

基于左奇异向量熵值分析的穿墙雷达杂波抑制算法

朱骥伦¹ 齐恒源¹ 徐沛航¹
ZHU Jilun QIAN Hengyuan XU Peihang

摘要

在穿墙雷达成像中，回波数据由天线耦合波、墙体杂波、噪声与目标回波组成，其中墙体杂波干扰严重，严重影响目标成像效果。基于子空间投影 SVD 对回波信号矩阵进行奇异值分解后去除墙体子空间，可以有效抑制墙体杂波干扰，在穿墙雷达成像中具有广泛的应用。针对回波信号难以划分目标子空间与墙体子空间的问题，通过对目标散射信号与墙杂波信号左奇异向量特征的深入分析，提出一种基于奇异值分解的墙杂波抑制方法。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信息熵值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，所提出的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抑制能力，改善了墙后目标的成像质量。

关键词

穿墙雷达；杂波抑制；奇异值分解；子空间投影；统计信号处理

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.08.004

0 引言

穿墙雷达通过穿透墙体向目标发射电磁波来探测墙后目标，目前已经广泛应用于城市巷战^[1]、地震救援^[2]及安全检查^[3]等各个领域。在穿墙雷达探测中，回波信号包含墙体回波、噪声回波与目标回波，且目标回波由于电磁波折射、反射、衰减而十分微弱，目标回波往往被墙体强回波信号淹没，直接成像效果很差，因此国内外许多学者展开了大量研究。

近年来，具有代表性的方法为背景消去法^[4]、低秩联合稀疏重构法^[5-6]、空域滤波法^[7]以及基于统计信号处理的方法^[8-11]。其中，背景消去法需要较强的先验信息，这在实际应用中难以实现；低秩联合稀疏重构法在 MIMO 机制下不能满足低秩特性而失效；空域滤波法基于单发单收天线阵列体制，根据目标与墙体回波空间频谱特性进行区分，但实际应用中目标回波和墙体回波的空间谱在零频附近公共频带展宽，造成严重的目标损耗。基于统计信号处理如主成分分析(PCA)、独立成分分析(ICA)、因子分析(FA)以及奇异值分解(SVD)得到了较为广泛的应用^[12-13]。其中，PCA 和 SVD 计算复杂度低，且不需要先验信息，因此应用最多，ICA 利用高阶统计量将数据分解为互相独立的新分量，获得了最优的抑制效果，但算法较为复杂。基于统计信号处理的方法通常具有一个问题：如何确定门限值。本文提出一种基于 SVD 左奇异向量熵值的穿墙雷达杂波抑制算法，该算法将 SVD 左奇异向量熵值作为区分墙体子空间与目标子空间的评判标准，经过实验证，适用于 SAR 天线阵列体制和 MIMO^[14-15]阵列体制，

具有较好的杂波抑制效果，能够有效改善成像质量。

1 穿墙雷达信号模型

目前使用最多的两种雷达天线体制分别是 SAR 和 MIMO，其中 SAR 体制通过单个收发天线移动来形成合成孔径进行成像；MIMO 体制使用多个发射天线和接收天线形成多发多收模式，能够在短时间内获取大量数据。

1.1 SAR 体制的穿墙雷达信号模型

SAR 体制的穿墙雷达模型是一个收发天线平行于墙体表面进行水平移动，天线发射步进频率信号^[16]，共在 N 个位置发射 M 个频率的步进频率信号。

穿墙雷达接收到的回波分为三部分，分别是墙体回波、目标回波和噪声回波。雷达系统在第 N 个位置的第 M 个频点接收到的回波信号表示为：

$$S_{N,M} = S_{N,M}^w + S_{N,M}^t + S_{N,M}^v \quad (1)$$

式中： $S_{N,M}^w$ 为墙体回波信号， $S_{N,M}^t$ 为目标回波信号， $S_{N,M}^v$ 为噪声回波信号。

墙体的回波信号可以表示为：

$$S_{N,M}^w = \sigma_w \cdot \exp(-j2\pi f_m \tau_w) \quad (2)$$

式中： σ_w 为墙体的反射系数， f_m 为第 N 个天线测量位置处的第 M 个频点， τ_w 为该位置到墙体之间的双程时延。天线平行于墙体水平移动，因此在测量过程中，在各个天线测量位置到墙体之间的双程时延都相等，即 τ_w 是一个常数。天线各测量位置处各频点得到的回波时延都相等，具有较强的相关性，即 $S_{1,M}^w = S_{2,M}^w = \dots = S_{N,M}^w$ 。

目标回波信号可以表示为：

1. 航空工业西安航空计算技术研究所 陕西西安 710065

$$S_{N,M}^t = \sum_{i=1}^P \sigma_p \cdot \exp(-j2\pi f_M \tau_{N,p}) \quad (3)$$

式中: P 为成像区域点目标的总个数, σ_p 表示第 P 个目标的散射系数, $\tau_{N,p}$ 为第 P 个目标在第 N 个天线测量位置的双程回波传输时延, $\tau_{N,p}$ 可以表示为:

$$\tau_{N,p} = \frac{2d_{air1}}{c} + \frac{2d_{air2}}{c} + \frac{2d_{wall}}{v_{wall}} \quad (4)$$

式中: c 表示光速, d_{air1} 表示天线到墙体前表面距离, d_{air2} 表示墙体后表面到目标距离, d_{wall} 表示电磁波在墙体内部传输距离, v_{wall} 表示电磁波在墙体内部传输速度。 d_{air1} 、 d_{air2} 、 d_{wall} 随天线位置和目标位置变化而不断变化, 因此目标的回波信号矩阵不具有相关性且为一个高秩矩阵。

1.2 MIMO 体制的穿墙雷达信号模型

MIMO 体制的穿墙雷达模型包含 M 个发射阵元, N 个接收阵元, 每个发射阵元发射的步进频率信号经过传输由每个接收阵元接收。

第 m 个发射阵元发射的第 M 个频点的信号经过传输, 由第 n 个接收阵元接收到的回波信号表示为:

$$S_{m,n,M}^w = S_{m,n,M}^w + S_{m,n,M}^t + S_{m,n,M}^v \quad (5)$$

式中: $S_{m,n,M}^w$ 为墙体回波信号, $S_{m,n,M}^t$ 为目标回波信号, $S_{m,n,M}^v$ 为噪声回波信号。

墙体回波信号 $S_{m,n,M}^w$ 可表示为:

$$S_{m,n,M}^w = \sigma_w \cdot \exp(-j2\pi f_M \tau_{m,n}) \quad (6)$$

式中: τ_w 为信号由第 m 个天线发射, 经过墙体反射到达第 n 个天线的时延, $S_{m,n,M}^w$ 具有一定的对称性, 即:

$$S_{m,n,M}^w = S_{n,m,M}^w \quad (7)$$

因此, 墙体回波信号具有一定的相关性。

目标回波信号 $S_{m,n,M}^t$ 可表示为:

$$S_{m,n,M}^t = \sum_{i=1}^P \sigma_p \cdot \exp(-j2\pi f_M \tau_{m,n,p}) \quad (8)$$

式中: $\tau_{m,n,p}$ 表示由第 m 个天线发射, 到达第 P 个点目标后, 由第 n 个天线接收的时延, $\tau_{m,n,p}$ 可以表示为:

$$\tau_{m,n,p} = \frac{d_{m,w}}{c} + \frac{d_{w1}}{v_{wall}} + \frac{d_{w,p}}{c} + \frac{d_{p,w}}{c} + \frac{d_{w2}}{v_{wall}} + \frac{d_{w,n}}{c} \quad (9)$$

式中: $d_{m,w}$ 表示第 m 个天线到墙体的距离; d_{w1} 表示信号第一次在墙体中经过的距离; $d_{w,p}$ 表示信号发射时, 穿透墙体后到达第 P 个点目标经过的距离; $d_{p,w}$ 表示信号到达目标后经过目标反射到达墙体的距离; d_{w2} 表示信号第二次在墙体内经过的距离; $d_{w,n}$ 表示信号穿出墙体后到达第 n 个天线经过的距离。 $\tau_{m,n,p}$ 随目标位置、发射天线位置与接收天线位置变化而不断变化, 因此各 $\tau_{m,n,p}$ 之间具有较弱相关性。

将回波信号写成矩阵形式:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{1,1} \\ \vdots \\ \mathbf{B}_{m,n} \end{bmatrix}_{m \times n \times M} \quad (10)$$

式中: m 为发射阵元数量, n 为接收阵元数量, M 为频点数, 因此回波数据可以看作一个信息矩阵。

2 算法原理与实现

2.1 信息熵原理

信息熵用来描述事件的不确定度, 若信息中某个符号出现得越多, 概率越大, 不确定性越小, 信息量越小; 相反, 若信息中某个符号出现得越少, 概率越小, 不确定性越大, 信息量越大^[17]。信息熵的计算公式为:

$$H(X_i) = -\sum_{i=1}^n p(x_i) \log(p(x_i)) \quad (11)$$

式中: $p(x_i)$ 为随机事件 x_i 出现的概率。

可以看出, 信息熵可以度量一个信号的复杂度, 如果一个信号包含的信息种类越多, 那么这个信号的信息熵就越大; 如果一个信号包含的信息种类很少, 此时信号的熵值就较小; 如果一个信号中某个信息出现的概率越靠近 0 或 1 时, 那么这个信息对信息熵的贡献就越小, 反之则称这个信息对信息熵的贡献越大。

2.2 基于 SVD 子空间投影的墙体杂波抑制

穿墙雷达接收到的回波矩阵 \mathbf{B} 经过 SVD 后可以表示为:

$$\mathbf{B} = \mathbf{U} \mathbf{S} \mathbf{V}^H = \sum_{i \in W} \lambda_i \mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^H + \sum_{i \in T} \lambda_i \mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^H + \sum_{i \in N} \lambda_i \mathbf{u}_i \quad (12)$$

式中: \mathbf{U} 表示左奇异矩阵, \mathbf{V} 表示右奇异矩阵, \mathbf{S} 表示奇异值矩阵, W 、 T 、 N 分别表示墙体子空间、目标子空间和噪声子空间的奇异值集合, H 表示矩阵的共轭转置, \mathbf{u}_i 和 \mathbf{v}_i 分别是回波矩阵 \mathbf{B} 的第 i 个左奇异向量和右奇异向量, λ_i 为回波矩阵 \mathbf{B} 的第 i 个奇异值, 按降序排列。对于 SVD 得到的奇异值, 较大的奇异值对应墙体子空间, 较小的奇异值对应目标子空间和噪声子空间。

回波信号经过奇异值分解后, 墙体子空间投影矩阵 \mathbf{P}_w 表示为:

$$\mathbf{P}_w = \sum_{i \in w} \mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^H \quad (13)$$

式中: w 为表征墙体的奇异值集合, \mathbf{u}_i 和 \mathbf{v}_i 分别为对应的左奇异向量和右奇异向量, 上标 H 表示共轭转置。墙体子空间正交子空间上的投影矩阵 \mathbf{P}_w^\perp 表示为:

$$\mathbf{P}_w^\perp = \mathbf{I} - \mathbf{P}_w \mathbf{P}_w^H \quad (14)$$

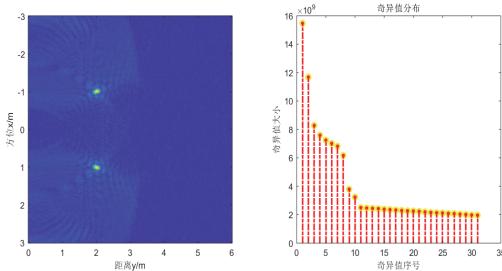
式中: \mathbf{I} 表示单位矩阵, 通过将回波矩阵 \mathbf{B} 投影到墙体子空间正交子空间上进行墙体杂波抑制, 即:

$$\mathbf{B}' = \mathbf{P}_w^\perp \mathbf{B} \quad (15)$$

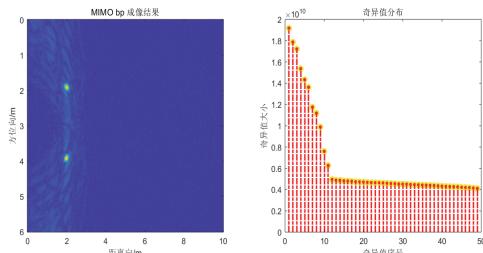
此时, \mathbf{B}' 中只剩余少部分墙体回波信号。

墙体反射信号奇异值具有奇异值较大且分布均匀的特征, 但目标反射信号奇异值特征难以描述, 不同信号体制下对于不同目标数目、不同目标距离, 目标回波信号的奇异值分布均具有不同特征。传统子空间投影技术将前 n 个奇异值表征墙体, 剩余奇异值表征目标^[18-19]。在实际应用中, 由于目标数量、目标距离、阵列体制等因素影响, 墙体子空间并不能够保证只存在于前 n 个基向量, 而是被分解到表征目标

子空间的基向量上，因此墙体子空间与目标子空间呈现一定相关性，不能通过计算门限值而简单选择墙体子空间。

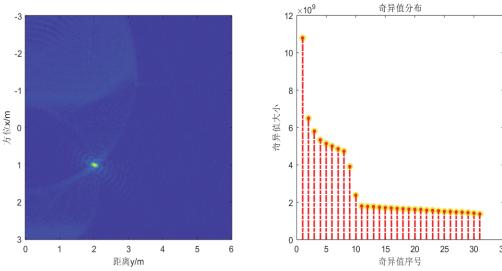


(a) SAR 体制下 2 点目标奇异值分布

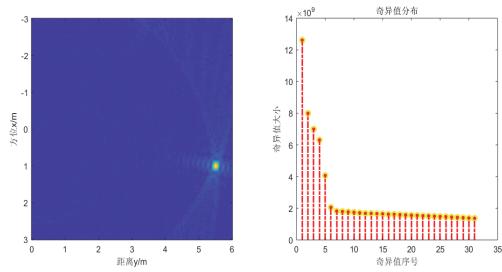


(b) MIMO 体制下 2 点目标奇异值分布

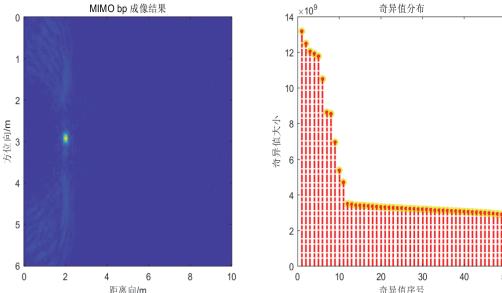
图 1 不同信号体制下奇异值分布



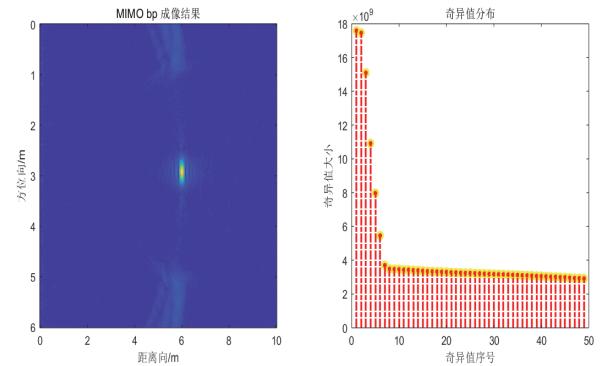
(a) SAR 体制下 近距离目标奇异值分布



(b) SAR 体制下 远距离目标奇异值分布



(c) MIMO 体制下 近距离目标奇异值分布



(d) MIMO 体制下 远距离目标奇异值分布

图 2 不同距离下目标奇异值分布

2.3 基于左奇异数量熵值分析的杂波抑制方法

对于穿墙雷达接收机接收到的回波信号，在SAR体制与MIMO体制下，各天线接收到的墙体回波信号具有一定相关性，而目标的回波信号相关性较弱。针对该特性，本文提出一种基于左奇异数量信息熵值分析的杂波抑制算法，将回波信号 \mathbf{B} 进行SVD表示为：

$$\mathbf{B} = \sum_{i \in W} \lambda_i u_i v_i^H + \sum_{i \in W, T} \lambda_i u_i v_i^H + \sum_{i \in T} \lambda_i u_i v_i^H + \sum_{i \in N} \lambda_i u_i v_i^H \quad (16)$$

式中： $\sum_{i \in W} \lambda_i u_i v_i^H$ 表示表征墙体子空间， $\sum_{i \in W, T} \lambda_i u_i v_i^H$ 表征包含墙体与目标的子空间， $\sum_{i \in T} \lambda_i u_i v_i^H$ 表征目标子空间， $\sum_{i \in N} \lambda_i u_i v_i^H$ 表征噪声子空间。并且有：

$$(\mathbf{B}^T \mathbf{B})v_i = \lambda v_i \quad (17)$$

$$(\mathbf{B} \mathbf{B}^T)v_i = \lambda u_i \quad (18)$$

将 $\mathbf{B}^T \mathbf{B}$ 中所有特征向量用 \mathbf{V} 表示，将 $\mathbf{B} \mathbf{B}^T$ 的所有特征向量用 \mathbf{U} 表示。

当 $i \in W$ 时，墙体子空间回波数据相关性较高，因此存在较低的信息熵，表征在 \mathbf{U} 中即为 $H(\mathbf{u}_i)$ 较低。

当 $i \in W, T$ 时，墙体子空间与目标子空间呈现一定的相关性，此时各左奇异数量 \mathbf{u}_i 的熵值既具有墙体子空间的特征，又具有目标子空间的特征，通过比较 $H(\mathbf{u}_i)$ 与阈值 h 确定子空间 i 属于墙体还是目标。阈值 h 的计算公式为：

$$h = \mu - \alpha \sigma \quad (19)$$

式中： μ 表示各左奇异数量的均值， σ 表示各左奇异数量的方差， α 为修正因子。当 $H(\mathbf{u}_i) < h$ 时，认为 $i \in W$ ，否则认为 $i \in T$ 。

当 $i \in T$ 时，各点目标回波数据相关性较低，因此信息熵较高，表征在 \mathbf{U} 中即为 $H(\mathbf{u}_i)$ 较高。

当 $i \in N$ 时，表征为噪声子空间，噪声子空间常用赤池信息准则（AIC）方法^[20]或最小描述长度（MDL）方法来确定。

综上所述，本文所采用的基于左奇异数量熵值分析的杂波抑制算法流程图如图3所示。

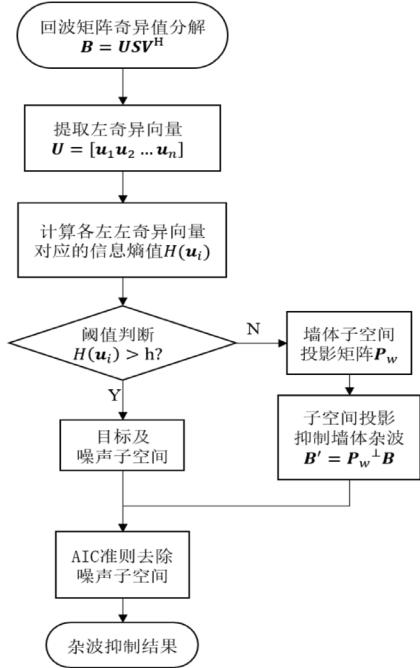


图 3 算法流程图

3 仿真结果与分析

本节针对所提出算法通过 MATLAB 仿真软件进行实验验证，同时对 SAR 和 MIMO 阵列体制下的穿墙雷达墙体杂波抑制算法进行仿真验证，仿真验证所采用的成像方法为后向投影（back projection, BP）成像算法。

3.1 SAR 体制下算法验证

成像区域设置为 $6 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ ，用点目标进行验证；共均匀设置 3 个测量点，点目标坐标分别为 (1,3)、(3,8)、(4,1)，天线距墙体的垂直距离为 0.2 m；系统采用步进频率信号，频率范围为 1 ~ 3 GHz，步长为 1 MHz；墙体厚度为 0.2 m，相对介电常数为 6.0，阵列距离墙体 0.2 m。具体仿真参数如表 1 所示，天线阵列平行墙体表面放置，共在 31 个位置发射并采集信号，天线在区间 [1.5 m, 4.5 m] 均匀放置。SAR 体制下回波信号左奇异向量熵值分布如图 4 所示，回波信号奇异值分布如图 5 所示。成像结果对比如图 6 所示。

表 1 SAR 体制下仿真参数表

参数	表示符号	参数数值
起始频率	f_0	1 GHz
终止频率	f_M	3 GHz
步长	Δf	1 MHz
频点个数	N_f	201
扫描点数	N_a	31
距离向网格数	W_x	256
方位向网格数	W_y	256
墙体厚度	d_w	0.2
天线距墙体距离	d_a	0.2

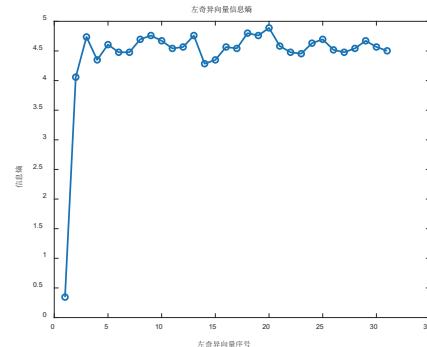
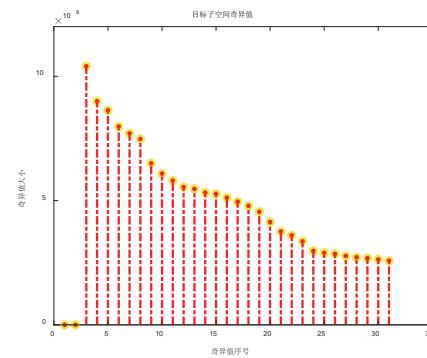
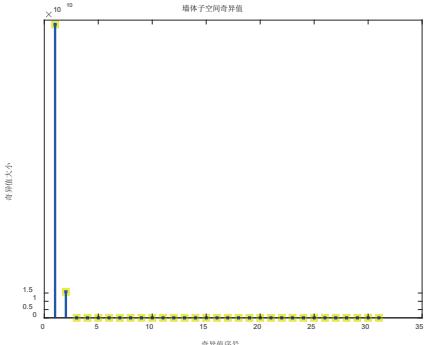


图 4 回波信号左奇异向量信息熵值

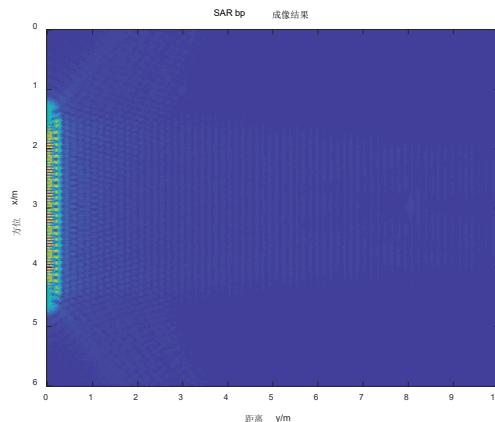


(a) 目标子空间奇异值分布

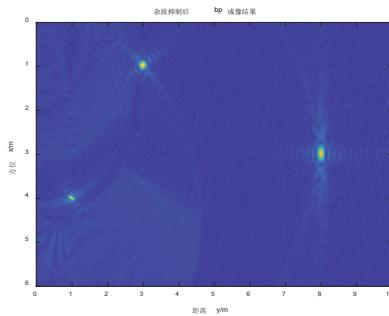


(b) 墙体子空间奇异值分布

图 5 回波信号奇异值分布

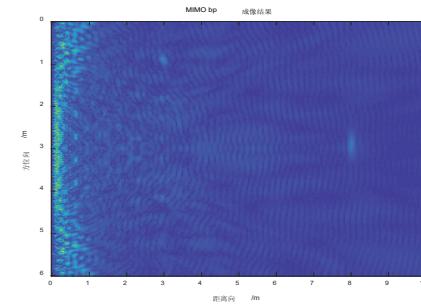


(a) 未经杂波抑制成像结果图



(b) 杂波抑制成像结果图

图 6 成像结果对比



(a) 未经杂波抑制成像结果图

3.2 MIMO 体制下算法验证

MIMO 模式除天线阵列设置不同外，其他参数设置均相同。MIMO 模式下设置 7 个发射天线和 7 个接收天线，在区间 [0 m, 3 m] 内均匀放置，接收天线在区间 [3 m, 6 m] 内均匀放置，回波信号左奇异向量信息熵值如图 7 所示，回波信号奇异值分布如图 8 所示，成像结果对比如图 9 所示。

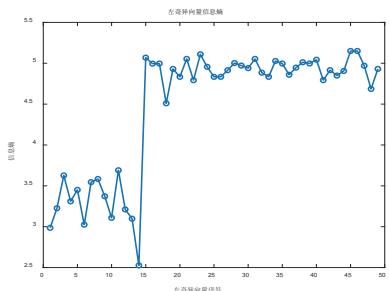
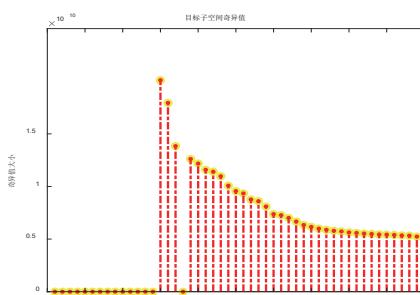
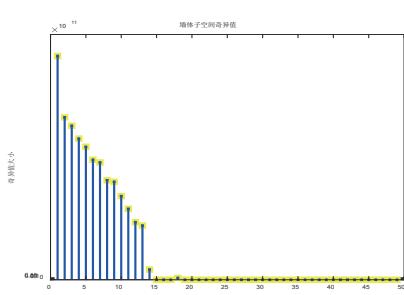


图 7 回波信号左奇异向量信息熵值

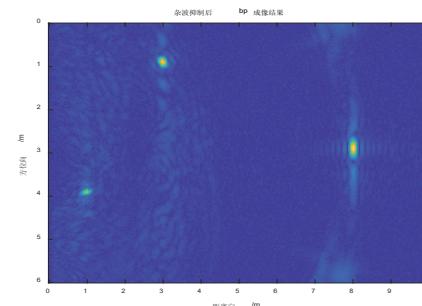


(a) 目标子空间奇异值分布



(b) 墙体子空间奇异值分布

图 8 回波信号奇异值分布



(b) 杂波抑制成像结果图

图 9 成像结果对比

3.3 性能评估

根据仿真实验可以看出，本文所提出的基于左奇异向量熵值分析的杂波抑制方法具有较好的效果，为进一步定量分析算法性能，使用目标杂波比（target to clutter ratio, TCR）进行分析。

图像的目标杂波比由下式计算：

$$\text{TCR} = \frac{\frac{1}{N_t} \sum_{(x,y) \in A_t} |I(x,y)|^2}{\frac{1}{N_c} \sum_{(x,y) \in A_c} |I(x,y)|^2} \quad (20)$$

式中： A_t 表示目标区域， A_c 表示除目标区域外的背景区域， N_t 表示目标区域的成像像素点数， N_c 表示背景区域的成像像素点数， $I(x,y)$ 为像素点 (x,y) 处的幅值。

分别计算 SAR 和 MIMO 阵列体制下的不同墙体杂波抑制技术的目标杂波比，结果如表 2 所示。从表中数据可以看出，本文所提出的方法在两种信号体制下均具有良好性能，且两种体制下成像目标杂波比与背景对消法较为相近。

表 2 目标杂波比对比

杂波抑制技术	SAR 体制下 TCR/dB	MIMO 体制下 TCR/dB
原始回波数据直接成像	18.526 4	10.421 3
背景对消法	30.359 9	24.512 2
本文提出的方法	24.018 6	24.195 8
去除前 1 个子空间	23.743 8	4.615 9
去除前 2 个子空间	24.018 6	4.928 1
去除前 3 个子空间	23.428 7	4.957 4
去除前 4 个子空间	23.731 8	5.221 6
去除前 5 个子空间	19.543 7	6.771 9

4 结论

本文主要针对 SAR 和 MIMO 两种体制下基于 SVD 的穿墙雷达杂波抑制算法难以划分墙体子空间的问题，提出了一种基于子空间投影的奇异值分解算法，根据信号矩阵左奇异向量信息熵值特征判断墙体子空间，实现了抑制墙体杂波的问题，提高了成像质量，取得了良好效果。在 MATLAB 仿真软件中，根据不同天线阵列体制设计了不同的成像场景，验证了算法的有效性，并与背景对消法等方法进行了比较。仿真结果表明，本文提出的方法的处理结果接近于理想情况下背景对消法的处理结果，能够有效抑制墙体杂波。

参考文献：

- [1] NOKWARI P K M, SINHA S, FERREIRA H C. Through-the-Wall radar imaging: a review[J]. IETE technical review, 2018, 35(6): 631-639.
- [2] BARANOSKI E J. Through wall imaging: historical perspective and future directions[C]//2008 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, v.1. Pisxataway: IEEE, 2008: 5173-5176.
- [3] VENKATASUBRAMANIAN V, LEUNG H, LIU X. Chaos UWB radar for through-the-wall imaging[J]. IEEE transactions on image process, 2009, 18(6): 1255-1265.
- [4] SOLIMENE R, SOLDOVIERI F, PRISCO G. A multiarray tomographic approach for through-wall imaging[J]. IEEE transactions on geoscience & remote sensing, 2008, 46(4): 1192-1199.
- [5] TANG V H, BOUZERDOUM A, PHUNG S L, et al. Indoor scene reconstruction for through-the-wall radar imaging using low-rank and sparsity constraints[C]// 2016 IEEE Radar Conference (RadarConf). Pisxataway: IEEE, 2016: 1-4.
- [6] QIU L, JIN T, HE Y, et al. Sparse and low-rank matrix decomposition based micro-motion target indication in through-the-wall radar[J]. Electronics letters, 2017, 53(3): 191-192.
- [7] YOON Y S, AMIN M G. Spatial filtering for wall-clutter mitigation in through-the-wall radar imaging[J]. IEEE transactions on geoscience & remote sensing, 2009, 47(9): 3192-3208.
- [8] GAIKWAD A N, SINGH D, VERMA P K, et al. Analysis of clutter reduction techniques for through wall imaging in UWB range[J]. Progress in electromagnetics research B, 2009(17): 29-48.
- [9] GAIKWAD A N, SINGH D, NIGAM M J. Application of clutter reduction techniques for detection of metallic and low dielectric target behind the brick wall by stepped frequency continuous wave radar in ultra-wideband range[J]. IET radar sonar & navigation, 2011, 5(4): 416-425.
- [10] ZHANG L Z, LU B Y, ZHOU Z M, et al. A wall-clutter suppression method based on spatial signature in MIMO through-the-wall radar imaging[J]. Journal of electronics & information technology, 2013, 55: 277-295.
- [11] FOK H C T, ABDESELAM B, MOENESS G A. A subspace projection approach for wall clutter mitigation in through-the-wall radar imaging[J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2015, 53: 2108-2122.
- [12] TIVIVE F, BOUZERDOUM A, AMIN M G. An SVD-based approach for mitigating wall reflections in through-the-wall radar imaging[C]//2011 IEEE Radar Conference, [v.1]. Pisxataway: IEEE, 2011: 519-524.
- [13] TIVIVE F, BOUZERDOUM A. An improved SVD-based wall clutter mitigation method for through-the-wall radar imaging[C]//2013 IEEE 14th Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications. Pisxataway: IEEE, 2013: 430-434.
- [14] YANIK M E, TORLAK M. Near-Field MIMO-SAR millimeter-wave imaging with sparsely sampled aperture data[J]. IEEE access, 2019, 7: 31801-31819.
- [15] ZHU R, ZHOU J, CHENG B, et al. Sequential frequency-domain imaging algorithm for Near-Field MIMO-SAR with arbitrary scanning paths[J]. Selected topics in applied earth observations and remote sensing, 2019, 12(8): 2967-2975.
- [16] GURBUZ A C, MCCLELLAN J H, SCOTT W R. A compressive sensing data acquisition and imaging method for stepped frequency GPRs[J]. IEEE transactions on signal processing, 2009, 57(7): 2640-2650.
- [17] 田振清, 周越. 信息熵基本性质的研究 [J]. 内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版), 2002(4): 347-350+360.
- [18] 王芳芳, 洪伟, 张业荣, 等. 基于奇异值分解的墙杂波抑制 [J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2017, 37(3): 52-59.
- [19] 张斓子, 陆必应, 周智敏, 等. 基于空间特征的 MIMO 穿墙雷达墙杂波抑制 [J]. 电子与信息学报, 2014, 36(4): 946-952.
- [20] RIAZ M M, GHAFOOR A. Through-Wall image enhancement based on singular value decomposition[J]. International journal of antennas & propagation, 2012, 2012(PT.4): 175-195.

【作者简介】

朱骥伦 (1998—), 男, 陕西咸阳人, 硕士, 助理工程师, 研究方向: 嵌入式软件开发。

(收稿日期: 2024-05-16)