

文章编号 1005-0388(2009)04-0720-05

电离层对高频电波吸收衰减的影响研究^{*}

何 昉¹ 赵正予²

(1. 中国极地研究中心, 上海 200136;

2. 武汉大学电子信息学院, 湖北 武汉 430079)

摘 要 提出了一种计算电离层吸收损耗的方法。利用国际参考电离层模型(IRI) 和离散电离层背景下的射线追踪模型, 对穿过电离层区域的高频雷达电波的吸收损耗进行了定量分析, 得到了在不同电波频率和不同发射仰角情况下的吸收损耗的模拟结果, 并给出了初步结论。

关键词 吸收损耗; 高频雷达; 频率; 仰角

中图分类号 TN011.2

文献标志码 A

Ionospheric loss of high frequency radio wave propagated in the ionospheric regions

HE Fang¹ ZHAO Zheng yu²

(1. Polar Research Institute of China, Shanghai 200000, China;

2. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan Hubei 430079, China)

Abstract A method of ionosphere absorption loss calculation is presented. By use of international reference ionosphere (IRI) model and the ray-tracing program on the discrete ionosphere background, the absorption loss of the High Frequency Radar wave in the ionosphere is calculated quantitatively. The simulation results are given by the absorption loss under different wave frequency or different elevation angles. Some primary conclusions are given.

Key words absorption loss; High Frequency Radar; frequency; elevation angle

引 言

电磁波穿过等离子体传播时, 波的电矢量引起电子运动, 电子同其他粒子发生碰撞, 部分能量转移到中性分子, 最终变成热能, 从而引起电波振幅的吸收衰减。能量的吸收和辐射过程伴随着相位的变化, 这种变化将引起相速度的变化。

对于电磁波在等离子体内的吸收, 已有许多学者进行过研究。LAROSSI M 等^[1]研究了磁化、稳态、二维等离子体层中微波的反射、吸收和传输效应。HU B J 等^[2]提出了一种散射矩阵法(SMM) 来计算等离子体层中的反射、吸收和传输效应。王舸

等^[3]提出了一种计算电磁波在非均匀等离子体层中反射和透射功率的模型。刘明海等^[4]曾利用洛伦兹模型来研究大气层人造非均匀等离子体的电磁响应特性。刘少斌等^[5]讨论了不均匀磁化等离子体片对电磁波的吸收。宋法伦等^[6]提出了一种计算任意入射角的电磁波在径向非均匀球对称等离子体中的传播和吸收模型。

但是, 对于等离子体内电波损耗在电离层电波传播的工程应用, 更多采用的是一般化的经验公式进行计算^[7]。而对于电离层内部精细结构的变化所导致的电波幅度衰减, 经验公式是无法描述的。难以得到电离层中实时的等离子体背景和电波在电离

* 收稿日期: 2008-11-10

联系人: 何昉 E-mail: Ares123628@yahoo.com.cn

层中未知的传播路径是约束等离子体内电波损耗应用于电离层电波传播工程的主要因素。电离层中电波的吸收在无线电通信特别是在中短波段(300 kHz~30 MHz)通信中有极其重要的意义。而电离层吸收损耗与电离层内电子碰撞频率密切相关。电离层中电子的碰撞频率已有现成的模型对其进行描述^[8]。已知无线电波在电离层中的传播轨迹后,通过轨迹上每一点的电子碰撞频率、电子密度和无线电波频率可以计算得到该点处的电离层吸收值,沿电波轨迹对各点的电离层吸收值进行积分,即可得到整条射线在电离层中总的吸收损耗。

传统电离层经验模型有很多,如准抛物线(QP)模型,分段准抛物(QPS)模型,二次双曲正割(SECH2)模型,带有水平梯度的指数(EXP)模型等。但是它们都仅描述了电离层中电子密度随高度和水平位置的变化。而电离层中的电子温度和其他种类粒子的密度分布对电波在电离层中的吸收损耗同样有着很大的影响。国际参考电离层(IRI)模型对上述参量均有描述,因此在这里我们选用 IRI 模型。

本文基于 IRI 2001 国际参考电离层模型^[8],利用射线追踪技术^[9,10],对高频雷达电波在电离层中传播的吸收损耗进行了数值模拟,并得到一些有用的结论。

1 高频电波在电离层中的吸收

1.1 电波在电离层等离子体内传播的吸收损耗

引入讨论等离子体中电波吸收常用的一些基本数学表达式。在矢径 r 正方向传播的平面波可以表示为

$$E = E_0 e^{j(q-k)r} = E_0 e^{j(q-nk_0)r} \quad (1)$$

式中, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$; $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$; n 是复折射指数,

$$n = \mu - j\chi \quad (2)$$

μ 和 χ 分别是 n 的实部和虚部。由此,式(1)变为

$$E = E_0 e^{-k_0 \chi} e^{j(q-nk_0)r} = E^1 e^{j(q-\mu k_0)r} \quad (3)$$

此平面波的振幅为

$$E^1 = E_0 e^{-k_0 \chi} = E_0 e^{-\beta r} \quad (4)$$

随距离指数衰减,其中

$$\beta = k_0 \chi = \frac{\omega}{c} \chi \quad (5)$$

β 称为电波在介质中的吸收系数,表示单位距离引起的电波吸收衰减。另一方面,由忽略磁场的 A-H 公式^[11]

$$n^2 = (\mu - j\chi)^2 = 1 - \frac{X}{1 - jZ} \quad (6)$$

可以得到

$$\chi = \text{Im} \sqrt{1 - \frac{X}{1 - jZ}} \quad (7)$$

这样就有

$$\beta = \frac{\omega}{c} \chi = \frac{\omega}{c} \text{Im} \sqrt{1 - \frac{X}{1 - jZ}} \quad (8)$$

式中, Im 表示取虚部; c 为真空中的光速; ω 为穿过等离子体的电波角频率; $X = \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$, ω_p 为等离子体角频率,为空间位置的函数; $Z = \frac{\omega_c}{\omega}$, ω_c 为电子碰撞角频率,而碰撞过程作为高频电波对电离层的欧姆加热机制的源,在下电离层加热过程中的作用尤其明显,虽然在反射高度附近异常吸收机制将发挥更大的影响,碰撞的作用也是不可忽略的。

1.2 影响吸收损耗的电离层内的粒子碰撞

根据高中低不同纬度的电离层粒子结构特征,数值模型中将考虑四种中性粒子: N_2 、 O_2 、 O 和 H_e ; 四种带电粒子: 电子、 O_2^+ 、 NO^+ 和 O^+ 。因此必须考虑各种粒子(包括电子中性粒子和电子离子)间的碰撞频率。它们分别满足下面的关系式^[12,13]:

(1) 电子-中性粒子的碰撞

$$\nu_{N_2} = 2.33 \times 10^{-17} n(N_2) [1 - 1.21 \times 10^{-4} T_e / T_e(s^{-1})] \quad (9)$$

$$\nu_{O_2} = 1.82 \times 10^{-16} n(O_2) [1 + 0.036 T_e^{1/2} / T_e^{1/2}(s^{-1})] \quad (10)$$

$$\nu_{O} = 2.65 \times 10^{-16} n(O) T_e^{1/2}(s^{-1}) \quad (11)$$

$$\nu_{H_e} = 4.6 \times 10^{-16} n(H_e) T_e^{1/2}(s^{-1}) \quad (12)$$

式中, T_e 为电子温度; ν_{N_2} 、 ν_{O_2} 、 ν_{O} 、 ν_{H_e} 分别是电子与 N_2 、 O_2 、 O 、 H_e 的碰撞频率; $n(N_2)$ 、 $n(O_2)$ 、 $n(O)$ 、 $n(H_e)$ 分别代表这四种中性粒子的密度,为空间位置的函数。

(2) 电子-离子的碰撞

$$\nu_{i,i} = \frac{5.45 \times 10^{-5} n_i}{T_e^{3/2}} (s^{-1}) \quad (13)$$

式中, $\nu_{i,i}$ 代表电子和 i 种离子的碰撞频率,这种离子可以是 NO^+ 、 O_2^+ 、 O^+ 之一; n_i 是该离子的密度,亦为空间位置的函数。

电子的总碰撞频率为

$$\nu = \nu_{N_2} + \nu_{O_2} + \nu_{O} + \nu_{H_e} + \nu_{NO^+} + \nu_{O_2^+} + \nu_{O^+} \quad (14)$$

2 模型参数

2.1 电离层背景模型

选取 IRF 2001 模型作为初始背景电离层模型, 包括计算所需的电子温度、电子密度和各种粒子密度随高度的分布。

这里取竖直方向的范围为 60~ 500 km, 步长为 1 km; 水平方向长度为 0~ 1000 km, 步长为 1 km, 且认为电离层是水平均匀分层, 则得到一个 441×1001 的二维离散电子密度空间网格。

电离层背景模型的地理位置选择海南省的东方市(地理经纬度: 108.7°E 、 19.0°N), 时间为 2006 年 9 月 25 日 20:00LT。

2.2 射线追踪参数

由电离层的临界频率 f^o 和斜入射电波频率 f 的关系可知, 当斜入射电波的频率 $f > f^o/\sin\theta$ 时, 电波将穿出电离层。为了保证在射线追踪中使模拟的射线由电离层反射后均回到地面, 选择如下的诊断射线参数:

- 1) 诊断射线频率 f 为 7~ 7.75MHz, 每 0.25MHz 为一个步长;
- 2) 诊断射线仰角 θ 为 51° 、 52° 、 53° 、 54° 、 55° 、 56° 、 57° 、 58° 、 59° 。

3 电波吸收衰减的模拟结果和分析

离散电离层背景下的射线追踪给出了射线的精确路径, 基于 IRI 背景模型, 由式(8)可计算得到路径上每一点的吸收系数 β , 吸收系数 β 沿整个路径 S 积分, 得到总的吸收 L 为

$$L = 8.68 \int_S \beta dS \quad (\text{dB}) \quad (15)$$

由于射线追踪给出了射线在电离层中传播的精确路径, IRI 模型给出了在电波传播路径上的电子密度、电子温度和其他电离层主要粒子的参量, 因此可以根据式(15)求得射线路径上的总吸收值。需要注意的是, 该吸收值为电波在电离层中的吸收损耗, 并不是电波总的传输损耗。

图 1 和图 2 分别给出了在节 2 的参数选择下射线追踪得到的射线传播距离随频率和仰角的变化。可以看到, 在同一个发射仰角的情况下, 随着频率的增加射线的传播距离单调递增。在仰角为 51° 和 52° 时射线距离随电波频率变化发生突变。这说明在发射仰角较小时, 随着诊断电波频率的增大, 射线的传播距离增加更为明显。由于射线的反射高度随

电波频率的增加而使得式(15)中的积分路径 S 增加, 从而导致总的吸收 L 增加。该趋势可以在图 3 和图 4 中看到。

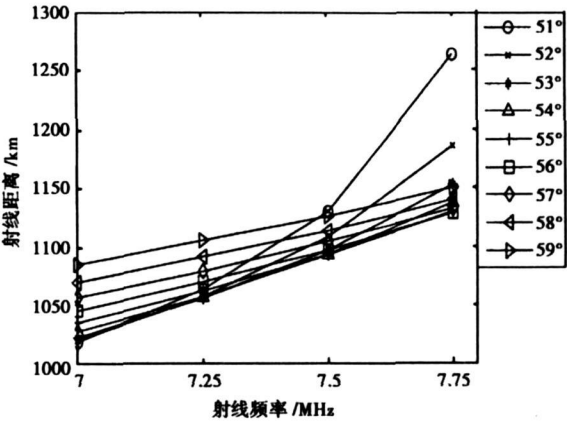


图 1 射线距离随电波发射仰角的变化

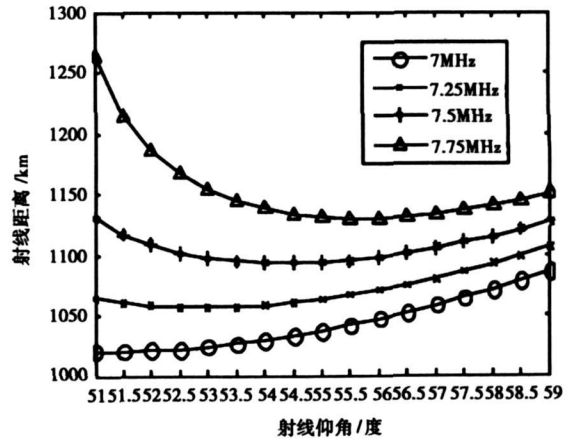


图 2 射线距离随电波频率的变化

图 3 给出了电波层吸收损耗随电波发射仰角的变化趋势。可以看出, 电波在电离层中的吸收衰减 $A(\text{dB})$ 随电波发射仰角的减小而迅速增大。当仰角大于 57° 时, 四种频率下的电离层吸收损耗都小于 10 dB。而在相同仰角的情况下, 由图 4 可以看到, 频率越高衰减越大, 因为在相同的发射仰角下, 在不穿出电离层的频率范围内, 电波频率越高射线的反射高度越高, 这样电波在电离层中的传播距离就越长, 吸收也就越大。另外, 发射仰角为 57° 时, 电离层吸收损耗随频率的变化已趋于平缓, 在频率为 7 MHz 和 7.75 MHz 下的吸收已经相差不到 3 dB。可以预见, 随着发射仰角的继续增大, 电离层吸收损耗将趋于一常数, 且不随频率的变化而变化。

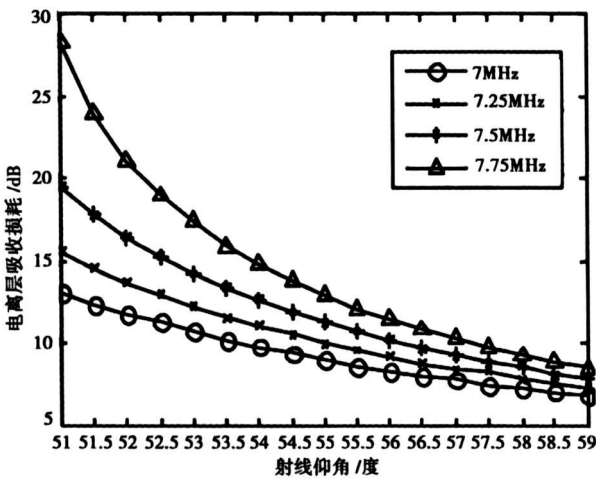


图 3 电离层吸收损耗随电波发射仰角的变化

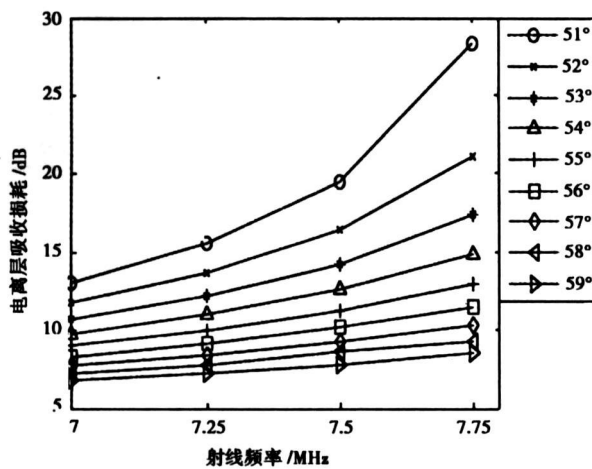


图 4 电离层吸收损耗随电波频率的变化

4 结 论

电离层的状态, 体现在各种粒子的密度和温度。这些参量会使电离层对高频电波的吸收效应产生很大的影响。

有别于传统的统计计算, 对于电离层等离子体内的电波吸收, 提出了一种精确的计算电离层吸收损耗的方法。基于电离层的 IIRF 2001 模型, 应用离散数字射线追踪方法得到射线在电离层中的射线路径, 再由射线路径上的各种粒子的分布, 计算得到电离层对电波的吸收损耗。结果表明, 随着发射仰角的增加, 电离层对电波的吸收损耗减小; 而在同一发射仰角下, 频率越高, 电离层吸收损耗越大。

参考文献

[1] LAROUSSI M. Numerical calculation of the reflection, absorption, and transmission of microwaves by a nonuniform plasma slab[J]. IEEE Transactions On

Plasma Science, 1993, 21(4): 366-372.

[2] HU B J, WEI G, LAI S L. SMM analysis of reflection absorption and transmission from nonuniform magnetized plasma slab[J]. IEEE Transactions On Plasma Science, 1999, 27(4): 1131-1136.

[3] 王 舸, 陈银华, 陆 玮. 电磁波在非均匀等离子体中的吸收[J]. 核聚变与等离子体物理, 2001, 21(3): 160-163.

WANG Ge, CHENG Yirhua, LU Wei. Absorption of electromagnetic waves in an inhomogeneous plasma[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2001, 21(3): 160-163. (in Chinese)

[4] 刘明海, 胡希伟, 江中和, 等. 电磁波在大气层人造等离子体中的衰减特性[J]. 物理学报, 2002, 51(6): 1317-1320.

LIU Ming hai, HU Xi wei, JIANG Zhong-he, et al. Property of electromagnetic wave attenuation in the artificial plasmas of atmosphere[J]. Acta Physica Sinica, 2002, 51(6): 1317-1320. (in Chinese)

[5] 刘少斌, 莫锦军, 袁乃昌. 电磁波在不均匀磁化等离子体中的吸收[J]. 电子学报, 2003, 31(3): 372-375.

LIU Shao bin, MO Jir jun, YUAN Nai chang. Research on the absorption of EM-wave by inhomogeneous magnetized plasmas[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(3): 372-375. (in Chinese)

[6] 宋法伦, 曹金祥, 王 舸. 电磁波在径向非均匀球对称等离子体中的衰减[J]. 物理学报, 2004, 53(4): 1110-1115.

SONG Fa lun, CAO Jir xiang, WANG Ge. The attenuation of electromagnetic waves by inhomogeneous spherically symmetric plasma[J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(4): 1110-1115. (in Chinese)

[7] CCIR. CCIR Interim Method for Estimating Skywave Field Strength and Transmission Loss at Frequencies Between the Approximate Limits of 2 and 30 MHz [R]. Report 2522, in Recommendations and Reports of the CCIR: Propagation in Ionized Media, Vol. VI, New Delhi Plenary, ITU, Geneva, 1970.

[8] BILITZA D. International reference ionosphere 2000 [J]. Radio Science, 2001, 36(2): 261-275.

[9] 谢树果, 赵正予, 施先青, 等. 一种网格法快速电离层射线追踪方法[J]. 电波科学学报, 1999, 14(增刊): 39-43.

[10] 种衍文, 谢树果, 等. 一种新的射线追踪方法三区划分处理法[J]. 电波科学学报, 2001, 16(2): 222-226.

CHONG Yarr wen, XIE Shu guo, et al. A new ray-tracing method three zoning treatment[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2001, 16(2): 222-226. (in Chinese)

(下转第 747 页)

16682.

- [13] ANTHES R A. A cumulus parameterization scheme utilizing a one dimensional cloud model[J]. Mon Wea Rev, 1997, 105: 270-286.
- [14] GRELL G A. Prognostic evaluation of assumptions used in cumulus parameterizations [J]. Mon. Wea. Rev, 1993(121): 764-787.
- [15] 肖子牛, 张万成, 段 玮, 等. 中尺度数值模式在低纬高原地区的应用研究[M]. 北京: 气象出版社, 2005.
- [16] 刘健文, 郭 虎, 李耀东, 等. 天气分析预报物理量计算基础[M]. 北京: 气象出版社, 2005.



张玉生 (1969-), 男, 河南人, 高级工程师, 1992年毕业于南京气象学院, 长期从事大气波导预报、微波遥感等方向的研究, 主持和参与国家课题多项, 发表论文十余篇。



康士峰 (1966-), 男, 河南人, 中国电波传播研究所研究员, 中国电子学会高级会员。长期从事对流层电波传播, 电磁散射理论和微波遥感方面的研究工作, 主持过多项相关课题的研究。在国内外会议、期刊发表文章三十余篇。



赵振维 (1965-), 男, 河北人, 研究员, 博士, 中国电波传播研究所副总工程师, 长期从事电波环境及其传播特性研究, 部分研究成果已为ITU-R采纳, 形成国际标准。曾获电子工业部科技进步二等奖, 山东省青年科技奖、青岛市青年科技奖和山东省有突出贡献的中青年专家。

(上接第723页)

- [11] HEALD M A and WHARTON C B. Plasma Diagnostics with Microwaves[M]. New York: Krieger, 1978.
- [12] BANKS P M and KOCHARTS G. Aeronomy, Parts A and B[M]. New York: Academic Press, 1973.
- [13] SCHUNK R W and WALKER J C. Theoretical ion densities in the lower ionosphere[J]. Planetary and Space Science, 1973, 21(11): 1875-1896. doi: 10.1016/0032-0633(73)90118-9.
- [14] 柳 文, 焦培南, 王世凯, 等. 电离层短波三维射线追踪及其应用研究[J]. 电波科学学报, 2008, 23(1): 4-48.
- LIU Wen, JIAO Pei nan, WANG Shi kai, et al. Short wave ray tracing in the ionosphere and its application[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008, 23(1): 4-48. (in Chinese)



何 昉 (1981-), 男, 湖北人, 博士, 主要从事高频无线电波在电离层不均匀体中传播特性的研究。



赵正予 (1952-), 男, 吉林人, 武汉大学电子信息学院教授, 博导, 主要从事电离层人工变态和电离层斜向返回探测雷达方面的研究。