

## 利用含纯增长模式线的异常非相干散射谱反演扰动电子温度

李海英<sup>\*①</sup> 孔鹏飞<sup>①</sup> 徐彬<sup>②</sup> 吴振森<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(西安电子科技大学物理与光电工程学院 西安 710071)

<sup>②</sup>(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:** 基于平衡态非相干散射理论的 GUIDAP 程序包在拟合含有纯增长模式线的非相干散射功率谱及反演加热扰动电离层参量中存在严重误差, 该文提出一种以未加热时刻的电离层参量为先验信息, 利用最小二乘法搜寻最佳高斯峰描述纯增长模式线来修正实测非相干散射谱, 并使用电子超高斯分布的非相干散射理论拟合修正后非相干散射谱来反演获取加热扰动电子温度的方法。通过将该方法用于分析 2010 年秋季我国在挪威开展的电离层加热实验数据表明: 利用该方法对含纯增长模式线的实测谱修正拟合后获得的电子温度比未加热时刻提高约 800 K 左右, 增幅比例约 13%~50%, 该结果与现有文献报道的电离层加热引起的电子温度增幅范围吻合较好。结论表明该方法适用于基于含纯增长模式线的非相干散射谱反演扰动电离层参量。

**关键词:** 电离层加热; 异常非相干散射谱; 超高斯分布; 电子温度

**中图分类号:** TN011.2; P352

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2018)06-1499-06

**DOI:** 10.11999/JEIT170823

## Inversion of Disturbed Electron Temperature by Anomalous Incoherent Scatter Spectra with Pure-growth Mode Line

LI Haiying<sup>①</sup> KONG Pengfei<sup>①</sup> XU Bin<sup>②</sup> WU Zhensen<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

<sup>②</sup>(National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, China Research Institute of Radio Wave Propagation, Qingdao 266107, China)

**Abstract:** In the fitting process of the incoherent scatter power spectra with pure-growth mode line and the inversion of the disturbed ionospheric parameters, the GUIDAP package which is based on the equilibrium incoherent scatter theory, always exits serious error. Assuming the ionospheric parameters at heating-off time as a priori information, by using the least squares method to search the best Gaussian peak for the modification of the measured incoherent scatter spectra, one method is provided to obtain the disturbed electron temperature through fitting the modified measured spectra by taking advantage of the incoherent scatter theory of electron super-Gaussian distribution. This method is used to the ionospheric heating experimental data which is conducted in Norway in the autumn of 2010, and the results indicate that the electron temperature obtained by fitting the modified spectra is about 800 K higher than that of the heating off time, and the increase ratio is about 13%~50%, which is well coincided with the electron temperature increase range of ionospheric heating reported in the existing literature. The conclusion shows that the method is applicable to the inversion of disturbed ionospheric parameters by using of the incoherent scatter spectra with pure-growth mode line.

**Key words:** Ionospheric heating; Anomalous incoherent scatter spectra; Super-Gaussian distribution; Electron temperature

### 1 引言

随着科学技术的进步, 通过人工“干预”电离

层方式开展空间等离子体特性的主动研究日益受到重视, 例如: 大功率无线电波加热<sup>[1]</sup>, 化学物质释放<sup>[2]</sup>等。扰动电离层状态探测是研究人工“干预”效应的重要基础, 非相干散射雷达是研究人工加热电离层中动力学过程最强有力的地面探测工具, 目前包括我国在内<sup>[3]</sup>世界上已建立了 10 多套, 其中欧洲非相干散射协会(EISCAT)管理的非相干散射雷达<sup>[4]</sup>被广泛应用于高纬地区电离层探测。利用非相干散

收稿日期: 2017-08-23; 改回日期: 2018-03-20; 网络出版: 2018-04-10

\*通信作者: 李海英 lihy@xidian.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61475123, 61571355), 陕西省自然科学基金基础研究计划(2016JQ4015)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61475123, 61571355), The Program for Natural Science Basic Research of Shaanxi Province (2016JQ4015)

射雷达实测数据和非相干散射理论能够获取扰动电离层参量。EISCAT 官方使用的非相干散射数据分析软件(GUISDAP)是基于非相干散射谱数据分析的程序包<sup>[5]</sup>,该程序包中使用的平衡态等离子体的非相干散射理论模型认为加热电离层中的离子和电子仍遵循麦克斯韦速度分布。

值得注意的是,大功率高频泵波注入会使电离层等离子体处于非平衡态,电子和离子偏离麦克斯韦分布从而影响探测雷达接收的非相干散射功率谱,使其不再保持对称双峰结构。早在 1992 年,Stubbe 等人<sup>[6]</sup>就讨论了电离层加热中由于振荡双流不稳定性激发在离子线谱中会出现明显的纯增长线。Kohl 等人<sup>[7]</sup>在利用 EISCAT 的加热实验中,使用 224 MHz 雷达发现了离子线中离子声波频率的奇次谐波分量。Rietveld 等人<sup>[8]</sup>测量了加热引起的增强离子线和等离子体线功率谱特征,分析了等离子体线的谐振结构。文献[9,10]通过对 2010 年和 2011 年我国利用 EISCAT 开展的加热实验数据中异常非相干散射离子线和等离子体线分析,发现在反射高度附近的离子线谱存在与已有实验结果不同的较长时间的增强现象;且离子线谱出现严重不对称双峰结构。Ekeberg 等人<sup>[11]</sup>指出自然条件下观测到的具有三峰结构的异常增强离子线谱的中心峰主要是因为离子速度分布函数不再是麦克斯韦分布造成的。Kuo 理论研究了参量不稳定性,给出了 O 模加热不同加热站点振荡双流不稳定性激发阈值<sup>[12]</sup>。

显然对电离层加热引起的异常非相干散射功率谱,利用基于平衡态非相干散射理论的 GUISDAP 程序包获得电离层参量会存在一致误差,某些情况结果甚至是错误的。Gurevich 等人<sup>[13]</sup>指出包含大的温度不均匀性的散射区域的自相关函数用麦克斯韦分布的等离子体非相干散射理论来拟合,电子温度将被严重低估。Ashrafi 等人<sup>[14]</sup>提出大功率泵波注入电离层中,朗缪尔波和其它离子声波被强烈增强,严重影响离子线功率谱,使用平衡态非相干散射理论获得电离层参数结果不可靠。

大量学者对扰动电离层参量获取方法展开了深入研究。Zheng 等人<sup>[15]</sup>将超高斯分布函数应用在非相干散射技术中数值仿真了离子线和等离子体线谱。文献[16,17]假定电子具有超高斯速度分布,代入非相干散射理论反演了电子和离子温度,结果表明直接利用电子麦克斯韦速度分布反演误差达 25%;建立了包含场向不规则体的速度分布模型,并成功用于扰动电离层参数反演。Wu 等人<sup>[18]</sup>将粒子群优化算法用于非相干散射雷达数据,反演获得了电离层多参量,并与最小均方拟合方法(LSF)的结果进行了

对比,结果表明:粒子群优化算法在利用 Arecibo 雷达数据反演同时获得离子和电子温度以及分子离子数中非常有效。Virtanen 等人<sup>[19]</sup>基于非相干散射理论,提出了利用多站、多波束非相干散射数据分析等离子体参量,结果表明远程站点在高信噪比情况能显著提高等离子体参数估计的准确性。程木松等人<sup>[20]</sup>提出利用等离子体 Cascade 频谱结构对加热区域电离层的电子密度反演的方法,分析结果表明反演结果的平均偏差仅在 1%左右。

上述研究表明:电离层加热引起的空间等离子体异常分布对非相干散射功率谱有显著影响,如何利用扰动异常非相干散射功率谱获取电离层参量是准确判断加热效应的关键问题。包含纯增长线的异常非相干散射谱是加热过程中经常出现的现象之一,这类谱线相对于不对称双峰非相干散射谱结构更加复杂,本文将纯增长模式谱修正方法用于我国 2010 年在挪威开展的电离层加热实验中观测到的含纯增长模式线的异常非相干散射谱,利用电子超高斯分布的非相干散射理论反演了扰动电离层的电子温度,并与 GUISDAP 结果进行了对比验证。

## 2 超高斯分布函数

电离层加热中由于电子与其他粒子之间的相互碰撞,会使电子速率分布函数的尾部增强。超高斯分布函数能够对电子的非麦克斯韦分布进行近似描述<sup>[15]</sup>。

$$f_{e0}(v) = \frac{m}{4\pi v_{Te}^3 \Gamma(3/m)} \exp\left\{-\left(\frac{v}{v_{Te}}\right)^m\right\} \quad (1)$$

其中,  $2 \leq m \leq 5$  为非麦克斯韦指数,当  $m = 2$  时,对应于麦克斯韦分布函数,

$$v_{Te}^2 = \frac{3T_e \Gamma(3/m)}{\Gamma(5/m)} v_e^2 \quad (2)$$

$v_e = \sqrt{T_e/m_e}$  为电子热速度,  $\Gamma(x)$  是伽马函数,

$T_e = \frac{1}{3} \int_{-\infty}^{+\infty} m_e v^2 f_{e0} dv$  是电子动力学温度。

图 1 给出了非麦克斯韦指数对速度分布函数的影响。将电子的超高斯分布代入任意粒子速率分布条件下非相干散射功率谱表达式,仿真结果表明:由于电离层加热增加了具有更高能量的电子组分,相关频率的回波幅度增强,零频幅度减弱<sup>[16]</sup>。

## 3 利用含纯增长模式线的非相干散射谱获得电子温度的流程

电离层加热激发的振荡双流不稳定性使非相干散射谱中出现纯增长模式线, Vicker 等人<sup>[21]</sup>提出了将含纯增长模式线的非相干散射谱看作双峰谱和以

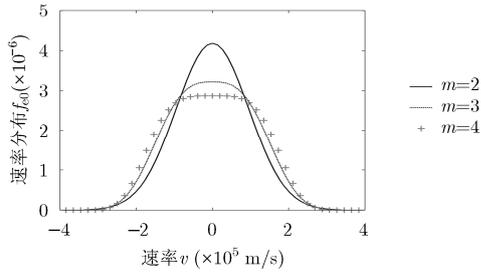


图 1 电子的超高斯分布

零频为中心的高斯峰叠加，通过优化方法寻找最佳高斯峰修正非相干散射谱获得电子温度，但在修正过程中仍使用的是麦氏分布的 GUISDAP 程序包拟合双峰谱并反演电子温度，这对仅去除纯增长模式影响的加热异常非相干散射谱的拟合和电离层参量反演仍会存在误差。本文将电子超高斯分布函数用于非相干散射谱的数值模拟，能够改善获得的电离层参量精度，具体流程如图 2 所示。

### 4 反演结果及分析

2010 年 9 月，我国利用 EISCAT 的地基大功率加热设施进行了电离层加热实验，其加热设备包含有 3 个大型阵列。9 月 5 日实验中采用的是天线阵

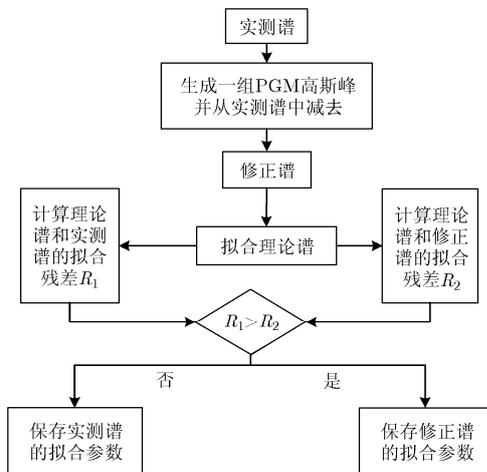


图 2 含纯增长模式线的非相干散射谱处理流程图

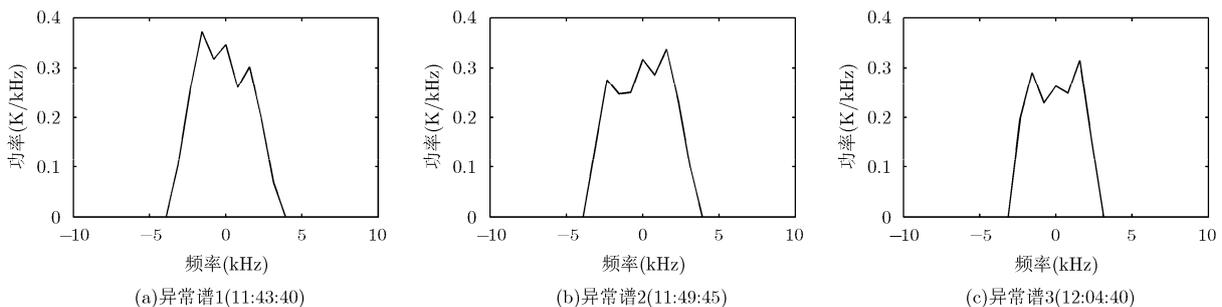


图 3 异常非相干散射实测谱

列 2，加热泵波频率选为 4.9128 MHz 的 O 模波，加热天线指向为垂向，加热周期采用 8 min 加热和 4 min 关闭。本次实验是过密加热，实验中使用 224 MHz 的 VHF 雷达进行探测诊断。本文从 9 月 5 日实验的反射高度 196 km 处随机选取 3 个具有纯增长模式特征的异常非相干散射谱。如图 3 所示。表 1 给出了这 3 个异常谱的发生时间、高度以及未加热时的先验电离层参量。

表 1 异常非相干散射实测谱的先验信息

	异常谱 1	异常谱 2	异常谱 3
时刻(UT)	11:43:40	11:49:45	12:04:40
高度(km)	196	196	196
电子温度(K)	1687	1793	1944
离子温度(K)	625	659	935
电子密度( $\times 10^{11} \text{ m}^{-3}$ )	2.53	2.69	3.04

首先，以异常谱 1 为例，利用 GUISDAP 程序包对异常实测谱进行最优化拟合，获得的电离层参量：电子温度为 1526 K，离子温度为 1064 K，电子密度为  $2.5 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$ 。将该组结果代入非相干散射谱公式得到拟合的非相干散射谱如图 4 所示。由图 4 可知：不论是从谱型还是幅度上看，理论拟合谱和实测谱都存在明显差异，说明利用 GUISDAP 程序包反演得到的电离层参量偏差会很大。

将表 1 中的先验参量作为反演的初始值，直接用超高斯分布的非相干散射谱理论对实测谱进行反演拟合。通过不断改变电离层参量并进行理论谱拟合，直到理论谱和实测谱的拟合残差  $R_1$  达到最小，图 5 为实测谱和最佳拟合谱，该最佳拟合谱对应的电子温度为 3288 K，拟合残差  $R_1$  为 0.0562。

按照图 2 所示流程，首先将实测谱减掉生成的具有不同宽度不同高度的高斯峰，利用超高斯分布的非相干散射理论对差值谱进行拟合，得到对应不同组合的电离层参量以及拟合残差，其中最小拟合

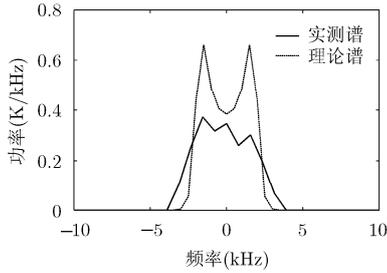


图 4 实测谱和 GUIDSAP 反演参量拟合谱

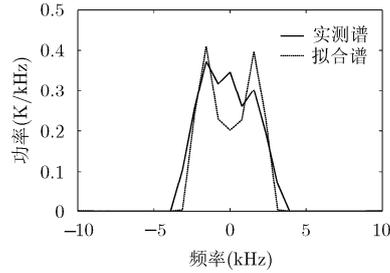


图 5 实测谱和未修正谱的反演拟合谱

残差  $R_2$  所对应的差值谱为最佳修正谱。图 6 中虚线表示的高斯峰是对异常谱 1 拟合效果最佳的纯增长模式特征峰。将该高斯峰从实测谱中去除, 所得到的最佳修正谱与最佳拟合谱分布如图 7 所示。由图可知: 最佳拟合谱与最佳修正谱之间吻合度很好。该最佳拟合谱对应的电子温度为 2513 K, 拟合残差  $R_2$  为 0.0205。因为拟合残差  $R_2 < R_1$ , 所以认为此次去除纯增长模式线是成功的。

利用类似的过程, 图 8(a)和图 9(a)分别给出了

异常谱 2 和异常谱 3 在未对纯增长模式线修正情况下拟合谱与实测谱的对比, 由图可知: 未修正情况下, 实测谱与拟合谱的谱线峰值和谱宽都存在较大差异。图 8(b)和图 9(b)分别给出了对异常谱 2 和异常谱 3 修正所要去除的纯增长模式高斯峰。将实测谱减掉图 8(b)和图 9(b)中高斯峰得到图 8(c)和图 9(c)中对异常谱 2 和异常谱 3 的最佳修正谱, 再重新利用超高斯分布的非相干散射理论拟合获得最佳拟合谱, 由图可知, 拟合谱与修正谱吻合度较高。

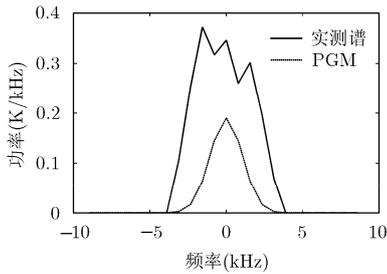


图 6 实测谱和拟合效果最佳的高斯峰

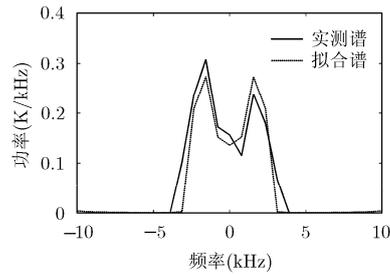


图 7 修正谱和修正谱的反演拟合谱

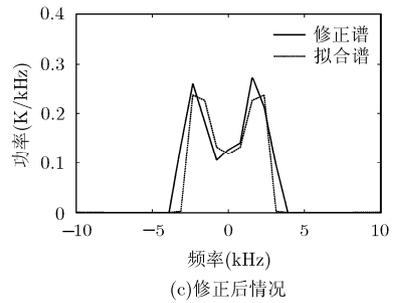
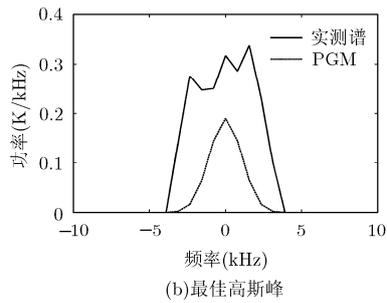
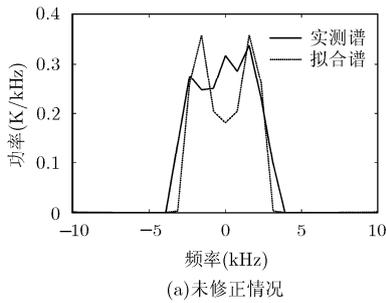


图 8 电子超高斯分布下异常谱 2 的修正与拟合

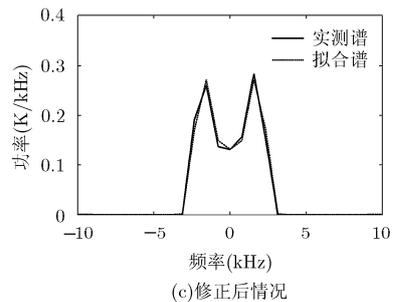
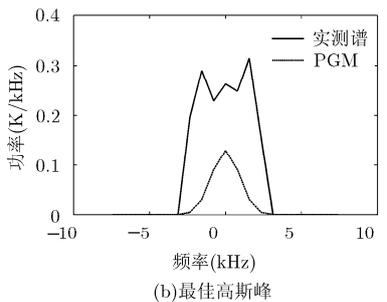
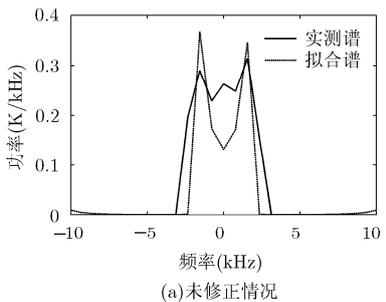


图 9 电子超高斯分布下异常谱 3 的修正与拟合

分别对 3 组数据的实测谱和修正谱拟合过程中所对应的最佳参量提取，得到反射高度处电子温度如表 2 所示。由表 2 可知，拟合残差在去除纯增长模式线后均减小，说明修正提高了拟合精度，获得的拟合参量更加准确。

表 2 超高斯分布反演电子温度表

		电子温度(K)	拟合残差
异常谱 1	未修正	3288	0.0562
	修正后	2513	0.0205
异常谱 2	未修正	2248	0.0684
	修正后	2639	0.0325
异常谱 3	未修正	1709	0.0949
	修正后	2209	0.0014

表 3 给出了未加热时刻、加热时刻超高斯分布和 GUISDAP 程序包等 3 种情况下获得的反射高度附近电子温度。将表 2 中未修正和表 3 中未加热时刻结果对比可知：直接对未修正的实测谱利用电子超高斯分布的非相干散射理论反演获得的电子温度结果不稳定，异常谱 1 中电子温度增幅约 100%，而异常谱 3 中加热时刻温度却小于未加热情况，与事实不符。因此，有必要对含纯增长模式线的异常非相干散射谱进行修正。

表 3 未加热时刻、超高斯分布和 GUISDAP 三者获得的电子温度对比(K)

	异常谱 1	异常谱 2	异常谱 3
未加热时刻	1687	1793	1944
超高斯分布	2513	2639	2209
GUISDAP	1526	1370	1576

由表 3 可知：与未加热时刻对比，直接利用 GUISDAP 对实测谱进行拟合反演，获得电子温度明显偏低，甚至低于未加热时刻，这与电离层加热能够一定程度提高电子温度<sup>[10]</sup>的结论不符，而通过去除纯增长模式线，并利用电子超高斯分布的非相干散射程序反演获得的电子温度相比未加热时刻有明显增加，电子温度绝对增加量分别为 826 K, 846 K, 265 K, 增加比例约为 13%~50%，该结果与文献[22]中的过密加热平衡状态时电子温度增幅比例相比有些差异，但绝对增加量处于几百 K 到 2000 K 的范围之内。根据文献[23,24]中对历史加热事件中电子温度增强的分析，我们认为本文结果能够对进一步分析电离层加热的异常效应提供一定的帮助。

## 5 结束语

本文提出将电子超高斯分布用于拟合反演含零频纯增长模式线的异常非相干散射谱获得扰动电子温度的方法，并成功应用于我国 2010 年秋在挪威开展的电离层加热实验数据。结果表明：与直接利用 GUISDAP 程序包结果和未加热时刻结果相比，利用电子超高斯分布的非相干散射理论拟合反演获得的扰动电子温度有显著提高，与现有电离层加热实验效应符合较好。但由于目前尚未见报道用于分析此类非相干散射谱反演电离层参量的其它方法，未能通过其它方式进一步判断获得的电子温度精确性。在今后的工作中需要通过大量加热实验数据，对本文反演方法的准确性做进一步的验证。同时，修正现有的经验加热电子分布，探索能够直接描述含纯增长模式线异常非相干散射谱的电子分布函数对进一步深入研究电离层加热中的物理机制也具有极其重要的意义。

## 参 考 文 献

- [1] 杨巨涛, 李清亮, 王建国, 等. 双频双波束加热电离层激发甚低频/极低频辐射理论分析[J]. 物理学报, 2017, 66(1): 348-356. doi: 10.7498/aps.66.019401.  
YANG Jutao, LI Qingliang, WANG Jianguo, *et al.* Theory of very low frequency/extra low frequency radiation by dual-beam beat wave heating ionosphere[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(1): 348-356. doi: 10.7498/aps.66.019401.
- [2] 赵海生, 许正文, 吴振森, 等. 电离层中释放六氟化硫效应的三维精细模拟研究[J]. 物理学报, 2016, 65(20): 209401. doi: 10.7498/aps.65.209401.  
ZHAO Haisheng, XU Zhengwen, WU Zhensen, *et al.* A three-dimensional refined modeling for the effects of SF<sub>6</sub> release in ionosphere[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(20): 209401. doi: 10.7498/aps.65.209401.
- [3] 丁宗华, 吴健, 许正文, 等. 电离层非相干散射雷达探测技术应用展望[J]. 电波科学学报, 2016, 31(1): 193-198. doi: 10.13443/j/cjors.2015030201.  
DING Zonghua, WU Jian, XU Zhengwen, *et al.* The application prospect of the ionospheric incoherent scatter measurement[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2016, 31(1): 193-198. doi: 10.13443/j/cjors.2015030201.
- [4] WANNBERG G, WOLF I, VANHAINEN L G, *et al.* The EISCAT Svalbard radar: A case study in modern incoherent scatter radar system design[J]. *Radio Science*, 1997, 32(6): 2283-2307. doi: 10.1029/97RS01803.
- [5] LEHTINEN M S and HUUSKONEN A. General incoherent scatter analysis and GUISDAP[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1996, 58: 435-452. doi: 10.1016/0021-9169(95)00047-X.

- [6] STUBBE P, KOHL H, and RIETVELD M T. Langmuir turbulence and ionospheric modification[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1992, 97: 6285-6297. doi: 10.1029/91JA03047.
- [7] KOHL H and RIETVELD M T. Harmonics of the ion acoustic frequency in the heater induced ion spectrum[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1996, 101(A3): 5391-5395. doi: 10.1029/95JA03342.
- [8] 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: Space Physics*, 2000, 105: 7429-7439. doi: 10.1029/1999JA900476.
- [9] CHENG Musong, XU Bin, WU Zhensen, *et al.* Observation of VHF incoherent scatter spectra disturbed by HF heating [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2013, 105: 245-252. doi: 10.1016/j.jastp.2013.08.010.
- [10] 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. doi: 10.6038/cjg20141117.  
CHENG Musong, XU Bin, WU Zhensen, *et al.* A large increase of electron density in ionospheric heating experiment [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(11): 3633-3641. doi: 10.6038/cjg20141117.
- [11] EKEBERG J, STASIEWICZ K, WANNBERG G, *et al.* Incoherent scatter ion line enhancements and auroral arc-induced Kelvin-Helmholtz turbulence[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2015, 122: 119-128. doi: 10.1016/j.jastp.2014.10.018.
- [12] KUO S P. Ionospheric modifications in high frequency heating experiments[J]. *Physics of Plasmas*, 2015, 22: 012901. doi: 10.1063/1.4905519.
- [13] GUREVICH A V, HAGFORS T, CARLSON H, *et al.* Electron temperature measurements by incoherent scattering in the presence of strong small scale temperature irregularities[J]. *Physics Letters A*, 1998, 246(3/4): 335-340. doi: 10.1016/S0375-9601(98)00422-8.
- [14] ASHRAFI M, KOSCH M J, and HONARY F. Heater-induced altitude descent of the EISCAT UHF ion line enhancements: Observations and modelling[J]. *Advances in Space Research*, 2006, 38(11): 2645-2652. doi: 10.1016/j.asr.2005.06.079.
- [15] ZHENG Jian, YU C X, and ZHENG Z J. Effects of non-Maxwellian (super-Gaussian) electron velocity distribution on the spectrum of Thomson scattering[J]. *Physics of Plasmas*, 1997, 4(7): 2736-2740. doi: 10.1063/1.872141.
- [16] 徐彬, 吴振森, 吴健, 等. 电离层加热期间非相干散射谱的反演[J]. *电波科学学报*, 2008, 23(4): 713-716. doi: 10.13443/j.cjors.2008.04.020.  
XU Bin, WU Zhensen, WU Jian, *et al.* Inversion of incoherent scatter spectra during ionosphere heating[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2008, 23(4): 713-716. doi: 10.13443/j.cjors.2008.04.020.
- [17] XU Bin, WANG Zhange, XUE Kun, *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): 492-497. doi: 10.1016/j.jastp.2010.01.006.
- [18] WU Lili, ZHOU Qinghou, CHEN Tiejun, *et al.* Application of particle swarm optimization method to incoherent scatter radar measurement of ionosphere parameters[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, 120(9): 8096-8110. doi: 10.1002/2014JA020970.
- [19] VIIRTANEN I I, MCKAY-BUKOWSKI D, VIERINEN J, *et al.* Plasma parameter estimation from multistatic, multibeam incoherent scatter data[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, 119(12): 10528-10543. doi: 10.1002/2014JA020540.
- [20] 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. doi: 10.13443/j.cjors.2014072401.
- [21] VICKERS H, ROBINSON T, and MCCREA I W. A method for improving plasma temperature estimates from incoherent scatter analysis during artificial ionospheric modification experiments[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2010, 115: A11316. doi: 10.1029/2010JA015606.
- [22] 王琛, 周晨, 赵正予, 等. 大功率电波加热电离层中热自聚焦不稳定性的理论研究和数值模拟[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(6): 1853-1868. doi: 10.6038/cjg20150602.  
WANG Chen, ZHOU Chen, ZHAO Zhengyu, *et al.* Theoretical analysis and numerical simulation of thermal self-focusing instability caused by powerful HF radio waves used in ionospheric heating experiments[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(6): 1853-1868. doi: 10.6038/cjg20150602.
- [23] RIETVELD M T, KOSCH M J, BLAGOVESHCHENSKAYA N F, *et al.* Ionospheric electron heating, optical emissions, and striations induced by powerful HF radio waves at high latitudes: Aspect angle dependence[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(A4): 1141. doi: 10.1029/2002JA009543.
- [24] 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]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1993, 55(10): 1433-1448. doi: 10.1016/0021-9169(93)90109-C.
- 李海英: 女, 1982年生, 副教授, 研究方向为电离层加热实验和理论、复杂介质中电磁波传播特性。
- 孔鹏飞: 男, 1991年生, 硕士生, 研究方向为电离层加热效应理论模拟。
- 徐彬: 男, 1982年生, 高级工程师, 研究方向为电离层人工干预实验和理论。
- 吴振森: 男, 1946年生, 教授, 研究方向为复杂环境中电磁波传播和散射。