0254-6124/2012/32(6)-812–06 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Yang Shenggao, Fang Hanxian, Li Gang, Niu Jun, Wang Kai. Impact of geomagnetic storms on L-band ionospheric scintillation over equatorial region. *Chin. J. Space Sci.*, 2012, **32**(6): 812-817

磁暴对赤道地区 L 波段电离层闪烁的影响研究 *

杨升高[1] 方涵先[1] 李 刚[1] 牛 俊[1] 王 凯[2]

1(解放军理工大学气象学院 南京 211101)

2(中国人民解放军 61828 部队 喀什 844200)

摘 要 利用赤道地区 Vamimo 站闪烁数据, 选取两次典型大磁暴时段重点分析, 对比磁暴发生前、发生时以及发生后连续几天电离层幅度闪烁强度和发生率的变化, 引入瑞利–泰勒不稳定性 (Rayleigh-Taylor, R-T 不稳定性) 线性增长率 γ_0, 对磁暴影响闪烁的机制进行初步探讨. 结果表明, 磁暴可能触发闪烁发生, 也可能抑制闪烁发生, 这既与观测季节有关, 也与磁暴不同发展阶段的地方时有关. 触发发生于闪烁少发季节磁暴主相所在的午夜至黎明时段, 可能是磁层穿透电离层的东向电场所致; 抑制发生于闪烁多发季节磁暴恢复相所在的午夜前时段, 可能是西向电场作用的结果. 磁暴发生时的电场变化可能是抑制或触发闪烁的主导因素, 但仍需进一步分析研究.

关键词 L 波段电离层闪烁, 磁暴, 赤道地区, R-T 不稳定性

中图法分类号 P 353

Impact of Geomagnetic Storms on L-band Ionospheric Scintillation Over Equatorial Region

YANG Shenggao[1] FANG Hanxian[1] LI Gang[1] NIU Jun[1] WANG Kai[2]

1(*Institute of Meteorology, PLA University of Science Technology, Nanjing* 211101)

2(*Unit 61828 of PLA, Kashi* 844200)

Abstract Using the observation data at Vanimo station, the amplitude scintillation intensity and the occurrence rate were analyzed during the two classic different strong magnetic storms. Mechanism of the magnetic storm influence on the scintillation was discussed preliminarily by Rayleigh-Taylor instability linear theory. Results show that the magnetic storm could either trigger or inhibit the scintillation, which relates to the season and the local time of the different period of the magnetic storm. If the magnetic storm main phase occurs from midnight to dawn, the scintillation may be triggered by the eastern ward electrical field, and if the magnetic storm recovery phase takes place during the pre-midnight, it may be inhibited by the western ward electrical field. The electrical field variation during the magnetic storms is possibly the main factor that influence the scintillation, but it needs further study to prove.

* 国家自然科学基金项目 (40505005) 和解放军理工大学气象学院基础理论基金项目共同资助

2011-06-27 收到原稿, 2012-03-08 收到修定稿

E-mail: fanghx@gmail.com

Key words L-band ionospheric scintillation, Magnetic storm, Equatorial region, Rayleigh-Taylor instability

0 引言

电离层 E 区和 F 区电子密度不均匀性使穿过电离层的电波信号发生幅度和相位的随机起伏, 引起闪烁现象 [1], 其对在轨飞行器、通信导航系统产生很大影响. 研究结果表明, 闪烁具有很强的纬度分布特性, 磁赤道地区及其南北纬 15° 范围内闪烁发生最频繁、最严重 [2], 引起广泛关注 [3−7]. 赤道电离层的高导电性使其对磁层对流电场、自身扰动和各种波扰动异常敏感 [8], 而源于太阳剧烈爆发的强磁暴会引起整个地球空间环境发生严重扰动, 对电离层动力学过程影响极大, 使原本复杂多变的电离层闪烁现象出现异常, 考察磁暴期间闪烁特性及不规则体发生、发展规律, 通过磁暴预测闪烁, 成为空间天气研究的重要课题 [9].

由于瑞利–泰勒不稳定性的驱动, 等离子体泡等不规则结构在赤道 F 层底部生成并上升到电离层顶部, 以羽状烟云的形式离开磁赤道沿磁力线向南北扩散, 导致赤道及低纬区闪烁发生 [10]. Aarons 和 Dasgupta[11] 认为, 夜间赤道 F 层不规则体产生的一个必要条件是 F 层抬升到电子、离子复合作用相对于瑞利–泰勒不稳定性发展处于弱势的高度. 磁暴期间, 赤道 F 层电场、不规则体漂移和不稳定性的触发均出现复杂变化 [12]. 有研究指出, 地磁扰动对低纬和赤道区闪烁发生的控制作用表现出多样性, 既与观测站的地理位置和观测季节有关, 又与磁暴不同发展阶段的地方时有关 [13−16].

Aaron[17] 提出, 磁暴对闪烁促进或抑制, 主要取决于 $|Dst|$ 最大值发生的时间, 认为可将其分为三种情形: 如果 Dst 指数最大值发生于白天 (日落之前), 正常抬升的 F 层受到扰动, 抑制了夜晚不规则体的产生; 如果这个最大值在午夜或午夜后出现, F 层先上升后下降, 则会产生不规则体; 当其发生于日落后到午夜前这段时间时, 磁暴不会影响 F 层的上升运动. Zou[18] 统计了桂林站 2006 年 4 月 4 至 20 日磁暴期间的闪烁发生情况, Shang[19] 分析了海南地区磁暴对闪烁的影响, 结果与 Aarons 的分析相吻合. 一种观点认为, 午夜前闪烁抑制提前于 $\mathrm{d}Dst/\mathrm{d}t$ 最大值所在时间, 与磁暴急始相 (SSC) 相关. 另外一种理论观点认为 [8,20], 闪烁发生与磁层、电离层环流有关. 研究表明, 磁暴发生时, 行星际磁场 IMF (Interplanetary Magnetic Field) 的正 B_z 分量能抑制闪烁的发生, 即当 IMF 的 B_z 分量为正时, F 层抬升受到抑制, 不能到达可以形成闪烁的高度. 目前对于磁暴影响闪烁的机制问题还没有一个统一的认识, 尚需进行大量监测数据的深入分析, 本文利用澳大利亚 IPS 提供的 Vanimo 站一年半数据 (重点选取两次磁暴期间闪烁数据), 分析了磁暴对闪烁促进或抑制两种情况的影响.

1 闪烁数据与磁暴事件

1.1 闪烁数据处理

闪烁数据 (2001 年 3 月至 2002 年 9 月) 来源于澳大利亚 IPS 提供的位于赤道地区的 Vanimo (2.7°S, 143°E) 站 GPS 闪烁监测仪 (ISM), 该设备以 50 Hz 的速率采样幅度和相位数据, 以 1 Hz 的速率采样信噪比 (C/N_0) 数据, 可提供经修正 (消除环境噪声和硬件误差) 的 S_4 指数. 为减小多径效应和低仰角效应对统计结果产生的影响, 剔除了 GPS 卫星仰角小于 25° 的数据. 闪烁的发生率参照文献 [21], 定义为一定时间段内接收到的闪烁指数满足某强度要求的卫星个数与该时间段接收到的总卫星个数之比.

图 1 给出的是 Vanimo 站所在位置及一天闪烁的分布情况. 从图 1 可以看出, 该站闪烁主要分布在测站的南北向, 剔除低仰角数据后, 该站闪烁主要集中于南纬 10° 到北纬 5° 之间, 这主要是赤道不规则体在抬升过程中沿磁力线向南北纬扩散的结果.

图 2 为 Vanimo 站 2001 年 3 月至 2002 年 9 月不同强度闪烁发生率随时间的变化情况 (2002 年 4 月部分数据缺失), 纵轴表示以天为单位的闪烁发生率. 从图 2 可以看出, 无论是弱闪烁、中等闪烁还是强闪烁都存在明显的季节变化特征, 即春秋季发生率高于夏冬季, 冬季发生率最小.

1.2 磁暴事件

地磁场扰动是由撞击地球的太阳风起伏引起的,

扰动一般仅限于高纬极区, 但当行星际磁场具有长期 (几小时或更长) 的南向分量且具有较大的幅度 (大于 10~15 nT) 时, 磁层连续受到压力, 磁场扰动达到赤道区域. 赤道磁场偏离正常值的程度, 即磁暴大小的测量, 通常用 Dst 指数表示. 本文重点选取 2001 年 11 月 24 至 25 日和 2002 年 9 月 7 至 9 日两次大磁暴 ($Dst < -100$ nT) 作为个例, 分析这两次磁暴期间闪烁的发生情况.

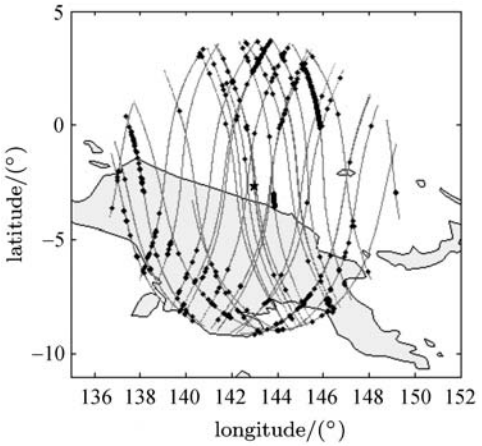


图 1 Vanimo 站一天卫星轨迹及闪烁分布 (五角星代表站点所在位置, 浅色线条表示卫星轨迹, 深色点为卫星经过该位置时幅度闪烁指数 $S_4 > 0.2$ 的标记)

Fig. 1 GPS satellite tracks in the 400 km altitude and the scintillation distribution at Vanimo station (Five-pointed star denotes the Vanimo station, light-colored lines are satellites tracks and dark points mark the position of satellites with $S_4 > 0.2$)

如图 3(a) (b) 所示, 2001 年 11 月 24 日 16:30 LT 出现磁暴急始, 标志着行星际激波到达, 磁暴进入初相 [22], 随后 IMF 的 B_z 分量方向由北转向南, 在 25 日凌晨 04:00 LT Dst 指数达到最小值 −221 nT. 磁暴恢复相持续时间较长, 直至 27 日才达到平静水平.

图 4(a) (b) 给出的是 2002 年 9 月 7 至 9 日磁暴期间行星际磁场 IMF 南向分量 B_z 及磁暴指数的世界时变化. 与前次磁暴不同, 在持续的南向 B_z 作用下, Dst 指数在 8 日 20:00 LT 达到最大值 −181 nT.

2 结果分析

选取两次磁暴事件, 统计磁暴发生前、发生时以及发生后连续几天电离层幅度闪烁的强度和发生率的变化, 通过对比分析磁暴期间与磁暴前后闪烁发生的异常, 结合引起磁暴的太阳风电场参数变化情况, 推断磁暴影响闪烁的机制.

磁暴一: 触发闪烁发生

赤道地区 2001 年 11 月的闪烁比较少见, 主要以 $S_4 < 0.2$ 的弱闪烁为主, 如图 2 所示. 通过对 11 月 24 至 27 日磁暴前后闪烁数据的统计发现, 本次磁暴触发闪烁发生. 图 3 给出的是 2001 年 11 月 24 至 27 日 IMF B_z 分量、磁暴指数 Dst、幅度闪烁指数 S_4, S_4 指数大于 0.2 的闪烁发生率随世界时变化情况. 图 2(d) 是以小时为单位的 S_4 指数大于 0.2 的

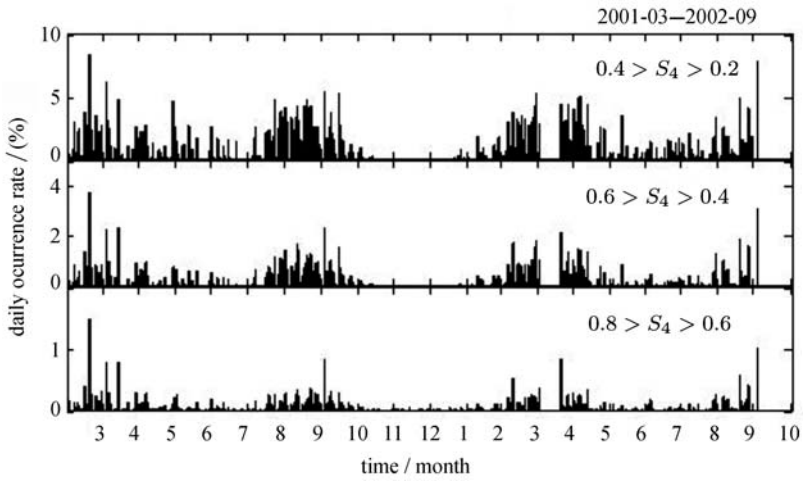


图 2 不同强度闪烁发生率随时间的变化情况

Fig. 2 Day-to-day variability of L-band scintillations with different intensity levels over equatorial region

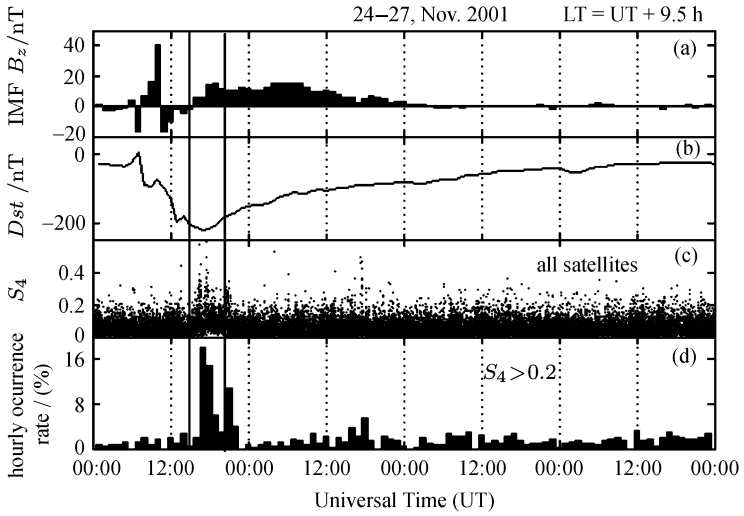


图 3 2001 年 11 月 24 至 27 日 IMF B_z 分量、Dst 指数、S_4 指数、闪烁发生率随世界时的变化

Fig. 3 Variation of the IMF B_z, magnetic storm index Dst, S_4 index and the scintillation occurrence rate with Universal Time (UT) from 24 to 27 November 2001

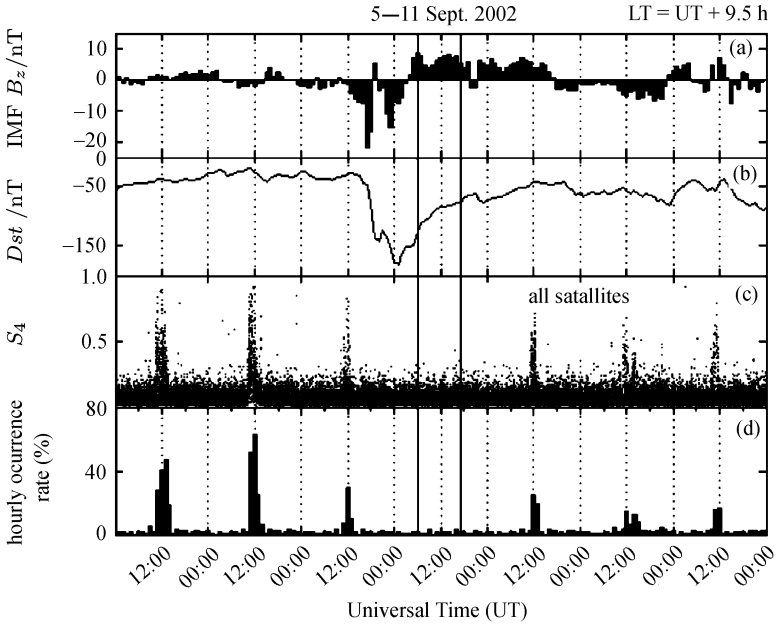


图 4 2002 年 9 月 5 至 11 日 IMF B_z 分量、Dst 指数、S_4 指数、闪烁发生率的世界时变化

Fig. 4 Variation of the IMF B_z, magnetic storm index Dst, S_4 index and the scintillation occurrence rate with Universal Time (UT) from 5 to 11 September 2002

闪烁发生率. 综合图 3 可以看出, 闪烁在磁静日 (26 日和 27 日) 表现比较平静, 而在磁暴发生期间 (24 日和 25 日) 有所增强, 且主要集中于午夜后 03:30 LT (18:00 UT) 左右的时段, 特别是当磁暴指数 Dst 下降至峰值时, 中等以上闪烁明显增加, $S_4 > 0.2$ 的闪烁发生率达到 18%, 远远超出磁静日平均水平. 这与文献 [17] 结论一致, 即当 Dst 指数最大值在午夜或午夜后出现, F 层先上升后下降, 会产生不规则体, 从而促发闪烁发生.

磁暴二: 抑制闪烁发生

从图 2 可以看出, 2002 年 9 月属于赤道地区闪烁频发季节. 且经统计发现, 该地区闪烁主要发生

于 21:00 LT 至 22:00 LT 左右. 图 4(a) (b) 给出的是 2002 年 9 月 5 至 11 日行星际磁场 IMF B_z 分量和磁暴指数 Dst 随世界时的变化, 图 4(c) (d) 为同时段对应时刻的幅度闪烁 S_4 指数和发生率统计结果, 图 4(c) 幅度闪烁指数的统计考虑了所有卫星, 图 4(d) 纵轴是以小时为单位的 S_4 指数大于 0.2 的幅度闪烁发生率. 从图 4(b) (c) (d) 不难看出, 此次大磁暴发生前两天 (5 日和 6 日), 在午夜之前 21:30 LT 左右, 幅度闪烁非常明显, S_4 指数最高达 0.9, 且 S_4 指数大于 0.2 的闪烁发生率达 40%~50%; 当磁暴进入主相直至恢复相阶段, 中强闪烁有所减少, 发生率也有所下降, 特别是 9 月 8 日 21:30 LT 左右时段, 中等以上闪烁几乎没有发生, 基本以弱闪烁为主, $S_4 > 0.2$ 的闪烁发生率陡降至平静时刻水平. 因此, 可以推断此次磁暴明显抑制了 9 月 8 日闪烁的发生, 如图 4(c) 所示, 这很可能是由于 IMF B_z 正向分量 (北向) 抑制 F 层的抬升所致 [8].

3 磁暴对闪烁的影响机制

磁赤道地区日落后电离层扩展 F 形成是 R-T 不稳定性发展的结果, 其中一个最重要的影响因素是垂直漂移 ($\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}$). 多年来, 对 R-T 不稳定性影响因素进行过大量研究 [3,10,23−24], 考虑的影响因子主要包括电子密度梯度、碰撞频率、电场及电场梯度、热层风场及其梯度和电导率等. 忽略背景电场和热层风场空间梯度的影响, 简化讨论, R-T 不稳定性线性增长率 γ_0 的表达式可以表示为 [24]

$$\gamma_0 = \frac{1}{\eta_0 L_{\rm nq}}\Big(\frac{g}{\nu_{\rm in}} + \frac{E_{0\rm s}}{B} - U_{\rm q} + \frac{\nu_{\rm in}}{\Omega_{\rm i}}\frac{E_{0\rm q}}{B} + \frac{\nu_{\rm in}}{\Omega_{\rm i}}U_{\rm s}\Big) - \beta.$$

其中, $L_{\rm nq}$ 为空间特征尺度 (梯度), $\nu_{\rm in}$ 为离子碰撞频率, $U_{\rm s}$ 为热层风的东西分量, g 为重力加速度, $E_{0\rm s}$ 为背景电场东西分量, B 为地磁场强度, β 为复合系数, $U_{\rm q}$ 为热层风场的垂直分量, $\Omega_{\rm i}$ 为离子回旋频率, $E_{0\rm q}$ 为背景电场垂直分量, γ_0 为不稳定性增长率.

上式表明, 背景电场和热层风场及其梯度是影响 R-T 不稳定性增长率的重要因素, 东向 (正的 $E_{0\rm s}$) 电场和向下 (负的 $U_{\rm q}$) 风场均有利于不稳定性的线性增长 (使 γ_0 增大). 此外, 垂直向上的电场和东向风场也对不稳定性发展起放大作用, 但是由于电离层 F 层 $\nu_{\rm in}/\Omega_{\rm i}$ 因子非常小, 与 $E_{0\rm q}/B$ 相乘后其对 γ_0 的影响不如东西向电场和垂直风场显著 [10].

目前普遍认为, 赤道扩展 F 产生的基本过程是 [10], 日落后, 由于快速复合作用, E 层电离密度明显降低, 而在背景东向电场的作用下, γ_0 增大, F 层快速抬升. 这样, F 层底部的背景电子密度分布逐渐变陡. 如果有一个初始小扰动, 随 R-T 不稳定性发展, 将在 F 层底部形成密度耗尽区. 这些耗尽的等离子体泡上升并穿透 F 层峰达到 F 层顶部, 形成赤道扩展 F.

磁暴对闪烁的影响可以归结为磁暴对 R-T 不稳定性发展的影响. 在 F 层抬升过程中, 存在一个门限高度 (约 350 km), 该高度由于条件适合, 能使不稳定线性增长率 γ_0 达到最大, 如果 F 层抬升高度等于或超过该门限, 就可能观测到闪烁, 否则可能不会发生闪烁 [8]. 当强烈的太阳活动爆发时, 例如耀斑、CME 事件等, 太阳风电场参量行星际磁场 IMF B_z 分量使磁层环电流电场受到严重扰动, 发生磁暴. 在磁暴期间, 来自磁层的东向电场会穿透至赤道地区, 促进 $\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}$ 作用, 同时放大不稳定性的线性增长率 γ_0, 等离子体向上垂直漂移得到增强, 使得等离子体泡能上升至 F 层顶, 触发闪烁的发生; 而西向电场则会起到相反的作用, 削弱等离子体的垂直上升运动, 使等离子体泡不能达到门限高度, 因而会抑制闪烁发生 [25].

4 结论与讨论

利用 2001 年 3 月至 2002 年 9 月闪烁数据, 统计分析了磁暴期间闪烁的发生情况. 依据磁暴对闪烁影响结果不同, 重点选取两次大磁暴背景下的闪烁进行分析, 得到结论如下.

(1) 磁暴对赤道闪烁的影响比较复杂, 既与磁暴发生的季节和地方时有关, 还可能与其他因素有关, 不是所有的磁暴都能起到触发或抑制闪烁的作用.

(2) 在闪烁少发月份 (2001 年 11 月), 磁暴能触发闪烁发生; 而在闪烁频发月份 (2002 年 9 月), 磁暴抑制闪烁发生. 这与文献 [16] 关于三亚站闪烁的磁暴效应结论一致.

(3) 2001 年 11 月 24 至 25 日的磁暴触发了闪烁的发生, 使闪烁强度较磁静日明显增强, 发生率明显增大. 且增强主要发生于磁暴主相 Dst 指数峰值阶段及午夜后 03:30 LT 时段, 符合 Aarons[17] 提出的三个标准之一, 即若 Dst 峰值午夜后出现, F 层先上升

后下降, 即会导致引发闪烁的不规则体产生.

(4) 2002 年 9 月 7 至 9 日磁暴主相至恢复相阶段闪烁强度及发生率有所下降, 明显受到抑制. 特别是 8 日磁暴恢复相阶段 (21:30 LT 左右时段), 中等以上闪烁几乎没有发生, S_4 大于 0.2 的闪烁发生率陡降至平静时刻水平. 这可能是由于太阳风电场参量 IMF B_z 的正向分量抑制了 F 层抬升造成的.

磁暴对闪烁的影响复杂多变, 既与观测季节有关, 也与磁暴不同发展阶段的地方时有关, 具有较强的时间特性. 深入研究磁暴对闪烁的影响机制对于闪烁的预报至关重要, 但关于这方面的研究还不够成熟, 仍需大量数据统计分析的支持和理论解释.

致谢 闪烁数据由澳大利亚 IGS 提供, ACE 卫星数据取自 NOAA 网站.

参考文献

[1] Yeh K C. Radio wave scintillations in the ionosphere [J]. *Proc. IEEE*, 1982, **70**(4):324-360

[2] Aarons J. 50 years of radio-scintillation observations [J]. *Antenn. Prop. Mag.*, 1997, **39**(6):7-12

[3] Kelley M C. The Earth's ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics (International Geophysics Series) [M]. San Diego, CA: 43 Academic Press, 1989

[4] Fejer B G. Ionospheric irregularities [J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**:24 047-24 056

[5] Shang Sheping, Shi Jiankui, Guo Shanjian, *et al*. Morphological study of L-band ionospheric scintillation in the equatorial region [J]. *Chin. J. Radio Sci.*, 2006, **21**(3):410-415

[6] Zhu Taiping, Long Qili. Radio scintillations and spread-F at low-latitudes [J]. *Chin. J. Radio Sci.*, 1995, **10**(3):410-415

[7] Shang Sheping, Shi Jiankui, Guo Shanjian, *et al*. Ionospheric scintillation monitoring and preliminary statistic analysis over Hainan region [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2005, **25**(1):23-28

[8] Biktash L Z. The equatorial scintillation and space weather effects on its generation during geomagetic storms [C]//11th International Conference on Ionospheric Radio Systems and Techniques, Edinburgh, UK, 2009

[9] Xu Jisheng, Zhu Jie, Cheng Guanghui. GPS observations of ionospheric effects of the major storm of Nov.7-10, 2004 [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2006, **49**(4):950-956

[10] Luo Weihua, Xu Jisheng, Xu Liang. Analysis of controlling factors leading to the development of R-T instability in equatorial ionosphere [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2009, **52**(1):849-858

[11] Aarons J, Dasgupta A. Equatorial scintillations during the major magnetic storm of April 1981 [J]. *Radio Sci.*, 1984, 731-739

[12] Basu S, Groves K M, Yeh H C, *et al*. Response of the equatorial ionosphere in the South Atlantic region to the great magnetic storm of July 15, 2000 [J]. *Geophys. Res.*, 2000, **28**(18):3577-3580

[13] Kumar S, Gwal A K. VHF ionospheric scintillation equatorial anomaly crest: solar and magnetic activity [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2000, **62**(3):157-167

[14] Basu S. Ionospheric effects of major magnetic storm during the international space weather period of September and October 1999: GPS observations, VHF/UHF scintillation, and in situ density structures at middle and equatorial latitudes [J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**(A12):30 389-30 413

[15] Chandra H, Vyas G D, Pathan B M, *et al*. Spectral characteristics of magnetic storm-induced F-region scintillations extending into daytime [J]. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1995, **57**(11):1273-1285

[16] Li G Z, Ning B Q. Effects of geomagnetic storm on GPS ionospheric scintillations at Sanya [J]. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 2008, **70**:1034-1045

[17] Aarons J. The role of the ring current in the generation or inhibition of equatorial F layer irregularities during magnetic storm [J]. *Radio Sci.*, 1991, **26**(4):1131-1139.

[18] Zou Y. Effects of the 4—20 April 2006 major geomagnetic storms on GPS ionospheric scintillations at Guilin [C]// 2009 3rd International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications. IEEE, 2009

[19] Shang S P. Response of Hainan GPS ionospheric scintillation to the different strong magnetic storm condition [J]. *Adv. Space Res.*, 2008, **41**(4):579-586

[20] LI G Z, Ning B Q. Observations of GPS ionospheric scintillations over Wuhan during geomagnetic storms [J]. *Ann. Geophys.*, 2006, **24**:1581-1590

[21] Bhattacharya S, Purohit P K, Tiwari R, *et al*. Study of GPS based ionospheric scintillation and its effects on dual frequency receiver [J]. *J. Eng. Sci. Manag. Educ.*, 2010(1):55-61

[22] Jiao Weixin. Scinence of Space Weather [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003. 90-100

[23] Sultan P J. Linear theory and modeling of the Rayleigh-Taylor instability leading to the occurrence of equatorial spread F [J]. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**(A12):26 875-26 891

[24] Basu S. On the linear theory of equatorial study of the wind field effect on the growth and observations [J]. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**(A8):1199-1208

[25] Rezende de L F C, Paula de E R, *et al*. Study of ionospheric irregularities during intense magnetic storms [J]. *Braz. J. Geophys.*, 2007, **25**(2):152-158