

3-25-2020

## Rapid Simulation and Volume Rendering of Electromagnetic Environment Based on Geographic Coordinate System

Yuguo Wu

*1. Zhengzhou University Industrial Technology Research Institute, Zhengzhou 450001, China;;2. Zhengzhou Normal University School of geography and Tourism, Zhengzhou 450044, China;*

Beibei Han

*1. Zhengzhou University Industrial Technology Research Institute, Zhengzhou 450001, 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.

---

# Rapid Simulation and Volume Rendering of Electromagnetic Environment Based on Geographic Coordinate System

## Abstract

**Abstract:** Considering the earth's curvature, the spherical regular grid model is used to organize the electromagnetic field data. In order to reduce computational complexity of ITM model, the terrain reuse is proposed to improve the efficiency of the simulation. The Multithread and the terrain reuse are combined to improve the efficiency of the multi-radiation source. Considering that the traditional ray casting algorithm which takes the cube model as the bounding box cannot draw spherical regular grid data directly, a ray casting algorithm which uses the dome model as the bounding box is proposed. Experiments show that even considering the influence of terrain, the algorithm still can get high computational efficiency and satisfy the needs of electromagnetic simulation of multi-radiation source. Taking the bounding box of dome as the model, the ray casting algorithm will be applied widely.

## Keywords

irregular terrain model, geographic coordinate system, spherical regular grid, ray casting, dome

## Recommended Citation

Wu Yuguo, Han Beibei. Rapid Simulation and Volume Rendering of Electromagnetic Environment Based on Geographic Coordinate System[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(3): 362-370.

# 基于地理坐标系的电磁环境快速仿真与体绘制

武玉国<sup>1,2</sup>, 韩贝贝<sup>1</sup>

(1. 郑州大学产业技术研究院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州师范学院地理与旅游学院, 河南 郑州 450044)

**摘要:** 为有效考虑地球曲率的影响, 采用球形规则网格模型组织电磁场数据。针对 ITM(Irregular Terrain Model)模型计算量大的问题, 提出一种地形重用方法提高仿真效率。针对多辐射源计算问题, 将多线程计算和地形重用方法相结合, 提高仿真效率。针对传统光线投射算法使用立方体作为包围盒, 不能直接绘制球形规则网格数据问题, 提出一种使用圆顶体作为包围盒的光线投射算法。经实验验证, 考虑地形影响仍然能够获得较高的计算效率, 满足多辐射源电磁环境仿真的需要, 且圆顶体包围盒使光线投射算法的应用范围更加广泛。

**关键词:** ITM 不规则地形模型; 地理坐标系; 球形规则网格; 光线投射算法; 圆顶体

中图分类号: TP391.9

文献标识码: B

文章编号: 1004-731X (2020) 03-0362-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.18-0193

## Rapid Simulation and Volume Rendering of Electromagnetic Environment Based on Geographic Coordinate System

Wu Yuguo<sup>1,2</sup>, Han Beibei<sup>1</sup>

(1. Zhengzhou University Industrial Technology Research Institute, Zhengzhou 450001, China;

2. Zhengzhou Normal University School of geography and Tourism, Zhengzhou 450044, China)

**Abstract:** Considering the earth's curvature, the spherical regular grid model is used to organize the electromagnetic field data. In order to reduce computational complexity of ITM model, the terrain reuse is proposed to improve the efficiency of the simulation. The Multithread and the terrain reuse are combined to improve the efficiency of the multi-radiation source. Considering that the traditional ray casting algorithm which takes the cube model as the bounding box cannot draw spherical regular grid data directly, a ray casting algorithm which uses the dome model as the bounding box is proposed. Experiments show that even considering the influence of terrain, the algorithm still can get high computational efficiency and satisfy the needs of electromagnetic simulation of multi-radiation source. Taking the bounding box of dome as the model, the ray casting algorithm will be applicated widely.

**Keywords:** irregular terrain model; geographic coordinate system; spherical regular grid; ray casting; dome

## 引言

电磁环境广泛存在且非常复杂, 很多设施设备

都会受到电磁环境的影响, 对电磁环境进行仿真是评估电磁影响的基础。随着各种电磁设备的增多, 计算量也随之增大, 提高电磁环境仿真效率, 成为迫切需要解决的问题。

文献[1]在银河 10 万亿次高性能计算机上, 基于 MPICH2.0<sup>[2]</sup>并行开发环境和 ITM 不规则地形模型, 基于地形重用和并行方法对电磁环境进行加速仿真。但对于大多数普通用户而言, 银河 10 万亿



收稿日期: 2018-04-08 修回日期: 2018-08-13;  
基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0502300),  
河南省科技攻关项目(142102210144);  
作者简介: 武玉国(1973-), 男, 黑龙江讷河, 博士, 副教授, 研究方向为地理信息系统与地理环境仿真等。

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

次高性能计算机的条件难以实现。并且该文献在直角坐标系下组织电磁场数据, 数据场中同一行或列方向上的经纬度坐标值并不相同, 提取的地形并不能重用, 没有有效考虑地球曲率的影响。

本文在地理坐标系下分别沿着经度、纬度和高度方向上等间隔剖分数据空间, 形成球形规则网格的电磁场数据。在行列方向上的经纬度坐标间隔相同, 高度方向上亦等间隔, 因此, 提出一种地形重用方法进行电磁环境数据的加速仿真, 行列方向上只需提取一次地形数据, 大大减少了地形数据提取的次数, 加快了计算速度, 并有效地考虑了地球曲率的影响。针对多个电磁设备辐射源形成的电磁环境仿真计算效率低的问题, 采用数据调度缓存和多线程并行计算的方法, 加快多个辐射源电磁环境的仿真计算, 实现了 PC 机上多个电磁设备辐射源的仿真计算问题。

基于 GPU 的光线投射体绘制算法, 因其具有较好的绘制效果<sup>[3]</sup>, 得到了广泛的研究和应用<sup>[4-9]</sup>, 本文研究中采用此算法进行电磁场数据的绘制。传统基于 GPU 的光线投射算法, 采用体数据包围盒作为绘制代理网格, 包围盒通常是直角坐标系下的规则立方体<sup>[10]</sup>, 且体数据是直角坐标系下的规则网格。而电波传播通常是沿地球表面的, 本文采用球坐标系组织电磁场数据, 包围盒不是规则的立方体, 因此传统基于 GPU 的光线投射不能直接用于球形规则网格组织的电磁场数据的绘制。文献[11]通过绘制球坐标系下的电磁环境体数据包围盒, 实现电磁场的绘制, 但该文献提出的包围盒和电磁场数据中间有一部分空白区域, 需要判断转换后的纹理坐标是否在体数据计算范围内, 以此将空白区域剔除, 降低了绘制效率。文献[12]在球坐标系下组织电磁场数据, 包围盒仍是传统的规则立方体, 通过投射光线修正实现电磁环境的体绘制, 实现过程较繁琐并且存在一定的误差。针对这些问题, 本文提出一种圆顶体包围盒作为球形规则网格数据的绘制代理网格, 圆顶体的大小和电磁环境剖分范围的大小相同, 包围盒和电磁场数据没有空白区域,

相比文献[11]提出的包围盒, 本文节省了剔除空白区域的时间。也无需进行文献[12]的投射光线修正, 仅需在顶点着色器中通过坐标转换即可实现球形规则网格数据的绘制。

## 1 电磁环境计算模型设计

### 1.1 球形规则网格数据模型

电波在地球、地球大气层中传播时, 受媒质和媒质交界面的作用, 会产生反射、散射、折射、绕射和吸收等现象, 使电波的特性参量如幅度、相位、极化、传播方向等发生变化。由于地球是球面体, 地球曲率会影响电波的传输。

大范围的电波传播由于受绕射、反射等影响通常是沿地球表面的, 若在直角坐标系下组织电磁场数据, 不能很好地考虑地球曲率的影响。因此, 本文使用球形规则网格组织数据, 在地理坐标系下分别沿着经度、纬度、高度方向上进行均匀采样<sup>[13]</sup>。假设体数据大小为  $w \times h \times d$ 。球形规则网格数据剖分范围的最小地理坐标是  $(\varphi_0, \theta_0, r_0)$ , 最大地理坐标是  $(\varphi_1, \theta_1, r_1)$ , 即  $\varphi_0 < \varphi_1$ ,  $\theta_0 < \theta_1$ ,  $r_0 < r_1$ , 其中  $\varphi_0, \varphi_1$  表示经度,  $\theta_0, \theta_1$  表示纬度,  $\varphi$  和  $\theta$  采用球坐标表示,  $r_0, r_1$  表示高度, 如图 1 所示,  $R$  表示地球半径,  $ABDC$  阴影区表示电磁场数据。球形规则网格数据也是规则网格数据, 因此无需存储每个采样点的坐标值, 仅需存储网格点上的电磁场数据值。

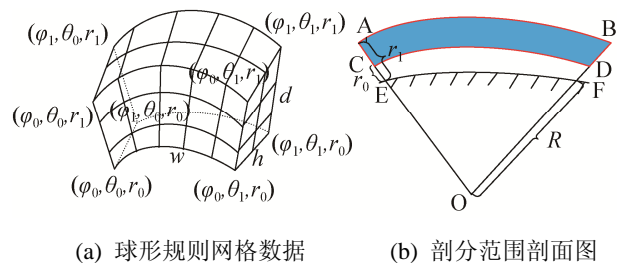


图 1 球形规则网格

Fig. 1 Spherical regular grid

### 1.2 基于 ITM 的电磁环境计算模型

ITM<sup>[14-15]</sup> (Irregular Terrain Model)模型考虑了

大气衍射、折射以及地形因素对电波传播的影响。本文基于 ITM 模型的点到点预测模型进行电磁环境计算模型的设计,适用于天线高度在 0.5 m 到 3 000 m,频率在 20 MHz~20 GHz,传播距离在 2 000 km 内的情况。

电波传播参考衰减  $A_{ref}$  是关于传播距离  $d$  的分段函数,计算公式见式(1):

$$A_{ref} = \begin{cases} \max(0, A_{el} + K_1 d + K_2 \ln(d/d_{ls})), & d < d_{ls} \\ A_{ed} + m_d d, & d_{ls} \leq d \leq d_x \\ A_{es} + m_s d, & d > d_x \end{cases} \quad (1)$$

当  $d < d_{ls}$  电波在视距区域传播,当  $d_{ls} \leq d \leq d_x$  在衍射区域,当  $d > d_x$  时在散射区域。参数  $A_{el}$ ,  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $A_{ed}$ ,  $A_{es}$ ,  $m_d$ ,  $m_s$ ,  $d_{ls}$ ,  $d_x$  是基于电磁理论和统计方法计算得到的,计算方法详见文献[16]。

电波在自由空间传播路径损耗的计算公式是:

$$L_{fs} = 32.45 + 20 \lg f + 20 \lg(dist) \quad (2)$$

式中:  $f$  为电磁波的频率,单位是 MHz;  $dist$  为传播路径长度,单位是 km; 则电磁波的总传播损耗值是:

$$Loss = L_{fs} + A_{ref} \quad (3)$$

根据用频设备的发射功率及天线增益,可计算得到三维空间中任意一点的功率强度值:

$$P_r = P_t + G - Loss - L_s \quad (4)$$

式中:  $P_r$  为计算得到的三维空间某一点的辐射功率强度值;  $P_t$  为用频设备的发射功率,单位是 dBW;  $G$  为天线增益,单位是 dBi;  $Loss$  为公式(3)计算的传播总损耗,单位是 dB;  $L_s$  为系统损耗和其它损耗等,一般取 3~5 dB<sup>[1]</sup>。

### 1.3 基于 DEM 的地形提取研究

ITM 模型考虑了地形因素对电波传播的影响,在计算辐射源到采样点的衰减时,需要从 DEM<sup>[17]</sup> 中提取这两点间的高程数据序列,如图 2 所示。

由辐射源  $a$  和采样点  $b$  的经纬度,可由公式(5)计算得到两点之间的大圆距离,原理见文献[18]。

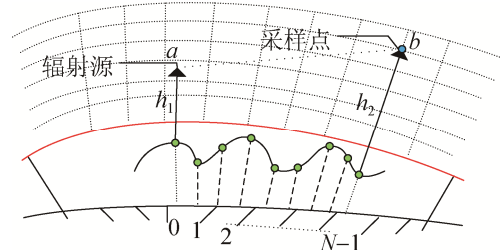


图 2 地形提取示意图

Fig. 2 Terrain extraction schematic

$$\begin{cases} c = \sin(\Delta LatRad/2.0) * \sin(\Delta LatRad/2.0) + \\ \cos(Lat1Rad) * \cos(Lat2Rad) * \\ \sin(\Delta LonRad/2.0) * \sin(\Delta LonRad/2.0) \quad (5) \\ e = 2.0 * \arctan(\sqrt{c}/\sqrt{1.0 - c}) \\ dis = R * e \end{cases}$$

式中:  $\Delta LatRad$ ,  $\Delta LonRad$  分别为  $a$ ,  $b$  两点的纬度差和经度差(弧度表示)。  $Lat1Rad$ ,  $Lat2Rad$  分别为  $a$ ,  $b$  两点的纬度(弧度表示),  $c$  和  $e$  是中间计算结果,具体含义见文献[18],  $dis$  为两点间的距离。

根据  $dis$  和 DEM。地形提取完成后,结合点  $a$  和点  $b$  的网格距,选取合适的采样间隔进行高程数据提取。为了保证采样精度,通常地形采样间隔要小于等于 DEM 网格距高度  $h_1$  和  $h_2$ ,即可采用基于 ITM 的电磁环境计算模型求得采样点  $b$  的功率强度值。

### 1.4 加速计算

在基于 ITM 模型计算  $w \times h \times d$  中每个采样点处的功率强度时,需要提供辐射源到采样点 2 点间地形提取的个数  $N$ 、地形采样间隔以及 2 点间  $N$  个高程数据序列。对于大范围的电磁仿真来说,计算距离越远,提取个数  $N$  就越多,地形提取消耗时间也就越长。大范围地形提取要对外存进行访问,相对于内存访问和 CPU 计算来说速度很慢,地形提取时间会占用整个 ITM 模型总计算量的大部分。

因此,针对球形规则网格数据的特点,即数据场列方向上的经纬度坐标相同,提出一种地形重用方法来加快仿真计算。即对于每一列采样点来说,计算一个辐射源到该列采样点的辐射功率强度时,地形序列只需提取一次,减少了地形提取的次数,

如图 3(a)所示。本文提出的地形重用方法和传统顺序计算每个采样点的功率值相比,计算距离和提取地形序列的次数由  $w \times h \times d$  次,缩短为  $w \times h$  次,大大提高了电磁仿真效率。文献[1]在直角坐标系下组织电磁场数据,如图 3(b)的蓝色线条,直线  $l_1$ 、 $l_2$  是由地球中心和采样点  $p_1$ 、 $p_2$  的连线,直线  $l_1$  和  $l_2$  上的经纬度坐标相同,点  $p_1$  所在垂直方向上列采样点(黄色圆点)的经纬度坐标并不相同,辐射源到该列采样点提取的地形高程数据实际上并不相同,文献[1]所用的地形重用方法计算得到的功率值存在较大误差。

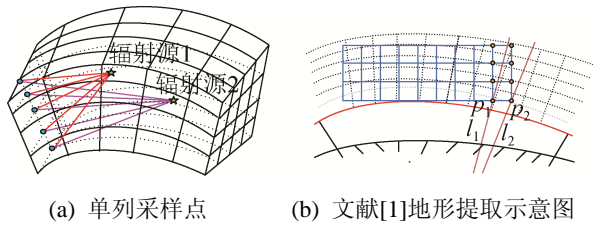


图 3 单列采样点地形重用示意图  
Fig. 3 Signal column sampling point terrain reuse schematic

针对多个辐射源形成的电磁环境计算效率慢的问题,本文还采用数据调度缓存和多线程并行计算的方法来提高计算效率。并行计算的粒度为每个水平网格点上所有列的功率强度计算。

## 2 球形规则网格数据的直接体绘制

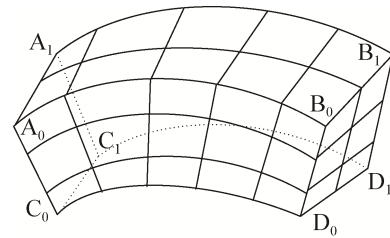
传统基于 GPU 的光线投射算法采用三维直角坐标系下的体数据包围盒作为绘制的代理网格,将包围盒每个顶点的坐标分量与该顶点的颜色分量以及三维纹理坐标分量在数值上设置相等。体数据是规则的,包围盒也是规则的立方体。

本文使用的是球形规则网格数据,包围盒不是立方体,因此传统基于 GPU 的光线投射算法不能直接应用到本文电磁场数据的绘制。

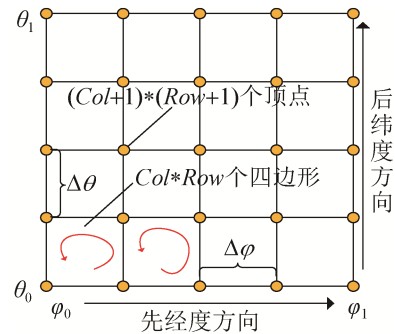
### 2.1 圆顶体包围盒的构建

为了采用光线投射算法绘制球形规则网格数据,本文提出一种圆顶体作为体绘制的代理几何体,如图 4(a)所示的刚好能够包围整个数据场的

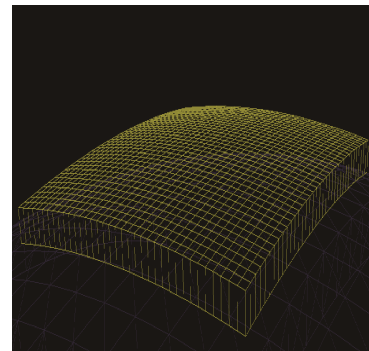
圆顶体  $A_0A_1B_1B_0C_0C_1D_1D_0$ 。  $A_0A_1B_1B_0$  曲面的高度是  $r_1$ ,  $C_0C_1D_1D_0$  曲面的高度是  $r_0$ ,点  $A_0$  和点  $C_0$  的经纬度相同,同理点  $A_1$  和  $C_1$ 、点  $B_0$  和  $D_0$ 、点  $B_1$  和  $D_1$  的经纬度分别对应相同。包围盒剖面图如图 1(b)的 ABDC 红色线条所示,与体数据剖分范围相同。



(a) 圆顶体包围盒



(b) 上顶面绘制示意图



(c) 圆顶体俯视图

图 4 圆顶体包围盒示意图  
Fig. 4 Dome bounding box schematic

圆顶体的构建过程:

(1) 经度间隔、纬度间隔和高度间隔的确定 ( $\Delta\varphi$ 、 $\Delta\theta$  和  $\Delta r$ )。

根据经验调整沿经度方向分割的行数  $Row$ ,沿纬度方向分割的列数  $Col$  以及高度方向分割的数

量  $Hei$ , 可用公式(6)计算得到经度间隔 $\Delta\varphi$ 、纬度间隔 $\Delta\theta$ 和高度间隔 $\Delta r$ 。

$$\begin{cases} \Delta\varphi = \frac{(\varphi_1 - \varphi_0)}{Col} \\ \Delta\theta = \frac{(\theta_1 - \theta_0)}{Row} \\ \Delta r = \frac{(r_1 - r_0)}{Hei} \end{cases} \quad (6)$$

(2) 上曲面  $A_0A_1B_1B_0$  的构建过程。

点  $A_0, A_1, B_0, B_1$  的球坐标分别是  $(\varphi_0, \theta_0, r_1 + R)$ 、 $(\varphi_0, \theta_1, r_1 + R)$ 、 $(\varphi_1, \theta_0, r_1 + R)$  和  $(\varphi_1, \theta_1, r_1 + R)$ 。先沿着经度方向遍历, 再沿着纬度方向遍历, 由  $A_0, A_1, B_1, B_0$  四个点的球坐标值、剖分间隔数( $Row$  和  $Col$ )以及经纬度方向剖分间隔( $\Delta\varphi$  和  $\Delta\theta$ ), 可得到该表面上  $(Col + 1) \times (Row + 1)$  个顶点的球坐标值用  $(\varphi_0 + i * \Delta\varphi, \theta_0 + j * \Delta\theta, r_1 + R)$  表示, 其中,  $i = 0, 1, 2 \dots Col$ ,  $j = 0, 1, 2 \dots Row$ 。然后用公式(7)将该表面上  $(Col + 1) \times (Row + 1)$  个顶点的球坐标转换为直角坐标。

$$\begin{cases} x = r \cos \theta \cos \varphi \\ y = r \cos \theta \sin \varphi \\ z = r \sin \theta \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $\varphi, \theta, r$  为球坐标, 分别表示经度、纬度和半径,  $x, y, z$  为直角坐标。得到  $(Col + 1) \times (Row + 1)$  个顶点的直角坐标后, 按逆时针方向顺序连接绘制四边形, 共有  $Col \times Row$  个四边形, 最后形成一个圆顶体上曲面  $A_0A_1B_1B_0$ , 示意图如图 4(b)所示。

(3) 其余 5 个曲面的绘制过程类似步骤(2)。

需要注意的是, 在绘制 4 个侧面时, 前后 2 个面四边形个数是  $Col \times Hei$ , 左右 2 个侧面四边形的个数是  $Row \times Hei$ 。当  $Col$  和  $Row$  取 36,  $Hei$  取 1 时整个圆顶体的绘制效果俯视图见图 4(c)。

## 2.2 着色器中的坐标转换

传统基于 GPU 的光线投射算法, 将包围盒每个顶点颜色设置为顶点坐标值, 即包围盒每个顶点的坐标分量与该顶点的颜色分量以及三维纹理坐标分量在数值上相等, 包围盒是立方体, 体数据是直角坐标系下的规则网格数据。经过图形硬件光栅

化后, 包围盒表面上每个片元的纹理坐标值与其颜色值相等。由于包围盒是凸的, 利用图形硬件的面片剔除功能, 通过帧缓存对象绘制包围盒背面到纹理, 那么背面纹理存储的就是背面片元的三维纹理坐标, 对应于投射光线的终点。绘制包围盒前面得到投射光线的起点。

本文仿真得到的电磁场数据, 是在球坐标系下组织的规则网格数据, 包围盒是圆顶体, 在用光线投射算法进行渲染时, 不能直接将包围盒顶点颜色值设置为顶点坐标值。本文通过坐标转换, 实现包围盒每个顶点的坐标分量与该顶点的颜色分量以及三维纹理坐标分量的对应。首先, 在 **BackFace** 顶点着色器中, 将圆顶体包围盒每个顶点的直角坐标  $(x, y, z)$  转换为球坐标值  $(\varphi, \theta, r)$ , 转换公式如式(8)所示。再将得到的球坐标  $(\varphi, \theta, r)$  用公式(9)转换到  $[0, 1]$  之间并存到 **vPos** 变量中。在 **BackFace** 片段着色器中, 将片元颜色值(RGB)在数值上设置为 **vPos** 的值。在 **FrontFace** 顶点着色器进行同样的顶点坐标转换, 然后启动 **FrontFace** 片段着色程序, 进行光线投射、重采样等过程。

$$\begin{cases} \varphi = \arctan \frac{y}{x} \\ \theta = \arcsin \frac{z}{r} \\ r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \end{cases} \quad (8)$$

式中: 经度  $\varphi$  的范围在  $[-\pi, \pi]$  之间, 纬度  $\theta$  的范围在  $[-\pi/2, \pi/2]$  之间。

$$\begin{cases} vPos_x = \frac{\varphi - \varphi_0}{\varphi_1 - \varphi_0} \\ vPos_y = \frac{\theta - \theta_0}{\theta_1 - \theta_0} \\ vPos_z = \frac{r - (r_0 + R)}{(r_1 + R) - (r_0 + R)} \end{cases} \quad (9)$$

通过以上一系列坐标转换, 包围盒片元坐标值、颜色值、三维纹理坐标就相对应, 在光线穿过体数据进行采样时, 就能得到重采样点正确的颜色和透明度值。整个着色器中坐标转换过程的伪代码如下:

```

1. //BackFace.vert 顶点着色器
varying vec3 vPos; //定义一个易变变量
vPos = gl_Vertex; //将包围盒顶点坐标赋给
//vPos
float x = vPos.x;
float y = vPos.y;
float z = vPos.z;
//将顶点直角坐标转换成球坐标
float r = sqrt(x*x + y*y + z*z);
float phi = atan(y,x);
float theta = asin(z/r);
//将坐标值转换到[0,1]之间
vPos.x = (phi-phi0)/(phi1-phi0);
vPos.y = (theta-theta0)/(theta1-theta0);
vPos.z = (r - (r0+R))/((r1+R)-(r0+R));
2. //BackFace.frag 片段着色器, 设置颜色分量、
//(RGB)在数值上和转换到[0,1]的坐标值相同
gl_FragColor = vec4(vPos,1.0);
3. //FrontFace.vert 中顶点坐标转换实现过程和
//BackFace.vert 相同
4. //FrontFace.frag 片段着色器进行光线投射,
//在三维纹理
//采样时就能得到正确的颜色值和不透明度值
RayCasting ; //光线投射
gl_FragColor = colorAcum; // 最终图像

```

### 3 实验结果

进行算法验证的 PC 机硬件配置: Inter(R) Core(TM) i7-6700HQ CPU8GB 内存 2.60 GHz、NVIDIA GTX1060 显卡; 软件环境: Win7-64 位操作系统环境、OSG3.0.0、GLSL 着色语言。ITM 模型参数设置: 表面折射率为 301N-units, 介电常数为 15 F/m, 电导率为 0.005 S/m。DEM 数据分辨率是 90.0 m, 地形采样间隔取 90.0 m。10 个辐射源电磁设备参数见表 1。

表 1 电磁设备参数

Tab. 1 Electromagnetic equipment parameters

编号	频率/MHz	功率/W	增益/dBi	系统 损耗/dB	天线 高度/m
1	350.0	359	20	3.5	10
2	355.0	500	18	3.2	8
3	353.9	480	23	4.0	9
4	348.0	259	25	4.5	12
5	358.9	450	27	4.8	15
6	349.5	380	22	3.9	13
7	352.5	330	19	3.7	7
8	351.0	550	24	5.0	9
9	350.5	520	28	4.9	10
10	351.2	490	20	4.2	15

### 3.1 仿真效率分析

在同一计算机、相同的仿真场景中, 用表 1 中电磁设备编号 1 的参数值, 仿真该辐射源构成的电磁环境。在不同采样密度下, 分别用传统顺序计算每个采样点功率值的方法和本文的地形重用方法进行试验对比, 结果统计见表 2, 其中, 加速倍数=传统顺序计算(地形不重用)仿真时间/本文的地形重用仿真时间。

表 2 改进的地形重用和传统地形不重用方法计算仿真时间对比

Tab. 2 Between improved terrain reuse and traditional method calculation simulation time comparison

编号	采样密度	地形重用/s	地形不重用/s	加速倍数
1	64×64×32	13	260	20.0
2	128×64×32	26	516	19.8
3	64×128×32	26	520	20.0
4	128×128×32	51	1 031	20.22
5	128×128×64	71	2 048	28.85
6	128×128×128	110	4 072	37.0

从表 2 可以看出, 从编号 1 和 2 及编号 1 和 3 的计算时间对比, 当经度方向( $w$ )和纬度方向( $h$ )的采样密度分别增大为之前的 2 倍时, 仿真计算时间增大为之前的 2 倍。从编号 1 和 4 进行对比, 当经度和纬度方向的采样密度同时增大为之前的 2 倍时, 即 4 倍时, 仿真时间约为 4 倍关系。将编号 4 和 5 进行对比, 当高度方向采样密度增大两倍, 地形不重用时, 仿真时间几乎也是 2 倍关系; 地形



重用方法, 计算时间为 1.39 倍, 这是因为高度方向每列采样点只进行一次地形数据序列的提取。编号 1, 2, 3, 4 四种采样密度下, 对比同一行中 2 种仿真方法计算时间, 加速倍数约为 20 倍。从编号 5、6 可以看到当采样密度为  $128 \times 128 \times 64$  和  $128 \times 128 \times 128$  时, 相比编号 1、2、3、4 来说, 加速效果比较明显, 分别为 28.85 倍和 37 倍。因此本文提出的地形重用方法, 对于大范围电磁仿真来说, 能有效提高计算效率。相比文献[1]的方法, 本文考虑了地球曲率的影响, 仿真结果更加准确。

在同一计算机仿真环境中, 地形重用条件下, 分别采用单线程和多线程来仿真表 1 中 10 个辐射源构成的多源电磁环境, 进行计算时间对比, 试验结果统计见表 3, 其中, 加速倍数=单线程+地形重用计算时间/多线程+地形重用计算时间。

表 3 由表 1 中十个辐射源构成的电磁环境计算效率对比  
Tab. 3 Comparison of calculation efficiency of electromagnetic environment composed of ten radiant sources in Table 1

编号	采样密度	地形重用+多线程计算时间/s	地形重用+单线程计算时间/s	加速倍数
1	$64 \times 64 \times 32$	40	161	4.025
2	$128 \times 128 \times 64$	221	885	4.0
3	$128 \times 128 \times 128$	341	1 371	4.02
4	$256 \times 128 \times 64$	441	1 761	3.99
5	$256 \times 256 \times 64$	883	3 538	4.01

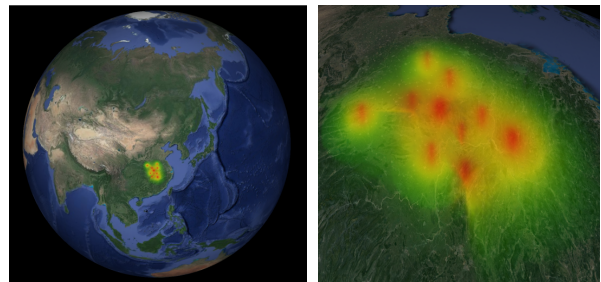
从表 3 可以看出, 多线程结合地形重用方法和单线程结合地形重用方法相比, 加速倍数达到 4 倍, 大大提高了仿真效率。随着采样密度的变化, 加速倍数并没有明显的变化, 都约等于 4。

### 3.2 绘制结果

本文采用 OSG<sup>[19]</sup> 三维渲染引擎和 OpenGL 着色语言实现了改进的光线投射算法, 窗口大小为  $1\,920 \times 1\,080$  像素, 视点高度为 19 114 km 时绘制帧率达到系统设置的最高帧率 60 帧/s。10 部电磁设备构成的电磁环境体绘制效果如图 5 所示。其中, 红色表示功率强度最强, 即辐射源附近; 距离辐

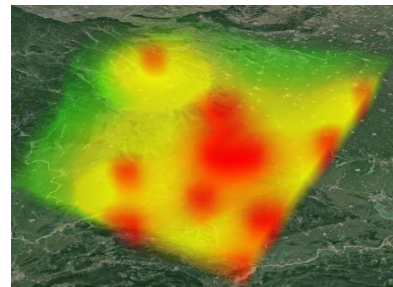
射源越远, 功率强度越弱, 颜色由黄色渐变到绿色。

图 5(d)是本文提出的圆顶体包围盒绘制的电磁场侧面效果图, 图 5(e)是采用传统立方体在高度方向上经过缩放后绘制的电磁场侧面效果图。对比可以看出, 本文提出的基于圆顶体包围盒绘制的电磁场, 紧贴地球表面, 有效地表现出地球曲率对其的影响; 而基于立方体绘制的电磁场无法紧贴地球表面, 不能很好地表现电波沿地球表面传播的特性。

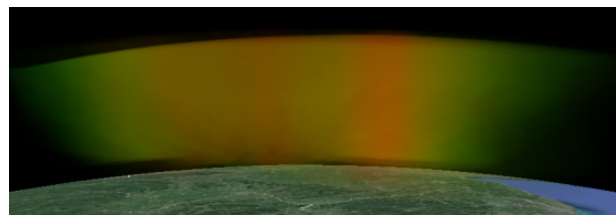


(a) 远距离效果

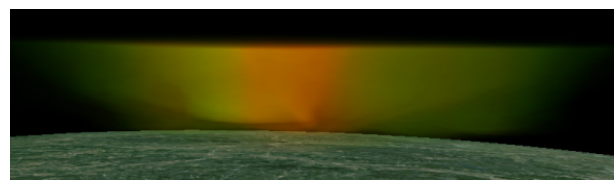
(b) 近距离效果



(c) 切块



(d) 圆顶体包围盒绘制效果



(e) 立方体包围盒绘制效果

图 5 电磁环境体绘制效果

Fig. 5 Electromagnetic environment rendering effect

如表 4 所示, 在不同的视点高度下, 采用传统立方体和本文圆顶体渲染的电磁场在三维数字地球平台上绘制最低帧率已达到 26 帧/s, 满足实时交互的需要。当视点高度是 19 114 km 时, 两种方法渲染的帧率达到系统设置的最高帧率 60 帧/s。随着视点的拉近, 因需要加载更详细的地形数据以及影像数据, 帧率有所下降。当视点高度是 6 428 km 和 787 km 时, 传统立方体绘制帧率略高于圆顶体绘制帧率, 差异产生的主要原因是 2 种方法下坐标系转换的不同造成的, 圆顶体需要进行球坐标、直角坐标和纹理坐标的转换, 因此计算量更大, 但该方法能更好地表现电波传播特性。

表 4 绘制效率对比  
Tab. 4 Rendering efficiency comparison

视点高度/km	传统立方体/fps	圆顶体/fps
1 9114.0	60	60
6 428.0	53	47
787.0	32	26

## 4 结论

本文结合球形规则网格数据组织特点和 ITM 模型的计算特点, 提出一种地形重用方法加速电磁环境数据仿真计算, 数据场列方向上地形只需提取一次, 减少了地形提取的次数, 并有效考虑了地球曲率的影响。针对多辐射源电磁环境计算效率低的问题, 结合地形重用方法和多线程技术提高电磁环境仿真效率。针对传统基于 GPU 的光线投射算法的包围盒是立方体, 不能直接绘制地理坐标系下组织的电磁环境数据场的问题, 提出一种圆顶体作为体数据包围盒, 通过坐标转换实现球形规则网格数据的绘制。实验表明, 本文提出的圆顶体包围盒, 无需进行空白区域的判断, 加快了绘制效率, 节约了系统资源, 且仿真效果能更好表现电磁场传播特性。本文提出的圆顶体包围盒, 也适合其它球形规则网格数据的可视化, 扩大了光线投射算法的应用范围, 解决了球形规则网格数据体绘制的难题。

## 参考文献:

- [1] 于荣欢, 吴玲达, 邓宝松, 等. 基于 ITM 的复杂电磁环境并行计算方法[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(7): 1339-1343.  
Yu Ronghuan, Wu Lingda, Deng Baosong, et al. Parallel Computing Research of Complex Electromagnetic Environment Based on ITM[J]. Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(7): 1339-1343.
- [2] 赖韬. 基于 MPI 的高并发负载生成系统的研究与实现[D]. 广州: 中山大学, 2014.  
Lai Tao. Research and Implementation of High Concurrency Load Generating System Based on MPI[D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2014.
- [3] 马千里, 李思昆, 白晓征, 等. CFD 非结构化网格格式数据高质量体绘制方法[J]. 计算机学报, 2011, 34(3): 3508-3516.  
Ma Qianli, Li Sikun, Bai Xiaozheng, et al. High-Quality Volume Rendering of Unstructured-Grid Cell-Centered Data in CFD[J]. Chinese Journal of Computers, 2011, 34(3): 3508-3516.
- [4] 杜松江, 张思超. 采用 GPU 的提升纹理缓存命中光线投射方法[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2016, 37(5): 627-632.  
Du Songjiang, Zhang Sichao. Improving Texture Cache-Hit Rate of GPU-Based Ray Casting[J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2016, 37(5): 627-632.
- [5] 吴玲达, 郝利云, 冯晓萌, 等. 结合等值面绘制与体绘制的电磁环境可视化方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(5): 887-893.  
Wu Lingda, Hao Liyun, Feng Xiaomeng, et al. Combining Isosurface Rendering and Volume Rendering for Method of Electromagnetic Environment Visualization[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(5): 887-893.
- [6] 张阿关, 蒋慧琴, 马岭, 等. 一种基于 GPU 的改进光线投射算法[J]. 计算机工程与科学, 2017, 39(1): 145-150.  
Zhang Aguan, Jiang Huiqin, Ma Ling, et al. An Improved Ray Casting Algorithm Based on GPU[J]. Computer Engineering & Science, 2017, 39(1): 145-150.
- [7] 罗月童, 张伟, 石放放, 等. 基于结构特征的自适应光线投射算法[J]. 中国图象图形学报, 2015, 20(4): 483-490.  
Luo Yuetong, Zhang Wei, Shi Fangfang, et al. Structure Feature Based Adaptive Ray Casting Algorithm[J]. Journal of Image and Graphics, 2015, 20(4): 483-490.

- [8] 何楠, 杜宏伟. 一种高效的光线投射体绘制优化算法[J]. 航天医学与医学工程, 2015, 28(4): 265-269.  
He Nan, Du Hongwei. An Efficient Ray Casting Volume Rendering Optimization Algorithm[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2015, 28(4): 265-269.
- [9] 冯晓萌, 吴玲达, 董士伟. CUDA 加速的动态电磁环境数据场实时绘制[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(9): 2044-2049.  
Feng Xiaomeng, Wu Lingda, Dong Shiwei. CUDA Accelerated Real-time Rendering for Dynamic Electromagnetic Environment Volume Data[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(9): 2044-2049.
- [10] 高颖, 陈旭, 周士军, 等. 基于光线投射的电磁态势实时可视化[J]. 兵工学报, 2015, 36(12): 2306-2314.  
Gao Ying, Chen Xu, Zhou Shijun, et al. Real-time Visualization of Electromagnetic Situation with Graphics Processing Unit Based on Ray-casting Algorithm[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(12): 2306-2314.
- [11] 杨超, 徐江斌, 吴玲达. 硬件加速的虚拟电磁环境体可视化[J]. 北京邮电大学学报, 2011, 34(1): 55-59.  
Yang Chao, Xu Jiangbin, Wu Lingda. Hardware Accelerated Volume Visualization in Virtual Electromagnetic Environment[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2011, 34(1): 55-59.
- [12] 冯晓萌, 吴玲达, 杨超. 基于 CUDA 架构的复杂电磁环境空间数据实时体绘制技术[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(7): 1549-1553.  
Feng Xiaomeng, Wu Lingda, Yang Chao. Real-time Volume Rendering Technique for Complex Electromagnetic Environment Space Data Based on CUDA Architecture[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(7): 1549-1553.
- [13] 杨超. 虚拟战场中电磁环境三维建模与绘制方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.  
Yang Chao. Research on 3D Modeling and Rendering of Electromagnetic Environment in Virtual Battlefield[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.
- [14] Longley A G, Rice P L. Prediction of tropospheric radio transmission loss over irregular terrain, a computer method[EB/OL]. [2018-03-27]. [http://www.its.bldrdoc.gov/pub/essa\\_ertl\\_79-its\\_67/](http://www.its.bldrdoc.gov/pub/essa_ertl_79-its_67/).
- [15] 刘增明. 基于 OSG 的战场视景仿真研究[D]. 北京: 电子科技大学, 2014.  
Liu Zengming. The Research of Battlefield Scene Simulation Based on OSG[D]. Beijing: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.
- [16] 朱晓丹. 大规模复杂电磁环境三维可视化研究与实现[D]. 北京: 电子科技大学, 2015.  
Zhu Xiaodan. The Research and Realization of 3D Large Scale Complex Electromagnetism Visualization[D]. Beijing: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.
- [17] 汤国安. 我国数字高程模型与数字地形分析研究进展[J]. 地理学报, 2014, 69(9): 1305-1325.  
Tang Guoan. Progress of DEM and Digital Terrain Analysis in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(9): 1305-1325.
- [18] The Math Forum. Haversine Formula [EB/OL]. (1999-04-21)[2018-03-27] <http://mathforum.org/library/drmath/view/51879.html>.
- [19] 王跃, 郑贵洲. 基于 OSG 的 OBS 导航定位系统三维可视化场景实现[J]. 计算机应用与软件, 2017, 34(8): 92-96,129.  
Wang Yue, Zheng Guizhou. Implementation of 3D Visualization Scene for OBS Navigation and Positioning System Based on OSG[J]. Computer Applications and Software, 2017, 34(8): 92-96,129.