0254-6124/2017/37(6)-702–08 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

SHANG Sheping, SHI Jiankui, YAN Jingye, YANG Guotao, YAN Chunxiao, WANG Xiao, WU Qiongzhi. Analysis of low latitude F region field-aligned irregularity events observed with Hainan VHF radar (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2017, **37**(6): 702-709. DOI:10.11728/cjss2017.06.702

海南 VHF 雷达观测到的低纬 F 区电离层场向不规则体事件分析*

尚社平[1] 史建魁[1,2] 闫敬业[3] 杨国涛[1]

燕春晓[1] 王 霄[1] 吴琼之[4]

1(中国科学院国家空间科学中心 空间天气学国家重点实验室 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

3(中国科学院国家空间科学中心 中国科学院微波遥感技术重点实验室 北京 100190)

4(北京理工大学信息与电子学院 北京 100081)

摘 要 中国海南 VHF 雷达具有快速扫描观测及对电离层不规则体进行二维成像的能力. 采用时间序列上的连续观测, 可以获得场向不规则体发展变化的一系列二维空间图像. 本文对海南 VHF 雷达 2011 年 10 月 27 日夜间观测到的电离层不规则体事件进行分析, 主要结果表明, 本次观测到的不规则体可分为三个阶段. 在初步形成阶段, 不规则体开始出现时非常微弱, 发展变化很慢, 主要表现为向上可扩展, 持续时间约 14 min. 在扩大增强阶段, 不规则体快速向上并向两侧扩展, 持续时间约 14 min; 不规则体强度前期迅速增大, 后期略有减弱, 空间尺度达 200 km 以上. 在东漂离开阶段, 不规则体强度进一步减弱, 扩展面积达到最大, 主要表现为东向漂移, 持续时间近 30 min. 这次观测首次给出了海南地区上空电离层不规则体的形成和发展过程. 结合其他台站的观测进行对比分析发现, 海南观测到的雷达羽与其他地区的雷达羽具有明显不同, 海南地区的雷达羽特性及其对应的物理过程有待进一步观测研究.

关键词 海南 VHF 雷达, 二维成像, 电离层不规则体, 形成和发展

中图分类号 P 352

Analysis of Low Latitude F Region Field-aligned Irregularity Events Observed with Hainan VHF Radar

SHANG Sheping[1] SHI Jiankui[1,2] YAN Jingye[3] YANG Guotao[1]

YAN Chunxiao[1] WANG Xiao[1] WU Qiongzhi[4]

1(*State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

* 国家自然科学基金项目资助 (41474136, 41474137)

2017-01-11 收到原稿, 2017-05-10 收到修定稿

E-mail: shangsp@nssc.ac.cn

2(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

3(*National Microwave Remote Sensing Laboratory, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

4(*School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081)

Abstract Hainan VHF radar has the rapid scan observation capability of two-dimensional imaging of ionospheric irregularities, which is essential for investigating the generation and evolution of Field-Aligned Irregularities (FAI). In this study, the ionospheric irregularities observed by Hainan VHF radar on the night of Oct. 27, 2011 have been analyzed. The main results show that the observed irregularities can be divided into three stages. In the initial formation stage, the irregularities appear very weak and develop very slowly, which mainly expand upward and last for about 14 minutes. In the expansion and enhancement stage, the irregularities rapidly expand and develop both in upward and zonal directions, which last for about 14 minutes. The intensity of irregularities early increases rapidly and later slightly decreases. The spatial scale of irregularities exceeds more than 200 km. In the stage of eastward drift and leaving, the intensity of irregularities further decreases, and the expansion area reaches the maximum. It mainly shows the eastward drift and last for nearly 30 minutes. This observation firstly gives the formation and development processes of ionospheric irregularities over the Hainan region, which seems to be quite different from that of other regions.

Key words Hainan VHF radar, Two-dimensional imaging, Ionospheric irregularities, Formation and development

0 引言

赤道电离层中发生在夜间 F 区的等离子体不规则体通常称为赤道扩展 F (ESF)[1]. ESF 中包括不同空间尺度的不规则体, 这些不规则体会导致所在区域无线电信号的幅度和相位闪烁, 对卫星通信和导航定位系统具有显著影响. 自 ESF 发现以来, 研制了各种观测仪器对其进行探测, 例如电离层测高仪、GPS 电离层闪烁监测仪、相干和非相干散射雷达、全天空气辉成像仪以及火箭和卫星携带的原位探测仪器等. 不同观测设备往往只能对某些特定尺度的电离层不规则体进行有效探测. 其中米量级尺度的不规则体可以通过 VHF/UHF 后向散射雷达来进行探测, 探测目标是沿磁场方向分布的半雷达波长尺度场向不规则体 (FAI).

赤道和低纬区工作频率处于 50 MHz 附近的 VHF 雷达可以对小尺度的 FAI 进行有效探测. 利用秘鲁利马附近 Jicamarca 台站 VHF 雷达的观测, Woodman 等 [2] 给出了 ESF 的综合特性并首次观测到从 F 区底部向顶部扩展的羽状不规则体. Hysell 等 [3−5] 利用 JULIA 雷达数据, 对 ESF 中的底部扩展 F、底侧扩展 F 和顶侧扩展 F (雷达羽) 以及午夜后扩展 F 等结构进行了详细研究, 其中雷达羽和宽扩展 F 被认为是强扩展 F, 顶侧扩展 F (或雷达羽) 代表了起源于底部并向顶部扩展的大尺度拉伸的等离子体泡结构. Narayan 等 [6] 为研究 Jicamarca 日落后赤道扩展 F 的气候学, 根据扩展 F 厚度和高度范围, 将赤道扩展 F 结构分为弱扩展 F (Weak Spread F, WSpF)、羽 (Plumes)、宽扩展 F (Broad Spread F, BSpF) 等不同的类型.

当前对于低纬度地区小尺度 FAI 的观测和研究相对有限. 目前的观测数据主要来源于秘鲁皮乌拉的 Piura VHF 雷达 (5.2°S, 80.63°W, dip7°N)[7], 印度南部安德拉邦的 GadankiMST 雷达 (13.5°N, 79.2°E, dip6.3°N)[8] 以及日本在印尼苏门答腊岛建立的 EAR 雷达 (0.2°S, 100.32°E, dip10.36°S)[9]. 利用这些低纬 VHF 雷达, 近年来对 E 区 FAI 进行了较多的观测研究, 同时也对 F 区 FAI 进行了观测研究. 利用 Piura VHF 雷达观测的研究结果表明 [10], 低纬 F 区不规则体与 ESF 存在明显的相关性. 利

用 GadankiMST 雷达观测的研究结果表明 [11], 低太阳活动条件下, 夏季午夜后发生的 F 区 FAI 形态与分季日落后 F 区 FAI 的形态存在明显差异.

在 Jicamarca VHF 雷达、Piura VHF 雷达和 Gadanki MST 雷达的观测中, 通常采用的都是固定的单波束观测模式, 实质上为单缝成像. 这种模式假定当不规则体纬向漂移时, 其形状保持不变, 因此无法对实际小尺度不规则体的时间和空间变化进行有效区分. 而采用扫描式的多波束雷达观测, 可以获得 FAI 的二维空间雷达图. 通过这些二维雷达图序列, 可以清晰得出 FAI 空间结构及其随时间的变化. 赤道区的扫描雷达观测主要有太平洋夸贾林环礁 (Kwajalein Atoll) 上的 ALTAIR 雷达 (9.4°N, 167.5°E; dip 4.3°N), 其获得了关于 ESF 发生及形态的许多重要研究结果 [12−15]. 在低纬区, 利用工作频率为 47 MHz 的印尼 EAR 多波束快速扫描观测, 也发现了一些定向单波束雷达所无法观测到的雷达羽分布重要特性 [16−18].

电离层扰动变化具有很强的区域特性, 子午工程海南 VHF 相干散射雷达 (19.5°N, 109.1°E; dip 13.6°N) 的建立, 为开展中国低纬电离层不规则体研究提供了一种新的观测手段. 该雷达的一个重要特点是雷达相阵天线系统可以控制雷达波束在沿正交于磁场的方向进行东西向快速扫描观测对电离层不规则体进行探测.

本文根据中国海南站 VHF 雷达的观测数据, 给出了海南上空电离层不规则体成像观测的结果. 分析研究了电离层一个不规则体形成和发展的事件, 给出这次事件中电离层不规则体在海南上空形成和发展的过程, 并从物理机制方面对其进行分析.

1 雷达观测和数据

中国海南站 VHF 雷达系统拥有一个 72 面 (共 4 行, 每行 18 面) 五单元 8 木矩形天线阵, 每个天线间的距离为 0.7 波长 (4.47 m), 所对应的雷达波束宽度为 5° (水平方向) × 21° (垂直方向), 每个 8 木天线均由一个单独的发射/接收模块驱动. 发射信号极化方向为东西向水平线极化. 海南 VHF 雷达的工作频率 47 MHz, 最大带宽 2 MHz, 峰值和平均功率分别为 54 kW 和 5.4 kW (最大占空比 10%), 脉冲宽度 0.5∼208 μs, 脉冲重复频率 100∼2 kHz, 脉冲压缩方式为 7/13 位 Barker 码, 子脉冲宽度 0.5∼16.0 μs. 雷达系统观测距离范围定为 80∼680 km, 最大距离分辨率为 75 m.

图 1 给出了 VHF 雷达波束方向与对应方位角分布及观测高度范围在垂直平面上的映射结果. VHF 雷达的相阵天线系统可以控制雷达波束沿正交于磁场的方向, 在方位角 ±22.5° 范围内进行东西向快速扫描观测, 还可以固定于其中的任意方向进行固定观测. 在通常情形下, VHF 雷达主要采用由东向西的扫描方式进行观测, 并设定 7 个雷达波束方向, 各个波束方向方位角之间间隔为 7.5° (见图 1), 其中波束 4 指向地理正北方向, 其偏离地磁北极方向约 1°, 为了能实现对 E 区和 F 区的同时探测, 根据国际参考磁场模型 IGRF, 将雷达波束 4 的仰角设为 61.8°, 两侧方向的仰角依次较小, 最大相差 2° 左右. 该 VHF 雷达进行东西向扫描的时间周期 (从波束 1 到波束 7) 设为 2 min, 雷达高度分辨率为 1.2 km.

图 2 给出了海南站 VHF 雷达扫描观测到的回波强度分布在垂直平面上映射结果的一个示例. 该图像时间取自 20:04:47 LT−20:06:47 LT. 彩色扇形范围为雷达扫描得到的回波分布, 蓝色为背景回波, 蓝色之上的回波具有不同强度. 回波信号强度可由图 2 右边色条对比得到. 图 2 中的横坐标与图 1 相同, 蓝色区域里两边分别相对于正北方向为 22.5°. 扇形底部宽度约为 70 km, 上部宽度约为 260 km. 扇形高度范围为 150∼600 km. 从图 2 可以看出, 在 VHF 雷达

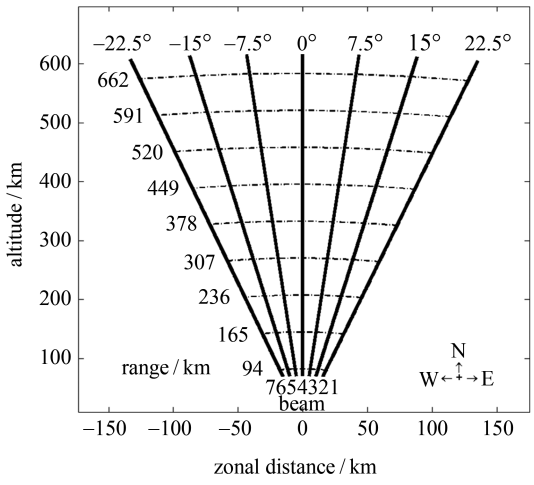


图 1 雷达波束方向与对应方位角分布及观测的高度范围

Fig. 1 Direction of the radar beam and the corresponding azimuth angle and the observation altitude range

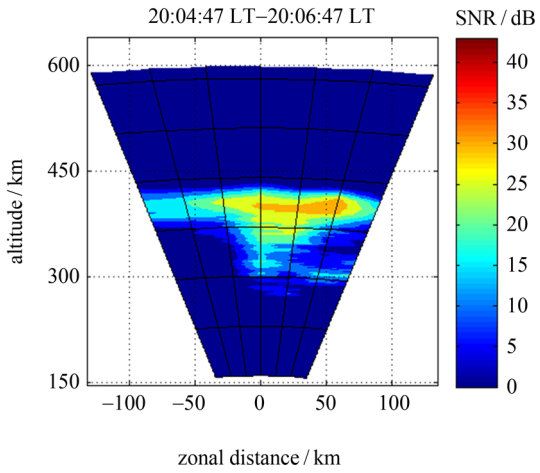


图 2 海南雷达观测到的不规则体成像示例

Fig. 2 Case of irregularity imaging observed by Hainan radar

的视场范围内存在电离层不规则体, 分布在 300~450 km 之间, 东西向充满了整个成像空间.

2 电离层场向不规则体事件分析

在 2011 年 10 月 27 日夜间, 海南站 VHF 雷达观测到一次 F 区 FAI 事件. 在本次观测中, VHF 雷达对本次事件过程进行了很好的成像观测, 较为完整地获取了本次电离层场向不规则体的形成和发展的过程. 图 3 给出了 VHF 雷达在 2011 年 10 月 27 日夜间 F 区 FAI 的二维扇形结构变化. 从其中每幅子图中雷达回波的空间分布和强弱变化可以看出, 本次观测到的电离层场向不规则体形成和发展可以分为三个阶段, 即初步形成阶段、扩大增强阶段和东漂离开阶段.

2.1 初步形成阶段

根据图 3 所示, 观测到的不规则体初步形成阶段的时间段可视为 19:50:47 LT−20:04:47 LT, 时长约为 14 min. 从 19:50:47 LT−19:52:47 LT 时段内的 VHF 雷达成像图可以看出, 约在 300 km 高度, 以正北方向为中心, 图中出现了一个微弱的回波斑点. 这代表弱电离层不规则体出现. 随着时间的延续, 回波斑点 (电离层不规则体) 逐渐增大和增强, 说明电离层不规则体在不断增大和增强. 到 19:56:47 LT−19:58:47 LT 时段, 回波斑点明显增大和增强, 但仍然基本位于正北方向, 并向上抬升. 到 19:58:47 LT−20:00:47 LT 时段, 回波斑点进一步明显增大和增强, 开始向东发展. 而后回波斑点继续增大和增强, 进一步向东发展, 继续向上抬升, 高度到达 300~350 km 之间, 并有明显向西发展的迹象. 到 20:02:47 LT−20:04:47 LT 时段, 回波斑点发展成一个上方为长条, 下方连接中心位于北偏东的一个大斑点形状的区域. 上方长条形区域高度约为 400 km, 在东西向扩大到两边沿附近. 在本阶段, 代表不规则体的回波斑点面积扩大较慢, 强度增加也较慢.

2.2 扩大增强阶段

在图 3 中, 观测到的不规则体扩大增强阶段时间可视为 20:04:47 LT−20:18:47 LT, 时长也约 14 min. 在 20:04:47 LT−20:06:47 LT 时段, 回波 (不规则体) 区域看起来有所增大, 回波强度明显增大, 这说明不规则体强度有明显增加. 另外不规则体继续抬升. 到 20:10:47 LT−20:12:47 LT 时段, 回波区域面积明显增大, 回波强度明显增大, 说明电离层不规则体分布的面积明显增大, 强度也有明显增强, 不规则体继续抬升, 向下也有所扩展. 到 20:12:47 LT−20:14:47 LT 时段, 回波区域面积进一步增大, 回波强度增大到最大值, 最大强度超过 40 dB. 不规则体主要表现为抬升, 高度范围扩大到 300~460 km. 电离层不规则体分布强度达到了最大值. 随着时间的推移, 在 20:14:47 LT−20:16:47 LT 时段, 雷达所观测到的回波强度开始有所减弱, 但是回波区域的面积继续增大. 至 20:16:47 LT−20:18:47 LT 时段, 回波强度进一步减弱, 回波区域面积继续增大, 不规则体进一步抬升, 其高度范围达到约 320~500 km. 从本阶段 (扩大增强) 总体分析, 电离层不规则体进一步扩大, 并向上抬升, 具有明显的向东移动趋势, 总强度达到最大之后有所减小, 但分布面积继续增加.

2.3 东漂离开阶段

从图 3 可以看出, 20:18:47 LT−20:46:47 LT 期间, 观测到的不规则体特征主要表现为东向漂移, 直至其漂移出 VHF 雷达视场, 故称其为东漂离开 (视场) 阶段. 在本阶段 20:18:47 LT−20:24:47 LT 期间, 回波强度进一步减小, 不规则体向上扩展明显减弱直至停止, 顶部高度到达 530 km 附近, 回波分布面积达到最大, 主要表现为明显东向运动, 随着时间的推移, 部分回波分布区逐步离开雷达视场. 在 20:24:47 LT−20:26:47 LT 时段, 回波分布区有一

半面积通过东向漂移离开了雷达视场, 但仍然可见其余部分. 到 20:32:47 LT－20:34:47 LT 时段, 回波分布区主体基本离开了雷达视场, 仅在雷达视场右侧留下了一个尾部. 到 20:44:47 LT－20:46:47 LT 时段, 从图 3 可以看出, 这时回波分布区基本上离开了雷达视场. 在本阶段, 由于电离层不规则体向东漂移逐步离开雷达视场, 离开以后的发展变化不得而知, 但从整体来看, 回波在向东漂移的过程中, 其强度也逐步减小.

从以上分析可以看出, 在 2011 年 10 月 27 日夜间, 中国科学院国家空间科学中心海南站 VHF 雷达观测到的电离层不规则体的形成、发展和消失过程可明显划分为三个阶段, 即初步形成阶段、扩大增强阶段和东漂离开阶段. 在初步形成阶段, 本次观测到的电离层不规则体, 无论是从空间分布还是强度变化而言, 都发展非常缓慢, 从 19:50:47 LT 至 20:04:47 LT, 总共经历 14 min. 而扩大增强阶段发展较快, 从 20:04:47 LT 至 20:18:47 LT, 虽然也经历了 14 min, 但是空间分布和强度变化均较快. 自 20:18:47 LT 以后, 回波的强度逐渐减小, 空间分布面

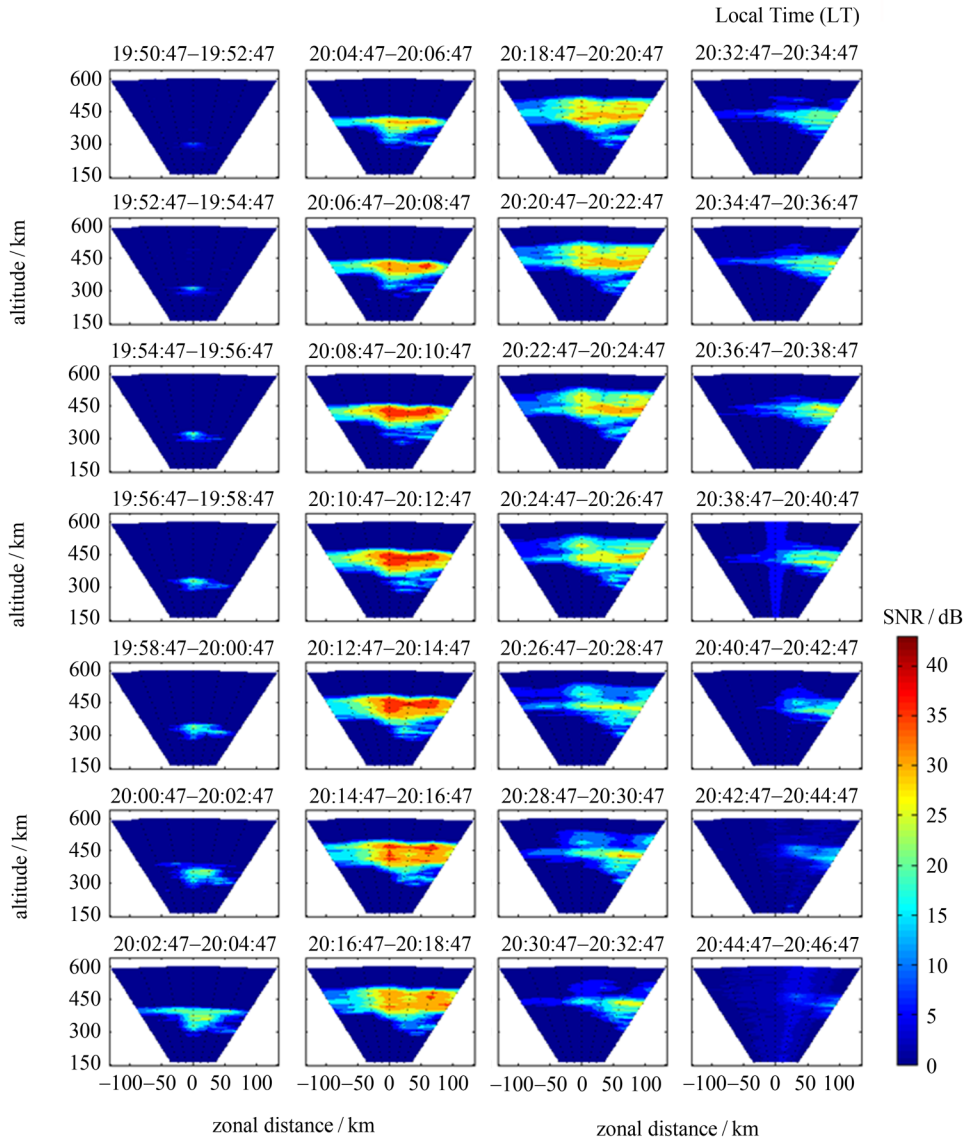


图 3 雷达观测到的 2011 年 10 月 27 日夜间 F 区 FAI 二维扇形结构

Fig. 3 Two-dimensional fan shaped structure maps of F region FAI by radar observation on the night of October 27, 2011

积逐渐达到最大. 这表明观测到的电离层不规则体开始扩散减弱直到消失. 在 20:46:47 LT 以后, 不规则体基本完全漂移出 VHF 雷达的视场范围. 在这期间用了近 30 min. 不规则体完全移出 VHF 雷达视场之后, 又经历了多长时间才完全消失也无法知道. 但可以说, 本次观测到的电离层不规则体的形成发展时间约为 30 min, 消失时间应该大于 30 min.

从空间分布来看, 本次观测到的电离层不规则体发展形成后的高度范围最大约为 300~530 km, 即不规则体的垂直高度范围约为 230 km. 而在东西方向上, 不规则体的空间范围在 200 km 以上. 这次观测到的不规则体具有明显的向上扩展. 在初步形成阶段, 从 19:50:47 LT 到 20:04:47 LT 的 14 min 内, 上边沿的高度从约 300 km 向上扩展到约 400 km. 向上扩展的速度约为 120 m·s^{-1}. 在扩大增强阶段, 从 20:04:47 LT 到 20:18:47 LT 的 14 min 内, 上边沿的高度从约 400 km 向上扩展到约 500 km. 向上扩展速度也约为 120 m·s^{-1}, 但向其他各个方向上扩展的速度较快. 可以估算不规则体东向漂移的速度. 在 20:12:47 LT 附近, 450 km 高度上不规则体的东西向尺度在视场内约为 200 km, 经过 32 min 后 (20:44:47 LT), 不规则体基本上完全离开视场, 可估算的漂移速度约为 100 m·s^{-1}.

3 讨论

从以上分析可以看出, 本次观测的不规则体在产生和发展的不同阶段, 其空间结构及随时间的变化存在明显差异. 在产生和缓慢发展阶段, 不规则体主要向上扩展, 没有明显的纬向运动; 在快速扩展和增强阶段, 不规则体的迅速向上和两侧扩展与增强, 存在明显的东向运动趋势; 在东向漂移期间, 不规则体向上扩展逐渐减慢至停止, 空间扩展范围达到最大, 不规则体强度逐渐减小, 呈现明显的东向运动, 最后离开雷达视场. 本次观测到的不规则体事件实质上是一个典型的雷达羽事件, 不同观测方向雷达羽的高度–时间–强度图 (ATI) 如图 4 所示, 不规则体于日落线附近突然出现, 并在日落线附近快速向顶部扩展和增强, 其形状类似于斜向下的楔形结构. 雷达羽在向上发展过程中, 向上速度超过 120 m·s^{-1}.

本次观测的低纬雷达羽与其他赤道区观测的雷达羽存在明显的形态差异. Jicamarca 雷达的观测和研究表明 [4], 在分季和 12 月, 底部扩展 F 的发生最为普遍, 几乎每天总会出现于日落附近, 赤道雷达羽基于底部扩展 F 或低侧扩展 F 快速向上发展而成. 底部扩展 F 能否转变成扩展 F 是 ESF 变化中的一个主要问题, 其重要性甚至强于 F 区电离层不稳定

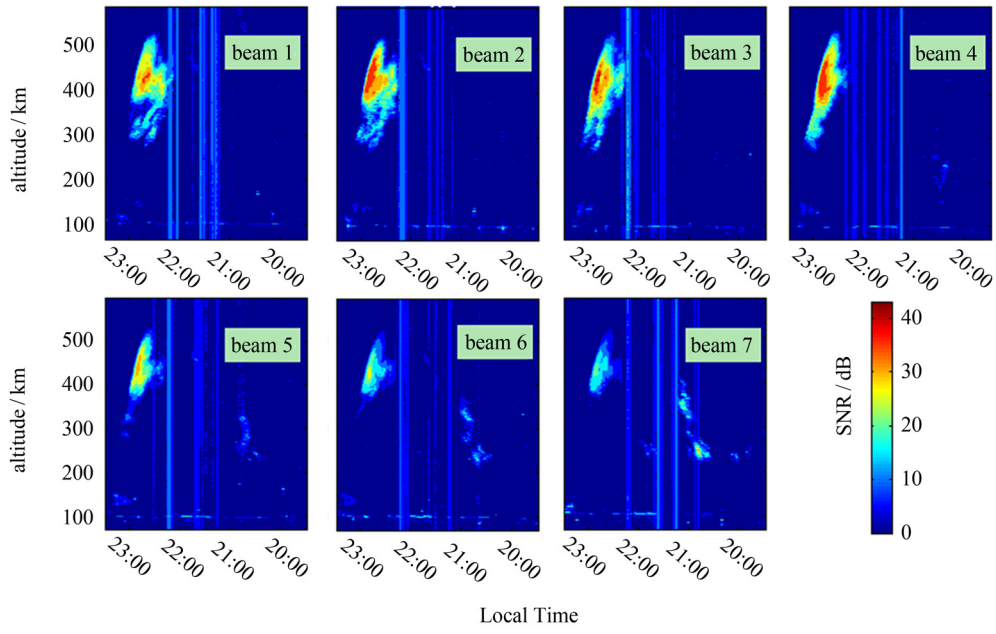


图 4 雷达观测到的 2011 年 10 月 27 日夜间 F 区 FAI 的高度–时间–强度 ATI 变化

Fig. 4 Altitude-Time-Intensity (ATI) plots of F region FAI observed by radar on the night of October 27, 2011

或种子不稳定性的作用. Tsunoda[12] 基于 ALTALR 多波束扫描雷达图显示出在赤道雷达羽结构发生期间, F 层底部后向散射始终存在, 而顶部后向散射则不能持续出现. 在本次观测期间, 低纬雷达羽是在日落线附近突然出现的, 在此之前几乎没有明显的底部扩展 F 或低侧扩展 F 的出现, 其他扩展 F 的出现几乎均明显发生在雷达羽之后. 在赤道扩展 F 的 ALT 图上, 底部扩展 F 向顶部羽的发展过程中, 有时会出现分叉, 经常形成 C 形或反 C 形的结构 [2,13]. 在海南低纬雷达羽的 ATI 图上 (见图 4), 雷达羽沿日落线向上扩展的形状则更像一个斜向下的楔形结构.

赤道雷达羽的形态会明显受到太阳活动的影响. 赤道雷达羽的发生和结束时间随太阳活动 (以 $F_{10.7}$ 指数来表征) 的增加而提前, 雷达羽的起始高度和峰值高度随着太阳活动的增加而增加. 较高的起始高度通常会导致较强的雷达回波. 雷达羽的峰值高度通常在分季期间达到最大, 可达上千公里以上, 向上扩展速度甚至可以超过离子声速 [5]. 本文中海南 VHF 雷达观测到的低纬雷达羽也显示了与赤道雷达羽相类似的变化特性, 但低纬雷达羽向上扩展的高度和速度明显不及赤道雷达羽, 低纬雷达羽高度处于 550 km 以下, 其对应磁赤道顶点高度处于 750 km 以下, 向上扩展速度 (约 120 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$) 明显小于离子声速, 这可能明显受到了低太阳活动的影响. 在此次观测期间, 虽然太阳活动已开始进入第 24 周峰年, 但还远未达到其他太阳周峰年的程度. 此外, 雷达羽的形态还可能受到东亚与南美等其他区域地理和地磁条件差异的影响.

可以看出, 低纬雷达羽与赤道雷达羽产生和发展的物理过程存在明显差异. 通常低纬地区产生的电离层不规则体可沿磁力线向两极方向扩展, 本次观测到的雷达羽事件有可能从磁赤道地区产生, 沿磁力线向赤道两侧快速扩散而形成, 进而导致低纬雷达羽的产生和发展. 有关这方面的问题, 需要将观测数据与理论分析相结合, 进一步开展深入研究.

4 结论

子午工程布设在中国低纬地区海南站 (19.5°N, 109.1°E, dip 13.6°N) 甚高频 (VHF) 雷达, 可对空间实施快速扫描, 进行电离层二维成像观测. 采用时间序列上的连续观测, 可以获得电离层场向不规则体发展变化的一系列二维空间图像, 为研究中国低纬 (海南) 电离层 F 区不规则体的空间结构和时间变化提供了新的条件. 在本文研究中, 对海南 VHF 雷达于 2011 年 10 月 27 日夜间观测到的一个电离层不规则体事件的发展和变化进行了分析.

本次海南 VHF 雷达观测到的电离层不规则体的形成和发展过程可以分为三个主要阶段. (1) 初步形成阶段: 不规则体出现后非常微弱, 发展变化也很慢, 主要变现为向上扩展, 持续时间约 14 min. (2) 扩大增强阶段: 不规则体快速向上和向两侧扩展, 发展变化较快, 持续时间约 14 min; 不规则体 (回波) 强度在前期迅速增大, 在后期略有下降, 不规则体在二维图像中的尺度达到了 200 km 以上. (3) 东漂离开阶段: 不规则体强度进一步下降, 向上扩展逐渐停止, 分布的面积达到最大, 主要表现为东向漂移运动. 随时间的推移, 不规则体逐步离开雷达视场, 持续时间近 30 min. 这次观测首次给出了海南地区上空电离层不规则体的形成和发展过程.

结合低纬度地区和赤道地区观测到的雷达羽进行对比分析, 结果表明海南站 VHF 雷达观测到的雷达羽与其他地区观测到的雷达羽既有相似之处, 更有明显不同. 这体现出不同区域的电离层具有不同特性. 关于低纬度地区电离层不规则体的特性及其形成和发展的物理机制, 还需要通过多种观测和理论分析进行更深入的研究.

致谢 国家重大科技基础设施项目子午工程提供了科学数据.

参考文献

[1] KELLEY M C. The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics [M]. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2009

[2] WOODMAN R F, LA HOZ C. Radar observations of F region equatorial irregularities [J]. *J. Geophys. Res.*, 1976, **81**(31): 5447-5466

[3] HYSELL D L, BURCHAM J D. JULIA radar studies of equatorial spread F [J]. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**(A12): 29155-29167

[4] HYSELL D L. An overview and synthesis of plasma irregularities in equatorial spread *F* [J]. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 2000, **62**(12): 1037-1056

[5] HYSELL D L, BURCHAM J D. Long term studies of equatorial spread *F* using the JULIA radar at Jicamarca [J]. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 2002, **64**(12/13/14): 1531-1543

[6] CHAPAGAIN N P, FEJER B G, CHAU J L. Climatology of postsunset equatorial spread F over Jicamarca [J]. *J. Geophys. Res.*, 2009, **114**(A7): A07307. DOI: 10.1029/2008JA013911

[7] WOODMAN R F, CHAU J L, AQUINO F, *et al.* Low latitude field-aligned irregularities observed in the E region with the Piura VHF radar: first results [J]. *Radio Sci.*, 1999, **34**(4): 983-990

[8] RAO P B, JAIN A R, KISHORE P, *et al.* Indian MST radar 1. System description and sample vector wind measurements in ST mode[J]. it Radio Sci., 1995, **30**(4): 1125-1138

[9] FUKAO S, HASHIGUCHI H, YAMAMOTO M, *et al.* Equatorial Atmosphere Radar (EAR): system description and first results [J]. *Radio Sci.*, 2003, 38(3): 1053. DOI: 10.1029/2002RS002767

[10] CHAU J L, WOODMAN R F, FLORES J A. Statistical characteristics of low-latitude ionospheric field-aligned irregularities obtained with the Piura VHF radar [J]. *Ann. Geophys.*, 2002, **20**(8): 1203-1212

[11] PATRA A K, PHANIKUMAR D V, PANT T K. Gadanki radar observations of F region field-aligned irregularities during June solstice of solar minimum: First results and preliminary analysis [J]. *J. Geophys. Res.*, 2009, **114**(A12): A12305. DOI: 10.1029/2009JA014437

[12] TSUNODA R T. Time evolution and dynamics of equatorial backscatter plumes 1. Growth phase[J]. *J. Geophys. Res.*, 1981, **86**(A1): 139-149

[13] TSUNODA R T, WHITE B R.On the generation and growth of equatorial backscatter plumes 1. Wave structure in the bottomside *F* layer [J]. *J. Geophys. Res.*, 1981, **86**(A5): 3610-3616

[14] TSUNODA R T, LIVINGSTON R C, MCCLUREJ P, *et al.* Equatorial plasma bubbles: vertically elongated wedges from the bottomside *F* layer [J]. *J. Geophys. Res.*, 1982, **87**(A11): 9171-9180

[15] TSUNODA R T. On the generation and growth of equatorial backscatter plumes: 2. Structuring of the west walls of upwellings[J]. *J. Geophys. Res.*, 1983, **88**(A6): 4869-4874

[16] FUKAO S, OZAWA Y, YOKOYAMA T, *et al.* First observations of the spatial structure of F region 3-m-scale field-aligned irregularities with the Equatorial Atmosphere Radar in Indonesia [J]. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**(A2): A02304. DOI: 10.1029/2003JA010096

[17] YOKOYAMA T, FUKAO S, YAMAMOTO M. Relationship of the onset of equatorial F region irregularities with the sunset terminator observed with the Equatorial Atmosphere Radar [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, **31**(24): L24804. DOI: 10.1029/2004GL021529

[18] FUKAO S, YOKOYAMA T, TAYAMA T, *et al.* Eastward traverse of equatorial plasma plumes observed with the Equatorial Atmosphere Radar in Indonesia [J]. *Ann. Geophys.*, 2006, **24**(5): 1411-1418