

基于射线管分裂方法的 SAR 场景快速消隐技术

董纯柱^{*①②} 殷红成^{①②} 王超^②

^①(中国传媒大学信息工程学院 北京 100024)

^②(电磁散射重点实验室 北京 100854)

摘要: SAR 场景模型常采用非均匀三角网格描述,使得传统的基于 Z-Buffer 技术的消隐算法难以在保持较高的消隐精度的同时兼顾消隐效率。该文提出了一种基于射线管分裂方法的 SAR 场景快速消隐技术,将复杂 SAR 场景的消隐问题分解为两个简单过程:一是对场景三角网格在发射平面上的投影点云做 2 维 Delaunay 三角网格划分,二是基于射线管分裂方法对新生网格可见性进行判断和拓扑重构。典型飞机目标和草地上 T-72 坦克的消隐结果验证了该方法的准确性和高效性。

关键词: 消隐算法; 射线管分裂方法; Delaunay 三角剖分; Z-Buffer 算法; SAR 场景

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2012)04-0436-05

DOI: 10.3724/SP.J.1300.2012.20064

A Fast Hidden Surface Removal Approach for Complex SAR Scene Based on Adaptive Ray-tube Splitting Method

Dong Chun-zhu^{①②} Yin Hong-cheng^{①②} Wang Chao^②

^①(Information Engineering School, Communication University of China, Beijing 100024, China)

^②(National Electromagnetic Scattering Laboratory, Beijing 100854, China)

Abstract: Traditional hidden surface removal algorithm based on hardware Z-Buffer technique cannot give attention to precision or efficiency at the same time when dealing with the non-uniform triangulated SAR (Synthetic Aperture Radar) scene model. A novel high-precision hidden surface removal approach using fast ray-tube splitting algorithm is proposed, where the SAR scene hidden surface removal problem is decomposed into two simple procedures, *i.e.* a Delaunay triangulator is used to generate the initial ray tubes from the projected point clouds of all incident visible vertices, then an adaptive ray-tube splitting method is adopted to carry out the complex scene shading situations and resultant visible model reconstruction. Simulation results of typical aircraft and T-72 tank show that, the new approach is feasible and effective.

Key words: Hidden surface removal algorithm; Ray-tube splitting method; Delaunay triangulation; Z-Buffer algorithm; SAR (Synthetic Aperture Radar) scene

1 引言

对基于模板匹配的 SAR 图像解译而言, SAR 图像中特有的透视收缩、叠掩和阴影等几何畸变特性是重要且稳定的识别特征^[1]。在低擦地角($10^\circ \sim 30^\circ$)条件下,高分辨率 SAR 图像表现出尤为明显和完整的阴影特征^[2]。地面目标 SAR 图像的阴影主要由地面目标的自遮挡阴影和目标-环境间的互遮挡阴影两部分组成。为准确仿真地面目标的散射特性和 SAR 图像中的阴影特征,不可避免地要事先确

定在给定向入射方向上地面目标以及环境表面的可见和不可见区域,即进行面消隐处理。

目前,常用的面消隐算法包括 Z-Buffer 算法、区间扫描线算法、BSP 树算法、区域细分算法、射线投射算法等。其中,以 Z-Buffer 算法和射线投射算法的应用最为广泛^[3,4]。借助显卡(GPU)强大的渲染和并行计算能力, Z-Buffer 算法和射线投射算法能够以秒级实现单个角度上百万量级均匀三角网格模型的消隐运算^[5]。然而,在高分辨条件下,若采用均匀三角网格对复杂目标和几百米甚至几公里的环境表面进行剖分,将产生千万甚至上亿量级的网格面元,消隐运算效率极低。为了提高 SAR 场景模型的消隐效率,必须大幅度减少网格面元的数量。

2012-09-11 收到, 2012-11-14 改回; 2012-12-10 网络优先出版

国家部委基金资助课题

*通信作者: 董纯柱 dongcz207@gmail.com

一种可行的方法是采用非均匀三角网格(或 TIN 网格)对 SAR 场景模型进行剖分,在不明显降低模型精度的条件下产生最少数量的面元网格。因此,解决非均匀三角网格模型的快速消隐问题是实现 SAR 场景快速消隐的关键。

本文融合区域细分算法和射线投射算法思想,在基于 kD-tree 的非均匀三角网格模型 GPU 快速射线追踪^[6,7]的基础上,将非均匀三角网格模型描述的 SAR 场景消隐问题分解为对场景网格在发射平面上的投影点云做 2 维 Delaunay 三角剖分^[3],以及基于射线管分裂方法对新生网格可见性进行判断和拓扑重构两个简单过程,实现了复杂场景的精确快速消隐计算。以飞机和草地上 T-72 坦克为例,消隐计算结果表明,本文方法能够实现复杂 SAR 场景实时/准实时的准确消隐,为快速获取 SAR 图像阴影等几何畸变特性以及目标-环境的电磁散射特性提供了高效预处理工具。

2 基于射线管分裂方法的 SAR 场景快速消隐

考虑到 SAR 场景是由非均匀三角网格描述的,基于射线管分裂方法的 SAR 场景快速消隐计算主要包括如下 3 个步骤:

(1) 发射面点云数据生成:沿入射方向对 SAR 场景进行自遮挡判断,并将自遮挡可见顶点投影到发射面上形成 2 维点云数据;

(2) 点云数据三角网格剖分:构建发射面点云数据 2 维凸包,并实现带凸包的 Delaunay 三角剖分,形成初始射线管;

(3) 网格模型可见性判断及拓扑重构:根据射线管与目标的相交情况,对射线管执行自动分裂,并根据细分射线管与场景网格的相交关系重构场景可见三角网格。

采用本文方法识别两个空间三角面片 f_1 和 f_2 相交遮挡部分(虚点区域)的过程如图 1 所示。

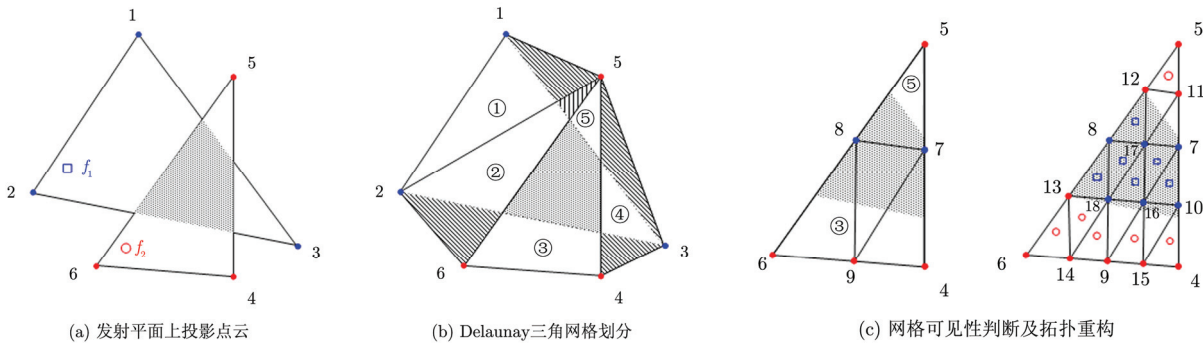


图 1 基于射线管分裂方法的 SAR 场景消隐示意图

2.1 发射面点云数据生成

为加速反射面点云生成过程,沿入射方向对三角网格进行自遮挡判断,即判断三角形面元正法向 \hat{n}_i 与入射方向 \hat{i} 夹角 α 的余弦

$$\cos \alpha = -(\hat{i} \cdot \hat{n}_i) = -\hat{i} \cdot \frac{(\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1) \times (\mathbf{v}_3 - \mathbf{v}_1)}{|(\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1) \times (\mathbf{v}_3 - \mathbf{v}_1)|} \quad (1)$$

当 $\cos \alpha > 0$ 时面元自遮挡可见,否则面元自遮挡不可见。式中, $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2$ 和 \mathbf{v}_3 为三角形顶点位置矢量,如图 2 所示。

将自遮挡可见面元各顶点组成的 3 维点云 $\mathbf{V}_s = \{\mathbf{v}_i^s | 1 \leq i \leq n_s\}$ 投影到如图 3 所示的预设发射平面 T_i 上,形成发射面点云数据 $\mathbf{V}'_s = \{\mathbf{v}'_i | 1 \leq i \leq n_s\}$,并且

$$\mathbf{v}'_i = \mathbf{v}_i - (\hat{i} \cdot \mathbf{v}_i) \hat{i} \quad (2)$$

其中, n_s 为可见顶点个数,发射平面 T_i 上的点 P_i 由远离场景的固定点 P_0 和面法向 \hat{i} 确定, P_0 如下:

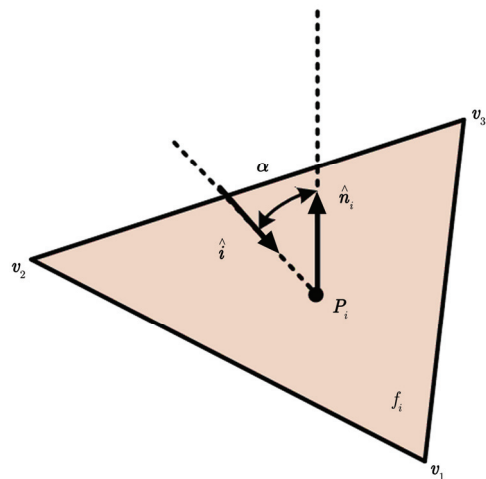


图 2 三角网格自遮挡判断

$$\mathbf{P}_0 = \mathbf{P}_c + d_{\text{Box}} \hat{i} \quad (3)$$

式中, \mathbf{P}_c 为场景模型的几何中心, d_{Box} 为场景模型包围球的直径。

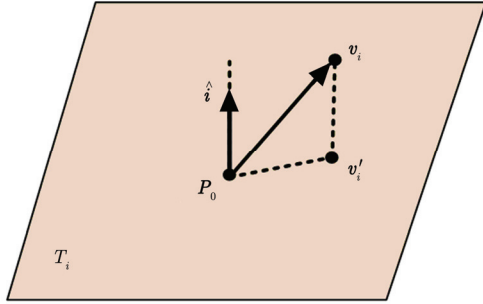


图3 可见顶点在发射面上投影示意图

2.2 点云数据三角网格剖分

为能够对发射面点云数据进行带凸包的 2 维 Delaunay 三角剖分, 首先需要建立如图 4 所示的发射面局部坐标系 $\{\hat{x}_c, \hat{y}_c; P_0\}$, 并将 3 维点云数据转换为局部坐标系下的 2 维点云数据 $V_s^c = \{v_i^c(x_i^c, y_i^c) | 1 \leq i \leq n_s\}$, 其中

$$\begin{cases} x_i^c = (v_i' - OP_0) \cdot \hat{x}_c \\ y_i^c = (v_i' - OP_0) \cdot \hat{y}_c \end{cases} \quad (4)$$

计算 2 维有限点云数据 2 维凸包(Convex Hull)的算法很多^[3,4], 这里不再赘述。本文采用时间复杂度为 $O(n \log n)$ 的分而治之算法^[8]实现发射面点云

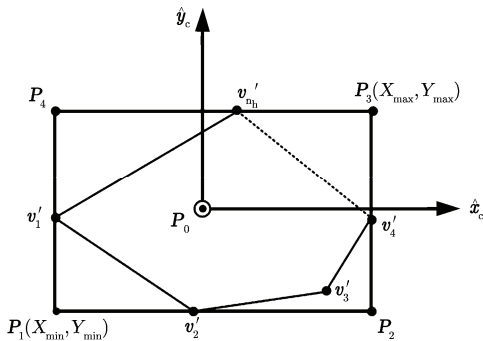


图4 发射面点云数据 2 维凸包构建示意图

数据 2 维凸包 $V_h = \{v_i | 1 \leq i \leq n_h\}$ 的快速构建, 其中 n_h 为凸包顶点个数。

三角剖分的一般要求是不存在长而薄的三角形(Slivers)。Delaunay 三角剖分是一种使最小角具有最大值的方法, 能够最大限度地减少狭长三角形的数量^[3]。为改进凸包边界附近的三角形的性态, 在进行 Delaunay 三角剖分前, 先求取如图 4 所示的 2 维凸包 V_h 的最小包围矩形; 然后按 d_h 对构成包围矩形的 4 条边界 P_1P_2, P_2P_3, P_3P_4 和 P_4P_1 进行均匀细分, 生成细分边界点 $V_s^b = \{v_i^b | 1 \leq i \leq n_b\}$, 其中 n_b 为细分边界点个数, 且

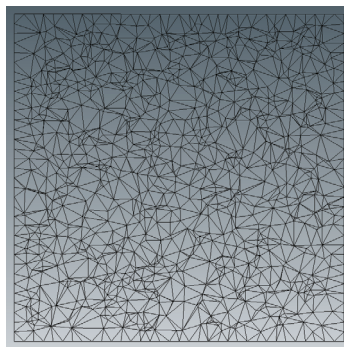
$$d_h = \sqrt{(X_{max} - X_{min}) \cdot (Y_{max} - Y_{min})} / n_s \quad (5)$$

式中, $X_{max}, X_{min}, Y_{max}$ 和 Y_{min} 分别为 2 维凸包在 \hat{x}_c 和 \hat{y}_c 方向的最大和最小值。

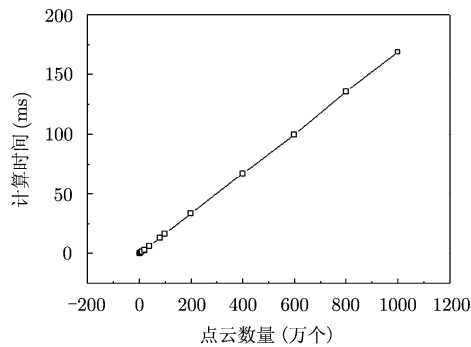
为实现对有界点云数据 $V_{ab} = \{V_s^a, V_s^b\}$ 的高效 Delaunay 三角剖分, 可以采用 J. R. Shewchuk 的三角剖分算法^[9,10]。带矩形边界 2 维点云数据的 Delaunay 三角剖分结果和剖分效率如图 5 所示。

2.3 网格模型可见性判断及拓扑重构

为实现对非均匀网格描述的 SAR 场景模型的精确消隐处理, 首先需要基于发射面点云数据 Delaunay 三角剖分结果生成初始射线管, 在 GPU 上采用 OptiX 射线追踪引擎^[5]完成射线管顶点射线的自动射线追踪, 并根据射线管顶点射线与非均匀网格的相交关系进行自动射线管分裂。本文采用的射线管自动分裂方法如图 1(c)所示, 阈值 $0.01\lambda^2 \leq S_{min} < 0.25\lambda^2, 0 < A_{max} \leq 10^\circ$, 并且 S_{min} 和 A_{max} 越小, 消隐精度越高, 计算量也越大。精度和效率折中考虑, S_{min} 和 A_{max} 经验值分别为 $0.04\lambda^2$ 和 6° 。对于每次分裂得到的 4 个细分射线管仅需追踪由原始射线管 3 边中点生成的 3 根新增射线。完成所有射线管的自动分裂计算后, 即可获得全部可见射线管



(a) 1000 个 2 维点云三角剖分结果



(b) 2 维点云三角剖分效率

图5 矩形边界 2 维点云 Delaunay 剖分结果和效率

$T_v = \{t_i^v(t_{i1}, t_{i2}, t_{i3}) | 1 \leq i \leq n_t\}$ 在网格模型面元上的第 1 个交点数据集 $P_v = \{p_i^v | 1 \leq i \leq n_p\}$ 。其中, n_t 为全部可见射线管个数; n_p 为可见射线管与面元模型的第 1 个交点个数; t_{i1} , t_{i2} 和 t_{i3} 为可见射线管第 1 个交点索引, 且 $1 \leq t_{i1}, t_{i2}, t_{i3} \leq n_p$ 。因此, 重建的消隐处理后的 SAR 场景的可见三角网格模型由线性表表示为

$$M_v = \{T_v, P_v\} \quad (6)$$

射线管顶点射线与非均匀网格的相交具体包括下面 4 种情况:

- (1) 若 3 根射线与网格模型无交点或射线管的面积小于阈值 S_{\min} , 判定为无效射线管, 直接丢弃;
- (2) 若 3 根射线的第 1 个交点均位于同一面元上, 判断为全部可见射线管, 不再分裂;
- (3) 若 3 根射线的第 1 个交点位于同一部件的不同面元上, 且面元法向间夹角小于阈值 A_{\max} , 判断为全部可见射线管, 不再分裂;
- (4) 除上述 3 种情形外, 都判断为部分可见射线管, 需要进行分裂。

3 算例和分析

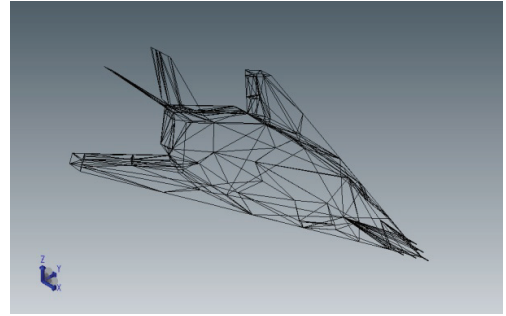
下面用飞机目标和地面上 T72 坦克的消隐计算实例验证本文方法的正确性、高效性和实用性。仿真硬件平台为搭载 NVIDIA Quadro FX 5800 4GB GDDR3 显存图形卡的 HP Z800 工作站。

3.1 飞机目标

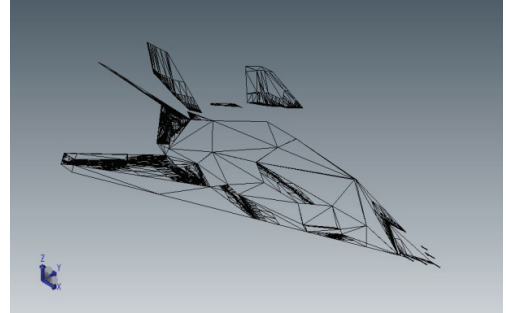
如图 6(a)所示, 飞机总体尺寸为 $20.09 \text{ m} \times 13.2 \text{ m} \times 2.33 \text{ m}$, 其非均匀三角网格模型由 423 个顶点和 842 个三角形面元构成。图 6(b)为取 $S_{\min} = 43.3 \text{ mm}^2$, $A_{\max} = 6^\circ$, 沿 $(\theta_i = 75^\circ, \phi_i = -60^\circ)$ 入射, 经消隐重构的由 44,139 个顶点和 64,272 个三角形面元构成的可见网格模型, 消隐处理时间为 1.033 s。如果将飞机按 10 mm 尺寸剖分(三角形面积约为 S_{\min}), 将生成由 2,608,529 顶点和 5,217,248 面元构成的均匀三角网格模型, 而在同样角度下采用基于硬件的 Z-Buffer 算法消隐计算时间为 0.841 s, 消隐结果如图 6(c)所示。可见, 本文算法能够在达到硬件 Z-Buffer 算法消隐效率和精度的同时, 重构更少面元数量(约为均匀剖分时的 1.23%)的可见三角网格模型供后续电磁散射计算使用, 并在完成 SAR 场景消隐处理的同时完成了场景的射线追踪, 因此必将显著提高 SAR 场景电磁特性预估效率。

3.2 草地上 T-72 坦克

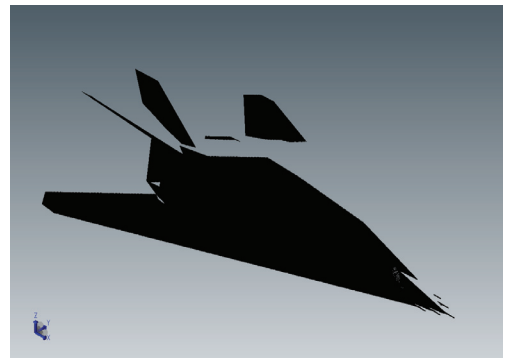
对 SAR 场景消隐重构可见三角网格模型的一个最直接的应用是高效仿真用于阴影区边界确定和



(a) 非均匀网格模型



(b) 非均匀三角网格模型本文方法消隐结果



(c) 均匀三角网格模型 Z-Buffer 算法消隐结果

图 6 复杂飞机目标消隐处理结果

姿态估计的非相干阴影模板图像。图 7 给出了采用本文方法快速获取的草地上 T-72 坦克在 73° 入射角 0.2 m 分辨率 128×128 像素、方位角间隔为 45° 的非相干阴影模板图像, 其中目标、地面和阴影区域的像素亮度分别为 255, 127 和 0。T-72 场景由 18,309 顶点和 35,317 三角形面元构成, 其单幅图像的仿真时间仅为 0.2 s, 1~2 min 即可完成方位角间隔 1° 全方位模板图集仿真。可以看出, 非相干阴影图像准确重现了给定角度下目标在环境上的稳定和完整阴影特性。

4 结论

本文提出的基于射线管分裂方法的 SAR 场景快速消隐技术有效融合了区域细分算法和射线投射

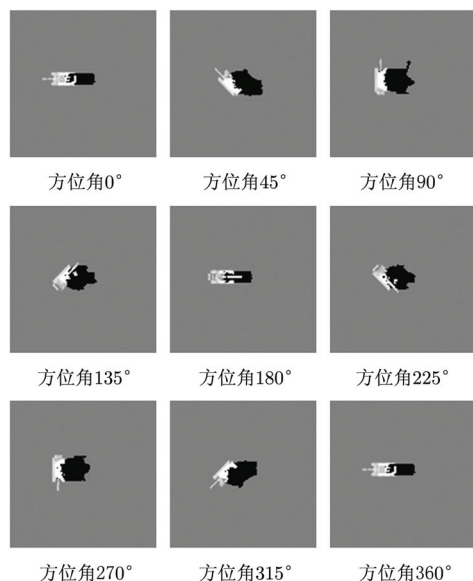


图7 草地上 T-72 坦克在 73° 入射角、0.2 m 分辨率、128 像素 \times 128 像素非相干阴影图像

算法思想, 能够解决采用非均匀三角网格描述的 SAR 场景模型的精确快速消隐问题。消隐重构的可见三角网格模型能够直接用于 SAR 场景非相干阴影模板图像仿真, 射线管分裂结果亦可直接用于 SAR 场景电磁散射特性计算, 从而显著提高复杂目标电磁特性预估以及 SAR 模板图像的仿真效率。

参考文献

- [1] Oliver C J, Quegan S, Ward, I A 等著, 丁赤飏等译. 合成孔径雷达图像理解[M]. 电子工业出版社, 2009.
Oliver C J, Quegan S, Ward, I A, *et al.*, translated by Ding Chi-biao, *et al.* Synthetic Aperture Radar Image Interpretation[M]. Publishing House of Electronics Industry, 2009.
- [2] Ross T D, Bradley J J, Hudson L J, *et al.* SAR ATR: so what's the problem? An MSTAR perspective[C]. SPIE Conference on Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery, Orlando, Florida, April 1999, 3721: 662–672.

作者简介

董纯柱(1981—), 男, 河南信阳人, 工程师, 现为中国传媒大学电磁场与微波技术专业在职博士生, 主要研究兴趣为 SAR 图像解译和电磁散射理论计算。

- [3] 和青芳. 计算机图形学原理及算法教程(Visual C++版)[M]. 清华大学出版社, 2010.
He Qing-fang. Principle and Algorithm on Computer Graphics(Visual C++ Edition)[M]. Publishing House of Tsinghua, 2010.
- [4] Schneider P J and Eberly D H 著, 周长发译. 计算机图形学几何工具算法详解[M]. 电子工业出版社, 2005.
Schneider P J and Eberly D H, translated by Zhou Chang-fa. Geometric Tools for Computer Graphics[M]. Publishing House of Electronics Industry, 2005.
- [5] Parker S G, Bigler J, Dietrich, A *et al.* OptiX: a general purpose ray tracing engine[C]. ACM Transactions on Graphics, New York, July 2010, 29(4): 1–13.
- [6] Wang Pan, Liu Hua-hai, and Li Si-kun. Multi-GPU Compositeless parallel rendering algorithm[C]. 12th International Conference on Computer-Aided Design and Computer Graphics, Shenzhen university, December 2011, 66: 103–107.
- [7] Zhang Chang-gong, Xi Ping, and Zhang Chao-xin. CUDA-based volume ray-casting using cubic b-spline[C]. International Conference on Virtual Reality and Visualization, Renmin University, October 2011, 10: 84–88.
- [8] Shih Min, Chiu Yung-Feng, Chen Ying-Chieh *et al.* Real-time ray tracing with CUDA[C]. Lecture Notes in Computer Science, Berlin Heidelberg, 2009, 5574: 327–337.
- [9] Balciunas D A, Dullely L P, and Zuffo M K. GPU-assisted ray casting of large scenes[J]. *IEEE Symposium on Interactive Ray Tracing*, 2006, 18(20): 95–103.
- [10] Dwyer R A. A faster divide-and-conquer algorithm for constructing delaunay triangulations[J]. *Algorithmica*, 1987, 2(2): 137–151.
- [11] Shewchuk J R. Triangle: Engineering a 2D quality mesh generator and delaunay triangulator[J]. *Applied Computational Geometry: Towards Geometric Engineering*, 1996, 1148: 203–222.
- [12] Shewchuk J R. Delaunay Refinement algorithms for triangular mesh generation[J]. *Computational Geometry: Theory and Applications*, 2002, 22(1–3): 21–74.

殷红成(1967—), 男, 江西余江人, 研究员, 专业总师, 博士生导师, 主要研究兴趣为电磁散射、雷达目标特性、目标识别等。

王超(1979—), 男, 陕西西安人, 高工, 博士, 主要研究兴趣为电磁散射、雷达目标特性和数值计算等。