0254-6124/2012/32(6)-818–06 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Wang Sicheng, Fang Hanxian, Yang Shenggao, Weng Libin. Heating of lower ionosphere by powerful HF radio wave. *Chin. J. Space Sci.*, 2012, **32**(6): 818-823

大功率无线电波加热低电离层*

汪四成[1,2] 方涵先[1,2] 杨升高[1] 翁利斌[1]

1(解放军理工大学气象学院 南京 211101)

2(中国科学院空间科学与应用研究中心 空间天气学国家重点实验 北京 100190)

摘 要 等离子体对大功率电波的欧姆耗散会使电子温度升高, 进而导致电子密度和其他等离子体参数改变, 实现电离层的地面人工变态. 本文基于大功率无线电波与低电离层相互作用的自洽模型, 分析了不同入射条件下电离层参数的变化, 主要结论如下: 电离层 D 区是电波的主要吸收区, 并且其吸收强度随入射频率的升高而降低, 当入射频率为 6 MHz (有效入射功率为 200 MW) 时电子温度的最大增幅约为 520 K, 电子密度最大增幅为 7300 cm^{-3} 左右; 电子温度达到饱和所需时间小于电子密度的饱和时间, 前者具有 μs 量级, 后者具有 ms 量级; 停止加热后, 电子温度和密度迅速恢复到初始状态, 恢复时间均小于各自的饱和时间, 但量级相当; 入射功率越高, 电子温度和密度的增幅越大, 并且饱和时间也越长, 在相同入射条件下, 夜晚的饱和时间要大于白天.

关键词 大功率无线电波, 低电离层, 欧姆加热

中图法分类号 P 353

Heating of Lower Ionosphere by Powerful High Frequency Radio Wave

WANG Sicheng[1,2] FANG Hanxian[1,2] YANG Shenggao[1] WENG Libin[1]

1(*Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing* 211101)

2(*State Key Laboratory of Space Weather, Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

Abstract The ionospheric heating by powerful High Frequency (HF) radio wave can excite the disturbance of temperature, density and other parameters of ionospheric plasma. Based on Ohmic theory, the effect of high power radio wave on the lower ionosphere is studied, and the following conclusions can be drawn. Firstly, D region is the main absorption area of the radio wave, and the intensity of absorption decreases with the increase of radio wave frequency. When radio frequency is 6 MHz (effective radio power is 200 MW), the electron temperature increase can be up to nearly 520 K, and electron density increase can reach about 7300 cm^{-3}. Secondly, the disturbance of electron temperature and density tend to be saturated after continuous heating. The time that the electron temperature needs to be saturated is of a scale of μs, while that of the electron density is ms. When

* 国家自然科学基金项目 (40505005), 国家重点实验室专项基金和解放军理工大学气象学院基础理论基金共同资助

2011-06-27 收到原稿, 2012-03-08 收到修定稿

E-mail: fanghx@gmail.com

stop heating, the electron temperature and density come back to the normal conditions quickly. Thirdly, the higher radio power is, the larger disturbance of electron temperature and density are caused, and the longer saturation time is needed. The saturation time at nighttime is longer than that at daytime under the same heating conditions.

Key words Powerful HF radio wave, Lower ionosphere, Ohmic theory

0 引言

电离层是电波传播的主要通道和载体, 高度范围一般认为是 60~2000 km. 1933 年, 卢森堡效应被发现, Tellege[1] 认为其是由于卢森堡无线广播电台的高功率电磁波改变了电离层无线电波传播特性而造成的, Bailey[2] 等对 Tellege 的解释给予了肯定, 并认为是由于电离层等离子体电子与背景中性粒子的频繁碰撞造成高功率无线电波的欧姆耗散, 加热电离层并导致电离层等离子体参数改变的.

此后, 空间环境的主动改变成为研究热点, 其主要手段之一就是电离层的地面人工加热. 特别是 20 世纪六七十年代之后, 美国、苏联和一些欧洲国家相继建立电离层加热的实验装置 [3], 并进行了大量实验, 得到很多有意义的结果: 高频电波可显著引起电离层电子温度和密度的改变 [4−5]; 可激发谐振不稳定性, 产生宽几米、长几公里的场向不规则体 [6−7]; 可产生气辉闪烁 [8] 等. 目前, 美国阿拉斯加州的 HAARP 计划加热装置是世界上功率和天线增益最大的实验装置, 其有效辐射功率可超过 1 GW, 能够在很短时间内向高空入射非常集中的电磁能量束, 实现电离层的加热.

在低电离层高度 (60~120 km), 电子与中性粒子的碰撞过程较显著, 等离子体的输运过程可被忽略. 电子在入射电波电场作用下被加速, 并通过碰撞过程转移能量, 在入射泵波为连续波的情况下, 一定时间后电子吸收电波的能量与碰撞损失的能量达到平衡, 电子温度趋于一个稳定值. 本文利用黄文耿 [9−10] 等建立的大功率无线电波与低电离层相互作用的自洽模型 (可用于计算在电磁波连续加热情况下的电离层参数变化), 通过数值计算分析不同入射条件下电离层电子温度和密度的扰动变化, 以期对不同条件下的加热效果进行预测和评估, 为实验提供一定的理论指导.

1 自洽模型

1.1 电波吸收能流

入射波通过低电离层时损失的能量主要被电子吸收 (欧姆吸收), 离子的加热可忽略. 复折射指数 $n=\mu+\mathrm{i}\chi$, 入射电磁波的吸收系数

$$\kappa=\frac{\omega}{c}\chi. \tag{1}$$

其中, $\omega=2\pi f$, f 为入射电波频率, 入射电波能流随高度的变化为

$$S(h)=\frac{P_{\mathrm{er}}}{4\pi h^2}\exp\Big(-2\int_{h_1}^{h}\kappa(h')\mathrm{d}h'\Big). \tag{2}$$

其中, P_{er} 为入射电波的有效辐射功率, h_1 为电离层的下边界. 单位体积单位时间内吸收的能量

$$Q(h)=2\kappa S(h). \tag{3}$$

计算中, 复折射指数由 A-H (Appleton-Hartree) 公式确定, 碰撞频率引自文献 [11], 地磁场采用中心偶极场模式 [12].

1.2 电子能量损失

电离层中电子能量的损失机制十分复杂, 主要通过碰撞过程来完成, 常见的损失机制有: 电子与正离子的弹性碰撞, 电子与中性粒子的弹性碰撞, 分子 O_2 和 N_2 旋转能级的激发, 分子 O_2 和 N_2 振动能级的激发, 原子氧 O 电子能级和精细结构的激发. 电子能量损失 $L(T_{\mathrm{e}},h)$ 是上述各个机制能量损失的总和, 各损失过程的具体表述见文献 [13].

1.3 平衡态电子温度

电子能量方程为 [14]

$$\frac{3}{2}kN_{\mathrm{e}}\frac{\partial T_{\mathrm{e}}}{\partial t}=Q(T_{\mathrm{e}},h)-L(T_{\mathrm{e}},h). \tag{4}$$

其中, k 为 Boltzmann 常数, 不同高度处的电子温度 T_{e} 可由式 (4) 确定.

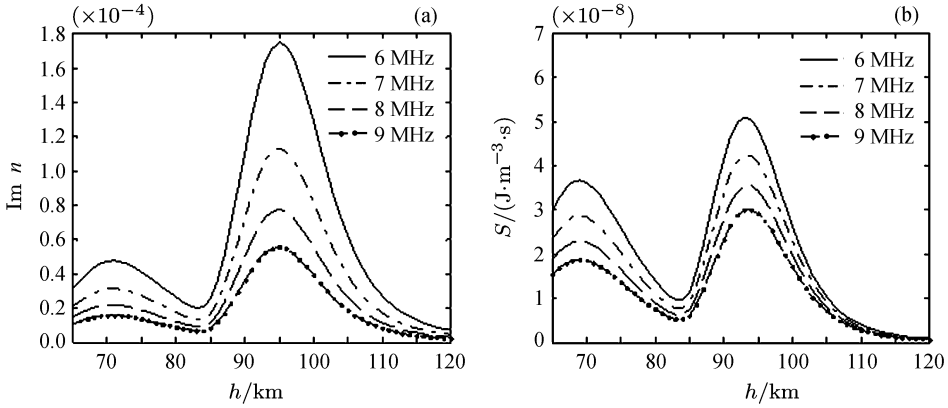


图 1 初始复折射指数虚部和吸收能流剖面

Fig. 1 Profile of the initial imaginary of refractive index and absorbed energy flux

1.4 平衡态电子密度

在低电离层, 离子化学主要是 α 复合类型, 考虑 NO^+ 和 O_2^+ 的离解复合, 即

$$NO^+ + e \rightarrow N + O,$$
$$O_2^+ + e \rightarrow O + O.$$

则电子的连续性方程为

$$\frac{\partial N_e}{\partial t} = q - \alpha(T_e)N_e^2. \tag{5}$$

其中, q 为产生率, $\alpha(T_e)$ 为复合系数, 取自文献 [15].

1.5 温度恢复时间

停止加热后电波能量吸收为零, 则电子温度迅速下降至初始背景值, 能量方程变为

$$\frac{3}{2}kN_e\frac{\partial T_e}{\partial t} = -L(T_e, h). \tag{6}$$

2 模拟结果及其比较

背景电离层参数和中性大气参数分别由经验模式 IRI-2007 和 NRLMSISE-00 得到, 加热地点在南京 (32°N, 118.5°E), 时间为 2011 年 1 月正午, 采用 O 波模加热, 加热开始前假设电子温度与中性粒子温度相等, 低电离层高度为 65~120 km, 层间距取为 1 km, 时间步长为 1 μs. 首先利用 A-H 公式计算电离层不同高度处的吸收系数, 再分别计算电子能量的吸收和损失, 最后, 运用能量方程和连续性方程计算电子温度和密度的变化, 更新所有与电子温度和密度有关的参量, 重复上述过程, 直至达到平衡状态.

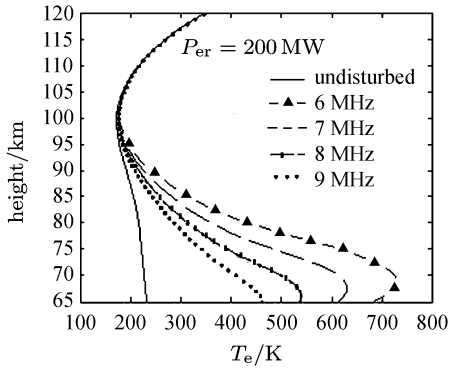


图 2 不同频率电波入射后电子温度的剖面

Fig. 2 Profile of the electron temperature heated by different wave frequencies

2.1 复折射指数虚部及吸收能流随入射频率的变化

在没有加热的条件下, 入射电波频率分别取为 6 MHz, 7 MHz, 8 MHz 和 9 MHz, 利用 A-H 公式计算复折射指数虚部及吸收能流, 如图 1 所示.

复折射指数虚部在 65~120 km 高度之间有两个峰值, 最大的峰值高度约在 95 km 处, 吸收能流的两个峰值分别在 68 km 和 94 km 处, 100 km 高度以上的吸收能流很小, 说明电离层 D 区是电波的主要吸收区, 可造成电波的有效衰减. 同时, 随着入射频率升高, 电离层对电波的吸收是减小的, 这与电波传播理论是一致的.

2.2 不同频率加热低电离层

有效入射功率为 200 MW, 采用不同频率进行加热, 电子温度达到稳态时的剖面如图 2 所示. 电子温度在 100 km 高度以下均有不同程度的增加, 最大增

幅约在 70 km 处, 并且最大增幅高度随入射频率的增加略有下降. 入射频率越小, 电子温度增幅越大, 当频率为 6 MHz 时最大增幅可达 520 K.

图 3 是 7 MHz 电波入射后不同时刻的电子温度剖面, 10 μs 后 65 km 处的温度增加了近 100 K, 320 μs 时 75 km 高度以下已经基本达到饱和, 电离层高度越高, 电子温度达到饱和所需的时间则越长. 表 1 计算了电子温度的饱和时间及恢复时间, 可以看出两者均随入射频率的增加而减少.

图 4 是不同频率加热达到饱和时的电子密度剖面. 在 85 km 以上, 电子密度均有不同程度增加, 最大增量约在 97 km 处. 入射频率越高, 电子密度增幅越小, 频率为 6 MHz 时, 电子密度最大增加了约 7300 cm^{-3}. 由图 5 可知, 电子密度的饱和时间及恢复时间均为 ms 量级, 远大于电子温度的饱和时间和恢复时间, 这是与实验结果相一致的.

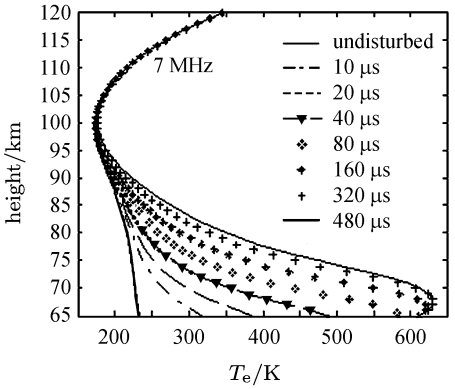


图 3 7 MHz 电波入射后不同时刻的电子温度剖面

Fig. 3 Profile of the electron temperature at different heating moments

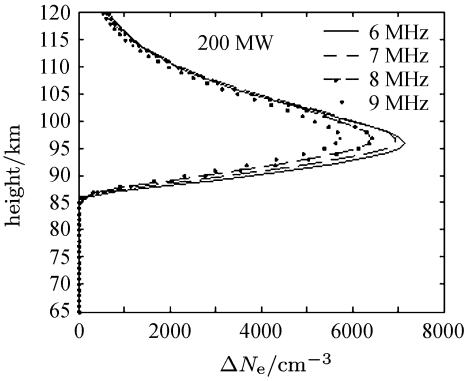


图 4 不同频率入射时电子密度的增幅剖面

Fig. 4 Profile of the electron density increment heated by different wave frequencies

表 1 不同频率电波加热时的饱和时间及恢复时间

Table 1 The saturation time and recovery time heated by different wave frequencies

电波频率/MHz	6	7	8	9
饱和时间/μs	764	565	414	323
恢复时间/μs	455	365	293	240

2.3 不同功率加热低电离层

图 6 为频率 7 MHz、不同功率电波入射后电子温度的变化剖面. 入射功率越高, 电子温度的增幅越大, 达到饱和所需的时间也越长 (见表 2), 并且电子温度的峰值高度也略有升高. 图 7 是电子密度的变化, 入射功率增加, 电子密度的增幅变大, 饱和时间也变长 (见表 3).

2.4 白天与夜晚加热效果的对比

在不同的时间点进行加热实验, 当入射频率为 7 MHz, 功率为 200 MW 时, 电子温度的变化如图8

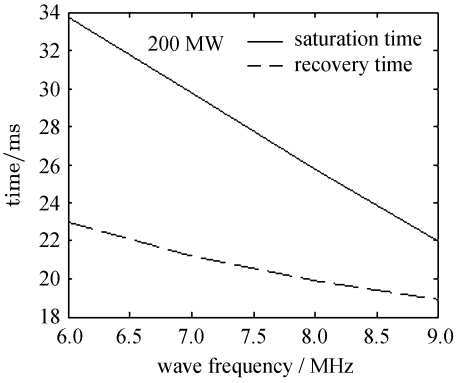


图 5 不同频率加热时电子密度的饱和时间及恢复时间

Fig. 5 Saturation time and recovery time heated by different wave frequencies

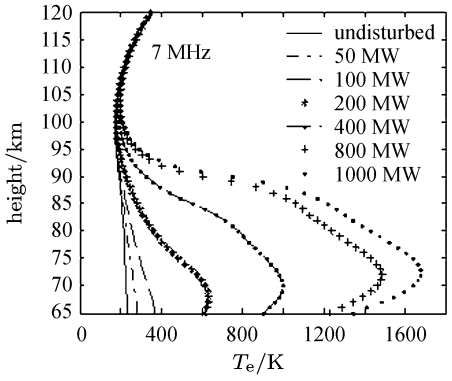


图 6 不同功率加热时的电子温度剖面

Fig. 6 Profile of the electron temperature heated by different effective radio power

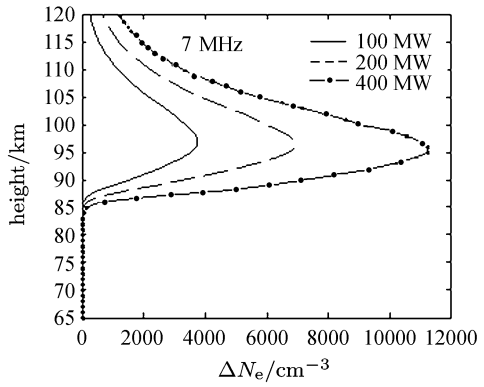


图 7 不同功率加热时的电子密度剖面

Fig. 7 Profile of the electron density heated by different effective radio power

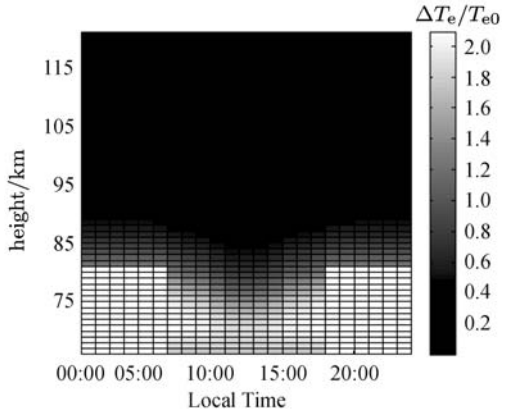


图 8 白天和夜晚加热饱和后电子温度的扰动剖面

Fig. 8 Profile of the electron density heated at daytime and nighttime

表 2 不同功率入射时的电子温度饱和时间

Table 2 Saturation time of electron temperature heated by different effective radio power

加热功率/MW	50	100	200	400	800	1000
饱和时间/μs	114	225	565	1663	2452	2505

表 3 不同功率入射时的电子密度饱和时间

Table 3 Saturation time of electron density heated by different effective radio power

加热功率/MW	100	200	400
饱和时间/ms	15.7	19.8	70.5

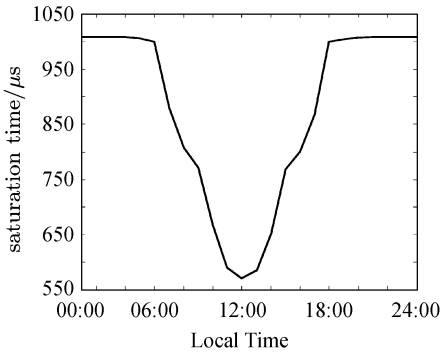


图 9 不同时刻加热后电子温度的饱和时间

Fig. 9 Saturation time of electron temperature heated at different moments

所示. 由于夜间电离层低处的电子密度很少, 对高频电波的传播几乎没有影响, 并且 IRI-2007 模型很难得到夜间 80 km 以下的电子密度, 因此, 夜间电离层的下边界取为 80 km. 由图 8 可以看出, 在 80 km 以上的相同高度, 夜间电子温度的扰动变化要比白天大, 这可能是由于夜间电离层的电子密度要比白天小得多, 对电波的吸收较小, 使得更多的能量进入到较高高度, 导致电子温度升高. 图 9 表明, 夜间电子温度达到饱和所需的时间更长.

3 结论

所用模型可研究在电磁波连续加热情况下电离层参数的扰动变化. 通过数值计算分析了在不同入射条件下电离层电子温度以及密度的变化, 主要结论如下.

(1) 吸收主要是在 100 km 以下, 并且随入射频率的增加, 吸收是减小的.

(2) 入射频率越小, 电子温度和密度的增幅越大, 当频率为 6 MHz (有效入射功率 200 MW) 时, 电子温度最大增幅为 520 K 左右, 位置约在 70 km 高度处, 电子密度的最大增幅为 7300 cm^{-3} 左右, 位置约在 97 km 处.

(3) 电子温度达到饱和所需的时间远小于电子密度的饱和时间, 前者具有 μs 量级, 后者是 ms 量级; 停止加热后, 电子温度和密度迅速恢复到初始状态, 恢复时间均小于各自的饱和时间, 但量级相当.

(4) 有效入射功率越高, 电子温度和密度的增幅越大, 并且饱和时间也越长; 在相同入射条件下, 相同

高度夜晚的电子温度变化要大于白天, 并且饱和所需的时间较长.

本文所用模型仅适用于欠密加热情况, 即入射频率大于电离层等离子体频率 ($f > f_N$) 时, 对于过密情况 ($f < f_N$), 由于在电波的反射点附近, 入射波和反射波相互叠加形成驻波, 电场可能很大, 反常吸收作用明显, 还需进一步研究.

致谢 国际无线电委员会 (URSI) 提供了 IRI2007 电离层模型程序, NRL 提供了 NRLMSISE-00 大气模型程序.

参考文献

[1] Tellegen B D H. Interaction between radio waves [J]. *Nature*, 1993, **131**:840

[2] Bailey D K, Martyn D F. The influence of electric waves on the ionosphere [J]. *Phil. Mag.*, 1934, **18**:369

[3] Thide B. Artificial modification of the ionosphere: preface [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 1997, **59**:2251-2252

[4] Utlaut W F, Violette E J, Paul A K. Some ionosonde observations of ionosphere modification by very high power, high frequency ground-based transmission [J]. *J. Geophys. Res.*, 1970, **75**(10):6424-6440

[5] Utlaut W F, Violette E J. Further observations of ionospheric modification by high-powered HF transmitter [J]. *J. Geophys. Res.*, 1972, **77**(11):6804-6818

[6] Kelley M C, Arce T L, Salowey J, *et al*. Density depletion at the 10 m scale induced by Arecibo heater [J]. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**:17 367-17 367

[7] Gurevich A V, Lukyanov A V, Zybin K P. Stationary state of isolated striations developed during ionospheric modification [J]. *Phys. Lett. A*, 1995, **206**:247-259

[8] Rietveld M T, Isham B, Kohl H, *et al*. Measurement of HF-enhanced plasma and ion lines at EISCAT with high-altitude resolution [J]. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**(A4):7429-7439

[9] Huang Wengeng, Gu Shifen. Interaction of the powerful high-frequency radio wave with the lower terrestrial ionosphere [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2003, **23**(3):181-188. In Chinese (黄文耿, 古士芬. 大功率无线电波与低电离层的相互作用 [J]. 空间科学学报, 2003, **23**(3):181-188)

[10] Huang Wengeng, Gu Shifen, Gong Jiancun. Ionospheric heating by powerful high-frequency radio waves [J]. *Chin. J. Radio Sci.*, 2004, **19**(3):296-301. In Chinese (黄文耿, 古士芬, 龚建村. 大功率高频无线电波加热电离层 [J]. 电波科学学报, 2004, **19**(3):296-301)

[11] Pashin A B, Belova E G, Lyatsky W B. Magnetic pulsation generation by a powerful ground-base modulated HF radio transmitter [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 1995, **57**:245-252

[12] Liu Libo, Wu Xiangyang, Tu Jiannan. Modeling study of modification of the lower ionosphere by VLF electromagnetic waves [J]. *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 [J]. 空间科学学报, 1997, **17**(2):130-135)

[13] Stubbe P, Varnum W S. Electron energy transfer rates in the ionosphere [J]. *Planet Space Sci.*, 1972, **20**:1121-1126

[14] Rietveld M T, Kopka H, Stubbe P. A-region characteristics deduced from pulsed ionospheric heating under auroral electrojet conditions [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 1986, **48**:311-326

[15] Gurevich A V. Nonlinear Phenomena in the Ionosphere [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1978