

用双频 GPS 观测值建立小区域 电离层延迟模型研究

张小红¹ 李征航¹ 蔡昌盛¹

(1 武汉大学测绘科学与技术学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘要:介绍了用双频 GPS 伪距观测值建立区域性电离层模型的基本原理和方法。模型的初步结果表明, 该电离层模型建立后, 可为覆盖区域内的广大单频用户提供在天顶方向优于 0.4m 精度的电离层延迟改正量, 且具有 30min 以内天顶方向优于 0.4m 的预报精度。

关键词:全球定位系统; 电子含量; 电离层模型; 广域差分 GPS

中图法分类号: P228.42

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。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。现有的电离层模型大体可分为两类。第一类模型是依据建立模型以前长时期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, 而我们对各因素间的相互关系、变化规律及其内部机制等又未完全搞清, 从而使电离层延迟中产生了很多不规则变化, 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。第二类模型则是依据某一时段中在某一区域内实际测定的电离层延迟采用数学方法而拟合出来的一个模型。显然, 建立这种模型时并不要求对电离层变化规律有透彻的了解, 一些时间尺度较长的不规则变化已经在模型中得到了反映。用双频 GPS 观测值已能较精确地测定电离层延迟, 目前 GPS 卫星的数量较多, 分布也大体均匀, 在数小时内用 2~4 次曲面就能很好地拟合出区域性电离层模型, 采用这种模型时通常能取得较为理想的效果, 与第一类模型相比, 其精度可大幅度

提高。所以, 为改善单频用户 GPS 定位精度, 削弱电离层延迟误差的影响, 在广域差分 GPS 系统中, 通常将电离层延迟误差“模型化”, 通过各基准站的双频 GPS 观测资料建立区域性的电离层延迟模型, 供广大单频用户使用。

1 VTEC 模型的建立

采用双频 GPS 接收机在基准站上同时进行载波相位测量和伪距测量, 联合载波相位观测值和伪距观测值, 可精确求出该观测时刻 GPS 信号路径中(测站至卫星)的总电子含量 TEC。

略去高阶项后, 电离层的相折射率可表示为:

$$n_p = 1 - 40.28 \frac{N_e}{f^2}$$

式中, N_e 为电子密度, 即每 m^3 中的电子数; f 为信号频率。群折射率 n_G 为:

$$n_G = 1 + 40.28 \frac{N_e}{f^2}$$

在 GPS 测量中, 载波相位是以相速度 $V_p = c/n_p$ 传播的, 而调制在载波上的信号(P 码、C/A 码及导航电文等)则是以群速度 $V_G = c/n_G$ 传播的。所以为了求得从卫星至接收机间的几何距离 S , 必须在伪距 R 和载波相位测得的距离 $\lambda(\varphi + N)$ 上分别加上电离层延迟改正 $(\Delta_{ion})_G$ 和 $(\Delta_{ion})_P$ 。

$$S = R + (\Delta_{\text{ion}})_G + cV_{IR} - cV_{IS} + \Delta_{\text{trop}} = \\ R + (\Delta_{\text{ion}})_G + \sigma \quad (1)$$

$$S = \lambda(\varphi + N) + (\Delta_{\text{ion}})_P + cV_{IR} - cV_{IS} + \\ \Delta_{\text{trop}} = \lambda(\varphi + N) + (\Delta_{\text{ion}})_P + \sigma \quad (2)$$

式中, V_{IR} 、 V_{IS} 分别为接收机钟差和卫星钟差;
 Δ_{trop} 为对流层延迟改正;电离层延迟为:

$$(\Delta_{\text{ion}})_G = -\frac{40.28}{f^2} \int_S N_e dS = -\frac{40.28}{f^2} \text{TEC} \quad (3)$$

$$(\Delta_{\text{ion}})_P = \frac{40.28}{f^2} \int_S N_e dS = \frac{40.28}{f^2} \text{TEC} \quad (4)$$

上式即为用距离(m)表示的电离层延迟改正。其中,积分表示沿着信号传播路径对电子密度 N_e 进行积分,即为该方向上的总电子含量 TEC,它表示底面积为 1m^2 ,贯穿整个电离层的柱体中的自由电子数,单位通常采用电子数/ m^2 。由于采用此单位时 TEC 的数值很大,本文采用 10^{16} 个电子/ m^2 作为 TEC 的单位,且记为 TECU,即 $1\text{TECU} = 10^{16}$ 个电子/ m^2 。那么对 L_1 和 L_2 载波相位来讲,其电离层延迟改正分别为:

$$(\Delta_{\text{ion}})_{L_1} = 0.162\ 292\text{TEC} \quad (5)$$

$$(\Delta_{\text{ion}})_{L_2} = 0.267\ 286\text{TEC} \quad (6)$$

据式(1)~(6)有:

$$S = R_1 - 0.162\ 292\text{TEC} + \sigma + b_1 \quad (7)$$

$$S = R_2 - 0.267\ 286\text{TEC} + \sigma + b_2 \quad (8)$$

$$S = \lambda_1 \Psi_1 + \lambda_1 N_1 + 0.162\ 292\text{TEC} + \sigma \quad (9)$$

$$S = \lambda_2 \Psi_2 + \lambda_2 N_2 + 0.267\ 286\text{TEC} + \sigma \quad (10)$$

式(7)、(8)相减,且令 $b = b_2 - b_1$,得:

$$\text{TEC} = 9.524\ 4(R_2 - R_1) + 9.524\ 4b \quad (11)$$

式(9)、(10)相减得:

$$\text{TEC} = 9.524\ 4(\lambda_1 \Psi_1 - \lambda_2 \Psi_2) + \\ 9.524\ 4(\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2) \quad (12)$$

由式(11)、(12),且令 $\text{Amb} = (\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2)$ 得:

$$(R_2 - R_1) + b = (\lambda_1 \Psi_1 - \lambda_2 \Psi_2) + \text{Amb}$$

若令 $\overline{\text{Amb}} = 1/n \sum [(R_2 - R_1) - L_4]$

$$L_4 = (\lambda_1 \Psi_1 - \lambda_2 \Psi_2)$$

则 $\text{Amb} = b + \overline{\text{Amb}}$

$$(R_2 - R_1) + b = L_4 + \text{Amb} = L_4 + \overline{\text{Amb}} + b \quad (13)$$

利用式(11)、(12)可求得信号传播路径上的总电子含量 TEC,采用单层模型后(将整个电离层中的自由电子压缩到高度为 365km 的一个球面上,用它来代替整个电离层),信号传播路径与单层的交点 P 处的天顶方向总电子含量 VTEC 可用下式计算:

$$\text{VTEC} = \text{TEC} \cdot \cos Z \quad (14)$$

需要说明的是,式(1)、(2)、(7)~(10)中的 σ 为非电离层延迟误差的组合,与频率 f 无关。式(14)中的 $\cos Z$ 为天顶距余弦。式(7)、(8)中的参数 b_1 和 b_2 是伪距测量中所有系统误差的组合,其产生机制可能是由于多路径、接收机通道中的线路延迟偏差、卫星通道中的线路延迟偏差,对于同一颗卫星,对于不同的频率,其大小是不一样的;对于不同的通道,不同的观测条件,这个偏差也不一样。研究发现,在非常好的观测条件下,这种差异也能达到 0.5m 或更大,在两种频率间求差并不能消除这种偏差;在没有考虑该参数时,码观测噪声会造成系统性的偏差,然而在伪距观测方程中考虑这种偏差时,码观测噪声的偏差是随机的,且其均值为零。另外,对于载波相位测量,其偏差较小且随时间的变化缓慢,在两种频率间求差后,其残余误差可忽略。对于伪距测量可忽略这种偏差在短时间内的变化,建立精确电离层模型很重要的一点就是能否精确确定偏差 b (每个测站卫星对应一个 b)。

VTEC 模型是依据某一时段中在某一区域内实际测定的电离层延迟采用数学方法而拟合出来的一个模型。该模型是将 VTEC 看作为纬差 $(\varphi - \varphi_0)$ 和太阳时角差 $(S - S_0)$ 的函数,其具体表达式为:

$$\text{VTEC} = \sum \sum E_{ik} (\varphi - \varphi_0)^i (S - S_0)^k \quad (15)$$

式中, φ_0 为测区中心的地理纬度; S_0 为测区中心点 (φ_0, λ_0) 在该时段中央时刻 t_0 时的太阳时角; $(S - S_0) = (\lambda - \lambda_0) + (t - t_0)$, λ 为信号路径与单层的交点 P 的地理经度, t_i 为观测时刻。当时段长度为 4h,测区范围不超过 100km 时,泰勒级数展开式中最佳阶数为: $(\varphi - \varphi_0)$ 项取 1~2 阶,时角 $(S - S_0)$ 项取 2~4 阶,单层模型对其高度 H 的取值不敏感,当 H 变化 100km 时引起的基线长度变化约为 0.04×10^{-6} ,因而计算中取 $H = 400\text{km}$, H 不作待估参数。

由式(11)~(15)可得观测方程为:

$$9.524\ 4(R_2 - R_1) \cos Z = \\ 9.524\ 4L_4 \cos Z + 9.524\ 4 \overline{\text{Amb}} \cdot \cos Z = \\ \sum \sum E_{ik} (\varphi - \varphi_0)^i (S - S_0)^k - 9.524\ 4b \cdot \cos Z$$

基准站上每观测一颗卫星、一个历元就有一个这样的方程。若在一个时段(3~4h)内观测多颗卫星,就能得到多个这样的方程。按最小二乘法就可解得各待定参数 E_{ik} 和 b ,从而建立起该时段的区域性电离层模型。

2 格网算法

在 WADGPS 的覆盖范围内,按经纬网线格网化,这实际上是将 WADGPS 系统监测站(高度角取一定值后)视场范围之内的“电离层单层”网格化。各格网结点(称为 IGP)的坐标已知,将结点的 (φ, λ) 值回代到 VTEC 模型,便可求得所有格网点处的电离层延迟。然后将各格网点上的电离层延迟按 WAAS 格式实时播发给单频导航用户。但是,单频用户只能获得格网点上的电离层延迟改正量,而不能直接得到观测时刻用户真正需要的电离层延迟,用户必须根据相应参数求定观测时刻 GPS 信号路径与单层交点(穿刺点 IPP)的位置 (φ, λ) ,从而根据穿刺点 IPP 所在单元格网 4 个格网点的电离层延迟内插出穿刺点 IPP 处的电离层延迟,用以改正单频用户的 GPS 观测值。穿刺点 IPP 的位置可用下面两式计算:

$$\varphi_{pp} = \sin^{-1}(\sin \varphi_u \cos \Psi_{pp} + \cos \varphi_u \sin \Psi_{pp} \cos A)$$

$$\lambda_{pp} = \lambda_u + \sin^{-1}\left(\frac{\sin \Psi_{pp} \sin A}{\cos \varphi_{pp}}\right)$$

式中, φ_u 为用户单点定位所确定的测站粗略位置; A 为用户到观测卫星的方位角; Ψ_{pp} 为地面测站点与穿刺点在地心处所张的夹角,其计算式为:

$$\Psi_{pp} = \frac{\pi}{2} - E - \sin^{-1}\left(\frac{R_e}{R_e + H} \cos E\right)$$

式中, E 为观测卫星的高度角; R_e 为地球的平均半径,取 $R_e = 6\,378.137\text{km}$; H 是单层的高度,取为 400km 。

计算出穿刺点的位置后,用户便可由穿刺点所在格网单元 4 个格网点的电离层延迟量按一定的方法内插出穿刺点天顶方向上的电离层延迟。这里采用权函数法内插,该算法是把穿刺点处的电离层延迟看成是位置 (φ, λ) 的函数,即

$$\tau_{pp}(\varphi_{pp}, \lambda_{pp}) = \sum_{i=1}^4 W_i(X_{pp}, Y_{pp}) \tau_{vi}$$

表 1 单站 VTEC 模型的精度统计

Tab. 1 The Statistic Accuracy of Single Station VTEC Model

测站	观测时段/h(UTC)	内符合精度/m	预报 15min/m	预报 20min/m	预报 30min/m
13	0~4	± 0.089	± 0.180	± 0.254	± 0.353
13	2~6	± 0.102	± 0.200	± 0.269	± 0.361
13	4~8	± 0.134	± 0.265	± 0.287	± 0.397

另外,笔者还利用 11 号测站的观测数据建立 VTEC 模型,与 12 号测站上的实测数据求出的电离层延迟相比较,计算出的天顶方向残差的中误差 $RMS = \pm 0.344\text{m}$ (外符合精度)。

式中, τ_{vi} 为 4 个格网点上的电离层延迟量; 权函数 $W(X, Y)$ 的通式为:

$$W(X, Y) = X^2 Y^2 (9 - 6X - 6Y + 4XY)$$

且 $W_1(X, Y) = W(X, Y)$

$$W_2(X, Y) = W(1 - X, Y)$$

$$W_3(X, Y) = W(X, 1 - Y)$$

$$W_4(X, Y) = W(X, Y) - W(X, 1 - Y)$$

$$X_{pp} = \frac{\lambda_{pp} - \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}, Y_{pp} = \frac{\varphi_{pp} - \varphi_1}{\varphi_2 - \varphi_1}$$

其中, (φ_1, λ_1) 为格网单元左下格网点的位置坐标; (φ_2, λ_2) 为格网单元右上格网点的位置坐标。

3 计算结果

试算网的图形如图 1 所示,是青藏高原地壳运动监测科学试验网于 1995 年 5 月 29 日观测所得的一个同步图形,观测数据由 4 台 Turbo Rogue SNR 8000 型 GPS 接收机测得,采样率为 30s。

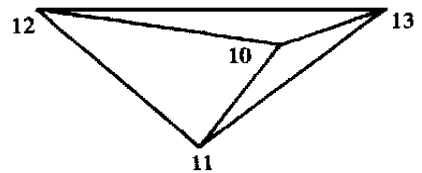


图 1 建立区域电离层模型的基准站网

Fig. 1 Fiducial Network Used to Determine the Ionosphere Model

为了客观地评价区域性电离层模型的精度,编制了相应求解 VTEC 模型的软件,利用单个测站上 4h 的观测资料建立该时间段的区域性电离层模型,并根据拟合后的残差来计算模型的内符合精度。为满足用户实时定位的需要,笔者对模型进行了外推预报,然后利用实测值来评定该模型的预报精度,其结果见表 1。

4 结论

区域电离层模型建立后,可为覆盖区域内的单

频用户提供在天顶方向优于 0.4m 的电离层延迟改正量,用以削弱电离层延迟对定位的系统影响。试算结果表明,单站电离层模型具有 30min 以上在天顶方向优于 0.4m 的预报精度。若进一步提高伪距观测值精度,用于拟合区域电离层模型的基站分布均匀合理,通过选择合适的模型拟合参数,该区域电离层模型精度有望进一步提高。

由于伪距本身的观测精度较低,要进一步提高电离层模型的精度,应采用高精度的相位观测值,但用相位观测值又将引入整周模糊度,如何利用相位观测值建立 cm 级的电离层延迟模型将是今后的研究方向。

参 考 文 献

1 刘基余,李征航,王跃虎,等.全球定位系统原理及其

应用.北京:测绘出版社,1993

- 2 张建军.利用 GPS 观测值建立区域性电离层延迟模型:[学位论文].武汉:武汉测绘科技大学,1996
- 3 Wu B, Nicolaides P, Upadhyay T N. Ionospheric Error Compensation for Receivers Using Real-time Ionospheric Model. The ION GPS' 96 Kansas, 1996
- 4 Gao Y, Li Z F. Ionosphere Effect and Modelling for Regional Area Differential GPS Network. The 11th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Nashville, Tennessee, 1998
- 5 Liao X Q. Carrier Phase Based Ionosphere Recovery Over a Regional Area GPS Network; [Dissatation]. Canada: University of Calgary, 2000

作者简介:张小红,博士生。现主要从事卫星定位技术理论及应用的科研和教学工作。已发表论文十多篇。

E-mail: xhang@hpb1.wtism.edu.cn

Study on Regional Ionospheric Model Using Dual-frequency GPS Measurements

ZHANG Xiaohong¹ LI Zhenghang¹ CAI Changsheng¹

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan, China, 430079)

Abstract: This paper introduces a regional ionospheric model derived from dual-frequency GPS pseudo-range measurements, and deduces the formula for VTEC from the GPS observation equation.

The ionosphere creates a delay in received GPS signal, which can range from several meters to more than one hundred meters. This will seriously corrupt the positioning and time transfer results unless these effects are taken into account. To mitigate the ionosphere effects, a number of ionosphere modeling methods have been developed including single frequency Klobuchar model, dual-frequency correction, differential method, and network modeling, each of which is appropriate in certain situations. Klobuchar model is typically accurate to a few meters along the vertical direction at mid-latitude. The dual-frequency method is based on the dispersive property of ionosphere and requires the use of a dual-frequency GPS receiver. Differential GPS is another method that can be used to remove or reduce the ionosphere effects. DGPS however works effectively only in local areas within, for instance, 50 kilometers. Therefore, wide area differential GPS (WADGPS) and regional area differential GPS (RADGPS) methods become popular in recent year which can overcome the drawbacks associated with the conventional DGPS method.

A WADGPS network includes a number of widely distributed reference stations with baselines typically in the range of several thousand kilometers, each of which is equipped with a GPS receiver (usually dual-frequency) and communication equipment. In this case the ionosphere is monitored using the GPS observation from all the reference stations. The ionosphere corrections are then produced over the covered area by some appropriate models such as grid-model, spherical harmonics, polynomial fitting. In this paper polynomial fitting model is adopted, and the VTEC is

(下转第 159 页)

ed in order to meet the needs of the precision of control points and satellite position for phase unwrapping and elevation calculation, as well as the method of base-line assessment.

Key words: SAR interferometry; mathematic model of elevation calculation; parameters of satellite position; precision of control point

About the author: SHU Ning, professor, Ph. D supervisor. He is in charge of the teaching and researches in the fields of photogrammetry, remote sensing and image understanding. His typical achievements of researches include remote sensing image understanding system, SAR image processing, extraction of elevation from SPOT imagery, and the integration of remote sensing and GIS, etc.

E mail: nshu@public.wh.hb.cn

(上接第 143 页)

expressed as the function of the single layer puncture point location(longitude, latitude).

Preliminary test shows that accurate to sub-meter along the vertical direction can be achieved by this model, and the predicted accuracy can reach sub-meter level in half an hour. Ionosphere model based on carrier phase should be studied further in the future in order to obtain the centimeter level accuracy.

Key words: GPS; TEC; ionosphere model; WADGPS

About the author: ZHANG Xiaohong, Ph. D candidate. He is concentrated on the research and education in theory and applications of satellite positioning technology. His published papers are more than ten.

E mail: xhang@hpb1.wtusm.edu.cn