

文章编号: 1001-2486(2007)06-0049-05

硬件加速的三维雷达作用范围表现*

陈鹏, 杨超, 吴玲达

(国防科技大学 信息系统与管理学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 未来数字化战场迫切需要表现复杂环境影响下的三维雷达作用范围, 目前研究多限于二维, 而三维表现又受限于速度, 为此提出一种硬件加速的三维表现方法。在构造环境影响下雷达电磁波损失三维数据场的基础上, 利用硬件加速的等值面提取算法建立雷达作用范围的三维模型, 并将其表现到战场环境中。在普通微机上针对典型雷达的实验中, 克服了二维表现不直观以及三维表现慢的缺点, 形象地展示了地形大气等环境影响下三维作用范围, 从而为用户提供决策和感官支持。

关键词: 雷达作用范围; 等值面; 硬件加速; 可视化

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A

Hardware Accelerated Representation for Three-dimensional Radar Coverage

CHEN Peng, YANG Chao, WU Ling-da

(College of Information System and Management, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Future digital battlefield is crying for a 3D representation of the radar coverage affected by complex environment such as terrain, ocean and weather. However, recent researches still focuses mainly on 2D representation while the existing 3D methods are always embarrassed by their low computation speed, a new hardware accelerated 3D representation method was put forward in this paper. Based on the constructed 3D data field of EM loss affected by environment, a hardware accelerated algorithm was designed to extract the isosurface for building the 3D radar coverage model. Then the model was represented into digital battlefield. In the experiment on popular PC and for typical Radar, the 3D radar coverage affected by terrain and atmosphere was vividly visualized in time. The result has overcome the implicitness of 2D method and the slowness of 3D method, thus providing excellent decision and sense supporting for users.

Key words: radar coverage; isosurface; hardware accelerated; visualization

传统的雷达电磁信息表现, 主要是在获得电磁信息的相关数据后, 通过手工标绘或者计算机辅助把雷达威力图以二维形式表现出来。这些方法存在明显不足: 精确度有限; 平面曲线不直观; 雷达威力图不能随目标参数变化而变化, 无法适应现代战争的需要等。然而要得到雷达波的三维覆盖情况, 必须求解三维向量波动方程, 其计算量是现代微机所不能承受的。文献[1]针对对流层大气折射以及地面反射和干涉等影响, 提出了 APM(Advanced Propagation Model)模型来计算平面内网格点上的传播因子。本文以此为基础来构造三维传播损失数据场, 再利用等值面提取的思想得到目标 RCS (Radar Cross Section) 大小一定时的三维雷达作用范围。第一个等值面提取算法是由 Lorensen 于 1987 年提出的 MC(Marching Cubes)算法^[2], 随后国内外学者对其进行了深入广泛的研究, 但都是基于 CPU 来实现的, 而随着 GPU (Graphic Processing Unit) 的发展, 其原始计算能力超出 CPU 峰值性能至少一个数量级, 可编程能力和浮点支持能力在不断提高, GPU 不再仅仅限于处理特定的图形绘制任务, 而成为能够辅助 CPU 计算的通用计算单元。Matsumura^[3]和 Klein^[4]分别在 2003 和 2004 年尝试利用 GPU 提取和绘制等值面, 但是当时由于显存以及 GPU 功能的限制, 等值面提取和绘制的过程并不能完全在图形硬件上实现。本文将基于非规则四面体的等值面提取过程完全移到 GPU 上去执行, 从而降低 CPU 计算负荷。

* 收稿日期: 2007-04-18

基金项目: 国家部委基金资助项目

作者简介: 陈鹏(1977—), 男, 博士生。

1 三维数据场建立

为了能够直观地展现雷达波在三维环境中的作用范围,首先在依据地形分辨率确定的划分精度基础上将空间按不同方位角划分成若干个剖面,然后计算每个剖面内的传播损失,再联合所有剖面构造三维传播损失数据场。下面将描述一个剖面内传播损失的计算。

针对对流层大气折射、大气吸收以及地面反射和干涉等影响,文献[1]所提出的 APM 计算模型包含四个基本的子模型:平坦地球模型、光线跟踪模型、扩展光学模型和抛物方程模型(Parabolic Equation, PE)。APM 综合了四个模型的优点,能够根据用户的需求运行于几种不同的模式,比单一的 PE 运行更快,且其整个精度可以和 PE 媲美。其应用的频率范围为 2MHz~95GHz,适用于任意分辨率的任意多数目的地形点,对地面雷达和机载雷达都适用,地面环境可以是海面、陆地或者两者混合。正因为如此,本文采用 APM 来计算平面内传播因子 F 以后,传播损失 L 就可以由式(1)中自由空间损失与 F 的差值来确定:

$$L = 20\lg\left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right) - 20\lg F \quad (1)$$

其中, r 表示传播距离。

首先计算出一定范围内的传播损失,再根据雷达系统的性能参数和目标 RCS 确定雷达能探测到该目标的损失阈值,然后将两者进行比较,损失小于该阈值的地方即在作用范围之内,否则就是探测盲区,由此即可确定雷达的整个作用范围。下面首先确定探测一定大小 RCS 目标的损失阈值,考虑环境因素影响的雷达方程^[5]为:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 l_i l_a} F^4 \quad (2)$$

其中, P_t , P_r 分别表示雷达发射功率和接收功率, λ 为波长, σ 是目标反射截面积, F 为天线方向图传播因子, R 为雷达波双程传播距离, l_i 为系统损失, l_a 为大气吸收衰减因子。为简单而不失一般性,我们认为收发天线是共用的,天线增益 $G_t = G_r = G$, 于是雷达方程可以表示为:

$$P_r = \frac{P_t G^2 4\pi \sigma}{l_s \lambda^2} a^4, \quad a = \frac{\lambda F}{4\pi R l_a^{1/4}} \quad (3)$$

根据文献[6]传播损失值 L (dB)为:

$$L = -20\lg a \quad (4)$$

则由式(3)、(4),雷达方程可用分贝数表示为:

$$L = 5\lg\left(\frac{P_t G^2}{l_s}\right) + 5\lg\left(\frac{4\pi \sigma}{\lambda^2}\right) - 5\lg P_r \quad (5)$$

由式(5)可知,只要 l_s 确定,当发射功率 P_t 和雷达目标反射截面积 σ 一定时,传播损失 L 和接收功率 P_r 的关系即可确定。因此,只要根据式(6)所确定的最小可检测信号功率 S_{\min} ,在一定虚警概率和发现概率的条件下,就可由式(5)确定雷达系统探测到一定大小 RCS 的目标所允许的传播损失值。

$$S_{\min} = kT_0 B_n F_0 D_0 \quad (6)$$

其中, k 为波尔兹曼常数; T_0 为标准室温 290K; B_n 是雷达接收机噪声带宽; F_0 为接收机的噪声系数; D_0 为雷达检测因子(由虚警概率和发现概率确定)。

因此对于特定雷达系统,只要虚警概率和发现概率一定,则它的最小可检测信号功率就确定了,由式(5)就可以确定对应该最小可检测信号的损失阈值,再将由 APM 计算得到的传播损失与此阈值进行比较,即可得到雷达的作用范围。于是问题就可以转化为在传播损失数据场中找到对应该阈值的所有位置,这些位置的集合将整个数据场一分为二——可探测区域和探测盲区,这就是经典的等值面提取问题。

2 硬件加速等值面提取

为了在硬件上实现加速,我们首先按照 Giertsen 提出的方法^[7]将第 1 节中建立的数据场转换成四面

体网格,并按照顶点和四面体连接关系两部分进行存储。然后将其以 GPU 可读的形式送到图形硬件。接下来将说明如何将顶点数据、四面体网格数据映射为纹理输入供 GPU 读取,然后将输出等值面的几何图元(四边形)映射到输出纹理,以真正地在 GPU 上执行等值面提取与绘制。

对于输入的四面体网格数据,我们将其映射为两个二维纹理。第一个用来存储顶点数据,包括顶点坐标及其函数值,采用 32 位浮点的 RGBA 格式,每个顶点对应一个纹理单元,而每个顶点的 x, y, z 坐标和函数值分别对应该纹理单元的 R, G, B 和 A 分量;第二个纹理用来存储四面体网格索引,该索引用于在顶点纹理中查找顶点坐标,采用 8 位 RGBA 格式,每个四面体对应四个纹理单元,每个纹理单元对应四面体的一个顶点索引。

根据等值面与四面体的相交情况(相交点的数目),一个四面体的顶点函数值的分布可以分为三类:没有交点、3 个交点和 4 个交点。因此对于每个四面体,若最终生成的等值面片以多边形表示,则最多需要 4 个浮点值来存储。因此,对每个四面体,都使用 4 个纹理单元来保存输出数据,最后将这四个纹理单元分别看成四边形 4 个顶点的坐标值,以四边形作为几何图元绘制等值面片。

当将输入数据映射到纹理并设计好输出数据结构以后,就可以在片段着色程序中实现等值面提取算法了。从前面设计的顶点、四面体网格纹理以及输出结构可知,每个四面体对应四个输出像素,假设四面体网格纹理大小为 $TTX \times TTY$,则输出纹理大小也为 $TTX \times TTY$,对于纹理坐标为 (x, y) 的当前输出像素,对应的四面体四个顶点索引的纹理坐标分别为 $(x - (x \bmod 4), y)$ 、 $(x - (x \bmod 4) + 1, y)$ 、 $(x - (x \bmod 4) + 2, y)$ 和 $(x - (x \bmod 4) + 3, y)$ 。由此就可以从四面体网格纹理中查找到这四个顶点的索引 $V_i (i = 0, \dots, 3)$ 。又假设顶点纹理的大小为 $VTX \times VTY$,则四个顶点的纹理坐标可以通过式(7)计算得到:

$$\begin{cases} V_{ix} = V_i \bmod VTX \\ V_{iy} = \lfloor V_i / VTX \rfloor \end{cases} \quad (i = 0, \dots, 3) \quad (7)$$

那么 4 个顶点的函数值 $S_i (i = 0, \dots, 3)$ 就可以据此纹理坐标在顶点纹理中查询得到。再按照阈值 c 可以将四面体四个顶点进行分类,我们通过式(8)来计算掩码值 β 以记录分类结果:

$$\beta_i = \begin{cases} 0, & (S_i < c) \\ 1, & (S_i \geq c) \end{cases} \quad (i = 0, \dots, 3) \quad (8)$$

其中, β_i 表示 β 的第 i 位,据此计算的比特掩码就可以决定四面体与等值面相交的边。显然,由于四面体有 4 个顶点, β 可能的状态有 $2^4 (= 16)$ 种。在这 16 种情况中,无论等值面与四面体如何相交,其相交的边最多只有 4 条,当少于 4 条的时候,我们认为其中包含了重复顶点。而且对于每一种情况,显然其相交边是确定的,于是我们引入边索引 $\pi = 0, 1, 2, 3$ 来分别标示这 4 条边(可能包含重复顶点),通过该索引就可以确切地知道每条相交边的两个端点在四面体中的局部序号,这些局部序号就可以确定相交边端点在顶点纹理中的纹理坐标。例如,对于状态为 1110 的情况,若当前处理的是第一个相交边即 $\pi = 0$,则该相交边的两端点局部序号就为 0 和 3,于是根据其所在的四面体,就可以得到这两个端点在顶点纹理中的纹理坐标分别是 $(x - (x \bmod 4), y)$ 和 $(x - (x \bmod 4) + 3, y)$ 。我们将所有这 16×8 种关系列表 1 并以边索引纹理的形式保存,采用 8 位浮点 RGB 格式,每一种四面体顶点函数值分布状态对应 8 个纹理单元,而这个 8 个纹理单元分别对应四面体与等值面的 4 个交点所在边的 8 个端点在四面体中的局部顶点序号,一个纹理单元仅存储一个局部顶点序号 0、1、2 或 3。

当得到了相交边两个端点的纹理坐标之后,就可以在顶点纹理中查找其相应的坐标值 V_1 和 V_2 及其相应函数值 S_1 和 S_2 ,那么输出顶点的位置就可以通过式(9)线性插值得到:

$$V = tV_1 + (1 - t)V_2, \quad t = \frac{c - S_1}{S_2 - S_1} \quad (9)$$

表1 寻找相交边的局部顶点序号的查询表

Tab.1 Table for finding local vertex serial number of intersect edge

β	π							
	0	1	2	3	0	1	2	3
0000	0	0	0	0	0	0	0	0
1111	0	0	0	0	0	0	0	0
0001	3	0	3	1	3	2	3	2
1110	0	3	1	3	2	3	2	3
0010	2	3	2	0	2	1	2	1
1101	3	2	0	2	1	2	1	2
0100	1	2	1	3	1	0	1	0
1011	2	1	3	1	0	1	0	1
1000	0	1	0	2	0	3	0	3
0111	1	0	2	0	3	0	3	0
0011	0	2	0	3	1	3	1	2
1100	2	0	3	0	3	1	2	1
0101	0	1	0	3	2	3	2	1
1010	1	0	3	0	3	2	1	2
0110	1	0	1	3	2	3	2	0
1001	0	1	3	1	3	2	0	2

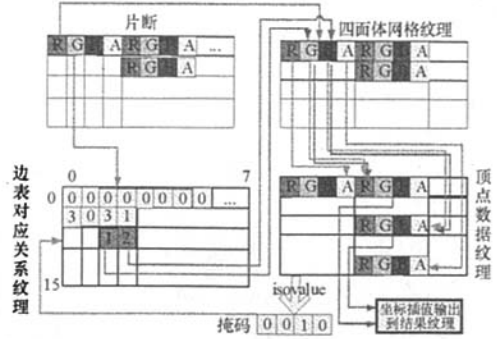


图1 数据映射以及等值面提取过程

Fig.1 Data mapping and isosurface extraction process

根据前述的算法,我们将整个数据映射以及提取过程用图1进行了形象的描述。

另外对于等值面法线的计算,我们先在预处理阶段计算每个顶点的梯度值,得到等值面坐标后插值计算等值面各顶点的法向。这个过程和顶点坐标插值完全类似,只需要在着色程序中简单地加入法向插值代码即可以实现,这里不再给出详细说明。

3 实验结果及分析

我们在 MS Windows XP 平台上基于 C++ 和 OpenGL 实现了这一想法,使用的显卡芯片是 ATI Radeon X1900 GT/575MHz/256MB。实验中计算雷达电磁波损失值部分采用 Fortran 9.0 语言编写,而后续的等值面提取采用 C++ 语言编写,表现部分基于 OpenGL 2.0 实现。实验中雷达的参数如表 2 所示,地表面大气绝对湿度 $10g/m^3$,大气折射率系数如表 3 所示,地表温度为 25° ,地形一种为平地,一种是采用随机高度图的方式模拟生成的,地形类型为中等干燥地面,探测的目标 RCS 设为一般的飞机大小 $30m^2$ 。针对分辨率分别为 $36 \times 100 \times 100$ 和 $180 \times 100 \times 100$ 两种情况得到的结果分别如图 2、3 所示,其中顶点映射为纹理的数据量分别约为 5.76MB 和 28.8MB,而四面体网格映射为纹理的数据量分别约为 28.2MB 和 141.1MB。在 CPU 和 GPU 上运行的结果比较如表 4 所示,显然基于 GPU 进行等值面提取比 CPU 要快近三倍。由于所使用的硬件和文献[4]的不同,因而无法进行比较,但可以肯定的是:由于我们使用了更高级的显卡,性能肯定要高。

表2 雷达参数

Tab.2 Parameters of Radar

参数	频率	天线高度	仰角	增益	波束宽度	方向图	功率	脉冲长度	脉冲频率	系统损失	虚警概率	极化
值	1GHz	20m	0°	60dBi	5°	全向	2MW	10	30Hz	3dB	$1.0e^{-6}$	水平

表3 大气折射率

Tab.3 Atmosphere refractive index

剖面	高度	折射率	高度	折射率
	(m)	(0km)	(m)	(250km)
1	0	330	0	330
2	100	342.5	600	405
3	230	312.5	730	375
4	2000	517.8	2000	522.3

表4 CPU和GPU上运行的结果比较

Tab.4 Result comparison between on CPU and GPU

分辨率	顶点数	四面体数	运行时间(ms)	
			CPU	GPU
$36 \times 100 \times 100$	360 000	1 764 180	98	36
$180 \times 100 \times 100$	1 800 000	8 820 900	402	196



图2 分辨率为 $36 \times 100 \times 100$ 平地时的实验结果
Fig.2 Result on plane terrain, resolution = $36 \times 100 \times 100$

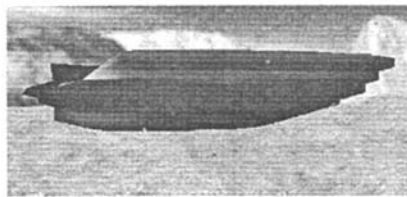


图3 分辨率为 $180 \times 100 \times 100$ 随机地形的实验结果
Fig.3 Result on random terrain, resolution = $180 \times 100 \times 100$

4 结论与展望

本文提出了一种基于硬件加速的数字战场环境中三维雷达作用范围表现方法,充分利用 APM 模型计算平面内雷达波传播因子在精度和效率方面的优势,联合多个平面的传播衰减构造出环境影响下相对精确的三维衰减数据场,将传统基于四面体网格的等值面提取算法移到 GPU 上去执行,通过等值面提取得到最终的三维雷达作用范围。该方法不仅保证了雷达作用范围的精度,而且充分利用了当前图形硬件在通用计算方面的能力,从而降低了 CPU 负荷,保证了表现的速度,适合于数字化战争中三维虚拟战场环境中多维信息的实时交互表现。

本文仅仅针对地形大气等自然环境的影响进行了讨论,没有涉及电磁环境等其他干扰的情况,由于实际电磁环境是复杂多变的,要想得到完全精确的雷达作用范围,必须进一步考虑这些干扰情况。另外,由于显卡内存毕竟有限,所以对于超过显卡内存容量的体数据,如何利用硬件进行加速提取和绘制仍然有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Patterson W L, Barrios A E. Advanced Propagation Model (APM) Ver. 1.3.1 Computer Software Configuration Item (CSCI) Documents[R]. 2002, SPACE and Naval Warfare Systems Center San Diego CA, Report Number: A125804.
- [2] Lorensen W E, Cline H E. Marching Cubes: A High Resolution 3D Surfaces Construction Algorithm[J]. Computer Graphics, 1987, 21(4):163 - 169.
- [3] Matsumura M, Anjyo K. Accelerated Isosurface Polygonization for Dynamic Volume Data Using Programmable Graphics Hardware[C]//Visualization and Data Analysis 2003, Santa Clara, CA Proceedings of SPIE, 2003: 145 - 152.
- [4] Thomas K, Simon S, Thomas E. Hardware-accelerated Reconstruction of Polygonal Isosurface Representations on Unstructured Grids [C]// Proceedings of the Computer Graphics and Applications, IEEE Computer Society, 2004:186 - 195.
- [5] Blake V, Radar L. Range-performance Analysis[M]. Norwood, MA, Artech House, Inc., 1986:467.
- [6] Craig K H, Levy M F. Parabolic Equation Modelling of the Effects of Multipath and Ducting on Radar Systems[J]. IEEE Proc. F, 1991, 38(2): 153 - 162.
- [7] Giertsen C. Volume Visualization of Sparse Irregular Meshes[J]. IEEE Computer Graphics & Applications, 1992, 12(2):40 - 48.

(上接第 33 页)

参考文献:

- [1] Dutton J C, Mikkelsen C D, Addy A L. A Theoretical and Experimental Investigation of the Constant Area, Supersonic-supersonic Ejector[J]. AIAA Journal, 1981, 20(10):1392 - 1400.
- [2] Keenan J H, Neumann E P, Lustwerk F. An Investigation of Ejector Design by Analysis and Experiment[J]. Journal of Applied Mechanics, 1950, 17: 299 - 309.
- [3] Emanuel G. Optimum Performance for a Single-stage Caseous Ejector[J]. AIAA Journal, 1976, 14(9):1292 - 1296.
- [4] 徐万武. 高性能、大压缩比化学激光器压力恢复系统研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2003.
- [5] Acebal R. Multi-stage Steam Ejector Methodology: Model Development and Application to High Energy Lasers[R]. AIAA - 85 - 1601, 1985.
- [6] Schreiber H, Acebal R. Multi-stage Ejector Methodology: Model Enhancement and Comparison to High Energy Laser Experiments[R]. AIAA - 88 - 2753, 1988.
- [7] Walter R F, O'Leary R A. Pressure Recovery in COIL Devices[R]. AIAA - 1994 - 2456, 1994.
- [8] 潘锦珊, 方人淞, 申振华, 等. 气体动力学基础(修订版)[M]. 西安:西北工业大学出版社, 1995.

