

文章编号: 2095-4980(2017)02-0165-07

## 太赫兹雷达细微结构成像仿真与特性分析

杨啸宇, 高敬坤, 邓彬, 王宏强, 秦玉亮

(国防科学技术大学 空间电子技术研究所, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 太赫兹频段下细微结构导体表面会对电磁散射回波的幅度、相位等产生影响。为分析这一影响, 以理想导体下尺寸可与波长比拟的周期网状结构、击芯铆钉阵列结构为例, 研究了不同俯仰角电磁散射在雷达图像中的表现规律。利用卷积逆投影算法, 对多角度、多频点的单站散射场回波数据进行成像。从仿真结果可以看出, 不同细微结构散射特性存在明显差异。利用距离像分析方法, 对不同细微结构成像结果的成因进行了分析, 得出图像的不同特征可由相干相消、相干增强与虚影效应3种机理进行解释, 表明太赫兹波对细微结构具有独特的刻画能力。

**关键词:** 转台成像; 细微结构; 太赫兹雷达; 特性分析

中图分类号: TN957.52

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201702.0165

## Radar imaging simulation and characteristics analysis of the fine structure at terahertz frequencies

YANG Xiaoyu, GAO Jingkun, DENG Bin, WANG Hongqiang, QIN Yuliang

(Institution of Space Electronic Technology, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China)

**Abstract:** The fine structure of conductor surface can cause impact on the amplitude, phase of the scattered fields at THz frequencies. For analyzing these effects, periodic and reticulate structure whose dimension assimilates to wavelength, and rivets array structure with Perfect Electric Conductor(PEC) are taken as examples to illustrate the characteristics of the scattered fields of different elevation angles in radar imaging. The convolution back projection algorithm is utilized to image the multi-angles, multi-frequency monostatic scattered fields echo data generated by the commercial software platform. The simulation results show that the scattering characteristics of different fine structures differ greatly. By employing the range profile analysis method, the reasons that form different features in the image domain are obtained. It is found that the mechanism of different image features can be resorted to the effects of coherent cancellation, coherent enhancement and the virtual ghosts. These results show that the THz wave owns a unique depictive ability for the fine structure.

**Keywords:** turntable imaging; fine structure; terahertz radar; characteristic analysis

目标太赫兹频段特殊的电磁散射特性<sup>[1-3]</sup>使得目标太赫兹图像与微波频段雷达图像特征有显著差异<sup>[4]</sup>。相对于微波、毫米波, 太赫兹波的波长较短, 更易于实现极大信号带宽和极窄天线波束, 从而获得精细的目标成像<sup>[5]</sup>。太赫兹雷达可以在距离和方位尺度上实现高分辨力成像, 进行逆合成孔径雷达实验, 并通过二维快速傅里叶变换方法和逆投影算法获得结果<sup>[6]</sup>。掌握太赫兹频段细微结构特性分析已成为该研究领域一项迫切而重要的任务。但由于太赫兹频段恰好处于由宏观电子学向微观光子学过渡的频段, 目前细微结构对太赫兹波的响应机理尚不明, 同时有效的特性分析计算方法与实验测量手段缺乏。这些问题的存在, 给太赫兹频段细微结构特性分析与太赫兹雷达技术的实际应用带来了严峻挑战。

本文采用数值仿真手段, 以周期网状结构和击芯铆钉阵列结构为例, 采用高频计算方法对细微结构进行计算, 利用多角度、多频点、水平极化的单站散射数据获得目标二维图像, 探究不同俯仰角目标所获图像中的特征规律<sup>[7]</sup>。

### 1 成像方法

二维雷达成像可以通过对一组在频率和角度上的扫描复散射数据进行相干处理获得,即对应雷达转台成像原理<sup>[8]</sup>,其几何关系如图 1 所示。

雷达天线向目标发射信号,接收到的回波为:

$$F(k, \varphi) = \int_0^{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f(r, \theta) \exp(-j4\pi(R - R_0) / \lambda) r dr d\theta \quad (1)$$

式中:  $F(k, \varphi)$  为目标回波,  $k = 2\pi/\lambda$  为空间波数;  $f(r, \theta)$  为目标的二维散射函数,它表征目标二维散射中心分布,它不仅是  $(r, \theta)$  的函数,同时也是雷达频率  $f$  和目标方位角  $\theta$  的函数;  $R_0$  为目标旋转中心(等效相位中心)到雷达收发机之间的距离;  $R$  为目标上一散射点到雷达收发机之间的距离。对式(1)进行二维逆傅里叶变换,并进行远场近似,获得旋转目标二维成像的一般公式:

$$\hat{f}(r, \theta) = \int_{-\frac{\Delta\varphi}{2}}^{\frac{\Delta\varphi}{2}} \int_{k_{\min}}^{k_{\max}} F(k, \varphi) \exp(j4\pi r / \lambda) \sin(\theta - \varphi) k dk d\varphi \quad (2)$$

在直角坐标与球面坐标的变换中:

$$x = r \sin \theta \cos \varphi, y = r \sin \theta \sin \varphi, z = r \cos \theta \quad (3)$$

由雅克比行列式

$$\frac{\partial(x, y, z)}{\partial(r, \theta, \varphi)} = \begin{vmatrix} \sin \theta \cos \varphi & -r \sin \theta \sin \varphi & r \cos \theta \cos \varphi \\ \sin \theta \sin \varphi & r \sin \theta \cos \varphi & r \cos \theta \sin \varphi \\ \cos \theta & 0 & -r \sin \theta \end{vmatrix} = -r^2 \sin \theta \quad (4)$$

$$dx dy dz = \frac{\partial(x, y, z)}{\partial(r, \theta, \varphi)} dr d\theta d\varphi = -r^2 \sin \theta dr d\theta d\varphi \quad (5)$$

故目标三维成像的一般公式为:

$$g(x, y, z) = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_{f_1}^{f_2} E(f, \theta, \varphi) \cdot |f|^2 \sin \theta \cdot \exp(jK(x \sin \theta \cos \varphi + y \sin \theta \sin \varphi + z \cos \theta)) df d\theta d\varphi \quad (6)$$

式中  $K = \frac{2 \times 2\pi}{\lambda} = 2k$ 。

采用卷积逆投影算法<sup>[9]</sup>(Convolution Back Projection Algorithm, CBPA)对散射回波数据进行二维成像,定义

$$G(k, \varphi) = k \cdot S(k, \varphi) \quad (7)$$

且设  $g(u, \varphi)$  为  $G(k, \varphi)$  的一维傅里叶逆变换,则有

$$f(x, y) = \int_{-\frac{\varphi_m}{2}}^{\frac{\varphi_m}{2}} \int_{k_{\min}}^{k_{\max}} G(k, \varphi) \exp[j2\pi k(-x \sin \varphi + y \cos \varphi)] dk d\varphi = \int_{-\frac{\varphi_m}{2}}^{\frac{\varphi_m}{2}} g(-x \sin \varphi + y \cos \varphi, \varphi) d\varphi \quad (8)$$

对指定位置  $(x_0, y_0)$ , 计算不同  $\varphi$  对应的  $u_0(\varphi) = -x_0 \sin \varphi + y_0 \cos \varphi$  值,然后将  $g(u_0(\varphi), \varphi)$  沿  $\varphi$  叠加即可求得  $f(x_0, y_0)$ 。可见, CBPA 算法主要分为 2 步: a) 利用快速傅里叶变换将回波数据变换至距离像域; b) 将不同方位的距离像沿其方向角做投影运算。

### 2 几何建模与散射计算

几何建模方面,在 CST 软件平台进行 CAD 建模。周期网状结构如图 2 所示,每个网孔宽为 1 mm,间隔为 0.3 mm,孔深为 0.7 mm。

击芯铆钉阵列结构如图 3 所示,其中单个铆钉半径约为 0.5 mm,高度约为 0.25 mm,铆钉间隔为 2 mm。

目标的电磁散射计算采用基于射线跟踪技术的弹跳射线法(Shooting and Bouncing Ray, SBR),是多次反射的几何光学法(Geometrical Optics, GO)与物理光学法(Physical Optics, PO)的结合,它首先利用 GO 进行多次反射的射线跟踪,在射线离开目标时,基于 PO 计算目标的散射场。SBR 同时结合考虑边缘散射和绕射效应的等效电磁流法,可以给出电大尺寸目标准确的散射场计算结果。

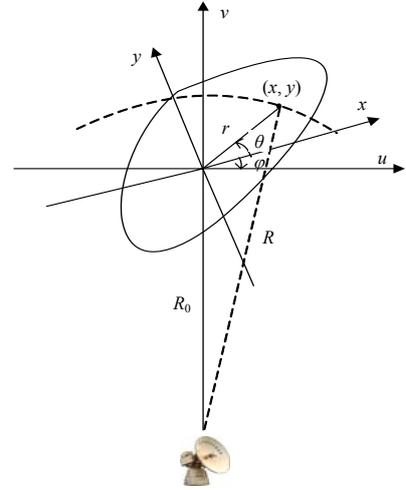


Fig.1 Geometric relation of turntable imaging  
图 1 转台成像几何关系

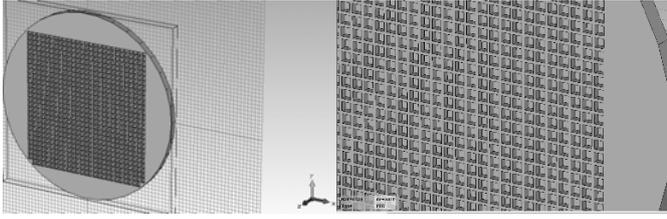


Fig.2 Periodic mesh structure  
图 2 周期网状结构

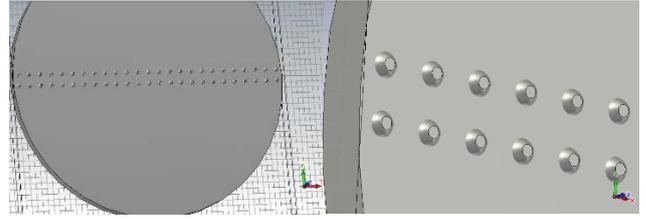


Fig.3 Rivets array structure  
图 3 击芯铆钉阵列结构

本文散射计算采用 CST 软件中的渐进求解器(A 求解器), 渐进计算基于 SBR 的频域分析技术。为使重建图像不产生模糊现象, 频率采样点数与方位采样点数需要满足采样定理。距离向和方位向最大不模糊距离<sup>[10]</sup>由式(9)给出:

$$D_d = \frac{c}{2\delta f}, \quad D_c = \frac{c}{2f_0\delta\varphi} \quad (9)$$

式中:  $\delta\varphi, \delta f$  分别为频率与方位角步进值;  $f_0$  为中心频率。

### 3 仿真结果与分析

本文所建立的包含细微结构的基底圆板直径为 5 cm, 厚度为 2 mm。仿真设置的中心频率为 600 GHz, 对应波长为 0.5 mm, 其他仿真参数设置见表 1。

表 1 仿真参数设置

Table 1 Parameters configuration

bandwidth/GHz	angle range/(°)	incident angle( $\varphi$ )=(0°-360°)		range resolution/mm	azimuth resolution/mm	range aliasing limit/mm	azimuth aliasing limit/mm
		frequency sampling interval/GHz	angle sampling interval/(°)				
40	360	2	0.18	3.75	0.04	75	79.58

#### 3.1 周期网状结构成像及分析

图 4 所示为周期网孔结构在不同俯仰角条件下, 利用方位角 85°到 95°范围内的散射数据进行成像的结果。成像平面均为  $xy$  平面, 成像方法即为前面描述的卷积逆投影算法。在所有俯仰角下, 所成图像的底部均有一个小的散射点, 这是由于圆板基底在远离观察方向处的边缘散射效应造成的, 并非由于周期网孔结构引起, 因此并非讨论与分析的重点。观察图 4 可以发现, 在所给观测条件下, 依据图像特征, 成像结果可大致分为 3 类。第 1 类的特征为 2 条明显的线状强散射区域, 如图 4(a),(c),(e),(f),(g)所示; 第 2 类的特征为一整块强面散射区域, 如图 4(b),(h)所示; 第 3 类介于第 1 类与第 2 类之间, 如图 4(d)所示。

为探究这 3 类特征出现的原因, 对距离像进行分析。分别取  $\theta=30^\circ, 36^\circ, 48^\circ, \varphi=90^\circ$  下的散射数据并进行距离成像, 结果如图 5 所示。将图中 3 条曲线与图 4(a)、图 4(b)及图 4(d)对比可以发现, 此时的距离像与二维图像在  $x=0$  处的截面具有很高的致性。可见, 在小转角成像条件下, 距离像特征直接决定了二维图像的特征。

下面分析距离像不同特征的形成原因。观察图 5 中 3 条曲线, 可以发现, 3 种特征可由零点处的幅度大小进行界定。具体来说, 3 种特征分别对应距离像零点处的相干相消、相干增强或介于两者之间。

为分析距离像零点处的特性, 对散射回波随频率的变化进行建模:

$$S(k) = \sum_R \exp(j2kR) \quad (10)$$

则目标距离像为:

$$g(r) = \int_{k_{\min}}^{k_{\max}} S(k) \exp(-jkr) dk = 2\Delta k \sum_R \text{sinc}(\Delta k(R-r)) \exp(2jk_{\text{mid}}(R-r)) \quad (11)$$

式中:  $\Delta k = k_{\max} - k_{\min}$ ;  $k_{\text{mid}} = (k_{\max} + k_{\min})/2$ 。为分析距离像零点处的幅度, 令  $r=0$ 。同时为分析不同的散射点间隔的影响, 假设场景中包含若干间隔均匀分布的点散射目标, 并令其间隔在  $0.1\lambda \sim 3\lambda$  (0.05 mm~1.5 mm) 间变化。图 5 为在所选实验参数下, 距离像零点幅度随相邻点目标间隔  $\Delta R$  的变化曲线。可以看出, 当散射点间隔处在半波长整数倍附近范围时, 距离像零点处会发生相干增强。

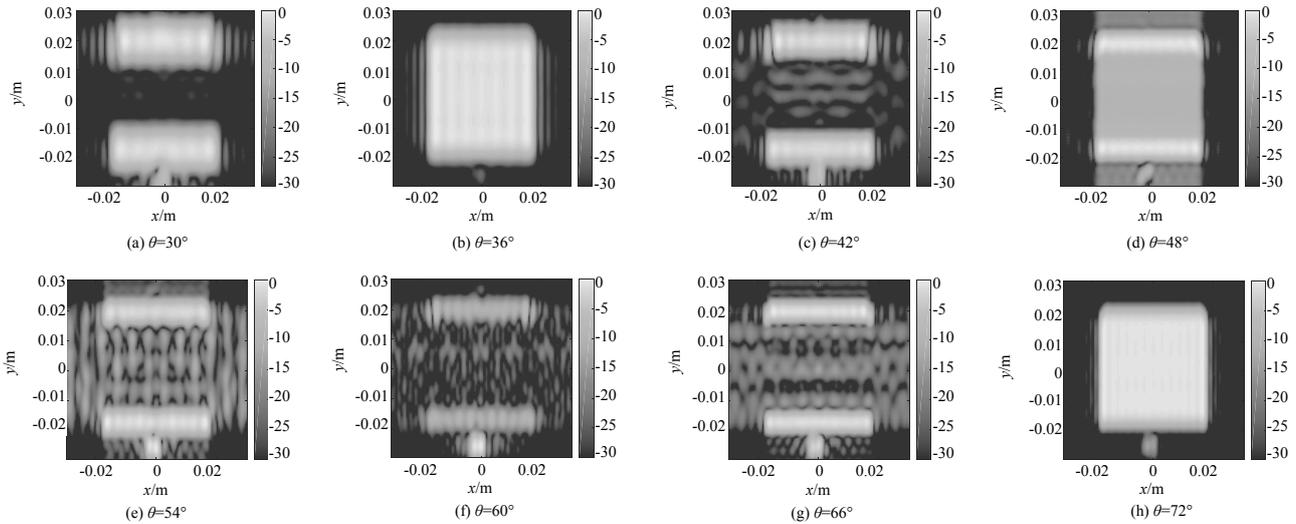


Fig.4 Small rotation angle imaging results of periodic mesh structure  $\varphi=85^\circ-95^\circ$   
 图 4 周期网状结构小转角成像结果  $\varphi=85^\circ\sim 95^\circ$

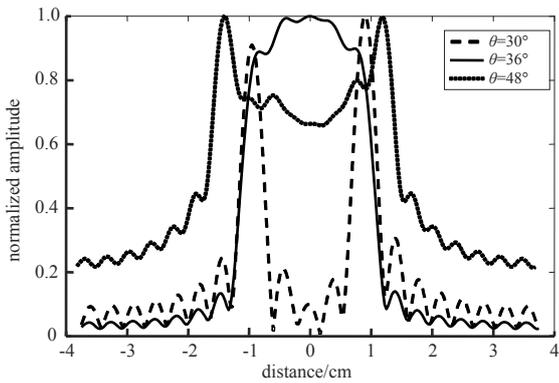


Fig.5 Range profiles under different elevation angles with  $\varphi=90^\circ$   
 图 5 不同俯仰角下距离像  $\varphi=90^\circ$

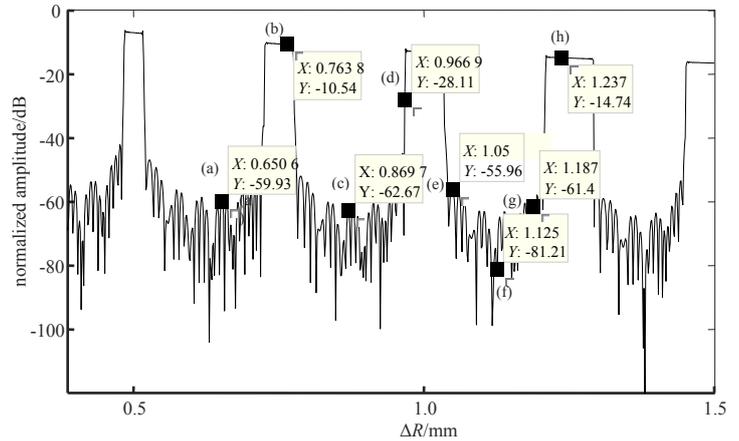


Fig.6 Relation between the amplitude of  $g(0)$  and the interval of the scattering centers  
 图 6 距离像零点幅度随散射点间隔变化曲线

根据几何建模参数可知，网孔间距为 1.3 mm，在所选取的观测俯仰角下，对应的距离向投影间隔分别为 0.65 mm, 0.76 mm, 0.86 mm, 0.96 mm, 1.05 mm, 1.13 mm, 1.18 mm, 1.23 mm。图 6 分别标出了这些间隔处对应的距离零点幅度。容易看出，图 6(b)、图 6(h) 对应投影距离处发生相干增强，图 6(a)、图 6(c)、图 6(e)、图 6(f) 及图 6(g) 对应位置发生相干相消，图 6(d) 则处于相干增强与相干相消的过渡区域。这与前面的成像结果呈现高度一致。这一方面说明了所采用分析方法的正确性，另一方面也对图像中所出现的不同特征给出了形成原因。

另外，观察图 4，以图 4(e)、图 4(g) 为代表，图像在方位向(即图中 x 轴方向)有明显的虚影效应。经分析，认为这些虚影是由腔体多次散射与网孔结构间的互遮挡效应所引起。具体来讲，对于简单散射体，比如点散射目标，散射回波的幅度与相位随着方位角的变化而缓慢变化。此时，从谱分析的角度看，单点目标的回波对应了一个单频或窄带的谱分量。而对于复杂散射体，尤其是包含腔体与遮挡的散射体，随着观测角度的变化，电磁波的多次散射路径与遮挡关系都可能随之变化，从而造成散射回波的幅度与相位随着方位角出现快速与不规则的变化。这时，回波的谱分量不再是一个窄带信号，而会出现一定的展宽。这一效应体现在图像上就显现为方位向的虚影效应。

综上，可以对造成图像不同特征的机理进行初步小结，即相干相消、相干增强和虚影效应。

由雷达成像的知识可知，成像是一个相干处理的过程。所得图像除了由散射数据决定，还受到由观测角度、频段与带宽决定的谱域支撑区形状的影响。在远场近似下，谱域支撑区形状决定了图像的点扩散函数，因此谱域支撑区形状也影响着图像中相干斑的特性。上述特点决定了雷达图像不如光学图像直观，尤其是当目标存在类似腔体等多次散射结构并造成了复杂的散射分量时。

图 7 为利用全部  $360^\circ$  方位角数据进行成像的结果, 可以看作是由若干相邻的小转角成像结果相干叠加所得, 这一点由卷积逆投影算法的成像过程很容易推断得到。对于每一段小的方位转角, 其成像结果均可用前面图 4 采取的分析方法进行分析。相似的, 对于每段小转角成像结果, 亦可用相干相消、相干增强和虚影效应进行解释。将所有小转角图像叠加起来, 全方位的成像结果的特征更为复杂, 这说明了周期网孔结构的散射特性随着方位观察角的变换发生了显著的改变。但在复数图像的意义下, 从图像与回波数据的傅里叶变换关系角度出发, 不难得出以下结论: 利用图 7 所示的复数图像可以生成任意小转角范围对应的子孔径图像, 特别地, 由图 7 可以生成对应俯仰角下的图 4 所示图像。采用这种方法, 间接地完成了对图 7 中图像的成因解释。另一方面, 由图 7 可以看出, 对于周期网孔这类复杂散射目标, 散射特性亦强烈依赖于俯仰观察角。

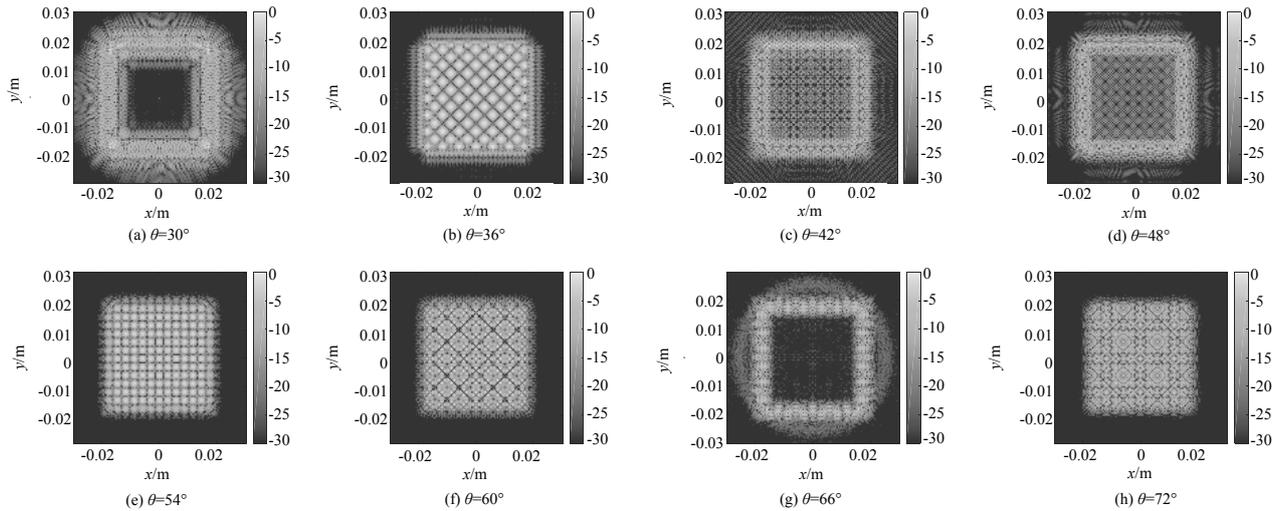


Fig.7 Wide rotation angle imaging results of periodic mesh structure  $\varphi=0^\circ\sim 360^\circ$

图 7 周期网状结构大转角成像结果  $\varphi=0^\circ\sim 360^\circ$

### 3.2 击芯铆钉阵列结构成像及分析

平头细微结构周围有一圈弧形散射结构, 其为铆钉斜面。可见击芯铆钉细微结构的成像散射中心主要由平头结构与铆钉斜面的镜面反射组成。

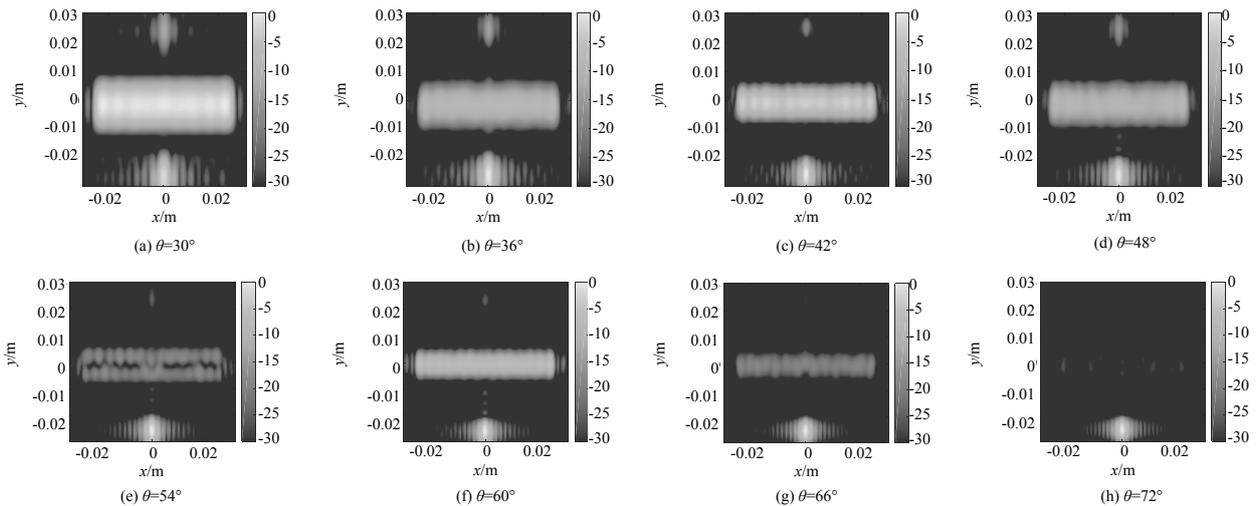


Fig.8 Small rotation angle imaging results of rivet array structure  $\varphi=85^\circ\sim 95^\circ$

图 8 击芯铆钉阵列结构小转角成像结果  $\varphi=85^\circ\sim 95^\circ$

图 8 所示为 2 排击芯铆钉阵列结构在不同俯仰角条件下, 利用方位角  $85^\circ$  到  $95^\circ$  范围内的散射数据进行成像的结果。成像平面均为  $xy$  平面, 成像方法即为前面描述的卷积逆投影算法。同样的, 所有图像底部均有一个小的强散射点, 这是由于圆板基底在远离观察方向处的边缘散射效应造成的, 而非由细微结构引起。相比上面的周期网孔结构, 击芯铆钉阵列结构不存在腔体等复杂散射结构。

采用与周期网孔结构相同的分析方法,即分析距离像零点处的幅度。由于 2 排铆钉阵列在方位角  $90^\circ$  的投影方向上可以看作 2 个散射点,因此,设定场景中包含 2 个间隔均匀分布的点散射目标,并令其间隔在  $1.5\lambda\sim 4.5\lambda(0.75\sim 2.25\text{ mm})$  间变化。图 9 所示为在所选实验参数下,距离像零点幅度随相邻点目标间隔的变化曲线。可以看出,距离像零点幅度呈现出以半波长为周期的周期性涨落。

同样,根据几何参数,2 排铆钉阵列间隔为 2 mm,在所选取的观测俯仰角下,对应的距离向投影间隔分别为 1.00 mm,1.17 mm,1.33 mm,1.48 mm,1.61 mm,1.73 mm,1.82 mm,1.90 mm。图 10 分别标出了这些间隔处对应的距离零点幅度。可以看出,距离零点幅度并非随俯仰角而变的单调曲线,并且各角度处的幅度与成像结果呈现高度一致。这给出了图像中铆钉阵列成像强度涨落变化的形成原因。另外,由于铆钉不包含腔体或遮挡结构,因此图像中方位向(即  $x$  轴方向)并未发生类似周期网孔结构的虚影现象。

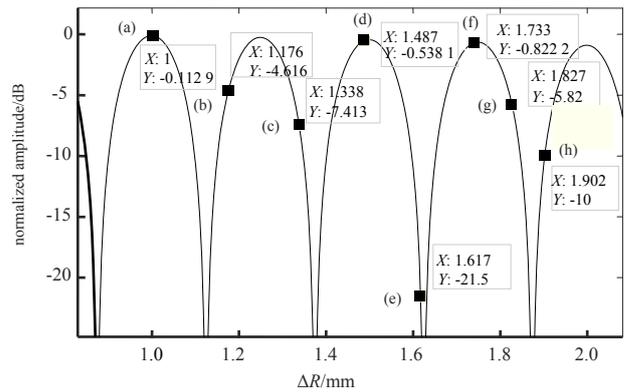


Fig.9 The relation between the amplitude of  $g(0)$  and the interval of the scattering centers

图 9 击芯铆钉结距离像零点幅度随散射点间隔变化曲线

这给出了图像中铆钉阵列成像强度涨落变化的形成原因。另外,由于铆钉不包含腔体或遮挡结构,因此图像中方位向(即  $x$  轴方向)并未发生类似周期网孔结构的虚影现象。

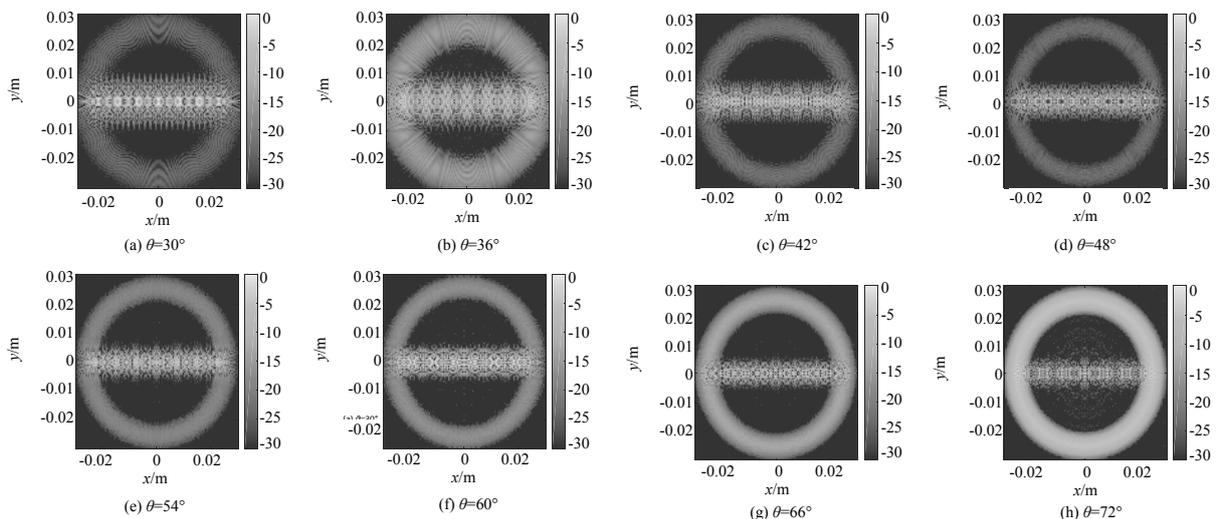


Fig.10 Wide rotation angle imaging results of rivet array structure  $\varphi=0^\circ\sim 360^\circ$

图 10 击芯铆钉阵列结构大转角成像结果  $\varphi=0^\circ\sim 360^\circ$

图 10 所示为击芯铆钉阵列结构的全方位角数据成像结果。与周期网孔结构的  $360^\circ$  成像结果不同,击芯铆钉阵列的全方位成像结果随俯仰角的特征变换并不显著,这是由于目标结构不存在复杂的散射分量,且击芯铆钉可以近似看作点散射体,因此成像结果相比网孔结果更加直观易理解。由图 10 可以看出,随着俯仰角的增加,2 排铆钉的成像结果在图像中的分布更加紧凑。这一现象主要是由于观测条件不同导致的谱域形变。具体地,随着俯仰角的增加,对应谱域形状为内外径均不断增加的圆环。由谱域与图像域的对偶关系可知,谱域圆环半径越大,图像中点扩散函数分布越集中。由于铆钉可近似看作点目标,因此铆钉成像结果随着俯仰角增加,其在图像中分布更加紧凑。另外,由于铆钉散射强度小于包含腔体结构的周期网孔,因此基底圆板的边缘散射效应在图中得以显现并体现为一个与圆板几何尺寸一致的圆环区域。

#### 4 结论

本文基于高频电磁计算方法,对周期网状结构和击芯铆钉阵列结构进行水平极化电磁散射计算。利用计算所得散射数据与卷积逆投影算法对目标进行二维成像。从仿真结果可以看出,不同细微结构散射特性存在明显差异。利用距离像分析方法,对不同细微结构成像结果的成因进行了分析,并得出图像的不同特征可由相干相消、相干增强与虚影效应 3 种机理进行解释。本文的研究工作一方面说明了细微结构的太赫兹散射回波携带了丰富的目

标信息;另一方面,复杂细微结构的散射特性亦强烈依赖于观测条件(比如观测角度),这也对利用太赫兹散射回波进行细微结构信息反演提出了挑战。

#### 参考文献:

- [1] IWASZCZUK K, HEISELBERG H, JEPSEN P U. Terahertz radar cross section measurements[C]// 35th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. [S.l.]: IEEE, 2010: 5–10.
- [2] MCGOWAN R W, CHEVILLE R A, GRISCHKOWSKY D R. Experimental study of the surface waves on a dielectric cylinder via terahertz impulse radar ranging[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2000, 48(3): 417–422.
- [3] GENTE R, JANSEN C, GEISE R, et al. Scaled bistatic radar cross section measurements of aircraft with a fiber-coupled THz time-domain spectrometer[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2012, 2(4): 424–431.
- [4] JAGANNATHAN A, GATESMAN A J, HORGAN T, et al. Effect of periodic roughness and surface defects on the terahertz scattering behavior of cylindrical objects[J]. Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering, 2010(7671): 76710E–76710E-12.
- [5] ZHANG Cunlin, MU Kaijun. Applications of terahertz imaging[C]// Lasers & Electro Optics & The Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, 2009. [S.l.]: IEEE, 2009: 294–296.
- [6] ZHANG B, PI Y, LI J. Terahertz imaging radar with inverse aperture synthesis techniques: system structure, signal processing, and experiment results[J]. Sensors Journal IEEE, 2015, 15(1): 290–299.
- [7] 高敬坤, 王瑞君, 邓彬, 等. THz粗糙导体圆锥的极化成像特性[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015, 13(3): 401–408. (GAO Jingkun, WANG Ruijun, DENG Bin, et al. Characteristics of polarized imaging of a conducting cone with surface roughness at terahertz frequencies[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015, 13(3): 401–408.)
- [8] SULIVAN R J. Radar Foundations for Imaging and Advanced Concepts[M]. Virginia: SciTech Publishing, Inc., 2004.
- [9] 陈颖滨, 邓彬, 王宏强. 基于投影-切片定理的转台成像算法[J]. 信号处理, 2011, 27(9): 1380–1384. (CHEN Yingbin, DENG Bin, WANG Hongqiang. Rotating target imaging algorithm based on the projection-slice theorem[J]. Signal Processing, 2011, 27(9): 1380–1384.)
- [10] 王瑞君, 邓彬, 王宏强, 等. 不同表面结构特征的圆柱导体太赫兹散射特性研究[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(6): 1549–1554. (WANG Ruijun, DENG Bin, WANG Hongqiang, et al. Study of scattering characteristics for cylindrical conductor with different surface micro-structure in terahertz regime[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(6): 1549–1554.)

#### 作者简介:



杨啸宇(1993–), 男, 四川省自贡市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为雷达目标特性与雷达信号处理 .email: yangxiaoyu\_1993@foxmail.com.

王宏强(1970–), 男, 陕西省宝鸡市人, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为雷达信号处理.

高敬坤(1992–), 男, 山东省梁山县人, 在读博士研究生, 主要研究方向为雷达信号处理.

邓彬(1981–), 男, 山东省济宁市人, 副研究员, 主要研究方向为雷达信号处理与微动目标指示.

秦玉亮(1980–), 男, 山东省潍坊市人, 副研究员, 主要研究方向为目标识别信息融合和精确制导.