0254-6124/2007/27(4)-286-06 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Xu Lijuan, Yuan Hong, Fan Jianjun, Liao Bingyu. Study on a method of calculating the ionosphere TEC using RDSS system observation data. *Chin. J. Space Sci.*, 2007, **27**(4): 286~291

利用 RDSS 系统测量数据提取电离层 TEC 参数的研究 *

徐丽娟[1,2,3] 袁 洪[1] 范建军[1] 廖炳瑜[1]

[1](中国科学院光电研究院 北京 100080)

[2](中国科学院空间科学与应用研究中心)

[3](中国科学院研究生院)

摘 要 提出了一种基于无线测定卫星业务 (RDSS) 系统观测数据提取电离层 TEC 参数的方法, 利用此方法计算分析了 2006 年 5 月地面中心地区电离层垂向 TEC 的日变化趋势. 研究结果表明, 利用 RDSS 系统观测数据提取的电离层垂向 TEC, 在北京时间每日凌晨 0400 时左右达到最小值, 在午后 1400 时左右达到最大值, 符合电离层 TEC 参数受太阳活动影响较大的物理规律. 结果说明研究方法是可行且有效的, 文章还对可能存在的误差进行了探讨.

关键词 无线测定卫星业务; 伪距; 电离层; 电子浓度总含量 (TEC)

中图法分类号 P 353

Study on a Method of Calculating the Ionosphere TEC Using RDSS System Observation Data

XU Lijuan[1,2,3] YUAN Hong[1] FAN Jianjun[1] LIAO Bingyu[1]

[1](*Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100080)

[2](*Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences*)

[3](*The Graduate School, Chinese Academy of Sciences*)

Abstract In this paper, a method of calculating the ionosphere TEC (Total Electron Content) is proposed using RDSS (Radio Determination Satellite Service) System observation data, and gained the ionosphere vertical TEC and its diurnal variation tendency of center station region using one month's data. The result indicates that the ionosphere TEC derived from the RDSS observational data touch bottom at about 4 o'clock and come to a peak at 14 o'clock (Beijing Time), which matches the physical rule that the ionosphere is affected by the solar zenith angle. Using the calculating method introduced in this paper, the TEC of ionosphere can be properly derived, and the trend of TEC would be properly got. This method is feasible and valid. Some errors, which might exist, are also disassed in this paper.

Key words RDSS, Pseudo range, Ionosphere, TEC

---

* 国家自然科学基金面上项目资助 (40374054)

2006-07-16 收到原稿, 2007-03-14 收到修定稿

1 引言

电离层电子浓度总含量 (TEC) 是一个非常重要的电离层参量，对电离层物理的理论研究及电离层电波传播的应用研究均具有十分重要的意义.

早期的电离层 TEC 探测手段以卫星信标测量为主，如微分多普勒方法、法拉第旋转方法 [1] 等. 目前，随着 GPS 系统的日益成熟，采用 GPS 双频信标的测量获取电离层 TEC 参量成为当前最为重要和广泛采用的方法. GPS 属于全球导航卫星系统 (即 GNSS) 体制，而无线测定卫星业务 (RDSS) 系统与 GNSS 体制不同，是一种导航与个人通信技术合理结合的新的卫星无线业务. 目前，RDSS 系统已成功应用，例如美国的 Geostar 系统、欧洲的 Locstar 系统，以及中国的北斗导航系统 [2]. 利用 RDSS 系统的测量数据也可以进行电离层 TEC 参数的提取，作为 GPS 系统观测的重要补充，本文提出了一种基于 RDSS 体制的北斗定位导航系统观测数据提取电离层 TEC 的方法，同时利用此方法计算分析了 2006 年 5 月地面中心电离层垂向 TEC 的日变化趋势，并对可能存在的误差进行了探讨.

2 研究概述

2.1 无线电信号的电离层延迟及数学表示

无线电波在介质中的传播速度可用介质的折射率来表示. 如果传播速度是电波频率的函数，该介质就是色散的. 电离层属于色散介质，它位于地球表面以上大约 60~1000 km 之间的大气层区域. 在这个区域，太阳紫外线使部分气体分子电离化，并释放出自由电子. 这些自由电子会影响电磁波的传播，其中就包括 RDSS 系统电波信号的传播.

由于电离层对电磁波传播属于色散介质，因此传播速度与频率有关. 电离层对无线电信号产生的延迟量 $\tau_{\mathrm{ion}}(f)$ 与载波频率、信号传播路径和电离层穿刺点的垂向 TEC 值的关系可表示为 [3]

$$\tau_{\mathrm{ion}}(f)=\frac{KN_{\mathrm{TEC}\perp}}{f^2\cos(\delta)}=\frac{40.32\times N_{\mathrm{TEC}\perp}}{f^2\cos(\delta)}. \quad (1)$$

其中，K 为电离层比例系数，$N_{\mathrm{TEC}\perp}$ 为用户与卫星间电波射线路径与电离层穿刺点的垂向电子总浓度，f 为载波频率，δ 为电波射线路径与电离层穿刺点的倾角.

2.2 RDSS 系统测距基本原理

可以借助图 1 来说明 RDSS 导航系统的基本测距原理 [4]. RDSS 系统测距时需要地面中心几乎实时地参与工作.

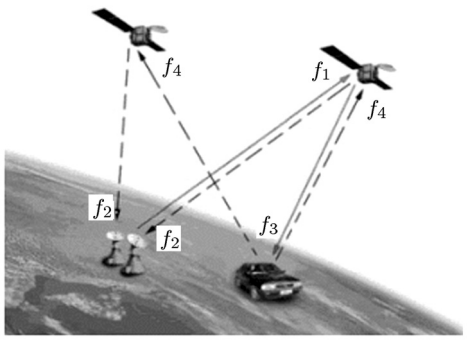

图 1 RDSS 导航系统 ($f_1=6.2\,\mathrm{GHz}$, $f_2=3.9\,\mathrm{GHz}$, $f_3=2.4\,\mathrm{GHz}$, $f_4=1.6\,\mathrm{GHz}$)

Fig.1 RDSS Navigation System ($f_1=6.2\,\mathrm{GHz}$, $f_2=3.9\,\mathrm{GHz}$, $f_3=2.4\,\mathrm{GHz}$, $f_4=1.6\,\mathrm{GHz}$)

首先地面中心需要以特定的频率 f_1 向处于 36 000 km 高空的同步静止轨道上的两颗定位卫星发送具有超帧、分帧结构的伪码扩频的连续波信号；卫星接收到信号以后，经过卫星上的转发器变频为 f_3，然后放大功率向各自天线波束覆盖服务区内的用户广播；用户接收机接收后，响应其中来自某一颗卫星的信号 (如图 1 中实线所示)；提出申请服务项目，并以 f_4 的频率同时向某两颗卫星发送应答信号 (如图 1 中虚线所示)；卫星接收到用户响应信号后，经转发器变频为 f_2 放大功率下传到地面中心；地面中心接收并解调卫星传送来的信号，然后根据用户的申请服务内容进行相应的数据处理，并根据出入站信号的时间差计算出 “用户到卫星的距离”，即伪距. 最后，地面中心将处理好的数据结果以出站信号的方式传送回用户.

2.3 利用 RDSS 系统提取电离层 TEC 参数的算法

在 RDSS 系统整个测距过程中，地面中心发出的测距信号 (具体为格式化的帧结构及其伪码) 含有时间信息，经过卫星—接收机—卫星，再回到地面中心，由出入站信号的时间差可计算出距离. 因而，地面中心根据测站应答信号计算的观测量，是出站信号从地面中心到用户入站信号的距离与从用户到地面中心的距离之和，也就是说，RDSS 测量的为

双程伪距. 用公式可以表示为

$$\rho_{ii}(t) = \rho_0(t) + \rho_1(t) + \tau_{\rm ion}(f_1) + \tau_{\rm ion}(f_2) + \tau_{\rm ion}(f_3) + \tau_{\rm ion}(f_4) + 4\tau_{\rm trop}(t) + O_i + I_i + B_{0\rm d} + e_{ii}(t). \tag{2}$$

其中, $\rho_0(t)$ 为出站信号从地面中心到用户的单程真空时延, $\rho_1(t)$ 为入站信号从用户到地面中心的单程真空时延, $\tau_{\rm ion}$ 为电离层时延, f_1, f_3, f_4, f_2 分别为地面中心到卫星、卫星到用户、用户到卫星、卫星到地面中心的载波频率, $\tau_{\rm trop}$ 为对流层时延, $O_i + I_i$ 为系统出入站波束零值漂移之和, $B_{0\rm d}$ 为用户接收机的零值误差, $e_{ii}(t)$ 为观测噪声.

在 RDSS 的测距原理中, 没有包含载波相位的信息, 所以不能采用 GPS 体制使用的提取电离层 TEC 参数的方法, 也不能单纯地利用 RDSS 系统的双程伪距信息来计算电离层的 TEC 参数. 为了解决这一问题, 在地面控制中心设置了一台用户机, 将用户机与控制中心的信号收发系统通过电缆实现同一时流信号, 保证信号发送与接收的计时起点同步. 地面控制系统在时间 t_0 点以频率 f_1 向同步卫星发送电波信号, 用户机在同一时刻也开始计时, 经过卫星变频转发, 用户接收机的两条通道分别接收来自东星和西星的转发信号. 当判断信号接收完毕时, 停止计时, 通过计算时间差, 从而得到地面中心 — 卫星 — 用户机的单程伪距信息. 用公式可以表示如下:

$$\rho_i(t) = \rho_0(t) + \tau_{\rm ion}(f_1) + \tau_{\rm ion}(f_3) + 2\tau_{\rm trop}(t) + O_i + B_{0\rm s} + e_i(t). \tag{3}$$

其中, O_i 为系统出站波束零值漂移, $B_{0\rm s}$ 为用户接收机的零值误差, 其余参数意义与式 (2) 相同. 将式 (3) 加倍并与式 (2) 相减可得

$$2\rho_i(t) - \rho_{ii}(t) = \rho_0(t) - \rho_1(t) + \tau_{\rm ion}(f_1) + \tau_{\rm ion}(f_3) - \tau_{\rm ion}(f_2) - \tau_{\rm ion}(f_4) + O_i - I_i + 2B_{0\rm s} - B_{0\rm d} + e_i(t) - e_{ii}(t). \tag{4}$$

其中, $\rho_1(t)$, $\rho_0(t)$ 分别为入站信号经历的真空距离和出站信号经历的真空距离. 由于无线电信号从地面发出经卫星再返回地面的上下行时间约为 0.24~0.28 s, 可以认为 $\rho_0(t)$ 与 $\rho_1(t)$ 的距离差可以达到忽略的程度. $O_i - I_i$ 可以通过计算系统入站波束零值漂移求得. $2B_{0\rm s} - B_{0\rm d}$ 可以通过计算标校站零值漂移求得. $e_i(t) - e_{ii}(t)$ 属于白噪声, 如果取一小时左右的数据进行平滑, 可以显著减小噪声的影响, 使噪声的影响达到可以忽略的程度. 由于我们是在地面控制中心地区附近设立用户接收机, 接收机的位置与地面控制中心信号收发系统的位置相距不过百米, 则地面中心到同步卫星的信号传播路径在电离层穿刺点的倾角可认为与同步卫星到用户的信号传播路径在电离层穿刺点的倾角近似相等. 根据式 (1) 的关系, 可以将式 (4) 转换, 得到大气电离层垂向电子总含量如下:

$$N_{\rm TEC\perp}(t) = \frac{1}{k\left(\frac{1}{f_1^2} + \frac{1}{f_3^2} - \frac{1}{f_2^2} - \frac{1}{f_4^2}\right)} \cdot \left\{\left[\overline{2\rho_i(t) - \rho_{ii}(t)} - (O_i - I_i) - 2B_{0\rm s} + B_{0\rm d}\right]\cos(\delta_i)\right\}. \tag{5}$$

其中, $\overline{2\rho_i(t) - \rho_{ii}(t)}$ 为一小时左右平滑的伪距差值, 其余参数意义同前.

3 数据处理结果与分析

3.1 地面中心 2006 年 5 月电离层 TEC

首先需要说明的是, 经过计算, 接收机到东星的电离层穿刺点 $\rm IPP_1$ 的经度为 119.04°E, 纬度为 36.74°N, 到西星的电离层穿刺点 $\rm IPP_2$ 的经度为 111.46°E, 纬度为 36.66°N. 为了便于比较, 更好地说明问题, 我们将所有的电离层 TEC 计算结果统一为北京时间.

图 2 显示的是利用 2.4 节中所述算法对 2006 年 5 月 1 日到 3 日的 RDSS 观测数据进行处理的结果. 用户接收机的两个通道分别接收来自东、西两颗同步卫星转发的信号, 从而可以计算出用户到东、西两颗星的路径在电离层穿刺点的垂向 TEC. 从图 2 中可以看出, 电离层 TEC 在每日 0400 LTB (北京时间) 左右达到最小值, 在 1400 LTB 左右达到最大值, 符合电离层 TEC 受太阳影响较大的物理规律. 同时也可以看出, 东星的计算结果在时间上超前于西星的计算结果, 可能是由于太阳从东方升起, 位于东边的电离层穿刺点要比位于西边的穿刺点先反映太阳天顶角的变化. 这一点也体现了电离层的 TEC 主要受太阳活动影响的物理规律.

3.2 误差原因分析

对 2006 年 5 月 1—31 日 RDSS 数据的计算结果作进一步处理，将每日同时间点的数据进行平均，得到地面中心 2006 年 5 月电离层 TEC 的日变化，并与中国气象局、国家空间天气监测预警中心公布的同一地区 2006 年 5 月电离层 TEC 数据的静日值进行比较. 由于接收机到东星的电离层穿刺点经度约为 119E°，西星的电离层穿刺点经度约为 111E°，北京的经度约为 116E°，将时间统一，只显示了 0000—2300 LT 的部分. 如图 3 所示.

图 3 显示的是 2006 年 5 月电离层 TEC 日变化及基于 RDSS 数据的计算结果与空间天气公报数据的比较 (只显示了 0000—2300 LT 的变化). 从图 3 可以看出，基于 RDSS 系统观测数据提取电离层 TEC 参数的日变化趋势符合物理规律，但数值幅度偏大，并且最大值出现的时间也有一定的差别，这说明在算法过程中，还存在其他的误差.

在 2.4 节的算法中，通过将单程伪距加倍减去

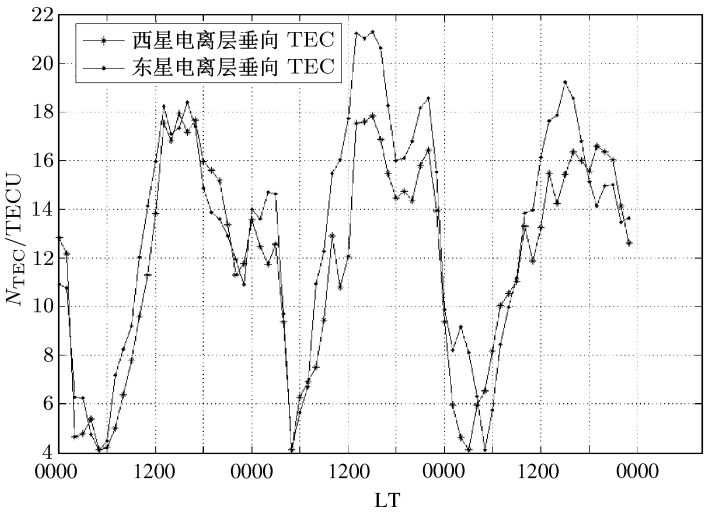

图 2 地面中心电离层 TEC 日变化趋势 (2006-05-01 至 2006-05-03)

Fig.2 Tendency of ionosphere TEC daily variation of center station region from May, 1 to May, 3, 2006

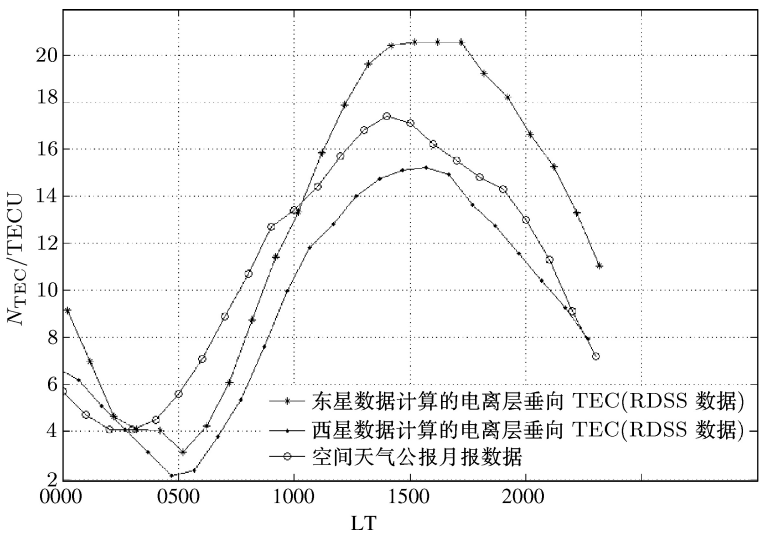

图 3 计算结果与空间天气公报数据的比较

Fig.3 Comparison between result and data from space weather bulletin

双程伪距的方法抵消掉真空距离值及对流层误差, 得到下列公式:

$$k\Big(\frac{1}{f_1^2}+\frac{1}{f_3^2}-\frac{1}{f_2^2}-\frac{1}{f_4^2}\Big)N_{\mathrm{TEC}i}(t)=\overline{2\rho_i(t)-\rho_{ii}(t)}-(O_i-I_i)-2B_{0\mathrm{s}}+B_{0\mathrm{d}}. \quad (6)$$

在公式中, 还存在以下几种可能的误差影响.

(1) RDSS 系统地面中心系统硬件误差

RDSS 系统的地面中心接收到由卫星转发回来的用户的应答信号时, 将由系统中不同的解调单元来解调用户的申请服务项目. 由于不同时刻的伪距是由不同的解调单元得出的, 因而解调单元的硬件系统误差也会造成各个时刻伪距测量的不同, 从而造成伪距之间的误差, 进而对电离层 TEC 参数的计算造成误差. 图 4 为地面中心接收系统面向东星的两条通道不同解调单元组合误差分析.

由图 4 可以看出, 导航系统地面中心面向东星的 2 号通道中, 与编号为 14 的解调单元相组合的对应的伪距差有一个明显的峰值, 其他的不同解算单元组合也存在不同的硬件误差, 导致测量伪距数据时也存在较大误差. 因此基于东星数据计算的电离层 TEC 与基于西星数据计算的电离层 TEC 的结果也不尽相同, 前者的 TEC 日变化最大值明显要大于后者.

(2) RDSS 系统由于卫星轨道漂移引起的星历速度误差

由于双星导航系统中担负转发信号任务的两颗卫星均为地球同步卫星, 在算法计算中, 我们假设卫星在一天中的位置是基本不变的, 从而认为出站信号经历的真空距离与入站信号经历的真空距离是相等的, 忽略了两者之间的距离差. 而事实上由于太阳光子的压力, 卫星的轨道每天都可能产生漂移, 在信号传送过程中, 出站信号与入站信号经历的路径是不一样的, 两者的真空距离差虽然是小量, 但也可能对电离层的计算产生误差.

(3) 代入同一 GEO 卫星出入站波束的相对零值 $(O_i - I_i)$ 时存在的误差

在研究过程中发现, 同一卫星出站波束与入站波束之间的相对零值漂移是缓变的, 因而在提取电离层 TEC 的算法中, 我们假设一天内同一 GEO 卫星的出入站波束的零值是不变的, 这也可能对计算电离层 TEC 参数产生误差.

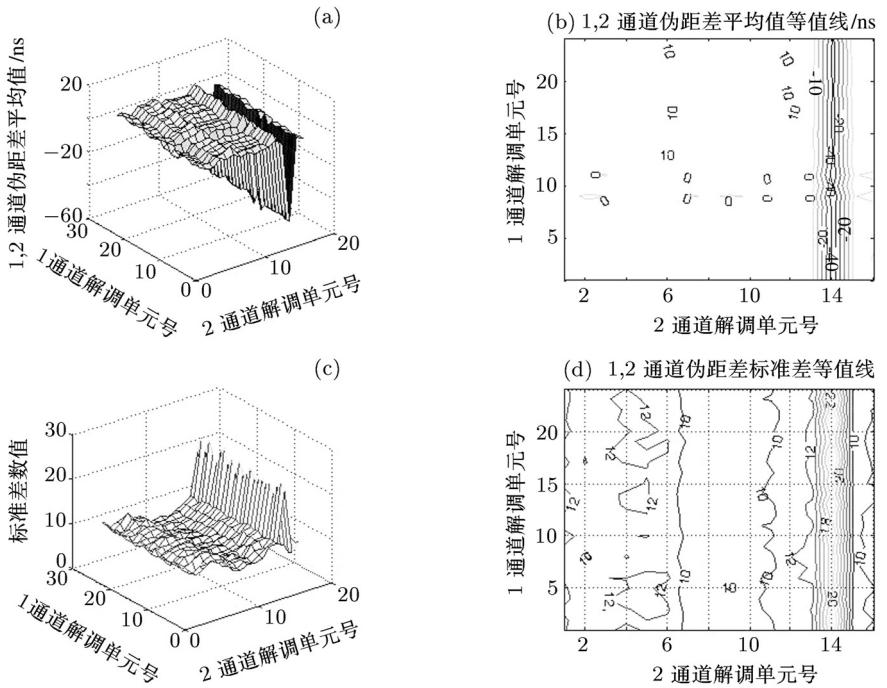

图 4 RDSS 系统误差分析

Fig.4 Analysis of RDSS system error

(4) 其他因素引起的误差

用户机与地面中心的计时脉冲频率不同和标校站的零值标定也可能引起误差，在后续的工作中，我们将作进一步的研究，以使上述可能存在的误差尽可能减小.

4 结语

尝试利用 RDSS 体制的北斗定位导航系统观测数据来研究计算电离层 TEC 的方法，并综合研究了电离层 TEC 的变化特征. 初步结果表明，利用该导航系统接收机的观测数据和合理的计算与分析方法，可以有效地提取观测站上空的电离层 TEC, 并得到合理的电离层 TEC 日变化趋势.

尽管本文的工作是初步的，但它是第一次利用我国自行研制的导航定位系统的观测数据提取中国区域内电离层 TEC 的方法研究，对以后的研究工作有很好的借鉴作用. 随着时间的累积，北斗定位导航系统接收机的观测数据将更加翔实且准确，计算得出的电离层 TEC 的结果也将更加精确，这必将为利用北斗定位导航系统更深入地研究我国电离层活动规律开辟一条新的途径，其研究成果也必将为大地测量等涉及高精度电离层 TEC 的应用领域提供更好的参考和借鉴.

参考文献

[1] Ratcliffe J A. Ionosphere Disquisition for Fifty Years. Beijing: Science Press, 1983. in Chinese (拉特克利夫 J A. 电离层研究五十年. 北京：科学出版社， 1983)

[2] Tong Kai. The Applications and Development of Satellite Navigation System in China. *Space Int.*, 2004, (1): 4∼8. in Chinese (童铠. 卫星导航系统在我国的应用与发展. 国际太空， 2004, (1):4∼8)

[3] Qiu Zhihe, Wang Wanyi. Understanding GPS Principles and Applications. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. in Chinese (邱致和, 王万义. GPS 原理与应用. 北京：电子工业出版社， 2002)

[4] Zhang Xuefeng. Capability and Development of the RDSS Navigation Satellite System. *Maritime Spectacle*, 2005, (8):25∼26. in Chinese (张学峰. 双星导航定位系统的性能与发展. 海事大观， 2005, (8):25∼26)

[5] Yuan Yunbin, Ou Jikun. Study on the new methods of correcting ionosphere delay and ionosphere model using GPS data. *J. Grad. Sch. Chin. Acad. Sci.*, 2002, **19**: 209∼214. in Chinese (袁运斌, 欧吉坤. 基于 GPS 数据的电离层模型和电离层延迟改正新方法研究. 中国科学院研究生院学报， 2002, **19**(2):209∼214)

[6] Wu Yanzhong, Li Guiqi. Geostationary Satellite Positioning. Beijing: Liberation Army Press, 2001. in Chinese (吴延中, 李贵琦. 地球同步卫星定位. 北京：解放军出版社， 2001)

[7] Liu Jiyu. GPS Satellite Navigation Positioning Principles and Method. Beijing: Science Press, 2003. in Chinese (刘基余. GPS 卫星导航定位原理与方法. 北京：科学出版社， 2003)