

应用于太赫兹成像的弧形多收多发阵列的设计方法

于洋^{1,2}, 乔灵博², 游燕², 赵自然^{1,2*}

¹清华大学工程物理系, 北京 100084;

²清华大学危爆物品扫描探测技术国家工程实验室, 北京 100084

摘要 提出了基于等效阵列概念的弧形多收多发(MIMO)阵列的设计方法,依照该方法设计了一种 50 发 60 收的弧形 MIMO 阵列,并在太赫兹波段进行仿真分析。结果表明,所设计的弧形 MIMO 阵列的成像分辨率接近于理论极限;该弧形 MIMO 阵列与包含 3000 个收发同置天线的等效阵列相比,点扩展函数的主瓣宽度一致、旁瓣波峰波谷的位置一一对应,其等效性得到了验证;与传统直线 MIMO 阵列相比,弧形 MIMO 阵列的成像范围较大,其旁瓣伪影得到明显抑制,这有利于获得更好的曲面目标侧面成像效果。

关键词 太赫兹技术; 成像系统; 多收多发; 阵列设计; 安检

中图分类号 TN957.52

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0614014

Design Method of Arc Multiple-Input Multiple-Output Array for Terahertz Imaging

Yu Yang^{1,2}, Qiao Lingbo², You Yan², Zhao Ziran^{1,2*}

¹Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

²National Engineering Laboratory for Dangerous Articles and Explosives Detection Technologies, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract In this study, we propose a design method to develop an arc multiple-input multiple-output (MIMO) antenna array based on the equivalent array concept. Further, an arc MIMO antenna array containing 50 transmitters and 60 receivers is designed. The simulation experiment and analysis conducted in the terahertz band denote that the imaging resolution of the arc MIMO array is almost equal to the theoretical limit. When compared with an equivalent array containing 3000 transmitters, the main-lobe widths of both the point spread functions are observed to be almost identical, and the positions of the side lobe peaks and valleys correspond accordingly. Subsequently, the equivalence between the arc MIMO array and the equivalent array can be verified based on the simulation results. When compared with the traditional linear MIMO array, the arc MIMO array exhibits a larger imaging range, and its side gating artifacts are almost completely reduced. These factors are important to obtain better imaging results with respect to the side view of the curved surface imaging targets.

Key words terahertz technology; imaging systems; multiple-input multiple-output; array design; security detection

OCIS codes 110.6795; 040.1240; 170.0110

1 引言

太赫兹波成像以其非电离辐射、高分辨及可穿透衣物等特性,在人体安检成像、无损检测等领域受到了越来越多的关注^[1-3]。为了实现近场高分辨成像,天线阵列要有足够大的孔径,且阵列中天线间隔距离需满足空间采样定理。随着成像频率的提高,

所需的天线数目迅速增加,这在实际系统中难以实现,而多收多发(MIMO)成像的出现为太赫兹波近场成像提供了一种新的思路^[4]。MIMO 成像是一种利用收发天线单元的多重组合来实现以较少的天线数目生成图像的方法,能够在保证图像分辨率的同时显著降低系统的成本及复杂度。基于 MIMO 阵列的太赫兹波成像系统的关键是阵列设计,它对

收稿日期: 2019-01-24; 修回日期: 2019-02-19; 录用日期: 2019-03-01

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合资助(U1633202)、国家自然科学基金重点项目(61731007)

* E-mail: zhaozr@mail.tsinghua.edu.cn

成像质量、参数估计和目标检测等都有直接的影响。

基于等效阵列概念进行 MIMO 阵列设计是远场应用中一种有效的方式。在远场条件下, MIMO 阵列可以等效为单收单发(SISO)阵列,该 SISO 阵列被称为 MIMO 阵列的等效阵列,等效阵列中天线的空间位置矢量是 MIMO 阵列中发射天线的空间位置矢量和接收天线空间位置矢量的卷积^[5]。国内外一些研究人员已对该方法在近场应用中的可行性进行了初步探究,典型的有 Zhuge 等^[6-7]设计的 4 发 8 收稀疏阵列以及 12 发 13 收的正交阵列,Ge 等^[8]提出的应用于近场成像的 MIMO 稀疏阵列, Tan 等^[9-10]提出的二维 MIMO 稀疏阵列,以及 Ahmed 等^[11-12]所采用的正方形稀疏阵列,但上述研究仅基于直线 MIMO 阵列或平面 MIMO 阵列。由于镜面反射的影响,人体等曲面成像目标侧面回波信号在平面阵列及直线阵列等平面扫描方式下难以被接收,得到的成像物体侧面图相对模糊。而对弧形阵列进行单次扫描即可获得成像目标各角度的信息,能在一定程度上克服平面扫描时侧面成像质量差的缺点^[13]。

本文针对太赫兹安检成像的需求,基于等效阵

列概念提出了一种弧形 MIMO 阵列的设计方法,并通过仿真对该方法在弧形 MIMO 阵列设计中的有效性进行验证。

2 成像模型

图 1 为弧形 MIMO 阵列成像模型示意图,该阵列由 M 个发射天线和 N 个接收天线组成,任一发射天线 t 到成像目标上任一点 o 的传输函数为

$$T_{to} = A_{to} p(r_{to}), t = 1, 2, \dots, M, o = 1, 2, \dots, O, \quad (1)$$

式中: A_{to} 为发射天线 t 与目标点 o 之间的信号振幅衰减因子; $p(r_{to})$ 为两者之间的相位传播因子,可记为 $\exp(-j2\pi r_{to})$; r_{to} 为发射天线 t 与目标点 o 之间的距离; O 为目标点的总数。同理,任一接收天线 r 到目标点 o 的传输函数为

$$R_{or} = A_{or} p(r_{or}), r = 1, 2, \dots, N, o = 1, 2, \dots, O, \quad (2)$$

式中: A_{or} 为目标点 o 与接收天线 r 之间的信号振幅衰减因子; $p(r_{or})$ 为两者之间的相位传播因子,可记为 $\exp(-j2\pi r_{or})$; r_{or} 为目标点 o 与接收天线 r 之间的距离。

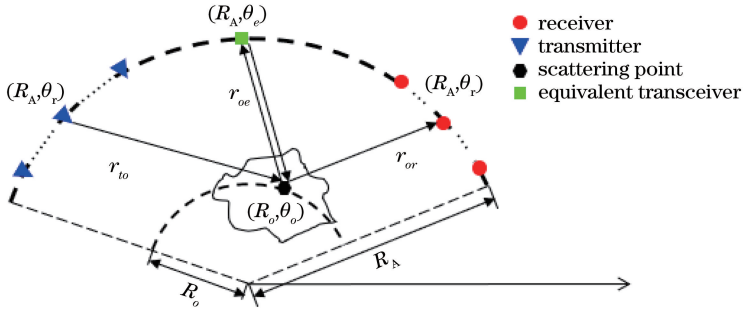


图 1 弧形 MIMO 阵列成像模型示意图

Fig. 1 Schematic of arc MIMO array imaging model

由任一发射天线 t 发射的单位振幅信号经过散射点 o 的散射后,接收天线 r 接收到的回波信号为

$$S_{tor} = \rho(o) T_{to} R_{or}, \quad (3)$$

式中: $\rho(o)$ 为散射点 o 的反射率。在近场条件下,振幅衰减因子可视为常数。归一化处理后得到的回

波信号为

$$S_{tor} = \rho(o) \exp[-j\omega(\tau_{to} + \tau_{or})], \quad (4)$$

式中: ω 为电磁波的角频率; τ_{to} 、 τ_{or} 分别为发射天线 t 与目标点 o 、目标点 o 与接收天线 r 之间的时延。总时延 τ_{tor} 可记为

$$\tau_{tor} = \tau_{to} + \tau_{or} = \frac{r_{to} + r_{or}}{c} = \frac{\sqrt{R_A^2 + R_o^2 - 2R_A R_o \cos(\theta_o - \theta_t)} + \sqrt{R_A^2 + R_o^2 - 2R_A R_o \cos(\theta_o - \theta_r)}}{c}, \quad (5)$$

式中: c 为光速; R_A 和 R_o 分别为弧形 MIMO 阵列和目标点 o 在极坐标系中的极径; θ_o 、 θ_t 和 θ_r 分别为目标点 o 、发射天线 t 和接收天线 r 在极坐标系中的极角。信号传输距离可近似表示为

$$r_{to} + r_{or} \approx 2\sqrt{R_A^2 + R_o^2 - 2R_A R_o \cos\left(\theta_o - \frac{\theta_t + \theta_r}{2}\right)} = 2r_{oe}, \quad (6)$$

式中: r_{oe} 为目标点 o 与收发同置天线 e 之间的距离; $\theta_e=(\theta_t+\theta_r)/2$ 为收发同置天线 e 对应的极角。(6)式显示,发射天线 t 和接收天线 r 组合产生的探测通道,可以用位于两者中心的一个收发同置天线 e 来代替。因此,可以基于等效阵列概念来设计弧形 MIMO 阵列。

3 弧形 MIMO 阵列设计方法

基于等效阵列概念的弧形 MIMO 阵列设计方法的基本原理为:首先设计满足成像性能要求的等效弧形 SISO 阵列,然后将其分解为相应的弧形 MIMO 阵列。具体而言,根据发射信号的中心波长 λ_c 、场景中心点与天线阵列的成像距离 d 、成像半径 R_o 以及方位角分辨率 δ_θ 等参数,设计等效阵列对应的半径 R_A 和孔径角度 θ_E 。其中,方位角分辨率 δ_θ 可表示为

$$\delta_\theta = \frac{\delta_{\tan}}{R_o}, \quad (7)$$

式中: δ_{\tan} 为场景中心点切线方向的空间分辨率。主动式太赫兹波成像过程可以看作是波长为 $\lambda/2$ 的单向光场传播过程^[14],其成像目标中心点切线方向的空间分辨率 δ_{\tan} 的大小取决于天线阵列所能接收到的空间频率的变化范围 Δk ^[14],即

$$\delta_{\tan} = \frac{2\pi}{\Delta k} = \frac{\lambda_c}{4\sin\gamma}, \quad (8)$$

式中: γ 为天线孔径和成像距离决定的最大几何角度,其计算表达式为

$$\gamma = \arctan\left(\frac{R_A \sin\frac{\theta_E}{2}}{d}\right). \quad (9)$$

综合(7)~(9)式可知,当 δ_{\tan} 优于 δ_θ 时,等效阵列对应的孔径角度 θ_E 应满足:

$$\sin\frac{\theta_E}{2} \geq \frac{d}{R_A} \tan\left[\arcsin\left(\frac{\lambda_c}{4R_o\delta_\theta}\right)\right], \quad (10)$$

式中:成像距离 d 为场景中心点到弧形天线阵列所对应弦的距离,其与 R_A 、 θ_E 的关系可表达为

$$d = R_A \cos\frac{\theta_E}{2} - R_o. \quad (11)$$

进一步整理(10)式和(11)式可得

$$\theta_E \geq 2\arctan\frac{d \tan\left[\arcsin\left(\frac{\lambda_c}{4R_o\delta_\theta}\right)\right]}{d + R_o}, \quad (12)$$

$$R_A = \frac{d + R_o}{\cos\frac{\theta_E}{2}}. \quad (13)$$

依据成像的空间采样条件^[15],等效阵列天线阵元之间的间隔 $\Delta\theta_e$ 应满足:

$$\Delta\theta_e \leq \frac{\lambda_c}{4R_A} \sqrt{1 + \frac{4d^2}{(L + R_A\theta_E)^2}}, \quad (14)$$

式中: L 为观测场景的方位向大小。频率采样间隔 Δf 应满足:

$$\Delta f \leq \frac{c}{4d}. \quad (15)$$

利用已获得的等效阵列参数,分解得到相应的弧形 MIMO 阵列参数。其中,弧形 MIMO 阵列参数应满足:

$$\begin{cases} N_E = 1 + (\theta_E/\Delta\theta_e) = N_T N_R \\ \Delta\theta_t = \frac{\Delta\theta_r}{N_{\text{sub } T}} = 2\Delta\theta_e \\ D_T = N_R \Delta\theta_r \end{cases}, \quad (16)$$

式中: N_E 、 N_T 和 N_R 分别为等效阵列包含的收发同置天线数目、MIMO 阵列中发射天线的数目和接收天线数目。为得到收发天线总数目最小的弧形 MIMO 阵列, N_T 与 N_R 应尽可能地接近; $\Delta\theta_t$ 和 $\Delta\theta_r$ 分别为发射天线间隔角和接收天线间隔角; $N_{\text{sub } T}$ 和 D_T 分别为单个发射天线子阵内的天线数目和发射天线子阵的间隔角。接收天线阵列和发射天线阵列中天线位置集合可表示为

$$\theta_R = \{-n\Delta\theta_r, (-n+1)\Delta\theta_r, \dots, n\Delta\theta_r\}, \quad (17)$$

$$\theta_T =$$

$$\{\theta_{\text{sub } T} - mD_T, \theta_{\text{sub } T} - (m-1)D_T, \dots, \theta_{\text{sub } T} + mD_T\}, \quad (18)$$

式中: $\theta_{\text{sub } T} = \{-m'\Delta\theta_t, -(m'-1)\Delta\theta_t, \dots, m'\Delta\theta_t\}$ 为发射天线子阵内阵元位置集合; $n = (N_R - 1)/2$ 、 $m = (N_T/N_{\text{sub } T} - 1)/2$ 和 $m' = (N_{\text{sub } T} - 1)/2$ 均为无量纲数。

由于分解得到的弧形 MIMO 阵列和等效阵列不是一一对应的关系,故最后需要根据系统要求从分解得到的多个弧形 MIMO 阵列中选择最为合适的弧形 MIMO 阵列。

4 设计实例及仿真验证

4.1 设计实例

考虑一种太赫兹成像的场景,成像目标对应的成像半径为 0.1 m,其中心点与天线阵列的距离为 0.35 m,要求系统的方位角分辨率优于 0.006 rad,发射信号的中心频率设定为 140 GHz。则由(12)、(14)式可得

$$\begin{cases} \theta_e \geq 1.992 \text{ rad} \\ \Delta\theta_e \leq 0.0069 \text{ rad}^\circ \end{cases} \quad (19)$$

取 $\theta_e = 1.999 \text{ rad}$, $\Delta\theta_e = 0.0067 \text{ rad}$, 则 $R_A = 0.827 \text{ m}$ 。假设等效阵列中收发同置天线数目为 3000, 利用所提的分解法, 将等效阵列分解为 6 种

50 发 60 收的弧形 MIMO 阵列, 该 6 种 MIMO 阵列及其等效阵列的结构示意图如图 2 所示。其中 MIMO 阵列 2 的空间结构最紧凑, 故选该阵列作为仿真的弧形 MIMO 阵列。

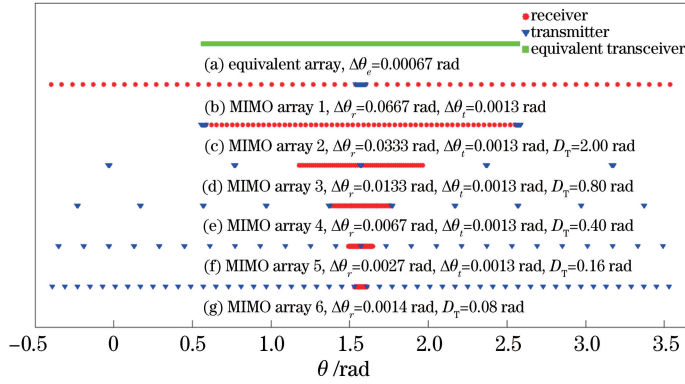


图 2 6 种 50 发 60 收弧形 MIMO 阵列及其等效阵列的结构示意图

Fig. 2 Topologies of arc MIMO arrays with 50 transmitters and 60 receivers as well as their equivalent arrays

4.2 仿真验证

弧形 MIMO 阵列 2 及其等效阵列点扩展函数 (PSF) 的仿真结果如图 3 所示, 其中点目标在极坐标系中的位置坐标为 $(0.1, \pi/2)$, 发射信号为频率 $f = 140 \text{ GHz}$ 的单频信号, 图像重建算法为反向传播 (BP) 算法。从图 3 可以看出, 弧形 MIMO 阵列的 PSF 与等效阵列的 PSF 的主瓣宽度一致, 且旁瓣的波峰及波谷的位置一一对应, 验证了基于等效阵列概念的弧形 MIMO 阵列设计方法的有效性。同时, 由瑞利判据可求得图 3 中 MIMO 阵列的方位角分辨率 $\delta_\theta \approx 0.0059 \text{ rad} < 0.006 \text{ rad}$, 满足设计要求。图 4 为弧形 MIMO 阵列对多点目标方位向的成像结果图。成像结果显示: 当两个点目标之间的距离为 0.012 rad 时, 两者能被清晰地区分; 当两个点目标之间的距离为 0.009 rad 时, 两者同样可以被清晰地区分; 而当两个点目标之间的距离为 0.006 rad 时, 两点目标几乎不可区分, 但依旧可以看出该成像结果存在两个峰值。由此可以判断该 MIMO 阵列的极限分辨率约为 0.006 rad , 该结果进一步验证了弧形 MIMO 阵列的方位向分辨能力。

图 5 为弧形 MIMO 阵列及其等效阵列对位于不同成像半径的点目标仿真成像结果。点目标对应的成像半径分别为 $0.120, 0.160, 0.200 \text{ m}$ 。从图中可以看出, 在不同成像半径下, 弧形 MIMO 阵列与其等效 SISO 阵列的成像结果均高度重合, 两者的等效性得到了进一步的验证。同时, 图 5(a)~5(c) 中 MIMO 阵列的方位角分辨率分别为 $0.0050,$

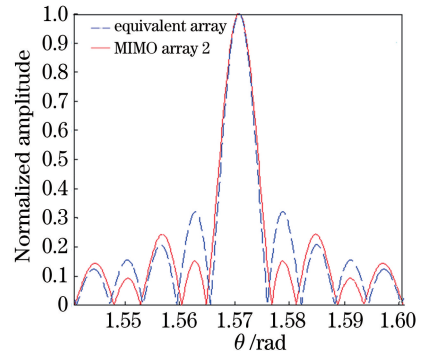


图 3 弧形 MIMO 阵列 2 及其等效阵列 PSF

($d = 0.35 \text{ m}, f = 140 \text{ GHz}$)

Fig. 3 PSF for MIMO array 2 and its equivalent array

($d = 0.35 \text{ m}, f = 140 \text{ GHz}$)

$0.0036, 0.0029 \text{ rad}$ 。由 (7) 式和 (8) 式可知, 天线阵列的角分辨率与成像半径负相关, 故随着成像半径的增大, 弧形 MIMO 阵列的角分辨率不断下降, 其分辨能力不断增强。

接下来对比直线 MIMO 阵列和弧形 MIMO 阵列对曲面目标的仿真成像结果。图 6 为弧形 MIMO 阵列及直线 MIMO 阵列成像系统布置图。将长半轴为 0.50 m 、短半轴为 0.25 m 的理想金属椭圆薄片作为成像目标; 成像系统各包含两组 MIMO 阵列, 分别对曲面目标的前、后面进行成像。弧形 MIMO 阵列采用图 2 中的阵列 2, 直线 MIMO 阵列的收发天线数目与弧形 MIMO 阵列相同, 其天线间隔距离等于弧形 MIMO 阵列天线间隔角度对应的弧长。收发天线均为偶极子天线, 发射信号的中心

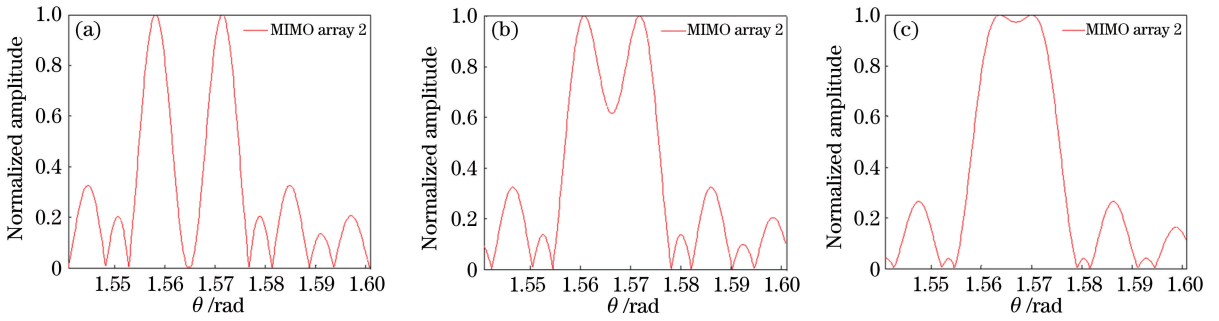


图 4 弧形 MIMO 阵列多点目标方位向成像结果。(a)点目标位置 $(0.1, \pi/2), (0.1, \pi/2 - 0.012)$;
(b)点目标位置 $(0.1, \pi/2), (0.1, \pi/2 - 0.009)$; (c)点目标位置 $(0.1, \pi/2), (0.1, \pi/2 - 0.006)$

Fig. 4 Azimuthal imaging results of multiple points for arc MIMO array. (a) Points located at $(0.1, \pi/2), (0.1, \pi/2 - 0.012)$;
(b) points located at $(0.1, \pi/2), (0.1, \pi/2 - 0.009)$; (c) points located at $(0.1, \pi/2), (0.1, \pi/2 - 0.006)$

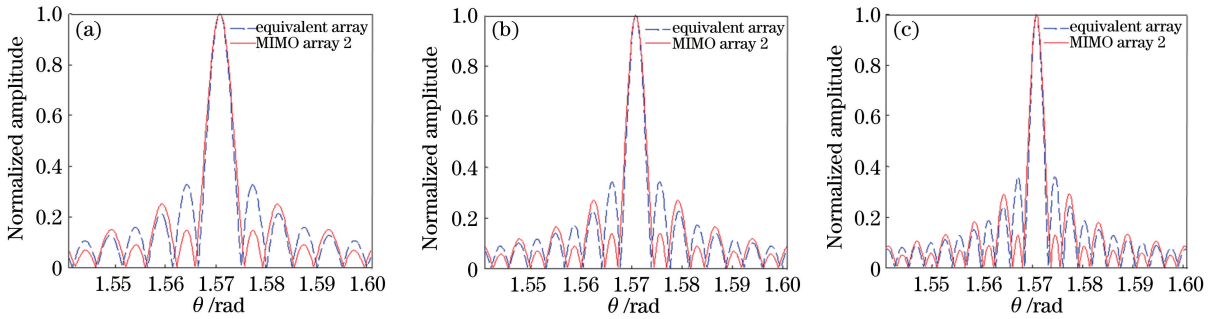


图 5 弧形 MIMO 阵列及其等效阵列对位于不同成像半径的点目标仿真成像结果。
(a)点目标位置 $(0.12, \pi/2)$; (b)点目标位置 $(0.16, \pi/2)$; (c)点目标位置 $(0.20, \pi/2)$

Fig. 5 Imaging results of points located at different imaging radii for arc MIMO array and its equivalent array.
(a) Point located at $(0.12, \pi/2)$; (b) point located at $(0.16, \pi/2)$; (c) point located at $(0.20, \pi/2)$

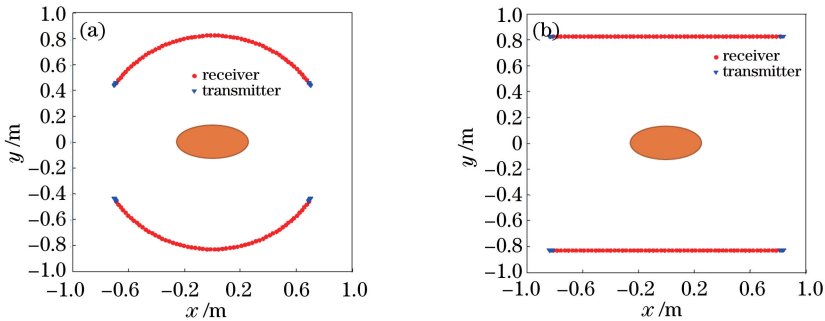


图 6 MIMO 阵列成像系统布置图。(a)弧形 MIMO 阵列; (b)直线形 MIMO 阵列

Fig. 6 Layouts of MIMO imaging systems. (a) Arc MIMO array; (b) linear MIMO array

频率为 140 GHz, 带宽为 40 GHz, 天线阵列到原点的距离为 0.827 m, 利用电磁仿真软件 FEKO 获得散射场数据, 并通过 BP 算法进行图像重建。

图 7 为弧形和直线形两种 MIMO 阵列的 FEKO 仿真成像结果图。由于电磁波无法穿透金属, 所成图像形状为圆环, 该圆环的宽度与距离向分辨能力有关。从图中可以看出, 在 22 dB 的动态范围内, 弧形 MIMO 阵列所成图像的最大张角约为 320° , 而直线 MIMO 阵列所成图像的最大张角约为

290° , 与直线 MIMO 阵列相比, 弧形 MIMO 阵列的成像范围增大了约 10%。同时, 直线 MIMO 阵列所成图像存在严重的旁栅伪影, 而弧形 MIMO 阵列所成图像的旁栅伪影明显比直线 MIMO 阵列浅。

5 结 论

从弧形 MIMO 阵列的成像模型出发, 提出了一种基于等效阵列概念的弧形 MIMO 阵列设计方法。在成像目标对应的成像半径为 0.1 m、中心点与天

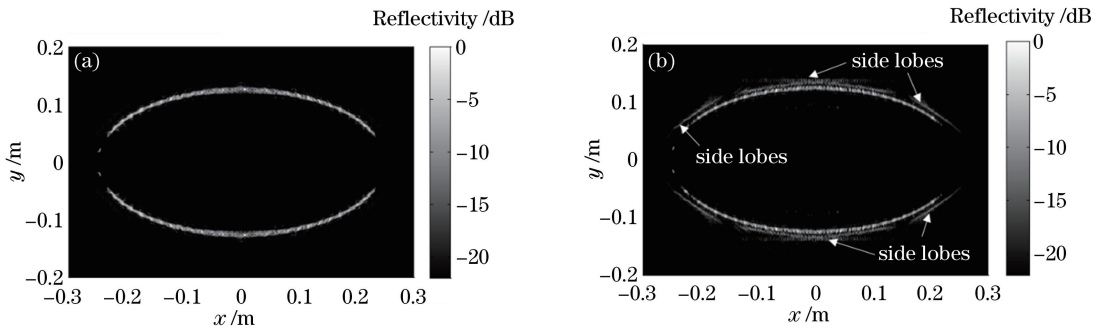


图 7 两种 MIMO 阵列的 FEKO 仿真成像结果。(a)弧形 MIMO 阵列;(b)直线形 MIMO 阵列

Fig. 7 Simulation imaging results of two MIMO arrays based on FEKO. (a) Arc MIMO array; (b) linear MIMO array

线阵列的距离为 0.35 m 时,弧形 MIMO 阵列的方位角分辨率 $\delta_\theta \approx 0.0059$ rad,该值接近理论极限。在不同的成像半径下,利用该方法设计的 50 发 60 收的 MIMO 阵列与包含 3000 个收发同置天线的 SISO 阵列均具有相近的 PSF,验证了所设计的 MIMO 阵列能极大地降低太赫兹成像中所需的天线数目。同时,曲面目标的仿真成像结果表明,与直线形 MIMO 阵列相比,弧形 MIMO 阵列对人体等曲面成像目标侧面的成像效果更好,其旁栅伪影也明显比直线形 MIMO 阵列浅,该结果验证了基于等效阵列概念的弧形 MIMO 阵列设计方法在弧形 MIMO 阵列设计中的有效性。

参 考 文 献

[1] Zhang J S, Zhu W W, Zhao Y J, *et al.* Passive THz imaging system based on the crank-rocker mechanism [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1211006.
张镜水, 朱维文, 赵跃进, 等. 基于曲柄摇杆机构的被动太赫兹波成像系统 [J]. *光学学报*, 2013, 33(12): 1211006.

[2] Yan Y Q, Zhao C Q, Xu W D, *et al.* Research on the terahertz active ghost imaging technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(8): 0814001.
闫显琪, 赵成强, 徐文东, 等. 太赫兹主动关联成像技术研究 [J]. *中国激光*, 2018, 45(8): 0814001.

[3] Li W J, Wang T Y, Zhou Y, *et al.* Terahertz non-destructive inspection of air defect within adhesive layers of multi-layer bonded structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(1): 0111002.
李文军, 王天一, 周宇, 等. 多层胶接结构胶层空气缺陷的太赫兹无损检测 [J]. *光学学报*, 2017, 37(1): 0111002.

[4] Gumbmann F, Schmidt L P. Millimeter-wave imaging with optimized sparse periodic array for short-range applications [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(10):

3629-3638.

[5] Su Y, Zhu Y T, Yu W X, *et al.* Design theory and algorithm of multi-channel radar antenna array [J]. *Scientia Sinica(Informationis)*, 2010, 40(10): 1372-1383.
粟毅, 朱宇涛, 郁文贤, 等. 多通道雷达天线阵列的设计理论与算法 [J]. *中国科学:信息科学*, 2010, 40(10): 1372-1383.

[6] Zhuge X D, Yarovoy A G. Sparse multiple-input multiple-output arrays for high-resolution near-field ultra-wideband imaging [J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2011, 5(13): 1552-1562.

[7] Zhuge X D, Yarovoy A G. Study on two-dimensional sparse MIMO UWB arrays for high resolution near-field imaging [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012, 60(9): 4173-4182.

[8] Ge T Y, Jing W, Zhao L, *et al.* Sparse array in near-field millimeter-wave multiple-input multiple-output radar imaging system [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28(11): 113101.
葛桐羽, 经文, 赵磊, 等. 毫米波多输入多输出雷达稀疏阵列近场成像 [J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28(11): 113101.

[9] Tan K, Wu S Y, Wang Y C, *et al.* A novel two-dimensional sparse MIMO array topology for UWB short-range imaging [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, 15: 702-705.

[10] Tan K, Wu S Y, Wang Y C, *et al.* On sparse MIMO planar array topology optimization for UWB near-field high-resolution imaging [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(2): 989-994.

[11] Ahmed S S, Schiessl A, Schmidt L P. A novel fully electronic active real-time imager based on a planar multistatic sparse array [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2011, 59(12): 3567-3576.

[12] Ahmed S S, Schiessl A, Gumbmann F, *et al.* Advanced microwave imaging [J]. *IEEE Microwave*

- Magazine, 2012, 13(6): 26-43.
- [13] Sheen D M, McMakin D L, Hall T E. Cylindrical millimeter-wave imaging technique and applications [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6211: 62110A.
- [14] Qiao L B, Wang Y X, Zhao Z R, *et al.* Exact reconstruction for near-field three-dimensional planar millimeter-wave holographic imaging [J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2015, 36 (12): 1221-1236.
- [15] Sheen D M, McMakin D L, Hall T E. Three-dimensional millimeter-wave imaging for concealed weapon detection [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2001, 49(9): 1581-1592.