



·电磁频谱作战与电磁安全·

# 大视场龙伯透镜电磁成像超分辨算法\*

杨美玲, 谢树果, 张申达, 冯荣光, 杨燕

(北京航空航天大学 电子信息工程学院 电磁兼容技术研究所, 北京 100191)

**摘要:** 现有的反射面电磁成像系统体积庞大, 无法满足机载、车载、无人机等应用平台要求。针对此类问题, 研究了龙伯透镜的结构特性和成像特性, 设计了大视场龙伯透镜电磁成像系统, 利用空不变成像特性进行超分辨图像处理, 实现了快速、大视场、宽频带、高分辨电磁辐射源分布成像。计算了口径 300 mm 带球核分层龙伯透镜参数, 仿真了 4~18 GHz 龙伯透镜焦弧面场强分布, 验证了龙伯透镜空不变的成像特性及其超分辨算法的有效性。实验对比了抛物反射面电磁成像系统和本文龙伯透镜电磁成像系统的体积、成像范围、源数目和分辨率, 结果证明了本文系统的优越性, 同样分辨率下, 达到了方位角及俯仰角均为 40° 的大视场范围。

**关键词:** 大视场电磁成像; 龙伯透镜; 空不变; 图像超分辨

中图分类号: TP391

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.230383

## Large field-of-view Luneburg lens electromagnetic imaging super-resolution research

Yang Meiling, Xie Shuguo, Zhang Shenda, Feng Rongguang, Yang Yan

(Electromagnetic Compatibility Research Institute, School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Due to extensive electromagnetic radiation or interference, the rapid detection and location of electromagnetic interference sources in a large space has become a hot issue to be studied urgently. Electromagnetic imaging technology can visually display the location of radiation sources and solve the problem of rapid detection and localization of electromagnetic interference sources. However, the existing reflector electromagnetic imaging system is bulky and cannot meet the requirements of airborne, vehicle-mounted, UAV and other application platforms. To address this issue, this paper studies the structure and imaging characteristics of Luneburg lens, designs a large field-of-view Luneburg lens electromagnetic imaging (EMI) system, and realizes rapid identification and location of EMI with the advantages of large field of view, wide bandwidth and high resolution. In this paper, the parameters of the 300 mm Luneburg lens with spherical core are calculated, the E-field intensity distribution of the 4~18GHz is simulated, and the space invariant imaging characteristics of Luneburg lens and its super-resolution algorithm are verified. The paper finally compares the volume, field of view, source number and resolution of the parabolic reflector electromagnetic imaging system and the Luneburg lens electromagnetic imaging system. The results demonstrate the superiority of the system proposed in this paper, achieving a large field of view with azimuth and elevation angles of 40° at the same resolution.

**Key words:** large field of view, Luneburg lens, space invariant, super-resolution

电子设备的广泛使用产生了大量的电磁辐射或干扰, 因此对大范围空间环境中电磁干扰源的快速检测和定位成为亟待研究的热点问题<sup>[1-2]</sup>。传统的测量方法利用天线和接收机进行逐点测量, 耗时长、效率低下、实时性差<sup>[3]</sup>。为此本课题组设计完成了一个宽带电磁成像系统<sup>[4]</sup>, 通过抛物反射面聚焦作用对物平面上的微波辐射源进行探测成像, 使得电磁辐射可见, 能够实现对电磁干扰源的快速识别及定位, 且具有无干扰、范围广、频带宽和实时性强等优点<sup>[5-6]</sup>。但是, 现有电磁成像系统是利用口径为 3 m 的抛物反射面实现了 $\pm 20^\circ$ 视场成像范围, 在机载、车载或无

\* 收稿日期: 2023-08-30; 修订日期: 2024-01-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62202030)

联系方式: 杨美玲, meiling.yang@buaa.edu.cn。

人机使用平台下,系统载荷空间有限,3 m 反射面用于成像汇聚显然不再可行。

合成孔径雷达成像能够实现大范围电磁成像,采用大量稀疏的小口径天线阵合成大的观测孔径,降低了真实孔径大口径天线及天线机械扫描的困难<sup>[7]</sup>。但是有限的载荷空间不具备组阵条件。多波束抛物反射焦平面成像利用多波束覆盖整个视域实现大范围成像<sup>[8]</sup>,但是抛物反射面的焦点位置唯一,正馈时馈源对抛物面有遮挡将限制系统灵敏度,偏馈时大视场成像范围下尤其是大视角离轴处点扩展函数畸变,空变问题造成超分辨率恢复不准确,空间分辨率下降。

龙伯透镜得益于其球对称性,整个外表面的球面上任意一点都是焦点,且路程等长衰减相等增益无变化,因此理论上任意位置的馈源都能在其表面汇聚为一点<sup>[9-10]</sup>。龙伯透镜集中了以下优点:(1)球对称性,整个球面上的任意位置都可以是焦点;(2)多波束增益相同,克服了抛物面天线馈源偏焦导致的增益损失;(3)宽频带,介质材料的介电常数随频率变化不敏感;(4)材料技术和制造水平的发展,发酵泡沫3D打印成本约为5 RMB/g,直径45 cm的球透镜质量约为10 kg。本文研究了龙伯透镜电磁成像特性,设计了大视场龙伯透镜电磁成像系统,实现了宽频带、大视场、小体积、高分辨电磁成像。

## 1 算法理论

### 1.1 龙伯透镜成像特性

龙伯透镜由 R. K. Luneburg 于 1944 年基于几何光学法提出,是一种球对称的介质透镜天线,如果其介电常数

$$\varepsilon_r = 2 - \left(\frac{r}{R}\right)^2, \quad r \leq R \quad (1)$$

那么一束平面波入射到透镜表面上,它将会聚焦到沿直径的另外一个端点上,式(1)中: $r$ 为点到介质球中心的距离, $R$ 为介质球半径<sup>[11]</sup>。理想的龙伯透镜介电常数是连续渐变分布的,但自然界不存在这样的介质<sup>[12]</sup>,实际设计中都是利用离散的球壳来逼近理想的渐变介电常数,如图1所示。在龙伯透镜具体的设计过程中,需要确定以下几个参数:透镜球的直径、透镜球的层数、每一层的厚度和每层介质的介电常数大小。

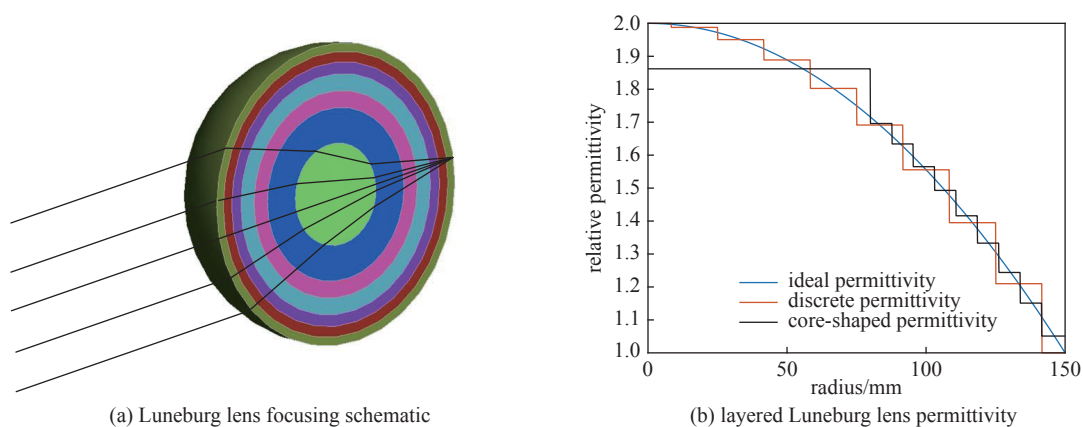


Fig. 1 Schematic diagram of layered Luneburg lens

图1 分层龙伯透镜结构示意图

传统的龙伯透镜设计主要有等介电常数变化和等厚度分层法,等介电常数方法是由 G.Peeler 和 H.Coleman 最早提出的<sup>[13]</sup>,相邻两层介电常数之差为定值;等厚度分层法是由 J.Sanford 提出的<sup>[14]</sup>,相邻两层的厚度为定值,每层的介电常数取半径平均值处对应的介电常数值材料的层数越多,越与理想状态接近,但随着层数的增加,层隙间的空气也会随之增多,且制作难度和生产成本也将增加。同时层间的间隙和粘接等也会带来附加的相位差。龙伯透镜的介电常数在球心变化缓慢,当  $r/R$  从 0 变到 0.3 时,介电常数仅从 2 变成 1.91,而  $r/R$  一直增大到 0.5 时,介电常数才变到 1.75,因此综合考虑制造工艺难度和辐射特性,考虑设计带有均匀球核的龙伯透镜,见图 1。

应用 Feko 电磁仿真软件,根据图 1(b)的参数建立龙伯透镜的仿真模型,波源为垂直极化平面波,频率覆盖 4~18 GHz,得到龙伯透镜焦弧面上的场强分布,如图 2 所示,远场平面波在透镜表面汇聚。

由于透镜的介质分布特性,天线对电磁波的频段相对不敏感,所以频带可以很宽。图 3 仿真数据显示,在 4~18 GHz 频段 40°视场范围内,平面波均在球面聚焦,焦斑的成像位置随着入射角度的改变而改变,但是焦斑的形状基本不变,保持空不变特性。

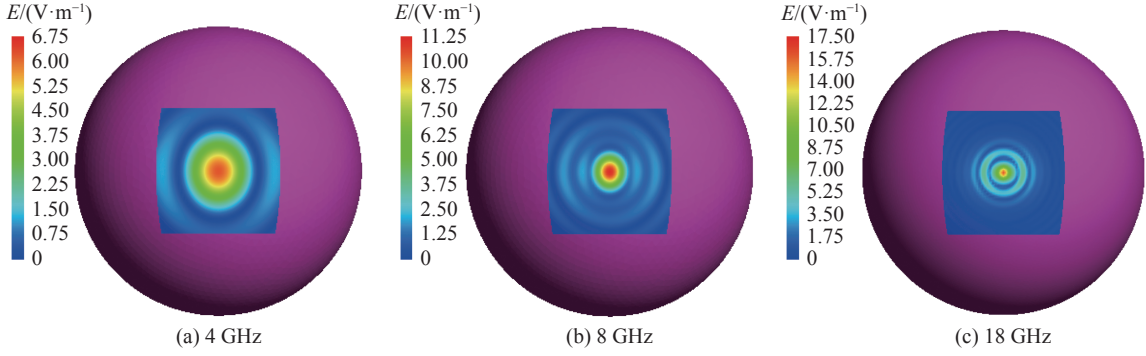


Fig. 2 E-field magnitude distribution on focal surface

图 2 不同频率下龙伯透镜焦距面上的场强分布

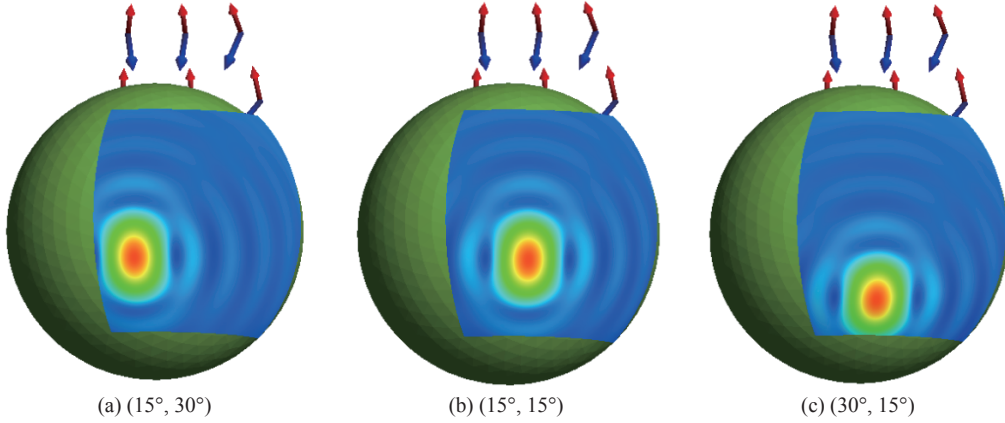


Fig. 3 Spatial invariance property of Luneburg lens imaging

图 3 龙伯透镜的空不变成像特性

## 1.2 空不变超分辨算法

由于透镜口径有限, 系统成像衍射受限, 高频分量被系统截断, 造成了图像模糊。图像超分辨即为衍射的逆问题, 获得准确的点扩展函数对图像恢复有着十分重要的影响<sup>[45]</sup>。在假设系统噪声为加性噪声的前提下, 其成像模型式(2)既与点扩展函数的频率相关也与其位置相关。针对龙伯透镜空不变的成像特性, 对于同一个频率在不同位置的模糊图像超分辨均可选择同一个点扩展函数进行迭代计算, 因此只需研究同一位置的不同频率点扩展函数的区别, 由此成像模型由式(2)优化为式(3), 只保留了点扩展函数的频率变量而不再与位置相关

$$P_b(x, y) = P_o(x, y) \otimes h(f, p(x, y)) + n(x, y) \quad (2)$$

↓

$$P_b(x, y) = P_o(x, y) \otimes h(f) + n(x, y) \quad (3)$$

式中:  $P_b$ 表示模糊图像强度分布,  $P_o$ 表示原始图像强度分布,  $h$ 表示系统的点扩展函数,  $f$ 表示频率,  $p$ 表示位置,  $\otimes$ 代表二维线性卷积运算,  $n$ 表示成像过程中引入的加性噪声。研究宽带龙伯透镜电磁图像点扩展函数时空频对应关系, 从空频特征估计辐射源频率, 选择对应的点扩展函数进行超分辨处理, 从空变频变问题简化为只频变问题。

仿真设置 2 个辐射源, 频率为 8 GHz, 信噪比设为 10 dB, 分别设置目标位于  $(0^\circ, 0^\circ)$ 、 $(0^\circ, 5^\circ)$  和  $(0^\circ, 0^\circ)$ 、 $(0^\circ, 3^\circ)$ , 在间隔  $5^\circ$  和间隔  $3^\circ$  两种情况下进行仿真, 观测不同间隔下系统成像特性。如图 4 所示,  $x$  轴为方位角向,  $y$  轴为俯仰角向,  $z$  轴表示辐射源归一化强度, 原模糊图像成一个模糊斑, 无法明确辐射源的数目更无法准确确定其位置, 超分辨处理后 2 个源清晰可见, 仿真一位置分别为  $(0^\circ, -0.5^\circ)$ 、 $(-0.5^\circ, 4.5^\circ)$ , 间隔约  $5^\circ$ , 仿真二位置分别为  $(-0.5^\circ, 0^\circ)$ 、 $(0^\circ, 3^\circ)$ , 间隔约  $3^\circ$ , 计算间隔与预设相符, 数目正确、位置准确。

## 2 实验

图 5(a) 是实验室现有抛物反射面电磁成像系统整体样机<sup>[16]</sup>, 直径 3 m, 占地面积大, 图 5(b) 是本文大视场龙伯

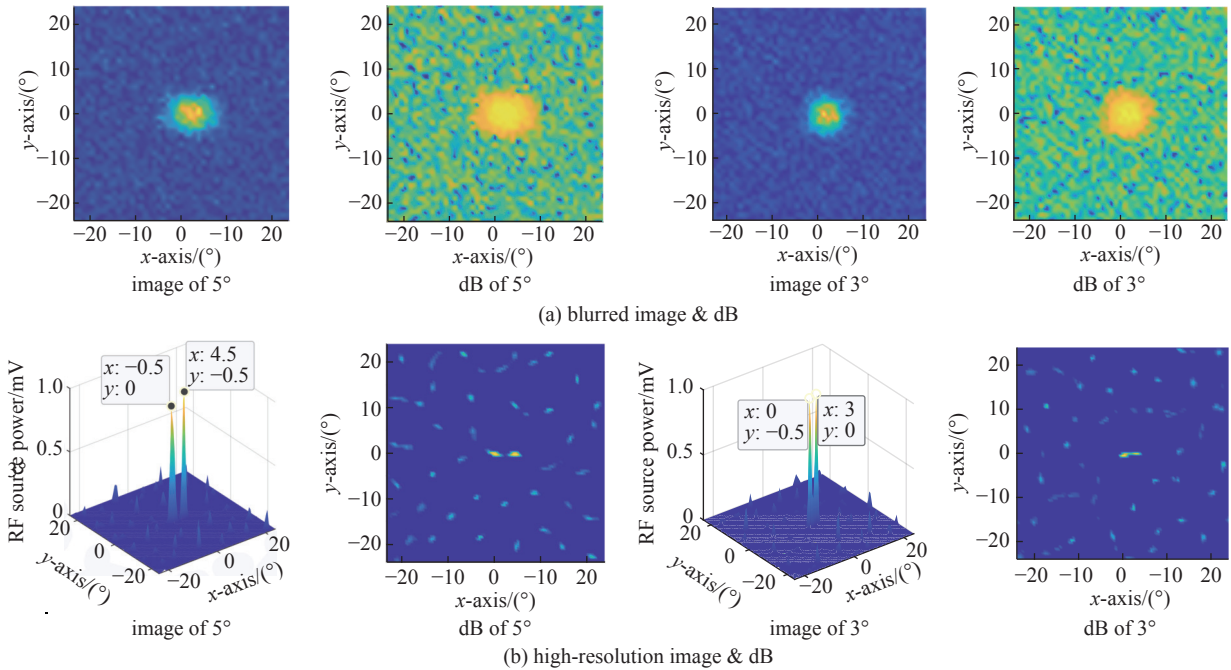


Fig. 4 8 GHz super resolution of 2 RF sources

图 4 2 源 8 GHz 超分辨重建仿真

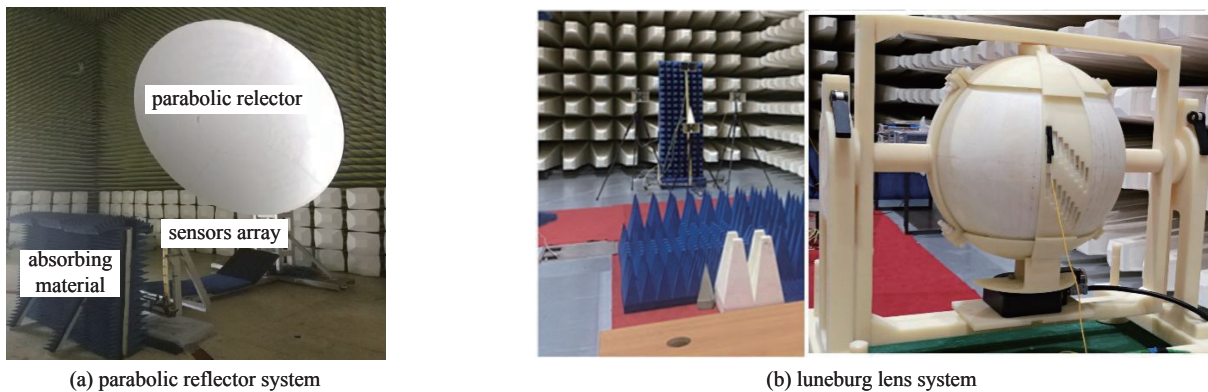


Fig. 5 Prototype of wideband large field-of-view (FOV) electromagnetic imaging system

图 5 宽带大视场电磁成像系统样机

透镜电磁成像系统样机，直径只有 30 cm，成像面直接在透镜表面，无需更多载荷空间。电磁辐射源的辐射电磁波经过反射面或龙伯透镜的汇聚作用，将在成像平面上形成电磁辐射源分布图。

在实验中采用两个或多个喇叭天线作为空间场景的辐射源，进行成像和分辨率测试。喇叭天线口面距龙伯透镜中心轴向距离为 11.24 m，确保被测辐射源在系统的探测范围内，3 个喇叭天线高度均为 1.4 m，3 个喇叭天线水平间距为 0.98 m，对应分辨角度为 5°。在 11.24 m 远的电磁场景中，辐射源发射的电磁波通过龙伯透镜天线汇聚，在龙伯透镜表面处进行接收，光电探头在接收面呈 17×17 分布，此时分布在±24°范围内，经度、纬度方向探头两两均匀间隔 3°。实验结果图 6 所示 x 轴为方位角向，y 轴为俯仰角向，z 轴表示辐射源归一化强度，图 6(a) 系统直接成像 18 GHz 隐约成两片模糊斑，无法确定其准确位置，8 GHz 成模糊一片斑更无法分辨辐射源数目及位置，超分辨处理后图 6(b) 18 GHz 和 8 GHz 的 3 个源清晰可见，方位角和俯仰角方位 18GHz 三源处理结果分别为 (-5.5°, -2.0°)、(0.3°, -2.0°)、(5.5°, -2.0°)，两两间隔约 5.5°，8 GHz 三源处理结果分别为 (-3.8°, -2.6°)、(0.87°, -2.6°)、(5.5°, -2.6°)，两两间隔约 4.7°，两次实验的俯仰角基本保持一致，数目正确、位置准确。

与仿真结果一致，抛物反射面电磁成像系统实验测试辐射源在不同位置成像斑的形状不同，而本文的龙伯透镜成像系统实验测试辐射源在不同位置的成像斑大小和形状基本保持不变。仿真部分展示了单源(图 3)、双源(图 4)的成像效果，验证了成像系统的空不变特性和算法有效性，实验部分增加辐射源为 3 个(图 6)或者 4 个(图 7(b))，进一步验证了仿真的正确性。抛物反射面成像系统因为点扩展函数的形变而导致点源不同位置的焦

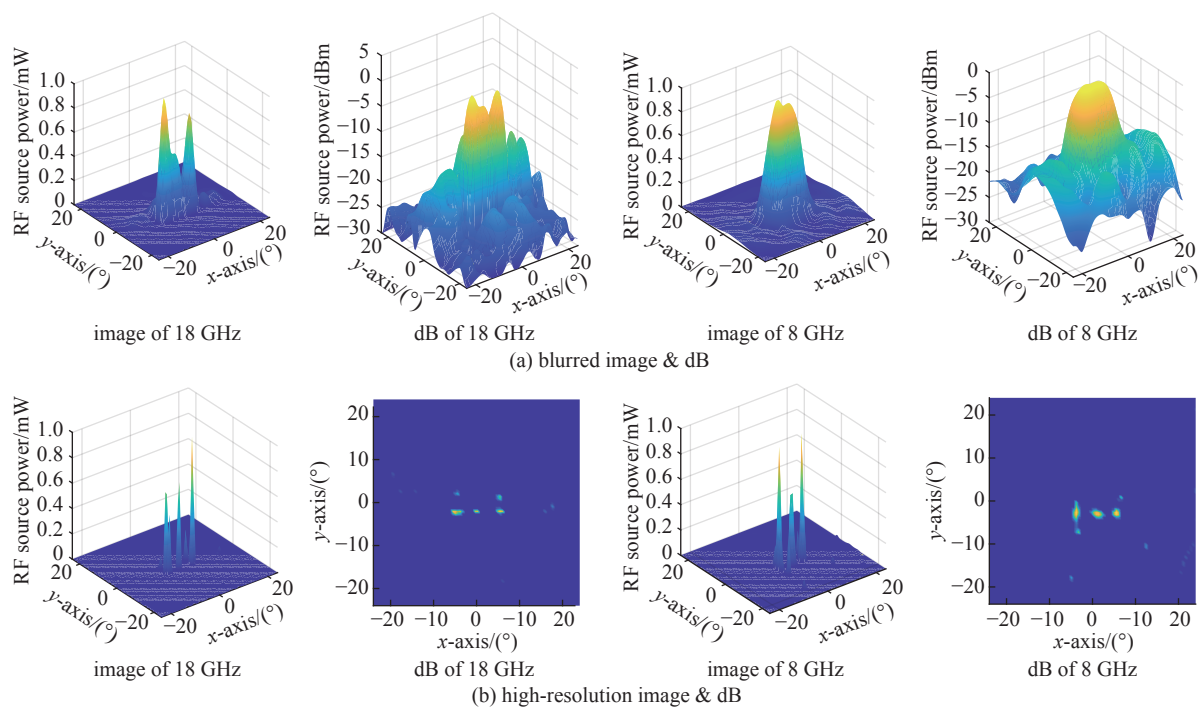


Fig. 6 Super-resolution experiment of 3 RF sources

图 6 3 源超分辨重建试验

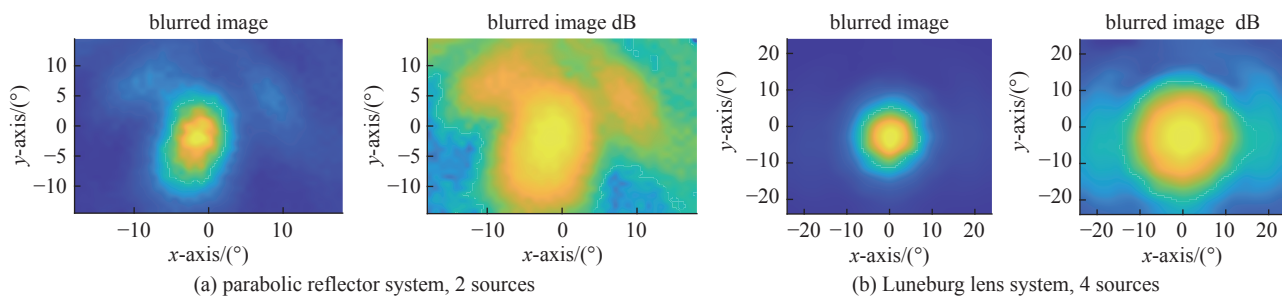


Fig. 7 Multiple RF sources imaging

图 7 多源系统成像

斑形状不一致(图 7(a)),用同一个点扩展函数做超分辨处理 4 GHz 辐射源达到 3°分辨率视场内数目不能超过 2,但本文龙伯透镜成像系统可以分辨 4 个。对于龙伯透镜成像系统,无论视场内有一个还是多个同频辐射源,都可以代入同一个点扩展函数进行反卷积计算而不影响图像恢复效果。

### 3 结论

利用龙伯透镜焦点不唯一的几何特性和介质材料的介电常数随频率变化的不敏感性,本文设计了大视场宽频带小体积电磁成像系统,并研究了空不变成像特性超分辨算法,仿真数据和实验测试都验证了系统方案的有效性,提高了系统分辨率,扩大了成像视野范围,达到方位角及俯仰角均 40°的成像范围。同时,本文仍有进一步研究待补充,如透镜表面的电磁绕射问题、系统增益和衰减的平衡问题等,这也将是下一阶段的工作重点。

### 参考文献:

- [1] Kodali V P. Engineering electromagnetic compatibility: principles, measurements, technologies, and computer models[M]. Piscataway: IEEE Press, 2001.
- [2] 李改有. 复杂电磁环境下辐射源自适应跟踪与信息融合研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022. (Li Gaiyou. Research on adaptive tracking and information fusion of emitters in complex electromagnetic environment[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022)
- [3] 陈昭. 超宽带接收机的研究与设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2023. (Chen Zhao. Research and design of UWB receiver[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2023)
- [4] Xie Shuguo, Wang Tianheng, Hao Xuchun et al. Localization and frequency identification of large-range wide-band electromagnetic interference sources in electromagnetic imaging system[J]. *Electronics*, 2019, 8: 499.
- [5] Yang Yan, Xie Shuguo, Dong Yakai et al. A frequency recovering method for photonic under-sampling E-field measurement[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021,

21(12): 13495-13505.

- [6] 杜鑫, 谢树果, 郝旭春, 等. 一种电磁干扰源成像多分辨率分区算法[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27: 103223. (Du Xin, Xie Shuguo, Hao Xuchun, et al. An electromagnetic interference source imaging algorithm of multi-resolution partitions[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 103223)
- [7] Niu Lijie, Liu Hao, Wu Lin, et al. Experimental study of an L-band synthetic aperture radiometer for ocean salinity measurement[C]//Proceedings of 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2016: 418-421.
- [8] 赵岚. 毫米波凝视成像机理研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009. (Zhao Lan. Study on mechanism of millimeter-wave staring imaging[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009)
- [9] 李先进. 伦伯透镜天线概述[C]//第六届卫星通信新业务新技术学术年会论文集. 2010: 444-450. (Li Xianjin. Overview of Luneburg lens antenna[C]//Proceedings of the 6th Annual Conference on New Services and Technologies of Satellite Communication. 2010: 444-450)
- [10] 王熙. 毫米波多波束龙伯透镜天线与高增益透射阵天线的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2023. (Wang Xi. Research on millimeter-wave multi-beam Luneburg lens antennas and high-gain transmittary antennas[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2023)
- [11] Luneburg R K. Mathematical theory of optics[M]. Providence: Brown University Press, 1944.
- [12] Zhao Liwei, Wu Yafei, Wang Cong, et al. A 3-D-printed deployable Luneburg lens antenna based on the pop-up kirigami sphere[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2023, 71(8): 6481-6489.
- [13] Peeler G, Coleman H. Microwave stepped-index luneburg lenses[J]. *IRE Transactions on Antennas and Propagation*, 1958, 6(2): 202-207.
- [14] Sanford J R. Scattering by spherically stratified microwave lens antennas[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1994, 42(5): 690-698.
- [15] Yang Meiling, Xie Shuguo, Zhang Shenda, et al. Space-frequency domain non-blind method for wideband electromagnetic imaging restoration[C]//Proceedings of 2021 International Applied Computational Electromagnetics Society (ACES-China) Symposium. 2021: 1-2.
- [16] Xie Shuguo, Luan Shenshen, Wang Tianheng, et al. Frequency estimation method for wideband microwave camera[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(10): 6838-6847.