

海南地区电离层闪烁监测及初步统计分析^{*}

尚社平¹ 史建魁¹ 郭兼善¹ 罗熙贵¹ P. M. Kintner²

甄卫民³ 武顺智¹ 张满莲¹ 王 霄¹

¹(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

²(School of Electric Engineering, Cornell University, New York, USA)

³(中国电波传播研究所)

摘 要 为开展赤道区的电离层闪烁形态特性及相关物理过程的研究, 空间中心海南台站建立了一套 GPS 电离层闪烁监测系统. 该系统是利用 Plessey GPS Builder-2 系统开发的, 对软件的源码进行了修改, 使其能以高采样率 (50/s) 同时并行记录 11 个通道 GPS 信号强度数据. 对 2003 年 7—12 月间 L-波段电离层闪烁事件的初步统计分析结果表明, 电离层闪烁主要发生在日落后到午夜附近, 其中 9—11 月较 7—8 月闪烁发生和结束的时间明显提前; 电离层闪烁发生的频率和强度在 9—11 月较其他月份明显增强, 其中 10 月达到最大; 电离层闪烁的逐日变化具有很强的随机性, 闪烁的发生在秋分附近 9 月底到 10 月中旬的磁静日期间达到最大; 太阳和地磁活动的增强通常会抑制电离层闪烁的发生, 这种情形在秋分附近尤为明显.

关键词 海南地区; 电离层闪烁; GPS 闪烁监测系统

中图分类号 P 352

Ionospheric Scintillation Monitoring and Preliminary Statistic Analysis Over Hainan Region

SHANG Sheping¹ SHI Jiankui¹ GUO Jianshan¹ LUO Xigui¹ P. M. Kintner²

ZHEN Weimin³ WU Shunzhi¹ ZHANG Manlian¹ WANG Xiao¹

¹(Center for Space Science and Applied Research, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

²(School of Electric Engineering, Cornell University, New York, USA)

³(The China Research Institute of Radiowave Propagation)

Abstract To investigate the equatorial ionospheric scintillation morphology and the relevant physical processes, one GPS ionospheric scintillation monitor was installed at CSSAR Hainan station. The monitor is built on Plessey GPS Builder-2 development system with its software modified to log signal strength from up to 11 channels at a high data rate (50 samples/s). It is suits the high time resolution studies of scintillation spectral and temporal characteristics and also can be used to perform the statistic analysis of scintillation signals. The preliminary analysis results of L-band ionospheric scintillations during Jul.—Dec. 2003 show that ionospheric scintillations mainly occur

^{*} 电波环境特性及模化技术国防科技重点实验室基金项目资助

2004-04-13 收到原稿, 2004-11-08 收到修定稿

near from sunset to midnight, where the onset and end time are evidently more advanced in Nov.—Dec. than in Jul.—Aug.; the occurrence rate and intensity of ionospheric scintillations are evidently more enhanced in Sept.—Nov. than in other months, and reach their peaks in Oct.; there is the strong randomness for the day-to-day variability of ionospheric scintillations, and the scintillation occurrence reaches their peak during the magnetic quiet days from the end of Sept. to the middle of Oct. near autumnal equinox; the increase of solar and geomagnetic activities generally may limit the occurrence of ionospheric scintillations, especially near autumnal equinox.

Key words Hainan region, Ionospheric scintillations, GPS scintillation monitor

1 引言

电离层中的电子密度不规则体可以造成卫星信号的幅度和相位闪烁。电离层闪烁通常在磁赤道区最为严重, 太阳活动峰年日落后磁赤道异常区 L-波段信号闪烁强度可达 20 dB 的量级。电离层闪烁会对天基卫星通信和导航系统的性能产生影响, 严重时可导致相关系统的失效, 在 GPS 导航系统中, 幅度闪烁会造成数据丢失和跳周, 相位闪烁则会导致 GPS 接收机相位锁定环失锁^[1]。随着各种天基卫星通信和导航系统的广泛应用, 电离层闪烁已成为当今电离层空间天气的主要研究内容之一^[2]。

我国的海南地区处于磁赤道与北异常峰区之间, 且靠近北异常峰的内沿区, 属于电离层闪烁的严重和频发区域, 相对于其他区域, 其所在的东亚赤道区, 除了 Fang 等^[3]的工作外, 有关该区域电离层闪烁和不规则体的数据统计研究, 在国际上还相当缺乏, 尤其是 L-波段电离层闪烁研究。在国内, 中国电波传播研究所的研究人员^{[4]–[6]}曾在上一个太阳活动峰年期间对海口和广州等地的 VHF 和 C 波段电离层闪烁进行过监测和研究。近些年来, 随着 GPS 导航系统在各行各业的广泛应用, 以及“伽利略”等计划的即将实施, 对 L-波段电离层闪烁特性及其对相关应用系统影响的研究, 受到了越来越多用户的关注。最近 Thomas^[7]等利用在澳大利亚以北到东南亚区建立的一个 GPS 电离层闪烁监测网, 对该区域电离层闪烁进行了初步的分析。Cervera^[8]等则对该地区 GPS 电离层闪烁观测结果和电离层闪烁模型 WBMOD 结果进行了比较研究, 由于 WBMOD 模型的建立在该地区只使用了菲律宾马尼拉站的 VHF 波段闪烁数据, 因此观测结果和模型结果的差异是不可避免的。赤道区的电离层闪烁通常与赤道扩展 F(ESF) 现象相联系。对 ESF 的逐日和季节变化的了解, 尤其是其逐日变化的问题, 还远

未达到令人满意的程度^[9]。电离层闪烁发生及强度逐日变化的不规则性, 使得基于逐日变化的电离层闪烁预报至少在目前看来还难以达到^[7]。

为了开展海南地区电离层闪烁形态特性及相关物理过程的研究, 我们与相关单位合作, 在中国科学院空间科学与应用研究中心海南台站 (19.3°N, 109.1°E) 建立了一套 GPS 电离层闪烁监测系统, 该系统于 2003 年 6 月底开始投入运行。在本文中, 我们将对该 GPS 电离层闪烁监测系统的软硬件及其基本性能作简单介绍, 并利用已有的 L-波段闪烁观测数据, 对海南地区 L-波段的电离层闪烁特性进行初步的统计分析。

2 系统软硬件及性能

GPS 电离层闪烁监测系统是 Cornell 大学空间等离子体物理组利用 GEC Plessey GPS Builder-2 系统开发的, 对其软件源码进行了修改。Plessey 系统包含了单频 (1.575 GHz), C/A 码 (1.023 MHz 码速率) 12 通道的接收机卡硬件及由 C 和汇编语言编写的接收机源码。接收机卡只进行码相关的快速数字处理, 其他所有的处理包括跟踪和导航都由 PC 机控制。利用该系统的优势在于可以直接利用码相关输出进行信号强度的测量, 而其他接收机的码相关输出通常被掩埋在积分微控制器中。对 Plessey 系统的主要修改包括: (1) 删除了属于差分校正码的所有部分, (2) 增加了快速闪烁记录 (FSL) 文件的能力, (3) 提供实时载噪比显示, (4) 增加了延迟命令执行功能, (5) 给出了 RINEX2 和 FSL 头字段的用户说明等。

建立在 Plessey 系统上的 GPS 电离层闪烁监测系统能以高采样率 (50/s) 同时并行记录 11 个通道 GPS 信号强度数据, 并将第 12 通道设计为噪声通道。该系统既可以用于 L-波 (1.575 GHz) 高分辨率

闪烁谱和时间特性的研究, 也可以通过事后处理, 进行闪烁信号的统计分析研究, 还可用来研究天线周围的多路径环境. 利用 GPS 闪烁接收机网, 也可以进行电离层不规则体闪烁的漂移测量及相关性研究 [10].

GPS 电离层闪烁监测系统每天最终产生 2 种数据文件, 即快速闪烁记录文件 (> 200 MB) 和导航文件 (70 KB 左右). 通过常规处理后, 可以得到每天的摘要文件 (350 KB 左右). 该摘要文件提供了系统接收到的所有 GPS 卫星每分钟的位置, 信号功率 WBP 和幅度闪烁指数 S_4 等信息, S_4 指数定义为每分钟信号强度 S 的标准偏差与其平均值之比, 即

$$S_4^2 = \frac{\langle S^2 \rangle - \langle S \rangle^2}{\langle S \rangle^2}. \quad (1)$$

式 (1) 中的角括号 $\langle \rangle$ 表示卫星信号强度的时间平均, S_4 指数的大小反映了电离层闪烁强度的变化 [11]. 图 1, 2, 3 分别给出了海南地区 2003 年 10 月 8 日夜间强烈闪烁活动期间 GPS 闪烁监测系统接收到的所有卫星的信号功率、幅度闪烁指数及其随仰角和方位角分布的变化. 对于高分辨率特性等研究, 通过特殊处理后, 可以从 FSL 文件提取每个卫星在特定时间段内的载波相位数据 (10/s)、伪距和宽带功率 WBPk (50/s) 等数据.

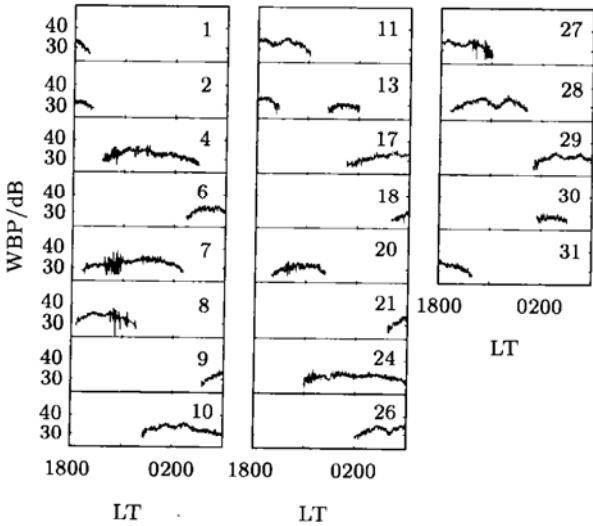


图 1 2003 年 10 月 8 日强烈闪烁活动期间系统接收到的所有卫星的信号功率 (WBP) 的变化

Fig.1 The signal power (WBP) variability of all satellites received by the monitor during the strong scintillation occurrence on Oct. 8, 2003

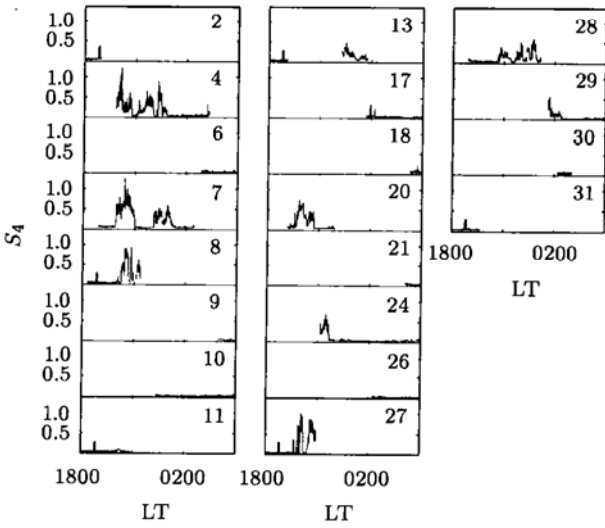


图 2 2003 年 10 月 8 日强烈闪烁活动期间系统接收到的所有卫星的 S_4 指数的变化

Fig.2 The S_4 index variability of all satellites received by the monitor during the strong scintillation occurrence on Oct. 8, 2003

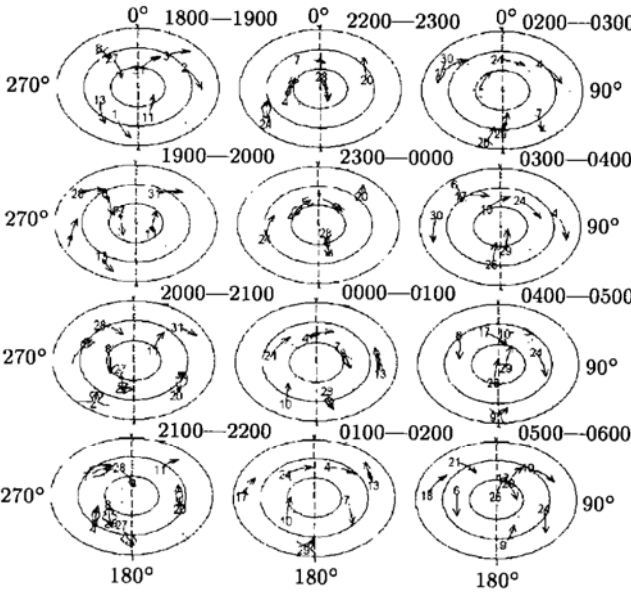


图 3 2003 年 10 月 8 日强烈闪烁活动期间系统接收到的所有卫星的 S_4 指数随仰角和方位角的分布, 其中泡状结构反映了闪烁活动的强弱

Fig.3 The elevation and azimuthal distribution of S_4 index of all satellites received by the monitor during the strong scintillation occurrence on Oct. 8, 2003, where the bubble-like structures indicate the magnitude of scintillation activity

利用 Cornell 大学的 Plessey GPS 卡等主要部件, 我们配备了相应的计算机软硬件系统. 进行了

相应的改进和处理,使得接收机在开机、接收、处理、传输和关机等方面尽可能实现自动化,以减少台站人员的日常操作,提高系统的稳定性和可靠性.系统在每天下午自动开机进入工作状态,并在次日早晨通过观测员的简单操作,系统退出工作状态,完成对原始数据的处理和存储,并将每日生成的摘要数据文件,上传到北京的数据服务器.北京的工作人员对每日的摘要数据进行进一步的处理,就可以掌握当天夜间海南地区的电离层闪烁活动情况.

3 闪烁的初步统计分析

目前我们已取得了半年多的连续观测资料,观测到了近 30 次的较明显的电离层闪烁事件.下面将对 2003 年 7—12 月之间发生的 GPS L-波段电离层闪烁事件进行初步的统计分析,主要分析每天 1800 LT 至次日 0600 LT 之间系统所接收到的所有卫星信号的幅度闪烁指数 S_4 的变化.由于信号幅度闪烁指数 S_4 随卫星的仰角减小而增加,且在低仰角时容易受到多径效应及其他低仰角效应的影响,因此在本文的分析中,根据实际经验,将卫星的最低仰角限于 15° ,对卫星仰角小于 15° 的观测数据不予考虑 [7].

3.1 闪烁发生的时间、强度和频率的统计分析

图 4 和图 5 给出了 GPS L-波段电离层闪烁发生的时间、强度和频率随地方时和月份变化的情况.图 4 中的每条曲线为每天系统所接收到的所有 GPS 卫星信号幅度闪烁指数 S_4 的最大值(其中卫星最低仰角限制为 30° ,以进一步削弱多径效应和低仰角效应的影响).图 5 中的每幅图是以半个小时为单位的当月内幅度闪烁指数 $S_4 > 0.2$ 的卫星数目与所有接收到的卫星数目之比,以 R 来表示.从图 4 可以看出, L-波段幅度闪烁强度在 7—8 月较弱, S_4 指数大部分处于 0.3 附近,几乎不大于 0.6; 9 月闪烁强度明显增大, S_4 指数大于 0.3 的情形普遍增多,部分达到 0.6, 10 月达到最大, S_4 指数大于 0.6 的情形很普遍,甚至接近于 1; 闪烁强度在 11 月明显减弱, S_4 指数基本不大于 0.6, 12 月达到最弱,几乎为 0.从图 5 可以看出,在 7—8 月间, L-波段闪烁发生率较低,最大为 2%—3% 左右; 9 月的闪烁发生率有所增加,个别时段达到 5%; 10 月的闪烁发生率最大,最大可达 13%—14%. 11 月的闪烁发生率明显降低,最大为 3%—4% 左右; 12 月的

闪烁发生率几乎为 0.结合图 4 和图 5 可以看出, L-波段电离层闪烁主要集中于日落后到午夜附近,其中 9—11 月较 7—8 月闪烁发生和结束的时间明显提前, 9—11 月闪烁集中发生在 2200 LT 附近,而 7—8 月闪烁则主要发生在午夜附近和午夜后.

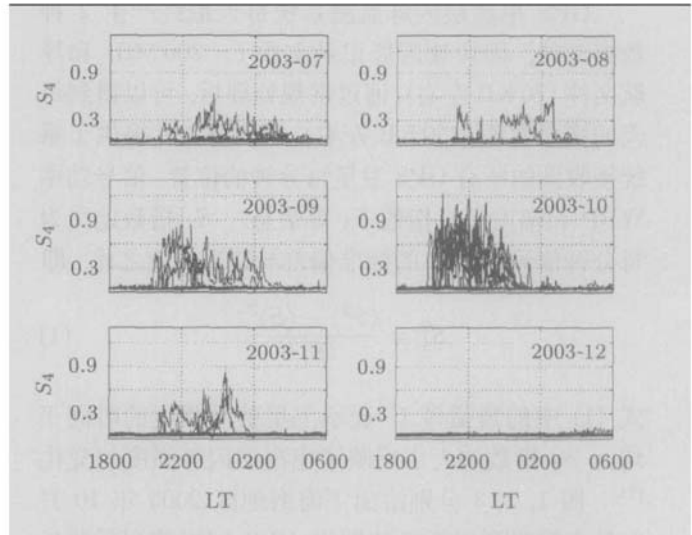


图 4 卫星仰角大于 30° 时 L-波段闪烁强度的变化
Fig.4 The variability of L-band scintillation intensity with GPS satellite elevation angle greater than 30°

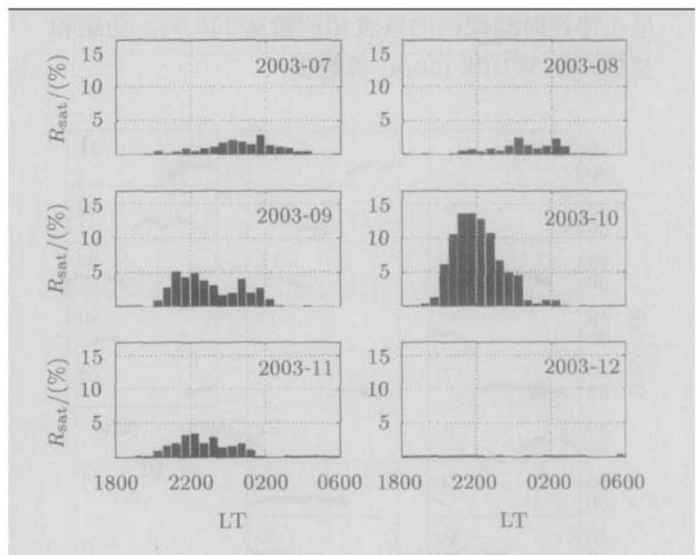


图 5 $S_4 > 0.2$ 时 L-波段闪烁发生率的变化
Fig.5 The variability of the occurrence rate of L-band scintillations with $S_4 > 0.2$

3.2 闪烁发生的逐日变化

对电离层闪烁的发生及其强度逐日变化的了解,还远未达到令人满意的程度.图 6 给出了每天夜间系统接收到的所有卫星中,满足不同闪烁强度

条件 ($S_4 > 0.2$, $S_4 > 0.4$ 和 $S_4 > 0.6$) 的卫星数与总卫星数之比 (以 R 来表示), 图 6 可以反映出 L-波段电离层闪烁活动逐日变化的情况. 从图 6 可以看出, L-波段闪烁的出现在大部分时间内具有一定的随机性, 在 9—11 月间出现的次数明显增加, 特别是在秋分 (9 月 23 日) 附近 9 月底到 10 月中旬间的半个月时间内, 出现了持续发生的强烈电离层闪烁现象, 闪烁发生的频率和强度均达到其最大值, 其间共发生约 10 次的强烈闪烁现象, $S_4 > 0.2$ 时闪烁发生率基本处于 10% 左右, $S_4 > 0.4$ 时闪烁发生率可达 5% 左右, 即使在 $S_4 > 0.6$ 条件下, 闪烁的发生也较为明显, 可达 3% 左右.

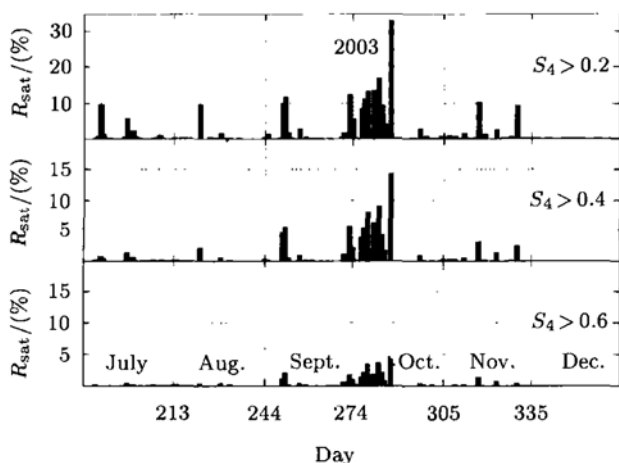


图 6 不同强度的 L-波段闪烁的逐日变化
Fig.6 The day-to-day variability of L-band scintillations with different intensity levels

3.3 闪烁发生与太阳和地磁活动的关系

图 7 给出了电离层闪烁活动的逐日变化与太阳和地磁活动的关系, 图 7 中的每条曲线上星号反映了闪烁发生当天太阳和地磁活动的平均情况, 其中 $\sum Kp$ 表示当天所有 Kp 指数的相加. 从图 7 可以看出, 总体上电离层闪烁趋向于在磁静日出现, 地磁和太阳活动相对较弱, 尤其是在 9—10 月的强烈电离层闪烁高发期间, 其对应的地磁活动处于两个月中的最小阶段 ($|Dst| < 20$, $\sum Kp < 16$, $A_p < 16$), 太阳活动也相对较弱, 且处于下降阶段 (太阳黑子数由 76 降到 13, $F_{10.7}$ 由 137 降到 91); 而在 9 月和 10 月的中下旬地磁和太阳活动增强期间, 电离层闪烁活动的发生明显受到抑制, 甚至完全消失, 最明显的情形表现在 10 月底到 11 月初强烈磁暴期间, 几乎没有任何明显的闪烁活动出现. 电离层闪烁有时

也可能出现于磁暴/扰期间 (如 2003 年 7 月 16 日), 由于这种情形下的观测结果很少, 对电离层闪烁与太阳和地磁活动关系的了解还有待于进一步的观测和分析.

4 结论和讨论

利用海南地区 GPS 电离层闪烁监测系统的观测数据, 对 2003 年 7—12 月间发生的 L-波段电离层闪烁事件的统计分析结果表明, 电离层闪烁主要发生在日落后到午夜附近, 其中 9—11 月较 7—8 月闪烁发生和结束的时间明显提前; 电离层闪烁的频率和强度在 9—11 月明显增强, 10 月达到最大; 而在 7—8 月相对较弱, 12 月甚至没有; 电离层闪烁的逐日变化具有很强的随机性, 其在秋分附近的 9 月底到 10 月中旬的发生率达到最大. 电离层闪烁趋向于在磁静日出现, 太阳和地磁活动的增强通常会抑制电离层闪烁的发生, 这种情形在秋分附近尤为明显.

赤道区的电离层闪烁是由赤道扩展 F 所产生, 赤道扩展 F 产生和发展由瑞利-泰勒不稳定性过程所控制. 其稳定性的增长率主要受垂直漂移、子午风场、扰动源等参数的控制. 在这些控制参数的作用下, 电离层 F 层底部形成的小扰动, 通过瑞利-泰勒不稳定性过程, 在磁赤道上被放大, 产生一个向上移动的耗散电离泡, 电离泡结构可以到达 1000 km 附近的高度上, 分裂为较小不规则体, 并几乎同时沿磁力线向南北异常区扩散, 当这些不规则体穿越高电子密度区 (如赤道异常峰区) 时, 就会对该区域内的无线电信号产生闪烁效应. 赤道扩展 F 中存在各种尺度的不规则体, GPS L-波段的电离层闪烁是由 400 m 尺度左右的不规则体所产生的. 电离层闪烁的统计特性, 很大程度上可以通过这些影响赤道扩展 F 的控制参数及背景电离密度的变化来解释. 如闪烁的逐日变化特性, 取决于电离层垂直漂移和高度的逐日变化, 而闪烁的季节变化特性, 可以归结为中性风场的季节变化^[9]. 地磁活动的增强, 通常会改变赤道区电场和风场结构, 进而影响到赤道扩展 F 和电离层闪烁的产生和发展^[12]. 海南地区在秋分附近的电离层闪烁高发期与该地区特殊的低磁偏角结构存在明显的相关^[8].

本文中我们简单介绍了海南地区 GPS 电离层闪烁监测系统及其基本性能的情况, 并对该地区 L-

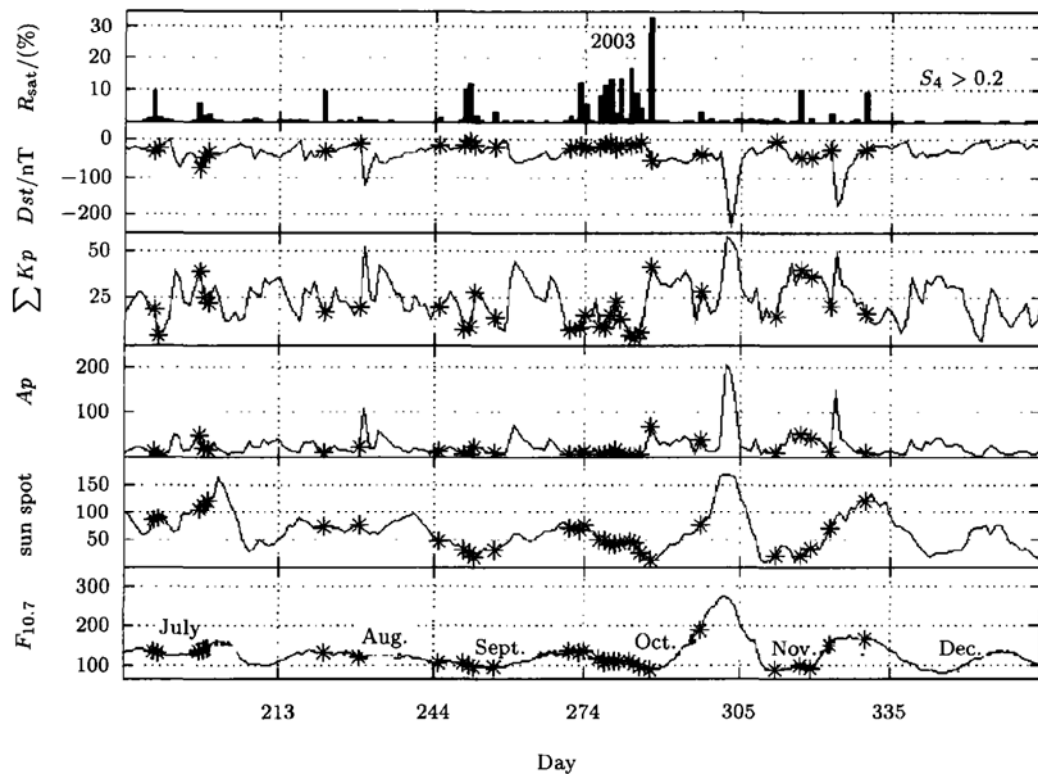


图7 太阳和地磁活动对于 L-波段闪烁的影响

Fig.7 The effects of solar and geomagnetic activities on L-band scintillation occurrences

波段电离层闪烁进行了初步的统计分析. 对海南地区电离层闪烁全面了解和掌握还有待于该现象进行连续的监测和观测数据的不断积累以及进行更深入、全面的分析研究.

参考文献

- [1] Groves K M, Basu S, Weber E J *et al.* Equatorial scintillation and systems support. *Radio Sci.*, 1997, **32**:2047—2064
- [2] Williamson S P, Evans D L, Neyland M A *et al.* National Space Weather Program Implementation Plan, 2nd Edition, 2000
- [3] Fang D J, Liu C H. A morphological study of gigahertz equatorial scintillations in the Asian region. *Radio Sci.*, 1983, **18**(2):241—252
- [4] Zhu Taiping, Wang Chunnian, Sun Huanfeng *et al.* Ionospheric scintillations observed via 4 GHz TV signals. *Chin. J. Radio Sci.*, 1992, **7**(3):69—74. in Chinese (朱太平, 王椿年, 孙环风等. 4 GHz 卫星电视信号电离层闪烁观测结果与分析. 电波科学学报, 1992, **7**(3):69—74)
- [5] Zhen Weimin, Long Qili, Ma Jianmin *et al.* Scintillation spectra investigations during the evolution of irregularities in the equatorial F region. *Chin. J. Space Sci.*, 1995, **15**(2):143—147. in Chinese (甄卫民, 龙其利, 马健敏等. 磁赤道异常区电离层 F 区不均匀体发展过程中的闪烁谱研究. 空间科学学报, 1995, **15**(2):143—147)
- [6] Long Qili, Ma Jianmin. Amplitude scintillation observations of Hainkou VHF signal. *Radio Antenna*, 1996, **2**:1—4. in Chinese (龙其利, 马健敏. 海口 VHF 信号幅度闪烁观测结果. 电波与天线, 1996, **2**:1—4)
- [7] Thomas R M, Cervera M A, Eftaxiadis K *et al.* A regional GPS receiver network for monitoring equatorial scintillation and total electron content. *Radio Sci.*, 2001, **36**:1545—1557
- [8] Cervera M A, Thomas R M, Groves K M *et al.* Validation of WBMOD in the Southeast Asian region. *Radio Sci.*, 2001, **36**:1559—1572
- [9] Abdu M A. Outstanding problems in the equatorial ionosphere-thermosphere electrodynamics relevant to spread F. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 2001, **63**:869—884
- [10] Beach T L, Kintner P M. Development and use of a GPS ionospheric scintillation monitor. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2001, **39**(5):918—928
- [11] Kil H, Kintner P M, Paula E De *et al.* Latitudinal variations of scintillation activity and zonal plasma drifts in South America. *Radio Sci.*, 2002, **37**(1): 10.1029/2001RS002468
- [12] Abdu M A. Major phenomena of the equatorial ionosphere-thermosphere system under disturbed conditions. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 1997, **59**:1505—1519