

基于截断奇异值的镜像综合孔径亮温重建方法

吴袁超^① 吕容川^{*①②} 窦昊锋^① 李一楠^① 李浩^①
卢海梁^① 罗丰^② 李青侠^③

^①(中国空间技术研究院西安分院 西安 710000)

^②(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

^③(华中科技大学电子信息与通信学院 武汉 430074)

摘要: 镜像综合孔径(MAS)辐射计的图像重建是由余弦可见度函数到场景亮温的图像反演过程, 余弦可见度函数由转移方程求解得到。而转移方程为不适定方程组, 相关输出中一个较小的误差, 都可能引起求解的余弦可见度函数存在较大偏离。因此, 对这个不适定方程组的求解是整个亮温重建算法成功的关键。该文基于镜像综合孔径的基本原理, 分析转移矩阵的病态性, 将截断奇异值分解应用于转移方程的求解问题中。仿真与实验表明, 该方法可以有效降低噪声, 提升图像质量。

关键词: 镜像综合孔径; 截断奇异值; 亮温重建

中图分类号: V416.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)02-0495-06

DOI: [10.11999/JEIT190886](https://doi.org/10.11999/JEIT190886)

A Brightness Temperature Reconstruction Method for Mirrored Aperture Synthesis Based on Truncated Singular Values

WU Yuanchao^① LÜ Rongchuan^{①②} DOU Haofeng^① LI Yi'nan^① LI Hao^①
LU Hailiang^① LUO Feng^② LI Qingxia^③

^①(China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an 710000, China)

^②(National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

^③(School of Electronic Information and Communications, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Image reconstruction for Mirrored Aperture Synthesis(MAS) radiometer is an image inversion process from cosine visibility function to brightness temperature, and the cosine visibility function is solved by the transformation equation. However, the transformation equation is ill-conditioned equation, and a small error in the correlation output causes a big deviation in the cosine visibility function. Therefore, the solution of the ill-conditioned equations is the key to the success of the brightness temperature reconstruction algorithm. Based on the basic principle of MAS, the ill-conditioned transformation matrix is analyzed, and the truncated singular value decomposition is applied to the solution of the transformation equation for MAS. Simulation and experiment show that this method can effectively reduce noise and improve image quality.

Key words: Mirrored Aperture Synthesis(MAS); Truncated singular values; Brightness temperature reconstruction

收稿日期: 2020-11-05; 改回日期: 2020-06-04; 网络出版: 2020-07-18

*通信作者: 吕容川 rosellinda_lrc@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(41706204), 钱学森青年创新基金(QXSCXJJ2017-504), 中国空间技术研究院西安分院自主研发课题(Y17-KJCX-04)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (41706204), The Qian Xuesen Young Innovation Foundation (QX-SCXJJ2017-504), The Independent Investigate Project of Xi'an Institute of China Academy of Space Technology (Y17-KJCX-04)

1 引言

微波辐射测量技术最早被用于射电天文领域,目前在地球遥感、医学及目标探测方面有越来越多的应用。光学、红外遥感虽然具有较高的空间分辨率,但存在易受天气因素(云、雨、雾等)干扰的缺点。微波遥感由于其能实现全天时、准全天候的实时动态遥感监测,而受到广泛关注^[1]。为提升微波辐射计的空间分辨率,综合孔径技术被引入到微波辐射计中,其采用多个小口径天线合成等效的大口径天线,通过直接测量的可见度函数经傅氏变换得到重建亮温图像。但相比于实孔径辐射计,综合孔径系统天线单元与通道数量多,数据处理相对复杂很多。综合孔径辐射计是以系统电气的复杂性 with 信号处理的复杂性换取实孔径辐射计中的机械复杂性^[2,3]。对于空间分辨率要求较高的综合孔径辐射计,例如GeoSTAR,其需要几百个天线和接收通道,上万个相关器,导致系统装配困难、成像复杂度高。

为进一步提高微波辐射计的空间分辨率,文献^[4-7]提出了镜像综合孔径(Mirrored Aperture Synthesis, MAS)的概念。镜像综合孔径辐射计采用反射板与天线阵组合,形成等效的镜像阵列,通过求解转移方程获得余弦可见度函数,由余弦可见度函数经反余弦变换可获得重建亮温图像。相较于常规综合孔径辐射计,镜像综合孔径辐射计能够在相同阵列大小下,有效提高系统的空间分辨率^[8,9]。由于实际系统硬件等因素影响,测量数据不可避免地存在误差与噪声。并且,对于镜像综合孔径辐射测量而言,余弦可见度函数由转移方程求解得到,求解的精度将影响最终重建亮温的精度。然而,转移矩阵为病态矩阵,含有误差的相关输出与病态的转移矩阵求解得到的余弦可见度偏离了正确的解向量,导致最终的重建亮温图像失真。

本文将基于镜像综合孔径的基本原理,研究一

种镜像综合孔径的亮温重建方法——截断奇异值分解,用于改善镜像综合孔径的成像质量。并通过仿真与实验验证该方法的有效性。

2 镜像综合孔径的基本原理

如图1所示,镜像综合孔径辐射计由反射板与天线阵组成。阵列中任意天线单元将接收来自场景的直射信号与来自反射板的反射信号。

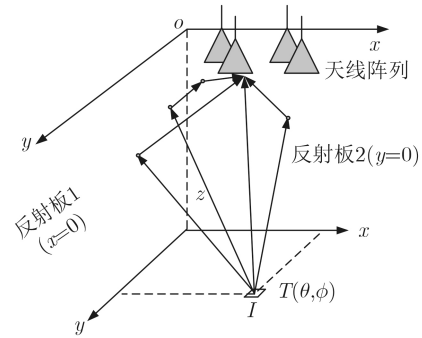


图1 镜像综合孔径示意图

当接收天线的极化方向为 x 方向时,天线 p 和 q 接收到的信号的相关输出为

$$R_{pq} = \text{Cv}(x_q - x_p, y_q - y_p) - \text{Cv}(x_q - x_p, y_q + y_p) + \text{Cv}(x_q + x_p, y_q - y_p) - \text{Cv}(x_q + x_p, y_q + y_p) \quad (1)$$

其中, (x_p, y_p) 与 (x_q, y_q) 分别是波长归一化的天线坐标, $\text{Cv}(u, v)$ 是2维余弦可见度,可表示为

$$\text{Cv}(u, v) = 4 \int_0^1 \int_0^1 T(\xi, \eta) \cos(2\pi u \xi) \cos(2\pi v \eta) d\xi d\eta \quad (2)$$

其中, $\xi = \sin \theta \cos \phi, \eta = \sin \theta \sin \phi$ 是方向余弦, $T(\xi, \eta) = T_\Omega(\xi, \eta) / \sqrt{1 - \xi^2 - \eta^2}$ 是2维修正亮温, (u, v) 是空间采样频率。

镜像综合孔径的双天线相关输出与余弦可见度可线性表示为

$$\begin{bmatrix} R_{12} \\ R_{13} \\ \vdots \\ R_{(Q-1)Q} \\ \mathbf{R} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & \cdots & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 1 & -1 & \cdots & -1 & 1 \\ \mathbf{P} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{CV}(0, 1) \\ \text{CV}(0, 2) \\ \vdots \\ \text{CV}(M, N) \\ \mathbf{CV} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中,式(3)即为转移方程。 Q 表示天线单元数目, M 和 N 分别表示两个维度的最大空间采样频率。 $\mathbf{R}$ 为双天线相关输出向量, $\mathbf{P}$ 为转移矩阵, $\mathbf{CV}$ 为余弦可见度向量。

亮温与余弦可见度间的余弦变换关系为

$$T(\xi, \eta) = 4 \int_0^\infty \int_0^\infty \text{CV}(u, v) \cos(2\pi u \xi) \cos(2\pi v \eta) du dv \quad (4)$$

故镜像综合孔径的重建亮温是先由式(3)求解得到余弦可见度,再根据式(4)进行反余弦变换得到。

3 转移矩阵的病态性

由双天线相关输出求解余弦可见度为一个数学反问题，求解反问题需要考虑其不适定性。而式(3)是一个第1类Fredholm的离散模型的方程组形式，是一个典型的病态方程，其解是不稳定、不唯一的，即式(3)是不适定的。若采用广义逆求解式(3)

$$\mathbf{CV} = \mathbf{P}^+ \mathbf{R} \quad (5)$$

其中， $\mathbf{P}^+$ 为转移矩阵 $\mathbf{P}$ 的广义逆矩阵。当相关输出存在任何微小的误差或噪声时，求解得到的余弦可见度结果将很不稳定，含有很大误差，严重偏离正确值。而镜像综合孔径的重建亮温是由余弦可见度经过余弦变换得到，余弦可见度的误差将导致重建亮温图像的失真。图像误差可以用误差条件下的重建亮温 $\hat{T}$ 与理想条件下的重建亮温 T_{id} 的均方根值来衡量

$$\Delta T = \frac{\|\hat{T} - T_{\text{id}}\|}{\sqrt{M}} \quad (6)$$

其中， M 代表像素点数。

以一个24单元的双L阵列为例，仿真存在系统噪声时，镜像综合孔径的成像效果。系统带宽设置为200 MHz，积分时间为0.05 s，接收机噪声温度为500 K。余弦可见度函数由式(5)求解得到。双L阵列如图2所示。仿真场景为环形展源(模拟电暖器实验场景)，理想的重建亮温结果如图3所示。加入系统噪声后的重建亮温图像如图4所示。从仿真结果可以看出，加入系统噪声后，重建亮温图像背景不均匀，且目标轮廓扭曲，图像质量不佳，图像误差 $\Delta T = 103$ K。

图4的结果主要是由于受误差影响，转移矩阵 $\mathbf{P}$ 的条件数“很大”，得到的余弦可见度含有较大误差。

假设转移矩阵 $\mathbf{P}$ 稳定不变的情况下，由矩阵论^[10]，有

$$\frac{\|\delta \mathbf{CV}\|}{\|\mathbf{CV}\|} \leq \text{cond}(\mathbf{P}) \frac{\|\delta \mathbf{R}\|}{\|\mathbf{R}\|} \quad (7)$$

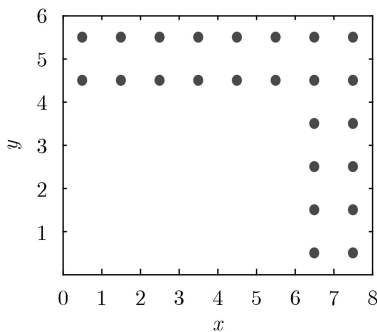


图2 双L阵列

其中， $\|\delta \mathbf{R}\|$ 表示相关输出向量 $\mathbf{R}$ 的噪声， $\|\delta \mathbf{CV}\|$ 为由 $\|\delta \mathbf{R}\|$ 导致的余弦可见度 $\mathbf{CV}$ 的误差， $\text{cond}(\mathbf{P})$ 为转移矩阵 $\mathbf{P}$ 的条件数，记为

$$\text{cond}(\mathbf{P}) = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} \quad (8)$$

其中， $\sigma_{\max}$ 为转移矩阵 $\mathbf{P}$ 的最大奇异值， $\sigma_{\min}$ 为转移矩阵 $\mathbf{P}$ 的最小奇异值。

条件数可用于衡量误差或噪声经转移矩阵 $\mathbf{P}$ 到余弦可见度 $\mathbf{CV}$ 的扩大程度。当 $\text{cond}(\mathbf{P})$ 趋近于1时，相关输出向量 $\mathbf{R}$ 或转移矩阵 $\mathbf{P}$ 的一个较小扰动只引起余弦可见度 $\mathbf{CV}$ 的一个很小扰动，此时转移矩阵 $\mathbf{P}$ 为良态矩阵，否则，就称为病态矩阵。并且，条件数越大，矩阵的病态性也越大。

双L阵对应的转移矩阵 $\mathbf{P}$ 的奇异值如图5所示。

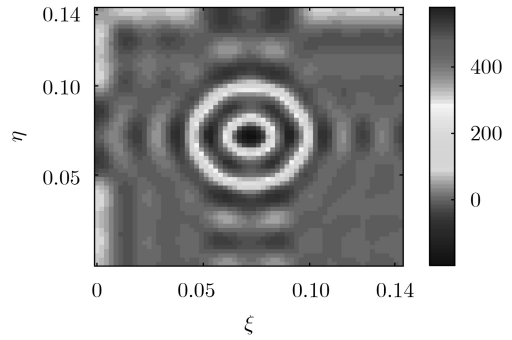


图3 理想重建亮温图像

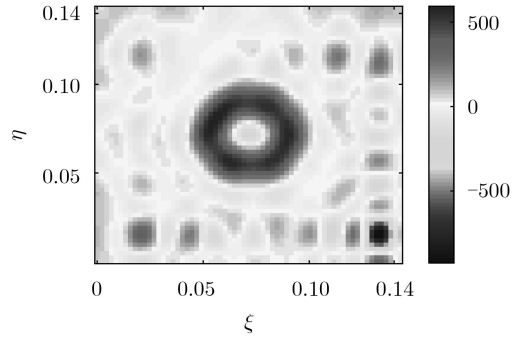


图4 带系统噪声的重建亮温图像

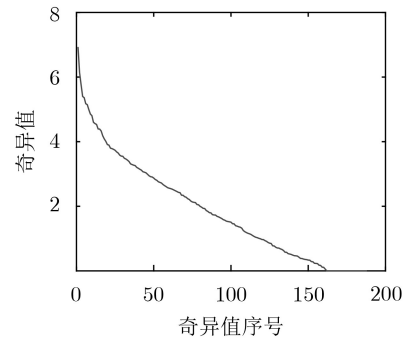


图5 转移矩阵 $\mathbf{P}$ 的奇异值

可以看到, 其奇异值从第162号开始均为0, 即 $\sigma_{\min}=0$ 。由式(7)可知, 此转移矩阵 $\mathbf{P}$ 的条件数为无穷大, 转移矩阵 $\mathbf{P}$ 是相当病态的。故系统噪声经过转移矩阵 $\mathbf{P}$ 的传播, 得到的重建亮温图像误差较大。

根据奇异值分解理论, 转移矩阵 $\mathbf{P}$ 的有效奇异值(非零奇异值)个数等于转移矩阵的秩。所以, 对于秩亏的转移矩阵, 必然存在 $\sigma_{\min}=0$, 即转移矩阵为病态的。对于图2中的双L阵, 其转移矩阵 $\mathbf{P}$ 的大

小为 276×188 , $\mathbf{P}$ 的秩 $\text{rank}(\mathbf{P})$ 为161, 故双L阵的转移矩阵是秩亏且是病态的。

显然, 在所有阵列中, 满阵的秩应是最大的^[11], 表1讨论了不同大小的满阵所对应的转移矩阵 $\mathbf{P}$ 及其秩的大小。可以看到, 在2维镜像综合孔径中, 即使是天线数最多的满阵也存在秩亏问题。故可以得出, 在镜像综合孔径中所有阵列的转移矩阵均存在秩亏问题, 转移矩阵为病态的。

表1 满阵的秩

天线单元数	9	15	25	35	49	63
转移矩阵 $\mathbf{P}$ 大小	36×42	105×74	300×116	595×156	1176×220	1953×284
$\text{rank}(\mathbf{P})$	24	48	95	131	191	251

4 截断奇异值分解

截断奇异值分解是一种正则化方法, 在信号降噪^[12,13]、特征提取^[14]、数据压缩^[15]、数据反演^[16]、图像加密^[17]等领域均有广泛地应用。本文将截断奇异值分解用于镜像综合孔径的亮温重建过程, 获取式(3)的稳定近似解。

对于式(3)中的转移矩阵 $\mathbf{P}(\mathbf{V} \in \mathbf{R}^{m \times n})$, 存在正交矩阵 $\mathbf{U}(\mathbf{U} \in \mathbf{R}^{m \times m})$ 和正交矩阵 $\mathbf{V}(\mathbf{V} \in \mathbf{R}^{n \times n})$, 使得矩阵 $\mathbf{P}$ 可以表示成

$$\mathbf{P} = \mathbf{U} \mathbf{\Lambda} \mathbf{V}^T \quad (9)$$

其中, $\mathbf{\Lambda} = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r)$ 为矩阵 $\mathbf{P}$ 的奇异值组成的对角矩阵, 且满足 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_r$ 。

由图5可知, 矩阵 $\mathbf{P}$ 的奇异值由大到小, 逐渐为零。对于无噪声的系统, 非零的奇异值才是有效的。而对于含有噪声的系统, 等于零的奇异值与部分由噪声引起的较小的奇异值均是无效的, 会导致解向量 $\mathbf{CV}$ 与精确解偏差很大。为此, 对矩阵 $\mathbf{P}$ 采用截断奇异值分解, 截去较小的奇异值, 保留较大的奇异值, 以减小 $\text{cond}(\mathbf{P})$, 降低矩阵 $\mathbf{P}$ 的病态性, 提升结果的有效性与稳定性。截去较小的奇异值后, 用剩余的奇异值重新构建转移矩阵 $\mathbf{P}$ 为 $\mathbf{P}_r$

$$\mathbf{P}_r = \sum_{i=1}^k \mathbf{u}_i \sigma_i \mathbf{v}_i^T \quad (10)$$

其中, $\sigma_k > 0$, 为截断阈值, 小于此阈值的各奇异值均被截断。

因此, 利用截断奇异值分解进行亮温重建的步骤为:

- (1) 对镜像综合孔径的转移矩阵 $\mathbf{P}$ 进行奇异值分解;
- (2) 观察奇异值曲线, 根据实际情况, 选择合适阈值, 截去小于阈值的奇异值及与其相关的左、右奇异向量;

- (3) 利用截断后的奇异值及与其相关的左、右奇异向量, 构建新的转移矩阵 $\mathbf{P}_r$;

- (4) 由新的转移矩阵 $\mathbf{P}_r$ 与相关输出向量 $\mathbf{R}$ 求出余弦可见度向量 $\mathbf{CV}$;

- (5) 利用求解得到的余弦可见度获得重建亮温。

对上一节中的仿真, 采用截断奇异值分解后, 得到的成像结果如图6所示。可以看到, 此时的成像结果与理想情况下的成像结果接近, 背景噪声明显减少, 图像轮廓清晰, 图像误差 $\Delta T = 17 \text{ K}$, 验证了该亮温重建方法的有效性。

5 实验

下面通过实验进一步对截断奇异值分解的亮温重建效果进行验证。

实验系统为镜像综合孔径微波辐射计系统 (Mirrored Aperture Synthesis at the V band, MAS-V)^[18,19]。MAS-V接收系统工作在V波段51~59 GHz, 共7个频点, 通过调节本振的频率可以实现不同频点的切换。MAS-V系统共24路接收通道, 包括6个四通道射频前端模块、3个八通道中频模块。接收天线阵列可排布为不同的阵列形式: 1维线阵、T形阵、U形阵、双L阵等。实验时, 系统工作频率设置为51.6 GHz, 接收天线单元为矩形

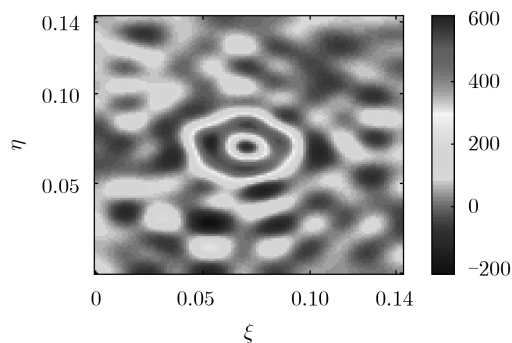


图6 截断奇异值分解后的重建亮温图像

喇叭天线。阵列排布与仿真相同，为24单元的双L阵，相邻天线间最小间距为3.5倍波长，实物图如图7(a)所示。带双反射板的MAS-V系统观测电暖器的实验场景如图8所示，反射板与阵列距离为1.75倍波长。此时，系统在两个维度上的空间分辨率分别为0.0184 rad与0.0248 rad^[8]。场景目标为电暖器，如图7(b)所示。场景目标与天线阵列距离约为4 m。

由于实际系统不可避免地存在误差，由式(2)求解的余弦可见度函数存在较大误差，得到的重建亮温图像质量较差，如图9所示。采用截断奇异值分解后得到的重建亮温图像如图10所示，图像质量提升明显，电暖器的轮廓较清晰。由于电暖器中部受金属遮挡，成像结果成环形高亮温，与实物图吻合。实验结果有效验证了截断奇异值分解的有效性。

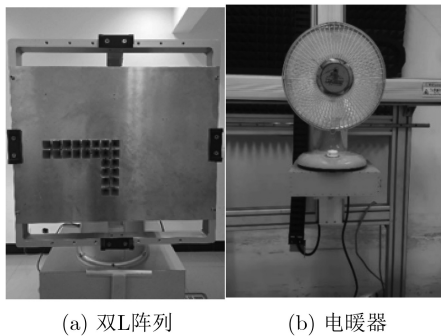


图7 实物图



图8 实验场景

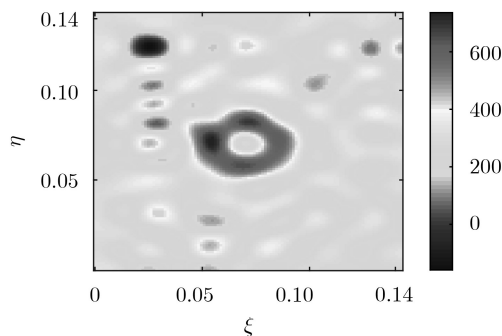


图9 电暖器的重建亮温图像

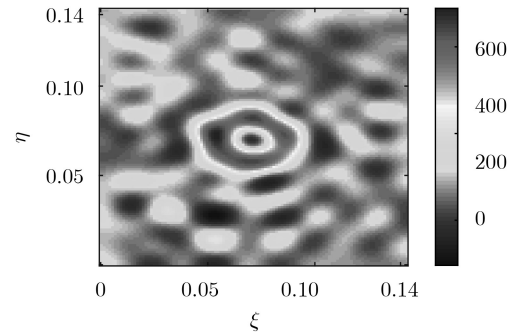


图10 截断奇异值后的电暖器重建亮温图像

6 结论

由于镜像综合孔径转移矩阵的病态性，求解的余弦可见度函数十分不稳定。实际系统的相关输出不可避免地存在误差与噪声，经过转移矩阵的传播扩大，余弦可见度函数存在较大误差，导致最后反演的亮温图像失真。本文给出了一种基于截断奇异值分解的镜像综合孔径亮温重建方法，较好地解决亮温重建中存在的病态问题。并对电暖器目标进行了仿真与实验。从仿真与实验结果可以看出，采用截断奇异值分解后的重建亮温图像背景噪声明显减少，目标轮廓更清晰，并且仿真中的图像误差从103 K减小到17 K。结果表明截断奇异值分解能有效降低噪声，对图像质量的提升起到重要作用。

参考文献

- [1] 刘一良. 微波遥感的发展与应用[J]. 沈阳工程学院学报: 自然科学版, 2008, 4(2): 171-173. doi: [10.3969/j.issn.1673-1603.2008.02.023](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-1603.2008.02.023).
- LIU Yiliang. The development and application of microwave sensing[J]. *Journal of Shenyang Institute of Engineering: Natural Science*, 2008, 4(2): 171-173. doi: [10.3969/j.issn.1673-1603.2008.02.023](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-1603.2008.02.023).
- [2] HARVEY A R, GREENAWAY A H, CAMPS A, *et al.* Millimeter-wave aperture synthesis for remote sensing of the Earth[J]. *SPIE*, 1998: 82-93. doi: [10.1117/12.333620](https://doi.org/10.1117/12.333620).
- [3] 牛立杰, 刘浩, 吴季. 高灵敏度、高稳定度微波辐射计技术研究及实验验证[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(8): 2028-2032. doi: [10.11999/JEIT161112](https://doi.org/10.11999/JEIT161112).
- NIU Lijie, LIU Hao, and WU Ji. Research and experimental verification on high sensitivity and high stability microwave radiometer[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(8): 2028-2032. doi: [10.11999/JEIT161112](https://doi.org/10.11999/JEIT161112).
- [4] CHEN Liangbing, LI Qingxia, GUO Wei, *et al.* One-dimensional mirrored interferometric aperture synthesis[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2010, 7(2): 357-361. doi: [10.1109/lgrs.2009.2035340](https://doi.org/10.1109/lgrs.2009.2035340).
- [5] 陈良兵. 镜像综合孔径微波辐射成像方法研究[D]. [博士论文], 华中科技大学, 2010. doi: [10.7666/d.d152610](https://doi.org/10.7666/d.d152610).

- CHEN Liangbing. Microwave radiometric imaging with mirrored interferometric aperture synthesis[D]. [Ph.D. dissertation], Huazhong University of Science and Technology, 2010. doi: [10.7666/d.d152610](https://doi.org/10.7666/d.d152610).
- [6] LI Yufang, LI Qingxia, and FENG Li. Relationship between mirrored aperture synthesis radiometers and aperture synthesis radiometers[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, 14(5): 631–635. doi: [10.1109/LGRS.2017.2666824](https://doi.org/10.1109/LGRS.2017.2666824).
- [7] CHEN Liangbing, WANG Yuhao, ZHOU Huilin, *et al.* Experimental verification of one-dimensional mirrored aperture synthesis[C]. IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Valencia, Spain, 2018: 1187–1190. doi: [10.1109/IGARSS.2018.8519561](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8519561).
- [8] DOU Haofeng, GUI Liangqi, LI Qingxia, *et al.* Initial results of microwave radiometric imaging with mirrored aperture synthesis[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(10): 8105–8117. doi: [10.1109/TGRS.2019.2918308](https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2918308).
- [9] DOU Haofeng, LI Qingxia, GUI Liangqi, *et al.* One-dimensional mirrored aperture synthesis with rotating reflector[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2018, 15(2): 197–201. doi: [10.1109/LGRS.2017.2779561](https://doi.org/10.1109/LGRS.2017.2779561).
- [10] 张贤达. 矩阵分析与应用[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2013: 341–358.
- ZHANG Xianda. Matrix Analysis and Applications[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 341–358.
- [11] CHEN Liangbing, RAO Zhaomin, WANG Yuhao, *et al.* The maximum rank of the transfer matrix in 1-d mirrored interferometric aperture synthesis[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, 14(9): 1580–1583. doi: [10.1109/lgrs.2017.2724602](https://doi.org/10.1109/lgrs.2017.2724602).
- [12] LEHTOLA L, KARSIKAS M, KOSKINEN M, *et al.* Effects of noise and filtering on SVD-based morphological parameters of the T wave in the ECG[J]. *Journal of Medical Engineering & Technology*, 2008, 32(5): 400–407. doi: [10.1080/03091900701248713](https://doi.org/10.1080/03091900701248713).
- [13] 代荡荡, 王先培, 赵宇, 等. 一种改进的奇异值降噪阶次选取方法用于紫外光谱信号去噪的研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(7): 2139–2143. doi: [10.3964/j.issn.1000-0593\(2016\)07-2139-05](https://doi.org/10.3964/j.issn.1000-0593(2016)07-2139-05).
- DAI Dangdang, WANG Xianpei, ZHAO Yu, *et al.* Research on denoising ultraviolet spectrum signal with an improved effective singular value selection method[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(7): 2139–2143. doi: [10.3964/j.issn.1000-0593\(2016\)07-2139-05](https://doi.org/10.3964/j.issn.1000-0593(2016)07-2139-05).
- [14] JUNG W H and LEE S G. An R-peak detection method that uses an SVD filter and a search back system[J]. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2012, 108(3): 1121–1132. doi: [10.1016/j.cmpb.2012.08.002](https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2012.08.002).
- [15] VANLANDUIT S, CAUBERGHE B, GUILLAUME P, *et al.* Reduction of large frequency response function data sets using a robust singular value decomposition[J]. *Computers & Structures*, 2006, 84(12): 808–822. doi: [10.1016/j.compstruc.2005.12.001](https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2005.12.001).
- [16] 王雅静, 袁曦, 申晋, 等. 噪声动态光散射数据Tikhonov与截断奇异值正则化反演[J]. *光学 精密工程*, 2018, 26(9): 2269–2279. doi: [10.3788/OPE.20182609.2267](https://doi.org/10.3788/OPE.20182609.2267).
- WANG Yajing, YUAN Xi, SHEN Jin, *et al.* Inversion of Tikhonov and truncated singular value decomposition regularization for noisy dynamic light scattering data[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(9): 2269–2279. doi: [10.3788/OPE.20182609.2267](https://doi.org/10.3788/OPE.20182609.2267).
- [17] 陈艳浩, 刘中艳, 周丽宴. 基于差异混合掩码与混沌Gyrator变换的光学图像加密算法[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(4): 888–895. doi: [10.11999/JEIT180456](https://doi.org/10.11999/JEIT180456).
- CHEN Yanhao, LIU Zhongyan, and ZHOU Liyan. Optical image encryption algorithm based on differential mixed mask and chaotic gyrator transform[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(4): 888–895. doi: [10.11999/JEIT180456](https://doi.org/10.11999/JEIT180456).
- [18] LI Qinxia, DOU Haofeng, GUI Liangqi, *et al.* MAS-V: Experimental system of mirrored aperture synthesis at V BAND[C]. IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Valencia, Spain, 2018: 1013–1016. doi: [10.1109/IGARSS.2018.8518080](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8518080).
- [19] 李青侠, 窦昊峰, 陈良兵, 等. 镜像综合孔径微波辐射成像原理验证实验研究[J]. *上海航天*, 2018, 35(2): 126–135. doi: [10.19328/j.cnki.1006-1630.2018.02.016](https://doi.org/10.19328/j.cnki.1006-1630.2018.02.016).
- LI Qingxia, DOU Haofeng, CHEN Liangbing, *et al.* Research on experimental verification of principle of microwave radiometric imaging with mirrored aperture synthesis[J]. *Aerospace Shanghai*, 2018, 35(2): 126–135. doi: [10.19328/j.cnki.1006-1630.2018.02.016](https://doi.org/10.19328/j.cnki.1006-1630.2018.02.016).
- 吴袁超: 女, 1993年生, 助理工程师, 研究方向为微波遥感、被动微波辐射无源探测等.
- 吕容川: 女, 1983年生, 研究员, 研究方向为全极化微波辐射计、被动微波遥感、大气探测等.
- 窦昊峰: 男, 1992年生, 博士后, 研究方向为微波遥感、信号处理.
- 李一楠: 男, 1985年生, 高级工程师, 研究方向为被动微波遥感、综合孔径微波辐射计系统设计等.
- 李 浩: 男, 1980年生, 研究员, 研究方向为全极化微波辐射计、综合孔径微波辐射计系统设计等.
- 卢海梁: 男, 1986年生, 博士, 高级工程师, 研究方向为被动微波辐射无源探测、被动微波遥感、射频干扰检测等.
- 罗 丰: 男, 1971年生, 博士, 教授, 研究方向为雷达系统与雷达信号处理、高速实时信号处理与检测等.
- 李青侠: 男, 1966年生, 博士, 教授, 研究方向为微波遥感、天线阵列及信号处理.

责任编辑: 马秀强