

doi: 10.7690/bgzdh.2014.06.001

地形影响条件下雷达电磁波三维可视化实现

杨玉林¹, 郭忠伟², 金峰²

(1. 陆军军官学院科研部, 合肥 230031; 2. 陆军军官学院炮兵系, 合肥 230031)

摘要: 针对地形、地物会形成雷达探测盲区的问题, 给出一种实现地形影响条件下雷达电磁波可视化方法。基于雷达方程, 对自由条件下雷达三维探测范围建模; 利用几何光学法对电磁传播进行模拟, 绘制出地形遮挡下雷达的实际探测范围; 并利用 OpenGL 进行曲面绘制, 实现地形影响条件下雷达电磁波的三维可视化。该技术可为雷达装备的部署、训练等提供支持。

关键词: 雷达电磁波; 可视化; 数据采样; 面绘制

中图分类号: TJ02 **文献标志码:** A

3D Visualization Implementation to Radar Electromagnetic Wave Under Influence of Topography

Yang Yulin¹, Guo Zhongwei², Jin Feng²

(1. Department of Science & Research, Army Officer Academy of PLA, Hefei 230031, China;

2. Department of Artillery, Army Officer Academy of PLA, Hefei 230031, China)

Abstract: The topography and terrain cause radar detection blind zone, introduce a method of radar electromagnetic wave visualization under influence of topography. Based on radar equation, establish modeling of radar 3D detection area under free conditions. Then, use geometrical optics to simulate electromagnetic propagation, draw the radar actual detection area by terrain masking. At last, use OpenGL to carry our curve drawing, realize 3D visualization of radar electromagnetic wave under influence of topography. The technique can provide the support for the deployment of radar equipment, training etc.

Keywords: radar electromagnetic wave; visualization; data acquisition; surface drawing

0 引言

雷达工作时, 四周的地形、地物所形成的遮蔽角会阻挡电磁波的传播, 影响雷达的覆盖范围, 致使覆盖范围极易形成探测盲区^[1]。另外, 地形也影响着雷达的机动、侦察、隐蔽、通信和架设。若能通过对不可见的雷达电磁波进行感知、分析和处理, 对雷达在地形影响下的作用范围进行可三维可视化显现^[2-3], 生成直观、逼真的雷达电磁波场景, 将在很大程度上优化雷达的配置和使用, 提高雷达的作战效能, 并可广泛应用于 C⁴ISR 系统, 进行电磁态势的展现。基于此, 笔者对地形影响条件下雷达电磁波三维可视化实现进行研究。

1 自由条件下雷达探测范围建模

1.1 雷达方程

雷达探测能力不仅取决于雷达本身的性能, 既与发射机、接收机、天线等参数有关, 又和目标的性质及环境因素有关。雷达方程集中地反映了与雷

达探测距离有关的因素以及它们之间的相互关系, 设雷达发射和接收采用同一天线, 则雷达接收到的回波功率为

$$P_r = \frac{P_t G_t^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4}$$

式中: P_t 为雷达发射峰值功率; G_t 为雷达发射天线增益; R 为雷达与目标之间的距离; σ 为目标的雷达截面积; λ 为雷达波长。

雷达接收到的回波功率 P_r 必须超过最小可检测信号功率 $S_{i\min}$, 雷达才能可靠地发现目标, 当 P_r 正好等于 $S_{i\min}$ 时, 就可得到雷达检测该目标的最大探测距离^[5]:

$$R_{\max} = \left[\frac{P_t G_t^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 S_{i\min}} \right]^{1/4}$$

最小可检测信号功率 $S_{i\min}$ 常常用最小输出信号噪声功率比 $(S/N)_{\text{omin}}$ 来表示:

收稿日期: 2014-01-15; 修回日期: 2014-03-03

基金项目: 中国博士后科学基金(200902686)

作者简介: 杨玉林(1974—), 男, 河南人, 博士, 讲师, 从事计算机仿真研究。

$$S_{i\min} = kT_s B_n F_n (S/N)_{o\min}$$

式中： k 为波尔兹曼常数 1.38×10^{-23} J/K； T_s 是以绝对温度表示的雷达接收机噪声温度，K； B_n 为接收机等效噪声带宽，Hz；一般情况下可认为 $B_n \approx 1/\tau$ ， τ 为脉冲宽度； F_n 为接收机噪声系数的倍数。

于是可得出：

$$R_{\max} = \left[\frac{P_t G_t^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k T_s B_n F_n (S/N) S_{o\min}} \right]^{1/4}$$

1.2 自由条件下建模与数据采样

1.2.1 水平面上雷达包络线的计算

以雷达为中心，将方位角 θ 按照一定间隔从 0° 取到 360° ，对雷达探测范围包络在水平面上的投影进行离散化处理，并依次连接各点，就得到二维包络线。

当雷达未受干扰时，由于水平面上各个方位角的最大探测距离相等，结合自由空间条件下雷达方程，得出二维包络线上方位角为 θ 处的最大探测距离计算公式^[6]为

$$R(\theta) = R_{\max} = \left[\frac{P_t G_t^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k T_s B_n F_n D_0 C_B L} \right]^{1/4}$$

式中： θ 为空间某点和雷达与目标连线的夹角，($^\circ$)，相当于方位角； D_0 为检测目标信号所需的最小输出信噪比，即检测因子， $D_0 = (S/N)_{o\min}$ ； L 为雷达各部分损耗的损耗因子 ($L > 1$)； C_B 为带宽校正因子，表示接收机带宽失配所带来的信噪比损失，匹配时 $C_B = 1$ ，其他时 $C_B > 1$ 。

1.2.2 垂直面上雷达探测距离的计算

雷达在方位角 θ 和俯仰角 ϕ 处的最大探测距离，等于该方位角 θ 处的最大探测距离与天线垂直面方向性函数 $f_y(\phi)$ 的平方根的乘积，则雷达在方位角 θ 和俯仰角 ϕ 处的最大探测距离 $R(\theta, \phi)$ 即为：

$$R(\theta, \phi) = R(\theta) \sqrt{f_y(\phi)}$$

式中： $f_y(\phi)$ 为雷达天线垂直面方向性函数； $R(\theta)$ 为

二维包络线在方位角 θ 处的最大探测距离。

1.2.3 雷达电磁波数据采样

因为电磁环境可视化要求数据必须是离散化的，所以需要将雷达电磁辐射包络按照一定的算法进行采样，得到数据采样点。

以求点 $A_{\phi_n}(\theta_m)$ 的坐标为例，数据采样算法步骤为：

步骤 1：根据方位角 θ_m 、干扰源数量、干扰方式计算最大探测距离 $R_j(\theta_m)$ ；

步骤 2：对于俯仰角 ϕ_n ，求探测距离 $R_{j\phi_n}(\theta_m) = R_j(\theta_m) \sqrt{f'_y(\phi_n)}$ ；

步骤 3：求采样点 $A_{\phi_n}(\theta_m)$ 的大地坐标：

M_CoordTransform. RD_RAzEItoBLH ($R_{j\phi_n}(\theta_m), \theta_m, \phi_n, B_A, L_A, H_A$)，其中 (B_A, L_A, A_A) 为 A 点的雷达地理坐标；

步骤 4：求采样点 $A_{\phi_n}(\theta_m)$ 的地心直角坐标：

M_CoordTransform.BLHtoXYZ ($B_A, L_A, H_A, X_A, Y_A, Z_A$)；

按照一定角度间隔，将 ϕ_n 从 0° 取到 90° ， θ_m 从 0° 取到 360° ，按照上述 5 步计算，得到每个采样点的地心直角坐标，从而建立采样点集合 $A_{N \times M}$ 。

2 地形影响条件下数据采样修正

当电磁波在空间传播受到地形遮挡时，遮挡物背面将会出现一定范围的探测盲区，综合考虑计算速度和雷达探测范围建模对精度的要求，把雷达波看似于直线传播，可利用几何光学法对电磁传播进行模拟，将受地形遮挡影响的雷达边界点调整到新的边界上，通过连接新边界上的点，绘制出地形遮挡下雷达的实际探测范围。当雷达中心点位于地形下方时，雷达被完全遮挡。这里主要讨论雷达中心位于地形上方的情况。雷达在地形遮挡影响下存在 2 种可能性：一是雷达波束被部分截断，如图 1(a) 所示，其中阴影部分为雷达实际探测范围；二是雷达波束被完全截断，如图 1(b) 所示，其中阴影部分为雷达实际探测范围。

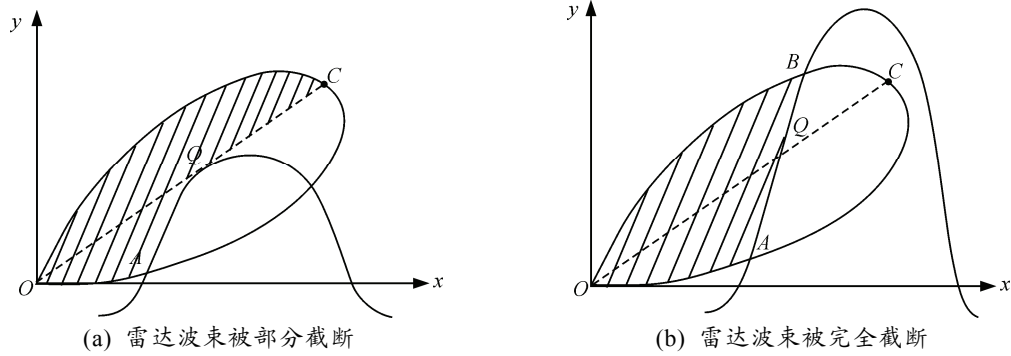


图 1 雷达在地形遮挡影响下存在 2 种可能性

地形影响下雷达采样点的修正步骤为：

步骤 1，对雷达波瓣上第一个受遮挡采样点的处理。当判断出雷达中心点位于地形上方后，从雷达中心点出发，沿雷达波瓣下半部分，按逆时针方向，寻找第一个受地形遮挡的雷达采样点，具体方

法是依次获取采样点高程，将其与对应地形点高程值进行比较，直到找到第 1 个高程值小于对应地形高程值的采样点，然后将该雷达采样点修正到对应地形点位置。如图 2(a)所示， P 为第 1 个受地形影响的采样点，它被修正到对应地形点 Q 处。

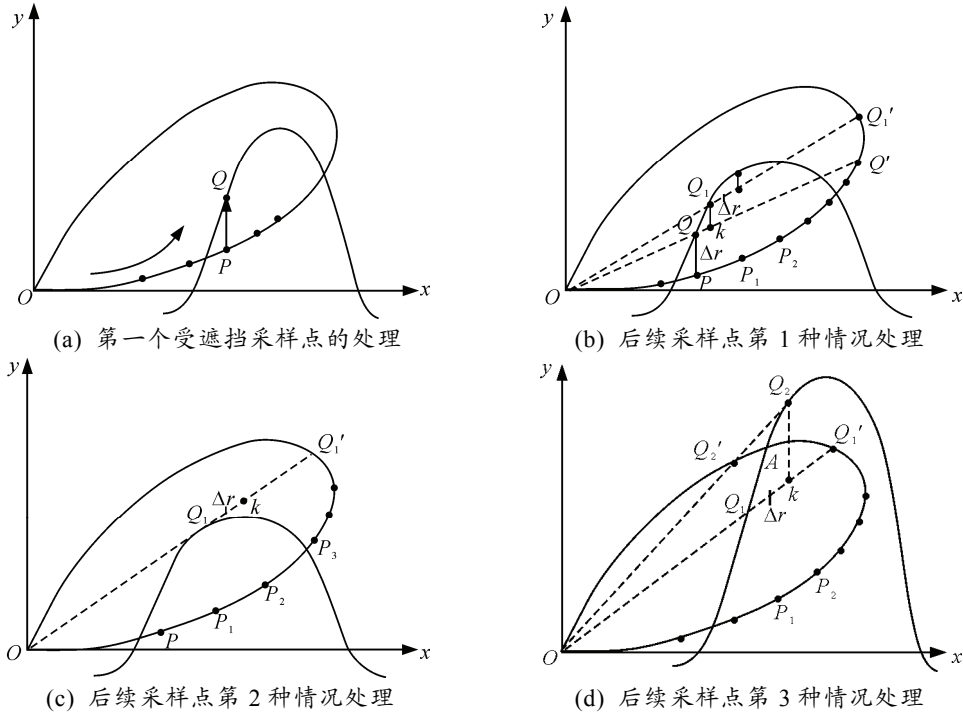


图 2 雷达电磁波数据采样修正算法示意图

步骤 2，对后续采样点分 3 种情况进行处理。

情况 1：如图 2(b)所示，假设 P_1 为当前待修正的采样点， P 为第 1 个受地形影响的点，它被修正到 Q 点位置。用 QQ' 的长度除以曲线 PQ' 之间的采样点数目得到微小步长 Δr 。从 Q 点出发，沿 QQ' 增加 Δr 到 K 点，此时 K 位于其对应的地形点 Q_1 下方。连接 OQ_1 形成射线与雷达探测边界相交于 OQ_1' ，此时满足 $OQ_1 < OQ_1'$ ，说明地形点 Q_1 在雷达最大探测范围内，将 P_1 修正到地形点 Q_1 处。对于 P_1 之后的采样点 P_2 ，采用同样的方法进行，直到出现其他特殊情况。

情况 2：如图 2(c)所示，假设 P_1 为前 1 个已被处理的采样点，它被修正到 Q_1 位置。从 Q_1 点出发，沿 Q_1Q_1' 增加 Δr 到 K 点。与情况 1 不同， K 点比其对应地形点高，说明已过山峰，此时山峰以后区域为雷达盲区，因此将待处理的点 P_2 修正到 K 的位置。此后沿 OK 方向继续增加步长 Δr ，并将后续采样点调整到新 K 点位置，直到 K 点位于地形下方(即又遇到新的地形遮挡)。

情况 3：如图 2(d)所示，假设 P_1 为前 1 个已被处理的采样点，它被修正到 Q_1 位置。从 Q_1 点出发，沿 Q_1Q_1' 增加 Δr 到 K 点，与情况 1 类似， K 点位于其

对应的地形点 Q_2 下方。连接 OQ_2 并与雷达边界相交于 Q_2' ，此时满足 $OQ_2 > OQ_2'$ ，说明地形点 Q_2 已超出雷达最大探测范围，将 P_2 修正到地形点 Q_2' 处。

经过以上 2 个步骤，即可得到地形影响条件下雷达探测电磁波的采样点数据集 $A'_{N \times M}$ 。

3 地形影响条件下可视化绘制

地形影响条件下雷达探测电磁波的可视化实现需要将采样点数据集 $A'_{N \times M}$ 与 OpenGL 图元建模的方法结合起来。OpenGL 绘制复杂曲面时，是按照一定次序绘制由复杂曲面分解出的一系列基本曲面的方法进行的^[3]。由于雷达三维探测范围包络曲面非常复杂，因此要将其分解为一系列基本曲面，而后再进行面绘制。如图 3 所示，阴影部分是由集合 $A_{N \times M}$ 中的 3 个相邻的点 $A_{\phi_i}(\theta_m)$ 、 $A_{\phi_j}(\theta_n)$ 、 $A_{\phi_k}(\theta_n)$ 围成的基本曲面。以这个基本曲面的绘制为例，探讨地形影响条件下雷达探测电磁波的可视化方法。

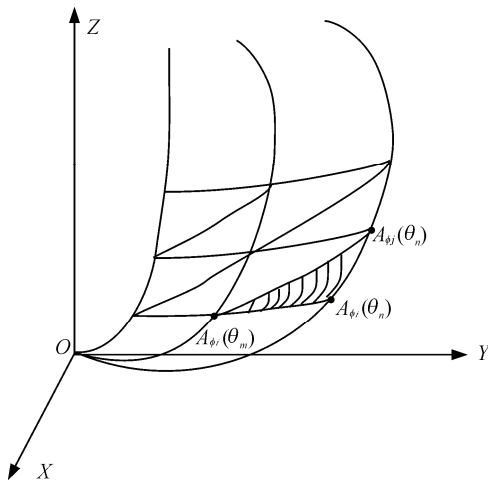


图 3 地形影响条件下雷达探测范围基本曲面绘制示意图

利用 OpenGL 的 `glBegin(GL_TRIANGLES)` 函数，结合 3 个顶点坐标，就可以绘制基本曲面，伪代码如下：

```
glPolygonMode(GL_FRONT_AND_BACK, GL_LINE); // 线绘制模式
glBegin(GL_TRIANGLES); // 绘制基本曲面
glVertex3d(X_{\phi_i}(\theta_m), Y_{\phi_i}(\theta_m), Z_{\phi_i}(\theta_m));
glVertex3d(X_{\phi_j}(\theta_n), Y_{\phi_j}(\theta_n), Z_{\phi_j}(\theta_n));
glVertex3d(X_{\phi_k}(\theta_n), Y_{\phi_k}(\theta_n), Z_{\phi_k}(\theta_n));
glEnd(); // 结束绘制
```

地形影响条件下雷达三维探测范围包络也是由许多个这样的基本曲面组成的。从集合 $A'_{N \times M}$ 中取

俯仰角 ϕ_n 及其相邻的 ϕ_{n+1} 进行采样的 2 组采样数据点，分别为：

$$A_{\phi_n} = \{A_{\phi_n}(\theta_m) |_{\phi_n}\} (1 \leq m \leq M, 1 \leq n \leq N-1)$$

$$A_{\phi_{n+1}} = \{A_{\phi_{n+1}}(\theta_m) |_{\phi_{n+1}}\} (1 \leq m \leq M, 1 \leq n \leq N-1)$$

将这 2 组点集按照图 3 的绘制方法，方位角遍历方位角集 θ_M ，就可以绘制俯仰角 ϕ_n 、 ϕ_{n+1} 之间的曲面。然后，改变 ϕ_n 的取值，遍历俯仰角集 ϕ_N ，按照前述绘制方法，即可绘制出整个曲面，从而实现地形影响条件下雷达电磁波的三维可视化。图 4 为某型雷达在受地形遮挡时电磁波可视化效果。

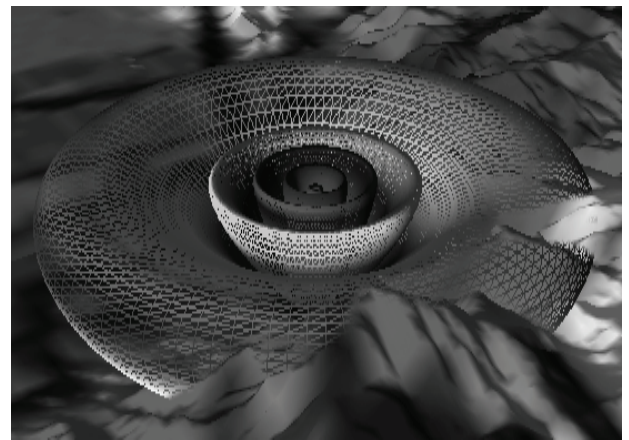


图 4 受地形影响下的雷达电磁波效果

4 结束语

针对雷达电磁波肉眼不可见的特点，给出了地形影响条件下雷达电磁波建模和基于 OpenGL 面绘制的可视化方法，并进行编程实现。该技术可作为支撑技术嵌入到指挥信息系统中的电磁态势模块及雷达模拟训练系统，对雷达装备的电磁波进行三维可视化显示，为雷达装备的部署、训练等提供支持。

参考文献：

- [1] 王汝群. 战场电磁环境[M]. 北京：解放军出版社，2006：27-60.
- [2] 李锋，张宗佩，万刚，等. 战场电磁态势三维可视化技术[J]. 测绘科学技术学报，2012，29(3)：223-225.
- [3] 张涛，曹婉，陈振宇. 战场环境与可视化技术[M]. 北京：军事科学出版社，2008：290-303.
- [4] 邓晶，张明智，李志强. 基于 STK 的信息作战态势三维可视化表现方法研究[J]. 系统仿真学报，2010，22(11)：2654-2659.
- [5] 陈淦涛，许稼，高效，等. 有源压制干扰下雷达探测距离分析与计算[J]. 雷达科学与技术，2011，9(1)：13-17.
- [6] 王小珂，周勇，王铃. 基于激光雷达距离图像信息的三维重构技术[J]. 兵工自动化，2013，32(3)：48-50.