

# 抛物面天线目标太赫兹雷达散射特性

李纯纯, 邓彬, 王宏强, 黎湘

(国防科学技术大学电子科学与工程学院空间电子技术研究所, 湖南长沙 410073)

**摘要:** 抛物面天线目标在太赫兹波段下属于电大尺寸。基于电磁散射计算软件 CST Microwave Studio 来建立旋转对称抛物面天线目标的 CAD 模型, 采用高频渐进法分别求解目标在太赫兹波段和 X 波段下的雷达散射截面, 进而研究分析目标 RCS 特性, 高分辨率一维距离像和逆合成孔径雷达像特性。

**关键词:** 太赫兹; 抛物面天线; RCS; 高分辨率一维距离像; 逆合成孔径雷达成像

中图分类号: O441 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2013.06.017

## Radar scattering characteristics of parabolic reflector antenna targets in the terahertz regime

LI Chun-chun, DENG Bin, WANG Hong-qiang, LI Xiang

(Institute of Space Electronics Technology, College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** In terahertz regime, the parabolic reflector antenna (PRA) targets are electrically very large targets. The CAD model of the PRA was simulated with the electromagnetic scattering computation software CST Microwave Studio. The radar cross section (RCS) of PRA was solved by the high frequency asymptotic solver in X waveband and terahertz regime. The RCS characteristics, high range resolution profiles and inverse synthetic aperture image of the target are researched and analyzed.

**Key words:** terahertz (THz); parabolic reflector antenna; RCS; high range resolution profiles (HRRP); inverse synthetic aperture radar (ISAR) image

### 1 引言

太赫兹波 (terahertz radiation or T-Rays, THz) 是介于微波和红外之间, 频率在 0.1 ~ 10 THz (波长在 3 ~ 0.03 mm) 范围内的电磁波, 是一个非常具有科学价值但尚未被完全认识和利用的电磁辐射区域<sup>[1]</sup>。近年来, 随着太赫兹源器件和检测技术的突破, 太赫兹波一系列独特的特性被发现, 在诸多行业显示出广阔的应用前景<sup>[2-3]</sup>。在诸多的军事目标中, 抛物面天线是地面防空反导单元和舰艇的重要部件, 目前, 关于抛物面天线目标特性的研究很少。几何光学法 (GO) 可以计算抛物面天线反射器的结构项 RCS<sup>[4-5]</sup>, 可推广用于太赫兹波段。文献<sup>[6]</sup>借助图形电磁计算软件对反射面天线的微波散射特性进行了计算和分析, 并对其距离像特征进行了分析。显然, 对于几何尺寸在分

米或米量级的军事目标, 其结构在太赫兹波段具有极大的电尺寸。高频渐进方法特别适用于超电大尺寸目标的 RCS 计算, 且频率越高, 使用高频近似方法的结果, 尤其是单站 RCS 就越精确, 如 PO 法可有效计算凸多面体理想导体目标在太赫兹波段下的 RCS<sup>[7-8]</sup>。文献<sup>[9]</sup>测量了目标的远场 RCS, 结果显示太赫兹和 GHz 频段下目标特性有巨大差异, 指出太赫兹体制下高频渐进方法在目标识别与检测中的可行性。

随着计算机技术和各种快速计算方法的发展, 原来无法求出解析解的电磁散射问题可以用计算机

数值模拟的方法加以解决。目前,国外已开发研制出多个军用和商用的仿真频率可以设置到太赫兹波段的电磁散射特性计算的仿真平台,用于仿真分析实际背景环境下真实目标的电磁特性,计算效率和精度都比较高。如美国国防电磁分析公司的 Xpatch、美国伊利诺依大学计算电磁学中心的 FISC 和 FASTFEM、德国 CST 公司的 CST、英国皇家海军机构的 RESPECT、西班牙的 GRECO 等。利用上述仿真平台,已先后完成多种军事目标电磁散射特性的计算,包括各种车辆、飞机、舰船等。

本文以单个反射面的旋转对称抛物面天线目标为对象,采用高频近似方法,计算天线目标在太赫兹波段下的 RCS,并研究其高分辨率一维距离像和逆合成孔径雷达成像特征。

## 2 电磁散射建模

本文选择 CST Microwave Studio - 2010 软件来计算电大尺寸目标太赫兹波段的电磁散射特性。该软件提供了专用于解决电大尺寸问题的渐进求解器 (Asymptotic Solver),采用高频近似方法——物理光学方法 (PO),弹跳射线 (SBR) 技术和一致性绕射理论 (UTD),可以非常精确方便地实现电极大尺寸目标电磁散射计算和天线设计仿真问题。主要应用领域包括:超电大尺寸良导体或表面阻抗类结构的单站或双站 RCS 计算;远场条件下电大尺寸结构天线的布局计算;具有成像所需的高效扫频性能;可计算远场 RCS。仿真时只需设置好入射的电磁波的频率和方位角,求解器会计算出静态目标的散射回波电场值。

参照表 1 中的几何参数,绘制旋转抛物面天线的 CAD 模型 (如图 1 所示),然后导入到 CST 软件

表 1 全尺寸和缩比天线模型的几何参数

天线模型	X 波段全尺寸天线/m	太赫兹波段缩比天线/mm
口面直径 $D$	6	60
焦距 $P$	5	50
馈源直径 $d$	0.5	5
馈源厚度 $h$	0.1	1

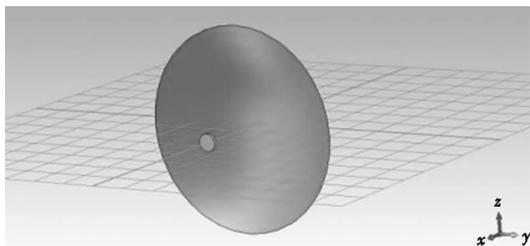


图 1 抛物面天线 CAD 模型

中,材料为良导体。原点  $(0,0,0)$  为抛物面天线模型的顶点,作为相位参考中心,抛物面方程:  $2Px = z^2 + y^2$ , 中心圆盘形馈源在焦点处。CST 软件求解散射场时需要对目标划分网格,在太赫兹波段下,如果按剖分物体的面片最大边长不超过  $1/10$  波长的要求,则实际尺寸的天线剖分后所需内存相当大,超出一般 PC 的能力。鉴于此,考虑 X 波段抛物面天线实际全尺寸模型,太赫兹波段采用缩比因子  $s = 100:1$  的缩比模型来进行建模。

两种抛物面模型的电尺寸  $L/\lambda = 200$ ,属电大尺寸目标,由波长归一化的目标特征尺寸  $ka = 2\pi a/\lambda > 20$ ,均处于光学区 (或称高频区),故可采用 CST 软件的高频渐进求解器来计算。仿真条件选择为自由空间,平面波,远场观测,参照表 2 设置仿真参数,包括入射波扫频带宽和步进量,方位角  $\phi$  从  $-90^\circ \sim 270^\circ$ ,按  $1^\circ$  步进,发射和接收都设为水平极化。

表 2 CST 软件仿真的参数设置

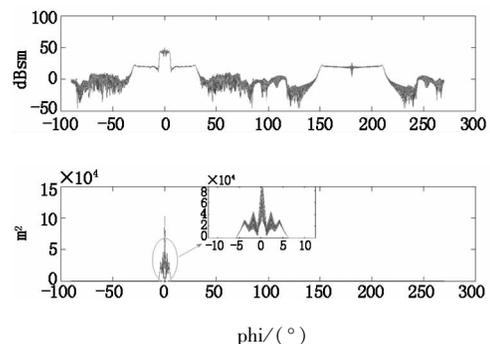
参数	X 波段全尺寸天线	太赫兹波段缩比天线
中心频率 $f_c$	10 GHz	1 THz
带宽 BW	1 GHz	30 GHz
波长 $\lambda$	30 mm	0.3 mm
频率采样间隔 $\Delta f$	10 MHz	300 MHz
角度采样间隔 $\Delta \phi$	$0.1^\circ$	$0.1^\circ$

## 3 雷达散射特性

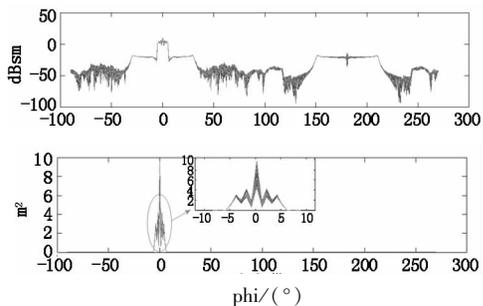
下面设计如下四个实验进行仿真,从不同角度来分析解释抛物面天线的 RCS 特性。

### 3.1 X 波段和太赫兹波段下的 RCS 比较

用 CST 软件分别计算 X 波段 (9.5 ~ 10.5 GHz) 全尺寸天线和太赫兹波段 (0.985 ~ 1.015 THz) 缩比模型天线在每个频点处的  $-90^\circ \sim 270^\circ$  全姿态 RCS,结果绘制如图 2 所示。



(a) 全尺寸抛物面天线模型的 RCS  
(含 9.5 ~ 10.5 GHz 各个频点)



(b) 缩比抛物面天线模型的 RCS  
(含 985 GHz ~ 1.015 THz 各个频点)

图2 旋转抛物面天线单站 RCS

分析图2 可得如下结论:

(1) RCS 曲线是入射波方位角  $\phi$  的偶函数,符合抛物面的对称结构,且无论是 X 波段还是太赫兹波段, RCS 几乎都不随频率而改变( $\phi = 0^\circ$  和  $\phi = 180^\circ$  除外),因此单站  $\sigma_{HH}(f, \phi)$  可简化为  $\sigma_{HH}(\phi)$ 。

(2) X 波段下,在视线偏离对称轴约  $30^\circ$  以内时,抛物面平均 RCS 约为  $100 \text{ m}^2$  ( $20 \text{ dBsm}$ ),大于发射器口径面积  $\pi(D/2)^2 = 28.2743 \text{ m}^2$ ,其余方向上接收到的目标能量很小几乎为零,说明天线的散射回波能量集中在对称轴附近  $\phi \in [-30^\circ, 30^\circ]$  内,即所谓“正侧闪烁”现象。

(3) 太赫兹波段下 RCS 曲线也有类似“正侧闪烁”现象,即在对称轴两侧  $30^\circ$  范围内,平均 RCS 约为  $0.01 \text{ m}^2$  ( $-20 \text{ dBsm}$ ),比发射器口径面积  $2.8743 \times 10^{-3} \text{ m}^2$  大。但是 RCS 的绝对值很小,对太赫兹波的散射回波能量很弱,看起来 RCS 只是在  $\phi \in [-5^\circ, 5^\circ]$  角度范围内呈现一个窄的“尖峰”。因此,从宏观上看,尺寸很小的抛物面缩比模型目标对太赫兹波的散射主要体现在正入射方向。

(4) 太赫兹波段缩比模型的 RCS 与 X 波段全尺寸目标的 RCS 相似成比例。例如 1 THz 下 RCS 峰值为  $9.05 \text{ dBsm}$ ,比 10 GHz 时的峰值  $49.05 \text{ dBsm}$  小了  $10^4$  个数量级(如图 3 所示),这恰好符合公式

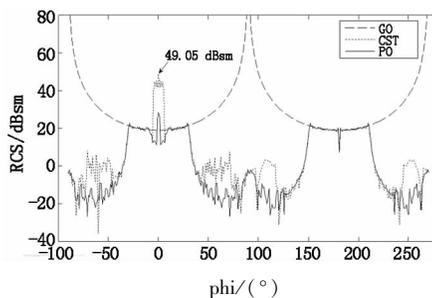
$$(\sigma_{RCS})_{\text{Model}} = \frac{1}{s^2} (\sigma_{RCS})_{\text{Full-scale}}, s = \frac{\lambda_{\text{Full-scale}}}{\lambda_{\text{Model}}} = \frac{L_{\text{Full-scale}}}{L_{\text{Model}}}$$

为缩比因子。其他姿态下的 RCS 也近似满足此相似比关系。这是因为两者特征尺寸相同,所以具有相似的 RCS 特性,也验证了通过对缩比模型在高频段进行暗室测量,可以模拟出实际目标在低频段的散射特性这一方法的正确性。

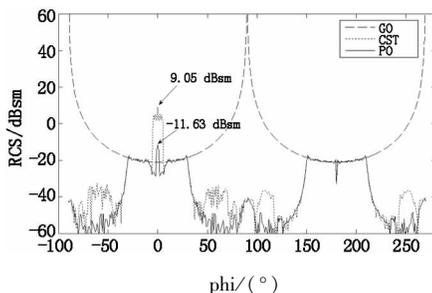
### 3.2 GO 法、PO 法和 CST 方法的 RCS 比较

将 GO 法、PO 法和 CST 软件三种方法所计算的中心频率 10 GHz 处的 RCS 结果显示如图 3(a) 所示,将中心频率 1 THz 处的 RCS 结果显示如图 3(b)

所示。



(a) GO 法、PO 法和 CST 软件计算的 RCS( $f=10 \text{ GHz}$ )



(b) GO 法、PO 法和 CST 软件计算的 RCS( $f=1 \text{ THz}$ )

图3 中心频率处 GO 法、PO 法和 CST 数据

比较三种高频计算方法可以看出,无论是 X 波段还是太赫兹波段都有:

(1) 在入射角为  $0^\circ$  的镜面反射点附近  $\phi \in [-5^\circ, 5^\circ]$  区间内,CST 比 GO 法的计算结果大了许多,这是由于 CST 求解模型中增加了馈源,而 GO 法没考虑馈源。显然,当太赫兹波正对凹面入射时,馈源会对天线总 RCS 产生很大的影响。

(2) 在  $\phi \in [-30^\circ, -5^\circ] \cup [5^\circ, 30^\circ] \cup [150^\circ, 175^\circ] \cup [185^\circ, 210^\circ]$  的区间内,GO 法与 PO 法、CST 计算的 RCS 曲线大致吻合,但在其余方向上 GO 法的计算结果却偏差较大。这是因为 GO 法推导的解析解只考虑了反射器的镜面散射场,只在角度支撑域  $|\eta| \arctan(6/2 \times 5) = 30.96^\circ$  内成立,其他姿态时入射点不在抛物面天线反射器的凹面上。

(3) 在抛物面对称轴附近以及侧视方向上,CST 计算结果比 PO 法略大。这是因为 PO 法只计算了面元散射场,忽略了边缘的贡献,而抛物面边缘极小的曲率半径会对入射波产生绕射,这种边缘绕射场可以用 UTD, MEC, MoM, ILDC 等方法来计算。CST 软件基于 SBR 和 UTD,不仅计入了馈源和反射器之间的多次散射,还考虑了反射器的边缘绕射。因此 PO 法只是对 RCS 的粗预估。

### 3.3 无馈源时的 RCS

用 CST 软件计算太赫兹波段无馈源抛物面反射器缩比模型的 RCS,把 0.985 ~ 1.015 THz 每个频点,  $-90^\circ \sim 270^\circ$  每个姿态的 RCS 绘,如图 4 所示。

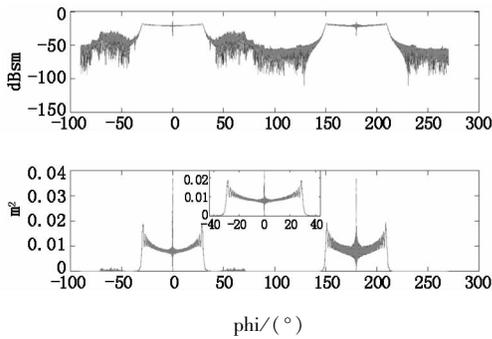


图4 无馈源抛物面天线缩比模型的 RCS  
(含 985 GHz ~ 1.015 THz 各个频点)

可见,当没有馈源时:

(1) 抛物面反射器的 RCS 峰值只出现在  $\phi = 0^\circ$  和  $\phi = 180^\circ$  处的一些频点上,对应于抛物面反射器的底心,属于镜面散射点且最大能量约  $0.0366 \text{ m}^2$  ( $-14.3652 \text{ dBsm}$ )。

(2) 在方位角  $\phi = \pm 30^\circ$  处, RCS 曲线各有一个极值,对应抛物面反射器边缘处较强的散射中心。

取中心频率 1 THz 时缩比模型 RCS 的 CST 计算结果(如图 5 所示),仔细比较馈源对 RCS 特性的影响。

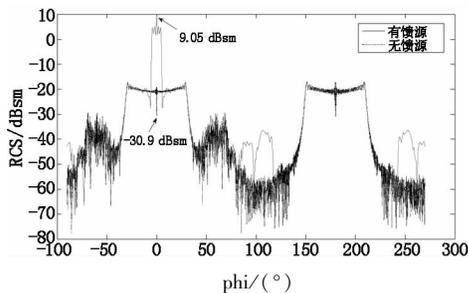


图5 有/无馈源抛物面天线缩比模型的 RCS( $f = 1 \text{ THz}$ )

可以看出:

(1) 当有馈源存在时, RCS 曲线的峰值为  $\sigma_{\text{CST}}|_{\phi=0^\circ} = 8.036 \text{ m}^2 = 9.05 \text{ dBsm}$ ,说明在  $\phi = 0^\circ$  处对应一个很强的散射回波能量中心。当去掉馈源后,抛物面反射器镜面散射的 RCS 仅为  $\sigma_{\text{CST}}|_{\phi=0^\circ} = 8.13 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = -30.9 \text{ dBsm}$ 。根据平板目标镜面反射 RCS 的解析解公式  $\sigma = \frac{4\pi^3 r^4}{\lambda^2}$  可知,在 1 THz 处,直径为 5 mm 馈源的镜面散射 RCS 值为  $0.0538 \text{ m}^2 = -12.6897 \text{ dBsm}$ 。馈源的镜面散射场与反射器的镜面散射场相干叠加的最大值也远不及峰值,这说明正入射时抛物面天线存在着一种其他散射形式,其散射能量远大于反射器镜面散射和馈源镜面散射,推测应为馈源与反射器之间的多次散射造成的。

(2) 在  $\phi \in [-90^\circ, -82^\circ] \cup [-83^\circ, 117^\circ] \cup$

$[242^\circ, 270^\circ]$  区间,去掉馈源后的 RCS 小了许多,说明 CST 也计算了馈源在侧视时的散射贡献,是比较符合实测情况的。

### 3.4 RCS 与频率的关系

图 6 给出了雷达垂直抛物面凹面照射时 RCS 与频率的变化关系,虚线为中心频率 1 THz 处 RCS。可见当太赫兹波正入射时,天线 RCS 随入射波频率的不同出现“震荡”现象,这是由于多个散射回波相干叠加发生了干涉增强或干涉对消引起的。天线目标在太赫兹波段属于光学区,可以推测此姿态时抛物面可能存在多个散射中心,或者存在多种散射回波。 $\phi = 180^\circ$  时有类似结论。

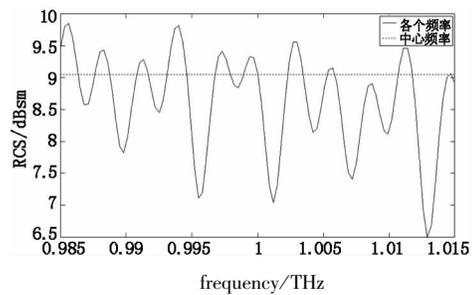


图6 RCS - 频率曲线( $\phi = 0^\circ$ )

## 4 成像特性

### 4.1 HRRP 特性

高分辨率一维距离像是高频区雷达目标识别所依据的最基本的目标特征之一,与目标表面的物理结构特性密切相关,可提供分辨识别目标有用的信息。宽带雷达信号的不同频率分量在不同的时间照射到目标上,不同时刻的回波对应于不同频率的目标散射场。对 CST 软件计算得到的目标后向散射场的频率响应数据作距离向 IFFT,就可以得到单个脉冲作用下的目标回波信号<sup>[10]</sup>,即抛物面天线的 HRRP。把不同姿态对应的 HRRP 排列在一起,就构成了目标全姿态 HRRP 矩阵。图 7(a) 分别画出了 X 波段和太赫兹波段下抛物面天线在  $0^\circ \sim 360^\circ$  姿态的 HRRP 矩阵,其中图 7(b) 是对 HRRP 幅度取 dB 的结果,仅为显示的更明显。横坐标代表入射波方位角,纵坐标代表以相位参考中心为零点的距离坐标,靠近雷达为负,远离雷达为正。图 7(c) 为提取雷达沿正对凹面和凸面方向的一维距离像序列。

分析 X 波段和太赫兹波段目标的 HRRP 可以得出以下结论:

(1) HRRP 具有对称性,抛物面法线(即  $0^\circ$  或  $180^\circ$ ) 两侧对称角度的一维距离像的形状一样。

(2) HRRP 具有周期性。距离像能量强度、宽度和位置周期出现,这与 RCS 角度支撑域的特点一

致。可以利用距离像序列的周期重复特性,识别旋转抛物面天线目标。

(3) HRRP 清晰地显示了旋转抛物面天线散射中心位置随天线姿态改变而“滑动”的现象。 $\phi \in [-30^\circ, 30^\circ] \cup [150^\circ, 210^\circ]$  在范围内, 散射回波强度的峰值对应于抛物面天线上一个反射点, 即目标存在一个主散射中心。对于天线凹面入射, 散射中心随视线偏离对称轴( $\phi$  从  $0^\circ$  向两边变化) 而向远离雷达的方向移动。对于天线凸面入射的情况, 移动方向正好相反。

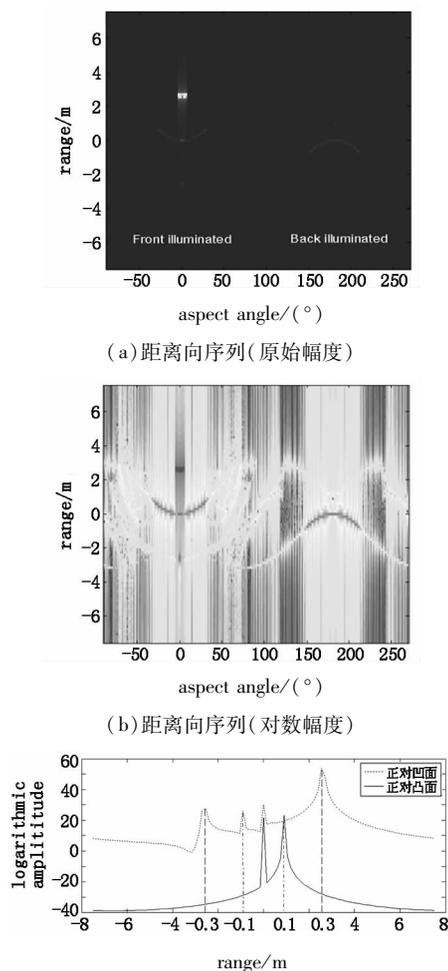
(4) 当雷达正对凹面或凸面时, 反射器产生了两个散射回波幅度极值点, X 波段分别位于距离  $\pm 0.9$  m 和  $0$  m 处, 太赫兹波段分别位于  $\pm 0.01$  m 和  $0$  m 处。这两个散射中心位置分别对应于抛物面天线模型的底心( $x = 0$ ) 和边缘( $x = \pm \frac{D^2}{8P}$ )。注意, 这里仿真频率的带宽按表 1 设置, 以便将两个峰值分辨开来, X 波段下两个峰值间隔距离为 6 个距离向分辨单元, 太赫兹波段下峰值间隔 2 个距离向分辨单元。

(5) 正对天线凹面入射时, 在抛物面焦点处 ( $-2.55$  m 或  $-25$  mm) 存在一个散射回波峰值, 这是由馈源的首次镜面反射造成的。更值得讨论的是, 在抛物面未被照射到的背面对称的焦点位置处 ( $2.55$  m 或  $25$  mm), 出现了一个幅值更大、方位角约有  $10^\circ$  展宽的散射峰值点。我们按照弹跳射线理论来解释这一多次散射特性, 当远场平面波正入射抛物面凹面时, 部分散射波会在聚焦到馈源所在的焦点上, 进而被馈源再次反射回抛物面, 这样波束会沿原来的方向返回, 从而表现为在时域上滞后和强散射点, 是一个“假象”。

(6)  $\phi \notin [-30^\circ, 30^\circ] \cup [150^\circ, 210^\circ]$  时, 图 7 (a) 图显示的距离像强度很弱, 可观察图 7 (b)。当目标侧面正对雷达时, 抛物面上的镜面反射点消失, 天线的散射情况变得较复杂, 出现了多个散射中心。而由于在这些角度范围内天线尺寸有一定的径向扩展, 所以距离像出现展宽, 占据多个距离单元。并且天线由侧视姿态旋转到正视姿态的过程中 ( $\pm 90^\circ \sim 0^\circ$ ), 距离像宽度先增大后减小。

(7) 当天线转到  $90^\circ$  时, 雷达波束照射点由天线凹面变到背面, 两侧距离像的位置发生突变, 变化长度约和天线口径相等。这是由于雷达从凹面入射时, 回波由天线直接反射回来, 而凸面入射时电磁波在反射面背面形成爬行波, 返回后造成回波延迟, 从

而导致距离像位置偏后。

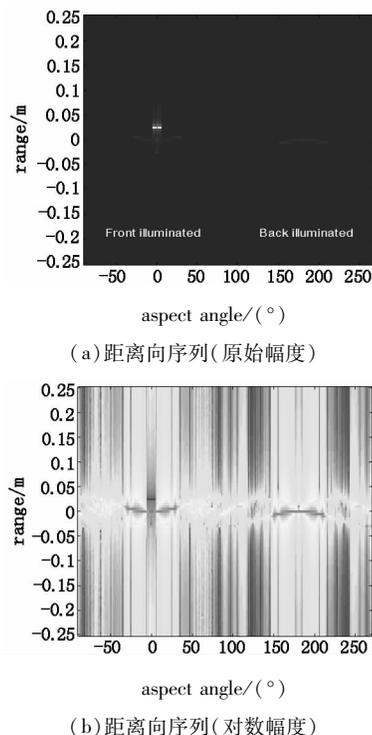


(a) 距离向序列 (原始幅度)

(b) 距离向序列 (对数幅度)

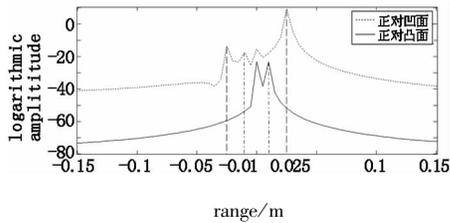
(c) 沿抛物面对称轴方向 HRRP

图 7 X 波段全尺寸天线 HRRP



(a) 距离向序列 (原始幅度)

(b) 距离向序列 (对数幅度)



(c) 沿抛物面对称轴方向 HRRP

图8 太赫兹波段缩比模型 HRRP

## 4.2 ISAR 成像特性

目标的二维像能够反映目标二维等效电磁散射分布和结构特征,提供目标的大致形状、尺寸等信息,更有利于散射中心提取和目标识别。ISAR 成像对应着雷达不动,抛物天线目标绕着垂直轴(图1中Z轴)旋转的转台成像。以目标后向散射场的频率响应数据 $\sqrt{\sigma_{HH}(f, \varphi)}$ 作为回波信号,频率 $f$ 对应于距离向,入射角 $\varphi$ 对应于方位向,采用卷积逆投影(convolution back projection, CBP)算法,分别做大/小转角的二维图像重构,结果以 dB 显示如图9和图10所示。

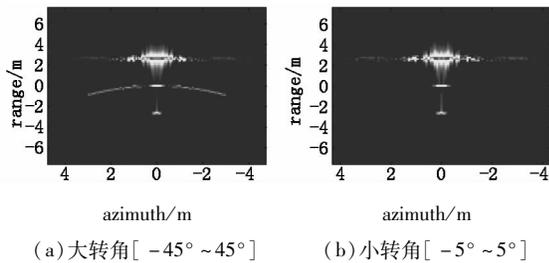
(a) 大转角 $[-45^\circ \sim 45^\circ]$  (b) 小转角 $[-5^\circ \sim 5^\circ]$ 

图9 全尺寸抛物面天线 CBP 转台成像

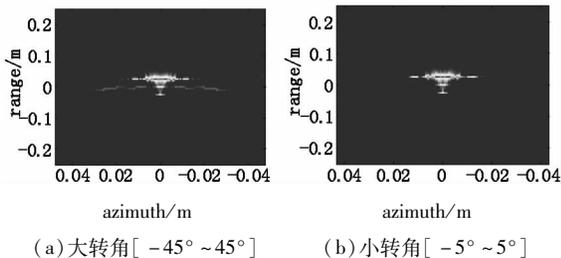
(a) 大转角 $[-45^\circ \sim 45^\circ]$  (b) 小转角 $[-5^\circ \sim 5^\circ]$ 

图10 缩比抛物面天线模型 CBP 转台成像

对比 X 波段下的抛物面天线在大转角和小转角下的成像结果可以看出,全尺寸抛物面天线主要包含三个散射中心。其中最强的散射中心位于距参考相位中心约 2 m 处,并且强度和分布不随姿态变化,说明此散射中心的回波能量始终朝着一个方向,因此它的成因符合上面的推测:入射波束经抛物面和馈源多次反射后,波束沿平行于对称轴的方向返回。中间位置处的散射中心对应于抛物面天线表面上的反射点,弧线形状是因为镜面反射点是抛物面单站 RCS 的主要贡献,在大转角时,它的位置会随姿态的变化而在曲面上发生滑动,成像过程中无法

相干合成为单个亮点,因此能量沿曲面分散,故称其为“滑动型”散射中心。强度最小的散射中心是馈源首次镜像反射回波所成的像。当向抛物面背面入射时,其图像具有类似形状特征,只是弧线开口方向相反,只是没有馈源多次反射导致的强散射中心。再观察图10可见,无论是大转角还是小转角,太赫兹波能对尺寸仅为几十毫米的缩比模型有效成像,且特征图像与全尺寸目标相似。太赫兹波段缩比模型的二维像中不仅可以清楚的分辨出3个主散射中心,而且分辨率比 X 波段高出两个数量级,说明太赫兹波具有更高的空间分辨力,能够探测更小的目标。

根据二维 SAR/ISAR 成像的方位向分辨率 $\rho_a = \lambda/2\theta$ 可知,在方位向最大理论分辨率一样的情况下,太赫兹波段的 ISAR 成像所需目标转角远远小于 X 波段。例如为获得 0.1 m 横向高分辨率:10 GHz 时需转角 $9^\circ$ ,而 1 THz 时只需转角 $0.09^\circ$ 。由此可以看出, X 波段(10 GHz)要获得足够高的分辨率一方面要求的转角过大,另一方面即使获得了大转角数据,在这期间抛物面天线散射点也已发生滑动,以致不能聚焦,完全达不到 0.1 m 分辨率的预想。而对于太赫兹波段(1 THz),获得同样的分辨率需要的转角极小,这期间抛物面天线的散射一般不会发生显著的变化(滑动、各向异性等影响很小),从而使理想散射中心模型仍然有效,结果获得了无模糊的高分辨图像。

## 5 结束语

在太赫兹波段,抛物面天线属于电极大尺寸目标,因此采用高频渐进方法求解 RCS 是适合的。本文以旋转抛物面天线为研究对象,设计了抛物面天线的高频渐进求解器,计算并分析了太赫兹波段下目标 RCS 特性。根据不同姿态下的频域响应数据,进一步研究其 HRRP, ISAR 像特性。研究抛物面天线目标太赫兹雷达特性,对提取天线有效特征,探索有效的识别方法,增强对雷达天线类目标的侦察监视等方面具有重要的意义。

## 参考文献:

- [1] Zhang X C. Terahertz wave imaging: horizons and hurdles [J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2002, 47 (21): 3667 - 3677.
- [2] Liu S G. The new development of terahertz science and technology [J]. *China Basic Science*, 2006, 8 (1): 7 - 12.

- (in Chinese)  
刘盛纲. 太赫兹科学技术的新发展[J]. 中国基础科学, 2006, 8(1): 7-12.
- [3] Yang G K, Yuan B, et al. Analysis on the use of THz technology in the military application [J]. Laser & Infrared, 2011, 41(4): 376-380. (in Chinese)  
杨光鲲, 袁斌, 等. 太赫兹技术在军事领域的应用[J]. 激光与红外, 2011, 41(4): 376-380.
- [4] Deng S H, Ruan N Z. Monostatic radar cross section of reflector antenna [J]. Journal of Electronic Science, 1990, 12(4): 361-368. (in Chinese)  
邓书辉, 阮颖铮. 反射器天线的单站雷达截面积[J]. 电子科学学刊, 1990, 12(4): 361-368.
- [5] Deng B. Synthetic aperture radar micro-motion target indicator (SAR/MMTI) study [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)  
邓彬. 合成孔径雷达微动目标指示 (SAR/MMTI) 研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2011.
- [6] Cheng Y Q, Qin Y L, Li Y P, et al. Electromagnetic computation of mechanical scanning antenna and characteristic analysis of its HRRP [J]. Systems Engineering and Electronic Technology, 2010, 32(11): 2317-2321. (in Chinese)  
程永强, 秦玉亮, 李彦鹏, 等. 机械扫描天线电磁计算与距离像特征分析 [J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(11): 2317-2321.
- [7] Zhong X J, Cui T J, et al. RCS Prediction of perfectly electrical conducting objects in terahertz band [C]//National Antenna Annual Conference Proceedings, 2007. (in Chinese)  
钟兴建, 崔铁军, 等. 太赫兹波段理想导体 RCS 预测的初步研究 [C]//全国天线年会论文集, 2007.
- [8] Li Z, Cui T J, Zhong X J, et al. Electromagnetic scattering characteristics of PEC targets in the terahertz regime [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2009, 51(1): 39-50.
- [9] Ding J J, Liu Z W, et al. Application of high frequency methods for scattering analysis of electrically large objects [J]. Systems Engineering and Electronic Technology, 2010, 32(11): 2309-2312. (in Chinese)  
丁建军, 刘志伟, 等. 基于高频方法分析电大尺寸目标的散射 [J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(11): 2309-2312.
- [10] Geng F Q, Huang Z H, Liu Y. Research on simulation of range profiles [J]. Electronic Measurement Technology, 2006, 29(6): 166-167. (in Chinese)  
耿福泉, 黄正华, 刘焱. 一维距离像的仿真研究 [J]. 电子测量技术, 2006, 29(6): 166-167.