

基于逆绕射抛物方程法定位大气波导 环境下的发射源*

郭建炎^{1,2}, 曹 林², 龙云亮², 龚主前²

(1. 厦门理工学院电子与电气工程系, 福建 厦门 361024;

2. 中山大学电子与通信工程系, 广东 广州 510275)

摘 要: 无源定位是近来的一个研究热门课题, 逆绕射抛物方程法(IDPELS)能对发射源进行定位; 但是传统IDPELS对复杂环境的处理能力有限, 影响了其定位的精度。由于大气波导对电波传播的影响很大直接降低了定位精度, 所以提出了逆绕射抛物方程法对大气波导的处理方法。对大气波导环境发射源定位进行了研究, 给出了仿真结果并分析了大气波导对定位精度的影响; 结果表明: 考虑大气波导环境提高了传统IDPELS的定位精度, 增大了IDPELS在复杂环境下的应用范围。

关键词: 抛物方程法; 逆绕射; 定位; 大气波导

中图分类号: TN 011 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579(2009)03-0047-05

Localization of Transmitter in Troposphere Environment Using Inverse Diffraction Parabolic Equation

GUO Jianyan^{1,2}, CAO Lin², LONG Yunliang², GONG Zhuqian²

(1. Department of Electronics and Electrical Engineering Xiamen University of technology,
Xiamen 361024, China; 2. Department of Electronics and Communication Engineering
Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Passive localization is a hot research topic recently. The transmitter location was estimated using inverse diffraction parabolic wave equation localization system (IDPELS), but it have limited to process complex environment and influences the localization accuracy. Because atmospheric duct have a great effect on radio propagation, the technique of dealing with atmospheric duct is presented for inverse diffraction parabolic equation. The influence of atmospheric duct on the precision of transmitter localization is analyzed, and the simulation results are given. The simulation results indicate that the precision of conventional IDPELS, and the application field in complex environment is improved.

Key words: parabolic equation; inverse diffraction; localization; atmospheric duct

在全球定位系统(GPS)、雷达遥感遥测等系统中, 定位是一个十分重要的功能。三边测量与三角测量是两种最基本的几何方法, 这两种方法需要估计传播时间、距离与来波方向(DOA)等参数; 但是参数估计受环境影响很大, 且敌方环境很难事先知道, 因此无源定位成了一个热门的研究课

题^[1]。无源定位通常采用谱估计的方法来估计DOA, 如智能天线系统^[2]; 但复杂环境电波传播受很多因素的影响^[3], DOA的估计很复杂。Spencer等^[4-6]提出了逆绕射抛物方程法定位系统(Inverse Diffraction Parabolic Wave Equation Localization System, 简称IDPELS)来定位发射源。IDPELS能

* 收稿日期: 2008-11-01

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(8151027501000102); 厦门理工学院人才引进基金资助项目(YKJ08012R)

作者简介: 郭建炎(1982年生), 男, 博士, 讲师; E-mail: guonetmail@163.com

很好的定位发射源,且在实测中得到了验证;但传统的 IDPELS 对复杂环境的处理能力还很有限,实测中也存在一些不理想的结果。

抛物方程法(PE)是一种能全波算法,能综合分析各种复杂环境对电波传播的影响;在对流层电波传播中得到了广泛应用^[7-11]。大气折射、大气波导的折射对电波传播的影响很大^[12-14],但是传统的 IDPELS 没有考虑大气波导因素,影响了其定位精度。本文研究了大气波导环境的处理方法,给出了大气波导环境下发射源的定位方法与仿真结果;分析了大气波导对发射源定位精度的影响,提高了传统 IDPELS 的定位精度,增大了 IDPELS 对复杂环境的处理能力。

1 逆绕射抛物方程法

抛物方程法(PE)的前向问题是从 Maxwell 方程组出发对电波做前向传播近似,从而把椭圆型的波动方程简化为抛物型方程;抛物方程法最主要的优点是可用步进法快速求解,缺点是忽略了电波的后向传播与散射。前向问题是已知发射源求解电波的空间分布;逆问题刚好相反,即由某处的场分布出发用抛物方程法的逆算法来求解电波的逆绕射,从而可估计发射源的位置信息。对波动方程做前向传播近似,可得抛物方程^[4]:

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} = j \sqrt{k^2 + \frac{\partial^2}{\partial z^2}} \psi + jkm\psi \quad (1)$$

用 Fourier 分步步进法求解抛物方程(1)可得,在距离 $x + \Delta x$ 的值可由前一距离 x 的值给出:

$$\psi(x + \Delta x, z) = e^{jkm\Delta x} \times F^{-1} \{ e^{j\Delta x \sqrt{k^2 - p^2}} \times F[\psi(x, z)] \} \quad (2)$$

其中, $\psi(x, z)$ 为标量磁场(垂直极化 VED)或标量电场(水平极化 HED), $m = n - 1 + z/a_e$ 为修正折射率。定义与大气折射、大气波导等相关的因子为环境传播因子:

$$\text{envpr} = e^{jkm\Delta x} \quad (3)$$

自由空间的绕射函数为空间传播因子:

$$\text{frsp} = e^{j\Delta x \sqrt{k^2 - p^2}} \quad (4)$$

则求解电波的前向传播算法可表示为:

$$\psi(x + \Delta x, z) = \text{envpr} \times F^{-1} \{ \text{frsp} \times F[\psi(x, z)] \} \quad (5)$$

抛物方程法的逆算法求解的是电波的逆绕射,逆绕射与电波传播方向相反;因此由(5)式可得抛物方程法的逆绕射迭代为:

$$\psi(x, z) = F^{-1} \left\{ \frac{F[\psi(x + \Delta x, z)]}{\text{envpr} \times \text{frsp}} \right\} \quad (6)$$

抛物方程法的逆绕射算法与前向传播算法过程刚好相反,首先模型给出电波在某一距离 $x + \Delta x$ 处的值,然后逆着电波传播方向用逆绕射迭代求出距离 x 处的值,最后求得电波在整个空间的逆绕射分布。通过逆绕射电波的空间分布收敛点可估计发射源位置,逆算法除了求解过程与前向算法相反外,其他求解过程、边界处理方法、窗函数以及对各种复杂环境的处理都类似于前向算法。

电波在传播过程中部分能量向空中辐射或损耗了,且抛物方程法做了前向传播近似;因此完全的求逆是不可行的(所以称之为逆绕射)。虽然无法完全对电波传播求逆,但是逆绕射抛物方程法在大多情况下能提供足够的信息来定位发射源;Spencer 等人基于 IDPELS 仿真求解了发射源定位问题,得出:IDPELS 能由电波分布的收敛点估计发射源位置;且在实测中验证了 IDPELS 系统。但是 IDPELS 没有考虑大气波导的影响,而大气波导对电波传播的影响很大,对定位的影响不可忽视。本文用修正折射率 m 对非均匀分布大气进行建模,研究了大气波导的处理方法,给出了大气波导环境下发射源定位的仿真结果。

2 数值计算与分析

海面、沙漠上容易形成大气波导,使电波在传播时发生折射,形成超视距传播。为了研究方便,用新的修正折射率 M 代替折射率 n ,即^[4]:

$$M = (n - 1 + z/a_e) \times 10^6 \quad (7)$$

M 反映了大气折射与地球曲面对电波传播的影响,且该影响由 M 的梯度分布函数决定,地球表面的标准大气 M 的梯度等于 0.118 m^{-1} 。当 M 的梯度大于 0 电波向上折射; M 的梯度小于 0 电波向下折射,形成超视距传播(此时大气环境称为:大气波导)。假设海面上存在一个低空波导,在 0 - 50 m 时 M 的梯度为 -0.40 m^{-1} ,高度 > 50 m 时为 0.118 m^{-1} ;发射天线水平极化,频率 1 800 MHz,半功率波瓣宽度 15° 。抛物方程法求得前向传播因子的分布如图 1 所示;逆绕射抛物方程法的初始值由前向传播中得到的接收电场给出,即图 1 中距离 10 km 处的值。图 2 给出了 10 km 处接收电场的传播损耗随高度的变化,图中同时显示了标准大气环境下的接收电场分布。由图 2 可见大气波导使得电波向下折射传播,波瓣变窄,地面附近的电波能量增加从而使得电波的传播距离增大。

对接收电场使用逆绕射抛物方程法求解电波的逆绕射,得到的传播因子分布如图 3 所示,图中实

际发射天线位置用圆与十字线标出。由图可见逆算法求得的传播因子分布在发射天线处有很好的收敛性。为了更好的显示逆绕射的收敛效果, 图4显示了图3收敛点附近的传播因子分布, 图中传播因子的最大值点用“叉”标出; 图中同时显示了1dB误差椭圆, 由图可见收敛点与实际发射天线的位置十分接近且在误差椭圆内。其中1dB误差椭圆定义为: 以最大值点为中心点, 然后在垂直方向(或水平方向)寻找所有传播因子与最大值相差小于1dB的点, 并取这些点的最长距离为椭圆的短轴(或长轴)。本文提出的误差椭圆可理解为系统在1dB误差范围内定位的最坏可能位置分布, 1dB误差椭圆的大小显示了逆绕射收敛性的好坏, 误差椭圆越小则收敛性质越好。

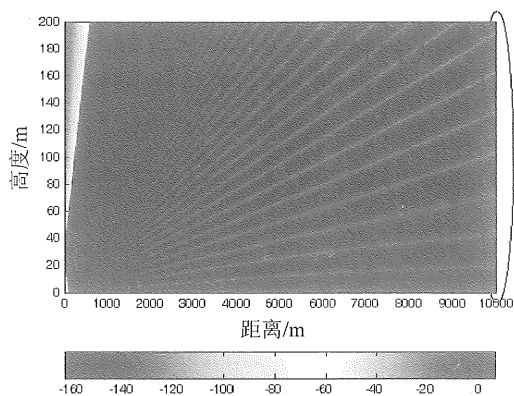


图1 大气波导环境下的前向传播因子分布

Fig. 1 The forward propagator in ducting environment

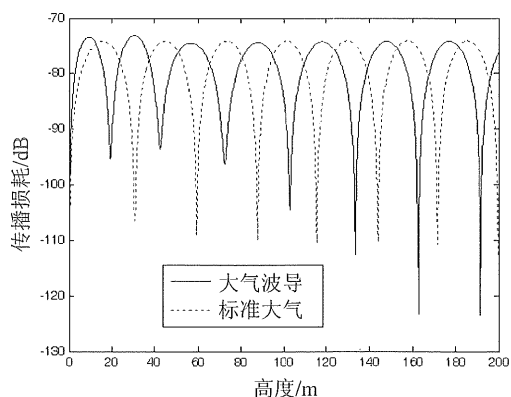


图2 接收电场的传播损耗随高度的变化图

Fig. 2 The propagation loss of receive field vs. height

大气波导、大气折射对电波传播的影响较大, 为了验证逆绕射抛物方程法模型中大气波导对定位结果的影响。在逆算法中使用标准大气环境, 重新计算图1的逆绕射传播, 得到的逆绕射传播因子分

布与收敛点如图5、图6所示。由图可见此时求得的逆绕射传播因子分布与图3、图4的分布不同, 逆绕射的传播因子收敛效果变差。且由图6可见此时收敛点位置与实际位置偏差很大, 1dB误差椭圆也增大了(注意图6的横坐标与图4的不同)。

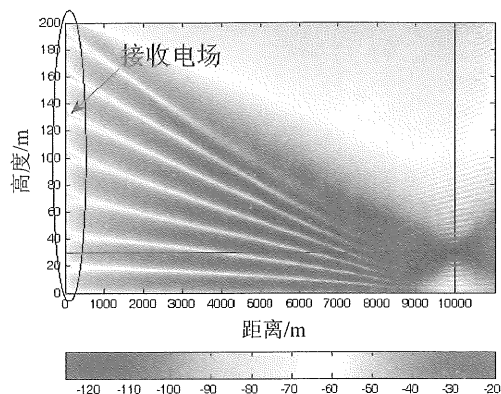


图3 大气波导环境下的逆绕射传播因子分布

Fig. 3 The inverse diffraction propagation factor in ducting environment

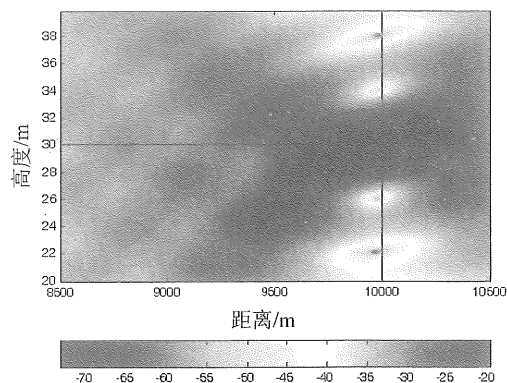


图4 图3的收敛点与1dB误差椭圆

Fig. 4 The convergence and 1dB error-ellipse of Fig. 3

为了更好的定量分析大气波导的影响, 表1给出了图4与图6的定位结果, 由表1可知图4的定位效果很好; 高度的估计误差在0.05 m左右, 相对误差大约0.18%; 距离的估计误差大约20 m, 相对误差大约0.21%; 可见此时定位误差很小、精度高。图6逆算法使用标准大气的定位结果误差要大得多; 估计的发射源高度误差达到2.63 m左右, 相对误差达到8.78%; 距离估计误差达到324 m, 相对误差达到3.24%。因此由表1可知, 不考虑大气波导环境时逆算法求解的逆绕射传播因子分布不仅发生了畸变, 同时定位的误差也大大的增加。值得注意的是发射源定位的精度与大气分布及大气波导强度有关; 在现实中, 大气波导主要在海

面与沙漠环境中存在,在其他环境中形成大气波导的情况较少。因此用逆绕射抛物方程法定位发射源时,首先应考察大气折射率分布情况,对大气波导环境定位时考虑大气波导的发射源定位精度较高。

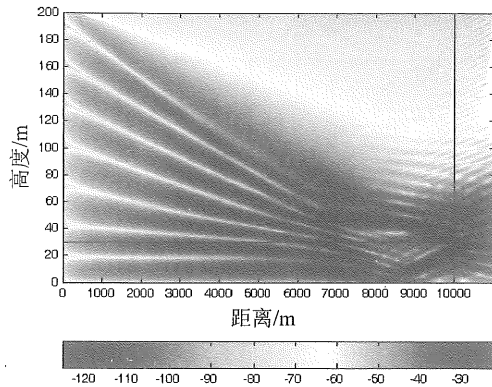


图 5 不考虑大气波导的逆绕射传播因子分布

Fig. 5 The inverse diffraction propagation factor without ducting environment

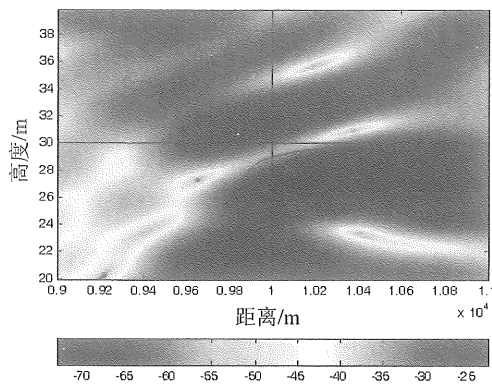


图 6 图 5 的收敛点与 1dB 误差椭圆

Fig. 6 The convergence and 1dB error-ellipse of Fig. 5

3 结 论

无源定位是近来的一个研究热门课题,本文研究了抛物方程法的逆算法;并基于逆绕射抛物方程法对大气波导环境下的发射源进行定位。大气波导对电波传播的影响很大,使电波发生折射从而改变了电波的空间分布;传统的 IDPELS 没有考虑大气波导因素,影响了其定位精度。本文研究了大气波导环境在逆绕射抛物方程法中的处理方法,给出了大气波导环境下发射源的定位方法与仿真结果。由仿真结果可知,在逆算法中加入大气波导环境能提高逆算法的发射源定位精度;而不考虑大气波导环境时误差大大的增加。本文提出的模型提高了传统 IDPELS 的定位精度,增大了 IDPELS 对复杂环境

的处理能力。值得注意的是发射源定位的精度与大气分布及大气波导强度有关相关,大气分布的估计精度直接影响了发射源定位的精度;且复杂地形、森林、动态海面等环境的处理有待进一步研究。

表 1 大气波导环境下的定位结果

Table 1 Locating results in ducting environment

项目	高度/m		距离/km	
	实际值	估计值	实际值	估计值
图 4	30.0	30.054 8	10.0	9.979
图 6	30.0	27.366 9	10.0	10.324

参考文献:

- [1] 胡来招. 无源定位[M]. 北京:国防工业出版社,2004.
- [2] 谢宁,周渊平,李未科,等. PHS 无线通信系统智能天线 DSP 硬件仿真平台[J]. 中山大学学报:自然科学版,2008,47(2):50-54.
XIE Ning, ZHOU Yuanping, LI Weike, et al. Smart antenna and its DSP simulation for PHS wireless communication systems [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyayseni, 2008, 47(2): 50-54.
- [3] 黄明,龙云亮. 山区环境电波传播路径损耗的预测[J]. 中山大学学报:自然科学版,2000,39(6):44-47.
HUANG Ming, LONG Yunliang. Prediction of radio propagation path loss in mountain areas [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyayseni, 2000, 39(6): 44-47.
- [4] SPENCER T A, WALKER R A, HAWKES R M. Inverse diffraction parabolic wave equation localisation system (IDPELS) [C]// The 2004 International Symposium on GNSS/GPS, Sydney, 2004: 15.
- [5] SPENCER T A, WALKER R A, HAWKES R M. Inverse diffraction parabolic wave equation localisation system (IDPELS) [J]. Journal of Global Positioning Systems, 2005, 4(1-2): 245-257.
- [6] HAWKES R M, SPENCER T A, WALKER R A. Three dimensional models for propagation in the troposphere and inverse diffraction [C] // IPS Radio and Space Services proceedings, 2006:61-66.
- [7] 郭建炎,王剑莹,龙云亮. 森林中电波传播的抛物方程法[J]. 电波科学学报,2007,22(6):1042-1046.
GUO Jianyan, WANG Jianying, LONG Yunliang. Parabolic equation model for wave propagation in forest environments [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2007, 22(6): 1042-1046.

(下转第 55 页)

参考文献:

- [1] KEITH H D, PADDEN F J, WALTER N M, et al. Evidence for a second crystal form of polypropylene [J]. *J Appl Phys*, 1959, 30(12): 1485 - 1488.
- [2] KARGER-KOCSIS J. How does "phase transformation toughening" work in semicrystalline polymers [J]. *Polym Eng Sci*, 1996, 36(2): 203 - 210.
- [3] TORDJEMAN P, ROBERT C, MARIN G, et al. The effect of α , β crystalline structure on the mechanical properties of polypropylene [J]. *Eur Phys J E*, 2001, 4(4): 459 - 465.
- [4] HUO H, JIANG S C, AN L J. Influence of shear on crystallization behavior of the β -phase in isotactic polypropylene with β -nucleating agent [J]. *Macromolecules*, 2004, 37(7): 2478 - 2483.
- [5] YAMAMOTO Y, INOUE Y, ONAI T. Deconvolution analyses of differential scanning calorimetry profiles of β -crystallized polypropylenes with synchronized X-ray measurements [J]. *Macromolecules*, 2007, 40(8): 2745 - 2750.
- [6] GARBARCZYK J, PAUKZTA D. Influence of additives on the structure and properties of polymer. 2: polymorphic transition of isotactic polypropylene caused by aminosulphur compounds [J]. *Polymer*, 1981, 22: 562 - 564.
- [7] JACOBY P, BERSTED B H, KISSEL W J, et al. Studies on the β -crystalline form of isotactic polypropylene [J]. *J Polym Sci(B): Polym Phys(B)*, 1986, 24(3): 461 - 491.
- [8] VARGE J, MUDRA I, EHRENSTEIN G W. Highly active thermally stable β -nucleating agents for isotactic polypropylene [J]. *J Appl Polym Sci*, 1999, 74(10): 2357 - 2368.
- [9] Marco C, Gomez M A, Ellis G, et al. Activity of a β -nucleating agent for isotactic polypropylene and its influence on polymorphic transitions [J]. *J Appl Polym Sci*, 2002, 86(3): 531 - 539.
- [10] KOTEK J, RAAB M, BALDRIAN J, et al. The effect of specific β -nucleation on morphology and mechanical behavior of isotactic polypropylene [J]. *J Appl Polym Sci*, 2002, 85(6): 1174 - 1184.
- [11] 冯嘉春, 陈鸣才, 黄志铿. 硬脂酸铜复合物对聚丙烯 β 晶的诱导作用 [J]. *高等学校化学学报*, 2001, 22(1): 154 - 156.
FENG Jiachun, CHEN Mingcai, HUANG Zhitang. Lanthanum stearate composite act as β -modification nucleating agent of isotactic polypropylene [J]. *Chem J Chinese Universities*, 2001, 22(1): 154 - 156.
- [12] LI X, HU K, JI M, et al. Calcium dicarboxylates nucleation of β -polypropylene [J]. *J Appl Polym Sci*, 2002, 86(3): 633 - 638.
- [13] LABOUR T, GAUTHIER C, SÉGUÉLA R, et al. Influence of the β -crystalline phase on the mechanical properties of unfilled and CaCO_3 -filled polypropylene. I. Structural and mechanical characterization [J]. *Polymer*, 2001, 42(16): 7127 - 7135.
- [14] CHAN C, WU J, LI J, et al. Polypropylene/ calcium carbonate nanocomposites [J]. *Polymer*, 2002, 43(10): 2981 - 2992.
- [15] LABOUR T, VIGIER G, SÉGUÉLA R, et al. Influence of β -crystalline phase on the mechanical properties of unfilled and calcium carbonate-filled polypropylene: Ductile cracking and impact behavior [J]. *J Polym Sci (B): Polym Phys*, 2001, 42(16): 31 - 42.
- [16] TURNER-JONES A, AIZLEWOOD J, BECKETT D. Crystalline forms of isotactic polypropylene [J]. *Makromol Chem*, 1964, 75(1): 134 - 158.

(上接第 50 页)

- [8] LEVY M. Parabolic equation methods for electromagnetic wave propagation [M]. London: IEE. 2000.
- [9] DONOHUE D J, KUTTLER J R. Propagation modeling over terrain using the parabolic wave equation [J]. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2000, 48(2): 260 - 277.
- [10] 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: 11 - 69.
- [11] ORAIZI H, HOSSEINZADEH S. Radio wave propagation modeling in the presence of multiple knife edges by the bidirectional parabolic-equation method [J]. *IEEE Trans. Vehicular Technology*, 2007, 56(3): 1033 - 1040.
- [12] AKBARPOUR R, WEBSTER A R. Ray-tracing and parabolic equation methods in the modeling of a tropospheric microwave link [J]. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2005, 53(11): 3785 - 3791.
- [13] HOLM P D. Wide-angle shift-map PE for a piecewise linear terrain-A finite difference approach [J]. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2007, 55(10): 2773 - 2789.
- [14] DOCKERY G D, AWADALLAH R S, FREUND D E, et al. An overview of recent advances for the TEMPER radar propagation model [C] // Radar conference, Boston, 2007 IEEE, 2007: 896 - 905.