

程木松, 徐 彬, 吴振森, 等. 基于加热激发等离子体线级联结构的电子密度反演[J]. 电波科学学报, 2015, 30(3): 463-469. doi: 10.13443/j.cjors. 2014072401

CHENG Musong, XU Bin, WU Zhensen, et al. Inversion of ambient electron density for the modified ionosphere from HF pumping induced plasma cascade lines[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2015, 30(3): 463-469. (in Chinese). doi: 10.13443/j.cjors. 2014072401

## 基于加热激发等离子体线级联结构的 电子密度反演

程木松<sup>1</sup> 徐 彬<sup>2</sup> 吴振森<sup>1</sup> 李海英<sup>1</sup> 许正文<sup>2</sup> 吴 军<sup>2</sup> 吴 健<sup>2</sup>

(1. 西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071;

2. 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, 山东 青岛 266107)

**摘 要** 2010 年 9 月 13 日, 利用欧洲非相干散射雷达协会的大功率加热设备和诊断设施开展了电离层加热实验, 实验中首次由甚高频雷达探测到了长生命周期的等离子体线增强现象. 通过对等离子体线的频谱分析, 发现了等离子体线的 cascade 频谱结构, 并推断参量衰变不稳定性是引起实验中等离子体线回波功率增强的原因. 同时依据参量衰变不稳定性理论, 给出了一种利用 cascade 频谱结构对加热区域电离层的电子密度反演的方法, 并将反演得到的电子密度与利用有效超高频雷达数据的程序 GUISDAP 反演结果进行了对比, 验证了该方法的正确性, 分析结果表明反演结果的平均偏差仅在 1% 左右. 新方法的提出对强扰动电离层条件下电离层参数的反演及深入理解电波能量的吸收机制和朗缪尔湍流加速电子的过程具有重要意义.

**关键词** 电离层加热; 等离子体线; 不稳定性; 电子密度

**中图分类号** P352 **文献标志码** A **文章编号** 1005-0388(2015)03-0463-07

## Inversion of ambient electron density for the modified ionosphere from HF pumping induced plasma cascade lines

CHENG Musong<sup>1</sup> XU Bin<sup>2</sup> WU Zhensen<sup>1</sup> LI Haiying<sup>1</sup>

XU Zhengwen<sup>2</sup> WU Jun<sup>2</sup> WU Jian<sup>2</sup>

(1. School of physics and Optoelectronic Engineering, Xidian  
University, Xi'an Shaanxi 710071, China;

2. National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, China Research  
Institute of Radiowave Propagation, Qingdao Shandong 266107, China)

**Abstract** The ionospheric heating experiments were carried out with the EISCAT heating and diagnosing facilities on September 13, 2010 at Tromsø, Norway. The long-lasting enhanced plasma lines were first observed by the ground-based VHF radar. Through the analysis of the plasma spectra, a cascade structure is discovered, inferring that the enhanced lines observed in the experiment may be caused by the parametric decay instability (PDI). In addition, an inversion method of electron density for the modified ionosphere is proposed.

收稿日期: 2014-07-24

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基金(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

sphere is developed by using the cascade spectrum, which is verified by a quantitative comparison with the traditional grand unified incoherent scatter design and analysis package (GUISDAP) inversion that utilizes the reliable UHF radar data to hold an average deviation of  $\sim 1\%$  for the inversion results. This method is of significant importance to evaluating the parameters of strongly modified ionosphere and improving the understanding of the power absorption of radio waves and the electron acceleration by the Langmuir turbulence.

**Key words** ionospheric heating; plasma lines; instability; electron density

## 引言

电离层是地球大气的一个电离区域,主要分布在距地面 60~1 000 km 的高空范围内,由于电离层能够反射电磁波,且对在其中传播的电磁波能造成吸收、闪烁、延迟、散射、法拉第旋转等效应,对广播、通讯、定位导航能产生严重的影响,因此研究电离层具有很重要的实际意义.随着科学技术的进步,利用人工方式改变电离层特性成为可能,通过人工电离层加热开展对空间等离子体的主动研究也日益受到人们的重视.自从 Gordon 第一次发现当高功率电磁波注入电离层中可以引起电子温度的改变起,各种各样的加热效应被讨论<sup>[1-2]</sup>.如电离层加热可以引起大范围的温度增强<sup>[3]</sup>,电子密度的扰动<sup>[4]</sup>,小尺度的场向不规则体的产生<sup>[5]</sup>,大尺度场向不规则体的产生<sup>[6]</sup>,异常吸收效应<sup>[7]</sup>,甚低频(Very Low Frequency, VLF)、极低频(Extremely Low Frequency, ELF)和超低频(Ultralow Frequency, ULF)波的激发<sup>[8]</sup>.

作为所有电离层加热异常特征实验研究的基础,扰动电离层状态的探测是最为关键的科学问题.非相干散射雷达是电离层地面探测最为强大的手段之一,加热扰动电离层探测的非相干散射理论与实验也就成为了研究的热点.自从 1958 年 Gordon<sup>[9]</sup>首次提出由彼此之间作不相关运动的电子产生的散射可以为研究地球电离层提供强有力的诊断工具开始<sup>[10]</sup>,众多的学者开展了大量的基于非相干散射技术的电离层探测工作<sup>[11]</sup>.常规电离层探测领域,已经形成了一整套的成熟的非相干散射理论和数据分析方法. Lehtinen 和 Huuskonen 等人系统开展了基于多频多脉冲技术、长脉冲编码和交替码等非相干散射雷达的脉冲编码技术研究工作<sup>[12]</sup>,讨论了先验信息、反演参数选择和原始数据完整性等因素对参数误差估计中的影响及其在非相干散射雷达中的应用<sup>[13-14]</sup>,给出了电离层参量误差估算和协方差计算

的方法<sup>[15]</sup>,最终利用欧洲非相干散射雷达设计了一套针对不同探测范围、不同探测对象的非相干散射雷达工作模式及其相应的数据分析程序 GUISDAP<sup>[16]</sup>.该程序在包括电离层加热在内的非相干散射雷达探测实验中应用广泛,为空间物理学家和等离子体物理学家的实验研究工作提供了极大的便利.尽管如此,该程序仅对加热扰动幅度很弱时才适用,其内核基于平衡态麦克斯韦粒子速度分布的假设,因此在电离层参数反演中存在较为严重的缺陷,在反射高度附近的强扰动区域,粒子分布状态已经处于非平衡态,再利用 GUISDAP 进行电离层参量反演,会导致严重的误差甚至会获取完全错误的反演结果.加热强扰动条件下的电离层状态探测一直是一个无法解决的科学问题,尽管我们为此建立了一些诸如人工场向不规则体的非相干散射模型和碰撞等离子体非相干散射模型等理论<sup>[17-18]</sup>,但在扰动十分剧烈,增强谱线幅度增加数个量级的条件下,这些修正的非相干散射理论也均不再适用了.抛开修正非相干散射理论的局限,由于加热异常特征系由不稳定性和波粒(波)相互作用产生,因此可以从加热激发的波动特征中提取电离层状态信息.鉴于此,本文从电离层加热实验中强扰动区域的等离子体线频谱特征出发,根据异常谱的频谱结构与电子密度的关系,给出了加热强扰动区域电子密度的一种新的反演方法.

## 1 实验描述

2010 年 9 月 13 日,在挪威开展了电离层加热激发异常谱特征的非相干散射雷达观测实验.实验中的加热设备为欧洲非相干散射联合会(European Incoherent Scatter, EISCAT)的大功率加热设施,该加热设备包含三个大型的天线阵,加热频率范围为 4~8 MHz<sup>[19]</sup>,根据当天的电离层状态选取了加热天线阵 1,加热频率选为 5.423 MHz,极化方式为 O 波加热,有效辐射功率为 286 MW,加热波束方向

为地磁场方向. 诊断设备选用了 930 MHz 的 UHF 和 224 MHz 的 VHF 非相干散射雷达, 两部雷达均工作在 Beata 实验模式, 其中作为主要探测手段的 VHF 雷达可实现上行和下行等离子体线的同时探测, 为满足宽带探测需要, 实验模式设定等离子体线的采样率为  $0.8 \mu\text{s}$ , 谱距离分辨率为 3 km, 探测范围 136~307 km. 本次实验中, 上下行等离子体的中心频率为  $\pm 5.7 \text{ MHz}$ , 带宽为 1.2 MHz. 整个加热实验从 10:00 开始, 12:20 结束, 包含了 12 个加热事件, 每个加热事件均为 8 min 加热和 4 min 关闭.

## 2 等离子体线频谱分析与电子密度反演

本文对实验中 VHF 雷达的原始数据进行了处理, 提取了探测范围内加热前后的等离子体线谱, 并进行对比分析(12 个加热事件中, 加热现象均很明显, 且基本相同, 因此本文仅选取加热事件 6 进行分析). 如图 1 所示, 横坐标为多普勒频移, 单位为 kHz, 纵坐标为高度, 单位为 km, 伪彩色对应不同的回波功率值, 单位为 K/kHz. 从图 1 可以看到, 加热未开启时刻(10:59:05)由于等离子体线回波幅度本身较弱, 加之 VHF 雷达的观测模式为 beata 工作模式, 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. 加热设备开启后, 受加热泵波驱动, 参量不稳定性等非线性过程被激发, 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, 而在高度 210 km、频率 300 kHz 附近出现斑点状的回波增强结构. 在以往的加热实验中, 利用 VHF 雷达仅观测到过持续时间  $\sim 200 \text{ ms}$  的等离子体线增强现象<sup>[20-21]</sup>, 而本次实验中幅度很强的异常频谱并没有

在加热起始后迅速消失, 而是在整个加热过程中持续存在<sup>[22]</sup>. 一般的, 在加热泵波反射高度附近发生的参量衰变不稳定性可以激发 Langmuir 湍流, 进而引起等离子体线回波功率的增强, 而且这一过程通常是短暂的, 一般在 ms 量级上, 如 Djuth 等人曾详细地讨论过加热开启前 100 ms 的等离子体线增强现象<sup>[23]</sup>. 这是由于加热实验产生的场向不规则体对加热电波会有异常吸收效应, 破坏了参量不稳定性持续发生的条件, 从而抑制了参量不稳定性的持续发生, 使得等离子体线回波功率增强的时间较短.

为了寻找本次实验中等离子体线增强特征的物理机制, 本文对加热期间等离子体线回波功率最大值所处高度附近的等离子体线进行频谱分析. 从图 1 可以看出, 加热期间 210 km 附近等离子体线谱回波功率增强明显, 因此着重考察了 210 km 附近的等离子体线谱. 未加热时刻高度为 210 km 的等离子体线谱如图 2 所示, 横坐标为多普勒频移, 单位为 kHz, 其中心 0 频对应为  $-5.7 \text{ MHz}$ , 纵坐标为回波功率幅值, 单位为 K/kHz. 从图 2 可以看出, 未加热时刻等离子体线频谱杂乱, 且回波功率幅值很低, 最大值仅在 0.11 K/kHz 左右. 加热时刻的等离子体线频谱如图 3 所示(从加热开始时刻 11:00:05 到加热结束时刻 11:07:55, 每隔 2~3 min 取一副图), 横纵坐标的单位及物理意义与图 2 相同, 可以看出在整个加热时间内, 等离子体线谱回波功率都有明显增强, 增强幅度可达  $10^2$  这个量级. 需要特别注意的是在等离子体线频谱中出现了典型的 cascade 结构, 且该 cascade 结构在加热期间内同样持续存在. 由于 cascade 是参量衰变不稳定性发生的标志性频谱结构<sup>[11]</sup>, 因此可以推断此次加热实验激发了参量衰变不稳定性. 根据前面的分析可知, 参量衰变不稳定性一般持续时间在 ms 量级上, 与以往的观测结果不同, 本次实验中参量衰变不稳定性持续了  $\sim 8 \text{ min}$ . 这是由于本次加热实验中所采用的加热频率为 5.423 MHz, 这个频率近似为 4 倍当地等离子体的电子回旋频率, 当加热频率接近电子的回旋频率的倍频时, 可以有效地抑制场向不规则体的产生, 从而使参量不稳定性可以持续发生<sup>[24-25]</sup>, 因此参量衰变不稳定性是引起实验中等离子体线增强的主要原因. 另外可以从不稳定性的激发原理角度出发, 提取加热扰动区的电离层参量.

依据参量不稳定性理论, cascade 频谱中相邻两个峰值的频差与等离子体中的低频振荡频率相关. 本文对峰值频率进行了统计分析, 如表 1 所示. 由表

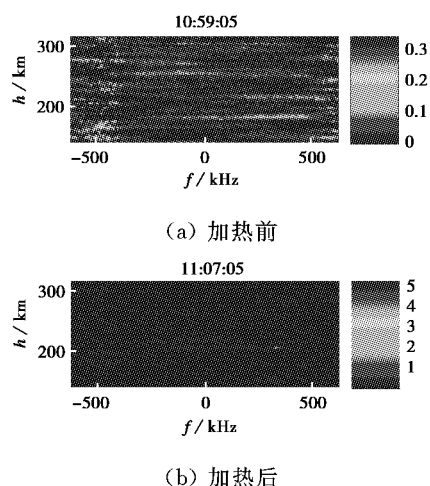


图1 加热前后等离子体线谱对比

1 可知,加热实验中观测到的等离子体线的 cascade 谱线结构的相邻谐振峰的频差在 48.8~51.3 kHz

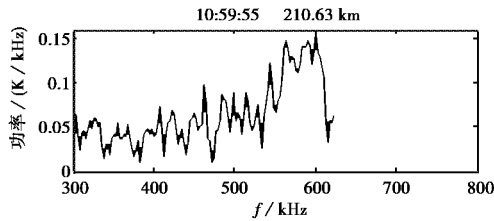


图2 未加热时刻等离子体线谱

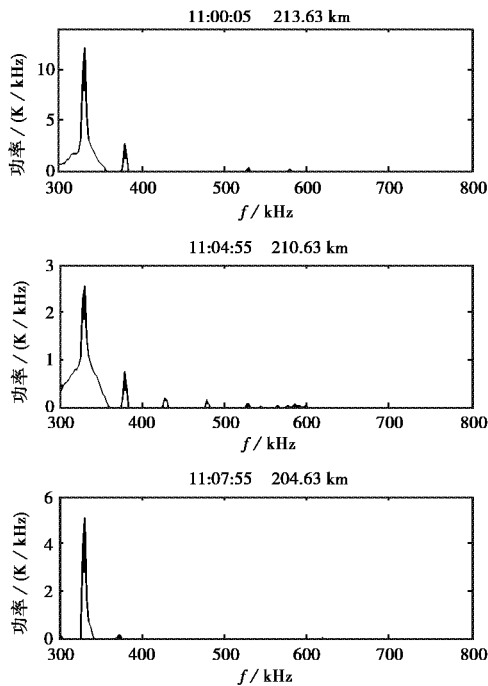


图3 加热时刻等离子体线谱

表1 “cascade”结构的频率间隔

|    | 峰频率值/<br>kHz | 相邻峰频差/<br>kHz | 平均频差/<br>kHz |
|----|--------------|---------------|--------------|
| 峰1 | 329.6        |               | 50.05        |
| 峰2 | 378.4        | 48.8          |              |
| 峰3 | 429.7        | 51.3          |              |
| 峰4 | 478.5        | 48.8          |              |

间变化,这系由雷达的频率分辨率为 2.5 kHz 引起的,因此 cascade 相邻频差应为  $(48.8 + 51.3)/2 = 50.5$  kHz. 参量衰变不稳定性系由等离子体中的波波耦合振荡所产生,根据参量衰变不稳定性理论,相邻谐振峰的频差近似等于 2 倍的离子等离子体频率,在等离子体中离子的等离子体频率为

$$f = \omega/2\pi = \sqrt{n_i e^2 / \epsilon_0 m_i} / 2\pi. \quad (1)$$

式中:  $n_i$  为离子密度;  $e$  为电子电量;  $m_i$  为离子质

量;  $\epsilon_0$  为真空中的介电常数. 由于等离子体整体表现为电中性,因此离子密度近似等于电子密度  $n_e$ . 根据式(1)可以由离子的等离子体频率推导出离子密度,进而得到电子密度,即

$$n_e = n_i = (2\pi f)^2 \epsilon_0 m_i / e^2. \quad (2)$$

因此可以利用 cascade 谱线中谐振峰的频差关系,来推算电子密度,根据公式(2)推出的满足参量衰变不稳定性发生的高度处的电子密度为  $3.08 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$ . 利用上述方法电子密度反演的正确性及误差估计将在下节进行详细讨论.

### 3 反演结果准确性验证及误差分析

在上一节中给出了基于加热波动特征提取得到的电子密度,本节将对这一反演结果进行验证. 此次加热实验中,同时开启了两部非相干散射雷达作为诊断设备,其中 VHF 雷达观测到的加热扰动特征比较显著,而 UHF 雷达由于其工作频率很高,加热形成的朗缪尔湍流对其影响相对较小. 如图 4 所示,与未加热时刻相比,加热时刻 VHF 雷达观测到的离子线谱在谱型特征及回波功率幅度上都有明显变化,而实验中 UHF 雷达观测到的离子线谱的扰动幅度很弱,谱型特征及回波功率幅度均无明显变化,基本处在平衡态附近,因此可以从同时刻、同高度的 UHF 非相干散射雷达的离子线谱反演中提取的电子密度参量与新方法的反演结果进行对比. 实验观测结果显示 VHF 非相干散射雷达的离子线谱最大值所处高度出现了阶跃性下降的特征,即参量衰变不稳定性的匹配高度发生了下降,如图 5 所示. 这是由于在反射高度附近的电子被加热电波加速发生扩散,沿着地磁场向上和向下运动,进而在反射高度附近形成电子密度谷,而在反射高度两侧形成电子密度峰,使得电磁波在原先的反射高度下方满足电磁波反射条件,导致反射高度下降,即波-粒作用的区域下降,且此过程在加热实验中持续不断地发生,当下降高度达到雷达分辨率 3 km 时,便会被探测到,最终形成离子线最大值所处高度阶跃性下降的特征<sup>[22]</sup>. 从图 5 可以看出时间段 11:00—11:03、11:03—11:05 和 11:06—11:07,离子线谱最大值所处高度分别为 213.63 km, 210.63 km 和 207.63 km. 在时间段 11:00—11:03 内,高度没有发生改变,可以认为电子密度的变化没有达到高度下降的阈值,即在时间段 11:00—11:03 内,高度 213.63 km 处的电子密度可以认为近似相等. 利用实验数据进行电子密度反演的过程中,由于单个数据的随

机性,产生的误差可能会较大,为减少误差,可选取 1 min 的数据进行累积平均(时间分辨率为 5 s,即 12 个数据的平均).根据上面的分析可知,在 1 min 的时间内电子密度的值可以近似地认为不变,但这 1 min 数据的时间选取上要满足一个要求,即离子线谱最大值所处高度在这 1 min 的时间内没有发生变化,为此选取了 11:01:59–11:02:59、11:03:59–11:04:59 和 11:05:59–11:06:59 这 3 个时间段实验数据进行了累积平均,反演的电子密度剖面如图 6 所示.由图 5 可知,在 11:01:59–11:02:59、11:03:59–11:04:59 和 11:05:59–11:06:59 这 3 个时间段内,离子线最大值所处的高度分别为 213.63 km、210.63 km 和 207.63 km,因此读取了图 6 中时间为 11:02:59 高度为 213.63 km、时间为 11:04:59 高度为 210.63 km 和时间为 11:06:59 高度为 207.63 km 处的电子密度,并将结果与 cascade 反演结果进行了对比,对比结果如表 2 所示.经过对比可以发现利用 cascade 频谱反演得到的电子密度与 GUIDAP 反演所得结果在数量级上相同,数值上接近,平均偏差仅为 1.05%,由此可以验证利用 cascade 反演电离层参量的方法是可靠的.由于 GUIDAP 处理数据和提取的原始数据在时间上存在一定的差异,且在利用 UHF 雷达数据反演电子密度处理过程中对数据进行了累积平均,这都将会导致反演结果产生一定的偏差.

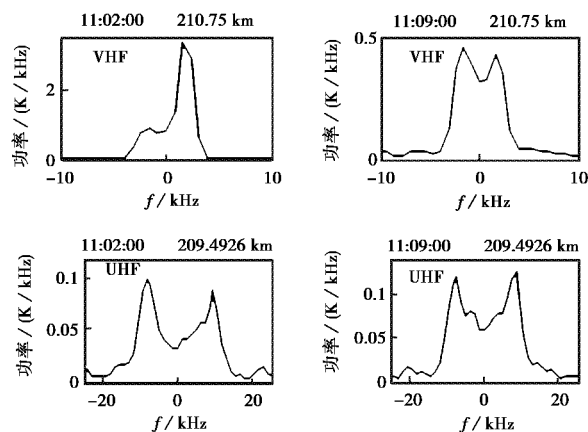


图 4 加热中与加热后 VHF/UHF 雷达离子线谱

此外利用强扰动条件下 VHF 雷达数据反演的电子密度进行了分析,如图 7 所示,标注 11:03:00 的子图代表对前 1 min 数据(11:02:00–11:03:00)的累积平均. VHF 雷达的反演结果如表 3 所示.从表 3 可以看出,对时刻 11:05:00 的数据反演失败,

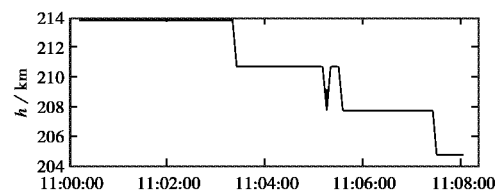


图 5 离子线谱最大值所处高度时间演化图

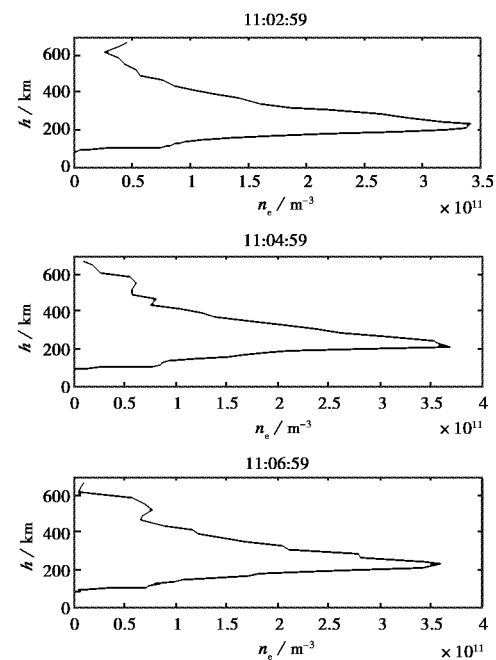


图 6 利用 UHF 雷达数据反演的电子密度剖面

时刻 11:03:00 和 11:07:00 的反演结果偏差分别为 64.01% 和 98.33%,平均反演偏差为 81.17%,与 cascade 反演方法相比平均偏差要大 80% 以上.可见在电离层加热实验中,对于反射高度附近的强扰动区域,传统利用 GUIDAP 的电离层参数反演不再适用,此时可以利用 cascade 结构对电子密度进行准确的反演.

表 2 利用 UHF 雷达数据反演的电子密度值

| 时刻       | 高度/km  | 电子密度/ $\text{m}^{-3}$    | 偏差/% |
|----------|--------|--------------------------|------|
| 11:02:59 | 213.63 | $3.134\ 7\times 10^{11}$ | 1.59 |
| 11:04:59 | 210.63 | $3.092\ 4\times 10^{11}$ | 0.24 |
| 11:06:59 | 207.63 | $3.125\ 9\times 10^{11}$ | 1.31 |

表 3 利用 VHF 雷达数据反演的电子密度值

| 时刻       | 高度/km  | 电子密度/ $\text{m}^{-3}$    | 偏差/%     |
|----------|--------|--------------------------|----------|
| 11:03:00 | 213.63 | $5.141\ 1\times 10^{11}$ | 64.0     |
| 11:05:00 | 210.63 | 反演失败                     | $\infty$ |
| 11:07:00 | 207.63 | $6.199\ 6\times 10^{11}$ | 98.33    |

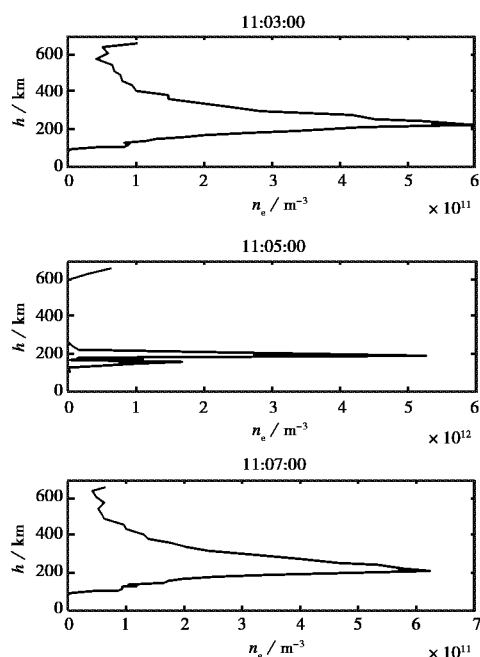


图7 利用 VHF 雷达数据反演的电子密度剖面

## 4 结论与讨论

在2010年开展的极区电离层加热实验中,利用VHF非相干散射雷达观测到了十分显著的等离子体线增强特征,通过等离子体线的频谱分析,可推断参量衰变不稳定性是引起等离子体线回波功率增强的原因.基于增强特征激发的物理机制,本文提出了一种利用 cascade 频谱结构对电子密度进行反演的新方法,并将该方法反演的电子密度与 UHF 雷达的反演结果进行了对比,验证了新方法的可靠性,分析结果表明反演结果的平均偏差仅在1%左右.该方法的提出具有很重要的科学意义.在加热实验中,对于强扰动区域的电子密度利用传统的非相干散射理论进行反演,反演的误差会很大,很多情况甚至会得到完全错误的反演结果,而此时可以利用 cascade 谱线反演得到真实可靠的高时空分辨率的电子密度.虽然此方法仅适用于反演 cascade 谱线发生高度附近的电子密度值,但可以作为传统电离层参量反演方法中的约束条件,进而有效地减少电离层参数的反演误差<sup>[13]</sup>.事实上,受限于当前的 VHF 非相干散射雷达的工作模式,我们还未完全发挥这一探测方法的潜力,由于等离子体线增强的幅度很高,可以设计新的实验模式提高采样率和时间分辨率获取秒级甚至毫秒级电离层参量演化结果.设计新的非相干散射雷达工作模式,并在其探测结果的基础上理解电离层加热的饱和与冷却过程,建立相应的

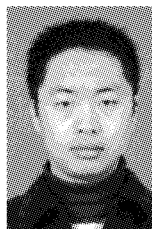
理论模型,理解电波能量的吸收机制和朗缪尔湍流的加热加速电子的过程是我们下一步所要完成的工作.

## 参考文献

- [1] GORDON W E, CARLSON H C. Ionospheric heating at Arecibo: first test[J]. J Geophys Res, 1971, 76: 7808-7813.
- [2] GORDON W E, CARLSON H C. Arecibo heating experiments[J]. Radio Science, 1974, 9(11): 1041-1047.
- [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] BLAGOVESHCHENSKAYA N F, BORISOVA T D, YEOMAN T K, et al. Artificial small-scale field-aligned irregularities in the high latitude f region of the ionosphere induced by an X-mode HF heater wave[J]. Geophys Res Lett, 2011, 38: L08802.
- [5] BLAGOVESHCHENSKAYA N F, BORISOVA T D, KORNIENKO V A, et al. Some distinctive features in the behavior of small-scale artificial ionospheric irregularities at mid-and high latitudes[J]. Radiophysics & Quantum Electronics, 2007, 50(8): 619-632.
- [6] GUZDAR P N, CHATURVEDI P K, PAPADOPOULOS K, et al. The self-focusing instability in the presence of density irregularities in the ionosphere[J]. J Geophys Res, 1996, 101: 2453-2460.
- [7] ROBINSON T R. The heating of the high latitude ionosphere by high power radio waves[J]. Phys Rep, 1989, 179(2/3): 79-209.
- [8] BARR R, KOPKA H. ELF and VLF wave generation by HF heating: a comparison of AM and CW techniques[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 1997, 59(18): 2265-2279.
- [9] GORDON W E. Incoherent scatter of radio waves by free electrons with applications to space exploration by radar[J]. Proc IRE, 1958, 46: 1824-1829.
- [10] BOWLES K L. Observation of vertical incidence scatter from the ionosphere at 41 Mc/s[J]. Physical Review Letters, 1958, 1: 454-455.
- [11] KOHL H, KOPKA H, STUBBE P, et al. Introduction to ionospheric heating at Tromsø Scientific problems[J]. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 1993, 55(4): 601-613.
- [12] HUUSKONEN A, LEHTINEN M S, PIRTTILA J.

- Fractional lags in alternating codes: Improving incoherent scatter measurements by using lag estimates at noninteger multiples of baud length[J]. *Radio Science*, 1996, 31(2):245-261.
- [13] VALLINKOSKI M, LEHTINEN M S. The effect of a priori knowledge on parameter estimation errors with applications to incoherent scatter[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1990, 52(6-8): 675-685.
- [14] VALLINKOSKI M, LEHTINEN M. Parameter mixing errors within a measuring volume with applications to incoherent scatter[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1990, 52(6/8): 665-674.
- [15] VALLINKOSKI M. Statistics of incoherent scatter multiparameter fits[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1988, 50(9): 839-851.
- [16] LEHTINEN M S, HUUSKONEN A. General incoherent scatter analysis and GUIDAP[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1996, 58(1/4): 435-452.
- [17] XU B, WANG Z G, XUE K, et al. The inversion of incoherent scatter spectra with a non-Maxwellian electron distribution[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2010, 72(5/6):492-497.
- [18] XU B, WU Z S, WU J, et al. Incoherent scatter spectrum of a collisional plasma[J]. *Acta Phys Sin*, 2009, 58(7): 5104-5110.
- [19] RIETVELD M T, KOHL H, KOPKA H. Introduction to ionospheric heating at Tromsø - I. experimental overview[J]. *J Atmos Terr Phys*, 1993, 55(4): 577-599.
- [20] ISHAM B, RIETVELD M T, HAGFORS T, et al. Aspect angle dependence of HF enhanced incoherent backscatter[J]. *Advances in Space Research*, 1999, 24:1003-1006.
- [21] ISHAM B, HOZ C L, RIETVELD M T, et al. Cavitating Langmuir turbulence observed during EISCAT high latitude ionospheric interaction experiments[J]. *Physical Review Letters*, 1999, 83(13): 2576-2579.
- [22] CHENG M S, XU B, WU Z S, et al. Observation of VHF incoherent scatter spectra disturbed by HF heating[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2013, 105-106:245-252.
- [23] DJUTH F T, ISHAM B, RIETVELD M T, et al. First 100ms of HF modification at Tromsø Norway [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109A: 11307-11331.
- [24] 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.
- [25] ASHRAFI M, KOSCH M J, KAILA K, et al. Spatio temporal evolution of radio wave pump-induced ionospheric phenomena near the fourth electron gyro-harmonic[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112: A05314.

### 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。