

抛物方程的动态网格模型及其应用

刘晓娣, 周新力, 金慧琴

(海军航空工程学院电子信息工程系, 山东烟台 264001)

摘要: 针对大尺度不规则地形条件下电波传播特性预测的准确性与时效性问题, 在非均匀网格技术的基础上, 提出了抛物方程的动态网格模型, 并通过对刃峰地形条件下的电波传播特性进行仿真, 探讨了动态网格模型的可行性和有效性。结果表明: 在计算精度相似的情况下, 相对于均匀细网格和非均匀网格, 动态网格模型缩短了抛物方程的计算时间, 具有更高的时效性; 相比均匀粗网格具有更高的计算精度。可见, 抛物方程的动态网格模型在预测大尺度不规则地形条件下电波传播特性时具有高效性。

关键词: 电波传播; 抛物方程; 动态网格; 不规则地形

中图分类号: TN011 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2017)06-0088-03

Dynamic Grid Model of Parabolic Equation and Its Application

LIU Xiao-di, ZHOU Xin-li, JIN Hui-qin

(Department of Electronic Information Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: The dynamic grid model of parabolic equation is presented based on non-uniform mesh technique for the accuracy and timeliness of the radio wave propagation in large scale irregular terrain environment. The feasibility and validity of the dynamic grid model are verified by simulating the radio propagation characteristics in the complex environment including knife-edge. The results show that: In the case of similar calculation accuracy, the parabolic equation with dynamic grid model can reduce the computation time compared with the uniform fine grid and the non-uniform grid in testing; and it has higher accuracy compared with the uniform coarse grid. Therefore, the dynamic grid model can enhance the efficiency greatly in predicting the radio wave propagation.

Key words: radio propagation; parabolic equation; dynamic grid model; irregular terrain

0 引言

随着无线通信、雷达、遥感遥测等电子信息系统的广泛应用, 空间电磁环境日益复杂, 复杂环境下的电波传播与电磁环境预测问题逐渐引起国内外学者的广泛关注^[1-6]。抛物方程(Parabolic Equation, PE)方法本身能够体现电波传播的折射和绕射效应, 同时处理不规则地形和复杂大气结构对电波传播的影响, 计算简单且精度高, 现已成为复杂环境下电波传播预测的主要方法^[7-11]。PE的数值解主要有分步傅里叶变换法(SSFT)和有限差分法, 它们都是步进迭代算法^[12]。SSFT采用

快速傅里叶变换(FFT)技术, 求解速度快; 在采用了离散混合傅里叶变换(DMFT)技术后, 稳定性也非常高。因此, 在求解远距离、大尺度电波传播的PE问题时主要采用SSFT方法。传统的SSFT-PE方法大都基于均匀网格进行步进迭代计算, 在整个计算域内采用同样的步长。而电波在传播过程中会经过山地、高原、丘陵、平原等多种不规则地形, 整个计算域若采用均匀粗网格来划分, 会给PE的计算带来较大误差; 若采用均匀细网格来划分, 则会耗费过多的计算资源和时间, 实时性较低。为求得计算精度与计算速度两者之间的平衡, 文献[13-14]提出了非均匀网格技术, 在整个计算域内根据电磁场强度变化的大小、下边界表面的起伏情况采用粗细两种网格, 取得了较好的效果。而在不规则地形条件下, 地形起伏程度会有差异, 对地形描述的精密度要求也不同, 若仅采用粗细两种网格来计

收稿日期: 2016-02-04 修回日期: 2016-03-13

基金项目: 国家自然科学基金(61179016)

作者简介: 刘晓娣(1982—), 女, 山东昌邑人, 博士生, 工程师, 研究方向为无线电波传播与电磁环境预测。

算,对于地形起伏较小的区域势必会造成计算资源浪费,而对于地形起伏较大的区域又会降低计算精度。为此,本文提出了抛物方程的动态网格模型,根据地形的起伏情况动态确定计算网格,并将计算结果与基于非均匀网格的 PE、传统 PE 进行对比,以验证该算法的可行性和有效性。

1 抛物方程法简介

假设电波在无源媒介中传播,电磁场的时谐因子为 $e^{-i\omega t}$ 。在直角坐标系中,二维标量波动方程只考虑电磁波的前向传播,采用 Feit-Fleck 近似法可得到宽角 PE 方程为

$$\frac{\partial u(x,z)}{\partial x} = ik \left[\sqrt{1 + \frac{1}{k^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2}} - 1 \right] u(x,z) + ik(m-1)u(x,z) \quad (1)$$

利用 SSFT 算法求解可得

$$u(x + \Delta x, z) = e^{ik\Delta x(m-1)} F^{-1} \{ e^{i\Delta x(\sqrt{k^2 - p^2} - k)} F[u(x,z)] \} \quad (2)$$

式中: $u(x,z)$ 表示当前步进的场分布; Δx 表示水平网格步长; $u(x + \Delta x, z)$ 表示下一步进的场分布; $p = k \sin \alpha_j$ 表示 z 的频域变化量,其中, α_j 为第 j 步进上的掠射角; F 和 F^{-1} 分别表示傅里叶变换与逆变换。

在对流层中,不规则地形是影响电波传播特性的主要因素之一。求解不规则地形条件下电波传播问题时,一般先采用变换方法对不规则地形边界进行表征,再进行 PE 计算。如图 1 中,采用地形遮蔽法^[9]将地形视为一系列宽度为水平步长 Δx 、高度为地形采样高度的刃峰组合。从图中可以看出,A 点之前为平坦地形,AB 段地形起伏较小,BC 段地形起伏较大,若采用传统的均匀网格或文献[13]提出的粗细混合非均匀网格进行步进求解,都会给地形边界的表征带来较大误差,影响电波传播预测的准确性。

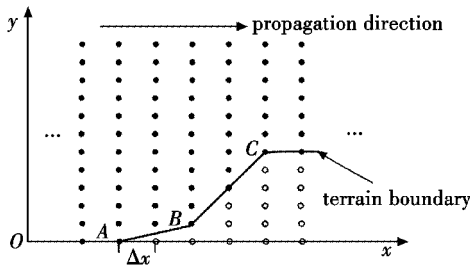


图1 不规则地形及其场分布

Fig. 1 Propagation field over irregular terrain

2 抛物方程的动态网格模型

本文利用抛物方程的动态网格模型代替传统的均匀网格模型和非均匀网格模型,根据地形的起伏情况动态地确定水平网格步长,以减小地形边界的表征误

差,提高电波传播预测的准确性。

假设在水平计算域 x 范围内,根据传播路径上的地形起伏情况,将水平网格步长分为 L 类,其中,最小步长为 Δx_{\min} ,最大步长为 Δx_{\max} ,第 j 步进上的步长为 Δx_j ;设地形高度门限为 Δh ,为保证电波传播预测的准确性,每一步进上的地形起伏 Δh_j 要小于高度门限,则

$$\begin{cases} \Delta x_{\min} \leq \Delta x_j \leq \Delta x_{\max} \\ \Delta x_j = l \Delta x_{\min} \\ \sum_j \Delta x_j = x \\ \Delta h_j \leq \Delta h \end{cases} \quad l \in Z \text{ 且 } 1 \leq l \leq L \quad (3)$$

式中, $\Delta h, \Delta x_{\min}$ 和 Δx_{\max} 的取值应根据实际的计算精度与计算时间需求来确定, Δh 应不小于 $\Delta z, \Delta x_{\min}$ 的取值应考虑地形数据的分辨率, Δx_{\max} 的取值需考虑 SSFT 算法的计算误差^[9]。根据上述约束条件,建立抛物方程的动态网格模型,如图 2 所示,其中,地形边界与图 1 一致。

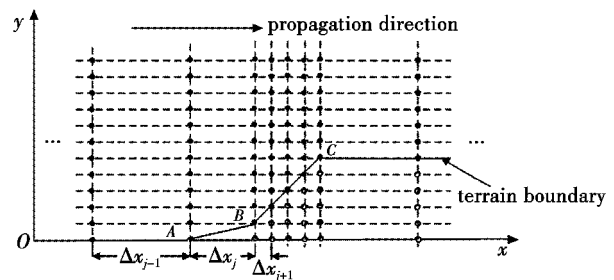


图2 抛物方程的动态网格示意图

Fig. 2 Dynamic grid map of parabolic equation

图中:在平坦地形区域采用粗网格划分,取 $\Delta x_{j-1} = \Delta x_{\max}$;AB 段地形起伏较小,根据地形高度门限确定 $\Delta x_j = l \Delta x_{\min} (1 \leq l \leq L)$;BC 段地形起伏最大,采用细网格划分,取 $\Delta x_{j+1} = \Delta x_{\min}$ 。动态网格模型的建立主要分为以下 3 个步骤。

1) 按照细网格步长 Δx_{\min} 对不规则地形边界进行预处理,得到相应的下边界地形高度集。

2) 当满足下面 3 个条件之一时,确定下一个步进的动态网格边界,否则,继续判断下一个细网格步进上的情况。

① 下一个细网格步进上的地形高度与当前步进上的地形高度大于等于地形高度门限 Δh 。

② 下一个细网格步进处为地形的拐点。

③ 满足 $\Delta x_j = \Delta x_{\max}$ 。

3) 按照步骤 2),依次确定整个计算域内动态网格的所有步长边界。

在抛物方程的动态网格模型中,当地形高度门限 Δh 足够大或 $\Delta x_{\min} = \Delta x_{\max}$ 时,该模型就等效为均匀网格模型;当地形起伏坡度的模值只分为两种情况或水平网格步长只有两类时,该模型就等效为非均匀网格

模型。因此,上述两类模型是抛物方程的动态网格模型的特例。

3 数值算例

利用抛物方程的动态网格模型,计算标准大气刃峰地形边界条件下的电波传播特性,并与非均匀网格模型、细网格模型、粗网格模型进行比较,验证该模型的可行性和有效性。

电波在刃峰地形条件下传播,发射天线的频率 $f = 1$ GHz,高斯天线方向图的 3 dB 宽度为 3° ,水平极化,高度 $H_T = 50$ m,刃峰分别距离发射天线 $x_1 = 3.04$ km, $x_2 = 10$ km, $x_3 = 30$ km,峰高 $h_1 = 50$ m, $h_2 = 120$ m 和 $h_3 = 200$ m,最大传播距离为 45 km,地形剖面如图 3 所示。地表的相对介电常数为 15,电导率为 0.03 S/m。分别采用均匀细网格模型、均匀粗网格模型、非均匀网格模型和动态网格模型进行计算,其中,均匀细网格的步长为 20 m,均匀粗网格的步长为 160 m,非均匀网格的粗网格步长为 160 m、细网格步长为 20 m,动态网格的最大步长为 160 m、最小步长为 20 m、地形高度门限为 1 m。

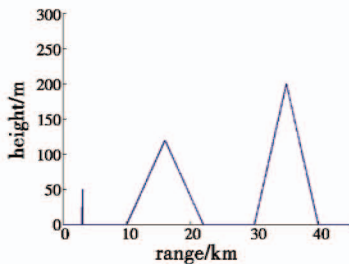


图3 多刃峰地形剖面

Fig. 3 Profile of multiple knife-edges

图 4 和图 5 分别是采用均匀粗网格和动态网格抛物方程计算得到的传播因子分布图。

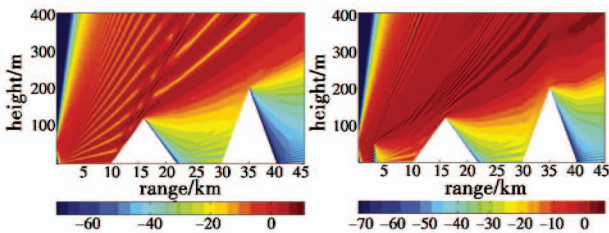


图4 采用均匀粗网格时的传播因子分布

Fig. 4 Propagation factor of uniform coarse grid

图5 采用动态网格时的传播因子分布

Fig. 5 Propagation factor of dynamic grid

从图中可以看出,抛物方程采用均匀粗网格模型进行仿真计算的结果忽略了第一个尖刃峰的影响,且在后两个刃峰背面的阴影区域偏大,而动态网格模型能够更好地描述地形边界,反映地形对电波的绕射效应,尤其是在地形起伏较大时,其效果更加明显。图 6 是电波传播至不同距离处传播因子随高度的变化图。

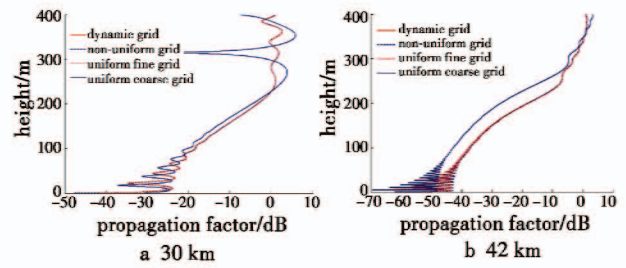


图6 不同传播距离处传播因子随高度的变化

Fig. 6 Propagation factor vs height at different distances

从图中可以看出,相对于均匀细网格,抛物方程采用均匀粗网格模型的仿真结果产生了较大误差,在 42 km 处的仿真误差明显大于 30 km 处的仿真误差,这是由地形起伏状况不同引起的,30 km 前的地形起伏比较平缓,42 km 前的地形起伏相对较大;而采用动态网格模型在不同距离处的仿真结果与非均匀网格模型、均匀细网格模型的仿真结果均能很好地吻合,其结果更加精确,且对不同的地形起伏状况都具有良好的适应性。

表 1 为抛物方程分别采用均匀细网格模型、非均匀网格模型和动态网格模型计算时的网格空间与计算时间的对比关系。由表 1 可知,在相同仿真环境下,本算例中,采用动态网格模型后,抛物方程计算所需的网格空间相对于均匀细网格模型下降了 58.1%,相对于非均匀网格模型下降了 23.5%;而所需的计算时间相对于均匀细网格模型减少了 73.8%,相对于非均匀网格模型减少了 31.1%。这表明采用动态网格模型能极大地减少抛物方程计算所需的内存和时间,更具高效性。

表1 网格空间和计算时间对比

Table 1 Comparison of grid number and computation time

	网格空间	计算时间/s
均匀细网格	2250 × 2048	90.047
非均匀网格	1231 × 2048	34.229
动态网格	942 × 2048	23.590

由上述分析可知:本文提出的动态网格模型能够在保证抛物方程仿真精度的同时,节约计算资源,提高计算效率,具有综合优势。特别是在地形起伏多变的大区域环境下,随着地形起伏的复杂化和仿真范围的增加,动态网格模型的优势将更加明显。

4 结束语

本文在非均匀网格技术的基础上,提出了抛物方程的动态网格模型,给出了该模型的构建方法,并通过对标准大气条件多刃峰地形边界条件下的电波传播特性进行仿真,验证了其可行性和有效性。结果表明:相比于粗网格,动态网格模型具有更高的计算精度;而相

(下转第 100 页)

40 s,间隔为5 s,声诱饵的航速固定为17 kn。仿真结果如图10所示。

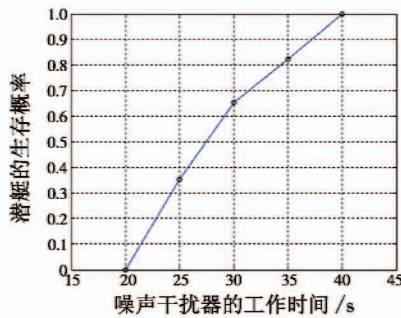


图10 噪声干扰器工作时间与潜艇生存概率的关系

Fig. 10 Operating time of the jammers vs probability of survival

由图10可以看出,潜艇的生存概率随着噪声干扰器工作时间的延长而增加。当噪声干扰器工作时间为20 s时,潜艇无法逃生,但当工作时间延长至40 s时,潜艇的生存概率达到1.0。

5 结论

本文对常规潜艇对抗轻型反潜鱼雷的规避能力进行了研究,分析了潜艇推进系统和鱼雷对抗系统对规避能力的影响。使用UML对仿真系统进行分析 and 设计,并用DEVS形式对全部模型进行开发。仿真结果对潜艇系统基于仿真的采办具有重要价值。

(上接第90页)

比于细网格和非均匀网格,动态网格模型能够在保证抛物方程仿真精度的同时,节约计算资源,提高计算效率,具有更高的时效性,特别是在地形起伏多变的大区域环境下,其优势会更加明显。

参考文献

- [1] 郭淑霞,胡占涛,王风华,等.海战场复杂电磁环境预测方法[J].红外与激光工程,2014,43(8):2431-2436.
- [2] 来嘉哲,方广有,刘帅.战场电磁环境构建中的抛物方程应用研究[J].雷达学报,2012,1(3):63-68.
- [3] 唐书娟,彭芳,吴岚,等.基于博弈值的战场电磁环境复杂度评估方法[J].电光与控制,2013,20(12):14-17.
- [4] 白瑞杰,廖成,盛楠,等.基于数字地图的二维电波传播问题仿真[J].强激光与粒子束,2014,26(7):191-194.
- [5] 陈习权,孙杰.通信基站电磁辐射场强的系统建模与数值仿真[J].电波科学学报,2013,28(1):183-189.
- [6] 康士峰,曹仲晴,王红光,等.基于目标函数的微波超视距雷达天线高度优化方法[J].电子与信息学报,2014,36(7):1767-1770.
- [7] BARRIOS E. A terrain parabolic equation model for pro-

参考文献

- [1] ARMO K R. The relationship between a submarine's maximum speed and its evasive capability [D]. Monterey: Master's Thesis of Naval Postgraduate School, 2009.
- [2] 邱晓刚,段伟. DEVS 研究进展及其对建模与仿真学科建立的作用[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(21): 6697-6704.
- [3] COBANOGU B, ZENGİN A, EKİZ H, et al. Implementation of DEVS based distributed network simulator for large-scale networks [J]. International Journal of Simulation Modelling, 2014. doi:10.2507/IJSIMM13(2)2-257.
- [4] CHEN B, ZHANG L B, LIU X C, et al. Activity-based simulation using DEVS: increasing performance by an activity model in parallel DEVS simulation [J]. Journal of Zhejiang University-Science C: Computer & Electronics, 2014, 15(1):13-30.
- [5] ZEIGLER B P. DEVS formalism: a framework for hierarchical model development [J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 1988, 14(2):228-241.
- [6] 李京,王子明,李冬. 基于 DEVS 的作战指挥行为建模研究[J]. 兵工自动化, 2014, 33(8):11-15.
- [7] 高学强,杨日杰,孙建国,等. 水声对抗器材反鱼雷组合使用建模仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(5):956-960.
- [8] WATTS A J. Jane's underwater warfare system [M]. 11th ed. London: Jane's Information Group, 1999.
- [9] KUTTLER J R, DOCKERY G D. Propagation modeling over terrain using the parabolic wave equation [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1994, 42:90-98.
- [8] KUTTLER J R, DOCKERY G D. Propagation modeling over terrain using the parabolic wave equation [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2000, 48:260-277.
- [9] 胡绘斌. 预测复杂环境下电波传播特性的算法研究 [D]. 长沙:国防科学技术大学, 2006.
- [10] 王昆,杨永钦,龙云亮,等. 多刃峰环境无线电波传播预测的双向抛物方程法 [J]. 电波科学学报, 2011, 26(6):1058-1064.
- [11] 张青洪,廖成,盛楠,等. 抛物方程的多重非均匀网格模型及其应用 [J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(5):210-215.
- [12] DOCKERY G D, KUTTLER J R. An improved impedance-boundary algorithm for Fourier split-step solution of the parabolic wave equation [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1996, 44(12):1592-1599.
- [13] 张青洪,廖成,盛楠,等. 抛物方程方法的非均匀网格技术研究 [J]. 电波科学学报, 2013, 28(8):635-640.
- [14] 张青洪,廖成,盛楠,等. 抛物方程方法的亚网格模型及其应用研究 [J]. 电子与信息学报, 2014, 36(8):2005-2009.