

张艳磊, 吴 健, 甄卫民等. 利用三站卫星闪烁数据测量电离层不均匀结构漂移速度. 地球物理学报, 2010, 53(7): 1515~1519, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.07.002

Zhang Y L, Wu J, Zhen W M, et al. An analysis on the ionospheric irregularities drift velocity using three ISM. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(7): 1515~1519, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.07.002

利用三站卫星闪烁数据测量电离层 不均匀结构漂移速度

张艳磊, 吴 健, 甄卫民, 马宝田

中国电波传播研究所, 电波环境特性及模化技术国家重点实验室, 青岛 266107

摘 要 本文介绍一种利用相邻多站卫星闪烁信号之间相关性测量电离层不均匀结构漂移速度的方法. 实验分析结果表明秋分前后我国低纬(海口)地区电离层不均匀结构的漂移速度在 50~110 m/s 之间, 方向为东向. 地方时 22:00 之前漂移速度的值变化较大, 之后相对比较稳定. 对同一次电离层闪烁事件, 取不同采样长度的数据进行处理, 得到的漂移速度整体上的变化趋势基本一致. 结果表明, 该方法是一种有效可行的方法, 时间分辨率可以达到 1 min.

关键词 电离层不均匀结构, 漂移速度, 相关性

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.07.002

中图分类号 P352

收稿日期 2008-01-07, 2010-06-17 收修定稿

An analysis on the ionospheric irregularities drift velocity using three ISM

ZHANG Yan-Lei, WU Jian, ZHEN Wei-Min, MA Bao-Tian

*China Research Institute of Radiowave Propagation, National Key Laboratory of
Electromagnetic Environment, Qingdao 266107, China*

Abstract A method of measuring ionospheric irregularity drift velocity by using scintillation signals from multi stations is introduced in this paper. Three Ionospheric Scintillation Monitors (ISM) are installed to test this method in Haikou, China. The result shows that the eastward drift velocity in Haikou near the autumnal equinox ranges from 50 m/s to 110 m/s. It varies significantly before 22:00 LT. In the same scintillation period, when different data lengths are used, the calculated drift velocities show the same tendency. A case study showed that it is feasible to estimate the ionospheric irregularity drift with this method. The temporal resolution of this method can reach 1 min.

Keywords Ionospheric irregularities, Drift velocity, Correlation

1 引 言

低纬地区是全球电离层闪烁频繁发生的区域,

自从第一颗人造卫星于 1957 年发射之后, 利用卫星发射的无线电波来观测电离层闪烁成为可能, 从此人们研究闪烁现象的兴趣一直持续未减^[1]. 研究电离层电子密度不均匀结构的漂移特征及其变化规

基金项目 国防科技重点实验室基金项目(9140C0801030802, 9140C0801030903)资助.

作者简介 张艳磊, 女, 1982 年生, 2006 年获得中国电波传播研究所硕士学位, 主要研究方向是电离层闪烁特性研究.

E-mail: yanlei8265@yahoo.com.cn

律,对于理解赤道 F 层电动力学过程以及发生在赤道低纬电离层中的各种空间天气现象,特别是电离层闪烁现象都极为重要^[2,3].

作为对雷达和卫星测量电离层的一种重要补充,地基卫星信标接收机台阵测量是获得电离层不均匀结构漂移信息的一种有效且十分方便的技术手段^[4].近年来,国内外的很多学者和研究机构相继开展了很多相关的实验研究工作,结果表明,利用空间间隔的多台接收机接收到的卫星闪烁数据,可以较精确地估计不均匀结构的漂移速度^[4~10].

本文介绍在我国海口地区开展的一次实验研究,利用多站卫星闪烁数据测量电离层不均匀结构的漂移速度.共观测到四次持续时间为 80、35、25、60 min 的强闪烁事件,用相关性分析法得到分辨率为 1 min、2 min、5 min 的漂移速度变化情况.初步获得了秋分前后我国海口地区电离层不均匀结构的漂移速度变化特点,其结论与已有的结论一致.数据分析和计算结果表明,利用三站卫星闪烁信号测量电离层不均匀结构漂移速度是一种有效可行的方法.

2 实验原理与方法

电离层闪烁研究中,通常在“冻结场”的假设条件下分析电离层不均匀结构,即假设电离层不均匀结构在一段时间内的漂移速度是恒定的,且内部形态没有发生变化.同时把不均匀结构从三维的空间状态“压缩”到一个二维平面上,不考虑其在高度上的运动,只分析其在水平方向上的漂移.

在“冻结场”的假设条件下,取电离层不均匀结构的高度为 350 km,位于电离层电子密度值最大的 F₂ 层.对于频率为 350 MHz 的卫星信号,对应的菲涅尔尺度为 $\sqrt{2\lambda z}$,约 775 m.因此可以用多个间距 100 m 左右的台站组成台网,测量菲涅尔尺度不均匀结构及其引起的振幅闪烁涨落图样的漂移速度^[6].

统计数据表明,低纬地区电离层闪烁多发生在春分和秋分前后,因此本文的实验选择在 2005 年 9 月到 10 月在海口进行.实验使用三台电离层闪烁监测仪(Ionosphere Scintillation Monitor, ISM)接收 UHF 频段的卫星信号,采样频率为 20 Hz,作为分析电离层闪烁的数据,本文中的电离层闪烁信号均为 UHF 频段,时间均采用地方时.同时接收 GPS 卫星信号获得三个观测站的经纬度,并保证三站接收闪

表 1 三个观测站的经纬度
Table 1 Geographic coordinates
of the three observation stations

| 站点 | 经度(°E) | 纬度(°N) |
|----|------------|-----------|
| A | 110.340878 | 19.995822 |
| B | 110.339872 | 19.995381 |
| C | 110.341414 | 19.995511 |

烁信号的时间同步性.表 1 给出了三个观测站点的地理经纬度,三站的位置关系如图 4 所示,它们之间的距离分别是 116.1m(AB),166.8m(BC),68.5m(AC).

3 数据处理

本次实验共观测到 4 次电离层闪烁事件,发生的时间分别是 2005 年 10 月 19 日 21:20~22:40,22:58~23:33,10 月 29 日 20:07~20:32,21:47~22:47,这 4 次电离层闪烁事件的幅度闪烁指数 S₄ 最高都达到了 0.9 以上,属于较强的电离层闪烁.

图 1 给出了 10 月 19 日 21:20~22:40 闪烁事件的三站信号幅度变化曲线,横坐标是地方时 LT,纵坐标是信号幅度 SI.为便于比较,作图时把 B 点和 C 点的信号分别上移和下移了若干单位, A 点的信号保持原值不变.由图可见三站信号的幅度变化具有明显的相关性.为进一步分析,图 2 给出了该闪烁事件期间的 1 min 幅度曲线,可以更明显地看出三站信号具有相关性,且存在时间延迟,信号首先到达 B 点,然后经过 A 点,最后到达 C 点.

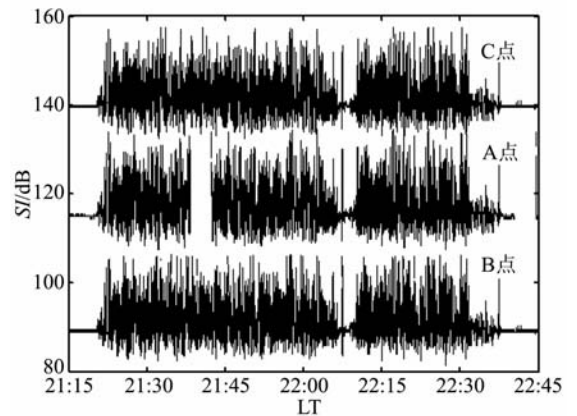


图 1 10 月 19 日 21:20~22:40 闪烁事件的三站信号幅度图

Fig. 1 Signal amplitudes of ionosphere scintillation from three stations during 21:20~22:40 October 19th

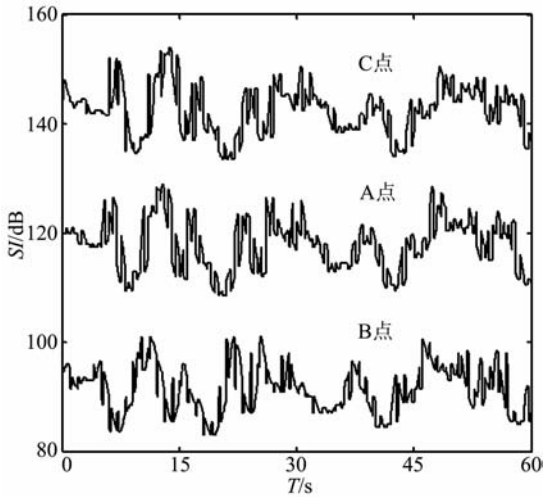


图2 10月19日21:28观测到的三站信号幅度图
Fig. 2 Signal amplitudes of ionosphere scintillation from three stations in 21:28 October 19th

以图1中的闪烁事件为例说明数据处理方法. 首先对三站的数据两两做相关性分析, 求信号间的互相关系数 ρ ^[11~13]. 式(1)中 $\rho_{x,y}(\tau)$ 是两站信号间的互相关系数, τ 是两站信号间的延迟时间, $x(t)$ 是 t 时刻A点接收到的信号, $y(t+\tau)$ 是 $t+\tau$ 时刻B点接收到的信号.

$$\rho_{x,y}(\tau) = \frac{(x(t) - \overline{x(t)}) \cdot (y(t+\tau) - \overline{y(t+\tau)})}{\sqrt{(x(t) - \overline{x(t)})^2} \cdot \sqrt{(y(t+\tau) - \overline{y(t+\tau)})^2}} \quad (1)$$

图3给出了处理结果, 横坐标是时间延迟(time delay), 纵坐标是互相关系数(correlation coefficient), 图中曲线分别是A-B、A-C、B-C之间的相关系数曲线. 最大相关系数对应的时间延迟分别为负值、正值、正值, 说明漂移速度分别为由B点到A点, 由A

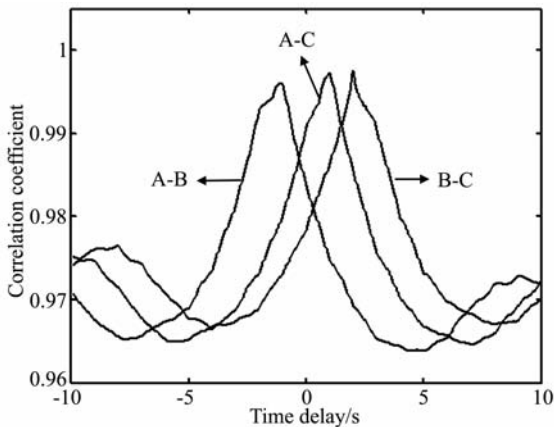


图3 互相关系数随时间延迟的变化

Fig. 3 Cross correlation coefficient versus time delay

点到C点, 由B点到C点, 即闪烁信号先后到达B点、A点和C点. 这一点和图2中观察得到的结果一致.

由两站间信号的时间延迟 T 和两站间的距离 S , 根据 $V = S/T$, 可以得到电离层不均匀结构的漂移速度在两站连线方向上的“投影速度”. 然后由三个方向上的“投影速度”求得不均匀结构的漂移速度, 合成方法如图4所示, 图中三条虚线分别表示三个方向上的速度矢量, 黑色的射线表示合成速度 V 的大小和方向.

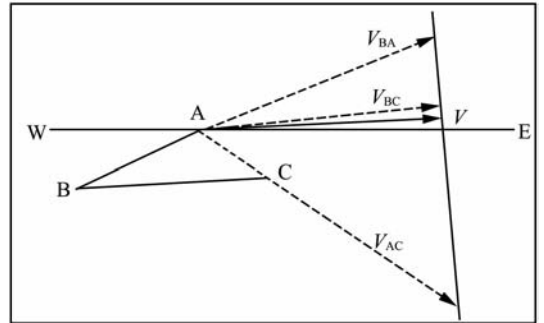


图4 电离层不均匀结构漂移速度的合成示意图

Fig. 4 Calculation method of ionosphere irregularity's drift velocity

4 结果分析

采用上面介绍的方法分析这次实验观测到的4次电离层闪烁事件, 图5给出不均匀结构漂移速度随时间的变化结果. 由于观测站记录的幅度值存在数据缺失的情况, 以及作图时需要舍去取值不合理的点, 所以得到的漂移速度值是不连续的. 圆圈代表5 min的平均速度, 三角形代表2 min的平均速度, 点划线是1 min的平均速度.

图5a给出了10月19日21:20~22:40发生的闪烁事件结果. 5 min的平均速度范围在55~70 m/s, 大部分值在55~60 m/s. 2 min的平均速度范围在55~80 m/s, 21:45之后大部分值在55~60 m/s. 1 min的平均速度范围在50~85 m/s, 21:45之后大部分值也在55~60 m/s. 从整体上来看, 漂移速度从开始的70~80 m/s下降到55~60 m/s, 在21:45之后比较稳定地在55~60 m/s之间变化. 这次闪烁持续80 min, 平均漂移速度为60 m/s, 因此可以估计该电离层不均匀结构东西向的几何尺度为300 km左右.

图5b给出了10月19日22:58~23:33发生的闪烁事件结果. 5 min的平均速度值比较稳定, 大

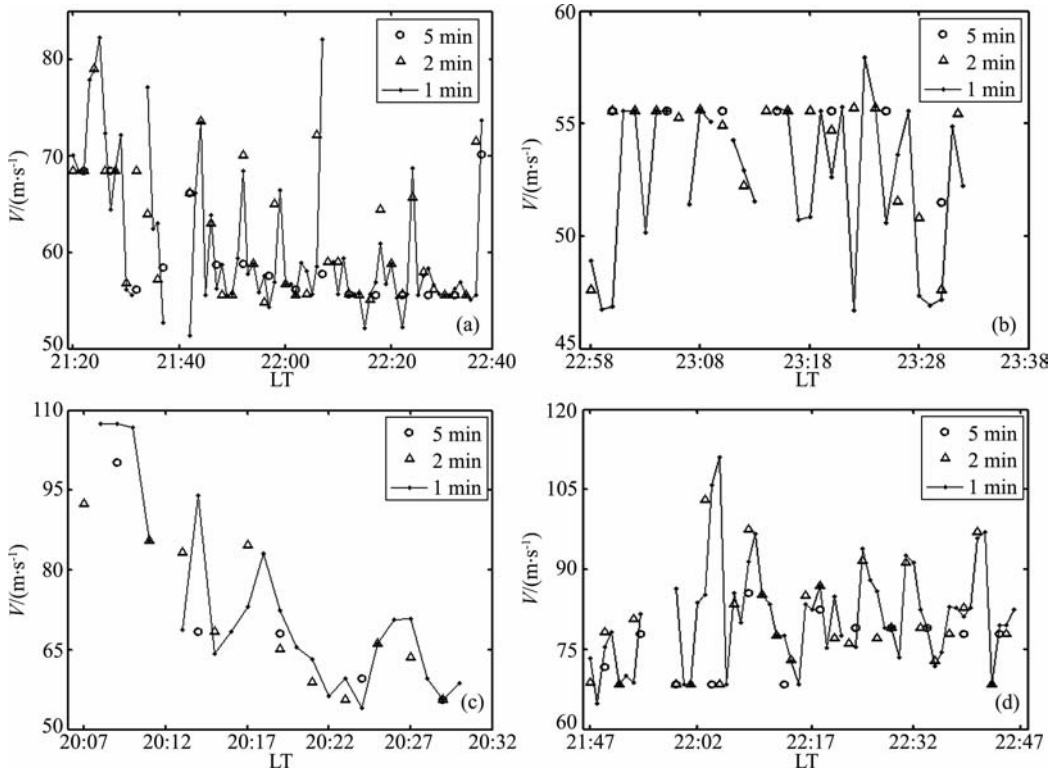


图 5 2005 年海口观测到的 4 次电离层闪烁事件中不均匀结构漂移速度变化图,向东漂移为正

(a) 10 月 19 日 21 : 20 ~ 22 : 40 ; (b) 10 月 19 日 22 : 58 ~ 23 : 33 ; (c) 10 月 29 日 20 : 07 ~ 20 : 32 ; (d) 10 月 29 日 21 : 47 ~ 22 : 47 .

Fig. 5 Ionospheric irregularities' drift velocity of four ionosphere scintillation in Haikou 2005.

positive value denotes the eastward drift

(a) 21 : 20 ~ 22 : 40 October 19th ; (b) 22 : 58 ~ 23 : 33 October 19th ; (c) 20 : 07 ~ 20 : 32

October 29th ; (d) 21 : 47 ~ 22 : 47 October 29th .

部分值都为 55.6 m/s, 2 min 的平均速度值大部分在 54.7~55.9 m/s 之间, 1 min 的平均速度值大部分在 50~56 m/s 之间. 从整体趋势上来看, 该闪烁事件的漂移速度比较稳定, 大部分时刻的值在 50~56 m/s 之间变化. 这次闪烁持续 35 min, 平均漂移速度为 55 m/s, 因此可以估计该电离层不均匀结构东西向的几何尺度为 120 km 左右.

图 5c 给出了 10 月 29 日 20 : 07~20 : 32 发生的闪烁事件结果. 5 min 的平均速度从 100 m/s 下降到 70 m/s, 又下降到 60 m/s 左右. 2 min 的平均速度从 83~92 m/s 下降到 55~70 m/s. 1 min 的平均速度从 107 m/s 下降到 55~70 m/s. 整体上来看, 该电离层不均匀结构的漂移速度变化范围较大, 从开始的 107 m/s 下降到后来的 55~70 m/s 之间. 这次闪烁持续 25 min, 平均漂移速度为 70 m/s, 所以可以估计该电离层不均匀结构东西向的几何尺度为 90 km 左右.

图 5d 给出了 10 月 29 日 21 : 47~22 : 47 发生的闪烁事件结果. 5 min 的平均速度从 68~78 m/s 达到最大值 85 m/s 后, 然后又下降到 75~80 m/s,

在 22 : 20 之后处于比较稳定的变化状态. 2 min 的平均速度从 68~81 m/s 达到最大值 103 m/s 后, 下降到 68~97 m/s, 22 : 10 之后大部分值在 75~85 m/s 之间变化. 1 min 的平均速度开始在 65~85 m/s 之间变化, 在 22 : 06 时达到最大值 111 m/s, 然后下降至 68~98 m/s 之间. 整体上来看, 这次闪烁事件的漂移速度 5 min 和 2 min 的平均值在 22 : 20 之前, 大部分值在 68~85 m/s 之间变化, 之后稳定在 75~85 m/s 之间. 1 min 的平均速度变化范围较大, 大部分值集中在 68~98 m/s 之间. 这次闪烁持续 60 min, 平均漂移速度为 80 m/s, 可以估计该电离层不均匀结构东西向的几何尺度为 290 km 左右.

本次实验观测到的 4 次电离层闪烁事件发生在 20 : 00~23 : 30 之间, 漂移速度的值在 50~110 m/s 之间, 方向为东向, 符合海南地区夜间子夜前的电离层不均匀结构沿纬圈向东漂移这一结论^[10]. 不均匀结构东西向的空间尺度分别是 300, 120, 90, 290 km 左右. 整体上来看, 22 : 00 之前漂移速度的值变化较大, 之后相对比较稳定, 尤其在 10 月 19 日的两次闪烁事件中非常明显, 这一结果

和其他学者的结论一致^[9]。

通过本次实验可知,对同一次电离层闪烁事件,电离层不均匀结构平均漂移速度的变化范围随数据采样长度而变化,数据采样时间间隔越长,速度的变化范围越小,即 5 min 的平均速度变化范围最小,2 min 的结果次之,1 min 的平均速度变化范围最大。但是,不同采样长度数据处理得到的平均速度的整体变化趋势基本一致,该方法的时间分辨率可以达到 1 min。

一些学者的研究表明,有多种因素可能引起电离层不均匀结构漂移速度的估计误差,仅特征随机速度(characteristic random velocity)一种因素,就可能产生 1~10 m/s 的估计误差^[12,14]。另外,由于接收机是在地面上接收闪烁信号,所以该结果是电离层不均匀结构的漂移速度在接收机平面上的“投影”^[5,6],因此需要利用卫星和信号在电离层上的穿透点以及接收机之间的位置关系对结果进行修正。由于卫星和电离层之间的距离远大于电离层和地面之间的距离,因此误差可以忽略。此外还有垂直漂移的影响^[4,5]、实验中接收机的硬件误差、三站之间距离的估计误差、速度合成时的算法误差等,如何消除这些因素的影响,是提高算法精度必须解决的问题。

5 结 语

本次实验利用三站卫星信号闪烁测量,在我国低纬地区实现了电离层不均匀结构的漂移速度测量,获得了初步的结果。通过本次实验,初步获得了 2005 年秋分前后我国海口地区电离层不均匀结构的漂移速度变化特点,其结论与已有的结论一致。本次实验验证了利用三站卫星闪烁数据测量电离层不均匀结构漂移速度的可行性和有效性,建议在其他区域,尤其是在电离层闪烁出现频率较高的低纬地区,如南沙群岛、三亚、广州、厦门等地开展类似实验,积累更多的实验数据,进行统计分析。

致 谢 本文的实验得到了 22 所海南观测站全体职工的大力支持和帮助,在此表示感谢!

参考文献(References)

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

- [2] Heelis R A, Kendall P C, Moffet R J, et al. Electrical coupling of the E and F regions and its effect on F-region drifts and winds. *Planet. Space Sci.*, 1974, **22**(5): 743~756
- [3] Richmond A D, Matsushita S, Tarpley J D. On the production mechanism of electric currents and fields in the ionosphere. *J. Geophys. Res.*, 1976, **81**(A1): 547~555
- [4] Kil H, Kintner P M. Global Positioning System measurements of the ionospheric zonal apparent velocity at Cachoeira Paulista in Brazil. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**(A3): 5317~5327
- [5] Ledvina B M, Kintner P M, Paula E R. Understanding spaced-receiver zonal velocity estimation. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**, A10306, doi: 10.1029/2004JA010489
- [6] Kintner P M, Ledvina B M, Paula E R, et al. Size, shape, orientation, speed, and duration of GPS equatorial anomaly scintillations. *Radio Sci.*, 2004, **39**, RS2012, doi: 10.1029/2003RS002878
- [7] 万卫星,宁百齐,袁洪等. 电离层扰动的 GPS 探测. *空间科学学报*, 1998, **18**(3): 247~251
Wan W X, Ning B Q, Yuan H, et al. GPS observations of the ionospheric disturbances. *Chin. J. Space Sci.* (in Chinese), 1998, **18**(3): 247~251
- [8] 王霄,史建魁,肖佐等. 海南地区电离层漂移的初步研究结果. *科学技术与工程*, 2004, **4**(6): 451~454
Wang X, Shi J K, Xiao Z, et al. Primary results on drift features of ionosphere in Hainan region. *Chin. Sci. Tech. Eng.* (in Chinese), 2004, **4**(6): 451~454
- [9] 李国主. 中国中低纬电离层闪烁监测、分析与应用研究[博士学位论文]. 武汉:中国科学院武汉物理与数学研究所, 2007
Li G Z. Studies on monitoring, analysis and application of mid-and low-latitude ionospheric scintillation in China[Ph. D.]. Wuhan: Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, 2007
- [10] 徐良,徐继生,朱劭等. 电离层不规则结构漂移的 GPS 测量及其初步结果. *地球物理学报*, 2009, **52**(1): 1~10
Xu L, Xu J S, Zhu J, et al. GPS measurements of ionospheric irregularity drifts and their initial results. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(1): 1~10
- [11] Briggs B H, Phillips G J, Shinn D H. On the analysis of moving patterns in geophysics-I. Correlation analysis. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 1968, **30**(10): 1777~1788
- [12] Briggs B H. On the anyalysis of moving patterns in geophysics-II. Dispersion analysis. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 1968, **30**: 1789~1794
- [13] Briggs B H, Phillips G J, shinn D H. The analysis of observation on spaced receivers of fading of radio signals. *Proc. Phys. Sci.*, 1950, **63**: 106~121
- [14] Wernik A W, Liu C H, Yeh K C. Modeling of spaced-receiver scintillation measurements. *Radio Sci.*, 1983, **18**(3): 743~764