

文章编号: 2095-4980(2017)04-0572-03

大气波导中基于抛物方程法的障碍物定位

王 昆¹, 龙云亮²

(1.广东工业大学 信息工程学院, 广东 广州 510006; 2.中山大学 信息科学与技术学院, 广东 广州 510006)

摘 要: 为了解决遥感遥测、自动导航、电子战等领域中常常涉及到障碍物定位问题, 在单向抛物方程法的逆算法的基础上提出了双向抛物方程法的逆算法。应用该逆算法对大气波导环境中的障碍物进行了探测和定位, 采用插值法分析了大气波导对障碍物定位精确度的影响。仿真结果表明, 通过双向抛物方程法的逆算法可以对传播路径上的障碍物进行探测和定位, 而且大气折射率变化会对定位精确度产生较大影响。

关键词: 双向抛物方程法; 逆算法; 定位; 大气波导

中图分类号: TN011

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201704.0572

Localization of obstacles based on Parabolic Equation method in duct environments

WANG Kun¹, LONG Yunliang²

(1.School of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou Guangdong 510006, China; 2.Department of Electronics and Communication Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou Guangdong 510006, China)

Abstract: An inverse algorithm of the two-way parabolic equation method is presented based on the inverse algorithm of one-way parabolic equation in order to localize objects in remote sensing, automatic navigation and electronic warfare, et al. It is applied to research the localization of obstacles in atmospheric duct environments. The effects of the atmospheric duct on the accuracy of localization are analyzed by using the interpolation method. The simulated results show that the obstacles on the propagation path can be detected and located by the inverse algorithm of the two-way parabolic equation method, and the atmospheric duct has a major impact on the location accuracy.

Keywords: two-way parabolic equation method; inverse algorithm; localization; atmospheric duct

在全球定位系统、雷达遥感遥测、自动驾驶导航和电子战等系统中, 定位是非常重要的功能。Spencer 等提出逆绕射抛物方程定位系统(Inverse Diffraction Parabolic wave Equation Localisation System, IDPELS), 对发射源进行定位^[1]。郭建炎^[2]和李德鑫^[3]等也研究了用抛物方程法(Parabolic Equation, PE)的逆算法进行辐射源定位的问题。可见, 单向抛物方程法(One-Way PE, 1WPE)的逆算法能用于发射源定位; 而对于双向抛物方程法(Two-Way PE, 2WPE), 也可以研究其逆算法, 并用其对电波传播路径上的障碍物进行探测和定位。Oraizi^[4], Ozgun^[5]和王昆^[6]等先后研究了能同时处理前向和后向电波传播问题的 2WPE 模型, 用傅里叶分步步进法(Fourier Split Step, FSS)和有限元法(Finite Element Method, FEM)等算法求解了 2WPE, 计算了各种复杂环境的双向电波传播。本文将进一步研究双向抛物方程法的逆算法及其在大气波导环境中的应用。对流层大气波导指的是在沿海拔高度方向上大气温度的逆变和湿度的剧烈变化而导致的大气折射率异常改变, 部分电磁波会受此影响被陷获在一定厚度的大气层内传播, 从而严重影响电磁波的传播特性。Kuttler^[7], Levy^[8]和 Barrios^[9]等用抛物方程(PE)法分析了对流层大气波导对前向电波传播的影响。而大气波导也势必会影响基于双向抛物方程法的逆算法的障碍物定位效果。

1 双向抛物方程法的逆算法理论

假设电磁场关于方位角对称, 不考虑电波的横向传播和横向地形对电波传播的影响, 则可由波动方程推导出窄角 2WPE^[9]:

收稿日期: 2015-11-24; 修回日期: 2016-02-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61401106; 41376041)

$$\frac{\partial u_f}{\partial x} = \frac{ik}{2} \left(\frac{1}{k^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + n^2 - 1 + \frac{2z}{a_e} \right) u_f \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_b}{\partial x} = -\frac{ik}{2} \left(\frac{1}{k^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + n^2 - 1 + \frac{2z}{a_e} \right) u_b \quad (2)$$

式中: u_f 表示前向传播电磁波; u_b 表示后向传播电磁波; k 是自由空间波数; n 为大气折射率; x 和 z 分别表示距离和高度变量; a_e 是地球半径。 $\delta = n^2 - 1 + \frac{2z}{a_e}$ 是考虑了地球曲率的大气修正折射率, 随 x 与 z 变化。 $x + \Delta x$ 和 $x - \Delta x$ 步进处的双向 FSS 解分别为:

$$u_f(x + \Delta x) = e^{\frac{ik\delta\Delta x}{2}} F^{-1} \left\{ e^{\frac{ip^2\Delta x}{2k}} F[u_f(x, z)] \right\} \quad (3)$$

$$u_b(x - \Delta x) = e^{\frac{ik\delta\Delta x}{2}} F^{-1} \left\{ e^{\frac{ip^2\Delta x}{2k}} F[u_b(x, z)] \right\} \quad (4)$$

式中: p 是变换域变量; F 和 F^{-1} 是傅里叶变换对, 总场为 $U = u_f e^{ikx} + u_b e^{-ikx}$ 。后向场的逆传播模型的步进解为:

$$u_b(x, z) = F^{-1} \left\{ \frac{F \left[\frac{u_b(x - \Delta x)}{e^{\frac{ik\delta\Delta x}{2}}} \right]}{e^{\frac{ip^2\Delta x}{2k}}} \right\} \quad (5)$$

则逆算法的步骤为: a) 在障碍物前且靠近发射源某一位置处, 用接收天线测量得到总场(本文为仿真便利, 总场是通过 2WPE 计算得到的); b) 从总场中减去前向场, 得到后向场; c) 对后向场进行逆绕射传播计算, 即根据后向场在 $x - \Delta x$ 处的值, 逆着电波传播方向用逆算法求出在 x 处的值, 通过不断的迭代得到其在整个空间的分布; d) 根据逆绕射传播场分布, 估计障碍物位置。

2 大气波导的处理方法

在 2WPE 模型及其逆算法模型中, $e^{\frac{ik\delta\Delta x}{2}}$ 项反映了大气折射对电波传播的影响, 因此本文在电波的前向传播、后向传播及逆传播运算中均采用插值法来处理大气波导结构, 分析其对双向电波传播和障碍物定位的影响。在求解 2WPE 和 2WPE 逆算法时需要给出大气折射率的准确分布。本文在仿真中假设存在表面波导, 在高度 135 m 到 150 m 之间是大气波导层, 修正大气折射率分布数据见表 1。

3 数值仿真结果和分析

假设工作频率为 2 000 MHz, 发射天线为水平极化高斯天线, 3 dB 垂直波束宽度为 3°, 且天线高为 50 m, 天线仰角为 0°。最大传播距离为 20 km, 存在如表 1 所示的表面波导, 中等干燥地面。假设在距离发射天线 10 km 位置处存在一个高 100 m 的刃峰型障碍物。图 1 给出了用 2WPE 法计算得到的双向电波传播因子分布图, 由图可见由于大气波导作用而得到增强的前向和后向电磁波间的干涉图样。在 $x = 100$ m 处, 将 2WPE 法算得的总场剖面与 1WPE 法求得的前向场剖面相减, 得到刃峰障碍物引起的后向场剖面, 从该后向场出发进行逆向反演计算, 在图 2 中给出了其逆绕射传播因子分布, 可见在刃峰顶点(已用圆与十字线标出)附近有很明显的转折点, 由此可估计刃峰的位置和高度。据图判断出刃峰位于距离后向场接收点 $x = 0.1$ km 约 9.94 km 远处, 即距离发射天线约 10.04 km 远处; 障碍物高度约为 101.4 m。可见, 对障碍物的定位精确度较高。

表 1 表面波导的修正折射率分布
Table 1 Modified refractivity distribution of surface-based duct

height/m	modified refractivity
0	340.00
135	355.93
150	340.03
250	351.83

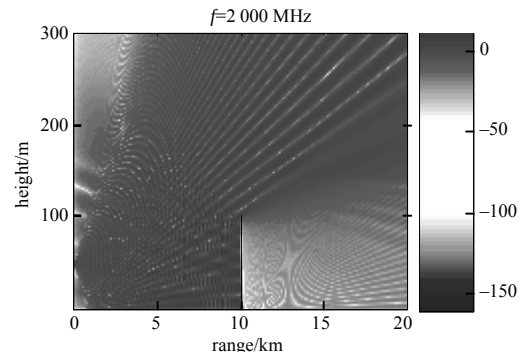


Fig.1 Two-way propagation factors in the presence of surface duct
图 1 存在大气波导时的双向电波传播因子分布图

如果实际存在上述所定义的大气波导,但是在逆算法中没有考虑此大气波导,此时得到的逆绕射传播因子分布见图3,此时很难给出一个确切的场分布转折点,相对于考虑了实际大气波导的计算结果,定位误差增加,定位精确度大大降低。因此,在逆算法中必须根据实时大气变化修正大气折射率,否则会造成定位不准的现象。

4 结论

本文采用双向抛物方程法的逆算法对大气波导环境的双向电波传播和障碍物定位问题进行了研究。首先给出了双向抛物方程法的逆算法模型,然后研究了大气波导结构的处理方法,通过插值法和PE模型中的折射因子指数项分析大气波导对双向电波传播和障碍物定位的影响。通过数值仿真和分析,得出结论:通过双向抛物方程法的逆算法可以对传播路径上的障碍物进行探测和定位,且逆算法中必须要考虑实际大气折射率的变化,如果算法中所用的大气折射率与实际值不相符,则逆绕射场的分布会产生变形,对障碍物的定位误差也大大增加。

参考文献:

- [1] SPENCER T A, WALKER R A, HAWKES R M. Inverse diffraction parabolic wave equation localisation system[J]. Journal of Global Positioning Systems, 2005,4(1-2):245-257.
- [2] 郭建炎,曹林,龙云亮,等. 基于逆绕射抛物方程法定位大气波导环境下的发射源[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2009,48(3):47-50. (GUO Jianyan, CAO Lin, LONG Yunliang, et al. Localization of transmitter in troposphere environment using inverse diffraction parabolic equation[J]. Journal of Sun Yatsen University(Natural Science Edition), 2009,48(3):47-50.)
- [3] 李德鑫,杨日杰,王鸿吉,等. 基于逆绕射抛物方程法的辐射源定位技术研究[J]. 电波科学学报, 2011,26(4):683-687. (LI Dexin, YANG Rijie, WANG Hongji, et al. Passive location based on inverse diffraction parabolic equation[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2011,26(4):683-687.)
- [4] ORAIZI H, HOSSEINZADEN S. Radio wave propagation modeling in the presence of multiple knife edges by the bidirectional parabolic equation method[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007,56(3):1033-1040.
- [5] OZGUN Ozlem. Recursive two-way parabolic equation approach for modeling terrain effects in tropospheric propagation[J]. IEEE Transactions Antennas Propagation, 2009,57(9):2706-2713.
- [6] 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. (WANG Kun, YANG Yongqin, LONG Yunliang, et al. Two-way parabolic equation approach for modeling radio wave propagation in the presence of multiple knife edges[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2011,26(6):1058-1064.)
- [7] KUTTLER J R, DOCKERY G D. Theoretical description of the parabolic approximation/Fourier split-step method of representing electromagnetic propagation in the troposphere[J]. Radio Science, 1991,26(2):381-393.
- [8] LEVY M. Parabolic Equation Methods for Electromagnetic Wave Propagation[M]. London:IEE Press, 2000.
- [9] BARRIOS A E. Parabolic equation modeling in horizontally inhomogeneous environments[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1992,40(7):791-797.

作者简介:



王 昆(1977-),女,辽宁省葫芦岛市人,博士,讲师,主要研究领域为无线通信、电波传播理论和电磁数值计算等,已在国内外相关期刊发表多篇论文.email:wkkelly@gdut.edu.cn.

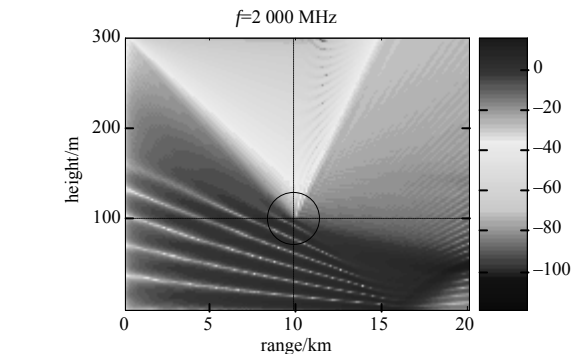


Fig.2 Inverse propagation factor in the presence of surface duct
图2 考虑大气波导时的逆绕射传播因子分布图

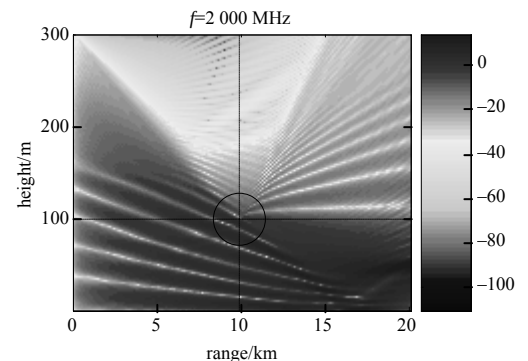


Fig.3 Inverse propagation factor without regarding to surface duct
图3 不考虑大气波导时的逆绕射传播因子分布图

龙云亮(1963-),男,重庆市人,教授,博士生导师,主要研究领域为天线理论与设计、电波传播理论和电磁数值计算等。