2019 年 12 月 Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

文章编号: 2095-4980(2019)06-0981-07

基于物理光学法的近场多入多出雷达成像模拟

经 χ^{a} , 赵宇姣^b, 江 舸^a, 刘 杰^b, 成彬彬^b, 张 健^{a,b}

(中国工程物理研究院 a.电子工程研究所; b.微系统与太赫兹研究中心, 四川 绵阳 621999)

摘 要:针对点目标扩展函数(PSF)不能有效分析复杂目标在毫米波近场多入多出(MIMO)雷达成像中的散射机理问题,研究了一种基于近场物理光学散射计算数据的毫米波 MIMO 雷达成像模拟方法。该方法利用近场物理光学方法,获得包含阵列构型和目标散射信息的近场计算数据,并通过近场 MIMO 成像处理器实现近场 MIMO 成像的全过程模拟。利用 D 波段"T"字型二维稀疏 MIMO 阵对复杂的三维目标开展了近场成像实验,仿真和实验结果表明,模拟结果与实际成像结 果有很好的一致性。该方法能够分析近场 MIMO 成像系统的成像性能,为近场 MIMO 成像的阵型 设计提供支撑,揭示复杂目标的近场散射特性与成像机理。

 关键词:近场 MIMO 成像;成像模拟;物理光学

 中图分类号:TN955
 文献标志码:A

doi: 10.11805/TKYDA201906.0981

Near-field MIMO radar imaging simulation based on physical optics method

JING Wen^a, ZHAO Yujiao^b, JIANG Ge^a, LIU Jie^b, CHENG Binbin^b, ZHANG Jian^{a,b}

(a.Institute of Electronic Engineering; b.Microsystem & Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: In view of the Point Spread Function(PSF) for near-field Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) radar imaging cannot analyze the scattering mechanism of complex targets effectively, a simulation method of millimeter wave near-field MIMO radar imaging based on near-field Physical Optical(PO) scattering data is studied. The method uses near-field physical optics method to compute the near-field scattering field including the information of array configuration and scattering mechanism. Near-field MIMO image is finally generated by imaging processor. Using the D-band "T"-shaped two-dimensional sparse MIMO arrays to carry out the near-field imaging experiment, the simulation results are in good agreement with the actual imaging results. This method can analyze the imaging performance of the near-field MIMO imaging system, support the formation design, and reveal the near-field scattering characteristics and imaging mechanism of complex targets.

Keywords: near-field MIMO imaging; raw data simulation; physical optics

主动式毫米波、亚毫米波超宽带多人多出(MIMO)稀疏阵列近场三维成像系统,具有高三维分辨能力和实时 采集能力,同时能够极大地减少阵列数目,降低系统成本,是一种备受关注的适用于人体安检场景的高分辨成 像系统^[1-2]。针对毫米波近场 MIMO 成像系统的阵列设计和成像算法的评估主要是利用点目标扩展函数 (PSF)^[3],但 PSF 是各向同性理想点目标的回波,无法考虑复杂扩展目标的散射特性和成像性能。高精确度的近 场 MIMO 成像模拟,可以反映 PSF 没有考虑的目标散射特性,定量分析 MIMO 阵型、收发天线方向图、系统 照射、目标散射机理和成像算法等因素的影响,指导系统的分析设计和验证、辅助近场人体安检图像解译、验 证近场 MIMO 图像处理算法以及提高违禁品检测性能,具有重要的理论意义和实用价值。

针对毫米波近场 MIMO 成像的成像模拟,依托于电磁散射计算方法,需要综合考虑仿真精确度和仿真效 率。电磁散射全波计算方法能够提供相当高的精确度,但在成像模拟中面临电大尺寸场景和巨大的三维回波数 据规模,在仿真速度和内存需求上受到严重限制;高频渐近技术能够极大地提高近场散射的计算效率,但不同 的电磁散射高频计算方法适用范围有限,对于毫米波乃至更高的频段,其有效性需要全波方法和实验结果的验 证。一些学者也初步讨论了利用电磁散射计算数据进行毫米波、亚毫米波频段成像模拟。王瑞君等利用弹跳射 线法产生的远场电磁计算数据进行亚毫米波雷达远场成像仿真研究,但不适用于近场成像^[4-5];Pätzold 利用射 线追踪法研究了包含人体体表亚毫米波粗糙散射的近场收发同置成像模拟框架,但对于复杂的人体模型,由于 建模误差,仿真结果与实际成像结果存在明显差距^[6];Ahmed 等基于射线追踪法简化了近场 MIMO 成像的照射 问题,可以针对人体模型得到照射区域,但不能反映更多的成像信息^[7]。在高频渐近技术中,近场物理光学(PO) 法可以计算电大尺寸目标的近场散射场,适用于以镜面反射为主要散射机理的近场散射回 波模拟,但在毫米波、亚毫米波频段的近场 MIMO 成像模拟的有效性有待实验验证。

本文选取位于大气窗口的 D 波段,中心频率为 140 GHz,研究了一种基于物理光学近场计算数据的主动式 毫米波近场稀疏 MIMO 成像模拟方法,并利用 D 波段宽带成像系统对复杂目标进行成像实验,验证了该模拟方 法的有效性。

1 近场稀疏 MIMO 成像

近场超宽带稀疏 MIMO 成像系统通过多天线发射、 多天线接收宽带电磁波的近程目标散射或反射回波,利 用空间分集获得高俯仰、方位分辨力,利用大带宽获得 高距离分辨力,同时二维稀疏 MIMO 阵列的收发阵列数 目远远小于二维密集阵收发数目,能够极大地减少毫米 波、太赫兹收发前端的数目,降低成像系统的设计成 本。近场超宽带二维稀疏 MIMO 三维成像系统的几何关 系如图 1 所示。发射和接收天线位于同一平面,而且天 线口面朝向相同,这里假设都指向-x 方向,r_t为发射天 线中心指向目标的位置矢量,r_r为目标指向接收天线的



Fig.1 Geometry of near-field MIMO 3D imaging system 图 1 近场 MIMO 三维成像系统几何关系

位置矢量。系统发射频率步进信号,每次接收的信号都是单频条件下的稳定的接收信号。在时刻 t,成像系统频率为 f,波长为 λ ,则系统波数 $k=\omega/c=2\pi f/c$,目标的回波为 $s(\mathbf{r}_t,\mathbf{r}_r,k)$ 。

对于空间坐标为 r, 散射系数为 g(r, i, s)的面目标, i, s分别为入射和散射的单位矢量,设接收的回波信号 为 $s(r_t, r_r, k)$,其中 r_t 为发射位置, r_r 为接收位置。只考虑收发天线与目标的相位历程,近场 MIMO 回波 $s(r_t, r_r, k)$ 可以表示为:

$$s(\mathbf{r}_{t},\mathbf{r}_{r},k) = \frac{1}{4\pi |\mathbf{r}_{t} - \mathbf{r}|} \int_{S} g(\mathbf{r},\mathbf{i},s) \exp(-jk(|\mathbf{r}_{t} - \mathbf{r}| + |\mathbf{r}_{r} - \mathbf{r}|)) ds$$
(1)

式中S为待求解的面目标表面区域。

近场超宽带稀疏 MIMO 成像系统具有三维成像分辨能力,通过近场 MIMO 三维成像算法进行目标重构,可 以从 *s*(*r*₁,*r*₁,*k*)中获得空间中待重构位置 *r*'的散射系数信息,即 *g**(*r*')。对于收发位置已知的近场 MIMO 三维成像 算法,主要包括时域算法和频域算法,时域算法包括时域相关(Time Domain Correlation, TDC)算法、后向投影 (Back Projection, BP)^[3]算法和适用于多层介质的修正的基尔霍夫徒动(Modified Kirchhoff Migration, MKM)^[8] 算法;频域算法为距离徒动算法(Range Migration Algorithm, RMA)^[9-10]。频域算法具有比时域算法更高的计算 效率,但对 MIMO 阵型有特殊要求,比如要求阵元等间隔等;时域算法适用于任意近场 MIMO 阵型,成像效果 良好而且稳健,其中 BP 算法相比于 TDC 和 MKM 有着更高的计算效率,适用于对实时性要求不高、能有效反 映目标散射机理的成像模拟。

2 基于物理光学的近场 MIMO 成像模拟

基于物理光学的近场 MIMO 成像模拟器可以准确分析和计算目标不同,位置不同系统照射下散射系数 g(r, î, ŝ),模拟高精确度原始数据。利用近场 MIMO 三维成像处理器,最终获得成像结果。

与远场相比,目标近场散射入射角和散射角会随目标的位置不同而改变,需对目标的不同位置进行本地化处理。在高频区,目标总的电磁散射可以认为是某些局部位置上的电磁散射贡献的总和^[11]。通过 CAD 软件对目标进行平面三角面元剖分,剖分应满足物理光学计算精确度要求:小面元边长的控制长度 $d < \min(\lambda/6, \sqrt{\rho\lambda}/3)$ (ρ 为散射体表面的曲率),减小由网格剖分带来的噪声。由面元法,在高频近似的条件下,近场散射场 E^{s} 可视

$$\boldsymbol{E}^{\mathrm{s}} = \sum_{m=1}^{M_{\mathrm{PO}}} V(\boldsymbol{i}_{m}, \boldsymbol{n}_{m}) A_{\mathrm{r}}(\boldsymbol{s}_{m}) \boldsymbol{E}_{m}^{\mathrm{s}}$$
(2)

式中: M_{PO} 为物理光学近似下的目标剖分的网格数; i_m 为从点电流源 r_t 到第m个三角面片中心点的入射方向单位矢量; s_m 为第m个三角面片中心点到接收天线 r_r 的散射方向单位矢量; n_m 为第m个三角面片的单位法向矢量; A_r 为接收天线的方向图权重因子;V为入射电磁波对目标的照射函数,当(i_m, n_m)<0 时,V=1;当(i_m, n_m)>0 时,V=0。由于近场成像距离仍然满足成像口面与目标的距离远大于波长,即 $r>>\lambda$,在此条件下,为了计算目标的近场散射,可以用发射天线中心位置处电偶极子 11 的辐射场来模拟全向天线的辐射场,再以天线方向图为权重函数,模拟发射天线波束宽度对目标照射的影响。假设电偶极子 11 沿 z方向,位置矢量为 r_t ,忽略高阶辐射量,此时电偶极子在空间中的场为准静态的辐射场,在第m个平面三角面片的辐射场为:

$$\begin{cases} \boldsymbol{E}_{\theta} = A_{t} (\boldsymbol{i}_{m}) \frac{j \omega \mu l l}{4\pi |\boldsymbol{r}_{t} - \boldsymbol{r}_{m}|} \exp(-jk |\boldsymbol{r}_{t} - \boldsymbol{r}_{m}|) \sin\theta \\ \boldsymbol{H}_{\varphi} = \boldsymbol{E}_{\theta} / Z_{0} \end{cases}$$
(3)

式中: $A_t(i)$ 为发射天线的方向图; μ 为自由空间磁导率; Z_0 为自由空间波阻抗; θ 为i与+z的夹角; r_m 为第m个平面三角面元中心点的位置矢量, $|r_t - r_m|$ 为电偶极子到第m个面元中心点的距离。

与人体安检近场成像中的目标(人体、违禁品等)相比,毫米波的波长远远小于目标表面的曲率半径,且近 场成像的入射角和散射角一般不大,PO 能够对目标近场散射提供比较高的高频近似计算精确度。应用基尔霍夫 近似和切平面假设,即面片表面上的电磁流可以近似看成与面片相切的无限大平面上的电磁流,第 *m* 个目标表 面的电磁流为:

$$\begin{cases} J_{s} = \hat{n} \times \left(\boldsymbol{H}^{i} + \boldsymbol{H}^{s} \right) \\ M_{s} = \left(\boldsymbol{E}^{i} + \boldsymbol{E}^{s} \right) \times \hat{\boldsymbol{n}} \end{cases}$$
(4)

式中: Eⁱ,Hⁱ 和 E^s,H^s 为该面片表面上的入射和散射场; *î* 为该面片的法线方向。将入射场按面片的本地坐标确 定极化方向,并沿极化方向进行分解,分别计算不同极化方向的散射系数:

$$\overline{E}^{i} = E_{h}^{i} e_{h} + E_{v}^{i} e_{v}$$

$$\overline{H}^{i} = H_{h}^{i} e_{h} + H_{v}^{i} e_{v}$$

$$E_{h,v}^{s} = R_{h,v} E_{h,v}^{i}$$

$$H_{h,v}^{s} = R_{h,v} H_{h,v}^{i}$$
(5)

式中:h,v 分别代表水平和垂直极化方向; e_h 和 e_v 分别为水平和垂直极化方向上的单位向量;对于金属和无损耗介质, $R_{h,v}$ 是 Snell 反射系数;对于人体皮肤等高损耗介质, $R_{h,v}$ 为复 Snell 反射系数,可以根据一般的复 Snell 定律^[12]计算。

假设电磁波从空气入射到目标,空气的介电常数为 ε_0 ,目标的相对介电常数为 ε_r ,对于 THz 频段下的高损 耗介质, ε_r 的虚部不可忽略,设 N 和 K 为等相面和等幅面系数,令 $\sqrt{\varepsilon_r} = \chi_{re} - j \chi_{im}$,由幅度匹配条件和相位匹配 边界条件有,

$$\begin{cases} K = -\sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{\left(\chi_{re}^2 - \chi_{im}^2 - \sin^2 \theta_i\right)^2 + 4\chi_{re}^2 \chi_{im}^2} - \left(\chi_{re}^2 - \chi_{im}^2 - \sin^2 \theta_i\right) \right)} \\ N = \sqrt{\chi_{re}^2 - \chi_{im}^2 + K^2} \end{cases}$$
(6)

式中 θ_i 为对每个面片的入射角。则h和v极化方向的复反射系数 R_h 和 R_v 可以写为:

$$\begin{cases} R_{\rm h} = \frac{Z_{\rm r} \cos\theta_i - Z_0 \cos\xi'}{Z_{\rm r} \cos\theta_i + Z_0 \cos\xi'} \\ R_{\rm v} = \frac{Z_0 \cos\theta_i - Z_{\rm r} \cos\xi'}{Z_0 \cos\theta_i + Z_{\rm r} \cos\xi'} \end{cases}$$
(7)

式中: Z_r为损耗介质的波阻抗; *ξ*'为电磁波穿过每个有耗介质面片的折射角:

$$\cos \xi' = \frac{\chi_{\rm re} \chi_{\rm im} - j K^2}{K \left(\chi_{\rm re} - j \chi_{\rm im}\right)}$$
(8)

若目标为理想导体,则 $Z_r=0$,即 $R_h=-1$, $R_v=1$ 。计算出第 m 个面片的散射系数 $R_{h,v}$,利用式(4)、式(5)计算 面片中心位置的总电流 $J_{s,m}$ 和总磁流 $M_{s,m}$ 。假设总电流 $J_{s,m}$ 和总磁流 $M_{s,m}$ 在第 m 个网格中不变,根据物理光学 积分,计算第 m 个面元对接收位置 r_r 的散射电场贡献为:

$$\boldsymbol{E}_{m}^{s} = \frac{jk \exp(-jk|\boldsymbol{r}_{r} - \boldsymbol{r}_{m}|)}{4\pi|\boldsymbol{r}_{r} - \boldsymbol{r}_{m}|} \left(\hat{s}_{m} \times \left(\boldsymbol{M}_{s,m} + Z_{0}\hat{s}_{m} \times \boldsymbol{J}_{s,m}\right)\right) \int_{S_{m}} \exp(jk(\boldsymbol{r}' - \boldsymbol{r}_{m})\hat{s}_{m}) ds$$
(9)

式中: \hat{s}_m 为第 *m* 个三角面片表面; r'为三角面元内点的 位置矢量; $|r_r - r_m|$ 为接收位置到第 *m* 个面元中心点的距 离。计入照射与接收天线方向图的影响,将式(9)代入式 (1)中,在物理光学近似的条件下累加获得近场 MIMO 成 像原始数据,并利用 Gordon 积分^[13]快速近似计算每个三 角面元上的面积分。只考虑+z 方向线极化天线接收回波 E_m^s ,即获得近场 MIMO 成像模拟的原始数据。利用 BP 算法对近场 MIMO 成像的原始数据进行快速成像处理, 获得目标的三维高分辨成像结果。



3 仿真与实验分析

Fig.2 'T' size MIMO transceiver array and equivalent phased array 图 2 "T"字型 MIMO 收发阵型和等效阵型

近场稀疏 MIMO 超宽带三维成像系统,要求在俯

仰、方位高分辨力有足够大的二维合成孔径,并且信号要有足够的带宽。仿真采用 D 波段步进频率系统实现超宽带,二维稀疏 MIMO 阵列进行三维成像,并且便于实验验证。步进频系统频率为 130~150 GHz,频率步进间隔为 100 MHz。收发天线的近场天线方向图主瓣宽度为 60°。在阵型设计上,利用综合孔径 MIMO 阵列设计方法。"T"字型阵是经典的二维稀疏 MIMO 阵,具有高稀疏度和二维孔径,步进频实现的超宽带。假设发射阵列位于 y 轴,接收天线位于 z 轴,发射天线和接收天线之间的间隔均为 2 mm。"T"字型近场 MIMO 阵的等效收发相位中心阵列构型如图 2 所示,出于实际测量的考虑,发射和接收之间间隔 85 mm,等效为间隔为 1 mm 的收发同置近场成像系统。假设系统与目标的距离大约为 0.32 m。

近场 MIMO 成像系统的成像性能主要利用点扩展函数 PSF 进行评估。PSF 是利用已知的收发天线位置对特定位置的各向同性点目标回波进行成像模拟,可以反映近场成像系统的聚焦水平、分辨力、空变性、旁瓣和栅斑水平等关键指标。成像模拟中,用足够小的金属球来近似模拟点目标,1 mm 金属球在波长约为 2 mm 的电磁波照射下,已经工作在谐振区,物理光学法对谐振区金属球回波的幅度描述存在误差,但由于金属球很小,对回波相位影响很小,仍能够对近场成像系统的成像性能进行有效模拟。空间中放置 5 个直径 1 mm 的金属球,距离阵面 0.32 m。其中,一个金属球位于等效阵列的中心,坐标为(0.32,0,0.1),4 个金属球位于等效阵的 4 个顶点,坐标为(0.32,±0.05,0.1±0.05),得到稀疏 MIMO 和等效阵的近场回波,并利用 BP 成像算法获得空间 5 点的PSF,如图 3(a),3(b)所示。



Fig.3 Point Spread Function of near-field imaging at 0.32 m (a) T-size MIMO arrays; (b) equivalent phased arrays 图 3 x=0.32 m 处近场成像的 PSF (a) "T"字型 MIMO 阵; (b) 等效阵列

由 "T"字型 MIMO 阵和等效阵的近场 PSF 结果可以看出,对于空间各向同性散射点目标,在 0.32 m 处, 位于等效阵列中心和 4 个顶点处的空间 5 点都能良好聚焦,因为近场成像的空变性,2 种成像结果中,中心点 的成像分辨力要高于边沿 4 点的分辨力。"T"字型 MIMO 近场成像相比于等效阵列的成像结果,方位分辨力下 第6期

降,旁瓣水平抬高,且旁瓣方向与等效阵的方向有偏差,这与稀疏 MIMO 阵列的阵型布局有关。x=0.32 m 处等效阵中心点的成像性能分析比较如表1所示。

实际的近场成像场景中,目标为扩展目标,不满 足空间点目标假设,系统对目标的照射效应明显,显 著影响目标的聚焦效果。利用成像模拟框架可以进一

表 1 近场 MIMO 阵与等效阵成像性能比较									
Table1 Comparison of near-field MIMO array imaging and									
equivalent phase array imaging									
target location/m	3 dB resolution/mm		peak sidelobe ratio/dB						
(0.32,0,0.1)	y direction	z direction	y direction	z direction					
MIMO array	3.3	3.4	-12.7	-12.5					
equivalent array	3.1	3.1	-13.2	-13.2					

步深入研究扩展目标近场 MIMO 成像的照射特性。将空间中的 5 个点目标替换为垂直于 x 轴放置的 5 个直径为 60 mm 的柠檬形金属板,并对其进行成像模拟,如图 4 所示。针对各向同性点目标,近场 MIMO 成像对无论是 成像空间中心还是边沿,均能很好聚焦;但对于平面扩展目标,近场 MIMO 成像系统只在一个局部区域能够良 好聚焦,在该区域以外目标散焦严重,这是由于成像系统对平面扩展目标不同位置的照射特性不同导致的。在 散射机理上,毫米波人体安检场景下的目标回波主要包含镜面反射和粗糙面散射(漫反射)。当镜面反射回波存 在时,一般是近场成像的主要散射机理。但镜面反射回波对入射角度与目标平面法线法相非常敏感,当接收天 线不在镜面反射区域时,接收到目标的散射回波很弱,在图像中明显暗于镜面反射区域回波,甚至无法聚焦。 近场 MIMO 成像结果中聚焦较好、成像质量比较好的区域,是接收天线能够接收到目标镜面反射回波的区域。 镜面反射区域可以利用近场 MIMO 天线的等效收发相位中心进行确定。对于与收发天线等距的光滑平面目标, 如图 5 所示,镜面反射点与等效收发相位中心在目标平面的投影重合;对于一般的凸目标,镜面反射区域将小 于利用光滑平面目标确定的镜面反射区域,需要利用基于物理光学法的成像模拟结果进一步确定。在镜面反射 区域,近场 MIMO 成像系统能够有效进行合成孔径处理,实现良好聚焦;而在该区域之外,接收不到目标的镜 面反射回波,只有目标表面的突变点,如边沿、二面角等形成的强散射点,目标的轮廓信息退化,逐渐向强散 射点过渡。



Fig.4 Near-field MIMO imaging results of 5 lemon-size plates at 0.32 m 图 4 x=0.32 m 处 5 个柠檬形金属板近场 MIMO 成像模拟结果

利用 D 波段步进频近场稀疏三维扫描成像系统对 仿真模拟结果进行验证。通过 ZVA50 矢量网络分析仪 经由 D 波段拓展件、功率放大器和发射天线辐射。照 射目标再经由接收天线和矢量网络分析仪,通过二维轨 道控制收发天线的位置,逐点采集步进频 S₂₁回波信 号,获得用于成像的回波数据。利用 D 波段步进频近 场稀疏三维扫描成像系统对 2 个柠檬板和 1 个金属球进 行成像实验,实验场景与目标布局如图 6 所示。

基于 PO 的近场 MIMO 成像模拟与实际测量成像 结果如图 7 所示,其中的方框是近场 MIMO 等效收发 阵列的布阵区域边界在目标上的投影。成像模拟和实验 都表明,聚焦良好的区域与近场 MIMO 的等效阵列对 目标的投影区域一致。利用小球的成像结果可以获得成 像性能,小球局部的成像结果如图 8 所示,利用小球的 仿真模拟和实验结果获得的成像性能如表 2 所示。成像 模拟和实验结果表明,镜面反射分量是面目标近场

表 2 近场 MIMO 阵仿真模拟与实验测量成像性能比较
Table2 Comparison of near-field MIMO array imaging between
simulation results and experiment results

······································							
	target location/m	3 dB resolution/mm		peak sidelobe ratio/dB			
	(0.32,0.0255,0.0789)	y direction	z direction	y direction	z direction		
	simulation	3.4	3.6	-13.7	-13.0		
	experiment	3.4	3.3	-12.0	-10.6		



Fig.5 Determination of specular area by equivalent phased array 图 5 利用等效相位中心确定镜面反射区域

MIMO 成像的主要相干散射分量,能够在近场 MIMO 成像中进行有效的相干积累,得到高分辨的成像结果。有效聚焦区域是图 7 中的矩形区域,在有效聚焦 区域外,成像结果散焦退化,而且实验结果的散焦退 化程度比仿真模拟结果更为严重。这种偏差的原因一方面是由于物理光学方法没有考虑边缘绕射的影响,对非镜面反射方向的仿真精确度下降;另一方面是由于实验采用的是扫描成像体制,在过程中目标细微晃 动造成的目标位置误差、成像位置误差。此外,成像 系统的位置误差和对天线近场辐射场模拟的误差也影响成像分辨力,抬高了实验结果中的旁瓣水平。

比较图 7、图 8 的成像模拟与实验测量的结果,两者在目标主要散射机理、有效聚焦区域、成像分辨



Fig.6 Near-field MIMO imaging experiment scene and target layout 图 6 近场 MIMO 成像实验场景与目标布局

力、旁瓣水平上都有很好的一致性。基于近场物理光学成像模拟方法能够反映目标成像散射机理和提高近场成 像模拟的精确度,为系统设计提供重要的支撑,这是点目标扩展函数所无法提供的。由于近场物理光学法只能 刻画目标的一次散射回波,只在同极化散射回波仿真中有较高的精确度,无法仿真交叉极化散射回波,这限制 了该方法对目标极化特性的描述。可以针对应用需要,在近场物理光学法的基础上,通过迭代物理光学法、射 线追踪法等方法进一步考虑目标多次散射分量,改善该方法的极化特性描述能力。此外,该成像模拟方法忽略 了目标背景杂波的影响。对于实际人体安检场景中携带违禁品的人体目标,相比于波长,是电大尺寸复杂三维 目标,可以借助高性能电磁仿真计算平台,对大量的仿真计算网格进行并行处理,实现高精确度的成像模拟。 总之,基于物理光学的近场 MIMO 成像模拟既能够很好地反映近场三维成像系统的成像性能,又能反映目标的 散射机理和成像系统对目标的照射特性。





4 结论

本文研究了一种基于物理光学的毫米波近场 MIMO 成像模拟器。该模拟器基于毫米波近场 MIMO 成像的

第6期 经 文等:基于物理光学法的近场多入多出雷达成像模拟

987

特点,首先对目标进行网格剖分精确建模,通过发射信道和收发天线模拟,利用物理光学法在每个网格的本地 坐标系上计算其近场散射贡献,在接收位置累加所有网格的回波贡献进而获得了同极化近场散射的 MIMO 成像 原始数据,最后利用 BP 算法进行成像处理,实现成像模拟。通过 D 波段近场 MIMO 成像模拟和实验的对比, 验证了毫米波近场 MIMO 成像模拟框架的有效性。该模拟器综合考虑了近场 MIMO 三维目标的散射机理,既能 反映成像系统的成像性能,又能系统分析近场 MIMO 阵列对目标的照射特性,对近场 MIMO 阵列设计、系统优 化和目标识别有着重要意义。

参考文献:

- SHEEN D M, HALL T E. Reconstruction techniques for sparse multistatic linear array microwave imaging[C]// Passive and Active Millimeter-Wave Imaging XVII. Xi'an, China:[s.n.], 2014(9078):90780I.
- [2] 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 & Techniques, 2011,59(12):3567-3576. doi:10.1109/TMTT.2011.2172812.
- [3] AHMED S S,SCHIESS A,SCHMIDT L P. Near field mm-wave imaging with multistatic sparse 2D-arrays[C]// European Radar Conference(EuRAD). [S.I.]:IEEE, 2009:180-183.
- [4] 王瑞君,王宏强,邓彬,等,基于高频电磁计算数据的太赫兹雷达高分辨成像研究[J]. 红外与毫米波学报, 2014,33(6):
 577-583. (WANG Ruijun,WANG Hongqiang,DENG Bin, et al. High-resolution terahertz imaging based on electromagnetic calculation data[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2014,33(6):577-583.) doi:10.3724/SP.J.1010.2014.00577.
- [5] 蒋彦雯,邓彬,王宏强,等. 基于 FEKO 和 CST 的太赫兹目标 RCS 仿真[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(5):684-689. (JIANG Yanwen, DENG Bin, WANG Hongqiang, et al. RCS simulation in THz band based on FEKO and CST[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(5):684-689.)
- [6] PÄTZOLD M,KAHL M,KLINKERT T,et al. Simulation and data-processing framework for hybrid synthetic aperture THz systems including THz-scattering[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology, 2013,3(5):625-634.
- [7] AHMED S S,SCHMIDT L P. Illumination of humans in active millimeter-wave multistatic imaging[C]// European Conference on Antennas and Propagation. Singapore:[s.n.], 2012:1755-1757. doi:10.1109/EuCAP.2012.6206694.
- [8] ZHUGE Xiaodong, YAROVOY A G, TIMOFEY Savelyev, et al. Modified kirchhoff migration for UWB MIMO array-based radar imaging[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2010,48(6):2692–2703. doi:10.1109/TGRS.2010.2040747.
- [9] ZHUGE Xiaodong, YAROVOY A G. Three-dimensional near-field MIMO array imaging using range migration techniques[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012,21(6):3026-3033. doi:10.1109/TIP.2012.2188036.
- [10] ZHU Rongqiang, ZHOU Jianxiong, JIANG Ge, et al. Range migration algorithm for near-field MIMO-SAR imaging[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2017(99):1-5. doi:10.1109/LGRS.2017.2761838.
- [11] 黄培康,殷红成,许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京:电子工业出版社, 2005. (HUANG Peikang, YIN Hongcheng, XU Xiaojian. Radar target characteristics[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2005.)
- [12] CHANG P C Y, WALKER J G, HOPCRAFT K I. Ray tracing in absorbing media[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2005,96(3/4):327-341. doi:10.1016/j.jqsrt.2005.01.001.
- [13] GORDON W B. Far-field approximations to the Kirchoff-Helmholtz representations of scattered fields[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 1975,23(4):590-592. doi:10.1109/TAP.1975.1141105.

作者简介:



经 文(1989-),男,广西壮族自治区桂 林市人,在读博士研究生,主要研究方向为 毫米波近场成像、目标特性.email:marty1865 @foxmail.com.

刘 杰(1981-),男,江西省全南县人,在读博士研究 生,副研究员,主要研究方向为太赫兹成像系统及组件. **赵宇姣**(1990-),女,四川省攀枝花市人,硕士,研究实习员,主要研究方向为太赫兹成像系统.

江 舸(1982-),男,四川省乐山市人,博 士,副研究员,主要研究方向为太赫兹成像与信 号处理.

成彬彬(1981-),男,湖北省随州市人,博 士,研究员,主要研究方向为太赫兹雷达及成像 技术.

张 健(1968-),男,重庆市大竹县人,博士 生导师,研究员,主要从事太赫兹技术研究.