

刘二小,胡红桥,刘瑞源等. 中山站高频雷达回波的日变化特征及地磁活动的影响. 地球物理学报, 2012, 55(9): 3066-3076, doi: 10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 09. 024.

Liu E X, Hu H Q, Liu R Y, et al. Diurnal variation of the HF radar echoes at Zhongshan Station and the influence of geomagnetic activity. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(9): 3066-3076, doi: 10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 09. 024.

## 中山站高频雷达回波的日变化特征及地磁活动的影响

刘二小<sup>1,2</sup>, 胡红桥<sup>2</sup>, 刘瑞源<sup>2</sup>, 吴振森<sup>1</sup>, 吴铭君<sup>2</sup>, 杨惠根<sup>2</sup>, 张北辰<sup>2</sup>

1 西安电子科技大学理学院, 西安 710071

2 国家海洋局极地科学重点实验室, 中国极地研究中心, 上海 200136

**摘 要** 利用新建中山站高频雷达 2010 年 4 月到 2011 年 2 月的观测数据, 研究了中山站高频雷达回波的日变化特征以及地磁活动的影响. 研究表明, 中山站高频雷达回波具有明显的日变化特征且受地磁活动影响较大. 雷达回波发生率的峰值在地磁活动较小时处于日侧; 随着地磁活动的增强, 峰值减小并向夜侧移动. 另外, 平均多普勒视线速度具有明显的昼夜分布, 夜侧主要为正向速度, 即朝向雷达, 日侧主要为负向速度, 即远离雷达; 随着地磁活动的增强, 平均回波强度和平均多普勒视线速度的峰值都会增加, 而多普勒谱宽则会减小.

**关键词** 高频雷达回波, 日变化, 地磁活动, 中山站

doi: 10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 09. 024

中图分类号 P318

收稿日期 2011-11-09, 2012-06-28 收修定稿

### Diurnal variation of the HF radar echoes at Zhongshan Station and the influence of geomagnetic activity

LIU Er-Xiao<sup>1,2</sup>, HU Hong-Qiao<sup>2</sup>, LIU Rui-Yuan<sup>2</sup>, WU Zhen-Sen<sup>1</sup>,

WU Ming-Jun<sup>2</sup>, YANG Hui-Gen<sup>2</sup>, ZHANG Bei-Chen<sup>2</sup>

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

2 State Oceanic Administration Key Laboratory for Polar Science, Polar Research Institute of China, Shanghai 200136, China

**Abstract** The diurnal variation of Zhongshan HF radar echoes and the influence of geomagnetic activity on it have been analyzed from 241 days of Zhongshan HF radar data from April, 2010 to February, 2011. The result shows that the diurnal variation is very obvious and the influence of geomagnetic activity is significant. The peak echo occurrence occurs at dayside during geomagnetic quiet times, and shifts toward nightside and exhibits an obvious decrease with the increasing geomagnetic level. The result also indicates that the average l-o-s velocity has obvious diurnal variation. At nightside, the velocity is mainly positive and toward the radar, but negative and away from the radar at dayside. The average power and the l-o-s velocity are apparently higher in geomagnetic active times than that during quiet times. In contrast, the echo occurrence and Doppler spectral width are lower.

**基金项目** 国家自然科学基金(41031064)、国家高技术研究发展计划(2008AA121703)、海洋公益项目(201005017)、南北极环境综合与评估专项-极区空间环境观测(CHINARE2012-02-03)共同资助.

**作者简介** 刘二小,男,1984 年出生,西安电子科技大学与中国极地研究中心联合培养在读博士,主要从事电离层物理和电波传播的研究.  
E-mail: liuerxiao@pric.gov.cn

**Keywords** HF echoes, Diurnal variation, Geomagnetic activity, Zhongshan Station

## 1 引言

中山站高频雷达是子午工程和极地考察十五能力建设项目共同支持下于 2010 年 4 月建成的大型观测设备,其主要功能是观测极区电离层对流。南极中山站地理坐标为(69°22′24″S,76°22′40″E),修正地磁(Corrected Geo-Magnetic, CGM)坐标为(74.49°S,96.01°E),不变磁纬约为 75°S,  $L=13.9$ ,  $MLT=UT+2h$ ,  $LT=UT+5h$ 。在太阳和地磁活动宁静环境下,中山站每天磁正午前后处于极隙区,夜间则处于极盖区,每天两次进出极光带(约 0400~0800UT 和 1200~1500UT 两时段,位于极光带内)。因此,优越的地理位置使其成为监测和研究极区空间环境变化的重要场所<sup>[1-3]</sup>。

中山站高频雷达于 2010 年 4 月开始试运行后,已成为国际上超级双子极光雷达观测网(SuperDARN)的一员。SuperDARN 雷达网诞生于 20 世纪 80 年代中期并不断地发展壮大,目前有近 30 部雷达在运行,其视场(Field of View, FOV)覆盖了南北半球大部分的极区电离层。SuperDARN 在研究磁层、电离层、热层以及中间层方面已经取得了很大的成功<sup>[4-5]</sup>。SuperDARN 高频雷达通过探测电离层不规则体的布拉格(Bragg)散射回波,对回波信号的自相关函数进行谱分析,从而得到电离层中场向不规则体的回波强度、视线速度以及多普勒谱宽。像其他 SuperDARN 高频雷达一样,中山站高频雷达由间隔约为 15 m 的 16 个对数周期天线形成主阵列,用于发射和接收高频段的无线电回波;由四个天线组成副阵列(大多数 SuperDARN 高频雷达),用于相干测量回波的到达角。

中山站高频雷达能够探测斜距在 180~3000 km 的高频后向散射回波,其探测高度包括了电离层 D 区、E 区和 F 区。高频雷达发射的无线电波通过在电离层中(主要是 E 区和 F 区)的折射,能够与电离层中沿场向排列的不规则体达到正交,当不规则体的尺度与电波波长相当时,就会产生后向相干散射回波。中山站高频相干散射雷达的工作频率可以在 8~20MHz 的范围内根据回波的情况自由调节。在常规或者快速扫描工作模式下,雷达通过相控阵在 16 个固定波束方向上连续扫描(即波束 0~15),相邻波束间隔约为 3.24°,16 个波束共覆盖约 52°的方

位角。雷达在每个波束方向上停留时间为 7 s 或者 3 s(快速扫描),因此一次完整的扫描需要大约 2 min(对于快速扫描则为 1 min)。在常规观测模式中,每个波束扫描的测量区间从 180 km 开始,共测量 75 个距离门(gate),在设定距离分辨率为 45 km 的情况下,最大测量距离为 3555 km。中山站高频雷达的距离分辨率为 15、30、45 km 可调。中山站高频雷达是双通道雷达,两个雷达通道可以独立地工作,如 A 通道进行全波束扫描时,B 通道可以在不同的工作频率、不同的距离分辨率和不同的扫描方式下观测,从而得到不同时间和空间分辨率的数据。通过统计方法研究 SuperDARN 高频雷达回波的日变化和统计特征可以显示出电离层的各种物理特性。

由于不同地区的电离层特性和磁力线位形不同,因此,不同的 SuperDARN 高频雷达的回波有着不同的日变化特征。地磁活动对于 SuperDARN 高频雷达回波统计特性也具有较大的影响。先前的许多工作都研究了 SuperDARN 高频雷达回波的特点以及统计特性<sup>[6-10]</sup>。Parkinson 等(2003)<sup>[11]</sup>利用南半球 TIGER 雷达波束 4(磁经向)和波束 15(磁纬向)统计分析了不同地磁活动条件下十米量级的电离层不规则体,其发生率、平均多普勒速度以及多普勒谱宽的分布特征,结果发现回波主要集中于磁午夜扇区,且靠近极光卵的极向一侧。而且随着  $Kp$  指数的增强,在极光卵的赤道向能够观测到更多的回波。Ruohoniemi 和 Greenwald(1997)<sup>[6]</sup>利用加拿大 Goose Bay 高频雷达对太阳活动高年的电离层 F 区回波发生率做了统计研究,结果显示最大发生率在地磁活动平静时期处于夜侧,在扰动较大时处于下午侧,即发生率峰值的出现位置会随着  $Kp$  指数的不同而发生较大的偏移。文中还指出,当  $Kp$  指数较大时,由于电离层 D 区和较低 E 区的电子密度较大,高频射线在晨侧吸收比较严重,因此发生率会有明显的下降。先前很多工作还分析了回波发生率的日变化特征<sup>[12-15]</sup>,这些研究都显示出不同波段的回波发生率具有相似的昼夜变化。Tsunoda 等(1988)<sup>[16]</sup>解释了午夜之后能够观测到较强不规则体的一种可能的机制。而中山站高频雷达由于其特殊的地理位置,使得 SuperDARN 高频雷达观测网的覆盖延伸到极盖区,因此中山站高频雷达更有利于观测极光卵极向一侧以及极盖区电离层。

本文通过对中国南极中山站新建高频雷达回波的统计,分析了中山站高频雷达回波的发生率、平均回波强度、平均多普勒速度和谱宽的日变化特征以及地磁活动的影响,从而为进一步利用中山站高频雷达研究电离层对流和磁层动力学过程奠定基础.

## 2 观测数据

本文利用 2010 年 4 月到 2011 年 2 月期间中山站高频雷达通道 A 波束 15 的数据,该时段正处于太阳活动低年向高年转换的上升期. 图 1 为中国南极中山站高频雷达的视场(FOV),其中标示了波束 15 和中心波束的位置.

表 1 给出了本文中用到的中山站高频雷达通道 A 的数据集. 雷达工作在通道 A 时,扫描频率一直维持在 10 MHz 左右. 其中从 2010 年 4 月 4 日到 2010 年 10 月 8 日,通道 A 采用常规扫描模式,时间分辨率为 2 min/次;从 2010 年 10 月 28 日换为快速扫描模式,时间分辨率为 1 min/次. 本文中的所有数据均为 SuperDARN 软件判别为电离层回波的数据<sup>[17]</sup>. 在统计过程中,软件将具有较小多普勒速度 ( $|V_{\text{los}}| < 30$  m/s) 和较小谱宽 ( $\Delta v < 35$  m/s) 的回波判别为地面回波,排除在统计之外.

在研究地磁活动的影响时,为了避免因事件数太少而出现较大的统计误差,地磁活动性指数  $Kp$

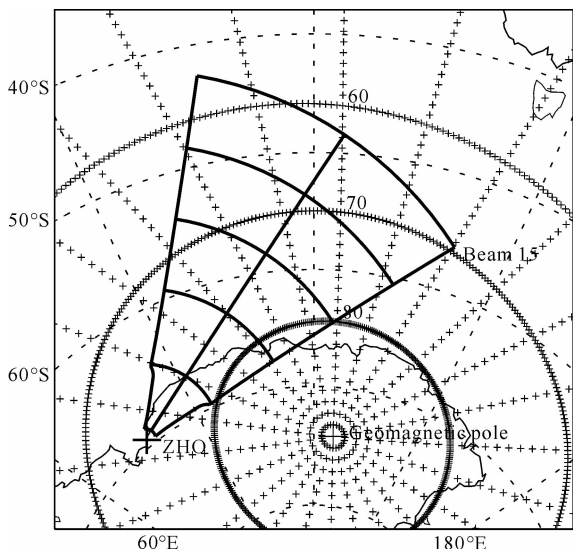


图 1 中山站高频雷达的视场(FOV)

细线为地理坐标网格,粗线为修正地磁坐标网格. 地理经纬度标示在方框外,而地磁纬度标示在方框内.

Fig. 1 Field of view of Zhongshan HF radar

The thin dashed lines indicate the geographic coordinates and the thick lines indicate the CGM coordinates.

表 1 本文中使用的 高频雷达通道 A 的数据集

Table 1 Zhongshan HF radar data set in channel A analyzed in this study

|        |  |
|--------|--|
| 2010 年 | 4 月 04,06—21; 5 月 06—31; 6 月 01—30; 7 月 01—31; 8 月 01—31; 9 月 01—25,30; 10 月 07—08,29—31; 11 月 01—30; 12 月 01—31 |
| 2011 年 | 1 月 01—04,27—31 日; 2 月 01—04,07 日  |

将分为四级,分别为: a)  $Kp=0$ , b)  $Kp=1$ , c)  $Kp=2$ , d)  $Kp \geq 3$ . 图 2 为四级地磁活动对应的发生天数的时间分布.

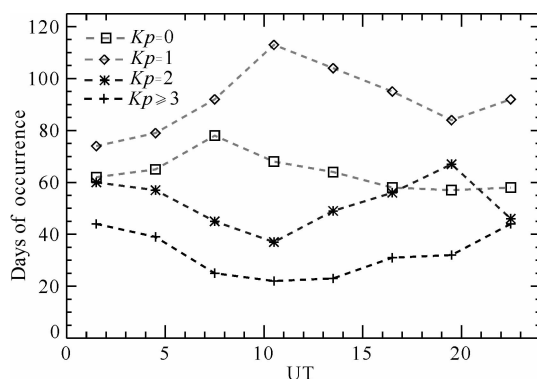


图 2 在 2010 年 4 月 3 日到 2011 年 2 月 7 日期间,不同  $Kp$  指数发生天数的时间分布

Fig. 2 Distribution of the number of days at different  $Kp$  levels at each 3-hour period during April 3, 2010 and February 7, 2011

## 3 统计结果

### 3.1 回波发生率的日变化以及地磁活动的影响

图 3 给出中山站高频雷达波束 15 观测的电离层回波发生率的日变化. 每个时间格的回波发生率

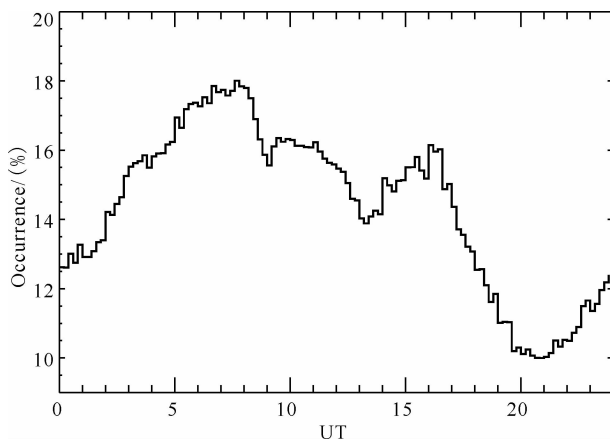


图 3 电离层回波发生率的日变化

Fig. 3 Diurnal variation of the occurrence of ionospheric echoes

计算方法如下,首先计算该段时间格(如时间格为  $m$  分钟)内雷达波束从 gate 0 到 gate 74 扫描的总数  $N(ut)$ ,如果雷达工作的时间分辨率为  $n$  分钟,即完成一次扫描需要  $n$  分钟,则  $N(ut)=75 m/n$ ,同时记录符合 SuperDARN 软件电离层回波判别依据的回波数,记为  $M(ut)$ ,则该时间格内的回波发生率为  $M(ut)/N(ut)$ . 由图 3 可知,回波发生率日变化特征明显且存在两个明显的峰值区和一个低谷区. 在 00~08UT 之间,发生率会随着时间逐渐增加,到 08UT 达到第一个峰值,约为 18%,这也是所有时间段内发生率的最大值. 从 08UT 开始,发生率总体呈下降趋势,一直到 14UT,此时发生率约为 14%. 随后,发生率又逐渐增加,一直到 16UT 的 16% 左右,此时出现发生率的次峰值. 然后,发生率急剧下降,一直到 21UT 附近到达最小值,约为 10% 左右. 随后又逐渐增加到 00UT 的 11% 左右. 考虑到中山站磁地方时 MLT 与世界时 UT 之间相差约 2 h,同时雷达探测的范围覆盖了约 7 h,日侧雷达回波的发生率明显高于夜侧.

图 4 给出不同地磁活动水平下中山站高频雷达波束 15 观测的电离层回波发生率随磁地方时 (MLT) 和地磁纬度 (MLAT) 的分布. 在统计中对数据进行了网格 (bin) 划分,磁地方时 (MLT) 网格分辨率为 12 min,磁纬度 (MLAT) 网格分辨率为  $1^\circ$ . 每个网格的发生率计算方法如下,首先计算波束 15 从 gate 0 到 gate 74 共 75 个单元格内理论上能够探测的该 MLT-MLAT 网格的总数,记为  $N(mlt,mlat)$ ,同时,程序记录该网格内符合 SuperDARN 软件电离层回波判别依据的回波点数,记为  $M(mlt,mlat)$ ,则该 MLT-MLAT 网格内的回波发生率为  $M(mlt,mlat)/N(mlt,mlat)$ . 图 4 中左上角的数值给出了回波总数. 各子图中,对应的  $Kp$  指数也给出;同心虚线圆为地磁纬度线,外圈为  $70^\circ$  线,内圈为  $85^\circ$  线;辐射状的虚线定义了整点的 MLT,00MLT 在底部,06MLT 在右侧,12MLT 在顶部(见图 4c);粗虚线椭圆给出了相应地磁活动水平下极光卵内边界;彩色圆环给出了回波发生率(颜色定义见右侧色标)的日变化情况及其随地磁纬度的分布.

由图 4 可见,雷达回波大多数发生在极光椭圆极向边界以内,即回波大都发生在极盖区,中山站高频雷达波束 15 的几何位置在一天中的变化决定了它在 MLT-MLAT 坐标中的探测范围在 MLAT =  $74^\circ$  和 MLAT =  $82^\circ$  之间. (1) 在  $Kp=0$  时,峰值发

生率约为 48%,出现在日侧的 05~11MLT 和  $79^\circ$  MLAT,这可能与日侧较强的太阳辐射有关. (2) 在地磁活动较弱 ( $Kp < 2$ ) 时,存在一个明显的发生率较小区域,位于 22~23MLT,这一方面是由于这个时段处于极光亚暴高发时段,吸收事件发生频繁<sup>[18]</sup>,另一方面就是极洞<sup>[19-20]</sup>的存在,并且夜侧本身电子密度较小,电离层对电波的折射效应减弱,电波更倾向于穿出电离层而使雷达回波减少,同时电子密度较小产生的起伏也较小,造成不规则体的减少. (3) 当  $Kp$  增大到 2 时,发生率的峰值明显减小,约为 30%,出现在 06~09MLT,且在纬度范围明显增大,分布在  $76^\circ$  MLAT~ $79^\circ$  MLAT. 另外,发生率在 MLT 的方向上也趋于均匀,发生率较低区域也明显减小. 当  $Kp$  指数进一步增大直到  $Kp \geq 3$  时,发生率的峰值位置出现了明显的变化,转移至夜侧 23~03MLT 和较低纬度  $76^\circ$  MLAT. 由中山站高频雷达波束 15 的几何位置可知,较低纬度的回波对应着较低的距离门,即回波高度也较低,而且与  $Kp$  较低时有明显区别的是在日侧 10~12MLT,回波发生率明显减小. 总体而言,日侧回波发生率峰值主要是地磁活动较低时的贡献,日侧发生率随着地磁活动的增强而减小.

### 3.2 平均回波强度的日变化以及地磁活动的影响

图 5 给出电离层回波平均强度的日变化. 平均回波强度的日变化与回波发生率的日变化特征总体趋势相似,日侧高,夜侧低. 不同之处是回波强度在 16~17UT 附近的次峰值不是很明显. 平均回波强度的峰值出现在 07UT 附近,约为 17 dB. 而最小值出现在 21UT 附近,约为 11 dB.

图 6 给出不同地磁活动条件下电离层回波的平均

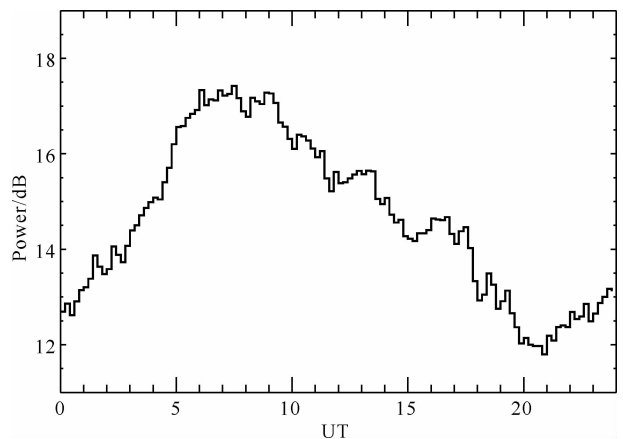


图 5 电离层平均回波强度的日变化

Fig. 5 Diurnal variation of the average power of ionospheric echoes

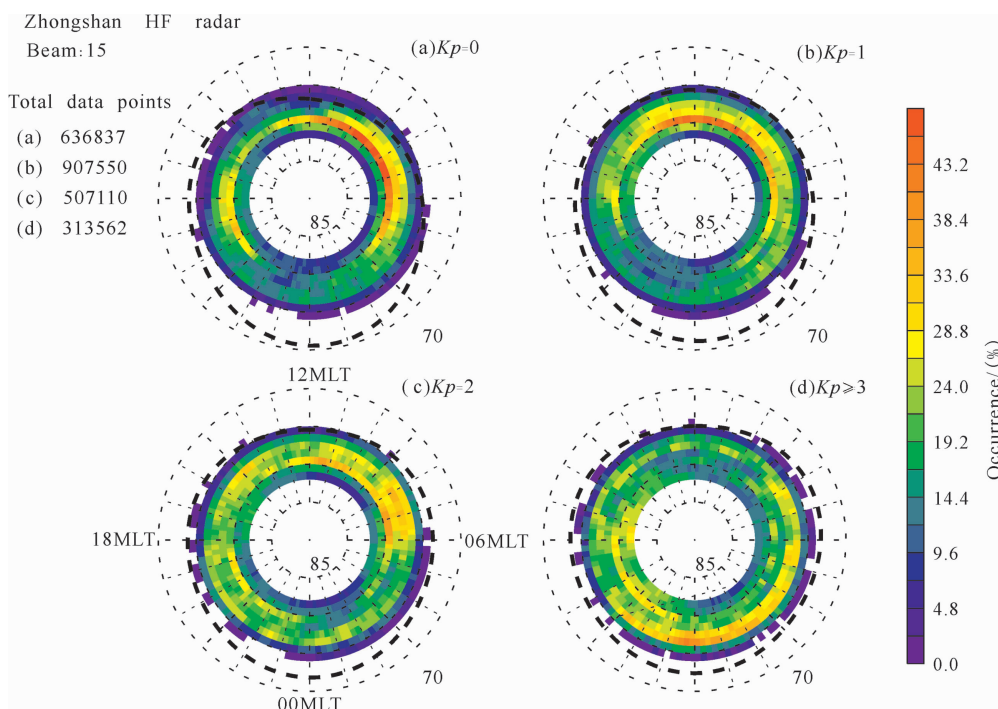


图 4 不同地磁活动条件下的电离层回波发生率, 网格分辨率为 12 min(MLT) 和  $1^\circ$ (MLAT), 电离层回波总数显示在左上角. 图中较粗虚线为极光卵极向边界

Fig. 4 The occurrence of ionospheric echoes at different geomagnetic activity levels

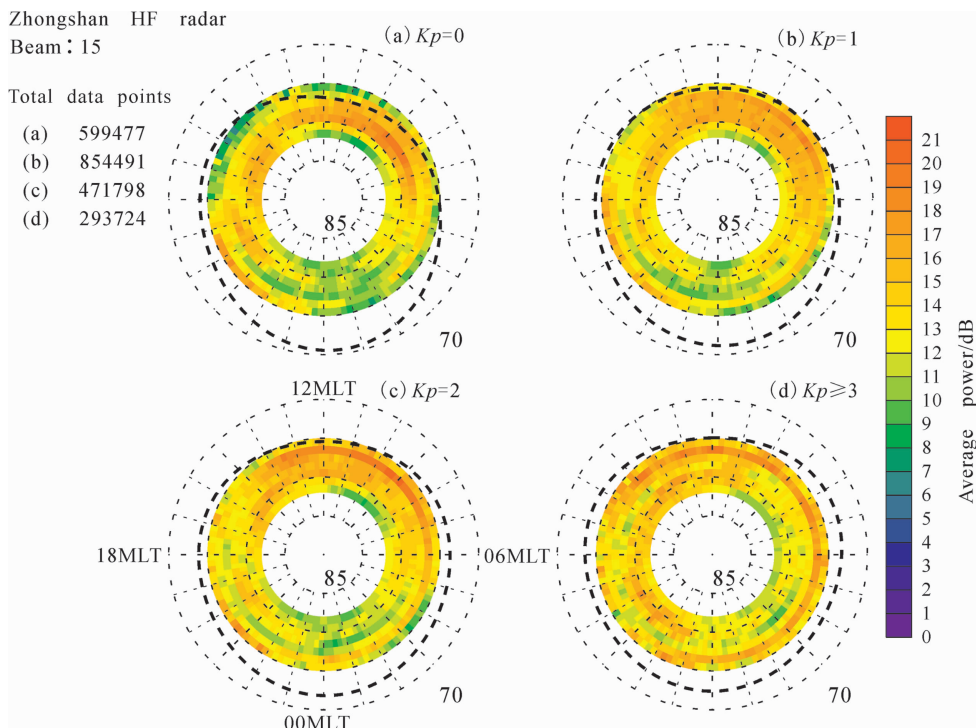


图 6 不同地磁活动条件下电离层回波的平均回波强度

Fig. 6 The average power of ionospheric echoes at different geomagnetic activity levels

均强度变化, 格式与图 4 相同. 在某些网格内, 因为电离层回波总数发生次数太少而使该网格内平均回波强度很大, 失去了统计的意义, 这些少数的网格点已经被排除. 从图 6 可以看出, 在不同的地磁活动

条件下, 回波强度的峰值处于不同的纬度与磁地方时. 当地磁活动较平静即  $Kp=0$  时, 回波强度的峰值主要位于三个区域, 第一个峰值区位于  $76^\circ\text{MLAT} \sim 79^\circ\text{MLAT}$  及  $06 \sim 12\text{MLT}$ , 平均回波强度大于

20 dB. 第二个峰值区位于 14~18MLT, 纬度较高, 平均回波强度约为 16 dB. 第三个峰值区位于较低纬度 75°MLAT, 且集中于 19~22MLT. 当地磁活动增大到  $Kp=1$  时, 峰值回波强度的分布区域在纬度和磁地方时范围上明显扩展, 集中于 05~18.5MLT 及 75°MLAT~79°MLAT. 从 15MLT 开始, 其纬度范围缩小至 79°MLAT~82°MLAT. 当地磁活动增大到  $Kp=2$  时, 平均回波强度的峰值有所增大, 由  $Kp=1$  时的 18 dB 增大到  $Kp=2$  时的 21 dB. 当  $Kp \geq 3$  时, 峰值回波强度主要存在于两个区域, 第一个区域位于 76°MLAT 和 22~16MLT, 第二个区域位于晨侧, 即 12~23MLT, 且集中于 79°MLAT~81°MLAT. 另外一个明显的特征就是在  $Kp$  指数较小时, 存在一个平均回波强度较小的区域位于 00~02MLT, 该区域随着地磁活动的增大而逐渐减小. 在不同的地磁活动下, 回波强度的平均值在夜侧都存在两个同心圆环分布的峰值, 在地磁活动较强时高纬侧的峰值环延伸到日侧, 这两个环对应的回波可能有不同的产生机制.

### 3.3 平均多普勒视线速度的日变化以及地磁活动的影响

图 7 给出电离层回波平均多普勒视线速度的日变化. 由图可见, 在 00~06UT, 多普勒速度为正, 即朝向雷达方向. 在 00UT 附近, 平均速度约为 260 m/s, 且随着时间变化大致呈线性递减趋势, 在 06UT 附近, 速度变为负, 即远离雷达方向, 且随着时间逐渐增大直到 11UT 附近的 -200 m/s 左右, 随后, 速度呈负向线性递减, 直到 17UT 附近, 速度又重新转变为朝向雷达方向的, 然后随着时间逐渐

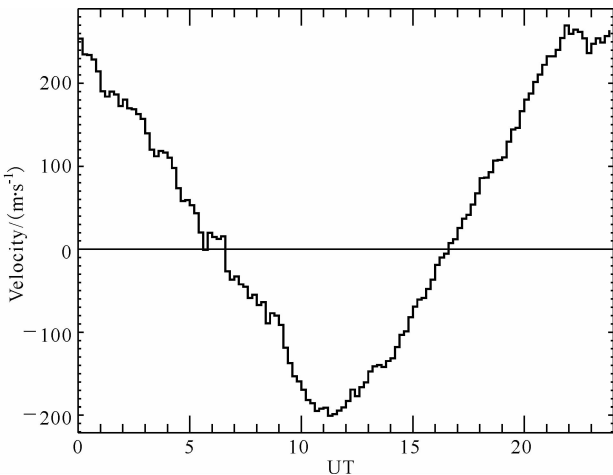


图 7 电离层回波平均多普勒视线速度的日变化

Fig. 7 Diurnal variation of the average line-of-sight velocity of ionospheric echoes

增加, 直到 22UT 附近达到峰值, 约为 270 m/s. 从 22UT 到 00UT 附近, 多普勒速度变化较为平缓, 基本介于 250~270 m/s 之间. 总之, 多普勒速度在日侧时基本为负, 即远离雷达方向, 在夜侧时为正, 即朝向雷达. 考虑到一天不同时刻雷达波束相对于电离层对流形指向的变化, 雷达回波的平均多普勒视线速度以逆阳方向为主, 峰值出现在磁中午和磁子夜附近.

图 8 显示了电离层回波的平均多普勒视线速度受地磁活动的影响. 由图 8 可见, (1) 速度分布具有明显的昼夜变化, 在日侧, 速度是远离雷达的, 而在夜侧, 速度主要是朝向雷达. 存在两个明显的速度反转区域, 在 0500UT 速度由正的变为负的, 即由朝向雷达转变为远离雷达, 而在 1700UT, 速度由负的转变变为正的, 即由远离雷达转变为朝向雷达. (2) 平均多普勒速度随着地磁活动的增强而增大. 当  $Kp=0$  时, 日侧的多普勒速度峰值约为 -300 m/s,  $Kp \geq 3$  时, 日侧的多普勒速度峰值绝对值变为大于 450 m/s. 多普勒速度随地磁活动的变化在夜侧也具有相似的特点.

### 3.4 平均谱宽的日变化以及地磁活动的影响

图 9 给出电离层回波平均谱宽的日变化. 从图 9 可见, 在 00UT 附近, 平均谱宽约为 140 m/s, 然后逐渐呈线性增加, 直到 10UT 附近到达最大值, 约为 180 m/s. 随后, 谱宽的值急剧地下降到 17UT 时的 110 m/s. 在 17UT 到 20UT 之间, 多普勒谱宽没有较大起伏. 从 20UT 开始, 谱宽又逐渐增大, 直到 00UT 附近的 140 m/s. 总之, 日侧回波多普勒谱宽较大, 夜侧回波谱宽较小.

图 10 给出中山站高频雷达波束 15 观测的电离层回波平均谱宽随  $Kp$  指数的变化. 由图 10 可知,

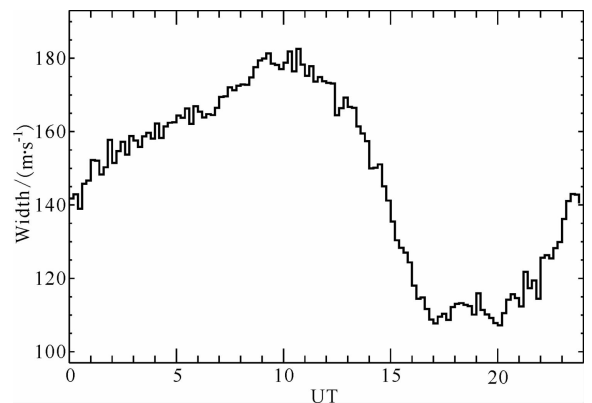


图 9 电离层回波平均谱宽的日变化

Fig. 9 Diurnal variation of the average widths of ionospheric echoes

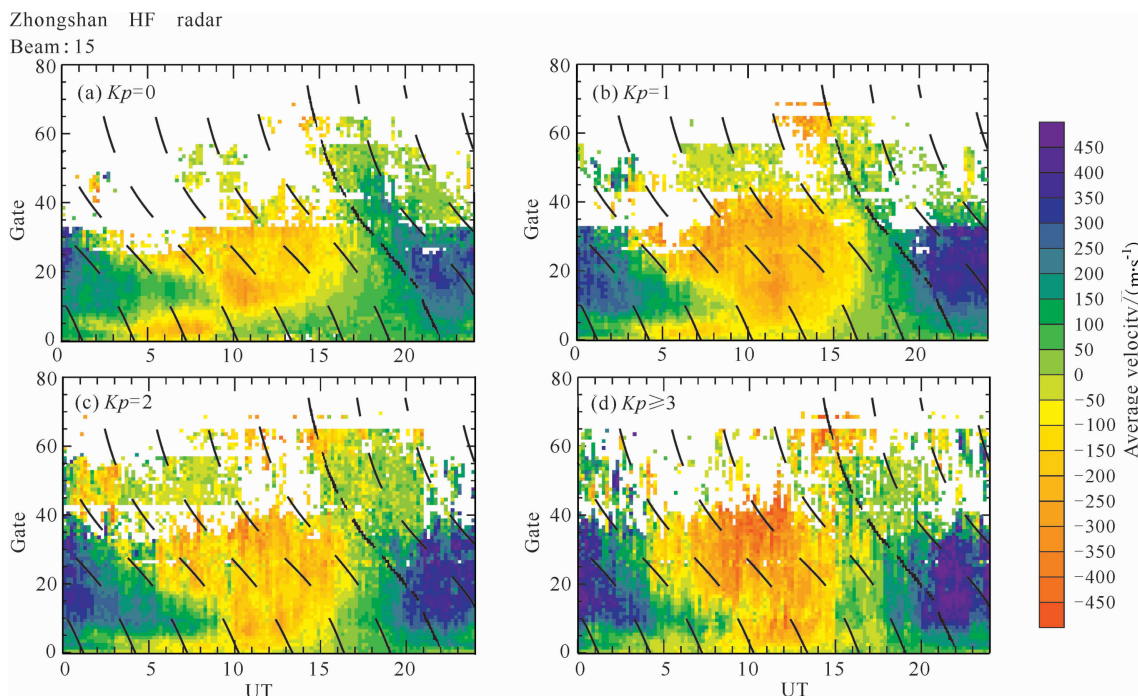


图 8 不同地磁活动条件下电离层回波的平均多普勒视线速度，图中倾斜虚线为 MLT 等值线，其中较粗的虚线为 00MLT，向右每条虚线递增 3MLT  
 Fig. 8 The average line-of-sight Doppler velocities of ionospheric echoes at different geomagnetic activity levels, the tilted dashed lines illustrate the overlay of MLT

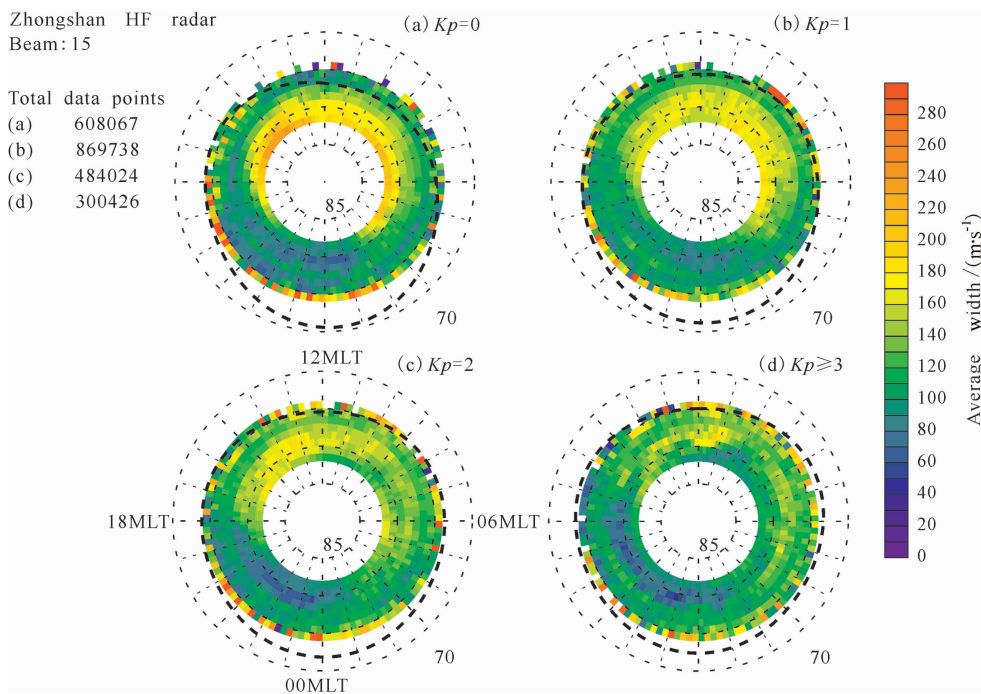


图 10 不同地磁活动条件下电离层回波的平均多普勒谱宽分布

Fig. 10 The average Doppler spectral widths of ionospheric echoes at different geomagnetic activity levels

(1) 谱宽的峰值出现在  $Kp=0$  时，主要集中在 04~09MLT、13~17MLT 和  $81^\circ$ MLAT 的纬度范围内，峰值都大于 230 m/s，且日侧的平均谱宽总体比夜侧的谱宽要大，这可能与日侧极隙区的粒子沉降有关。

当  $Kp$  指数增大时，谱宽的峰值会减小。(2) 从昏侧到子夜附近，存在一个平均谱宽较低的区域，谱宽值基本都小于 100 m/s，当地磁活动剧烈时，该区域更多的集中于较高纬度，而在夜侧的较低纬度谱宽反

而较大,这可能与电离层回波的产生机制有关. 总体而言,平均多普勒谱宽会随着地磁活动的增强而减小,Fukumoto 等(1999)<sup>[21]</sup>利用日本南极昭和站高频雷达进行的谱宽统计也得到了类似的结果.

## 4 讨 论

本文通过对 2010 年中国南极中山站高频雷达运行第一年的数据进行统计研究,分析了雷达回波发生率、平均回波强度、平均多普勒速度和谱宽的日变化以及地磁活动对其统计分布的影响,揭示了南极中山站高频雷达回波的统计特性. 关于 SuperDARN 高频雷达回波统计特性,已有一些研究分析了不同的 SuperDARN 雷达的回波发生率和谱宽的日变化特征以及受地磁活动的影响,并且解释了其中包含的物理原因. Fukumoto 等(1999)<sup>[21]</sup>利用日本南极昭和站 1995 年的 SuperDARN 高频雷达数据统计分析了这三个物理参量(回波强度、多普勒速度、谱宽)受地磁活动的影响. 总体而言,随着地磁活动的增强,雷达回波的平均多普勒谱宽会减小,而平均回波强度和谱宽则会增大. 这与本文的统计结果一致. Hanuise 等(1991)<sup>[22]</sup>利用加拿大的 SHERPA 高频雷达获得的这三个参数通过统计研究讨论了三个参数之间的关系,发现电离层 E 区回波主要有两个来源,即双流等离子体波和梯度漂移等离子体. Ruohoniemi 和 Greenwald(1997)<sup>[6]</sup>也研究了多普勒速度和回波强度的统计分布,结果都显示了 SuperDARN 高频雷达回波统计特性受地磁活动的影响较大,但是研究结果与本文的结果存在较大差别,这与雷达的地理和地磁位置、波束指向以及太阳活动性指数有关系. Ruohoniemi 和 Greenwald(1997)<sup>[6]</sup>利用 Goose Bay 雷达探测的回波主要是极光卵及极光卵赤道向一侧的 F 区回波,而本文中的数据为太阳活动上升期中山站高频雷达探测的大多数极盖区的回波,因此会有差异. Carter 和 Makarevich<sup>[15]</sup>利用 15 部 SuperDARN 高频雷达 2002—2004 年的数据统计分析了 E 区回波的日变化特征以及随地磁活动的变化,结果表明不同雷达的 E 区回波发生率在地磁活动较小时很相似,随着地磁活动增强,差异也会增大.  $Kp$  指数较低时,回波发生率的峰值都位于晨侧,在  $Kp$  指数最高时,回波发生率是最小的,这些都与本文的统计结果相一致. 地磁活动增强时,不同雷达的回波发生率峰值的位置具有较大差异.

由本文的统计结果表明,中山站高频雷达回波的发生率和平均回波强度的日变化特征具有相似性,日侧高,夜侧低,且在 21UT 附近存在一低谷区域. 这一方面是由于日侧太阳辐射较强,电子密度较大,与电子密度成正比的电子密度起伏相对较大,产生的电子密度不规则体较多且后向散射回波强度较大<sup>[23-25]</sup>,所以日侧回波发生率较高. 另一方面,夜侧的 21UT 这个时段处于极光亚暴高发时段,此时的吸收事件较为频繁,电离层对雷达高频电波吸收严重,还有就是极盖区子夜附近极洞<sup>[19-20,26]</sup>的存在也是回波发生率较低的原因之一. 极洞中的电子密度小,本身产生的不规则体就少. 同时,电离层对无线电波的折射效应不明显,无线电波矢量很难通过折射与场向排列的不均匀体正交,较难形成布拉格相干散射,所以产生较少的后向散射回波.

从地磁活动的影响可以看出,回波发生率的峰值会随着地磁活动的增强而减少,这是由于当地磁活动增强时极区粒子沉降严重,对雷达电波吸收增大,使回波发生率减少. 另外,回波发生率的分布在不同地磁活动水平下的纬度范围也有所不同. 在地磁活动宁静时刻(即  $Kp < 2$  时,见图 4a 和 4b),在日侧  $80^\circ$ MLAT 的附近可以观测到较多的回波,而当地磁活动增大到  $Kp \geq 3$  时,在夜侧  $76^\circ$ MLAT 附近观测到较多的回波. 一般地,斜距在  $900 \sim 1500$  km 的回波通常为 F 区回波,而斜距在  $400 \sim 900$  km 的回波既可能是 E 区回波也可能是 F 区回波<sup>[27]</sup>,在仰角一定的情况下,斜距越大则回波高度也越高. 通常距离大于 630 km 的回波认为是来自于 F 区的回波<sup>[28]</sup>. 通过分析中山站高频雷达波束 15 的几何位置及其探测范围,可知,这两个纬度区域的回波可能对应着不同的产生机制. 地磁宁静时(见图 4a 和 4b)较高纬度的回波对应着电离层中较高 E 区和 F 区的回波,而地磁扰动较大时(见图 4d)较低纬度的回波对应着较低的 E 区产生的电离层回波. 这是因为当地磁扰动较大时,由于粒子沉降严重,更易于在较低的电离层中形成较大的电子密度,而电子密度的起伏量也会增大,从而在较低高度形成更多的不规则体,同时较高的电子密度对电波折射效应增大. 另外,在夜侧由于电离层 D 区的消失,夜侧吸收相对较小,最终导致在夜侧较低纬度(即较低的电离层高度)能够探测到更多的电离层不规则体,这与图 10d 中地磁扰动较大时位于夜侧较低纬度的回波谱宽较大相对应. 对于日侧,电离层 D 区的存在会产生吸收,当发生地磁暴时,吸收更加严重,最终导致



日侧的发生率要低于夜侧的。

平均多普勒视线速度的日变化具有明显的昼夜特征,在日侧 06~17UT,平均速度为负,即远离雷达,在夜侧为正,即朝向雷达,这与极盖区电离层对流以逆阳为主是一致的。结合图 11 来分析,在磁中午(11UT)附近,如图 11b 中所示,雷达波束 15 有一个指向夜侧的分量,远离雷达的速度分量与逆阳对流是一致的。而磁子夜(23UT)附近,波束 15 有一个指向日侧的分量,朝向雷达的速度分量也与逆阳对流是一致的,如图 11d 所示。随着地磁活动的增强,平均多普勒视线速度明显增加与极区电离层对流增强是一致的。这里有一个很有趣的现象就是对于平均多普勒视线速度而言,在 05~09UT 之间,在

6 个距离门和 15 个距离门之间,平均速度的值为正,而在这个距离门之外速度则为负。这实际上也与极区双涡对流有关,是日侧高纬逆阳对流的東西向分量投影到雷达波束方向上的结果(见图 11a 和 11c)。

通常认为,谱宽的增强与大尺度的速度梯度、对流的扰动,以及 Pc1-2 磁流体波的活动有关<sup>[11]</sup>。通常日侧开放磁力线区域的谱宽较大,这与本文的结论一致的。另外,本文的统计结果也证实了谱宽会随着地磁活动的增强而减小,这是因为当地磁活动增强时,高能粒子沉降较为严重,而高能粒子产生的谱宽会相对较小,所以平均谱宽会随着  $Kp$  指数的增大而减小。这也与 Fukumoto 等(1999)对南极昭和站高频雷达的谱宽统计结果一致。

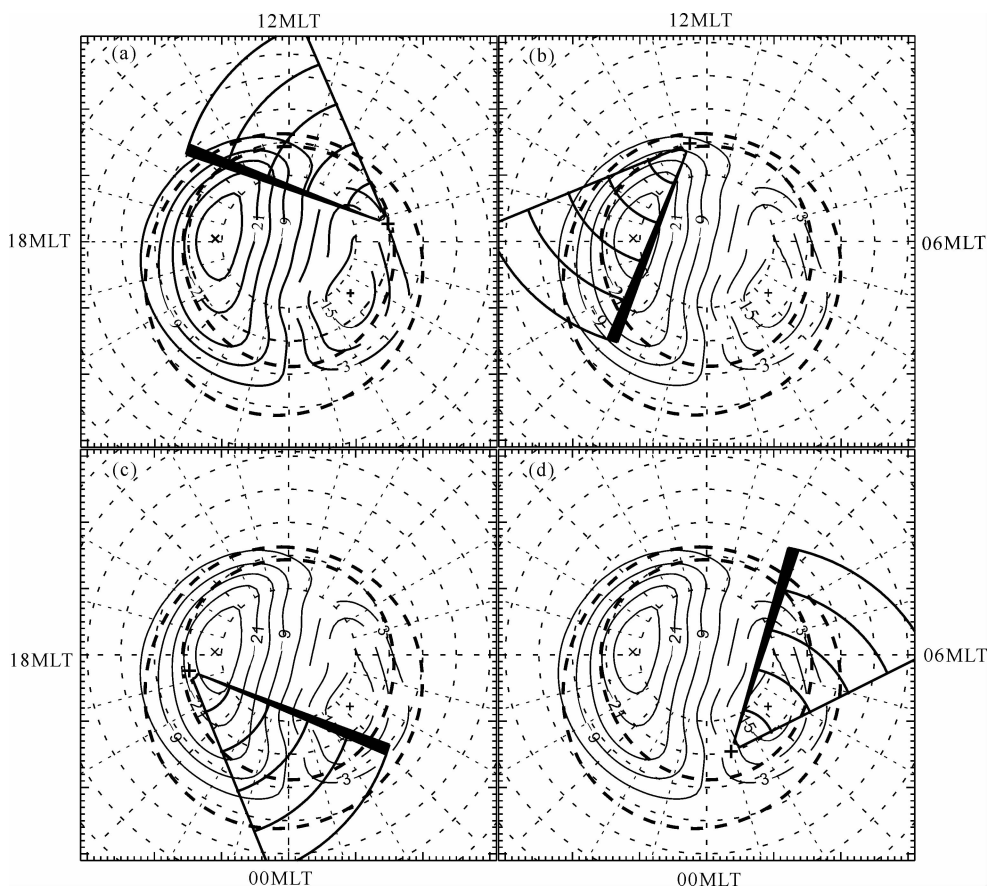


图 11 不同时刻中山站高频雷达的视场(FOV), (a) UT=05, (b) UT=11, (c) UT=17, (d) UT=23. 其中黑色阴影为波束 15.

图中的黑色虚线为  $Kp=1$  时的极光卵边界。图中也画出了较为典型的电离层对流双涡

Fig. 11 The FOV of Zhongshan radar at different universal time (UT). The black shadow illustrates beam 15. The dashed lines indicate the auroral oval boundary. The typical ionospheric convection twin-vortex is also indicated

## 5 结论

(1) 总体而言,在地磁活动较小时,回波发生率峰值集中于日侧,随着地磁活动的增强,峰值会减小

并向夜侧移动。这一方面是由于地磁活动增强时极区粒子沉降严重,对雷达电波产生较大的吸收,使回波发生率减小;另一方面,当  $Kp$  指数增大时,电离层 D 区对电波的吸收急剧增加,最终导致磁暴时日侧发生率低于夜侧。

(2)平均回波强度的日变化与回波发生率的日变化特征相似,日侧高,夜侧低.随着地磁活动的增强,平均回波强度相对较大的分布区域所包含的纬度和磁地方时的范围明显增大.

(3)平均多普勒速度有明显的昼夜分布,夜侧以正向速度(朝向雷达)为主,而日侧以负向速度(远离雷达)为主,而且随着地磁活动的增强速度会明显地增大.结合一天不同时刻雷达波束的指向变化可知,平均多普勒视线速度以逆阳方向为主.还有一个明显的特征就是,当  $Kp \geq 3$  时,日侧、夜侧平均多普勒速度的峰值绝对值多数大于 450 m/s.

(4)高频雷达回波谱宽在日侧较大,夜侧较小且谱宽峰值随着地磁活动的增强而普遍减小,而且不同纬度位置的谱宽也存在差异,这与不同高度的电离层回波相对应.总体而言,较大的谱宽普遍集中于日侧的正午附近,这与日侧极隙区粒子沉降以及开放磁力线区域相对应<sup>[29]</sup>.

致 谢 感谢审稿人宝贵的审稿意见.

## 参考文献 (References)

- [1] Hu H Q, Liu R Y, Yang H G. The auroral occurrence over Zhongshan Station, Antarctica. *Chinese Journal of Polar Science*, 1999, 10(2): 101-109.
- [2] 胡红桥,刘瑞源,王敬芳等. 南极中山站极光形态的统计特征. 极地研究, 1999, 11(1): 8-18.  
Hu H Q, Liu R Y, Wang J F, et al. Statistic characteristics of the aurora observed at Zhongshan Station, Antarctica. *Chinese Journal of Polar Research* (in Chinese), 1999, 11(1): 8-18.
- [3] 刘瑞源,杨惠根. 中国极区高空大气物理学观测研究进展. 极地研究, 2011, 23(4): 241-258.  
Liu R Y, Yang H G. Progress in the polar upper atmospheric physics research in China. *Chinese Journal of Polar Research* (in Chinese), 2011, 23(4): 241-258.
- [4] Chisham G, Lester M, Milan S E, et al. A decade of the Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN): scientific achievements, new techniques and future directions. *Surv. Geophys.*, 2007, 28(1): 33-109.
- [5] Greenwald R A, Baker K B, Dudeney J R, et al. DARN/SuperDARN. *Space. Sci. Rev.*, 1995, 71(1-4): 761-796.
- [6] Ruohoniemi J M, Greenwald R A. Rates of scattering occurrence in routine HF radar observations during solar cycle maximum. *Radio Science*, 1997, 32(3): 1051-1070.
- [7] Ruohoniemi J M, Greenwald R A, Villain J P, et al. Coherent HF radar backscatter from small-scale irregularities in the dusk sector of the subauroral ionosphere. *Journal of Geophysical Research*, 1988, 93(A11): 12871-12882.
- [8] Nishitani N, Ogawa T, Sato N, et al. Averaged pattern of ionospheric echo region and convection: initial results from the Syowa station HF radar. // Proc. NIPR Symp. *Upper Atmos. Phys.*, 1997, 10: 42-49.
- [9] Milan S E, Yeoman T K, Lester M, et al. Initial backscatter occurrence statistics from the CUTLASS HF radars. *Ann. Geophys.*, 1997, 15(6): 703-718.
- [10] Villain J P, Andre R, Pinnock M, et al. A statistical study of the Doppler spectral width of high-latitude ionospheric F-region echoes recorded with SuperDARN coherent HF radars. *Ann. Geophys.*, 2002, 20(11): 1769-1781.
- [11] Parkinson M L, Devlin J C, Ye H, et al. On the occurrence and motion of decametre-scale irregularities in the sub-auroral, auroral, and polar cap ionosphere. *Ann. Geophys.*, 2003, 21(8): 1847-1868.
- [12] Milan S E, Lester M. A classification of spectral populations observed in HF radar backscatter from the E region auroral electrojets. *Ann. Geophys.*, 2001, 19(2): 189-204.
- [13] Makarevitch R A, Koustov A V, Igarashi K, et al. Comparison of flow angle variations of E-region echo characteristics at VHF and HF. // Advances in Polar Upper Atmosphere Research, 2002: 59-83.
- [14] Carter B A, Makarevich R A. E-region decameter-scale plasma waves observed by the dual TIGER HF radars. *Ann. Geophys.*, 2009, 27(1): 261-278.
- [15] Carter B A, Makarevich R A. On the diurnal variation of the E-region coherent HF echo occurrence. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2010, 72(7-8): 570-582.
- [16] Tsunoda R T. High-latitude F-region irregularities: a review and synthesis. *Reviews of Geophysics*, 1988, 26: 719-760.
- [17] Blanchard G T, Sundeen S, Baker K B. Probabilistic identification of high-frequency radar backscatter from the ground and ionosphere based on spectral characteristics. *Radio Science*, 2009, 44(5): RS5012, doi: 10.1029/2009RS004141.
- [18] 邓忠新,刘瑞源,赵正予等. 中山站电离层尖峰脉冲型吸收统计特性. 空间科学学报, 2006, 26(3): 172-176.  
Deng Z X, Liu R Y, Zhao Z Y, et al. Statistical characteristics of ionospheric absorption spike events at Zhongshan station. *Chinese Journal of Space Science* (in Chinese), 2006, 26(3): 172-176.
- [19] Crowley G, Carlson H C, Basu S, et al. The dynamic ionospheric polar hole. *Radio Science*, 1993, 28(3): 401-413.
- [20] Brinton H C, Grebowsky J M, Brace L H. The high-latitude winter F region at 300 km: Thermal plasma observations from AE-C. *Journal of Geophysical Research*, 1978, 83(A10): 4767-4776.
- [21] Fukumoto M, Nishitani N, Ogawa T, et al. Statistical analysis of echo power, Doppler velocity and spectral width obtained with the Syowa South HF radar. *Adv. Polar. Upper. Atmos. Res.*, 1999, 13: 37-47.
- [22] Hanuise C, Villain J P, Cerisier J C, et al. Statistical study

- of high-latitude E-region Doppler spectra obtained with the SHERPA HF radar. *Ann. Geophys.*, 1991, 9: 273-285.
- [23] Ponomarenko P V, St-Maurice J P, Waters C L, et al. Refractive index effects on the scatter volume location and Doppler velocity estimates of ionospheric HF backscatter echoes. *Ann. Geophys.*, 2009, 27(11): 4207-4219.
- [24] Hosokawa K, Iyemori T, Yukimatu A S, et al. Source of field-aligned irregularities in the subauroral F region as observed by the SuperDARN radars. *J. Geophys. Res.*, 2001, 106(A11): 24713-24731, doi:10.1029/2001JA900080.
- [25] Jones T B, Lester M, Milan S E, et al. Radio wave propagation aspects of the CUTLASS radar. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phy.*, 2001, 63(2-3): 99-105.
- [26] 贺龙松, 刘瑞源, 刘顺林等. 太阳活动低年南极中山站电离层 F 层的平均特性. *地球物理学报*, 2000, 43(3): 289-295.
- He L S, Liu R Y, Liu S L, et al. Overall properties of F region around solar minimum at Zhongshan Station, Antarctica. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2000, 43(3): 289-295.
- [27] Koustov A V, André D, Turunen T, et al. Height of SuperDARN region echoes estimated from the analysis of HF radio wave propagation. *Ann. Geophys.*, 2007, 25(9): 1987-1984.
- [28] Villain J P, Caudal G, Hanuise C. A safari-eiscat comparison between the velocity of f region small-scale irregularities and the ion drift. *J. Geophys. Res.*, 1985, 90(9): 8433-8443.
- [29] Baker K B, Dudeney J R, Greenwald R A, et al. HF radar signatures of the cusp and low-latitude boundary layer. *Journal of Geophysical Research-Space Physics*, 1995, 100(5): 7671-7695.

(本文编辑 胡素芳)