

基于三维纹理的雷达探测概率直接体可视化

孟慧军^{1,2}, 袁修久¹, 张敬卓¹, 赵学军¹

(1.空军工程大学理学院,陕西西安,710051;2.95010部队,广东汕头,515023)

摘要 针对面绘制技术表现雷达探测效能不充分的缺陷,提出了基于三维纹理的雷达探测概率直接体绘制可视化算法。针对雷达探测数据分布不均匀、重要性不一致等特点,提出了颜色传递函数的设计准则,以此基础设计了传递函数表达式。通过高级传播模型计算三维雷达探测信息,并使用传递函数将其映射成不同的光学成像参数。建立了计算视觉效果最差情况的角度模型,通过实验方式验证了使用3个备选切片方案代替实时计算采样多边形方法的可行性。仿真结果表明:与面绘制方法比较,文中算法不仅能直观地表现雷达探测范围的整体信息,而且还能清晰地展示雷达探测三维数据场的内部细节。

关键词 雷达探测概率;直接体可视化;三维纹理;传递函数

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2012.01.010

中图分类号 TN953 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2012)01-0042-05

雷达探测概率是刻画雷达武器效能的重要指标,直观准确地描述雷达探测概率对指战员准确把握战场态势具有重要意义^[1]。传统的雷达探测概率往往是停留在理论计算阶段,当前电磁环境可视化的研究也主要集中在面绘制方法上。文献[2-3]提出了基于等值面的雷达探测范围可视化方法,该方法可以展示雷达探测范围的包络,但无法显示内部的数据信息。复杂环境条件下,电磁场强度分布很不规律,从而导致概率大小也呈现大的差别^[1],通过面绘制方法无法表现这些信息。多层半透明等值面绘制^[4]方法通过展示体数据的多层信息,能在一定条件下弥补单层等值面的不足,但是当数据场相对复杂时,可视性不强,并且它没有类似针对体数据进行信息分析的切片、切割能力。

近年来,体可视化技术^[5]在医学等领域已经得到广泛应用,但在军事领域,特别是在电磁环境可视化方面的研究还较少。文献[6]研究了基于图形处理单元GPU(Graphics Processing Unit,GPU)的光线投射体绘制的雷达传播信息三维体绘制方法,但由于光线投射算法本身固有的计算复杂性,绘制效率低。鉴于此,本文提出基于三维纹理的雷达探测概率的直接体绘制算法,这对战场环境可视化的建模与仿真具有重要的借鉴意义。

1 雷达探测概率体数据的计算

1.1 电磁波传播信息建模

高级传播模型APM(Advanced Propagation Model,APM)综合考虑了地形、大气等多种因素的影响,能较为准确地计算电磁波的传播损失^[7]。APM是射线光学和抛物方程理论的混合模型,它克服了抛物方程模型计算量大的缺点,将传输区域分为4个部分:平坦地面FE(Flat Earth,FE)、射线光学RO(Ray Optics,RO)、抛物方程PE(Parabolic Equation,PE)和扩展光学EO(Extended Optics),见图1。

APM的4个子模型分别计算雷达传播方向图因子 F ,其中PE区域:

* 收稿日期:2011-06-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11071256);陕西省电子信息系统综合集成重点实验室基金资助项目(201113Y14)

作者简介:孟慧军(1984-),男,湖南常德人,硕士生,主要从事虚拟现实技术研究.E-mail:mengziyouxiang@163.com

$$F = |u(x, z)| \sqrt{x} \quad (1)$$

式中: x 和 z 分别为雷达的水平距离和垂直高度; u 为该处的电场强度。其它3个子模型具体计算方法参见文献[7]。采用雷达方程^[1]计算目标回波功率(dBW)为:

$$P_r = 10 \lg(P_t \sigma F^4 / f^2 R^4) + 2G - L_s - 73.43 \quad (2)$$

式中: P_t 为雷达发射功率(kW); G 为雷达收发天线增益(dB); σ 为目标反射截面积(m^2); R 为雷达至目标的距离(km); f 为雷达波频率(MHz); L_s 为雷达系统损耗。

1.2 雷达探测概率计算

目标信噪比定义为雷达接收功率与接收噪声之比,其分贝形式为^[1]:

$$SNR = P_r - P_n \quad (3)$$

式中 P_n 为系统噪声(dBW)。

设脉冲积累数为 n ,虚警概率为 p_f ,根据噪声和信号通过雷达接收机的统计特性,可得多脉冲检测时雷达的平均探测概率 p_d :

$$p_d = [(nSNR + 1) / nSNR]^{n-1} p_f^{\frac{1}{1+SNR}} \quad (4)$$

综合雷达网的探测能力,需要将雷达网中每部雷达的探测能力进行合成。假设组网雷达都采用了不同频段,即忽略相互间干扰,则组网雷达探测区域为网内单个雷达探测区域之“并”。设雷达网由 N 部雷达组成,则空间 (x, y, z) 处的合成探测概率 $p_D(x, y, z)$ 可表示为:

$$p_D(x, y, z) = 1 - \prod_{i=1}^N [1 - p_{di}(x, y, z)] \quad (5)$$

式中 $p_{di}(x, y, z)$ 为第 i 部雷达在 (x, y, z) 处的探测概率。具体数据处理过程中,需要将圆柱坐标系下数据格式转化到笛卡尔坐标系下的数据格式。

2 雷达探测概率可视化模型

2.1 颜色传递函数的设计

在直接体绘制中,传递函数将三维数据场的数据信息转换为光学成像参数,从而建立采样点与光学特征的映射关系,它决定了直接体绘制的成像质量^[8]。设计雷达探测概率的颜色传递函数需要考虑的因素很多,例如怎样分配不同颜色值进行“突显”或“隐藏”不同的探测概率。这里给出雷达概率场可视传递函数设计时的可参考准则:①将小于规定发现概率的不透明度映射为0;②按军事上警戒等级为概率分配颜色值;③对于关键探测概率设置较大的不透明度;④对于数据分布密集区间分配更多的颜色值。

设某雷达的最小探测概率为 p_{min} ,关键探测概率为 p_{temp} ,由于作战指挥人员一般只关注大于 p_{min} 的探测概率,根据战术要求可能会需要重点关注关键概率 p_{temp} ,则不透明度分量 $\alpha(p_D)$ 可表示为:

$$\alpha(p_D) = \begin{cases} 0 & , p_D \in [0, p_{min}] \\ \alpha_{normal} (1 + (p_D - p_{min}) / (p_{temp} - p_{min})) & , p_D \in [p_{min}, p_{temp}] \\ \alpha_{normal} (1 + (1 - p_D) / (1 - p_{temp})) & , p_D \in [p_{temp}, 1] \end{cases} \quad (6)$$

式中: α_{normal} 为非关键概率点对应的不透明度,大小与采样频率有关,频率越大该值越小,取值在0.001-0.1之间。一般用橙色、黄色等红色分量较多的颜色代表较高的警戒等级,即较大的探测概率,则红色分量值 $R(p_D)$ 可表示为:

$$R(p_D) = \begin{cases} 0 & , p_D \in [0, p_{min}] \\ (p_D - p_{min}) / (1 - p_{min}) & , p_D \in [p_{min}, 1] \end{cases} \quad (7)$$

限于篇幅,绿色分量值 $G(p_D)$ 和蓝色分量值 $B(p_D)$ 的表达示将不再罗列。

2.2 预计算切片方案

基于三维纹理直接体可视化在每次重绘时,都需要根据视点方向重新计算切片方向,并且实时向GPU传输切片序列的空间位置和纹理坐标数据,这在实时绘制中会给CPU和数据总线造成很大的负担^[9]。通过

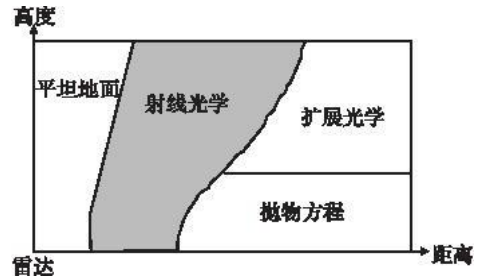


图1 APM子区域划分简图

Fig. 1 APM sub-models

实验发现:当视线方向 e 与切片方向 n 平行时视觉效果最佳,此时 e 与 n 之间夹角 α (锐角) 为 0° ; 只有当 e 与 n 近似垂直时,才会出现视觉走样,此时 α 接近 90° ; 每一种切片方向都存在一个相当广的可视角度范围,视线在此范围内变化时图像质量不会走样。

基于上述原因,本文绘制时,在备选切片方案中选择最佳方案,从而减少采样多边形复杂的求交运算。其预切片方案生成方法:建立数据体的局部坐标系,方案切片方向分别与 3 个坐标轴的方向一致。设 e_x 、 e_y 和 e_z 分别表示与 x 轴、 y 轴和 z 轴同向的单位向量,则预切片方案方向的集合 $E = \{e_x, e_y, e_z\}$ 。建立数学模型,求解使用 3 个预切片方案时视觉效果最差情况下的 n 和 α 。设视线方向单位向量 $n = (n_x, n_y, n_z)$, n_x 、 n_y 和 n_z 分别代表对应坐标分量,由空间几何知识可知, n 与预切片方案方向 e_i 的夹角 α_i 为 n 与 e_i 内积绝对值的反余弦角, α_i 中较小值即为最佳方案对应夹角,建立数学模型如下:

$$\begin{aligned} & \max_n \quad \min_i \{ \alpha_i \} \\ \text{s. t.} \quad & \alpha_i = \arccos(|\langle n, e_i \rangle|), e_i \in E, i = 1, 2, 3 \end{aligned} \quad (8)$$

求解模型:根据对称性,不妨设 α_1 为 $\alpha_i (i = 1, 2, 3)$ 中较大者,此时选用了方案 e_x , 可求得 $\alpha_1 \approx 54.74^\circ$, 对应 $n = \left(\frac{\pm\sqrt{3}}{3}, \frac{\pm\sqrt{3}}{3}, \frac{\pm\sqrt{3}}{3} \right)$ 。同理可求得选用其它方案时视觉最差角度,均约等于 54.74° 。由于无法定量给出视觉上走样的定量标准,本文仅从实验角度,给出从不同的视角 α 观察体绘制成像的效果图,见图 2。

图 2 中,各子图标注处为观察点位置。不难看出, α 为 0° 时观察效果最好, α 为 90° 时体绘制成像完全走样,而 $\alpha < 60^\circ$ 时体绘制成像不会走样,而文中给出的使用预计算切片方案方法中最差情况下观察视角 α 约为 54.74° , 所以采用标准轴向的采样方案能够满足视觉不走样的要求。这与文献[9]给出 $\alpha = 55^\circ$ 的结果基本一致。

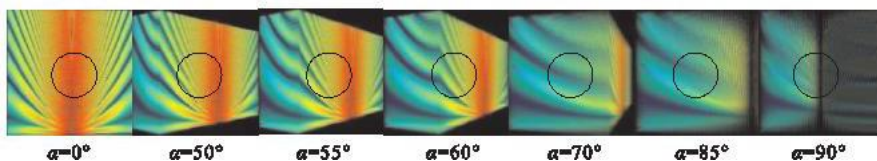


图 2 从不同视角 α 观察体绘制成像的效果图

Fig. 2 Visual effect under different view angles

将 3 个备选方案对应代理几何体的渲染保存到显示列表中,选择切片方案时,直接比较 n 中各分量绝对值大小,取其中最大者对应坐标轴方向为切片方案方向。

2.3 雷达探测概率可视化流程

基于三维纹理直接体可视化的原理可以概括为在每个像素上对体数据的可视化贡献进行积分,即沿着每个视线方向对各个数据点的颜色和光强衰减系数进行积分。方法主要由 3 部分组成,即纹理生成,绘制采样多边形和合成图像^[10]。

雷达探测概率体绘制具体流程如下:在纹理生成过程中,向 APM 输入地形大气数据计算电磁波空间传播损耗,通过信噪比计算雷达探测概率,概率合成最终得到空间各处的组网雷达探测概率,将概率数据定义装入到图形硬件的纹理缓存中,即绑定为三维纹理;在纹理绘制过程中,定义一系列相互平行的多边形体数据进行重采样;最后将采样多边形上各采样点的数值按传递函数转换为相应的颜色值和不透明度值,利用硬件的混合功能按照从后向前的顺序进行合成,投影于视平面而形成最后的图像。

纹理生成的全过程都是在图形硬件中实现,这也是基于三维纹理的体绘制算法比其它体绘制算法(如光线投射)速度快的原因所在。

3 仿真分析

本文采用 Visual C++ 6.0 和 OpenGL 2.1 实现了雷达探测概率体绘制,实验中雷达波频率为 500 MHz,功率为 1 000 kW,天线增益为 30 dB,脉冲长度为 0.01 ms,水平极化,噪声因子为 5.5 dB,系统损失设为 2 dB,雷达天线类型为高斯型,虚警概率为 10^{-6} ,目标 RCS 设为 5 m^2 。地形类型为中等干燥地形,大气绝对湿度为 10 g/m^3 ,气温为 25°C ,APM 计算的最大距离和最高高度分别设为 600 km 和 40 km。

图 3(a) 为使用 APM 计算电磁波传播因子后雷达探测概率体绘制效果图,平均绘制帧率为 24 fps,高于文献[6]中使用的光线投射方法绘制帧率(12 fps),说明了本文方法的高效性。图 3(b)为理想情况(未使用 APM 计算电磁波传播因子)下雷达探测概率体绘制效果,与之比较,图 3(a)更真实地展示了由于电磁波在空间的干涉作用,雷达探测区域呈多波束状情况,区域内部出现了探测的“空隙”。图 4 为面绘制的雷达探测范围效果,它显示了探测概率大于 0.5 的空间区域包络,但是区域内部探测概率变化无法体现,而图 3(a)清晰显示了距离雷达发射点越近探测概率越大的这一事实。

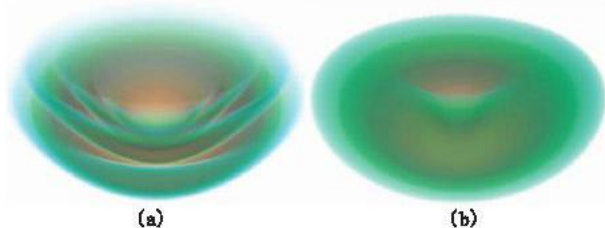


图 3 雷达探测概率体绘制效果图

Fig. 3 Volume rendering results of radar probability

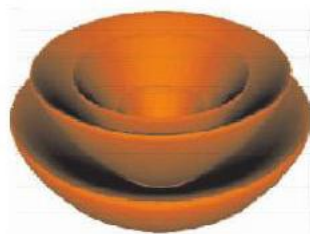


图 4 雷达探测范围面绘制效果图

Fig. 4 Surface rendering results of radar range

图 5 展示了剖切后雷达探测概率场内部结构,可以清楚地看到,20 km 高度雷达最大探测距离为 500 km,但是此处的探测概率明显小于高度为 20 km 距离为 400 km 处的概率值。另外,在距离 400 km 处,不同高度的位置,雷达探测概率也有很大变化,12 km 以下为探测盲区,往上至 20 km 探测概率由小变大,再由大变小。图 6(a)展示了组网雷达探测概率体绘制效果,由于概率合成,雷达探测的重叠区域对目标的探测能力明显增强。图 6(b)展示了 10 km 高度平面上的组网雷达探测概率体绘制效果,目标高度平面内的雷达探测的盲区、组网作用使得探测概率增强区等区域都能从图中清晰的“读出”。雷达探测概率体绘制效果也可以应用于基于 GIS 的虚拟场景,图 7 为嵌入虚拟战场中的雷达探测概率体绘制效果。

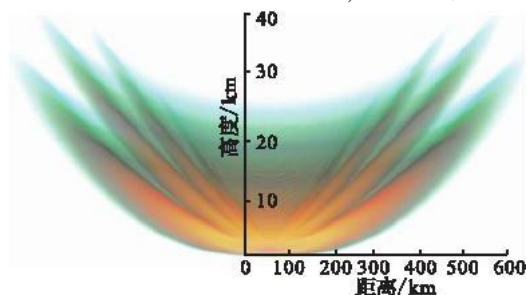


图 5 雷达探测概率体绘制后剖切的效果图

Fig. 5 Clipping radar volume probability

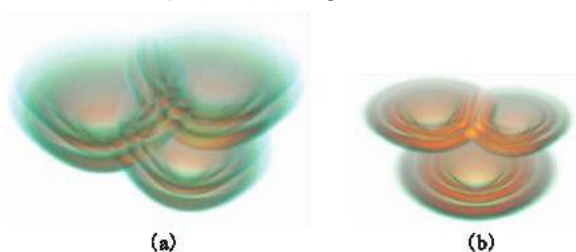


图 6 组网雷达探测概率体绘制效果图

Fig. 6 8 Volume rendering netted radar probability

4 结束语

针对面绘制方法不能充分表现雷达探测信息的情况,本文提出了基于三维纹理的雷达探测概率直接体绘制算法,结果表明该算法能够实时生成高质量的可视化图像。它不仅能表现雷达探测范围的整体信息,而且还能展示雷达探测三维数据场的内部细节,这对雷达设计和组网雷达部署都有辅助作用。如果雷达探测的体数据较大,体数据可以划分为多个分块,每块采用同样的方法绘制,然后按照分块从后往前的顺序融合到三维环境中,因此本文方法也适合较大规模数据量的雷达探测概率体绘制来分析雷达探测范围的内部信息。

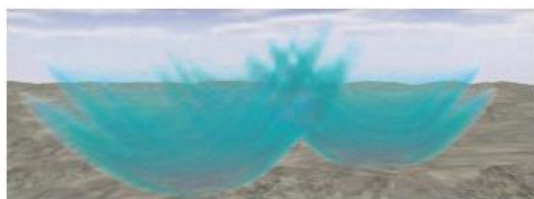


图 7 嵌入虚拟战场中的雷达探测概率体绘制效果图

Fig. 7 Rendering result of radar probability imbedded in virtual battlefield

参考文献(References):

- [1] Merrill I, Skolnik. Radar handbook[M]. New York: McGraw - Hill publishing company, 2008.
- [2] CHEN Peng, WU Lingda. 3D representation of radar coverage in complex environment[J]. International journal of computer science and network security (IJCSNS), 2007, 7(7): 139 - 145.
- [3] 杨超,徐江斌,吴玲达. 分布式干扰下雷达网探测能力的三维可视化[J]. 计算机工程, 2011, 37(1): 19 - 21.
YANG Chao, XU Jiangbin, WU Lingda. 3D visualization on radar network detection ability under distributed jamming[J]. Computer engineering, 2011, 37(1): 19 - 21. (in Chinese)
- [4] 杨超,徐江斌,赵健,等. 基于多层等值面的电磁环境三维可视化研究[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(11): 2767 - 2772.
YANG Chao, XU Jiangbin, ZHAO Jian, et al. Research on 3D visualization of electromagnetic environment based on multi - isosurface[J]. Systems engineering and electronics, 2009, 31(11): 2767 - 2772. (in Chinese)
- [5] 唐泽圣,陈莉,邓俊辉. 三维数据场可视化[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
TANG Zesheng, CHEN Li, DENG Junhui. Visualization of 3D data[M]. Beijing: Tsinghua university press, 1999. (in Chinese)
- [6] 杨超,徐江斌,吴玲达. 复杂环境影响下雷达传播信息圆柱体绘制[J]. 小型微型计算机系统, 2010, 31(9): 1096 - 1099.
YANG Chao, XU Jiangbin, WU Lingda. Cylindrical volume rendering on radar propagation information in complicated environment[J]. Journal of chinese computer systems, 2010, 31(9): 1096 - 1099. (in Chinese)
- [7] Barrios A E, Patterson W L. Advanced propagation model(APM) Ver. 1. 3. 1 computer software configuration item[R]. CSCI Technical document 3145, 2002.
- [8] Pfister H, Lorensen B, Bajaj C, et al. The transfer function bake - off[J]. IEEE computer graphics and applications, 2001, 21(3): 16 - 22.
- [9] 宫中樑,唐杰,武港山. 基于预计算切片序列的动态体绘制技术[J]. 计算机技术与发展, 2010, 20(8): 5 - 8.
GONG Zhongliang, TANG Jie, WU Gangshan. A precomputed slicing based volume rendering technique[J]. Computer technology and development, 2010, 20(8): 5 - 8. (in Chinese)
- [10] Cullip T J, Neumann U. Accelerating volume reconstruction with 3D texture mapping hardware[R]. University of North Carolina: Technical report UNC - 1993 - 027.

(编辑:田新华)

Directive Volume Rendering of Radar Detection Probability Based on 3D Texture

MENG Hui - jun^{1,2}, YUAN Xiu - jiu¹, ZHANG Jing - zhuo¹, ZHAO Xue - jun¹

(1. Science Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. Unit 95010, Shantou 515023, Guangdong, China)

Abstract: Aimed at the defect that radar detection performance can't be fully displayed by using surface rendering, an algorithm of radar detection probability visualization using directive volume rendering technique based on 3D texture is proposed. According to the characteristics of radar detection data such as uneven distribution and inconsistent significance, design principles of the transfer function is given, and then the analytical formula is presented based on the principles. 3D radar volumetric data is calculated based on the advanced propagation model, and the probability is classified by assigning optical imaging parameters through color transfer function. The angle on the condition of the worst visual effect is computed through mathematic model, and experiments have validated that method that replaces real - time slicing calculation by prepared three schemes is feasible. Simulation results show that, compared with the surface rendering, the display of radar detection whole coverage by new version is clear and the internal data can be easily exhibited by cutaway view.

Key words: radar detection probability; directive volume rendering; 3D texture; transfer function