

文章编号: 2095-4980(2021)06-1027-06

## 二维干涉式被动毫米波近场目标成像分析

周燕晖<sup>1,2</sup>, 刘浩<sup>1</sup>, 张成<sup>1</sup>, 牛立杰<sup>1</sup>, 郭曦<sup>1,2</sup>, 郭天舒<sup>1,2</sup>

(1.中国科学院国家空间科学中心 中国科学院微波遥感技术重点实验室, 北京 100190;  
2.中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 近场成像是干涉式被动毫米波成像技术的重要应用领域, 阵列构型是影响近场相位误差的重要因素。搭建二维合成孔径近场成像仿真系统, 实现目标场景生成、近/远场前向仿真、图像重构和近场相位误差等功能。利用该系统对空间分辨力相同条件下的常用二维天线阵型的近场误差进行定量评估和分析, 针对二单元的扫描成像试验系统, 提出一种将接收机通道误差、近场相位误差分步校正的自定标方法。比较基于参考点源的近场成像方法, 该方法仅需先验距离信息, 无需再对参考点源进行成像, 具有操作简单、成像速度快的优势。

**关键词:** 合成孔径; 近场成像; 亮温重建; 天线阵列; 误差评估; 误差校正

中图分类号: TP732.1; TN29

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020134

## Near-field imaging analysis of 2-D millimeter-wave interferometric radiometer

ZHOU Yanhui<sup>1,2</sup>, LIU Hao<sup>1</sup>, ZHANG Cheng<sup>1</sup>, NIU Lijie<sup>1</sup>, GUO Xi<sup>1,2</sup>, GUO Tianshu<sup>1,2</sup>

(1.National Space Science Center, CAS Key Laboratory of Microwave Remote Sensing, Beijing 100190, China;  
2.University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Near-field imaging is an important application area of interference passive millimeter-wave imaging technology, and the array configuration is an important factor affecting the near-field phase error. In this paper, a 2-D synthetic aperture near-field imaging simulation system is built to implement functions such as target scene generation, near/far field forward simulation, image reconstruction, and near-field phase error correction. This system is utilized to quantitatively evaluate and analyze the near-field errors of different 2-D antenna arrays with the same spatial resolution. For the two-unit near-field scanning imaging test system, a self-calibration method is proposed to correct the receiver channel error and near-field phase error respectively. Compared with the near-field imaging method based on a reference point source, this method requires only a priori distance information and no need to image the reference point source, which bears the advantages of simple operation and fast imaging speed.

**Keywords:** synthetic aperture; near-field imaging; brightness temperature reconstruction; antenna array; error evaluation; error correction

除卫星遥感应用之外, 近场成像是干涉式合成孔径技术的另一个重要应用领域。一方面, 面向星载应用研发的综合孔径辐射计系统, 在地面测试阶段需在近场条件下完成对系统成像能力及部分系统级指标的验证<sup>[1-2]</sup>; 另一方面, 近年来人体隐匿危险品安检成像<sup>[3-5]</sup>、恶劣视觉条件下的近距离目标成像、地下埋入物品探测等方面的实际应用也对高分辨力被动微波近场成像提出了迫切需求。目前, 二维天线阵型因其可实现瞬时成像的优势逐渐得到广泛应用, 国内外的研究中, 对不同二维天线阵型在近场条件下误差的定量评估仍较少涉及。针对傅里叶变换关系在近场条件下不再成立的问题, 现有的近场成像算法都存在着缺陷, 通过改变硬件结构的物理方法<sup>[6-7]</sup>对观测距离有很大限制; 基于广义逆的数学求解法<sup>[3]</sup>、基于  $G$  矩阵的正则化近场成像算法<sup>[8]</sup>、基于局部自适应偏微分方程的图像反演法<sup>[9]</sup>对二维天线阵型的反演来说计算复杂度较高, 运算效率差, 难以达到实时成像的目的。

本文利用 Matlab 搭建毫米波合成孔径辐射计近场成像仿真平台, 再基于该系统对不同二维天线阵型的近场成像误差进行定量评估和对比分析, 得到的结论对合成孔径辐射计近场应用中二维天线阵型的选择, 和基于相位

补偿的快速傅里叶变换算法的改进具有参考价值。针对二单元近场扫描成像系统，提出一种将接收机通道相误差、近场相位误差分步校正的自定标快速成像方法，该方法比较基于参考点源的近场成像方法，其通过利用前述仿真系统所得结果，避免了对参考点源的成像试验，大大简化对目标的近场探测过程；比较基于  $G$  矩阵的成像算法，该方法仅需先验目标观测距离信息，具有成像速度快、操作简单的优势。

### 1 合成孔径辐射计成像原理

反演目的是将各小天线单元接收信号两两相关得到采样数据，通过一定的数学运算得到目标观测区域的亮温分布信息，如图 1 所示。

将两天线单元接收信号进行复相关后的结果为：

$$V_{12} = \frac{\sqrt{D_1 D_2}}{4\pi} \iint_{\Omega_i} T_B(\theta, \varphi) F_{n1}(\theta_1, \varphi_1) F_{n2}^*(\theta_2, \varphi_2) \exp(-jk(d_1 - d_2)) \frac{d^2}{d_1 d_2} d\Omega \quad (1)$$

式中： $D_i$  为天线的方向性系数； $T_B$  为场景亮温； $F_n$  为天线的场强方向图； $d$  为场景平面到天线阵平面的垂直距离； $(\theta, \varphi)$  为辐射面元与天线阵列中心所成角度； $(\theta_i, \varphi_i)$  为辐射面元到各天线单元所成角度，指数部分为入射电磁波到两天线单元的相位差。

根据图 1 中的几何关系，两天线单元的路径差可表示为：

$$d_1 - d_2 = \sqrt{(x_1 - x')^2 + (y_1 - y')^2 + d^2} - \sqrt{(x_2 - x')^2 + (y_2 - y')^2 + d^2} \quad (2)$$

远场条件下，满足  $(x - x')/d \ll 1$ ， $(y - y')/d \ll 1$  时，利用泰勒近似可将式(2)转换为：

$$d_1 - d_2 = \frac{x_1^2 - x_2^2 + y_1^2 - y_2^2}{2d} + \frac{(x_1 - x_2)x' + (y_1 - y_2)y'}{d} \quad (3)$$

将空间域坐标  $(\xi, \eta) = (\sin \theta \cos \varphi, \sin \theta \sin \varphi) = \left(\frac{x'}{d}, \frac{y'}{d}\right)$  和频率域坐标  $(u, v) = \left(\frac{x_1 - x_2}{\lambda}, \frac{y_1 - y_2}{\lambda}\right)$  代入式(3)，可推得傍轴近似条件  $d_1 - d_2 \approx -(\xi \Delta x + \eta \Delta y)$ ，且  $d_1 \approx d_2 = d$ ，则：

$$V_{12}(u, v) = \frac{\sqrt{D_1 D_2}}{4\pi} \iint_{\Omega_i} \frac{T_B(\xi, \eta)}{\sqrt{1 - \xi^2 - \eta^2}} F_{n1}(\xi, \eta) F_{n2}^*(\xi, \eta) \exp(-j2\pi(u\xi + v\eta)) d\xi d\eta \quad (4)$$

在理想远场条件下，空间去相关效应可忽略且各天线单元方向图相同，此时可视度函数与目标场景亮温成傅里叶变换关系。对于空间频率域采样网格为矩形的 T/U/方形阵列，可采用常见的快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)算法进行后向反演；对于空间频率域采样网格为六边形的 Y/六边形阵列，可采用六边形快速傅里叶变换算法(Hexagonal FFT, HFFT)<sup>[10]</sup>进行反演；对于圆环这样的圆形栅格采样阵列，可采用伪极网格傅里叶变换算法(Pseudo-Polar FFT, PPF<sub>FT</sub>)<sup>[11]</sup>实现。在近场条件下，傍轴近似关系不再满足，且辐射源到天线单元的方向矢量各不相同，从而引入了近场相位误差，其大小主要与观测距离和天线阵列构型有关。

### 2 合成孔径近场成像仿真模型

本文模拟近场目标探测场景，利用 Matlab 构建的二维合成孔径微波辐射计近场成像仿真模型主要由近场相位修正模块和后向反演模块构成。近场相位修正模块采用相位补偿的数值计算法，需根据仿真目的不同选择是否使用该模块；后向反演模块针对天线阵型频率域采样方案的不同实现了 3 种快速傅里叶逆变换算法。

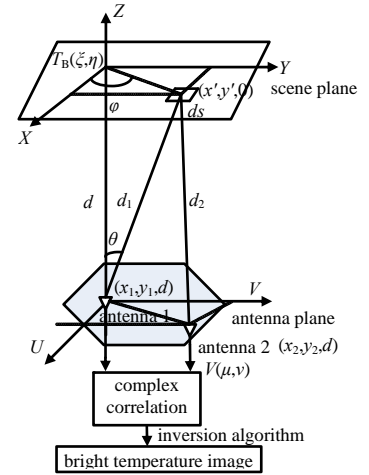


Fig.1 Imaging principle of synthetic aperture microwave radiometer  
图 1 合成孔径微波辐射计成像原理示意图

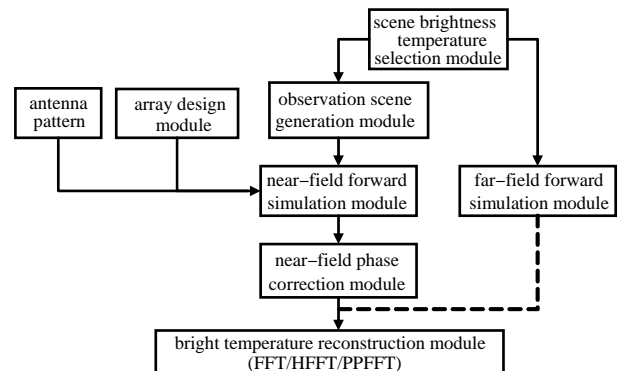


Fig.2 Composition of near-field imaging system  
图 2 近场成像系统构成

### 3 二维天线阵型近场误差的定量评估

#### 3.1 仿真模型基本参数设置

仿真模型基本参数设置为：工作频率  $f_0 = 36.5 \text{ GHz}$ ，天线单元最小间距  $0.8 \lambda$ ，视场角范围 FOV 为  $50^\circ$ ，空间域采样点数为  $201 \times 201$ 。原始场景亮温如图 3 所示，其表示在冷空背景下 ( $0 \text{ K}$ ) 有一亮温为  $100 \text{ K}$  的平面目标，中间有一亮温为  $300 \text{ K}$  的矩形目标。该目标源所在平面与天线阵列平面平行放置。

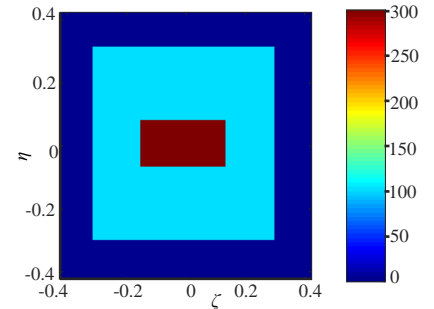


Fig.3 Brightness of original scene  
图 3 原始场景亮温

#### 3.2 二维天线阵列结构

天线阵列构型的选择是合成孔径微波辐射计实现干涉测量和孔径合成的关键。本节不同天线阵型近场误差的定量分析是建立在所有天线阵型的空间分辨力一致的前提条件下，一般将合成孔径微波辐射计的空间分辨力定义为阵列波束的  $3 \text{ dB}$  波束宽度。对于不同天线阵型的空间分辨力，目前已有比较完善的理论研究结果<sup>[12]</sup>：

$$\Delta\theta_{\text{HP}} = \begin{cases} \alpha_{\text{sw}} (0.35/D_{\text{circ}}), & \text{Circular array} \\ \alpha_{\text{sw}} (0.60/D_{\text{rec}}), & \text{T/U/Square array} \\ \alpha_{\text{sw}} (0.36/D_{\text{hex}}), & \text{Hexagonal array} \\ \alpha_{\text{sw}} (0.47/D_{\text{Y}}), & \text{Y array} \end{cases} \quad (5)$$

式中： $D_{\text{circ}}$  为圆环阵列的半径； $D_{\text{rec}}$  为方形天线阵列的边长或 T/U 型天线阵列的单臂长； $D_{\text{hex}}$  为六边形天线阵列的边长； $D_{\text{Y}}$  为 Y 型天线阵列的单臂长，另外，上述参数均为波长归一化后的电尺寸； $\alpha_{\text{sw}}$  为由窗函数导致的衰减因子，这里暂不考虑加窗，该值为 1。

通过以上数学计算和各类天线阵型阵列因子主波束宽度的对比，得出空间分辨力相同条件下各类天线阵型的阵元个数为：Y 型阵：97；六边形阵：126；圆环阵：140；U 型阵：103；T 型阵：103；方形阵：136。天线阵列排布及对应的频率域采样分布如图 4 所示。

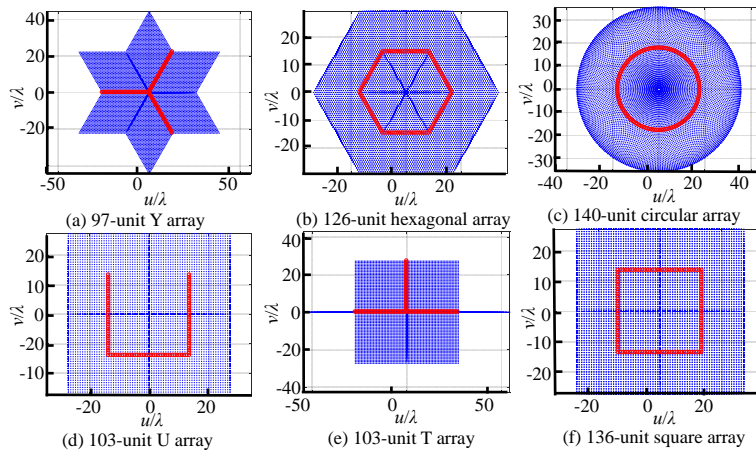


Fig.4 Array layout and  $uv$  sampling grid coverage of each antenna array  
图 4 各天线阵列排布及对应的  $uv$  域分布

从图 4 可以看出，不同天线阵型对应的频率域采样分布存在很大差异，其采样点覆盖面积、冗余度等信息已有文献做出分析和比较<sup>[12]</sup>，本节主要对空间分辨力相同条件下的各二维天线阵型的近场误差，进行定量分析和评估。另外，对于天线单元间距为  $0.8\lambda$  的上述阵列来说，阵元尺寸较小，方向图波束很宽，使得不同阵元接收到的同一方向目标的辐射能量近似相同，因此本文近场成像仿真过程中暂不考虑天线方向图的影响。

#### 3.3 仿真结果及分析

本文采用均方误差 (Mean Squared Error, MSE) 和互相关系数 (C) 以客观地衡量重建图像的质量。合成孔径辐射计一般远场条件<sup>[13]</sup>通常定义为： $R \geq 2D^2/\lambda$ ，式中， $D$  为天线阵列最长基线的大小。经过计算，3.2 节天线阵

型的一般远场条件均大于 10 m，这里设置近场观测距离为 5 m。基于搭建的近场成像仿真平台，针对以上二维天线阵型做近、远场误差的仿真实验，成像结果如图 5 中所示。

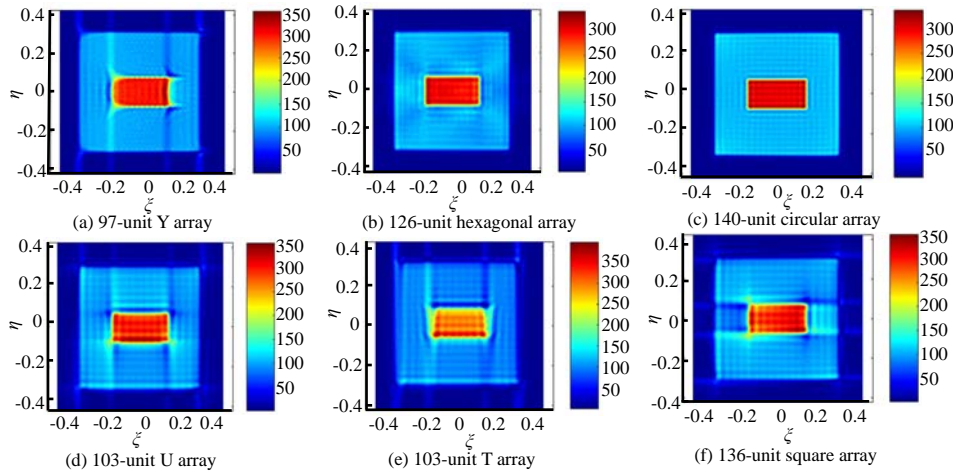


Fig.5 Near-field brightness temperature reconstruction results of each antenna array

图 5 近场条件下各天线阵型对应的亮温重建结果

从重建结果可以明显看出，六边形和圆环天线阵列的近场重建图像形变程度较小；T/U/方形天线阵的重建图像在中间高亮温目标边缘处存在较为严重的形变。另外，空间分辨力相同条件下的各二维天线阵型近场重建结果与理想远场重建结果的误差如表 1 中所示，从数值关系上同样可看出，闭合型天线阵列(如圆环阵、六边天线阵)比开环型天线阵列(T/Y/U)引入的近场相位误差更小，该结论可为近场目标探测实验中天线阵型的选择提供参考。

表 1 不同天线阵型近场误差对比(空间分辨力相同)  
Table1 Comparison of near-field errors of antenna arrays with the same spatial resolution

antenna array	array elements	MSE/K	C
Y	97	15.955 5	0.975 6
hexagon	126	6.824 6	0.995 6
circular	140	2.518 2	0.999 4
U	103	18.388 9	0.968 3
T	103	24.087 0	0.944 9
square	136	16.705 7	0.973 4

#### 4 二元干涉仪近场成像试验

二元干涉仪是干涉式合成孔径微波辐射计系统的最小组成单元，通过二元分时采样可构成各种阵列构型及其对应的基线组合采样覆盖，可用于成像系统及算法的原型验证<sup>[13-14]</sup>。本文利用基于 T 形扫描架<sup>[14]</sup>的二单元亚毫米波近场扫描干涉仪开展了近场目标成像试验，该系统通过 2 个接收机分别在水平、垂直方向的移动实现 T 型天线阵的扫描。主要技术指标为：工作频率为 100 GHz，天线单元间距为 33λ，滑轨长度为 400 mm。针对此类扫描干涉仪，基于前述近场成像仿真系统结果，提出了一种自定标近场成像方法，该方法相比于基于参考点源的近场成像方法来说，具有操作简单的优势。

##### 4.1 基于参考点源的近场成像方法

基于参考点源的误差整体校正方法可同时完成对系统接收通道相位误差的校准<sup>[15]</sup>。设二单元干涉仪对小太阳直接探测所得可视度函数为  $VF$ ，对相同观测距离条件下的视场中心点源目标的直接探测所得可视度函数为  $VF_0$ ，则经该方法校正后的可视度函数  $VF'$  为：

$$VF' = VF \cdot e^{-j \cdot \text{angle}(VF_0)} \quad (6)$$

该方法针对不同观测距离的目标探测过程中，除对目标的一次成像外，还需对视场中心点源进行成像，试验过程较为繁琐。

##### 4.2 自定标近场成像方法

在二元干涉成像试验系统中，所有可视度函数是用 2 个接收机分时采样获得，两通道间的相位差异导致所有可视度函数均存在一个相同的相位误差项(用常数  $A$  表示)。在近场条件下，可视度函数的共轭相位关系不再成立，但由理想两单元干涉系统分时获取的近场可视度函数应保持连续，并在  $(u, v) = (0, 0)$  处的相位仍将逼近于 0，因此可将试验系统可测的最短基线处的可视度函数相位大小近似作为通道相位误差  $A$ ，设经接收机通道相位误差校正后可视度函数为  $VF_1$ ，则：



$$VF_1 = VF \cdot e^{-jA} \tag{7}$$

以暗室内观测距离为 5.5 m 的小太阳探测数据为例， $v=0$  对应的复相关系数相位如图 6(a)所示，从图中可以看出，可将通道相位误差  $A$  近似为  $-1.496$ 。经式(7)校正后的复相关系数相位如图 6(b)所示。利用 4.1 节所介绍的近场成像仿真系统对观测距离为 5.5 m 的视场中心点源进行成像，可视度函数为  $VF'_0$ ，其中，仿真系统参数与扫描干涉仪的技术指标完全一致。则经近场相位误差校正后的  $VF_2$  可表示为：

$$VF_2 = VF_1 \cdot e^{-j\text{angle}(VF'_0)} \tag{8}$$

经式(8)校正后的复相关系数相位如图 6(c)所示。

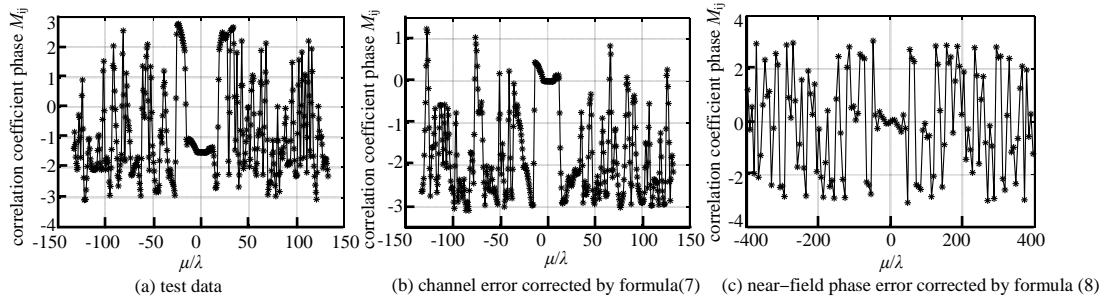


Fig.6 Phase change of complex correlation coefficient corresponding to  $v=0$  in the test data  
图 6 试验数据中  $v=0$  对应的复相关系数相位变化

从图 6 中可以看出，经通道相位误差校正后，系统可测最短基线处可视度函数相位近似为 0，在此基础上，经近场相位误差校正后的可视度函数相位近似满足共轭对称关系，进而利用快速傅里叶逆变换算法反演得到目标视场亮温。

### 4.3 试验结果及分析

分别利用上述基于参考点源和自定标近场成像方法对试验条件下所得采样数据进行亮温重建，成像结果如图 7 所示。

图 7(a)为未经误差校正的直接反演成像结果，图 7(b)和 7(c)分别为采用上述 2 种近场误差处理方法后的反演成像结果，与图 7(a)对比发现，小太阳的轮廓和形状更加清晰可辨识。图 7(d)为未经通道误差校正，仅进行近场相位校正后的反演成像结果，通过对比图 7(c)与图 7(d)，可间接推断出自定标近场成像方法中通道相位误差校正部分的合理性。本文提出的自定标近场成像方法的成像结果仍存在一定误差，但足以提取出目标的几何分布信息，适用于基于二单元扫描干涉仪开展相应的成像算法评估及原型验证。该方法的优势主要体现在：成像速度快，可利用 FFT 成像，计算复杂度低，不会像基于  $G$  矩阵的反演方法那样出现病态性；操作简单，相比  $G$  矩阵方法，不需已知目标的具体空间三维分布信息，仅需已知目标到阵列中心的距离信息，相比基于参考点源的成像方法而言，不需再对参考点源进行成像。

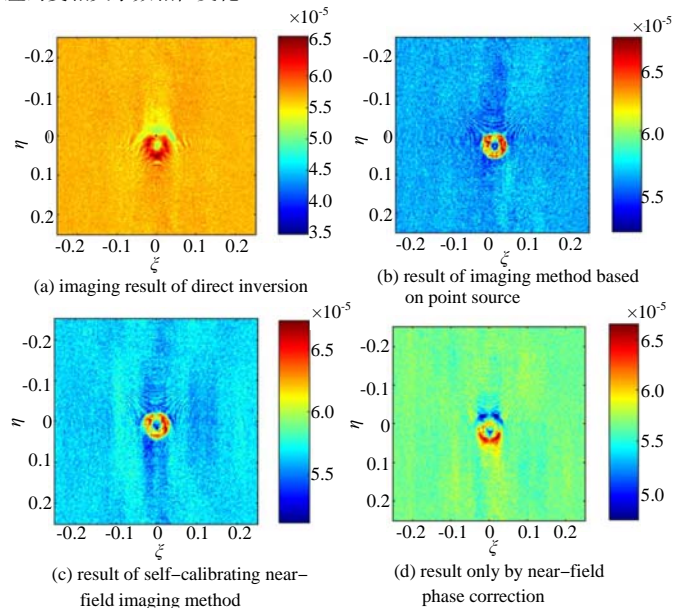


Fig.7 Comparison of brightness temperature reconstruction results of two methods

图 7 2 种近场成像方法的亮温重建结果对比

## 5 结论

本文首先基于二维合成孔径近场成像仿真平台，对空间分辨率相同条件下的各二维天线阵型的近场成像误差进行定量评估和对比，发现闭合型天线阵列的近场误差更小，所得结论对近场目标探测实验中天线阵型的选择具有参考价值，填补了合成孔径辐射计的研究中对二维天线阵型近场误差定量评估的空白。另外，针对二单元扫描干涉仪，提出了一种基于仿真系统结果的自定标近场成像方法，该方法除可有效校正近场误差外，具有成像速度快和操作简单的优势。本文研究成果将利于合成孔径辐射计在近场探测领域中的推广，后续将继续对近场误差校

正方法进行研究,使其适用范围更广。

#### 参考文献:

- [1] DUFFO N,CORBELLA I,TORRES F,et al. Advantages and drawbacks of near field characterization of large aperture synthesis radiometers[C]// Proceedings of IEEE International Conference. Rome,Italy:IEEE, 2004.
- [2] TANNER A B,LAMBRIGSTEN B H,GAIER T M. Near field characterization of the GeoSTAR demonstrator[C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Denver,CO,USA:IEEE, 2006:2529-2532. doi:10.1109/IGARSS.2006.654.
- [3] 张成,吴季,刘浩. 综合孔径微波辐射计近场成像方法[J]. 中国科学, 2011,41(9):1225-1233. (ZHANG Cheng,WU Ji, LIU Hao. Near field imaging method of synthetic aperture radiometer[J]. Chinese Science, 2011,41(9):1225-1233.)
- [4] 成彬彬,李慧萍,安健飞,等. 太赫兹成像技术在站开式安检中的应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(6): 843-848. (CHENG Binbin,LI Huiping,AN Jianfei,et al. Application of terahertz imaging in standoff security inspection[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(6):843-848.) doi:10.11805/TKYDA201506.0843.
- [5] 林富平,潘鸣. W 波段宽带辐射计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(2):269-273. (LIN Fuping,PAN Ming. Design of W band broadband radiometer[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019, 17(2):269-273.) doi:10.11805/TKYDA201902.0269.
- [6] WALSH K P,SCHULKIN B,GARY D,et al. Terahertz near-field interferometric and synthetic aperture imaging[J]. The International Society for Optical Engineering, 2004(5411):1-9. doi:10.1117/12.541525.
- [7] LAURSEN B,SKOU N. A spaceborne synthetic aperture radiometer simulated by the TUD demonstration model[J]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1994(3):1314-1316. doi:10.1109/IGARSS.1994.399426.
- [8] CHEN J F,ZHU X W,ZHANG S,et al. General G-matrix imaging method for near-field millimeter-wave SAIR with any arrays[C]// IEEE MIT-S International Wireless Symposium(IWS). Chengdu,China:[s.n.], 2018. doi:10.1109/IEEE-IWS.2018.8400862.
- [9] 姚现勋,尚晓舟,苗俊刚,等. 综合孔径辐射计偏微分方程近场图像反演算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(2):267-272. (YAO Xianxun,SHANG Xiaozhou,MIAO Jungang,et al. Near field image reconstruction algorithm of synthetic aperture radiometer based on partial differential equation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015,41(2):267-272.) doi:10.13700/j.bh.1001-5965.2014.0135.)
- [10] ADRIANO C,IGNASI C S. The processing of hexagonally sampled signals with standard rectangular techniques:application to 2-D large aperture synthesis interferometric radiometers[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997,35(1): 183-190. doi:10.1109/36.551946.
- [11] 张颖. 静止轨道干涉式毫米波大气探测仪动态目标观测仿真分析[D]. 北京:中国科学院国家空间科学中心, 2017. (ZHANG Ying. Simulation and analysis for dynamic target observation of geostationary interferometric microwave sounder[D]. Beijing,China:National Center for Space Science of Chinese Academy of Sciences, 2017.)
- [12] WU J,ZHANG C,LIU H,et al. Performance analysis of circular antenna array for microwave interferometric radiometers[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017,55(6):3261-3271. doi:10.1109/TGRS.2017.2667042.
- [13] LAURSEN B,SKOU N. Synthetic aperture radiometry evaluated by a two-channel demonstration model[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998,36(3):822-832. doi:10.1109/36.673675.
- [14] 韩东浩,刘浩,吴季,等. 基于高速数字相关器的太赫兹干涉仪系统研究[J]. 电子与信息学报, 2016,38(4):964-969. (HAN Donghao,LIU Hao,WU Ji,et al. Investigation on THz interferometer system based on high speed digital correlator[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016,38(4):964-969.) doi:CNKI:SUN:DZYX.0.2016-04-027.
- [15] HAN D H,LIU H,ZHANG D H,et al. Passive submillimeter-wave imaging demonstrated by a two-element interferometer[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2016,35(6):656-661. doi:CNKI:SUN:HWYH.0.2016-06-004.

#### 作者简介:

周燕晖(1995-),女,在读硕士研究生,主要研究方向为综合孔径辐射计近场成像方法.email:zhouyanhui\_6688@163.com.

张成(1978-),男,石家庄市人,研究员,主要研究方向为被动微波遥感技术.

郭天舒(1994-),男,北京市人,在读博士研究生,主要研究方向为干涉式综合孔径辐射计的数字技术.

刘浩(1978-),男,江西省九江市人,研究员,主要研究方向为干涉式被动微波成像技术及其在静止轨道探测的应用研究.

牛立杰(1974-),男,北京市人,副研究员,主要研究方向为综合孔径辐射计系统与定标技术.

郭曦(1993-),男,北京市人,博士,主要研究方向为综合孔径微波辐射计系统仿真与定标方法.