

香港地区电离层垂向电子含量的变化规律*

邱卫宁 陈永奇

(武汉测绘科技大学地学测量工程学院, 武汉市珞喻路129号, 430079)

摘 要 根据香港 GPS 永久跟踪站的长期 GPS 观测资料, 估计出了香港地区电离层垂向电子含量, 并分析了垂向电子含量的周日变化规律, 对建立香港地区实用的电离层模型有重要的指导意义。

关键词 电离层; 垂向电子含量; GPS 跟踪站

分类号 TN011.2; P228.42

GPS 测量的误差来源大致可分为3种类型——与卫星有关的误差, 信号传播误差以及观测和接收设备的误差。在信号传播误差中, 主要是电离层延迟, 而“电磁波在电离层中产生的延迟, 都与电磁波传播路径上的电子总量 TEC 有关”^[1]。若能较准确地知道某地区的电子总量, 就能建立较准确的电离层改正模型, 最大限度地消除或削弱电离层延迟的影响。由于一个永久性的跟踪站数据足够用来计算能实际应用的电离层模型(至少覆盖距离在200~300km), 香港地区建有一个永久性跟踪站, 根据此跟踪站数据, 可估计出香港地区不同时间电磁波传播路径上的电子总量(TEC), 继而可建立适合香港地区的准确电离层模型。

1 电离层垂向电子含量的估计原理

在 GPS 载波相位测量中, 载波相位的观测方程为:

$$-\lambda\Phi_i^j = \rho + cT_i - ct' - \delta\rho_{\text{ion}} + \delta\rho_{\text{trop}} + \lambda N_0 + \epsilon \quad (1)$$

式中, Φ_i^j 为某一时刻在测站 i 上观测卫星 j 的载波相位观测值; λ 为载波波长; ρ 为卫星与接收机之间的几何距离; c 为光速; T_i 为接收机钟差; t' 为卫星钟差; $\delta\rho_{\text{ion}}$ 为信号的电离层延迟, 它与信号的频率有关; $\delta\rho_{\text{trop}}$ 为信号的对流层延迟; N_0 为整周模糊度; ϵ 为观测误差。

对于双频接收机, 对应于 f_1 和 f_2 的载波相位观测方程分别为:

$$-(\lambda\Phi_i^j)_1 = \rho + cT_i - ct' - (\delta\rho_{\text{ion}})_1 + \delta\rho_{\text{trop}} + (\lambda N_0)_1 + \epsilon_1 \quad (2)$$

$$-(\lambda\Phi_i^j)_2 = \rho + cT_i - ct' - (\delta\rho_{\text{ion}})_2 + \delta\rho_{\text{trop}} + (\lambda N_0)_2 + \epsilon_2 \quad (3)$$

将(2)式减去(3)式得:

$$(\lambda\Phi_i^j)_2 - (\lambda\Phi_i^j)_1 = (\delta\rho_{\text{ion}})_2 - (\delta\rho_{\text{ion}})_1 - [(\lambda N_0)_2 - (\lambda N_0)_1] + \epsilon_\Phi \quad (4)$$

当仅考虑电离层延迟的一次项时, 由[1]知:

$$(\delta\rho_{\text{ion}})_i = 40.3 \text{TEC} / f_i^2 (i = 1, 2) \quad (5)$$

式中, TEC 为电子总量。

将(5)式代入(4)式得:

$$\Delta\Phi = \text{TEC} / \alpha - \Delta N + \epsilon_\Phi \quad (6)$$

式中, $\Delta\Phi = (\lambda\Phi_i^j)_2 - (\lambda\Phi_i^j)_1$, 为宽巷观测值; $\Delta N = (\lambda N_0)_2 - (\lambda N_0)_1$, 为宽巷观测值的整周模糊度;

$$1/\alpha = (1/f_2^2 - 1/f_1^2) \times 40.3 \quad (7)$$

另外, 对于双频接收机, 还可得到两个伪距观测值:

$$\rho_1 = \rho + (\delta\rho_{\text{ion}})_1 + \delta\rho_{\text{trop}} + cT_i - ct' + \epsilon_{\rho_1}$$

$$\rho_2 = \rho + (\delta\rho_{\text{ion}})_2 + \delta\rho_{\text{trop}} + cT_i - ct' + \epsilon_{\rho_2}$$

此两式相减, 并顾及(5)式和(7)式, 得:

$$\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1 = \text{TEC} / \alpha + \epsilon_\rho \quad (8)$$

利用香港跟踪站数据, 每个历元均可由(6)式和(8)式得到两个观测方程, 它们是时间 t_i 的函数:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\rho(t_i) &= \text{TEC}(t_i) / \alpha + \epsilon_\rho(t_i) \\ \Delta\Phi(t_i) &= \text{TEC}(t_i) / \alpha - \Delta N + \epsilon_\Phi(t_i) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

设一天共有 n 个历元, 则可列出 $2n$ 个观测方程, 其解可根据最小二乘原理解出。文献[3]给出了最小二乘解的实用公式:

$$\left. \begin{aligned} \hat{b}_{k+1} &= \frac{k}{k+1} \hat{b}_k + \frac{\Delta\rho(t_{k+1}) + \Delta\Phi(t_{k+1})}{i+1} \\ \hat{x}_{i+1}(t_{i+1}) &= [\rho_{\Delta\rho} \Delta\rho(t_{i+1}) - \rho_{\Delta\Phi} (\Delta\Phi(t_{i+1}) - \hat{b}_{i+1})] / (\rho_{\Delta\rho} + \rho_{\Delta\Phi}) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

收稿日期: 1997-08-08. 邱卫宁, 女, 41岁, 副教授, 现从事数据处理研究。

* 香港理工大学和测绘遥感信息工程国家重点实验室开放研究基金资助项目, 编号340095及 WKL(96)0201。

式中, $b = \lambda_2 N_2 - \lambda_1 N_1$; t_i 是历元 ($i = 1, \dots, n$); $\rho_{\Delta\phi}$ 和 $\rho_{\Delta\phi}$ 分别是伪距和相位观测值的权; $x(t_i)$ 是每个历元中计算的电离层影响的向量元素:

$$x(t_i) = 40.3(f_1^2 - f_2^2) \text{TEC}(t_i) / f_1^2 f_2^2 \tag{11}$$

(11)式中,如果 $\rho_{\Delta\phi}$ 为零,电离层的影响仅由相位观测值计算;如果 $\rho_{\Delta\phi}$ 为零,则电离层的影响仅由伪距观测值计算。由于沿信号传播路径上的电子总量 TEC 与电离层垂向电子含量 VEC 有如下关系:

$$\text{TEC} = \text{VEC} / \cos z \tag{12}$$

式中, z 为电离层点的天顶距。于是由 n 个不同时刻的电子总量 $\text{TEC}(t_i)$ 就可估计出不同时刻电离层垂向电子含量:

$$\text{VEC}(t_i) = \text{TEC}(t_i) \cos z \tag{13}$$

由于香港 GPS 永久跟踪站的 GPS 观测数据每10s 为一历元,且每10min 取一个平均值作为计算结果,则在 $\rho_{\Delta\phi}$ 为零、 $\rho_{\Delta\phi}$ 为零、 $\rho_{\Delta\phi}$ 和 $\rho_{\Delta\phi}$ 相等3种情况下,所计算的 VEC 没有明显的差异(最大差值为1.2(TECU))。因此,取 $\rho_{\Delta\phi}$ 为零,方程(11)为如下形式:

$$\Delta\rho(t_i) = 40.3(f_1^2 - f_2^2) \text{TEC}(t_i) / f_1^2 f_2^2 \tag{14}$$

或
$$\Delta\rho(t_i) = \text{TEC}(t_i) / \alpha \tag{15}$$

2 垂向电子含量估值 VEC 的计算精度

由(15)式得:

$$\text{TEC} = \alpha(\rho_2 - \rho_1) \tag{16}$$

则
$$\text{VEC} = \alpha(\rho_2 - \rho_1) \cos z \tag{17}$$

设 ρ_1 和 ρ_2 的中误差分别为 σ_{ρ_1} 和 σ_{ρ_2} , 由于 ρ_1 和 ρ_2 互相独立, 所以有 $\sigma_{\rho_1, \rho_2} = 0$, 于是, 由(17)式应用协方差传播律得:

$$\sigma_{\text{VEC}}^2 = \alpha^2 \cos^2 z (\sigma_{\rho_1}^2 + \sigma_{\rho_2}^2)$$

若 $\sigma_{\rho_1} = \sigma_{\rho_2} = \sigma_\rho$, 则有:

$$\sigma_{\text{VEC}} = 2^{1/2} \alpha \sigma_\rho \cos z$$

当 $f_1 = 1\,575.42\text{MHz}$, $f_2 = 1\,227.60\text{MHz}$ 时, $\alpha = 9.15 \times 10^{16} \text{Hz}^2$ 。

将 α 代入(15)式, 得:

$$\sigma_{\text{VEC}} = 13.46 \sigma_\rho \cos z$$

若取 $\sigma_\rho = \pm 1\text{m}$, 则 σ_{VEC} 仅与卫星相对于信号传播路径与电离层点的天顶距 z 有关, 其大小见表1。TECU 表示电子含量单位, $1\text{TECU} = 10^{16} \text{el/m}^2$ 。

表1 不同天顶距所对应的 σ_{VEC}

Tab. 1 Computed by Zenith Angle

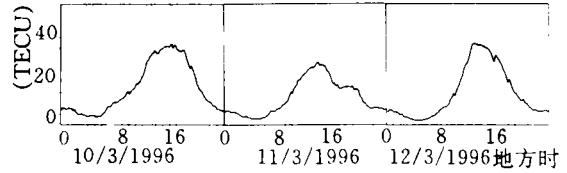
$z/(^\circ)$	20	30	40	50	60	70	80
$\sigma_{\text{VEC}}/\text{TECU}$	12.65	11.66	10.31	8.6	6.73	4.60	2.34

在实际估计中,取10s 为一历元,且每10min 取一个平均值作为最后估计结果,因此,在最不利情况下($z = 20^\circ$)VEC的精度为:

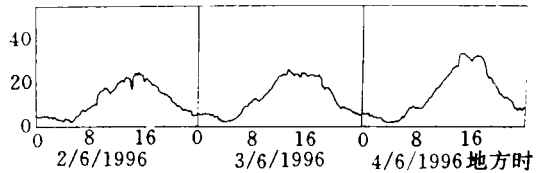
$$\sigma_{\text{VEC}} = \sigma_{\text{VEC}} / \sqrt{60} = \pm 1.63 \text{TECU}$$

3 垂向电子含量的周日变化规律

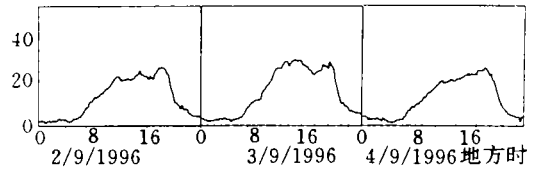
根据上述估计原理,我们利用香港永久跟踪站的数据,对1996年3、6、9、12个月份进行了估计,这4组数据正好位于一年中的4个季节。香港地区电离层的垂向电子含量分别列于图1(a)~(d)。



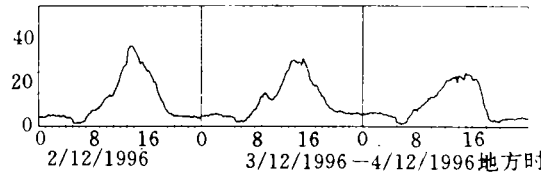
(a)



(b)



(c)



(d)

图1 VEC 值在一年中不同季度某三天内的变化情况

Fig. 1 Variance of VEC in Three Days in Different Quarter in 1996

从图上可清楚地看出,香港地区电离层垂向

电子含量有如下变化规律:

1) 垂向电子含量夜间明显小于白天, 且非常稳定, 从北京时间晚上 20h 到次日早上 7h 都很小, 几乎为常数。其数值约为白天最大值的 1/9, 一般早上 5h 达到最小值。

2) 白天垂向电子含量变化显著, 一般从早上 7h 到下午 14h 左右, 垂向电子含量持续上升; 在 13h 至 16h 之间达到最大值, 然后持续下降, 直到晚上 20h 左右趋于稳定。

3) 垂向电子含量的最大值比其最小值最大约大 13 倍, 最小的约大 5 倍, 平均约大 9 倍。

4) 香港地区电离层垂向电子含量没有明显的季节差异, 一年中较为稳定, 并不像文献[1]中所说的冬季为夏季的 4 倍。

5) 由于香港地区范围不大, 其电离层垂向电子含量亦没有明显的地区差异。图 2 中虚线表示根据香港 GPS 永久跟踪站 1997 年 4 月 17 日 GPS 数据计算出的垂向电子含量, 实线表示在距永久跟踪站 25km 的另一地点用 GPS 接收机采得的数据 (12h) 计算的电离层垂向电子含量。由图 2 中看

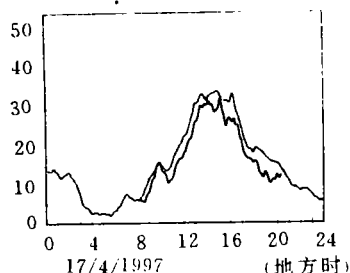


图2 两地 VEC 变化的比较

Fig. 2 Comparison of VEC Values Between Two Places

出, 两个地方的电离层垂向电子含量的变化和大小都基本一致。

6) 在 1997 年 4 月 2 日至 4 月 7 日期间, 发生了较大的太阳耀斑, 此时垂向电子含量比往年同期稍大, 见图 3。

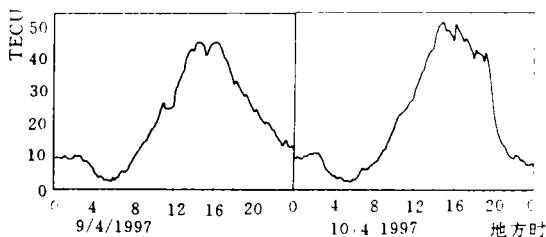


图3 在太阳耀斑期间 VEC 的变化

Fig. 3 VEC Values in the Period of Solar Flare

根据上述垂向电子含量的周日变化规律, 可以建立较实用的香港地区电离层延迟改正模型, 从而最大限度地改正香港地区电离层延迟。

参 考 文 献

- 1 刘大杰, 施一民, 过静珩. 全球定位系统 (GPS) 的原理与数据处理. 上海: 同济大学出版社, 1996. 86~93
- 2 韩绍伟. 卫星信号的电离层延迟. 见: 大气折射研究专集. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1992.
- 3 Ordnez J F, Threde K. Real-Time TEC Determination for Ionospheric Modeling in WADGPS. In: Proceedings of ION GPS 95. Washington, DC: The Institute of Navigation 1995. 1193~1197
- 4 Wild U, Beutler G, et al. Estimating the Ionosphere Using One or More Dual Frequency GPS Receivers. In: Proceedings of the Fifth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning. New Mexico, 1989(2): 724~736

The Variant Regularity of Ionospheric Vertical Total Electron Content in Hong Kong Area

Qiu Weining Chen Yongqi

(School of Geo-science and Surveying Engineering, WUTuSM, 129 Luoyu Road, Wuhan, China, 430079)

Abstract In this paper, an assessment of measured ionospheric vertical total electron content (VEC) in Hong Kong area based on dual GPS data which are from the Hong Kong DGPS universal reference station is presented. The variances of VEC on four seasons in one year are given, and the variant regularity of VEC in one day is also analyzed. It is favorable for building a practical model of ionosphere in Hong Kong area.

Key words ionosphere; vertical total electron content; GPS universal reference station