

文章编号: 2095-4980(2020)06-0962-06

太赫兹近场合成孔径成像与焦平面成像对比

王冠文^{1,2}, 祁峰^{1,2}, 李玉峰¹

(1.沈阳航空航天大学 电子信息工程学院, 辽宁 沈阳 110122; 2.中国科学院 沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110000)

摘要: 针对近场目标高分辨力成像, 基于 220~325 GHz 频段的近场雷达收发模块, 在相同测量条件下, 分别采用合成孔径雷达成像以及焦平面成像。对比合成孔径成像算法以及焦平面测量法的优劣, 获得详细的测量参数以及成像效果对比, 用于太赫兹近场成像分辨率的提高。

关键词: 太赫兹; 近场雷达; 合成孔径雷达; 焦平面

中图分类号: TN95

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019381

Comparison of terahertz near-field SAR imaging and focal plane imaging

WANG Guanwen^{1,2}, QI Feng^{1,2}, LI Yufeng¹

(1.School of Electronics and Information Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang Liaoning 110122, China;
2.Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang Liaoning 110000, China)

Abstract: For near field high resolution imaging, near-field radar transceiver modules based on the 220–325 GHz bands, adopt Synthetic Aperture Radar(SAR) and focal plane imaging under the same measure environments. The advantages and disadvantages are compared between SAR and focal plane measurement. Detailed measurement parameters and imaging results comparison will be helpful to make improvement on the resolution of terahertz near-field imaging.

Keywords: terahertz; near field radar; Synthetic Aperture Radar; focal plane

太赫兹波是频率介于 0.1~10 THz 之间的电磁波, 相对于微波, 具有频率高、波长短的特点, 使太赫兹成像有更高分辨力。目前受太赫兹源的功率瓶颈以及探测灵敏度的限制, 大部分研究集中于近场范围内的目标测量与成像^[1]。波前相位差在远场条件下小于 $\pi/8$, 在计算时可近似为等相位波前的平面波; 在近场条件下远高于 $\pi/8$, 因此, 在计算时非平面波的影响不能忽视。合成孔径成像算法^[2-4]通过将近场发散球面波变换到波数域, 并转换为会聚球面波, 在聚焦位置进行成像, 可提高成像分辨力, 该过程称为数字聚焦。该算法可用于表面起伏目标的准确三维重建^[5]。对该算法改善, 可获得成像效率与成像质量的有效提升^[6]。在数据采集与数字聚焦过程方面, 通过稀疏阵列和数字波束形成技术, 可以对目标回波进行快速采集与处理, 且能获得与全孔径阵列相当的成像质量^[7]。焦平面成像能够通过透镜进行物理聚焦^[8], 将发散球面波先通过准直透镜进行准直处理, 获得平行的平面波, 再采用聚焦透镜将平面波变化为会聚球面波。目标放置在聚焦透镜的后焦点对应的平面处, 以获得最窄的测量波束。该成像方法称为焦平面成像^[9]。

本文针对近场目标的高分辨力成像, 分别采用 SAR 与焦平面成像进行测量并处理。实验结果表明, 合成孔径成像算法具有更好的三维成像效果, 而聚焦透镜系统具有更好的二维成像效果。

1 实验设置

实验设备如图 1 所示, 图 1(a)为 SAR 成像系统图, 待测目标被固定在电动平移台上, 按直角坐标系蛇形移动进行逐点宽频扫描, 在每个坐标点扫描结束后再移动到下一个点进行扫描。图 1(b)为焦平面成像系统图, 通过 2 个透镜对入射波进行准直和聚焦在成像样品表面, 样品表面反射的回波经过透镜重新聚焦至波导口, 用于记录

收稿日期: 2019-10-14; 修回日期: 2019-11-26

基金项目: 科技部国家重点研发计划基金资助项目(2016YFC0102900); 国家自然科学基金资助项目(61605235; 61505089; 61801467); 中科院“百人计划”基金资助项目(1804160)

作者简介: 王冠文(1994-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹雷达成像算法。email:wgw7969872@163.com

目标表面参数。实验过程中采用收发共置的矢量网络分析仪实现太赫兹波的收发，系统工作频率为 220~325 GHz。

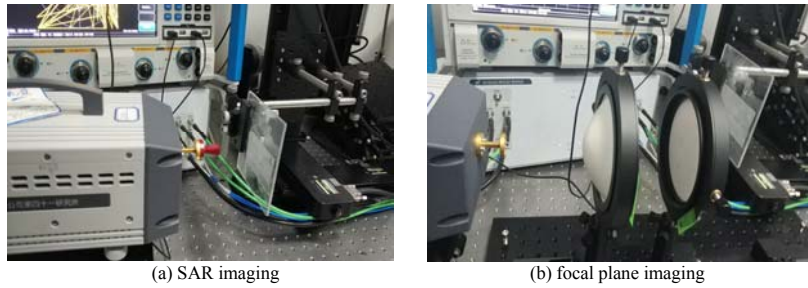


Fig.1 Construction of test system
图 1 测试系统的搭建

2 合成孔径成像算法与聚焦透镜成像

2.1 合成孔径成像算法

雷达发射信号为频域宽频信号，在回波接收后需将其压缩为时域冲激信号，以获得更好的距离向分辨力。通过傅里叶变换将距离向时域脉冲回波转换至频域：

$$s(x, y, \omega) = FT_{(t)}[s_t(x, y, t)] \quad (1)$$

式中：(x,y)表示方位向坐标；FT表示傅里叶变换。通过二维傅里叶变换将方位向空域转换至波数域：

$$S(k_x, k_y, \omega) = FT_{2D}\{s(x, y, \omega)\} \quad (2)$$

式中 k_x, k_y 分别为 x 轴与 y 轴方向波数， $k=2\pi/\lambda$ 。对波数域数据进行聚焦处理，恢复目标的二维图像：

$$S(k'_x, k'_y, \omega) = S(k_x, k_y, \omega) e^{-j\sqrt{4k^2 - k_x^2 - k_y^2} R} \quad (3)$$

式中 $e^{-j\sqrt{4k^2 - k_x^2 - k_y^2} R}$ 为聚焦函数。

对式(3)进行数字聚焦处理，通过 stolt 插值^[10]进行均匀化，得到目标在距离—方位向实现准确的聚焦效果。

$$S(k'_x, k'_y, k'_z) = S_{stolt}(k'_x, k'_y, \omega) \quad (4)$$

最后，对波数域信号进行三维傅里叶逆变换，将其转换至空间域，得到目标的空间域成像结果，

$$S(x, y, z) = FT_{3D}(S(k'_x, k'_y, k'_z)) \quad (5)$$

2.2 焦平面成像

引入菲涅尔公式^[11]，透镜外坐标为(x,y)的点处复场强表示为：

$$U(x, y) = \frac{1}{j\lambda z} \exp(jkz) \exp\left[j\frac{k}{2z}(x^2 + y^2)\right] \times FT\left\{U(x_0, y_0) \exp\left[j\frac{k}{2z}(x_0^2 + y_0^2)\right]\right\}_{f_x = \frac{x}{\lambda z}, f_y = \frac{y}{\lambda z}} \quad (6)$$

式中： λ 为对应频率的波长； z 为透镜外一点距离透镜孔径平面的垂直距离； $U(x_0, y_0)$ 为透镜孔径平面内对应坐标为 (x_0, y_0) 处复场强； k 为波数。式(6)表示了近场菲涅尔区内折射光幅度、相位与透镜孔径上各点的幅度、相位的关系。

如图 2 所示，令点波源 P 发射的信号为 $t(x, y)$ ，经过透镜变换后， P' 反射至 P 处的复场强表示为：

$$U(x', y') = Ct(x', y') \quad (7)$$

式中 C 为常数，与透镜材质有关。经过 2 次变换，物体在空间域被还原成像，图像的坐标方向不变。

2.3 两种成像方法差异对比

合成孔径成像算法通过对同一距离内波数域数据进行聚焦，再经过二维逆傅里叶变换将聚焦后的波数域数据变换至空间域，完成该距离目标的数字聚焦过程。由于是基于数字聚焦的波束形成，因此在对目标进行成像聚焦时，类似于光学里的变焦镜头，可以通过调整聚焦函数的聚焦距离对任意距离处进行聚焦。当回波数据来源

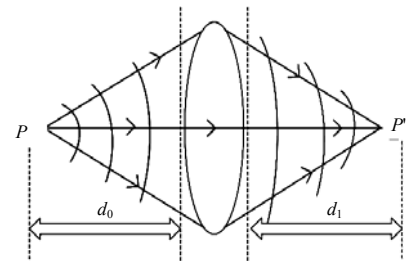


Fig.2 Process of physical lens focusing
图 2 物理透镜聚焦过程

于对应距离的目标, 聚焦数据在对应距离获得最大值, 此时可以获得该距离目标的清晰图像。而焦平面成像是通过物理透镜对太赫兹波进行会聚, 从而在透镜后焦距处获得前焦距处理想点波源的聚焦光斑。由于光路可逆, 位于透镜前焦距处的收发共置天线可以获得位于透镜后聚焦处目标的反射回波。移动目标在透镜后焦距对应平面内进行移动, 即可获得目标的物理聚焦成像图。与合成孔径成像算法相比, 焦平面成像所采用的物理透镜具有固定的焦距。且为获得更好的聚焦效果, 透镜的焦距会设计得尽可能小, 造成透镜焦深的减小。当目标偏离后焦平面时, 成像的散焦效果会更加明显。因此, 理论分析结果为合成孔径成像算法更适用于三维成像, 对前后距离差距较大的多个目标均能获得较好的聚焦效果。而焦平面成像得益于透镜的大口径, 在焦平面处的目标可以获得更多的空间频率分量, 从而获得更高的二维成像分辨力。但焦深的限制使得偏离焦平面过远的目标散焦更加严重, 无法获得准确的成像效果。为验证理论分析结果, 分别从二维和三维成像 2 个方面进行实验数据的对比。

3 二维成像结果对比

实验样品为厚度不同的金属阶梯, 尺寸为 $4.3\text{ cm} \times 4\text{ cm}$, 如图 3 所示, 各级之间高度差分别为 $0.2\sim 0.4\text{ mm}$ 。实验扫描步进为 1 mm , 扫描区域为 $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ 。工作频率为 $220\sim 325\text{ GHz}$ 。

SAR 成像采用二维距离徙动算法(Range Migration Algorithm, RMA)进行数字聚焦, 以获得目标的二维信息。在数据处理时, 通过对径向频域回波采用傅里叶变换以获得目标的距离向信息, 再筛选出目标对应位置的二维数据, 从而实现二维成像。焦平面成像通过透镜实现二维物理聚焦。由图 4 可见, 2 种成像方式均能对目标进行二维成像, 且能区分出各个阶梯, 但在目标边缘准确性方面存在一定的差距。在同样的扫描区域仅比目标略大的条件下, 焦平面成像具有更好的二维成像效果。由于 RMA 的二维分辨力与扫描区域和目标尺寸的比例正相关, 因此 SAR 成像在对同一目标进行扫描时, 扫描区域越大, 成像效果越好。阶梯的表面高度差低于 1 mm , 从而确保其在焦平面成像时表面各点偏离焦平面的距离均小于 1 mm , 处于透镜焦深内。在同样的扫描区域下, 焦平面成像二维效果强于 SAR 成像。

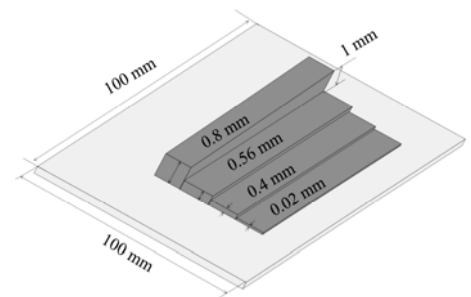


Fig.3 Parameter for test target
图 3 测试目标的参数

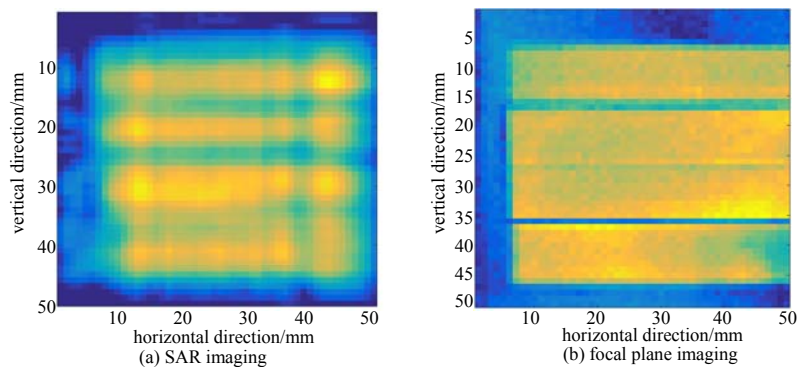


Fig.4 2D imaging of ladder
图 4 阶梯二维成像

作为对比, 采用前后距离差更大的目标进行二维成像, 扩大扫描区域以换取 SAR 成像分辨力。图 5(a)中 SAR 成像采用前后距离为 6.5 cm 的字母“A”和“H”进行三维重建, 其中 A 距离天线口为 6.5 cm , H 距离天线口为 13 cm 。扫描步进为 2 mm , 扫描区域为 $200\text{ mm} \times 152\text{ mm}$, 扫描信号的频率为 $270\sim 290\text{ GHz}$ 。在图 5(b)中采用前后距离为 2 mm 的字母“A”和“H”进行三维重建, 其中 A 处于焦平面位置, H 处于焦平面后 2 mm 处, 扫描步进为 1 mm , 扫描区域为 $126\text{ mm} \times 70\text{ mm}$, 扫描信号的频率为 $220\sim 325\text{ GHz}$ 。

字母的二维成像对比如图 6 所示。由于 A 与 H 的前后距离差, SAR 二维成像结果可以看出两者的强度存在差异。实验表明, 相比阶梯的二维效果, 字母的边缘更加清晰。这是由于扫描区域的扩大使得 RMA 的波数增加, 在变换至空间域时获得了更好的聚焦效果。焦平面成像二维效果依然好于 SAR 成像。但偏离焦平面 2 mm 的字母 H 由于失焦严重无法准确成像。由于透镜焦距固定, 当焦平面成像过程中目标前后距离差过大时, 无法确保目标上各点均处于焦平面附近的透镜焦深内, 从而产生散焦现象。

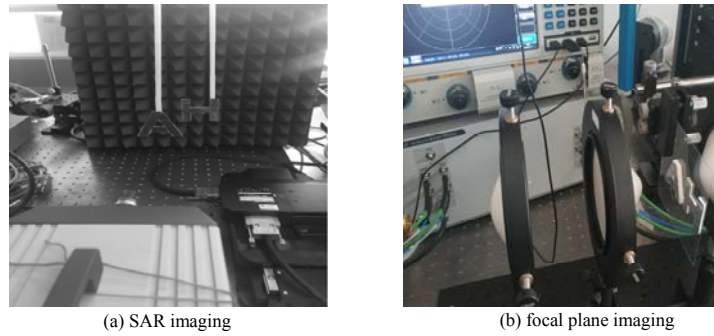


Fig.5 Test system of letters
图 5 用于成像的字母测试系统

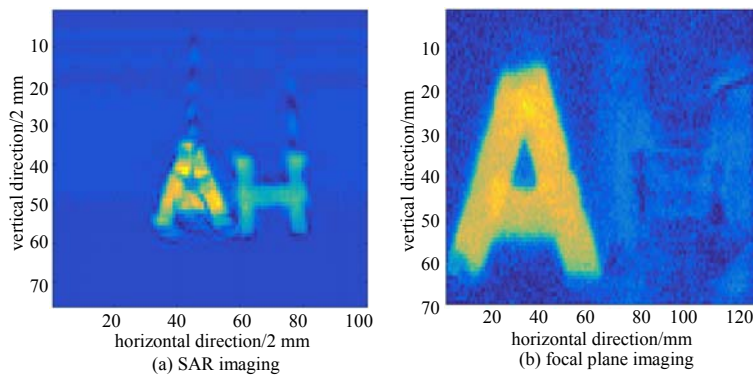


Fig.6 2D imaging of letters
图 6 字母二维成像

4 三维成像结果对比

对金属阶梯数据进行三维重建对比。SAR 数据采用三维 RMA 进行重建，焦平面成像数据采用径向傅里叶变换进行三维重建。

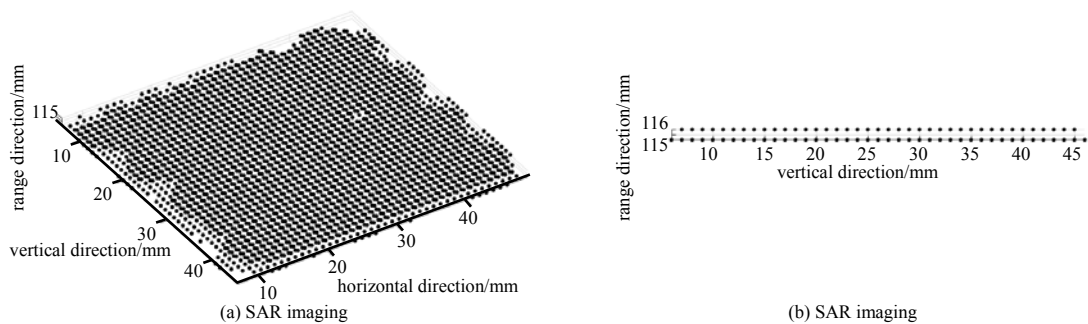
2 种成像方式的阶梯三维重建效果如图 7 所示。由于 2 种测量方式均采用 105 GHz 带宽的太赫兹波进行测量，对应的径向理论分辨力为：

$$\Delta z = c / 2B \approx 1.43 \text{ mm} \tag{8}$$

式中： c 为电磁波在空气中的传播速度； B 为对应测试信号的带宽。

如图 7 所示，由于阶梯各级之间高度差均小于 1.43 mm，SAR 数据的三维重建时各级阶梯之间无法区分高度差，且该现象存在于 2 个距离平面。焦平面数据的三维重建结果除了少量错点外，大部分区域均处于无法区分的一个平面。为进一步探究 2 种成像方式三维重建的差异，对距离差更大的字母目标进行三维重建。

如图 8 所示，对比 2 种成像方式，SAR 数据经过 RMA 三维数字聚焦后 2 个目标的距离信息均被准确恢复。焦平面成像数据经过处理后准确恢复出了字母 A 的三维距离信息，但是字母 H 由于偏离焦平面，从而产生失焦现象，在三维重建中没有被恢复出来。且与图 6(b)相同，椒盐噪声同样出现在了三维重建中，使得无目标位置出现了少量散点。



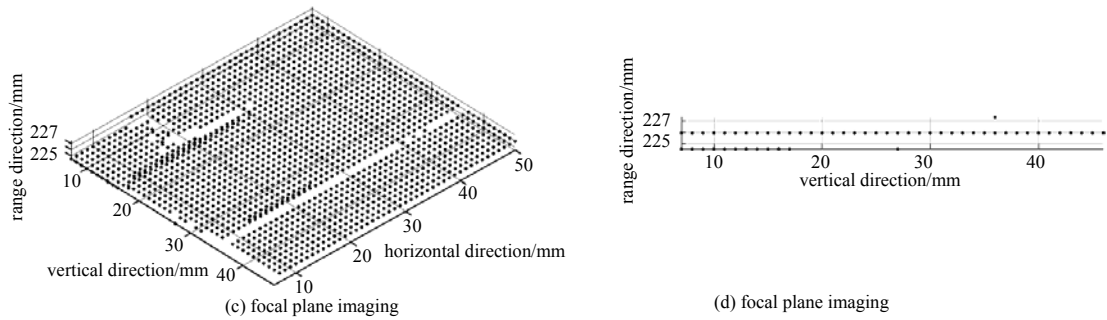


Fig.7 3D imaging of ladder for (a)(b) SAR imaging and (c)(d) focal plane imaging
图 7 用于(a),(b)SAR 成像和(c),(d)焦平面成像的阶梯三维成像

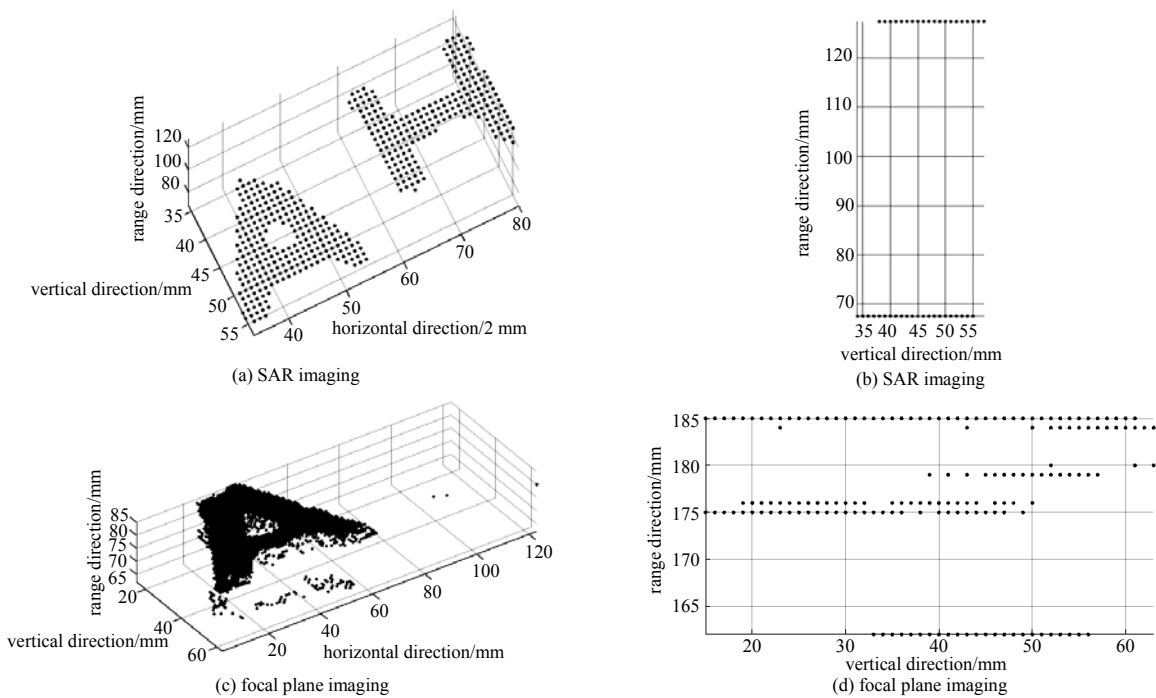


Fig.8 3D imaging of letters for SAR imaging and focal plane imaging
图 8 用于 SAR 成像和焦平面成像的字母三维成像

5 结论

针对近场目标采用的基于太赫兹近场雷达搭建的 SAR 成像与焦平面成像系统，分别对阶梯以及字母目标进行测量与二维、三维重建。对比二维成像效果发现，SAR 数据经过 RMA 的数字聚焦后能获得目标的边缘轮廓信息，并且随着扫描区域的增大，二维聚焦效果有所提升。焦平面成像数据经过透镜的物理聚焦可以获得效果更好的目标二维成像结果。2 种成像方式在三维重建时均无法区分低于径向理论分辨力的目标距离差异。但由于 SAR 具有数字聚焦的可变动性优势，因此能区分出距离差较大的目标并且能准确实现三维重建。而焦平面成像由于透镜焦深限制，在三维重建时无法恢复出偏离焦平面较远的目标。SAR 成像更适用于三维目标重建，焦平面成像更适用于表面高度差较小目标的二维高分辨力成像。

参考文献：

[1] SHEEN D,MCKAKIN D,HALL T. Near-field three-dimensional radar imaging techniques and applications[J]. Applied Optics, 2010,49(19):83-93.
[2] SHEEN D M,MCKAKIN D L,HALL T E. Three-dimensional millimeter-wave imaging for concealed weapon detection[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002,49(9):1581-1592.

(下转第 983 页)