

改进的 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)

周建华

(北京中华测绘信息服务总公司)

朱民才

(北京航天指挥控制中心)

摘 要

在考虑电离层倾斜的基础上给出了一套改进的广域增强系统电离层时延网格算法, 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, 同样条件下不考虑倾斜时产生的方差为考虑倾斜度时的 2 倍。

关键词 网格算法—电离层时延—WAAS

1 引言

电离层延迟是影响 GPS 定位精度的主要误差源之一, 为了尽可能消除电离层延迟的影响, 提高用户定位精度, 不同的研究者采取不同的思想和给出了消除误差的不同办法. 如双频法、局域差分 GPS(Local Area Differential GPS, 简称 LADGPS)、广域差分 GPS(Wide Area Differential GPS, 简称 WADGPS)、广域增强差分 GPS(Wide Area Augmentation Differential GPS) 以及 Klobuchar 模型修正法^{[1],[4]}. 其中, 以美国联邦航空局 (FAA) 的广域增强系统^{[2],[3]}(Wide Area Augmentation System) 最具代表性, 其对电离层修正的处理方法是, 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°(高纬 10°) 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, 监测站实时计算出其可视范围内 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. 用户则通过计算其可视 GPS 卫星在电离层参考面上的经纬度并对照接收到的网格结点电离层电子总含量数据, 依一定算法获得 GPS 卫星到用户电波穿透点的垂直电离层电子总含量 TEC_v , 再按

$$\gamma = \sec \left[\arcsin \left(\frac{R_e \cdot \cos B}{R_e + H} \right) \right], \quad (1)$$

2000-09-18 收到原稿, 2001-10-20 收到修定稿

* 现在荆州市师范学院计算机科学与技术系, (434100)

$$\text{TEC}_s = \gamma \cdot \text{TEC}_v \quad (2)$$

计算斜向的电子总含量 TEC_s 。其中 R_e 地球半径, B 为地面用户的仰角, H 为等效薄层高度。如此修正电离层时延简单有效, 可以满足一定的精度要求, 但是在某些情形下误差较大。实际观测表明, 随着地磁纬度的下降, 子午面内电离层出现明显的倾斜, 在我国南部地区所处的中低纬(磁纬)地区, 电离层电子浓度高, 而且当地理纬度小于 40° 时, 电离层出现明显倾斜, 从而导致等效高度随时间空间的变化和电波穿透电离层倾角的变化, 王一举等人的研究表明^[5], 等效高度的变化给电离层网格修正法带来的影响可以忽略不计, 但倾角的变化会带来较大的误差。本文基于电离层薄层倾斜的思想, 给出了一套考虑电离层倾斜的改进的 WAAS 电离层时延网格修正算法, 新方法在增加少量广播参数的情况下, 提高了修正精度。

2 改进的网格法修正原理

取局地坐标系 x, y, z 分别指向东、北和上, 日出日落时电离层在东西向也有明显的倾斜, 但此时 TEC 的绝对值很小, 从电波修正的角度出发, 考虑到实际工程中通信的容量限制, 只考虑电离层在子午面内倾斜, 取电离层法向单位矢量 $\hat{n}$ 为

$$\hat{n} = (0, \sin \gamma, \cos \gamma). \quad (3)$$

射线方向的单位矢量 $\hat{r}$ 表示为

$$\hat{r} = (\cos \beta \cdot \sin \sigma, \cos \beta \cdot \cos \sigma, \sin \beta). \quad (4)$$

其中, γ 是子午面内电离层的倾斜角(法向和垂直方向的夹角)反应电离层的倾斜; 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。略去电离层偏离球面的高次曲率效应, 由 (3) 和 (4) 式可得

$$\text{TEC}_\perp = \text{TEC}_s \cdot (\hat{n} \cdot \hat{r}) = \text{TEC}_s \cdot (\sin \gamma \cdot \cos \beta \cdot \cos \sigma + \cos \gamma \cdot \sin \beta). \quad (5)$$

其中, TEC_s 是卫星视线上的斜向电子浓度总含量, $\text{TEC}_\perp$ 是电离层法线方向上的电子浓度总含量, 它有别于通常所指的垂直方向上的总含量 TEC_v 。一般情况下, $\gamma \ll 1$, (5) 式可简化为

$$\text{TEC}_v = \text{TEC}_s \cdot (\gamma \cdot \cos \beta \cdot \cos \sigma + \sin \beta). \quad (6)$$

根据电离层分布特性, 电离层倾斜因子可用以下模式表示

$$\begin{aligned} \gamma(\theta, \varphi) &= \sum_{i=1}^4 \alpha_i \cdot (\varphi - \varphi_0)^i, & \varphi < 40^\circ. \\ \gamma(\theta, \varphi) &= 0, & \varphi > 40^\circ. \end{aligned} \quad (7)$$

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。

在考虑电离层倾斜时, 电波传播修正的基本原理是, 对中心站而言, 从 (6) 式出发, 用各基准站实测的电子浓度总含量通过 (6) 式拟合得出各预定的网格点上的电离层法向

方向上的电子浓度总含量, 作为广播参量广播出去, 供用户使用. 在拟合各网格点上电子浓度总含量的同时, 拟合各网格点上的电离层倾斜因子, 在此基础上依照 (7) 式对值沿子午面进行空间建模, 并将模型参数 α_1 、 α_2 、 α_3 、 α_4 广播出去供用户使用. 对用户而言, 首先根据电离层穿透点的经纬度和各网格点上电子浓度总含量拟合得出穿透点上的电子浓度总含量, 再根据穿透点的纬度和广播参数 α_1 、 α_2 、 α_3 、 α_4 通过 (7) 式计算该纬度上的值, 最终通过 (6) 式计算电离层修正值. 具体算法将在下面叙述, 凡是与原网格修正法计算相同的公式不再给出.

3 改进的电离层时延网格修正算法

3.1 基准站算法

(1) 各基准站 ($m = 1, 2, \dots, M$) 对各 GPS 卫星 ($n = 1, 2, \dots, N$) 进行双频观测得到 l ($l = 1, 2, \dots, L$) 个时刻的电波传播路径上的电离层电子浓度总含量 $TEC_m^n(t_l)$, 单位为 m.

(2) 对应于每一个电离层电子浓度总含量观测值 $TEC_m^n(t_l)$, 各基准站计算对基准站而言的 GPS 卫星的仰角 $\beta_m^n(t_l)$ 和方位角 $\sigma_m^n(t_l)$, $\bar{\beta}_m^n(t_l)$ 和 $\bar{\sigma}_m^n(t_l)$ 的单位均为度.

(3) 计算电离层穿透点 $P_m^n(t_l)$ 的经纬度 $\lambda_m^n(t_l)$ 和 $\phi_m^n(t_l)$, $\lambda_m^n(t_l)$ 和 $\phi_m^n(t_l)$ 的单位均为度.

(4) 计算电离层穿透点即 $P_m^n(t_l)$ 点处相应的 GPS 卫星的仰角 $\beta_m^n(t_l)$ 和方位角 $\sigma_m^n(t_l)$, $\beta_m^n(t_l)$ 和 $\sigma_m^n(t_l)$ 单位均为度.

3.2 中心站算法

(1) 对于 K 个网格点, 采用逐点建模的方法分别计算各网格点对应的 $TEC_{\perp}(k)$ 和 γ_k , 它们的单位分别为 m 和 rad.

计算中所需的输入参量为 $TEC_m^n(t_l)$ 、 $\lambda_m^n(t_l)$ 、 $\phi_m^n(t_l)$ 、 $\beta_m^n(t_l)$ 、 $\sigma_m^n(t_l)$ 和 t_l , ($m = 1, 2, \dots, M$, $n = 1, 2, \dots, N$, $l = 0, 1, 2, \dots, L$), 其中 $l = 0$ 为当前时间点, $l > 0$ 表示以前的时间点.

$$TEC_{\perp}(\lambda, \phi, t) = \sum_{p,q,r=0}^{p+q+r \leq M_{pqr}} C_{pqr} \cdot (\lambda - \lambda_k)^p \cdot (\phi - \phi_k)^q \cdot (t - t_0)^r; \quad (8)$$

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

其中, (λ_k, ϕ_k) 为拟进行建模计算的网格点 $IGPk$ 的经纬度, t_0 为当前时间点; M_{pqr} 和 M_s 为阶数, 暂时取为 $M_{pqr} = 2$ 和 $M_s = 2$.

对于特定的观测量 $TEC_m^n(t_l)$, 对网格点 $IGPk$, 根据 (8)、(9) 式并通过 (6) 式得观测方程

$$\sum_{p,q,r=0}^{p+q+r \leq M_{pqr}} C_{pqr} \cdot W_m^n(t_l) \cdot [\lambda_m^n(t_l) - \lambda_k]^p \cdot [\phi_m^n(t_l) - \phi_k]^q \cdot [t_l - t_0]^r =$$

$$TEC_m^n(t_l) \cdot W_m^n(t_l) \cdot \left\{ \sin[\beta_m^n(t_l)] + \right.$$

$$\sum_{s=0}^{M_s} D_s [\phi_m^n(t_l) - \phi_k]^s \cdot \cos[\beta_m^n(t_l)] \cdot \cos[\sigma_m^n(t_l)] \Big\}. \quad (10)$$

其中, $W_m^n(t_l)$ 为根据 $\text{TEC}_m^n(t_l)$ 对应的 P 点距离网格点远近以及时间 t_l 距当前时间点 t_0 远近定义的权重因子

$$W_m^n(t_l) = \{[\phi_m^n(t_l) - \phi_k]^2 + [\lambda_m^n(t_l) - \lambda_k]^2 + [15 \cdot (t_l - t_0)]^2\}^{-1/2}. \quad (11)$$

上式中, 时间是以小时为单位的. 如果采用其他单位, 则上述权重因子公式应作相应的变换.

按 (10) 式构成的观测方程组

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{X} = \mathbf{B}, \quad (12)$$

其中,

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & W_m^n(t_l) \cdot [\lambda_m^n(t_l) - \lambda_k]^p \cdot [\phi_m^n(t_l) - \phi_k]^q \cdot [t_l - t_0]^r & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & -W_m^n(t_l) \cdot \text{TEC}_m^n(t_l) \cdot [\phi_m^n(t_l) - \phi_k]^s & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots \end{pmatrix}^T. \quad (13)$$

$$\mathbf{X} = \{\cdots C_{pqr} \cdots D_s \cdots\}^T. \quad (14)$$

$$\mathbf{B} = \{\cdots W_m^n(t_l) \cdot \text{TEC}_m^n(t_l) \cdot \sin[\beta_m^n(t_l)] \cdots\}^T. \quad (15)$$

其中, 上标 T 表示矩阵转置. 解算该方程组中的参数 C_{000} 以及 D_0 即可通过下式得到 $\text{TEC}_\perp(k)$ 和 γ_k

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

$$\text{TEC}_\perp(k) = C_{000}. \quad (17)$$

(2) 计算对应于 (7) 式的描述电离层倾斜因子的模型系数 α_1 、 α_2 、 α_3 、 α_4 . 电离层倾斜因子模型参数的具体计算如下.

计算电离层倾斜因子模型参数所需的输入量为纬度小于 40 度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 . 依照 (3) 式, 按下式组成观测方程组

$$\begin{pmatrix} (\phi_1 - \phi_0) & (\phi_1 - \phi_0)^2 & (\phi_1 - \phi_0)^3 & (\phi_1 - \phi_0)^4 \\ \Lambda & \Lambda & \Lambda & \Lambda \\ (\phi_k - \phi_0) & (\phi_k - \phi_0)^2 & (\phi_k - \phi_0)^3 & (\phi_k - \phi_0)^4 \\ \Lambda & \Lambda & \Lambda & \Lambda \\ (\phi_M - \phi_0) & (\phi_M - \phi_0)^2 & (\phi_M - \phi_0)^3 & (\phi_M - \phi_0)^4 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma_1 \\ \Lambda \\ \gamma_k \\ \Lambda \\ \gamma_M \end{pmatrix}. \quad (18)$$

解算该方程组即可得到所需的 α_1 、 α_2 、 α_3 、 α_4 值.

3.3 用户算法

用户算法分为 4 部分, 第一是通过广播参数中的约 180 个网格点上的电离层法向电子浓度总含量计算其需要的电离层穿透点 (λ, ϕ) 处的电离层法向电子浓度总含量 $\text{TEC}_\perp(\lambda, \phi)$;

第二是根据广播参数中的电离层倾斜因子模型参数计算电离层穿透点 (λ, ϕ) 处的电离层倾斜因子 $\gamma(\lambda, \phi)$; 第三是在前两部分计算结果的基础上计算电离层改正值 $\text{TEC}(\lambda, \phi)$; 第四是对修正误差界限进行估算。

(1) 电离层穿透点 (λ, ϕ) 处的电离层法向电子浓度总含量 $\text{TEC}_\perp(\lambda, \phi)$ 的计算。计算 $\text{TEC}_\perp(\lambda, \phi)$ 的输入参量为广播参数中的各网格点处的电离层法向电子浓度总含量。对这一参量的具体计算方法不作特别要求, 用户可按照其认为的最合适的方法进行计算, 比如 WAAS 方案中提出的方法等。

(2) 电离层穿透点 (λ, ϕ) 处的电离层倾斜因子 $\gamma(\lambda, \phi)$ 的计算。计算所需的输入参数为电离层穿透点经纬度 (λ, ϕ) 以及广播参数中的电离层倾斜因子模型系数 $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, 计算公式如下:

$$\gamma(\lambda, \phi) = \begin{cases} \sum_{i=1}^4 \alpha_i \cdot (\phi - \phi_0)^i, & \phi_m^n(t_i) < 40^\circ; \\ \gamma(\lambda, \phi) = 0, & \phi_m^n(t_i) > 40^\circ. \end{cases} \quad (19)$$

(3) 电离层改正值的计算。所需输入参量为前两步计算得出的法向电子浓度总含量 $\text{TEC}_\perp(\lambda, \phi)$ 和电离层倾斜因子 $\gamma(\lambda, \phi)$, 计算公式为:

$$\text{TEC}(\lambda, \phi) = \frac{\text{TEC}_\perp(\lambda, \phi)}{\gamma(\lambda, \phi) \cdot \cos[\beta(\lambda, \phi)] \cdot \cos[\sigma(\lambda, \phi)] + \sin[\beta(\lambda, \phi)]}. \quad (20)$$

其中, $\beta(\lambda, \phi)$ 和 $\sigma(\lambda, \phi)$ 为相应的电离层穿透点处的 GPS 卫星仰角和方位角, 用户可以计算得到。

4 实算结果和误差分析

用分布在中纬地区的 8 个站 1998 年的 GPS 实际观测数据对本方案进行了检验。图 1

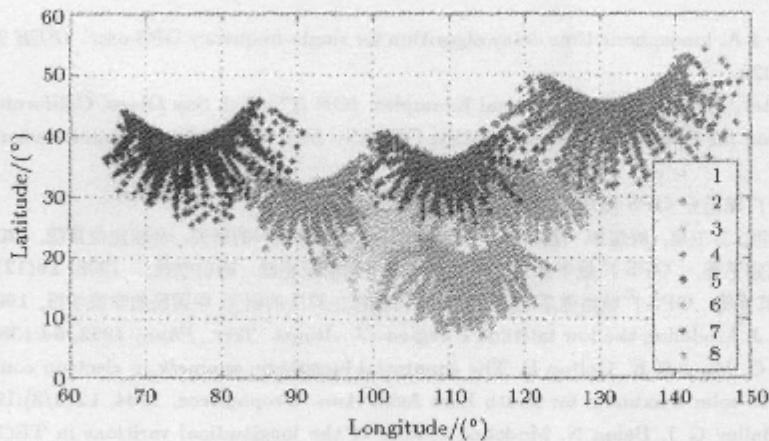


图 1 8 个 GPS 观测站在两天时间内在电离层等效薄层高度的星下点的地理分布

Fig.1 Geographical distribution of map point of 8 GPS receivers on thin layer in 2 days

给出了两天间实际的电离层电子浓度总含量观测值对应的穿透点 P 点在经纬度平面内的分布. 图 2 给出了检验结果. 检验方法是每次抽掉一个双频 GPS 站点对不同 GPS 卫星的 TEC 观测值后进行建模, 然后用其他站点的 TEC 观测值进行预测, 再将预测值与实际观测值比较, 得到与实际观测值间的误差, 由图可见绝大部分误差绝对值都小于 GPS 频率的 0.7 m, 最大为 2 m, 而方差为 0.37 m. 作为比较, 对同样的观测数据在不考虑电离层倾斜的情况下用同样的检验方法得到了图 3 所示结果, 绝大部分误差绝对值都小于 GPS 频率的 1.2 m, 最大为 3 m, 而方差为 0.72 m.

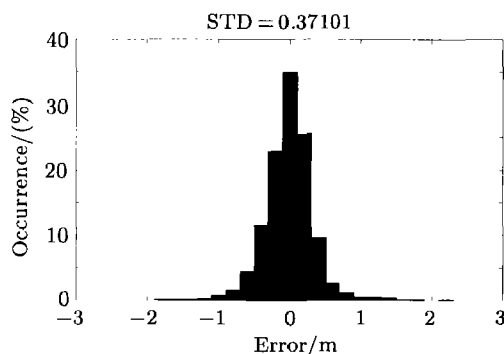


图 2 考虑倾斜时的预测结果与实测结果之间的误差分布

Fig.2 Error distribution of considered the ionospheric incline

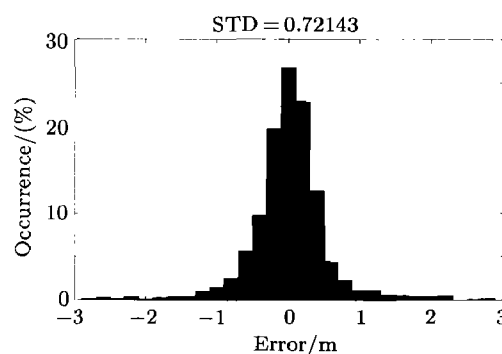


图 3 不考虑倾斜时的预测结果与实测结果之间的误差分布

Fig.3 Error distribution of ignored the ionospheric incline

从上述结果可以看出, 本改进算法的精度在原方法的基础上有所提高, 误差的统计方差为原来方法的 1/2.

参 考 文 献

- [1] Klobuchar J A. Ionospheric time delay algorithm for single-frequency GPS user. *IEEE Trans. AES-23*, 1987, (3):325
- [2] Todd Walter. WAAS MOPS: Practical Examples. ION NTM'99, San Diego, California, 1999
- [3] Specification for Wide Area Augmentation (WAAS). Federal Aviation Administration, FAA-E-2892, 1994
- [4] 刘经南等. 广域差分 GPS 原理和方法. 北京: 测绘出版社, 1998
- [5] 王一举, 袁洪, 万卫星, 周建华. 低纬地区电离层时延网格算法偏差的研究. 全球定位系统, 2001, **26**(2):5—9
- [6] 王永澄, 黄建宇等. 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
- [7] 黄建宇, 周其焕等. 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
- [8] Stening R J. Modeling the low latitude F region. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1992, **54**:1387
- [9] Walker G O, Ma J H K, Golton E. The equatorial ionospheric anomaly in electron content from solar minimum to solar maximum for South East Asia. *Ann. Geophysicae*. 1994, **12**(2/3):195—209
- [10] Su Y Z, Bailey G J, Balan N. Modeling studies of the longitudinal variations in TEC at equatorial-anomaly latitudes. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1995, **57**:433—442

AN IMPROVED GRID-BASED CORRECTION ALGORITHMS FOR THE IONOSPHERIC DELAY IN WAAS

WANG Yiju YUAN Hong WAN Weixing ZHOU Jianhua ZHU Mincai

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

Abstract

Considering the Ionospheric TEC incline, We have given an improved Grid-based Correction Algorithm for ionospheric delay in Wide Area Augmentation System (WAAS). After computing with GPS data, we have got that the variance is $1/2$ reduced compared with original Grid-based Correction Algorithm.

Key words Grid-based correction algorithms ionospheric, Time Delay, WAAS

~~~~~

## 地球空间双星探测计划和 Cluster II 科学研讨会

地球空间双星探测计划(简称双星计划)是我国首次以自己提出的空间科学探测计划开展的国际合作项目。为了更好地利用 Cluster 数据开展科学研究,并为双星计划科学研究打好基础,中国空间科学学会与有关学会和部门合作,拟决定于 2002 年 9 月 2 日举行学术研讨会,会议地点:山东省潍坊市潍坊学院。其主要目的是:介绍 Cluster II 的数据情况,明确 Cluster II 数据分析的关键科学问题,研讨 Cluster II 数据分析的方法和软件,介绍 Cluster II 数据分析的初步结果;讨论双星计划科学目标预研方案;讨论 Cluster II 和双星计划科学问题合作研究的组织形式和运行方式。

### 会议的主要内容

1. 邀请报告。(1) 双星计划和 Cluster II “六点探测”的关键科学问题;(2) Cluster II 探测数据情况;(3) 磁层空间暴的研究现状和发展趋势;(4) 与双星计划和 Cluster II 科学目标有关的主要等离子体问题;(5) 与双星计划和 Cluster II 科学目标有关的数值模拟方法问题;(6) 极区电离层、中高层大气与磁层耦合过程。

2. 双星和 Cluster II 主要探测区的关键科学问题。(1) 太阳风、舷激波和磁鞘区;(2) 向阳面磁层顶边界层区(包括极隙区);(3) 磁尾等离子体片及其边界层区;(4) 辐射带区和环电流区;(5) 极光加速区;(6) 极区电离层和中层大气与磁层的耦合过程;(7) 太阳活动和行星际扰动及其对地球空间暴的影响。

3. 讨论主题。(1) 拟解决的关键科学问题;(2) 多点卫星探测数据的分析方法和软件;(3) 数据模拟方法;(4) 合作研究的组织形式和运行方式。