

程木松, 徐彬, 吴振森, 等. 电离层加热实验中反射高度下降特征的数值模拟 [J]. 电波科学学报, 2016, 31(5): 834-842. DOI: 10.13443/j.cjors.2015041101

CHENG M S, XU B, WU Z S, et al. A simulation of the descending reflection height in ionospheric heating experiment [J]. Chinese journal of radio science, 2016, 31(5): 834-842. (in Chinese). DOI: 10.13443/j.cjors.2015041101

电离层加热实验中反射高度下降特征的数值模拟

程木松^{1,2,3} 徐彬³ 吴振森² 李海英² 许正文³ 吴军³ 吴健³

(1. 中国电子科技集团公司第三十八研究所, 合肥 230088; 2. 西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 西安 710071; 3. 中国电波传播研究所 电波环境特性及模化技术重点实验室, 青岛 266107)

摘要 向电离层中注入大功率电磁波可引发地基非相干散射雷达观测的离子线和等离子体线回波功率增强现象. 2010年秋季, 在挪威开展了极区电离层离子线与等离子体线增强特征激发实验. 实验中首次得到了 VHF 雷达观测的长生命周期的增强特征, 该现象系由参量衰变不稳定性引起的. 另外, 增强现象所处高度随加热的进行呈下降趋势, 针对该特征文章给出了可能的物理机制, 即该现象系由泵波促使反射高度附近的电子扩散效应增强引起的. 文章利用修正的 IRI 和 MSISE 模型参数对加热实验中的反射高度阶跃性下降特征进行了仿真, 仿真结果表明, 加热电波引起的电子扩散效应可以使得反射高度下降, 并且下降的高度与实验结果吻合较好, 验证了该物理机制的可能性.

关键词 电离层加热; 离子线; 等离子体线; 反射高度

中图分类号 P352

文献标志码 A

文章编号 1005-0388(2016)05-0834-09

DOI 10.13443/j.cjors.2015041101

A simulation of the descending reflection height in ionospheric heating experiment

CHENG Musong^{1,2,3} XU Bin³ WU Zhensen² LI Haiying²
XU Zhengwen³ WU Jun³ WU Jian³

(1. No. 38 Research Institute of CETC, Hefei 230088, China; 2. School of physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China; 3. National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao 266107, China)

Abstract Enhanced ion and plasma lines can be observed by the ground-based incoherent radar when high power HF waves were transmitted into ionosphere. An ionospheric heating experiment was carried out in the fall of 2010, Norway. The long-lived enhanced ion and plasma lines were first observed in this experiment, and this may be caused by the Parametric Decay Instability (PDI). In addition, the VHF data show that the enhanced lines are descending in altitude with time during the heater-on period. The possible cause for the descending altitude may be the enhanced electron diffusion. In this paper, the reflection height is simulated based on the parameters of modified IRI and MSISE models, and results show that the reflection height can be descent with time due to the enhanced diffusion. A good agreement is obtained between the simulation and experiment, thus the hypothesis is proved to be reliable.

收稿日期: 2015-04-11

资助项目: 国家自然科学基金(40831062, 41004065, 41104108); 中央高校基本科研基金(K5051207003); 空间天气学国家重点实验室(08262DAA4S); 电波环境特性及模化技术国防重点实验室基金

联系人: 程木松 E-mail: chengmusong@163.com

Keywords ionospheric heating; ion lines; plasma lines; reflection height

引言

早在20世纪70年代,科学家们便开始了利用大功率电磁波对电离层进行加热的实验,在实验中通常利用频率低于电离层临界频率的高功率寻常波进行实验,即进行过密加热实验.受高功率电磁波的驱动,可以观测到很多异常效应,如引起电子密度、离子温度和电子温度扰动^[1],Leyser曾利用欧洲非相干散射联合会(European Incoherent Scatter, EISCAT)的特高频(Ultra High Frequency, UHF)雷达对泵波加热实验中的电子温度和离子温度增强现象进行了观测,电子温度最高达到了近似3 500 K,通常状态下电子温度仅为1 000 K左右,即电子温度有250%的增幅,离子温度相对于常态下900 K的温度也有近似55%的增幅^[2].我国在2008年极区开展的加热实验中观测到了大范围的电子温度增强特征,增强幅度可达60%~120%^[3];而在2011年的加热实验中观测到了电子密度30%以上的增强特征^[4].高功率电磁波除了可以引起电离层参量的扰动外,还可以引起辉光效应^[5]和极低频(Extremely Low Frequency, ELF)、甚低频(Very Low Frequency, VLF)波的激发.光辐射系由于加热试验中产生的等离子体湍流对电离层中的电子进行了加速,使电子的能量处于2 eV以上的高能态(相对于常态下电子的热能量级为0.1~0.2 eV),当电离层中的粒子与高能电子发生碰撞时,可以使得粒子状态向高能态改变,而高能态粒子不稳定会向低能态跃迁,当发生能级跃迁时会向外辐射光子,即产生了光辐射.如1999年Brändström第一次观测到了极区利用HF激发的6 300 Å辉光辐射^[6],2012年,Denton第一次利用电子耦合器件监测系统对VLF发射机激发的4 278 Å的光辐射进行了直接观测^[7].在ELF、VLF波激发方面国内学者也做了大量工作.2008年李清亮等人对中低纬度调制高频加热电离层ELF、VLF激发进行了模拟^[8],2009年汪枫等讨论了低纬度地区利用大功率电磁波激发ELF、VLF波的可能性^[9].2012年常珊珊等利用射线追踪方法,模拟了电离层调制激发的VLF波在磁层的传播路径,分析了激发纬度和调制频率对传播路径和传播特性的影响;并基于低频波的色散方程和波粒共振条件,分析了VLF波传播路径上与磁层高能粒子的最低共振能及其分布^[10].

作为电离层加热效应分析的基础,离子线和等离子体线的增强特征一直是研究的重点内容.一般地,利用高功率寻常波对电离层进行加热实验中,加热泵波可在反射高度附近激励参量衰变不稳定性,使得平行于地磁场方向的朗缪尔波增强,进一步形成朗缪尔湍流,朗缪尔湍流的形成可以引起非相干散射雷达背向散射功率的增强,即离子线与等离子体线的增强现象^[11-12].在2001年EISCAT的加热实验中,利用超高频(Ultra High Frequency, UHF)雷达观测到了长生命周期的离子线谱增强特征^[13],而在2011年EISCAT的加热试验中曾观测到大范围的离子线谱回波增强特征^[14].

2010年秋季,我国在挪威开展了极区电离层离子线与等离子体线增强特征激发实验.在过去的实验中,很少有VHF雷达观测到的增强特征被报道,而本次实验中首次得到了VHF雷达观测的长生命周期的增强特征;在时空演化上,增强特征所处高度随着加热的进行逐渐下降,本文针对该时空演化特征给出了可能的物理机制,并利用修正的IRI和MSISE模型参数对加热实验中的反射高度进行了仿真,验证了该物理机制的可能性.

1 实验描述

欧洲非相干散射雷达协会EISCAT的加热设备坐落在挪威Tromsø附近(69.59°N, 19.23°E),于20世纪80年代开始投入使用^[15].发射机由三个天线阵组成,有效辐射功率可以达到几百兆瓦,频率覆盖范围为4~8 MHz.为获取较好的实验效果,根据当地电离层实时临界频率状态选取天线阵列1进行加热实验,加热频率为5.423 MHz,电磁波的极化方式为O模,加热波束指向为场向(12°S),有效发射功率为286 MW,垂向有效辐射功率为3.3 MW.单个加热周期为12 min,每个加热周期包括8 min加热开启和4 min加热关闭.诊断设备使用的是VHF非相干散射雷达,探测方向为垂向,时间分辨率为5 s,空间分辨率为3 km.

2 VHF 雷达数据分析

RTG是由EISCAT官方给出的实时监控非相干散射实验的软件,主要功能是实时显示实验结果,也可作简单的数据分析.利用RTG对VHF雷达的离子线和等离子体线频谱进行提取.图1给出了加

热前后离子线伪彩色图,横轴为多普勒频率,单位为 kHz;纵轴为高度,单位为 km;伪彩色为功率,单位为 K/kHz. 加热未开启时刻(11:47:55、11:56:05)整个探测空间的离子线回波功率幅值很低,最大值仅为 0.6~0.8(K/kHz),在 150 km 以上的离子线谱形状呈现为典型的平滑双峰结构,该结构系由离子的朗道阻尼产生,且谱线的形态特征与电离层参数直接相关,谱线面积与电子密度成正比,峰谷比正比于电子温度与离子温度比值^[16]. 在更低的高度上,由于电子温度与离子温度比值下降,加之碰撞频率增大,谱线逐渐由双峰退化为单峰结构. 加热机开启后(11:48:05—11:56:00),反射高度附近(210 km 左右)的离子线显著增强,如时刻 11:48:05 的

回波幅度值在 150 K/kHz 以上,进而导致其他高度上的离子线频谱特征在图中很难被看到. 图 2 给出了加热前后等离子体线的伪彩色图,横轴为多普勒频率,单位为 kHz;纵轴为高度,单位为 km;伪彩色为功率,单位为 K/kHz. 加热未开启时刻(11:47:55、11:56:05)由于等离子体线回波本身幅度较弱,加之 VHF 雷达的观测模式为 beata 工作模式,等离子体信道接收带宽较宽,因此自然的等离子体线回波被背景噪声覆盖,等离子体线谱呈现为不规则的条纹状结构,仅在某些时刻,对自然等离子体线谱进行大范围的空间累积才能获取显著的等离子体线频谱结构. 加热机开启后,受加热泵波驱动,等离子体线回波幅度明显增强,具体表现为条纹状结构消失,

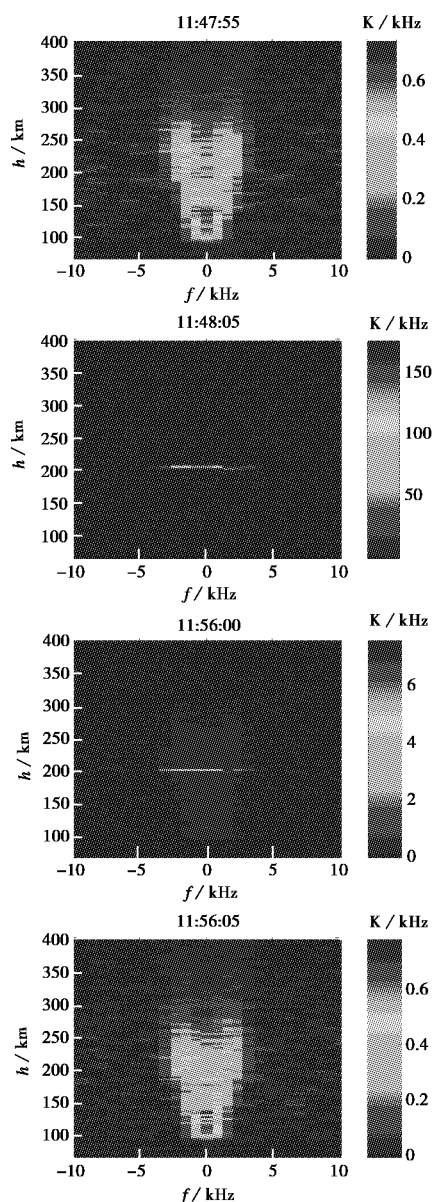


图 1 加热前后离子线谱伪彩色图

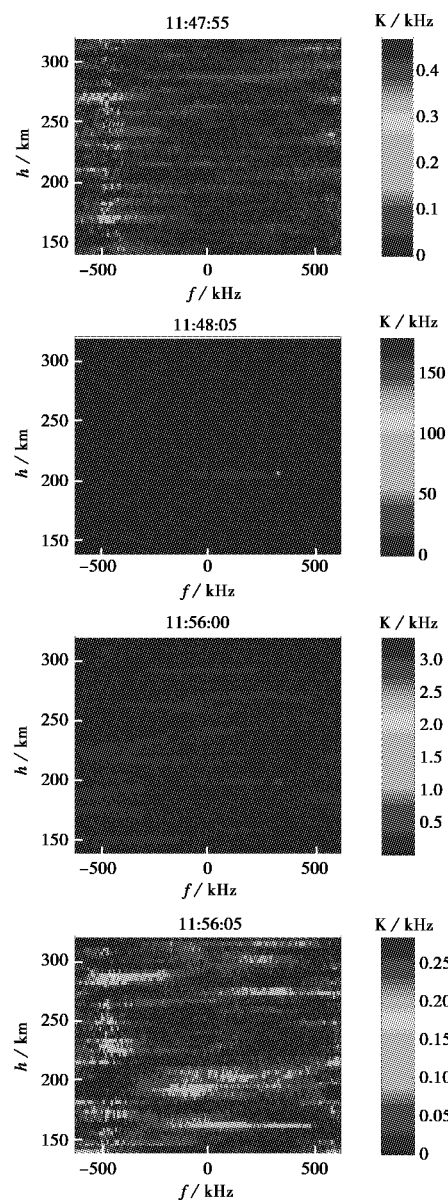


图 2 加热前后等离子体线伪彩色图

而在高度 210 km、频率 330 kHz 附近出现亮点状的增强结构. 通过图 1 和图 2 可以看出, 实验中离子线与等离子体线增强特征显著, 增强幅度可以达到 10^2 这个量级. 与以往的实验不同, 增强特征没有在加热开启后很快地消失, 而是在整个加热周期内持续出现. 过去的加热实验中, 由 VHF 雷达仅观测到了 200 ms 增长特征, 而本次实验观测到了 8 min 的增强现象. 这是因为实验中选取的加热频率 (5.423 MHz) 等于反射高度附近电子磁旋频率的倍频. 如图 3 所示, 点划线为电离层等离子体频率剖面, 实线为 4 倍电子磁旋频率, 从图中可以看出, 反射高度 (210 km) 附近的电子等离子体频率刚好与 4 倍电子磁旋频率相等. 根据前面的分析可以知道, 一般地, 利用高功率寻常波对电离层进行加热实验中, 加热泵波可在反射高度附近激励参量衰变不稳定性, 使得平行于地磁场方向的朗缪尔波增强, 进一步形成朗缪尔湍流, 朗缪尔湍流的形成可以引起非相干

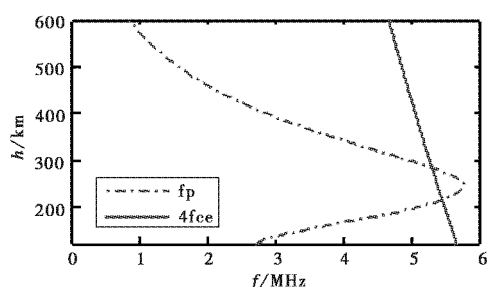
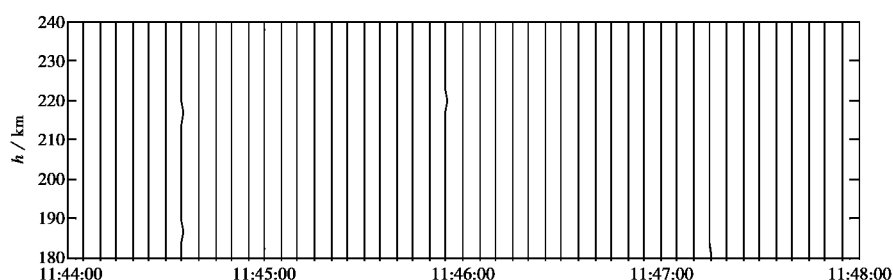
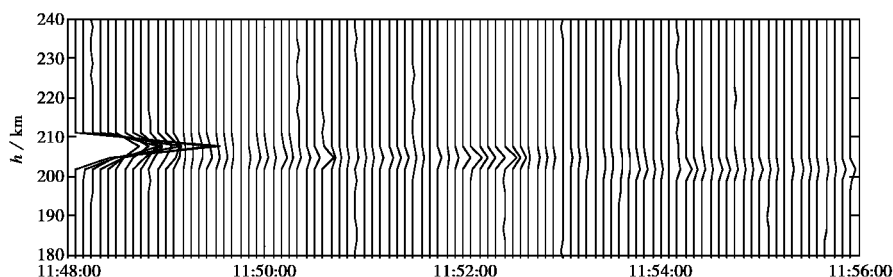


图3 等离子体频率剖面与 4 倍电子磁旋频率

散射雷达背向散射功率的增强, 即离子线与等离子体线的增强现象, 但这种现象通常是短暂的, 因为朗缪尔湍流发生时, 常常会伴随着场向不规则体的产生, 而场向不规则体会对加热泵波产生很强的散射作用, 使得不稳定性不能持续发生, 而当加热频率等于电子磁旋频率的倍频时, 可以有效地抑制不规则体的产生^[17], 进而使得不稳定性可以有效的持续发生, 即当加热频率为电子磁旋频率的倍频时, PDI 理论可以很好地解释离子线和等离子体线的增强现象. 图 4 给出了未加热和加热时刻功率谱剖面的对比图, 从图中可以看出未加热时刻, 整个探测高度范围内功率幅值均很低, 当加热开始 (11:48:00), 功率幅值增强, 且功率峰值在 208 km 高度处出现, 且随着加热时间的进行, 峰值的高度逐渐下降到 202 km 附近, 即反射高度下降了 2 个距离门. 由于离子线和等离子体线峰值高度的时间演化特征相似, 这里只给出离子线峰值高度的时间演化, 如图 5 所示, 从图中可以看到峰值高度随着加热实验的进行逐渐下降. 反射高度与电子密度相关: 引起电子密度的改变一般有两种主要因素, 一种是温度影响电子的复合率, 进而改变电子密度, 另一种是电子的扩散漂移改变电子密度. 通常认为在 200 km 以下的高度中, 温度影响电子的复合率是改变电子密度的主要因素, 即温度占优; 而在 200 km 以上, 扩散输运过程是引起电子密度改变的主要因素, 即扩散占优. 如果反射



(a) 未加热时等离子体线功率剖面



(b) 加热时等离子体线功率剖面

图4 加热前后等离子体线功率剖面对比图

高度在温度占优的区域,则加热会引起反射高度附近电子密度增强,而当反射高度处于扩散占优区域,反射高度的电子密度会减小^[1]. 本文认为,此次加热实验中反射高度下降是由于反射高度附近电子的扩散输运过程增强引起的. 图6为扩散引起反射高度下降的物理机制示意图,当大功率无线电波入射到电离层中时,加热电波会在等离子体频率与加热频率相等的高度处反射,而受加热电波的驱动,反射高度附近的电子会被加速,沿磁场方向向上和向下运动,即扩散输运效应被增强,使得在反射高度附近形成了电子密度谷,而在两侧形成了电子密度峰,进而致使电磁波在较低的高度上满足反射条件,即电磁波在更低的高度上发生反射,需要注意的是形成的电子密度谷峰结构是不稳定的,是实时变化的,但在整个加热时段内,加热电波都会促使反射高度附近电子输运过程的增强,进而形成动态的电子密度的谷峰结构,随着加热的不断进行,最终形成了反射高度随时间下降的演化特征. 由于反射高度随时间下降,波与电离层的作用区域也就随时间下降,表现为实验中增强的离子线和等离子体线的峰值高度随时间下降的加热效应. 当加热结束后,输运增强效应停止,电子密度的谷峰结构也会迅速消失. 早在1989年 bernhardt 等人的实验中便在电子密度谷处观测到了增强的谱线特征^[18]. 在下一节中,本文将由电子的连续性方程、动量方程和能量方程出发,忽略电

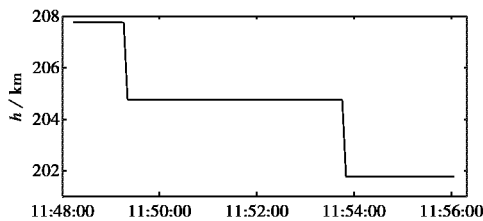


图5 离子线峰值高度的时间演化特征

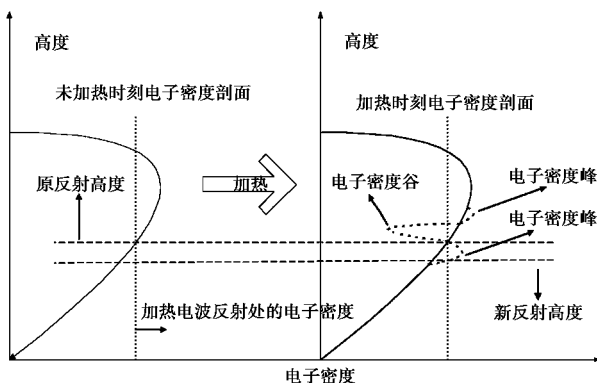


图6 反射高度下降的物理机制示意图

子温度对电子密度的影响,考虑扩散漂移的输运过程对反射高度下降特征进行仿真.

3 反射高度下降仿真

在电离层F区,主要离子成分是 O^+ , 由于 O^+ 不易与电子复合,而主要通过双原子分子 N_2 和 O_2 的电荷交换后生成分子离子 NO^+ 和 O_2^+ , 然后再与电子复合. 主要的化学反应为



以上两个反应的反应系数与电子温度无关,如果忽略加热过程中的 O^+ 、 N_2 和 O_2 密度的变化,则电子温度的变化对 NO^+ 和 O_2^+ 生成没有影响. 在F层中 O^+ 占绝对优势,而 O^+ 复合与温度无关,因此加热引起的电子密度的变化主要由输运过程来决定. 计算中,复合过程主要考虑 NO^+ 和 O_2^+ 的离解性复合,即



NO^+ 和 O_2^+ 的密度由经验模型给出,此时电子的连续性方程为

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = Q_0 - (k_1 n_{NO^+} + k_2 n_{O_2^+}) n_e - \frac{\partial (n_e v_e)}{\partial z}. \quad (5)$$

式中: k_1 、 k_2 为复合系数; Q_0 是无外场作用时,平衡态 ($\partial/\partial t = 0$) 的电子产生率. 主要考虑三种正离子 (O^+ 、 NO^+ 和 O_2^+) 和电子,忽略粘滞和惯性项,并在最后考虑中性风的影响,这四种带电粒子的运动方程为

$$n_\alpha m_\alpha \mathbf{g} + q_\alpha n_\alpha (\mathbf{E} + \mathbf{v}_\alpha \times \mathbf{B}) - \nabla P_\alpha - n_\alpha m_\alpha \nu_{\alpha n} \mathbf{v}_\alpha - n_\alpha m_\alpha \sum_{\beta \neq \alpha} \nu_{\alpha \beta} (\mathbf{v}_\alpha - \mathbf{v}_\beta) = 0. \quad (6)$$

式中: α 和 β 表示带电粒子种类; n_α 、 m_α 、 q_α 和 $\mathbf{v}_\alpha$ 分别为 α 类粒子的密度、质量、电量 and 速度; $\mathbf{g}$ 为重力加速度; $\mathbf{E}$ 为包括带电粒子的运动产生的极化场在内的自洽场; $\mathbf{B}$ 为地磁场; P_α 为压力项,一般的 $P_\alpha = n_\alpha k_b T_\alpha$, k_b 为玻尔兹曼常量; T_α 为带电粒子温度,假设三种离子温度相同,设其为 T_i ; $\nu_{\alpha n}$ 和 $\nu_{\alpha \beta}$ 分别为带电粒子与中性粒子和带电粒子之间的碰撞频率. 将以上运动方程相加,考虑到准中性条件和偶极扩散条件假设,则动量方程为

$$n_e v_e = - \frac{1}{m_e \nu_{en} + M_i \nu_{in}} \cdot \left[\frac{\partial}{\partial z} n_e k_b (T_e + T_i) + \sum_\alpha n_\alpha m_\alpha \mathbf{g} \right] + n_e \mathbf{v}_n. \quad (7)$$

式中, v_n 为中性风速度. 电子吸收电波能量后, 能量方程为:

$$\begin{aligned} & \frac{3}{2} k_b \left[n_e \frac{\partial T_e}{\partial t} + n_e v_e \frac{\partial T_e}{\partial z} \right] + k_b n_e T_e \frac{\partial v_e}{\partial z} \\ &= \frac{\partial}{\partial z} \left(K_e \frac{\partial T_e}{\partial z} \right) + S_{HF} + S_0 - L. \end{aligned} \quad (8)$$

方程左边第一项是由于 HF 外场加热引起的电子温度随时间的变化, 第二项是对流项, 第三项是压力流; 右边第一项是热传导项, 第二项为单位时间内吸收电波的能量密度, 第三项为电子在平衡态没有电波作用下, 吸收其他能量(主要是太阳能)的能量密度, 第四项为能量损失率. 沿磁场方向的热传导系数为

$$K_e = \frac{7.7 \times 10^5 T_e^{5/2}}{1 + 3.22 \times 10^4 (T_e^2/n_e) \sum_n n_n \bar{Q}_D} \quad (\text{eV} \cdot \text{cm} \cdot \text{s} \cdot \text{K}^{-1}) \quad (9)$$

式中: 分母中的求和项为中性粒子的作用, n_n 为中性粒子密度; $\bar{Q}_D$ 为相应中性粒子的平均动量传输截面^[19]:

$$\bar{Q}_{D, N_2} = (2.82 - 3.41 \times 10^{-4} T_e) T_e^{1/2} \times 10^{-17} \text{ cm}^2, \quad (10)$$

$$\bar{Q}_{D, O_2} = 2.2 \times 10^{-16} (1 + 3.6 \times 10^{-2} T_e^{1/2}) \text{ cm}^2, \quad (11)$$

$$\bar{Q}_{D, O} = 1 \times 10^{-15} \text{ cm}^2. \quad (12)$$

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. 常见的损失机制如下所示^[20-21]: 1) 电子与正离子的弹性碰撞; 2) 电子和中性粒子的弹性碰撞; 3) 分子 O_2 和 N_2 旋转能级的激发; 4) 分子 O_2 和 N_2 振动能级的激发; 5) 原子氧 O 电子能级和精细结构的激发. 电子能量的损失是上述各个损失机制的总和. 一般地, 在加热实验中, 电波能量的吸收以反射点为中心成近高斯分布, 因此单位体积单位时间内吸收的电波能量可以写为:

$$\begin{aligned} S_{HF}(z) &= A S_{\max} \exp(-(z - z_m)^2 / \sigma_{z1}^2), z < z_m; \\ S_{HF}(z) &= A S_{\max} \exp(-(z - z_m)^2 / \sigma_{z2}^2), z > z_m. \end{aligned} \quad (13)$$

式中: z_m 为反射点高度; A 为比例常数. 反射点处欧姆吸收为^[22]

$$S_{\max} = \frac{\nu_e \epsilon_0}{2} \left(\frac{f_N^2}{f_0^2} \right) E(z_m)^2. \quad (14)$$

式中: ϵ_0 为自由空间的介电常数; f_N 为等离子体频率; $E(z) = \sqrt{30 \text{ ERP}}/z$ 为经验的电波场强^[23]; $\nu_e = \nu_{en} + \nu_{ei}$ 是电子的碰撞频率

$$\nu_{en} = 9.32 \times 10^{-12} [N_2] (1 - 3.44 \times 10^{-5} T_e) +$$

$$1.21 \times 10^{-10} [O_2] (1 + 2.15 \times 10^{-12} T_e^{0.5}) T_e + 5.49 \times 10^{-10} [O] T_e^{0.5}, \quad (15)$$

$$\nu_{ei} = 54 n_e / T_e^{3/2}. \quad (16)$$

初始条件: 电离层加热仿真的背景电离层参数由 IRI 模型给出^[24], 中性大气参数由 MSIS 模型给出^[25]. 由于 IRI 模型对极区电离层状态的描述并不准确, 文中利用 EISCAT 官方给出的电离层等离子体频率剖面对仿真初值进行了修正. 边界条件使用 Hansen 边界条件^[26], 即上下边界的温度和密度梯度保持不变. 初始反射高度为 208 km, 空间分辨率为 1 km, 时间分辨率为 5 ms, 泵波频率为 5.423 MHz, 有效辐射功率为 3.3 MW. 如前文提到的, 可以引起反射高度下降特征主要有两种物理机制: 一种是温度影响电子的复合率, 改变电子密度, 进而影响反射高度; 另一种是电子的扩散漂移对电子密度的影响, 进而改变反射高度. 一般在 200 km 以下的高度中, 温度影响电子的复合率是改变电子密度的主要因素, 即温度影响占优; 而在 200 km 以上的高度, 输运过程引起电子密度的改变是主要因素, 即输运过程占优. 如果反射高度在温度占优的区域, 则加热会引起反射高度附近电子密度增强, 而当反射高度处于扩散占优区域, 反射高度的电子密度会减小. 本文认为此次实验中反射高度发生在输运过程占优的区域, 仿真中忽略了温度对电子复合率的影响, 主要考虑热输运过程对电子密度的影响, 即对加热引起反射高度附近输运过程增强导致反射高度下降的特征进行仿真验证. 图 7 给出了加热前后电子密度剖面的对比图, 从图中可以看出加热前后整个电子密度剖面形态变化不大, 仅在反射高度附近扰动比较明显. 图 8 为反射高度附近的电子密度和电子密度增量剖面图. 从反演结果中可以看出在反射高度附近有电子密度谷形成, 而在反射高度两侧形成电子密度峰, 仿真结果与理论假设结果相吻合. 图 9 给出了实验中观测到的反射高度阶跃性下降的实测图以及仿真得到的仿真结果. 其中图 9(a) 为实验观测结果, 图 9(b) 为利用修正的 IRI 模型和 MSIS 模型的仿真结果. 从图 9(a) 可以看出, 在单个加热周期内反射高度呈阶跃性下降特征, 其中阶跃性是由于雷达分辨率造成的, 实验中用于观测的 VHF 雷达的空间分辨率为 3 km, 当加热实验开启后, 由于加热电波促使反射高度附近电子的扩散输运过程增强, 反射高度附近形成电子密度谷, 反射高度两侧形成电子密度峰, 加热电波在原反射高度下形成的电

子密度峰结构处便满足反射匹配条件发生反射,此过程在整个加热时段内不断进行,反射高度逐渐下降,当反射高度下降达到 3 km 时便会被 VHF 雷达探测到,进而最终表现为反射高度呈阶跃性下降的

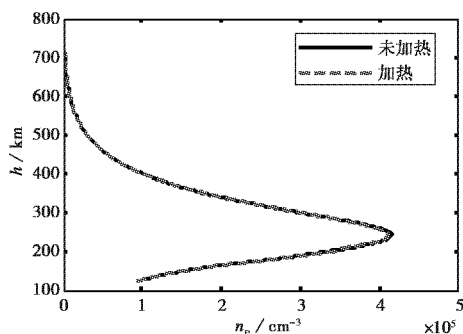
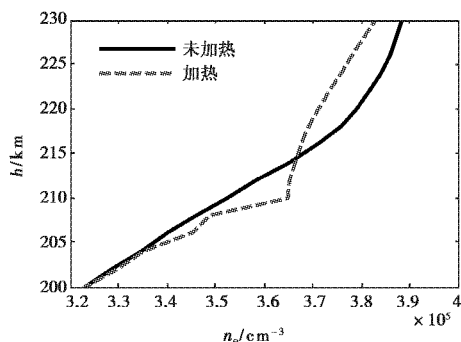
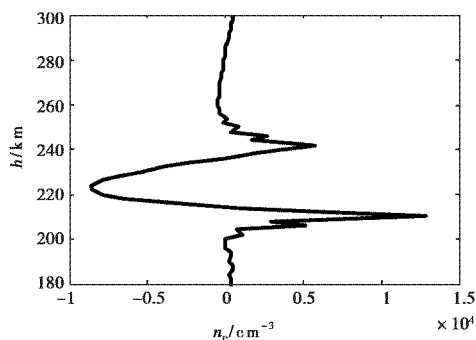


图7 加热前后电子密度剖面



(a) 电子密度剖面对比图

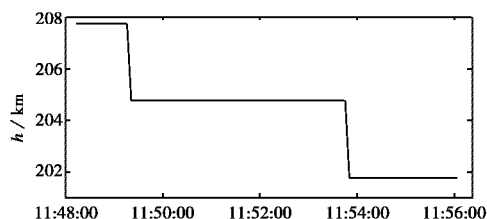


(b) 电子密度增量剖面

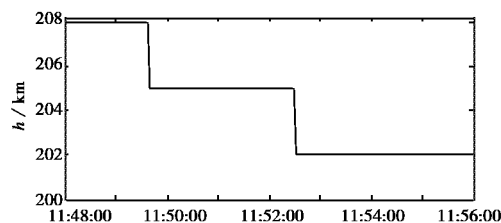
图8 反射高度附近电子密度剖面对比和密度增量剖面

特征. 仿真中使用的空间分辨率为 1 km, 但为与实验结果相比拟, 给出了分辨率为 3 km 的仿真结果. 从图 9(b) 可以看出实验中反射高度下降了两个距离门, 即反射高度下降了 6 km. 在 3 km 分辨率下, 仿真结果中反射高度也下降了 6 km, 仿真结果与实

验结果相吻合, 表明加热引起的输运过程增强是引起实验中观测到的反射高度下降特征的主要原因. 另一方面, 实测结果和仿真结果在下降的时刻有所差异, 即反射高度下降的速度有所不同, 这是由于实际的电离层条件非常复杂, 电离层在自然条件下, 受太阳辐射的影响也会产生很强的电子密度扰动特征, 这都会造成实验结果与仿真结果的差异.



(a) 实测结果



(b) 仿真结果

图9 反射高度阶跃性下降仿真与实验对比

4 结 论

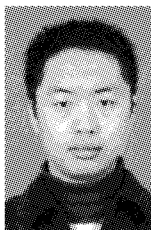
2010 年秋季, 在挪威开展的极区电离层离子线与等离子体线增强特征激发实验中首次得到了 VHF 雷达观测的长生命周期的增强特征. 在时空演化上, 增强特征所处高度随着加热的进行逐渐下降, 本文认为该特征是由于加热电波促使反射高度附近电子输运过程增强引起的. 即反射高度附近的电子受加热电波的驱动, 沿磁场方向向上和向下运动, 在反射高度附近形成了电子密度谷, 而在反射高度两侧形成电子密度峰, 使得加热电波在较低的高度上满足反射条件发生反射, 该过程不断发生, 进而形成了反射高度逐渐下降的特征. 另本文利用 EISCAT 实测数据修正的 IRI 和 MSISE 模型参数, 由电子的连续性方程、动量方程和能量方程出发, 忽略电子温度对电子复合率的影响, 仅考虑输运过程对实验中反射高度的时间演化特征进行了仿真, 仿真结果与理论假设以及实验结果吻合得很好, 验证了输运过程的增强是引起本次实验中反射高度下降的可能物理机制.

参考文献

- [1] KELLEY M C, ARCE T L, SALOWEY J, et al. Density Depletions at the 10-m scale induced by the arecibo heater[J]. *Journal of geophysical research*, 1995, 100(A9): 17367-17376.
- [2] LEYSER T B, GUSTAVSSON B, BRÄNDSTRÖM B U E, et al. Simultaneous measurements of high-frequency pump-enhanced airglow and ionospheric temperatures at auroral latitudes[J]. *Advance in Polar upper atmosphere research*, 2000, 14:1-11.
- [3] XU B, WU J, WU Z S, et al. The temperature enhancement induced by ionosphere heating in low region[J]. *Progress in natural science*, 2008, 18(11): 1339-1343.
- [4] 程木松, 徐彬, 吴振森, 等. 电离层加热实验中超强电子密度增强特征[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(11): 3633-3641.
- CHENG M S, XU B, WU Z S, et al. A large increase of electron density in ionospheric heating experiment [J]. *Chinese journal of geophysics*, 2014, 57(11): 3633-3641. (in Chinese)
- [5] KOSCH M J, PEDERSEN T R, RIETVELD M T, et al. Artificial optical emissions in the high-latitude thermosphere induced by powerful radio waves: An observational review[J]. *Advances in space research*, 2007, 40(3): 365-376. DOI: 10.1016/j.asr.2007.02.061.
- [6] BRÄNDSTRÖM B U E, LEYSER T B, STEEN A, et al. Unambiguous evidence of HF pump-enhanced airglow at auroral latitudes[J]. *Geophysical research letters*, 1999, 26:3561-3564.
- [7] DENTON M H, KOSCH M J, BOROVSKY J E, et al. First optical observations of energetic electron precipitation at 4278Å caused by a powerful VLF transmitter[J]. *Geophysical research letters*, 2014, 41: 2237-2242.
- [8] 李清亮, 杨巨涛, 闫玉波, 等. 中低纬调制高频加热电离层 ELF/VLF 辐射模拟[J]. *电波科学学报*, 2008, 23(5):883-887.
- LI Q L, YANG J T, YAN Y B, et al. ELF/VLF waves radiated by modulated HF heating ionospheric in mid-latitude and equatorial regions[J]. *Chinese journal of radio science*, 2008, 23(5): 883-887. (in Chinese)
- [9] 汪枫, 赵正予, 张援农. 低纬地区电离层电流的人工调制数值模拟[J]. *地球物理学报*, 2009, 52(4): 887-894.
- WANG F, ZHAO Z Y, ZHANG Y N. Numerical modeling of ionospheric current artificial modulation at low latitude[J]. *Chinese journal of geophysics*, 2009, 52(4): 887-894. (in Chinese)
- [10] 常珊珊, 赵正予, 倪彬彬. 电离层人工调制激发的 VLF 波在磁层的传播特性及应用研究[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(12): 3960-3968.
- CHANG S S, ZHAO Z Y, NI B B. Propagation and application of VLF waves generated by HF heating of ionosphere in the magnetosphere[J]. *Chinese journal of geophysics*, 2013, 56(12): 3960-3968. (in Chinese)
- [11] RIETVELD M T, ISHAM B, KOHL H, et al. Measurements of HF-enhanced plasma and ion lines at EISCAT with high altitude resolution[J]. *Journal of geophysical research*, 2000, 105:7429-7439.
- [12] DJUTH F T, ISHAM B, RIETVELD M T, et al. First 100 ms of HF modification at Tromsø, Norway [J]. *Journal of geophysical research*, 2004, 109: A11307.
- [13] ASHRAFI M, KOSCH M J, HONARYF. Heater-induced altitude descent of the EISCAT UHF ion line enhancements: observations and modeling[J]. *Advances in space research*, 2006, 38(11):2645-2652.
- [14] SENIOR A, RIETVELD M T, HÄGSTRÖM I, et al. Radio-induced incoherent scatter ion line enhancements with wide altitude extents in the high-latitude ionosphere[J]. *Geophysical research letters*, 2013, 40:1-6.
- [15] RIETVELD M T, KOHL H, KOPKA H, et al. Introduction to ionospheric heating at Tromsø— I . experimental overview[J]. *Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics*, 1993, 55(4/5): 577-599.
- [16] EVANS J V. Theory and practice of ionosphere study by Thomson scatter radar[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1969, 57:496-530.
- [17] KOSCH M J, RIETVELD M T, KAVANAGH A J, et al. High-latitude pump-induced optical emissions for frequencies close to the third electron gyro-harmonic[J]. *Geophysical research letters*, 2002, 29(23): 2112.
- [18] BERNHARDT P A, TEPLY C A, DUNCAN L M. Airglow enhancements associated with plasma cavities formed during ionospheric heating experiments[J]. *Journal of geophysical research*, 1989, 94(A7): 9071-9092.
- [19] BANKS P, KOCKARTS G. *Aeronomy, part A and part B*[M]. New York: Academic Press, 1973.

- [20] STUBBE P, VARNUM W S. Electron energy transfer rates in the ionosphere[J]. Planetary and space science, 1972, 20:1121-1126.
- [21] STUBBE P. A new collisional relaxation model for small deviations from equilibrium[J]. Journal of plasma physics, 1987, 38(1): 95-116.
- [22] BERNHARDT P A, DUNCAN L M. The feedback-diffraction theory of ionospheric heating[J]. Journal of atmospheric and solar-terrestrial Physics, 1982, 44(12): 1061-1074.
- [23] BELENOV A F, ERUKHIMOV L M, PONOMARENKO P V. Interaction between artificial ionospheric turbulence and geomagnetic pulsations[J]. Journal of Atmospheric and solar-terrestrial physics, 1997, 59: 2367-2372.
- [24] BILITZA D. International reference ionosphere-status 1995/96[J]. Advances in space research, 1997, 20: 1751-1754.
- [25] HEDIN A E. Extension of the MSIS thermospheric model into the middle and lower atmosphere[J]. Journal of geophysical research, 1991, 96 (A2): 1159-1172.
- [26] HANSEN J D, MORALES G J, MAGGS J E. Large-scale HF-induced ionospheric modifications—theory and modeling[J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97(A11):17019-17032.

作者简介



程木松 (1986—),男,黑龙江人,2012年毕业于西安电子科技大学理学院,现在西安电子科技大学物理与光电工程学院攻读博士学位,主要从事电离层加热异常扰动谱的研究。



徐彬 (1982—),男,辽宁人,高级工程师,博士,主要从事非相干散射理论与实验研究。



吴振森 (1946—),男,湖北人,西安电子科技大学教授,博士生导师,主要从事随机介质波传播、电磁散射等方面的研究.发表论文三百余篇,其中 SCI 论文两百余篇。