

观测站稀疏地区的 WAAS 电离层时延网格修正算法

王一举* 袁 洪 万卫星

(中国科学院武汉物理与数学研究所 武汉 430071)

摘 要

在改进的广域增强系统电离层时延网格算法的基础上,给出了针对观测量比较少的地区比较适用的电离层时延网格修正算法,并通过模拟数据和 GPS 实测数据与原方法进行了分析比较.结果表明,在观测站稀疏的情况下,本文的计算方法模式的精度比原方法有较大的提高.

关键词 网格算法; 电离层时延; WAAS

1 引言

在广域增强系统 (WAAS) 中,影响 GPS 定位精度的主要误差源是电离层延迟. 1994 年, FAA 在关于 WAAS 的技术文档中提出了电离层延迟网格修正法^[1]. 为了对电离层带来的附加时延进行修正, FAA 把复杂的电离层等效成离地面固定高度的薄层,并作为地面用户和站点的共同的电离层参考面. 在参考面上,经度线和纬度线按 5° 的间隔把参考面分割成一定数量的网格,在 WAAS 覆盖区域内分布有一个主控站和一定数量的监测站,监测站实时计算出它到可视范围内 GPS 卫星的电离层电子总含量,同时计算出 GPS 卫星在电离层参考面上穿透点的经纬度,这些数据通过同步卫星组成的通信链路实时传送给主控站. 主控站则根据各监测站的数据计算出电离层参考面上每个网格结点的垂直电离层电子总含量,并按一定格式生成电文由同步通信卫星转发给区域内广大用户. 对于可以按要求设定适当密度地面监测站的空间,其修正精度很高^{[2],[3]},但是,对海洋和气候条件极其恶劣的地面,监测站非常稀少,导致对应空间的观测量稀疏,采用常规方法给出的修正会带来较大的误差. 为了能在条件不变的情况下提高修正精度,我们考虑到电离层的 TEC (Total Electronics Content) 的厚度与地方时有较强相关性的特性,将地方时引进了修正模型,给出了如下的观测量稀疏地区的改进电离层时延修正网格算法.

2 观测量稀疏地区考虑电离层等效薄层倾斜的修正模型

WAAS 传统的电离层附加时延修正方法中,网格点垂直方向的电子总含量为^[1]

$$C_{tecv} = \gamma^{-1} \cdot C_{tecs}, \quad (1)$$

* 现在荆州师范学院计算机科学与技术系工作 (434100)

2002-10-17 收到原稿, 2003-01-20 收到修定稿

$$\gamma = \sec \left[\arcsin \left(\frac{R_e \cdot \cos B}{R_e + H} \right) \right]. \quad (2)$$

其中, C_{tecv} 为 GPS 卫星到用户电波穿透点的垂直电离层电子总含量, C_{tecs} 为监测站观测到的电子总含量, R_e 地球半径, B 为地面用户的仰角, H 为等效薄层高度.

在考虑电离层在子午面内倾斜后, GPS 卫星到用户电波穿透点的垂直电离层电子总含量和电离层倾斜因子为^{[4],[5]}

$$C_{\text{tecv}} = C_{\text{tecs}} \cdot (\gamma \cdot \cos \beta \cdot \cos \sigma + \sin \beta), \quad (3)$$

$$\gamma(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^4 \alpha_i \cdot (\varphi - \varphi_0)^i, \quad \varphi < 40^\circ. \quad (4)$$

其中, φ_0 为电离层开始倾斜的纬度值, 根据经验取 $\varphi_0 = 40^\circ$; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 为模型参数; β 为在电离层高度处的 GPS 卫星视线仰角; σ 为视线的方位角. 对于某网格点 k , 则有

$$C_{\text{tec}\perp}(\lambda, \phi, t) = \sum_{p,q,r=0}^{p+q+r \leq M_{pqr}} C_{pqr} \cdot (\lambda - \lambda_k)^p \cdot (\phi - \phi_k)^q \cdot (t - t_0)^r. \quad (5)$$

$$\gamma(\lambda, \phi, t) = \sum_{s=0}^{M_s} D_s \cdot (\phi - \phi_k)^s. \quad (6)$$

其中, (λ_k, ϕ_k) 为拟进行建模计算的网格点 k 的经纬度, t_0 为当前时间点, M_{pqr} 和 M_s 为阶数.

对于观测量稀疏的地区, 首先定义一个新的参量:

$$L = t + \lambda/15 \quad (7)$$

其物理意义是当地时间, 以小时为单位, λ 为经度, 以度为单位, 对于任意网格点 k , 则有

$$C_{\text{tec}\perp}(L, \phi) = \sum_{p,q=0}^{p+q \leq M_{pq}} C_{pq} \cdot (L - L_k)^p \cdot (\phi - \phi_k)^q, \quad (8)$$

$$\gamma(L, \phi) = \sum_{s=0}^{M_s} D_s \cdot (\phi - \phi_k)^s. \quad (9)$$

这就是考虑电离层等效薄层倾斜时观测量稀疏地区的附加时延修正模型.

3 观测量稀疏地区的 WAAS 电离层时延网格修正算法

基准站算法和用户算法与观测量密集地区的类似, 在有关文章^[4]中已经给出, 这里不再重复. 下面主要给出中心站的算法.

在网格点 k , 特定的监测站 ($m = 1, 2, \dots, M$) 对各 GPS 卫星 ($n = 1, 2, \dots, N$) 在当地时间 L_m^n 进行双频观测得到的电波传播路径上的电离层电子浓度总含量为 $C_m^n(L_m^n)$, 利用

(8), (9) 式, 可得观测方程为

$$\begin{aligned} & \sum_{p,q=0}^{p+q+r \leq M_{pq}} C_{pqr} \cdot W_m^n(L_m^n) \cdot [L_m^n - L_k]^p \cdot [\phi_m^n(L_m^n) - \phi_k]^q \\ & = C_m^n(L_m^n) \cdot W_m^n(L_m^n) \cdot \left[\sin[\beta_m^n(L_m^n)] + \sum_{s=0}^{M_s} D_s \cdot [\phi_m^n(L_m^n) - \phi_k]^s \right. \\ & \quad \left. \cdot \cos[\beta_m^n(L_m^n)] \cdot \cos[\sigma_m^n(L_m^n)] \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

其中, 权重因子 $W_m^n(L_m^n)$ 定义为

$$W_m^n(L_m^n) = \{[\phi_m^n(L_m^n) - \phi_k]^2 + [15 \cdot (L_m^n - L_k)]^2\}^{-1/2}. \quad (11)$$

从 (10)、(11) 式可以看出, 不同地方时的观测量对当前地方时 TEC 的预测值有贡献, 这样, 对于监测站稀少的地方, 就可以利用其他站点的观测量. 将 (11) 代入 (10) 式并展开则得到构成的观测方程组:

$$A' \cdot X = B' \quad (12)$$

其中,

$$A' = \begin{Bmatrix} \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & W_m^n(L_m^n) \cdot [\lambda_m^n(L_m^n) - \lambda_k]^p \cdot [\phi_m^n(L_m^n) - \phi_k]^q & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & -W_m^n(L_m^n) \cdot C_m^n(L_m^n) \cdot [\phi_m^n(L_m^n) - \phi_k]^s \cdot \cos[\beta_m^n(L_m^n)] \cdot \cos[\sigma_m^n(L_m^n)] & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots \end{Bmatrix}^T, \quad (13)$$

$$X = \{\cdots C_{pq} \cdots D_s \cdots\}^T, \quad (14)$$

$$B' = \{\cdots W_m^n(L_m^n) \cdot C_m^n(L_m^n) \cdot \sin[\beta_m^n(L_m^n)] \cdots\}^T. \quad (15)$$

解算该观测方程组中的参数 C_{00} 及 D_0 , 即可通过下式得到 $C_{\text{tec}\perp}(k)$ 和 γ_k .

$$\gamma_k = D_0, \quad (16)$$

$$C_{\text{tec}\perp}(k) = C_{00}. \quad (17)$$

在实际计算中, 模型的阶数 M_{pq} 和 M_s 可按精度和实时性的要求给出. 利用 (16) 式计算得到的纬度小于 40° 的各网格点上的电离层倾斜因子 γ_k 和网格点的纬度 ϕ_k . 组成方程组:

$$\begin{Bmatrix} (\phi_1 - \phi_0) & (\phi_1 - \phi_0)^2 & (\phi_1 - \phi_0)^3 & (\phi_1 - \phi_0)^4 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ (\phi_k - \phi_0) & (\phi_k - \phi_0)^2 & (\phi_k - \phi_0)^3 & (\phi_k - \phi_0)^4 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ (\phi_m - \phi_0) & (\phi_m - \phi_0)^2 & (\phi_m - \phi_0)^3 & (\phi_m - \phi_0)^4 \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \gamma_1 \\ \cdots \\ \gamma_k \\ \cdots \\ \gamma_m \end{Bmatrix}. \quad (18)$$

解算该方程组即可得到所需的 α_1 、 α_2 、 α_3 、 α_4 . 用户根据得到的上述参数, 便可以解算出自己位置的电离层传播附加时延修正值^[4].

4 误差分析和实算结果

为了检验实际效果, 利用分布在中纬地区 (见表 1) 的 8 个站 1998 年的 GPS 实际观测数据对本方案进行了检验. 将 8 个站中最东部的站 (5 号站) 的所有观测数据去掉, 再用文献 [4] 的模式对其进行预测, 计算并统计预测值与 5 号站实测值的偏差, 得到的结果见图 1. 图 2 是用本文给出的模式对 5 号站观测值进行预测, 再计算并统计预测值与 5 号站实测值的偏差而得到的结果. 从图 1 和图 2 可以得到如下结论, 观测量比较稀疏的地区, 以前的模式计算的结果最大偏差达到 3m 以上, 方差为 3.366, 而本文给出的模式误

表 1 GPS 观测站位置

Table 1 The position of GPS observational station

站名	1	2	3	4	5	6	7	8
经度	91.1	121.1	114.4	109.2	131.0	102.5	75.0	110.3
纬度	29.5	31.0	30.6	34.3	44.4	25.0	37.7	17.0

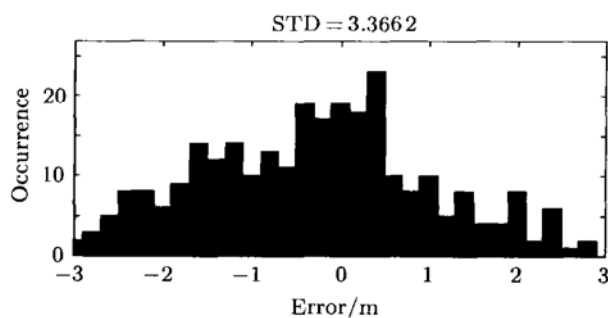


图 1 采用文献 [4] 的模式预测结果与实测结果之间的误差分布

Fig.1 Distribution of the difference between estimating with the method in Ref.[4] and actual measuring value

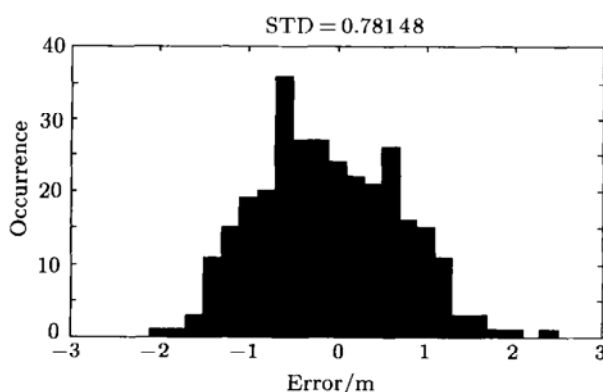


图 2 采用本文模式预测结果与实测结果之间的误差分布

Fig.2 Distribution of the difference between estimating with the method in this article and actual measuring value

差一般小于 1.5 m, 方差为 0.781, 结果要好得多, 说明在观测点比较稀疏的地区采用本章给出的模式是必要的。

参 考 文 献

- [1] Todd Walter. WAAS MOPS: Practical Examples, ION NTM'99, San Diego, California, January 1999
- [2] Wang Y C *et al.* Grid algorithms of ionospheric delay in a GPS wide-area augmentation system. *J. Institute of Comm.*, 1998, **19**(12):38—41. in Chinese (王永澄等. GPS 广域增强系统的电离层延迟网格校正法. 通信学报, 1998, **19**(12):38—41)
- [3] Huang J Y *et al.* A study on the grid-based algorithms for the Ionospheric delay correction in a GPS wide-area augmentation system. *J. Civil Avi. Ins. China*, 1998, **16**(6):6—12. in Chinese (黄建宇等. GPS 广域增强系统电离层延迟网格修正算法的研究. 中国民航学院学报, 1998, **16**(6):6—12)
- [4] Wang Y J *et al.* An improved grid-based correction algorithms for the ionospheric delay in WAAS. *Chin. J. Space Sci.*, 2002, **22**(2):129—135. in Chinese (王一举等. 改进的 WAAS 电离层时延网格修正算法. 空间科学学报, 2002, **22**(2):129—135)
- [5] Wang Y J *et al.* A study on the error for the grid-based algorithms of ionospheric delay correction in low latitude. *GPS World of China*, 2001, **26**(2):5—9. in Chinese (王一举等. 低纬地区电离层时延网格修正算法的偏差的研究. 全球定位系统, 2001, **26**(2):5—9)
- [6] Walker G O, Ma J H K, Golton E. The equatorial inospheric anomaly in electron content from solar minimum to solar maximum for South East Asia. *Ann. Geophys.*, 1994, **12**(2/3):195—209

AN IMPROVED GRID-BASED CORRECTION ALGORITHMS FOR SPARSELY OBSERVATION STATION REGION IN WAAS

WANG Yiju YUAN Hong WAN Weixing

(Wuhan Institute of Physics and Mathematics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071)

Abstract

The correction method of additional time delay caused by ionosphere and atmosphere plays a more and more important role in satellite timing and positioning system. In many radio projects which using electromagnetic wave as a measuring tool have to deal with the additional time delay, such as GPS, LADGPS, WADGPS and WAAS. In this paper, a new additional time delay algorithm model for a sparsely observation station region in WAAS is established and studied.

Based on the improved grid-based correction algorithm for ionospheric delay in WAAS^[4] and the model given in this paper, after numerical simulating with GPS data, the result was obtained showing that the precision of new algorithm is better than original one in the case of sparsely observation station region.

Key words Grid-based correction algorithms, Ionospheric delay, WAAS