

# 基于先验信息补偿的太赫兹雷达 近场大转角精细成像研究

王瑞君<sup>1</sup>, 曹睿<sup>1</sup>, 贺思三<sup>1</sup>, 杨琪<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051; 2. 国防科技大学电子科学学院, 长沙, 410073)

**摘要** 基于雷达成像技术实现太赫兹频段目标散射特性获取是一种重要的特性测量手段,其前提是能够获得目标的高分辨精细成像结果。针对室内太赫兹雷达系统成像测量时难以保证参考目标中心和转台中心完全重合,且近场成像结果敏感于目标位置误差的实际问题,推导建立了相应的精确成像模型,提出了基于先验信息的距离误差补偿方法和近场成像算法实现方法,得到了近场大转角条件下太赫兹目标高分辨精细成像结果。经实验系统测量验证,该成像方法可精确修正目标位置摆放误差和近场测量误差造成的图像形变与散焦,无目标坐标系和雷达坐标系中心重合的要求限制,为太赫兹频段目标散射特征精确反演和散射中心诊断提供了重要支撑。

**关键词** 太赫兹雷达;精细成像;先验信息;距离补偿;近场

**DOI** 10.3969/j.issn.2097-1915.2024.04.006

**中图分类号** TN95 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2024)04-0033-08

## Research on Terahertz Radar Near-Field Imaging with Large Rotation Angle Based on Prior Information Compensation

WANG Ruijun<sup>1</sup>, CAO Rui<sup>1</sup>, HE Sisan<sup>1</sup>, YANG Qi<sup>2</sup>

(1. Air Defense and Antimissile School, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

2. School of Electronic Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract** Terahertz scattering characteristic acquisition of targets by radar imaging is an important way of scattering measurement, and its premise is to obtain the high resolution and fine imaging results. Aimed at the problems that measurement of imaging in terahertz radar system is difficult to guarantee a complete consistency between the target center and the turntable center during measurement, and the results of imaging are sensitive to position error of targets for the near field terahertz radar system, in this paper, a corresponding accurate imaging model is deduced and established, a method of distance error compensation based on prior information is presented, and a realization of imaging algorithm is proposed, achieving the target's high resolution fine image acquisition under condition of near field and large rotation angle. The experimental results show that the proposed imaging method can accurately correct the image distortion and defocus caused by the positioning error and near-field factors of the target, and is not subject to the coincidence of the center of the target coordinate system and the radar coordinate system. The study could

**收稿日期**: 2023-11-06

**基金项目**: 陕西省自然科学基金基础研究计划(2023JCYB509)

**作者简介**: 王瑞君(1986—),男,内蒙古凉城人,副教授,研究方向为太赫兹雷达成像与雷达目标特性技术。E-mail:wandering\_jun@163.com

**引用格式**: 王瑞君,曹睿,贺思三,等.基于先验信息补偿的太赫兹雷达近场大转角精细成像研究[J].空军工程大学学报,2024,25(4):33-40. WANG Ruijun, CAO Rui, HE Sisan, et al. Research on Terahertz Radar Near-Field Imaging with Large Rotation Angle Based on Prior Information Compensation[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2024, 25(4): 33-40.

pave the way for image-based target scattering feature extraction and scattering center diagnosis in terahertz band.

**Key words** terahertz radar; fine imaging; prior information; distance compensation; near-field

太赫兹雷达作为太赫兹技术的重要应用与发展方向之一,近年来受到了国内外学者的广泛关注<sup>[1-2]</sup>。相比微波雷达和红外探测器,太赫兹雷达具有高空间/时间/频率分辨率、高精度、强穿透力与强抗干扰能力等优势<sup>[3-4]</sup>。当前,太赫兹雷达系统逐渐走向实际应用,掌握太赫兹频段目标散射特性是对目标进行精确探测与精细识别的必然要求,基于成像技术研究目标的散射特性也是当前太赫兹领域研究的热点之一。

太赫兹雷达通过发射宽带信号对目标进行高分辨成像,成像结果可直观反映出目标的结构与形状,非常有利于目标不同类型特征的获取与目标的识别,国内外许多机构在此方面对太赫兹成像算法与特征提取方法等开展了相关研究<sup>[5-8]</sup>。其中,基于太赫兹雷达系统高分辨成像结果反演目标的雷达散射截面(radar cross section, RCS)特征已成为一种重要的 RCS 测量技术途径<sup>[9-10]</sup>。文献[10]研究了基于逆合成孔径雷达(inverse synthetic aperture radar, ISAR)成像的太赫兹 RCS 测量技术,小转角成像时采用远场平面波近似处理,大转角条件下利用球面波展开处理后,采用非均匀快速傅里叶变换(non-uniform fast Fourier transform, NUFFT)算法实现快速成像。

在基于雷达成像进行 RCS 反演的过程中,实现目标高分辨精确成像是保证反演精度的重要前提。但成像时采用远场平面波近似处理和快速成像算法均会影响成像质量,且这些成像方式受成像系统参考信号不在转台中心的影响,会出现图像散焦现象。高敬坤等<sup>[11]</sup>研究了参考目标不在转台中心时的太赫兹成像补偿问题,提出一种基于参数寻优的位置误差补偿成像算法,但这种方法存在计算开销大的问题。卷积滤波逆投影成像算法作为一种可实现大转角精确成像的方法在远场条件下被广泛使用<sup>[12-13]</sup>,其成像结果通常被视为精确成像结果用于参考,但对其在太赫兹近场成像应用中的模型阐述与分析仍不全面。

本文针对太赫兹目标散射特性测量时,雷达转台成像过程中参考目标坐标系和雷达坐标系中心不重合问题和近场测量问题,重新推导建立了近场大转角精确成像模型,修正了参考中心的位置误差对成像聚焦的影响,且没有做任何远场近似,可获取目标大转角精细成像结果,通过太赫兹雷达实验系统进行成像测量,验证了所提大转角高分辨近场成像方法的有效性,为目标特征反演奠定了基础。

## 1 成像模型

在理想转台成像条件下,通常认为雷达探测满足远场平面波假设条件,雷达回波和图像之间有直接的对应关系,可通过傅里叶变换实现成像<sup>[14]</sup>。对于近距离太赫兹雷达成像实验系统,由于目标尺寸和雷达至目标之间的距离处于同一数量级,平面波假设条件不再成立,需视为近场成像。同时为获取目标的高分辨成像结果,需要对目标进行大转角条件下的精细成像。

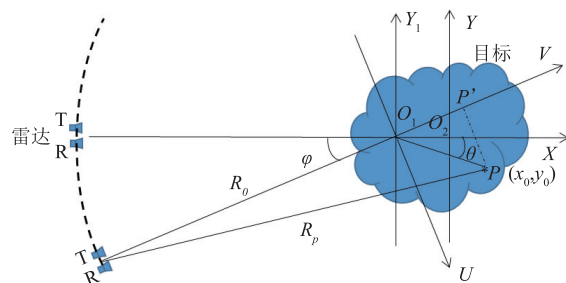


图1 太赫兹雷达近场成像几何关系

考虑如图1所示的成像关系,雷达测量坐标系为 $UO_1V$ ,目标坐标系为 $XO_2Y$ ,理想条件下,2个坐标系中心 $O_1$ 和 $O_2$ 应该重合。实际测量实验中,通常需要利用参考信号对目标回波进行校正,以消除成像系统器件的非线性影响。这时,由于参考目标摆放位置存在误差,造成参考目标中心与雷达观测坐标系中心不重合,从而导致雷达测量坐标系与目标坐标系之间中心不重合,进而会产生附加线性相位,造成成像结果发生散焦与失真。同时,传统成像处理过程对目标上任意点 $P$ 与雷达之间的距离 $R_p$ 采用其在雷达视线上的投影( $R_0 + O_1P'$ )进行近似<sup>[4]</sup>,这同样会导致成像时图像散焦。下面对图1所示的成像场景进行重新建模。

假设雷达系统采用微波倍频方式发射线性调频信号:

$$s(t) = \exp(j2\pi(f_c t + \frac{1}{2}\gamma t^2)) \quad (1)$$

式中: $f_c$ 为中心频率; $\gamma$ 为调频斜率; $t$ 为信号持续时间。

雷达发射的信号经目标反射后,回波信号表示为:

$$r(t) = A \exp(-j2\pi(f_c(t-\tau) + \frac{1}{2}\gamma(t-\tau)^2)) \quad (2)$$

式中: $\tau$ 为目标回波的延迟时间; $A$ 为散射回波强度。

对宽带线性调频信号的回波进行去斜处理,得到中频信号形式为:

$$r_{IF}(t) = A \exp(-j2\pi(f_c \tau + \gamma t \tau - \frac{1}{2} \gamma \tau^2)) \quad (3)$$

经斜置项和剩余视频相位项校正后的信号为:

$$r_{IF}(t) = A \exp(-j4\pi(f_c + \gamma t) \frac{R}{c}) \quad (4)$$

式中: $R = c\tau/2$ ,即目标上任意一点  $P$  到雷达之间的距离。假设某一时刻,雷达测量视线角为  $\varphi$ ,此时,由于雷达坐标系中心和目标坐标系中心不重合,若将目标上任一点  $P(x_0, y_0)$  在直角坐标系  $XO_1Y_1$  中表示为  $P_1(x_1, y_1)$ ,则该点与雷达间的距离表示为:

$$R_p = \sqrt{R_0^2 + r_1^2 - 2R_0 r_1 \cos(\pi + \theta - \varphi)} \quad (5)$$

式中: $r_1 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2}$ ;  $\theta = \arctan(y_1/x_1)$ 。该瞬时距离公式未做任何投影近似,它的变化直接影响着回波中相位的变化,可精确反映目标上不同散射点的位置信息。若雷达绕着  $O_1$  点做圆周转动并发射宽带信号,则目标散射回波的频域表达形式可写为:

$$r_T(f, \varphi) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} g(x, y) \cdot \exp\left(-j \frac{4\pi f}{c} \sqrt{R_0^2 + r_1^2 - 2R_0 r_1 \cos(\pi + \theta - \varphi)}\right) dx dy \quad (6)$$

式中: $g(x, y)$  为目标的散射分布函数,即目标的二维像,它是雷达工作频率  $f$  和观测视角  $\varphi$  的函数。

成像时,由于目标参考中心  $O_2$  无法保持与转台中心完全一致,若参考点目标位于  $O_2$  点,与转台中心(雷达坐标系中心)  $O_1$  不重合,那么参考点  $O_2$  的回波信号可表示为:

$$r_{Ref}(f, \varphi) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} g(x, y) \exp(-j \frac{4\pi f}{c} R_c) dx dy \quad (7)$$

式中: $R_c$  为雷达与参考中心  $O_2$  之间的距离。

以式(7)作为参考信号对目标回波进行校正,得到校正后的回波为:

$$r_{TR}(f, \varphi) = r_T(f, \varphi) / r_{Ref}(f, \varphi) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} g(x, y) \cdot \exp\left(-j \frac{4\pi f}{c} (\sqrt{R_0^2 + r_1^2 - 2R_0 r_1 \cos(\pi + \theta - \varphi)} - R_c)\right) dx dy \quad (8)$$

若在远场近似条件下,式(5)可以表示为经典的转台形式<sup>[14]</sup>:

$$R_p = R_0 - (x_1 \cos \varphi + y_1 \sin \varphi) \quad (9)$$

这时式(8)可重写为:

$$r_{TR}(f, \varphi) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} g(x, y) \exp(j \frac{4\pi f}{c} (x_1 \cos \varphi + y_1 \sin \varphi)) \cdot \exp(-j \frac{4\pi f}{c} (R_0 - R_c)) dx dy \quad (10)$$

可以看出,上述转台成像公式中多出了一项相位项  $\exp(-j4\pi f(R_0 - R_c)/c)$ ,正是由于多出了这个由参考中心距离误差引起的线性相位项,所以成像时必须先对其进行补偿,否则会对成像质量产生影响。另一方面,成像为近场成像场景,因此采用式(9)进行近似处理同样会使成像质量下降,本文直接采用式(8)进行下一步的成像实现。

由于式(8)中没有对距离项  $R_p$  进行远场近似处理,所以无法将其进一步简化并以远场条件下的傅里叶变换形式表示。在成像时,需要对式(8)进行进一步处理以重建目标的散射分布函数  $g(x, y)$ 。

## 2 成像算法

### 2.1 基于先验信息的距离误差补偿

通过第1节的分析可知,目标回波中多了一项线性相位项需要进行补偿,这本质上是一个单参数优化问题,这里基于标准球体目标散射机理的先验信息进行距离偏差估计并补偿。

金属球体作为标准体目标,在散射特性测量实验中会经常用到,在不同频段,其散射特性规律目前已有清晰的理论认知。在先前对太赫兹频段金属球散射特性的理论研究中已获知:光学区金属球的  $360^\circ$  转角成像结果为一圆环,是由球体表面的镜面反射分量在滑动后形成的,且圆环半径等于球体半径<sup>[15]</sup>。因此在对球体目标进行成像测量时,若回波中存在这样一个线性相位项,那么将会导致球体目标表面的散射中心在图像中的位置发生偏移,结合球体目标实际半径大小,根据成像结果中球体镜面散射中心的位置或半径大小,便可估计出该偏移量,从而实现对参考目标距离误差的补偿。具体补偿流程见图2。

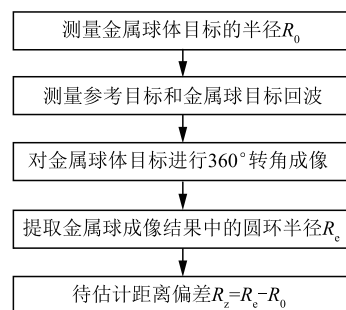


图2 距离偏差估计流程

根据上述流程,在一次测试中,分别测试待测目标和参考目标回波,以待测金属球作为点目标估计参考目标的距离偏差,得到距离偏差估计值后,即可利用参考目标信号完成对其他待测目标的回波校正

以及距离误差补偿,为下一步的成像处理奠定基础。

## 2.2 近场成像算法

由式(8)可以看出,散射回波表达式中的相位项具有  $\exp(jkR)$  的形式,这个函数既是信号处理中傅里叶变换核的形式,也是电磁散射理论中格林函数的形式,这一关系意味着雷达成像与傅里叶变换之间关系密切。因此,令:

$$\varphi(f, \varphi) = \exp(j \frac{4\pi f}{c} R) \quad (11)$$

则:

$$r_{\text{TR}}(f, \varphi) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} g(x, y) \varphi^*(f, \varphi) dx dy \quad (12)$$

令  $k = 2f/c$ , 利用积分相似逆变换原理,可得到目标的散射分布函数为:

$$g(x, y) = \int_{\varphi} \int_k r_{\text{TR}}(k, \varphi) \varphi(k, \varphi) k dk d\varphi \quad (13)$$

观察式(13)可以发现,由于在实验测试时,信号频率范围和转角的范围不是无限的,换言之,式(13)的积分限不满足快速傅里叶变换条件,在算法实现过程中,需要对波数  $k$  进行频移  $k_{\min}$  处理。由于成像雷达系统发射的线性调频信号经过回波采样后,频率点是离散的,若采样频率点数为  $N$ ,对波数  $k$  的采样形式可表示为:

$$k = \frac{nB}{N-1}, n=0, 1, \dots, N-1 \quad (14)$$

式中: $B$  为发射信号的带宽。

则频移后式(13)的积分可以表示为:

$$g(x, y) = \int_{\varphi_{\min}}^{\varphi_{\max}} \left[ \int_0^B (k + k_{\min}) r(k + k_{\min}, \varphi) \exp(j2\pi k R) dk \right] \cdot \exp(j2\pi k_{\min} R) d\varphi \quad (15)$$

式(15)中,方括号内的积分项为某一观测视角下的积分,将该视线方向的成像场景按照距离分辨率  $\delta_r$  进行距离上的离散化,即:

$$R_m = m\delta_r, m=0, 1, \dots, N-1 \quad (16)$$

则内部积分项可表示为:

$$P_{\varphi}(R_m) = \int_0^B (k_{\min} + \frac{nB}{N-1}) r(n, \varphi) \exp(j2\pi \frac{nB}{N-1} R) dk = \sum_{n=0}^{N-1} (k_{\min} + \frac{nB}{N-1}) r(n, \varphi) \exp(j2\pi \frac{m}{N-1} n) = \text{IFT}_n \left[ (k_{\min} + \frac{nB}{N-1}) r(n, \varphi) \right] \quad (17)$$

经过以上处理,可以发现成像时,首先在波数域

中将径向波数矢量  $k$  与雷达回波  $r(n, \varphi)$  进行相乘。由傅里叶变换理论可知波数域相乘对应空间域函数的卷积,因此这一步可视作卷积处理。然后将卷积后的结果进行逆傅里叶变换,式(17)得到的是在观测视线方向相应  $R_m$  点上的投影结果。在积分的过程中,观测视线随着  $\varphi$  发生变化,对于成像空间中的任一目标散射点,在每个观测角  $\varphi$  下对应的  $R$  不同,所以式(17)得到的离散距离上的投影值是极坐标格式下的结果,需要将其插值到事先划分的二维直角坐标成像网格中去。若成像场景划分网格为  $D(p, q)$ ,划分的全部成像网格点在视线角  $\varphi$  方向上的投影可表示为:

$$R'_{\varphi} = \sqrt{p^2 + q^2} \cos(\varphi - \theta) \quad (18)$$

$R'_{\varphi}$  作为被插值点,在采样点  $R_m$  中进行一维插值即可得到全部网格点  $D(p, q)$  在视角  $\varphi$  方向上的投影值。

在完成插值处理后,依据式(15),在所有的观测视角下进行角度积分即可完成对目标图像的重建,即:

$$g(x, y) = \int_{\varphi_{\min}}^{\varphi_{\max}} P_{\varphi}(R) \exp(j2\pi k_{\min} R) d\varphi = \sum_{\varphi} P_{\varphi}(R) \exp(j2\pi k_{\min} R) \quad (19)$$

由以上处理可知,先后通过卷积滤波、逆傅里叶变换、插值和角度积分等步骤,便可以实现对测量回波的成像处理过程,得到测量目标的二维高分辨精细成像结果。上述成像处理对雷达观测角范围大小无限制,且插值中利用了式(5)所示的精确距离表达式,没有做任何距离上的近似,因此可以实现近场条件下对目标的大转角精确成像。另一方面,由于成像时对目标区域进行了场景网格划分,且距离公式未近似处理,所以重建得到的成像结果不受雷达测量坐标系与目标坐标系中心不一致因素的影响,获得的是目标在坐标系  $XO_1Y_1$  中的散射分布结果,可实现目标图像的精确聚焦。

## 3 实验结果分析

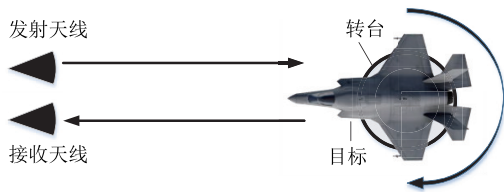
为了验证本文成像模型和算法,基于太赫兹雷达实验系统进行测量与成像处理对比分析。

### 3.1 雷达系统与测试过程

太赫兹雷达实验系统基于双通道信号源采用微波倍频方式产生宽带发射信号,中心工作频率为 334 GHz,最大带宽可达 20 GHz。接收时系统采用二次混频方式对回波进行处理获得中频采样信号,收发天线采用分置方式排布,目标放置在二维精密转台上,利用低散射支架进行支撑。通过系统控制



主机,可设置雷达发射信号的波形、脉宽、占空比、采样点数、采样率和转台转速等参数。在下面的测量实验中,雷达产生宽带线性调频信号,带宽为 12.5 GHz,雷达收发天线与二维精密转台之间距离约为 5 m,待测目标在转台上进行 360°旋转,雷达系统测量获得其不同角度的散射回波。测试示意图与测试场景见图 3。



(a) 雷达系统测量过程俯视图



(b) 系统测量场景

图 3 太赫兹雷达系统测量示意图与场景

为最终获得目标的高分辨成像结果,在成像处理之前,需要对回波数据进行预处理。在成像场景中,通常会存在一些背景和多路径干扰信号,这些信号会对成像结果造成影响,对回波信号进行背景对消处理是一种有效的抑制背景杂波和提升信噪比的方法,因此测量时首先测试空场景的背景信号,将其与测得的目标信号进行矢量相减得到背景对消后的回波。另一方面,由于太赫兹频段线性调频信号产生时的非理想特性,导致利用未校正的回波信号直接成像将无法实现准确聚焦。利用一个转台中心处的角反参考信号对目标进行校正可较好地消除这种非理想因素影响。所以测量时首先测量一个转台中心位置处的角反参考信号,然后将待测目标放置在转台上对其进行大转角姿态下的测试。在背景对消基础上,对目标回波信号进行参考校正处理以完成数据的预处理过程。

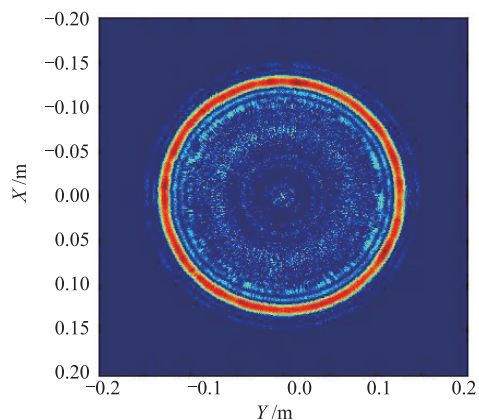
### 3.2 成像结果分析

球体作为标准体目标,其散射和成像特性被广泛的研究,因此首先选取 1 个半径为 10 cm 的金属球进行测量。将球调整放置在转台中心位置和偏移中心一定距离的位置分别进行测量,发射脉冲,重复周期设置为 1 ms、脉宽为 160  $\mu$ s、脉内采样点数为 2 048 点、转台转速 10°/s、角度测量范围 360°、方位向共计采样点数为 36 000 点。

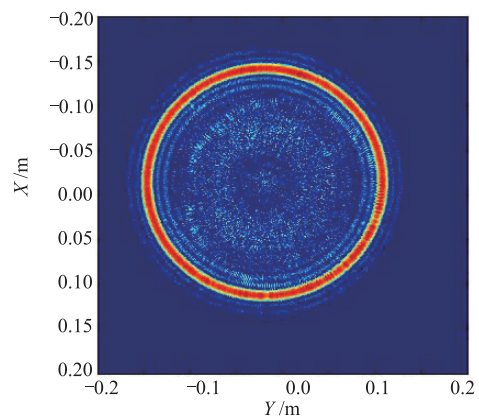
#### 3.2.1 距离误差提取与补偿

利用角反作为参考目标对待测目标的回波信号进行校正,在摆放时无法保证角反的散射中心位置与转台中心重合,根据上文分析,这将对成像质量产生影响。首先对金属球进行一次误差补偿前的成像,从中提取参考偏移距离。

图 4 为参考角反目标中心与转台中心不重合时,且未对由此产生的距离误差进行补偿时的成像结果。从成像结果可以看出,在 360°转角下,由于太赫兹雷达具有极高的距离分辨率,球体目标散射分布为一圆环,这与对球体目标散射机理的理解一致。这一散射特征分布对应金属球表面的反射分量,且随着观测视角变化发生滑动,形成滑动型散射中心,图像中球面反射形成的圆环半径应与球体的半径相同。但是从图 4 所示的图像中可以看出,不论是球体目标在近转台中心位置摆放还是偏离转台中心较大距离摆放,此时图像中的圆环半径均大于球体的实际半径,约达到 13 cm,表明成像结果发生了畸变。结合上文中的理论分析可知,这是由于未对参考信号的距离误差进行补偿造成的。



(a) 球体目标中心摆放



(b) 球体目标偏移摆放

图 4 参考距离误差补偿前球体目标的成像结果

对图 4(a) 的圆环成像结果沿其直径方向取一截面,见图 5。图 5 中的蓝色曲线的 2 个主峰分别对应球体直径方向的镜面散射,峰值之间的距离理

论上与球体直径一致。但由于参考偏移距离误差的存在,在未补偿时,峰值之间的距离发生了变化。通过计算补偿之前峰值之间的距离,将其与实际直径相比,即可求得参考偏移距离误差。图 5 中红色实线即为误差补偿后球体成像结果的相应截面曲线。

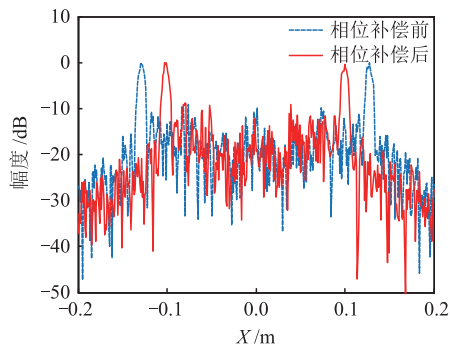
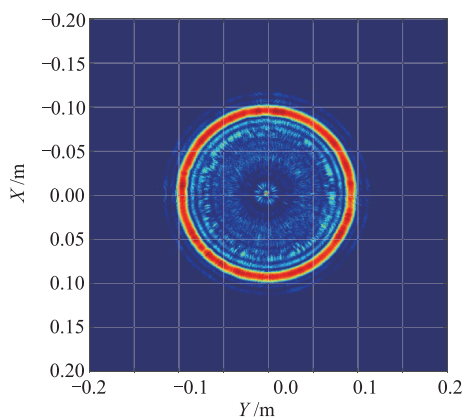
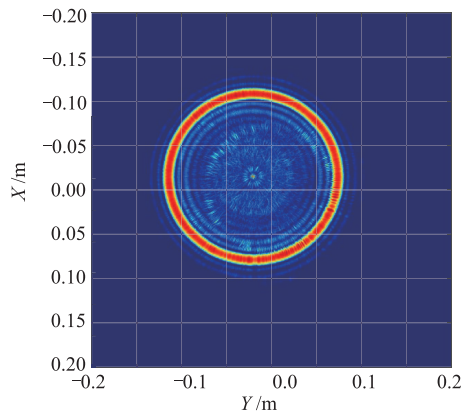


图 5 相位补偿前后球体直径方向截面散射分布对比结果

经距离误差估计与补偿方法对回波信号进行补偿处理,球体目标的成像结果见图 6。可以看出,补偿后实现了对目标的精确聚焦成像,圆环半径对应测量球的半径 10 cm,成像结果与目标实际大小尺寸相符。对比图 6(a)和图 6(b)可以看出,不论待测球体目标是否处于转台中心,由于补偿了参考目标中心的距离偏差,都可以实现有效的成像聚焦。



(a)球体目标中心摆放



(b)球体目标偏移摆放

图 6 参考目标距离误差补偿后球体目标的成像结果

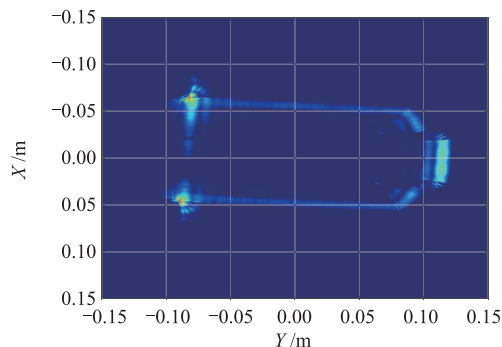
相比文献[11]采用的基于图像熵的偏差距离寻

优及线性相位校正方法,本文提出的方法通过一次预成像估计出距离误差,具有速度快、简单实用、物理意义明确、误差估计精度高的特点。在对比仿真中,设定仿真参数(成像范围为  $0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$ ,像素点数为  $400 \times 400$ )和计算平台参数(1 台配有 Intel i7-8700 处理器和 32 GB 内存的台式机),各算法均基于 MATLAB 代码实现。基于图像熵的偏差距离寻优方法完成偏差估计用时为 6 931 s,本文方法仅用时 109 s。这是因为基于图像熵的偏差距离寻优需多次成像并进行熵值计算,而本方法仅需一次预成像即可。

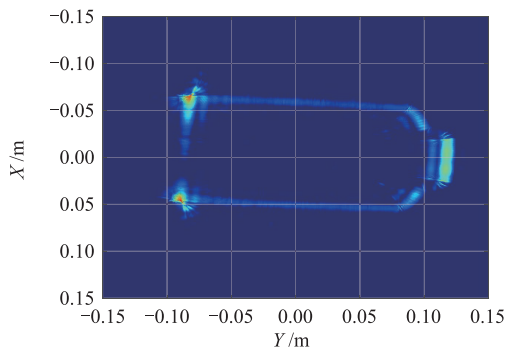
图 7 为对一个锥柱形组合体的成像结果。测量时尽量将参考目标放置在转台中心位置以减小偏移距离误差对成像的影响,但这时仍然存在一个较小的偏移分量。从成像结果看,这时组合体在距离补偿前后均可实现有效聚焦,可反映目标的形状和散射中心分布情况。但是与目标真实尺寸相比,未进行距离补偿时的成像结果与目标实际尺寸不符,由于参考目标位置超前于转台中心,因此造成成像结果中柱体的直径减小,且柱底形成的二面角散射中心越过柱面,这与实际不符,如图 7(b)所示。经补偿后的成像结果如图 7(c)所示,在这个目标上具有单曲面、平面、二面角、锥柱结合处等结构特征,从成像结果可以看出,图像可以很好地反映目标的轮廓和这些细微结构特征,对于目标的散射特性分析具有重要意义。



(a)待测锥柱形组合体目标



(b)距离补偿前成像结果



(c)距离补偿后成像结果

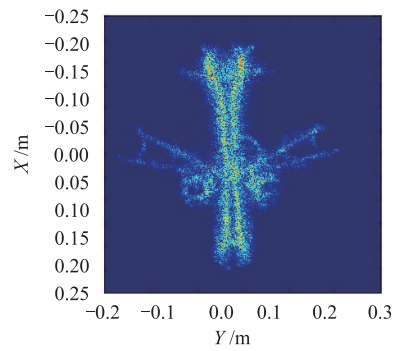
图 7 锥柱组合体目标在距离补偿前后的近场成像结果对比  
3.2.2 近场误差补偿分析

下面对近远场条件下成像效果进行进一步对比分析。文献[11]在完成参考偏移误差估计与补偿后,成像时采用式(10)所示的远场近似处理,将其与本文基于式(8)的近场处理结果进行对比。成像测量目标为散射机理更加复杂的飞机模型。因为飞机上不同部位存在不同类型的散射中心,散射中心数目大大增加,若仅对参考目标的距离偏移误差进行补偿,而不考虑近场测量时球面波照射的影响,那么在大转角条件下,由于距离误差造成的相位误差会不断积累,最终使得成像结果散焦或者出现失真。

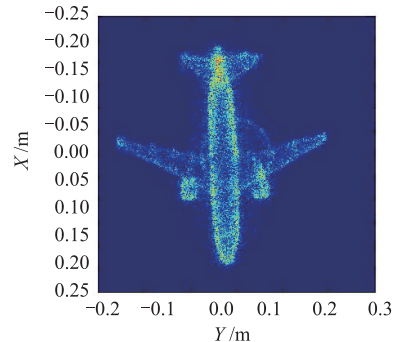
待测量飞机模型和成像结果如图 8 所示,从图 8(b)中可以看出,由于参考目标偏移转台中心距离比较大,未进行参考目标距离误差精确补偿时,成像结果散焦严重,完全无法反映飞机目标的真实散射分布和形状。在对参考目标信号进行距离误差补偿后,成像结果得以改善。图 8(c)为完成距离误差补偿后,直接采用远场近似处理获得的成像结果,从散射分布来看,基本可以反映出飞机目标结构特征。图 8(d)则为本文基于式(8)进行精确距离补偿后由近场成像算法处理得到的成像结果,从图中可以看出,在图像中心位置存在一个较弱的散射圆环,这是由圆柱形的弱散射泡沫支架形成的散射分布,飞机并未放置在支架中心位置,但是仍然可获得精确的成像结果。对比图 8(c)可以看出,若不考虑球面波前的影响直接采用远场平面波近似处理,目标图像的边缘会发射弯曲,如靠近图像边缘的飞机机翼两端、尾翼和机头等部位发生了明显的形变,使得整个机身也发生了畸变。



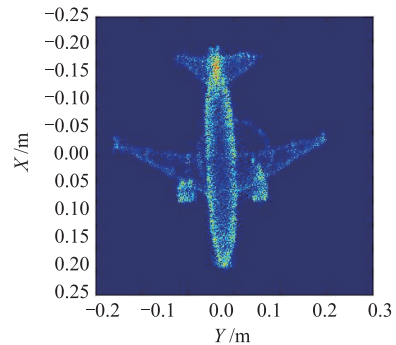
(a)待测飞机模型



(b)距离补偿前成像结果



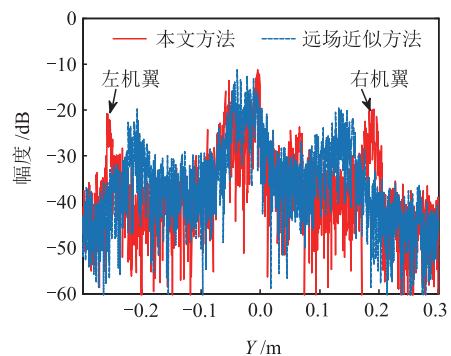
(c)距离补偿后远场成像结果



(d)距离补偿后近场成像结果

图 8 飞机模型目标在不同条件下的成像结果对比

图 9 为上述二维成像结果在不同的横向和纵向距离截面上的目标散射分布情况对比。可以看出在远场近似处理下,两侧机翼散射分布的位置向内发生偏移,而机头出现展宽现象,这均与目标的实际几何尺寸不符。从图 9(c)可以看出,在远场近似处理下,发动机和尾翼的散射分布位置也发生了一定的偏移。



(a)距离  $X = -0.0415$  m 时的截面



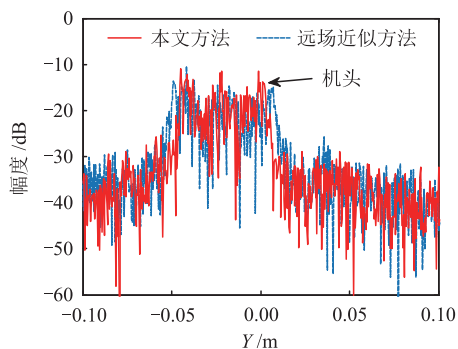
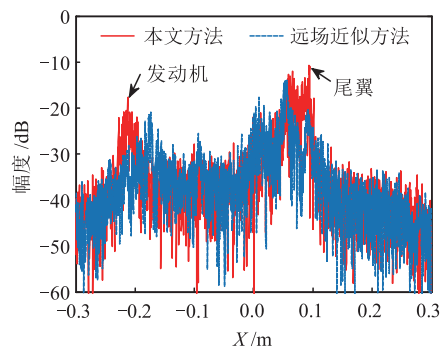
(b) 距离  $X=0.1705$  时的截面(c) 距离  $Y=0.1053$  m 时的截面

图 9 不同的距离截面上的目标散射分布情况对比

通过近场精确成像算法进行精细补偿处理,聚焦成像结果与飞机模型实际散射中心位置、尺寸和形状一致吻合,准确反映了飞机目标的结构与形状,从图像中可清晰识别出机身、机翼、机尾和发动机等部位,也为目标雷达散射截面的精确反演奠定了基础。

## 4 结语

太赫兹雷达工作频率高、可发射大带宽信号,具有极高的成像分辨能力,在目标探测识别与目标散射特性分析方面具有重要应用价值。本文面向基于太赫兹雷达成像的目标散射特性测量需求,针对太赫兹雷达转台成像时参考目标中心和雷达测量坐标系中心不重合问题和近场测量问题,推导建立了近场大转角精确成像模型,提出了距离偏移误差校正方法和近场成像算法实现流程。通过太赫兹雷达实验系统进行成像测量,验证了所提大转角高分辨近场成像方法可精确修正目标位置摆放误差和近场测量误差造成的图像形变与散焦,可获得目标的高分辨散射分布,为后续基于成像的目标散射特征反演和散射中心诊断提供了基础。

## 参考文献

[1] COOPER K B. Performance of a 340 GHz Radar

Transceiver Array for Standoff Security Imaging [C]//2014 39th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). Tucson, AZ: IEEE, 2014:1.

- [2] 王佳颖,张铎宸,周思远,等. 太赫兹雷达技术发展与应用[J]. 中国电子科学研究院学报, 2021, 16(8): 844-850.
- [3] 王宏强,邓彬,秦玉亮. 太赫兹雷达技术[J]. 雷达学报, 2018, 7(1): 1-21.
- [4] 张彪. 太赫兹雷达成像算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [5] 郭俊川. 基于太赫兹雷达的空间碎片高分辨三维成像技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
- [6] WANG R J, ZHOU F. A 330 GHz Multi-Channel Radar for Interferometric Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging[C]//2021 46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz). Chengdu: IEEE, 2021:1-2.
- [7] DEMARTINIS G B, MICHAEL J C, THOMAS M H. A 240 GHz Polarimetric Compact Range for Scale Model RCS Measurements[C]//Proceedings of Antenna Measurements Techniques Association (AMTA). Atlanta, GA: SPIE, 2010: 3-8.
- [8] ZHANG Y, YANG Q, DENG B, et al. Experimental Research on Interferometric Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging with Multi-Channel Terahertz Radar System [J]. Sensors, 2019, 19(10): 2330.
- [9] 任浩田. 基于旁瓣抑制的三维成像 RCS 测量技术研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2021.
- [10] 赵珊珊. 太赫兹频段目标 RCS 测量与远场外推技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2019.
- [11] GAO J K, QIN Y L, DENG B, et al. Terahertz Wide-Angle Imaging and Analysis on Plane-Wave Criteria Based on Inverse Synthetic Aperture Techniques[J]. Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2016, 37(4): 373-393.
- [12] 蒙国宽. 太赫兹雷达 ISAR 成像实测数据处理研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- [13] 舒明敏,全绍辉. ISAR 快速 CBP 成像算法研究[J]. 微波学报, 2014, 30(6): 31-35.
- [14] 保铮,邢孟道,王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [15] WANG R J, DENG B, QIN Y L, et al. Study of Scattering Characteristics for Metallic Spheres at Terahertz Frequencies[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2014, 28(14): 1786-1797.

(编辑:杜娟)