

徐 彬,王占阁,许正文等.极区冬季电离层加热实验研究(三)——低电离层分析.地球物理学报,2010,53(6):1263~1268, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.06.003

Xu B, Wang Z G, Xu Z W, et al. Observations of the heating experiments in the polar winter ionosphere III —— Analysis of low region. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(6):1263~1268, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.06.003

极区冬季电离层加热实验研究(三) ——低电离层分析

徐 彬^{1,2},王占阁¹,许正文¹,吴振森²,吴 健¹,
吴 军¹,薛 昆¹,车海琴¹,闫玉波¹

1 中国电波传播研究所电波环境特性及模化技术国家重点实验室,北京 102206

2 西安电子科技大学理学院,西安 710071

摘 要 使用低电离层加热条件下,非麦克斯韦碰撞等离子体非相干散射的理论模型,我们对我国 2008 年 1 月进行的极区冬季电离层加热实验进行了分析.分析结果表明,本次实验在低电离层区域得到了显著的电子温度增强现象,最大增幅百分比达到了 168.9%.基于上述理论模型,我们进一步反演了非麦克斯韦指数,并由其计算出了加热电场强度,这对电离层加热的精确数值仿真有着重要的意义.

关键词 电离层加热,非相干散射雷达,电子温度,非麦克斯韦分布

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.06.003

中图分类号 P352

收稿日期 2010-01-19,2010-05-11 收修定稿

Observations of the heating experiments in the polar winter ionosphere III —Analysis of low region

XU Bin^{1,2}, WANG Zhan-Ge¹, XU Zheng-Wen¹, WU Zhen-Sen²,
WU Jian¹, WU Jun¹, XUE Kun¹, CHE Hai-Qin¹, YAN Yu-Bo¹

1 National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, China Research Institute of
Radiowave Propagation, Beijing 102206, China

2 School of Science, Xidian University, Xi'an 710071, China

Abstract Under the condition of ionosphere heating in low region, the theoretical incoherent scatter model with the non-Maxwellian distribution in collision plasma is presented, and the measured data in polar winter ionospheric modification experiments carried out in January 2008 at Tromsø are analyzed. The obvious electron temperature enhancement can be seen in this experiment, and the maximum percentage is up to 168.9%. The non-maxwellian index is also given, and the heating electric field is deduced from the index, which has important meaning for numerical simulation of the artificial ionospheric modification.

Keywords Ionospheric heating, Incoherent scatter radar, Electron temperature, Non-Maxwellian distribution

基金项目 国家自然科学基金重点项目(40831062),国家科技支撑计划(2006BAB18B06),空间天气学国家重点实验室(08262DAA4S)和电波环境特性及模化技术国家重点实验室基金资助.

作者简介 徐 彬,男,1982 年生,西安电子科技大学无线电物理专业博士,主要从事非相干散射雷达和电离层加热的研究.

E-mail:jasur1982@sina.com.cn

1 引言

近几十年来,主动电离层研究正在蓬勃发展. 1978年, Gurevich 基于流体力学提出了电离层加热的基本理论^[1]. Bernhardt 等使用连续性方程、动量方程和能量方程考察了 F 区加热的自聚焦效应^[2]. 文献^[3~7]对高低电离层加热引起的电子密度、电子温度、碰撞频率、能量吸收和损失率、热传导和扩散系数、以及复合率等电离层参量的扰动特征进行了讨论,并分析了加热参数和背景参数对加热效应的影响. 为了验证大功率无线电波产生的加热特征,我们必须采用有效的诊断手段进行观测,非相干散射雷达无疑是一种最为理想的地面探测工具^[8]. Mantas 等观测到了 Arecibo 夜间电离层加热实验 40% (大约 350 K) 的温度增强^[9],这与理论仿真模型的预测取得了一致. 高纬地区,由于白天的电离层状态比较稳定,更多的加热实验在白天进行^[10~14],峰值电子温度的增长达到了 55%. 我国 2008 年 1 月进行的冬季电离层加热实验取得了更显著的效果,电子温度增强达到了 121%^[15]. 然而,这些显著的电离层加热特征都是从高电离层观测到的,在低电离层区域,观测电离层加热效应较为困难,这主要是由非相干散射理论模型本身的缺陷引起的. 现有的非相干散射雷达数据分析都是基于平衡态无碰撞等离子体来进行的,低电离层加热,会给非相干散射理论模型引入两个新的特性:一是大功率高频电场作用下,导致的粒子系统对平衡态的偏离,一是中性粒子高密度引起的强烈的碰撞效应. Gurevich^[1], Stubbe^[16] 和 Gustavsson^[17] 等人使用不同的解析和数值方法讨论了低电离层交变电场作用下的电子的非麦克斯韦分布函数. Zheng^[18] 和 Saito^[19] 等人计算了具有超高斯分布和 Kappa 分布的非相干散射的离子线和等离子体谱,并讨论了非麦克斯韦因子对谱特征及等离子体谐振频率和阻尼率的影响. 然而,由于碰撞等离子体非相干散射谱的求解存在很大的难度,以上所有理论和实验上的研究,即便针对 D 层和低 E 层这些碰撞效应十分显著的区域,谱计算中也采用了碰撞频率等于零的近似.

本文使用低电离层加热条件下,非麦克斯韦碰撞等离子体的非相干散射理论模型,对我国 2008 年 1 月进行的极区冬季电离层加热实验进行了分析,对比了该模型和平衡态模型的反演结果,给出了非麦克斯韦指数,并由非麦克斯韦指数对加热电场强

度进行了推算.

2 理论模型

在低电离层条件下,碰撞效应显著,功率谱的计算中必须考虑碰撞的影响. Sheffield 给出了碰撞等离子体的非相干散射功率谱^[20]:

$$S(k, \omega) = 2 \left| \frac{1 + C_i}{\epsilon} \right|^2 B_e + 2Z \left| \frac{C_e}{\epsilon} \right|^2 B_i, \quad (1)$$

其中 $k = 2k_i \sin(\theta/2)$ 为波数, θ 为散射角,对后向散射 $k = 2k_i$, ω 为多普勒频率, Z 为离子电荷数. $\epsilon = 1 + C_i + C_e$ 为径向的介电函数, C_i 和 C_e 分别为离子和电子的极化率. B_i 和 B_e 为考虑碰撞条件下,单个离子和电子引起的密度扰动的功率谱. 后向散射条件下, C_i, B_i, C_e 和 B_e 分别定义为

$$C_i = \frac{1}{1 + D_i} \int_{-\infty}^{+\infty} dv \frac{4\pi Ze^2 n_{oi}}{m_i k^2} \frac{k \partial f_{oi} / \partial v}{\omega - kv - iv_i}, \quad (2)$$

$$B_i = \frac{v_i}{|1 + D_i|^2} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} dv \frac{f_{oi}}{(\omega - kv)^2 + v_i^2} - \frac{|D_i|^2}{v_i^2} \right], \quad (3)$$

$$C_e = \frac{1}{1 + D_e} \int_{-\infty}^{+\infty} dv \frac{4\pi e^2 n_{oe}}{m_e k^2} \frac{k \partial f_{oe} / \partial v}{\omega - kv - iv_e}, \quad (4)$$

$$B_e = \frac{v_e}{|1 + D_e|^2} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} dv \frac{f_{oe}}{(\omega - kv)^2 + v_e^2} - \frac{|D_e|^2}{v_e^2} \right], \quad (5)$$

其中 m_i 和 m_e 分别为离子和电子质量, e 为电子电量, n_{oi} 和 n_{oe} 分别为离子和电子密度, f_{oi} 和 f_{oe} 分别为视线方向上离子和电子的速度分布函数, v 为视线方向粒子速度, v_i 和 v_e 分别为离子和电子的有效碰撞频率. D_i 和 D_e 分别为

$$D_i = iv_i \int_{-\infty}^{+\infty} dv \frac{f_{oi}}{\omega - kv - iv_i}, \quad (6)$$

$$D_e = iv_e \int_{-\infty}^{+\infty} dv \frac{f_{oe}}{\omega - kv - iv_e}. \quad (7)$$

对(2)~(7)式做归一化处理,可得^[21]

$$D_i = \frac{iv_i}{kb} \left[i\pi g_{oi}(\tilde{z}_{oi}) + P \int_{-\infty - i\tilde{v}_i}^{+\infty - i\tilde{v}_i} \frac{d p_i g_{oi}}{\tilde{z}_{oi} - p_i} \right], \quad (8)$$

$$C_i = \frac{a^2 Z}{1 + D_i} \frac{T_e}{2T_i} \left[i\pi \partial g_{oi}(\tilde{z}_{oi}) / \partial p_i + P \int_{-\infty - i\tilde{v}_i}^{+\infty - i\tilde{v}_i} d p_i \frac{\partial g_{oi} / \partial p_i}{\tilde{z}_{oi} - p_i} \right], \quad (9)$$

$$B_i = \frac{1}{kb |1 + D_i|^2} \text{Im} \left[i\pi g_{oi}(\tilde{z}_{oi}) + P \int_{-\infty - i\tilde{v}_i}^{+\infty - i\tilde{v}_i} d p_i \frac{g_{oi}}{\tilde{z}_{oi} - p_i} \right] - \frac{|D_i|^2}{v_i |1 + D_i|^2}, \quad (10)$$

$$D_e = \frac{i v_e}{ka} \left[i \pi g_{0e}(\tilde{z}_{0e}) + P \int_{-\infty - i \tilde{v}_e}^{+\infty - i \tilde{v}_e} \frac{d p_e g_{0e}}{\tilde{z}_{0e} - p_e} \right], \quad (11)$$

$$C_e = \frac{1}{2} \frac{\alpha^2}{1 + D_e} \left[i \pi \partial g_{0i}(\tilde{z}_{0e}) / \partial p_i + P \int_{-\infty - i \tilde{v}_e}^{+\infty - i \tilde{v}_e} d p_e \frac{\partial g_{0e} / \partial p_e}{\tilde{z}_{0e} - p_e} \right], \quad (12)$$

$$B_e = \frac{1}{ka |1 + D_e|^2} \text{Im} \left[i \pi g_{0e}(\tilde{z}_{0e}) + P \int_{-\infty - i \tilde{v}_e}^{+\infty - i \tilde{v}_e} d p_e \frac{g_{0e}}{\tilde{z}_{0e} - p_e} \right] - \frac{|D_e|^2}{v_e |1 + D_e|^2}, \quad (13)$$

其中 $P \int$ 为柯西积分主值, b 和 a 分别为离子和电子的热速度, T_i 和 T_e 分别为离子和电子温度, g_{0i} 和 g_{0e} 分别为视线方向上归一化的离子和电子的速度分布函数, $\alpha \equiv 1/(k\lambda_D)$, λ_D 为德拜长度. $p_e, p_i, \tilde{v}_e, \tilde{v}_i, \tilde{z}_{0e}$ 和 \tilde{z}_{0i} 分别为电子和离子的归一化速度、归一化碰撞频率和归一化奇点.

人工大功率无线电波的注入可以导致电离层等离子体电子分布函数偏离麦氏分布, Gurevich 给出了在低电离层条件下电子的分布函数^[1]:

$$f_{0e} = C \exp \left\{ - \int_0^v m_e v dv \left[k_B T_e + \frac{e^2 E_0^2}{3 m_e (4 \pi^2 f^2 + \nu_e^2)} (\delta_{el} + R_r / \nu_e) \right] \right\}, \quad (14)$$

其中 f 为泵波频率, E_0 为加热电场强度, R_r 为转动能级激发对应的碰撞频率, δ_{el} 为电子同中性粒子一次碰撞中所损失能量的平均部分数. 从方程(14)中可以看到: 加热引起的非麦克斯韦特性由方程第2项的分母决定, $E_0 = 0$ 条件下, 分布函数退化为麦克斯韦分布.

图1给出了电子分布函数随加热电场的变化. 由于电子的质量很小, 高频外场作用下, 电子很容易被加速, 加速电子的速度方向受弹性和非弹性碰撞的影响, 偏离电场方向, 结果是在这一系列的作用下, 具有更高速度的电子数目增加. 如图1所示, 随电场增大, 分布函数的尾向扩展增强. 图2给出了非相干散射谱随加热电场的变化. 在低电离层区域由于很低的粒子温度和电子密度、很小的电子和离子温度差、以及显著的碰撞效应, 这些因素使得功率谱呈现单峰谱, 而不是我们通常见到的双峰. 从图中可以看到, 随电场的增大, 功率谱的幅度下降, 宽度变窄. 单峰谱分析中, 不存在峰谷比, 随温度比的增加功率谱同样表现为幅度减小、谱宽变窄. 由于 HF 的

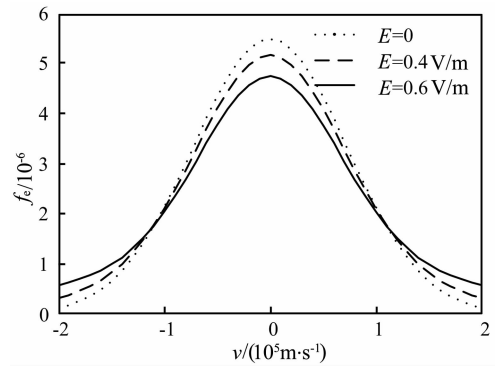


图1 加热电场对电子分布函数的影响

Fig. 1 Effects of the heating electric field on the distribution function

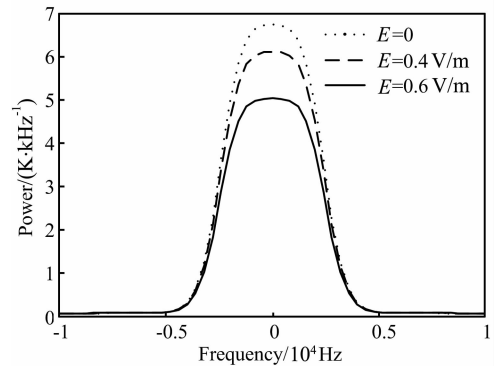


图2 加热电场对非相干散射谱的影响

Fig. 2 Effects of the heating electric field on the incoherent scatter spectra

加热效应与温度比对谱的影响相似, 且由于离子质量很大, HF加热中离子温度几乎不发生任何改变, 因此非麦克斯韦分布会对电子温度的反演产生很大影响.

在实际的非相干散射数据分析中, 由于方程(14)的求解需要计算积分, 归一化系数同样需要数值方法得到. 为提高计算效率, 不损失精度的条件下, 可以使用经验的分布函数对其进行拟合. 此时, 超高斯分布函数是一个很好的近似^[18]:

$$f_{0e}(v) = C \exp[-(v/v_{Te})^m], \quad (15)$$

其中 m 为非麦克斯韦指数, $m=2$ 对应于麦克斯韦分布函数. $C = m/[4\pi v_{Te}^3 \Gamma(3/m)]$ 为归一化系数. 归一化速度这里不再是热速度, 其具体形式为

$$v_{Te} = a \sqrt{3\Gamma(3/m)/\Gamma(5/m)}, \quad (16)$$

这里 $\Gamma(x)$ 是伽马函数. 在下面的实测数据分析中, 我们联立(1), (8)~(13)和(16)式, 组成超高斯非相干散射理论模型, 反演电离层参量和非麦克斯韦指数 m , 再通过(14)~(15)式, 进一步得到加热电场强度.

3 实验结果分析与讨论

基于超高斯非相干散射功率谱的理论模型,我们使用 LM 算法对 2008 年 1 月 11 日 10:08, 10:16, 10:24, 10:32, 10:40, 10:48, 10:56 7 个加热时刻 100 km 处的电离层加热数据进行了反演. 文献[15]给出了此次电离层加热的实验描述, 加热机 4 min 开, 4 min 关, 其中 10:08, 10:24, 10:40, 10:56 时刻 4 个加热事件为 X 波加热, 10:16, 10:32, 10:48 时刻 3 个加热事件为 O 波加热. 基于平衡态等离子体的麦克斯韦速度分布模型, 欧洲非相干散射雷达协会给出了官方的非相干散射数据分析程序 GUISDAP (Grand Unified Incoherent Scatter Design and Analysis Package). 107 km 以上, GUISDAP 可以得到的 4 个独立电离层参量为电子密度、电子温度、离子温度和离子漂移速度. 107 km 以下, 4 个独立电离层参量为电子密度、碰撞频率、离子温度和离子漂移速度, 这里电子温度和离子温度不再独立, 电子和离子温度的比值约为 1.1, 因此使用 GUISDAP 分析程序我们无法得到低电离层加热的温度增强效应. 我们使用上面给出的超高斯非相干散射理论模型, 将电子温度作为独立反演变量, 同时引入非麦克斯韦指数, 对电离层加热数据进行了分析. 因为离子质量较大, 离子温度受加热扰动较小, 因此反演中我们假设离子温度不受加热影响, 直接由加热前后的离子温度均值给出. 相似地, 加热前后电子温度、电子密度和碰撞频率均值用作反演的初始值, 因此反演中独立变量数目仍为 4 个, 即电子温度、电子密度、碰撞频率和非麦克斯韦指数, 不会额外增加反演的不稳定性.

图 3 给出了 10:04~11:00 期间, 实测非相干散射功率谱密度的峰值. 从图中可以看到, 7 个加热时刻的功率谱密度峰值要低于两侧未加热时刻的结果. 由于大功率无线电波的注入, 电子温度增加, 非麦克斯韦特征增强, 因此功率谱幅度下降, 实验观测结果与我们的理论预测保持一致. 此外, 10:08, 10:24, 10:40, 10:56 时刻 4 个 X 波加热事件, 峰值功率要明显低于 10:32, 10:48 时刻 2 个 O 波加热事件, 这同样与文献[4, 5]给出的低电离层加热的数值仿真结果保持一致.

图 4 给出了 7 个加热事件的实测功率谱密度, 以及 GUISDAP 和超高斯模型的拟合结果的对比. 由于 GUISDAP 分析程序存在平衡态和电子温度与

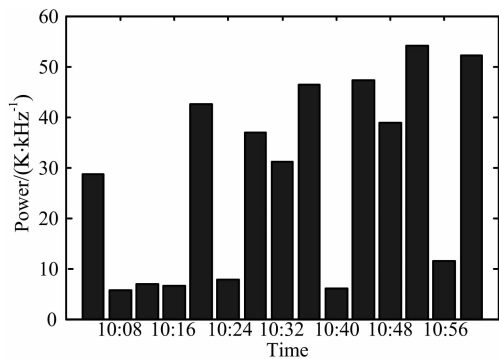


图 3 功率谱密度峰值

Fig. 3 The peak of power spectra density

离子温度比值为常数两个假设, 理论模型的缺陷使得拟合结果存在误差. 从图中可以看到, 7 个加热时刻 GUISDAP 拟合结果均存在误差, 特别是加热效应比较显著时(如 X 波加热), GUISDAP 拟合效果也更差, 而相应的独立电子温度和非麦克斯韦指数的引入, 使得超高斯模型取得了更好的拟合效果.

由于理论模型的缺陷, GUISDAP 的分析无法获得显著的低电离层的加热效应. 电子温度和离子温度的比值为定值假设, 使得反演过程中, 把加热引起的电子温度增强特征平均到电子温度和离子温度上, 导致我们仅能观察到小幅的电子温度的增强效应. 图 5 给出了 GUISDAP 和超高斯模型分析得到的 7 个加热时刻的电子温度, 以及反演所使用的初始值(加热前后时刻电子温度均值). 从图中可以看到, GUISDAP 分析程序得到的电子温度可以观察到小幅的增强特征, 增幅最大百分比仅为 23.3%, 平均电子温度增量为 19.1 K. 而超高斯模型得到的电子温度, 特别是 X 波加热事件, 则可以观察到十分显著的电子温度增强, 增幅最大百分比达到了 168.9%, 平均电子温度增量也达到了 162.2 K.

图 6 给出了超高斯模型引入的另外一个独立的反演参量——非麦克斯韦指数. 从图中可以看到, 与电子温度所呈现的非相干散射谱峰值功率显著下降, 电子温度即显著增长不同, 非麦克斯韦指数与峰值功率没有明显的对应关系. 非麦克斯韦指数随时间的变化较为平缓, 均值为 3.52, 标准差为 0.47, 且非麦克斯韦指数不受加热电场极化方向的影响. 联立(14)~(15)式, 我们就可以由非麦克斯韦指数推算出加热电场强度. 图 7 给出了加热电场强度在不同加热时刻的结果. 与非麦克斯韦指数类似, 加热电场强度变化平缓, 幅度在 0.42~0.52 V/m 之间, 均值为 0.47. 同样, 电场与峰值功率和极化状态没有明显的对应关系.

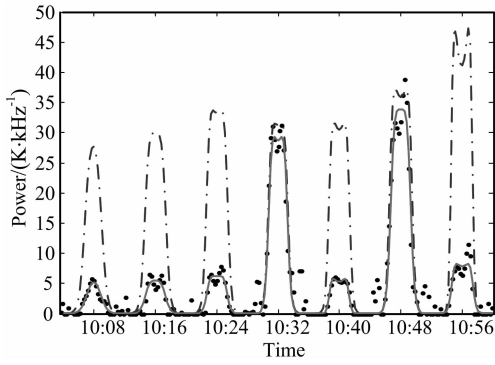


图 4 7 个加热事件实测功率谱密度及其拟合结果
点:实测谱;点划线:GUSIDAP 拟合结果;
实线:超高斯模型拟合结果

Fig. 4 The measured and fit power spectra density of the seven heating cases

Dot: measured data; dashed line: fit results of GUSIDAP;
solid line: fit results of the super-Gaussian model

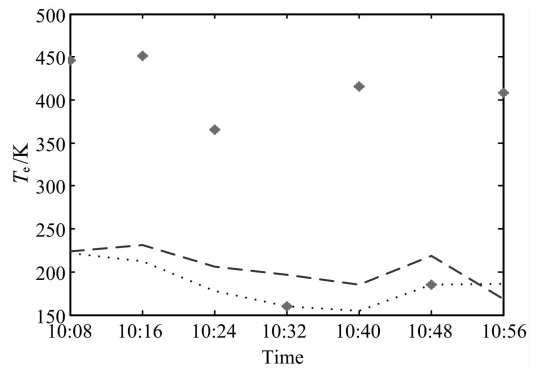


图 5 7 个加热事件的电子温度
短虚线:初始值;长虚线:GUSIDAP 反演值;
点:超高斯模型反演值

Fig. 5 The electron temperature of the seven heating cases

Dotted line: initial value; dashed line: inversion value of GUSIDAP;
dot: inversion value of the super-Gaussian model

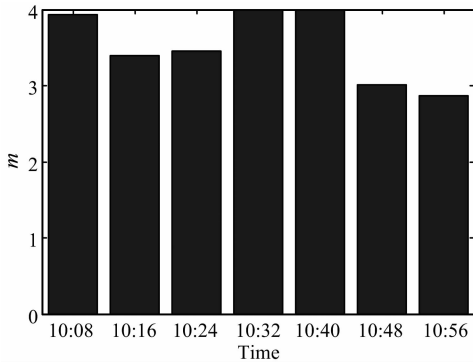


图 6 7 个加热事件的非麦克斯韦指数

Fig. 6 The non-Maxwellian index of the seven heating cases

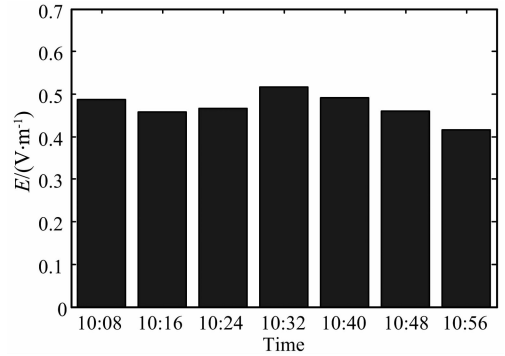


图 7 7 个加热事件的电场强度

Fig. 7 The electric field of the seven heating cases

4 结 论

低电离层加热条件下,波与带电粒子、带电粒子与中性大气的相互作用,一方面使得电子温度显著升高,另一方面,会使电子的速度分布函数偏离平衡状态,呈现为非麦克斯韦分布.而 EISCAT 的分析程序在低电离层非相干散射数据分析中,基于平衡态和温度比为常数假设,使得电离层参量的反演存在很大误差,导致我们无法观测到显著的电离层加热特征.我们使用基于超高斯分布的碰撞等离子体非相干散射模型,对 2008 年 1 月我国在 Tromsø 进行的第 1 次冬季电离层加热实验数据进行了分析,并与 GUSIDAP 的分析结果进行了对比.超高斯模型得到了显著的电子温度增强,最大增幅百分比达到了 168.9%,平均电子温度增量也达到了 162.2 K,而相应的 GUSIDAP 结果仅为 23.3%和 19.1 K.超

高斯模型得到的电子温度与非相干散射功率谱幅度和加热电场极化状态有着显著的对应关系,X 波加热的温度增强更为明显.非麦克斯韦特征的引入,使得非麦克斯韦指数可以作为一个独立的变量由非相干散射数据分析得到.通过 Gurevich 给出的分布函数和超高斯分布函数的比较,我们可以使用非麦克斯韦指数推算加热电场强度,使得加热电场强度成为直接反演变量,而不需要假设理论模型进行估算.从文中得出的结果来看,非麦克斯韦指数和加热电场强度一样变化平缓,且与峰值功率和极化状态没有明显的对应关系.我们使用非麦克斯韦的碰撞等离子体模型对非相干散射数据进行了分析,将分析结果与欧姆加热理论的数值仿真结果进行对比研究是我们进一步所要完成的工作.

致 谢 感谢欧洲非相干散射雷达协会(EISCAT)的数据提供,感谢 Cesar 教授和 Rietveld 博士在实验中给予的帮助.

参考文献(References)

- [1] Gurevich A V. Nonlinear Phenomena in the Ionosphere. Berlin: Springer, 1978
- [2] Bernhardt P A, Duncan L M. The feedback-diffraction theory of ionospheric heating. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1982, **44**(12):1061~1074
- [3] 黄文耿,古士芬,龚建村. 大功率无线电波加热电离层. 电波科学学报,2004,**19**(3): 296~301
Huang W G, Gu S F, Gong J C. Ionospheric heating by powerful high-frequency radio waves. *Journal of Radio Science* (in Chinese), 2004, **19**(3): 296~301
- [4] 倪彬彬,赵正予,项 薇等. 高频泵波加热电离层的数值模拟. 电波科学学报,2004,**19**(3): 274~289
Ni B B, Zhao Z Y, Xiang W, et al. Numerical modeling of ionospheric modification with powerful HF pump waves. *Journal of Radio Science* (in Chinese), 2004, **19**(3): 274~289
- [5] 黄文耿,古士芬. 大功率无线电波与低电离层的相互作用. 空间科学学报,2003,**23**(3): 181~187
Huang W G, Gu S F. Interaction between the powerful high-frequency radio wave and the lower terrestrial ionosphere. *Chinese Journal of Space Science* (in Chinese), 2003, **23**(3): 181~187
- [6] 黄文耿,古士芬. 大功率无线电波对高电离层的加热. 空间科学学报,2003,**23**(5): 343~350
Huang W G, Gu S F. The heating of upper ionosphere by powerful high-frequency radio waves. *Chinese Journal of Space Science* (in Chinese), 2003, **23**(5): 343~351
- [7] 邓 峰,赵正予,石 润等. 中低纬电离层加热大尺度场向不均匀体的二维数值模拟. 物理学报,2009, **58**(10): 7382~7391
Deng F, Zhao Z Y, Shi R, et al. Two dimensional simulation of high frequency induced larger-scale irregularities in F region. *Acta Physica Sinica* (in Chinese), 2009, **58**(10): 7382~7391
- [8] Evans J V. Theory and practice of ionosphere study by Thomson scatter radar. *Proceedings of the IEEE*, 1969, **57**(4): 496~530
- [9] Mantas G P, Carlson H C, LaHoz C H. Thermal response of the F region ionosphere in artificial modification experiments by HF radio waves. *J. Geophys. Res.*, 1981, **86**: 561~571
- [10] Jones T B, Robinson T, Kopka H, et al. Phase changes induced in a diagnostic radio wave passing through a heated region of the aurora ionosphere. *J. Geophys. Res.*, 1982, **87**(A3): 1557~1564
- [11] Jones T B, Robinson T, Stubbe P, et al. EISCAT observation of heated ionosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1986, **48**(A1): 1027~1035
- [12] Robinson T R. The heating of the high latitude ionosphere by high power radio wave. *Phys. Rep.*, 1989, **179**(2/3): 79~209
- [13] Stocker A J, Honary F, Robinson T R, et al. EISCAT observation of large scale electron temperature and density perturbations caused by high power HF radio waves. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1992, **54**(11/12): 6285~6297
- [14] Honary F, Stocker A J, Robinson T R, et al. EISCAT observations of electron temperature oscillations due to the action of high power HF radio waves. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1993, **55**(10): 1433~1448
- [15] 徐 彬,吴 军,吴 健等. 我国极区冬季电离层加热实验研究. 地球物理学报,2009,**52**(4):859~877
Xu B, Wu J, Wu J, et al. Observations of the heating experiments in the polar winter ionosphere. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(4):859~877
- [16] Stubbe P. Modifying effects of a strong electromagnetic wave upon a weakly ionized plasma: a kinetic description. *Radio Science*, 1981, **16**(3): 417~425
- [17] Gustavsson B, Sergienko T, Haggstrom I, et al. Simulation of high energy tail of electron distribution function. *Advances in Polar Upper Atmosphere Research*, 2004, **18**(1): 1~9
- [18] Zheng J, Yu C X, Zheng Z J. Effects of non-Maxwellian (super-Gaussian) electron velocity distribution on spectrum of Thomson scattering. *Physics of Plasmas*, 1997, **4**(7): 2736~2740
- [19] Saito S, Forme F R E, Buchert S C, et al. Effect of a Kappa distribution function of electrons on incoherent scatter spectra. *Annales Geophysicae*, 2000, **18**(9): 1216~1223
- [20] Sheffield J. Plasma Scattering of Electromagnetic Radiation. New York: Academic Press, 1975
- [21] 徐 彬,吴振森,吴 健等. 碰撞等离子体的非相干散射谱. 物理学报,2009,**58**(7):736~742
Xu B, Wu Z S, Wu J, et al. Incoherent scatter spectra of a collisional plasma. *Acta Physica Sinica* (in Chinese), 2009, **58**(7):736~742

(本文编辑 何 燕)