

## 基于电磁散射的复杂目标 SAR 回波与图像仿真

张锐<sup>①②③</sup> 洪峻<sup>①②</sup> 明峰<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院空间信息处理与应用系统技术重点实验室 北京 100190)

<sup>②</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

<sup>③</sup>(中国科学院研究生院 北京 100039)

**摘要:** 复杂目标的 SAR 图像仿真技术, 对于目标识别与解译研究具有重要意义。该文提出的仿真算法, 从目标的 3 维模型出发, 运用弹射线原理, 通过仿真全方位, 全频带的目标散射系数来构建回波并成像。改传统平面波入射为球面波入射, 使得算法不仅能够仿真远场成像系统, 也适用于近场仿真成像。标准体实验, 验证了算法的近远场, 全极化, 多角度, 宽频带的仿真能力; 复杂目标的仿真结果, 同实测数据相比十分逼真。

**关键词:** 合成孔径雷达; 弹射线法; SAR 回波仿真; 复杂目标

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)12-2836-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.01657

## SAR Echo and Image Simulation of Complex Targets Based on Electromagnetic Scattering

Zhang Rui<sup>①②③</sup> Hong Jun<sup>①②</sup> Ming Feng<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(Key Laboratory of Spatial Information Processing and Application System Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>②</sup>(Institute of Electronics Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>③</sup>(Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** SAR image simulation of complex target is very important to radar target recognition and SAR image interpretation. In this paper, the raw echo is simulated by assembling scattering coefficients of the target, under the different aspect and frequency. These coefficients are obtained by applying shooting and bouncing rays technology onto the target's 3D model. Via improving the traditional assumption of incident plane wave as the spherical wave, the algorithm is extended to be suitable for the near-field condition, as well as the far-field. Standard target experiment validate the algorithm can simulate full polarimetry, multiple aspect and wide bandwidth SAR echo. The simulated images of complex targets are very similar to the real data.

**Key words:** SAR (Synthetic Aperture Radar); SBR (Shooting and Bouncing Rays); SAR echo simulation; Complex target

### 1 引言

复杂目标的 SAR 回波与图像仿真技术, 不仅是实现基于模型的自动目标识别系统的基础, 而且还能为识别算法的研究提供大量廉价的数据支持, 在目标解译领域有着广阔的应用前景<sup>[1]</sup>。与针对 SAR 系统的仿真不同, 复杂目标的仿真不仅需要模拟回波和成像, 更需要模拟目标散射电磁波的各种机制, 如单次、多次散射等。其生成的回波应包含目标散射电磁波的幅度、相位、极化、带内响应及孔径内响应等信息。

依据所选的电磁计算方法和 SAR 仿真模型的不同, 国内外学者已提出多种方法: 文献[2-4]利用图形电磁计算的方法进行 SAR 仿真, 其优点是电磁计算可用显卡加速, 实时性好, 缺点是未考虑多次反射及变极化效应; 文献[5]的散射计算虽然考虑较为全面, 但其回波仿真模型过于简单, 不适用于宽带宽, 大孔径的工作模式; 文献[6]给出了一种 ISAR 仿真方法, 但其平面波入射假设不能适用于近场成像系统。

针对上述研究现状, 本文提出了一种基于目标散射特性的复杂目标 SAR 回波与图像仿真算法。该算法通过严格仿真不同位置, 不同频点的目标后向散射系数来构建回波, 从而避免了稳定散射中心的

假设: 仿真回波中包含了目标响应随频率和视角的变化, 更适用于大角度, 宽带宽的工作模式; 将传统的平面波入射改为球面波, 使得近、远场工作模式均能准确仿真; 另外, 算法能模拟出目标的单次、多次反射及其引起的变极化效应, 具有全极化的仿真能力。

## 2 仿真原理与流程

如前所述, 电磁计算方法和回波仿真模型的选择, 是实现复杂目标回波仿真的关键。在高频近似方法中, 弹射线法(Shooting and Bouncing Rays, SBR)通过结合几何光学法(GO)和物理光学法(PO)仿真目标的 RCS, 对金属目标的仿真较为准确<sup>[7]</sup>, 故本文选择 SBR 作为电磁计算方法。

传统 SBR 法的入射波通常都假定为平面波, 参考相位面取在入射平面处。上述假设对于 SAR 回波仿真是不合适的, 其主要原因在于: 入射参考面的零相位假设未包含传感器的位置信息, 即不能仿真出回波的多普勒历程; 另外, 近场成像时的平面波假设, 会引起入射信号的相位偏差, 和孔径内的去相干。事实上, 利用 SBR 法进行 SAR 回波仿真, 并不是一个显而易见的过程, 需结合 SAR 的工作原理, 做出有针对性的改进。

从回波仿真模型上考虑, 传统方法多基于稳定散射中心假设, 其仿真的一般步骤为: 先通过电磁计算, 获得载频点, 孔径中心处的目标散射系数分布, 然后在假定散射系数稳定的前提下仿真回波并成像。然而散射中心的假设不能反映目标散射特性在孔径和带宽内的变化。鉴于上述考虑, 本文提出了如图 1 所示的仿真流程, 其基本思想是: 在保持发射信号相干性的前提下, 逐点, 逐频地计算目标后向散射系数以构成回波。

记孔径内采样点  $\mathbf{p}_i$  和频率(波数)采样点  $k_j$  的个数分别为  $N_s$  和  $N_k$ ,  $\mathbf{p}_i$  及  $k_j$  的表达式分别为

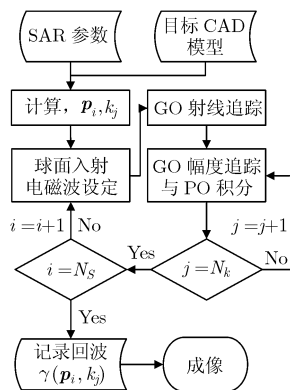


图 1 基于电磁散射的目标 SAR 回波仿真算法

$$\mathbf{p}_i = [x_i, y_i, z_i]^T, \quad i = 1, 2, \dots, N_s \quad (1)$$

$$k_j = k_{\min} + (j-1)\Delta k, \quad j = 1, 2, \dots, N_k \quad (2)$$

算法首先依据 SAR 参数, 计算  $\mathbf{p}_i$  和  $k_j$  的采样值; 然后, 对于每组  $\mathbf{p}_i$  和  $k_j$ , 经图 1 所示的 4 个计算步骤, 得到目标的散射系数; 最后, 循环计算各  $i, j$  时的散射系数  $\gamma(\mathbf{p}_i, k_j)$  作为回波并成像。

需要指出的是, 算法获取的回波是频域采样的, 成像算法会略有不同<sup>[8]</sup>。另外, 算法可仿真包括聚束和 3D SAR 在内的多种工作模式: 对聚束 SAR,  $\mathbf{p}_i$  为 1 维孔径, 则可构建 2 维回波; 对 3D SAR,  $\mathbf{p}_i$  为 2 维孔径, 则可构建 3 维回波。

## 3 仿真方法与步骤

结合流程图 1, 本节将给出仿真算法的详细计算步骤, 推导具体的计算公式, 并指明各关键项。

### 3.1 球面入射电磁波设定

如图 2 所示, 目标的支持域包含在一半径为  $R_T$  的球内, 以目标中心为原点, 建立直角坐标系  $XYZ$ 。另以传感器的位置  $\mathbf{p}_i$  为原点, 建立直角坐标系  $X'Y'Z'$ , 其对应的单位法矢量如下

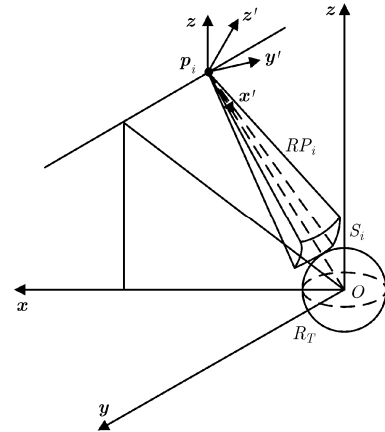


图 2 球面入射电磁波示意图

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}' &= -\mathbf{p}_i / \|\mathbf{p}_i\| \\ \mathbf{y}' &= \mathbf{z} \times \mathbf{x}' / \|\mathbf{z} \times \mathbf{x}'\| \\ \mathbf{z}' &= \mathbf{x}' \times \mathbf{y}' \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

目标中心到传感器的距离  $R_i = \|\mathbf{p}_i\|$ , 取距离传感器为  $RP_i = R_i - R_T$  的球表面  $S_i$  为入射波的等相位面

$$S_i = \{(\rho', \theta', \phi') \mid \rho' = RP_i, |\theta' - \pi/2| \leq \alpha_i, |\phi'| \leq \alpha_i\} \quad (4)$$

其中

$$\alpha_i = \arcsin(R_T/R_i) \quad (5)$$

为使用 GO 法模拟球面入射波, 以  $\Delta\alpha$  为间隔,

均匀划分入射波表面  $S_i$ ，其划分密度满足  $R_i \Delta\alpha \ll \lambda$ ，一般取  $\Delta\alpha = \lambda/6R_i$ ，令  $N_R = \lceil \alpha/\Delta\alpha \rceil$ ，则存在  $(2N_R + 1)^2$  个划分点

$$\begin{aligned} \mathbf{R}'_{m,n} &= [x'_{m,n}, y'_{m,n}, z'_{m,n}]^T = [RP_i \sin(\theta'_m) \cos(\varphi'_n), \\ &RP_i \sin(\theta'_m) \sin(\varphi'_n), RP_i \cos(\theta'_m)]^T \quad (6) \\ \theta'_m &= \pi/2 - (N_R - m + 1)\Delta\alpha, \quad m = 1, 2, \dots, 2N_R + 1 \\ \varphi'_n &= -(N_R - n + 1)\Delta\alpha, \quad n = 1, 2, \dots, 2N_R + 1 \end{aligned} \quad (7)$$

将式(6)转换到  $XYZ$  坐标系下，得各划分点坐标为

$$\mathbf{R}_{m,n} = x'_{m,n} \mathbf{x}' + y'_{m,n} \mathbf{y}' + z'_{m,n} \mathbf{z}' + \mathbf{p}_i \quad (8)$$

其法矢量为  $\mathbf{s}_{m,n} = (\mathbf{R}_{m,n} - \mathbf{p}_i) / \|\mathbf{R}_{m,n} - \mathbf{p}_i\|$ ，各入射线可表示为

$$\mathbf{r}_{m,n}(t) = \mathbf{R}_{m,n} + t\mathbf{s}_{m,n}, \quad t \geq 0 \quad (9)$$

因式(6)中的各点是对  $S_i$  球面的角度等间隔划分，故每条射线管的面积略有不同，即  $\Delta S_{m,n} \simeq RP_i^2 \cdot \sin(\theta'_m) \Delta\alpha^2$ ；各射线的主曲率半径为  $\rho_{1,2}^0 = RP_i$ ；忽略天线方向图的加权，并取入射电场为单位幅度，记其法矢量为  $\mathbf{n}_{\text{polT}}$ ，则入射线的电场强度为

$$\mathbf{E}(r_0^-) = \exp(-jkRP_i) \mathbf{n}_{\text{polT}} \quad (10)$$

式(9)，式(10)分别表示球面入射电磁波的入射轨迹和电场强度，是后续两节迭代运算的初始状态。

### 3.2 复杂目标的 GO 射线追踪

射线追踪的目的是找出式(9)中的  $(2N_R + 1)^2$  条射线与目标相交和弹射的情况，为方便表达，考察其中的一条射线，忽略其下标并简记为

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{R} + t\mathbf{s}, \quad t \geq 0 \quad (11)$$

目标模型用大量三角形面元描述(参见图4，图8)

$$\{\mathbf{a}_q, \mathbf{b}_q, \mathbf{c}_q\}, \quad q = 1, 2, \dots, N_T \quad (12)$$

其中  $q$  为面元序数， $N_T$  为总数，每个面元由3个顶点表示。对入射线式(11)，搜索每个面元，如果当  $t = t_0$  时，点  $\mathbf{R}_1 = \mathbf{r}(t_0)$  在点  $\{\mathbf{a}_q, \mathbf{b}_q, \mathbf{c}_q\}$  构成的三角形内，则判定该射线与第  $q$  个面元相交于  $\mathbf{R}_1$  点；如果射线不与任一面元相交，则认为其离开目标。

若射线相交，由 GO 近似，反射波满足 Fresnel 原理，记相交面元的法向量为  $\mathbf{n}$ ，则弹射线的法向为

$$\mathbf{s}_1 = \mathbf{s} - 2(\mathbf{s} \cdot \mathbf{n})\mathbf{n} \quad (13)$$

其中  $(\mathbf{s} \cdot \mathbf{n})$  表示向量点乘，弹射线为(见图3)

$$\mathbf{r}_1(t) = \mathbf{R}_1 + t\mathbf{s}_1, \quad t \geq 0 \quad (14)$$

式(14)中的下标 1 表示其为一次弹射线，不妨将式(11)中的对应下标加 0，表示其为入射线。对弹射线继续射线追踪，直到其离开目标。

### 3.3 GO 幅度追踪

当射线跟踪结束后，射线管的幅度，相位和极

化需进一步计算，由 GO 近似，电场满足以下迭代式<sup>[7]</sup>

$$\mathbf{E}(r_{i+1}^-) = (\text{DF})_i (\bar{\Gamma})_i \mathbf{E}(r_i^-) \exp(-jkt_i) \quad (15)$$

其中  $(\text{DF})_i$  和  $(\bar{\Gamma})_i$  分别为第  $i$  次弹射的扩散和并矢反射系数。第  $i$  次弹射线的两个主曲率半径为  $\rho_{1,2}^i$ ，射线长度为  $t_i$ ，则  $(\text{DF})_i$  可由下式计算

$$(\text{DF})_i = \sqrt{\frac{\rho_1^i \rho_2^i}{(\rho_1^i + t_i)(\rho_2^i + t_i)}} \quad (16)$$

在球面波假设下，入射线的主曲率半径  $\rho_{1,2}^0 = RP_i$ ，记弹射点处目标的曲率半径为  $\rho_{1,2}^i$ ，入射角为  $\theta_1$ ，入射线和目标主方向  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  的夹角分别为  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  (图3)，则弹射线的主曲率半径满足迭代式

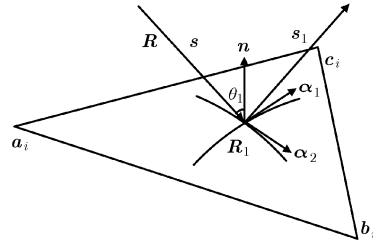


图3 射线管与目标的弹射

$$\frac{1}{\rho_{1,2}^{i+1}} = \frac{1}{\rho_{1,2}^i} + \frac{1}{\rho' \cos \theta_1} \pm \sqrt{\frac{1}{(\rho')^2 \cos^2 \theta_1} - \frac{4}{\rho_1^i \rho_2^i}} \quad (17)$$

其中

$$\frac{1}{\rho'} = \frac{\sin^2 \varphi_1}{\rho_1^i} + \frac{\sin^2 \varphi_2}{\rho_2^i} \quad (18)$$

记弹射点前后的电场分量分别为  $\mathbf{E}(1^-)$  和  $\mathbf{E}(1^+)$ ，入射场  $\mathbf{E}^{\text{inc}}$  被分解为垂直和水平分量，则有<sup>[7]</sup>

$$\mathbf{E}(1^-) = (\mathbf{E}^{\text{inc}} \cdot \boldsymbol{\varphi}^{\text{inc}}) \boldsymbol{\varphi}^{\text{inc}} + (\mathbf{E}^{\text{inc}} \cdot \boldsymbol{\theta}^{\text{inc}}) \boldsymbol{\theta}^{\text{inc}} \quad (19)$$

$$\mathbf{E}(1^+) = \Gamma_{\text{TE}} (\mathbf{E}^{\text{inc}} \cdot \boldsymbol{\varphi}^{\text{inc}}) \boldsymbol{\varphi}^{\text{ref}} + \Gamma_{\text{TM}} (\mathbf{E}^{\text{inc}} \cdot \boldsymbol{\theta}^{\text{inc}}) \boldsymbol{\theta}^{\text{ref}} \quad (20)$$

其中  $\boldsymbol{\varphi}^{\text{inc}}, \boldsymbol{\theta}^{\text{inc}}, \boldsymbol{\varphi}^{\text{ref}}, \boldsymbol{\theta}^{\text{ref}}$  依次为局部入射/反射波的 TE/TM 法向，对理想导体， $\Gamma_{\text{TE}} = -1, \Gamma_{\text{TM}} = 1$ 。需要指出的是：式(19)，式(20)的分解反射，式(15)的迭代，是金属目标产生变极化效应的主要因素之一。

### 3.4 PO 积分计算

记最后一个弹射点处的磁感强度为  $\mathbf{H}(\mathbf{R}_i)$ ，由 PO 近似，表面感应电流为  $\mathbf{J}_{\text{po}} = 2\mathbf{n} \times \mathbf{H}$ ，传感器处的后向散射电场强度为<sup>[9]</sup>

$$\mathbf{E}^s = -jkZ \frac{\exp(-jk\|\mathbf{p}_i - \mathbf{R}_i\|)}{4\pi\|\mathbf{p}_i - \mathbf{R}_i\|} \int \mathbf{J}_{\text{po}}(\mathbf{r}') dS' \quad (21)$$

设接收天线的极化取向为  $\mathbf{n}_{\text{polR}}$ ，则最终接收电场强度为  $(\mathbf{E}^s \cdot \mathbf{n}_{\text{polR}})$ ，相应的复散射系数为

$$\gamma_{\text{polR,polT}} = (\mathbf{E}^s \cdot \mathbf{n}_{\text{polR}}) \quad (22)$$

polR, PolT 分别表示接收和发射天线的极化, 通过将  $n_{\text{polT}}$  和  $n_{\text{polR}}$  设定为不同的线极化对, 可进行全极化的回波仿真。回顾流程图 1 可知, 循环  $i, j$  并重复计算各  $p_i$  和  $k_j$  下的式(22)即构成回波  $\gamma(p_i, k_j)$ 。

### 4 仿真实验验证

为验证算法, 分别进行了标准体和复杂目标的实验: 其中, 标准体实验通过设置特定场景, 定量的验证了算法的优越性; 复杂目标实验仿真了两类装甲车目标, 并同实测数据进行了定性、定量比较和分类实验。

#### 4.1 标准体的近场 SAR 成像仿真实验

本实验仿真了一套步进频, 连续波工作模式的地基实验 SAR 系统, 具体参数如表 1 所示。

表 1 仿真近场 SAR 成像系统参数

孔径高度(m)	3.9	频率采样点	601
中心地距(m)	6.76	孔径范围(m)	$\pm 3.9$
中心斜距(m)	7.8	方位采样点	261
下视角( $^\circ$ )	30	分辨率(cm)	$4 \times 2$
频率(GHz)	8-12	极化方式	Full

如图 4, 仿真场景由 5 个角反射器组成, 其中标准放置的二面角反射器 2 个, 三面角反射器 1 个, 沿电轴向旋转  $45^\circ$  的二面角反射器 2 个。所有反射器的边长均为 18 cm, 且全部摆放在斜平面上, 4 个角落上的反射器构成一个长 3 m, 宽 75 cm 的矩形(图 5)。

为验证球面波假设对于近场仿真的重要性, 分别在球面、平面波条件下仿真了回波并用 Omega-K 算法成像<sup>[8]</sup>, 结果如图 6 所示。

由图 6 可见, 对于场景中心而言, 两假设的成像质量一致; 但对于非场景中心, 平面波假设会引起目标的方位向散焦, 降低图像质量。以 |HH-VV| 中的目标为例, 球面波假设下, 测得方位分辨率为

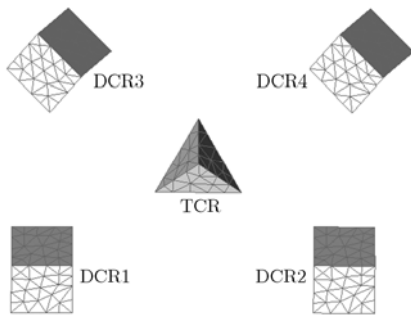


图 4 角反射器阵的 CAD 模型

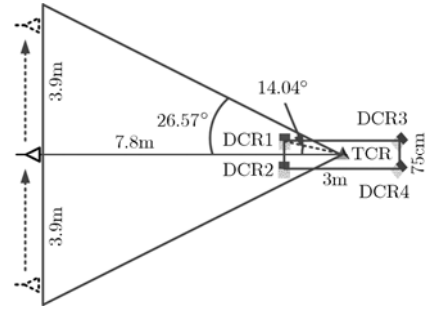


图 5 斜平面成像几何与目标位置



图 6 全极化成像结果 (上排为球面波, 下排为平面波, 从左至右依次为: |HH+VV|, |HV+VH|, |HH-VV|)

1.98 cm, 而平面波假设下的分辨率降为 3.49 cm。

为验证算法的全极化仿真能力, 测量各目标的归一化 Sinclair 矩阵如表 2 所示。与理论值相比, 其幅度误差小于 0.2 dB, 相位误差小于  $2^\circ$ , 极化隔离度优于 -28 dB。可见, 算法能准确的仿真目标的变极化效应。

表 2 仿真图像中各目标的 Sinclair 矩阵

反射器编号	Sinclair 矩阵
DCR1	$\begin{bmatrix} 1 \angle 0^\circ & 0.04 \angle 203.16^\circ \\ 0.03 \angle 204.15^\circ & 0.97 \angle 180.18^\circ \end{bmatrix}$
DCR2	$\begin{bmatrix} 1 \angle 0^\circ & 0.03 \angle 233.16^\circ \\ 0.03 \angle 235.12^\circ & 0.98 \angle 180.51^\circ \end{bmatrix}$
TCR	$\begin{bmatrix} 1 \angle 0^\circ & 0.03 \angle 56.75^\circ \\ 0.03 \angle -32.18^\circ & 0.97 \angle 1.71^\circ \end{bmatrix}$
DCR3	$\begin{bmatrix} 0.03 \angle 30.03^\circ & 0.98 \angle 1.78^\circ \\ 1 \angle 0^\circ & 0.02 \angle -131.13^\circ \end{bmatrix}$
DCR4	$\begin{bmatrix} 0.03 \angle 34.10^\circ & 0.98 \angle 1.61^\circ \\ 1 \angle 0^\circ & 0.02 \angle -103.16^\circ \end{bmatrix}$

对|HH+VV|分量,估计场景中心处 TCR 的方位功率谱密度,并与传统方法所得结果同绘于图 7。由于常规算法用孔径中心的散射代替全孔径内的散射,故图 7 中的虚线幅度在±20°内几乎不变;而图 7 中的实线在±14°时,目标功率谱出现了急剧衰减,参照图 5 可知,这是由于近距端的两二面角的遮挡造成的。显然,和文献[2-6]的算法相比,本文算法对大孔径,复杂结构目标的仿真更为准确。同样,带内响应特性的仿真上,本算法也有优势,篇幅所限不再赘述。

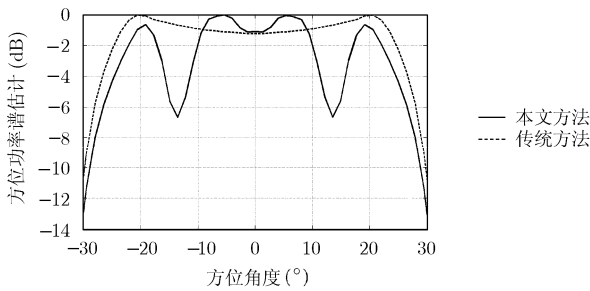


图 7 TCR 的归一化方位功率谱

### 4.2 复杂目标的 SAR 成像仿真实验

为验证算法对复杂目标的仿真能力,仿真了 BMP2 和 BTR70 两类装甲车目标,并同 MSTAR<sup>[10]</sup>数据进行了比较。仿真参数严格按照 MSTAR 数据采集时使用的 Twin Otter 机载 SAR 的参数设定。为使仿真效果更加真实,对背景进行了仿真,且忽略了背景与目标的相互作用,仅考虑目标对背景的遮挡。背景是通过杂波先验模型仿真的,其幅度服从瑞利分布,相位服从均匀分布<sup>[11]</sup>。以1°为间隔,每类目标均仿真了 360 幅图像。目标的 CAD 模型均为真实尺寸,分别由 41140 和 30158 个三角面元构成(参见图 8)。

图 9 和图 10 分别是 MSTAR 图像,和对应的仿真图像。定性比较两组图中对应目标的阴影长度,遮蔽效应,强度分布等,均能较好吻合。如图 9 中 BMP2 图像右上方存在较强的线散射中心, BTR70 的强散射分为前后两个部分等特征,均能在图 10 中找到。可见仿真视觉效果逼真,较为成功。

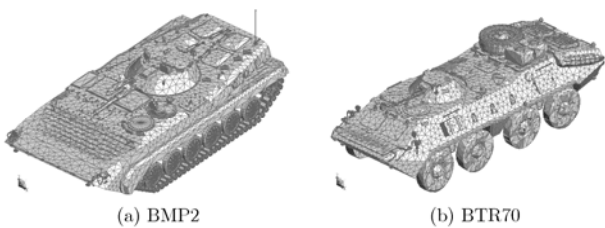


图 8 BMP2 和 BTR70 的 CAD 模型

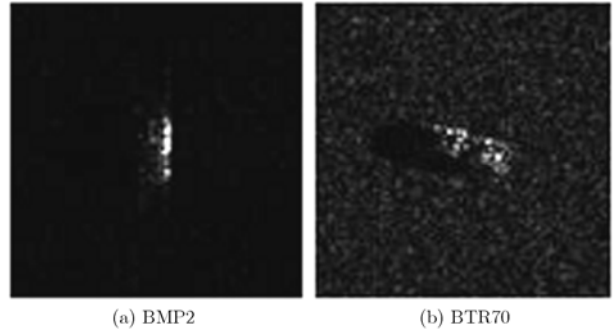


图 9 BMP2 和 BTR70 的 MSTAR 图像

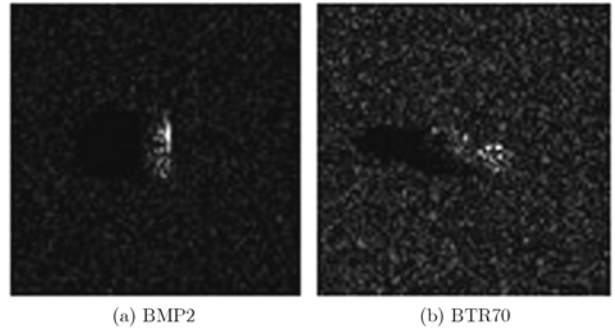


图 10 BMP2 和 BTR70 的仿真图像

进一步,为量化研究仿真结果与 MSTAR 数据的相似程度,定义两幅图像 A,B 的 PCA 特征域相似度为

$$PCASim(A, B) = \frac{PCA(A)^T PCA(B)}{\|PCA(A)\| \|PCA(B)\|} \quad (23)$$

其中 PCA(A) 表示求取图像的 PCA 特征向量,式(23)的值为[0,1], 0 表示完全“不相似”, 1 表示完全“相似”。对 391 幅 MSTAR 图像,计算其与对应仿真图像的相似度,所得结果的直方图如图 11 所示。

统计图 11 的平均相似度为 0.6995, 方差为 0.0138, 其中 90% 以上的目标相似度大于 0.6, 即绝大多数仿真目标是较为相似的,亦说明仿真较为成功。

最后,利用仿真图片作为训练样本,对 MSTAR 数据进行了分类实验。分类算法选择了常用的 PCA+1NN 的方法<sup>[12]</sup>,结果如表 3 所示。

由表 3 可见两类目标的正确识别率分别为

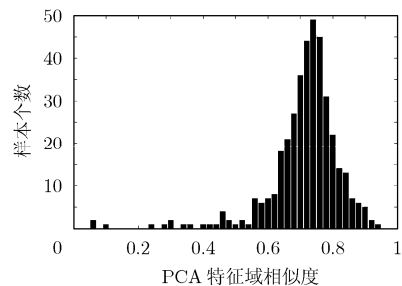


图 11 仿真与 MSTAR 数据的 PCA 相似度统计直方图

表3 MSTAR 数据分类的混淆矩阵

Type	BMP2	BTR70	Pcc(%)
BMP2	172	23	88.21
BTR70	49	147	75.00
		Anv	81.59

88.21%和 75.00%，其平均识别率达 80%以上，再次证明了本文算法能够较为逼真的仿真复杂目标的 SAR 图像。

## 5 结束语

同传统方法相比，本文算法的主要优势在于：首先，回波仿真具有通用性，不局限于特定的孔径形式和近、远场成像设置；其次，仿真回波包含了目标的多角度，宽频带的散射信息，适用于宽带宽，大孔径的工作模式；最后，目标的多次反射及变极化效应的仿真较为准确。在后续工作中，可将绕射理论(如 GTD, UTD)同 SBR 法相结合，更为全面的仿真目标的多种散射机制，及变极化效应。可以预见，结合高分辨率，多维度和全极化测量技术，将是利用微波进行目标识别的最有潜力的发展方向。而本文算法，也可应用于复杂目标的多维度，全极化 SAR 仿真，目标 RCS 预测与缩减等诸多领域。

## 参 考 文 献

- [1] Chiang H C and Moses R L. Model-based classification of radar images[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2000, 46(5): 1842-1854.
  - [2] Margarit G, Mallorqui J J, and Martinez C L. GRECOSAR, a SAR simulator for complex targets: application to urban environments[C]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Barcelona, Spain, 2007: 4160-4163.
  - [3] Rius J M, Ferrando M, and Jofre L. GRECO: graphical electromagnetic computing RCS prediction in real time[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 1993, 35(2): 7-17.
  - [4] 陈杰, 李少斌等. 一种高分辨率合成孔径雷达的目标散射特性建模方法[P]. 中国专利, No. 200810112009.6, 2008年5月.
  - [5] Andersh D, Moore J, and Kosanovich S, *et al.* Xpatch 4 the next generation in high frequency electromagnetic modeling and simulation software[C]. IEEE National Radar Conference, Alexandria, USA, 2000: 844-849.
  - [6] 周文明, 宋建社, 郑永安, 徐军. 基于电磁特性 SAR 图像目标识别模板的建立[J]. *电光与控制*, 2008, 15(7): 43-47.  
Zhou Wen-ming, Song Jian-she, Zheng Yong-an, and Xu Jun. Establishing target recognition template in SAR images based on electromagnetic characteristics[J]. *Electronics Optics & Control*, 2008, 15(7): 43-47.
  - [7] Ling H and Chou R. Shooting and bouncing rays: calculating the RCS of an arbitrarily shaped cavity[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1989, 37(2): 194-205.
  - [8] Soumekh M. Synthetic Aperture Radar Signal Processing with Matlab Algorithms[M]. New York: Wiley, 1999, Chapter 4.
  - [9] 盛新庆. 计算电磁学要论[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 40-42.  
Sheng X. Introduction of Computational Electromagnetic [M]. Beijing: Science Press, 2005: 40-42.
  - [10] MSTAR-dataset website: <https://www.sdms.afrl.af.mil/datasets/mstar>, 2008.6
  - [11] Zhang R, Hong J, and Ming F. CASpatch: a SAR image simulation code to support ATR applications[C]. 2nd Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, Xi'an, China, 2009: 502-505.
  - [12] Chen Y, Blasch E, and Chen H, *et al.* Experimental feature-based SAR ATR performance evaluation under different operational conditions[C]. Proc. of SPIE, Orlando, USA, 2008, Vol.6968: 69680F.
- 张 锐: 男, 1982年生, 博士生, 研究方向为 SAR 信号处理、SAR 自动目标识别。  
洪 峻: 男, 1960年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为 SAR 定标技术、量化 SAR 图像应用等。  
明 峰: 男, 1978年生, 副研究员, 研究方向为雷达信号处理、SAR 系统量化应用等。