

复杂路径上空过渡区域低频电波传播损耗求解

周丽丽^{①③} 白学胜^① 穆中林^{*②} 蒲玉蓉^③ 席晓莉^③ 何立凤^①

^①(陕西科技大学电气与信息工程学院 西安 710021)

^②(空军工程大学航空航天大学工程 西安 710038)

^③(西安理工大学自动化与信息工程学院 西安 710048)

摘要: 该文基于宽角抛物方程方法,对复杂路径上空过渡区域低频电波传播损耗问题进行研究。增加了高空接收场分量的方向因子公式推导及其约束条件;仿真了3种典型路径模型下,距地面上空60 km范围内的垂直电场分布,并比较分析了其与近地表面变化规律的异同。所提方法能够更好地将近地面与高空过渡区域场量求解方法统一起来,提高了计算精度,可为复杂地—电离层波导中低频天波传播问题解决提供技术支持。

关键词: 低频电波;过渡区域;宽角抛物方程;方向因子

中图分类号: TN011

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)08-2019-04

DOI: 10.11999/JEIT161332

Solution to Low-frequency Radio Wave Propagation Problems in Transition Regions over Irregular Terrain

ZHOU Lili^{①③} BAI Xuesheng^① MU Zhonglin^② PU Yurong^③ XI Xiaoli^③ HE Lifeng^①

^①(College of Electrical and Information Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

^②(College of Aeronautics and Astronautics Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

^③(College of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Based on the wide-angle parabolic equation method, propagation characteristics of low-frequency radio wave in transition regions over irregular terrain are analyzed. The formula of the direction factor is deduced with certain assumptions. Electric field distributions within 60 km height of three path models are simulated, and the propagation characteristics are compared with those on the ground. By the proposed approach calculation schemes of the electric field both on the ground and in transition regions can be unified with high accuracy, which is important for solutions of the sky-wave propagation problems in a complex earth-ionosphere waveguide.

Key words: Low-frequency radio wave; Transition area; Wide-angle parabolic equation; Direction factor

1 引言

低频电波可用于导航授时、空间环境监测、透地通信等诸多领域,与其它频段电波有着不同的传输性质^[1-3]。根据工程辐射特点,该频段传统传播理论研究主要是针对沿地球表面绕射波传播方式,给出典型路径上地波衰减因子^[4]预测算法;或是基于电离层反射的天波传播方式,重点研究简化地—电离层模型下的割背因子、会聚系数、反射系数等参数对近地表面场的影响^[5,6]。对于复杂路径上空过渡

区域(不考虑电离层反射)低频电波空间传播损耗计算问题研究较少,而低电离层反射天波研究的基础之一则恰是其入射场量的计算。基于分步混合傅里叶变换的抛物方程方法是求解电磁波传播与散射问题的有效方法^[7,8]。国内潘威炎等人^[9]首次将其窄角形式用于近地表面10 km高度范围内低频地波衰减因子的预测。2016年,其宽角形式则被用于罗兰-C系统中地面附加二次相延的求解^[10]。因地波“绕射”理论是针对地表面波^[11,12]的场分布或时延特性,天线辐射场分量的空间方向性问题^[13,14]考虑较少,而天波“射线”传播理论中除在“焦散区”及“阴影区”外,对地面路径的影响也不予考虑,在应用双向抛物方程^[15]及FDTD方法进行山前合成场研究时,文献^[16]发现该方向效应及地面路径影响的忽略会在短距离高仰角区域引入较大误差。本文将宽角抛物方程应用于高空过渡区域远区场的计算,增加

收稿日期: 2016-12-08; 改回日期: 2017-05-07; 网络出版: 2017-06-23

*通信作者: 穆中林 lin1997_98@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61401261), 中国博士后科学基金(2016M600803), 陕西科技大学科研启动基金(BJ11-20)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61401261), China Postdoctoral Science Foundation (2016M600803), The Scientific Research Startup Foundation of Shaanxi University of Science and Technology (BJ11-20)

方向性因子的推导过程, 并比较分析远区场分量在高空与近地表面变化规律的异同。

2 理论方法

若取如图 1(a)所示的球坐标系, 球心 o 为地心, 场源为放置在 $\theta = 0^\circ$, $r = r_0$ 处的垂直电偶极子, 电流元大小为 I 。若电波传播的介质环境对方位角 φ 没有变化, 取时谐变化为 $e^{-i\omega t}$, 则对于空中和地面的磁场 H_φ 在球坐标系中可表示为^[9]

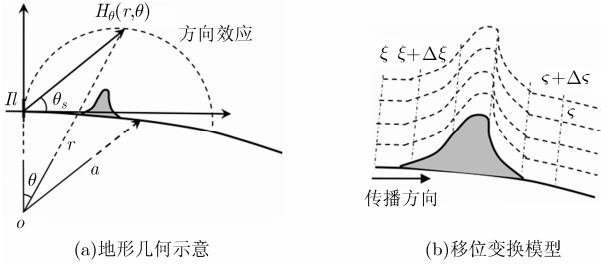


图 1 地形模型示意及抛物方程方法中不规则地形处理

$$H_\varphi = \sqrt{\frac{\varepsilon}{r \sin \theta}} e^{ika\theta} u(r, \theta) \quad (1)$$

其中, a 为地球半径, ε 为空气中的介电常数, θ_s 为接收点与源点及地面之间的夹角。设接收点离地高度为 $z = r - a$, 沿地面传播大圆距离为 $x = r\theta \approx a\theta$, 波函数 $u(r, \theta)$ 转换到一个新变量体系中, 满足方程

$$\left\{ \partial_z^2 + 2ik\partial_x + k^2 \left[n^2(x, z) - 1 + \frac{2z}{a} \right] \right\} u(x, z) = 0 \quad (2)$$

其中, k 为空气中的波数, n 为空气折射率。对于不规则地表, 采用移位变换模型^[7,8], 如图 1(b)所示。假设地形函数为 $h(x)$, 定义新的距离和地形高度变量^[7,8]

$$\xi = x \quad (3)$$

$$\zeta = z - h(x) \quad (4)$$

令

$$u(x, z) = e^{i\theta_p(\xi, \zeta)} v(\xi, \zeta) \quad (5)$$

其中, θ_p 定义为

$$\theta_p(\xi, \zeta) = k\zeta h'(\xi) + \frac{k}{2} \int_0^\xi h'^2(s) ds \quad (6)$$

若已知 ξ 处地面及空中的函数值 v , 由分步混合傅里叶变换则可以递推得到 $\xi + \Delta\xi$ 处任意高度的 $v(\xi + \Delta\xi, \xi)$ ^[10]:

$$v(\xi + \Delta\xi, \zeta) = e^{ik(n(\xi, \zeta) - 1 + \zeta/a - h''(\xi))\Delta\xi} \cdot F^{-1} \left\{ e^{-ik\Delta\xi(\sqrt{k^2 - p^2} - k)} F[v(\xi, \zeta)] \right\} \quad (7)$$

其中, p 为 ζ 的混合傅里叶变换域。磁场的初始值可

通过平地公式计算得到, 进而迭代得到不同区域范围的磁场。定义地波衰减因子为^[9]

$$W_g(\xi, \zeta) = H_\varphi(\xi, \zeta) / H_0(\xi) \quad (8)$$

其中, $H_0(\xi) = \frac{ikI}{2\pi\xi} \exp(ik\xi)$ 。

可直接通过该地波衰减因子求解近地表面电场垂直分量损耗

$$E_\zeta(\xi, \zeta) = E_0(\xi)W_g(\xi, \zeta) \quad (9)$$

其中, $E_0(\xi)$, $H_0(\xi)$ 是理想导体平面相同接收距离处的电磁场, 二者比值等于波阻抗 Z_0 。

由无源区磁场旋度方程

$$\nabla \times \mathbf{H} = -i\omega\varepsilon\mathbf{E} \quad (10)$$

当收发大圆距离较近, 不考虑地球曲率影响, 可得不同方向电场分量

$$\begin{aligned} E_\zeta &\approx -\frac{1}{i\omega\varepsilon\xi} \cdot \partial_\xi(\xi H_\varphi) \\ &= -Z_0 H_\varphi + Z_0 \frac{I}{2\pi\xi} e^{ik\xi} \partial_\xi(W_g) \end{aligned} \quad (11)$$

$$E_\xi \approx -\frac{1}{i\omega\varepsilon} \cdot \partial_\zeta(-H_\varphi) = -Z_0 \frac{I}{2\pi\xi} e^{ik\xi} \partial_\zeta(W_g) \quad (12)$$

令

$$W_g = e^{ik(r_0 - \xi)} \frac{\xi}{r_0} W_p \quad (13)$$

其中, $r_0 \approx \sqrt{\xi^2 + z^2}$, 可以证明

$$\begin{aligned} \partial_\xi(W_g) &= \left[\frac{1}{\xi} + \frac{ik\xi}{r_0} - ik - \frac{\xi}{r_0^2} \right] W_g \\ &\quad + e^{ik(r_0 - \xi)} \frac{\xi}{r_0} \partial_\xi(W_p) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\partial_\zeta(W_g) = W_g \left[ik \frac{z}{r_0} - \frac{z}{r_0^2} \right] + e^{ik(r_0 - \xi)} \frac{\xi}{r_0} \partial_\zeta(W_p) \quad (15)$$

将式(14)和式(15)分别代入式(11)和式(12), 可得

$$\begin{aligned} E_\zeta &= -Z_0 H_\varphi \left[\frac{1}{ik\xi} + \frac{\xi}{r_0} - \frac{\xi}{ikr_0^2} \right] \\ &\quad + Z_0 \frac{I}{2\pi r_0} e^{ikr_0} \partial_\xi(W_p) \\ &\approx -Z_0 H_\varphi \cos \theta_s - Z_0 \frac{H_0(r_0)}{ik} \partial_\xi(W_p) \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} E_\xi &= Z_0 H_\varphi \left[\frac{z}{r_0} - \frac{z}{ikr_0^2} \right] + \frac{Z_0 H_0(r_0)}{ik} \partial_\zeta(W_p) \\ &\approx Z_0 H_\varphi \sin \theta_s + \frac{Z_0 H_0(r_0)}{ik} \partial_\zeta(W_p) \end{aligned} \quad (17)$$

当地形变化梯度不大, W_p 为缓变函数, 且满足 $|\partial_\xi(W_p)| \ll k$, $|\partial_\zeta(W_p)| \ll k$ 时, 式(16), 式(17)最后一项可以忽略。当接收点位于地表面, 式(16)即退

化为式(9)。

当收发点之间大圆距离较大, 需考虑地球曲率时, 推导愈加复杂, 可以通过空域差分技术得到不同方向电场分量。而实际上, 随着大圆距离增大, 方向效应减弱。在视距传播范围内, 亦可利用与式(16), 式(17)相近处理办法, θ_s 可理解为出射角。当地形起伏剧烈, W_p 不再是缓变函数, 此时抛物方程本身采用的地面阻抗边界条件不再满足, 误差增大。

为了便于后续比较, 此处给出传统方法中, 在视距传播范围内的过渡区域, 空中电场垂直分量表达式:

$$E_c = 300\sqrt{P_t} \frac{\exp(-ik_0L)}{L} (\cos\theta_s)^2 F_t \quad (18)$$

其中, P_t 是发射功率, 以 kW 计; L 是收发点的视距; 则 $F(t)$ 表示由于地面的曲率和有限电导率引起的发射点的背景因子。

$$F_t = (1 + R_g)/2 \quad (19)$$

其中

$$R_g = (\sin\theta_s - \Delta_g)/(\sin\theta_s + \Delta_g) \quad (20)$$

为地面反射系数;

$$\Delta_g = \frac{\sqrt{\varepsilon_r - \cos^2\theta_s - i60\lambda\sigma}}{\varepsilon_r - i60\lambda\sigma} \quad (21)$$

为归一化地表面阻抗。 ε_r 为地表面相对介电常数, λ 为波长, σ 为大地电导率。

3 计算结果

该部分仿真了 3 种不同地表面模型条件下电波传播的空间特性, 第 1 种是平地面模型, 第 2 种为 3 段混合光滑路径模型, 第 3 种为含有高斯山脉的不规则模型。3 种模型垂直距离 z 取值为 0~60 km。仿真频率为 100 kHz。源发射功率 1 kW。

图 2 给出的是平地面模型时的不同传播距离下, 采用式(9)和式(16)计算的垂直电场幅度结果。传播路径总长 100 km, 地面电参数为 $\sigma = 3 \times 10^{-3}$ s/m, $\varepsilon_r = 13$ 。采用平地面公式结果验证了文中算法的计算精度。

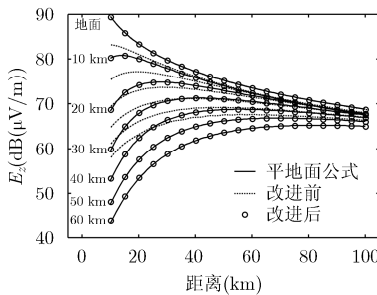


图 2 平地面上空的垂直电场

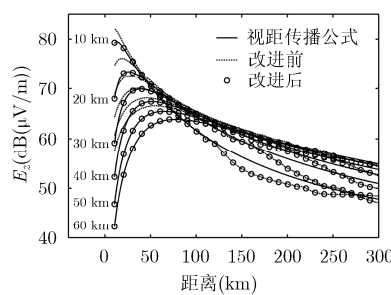


图 3 3段不均匀光滑球地面上空的垂直电场

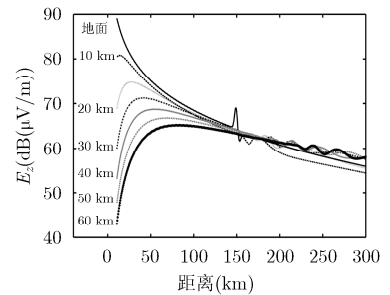


图 4 复杂地面上空的垂直电场

从图 2 可以看出, 随着接收点高度的增加, 采用式(9)求解的电场损耗误差增大, 而增加了方向性因子的抛物方程结果与平地面公式结果一致, 验证了本文算法的正确性。由式(16)和式(9)的区别亦可以看出, 接收点大圆距离越小, 高度越高, 出射角越大, 两者误差也就越大。

图 3 给出的是抛物方程方法和式(18)计算的 3 段不均匀光滑球地面上空垂直电场幅度。地球等效半径 $a_e = 4a/3$, $a = 6371.12$ km, 各段路径长度均为 100 km, 地面电参数依次为: $\sigma = 2 \times 10^{-4}$ s/m, $\varepsilon_r = 6$; $\sigma = 3 \times 10^{-3}$ s/m, $\varepsilon_r = 13$; $\sigma = 5$ s/m, $\varepsilon_r = 80$ 。

从图 3 可以看出, 对于光滑路径, 在大圆路径较小的区域, 地面对 $z \geq 10$ km 空中视距范围内接收点没有影响, 而随着大圆距离的增加, 由于绕射作用, 收发点之间地表面路径影响作用增强, 方向效应减弱, 超过视距传播范围后, 方向效应则不予考虑。

图 4 给出的是传播路径中含有孤立陡峭山脉时的不同传播距离抛物方程方法计算的垂直电场幅度结果。其中传播路径的地形函数为

$$h(x) = 1.5 \exp\left[-9\left(\frac{x-150}{8}\right)^2\right] \quad (22)$$

其中, x , $h(x)$ 单位均为 km。传播路径总长为 300 km, 地面电参数为 $\sigma = 3 \times 10^{-3}$ s/m, $\varepsilon_r = 13$ 。

从图 4 中可以看出受复杂地面路径的影响, 电场幅度曲线发生畸变, 山后近地面的场很快恢复稳定, 而复杂地面对高空电场影响范围比近地表面影响范围要大得多, 高空场出现振荡, 且不断向后延伸, 变化规律愈加复杂。

4 结论

复杂地、电离层对低频电波传播特性预测对其在空间领域的应用拓展至关重要。由于高空视距传播范围内的远区场具有一定方向性, 忽略其影响会产生较大误差。针对该问题, 文中先根据宽角抛物

方程求出磁场损耗在不规则点阵网格上的空间分布, 然后由磁场旋度方程推导出电场不同方向分量满足的近似表达式, 增加了方向性因子的影响, 从而提高复杂路径上空过渡区域电场传播损耗的计算精度。本文结果可为低频“波跳”理论中各跳天波入射场的计算提供一定借鉴。

参考文献

- [1] 刘辛涛, 胡安平. 长波导航系统拓展应用研究[J]. 现代导航, 2013, 4(2): 116-119.
LIU Xintao and HU Anping. Research on application extension of long wave navigation system[J]. *Modern Navigation*, 2013, 4(2): 116-119.
- [2] FENG Y and ASTIN I. Remote sensing of soil moisture using the propagation of Loran-C navigation signals[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(1): 195-198. doi: 10.1109/LGRS.2014.2332055.
- [3] 郑鹏. 基于 HTcSQUID 技术的低频电磁波应用研究[D]. [硕士学位论文], 北京大学, 2014.
ZHENG Peng. Application research of low frequency electromagnetic wave based on HTcSQUID technique[D]. [Master dissertation], Peking University, 2014.
- [4] 周丽丽, 穆中林, 蒲玉蓉, 等. 不规则地形地波传播衰减因子的改进算法及结果一致性研究[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(9): 2254-2259. doi: 10.11999/JEIT150077.
ZHOU Lili, MU Zhonglin, PU Yurong, et al. An improved algorithm for the ground-wave attenuation factor prediction over irregular terrain and the results consistency study[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(9): 2254-2259. doi: 10.11999/JEIT150077.
- [5] DEMINCO N. Propagation prediction techniques and antenna modeling (150 to 1705 kHz) for intelligent transportation systems (ITS) broadcast applications[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2000, 42(4): 9-34. doi: 10.1109/74. 868050.
- [6] WAKAI N, KURIHARA N, and OTSUKA A. Numerical method for calculating LF sky-wave, ground-wave and their resultant wave field strengths[J]. *Electronics Letters*, 2004, 40(5): 288-290. doi: 10.1049/el:20040207.
- [7] 胡绘斌. 预测复杂环境下电波传播特性的算法研究[D]. [博士学位论文], 国防科学技术大学, 2006.
HU Huibin. Study on the algorithms of the radio propagation characteristics in complex environments[D]. [Ph.D. dissertation], National University of Defense Technology, 2006.
- [8] ZHANG P, BAI L, WU Z, et al. Applying the parabolic equation to tropospheric groundwave propagation: A review of recent achievements and significant milestones[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2016, 58(3): 31-44. doi: 10.1109/MAP.2016.2541620.
- [9] 潘威炎, 彭怀云, 张红旗. 非均匀光滑球面地波衰减因子的抛物方程算法[J]. 电波科学学报, 2006, 21(1): 37-42. doi: 10.3969/j.issn.1005-0388.2006.01.007.
PAN Weiyan, PENG Huaiyun, and ZHANG Hongqi. Parabolic equation algorithm of wave attenuation along inhomogeneous smooth ground[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2006, 21(1): 37-42. doi: 10.3969/j.issn.1005-0388. 2006.01.007.
- [10] WANG D, XI X, PU Y, et al. Parabolic equation method for Loran-C ASF prediction over irregular terrain[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, 15: 734-737. doi: 10.1109/LAWP.2015.2471079.
- [11] COLLIN R E. Hertzian dipole radiating over a lossy earth or sea: Some early and late 20th century controversies[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2004, 46(2): 64-79. doi: 10.1109/MAP.2004.1305535.
- [12] WAIT J R. The ancient and modern history of EM ground-wave propagation[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 1998, 40(5): 7-24. doi: 10.1109/74. 735961.
- [13] VINCENT J, BORDERIES P, POIRIER J R, et al. Long-range three-dimensional ground wave propagation modeling over flat, irregular terrain[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(5): 1900-1906. doi: 10.1109/TAP.2016.2540647.
- [14] 马斯敏, 宋铮, 马恒民. 基于 FEKO/PE 混合算法的近地线天线地波场求解[J]. 微波学报, 2014, 30(6): 46-49.
MA Simin, SONG Zheng, and MA Hengmin. FEKO/PE hybrid algorithm based calculation on ground-wave of the wire antennas[J]. *Journal of Microwaves*, 2014, 30(6): 46-49.
- [15] 王昆, 龙云亮, 刘震宇. 基于双向抛物方程逆算法的障碍物定位技术研究[J]. 电波科学学报, 2015, 30(6): 1108-1115. doi: 10.13443/j.cjors.2014122201.
WANG Kun, LONG Yunliang, and LIU Zhenyu. Localization of obstacles based on the inverse algorithm of two-way parabolic equation approach[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2015, 30(6): 1108-1115. doi: 10.13443/j.cjors. 2014122201.
- [16] ZHOU L, WANG D, MU Z, et al. LF radio wave prediction at short ranges with high propagation angles over irregular terrain[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 732-735. doi: 10.1109/LAWP.2016.2601138.
- 周丽丽: 女, 1981年生, 讲师, 研究方向为电波传播与电磁场计算。
白学胜: 男, 1990年生, 硕士生, 研究方向为控制工程。
穆中林: 男, 1981年生, 讲师, 研究方向为电波传播、导航与控制。
蒲玉蓉: 女, 1983年生, 讲师, 研究方向为电波传播与电磁场数值计算。
席晓莉: 女, 1967年生, 教授, 研究方向为电波传播、天线设计及电磁场数值计算。
何立凤: 男, 1962年生, 教授, 研究方向为模式识别与人工智能。