

文章编号: 2095-4980(2021)02-0256-06

部分森林覆盖山区电波传播特性预测的快速算法

刘晓娣^a, 张 静^a, 宋斌斌^b, 张 涵^b

(海军航空大学 a.航空基础学院; b.作战勤务学院, 山东 烟台 264001)

摘要: 为提高部分森林覆盖山区电波传播特性预测的时效性, 提出了一种基于宽角抛物方程(PE)的快速预测算法。采用 PE 通过分步傅里叶变换(SSFT)求解; 在 SSFT 步进迭代过程中, 根据传播路径上森林的等效介电常数、地形的起伏情况, 动态选择 PE 的水平步长。通过对部分森林覆盖的不规则地形条件下的电波传播特性进行仿真, 探讨了该方法的可行性和有效性。结果表明: 相比于均匀大步长算法, 该方法更准确; 而相比于均匀小步长算法, 该方法能够保证抛物方程的计算精确度, 同时极大地提高计算效率。

关键词: 电波传播; 抛物方程; 森林; 山区

中图分类号: TN011

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019147

A fast prediction method of radio wave propagation in partly forested terrain environment

LIU Xiaodi^a, ZHANG Jing^a, SONG Binbin^b, ZHANG Han^b

(a.Aviation Foundation Academy; b.Combat Service Academy, Naval Aviation University, Yantai Shandong 264001, China)

Abstract: A fast prediction method based on parabolic equation is presented for the timeliness of the radio wave propagation in large scale partly forested irregular terrain environment. The wide angle Parabolic Equation(PE) method is used, which is solved by Split-Step Fourier Transform(SSFT). In the SSFT step iteration process, the level step is determined dynamically, according to the equivalent dielectric permittivity of forest and irregular terrain. The feasibility and validity of the fast prediction method is verified by simulating the radio propagation characteristic in the partly forested irregular terrain. The results show that the method has higher accuracy compared with the uniform coarse step, and could improve the computational efficiency greatly compared with fine accuracy.

Keywords: radio propagation; parabolic equation; forest; irregular terrain

无线电波在部分森林覆盖山区传播会产生反射、折射、绕射等现象, 严重影响无线通信系统的性能。森林环境、地形条件下的电波传播问题成为国内外学者研究的一个热点^[1-3]。目前, 关于森林环境电波传播特性预测已有大量研究^[4-7], TAMIR^[4]指出对于 2~200 MHz 的电磁波, 森林可等效为大气与地面之间的均匀有耗介质层, 等效介电常数接近于 1, 并提出了著名的 Tamir 侧面波模型。该模型被广泛应用, 但未考虑地形起伏问题。在部分森林覆盖山区, 电波传播受到森林、地形和大气等复杂因素的影响, 而抛物方程(PE)法能够同时处理非均匀媒介和复杂边界条件, 被广泛应用于大区域复杂环境电波传播问题中^[8-11]。HOLM^[12]、郭建炎^[13]等在预测部分森林覆盖山区的电波传播问题时利用 PE 法, 效果较好; 但在利用分步傅里叶变换(SSFT)算法求解时, 整个计算域都使用均匀的水平步长。在部分森林覆盖山区, 有森林覆盖和无森林覆盖区域传播媒介的等效介电常数不同, 不同的森林环境等效介电常数也不同, 在利用 PE 法进行电波传播特性预测时, 在相同误差范围内, 对水平步长的要求会有较大差异; 此外, 在平坦地面和地形起伏区域, 利用 PE 法进行电波传播特性预测时, 在相同误差范围内, 对水平步长的要求也有较大差异。因此, 在整个计算域, 若采用均匀粗网格来划分, 会给预测结果带来较大误差; 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。

收稿日期: 2019-05-15; 修回日期: 2019-06-20

作者简介: 刘晓娣(1982-), 女, 副教授, 主要研究方向为无线电波传播与电磁环境预测。email:xdl_1982@163.com

针对部分森林覆盖山区电波传播特性预测问题, 本文提出一种基于 PE 法的快速预测方法。采用宽角 PE 通过 SSFT 实现快速求解; 对于山区的不规则地形边界采用边界平移法^[14]进行处理, 且将森林等效为均匀有耗介质; 在 SSFT 步进迭代过程中, 根据传播路径上森林的等效介电常数、地形的起伏情况, 动态选择 PE 的水平步长, 以平衡计算精确度与计算时间的矛盾; 最后, 通过仿真算例验证该方法的有效性。

1 部分森林覆盖山区的 PE 法

假设无线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前向传播, 忽略后向传播, 采用 Feit-Fleck 方法作宽角近似^[15]可得 PE:

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

式中: $m = n + z/a_e$ 为传播媒介的修正折射指数, 考虑地球曲率引入 z/a_e , 其中 a_e 为地球半径, $n \approx \sqrt{\varepsilon_r}$ 为传播媒介的折射指数, $\varepsilon_r = \varepsilon/\varepsilon_0$ 为媒介的相对介电常数, ε 和 ε_0 分别为媒介和真空的介电常数; x, z 分别表示电波的传播距离和传播高度; $u(x, z)$ 为在当前步进处的场分布; k 为真空中的传播常数。

在无森林覆盖区域, 传播媒介为大气; 在森林覆盖区域, 将森林等效为一个均匀有耗介质层, 其等效介电常数 ε_r 为复数, 实部接近于 1, 虚部通常很小, 反映了无线电波传播产生的电导损耗, 传播媒介可看作由森林吸收层和森林以上大气层构成。

利用 SSFT 求解, 可得:

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

式中: 指数项 $e^{ik\Delta x(m-1)}$ 为在传播路径上传播媒介的折射效应; 指数项 $e^{i\Delta x(\sqrt{k^2 - p^2} - k)}$ 为在传播路径上障碍物的绕射效应; Δx 为 SSFT 步进求解时的水平步长; F, F^{-1} 分别为傅里叶变换与逆变换; $p = k \sin \theta$ 是变换域变量, 通常称为电波的空间频率或垂直波数, θ 为电波与水平方向的夹角。根据 Nyquist 准则确定变换的点数, 在垂直方向上相邻 2 点的高度差 Δz 要满足:

$$\Delta z \leq \lambda / (2 \sin \beta) \quad (3)$$

式中 β 表示电波传播的最大仰角。

利用 PE 求解电波传播问题时, 通过阻抗边界条件反映地表下边界的影响。在山区环境, 首先要对不规则地形边界处理变换, 然后运用平面阻抗边界条件的离散傅里叶变换求解。对于地形下边界, 本文采用边界平移法^[9]进行处理。

2 电波传播特性的快速预测算法

2.1 不同森林环境下 PE 的步长对电波传播特性的影响分析

将森林等效为均匀有耗介质, 通过等效介电常数来反映电波传播路径上森林的影响, 森林植被的差异也由等效介电常数的不同来体现。假设发射天线位于地表以上 16 m 处, 频率 $f = 100$ MHz, 高斯天线方向图, 方向图的 3 dB 宽度为 3° , 水平极化; 接收天线高度为 10 m; 森林外部大气为标准大气环境, 地表的相对介电常数为 20, 导电率为 10 mS/m。采用 PE 法分析电波在不同等效介电常数的森林中的传播损耗, 并通过对比在相同等效介电常数下 PE 采用不同步长的计算结果, 分析 PE 的步长对电波传播特性的影响。

图 1(a)~(b)分别为电波在等效介电常数 $\varepsilon_c = 1.12 + 0.02i$, $\varepsilon_c = 1.01 + 0.01i$ 的森林环境中的传播损耗。由图可见: a) PE 计算的传播损耗略小于 Tamir 模型的计算结果, 且传播损耗随

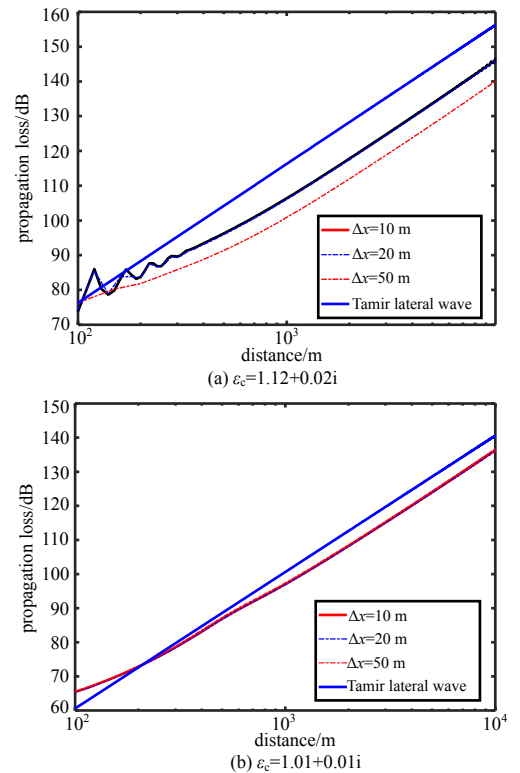


Fig.1 Propagation loss in forest with different equivalent dielectric permittivities
图 1 不同等效介电常数时电波在森林中的传播损耗

着等效介电常数 ϵ_c 的减小而减小；b) 图 1(a)中，步长为 10 m,20 m 时 PE 的计算误差相近，小于步长为 50 时的误差；图 1(b)中，步长为 10 m,20 m,50 m 时 PE 的计算误差都相近，由此可见，在相同等效介电常数下，步长的设置影响 PE 的计算误差，等效介电常数越大，影响越大；c) 对比图 1 中的 2 幅图发现，在相同步长情况下，等效介电常数越大，PE 的计算误差越大。由此可推知，为满足计算误差要求，PE 的水平步长应随等效介电常数的增大而减小。

2.2 PE 的快速预测算法

采用 SSFT 求解 PE 时，在整个计算区域内通常采用一个固定的水平步长 Δx 。但在有森林覆盖区域和无森林覆盖区域，传播媒介的等效介电常数不同；在不同的森林覆盖区域，由于植被等的差异，等效介电常数也不同。因此，在部分森林覆盖区域，等效介电常数在电波传播的 x 方向是分段变化的，折射指数 n 也是分段变化的。为满足计算误差要求，PE 的水平步长应随等效介电常数的增大而减小。此外，在山区环境下，不同区域由于地形起伏不同，相同的水平步长对应的地形高度会有较大差别，也会给地形边界的处理带来较大误差^[16]，从而导致计算结果存在较大误差。为满足计算误差要求，PE 的水平步长应随地形起伏的增大而减小。

在部分森林覆盖山区，电波传播路径上的森林覆盖情况不同，地形起伏情况也千变万化。假设在整个计算区域内通常采用统一的水平步长 Δx ，若为保证计算精确度，根据等效介电常数大、地形起伏大的区域确定水平步长， Δx 往往较小，PE 完成整个计算域内的计算将花费很长的时间，时效性较差；若为保证计算的时效性，根据光秃平坦地形区域确定水平步长， Δx 往往较大，将会存在较大的计算误差，计算精确度较差。

为保证计算精确度，提高计算效率，提出部分森林覆盖山区电波传播特性的快速预测算法。首先根据计算精确度要求，结合传播路径上传播媒介、地形起伏情况，明确在该路径上采用 SSFT 求解允许的最大水平步长 Δx_{\max} 和最小水平步长 Δx_{\min} ；然后根据传播路径上传播媒介的等效介电常数、地形的起伏情况，在水平步长的允许范围内动态确定 PE 的水平步长。

若在水平计算域 x 内，将水平步长分为 J 类，第 j 类对应的步长为 Δx_j ，为保证地形条件下 PE 的计算精确度，设地形起伏门限为 Δh ，在每一步进上，地形起伏 Δh_i 皆小于门限，则：

$$\begin{cases} \Delta x_{\min} \leq \Delta x_j \leq \Delta x_{\max}, & 1 \leq j \leq J \\ \Delta x_j = s\Delta x_{\min}, & s \in Z \text{ 且 } s > 0 \\ q_i \Delta x_j = l_i, & q_i \in Z \text{ 且 } q_i > 0 \\ \sum_i l_i = x \\ \Delta h_i \leq \Delta h \end{cases} \quad (4)$$

式中： Δx_j 根据所在区域传播媒介的等效介电常数、地形起伏而定； Δx_{\min} 的取值需考虑地形数据的分辨力、传播媒介的等效介电常数； Δx_{\max} 的取值需考虑 SSFT 算法的计算误差^[17]，然后综合实际计算中对计算时间和计算精确度的要求来确定； Δh 应不小于 Δz 。根据式(4)的约束条件，建立部分森林覆盖山区 PE 求解的动态步长模型，如图 2 所示。

图 2 中，在光秃平坦地面采用较大水平步长，取 $\Delta x_{j-1} = \Delta x_{\max}$ ；在森林 Forest 1 覆盖区域，根据媒介的等效介电常数确定水平步长 Δx_j ；在地形起伏区域 BC 段，根据地形起伏情况确定水平步长 Δx_{j+2} ；在地形起伏且有森林 Forest 2 覆盖的 AB 段，根据地形起伏情况和传播媒介两方面因素确定水平步长 Δx_{j+1} 。图中根据地形起伏和传播媒介情况设置 $\Delta x_{j+1} < \Delta x_{j+2} < \Delta x_j < \Delta x_{j-1}$ 。

3 数值算例

假设在标准大气条件下，电波在部分森林覆盖山区环境中传播。不规则地形如图 3 所示。发射天线位于地表以上 5 m 处，频率 $f = 200 \text{ MHz}$ ，方向图的 3 dB 宽度为 3° ，水平极化。地表的相对介电常数为 20，导电率为 10 mS/m 。在距发射天线 4~6 km 的平坦地表上有一片稀疏树林，高 15 m，等效介电常数 $\epsilon_1 = 1.01 + 0.02i$ ；在距发射天线 9~12 km 的上坡处有一片浓密树林，高 20 m，等效介电常数 $\epsilon_2 = 1.06 + 0.10i$ ；最大传播距离 $x = 20 \text{ km}$ 。以

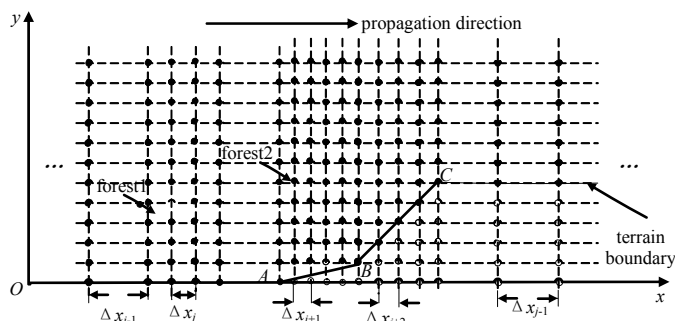


Fig.2 Dynamic step model in partly forest environments
图 2 部分森林覆盖山区动态步长模型示意图

PE 的均匀大步长、均匀小步长和动态步长 3 种算法分别预测该区域的电波传播损耗，其中均匀小步长为 10 m，均匀大步长为 100 m，动态步长根据森林的等效介电常数、地形起伏在 10~100 m 之间动态设置，具体的步长设置如图 4 所示。

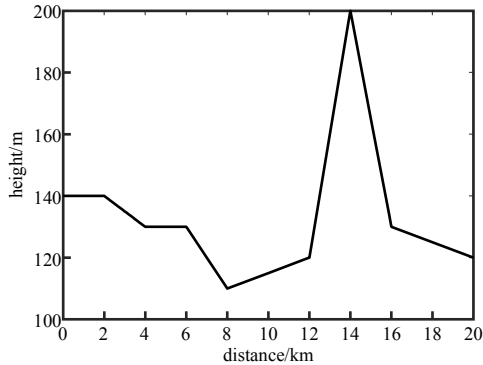


Fig.3 Terrain profile
图 3 地形剖面

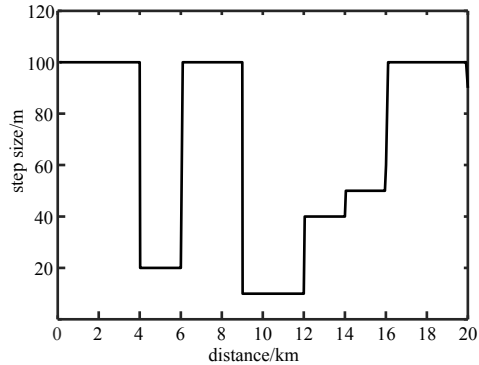
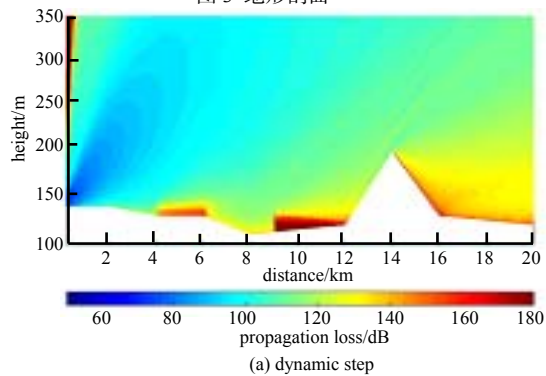
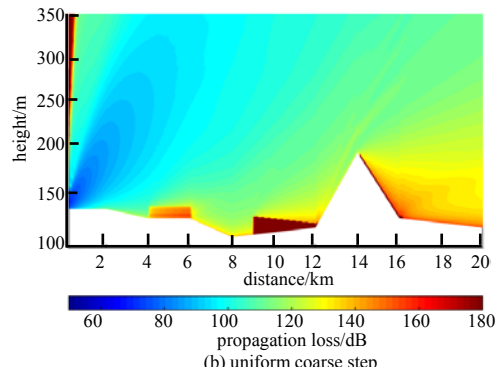


Fig.4 Diagram of step size setting in dynamic step model
图 4 动态步长算法的步长设置示意图



(a) dynamic step



(b) uniform coarse step

Fig.5 Propagation loss in partly forested terrain environment
图 5 电波在部分森林覆盖山区的传播损耗

图 5 表示电波在部分森林覆盖山区的传播损耗，其中图 5(a)采用动态步长算法，图 5(b)采用均匀大步长算法。由图 5(a)可见，森林覆盖区域的传播损耗大于光秃地面，且浓密树林的传播损耗高于稀疏树林；在水平方向上，9~12 km 处浓密树林的传播损耗随着地势的抬升而逐渐减小，这是因为该处树林的地势较低，受前面地形、树林的阻挡，在起始端进入树林的电波以绕射波为主，随着地势的抬升，阻挡减小，直射波和反射波逐渐起主要作用；由于地形的遮蔽，在最高峰以后传播损耗明显增大。对比图 5(a)和图 5(b)可以看出，采用均匀大步长算法时在森林与大气交界的上方、后方，传播损耗渐变过程不明显，尤其是浓密树林，这与图 6 电波在距离 10 km 处的传播损耗情况相一致，动态步长算法与均匀小步长算法的计算平缓变化，而均匀大步长算法的计算结果存在传播损耗的突变，这说明均匀大步长算法存在较大误差，不能有效反映电波在森林区域的传播情况。

表 1 为采用均匀小步长 PE 算法和动态步长 PE 算法时的网格空间和计算时间。从表 1 中可以看出，在相同仿真环境下，本算例中，采用动态步长快速算法后，相对于均匀小步长算法，PE 计算所需的网格空间下降了 60%，所需的计算时间减少了 68.2%。这表明采用动态步长算法能极大地减少 PE 计算需要的资源和时间，更具高效性。

由上述分析可知，本文提出的基于动态步长的 PE 快速预测算法能够保证 PE 的计算精确度，同时提高计算效率。特别是在地形起伏多变、部分森林覆盖的大区域环境下，随着地形起伏的复杂化、森林植被的变化和仿真范围的增加，快速预测算法的优势将更加明显。

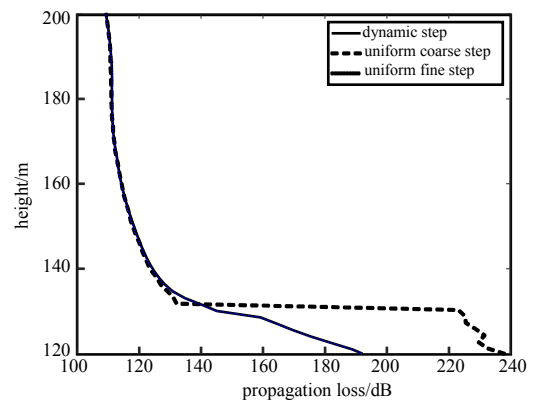


Fig.6 Propagation loss with height at distance 10 km
图 6 电波在距离 10 km 处的传播损耗

表 1 网格空间和计算时间对比

Table 1 Comparison of grid number and computational time		
algorithm	grid number	computational time/s
uniform fine step	2 000	4.88
dynamic step	800	1.55

4 结论

在保证计算精确度的前提下,为提高部分森林覆盖山区电波传播特性预测的时效性,提出了一种基于PE的快速预测算法。分析了不同森林环境下PE的步长对电波传播特性的影响分析,建立了部分森林覆盖山区PE快速求解的网格模型,并通过数值算例,分析了部分森林覆盖的不规则地形条件下的电波传播特性,验证了该方法的可行性和有效性。结果表明:相比于均匀大步长算法,动态步长算法更准确;而相比于均匀小步长算法,动态步长算法能够保证PE的计算精确度,同时极大地提高计算效率。

参考文献:

- [1] 姜博文,齐世举,郭金库,等. 战场环境中的电波传播模型优化选择方法[J]. 电讯技术, 2018,58(3):263-268. (JIANG Bowen, QI Shiju, GUO Jinku, et al. An optimization method of radio propagation model in battlefield environment[J]. Telecommunication Engineering, 2018,58(3):263-268.)
- [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. (LAI Jiazhe, FANG Guangyou, LIU Shuai. Research on constructing war-field electromagnetic environment using parabolic equation[J]. Journal of Radars, 2012,1(3):63-68.)
- [3] 刘海洋,于新文,张旭,等. 无线信号在针叶林中的传播性质[J]. 林业工程学报, 2016,1(3):127-132. (LIU Haiyang, YU Xinwen, ZHANG Xu, et al. Transmission properties of wireless signal in coniferous forest[J]. Journal of Forestry Engineering, 2016,1(3):127-132.)
- [4] TAMIR T. On radio-wave propagation in forest environments[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1967,15(6):806-817.
- [5] SOUZA J F, MAGNO F N B, VALENTE Z A, et al. Mobile radio propagation along mixed paths in forest environment using parabolic equation[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2009,51(4):1133-1136.
- [6] 刘晓娣,朱四华,林洪文. 一种部分森林覆盖环境电波传播特性预测方法[J]. 海军航空工程学院学报, 2018,33(1):130-134. (LIU Xiaodi, ZHU Sihua, LIN Hongwen. A method of wave propagation in partly forest environments[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2018,33(1):130-134.)
- [7] 刘晓娣,宋斌斌,张静,等. 抛物方程法在森林环境电波传播特性预测中的应用[J]. 电讯技术, 2018,58(3):257-262. (LIU Xiaodi, SONG Binbin, ZHANG Jing, et al. Application of parabolic equation model for wave propagation in forest[J]. Telecommunication Engineering, 2018,58(3):257-262.)
- [8] 周丽丽,白雪胜,穆中林,等. 复杂路径上空过渡区域低频电波传播损耗求解[J]. 电子与信息学报, 2017,39(8):2019-2022. (ZHOU Lili, BAI Xuesheng, MU Zhonglin, et al. Solution to low-frequency radio wave propagation problems in transition regions over irregular terrain[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2017,39(8):2019-2022.)
- [9] 盛楠,廖成,张青洪,等. 太赫兹波大气衰减的抛物方程模型[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(2):175-179. (SHENG Nan, LIAO Cheng, ZHANG Qinghong, et al. Parabolic equation model for calculation atmospheric attenuation of THz wave[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(2):175-179.)
- [10] 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. (ZHANG Qinghong, LIAO Cheng, SHENG Nan, et al. Non-uniform mesh technique for parabolic equation[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2013,28(8):635-640.)
- [11] 魏乔菲,尹成友,范启蒙. 存在障碍物时电波传播抛物线方程分析及其验证[J]. 物理学报, 2017,66(12):126-134. (WEI Qiaofei, YIN Chengyou, FAN Qimeng. Research and verification for parabolic equation method of radio wave propagation in obstacle environment[J]. Acta Physica Sinica, 2017,66(12):126-134.)
- [12] HOLM P, ERIKSSON G, KRANS P, et al. Wave propagation over a forest edge-parabolic equation modeling vs. measurements[C]// IEEE Symposium Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Lisboa Portugal:[s.n.], 2002:140-145.
- [13] 郭建炎,王剑莹,龙云亮,等. 基于抛物方程法的部分森林覆盖山区电波传播分析[J]. 电波科学学报, 2008,23(6):1045-1050. (GUO Jianyan, WANG Jianying, LONG Yunliang, et al. Analysis of radio propagation in partly forested terrain environment using parabolic equation approach[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008,23(6):1045-1050.)
- [14] SPRAGUE R A, PATTERSON W L, BARRIOS A E. Advanced Propagation Model(APM) version 2.1.04 computer software Configuration Item(CSCI) documents[Z]. Space and Naval Warfare Systems Command San Diego CA, 2007.
- [15] FEIT M D, FLECK J A. Light propagation in graded-index fibers[J]. Applied Optics, 1978,17(24):3990-3998.