

复杂地形影响下雷达探测范围表现算法研究

白玉兵^{1,2,3} 余小游¹ 陈寿辙⁴ 殷玲^{1,3} 陈铁军¹

(湖南大学信息科学与工程学院 长沙 410082)¹ (中国人民解放军 91821 部队 潮州 515729)²

(国防科学技术大学卫星导航研发中心 长沙 410073)³ (海南水文地质工程地质勘察院 海口 571100)⁴

摘要 通过分析雷达探测范围边界与数字地形高程的相对位置关系,提出一种基于几何光学原理的雷达探测范围受复杂地形影响的修正算法。采用雷达传播衰减模型和混合采样方法,应用该修正算法,实现了对复杂地形影响下雷达探测范围的修正。实验结果表明,该算法不仅对复杂地形适应性强,而且表现效果真实直观。

关键词 雷达探测范围,三维可视化,修正算法,数字地形

中图分类号 TP391.9 文献标识码 A

Research on Representation Arithmetic of Radar Detection Range in Complicated Terrain Environment

BAI Yu-bing^{1,2,3} YU Xiao-you¹ CHEN Shou-zhe⁴ YIN Ling^{1,3} CHEN Tie-jun¹

(School of Information Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)¹

(Unit 91821 of PLA, Chaozhou 515729, China)²

(Satellite Navigation R&D Center, School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)³

(Hainan Investigation Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Haikou 571100, China)⁴

Abstract Through analysis of the relative position between the borderline of radar coverage and the height of digital terrain, the correction arithmetic of radar coverage influenced by complicated terrain was proposed, which is based on the principle of geometrics optics. Finally, the correction of radar coverage in complicated terrain was realized, which uses the propagation attenuation theory of the radar electromagnetic wave, the method of mixed sampling and the correction arithmetic. The result of experiment shows that this method not only is efficient for the complicated terrain, but also can make the visualization lifelike.

Keywords Radar coverage, 3D visualization, Correction arithmetic, Digital terrain

雷达探测信息可视化一直是人们十分热衷的研究领域。传统研究方式主要是通过数值参数特征和绘制二维威力图等来分析和表现雷达。文献[1]研究了雷达的探测能力和预警时间,主要以数值分析的方法为主。美国海军研究室的 SIG-PLOT 程序^[2]绘制了以二维曲线为表现形式的雷达威力图。数值参数和二维威力图不够直观形象,很难满足人们对雷达探测信息可视化的需求。随着计算机仿真和可视化技术的发展,人们开始关注雷达电磁环境的三维表现。程柏林等^[3]和林卫明等^[4]分别应用 MATLAB 和计算机图形学,初步实现了雷达探测范围的三维显示。

然而,雷达探测范围会受到诸如地形、大气、电磁干扰等环境因素影响,目前针对地形影响的研究也在逐渐深入开展。文献[5]基于雷达方程进行建模,考虑了地形遮挡对雷达的影响,提出把受地形影响的雷达采样点在直角坐标系中沿纵坐标方向向上修正的方法,该方法实现简单且效率较高,但修正后雷达边界采样点的分布依赖于具体的地形起伏状况,精度过低。文献[6]在前者的基础上提出连续山峰处理算法,即对于山峰之前的采样点采用类似于文献[5]的处理方式,后续点采用单峰处理算法。该方法虽然精度有所提高,但仍然受具体地形情况的影响。文献[7,8]提出基于抛物线方程的雷达

探测范围三维建模,给出了考虑因素较为全面的雷达电磁波传输衰减数学模型,然而该方法计算量巨大,不易在实际应用中实现。

本文重点研究复杂地形对雷达探测范围的影响,提出一种基于几何光学原理的单峰和多峰地形影响下雷达探测范围的修正算法,用以实现对复杂地形影响的修正。

1 雷达探测范围建模

为了研究地形遮挡影响下雷达作用范围的变化,首先在自由空间中对雷达的探测范围进行可视化建模,分为两步:雷达探测范围数据建模和三维可视化建模。前者利用雷达传播衰减模型实现,后者则通过混合采样完成。

1.1 雷达传播衰减模型

雷达方程^[9]经过推导,表示为传播衰减 L 形式见式(1):

$$L = 5 \log\left(\frac{P_r G^2}{l_s}\right) + 5 \log\left(\frac{4\pi\sigma}{\lambda^2}\right) - 5 \log(P_r) \quad (1)$$

式中, P_r 、 P_r 为雷达发射和接收功率; λ 为电磁波长; σ 为目标反射面积; l_s 为系统衰减; G 为单基地雷达天线增益。

雷达接收机接收信号的能力可用最小可检测信号功率 S_{\min} 表示。当接收功率大于或等于 S_{\min} 时,接收机能正常检测

识别,否则,接收机就不能识别。式(1)中,当 $P_r = S_{\min}$ 时,可得到雷达探测目标时的最大衰减阈值 L_{\max} 。

文献[10]给出电磁波在自由空间中的传播损耗 L 的计算公式,其仅与频率、距离和天线方向图函数有关,见式(2):

$$L = -20 \log_{10} \left(\frac{4\pi r}{\lambda f(\theta, \varphi)} \right) \quad (2)$$

式中, $f(\theta, \varphi)$ 为雷达天线归一化的方向性系数, θ 为俯仰角, φ 为方位角。

当 $f(\theta, \varphi) = 1$ 时,令 $L = L_{\max}$,求得雷达最大探测方向上的最大探测距离 R_{\max} 。空间各个方向上的最大探测距离计算公式见式(3):

$$r = R_{\max} f(\theta, \varphi) \quad (3)$$

1.2 基于混合采样三维可视化建模

由式(3)可知,任何确定的 (θ_i, φ_j) 会有唯一确定的 r ,即该方向上雷达的最大探测距离 r_{\max} ,对应球坐标为 $(r_{\max}, \theta, \varphi)$ 。为确定空间各个方向的最大探测距离点,在俯仰角 θ 和方位角 φ 方向对空间进行混合采样。参考文献[11]方法,对俯仰角 θ 和方位角 φ 分别抽样。

方位角 φ : 初始化使雷达位于地形网格交点上,以雷达最大探测方向的最大探测距离 R_{\max} 为半径作圆,确定能够包含该圆的正方形地形网格。以雷达中心所在地形网格线与正方形的右侧交点为起点,逆时针采样正方形地形网格上的交点,每个采样点对应一个方位角,计算出所有采样点对应的角度,得到方位角采样数组 $\varphi[m]$,范围 0 到 2π 。

俯仰角 θ : 考虑实际应用时,雷达主要作用区域位于半功率波瓣宽度 $\theta_{p/2}$ 以内,因此采用分区间均匀采样,降低其以外的采样数,提高在其以内的采样。

假设雷达本身仰角为 $\pi/4$,采样数为 n ,则采样公式见式(4):

$$\theta_i = \begin{cases} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta_{p/2}}{2} \right) i / \left(\frac{n}{4} \right), & i < \frac{n}{4} \\ \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta_{p/2}}{2} \right) + \frac{\theta_{p/2} (i - n/4)}{n/2}, & \frac{n}{4} < i < \frac{3n}{4} \\ \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta_{p/2}}{2} \right) (i - \frac{3n}{4}) / (n/4) + \theta_{p/2}, & i > \frac{3n}{4} \end{cases} \quad (4)$$

计算得到俯仰角采样数组 $\theta[n]$,范围 0 到 $\pi/2$ 。

运用传播衰减模型和空间抽样模型,得到各个抽样点的球坐标。通过坐标系转换,定义雷达最大探测边界采样点为二维数组 $RadioV[m, n]$,雷达初始位置为 $RadioP(x_0, y_0, z_0)$,则有式(5):

$$\begin{cases} RadioV[i, j]. X = r_{\max(i, j)} \cos(\theta[j]) \cos(\varphi[i]) + RadioP.X \\ RadioV[i, j]. Y = r_{\max(i, j)} \sin(\theta[j]) + RadioP.Y \\ RadioV[i, j]. Z = r_{\max(i, j)} \cos(\theta[j]) \sin(\varphi[i]) + RadioP.Z \end{cases} \quad (5)$$

最后,将雷达最大探测边界采样点按照 θ 方向和 φ 方向连接成线,得到三维可视化的雷达探测范围。

2 地形影响下修正算法

电磁波遇到障碍物时,根据衍射定理,只有当障碍物的尺寸不大于波长才会发生明显衍射,否则,无法透过障碍物继续传播。雷达工作频率一般都在超高频以上,在实际传播过程中,可以忽略衍射,近似认为沿直线传播。因此,可以利用几何光学法处理雷达因障碍物遮挡而产生的探测盲区。

为了更好地实现可视化,采用 DirectX 方法模拟产生真实场景数字地形。通过位图产生高度,地形网格分辨率为 1×1 ,确保地形水平剖面上的每个二维整数坐标点都有相应高层对应。根据数字地形生成原理,把产生的数字地形点保存为二维数组 $LandV[xCount, yCount]$,令其索引值 $[i, j]$ 恰好是地形点水平投影面的 x 和 z 坐标值。

图 1 为雷达探测范围与地形在某个方位角 φ 的剖面图,雷达中心位于 O 点。依据几何光学原理,由于障碍物的阻挡,雷达探测范围应当修正为以闭合曲线 OMP1Q1P2Q2NO 为边界的区域, P1、P2 为山峰点。遍历各个方位角,修正所有受影响的区域。

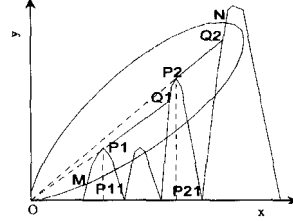
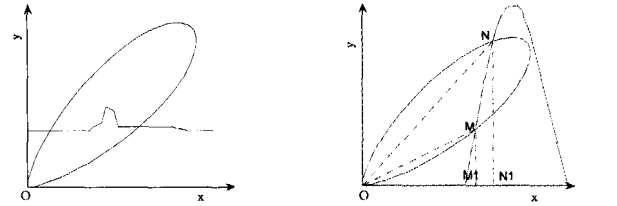


图 1 雷达探测范围与地形剖面图

根据实际应用,障碍物分为:单峰和连续多峰。下面按情况分析讨论。

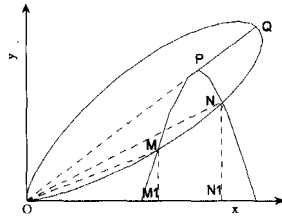
2.1 单峰修正算法

单峰地形与雷达中心(位于 O 点)的位置关系分为 3 种情况(如图 2 所示):



(a) 雷达中心位于地形下方

(b) 探测边界与地形首末交点在山峰点同侧



(c) 探测边界与地形首末交点在山峰点异侧

图 2 雷达探测边界与单峰地形位置关系图

情况(a): 雷达中心位于所在地形点高层以下,雷达被遮挡。雷达探测范围完全被遮挡,雷达无法探测目标;

情况(b): 雷达探测范围边界与地形切面首末交点 M、N 位于山峰点的同侧。雷达探测范围部分被遮挡,应当修正为以闭合曲线 OMNO 为边界的区域;

情况(c): 雷达探测范围边界与地形切面首末交点 M、N 位于山峰点的异侧。雷达探测范围部分被遮挡,应当修正为以闭合曲线 OMPQO 为边界的区域。

单峰修正算法具体实现:

1) 情况(a)处理: 雷达中心被地形遮蔽,雷达无法探测目标,不存在探测范围绘制。

2) 情况(b)和情况(c)处理:

二维数组 $RadioVC[m, n]$ 存放修正后的雷达探测范围抽

样点集。抽样方位角 φ_i 上,若雷达最大探测边界曲线与数字地形曲线不相交,则该方位角探测范围未受影响;若相交且按逆时针方向的首末两交点为 M_i, N_i ,则受到影响,需修正。

Step1 方位角 φ_i 一定时:俯仰角 $\theta[i]$ 令 i 从 0 到 $n-1$ 遍历, M_i 是雷达探测范围边界抽样点高程首次小于该点数字地形高程的点;俯仰角 $\theta[i]$ 令 i 从 $n-1$ 到 0 遍历, N_i 是雷达探测范围边界抽样点高程首次小于该点数字地形高程的点。利用此规律,遍历所有方位角,求出所有交点 M_i, N_i 对应俯仰角数组 $\theta[n]$ 的索引值 n_{M_i}, n_{N_i} ,将结果存放在二维数组 $\text{Index}[m, 2]$ 。

Step2 判断 M_i, N_i 位于 P 的同侧还是异侧。对 $M_i N_i$ 在水平面的投影线段 $M_i' N_i'$ 按间距 $M_i' N_i' / (n_{N_i} - n_{M_i})$ 平均采样,求出采样点对应水平面的 x 和 z 坐标值,根据数字地形产生机理,确定对应抽样点地形高程。分析可知:若同

$$h_{Q_i} = k_i \sqrt{(\text{Radio}[i, ii]. X - \text{Radio}P. X)^2 + (\text{Radio}[i, ii]. Z - \text{Radio}P. Z)^2} + \text{Radio}P. Y \quad (6)$$

侧,影响部分地形高程逐渐增大;若异侧,影响部分地形高程先增大后减小。依照此规律,确定结论,且异侧时,求出山峰点 P_i 。

Step3 若 M_i, N_i 同侧,则只需将方位角 φ_i 上的雷达探测边界曲线 $M_i N_i$ 修正为数字地形边界曲线 $M_i P_i$ 即可。若 M_i, N_i 异侧,则根据“Step2”求出的山峰点 P_i ,将雷达探测范围边界曲线 $M_i N_i Q_i$ 修正为地形曲线 $M_i P_i$ 和直线 $P_i Q_i$, Q_i 为 OP_i 延长线与雷达探测范围边界的交点。对 $M_i P_i$ 进行修正,根据求出的 P_i 对应俯仰角数组 $\theta[n]$ 的索引值 n_{P_i} ,在索引值 n_{M_i} 至 n_{P_i} 对应采样修正为地形曲线 $M_i P_i$;对 $P_i Q_i$ 进行修正,首先确定 Q_i 位置。 Q_i 是雷达探测边界点高程与直线 OQ_i 上点高程大小的分界点。雷达探测范围边界点高程为 $\text{Radio}V[i, ii]. Y$, 求出直线 OP_i 斜率 k_i , 则有 OQ_i 上点高程 h_{Q_i} 为:

增大的山峰点才会影响到雷达探测范围,筛选得到新的山峰点数组 $P_p[n_0]$, n_0 为实际有效的山峰点个数,数组 $k[n_0]$ 保存对应山峰点的斜率。

Step3 定义点数组 $Q[n]$ 保存 OP_i 与后一山峰地形的交点 Q_i , 定义索引值数组 $Q_Index[n]$ 保存 Q_i 对应俯仰角数组的索引值。利用单峰算法“Step3”中方法,求解 OP_i 延长线与雷达探测范围的交点 Q 。根据求出的 Q 判断,若是情况(1), Q_i 位于山峰点 P_i 后,则 $n=n_0$;若是情况(2), Q_i 位于山峰点 P_{i-1} 后,则 $n=n_0-1$ 。确定所有 Q_i 点;根据 P_i 和 P_{i+1} 对应的俯仰角数组索引值 n_{P_i} 和 $n_{P_{i+1}}$,按间距 $P_i P_{i+1} / (n_{P_{i+1}} - n_{P_i})$ 对 $P_i P_{i+1}$ 均匀抽样,用单峰算法“Step3”中的方法采样,保存为点数组 $P_C[n_{P_{i+1}} - n_{P_i}]$ 。通过比较 OP_i 延长线上点的高程 h_i 和对应地形点的高程 h_{i_land} ,找出首次 $h_{i_land} > h_i$ 的点,记录坐标值保存在 $Q[i]$ 点,记录索引值保存在 $Q_Index[i]$ 。

Step4 按以上方法,修正所有受地形影响的方位角,得到修正后的雷达探测范围点数组 $\text{Radio}VC[m, n]$ 。最后,将得到的点数组按照 θ 方向和 φ 方向连接成线,实现修正后的雷达探测范围。

2.2 连续多峰修正算法

连续多峰地形在雷达中心不被遮蔽时,相对位置关系分两种情况:末交点 N 高程不小于 Q 点高程,见图 3(a);末交点 N 高程小于 Q 点高程,见图 3(b)。 Q 为 OP_2 延长线与雷达探测边界的交点。

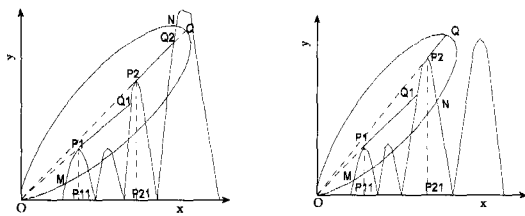


图 3 雷达探测边界与连续多峰地形位置关系图

情况(a) 末交点 N 高程不小于 Q 点高程。雷达探测范围部分遮挡,实际探测范围应当修正为以闭合曲线 $OMP_1 Q_1 P_2 Q_2 \dots P_n Q_n NO$ 为边界的区域;

情况(b) 末交点 N 高程小于 Q 点高程。雷达探测范围部分遮挡,实际探测范围应当修正为以闭合曲线 $OMP_1 Q_1 P_2 Q_2 \dots P_n QO$ 为边界的区域。

连续多峰修正算法具体实现:

Step1 利用单峰算法“Step1”求出首末交点 M_i, N_i 。

Step2 确定所有影响雷达探测范围的山峰点 P_i 。定义山峰点数组 $P_P[n/2]$,按照单峰算法“Step2”的方法确定第一个山峰点 $P_P[0]$ 。求解下一个山峰点,当抽样点地形高程大于上一个山峰点的高程时才进行递增判断,直到找到下一个山峰点。依此方法确定所有可能对雷达探测范围造成影响的山峰点。分析只有 OP_i 斜率 k_i 的绝对值,随着 i 增大而

Step4 根据以上结果,把每个对雷达探测范围产生影响的山峰看作单峰,若是情况(1):按照单峰算法,把实际探测范围修正为以闭合曲线 $OMP_1 Q_1 P_2 Q_2 \dots P_n Q_n NO$ 为边界的区域;若是情况(2):按照单峰算法,把实际探测范围修正为以闭合曲线 $OMP_1 Q_1 P_2 Q_2 \dots P_n QO$ 为边界的区域。修正遍历所有受地形影响的方位角 φ_i ,最终实现对雷达探测范围的修正。

3 算法实现与分析

基于 Microsoft Visual Studio 2010 编程平台,采用 C# 语言,利用可视化开发工具 DirectX 9.0 实现修正算法。

雷达天线选取常见的高斯型方向图函数: $F = e^{-(4 \ln 2 \theta_0^2 / \sigma^2) \theta^2}$, θ_0 为半功率波瓣宽度。雷达参数如表 1 所列。

表 1 雷达参数表

参数	参数值
f	3GHz
P_t	10KW
G	40dB
l_s	12dB
D_0	20.1dB
B_n	300MHz
σ	0dBsm
θ_b	$\pi/6$

依据算法,应用仿真环境,分别对单峰地形和多峰地形下的雷达探测范围进行修正,实现结果如图 4—图 7 所示。

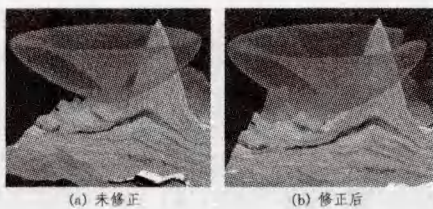


图4 单峰地形下雷达探测范围正视图

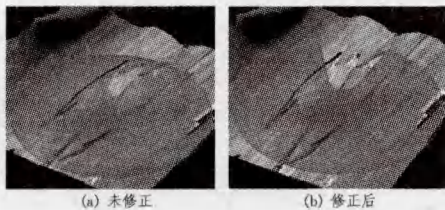


图5 单峰地形下雷达探测范围俯视图

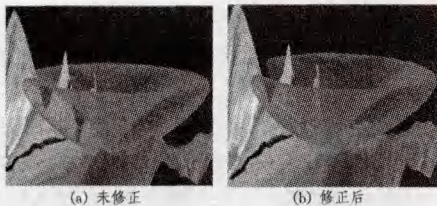


图6 多峰地形下雷达探测范围正视图

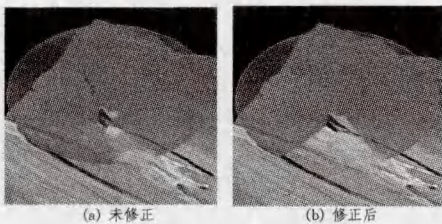


图7 多峰地形下雷达探测范围俯视图

图4为单峰地形下雷达探测范围正视图,(a)图为受到单峰地形影响没有经过修正的雷达探测范围正视图,(b)图为受到单峰地形影响经过修正的雷达探测范围正视图。图5为单峰地形下雷达探测范围俯视图,(a)图为受到单峰地形影响没有经过修正的雷达探测范围俯视图,(b)图为受到单峰地形影响经过修正的雷达探测范围俯视图。通过对比可以看出,雷达在受到单峰地形影响时,如果不进行修正,可视化后的雷达探测范围在实际无法探测的盲区仍旧显示为可以探测,如图4的(a)图和图5的(a)图,在被山峰遮蔽的探测盲区显示为可以探测,因此,可视化后的雷达探测范围与实际不符,存在错误。相反,经过修正后的单峰地形影响下的雷达探测范围,在实际因地形遮蔽产生的探测盲区显示为不可探测,能够很好地处理雷达探测范围因地形遮蔽而产生的探测盲区,可视化结果精确、直观,细节处理清晰,图4的(b)图和图5的(b)图直观、形象地展现了此修正效果。

图6为多峰地形下雷达探测范围正视图,(a)图为受到多峰地形影响没有经过修正的雷达探测范围正视图,(b)图为受到多峰地形影响经过修正的雷达探测范围正视图。图7为多峰地形下雷达探测范围俯视图,(a)图为受到单峰地形影响没有经过修正的雷达探测范围俯视图,(b)图为受到多峰地形影响经过修正的雷达探测范围俯视图。通过对比可以看出,雷达在受到多峰地形影响时,如果不进行修正,可视化后的雷达

探测范围与实际不符,存在错误,图6的(a)图和图7的(a)图形象直观地表现了错误。相反,经过修正后的多峰地形影响下的雷达探测范围,能够很好地处理雷达探测范围因多峰地形遮蔽而产生的探测盲区,可视化结果精确、直观,细节处理得当,图6的(b)图和图7的(b)图形象直观地展现了修正效果。

对比分析以上修正实现效果可以得出,本文提出的修正算法不仅实现效果精确、直观、形象,而且对各种地形的适应性强,为雷达探测范围在复杂地形影响下的表现提供了切实可行的方法。对于任何复杂地形,均可以利用该算法,找出所有影响雷达探测范围的各个局部最高点,将其看作连续山峰处理,实现雷达探测范围的修正,因此,可以看出本算法对复杂地形有很好的适应性。

在实现过程中,独立定义自由空间下雷达探测范围抽样点数组,当雷达漫游时,不需重复计算雷达抽样点的坐标值,只需相应累加雷达中心漫游的坐标值,确保算法实时高效。

结束语 本文提出一种基于几何光学原理的复杂地形影响下雷达探测范围的修正算法,详细分析了单峰地形和连续多峰地形影响下的雷达修正算法。最后,实现了单峰和多峰影响下雷达探测范围的修正。修正算法能够很好处理复杂地形对雷达探测范围的影响,实现效果较好。

然而,雷达探测范围不仅受地形环境影响,而且受到电磁干扰等诸多环境因素制约,因此,在以后的学习研究过程中需不断完善。

参考文献

- [1] Liu Ji-bin, Guan Xiang-chen, Lu Jian-wei, et al. Radar detection capability analysis and simulation in complicated electromagnetic environment [J]. *Systems Engineering Theory & Practice*, 2008, 28(5): 142-147
- [2] James C N, Brodzik S R, Edmon H, et al. Radar data processing and visualization over complex terrain[J]. *Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics*, 2000, 10(3): 327-338
- [3] 程柏林, 张尉. 用 MATLAB 语言实现雷达探测范围图的绘制 [J]. *空军雷达学院学报*, 1999, 13(4): 62-64
- [4] 林卫明, 刘德权. 利用 OpenGL 技术实现雷达探测范围的三维显示 [J]. *武汉理工大学学报*, 2002, 26(1): 72-75
- [5] 孟国明. 虚拟战场环境中雷达探测范围表现技术研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2005
- [6] 陈鹏, 吴玲达, 杨超. 虚拟战场环境中地形影响下雷达作用范围表现 [J]. *系统仿真学报*, 2007(7): 1500-1503
- [7] 杨超. 雷达最大探测范围三维建模和可视化研究与实现 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006
- [8] 杨超, 陈鹏, 魏迎梅. 雷达最大探测范围三维可视化研究与实现 [J]. *计算机工程与应用*, 2007, 43(7): 245-248
- [9] Barrios E. Considerations in the development of the advanced propagation model (APM) for US navy applications [C] // *Proceedings of the International Radar Conference*. 2003: 77-82
- [10] 张长峰. 杂波建模与仿真技术及其在雷达信号模拟器中的应用研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2004
- [11] 邱航, 陈雷霆, Chen J X. 一种基于混合采样的雷达三维建模方法 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2010, 24(1): 10-16