

文章编号: 2095-4980(2018)03-0458-07

基于水平非均匀蒸发波导的非互易性

郭凯凯, 杜晓燕

(信息工程大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 针对现有蒸发波导条件下无线电系统性能研究过程中, 忽略了蒸发波导水平非均匀特性影响, 探讨了水平非均匀蒸发波导条件下的非互易性。利用马尔科夫过程模拟蒸发波导水平非均匀特性, 结合抛物方程法计算电波传输损耗, 仿真分析了雷达电磁参数对非互易性的影响。仿真结果表明: 蒸发波导环境下电波传播的非互易性在波导水平非均匀时无法忽略, 天线高度和电波频率对非互易性的影响较大。天线高度越高, 电波频率越大, 则非互易性越强。

关键词: 蒸发波导; 水平非均匀; 非互易性; 抛物方程

中图分类号: TN95

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201803.0458

Non-reciprocity based on horizontally inhomogeneous evaporation duct

GUO Kaikai, DU Xiaoyan

(Institute of Information System Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou Henan 450001, China)

Abstract: For the problem of ignoring the horizontal inhomogeneous characteristics of evaporation duct in the research of radio system performance, the non-reciprocity of evaporation duct on the condition of horizontal inhomogeneous environment is discussed. The non-uniformity characteristics are studied by the simulation of Markov process. Radio transmission losses are calculated by parabolic equation method. The impacts of radar electromagnetic parameters on non-reciprocity are analyzed. Simulation results show that the radio non-reciprocity cannot be ignored in the horizontal inhomogeneous evaporation duct environment, the effects on non-reciprocity of antenna height and frequency are great. The larger the antenna height and the radio frequency, the stronger the non-reciprocity.

Keywords: evaporation duct; horizontal inhomogeneous; non-reciprocity; parabolic equation

对流层波导是一种极端异常负梯度折射率结构^[1], 它能使电波陷获在波导内以较小的损耗实现超视距传播, 进而实现雷达系统的超视距探测, 同时也可能使电波在波导内跳跃传播, 造成电磁盲区, 或引入新的干扰, 进而影响雷达的工作性能。蒸发波导是对流层波导的一种, 具有波导高度低, 发生概率高的特点。世界几乎所有海域所有时间内都可能存在蒸发波导^[2], 这使得无线电等系统在实际海上工作时不能忽略波导的影响。由于不同海域上空气象条件的不同, 海上蒸发波导在大尺度海面上空发生时通常是区域性非均匀的, 这种非均匀性严重影响电波传播损耗的空间分布^[3], 进而引起了电波传播的非互易。对流层波导互易性是指在给定电波频率、发射天线参数(发射天线仰角、方向图函数、高度、半功率波束宽度)、空间折射率分布(水平分布与垂直分布)、信道下垫面(下垫面煤质的介电常数、磁导率和电导率)等条件的情况下, 信道中电磁波传播特性与其无线电系统探测、通信的方向(正向或反向)无关。

目前, 国内外开展了很多大气波导的机理、监测及统计等方面的研究, 针对对流层波导条件下电波传播非互易性的研究却很少。盛峰^[4]等建立了海洋波导环境中典型的五参数经验模型, 对参数变化导致电磁波传播损耗的变化进行了敏感性分析。刘爱国^[5]等开展了海上电磁波传播损耗测量实验, 与基于理论模型的计算结果进行了对比, 发现电磁波传播模型传播损耗理论预测值偏小。孙长龙^[6]等分析了大气波导环境下的电波传输损耗, 并给出了波导条件下电磁波传输损耗模型和波导环境下的电磁波传输损耗计算方法。P. Gerstoft^[7]等对波导参数变化导致电磁波传播损耗变化的敏感性进行了研究, 并估计了发生波导条件下的大气折射率结构。为研究方便, 上述研

收稿日期: 2016-12-28; 修回日期: 2017-02-23

基金项目: 国防重点实验室基金资助项目(9140C860303)

究过程中通常只考虑蒸发波导垂直方向的变化, 假定蒸发波导在水平方向上是不变的, 即未考虑水平非均匀性。然而, 大量实验研究表明, 对流层波导存在着显著的水平(沿电波传播方向)非均匀性, 其对电波传播特性及修正折射率的反演结果影响剧烈^[8]。杨坤德^[9]等通过蒸发波导试验研究了大气修正折射率水平非均匀对电磁波传播的影响, 发现电波正向与反向传播损耗不同, 即波导的水平非均匀导致了电波传播的非互易性。针对上述问题, 本文利用马尔科夫过程构建蒸发波导水平非均匀模型, 用抛物方程法计算电波传输损耗, 用正向与反向传输损耗的差值来描述非互易性的大小, 探讨了蒸发波导环境下雷达系统参数对非互易性的影响。

1 电波传输损耗计算

1.1 蒸发波导修正折射率模型

目前, 应用最广泛的蒸发波导垂直剖面模型是 Paulus-Jeske 提出的单参数蒸发波导修正折射率模型^[10]。

$$M(z) = M_0 + c_0(z - z_0) - c_0 h_d \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (1)$$

式中: M_0 为海表面修正折射率; c_0 为中性层蒸发波导参数(通常取 0.125 M/m); h_d 为蒸发波导高度; z_0 为粗糙度因子(通常取 0.000 15 m)。

图 1 为利用式(1)生成的修正折射率剖面。

在此基础上, 利用马尔科夫过程构建蒸发波导水平非均匀模型, 对应的解析式为:

$$M(x, z) = M_0 + c_0(z - z_0) - c_0 h_d(x) \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (2)$$

式中 x 为水平距离。

文献[11]指出用 20 000 个水平非均匀分布可以模拟遍历对流层波导水平非均匀性的随机特性。本文参考其研究思路随机生成了 20 000 个 h_d 水平非均匀样本, 图 2 展示了利用该方法随机生成的 10 个 h_d 水平非均匀样本以示说明。首先, 利用计算机模拟实现 106 个马尔科夫过程样本。沿距离每隔 1 km 利用高斯随机数对 h_d 更新 1 次, 其变化幅度控制在 ± 20 m 内, 且具有良好的随机性。然后, 运用 K-L 变换的方法提取出马尔科夫过程的 5 个最主要的主特征向量 $eigenvector_{h_d}^i$, ($i = 1, 2, 3, 4, 5$) 和特征值(这里 5 个主特征值大小已超过所有特征值总和的 85%, 本文在满足条件的情况下选取了 5 个参数, 是该过程的主成分)。利用随机选取的 5 个参数 $coe_{h_d}^i$, ($i = 1, 2, 3, 4, 5$) 来表征折射率在水平方向的随机变化趋势。最后, h_d 在水平方向上的变化可以表示为:

$$h_d(x) = h_d(0) + \sum_{i=1}^5 coe_{h_d}^i eigenvector_{h_d}^i(x) \quad (3)$$

1.2 抛物方程法

抛物方程法^[12-14]是利用旁轴近似根据电磁波波动方程导出的一种前向全波分析法, 该方法的优点在于模型内部已经考虑了地形绕射、大气折射以及地表反射等现象对电波传播的影响, 可以计算任意不规则地形与非均匀大气折射率环境中的电波传播问题。因此抛物方程法被广泛应用于低空对流层大气环境中的电波传播问题。

由亥姆霍兹波动方程经过抛物近似处理, 可以推导得到电磁波传播的抛物近似数值方程:

$$\partial_z^2 u + 2jk \partial_x u + k^2 \left(n^2 - 1 + 2 \frac{z}{a_e} \right) u = 0 \quad (4)$$

式中: u 为标量电场或磁场强度; n 为大气折射指数; k 为自由空间波数; a_e 为地球半径; z 和 x 分别为电磁波传播的高度和距离。

假设下边界 $z = 0$ 是平静的海面, 由天线参数确定初始场, 就可以采用分步傅里叶算法求解式(4)。解的形式如下:

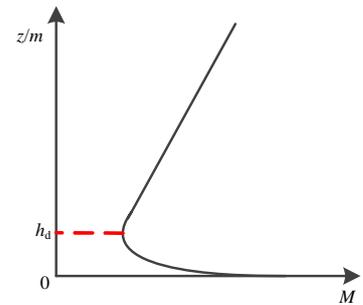


Fig.1 Modified refractive index vertical profile of evaporation duct
图 1 蒸发波导修正折射率垂直剖面

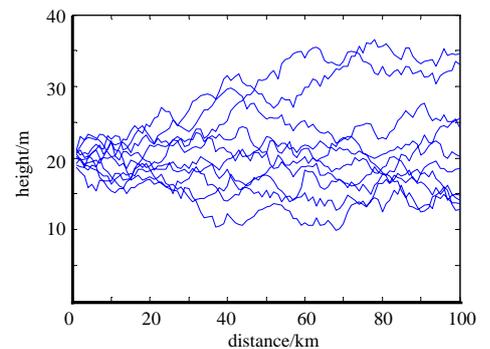


Fig.2 Ten horizontal inhomogeneous samples
图 2 10 个 h_d 水平非均匀样本

$$u(x + \Delta x, z) = \exp\left[\frac{ik\Delta x(n^2 - 1)}{2}\right] F^{-1}\left\{\exp\left[-\frac{i\Delta x p^2}{2k} F[u(x, z)]\right]\right\} \quad (5)$$

式中： Δx 是选择的步长； $F\{\cdot\}$ 和 $F^{-1}\{\cdot\}$ 分别是傅里叶正弦变换和傅里叶正弦逆变换。

若忽略介质对电磁波吸收、散射等作用引起的损耗，实际中的电波传输损耗为：

$$L = 32.45 + 20\lg d_{\text{km}} + 20\lg f_{\text{MHz}} - A - G_t - G_r \quad (6)$$

式中： $A = 20\lg|E/E_0|$ 为电磁波的衰减因子，电波能量的衰减由其反映出来； G_t 和 G_r 分别为发射天线增益与接收天线增益。

本文将重点探讨天线高度、电波频率与非互易性之间的关系。由于波导水平非均匀地存在，电波正向传播损耗与反向传播损耗大小不同。本文将正向损耗记为 L_1 ，反向损耗记为 L_2 ，则用 $\Delta L = |L_1 - L_2|$ 表示电波传播的非互易程度。

2 仿真分析

本文利用马尔科夫过程随机生成了 20 000 个蒸发波导的水平非均匀分布，并用抛物方程法仿真计算了不同发射天线高度和频率条件下的正向损耗 $L_{1,i}$ ($i=1,2,\dots,20\,000$) 与反向损耗 $L_{2,i}$ ($i=1,2,\dots,20\,000$)，作差得 ΔL_i ($i=1,2,\dots,20\,000$)，由此分析蒸发波导条件下电波传播的非互易性。

仿真参数设定如表 1 所示。

表 1 天线及环境参数

Table 1 Antenna and environmental parameters

parameter/unit	value	parameter / unit	value
transmit antenna height/m	5/10/15/20/25	beam width/(°)	1.5
duct height initial value/m	20	transmit power/W	50 000.0
frequency/GHz	8/9/10/11/12	antenna gain/dBi	48.0
main beam direction angle/(°)	0	sea surface conductivity/(S·m ⁻¹)	4.0

在表 1 中 5 个不同频率、5 个不同天线高度条件下，计算 20 000 个不同蒸发波导水平非均匀条件下的正向损耗与反向损耗的差值，并对 20 000 个不同水平非均匀条件下的损耗差作了比较分析。此处任意抽取其中 2 条水平非均匀链路条件下的仿真结果进行举例说明。

向量的范数可以简单形象地理解为向量的长度，或者向量到零点的距离，或者相应的 2 个点之间的距离。对非互易情况下损耗差值矩阵 $\Delta L(100 \times 100)$ 求 2 范数即可得损耗差值矩阵与互易条件下损耗差值矩阵的距离，本文将此距离记为 $\|\Delta L\|_2$ 。

1) 图 3(a)与图 3(b)分别为其中一条所抽取链路的正向蒸发波导水平非均匀曲线图与反向蒸发波导水平非均匀曲线图；图 4 为蒸发波导环境下天线高度为 10 m 时 5 个不同频率条件下的电波损耗差值图。表 2 给出了天线高度为 10 m 时 5 个不同频率条件下损耗差值超过一定门限的概率；表 3 为天线高度为 10 m 时 5 个不同频率条件下的距离值 $\|\Delta L\|_2$ 。

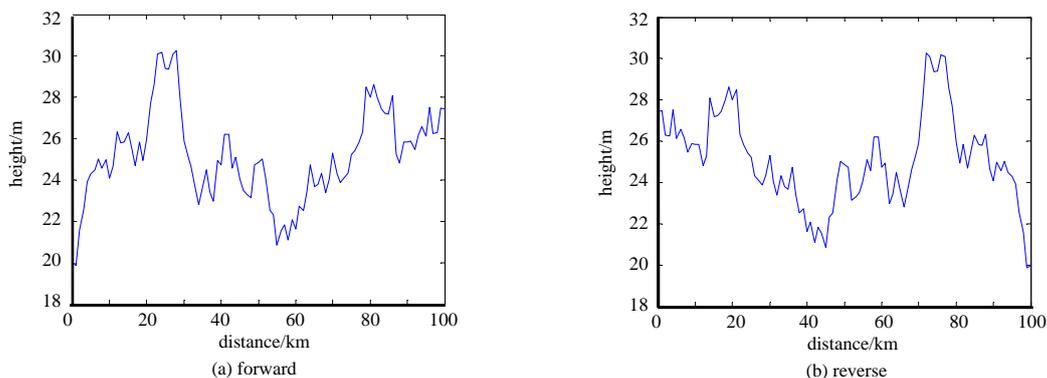


Fig.3 Horizontal non-uniform curves of evaporation duct

图 3 蒸发波导水平非均匀曲线图

表 2 $h_t=10\text{ m}$ 时损耗差值超过一定门限的概率

Table2 Probability of loss difference exceeding a certain threshold($h_t=10\text{ m}$)

f/GHz	$P(\Delta L \geq 5\text{ dB})/\%$	$P(\Delta L \geq 8\text{ dB})/\%$	$P(\Delta L \geq 10\text{ dB})/\%$
8	15.16	5.40	3.12
9	26.58	14.57	9.80
10	37.42	19.28	11.93
11	37.57	19.42	11.38
12	42.85	23.80	15.18

表 3 $h_t=10\text{ m}$ 时损耗差值距离

Table3 Loss difference distance($h_t=10\text{ m}$)

f/GHz	8.00	9.00	10.00	11.00	12.00
$\ \Delta L\ _2$	303.44	423.40	501.37	500.77	569.10

图 4 为同一天线高度，不同电波频率条件下的损耗差值图。颜色越暖表示损耗差值越大，颜色越冷表示损耗差值越小。分析图 4 与表 2、3 可知，在 X 波段，蒸发波导的非互易性与电波频率的大小紧密相关。频率 f 越大，损耗差值越大， $\|\Delta L\|_2$ 距离也越大，非互易性越强。

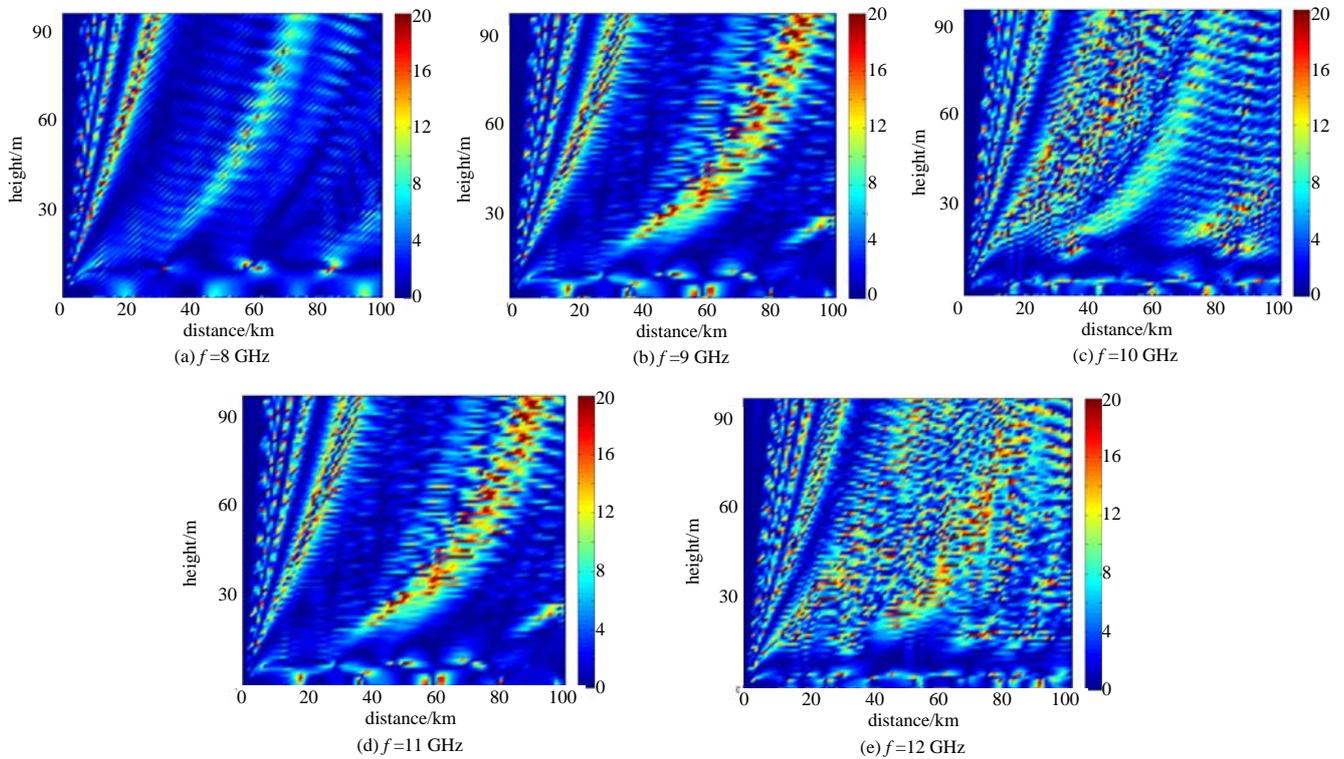


Fig.4 Loss difference under different frequencies

图 4 不同频率条件下损耗差值图

2) 图 5(a)与图 5(b)分别为所抽取的另外一条链路正向蒸发波导水平非均匀曲线图与反向蒸发波导水平非均匀曲线图；图 6 为蒸发波导环境下电波频率为 8 GHz 时 5 个不同天线高度条件下的电波损耗差值图。表 4 给出了电波频率为 8 GHz 时 5 个不同天线高度条件下损耗差值超过一定门限的概率；表 5 为电波频率为 8 GHz 时 5 个不同天线高度条件下的距离值 $\|\Delta L\|_2$ 。

表 4 $f=8\text{ GHz}$ 时损耗差值超过一定门限的概率

Table4 Probability of loss difference exceeding a certain threshold($f=8\text{ GHz}$)

h_t/m	$P(\Delta L \geq 5\text{ dB})/\%$	$P(\Delta L \geq 8\text{ dB})/\%$	$P(\Delta L \geq 10\text{ dB})/\%$
5	6.87	1.81	0.78
10	9.63	2.13	0.98
15	16.86	6.29	3.21
20	20.41	9.04	5.32
25	21.40	9.74	6.01

分析图 6 与表 4、5 可知，蒸发波导的非互易性与天线高度大小紧密相关。天线高度 h_t 越高，损耗差值越大， $\|\Delta L\|_2$ 距离也越大，非互易性越强。

表 5 $f=8\text{ GHz}$ 时损耗差值距离

Table5 Loss difference distance($f=8\text{ GHz}$)

h_t/m	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00
$\ \Delta L\ _2$	204.04	244.53	297.57	347.71	364.49

综上，基于水平非均匀蒸发波导条件下的非互易性受天线高度 h_t 与电波频率 f 的影响较大。天线高度 h_t 越高，电

波频率 f 越大, 电波传播的非互易性越不能忽略。实际工程可通过改变雷达电磁参数以提高无线电系统的性能。

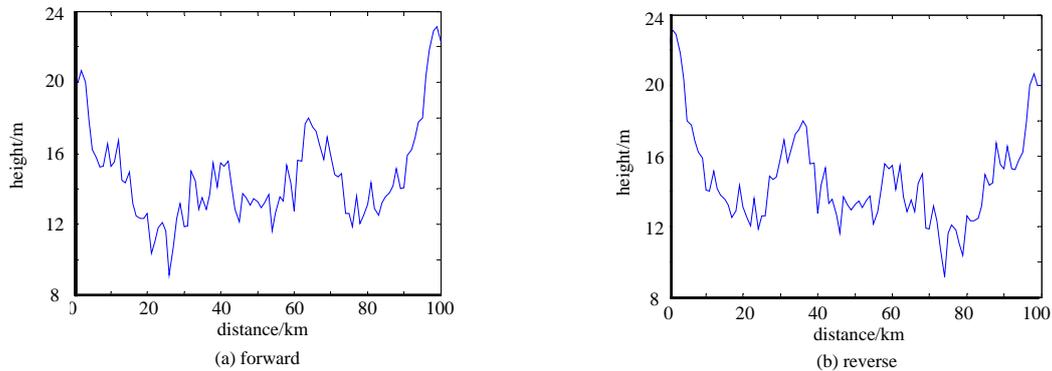


Fig.5 Horizontal non-uniform curves of evaporation duct
图5 蒸发波导水平非均匀曲线图

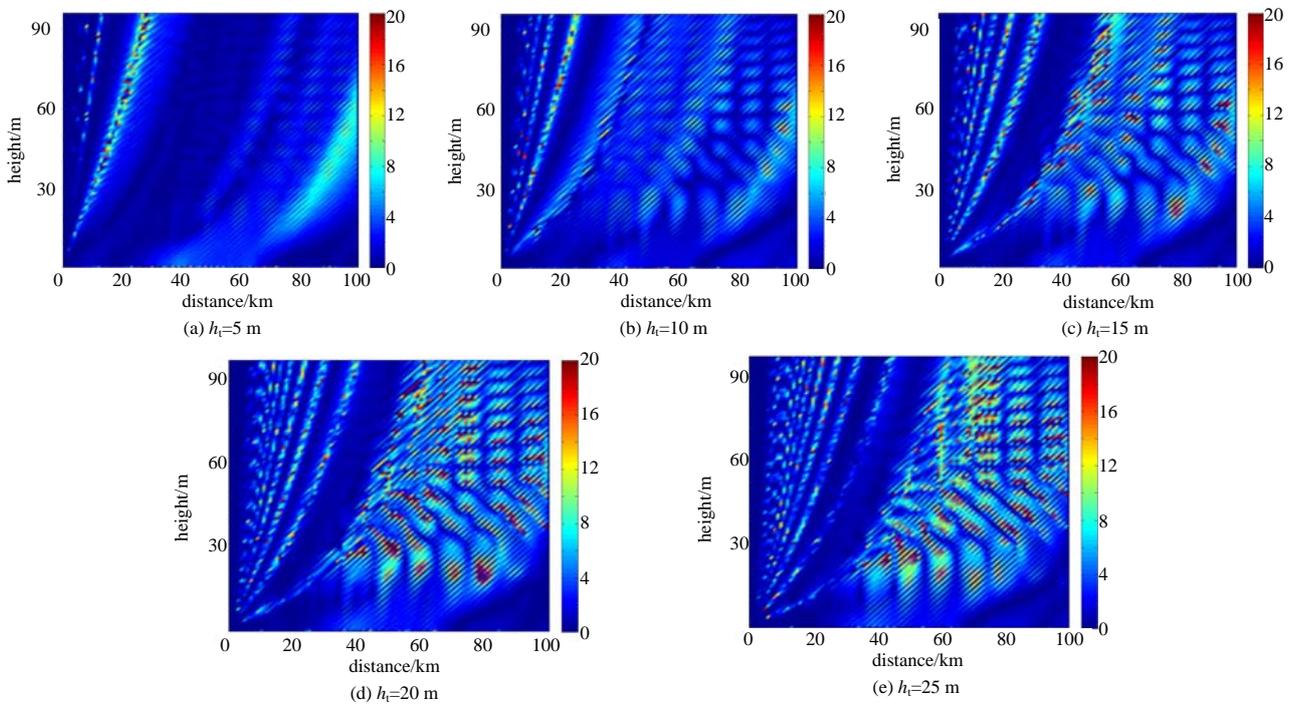


Fig.6 Loss difference under different antenna heights
图6 不同天线高度条件下损耗差值图

仿真过程中可能存在一定误差, 总结如下:

1) 仿真参数误差

涉及的主要参数包括: 雷达天线参数和环境参数。其中环境参数主要有下垫面参数、蒸发波导高度初值及其水平非均匀分布。仿真过程中选取平静海面作为下垫面, 与实际情况必然存在一定误差。

2) 理论计算涉及的方法误差

理论计算方法涉及抛物方程法、分步傅里叶变换、K-L 变换等, 这些方法本身就存在误差。如, 抛物方程中存在近似误差, 应用分步傅里叶变换法时会引入分离误差等。

3) 其他误差

3 结论

本文针对目前关于蒸发波导的探测和反演研究过程中忽略水平非均匀特性的问题, 利用马尔科夫过程模拟了蒸发波导的水平非均匀特性, 探究了天线高度与电波频率对电波非互易性的影响, 当蒸发波导存在水平非均匀时

电波的非互易性无法忽略。同时,指出了仿真过程中可能存在的误差原因。研究过程中所采用的思路和方法可为其他非标准大气条件下无线电系统性能的研究提供理论参考,对提高复杂电磁环境下的无线电系统性能具有一定的理论指导意义。

参考文献:

- [1] 卫佩佩,杜晓燕,江长荫,等. 蒸发波导环境掠射角对雷达海杂波的影响[J]. 电波科学学报, 2016,31(1):1-9. (WEI Peipei, DU Xiaoyan,JIANG Changyin,et al. The effect of grazing angle on radar sea clutter in evaporation duct environment[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2016,31(1):1-9.)
- [2] ANDERSON K D. Radar measurements at 16.5 GHz in the oceanic evaporation duct[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 1989,37(1):100-106.
- [3] 张金鹏,张玉石,吴振森,等. 基于雷达海杂波的区域性非均匀蒸发波导反演方法[J]. 物理学报, 2015,64(12):124101. (ZHANG Jinpeng,ZHANG Yushi,WU Zhensen,et al. Inversion of regional range-dependent evaporation duct from radar sea clutter[J]. Acta Physica Sinica, 2015,64(12):124101.)
- [4] 盛峥,黄思训,程亮. 海洋上大气波导中电磁波传播损耗的误差分析和敏感性试验[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2009,10(2):200-204. (SHENG Zheng,HUANG Sixun,CHENG Liang. Sensitivity experimentation and error analysis of electromagnetic propagation loss in ocean waveguide[J]. Journal of PLA University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2009,10(2):200-204.)
- [5] 刘爱国,察豪. 海上蒸发波导条件下电磁波传播损耗实验研究[J]. 电波科学学报, 2008,23(6):1199-1203. (LIU Aiguo, CHA Hao. Experiment study of electromagnetic wave propagation loss in oceanic evaporation duct[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008,23(6):1199-1203.)
- [6] 孙长,姜艳. 电磁波在大气波导环境下传播特性研究[J]. 现代雷达, 2009,31(6):8-11. (SUN Chang,JIANG Yan. Study on propagation on characteristics of electromagnetic wave under the atmospheric duct environment[J]. Modern Radar, 2009, 31(6):8-11.)
- [7] GERSTOFT P,ROGERS L T,HODGKISS W S,et al. Refractivity estimation using multiple elevation angles[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2003,28(3):513-525.
- [8] 庞佳玮,杜晓燕,张水莲,等. 蒸发波导高度水平非均匀性对路径损耗的影响[J]. 电波科学学报, 2013,28(6):1054-1062. (PANG Jiawei,DU Xiaoyan,ZHANG Shuilian,et al. Evaporation duct height level of heterogeneity on the distribution of path loss[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2013,28(6):1054-1062.)
- [9] SHI Yang,YANG Kunde,YANG Yixin,et al. Experimental verification of effect of horizontal inhomogeneity of evaporation duct on electromagnetic wave propagation[J]. Chinese Physics B, 2015,24(4):193-201.
- [10] PAULUS R A. Practical application of an evaporation duct model[J]. Radio Science, 1985,20(4): 887-896.
- [11] PETER G,ROGERS L T,KROLIK J L. Inversion for refractivity parameters from radar sea clutter[J]. Radio Science, 2003,38(3):1-18.
- [12] BARRIOS A E. A terrain parabolic model for propagation in the troposphere[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 1994,42(1):90-98.
- [13] AKBARPOUR R, WEBSTER A R. Ray tracing and parabolic equation methods in the modeling of a tropospheric microwave link[J]. Transactions on Antennas & Propagation, 2005,53(11):3785-3791. doi:10.1009/TAP.2005.856355.
- [14] 杨明珊,邱志勇,杜晓燕. 对流层波导中电波传播的抛物方程方法及误差分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2015,36(1): 101-109. (YANG Mingshan,QIU Zhiyong,DU Xiaoyan. Troposphere radio waves propagation in duct of parabolic equation method and error analysis[J]. Journal of Zhengzhou University(Engineering Science), 2015,36(1):101-109.)

作者简介:



郭凯凯(1992-), 山西省晋城市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为无线电通信技术, email: guokai155411@163.com.

杜晓燕(1975-), 女, 山东省济南市人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为天线与电波传播.