

# 复杂环境影响下雷达探测范围三维可视化

邱航, 陈雷霆, 蔡洪斌

(电子科技大学计算机科学与工程学院 成都 610054)

**【摘要】**提出了一种复杂环境影响下的雷达探测范围三维可视化方法。该方法以雷达方程为基础, 主要考虑地形和电磁干扰影响下的雷达探测范围三维可视化。首先利用均匀采样法建立自由空间中的雷达探测范围模型, 然后在获取数字地形高程的前提下, 基于光的直线传播原理提出一种雷达探测范围受地形影响的算法, 并实现了地形影响下的雷达探测范围三维可视化; 以干扰方程为基础, 实现了多干扰源情况下雷达探测范围三维可视化。利用基于视点的雷达模型简化方法, 有效地提高了绘制速度。实验结果表明, 该方法不仅效率高, 而且能真实直观地展现雷达探测范围。

**关键词** 三维可视化; 细节层次; 雷达探测范围; 地形

中图分类号 TN957.53; TP391

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2010.05.018

## 3D Visualization of Radar Detection Range in Complicated Environment

QIU Hang, CHEN Lei-ting, and CAI Hong-bin

(School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

**Abstract** A method about 3D visualization of radar detection range in complicated environment is presented. Based on the formula of radar, this method considers the influence of terrain and electronic jamming. First, a radar detection range model in the free space is built by using uniform sampling method, and then according to the terrain elevation around the radar, an algorithm of 3D visualization of radar detection range is proposed to represent the 3D radar detection range affected by terrain. Based on jamming formula, the radar detection range considering the influence of multi-electronic jamming is implemented. Besides, by using view-dependent simplification of model the speed of rendering is improved. The result of experiment shows that this method not only is efficient but also can visualize radar detection range.

**Key words** 3D visualization; level of detail; radar detection range; terrain

雷达电磁环境是一种无形的环境, 看不见、摸不着, 并且呈现出动态多样性。如何将雷达电磁信息更形象地展现出来是一个极具挑战的课题。从雷达出现开始, 人们就致力于以图形图像的方式表现雷达信息。文献[1]提供了LOBE PLOT程序, 计算和绘制考虑多路径干涉的雷达垂直平面威力图。美国海军研究室的SIG PLOT程序<sup>[1]</sup>绘制了另一种形式的多径曲线。这些是最早的雷达性能图像表现, 但都是以二维曲线的形式给出雷达威力图, 不够直观, 很多信息不能表现出来。文献[2]根据干扰区域边界曲线的连续性, 给出了作战态势处理系统中多对一情况下, 掩护运动目标和掩护固定目标时干扰区域的绘制算法, 但仍然只是一种二维的表现方式。文献[3]根据雷达本身的各种技术参数和获取的外界参数, 计算出雷达的探测范围, 通过Matlab绘制雷达

探测范围。文献[4]给出了单部雷达从垂直探测范围图到三维探测范围图的转换算法, 利用OpenGL绘制雷达的三维探测范围, 但没有考虑复杂(尤其是环境)因素对雷达的影响。上述研究仅限于雷达在非自由空间中的二维表现, 或自由空间中的三维表现。

随着计算机及可视化技术的发展, 雷达探测范围的三维表达方式得到了进一步提高。文献[5]利用雷达方程研究雷达探测范围受大气折射的影响, 在GIS上表现了单部雷达和雷达组网时探测范围在不同高度的二维视图, 不过其三维表现是采用叠加不同高度的二维雷达探测范围图实现的。文献[6]以自由空间中雷达作用范围为基础, 研究单峰对雷达作用范围的影响, 给出了地形影响下雷达的三维作用范围表现算法。文献[7]通过获取雷达波损失三维数据场, 然后利用硬件加速的等值面提取算法抽取一

收稿日期: 2009-03-05; 修回日期: 2010-06-12

基金项目: 国家863计划(2007AA010407); 部级预研项目

作者简介: 邱航(1964-), 男, 博士生, 主要从事计算机图形学、数字媒体技术等方面的研究。

定阈值的等值面，再将其表现到战场环境中。文献[6-7]仅仅考虑了单个雷达的情况，没有给出雷达数量增加后的处理方式。文献[8]提出了基于抛物线方程的雷达探测范围三维建模，并给出考虑因素较为全面的雷达电磁波传输衰减数学模型。但该方法的计算开销大，在实际应用中不易实现。

本文给出了一种复杂环境影响下的雷达探测范围三维可视化方法，重点考虑地形、电子干扰对雷达探测范围的影响，以及如何提高绘制效率等问题，取得了很好的效果。

## 1 雷达探测范围模型的建立

在自由空间中，当不考虑任何环境影响时，雷达最大作用距离由以下的雷达方程<sup>[9]</sup>决定：

$$R_{\max} = \left[ \frac{P_t G_t G_r \sigma \lambda^2 F_t^2 F_r^2}{(4\pi)^3 k T_s D_0 C_b L} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

式中  $P_t$  为发射功率； $G_t$  为发射天线功率增益； $G_r$  为接收天线功率增益； $\tau$  为脉冲带宽； $\sigma$  为雷达目标截面积； $\lambda$  为波长； $k$  为波尔兹曼常数； $T_s$  为接收系统噪声温度； $D_0$  为检测因子； $C_b$  为带宽校正系数； $L$  为系统损耗因子； $F_t$  为发射天线到目标的方向图传播因子； $F_r$  为目标到接收天线的方向图传播因子。 $F_t$  和  $F_r$  说明目标不在波束最大值方向上 ( $G_t$  和  $G_r$  是最大值方向上的增益) 时，以及在非自由空间传播时的多径传播的影响。

雷达探测范围实际上是雷达对目标进行连续观察的区域，由雷达在各方位角和俯仰角方向上的最大作用距离决定。假设雷达的扫描方式为全方位扫描，设定在俯仰角方向采样次数为  $elSampleCnt$ ，在方位角方向采样次数为  $azSampleCnt$ 。另设雷达的俯仰角为  $\theta$ ，方位角为  $\beta$ 。由式(1)可知， $R_{\max}$  中已经包括了俯仰角上的方向图系数，由于雷达为全方位扫描，方位角上的方向图系数为1，所以  $R_{\max}$  是关于  $\theta$  和  $\beta$  的函数。

本文通过对雷达的俯仰角和方位角进行采样，求出对应俯仰角和方位角上的最大作用距离，得到边界采样点在雷达坐标系的坐标，再与雷达在世界坐标系的坐标相加，从而得到边界采样点在世界坐标系的坐标。将得到的边界采样点按照一定的方式连接起来，形成雷达探测范围模型。

建立雷达探测范围模型的具体步骤如下。

(1) 存储采样点最大作用距离及坐标

定义一个二维数组 `float Distance[elSampleCnt][azSampleCnt]` 用于存储对应于每个采样点的最大作

用距离。定义一个结构体存储采样点的坐标 `struct Vertex{float x, float y, float z}`，以及一个二维数组存储每个采样点的坐标 `Vertex FixBound [elSampleCnt][azSampleCnt]`，采样点坐标为：

$$\begin{cases} \text{FixBound}[i][j].x = \text{Distance}[i][j] \cos \theta \cos \beta \\ \text{FixBound}[i][j].y = \text{Distance}[i][j] \sin \theta \\ \text{FixBound}[i][j].z = \text{Distance}[i][j] \cos \theta \sin \beta \end{cases} \quad (2)$$

式中  $0 \leq i < elSampleCnt$ ； $0 \leq j < azSampleCnt$ ； $\theta$  为对应的俯仰角； $\beta$  为对应的方位角。由此得到以雷达为原点的雷达坐标系中边界点的坐标。

(2) 存储采样点在世界坐标系中的坐标

假设雷达在世界坐标系中的坐标为  $(x_0, y_0, z_0)$ ，定义一个数组用于存储采样边界点在世界坐标系中的坐标 `Vertex Bound[elSampleCnt][azSampleCnt]`，则其值为：

$$\begin{cases} \text{Bound}[i][j].x = \text{FixBound}[i][j].x + x_0 \\ \text{Bound}[i][j].y = \text{FixBound}[i][j].y + y_0 \\ \text{Bound}[i][j].z = \text{FixBound}[i][j].z + z_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中  $0 \leq i < elSampleCnt$ ； $0 \leq j < azSampleCnt$ 。

为了提高效率，本文重新定义了一个数组存储采样边界点在世界坐标系中的坐标，而不是用原来的数组存储。当雷达在虚拟场景中漫游时，雷达坐标发生了改变。而边界采样点在雷达坐标系中的坐标没有发生改变。由于已经事先将它们存储在数组 `FixBound` 中，因此只需用式(3)更新边界点在世界坐标系中的坐标即可，不用重新计算边界点在雷达坐标系中的坐标，避免了多次计算三角函数，大大提高了效率。文献[6]直接计算采样点在世界坐标系的坐标，在场景中漫游时，每次都要计算采样点在世界坐标系的坐标，会有大量的重复的三角函数计算，降低了效率。

(3) 绘制采样点组成的三角形带

用三角形带将相邻的3个顶点用三角形连接填充，完成对由采样点围成的雷达探测范围的绘制。

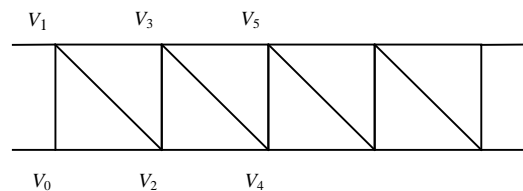


图1 雷达探测范围表现的绘制网格

## 2 地形影响下的雷达探测范围可视化

在传播过程中，雷达电磁波会受到地形或建筑物的遮挡，此时雷达的探测范围会受到很大的影响，

因此在进行雷达探测范围三维可视化时, 地形的影响是不可忽略的。

图2给出了某个方位角方向上的地形截面和探测范围截面, 由于受到地形遮挡的影响, 雷达的探测范围应该修正为黑色填充区域。雷达位于原点O处, 黑色弧线AB为地形影响前的雷达作用范围, ACDEB为受到地形影响后的雷达探测范围。从A点开始, 雷达开始受到地形的影响, 由于山坡AC的遮挡, 原来黑色的范围调整到AC。在山峰C之后, CD下方的区域由于受到AC的遮挡, 电磁波无法传播, 所以雷达只能探测到CD以上的范围; 在D点遇到更高的山坡DE, 所以相应地也调整至DE处; BE下方的区域也由于山峰的遮挡, 电磁波无法到达, 所以雷达也只能探测到BE上方的区域。

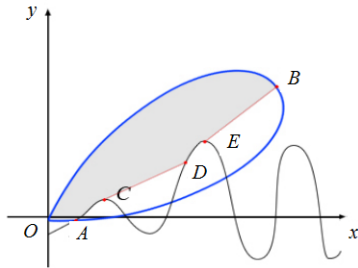


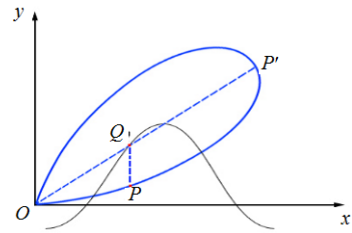
图2 探测截面和地形截面图

基于光的直线传播原理, 本文提出了一种雷达探测范围受地形影响的算法, 步骤如下:

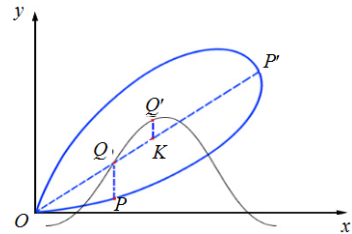
- (1) 获取一个未处理的采样点P, 求解该采样点对应的地形高程点Q。如果采样点位于对应地形高程点上方, 执行步骤(7); 否则执行步骤(2)。
- (2) 计算得到射线OQ所对应的俯仰角采样点P', 将射线OP与OP'之间的雷达边界采样点修正为OP与OQ之间的插值。
- (3) 沿OQ方向增加 $\Delta r$ , 如果 $OQ + \Delta r > OP'$ , 则转到步骤(7); 否则执行步骤(4)。
- (4)  $OK = OQ + \Delta r$ , 求K点对应的地形高程点Q'。如果 $Q'y > Ky$ , 转到步骤(5), 如图3b所示; 否则, 转到步骤(6), 如图3c所示。
- (5)  $P = Q, Q = Q'$ , 转到步骤(2)。
- (6)  $Q = K$ , 转到步骤(3)。
- (7) 处理下一个未处理过的采样点P后, 执行步骤(1)。

雷达探测范围边界点是按方位角和俯仰角采样的, 而数字地形是按照x和z方向均匀采样的, 所以, 在求边界采样点对应于数字地形的高度值时, 会由于采样方式不同, 不能恰好地对应于地形的采样点。本文采用二次插值的方法求解对应的采样点的高

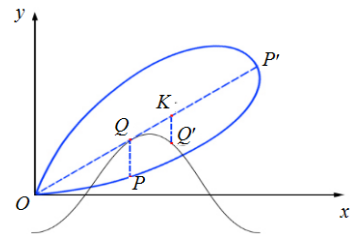
度值。



a. 由采样点求解对应地形高程点



b. K点位于对应地形高程点下方



c. K点位于对应地形高程点上方

图3 地形影响雷达探测范围算法

文献[6]描述了一种计算地形影响下雷达作用范围的算法, 研究单峰影响下雷达的作用范围, 根据山峰与探测截面的关系, 修正截面边界数据; 并以此为基础, 给出了多峰影响下雷达的三维探测范围表现算法。在本文的算法中, 根据电磁波的直线传播原理, 沿着电磁波传播方向向前延伸一段距离 $\Delta r$ , 如果延伸以后到达地形高程点下方, 就将对应的采样点修正到地形表面; 然后再延伸, 直到到达作用范围的边界, 而不用求出地形中的山峰再单独进行处理, 从而很好地解决了由于两种采样方式不同而引起的冲突。经过实验, 本文的算法对单峰和多峰的情况都能很好地进行处理。

### 3 干扰影响下雷达探测范围可视化

在实际环境中, 雷达探测性能不仅受地形或建筑物的影响, 也会受到电子干扰设施的影响, 特别是在战场环境中, 交战双方用电子干扰设施削弱对方电磁系统的性能。因此有必要考虑在电子对抗条件下, 雷达探测范围受到的影响。

在电子干扰设施中, 最常使用的是以下两种干扰方式:

- (1) 自屏蔽, 雷达目标自带干扰机。雷达距离方

程为:

$$R_{\max} = \left( \frac{P_t \tau G_t \sigma F_t^2}{4\pi P_{ij} G_j D_0 C_b L} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

式中  $P_{ij}$  为干扰机发射的功率频谱密度;  $G_j$  为干扰机天线在雷达方向上的增益。

(2) 远方支援干扰, 将干扰机装在一个专用的飞行器上, 在离雷达一定距离处进行支援。雷达距离方程如下:

$$R_{\max} = \left( \frac{P_t \tau G_t \sigma F_t^2 F_r^2 R_j^2 L_j}{4\pi P_{ij} G_j F_j^2 D_0 C_b L} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (5)$$

式中  $R_j$  为干扰机离雷达的距离;  $F_j$  包含了雷达接收天线方向图系数。当干扰机处于雷达旁瓣中时, 该方向图系数为天线的“旁瓣比”。

当有干扰施加在雷达上时, 可根据干扰的具体类型, 用式(4)或式(5)重新计算雷达作用距离, 再重新绘制雷达探测范围。

本文研究了有多部干扰机对雷达实施远距离干扰时雷达探测范围的三维可视化。假设有  $m$  个干扰机对雷达实施远距离干扰, 第  $i$  个干扰机对雷达的干扰能量为:

$$P_{rji} = \frac{P_{tji} G_{ji} G_{ri}(\theta) F_{ji}^2 \lambda^2}{(4\pi)^2 R_{ji}^2 L_{ji}} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

式中  $P_{tji}$  为第  $i$  部干扰机的发射功率;  $G_{ji}$  为第  $i$  部干扰机的天线增益;  $G_{ri}(\theta)$  为雷达天线在第  $i$  部干扰机方向上的增益;  $\theta$  为干扰机与雷达主波束的夹角;  $\lambda$  为雷达发射机的工作波长;  $R_{ji}$  为第  $i$  部干扰机与雷达之间的距离。其中,  $G_{ri}(\theta)$  为:

$$G_{ri}(\theta) = \begin{cases} G_t & 0 \leq \theta \leq \theta_{0.5}/2 \\ G_{sl} & \theta > \theta_{0.5}/2 \end{cases} \quad (7)$$

式中  $G_t$  为雷达天线增益;  $G_{sl}$  为雷达旁瓣天线增益;  $\theta_{0.5}$  为雷达天线波瓣宽度。  $m$  个干扰机对雷达的干扰能量为:

$$P_{rj} = \sum_{i=1}^m P_{rji} = \sum_{i=1}^m \frac{P_{tji} G_{ji} G_{ri}(\theta) F_{ji}^2 \lambda^2}{(4\pi)^2 R_{ji}^2 L_{ji}} \quad (8)$$

此时, 可得雷达作用距离公式为:

$$R_{\max} = \left( \frac{P_t \tau G_t^2 \sigma F_t^2 F_r^2 L_j}{4\pi D_0 C_b L \sum_{i=1}^m \frac{P_{tji} G_{ji} G_{ri} F_{ji}^2}{R_{ji}^2}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (9)$$

与在自由空间里建立雷达探测范围模型相似, 实现多干扰源情况下雷达探测范围三维可视化, 是在计算 Distance[elSampleCnt][azSampleCnt] 时使用式(9)进行计算, 其他的步骤相同。

文献[1]给出了雷达在多干扰源情况下的干扰区域, 但它给出的是二维情况下的干扰区域, 不够直观。文献[11]也给出雷达在干扰情况下的作用范围, 但只考虑了一个干扰源情况下的雷达探测范围。

## 4 基于视点的雷达模型简化

在大的虚拟场景中, 为了获得较好的视觉效果, 一个雷达作用范围模型一般需要成千上万个绘制单元来完成, 但绘制单元数量对系统实时性的影响非常显著, 需要考虑模型简化<sup>[12-14]</sup>。当视点离模型较远时, 由于整个雷达作用范围模型占绘制屏幕的像素很少, 没有必要用高细节的原型模型绘制, 因此可引入基于视点的雷达模型简化方法。定义3层精度的雷达探测范围模型分别用于视点距离其远、中、近时调用。

(1) 最高精度的雷达作用范围模型是原型, 不进行任何处理, 如图4a所示。

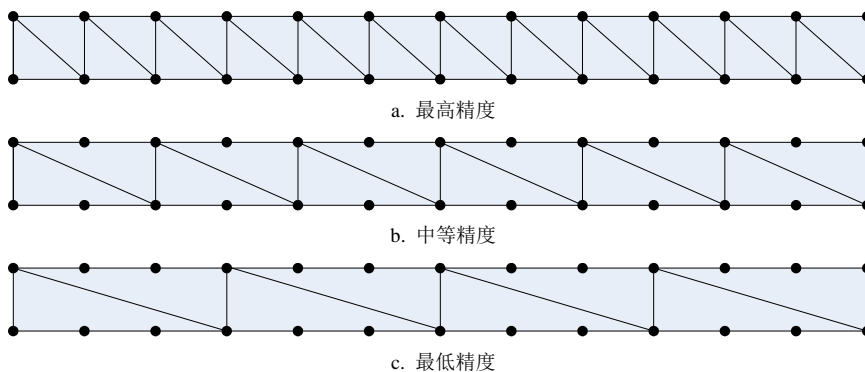


图4 模型简化

(2) 中等精度的雷达作用范围模型是在方位角方向, 每2个采样点绘制一个, 如图4b所示。

(3) 最低精度的雷达作用范围模型是在方位角方向, 每3个采样点绘制一个, 如图4c所示。

在求解地形对雷达探测范围的影响时, 其中的参数 $\Delta r$ 根据雷达探测范围模型与摄像机的距离取不同的值, 也是将计算的精度分为3层, 最高精度时 $\Delta r$ 取值为0.1, 中等精度时 $\Delta r$ 取值为0.5, 最低精度时 $\Delta r$ 取值为1.0。

### 5 实验结果与分析

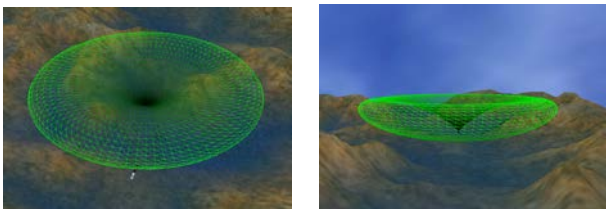
本文在实验室环境下使用C++实现上述雷达探测范围三维可视化方法。实验机器具体配置为: Windows XP操作系统、1 GB内存、NVIDIA GeForce 8600 GT显卡、显存256 MB。

在实验中, 雷达参数如表1所示。

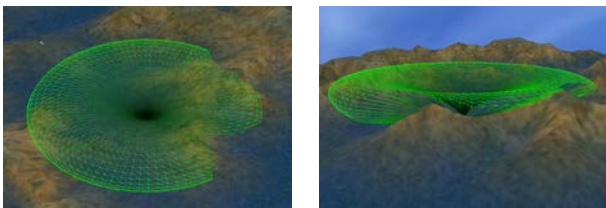
表1 雷达参数

参数名称	参数值
发射功率/kW	4 000
工作频率/MHz	3 000
天线增益/dB	40
天线旁瓣增益/dB	-10
脉冲重复频率/Hz	250
系统损耗/dB	12
检测概率	0.9
虚警概率	$10^{-6}$
波束宽度/(°)	20
仰角/(°)	15
天线转速/(°)·s <sup>-1</sup>	36

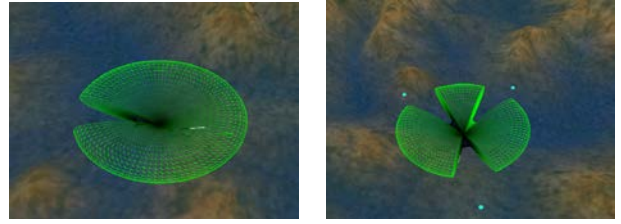
探测目标的RCS设为人的大小(1 m<sup>2</sup>)。实验中elSampleCnt取值为90, azSampleCnt取值为90。雷达探测范围三维可视化效果如图5所示。



a. 不受任何影响的雷达探测范围三维效果



b. 受地形影响的雷达探测范围三维效果



c. 受干扰影响的雷达探测范围三维效果

图5 雷达探测范围三维可视化效果

为了验证基于视点的模型简化的有效性, 本文在场景中部署不同精度的雷达模型, 用于测量渲染帧速。不同精度雷达模型的采样点如表2所示。

表2 基于视点的模型简化实验结果

	最高精度	中等精度	最低精度
采样点数	8 100	4 050	2 700

本文首先考虑雷达模型不漫游的情况, 即仅在场景中绘制出雷达探测范围, 而雷达本身不移动。通过增加不同精度的雷达数量来验证渲染效率, 实验结果如图6所示。

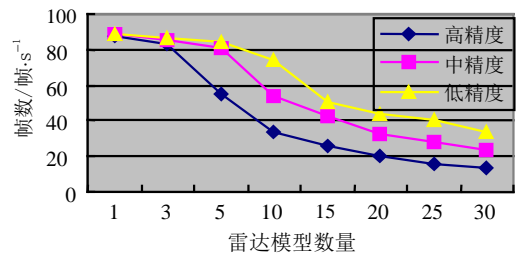


图6 绘制帧速与雷达模型数量及精度的关系

由图6可以看到, 当在场景中只绘制少数的雷达模型时, 绘制速度很高, 而且高、中、低精度的差别不大; 但当雷达模型数量增加时, 精度不同, 绘制效率有很大的差别, 低精度比中精度和高精度的绘制帧速高得多。

同时, 本文也考虑了雷达模型在场景中漫游的情况(如雷达车在移动), 通过增加不同精度雷达模型的数量验证渲染效率, 实验结果如图7所示。

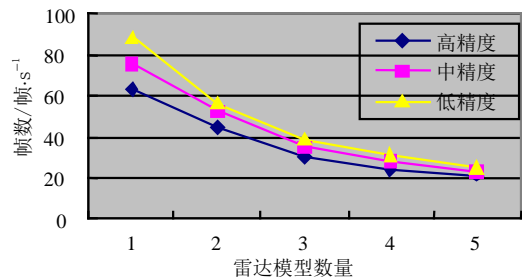


图7 漫游帧速与雷达模型数量及精度的关系

由图7可以看到, 当有一个雷达模型在场景中漫游时, 即使在最高精度的情况下, 漫游帧速已经达



到63帧/s,在最低精度下漫游帧速达到88帧/s,最低精度时的帧速相对最高精度时的帧速提高了39%。即使增加到5个雷达模型同时场景中漫游,最高精度时的帧速也在20帧/s以上,满足了实时漫游的要求;而在一个场景中5个雷达模型同时漫游也完全满足了应用的需求。

将图6与图7对比可以发现,当雷达模型只是在场景中绘制而不需要漫游时,随着雷达模型数量的增加,由精度不同带来的绘制速度差别增大。这是因为当模型较少时,它们在整个场景中占用的资源很少,采样点数量不同所带来的差别在整个场景的绘制中不是很明显;随着模型数量的增加,绘制精度不同而引起的绘制采样点数量上的差异越来越明显,基于视点的雷达模型简化的优势也越来越明显。当雷达模型在场景中漫游时,雷达模型数量越少,由于精度不同而带来的绘制速度差别越大。这是因为随着场景中漫游的雷达模型数量的增加,要重新计算和绘制的不同精度模型的采样点数量急速增加,使得绘制效率差异不大。

## 6 结 论

电磁信息可视化一直是科学可视化领域的一个研究热点。针对如何更高效和形象地表现雷达电磁环境问题,本文提出了一种复杂环境影响下的雷达探测范围三维可视化方法,模拟了受地形和多干扰源影响下的雷达探测范围三维可视化。为了提高渲染效率,引入了基于视点的雷达模型简化方法,取得了较好的效果。

由于雷达探测性能的复杂性,本文对某些情况做了限定,如雷达系统损耗近似为一个固定值;假设雷达工作在参数固定的状态,将是今后研究工作的重点。此外,雷达在实际环境中会受到各种因素的影响,如衰减、大气等,这些因素都需要进一步考虑和分析。

## 参 考 文 献

- [1] JAMES C N, BRODZIK S R, EDMON H, et al. Radar data processing and visualization over complex terrain[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2000, 10(3): 327-338.
- [2] 贺静波, 席泽敏. 一种快速绘制干扰区域的算法[J]. *现代雷达*, 2005, 27(3): 15-17.  
HE Jing-bo, XI Ze-min. An algorithm for quickly drawing jamming range[J]. *Modern Radar*, 2005, 27(3): 15-17.
- [3] 程柏林, 张 尉. 用Matlab语言实现雷达探测范围图的绘制[J]. *空军雷达学院学报*, 1999, 13(4): 62-64.  
CHEN Bo-lin, ZHANG Wei. Plotting of radar detection

- range by matlab language[J]. *Journal of Air Force Radar Academy*, 1999, 13(4): 62-64.
- [4] 林卫明, 刘德权. 利用OpenGL技术实现雷达探测范围的三维显示[J]. *武汉理工大学学报*, 2002, 26(1): 72-75.  
LIN Wei-ming, LIU De-quan. Three-dimensional display of radar survey scope using opengl technique[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2002, 26(1): 72-75.
- [5] ALEKSANDAR K, DEJAN R. Radar coverage analysis in virtual GIS environment[C]//6th International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services. Serbia: [s.n.], 2003.
- [6] 陈 鹏, 吴玲达, 杨 超. 虚拟战场环境中地形影响下雷达作用范围表现[J]. *系统仿真学报*, 2007, 19(7): 1500-1503.  
CHEN Peng, WU Ling-da, YANG Chao. Research on representation of radar coverage in virtual battlefield environment considering terrain effect[J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(7): 1500-1503.
- [7] 陈 鹏, 魏迎梅, 吴玲达, 等. 硬件加速的雷达作用范围三维可视化研究与实现[J]. *计算机工程与科学*, 2008, 30(4): 33-36.  
CHEN Peng, WEI Ying-mei, WU Ling-da, et al. Research and implementation of the 3D radar coverage visualization accelerated by hardware[J]. *Computer Engineering & Science*, 2008, 30(4): 33-36.
- [8] 杨 超, 陈 鹏, 魏迎梅. 雷达最大探测范围三维可视化研究与实现[J]. *计算机工程与应用*, 2007, 43(11): 245-248.  
YANG Chao, CHEN Peng, WEI Ying-mei. Research and implementation of 3D visualization of radar maximum detection range[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2007, 43(11): 245-248.
- [9] 丁鹭飞, 耿富录. 雷达原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.  
DING Lu-fei, GENG Fu-lu. *Radar theory*[M]. Xi'an: XiDian University Press, 2004.
- [10] 张 尉, 程柏林, 金素华. 搜索雷达探测范围的可视化技术[J]. *现代雷达*, 2000, 22(3): 44-47.  
ZHANG Wei, CHENG Bo-lin, JIN Su-hua. The visual technology of the detection range in search radar[J]. *Modern Radar*, 2000, 22(3): 44-47.
- [11] 李 源, 刘建新, 蔡英武. 逆合成孔径雷达的干扰仿真[J]. *电子科技大学学报*, 2006, 35(1): 9-12.  
LI Yuan, LIU Jian-xin, CAI Ying-wu. Jamming simulation for inverse synthetic aperture radar[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2006, 35(1): 9-12.
- [12] LI W D, CAI Y L, LU W F. A 3D simplification algorithm for distributed visualization[J]. *Computers in Industry*, 2007, 58(3): 211-226.
- [13] GARLAND M, ZHOU Y. Quadric-based simplification in any dimension[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2005, 24(2): 209-239.
- [14] MUHAMMAD H, YOSHIHIRO O. LOD modelling of polygonal models[J]. *Machine Graphics & Vision International Journal*, 2005, 14(3): 325-343.

编辑 黄 莘