

引用格式: Zhou Jinlin, Chen Kunshan, Gu Qiongsheng, *et al.* Analysis of Radar Imaging based on Multiple Scattering Effect[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(1): 132-140. [周金霖, 陈锬山, 古琼昇, 等. 基于多次散射目标模型的雷达成像研究[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(1): 132-140.]
doi: 10.11873/j.issn.1004-0323.2021.1.0132

基于多次散射目标模型的雷达成像研究

周金霖^{1,2}, 陈锬山^{1,3}, 古琼昇³, 曾江源¹, 许 镇^{1,2}

(1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 许昌学院, 河南 许昌 461000)

摘要:合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)作为一种主动微波传感器,被广泛应用于遥感对地观测。然而,传统上的雷达散射模型是基于几何光学近似的,忽略了地物目标之间的相互作用,即多次散射效应。为了充分挖掘和利用毫米波雷达影像中目标电磁散射特性信息,亟需对典型目标的多次散射效应进行建模仿真和验证。基于矩量法(Method of Moments, MoM)分析了球体、二面角等目标表面等效电流分布与分段成像结果的对应关系,并利用后向投影(Back-Projection, BP)算法进行电磁仿真成像,总结了单/双基地雷达模式对成像中散射机制的影响。结果表明:目标表面等效电流分布以及分段等效合成孔径张角会随入射角度发生改变,其中分段等效合成孔径张角会影响方位向分辨率;双基地雷达成像结果中包含更丰富的电磁散射信息。本研究可为SAR系统设计和验证、典型目标回波特性数据收集以及如何基于高解析度SAR影像进行目标识别等研究提供借鉴与参考。

关键词:SAR成像;电磁仿真;BP算法;矩量法;多次散射

中图分类号:TN958;TP721.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2021)01-0132-09

1 引言

在遥感领域中,合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)影像在对地观测应用上具有独特的优势,在灾害监测、海洋监测、资源勘查以及农作物估产等方面应用广泛^[1-3]。而毫米波雷达传感器不仅体积小,同时具备高的目标分辨性能和好的目标探测能力,能够更好地满足目前微波遥感的应用需求,毫米波段的典型目标特性仿真以及成像也逐渐成为当下的研究热点与发展方向^[4-5]。与此同时,SAR数据处理也获得了相应的快速发展,从而能在目标回波原始数据中提取更多的有用信息^[7]。而如何充分挖掘和利用毫米波SAR影像中包含的目标

电磁散射信息,从而降低影像解译的难度,满足雷达影像高精度目标识别的应用需求,对扩大微波遥感的应用范围以及提升其应用价值具有重大意义,同时也是待解决和突破的技术难题^[8]。

雷达系统十分繁琐复杂且造价昂贵,无论是室内还是室外实验均会耗费大量的人力物力。通过SAR成像仿真,研究人员可以提前验证系统参数、测试成像算法、进行地理校准,从而降低试错成本,提高工程可行性,对SAR图像解译和目标识别等具有重要意义^[9]。研究SAR成像问题的一个重要基础是对地物目标散射进行建模和仿真。目前通用的SAR图像仿真大多基于点目标模型或几何光学模型^[10],其前提假设仅考虑地物目标的单次散射,

收稿日期:2019-11-06;修订日期:2021-01-09

基金项目:国家自然科学基金项目“同轨集合SAR-Scatterometer微波多维探测理论与模式研究”(41531175)

作者简介:周金霖(1996—),女,湖南长沙人,硕士研究生,主要从事电磁仿真成像研究。E-mail:jlzhou@radi.ac.cn

通讯作者:陈锬山(1959—),男,台湾台中人,研究员,博士生导师,主要从事微波遥测与通讯、电磁波传播散射以及雷达信号系统的研究。
E-mail: chenks@radi.ac.cn

而忽略了成像物理过程中地物目标之间的多次散射效应,无法反映真实目标的电磁散射信息。另一方面,在成像结果中,高距离分辨率的一维成像能够分辨出一个复杂目标中不同的散射中心并且给出目标的径向剖面图,从剖面图上可以大致估计出目标在距离维的长度。但是目标的一维距离像会随目标的姿态角发生很大变化,其结果不利于进行目标分类与识别^[12-14]。而采用全波方法^[15-19]可以对雷达参数和场景进行模拟,通过数值计算的方式收集 SAR 原始回波信号数据,对其进行成像处理从而获得包括地物目标散射物理机制的二维 SAR 模拟图像,能更全面、真实地揭示和反映地物目标的电磁散射特性,从而满足 SAR 图像解译与目标识别的应用需求^[20]。通过 SAR 图像仿真技术可高效建立目标参考模板库,对 SAR 图像目标识别与分类起到重要作用。

本文基于全波方法研究了在不同场景下地物目标的散射结果,并总结了二维影像结果中多次散射效应的变化规律。首先根据电磁波传播理论分析了目标电磁散射特性,并详细阐述了基于目标回波原始数据进行后向投影(Back-Projection, BP)算法成像的实验流程方法,包括如何将电磁散射信息转化为回波信号并进行成像仿真;而后根据以上方法得到了金属球与二面角的二维 SAR 仿真影像,进而分析、讨论了全波方法与点目标模型、单双站 SAR 成像模式下的成像结果。

2 研究方法

2.1 目标电磁散射特性仿真

以正侧视条带 SAR 为例,本文利用全波方法生成了 SAR 回波信号的模型。SAR 通过利用目标对电磁波的散射现象来探测目标,并从目标回波中提取相关信息,从而计算目标的复散射场,即求解真实目标场景的电磁散射特性^[22]。当电磁波与目标相互作用时,在媒质边界会发生散射(见图 1)。计算目标电磁散射时,总电场 $\vec{E}(\vec{r})$ 为入射电场 $\vec{E}_i(\vec{r})$ 和散射电场 $\vec{E}_s(\vec{r})$ 之和:

$$\vec{E}(\vec{r}) = \vec{E}_i(\vec{r}) + \vec{E}_s(\vec{r}) \quad (1)$$

在三维介质目标场景中,散射电场可由体积方程表示:

$$\begin{aligned} \vec{E}(\vec{r}) &= \vec{E}_i(\vec{r}) \\ &+ k_0^2 \iiint_V \vec{G}(\vec{r}, \vec{r}') \cdot [\epsilon_r(\vec{r}') - 1] \vec{E}(\vec{r}') d\vec{r}' \end{aligned} \quad (2)$$

其中: \vec{r}' 表示目标上的任意位置, k_0 是自由空间波数, ϵ_r 是介质目标的相对介电常数, $\vec{G}(\vec{r}, \vec{r}')$ 是自由空间中电场矢量格林方程:

$$\vec{G}(\vec{r}, \vec{r}') = \left(\vec{I} + \frac{\nabla \nabla}{k_0^2} \right) \frac{e^{ik_0|\vec{r}-\vec{r}'|}}{4\pi|\vec{r}-\vec{r}'|} \quad (3)$$

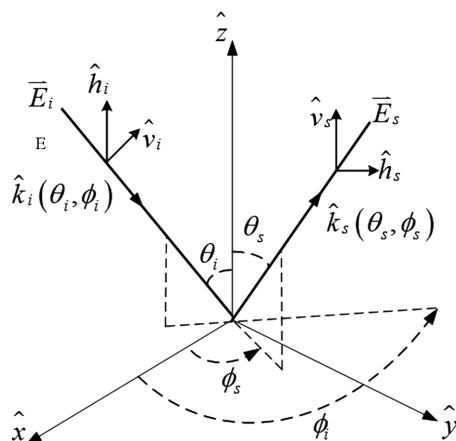


图 1 散射电磁场几何关系

Fig.1 Geometry of electromagnetic scattering field

式(3)中的体积分方程可以利用数值方法求解。矩量法(Method of Moments, MoM)是一种基于积分方程的严格求解数值方法,通过将几何目标分割离散,在其上定义合适的基函数,然后建立积分方程,用权函数检验从而产生一个矩阵方程,求解该矩阵方程即可得到几何目标上的电流分布,从而其散射场信息可从该电流分布求得。MoM将连续方程离散化为代数方程组,以便用数值的方法有效求解电磁场积分方程。完备的 MoM 的解可近似为解析解,相比其他数值方法其收敛性更佳。因此本文采用 MoM 求解目标散射场,并由此生成目标回波信号。

根据麦克斯韦方程组,可知表面电流与总电场的关系为:

$$\vec{J}(\vec{r}) = j\omega \frac{\epsilon - \epsilon_0}{\epsilon} \vec{E}(\vec{r}) \quad (4)$$

其中: ϵ 是介质目标的介电常数, ϵ_0 是自由空间的介电常数。

目标表面等效电流可由 RWG (Rao-Wilton-Glison) 基函数进行近似展开:

$$\vec{J}(\vec{r}) = \sum_{n=1}^N I_n \Lambda(\vec{r}) \quad (5)$$

其中: $\Lambda(\vec{r})$ 为 RWG 基函数, I_n 为所展开基函数的权函数,是待求的未知量。

基于惠更斯原理,散射场可以由目标表面等效

电流获得:

$$\vec{E}_s(\vec{r}) = \oint_S j\omega\mu G(\vec{r}, \vec{r}') \vec{J}(\vec{r}') dS' \quad (6)$$

获取散射场之后,可以进一步得到 SAR 系统的回波信号。由于散射能量的空间分布取决于物体的形状、大小和结构,以及入射波的频率和极化等,为目标识别和目标成像提供了重要信息。本研究设定发射天线为垂直极化 \vec{v}_T ,接收天线为垂直极化 \vec{v}_R ,从而获得在 n 个天线位置接收的 K 个扫频回波信号 $S(f_k, \tau_n)$:

$$S(f_k, \tau_n) = \vec{v}_R \cdot \vec{E}_s(\vec{r}) \quad (7)$$

至此,由全波方法仿真得到了包含被照射目标的几何形状和电磁参数信息的散射回波信号,为 SAR 成像处理提供了回波数据。

2.2 SAR 成像处理

为实现 SAR 系统成像的有效聚焦,在获取回波信号之后,需要利用 SAR 成像算法对回波信号进行处理。在过去五十年中,不同的 SAR 成像算法在复杂度和精度上均有明显的改进和提升。目前典型的 SAR 成像算法有基于频域的距离多普勒(Range-Doppler)算法、Chirp Scaling 算法、Omega-K 算法以及基于时域的 BP 算法等^[23-24]。其中 BP 算法通过对每个天线接收位置获得的回波信号进行时延求和,从而获得目标在所有观测点的相干叠加值并获得整个目标区域的成像结果。其成像过程不仅简单直观,能反映成像物理过程,还受雷达模式影响^[23-24]。传统的 BP 算法存在时域计算量巨大的缺点,因此本文基于 BP 算法思想,在获得目标近场电磁仿真频域回波信号后,利用逆离散傅里叶变换实现 SAR 图像仿真。与传统后向投影算法相比,该方法可有效提高 SAR 图像仿真效率。

本研究所采用的 BP 算法流程如图 2 所示。首先对三面角进行全波仿真得到在 n 个天线位置接收的 K 个扫频回波信号 $S(f_k, \tau_n)$,对输入信号频域进行加窗处理(Kaiser 窗, $\beta=2$)。通过将成像区域进行网格划分,并在每个天线接收位置求雷达天线与成像网格点 (x, y) 之间的时间延迟 $\frac{R_t + R_r}{c}$ (R_t 和 R_r 分别表示每个成像网格点到发射天线和接收天线的距离)。通过这项处理,可以将雷达回波数据反向投影到成像区域的每个网格中。将时延序列与回波信号进行逆离散傅里叶变换,可以求得每个网格点对应的时域表达:

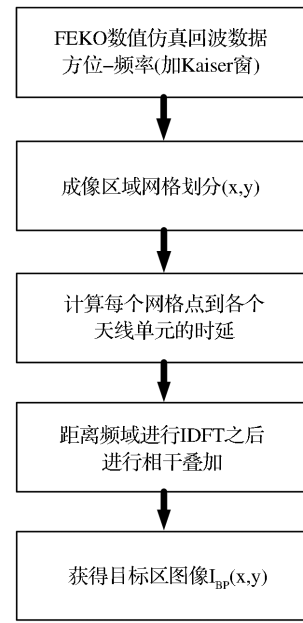


图 2 BP 算法流程图

Fig.2 Flowchart of the BP algorithm

$$\begin{aligned} s(x, y) &= \int S(f_k, \tau_n) \exp\left(\frac{j4\pi f_k \Delta R(x, y)}{c}\right) df \\ &= \sum_{k=1}^K S(f_k, \tau_n) \exp\left(\frac{j4\pi f_k \Delta R(x, y)}{c}\right) \Delta f \end{aligned} \quad (8)$$

根据式(8)对每个天线接收的雷达信号进行求和,获得目标在所有观测点的相干叠加值,求得整个目标区域的图像:

$$I(x, y) = \sum_{n=1}^{N_p} s(x, y, \tau_n) \quad (9)$$

2.3 基于电磁散射特性计算的目标 SAR 图像仿真流程

图 3 给出了完整的 SAR 图像仿真流程。首先根据雷达平台参数以及 SAR 成像几何关系构建仿真模型;然后根据设定的雷达系统参数计算电磁波频率,利用 MOM 计算不同天线位置在不同频率下

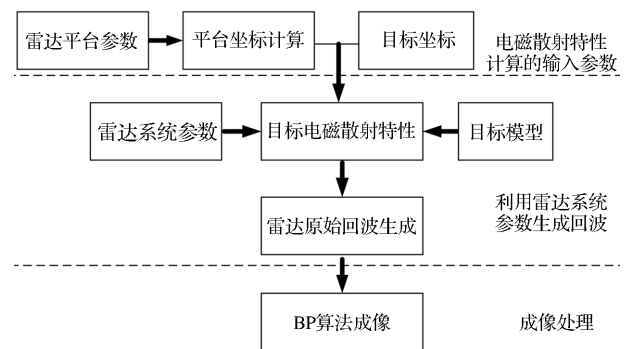


图 3 目标 SAR 图像仿真流程

Fig.3 Flowchart of SAR image simulation

的目标散射场,得到目标二维频域回波数据;最后利用BP成像算法处理回波数据得到目标 SAR 仿真图像。

3 实验结果与分析

为了验证基于全波方法计算的目标回波进行 SAR 图像仿真方法的有效性,本文首先对比分析了单个金属球全波仿真结果与点目标仿真结果,如图 4 所示。

经过参数验证^[19,22],金属球仿真参数如表 1 所示。点目标模型广泛应用于单/双基地雷达系统设计以及成像算法性能验证中,但是基于点目标模型的回波信号仅包括目标的相位信息,忽略了目标的物理特性,无法在影像结果中反映出目标完整的电磁散射信息。在本研究中,基于全波方法计算目标电磁散射信息,并由此获得目标回波信号,从而在目标和成像之间建立物理联系。从一维距离向成像结果(图 4(c)、(d))可以看出,当半径为 0.015 m 的球中心位于 1 m 时,单次散射在点目标模型和全

表 1 金属球模型 SAR 图像仿真参数

Table 1 Simulation parameters of PEC sphere

参数	值
载频(f_c)/GHz	35
波长(λ)/m	0.0086
带宽(B)/GHz	10
天线位置间隔/m	0.08
天线半波角宽(θ_{bw})/°	17.5
斜距(R)/m	1
合成孔径长度(L_s)/m	0.8
球体半径(r)/m	0.015
频率采样点	201
方位向采样点	101
理论距离向分辨率(ρ_r)/m	0.015
理论方位向分辨率(ρ_a)/m	0.012

波模型结果一致,均发生在 0.985 m。但是利用全波模型还可以在距离向观察到爬行波效应的影响(出现在 1.023 m)。而点目标模型则无法表现出该类效应。这说明对于单次散射,两种模型的成像结果均能准确反映目标的散射位置信息,点目标模型

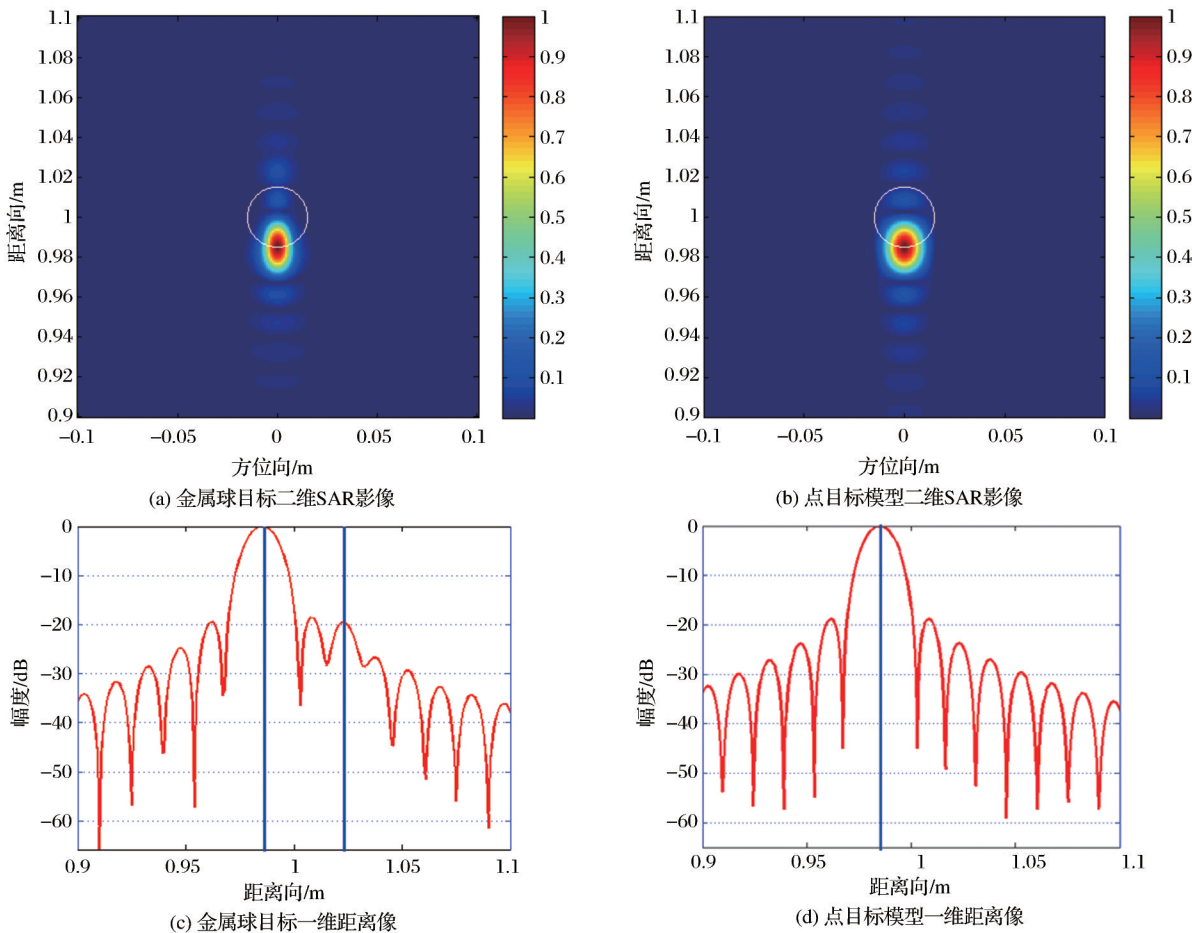


图 4 基于金属球目标与点目标的 BP 成像结果

Fig.4 BP imaging results of the PEC sphere target and the point-target model

的回波信号不包括目标单次散射以外的信息,而基于全波数值仿真方法的金属球目标的回波信号能够更全面、真实地反映目标的电磁散射特性。

雷达发射电磁波照射在目标表面时将形成强反射,为了在成像结果中观察到目标间更多的物理散射机制,以及探索其在成像结果中的影响,本文对金属双球简单几何体的表面等效电流分布与分段成像结果进行了对比分析。通过观察目标表面电流分布的变化,并与分段成像过程以及方位向分辨率的变化进行对比,可以对目标表面电流与成像结果的物理联系有直观的认知,以及对多次散射现象有更深刻的了解。其正侧视条带 SAR 成像场景如图 5 所示,此时双球间隔为 2.5λ 。

不同天线位置照射下目标表面等效电流分布

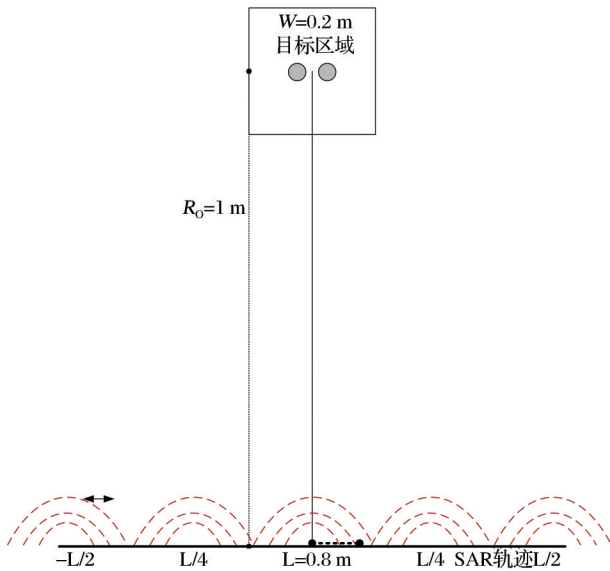


图5 金属双球成像场景

Fig.5 PEC double sphere imaging scene

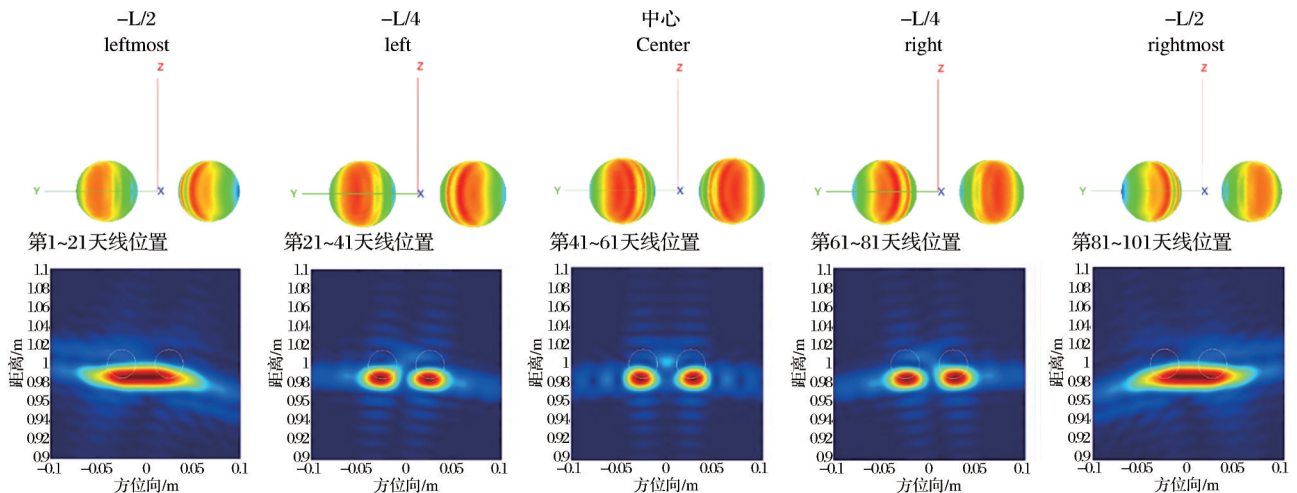


图6 金属双球表面等效电流分布与分段成像过程

Fig.6 Surface equivalent current distribution and segmentation imaging process of metal double spheres

结果如图 6 所示。可以观察到随着天线位置(共 101 个采样点)从左向右移动,目标表面等效电流会随着天线位置的改变而改变,即表面等效电流分布会随入射角的变化而变化。对于对称目标而言,其相应对称天线位置所观察到的表面等效电流呈对称分布。不仅如此,无论观测点是在边缘位置还是在中心位置,在目标表面等效电流分布中都会呈现电磁耦合效应。

散射电场是由目标表面的表面电流产生的,为了分析目标表面等效电流分布对成像结果的影响,本研究将 101 个不同的天线位置等分成了 5 段合成孔径,该 5 段的合成孔径长度一致,但每段的合成孔径张角不同。合成孔径张角为真实合成孔径长度在垂直于入射方向上的投影,该投影长度会随入射角度改变。入射角越小,投影长度则越接近真实合成孔径长度,从而方位向分辨率则越接近理论值。图 6 展示了金属双球表面等效电流分布与对应的分段合成孔径成像结果。从边缘位置到中心位置,随着等效合成孔径长度的变化,可以观察到成像结果中方位向分辨率在不断提高。与目标表面等效电流分布进行对比,其成像结果中也包含了目标间的电磁耦合效应,且此效应随着入射角的改变而改变。左右对称的分段合成孔径下的成像结果也是左右对称,与表面等效电流分布同样具有对称性。值得注意的是,此类信息在传统的点目标模型中被简单地忽略掉了,这可能会在图像判读中造成误判,从而无法满足后续的应用需求。

SAR 仿真可以为研究人员在系统设计时优化雷达组件以满足信号生成和分析等应用,而模块化

且灵活的仿真设计允许针对不同案例进行调整和拓展。尽管典型的SAR成像采用的是单基地雷达模式,但由于其发射和接收角度固定只能提取有限信息,无法完全呈现目标信息。双基地雷达成像系统将发射机和接收机分开,接收到包含丰富目标信息的回波信号用于特征提取与目标识别。为了进一步探索目标间电磁耦合效应在成像结果中的影响,本文对边长分别为 1.8λ 、 18λ 、 36λ 的二面角目标,对单、双站模式下的成像结果进行了对比分析,其中双站模式下收发天线距离间隔为 $2L_0$,张角为 2τ 。其成像几何如图7所示。

如图7(a)所示,由于单基地雷达发射机和接收机都处在同一位置,从发射回波到接收回波产生的相位差为零,此时雷达获得的距离向信息都被压缩在了二面角角点位置,故该处回波信号幅度最强。这也是在单基地模式下二面角的仿真图像为一个强点目标的原因(图8(a))。而在双基地雷达模式下,通过发射和接收垂直极化的电磁波,在成像结果中可以观测到二面角张角信息(图8(b)),相比单基地雷达模式具备更强的探测能力。随着目标电

尺寸的增大,雷达观测能力提升,单基地模式下二面角目标影像中的多次散射效应逐渐减弱,如二面角张角处的电磁耦合效应在图8(a)有所呈现,随着电尺寸的增大该效应迅速减弱并消失在影像中(图8(c)),且该规律同样适用于双基地雷达模式中。

由图8(b)、(d)、(f)可以看出,对比单基地雷达成像结果,双基地雷达模式下二面角角点在影像中的强度较单基地模式弱,且强点出现位置与角点真实位置会有所偏差。结合观测参数,随着二面角电尺寸增大,二面角的双基地散射特性更加直观且容易区分,成像观测的分辨率越来越高。综上所述,收发电磁波皆为垂直极化的双基地雷达模式成像结果中包含更丰富的目标几何信息。对于边长较小的二面角目标,双站影像中可以清晰地观测到多次散射效应的存在,而单站影像中该效应较难区分。这表明,对于传统的单站SAR而言,多次散射效应并不足以影响其成像结果。而对于双站SAR成像而言,必须对其成像过程中的多次散射效应加以考虑,否则会造成影像误判,地物分类结果不准确等问题。

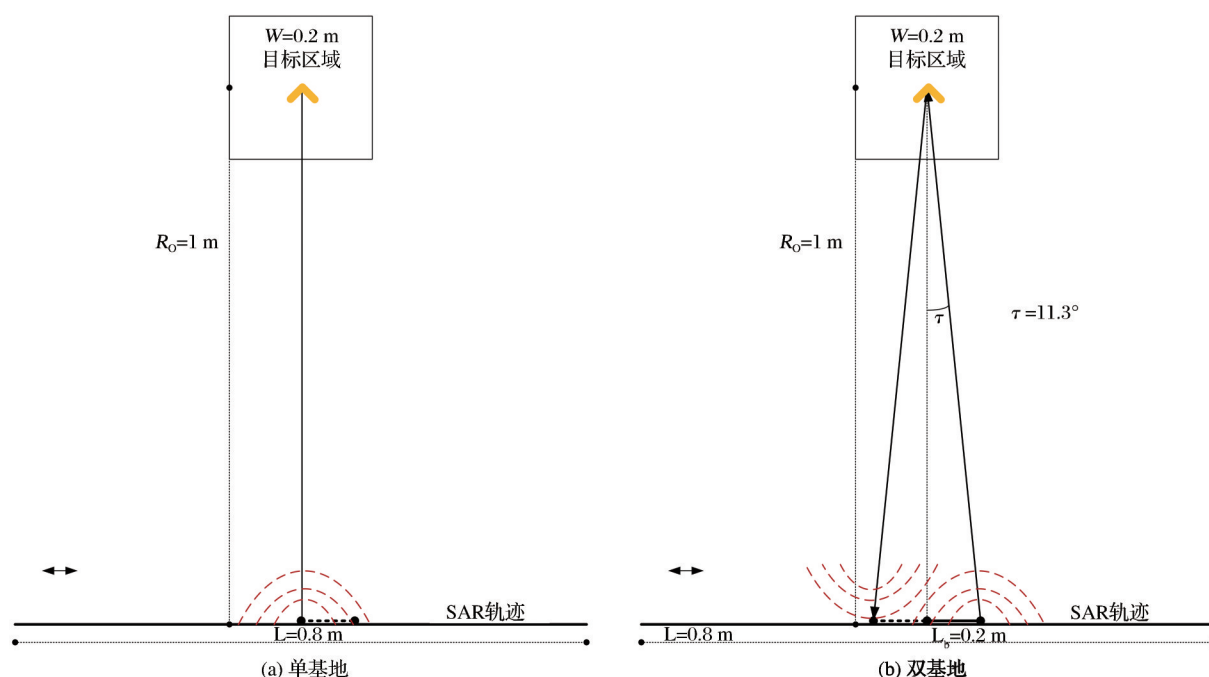


图7 二面角目标单/双站基地仿真示意图

Fig.7 Schematic diagram of dihedral target in single/bistatic mode SAR

4 结 语

本文采用MoM对毫米波段下典型目标散射过程进行仿真模拟,生成包含目标散射电磁波的幅

度、相位、极化信息的回波信号,并利用BP算法对信号进行成像处理,基于不同场景下的高解析度影像去辨识目标特征,探讨了目标间多次散射效应在SAR影像中的影响。为了验证实验方法的有效性

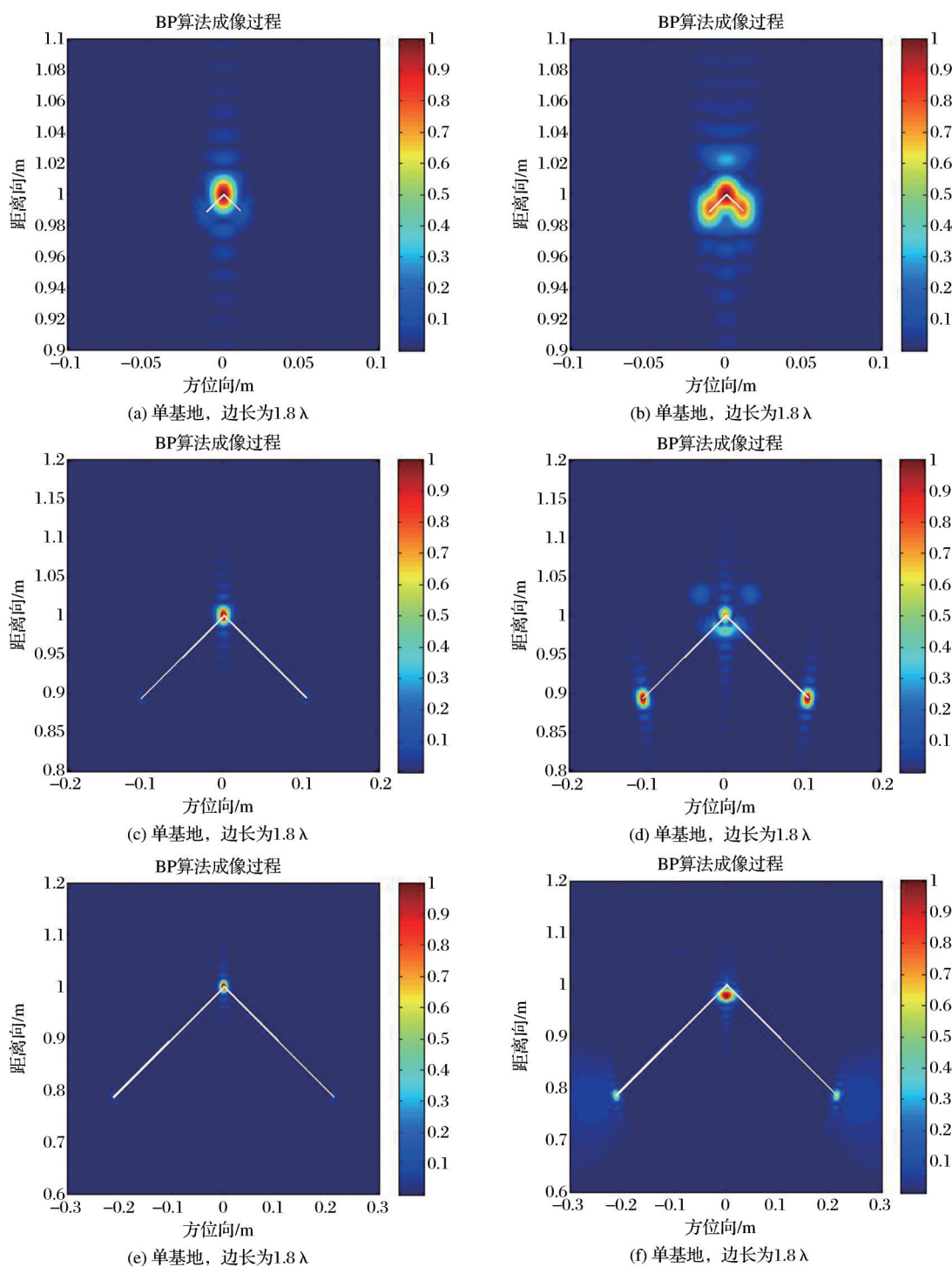


图8 二面角目标单/双站基地成像结果

Fig.8 Focused images of dihedral target in single/bistatic mode

以及更好地分析SAR成像中目标之间的电磁耦合作用,本文首先对比分析了单个金属球的全波仿真结果与点目标仿真结果。相比利用雷达散射截面去描述目标的电磁散射特性,基于全波方法可以获得仿真目标的二维SAR影像,从而更能满足目标识别与解析的需求。

为了在成像结果中观察到目标间更多的物理

散射机制以及探索其在成像结果中的影响,本文对金属双球的表面等效电流分布与分段成像结果进行了对比分析,并总结了入射角度与方位向分辨率的定性关系。接着,为了进一步探索目标间电磁耦合效应在成像结果中的影响,本文对单/双站基地雷达模式下二面角反射器的SAR成像结果中多次散射效应差异进行了初步探讨。本文可为SAR系

统设计和验证、典型目标回波特性数据收集以及如何基于高解析度影像进行目标识别等研究提供借鉴与参考。

参考文献 (References):

- [1] Ulaby F T, Moore R K, Fung A K. Microwave Remote Sensing: Active and Passive. Vol. 2, Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory[M]. MA: Addison-Wesley, 1982.
- [2] Caduff R, Schlunegger F, Kos A, *et al.* A Review of Terrestrial Radar Interferometry for Measuring Surface Change in the Geosciences[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2015, 40(2): 208-228. doi: 10.1002/esp.3656.
- [3] Xie D, Chen K, Zeng J, *et al.* The Frequency Selective Effect of Radar Backscattering from Multiscale Sea Surface[J]. Remote Sensing, 2019, 11(2): 160. doi: 10.3390/rs11020160.
- [4] Nashashibi A, Sarabandi K, Frantzis P, *et al.* An Ultrafast Wide-band Millimeter-wave (MMW) Polarimetric Radar for Remote Sensing Applications[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(8): 1777-1786. doi: 10.1109/TGRS.2002.802462.
- [5] Jose E, Adams M, Mullane J, *et al.* Predicting Millimeter Wave Radar Spectra for Autonomous Navigation[J]. IEEE Sensors Journal, 2010, 10(5): 960-971. doi: 10.1109/JSEN.2009.2037013.
- [6] Guo K, Hoare E, Jasteh D, *et al.* Road Edge Recognition Using the Stripe Hough Transform from Millimeter-Wave Radar Images[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(2): 825-833. doi: 10.1109/TITS.2014.2342875.
- [7] Chen K S. Principles of Synthetic Aperture Radar: A System Simulation Approach[M]. CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2015.
- [8] Cheney M, Borden B H. TOPICAL REVIEW: Problems in Synthetic-aperture Radar Imaging[J]. Inverse Problems, 2009. doi: 10.1088/0266-5611/25/12/123005.
- [9] Moreira A, Pratsiraola P, Younis M, *et al.* A Tutorial on Synthetic Aperture Radar[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2013, 1(1): 6-43. doi: 10.1109/MGRS.2013.2248301.
- [10] Qiu X, Hu D, Zhou L, *et al.* A Bistatic SAR Raw Data Simulator based on Inverse Omega-k Algorithm[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(3): 1540-1547. doi: 10.1109/TGRS.2009.2032776.
- [11] Auer S, Hinz S, Bamler R. Ray-tracing Simulation Techniques for Understanding High-resolution SAR Images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48: 1445 - 1456. doi: 10.1109/TGRS.2009.2029339.
- [12] Ruck G T, Barrick D E, Stuart W D, & Krichbaum C K. Radar Cross Section Handbook Volumes 1 & 2[M]. New York: Plenum Press, 1970.
- [13] Wang Y Z, Feng C Q, Zhang Y S, *et al.* Space Precession Target Classification based on Radar High-Resolution Range Profiles[J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2019: 1-9. doi: 10.1155/2019/8151620.
- [14] Guo K, Han X, Sheng X, *et al.* Scattering Center Models of Backscattering Waves by Dielectric Spheroid Objects[J]. Optics Express, 2018, 26(4): 5060-5074. doi: 10.1364/OE.26.005060.
- [15] Sullivan D M. Electromagnetic Simulation Using the FDTD Method[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2013.
- [16] Gu Shengming, Yang Zhifu, Liu Yuedong. The Study of Terahertz Antenna and SAR Imaging[J]. Journal of Microwaves, 2015, 10(2): 52-55. [古胜明, 杨志甫, 刘越东. 基于 FEKO 的太赫兹天线设计与 SAR 成像仿真研究[J]. 微波学报, 2015, 10(2): 52-55.]
- [17] Jin J M. The Finite Element Method in Electromagnetics[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2015.
- [18] Li Renjie, Ji Kefeng, Zou Huanxin, *et al.* Simulation of SAR Imagery of Target based on Electromagnetic Scattering Characteristic Computation[J]. Radar Science and Technology, 2010, 8(5): 395-405. [李仁杰, 计科峰, 邹焕新, 等. 基于电磁散射特性计算的目标 SAR 图像仿真[J]. 雷达科学与技术, 2010, 8(5): 395-405.]
- [19] Gibson W C. The Method of Moments in Electromagnetics, 2nd ed[M]. CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2014.
- [20] Ku C, Chen K, Chang P, *et al.* Imaging Simulation for Synthetic Aperture Radar: A Full-Wave Approach[J]. Remote Sensing, 2018, 10(9): 1404. doi: 10.3390/rs10091404.
- [21] Hu Cheng, Ao Dongyang, Zeng Tao, *et al.* Bistatic Scattering Characteristic Analysis of Dihedral Corner Reflector[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2016, 31(4): 675-687. [胡程, 敖东阳, 曾涛, 等. 二面角的双基地散射特性分析[J]. 数据采集与处理, 2016, 31(4): 675-687.]
- [22] Kong J A. Theory of Electromagnetic Waves[M]. New York: Wiley-Interscience, 1975.
- [23] Cumming I G, Wong F H. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation[M]. Boston: Artech House, 2005.
- [24] Li T, Chen K, Jin M, *et al.* Analysis and Simulation on Imaging Performance of Backward and Forward Bistatic Synthetic Aperture Radar[J]. Remote Sensing, 2018, 10(11): 1676. doi: 10.3390/rs10111676.

Analysis of Radar Imaging based on Multiple Scattering Effect

Zhou Jinlin^{1,2}, Chen Kunshan^{1,3}, Gu Qiongsheng³, Zeng Jiangyuan¹, Xu Zhen^{1,2}

(1. *Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *Xuchang University, Xuchang 461000, China*)

Abstract: As an active microwave sensor, the Synthetic Aperture Radar (SAR) is widely employed in earth observation. However, the traditional radar scattering model is based on geometrical optical approximation, which ignores the interaction among the ground objects, i.e., the multiple scattering effects. To fully exploit and utilize the information of target electromagnetic scattering characteristics in millimeter-wave SAR images, it is imperative to simulate and verify the multiple scattering effects of typical targets. In this paper, the correspondence between the equivalent current distribution of the spherical surface and the dihedral angle and the segmentation imaging results was analyzed based on the Method Of Moments (MOM), and the electromagnetic simulation imaging was performed by the Back-Projection (BP) algorithm. The effect of scattering on the single/bistatic mode radar imaging was summarized. The results show that the target surface equivalent current distribution and the segmental equivalent synthetic aperture angle change with the incident angle, and the segmented equivalent synthetic aperture angle affects the azimuth resolution. Moreover, it is found that the bistatic radar images include more abundant electromagnetic scattering information. These findings can provide reference for design and verification of SAR system, echo characteristic data collection of typical targets and identification of targets based on high-resolution SAR images.

Key words: SAR imaging; Electromagnetic simulation; BP algorithm; MOM; Multiple scattering