第20卷 第2期 空 间 科 学 学 报 Vol.20, No.2
2000 年 4月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Apr., 2000

通过 GPS 测量数据研究电离层电子总含量的逐日变化*

萧 佐 张东和
(北京大学地球物理系 100871)

摘 要

提出了一种直接通过双频 GPS 伪距测量数据导出接收站附近垂直 TEC 的方法，这种方法不需要事先知道卫星和接收机电路时延的精确值，前者可在换算过程中自洽地加以修正，而接收机时钟误差则利用 IRI 模式的夜晚平均值作为参考来订正，这一订正存在一定的绝对误差，但不会影响逐日相对变化，却使数据处理过程大为简化．得到的垂直 TEC 为天顶周围 60° 锥角内的平均值，能够相当好地反映电离层电子总含量的周日变化．一个计算实例显示了连续三天北京地区 TEC 的日变化情况，证实了这一方法的实用性．文中还提出一个新概念或问题，即 GPS 卫星仰角很小时，通常认为多径效应造成大的误差，本文的一些实例似乎表明，这种多径效应的概念应当包括电离层不规则结构的贡献．

关键词 TEC —电离层逐日变化— GPS

1 引 言

用双频 GPS 系统监测电离层总电子含量的时间变化是一种较理想的方法，电子总含量及其变化不但是电离层形态学研究的重要资料，也是精密定位中电离层修正的重要参数．近 10 余年来，作为电离层电子总含量测量的主要方法之一，已发表了大量的有关工作，Lanyi 等人比较了 GPS 方法和传统卫星信标方法 [1]，Hargreaves[2] 等将这一方法应用于极光区域电子总含量，强调了不规则性的效应．在我国中纬地区，有研究分别报道了不同目的的测量结果 [3−5]．近年来利用全球分布的网络已经画出了全球 TEC 分布图 [6]．虽然建立在基本原理完全相同的基础上，但具体的处理方法并不完全一样，各有自己的特点．事实上，从电离层研究的角度来看，不同侧重的研究方面可以有不同的处理方法，以便突出某些特定的要求，正是出于这样的考虑，本文提出了一种只用双频群时延测量直接导出垂直 TEC 的方法，能够给出垂直 TEC 日变化特征．并以北京地区的探测结果为例证实了这一方法的实用和合理性，简略讨论了电离层不规则结构的影响问题．

2 分析方法和步骤

双频 GPS 接收机的两个频率伪距之差正比于电离层总电子含量，由于 GPS 卫星的

* 国家自然科学基金资助项目 49874041, 49990454
1999-06-12 收到原稿，2000-01-13 收到修定稿

运行特点，每一时刻得到的 TEC 代表该时刻卫星与接收机连线方向的值，随着卫星的运动，该值不断变化，一个卫星在其可观测时段内不同时刻的值既反映了卫星本身的运动，又叠加了电离层本身的地方时变化.

图 1 和图 2 是一天 24 小时的一次实际 TEC 测量值，涉及多颗 GPS 卫星，每个卫星的可观测时间从数 10 分钟到几个小时不等，图 1 包含了以接收机为中心的各个方向的全部路径. 显然电离层随时间和空间变化的影响十分重要，需要设法消除.

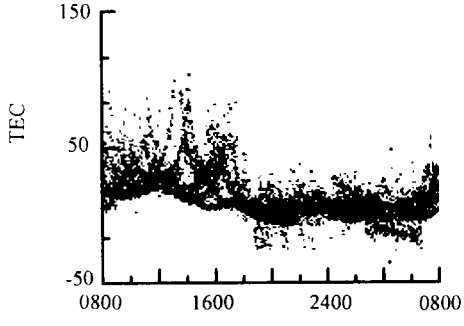


图 1 .1998 年 11 月 21 日北京地区全天 (地方时 0800 开始) 所有卫星测得的未加任何修正的 TEC 原始资料

Fig.1 Diurnal variation of line of sight TEC at Beijing for 21st, Nov. 1998, showing TEC (in TEC Unit) vs. local time for all satellite measurements of that day without any corrections

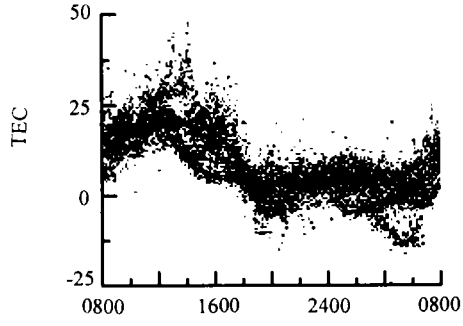


图 2 同图 1, 但将所有方向的 TEC 值均直接投影到垂直方向

Fig.2 Same as Fig.1, are projected to the vertical direction

图 2 显示在图 1 基础上将沿所有路径的 TEC 都乘以天顶角的余弦以归算到垂直方向，这里对一定仰角路径的天顶角计算须考虑到球面效应，并不是简单的与仰角互余. 从图 2 可以看出 TEC 取值范围大大缩小，且以粗略地表现出日变化趋势，中午的值大而夜晚的值小，然而同一时刻的测量值仍然有相当的偏离. 进一步的措施是使其归算到尽可能真正代表垂直方向实际情况的值，为此，只取接收机周围天顶角为 30° 的一个锥体内的所有路径上的测量值，在一个垂直而较小的角度范围内，不同路径的差异应当大大减小，亦即电离层空间不均匀性和地方时变化的效应相应减少. 图 3 给出在这样一个锥体内所有路径上的 TEC 值. 再一次重复图 2 的做法，认为电离层质心在 400 km 高度，而把天顶角 30° 范围内的值均归算为垂直 TEC. 这样做的结果显示在图 4 中，可以看出图 3 和图 4 的差别并不大，电离层的日夜变化趋势已经相当明显. 然而一个新的矛盾突出表现出来，即同一时刻两个以上卫星的测量值显然有一个系统偏差，这是由卫星时钟本身的小量时间偏差造成的. 原则上应当确切知道不同卫星的时间偏移量，卫星的星历有时不定期提供这些参数，也有作者系统研究了确定这种偏移量的精确方法. 我们采用了一个较简易的替代办法，即认为同一时刻不同卫星在天顶周围 30° 锥体内测量值的垂直分量大体上是相同的，表现出的差异来自不同卫星的硬件偏差. 用反复拟合或联立代数方程求出每颗卫星的偏差 (可以为正或为负), 加到每个卫星测量的群时延中去.

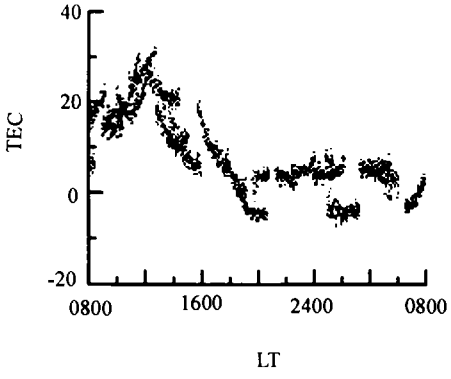


图 3　同图 1，但去掉了所有视线天顶角大于 30° 的测量值

Fig.3　Same as Fig.1, data with zenith angles larger than 30° removed

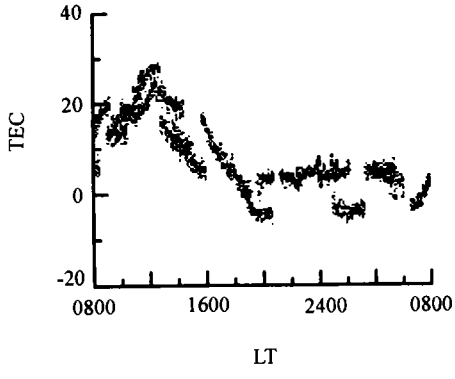


图 4　将图 3 中数据均投影到垂直方向后的结果

Fig.4　Vertical projection of all TEC from Fig.3

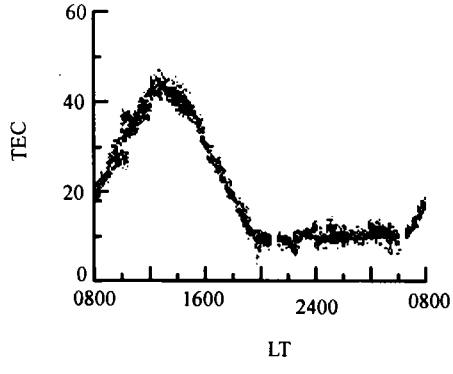


图 5　拟合并与夜晚 IRI 模式比较，对卫星和接收机时差做了订正后的 TEC

Fig.5　TEC after corrections of satellite bias and receiver clock error through fitting and comparison with IRI

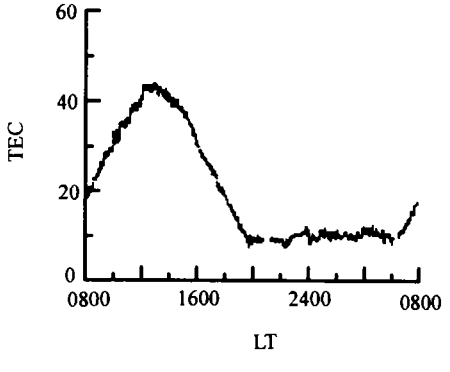


图 6　进行 7 点滑动平均，与图 1 所示同一天的光滑的 TEC 日变化曲线

Fig.6　After a running average of 7 points of data of Fig.5, a very smooth vertical TEC of same day as in Fig.1 was shown

还有二个问题，一是 TEC 日变化曲线仍有一定的宽度范围，包含着双频伪距方法本身的误差和天顶附近 30° 锥体内不同路径上电离层自身的差异，对这一问题的进一步改善将在下面做专门讨论；而另一个问题则是绝对值标定问题，夜间的 TEC 值为负，明显不合理，这由接收机的硬件偏移引起，可以由一个已知硬件偏差的接收机在同一地点同时观测而加以校正，在只考虑相对变化情况下，我们取另一种简单办法，即用国际参考电离层算出接收点的接收日期前后连续数日的 TEC 时间变化，以其夜间平均作为标准将测量的夜间平均值归算到 IRI 计算值，以此作为接收机的硬件修正量．图 5 显示了这种修正后的结果，尽管这一结果仍然存在一定程度的离散性，但总的日变化趋势是十分明显的．

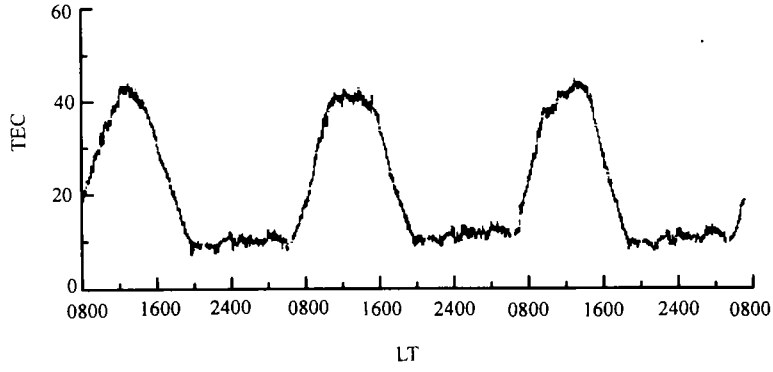


图 7 1998 年 11 月 21 至 23 日连续 3 天的 TEC 逐日变化

Fig.7 A consecutive three days' TEC variation (21—23, Nov. 1998), show a day-to-day variation

3 几个具体问题的进一步讨论

首先，对图 5 显示的离散性做进一步的讨论，分析一下造成这种离散的物理原因. 影响 GPS 卫星测量的时延因素可表示为:

$$\mathrm{d}T = R/c + \mathrm{d}t_1 + \mathrm{d}t_2 + \mathrm{d}t_t + \mathrm{d}t_i + \mathrm{d}t_m$$

其中，R 为接收机与卫星的真实距离，c 为光速，$\mathrm{d}t_1, \mathrm{d}t_2$ 分别为接收机和卫星本身的钟差，$\mathrm{d}t_t, \mathrm{d}t_i$ 分别是对流层和电离层时延，$\mathrm{d}t_m$ 是多径效应等影响，由于电波在大气和电离气体中的实际传播速度 (群速度) 小于光速，实测的时延不等于 R/c, 后面的几项中，$\mathrm{d}t_1$ 和 $\mathrm{d}t_2$ 可正可负，但不会在短时间内有明显的涨落，前面我们已对此作了修正. $\mathrm{d}t_t, \mathrm{d}t_i$ 可以有不同时间尺度的变化以及空间变化，由于采用了双频差分方法，$\mathrm{d}t_t$ 与频率无关，已由差分而抵消，$\mathrm{d}t_i$ 则可用来研究电离层. 多径效应一般指接收机附近的各种物体造成的多次反射效应，对运动接收机，这一项带有强的随机性，而对固定地点接收机而言，这一项效应应当不随时间而变化，好象比较容易区分，但对电离层研究而言，我们认为，电离层不规则结构将会造成强的多径效应. 电离层的这种效应应当与电离层背景效应加以区别，从而提供一种研究电离层不规则结构的有效手段.

首先，对图 5 的离散性还可做进一步的改善，同一时刻一般有 4 到 8 个卫星资料，尽管最终只取了通过天顶附近一定角度范围内的轨道并已经通过处理归算为测量点当地的垂直 TEC, 但仍然反映出不同路径的电离层差异. 为了更清晰地探讨不规则结构的影响，我们定义一个垂直平均电离层，代表某一时刻垂直方向周围 30° 锥体电离层的平均状况，由于同一时刻处于该锥体内实际卫星的数目不会超过 8 个，采用连续若干个点 (取 6—8 个点，大体相当与同一时刻能同时观测到的 GPS 卫星数) 滑动平均的办法可在一定程度上减小误差而获得该锥体内的平均 TEC 值. 对图 5 的数据做 7 点的滑动平均，以此来代表我们所定义的平均 TEC. 图 6 表示的正是这种平均垂直 TEC 的日变化曲线. 用这样的方法给出 1998 年 11 月 21—23 连续 3 天北京地区平均垂直 TEC 的变化 (示于图 7) 每天 TEC 的结构明显不同，无论是曲线的峰值高度、宽度还是形状，都显示了清晰的周日变

化. 从实际物理过程考虑，围绕日出日落时刻的前后几个小时内，电离层电子数密度的时间变化和空间梯度均最大，而中午和子夜前后上述空间和时间变化平均最小，而这恰恰与图 7 所示的离散程度的时间分布大体相反，这似乎表明测量值围绕平均值的涨落主要不是由于小范围内不同卫星视线方向对应的电离层空间变化造成，因为其明显的特征是几乎整个夜间这种平均电离层表现出强烈的涨落，这可能提出了一个令人感兴趣的问题，即代表 dt_m 的这种涨落不仅仅反映接收机周围环境造成的多径效应，而且反映了电离层的某种影响. 图 8 更明确的说明了这一点，这是 1998 年 11 月 21 日北京地区同一颗卫星分别在白天和夜晚两个时段的伪距法测量结果，密集的点是 TEC，而较粗的实线代表相应时刻的仰角，以同一个纵轴表示，在地方时 1000—1100 和次日凌晨 0600—0700，相应的卫星仰角几乎相同，但测量得到的 TEC 的涨落明显不同，夜晚的涨落强烈得多. 在电离层 F 区，广义的不规则结构包括不同尺度的波、Spread-F 和湍流结构等等，而这类不规则性更易于在夜间出现，因而可以说，本方法提供了一种新途径，从统计角度研究电离层不规则性的出现率、形态甚至它们的演化. 当然，由于目前采用的数据是分钟量级，且滑动平均已将同一时刻的几颗卫星的资料加以平滑，这些结果反映的不规则结构的时间涨落尺度应在 5 min 以上，即使这样，它也可能成为电离层不规则结构研究中的一种有用的辅助手段. 总之，本文提出一种有效而实用的单独利用 GPS 双频伪距信息获得垂直 TEC 的方法，能够很好的反映平均的 TEC 周日变化形态，初步的结果表明其精度相当高，且对日变化的反映十分灵敏，也有可能给出某些不规则结构出现率和形态演化方面的信息，但这一点还需要更多的资料分析和研究加以确认.

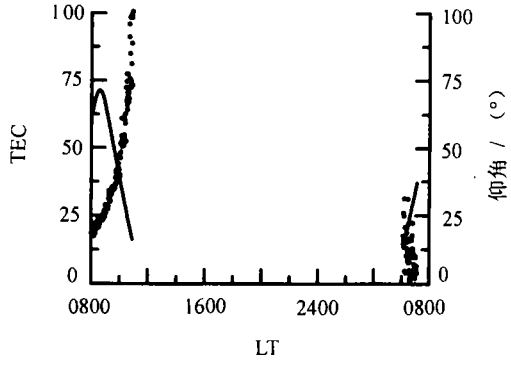


图 8　同一个卫星覆盖两个时段的测量值，小点代表 TEC 而实线为仰角，注意 1000—1100 LT 和次日凌晨 0600 仰角大体相同而后一时刻的 TEC 误差大得多，表明电离层中的不规则结构可能造成多径效应

Fig.8　A same satellite covered two time intervals, dots are the uncorrected TEC values and solid line is angles of elevation. Note that at 1000—1100 LT in the late morning and at about 30 hours (very early next morning) the satellite had nearly the same elevation (small elevation) while TEC errors around 30 hours are much greater. This may be from multi-path effect due to the irregularities in the early morning

由于我们所用的方法本身带有平均的性质，不适用于研究瞬态或短时的扰动过程，例如耀斑效应、声重力波、电离层泡等结构，虽然有时对此也有所反映，但不敏感，或难于从涨落中区分出来，图 7 中有一个实例，第二天中午的第 4 个小峰 (地方时 22 日 1432) 对应着一个太阳耀斑，尽管有所反映，但很难同中午或夜晚涨落形成的类似小峰在没有事先信息的情况下加以区分. 对这一类扰动，可以用双频相位和伪距联合分析来认证和研究，我们已就此发展了一种行之有效的分析技术，将在另文中专门讨论.

参　考　文　献

[1] Lanyi G E, Roth T. A comparison of mapped and measured total ionospheric electron content using Global Positioning System and beacon satellites observations. *Radio Sci.*, 1998, 23(147):483—492

[2] Coco D S, Coker C, Dankle S R, Clynch J R. Variability of GPS satellite differential group delay biases. *IEEE Trans. Aeros. Elec. Sys.*, 1991, **27**(6):931—938

[3] Hargreaves J K, Burns C J. Electron content measurement in the auroral zone using GPS: Preliminary observations of the main trough and a survey of the degree of irregularity in summer. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1996, **58**(13):1 449—1 457

[4] 张东和，曹冲，甄卫民. GPS 接收机测量电离层 TEC 的数据处理方法. 电波科学学报，1996, **10**(3):76—79

[5] 万卫星等. 电离层扰动的 GPS 探测. 空间科学学报，1998, **18**(3):25—30

[6] 田茂等. 应用 GPS 信标监测电离层 TEC. 电波科学学报，1999, **14**(增刊):27—30

[7] 曹冲，周群山，司天雷，孙环凤. XX-5A 试验期间观测到的电离层有源变态效应的实验结果分析. 电波科学学报，1998, **13**(1):17—20

[8] Breed A M, Goodwin G L. Total electron content measurements in the southern hemisphere using GPS satellites, 1991 to 1995. *Radio Sci.*, 1998, **33**(6):1 705—1 726

[9] Sardon E, Rius A, Zarraoa N. Estimation of the transmitter and receiver differential biases and ionospheric total electron content from Global Positioning System observations. *Radio Sci.*, 1996, **29**(3):577—586

AN APPROACH TO STUDY THE DAY-TO-DAY VARIATIONS OF IONOSPHERIC TEC DIRECTLY BY GPS TIME-DELAY SIGNALS

XIAO Zuo ZHANG Donghe

(*Department of Geophysics, Peking University, Beijing* 100871)

Abstract

In this paper, an approach was presented to deduce the diurnal variation of ionospheric TEC through only the measured data of time-delay (pseudo-range) of GPS signals without using any phase information. Thus the procedure to study TEC day-to-day variations is greatly simplified. In this method, satellite clock bias can be removed self-consistently in the calculations while the receiver clock error is corrected by using the average night values from IRI model. In this way, some absolute error due to receiver clock may still exist, but this does not influence the study of day-to-day variations. The calculated vertical TEC is the average of vertical projections of all the line-of-sight TEC from different satellites in a conical angle of 60 degrees around the local vertical direction. An example of three consecutive days' TEC variation was given, which shows the validity of the method suggested in this paper. Finally, it is pointed out that in the case of large zenith angle of satellite, ionospheric irregularities may contribute certain amount to the multi-path effect.

Key words TEC, Ionospheric day-to-day variation, GPS