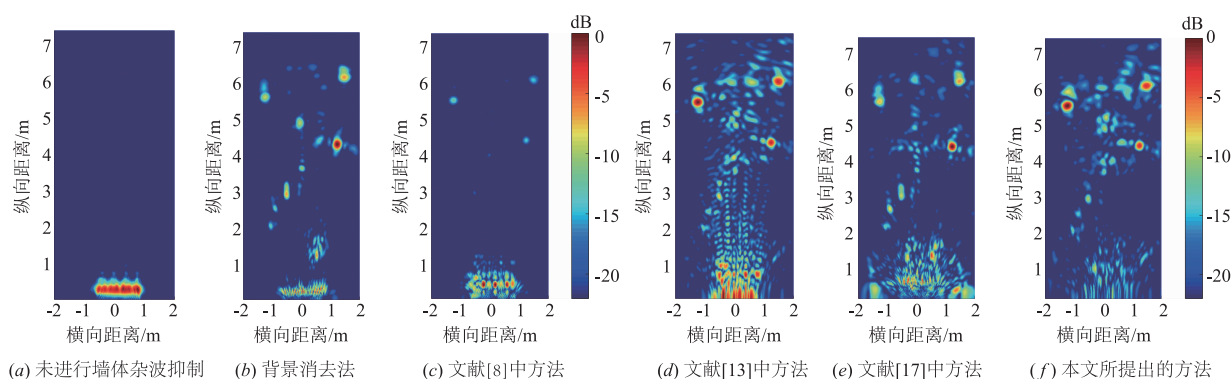


图 10 实测数据目标成像结果

表 3 实测数据目标图像改善因子

杂波抑制技术	改善因子 (IF)
背景消去法	14.91 dB
所提出的方法	12.16 dB
文献[17]中方法	11.59 dB
文献[13]中方法	9.62 dB
文献[8]中方法	6.18 dB

## 5 结论

本文提出了一种基于左奇异向量的墙体子空间划分技术, 在穿墙探测雷达成像中, 首先对各天线所构成的原始回波信号矩阵进行 SVD 分解, 然后根据各个左奇异向量的平稳度来确定该子空间中的主要成分并划分出墙体子空间, 最后对目标子空间进行成像. 实验结果表明, 对于均匀墙体, 该方法对墙体子空间的确定更加精细准确, 有效的抑制了目标信号中的墙体信息干扰. 相比于现有的其它墙体杂波抑制方法, 该方法增强了目标图像的改善效果, 同时具有优良的抗噪性能.

### 参考文献

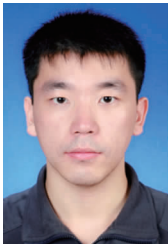
[1] AHMAD F, QIAN J, AMIN M G. Wall clutter mitigation

using discrete prolate spheroidal sequences for sparse reconstruction of indoor stationary scenes[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(3): 1549-1557.

- [2] ZHANG X H, XI X L, LI M C, et al. Comparison of impulse radar and spread-spectrum radar in through-wall imaging[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2016, 64(3): 699-706.
- [3] 张华美, 张业荣, 王芳芳. 墙体参数未知时的穿墙雷达实时成像方法[J]. 电子学报, 2016, 44(7): 1613-1618. ZHANG Hua-mei, ZHANG Ye-rong, WANG Fang-fang. A real-time approach for through-the-wall imaging under unknown wall characteristics[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(7): 1613-1618. (in Chinese)
- [4] SOLIMENE R, CUCCARO A. Front wall clutter rejection methods in TWI[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(6): 1158-1162.
- [5] 张澜子, 陆必应, 周智敏, 等. 基于空间特征的 MIMO 穿墙雷达杂波抑制[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(4): 946-952. ZHANG Lan-zi, LU Bi-ying, ZHOU Zhi-min, et al. A wall clutter suppression method based on spatial signature in

- MIMO through-the-wall radar imaging[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(4): 946–952. (in Chinese)
- [6] WANG W, LU B Y, QIU L, et al. A modified adaptive sidelobe reduction method for through-the-wall radar imaging[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 13(9): 1255–1259.
- [7] TIVIVE F, BOUZERDOUM A, AMIN M G. An SVD-based approach for mitigating wall reflections in through-the-wall radar imaging[A]. *IEEE Radar Conference*[C]. Kansas City, MO, USA: IEEE, 2011. 519–524.
- [8] RIAZ M M, GHAFOR A. Through-wall image enhancement based on singular value decomposition[J]. *International Journal of Antennas & Propagation*, 2012, 2012(4): 175–195.
- [9] CHEN X, XUE S J, FENG D, et al. A new wall clutter reduction strategy for through wall radar imaging[A]. *12th International Conference on Signal Processing*[C]. Hangzhou, China: IEEE, 2014. 2102–2105.
- [10] AHMAD F, AMIN M G, KASSAM S, et al. A wideband, synthetic aperture beamformer for through-the-wall imaging[A]. *IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology*[C]. Boston, MA, USA: IEEE, 2003. 187–192.
- [11] TIVIVE F, BOUZERDOUM A, AMIN M G. A subspace projection approach for wall clutter mitigation in through-the-wall radar imaging[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(4): 2108–2122.
- [12] TIVIVE F H C, AMIN M G, BOUZERDOUM A. Wall clutter mitigation based on eigen-analysis in through-the-wall radar imaging[A]. *17th International Conference on Digital Signal Processing*[C]. Corfu, Greece: IEEE, 2011. 1–8.
- [13] 倪裕豪, 倪国新, 孙晓闻, 等. 基于子空间投影 SVD 的 MIMO 穿墙雷达杂波抑制方法[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 2016, 52(6): 1146–1153.
- NI Yu-hao, NI Guo-xin, SUN Xiao-wen, et al. An SVD method for clutter mitigation in MIMO through-the-wall radar imaging based on subspace projection[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2016, 52(6): 1146–1153.
- [14] ZHANG X H, XI X L, LI M C, et al. Comparison of spread spectrum radar and impulse radar for through-wall imaging based on FDTD[A]. *IEEE International Wireless Symposium (IWS)*[C]. Shenzhen, China: IEEE, 2015. 1–4.
- [15] ULANDER L, HELLSTEN H, STENSTROM G. Synthetic-aperture radar processing using fast factorized back-projection[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2003, 39(3): 760–776.
- [16] CHEN X, CHEN W D. Clutter reduction based on coefficient of variation in through-wall radar imaging[A]. *IEEE Radar Conference (RadarCon13)*[C]. Ottawa, ON, Canada: IEEE, 2013. 1–4.
- [17] TIVIVE F H C, BOUZERDOUM A. An improved SVD-based wall clutter mitigation method for through-the-wall radar imaging[A]. *IEEE 14th Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*[C]. Darmstadt, Germany: IEEE, 2013. 430–434.
- [18] DILSAVOR R, AILES W, RUSH P, et al. Experiments on wideband through-the-wall imaging (invited paper)[A]. *SPIE Defense and Security Symposium*[C]. Orlando, Florida, USA: SPIE, 2005. 196–209.

#### 作者简介



郑 晨 男, 1988 年生于陕西西安. 现为西安理工大学自动化与信息工程学院在读博士, 研究方向为穿墙雷达成像、全球导航定位接收机.

E-mail: zhengchen001@126.com



席晓莉 女, 1967 年生于陕西西安. 现为西安理工大学教授、博士生导师. 研究方向为电磁理论与数值计算、无线接收与抗干扰技术等.

E-mail: xixiaoli@xaut.edu.cn