

## 基于面元投影模型的SAR建筑物快速图像仿真

熊文昌<sup>\*①②③</sup> 王宏琦<sup>①②</sup> 唐侃<sup>①②③</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>(中国科学院大学 北京 100190)

**摘要:** SAR图像仿真技术是SAR图像理解与应用的重要辅助工具。该文根据SAR图像建筑物解译的需求, 结合建筑物的结构特点, 提出一种基于面元投影模型的SAR建筑物快速图像仿真方法。该方法通过简化射线跟踪算法加速目标模型到图像平面的几何映射过程, 并提出面元投影模型降低散射面元到图像分辨单元中的插值误差。相较于传统SAR图像仿真, 该方法实现了仿真精度与速度间的平衡。实验结果表明, 该文方法能够快速生成仿真结果, 仿真图像与真实图像匹配度高, 具有较强的实用价值。

**关键词:** 合成孔径雷达; SAR图像仿真; 面元投影模型; 射线跟踪

中图分类号: TP751

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)05-1062-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.00957

## Fast SAR Imaging Simulation for Urban Structures Based on Facet Projection Model

Xiong Wen-chang<sup>①②③</sup> Wang Hong-qi<sup>①②</sup> Tang Kan<sup>①②③</sup>

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

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

<sup>③</sup>(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** SAR imaging simulator is an important tool for understanding and implementing the SAR images. In the light of the structural features of buildings, a novel fast SAR imaging simulator for urban structures based on facet projection model is proposed to meet the requirements of the SAR image interpretation applications for buildings. The geometry mapping process from the target model to the image-domain is accelerated by using simplified ray tracing algorithm, and the facet projection model is performed to reduce interpolating error from scattering facets to resolution cells. Compared with the traditional SAR image simulator, this simulator strikes a balance between accuracy and efficiency. Some experiments validate the facet projection model and demonstrate the efficiency of the simulator, which will offer a higher value of practical applications.

**Key words:** SAR; SAR imaging simulation; Facet projection model; Ray tracing

### 1 引言

随着 SAR 传感器不断发展, 高分辨率城区 SAR 数据得以大量获取(Cosmo-SkyMED, TerraSAR-X, MiniSAR), 建筑物作为城区重要的人造目标, 针对 SAR 图像建筑物解译工作也受到越来越广泛的关注<sup>[1]</sup>。然而, 由于 SAR 图像的不直观, 难理解, 给建筑物的解译工作带来了很大困难。作为建筑物 SAR 图像理解与信息提取的重要辅助工具, 建筑物 SAR 图像仿真技术逐渐成为了当前研究的热点。

围绕 SAR 建筑物图像仿真技术, 学者们展开了大量的研究, 提出了各种的散射模型和模拟方法。常用的仿真方法可分为两类<sup>[2]</sup>: 基于回波的 SAR 成像仿真方法和基于特征的 SAR 图像仿真方法。SAR 回波成像仿真方法<sup>[3-6]</sup>根据目标信息模拟 SAR 原始回波信号, 再经适当的 SAR 信号处理器得到图像, 如文献[5]基于地物属性和入射角计算目标的后向散射强度, 获得原始回波信号进行成像。文献[3]开发了 GRECOSAR 仿真器, 用来模拟建筑物在不同成像条件下全极化、干涉和极化干涉的 SAR 图像。

SAR 回波成像仿真包括地物散射, SAR 回波信号产生和处理一系列物理过程, 和真实的 SAR 系统

2013-07-03收到, 2013-12-11改回

国家自然科学基金(41001285, 41301493)资助课题

\*通信作者: 熊文昌 xwc1568@163.com

成像的过程一致，但效率过低，不能满足当前高分辨率 SAR 图像交互式解译与信息反演等实时应用<sup>[7]</sup>。在此背景下，仿真技术的研究重点逐渐由精度转向了运算速度，基于特征的 SAR 图像仿真方法成为研究热点<sup>[8-11]</sup>。如文献[2]和文献[12]提出了基于光栅的高分辨率 SAR 图像仿真方法，耗时短，在数据获取方案的制定和快速 SAR 图像理解方面具有明显的优势。文献[8]等采用射线跟踪方法，引入了开源软件包“Peristence of Vision Ray”，可快速模拟多次散射特征便于理解复杂城市目标的图像。文献[11]开发了一种简单高效的 SAR 图像模拟器，应用于城市人工目标的 3D 重建。此类方法从 SAR 图像特征出发，简化电磁散射模型与 SAR 处理过程从而缩减计算时间，能够有效模拟目标的几何特征，但反映目标辐射特性方面有所欠缺。

对比两类方法可知，不同仿真方法在计算速度与辐射精度上各有偏重，两者未能达到较好的统一。针对此问题，为了快速有效地模拟建筑物的几何特征与辐射特征，本文提出了基于面元投影模型的建筑物 SAR 快速成像仿真方法。主要创新点包括两部分：(1)通过简化的射线跟踪法来提取目标模型几何信息，其计算复杂度不再依赖于目标模型所构成的面元数目，而与采样射线密度相关，由此可降低采样射线密度来提高计算速度；(2)提出面元投影模型降低了散射面元到分辨单元中的插值误差，获得离散化的散射系数图，用于后期快速 FFT 卷积成像处理过程。后续相关对比实验证实了本方法的快速有效性。文章第 2 节将详细介绍仿真流程；第 3 节将仿真建筑物图像并加以分析；第 4 节将讨论本文实验结果。

## 2 SAR 成像仿真

SAR 成像仿真过程包括两个阶段(如图 1 所示)：根据目标参数以及轨道参数，采用电磁散射模型计算得到后向散射系数图；后向散射系数图生成原始回波信号，然后经由 SAR 处理器获得 SAR 图像。

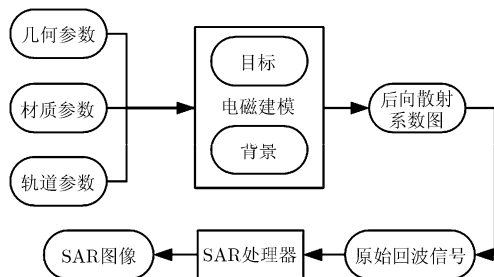


图 1 SAR 仿真流程

前一阶段，文中通过简化的射线跟踪法快速获取单次、多次散射中的几何信息，并选用 Kirchhoff 电磁理论用于建筑物表面后向散射系数计算。后一阶段中则采用小角度近似理论，将 SAR 处理过程近似为后向散射系数图与点扩展函数的卷积<sup>[13]</sup>，从而缩减多频率、多角度计算时间。具体过程将在下面章节中详细介绍。

### 2.1 场景模型采样

场景模型采样是后向散射系数计算的首要工作。在此过程中，采用几何映射方法对物理模型采样，并获取采样面的几何信息。常见的几何映射方法有射线跟踪方法与光栅法。

光栅法通过变换矩阵将场景目标从世界坐标系转换到图像坐标系统，经由光栅化将场景目标处理到图像网格中。该变换过程计算速度快，但在处理多次散射，如建筑物二面角、三面角时存在障碍。

射线跟踪方法采用光学射线详细地描述了传感器与目标间的电磁散射过程，能有效处理多次散射、阴影、遮挡效应，适应性更好。然而，高模拟真实度也导致了低运算速度。传统的射线跟踪法主要采用三角面元描述目标，须判断每根射线与场景中的所有模型的小面元是否相交来追踪射线路径。对于包含着大量面元信息的复杂建筑物场景而言，难以保证运算效率。

对此，本文提出一种简化的跟踪模式：沿电磁波入射方向垂直面将目标模型采样为电大尺寸的平面片段，然后在片段基础上完成跟踪过程。采用简化模式后，目标的描述方式转化为与射线管相关联的平面片段组合，射线跟踪的计算复杂度将不依赖于模型的复杂度，而仅仅与平面片段数目相关。同时，SAR 建筑物场景中，由于地面或墙壁表面主要的散射机制为面散射<sup>[14]</sup>，这也为该简化模式提供了现实基础。具体实现过程如下：

首先根据输入的建筑物目标 3D 模型绘制场景，以传感器为基点，飞行方向为  $x$  轴，距离向反方向为  $z$  轴构建局部观察坐标系(图 2)。通常情况下传感器与目标距离较远，入射波可近似为平面波，因此取正交透射的观测模式。然后在局部坐标系内，根据场景模型的尺寸，通过采样射线将电磁波入射面网格化，则每个网格对应着目标模型的一个或者多个平面片段(可见面或者不可见面)。单个平面片段尺寸远大于波长，大小依赖于射线采样密度，且包含了位置信息与方向信息( $\hat{r}_{ij}, \hat{n}_{ij}$ )。在后续计算中，以平面片段为基准，展开单次、多次的射线跟踪。

### 2.2 基于平面片段的射线跟踪法

目标场景经采样后，目标表面被划分为  $W_x \times W_y$

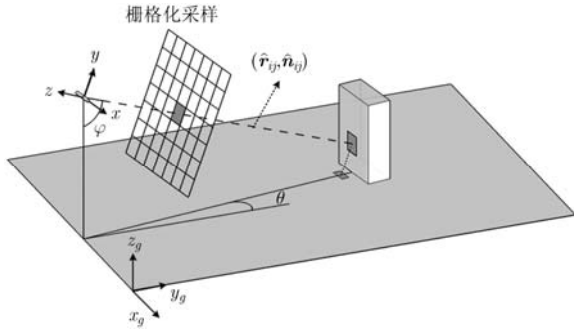


图2 目标场景平面片段采样

平面片段。单次散射面几何信息可由平面片段斜距投影获得，多次散射分布则须对射线进一步跟踪。对于目标每个平面片段，沿着射线的镜面反射方向进行跟踪，然后通过对比射线路径中深度坐标与相应片段的深度坐标来确定反射路线。反射方向为

$$\hat{\mathbf{k}}_s = \hat{\mathbf{k}}_i - 2(\hat{\mathbf{k}}_i \cdot \hat{\mathbf{n}}_s)\hat{\mathbf{n}}_s \quad (1)$$

假定射线入射点为索引  $(m_0, n_0)$  片段，其空间坐标为  $\{m_0\Delta x, n_0\Delta y, z(m_0, n_0)\}$ ，其中  $z(m_0, n_0)$  为片段索引对应的表面的深度坐标， $\Delta x, \Delta y$  对应  $x, y$  方向上的片段尺寸。由式(1)计算得出反射方向  $\hat{\mathbf{k}}_s$ ，对应矢量为  $(x_{ks}, y_{ks}, z_{ks})$ ，跟踪路径如下：

$$(x, y, z)_i = \begin{cases} \left( m_0\Delta x + i\Delta x, n_0\Delta y + i\frac{y_{ks}}{x_{ks}}\Delta x, z(m_0, n_0) + i\frac{z_{ks}}{x_{ks}}\Delta x \right), & y_{ks} < x_{ks} \\ \left( m_0\Delta x + i\frac{x_{ks}}{y_{ks}}\Delta y, n_0\Delta y + i\Delta y, z(m_0, n_0) + i\frac{z_{ks}}{y_{ks}}\Delta y \right), & y_{ks} > x_{ks} \end{cases} \quad (2)$$

引入函数： $f(i) = z(i) - z\left(\left[\frac{x(i)}{\Delta x}\right], \left[\frac{y(i)}{\Delta y}\right]\right)$ ，其中，

$[x]$  表示为  $x$  的临近整数。零值对应入射点，则易知射线与平面相交时  $f(i)$  第 1 次过零点，则相应的反射点索引位置的判定流程如下：

步骤 1 初始化  $i = 0$ ；

步骤 2 计算  $F(i) = f(i)f(i+1)$ ；

步骤 3 如果  $F(i) > 0$ ，则  $i = i + 1$ ，并跳至步骤 2，否则跳至步骤 4；

步骤 4 结束循环，计算并保存反射点坐标。

通过上述循环，根据入射点与索引函数可得反射点坐标，将反射点重置为入射点，重复循环计算即可获得多次散射的跟踪路径(图 3)。

该算法的计算复杂度与射线采样率相关，并不受限于构建目标模型的三角面元数目。假定输入目标模型由  $N_T$  个三角面元组成，由观测方向沿横纵方

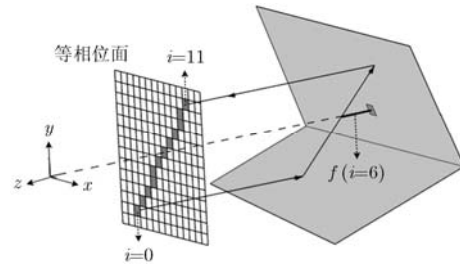


图3 基于平面片段的射线跟踪法

向采样后重构为  $N_F = W_x \times W_y$  个平面片段。目标模型采样前，每条射线弹射一次所需查找的三角面元数为  $N_T$ ，而采样后弹射一次所需查找面元数的最大值为  $W_x$  或  $W_y$ 。在模型采样尺寸一致的前提下，可近似认为  $N_F \approx N_T$ ，不难看出，此时射线跟踪的搜索范围大大减少，采样后计算复杂度更低。此外，在更偏重几何特性分析的 SAR 相关应用中，可降低采样密度使得  $N_F \ll N_T$ ，进一步提升运算速度。

### 2.3 电磁散射计算

复杂城市环境中，后向散射强度不仅与目标几何结构有关，还与建筑物表面的特性有关，而简单的散射模型不能表现城区的这种地物差异性。为了获得高质量的仿真图像，需要引入能描述信号与目标之间的交互作用的复杂电磁散射模型。在此选取 Kirchhoff 近似理论来完成其电磁强度计算<sup>[14]</sup>，对于高频远场，天线接收电磁场可表示为

$$\hat{\mathbf{E}}_s(r) = \frac{jk \exp(-jkr)}{4\pi r} E_i (\mathbf{I} - \hat{\mathbf{k}}_s \hat{\mathbf{k}}_s) \cdot \int \int_A \hat{\mathbf{F}}(\hat{\mathbf{k}}_i, \hat{\mathbf{e}}_i, \hat{\mathbf{n}}) \exp[j(\hat{\mathbf{k}}_i - \hat{\mathbf{k}}_s) \cdot \hat{\mathbf{r}}'] d\hat{\mathbf{r}}' \quad (3)$$

$\hat{\mathbf{F}}(\hat{\mathbf{k}}_i, \hat{\mathbf{e}}_i, \hat{\mathbf{n}})$  主要与电磁波的极性、电磁波入射角、平面的电磁介电常数有关。

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{F}}(\hat{\mathbf{k}}_i, \hat{\mathbf{e}}_i, \hat{\mathbf{n}}) = & -(\hat{\mathbf{e}}_i \cdot \hat{\mathbf{q}}_i)(\hat{\mathbf{n}} \cdot \hat{\mathbf{k}}_i)\hat{\mathbf{q}}_i(1 - R_{\perp}) \\ & + (\hat{\mathbf{e}}_i \cdot \hat{\mathbf{p}}_i)(\hat{\mathbf{n}} \times \hat{\mathbf{q}}_i)(1 + R_{//}) + (\hat{\mathbf{e}}_i \cdot \hat{\mathbf{q}}_i) \\ & \cdot (\hat{\mathbf{k}}_s \times (\hat{\mathbf{n}} \times \hat{\mathbf{q}}_i))(1 + R_{\perp}) + (\hat{\mathbf{e}}_i \cdot \hat{\mathbf{p}}_i) \\ & \cdot (\hat{\mathbf{n}} \cdot \hat{\mathbf{k}}_i)(\hat{\mathbf{k}}_s \times \hat{\mathbf{q}}_i)(1 - R_{//}) \end{aligned} \quad (4)$$

其中  $(\hat{\mathbf{p}}_i, \hat{\mathbf{q}}_i, \hat{\mathbf{k}}_i)$  为位置  $\hat{\mathbf{r}}'$  处的局部正交坐标系。 $\hat{\mathbf{q}}_i = \frac{\hat{\mathbf{k}}_i \times \hat{\mathbf{n}}}{|\hat{\mathbf{k}}_i \times \hat{\mathbf{n}}|}$ ， $\hat{\mathbf{p}}_i = \hat{\mathbf{q}}_i \times \hat{\mathbf{k}}_i$ ， $R_{\perp}, R_{//}$  为局部垂直分量与水平

分量对应的垂直与水平 Fresnel 反射系数。针对平面切片，式(3)进一步改写为

$$\hat{\mathbf{E}}_s(r) = \frac{jk \exp(-jkr)}{4\pi r} E_i (\mathbf{I} - \hat{\mathbf{k}}_s \hat{\mathbf{k}}_s) \cdot \hat{\mathbf{F}}(\hat{\mathbf{k}}_i, \hat{\mathbf{e}}_i, \hat{\mathbf{n}}) \cdot I_A \quad (5)$$

极化散射矩阵  $\mathbf{S}$  可得

$$\begin{bmatrix} E_{sh} \\ E_{sv} \end{bmatrix} = \frac{jk \exp(-jkr)}{4\pi r} \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{vh} \\ S_{hv} & S_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{ih} \\ E_{iv} \end{bmatrix} I_A \quad (6)$$

对比式(5)与式(6)可求得

$$S_{pq} = \widehat{\mathbf{F}}(\hat{\mathbf{k}}_i, \hat{\mathbf{e}}_{iq}, \hat{\mathbf{n}}) \cdot \hat{\mathbf{e}}_{sq} \quad (7)$$

其中  $\hat{\mathbf{e}}_{iq}$  与  $\hat{\mathbf{e}}_{sq}$  分别为入射场与散射场的水平或者垂直极化分量，并由于极化分量均与  $\hat{\mathbf{k}}_s$  的方向垂直，因此  $\hat{\mathbf{k}}_s$  对应项可以消除。进一步复反射率矩阵  $\gamma$  可表示为

$$\gamma = \begin{pmatrix} \gamma_{hh} & \gamma_{vh} \\ \gamma_{hv} & \gamma_{vv} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{hh} & S_{vh} \\ S_{hv} & S_{vv} \end{pmatrix} \cdot I_A \quad (8)$$

获知目标表面方向与复介电常数，以及电磁波入射方向与反射方向后，依据式(7)可求取对应的极化矩阵  $\mathbf{S}$ 。其中，取与地面平行的电场分量方向为水平极化方向，取传播方向与电场水平分量确定垂直极化方向。

式(8)中， $I_A = \int \int_A \exp[j(\hat{\mathbf{k}}_i - \hat{\mathbf{k}}_s) \cdot \hat{\mathbf{r}}] d\hat{\mathbf{r}}$ ，主要与形状有关，平面形状的随机性将导致  $I_A$  的随机变换。这里通过粗糙面模型来描述平面起伏的随机性，考虑到建筑物表面较光滑，而背景地表粗糙度较大，本文采用物理光学(Physical Optics, PO)与几何光学(Geometrical Optics, GO)的方法计算光滑平面的散射场与粗糙平面的随机散射场<sup>[4]</sup>，实现过程见文中后续。

结合反射面对应的形状函数  $I_A$ ，可得到目标的散射系数。单次散射与多次散射对应的后向散射计算过程如下。

**2.3.1 单次散射** 对于单次散射系数计算，目标模型网格化后，照射面的入射角不同将导致采样面元的尺寸与位置不同，其成像平面上的投影将覆盖一个或者多个分辨单元(图4)。由于采样面与分辨单元间存在一对多的情况，直接的将其散射强度投影插值到分辨单元中将导致较大误差，从而导致在图像中出现不应当存在的明暗相间的条纹特征。因此须在投影面上进行分解，合理计算采样面对每个分辨单元的散射贡献。

假定  $F_{ij}$  为光栅  $(i, j)$  所对应的采样平面， $F_{ij}$  法向矢量为  $\{n_x, n_y, n_z\}$ ，与斜距平面夹角为  $\alpha$ ， $F_{ij}$  在分辨

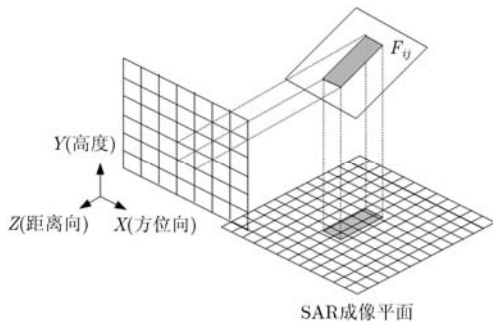


图4 平面片段在成像平面上的投影

单元  $(m_r, n_{xr})$  中的有效投影长度为  $l_x, l_z$ ，则  $F_{ij}$  对分辨单元  $(m_r, n_{xr})$  的形状函数贡献为

$$I_A(m_r, n_{xr}) = \begin{cases} \frac{l_x l_z}{\tan \alpha} \text{sinc}[kl_z] e^{-2jkz_0}, & \alpha \neq 0 \\ l_x \Delta y \text{sinc}\left[\frac{n_x}{n_z} kl_x\right] e^{-2jkz_0}, & \alpha = 0 \end{cases} \quad (9)$$

其中  $\Delta y$  为光栅在  $y$  方向上的采样间隔， $z_0$  为有效投影面的中心坐标。

**2.3.2 多次散射** 文中采用 GO+PO 方法来计算多次散射强度，最后一次散射过程采用 PO 计算，中间过程取 GO 近似。不同于单次散射，多次散射面与成像矩阵间没有直观的对应关系，对此我们先计算面元片段采样管所对应面元的总散射强度，然后根据等效散射区域依据等相位面取平均。

设最后一次反射的入射方向为  $\hat{\mathbf{k}}_i$ ，法相矢量为  $\hat{\mathbf{n}}$ ，传感器接收方向为  $\hat{\mathbf{k}}_s$ 。在不考虑电磁衰减时，射线管的电磁强度由最后一次散射面决定。其中路径中极化转移方程为

$$\hat{\mathbf{e}}_{sr} = \Gamma_{\perp}(\psi)(\hat{\mathbf{e}}_i \cdot \hat{\mathbf{e}}_{\perp})\hat{\mathbf{e}}_{\perp} + \Gamma_{\parallel}(\psi)(\hat{\mathbf{e}}_i \cdot \hat{\mathbf{e}}_{\parallel})\hat{\mathbf{e}}_{\parallel} \quad (10)$$

$\hat{\mathbf{e}}_{\perp}$  与  $\hat{\mathbf{e}}_{\parallel}$  由  $\hat{\mathbf{k}}_i$  与  $\hat{\mathbf{n}}$  确定，获取散射路径后，依据式(10)与式(7)依次计算第  $i$  次反射以及最后一次散射所对应的极化散射矩阵  $\mathbf{S}_i$ ，然后通过多次散射的矩阵相乘可得到总的极化矩阵。

每条射线可视为沿着横截面为矩形的射线管道进行传播，全局坐标系  $(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{y}}, \hat{\mathbf{z}})$  中以初始极化基与传播方向建立局部坐标系  $(\hat{\mathbf{x}}', \hat{\mathbf{y}}', \hat{\mathbf{z}}')$ ，经多次反射对称变换后可得最后一次散射的局部坐标系  $(\hat{\mathbf{x}}^{(n)}, \hat{\mathbf{y}}^{(n)}, \hat{\mathbf{z}}^{(n)})$ 。假设  $\hat{\mathbf{k}}_i$  与  $\hat{\mathbf{k}}_s$  局部坐标系  $(\hat{\mathbf{x}}^{(n)}, \hat{\mathbf{y}}^{(n)}, \hat{\mathbf{z}}^{(n)})$  中的相对矢量为  $\hat{\mathbf{k}}'_i$  与  $\hat{\mathbf{k}}'_s$ ，令  $\hat{\mathbf{p}} = \hat{\mathbf{k}}'_i - \hat{\mathbf{k}}'_s$ ，则最后一次散射所对应多次散射形状函数为

$$I_{Am} = \Delta x \Delta y \cdot \text{sinc}\left[\frac{x_{\hat{\mathbf{p}}} - z_{\hat{\mathbf{p}}} \frac{n_x}{n_z}}{2} k \Delta x\right] \cdot \text{sinc}\left[\frac{y_{\hat{\mathbf{p}}} - z_{\hat{\mathbf{p}}} \frac{n_y}{n_z}}{2} k \Delta y\right] e^{-2jkz} \quad (11)$$

其中  $\Delta x \Delta y$  为射线采样间隔。

进一步分析采样平面片段在成像平面上位置投影。设入射线从等相位面出发，依次经过  $A_1, A_2, \dots, A_N$  点的反射，最后回到等相位面。点散射强度可等效来源于虚拟散射点<sup>[8]</sup>，距离向方位向坐标分别满足

$$R_v = \left( \|\mathbf{OA}_1\| + \|\mathbf{OA}_N\| + \sum_{i=1}^{N-1} \|\mathbf{A}_i \mathbf{A}_{i+1}\| \right) / 2 \quad (12)$$

$$a_v = \sum_{i=1}^N x_{A_i} \quad (13)$$

其中,  $\mathbf{OA}_1$  与  $\mathbf{OA}_N$  为射线入射点与最后一次反射点到等相位面的距离矢量,  $\mathbf{A}_i\mathbf{A}_{i+1}$  为传播路径中相邻反射点构成的距离矢量。此外, 假设某入射点为  $A$ , 跟踪路径为  $A'$ , 反射面法相矢量为  $\hat{\mathbf{n}}, \hat{\mathbf{n}}'$ ,  $B$  为平板上不同于  $A$  的另一点, 则对应递归反射点位置推断为:  $\mathbf{BB}' = \frac{\mathbf{BA}' \cdot \hat{\mathbf{n}}'}{\mathbf{AA}' \cdot \hat{\mathbf{n}}'} \mathbf{AA}'$ , 依次可推断出四边形平板 4 个顶点的等效虚拟散射点(图 5), 进而可获得成像平面上投影范围, 然后根据等相位面对投影区域取平均, 获得散射面对分辨单元  $(r_m, xr_n)$  的强度贡献。

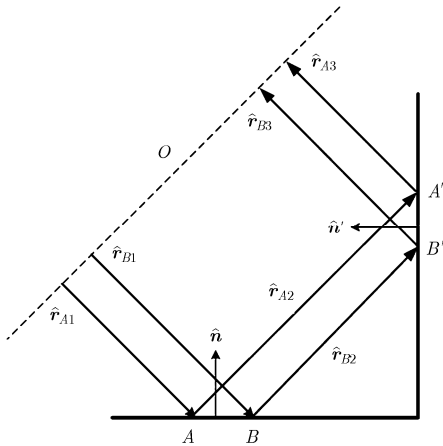


图5 相对散射点坐标计算

依照粗糙面模型, 粗糙面的散射场可划分为相干分量与非相干分量, 分别对应与散射波中的镜反射与漫反射, 在散射场中以均值和方差的形式出现。

假设粗糙面表面高度起伏服从高斯分布, 其均方根高度为  $\sigma$ , 相关长度为  $l$ , 则相干分量可近似为在前述平面单元的 GO 反射基础上乘上粗糙度修正因子:

$$\langle I_A \rangle = I_A \cdot \exp(-4k_n^2 \sigma^2) \quad (14)$$

其中  $k_n$  为  $\hat{\mathbf{k}}_s$  在平面法向方向上的分量。

非相干分量则对应着随机散射场的方差, 可通过总散射场计算得到

$$\sigma_A^2 = \langle I_A I_A^* \rangle - |\langle I_A \rangle|^2 \quad (15)$$

将所有面元片段对应的散射场与随机散射场在成像平面上投影, 相干叠加得到分辨单元  $(r_m, xr_n)$  的反射率系数为

$$\Upsilon(m_r, n_{xr}) = \sum_{\text{facets}} \Upsilon_{\text{single}}(m_r, n_{xr}) + \sum_{\text{facets}} \sum_{\text{times}} \Upsilon_{\text{multiple}}(m_r, n_{xr}) \quad (16)$$

依据式(6)和雷达散射截面定义  $\delta = 4\pi R^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2}$ ,

进一步求得离散化的后向散射系数图。

$$\delta(m_r, n_{xr}) = \frac{k^2}{4\pi} |\gamma(m_r, n_{xr})|^2 \quad (17)$$

## 2.4 SAR 卷积成像

涉及到多频率、多角度的回波信号采样, 完全模拟 SAR 处理过程需耗费大量时间。为提高效率, 可取小角度近似, 假设合成孔径与信号带宽内, 图像分辨单元的散射强度稳定不变, 则 SAR 图像可近似为后向散射系数图与点扩展函数的卷积结果<sup>[13]</sup>。

$$O(r, xr) = \sum_{M_r} \sum_{N_{xr}} \sigma(m_r, n_{xr}) h(r - m_r \Delta r, xr - n_{xr} \Delta xr) \quad (18)$$

其中点扩展函数为

$$h(r, xr) = e^{j2k_0 r} \{ \text{sinc}(\Delta k r) \text{sinc}(k_0 \theta_0 xr) \} \quad (19)$$

式(19)中,  $r$  为距离向,  $xr$  指示交叉距离向,  $r_i$  为第  $i$  像素的距离向深度,  $xr_i$  为交叉距离向对应坐标。 $\sigma(m_r, n_{xr})$  为离散化散射系数图中分辨单元  $(m_r, n_{xr})$  所对应的散射系数。中心频率与带宽分别为  $k_0$  和  $\Delta k$ 。  $\Delta r = R/N_r$ ,  $\Delta xr = XR/N_{xr}$ ,  $R$  与  $XR$  对应于成像平面距离向长度与交叉距离向长度, 其中  $N_r$  与  $N_{xr}$  对应距离向与方位向的脉冲采样频率, 一般取  $h(r, xr)$  的奈奎斯特采样频率 3 到 5 倍。卷积过程可采用快速 FFT 变换完成。

## 3 实验分析

为了验证本文提出的面元投影模型的快速有效性, 选用两组建筑物目标进行了仿真分析。第 1 组实验选取了长 52.8 m, 宽 14.4 m, 高 8 m 的立方体结构的建筑物 MiniSAR 图像, 采用不同的射线采样率生成了仿真结果, 如图 6 所示。雷达观测方向自底向上, 成像参数如表 1。

表1 MiniSAR图像切片相关成像参数

参数	值	参数	值
中心频率	16.8 GHz	极化	HH
带宽	1.77 GHz	地面介电常数	1.5
俯仰角	28°	建筑物介电常数	4.0
方位角	41°	地面粗糙度 $k\sigma$	0.9

图 6 显示了不同射线采样率条件下的建筑物图像仿真所得到的散射系数图。在 2.66 GHz 主频、2 GHz 内存的计算机配置下, 选取射线采用率  $800 \times 800$  的射线跟踪算法耗时为 9.93 s,  $200 \times 200$  的射线跟踪算法耗时为 0.51 s。

从仿真结果中可以看到, 在不考虑相干斑噪声的前提下, 不同采样频率下模拟得到的散射系数图光滑连续, 即目标散射面均匀投影到了成像平面, 验证了面元投影模型的有效性。并且对比图 6(c)、图 6(d)可以看出, 降低射线采样频率虽然会导致仿

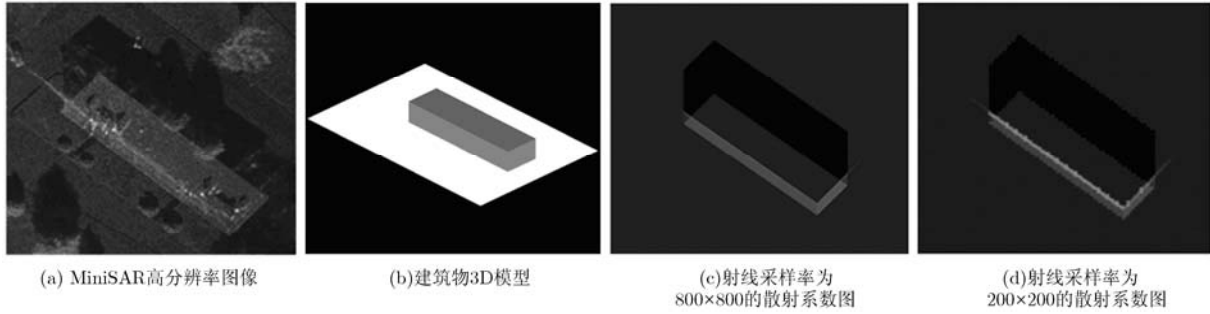


图6 不同射线采样率条件下的平顶建筑物仿真结果对比

真结果的部分模糊，但并不影响目标主要散射特征分析，如地面散射、墙面散射、屋顶散射、地面与墙面构成的二次散射以及阴影特征均能有效模拟。

降低射线采样率能够大幅提高运算速度，反之提高采样率能够保证仿真的精度。图7为不同射线采样率的情况下，仿真图像与真实图像所对应的二次散射线(长边)平均灰度变化趋势。根据测量，真实图像中该灰度比值为1.99，低采样率条件下，二次散射强度偏离真实值较远，然而随着射线采样越密集，仿真得到的灰度比值越接近于真实值。

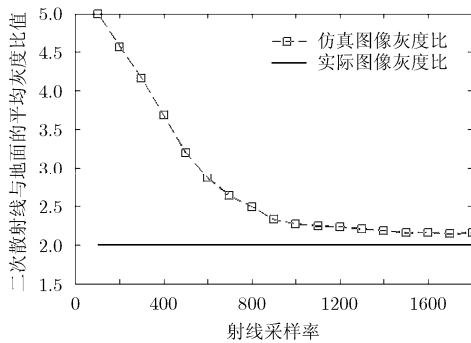


图7 二次散射线与地面的平均灰度比值

该组实验表明，在牺牲较少的仿真精度前提下，可通过降低射线采用频率提高运算速度。同时，也可通过牺牲一定的运算速度来提高仿真精度。其中射线采样率可视为速度与精度的调节阀，依照不同的应用需求选取适当的采样率。

第2组实验则选取了较为复杂的组合建筑物TerraSAR图像，如图8所示。雷达观测方向自东向西，成像参数如表2。

表2 TerraSAR图像切片相关成像参数

中心频率	9.65 GHz	极化	HH
带宽	0.15 GHz	地面介电常数	2
俯仰角	46°	建筑物介电常数	4
方位角	22°	地面粗糙度 $k\sigma$	3

图8(a)为多伦多地区某典型建筑(长160 m，宽148 m，高27 m)所对应的GoogleEarth光学航拍图像，图8(b)，图8(c)为航拍图像对应经纬度的TerraSAR图像切片以及相应仿真成像结果。在2.66 GHz主频、2 GHz内存的计算机配置下，射线采样率800×800时，射线跟踪算法耗时为16.62 s，卷积成像算法耗时为2.54 s。

对比仿真图像与实测图像，其中主要的散射特征匹配良好，如图中L形阁楼与屋顶构成的二面角散射，以及墙面与地面构成的二面角散射，以及建筑物沿距离向形成的阴影均能在几何分布上保持一致。此外由于L型阁楼材质偏向金属，从而导致其二次散射强度高于墙面与地面构成的二次散射强度；由于粗糙度影响，从而导致屋顶平均散射强度高于地面平均散射强度，这些散射特征均能通过仿真结果得以体现。

同时两者间也存在不相似区域，这些匹配误差则来源于模型的细节描述。如模型中采用理想平面拟合了建筑物墙面，忽略了墙面上分布的大量窗体、外置空调等局部布置，从而丢失了二次反射线上的局部强散射现象，以及墙体附近车辆导致的强散射点现象。此类误差可以通过提高模型精细度解决。

该组实验则表明，本文方法针对复杂的建筑物结构同样快速有效。

两组实验仿真结果可以分析得出，本文仿真方法计算速度独立于目标模型的复杂度，在场景区域跨度为百米左右时，标准计算机配置下，总体仿真时间小于1 min，相对于文献[8]中耗时数分钟以及文献[15]中耗时数小时的SAR成像算法，在速度上有较大优势。同时，仿真结果能够较好地体现图像的主要散射特征，结果图像质量较高，其精度能够满足SAR图像理解等应用。

#### 4 结束语

本文提出了一种采用面元投影的快速建筑物

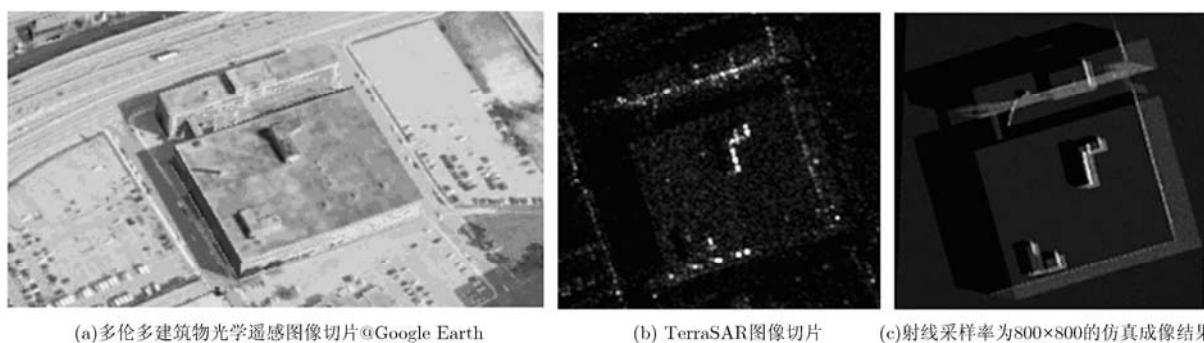


图8 组合建筑物 SAR 图像切片以及对应的仿真成像结果

SAR 成像仿真方法。该仿真方法简洁有效，通过降低射线密度提高了仿真速度，同时采用面元投影模型减少了散射系数投影过程中的插值误差，能够实现复杂建筑物图像的快速仿真。后续实验表明，该方法在速度与精度间的平衡过程中有着较佳的调节能力，对于城区 SAR 图像交互式解译有着重要作用，并可进一步用于建筑物目标提取等应用。此外，文中 PO+GO 的方法能够有效计算光滑表面与大粗糙度表面散射场，但不适用于微粗糙等其它边界条件下的表面散射解析分析，相关的辐射精度研究工作将在后续中展开。

### 参考文献

- [1] 王国军, 邵芸, 张风丽. 城市建筑物 SAR 图像模拟综述[J]. 遥感信息, 2012, 27(4): 116-122.  
Wang Guo-jun, Shao Yun, Zhang Feng-li, et al. Review of SAR image simulation for urban buildings[J]. *Remote Sensing Information*, 2012, 27(4): 116-122.
- [2] Balz Timo and Stilla Uwe. Hybrid GPU-based single- and double-bounce SAR simulation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(10): 3519-3529.
- [3] Margarit G, Mallorqui J J, and Lopez-Martinez C. GRECOSAR, a SAR simulator for complex targets: application to urban environments[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Barcelona, Spain, 2007: 4160-4163.
- [4] He Zhi-hua, He Feng, Dong Zhen, et al. Real-time raw-signal simulation algorithm for InSAR hardware-in-the-loop simulation applications[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(1): 134-138.
- [5] Franceschetti G, Iodice A, Riccio D, et al. SAR raw signal simulation for urban structures[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(9): 1986-1995.
- [6] Zhang Fan, Li Zheng, Wang Bing-nan, et al. Hybrid general-purpose computation on GPU (GPGPU) and computer graphics synthetic aperture radar simulation for complex scenes[J]. *International Journal of Physical Sciences*, 2012, 7(8): 1224-1234.
- [7] Brunner D, Lemoine G, Bruzzone L, et al. Building height retrieval from VHSAR imagery based on an iterative simulation and matching technique[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(3): 1487-1504.
- [8] Auer S, Hinz S, and Bamler R. Ray-tracing simulation techniques for understanding high-resolution SAR images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(3): 1445-1456.
- [9] Chen Hong-zhen, Zhang Yue-ting, Wang Hong-qi, et al. SAR imaging simulation for urban structures based on analytical models[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(6): 1127-1131.
- [10] Tang Kan, Sun Xian, Sun Hao, et al. A geometrical-based simulator for target recognition in high-resolution SAR images[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(5): 958-962.
- [11] Dominik B, Guido L, Harm G, et al. Radar imaging simulation for urban structures[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(1): 68-72.
- [12] Balz T and Haala N. Improved real-time SAR simulation in urban areas[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Denver, CO, 2006: 3631-3634.
- [13] Rainer S, Paolo T, and Helmut S. An end-to-end simulator for high-resolution spaceborne SAR systems[C]. Conference on Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XIV, Orlando, FL, 2007, 6568: 65680H1-65680H8.
- [14] Franceschetti G, Iodice A, and Riccio Iodice D. A canonical problem in electromagnetic backscattering from buildings[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(8): 1787-1801.
- [15] Bhalla R and Hao Ling. A fast algorithm for signature prediction and image formation using the shooting and bouncing ray technique[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1995, 43(7): 727-731.

熊文昌: 男, 1985 年生, 博士生, 研究方向为 SAR 图像仿真和 SAR 图像理解。

王宏琦: 男, 1964 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为遥感图像处理及目标识别。

唐侃: 女, 1984 年生, 博士生, 研究方向为 SAR 图像仿真和 SAR 图像理解。