

大功率无线电波与低电离层的相互作用

黄文耿 古士芬

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

摘 要

地面入射的大功率无线电波能加热电离层等离子体,引起电离层电子温度和密度的扰动,实现电离层的地面人工变态.本文中,着重考虑电波和电离层相互作用过程中的自吸收,构造一个自洽的相互作用模型,在一定功率和频率的加热电波作用下,利用该模型计算了白天低电离层电子温度和由温度的变化而引起的电子密度的变化.计算结果表明,在白天低电离层,电波的自吸收在 90 km 以下比较显著,而最大温度变化在 70 km 高度上,大约增加了 2 倍.在 α 复合的假设下,电子密度变化幅度随高度的增加而减少,在 70 km 处,大约增加 55%, 120 km 处则为 4% 左右.

关键词 大功率无线电波; 低电离层; 自洽模型

1 引言

自从 20 世纪 30 年代的卢森堡效应 (Luxembourg Effect) 被发现以来,空间环境的主动改变成为研究热点.其中最主要的方法之一,就是利用大功率无线电波的地面注入,来加热电离层,引起电离层参数的改变,从而实现电离层的人工变态.特别是六、七十年代以后,美国、苏联和一些欧洲国家相继建立了电离层加热的实验装置^[1],并进行了有针对性的研究,得到了很多有意义的实验结果.另外,电离层作为户外天然的等离子体实验室,具有大尺度、多形态、无边界等特点,这是地面条件下无法比拟的,因此电离层的变态实验又促进了等离子体物理的研究.科技的发展,性能优越的诊断工具的投入,如非相干散射雷达的使用,将这些研究推向了新阶段.

总的说来,大功率无线电波与电离层等离子体的相互作用是一个非线性的物理过程,地球磁场的存在使这一问题更加复杂化,涉及到电磁波能量的吸收和转移、电离层离子化学反应以及波-粒相互作用、波-波相互作用等过程,另外,电离层在不同的高度上显示不同的特点,加热的结果也将有很大的不同.因此要完全描述这一过程是很困难的.一般而言,在小于 150 km 的低电离层,加热波作用后,电子温度显著上升,密度也有不同程度的增加;在高于 200 km 的上电离层,热传导和扩散过程很重要,使加热区电子密度向外膨胀,并按地磁场排列,形成密度减小区^[2],即所谓的“空腔”.早期的理论研究中,在计算加热区电子温度和密度的扰动时,大多采用的是微扰论的方法^[3],也就是将扰动当作小量来处理.但是,随着入射功率的提高,加热区大的扰动在实验中经常被观测到,因此用微扰的方法显然不再适合,有必要重新构造合适的理论来评估加热效果.另外,在很多电离层的加热理论模型研究中,加热达到稳态之前,前一时刻入射电波造成的电离层电子温

2002-06-18 收到原稿, 2003-03-05 收到修定稿

度和密度的扰动对后一时刻电波吸收和冷却的影响往往被忽略. 但是, 随着加热装置发射功率的较大提高, 这种忽略是不恰当的. 本文假设在入射波连续加热的条件下, 考虑电子温度升高过程中对入射波的作用, 并计及电子密度变化对加热的影响, 在 α 复合的假设下, 构造一个自洽的低电离层稳态加热理论模型. 作为应用, 我们用该模型计算了一定入射波作用下, 一定电离层参数背景下, 系统达到稳态时电子温度和密度的变化.

2 加热模型

当入射电波电场 (E_0) 大于电离层特征等离子体场 (E_p) 时, 电离层表现出强的热非线性效应, 而根据现在加热台站的实际辐射功率可知, E_0 大于甚至远大于 E_p ^[3], 因此电离层能被地面入射的大功率电磁波有效地加热. 电磁波通过地球电离层时, 损失的能量主要被电子所吸收, 电子通过与中性粒子的碰撞而又损失能量, 一定时间后, 达到能量平衡, 这里我们假设电子的有效碰撞频率的变化与温度的变化同步. 在连续波加热的情况下, 电子温度达到平衡的时间是极短的, 如在 60 km 大约为 $10 \mu s$, 而在 90 km 高度上, 约是 1 ms. 由于复合系数是温度的函数, 因此电子数密度也将发生变化, 但是密度的改变时间远大于温度的变化时间. 在电子温度和密度逐步变化的同时, 电波的吸收以及电子的冷却都会发生改变, 也就是说前一时刻电离层的扰动会影响后一时刻电波的传播, 直至达到最终的稳态, 将这一过程称为电波能量的自吸收. 我们自洽的加热模型主要方法为: 首先计算温度的变化, 然后根据温度的变化计算密度的变化, 再将这些变化作为新的背景电离层重复以上过程, 当电子温度和密度的改变在一定的误差范围内时, 我们认为系统达到了平衡态, 计算出此时的电离层扰动结果. 在以上的循环过程中, 忽略电波的反常吸收以及所有的传导和扩散过程, 这在低电离层的加热中是合适的. 主要的公式和步骤如下.

(1) 用 A-H 公式^[4] 确定波的折射率, 并计算折射指数虚部随电离层高度的变化. A-H 公式为

$$n^2 = 1 - 2X \frac{1 - iZ - X}{2(1 - iZ)(1 - iZ - X) - Y_T^2 \pm \sqrt{Y_T^4 + 4Y_L^2(1 - iZ - X)^2}}. \quad (1)$$

其中, $n = \mu + i\chi$ 是折射指数 (χ 是其虚部), $X = \frac{f_N^2}{f^2}$, $Y = \frac{f_H}{f}$, $Z = \frac{\nu}{2\pi f}$, $Y_T = Y \sin \varphi$, $Y_L = Y \cos \varphi$. 式 (1) 中, f_N 是电离层等离子体频率, f_H 是电子的回旋频率, ν 是电子的碰撞频率, f 是入射电波频率, φ 是波法向和地球磁场之间的夹角. 公式中 $\pm$ 分别对应于寻常波和非常波入射, 所要用到的碰撞频率由下面的经验公式确定^[5]:

$$\nu = 1.7 \times 10^{-11} [N_2] T_e + 3.8 \times 10^{-10} [O_2] T_e^{1/2} + 1.4 \times 10^{-10} [O] T_e^{1/2}. \quad (2)$$

方括号中的量代表中性成分的浓度, T_e 是电子的温度. 这里地磁场我们采用文献 [6] 中用到的中心偶极场模式,

$$B = B_0 \left(\frac{R_e}{R_e + h} \right)^3 \sqrt{1 + 3 \sin^2 \lambda}. \quad (3)$$

其中, 常数 $B_0 = 3.085 \times 10^{-5} \text{ T}$, $R_e = 6371.2 \text{ km}$, λ 为磁纬, h 为距地面高度.

(2) 用欧姆定律计算吸收能流. 吸收指数为

$$\kappa = \frac{\omega}{c} \chi, \quad (4)$$

其中, $\omega = 2\pi f$, c 为光速. 入射电波能流随高度的表达式为

$$S(h) = \frac{P_{\text{ER}}}{4\pi h^2} \exp\left(-2 \int_{h_1}^h \kappa(h') dh'\right), \quad (5)$$

其中, P_{ER} 是电波的有效辐射功率 (effective radiated power), h_1 是电离层的下边界. 则单位体积单位时间内吸收的能量随高度的关系为

$$Q(h) = 2\kappa S(h). \quad (6)$$

(3) 由各种冷却过程计算能量的损失. 电离层中电子能量的损失是一个十分复杂的过程, 主要是通过碰撞来完成的, 它的损失机制主要包括: ①和正离子及中性粒子的弹性碰撞. ②分子 O_2 和 N_2 旋转能级的激发. ③分子 O_2 和 N_2 振动能级的激发. ④原子 O 电子能级的激发. ⑤原子 O 精细结构的激发. 我们的计算参照文献 [7] 中讨论的各种损失过程的表述, 来确定总的能量损失 $L(h)$ 在不同高度上的数值.

(4) 平衡态温度的计算. 电子的能量方程为 [8]

$$\frac{3}{2} k N_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = Q(T_e, h) - L(T_e, h). \quad (7)$$

其中, k 是 Boltzmann 常数, $\partial/\partial t$ 是对时间的偏导. 平衡态 ($\partial T_e/\partial t = 0$) 时, 不同高度上的温度 T_e 就可以由上式确定.

(5) 平衡态电子密度的计算. 在低电离层, 离子化学是 α 复合类型

$$\partial N_e/\partial t = q - \alpha(T_e) N_e^2, \quad (9)$$

$$\alpha(T_e) = 5 \times 10^{-7} [\text{NO}^+](300/T_e)^{1.2} + 2.2 \times 10^{-7} [\text{O}_2^+](300/T_e)^{0.7}. \quad (10)$$

复合系数引自文献 [3], 其中, q 是电子的产生率, 方括号中表示电离层中正离子的浓度, 在一定的背景电离层下, 就可以由上式计算出扰动后的电子数密度的变化.

3 初始参数选取

按照第 2 节介绍的方法, 我们对以上公式联合循环求解, 其中背景电离层使用 IRI95 模式 [9], 正离子仅保留 NO^+ 和 O_2^+ , 中性大气密度和温度由 MSIS90 经验模式 [10] 计算. 在加热开始前, 假设电子温度 (T_e) 与中性粒子温度 (T_n) 相等 ($T_e = T_n = T_0$). 以上初始参数都是在地理位置为东经 120° , 北纬 30° , 地方时 1200, 太阳和地磁活动比较平静时选取的. 而电离层的下边界我们假设为 60 km, 这个选取有一定的随意性, 主要原因是在白天 60 km 以下的高度上, 电子的浓度是很低的, 对电波的传播特别是高频电波的传播几乎没有影响, 另外, IRI95 模式在很低的高度上也存在困难. 在计算中, 低于 60 km 以下电

波的吸收被忽略,但是对自洽加热模型和下面的计算结果几乎没有影响. 主要的初始参数如图 1 所示.

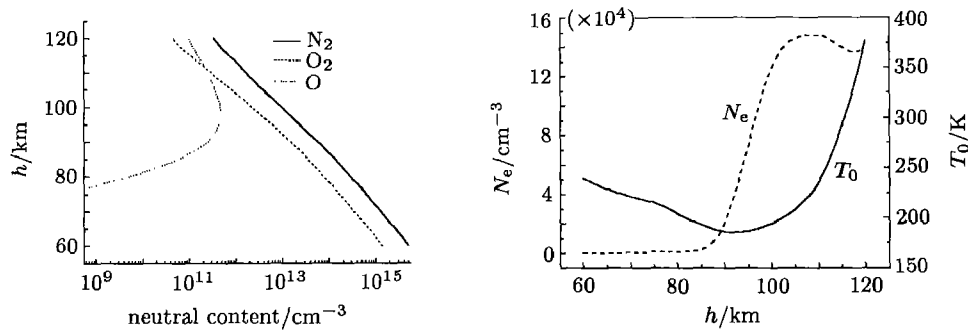


图 1 初始参数剖面图

Fig.1 The profile of initial parameters

4 计算结果

地面发射机的参数选取为 $P_{ER} = 200 \text{ MW}$, $f = 7.0 \text{ MHz}$, $\varphi = 15^\circ$. 首先由 A-H 公式计算折射指数的虚部, 如图 2 所示. 我们发现在 60—120 km 之间折射指数虚部有两个峰值, 对 X 波和 O 波而言, 两者的变化趋势相同, 但是 X 波较 O 波大, 说明了 X 波比 O 波更容易被吸收, 最大峰值高度约在 95 km 处. 图 3 为加热开始时, O 波在单位时间、单

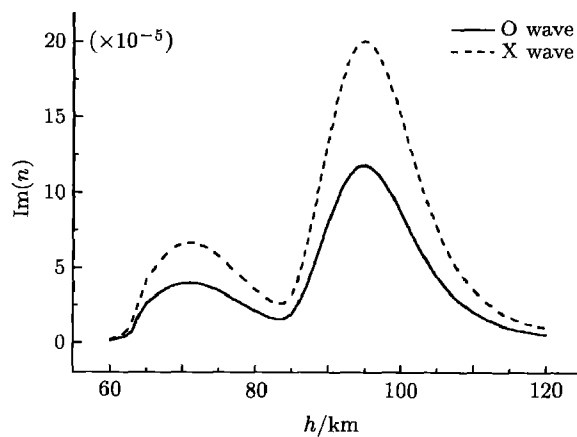


图 2 折射指数的虚部

Fig.2 The imaginary of refractive index in different heights

位体积内被吸收的能量随高度的剖面图. 同样, 吸收能流也有两个峰值, 分别在 70 km 和 94 km 高度上, 从图中看出, 电波的吸收区主要在 100 km 以下, 进入 E 区的吸收能流很少, 说明了电离层的 D 区是电波的重要吸收区, 计算结果与电波传播理论是一致的. 在

图 3 中, 我们分别作出了几个温度下电子能量损失的曲线, 当 $T_e = 400$ K 时, 在 70 km 以下吸收大于损失, 而在 70 km 以上则相反. 在 $T_e = 600$ K 的情况下, 各个高度上的吸收都小于这一温度下的损失. 我们根据这一结果可以粗略地估计, 在不计及自吸收的能量平衡态时, 电子的温度应该小于 600 K, 这是以后计算的重要参考.

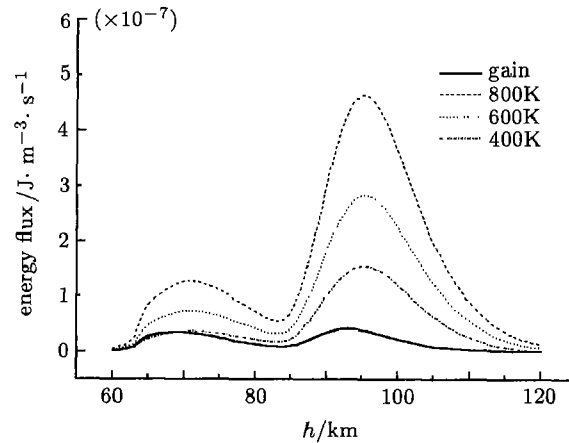


图 3 初始吸收能流和特定温度下的损失能流

Fig.3 The initial absorbed energy flux (gain) and the energy flux of loss for specific electron temperature

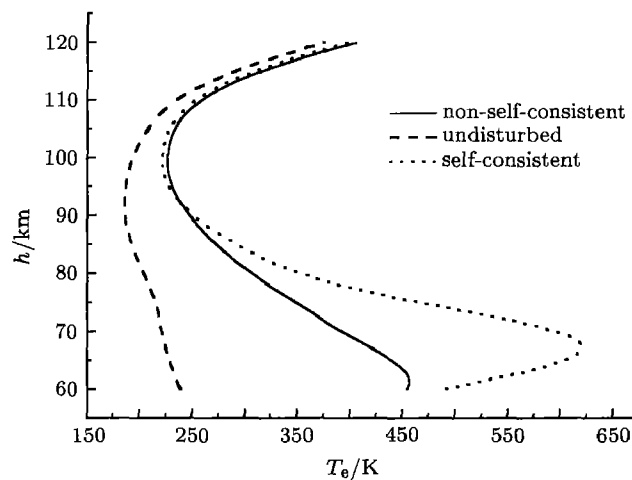


图 4 稳定时电子温度扰动剖面

Fig.4 The profile of electron temperature disturbance, when the equilibrium is reached

图 4 是系统达到稳态时, 电子温度的变化情况, 在低于 90 km 的高度上, 温度的增加幅度较大, 自吸收效应很明显, 最大的温度变化在 70 km 高度上, 增加了 400 K 以上, 大约为原来的 3 倍, 加热效果是很突出的. 在 90 km 以上的高度, 温度的增加幅度不大, 而且不计及电波的自吸收效应与考虑了自吸收后两种计算结果相差不大, 主要是因为吸收逐渐减少, 而能量损失却很大. 图 5 是由本文提出的电波加热自洽模型计算的电子数密度

在稳态时的剖面图. 我们只计算了 70 km 以上高度的扰动, 主要是因为很低的电离层高度上, 离子化学十分复杂, 目前不是特别清楚. 图 5(a) 是电子密度增加高度分布图, 最大增加在 97 km 处, 大约增加了 9200 cm^{-3} . 图 5(b) 是电子数密度增加的百分数随高度变化图, 随高度的增加而减少, 在 70 km 处, 大约增加 55%, 120 km 处则约为 4%.

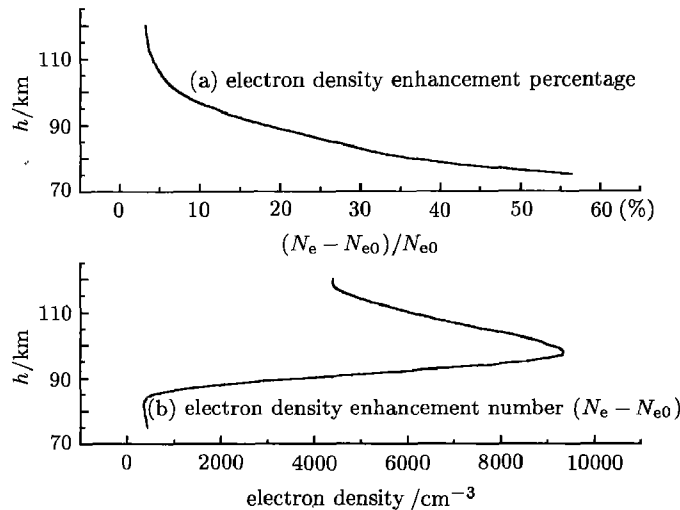


图 5 稳定时电子密度扰动剖面

Fig.5 The profile of electron density disturbance, when the equilibrium is reached

5 结论和讨论

我们构造了一个大功率无线电波与低电离层相互作用的模型, 该模型是自洽的, 可用于计算电磁波的连续加热, 系统达到稳态时电离层的扰动情况. 作为应用, 文中计算了在一定功率、一定频率的电磁波垂直入射下低电离层的变态情况. 可以发现在白天电离层背景下, 对 $P_{\text{ER}} = 200 \text{ MW}$, $f = 7.0 \text{ MHz}$ 的入射电磁波, 自吸收在 90 km 以下的高度上比较显著, 电子温度有明显的增加, 最大峰值温度变化约在 70 km 的高度上, 约是原来的 3 倍, 在大于 90 km 的高度上, 电波的自吸收效应可以忽略不计, 温度的增加幅度不大. 电子密度的增加百分数是随高度的增加而减小的, 在 70 km 的高度上, 大约增加了 55%, 而在 120 km 高度上约为 4% 左右, 电子数密度峰值增加在 97 km 的高度上, 大约增加 9200 cm^{-3} . 计算中, 扩散、传导等各种输运过程及中性风的影响被忽略, 在碰撞占优势的低电离层, 这一假设是合理的. 另外, 由于电离层的电离度是很低的, 特别是在低电离层, 因此文中假设在加热过程中各种中性成分浓度保持不变也是合理的. 本文的计算结果和很多实验结果基本一致, 我们并没有作定量比较的原因在于背景电离层对加热效果有很大的影响, 而由经验模式计算出来的背景电离层的各种数值往往和当时实际加热时的数值有一定的差别, 因此定量的比较缺乏统一的标准而使之失去了意义. 在本模型中, 复合过程完全由 α 类型确定, 这是模型的不足之处, 更加精确的计算必须依据各种化学反应过程以及它们的反应系数, 在低电离层特别是低于 80 km 高度上, 这将是十分复杂的过程.

由于电磁波在传播过程中, 电离层的吸收和电子能量的损失与当时的背景电离层和背景中性大气状况有关, 而这些均受太阳活动、地磁扰动、声重力波以及季节变化等的影响, 因此计算结果将会有不同程度的波动, 另外, 地面发射机天线也是影响因素之一, 在具体的计算中, 这些都可以作适时的调整. 最后我们要指出的是, 本模型是“欠密”(underdense)变态情况, 即 $f > f_N$. 对于另一种“过密”(overdense) 变态情况, 由于在电波的发射点附近, 入射波和反射波相互叠加, 形成“驻波”, 电场可能很大, 吸收将要重新被考虑, 这是我们下一步所要研究的工作, 将在另文中给出.

参 考 文 献

- [1] Thide B. Artificial modification of the ionosphere: preface. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 1997, **59**:2 251—2 252
- [2] Benson R F. Evidence for the stimulation of field-aligned electron density irregularities on a short time scale by ionospheric topside sounders. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 1997, **59**:2 281—2 293
- [3] Gurevich A V. Nonlinear phenomena in the ionosphere. Berlin: Springer-Verlag, 1978
- [4] Ye Gongjie, Liu Zhaohan. The theory of ionospheric waves. Beijing: Science Press, 1983. in Chinese (叶公节, 刘兆汉. 电离层波理论. 北京: 科学出版社, 1983)
- [5] Pashin A B, Belova E G, Lyatsky W B. Magnetic pulsation generation by a powerful ground-bases modulated HF radio transmitter. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 1995, **57**:245—252
- [6] Liu Libo, Wu Xiangyang, Tu Jiannan. Modeling study of modification of the lower ionosphere by VLF electromagnetic waves. *Chin. J. Space Sci.*, 1997, **17**(2):130—135. in Chinese (刘立波, 吴向阳, 涂剑南. 甚低频电磁波变态低电离层的数值模拟. 空间科学学报, 1997, **17**(2):130—135)
- [7] Stubbe P, Varnum W S. Electron energy transfer rates in the ionosphere. *Planet Space Sci.*, 1972, **20**:1 121—1 126
- [8] Rietveld M T, Kopka H, Stubbe P. D-region characteristics deduced from pulsed ionospheric heating under auroral electrojet conditions. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1986, **48**:311—326
- [9] Bilitza D. International Reference Ionosphere — status 1995/96. *Adv. Space Res.* 1997, **20**:1 751—1 754
- [10] Hedin A E. Extension of the MSIS thermospheric model into the middle and lower atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**(A2):1 159—1 172

INTERACTION BETWEEN THE POWERFUL HIGH-FREQUENCY RADIO WAVE AND THE LOWER TERRESTRIAL IONOSPHERE

HUANG Wengeng GU Shifen

(Center for Space Science and Applied Research, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract

The terrestrial ionospheric plasma can be heated by a powerful ground-based high-frequency radio wave, which results in the disturbance of the electron temperature and density. In this paper, a self-consistent model of interaction between the powerful HF radio wave and the lower ionosphere is presented. In this model, the self-absorption effect of radio wave is emphasized. For specific transmitter's parameters (in this paper, $P_{\text{ER}} = 200 \text{ MW}$, $f = 7.0 \text{ MHz}$ are used, which is at the range of many transmitters), under the daytime ionospheric background, the calculated results show that the self-absorption effect is obvious, when $h < 90 \text{ km}$, but the effect can be ignored for $h > 90 \text{ km}$. The results also show that the maximum electron temperature enhancement is at the altitude of 70 km, which is three times of the undisturbed background. With the assumption of α recombination in lower ionosphere, the percentage of electron density enhancement is decreasing with the increase of ionospheric heights. For example, at the altitude of 70 km, it is 55% or so, but at 120 km altitude, it is about 4%.

Key words Powerful HF radio wave, Lower ionosphere, Self-consistent model