

载波相位观测对传统双频 GPS 电离层模型改进研究

张君莉¹, 田天¹, 易欣¹, 曹志茹²

(1. 北京市2433信箱, 北京 100081; 2. 北京5111信箱, 北京 100094)

摘要: 详细推导出利用 GPS 双频码距和载波相位观测联合双频码距进行电离层电子密度求定的2种模型, 给出了求定这2种模型参数的数学表达, 从理论上指出该2种模型分别适合单历元和多历元解算的基本条件, 通过实例进行了2种模型的电离层修正误差的分析和比较。结果表明, 载波相位观测联合双频码距建立电离层延迟模型具有观测数据利用率较高、解算精度高等优点。

关键词: 全球定位系统; 电离层; 模型; 改进

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2011)01-0090-04

Research on Improvement of Conventional Dual-frequency GPS Ionosphere Model with Carrier Wave Phase Observation

ZHANG Jun-li¹, TIAN Tian¹, YI Xin¹, CAO Zhi-ru²

(1. Mailbox 2433 Beijing, Beijing 100081, China; 2. Mailbox 5111 Beijing, Beijing 100094, China)

Abstract: Two models of electron density in ionosphere were deducted, which were double-frequency code observation and double-frequency phase carrier phase observation using GPS. Mathematical expressions for solving the parameters in the two models were given. The basic conditions suitable for single epoch and many epochs were derived, through the example of the two models of the ionosphere correction error analysis and comparison. Results showed that the established model has the advantages of higher observation data utilization rate and higher precision.

Key words: GPS; ionosphere; model; improvement

GPS(全球定位系统)是美国建立的新一代卫星无线电导航系统,能向全世界有关观测站提供高精度的时间、当地位置及运动速度等信息。电离层延迟误差是GPS定位中的一项重要误差源,也是导致

一般差分GPS的定位精度随用户和基准站间距离的增加而迅速降低的主要原因之一^[1]。目前,解决电离层延迟误差的方法一般有双频改正法、差分GPS定位法、半和改正法和电离层模型法。第1类模型是

收稿日期: 2010-05-25

作者简介: 张君莉(1979—),女,江苏徐州人,工程师,主要从事无线电通信研究。

依据建立模型以前长时间内收集到的观测资料而建立起来的反映电离层变化规律的一些经验公式,如 Bent 模型、International Reference Ionosphere (IRI) 模型、Klobuchar 模型等。由于影响电离层的因素很多,许多因素又带有较大的随意性,所以利用这些模型得到的电离层延迟的精度一般都不太好。第2类模型是利用 GPS 观测资料建立的电离层计算模型。文中主要利用载波相位观测联合双频码距建立模型来计算电离层总电子含量(TEC),从而对传统双频 GPS 电离层模型进行了改进^[2-3]。

1 传统的码位观测电离层模型的基本原理

在 GPS 测量中,测距码(C/A 码和 Y 码)和导航电文都是调制在载波上的,故在伪距测量中调制码是以群速度 V_g 在电离层中传播的。在载波相位测量中,载波的相位是以相速度 V_p 传播的。对于频率大于 1.2 GHz 的 GPS 卫星信号而言,有下列近似公式:

$$V_g = c[1 - 40.28(N_e/f^2)] \quad (1)$$

$$V_p = c[1 - 40.28(N_e/f^2)] \quad (2)$$

式中: N_e 为电子密度; f 为载波的频率; c 为真空中的光速。

若在伪距测量中测定的测距码从卫星传播到接收机的时间为 Δt 的话,则从卫星到接收机间的几何距离 S 表示为:

$$S = \int_{\Delta t} V_g dt = \int_{\Delta t} c[1 - 40.28(N_e/f^2)] dt = c\Delta t - 40.28/(f^2) \int_{\Delta t} N_e c dt = \rho - 40.28/(f^2) \int_S N_e dS \quad (3)$$

式中: ρ 为伪距观测值; $\int_S N_e dS$ 表示以单位面积作为底面积,沿着信号传播路径贯穿整个电离层的一个柱体中所含的总电子数 Q_{TEC} 。

同样,如果载波相位从卫星传播至接收机的时间为 $\Delta t'$ 的话,则卫星至接收机间的几何距离 S 表示如下:

$$S = 40.28/f^2 \int_S N_e c dt = (\varphi + N)\lambda + 40.28/f^2 \int_S N_e dS \quad (4)$$

式中: φ 为载波相位测量的观测值; N 为整周模糊度; λ 为载波相位对应的波长。于是式(3)和(4)可写为:

$$S = \rho - 40.28Q_{TEC}/f^2 = (\varphi + N)\lambda + 40.28Q_{TEC}/f^2 \quad (5)$$

为消除电离层延迟, GPS 卫星同时采用了 2 个频率的载波 L_1 和 L_2 , L_1 的频率为 1 575.42 MHz; L_2 的频率为 1 227.60 MHz。调制在这 2 个载波上的信号同时离开卫星(暂不计卫星内部时延的微小误差),但由于途经电离层时所受到的延迟量各不相同,因而并不同时到达接收机。根据它们到达接收机的时间差 Δt 或伪距观测值之差 $\Delta \rho$ 即可反推出这 2 个信号各自所受到的电离层延迟量,现以伪距测量为例来加以说明。从式(3)和(5)可知,利用调制在 L_1 和 L_2 载波上的测距码进行伪距测量时分别有:

$$S = c\Delta t_1 - 40.28 \int_S N_e dS / f_1^2 = \rho_1 - 40.28Q_{TEC}/f_1^2 \quad (6)$$

$$S = c\Delta t_2 - 40.28 \int_S N_e dS / f_2^2 = \rho_2 - 40.28Q_{TEC}/f_2^2 \quad (7)$$

由式(6), (7)得:

$$\Delta \rho = \rho_1 - \rho_2 = 40.28Q_{TEC} \times (f_2^2 - f_1^2) / (f_1^2 - f_2^2) = -0.6469(40.28Q_{TEC})/f_1^2 \quad (8)$$

故:

$$-40.28Q_{TEC}/f_1^2 = 1.54573\Delta \rho = 1.54573(\rho_1 - \rho_2) = 1.54573c(\Delta t_1 - \Delta t_2) = 1.54573c\delta t \quad (9)$$

同理可得:

$$-40.28Q_{TEC}/f_1^2 = 2.54573\Delta \rho = 2.54573c\delta t \quad (10)$$

式(1)调制在 L_1 载波和 L_2 载波上的信号可认为是沿着同一路径传播,因而式(6)和(7)中的 Q_{TEC} 也认为是相同的。式(8)中 ρ_1 和 ρ_2 之差是由于所受到的电离层延迟不同而引起的。

从式(9), (10)可知,利用 GPS 双频观测值可以准确确定电离层中的 Q_{TEC} 值。当 $\Delta \rho$ 以 m 为单位,信号频率以 GHz 为单位, Q_{TEC} 以 10^{16} 个电子/ m^2 为单位时,有下列关系式:

$$Q_{TEC} = 9.52437(\rho_2 - \rho_1) = -9.52437\Delta \rho \quad (11)$$

2 对传统电离层模型的改进

2.1 用载波相位观测值建立模型的原理方法

由于载波相位观测值的精度要比伪距观测值的精度高2~3个数量级,故用载波相位观测所确定的TEC的精度也将有大幅度提高。载波相位观测值所受到的电离层延迟与伪距观测值所受到的电离层延迟大小相同符号相反,表示为:

$$-\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1 = (\varphi_1\lambda_1 - \varphi_2\lambda_2) + (N_1\lambda_1 - N_2\lambda_2) = (\varphi_1\lambda_1 - \varphi_2\lambda_2) + M_{\text{Amb}} \quad (12)$$

但是在采用这种观测值时会碰到一个偏差项 $(N_1\lambda_1 - N_2\lambda_2)$,即:整周模糊度号数(M_{Amb})的问题,式中 λ_1 和 λ_2 分别代表 L_1 载波和 L_2 载波对应的波长。解决方法2个:1)将这些模糊度当作待定系数,与其它模型参数一起通过平差计算来求得,在正常情况下一站一星会出现一个模糊度参数,但出现周跳后需引入新的模糊度参数,采用多站数据来建立电离层延迟模型时,待估模糊度参数的个数可能很多,这不仅会增加计算负担,还会影响解的稳定性;2)通过伪距观测值来求解模糊度参数 M_{Amb} ,在此采用的是方法2^[4]。

$$\overline{M_{\text{Amb}}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (N_1\lambda_1 - N_2\lambda_2) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(\rho_2 - \rho_1) - L_4] \quad (13)$$

对实际数据的处理结果表明利用15~20 min的观测值按式(13)取中后就可获得较精确的 M_{Amb} 值。

2.2 计算穿刺点的垂直TEC

GPS接收机所得原始数据包括GPS时间、卫星星历、信号的信噪比、双频电离层差分群时延和载波相位差分值。为计算电离层TEC的绝对值,用双频差分群时延实现TEC的计算^[5]。计算公式为:

$$Q_{\text{TEC}} = 10^{16} \times A(\Delta\tau - \Delta\tau_H) \cos\beta \quad (14)$$

式中: Q_{TEC} 是指电离层星下点的垂直TEC, m^{-2} ; A 为决定于2个卫星信号频率和相关因子的系数,2.853; $\Delta\tau$ 为观测到的差分群时延, ns; $\Delta\tau_H$ 为GPS接收机的硬件时延, -0.73 ns; β 为与卫星仰角 α 、地球半径 R_e 及电离层电子密度质心高度 h 有关的倾斜

因子,可用下式^[6-7]进行计算:

$$\beta = \arcsin\left(\frac{R_e}{R_e + h} \cos\alpha\right) \quad (15)$$

式中: $h=400$ km。图1所示为地面观测站与卫星和电离层质心高度的几何图形: O 点为其中地心; A 点为观测站; S 点为卫星。

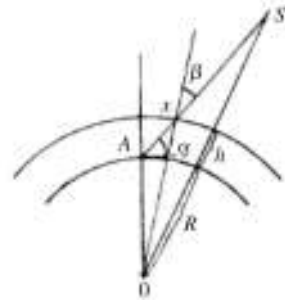


图1 地面观测站与卫星和电离层电子密度质心高度的几何图形

Fig. 1 Geometric figure of electronic density centroid height in ionosphere from observatory and satellite

3 2种模型对实际观测资料的分析对比

利用上述2种模型,对2004年7月14号北京房山全天的GPS观测资料进行了分析对比,分析结果表明用载波相位观测模型比传统码位观测电离层模型的计算结果更加平滑,精确。

其中图2、图3中横坐标代表观测历元次数,各观测历元的采样间隔为30 s,观测时间为UTC的0~24时,纵坐标表示天顶方向电离层总含量,单位为TECU。

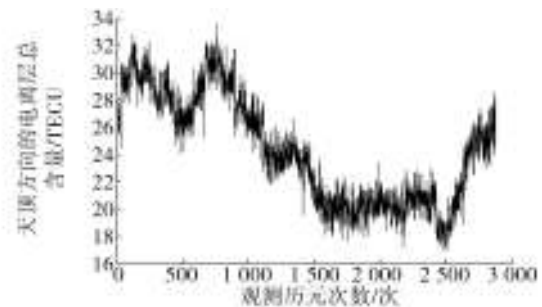


图2 传统码位观测电离层模型的计算结果

Fig. 2 Computational results of traditional code observation ionosphere model

从图2、图3中可以看出天顶方向电离层总含

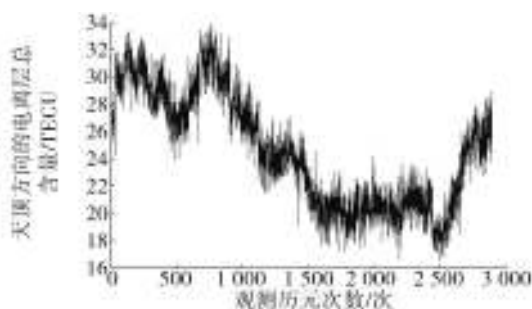


图3 载波相位观测电离层模型的计算结果

Fig. 3 Computational results of carrier phase observation ionosphere model

量随当地的地方时而变化。一般都在当地的地方时为14时达到最大时,这和国际上的普遍观点是一致的。此外从当天国际IGS服务组织公布的2 h 1次的全球电离层总含量分布图对比,结果也大致相当,从而证明这2种模型计算的准确性与可靠性。

4 结论

讨论了2种电离层总含量计算模型,并进行了较为详细的模型参数解算的推导。从传统码位观测电离层模型本身来说,该模型是通过计算码位观测残差来求出电子总含量的分布,具有计算速度快,适用性强等优点。但由于P码观测量的性噪比较低,故其最后解算精度较低。相比之下载波相位观测电离层模型解算精度高,但由于存在整周模糊度的问题,使其适用性降低,同时需要作业时间较长。2种模型

都可以利用多个测站的同步观测数据,又可以利用单测站的数据;既可以同时处理多颗卫星的数据,又可以处理单颗卫星的数据;既可以利用多历元数据,又可以利用单历元数据。在下一步的工作中,应将这2种模型应用到差分GPS技术当中去,以期获得更高的解算精度。

参考文献:

- [1] 张东和,萧佐. 太阳耀斑期间向日面电离层相关扰动现象与分析[J]. 科学通报,2002,47(2):96—98.
- [2] ZHANG D H, IGARASHI K, XIAO Z, et al. The Observation of Large Scale Travelling Ionospheric Disturbances Based on GPS Network[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2002, 45(4):469—475.
- [3] AFRAIMOVICH EDWARD L, KOSOGOROV EUGENE A, LEONOVICH LUDMILA A. The Use of International GPS Network as the Global Detector(GLOBDET) Simultaneously Observing Sudden Ionospheric Disturbances[J]. Earth Planes Space, 2000, 52:1077—1082.
- [4] 万卫星,袁洪,刘立波,等. 2000年7月14日特大耀斑引起的电离层TEC突然增强现象[J]. 中国科学(A辑), 2001, 31(增刊):120—125.
- [5] 刘经南,陈俊勇,张燕平,等. 广域差分GPS原理和方法[M]. 北京:测绘出版社,1999:95—114.
- [6] 朱文耀,符养,李彦. GPS高程导出的全球高程震荡运动与季节变化[J]. 中国科学(D辑),2003,33(5):470—481.
- [7] 韩保民,欧吉坤. 基于GPS非差观测值进行精密单点定位研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2003,28(4):409—412.

(上接第77页)

应该引起足够的重视。在加工、生产、装配和运输过程中,砂粒、灰尘是工业产品质量提高的一个十分危险的敌人,所以除产品本身有良好密封条件外,严格控制生产环境与运输环境中的机械活性物质(砂粒、灰尘)是十分重要的一环。为此,需要加强机械活性物质环境条件试验的标准化工作,从产品设计就开始考虑该环境变化对产品的影响,增强产品对环境的适应性,从而提高产品的质量。

参考文献:

- [1] 袁顺才. 公路水路货物运输环境指南[M]. 北京:中国标准出版社,1995:225—226.
- [2] 周俊森,黄雪林. 军用物资运输环境条件研究[R]. 北京:铁道部标准计量研究所,1996:14—15.
- [3] 航空工业总公司第301研究所. 军用物资集装箱运输环境条件研究[R]. 北京:航空工业总公司第301研究所,2000:115—116.