

探究不同纬度对北斗电离层延迟的影响

于耕¹, 郝俊²

(1. 沈阳航空航天大学 民用航空学院, 沈阳 110136;

2. 沈阳航空航天大学 电子信息工程学院, 沈阳 110136)

摘要: 针对不同用户需采用不同的电离层延迟模型。适用于单频用户的 Klobuchar 模型, 考虑了该模型的振幅、周期和夜间延迟值随时间变化的特性, 并加入太阳相对黑子数这一变量, 建立其改进模型; 而对于双频用户的格网电离层模型, 选用不同纬度参考站, 根据格网点与穿透点的位置关系, 采用反距离加权法和克里金内插法 (KRG) 估算参考面格网点的电离层垂直延迟误差, 仿真分析了格网点电离层垂直延迟修正误差 (GIVE); 结果表明, Klobuchar 改进模型修正电离层延迟误差精度效果显著; 而格网电离层模型校正的精度变化和纬度变化相关, 低纬度地区格网改正效果更接近实测值, 修正误差也在正常范围内, 中纬度地区改正精度相对较差, 可使用 KRG 内插法的格网模型修正延迟误差。

关键词: Klobuchar 模型; 格网电离层模型; 太阳相对黑子数; 内插法; GIVE; 纬度

Exploring Effect of Different Latitudes on Beidou Ionospheric Delay

Yu Geng¹, Hao Jun²

(1. School of Civil Aviation, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China; 2. School of Electronics and

Information Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: Different ionospheric delay models need to be used for different users. Klobuchar model for single-frequency users, taking into account the characteristics of the model's amplitude, period and nighttime delay value changes over time, and adding the sun relative sunspot number of variables to establish its improved model. For the grid ionosphere models of dual-frequency users, different latitude reference stations are used. According to the positional relationship between grid points and penetration points, inverse distance weighting method and Kriging interpolation method (KRG) are used to estimate the reference grid points. The ionospheric vertical delay error, and the grid point ionosphere vertical delay correction error GIVE. The results show that Klobuchar improved the model to correct ionospheric delay error accuracy significantly. The accuracy of grid ionosphere model correction is related to latitude variation. The effect of grid correction at low latitudes is closer to the measured value, the correction error is within the normal range, and the accuracy of correction in the mid-latitude region is relatively poor. KRG interpolation can be used. The grid model corrects the delay error.

Keywords: Klobuchar model; grid ionosphere model; solar relative sunspot number; interpolation method; GIVE; latitude

0 引言

电离层是地球大气的重要电离区域, 容易使穿过其中的无线电导航信号发生信号衰减、信号弯曲、信号折射等色散效应, 这种现象在卫星导航中容易引起电离层延迟, 从而会给导航定位精度带来误差。为了减小电离层延迟引起的误差, 提高导航定位精度, 需要对电离层延迟改正误差进行建模。目前国内外专家学者提出了很多电离层改正的方法, 但均存在一定的不确定性^[1-2]。因此, 针对星基增强系统 (SBAS, Satellite-Based Augmentation System) 中的电离层延迟误差, 有两种解决方法: 针对单频用户采用 Klobuchar 模型计算电离层延迟, 而双频用户则采用格网电离层模型进行误差校正。采用上述两种方法, 用户能够获

得更为精确的电离层误差修正。

Klobuchar 模型是用于广域差分 (WADGPS) 中用户测站进行电离层误差校正的理想方法^[3], 它能够直观简洁地反映出电离层的周期变化特性^[4]。并且为了清晰的体现电离层的变化特性, 文中加入随时间变化的三角余弦函数, 这样可以更准确的计算出不同时间段的电离层延迟误差。太阳活动对电离层的影响是全球性的^[5], 是引起电离层变化的主要因素, 其中相对太阳黑子数是影响太阳活动强度的因素之一。因此, 考虑这一因素, 对 Klobuchar 模型的周期引入相对太阳黑子数这一变量。

格网电离层模型把电离层描述为地球表面上空约 350km 处的壳层, 在此壳层上建立矩形或其他形式的格网^[6]。随着空间需求的不断提高、大规模电离层格网的建立, 更加需要优化格网电离层模型来提高导航定位精度, 这对我国的太空发展计划有重要的战略意义。格网电离层模型中, 参考面需根据一定的经度和纬度间隔网格化, 网格结点播发 SBAS 中的电离层延迟误差。主控站按照各个参考站实时监测的穿透点的垂直电离层延迟值, 通过内插

收稿日期: 2018-05-24; 修回日期: 2018-06-22。

基金项目: 国家自然科学基金(U1433115; 61671141); 辽宁省教育厅系列项目基金(L201723)。

作者简介: 于耕(1973-), 男, 陕西咸阳人, 研究生导师, 教授, 主要从事卫星导航定位技术方向的研究。

方法获得准确的网格结点的垂直电离层延迟误差。其原理与基于参考站电离层改正法根据各参考站数据测得流动站的误差延迟项相似。在基于参考站电离层改正方法的几种内插模型中, KRG 内插法精度最高^[7]。因此, 采用反距离加权法和 KRG 内插法对两个不同纬度的参考站进行格网电离层延迟校正, 并与双频实测数据做对比, 分析影响格网电离层模型修正延迟性能的因素。

1 Klobuchar 模型的改进

导致模型误差主要体现在, 固定了夜间垂直延迟常数、余弦函数的振幅、周期以及相位值^[8]。电离层的活动强度与太阳活动密切相关, 固定夜间延迟值及相位会分别引入 20%–30% 和 3%–10% 的模型误差^[8]。因此, 本文对 Klobuchar 模型作出如下改进: 1) 仅凭电文参数 α 算出白天三角余弦曲线的振幅是存在误差的, 因此需加入振幅改正系数对振幅改正; 2) 由于太阳活动的平均特性会导致电离层发生许多变化, 二者密切相关。因此, 需考虑相对太阳黑子数这一参数对模型周期的影响; 3) 夜间时延值为固定常数 5 ns, 这将会增加一定的模型误差^[9]。据相关资料得知, 夜间 VETC 值可近似看作随时间的变化的三角余弦函数。为此, 需加入余弦函数来改进夜间时延值, 使其具有随时间变化的特性, 即:

$$\text{振幅: } A_2 \rightarrow A_2 (1 + K_1)$$

$$\text{周期: } T \rightarrow T \left(1 + \left| \frac{N-50}{N} \right| \right)$$

$$\text{夜间垂直延迟值: } A_1 \rightarrow A_2 + K_2 \cdot \cos \frac{2\pi(t-A_3)}{T}$$

优化模型的数学表达式为:

$$I_z = \begin{cases} A_1 + A_2(1 + K_1) \cos \frac{2\pi(t - A_3)}{T} \\ |t - A_3| < \frac{T}{4} \\ A_1 + K_2 \cos \frac{2\pi(t - A_3)}{T}, t \text{ 为其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中, t 为卫星与接收机传输的信号过程中穿过电离层处的地方时。 A_2 为白天电离层延迟余弦函数的振幅, 由 an 计算得到; T 为余弦曲线的周期, 用 bn 系数求得; GPS 卫星广播星历中导航电文发播天顶电离层改正的参数 an 和 bn 值^[10]; N 为相对太阳黑子数, 数据由太阳预报活动中心提供; K_1 、 K_2 为振幅改正系数:

$$K_i = \sum_{n=1}^n k_i^n, i = 1, 2 \quad (2)$$

n 的值通过显著性检验自动选取^[11], 取 $n=2$ 。迭代次数取 10。通过非线性迭代方法求解 K_1 、 K_2 收敛值, 了解认识迭代函数对收敛性的影响, 知道当迭代函数满足什么条件时, 振幅改正系数收敛。为了保障模型各参数本身的特性, 引入监测网采集观测量, 可以实现连续解算, 不断的更新电离层延迟参数, 从而使改进 Klobuchar 模型电离层延迟值接近实测电离层延迟值, 即:

$$I_z - I = 0 \quad (3)$$

I 为监测站实测的电离层延迟值。

$$\left. \begin{aligned} f(k_1) &= A_1 + A_2(1 + k_1 + k_1^2) \cos \frac{2\pi(t - A_3)}{T} - I = 0 \\ f(k_2) &= A_1 + (k_2 + k_2^2) \cos \frac{2\pi(t - A_3)}{T} - I = 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

化为等价方程

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= \sqrt{\frac{I - A_1}{A_2 \cos \frac{2\pi(t - A_3)}{T}}} - k_1 - 1 = \varphi(k_1) \\ k_2 &= \sqrt{\frac{I - A_1}{\cos \frac{2\pi(t - A_3)}{T}}} - k_2 = \varphi(k_2) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

非线性迭代方法求解 K_1 、 K_2 收敛值流程如图 1 所示。

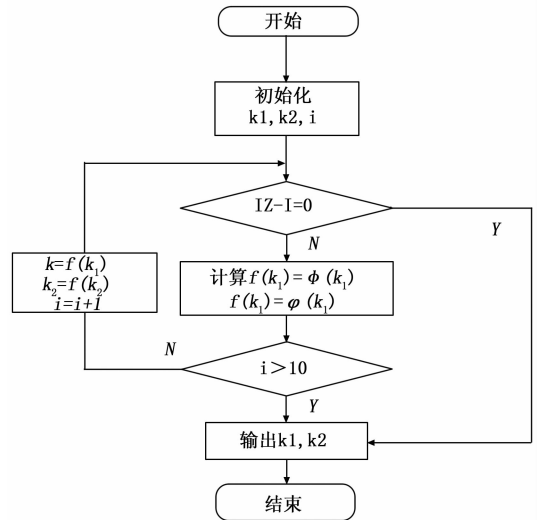


图 1 求解 K_1 、 K_2 收敛值流程图

得到各参数值后, 应根据倾斜因子转换成穿透点垂直入射的电离层延迟误差:

$$I(t) = FI_z \quad (6)$$

倾斜因子反映的是 GPS 信号分别垂直入射和倾斜入射到同一个电离层穿透点所引起的电离层延迟的比率。计算公式如下:

$$F = \left[1 - \left(\frac{R_e \cos E}{R_e + H} \right)^2 \right]^{-1} \quad (7)$$

其中: R_e 为地球半径; H 为电离层参考面的平均高度; E 为 GPS 卫星相对监测站的仰角。

2 格网电离延迟模型

2.1 格网电离层延迟修正过程

1) 将电离层参考面根据一定的经纬度间隔分割成一定数量的网格, 网格的结点作为 SBAS 系统播发电离层延迟误差的依附点。

2) 参考站根据双频接收机接收到的信息实时计算出其穿透点电离层延迟值和北斗卫星在参考面上穿透点的经

纬度。

3) 参考站的数据无线通信网络传送至主控站, 计算出电离层参考面上每个网格节点的垂直电离层延迟值, 并调制成导航数据经地球同步通讯卫星发送至区域内用户。

4) 用户通过接收到的数据计算出穿透点的经纬度, 然后根据网格节点电离层延迟数据借助相应算法得到电离层延迟值。

2.2 格网点垂直延迟值的计算

电离层格网点的延迟计算值对电离层延迟的结果准确度有一定的影响, 因此如何由穿透点处的垂直电离层延迟计算格网点处垂直电离层延迟是保证格网电离层模型精度的关键^[12]。

由于监测站采用双频 P 码接收机, 电离层的延迟数据可通过比较 f_1 、 f_2 的 P 码观测数据实时获得:

$$I = \frac{f_2^2}{f_2^2 - f_1^2}(\rho_2 - \rho_1) \quad (8)$$

其中: I 为电离层穿透点的倾斜延迟值, ρ_1 、 ρ_2 分别为 f_1 、 f_2 频率下的 P 码伪距。

电离层穿透点的倾斜延迟根据倾斜因子 F 转换为电离层穿透点的垂直延迟值:

$$D_{IPP} = \frac{I}{F} \quad (9)$$

2.2.1 反距离加权法

在 SBAS 中, 主控站通常利用反距离加权法计算出参考面内网格节点的垂直电离层延迟值。几何示意图参见图 2。

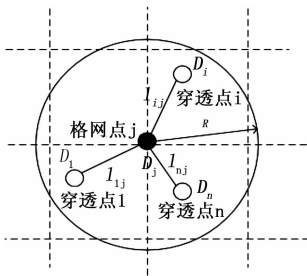


图 2 格网点几何示意图

反距离加权算法的原理是: 参考面涵盖范围内的每个网格节点, 各个监测站监测的穿透点数据按照距离该网格节点的远近赋予不同的加权值, 即穿透点距离网格节点越近, 加权值越大, 其对应的性质就会越相似; 距离越远加权值越小, 则它们的相似性越小; 距离超出一定范围, 加权值为零^[13]。具体数学表达式如下:

$$D_j = \left\{ \begin{array}{ll} \sum_{i=1}^n \frac{D_i}{l_{ij}} & 0 < l_{ij} \leq R \\ D_i & l_{ij} = 0 \\ 0 & l_{ij} > R \end{array} \right\} \quad (10)$$

$$l_{ij} = \sqrt{(H_j - H_i)^2 + (L_j - L_i)^2}$$

式中, R 为所选穿透点的距离值, H_j 、 L_j 为格网点的经纬度, H_i 、 L_i 为穿透点的经纬度^[14]。

2.2.2 KRG 内插模型

KRG 内插法又称空间自协方差最佳插值法。它考虑在空间分布的属性, 对某一空间位置有影响的范围内的条件值进行内插^[7]。数学模型为:

$$\begin{bmatrix} C_v & e_n \\ e_n & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a^T \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{ij} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$C_v = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nn} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$C_{ij} = [C_{1j} C_{2j} \cdots C_{nj}]^T \quad (13)$$

C_v 为两穿透点间的相关函数矩阵, 相关函数 $C_{mn} = l_{max} - l_{mn}$, l_{max} 取穿透点间距离最长的基线长度。

$e_n = [1 \ 1 \ \cdots \ 1]^T$, λ 为拉格朗日乘数, 用于限制条件数。表达式为:

$$\lambda = (e_n^T C_v^{-1} e_n)^{-1} (C_{ij}^T C_v^{-1} e_n - 1) \quad (14)$$

各参数确定后, 即可求得系数矩阵为:

$$a = C_{ij}^T C_v^{-1} - \lambda e_n^T C_v^{-1} \quad (15)$$

因此, 格网点延迟值为:

$$D_j = a D_i \quad (16)$$

2.3 用户穿透点电离层延迟的计算

虽然用户能够接收到 GEO 转发的 SBAS 区域内网格节点的垂直电离层延迟数据, 但对于用户来说其电离层穿透点不可能时刻都在网格节点上, 所以需利用广播的电离层延迟数据对其各个穿透点进行内插。内插后的电离层穿透点的垂直延迟为:

$$\tau(\varphi_{PP}, \lambda_{PP}) = \sum_{i=1}^4 W_i(x_{PP}, y_{PP}) \tau_{vi} \quad (17)$$

其中: Φ_{PP} 、 λ_{PP} 分别为电离层穿透点的纬度和经度, τ_{vi} 为格网点的电离层垂直延迟。

根据加权函数模型 $f(x, y) = xy$ 得到具体的加权函数为:

$$\begin{aligned} W_1 &= x_{PP} y_{PP} \\ W_2 &= (1 - x_{PP}) y_{PP} \\ W_3 &= (1 - x_{PP})(1 - y_{PP}) \\ W_4 &= x_{PP}(1 - y_{PP}) \end{aligned} \quad (18)$$

最后, 穿透点垂直延迟值乘以倾斜因子即为电离层校正延迟:

$$\hat{D}_{IPP} = F_{PP} \tau(\varphi_{PP}, \lambda_{PP}) \quad (19)$$

2.4 格网点电离层垂直改正误差 GIVE 的计算

为了验证网络插值算法的可行性, 需计算格网点电离层垂直改正误差 GIVE。GIVE 对特定时段内的每个电离层穿透点的延迟修正残差统计, 计算格网点四周穿透点误差限值。计算过程^[15]为:

1) 根据 4 个相邻格网点的电离层延迟校正信息估算穿

透点的电离层垂直延迟值 $\hat{D}_{IPP}(t)$ 。

2) 采用双频法得到穿透点电离层延迟校正值 $D_{IPP}(t)$, 将该穿透点的电离层延迟改正计算值与估计值进行比较, 即:

$$e_{IPP}(t) = D_{IPP}(t) - \hat{D}_{IPP}(t) \quad (20)$$

3) 统计该时段内的穿透点 $e_{IPP}(t)$ 的误差限值:

$$E_{IPP} = |\bar{e}_{IPP}(t)| + \kappa(\text{Pr})\sigma_e \quad (21)$$

其中: $\kappa(\text{Pr})$ 为置信水平是 99.9% 的置信度, 取值为 3.2905。

$$|\bar{e}_{IPP}(t)| = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n e_{IPP}(t) \quad (22)$$

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (e_{IPP}(t_k) - \bar{e}_{IPP})^2} \quad (23)$$

4) 网点相邻的网格中穿刺点的 GIVE 值为:

$$\text{GIVE} = \text{Max}\{E_{IPP,i}\} + \hat{e}_{IGP} \quad (24)$$

式中, \hat{e}_{IGP} 为格网点电离层延迟的绝对误差, 由穿透点的电离层延迟误差内插得到:

$$\hat{e}_{IGP} = \frac{\sum_{j=1}^n W_j |e_{IPP}|}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (25)$$

3 数据处理与分析

选取武汉、桂林、勉县、太原、盐城、厦门各参考站的观测数据, 采集时间为 2016 年 3 月 20 日 12:00—15:00, 采样间隔为 1 s。分别用 Klobuchar 模型、改进的 Klobuchar 模型和双频校正模型计算电离层延迟改正误差。以武汉站和桂林站为例, 仿真结果如图 3 和图 4 所示。

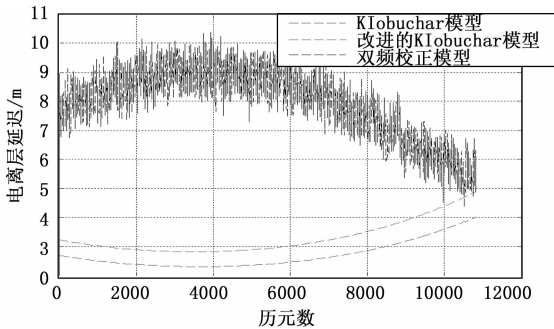


图 3 武汉站 3 种模型电离层延迟对比

可以看出, 改进的 Klobuchar 模型修正电离层延迟误差可达 3~5 m, 高于原模型修正精度 1~2 m, 具有更好的修正效果, 且更加接近于双频实测值。

分别采用反距离加权法和 KRG 内插法计算格网点电离层延迟值, 进而得到用户电离层延迟误差的精度, 比较两种内插模型的效果。

图 5 和图 6 分别表示太原站和桂林站利用 2 种内插法的格网模型进行定位时的改正效果。表 1 和表 2 分别列出了两站当日取样时段内修正电离层延迟误差的精度情况。可以看出, 在桂林站使用两种格网内插模型校正的电离层延迟

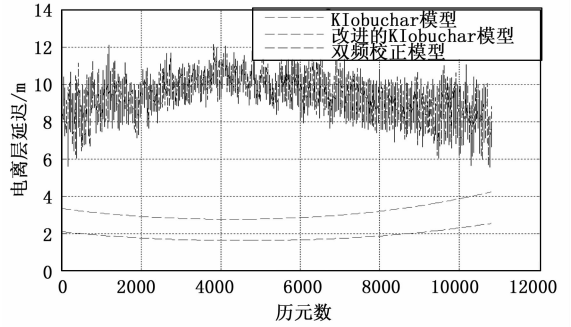


图 4 桂林站 3 种模型电离层延迟对比

值明显比太原站更接近于双频实测值。

太原站 (37.71°, 112.43°) 属于中纬度地区, 桂林站 (25.19°, 110.31°) 属于低纬度地区, 低纬度参考站的格网模型校正精度相对较高, 说明格网模型的改正性能和空间纬度密切相关^[16]。

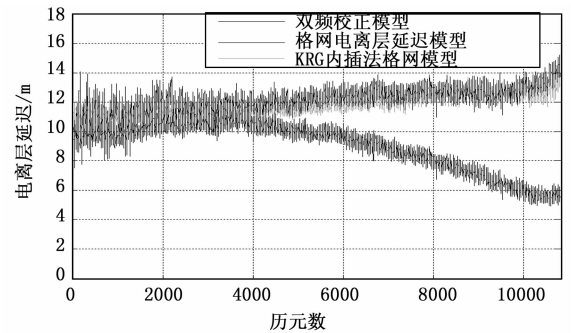


图 5 太原站 3 种模型电离层延迟对比

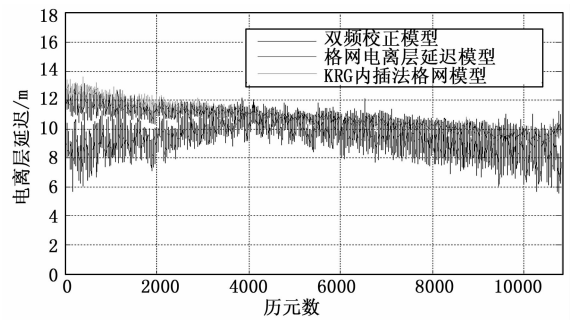


图 6 桂林站 3 种模型电离层延迟对比

表 1 太原站 3 种模型的精度情况

模型	最大值/m	最小值/m	平均值/m
双频校正	11.7424	4.9008	9.0127
反距离加权	15.2039	7.5070	12.1416
KRG	14.7658	10.2660	11.8209

表 2 桂林站 3 种模型的精度情况

模型	最大值/m	最小值/m	平均值/m
双频校正	12.1337	5.5813	9.3481
反距离加权	13.1725	8.4888	10.7094
KRG	13.5987	8.6221	10.7664

根据参考站实时监测的穿透点数据, 分别采用上节叙述两种内插法计算 GIVE 值。GIVE 值在通常低于 10 m, 最佳保持在 1.5 m 以下^[17]。

图 7 和图 8 为格网点 (27.5°N, 110°E) 在两站监测时段内的 GIVE 的分布情况。可以看出, 两站使用 KRG 内插法格网模型的修正误差均在正常范围内, 验证了算法的可行性。太原地区 KRG 内插法格网模型 GIVE 值相对更小, 说明在中纬度地区更能凸显 KRG 内插法的优势。表 1 也可以看出 KRG 内插法格网模型对电离层延迟值的改正结果更接近于双频校正值。由此可见, 在使用格网模型校正效果不佳的中纬度地区, 使用 KRG 内插法格网模型修正电离层延迟误差的精度相对更准确。

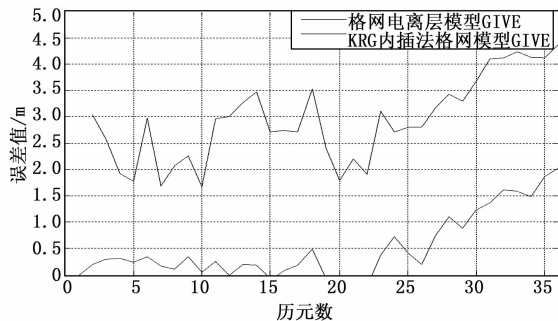


图 7 太原站两种模型 GIVE 对比

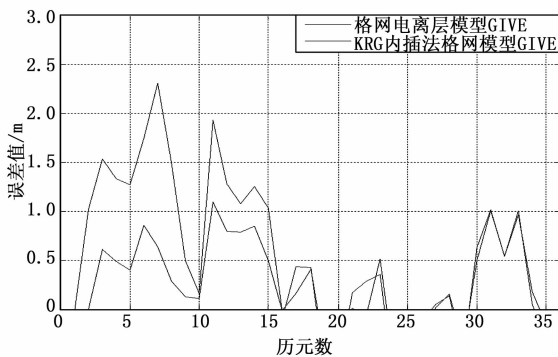


图 8 桂林站两种模型 GIVE 对比

4 结论

本文对 Klobuchar 模型的振幅和夜间延迟值进行不断改进, 得到误差数据补偿定位, 使定位更加精确。考虑到与太阳活动强度有关的相对太阳黑子数这一因素, 对 Klobuchar 模型的周期进行修正, 建立了改进的 Klobuchar 电离层延迟模型, 并双频模型进行评估。此外, 还研究了北斗星基增强系统中格网电离层延迟算法以及计算格网点垂直延迟值的方法。以参考站电离层改正方法为基础, 采用 KEG 内插法计算格网点垂直延迟值的计算方法进行改进, 计算格网点 GIVE 值。结果表明:

- 1) 改进的 Klobuchar 模型比原模型提高了修正效果, 更接近双频实测电离层延迟值, 从而提高定位精度。
- 2) 空间纬度是影响格网电离层模型修正延迟性能的因素之一。

对于低纬度地区, 两种格网内插算法校正精度基本相当, 改正误差 GIVE 值也均在正常范围内。而中纬度地区格网模型改正精度相对较差, 但使用 KRG 内插法改正电离层延迟误差的精度略高于反距离加权法, 而且 GIVE 值更可靠。因此, 中纬度地区可采用 KRG 内插法的格网模型计算用户电离层延迟误差。

参考文献:

- [1] 李征航, 陈 锴, 刘万科. GNSS 电离层延迟模型的数学统一与方法扩展 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2007, 32 (8): 699-703.
- [2] Jin S G, Park J U. GPS ionospheric tomography: a comparison with the IRI-2001 model over South Korea [J]. Earth Planets Space, 2007, 59: 287-292.
- [3] 廖伟迅. Klobuchar 模型的解读 [J]. 韶关学院学报 (自然科学版), 2006, 27 (12): 6-8.
- [4] 向淑兰, 何晓薇, 牟奇锋. GPS 电离层延迟 Klobuchar 与 IRI 模型研究 [J]. 微计算机信息 (测控自动化), 2008, 24: 200-202.
- [5] 刘立波, 万卫星, 陈一定. 电离层与太阳活动性关系 [J]. 科学通报, 2011, 56 (7): 477-487.
- [6] 王 刚, 魏子卿. 格网电离层延迟模型的建立方法与试算结果 [J]. 测绘通报, 2000, 9: 1-2.
- [7] 孙 伟, 张绍成, 耿胜辉, 等. GPS/GLONASS 集成的 CORS 网大气延迟插值模型比较分析 [J]. 测绘工程, 2016, 25 (7): 1-6.
- [8] 赵 威, 张成义. Klobuchar 模型的实用分析与改进 [J]. 空间科学学报, 2013, 33 (6): 624-628.
- [9] 章红平, 平劲松, 朱文耀, 等. 电离层延迟改正模型综述 [J]. 天文学进展, 2006, 24 (1): 16-26.
- [10] 廖伟迅. GPS 信号电离层时延误差的研究 [J]. 首都师范大学学报 (自然科学版), 2010, 1: 95-98.
- [11] 张凤菊, 刘晓娟, 赵丽平, 等. 数据差异显著性检验 [J]. 农机使用与维修, 2012, 4: 51-52.
- [12] 于 耕, 曲 歌. 北斗格网电离层模型格网点计算方法研究 [J]. 航天电子技术, 2017, 43 (6): 15-18.
- [13] 王天应, 施 闯. 浅析 WAAS 电离层延迟网格修正算法 [J]. 测绘信息与工程, 32 (5): 38-39.
- [14] DO-229D (SC-159). Minimum operational performance standards for global positioning system / wide area augmentation system airborne equipment (WAAS) [Z]. Washington, DC: RTCA Inc, 2006
- [15] 詹先龙, 刘瑞华, 等. 北斗系统格网电离层延迟算法研究 [J]. 航天控制, 2012 (1): 15-19.
- [16] 冯 炜, 陈向东, 吴 星, 等. 空间纬度对于差分系统电离层格网性能的影响 [J]. 大地测量与地球动力学, 2011, 31 (4): 135-138.
- [17] 曹海洋. GNSS 完好性监测理论与方法研究 [D]. 西安: 长安大学, 2013: 41.