

8-14-2020

On Simulating Marine Radar Echo Intensity Generated by 3D Graphic Rendering

Shilian Cao

1. Laboratory of Marine Simulation & Control, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;;2. Navigation collage, Jimei University, Xiamen 361021, China;

Yicheng Jin

1. Laboratory of Marine Simulation & Control, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;;

Yin Yong

1. Laboratory of Marine Simulation & Control, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

On Simulating Marine Radar Echo Intensity Generated by 3D Graphic Rendering

Abstract

Abstract: The echo image cannot show reliable occlusion between objects, and the echo intensity cannot represent physical characteristics of electromagnetic wave propagation in the existing marine radar simulator. To solve these problems, a new method of generating radar echo image was raised on the basis analyzing the method of ray tracing. *3D visual database was used as data source, the marine radar echo image was generated by the method scene graphic rendering. A model based on radar equation was raised to compute marine radar echo intensity.* The model gave the method of computing path attenuation, rain attenuation and attenuation due to cloud and fog based on ITU recommended standard. The generated echo image raised method was realized in programmable graphic pipeline. Simulation results show that the echo image object occlusion relation is clear, the echo intensity change is reasonable, and the echo reality is obviously improved.

Keywords

radar image, echo intensity, visual scene rendering, GLSL

Recommended Citation

Cao Shilian, Jin Yicheng, Yin Yong. On Simulating Marine Radar Echo Intensity Generated by 3D Graphic Rendering[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(9): 2076-2084.

三维图形绘制生成航海雷达回波的强度仿真

曹士连^{1,2}, 金一丞¹, 尹勇¹

(1. 大连海事大学航海动态仿真和控制实验室, 大连 116026; 2. 集美大学航海学院, 厦门 361021)

摘要: 现有航海雷达模拟器的回波图像对物标间的遮挡判断不明确, 回波强度不能有效反映电磁波传播的物理特性。在分析射线跟踪方法的基础上, 提出了以三维视景库为数据源, 通过视景图形绘制方法生成航海雷达图像。提出了基于雷达方程的航海雷达回波强度计算模型, 以 ITU 建议标准为参考计算模型中的大气传播损耗、降雨损耗和云雾损耗, 结合图形绘制流水线实现回波强度计算。仿真试验证明该方法生成的航海雷达图像物标遮挡关系明确, 回波强度变化合理, 真实感明显提高。

关键词: 雷达图像; 回波强度; 图形绘制; GLSL

中图分类号: TP319.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2016) 09-2076-09

On Simulating Marine Radar Echo Intensity Generated by 3D Graphic Rendering

Cao Shilian^{1,2}, Jin Yicheng¹, Yin Yong¹

(1. Laboratory of Marine Simulation & Control, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

2. Navigation collage, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: The echo image cannot show reliable occlusion between objects, and the echo intensity cannot represent physical characteristics of electromagnetic wave propagation in the existing marine radar simulator. To solve these problems, a new method of generating radar echo image was raised on the basis analyzing the method of ray tracing. 3D visual database was used as data source, the marine radar echo image was generated by the method scene graphic rendering. A model based on radar equation was raised to compute marine radar echo intensity. The model gave the method of computing path attenuation, rain attenuation and attenuation due to cloud and fog based on ITU recommended standard. The generated echo image raised method was realized in programmable graphic pipeline. Simulation results show that the echo image object occlusion relation is clear, the echo intensity change is reasonable, and the echo reality is obviously improved.

Keywords: radar image; echo intensity; visual scene rendering; GLSL

引言

航海雷达模拟器主要用于船舶驾驶员正确使用雷达进行目标探测与识别、定位、导航等的训练, 为达到良好的训练效果, 要求雷达模拟图像具有较

好的真实感。雷达模拟图像的真实感可以从两个方面进行评价: 一是物标的遮挡关系是否正确。由于电磁波直线传播的特性, 船舶处于某一位置时雷达天线发射的电磁波被周围物标遮挡, 致使物标背向雷达天线侧产生一个阴影区, 该物标的背侧及其产生的阴影区内其它物标或物标的一部分在雷达屏幕上不会产生回波, 使雷达物标图像看起来和海图并不一致, 雷达模拟图像应能正确反映这种物标间相互遮挡产生的影响。二是回波强度是否正确。在不同的增益和调谐状态下, 物标产生的回波强度是



收稿日期: 2016-04-28 修回日期: 2016-07-14;
基金项目: 国家高技术研究发展计划(863) (2015AA 016404);

作者简介: 曹士连(1975-), 男, 辽宁铁岭, 博士生, 讲师, 研究方向为航海仿真技术、真实感实时图形生成技术、虚拟现实技术等。

<http://www.china-simulation.com>

• 2076 •

不同的, 如弱增益状态下部分物标回波强度过小不能被检测到, 同样的增益和调谐状态下不同物标或物标的不同部分“反射”(后向散射)电磁波的能力也不同, 回波强度存在差异, 甚至有些反射能力弱的物标不可见。回波强度的仿真是实现雷达增益和调谐功能的基础, 没有正确的回波强度计算就不可能真正地实现增益和调谐功能。

以往的航海雷达模拟器雷达回波生成都是基于二维模型如位图或岸线折线段^[1], 物标的遮挡关系由于缺乏明确的模型支撑而难以确定。一种改进的方法是采用高度图实现^[2], 该方法将仿真区域表示为二维图像, 图像的灰度用来表示高程, 采用 Bresenham 算法生成雷达扫描线并进而生成雷达图像。高度图包含了明确的高程信息, 可以用来进行简单的遮挡判断(如比较高程), 但准确的遮挡判断必须逐点计算斜率, 难以满足实时性要求。三维模型在表达对象的空间关系上较二维模型具有明显优势, 有些 SAR 雷达图像的仿真运用了场景的三维模型, 但多采用射线跟踪算法包括基于 GPU 的射线跟踪算法, 由于射线跟踪算法涉及大量的(每个像素一根)射线与对象的求交计算, 没有硬件支撑是难以达到实时的。本文采用基于视景图形绘制方法生成雷达图像, 可以较好地解决物标遮挡判断问题, 在此基础上重点研究雷达回波强度仿真。

1 基于视景图形绘制方法生成雷达图像

雷达通过天线发射电磁波束来探测物标的方位和距离并将其显示在雷达屏幕上。航海雷达天线为定向天线, 发射的电磁波横向波束宽度约 2° , 纵向波束宽度约 $20^\circ\sim 30^\circ$, 波束范围内的物体将电磁波反射(后向散射)回雷达天线, 雷达通过测量电磁波往返时间来测定物标距离, 天线指向即为物标方位。天线处于某一特定方位时, 波束范围内的所有回波被量化为一个按时间(距离)排列的回波强度值序列(如图 1 所示), 称为扫描线。天线不停旋转, 天线指向按圆周顺序改变, 即可完成 360° 的圆周扫描。



图 1 数字化雷达扫描线示意图

雷达电磁波处于微波波段, 在海面近似于直线传播, 射线跟踪算法将波束离散化, 视作一簇从天线出发的射线, 通过计算每条射线与三角形的交点获得场景对象的距离(同时计算回波强度), 进而形成扫描线。射线跟踪算法与雷达工作原理基本相同, 可以较好地模拟雷达的工作过程。因其可“跟踪”射线的特性, 不仅可以生成物体直接后向散射产生的回波, 还可以模拟电磁波被反射到其它方向形成的二次反射回波。射线跟踪算法的缺点是求交计算量巨大, 且随着场景复杂度的增加算法开销迅速增大, 为达到实时性必须严格控制射线数量并对场景进行大幅度简化^[3]。航海场景十分复杂, 不仅包含大量的地形, 还包括大量的人工构筑物、助航标志、船舶等, 当使用者选用大量程时, 场景范围可达数十海里。由于航海雷达天线高度有限, 受 foreshortening 现象的影响严重, 需要数千条射线才能形成一条比较理想的扫描线, 一个圆周扫描周期内(2~4 s)需要生成一千条左右扫描线, 采用射线跟踪算法实时性很难保证, 而实时性是评价训练用航海雷达模拟器性能的重要指标之一。随着基于 GPU 的通用计算的逐步成熟, 出现了多种使用 GPU 加速的射线跟踪算法, 但仍无法从根本上解决求交计算的瓶颈问题。

相对于射线跟踪算法, 现代计算机的图形处理器普遍采用 Z-Buffer 算法实现消隐, 以像素为单位将三维场景数据离散化, 生成的三维图形中每个像素分别对应于一个深度缓存单元和一个颜色缓存单元。在透视投影方式下, 视点和每个像素就确定了一条射线, 帧缓存实际上存储了射线与场景中最近对象的交点信息, 深度缓存存储交点与视点的距离信息, 因此, 采用透视投影生成的视景图形中的像素与射线跟踪算法的射线在本质上是一致的。根据雷达波束特征来设置视见体, 利用 GPU 的可编程特性来计算对象的雷达探测距离和回波强度并将计算结果分别保存在深度帧缓和颜色缓存中, 则

每个像素可看作一条射线,即波束离散化后的一个采样点,可用来生成雷达回波图像。

航海雷达图像可看作雷达波束范围内物标与天线距离的点集,生成雷达图像最重要的是计算物标与视点的距离。

1.1 计算雷达探测距离和回波强度

图 2 为可编程 GPU 的图形处理流水线,首先,视景图形的顶点属性和相机设置等信息被送入顶点着色器(Vertex Shader)。在顶点着色器中,读取顶点的世界坐标 $V_w(x_w, y_w, z_w)$ 、法线向量 N 、模型视变换矩阵 MV 和投影矩阵 P , 雷达探测距离 r 为对象到天线的距离,将视点设置在雷达天线处,则雷达探测距离 r 即视坐标系下顶点到原点的距离,因此利用式(1)将顶点坐标由世界坐标系变换到视坐标系 $V_e(x_e, y_e, z_e)$:

$$V_e = MV * V_w \quad (1)$$

则雷达探测距离 r 可由下式计算:

$$r = \sqrt{x_e^2 + y_e^2 + z_e^2} \quad (2)$$

回波强度与顶点的雷达探测距离 r 和法线 N 有关,可用来计算回波强度 d (回波强度计算方法见后文)。接下来将雷达探测距离 r 和回波强度 d

以输出变量的形式传递到后续流程。在顶点着色器的最后还要将视坐标系下的顶点坐标进行投影变换,把投影变换后的顶点坐标 $V_p(x_p, y_p, z_p, w)$ 赋值给顶点着色器内置变量 $gl_Position$ 以保证场景按照透视投影方式进行处理。接下来, GPU 将进行图元装配、裁切和光栅化操作,顶点被组装为图元并离散化为若干片元。在片元着色器中,需要把雷达探测距离 r 赋值给片元着色器内置变量 gl_Depth , 经深度测试被保留的片元成为一个像素,写入 gl_Depth 的雷达探测距离 r 最终将写入深度缓存。深度缓存的取值范围默认为 $[0.0, 1.0]$, 直接将雷达探测距离 r 写入 gl_Depth 显然不可行,需要将雷达探测距离 r 映射到 $[0.0, 1.0]$ 区间,令:

$$r' = r / R \quad (3)$$

以 r' 代替 r 写入 gl_Depth 。式中 R 为雷达当前量程,由主程序根据用户通过 Uniform 变量传入。在片元着色器中,还需将回波强度 d 转换为能够表示回波强度的 RGB 颜色并写入片元着色器内置变量 gl_Color , 同样,经深度测试被保留片元的颜色值最终将被写入颜色缓存。

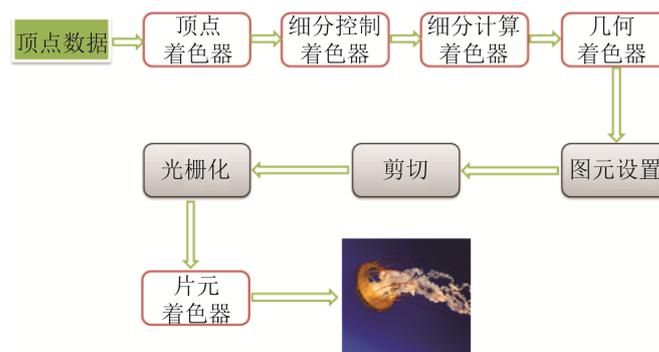


图 2 可编程 GPU 的图形处理流水线

1.2 生成雷达图像

理想状态下,将视见体的水平视场角设置为天线水平波束宽度,垂直视场角设置为天线垂直波束宽度,则生成的视景图形每个像素作为雷达波束的一个采样点,根据像素颜色和深度值即可生成雷达扫描线。事实上,要想生成较为理想的

雷达图像至少需要 1 000 条左右的扫描线,要在天线旋转一周(2~4 s)的时间内进行 1 000 次绘制是不现实的。因此,适当扩大水平视场角,将生成的三维视景图形内每一列像素作为一条扫描线的采样点,一次生成若干条扫描线以提高效率。如图 3 所示,对于帧缓存的每一列像素,逐像素读取像

素的深度值 r' 和颜色值, 若雷达量程为 R 、每条雷达扫描线由 T 个点组成, 令:

$$t = r' * T \quad (4)$$

将 t 取整后得到的整数值即为扫描线上点的序号, 把像素颜色值写入扫描线的第 t 个点, 这样, 就生成了一条扫描线。一次绘制可生成若干条扫描线, 将这些扫描线按其方位绘制到屏幕上即可生成雷达图像。

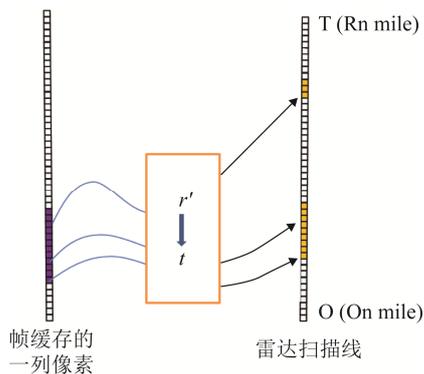


图 3 可编程 GPU 的图形处理流水线

上述基于视景图形绘制方法生成雷达图像的过程中, 视景图形的每个像素所起的作用与射线跟踪算法中的一条射线作用相同, 却不必进行求交计算, 避开了射线跟踪算法必须进行求交计算的瓶颈, 而所生成雷达图像效果与射线跟踪算法并无太大差异, 主要的差别在于不能模拟电磁波经物标反射到其它物体后形成的二次反射回波, 这也是提高实时性所付出的代价。

2 回波强度仿真模型

2.1 雷达方程

雷达回波强度由接收机接收到的功率密度决定, 根据雷达方程, 雷达接收的回波功率密度 d 为:

$$d = \frac{PG^2\lambda^2\sigma^0\Delta A}{(4\pi)^3 r^4 L_t L_r L_p} \quad (5)$$

式中: P 为发射功率; G 为天线增益; σ^0 为后向散射系数; ΔA 为散射单元面积; λ 为波长; r 为天线到物标距离; L_t 为发射机损耗; L_r 为接收机损耗; L_p 为电磁波传播引起的路径损耗。

在航海雷达模拟器中, 发射功率、天线增益、波长以及发射和接收损耗可认为是定值, 令:

$$A = \frac{PG^2\lambda^2}{(4\pi)^3 L_t L_r} \quad (6)$$

单位面积散射单元的雷达方程可写成如下形式:

$$d = AL_p^{-1}\sigma^0 R^{-4} \quad (7)$$

分析上式, A 仅与雷达自身特性有关, 反映了待仿真雷达的基本特性, 将其称为雷达性能系数, 可根据实际雷达的性能适当选取。本文中计算系数 A 所需的各参数取值^[4-5]见表 1。路径损耗 L_p 和后向散射系数 σ^0 相对较复杂, 下面分别予以讨论。

表 1 雷达性能参数表

量	取值
P	25 000 W
G	1 260
λ	0.031 9 m
L_t	2.51
L_r	3.16

2.2 路径损耗 L_p

微波波段电磁波传播引起的路径损耗主要有: 大气吸收损耗 A_{gt} , 地海面干涉损耗 A_{in} , 障碍物绕射损耗 A_d , 树林损耗 A_{wd} , 云雾损耗 A_g , 沙尘损耗 A_{sd} , 降雨损耗 A_R , 大气波导传播损耗 A_c ^[6]。从航海雷达的使用环境和航海雷达模拟器的使用目的来看, 可不考虑地海面干涉损耗、障碍物绕射损耗、树林损耗、沙尘损耗和大气波导损耗。因此, 传播衰减可用式(8)表示:

$$L_p = A_{gt} + A_R + A_g \quad (8)$$

当所在海区没有云雾或降水时, A_R 和 A_g 两项损耗可不计入。

2.2.1 大气吸收损耗

航海雷达天线高度十分有限, 大气吸收损耗 A_{gt} 可根据 ITU 水平路径大气衰减的方法^[7]进行计算。

$$A_{gt} = (\gamma_o + \gamma_w)r \quad (9)$$

式中: γ_o 和 γ_w 分别为氧气和水汽的衰减率; r 为雷达天线到目标的距离。为简化计算, γ_o 和 γ_w 两者

均取常数， γ_0 与 γ_w 之和 S 波段取 0.075 dB/km，X 波段取 0.13 dB/km。

2.2.2 降雨损耗

降雨引起的雷达电磁波衰减是很严重的，因此模拟雨天的雷达回波必须计及降雨损耗。ITU 建议的雨衰减计算公式为^[8]：

$$A_R = \gamma_R L \tag{10}$$

式中： γ_R 为雨衰减率，单位 dB/km； L 为电磁波通过的路径长度。

雨衰减率 γ_R 为：

$$\gamma_R = kR^\alpha \tag{11}$$

式中： R 为雨强(mm/h)，参数 k ， α 分别为：

$$k = [k_H + k_V + (k_H - k_V)\cos^2 \theta \cos(2\tau)] / 2 \tag{12}$$

$$\alpha = [k_H \alpha_H + k_V \alpha_V + (k_H \alpha_H - k_V \alpha_V) \cos^2 \theta \cos(2\tau)] / (2k) \tag{13}$$

式中： θ 为路径仰角； τ 为相对于水平面的极化倾角。对于航海雷达 k_H ， k_V ， α_H ， α_V 的取值见表 2。

表 2 航海雷达 k_H ， k_V ， α_H ， α_V 的取值

频率	k_H	k_V	α_H	α_V
3 GHz	0.000 350 4	0.000 314 5	1.018 5	0.992 7
9 GHz	0.006 916	0.006 056	1.304 4	1.293 7

航海雷达为水平极化， τ 为 0，天线高度较低且接近水平发射，要求不高时可将路径仰角 θ 取 0°，对雷达模拟器来说，环境数据是根据仿真需要人为设置的，故可预先将降水量设定为几个级别，并将每个级别的雨衰减率预先计算出来。本文根据降水量等级国家标准将降雨强度分为 7 个等级，每个等级的雨强采用估计值，各等级的雨强取值及根据公式(11)计算的雨衰减系数结果见表 3。

表 3 不同降水等级的雨衰减系数

降水等级	雨强 R /(mm/h)	X 波段/dB	S 波段/dB
特大暴雨	50.0	1.137 6	0.018 8
大暴雨	45.0	0.991 5	0.016 9
暴雨	27.5	0.521 5	0.010 2
大雨	11.0	0.157 9	0.004 0
中雨	4.3	0.046 4	0.001 5
小雨	0.8	0.005 2	0.000 3
微量降雨	0.1	0.000 3	0.000 0

2.2.3 云雾损耗

当航行区域有云或雾时，云雾也会吸收电磁波，造成传播衰减。根据 ITU 的建议标准^[9]，云雾衰减的计算公式为：

$$A_g = \gamma_c L = K_1 M L \tag{14}$$

式中： K_1 为衰减系数(dB/km)/(g/m³)； M 为云雾中液态水含量(g/m³)； L 为穿过云雾传播的路径长度。

S 波段雷达可不计及该项衰减，X 波段雷达的衰减系数可根据表 4 就近或内插求取。液态水含量 M 雨云取 0.5，中雾取 0.05(能见度约 300 m)，浓雾取 0.5(能见度约 50 m)^[6]。

表 4 K_1 取值

温度/°C	K_1
20	0.05
10	0.07
0	0.09
-8	0.10

综合上述分析，路径损耗 L_p 各项的计算由两部分组成：一部分为系数，随海上环境的变化而变化，变化不频繁，另一部分为电磁波的传播距离或穿越雨雪、云雾等区域的距离，与船位直接相关，船舶在海上航行船位随时变化，因此路径损耗 L_p 不能像雷达性能系数 A 一样进行预计算，必须在程序运行过程中进行动态计算。

2.3 后向散射系数 σ^0

地海杂波模型分为理论模型和经验模型。简单理论模型有 γ 常数模型、小镜面理论和 Bragg 共振散射等，粗糙面散射理论模型有适合大尺度粗糙表面的基尔霍夫模型、适合小尺度粗糙表面的小微扰近似解和两者相结合的双尺度模型等，密歇根大学 F. T. Ulaby 和 M. C. Dobson 提出的平均散射系数的经验模型(以下简称经验模型)是一个简单灵活的经验模型^[6]。航海雷达模拟器的使用性质决定了回波生成应具有较高的实时性，综合考虑， γ 常数模型和经验模型较适合于航海雷达回波生成。 γ 常数模型：

$$\sigma^0 = \gamma \sin \psi \quad \text{或} \quad (15)$$

$$\sigma^0 = \gamma \cos \theta \quad (16)$$

适用的入射角 θ (图 4)范围为 $30^\circ \sim 80^\circ$

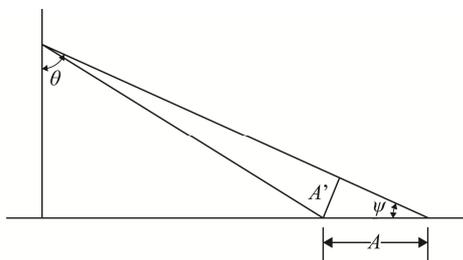


图 4 入射角

航海环境较为复杂,目前对后向散射系数的研究多集中在与国民经济密切相关的领域,如农作物探测,海上物标的后向反射系数缺乏实验数据支撑,本文参考表 5 和表 6 列出的实验数据分类列出了航海环境目标的估计值(表 7)。

表 5 几种地物 X 频段下的 γ 值

地物种类	γ/dB
小麦	-12.5
水稻	-8.216
草地	-7.27

表 6 几种地形的 r 值

地形特征	均值	5%概率	中值	95%概率
平原	-13.78	-8.296	-16.609	-28.356
丘陵	-8.751	-3.607	-10.874	-22.558
山区	-5.247	-0.124	-7.364	-18.952
城市	-3.510	1.495	-5.369	-16.197

表 7 航海雷达物标的 r 估计值

海上物标类型	γ/dB	r (比值)
淤泥	-16	0.025
沙滩	-9	0.126
礁石	-5	0.316
无植被覆盖的陆地	-7	0.200
有植被覆盖的陆地	-10	0.100
钢质船舶	-4	0.398
木质小船	-9	0.126
浮标	-5	0.316

平均散射系数的经验模型为:

$$\sigma^0 = P_1 + P_2 \exp(-P_3 \theta) + P_4 \cos(P_5 \theta + P_6) \quad (17)$$

式中: θ 为入射角, $P_1 \sim P_6$ 为参数, 通过拟合实验确定。

两种模型均可以用于回波强度计算, γ 常数模型相对较简单, 也能够满足雷达操作训练需求。经验模型设置更加灵活, 只要测得某种地物的雷达回波或数据, 总可以拟合得到合适的参数(表 8 为不同地物的参数^[6]), 扩充较为方便, 计算量也不大。

表 8 X 频段 HH 极化经验模型不同地物参数表

地形	裸土	草地	水稻	雪地
入射角范围	0~60	0~80	0~84	0~75
P_1	-42.269	-57.817	-17.543	-8.304
P_2	45.211	68.689	71.603	12.809
P_3	0.189	0.402	0.764	19.313
P_4	-10.876	-9.936	-57.161	15.581
P_5	-0.246	1.187	0.510	0.671
P_6	1.188	0.242	0.526	1.313
相关系数	0.897	0.985	0.977	0.975

2.4 对数接收机仿真模型

雷达回波功率密度 d 反映了传播介质、传播距离和物标后向散射特性等造成的回波强弱变化。回波功率密度受距离影响显著, 随着距离的增加回波功率密度快速下降, 由于航海雷达的量程通常较大, 造成回波功率密度 d' 动态范围较大(如图 5(a)所示), 很难用 $[0.0, 1.0]$ 区间内的颜色值将其合理地表示出来, 若直接截取到 $[0.0, 1.0]$ 区间, 显示在屏幕上的回波要么是 1.0, 回波过强, 要么是 0.0, 回波过弱, 与实际雷达并不相符。事实上, 接收机接收到的微弱电信号还需要经过检波器、A/D 变换器、限幅器、中频放大器等一系列处理才最终将回波显示到雷达屏幕上, 为获得较为合理的回波强度, 还需根据雷达接收机及显示器的工作特性将回波功率密度转换为可用于屏幕显示的颜色值。在上述信号处理过程中, 对回波波形影响较为显著的是中频放大器, 为达到较为合理的回波强度值, 本文根据对数接收机的输出特性, 采用对数放大器对回波功率密度 d 作进一步处理, 对数接收机的实际输出特性如下^[10]:

$$d' = A \ln(1 + Bd) \quad (18)$$

式中, A 、 B 为接收机常数; 回波功率密度 d 作为对数接收机的输入; d' 为对数接收机的输出。通过调整接收机常数 A 、 B , d' 的动态范围将达到一个较为合理的区间(如图 5(b)), 将其截取到 $[0.0, 1.0]$ 区间即可作为雷达回波强度使用。

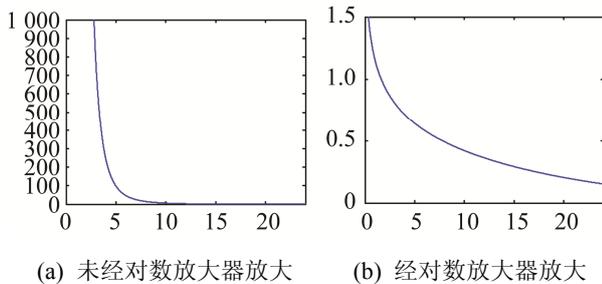


图 5 回波功率密度

3 图形绘制流水线中回波强度的计算流程

从上节分析可知, 雷达图像的回波强度主要受雷达自身特性 A 、路径损耗 L_p 、后向散射系数 σ^0 和对象与天线间距离 r 的影响。如前文所述, 雷达性能系数 A 为常数, 可作为参数传递到着色器程序直接参与计算, 路径损耗只能实时计算。后向散射系数则与物标的类型密切相关, 在三维模型中设置物标的材质属性, 程序运行中转换为后向散射系数是更为合理的选择。

3.1 在三维视景库中加入后向散射系数

基本光照模型以几何体的材质属性来表征对象的光学特性, 材质属性包括漫反射、镜面反射和环境光。漫反射模型可用式(10)表示:

$$I_{l,diff} = k_d I_1 \cos \theta \quad (19)$$

式中: $I_{l,diff}$ 漫反射光强度; k_d 为漫反射系数; I_1 为入射光强度; θ 为入射角。将 γ 常数模型与基本光照模型比较发现, 两者极为相似, k_d 与 γ 常数所起的作用是一致的, 分别表示光线和电磁波的漫反射或散射特性。因此, 可以仿照图形学的做法, 在建模阶段将 γ 常数写入几何体材质属性的某一通道, 在着色器程序中, 通过读取顶点的材质属

性获取 γ 常数。

对于经验模型, 有 $P_1 \sim P_6$ 六个计算参数, 材质属性只有三个通道, 无法将计算参数直接写入材质属性。考虑到模拟的物标仅是有限的若干类别, 可采用编码的方式表示物标的后向反射系数, 如淤泥的材质可表示为 $(0.0, 0.1, 0.0)$, 而沙滩可表示为 $(0.0, 0.2, 0.0)$ 等。在着色器程序中, 将不同类型物标的计算参数 $P_1 \sim P_6$ 存储于二维数组中, 读取顶点的材质属性, 根据材质属性判断物标类别, 之后即可根据物标类别查询相应的参数。

从建模的角度考虑, γ 常数模型与图形学上的一般做法更为接近, 建模简单直接, 程序实现也更为简单高效, 在 γ 常数模型能满足要求的情况下应优先选用。

3.2 采用可编程 GPU 的回波强度计算方法

3.2.1 计算后向反射系数 σ^0

不管是采用采用 γ 常数模型还是采用经验模型计算后向散射系数, 除需要根据物标材质属性查询计算参数外(γ 常数或 $P_1 \sim P_6$), 还要求取入射角 θ 。在顶点着色器中, 可通过顶点属性获取顶点的法线向量 N , 入射角 θ 为视坐标系下顶点坐标向量 V_e 的反方向与 N 的夹角, 令:

$$L = -V_e \quad (20)$$

$$\text{则: } \cos \theta = \frac{N \cdot L}{|N||L|} \quad (21)$$

若使用 γ 常数模型则直接进行计算, 若使用经验模型还需进行反三角函数计算。从这里可以看出, 使用 γ 常数模型不必进行反三角函数的计算, 由于每个顶点都要进行一次计算, 采用 γ 常数模型可节约大量计算资源, 效率更高。

3.2.2 计算顶点的路径损耗 L_p

路径损耗分为大气衰减、雨雪衰减和云雾衰减。大气衰减可根据公式直接计算, 不再赘述。雨雪衰减的计算分为两种情形, 一种是均匀或近似均匀的降雨, 如船舶处于某一近似恒定降水量的雨区。这时电磁波穿越雨区的路径长度 L 与物标到天

线的距离 r 相等, 可直接根据公式进行计算。另一种情形是非均匀降雨, 如船舶正逐渐接近(远离)降雨区或降雨区内部降水量差异较大, 这时穿越雨区的路径长度 L 应根据雨区的位置进行计算。为避免复杂计算, 本文采用以天线位置为中心的扇形来定义雨区, 如图 4 所示, 距离位于 R_{\min} , R_{\max} 之间, 且方位位于 TB_1 , TB_2 ($TB_1 < TB_2$, $TB_1, TB_2 \in [0, 360)$) 之间的扇形区域为雨区。若世界坐标系的 xy 平面为水平面, y 轴正向指向真北, 天线位置为 $V_p(x_p, y_p, z_p)$, 顶点的世界坐标为 $V_w(x_w, y_w, z_w)$, 令:

$$V_B = (x_w - x_p, y_w - y_p) \quad (22)$$

很容易求得向量 V_B 的真方位(与真北即 y 轴的夹角) TB 和长度 r_v , 若 $TB < TB_1$ 或 $TB > TB_2$, 那么电磁波不穿越雨区, 否则:

$$\begin{cases} r_v \leq r_{\min} & L = d \\ r_{\min} < r_v \leq r_{\max} & L = d - r_{\min} \\ r_v > r_{\max} & L = r_{\max} - r_{\min} \end{cases} \quad (23)$$

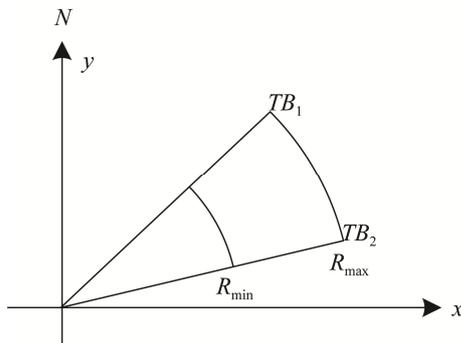


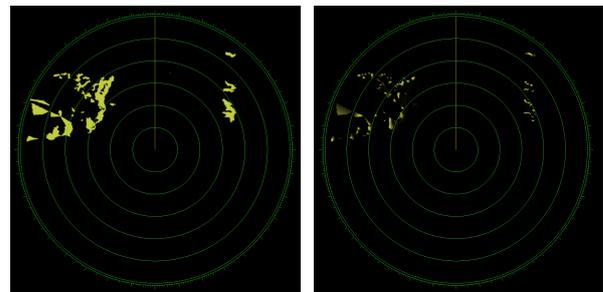
图 6 雨雪区域示意图

云雾衰减的计算方法与降雨损耗的计算方法类似, 只是衰减系数不同, 可参照降雨损耗的计算方法。

后向反射系数 σ^0 、路径损耗计算完成后, 根据雷达方程计算回波功率密度 d , 然后根据式 18 对回波功率密度进行对数放大, 将输出结果 d' 传递至片元着色器。

在片元着色器中, 每一个待处理的片元得到一个经插值的回波功率密度 d'' , 将 d'' 截取到 $[0.0, 1.0]$ 即为所要求取的回波强度。但此时得到的雷达回波强度还不是一个可观测的图像, 还要将其

转化为着色器程序能够识别的 RGB 色彩以显示到屏幕上。真雷达一般以回波的明亮程度来区别回波的强弱, HSV 颜色模型是一个对用户更为直观的色彩描述方法, 明度值 V 被认为是感觉的均匀量^[11], 更加适合表示雷达回波强度。将 d'' 作为明度值 V , 选择合适的色调 H 和色饱和度 S , 可得到亮度均匀变化的 HSV 颜色值。HSV 颜色值不能通过屏幕直接显示, 因此将其转化为 RGB 颜色值, 所获得的 RGB 颜色值即可作为雷达回波强度的视觉表示而显示在雷达屏幕上。最后, 将 RGB 值写入内置变量 gl_Color , 根据前文所述方法即可生成具有回波强度变化的航海雷达回波图像见图 7 所示。



增益较大回波较强

调小增益回波较弱

图 7 仿真结果

4 结论

本文提出了基于视景图形绘制方法生成航海雷达回波图像的方法, 该方法生成的雷达图像与射线跟踪算法相近, 但避开了射线跟踪方法求交计算的瓶颈问题。在此基础上, 根据航海雷达的特点和电磁波在航海环境中的传播特性, 提出了基于雷达方程的回波强度计算模型。该模型对传播衰减的计算项做了适当简化, 以 ITU 建议标准为基础结合海上环境特点提出了大气传播损耗、降雨损耗和云雾损耗的计算方法。对于后向散射系数, γ 常数模型相比于经验模型更为简单高效, 能满足要求时应优先选用。回波强度的计算采用着色器程序实现, 可充分获得图形硬件加速。

从仿真结果来看, 物标遮挡关系明确, 回波强

度变化合理,能较好地模拟增益变化产生的回波强度和形状变化,与以往以二维模型为基础的扫描线求交算法生成的航海雷达图像相比,回波图像真实感有了明显的提升。从本文第 3 节可以看出,目前求回波强度的方法仅考虑了回波强度中的 diffuse 分量,下一步将考虑增加 specular 分量对回波强度仿真计算的影响。

参考文献:

- [1] 金一丞,尹勇.航海模拟器 [M].北京:科学出版社,2013:331-352.
- [2] Ranaweera W, Jabbar S, Wickramarachchi R, et al. A Lightweight Approach to Simulate a 2D Radar Coverage for Virtual Maritime Environments [C]// Computer Science & Education (ICCSE), 2013 8th International Conference on. USA: IEEE, 2013: 402-406.
- [3] D'Amato J P, Bauza C G, Boroni G, et al. Real-Time Aircraft Radar Simulator for a Navy Training System [J].

Computer Applications in Engineering Education (S1061-3773), 2013, 21(4): 606-613.

- [4] John N Briggs. 航海雷达目标检测 [M].北京:电子工业出版社,2009.
- [5] 赵登平.世界海用雷达手册 [M].北京:国防工业出版社,2012.
- [6] 焦培南,张忠治.雷达环境与电波传播特性 [M].北京:电子工业,2007.
- [7] Rec. ITU-R P.676-6: Attenuation by atmospheric gases [S]. 2005.
- [8] Rec. ITU-R P.838-2: Specific attenuation model for rain for use in prediction methods [S]. 2003, 4.
- [9] Rec. ITU-R P.840-3: Attenuation due to clouds and fog [S]. 1999.
- [10] 杨万海.雷达系统建模与仿真 [M].西安:西安电子科技大学出版社,2007.
- [11] 孟章荣.各种颜色模型选用需求分析 [J].中国图象图形学报,1996,1(3):238-241.

(上接第 2075 页)

绞刀切削的数学模型的建立以及相对应的地形变化的环境模拟,具有较好的仿真效果和人机互动性。它不仅可以用于船员的虚拟培训,还可辅助挖泥船工程进行工程预测。此外,本文在考核模块的设计、绞刀切削的数学模型选择还需要进一步的实验设计,在未来的工作中我们将进行重点研究。

参考文献:

- [1] 王翰涛,鲁力群,王秀景.绞吸式挖泥船绞刀系统技术现状及发展 [J].机电设备,2014(6):10-16.
- [2] 张安鸿,倪福生.绞吸船三维图形仿真与变速控制研究 [J].系统仿真学报,2010,22(6):1520-1523.
- [3] 孙俊,陆畅,逢守文.船舶机舱虚拟现实仿真系统的实现方法 [J].系统仿真学报,2007,19(15):3456-3459.

- [4] 闫文珠,刘成,李磊民,等.基于 VR 技术的机器人核事故训练平台研究 [J].计算机仿真,2015,32(9):395-399.
- [5] 倪福生,赵立娟,顾磊,等.绞吸挖泥船疏浚仿真研究 [J].系统仿真学报,2012,24(11):2271-2274.
- [6] 何炎平,冯长华,顾敏童,等.“天鲸”号大型自航绞吸式挖泥船 [J].船舶工程,2009,31(5):1-5.
- [7] Downey S, Charles D. Distribution of Artificial Intelligence in DigitalGames [J]. International Journal of Intelligent Information Technologies (S1548-3657), 2015, 11(3): 1-14.
- [8] Rubin P. The Inside Story of Oculus Rift and How Virtual Reality Became Reality [J/OL]. (2014-05-20) [2016-05-31]. <http://www.wired.com/2014/05/oculus-rift-4/>
- [9] Simon Choppin, Jonathan Wheat. The potential of the Microsoft Kinect in sports analysis and biomechanics [J]. Sports Technology (S1934-6182), 2013, 6(2): 37-41.