

# 电磁波在电离层的传播特性研究

虞超<sup>1</sup> 沈国柱<sup>1</sup> 顾斌<sup>1</sup> 程国生<sup>1</sup>

## 摘要

研究了折射率  $n$  与电子数浓度  $N_e$  及高度  $h$  之间的关系,并通过数值模拟对电子数浓度的高度剖面和折射率随高度的变化规律进行了分析.将模拟和实际观测出的频高图进行对比,发现在高电离层模拟值与实际值较相近,在低电离层则由于非线性关系及  $E_s$  层存在的效应,模拟值与实际值有较大的误差.

## 关键词

电磁波;电离层;折射率;电子数浓度;数值模拟

中图分类号 TN011

文献标志码 A

## 0 引言

电磁波在电离层中传播是一个复杂的过程.在这个过程中,电磁波的传播主要受制于电离层中的自由电子,此外,中性大气及地磁场也会对电磁波传播产生影响<sup>[1]</sup>.电离层对于高频电磁波传播的影响主要体现在自由电子对传播的折射作用上,地磁场与非线性衰减对其传播产生的影响很小<sup>[1-9]</sup>.本文在不考虑地磁场影响,忽略电磁波传播时的非线性效应,将电磁波看作平面波的情况下,研究了电磁波在电离层中的折射率与电子数浓度及高度的关系.

## 1 电磁波电离层折射理论

电离层由离子、电子和中性粒子组成,具有等离子体特性.当电磁波在电离层中传播时,电子和离子都受到电磁场的作用.本文忽略了离子的运动和地磁场的作用及高功率电磁波传播过程中引起的非线性效应,将电离层某一高度传播的电磁波视为单色平面波.

电离层中电子在电磁波作用下的运动方程可表示为<sup>[3]</sup>

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = eE, \quad (1)$$

其中,  $m$  为电子的质量,  $e$  为电子的电荷,  $z$  为电子位移,  $E$  为电磁波的电场强度:

$$E = E_0 e^{i(kr - \omega t)}, \quad (2)$$

式(2)中,  $E_0$  为电磁波的初始电场强度,  $\omega$  为电磁波角频率.

由式(1)、(2)可推得等离子体角频率  $\omega_p$  为<sup>[3-7]</sup>

$$\omega_p = \sqrt{\frac{N_e e^2}{\epsilon_0 m}}, \quad (3)$$

其中  $N_e$  为电子数浓度,  $\epsilon_0$  为自由空间的介电常数.

根据电子运动方程可以得到电离层的相对介电常数  $\epsilon_r$  的表达式<sup>[2]</sup>:

$$\epsilon_r = 1 - \frac{N_e e^2}{\epsilon_0 m (\nu^2 + \omega^2)}, \quad (4)$$

其中,  $\nu$  为碰撞频率,表示单位时间内中性粒子的平均碰撞次数,将式(3)代入式(4)得:

$$\epsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2}. \quad (5)$$

收稿日期 2011-11-15

资助项目 国家自然科学基金(11105075)

作者简介

虞超,男,硕士生,主要研究电磁波与粒子的应用. yuchao0417@yahoo.com.cn

沈国柱(通信作者),男,博士,副教授,研究领域为材料学. 001907@nuist.edu.cn

<sup>1</sup> 南京信息工程大学 物理与光电工程学院, 南京,210044

而通常情况下,满足  $\omega^2 \gg \nu^2$ <sup>[2]</sup>,所以表达式(4)可以简化为

$$\epsilon_r \approx 1 - \frac{N_e e^2}{\epsilon_0 m \omega^2} \quad (6)$$

由式(3)、(5)可得:

$$\epsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} = 1 - \frac{f_p^2}{f^2}, \quad (7)$$

其中,  $f$  是电磁波频率,  $f_p$  是等离子体频率. 将已知量代入式(7)可得:

$$\epsilon_r = 1 - \frac{80.8N_e}{f^2} \quad (8)$$

则,电离层的大气折射系数  $n$  表示为

$$n = \sqrt{\epsilon_r} = \sqrt{1 - \frac{80.8N_e}{f^2}} \quad (9)$$

图1所示为电磁波的垂直折射率随电子数浓度的变化曲线. 由式(9)及图1可以看出,  $n$  随  $N_e$  的增高而降低,曲线  $a$  与  $b$  在  $N_e$  轴上有交点,表明当电子浓度升高到一定值时,电磁波的折射率为0,此时,  $f = \sqrt{80.8N_e}$ ,当反射点电子数浓度为最大值  $N_{e,max}$  时,可得:

$$f_c = \sqrt{80.8N_{e,max}}, \quad (10)$$

式中,  $f_c$  为临界频率,是电磁波垂直入射电离层中能反射回来的最高频率.

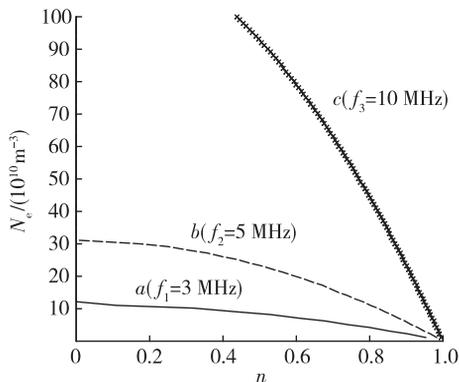


图1 折射率随电子数浓度的变化曲线

Fig.1 Relationship between refractive index and electron concentration

当  $f < f_c$  时,电磁波无法进入该层空间,全部被反射回去;当  $f > f_c$  时,电磁波将以光滑的曲线折射进入该层空间,到达某一高度时,反射回地面;当  $f$  足够大时,可以穿透该层. 由图1可知,  $f$  越大,电磁波在电离层中传播距离越长,穿透电离层的能力也越强.

如果电磁波在电离层中以入射角  $\theta_0$  传播,它会

连续地沿着折射角大于入射角的方向传播. 当在电离层某一高度  $h_n$  处,电子数浓度  $N_{e,n}$  正好使折射角  $\theta_n$  为  $90^\circ$ ,这时电磁波传播到电离层中的最高点,随后逐渐折射回地面. 根据斯奈尔定理得<sup>[2]</sup>:

$$\sin \theta_0 = \sqrt{1 - \frac{80.8N_{e,n}}{f^2}} \quad (11)$$

由式(10)及(11)可得:

$$f_{max} = f_c \sec \theta_0, \quad (12)$$

其中  $f_{max}$  是电磁波斜入射时能反射回来的最高频率.

## 2 数值模拟

### 2.1 电子数浓度函数分析

在自然状态下的电离层中的电子数浓度  $N_e$  随着高度的增加而增大. 由式(9)可看出,折射率  $n$  将随着高度的增加而减小,电磁波将会在电离层中进行连续地折射而返回地面,当折射次数接近无限时,电磁波在电离层中的传播轨迹就变成一条光滑的曲线. 而电磁波在电离层中的传播轨迹也不是向一个方向偏折的简单的曲线,它的曲率随电子数浓度的变化而变化.

在下电离层峰值附近的电子数浓度分布与抛物线分布接近,在模拟电子数浓度剖面  $N_e(h)$  时可以采用函数<sup>[6]</sup>:

$$N_e(h) = N_m \left[ 1 - \left( \frac{h - h_m}{y_m} \right)^2 \right], \quad (13)$$

其中  $N_m$  和  $h_m$  是某层的最大电子数浓度及其相应的高度,  $y_m$  是半厚度.

上电离层剖面计算一般采用卡普曼模式描述<sup>[2]</sup>:

$$N_e(h) = N_{mF_2} \exp \left[ \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{h - h_{mF_2}}{H} - e^{-\frac{h - h_{mF_2}}{H}} \right) \right], \quad (14)$$

其中  $N_{mF_2}$  与  $h_{mF_2}$  是  $F_2$  层的最大电子数浓度及其相应的高度,  $H$  (km) 为标高<sup>[2]</sup>:

$$H = 1.66 [30 + 0.075(h_{mF_2} - 200)]. \quad (15)$$

文献[10]给出了详细的电子数浓度剖面表达式:

$$N_e(h) = \begin{cases} N_{mE} \left[ 1 - \left( \frac{h - h_{mE}}{y_{mE}} \right)^2 \right], & h_{mE} - y_{mE} \leq h \leq h_{mE}, \\ \frac{N_j - N_{mE}h}{h_j - h_{mE}} + \frac{N_{mE}h_j - N_j h_{mE}}{h_j - h_{mE}}, & h_{mE} < h \leq h_j, \end{cases}$$

$$N_e(h) = \begin{cases} N_{mF_2} \left[ 1 - \left( \frac{h - h_{mF_2}}{y_{mF_2}} \right)^2 \right], & h_j < h \leq h_{mF_2}, \\ N_{mF_2} \exp \left[ \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{h - h_{mF_2}}{H} - e^{-\frac{h - h_{mF_2}}{H}} \right) \right], & h_{mF_2} < h \leq 1000 \text{ km}, \end{cases} \quad (16)$$

其中  $N_{mE}$  与  $h_{mE}$  为  $E$  层的最大电子数浓度及相应的高度,  $y_{mE}$  与  $y_{mF_2}$  分别为  $E$  层半厚度与  $F_2$  层半厚度.

$$N_j = 1.24 \times 10^{10} f_j^2, \quad (17)$$

$$h_j = h_{mF_2} - y_{mF_2} \sqrt{1 - \left( \frac{f_j}{f_{0F_2}} \right)^2}, \quad (18)$$

其中,  $f_j = 1.7f_{0E}$ ,  $f_{0E}$  为  $E$  层临界频率,  $f_{0F_2}$  为  $F_2$  层临界频率.

## 2.2 数据采集

2011年9月29日7时30分武汉观测站与7时35分的三亚观测站实测的电离层频高图(临界频率随高度的变化曲线)上获得的电离层相关参数数据如表1所示.

## 2.3 结果分析

### 2.3.1 电子数浓度高度剖面分析

采用表1中的数据及计算得到的相关参数,再通过式(16)对电子数浓度剖面进行模拟得到图2.由图2可以看出,模拟曲线与实际曲线在峰值以下有着较高的重合度,特别是在  $F_1$  层与  $F_2$  层区两曲线很相近,但在  $E$  层区有较大的差别,可能是由于“突发  $E$  层( $E_s$  层)”的存在,  $E_s$  层的出现时间是随机的,且  $E_s$  层的最大电子数浓度也是随机的,一般都以实际测量决定<sup>[1-6]</sup>.在  $F_2$  层往上部分,高度越高模拟与实测曲线分离越大,符合度也越来越低.总体来说,模拟曲线在一定程度上能够反映出电离层电子数浓度的实际情况.

### 2.3.2 折射率随高度的变化曲线分析

电离层频高图为电磁波穿透电离层每一高度时所需要的临界频率  $f_0$  (MHz) 随高度  $h$  (km) 的变化曲线,根据表1的数据,数值模拟得到武汉和三亚地

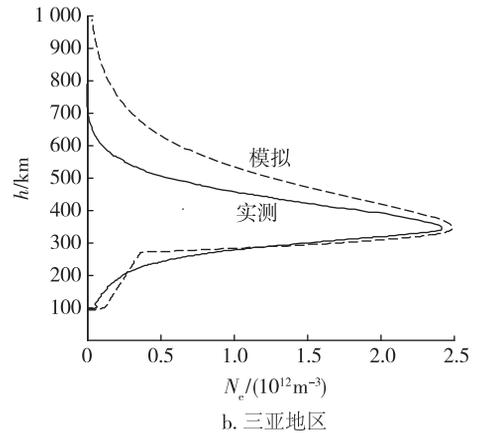
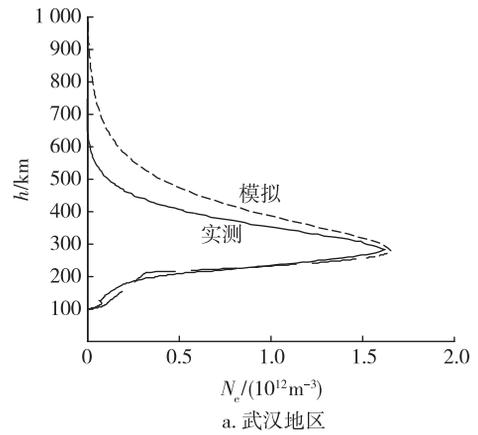


图2 电子数浓度随高度的变化曲线

Fig. 2 Altitudinal profile of electron concentration

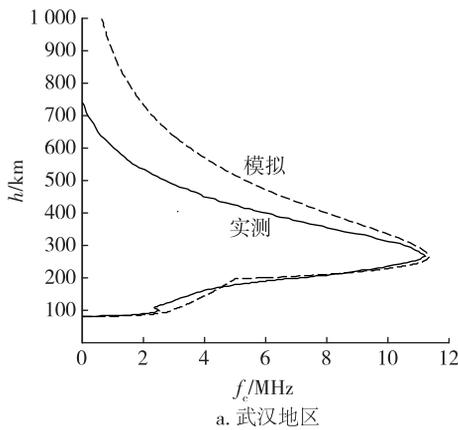
区频高模拟图,如图3所示.

从图3中峰值数据可以看出,峰值附近,模拟值与实际值误差很小,而在峰值往上,则误差随着高度升高而变大.模拟曲线与实际曲线在单调性方面大部分保持一致,只是在110 km附近由于  $E_s$  的存在使实际曲线较复杂.在120~250 km高度上,图3a中模拟曲线与实际曲线靠拢程度比图3b紧密,这是由于电离层电子数浓度与地域、环境、温度、太阳活动的强弱等各种因素都有关系,电子的产生、损失与运输随时随着这些因素而发生改变,所以模拟程度也与这些因素有关.

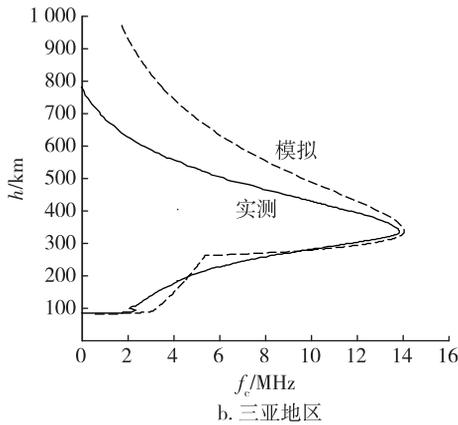
表1 武汉与三亚地区相关电离层参数

Table 1 Ionospheric parameters for Wuhan and Sanya

参数	$f_{0E}$ /MHz	$h_{mE}$ /km	$y_{mE}$ /km	$f_{0F_2}$ /MHz	$h_{mF_2}$ /km	$y_{mF_2}$ /km
武汉数值	3.00	110	20.0	11.52	271.5	73.8
三亚数值	3.21	101	10.7	14.20	339.3	78.0



a. 武汉地区



b. 三亚地区

图3 模拟频高

Fig. 3 Simulated altitudinal profile of critical frequency

取电磁波入射频率分别为  $f_1 = 12 \text{ MHz}$ ,  $f_2 = 10 \text{ MHz}$ , 采用表 1 中武汉观测站的数据, 通过式 (16) 与式 (9), 对电磁波在电离层中的折射率高度剖面进行模拟, 图 4 为这 2 种入射频率下模拟所得到的折射率随高度曲线. 在图 4 中, 由曲线 1 可以看出, 折射率随着高度上升而逐渐减小, 在高度为 270 km 处, 折射率达到最小值, 然后随着高度上升而增加, 当电磁波离开电离层到达外层空间时, 电磁波沿直线传播. 曲线 2 与高度轴有交点, 大约在 225 km 高度, 折射率为 0, 相对于曲线 1, 曲线 2 的入射频率不足以穿透整个电离层, 在 225 km 处, 电磁波按原路径被反射回地面. 在研究折射率随高度变化时, 取能够穿透电离层的电磁波频率 (大于临界频率) 作为入射频率.

根据上文分析, 入射频率大于电离层最大临界频率时, 电磁波才能穿透整个电离层. 所以在研究折射率随高度的变化时, 采用入射频率为  $f_1 = 12 \text{ MHz}$  的电磁波对武汉地区的电离层折射率进行研究, 对于三亚地区的折射率研究则采用入射频率为  $f_3 = 15 \text{ MHz}$  的电磁波. 利用式 (16) 和式 (9), 得到模拟

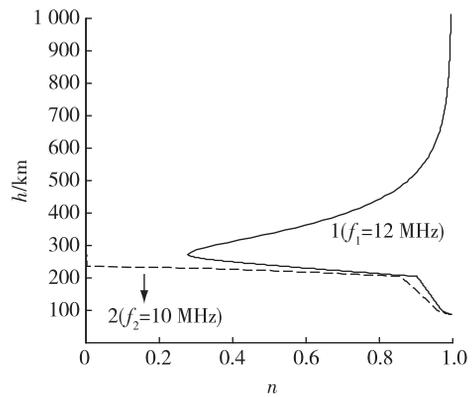


图4 折射率随高度变化曲线

Fig. 4 Altitudinal profile of refractive index

后的折射率高度剖面, 并且与实际测得的电离层电子数浓度所计算得到的折射率曲线进行对比.

图 5 是武汉地区与三亚地区的电离层折射率高度剖面, 可以看出, 图 5 较好地模拟了电磁波在电离层中的实际传播的折射率变化. 在峰值附近与峰值以下部分, 模拟曲线与实际符合得很好, 有些部分重合在一起, 也就是说, 在  $F_2$  层顶往下, 折射率模拟值与实际值相近, 模拟曲线较好地模拟出实际折射情况, 但在  $E_s$  层附近, 实际曲线较复杂, 没有规律, 数值是随机的, 模拟曲线无法模拟出这一层的真实情况. 在峰值以上部分, 模拟曲线随着高度的升高与实际曲线的差距也越来越大, 由于上电离层电子数浓度分布不确定, 各种影响因子较多, 且不能忽略, 导致模拟值误差较大.

### 3 结论

电磁波在电离层中传播的折射率随着电子数浓度的增加而减小, 当入射频率小于临界频率时, 电磁波反射回地面, 入射频率越大, 电磁波在电离层中传播的距离也越大.

通过对电子数浓度经验公式的模拟且与实际数值对比得出, 电离层  $E$  层作为抛物分布进行模拟, 由于  $E_s$  层的存在, 在  $E_s$  附近模拟值与实际值有些误差.  $F_2$  层可近似于抛物分布, 模拟值与实际值误差较小, 特别是峰值附近, 模拟曲线与实际曲线相符良好.  $F_1$  层电子数浓度分布取决于  $E$  层与  $F_2$  层, 在模拟时采用了两段函数, 在  $h_j$  高度以下, 模拟曲线达不到峰值附近的模拟程度, 但两地相比较, 武汉地区要比三亚地区稍好一点, 在  $h_j$  高度以上, 模拟曲线按照抛物分布与实际值符合较好, 在  $F_2$  层以上, 随着高度上升, 模拟值与实际值的误差越来越大. 总体

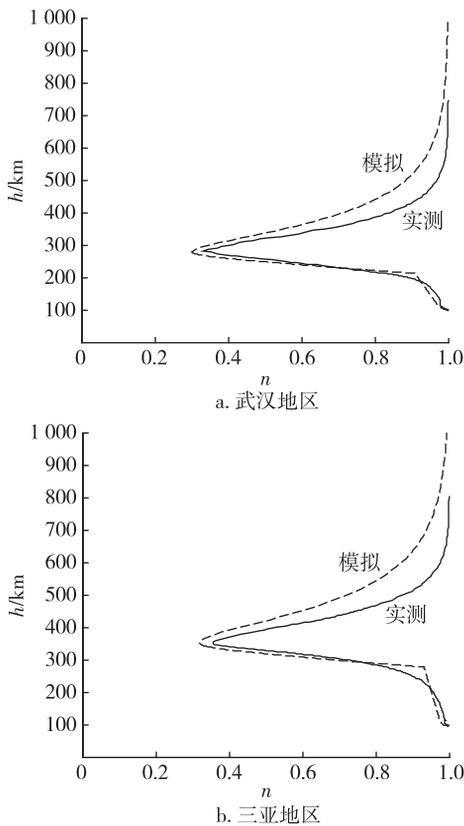


图5 折射率随高度的变化曲线

Fig. 5 Altitudinal profile of refractive index

来说对于  $F_2$  层以下的电离层,模拟曲线可以较好地反映实际分布情况,对于  $F_2$  层以上电离层,模拟曲线模拟程度较差。

在入射电磁波为单色平面波,不考虑吸收情况下,对折射率的高度剖面进行了模拟,折射率在电离层中发生折射并不是简单的向一个方向偏折,它随着高度上升而逐渐减少,在高度为  $F_2$  层顶处,折射率存在极值,在极值附近折射率的分布近似于抛物分布,且与实际曲线符合良好.在  $E_s$  层和  $F_2$  层以上区域,模拟值与实际值误差较大.从两地比较来看,武汉地区模拟曲线比较符合实际关系.当电磁波离开电离层到达外层空间时,电磁波沿直线传播.模拟得出的频高与实际频高相近,能在一定程度上反映出实际的频高关系,但在电离层  $E_s$  区与  $F_2$  层以上区域产生的误差较高。

### 参考文献

#### References

[ 1 ] 熊皓. 电磁波传播与空间环境[M]. 北京:电子工业出版社,2004:36-52  
XIONG Hao. Electromagnetic wave propagation and space

environment[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004:36-52  
[ 2 ] 张瑜. 电磁波空间传播[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2007:61-70,151-158  
ZHANG Yu. Electromagnetic wave propagation in space [M]. Xi'an: Xidian University Publishing House, 2007: 61-70,151-158  
[ 3 ] 邹伟,侯德亭,邢朝伟,等. 微波电离层传播特性研究[J]. 无线电工程,2006,36(11):50-52  
ZOU Wei, HOU Deting, XING Zhaowei, et al. Study on MW propagation characteristics through ionosphere[J]. Radio Engineering of China, 2006, 36(11):50-52  
[ 4 ] 吴跃雨,葛德彪,叶明. 用FDTD及Z变换方法分析电离层中电磁波传播[J]. 杭州电子工业学院学报, 2002, 22(6):57-60  
WU Yueli, GE Debiao, YE Ming. Analysis of electromagnetic wave propagation in ionosphere by using FDTD combined with Z transform method[J]. Journal of Hangzhou Institute of Electronic Engineering, 2002, 22(6): 57-60  
[ 5 ] 叶公节,刘兆汉. 电离层波理论[M]. 北京:科学出版社,1983:342-345  
YE Gongjie, LIU Zhaohan. Theory of ionospheric waves [M]. Beijing: Science Press, 1983:342-345  
[ 6 ] 熊年禄,唐存琛,李行键. 电离层物理概论[M]. 武汉:武汉大学出版社,1999:364-376  
XIONG Nianlu, TANG Cunchen, LI Xingjian. Outline of ionosphere physics [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 1999,364-376  
[ 7 ] 郭仿军. 平面电磁波在高空电离层中的传播[J]. 四川师范大学学报:自然科学版,2001,24(4):402-404  
GUO Fangjun. Propagation of plane electromagnetic waves in the high-altitude ionosphere[J]. Journal of Sichuan Normal University: Natural Science, 2001, 24(4): 402-404  
[ 8 ] Ashmanets V I, Vodyannikov V V, Troitsky B V. Exact calculation of errors at transionospheric propagation[J]. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 1996, 58(10):1161-1163  
[ 9 ] 胡涛,周东方. 高功率微波对电离层电子温度的影响[J]. 信息工程大学学报,2008,9(4):401-403  
HU Tao, ZHOU Dongfang. Effect of high power microwave on electronic temperature in ionosphere[J]. Journal of Information Engineering University, 2008, 9(4): 401-403  
[ 10 ] 国防科学技术工业委员会. 雷达电波传播折射与衰减手册[S]. 1997:5-9  
Commission on Science, Technology, and Industry for National Defense. Handbook of refraction and attenuation of radio wave propagation for radar[S]. 1997:5-9  
[ 11 ] 邹伟,侯德亭,王芊,等. 高功率微波在电离层中传播的折射率研究[J]. 强激光与粒子束,2006,18(10):1673-1676  
ZOU Wei, HOU Deting, WANG Qian, et al. Refractive index of HPM at transionospheric propagation [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(10): 1673-1676  
[ 12 ] 金兹堡. 电磁波在等离子体中的传播[M]. 北京:科学

出版社,1978:84-90,554-625

Гизнбрыг В.И. Propagation of electromagnetic waves in plasmas [M]. Beijing: Science Press, 1978: 84-90, 554-625

- [13] 侯德亭,邹伟,周东方,等. 高功率微波在低电离层中传输特性分析[J]. 强激光与粒子束,2005,17(8):

1239-1242

HOU Deting, ZOU Wei, ZHOU Dongfang, et al. Characteristic of high-power microwave propagating through lower ionosphere[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005,17(8):1239-1242

## Characteristics of electromagnetic wave propagating through ionosphere

YU Chao<sup>1</sup> SHEN Guozhu<sup>1</sup> GU Bin<sup>1</sup> CHENG Guosheng<sup>1</sup>

1 School of Physics & Opto-electronic Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

**Abstract** Refraction is the main characteristic when electromagnetic wave propagates through ionosphere, which is mainly determined by the free electrons in ionosphere. In this paper the relationship between the refractive index ( $n$ ), the electron concentration ( $N_e$ ) and the altitude ( $h$ ) is analyzed, and numerical simulations are taken on the refractive index and the electron concentration relating to the altitude. We contrast the simulated altitudinal profile of critical frequency and the actual altitudinal profile of critical frequency, and the results show that at high ionosphere, the simulations are roughly in agreement with the actual measurements, while at the lower ionosphere the simulations deviate from the measurements by reason of nonlinear relationship and existence of  $E_s$  layer.

**Key words** electromagnetic wave; ionosphere; refractive index; electron concentration; numerical simulations