

电离层 TEC 日落阶段涨落异常 增强现象研究^{*}

陈志宇 张东和 肖 佐

(北京大学地球物理系 北京 100871)

摘 要

重点报道了一种 TEC 伪距观测量的夜间抖动异常现象, 分析了这种现象的观测特征, 指出了夜间 GPS 伪距观测量的异常抖动, 特别是日落后时段 GPS 伪距观测量的散开十分严重的现象不是个别的偶然现象. 在考察了周围环境之后初步排除了这种现象是由周围地物引起的可能性, 而进一步与电离层不均匀体 (Spread-F) 的特征, 特别是它发生率最大的地方时进行比较, 认为这是一种电离层效应, 由大尺度的电离层不规则结构造成的散射很可能是这种夜间散开的主要原因. 本文仅就单站 GPS 观测资料认证了这种夜间强烈抖动的存在, 分析了北京上空电离层中发生的不均匀体或各种扰动对 GPS 信号的可能影响及其观测特征, 指出了夜间 GPS 伪距观测量的异常抖动, 特别是日落后时段 GPS 伪距观测量的散开十分严重的现象, 可以用于电离层不规则结构的研究. 由于 GPS 设备比较简便、数据量大、精度高、适用于各种环境等特点, 我们发展的单站 GPS 数据分析方法可能会对研究电离层 TEC 夜间涨落异常增加现象, 包括地域、时间上的统计特性比较有利.

关键词 电离层不规则结构; 电离层电子总含量; 电离层扩展 F

1 引言

GPS 用于电离层研究起始于 20 世纪 90 年代中期, 与传统的电离层探测方法比较优点很多. 首先, GPS 设备容易携带, 适合于在任何地点进行观测. 其次, GPS 数据量很大, 并且一颗卫星一次过天顶可以覆盖几百公里的地面范围, 而在一个时段至少可以有 4 颗 GPS 卫星被接收设备锁定. 由于传统的电离层探测方法 (包括垂直测量、斜向探测等) 仅能够得到电离层 F₂ 层峰值高度以下的电离层状况, 因此 GPS 观测可以有力地揭示可能发生在 F₂ 层峰值高度以上部分的电离层结构状况. GPS 的数据格式基本上比较统一, 容易通过 GPS 数据了解电离层形态的时间及空间变化.

GPS 数据在电离层方面主要用于得到电离层电子总含量 TEC, 由于 TEC 是一种积分效应, 考察 TEC 公式 $TEC = \int_L N_e ds$ 可以知道, 电离层的状态影响观测结果主要通过两方面, 一是电离层某区域电子密度涨落会影响 TEC 的涨落, 另一方面表现为电离层或地面 (特别在 GPS 卫星处于低仰角时) 对电波的多径效应. 用于电离层研究主要是 GPS 数据中的伪距观测量和载波相位观测量. 载波相位观测量所描述的 TEC 比用伪距观测量

^{*} 国家自然科学基金资助项目, 批准号 (40134020, 60027001)

2002-03-01 收到原稿, 2002-10-29 收到修定稿

描述的 TEC 光滑得多, 主要因为相位接收方式对多径效应很不敏感, 这是相位方法的优点, 但正因为如此, 它可以反映电离层电子密度涨落造成的信号闪烁, 但不能有效地反映电离层中不均匀结构可能造成的多路径传播效应. 我们做过这方面的对比, 发现即使在低仰角处地面多径效应对伪距观测量有较显著影响时载波相位仍然没有什么起伏涨落. 相比之下, 伪距观测量对电子密度本身的涨落和多径效应都比较敏感. 正是出于这样的考虑, 本论文的工作将依据 GPS 伪距观测量来研究 TEC 的抖动情况, 发现日落后时段内电波的抖动在相同条件下要比其他时刻强烈得多.

本文仅就单站 GPS 观测资料分析了北京上空电离层中可能存在的不均匀体或各种扰动对 GPS 信号的影响及观测特征, 发现 GPS 信号的抖动大多数发生在夜间, 并主要集中在日落后一段期间, 黎明前夕这种涨落也比较大. 在研究了关于赤道地区的 Spread-F 以及中纬度 Spread-F 发生率的现行理论, 数值模拟以及观测结果之后, 发现 GPS 信号的抖动发生的规律与 Spread-F 的发生规律很相近, 在考察了周围环境之后确认这种扰动不是由地物造成的, 初步认为电离层大尺度不均匀结构造成的散射多径效应是引起这种现象的最可能的原因.

2 问题的提出

电离层不同层次存在各种类型的不均匀体, 它们会造成对无线电波的散射及多路径传播, 例如短波场强的衰落就是一例. 传统上, 不均匀体本身的快速密度涨落造成电波的闪烁, 人们通过对在不同区域接收到的电波的闪烁情况来研究电离层不均匀体的发生及

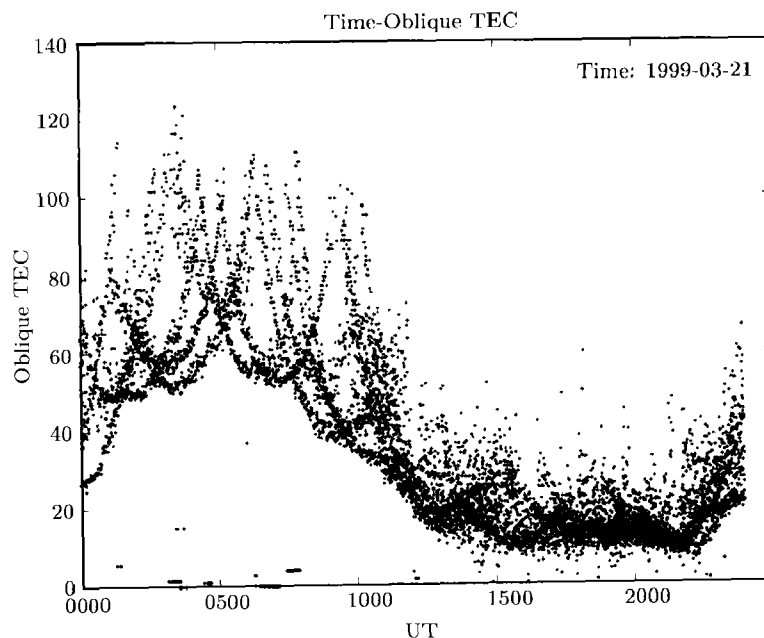


图 1 夜间出现抖动的伪距观测斜向 TEC 全天测量结果

Fig.1 A whole day measurement of TEC, showing the different fluctuations day and night

发展, 雷达回波的相干散射也是一种重要手段. 20 世纪 70—80 年代, 通过雷达探测得到不均匀体资料大多集中在低纬地区, 低纬地区的不均匀体的理论及观测资料都已经比较丰富^{[4]–[6]}, 发生规律也总结得比较多^[6], 相比之下, 中纬度地区电离层不均匀体的研究较少, 根据已有的研究表明, 其规律与低纬地区得到的规律有相似之处^[3]. 而且从动力学角度来讲, 不均匀体大多发生于低纬地区, 特别是在赤道异常区附近, 这些不均匀体可以顺着磁力线扩展到中纬度, 低纬地区不均匀结构的研究结果对我们工作的开展是很有帮助的. Aarons 通过雷达探测资料总结了赤道地区不均匀结构发生的时间及空间规律, 发现在夜间不均匀体的发生要频繁得多, 大多数时候, 在日落前后有发生率的极大值. 同时, 我们的 10 MHz 高频多普勒观测数据也发现夜间电波信号的涨落增强现象, 与白天观测结果显著不同. 在此基础上, 我们考察了 GPS 伪距观测数据, 发现在很多时候, 夜间 TEC 的涨落明显比白天大得多, 如图 1 所示, 这里, 我们选取的是原始的没有投影到垂直方向的 TEC, 作数据选择时, 把仰角限定到 20° 以上, 观测时间是 1999 年 3 月 21 日. 虽然对仰角作了限制, 消除了很多地面因素的影响, TEC 的白天形态和夜间形态仍然是显著不同的. 白天得到的斜向 TEC 形态很规则, 我们甚至可以区分出每一颗卫星的观测结果, 而到了夜间, TEC 则模糊成了一片. 后面的讨论中将具体区分这种“异常”的涨落现象, 并具体地将这种信号的涨落给予定量化描述.

3 观测事实及分析

通过对一年多的数据分析, 发现了很多天都存在这种 TEC 夜间剧烈起伏的现象, 而白天时段, 这种现象发生很少. 为了便于比较, 我们将 TEC 投影到垂直方向, 并取 ROT 作为定量化这种起伏大小的标准, ROT 定义为 $\frac{d\text{TEC}}{dt}$, 一般用于定量化卫星信号抖动所用的参数是 S_4 , 研究表明, ROT 与 S_4 很好地相关, 并可以用在 GPS 伪距观测量所得到的 TEC 上. 关于 ROT 参量的讨论请参看文献 [7], 他们通过实验给出 ROT 是很好的表征电波信号抖动的参量.

图 2 给出了 1999 年 3 月 21 日日落前后 4 颗 GPS 卫星观测到的 TEC 伪距观测量 (已经投影到垂直方向, 单位为 TECU, $1 \text{ TECU} = 1 \times 10^{16} \text{ m}^{-2}$), 图中同时给出了卫星的仰角轨迹以及 ROT 参量. 可以很清楚地看到, 这 4 颗卫星, 特别是 10 号、21 号卫星, 在卫星仰角甚至高达 60° — 70° 的时段, TEC 已经开始发生散开的现象. 而在此之前或之后散开现象即使对应着相同仰角亦不是十分显著, ROT 参数表现也是如此. 此外, 由于日落效应, TEC 本身是应该下降的, 相应的 ROT 量值在日落时段内应该自然有较大的散开, 如果剔除这个因素, 我们将期望看到的 TEC 在日落期间有相比之下更显著的涨落.

除了 1999 年 3 月之外, 我们还在 2000 年 2 月、2000 年 4 月、2000 年 6 月等时间内发现日落前后有 TEC 散开的现象, 而夜间 TEC 涨落比白天大的事实在某些月份几乎所有天都存在. 我们对周边环境做了进一步的分析 (本文的后半部分) 表明, 这种日夜间的 TEC 抖动并不是单纯由地面多径效应引起, 电离层不规则结构的发展在其中起到了很大的作用. 在通常情况下, 有多颗卫星在不同时段 (几乎是连续的) 测量到由 GPS 伪距测量 TEC 的散开 (如图 2), 我们认为, 这种不均匀结构有比较大的尺度形态. 而特别需要指出

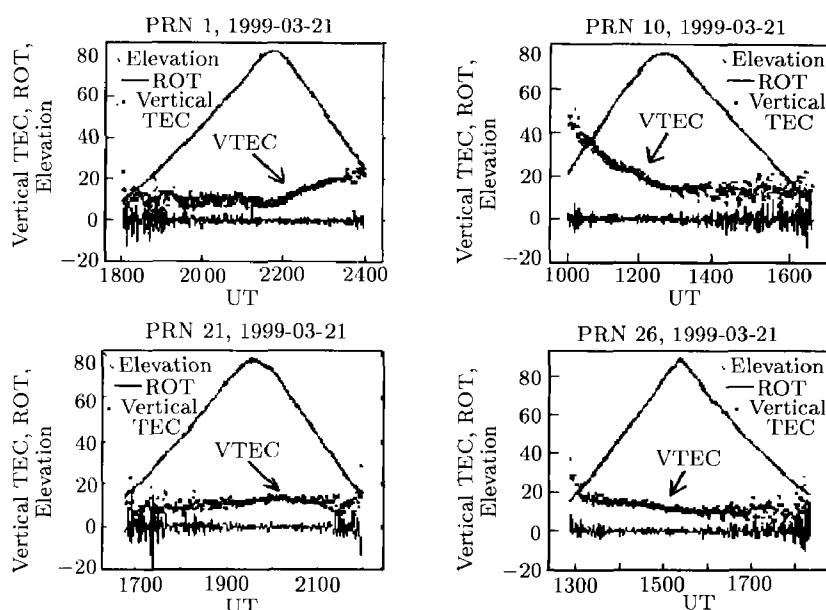


图 2 1999 年 3 月 21 日 10 号卫星、1 号卫星、21 号卫星和 26 号卫星观测到的日落后 TEC 散开现象

Fig.2 Observations of pseudo-range fluctuations after local sunset

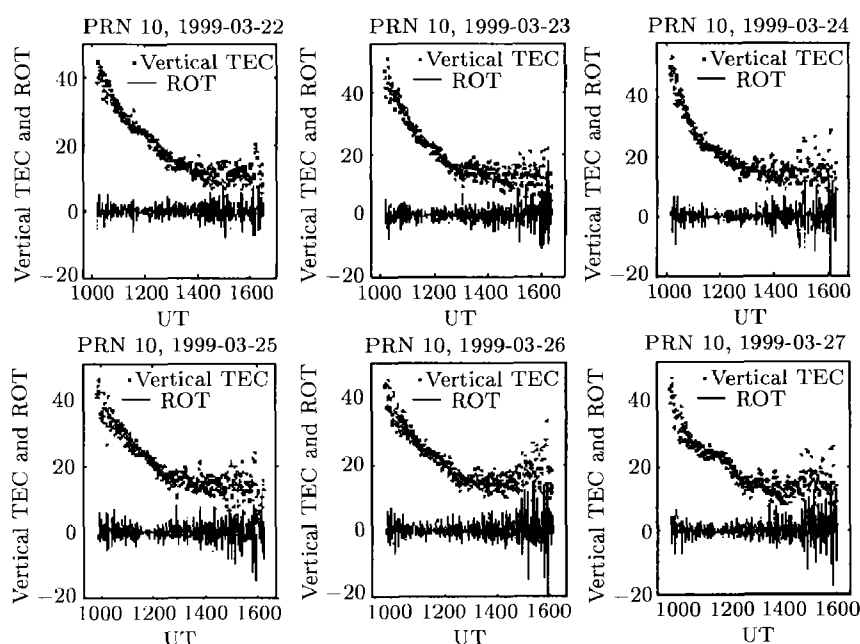


图 3. 1999 年 3 月 22—27 日连续几天内 10 号卫星观测到的 TEC 涨落情况

Fig.3 Fluctuations of GPS satellite number 10 for 6 consecutive days

的是, 我们往往在连续 4—5 天之内能够观测到同一地方时的 TEC 抖动现象, 而且 4—5 天之后散开不再明显, 如图 3 所示. 由于观测到这种情况大多发生于宁静日, 我们认为也

存在电离层中这种不均匀体在宁静日长时间存在的可能。

图 4 则给出了 1999 年 3 月 21 日至 24 日连续 4 天内 TEC 的变化情况, 其中 TEC 已投影到垂直方向, 并且作了 7 点滑动平均, 从图中可以明显看出连续很多天内 TEC 在夜间剧烈抖动, 某些天内 TEC 涨落甚至达到本底 TEC 的量级, 而白天此现象不明显。

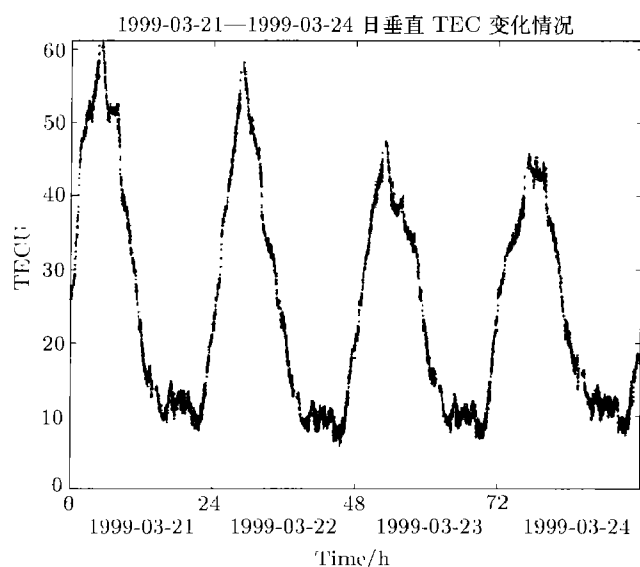


图 4 1999 年 3 月 21—24 日连续 4 天全天垂直 TEC 变化情况 (已做 7 点滑动平均)

Fig.4 Day-to-Day variations of pseudo-range deduced TEC, Fluctuations stronger during night

4 GPS 接收天线的周边环境

我们采用的 GPS 数据来自放置于北京大学的 TURBO ROGUE SNR-8000 双频 GPS 接收机, 天线置于 15 m 高的楼顶, 离大片水源比较远, 其周边物体对仰角的限制几乎不超过 10° , 如图 5 所示. 我们对取得的数据作了卫星硬件延迟修正, 由于条件限制, 接收机硬件延迟没有作修正, 但是, 由于接收机硬件延迟对于所有的卫星是相同的, 而我们这里所研究的是一种相对效应, 因此, 接收机硬件延迟对观测结果影响不大。

在实际观测情况下, 由于地面物体的反射造成的多径效应可能影响到 20° 仰角的 GPS 观测卫星, 甚至可能更高, 但鉴于接收天线周边环境的不可变更性, 可以通过对比长时间观测数据剔除这种地面多径效应的影响。

因为电波传播路径可以近似视为直线, 只有当卫星的仰角能够越过天线周边障碍物时才能够被接收机天线锁定, 我们找了一些气候以及电离层都非常宁静时的数据, 抽取卫星逐渐抬升并恰好为天线锁定所对应的仰角及方位角画到极坐标图上 (如图 6 所示), 而这样的图能够反映天线周边的障碍物情况. 从图 6 可以看到, 天线周边环境的影响基本上是各向同性的, 而且这种影响当卫星仰角超过 20° 时几乎很小. 基于这种考虑, 可以认为地面物体所造成的多径效应仅当卫星仰角较低时有比较大的影响. 考虑到天线周边环境的近似各向同性, 当我们选择数据时如果不作仰角限制, GPS 伪距观测测量应该是两边散开

的(散开位置对应于较低仰角),当仰角比较高时不应该出现散开现象. 如果在相同仰角处有一边散开,而且散开位置对应的仰角较高(甚至可以超过 30°),我们就认为这是一种电离层环境效应.

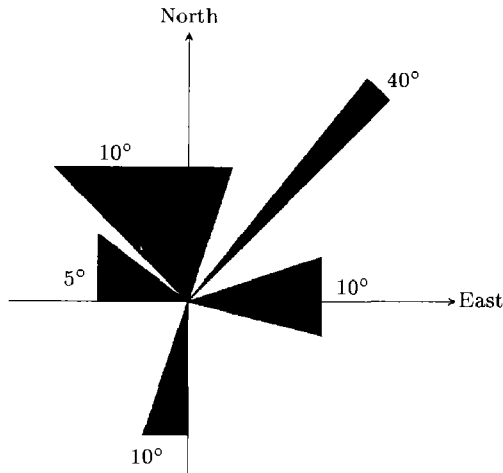


图5 GPS 信号接收天线周边环境

Fig.5 An illustration of the environment around the receiver

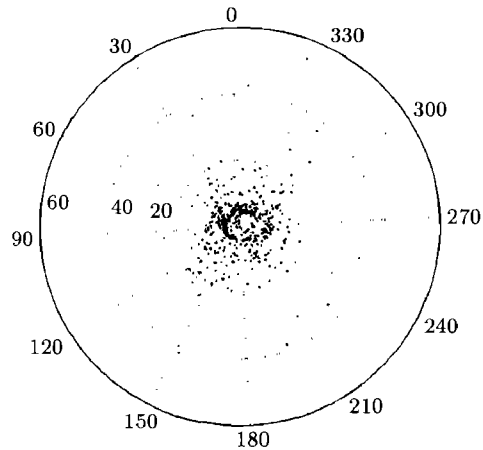


图6 真实的天线周围环境对卫星仰角的限制

Fig.6 Elevation and azimuth angles for the environment showing in Fig.5 when GPS signals are locked in

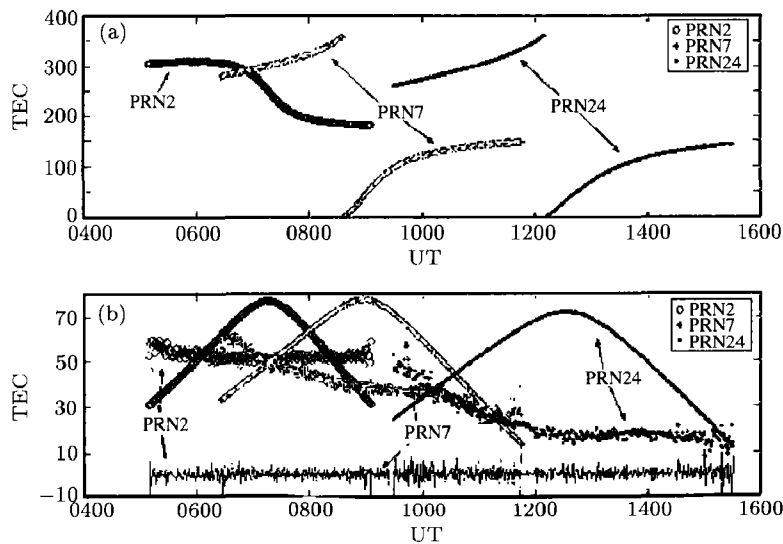


图7 GPS 信号不受电离层不均匀体多径效应影响的情况下 TEC 伪距观测量变化情况 (0500—1400 UT)

Fig.7 Examples without strong fluctuations after local sunset

除了天线近处环境因素之外,远处环境所造成的影响我们也是关心的.图7所示为正常情况下 TEC 变化情况(已投影到了垂直方向),图中选取了能够覆盖日落时段并且卫星轨迹绕接收机天线一周的2号、7号、24号卫星.图7(a)给出了3颗卫星方位角的变化情况,从图中可看出在接收时段里卫星扫过了接收天线所在的平面周围一圈,因此,地

面各方向的因素都应该考虑在内. 图 7(b) 给出了这 3 颗卫星测量到的 TEC 变化情况, TEC 下方画的是 ROT 参数. 测量到的 TEC 变化情况可以反应周围环境的变化, 至少在比较高的仰角下 TEC 几乎是没有什么抖动. 在较高仰角处, 地面环境引起的多径效应对 GPS 伪距观测量影响不大. 如果存在影响, 在较高仰角下的影响应该是各向同性的. 最后, 没有任何理由说明地面固定物体的影响会有明显的日夜差异.

通过以上讨论, 我们初步认为天线近处环境对接收到的信号影响一致, 远处的环境至少对较高仰角的 GPS 卫星的 TEC 伪距观测量不产生较大的影响, 如果在较高仰角时发生 TEC 的散开现象我们认为这主要是电离层效应造成的. 由本文的第 2、3 部分的讨论, 我们认为这种电离层效应很可能是 Spread-F, 而且尺度比较大.

5 结论和讨论

从上述讨论我们总结出如下现象.

(1) 夜间 TEC 伪距观测量涨落异常增强现象十分显著, 如果用 ROT 作为标准, 可以很明显地看到这种现象.

(2) 通常电离层 TEC 夜间涨落异常增强可以延续 2—5 h, 甚至更长.

(3) 从发生范围来说, 一天中常常有好几颗卫星在几乎同一时段观测到这种现象, 这种扰动的尺度比较大.

(4) TEC 夜间涨落增强现象持续的时间可以比较长, 我们常常在连续的许多天的同一时段发现同一颗卫星观测到的 TEC 涨落情况十分相似.

(5) TEC 夜间涨落异常增强现象更常发生在日落后的一段时间, 而这段时间通常是电离层不均匀体出现频率最高的一个时段, 所以我们认为这种异常涨落增强现象与不均匀结构的出现密切相关.

参 考 文 献

- [1] Zhang Donghe, Xiao Zuo. The Calculating TEC methods by using GPS observations and its applications for ionospheric disturbances. *Chin. J. Geophys.*, 2000, **43**(4):451—458, in Chinese (张东和, 萧佐. 利用 GPS 计算 TEC 的方法及其对电离层扰动的观测. 地球物理学报, 2000, **43**(4):451—458)
- [2] Xiao Zuo, Zhang Donghe. An approach to study the day-to-day variation of ionospheric TEC directly by GPS time delay signals. *Chin. J. Space Sci.*, 2000, **20**(2):97—102, in Chinese (萧佐, 张东和. 通过 GPS 测量数据研究电离层总电子含量的逐日变化. 空间科学学报, 2000, **20**(2):97—102)
- [3] Xie Hong, Liu Binsha, Xiao Zuo. The role of neutral wind in spread-F of low and mid-latitudes. *Acta Scientiarum Naturalium, University Pekinensis*, 1996, **32**(1):78—88, in Chinese (谢红, 刘滨沙, 萧佐等. 中性风在中低纬 Spread-F 中的作用. 北京大学学报 (自然科学版), 1996, **32**(1):78—88)
- [4] Aarons J. Global morphology of ionospheric scintillations. *Proc. IEEE*, 1982, **70**(4):360—378
- [5] Yeh K C, Liu C H. Radio wave scintillation in the ionosphere. *Proc. IEEE*, 1982, **70**:324
- [6] Aarons J. The longitudinal morphology of equatorial F-layer irregularities relevant to their occurrence. *Space Sci. Rev.*, 1993, **63**:209
- [7] Theodore L Beach. Simultaneous global positioning system observations of equatorial scintillations and total electron content fluctuations. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**:22 553—22 565
- [8] Nasyrov A M, Nasyrov I A, Bochkarev G S. The development of small-scale irregularities in the ionosphere disturbed by powerful oblique HF radio waves. *Adv. Space Res.*, 1998, **21**(5):701—704

- [9] Basu S, Groves K M *et al.* A comparison of TEC fluctuations and scintillations at ascension island. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 1999, **61**:1219—1226
- [10] Gordienko G I, Zachateiskiy D E, Kaliev M Z, Mukasheva S N, Vodyannikov V V. Nighttime increases in ionosphere electron content (a statistical and experimental study). *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 2001, **63**:617—625

THE ABNORMAL FLUCTUATIONS OF GPS PSEUDO-RANGE MEASUREMENTS AFTER LOCAL SUNSET

CHEN Zhiyu ZHANG Donghe XIAO Zuo

(Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871)

Abstract

Using GPS signals to deduce the ionospheric TEC as a tool to study the ionospheric physical processes has been widely conducted. For a dual frequency GPS receiver, both pseudo-range and phase measurements are used. Phase measurement is not sensitive to so-called multi-path effect so it is less affected by scattered or reflected signals and is more useful in determining the exact TEC value, including the signals' scintillation due to the fast fluctuations of electron density.

In this paper, an observational phenomenon is introduced to show that the pseudo-range fluctuates asymmetrically day and night. During the nighttime, especially, one to three hours after the local sunset, fluctuations of pseudo-range values often appear and last for several hours. The magnitudes of these fluctuations are much larger than that observed at daytime. Some examples are given and their observational features are analyzed. Both examinations of the environments around the receiver and the asymmetrical features of the phenomenon itself show that these fluctuations can not be produced by any ground objects, but instead, may be due to some ionospheric structures.

By comparing with the theoretical and observational characteristics of ionospheric Spread-F at mid- and low latitudes, particularly with its occurring time after local sunset, it is suggested that the nighttime fluctuations of GPS pseudo-range measurements is a kind of multi-path effects, which is produced due to the scattering of GPS signals by large scaled ionospheric structures such as Spread-F. Thus, GPS may provide a way to study the ionospheric irregularities.

Key words Ionospheric irregularities, GPS, Ionospheric TEC, Spread-F