

利用多参数估计法解算对流层延迟

郑作亚¹, 卢秀山¹, 韩晓冬¹, 宫维坤²

(1. 山东科技大学 地球信息科学与工程学院, 泰安 271019; 2. 泰安市城市建设局, 泰安 271000)

摘 要: 由于对流层引起的真空光速、气温、气压和湿度的变化使码和载波的观测值受到时延的影响, 本文把电离层延迟、卫星和接收机钟差、整周模糊度作为未知参数, 利用多参数估计法建立误差方程、法方程来解算对流层的延迟。

关键词: GPS 气象学; 对流层延迟; 多参数估计; 历元

中图分类号: P228

文献标识码: A

Troposphere Delay Calculation with Multi-parameter Estimates

ZHENG Zuo-ya¹, LU Xiu-shan¹, HAN Xiao-dong¹, GONG Wei-kun²

(1. College of Geo-info Science & Engg, SUST, Taian 271019, China; 2. Bureau of City Construction, Taian, Shandong 271000, China)

Abstract: The code and carrier measurement are affected by time-delay because of the change of light velocity, air temperature, air pressure and temperature in vacuum caused by troposphere, the ionosphere delay, clock error of satellite and receiver, integer cycle ambiguity are looked upon as unknown parameters, error equation and normal equation are set up to calculate troposphere delay with multi-parameter estimate in this paper.

Key words: GPS meteorology; troposphere delay; multi-parameter estimate; epoch

在 GPS 气象学数据处理时,一般是像对待基线向量^[1]一样,将大气折射视为未知数进行估计,通常根据观测时间的长短、基线的长短、观测时的气象条件等因素来决定大气折射未知数参数估计的个数。而大气折射量的大小是由 GPS 信号穿过对流层时沿路径上的大气折射率 n 来决定的,在处理对流层大气折射时一般将空气分为两部分,一部分是干空气,另一部分是湿空气^[2]。GPS 信号延迟中,湿空气所占的比重比干空气所占的比重要小的多,但湿空气这一部分的变化比干空气的变化要大,而且比干空气更不稳定。因此,湿空气的变化及其难以估计是造成大气折射量估计不准的主要原因。同时也影响着气

象元素的计算精确性。

在 GPS 观测中,当 GPS 发出的信号穿过大气中对流层时,由于对流层引起的真空光速、气温、气压和湿度的变化影响电波的传播速度,使码和载波的观测值受到同样时延。GPS 信号要发生弯曲和延迟,其中信号的弯曲量很小,而信号的延迟量很大,通常在 2.3m 左右^[3]。综上所述,对流层延迟的解算对于 GPS 观测中误差的消除和在气象学研究中都有着重要的意义。

1 对流层延迟的解算

在一般的 GPS 测量中,是用双频信号或组成单差或双差等方法消除误差源的影响,从而提高

观测精度。而在 GPS 气象学中,为了更好地预测可降水汽量,我们是在三维坐标已知的 GPS 点上进行观测。应该指出的是,高程精度要尽量高,因为它直接影响预测精确性。为了估算对流层延迟,把它作为平差解算时的观测量改正数,把电离层延迟、卫星和接收机钟差、整周模糊度作为未知参数,利用多参数估计法建立误差方程、法方程来解算对流层的延迟。

根据文献^[4],由于 $\delta\rho_{\text{trop}}$ 很小,令 $V_{\text{trop}} = \delta\rho_{\text{trop}}$,于是得到求解对流层延迟的误差方程式为:

$$V_{\text{trop}} = -\delta X_{\text{ion}} + c\delta X_{T_s} - c\delta X_{T_r} - \lambda\delta X_N + l^i(t) \quad (1)$$

其中, δX_{ion} ——为电离层延迟改正数;

$\delta X_{T_s}, \delta X_{T_r}$ ——分别为卫星信号延迟传播时间改正数;

δX_N ——为整周模糊度未知参数改正数;

$l^i(t) = \rho - \bar{\rho}$ ——为常数项;

若认为各观测历元的钟差是不同的,则钟差参数就很多,组成法方程的阶数就很高,解算起来比较困难。因此我们在误差允许的范围内进行时间标准化,将卫星钟差表示为二阶多项式的形式:

$$\delta X_{T_r} = \delta X_{a0} + (t - t_{0e})\delta X_{a1} + (t - t_{0e})^2\delta X_{a2} \quad (2)$$

并把多项式的系数作为未知数,利用拟合法求解多项式系数,在平差计算中解出系数 a_{in} ,其中 t 为观测历元; t_{0e} 为参考历元; $\delta X_{a0}, \delta X_{a1}, \delta X_{a2}$ 为未知数。把式(2)代入式(1),可得:

$$V_{\text{trop}} = -\delta X_{\text{ion}} + c\delta X_{T_s} - c\delta X_{a0} - c(t - t_{0e})\delta X_{a1} - c(t - t_{0e})^2\delta X_{a2} - \lambda\delta X_N + l^i(t) \quad (3)$$

假设,在观测站 T 上,有历元 t 同步观测的卫星数为 n' ,则可写出误差方程组为:

$$V_{\text{trop}}^i(t) = a(t)\delta X_{\text{ion}}^i + b(t)\delta X_{T_s}^i + d(t)\delta X_{a0}^i + e(t)\delta X_{a1}^i + k(t)\delta X_{a2}^i + m(t)\delta X_N^i + l^i(t) \quad (4)$$

式中,

$$V_{\text{trop}}^i(t) = [V_{\text{trop}}^1(t) \ V_{\text{trop}}^2(t) \ \cdots \ V_{\text{trop}}^{n'}(t)]^T$$

$$a(t) = \begin{bmatrix} -1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & -1 \end{bmatrix}$$

万方数据

$$b(t) = [c \ c \ \cdots \ c]^T$$

$$d(t) = \begin{bmatrix} -c & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -c & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & -c \end{bmatrix}$$

$$e(t) = \begin{bmatrix} -c(t - t_{0e}) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -c(t - t_{0e}) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & -c(t - t_{0e}) \end{bmatrix}$$

$$K(t) = \begin{bmatrix} -c(t - t_{0e})^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -c(t - t_{0e})^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & -c(t - t_{0e})^2 \end{bmatrix}$$

$$m(t) = \begin{bmatrix} -\lambda & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -\lambda & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & -\lambda \end{bmatrix}$$

其中, $a(t), m(t)$ 分别为电离层延迟和整周模糊度改正数系数;

$b(t)$ 中各元素均为光速,是一个常数向量;

$d(t), e(t), k(t)$ 分别为卫星钟差多项式系数;

$$\delta X_{\text{ion}}^i = [\delta X_{\text{ion}}^1 \ \delta X_{\text{ion}}^2 \ \cdots \ \delta X_{\text{ion}}^{n'}]^T$$

$$\delta X_{a0}^i = [\delta X_{a0}^1 \ \delta X_{a0}^2 \ \cdots \ \delta X_{a0}^{n'}]^T$$

$$\delta X_{a1}^i = [\delta X_{a1}^1 \ \delta X_{a1}^2 \ \cdots \ \delta X_{a1}^{n'}]^T$$

$$\delta X_{a2}^i = [\delta X_{a2}^1 \ \delta X_{a2}^2 \ \cdots \ \delta X_{a2}^{n'}]^T$$

$$\delta X_N^i = [\delta X_N^1 \ \delta X_N^2 \ \cdots \ \delta X_N^{n'}]^T$$

$$l^i(t) = [l^1(t) \ l^2(t) \ \cdots \ l^{n'}(t)]^T$$

如果在观测站 T ,用不同历元 $t = t_1, t_2, \cdots, t_n$,对相同的卫星进行了观测,则可以写出相应的误差方程组:

$$V_{\text{trop}} = A\delta X_{\text{ion}} + B\delta X_{T_s} + D\delta X_{a0} + E\delta X_{a1} + K\delta X_{a2} + M\delta X_N + L \quad (5)$$

式中,

$$V_{\text{trop}} = [V_{\text{trop}}^1(t_1) \ V_{\text{trop}}^1(t_2) \ \cdots \ V_{\text{trop}}^1(t_n)]^T$$

$$A = [a(t_1) \ a(t_2) \ \cdots \ a(t_n)]^T$$

$$B = \begin{bmatrix} b(t_1) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & b(t_2) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & b(t_n) \end{bmatrix}$$

$$D = [d(t_1) \ d(t_2) \ \cdots \ d(t_n)]^T$$

$$E = [e(t_1) \ e(t_2) \ \cdots \ e(t_n)]^T$$

$$K = [k(t_1) \ k(t_2) \ \cdots \ k(t_n)]^T$$

$$M = [m(t_1) \ m(t_2) \ \cdots \ m(t_n)]^T$$

$$\delta X_{T_b} = [\delta X_{T_b}(t_1) \ \delta X_{T_b}(t_2) \ \cdots \ \delta X_{T_b}(t_n)]^T$$

$$L = [l'(t_1) \ l'(t_2) \ \cdots \ l'(t_n)]^T$$

如果我们进一步令:

$$Q = [A \ B \ D \ E \ K \ M]$$

$$X = [\delta X_{ion} \ \delta X_{T_b} \ \delta X_{a0} \ \delta X_{a1} \ \delta X_{a2} \ \delta X_N]^T$$

则式(5)可以简化为形式:

$$V_{trop} = QX + L \quad (6)$$

如果,根据文献^[5],我们假设按观测值等权且彼此独立,即权矩阵 P 为单位阵,组成法方程为: $NX + W = 0$

式中,

$$\begin{aligned} N &= Q^T Q \\ W &= Q^T L \end{aligned}$$

按最小二乘法可求得:

$$X = N^{-1}W = -(Q^T Q)^{-1}(Q^T L) \quad (7)$$

最后把 X 值代入(6)式就可得到对流层延迟 V_{trop} , 即有:

$$V_{trop} = -Q(Q^T Q)^{-1}(Q^T L) + L \quad (8)$$

2 结束语

通过上述分析和理论上的推导,可以得出如下结论:

(1)若在一个测站上,用不同历元观测不同的

卫星,则只要把式(4)的向量直接代入(5)式向量的各元素中即可得到其误差方程。应当指出的是:在不同历元观测的卫星数不一定相同,在组成平差模型时应注意。

(2)由于多个未知参数与所观测的卫星有关,所以在不同历元观测不同的卫星时,将会增加新的未知数,这可能会使数据处理变得更为复杂。因此,在一个测站的观测过程中,尽可能观测同一组卫星是比较适宜的。

(3)在观测卫星数为 n' , 观测历元数为 n_t 的情况下,用任一观测站 T , 可得到观测量的总数为 $n' \times n_t$, 而同时待解的未知数有: n' 个电离层延迟改正数, n_t 个接收机钟差参数, $3n'$ 个钟差模型的系数和与所测卫星相应的 n' 个整周未知数。为了求解,观测量的总数应满足以下不等式:

$$n'n_t \leq n' + n_t + 3n' + n'$$

则,也就是:

$$n_t \leq \frac{5n'}{n' - 1}$$

由上式,我们可以知道,当所测卫星数 $n' = 4$ 时,则观测历元数 $n_t \leq 7$; 当卫星数 $n' \leq 6$ 时,则观测历元数 $n_t \leq 6$ 。所以,为了解算对流层延迟,本文认为每次观测至少需要 7 个历元。

参考文献:

- [1] 刘大杰,等.全球定位系统(GPS)的原理与数据处理[M].上海:同济大学出版社,1996.
- [2] 王小亚,朱文耀,严豪健.地面 GPS 观测探测大气可降水汽量的方法和前景[J].天文学进展,1998,16(2).
- [3] 刘基余,等.全球定位系统原理及其应用[M].北京:测绘出版社,1993.
- [4] 王小亚.关于地面 GPS 探测可降水汽量及其在气象学应用的研究(硕士论文)[D].中科院上海天文台,1998.
- [5] 黄维彬.近代平差理论及其应用[M].北京:解放军出版社,1990.

利用多参数估计法解算对流层延迟

作者：[郑作亚](#)，[卢秀山](#)，[韩晓冬](#)，[宫维坤](#)
作者单位：[郑作亚, 卢秀山, 韩晓冬 \(山东科技大学地球信息科学与工程学院, \)](#)，[宫维坤 \(泰安市城市建
设局, \)](#)
刊名：[山东科技大学学报 \(自然科学版\)](#)
英文刊名：[JOURNAL OF SHANDONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY \(NATURAL SCIENCE\)](#)
年，卷(期)：2001, 20 (4)
被引用次数：3次

参考文献(5条)

1. [黄维彬](#) [近代平差理论及其应用](#) 1990
2. [王小亚](#) [地面GPS探测大气可降水汽量的研究及其在气象上的应用](#)[学位论文] 1998
3. [刘基余](#) [全球定位系统原理及其应用](#) 1993
4. [王小亚](#); [朱文耀](#); [严豪健](#) [地面GPS观测探测大气可降水汽量的方法和前景](#) 1998 (02)
5. [刘大杰](#) [全球定位系统 \(GPS\) 的原理与数据处理](#) 1996

引证文献(3条)

1. [宋玉珍](#); [刘炼](#) [利用GPS探测海洋大气环境和大气波导](#)[期刊论文]-[舰船电子工程](#) 2010 (7)
2. [罗峰](#) [基于广州CORS的大气水汽含量遥感](#)[期刊论文]-[城市勘测](#) 2010 (6)
3. [曲建光](#) [GPS遥感气象要素的理论与应用研究](#)[学位论文]博士 2005

本文链接：http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_sdkjdxxb200104024.aspx